T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	曲げを受けるモルタルおよびコンクリートのクラック進展挙動とその力学的特性に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	篠原保二
Author(English)	YASUJI SHINOHARA
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2624号, 授与年月日:1994年4月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2624号, Conferred date:1994/4/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

曲げを受けるモルタルおよびコンクリートの
クラック進展挙動とその力学的特性に関する研究

平成６年　４月

篠 原 保 二

謝　辞

本研究に着手しました初めより今日に至るまで終始懇切なる御指導を賜りました恩師、東京工業大学教授・工学博士・古村福次郎先生に深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり御指導、御助言を賜りました東京工業大学助教授・工学博士・安部武雄先生に厚く御礼申し上げます。

内容梗概

一般に、コンクリートのクラック先端前方には、損傷は受けているが応力を伝達できる軟化領域が存在するということについてはコンセンサスが得られている。しかしながら、軟化領域の大きさやその力学的特性に関してはコンセンサスが得られていないのが現状である。コンクリートなどの不均質材料の非線形挙動は、軟化領域内で生じるマイクロクラックの発生・累積・連結・進展機構に起因する。したがって、軟化領域内の破壊メカニズムを明らかにし、これらの特性を定量化することは、コンクリート構造物の非線形挙動をより合理的に予測するために、また、新材料の開発やその力学的挙動を予測する上で重要である。

本研究では、直接引張試験によってコンクリートの軟化領域の力学的特性（引張軟化特性）を直接定量化することは、コンクリート特有の不均質さに起因する曲げ変形が試験結果に大きく影響し、困難であるため、間接的な方法であるが、最大耐力後も安定した荷重－変位関係を測定できる曲げ試験を行い、コンクリートおよびモルタルのクラック抵抗性能に及ぼす各種要因（初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生、試験体寸法、材令）の影響を検討する。次に、曲げ試験結果に対して最適な引張軟化特性を逆解析法によって決定し、各種要因が引張軟化特性に及ぼす影響について考察する。さらに実験中、顕微鏡で観察したクラック進展挙動と引張軟化特性を組み込んだ解析結果を比較し、そのモデルが何を表しているのかを検討し、軟化領域の破壊メカニズムについて考察する。また、アコースティック・エミッション（ＡＥ）の三次元位置標定により、軟化領域の進展挙動およびその大きさについて考察する。

本論文は以下の７章で構成されている。

第１章「序論」では、金属材料に対して確立した破壊力学をコンクリートに直接適用する場合の問題点および本研究と関連する既往の研究について概説し、本研究の目的と範囲について述べた。

第２章「直接引張試験」では、コンクリートの直接引張試験結果が大きく変動する要因として、曲げの影響を取り上げ、円周ノッチを有するシリンダー試験体を用いて、球座を取り付けた場合と取り外した場合の直接引張試験を行った。球座を取り外した直接引張試験の場合、引張強度が30％以上低下するが、その原因は曲げ変形であることを、線形破壊力学に基づいて、詳細に説明した。また、球座を取り付けた直接引張試験においても、コンクリート固有の不均質さに起因する曲げ変形が弾性範囲内から生じるため、直接引張試験によってコンクリートの引張軟化特性を直接定量化することは、困難であることを示した。

第３章「ノッチを有するコンクリートの曲げ試験」では、RILEMの標準試験で問題となる試験体自重の影響を小さくするために、スパンを短くし、測定精度を高めて曲げ試験を行い、コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす初期ノッチ深さ、載荷速度、骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生および材令の影響を詳細に検討した。さらに、実験中顕微鏡による観測を行い、クラック進展挙動と曲げ変形モードの関係について述べた。これらの実験結果は、第５章の逆解析によってコンクリートの引張軟化特性を推定する場合の基礎データとなる。

第４章「モルタルの曲げ試験」では、第３章の実験結果から、コンクリート曲げ試験体は最大耐力以降、抵抗力が徐々に減少するいわゆる軟化挙動を示すが、その挙動は粗骨材の存在に大きく影響され、その他の影響が明確にならない場合もあることがわかった。そこで、粗骨材以外の因子がセメント系材料の軟化挙動に及ぼす影響をより詳細に検討するために、モルタルの曲げ試験を行った。本実験では、スロークラック成長を伴う最大耐力後の軟化挙動および破壊エネルギーに注目し、初期ノッチ深さ、載荷速度、骨材寸法、水セメント比、載荷方法、および材令の影響を詳細に検討している。さらに、最大耐力の85％以上の荷重で、一定荷重あるいは一定変位を維持した場合の変位増加あるいは荷重減少、およびその後の軟化挙動に与える影響について述べた。

第５章「逆解析によるコンクリートの引張軟化特性」では、ノッチを有するコンクリート曲げ試験結果に適合する軟化特性パラメータを逆解析により求め、破壊エネルギーを数値解析に利用する際、破壊エネルギーの値そのものよりも重要になる引張軟化曲線の形状（引張軟化特性）を決定した。初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生方法および材令がコンクリートの引張軟化特性に及ぼす影響について考察した。また同じ軟化特性パラメータによって、寸法の異なるモルタルの試験結果を近似できることを示した。さらに実験中、顕微鏡で観測したクラック進展挙動と引張軟化特性を組み込んだ解析結果を比較し、そのモデルが何を表しているのかを検討し、軟化領域の破壊メカニズムについて述べた。

第６章「アコースティック・エミッションによる軟化領域の推定法」では、アコースティック・エミッション（ＡＥ）発生源の位置標定精度を高めるために、ＡＥ波形より真のＡＥ到達時間を決定し、さらに、ＡＥ波形のスペクトル解析を行い、そのスペクトルパターンを比較することによって、ダメージに起因したと考えられるＡＥ信号を識別し、軟化領域の進展および大きさを推定した。また、粗骨材のクラック拘束のメカニズムを解明するための一助として、円柱状の疑似骨材を含む簡単なモデルコンクリート試験体を用いて、骨材がクラック進展挙動と最大耐力後の軟化挙動に与える影響について述べた。

第７章「結論」では、各章で得られた結論を総括して述べた。

目　　次

第１章　序論　・・・

４．４．２　考察　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・273
４．５　まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・282

第５章　逆解析によるコンクリートの引張軟化特性　・・・・・・・・・・・284
５．１　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・285
５．２　解析方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・287
５．２．１　引張軟化特性を考慮した数値解析法　・・・・・・・・・・287
５．２．２　要素分割レベル　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・293
５．２．３　バイリニア関数の推定方法　・・・・・・・・・・・・・・296
５．３　解析結果および考察　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・298
５．３．１　実験と解析による荷重－変位曲線の比較　・・・・・・・・298
５．３．２　引張軟化特性の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・303
５．３．３　引張軟化特性とクラック進展の関係・・・・・・・・・・・314
５．４　まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・331

第６章　アコースティック・エミッションによる軟化領域の推定法　・・333
６．１　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・334
６．２　アコースティック・エミッション　・・・・・・・・・・・・・335
６．２．１　計測と信号処理　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・335
６．２．２　スペクトル解析法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・341
６．３　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・344
６．３．１　試験体　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・344
６．３．２　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・348
６．４　実験結果および考察　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・356
６．４．１　荷重－変位曲線　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・356
６．４．２　三次元位置標定　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・368
６．５　まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・385

第７章　結論　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・387

参考文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・395

発表論文　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・407

第1章　序　論

1．1　本研究の目的と範囲

ポルトランドセメントコンクリートは、圧縮強度が引張強度よりも著しく劣っており、引張応力下において脆性的な性状を示すことはよく知られている。このため、通常の鉄筋コンクリート構造物の設計では、コンクリートは主に圧縮力に抵抗するように使用されており、引張応力下でのコンクリートの抵抗力は無視され、主として鉄筋コンクリート構造物の耐久性の面からのみコンクリートのクラックが重視されてきた。しかしながら、コンクリートは海洋構造物、液化天然ガス貯蔵タンクおよび原子炉格納構造物など、従来とは異なる荷重や環境条件下においても使用されるようになり、コンクリートのクラックに対する関心も高まってきた。

クラックの発生、成長によって引き起こされる破壊現象を対象とした破壊力学に関する最初の研究は、1920年、Griffith [1]によって行われた。Griffithは、エネルギー解放率（G値）を用いて完全脆性材料中のクラックの不安定伝播の発生を説明している。その後、金属材料に対して破壊力学が適用できるように、クラック先端の小規模降伏を考慮する修正Griffith理論が確立された。その結果、破壊力学パラメータ（K値、G値、J値）を決定する標準材料試験法が開発され、そのパラメータに基づいた設計法が、圧力容器、航空機、船、パイプラインなど、重要な金属構造物の関連仕様書に含まれるようになった[2),3)]。セメント系複合材料に対して、最初に破壊力学を適用したのは、1961年のKaplan [4]であるが、コンクリートの破壊力学に関する初期の研究は、金属材料に対して確立された破壊力学パラメータに基づくものが多かった。線形または非線形破壊力学における破壊靭性パラメータ（K_c, G_c, J_c）は、本来、クラックの進展開始の条件を与えるものであり、コンクリートへのこれらのパラメータの利用は、破壊現象の定性的な説明や品質評価の尺度にとどまっていた。1970年代後半になると、コンクリートのクラック先端前方には、損傷は受けているが応力を伝達できるいわゆる軟化領域が存在し、その力学的特性や大きさが金属材料とはかなり異なるため、金属材料に対する破壊力学をコンクリートに直接適用することはできないということが認知されるようになった。

一方、有限要素法に代表される解析手法の発達は目ざましく、従来は取り入れることが不可能に近かったコンクリートのクラックや鉄筋とコンクリート

間の力の伝達機構など、非線形挙動を引き起こす種々の要因を組み込んだ鉄筋コンクリートの解析も可能になってきている。ただし、このような数値解析法を十分活用するためには、実際の物理的現象を解析に適した形でモデル化することはもちろんのこと、解析法の発達に見合った材料挙動のモデル化の開発が必要である。すなわち、解析方法の発達と材料挙動のモデル化の開発は、バランスよく進行しなければならない。鉄筋コンクリート構造の力学的挙動に及ぼす影響因子は複雑で多岐にわたるため、森田[5]を研究代表者とする「鉄筋コンクリート構造のＦＥＭ解析の精度向上に必要な基礎実験と解析モデルの開発」という総合研究を行っている。また、コンクリートのひび割れ特性に関しては、三橋[6]を委員長とするコンクリートの破壊力学研究委員会で、これまでの研究の情報を収集、整理し、コンクリートのひび割れ抵抗性能を合理的に表現できる破壊力学パラメータの定義、そのパラメータを評価するための試験方法の開発、破壊力学的手法のコンクリート工学への応用について検討している。

一般に、コンクリートのクラック先端前方には、軟化領域が存在するということについてはコンセンサスが得られている。しかしながら、軟化領域の大きさやその力学的特性に関してはコンセンサスが得られていないのが現状である。コンクリートなどの不均質材料の非線形挙動は、軟化領域内で生じるマイクロクラックの発生・累積・連結・進展機構に起因する。したがって、軟化領域内の破壊メカニズムを明らかにし、これらの特性を定量化することは、コンクリート構造物の非線形挙動をより合理的に予測するために、また、新材料の開発やその力学的挙動を予測する上で重要である。

以上の考察を背景として、本論文では、直接引張試験によってコンクリートの軟化領域の力学的特性（引張軟化特性）を直接定量化することは、コンクリート特有の不均質さに起因する曲げ変形が試験結果に大きく影響し、困難であることを線形破壊力学に基づいて示す。それ故間接的な方法であるが、最大耐力後も安定した荷重－変位関係を測定できる曲げ試験を行い、コンクリートおよびモルタルのクラック抵抗性能に及ぼす各種要因（初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生、試験体寸法、材令）の影響を検討する。次に、曲げ試験結果に対して最適な引張軟化特性を逆解析法によって決定し、各種要因が引張軟化特性に及ぼす影響について考察する。さ

らに実験中、顕微鏡で観察したクラック進展挙動と引張軟化特性を組み込んだ解析結果を比較し、そのモデルが何を表しているのかを検討し、軟化領域の破壊メカニズムについて考察する。また、アコースティック・エミッション（ＡＥ）の三次元位置標定精度を高めるために、ＡＥ波形より真のＡＥ到達時間を決定し、さらに、ＡＥ波形のスペクトル解析を行い、そのスペクトルパターンを比較することによって、ダメージに起因したと考えられるＡＥ信号を識別し、軟化領域の進展挙動およびその大きさについて考察する。

1．2　本研究と関連する既往の研究

［直接引張試験に関する研究］

直接引張試験は、引張軟化特性を決定する最も直接的な試験法であるが、最大耐力後も安定した荷重－変形関係を測定する必要がある。Hughes と Chapman [7),8)] は、鋼性の剛性ブロックで試験機の剛性を高めて、引張におけるコンクリートの完全な応力－ひずみ関係を測定している。ただし最大耐力を越え、荷重が減少していくと、軟化領域にひずみが集中し、損傷を受けていない部分のひずみは弾性的に回復するため、ひずみ分布は一様とはならないが、それは考慮されていない。Evans と Marathe [9)] も、100ton万能試験機の剛性を高めて完全な引張応力－ひずみ関係を測定しているが、ひずみの局所化の問題には触れていない。Gopalaratnam と Shah [10)] は、コンクリートの引張軟化特性を測定するために、サーボコントロール試験機による一定変位速度載荷によって、試験体の異なる位置におけるひずみ、異なるゲージ長さに対する伸びおよびクラック幅の測定を行っている。しかしながら、試験体のつかみ治具の制約から、試験体の厚さが薄い（19mm）ものに限られている。Guo と Zhang [11)] は、断面が70X70mmの試験体を用いて直接引張試験を行っている。試験機の剛性を４本の鋼棒（直径20mm）によって高め、試験体に貼り付けた数カ所のひずみゲージから、最大耐力以降において、試験体内の不均一なひずみ分布を観測している。また、コンクリートの不均質さに起因する偏心荷重が作用し、実験結果に影響を及ぼすと指摘している。この偏心の影響を抑えるために、Reinhardt ら [12),13)] は、試験体の回転を拘束するガイディングシステムを取り付けたサーボコントロール試験機を用いて、引張試験を行っている。ただし、不均一な弾性変形に伴う試験体の小さな曲げは、取り除くことができなかった。以上の直接引張試験は、いずれも試験体に球座を取り付けずに行ったものであり、曲げ変形が試験結果に影響を与えたと考えられる。

本研究では、コンクリートの直接引張試験結果が大きく変動する要因として、曲げの影響を取り上げ、球座の有無による直接引張試験を行い、線形破壊力学に基づいて、引張強度に及ぼす曲げ変形の影響を詳細に検討する。

［ノッチを有するコンクリートおよびモルタルの曲げ試験に関する研究］

Griffith [1] のエネルギー解放率の概念を最初にコンクリートに適用したのは、Kaplan [4] であった。彼は、試験体寸法によって限界エネルギー解放率が変化するのは、スロークラック成長の影響であると推論しているにもかかわらず、Griffith の理論がコンクリートに適用できるという結論を下している。また、Glucklich [14] は、コンクリートのクラック進展に必要なエネルギーは、粗骨材のクラック拘束によって、クラック長さに伴って増加すると仮定し、Griffith の理論をコンクリートのような不均質材料に直接適用できないということを定性的に説明した。Moavenzadeh [15] は、セメントペースト、モルタル、コンクリートの３点曲げ試験から破壊パラメータを決定し、それらのパラメータを比較することによって、各試験体の破壊機構の相違を考察している。Shah [16] は、セメントペースト、モルタル、コンクリートの曲げ試験および引張試験を行い、各試験結果に影響を与えるノッチの敏感さおよびその限界長さについて考察している。一般に、線形破壊力学における破壊靭性パラメータ（K_{IC}, G_{IC}）は、クラック進展によって生じるコンクリートの破壊現象、引張と圧縮における破壊機構および強度の寸法依存性の定性的な説明または品質評価に利用されてきた[17), 18)]。ただし、１．１節でも述べたようにコンクリートの場合、クラック先端付近に大きな軟化領域が存在するため、通常の構造部材程度の寸法のコンクリートに対して、線形破壊力学を直接適用することはできないと現在では一般に認められている。

1970年代後半、Hillerborg [19)-23)] らによって提案されたコンクリートの破壊エネルギーや引張軟化曲線は、コンクリートの性能評価に利用できるばかりでなく、コンクリートの破壊現象の数値解析にも組み込めるため、従来の破壊パラメータより優れている。破壊エネルギーを決定するための標準３点曲げ試験法が、RILEM [24)] より提案され、その試験法の妥当性を検討するために、多数の比較実験が行われた[25)]。その結果、破壊エネルギーは試験体寸法および骨材寸法に依存するという以外は、明白な傾向を示さなかった。その後、破壊

エネルギーを決定するための実験方法や実験結果の評価方法に関する提案[26)-28)]および破壊エネルギーに影響を及ぼす各種要因の考察[29)-32)]が行われるようになった。しかしながら、軟化領域の観測に関しては、直接観測が困難なため、研究例は少ない。軟化領域の観測方法は、Mindess[33)]によって要約されている。

本実験では、RILEMの標準試験で問題となる自重の影響を小さくするために、スパンを短くし、測定精度を高めて曲げ試験を行い、コンクリートおよびモルタルの破壊エネルギーに及ぼす初期ノッチ深さ、載荷速度、骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生および材令の影響を詳細に検討する。さらに、実験中顕微鏡による観測を行い、クラック進展挙動と曲げ変形モードの関係について考察する。

[逆解析によるコンクリートの引張軟化特性に関する研究]

破壊エネルギーを数値解析に利用する際、破壊エネルギーの値そのものよりも引張軟化曲線の形状が重要であり[34),35)]、破壊エネルギーと引張軟化曲線、すなわち引張軟化特性を決定する必要がある。引張軟化特性を求める最も直接的な方法は、コンクリートの直接引張試験による方法である。しかしながらコンクリートのような不均質材料の引張軟化特性を、直接引張試験によって求めるのは非常に困難である。したがって間接的な方法ではあるが、比較的安定した結果が得られる曲げ試験結果およびサーボ制御によるCT（compact tension）試験結果に対し、最適な軟化特性パラメータを決定する逆解析法が最も良く用いられている。例えばRoelfstraら[34)]およびWittmannら[31),32)]は最小二乗法を用いて軟化特性パラメータを決定し、試験体寸法、載荷速度、調合、材令の変化がパラメータに与える影響を考察している。野村ら[36),37)]は高強度コンクリートの脆性化のメカニズムおよび内部構造の異なるコンクリートの軟化領域の特性について軟化特性パラメータを用いて推測している。しかし、軟化領域の観測結果と軟化特性パラメータの関係については、直接観察が困難なため、研究例は少ない。堀井ら[38)]はレーザースペックル法による軟化領域の計測結果と線形引張軟化モデルによる解析結果を比較し、このモデルがマイクロクラッキングゾーンを表していないとしている。野村ら[39)]はバイリニア

型引張軟化モデルによる解析結果とＡＥ（アコースティック エミッション）発生頻度および裸眼よる観察結果を比較し、モデルの第一勾配がマイクロクラッキングに、第二勾配がブリッジングに対応するとしている。軟化領域における力学的特性を明らかにするためには、このような観察結果とモデルによる解析結果を比較し、モデルの妥当性や破壊メカニズムについて検討する必要がある。

本研究では、ノッチを有するコンクリート曲げ試験結果に適合する軟化特性パラメータを逆解析により求め、初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生方法および材令がコンクリートの引張軟化特性に及ぼす影響について考察する。また同じ軟化特性パラメータによって、寸法の異なるモルタルの試験結果を近似できるかを検討する。さらに実験中、顕微鏡で観測したクラック進展挙動と引張軟化特性を組み込んだ解析結果を比較し、そのモデルが何を表しているのかを検討し、軟化領域の破壊メカニズムについて考察する。

［アコースティック・エミッションによる軟化領域の推定法に関する研究］

固体材料が変形もしくは破壊する際には、内部に蓄積されたエネルギーが急激に解放されるため、その一部は過渡的な弾性波となって伝播する。その弾性波がアコースティック・エミッション（Acoustic Emission、以後ＡＥと略す）である。ＡＥは、試験体内部のダメージの状況を、リアルタイムで測定できる方法として有望視されており、多数の研究が報告されている[40)-45)]。ＡＥ信号は、主に次のように解析されている。

1）外力による内部のダメージの様子を知るために、ＡＥ発生頻度を計測する。
2）限界エネルギー解放率を決定するために、ＡＥエネルギーを使用する。
3）異なる荷重段階で生じるダメージのメカニズムの相違を区別するために、ＡＥ信号の周波数成分、振幅、立ち上がり時間を使用する。
4）複数個のＡＥセンサーに到達する同一ＡＥ信号の時間差から、ＡＥ発生源を標定し、クラックの進展や軟化領域の大きさを検討する。
5）ＡＥの波形解析により、マイクロクラックの大きさ、方向、タイプを識別する。

上記4）、5）の解析法は、コンクリート内部の破壊メカニズムを知る上で有力な方法である。しかしながら、複数個のＡＥセンサーに到達する同一ＡＥ信号の時間差から、ＡＥ発生源を標定する場合、その標定位置は、実際に観察されるひび割れを中心に、かなりランダムに分布する場合が多い。

本研究では、ＡＥ発生源の位置標定精度を高めるために、ＡＥ波形より真のＡＥ到達時間を決定し、さらに、ＡＥ波形のスペクトル解析を行い、そのスペクトルパターンを比較することによって、ダメージに起因したと考えられるＡＥ信号を識別し、軟化領域の進展および大きさを推定する。

また、これまでの考察により、軟化領域における応力伝達機構は、クラック先端前方の不連続なマイクロクラック、あるいはクラック先端後方の蛇行したクラック間における摩擦および粗骨材によるブリッジングに起因することが明らかになり、その力学的特性を伝達応力と仮想ひび割れ幅の関係でモデル化した。しかしながら粗骨材によるクラック拘束とは実際にどんなものなのか、あるいはどのように引張応力を伝達できるのかということに関しては研究例が少ない[43),46)]。それ故、粗骨材のクラック拘束のメカニズムを解明するための一助として、円柱状の疑似骨材を含む簡単なモデルコンクリート試験体を用いて、クラック進展に及ぼす骨材の影響について検討する。

第２章　直接引張試験

2．1　はじめに

直接引張試験は、コンクリートの引張軟化特性を決定する最も直接的な試験法である。しかしながら、直接引張試験によって引張軟化特性を決定するためには、最大荷重後も安定した荷重－変形関係を測定することが必要である。そのような測定を行うために、HughesとChapman(1),(2)は、鋼製の剛性ブロックによって試験機の剛性を高めて、コンクリートの引張試験を行っている。ただし、最大荷重を越え、荷重が減少していくと、軟化領域にひずみが集中し、ダメージを受けていない部分のひずみは弾性的に回復するため、試験体のひずみ分布は不均一となるが、その測定は行っていない。GopalaratnamとShah(3)は、コンクリートの引張軟化応答を特徴づけるために、試験体の異なる位置におけるひずみ、異なるゲージ長に対する伸びおよびクラック幅の測定をサーボコントロール試験機を用いて行っている。ただし、試験体のつかみ治具の制約から、試験体厚さが19mmと小さい。GuoとZhang(4)は断面が70x70mmのコンクリート試験体を用いて、直接引張試験を行っている。試験機の剛性を４本の鋼棒（直径20mm）によって高め、試験体に貼り付けた数ケ所のひずみゲージから、最大荷重以後、試験体内のひずみ分布が不均一になることを観測している。また、コンクリート内の粗骨材粒子がランダムに分布しており、骨材とモルタルの付着強度はモルタルの引張強度と異なるので、各断面における引張剛性の中心は、断面の幾何学的中心とも、荷重の作用線とも一致しない。それ故、試験体にクラックが入る前から偏心が存在し、クラック後、さらにその偏心は大きくなり、実験結果に影響を及ぼすであろうと指摘している。この偏心の影響を抑えるために、Reinherdt(5)は試験体の回転を拘束するガイディングシステムを取り付けたサーボコントロール試験機を用いて、引張試験を行っている。このガイディングシステムはベースプレートに４本の剛な支柱を取り付け、それらをアクチュエータに接続されている上の圧盤に取り付けられたローラーベアリングの中に正確に組み入れた装置である。ただし、ガイド装置の摩擦力は無視している。この装置を用いても不均一な弾性変形による試験体の小さな曲げは取り除

くことができなかったと報告されている(6)。以上の試験はいずれも試験体に球座を取り付けずに行ったものであり、曲げ変形が試験結果に影響を与えたと考えられる。

本章では、円周ノッチを有するシリンダー試験体の直接引張試験を行い、その試験結果に及ぼす曲げ変形の影響を線形破壊力学に基づいて詳細に検討することを目的とする。

2．2　クラックを有する部材の変形

円周ノッチを有するシリンダー試験体のように、一般にクラックを有する部材の変形を線形破壊力学に基づいて計算する方法について述べる。

2．2．1 クラック進展に伴うエネルギー変化

与えられた境界条件のもとでクラック面積が０からＡまで成長して、荷重が $P_1, P_2, \cdots\cdots P_n$ なる最終状態に達したとき、この状態でのひずみエネルギーや変位は、弾性体の場合、途中の経路に依存しないから、初めから最終状態と同じ一定荷重が加わっている条件のもとでクラックが進展して、Ａに達した場合のひずみエネルギーや変位に等しいはずである。そこで、最終状態の荷重が加わった状態でＡ＝０の場合のひずみエネルギーを $\overline{W}_0$、荷重 P_i の作用点の P_i 方向の変位を u_{i0} と書き、クラックの存在による増加分をそれぞれ $\Delta\overline{W}, \Delta u_i$ と書く。すなわち、全ひずみエネルギー $\overline{W}$ と全変位 u_i は、

$$\overline{W} = \overline{W}_0 + \Delta\overline{W}$$
$$u_i = u_{i0} + \Delta u_i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1)$$

である。ただし、これらの増分は、同一の外力のもとにおいて比較したクラックの有無による差である。

次に、クラックによるひずみエネルギーの増加分を求めるために、Griffith(7)の手法を用いる。すなわち、線形弾性体の場合、クラックが単位面積だけ増加する際に解放されるポテンシャルエネルギー（対象としている力学系全体のエネルギーをΠとする。）Ｇ を、エネルギー解放率と呼び、これは、

$$G = -\lim_{\delta A \to 0} \frac{\delta \Pi}{\delta A} = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.2)$$

で与えられる。とくに、荷重が一定の場合は、ポテンシャルエネルギーの減少はひずみエネルギーの増加に等しい（$-\delta \prod = \delta \overline{W}$）(8)ので、ひずみエネルギーを使って

$$G = \frac{\partial \overline{W}(P,A)}{\partial A} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3)$$

と書けることがわかる。したがって、(2.3)式を積分すれば

$$\overline{W}(P,A) = \overline{W}_0 + \int_0^A G dA \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.4)$$

すなわち、荷重一定の条件下でのひずみエネルギーの増分$\Delta\overline{W}$は、(2.4)式の右辺第２項であって、

$$\Delta\overline{W} = \int_0^A G(P,A) dA \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.5)$$

となる。

2．2．2　クラックの存在による変形の増加

クラックが存在あるいは進展することにより、このクラックを含む部材の変位は同一荷重下で増加する。荷重P_iの作用点のP_i方向変位u_iは、Castiglianoの定理を(2.4)式に適用して、

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{\partial \overline{W}(P,A)}{\partial P_i} \\ &= \frac{\partial \overline{W}_0}{\partial P_i} + \frac{\partial \Delta\overline{W}(P,A)}{\partial P_i} \\ &= u_{i0} + \int_0^A \frac{\partial G(P,A)}{\partial P_i} dA \end{aligned} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.6)$$

である。右辺第１項はu_{i0}、第２項がΔu_iである。すなわち、クラックの存在による変位の増加分は、

$$\Delta u_i = \frac{\partial \Delta\overline{W}(P,A)}{\partial P_i} = \int_0^A \frac{\partial G(P,A)}{\partial P_i} dA \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7)$$

で与えられる。クラック先端の応力拡大係数が、外力およびクラック寸法の関数として知られているとき便利なように、(2.7)式を応力拡大係数を用いて書き直す。エネルギー解放率と応力拡大係数(K_I, K_{II}, K_{III})との間には、周知の次の関係式が存在する(8)。

$$G = \frac{1}{E'}(K_{\mathrm{I}}^2 + K_{\mathrm{II}}^2) + \frac{1}{2\mathrm{G}} K_{\mathrm{III}}^2 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.8)$$

ただし、$E' = \begin{cases} E & (plane\ stress) \\ E/(1-\nu^2) & (plane\ strain) \end{cases}$

ここで、Ｇはせん断弾性係数、Eは弾性係数、νはポアソン比である。

応力拡大係数の引数を荷重P_1, P_2，……とクラック面積Aと考えて、(2.8)式の荷重P_iに関する偏微分を、(2.7)式に代入すると、

$$\Delta u_i = \int_0^A \left\{ \frac{2}{E'} \left(K_{\mathrm{I}} \frac{\partial K_{\mathrm{I}}}{\partial P_i} + K_{\mathrm{II}} \frac{\partial K_{\mathrm{II}}}{\partial P_i} \right) + \frac{1}{\mathrm{G}} K_{\mathrm{III}} \frac{\partial K_{\mathrm{III}}}{\partial P_i} \right\} dA \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.9)$$

が得られる。

2．2．3　円周ノッチを有する丸棒の引張による変形

半径R、ノッチ部の最小断面の半径がbの丸棒が引張力Pを受けるときの変形を考える。変形uをノッチが存在しない場合の変位u_0とノッチの存在による増加分Δuに分けて考えると、

$$u = u_0 + \Delta u \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (2.10)$$

である。u_0は簡単に、ゲージ長さをLとして、

$$u_0 = \frac{PL}{\pi R^2 E} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (2.11)$$

より求められる。ノッチによる増加分は、(2.9)式より

$$\Delta u = \int_0^A \frac{2}{E'} K_I \frac{\partial K_I}{\partial P_i} dA \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (2.12)$$

から計算できる。ここでK_Iは円周ノッチを有する丸棒の引張に対する応力拡大係数であり、次の近似式が得られている(9)。

$$K_I = \frac{P}{\pi b^2}\sqrt{\pi b}\,F(b/R) \quad ; \quad b/R = \xi \quad とおくと$$

$$F(\xi) \approx \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{2}\xi + \frac{3}{8}\xi^2 - 0.363\xi^3 + 0.731\xi^4\right)\sqrt{1-\xi} \qquad \cdots\cdots\cdots \qquad (2.13)$$

また、軸対称問題のため、必然的に平面ひずみ状態となるので

$$E' = E/(1-\nu^2) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (2.14)$$

である。ノッチ面積の増分 dA は

$$dA = 2\pi b\, db \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.15)$$

となる。よって、(2.13)～(2.15)式を(2.12)式に代入して、整理すると、

$$\Delta u = \frac{4(1-\nu^2)P}{ER^2}\int_b^R \left(\frac{R}{b}\right)^2 \{F(b/R)\}^2 db$$

が得られる。ここで、$b/R=\xi$ とおくと、

$$\Delta u = \frac{(1-\nu^2)P}{ER}\int_\xi^1 \frac{1}{\xi^2}\left(1+\frac{1}{2}\xi+\frac{3}{8}\xi^2-0.363\xi^3+0.731\xi^4\right)^2(1-\xi)d\xi$$

$$= \frac{(1-\nu^2)P}{ER}\left(-1.413+\frac{1}{\xi}+0.676\xi^2-0.530\xi^3+0.195\xi^4\right.$$
$$\left.-0.044\xi^5+0.202\xi^6-0.152\xi^7+0.067\xi^8\right) \qquad \cdots\cdots \quad (2.16)$$

となり、ノッチの存在による変位の増加分 Δu が求められる。本実験で用いる試験体の形状および材料定数として、L=10cm、R=5cm、ξ=0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、ν=1/6、E=3.0x10^{5}kg/cm^{2}を(2.11)、(2.16)式に代入して、u_0, Δu を計算した結果を表－2.1に示す。

表－2.1　円周ノッチを有する丸棒の引張変形

変位記号		荷重1kg当りの変位　(mm/kg)	σ_{net}=25kg/cm^{2}となる荷重　(kg)	σ_{net}=25kg/cm^{2}ときの$u_0+\Delta u$(mm)
u_0		4.244×10^{-6}	1963	8.33×10^{-3}
Δu	ξ=0.5	4.555×10^{-6}	491	4.32×10^{-3}
	ξ=0.6	2.662×10^{-6}	707	4.88×10^{-3}
	ξ=0.7	1.423×10^{-6}	962	5.45×10^{-3}
	ξ=0.8	0.623×10^{-6}	1257	6.12×10^{-3}
	ξ=0.9	0.160×10^{-6}	1590	7.00×10^{-3}

表－2.1より、弾性限界と考えられるσ_{net}=25kg/cm^{2}のときの全変位は、1/100mm以下と非常に小さく、その変位測定には十分な配慮が必要である。

2．2．4　円周ノッチを有する丸棒の曲げによる回転角

引張と同様、曲げモーメントによる回転角θをノッチが存在しない場合の回転角とノッチの存在による増加分に分けて考えるが、本試験体寸法の場合、ノッチによる増加分の方が支配的であるため、それぞれの記号を$\theta_{\text{no crack}}$とθ_{crack}とすると、

$$\theta = \theta_{\text{no crack}} + \theta_{\text{crack}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.17)$$

である。$\theta_{\text{no crack}}$は簡単に、試験体長さをlとすると

$$\theta_{\text{no crack}} = \frac{Ml}{2EI} = \frac{2Ml}{\pi ER^4} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.18)$$

となる。また、円周ノッチを有する丸棒の曲げに対する応力拡大係数は

$$K_I = \frac{4M}{\pi b^3}\sqrt{\pi b}F(b/R)\ ;\quad b/R = \xi \quad \text{とおくと、}$$

$$F(\xi) \approx \frac{3}{8}\left(1 + \frac{1}{2}\xi + \frac{3}{8}\xi^2 + \frac{5}{16}\xi^3 + \frac{35}{128}\xi^4 + 0.531\xi^5\right)\sqrt{1-\xi} \qquad \cdots\cdots \quad (2.19)$$

で近似できる(9)。したがって、θ_{crack}は、引張と同様に、

$$\begin{aligned}\theta_{\text{crack}} &= \int_0^A \frac{2}{E'} K_I \frac{\partial K_I}{\partial M} dA \\ &= \frac{64(1-\nu^2)}{ER^4} M \int_b^R \left(\frac{R}{b}\right)^4 \{F(b/R)\}^2 db\end{aligned} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.20)$$

が得られる。ここで、$b/R=\xi$の変数変換を行うと、

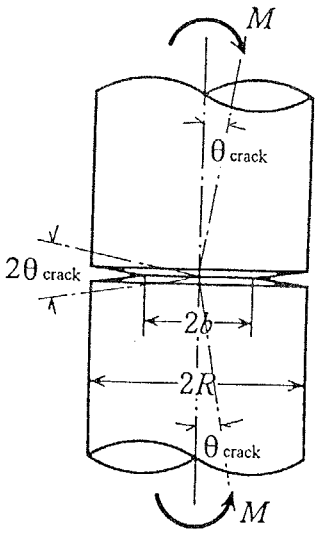
$$\theta_{crack} = \frac{9(1-\nu^2)}{ER^3} M \int_{\xi}^{1} \frac{1}{\xi^4}\left(1+\frac{1}{2}\xi+\frac{3}{8}\xi^2+\frac{5}{16}\xi^3+\frac{35}{128}\xi^4+0.531\xi^5\right)^2(1-\xi)d\xi$$

$$= \frac{9(1-\nu^2)}{ER^3} M\left(-0.448+\frac{1}{3\xi^3}-0.285\xi^2+0.245\xi^3+0.066\xi^4\right.$$

$$\left.+0.033\xi^5+0.019\xi^6+0.001\xi^7+0.035\xi^8\right)$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.21)$$

となり、θ_{crack} が計算できる。試験体の形状および材料定数として、l=15cm、R=5 cm、ξ =0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、ν =1/6、E=3.0x10^{5}kg/cm^2 を(2.18)、(2.21)式に代入して、$\theta_{no\ crack}$, θ_{crack} を計算した結果を表－2.2に示す。また下図に示すように、ノッチ部断面における傾斜角より曲げモーメントを評価するため、単位の回転角θ_{crack} を生じさせる曲げモーメントMを表－2.3に示す。



表－2.2　ノッチを有する丸棒の曲げモーメント1kg･cm 当りの回転角

回転角　記号		M=1kg･cm当りの回転角(1/kg･cm)
$\theta_{no\ crack}$		5.093×10^{-8}
θ_{crack}	$\xi=0.5$	50.95×10^{-8}
	$\xi=0.6$	24.69×10^{-8}
	$\xi=0.7$	11.53×10^{-8}
	$\xi=0.8$	4.550×10^{-8}
	$\xi=0.9$	1.060×10^{-8}

表－2.3　ノッチを有する丸棒の単位回転角θ_{crack}を生じさせる曲げモーメント

曲げモーメント	単位回転角θ_{crack}を生じさせる曲げモーメント(kg･cm)
$M(\xi=0.5)$	1.963×10^{6}
$M(\xi=0.6)$	4.050×10^{6}
$M(\xi=0.7)$	8.673×10^{6}
$M(\xi=0.8)$	21.98×10^{6}
$M(\xi=0.9)$	94.34×10^{6}

2．3　実験方法

直接引張試験に用いた試験体は、直径100mm、長さ150～200mmのシリンダーである。最大荷重後の荷重－クラック開口変位関係を測定するために、試験体に円周切り欠き（ノッチ）を導入し、クラック位置を規定している。ノッチ深さは、5～25mmまで5mmきざみで、それによって試験体名を表－2.4のように決める。ここで、球座の有無とは、図－2.1に示す実験装置のように、４本の鋼棒によって構成された剛な骨組の中に球座を組み込むと、試験体の偏心を低減する効果はあるが、試験体にクラックが入ると同時に球座が回転し、クラックが急激に進展するので最大荷重後の荷重－変位曲線を得ることができない。それ故、試験体の上下の球座を取り外して実験を行ったが、偏心の影響を検討するために、N10-1およびN20-1は、球座を取り付けて実験を行った試験体である。

表－2.4 試験体名称

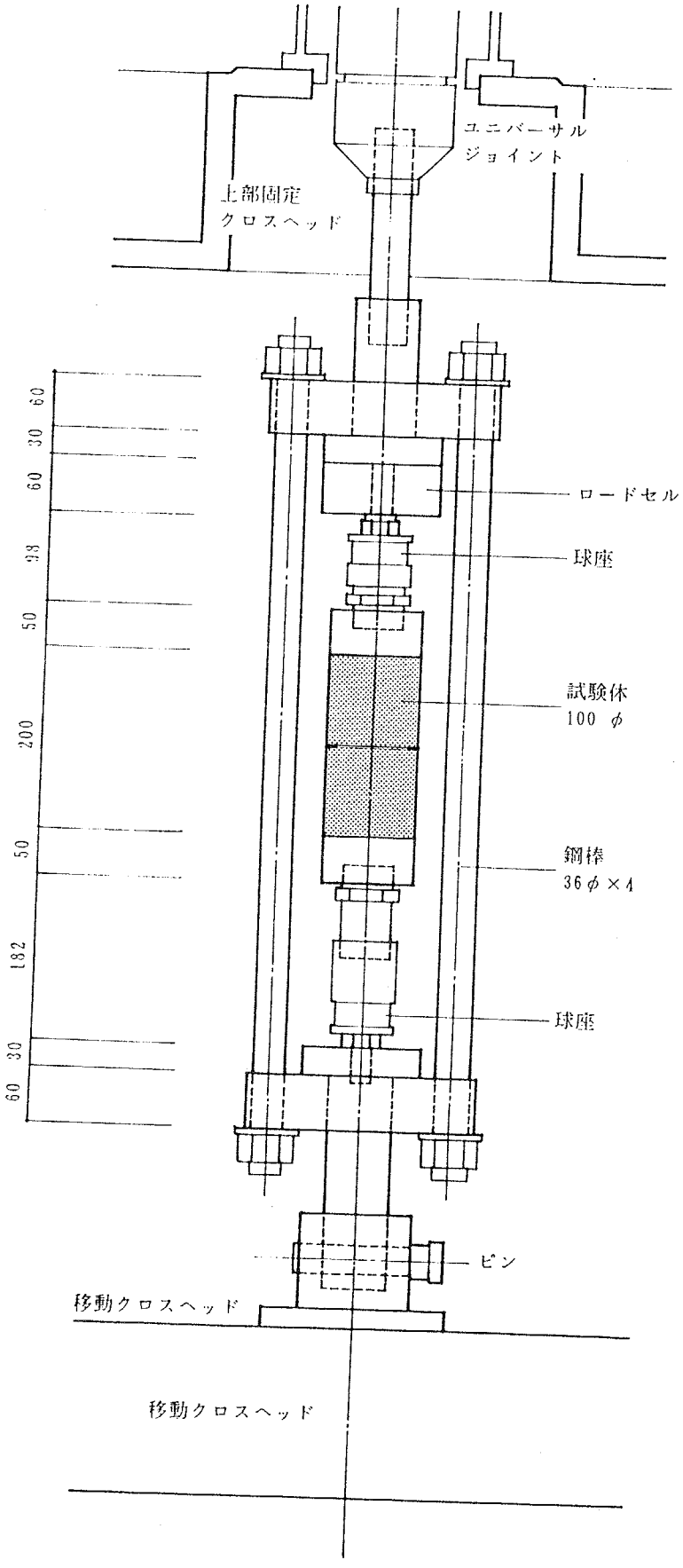
試験体名	ノッチ深さ	球座の有無
N05-2	5mm	無
N10-1	10mm	有
N10-2	10mm	無
N15-2	15mm	無
N20-1	20mm	有
N20-2	20mm	無
N25-2	25mm	無

試験体の調合を表－2.5に示す。普通ポルトランドセメントと天然骨材（細骨材の最大寸法5mm，粗骨材の最大寸法20mm，粗粒率=6.33）を使用した。打設後約30時間で脱型し、材令28日まで標準水中養生を、その後試験日（試験材令約６ヵ月）まで20℃の恒温室に放置した。

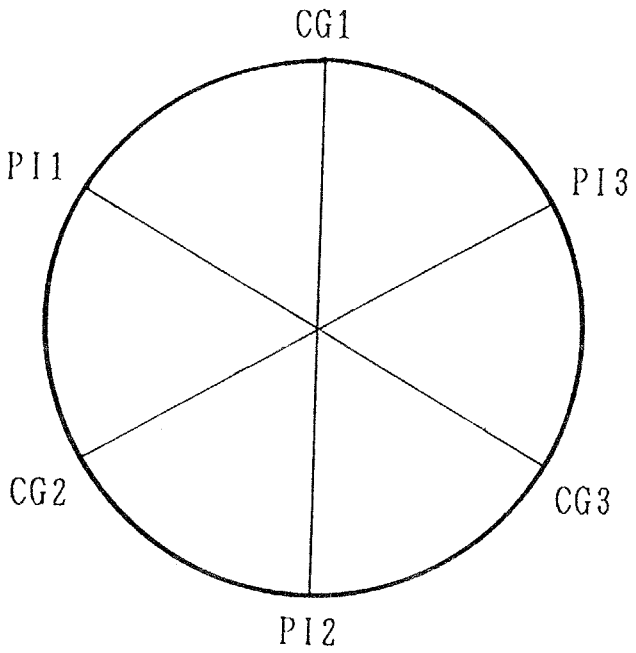
表－2.5 コンクリートの調合表

最大骨材寸法	水セメント比	単位重量 (kg/m3)			
		水	セメント	砂	砂利
20mm	0.55	194	353	689	1054

4週圧縮強度は約400kg/cm^2、1年圧縮強度は約480kg/cm^{2}であった。試験日の前日に厚さ1.2mmのダイヤモンドブレードによって、所定の深さのノッチを導入し、端面を仕上げ、エポキシ系接着剤で鋼製の加圧盤に接着した。加圧盤を接着した試験体は、図－2.1のように加力治具に取り付けられた。加力はインストロン型25ton試験機を用いて、4本の荷重制御棒にあらかじめ引張力を導入して加力治具の遊びを除去した後、一定の変位速度(0.005mm/min.)で載荷した。荷重は1kg感度のロードセルで、ノッチ部の開口変位は、円周方向に等間隔な3ヵ所に取り付けた1/2500mm感度のクリップゲージで測定した（図－2.2のCG1～CG3）。この3ヵ所のクリップゲージの出力より、ノッチ断面の傾きが計算できる。さらに、クリップゲージの中間点における変位をゲージ長さ100mm、感度1/1100mmのパイゲージで測定した（図－2.2のPI1～PI3）。


ユニバーサル
ジョイント
上部固定
クロスヘッド
60
30
60
98
50
200
50
182
30
60
ロードセル
球座
試験体
100 φ
鋼棒
36φ×4
球座
ピン
移動クロスヘッド
移動クロスヘッド

図－2.1　載荷装置



CG1～CG3：クリップゲージ
PI1～PI3：パイゲージ

図－2.2　変位測定位置および変位記号

2．4　実験結果および考察

表－2.6に実験より得られた最大荷重、最小断面に対する引張強度および最大荷重時のノッチ部平均開口変位を示す。

表－2.6　実験結果

試験体名	最大荷重 (kg)	引張強度 (kg/cm^2)	最大荷重時のｸﾗｯｸ開口変位 (μm)
N05-2	1265	19.9	7.8
N10-1	1945	38.7	7.2
N10-2	1345	26.7	11.7
N15-2	1173	30.5	12.4
N20-1	1160	41.0	13.4
N20-2	764	27.0	11.0
N25-2	473	24.1	9.7

図－2.3～図－2.9に荷重－変位曲線を示す。試験体の上下に球座を用いた試験体N10-1およびN20-1は、前節で述べたように、最大荷重よりわずかに荷重が落下した時点で急激なクラック伝播が起こり、その後の荷重－変位曲線が得られていない。一方、球座を取り外したその他の試験体では、最大荷重後のクラック伝播が、４本の荷重制御棒により拘束されるため、最大荷重後も荷重－変位曲線が得られている。クリップゲージによる開口変位の平均曲線（実線）とパイゲージによる平均変位曲線（実線）とを比較すると最大荷重後ほぼ同様な挙動を示していることがわかる。これは、Hillerborg(10)が指摘しているように、最大荷重付近で破壊進行領域（本試験体の場合ノッチ部）が形成されると、その後の変位増分は破壊領域内（ノッチ部）で生じ、その他の領域では荷重の減少に伴って、ひずみも弾性的に減少するためである。

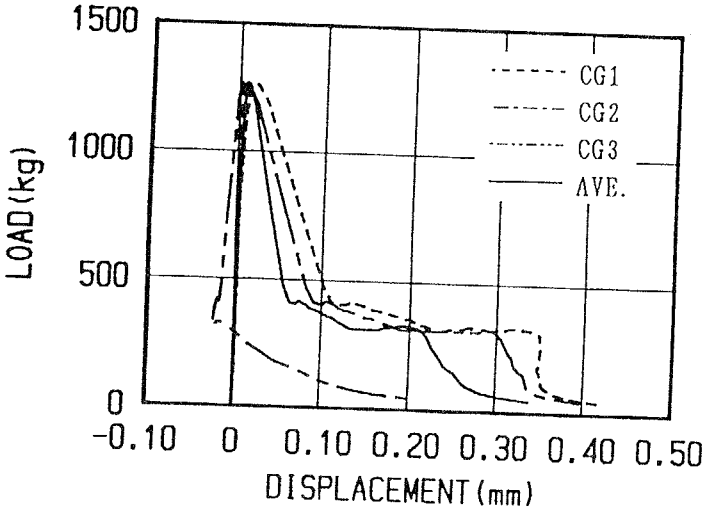
球座の有無による引張強度を比較すると、球座を取り外した試験体（N10-2、N20-2）の引張強度は、球座を取り付けた試験体（N10-1、N20-1）の引張強度よりかなり低下している（ノッチ10mm試験体で31%減、20mm試験体で34%減）。これは球座を取り外したため、試験体により大きな曲げが作用したことに起因している。さらに、2.2節で述べた線形破壊力学に基づいて計算した変位とパイゲージによる平均変位を比較して図－2.10に示す。計算値は最大応力度の1/3に相当する応力度に対する割線弾性係数を用いているので、実験値は荷重の上昇に伴って計算値より変位が大きくなり、上に凸の曲線となる。球座を取り付けた試験体と取り外した試験体を比べると、球座を取り外した試験体の方が、曲げの影響により、荷重の上昇に伴って、より大きな変位を生じている。図－2.11に、最大荷重時におけるノッチ断面部の最大傾斜を、３個のクリップゲージより評価して示す。この図から明らかなように、球座の無い試験体は、球座を有する試験体の２倍以上の傾きとなっており、試験体が完全弾性体であれば２倍以上の曲げモーメントが生じたことになる。さらに試験体を弾性体と見なせる最大荷重前におけるノッチ部断面の最大傾斜の変遷を、ノッチ10mmの試験体と20mmの試験体について、図－2.12～図－2.15に示す。球座を有するN10-1試験体では最大荷重の約40%で、最大荷重時の傾きとほぼ同じ傾きを示し、荷重の増加に伴って傾斜も増大する。しかし、荷重が最大荷重の約80%に達すると、傾斜の増大は見られなくなり、ほぼ同一傾斜で引張変形が進行している。一方、球座の無いN10-2試験体では、載荷初期の段階から、最大荷重時の傾きとほぼ同じ傾きを示す。最大荷重の40%位迄は、その傾斜の増大は少ないが、70%を越えると、急激に増大し始める。ノッチ20mm試験体についても、球座の無いN20-2試験体は、最大荷重に近づくと急激に傾斜が増大しており、その結果、引張強度が低減すると考えられる。

次に、図－2.12～図－2.15のノッチ部断面の傾斜角から、2.2.4節の線形破壊力学に基づく方法によって、試験体に作用する曲げモーメントを算定し、表－2.7に示す。同表には曲げモーメントの他に、偏心距離、曲げ応力および

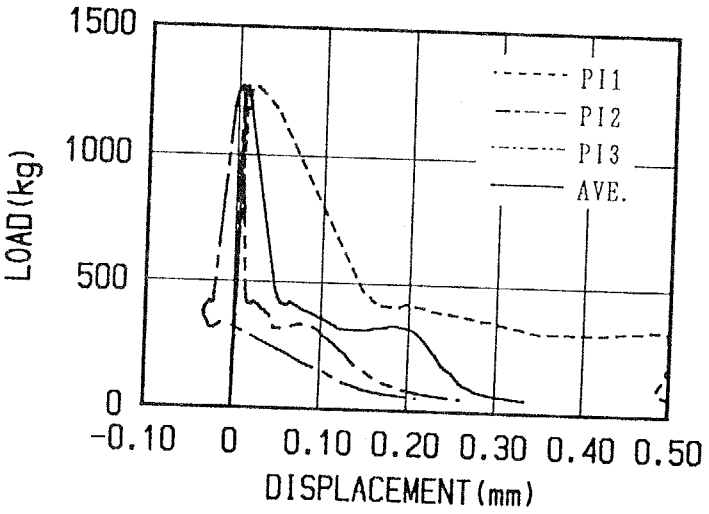
全応力度（引張応力度＋曲げ応力度）も示している。最大荷重時の全応力度より引張強度を推定すると、50～60kg/cm^{2}となるが最大荷重時まで線形破壊力学を適用した場合、曲げモーメントを過大評価することになり、この強度も過大評価となる。球座を有する試験体(N10-1、N20-1)の偏心距離は、最大荷重まで、ごく限られた範囲内にあるので、実用上、これらの試験体の引張強度（約40kg/cm^2）を用いて差し支えない。これらの偏心はコンクリート内の粗骨材粒子の分布により、断面の引張剛性の中心が断面の幾何学的中心と必ずしも一致しないために生じる。この偏心を考慮すると、引張強度は10%程度上昇する可能性はあるが、詳しくは、第５章の逆解析法による引張軟化特性で考察する。

表－2.7　線形破壊力学によって算定した曲げモーメント

試験体名 断面積 A 断面係数 Z	荷　重 P (kg)	引張応力度 σt (kg/cm^2)	傾斜角 $\left(\frac{B_1-B_2}{D}\right)/2$ x10^{-5}	曲げﾓｰﾒﾝﾄ M (kg. cm)	偏心距離 e=M/P (mm)	曲げ応力度 σM (kg/cm^2)	全応力度 σt+σM (kg/cm^2)
N10-1	410	8.2	0.50	110	2.7	2.2	10.4
A=50.3cm^2	835	16.6	1.85	407	4.9	8.1	24.7
Z=50.3cm^3	1195	23.8	3.10	681	5.7	13.5	37.3
	1590	31.6	4.35	956	6.0	19.0	50.6
	(1945)	(38.7)	(4.25)	(934)	(4.8)	(18.6)	(57.3)
N10-2	276	5.5	0.15	33	1.2	0.7	6.2
A=50.3cm^2	558	11.1	0.95	209	3.7	4.2	15.3
Z=50.3cm^3	892	17.7	2.00	440	4.9	8.7	26.4
	1178	23.4	3.75	824	7.0	16.4	39.8
	(1345)	(26.7)	(9.25)	(2033)	(15.1)	(40.4)	(67.1)
N20-1	617	21.8	1.05	43	0.7	2.0	23.8
A=28.3cm^2	800	28.3	1.40	57	0.7	2.7	31.0
Z=21.2cm^3	1000	35.3	1.95	79	0.8	3.7	39.0
	1100	38.9	2.70	109	1.0	5.1	44.0
	(1160)	(41.0)	(6.00)	(243)	(2.1)	(11.5)	(52.5)
N20-2	194	6.9	0.75	30	1.5	1.4	8.3
A=28.3cm^2	389	13.7	1.30	53	1.4	2.5	16.2
Z=21.2cm^3	568	20.1	2.60	105	1.8	5.0	25.1
	659	23.3	4.85	196	3.0	9.2	32.5
	(764)	(27.0)	(12.00)	(486)	(6.4)	(22.9)	(49.9)

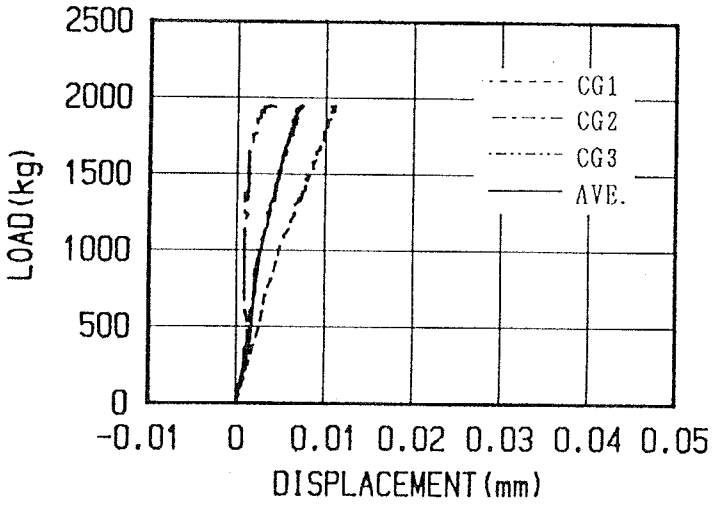


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

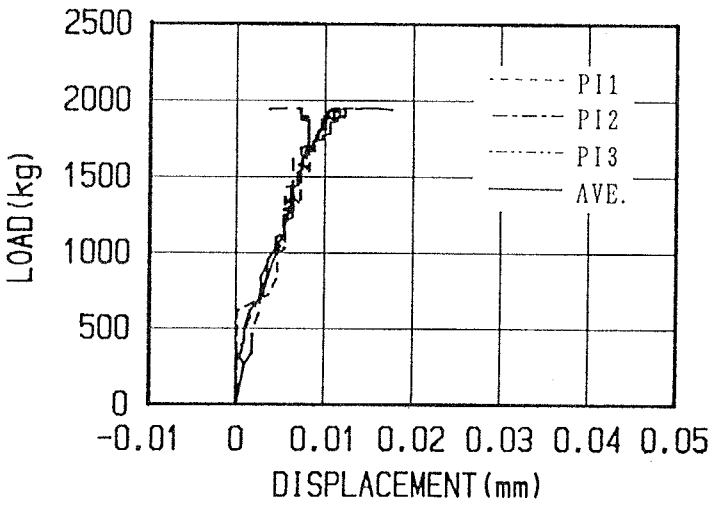


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

図－2.3　荷重－変位曲線：NO5-2

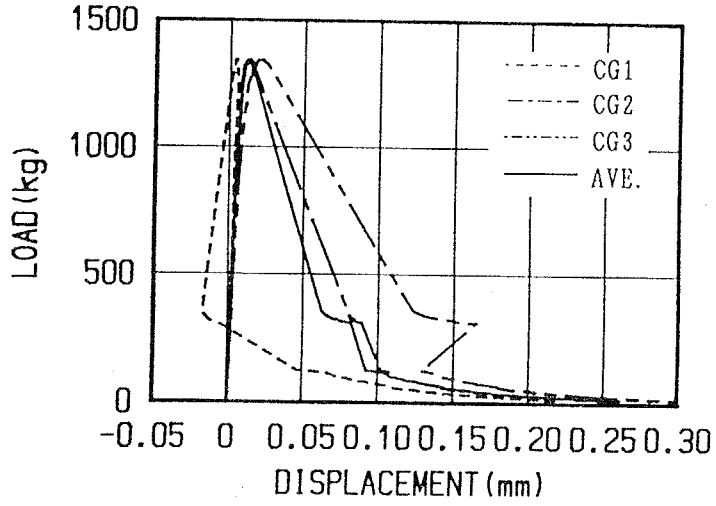


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

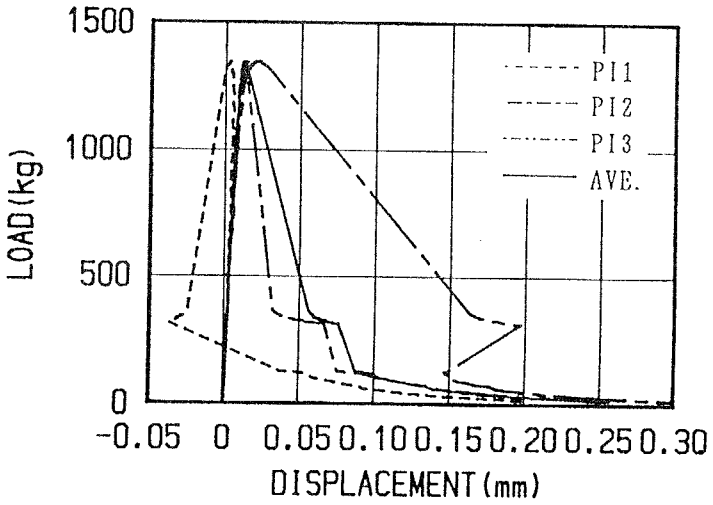


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

図－2.4　荷重－変位曲線：N10-1

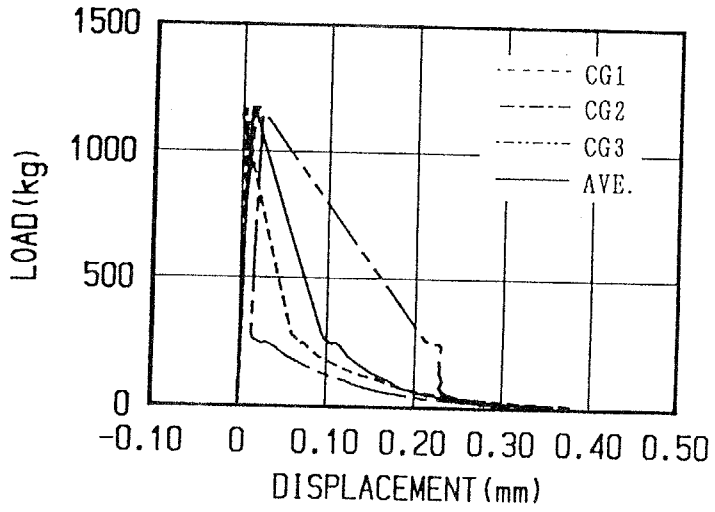


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

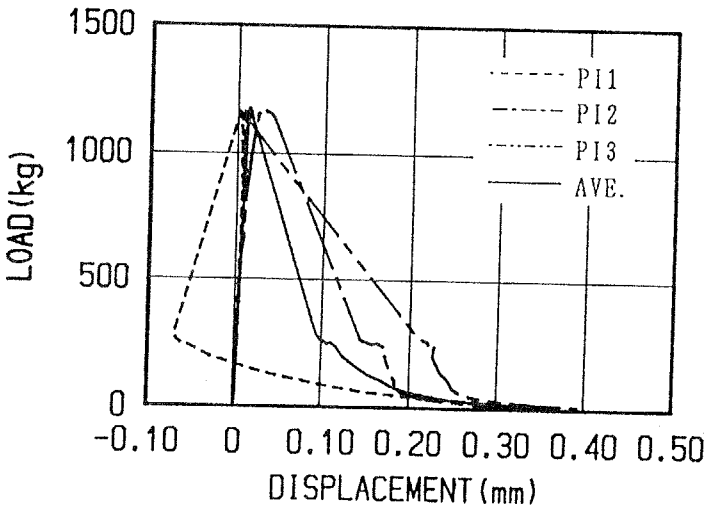


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

図－2.5 荷重－変位曲線：N10-2

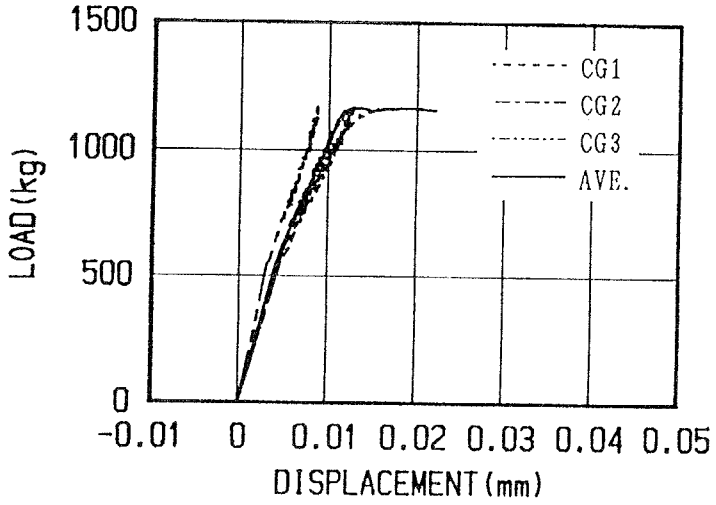


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

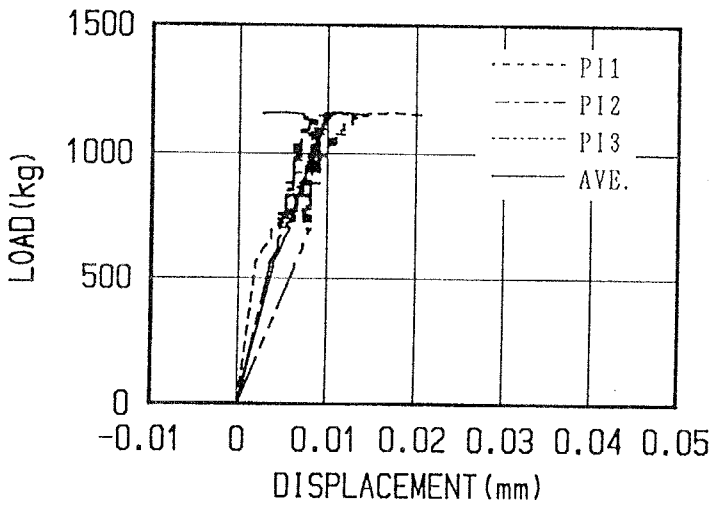


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

図－2.6　荷重－変位曲線：N15-2

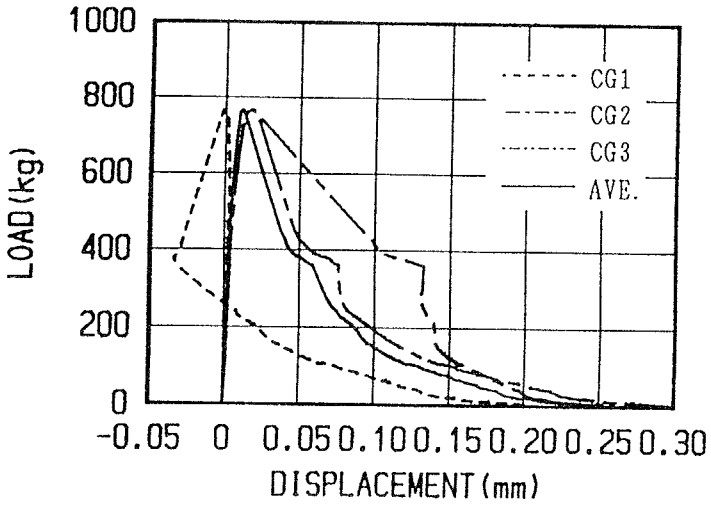


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

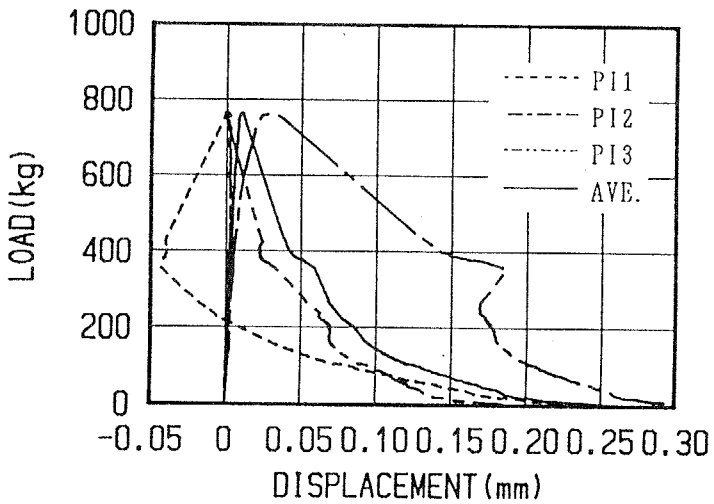


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

図－2.7　荷重－変位曲線：N20-1

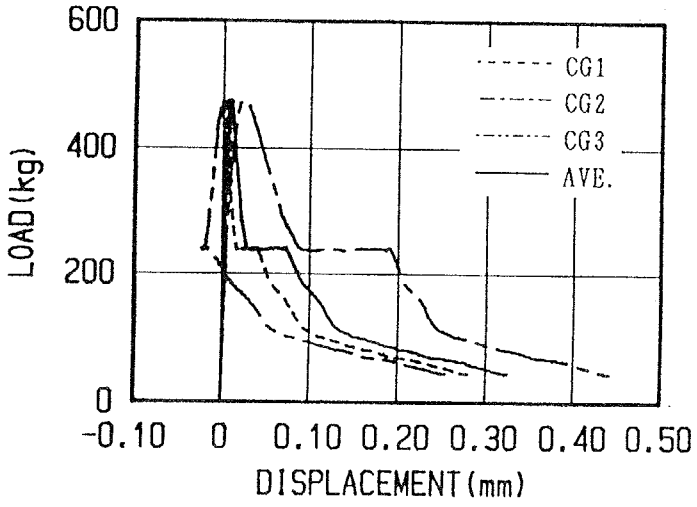


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

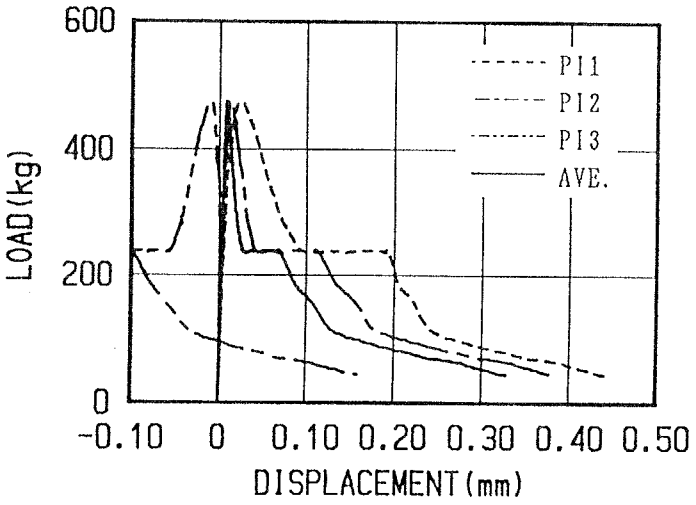


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

図－2.8　荷重－変位曲線：N20-2

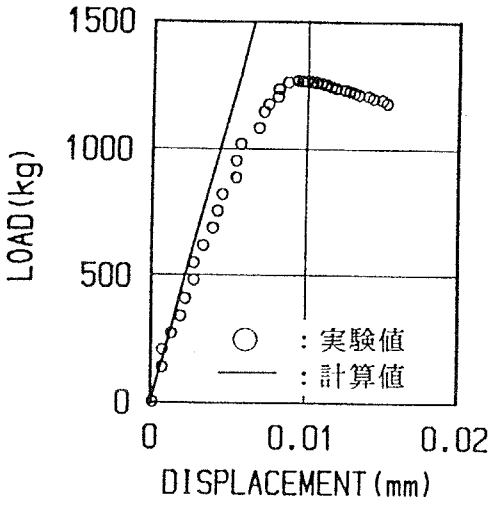


(1) 荷重－ノッチ部開口変位関係

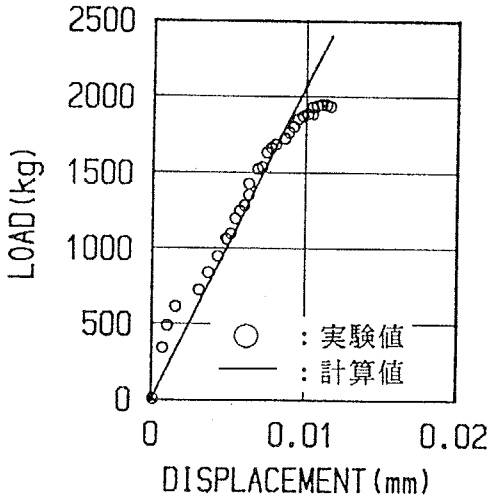


(2) 荷重－パイゲージによる変位関係

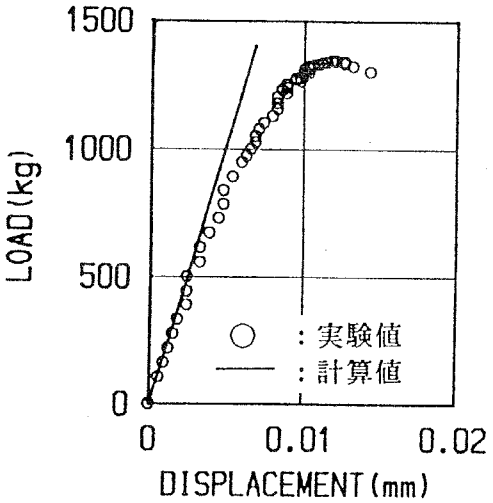
図－2.9　荷重－変位曲線：N25-2



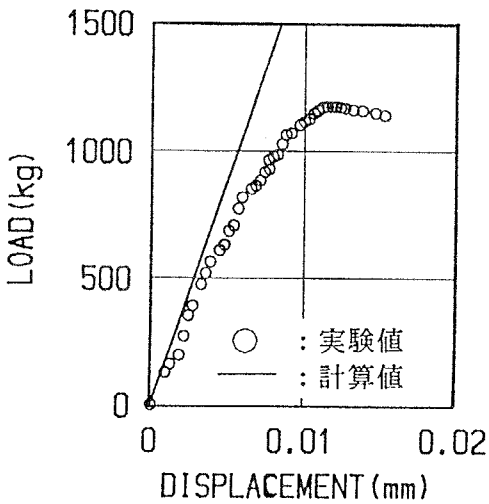
(1) ノッチ5mm、球座無：N05-2



(2) ノッチ10mm、球座有：N10-1

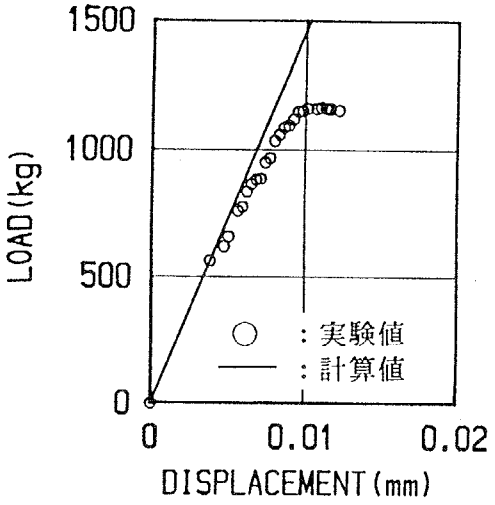


(3) ノッチ10mm、球座無：N10-2

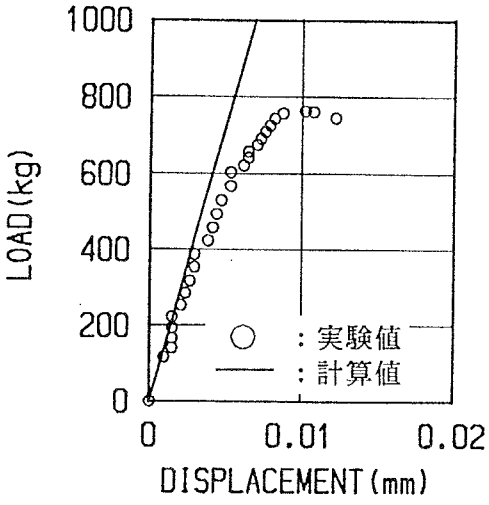


(4) ノッチ15mm、球座無：N15-2

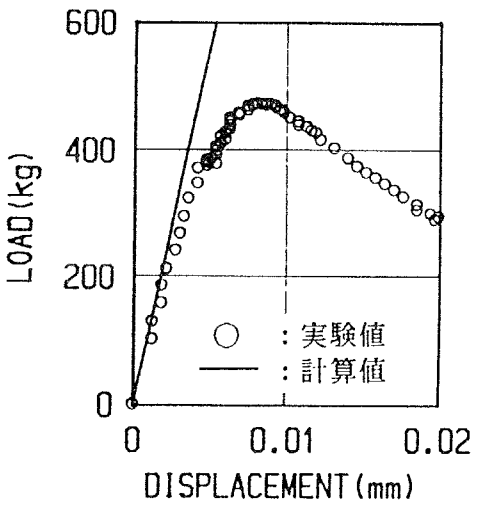
図－2.10　実験値（パイゲージによる平均変位）と線形破壊力学による計算値の比較（その１）



(5) ノッチ20mm、球座有：N20-1

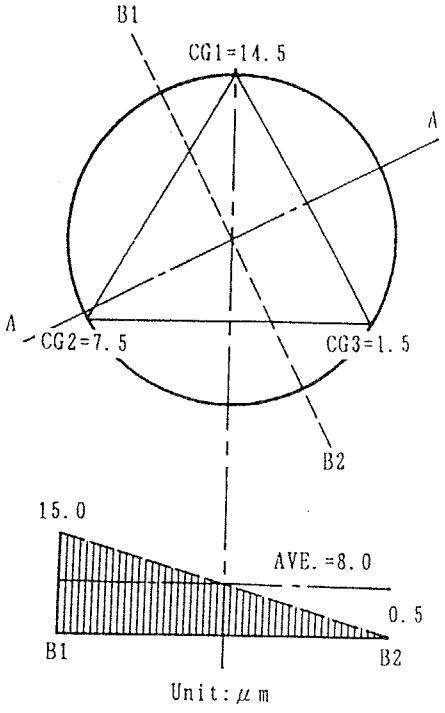


(6) ノッチ20mm、球座無：N20-2



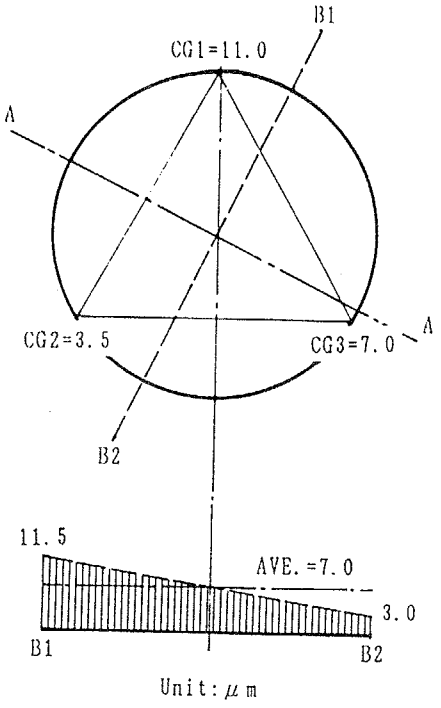
(7) ノッチ25mm、球座無：N25-2

図－2.10　実験値（パイゲージによる平均変位）と線形破壊力学による計算値の比較（その２）



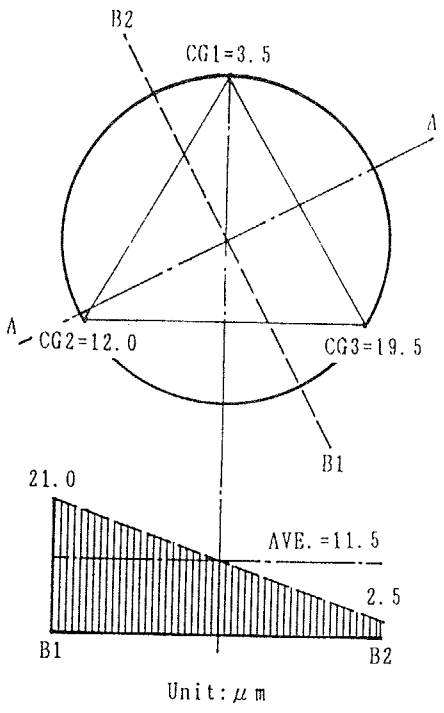
N05-2(Max. Load=1265kg)

(1) N05-2



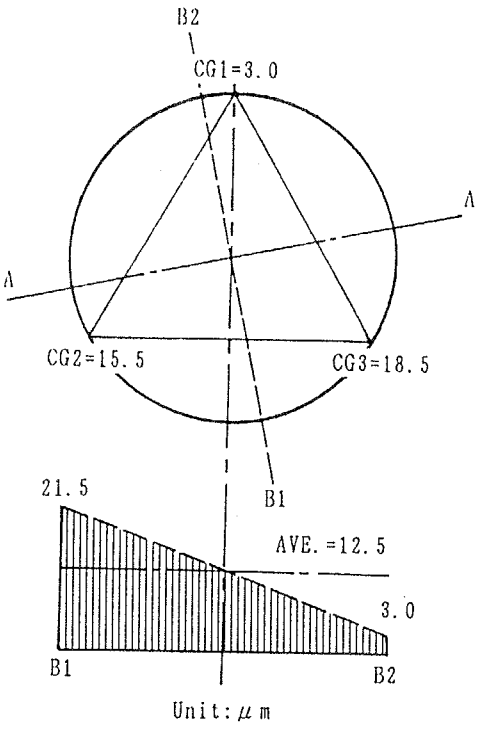
N10-1(Max. Load=1945kg)

(2) N10-1



N10-2(Max. Load=1345kg)

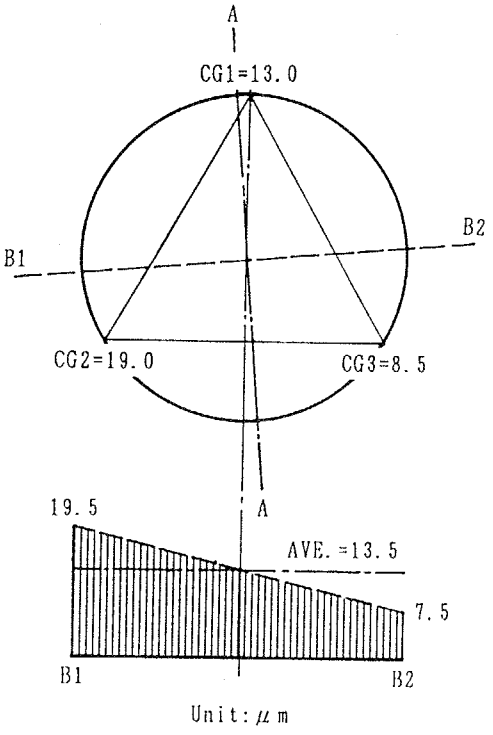
(3) N10-2



N15-2(Max. Load=1173kg)

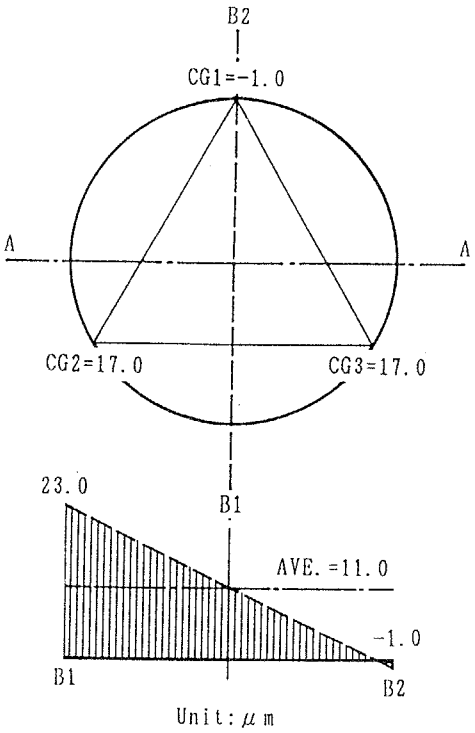
(4) N15-2

図－2.11　最大荷重時におけるノッチ部断面の最大傾斜（その１）



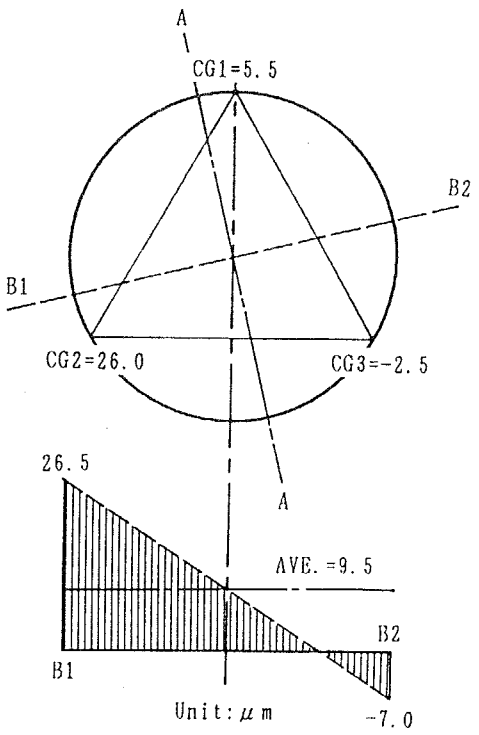
N20-1(Max. Load=1160kg)

(5) N20-1



N20-2(Max. Load=764kg)

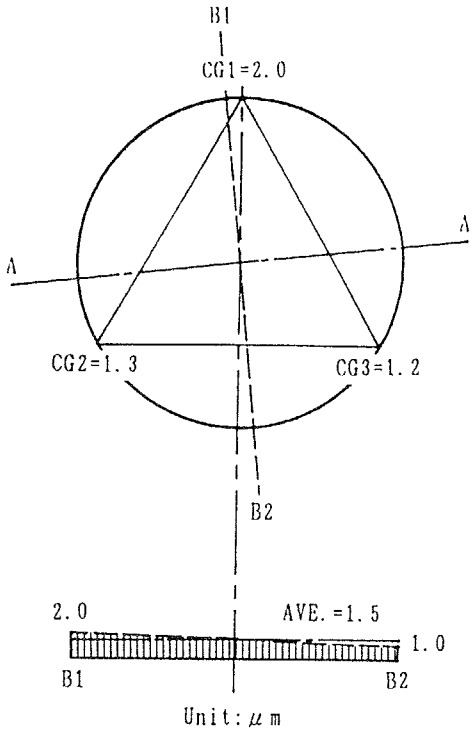
(6) N20-2



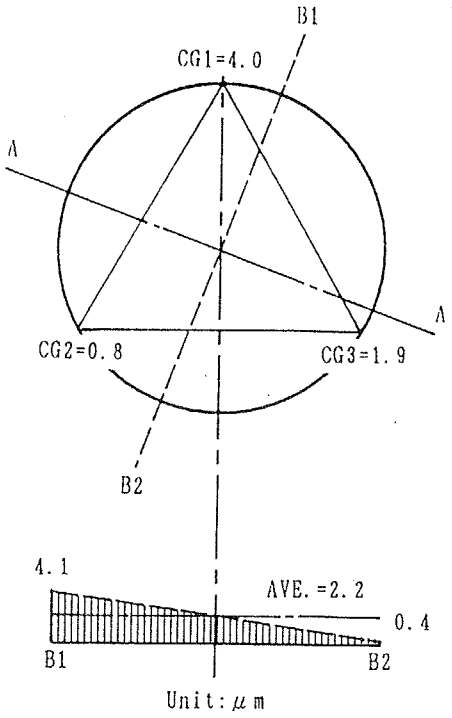
N25-2(Max. Load=473kg)

(7) N25-2

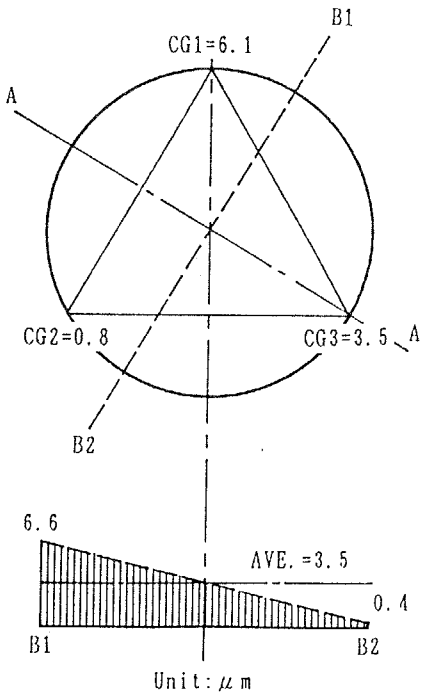
図－2.11　最大荷重時におけるノッチ部断面の最大傾斜（その２）



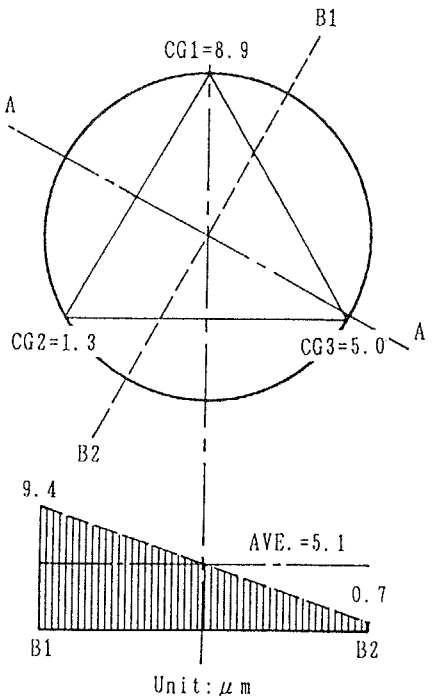
N10-1(Load=410kg)



N10-1(Load=835kg)

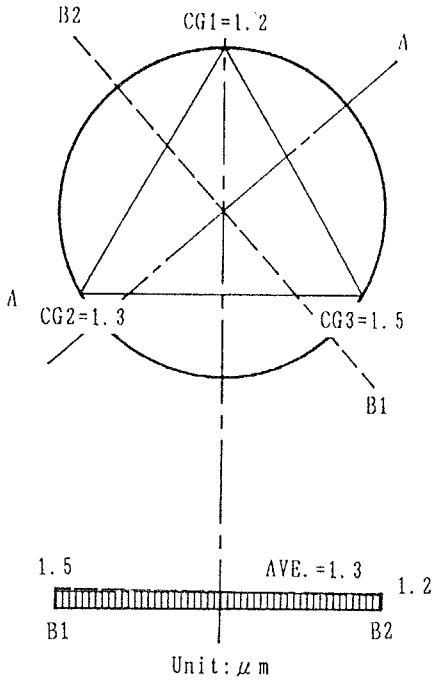


N10-1(Load=1195kg)

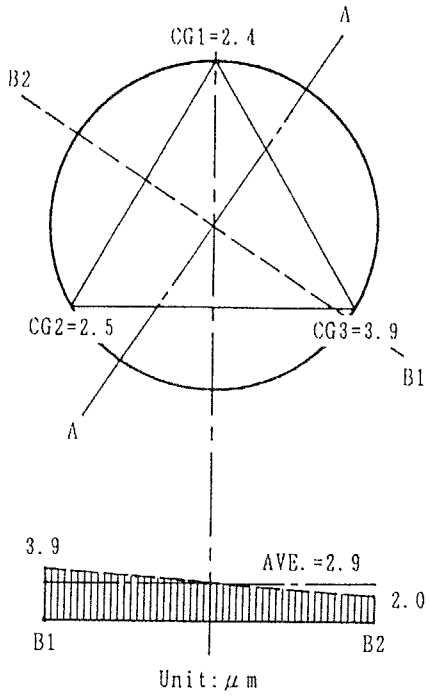


N10-1(Load=1590kg)

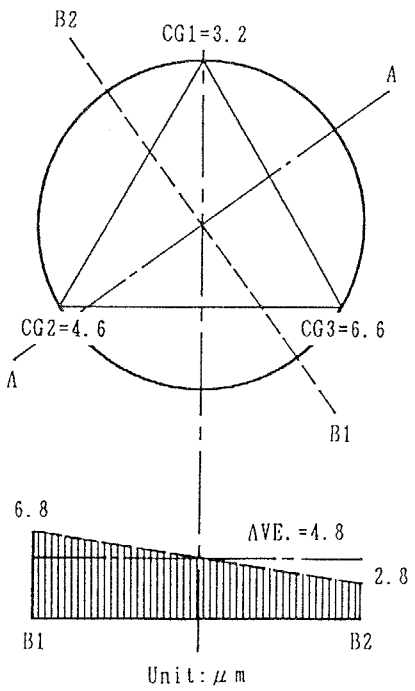
図－2.12　最大荷重前におけるノッチ部断面の傾斜の変化：N10-1



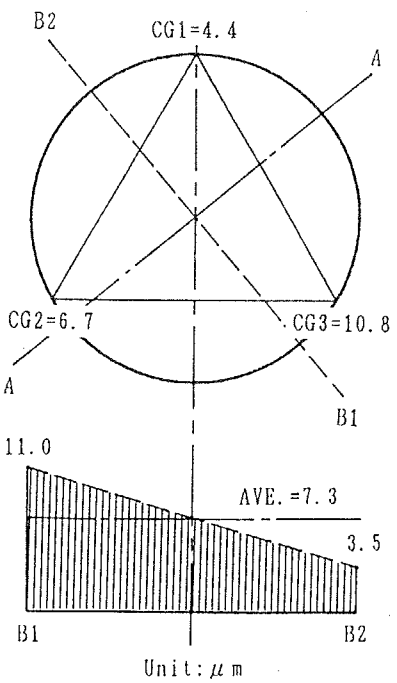
N10-2(Load=276kg)



N10-2(Load=558kg)

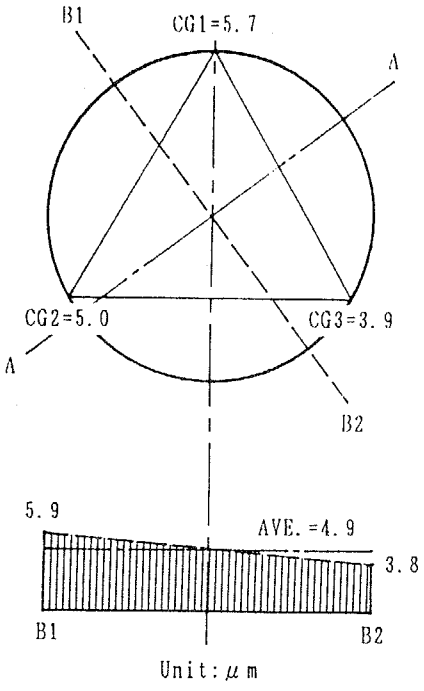


N10-2(Load=892kg)

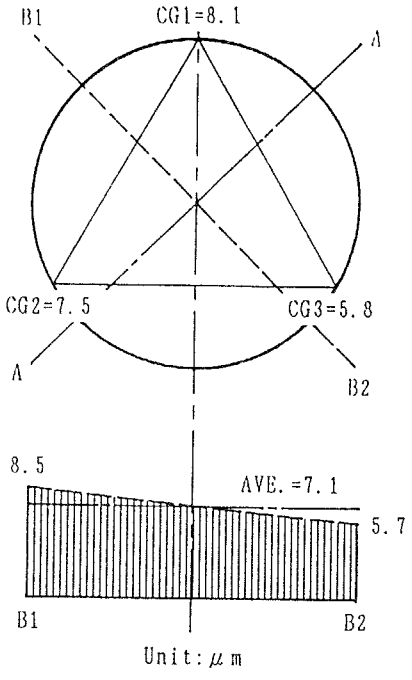


N10-2(Load=1178kg)

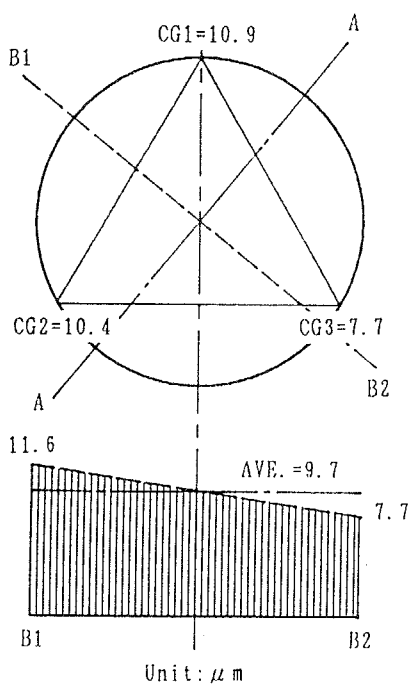
図－2.13　最大荷重前におけるノッチ部断面の傾斜の変化：N10-2



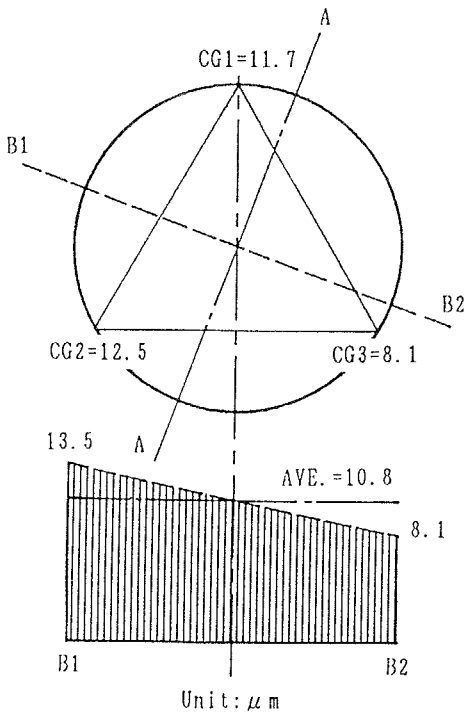
N20-1(Load=617kg)



N20-1(Load=800kg)

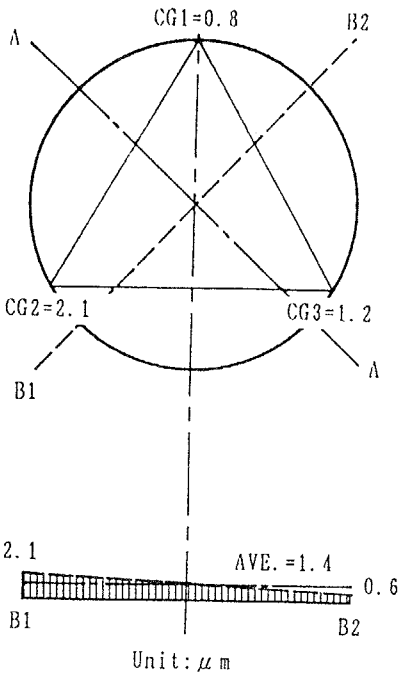


N20-1(Load=1000kg)

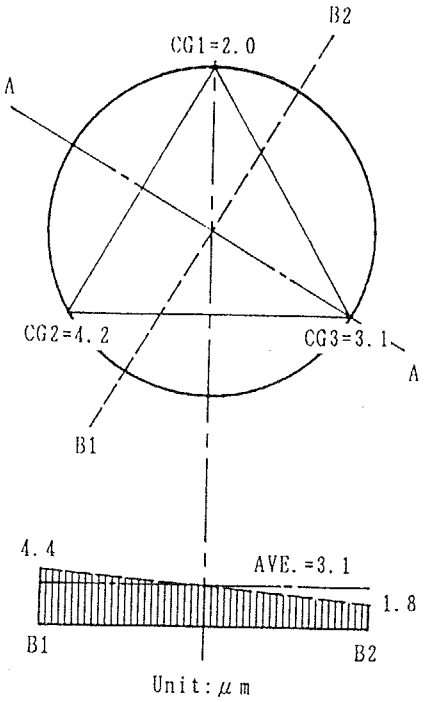


N20-1(Load=1100kg)

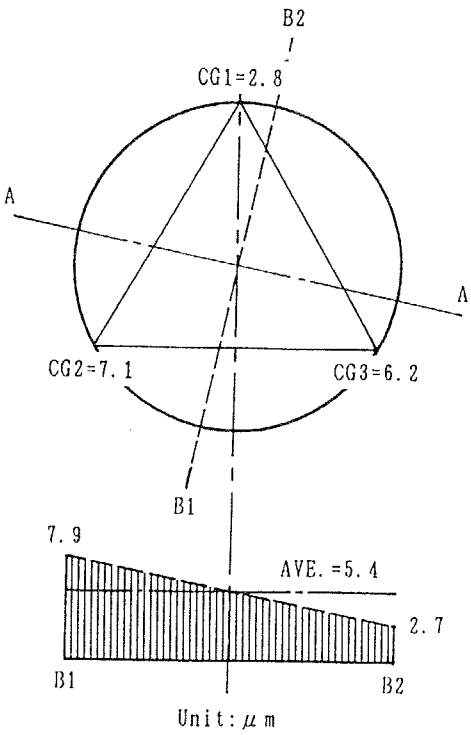
図－2.14　最大荷重前におけるノッチ部断面の傾斜の変化：N20-1



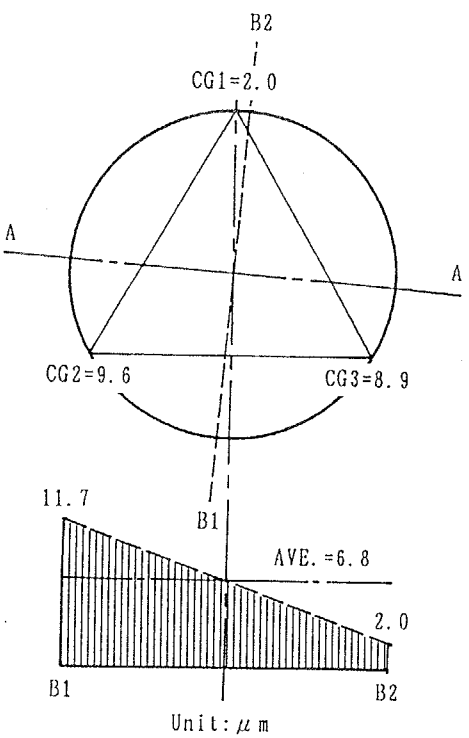
N20-2(Load=194kg)



N20-2(Load=389kg)



N20-2(Load=568kg)



N20-2(Load=659kg)

図－2.15　最大荷重前におけるノッチ部断面の傾斜の変化：N20-2

2.5 まとめ

コンクリートの直接引張試験結果が大きく変動する要因として、曲げの影響を取り上げ、球座の有無による直接引張試験を行い、線形破壊力学に基づいて、引張強度に及ぼす曲げ変形の影響を考察した。これから以下の結論を得た。

(1) 球座の有無にかかわらず、試験体には曲げ変形が生じる。これはコンクリート内の骨材粒子がランダムに分布しており、各断面における引張剛性の中心は、断面の幾何学的中心とも、荷重の作用線とも一致しないためである。したがって、弾性範囲内から偏心が存在し、最大荷重後、クラックは不均一に進行するので、偏心も増大する。

(2) 球座を有する試験体の偏心距離は、最大荷重まで増加が少なく、曲げの影響は小さい。それ故、曲げの影響を無視して引張強度を算定してもその誤差は10%程度である。しかし、最大荷重後、クラックが進行すると球座が回転するので安定した荷重－クラック開口変位関係を得ることはできない。

(3) 最大荷重後も安定した荷重－クラック開口変位関係を得るために、球座を取り外して行った試験では、最大荷重に近づいていくと偏心距離が急増し、曲げの影響が大きくなる。その結果、引張強度は、球座を有する試験体と比較すると、30%以上低下する。

(4) コンクリートの直接引張試験は、荷重－クラック開口変位関係を決定する最も直接的な方法であるが、コンクリート固有の不均質さに起因する曲げ変形を避けることができないので、試験結果の評価は困難である。

第３章　ノッチを有するコンクリートの曲げ試験

3．1　はじめに

前章では、球座の有無による直接引張試験結果の差異を、線形破壊力学に基づいた曲げ変形によって考察し、試験結果が曲げ変形に大きく影響されることを示した。この曲げ変形はコンクリート固有の不均質構造に起因しており、避けることができないため、引張試験結果より、コンクリートの引張軟化特性を決定する方法は、最も直接的ではあるが、ほとんど行われていない。通常行われている引張軟化特性を決定する手法は、間接的ではあるが、比較的安定した結果が得られる曲げ試験およびCT(compact tension)試験を行い、その試験結果を最も良く近似できる引張軟化特性を数値計算によって推定する逆解析法である。ただし、引張軟化特性を逆解析によって推定するためには、最大耐力後も安定した荷重－変位関係を測定する必要がある。

本章では、ノッチを有するコンクリートの曲げ試験を行い、最大耐力後も安定した荷重－変位関係を得ること、および試験中の顕微鏡観察によってクラックの進展挙動をリアルタイムに測定することを目的とする。ノッチ深さ、載荷速度、骨材寸法、水セメント比、載荷法、養生および材令が最大耐力後の軟化挙動や破壊エネルギーに及ぼす影響について考察する。

3．2　ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の変形

変位計に要求される感度および測定結果の妥当性を検討するために、スパンSの中央に集中荷重Pが作用する片側ノッチを有する試験体（3点曲げ）の載荷点変位を2.2節の方法で算定しておく。

ノッチの無い場合のひずみエネルギー$\overline{W_0}$を曲げによるひずみエネルギー$\overline{W_{bending}}$とせん断によるひずみエネルギー$\overline{W_{shear}}$に分けて考えると、材料力学(1)より次のように計算できる。

$$\overline{W_0} = \overline{W_{bending}} + \overline{W_{shear}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (3.1)$$

ここで

$$\overline{W_{bending}} = \int_0^S \frac{M^2}{2EI} dx \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (3.2)$$

$$M = \frac{1}{2} Px \qquad （3点曲げ）$$

および

$$\overline{W_{shear}} = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \int_0^S \frac{\tau^2}{2G} B dx dy \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (3.3)$$

$$\tau = \frac{V}{IB} \int_y^{\frac{W}{2}} yBdy$$

ここで、W：断面の高さ、B：断面の幅、I：断面2次モーメント$(BW^3/12)$、E：弾性係数、G：せん断弾性係数、τ：せん断応力度、M：曲げモーメント、V：せん断力$(P/2)$である。

(3.2)式、(3.3)式の積分を実行し、(3.1)式に代入すると

$$\overline{W_0} = \frac{P^2 S^3}{8EBW^3} + \frac{3P^2 S}{20GBW} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (3.4)$$

となる。よってCastiglianoの定理より、ノッチの無い場合の変位 u_0 は

$$u_0 = \frac{\partial \overline{W}_0}{\partial P} = \frac{PS^3}{48EI}\left\{1 + \frac{12(1+\nu)}{5}\left(\frac{W}{S}\right)^2\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5)$$

となる。ノッチによる変位の増分 Δu は、(2.9)式より

$$\Delta u = \int_0^A \frac{2}{E'} K_I \frac{\partial K_I}{\partial P} dA \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.6)$$

から計算できる。ここで K_I は片側ノッチ（深さa）を有する3点曲げ試験体の応力拡大係数であり、次の近似式が得られている(2)。

$$K_I = \frac{3}{2}\frac{PS}{BW^2}\sqrt{a}\,Y \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.7)$$

$$Y = \frac{1.99 - (a/w)(1-a/w)(2.15 - 3.93a/w + 2.7a^2/w^2)}{(1+2a/w)(1-a/w)^{3/2}}$$

上式は、$S/W = 4$ に対して求められた式であるが、本試験体の $S/W = 3$ に対して適用しても誤差は小さい(3)。(3.7)式を(3.6)式に代入し、整理すると、

$$\Delta u = \frac{PS^3}{48EI}\left(18\frac{W}{S}\right)\int_0^{a/w}\left(\frac{a}{w}\right)Y^2 d(a/w) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.8)$$

となる。本実験で用いる試験体の形状および材料定数として、B=W=10cm、S=30cm、a/W=0.1、0.3、0.5、0.7、ν =1/6、E=2.9x10^{5}kg/cm^2（4週）、E=3.5x10^{5}kg/cm^2（1年）を(3.5)式、(3.8)式に代入して、u、Δu を計算した結果を表－3.1に示す。ただし、(3.8)式の積分はSimpsonの1/3公式を用いて計算した。

表－3.1　ノッチを有する曲げ試験体の変形

		荷重1kg当りの変位(mm/kg)		σ_{net}=25kg/cm^{2}のときの全変位 $u_0+\Delta u\ (mm)$	
試験材令		4週試験	1年試験	4週試験	1年試験
u_0		3.05×10^{-5}	2.53×10^{-5}	1.69×10^{-2}	1.41×10^{-2}
Δu	a/w=0.1	0.236×10^{-5}	0.195×10^{-5}	1.48×10^{-2}	1.23×10^{-2}
	0.3	2.00×10^{-5}	1.66×10^{-5}	1.37×10^{-2}	1.14×10^{-2}
	0.5	7.19×10^{-5}	5.96×10^{-5}	1.42×10^{-2}	1.18×10^{-2}
	0.7	27.35×10^{-5}	22.66×10^{-5}	1.52×10^{-2}	1.26×10^{-2}

表－3.1より、曲げ変形は第２章の直接引張試験における変形より数倍大きくなるが、弾性変形は1/100mm程度であり、その測定には十分な精度が要求されることがわかる。

3.3　試験体

3.3.1　試験体概要

試験体はすべてセメント、水、天然骨材だけからなるプレーンコンクリートであり、混和剤は用いていない。試験体寸法は幅100mm、高さ100mm、長さ400mmで全て一定である。以下に示す７項目をパラメーターとし、最大耐力後の軟化挙動の相違を検討する。

(1)ノッチ深さ

ノッチ深さの試験体高さに対する割合(a/W)は、0.1から0.7まで0.2の間隔で変える。a/Wは0.5を規準とする。

(2)載荷速度

載荷速度は試験機の移動クロスヘッドの速度により制御されており、以下で示されている載荷速度はすべてクロスヘッド自身の速度であり、試験体自身の加力部の変形速度とは若干異なる。クラック進展の顕微鏡による観測を容易にするために、比較的遅い載荷速度(0.005mm/min.)を基準とし、載荷速度の影響を検討するために、基準載荷速度の10倍および100倍の載荷速度で試験を行う。

(3)最大骨材寸法

最大骨材寸法は 5mm から 25mm まで 5mm 間隔とし、 20mm を基準とする。

(4)水セメント比

水セメント比は 0.45、 0.55、 0.65 とし、0.55 を基準とする。

(5)載荷方法

載荷は簡便な３点曲げを基準とするが、一部４点曲げ（純曲げ）で試験を行う。

(6)養生

試験直前まで、標準水中養生を基準とするが、材令１年の試験体の一部は、４週後気中養生として試験を行う。

(7)材令

材令４週および１年で試験を行う。

これらのパラメーターの組合せに対し、表－3.2に示す実験条件で試験を行う。試験体のバラツキを考慮して、同一実験条件における試験体数は３～５体である。

試験名称の最初の２文字、3P、4Pはそれぞれ３点曲げ、４点曲げを表し、3Dは気中養生試験体である。次のアルファベットは水セメント比に対応している(L:W/C=0.45、 M:W/C=0.55、 H:W/C=0.65)。 L、M、Hの後の数字は最大骨材粒径(mm)を表す。

表－3.2 実験条件

試験名称	ノッチ 深さ (mm)	載荷速度 (mm/min)	最大骨材寸法(mm)	水セメント比	試験体数 4週＋1年	試験項目
3PM20-1	10	0.005	20	0.55	3＋4	ノッチ 深さの影響
3PM20-2	30	0.005	20	0.55	3＋5	
3PM20-3	50	0.005	20	0.55	3＋5	
3PM20-4	70	0.005	20	0.55	3＋5	
3PM20-5	50	0.05	20	0.55	3＋5	載荷速度の影響
3PM20-6	50	0.5	20	0.55	3＋5	
3PM05-1	50	0.005	5	0.55	3＋5	最大骨材寸法の影響
3PM10-1	50	0.005	10	0.55	3＋5	
3PM15-1	50	0.005	15	0.55	3＋5	
3PM25-1	50	0.005	25	0.55	3＋5	
3PL20-1	50	0.005	20	0.45	3＋5	水セメント比の影響
3PH20-1	50	0.005	20	0.65	3＋5	
4PM20-7	50	0.005	20	0.55	3＋3	４点曲げ
4PM20-8	50	0.05	20	0.55	3＋3	
4PH20-2	50	0.005	20	0.65	3＋3	
3DM20-7	50	0.005	20	0.55	3	気中養生
3DM20-8	50	0.05	20	0.55	3	
3DH20-2	50	0.005	20	0.65	3	

試験体の調合は、日本建築学会の『コンクリートの調合設計・調合管理・品質管理検査指針案・同解説』の７節「計画調合の定め方」に準じて、スランプ 18cm を目標に行った。表－3.3に各試験体の調合を示す。JIS A1101 によるスランプ試験結果を表－3.4に示す。

試験体は鋼製型枠を用いて打設し、約24時間後に脱型、その後20℃の恒温水槽に移して水中養生を行った。試験体は材令28日または１年で水槽から取り出し、その直後に厚さ1.2mmのダイヤモンドカッターを用いて、所定の深さのノッチを与え、曲げ試験を行った。

曲げ試験体と同一の調合試料から、直径 100mm、高さ 200mmの圧縮試験体を打設し、曲げ試験体と同様に脱型、養生を行っている。材令28日および１年でそれぞれ３～４体の圧縮試験を行い、曲げ試験体に用いた材料の圧縮強度および弾性係数を決定した。

表－3.3 試験体の調合

調合名称	水ｾﾒﾝﾄ比	最大骨材寸法(mm)	水 (kg/m^3)	セメント (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)
M20	0.55	20	194	353	700	1054
M05	0.55	5	323	587	1174	---
M10	0.55	10	202	367	700	1020
M15	0.55	15	198	360	703	1037
M25	0.55	25	190	345	700	1071
L20	0.45	20	203	451	603	1054
H20	0.65	20	192	295	766	1037

表－3.4 スランプ試験結果

試験名称	打設日 年/月/日	天気	気温 (℃)	スランプ (cm)
M20-1	88/09/21	晴れ	25	18.0
M20-2	88/09/26	雨	25	18.0
M20-3	88/09/28	雨	20	18.0
M20-4	88/09/30	曇り	20	18.0
M20-5	88/10/05	雨	20	18.0
M20-6	88/10/11	晴れ	22	19.0
M05-1	88/10/13	晴れ	20	240*
M10-1	88/10/17	曇り	18	17.0
M15-1	88/10/20	晴れ	17	19.5
M25-1	88/10/25	曇り	16	19.0
L20-1	88/10/27	晴れ	17	18.0
H20-1	88/11/01	晴れ	17	18.0
M20-7	88/11/04	晴れ	17	18.5
M20-8	88/11/07	晴れ	17	19.5
H20-2	88/11/09	晴れ	17	18.5

*M05-1は最大骨材寸法5mmのモルタルなのでフロー値を記載している。

3.3.2　材料試験

(1)ふるい分け試験

ふるい分け試験は、JIS A1102に従って行った。表－3.5に細骨材、表－3.6に粗骨材の試験結果を示す。

(2)比重および吸水率試験

比重および吸水率試験はJIS A1109（細骨材）およびJIS A1110（粗骨材）に従って行い、その結果を表－3.7、表－3.8にそれぞれ示す。

(3)単位容積質量および実積率試験

単位容積質量および実積率試験は、JIS A1104に従って行った。最大骨材寸法が25mm、20mm、15mm、10mmの各場合の試験結果を表－3.9に示す。

(4)含水率および含水率に基づく表面水率試験

含水率および含水率に基づく表面水率試験は、JIS A1125に従って行った。表－3.10に細骨材、表－3.11に粗骨材の試験結果を示す。

(5)セメントの材料試験

セメントは普通ポルトランドセメントであり、メーカーによる材料試験結果を表－3.12に示す。

表－3.5 細骨材のふるい分け試験の結果

ふるいの呼び寸法 (mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.15 以下	計
各ふるい残留量(g)	0	0	71	96	124	114	69	14	488
各ふるい残留率(%)	0	0	15	20	25	23	14	3	100
累加残留率 (%)	0	0	15	35	60	83	97	100	—
通過率 (%)	100	100	85	65	40	17	3	0	—
粗粒率	(0+0+15+35+60+83+97)/100=2.90								

表－3.6 粗骨材のふるい分け試験の結果

ふるいの呼び寸法 (mm)	30	25	20	15	10	5	2.5	2.5 以下	計
各ふるい残留量(g)	0	0	406	577	4098	5213	1000	36	11330
各ふるい残留率(%)	0	0	4	5	36	46	9	0	100
累加残留率 (%)	0	0	4	9	45	91	100	100	—
通過率 (%)	100	100	96	91	55	9	0	0	—
粗粒率	25mm以下：(0+4+45+91+100+100+100+100+100)/100=6.40 20mm以下：(41+87+ 96+ 96+ 96+ 96+ 96)/ 96=6.33 15mm以下：(36+82+ 91+ 91+ 91+ 91+ 91)/ 91=6.30 10mm以下：(46+ 55+ 55+ 55+ 55+ 55)/ 55=5.84								

表－3.7 細骨材の比重および吸水率試験の結果

試料番号	試料 No.1	試料 No.2	
W_{S1}：表面乾燥飽水状態の試料の質量 (g)	500.0	500.0	
W_I ：フラスコに加えた水の全量 (ml)	301.4	302.3	
W_{D1} ：乾燥後の試料の質量 (g)	484.0	484.1	平均
D_S ：表乾比重	2.52	2.53	2.52
D_D ：絶乾比重	2.44	2.45	2.44
W_{S2} ：表面乾燥飽水状態の試料の質量 (g)	500.0	500.0	
W_{D2} ：乾燥後の試料の質量 (g)	484.0	484.1	平均
Q ：吸水率 (%)	3.31	3.28	3.30

表－3.8 粗骨材の比重および吸水率試験の結果

最大骨材寸法	25mm			20mm		
試料番号	試料No.1	試料No.2	平均	試料No.1	試料No.2	平均
D_S ：表乾比重	2.68	2.68	2.68	2.65	2.67	2.66
D_D ：絶乾比重	2.66	2.65	2.66	2.63	2.65	2.64
Q ：吸水率 (%)	0.88	0.92	0.90	0.93	0.88	0.90

最大骨材寸法	15mm			10mm		
試料番号	試料No.1	試料No.2	平均	試料No.1	試料No.2	平均
D_S ：表乾比重	2.67	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66
D_D ：絶乾比重	2.64	2.64	2.64	2.64	2.63	2.64
Q ：吸水率 (%)	0.87	0.90	0.88	0.87	0.90	0.88

表－3.9 粗骨材の単位体積質量および実積率試験の結果

最大骨材寸法	25mm			20mm		
試料番号	試料No.1	試料No.2	平均	試料No.1	試料No.2	平均
Q ： 試料の吸水率 (%)	0.90			0.90		
D_S ： 試料の表乾比重	2.68			2.66		
T ： 単位体積質量(kg/l)	1.71	1.71	1.71	1.70	1.71	1.70
G ： 実積率 (%)	64.4	64.4	64.4	64.5	64.9	64.7

最大骨材寸法	15mm			10mm		
試料番号	試料No.1	試料No.2	平均	試料No.1	試料No.2	平均
Q ： 試料の吸水率 (%)	0.88			0.88		
D_S ： 試料の表乾比重	2.66			2.66		
T ： 単位体積質量(kg/l)	1.69	1.70	1.70	1.66	1.66	1.66
G ： 実積率 (%)	64.1	64.5	64.1	63.0	63.0	63.0

表－3.10 含水率および含水率に基づく表面水率試験の結果（細骨材）

	試料 No.1	試料 No.2	
W_S ：乾燥前の試料の質量 (g)	500.0	500.0	
W_D ：乾燥後の試料の質量 (g)	496.2	496.0	
Q ：吸水率 (%)	3.30		平均
Z ：含水率 (%)	0.77	0.81	0.8
H ：表面水率 (%)	-2.45	-2.41	-2.4

表－3.11 含水率および含水率に基づく表面水率試験の結果（粗骨材）

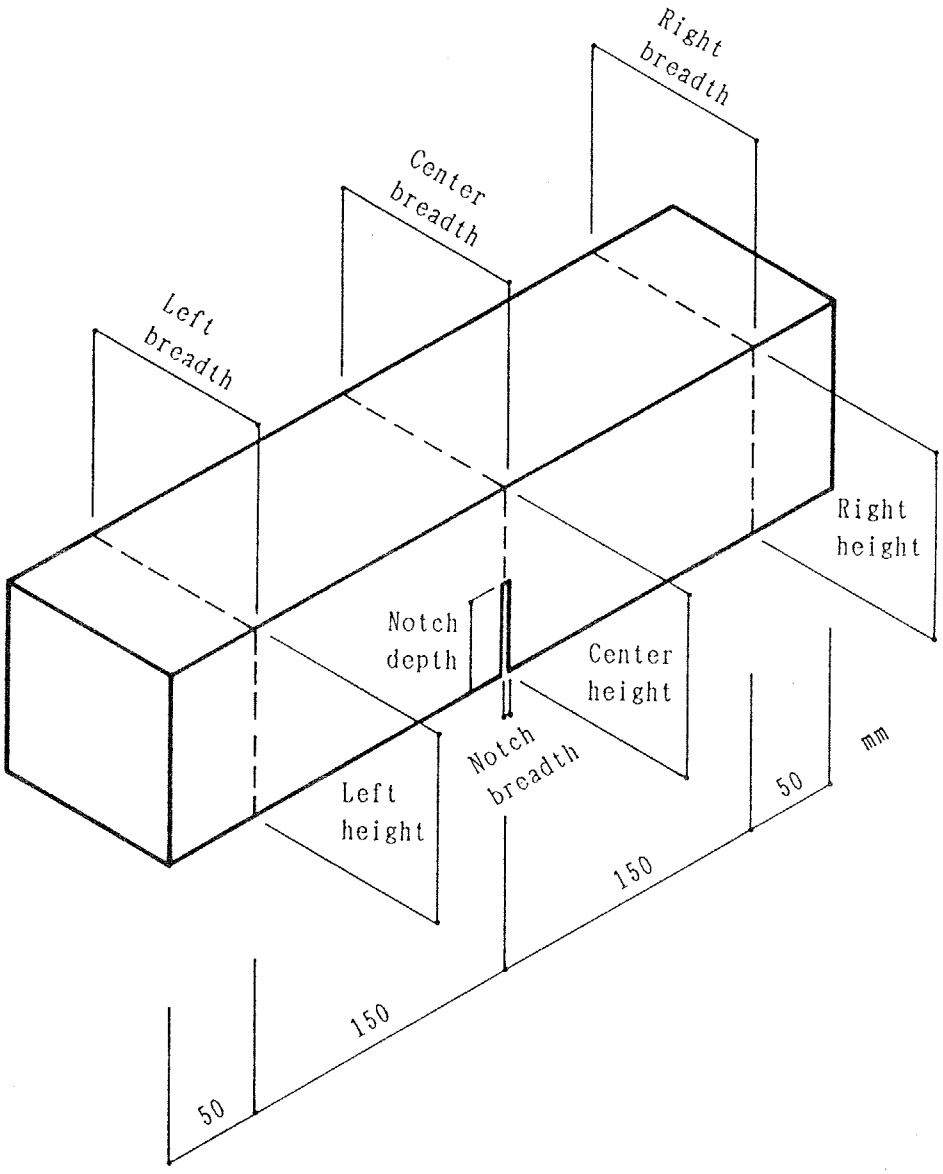
	試料 No.1	試料 No.2	
W_S ：乾燥前の試料の質量 (g)	5581.0	5791.0	
W_D ：乾燥後の試料の質量 (g)	5555.0	5767.0	
Q ：吸水率 (%)	0.90		平 均
Z ：含水率 (%)	0.47	0.41	0.4
H ：表面水率 (%)	-0.43	-0.49	-0.5

表－3.12 セメントの材料試験結果

比 重	比表面積 (cm^2/g)	凝 結		安定性	圧縮強さ (kgf/cm^2)		
		始発 (h-min)	終結 (h-min)		3日	7日	28日
3.16	3180	2-24	3-42	良	138	240	418

3.3.3　試験体の寸法および重量の測定結果

曲げ試験体は、幅100mm、高さ100mm、長さ400mmの鋼製型枠で成型し、ノッチは厚さ1.2mmのダイヤモンドカッターで導入しているが、若干の製作誤差が生じるので、各試験の直前に、寸法を1/20mm精度のノギスで、ノッチを1/100mm精度の顕微鏡で測定している。図－3.1に試験体寸法の測定位置を示す。さらに、破壊エネルギーを算定する際、試験体重量を考慮する必要があるので、試験の直前に重量の測定も行っている。試験体の寸法および重量の測定結果を表－3.13（４週曲げ試験体）および表－3.14（１年曲げ試験体）に示す。



図－3.1　試験体の測定位置

表－3.13　コンクリート４週曲げ試験体寸法測定結果（その１）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	ノッチ幅 (mm)	重量 (g)
M20-1 No. 1	高さ	100.2	100.3	100.4	9.95	1.34	9690
	幅	100.8	100.8	100.6			
M20-1 No. 2	高さ	100.0	100.0	100.0	10.04	1.35	9580
	幅	100.5	100.5	100.3			
M20-1 No. 3	高さ	100.4	100.5	100.4	10.12	1.38	9650
	幅	100.2	100.4	100.3			
M20-2 No. 1	高さ	100.6	100.7	100.5	29.99	1.45	9740
	幅	102.2	101.2	101.3			
M20-2 No. 2	高さ	100.0	100.1	100.0	30.23	1.44	9590
	幅	101.0	100.8	100.8			
M20-2 No. 3	高さ	100.0	100.0	100.0	30.21	1.44	9560
	幅	100.4	100.4	100.4			
M20-3 No. 1	高さ	100.3	100.2	100.2	50.02	1.40	9680
	幅	100.6	100.6	100.6			
M20-3 No. 2	高さ	100.0	100.0	100.1	50.13	1.38	9670
	幅	100.4	100.6	100.6			
M20-3 No. 3	高さ	100.1	100.1	100.0	50.20	1.41	9550
	幅	100.4	100.4	100.8			
M20-4 No. 1	高さ	100.4	100.7	100.6	70.01	1.42	9640
	幅	100.8	100.9	101.0			
M20-4 Mo. 2	高さ	100.2	100.3	100.4	70.22	1.40	9640
	幅	100.5	100.3	100.6			
M20-4 No. 3	高さ	100.0	100.0	100.0	70.08	1.46	9550
	幅	101.0	100.8	100.6			
M20-5 No. 1	高さ	100.2	100.2	100.2	50.50	1.51	9550
	幅	100.0	100.0	100.0			
M20-5 No. 2	高さ	100.0	100.1	100.0	50.44	1.49	9540
	幅	100.8	100.6	100.8			
M20-5 No. 3	高さ	99.9	99.8	99.8	50.17	1.48	9550
	幅	100.4	100.8	100.4			
M20-6 No. 1	高さ	100.3	100.4	100.2	50.10	1.52	9620
	幅	100.8	100.8	100.3			
M20-6 No. 2	高さ	100.0	99.9	100.0	50.03	1.50	9480
	幅	99.9	99.9	100.3			
M20-6 No. 3	高さ	100.1	100.3	100.2	50.14	1.42	9460
	幅	99.9	99.8	99.9			

表－3.13　コンクリート４週曲げ試験体寸法測定結果（その２）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	ノッチ幅 (mm)	重量 (g)
M05-1 No. 1	高さ	99.9	100.1	100.0	50.11	1.50	9040
	幅	100.9	101.0	100.9			
M05-1 No. 2	高さ	100.1	100.1	100.1	49.98	1.45	9030
	幅	101.1	100.9	101.0			
M05-1 No. 3	高さ	100.0	100.1	100.1	49.97	1.40	9030
	幅	100.5	100.8	101.2			
M10-1 No. 1	高さ	100.5	100.1	99.9	50.12	1.42	9440
	幅	100.0	100.0	99.9			
M10-1 No. 2	高さ	100.3	100.5	100.3	50.14	1.42	9490
	幅	100.3	100.5	100.3			
M10-1 No. 3	高さ	100.1	100.1	100.1	50.04	1.52	9520
	幅	100.6	100.7	100.5			
M15-1 No. 1	高さ	100.2	100.1	100.1	50.00	1.51	9650
	幅	101.0	100.5	100.2			
M15-1 No. 2	高さ	100.0	99.9	100.0	49.92	1.34	9560
	幅	100.2	100.5	100.7			
M15-1 No. 3	高さ	100.3	100.5	100.4	49.88	1.38	9630
	幅	100.3	100.8	100.8			
M25-1 No. 1	高さ	100.2	100.2	100.1	50.20	1.39	9540
	幅	100.4	100.4	100.1			
M25-1 No. 2	高さ	100.2	100.3	100.2	50.00	1.44	9610
	幅	100.8	100.3	100.2			
M25-1 No. 3	高さ	100.2	100.1	100.1	50.00	1.38	9610
	幅	100.3	100.2	100.7			
L20-1 No. 1	高さ	100.2	100.3	100.3	49.98	1.42	9610
	幅	100.7	100.5	100.6			
L20-1 No. 2	高さ	100.4	100.4	100.5	50.00	1.52	9590
	幅	100.4	100.4	100.4			
L20-1 No. 3	高さ	100.3	100.2	100.3	50.48	1.44	9580
	幅	100.6	100.5	101.7			
H20-1 No. 1	高さ	100.5	100.6	100.5	49.92	1.39	9540
	幅	99.9	99.9	100.0			
H20-1 No. 2	高さ	100.6	100.6	100.5	49.99	1.40	9560
	幅	100.2	99.9	100.1			
H20-1 No. 3	高さ	100.3	100.3	100.2	50.18	1.40	9490
	幅	100.2	100.0	100.0			

表－3.13　コンクリート４週曲げ試験体寸法測定結果（その３）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	ノッチ幅 (mm)	重量 (g)
M20-7 No. 1 (4PB)	高さ	100.3	100.5	100.5	50.24	1.47	9610
	幅	100.6	100.6	100.5			
M20-7 No. 2 (4PB)	高さ	100.2	100.2	100.3	50.10	1.38	9560
	幅	100.3	100.4	100.3			
M20-7 No. 3 (4PB)	高さ	100.5	100.5	100.4	49.90	1.37	9680
	幅	100.4	100.4	100.3			
M20-8 No. 1 (4PB)	高さ	100.0	100.0	100.1	49.94	1.33	9590
	幅	100.2	100.1	100.2			
M20-8 No. 2 (4PB)	高さ	100.4	100.4	100.3	49.74	1.46	9650
	幅	100.3	100.2	100.5			
M20-8 No. 3 (4PB)	高さ	100.2	100.1	100.2	50.10	1.36	9600
	幅	100.1	100.2	100.3			
H20-2 No. 1 (4PB)	高さ	100.2	100.2	100.2	49.86	1.36	9560
	幅	100.6	100.7	100.8			
H20-2 No. 2 (4PB)	高さ	100.3	100.2	100.3	50.64	1.37	9610
	幅	100.7	101.0	101.2			
H20-2 No. 3 (4PB)	高さ	100.6	100.6	100.6	49.92	1.36	9610
	幅	100.9	100.9	100.9			

表－3.14　コンクリート１年曲げ試験体寸法測定結果（その１）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	ノッチ幅 (mm)	重量 (g)
M20-1 No. 1	高さ	100.30	100.30	100.30	10.01	1.53	9605
	幅	100.50	100.30	100.10			
M20-1 No. 2	高さ	100.25	100.15	100.25	10.01	1.58	9626
	幅	100.50	100.40	100.50			
M20-1 No. 3	高さ	100.15	100.00	100.15	10.04	1.54	9655
	幅	101.30	101.10	100.60			
M20-1 No. 4	高さ	100.60	100.60	100.60	9.96	1.57	9698
	幅	100.95	101.20	101.60			
M20-2 No. 1	高さ	100.30	100.25	100.35	30.27	1.48	9677
	幅	101.00	100.85	100.60			
M20-2 No. 2	高さ	100.20	100.30	100.30	30.15	1.52	9651
	幅	101.10	101.20	100.70			
M20-2 No. 3	高さ	100.10	100.00	100.10	29.95	1.44	9650
	幅	100.80	100.55	100.80			
M20-2 No. 4	高さ	100.30	100.40	100.40	29.99	1.41	9712
	幅	101.45	101.10	100.50			
M20-2 Mo. 5	高さ	100.40	100.40	100.40	29.78	1.43	9730
	幅	101.50	101.80	101.10			
M20-2 No. 6	高さ	100.30	100.25	100.25	29.95	1.49	9652
	幅	100.90	101.35	100.35			
M20-3 No. 1	高さ	100.70	100.80	100.70	49.98	1.50	9678
	幅	100.40	100.40	100.60			
M20-3 No. 2	高さ	100.25	100.25	100.25	50.04	1.40	9646
	幅	100.40	100.40	100.25			
M20-3 No. 3	高さ	100.65	100.65	100.60	50.00	1.43	9706
	幅	100.55	100.80	100.80			
M20-3 No. 4	高さ	100.35	100.40	100.35	50.02	1.47	9604
	幅	100.80	100.95	100.80			
M20-3 No. 5	高さ	100.10	100.00	100.10	49.96	1.49	9647
	幅	101.00	100.80	100.80			
M20-3 No. 6	高さ	100.05	100.00	100.00	50.00	1.44	9588
	幅	100.05	100.00	100.15			

表－3.14　コンクリート１年曲げ試験体寸法測定結果（その２）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	ノッチ幅 (mm)	重量 (g)
M20-4 No. 1	高さ	100.10	100.00	100.05	69.94	1.42	9684
	幅	100.50	100.50	100.60			
M20-4 No. 2	高さ	100.30	100.40	100.30	70.04	1.46	9680
	幅	101.40	101.30	101.30			
M20-4 No. 3	高さ	100.30	100.30	100.30	69.77	1.44	9659
	幅	100.45	100.30	100.30			
M20-4 No. 4	高さ	100.25	100.10	100.15	69.79	1.46	9597
	幅	100.55	100.55	100.70			
M20-4 Mo. 5	高さ	100.15	100.00	100.10	69.84	1.44	9628
	幅	100.25	100.15	100.20			
M20-4 No. 6	高さ	100.20	100.15	100.25	69.77	1.45	9626
	幅	100.20	100.30	100.40			
M20-5 No. 1	高さ	100.25	100.20	100.15	50.03	1.44	9537
	幅	100.50	100.05	100.00			
M20-5 No. 2	高さ	100.60	100.60	100.50	49.92	1.45	9636
	幅	100.50	100.50	100.35			
M20-5 No. 3	高さ	100.30	100.40	100.40	49.88	1.44	9607
	幅	100.50	100.30	100.30			
M20-5 No. 4	高さ	100.35	100.35	100.35	50.03	1.45	9615
	幅	100.00	100.80	100.80			
M20-5 No. 5	高さ	100.10	100.10	100.00	49.89	1.47	9525
	幅	100.10	100.00	100.00			
M20-6 No. 1	高さ	100.00	99.95	99.95	49.33	1.44	9531
	幅	100.55	101.00	100.90			
M20-6 No. 2	高さ	100.10	100.00	100.20	49.80	1.37	9545
	幅	100.00	100.00	100.45			
M20-6 No. 3	高さ	100.50	100.60	100.60	49.78	1.43	9578
	幅	100.20	100.30	100.70			
M20-6 No. 4	高さ	100.20	100.00	100.20	49.87	1.45	9552
	幅	100.40	100.40	100.00			
M20-6 No. 5	高さ	100.00	99.90	100.00	49.82	1.41	9533
	幅	99.80	99.80	99.80			

表－３.１４　コンクリート１年曲げ試験体寸法測定結果（その３）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	ﾉｯﾁ幅 (mm)	重量 (g)
M05-1 No. 1	高さ	99.95	99.95	99.95	49.85	1.45	9003
	幅	100.40	100.50	100.50			
M05-1 No. 2	高さ	100.25	100.30	100.30	49.92	1.59	9080
	幅	100.25	100.90	101.10			
M05-1 No. 3	高さ	99.95	99.90	100.00	50.00	1.48	8973
	幅	100.50	100.80	100.60			
M05-1 No. 4	高さ	100.00	99.80	99.80	49.82	1.44	9003
	幅	100.40	100.25	100.75			
M05-1 No. 5	高さ	100.00	100.00	100.10	49.96	1.47	9037
	幅	100.60	100.40	100.50			
M10-1 No. 1	高さ	100.20	100.20	100.10	49.71	1.47	9536
	幅	100.75	100.75	100.45			
M10-1 No. 2	高さ	100.30	100.30	100.20	49.83	1.51	9567
	幅	100.55	100.70	100.60			
M10-1 No. 3	高さ	100.00	99.95	100.00	49.97	1.43	9541
	幅	100.50	100.60	100.60			
M10-1 No. 4	高さ	100.20	100.35	100.00	49.88	1.45	9643
	幅	101.20	100.80	101.20			
M10-1 No. 5	高さ	100.50	100.60	100.50	49.89	1.44	9590
	幅	100.60	100.35	100.40			
M15-1 No. 1	高さ	100.25	100.25	100.25	50.12	1.44	9675
	幅	100.80	100.35	100.15			
M15-1 No. 2	高さ	100.55	100.60	100.60	50.07	1.43	9703
	幅	100.80	100.80	100.25			
M15-1 No. 3	高さ	100.25	100.20	100.25	49.98	1.48	9651
	幅	100.60	101.00	100.60			
M15-1 No. 4	高さ	100.20	100.20	100.20	49.98	1.41	9648
	幅	100.20	100.20	100.75			
M15-1 No. 5	高さ	100.15	100.10	100.15	50.05	1.44	9613
	幅	100.00	100.30	100.80			

表－3.14　コンクリート１年曲げ試験体寸法測定結果（その４）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	ノッチ幅 (mm)	重量 (g)
M25-1 No. 1	高さ	100.05	100.00	100.10	49.86	1.40	9565
	幅	100.25	100.10	100.70			
M25-1 No. 2	高さ	100.40	100.40	100.30	50.10	1.49	9625
	幅	100.20	100.25	100.25			
M25-1 No. 3	高さ	100.05	100.00	100.05	49.92	1.48	9582
	幅	100.20	100.60	100.30			
M25-1 No. 4	高さ	100.60	100.75	100.50	50.15	1.40	9721
	幅	100.50	100.10	100.35			
M25-1 No. 5	高さ	100.25	100.25	100.35	50.07	1.51	9599
	幅	100.20	100.35	100.50			
L20-1 No. 1	高さ	100.10	100.10	100.10	49.85	1.42	9593
	幅	100.25	100.10	100.10			
L20-1 No. 2	高さ	100.30	100.30	100.30	49.96	1.52	9645
	幅	100.40	100.40	100.60			
L20-1 No. 3	高さ	100.20	100.20	100.20	49.95	1.42	9632
	幅	100.65	100.30	100.35			
L20-1 No. 4	高さ	100.00	99.90	99.90	50.19	1.46	9535
	幅	100.20	100.15	100.40			
L20-1 No. 5	高さ	99.95	100.00	100.00	49.96	1.42	9582
	幅	100.60	100.50	100.20			
H20-1 No. 1	高さ	100.50	100.60	100.50	49.92	1.49	9547
	幅	100.20	100.00	100.20			
H20-1 No. 2	高さ	100.00	100.00	100.00	49.97	1.43	9575
	幅	100.70	100.35	100.20			
H20-1 No. 3	高さ	100.00	100.00	100.00	49.88	1.42	9524
	幅	100.00	100.50	100.50			
H20-1 No. 4	高さ	100.00	100.00	100.00	49.93	1.40	9532
	幅	100.00	100.00	100.10			
H20-1 No. 5	高さ	100.40	100.40	100.40	50.19	1.43	9578
	幅	100.10	100.00	100.00			

表－3.14　コンクリート１年曲げ試験体寸法測定結果（その５）

試験体名	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	ﾉｯﾁ幅 (mm)	重量 (g)
M20-7 No. 1 (4PB)	高さ	100.25	100.25	100.25	50.12	1.40	9604
	幅	100.00	100.00	100.60			
M20-7 No. 2 (4PB)	高さ	100.00	100.00	100.00	50.05	1.43	9584
	幅	100.90	100.30	100.70			
M20-7 No. 3 (4PB)	高さ	100.00	99.85	99.90	49.91	1.39	9549
	幅	100.20	100.00	100.20			
M20-7 No. 1 (DRY)	高さ	100.10	100.15	100.10	49.90	1.44	9443
	幅	100.30	100.40	100.65			
M20-7 No. 2 (DRY)	高さ	99.90	99.80	99.90	49.89	1.40	9328
	幅	100.00	100.05	100.00			
M20-7 No. 3 (DRY)	高さ	100.15	100.10	100.15	49.78	1.50	9368
	幅	100.30	100.45	100.60			
M20-8 No. 1 (4PB)	高さ	100.20	100.30	100.20	49.86	1.47	9663
	幅	100.10	100.15	100.25			
M20-8 No. 2 (4PB)	高さ	100.45	100.40	100.45	49.67	1.42	9588
	幅	100.30	100.15	100.20			
M20-8 No. 3 (4PB)	高さ	99.90	99.90	100.00	49.63	1.49	9595
	幅	100.00	100.20	100.25			
M20-8 No. 1 (DRY)	高さ	100.20	100.15	100.10	49.63	1.42	9406
	幅	100.30	100.30	100.20			
M20-8 No. 2 (DRY)	高さ	100.50	100.55	100.45	49.59	1.42	9455
	幅	100.55	100.40	100.50			
M20-8 No. 3 (DRY)	高さ	100.25	100.25	100.25	49.64	1.45	9391
	幅	100.60	100.20	100.10			
H20-2 No. 1 (4PB)	高さ	100.00	99.95	100.00	50.04	1.49	9606
	幅	100.25	100.55	100.80			
H20-2 No. 2 (4PB)	高さ	100.35	100.35	100.35	50.25	1.45	9616
	幅	100.45	100.60	100.55			
H20-2 No. 3 (4PB)	高さ	100.25	100.30	100.30	49.61	1.44	9655
	幅	100.50	101.00	101.00			
H20-2 No. 1 (DRY)	高さ	100.55	100.55	100.50	49.72	1.44	9396
	幅	100.30	100.50	100.25			
H20-2 No. 2 (DRY)	高さ	100.00	99.90	100.00	49.91	1.40	9266
	幅	100.15	100.30	101.00			
H20-2 No. 3 (DRY)	高さ	100.20	100.15	100.20	49.84	1.44	9353
	幅	100.25	100.75	100.75			

3.4　実験方法

(1)載荷方法

ノッチを有するコンクリートの曲げ試験は、荷重容量25tonのインストロン型試験機により変位制御で載荷を行った。曲げ試験は、３点曲げ（以下3PBと略す）を標準としているが、一部４点曲げ（以下4PBと略す）試験を行った（4PM20-7、4PM20-8および4PH20-2シリーズ）。図－3.2に3PBの載荷装置を示す。また、実際の3PBおよび4PBの様子を写真3.1および3.2に示す。

支点部分は支点のピンの摩擦の影響を小さくするために、ピンはその直径よりも若干大きい溝の内側に、弱いバネを使って置かれており、必要な水平方向の移動が可能な構造になっている。また、加力部分は球座の回転およびバネのネジの締め付けの調節により、加力部分の試験体への片当りを防止できるようになっている。

荷重は0.4kg感度のロードセルで測定を行った。

(2)変位の測定方法

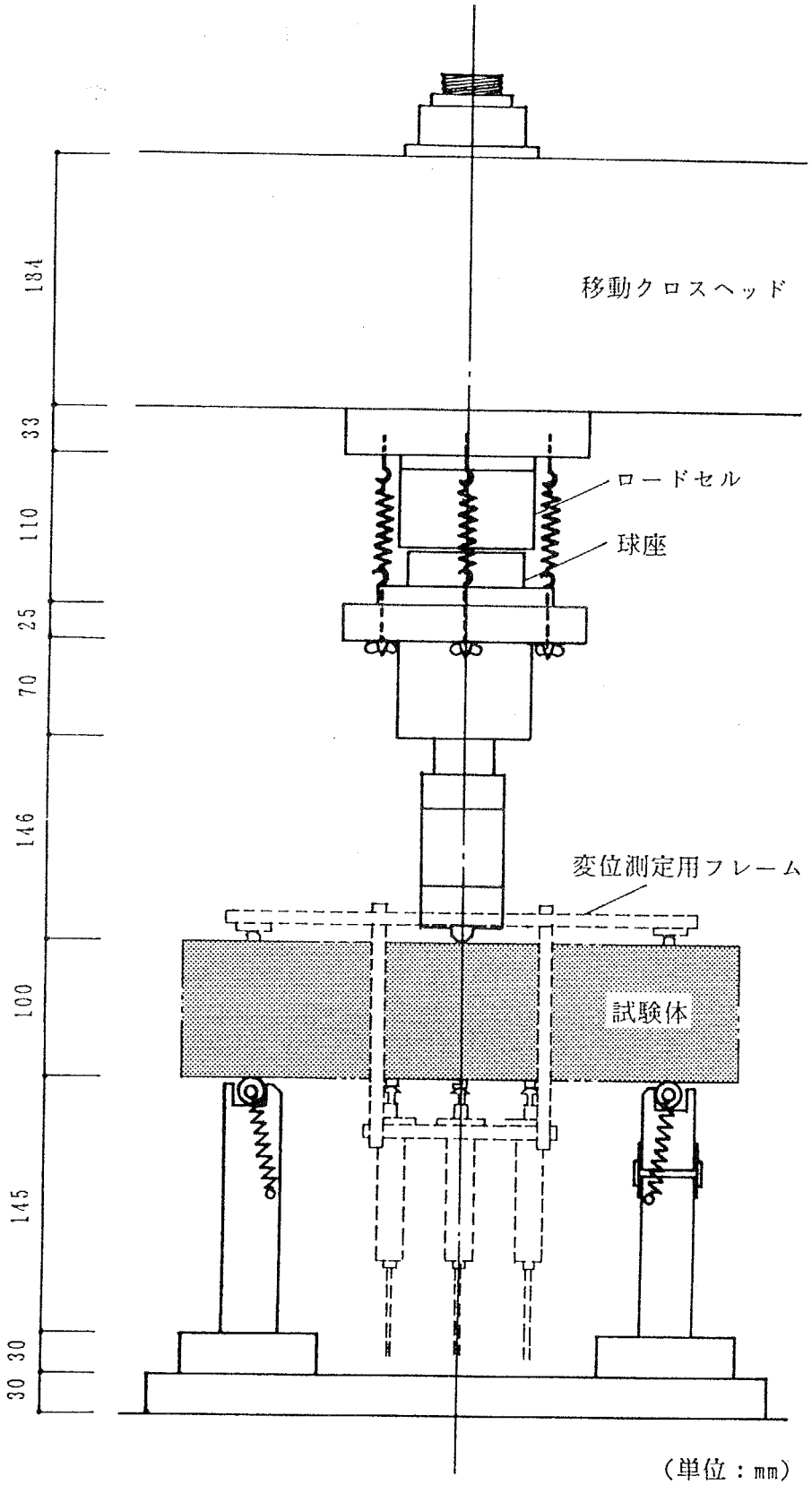
3.2節で述べたように、本試験体の鉛直変位は、弾性範囲内で1/100mm程度と非常に小さく、加力点および支点の局所的な塑性変形が測定結果に大きな影響を及ぼす（図－3.3参照）。そこで、図－3.4に示すような変位測定用フレームを用いて、加力点および支点の鉛直方向の塑性変形を取り除いた鉛直変位を測定した。変位測定用フレームの詳細を図－3.5に示す。

変位測定位置および載荷位置を図－3.6に示す。３ヵ所の鉛直変位（VT1、VT2、VT3）は、感度1/2000mmの変位計で、２ヵ所のクラック口開口変位（CG1、CG2）は、感度1/2400mmのクリップゲージで測定した。

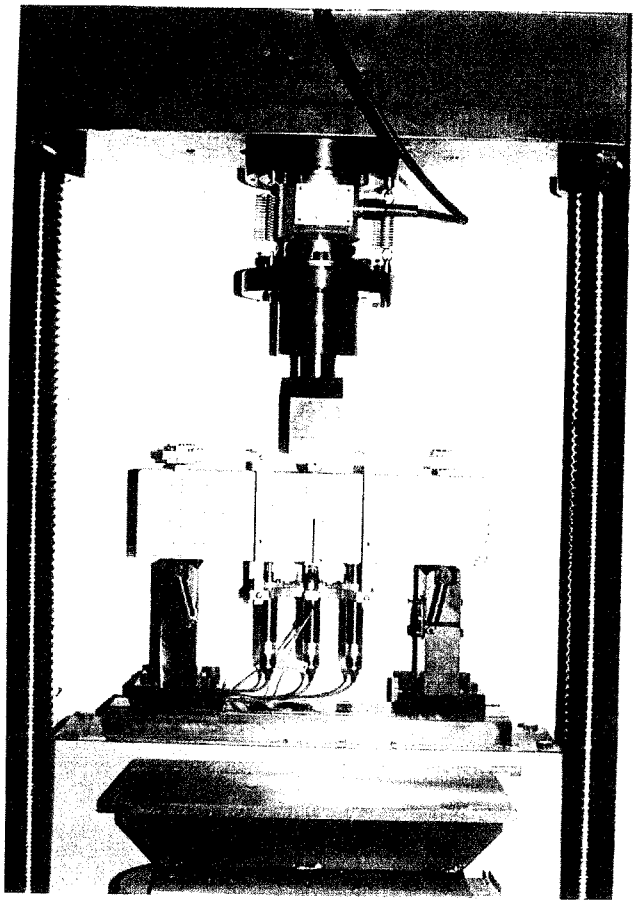
以上の測定方法の妥当性を検討するために、ノッチ深さ10mm、30mm、50mmおよび70mm試験体の載荷点変位（VT2）を、3.2節の線形破壊力学に基づいた計算値と比較して、図－3.7に示す。弾性範囲内と考えられる最大荷重の70%位迄、良く一致しているといえる。

(3)クラックの測定方法

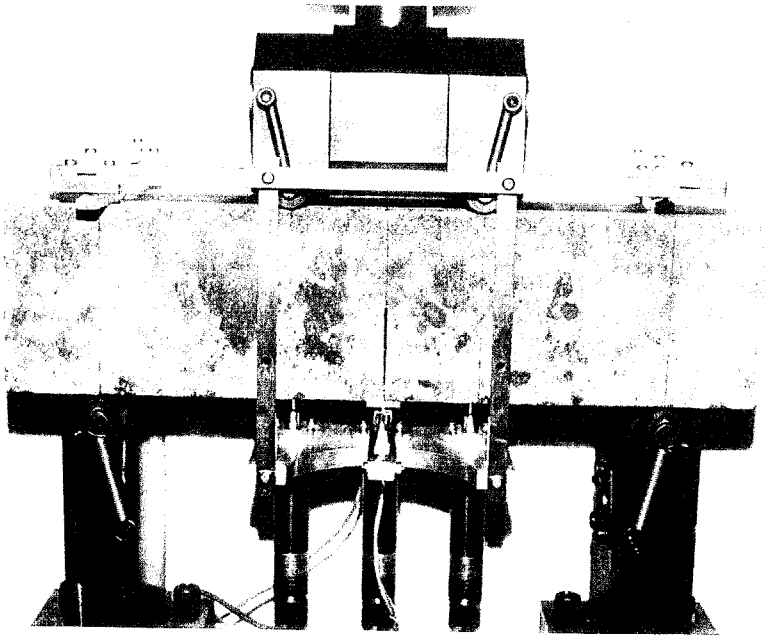
載荷中のクラック進展挙動は、倍率50倍の顕微鏡で２側面から観察した。この顕微鏡は、観測位置の直角２方向の座標を1/100mm精度でデジタル表示する機能を有している。試験体のノッチ下端中央を原点としたクラック先端の位置とその時の荷重を記録した。クラックの観測に用いたデジタル式読取顕微鏡を写真－3.3および写真－3.4に示す。


移動クロスヘッド
ロードセル
球座
変位測定用フレーム
試験体
184
33
110
25
70
146
100
145
30
30
(単位：mm)

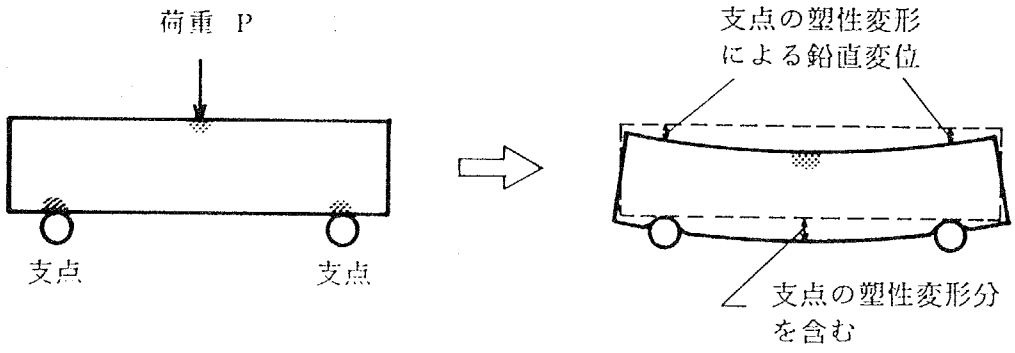
図－3.2　載荷装置



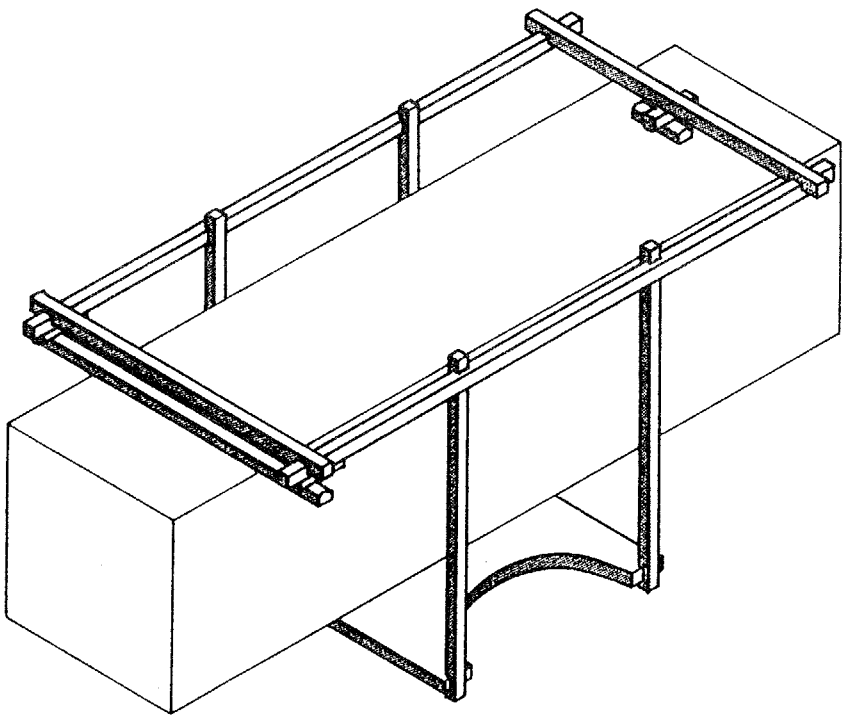
写真－3.1　3点曲げの載荷装置



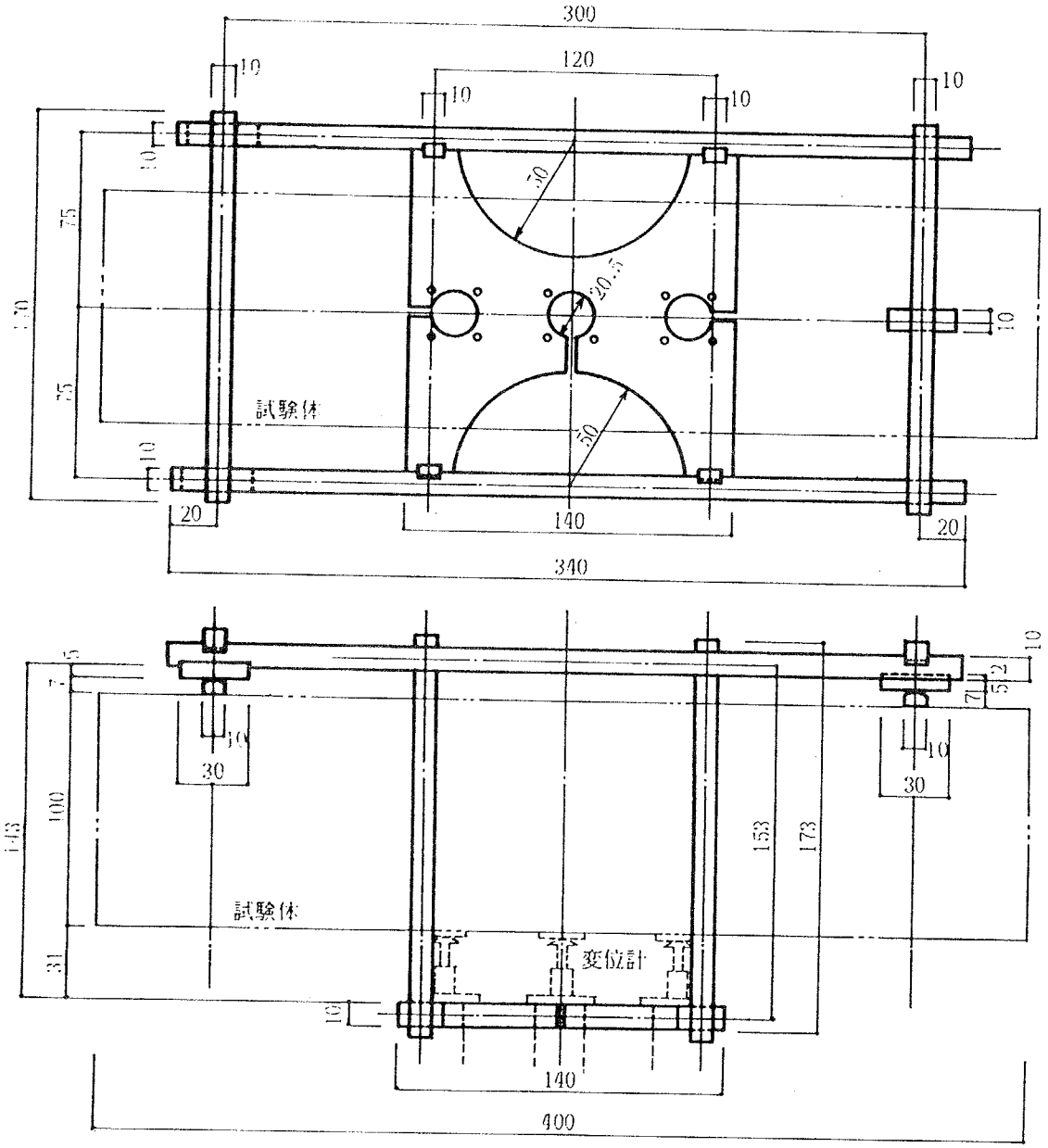
写真－3.2　4点曲げの載荷装置



図－3.3　加力点および支点の局所的な変形

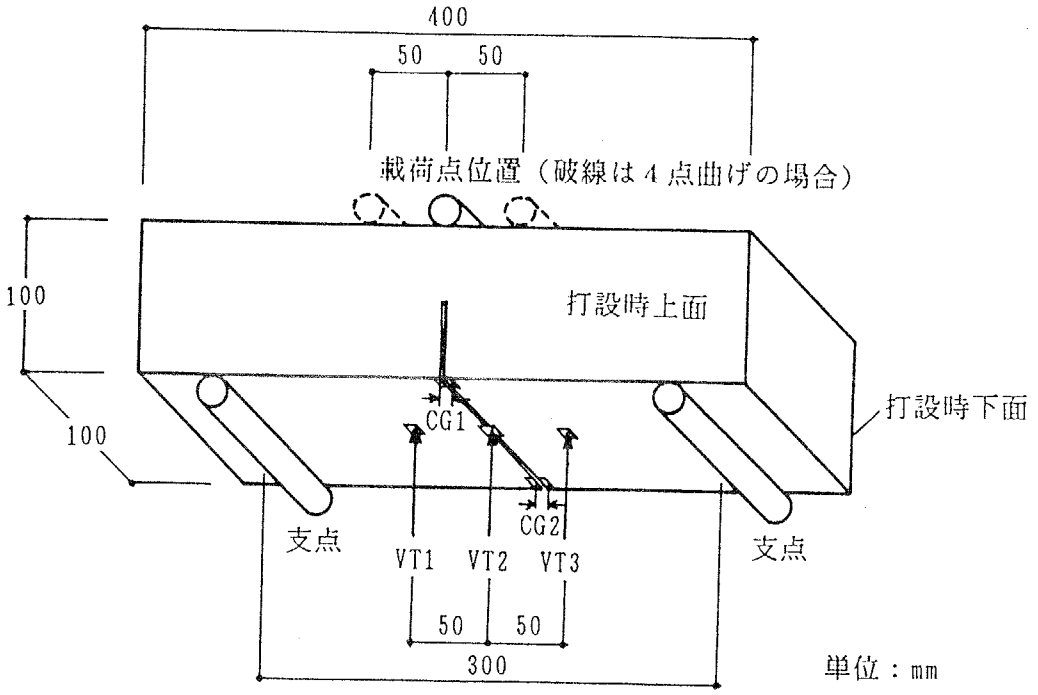


図－3.4　変位測定用フレーム



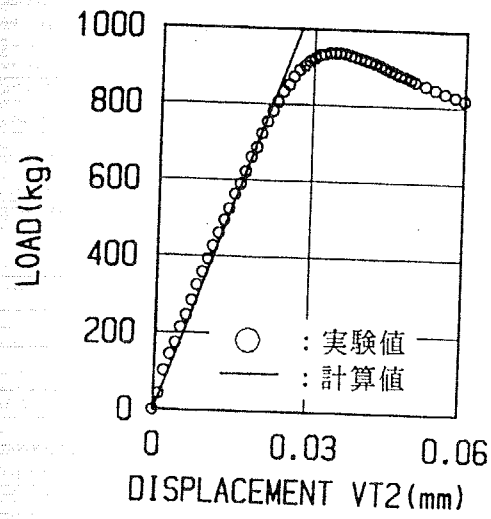
単位：mm

図－3.5　変位測定用フレーム詳細図

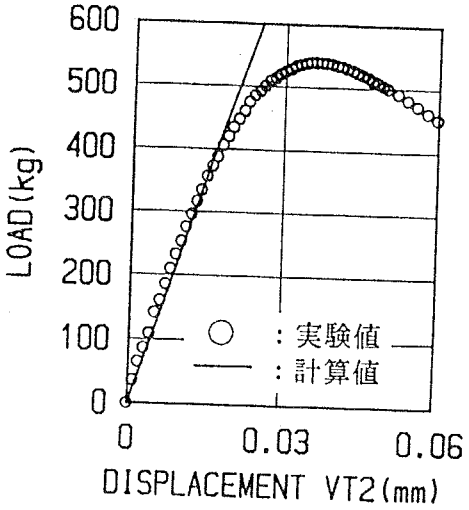


VT1～VT3：鉛直方向変位を測定する変位計の位置
CG1，CG2：クラック口開口変位を測定するクリップゲージの位置

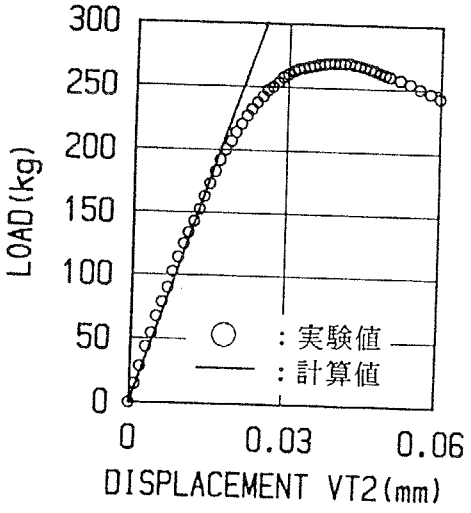
図－3.6　変位測定位置および載荷位置



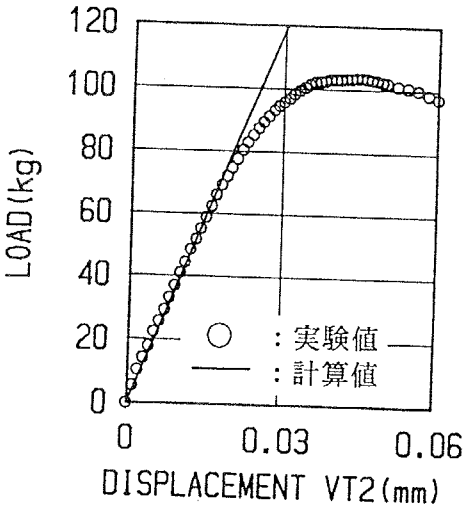
(1)ノッチ深さ10mm



(2)ノッチ深さ30mm

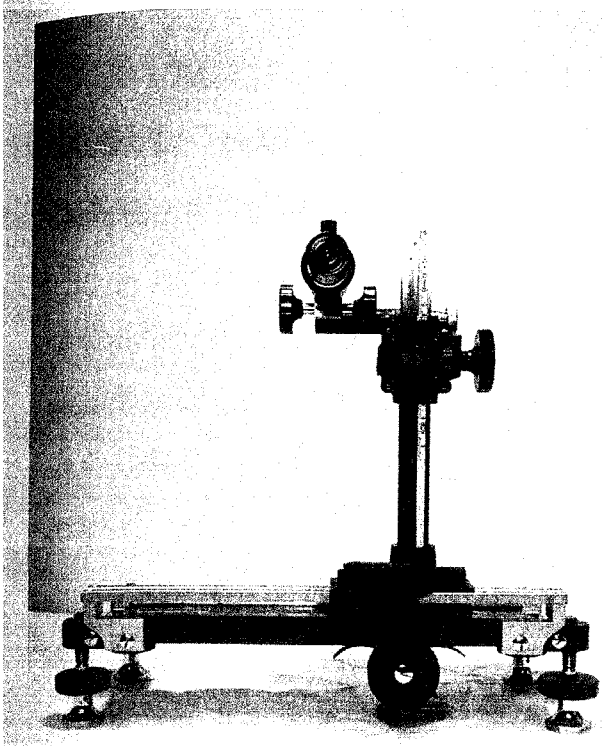


(3)ノッチ深さ50mm

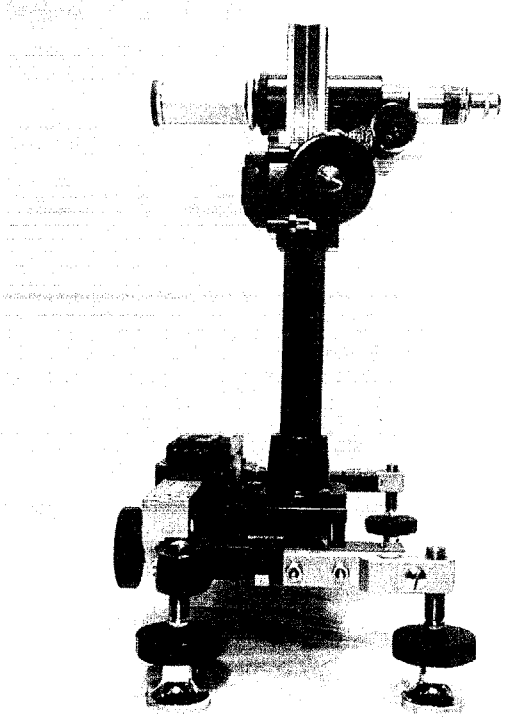


(4)ノッチ深さ70mm

図－3.7　載荷点鉛直変位（VT2）の測定値と線形破壊力学による計算値の比較



写真－3.3　デジタル式読取顕微鏡（正面）



写真－3.4　デジタル式読取顕微鏡（側面）

3.5　実験結果および考察

3.5.1　実験結果

(1)荷重－変位曲線

ノッチを有するコンクリートの曲げ試験により得られた各試験体の荷重－変位曲線を各試験シリーズ毎に、４週試験結果は図－3.8～22に、また、１年試験結果は図－3.23～40に示す。これらの図には、各試験シリーズ毎の平均値に対する個々の試験体のバラツキも各測定点毎に示してある。ただし、鉛直変位のVT1、VT3およびクラック口開口変位（Crack Mouse Opening Displacement、以下CMODと略す）のCG1、CG2は、対称条件からほとんど同一の荷重－変位曲線が得られるので、各々その平均値を示してある。ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比が荷重－変位曲線に及ぼす影響を検討するために、各試験シリーズの平均荷重－変位曲線をパラメータ毎に比較して、４週試験結果を図－3.41～44に、１年試験結果を図－3.45～48に示す。４点曲げによる平均荷重－変位曲線を図－3.49～50に示す。また、図－3.51に、水中養生試験体（3PM20-3、3PM20-5、3PH20-1）と気中養生試験体（3DM20-7、3DM20-8、3DH20-2）の平均荷重－鉛直変位VT2曲線を比較して示す。図－3.52は、４週試験と１年試験の平均荷重－鉛直変位VT2曲線を比較して示している。

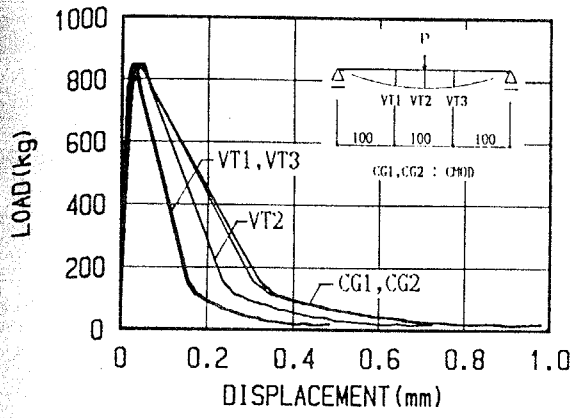
(2)荷重とクラック進展の関係

コンクリート曲げ試験体のノッチ下端中央を原点として、クラック進展挙動を50倍率の顕微鏡で観測しているが、鉛直方向のクラック最先端位置とその時の荷重の関係を各試験シリーズ毎に図－3.53～67に示す。なお、載荷速度の最も速いM20-6シリーズに関しては、クラック進展が非常に速いため、顕微鏡では追跡することができなかった。

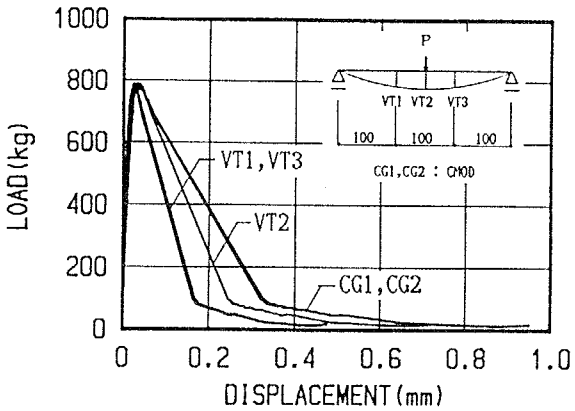
(3)シリンダーの圧縮試験結果

シリンダーの圧縮試験により得られた応力－ひずみ曲線を試験シリーズ毎に、４週試験を図－3.68に、１年試験を図－3.69に示す。各試験シリーズについて３～４体の実験を行っているが、それらの応力－ひずみ曲線を一枚の図に

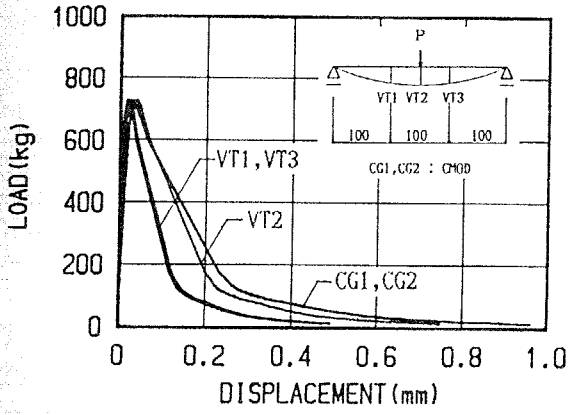
まとめて示している。ただし、ひずみはシリンダー１体につき３ヵ所測定しているが、その平均値を用いている。



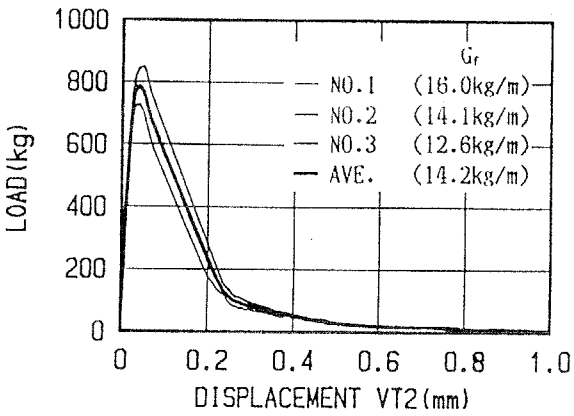
(1) 試験体 No. 1



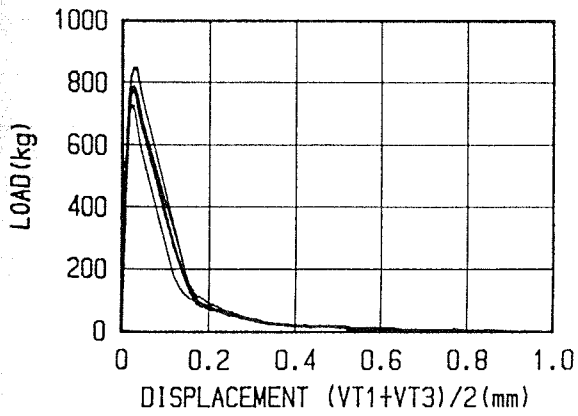
(2) 試験体 No. 2



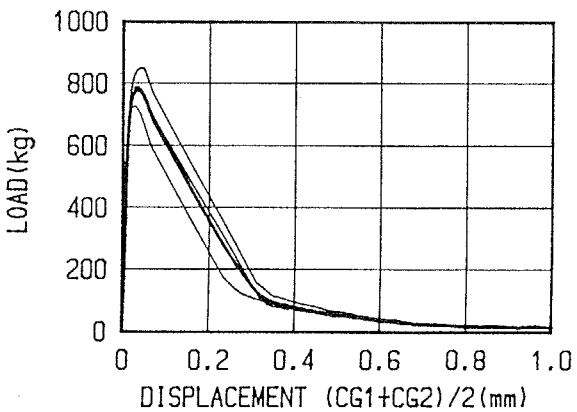
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

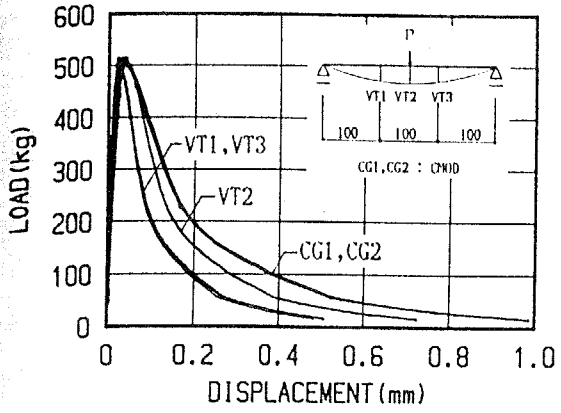


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

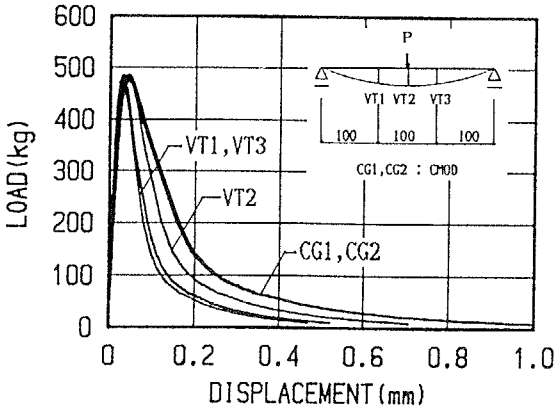


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

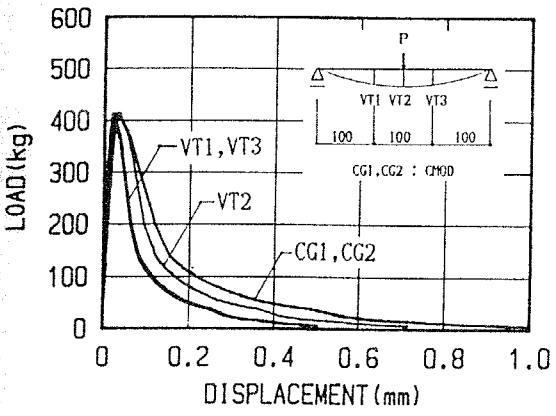
図－3.8 荷重－変位曲線：3PM20-1シリーズ（4週試験）



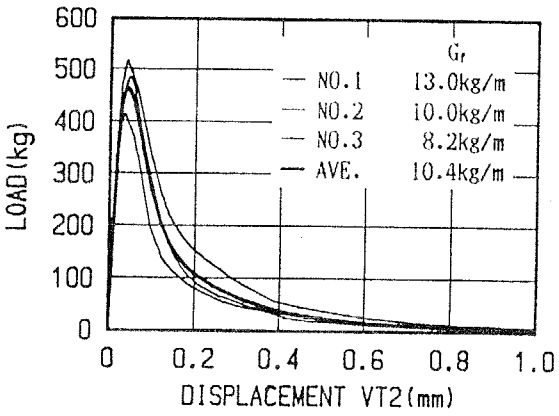
(1) 試験体 No.1



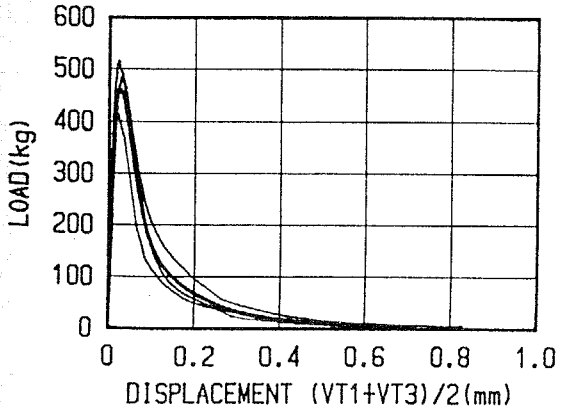
(2) 試験体 No.2



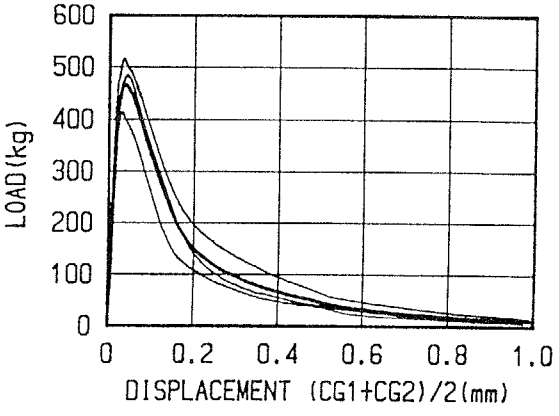
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

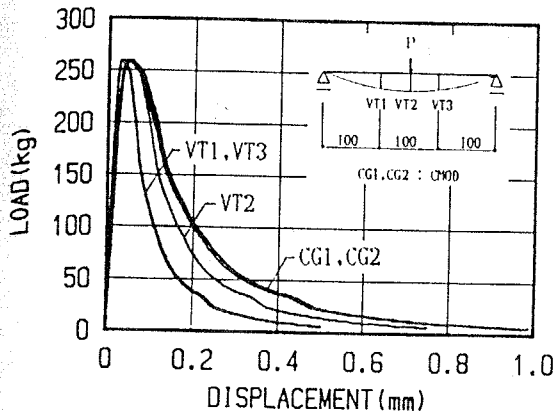


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

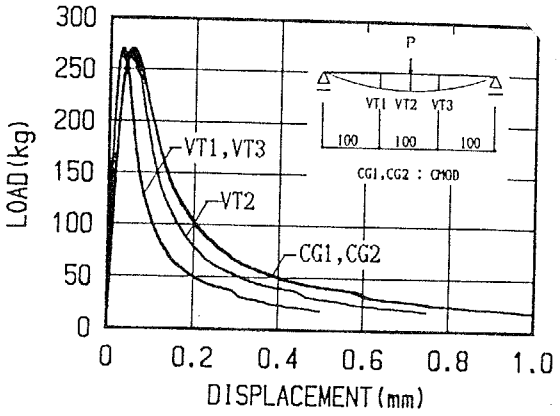


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

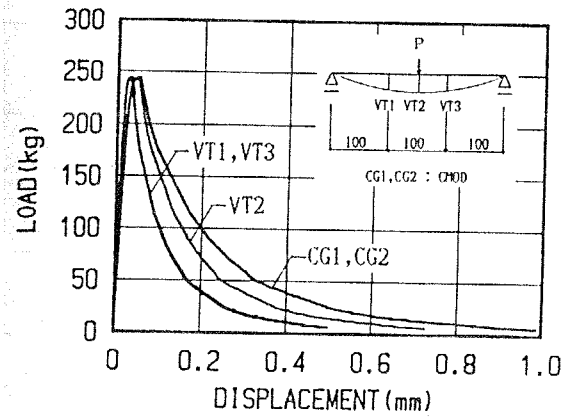
図－3.9 荷重－変位曲線：3PM20-2シリーズ（4週試験）



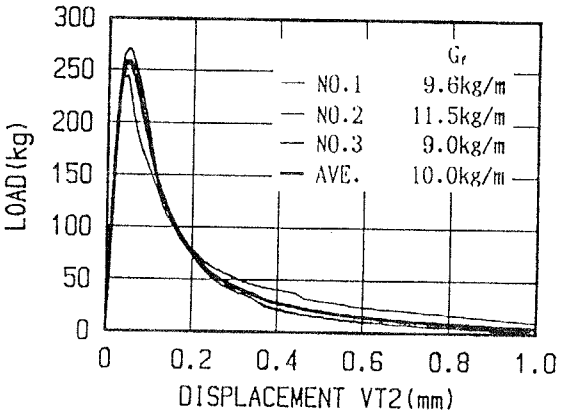
(1) 試験体 No.1



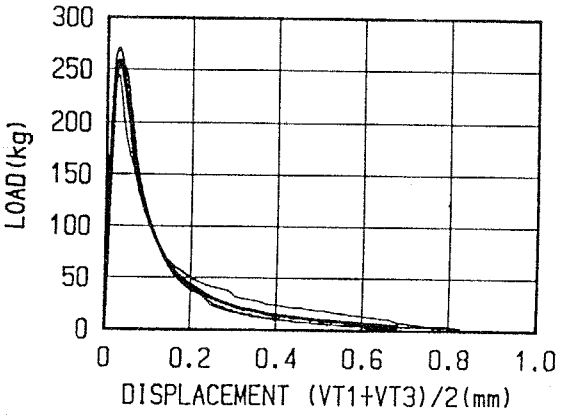
(2) 試験体 No.2



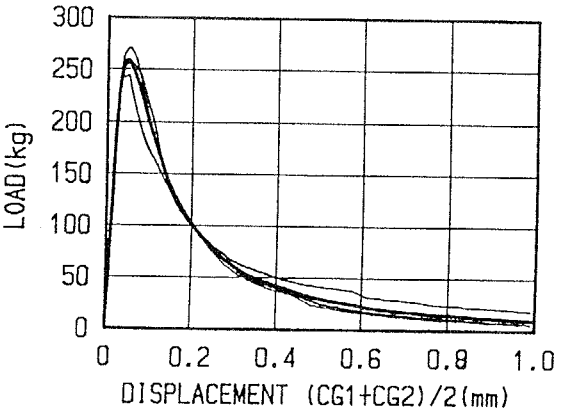
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

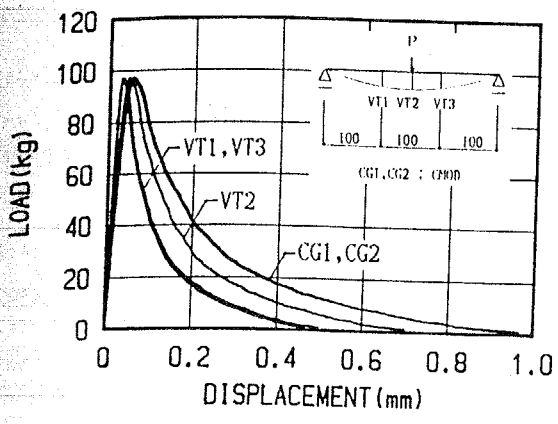


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

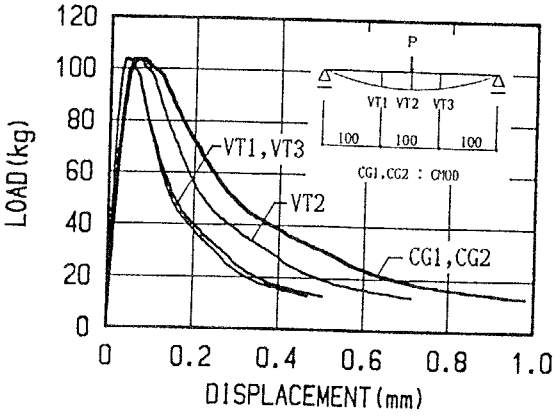


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

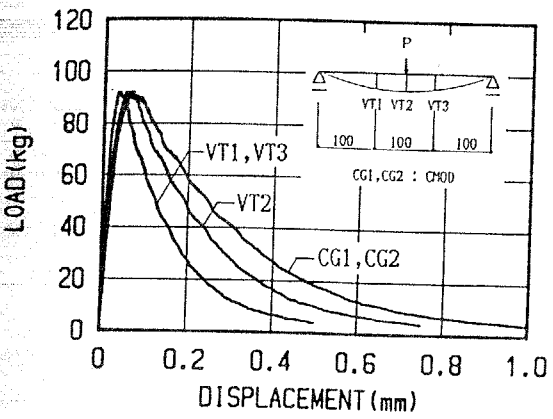
図－3.10 荷重－変位曲線：3PM20-3シリーズ（4週試験）



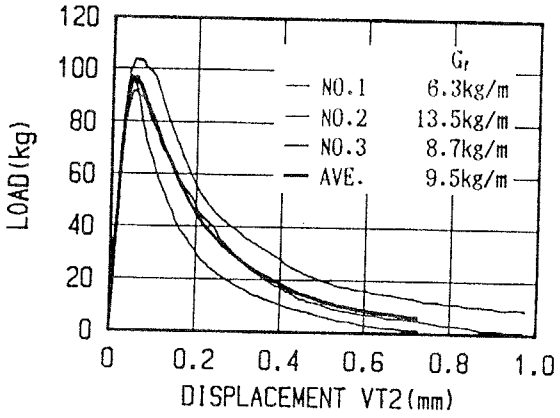
(1) 試験体 No.1



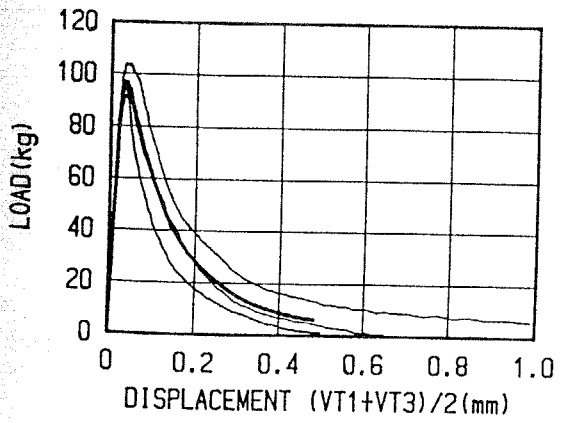
(2) 試験体 No.2



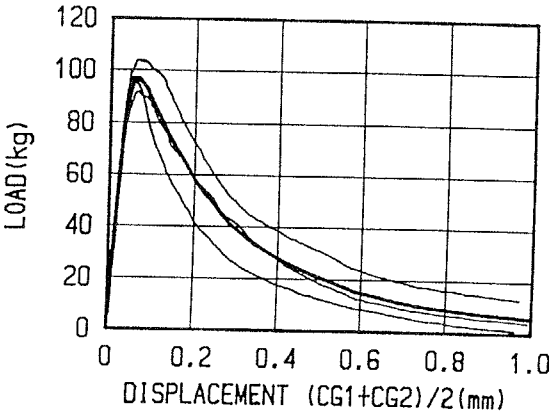
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

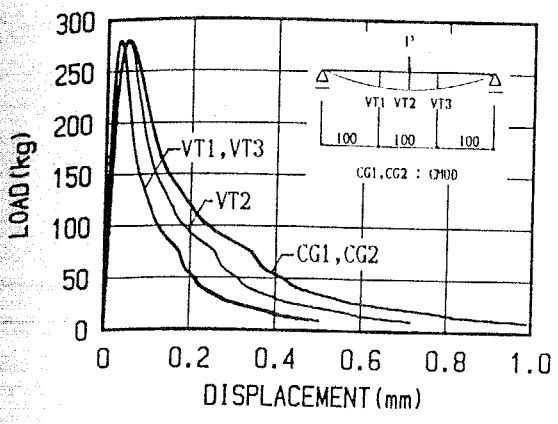


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

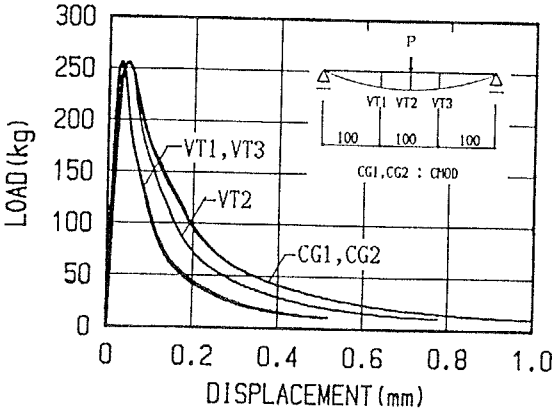


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

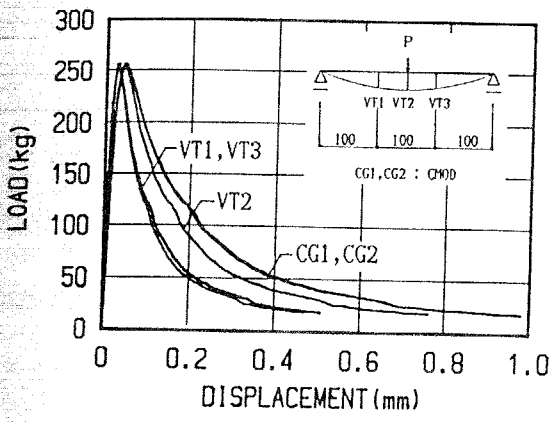
図－3.11 荷重－変位曲線：3PM20-4シリーズ（4週試験）



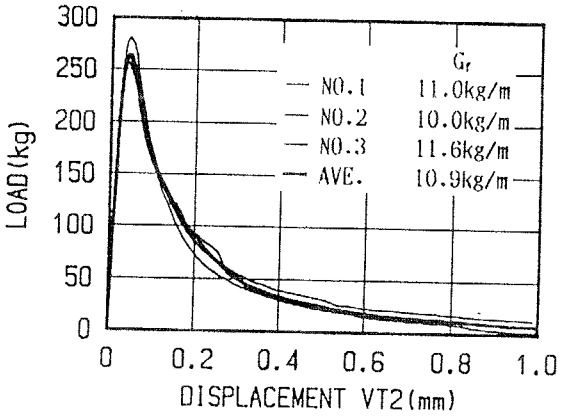
(1) 試験体 No.1



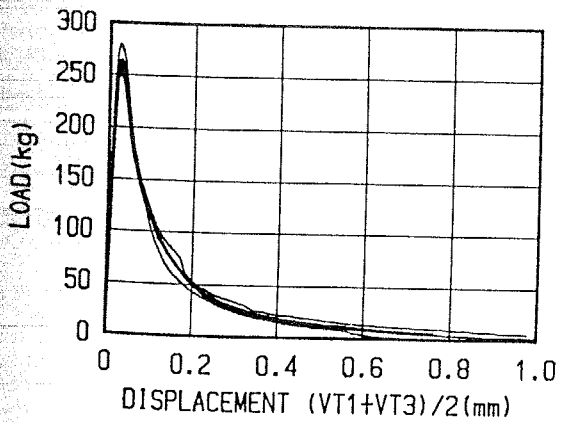
(2) 試験体 No.2



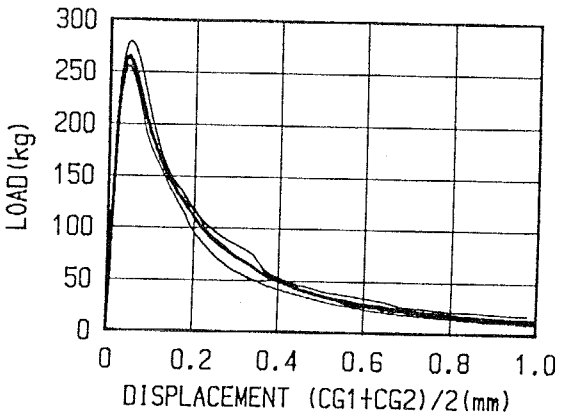
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

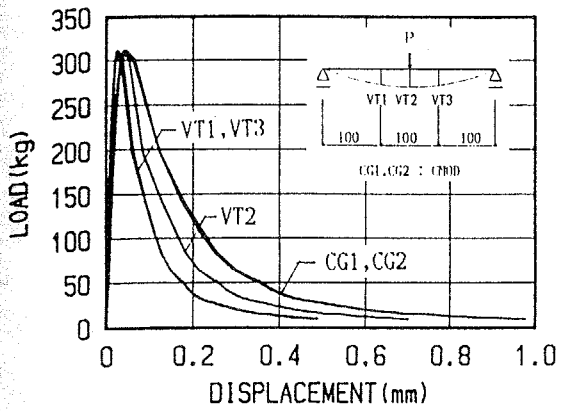


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

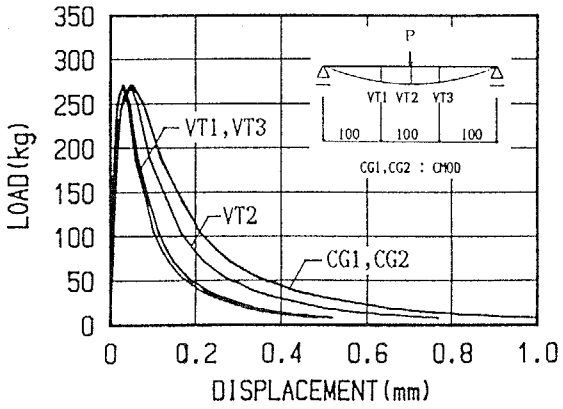


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

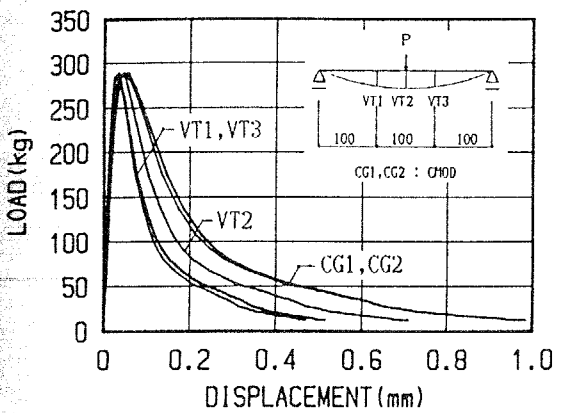
図－3.12 荷重－変位曲線：3PM20-5シリーズ（4週試験）



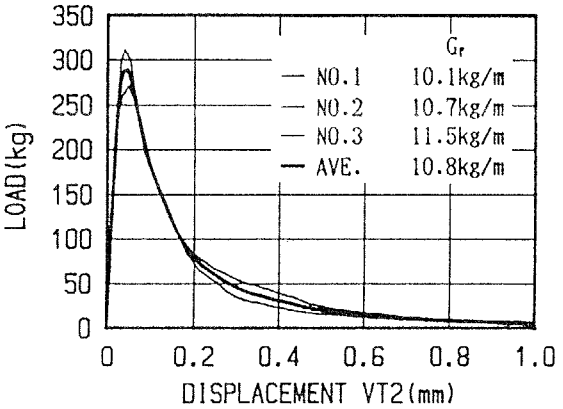
(1) 試験体 No. 1



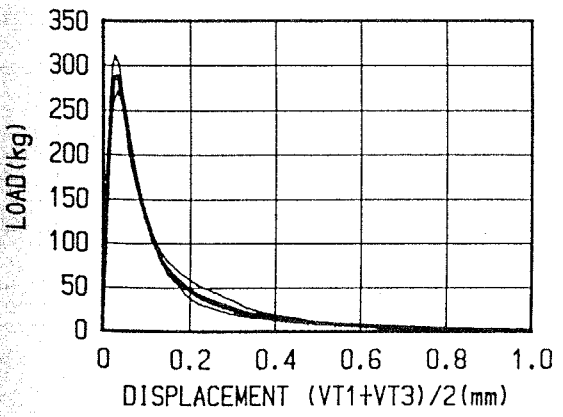
(2) 試験体 No. 2



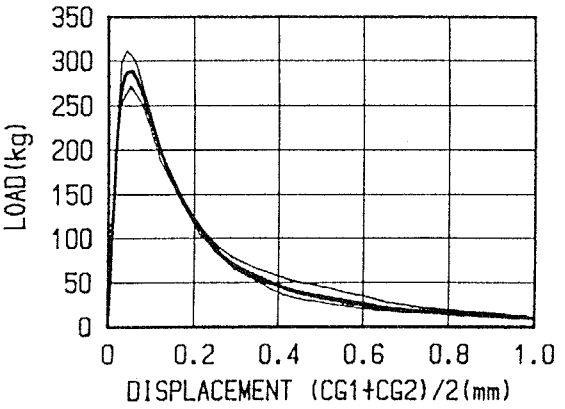
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

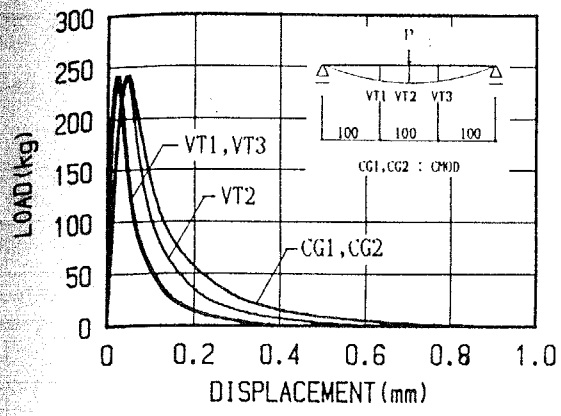


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

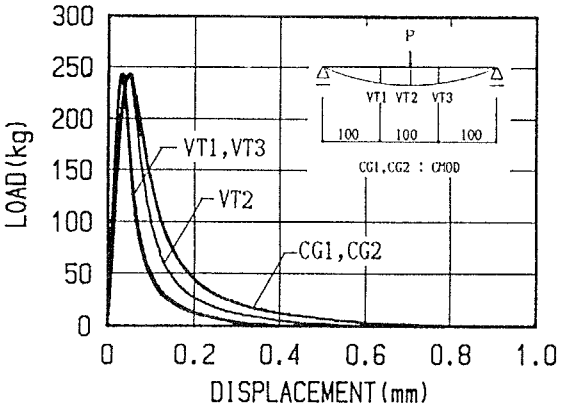


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

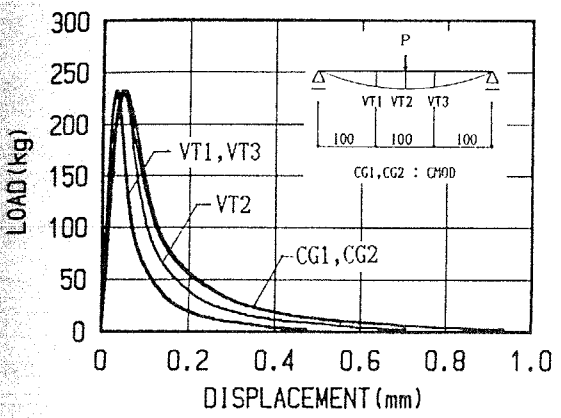
図－3.13 荷重－変位曲線：3PM20-6シリーズ（4週試験）



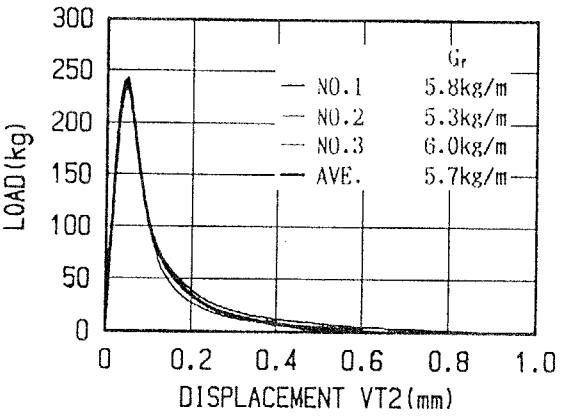
(1) 試験体 No. 1



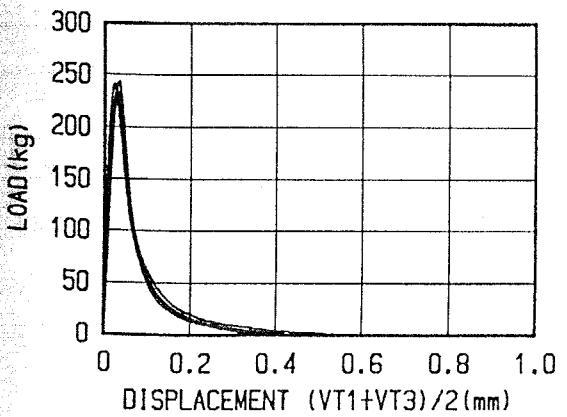
(2) 試験体 No. 2



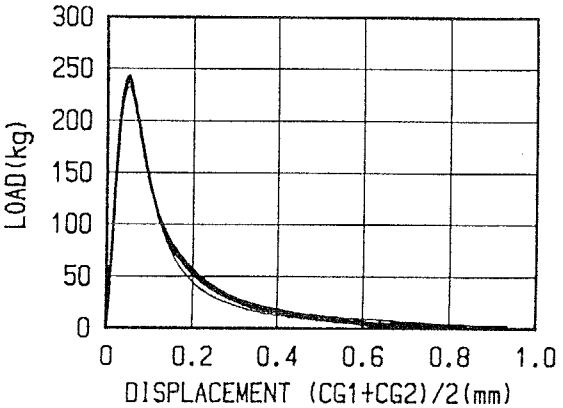
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

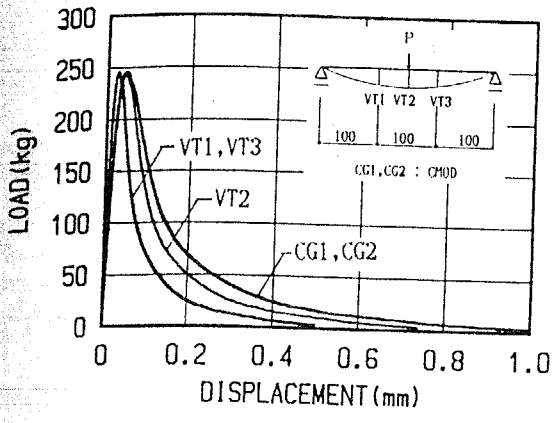


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

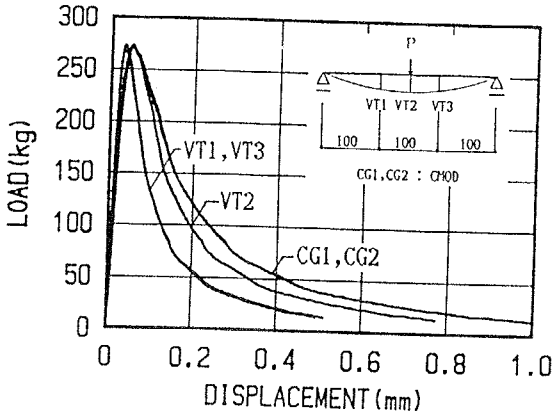


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

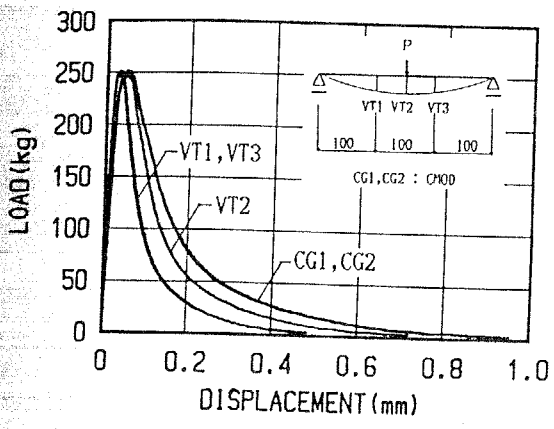
図－3.14 荷重－変位曲線：3PM05-1シリーズ（4週試験）



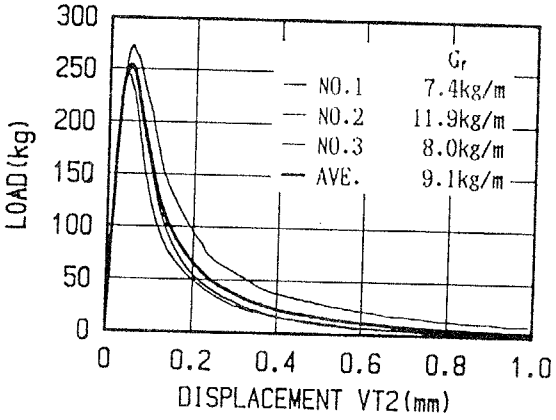
(1) 試験体 No.1



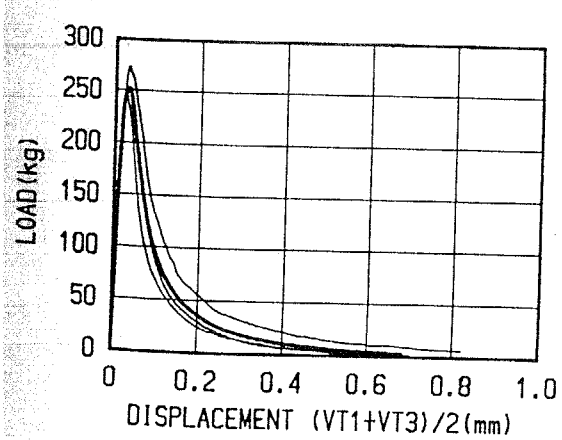
(2) 試験体 No.2



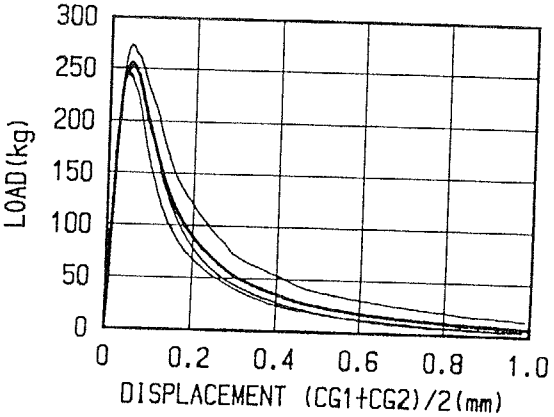
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

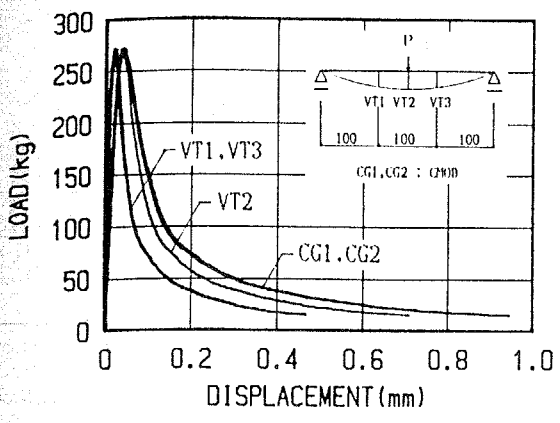


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

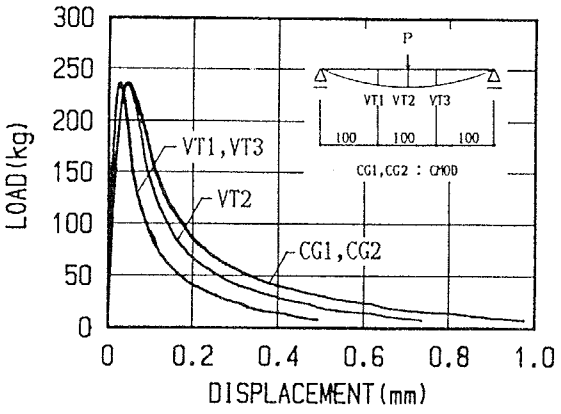


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

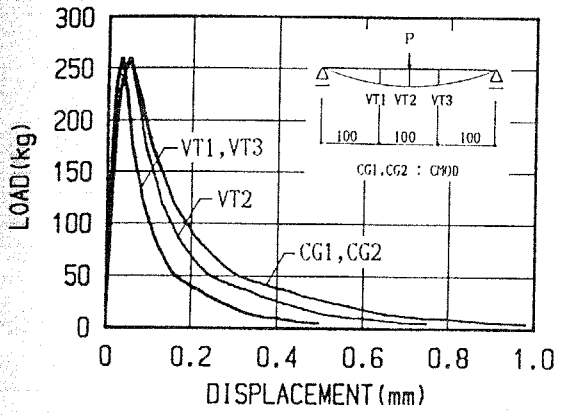
図－3.15 荷重－変位曲線：3PM10-1シリーズ（4週試験）



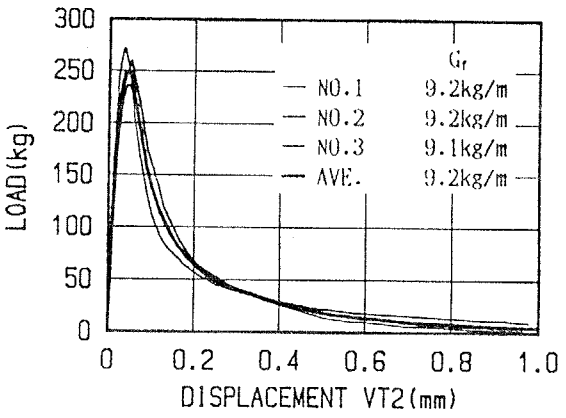
(1) 試験体 No.1



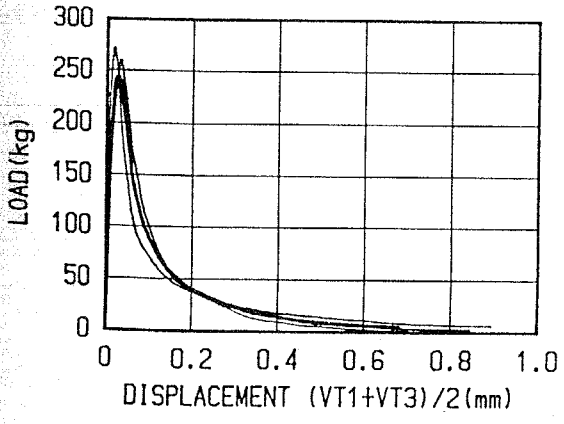
(2) 試験体 No.2



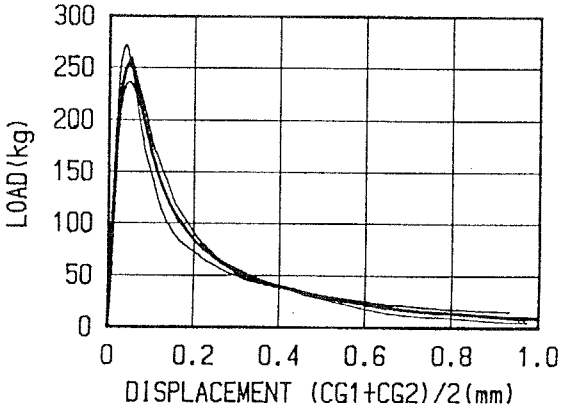
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

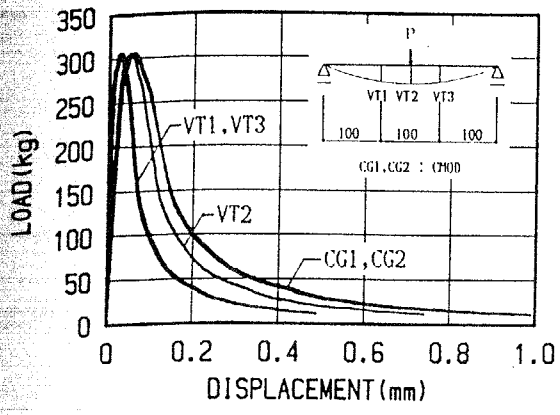


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

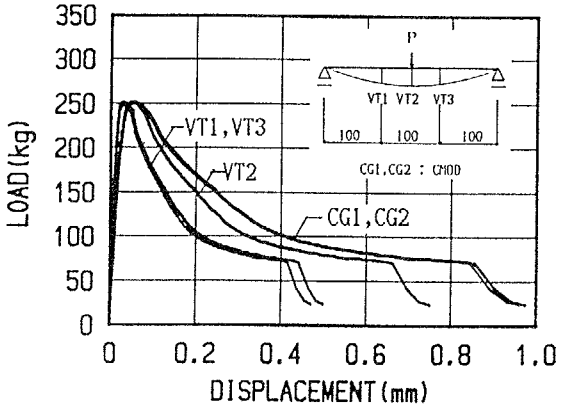


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

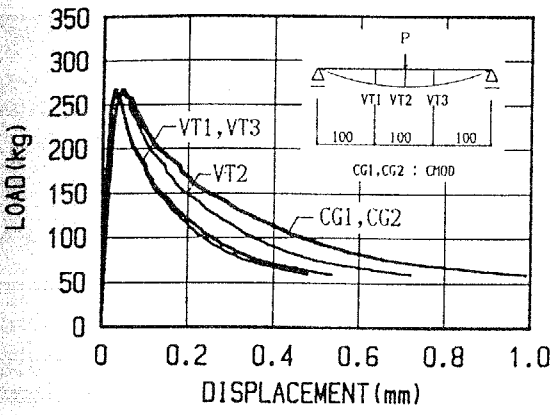
図－3.16 荷重－変位曲線：3PM15-1シリーズ（4週試験）



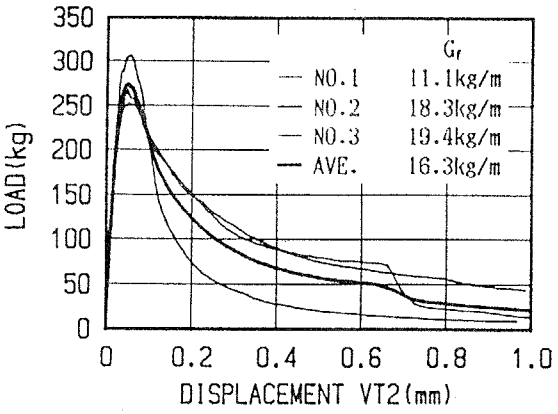
(1) 試験体 No.1



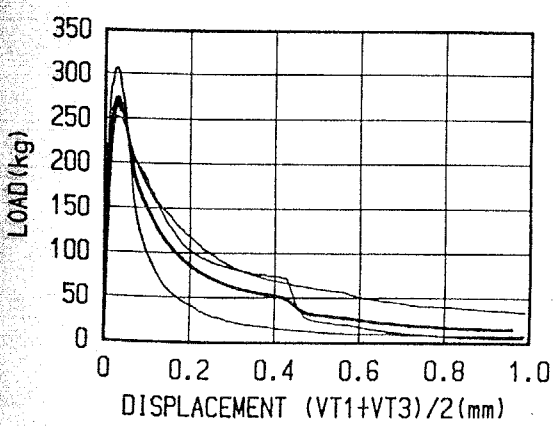
(2) 試験体 No.2



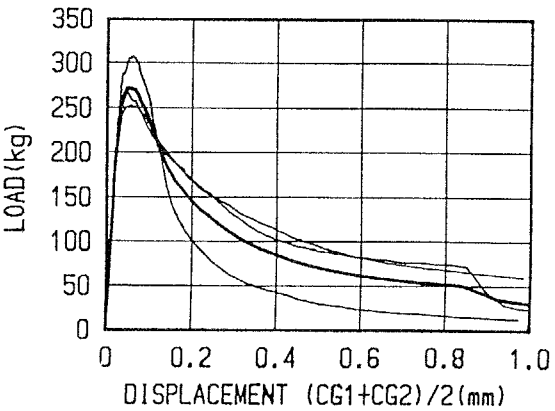
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

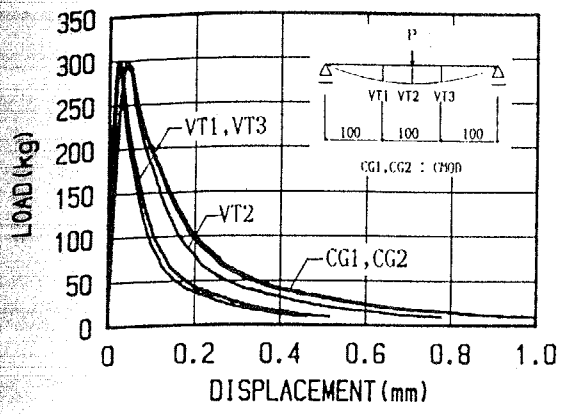


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

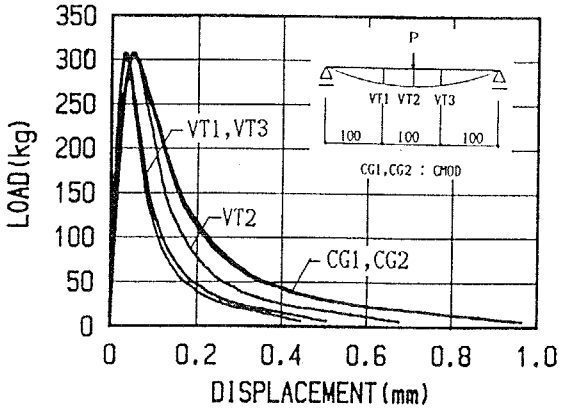


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

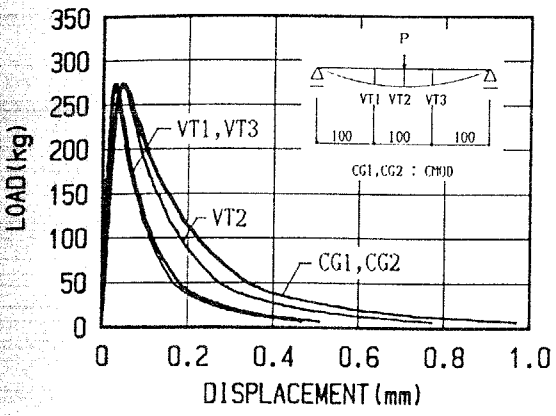
図－3.17 荷重－変位曲線：3PM25-1シリーズ（4週試験）



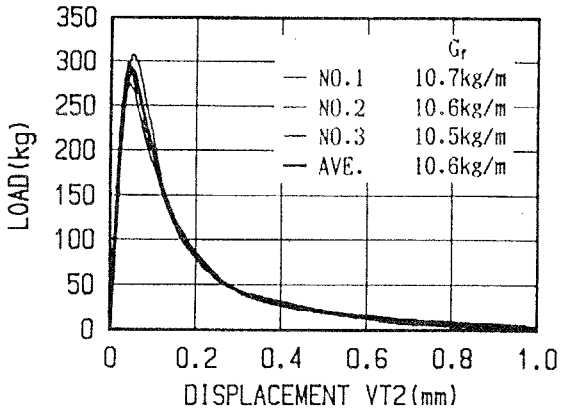
(1) 試験体 No.1



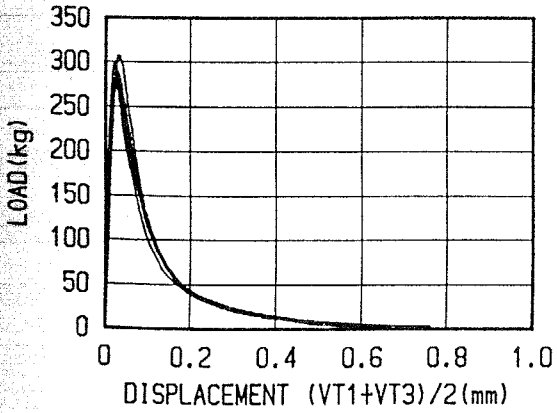
(2) 試験体 No.2



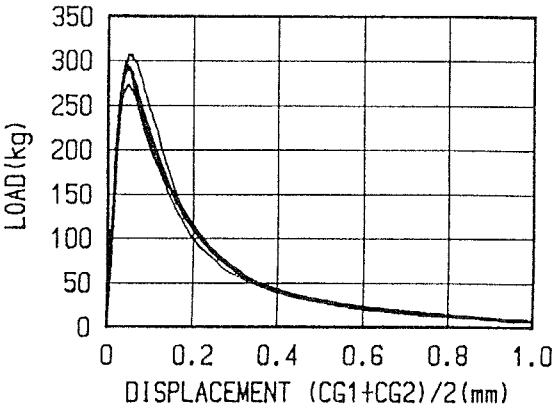
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

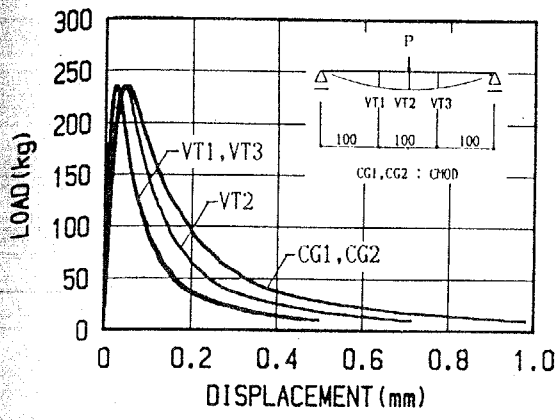


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

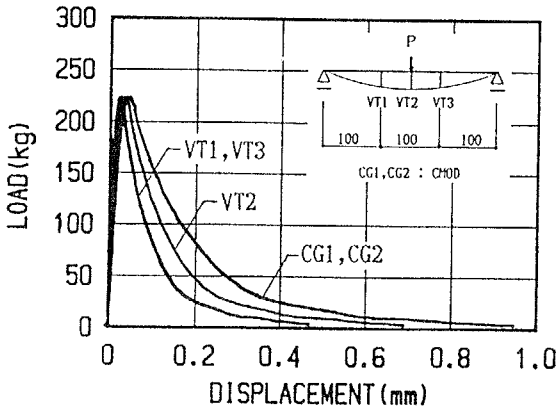


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

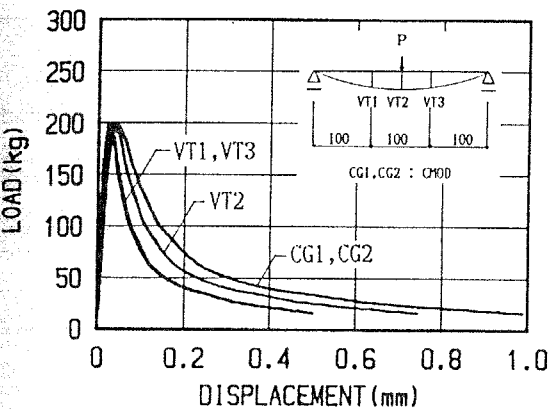
図－3.18 荷重－変位曲線：3PL20-1シリーズ（4週試験）



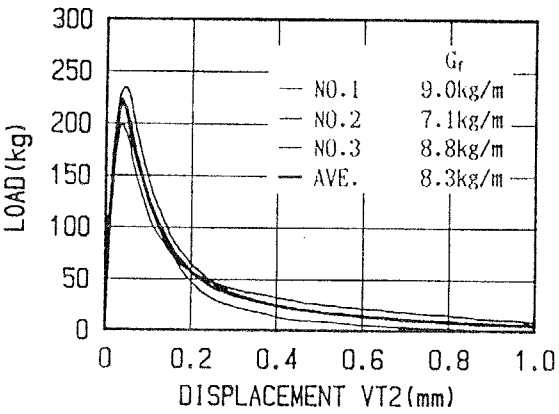
(1) 試験体 No.1



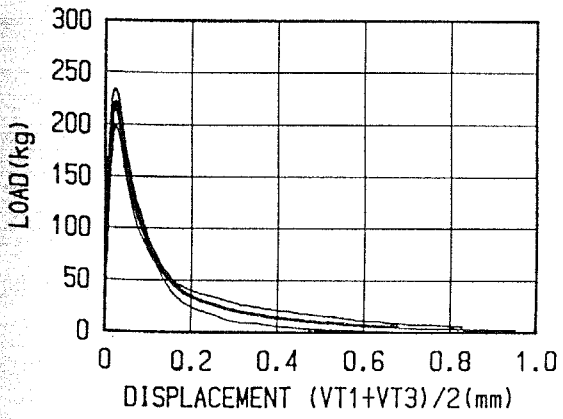
(2) 試験体 No.2



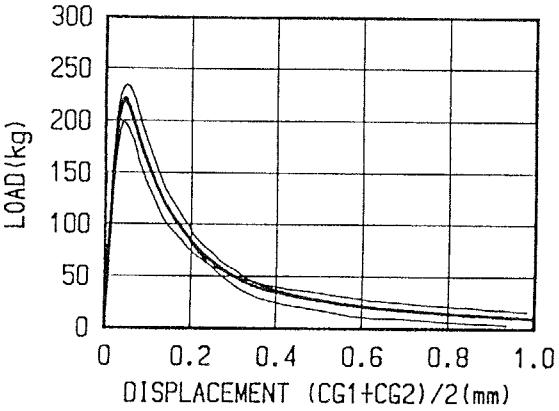
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

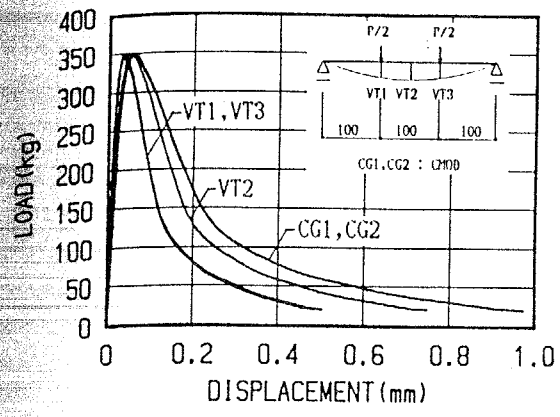


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

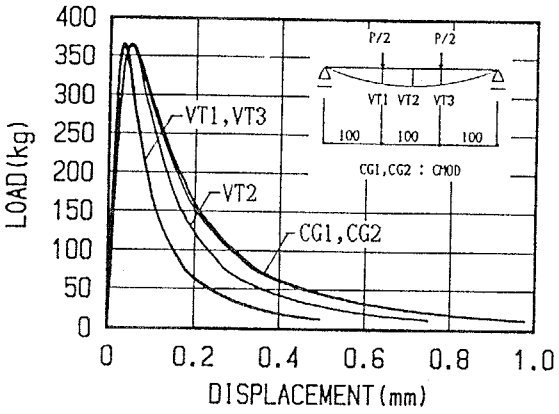


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

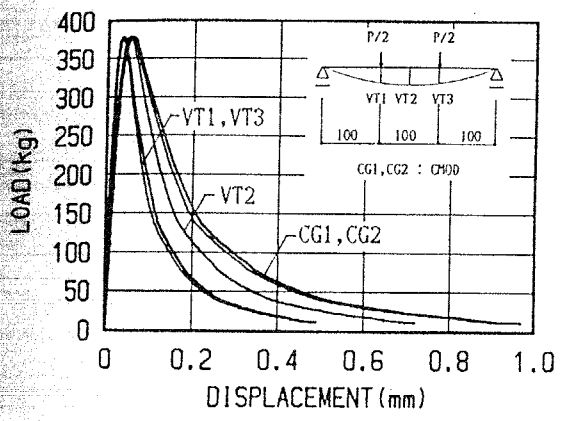
図－3.19 荷重－変位曲線：3PH20-1シリーズ（4週試験）



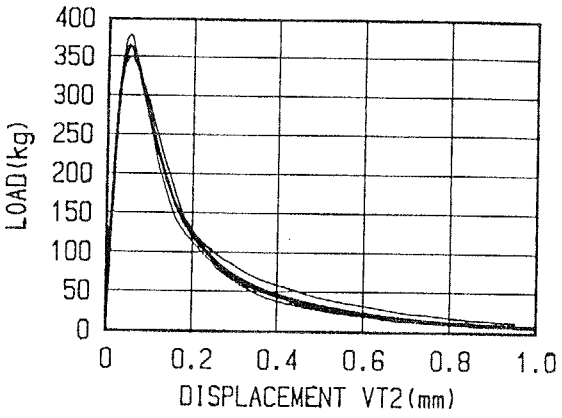
(1) 試験体 No.1



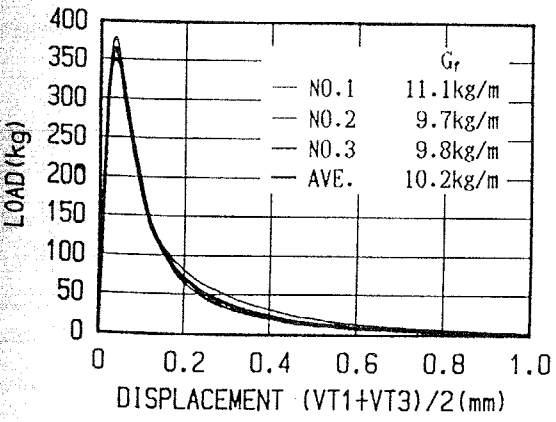
(2) 試験体 No.2



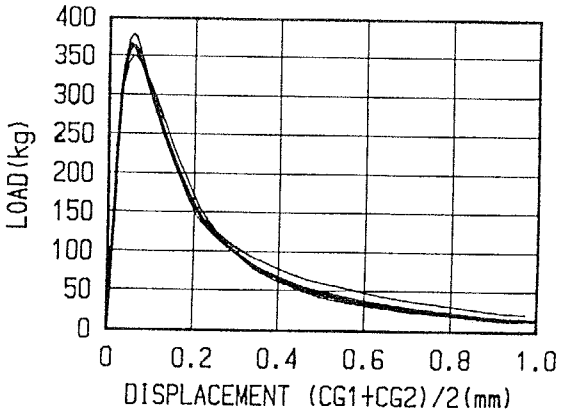
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

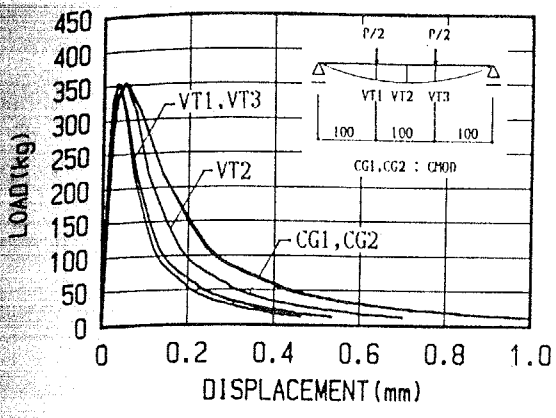


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

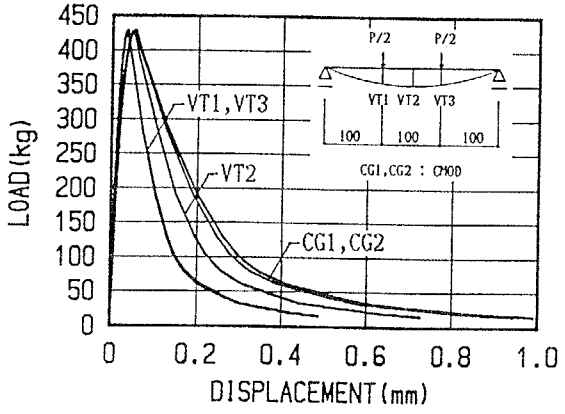


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

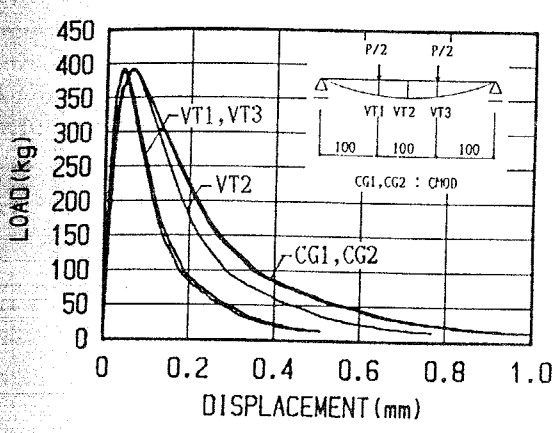
図－3.20 荷重－変位曲線：4PM20-7シリーズ（4週試験）



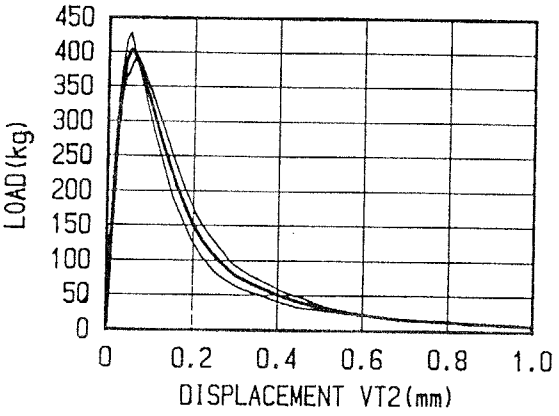
(1) 試験体 No. 1



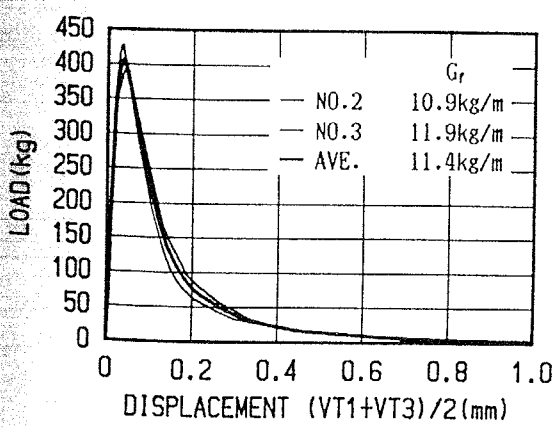
(2) 試験体 No. 2



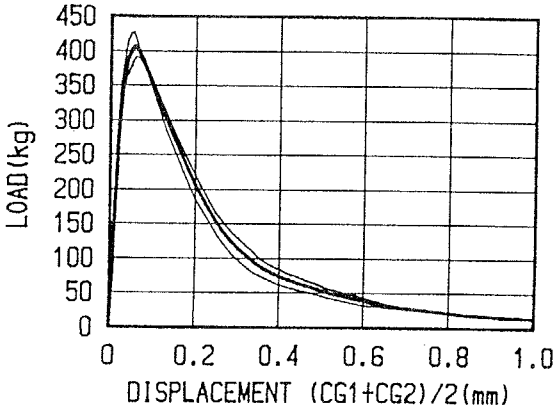
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

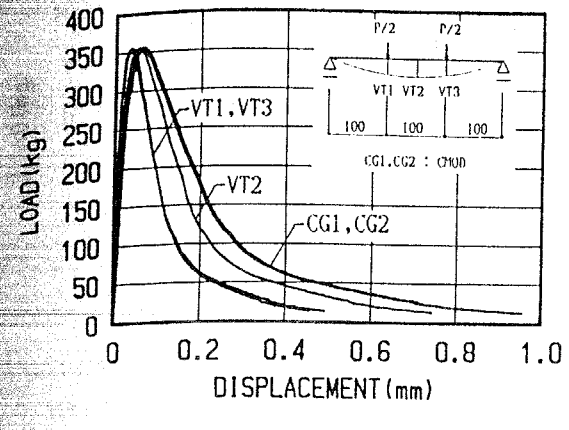


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

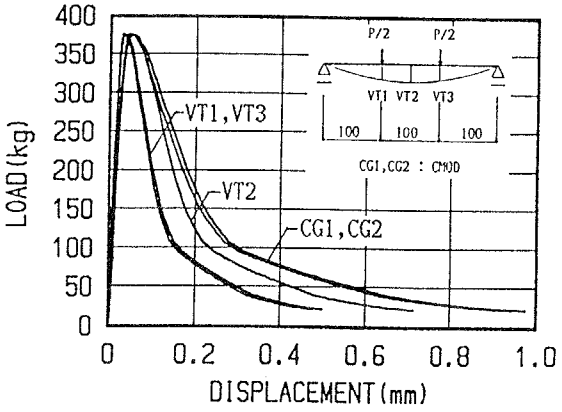


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

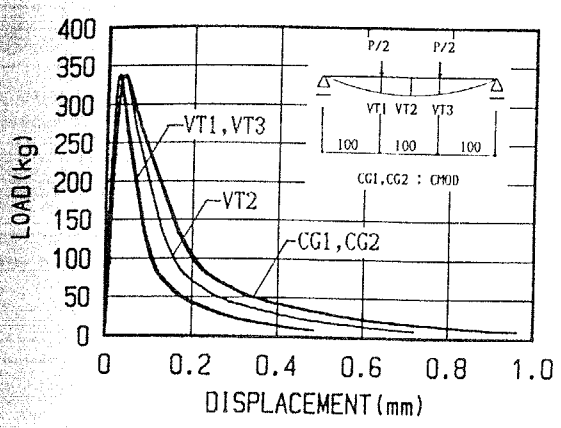
図－3.21 荷重－変位曲線：4PM20-8シリーズ（4週試験）



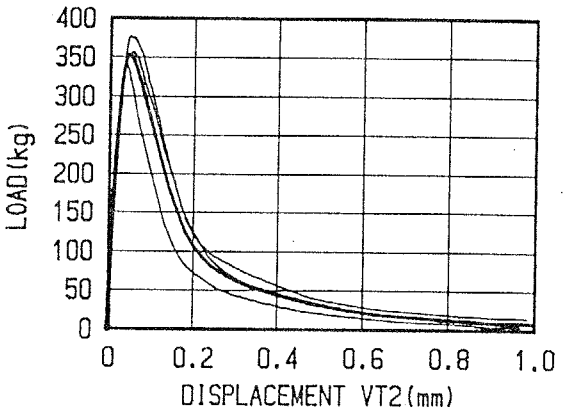
(1) 試験体 No.1



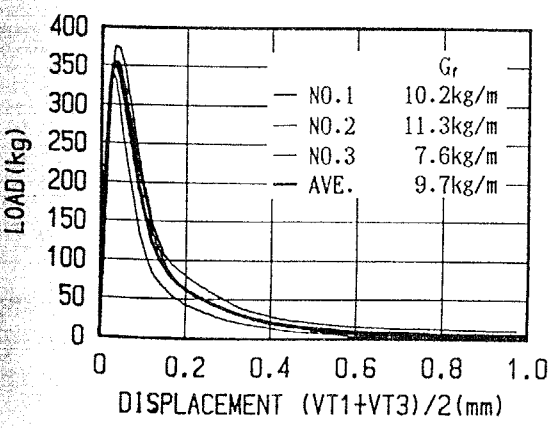
(2) 試験体 No.2



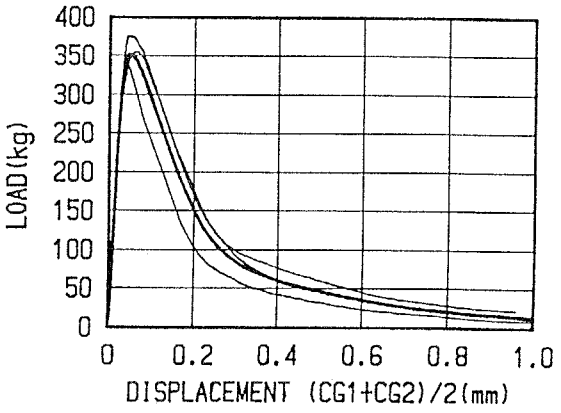
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

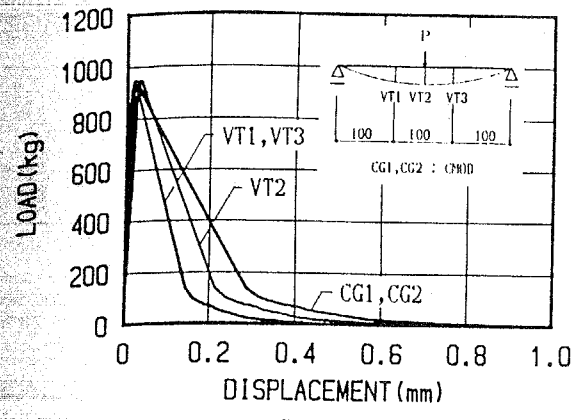


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

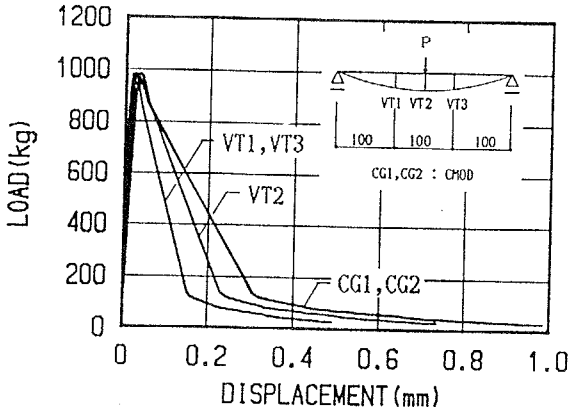


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

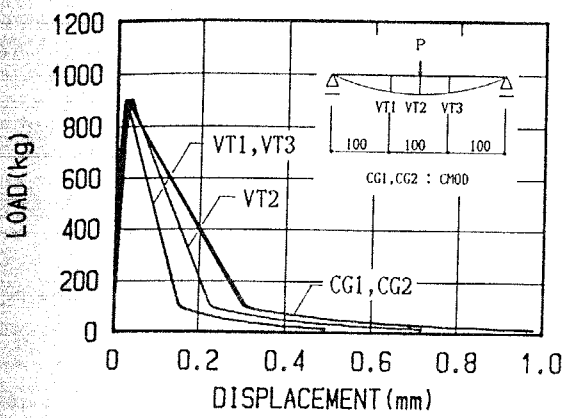
図－3.22 荷重－変位曲線：4PH20-2シリーズ（4週試験）



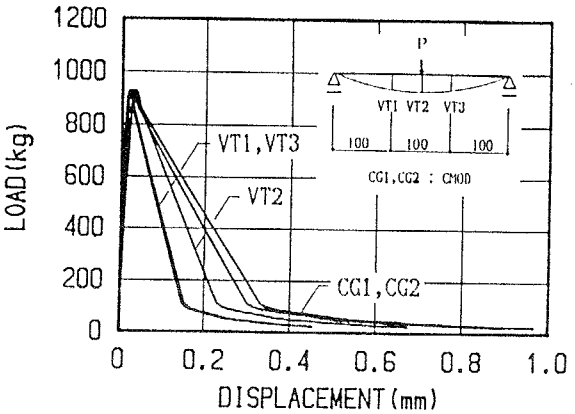
(1) 試験体 No. 1



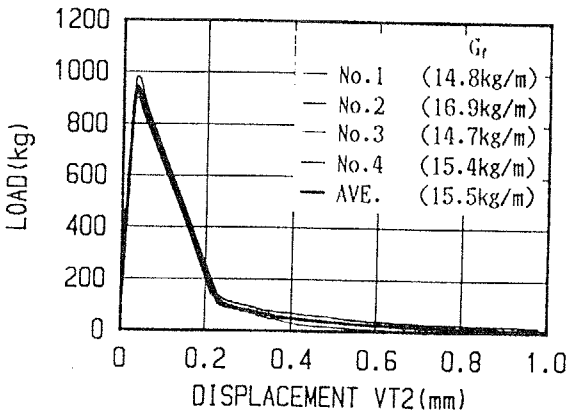
(2) 試験体 No. 2



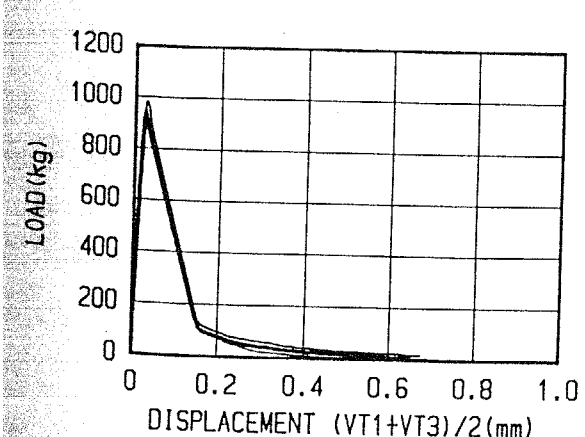
(3) 試験体 No. 3



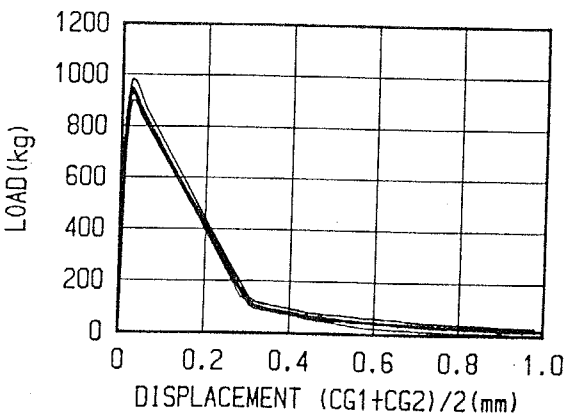
(4) 試験体 No. 4



(5) 荷重－変位 VT2

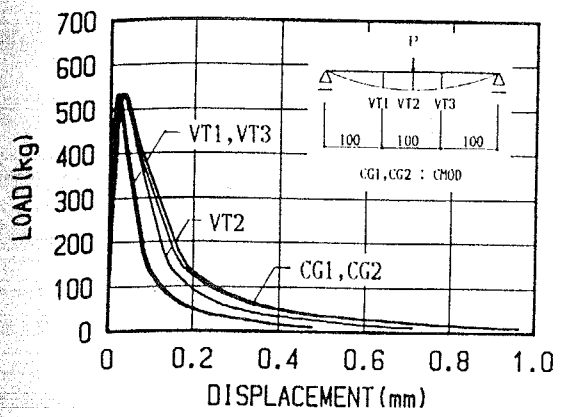


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

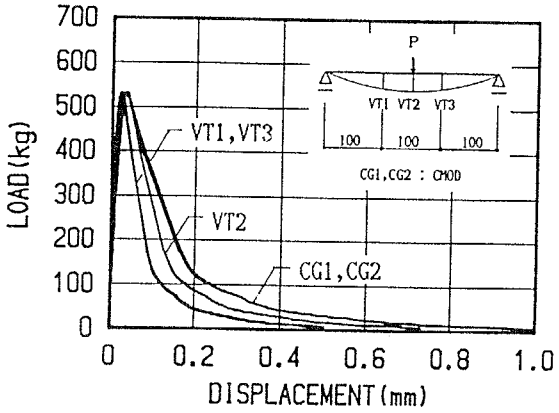


(7) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

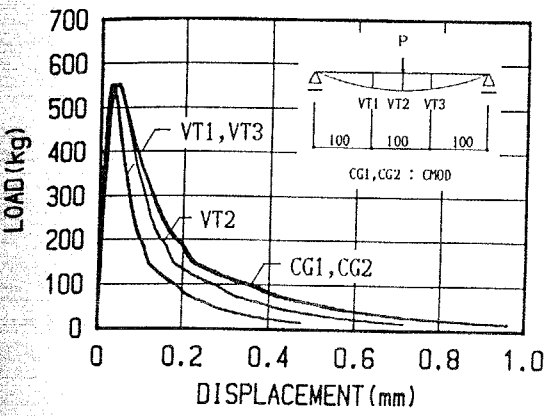
図－3.23 荷重－変位曲線：3PM20-1シリーズ（1年試験）



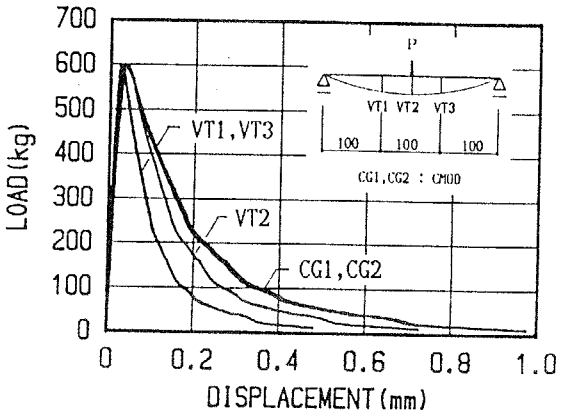
(1) 試験体 No. 1



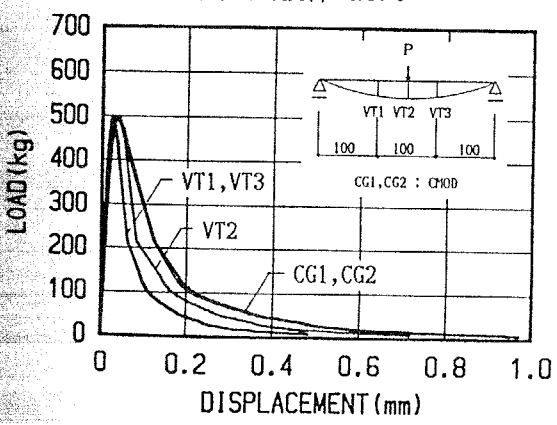
(2) 試験体 No. 2



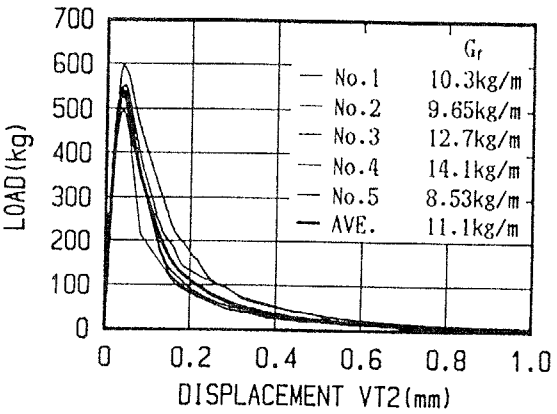
(3) 試験体 No. 3



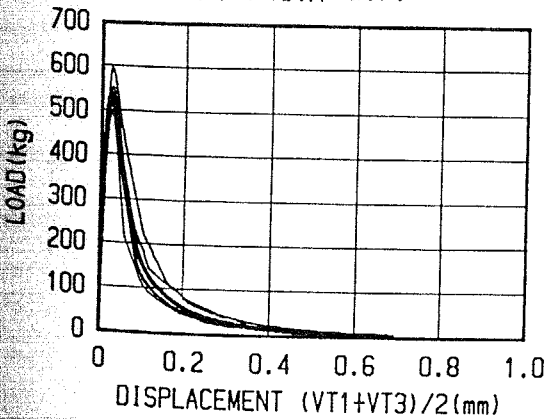
(4) 試験体 No. 4



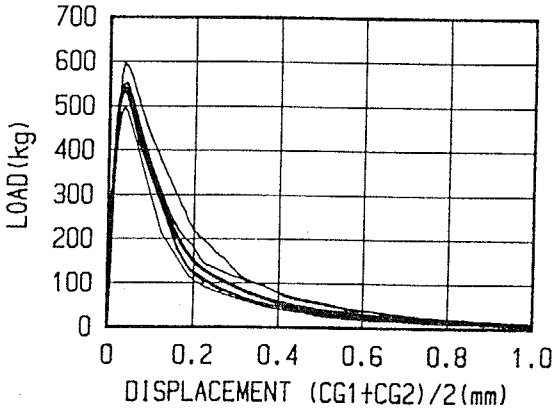
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

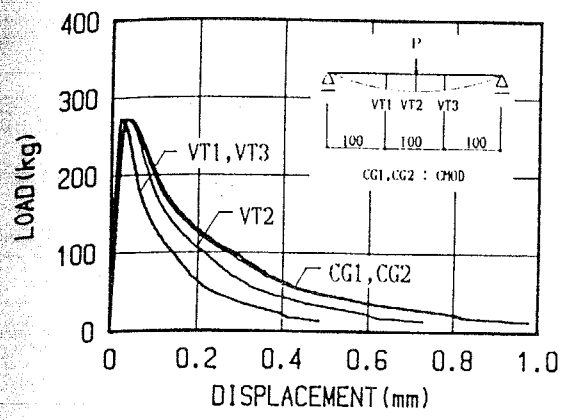


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

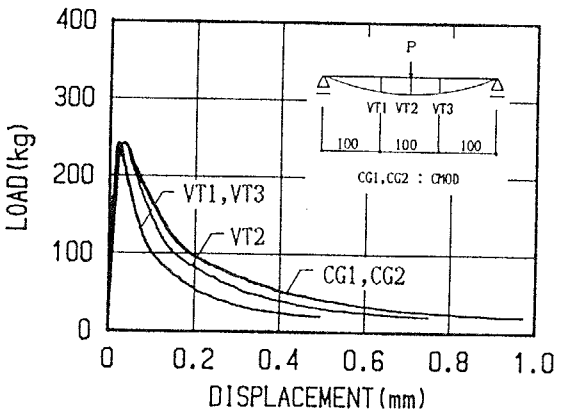


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

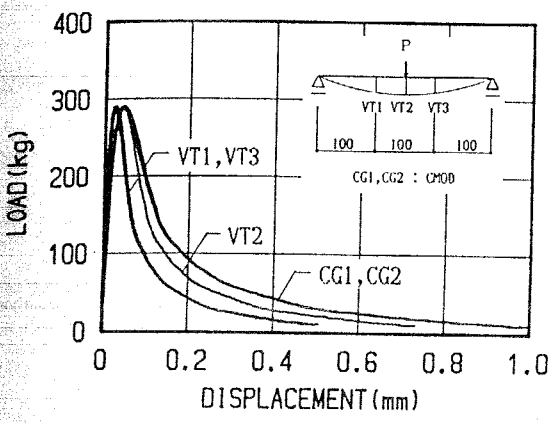
図－3.24 荷重－変位曲線：3PM20-2シリーズ（1年試験）



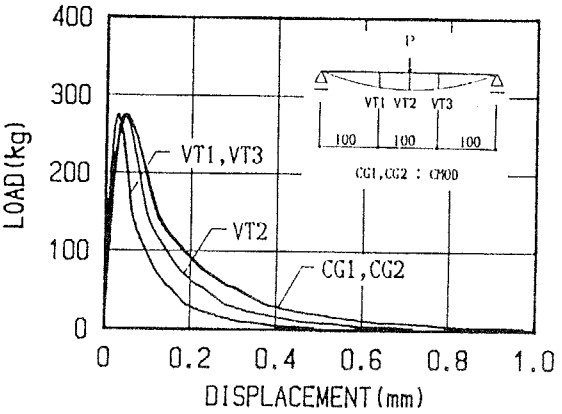
(1) 試験体 No. 1



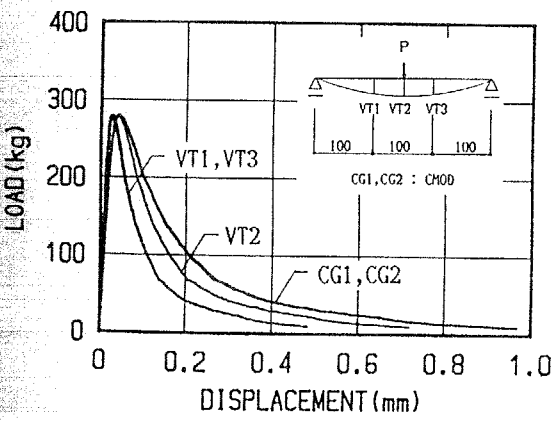
(2) 試験体 No. 2



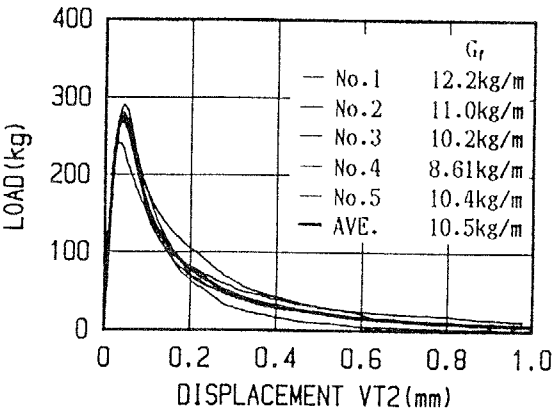
(3) 試験体 No. 3



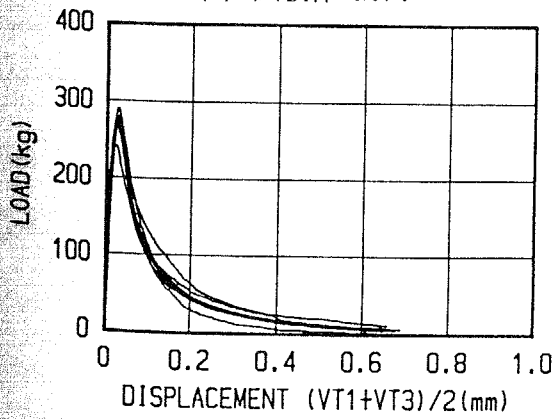
(4) 試験体 No. 4



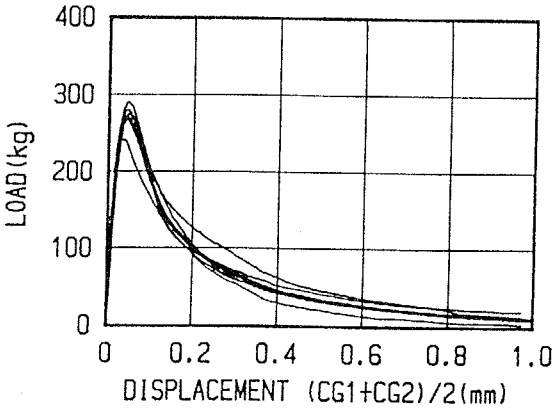
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

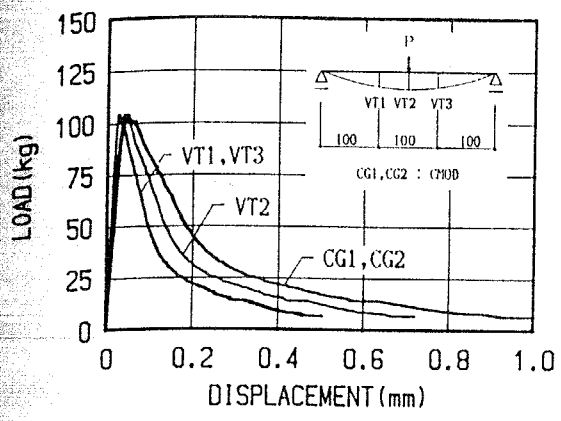


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

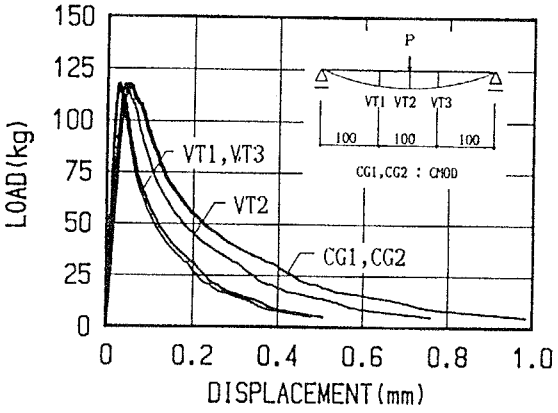


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

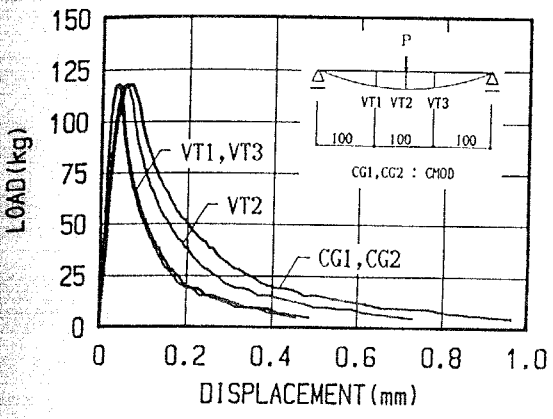
図－3.25 荷重－変位曲線：3PM20-3シリーズ（1年試験）



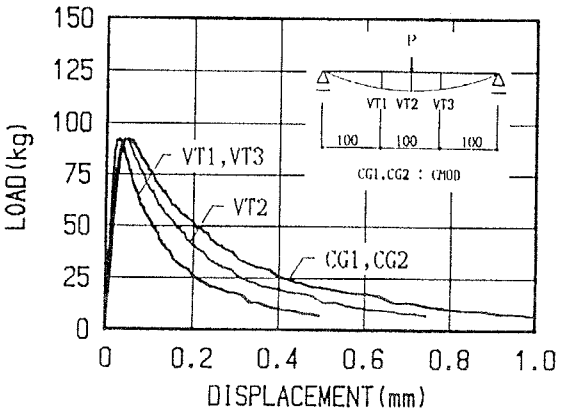
(1) 試験体 No. 1



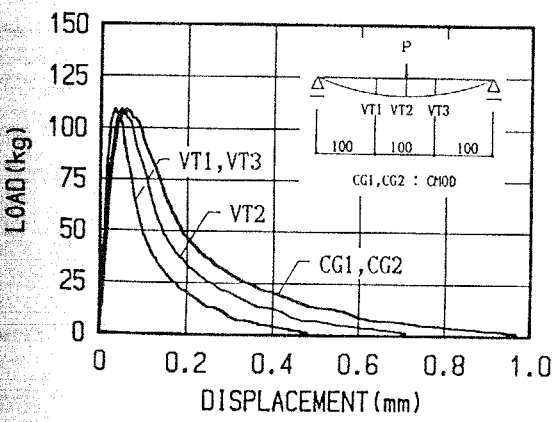
(2) 試験体 No. 2



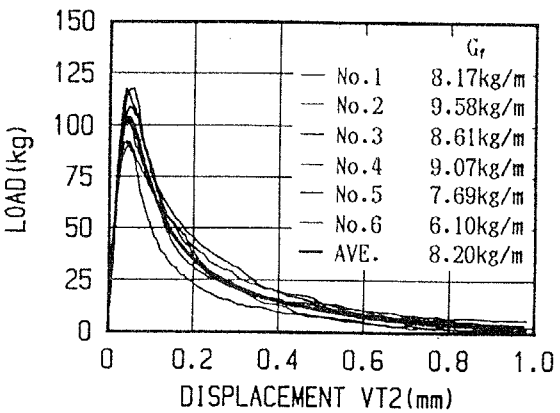
(3) 試験体 No. 3



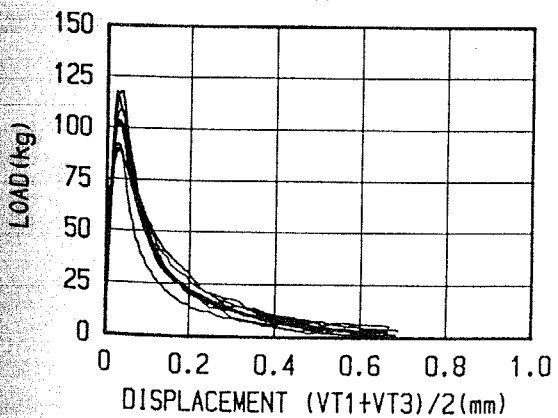
(4) 試験体 No. 4



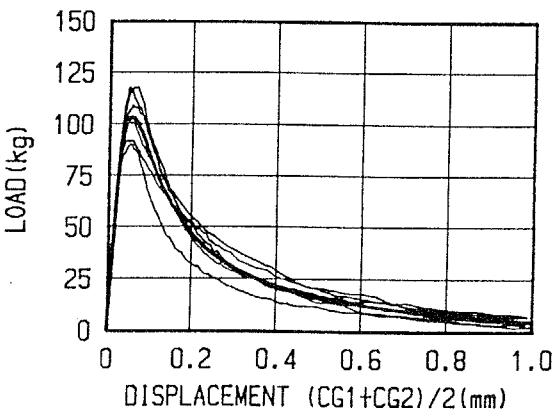
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

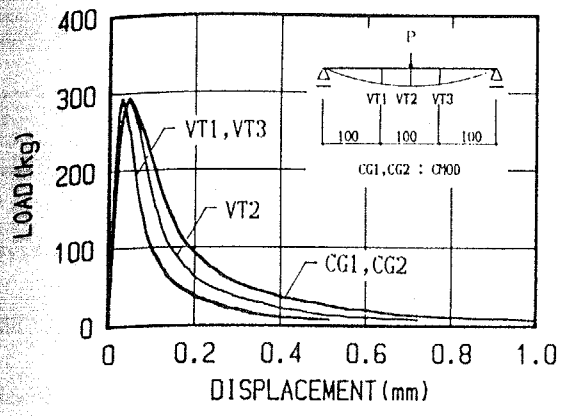


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

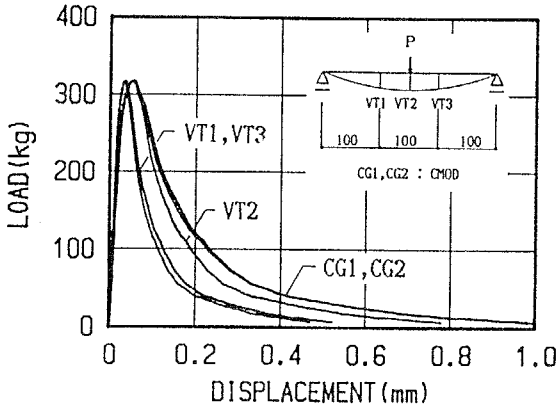


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

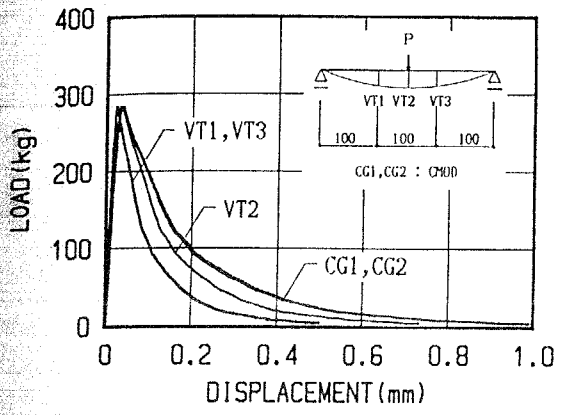
図－3.26 荷重－変位曲線：3PM20-4シリーズ（１年試験）



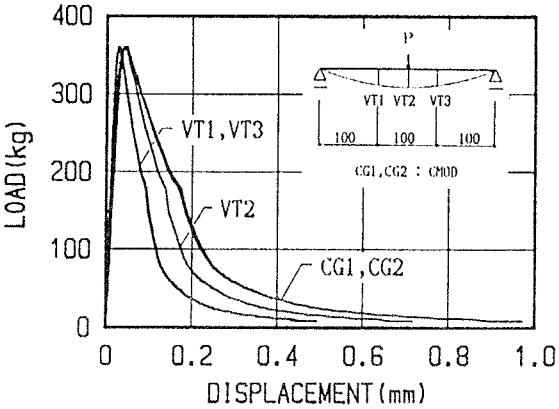
(1) 試験体 No. 1



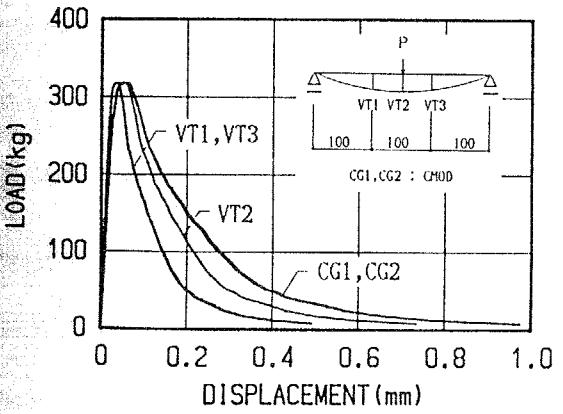
(2) 試験体 No. 2



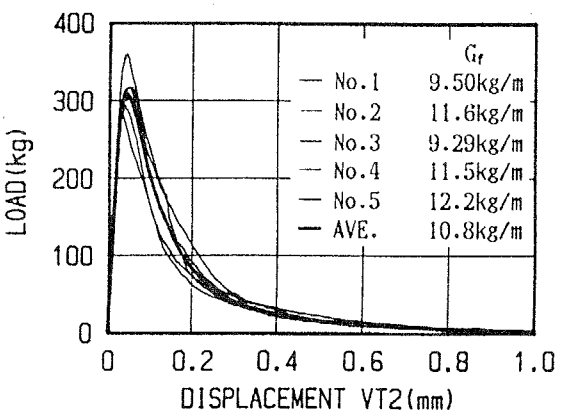
(3) 試験体 No. 3



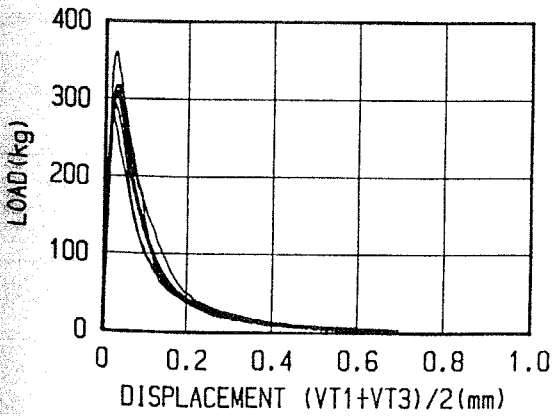
(4) 試験体 No. 4



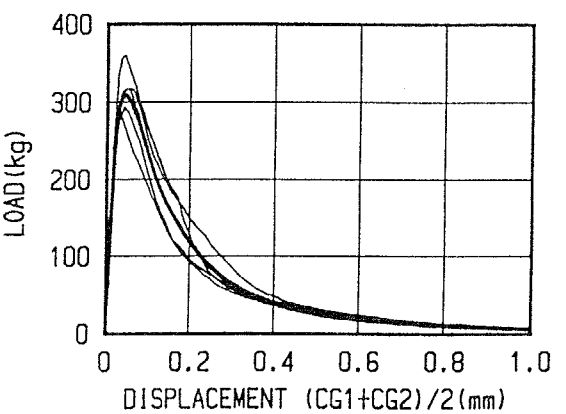
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

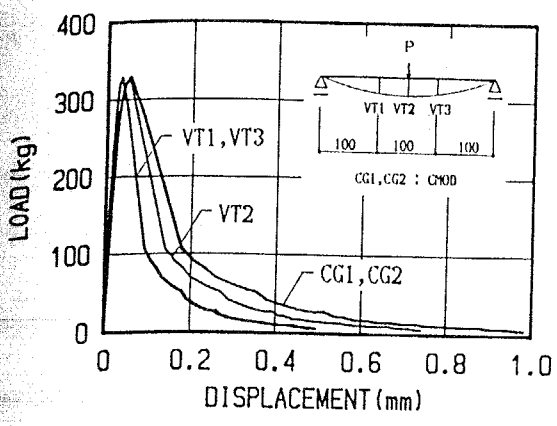


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

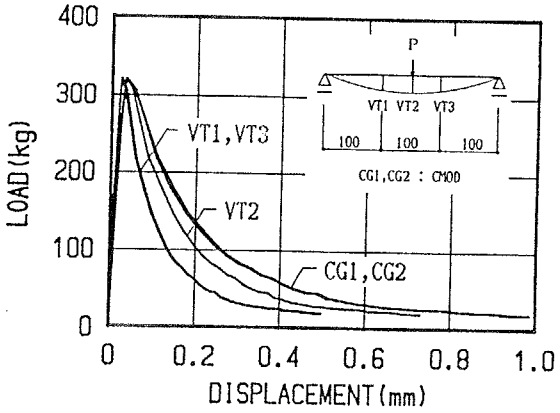


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

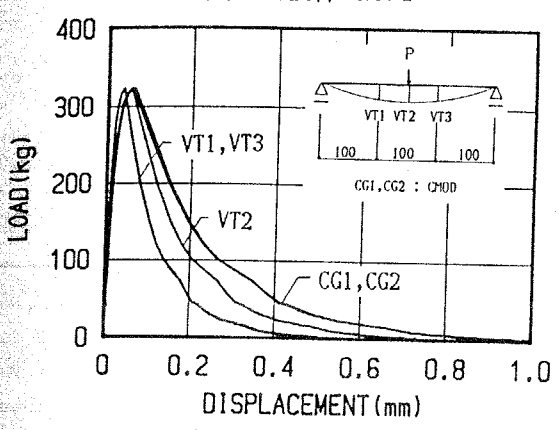
図－3.27 荷重－変位曲線：3PM20-5シリーズ（1年試験）



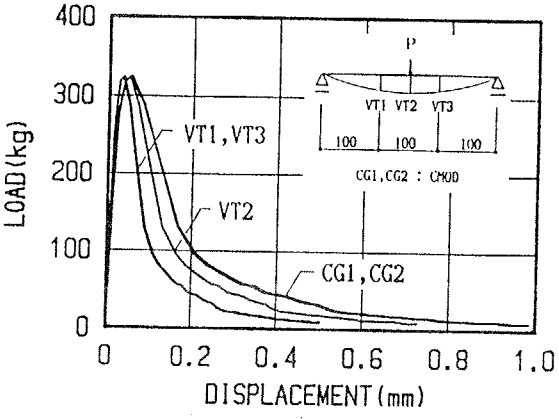
(1) 試験体 No. 1



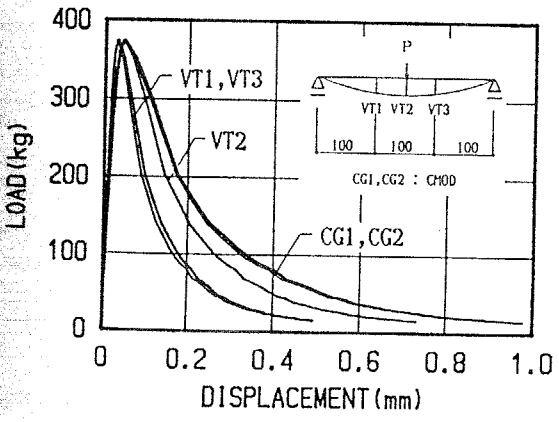
(2) 試験体 No. 2



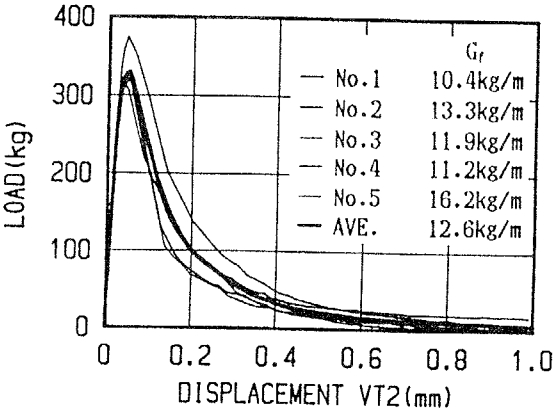
(3) 試験体 No. 3



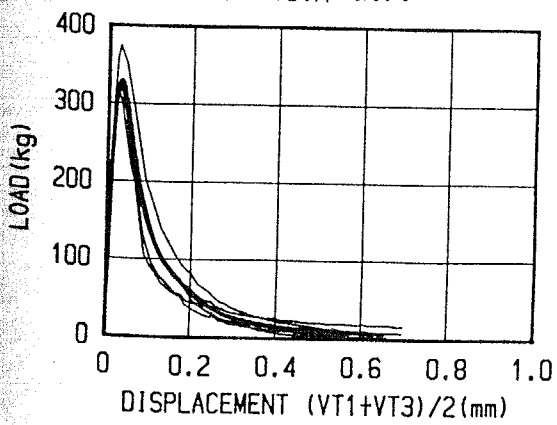
(4) 試験体 No. 4



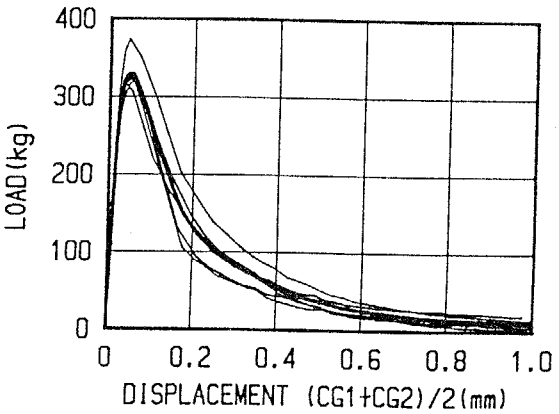
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

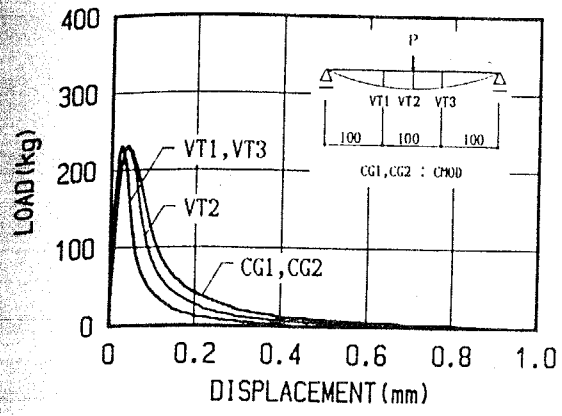


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

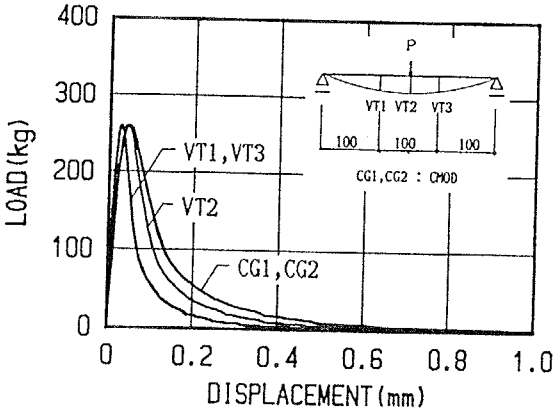


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

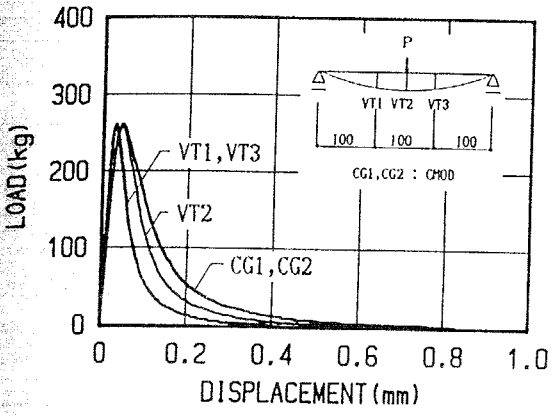
図－3.28 荷重－変位曲線：3PM20-6シリーズ（1年試験）



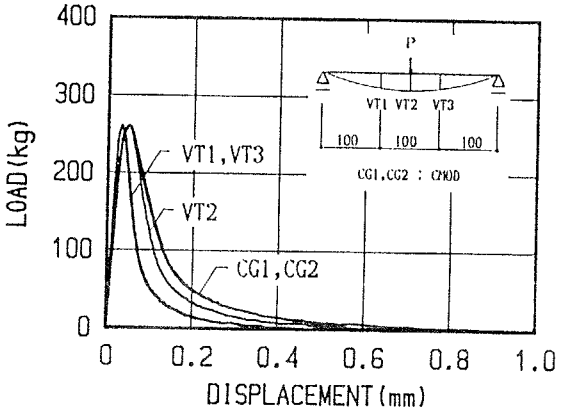
(1) 試験体 No. 1



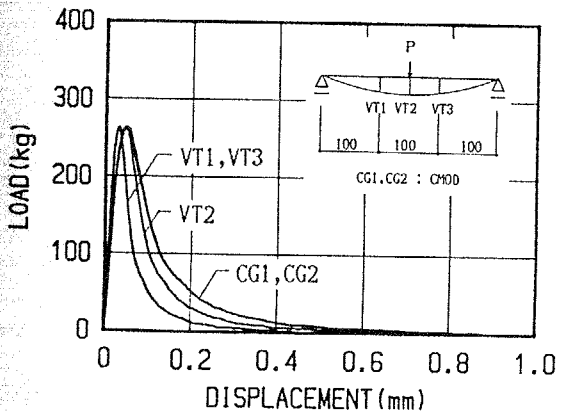
(2) 試験体 No. 2



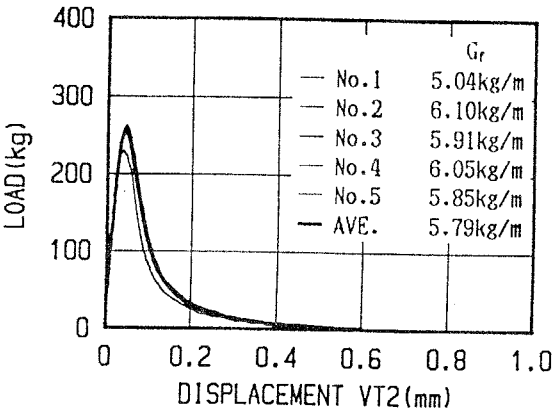
(3) 試験体 No. 3



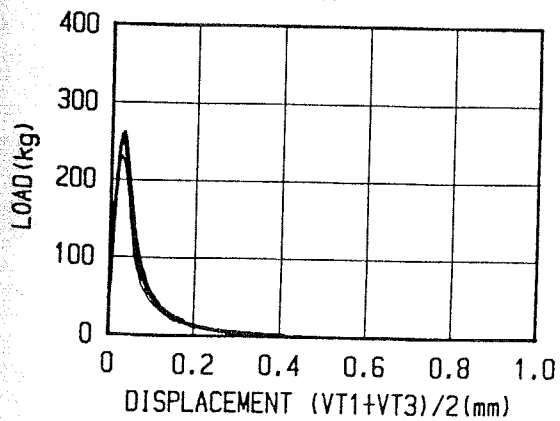
(4) 試験体 No. 4



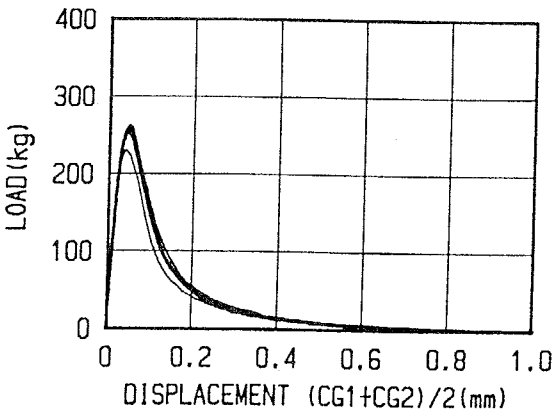
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

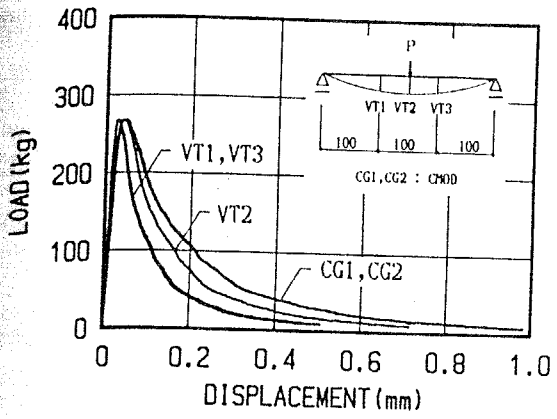


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

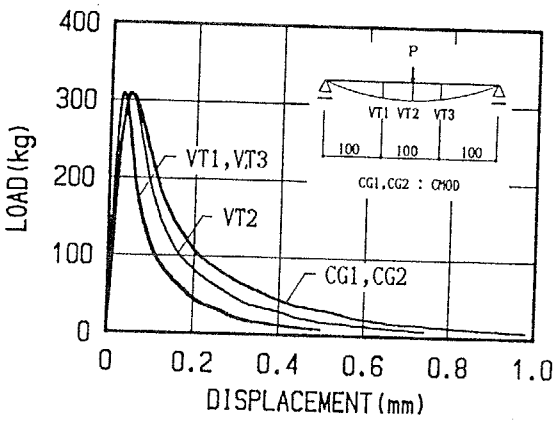


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

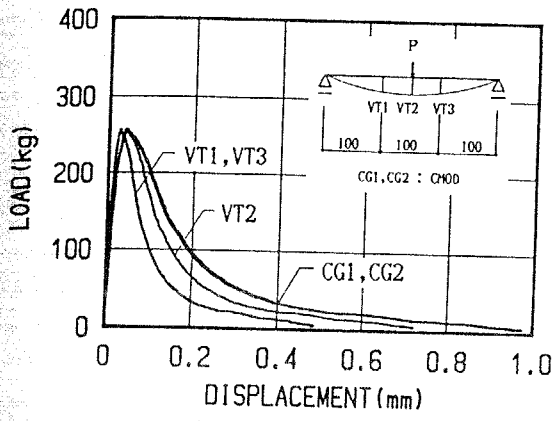
図－3.29 荷重－変位曲線：3PM05-1シリーズ（1年試験）



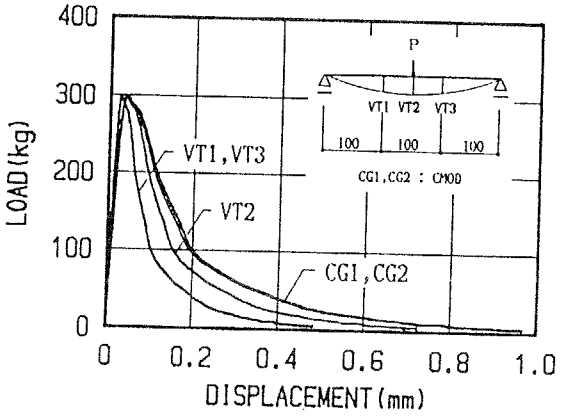
(1) 試験体 No. 1



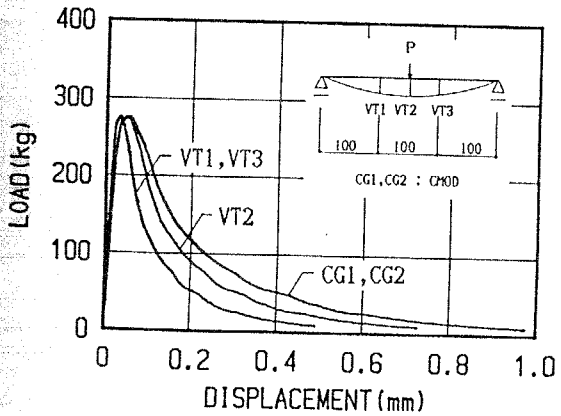
(2) 試験体 No. 2



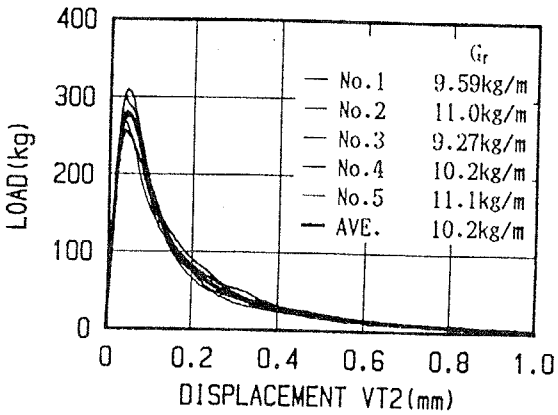
(3) 試験体 No. 3



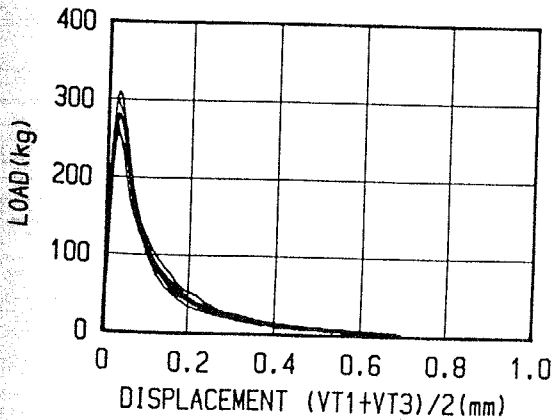
(4) 試験体 No. 4



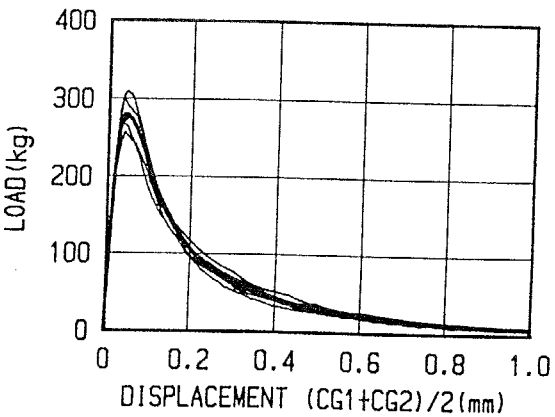
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

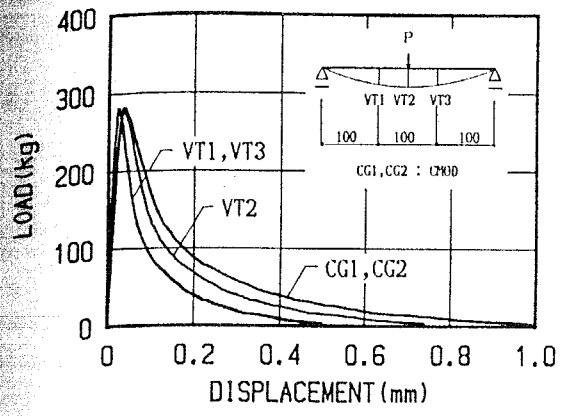


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

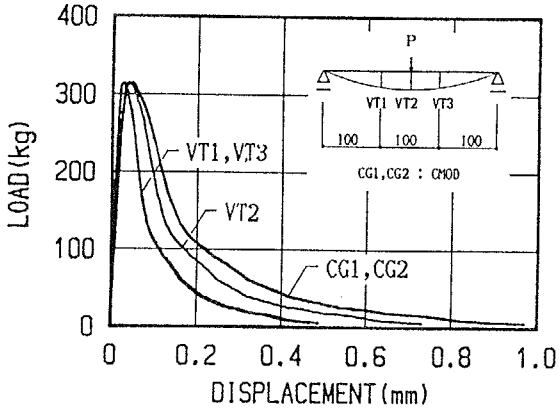


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

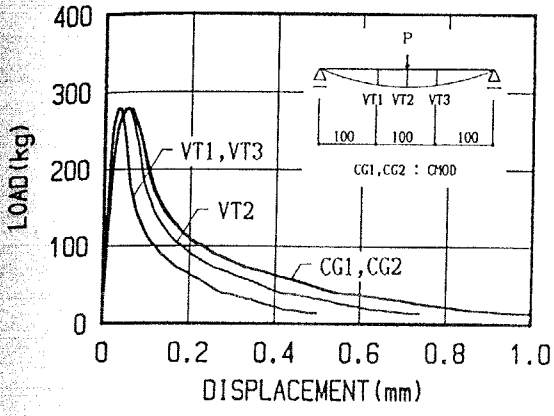
図－3.30 荷重－変位曲線：3PM10-1シリーズ（1年試験）



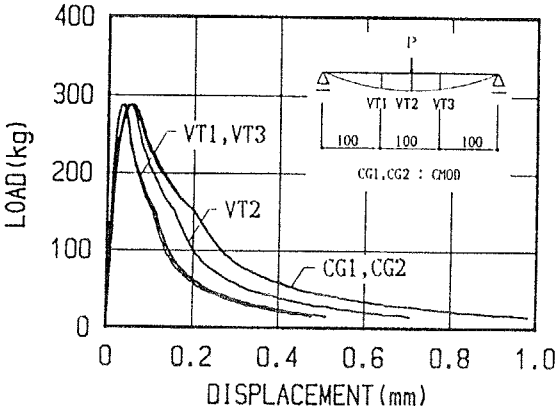
(1) 試験体 No. 1



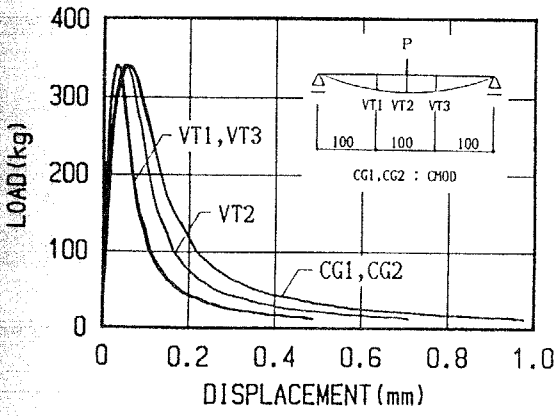
(2) 試験体 No. 2



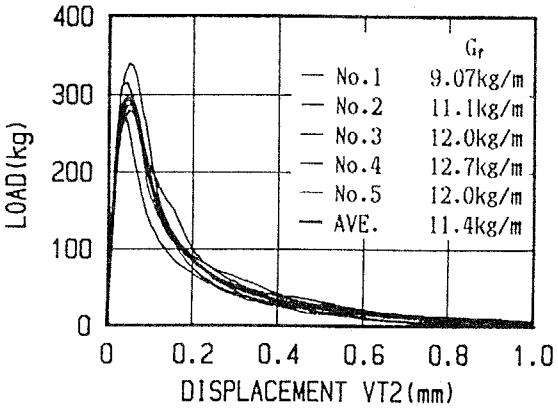
(3) 試験体 No. 3



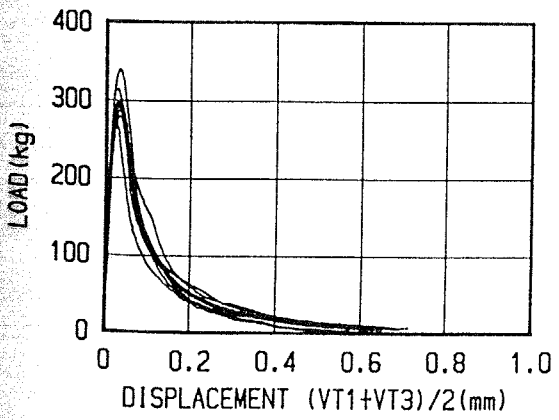
(4) 試験体 No. 4



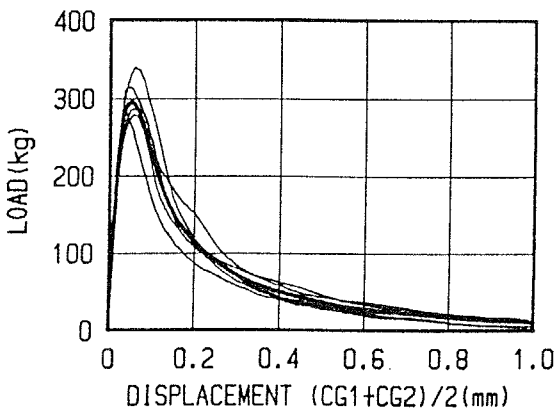
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

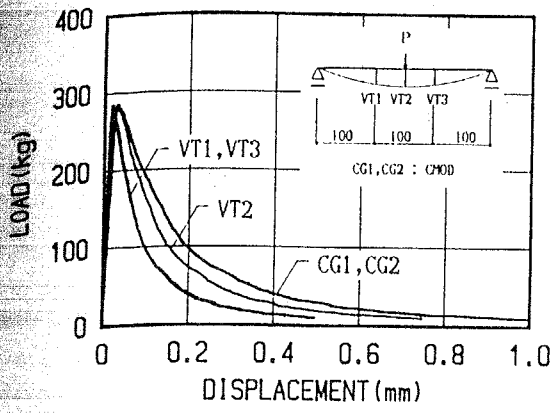


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

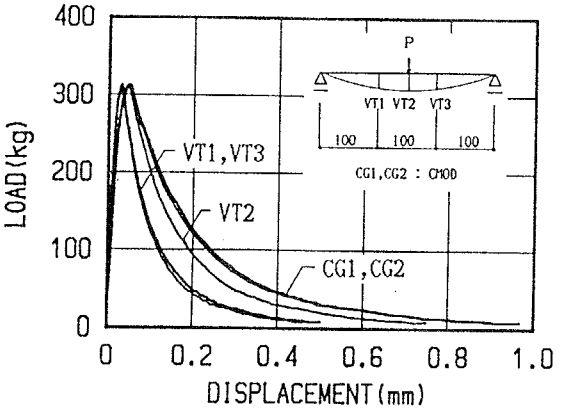


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

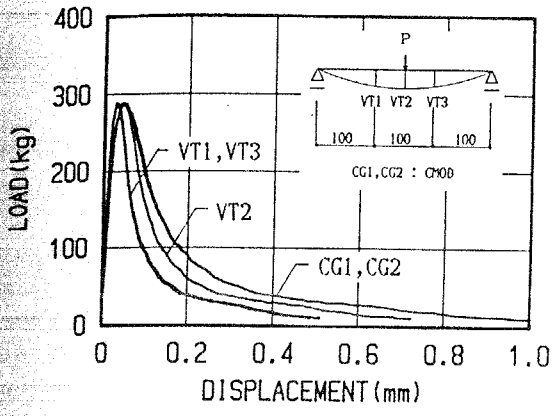
図－3.31 荷重－変位曲線：3PM15-1シリーズ（１年試験）



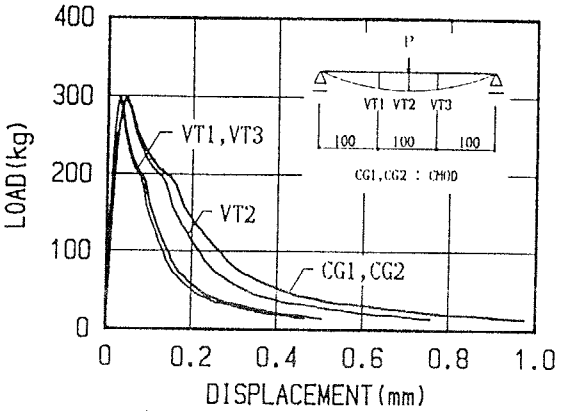
(1) 試験体 No. 1



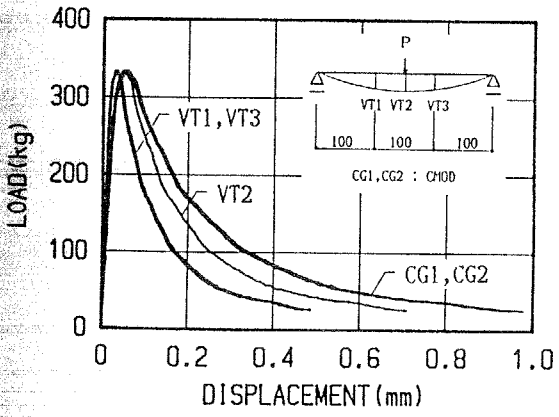
(2) 試験体 No. 2



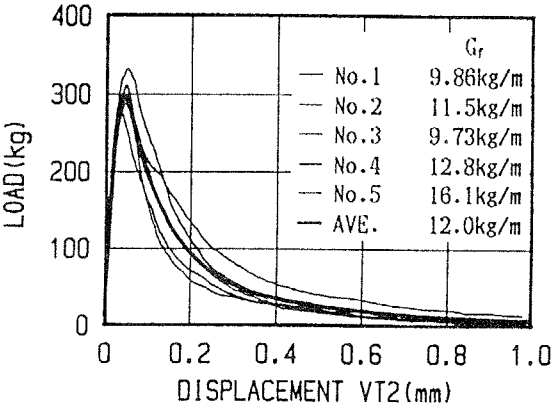
(3) 試験体 No. 3



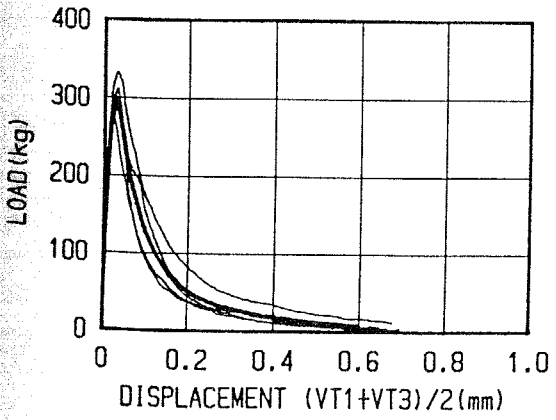
(4) 試験体 No. 4



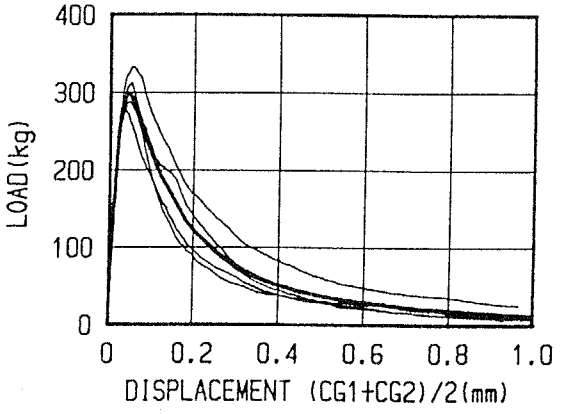
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

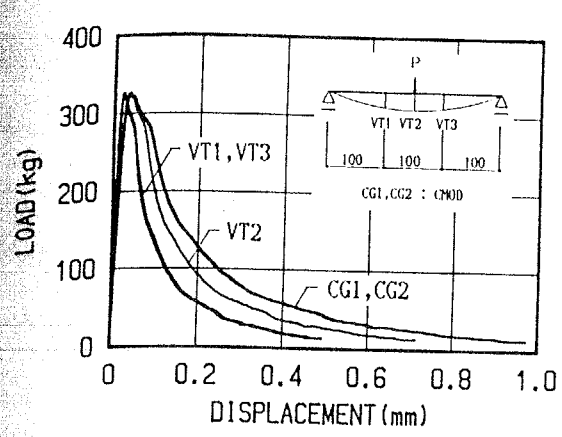


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

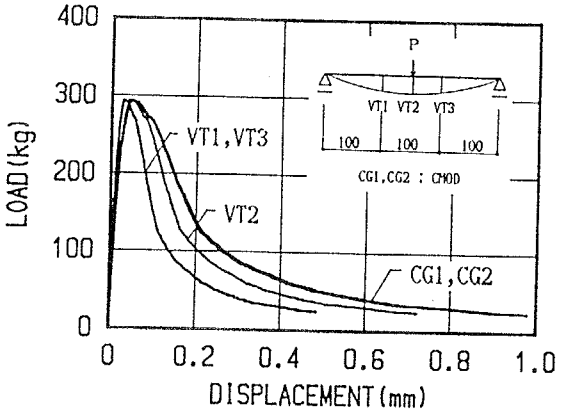


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

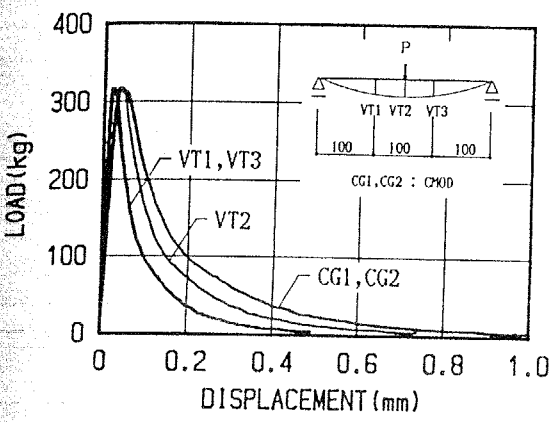
図－3.32 荷重－変位曲線：3PM25-1シリーズ（1年試験）



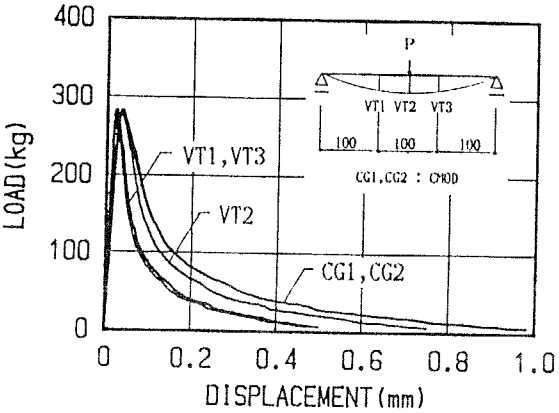
(1) 試験体 No. 1



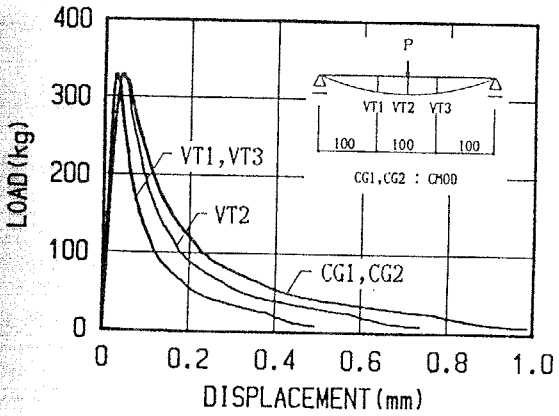
(2) 試験体 No. 2



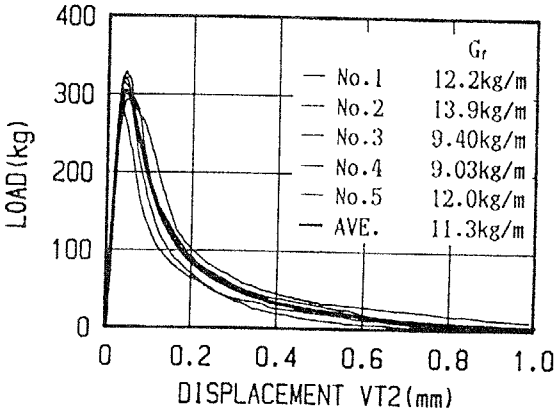
(3) 試験体 No. 3



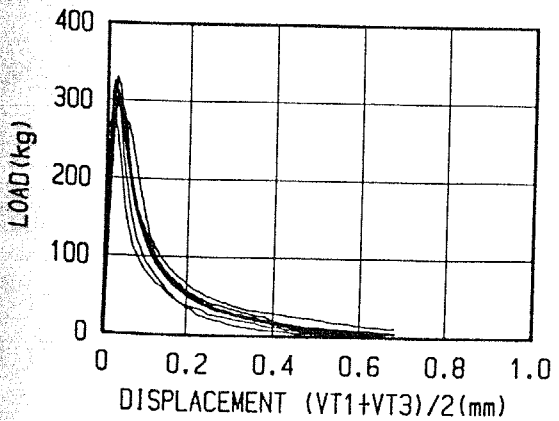
(4) 試験体 No. 4



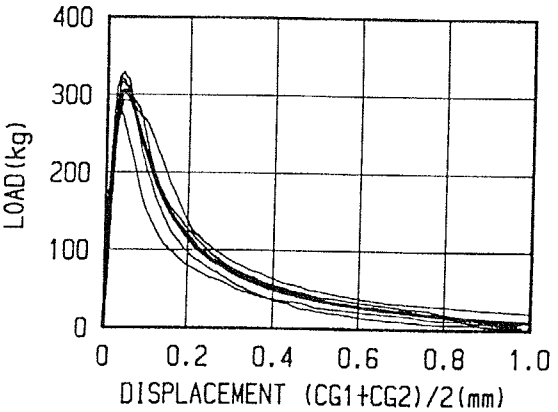
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

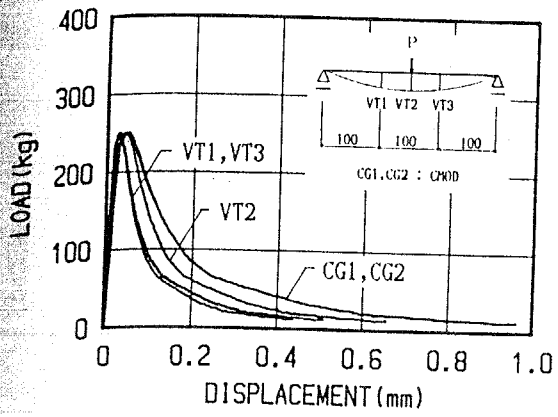


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

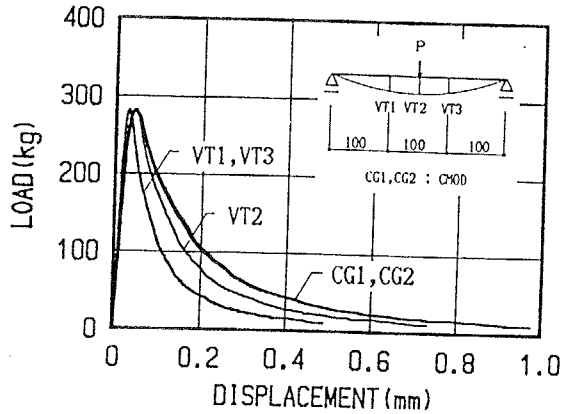


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

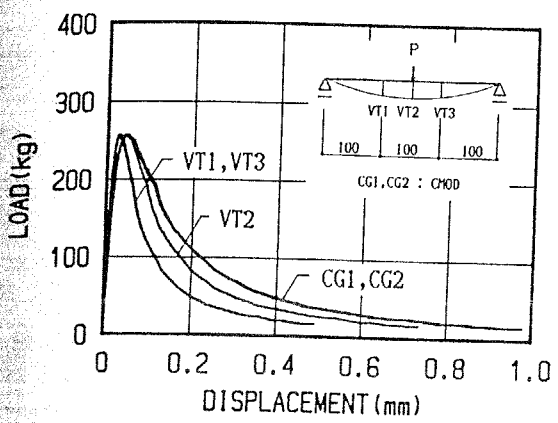
図－3.33 荷重－変位曲線：3PL20-1シリーズ（1年試験）



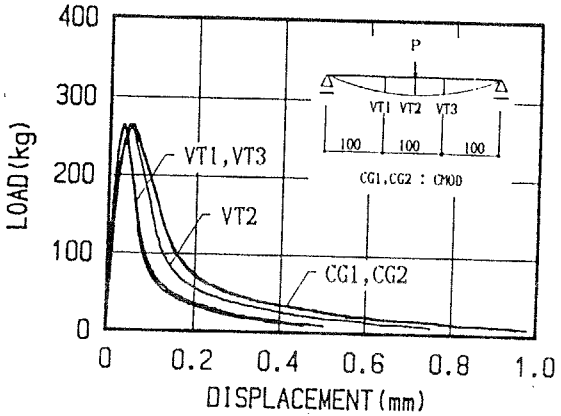
(1) 試験体 No. 1



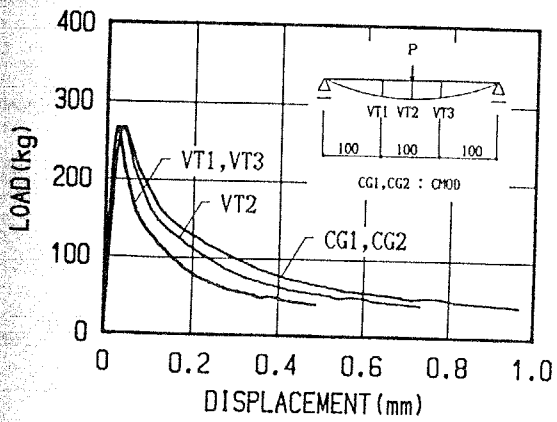
(2) 試験体 No. 2



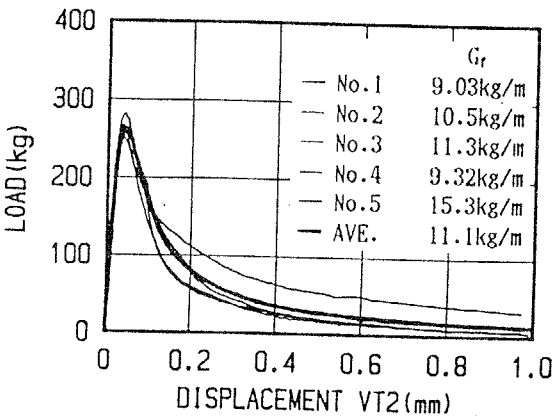
(3) 試験体 No. 3



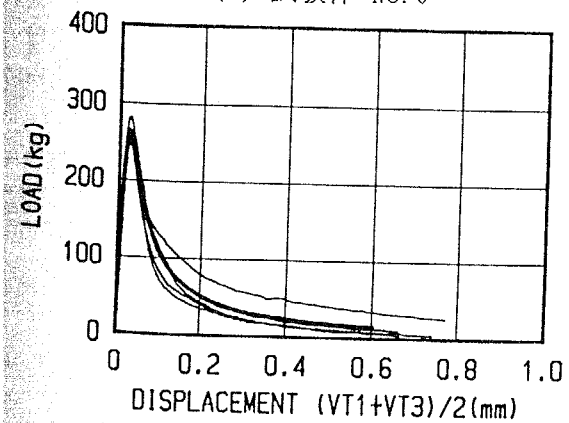
(4) 試験体 No. 4



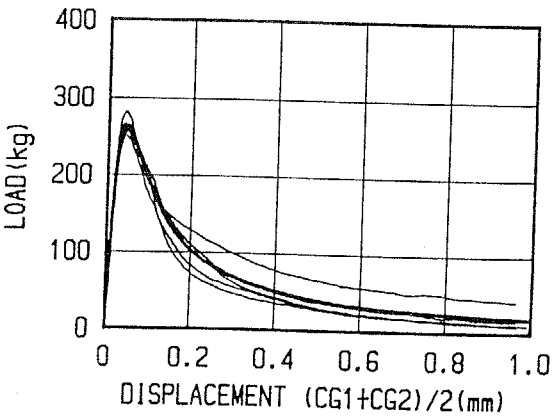
(5) 試験体 No. 5



(6) 荷重－変位 VT2

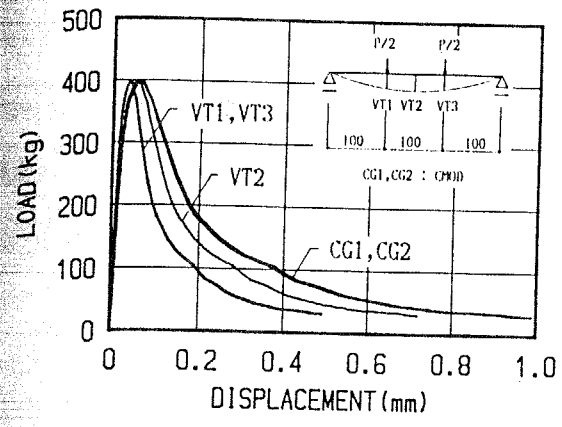


(7) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

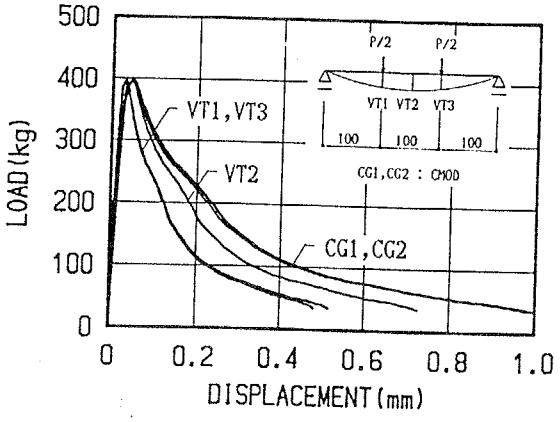


(8) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

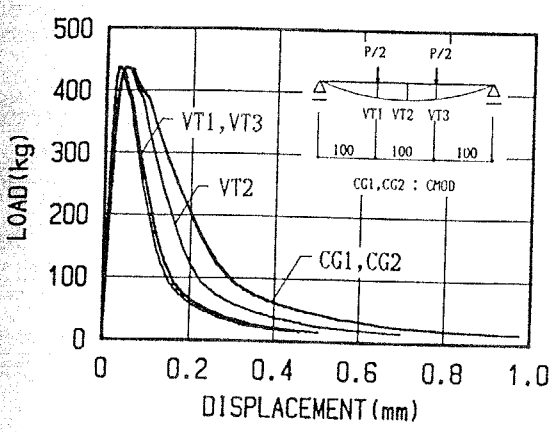
図－3.34 荷重－変位曲線：3PH20-1シリーズ（1年試験）



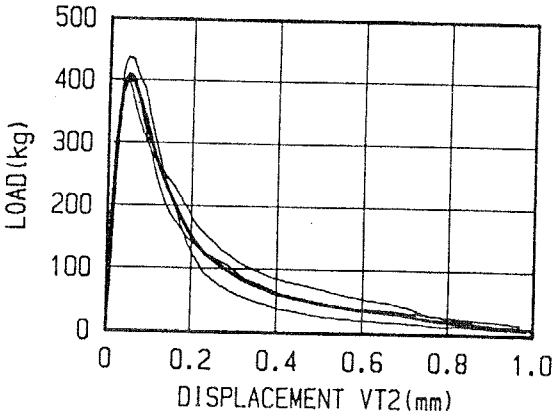
(1) 試験体 No. 1



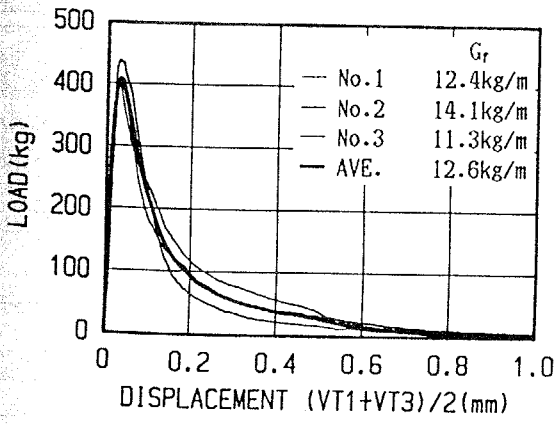
(2) 試験体 No. 2



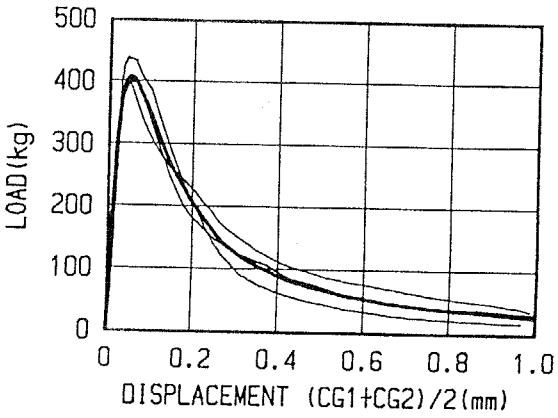
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

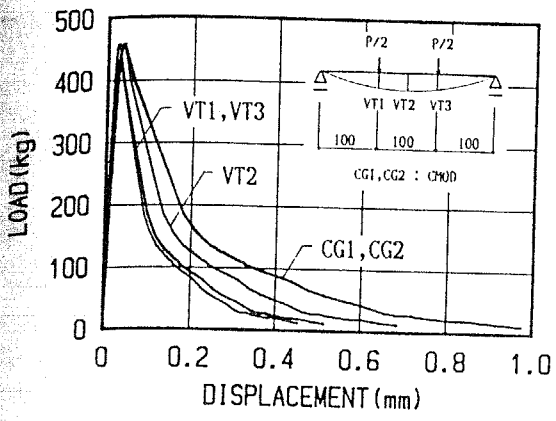


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

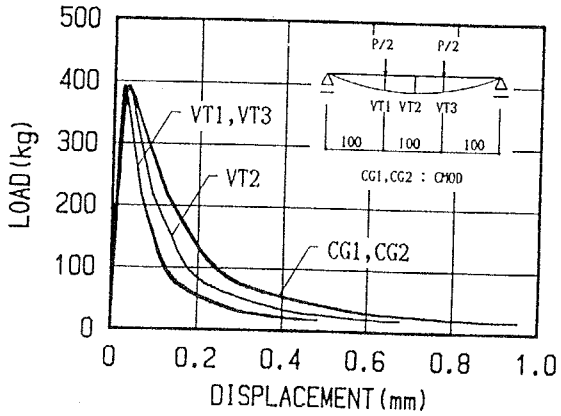


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

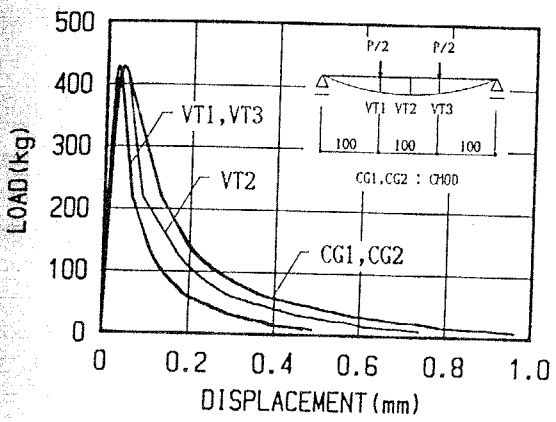
図－3.35 荷重－変位曲線：4PM20-7シリーズ（1年試験）



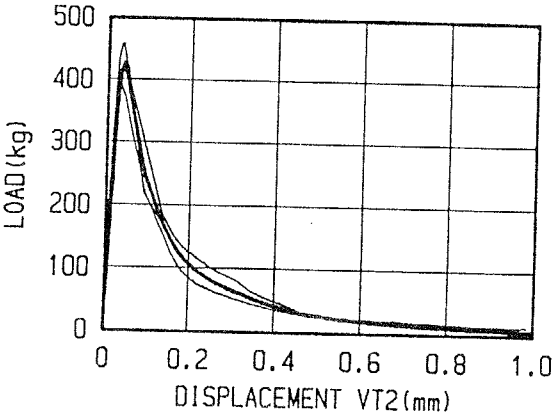
(1) 試験体 No. 1



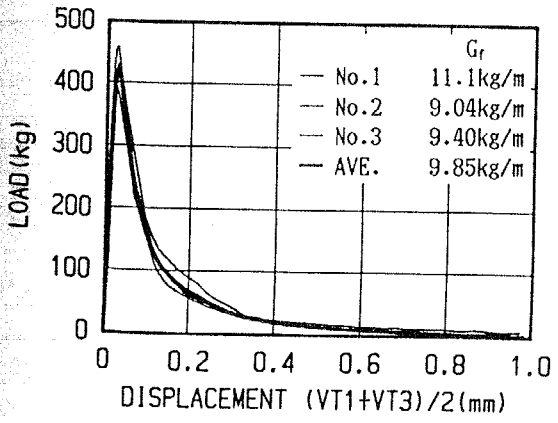
(2) 試験体 No. 2



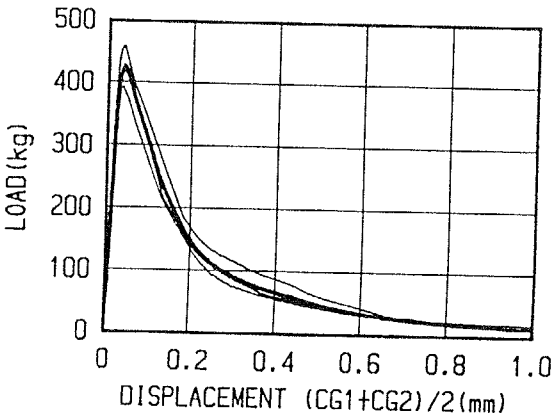
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

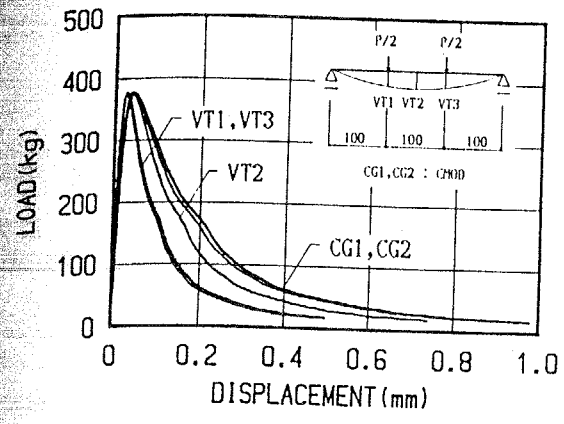


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

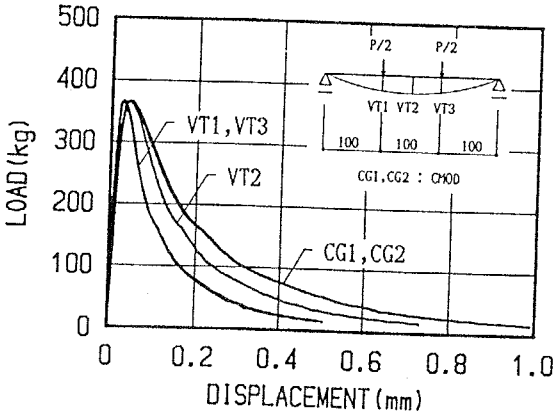


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

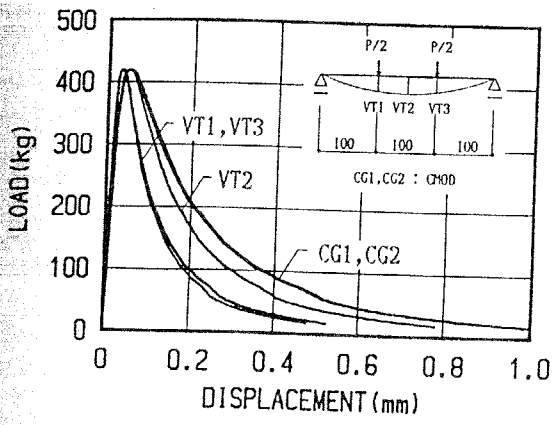
図－3.36 荷重－変位曲線：4PM20-8シリーズ（1年試験）



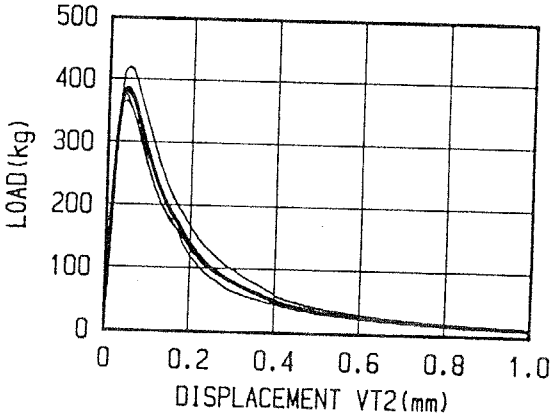
(1) 試験体 No. 1



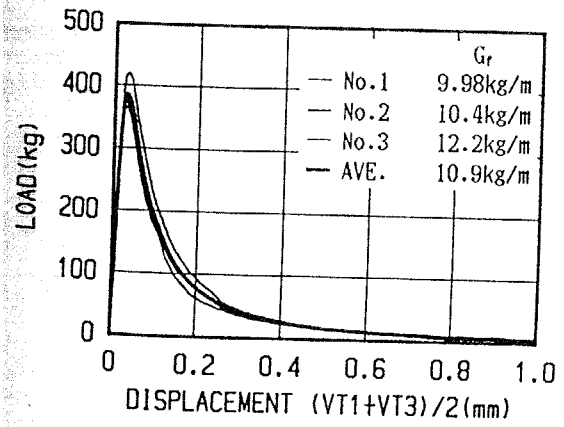
(2) 試験体 No. 2



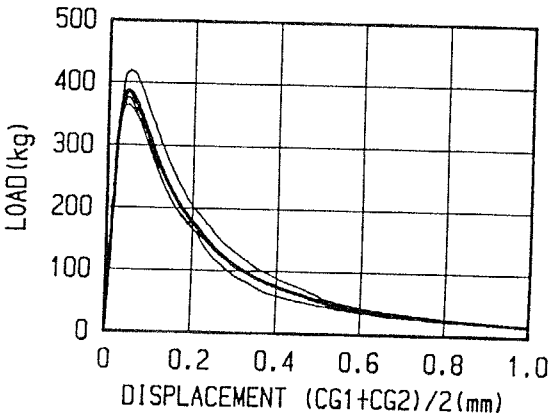
(3) 試験体 No. 3



(4) 荷重－変位 VT2

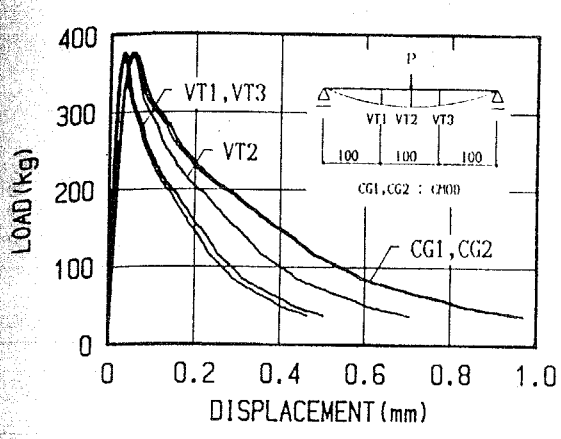


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

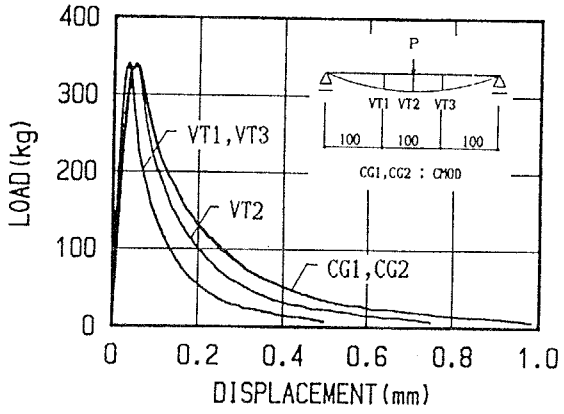


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

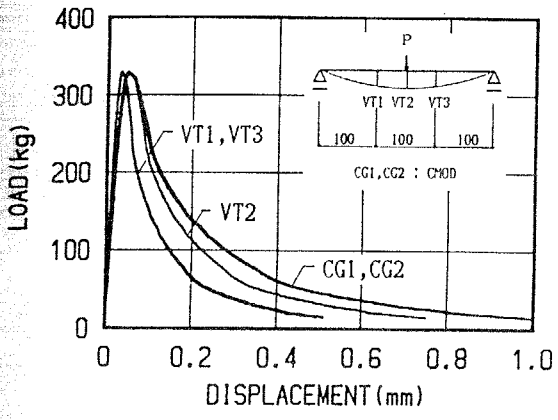
図－3.37 荷重－変位曲線：4PH20-2シリーズ（1年試験）



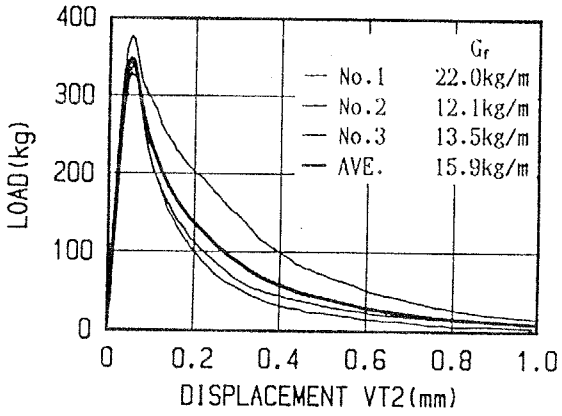
(1) 試験体 No.1



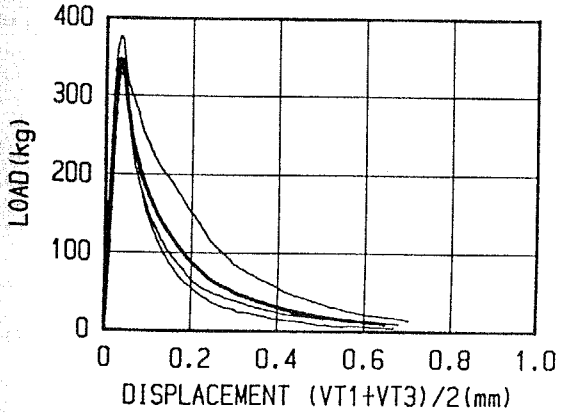
(2) 試験体 No.2



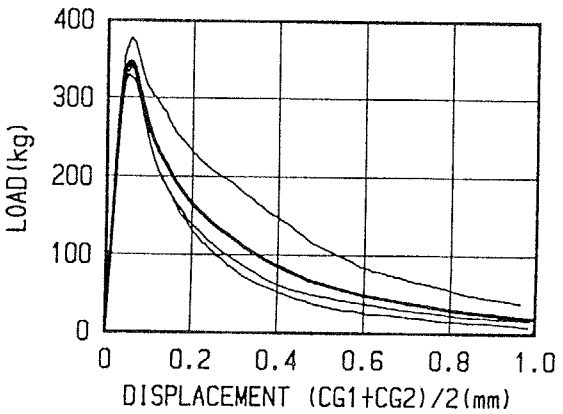
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

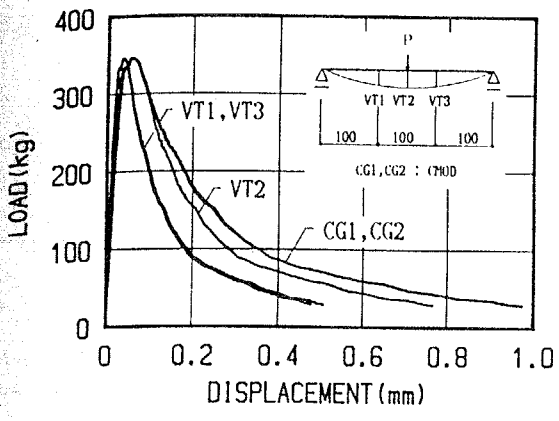


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

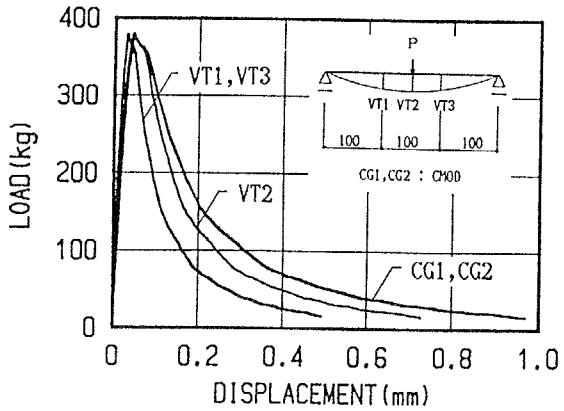


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

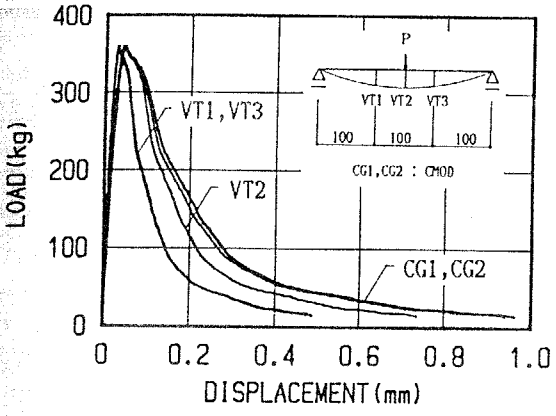
図－3.38 荷重－変位曲線：3DM20-7シリーズ（1年試験）



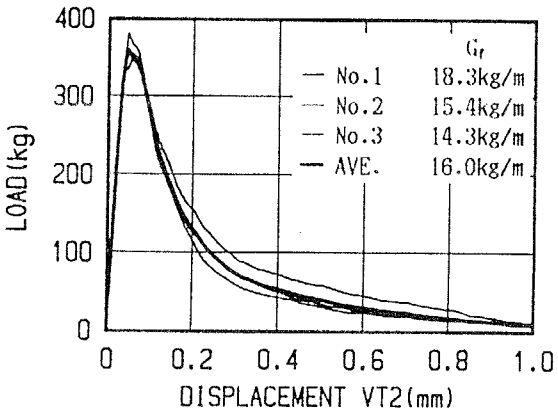
(1) 試験体 No.1



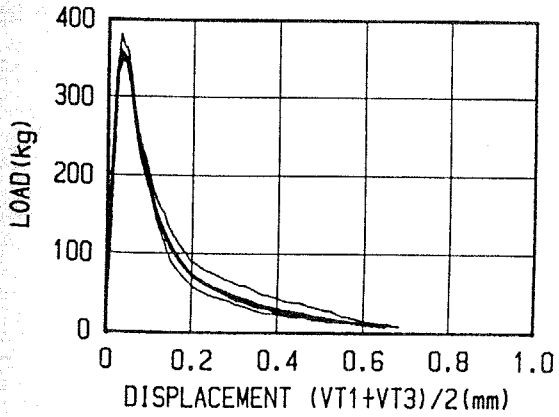
(2) 試験体 No.2



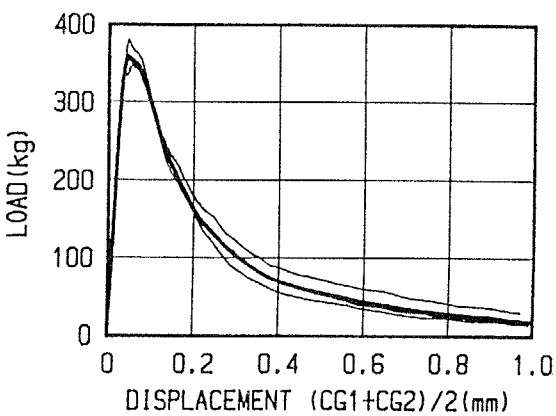
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

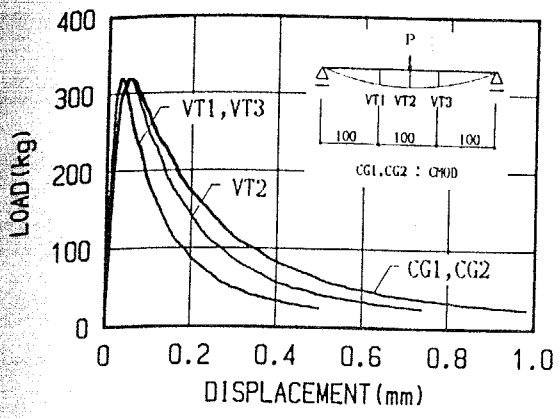


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

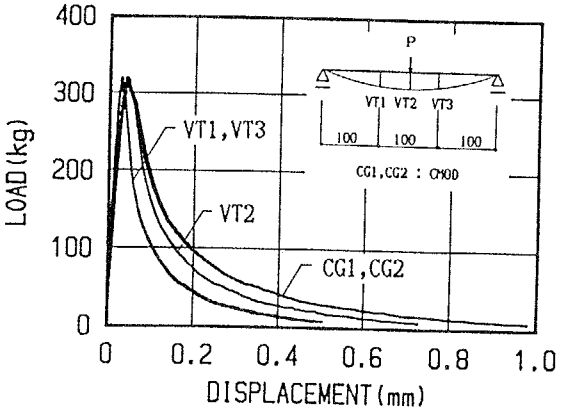


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

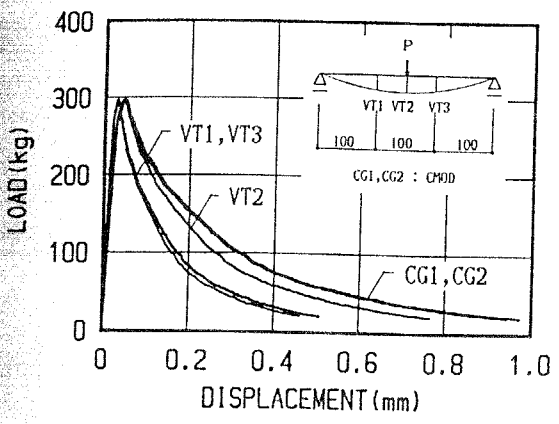
図－3.39 荷重－変位曲線：3DM20-8シリーズ（1年試験）



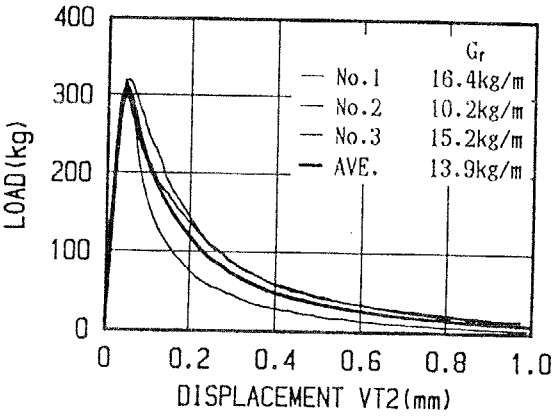
(1) 試験体 No.1



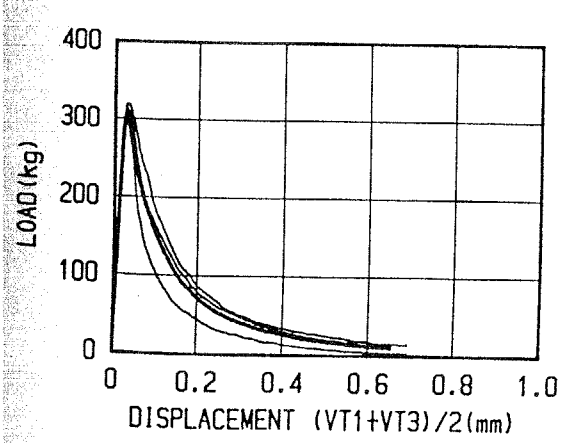
(2) 試験体 No.2



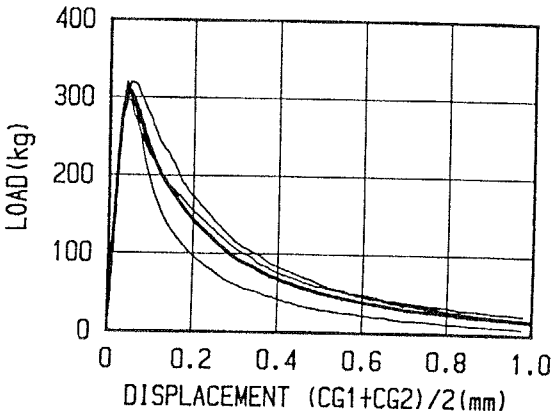
(3) 試験体 No.3



(4) 荷重－変位 VT2

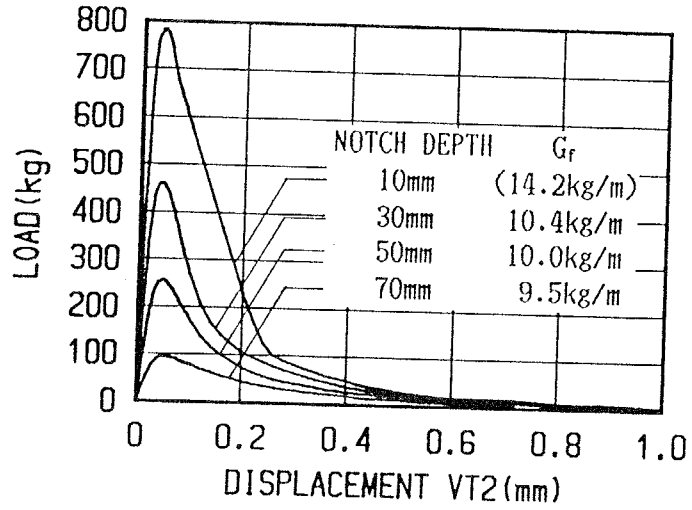


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

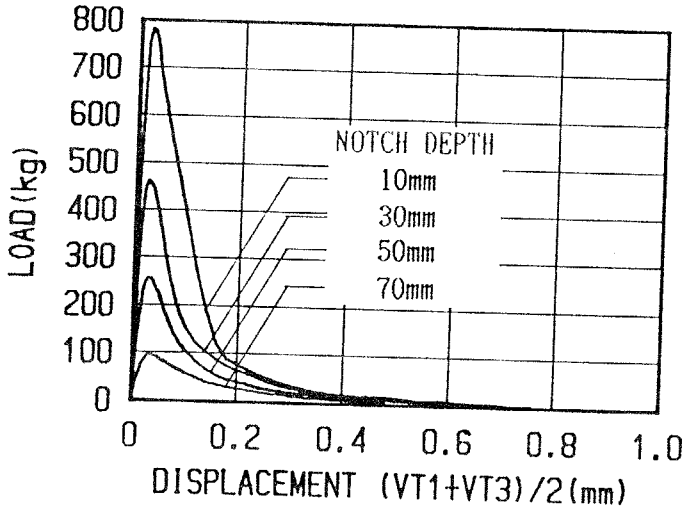


(6) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

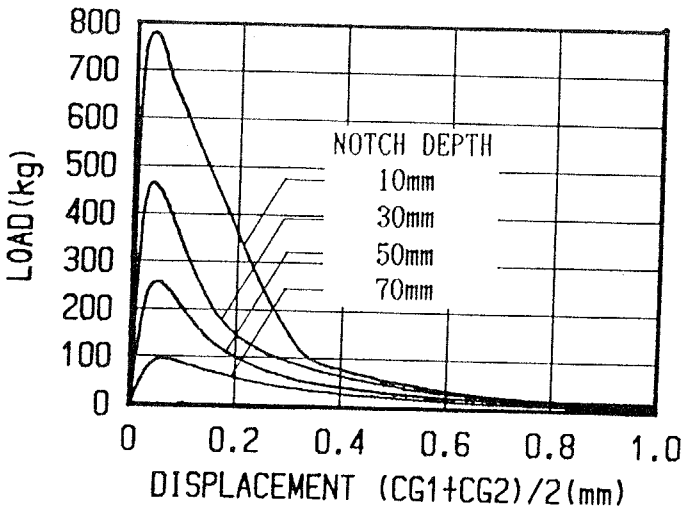
図－3.40 荷重－変位曲線：3DH20-2シリーズ（1年試験）



(1) 荷重－変位 VT2

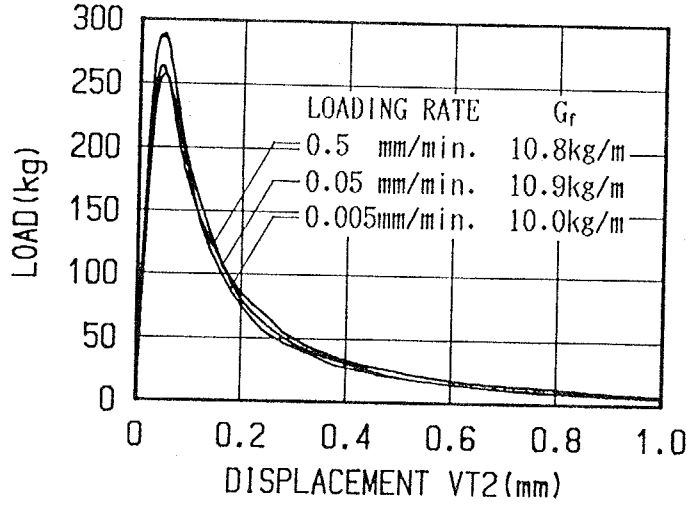


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

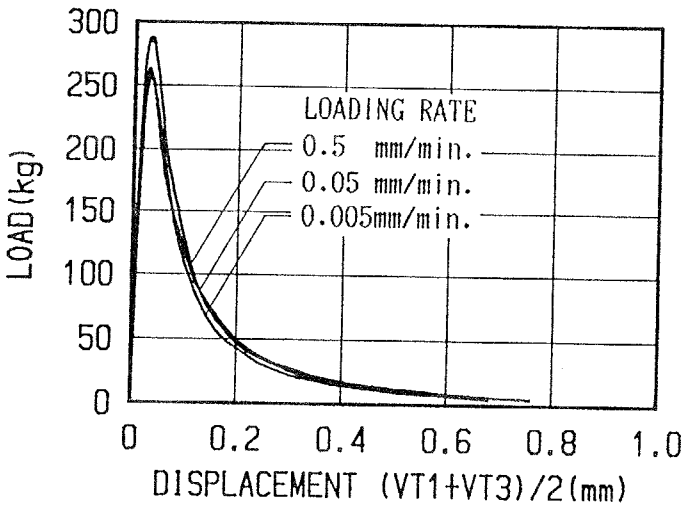


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

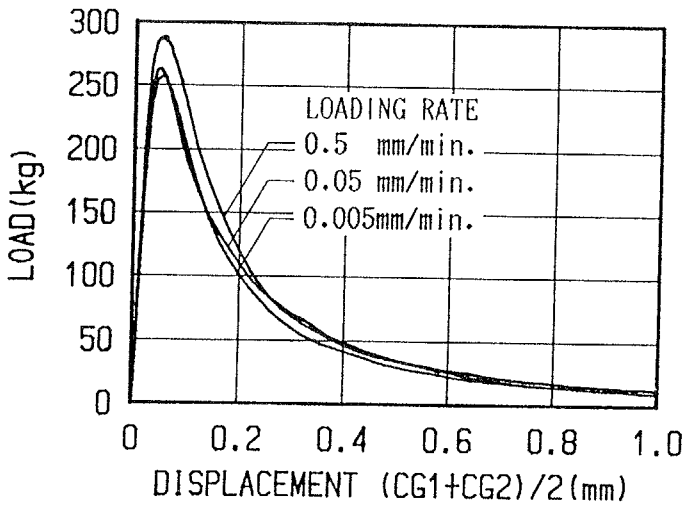
図－3.41 ノッチ深さが荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）



(1) 荷重－変位 VT2

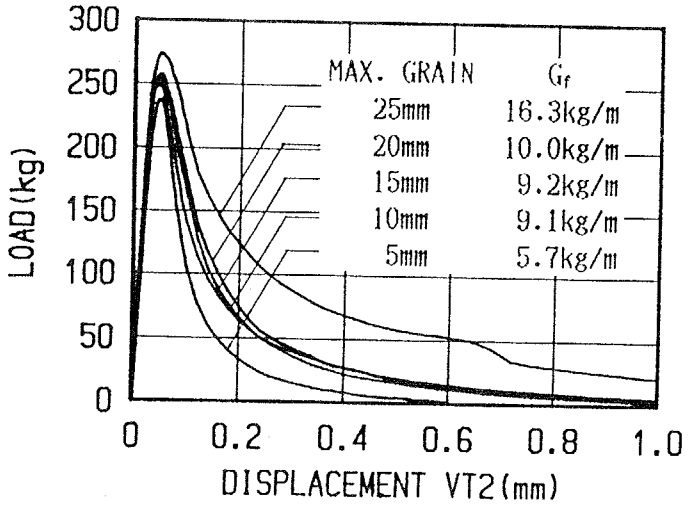


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

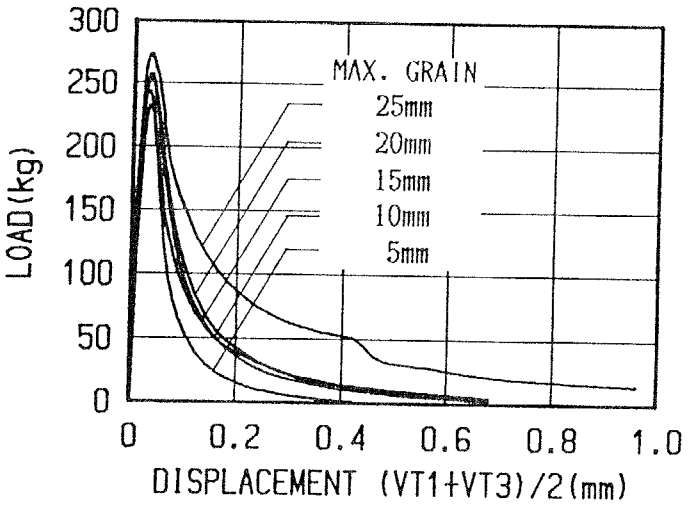


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

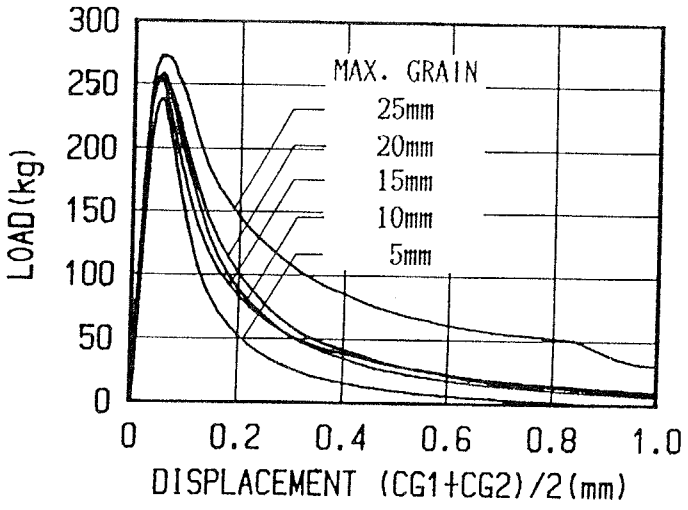
図－3.42 載荷速度が荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）



(1) 荷重－変位 VT2

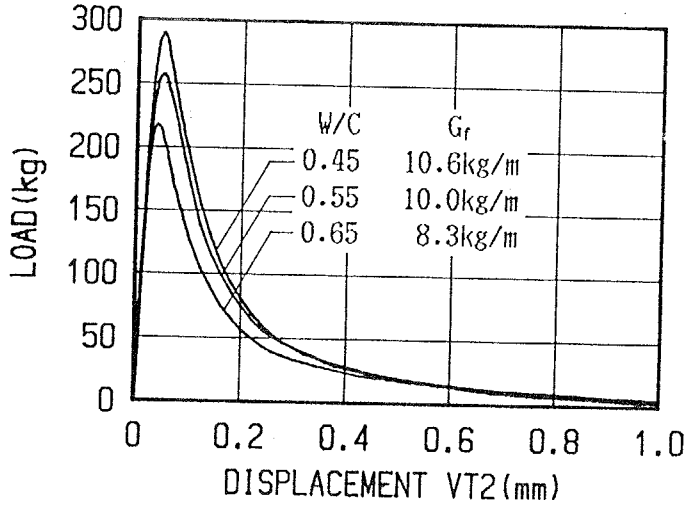


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

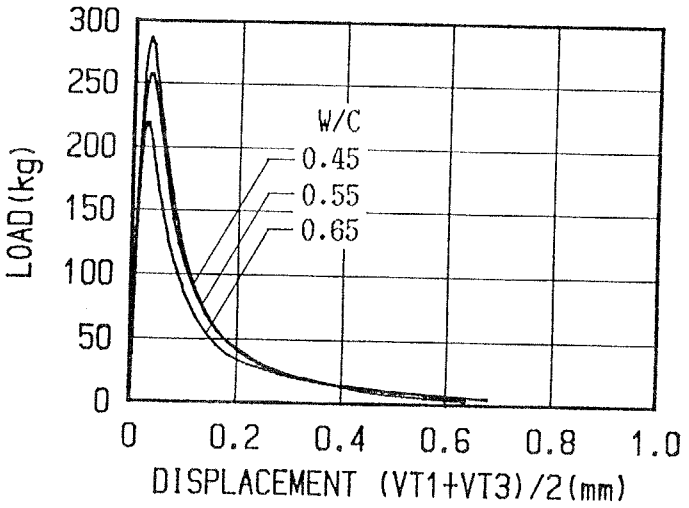


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

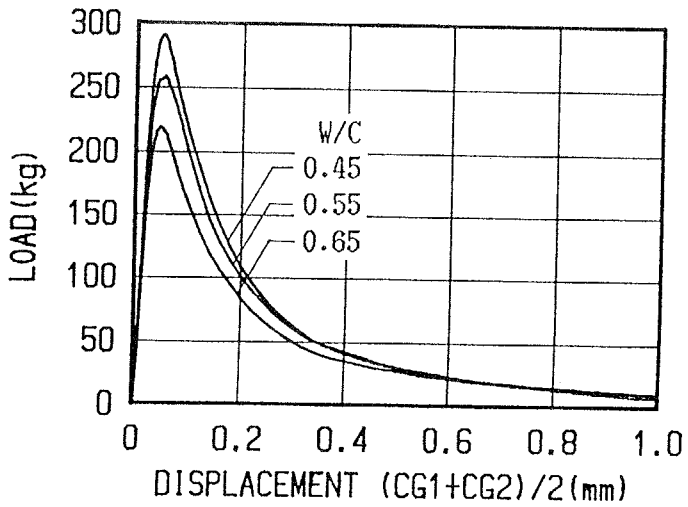
図－3.43　最大骨材寸法が荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）



(1) 荷重－変位 VT2

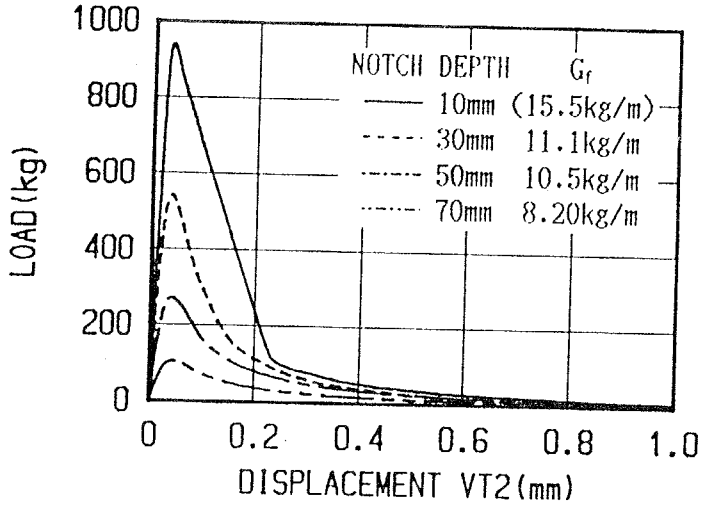


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

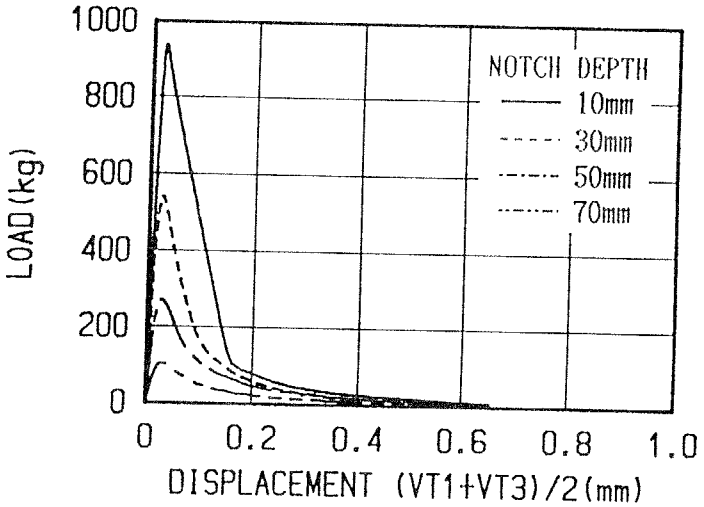


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

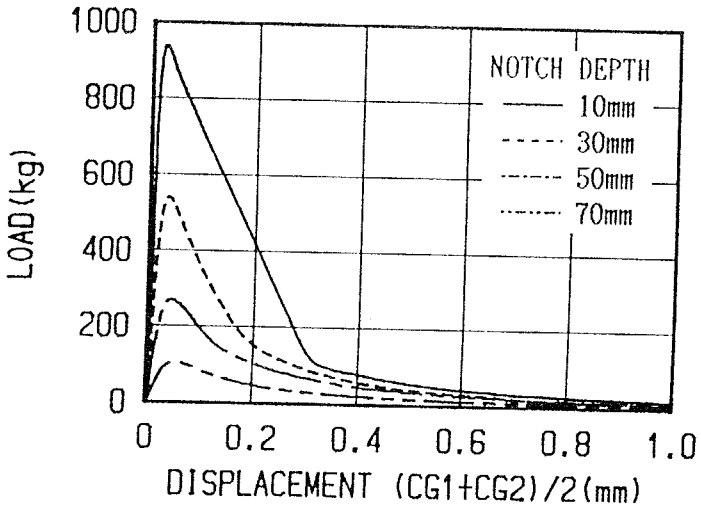
図－3.44　水セメント比が荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）



(1) 荷重－変位 VT2

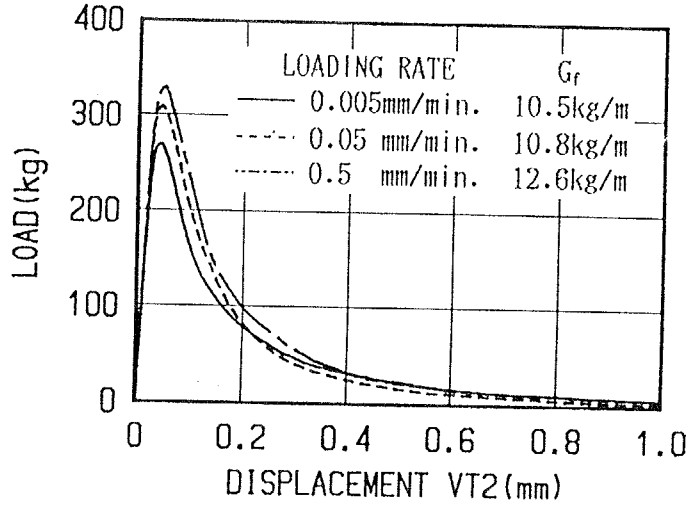


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

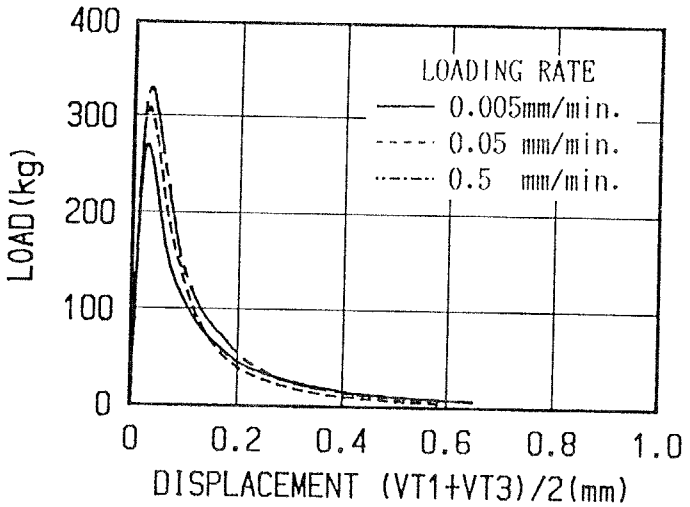


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

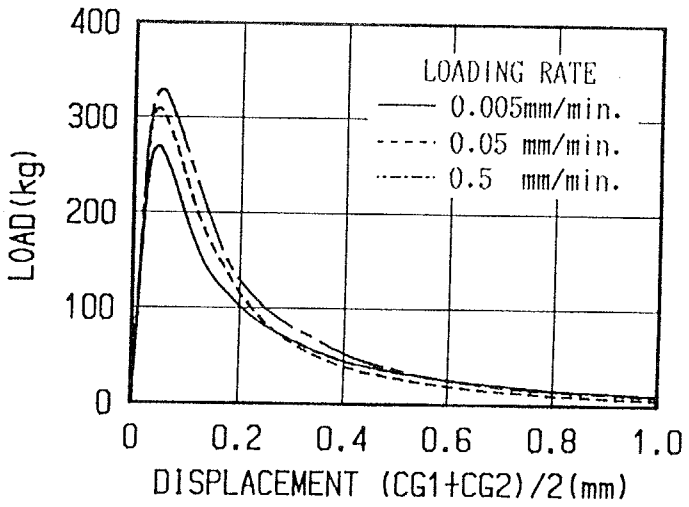
図－3.45 ノッチ深さが荷重－変位曲線に及ぼす影響（１年試験）



(1) 荷重－変位 VT2

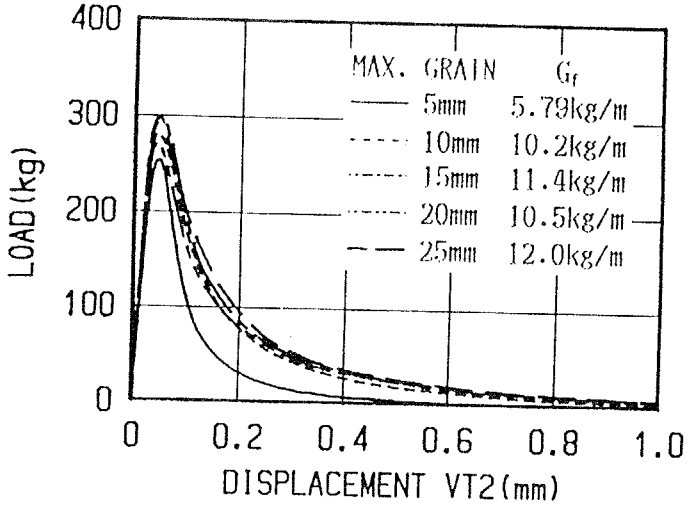


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

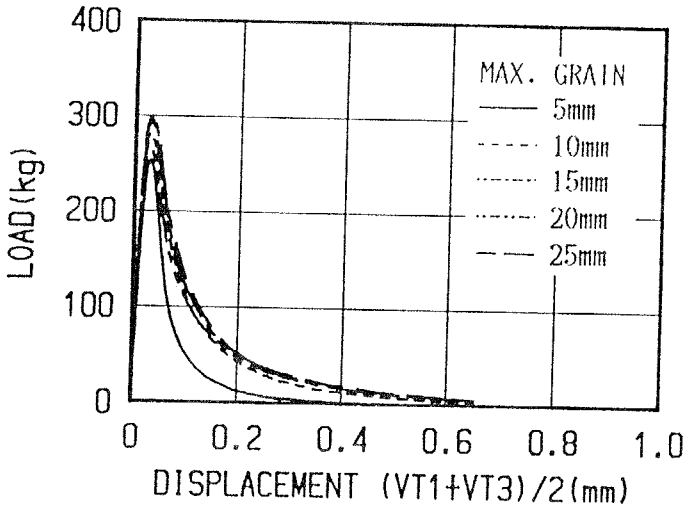


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

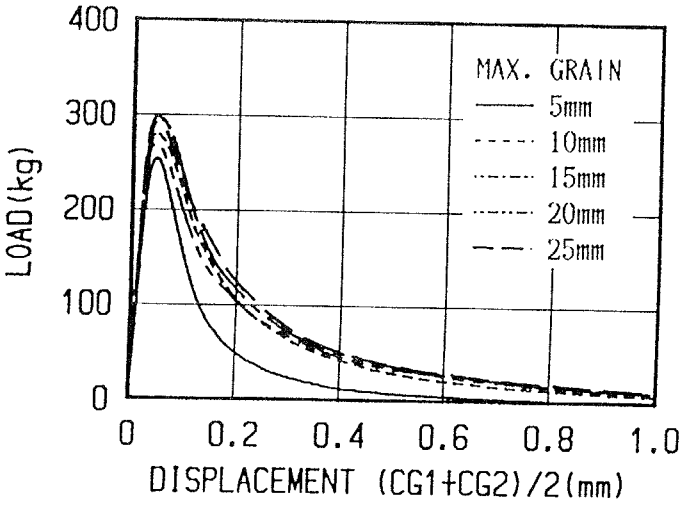
図－3.46　載荷速度が荷重－変位曲線に及ぼす影響（１年試験）



(1) 荷重－変位 VT2

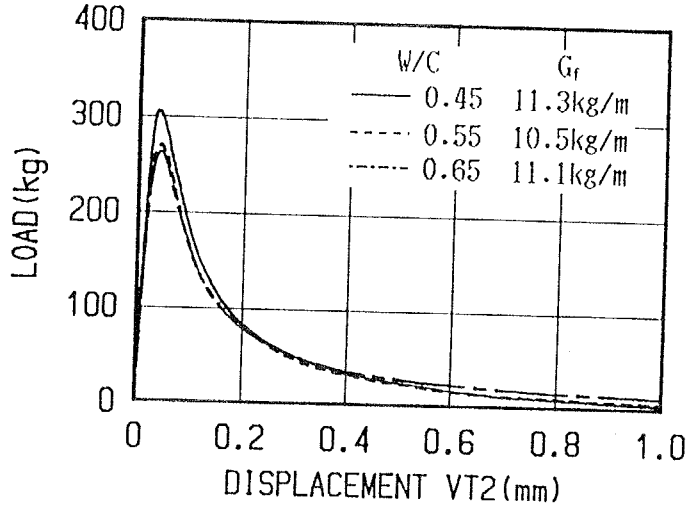


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

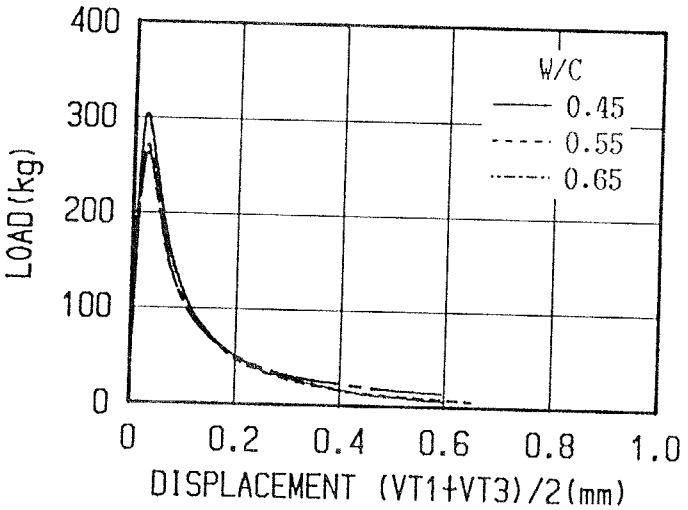


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

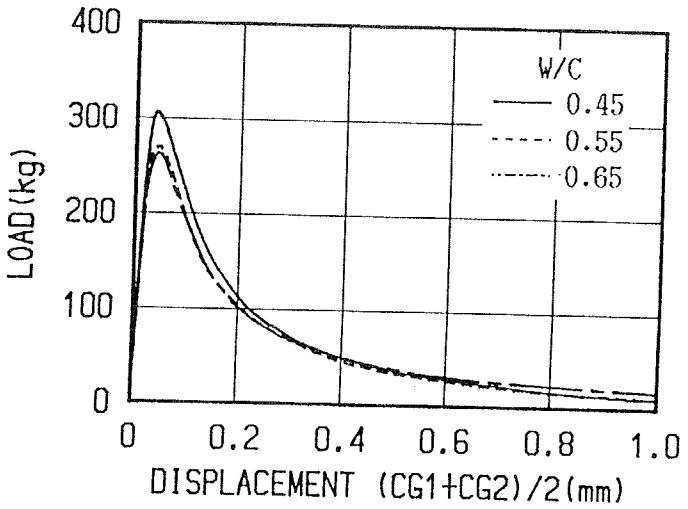
図－3.47　最大骨材寸法が荷重－変位曲線に及ぼす影響（１年試験）



(1) 荷重－変位 VT2

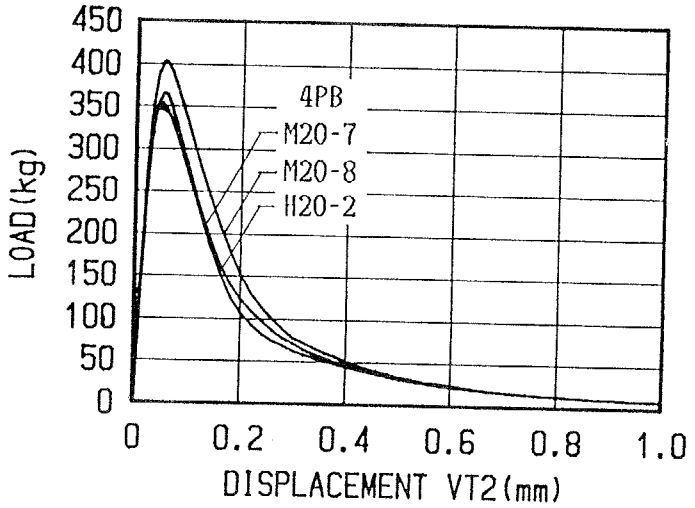


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

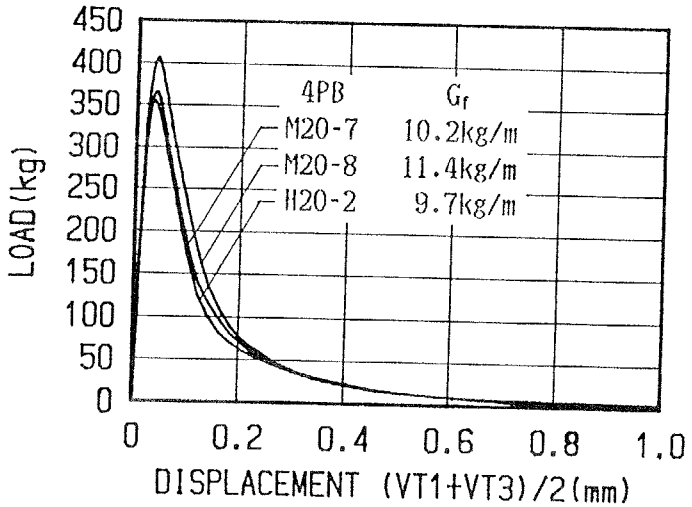


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

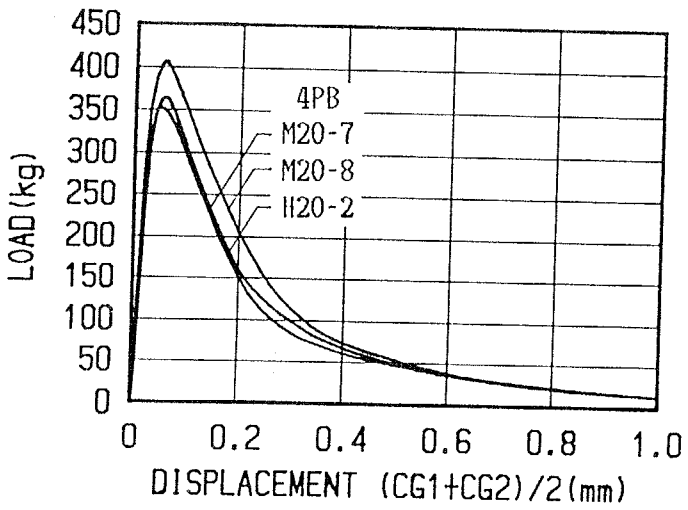
図－3.48 水セメント比が荷重－変位曲線に及ぼす影響（1年試験）



(1) 荷重－変位 VT2

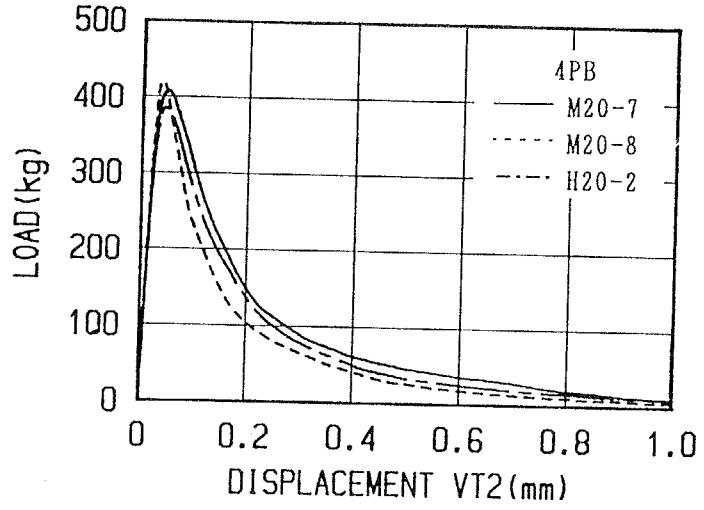


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

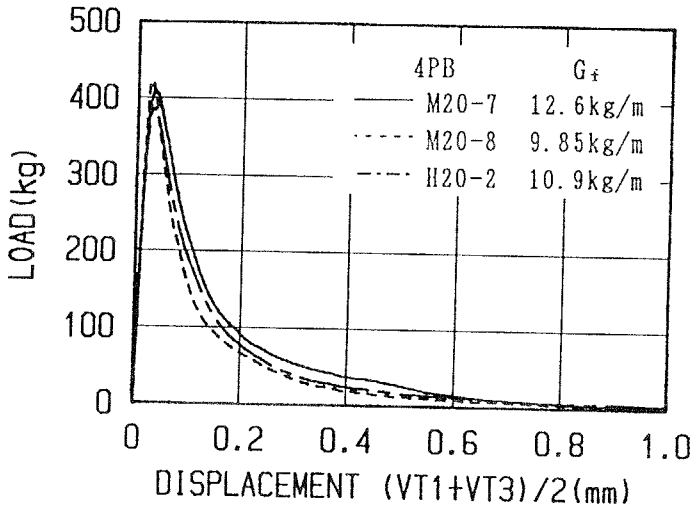


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

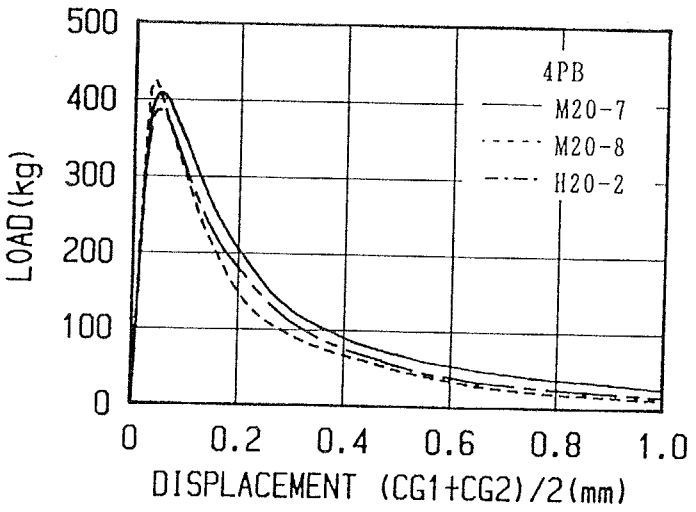
図－3.49　4点曲げによる荷重－変位曲線（4週試験）



(1) 荷重－変位 VT2

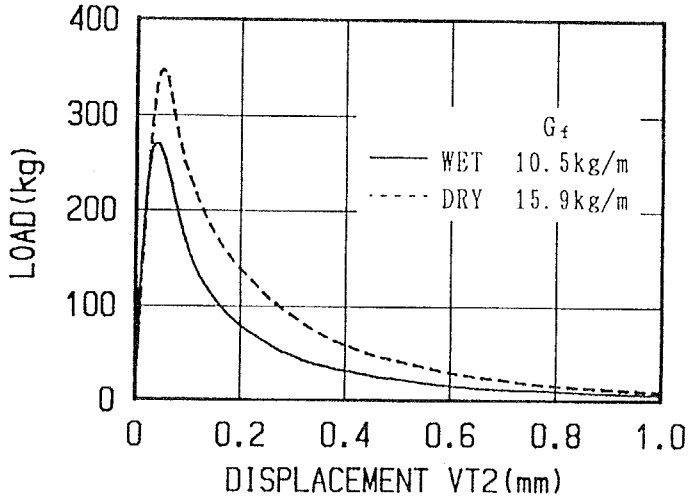


(2) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

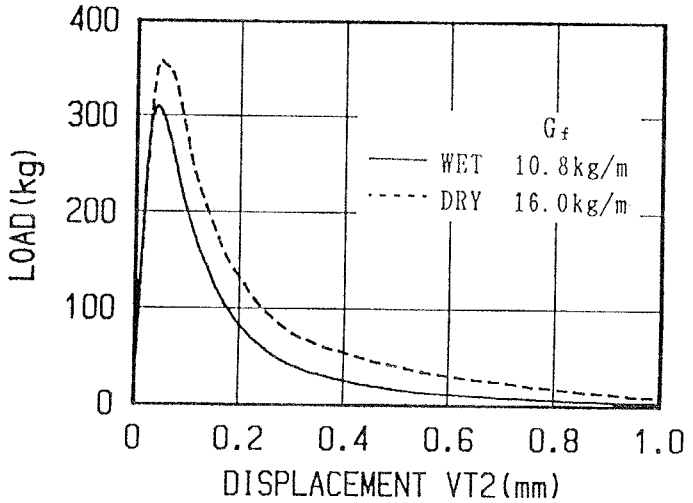


(3) 荷重－変位 (CG1+CG2)/2

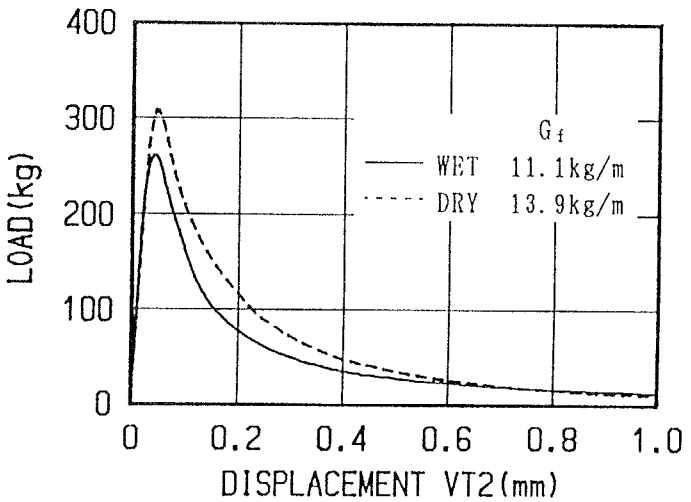
図－3.50　4点曲げによる荷重－変位曲線（1年試験）



(1) 3PM20-3シリーズ（水中養生）と3DM20-7シリーズ（気中養生）

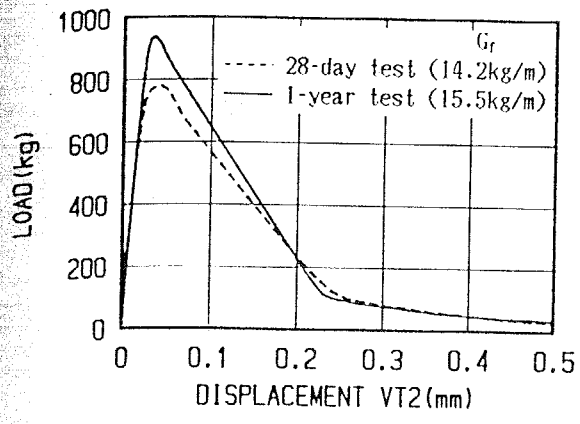


(2) 3PM20-5シリーズ（水中養生）と3DM20-8シリーズ（気中養生）

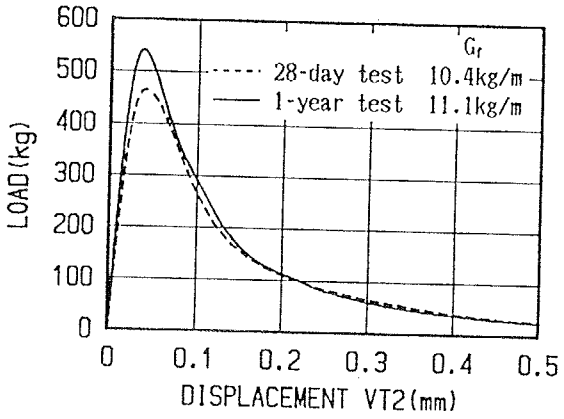


(3) 3PH20-1シリーズ（水中養生）と3DH20-2シリーズ（気中養生）

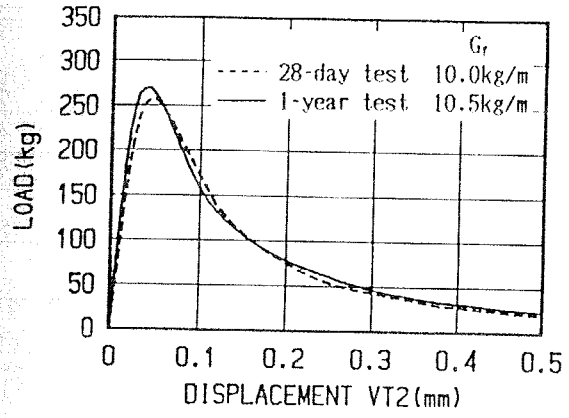
図－3.51　養生条件が荷重－荷重点変位曲線に及ぼす影響（１年試験）



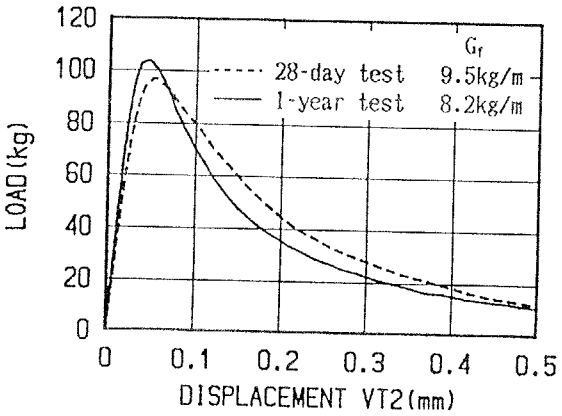
(1) 3PM20-1シリーズ



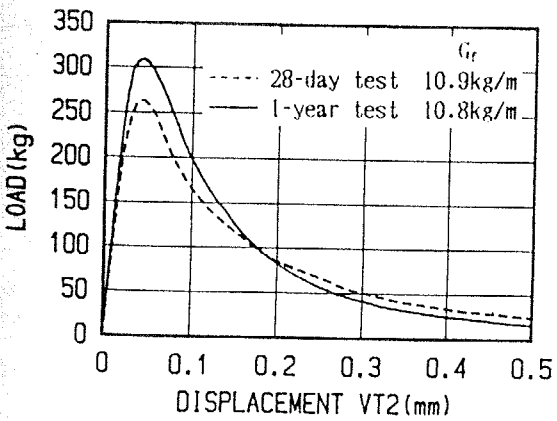
(2) 3PM20-2シリーズ



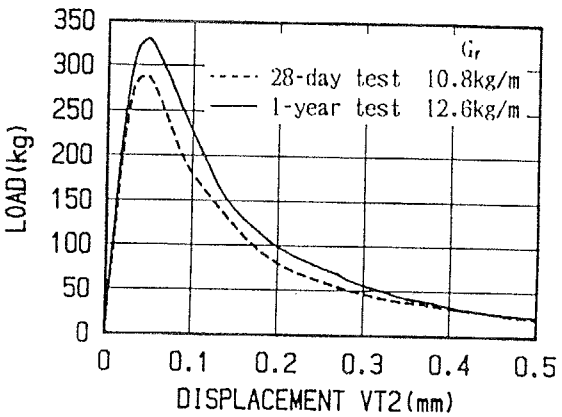
(3) 3PM20-3シリーズ



(4) 3PM20-4シリーズ

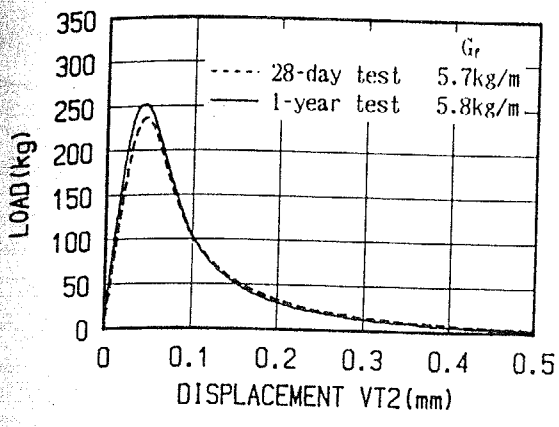


(5) 3PM20-5シリーズ

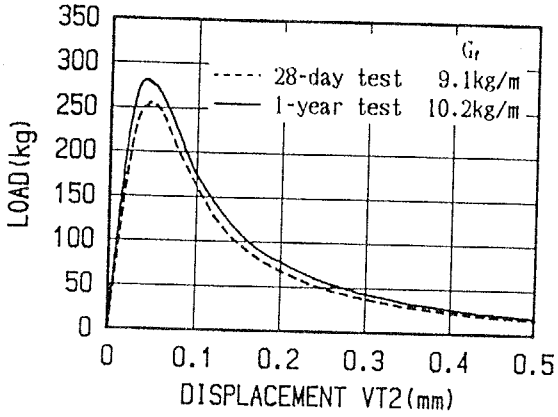


(6) 3PM20-6シリーズ

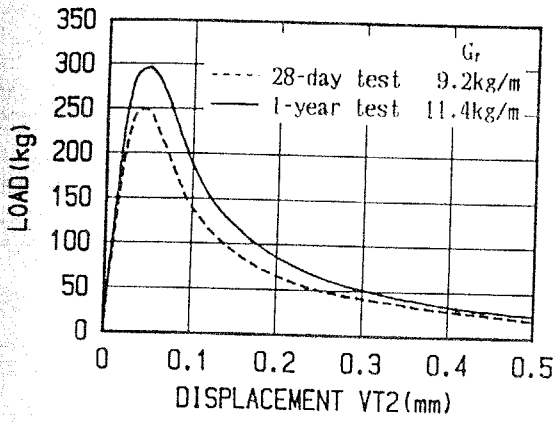
図－3.52　材令が荷重－荷重点変位曲線に及ぼす影響（４週と１年試験、その１）



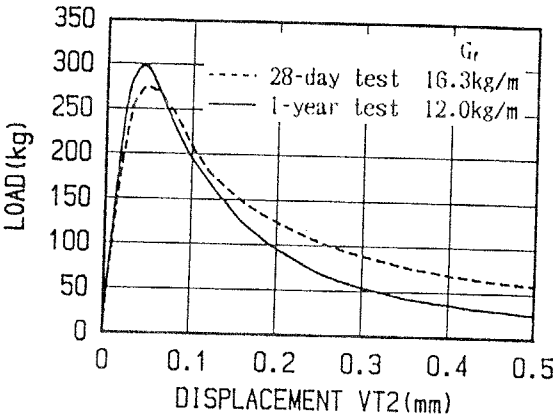
(7) 3PM05-1シリーズ



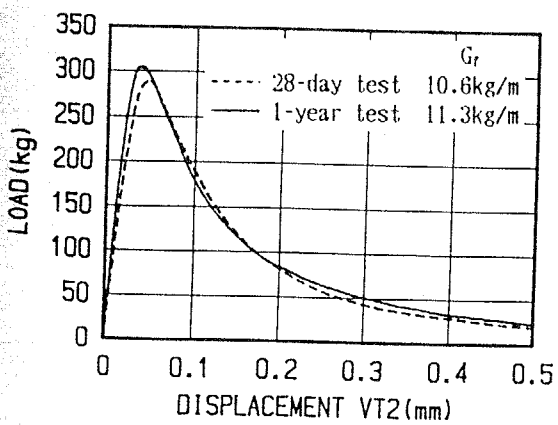
(8) 3PM10-1シリーズ



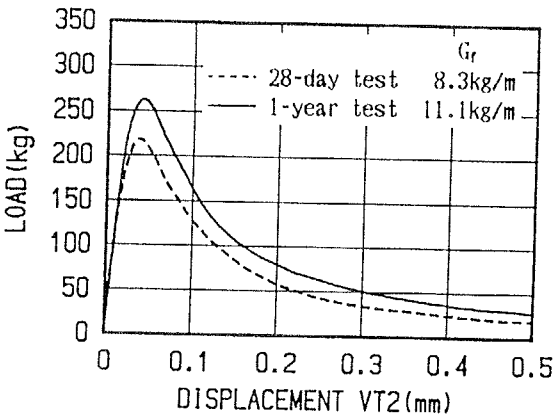
(9) 3PM15-1シリーズ



(10) 3PM25-1シリーズ

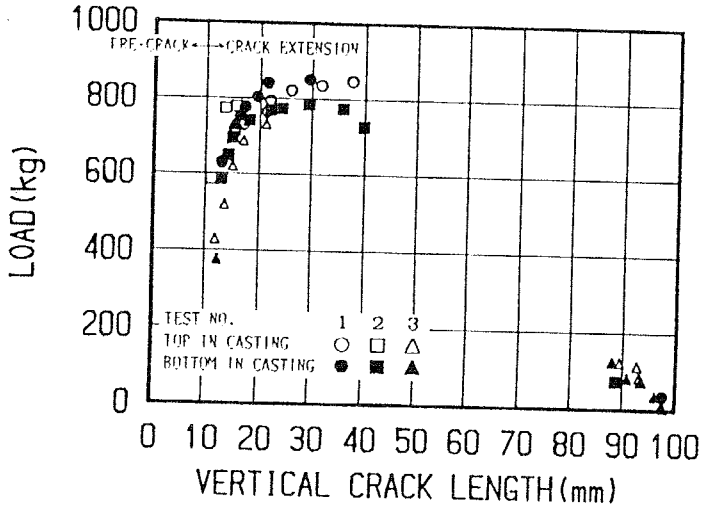


(11) 3PL20-1シリーズ

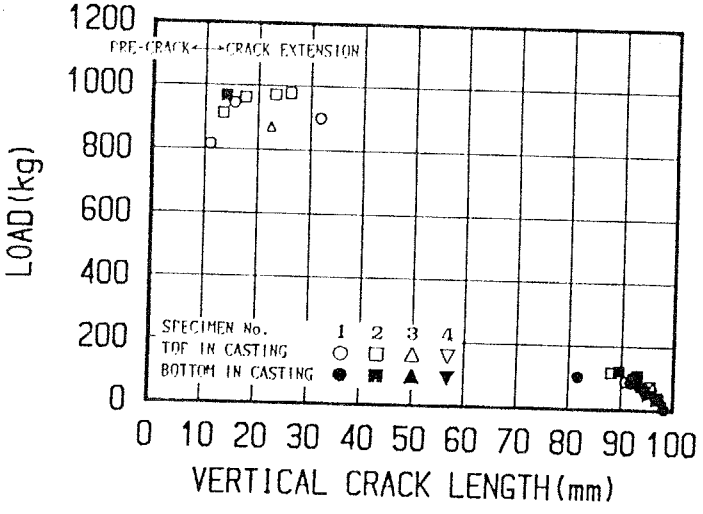


(12) 3PH20-1シリーズ

図－3.52　材令が荷重－荷重点変位曲線に及ぼす影響（４週と１年試験、その２）

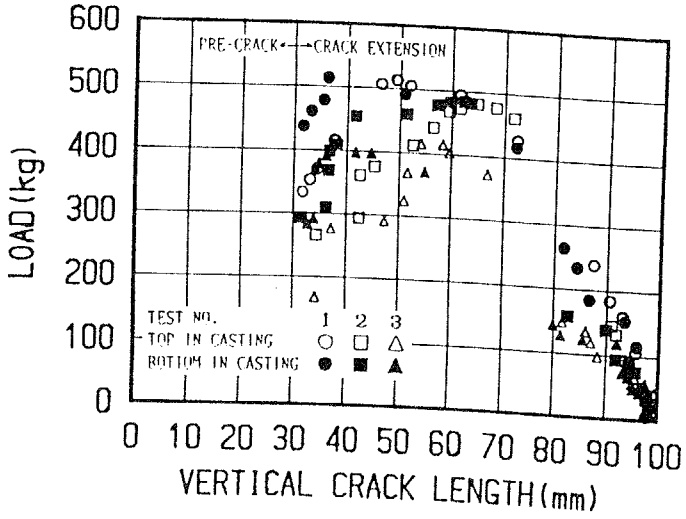


(1) 4週試験

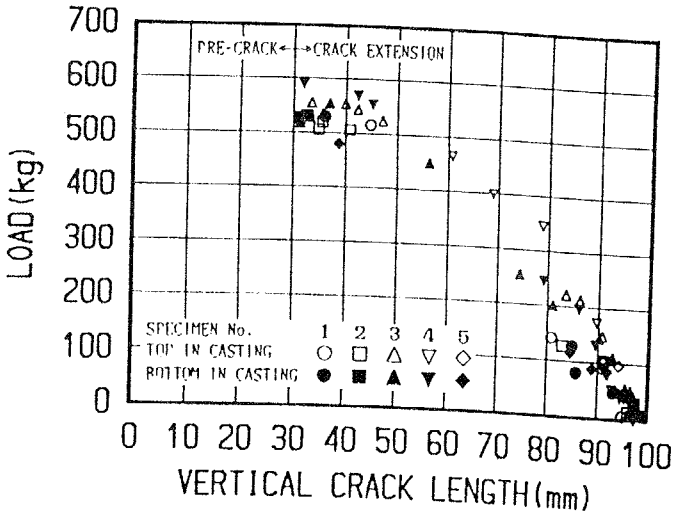


(2) 1年試験

図－3.53 荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM20-1シリーズ

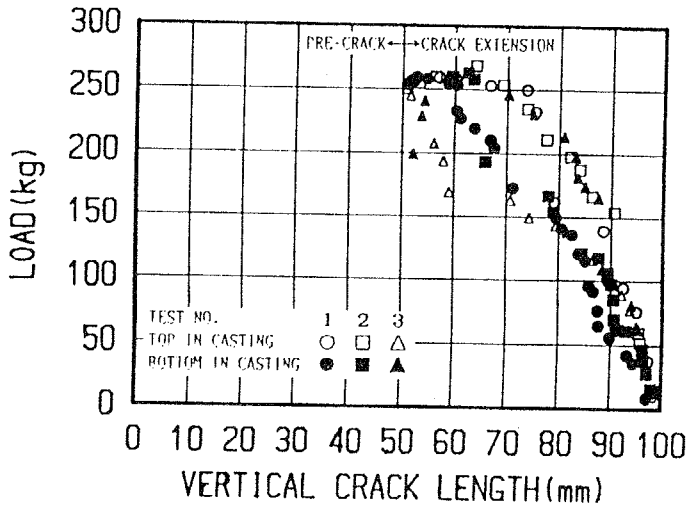


(1) 4週試験

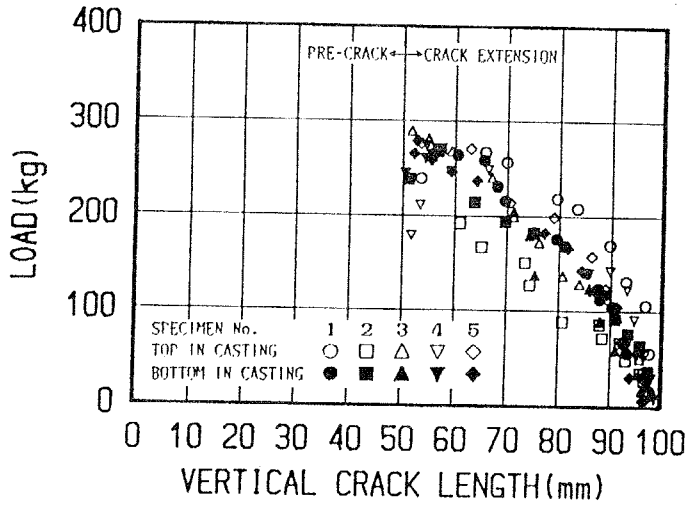


(2) 1年試験

図－3.54　荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM20-2シリーズ

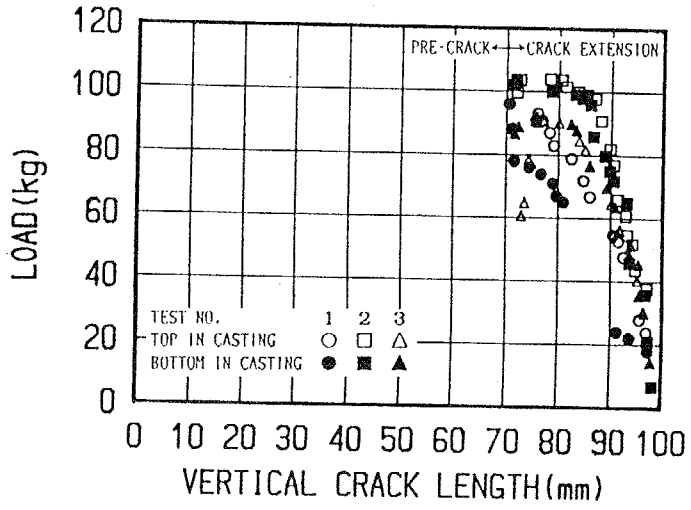


(1) 4週試験

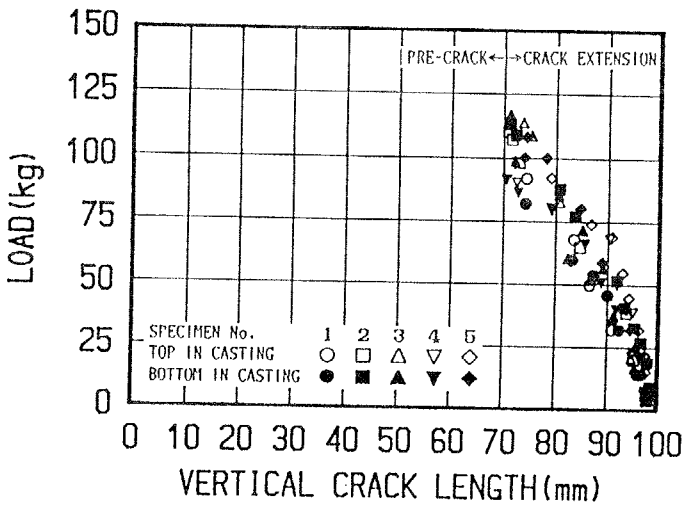


(2) 1年試験

図－3.55　荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM20-3シリーズ

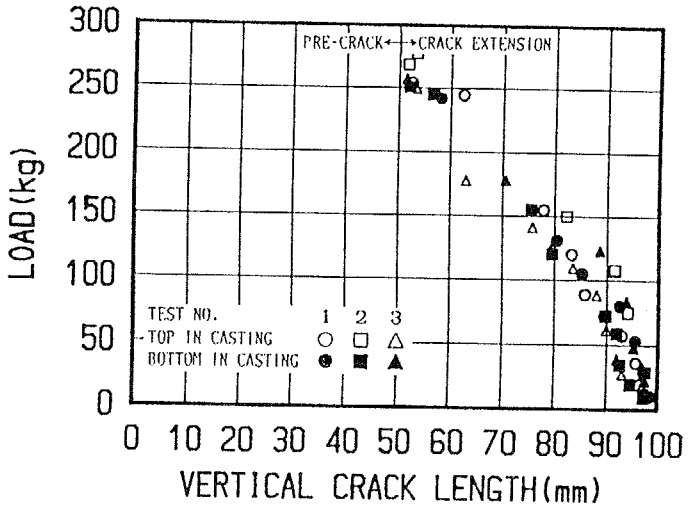


(1) 4週試験

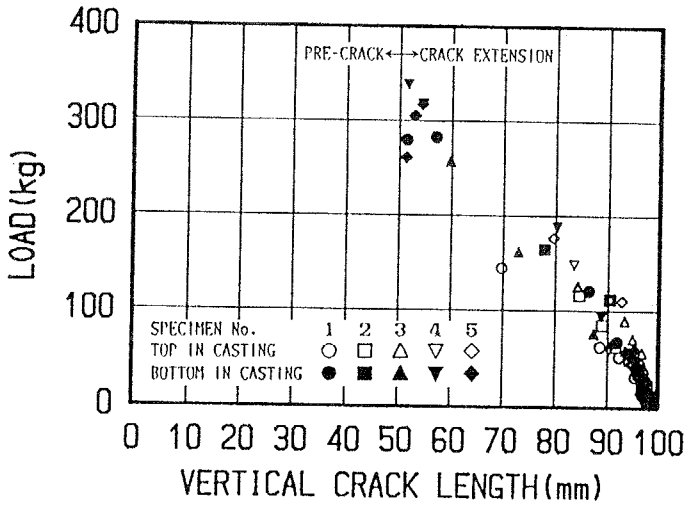


(2) 1年試験

図－3.56　荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM20-4シリーズ

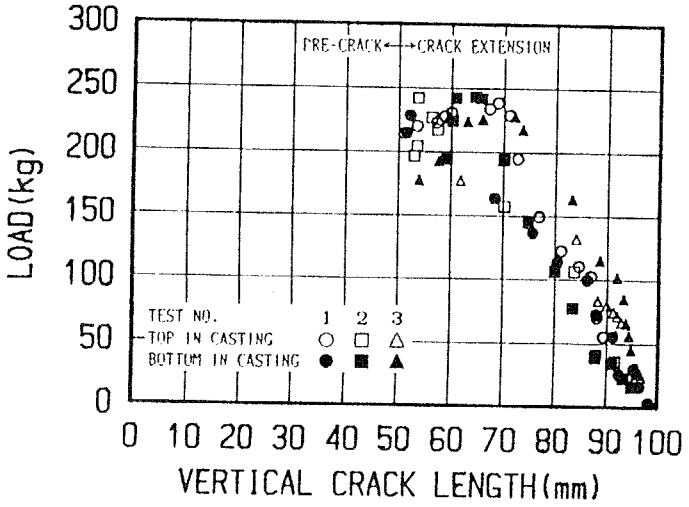


(1) 4週試験

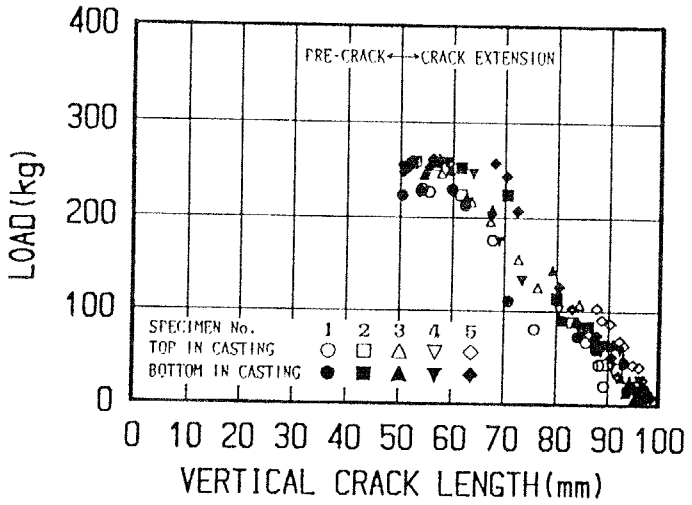


(2) 1年試験

図－3.57　荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM20-5シリーズ

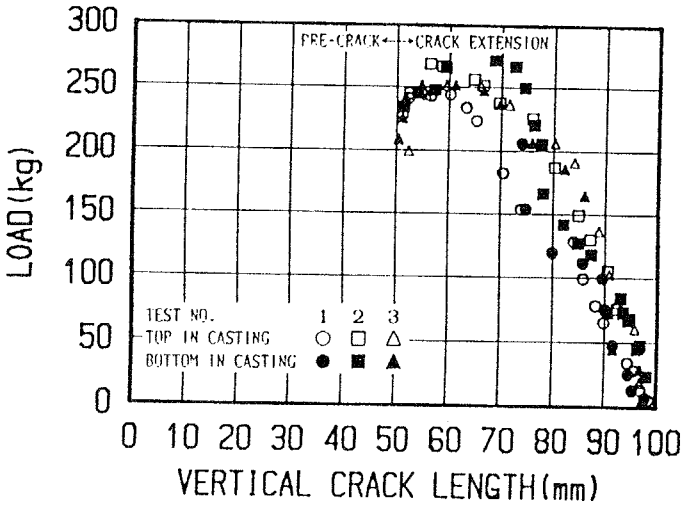


(1) 4週試験

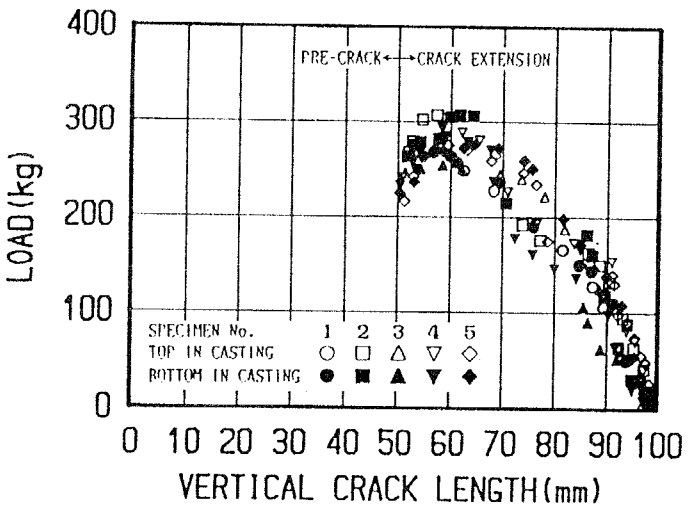


(2) 1年試験

図－3.58　荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM05-1シリーズ

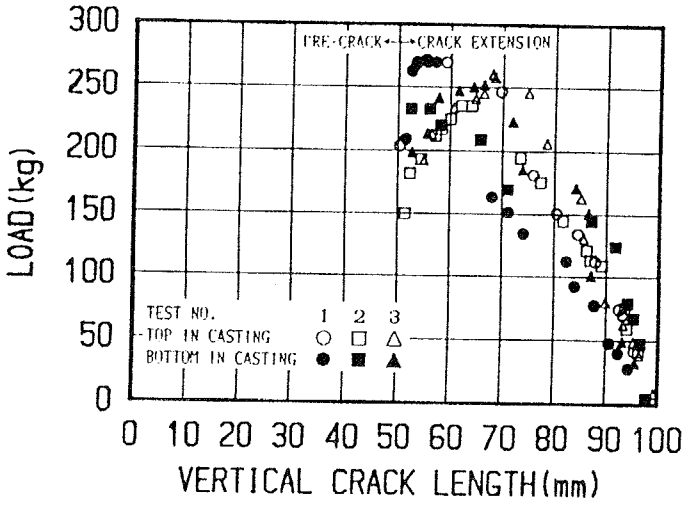


(1) 4 週試験

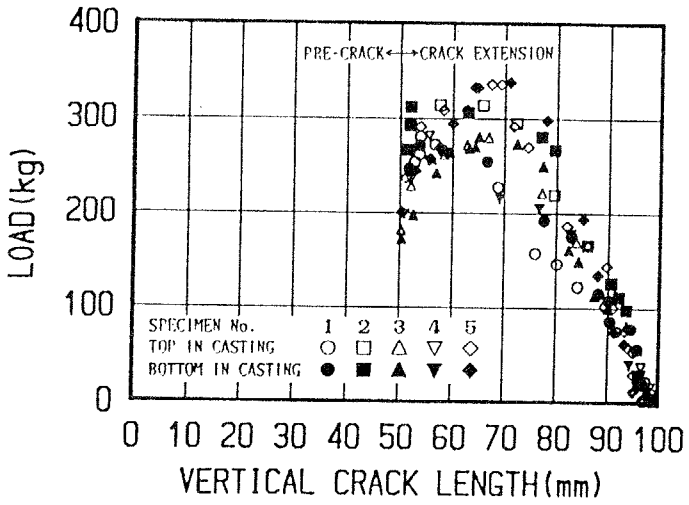


(2) 1 年試験

図－3.59 荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM10-1シリーズ

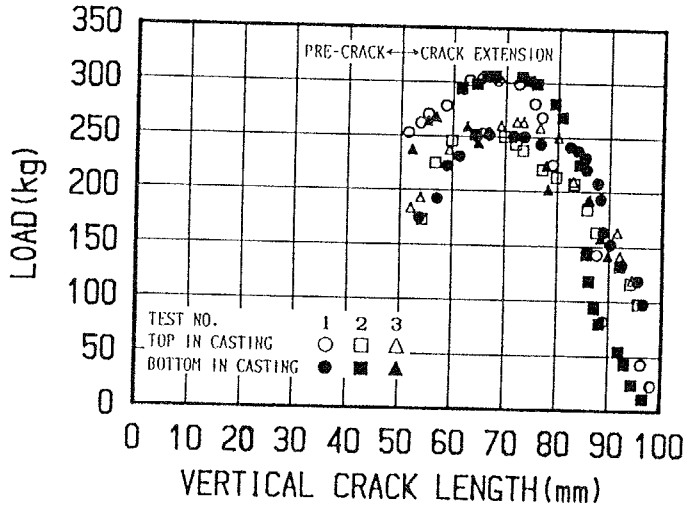


(1) 4週試験

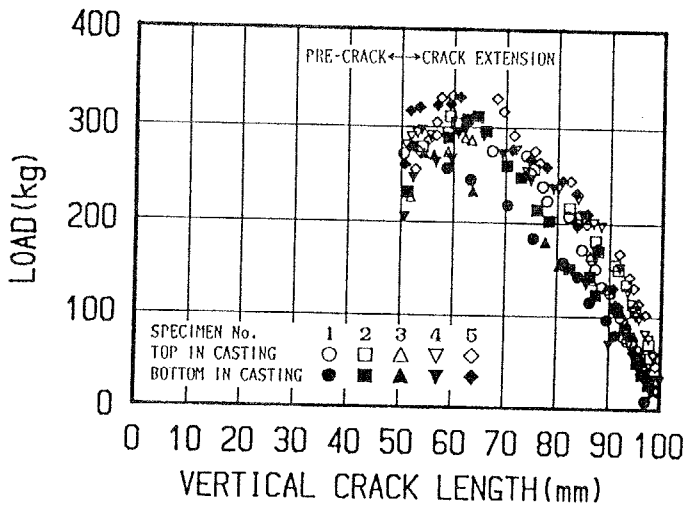


(2) 1年試験

図－3.60 荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM15-1シリーズ

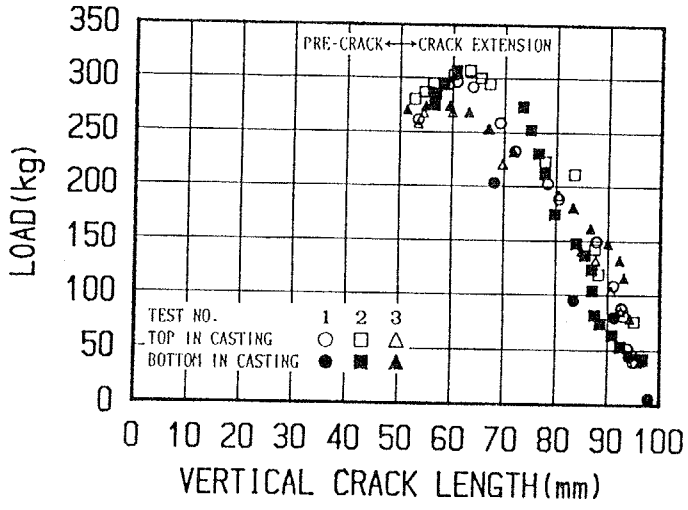


(1) 4 週試験

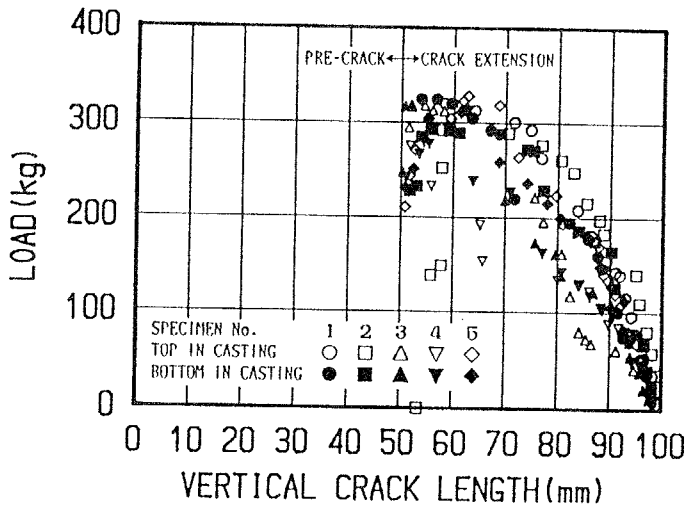


(2) 1 年試験

図－3.61 荷重と鉛直クラック進展の関係：3PM25-1シリーズ

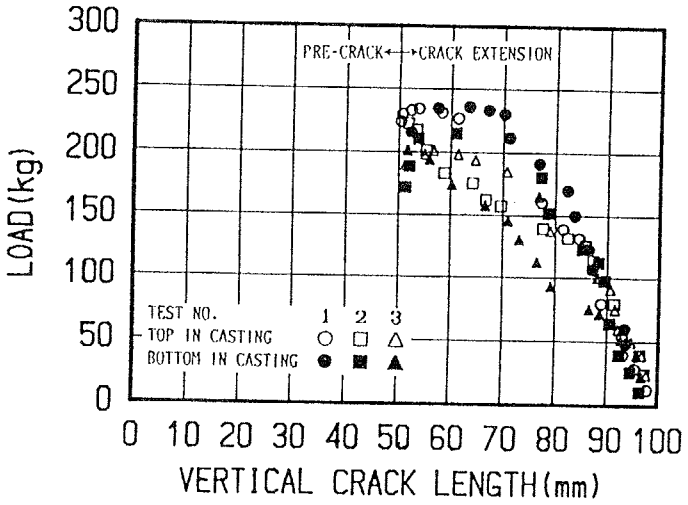


(1) 4週試験

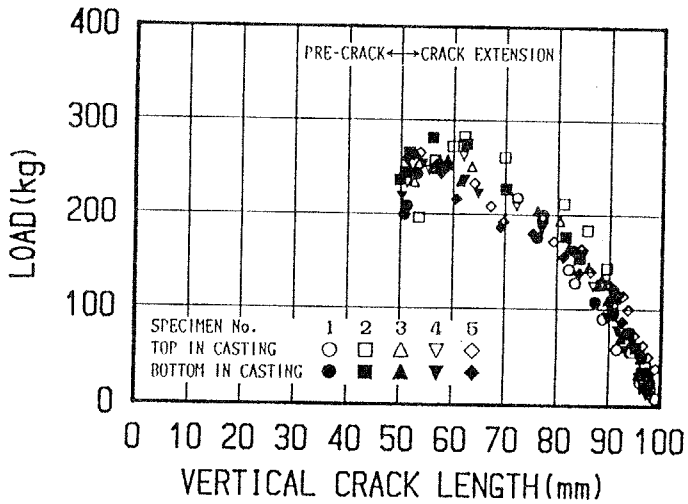


(2) 1年試験

図－3.62　荷重と鉛直クラック進展の関係：3PL20-1シリーズ

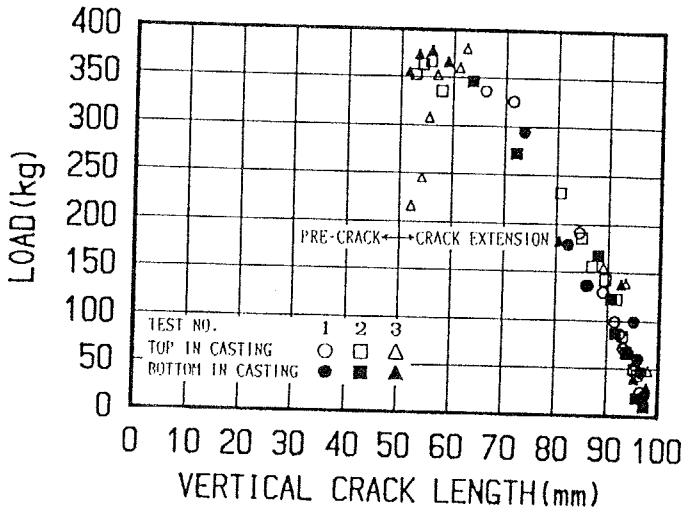


(1) 4週試験

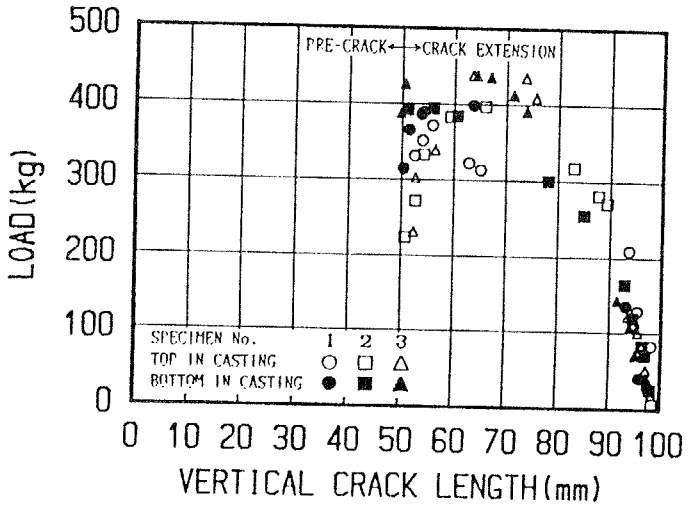


(2) 1年試験

図－3.63 荷重と鉛直クラック進展の関係：3PH20-1シリーズ

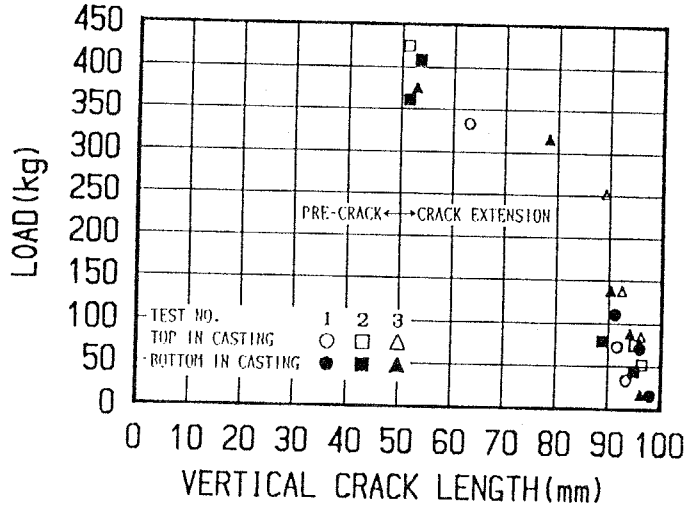


(1) 4週試験

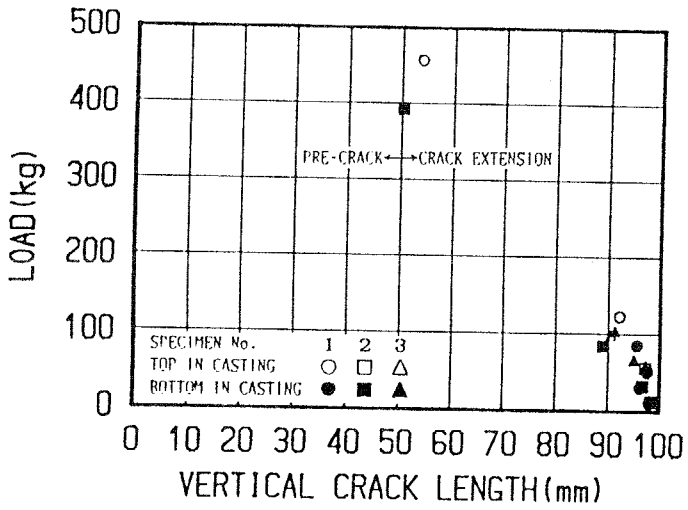


(2) 1年試験

図－3.64　荷重と鉛直クラック進展の関係：4PM20-7シリーズ

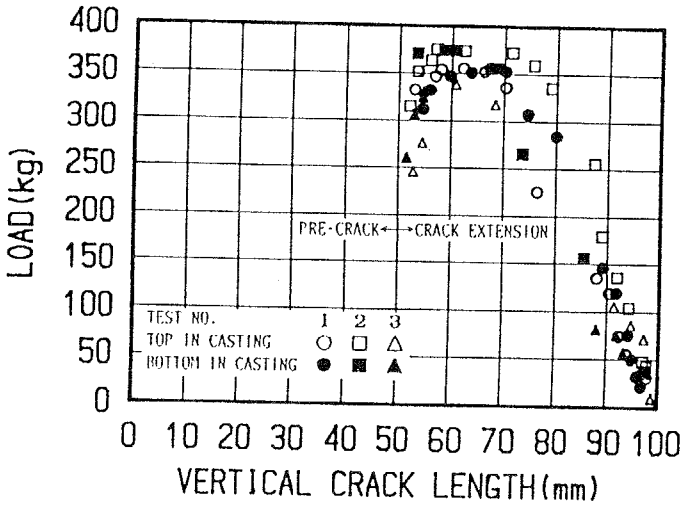


(1) 4 週試験

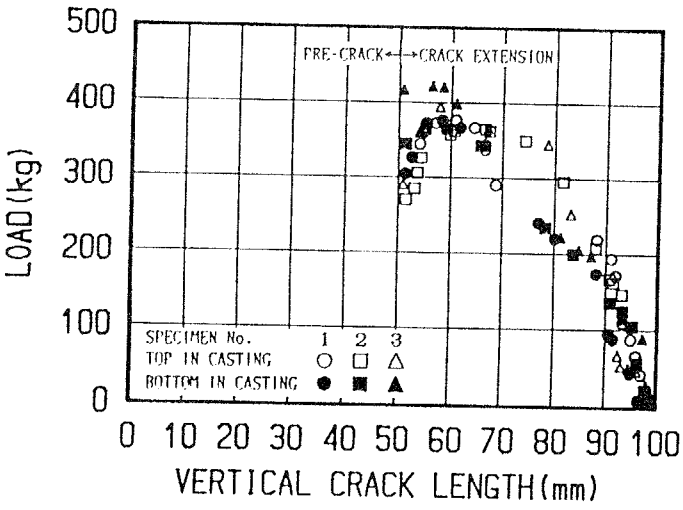


(2) 1 年試験

図－3.65 荷重と鉛直クラック進展の関係：4PM20-8シリーズ

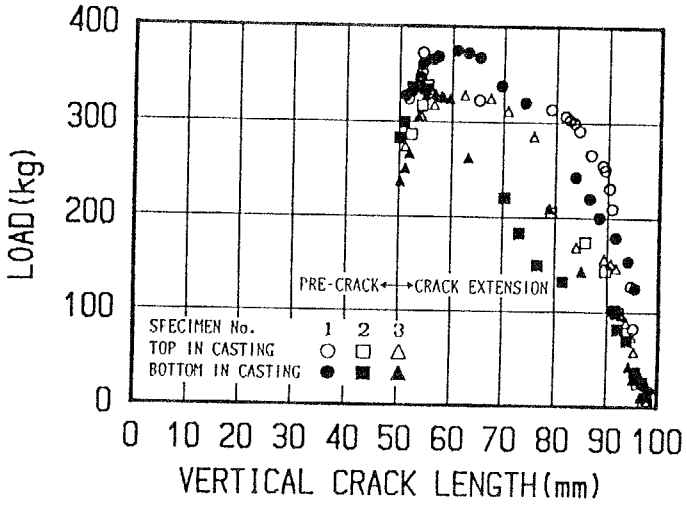


(1) 4週試験

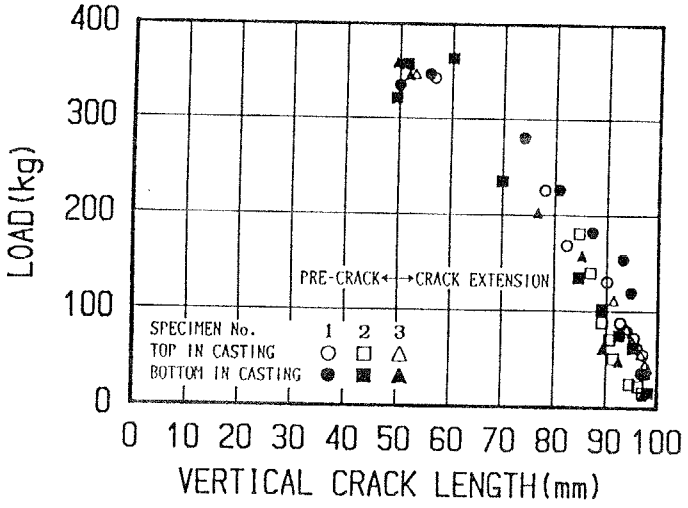


(2) 1年試験

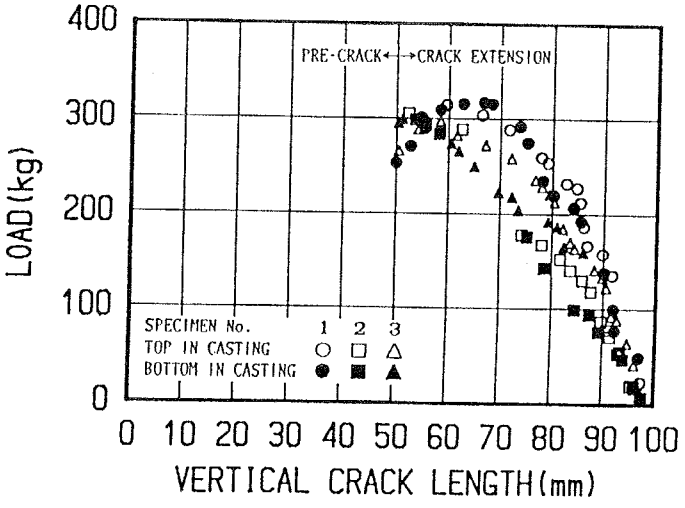
図－3.66　荷重と鉛直クラック進展の関係：4PH20-2シリーズ



(1) 3DM20-7シリーズ

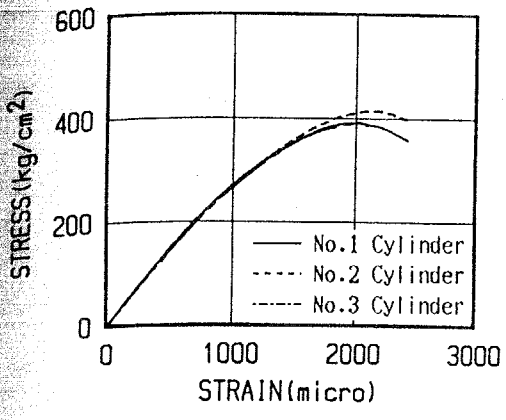


(2) 3DM20-8シリーズ

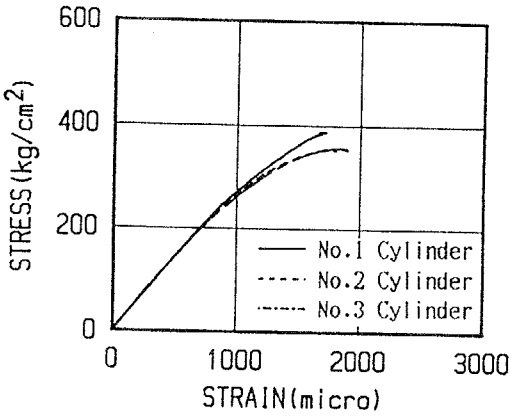


(3) 3PH20-2シリーズ

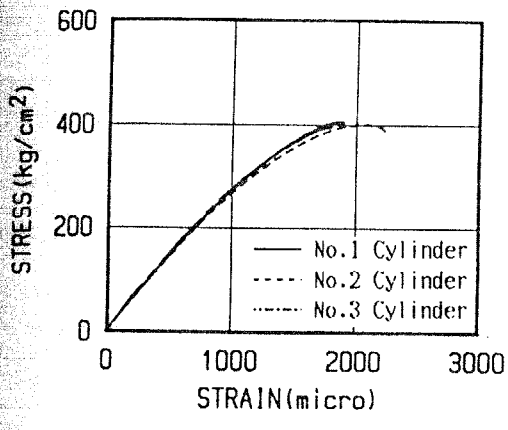
図－3.67　荷重と鉛直クラック進展の関係：気中養生試験体



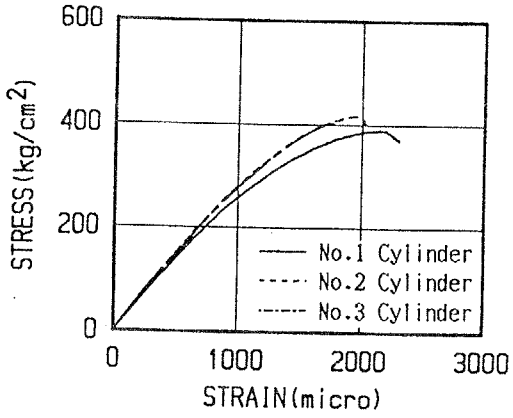
(1) 3PM20-1シリーズ



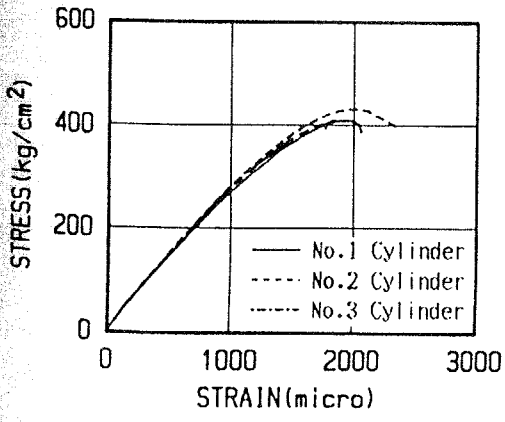
(2) 3PM20-2シリーズ



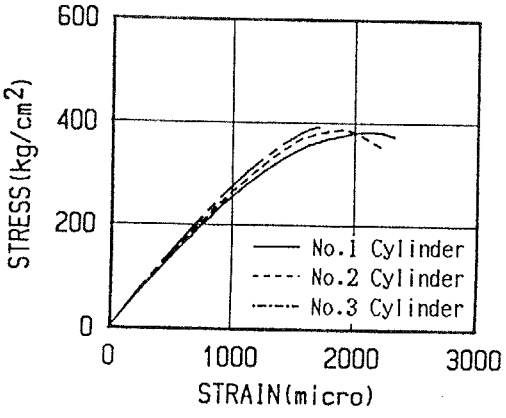
(3) 3PM20-3シリーズ



(4) 3PM20-4シリーズ

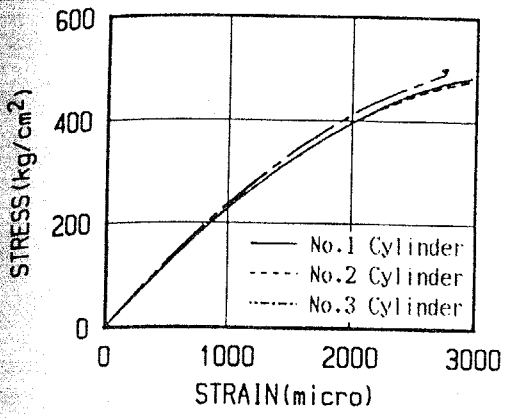


(5) 3PM20-5シリーズ

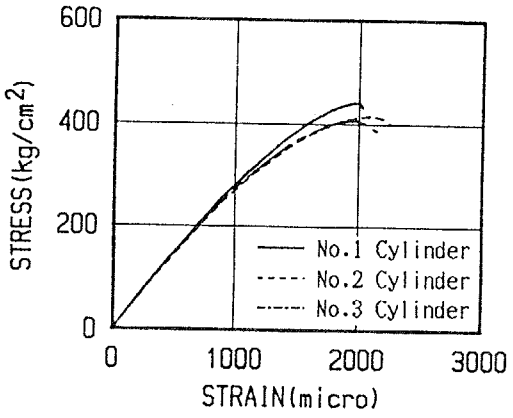


(6) 3PM20-6シリーズ

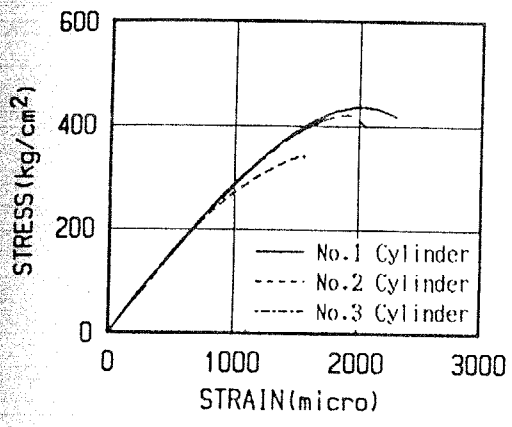
図－3.68　圧縮試験による応力-歪曲線（４週試験、その１）



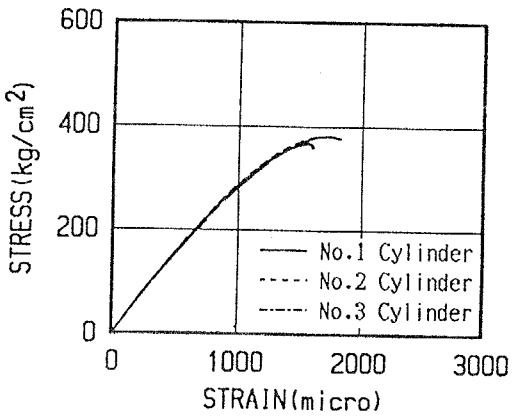
(7) 3PM05-1シリーズ



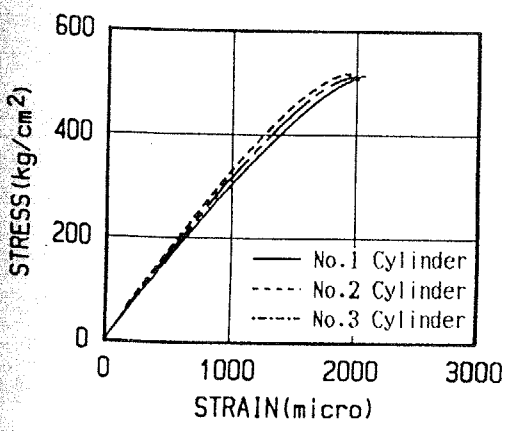
(8) 3PM10-1シリーズ



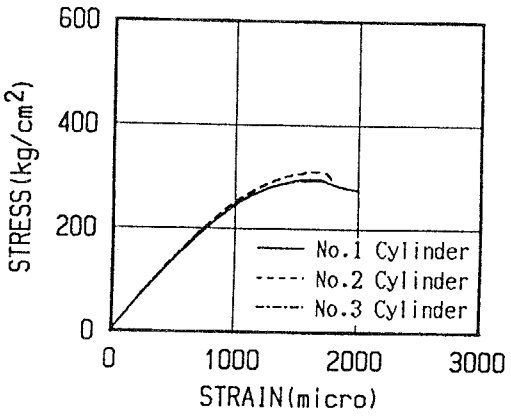
(9) 3PM15-1シリーズ



(10) 3PM25-1シリーズ

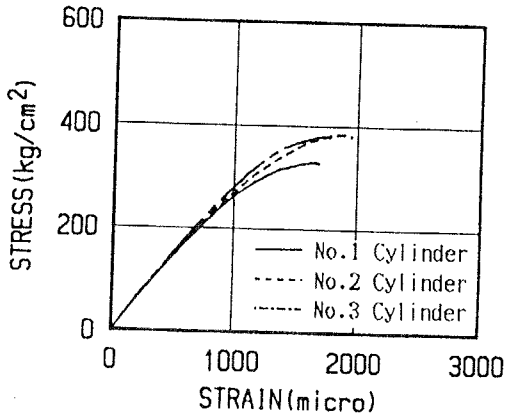


(11) 3PL20-1シリーズ

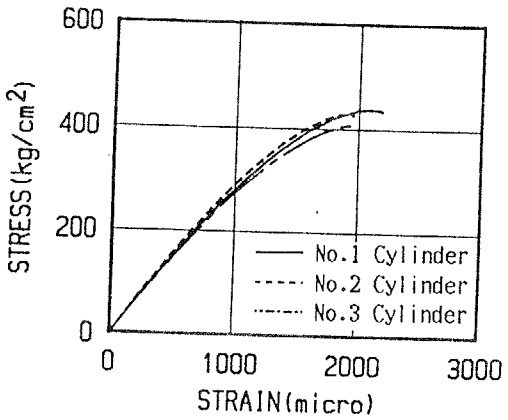


(12) 3PH20-1シリーズ

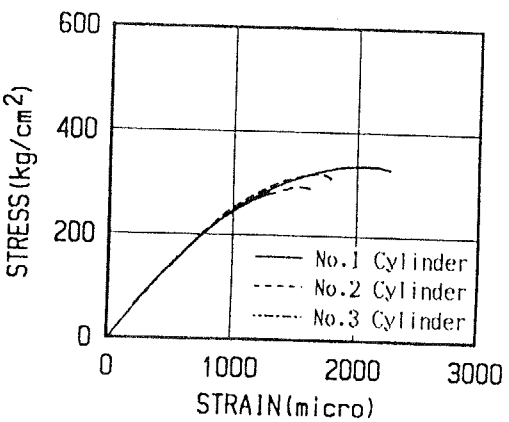
図－3.68　圧縮試験による応力-歪曲線（４週試験、その２）



(13) 4PM20-7シリーズ

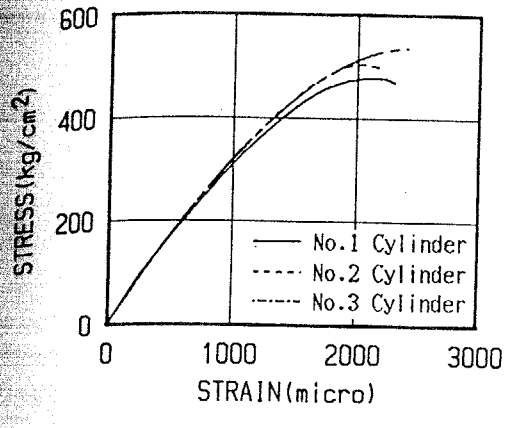


(14) 4PM20-8シリーズ

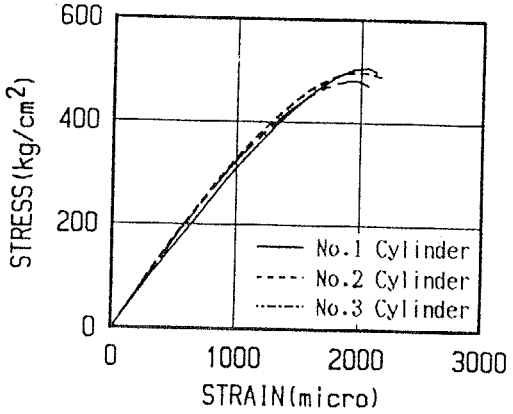


(15) 4PH20-2シリーズ

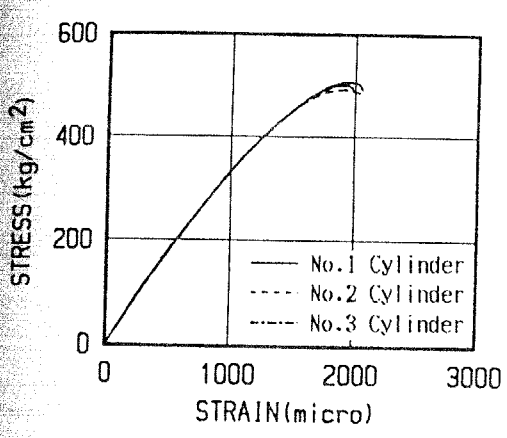
図－3.68　圧縮試験による応力-歪曲線（４週試験、その３）



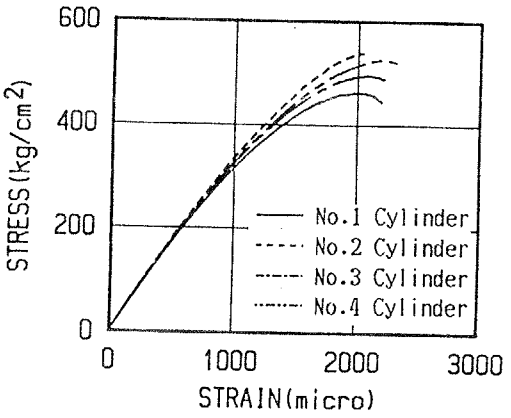
(1) 3PM20-1シリーズ



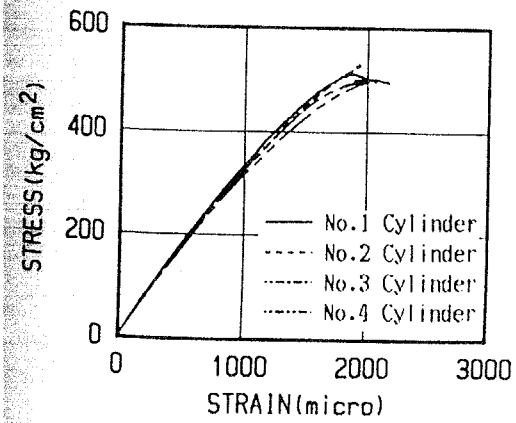
(2) 3PM20-2シリーズ



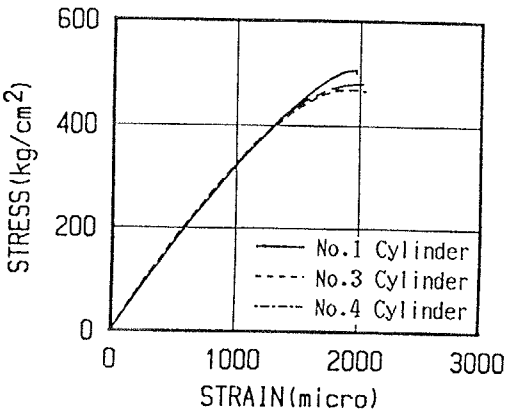
(3) 3PM20-3シリーズ



(4) 3PM20-4シリーズ

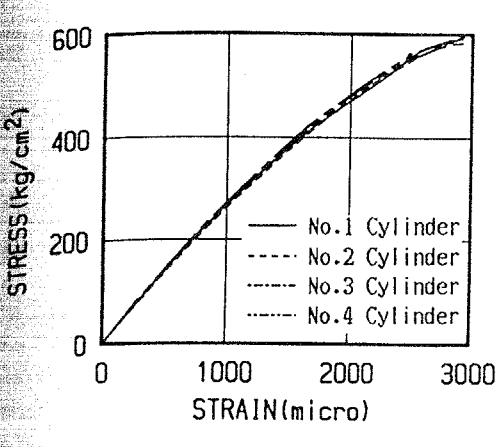


(5) 3PM20-5シリーズ

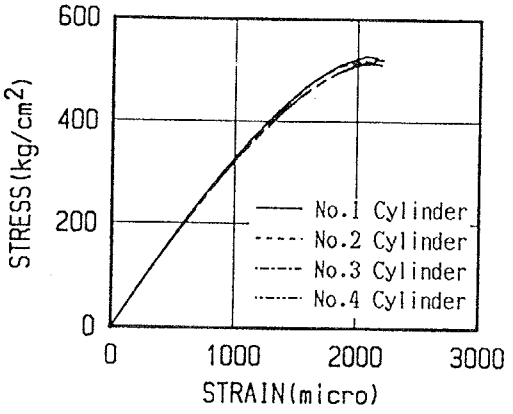


(6) 3PM20-6シリーズ

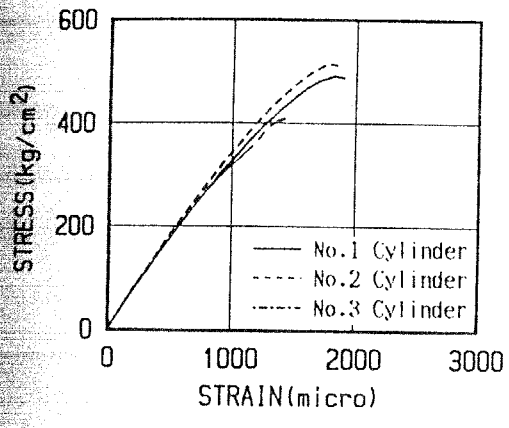
図－3.69　圧縮試験による応力-歪曲線（１年試験、その１）



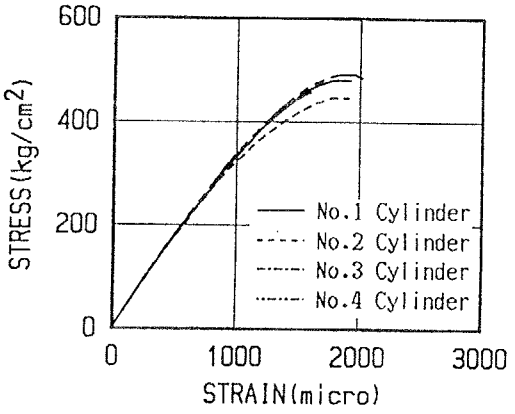
(7) 3PM05-1シリーズ



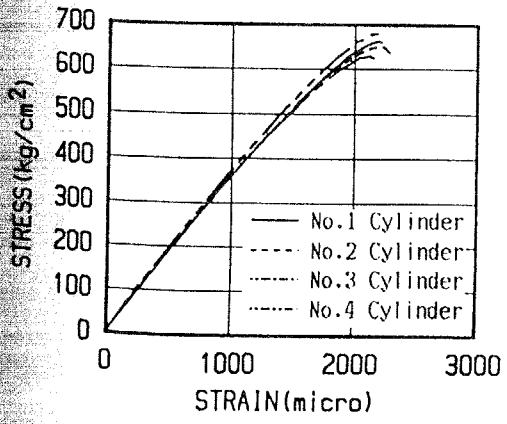
(8) 3PM10-1シリーズ



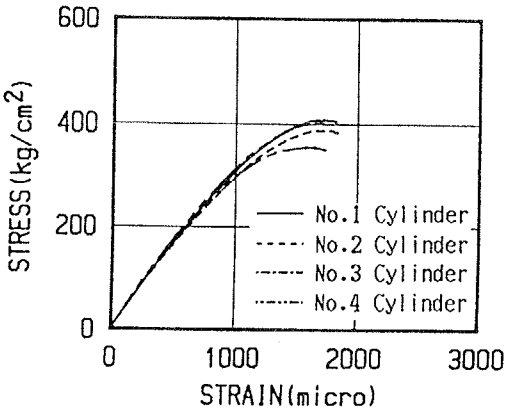
(9) 3PM15-1シリーズ



(10) 3PM25-1シリーズ

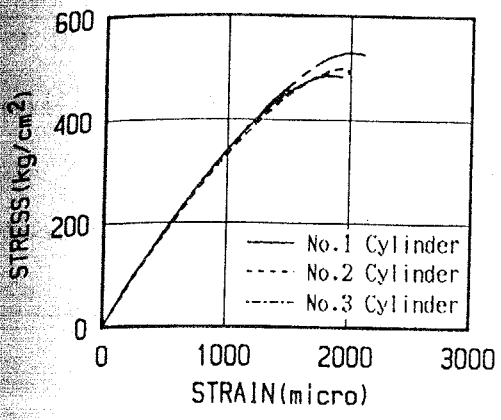


(11) 3PL20-1シリーズ

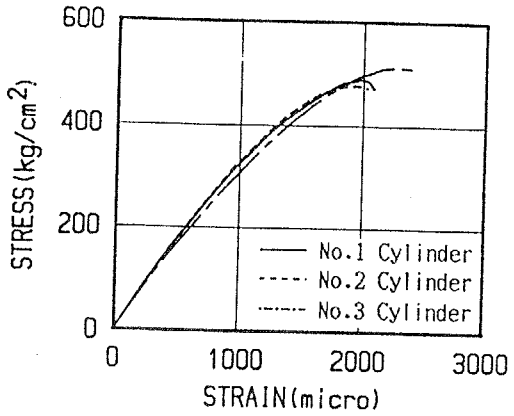


(12) 3PH20-1シリーズ

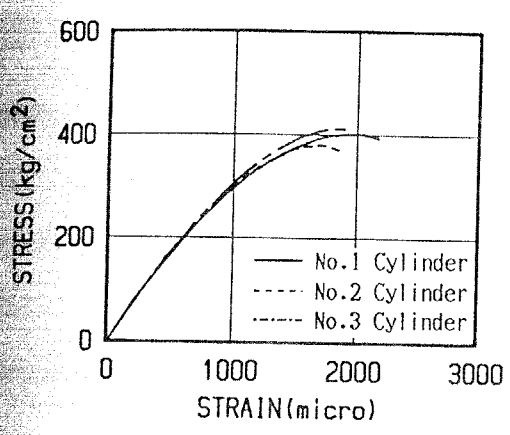
図－3.69　圧縮試験による応力-歪曲線（１年試験、その２）



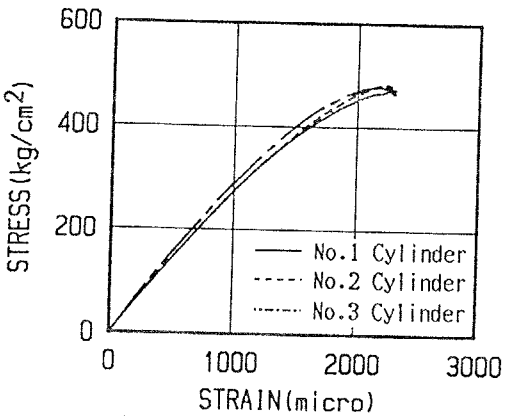
(13) 4PM20-7シリーズ



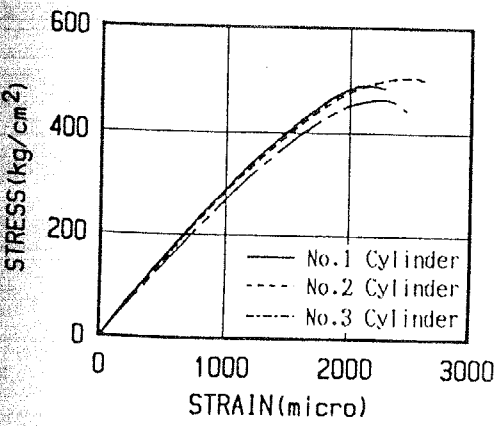
(14) 4PM20-8シリーズ



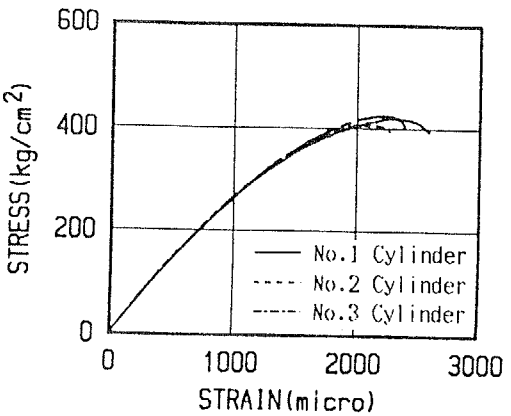
(15) 4PH20-2シリーズ



(16) 3DM20-7シリーズ



(17) 3DM20-8シリーズ



(18) 3DH20-2シリーズ

図－3.69　圧縮試験による応力-歪曲線（１年試験、その３）

3.5.2 考　　察

(1) 材料特性値概要

ノッチを有するコンクリートの曲げ試験およびシリンダーの圧縮試験結果から、下記の材料特性値を求め、表－3.15に要約する。

- 最大荷重（L_p）
- 最大荷重時の変位（D_p）
- 有効曲げ強度（σ_{net}）
- 限界応力拡大係数（K_{IC}）
- 限界エネルギー解放率（G_{IC}）
- 破壊エネルギー（G_f）
- 圧縮強度（f'_c）
- 割線弾性係数（$E_{1/3}$）

表−3.15　材料特性値

試験種別		曲げ試験						圧縮試験	
試験名称	試験材令	最大荷重 L_p (kg)	L_p時の変位(VT2) D_p (mm)	有効曲げ強度 σ_{net} kg/cm^2	限界応力拡大係数 K_{Ic} kg/cm$^{3/2}$	限界エネルギー解放率 G_c (kg/m)	破壊エネルギー G_f (kg/m)	圧縮強度 f'_c kg/cm^2	割線弾性係数 $E_{1/3}$ (kg/cm^2)
3PM20-1	4週	788	0.041	43.8	63.3	1.39	(14.2)	397	2.90X10^5
3PM20-1	1年	939	0.034	52.2	75.5	1.66	(15.5)	506	3.43X10^5
3PM20-2	4週	471	0.039	43.2	68.0	1.60	10.4	365	2.91X10^5
3PM20-2	1年	541	0.037	49.7	78.0	1.79	11.1	495	3.41X10^5
3PM20-3	4週	258	0.048	46.4	65.1	1.45	10.0	400	2.93X10^5
3PM20-3	1年	272	0.038	48.9	68.6	1.31	10.5	500	3.60X10^5
3PM20-4	4週	97.6	0.052	48.8	54.1	1.01	9.5	401	2.91X10^5
3PM20-4	1年	105	0.043	52.5	58.3	0.98	8.2	504	3.51X10^5
3PM20-5	4週	264	0.042	47.6	66.7	1.49	10.9	417	2.99X10^5
3PM20-5	1年	314	0.043	56.5	79.3	1.83	10.8	509	3.46X10^5
3PM20-6	4週	291	0.044	52.3	73.5	1.86	10.8	387	2.92X10^5
3PM20-6	1年	334	0.046	60.0	84.2	2.05	12.6	486	3.48X10^5
3PM05-1	4週	239	0.046	43.0	60.4	1.51	5.7	490	2.42X10^5
3PM05-1	1年	254	0.042	45.8	64.3	1.50	5.8	588	2.77X10^5
3PM10-1	4週	256	0.048	46.1	64.7	1.41	9.1	421	2.97X10^5
3PM10-1	1年	282	0.041	50.8	71.2	1.45	10.2	519	3.51X10^5
3PM15-1	4週	256	0.044	46.1	64.6	1.36	9.2	398	3.09X10^5
3PM15-1	1年	301	0.048	54.1	75.9	1.60	11.4	470	3.62X10^5
3PM25-1	4週	275	0.049	49.5	69.5	1.55	16.3	374	3.13X10^5
3PM25-1	1年	303	0.042	54.5	76.5	1.62	12.0	468	3.62X10^5
3PL20-1	4週	293	0.044	52.8	74.1	1.66	10.6	513	3.31X10^5
3PL20-1	1年	309	0.036	55.6	78.0	1.63	11.3	655	3.75X10^5
3PH20-1	4週	219	0.037	39.4	55.3	1.06	8.3	300	2.91X10^5
3PH20-1	1年	264	0.041	47.5	66.6	1.28	11.1	388	3.46X10^5
4PM20-7	4週	365	0.051	43.8	64.9	1.40	10.2	365	3.02X10^5
4PM20-7	1年	410	0.046	49.2	73.0	1.47	12.6	504	3.64X10^5
4PM20-8	4週	409	0.055	49.1	72.8	1.74	11.7	425	3.05X10^5
4PM20-8	1年	425	0.036	51.0	75.6	1.67	9.9	492	3.43X10^5
4PH20-2	4週	357	0.046	42.8	63.5	1.36	9.7	317	2.97X10^5
4PH20-2	1年	387	0.043	46.4	68.8	1.38	10.9	397	3.44X10^5
3DM20-7	1年	348	0.050	62.6	87.9	2.62	15.9	476	2.96X10^5
3DM20-8	1年	362	0.048	65.1	91.4	2.86	16.0	486	2.92X10^5
3DH20-2	1年	312	0.046	56.1	78.8	2.13	13.9	417	2.91X10^5

有効曲げ強度とは、スパン中央の有効断面積（ノッチの面積を除く）およびモーメントと曲げ応力度の周知の関係式から計算したものであり、次式で表される。

$$\sigma_{net} = \frac{3L_p S}{2B(W-a)^2} \qquad \text{（３点曲げの場合）} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.9)$$

$$\sigma_{net} = \frac{3L_p S}{B(W-a)^2} \qquad \text{（４点曲げの場合）} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.10)$$

ただし、W：試験体の高さ、B：断面の幅、a：ノッチの深さ、S：スパンである。

線形破壊力学が適用可能であると仮定すると、限界応力拡大係数K_{IC}は次式で表される。

$$K_{IC} = Y\sigma a^{1/2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.11)$$

ここで、Yは試験体の形状によって求まる係数であり、σはノッチが無いものとして計算した最大耐力時の公称曲げ応力度である。本試験体のYは、次の実用式によって計算できる(2),(4)。

$$Y = \frac{1.99-(a/W)(1-a/W)(2.15-3.93a/W+2.7a^2/W^2)}{(1+2a/W)(1-a/W)^{3/2}}$$

（３点曲げ） $\cdots\cdots\cdots$ (3.12)

$$Y = \left\{1.99-2.47(a/W)+12.97(a/W)^2-23.17(a/W)^3+24.80(a/w)^4\right\}$$

（４点曲げ） $\cdots\cdots\cdots$ (3.13)

エネルギー解放率は、クラックが単位面積だけ進展する際に解放されるポテンシャルエネルギー（あるいは系全体のエネルギー）であり、次式で表される。

$$G_{IC} = \frac{1}{E'} K_I^2 \qquad \text{ただし、} E' = \begin{cases} E & (Plane\ stress) \\ E/(1-\nu^2) & (Plane\ strain) \end{cases} \quad \cdots \quad (3.14)$$

ここで、E：弾性係数、ν:ポアソン比である。

破壊エネルギーG_fとは、荷重－載荷点鉛直変位曲線で囲まれる面積（試験体を破壊するのに必要なエネルギーU）を、破壊面積（A）で除した値である。

$$G_f = U / A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.15)$$

これらの値（K_{IC}、G_f）の評価には、試験体の自重による影響を考慮したが(5)、スパンが小さいため、基準となるノッチ深さ50mmの試験体で、その影響は数パーセント程度であった。本実験では、3PM05-1シリーズ以外の試験体は、試験終了まで完全に破壊しなかった。それ故、破壊エネルギーの計算には、後で議論するが、試験体の変形を図－3.70に示すようにノッチの上の試験体上端に回転中心のある剛体の回転運動と仮定して、ノッチ先端開口変位が0.6mm（3PM05-1シリーズは0.4mm）に達するまでのエネルギーを考慮した。また、その時点でクラックは試験体の上端にまで達し、さらに大部分の試験体の抵抗力は最大耐力の3%以下となり、その後の変形が破壊エネルギーに及ぼす影響は小さいので、破壊面積はノッチ部における有効断面積（リガメント面積）とした。ノッチ先端開口変位で規定することにより、３点曲げと４点曲げ試験の破壊状態は同じであると考えられる。

G_fとG_{IC}の値が大きく食い違っているのは、それぞれの値を計算する際に

用いるエネルギーの範囲が異なるからである。すなわち、G_fは試験体が二つに分れるまでに必要な全エネルギーを考慮しているのに対して、G_{IC}はクラックが微小長さ進展するときの弾性エネルギーのみ考慮しているからである。コンクリートの場合、クラック進展に大きなエネルギーを必要とし、僅かなクラック進展が破壊に直結しないこともあるため、破壊靭性パラメータとして破壊エネルギーの方が重要であると考え、各パラメータに関する以下の考察では、主に破壊エネルギーについて述べる。

(2) ノッチ深さの影響

ノッチ深さと破壊エネルギーG_f値との関係（図－3.41、45）をみると、ノッチ深さが浅くなるとG_f値が大きくなる傾向がある。これは、ノッチ深さが浅いとリガメント長さ（ノッチ先端から試験体の上端までの長さ）が長いため、進展するクラックがより大きな抵抗を示す粗骨材に出会う可能性が高くなること、およびクラック径路が複雑になるため、クラック後の粗骨材のかみ合い効果が増大することが、主な要因として考えられる。載荷点の鉛直変位VT2が0.5mmを超えても、リガメント長さが長い試験体がより大きな抵抗力を保持するのは、破断面のかみ合っている面積の大きさに起因する。ただし、ノッチ深さが10mmの試験体は、最大耐力を過ぎてから急激なクラック伝播を起こし、その間での測定回数が不足しているため、破壊エネルギーを過大評価しているが、外挿によりG_f値を推定すると、４週試験で11.5kg/m、１年試験で12.0kg/m程度である。

(3) 載荷速度の影響

一般に載荷速度が大きくなるほどコンクリート強度が高くなるように、曲げ強度も高くなっている。この原因は、内部クラックの伝播速度との関連で説明されている(6)。すなわち、載荷速度が遅いほど内部クラックはより十分発達し、さらにクリープひずみが大きくなるので、低い応力で限界ひずみ量に達する。このような破壊機構から推定して、内部クラックのあまり発達しない応力レベルまでは、載荷速度の影響は小さく、破壊に近い応力レベルでの載荷速度

が強度に大きく影響する。一例として、3PM20-2および3PM20-3シリーズの１年試験において、最大耐力の85%の一定荷重を与えた場合の荷重－変位曲線を図－3.71に示す。一定荷重下のクリープひずみにより変形が進行し、3PM20-2は15分後、3PM20-3は10分後にその荷重を維持できなくなり、荷重－変位曲線は頂きの部分が欠けた形となる。ただし、これらの試験体は比較的早く限界ひずみ量に達したが、限界ひずみ量に達するまで、さらに段階的な荷重増加が必要な試験体もあり、最大耐力近い荷重下でのクリープ試験は、個々の試験体のバラツキが試験結果に大きな影響を与える。JIS A1106曲げ試験による載荷速度の目安は、縁応力度の増加が毎分8～10kg/cm^{2}で、3PM20-5シリーズの載荷速度（0.05mm/分）に相当する。本実験では、顕微鏡によるクラック観測を容易にするために、3PM20-3シリーズの載荷速度（0.005mm/分）を標準としているが、１年試験の最大荷重を除いて、両者の差は比較的小さい。

(4) 最大骨材寸法の影響

最大骨材寸法の影響（図－3.43、47）をみると、最大骨材寸法が大きいほど最大耐力およびG_f値は大きくなる傾向がある。粗骨材の存在しない3PM05-1シリーズのG_f値は、他のシリーズに比べて非常に小さく、各試験体のバラツキも小さい（図－3.14、29）。それ故、粗骨材の存在によるクラック拘束あるいはかみ合い効果が最大耐力後の軟化挙動に大きな影響を与えていると考えられる。特に、最大骨材寸法25mmの４週試験体（図－3.17）では、３体のうち２体が、クラック拘束によって最大耐力後の抵抗力の減少が緩やかになり、１年試験より大きなG_f値となっている。クラック進展経路上に大きな骨材が存在した試験体２体のうち１体は、変位の大きな領域（VT2が0.65mm）で急激に荷重減少を生じた。破壊断面を観察すると、破壊面の上端部で骨材が破砕しているのが確認された。これらの影響は荷重－平均変位曲線（図－3.43）にも現れており、破壊面に対して骨材寸法がある程度以上になると、均質材料として平均的な挙動を捕えることが困難になる。

(5) 水セメント比の影響

水セメント比(W/C)の影響（図－3.44、48）をみると、W/Cが大きくなると、最大耐力は、圧縮強度と同様に減少する。しかしながら、破壊エネルギーについてみると、４週試験のW/C=0.45と0.55のG_f値の差はわずかであり、さらに１年試験では、W/C=0.65のG_f値がW/C=0.55の値より大きくなっている。これは水セメント比より、前述の骨材の存在が最大耐力後の軟化挙動に大きな影響を与え、最大耐力の増加が必ずしもG_f値の増加とならないためである。

(6) ４点曲げの影響

一般の曲げ試験では、３点曲げは４点曲げより曲げ強度が高くなる傾向がある。その原因の一つは、コンクリートが厳密には均質でなく、４点曲げでは中央モーメント一定区間中任意の最弱面で破壊するが、３点曲げでは載荷点近傍に破壊面が限定され、しかもその位置が最弱面になる確率が小さいためである。もう一つの原因は、供試体の高さに対してスパンが短いため、線材の曲げ理論が厳密には成立せず、両載荷法の強度に差が生じるSeewald effectと呼ばれる影響のためである。スパン／高さ＝３の場合について、弾性学的に厳密に解かれた結果(7)は、４点曲げの引張応力は３点曲げより11.5%大きくなる。しかしながら、本実験で用いた試験体は、50mm深さのノッチを導入し、破壊位置を規定しているので、第１の推計学的に説明のつく原因は除外され、Seewald effectの影響も小さくなる。それ故、３点曲げと４点曲げの有効曲げ強度において、有意な差異は認められない。例えば、3PM20-3シリーズと4PM20-7シリーズを比較すると、４週試験は３点曲げの曲げ強度が大きいが、１年試験は４点曲げが大きい。また、3PM20-5シリーズと4PM20-8シリーズおよび3PH20-1シリーズと4PH20-2シリーズを比較すると、４週試験は４点曲げが大きく、１年試験は３点曲げが大きい。

破壊エネルギーを比較すると、４点曲げの方が３点曲げより大きくなる傾向にあるが、3PM20-5シリーズと4PM20-8シリーズの１年試験では、その傾向が逆転している。これは前述の粗骨材の存在がG_f値に大きく影響を与えている

と考えられ、載荷方法の影響を検討するには、さらに詳細な実験が必要である。

(7) 養生条件の影響

コンクリートの曲げ強度は、試験体の乾燥によって大きく異なる。水中養生されていた供試体を急激に乾燥状態におくと、表面近くのみが乾燥収縮し、表面が引張、内部が圧縮の収縮応力が発生する。このような応力状態で曲げ試験を行うと曲げ強度が著しく低下することになるが、その後材令とともに強度は回復し、１～４週程度で湿潤強度に戻るといわれている(7)。本実験における乾燥養生試験体は、材令28日で水中から取り出した後、約11ヵ月恒温室に放置している。従って、収縮応力の影響は無く、逆に、同材令の湿潤試験体の曲げ強度より約20%高い強度となり、他の材料にも見られるように水分が強度を低下させているといえる。水分によるこの強度低下は、微小レベルにおける硬化セメントペーストの間隙内の水分が、その力学的特性にどのように影響を与えるかを詳細に検討する必要がある(8)。

破壊エネルギーを比較すると、気中養生試験体は水中養生試験体より、30～50%G_f値が大きくなっている。この原因は、強度増加および図－3.51に見られるように、最大耐力後の荷重の低下は、気中養生試験体の方が緩やかなことによる。気中養生試験体における最大耐力後の抵抗力の増加については、２つの原因が考えられる。第一には潤滑剤としての水分が存在しないため、摩擦力が増加することによる。第二の原因は、乾燥収縮によって、骨材に拘束されたモルタル中に微細クラックが発生し、エネルギー吸収量が増加することによる。アルカリ骨材反応により損傷を受けたコンクリートは、ひび割れが試験体内部に存在するため、フラクチャープロセスゾーン（微細なひび割れの生じている領域）が増え、破壊エネルギーが増加（約47%）したという報告もある(9)。

(8) 材令による影響

表－3.15から、材令の増加により最大耐力は増加するが、その時の鉛直変位VT2は減少する傾向があり、剛性が増加していることがわかる。また、材令１年試験は、４週試験より圧縮強度は約20%増加するが、破壊エネルギーはそ

れほど増加していない。これは水和過程が進行すると、マトリックスと骨材の強度の差異が減少し、骨材を貫通するクラックが増加するので、より脆性的な破壊形式になるためであると考えられる。

(9) 荷重とクラック進展

荷重とクラック進展との関係（図－3.53～67）をみると、各試験シリーズおよび各試験体間にバラツキはあるが、一般に最大荷重の70～80%の荷重からクラックを確認できるようになり、最大荷重時で10～20mm程度のクラック進展が観察されている。その後、荷重の低下とともに、クラックは急速に進展するが、骨材のブリッジング効果によって最大耐力後大きな抵抗力を示した3PM25-1シリーズ（４週）No.3試験体は、クラック進展が40mm以上となっても最大耐力の50%以上の抵抗力を保持している。

(10)ノッチを有するコンクリートの曲げ変形モード

ノッチを有するコンクリートの曲げ変形モードを剛体の回転運動と仮定すると、鉛直変位（VT1、2、3）とクラック口開口変位（CG1、2）より、剛体の回転中心を求めることができる。図－3.72から明らかなように、たわみ角 θ はVT1、2、3およびCG1、2と(3.16)式の関係がある（微小変形角を仮定）。

$$\theta = \frac{VT2}{S/2} = \frac{(VT1+VT3)/2}{S/3} = \frac{(CG1+CG2)/2}{2(r(W-a)+a+z)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.16)$$

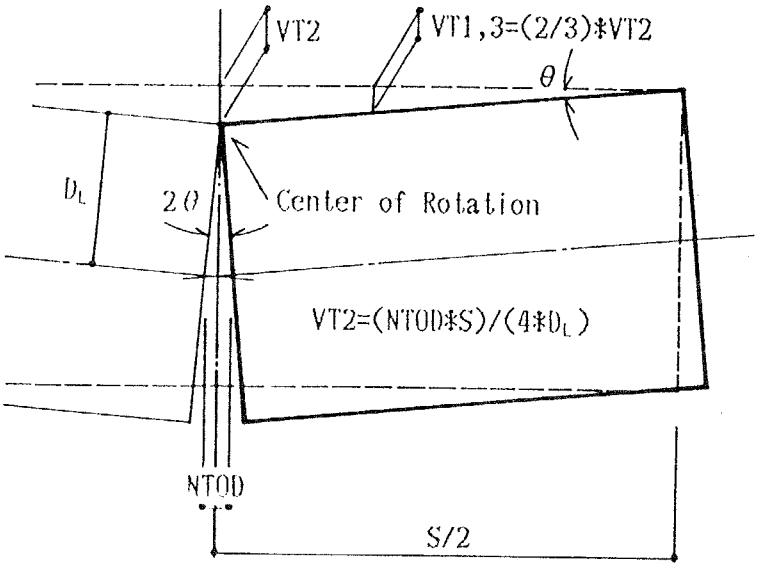
ここで、各変数の記号は図－3.72に従う。回転係数（r）はリガメント（W-a）に対するノッチ先端と回転中心間距離の比である。また、鉛直変位間の関係は次式となる。

$$(VT1+VT3)/2 = 2(VT2)/3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.17)$$

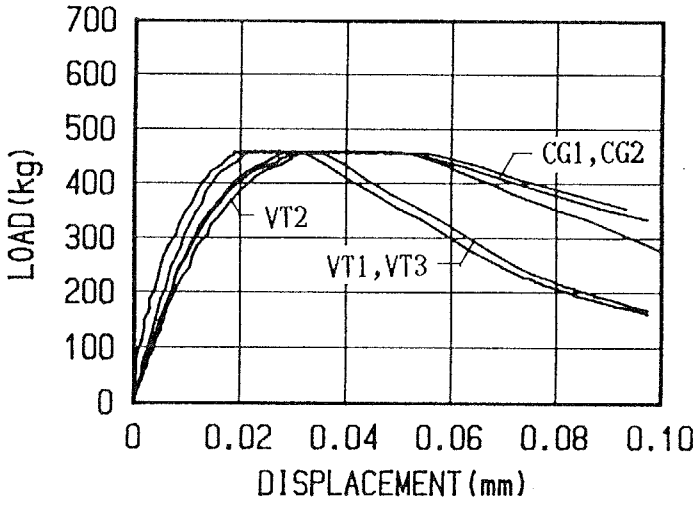
試験体の下面から回転中心までの距離（dc）は(3.18)式で与えられる。

$$dc = r(W-a)+a = \frac{S(CG1+CG2)/2}{4(VT2)} - z \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.18)$$

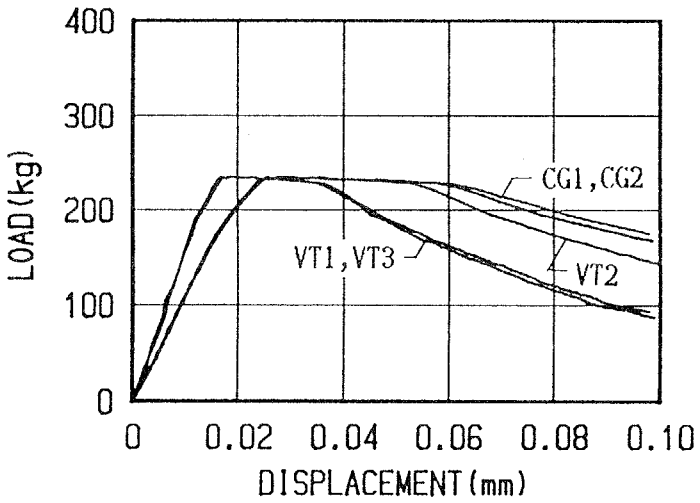
図−3.73は、VT2と(VT1+VT3)/2の関係をある試験体について示したものであるが、(3.17)式の関係が成立しており、剛体の回転運動の仮定を裏付けている。図−3.74は(3.18)式で計算したdc値を開口変位(CG1+CG2)/2に対して示したものである。実験中、顕微鏡で観察したクラック進展長さも同図に示してある。変形が微小であるとき、(3.18)式によるdcの値はかなり大きくなっている。これは、ノッチを有する試験体の曲げ変形モードを剛体の回転運動と仮定したためである。実際の試験体は、変形の初期の段階では弾性的に挙動するので、VT2値は剛体運動と仮定したときより小さいはずである。しかし、その後、(CG1+CG2)/2が0.015mmからほぼ最大耐力に対する0.04mmまで増加する間、回転中心はリガメントの中央付近に留っている（M20-3はr=0.49から0.53、M05-1はr=0.45から0.50）。この回転係数は、金属に対して英国規準(10)で仮定している0.4より幾分大きく、その規準をコンクリートに適用すると、クラック先端開口変位を過小評価することになる。更に変形が進んで、マイクロクラックのような重大な軟化が発生すると、回転係数はもはや一定ではなく、クラック進展と共に、急速に増大することがわかる。



図－3.70　仮定した曲げ変形モード

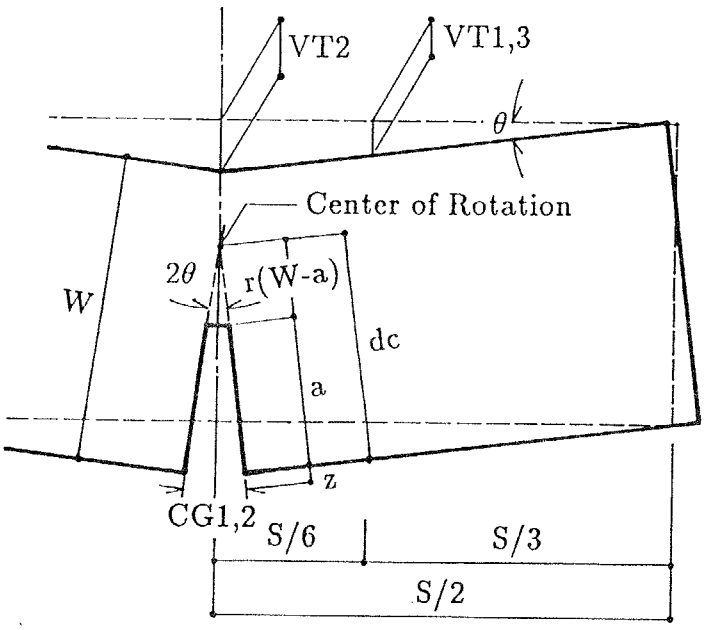


(1)3PM20-2ｼﾘｰｽﾞ－No.6試験体（材令１年）

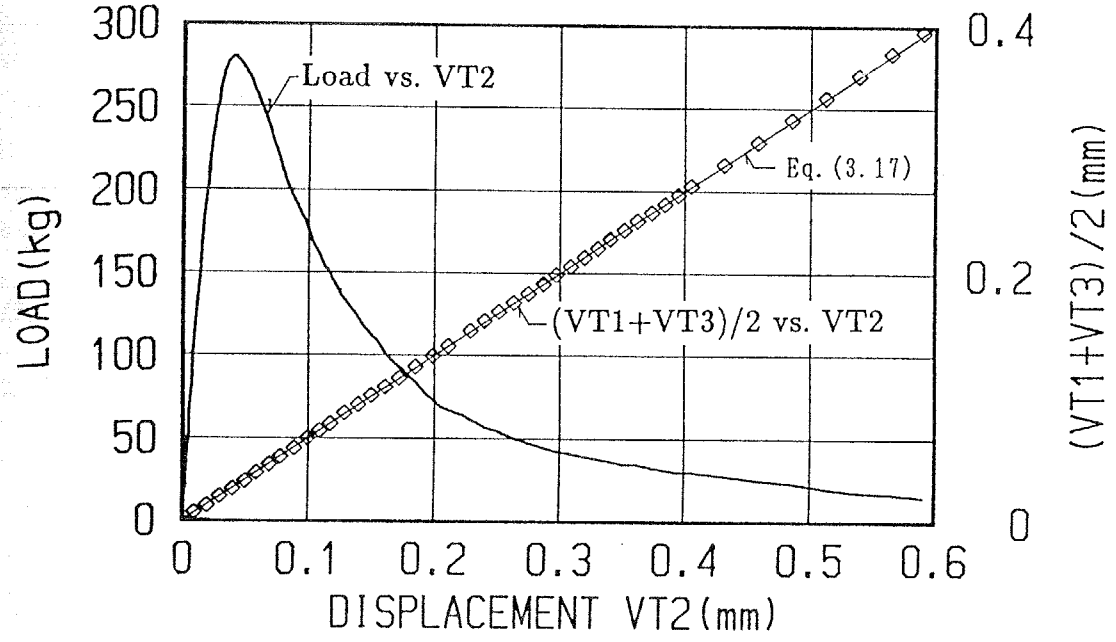


(2)3PM20-3ｼﾘｰｽﾞ－No.6試験体（材令１年）

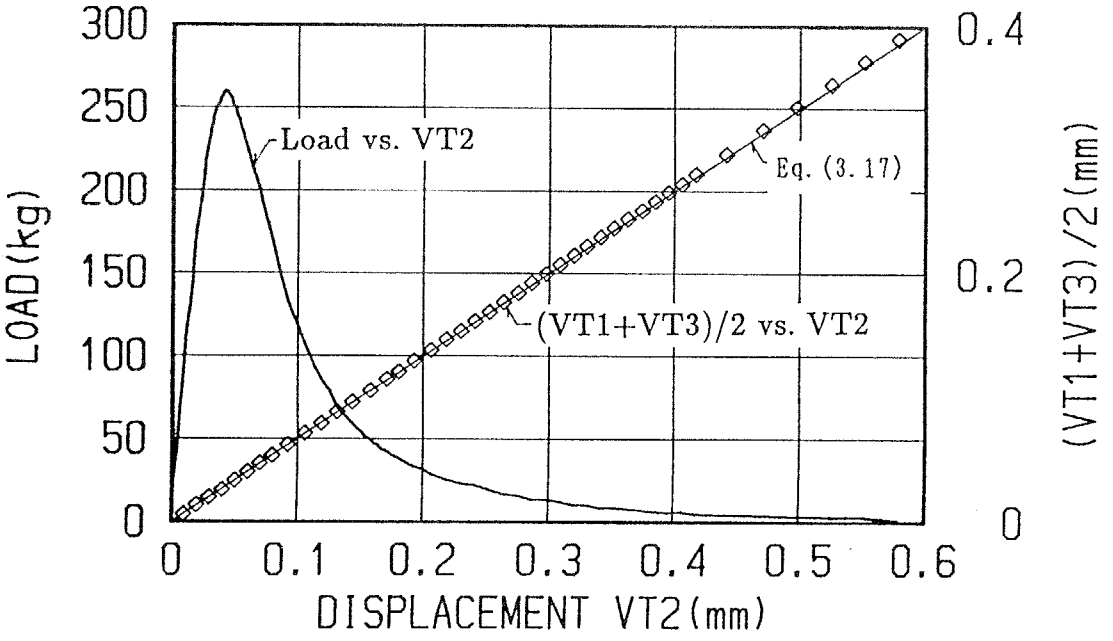
図－3.71　一定荷重下における荷重-変形曲線（最大耐力の85%）



図－3.72　各変位間の幾何学的関係

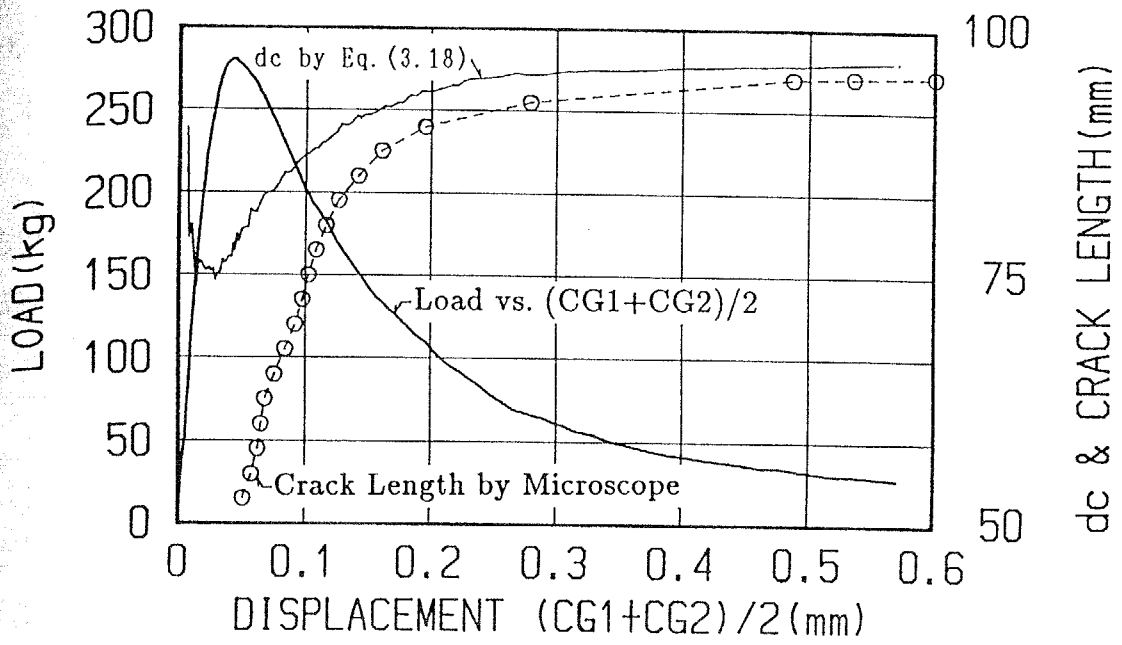


(1)3PM20-3ｼﾘｰｽﾞ－No.5試験体（材令１年）

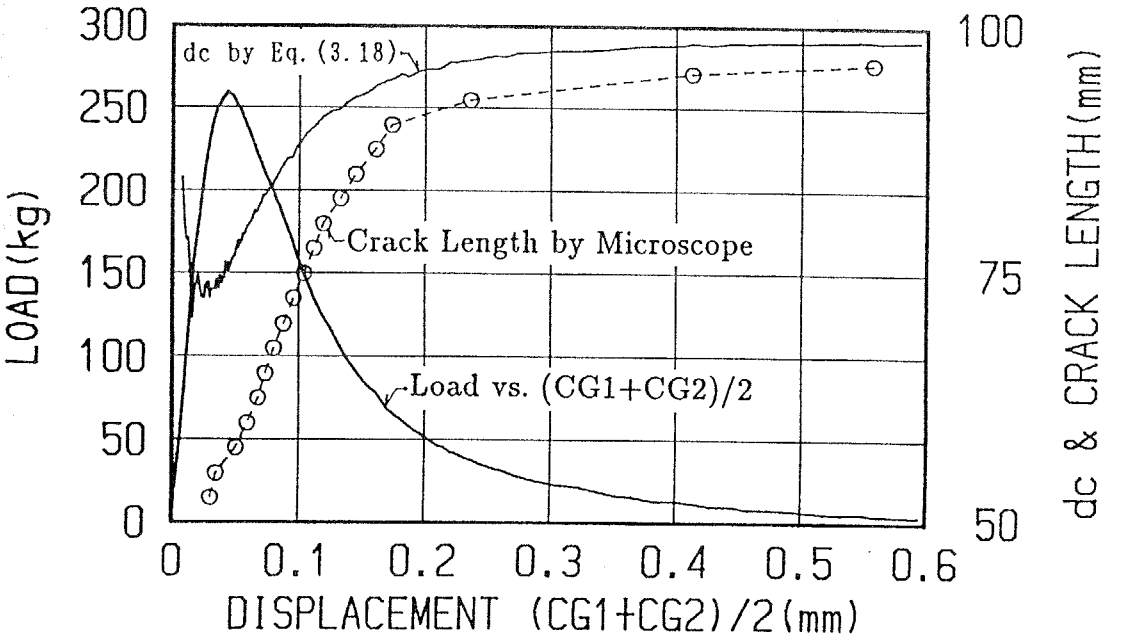


(2)3PM05-1ｼﾘｰｽﾞ－No.3試験体（材令１年）

図－3.73　鉛直変位 VT2 と(VT1+VT3)/2 の関係および(3.17)式との比較



(1) 3PM20-3ｼﾘｰｽﾞ－No. 5試験体（材令１年）



(2) 3PM05-1ｼﾘｰｽﾞ－No. 3試験体（材令１年）

図－3.74　開口変位 (CG1+CG2)/2 に対する(3.18)式によるdcおよびクラック進展長さの関係

3.6 まとめ

本章では、ノッチを有するコンクリートの曲げ試験を各種試験条件下で行い、最大耐力後の軟化挙動に影響を与える要因について考察し、引張軟化特性を数値計算によって推定するための基礎データを蓄積した。本章で得られた主な結論を以下に要約する。

(1) 本実験で用いた鉛直変位測定用フレームおよびバネ支持の支点ローラーにより、微小な弾性変形が正確に測定でき、ノッチ深さ30mm以上の試験体に対して、最大耐力後も安定した荷重－変位曲線を得ることができた。

(2) コンクリートは、微小なクラック進展が破壊に直結しない場合があるため、線形弾性破壊力学から得られる破壊靭性パラメータより、クラック抵抗性能を評価できる破壊エネルギーの方が、重要なパラメータとなる。

(3) 最大耐力後の抵抗力と破壊エネルギーは、試験体のリガメント長さが長くなると増大する。

(4) 載荷速度を速くすると、最大耐力は増加するが、破壊エネルギーへの影響は少ない。

(5) 最大耐力に近い荷重を持続させると、クリープ変形が進行し、その荷重を維持できなくなる限界変位に達する。したがって、荷重－変位曲線は頂の部分が欠けた曲線となる。

(6) 最大骨材寸法が大きいほど破壊エネルギーも大きくなり、バラツキも大きくなる。

(7) 水セメント比が大きくなると、最大耐力は減少するが、破壊エネルギーに関しては、明確な傾向がみられない。

(8) ノッチを有しているため、３点曲げと４点曲げの有効曲げ強度に有意な差異は認められない。また、破壊エネルギーは、４点曲げの方が３点曲げより大きくなる傾向がある。

(9) 気中養生試験体は水中養生試験体に比べ、曲げ強度は約20%、破壊エネルギーは30～50%高くなる。

(10)材令に伴う破壊エネルギーの増加は、圧縮強度、曲げ強度と比べて小さい。

(11)クラックは最大荷重の70～80%の荷重から50倍率の顕微鏡で確認できるようになり、最大荷重時で10～20mm程度のクラック進展である。

(12)コンクリートの最大耐力後の軟化挙動は、骨材のクラック拘束によって大きく影響を受け、その他の影響が明確に現れない場合がある。

(13)ノッチを有するコンクリートの曲げ変形モードは、ノッチの上方のリガメント内に回転中心をもつ剛体の回転運動とみることができる。この回転中心は、最大耐力までリガメントの中央付近にあるが、その後、クラック進展に伴って、上へ移動する。

第４章　モルタルの曲げ試験

4.1 はじめに

第3章でコンクリートの曲げ試験を行ない、その最大耐力後において抵抗力が徐々に減少する軟化挙動は、粗骨材のクラック拘束によって大きく影響され、その他の影響が明確にならない場合もあるという結論を得た。本章では、粗骨材以外の因子がセメント系材料の軟化挙動に及ぼす影響をより詳細に検討するために、モルタルの曲げ試験を行なう。セメントペーストまたはモルタル試験体を用いた既往の研究は、線形破壊力学の適用性に関するものが多かった(1)-(7)。本実験では、線形破壊力学の適用範囲外であるスロークラック成長を伴う最大耐力後の軟化挙動および破壊エネルギーに注目し、初期ノッチ深さ、載荷速度、細骨材粒子径、水セメント比、載荷法（3点曲げ(3PB)、4点曲げ(4PB)、スパン長さ）および材令の影響を検討する。さらに、最大耐力近くで一定荷重あるいは一定変位を維持した場合の変位増加あるいは荷重減少、およびその後の軟化挙動にどのような影響を与えるかについて考察する。

4.2　試験体

4.2.1　実験条件および試験体の準備

試験体はすべて普通ポルトランドセメント、水、砂からなるプレーンモルタルであり、混和剤は用いていない。試験体寸法は幅40mm、高さ40mm、長さ160mmと幅40mm、高さ40mm、長さ400mmの二種類である。以下に示す６項目をパラメータとし、最大耐力後の軟化挙動に与える影響について検討する。

(1) ノッチ深さ

ノッチ深さの試験体高さに対する割合(a/W)は、0～0.75まで0.25の間隔で変える。a/Wは0.5を基準とする。

(2) 載荷速度

載荷速度は、試験機の移動クロスヘッドで制御し、0.005mm/min.を基準とする。載荷速度の影響を検討するために、基準載荷速度の10倍および100倍の載荷速度で試験を行なう。

(3) 最大細骨材粒子径

最大細骨材粒子径は、0.3mm、0.6mm、1.2mm、2.5mm および5.0mm の５段階とし、2.5mmを基準とする。各最大粒子径の細骨材は、第３章で使用した細骨材をふるって用意したが、最大粒子径0.3mmの細骨材は、豊浦標準砂を用いた。

(4) 水セメント比

水セメント比は、0.45、0.55、0.65とし、0.55を基準とする。

(5) 載荷方法

載荷方法は、120mmスパン３点曲げを基準とするが、120mmスパン４点曲げ（純曲げ）および320mmスパン３点曲げについても試験を行なう。

(6) 材　令

材令４週および１年で試験を行なう。

上記パラメータの組合せに対し、表－4.1に示す実験条件で試験を行なう。

試験体のバラツキを考慮して、同一実験条件における試験体は3～7体とする。

試験名称の最初の２文字、3P、4PおよびSは、120mmスパンの３点曲げ、４点曲げおよび320mmスパンの３点曲げを表す。次のアルファベットは、水セメント比に対応している(L:W/C=0.45、 M:W/C=0.55、 H:W/C=0.65)。L、M、Hの後の数字は最大粒子径(mm)を示している。

表－4.1　実験条件

試験名称	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	載荷速度 (mm/min)	最大粒子径mm	水ｾﾒﾝﾄ比	調合名称	試験体数 4週＋1年	試験項目
3PM2.5-1	0	0.005	2.5	0.55	M2.5-A	3+4	ﾉｯﾁ 深さの影響
3PM2.5-2	10	0.005	2.5	0.55	M2.5-A	3+3	
3PM2.5-3	20	0.005	2.5	0.55	M2.5-A	3+7	
3PM2.5-4	30	0.005	2.5	0.55	M2.5-B	3+4	
3PM2.5-5	20	0.05	2.5	0.55	M2.5-B	3+4	載荷速度の影響
3PM2.5-6	20	0.5	2.5	0.55	M2.5-B	3+4	
3PM0.3-1	20	0.005	0.3	0.55	M0.3	3+4	最大粒子径の影響
3PM0.6-1	20	0.005	0.6	0.55	M0.6	3+4	
3PM1.2-1	20	0.005	1.2	0.55	M1.2	3+4	
3PM5.0-1	20	0.005	5.0	0.55	M5.0	3+5	
3PL2.5-1	20	0.005	2.5	0.45	L2.5	3+5	水ｾﾒﾝﾄ比の影響
3PH2.5-1	20	0.005	2.5	0.65	H2.5	3+4	
4PM2.5-7	10	0.005	2.5	0.55	M2.5-C	3+4	４点曲げの影響
4PM2.5-8	20	0.005	2.5	0.55	M2.5-C	3+4	
4PM2.5-9	20	0.05	2.5	0.55	M2.5-D	3+4	
4PM0.3-2	20	0.005	0.3	0.55	M0.3	3+4	
4PM5.0-2	20	0.005	5.0	0.55	M5.0	3+5	
4PL2.5-2	20	0.005	2.5	0.45	L2.5	3+4	
4PH2.5-2	20	0.005	2.5	0.65	H2.5	3+4	
SM2.5-00	0	0.005	2.5	0.55	M2.5-C	0+4	ｽﾊﾟﾝ長さの影響
SM2.5-10	10	0.005	2.5	0.55	M2.5-C	3+4	
SM2.5-11	20	0.005	2.5	0.55	M2.5-D	3+4	
SM2.5-12	20	0.05	2.5	0.55	M2.5-D	3+4	
SM0.3-3	20	0.005	0.3	0.55	M0.3	3+5	
SM0.3-4	10	0.005	0.3	0.55	M0.3	0+4	
SM5.0-3	20	0.005	5.0	0.55	M5.0	3+4	
SM5.0-4	10	0.005	5.0	0.55	M5.0	0+5	
SL2.5-3	20	0.005	2.5	0.45	L2.5	3+4	
SL2.5-4	10	0.005	2.5	0.45	L2.5	0+5	
SH2.5-3	20	0.005	2.5	0.65	H2.5	3+4	
SH2.5-4	10	0.005	2.5	0.65	H2.5	0+5	

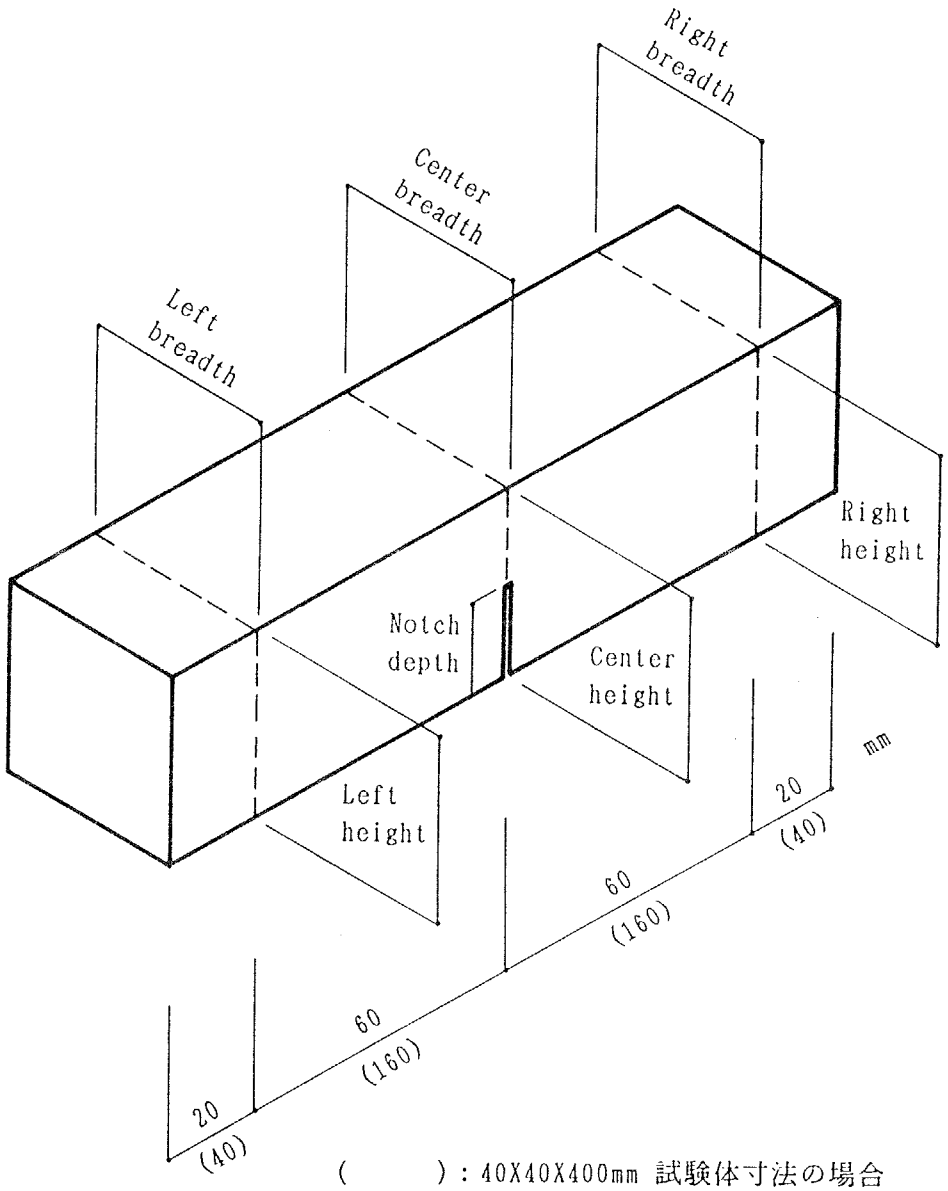
試験体の調合は、セメントに対する砂の重量比を2とし、各試験シリーズの必要量を強制練りミキサーを用いて一度に練り上げた。表－4.2に各試験体の調合を示す。試験体の作製は、JIS R 5201のセメントの強さ試験に準じて、鋼製型枠を用いて打設し、約24時間後に脱型、その後20℃の恒温水槽に移して水中養生を行った。試験体は材令28日又は１年で水槽から取り出し、その直後に厚さ0.8mmのダイヤモンドカッターを用いて所定の深さのノッチを与え、曲げ試験を行った。JIS R 5201に従って行った各調合のフロー値および強さ試験結果も表－4.2に示している。

表－4.2　調合および強さ試験結果

調合名称	水セメント比	最大粒子径 (mm)	C：W：S	フロー値	曲げ強さ (kg/cm^2)		圧縮強さ (kg/cm^2)	
					4週	1年	4週	1年
M2.5-A	0.55	2.5	1:0.55:2.0	220	78.4	84.6	479	683
M2.5-B	0.55	2.5	1:0.55:2.0	205	75.1	81.9	496	735
M2.5-C	0.55	2.5	1:0.55:2.0	200	75.6	82.2	513	690
M2.5-D	0.55	2.5	1:0.55:2.0	205	76.0	86.3	529	713
M0.3	0.55	0.3	1:0.55:2.0	145	72.0	84.8	430	562
M5.0	0.55	5.0	1:0.55:2.0	218	79.2	74.9	508	700
L2.5	0.45	2.5	1:0.45:2.0	125	77.6	81.5	546	769
H2.5	0.65	2.5	1:0.65:2.0	255	77.6	80.7	449	608
M1.2	0.55	1.2	1:0.55:2.0	175	74.9	78.0	499	665
M0.6	0.55	0.6	1:0.55:2.0	155	74.9	84.3	451	599

4.2.2　試験体の寸法および重量の測定結果

コンクリート曲げ試験体と同様に、図－4.1に示す試験体の寸法を1/20mm精度のノギスで測定した。寸法の測定結果を試験直前の重量とともに表－4.3（4週曲げ試験体）および表－4.4（1年曲げ試験体）に示す。



(　　)：40X40X400mm 試験体寸法の場合

図－4.1　試験体の測定位置

表－4.3　モルタル４週曲げ試験体寸法測定結果（その１）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-1 No.1	高さ	40.10	40.15	40.10	0.00	578	M2.5-A
	幅	40.10	40.10	40.35			
M2.5-1 No.2	高さ	40.00	40.10	40.05	0.00	578	M2.5-A
	幅	40.30	40.25	40.40			
M2.5-1 No.3	高さ	40.00	40.05	40.05	0.00	580	M2.5-A
	幅	40.30	40.25	40.40			
M2.5-2 No.1	高さ	40.00	40.05	40.05	10.00	579	M2.5-A
	幅	40.50	40.50	40.40			
M2.5-2 No.2	高さ	40.10	40.15	40.15	10.10	581	M2.5-A
	幅	40.20	40.40	40.20			
M2.5-2 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	9.90	580	M2.5-A
	幅	40.35	40.30	40.45			
M2.5-3 No.1	高さ	40.15	40.10	40.10	20.20	584	M2.5-A
	幅	40.55	40.55	40.50			
M2.5-3 No.2	高さ	40.20	40.10	40.05	20.05	579	M2.5-A
	幅	40.40	40.20	40.20			
M2.5-3 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	20.10	582	M2.5-A
	幅	40.55	40.50	40.40			
M2.5-4 No.1	高さ	40.05	40.05	40.05	30.08	586	M2.5-B
	幅	40.60	40.55	40.60			
M2.5-4 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	30.03	584	M2.5-B
	幅	40.40	40.40	40.40			
M2.5-4 No.3	高さ	40.00	40.00	40.05	30.03	580	M2.5-B
	幅	40.50	40.30	40.50			
M2.5-5 No.1	高さ	40.05	40.05	40.00	20.10	586	M2.5-B
	幅	40.70	40.60	40.60			
M2.5-5 No.2	高さ	40.05	40.10	40.10	20.05	582	M2.5-B
	幅	40.35	40.35	40.35			
M2.5-5 No.3	高さ	40.10	40.05	40.05	20.10	590	M2.5-B
	幅	40.80	40.80	40.80			
M2.5-6 No.1	高さ	40.05	40.10	40.05	20.20	580	M2.5-B
	幅	40.40	40.40	40.75			
M2.5-6 No.2	高さ	40.10	40.05	40.05	20.10	582	M2.5-B
	幅	40.60	40.60	40.60			
M2.5-6 No.3	高さ	40.10	40.00	40.00	20.00	586	M2.5-B
	幅	40.50	40.70	40.80			
M2.5-6 No.4	高さ	40.10	40.05	40.05	20.00	589	M2.5-B
	幅	40.80	40.70	40.90			

表－4.3　モルタル４週曲げ試験体寸法測定結果（その２）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M0.3-1 No.1	高さ	40.05	40.00	40.00	20.08	563	M0.3
	幅	40.20	40.10	40.10			
M0.3-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	559	M0.3
	幅	40.05	40.00	40.10			
M0.3-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.05	20.08	563	M0.3
	幅	40.30	40.30	40.30			
M0.6-1 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	19.90	572	M0.6
	幅	40.55	40.35	40.40			
M0.6-1 No.2	高さ	39.95	39.95	39.95	20.05	567	M0.6
	幅	40.50	40.15	40.25			
M0.6-1 No.3	高さ	39.95	39.95	39.95	20.00	563	M0.6
	幅	40.10	40.10	40.55			
M1.2-1 No.1	高さ	40.05	40.00	40.05	20.00	582	M1.2
	幅	40.90	40.85	41.00			
M1.2-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.15	585	M1.2
	幅	41.20	40.85	41.20			
M1.2-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	575	M1.2
	幅	40.70	40.80	40.60			
M5.0-1 No.1	高さ	40.10	40.00	40.00	20.05	587	M5.0
	幅	40.50	40.60	40.60			
M5.0-1 No.2	高さ	40.10	40.00	40.10	20.15	586	M5.0
	幅	40.50	40.45	40.50			
M5.0-1 No.3	高さ	40.10	40.00	40.10	20.05	593	M5.0
	幅	40.40	40.50	40.60			
L2.5-1 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	590	L2.5
	幅	40.45	40.25	40.35			
L2.5-1 No.2	高さ	40.05	40.05	40.05	20.05	591	L2.5
	幅	40.50	40.05	40.50			
L2.5-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	591	L2.5
	幅	40.35	40.45	40.55			
H2.5-1 No.1	高さ	40.00	39.95	40.00	20.15	586	H2.5
	幅	40.90	41.00	41.00			
H2.5-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	587	H2.5
	幅	40.90	40.80	40.85			
H2.5-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.15	577	H2.5
	幅	40.75	40.65	40.65			

表－4.3　モルタル４週曲げ試験体寸法測定結果（その３）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-7 No.1	高さ	40.05	40.00	40.00	10.05	580	M2.5-C
	幅	40.50	40.30	40.50			
M2.5-7 No.2	高さ	40.05	40.00	40.05	10.05	582	M2.5-C
	幅	40.20	40.20	40.60			
M2.5-7 No.3	高さ	40.05	40.00	40.05	10.13	576	M2.5-C
	幅	40.30	40.00	40.20			
M2.5-8 No.1	高さ	40.05	40.00	40.05	20.08	582	M2.5-C
	幅	40.60	40.60	40.40			
M2.5-8 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	19.98	588	M2.5-C
	幅	40.80	40.90	41.00			
M2.5-8 No.3	高さ	40.00	40.00	40.05	20.05	580	M2.5-C
	幅	40.60	40.60	40.60			
M2.5-9 No.1	高さ	40.05	40.00	40.00	20.08	577	M2.5-D
	幅	40.10	40.00	40.10			
M2.5-9 No.2	高さ	40.05	40.00	40.00	20.00	578	M2.5-D
	幅	40.00	40.00	40.20			
M2.5-9 No.3	高さ	40.05	40.00	40.05	20.18	580	M2.5-D
	幅	40.20	40.15	40.15			
M0.3-2 No.1	高さ	40.00	40.00	40.05	20.18	563	M0.3
	幅	40.20	40.30	40.40			
M0.3-2 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.08	558	M0.3
	幅	40.00	40.00	40.00			
M0.3-2 No.3	高さ	40.00	40.00	40.05	20.15	564	M0.3
	幅	40.40	40.20	40.40			
M5.0-2 No.1	高さ	40.10	40.00	40.05	20.10	587	M5.0
	幅	40.30	40.10	40.20			
M5.0-2 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.15	583	M5.0
	幅	40.20	40.10	40.15			
M5.0-2 No.3	高さ	40.05	40.05	40.05	19.90	595	M5.0
	幅	40.50	40.90	40.70			
L2.5-2 No.1	高さ	40.10	40.05	40.05	20.05	590	L2.5
	幅	40.30	40.30	40.20			
L2.5-2 No.2	高さ	40.05	40.05	40.05	20.05	587	L2.5
	幅	40.45	40.30	40.30			
L2.5-2 No.3	高さ	40.10	40.05	40.05	20.10	593	L2.5
	幅	40.55	40.60	40.55			

表－4.3　モルタル４週曲げ試験体寸法測定結果（その４）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
H2.5-2 No.1	高さ	39.90	39.90	39.90	20.05	574	H2.5
	幅	40.70	40.60	40.50			
H2.5-2 No.2	高さ	39.95	40.00	39.95	20.15	581	H2.5
	幅	40.60	40.40	40.90			
H2.5-2 No.3	高さ	39.95	39.95	39.95	20.00	581	H2.5
	幅	40.60	40.50	40.40			
M2.5-10 No.1	高さ	40.10	40.10	40.10	10.00	1439	M2.5-C
	幅	40.40	40.20	40.10			
M2.5-10 No.2	高さ	40.00	40.10	40.05	10.08	1460	M2.5-C
	幅	41.00	40.75	40.60			
M2.5-10 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	10.05	1451	M2.5-C
	幅	40.70	40.40	40.10			
M2.5-11 No.1	高さ	40.10	40.00	40.10	20.05	1446	M2.5-D
	幅	40.50	40.30	40.40			
M2.5-11 No.2	高さ	40.10	40.10	40.05	20.15	1438	M2.5-D
	幅	40.30	40.05	40.05			
M2.5-11 No.3	高さ	40.10	40.00	40.10	20.10	1456	M2.5-D
	幅	40.60	40.50	40.55			
M2.5-12 No.1	高さ	40.05	40.10	40.05	20.13	1445	M2.5-D
	幅	40.25	40.10	40.00			
M2.5-12 No.2	高さ	40.05	40.10	40.05	20.08	1456	M2.5-D
	幅	40.75	40.75	40.80			
M2.5-12 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	20.00	1444	M2.5-D
	幅	40.35	40.30	40.25			
M0.3-3 No.1	高さ	40.10	40.10	40.10	20.05	1398	M0.3
	幅	40.10	40.05	40.05			
M0.3-3 No.2	高さ	40.10	40.10	40.10	20.00	1413	M0.3
	幅	40.45	40.25	40.25			
M0.3-3 No.3	高さ	40.05	40.00	40.05	19.98	1416	M0.3
	幅	40.60	40.40	40.40			
M5.0-3 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	19.95	1442	M5.0
	幅	40.20	40.15	40.35			
M5.0-3 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	1461	M5.0
	幅	40.35	40.35	40.45			
M5.0-3 No.3	高さ	39.90	39.90	39.90	20.00	1450	M5.0
	幅	40.00	40.20	40.40			

表－4.3　モルタル４週曲げ試験体寸法測定結果（その５）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
L2.5-3 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	1466	L2.5
	幅	40.70	40.50	40.70			
L2.5-3 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	1461	L2.5
	幅	40.30	40.45	40.50			
L2.5-3 No.3	高さ	40.00	40.05	40.00	20.10	1482	L2.5
	幅	40.40	40.75	41.00			
H2.5-3 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	1430	H2.5
	幅	40.15	40.00	40.35			
H2.5-3 No.2	高さ	39.95	40.00	40.00	20.05	1443	H2.5
	幅	40.40	40.60	41.00			
H2.5-3 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	1455	H2.5
	幅	40.75	40.85	41.20			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その１）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-1 No.1	高さ	40.10	40.10	40.10	0.00	585	M2.5-A
	幅	40.40	40.55	40.55			
M2.5-1 No.2	高さ	40.10	40.10	40.10	0.00	580	M2.5-A
	幅	40.20	40.20	40.45			
M2.5-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	0.00	582	M2.5-A
	幅	40.35	40.30	40.35			
M2.5-1 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	0.00	586	M2.5-A
	幅	40.35	40.65	40.55			
M2.5-2 No.1	高さ	40.05	40.05	40.05	10.15	580	M2.5-A
	幅	40.25	40.25	40.30			
M2.5-2 No.2	高さ	40.00	40.05	40.10	10.20	583	M2.5-A
	幅	40.40	40.40	40.50			
M2.5-2 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	10.15	584	M2.5-A
	幅	40.25	40.55	40.80			
M2.5-3 No.1	高さ	40.10	40.10	40.10	20.10	578	M2.5-A
	幅	40.30	40.45	40.15			
M2.5-3 No.2	高さ	40.10	40.05	40.05	20.10	586	M2.5-A
	幅	40.65	40.50	40.65			
M2.5-3 No.3	高さ	40.10	40.05	40.10	20.25	585	M2.5-A
	幅	40.50	40.75	40.80			
M2.5-3 No.4	高さ	40.05	40.00	40.00	20.10	584	M2.5-B
	幅	40.10	40.30	40.40			
M2.5-3 No.5	高さ	40.05	40.05	40.05	20.05	581	M2.5-C
	幅	40.35	40.35	40.50			
M2.5-3 No.6	高さ	40.10	40.10	40.10	20.00	584	M2.5-D
	幅	40.55	40.55	40.45			
M2.5-3 No.7	高さ	40.05	40.05	40.05	20.00	583	M2.5-D
	幅	40.50	40.65	40.35			
M2.5-4 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	30.10	583	M2.5-B
	幅	40.45	40.25	40.40			
M2.5-4 No.2	高さ	40.10	40.05	40.10	30.15	586	M2.5-B
	幅	40.45	40.45	40.50			
M2.5-4 No.3	高さ	40.10	40.05	40.10	30.05	587	M2.5-B
	幅	40.40	40.40	40.60			
M2.5-4 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	30.00	589	M2.5-B
	幅	40.85	40.85	40.70			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その２）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-5 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	582	M2.5-B
	幅	40.55	40.25	40.30			
M2.5-5 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.20	585	M2.5-B
	幅	40.45	40.45	40.55			
M2.5-5 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	582	M2.5-B
	幅	40.10	40.20	40.40			
M2.5-5 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	587	M2.5-B
	幅	40.50	40.75	40.80			
M2.5-6 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.20	584	M2.5-B
	幅	40.20	40.40	40.35			
M2.5-6 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.15	588	M2.5-B
	幅	40.55	40.30	40.50			
M2.5-6 No.3	高さ	40.05	40.00	40.05	20.05	582	M2.5-B
	幅	40.20	40.25	40.35			
M2.5-6 No.4	高さ	40.05	40.00	40.05	20.05	582	M2.5-B
	幅	40.15	40.10	40.50			
M0.3-1 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	559	M0.3
	幅	40.05	40.10	40.10			
M0.3-1 No.2	高さ	40.05	40.00	40.00	20.05	563	M0.3
	幅	40.45	40.45	40.40			
M0.3-1 No.3	高さ	40.00	40.05	40.05	19.95	560	M0.3
	幅	40.20	40.20	40.00			
M0.3-1 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	565	M0.3
	幅	40.25	40.40	40.40			
M0.6-1 No.1	高さ	39.95	39.95	39.95	20.05	569	M0.6
	幅	40.20	40.30	40.45			
M0.6-1 No.2	高さ	39.95	39.95	40.00	20.05	567	M0.6
	幅	40.65	39.95	40.60			
M0.6-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	571	M0.6
	幅	40.40	40.80	40.55			
M0.6-1 No.4	高さ	39.95	39.95	39.95	20.05	566	M0.6
	幅	40.20	40.00	40.15			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その３）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
M1.2-1 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	571	M1.2
	幅	40.80	40.70	40.70			
M1.2-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	580	M1.2
	幅	41.20	41.10	41.10			
M1.2-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	579	M1.2
	幅	41.20	41.25	41.30			
M1.2-1 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	574	M1.2
	幅	40.60	40.50	40.80			
M5.0-1 No.1	高さ	40.00	40.05	40.00	20.00	584	M5.0
	幅	40.20	40.15	40.80			
M5.0-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	19.95	581	M5.0
	幅	40.20	40.40	40.55			
M5.0-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	581	M5.0
	幅	40.20	40.20	40.30			
M5.0-1 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	19.95	581	M5.0
	幅	40.05	40.20	40.20			
M5.0-1 No.5	高さ	40.05	40.05	40.05	20.05	584	M5.0
	幅	40.30	40.20	40.35			
L2.5-1 No.1	高さ	40.05	40.05	40.05	20.05	588	L2.5
	幅	40.45	40.50	40.30			
L2.5-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	590	L2.5
	幅	40.90	41.00	40.90			
L2.5-1 No.3	高さ	40.05	40.00	40.05	20.10	593	L2.5
	幅	40.75	40.85	40.60			
L2.5-1 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	19.90	589	L2.5
	幅	40.85	40.35	40.70			
L2.5-1 No.5	高さ	40.05	40.05	40.10	20.05	582	L2.5
	幅	40.30	40.10	40.25			
H2.5-1 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	578	H2.5
	幅	40.75	41.10	41.35			
H2.5-1 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	573	H2.5
	幅	40.65	40.30	40.40			
H2.5-1 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	19.85	570	H2.5
	幅	40.50	40.15	40.20			
H2.5-1 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	20.15	571	H2.5
	幅	40.55	40.35	40.50			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その４）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-7 No.1	高さ	40.05	40.05	40.05	10.05	580	M2.5-C
	幅	40.10	40.10	40.10			
M2.5-7 No.2	高さ	40.10	40.10	40.10	10.20	586	M2.5-C
	幅	40.60	40.90	40.90			
M2.5-7 No.3	高さ	40.05	40.05	40.05	10.10	587	M2.5-C
	幅	40.60	40.55	40.45			
M2.5-7 No.4	高さ	40.00	40.10	40.10	10.10	579	M2.5-C
	幅	40.25	40.25	40.25			
M2.5-8 No.1	高さ	40.05	40.05	40.10	20.20	586	M2.5-C
	幅	40.60	40.80	40.90			
M2.5-8 No.2	高さ	40.00	40.05	40.05	20.05	587	M2.5-C
	幅	40.40	40.50	40.80			
M2.5-8 No.3	高さ	40.05	40.05	40.05	20.15	590	M2.5-C
	幅	41.00	41.00	41.05			
M2.5-8 No.4	高さ	40.05	40.05	40.10	20.05	585	M2.5-C
	幅	40.55	40.60	40.50			
M2.5-9 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.10	585	M2.5-D
	幅	40.40	40.40	40.40			
M2.5-9 No.2	高さ	40.10	40.10	40.10	20.05	583	M2.5-D
	幅	40.50	40.70	40.25			
M2.5-9 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	581	M2.5-D
	幅	40.20	40.10	40.25			
M2.5-9 No.4	高さ	40.10	40.10	40.10	20.10	578	M2.5-D
	幅	40.00	40.00	40.00			
M0.3-2 No.1	高さ	40.00	40.00	40.05	20.00	561	M0.3
	幅	40.20	40.30	40.30			
M0.3-2 No.2	高さ	40.00	40.05	40.00	20.00	559	M0.3
	幅	40.30	40.20	40.15			
M0.3-2 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	20.05	560	M0.3
	幅	40.30	40.20	40.40			
M0.3-2 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	20.13	560	M0.3
	幅	40.00	40.00	40.20			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その５）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
M5.0-2 No.1	高さ	40.05	40.05	40.10	20.00	590	M5.0
	幅	40.55	40.60	40.70			
M5.0-2 No.2	高さ	40.00	40.00	40.05	20.10	589	M5.0
	幅	40.80	40.75	40.60			
M5.0-2 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.15	588	M5.0
	幅	40.75	40.75	40.60			
M5.0-2 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	20.10	584	M5.0
	幅	40.65	40.15	40.10			
M5.0-2 No.5	高さ	40.05	40.00	40.05	20.10	592	M5.0
	幅	40.95	40.95	40.95			
L2.5-2 No.1	高さ	40.10	40.10	40.10	20.00	591	L2.5
	幅	40.60	41.00	40.40			
L2.5-2 No.2	高さ	40.10	40.10	40.10	19.90	584	L2.5
	幅	40.50	40.20	40.45			
L2.5-2 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	20.05	585	L2.5
	幅	40.70	40.10	40.35			
L2.5-2 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	584	L2.5
	幅	40.10	40.10	40.20			
H2.5-2 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	580	H2.5
	幅	41.00	41.10	40.95			
H2.5-2 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	20.00	574	H2.5
	幅	40.70	40.60	40.80			
H2.5-2 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	573	H2.5
	幅	40.55	40.45	40.50			
H2.5-2 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	568	H2.5
	幅	40.60	40.50	40.65			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その６）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-00 No.1	高さ	40.05	40.10	40.05	0.00	1471	M2.5-C
	幅	40.65	40.65	40.70			
M2.5-00 No.2	高さ	40.05	40.10	40.05	0.00	1455	M2.5-C
	幅	40.35	40.10	40.50			
M2.5-00 No.3	高さ	40.10	40.15	40.10	0.00	1466	M2.5-C
	幅	40.55	40.50	40.65			
M2.5-00 No.4	高さ	40.10	40.05	40.10	0.00	1471	M2.5-C
	幅	40.95	40.70	40.80			
M2.5-10 No.1	高さ	40.05	40.10	40.10	10.14	1468	M2.5-C
	幅	40.80	40.75	41.00			
M2.5-10 No.2	高さ	40.00	40.05	40.05	10.04	1456	M2.5-C
	幅	40.80	40.45	40.45			
M2.5-10 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	10.07	1450	M2.5-C
	幅	40.30	40.10	40.40			
M2.5-10 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	10.19	1461	M2.5-C
	幅	40.60	40.40	41.00			
M2.5-10 No.5	高さ	40.05	40.00	40.00	10.14	1446	M2.5-C
	幅	40.25	40.15	40.30			
M2.5-10 No.6	高さ	40.10	40.10	40.10	10.15	1462	M2.5-C
	幅	40.60	40.60	40.60			
M2.5-11 No.1	高さ	40.00	40.05	40.00	20.11	1452	M2.5-D
	幅	40.40	40.25	40.25			
M2.5-11 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	19.92	1454	M2.5-D
	幅	40.30	40.00	40.50			
M2.5-11 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.03	1446	M2.5-D
	幅	40.25	40.00	40.00			
M2.5-11 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.23	1446	M2.5-D
	幅	40.25	40.15	40.00			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その７）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M2.5-12 No.1	高さ	40.00	40.05	40.05	20.10	1450	M2.5-D
	幅	40.15	40.00	40.25			
M2.5-12 No.2	高さ	40.05	40.10	40.10	19.95	1465	M2.5-D
	幅	40.80	40.75	40.30			
M2.5-12 No.3	高さ	40.10	40.10	40.10	20.00	1458	M2.5-D
	幅	40.35	40.25	40.50			
M2.5-12 No.4	高さ	40.10	40.10	40.10	20.10	1468	M2.5-D
	幅	40.80	40.75	40.55			
M2.5-12 No.5	高さ	40.10	40.10	40.05	20.10	1451	M2.5-D
	幅	40.40	40.55	40.10			
M0.3-3 No.1	高さ	40.05	40.05	40.05	20.11	1412	M0.3
	幅	40.35	40.20	40.20			
M0.3-3 No.2	高さ	40.05	40.00	40.00	20.23	1407	M0.3
	幅	40.35	40.00	40.00			
M0.3-3 No.3	高さ	40.00	40.05	40.05	20.08	1423	M0.3
	幅	40.70	40.50	40.50			
M0.3-3 No.4	高さ	40.05	40.00	40.10	20.11	1415	M0.3
	幅	40.60	40.45	40.40			
M0.3-3 No.5	高さ	40.15	40.20	40.15	20.02	1400	M0.3
	幅	40.15	40.15	40.15			
M0.3-4 No.1	高さ	40.10	40.15	40.15	10.01	1414	M0.3
	幅	40.65	40.60	40.40			
M0.3-4 No.2	高さ	40.05	40.05	40.05	10.15	1408	M0.3
	幅	40.50	40.10	40.10			
M0.3-4 No.3	高さ	40.05	40.05	40.00	10.09	1421	M0.3
	幅	40.90	40.75	40.60			
M0.3-4 No.4	高さ	40.10	40.05	40.05	10.17	1399	M0.3
	幅	40.20	40.10	40.00			
M0.3-4 No.5	高さ	40.00	40.00	40.00	10.07	1399	M0.3
	幅	40.30	40.00	39.90			
M0.3-4 No.6	高さ	40.10	40.10	40.10	10.14	1417	M0.3
	幅	40.55	40.45	40.40			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その８）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ノッチ深サ (mm)	重量 (g)	調合名
M5.0-3 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.16	1458	M5.0
	幅	40.45	40.20	40.80			
M5.0-3 No.2	高さ	40.05	40.05	40.05	20.17	1453	M5.0
	幅	40.50	40.05	40.25			
M5.0-3 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	20.20	1472	M5.0
	幅	40.60	40.80	41.00			
M5.0-3 No.4	高さ	40.00	40.05	40.00	20.08	1455	M5.0
	幅	40.25	40.10	40.60			
M5.0-4 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	10.23	1475	M5.0
	幅	40.55	40.70	40.95			
M5.0-4 No.2	高さ	40.00	39.95	39.95	10.26	1448	M5.0
	幅	40.20	40.00	40.40			
M5.0-4 No.3	高さ	40.00	40.00	40.05	10.01	1455	M5.0
	幅	40.25	40.10	40.50			
M5.0-4 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	10.20	1452	M5.0
	幅	40.10	40.10	40.40			
M5.0-4 No.5	高さ	40.00	40.05	40.05	10.11	1455	M5.0
	幅	40.10	40.10	40.45			
M5.0-4 No.6	高さ	40.00	40.05	40.05	10.10	1455	M5.0
	幅	40.00	40.15	40.50			
M5.0-4 No.7	高さ	40.00	40.00	40.00	10.16	1470	M5.0
	幅	40.50	40.45	41.00			
M5.0-4 No.8	高さ	40.00	39.95	40.00	10.00	1466	M5.0
	幅	40.30	40.70	40.90			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その９）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
L2.5-3 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	20.05	1475	L2.5
	幅	40.80	40.40	40.75			
L2.5-3 No.2	高さ	40.00	40.05	40.00	19.88	1477	L2.5
	幅	40.80	41.20	41.00			
L2.5-3 No.3	高さ	40.00	40.00	40.00	19.87	1448	L2.5
	幅	40.20	40.30	40.00			
L2.5-3 No.4	高さ	40.05	40.05	40.05	20.05	1459	L2.5
	幅	40.30	40.00	40.60			
L2.5-4 No.1	高さ	40.05	40.05	40.05	9.99	1485	L2.5
	幅	41.00	40.90	41.30			
L2.5-4 No.2	高さ	40.05	40.05	40.05	10.02	1470	L2.5
	幅	40.35	40.50	40.50			
L2.5-4 No.3	高さ	39.95	39.90	39.95	10.05	1468	L2.5
	幅	40.70	40.50	40.75			
L2.5-4 No.4	高さ	40.10	40.10	40.05	10.01	1483	L2.5
	幅	40.50	41.00	41.00			
L2.5-4 No.5	高さ	40.05	40.00	40.00	10.13	1466	L2.5
	幅	40.25	40.20	40.70			
L2.5-4 No.6	高さ	40.05	40.05	40.05	10.00	1461	L2.5
	幅	40.20	40.00	40.40			
L2.5-4 No.7	高さ	40.00	40.00	40.00	10.03	1465	L2.5
	幅	40.30	40.40	40.30			
L2.5-4 No.8	高さ	40.10	40.05	40.10	10.00	1473	L2.5
	幅	40.80	40.35	40.75			

表－4.4　モルタル１年曲げ試験体寸法測定結果（その１０）

試験体名称	部所	左 (mm)	中央 (mm)	右 (mm)	ﾉｯﾁ深ｻ (mm)	重量 (g)	調合名
H2.5-3 No.1	高さ	40.00	40.05	40.05	19.97	1470	H2.5
	幅	40.85	41.10	41.40			
H2.5-3 No.2	高さ	39.95	39.90	39.90	19.97	1428	H2.5
	幅	40.45	40.20	40.80			
H2.5-3 No.3	高さ	40.05	40.00	40.05	20.03	1439	H2.5
	幅	40.60	40.70	40.80			
H2.5-3 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	20.01	1426	H2.5
	幅	40.20	40.10	40.65			
H2.5-4 No.1	高さ	40.00	40.00	40.00	10.06	1444	H2.5
	幅	40.65	40.70	40.75			
H2.5-4 No.2	高さ	40.00	40.00	40.00	9.92	1452	H2.5
	幅	40.90	41.05	41.25			
H2.5-4 No.3	高さ	40.00	40.05	40.05	10.02	1435	H2.5
	幅	40.40	40.40	40.60			
H2.5-4 No.4	高さ	40.00	40.00	40.00	9.95	1440	H2.5
	幅	40.70	40.70	40.80			
H2.5-4 No.5	高さ	40.00	40.00	40.00	9.98	1419	H2.5
	幅	40.20	40.00	40.25			
H2.5-4 No.6	高さ	40.00	40.00	40.00	10.01	1434	H2.5
	幅	40.40	40.40	40.85			
H2.5-4 No.7	高さ	40.00	40.00	40.00	10.03	1425	H2.5
	幅	40.20	40.25	40.25			
H2.5-4 No.8	高さ	40.00	40.00	40.00	10.00	1446	H2.5
	幅	40.85	40.80	41.00			

4.3　実験方法

(1) 載荷方法

モルタルの曲げ試験は、荷重容量25tonのインストロン型試験機を用いて、変位制御で載荷を行った。載荷方法は、120mmスパン３点曲げ(3PB)、120mmスパン４点曲げ(4PB)および320mmスパン３点曲げの３通りであり、図－4.2に3PBの載荷装置を示す。また、実際の4PBおよび320mmスパンの3PBの様子を写真－4.1および4.2に示す。

支点部分は支点のピンの摩擦の影響を小さくするために、ピンはその直径よりも若干大きい溝の内側に、弱いバネで保持されており、必要な水平方向の移動が可能な構造になっている。また、加力部分は球座の回転およびバネのネジの締め付けの調節により、加力部分の試験体への片当りを防止できるようになっている。

荷重は、0.2kg感度のロードセルで測定を行った。

(2) 変位の測定方法

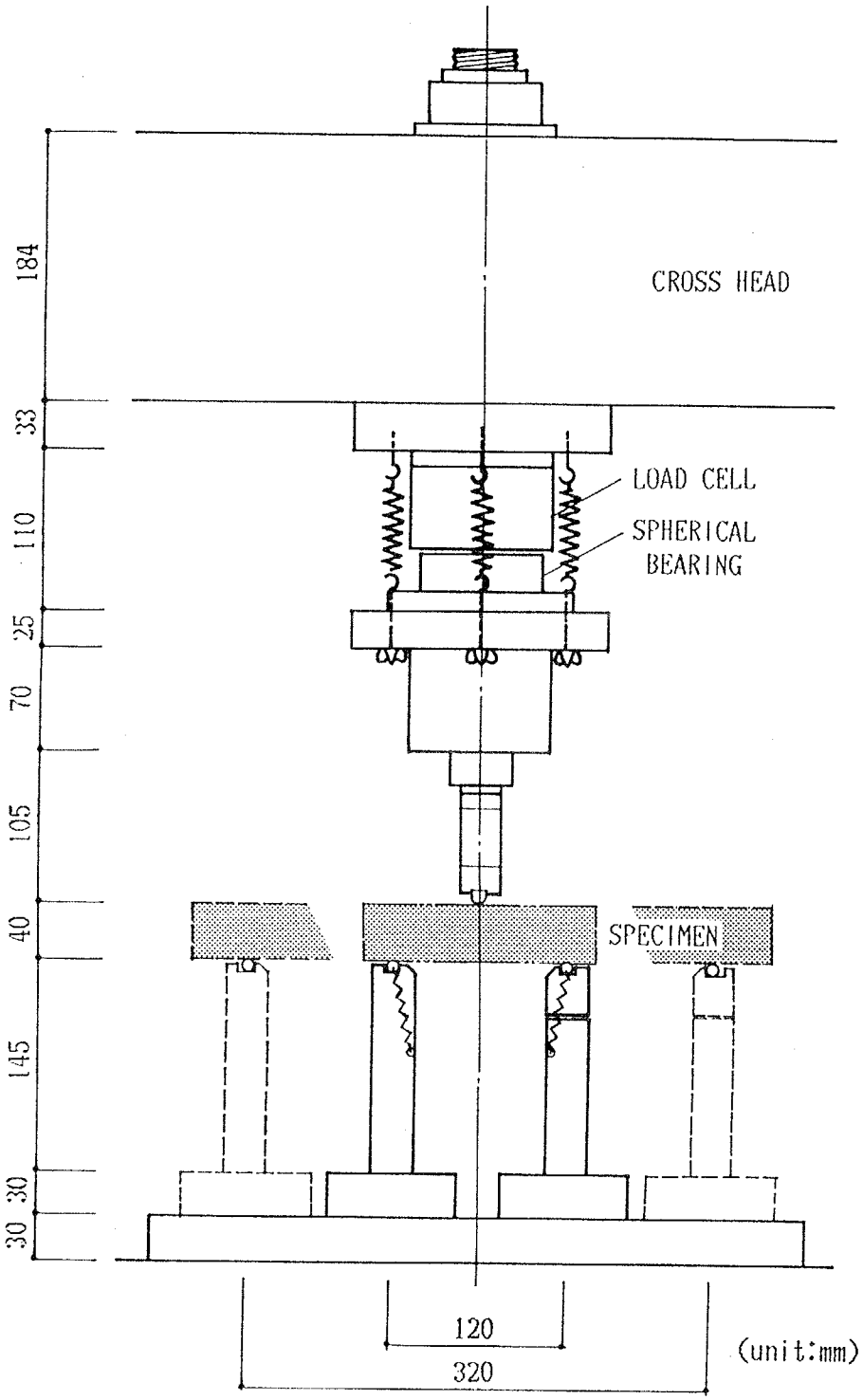
コンクリートの曲げ試験と同様、加力点および支点の局所的な塑性変形を取り除くために、変位測定用フレームを用いた。120mmスパン試験に用いた変位測定用フレームの詳細を図－4.3に示す。

変位測定位置および載荷位置を図－4.4に示す。３ヵ所の鉛直変位(VT1、VT2、VT3)は、120mmスパン試験では感度1/1000mmの変位計で、320mmスパン試験では感度1/2000mmの変位計で測定を行った。ただし、１年試験の場合、120mmスパンの３点曲げ試験ではVT2を、４点曲げ試験ではVT1とVT3をそれぞれ感度1/2000mmの変位計で測定を行った。

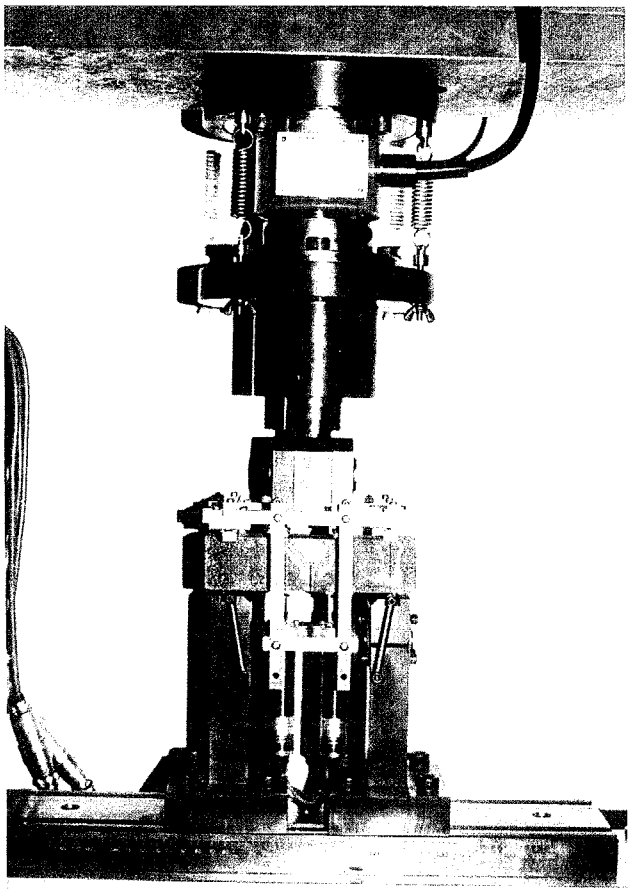
クリップゲージによる開口変位の測定は、本実験で用いる小型試験体の場合、クリップゲージのバネ反力が試験結果に与える影響が大きいので行っていない。

(3) クラックの測定方法

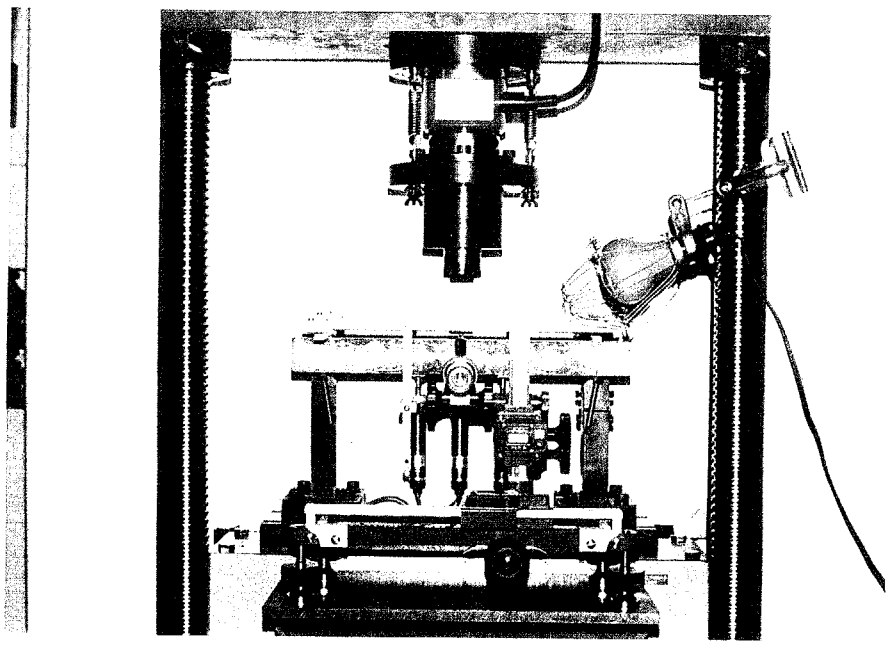
試験体が小さいので、載荷中のクラック進展挙動の観測は、原則行っていないが、1年試験のスパン長さ320mmの試験体については、コンクリートの曲げ試験の場合と同様にクラック観測を行った。


CROSS HEAD
LOAD CELL
SPHERICAL
BEARING
SPECIMEN
184
33
110
25
70
105
40
145
30
30
120
320
(unit:mm)

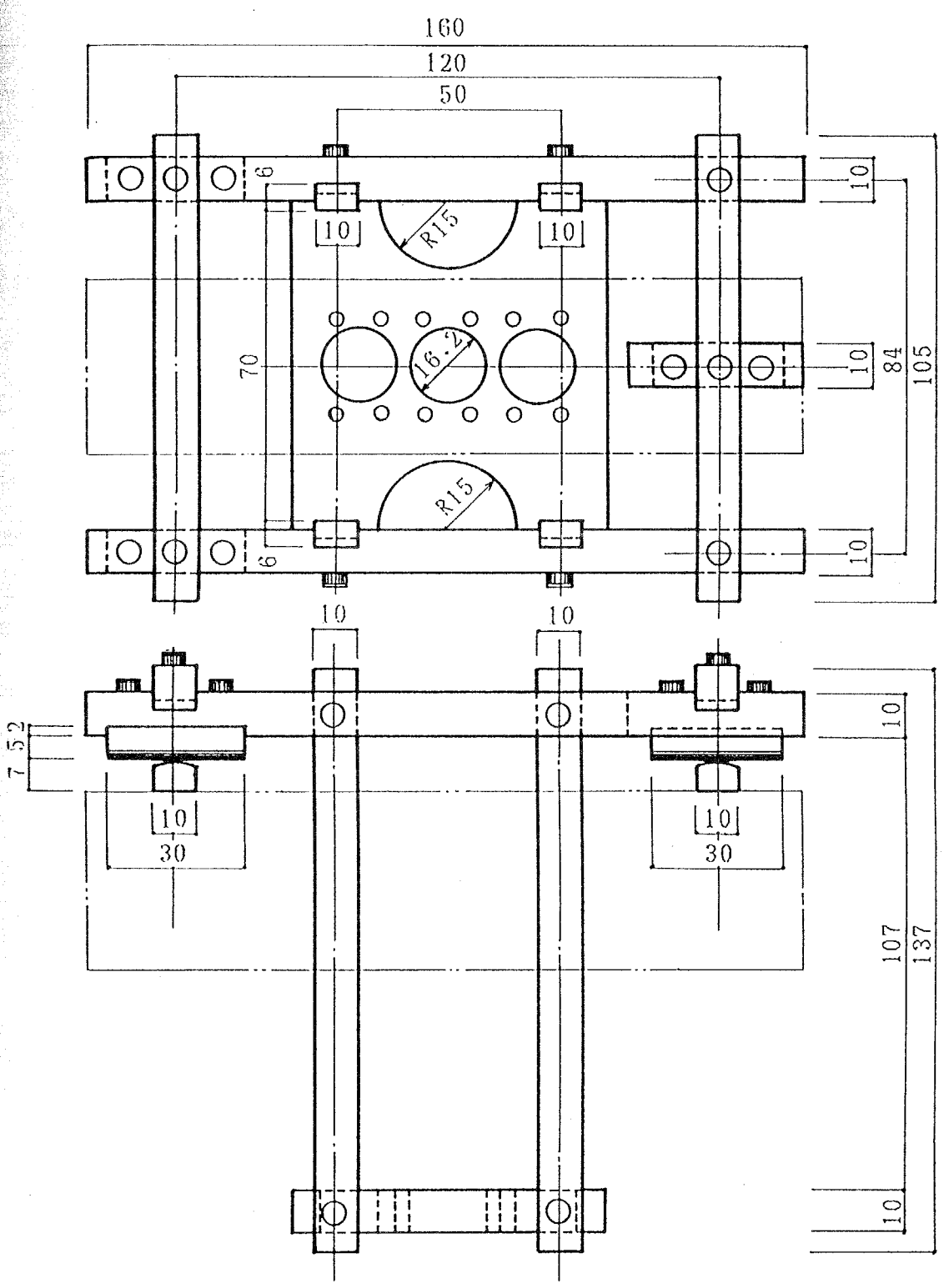
図－4.2　載荷装置



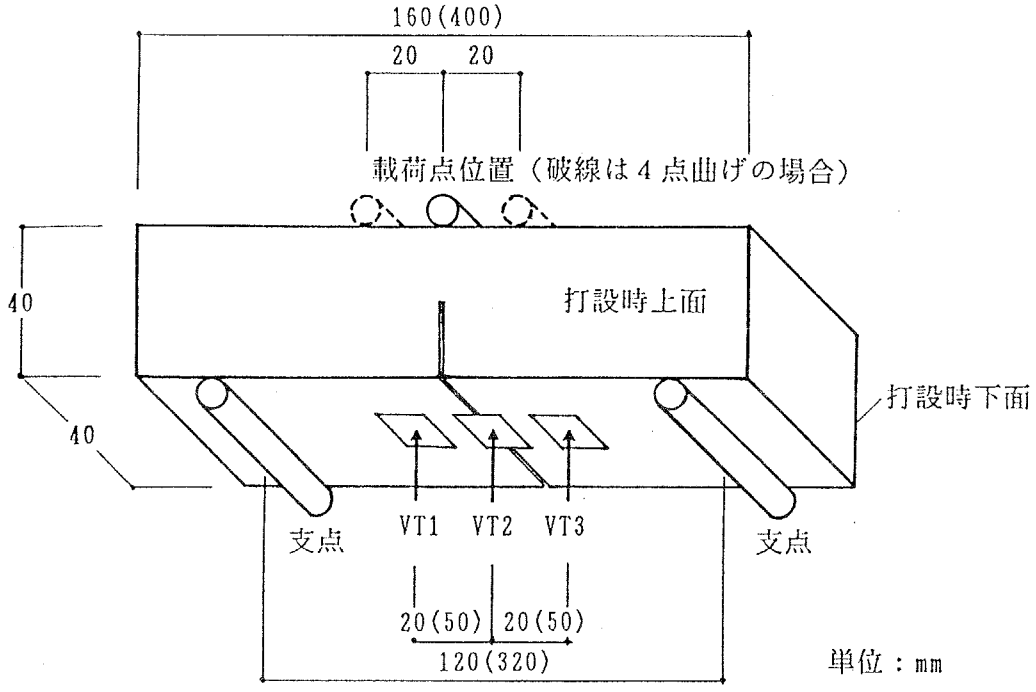
写真－4.1　4点曲げの載荷装置



写真－4.2　320mmスパン3点曲げの載荷装置とクラック観測用顕微鏡



図－4.3　変位測定用フレーム詳細図



VT1～VT3：鉛直方向変位を測定する変位計の位置
（　　）：40X40X400mm 試験体寸法の場合

図－4.4　変位測定位置および載荷位置

4.4　実験結果および考察

4.4.1　実験結果

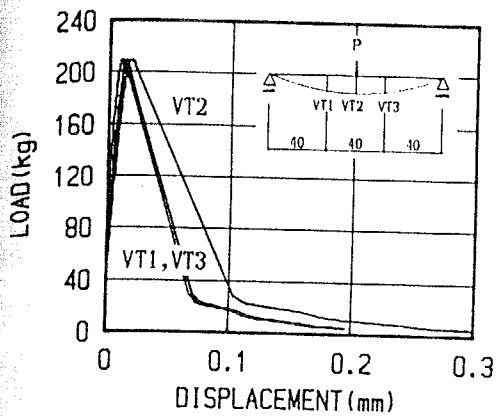
(1) 荷重－変位曲線

モルタルの曲げ試験により得られた各試験体の荷重－変位曲線を各シリーズ毎に、４週試験結果は図－4.5～30に、また、１年試験結果は図－4.31～61に示す。これらの図には、各試験シリーズ毎の平均値に対する各試験体のバラツキも示してある。ただし、鉛直変位のVT1,VT3は、対称条件よりほとんど同一の荷重－変位曲線が得られるので、その平均値を示している。

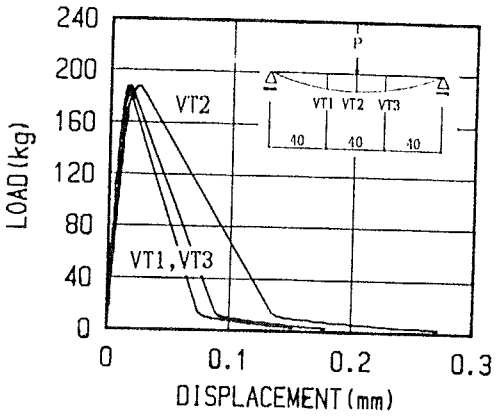
ノッチ深さ、載荷速度、最大粒子径、水セメント比が荷重－変位曲線に及ぼす影響を検討するために、各試験シリーズの平均荷重－変位曲線をパラメータ毎に比較して、４週試験結果を図－4.62～65に、１年試験結果を図－4.66～69に示す。載荷方法の異なる荷重－荷重点変位平均曲線を図－4.70（４週試験）および図－4.71（１年試験）に示す。また、くり返し載荷試験結果を図－4.72に、時間効果試験結果を図－4.73～77に示す。

(2) 荷重とクラック進展の関係

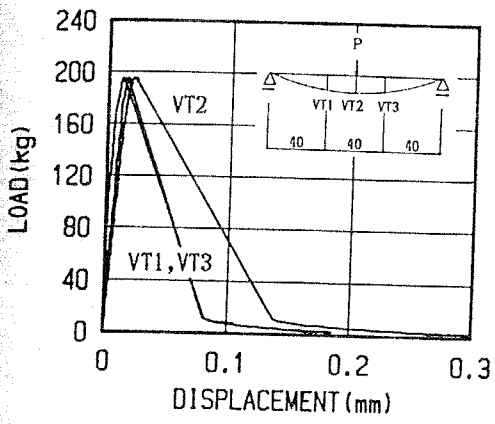
クラック観測を行った試験結果を図－4.78～82に示す。



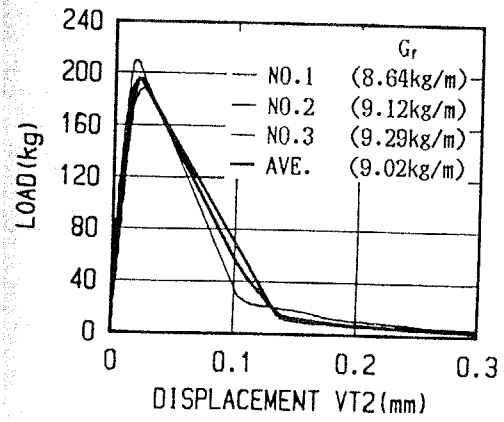
(1) 試験体 No.1



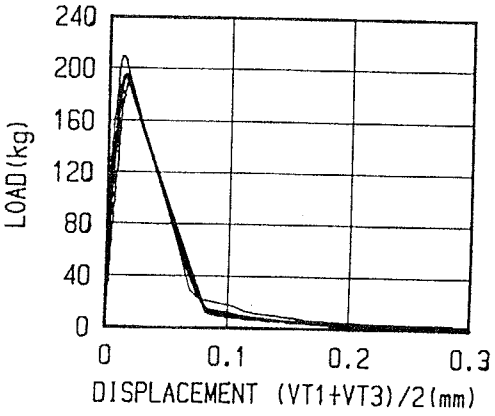
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

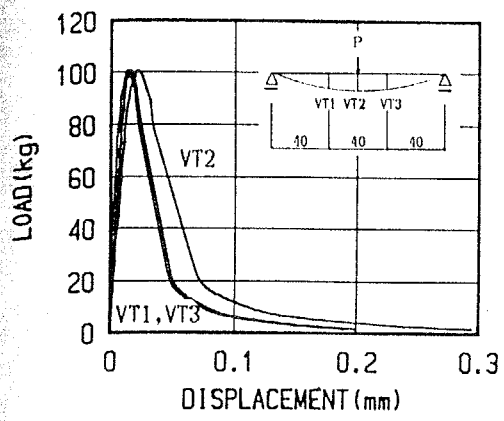


(4) 荷重－変位 VT2

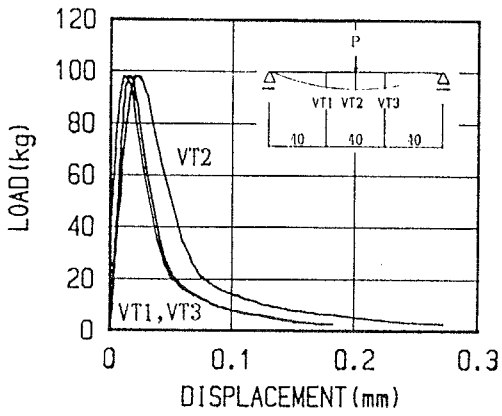


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

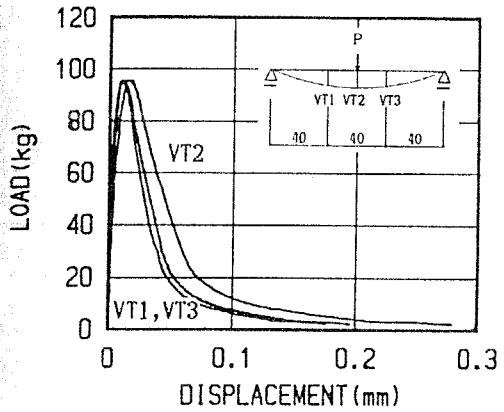
図－4.5 荷重－変位曲線：3PM2.5-1シリーズ（4週試験）



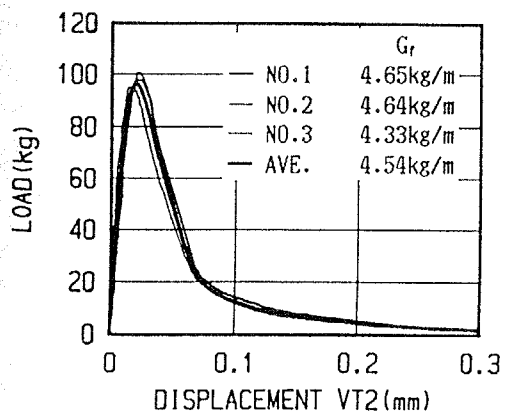
(1) 試験体 No.1



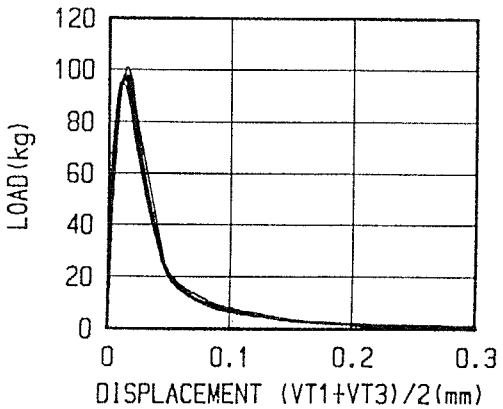
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

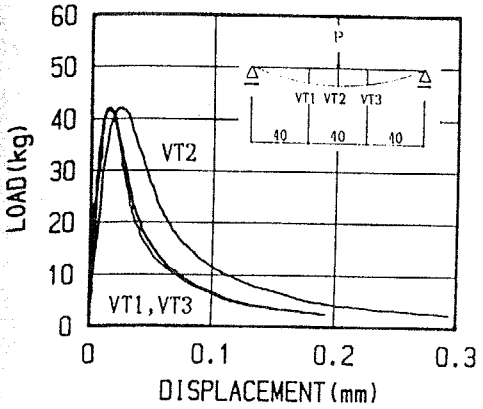


(4) 荷重－変位 VT2

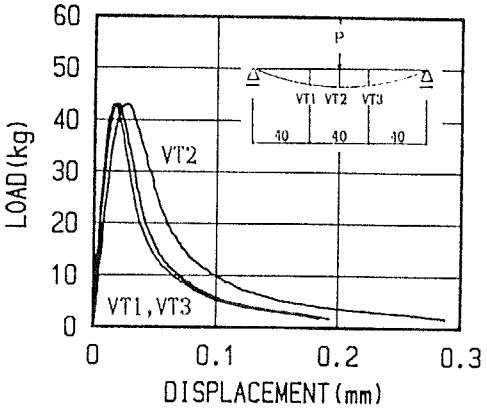


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

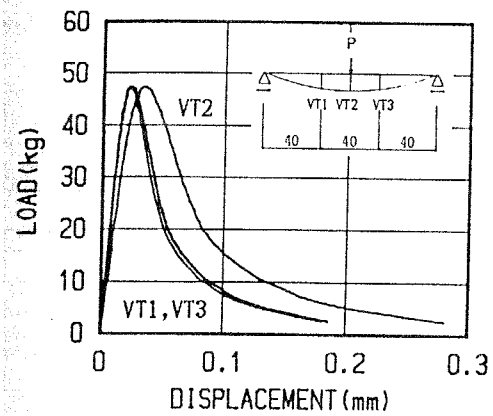
図－4.6 荷重－変位曲線：3PM2.5-2シリーズ（4週試験）



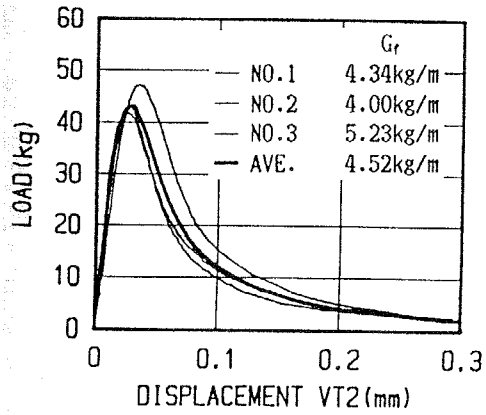
(1) 試験体 No.1



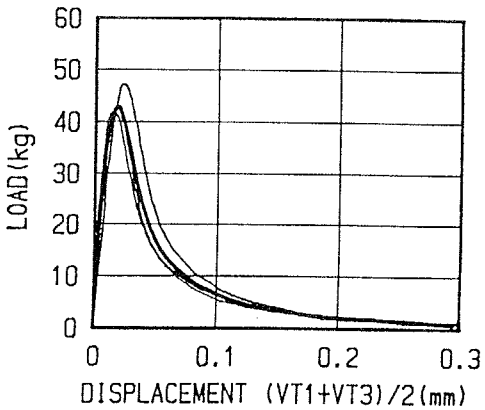
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

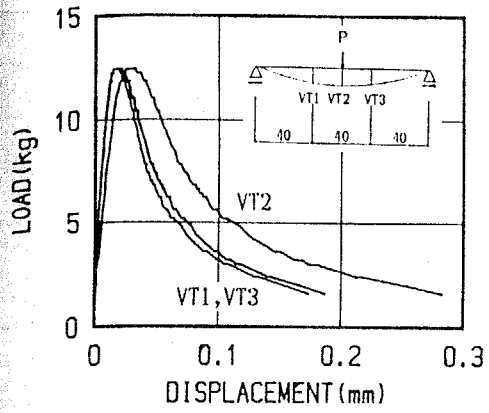


(4) 荷重－変位 VT2

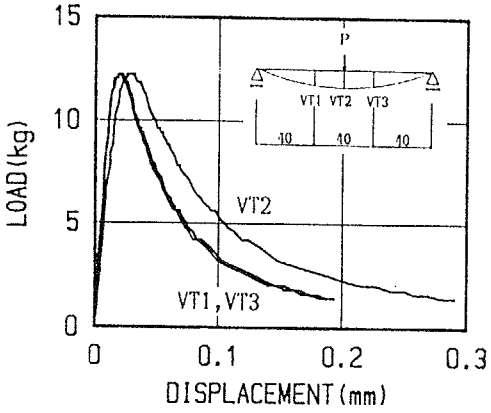


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

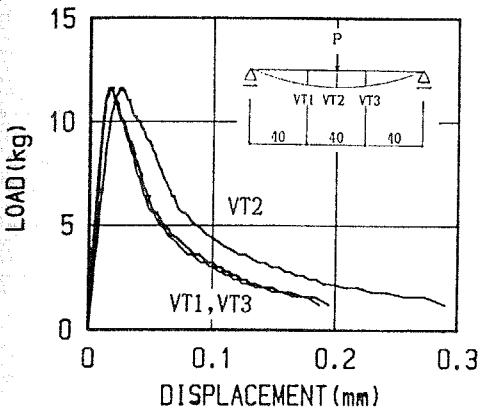
図－4.7 荷重－変位曲線：3PM2.5-3シリーズ（4週試験）



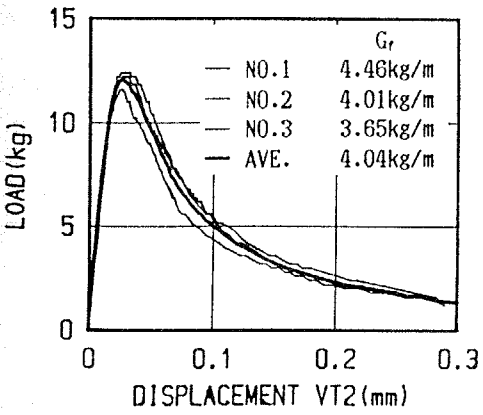
(1) 試験体 No.1



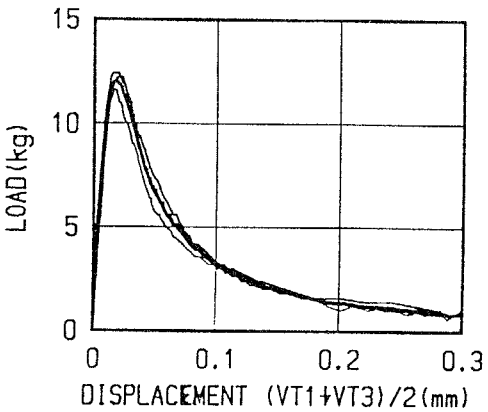
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

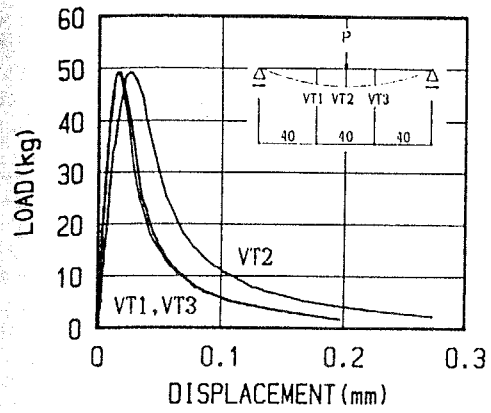


(4) 荷重－変位 VT2

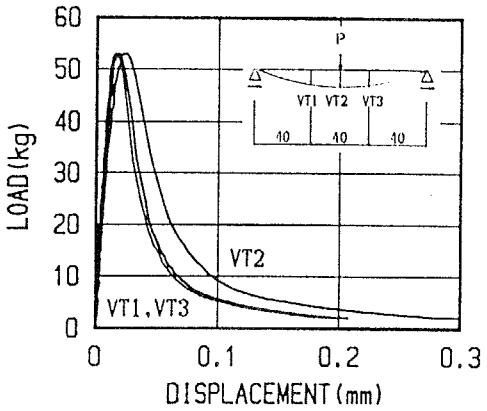


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

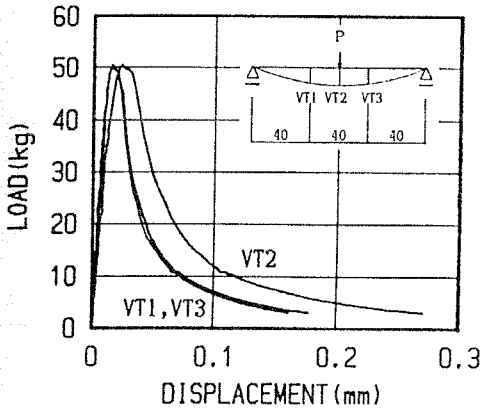
図－4.8 荷重－変位曲線：3PM2.5-4シリーズ（4週試験）



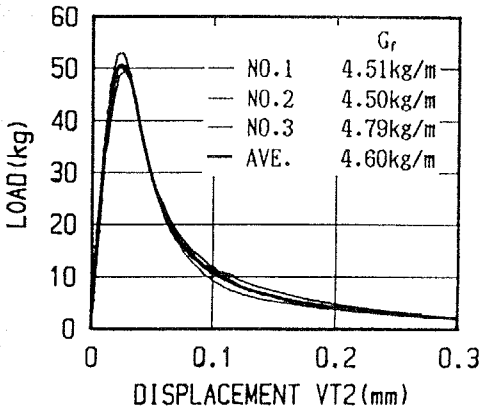
(1) 試験体 No.1



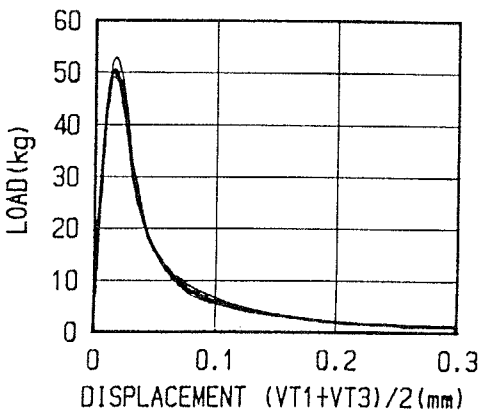
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

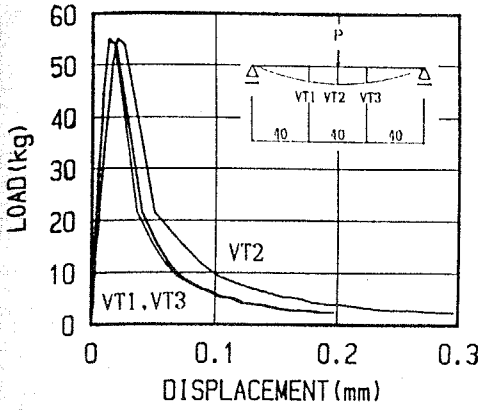


(4) 荷重－変位 VT2

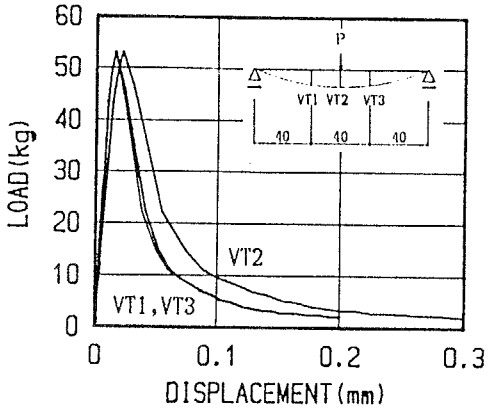


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

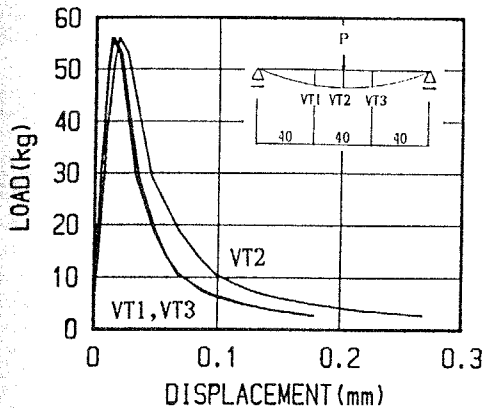
図－4.9 荷重－変位曲線：3PM2.5-5シリーズ（4週試験）



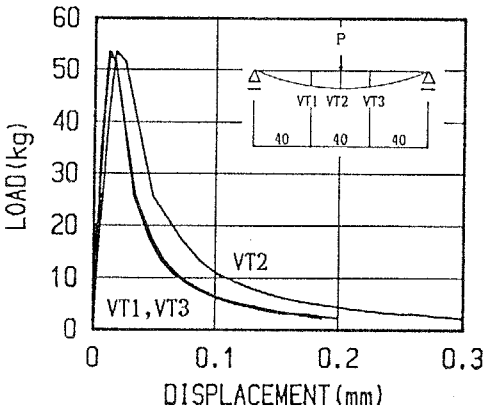
(1) 試験体 No.1



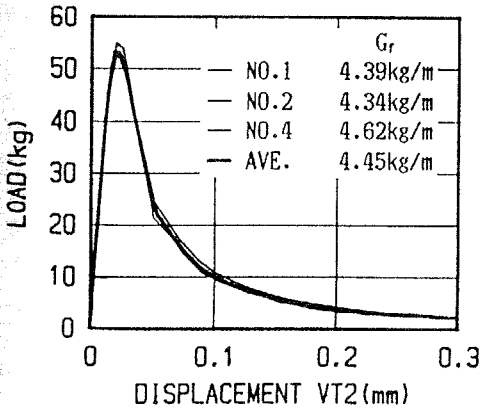
(2) 試験体 No.2



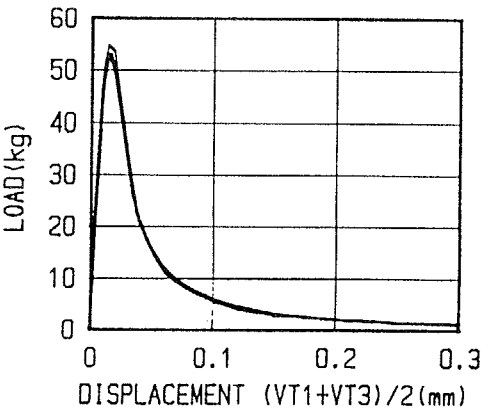
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

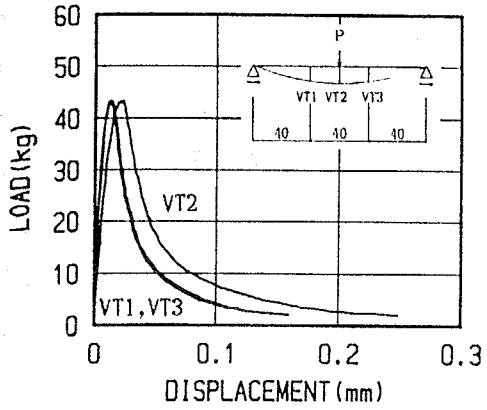


(5) 荷重－変位 VT2

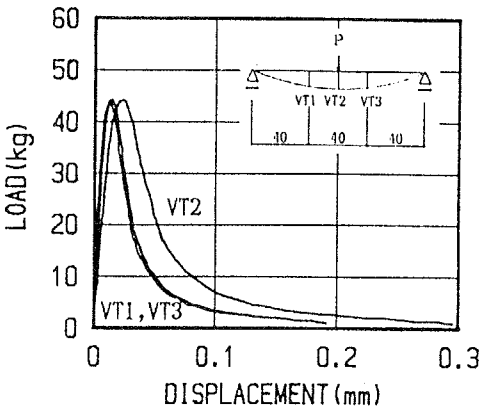


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

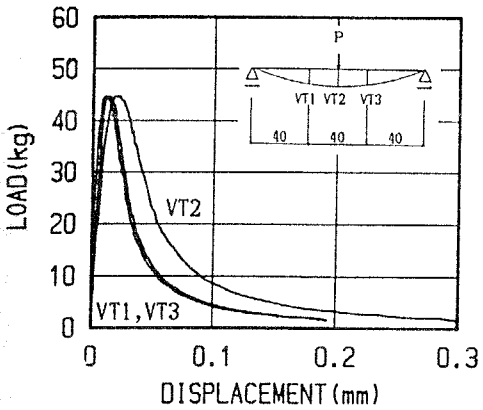
図－4.10 荷重－変位曲線：3PM2.5-6シリーズ（4週試験）



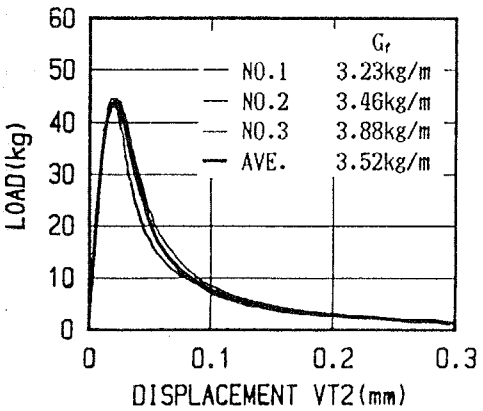
(1) 試験体 No.1



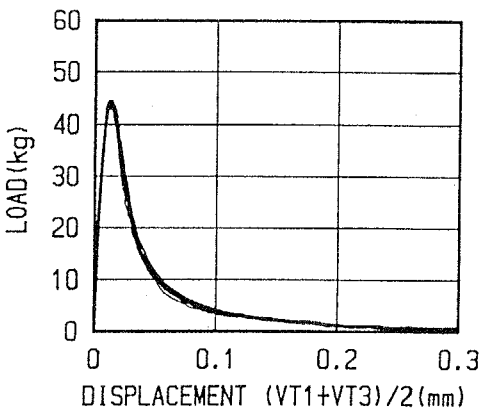
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

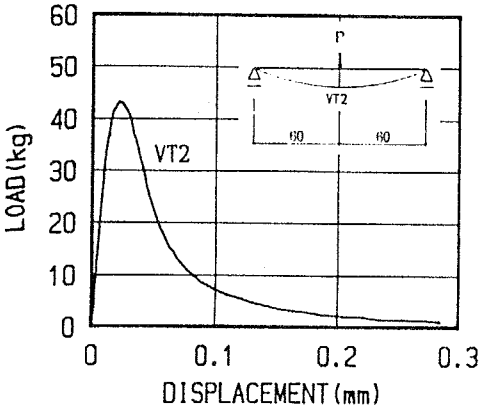


(4) 荷重－変位 VT2

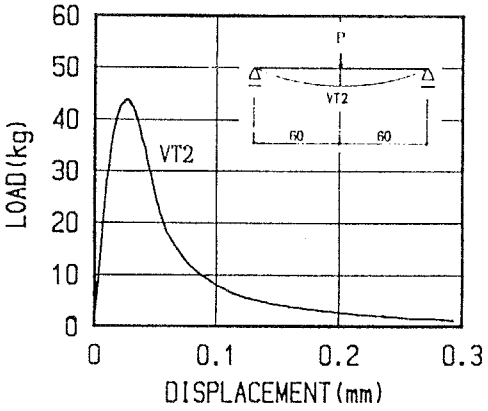


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

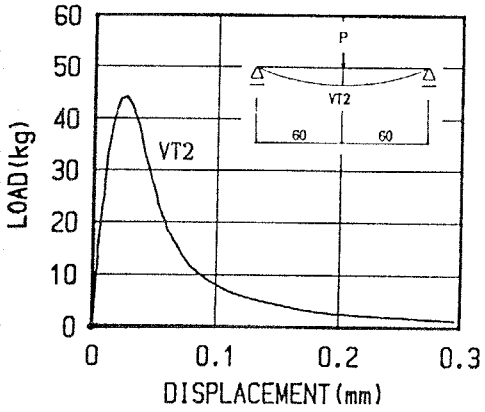
図－4.11 荷重－変位曲線：3PM0.3-1シリーズ（4週試験）



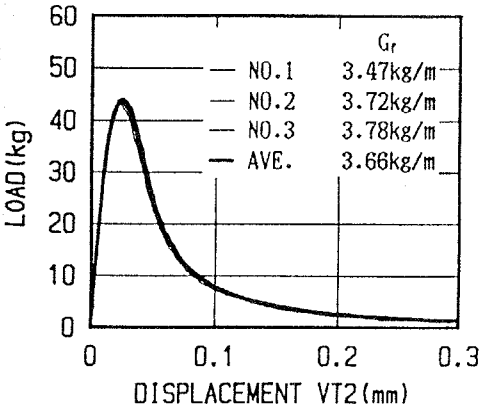
(1) 試験体 No.1



(2) 試験体 No.2

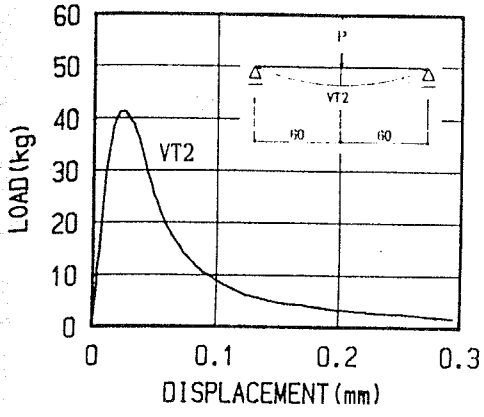


(3) 試験体 No.3

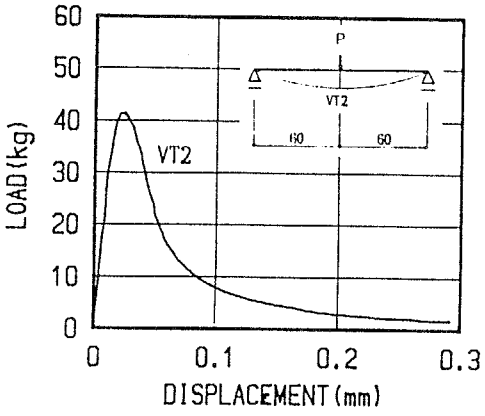


(4) 荷重－変位 VT2

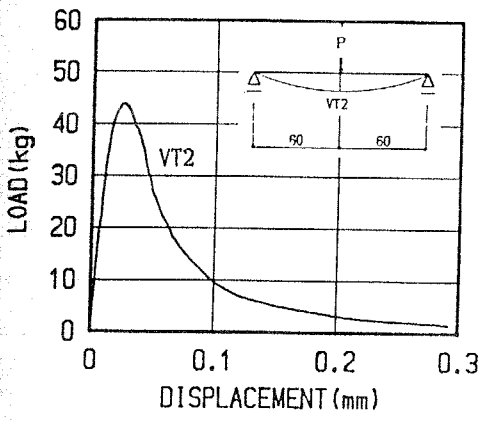
図－4.12 荷重－変位曲線：3PM0.6-1シリーズ（4週試験）



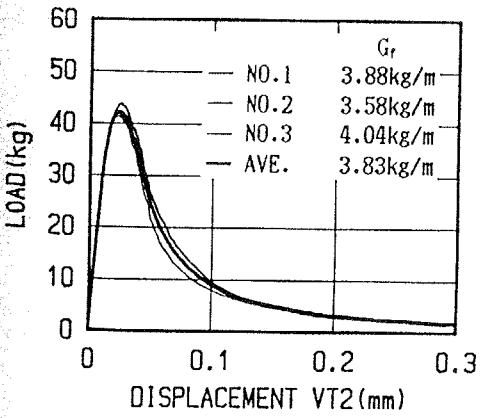
(1) 試験体 No.1



(2) 試験体 No.2

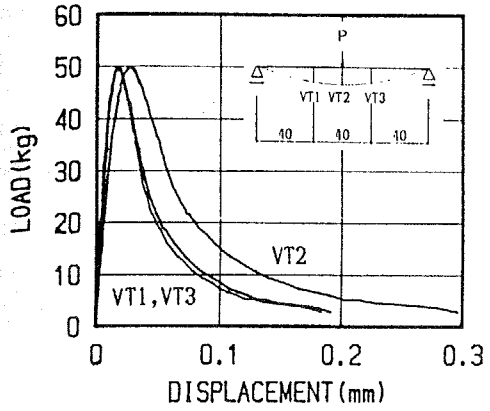


(3) 試験体 No.3

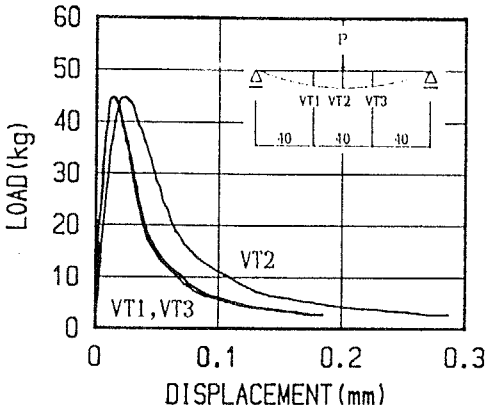


(4) 荷重－変位 VT2

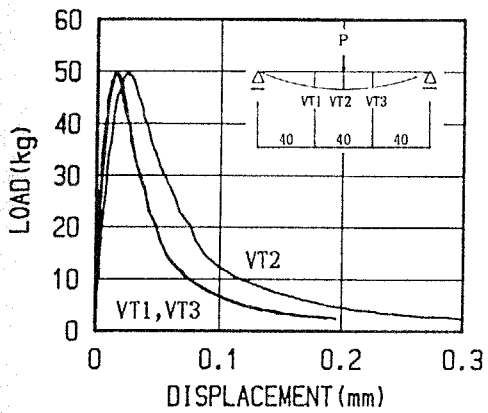
図－4.13 荷重－変位曲線：3PM1.2-1シリーズ（4週試験）



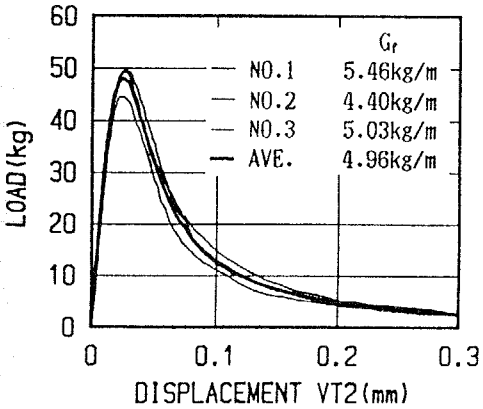
(1) 試験体 No.1



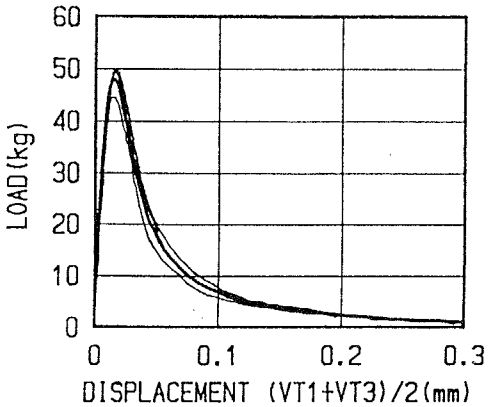
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

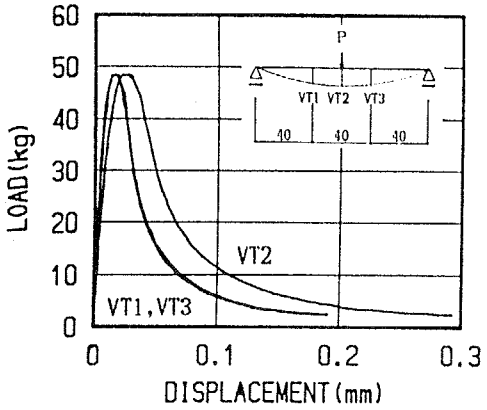


(4) 荷重－変位 VT2

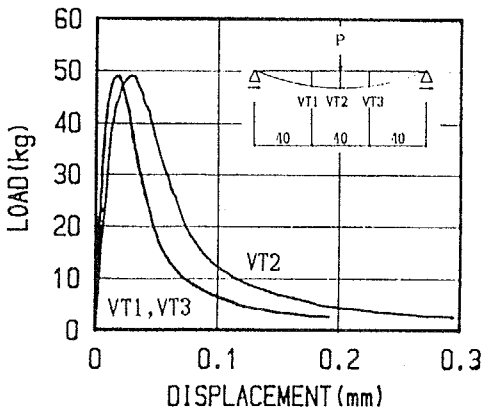


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

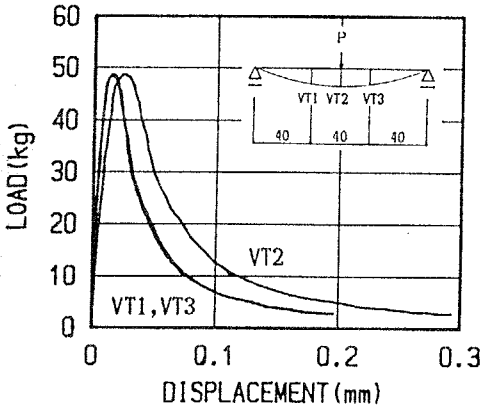
図－4.14 荷重－変位曲線：3PM5.0-1シリーズ（4週試験）



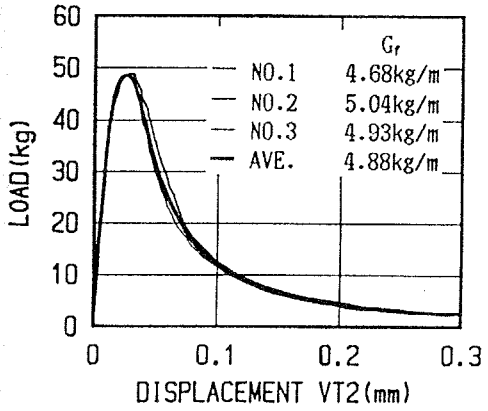
(1) 試験体 No.1



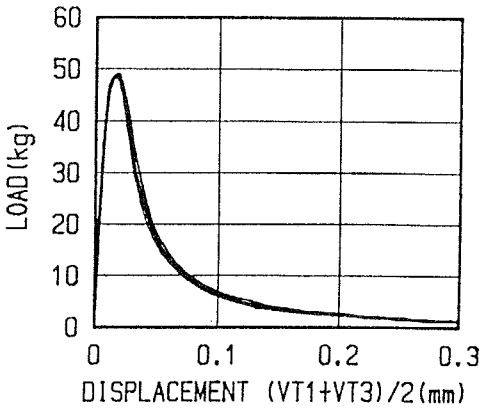
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

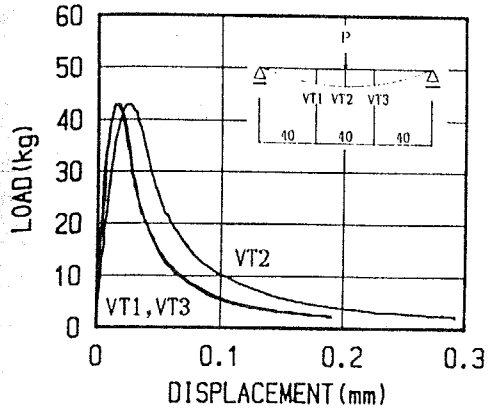


(4) 荷重－変位 VT2

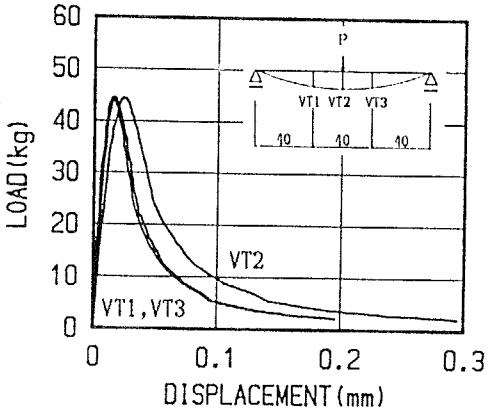


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

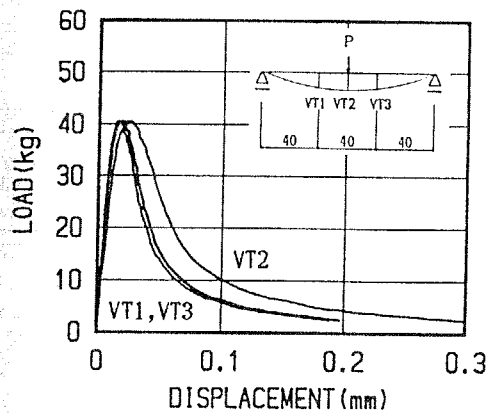
図－4.15 荷重－変位曲線：3PL2.5-1シリーズ（4週試験）



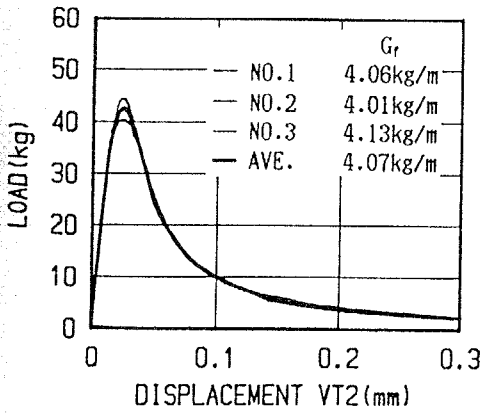
(1) 試験体 No.1



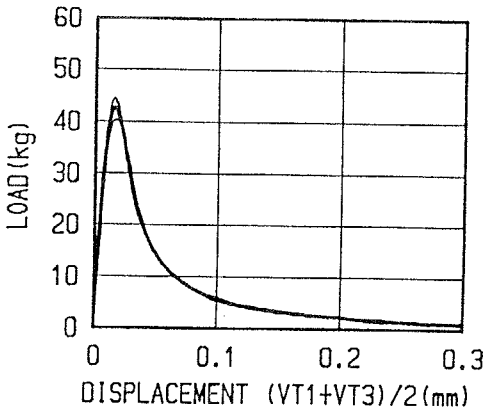
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

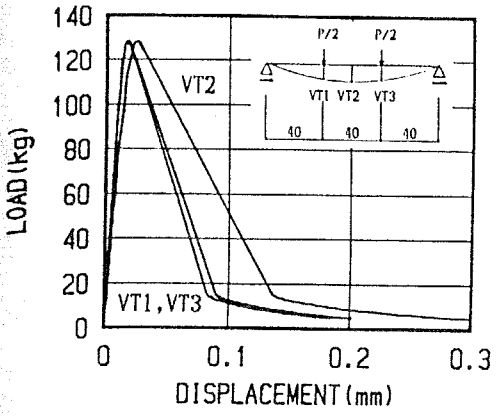


(4) 荷重－変位 VT2

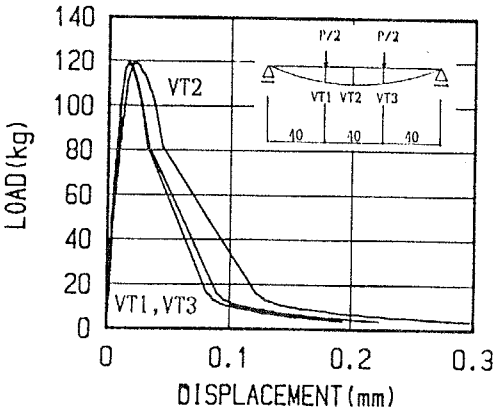


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

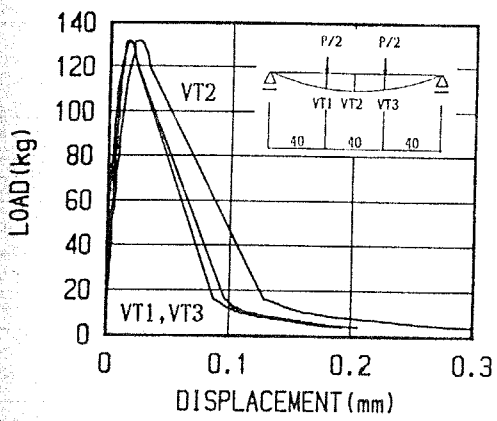
図－4.16 荷重－変位曲線：3PH2.5-1シリーズ（4週試験）



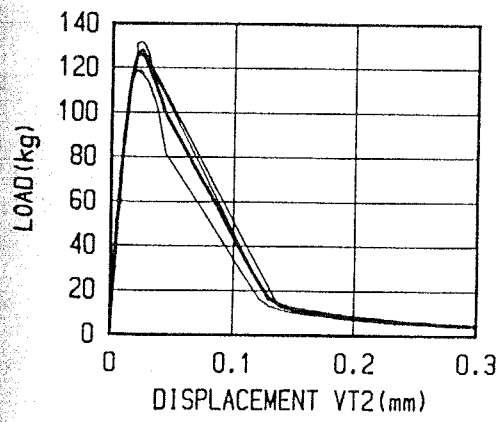
(1) 試験体 No.1



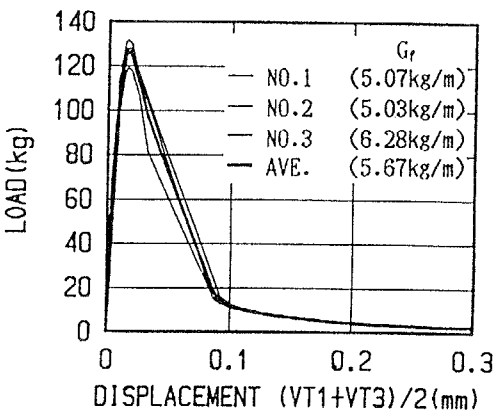
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

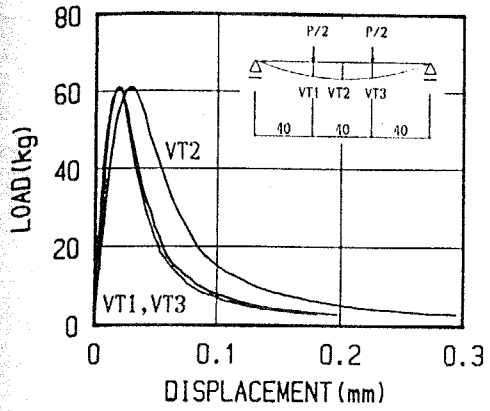


(4) 荷重－変位 VT2

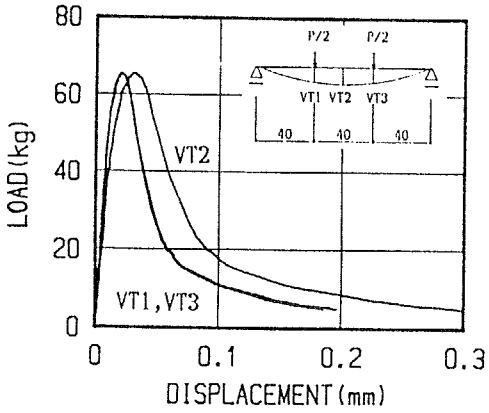


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

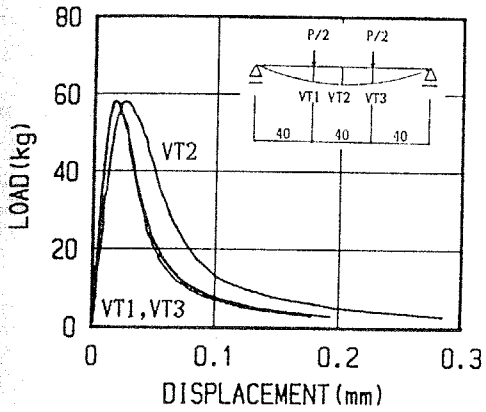
図－4.17 荷重－変位曲線：4PM2.5-7シリーズ（4週試験）



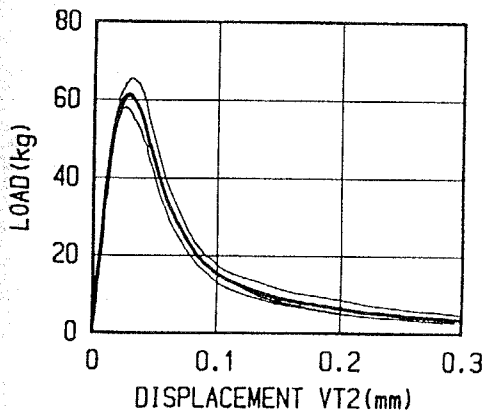
(1) 試験体 No.1



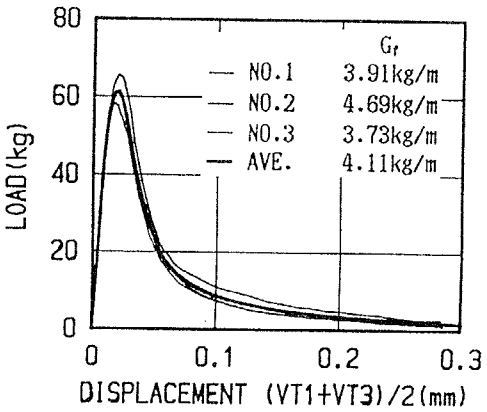
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

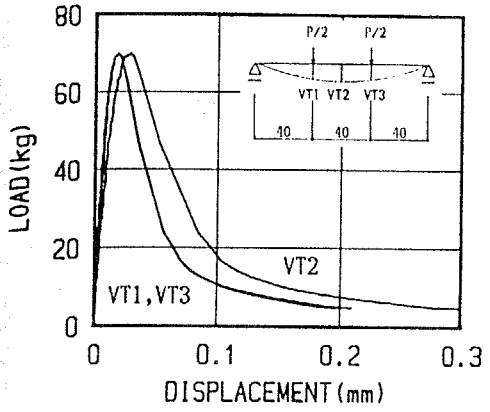


(4) 荷重－変位 VT2

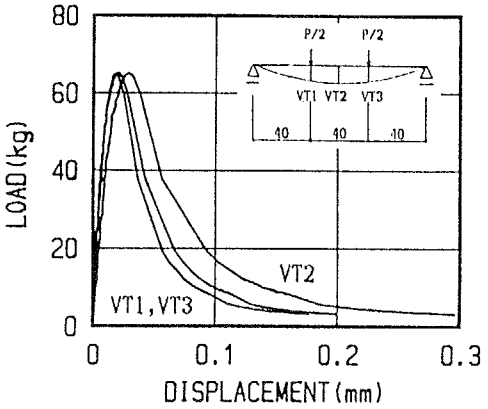


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

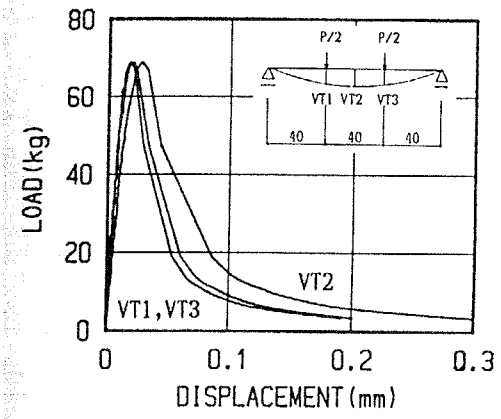
図－4.18 荷重－変位曲線：4PM2.5-8シリーズ（4週試験）



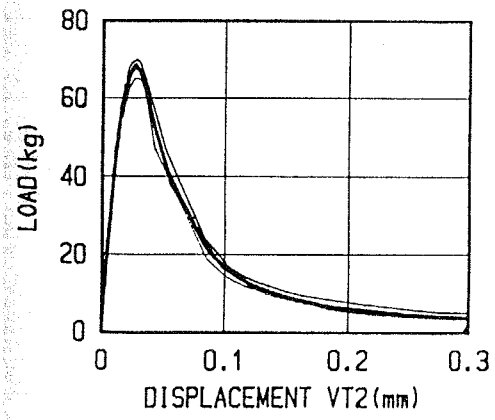
(1) 試験体 No.1



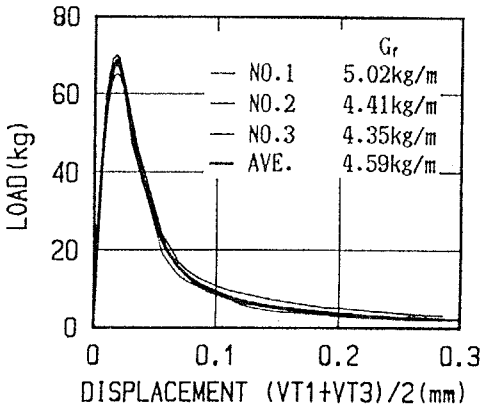
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

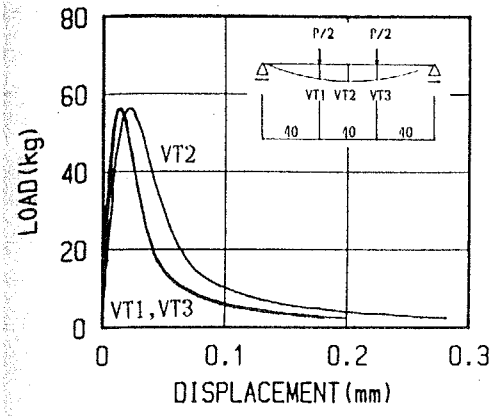


(4) 荷重－変位 VT2

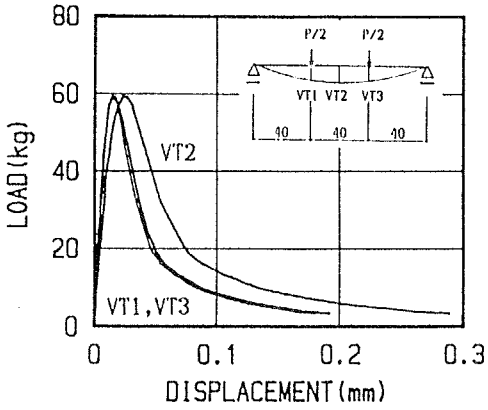


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

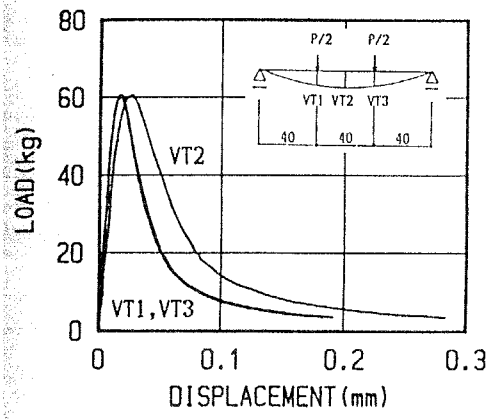
図－4.19 荷重－変位曲線：4PM2.5-9シリーズ（4週試験）



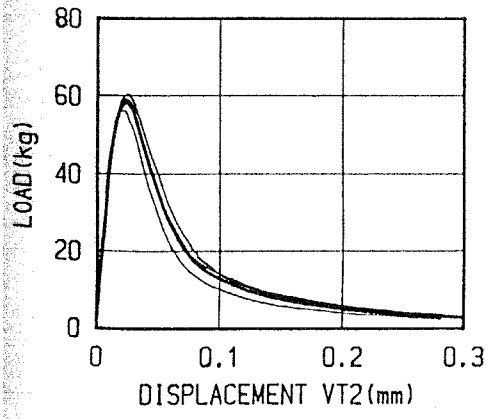
(1) 試験体 No. 1



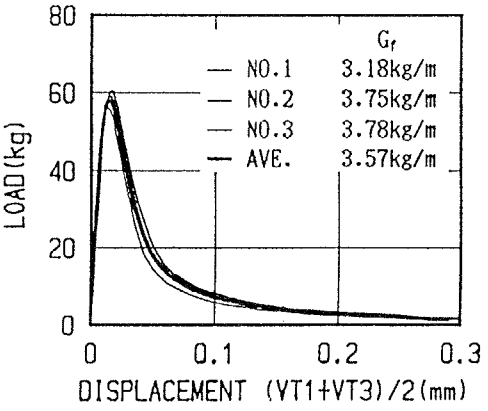
(2) 試験体 No. 2



(3) 試験体 No. 3

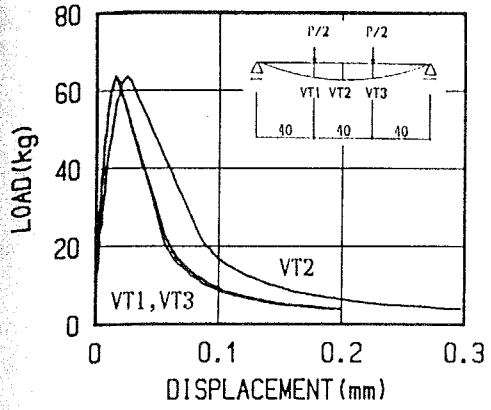


(4) 荷重－変位 VT2

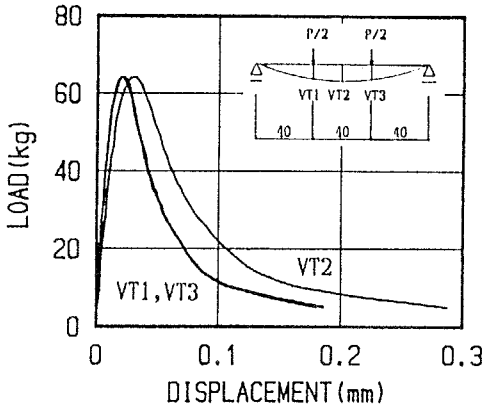


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

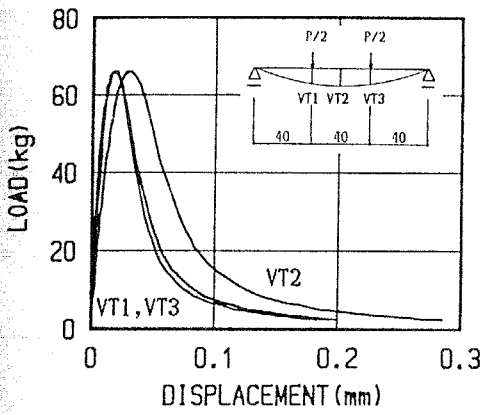
図－4.20 荷重－変位曲線：4PM0.3-2シリーズ（4週試験）



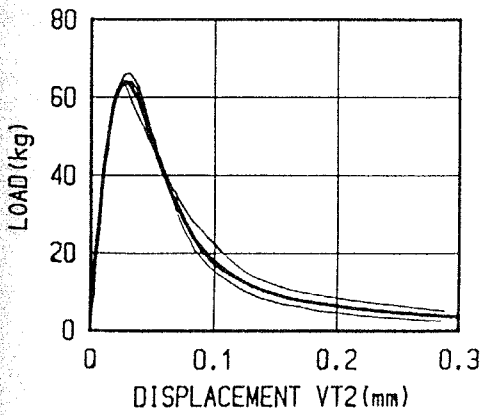
(1) 試験体 No.1



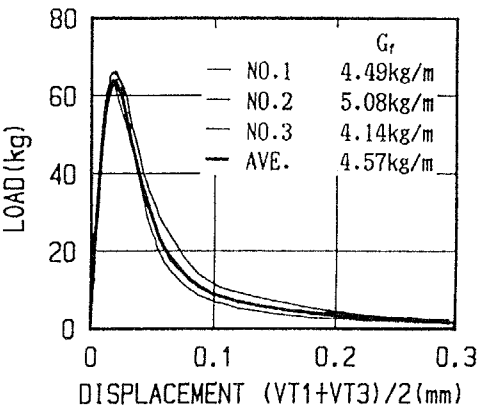
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

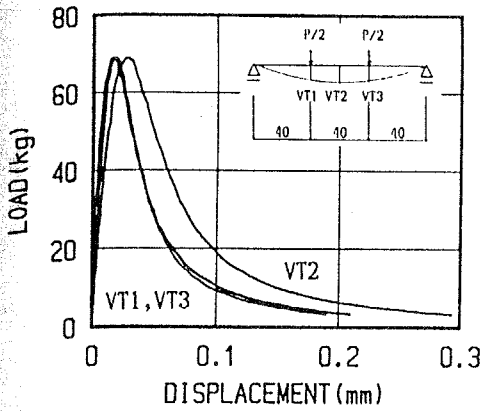


(4) 荷重－変位 VT2

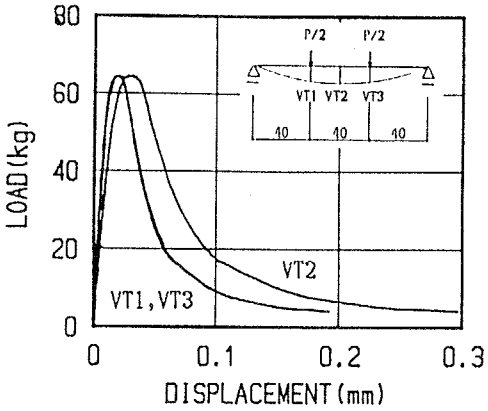


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

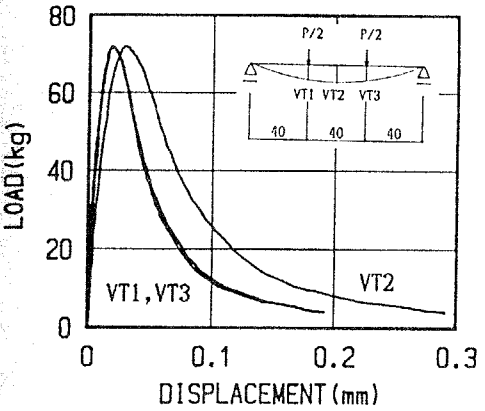
図－4.21 荷重－変位曲線：4PM5.0-2シリーズ（4週試験）



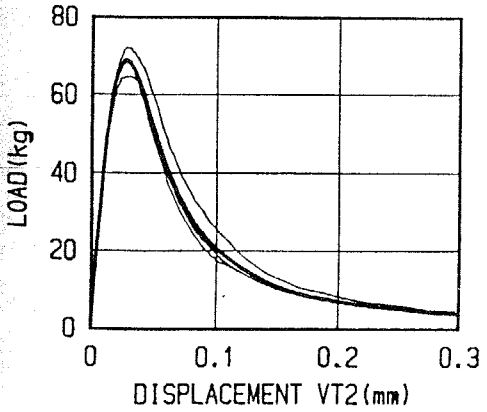
(1) 試験体 No.1



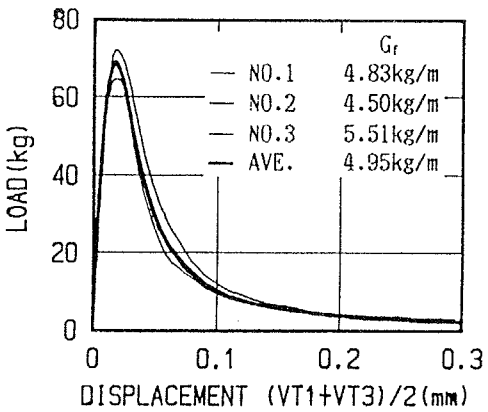
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

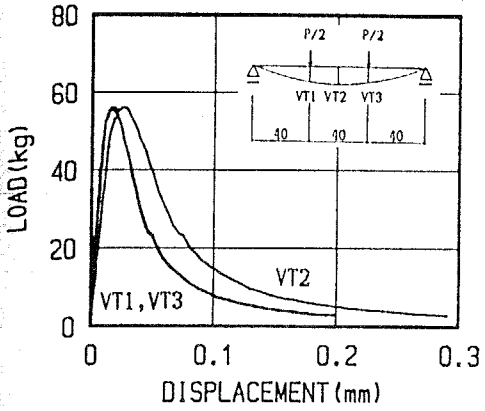


(4) 荷重－変位 VT2

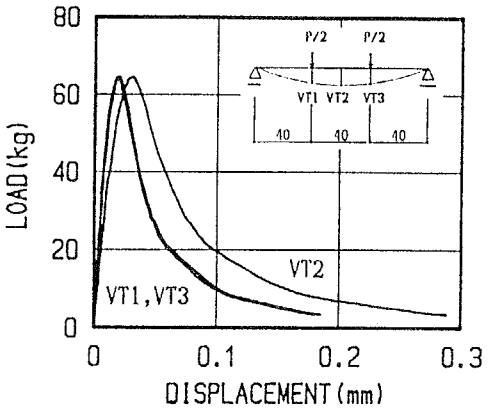


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

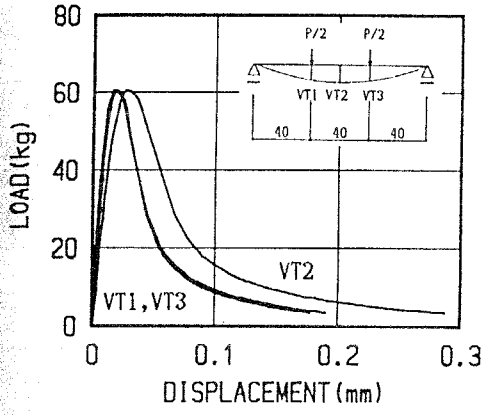
図－4.22 荷重－変位曲線：4PL2.5-2シリーズ（4週試験）



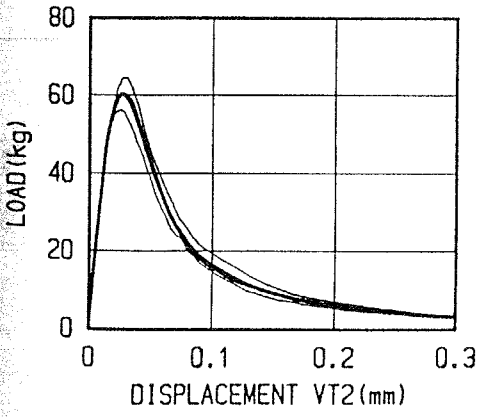
(1) 試験体 No.1



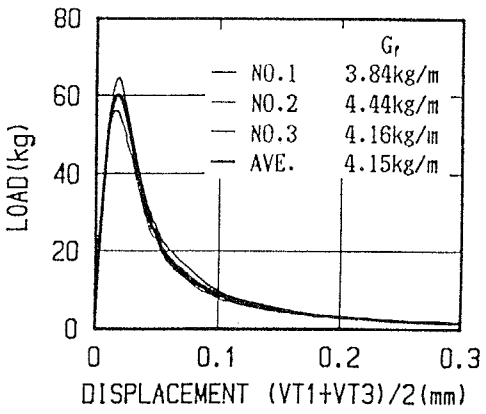
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

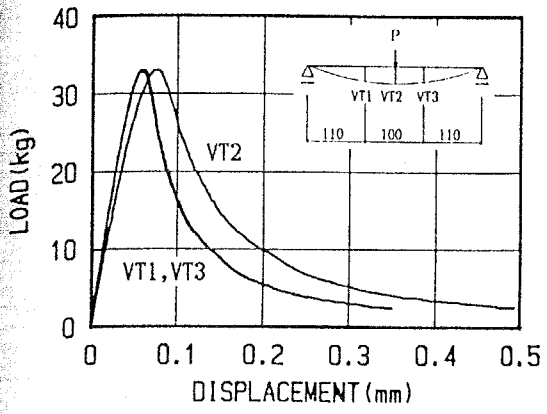


(4) 荷重－変位 VT2

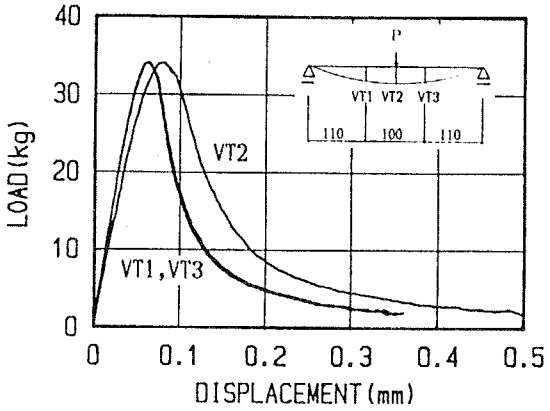


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

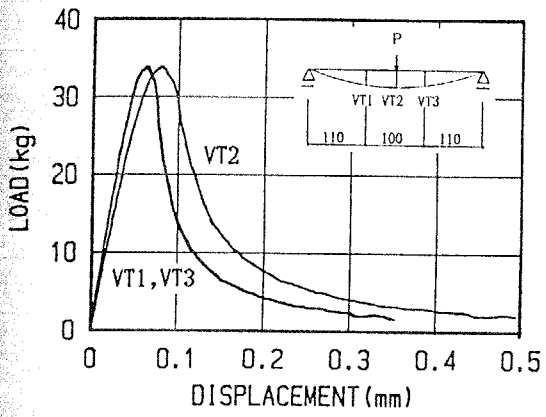
図－4.23 荷重－変位曲線：4PH2.5-2シリーズ（4週試験）



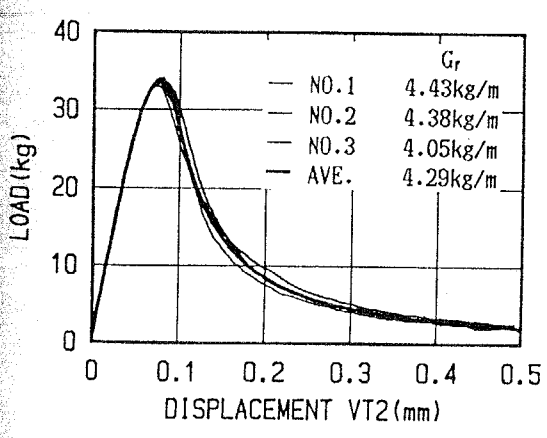
(1) 試験体 No.1



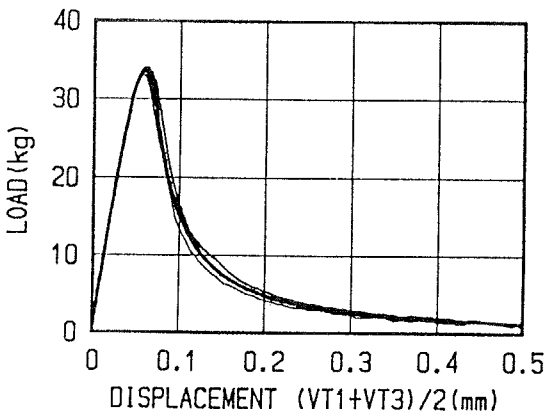
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

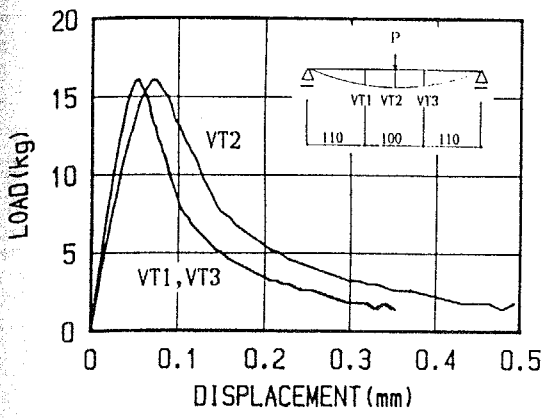


(4) 荷重－変位 VT2

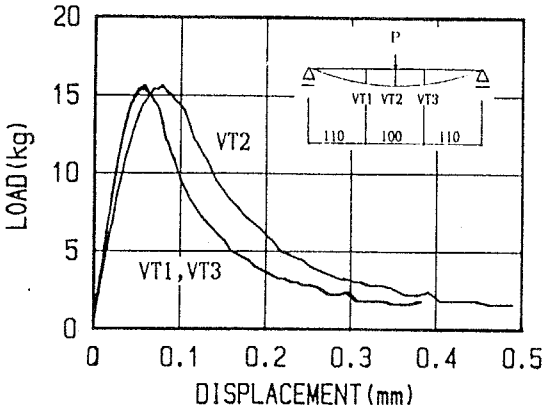


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

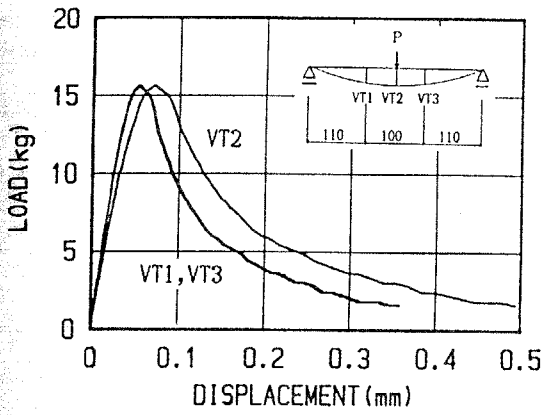
図－4.24 荷重－変位曲線：SM2.5-10シリーズ（4週試験）



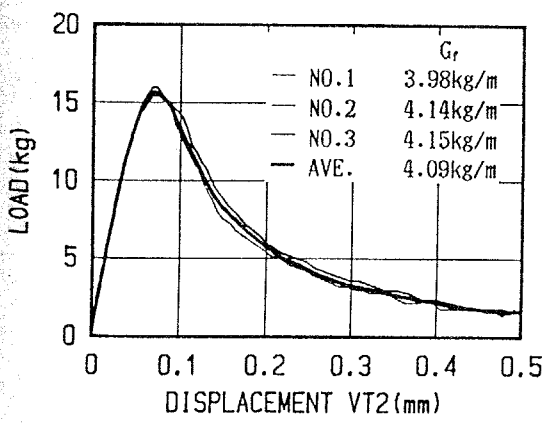
(1) 試験体 No.1



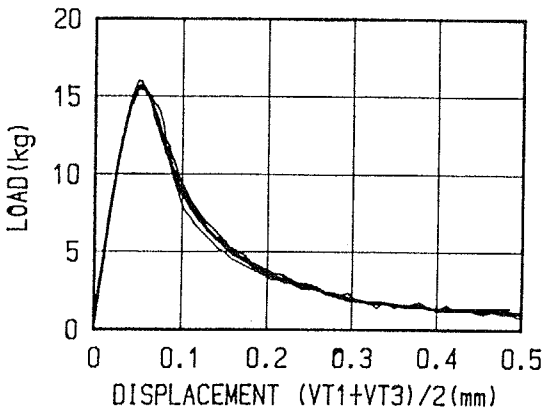
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

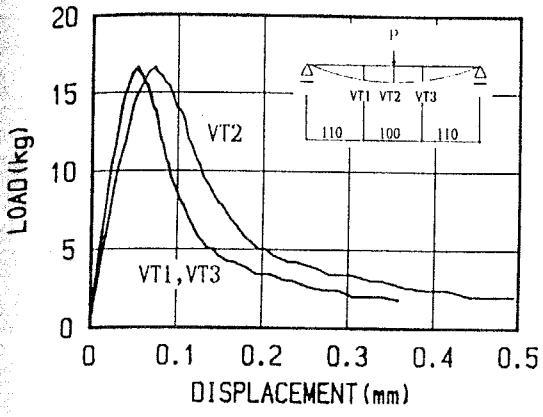


(4) 荷重－変位 VT2

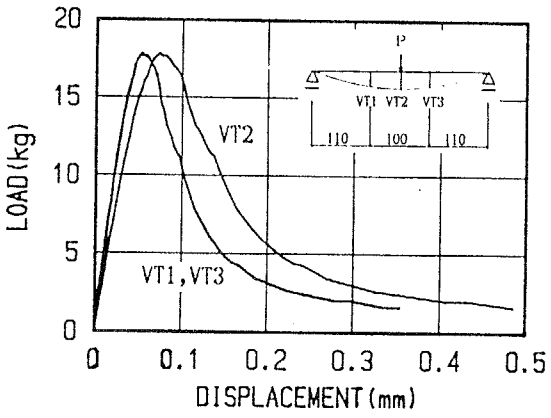


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

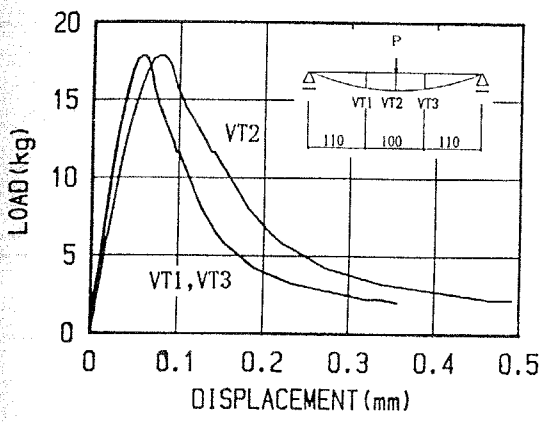
図－4.25 荷重－変位曲線：SM2.5-11シリーズ（4週試験）



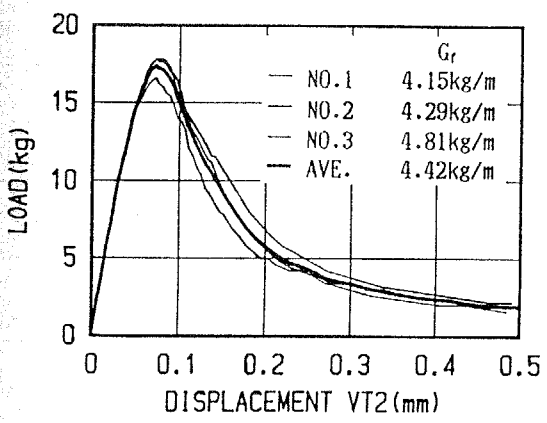
(1) 試験体 No.1



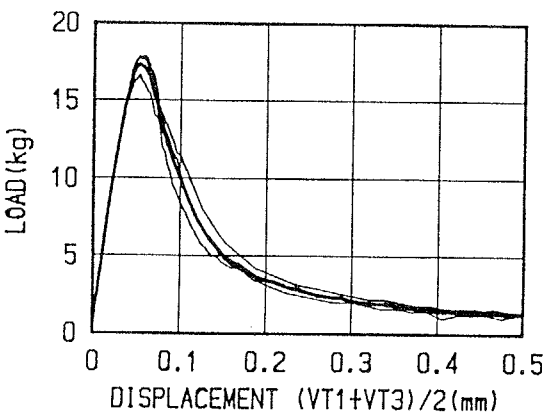
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

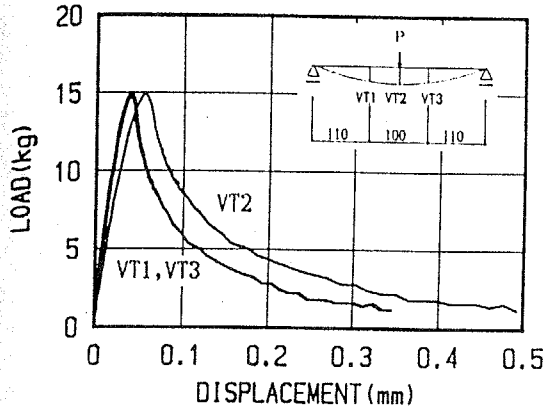


(4) 荷重－変位 VT2

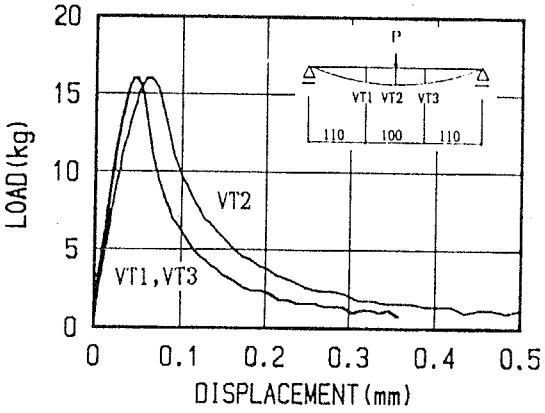


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

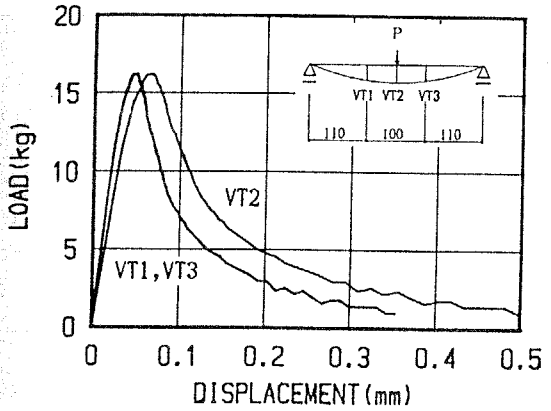
図－4.26 荷重－変位曲線：SM2.5-12シリーズ（4週試験）



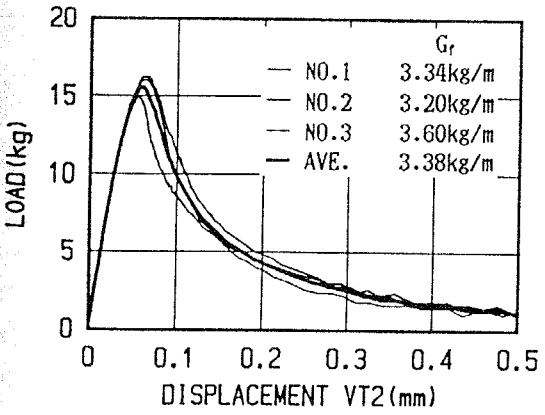
(1) 試験体 No.1



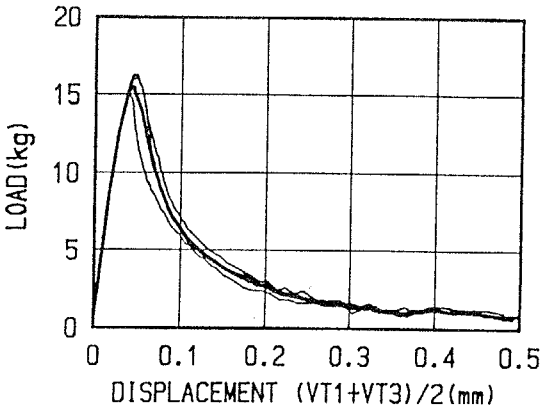
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

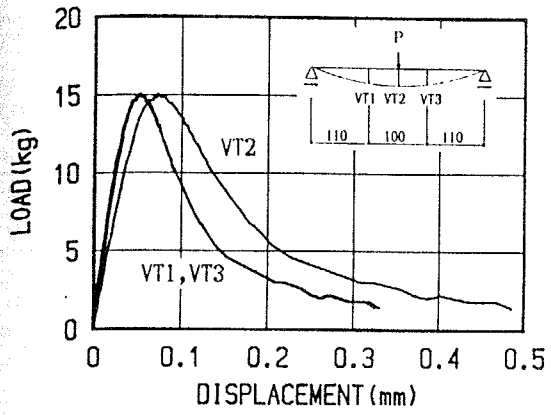


(4) 荷重－変位 VT2

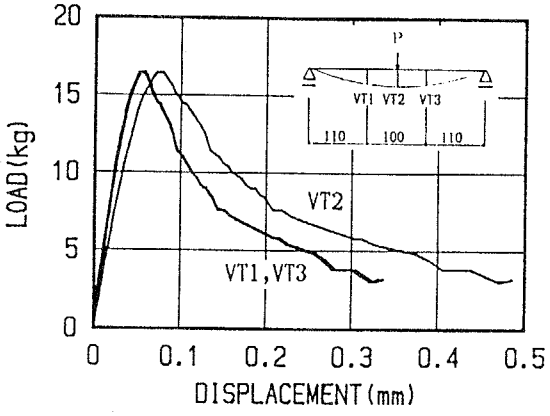


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

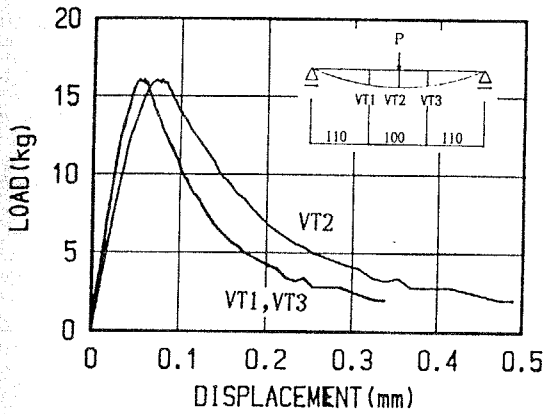
図－4.27 荷重－変位曲線：SM0.3-3シリーズ（4週試験）



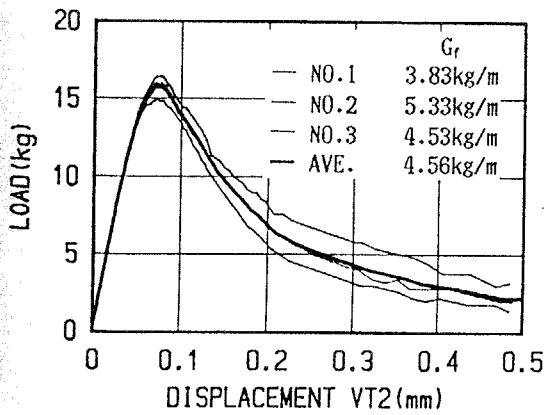
(1) 試験体 No.1



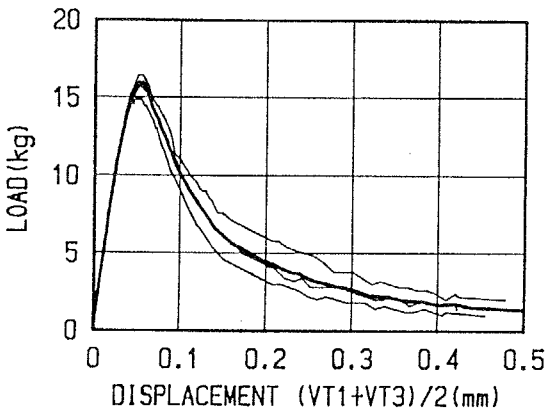
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

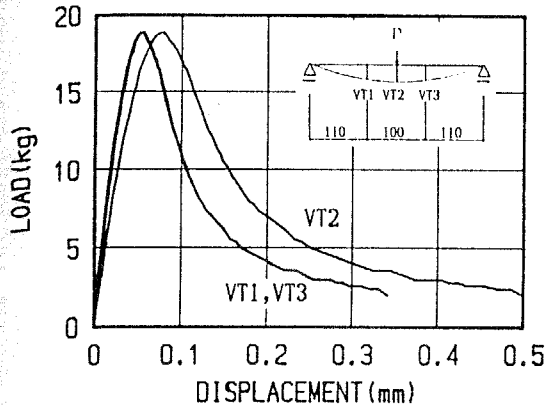


(4) 荷重－変位 VT2

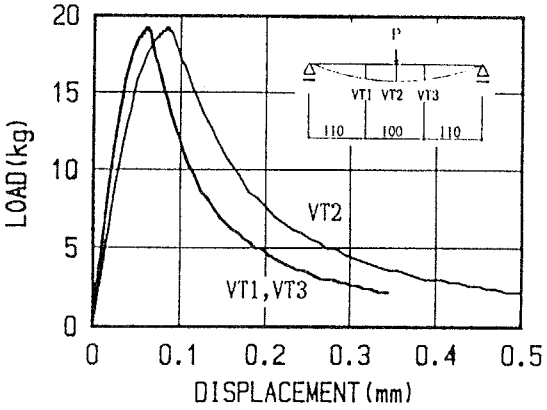


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

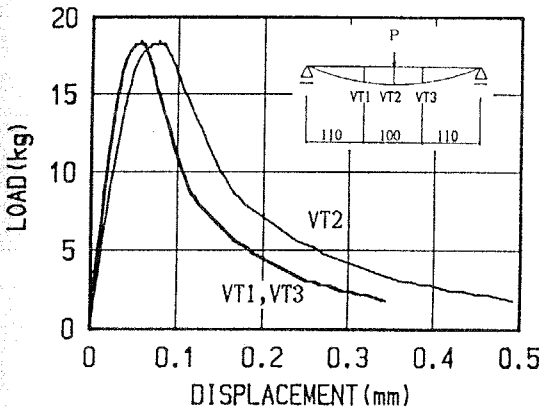
図－4.28 荷重－変位曲線：SM5.0-3シリーズ（4週試験）



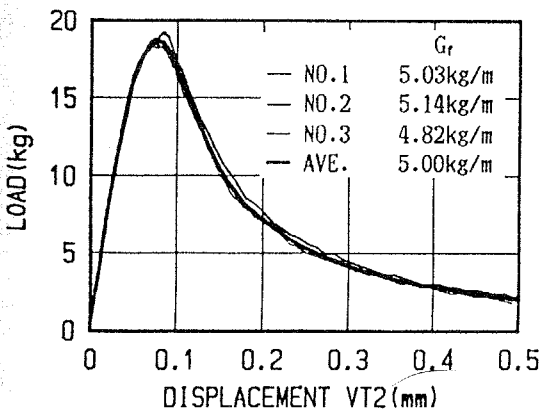
(1) 試験体 No.1



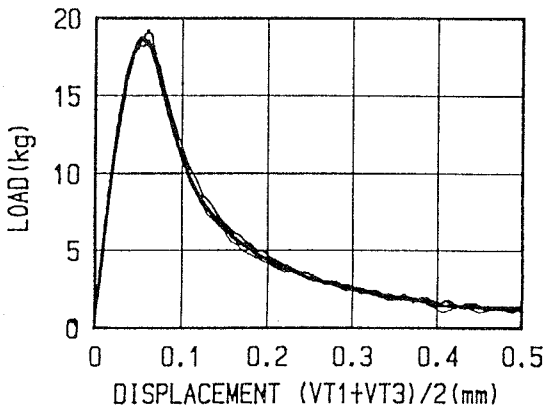
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

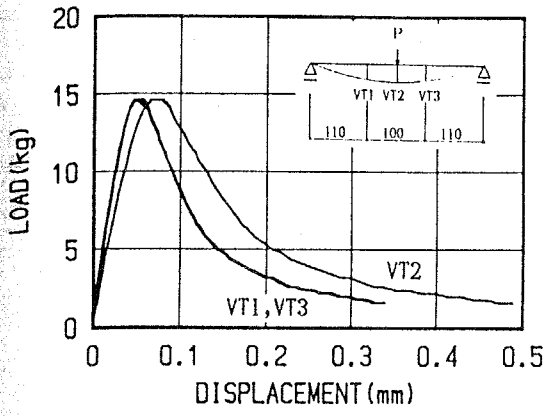


(4) 荷重－変位 VT2

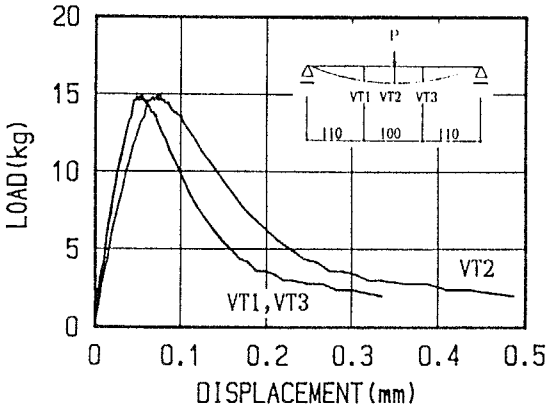


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

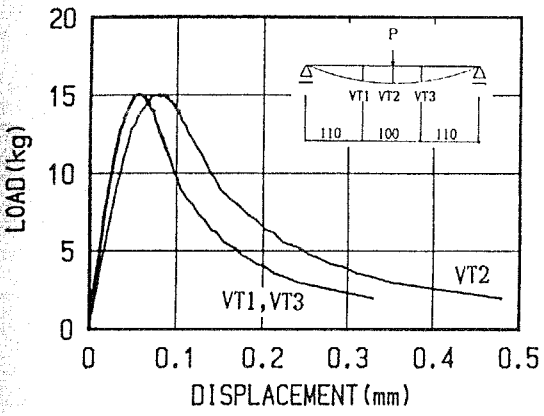
図－4.29 荷重－変位曲線：SL2.5-3シリーズ（4週試験）



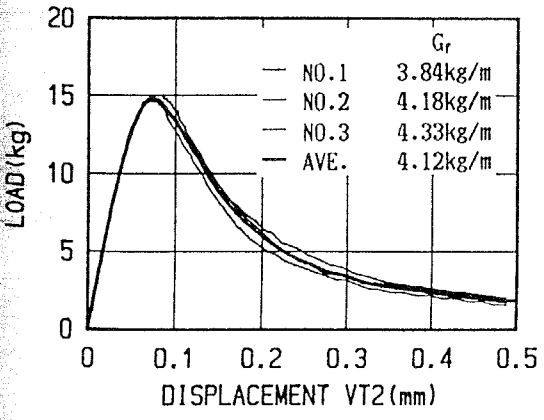
(1) 試験体 No. 1



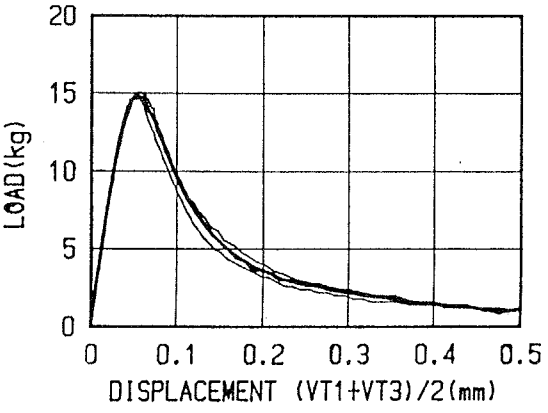
(2) 試験体 No. 2



(3) 試験体 No. 3

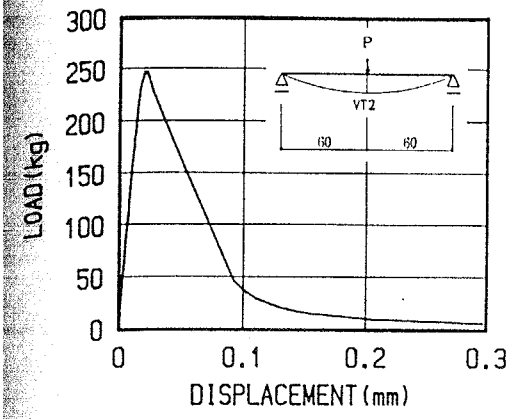


(4) 荷重－変位 VT2

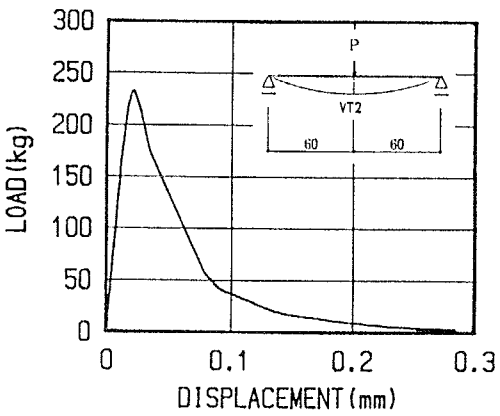


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

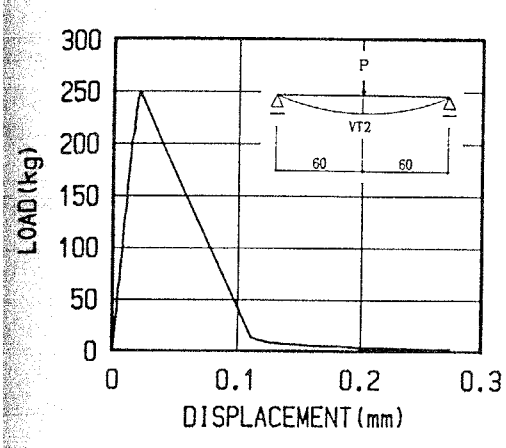
図－4.30 荷重－変位曲線：SH2.5-3シリーズ（4週試験）



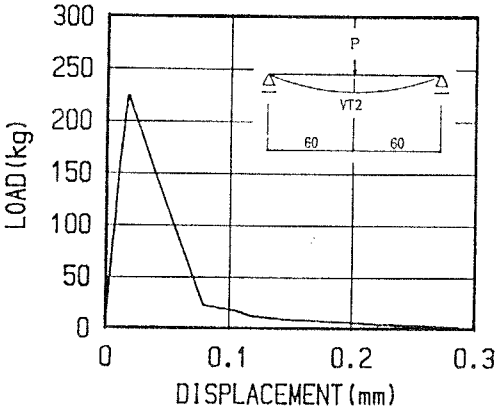
(1) 試験体 No.1



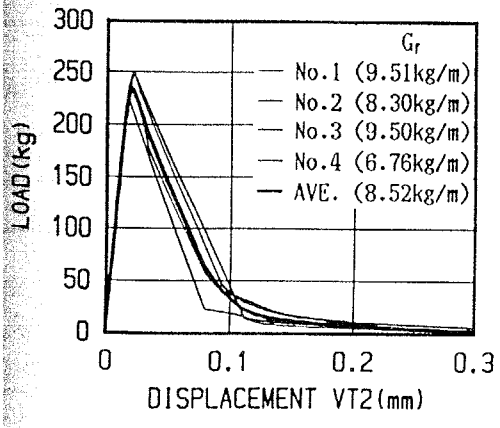
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

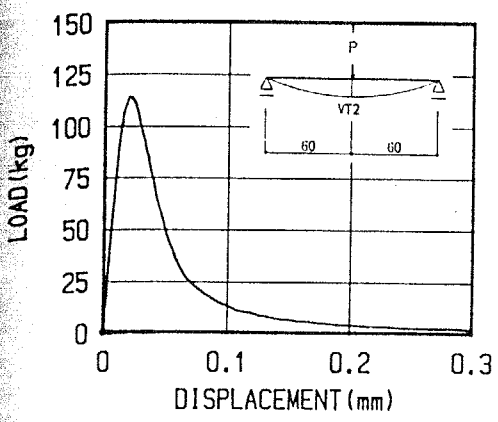


(4) 試験体 No.4

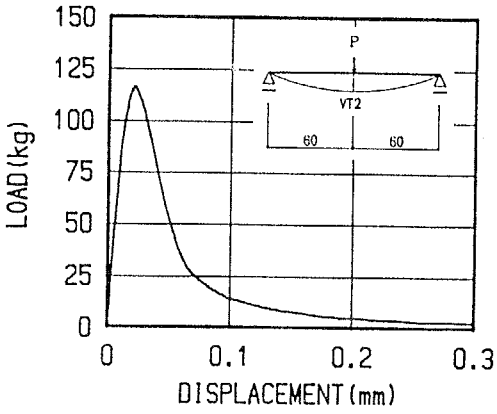


(5) 荷重－変位 VT2

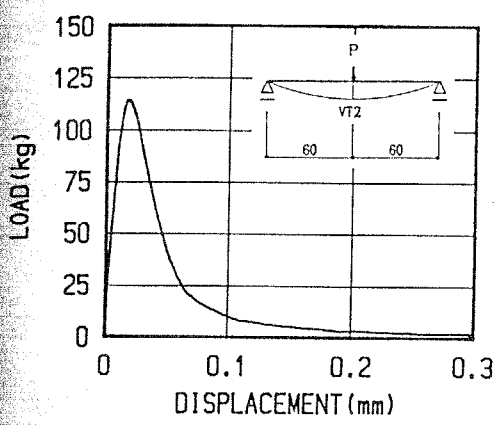
図－4.31 荷重－変位曲線：3PM2.5-1シリーズ（1年試験）



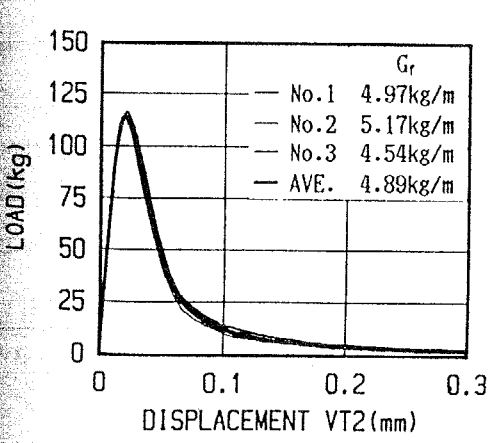
(1) 試験体 No.1



(2) 試験体 No.2

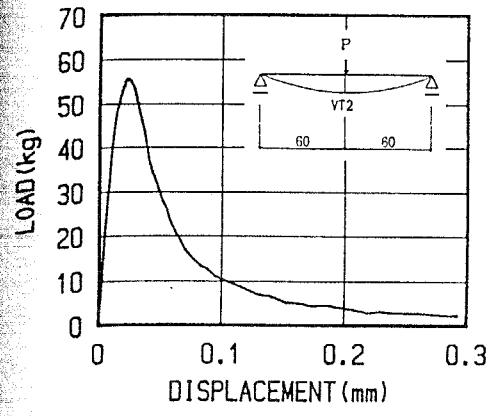


(3) 試験体 No.3

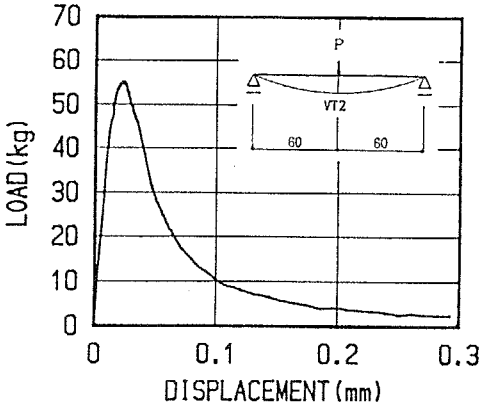


(4) 荷重－変位 VT2

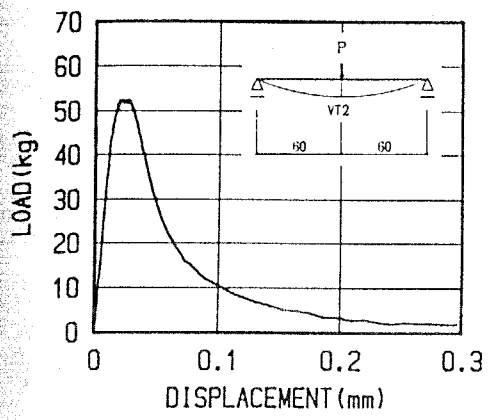
図－4.32 荷重－変位曲線：3PM2.5-2シリーズ（1年試験）



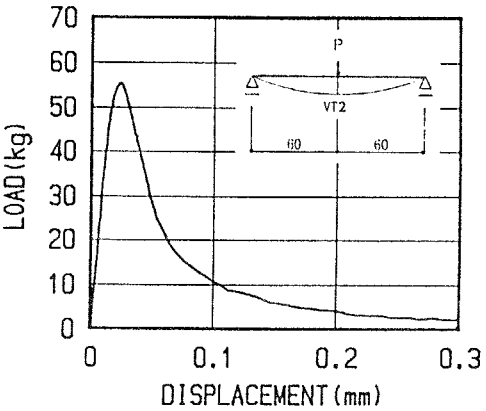
(1) 試験体 No. 1



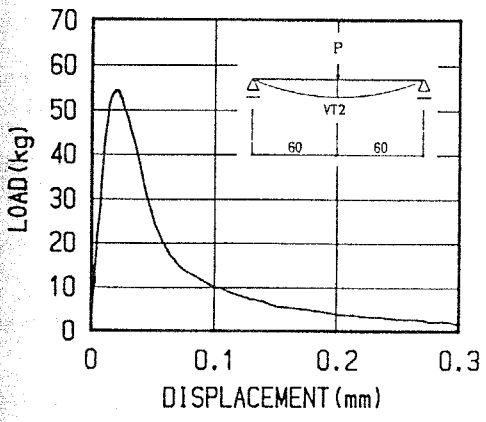
(2) 試験体 No. 2



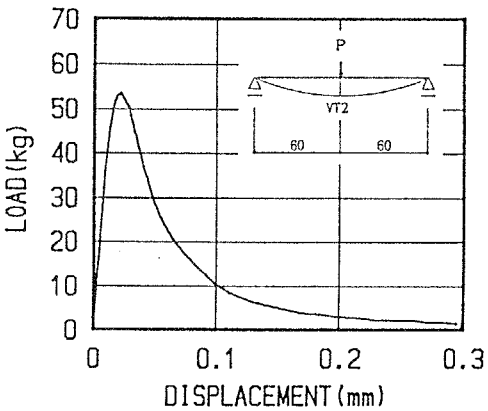
(3) 試験体 No. 3



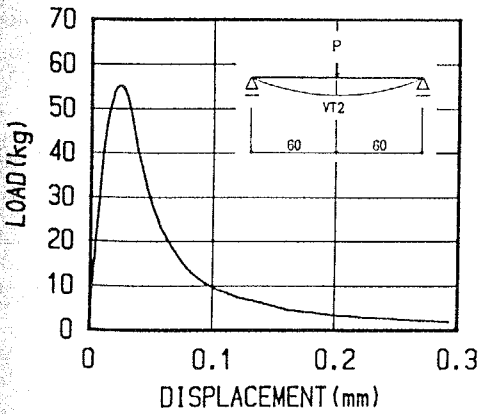
(4) 試験体 No. 4



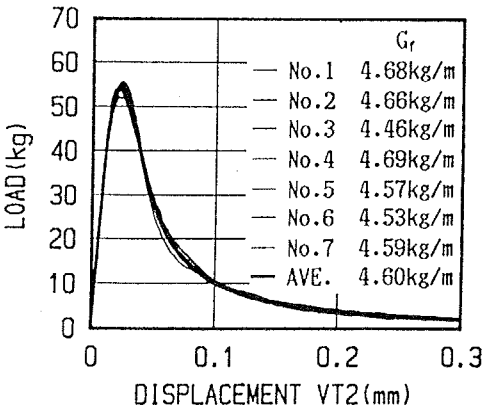
(5) 試験体 No. 5



(6) 試験体 No. 6

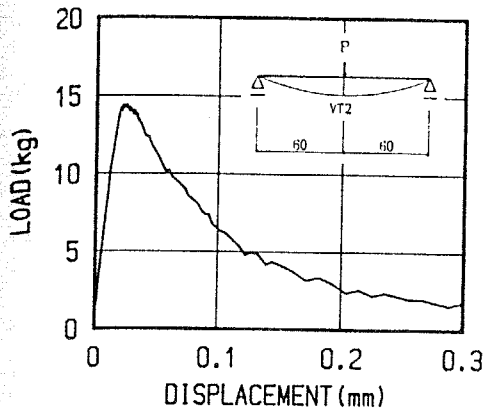


(7) 試験体 No. 7

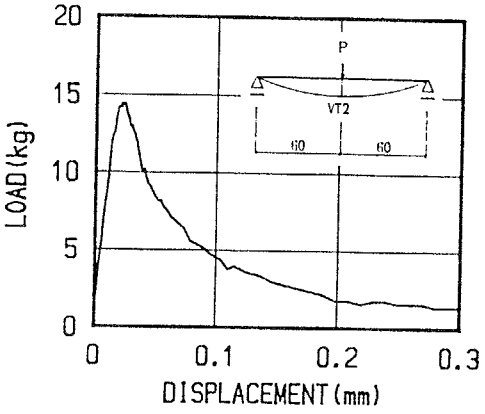


(8) 荷重－変位 VT2

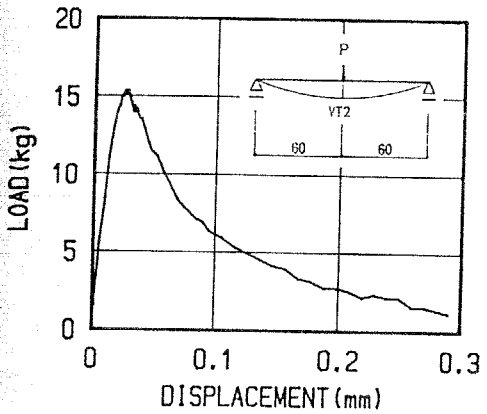
図－4.33 荷重－変位曲線：3PM2.5-3シリーズ（1年試験）



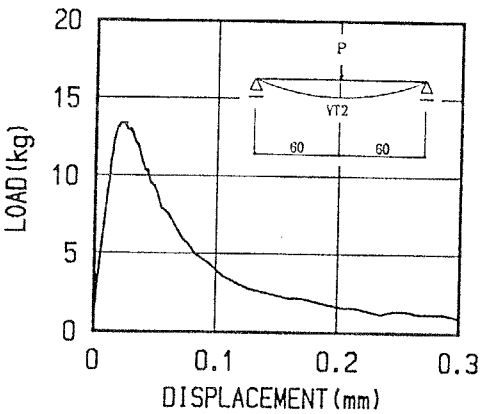
(1) 試験体 No.1



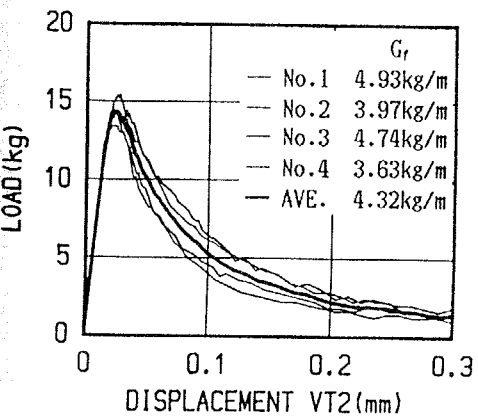
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

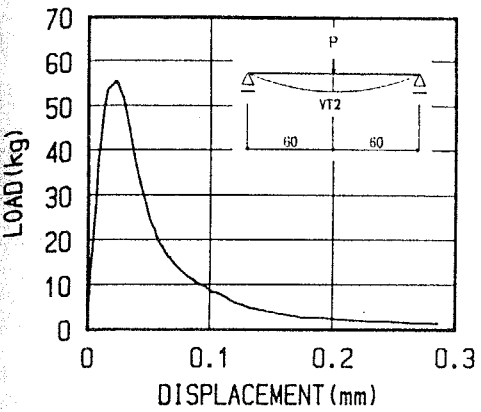


(4) 試験体 No.4

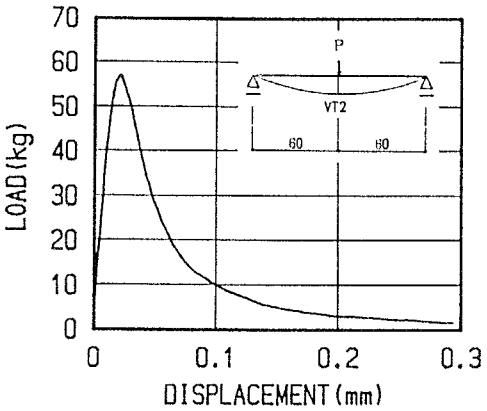


(5) 荷重－変位 VT2

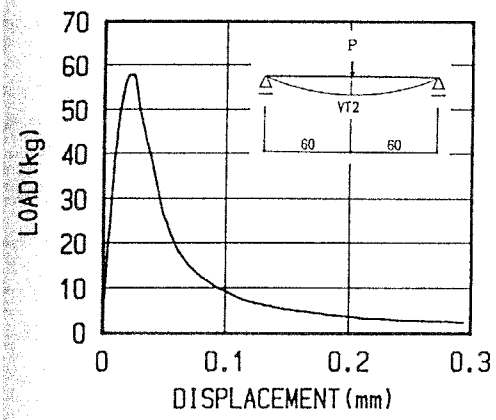
図－4.34 荷重－変位曲線：3PM2.5-4シリーズ（1年試験）



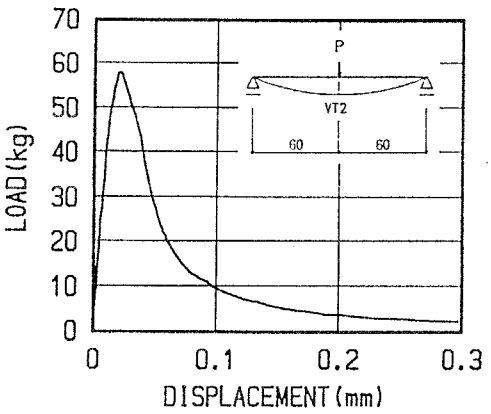
(1) 試験体 No.1



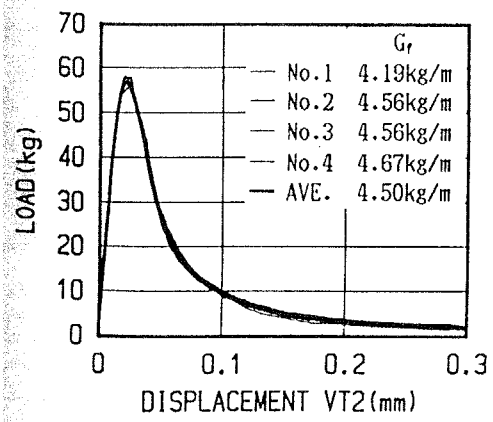
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

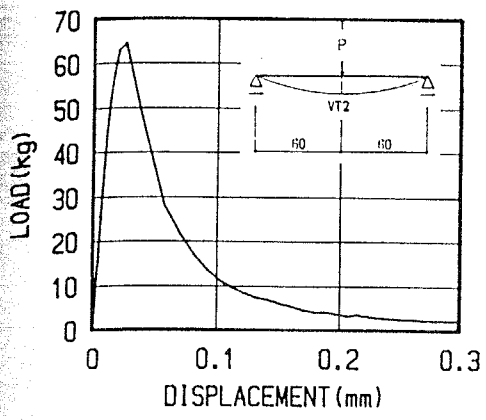


(4) 試験体 No.4

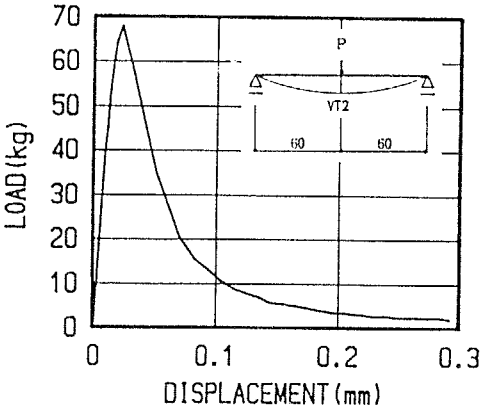


(5) 荷重－変位 VT2

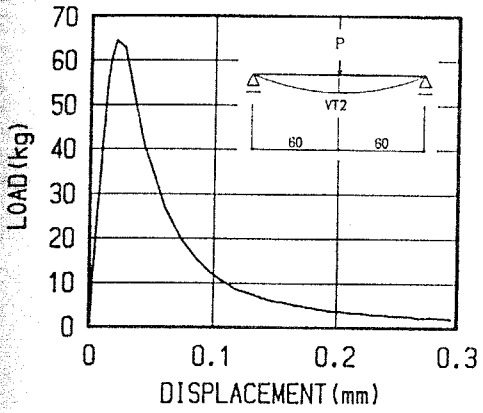
図－4.35 荷重－変位曲線：3PM2.5-5シリーズ（1年試験）



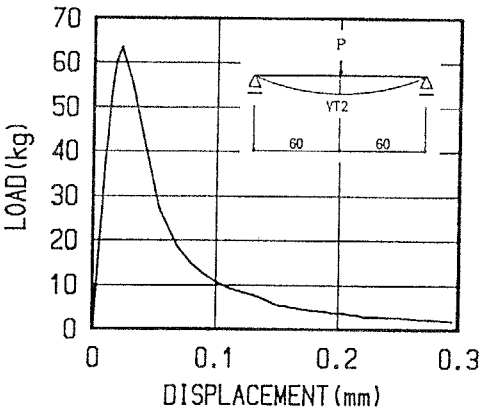
(1) 試験体 No.1



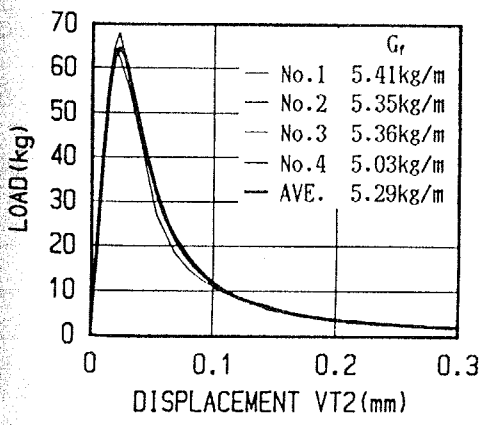
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

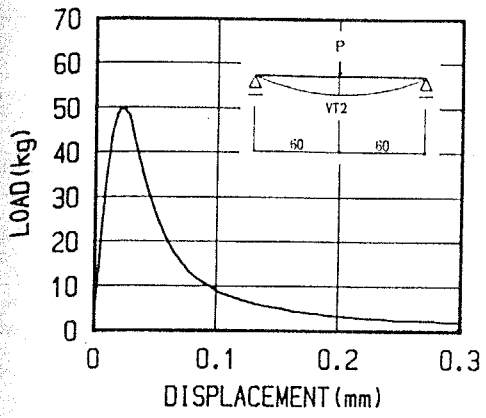


(4) 試験体 No.4

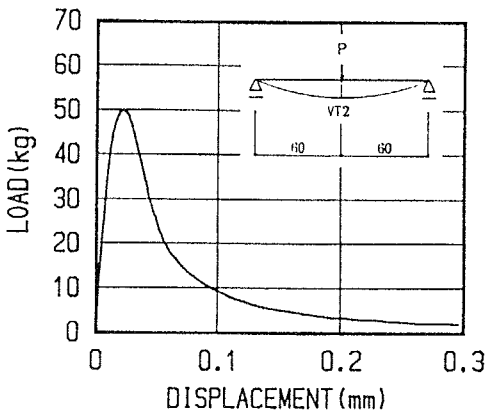


(5) 荷重－変位 VT2

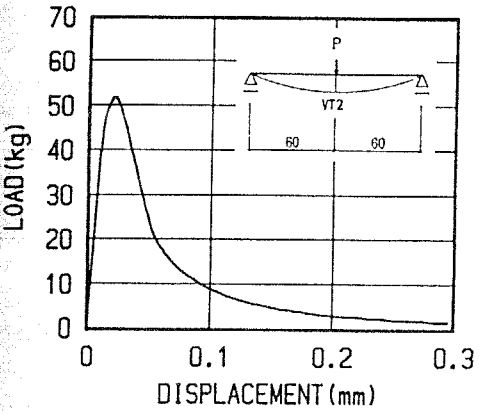
図－4.36 荷重－変位曲線：3PM2.5-6シリーズ（1年試験）



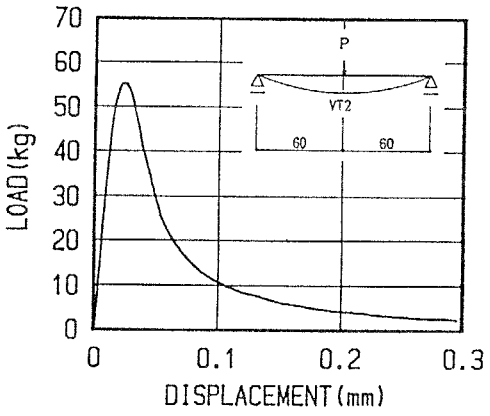
(1) 試験体 No.1



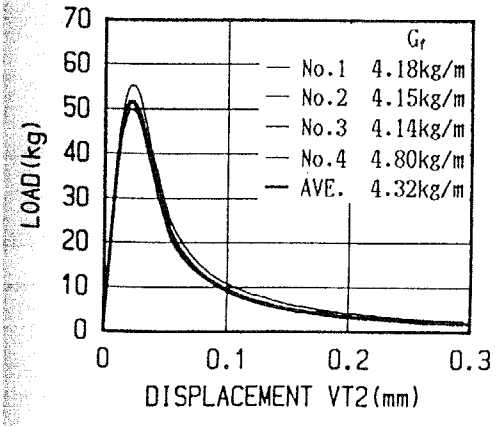
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

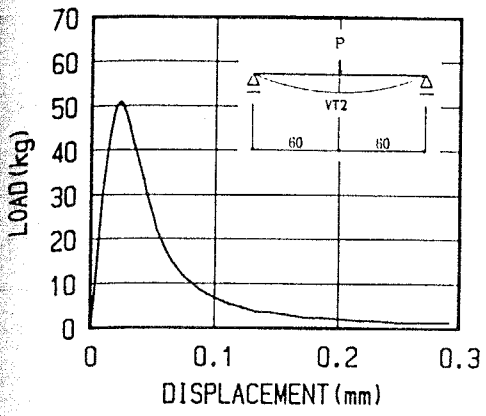


(4) 試験体 No.4

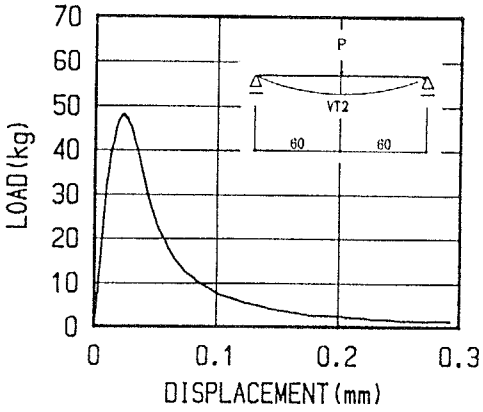


(5) 荷重－変位 VT2

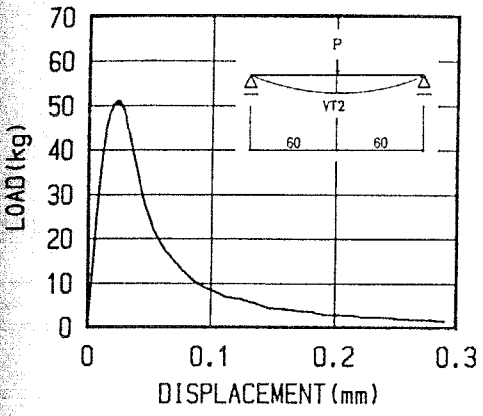
図－4.37 荷重－変位曲線：3PM0.3-1シリーズ（1年試験）



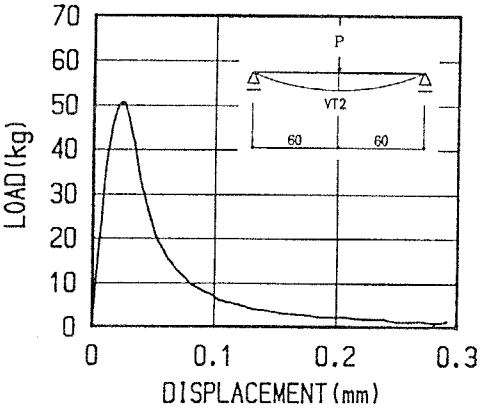
(1) 試験体 No.1



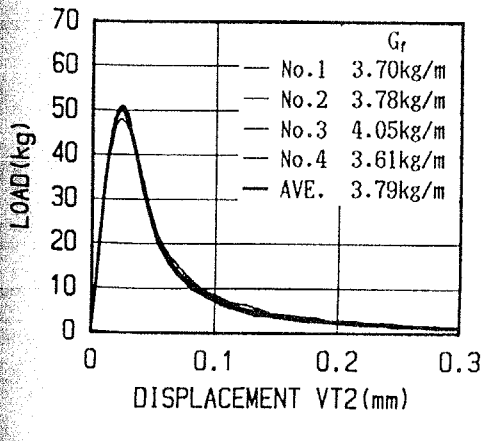
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

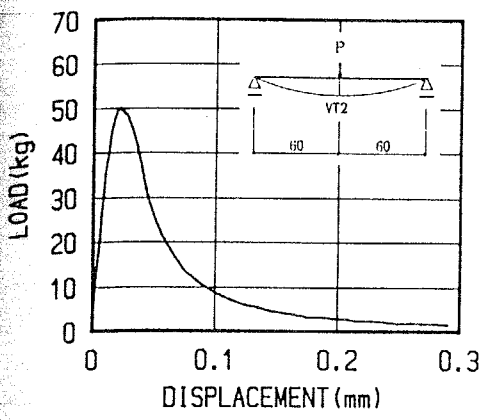


(4) 試験体 No.4

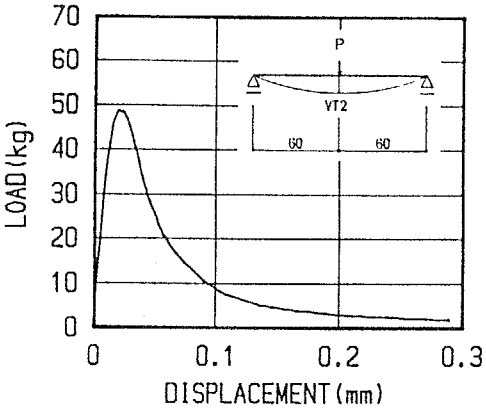


(5) 荷重－変位 VT2

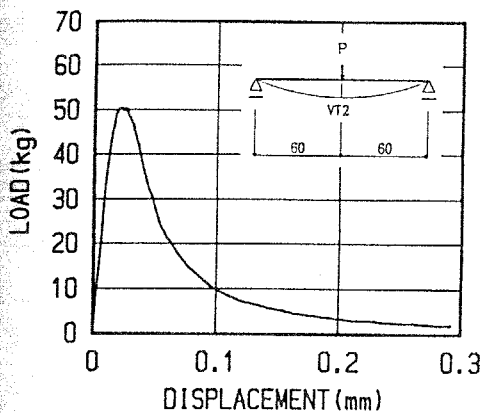
図－4.38 荷重－変位曲線：3PM0.6-1シリーズ（1年試験）



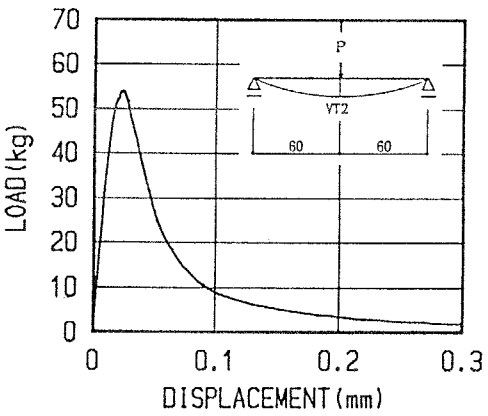
(1) 試験体 No.1



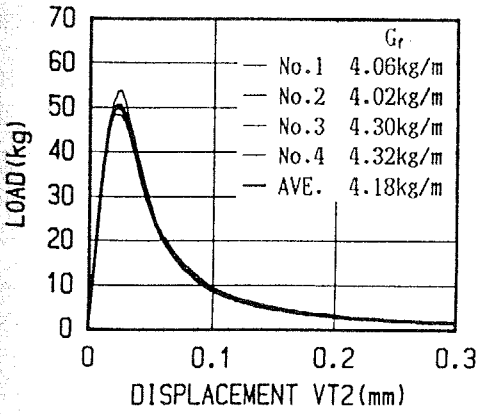
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

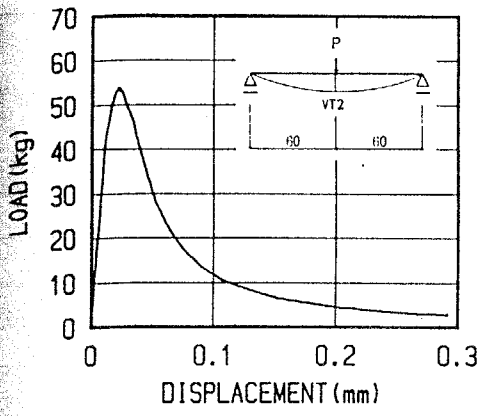


(4) 試験体 No.4

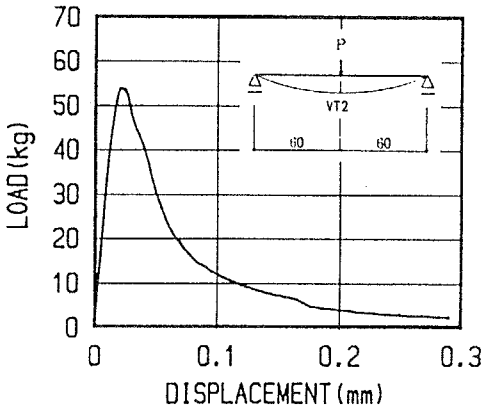


(5) 荷重－変位 VT2

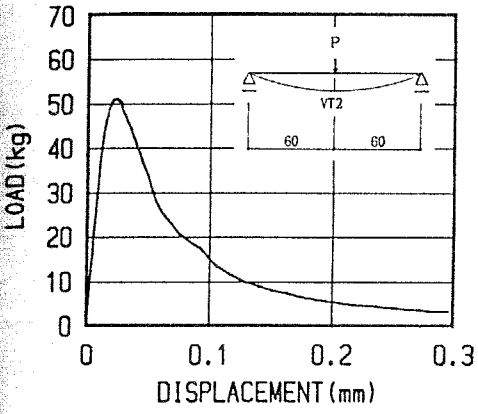
図－4.39 荷重－変位曲線：3PM1.2-1シリーズ（1年試験）



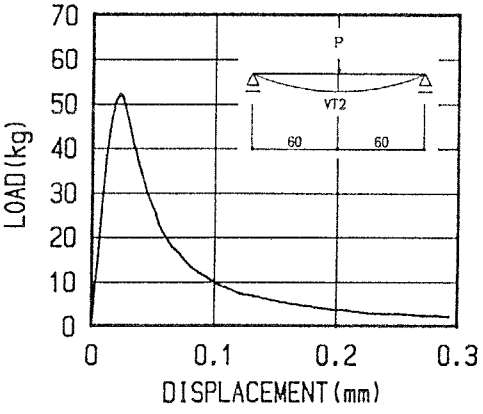
(1) 試験体 No.1



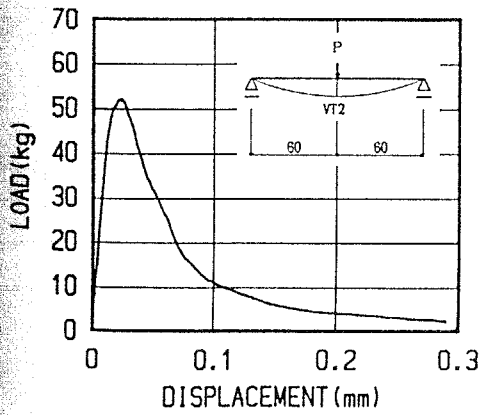
(2) 試験体 No.2



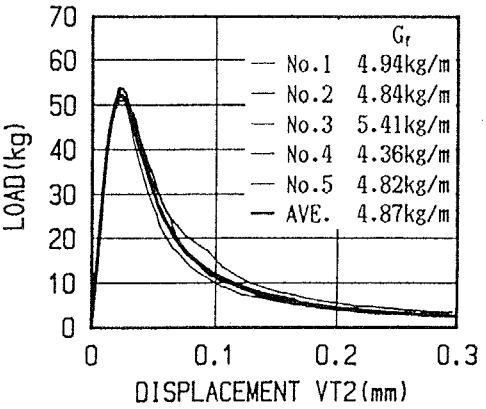
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

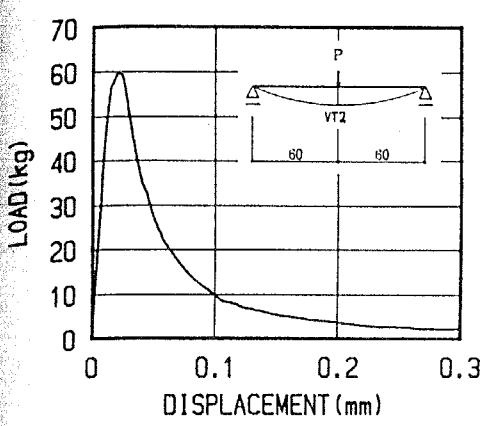


(5) 試験体 No.5

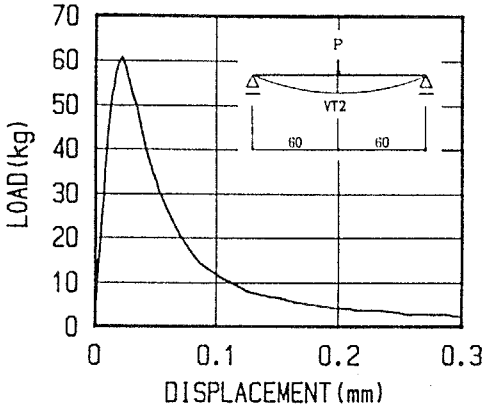


(6) 荷重－変位 VT2

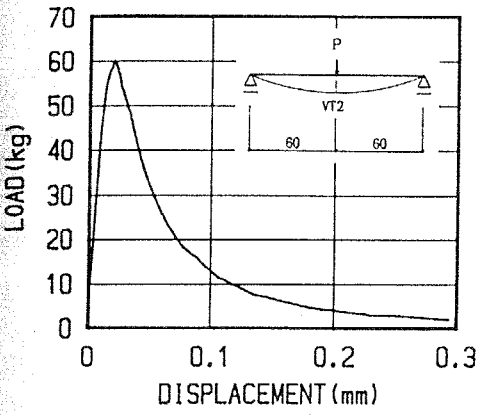
図－4.40 荷重－変位曲線：3PM5.0-1シリーズ（1年試験）



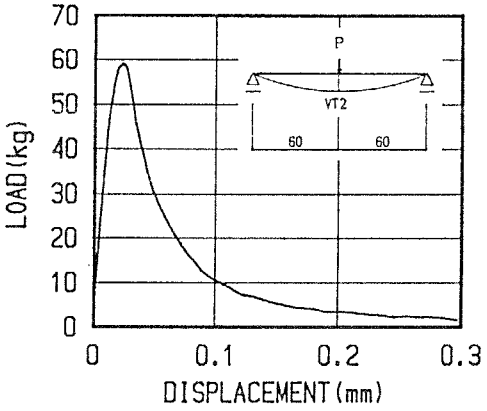
(1) 試験体 No.1



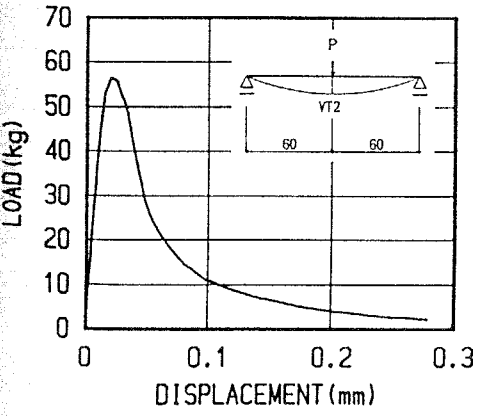
(2) 試験体 No.2



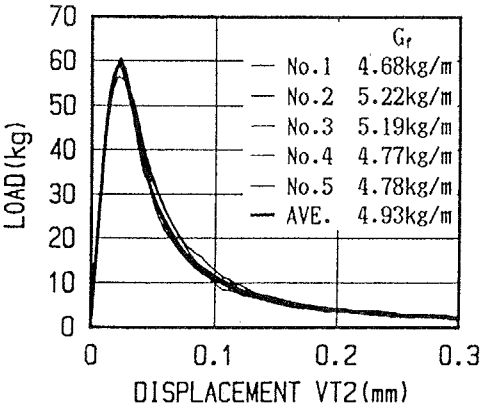
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

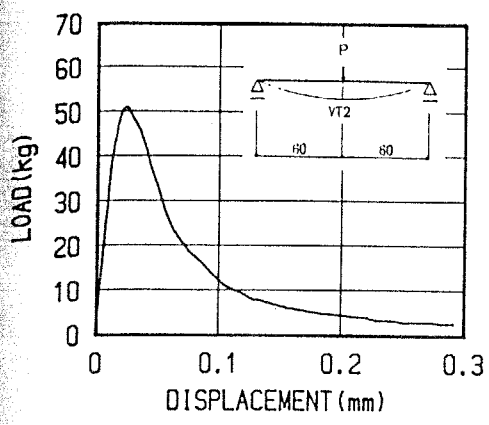


(5) 試験体 No.5

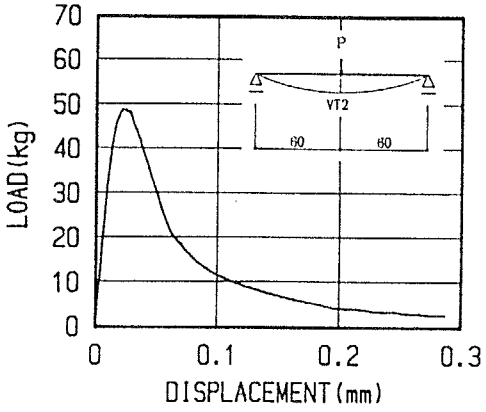


(6) 荷重－変位 VT2

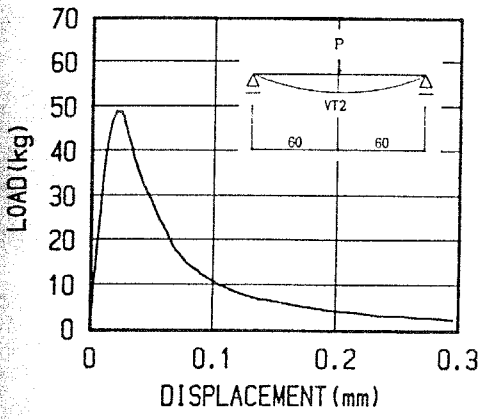
図－4.41 荷重－変位曲線：3PL2.5-1シリーズ（1年試験）



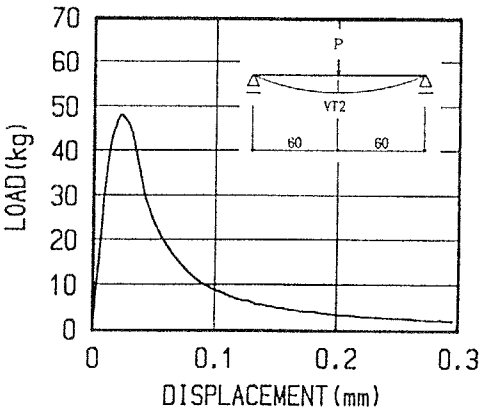
(1) 試験体 No. 1



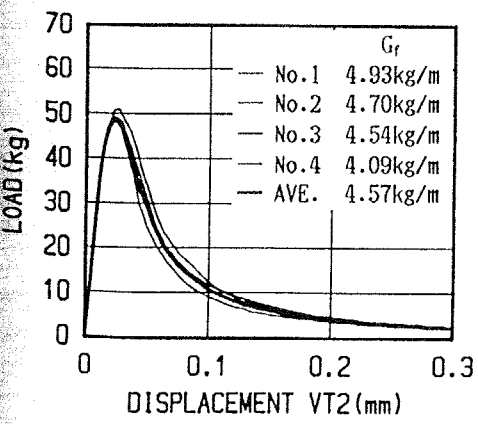
(2) 試験体 No. 2



(3) 試験体 No. 3

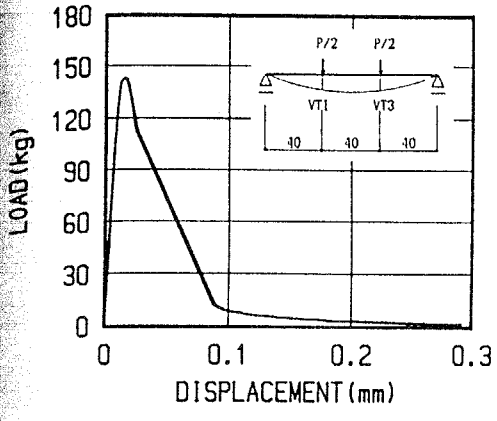


(4) 試験体 No. 4

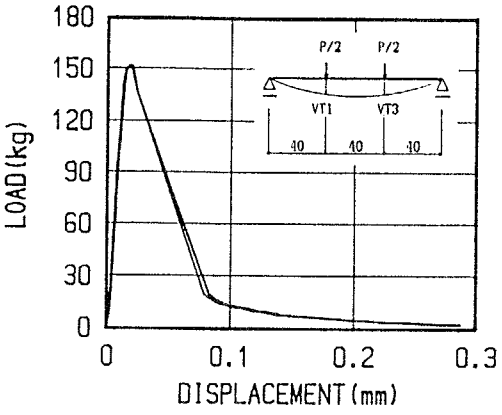


(5) 荷重－変位 VT2

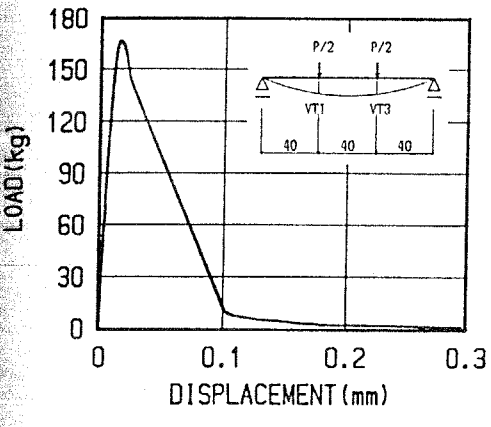
図－4.42 荷重－変位曲線：3PH2.5-1シリーズ（1年試験）



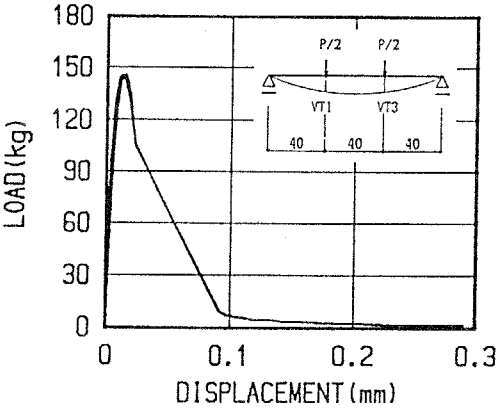
(1) 試験体 No.1



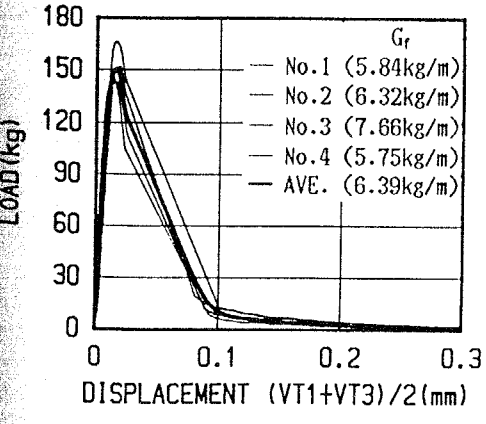
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

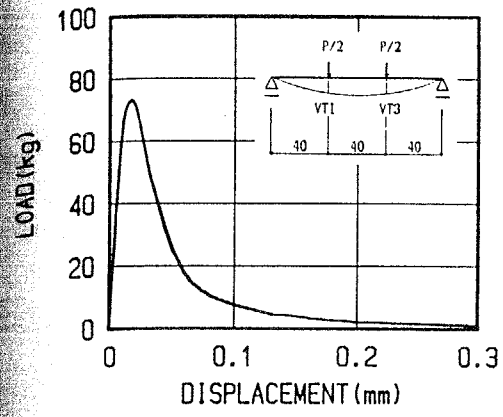


(4) 試験体 No.4

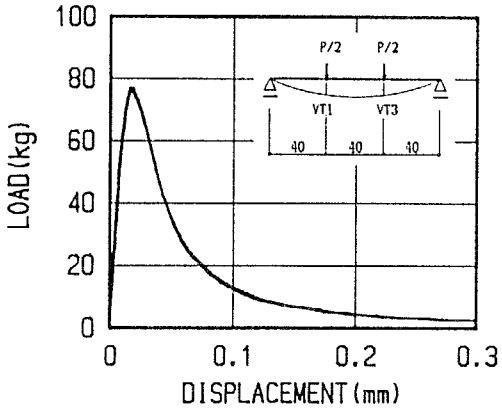


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

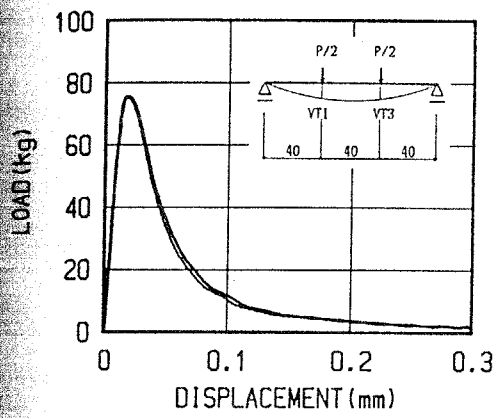
図－4.43 荷重－変位曲線：4PM2.5-7シリーズ（1年試験）



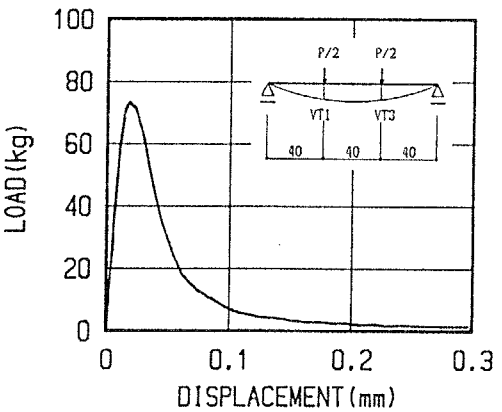
(1) 試験体 No. 1



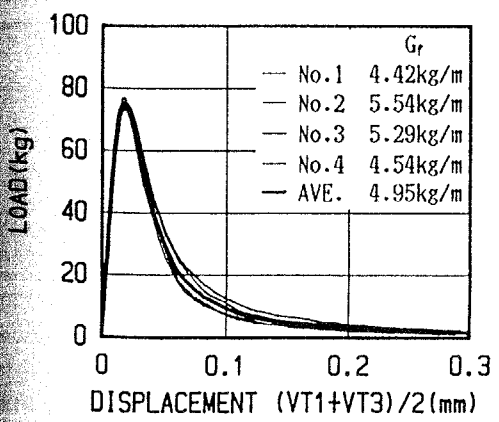
(2) 試験体 No. 2



(3) 試験体 No. 3

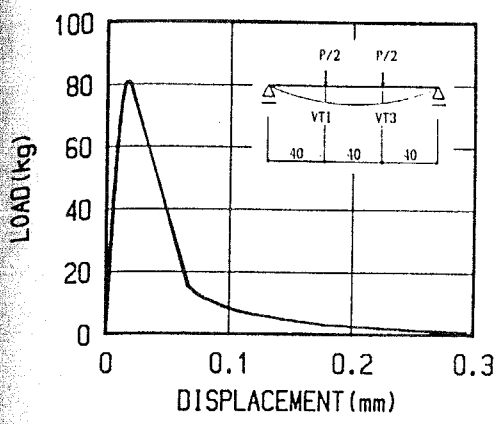


(4) 試験体 No. 4

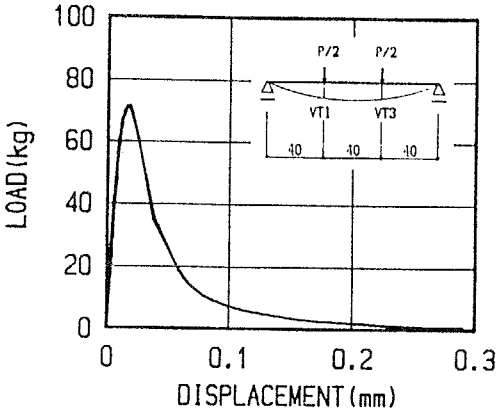


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

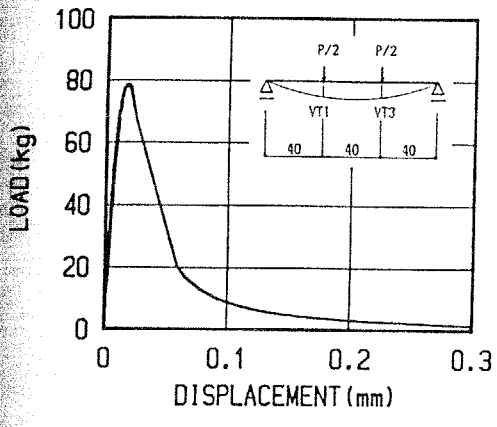
図－4.44 荷重－変位曲線：4PM2.5-8シリーズ（1年試験）



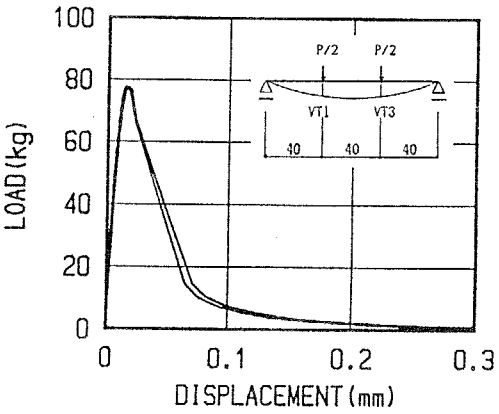
(1) 試験体 No.1



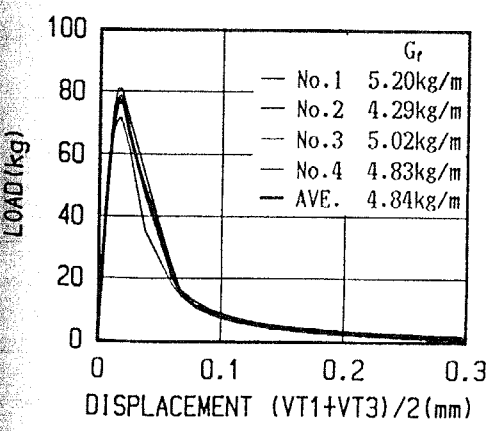
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

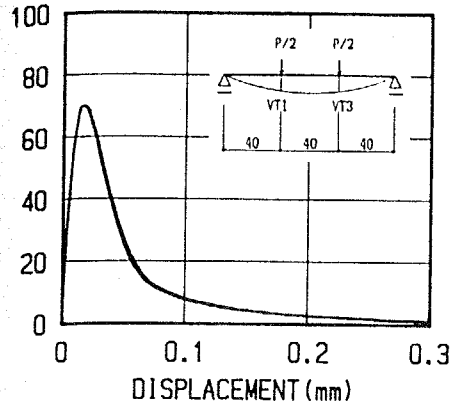


(4) 試験体 No.4

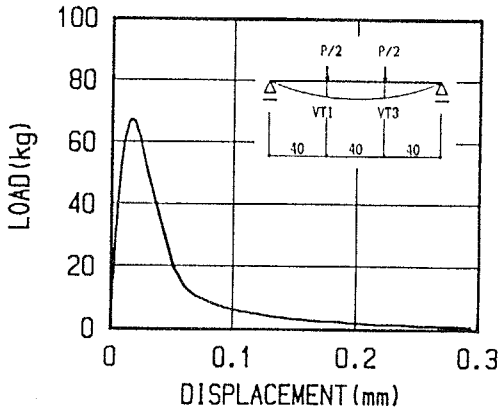


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

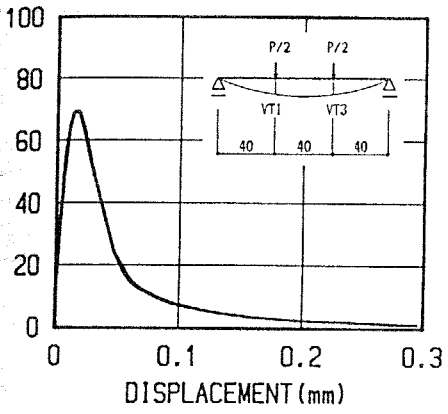
図－4.45 荷重－変位曲線：4PM2.5-9シリーズ（1年試験）



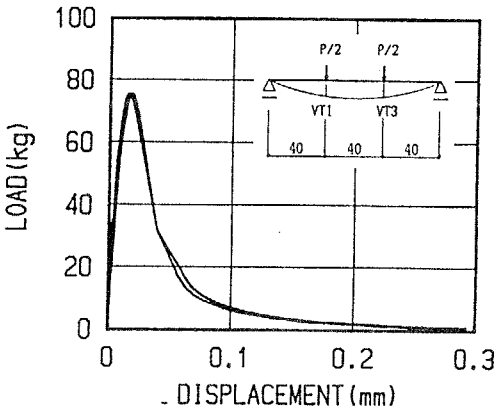
(1) 試験体 No.1



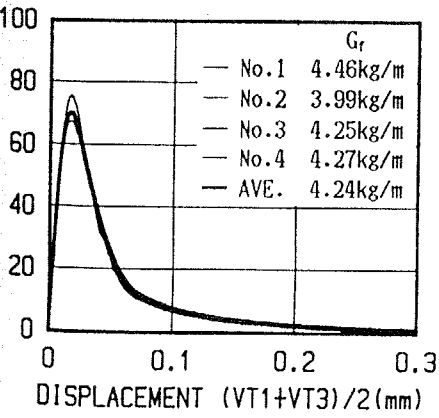
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

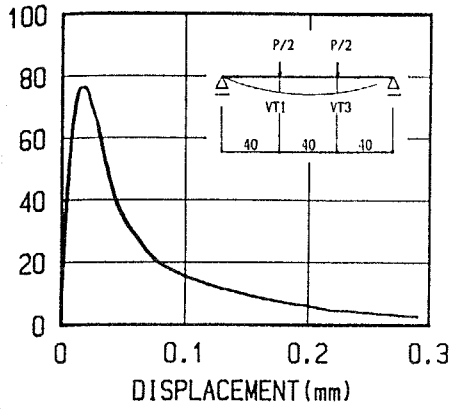


(4) 試験体 No.4

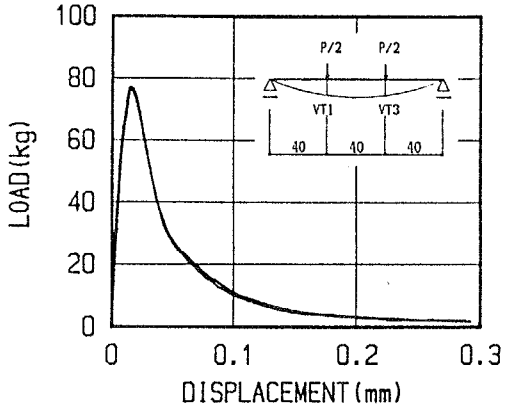


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

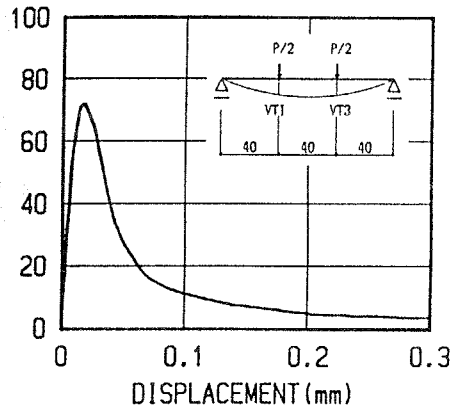
図－4.46 荷重－変位曲線：4PM0.3-2シリーズ（1年試験）



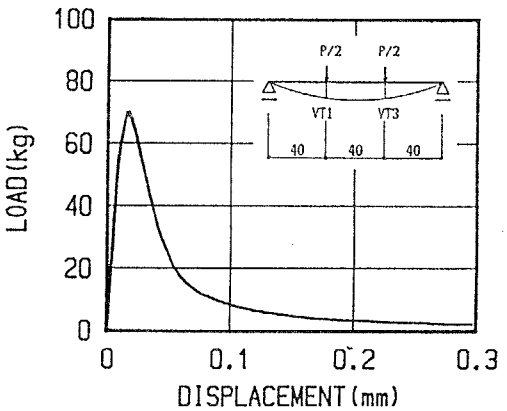
(1) 試験体 No.1



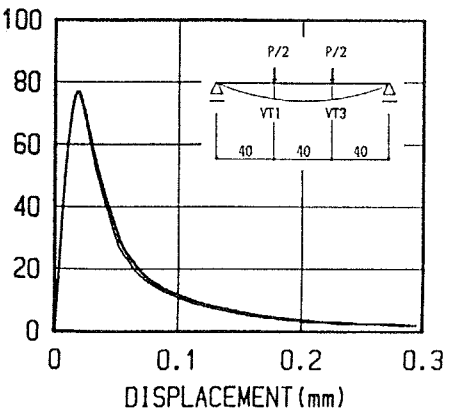
(2) 試験体 No.2



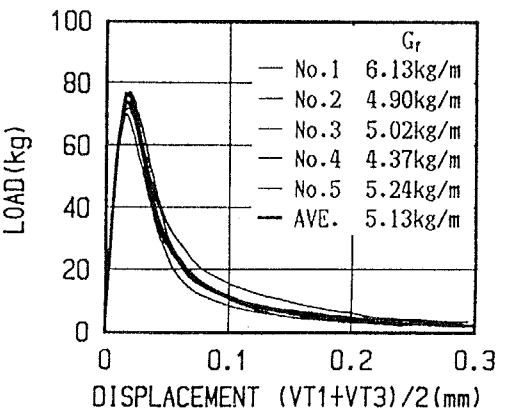
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

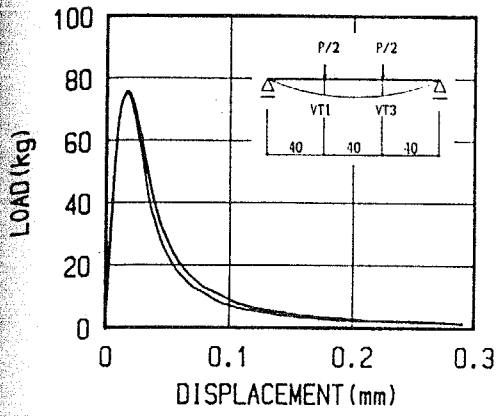


(5) 試験体 No.5

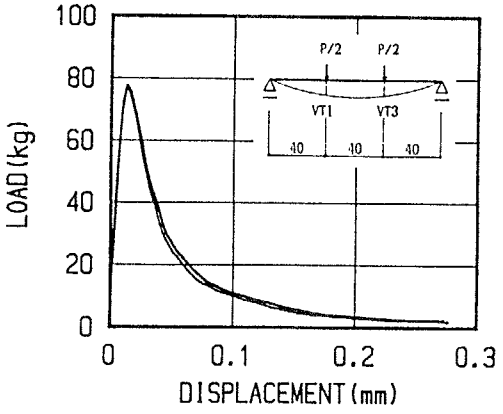


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

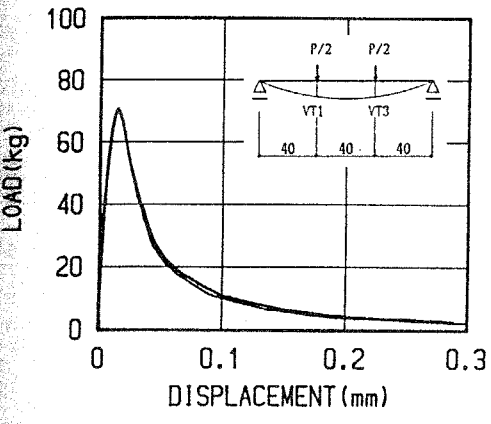
図－4.47 荷重－変位曲線：4PM5.0-2シリーズ（1年試験）



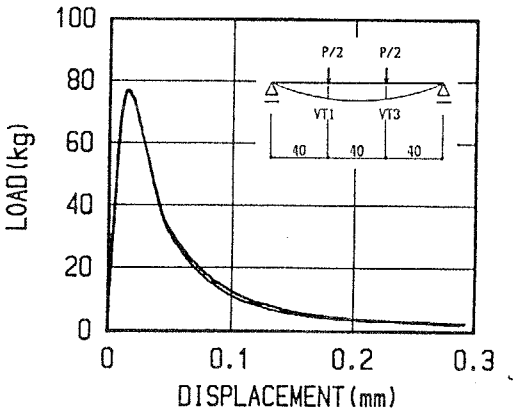
(1) 試験体 No.1



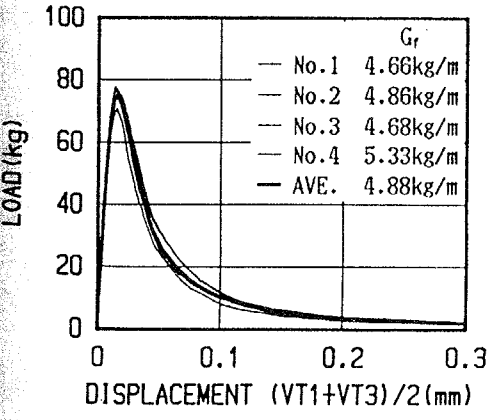
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

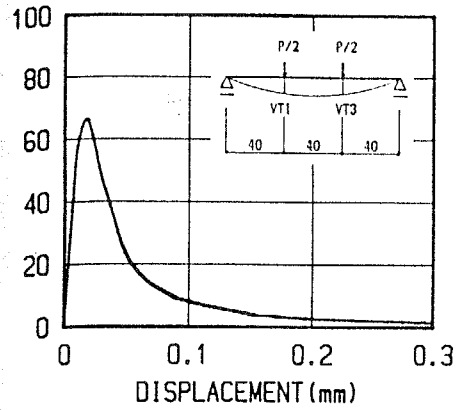


(4) 試験体 No.4

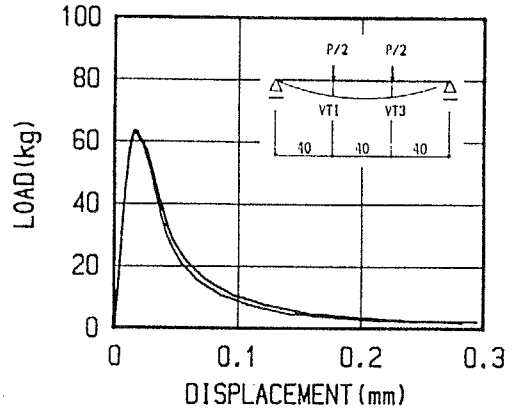


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

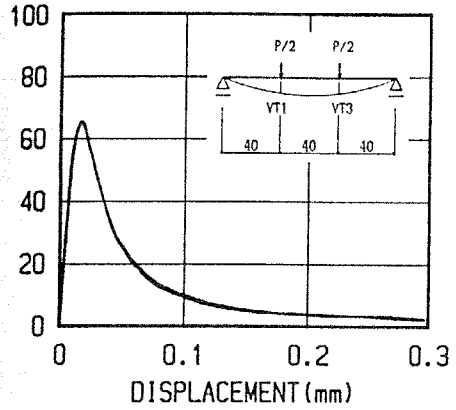
図－4.48 荷重－変位曲線：4PL2.5-2シリーズ（1年試験）



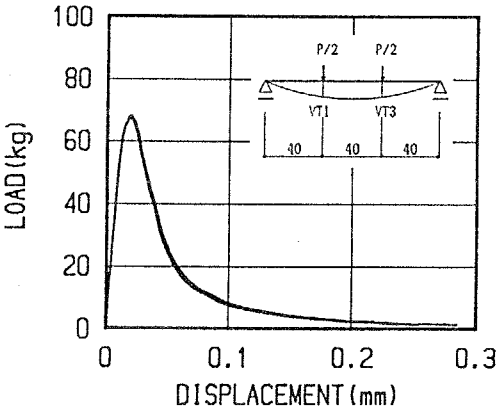
(1) 試験体 No.1



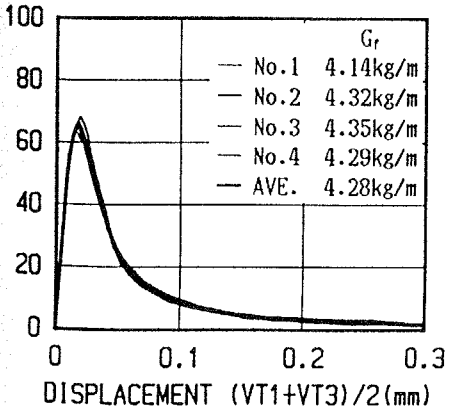
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

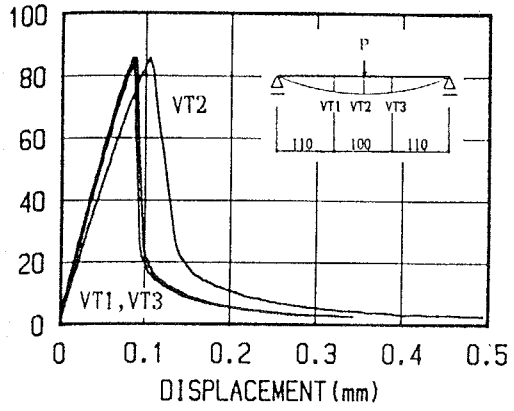


(4) 試験体 No.4

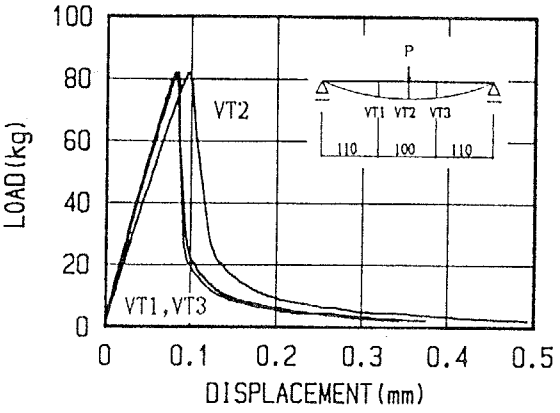


(5) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

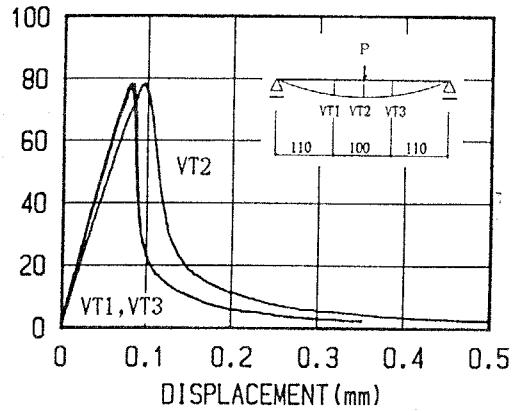
図－4.49 荷重－変位曲線：4PH2.5-2シリーズ（1年試験）



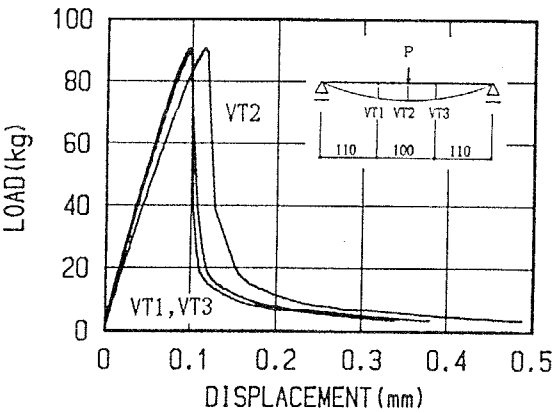
(1) 試験体 No.1



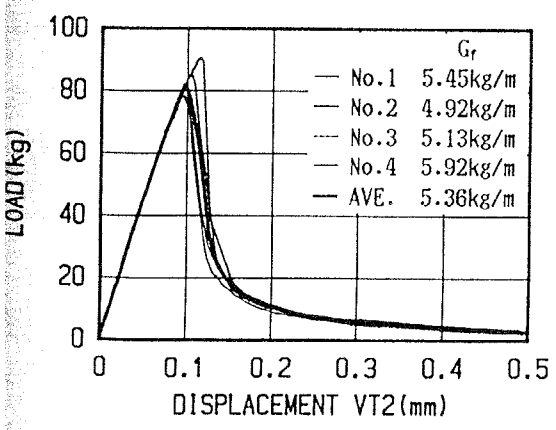
(2) 試験体 No.2



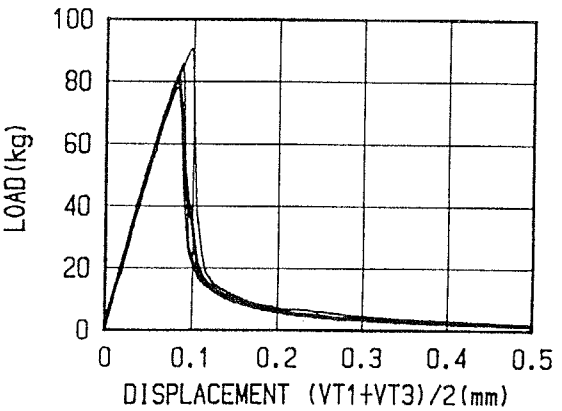
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

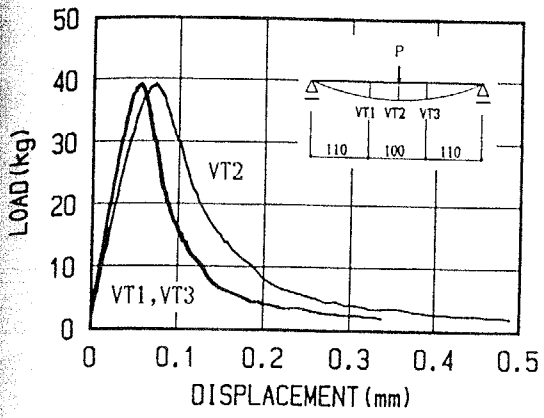


(5) 荷重－変位 VT2

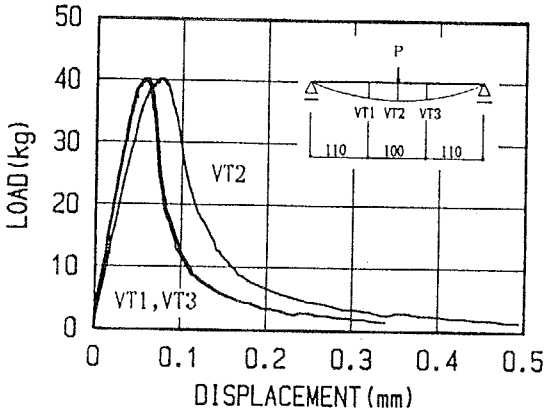


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

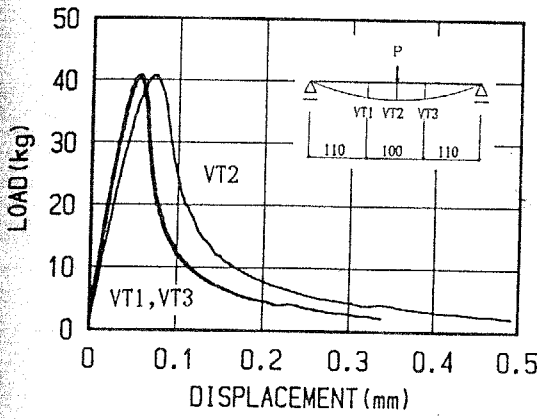
図－4.50 荷重－変位曲線：SM2.5-00シリーズ（1年試験）



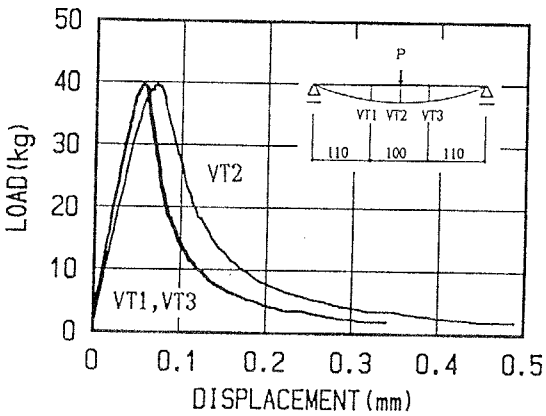
(1) 試験体 No. 1



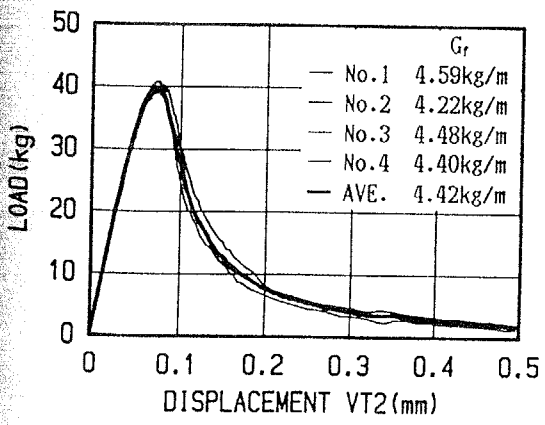
(2) 試験体 No. 2



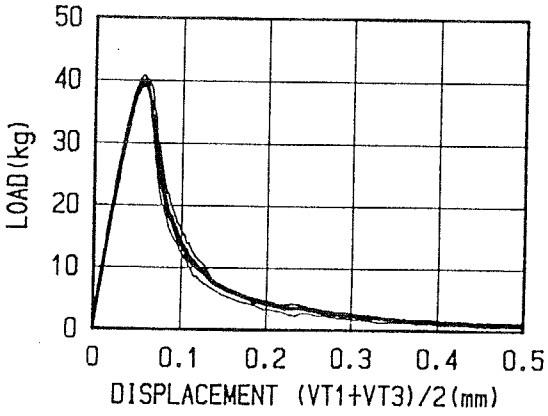
(3) 試験体 No. 3



(4) 試験体 No. 4

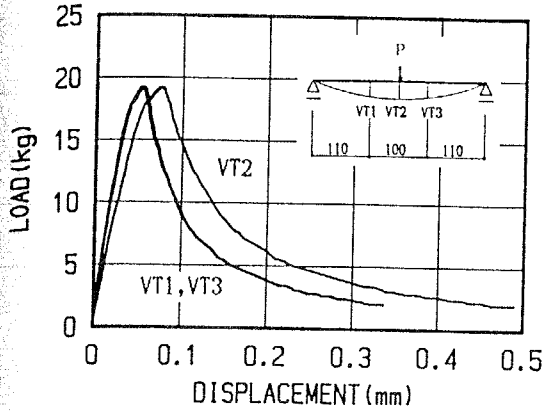


(5) 荷重－変位 VT2

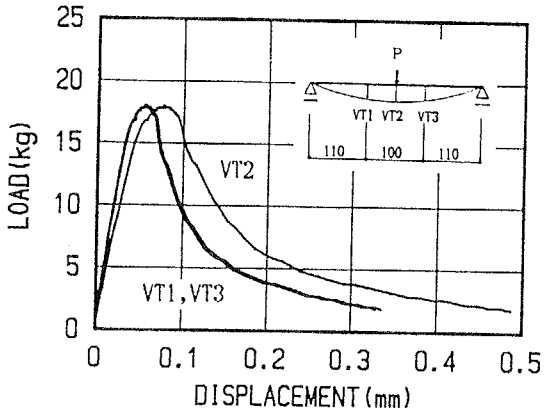


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

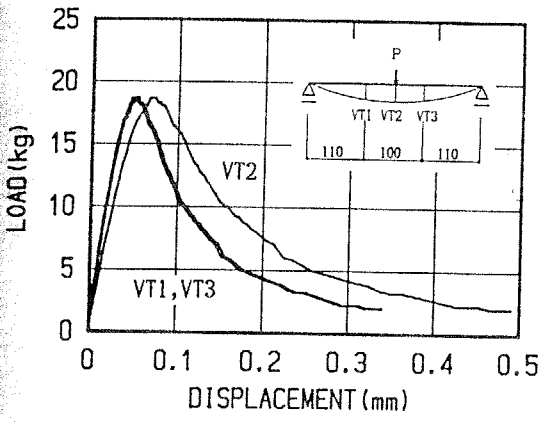
図－4.51 荷重－変位曲線：SM2.5-10シリーズ（1年試験）



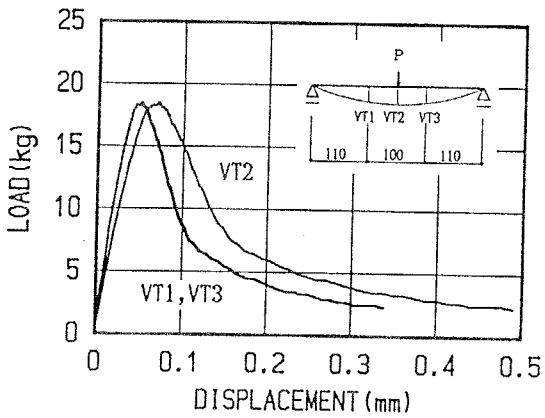
(1) 試験体 No.1



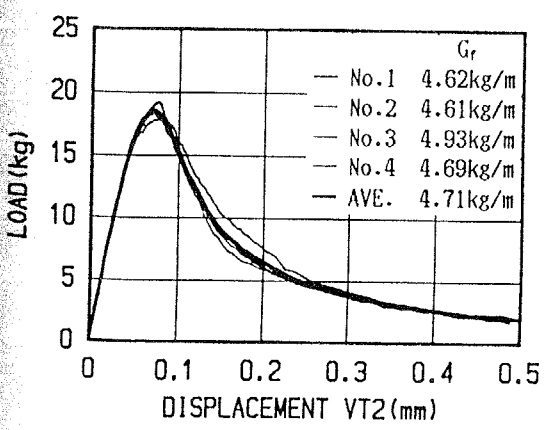
(2) 試験体 No.2



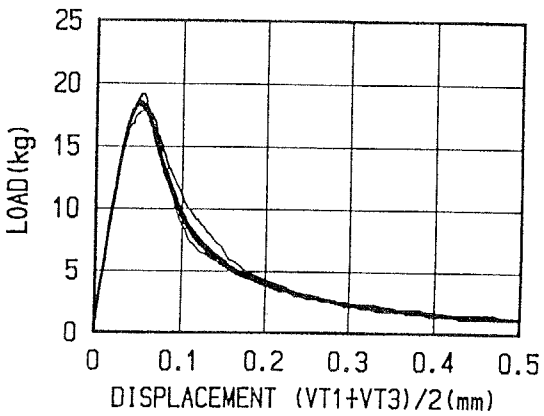
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

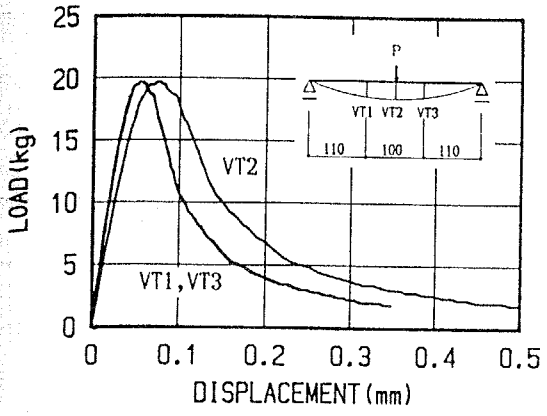


(5) 荷重－変位 VT2

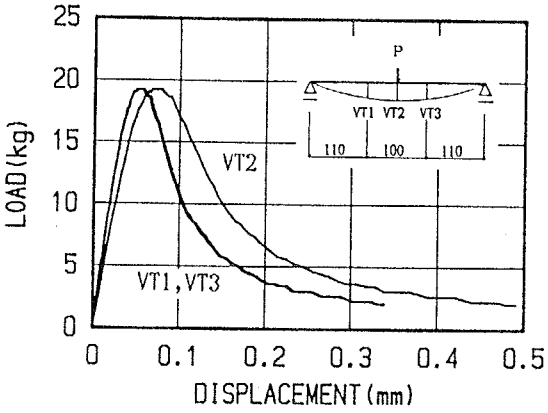


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

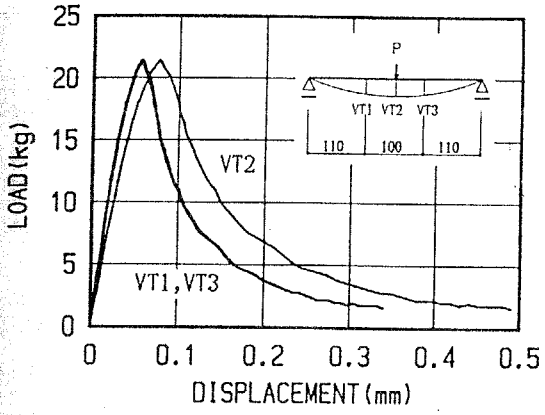
図－4.52 荷重－変位曲線：SM2.5-11シリーズ（1年試験）



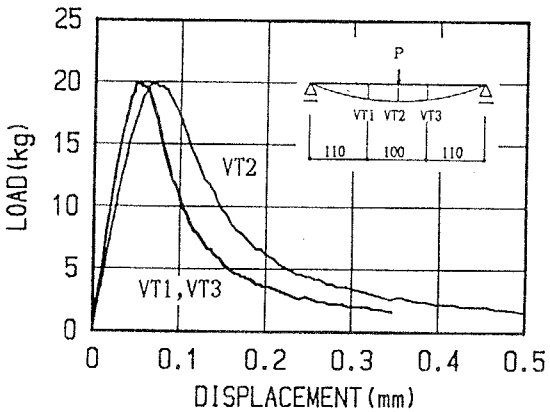
(1) 試験体 No.1



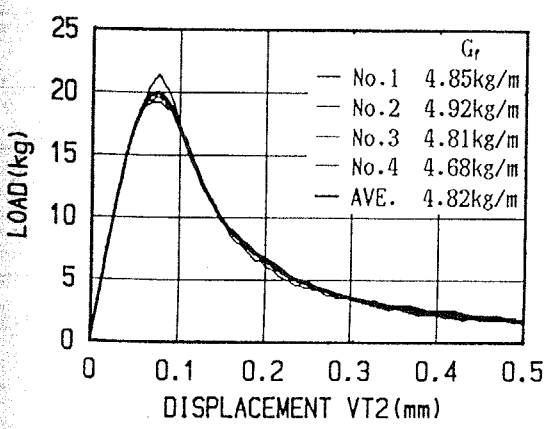
(2) 試験体 No.2



(3) 試験体 No.3

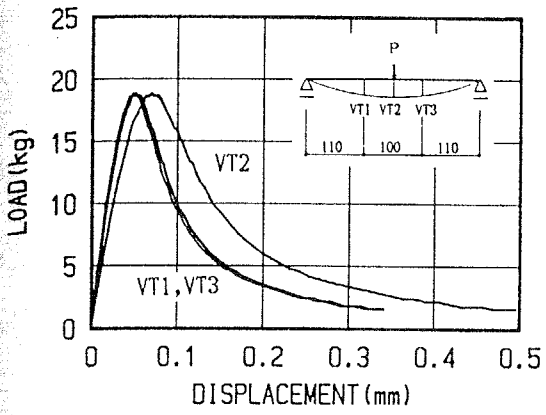


(4) 試験体 No.4

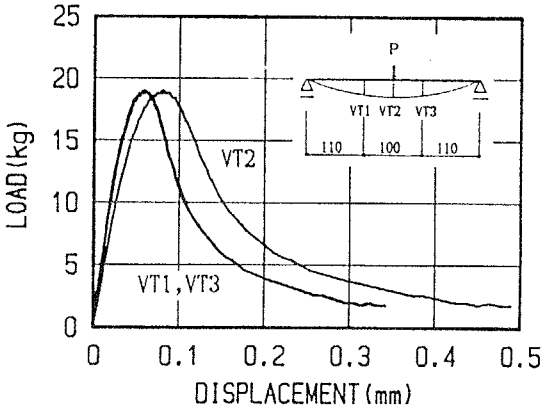


(5) 荷重－変位 VT2

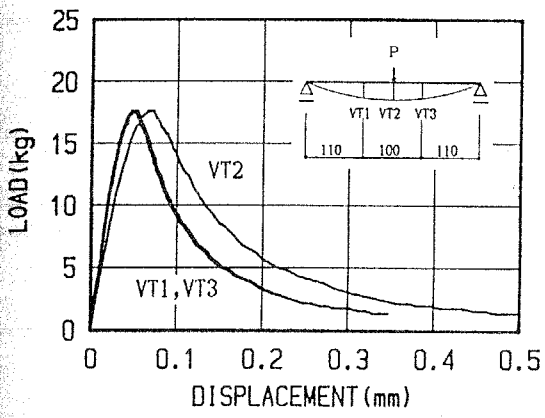
図－4.53 荷重－変位曲線：SM2.5-12シリーズ（1年試験）



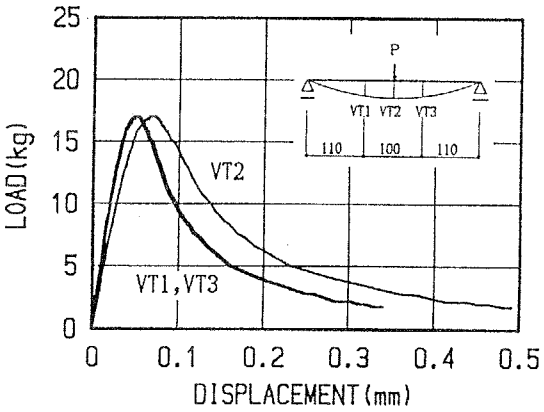
(1) 試験体 No. 1



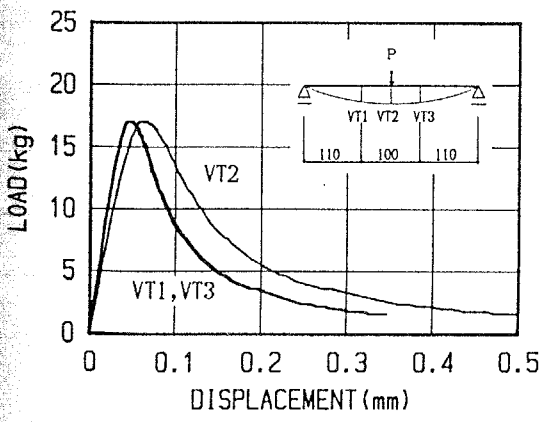
(2) 試験体 No. 2



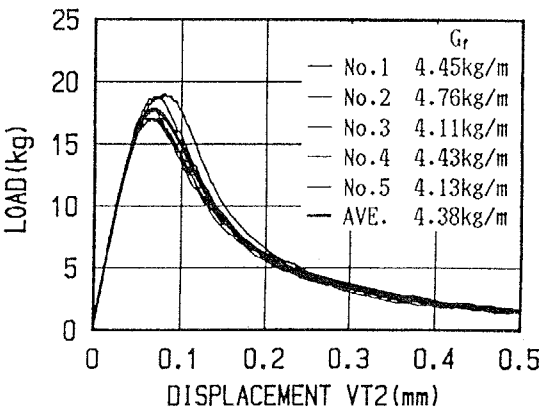
(3) 試験体 No. 3



(4) 試験体 No. 4

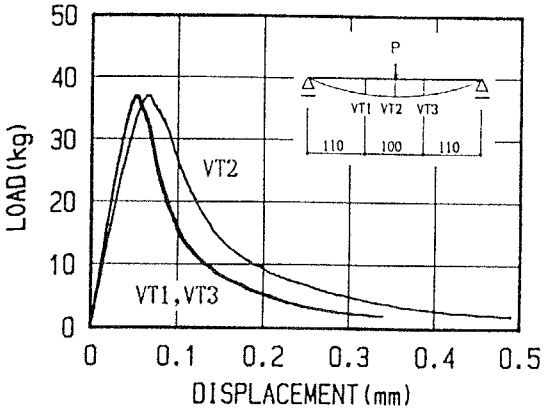


(5) 試験体 No. 5

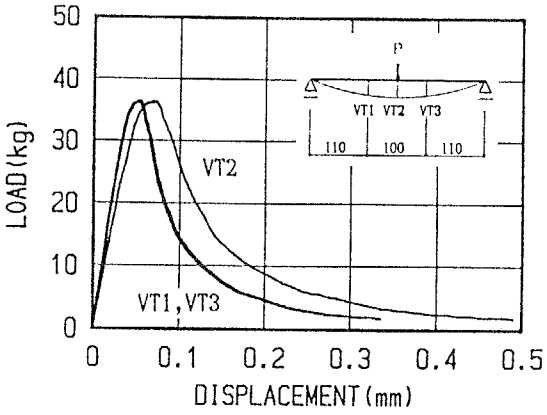


(6) 荷重－変位 VT2

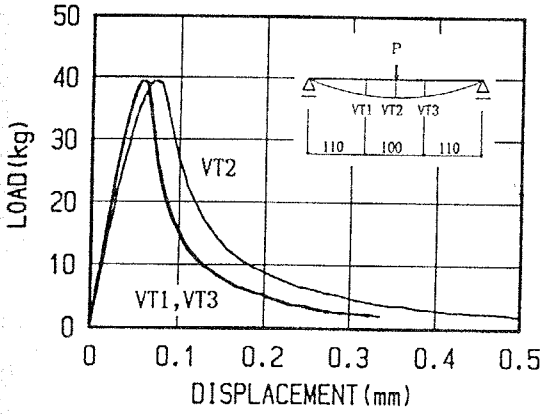
図－4.54 荷重－変位曲線：SM0.3-3シリーズ（1年試験）



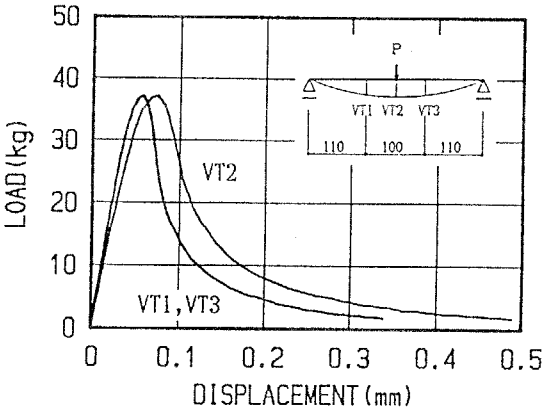
(1) 試験体 No.1



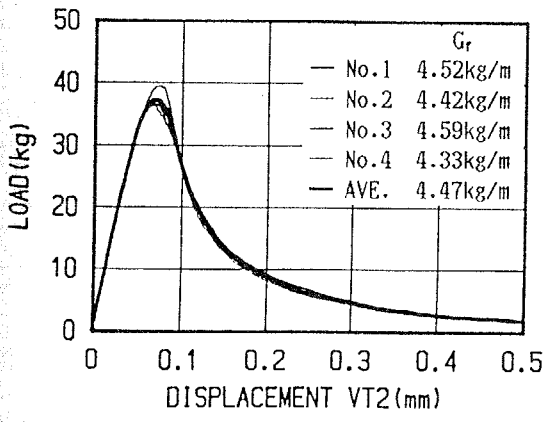
(2) 試験体 No.2



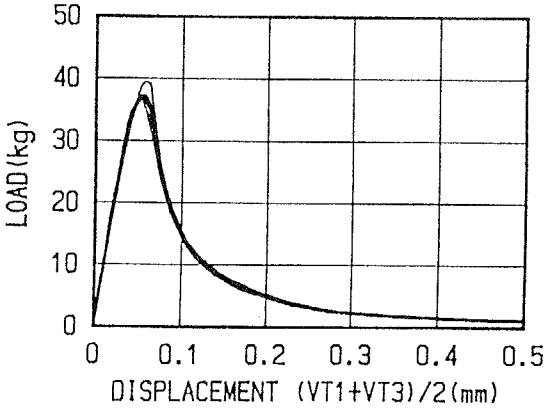
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

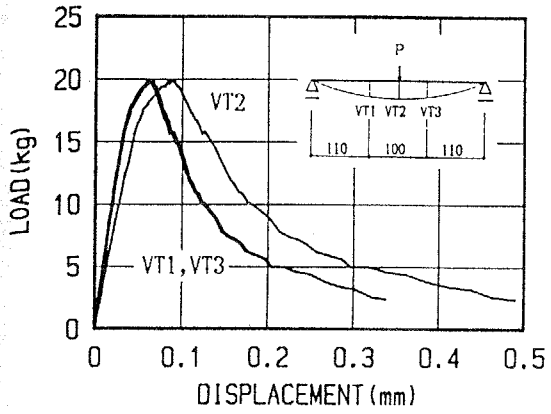


(5) 荷重－変位 VT2

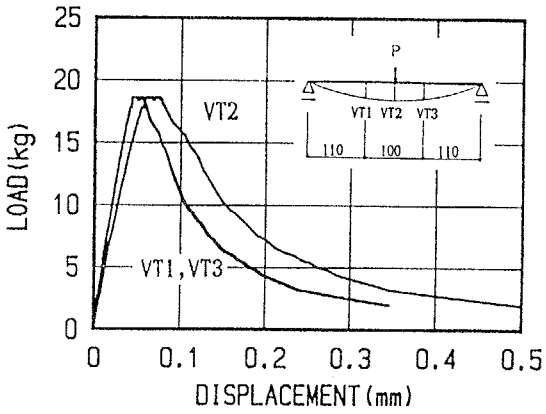


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

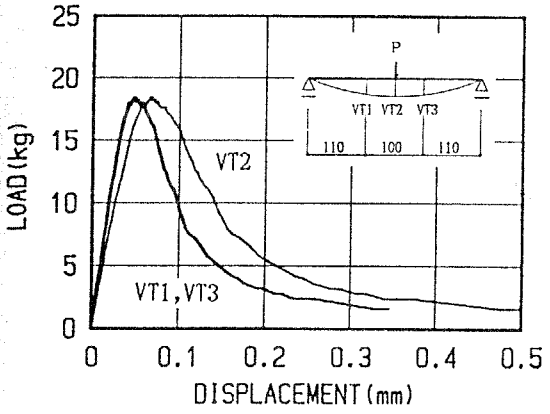
図－4.55 荷重－変位曲線：SM0.3-4シリーズ（1年試験）



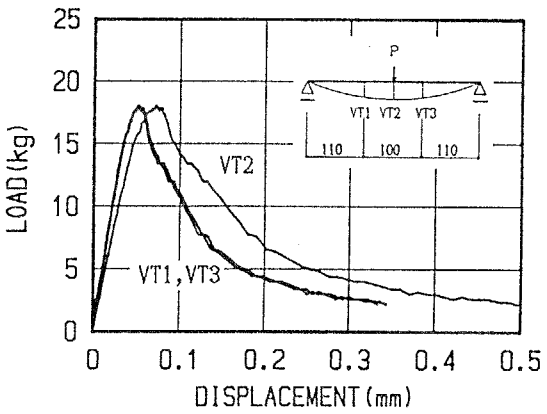
(1) 試験体 No.1



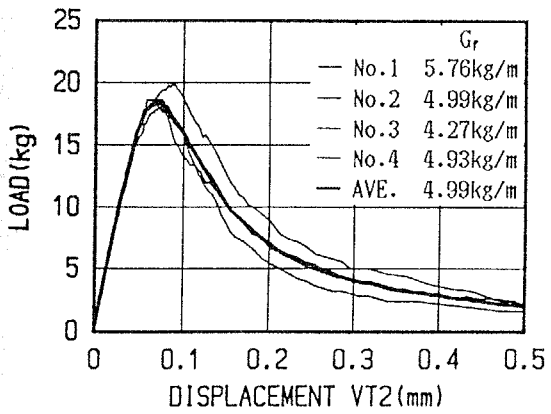
(2) 試験体 No.2



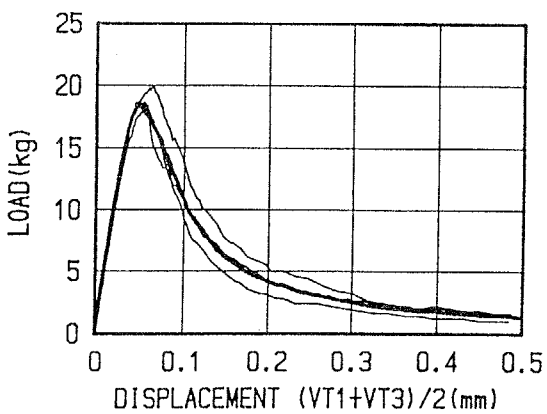
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

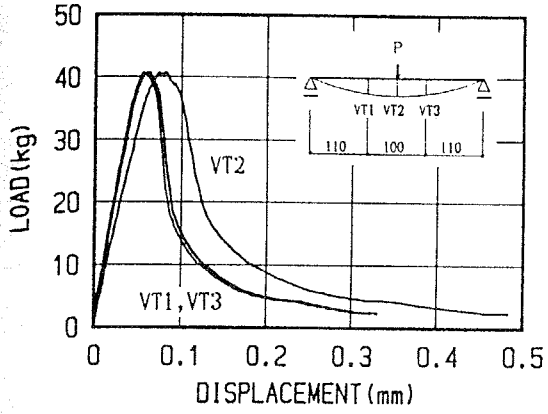


(5) 荷重－変位 VT2

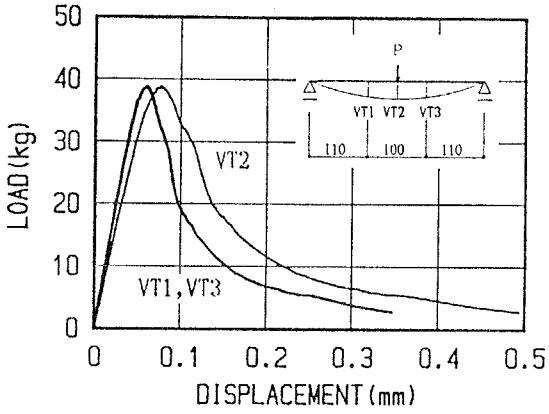


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

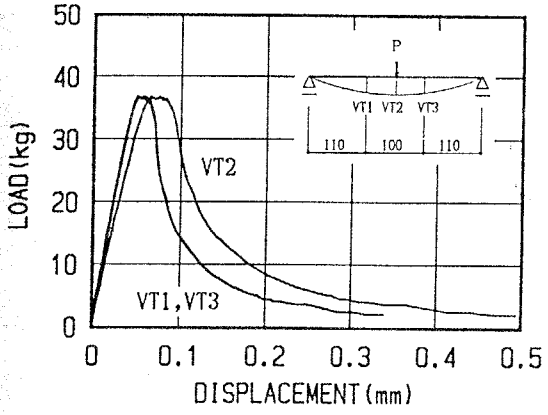
図－4.56 荷重－変位曲線：SM5.0-3シリーズ（1年試験）



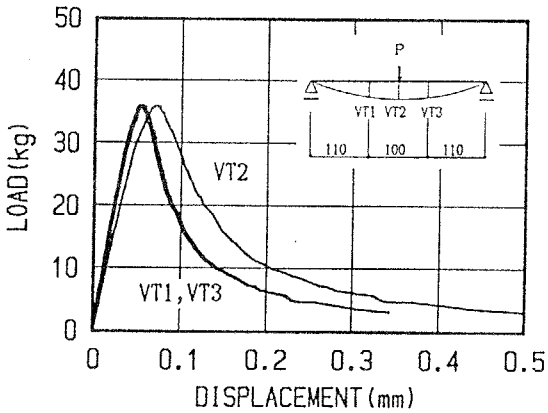
(1) 試験体 No. 1



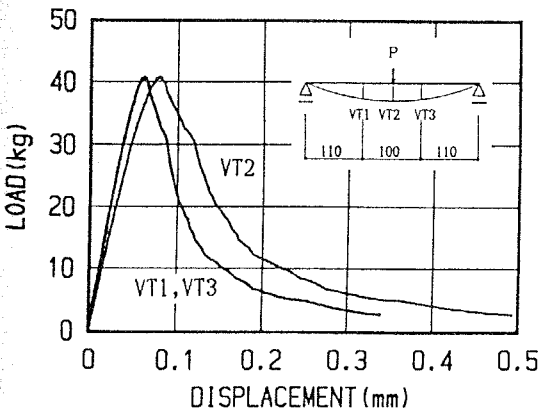
(2) 試験体 No. 2



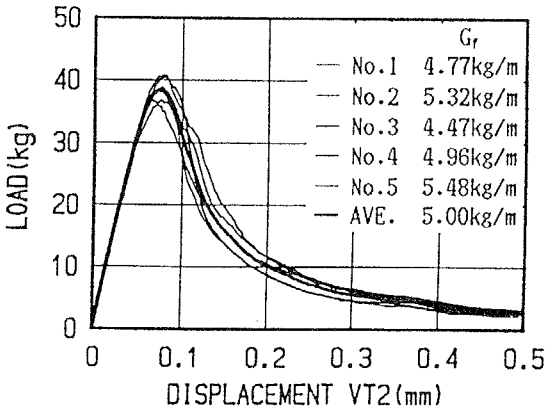
(3) 試験体 No. 3



(4) 試験体 No. 4

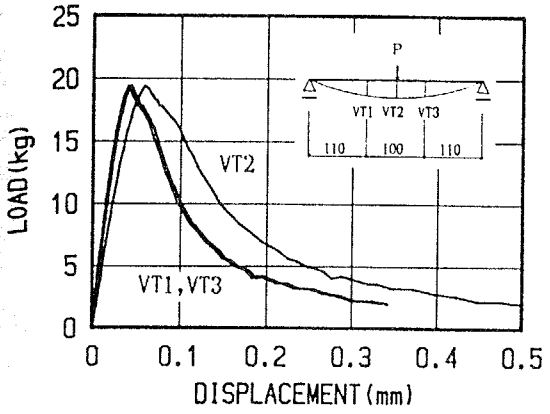


(5) 試験体 No. 5

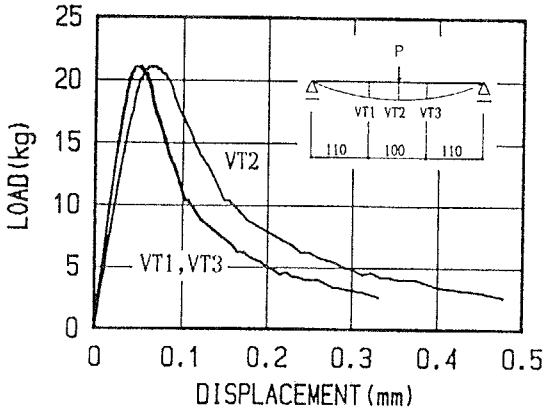


(6) 荷重－変位 VT2

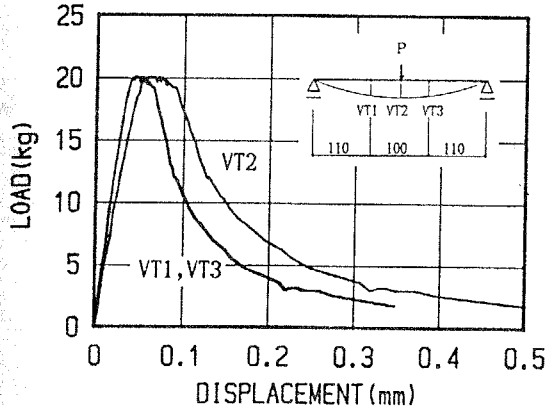
図－4.57 荷重－変位曲線：SM5.0-4シリーズ（1年試験）



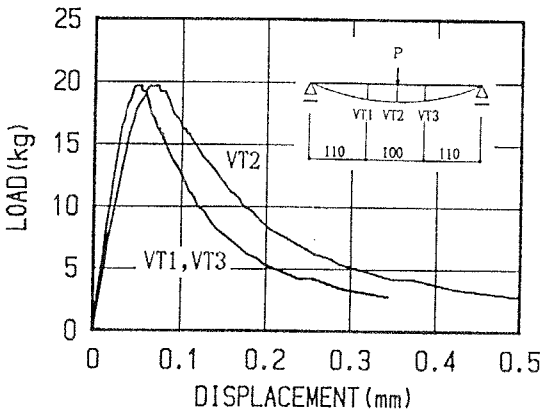
(1) 試験体 No.1



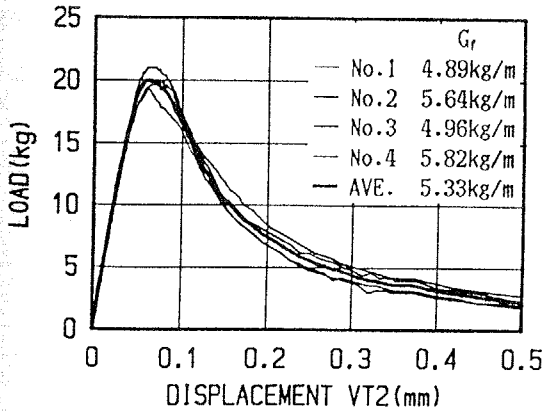
(2) 試験体 No.2



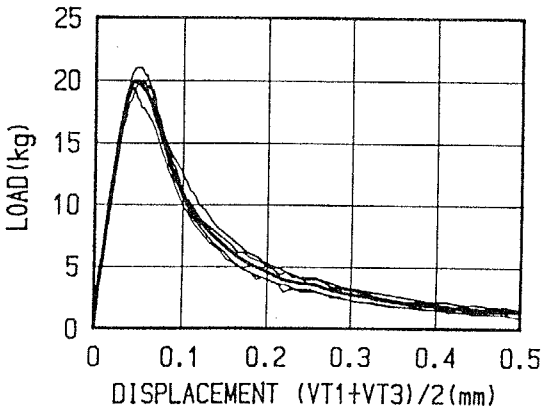
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

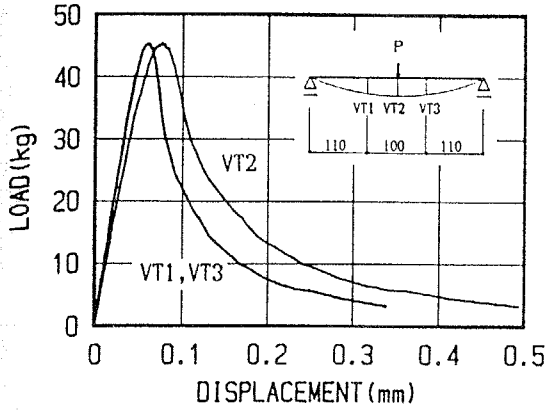


(5) 荷重－変位 VT2

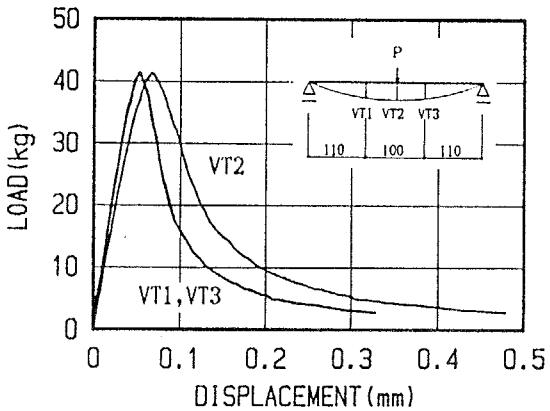


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

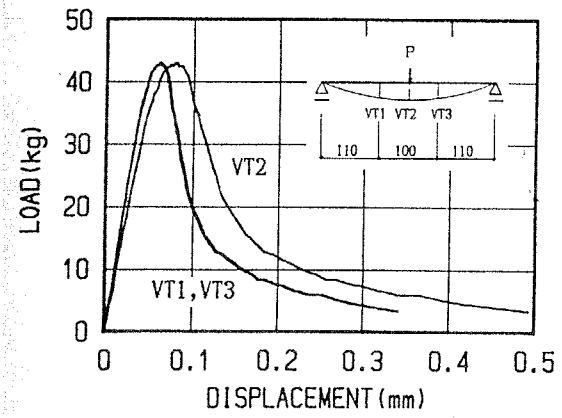
図－4.58 荷重－変位曲線：SL2.5-3シリーズ（1年試験）



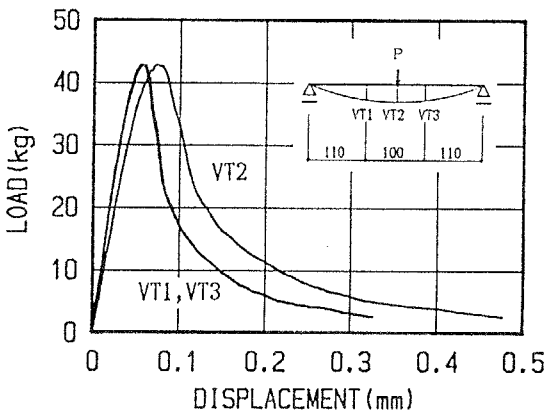
(1) 試験体 No.1



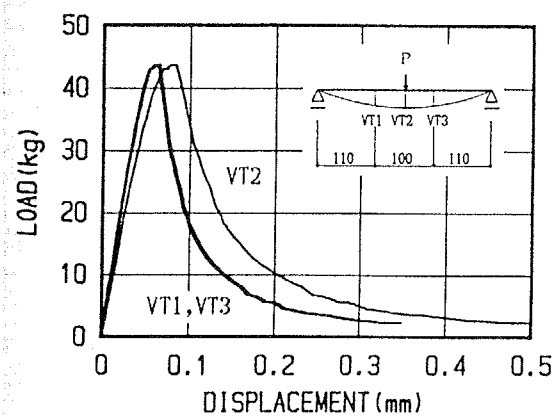
(2) 試験体 No.2



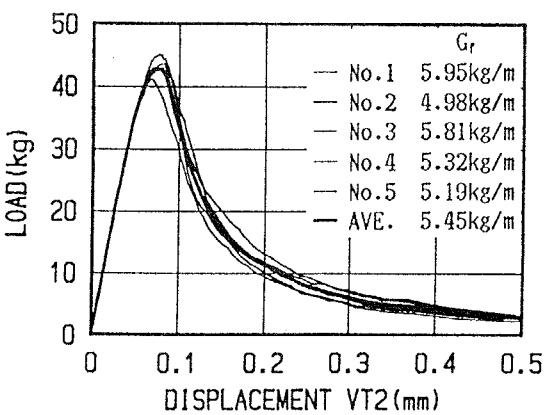
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

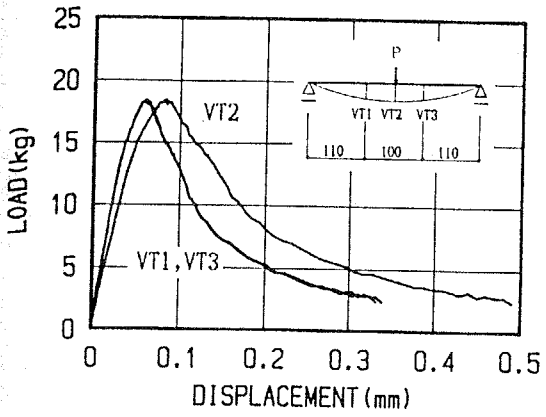


(5) 試験体 No.5

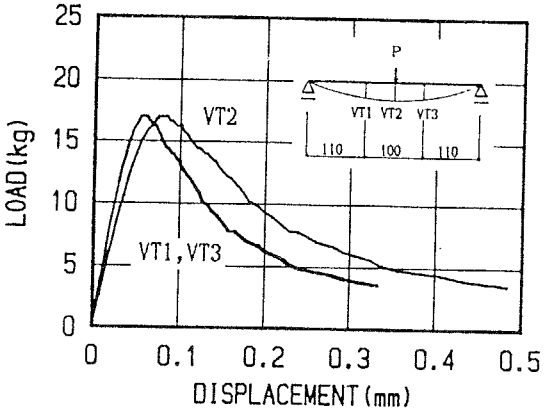


(6) 荷重－変位 VT2

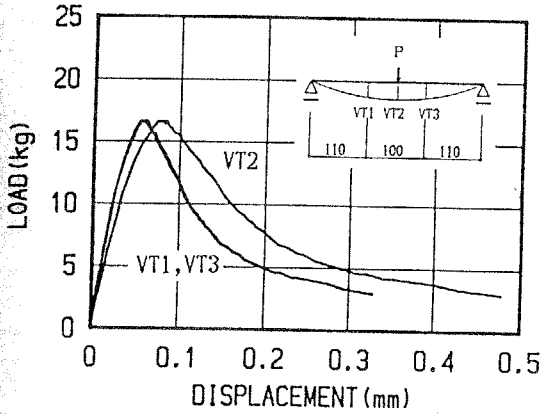
図－4.59 荷重－変位曲線：SL2.5-4シリーズ（1年試験）



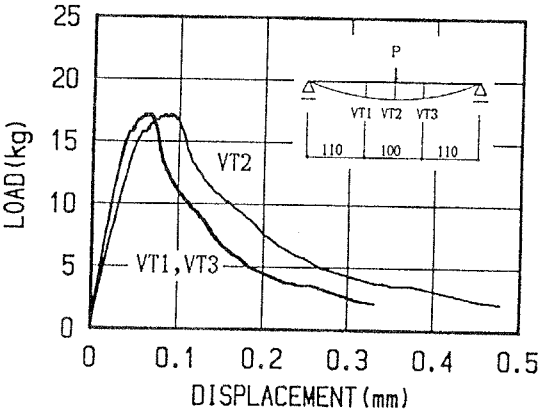
(1) 試験体 No.1



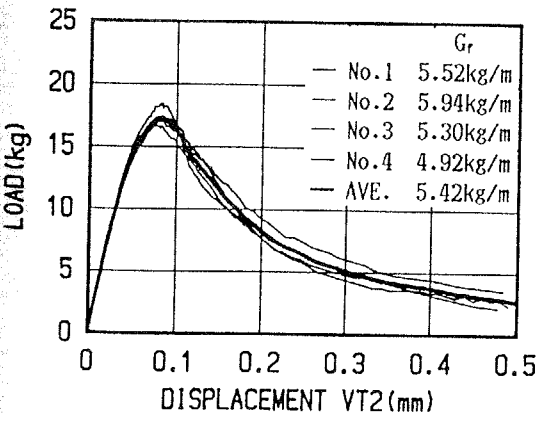
(2) 試験体 No.2



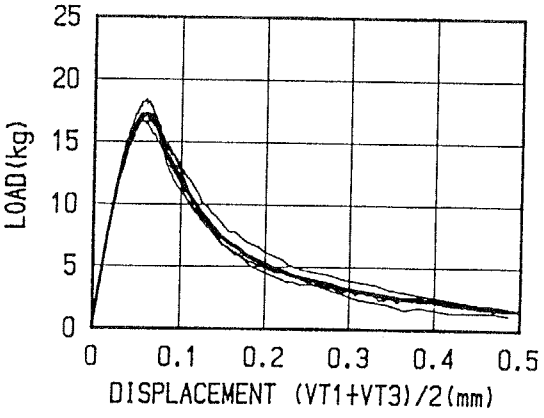
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

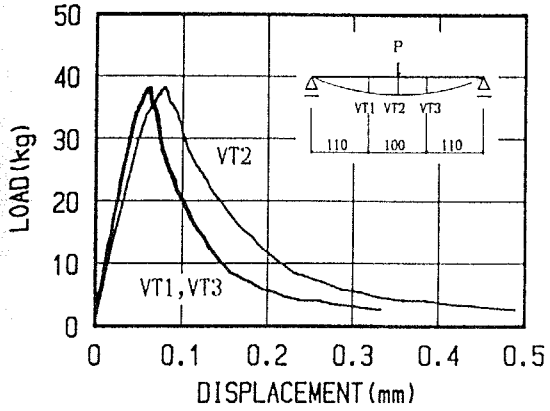


(5) 荷重－変位 VT2

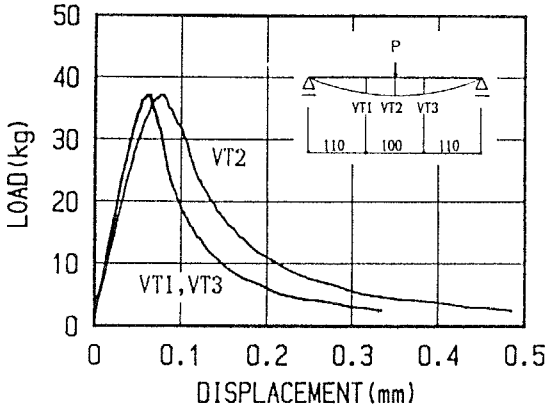


(6) 荷重－変位 (VT1+VT3)/2

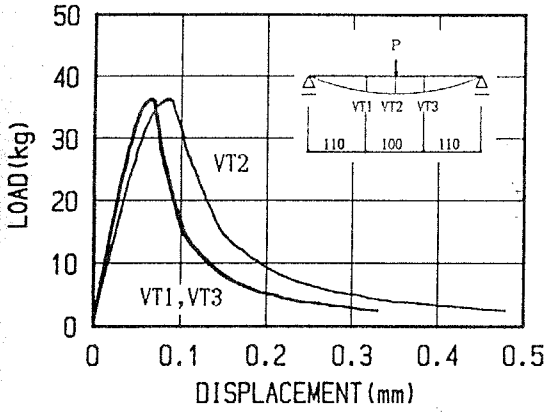
図－4.60 荷重－変位曲線：SH2.5-3シリーズ（1年試験）



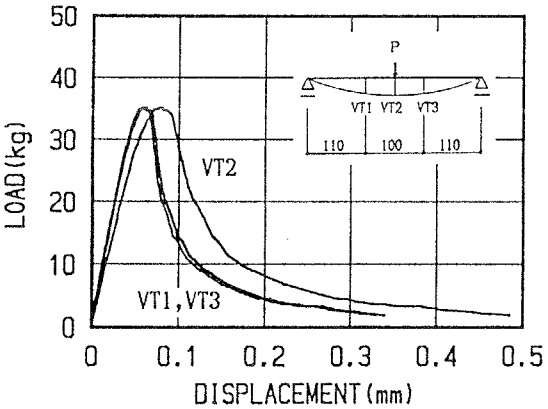
(1) 試験体 No.1



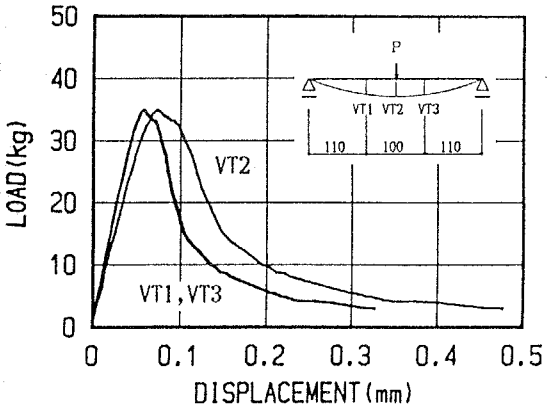
(2) 試験体 No.2



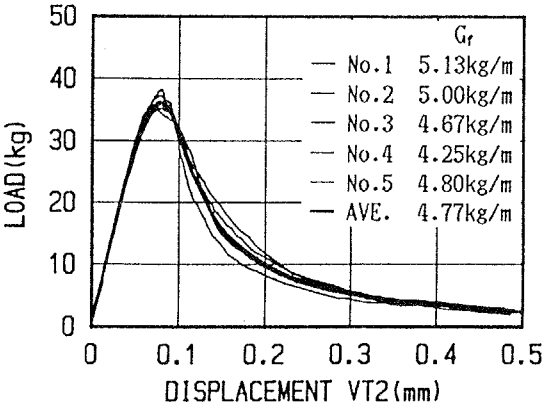
(3) 試験体 No.3



(4) 試験体 No.4

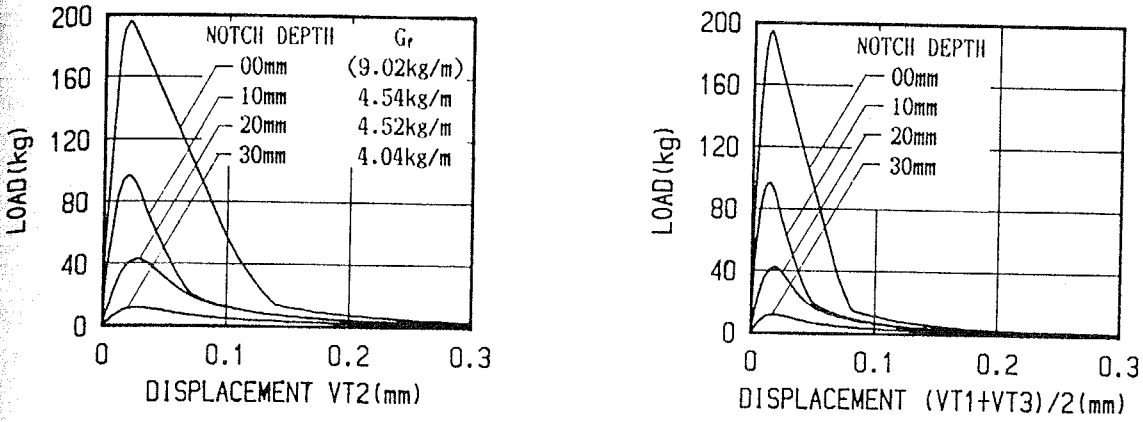


(5) 試験体 No.5

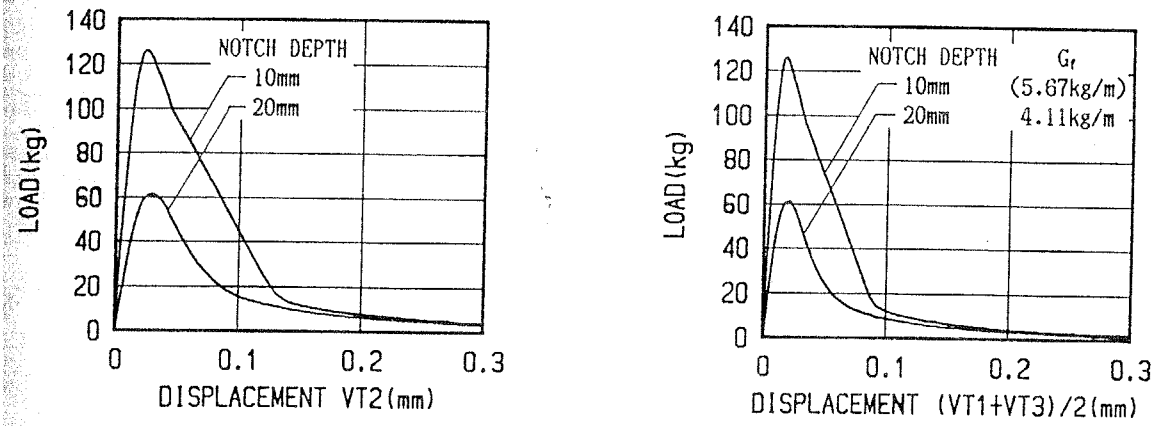


(6) 荷重－変位 VT2

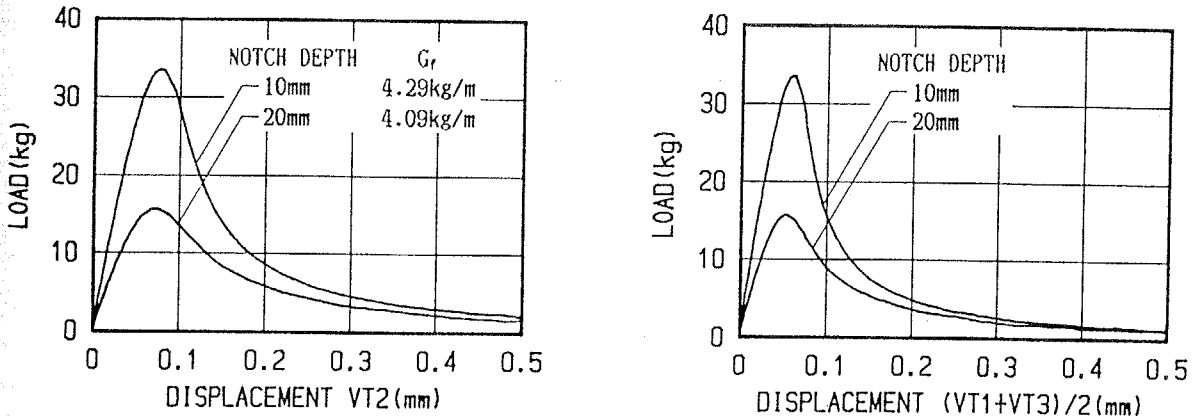
図－4.61 荷重－変位曲線：SH2.5-4シリーズ（1年試験）



(1) 120mmスパン、3PB：3PM2.5-1/2/3/4シリーズ

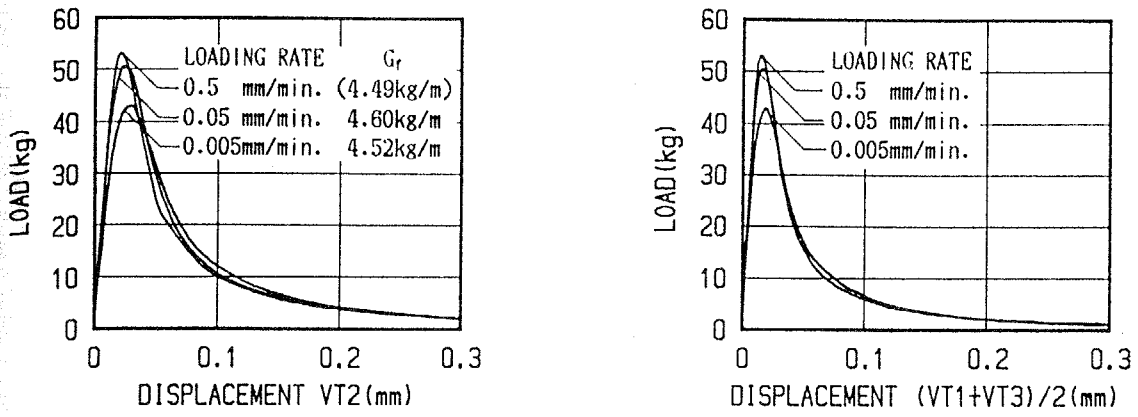


(2) 120mmスパン、4PB：4PM2.5-7/8シリーズ

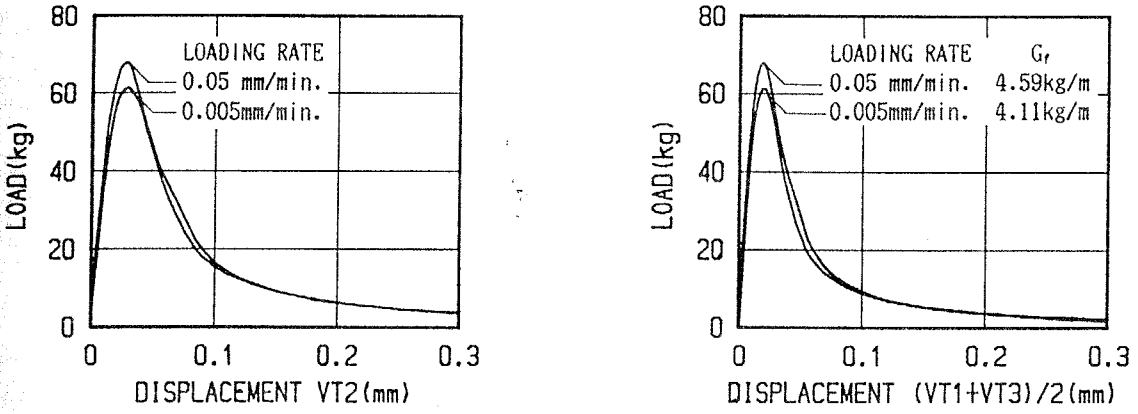


(3) 320mmスパン、3PB：SM2.5-10/11シリーズ

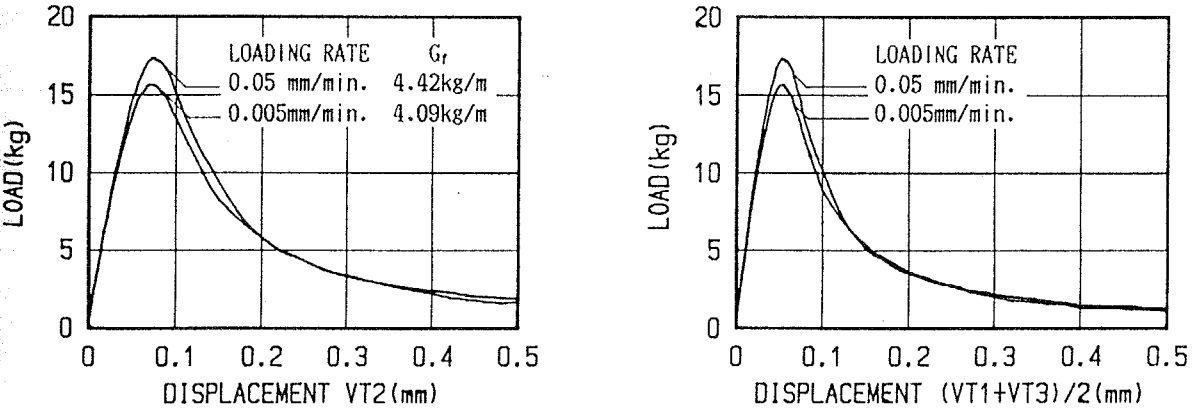
図－4.62　ノッチ深さが荷重－変位曲線に及ぼす影響（4週試験）



(1) 120mmスパン、3PB：3PM2.5-3/5/6シリーズ

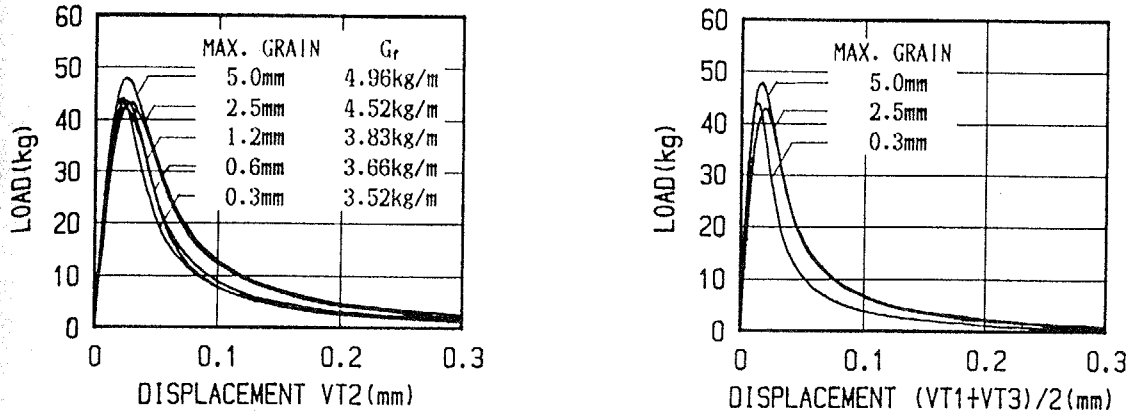


(2) 120mmスパン、4PB：4PM2.5-8/9シリーズ

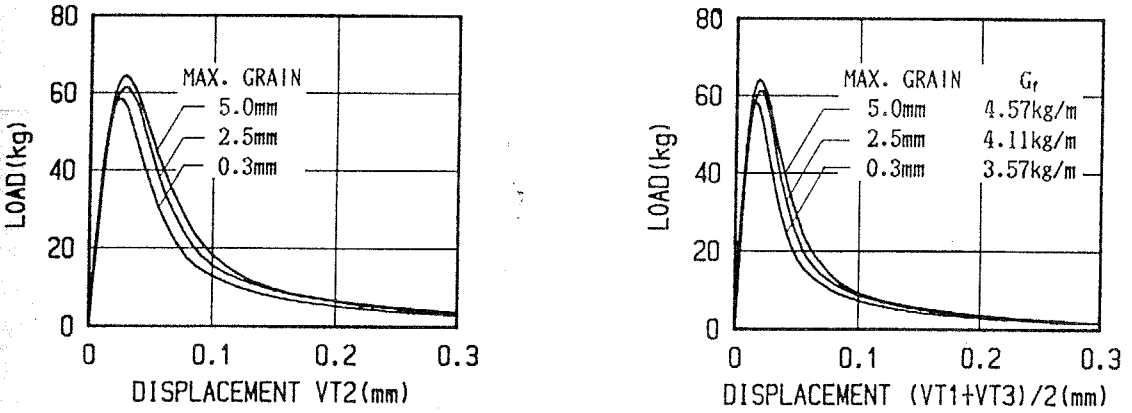


(3) 320mmスパン、3PB：SM2.5-11/12シリーズ

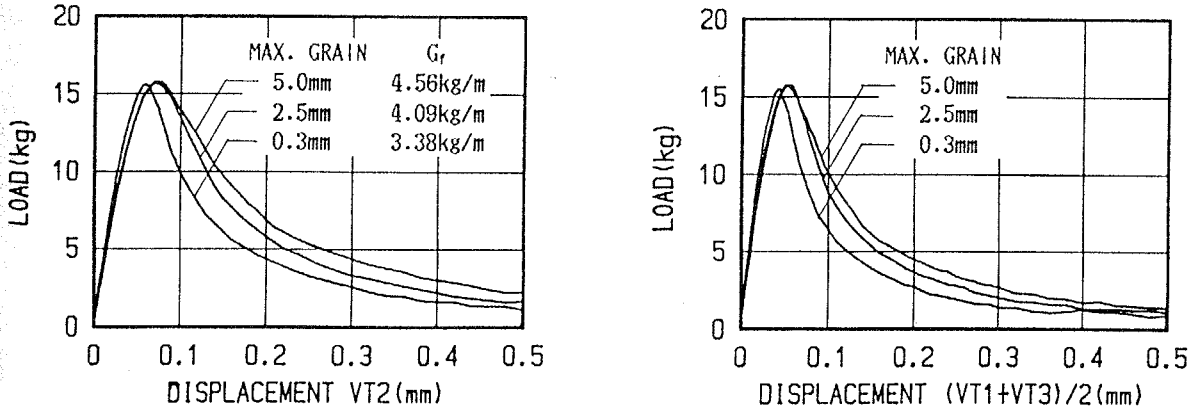
図－4.63　載荷速度が荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）



(1) 120mmスパン、3PB：3PM0.3/0.6/1.2/2.5/5.0シリーズ

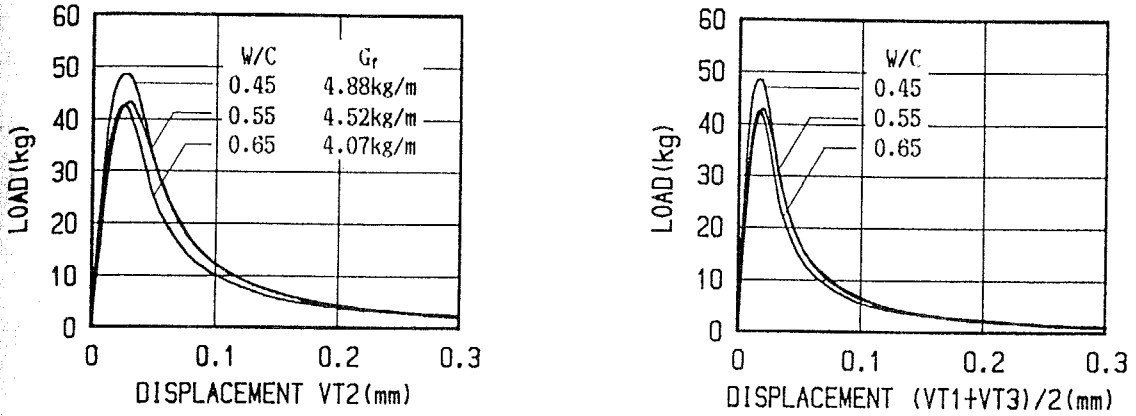


(2) 120mmスパン、4PB：4PM0.3/2.5/5.0シリーズ

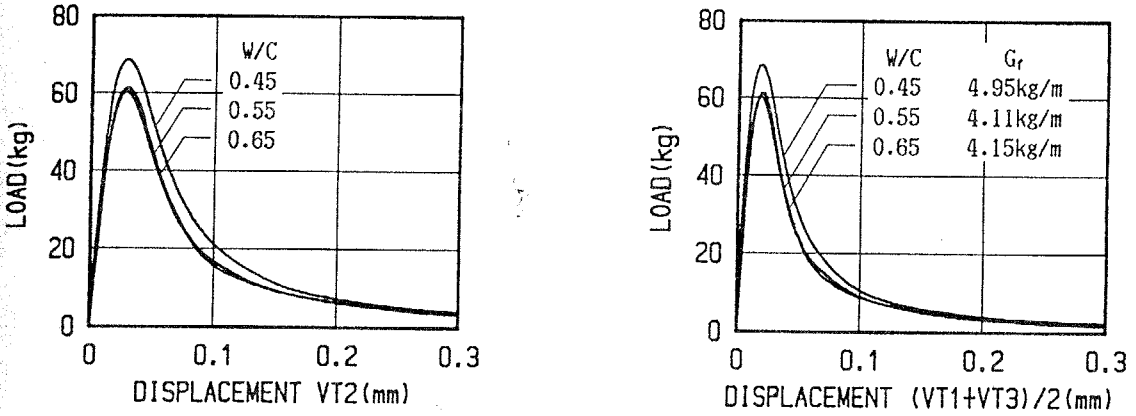


(3) 320mmスパン、3PB：SM0.3/2.5/5.0シリーズ

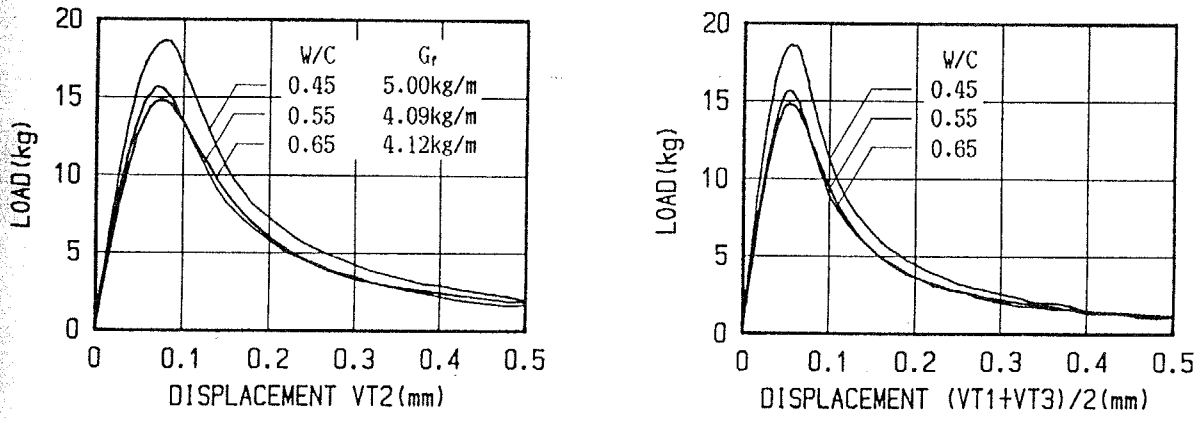
図－4.64　最大粒子径が荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）



(1) 120mmスパン、3PB：3PL/M/H2.5シリーズ

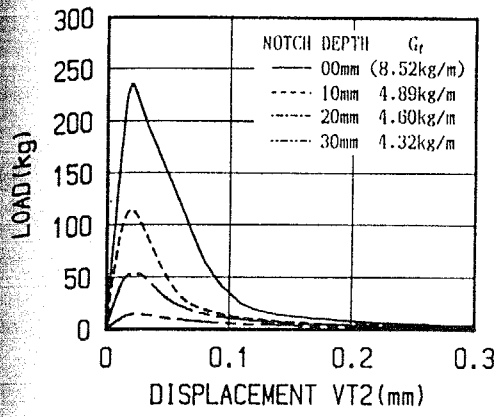


(2) 120mmスパン、4PB：4PL/M/H2.5シリーズ

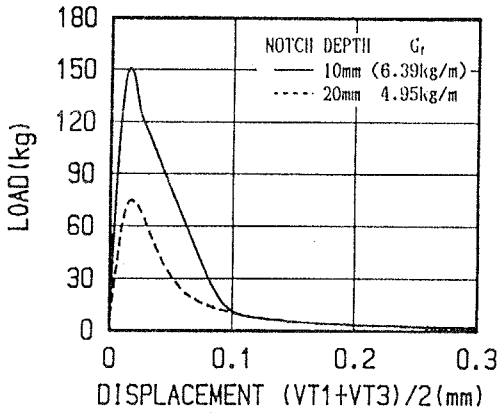


(3) 320mmスパン、3PB：SL/M/H2.5シリーズ

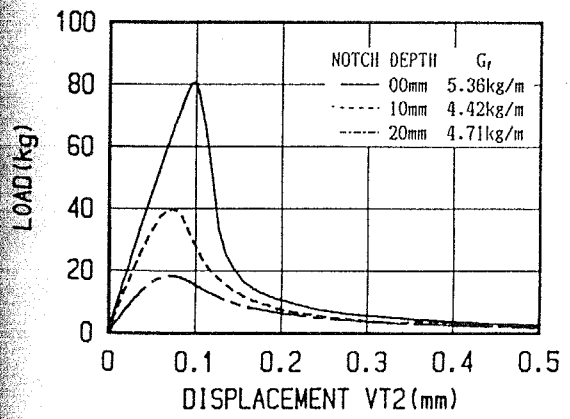
図－4.65　水セメント比が荷重－変位曲線に及ぼす影響（４週試験）

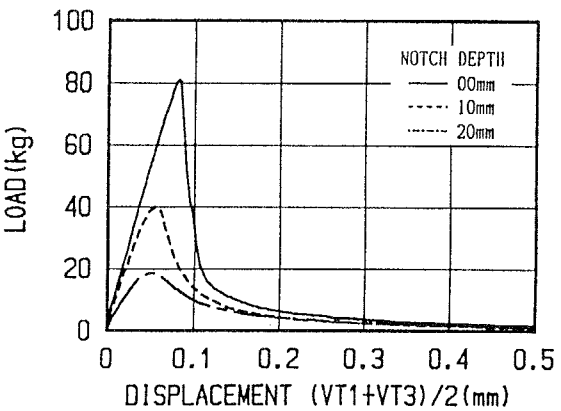


(1) 120mmスパン、3PB：3PM2.5-1/2/3/4シリーズ



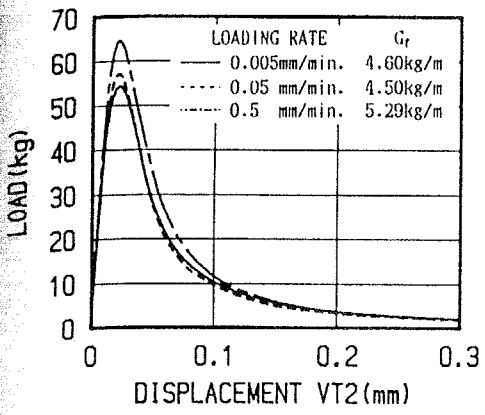
(2) 120mmスパン、4PB：4PM2.5-7/8シリーズ



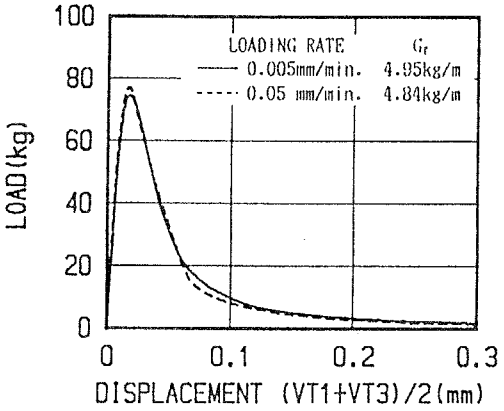


(3) 320mmスパン、3PB：SM2.5-00/10/11シリーズ

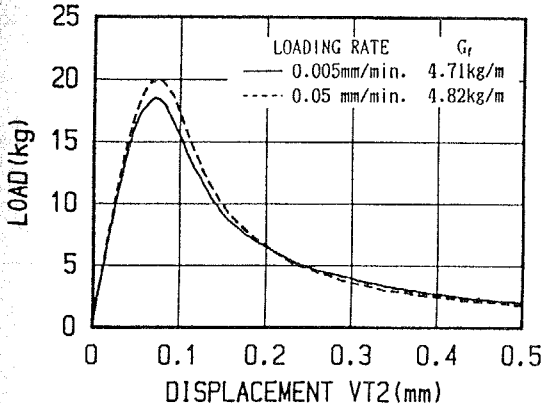
図－4.66　ノッチ深さが荷重－変位曲線に及ぼす影響（1年試験）

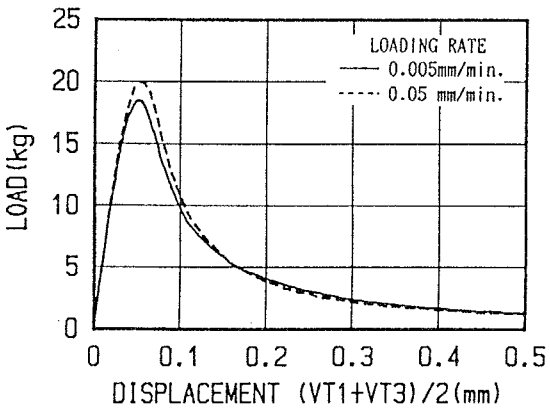


(1) 120mmスパン、3PB：3PM2.5-3/5/6シリーズ



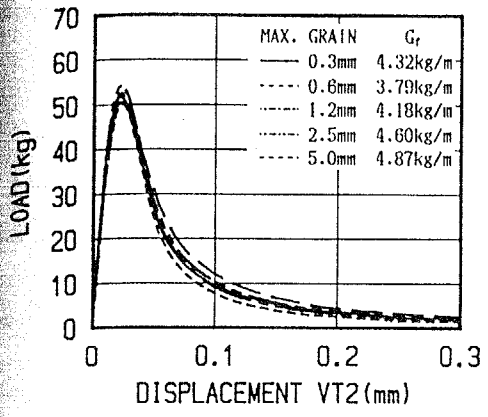
(2) 120mmスパン、4PB：4PM2.5-8/9シリーズ



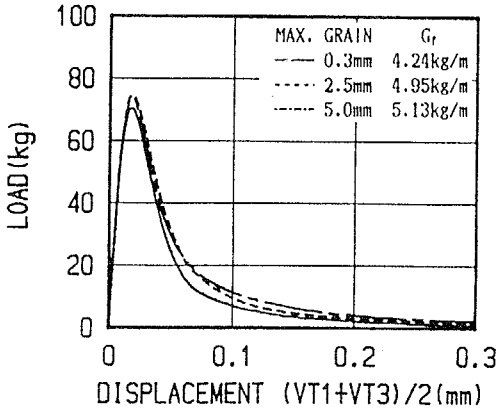


(3) 320mmスパン、3PB：SM2.5-11/12シリーズ

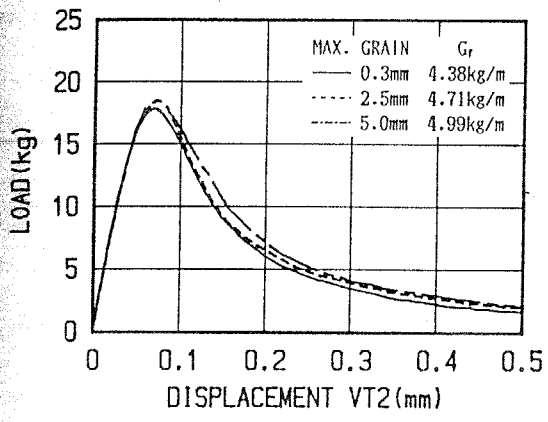
図－4.67　載荷速度が荷重－変位曲線に及ぼす影響（1年試験）

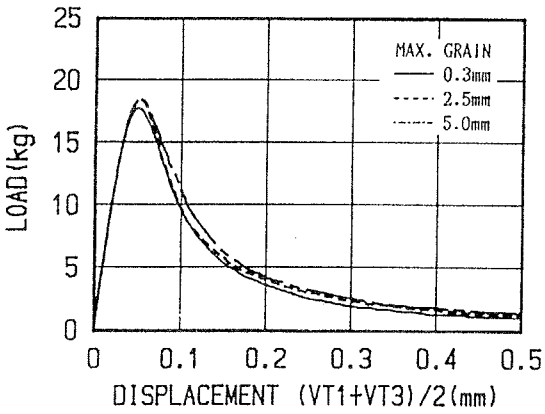


(1) 120mmスパン、3PB：3PM0.3/0.6/1.2/2.5/5.0

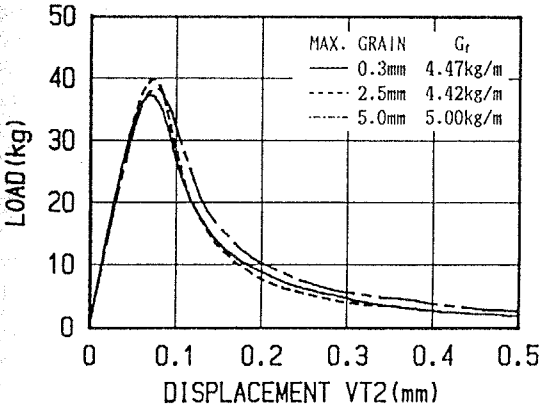


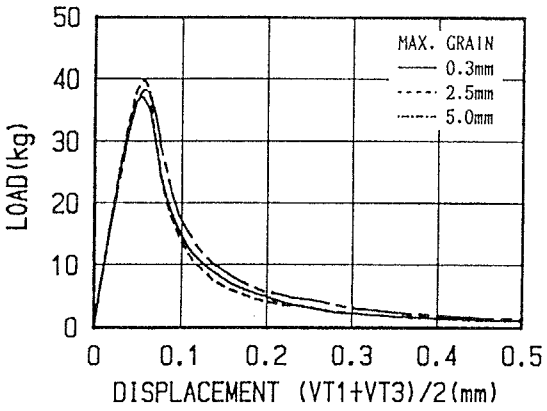
(2) 120mmスパン、4PB：4PM0.3/2.5/5.0シリーズ





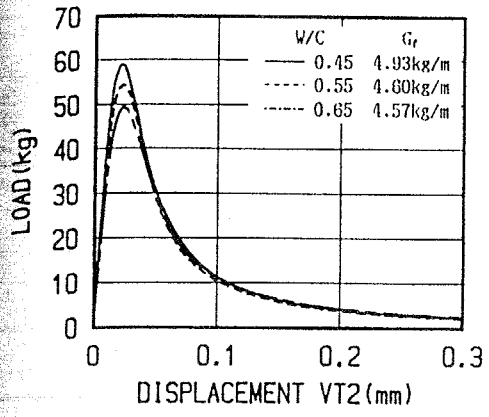
(3) 320mmスパン、3PB、ノッチ20mm：SM0.3/2.5/5.0シリーズ



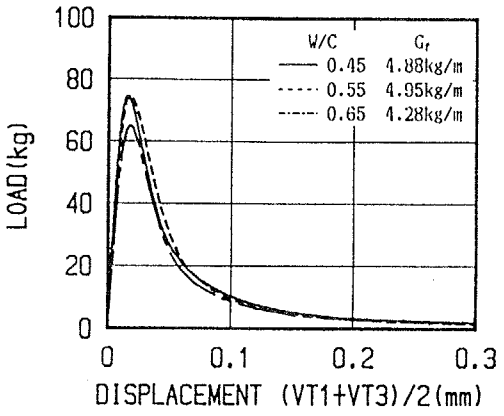


(4) 320mmスパン、3PB、ノッチ10mm：SM0.3/2.5/5.0シリーズ

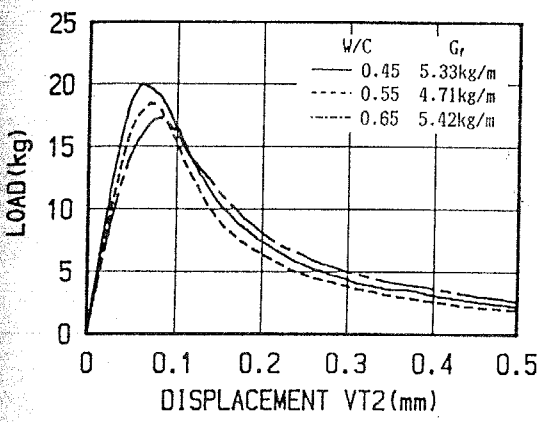
図－4.68　最大粒子径が荷重－変位曲線に及ぼす影響（1年試験）

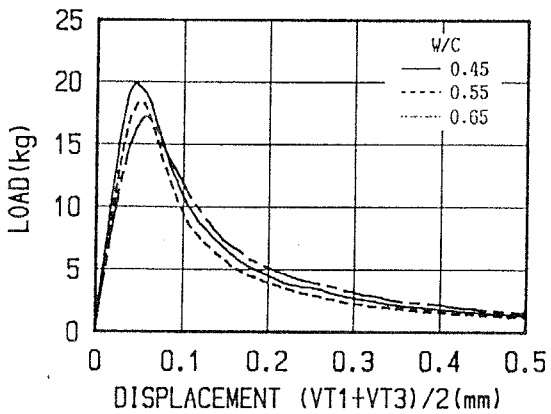


(1) 120mmスパン、3PB：3PL/M/H2.5シリーズ

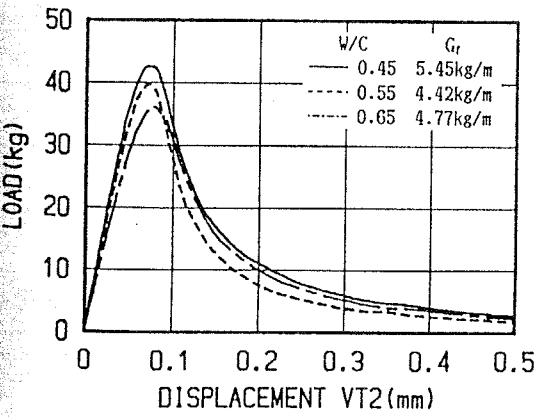


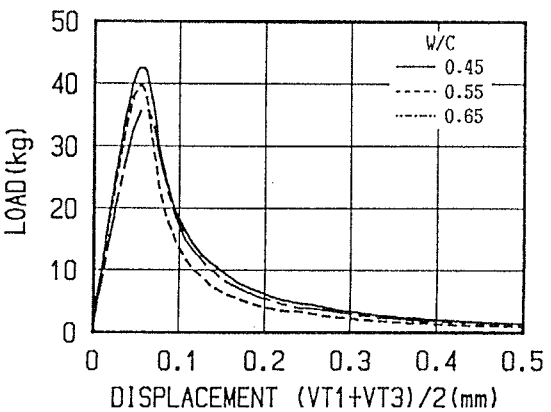
(2) 120mmスパン、4PB：4PL/M/H2.5シリーズ





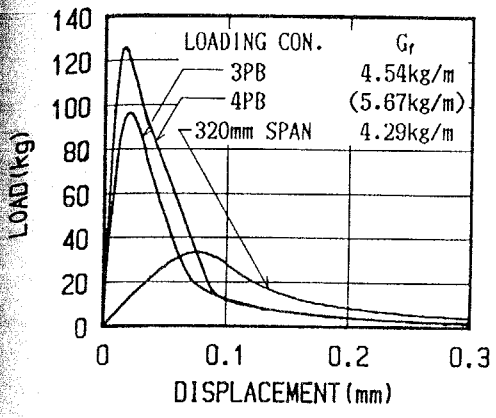
(3) 320mmスパン、3PB、ノッチ20mm：SL/M/H2.5シリーズ



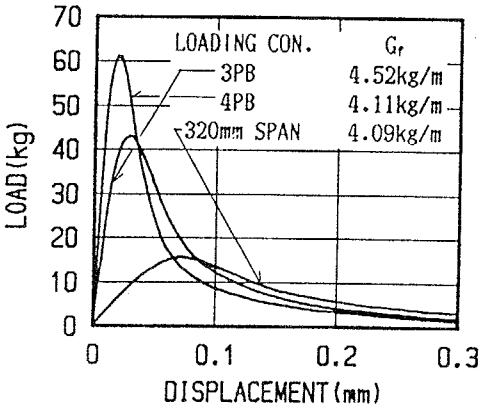


(4) 320mmスパン、3PB、ノッチ10mm：SL/M/H2.5シリーズ

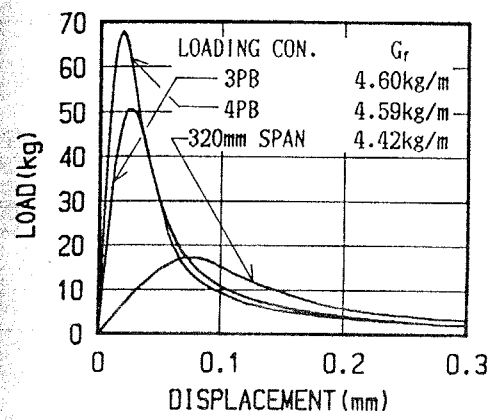
図－4.69　水セメント比が荷重－変位曲線に及ぼす影響（１年試験）



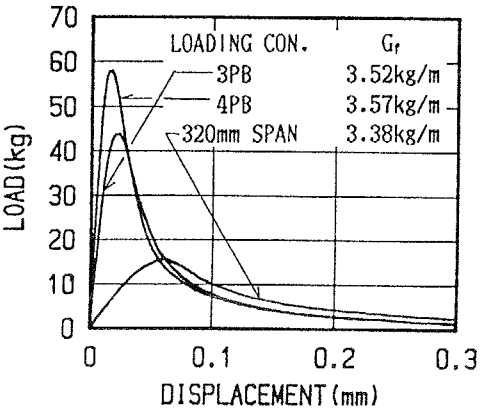
(1) M2.5-2/7/10シリーズ



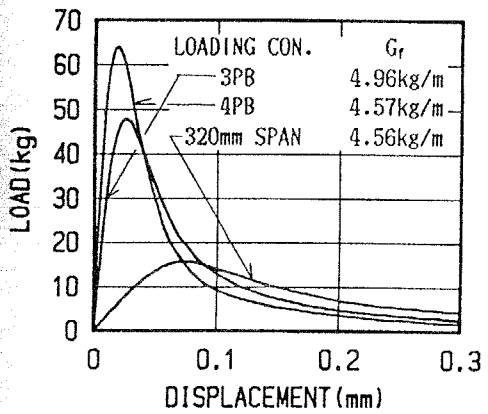
(2) M2.5-3/8/11シリーズ



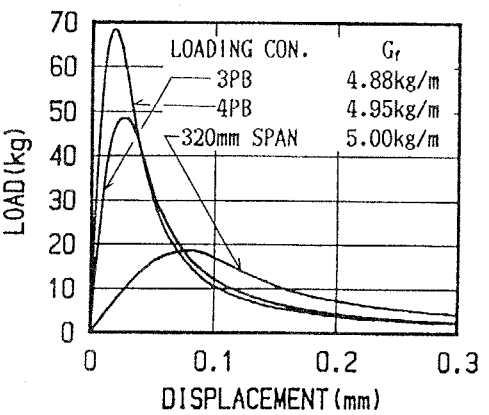
(3) M2.5-5/9/12シリーズ



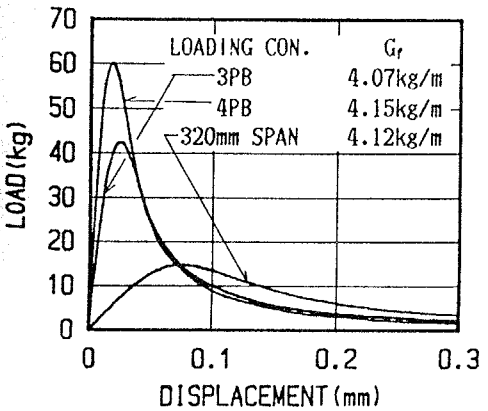
(4) M0.3-1/2/3シリーズ



(5) M5.0-1/2/3シリーズ

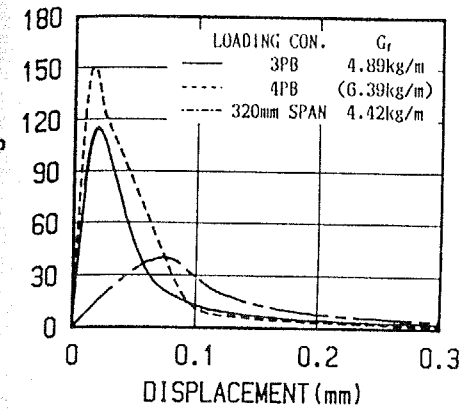


(6) L2.5-1/2/3シリーズ

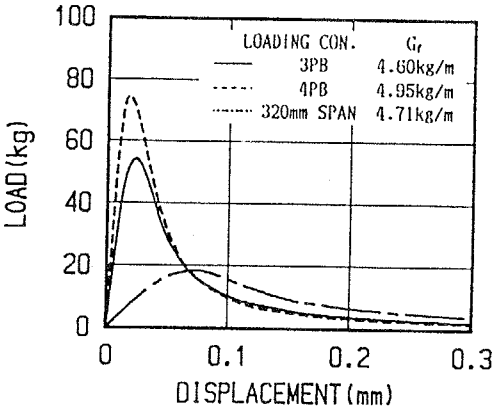


(7) H2.5-1/2/3シリーズ

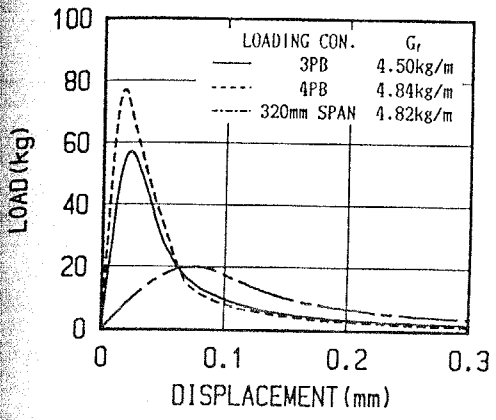
図－4.70　各載荷方法による荷重－荷重点変位曲線（４週試験）



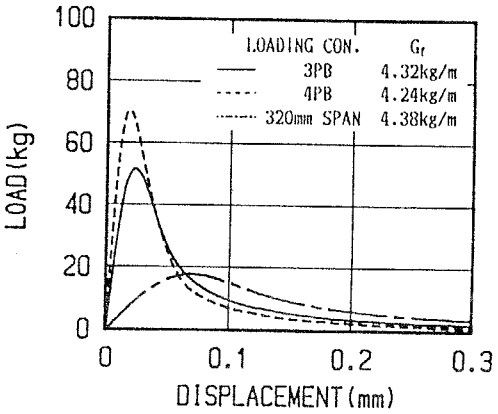
(1) M2.5-2/7/10シリーズ



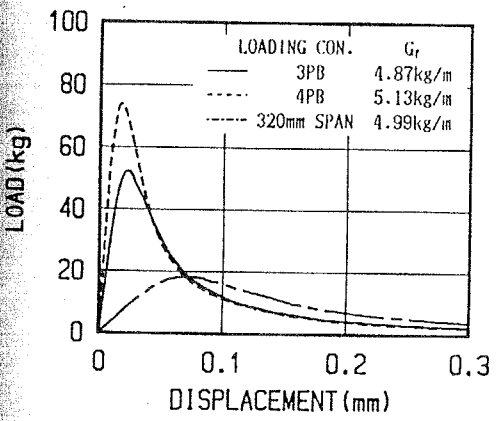
(2) M2.5-3/8/11シリーズ



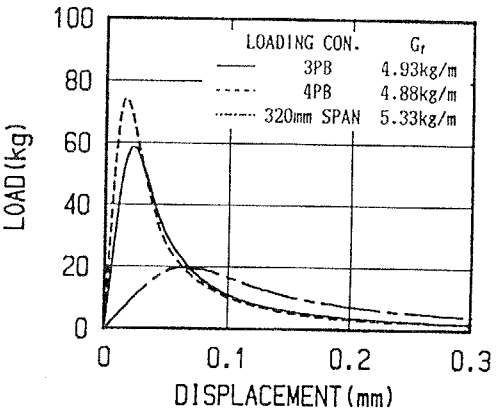
(3) M2.5-5/9/12シリーズ



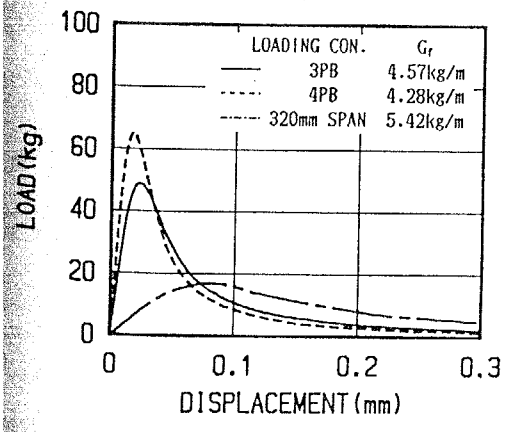
(4) M0.3-1/2/3シリーズ



(5) M5.0-1/2/3シリーズ

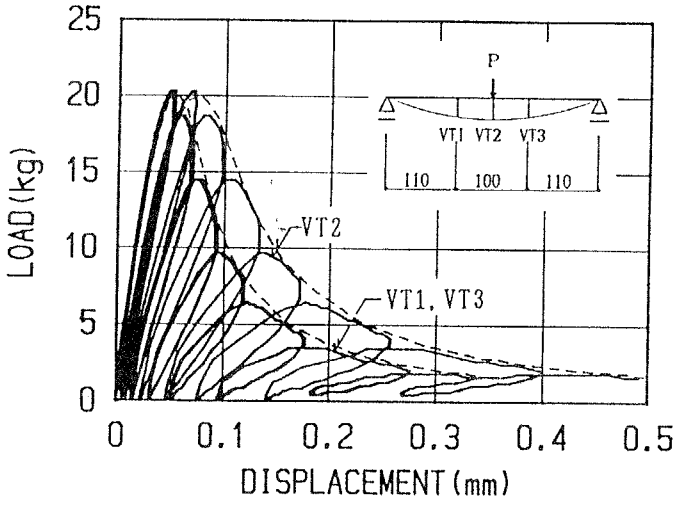


(6) L2.5-1/2/3シリーズ

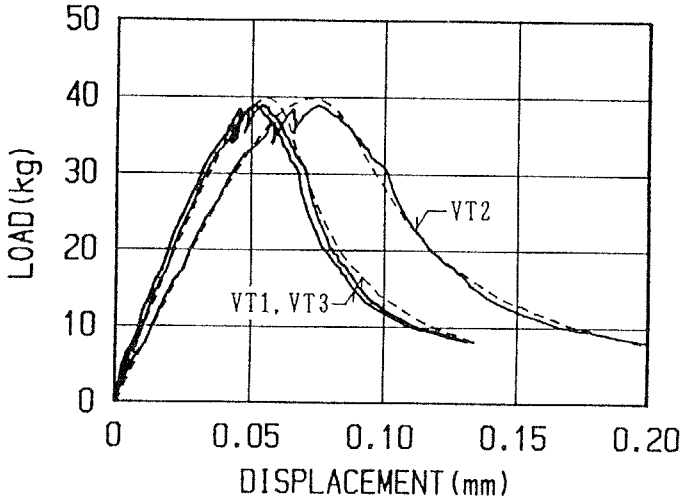


(7) H2.5-1/2/3シリーズ

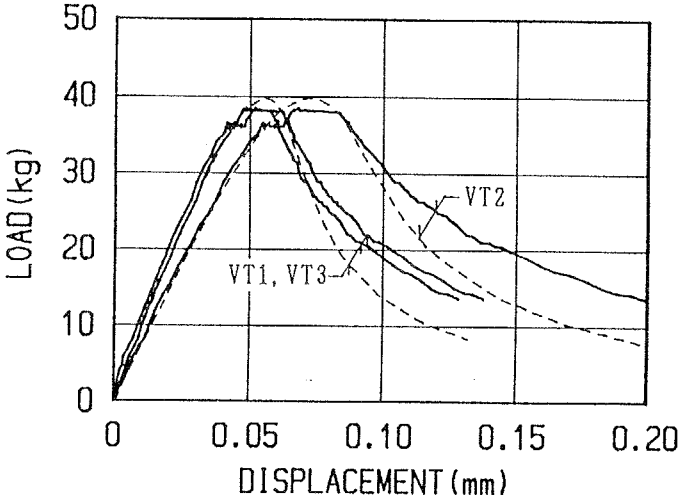
図－4.71　各載荷方法による荷重－荷重点変位曲線（1年試験）



図－4.72　繰り返し載荷による荷重－変位曲線：SM2.5-12シリーズ
（点線は単調載荷による平均荷重－変位曲線：1年試験）

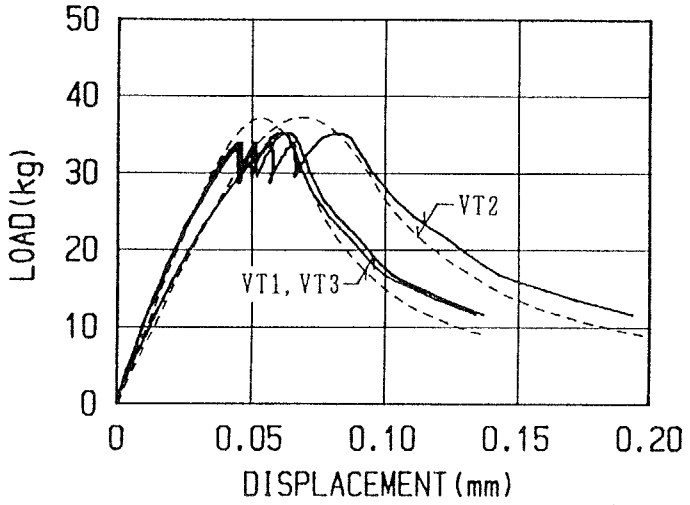


(1) 経過時間　18.0分→60.0分→62.5分→105分
荷重変動　0.90Lp→0.85Lp→0.95Lp→0.88Lp→破壊まで再載荷

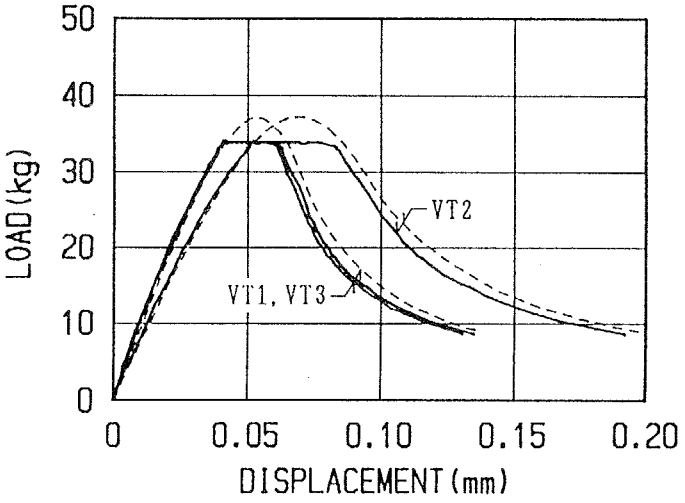


(2) 経過時間　19.5分→60.0分→80分後荷重維持できず
荷重変動　0.90Lp→0.95Lp

図－4.73　時間効果試験による荷重－変位曲線：SM2.5-10シリーズ
（点線は単調載荷による平均荷重－変位曲線：1年試験）

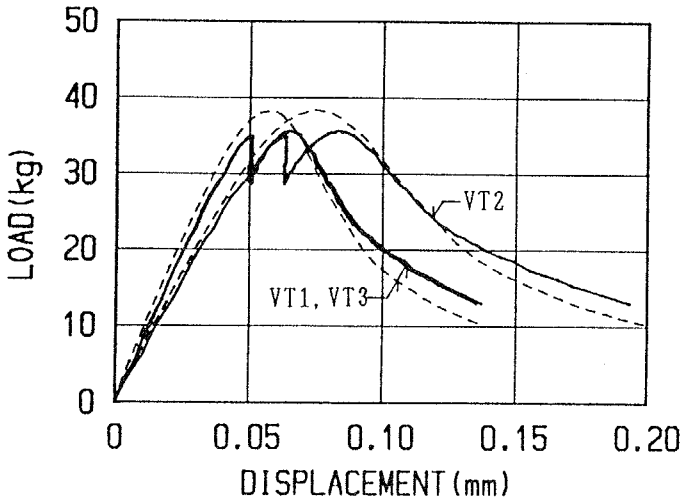


(1) 経過時間　17.5分→77.0分→79.5分→140分
荷重変動　0.90Lp→0.77Lp→0.90Lp→0.78Lp→破壊まで再載荷

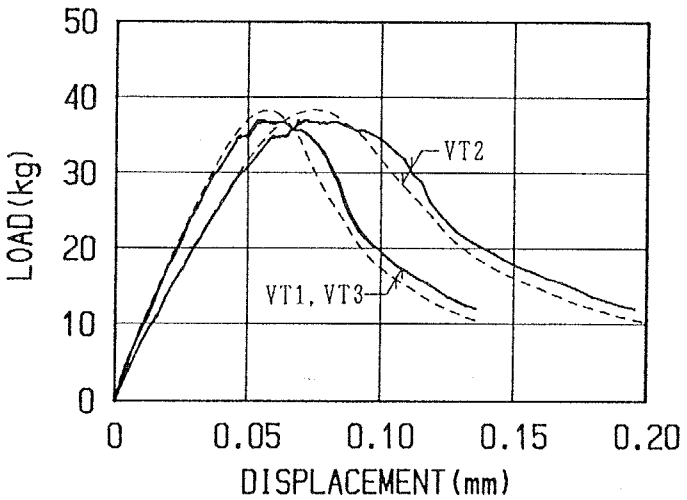


(2) 経過時間　18.5分→52分後荷重維持できず
荷重変動　0.90Lp

図－4.74　時間効果試験による荷重－変位曲線：SM0.3-4 シリーズ
（点線は単調載荷による平均荷重－変位曲線：1年試験）

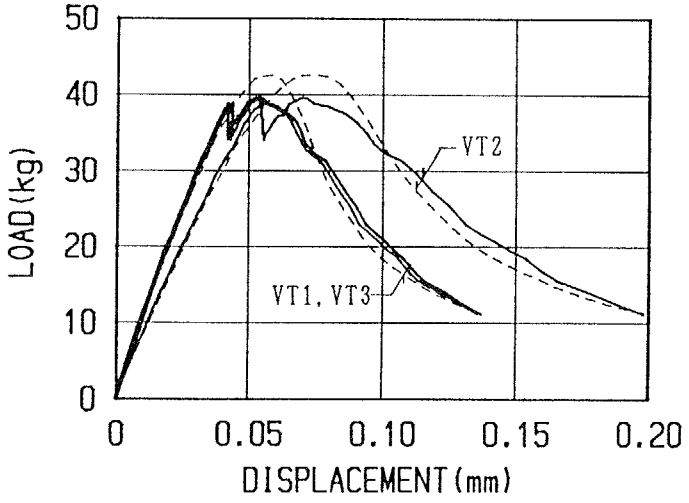


(1) 経過時間　18.5分→60.0分
荷重変動　0.90Lp→0.74Lp→60分後再載荷途中破壊

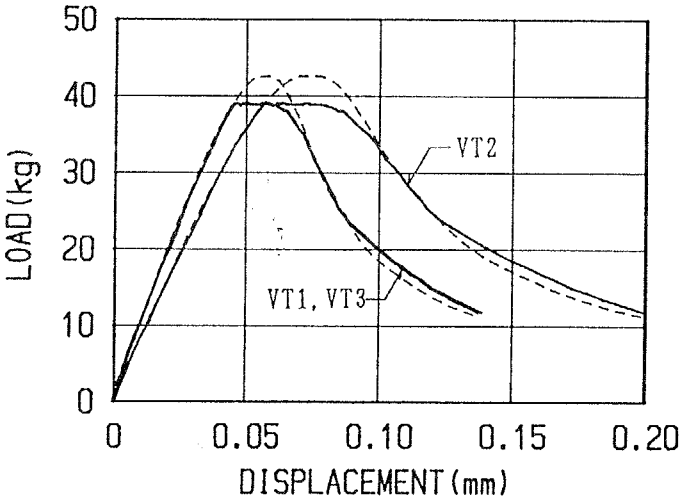


(2) 経過時間　16.5分→30.0分→54分後荷重維持できず
荷重変動　0.90Lp→0.95Lp

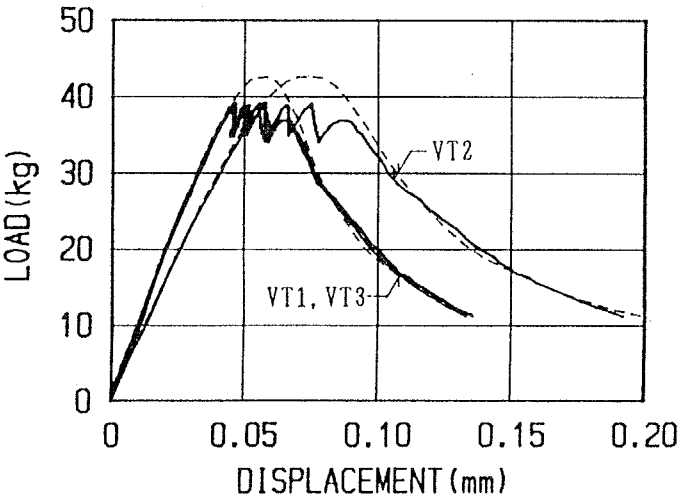
図－4.75　時間効果試験による荷重－変位曲線：SM5.0-4 シリーズ
（点線は単調載荷による平均荷重－変位曲線：1年試験）



(1) 経過時間　14.5分→60.0分
荷重変動　0.90Lp→0.79Lp→60分後再載荷途中破壊

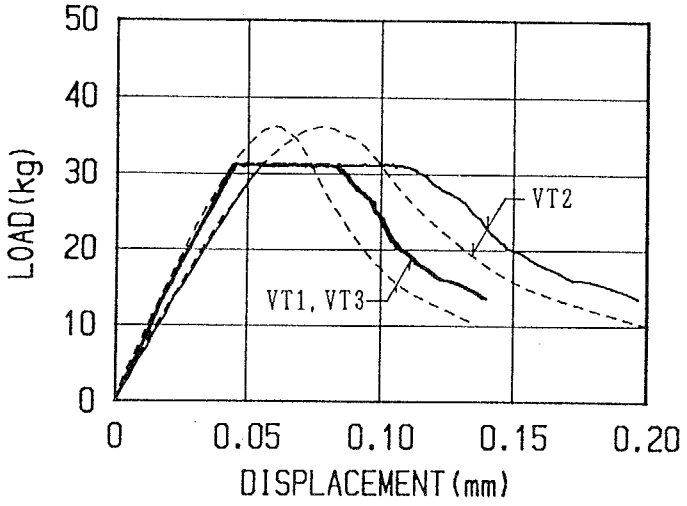


(2) 経過時間　16.0分→50分後荷重維持できず
荷重変動　0.90Lp

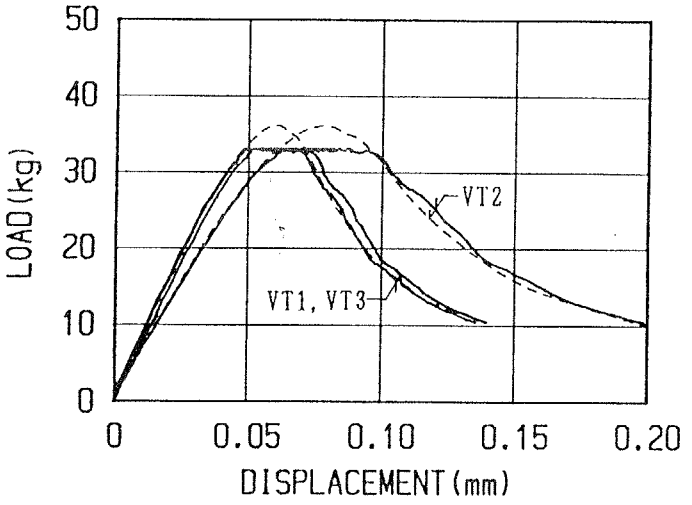


(3) 経過時間　15.0分→60.0分→62.0分→105分 →107分 →135分
荷重変動　0.90Lp→0.81Lp→0.90Lp→0.81Lp→0.90Lp→0.79Lp→135分後再載荷途中破壊

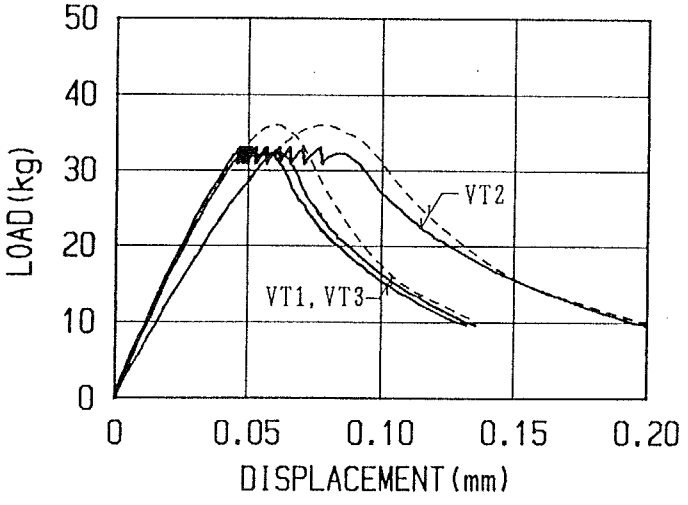
図－4.76　時間効果試験による荷重－変位曲線：SL2.5-4 シリーズ
（点線は単調載荷による平均荷重－変位曲線：1年試験）



(1) 経過時間　14.0分→158分後荷重維持できず
荷重変動　0.85Lp

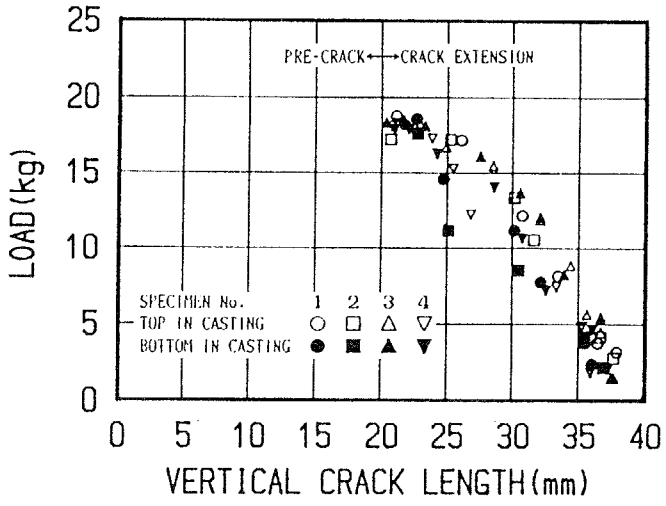


(2) 経過時間　17.0分→67.5分後荷重維持できず
荷重変動　0.90Lp

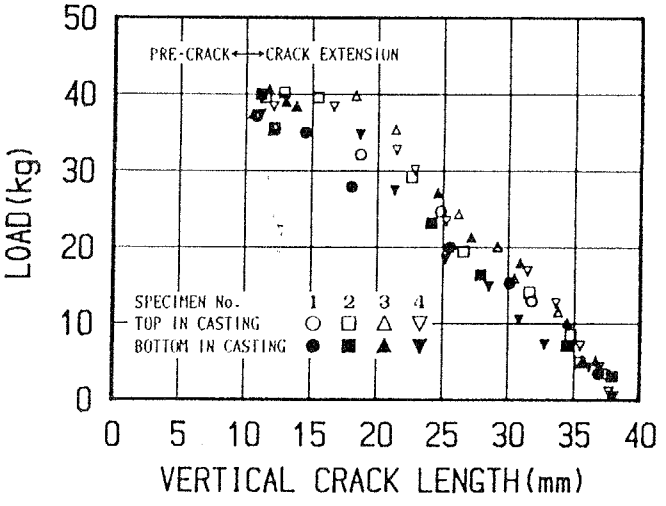


(3) 経過時間　17.0分→29.0分→30.0分→53.0分→54.0分→70.5分→71.5分→77.0分
荷重変動　0.90Lp→0.85Lp→0.90Lp→0.85Lp→0.90Lp→0.85Lp→0.90Lp→0.85Lp→77.0分後再載荷途中破壊

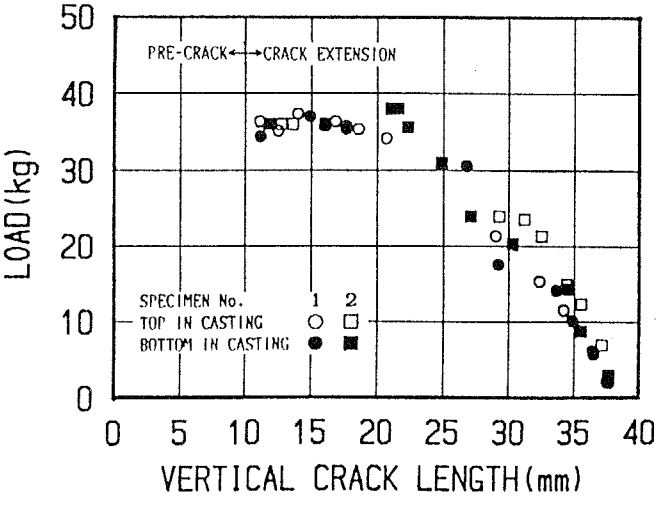
図－4.77　時間効果試験による荷重－変位曲線：SH2.5-4 シリーズ
（点線は単調載荷による平均荷重－変位曲線：1年試験）



(1) 単調載荷試験：SM2.5-11シリーズ

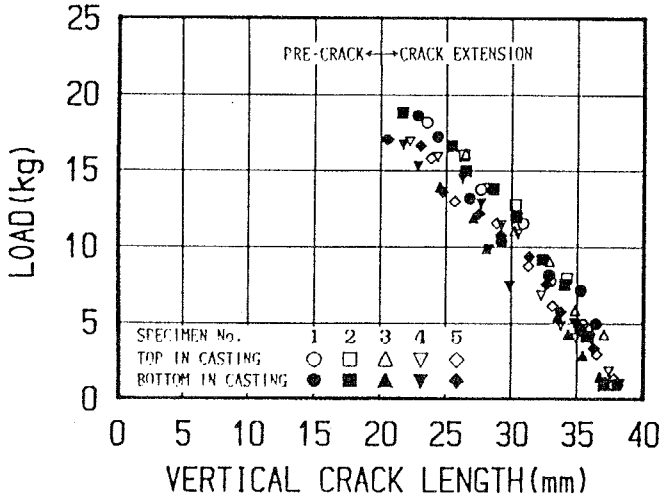


(2) 単調載荷試験：SM2.5-10シリーズ

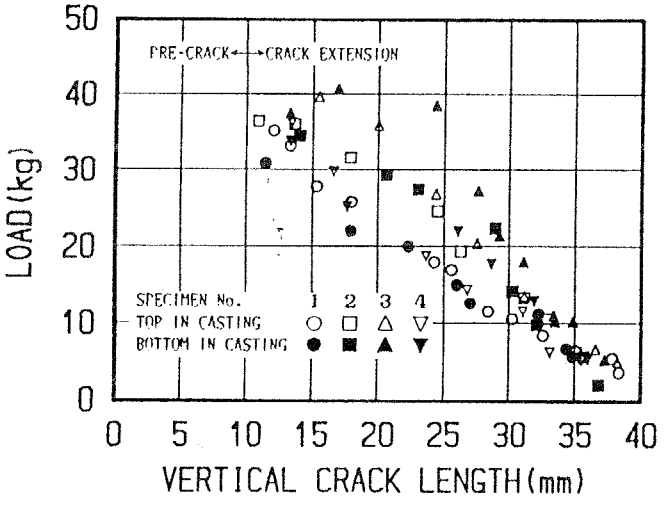


(3) 時間効果試験：SM2.5-10シリーズ

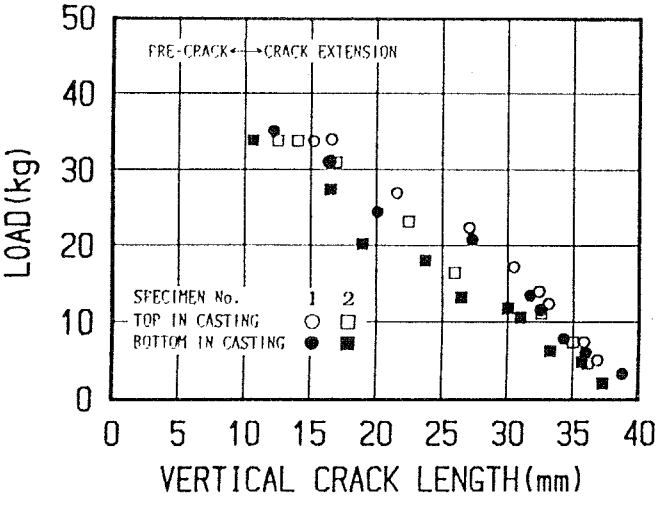
図－4.78　荷重と鉛直クラック進展の関係：SM2.5-10/11シリーズ



(1) 単調載荷試験：SM0.3-3シリーズ

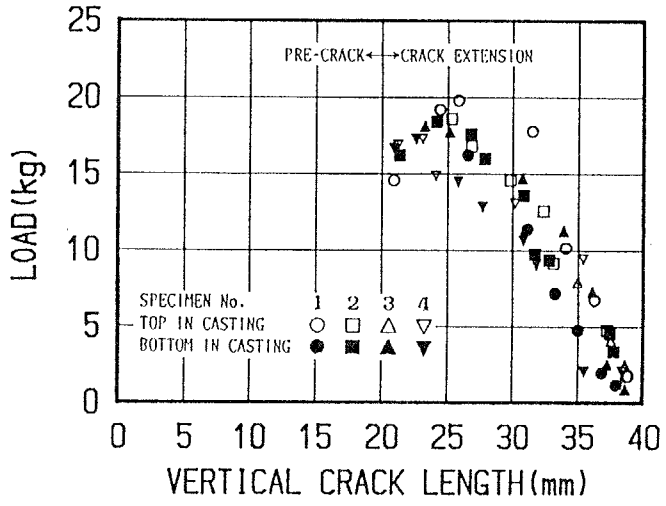


(2) 単調載荷試験：SM0.3-4シリーズ

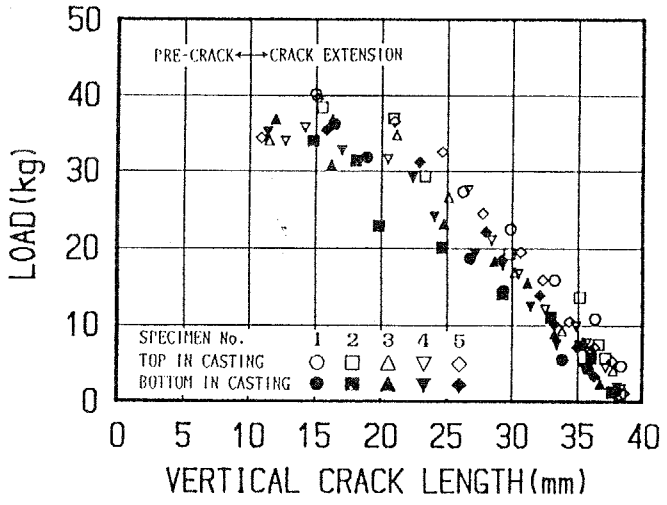


(3) 時間効果試験：SM0.3-4シリーズ

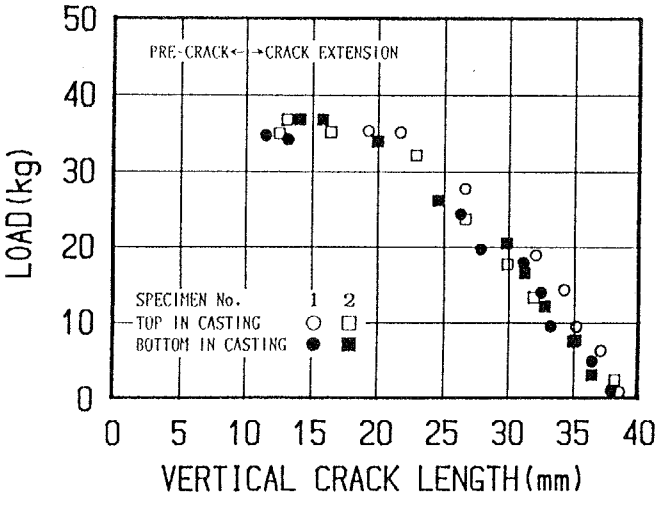
図－4.79　荷重と鉛直クラック進展の関係：SM0.3-3/4シリーズ



(1) 単調載荷試験：SM5.0-3シリーズ

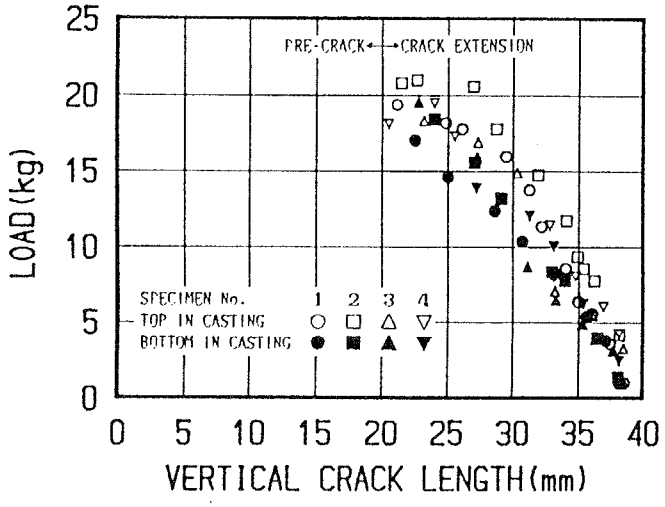


(2) 単調載荷試験：SM5.0-4シリーズ

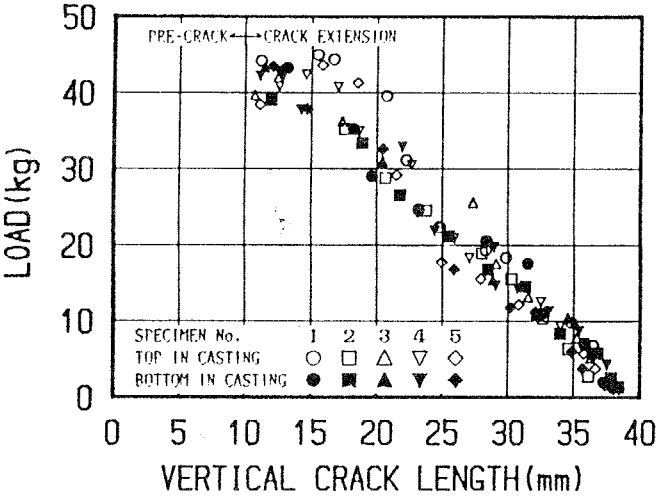


(3) 時間効果試験：SM5.0-4シリーズ

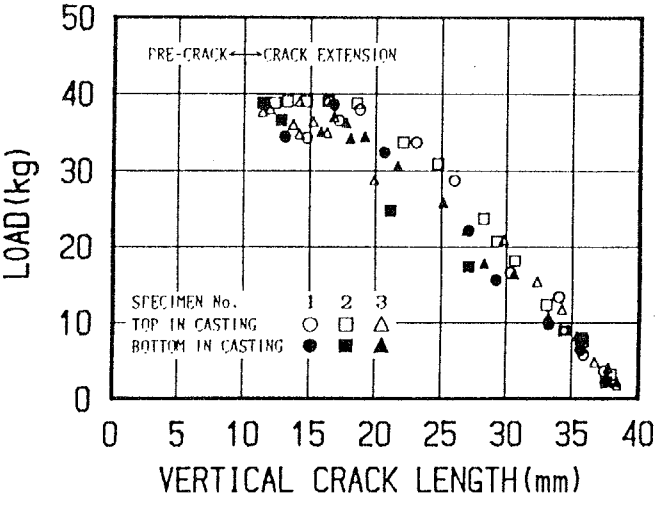
図－4.80　荷重と鉛直クラック進展の関係：SM5.0-3/4シリーズ



(1) 単調載荷試験：SL2.5-3シリーズ

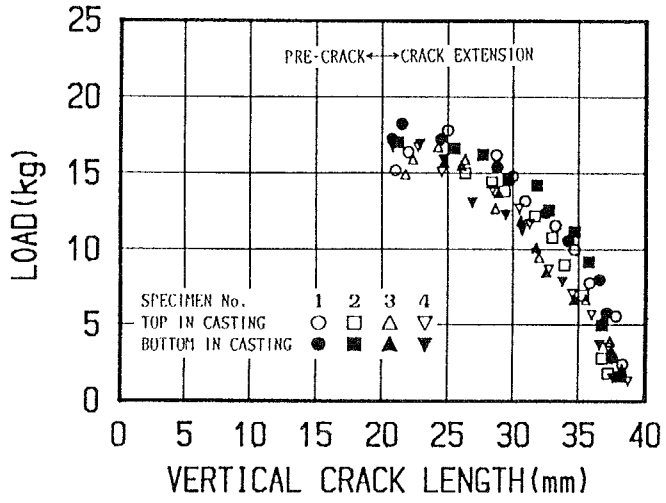


(2) 単調載荷試験：SL2.5-4シリーズ

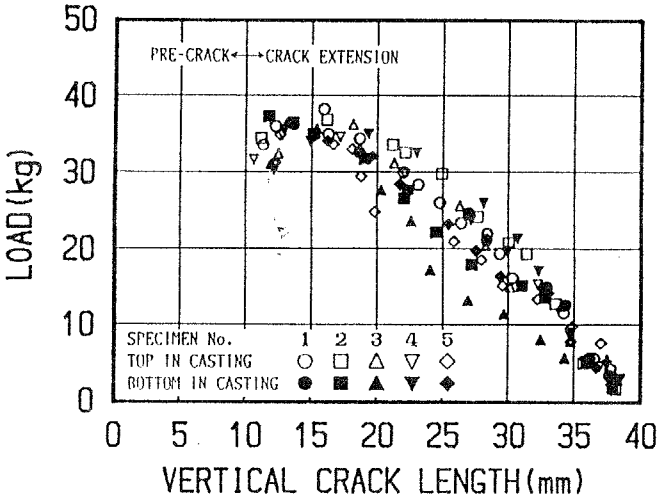


(3) 時間効果試験：SL2.5-4シリーズ

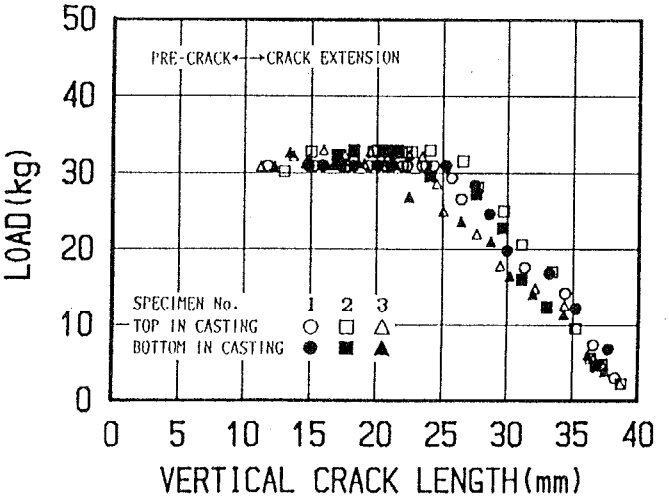
図－4.81　荷重と鉛直クラック進展の関係：SL2.5-3/4シリーズ



(1) 単調載荷試験：SH2.5-3シリーズ



(2) 単調載荷試験：SH2.5-4シリーズ



(3) 時間効果試験：SH2.5-4シリーズ

図－4.82　荷重と鉛直クラック進展の関係：SH2.5-3/4シリーズ

4.4.2 考　察

(1) 材料特性値

モルタルの曲げ試験結果から、下記の材料特性値を計算し、表－4.5に要約する。

・最大荷重（L_p）

・最大荷重時の荷重点変位（D_p）

・有効曲げ強度（σ_{net}）

・限界応力拡大係数（K_{IC}）

・限界エネルギー解放率（G_{IC}）

・破壊エネルギー（G_f）

有効曲げ強度、限界応力拡大係数、限界エネルギー解放率および破壊エネルギーは、第３章で述べた方法と同様に計算できる。ただし、320mmスパン(S/W=8)に対する応力拡大係数の形状係数は、次の実用式を用いている(8)。

$$Y = 1.96 - 2.75(a/W) + 13.66(a/W)^2 - 23.98(a/W)^3 + 25.22(a/W)^4 \quad \cdots\cdots (4.1)$$

破壊エネルギーの計算において、試験体の自重は鉛直変位計のバネ反力(0.2kg/mm)とほぼ釣合っているので、その影響を考慮していない。また、本実験では、クラックが試験体上端まで進展した後も荷重が0に落ちず、変位計のバネ反力が測定荷重値に及ぼす影響が無視できなくなる。そこで前章のコンクリートの破壊エネルギーの算定と同様に、試験体の変形モードをノッチ真上の試験体上端に回転中心をもつ剛体の回転運動と仮定し、ノッチ先端の開口変位が0.2mmに達するまでの荷重－荷重点変位のみを考慮した。スパン長さ120mm、ノッチ深さ20mmの３点曲げ標準試験体では、VT2=0.3mm迄の荷重－荷重点変位曲線の下の面積を考慮することになる。この算定法による破壊エネルギーは、載荷方法にかかわらず破壊面の回転角が同一となるので、同じ破壊状態に至る

までのエネルギーであると考えることができる。

表－4.5の3PM5.0-1シリーズの下段は、寸法の影響を検討するために、前章の同一試験条件である3PM05-1シリーズ（寸法：100x100x400mm）の実験結果である。小寸法試験体の有効曲げ強度は、大寸法試験体より25%～30%高くなる。この原因は一般に、試験体が大きいほど、弱い欠陥を持った要素が介入する確率が高いという最弱エレメント説で説明されるのが普通である。しかしながら、本実験で用いた程度の試験体寸法差に対するこの強度差を、最弱エレメント説だけで説明するには無理があるように思える。そこで考えられるもう一つの原因は、ダメージにもかかわらず応力を伝達できる軟化領域（図－4.83）の存在である。コンクリートのクラック先端前方には、軟化領域が存在することは広く認められているが、その大きさや力学的特性に関してはコンセンサスが得られていない(9)。ここでモルタルの軟化領域は材料特性であり、その大きさや力学的特性は同じであると仮定すると、試験体寸法に対して軟化領域が占める割合が大きいほど高い強度となる。また、軟化領域の特性を表す同じ力学的モデルを用いて、寸法の異なる荷重－変位曲線を数値計算で近似することも可能であるが、詳しくは次章で述べる。

破壊エネルギーを比較すると、3PM05-1シリーズは、3PM5.0-1シリーズより１割強大きくなっている。これは、大きな試験体の方がクラック径路が複雑になり、破断面のかみ合いによる抵抗が大きくなるためと考えられる。

表－4.5　材料特性値

試験名称	最大荷重 Lp (kg)		Lp時の荷重点変位 Dp ($X10^{-3}$mm)		有効曲げ強度 σ_{net} (kg/cm^2)		限界応力拡大係数 K_{IC} ($kg/cm^{3/2}$)		限界歪エネルギー G_{IC} (kg/m)		破壊エネルギー G_f (kg/m)	
	4週	1年	4週	1年	4週	1年	4週	1年	4週	1年	4週	1年
3PM2.5-1	198	238	20.2	19.5	55.6	66.9	****	****	****	****	9.02	8.52
3PM2.5-2	97.9	115	19.6	18.8	49.0	57.4	48.2	56.5	0.97	1.16	4.54	4.89
3PM2.5-3	44.0	54.5	28.5	23.7	49.5	61.3	43.9	54.4	0.80	1.08	4.52	4.60
3PM2.5-4	12.1	14.4	29.7	25.3	54.3	64.8	35.0	41.7	0.51	0.63	4.04	4.32
3PM2.5-5	50.9	57.1	23.9	23.1	57.3	64.2	50.8	57.0	1.08	1.18	4.60	4.50
3PM2.5-6	54.4	65.1	19.3	22.4	61.2	73.2	54.3	65.0	1.23	1.54	4.49	5.29
3PM0.3-1	44.0	51.7	21.8	22.6	49.5	58.2	43.9	51.6	0.80	0.97	3.52	4.32
3PM0.6-1	43.7	50.2	24.2	23.9	49.2	56.5	43.6	50.1	0.79	0.91	3.66	3.79
3PM1.2-1	42.2	50.7	23.9	22.3	47.5	57.0	42.1	50.6	0.74	0.93	3.83	4.18
3PM5.0-1	48.0	52.6	24.8	22.6	54.0	59.2	47.9	52.5	0.96	1.00	4.96	4.87
3PM05-1	239	254	45.7	42.2	43.0	45.8	61.2	64.3	1.54	1.50	5.69	5.79
3PL2.5-1	48.7	59.2	27.0	22.5	54.8	66.6	48.6	59.1	0.98	1.27	4.88	4.93
3PH2.5-1	42.5	49.3	24.5	23.4	47.8	55.5	42.4	49.2	0.75	0.88	4.07	4.57
4PM2.5-7	126	152	15.6	15.6	42.0	50.6	45.4	54.6	0.86	1.08	5.67	6.39
4PM2.5-8	61.7	74.6	18.2	16.8	46.3	56.0	43.4	52.4	0.78	1.00	4.11	4.95
4PM2.5-9	68.0	77.1	18.3	16.2	51.0	57.8	47.8	54.2	0.95	1.07	4.59	4.84
4PM0.3-2	58.6	70.5	15.0	17.0	44.0	52.9	41.2	49.5	0.71	0.89	3.57	4.24
4PM5.0-2	64.7	74.3	18.6	17.3	48.5	55.7	45.5	52.2	0.86	0.99	4.57	5.13
4PL2.5-2	68.6	75.1	17.7	15.1	51.5	56.3	48.2	52.8	0.97	1.01	4.95	4.88
4PH2.5-2	60.5	65.7	17.4	17.5	45.4	49.3	42.5	46.2	0.75	0.78	4.15	4.28
SM2.5-00	—	84.0	—	103	—	63.0	—	****	—	****	—	5.36
SM2.5-10	33.6	40.0	78.3	74.4	44.8	53.3	46.6	55.5	0.90	1.12	4.29	4.42
SM2.5-11	15.7	18.6	74.3	74.6	47.2	55.8	43.0	50.9	0.77	0.94	4.09	4.71
SM2.5-12	17.4	20.0	74.8	75.4	52.2	60.0	47.6	54.7	0.94	1.09	4.42	4.82
SM0.3-3	15.7	17.9	62.2	71.7	47.2	53.7	43.0	49.0	0.77	0.87	3.38	4.38
SM0.3-4	—	37.5	—	71.8	—	50.0	—	52.0	—	0.98	—	4.47
SM5.0-3	15.8	18.7	75.2	75.5	47.4	56.1	43.2	51.2	0.78	0.95	4.56	4.99
SM5.0-4	—	38.6	—	76.4	—	51.5	—	53.6	—	1.04	—	5.00
SL2.5-3	18.8	20.0	80.7	69.3	56.4	60.0	51.5	54.7	1.11	1.09	5.00	5.33
SL2.5-4	—	43.2	—	75.3	—	57.6	—	59.9	—	1.30	—	5.45
SH2.5-3	14.8	17.3	80.7	85.5	44.4	51.9	40.5	47.3	0.68	0.81	4.12	5.42
SH2.5-4	—	36.4	—	80.2	—	48.5	—	50.5	—	0.93	—	4.77

(2) 荷重－変位関係の概要

各試験シリーズの荷重－変位関係（図－4.5～61）をみると、3PM2.5-1シリーズ（図－4.5、31）および4PM2.5-7シリーズ（図－4.17、43）以外は、最大耐力後も安定した荷重－変位関係が得られている。上記試験シリーズは、最大

耐力を過ぎてから急激なクラック伝播を起こし、荷重が急激に落ち、その間の測定点が不足しているため、破壊エネルギーを過大評価している。また、各試験シリーズの個々の試験体のバラツキは、コンクリートの場合より小さくなっており、粗骨材の存在が最大耐力後の軟化挙動に大きな影響を与えていたことがわかる。

以下、各パラメータに関する考察では、120mmスパン３点曲げを3PB、120mmスパン４点曲げを4PB、320mmスパン３点曲げを320mmスパンと略す。

(3) ノッチ深さの影響

図－4.62、66から、最大耐力後の抵抗力と破壊エネルギーは、リガメント長さが長くなる（ノッチ深さが浅くなる）と増大する傾向がある。この原因は、コンクリートの場合と同様に、リガメント長さが長くなるとクラック径路が複雑になり、破断面のかみ合っている面積が大きくなるためである。

有効曲げ強度σ_{net}（表－4.5）を比較すると、ノッチの無い試験シリーズ(3PM2.5-1、SM2.5-00)を除いて、正味の断面積が減少すると、σ_{net}は増加する（3PBの3PM2.5-2、3、4シリーズ、4PMの4PM2.5-7、8シリーズ、320mmスパンのSM2.5-10、11シリーズ）。これは、寸法の影響で述べたように、調合が同じであれば軟化領域の大きさもほぼ同じと考えられ、軟化領域が正味の断面積に占める割合が増加するためである。ノッチを入れない試験シリーズでは、応力集中が生じないのでσ_{net}が大きくなる。

(4) 載荷速度の影響

表－4.5から、有効曲げ強度は、いずれの載荷方法においても載荷速度が10倍で約10%、100倍で約20%上昇するが、破壊エネルギーは、それほど上昇しない場合が多い（3PBの４週試験、4PBの１年試験、320mmスパンの１年試験）。これは、図－4.63、67にみられるように、載荷速度の速い荷重－変位曲線は、最大耐力後、急速に載荷速度の遅い荷重－変位曲線に近づき、さらにその曲線より小さな抵抗力を示すようになるためである。この原因は、載荷速度が遅いほど、軟化領域のマイクロクラックが十分発達しながらクラックが進展するた

め、抵抗力が大きくなると考えられる。

(5) 最大粒子径の影響

最大粒子径の影響をみると（図－4.64、68および表－4.5）、有効曲げ強度は最大粒子径が大きくなると高くなるが、最大粒子径が5.0mmと0.3mmの強度比は、いずれの載荷方法においても1.10以下である。破壊エネルギーは、最大粒子径が大きいほど大きくなる傾向にあるが、コンクリートの場合と比較すると、その変動は小さい（3PM5.0-1/3PM0.3-1=1.41(4週)、1.13(1年)、4PM5.0-2/4PM0.3-2=1.28(4週)、1.21(1年)、SM5.0-3/SM0.3-3=1.35(4週)、1.14(1年)、SM5.0-4/SM0.3-4=1.12(1年)）。特に、１年試験において、最大粒子径の影響が小さくなるが（図－4.68）、これは、水和反応の進行によってマトリックスと骨材の強度差が減少し、より均質な材料になったためと考えられる。

(6) 水セメント比の影響

表－4.2から、水セメント比(W/C)=0.55の圧縮強さを1.00とすると、W/C=0.45は1.09、W/C=0.65は0.88となり、W/Cが低くなると圧縮強さは高くなるが、曲げ強さは水セメント比にかかわらずほぼ一定となっている。これは、圧縮と曲げの破壊機構の相違に起因している。圧縮破壊は、試験体全体にクラックが進展した後、破壊に至るが、曲げ破壊は、最大曲げモーメント付近の最弱エレメントにクラックが入り、そのクラックが進展することによって破壊するので、最弱エレメント以外の試験体部分は、曲げ強さに寄与していないことになる。本実験で用いたW/Cの範囲では、最弱エレメント部の強度はほとんど同じであったと考えられる。

図－4.65、69および表－4.5から、４週試験では、W/Cが0.55と0.65の有効曲げ強度および破壊エネルギーの差異は小さい（有効曲げ強度：3PM2.5-3/3PH2.5-1=1.04、4PM2.5-8/4PH2.5-2=1.02、SM2.5-11/SH2.5-3=1.06、破壊エネルギー：3PM2.5-3/3PH2.5-1=1.11、4PM2.5-8/4PH2.5-2=0.99、SM2.5-11/SH2.5-3=0.99）。しかし、W/Cが0.45では、有効曲げ強度で約１割、破壊エネルギーで約２割上昇している。

1年試験の有効曲げ強度は、W/Cを0.45、0.55、0.65と変えると、約10%づつ低下する。しかし破壊エネルギーは、最大耐力が高いほど、その後の荷重の低下が急激になるため（図－4.69）、3PBのW/C=0.55と0.45および4PBのW/C=0.55と0.45は、ほぼ同じ値となっている。また、320mmスパンのW/C=0.65の場合、最大耐力後の荷重低下が緩やかなため（図－4.69）、より低い水セメント比の場合より高い破壊エネルギーとなっている。この結果は、弱いモルタル（高い水セメント比）は低い破壊エネルギーとなるであろうと予想していたので、幾分意外である。これは、最大耐力後の軟化挙動は水セメント比に依存しないということを示している。破壊エネルギーは、クラック径路と破壊面における摩擦力に、より強く影響されるといえる。

(7) 載荷方法の影響

図－4.70、71から、破壊エネルギーは、W/Cが0.45と0.65の場合を除くと、320mmスパンがやや低めになる傾向があるが、その差は僅かである。従って、本実験の各載荷方法によって得られた破壊エネルギーの値に差異はないといえる。

(8) 材令の影響

表－4.2からわかるように、材令1年の圧縮強さは、材令4週より30～50%高くなるが、曲げ強さの上昇は、高々10%程度である。これは、水セメント比の影響で述べたように圧縮と曲げの破壊機構の相違に起因している。すなわち、圧縮破壊は試験体全体の破壊であるのに対して、曲げ破壊は試験体の一部の最弱エレメントにおける破壊である。実験結果は、最弱エレメント部の材令に伴う強度上昇は小さいということを示している。

表－4.5から、材令1年の破壊エネルギーは、材令4週より10%程度高くなるが、3PM2.5-5、3PM5.0-1および4PL2.5-2シリーズのように減少する場合もある。最大荷重は10～20%上昇しているので、材令1年の試験体は最大耐力後より脆性的な挙動を示している。

(9) 繰り返し載荷による荷重－変位曲線

図－4.72から、繰り返し圧縮載荷時の応力－ひずみ曲線と同様、繰り返し載荷による荷重－変位曲線の包絡線は、単調漸増載荷による荷重－変位曲線とほぼ一致する。また、包絡線からコモンポイント（除荷曲線とそれに引続く再載荷曲線との交点）に至るまでの除荷特性は、変位がほぼ一定で、応力だけが減少する鉛直に近い直線となる。しかしながら、圧縮載荷と異なって、再載荷曲線は、変形が進行しても下に凸な曲線とはならない。

(10)時間効果試験による荷重－変位曲線

図－4.73～77から、時間効果試験後の軟化挙動は、単調漸増載荷における最大耐力後の軟化挙動とほぼ一致しており、全体の荷重－変位曲線は、単調載荷による曲線の頂が欠けた形となっている。この原因は、先に述べたように、モルタルの曲げ破壊は一本のメインクラックの進展によって起り、時間が経過してもメインクラック以外への軟化領域の広がりは少ないためと考えられる。

最大荷重(Lp)の90%の荷重で荷重を一定にした場合、約35分（図－4.74(2)、図－4.76(2)）から50分（図－4.77(2)）後に、0.85Lpの荷重で荷重を一定にした場合、144分（図－4.77(1)）後に、荷重を維持できない限界変位に達し、荷重が低下する。

最大荷重(Lp)の90%の荷重で変位を一定にした場合の荷重の低下は、約15分で0.85Lp（図－4.77(3)）、約45分で0.81Lp（図－4.76(3)）であるが、限界変位に近づくと荷重の低下速度は速くなる。

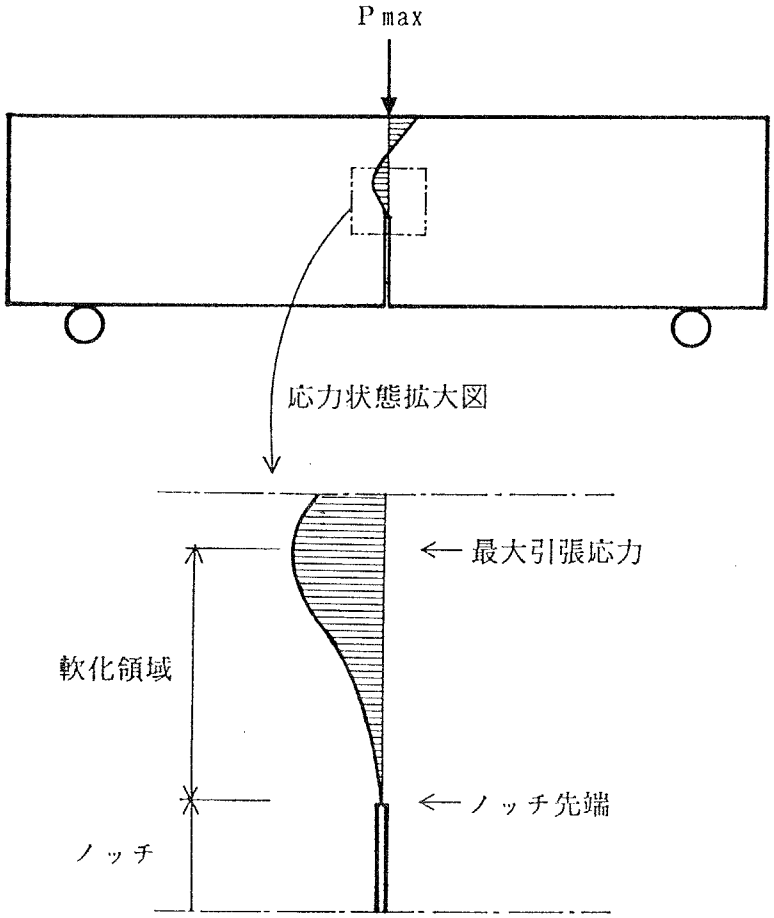
以上より、最大荷重の85%以上の荷重では、一定荷重下におけるひずみ硬化現象はほとんどなく、クラックの進展（図－4.78～82の(3)）によって変形が進み、崩壊に至るといえる。

(11)荷重とクラック進展

荷重とクラック進展との関係（図－4.78～82）をみると、単調載荷試験の場合、最大耐力近くまでクラックが観測されていない。この原因は、コンクリートと違ってクラックを拘束する粗骨材が存在しないので、クラックの開始

が荷重低下に直結するためと考えられる。

時間効果試験における荷重とクラック進展との関係から、一定荷重下でクラックが進展して行く様子が伺える。



図－4.83　最大荷重時の応力状態と軟化領域

4.5 まとめ

本章では、粗骨材以外の因子がセメント系材料の軟化挙動に及ぼす影響をより詳細に検討するために、各種条件下でモルタルの曲げ試験を行った。本章で得られた主な結論を以下に要約する。

(1) 小寸法試験体(40x40x160mm)の有効曲げ強度は、大寸法試験体(100x100x400mm)より軟化領域が破壊面に占める割合が高くなるため、25～30%上昇する。

(2) 大寸法試験体の方がクラック径路が複雑になるため、破壊エネルギーは小寸法試験体より１割強高くなる。

(3) リガメント長さが長くなる（ノッチ深さが浅くなる）と、上記(1),(2)と同じ理由により、破壊エネルギーは増加するが、有効曲げ強度は減少する。

(4) 載荷速度が速いほど、有効曲げ強度は高くなるが、最大耐力後の抵抗力は低くなる傾向がある。

(5) 最大粒子径が大きくなると、有効曲げ強度および破壊エネルギーは上昇するが、水和反応が進行すると最大粒子径の影響は少なくなる傾向がある。

(6) 破壊面を規定しない（ノッチの無い）曲げ試験では、最弱エレメント部の強度で耐力が決定し、水セメント比が0.45～0.65の範囲の曲げ強さは、ほぼ一定となる。

(7) ノッチを有する曲げ試験の有効曲げ強度（最大耐力）は、水セメント比が高くなると低下するが、最大耐力後の軟化挙動は、水セメント比より破壊面におけるクラック径路に大きく影響される。

(8) 本実験で用いた各載荷方法（120mmスパン３点曲げ、120mmスパン４点曲げ、320mmスパン３点曲げ）によって得られた破壊エネルギーの値に差異はない。

(9) 最弱エレメント部の材令に伴う強度上昇は小さい。

(10) 水和反応の進行による破壊エネルギーの増加は、強度と比較して小さく、材令１年の試験体は最大耐力後、より脆性的な挙動を示す。

(11)繰り返し曲げ載荷による荷重－変位曲線は、繰り返し圧縮載荷による応力－ひずみ曲線と同様の挙動を示すが、再載荷曲線は常に上に凸な曲線である。

(12)時間効果試験後の軟化挙動は、単調漸増載荷における最大耐力後の軟化挙動とほぼ一致しており、全体の荷重－変位曲線は、単調載荷による曲線の頂が欠けた形となる。

(13)最大荷重の85%以上の一定荷重下では、ひずみ硬化はほとんどみられず、クラックの進展によって変形が進み、崩壊に至る。

(14)クラックを拘束する粗骨材が存在しない場合、クラックの開始が荷重低下に直結するため、クラックは最大耐力近くまで観測されない。

第５章　逆解析によるコンクリートの引張軟化特性

5．1　はじめに

コンクリートのクラック先端前方には、モルタルと骨材間のディボンディングやモルタルのマイクロクラックなどの損傷は受けているが、応力を伝達できるいわゆる軟化領域が存在することは広く認められている。コンクリートの軟化領域の大きさは、ガラスや金属材料と比較するとかなり大きく、コンクリートに線形破壊力学を直接適用することができない理由となっている。しかしながら軟化領域の大きさや力学的特性に関しては、載荷方法や試験体寸法が異なると、実験結果も異なり、コンセンサスが得られているとはいえない[1)]。それ故、クラック進展に起因するコンクリートの非線形挙動をより合理的に予測するためには、軟化領域における力学的特性を明らかにしていく必要がある。

軟化領域における力学的挙動を記述する代表的な力学的モデルとして、Hillerborg[2)]のfictitious crack modelとBazant[3)]のcrack band modelがある。本論文ではメインクラックの進展による破壊挙動を対象としているので、軟化領域の特性を表すモデルとして、より適切なHillerborgの伝達応力と仮想ひび割れ幅の関係で記述されるモデルを使用し、以後、このモデルを単に引張軟化特性と呼ぶことにする。引張軟化特性を求める最も直接的な方法は、コンクリートの直接引張試験による方法である。しかしながらコンクリートのような不均質材料の引張軟化特性を直接引張試験によって求めるのは非常に困難であることは第２章で述べた。したがって間接的な方法ではあるが、比較的安定した結果が得られる曲げ試験結果およびサーボ制御によるＣＴ（compact tension）試験結果に対し、最適な軟化特性パラメータを決定する逆解析法が最も良く用いられている。例えばRoelfstraら[4)]およびWittmannら[5),6)]は最小二乗法を用いて軟化特性パラメータを決定し、試験体寸法、載荷速度、調合、材令の変化がパラメータに与える影響を考察している。野村ら[7),8)]は高強度コンクリートの脆性化のメカニズムおよび内部構造の異なるコンクリートの軟化領域の特性について軟化特性パラメータを用いて推測している。しかし、軟化領域の観測結果と軟化特性パラメータの関係については、直接観察が困難なため、研究例は少ない。

堀井ら[9]はレーザースペックル法による軟化領域の計測結果と線形引張軟化モデルによる解析結果を比較し、このモデルがマイクロクラッキングゾーンを表していないとしている。野村ら[10]はバイリニア型引張軟化モデルによる解析結果とＡＥ（アコースティック　エミッション）発生頻度および裸眼よる観察結果を比較し、モデルの第一勾配がマイクロクラッキングに、第二勾配がブリッジングに対応するとしている。軟化領域における力学的特性を明らかにするためには、このような観察結果とモデルによる解析結果を比較し、モデルの妥当性や破壊メカニズムについて検討する必要がある。

本章では、第３章のノッチを有するコンクリート曲げ試験結果に適合する軟化特性パラメータを逆解析により求め、初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生方法および材令がコンクリートの引張軟化特性に及ぼす影響について考察する。また同じ軟化特性パラメータによって、第３章と第４章の寸法の異なる試験結果を近似できるかを検討する。さらに実験中、顕微鏡で観測したクラック進展挙動と引張軟化特性を組み込んだ解析結果を比較し、そのモデルが何を表しているのかを検討し、軟化領域の破壊メカニズムについて考察する。

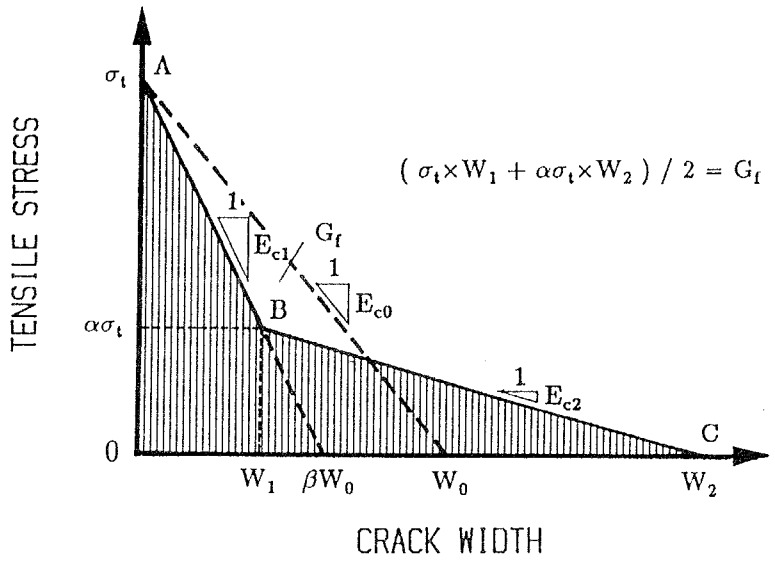
5．2　解析方法

5．2．1　引張軟化特性を考慮した数値解析法

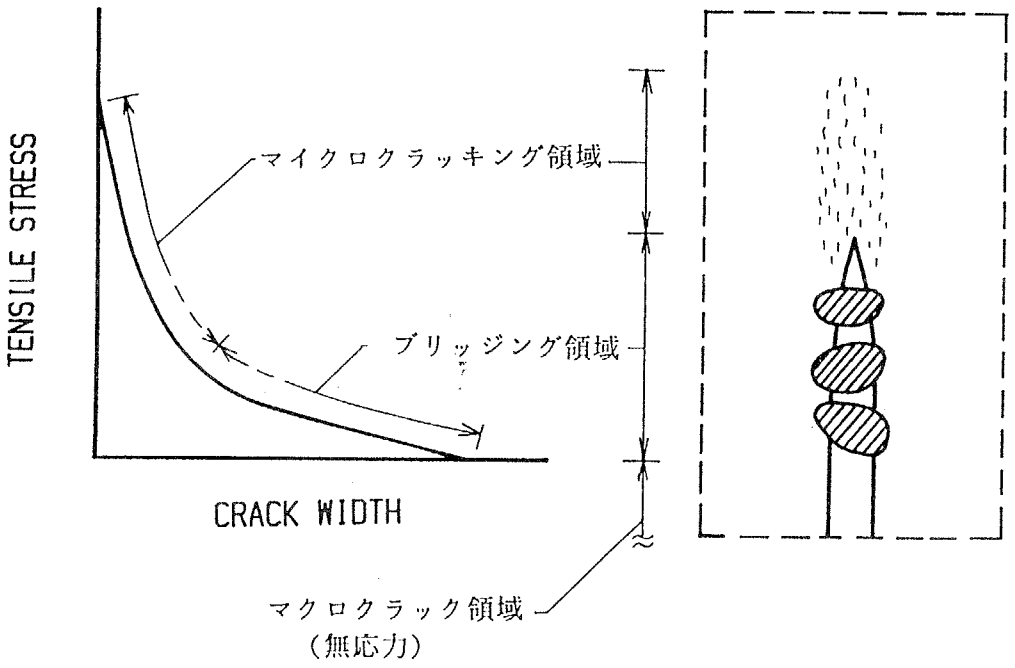
解析には、従来の研究[2),11)]で使用されている引張軟化特性を組み込んだ有限要素法を用いる。引張軟化曲線としては、直接引張試験による荷重－変位曲線を簡単に近似できるバイリニア関数を使用する（図－5.1）。引張軟化特性は、図－5.2のように、前半部分は不連続な微細ひび割れが発生するマイクロクラッキングゾーンに対応し、後半は骨材による噛み合わせなどによって応力が伝達されるブリッジングゾーンに対応すると考えることができる[10)]。本論文では、前半部分（図－5.1のＡＢ間）を一次破壊、後半部分（図－5.1のＢＣ間）を二次破壊と呼ぶことにする。

ノッチを有するコンクリートの曲げ試験におけるクラックは、個々の試験体において多少の蛇行は見られるが、平均的にはノッチ先端から上方にかけて一直線上に進展するものと仮定し、仮想クラックを設定する。試験体の形状および載荷位置の対称性から支点間の半分（図－5.3）に対して、試験体自重を考慮して解析を行う。解析に用いた要素は６節点および８節点アイソパラメトリック要素であり、クラック進展上に負の剛性（引張軟化特性）を持つバネ要素を用いる。アイソパラメトリック要素内はすべて線形弾性とし、バネ要素のみ非線形とする。クラックの進展挙動は、クラック進展上の節点の反力が応力度に換算して最大引張応力度に達した時点で、節点を分離し、バネ要素を挿入することでモデル化し、クラック間には引張軟化曲線から計算した引張応力を等価節点力に換算して作用させる。また、最大耐力後の荷重の減少する領域を含めて解析を行うことから、変位制御とする。本解析ではクラック進展経路が既知であり、クラック進展後の挙動をバイリニア関数で近似していることから、計算の各ステップで線形計算とし、収束計算を行わなくてよい方法を採用している。すなわち、与えられた強制変位δに対してその何倍の強制変位を与えると、クラック進展経路上の各節点の応力が図－5.1のバイリニア関数のＡ，Ｂ，Ｃ点の応力（σ_t、$\alpha\sigma_t$、０）に達するかを計算し、次にその倍率Ｒの中で最

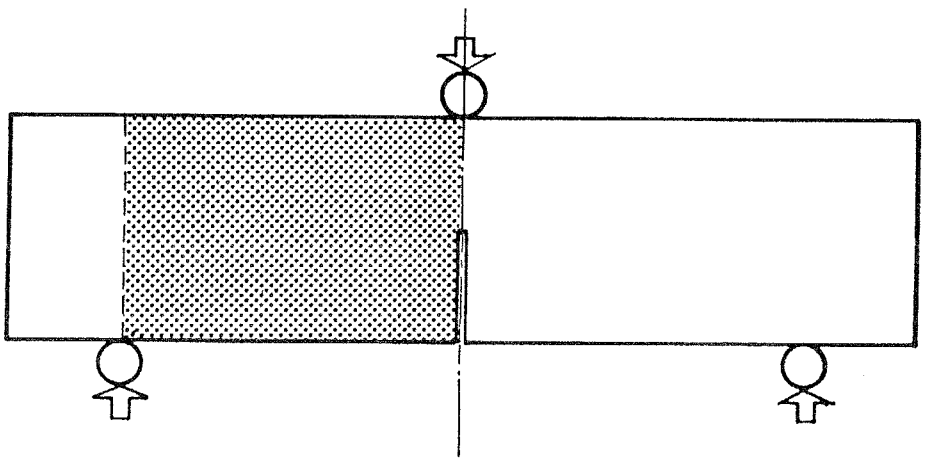
小のものを求めて、強制変位Ｒ×δの間のステップにおいて、すべての要素が線形挙動するとして計算を行う。図－5.4に解析のフローチャートを示す。



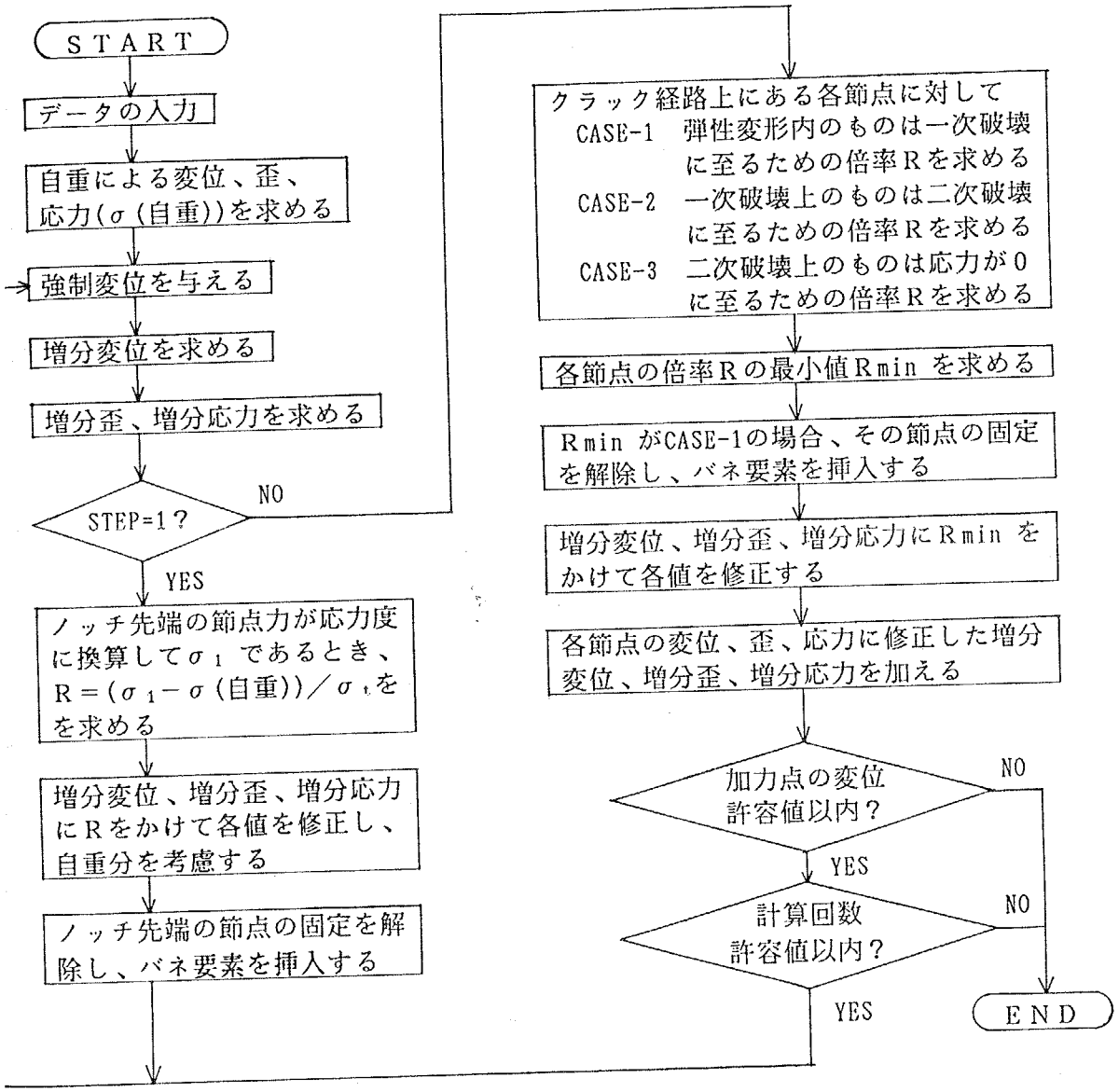
図－5.1　バイリニア近似による引張軟化特性とその諸係数



図－5.2　軟化領域における応力伝達機構



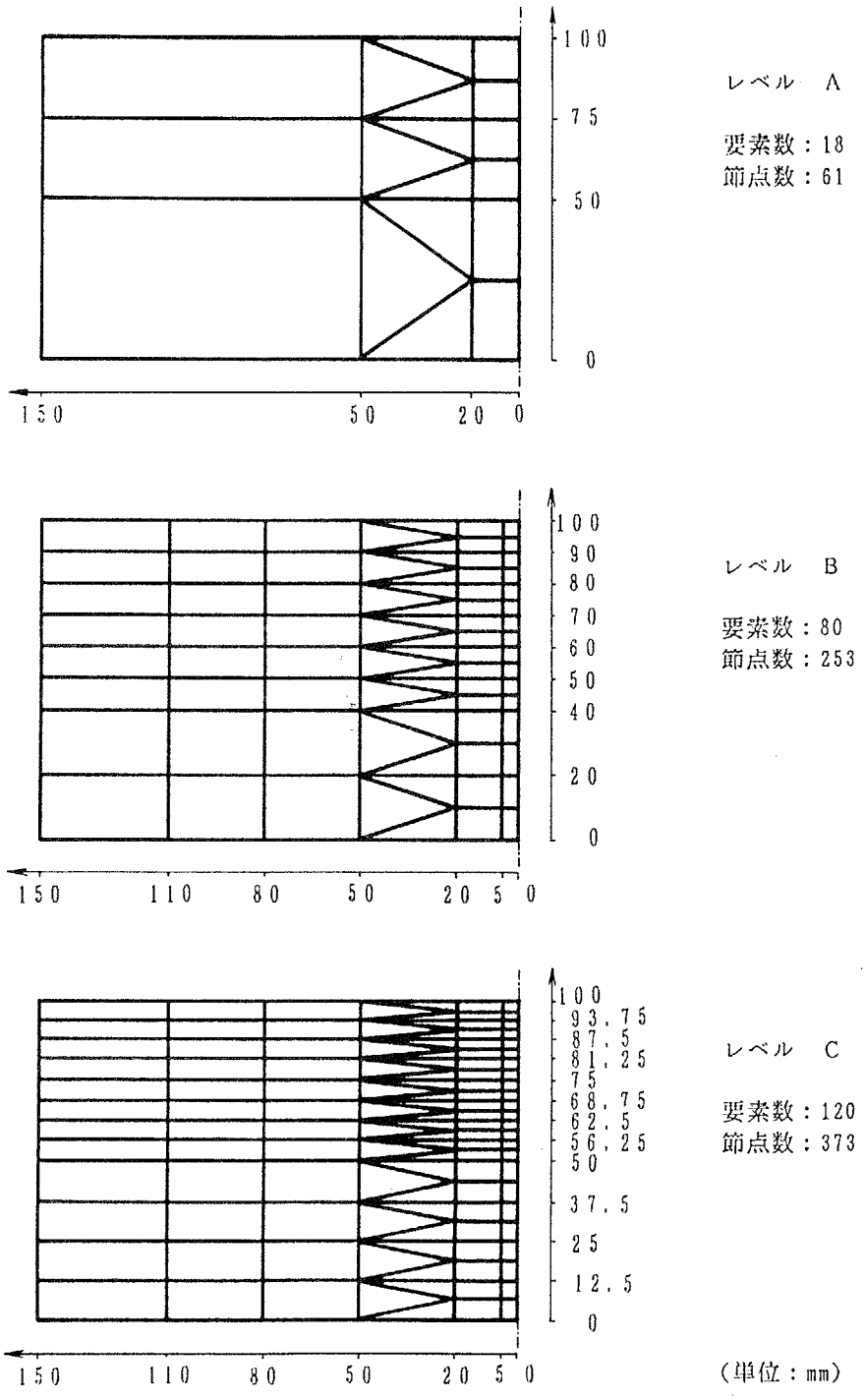
図－5.3　対称性を考慮した解析範囲



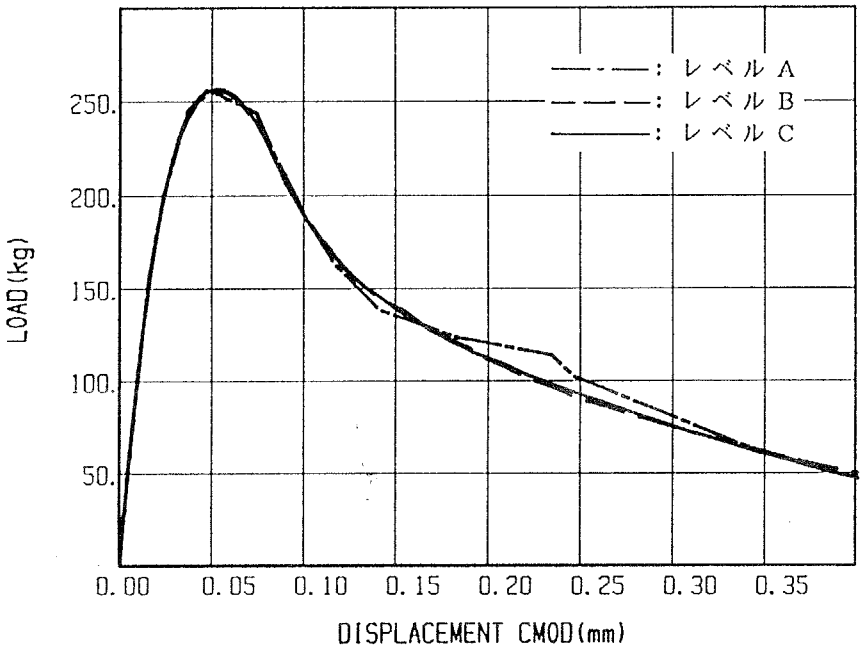
図－5.4　解析方法のフローチャート

5．2．2　要素分割レベル

図－5.5に示すような３レベルの要素分割で、同一のバイリニア関数を用いて解析を行い、要素分割レベルによる解析結果の相違を検討する。３レベルの要素分割による解析結果を図－5.6に示す。いずれの要素分割レベルにおいても、最大耐力までは非常に良く一致しているといえる。しかしながら最大耐力以降、非線形バネ要素が多くなる変位の大きい領域で、レベルＡによる解析結果は荷重変動が激しくなっている。一方レベルＢとレベルＣの解析結果は、最大耐力以降も良く一致しており、最大耐力後の軟化挙動を含めた解析にはレベルＢの要素分割で十分である。それ故、本解析はレベルＢの要素分割で行う。



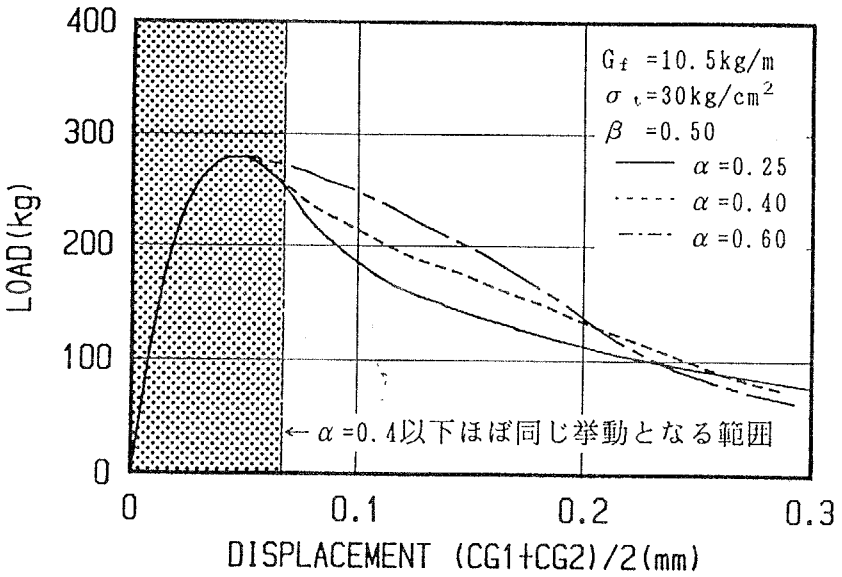
図－5.5　3 レベルの要素分割図（解析にはレベルＢを使用）



図－5.6　3 レベルの要素分割による解析結果

5．2．3　バイリニア関数の推定方法

逆解析で推定を行うパラメータは引張強度σ_t、引張強度に対する折れ点の応力の比α、破壊エネルギーに対する一次破壊で消費されるエネルギーの比βの３個である。破壊エネルギーおよび弾性係数は実験値を用い、破壊エネルギーと推定されるバイリニア関数で囲まれた面積は一致するものとする。また、調合、載荷速度、養生、材令が同一の試験体は引張強度を材料特性と考えて統一する。実験結果のバラツキを考慮し、σ_tは1 kg/cm^2、α、βは0.05間隔で変動させることによって推定を行う。ケーススタディから、σ_tと一次破壊の負勾配 $E_{c1}=1/\beta \cdot E_{c0}$（$E_{c0}$は図－5.1の点線で示した一定負勾配としたときの負勾配の大きさ。また、W_0はそのときの応力がゼロとなる開口変位であり、３角形０$\sigma_t W_0$の面積は破壊エネルギーに等しい。）、すなわちβを固定すると、二次破壊の始まる応力$\alpha\ \sigma_t$、すなわちαの値がある程度以下（図－5.7に示す計算例では$\alpha=0.40$以下）であれば、最大耐力後の一部を含めてほぼ同一の荷重－変形挙動となる。また、最大耐力が一致するσ_tとβの組み合わせは無数にあるが、最大耐力後の一部を含めて、実験結果の荷重－変位関係と良好な一致を示す組み合わせは限られてくる。例えば、βの値を小さくしていくと、最大耐力時の変位が減少し、その後二次破壊が現れるまで抵抗力が急激に低下する結果となる。以上のことから、上記パラメータの推定には、まず実験値と計算値の最大耐力の差異が２％以内でかつ最大耐力後の一部を含めて、実験結果の荷重－変位関係と良好な一致を示すσ_tとβの組み合わせを２～３組決定する。次にこの決定された組み合わせに対してαの値を適当に変えて解析を行い、最終的に最も良く実験結果と一致するσ_t、α、βの組み合わせを最小二乗法によって決定する。



図－5.7　引張軟化特性パラメータαが荷重－変形挙動に及ぼす影響

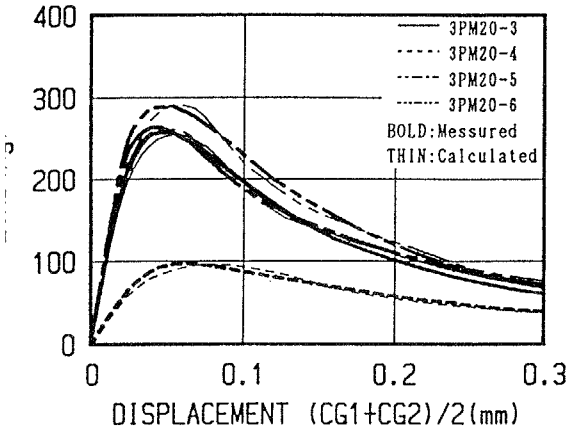
5．3　解析結果および考察

5．3．1　実験と解析による荷重－変位曲線の比較

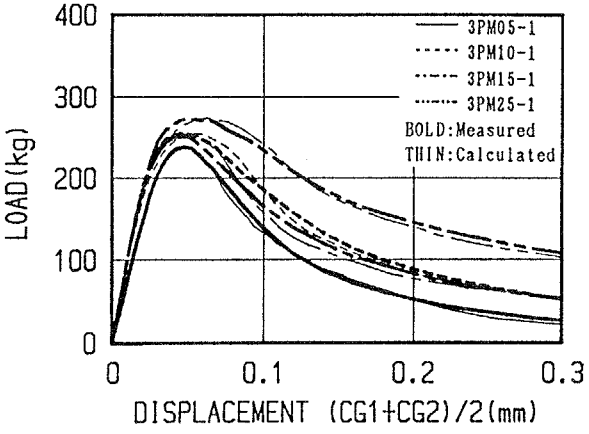
5.2.3節で述べた引張軟化特性（バイリニア関数で近似）の推定方法により、実験結果と最も良好な一致を示すと推定されたバイリニア関数の諸係数を表－5.1に示す。これらの諸係数を比較することによって、有効曲げ強度や破壊エネルギーのみでは相対的な評価ができない脆性化および破壊メカニズムの相違について考察する。また、この引張軟化特性を用いた解析結果と実験結果との比較を、図－5.8（４週試験）と図－5.9（１年試験）に示す。また、3PM20-3 シリーズの解析において、破壊の進行に伴う破壊面（バネ要素モデル）の応力状態の変化を図－5.10に示す。表－5.1の最右欄の誤差評価は、実験と解析による二本の荷重－変位曲線間の面積（絶対値の総和）を、実験による荷重－変位曲線で囲まれる面積で除した値であり、解析結果の一致性を示す指標となるものである。誤差評価の値は、大部分が５％以下であり、本解析によって推定された引張軟化特性は、クラック前方の軟化領域における力学的特性を良く近似しているといえる。

表－5.1　バイリニア関数の諸係数

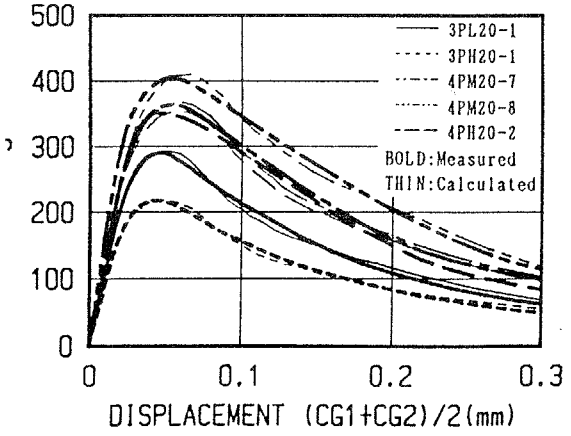
試験名称	試験材令	引張強度 kg/cm^2	α	β	E_{c1} kg/cm^3	E_{c2} kg/cm^3	W_1 μm	W_2 μm	誤差評価 %
3PM20-1	4週	27	0.15	0.55	5763	154	40	302	****
3PM20-1	1年	30	0.10	0.70	5357	122	50	296	****
3PM20-2	4週	27	0.30	0.55	6372	631	30	158	5.91
3PM20-2	1年	30	0.25	0.60	6757	579	33	163	5.01
3PM20-3	4週	27	0.25	0.60	6075	521	33	163	3.98
3PM20-3	1年	30	0.25	0.50	8571	504	26	175	3.52
3PM20-4	4週	27	0.25	0.60	6395	548	32	155	4.73
3PM20-4	1年	30	0.25	0.55	9978	708	23	128	4.00
3PM20-5	4週	29	0.25	0.50	7716	454	28	188	3.39
3PM20-5	1年	36	0.30	0.55	10909	1081	23	123	4.06
3PM20-6	4週	33	0.25	0.60	8403	720	29	144	3.91
3PM20-6	1年	38	0.25	0.55	10419	739	27	156	5.65
3PM05-1	4週	30	0.15	0.70	11278	563	23	103	4.73
3PM05-1	1年	32	0.15	0.70	12611	629	22	98	4.47
3PM10-1	4週	27	0.15	0.65	6162	247	37	201	3.90
3PM10-1	1年	29	0.20	0.65	6342	439	37	169	2.39
3PM15-1	4週	28	0.15	0.55	7747	207	31	233	4.40
3PM15-1	1年	30	0.20	0.65	6073	420	40	182	1.55
3PM25-1	4週	27	0.25	0.50	4472	263	45	302	3.37
3PM25-1	1年	32	0.25	0.55	7758	551	31	176	3.55
3PL20-1	4週	33	0.25	0.55	9340	663	27	151	4.28
3PL20-1	1年	35	0.25	0.50	10841	638	24	161	4.35
3PH20-1	4週	23	0.25	0.55	5794	411	30	170	3.44
3PH20-1	1年	28	0.20	0.50	7063	272	32	238	4.22
4PM20-7	4週	27	0.25	0.60	5956	511	34	166	3.62
4PM20-7	1年	30	0.30	0.50	7143	590	29	182	4.59
4PM20-8	4週	31	0.30	0.60	6845	814	32	146	3.80
4PM20-8	1年	36	0.25	0.50	13091	770	21	138	5.72
4PH20-2	4週	26	0.25	0.60	5808	498	34	164	5.58
4PH20-2	1年	28	0.30	0.55	6539	648	30	160	2.63
3DM20-7	1年	46	0.25	0.40	16635	665	21	194	1.97
3DM20-8	1年	47	0.25	0.45	15340	746	23	180	6.45
3DH20-2	1年	40	0.25	0.40	14389	576	21	195	3.31



(1) 3PM20-3/4/5/6シリーズ

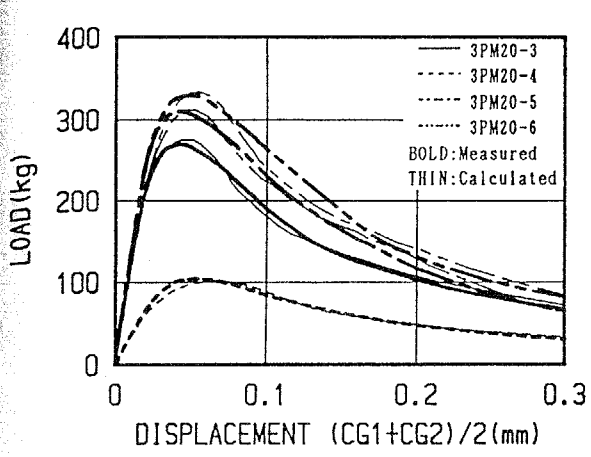


(2)3PM05/10/15/25-1シリーズ

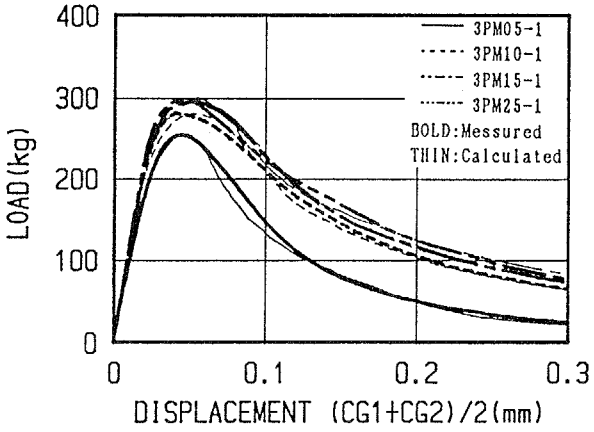


3) 3PL/H20-1&4PM20-7/8&4PH20-2シリーズ

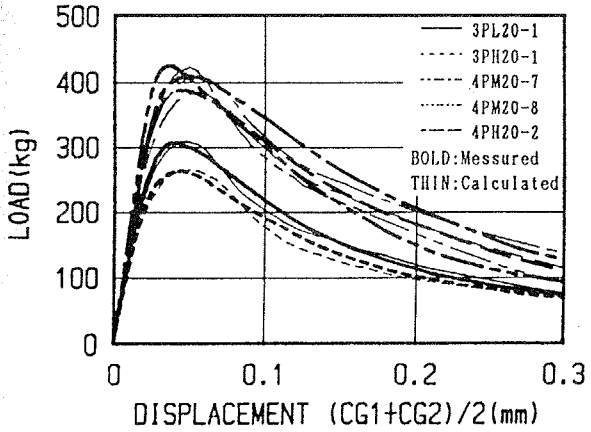
図－5.8　実験と解析による荷重－変位曲線の比較（４週試験）



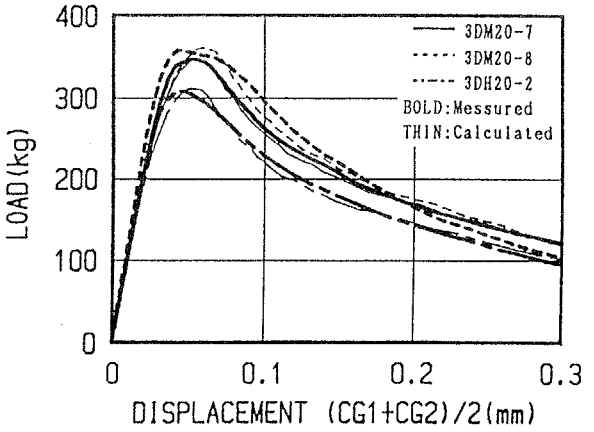
(1) 3PM20-3/4/5/6シリーズ



(2)3PM05/10/15/25-1シリーズ

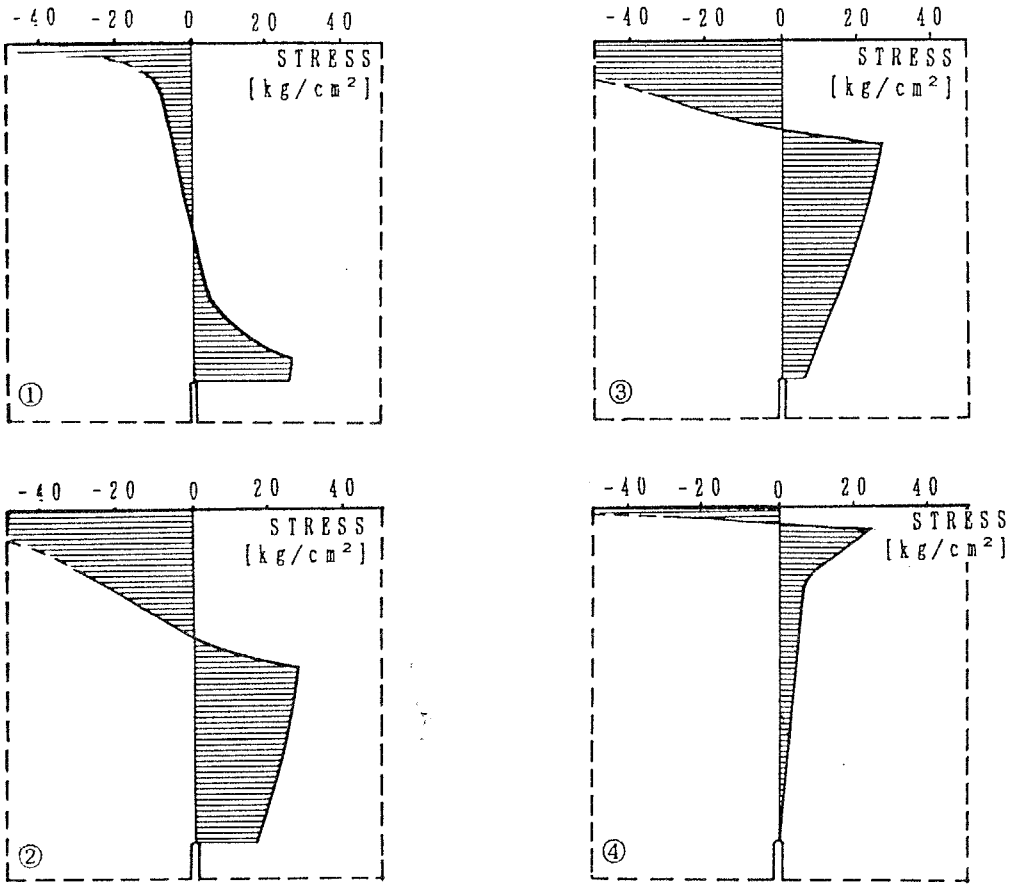


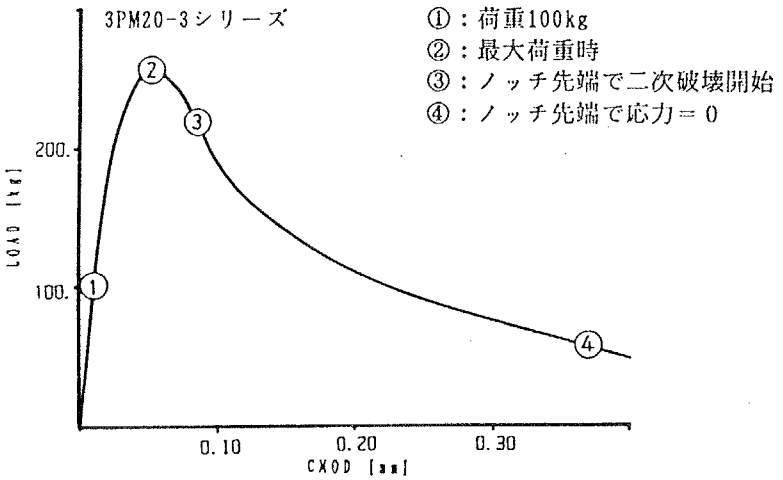
(3) 3PL/H20-1&4PM20-7/8&4PH20-2シリーズ



(4)3DM20-7/8&3DH20-2シリーズ

図－5.9　実験と解析による荷重－変位曲線の比較（１年試験）





図－5.10　破壊の進行に伴う破壊面の応力状態の変化

5．3．2　引張軟化特性の比較

(1) ノッチ深さによる比較

ノッチ深さの影響を検討するために行った試験に対して推定されたバイリニア関数を図－5. 11に示す。ノッチ深さ10mmの試験（3PM20-1）の場合、最大耐力を過ぎてから急激なクラック伝播を起こし、その間の測定点がないので破壊エネルギーを過大評価している。それ故計算には、外挿により推定した値（４週：11.5kg/m、１年：12.0kg/m）を用いた。また、この試験のαの値が小さくなっているのは、上記理由により、急激なクラック伝播が終了した最終段階の実験結果のみ逆解析に使用したためであり[12)]、得られたパラメータも参考値である。30～70mmノッチに対して、４週試験では有意な差異は認められないが[6)]、１年試験ではノッチ深さが増加すると、一次破壊の負勾配E_{c1}が大きくなってより脆性的な軟化特性を示す傾向がみられる。特に3PM20-4 シリーズの場合、４週試験よりも破壊エネルギーが減少し、その傾向が顕著に現れている。

(2) 載荷速度による比較

載荷速度の影響を検討するために行った試験に対して推定されたバイリニア関数を図－5. 12に示す。載荷速度が速くなるほど引張強度および一次破壊の負勾配の値が増加し、より脆性破壊的な特性を示すようになる。3PM20-5 シリーズの１年試験の場合、４週試験よりも引張強度は20%以上増加しているが、破壊エネルギーがほとんど変わらないため、一次破壊の負勾配が急勾配となっている。

(3) 最大骨材寸法による比較

最大骨材寸法の影響を検討するために行った試験に対して推定されたバイリニア関数を図－5. 13に示す。引張軟化特性は最大骨材寸法によって大きく変動しており、その特性の主要因は骨材によるクラック拘束およびブリッジングであることが伺われる。モルタル試験（3PM05-1）の場合、一次破壊で消費されるエネルギーが大きく（β＝0.70）、二次破壊はメインクラックの蛇行によ

る寄与分と考えられる。また破壊エネルギーがコンクリートの約半分となり、一次破壊の負勾配の値が大きくなって非常に脆性的な軟化特性を示している。3PM25-1シリーズの４週試験における破壊エネルギーの値が突出したのは、試験体３体のうち２体までが、クラック進展上に存在していた骨材によるクラック拘束が非常に大きく、載荷点鉛直変位が0.5mm過ぎまでメインクラックの進展を拘束していたことに起因している。この実験結果を反映して、引張軟化特性の一次破壊の負勾配は緩やかになり、二次破壊終了時のクラック幅W_2は大きな値となっている。一般に最大骨材寸法が小さくなると一次破壊が卓越し（βが大）、大きくなると二次破壊（ブリッジング効果）が卓越してくる傾向があり、図－5.2に示した破壊メカニズムの相違を裏付ける結果となっている。

(4) 水セメント比による比較

水セメント比の影響を検討するために行った試験に対して推定されたバイリニア関数を図－5.14に示す。水セメント比が減少していくと、引張軟化特性における一次および二次破壊の負勾配が急勾配となり、それぞれの破壊終了時のクラック幅W_1、W_2が減少して脆性化する。これはコンクリート強度が大きくなると、マトリクスの力学的特性が粗骨材のそれに近づき、粗骨材によるクラック拘束効果が減少するためと考えられる[7)]。

(5) ３点曲げと４点曲げによる比較

３点曲げと４点曲げ試験に対して推定されたバイリニア関数を図－5.15に示す。４点曲げは３点曲げよりも一次破壊で消費されるエネルギーの割合（β）および引張強度に対する折れ点応力の比（α）の値が大きくなる。したがって４点曲げのバイリニア関数の形状は、３点曲げのものより一次破壊の負勾配が減少し、二次破壊の負勾配が増加する傾向を示しているが、4PM20-8シリーズの１年試験では、破壊エネルギーが極端に低い値となったため、逆の傾向を示している。

(6) 水中養生と気中養生による比較

水中養生と気中養生による試験体に対して推定されたバイリニア関数を図

ー5.16に示す。気中養生の場合、引張強度が水中養生より30～50%増加し、βの値が減少するので、一次破壊の負勾配は水中養生の約２倍にまで達している。また、二次破壊で消費されるエネルギーが増加し、W_2の値も増加する傾向にある。水分によるこの強度低下を説明するには、微小レベルにおける硬化セメントペーストの間隙内の水分が、その力学的特性にどのように影響を与えるかを考察する必要がある[13]。岡島[14]、大岸[15]らは水分による強度低下を、水分による表面エネルギーの低下に関連づけて考察している。しかしながら、骨材に拘束されたセメントペーストは、乾燥収縮によってひび割れが発生するのは避けられないので、定量的な評価をするにはより詳細な検討が必要である。圧縮試験においては、この収縮ひび割れに起因したと思われる割線弾性係数の約20%の低下および一部圧縮強度の低下が見られた（第３章の表ー3.15）。

3DM20-7シリーズに対して推定された引張強度σ_t=46kg/cm^2（材令１年）は、第２章の直接引張試験より得られた引張強度σ_t=44kg/cm^2（材令６ヶ月）と比較して、妥当な値であるといえる。

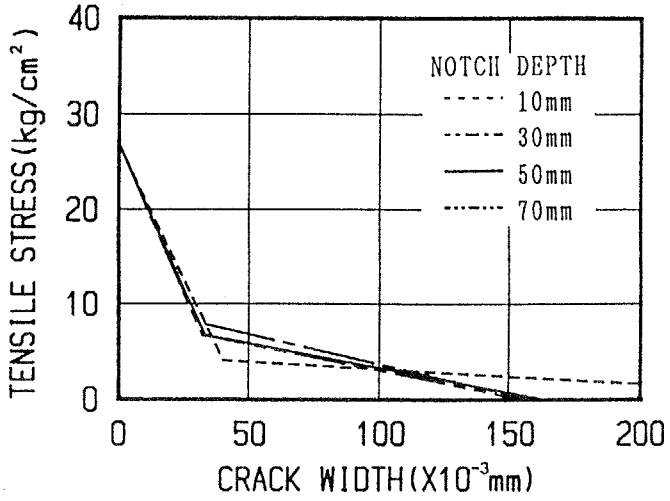
(7) 材令による比較

一般に、１年試験は４週試験に比べ、引張軟化特性における一次および二次破壊の負勾配が急勾配となり、それぞれの破壊終了時のクラック幅W1、W2が減少する傾向が見られる。これは実験結果（第３章の表ー3.15）からわかるように、材令とともに最大耐力は増加するが、そのときの荷重点鉛直変位が減少すること、および破壊エネルギーがそれほど増加していない（一部減少）ことに起因している。

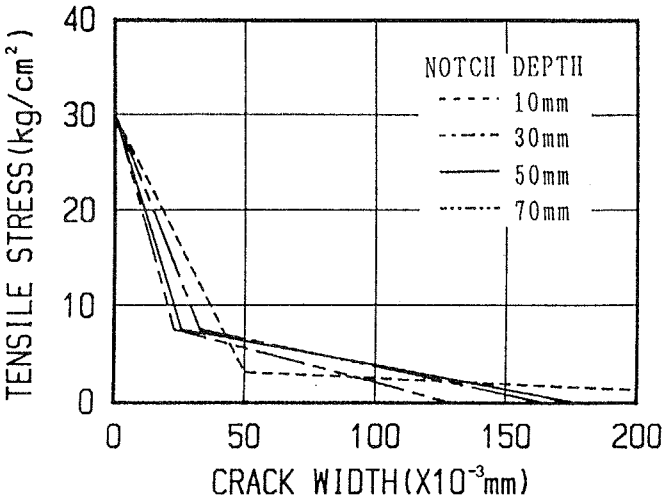
(8) 試験体寸法による比較

引張軟化特性が材料特性であれば、試験体寸法が異なる荷重ー変位曲線を、同じ引張軟化特性によって近似することができるはずである。このことを検討するために、第３章の3PM05-1シリーズ（100X100X400mm）および第４章の同調合の試験シリーズ（40X40X160mm）の試験結果を、引張軟化特性を特徴づける同一のσ_t、α、βを用いて計算した解析結果と比較して図ー3.17に示す。

両者の結果は、いずれの試験体寸法においても良く一致しており、モルタルの場合、引張軟化特性は材料特性であると考えることができる。

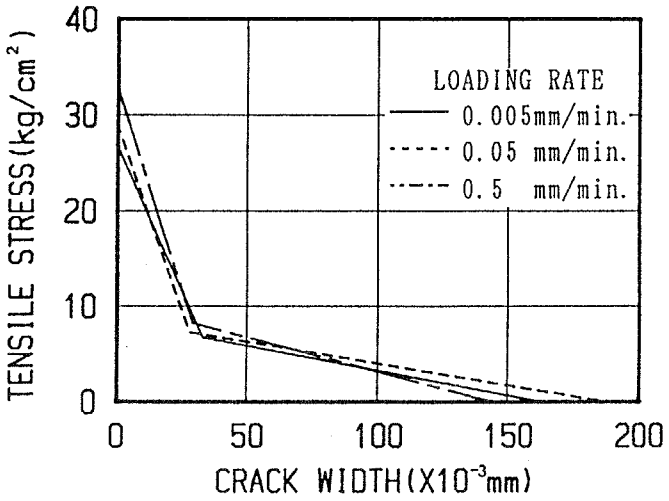


(1) 4 週試験

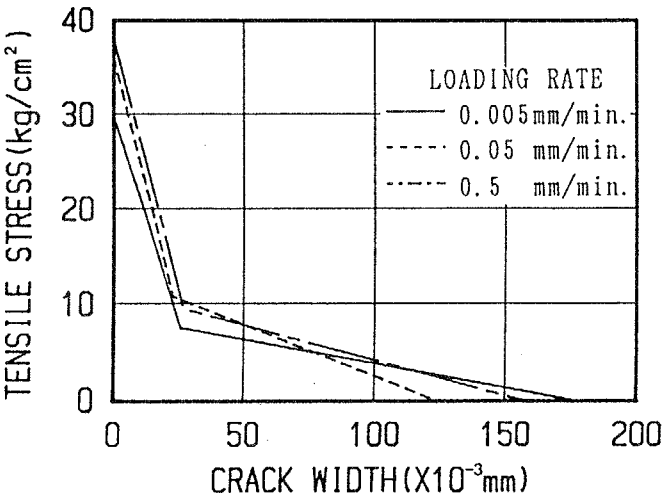


(2) 1 年試験

図－5.11 引張軟化特性に及ぼすノッチ深さの影響

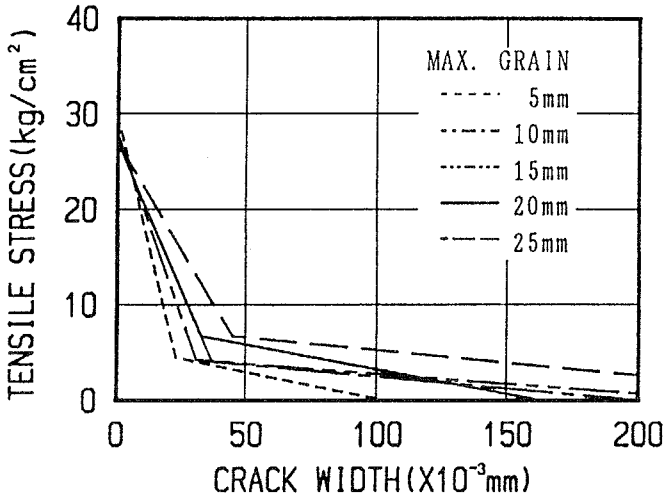


(1) 4週試験

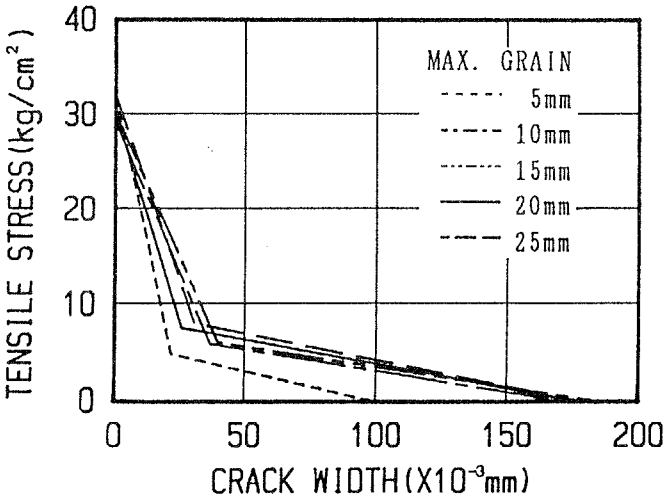


(2) 1年試験

図－5.12 引張軟化特性に及ぼす載荷速度の影響

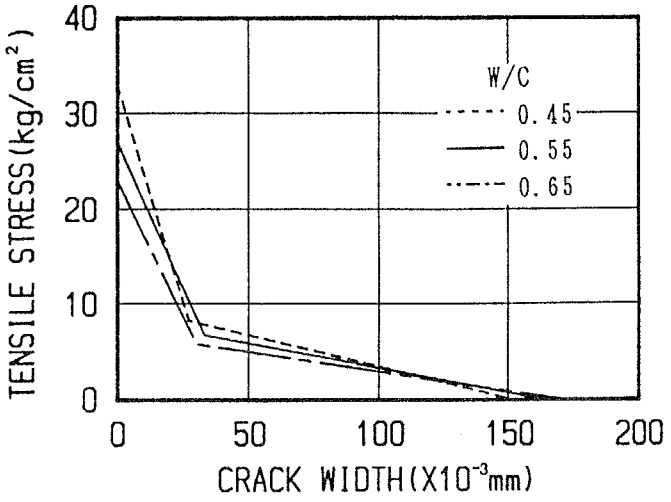


(1) 4週試験

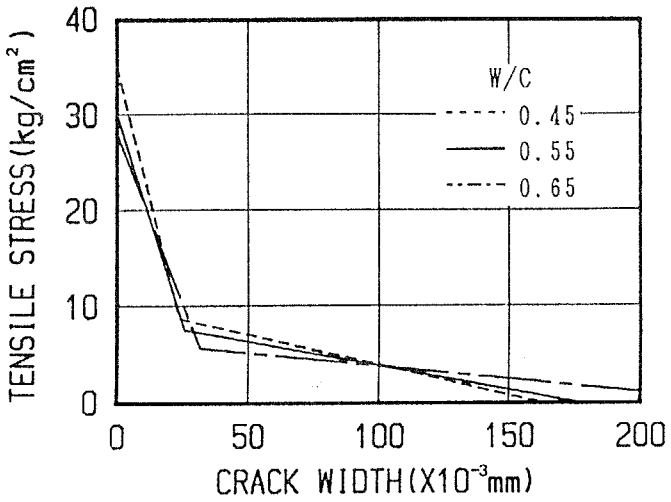


(2) 1年試験

図－5.13 引張軟化特性に及ぼす最大骨材寸法の影響

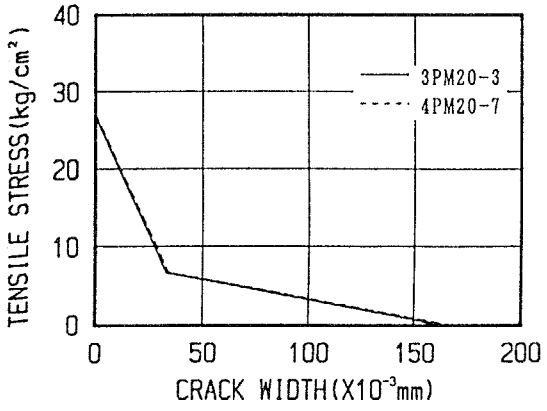


(1) 4週試験

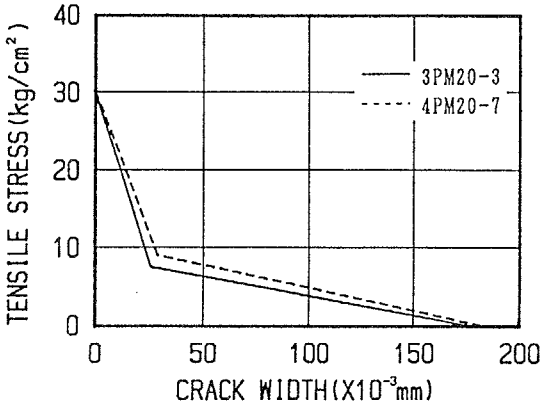


(2) 1年試験

図－5.14　引張軟化特性に及ぼす水セメント比の影響

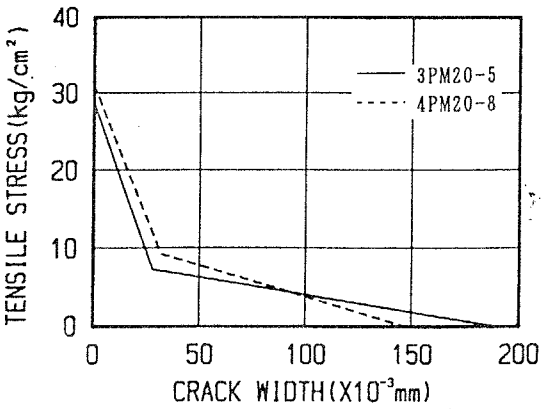


(1) 4週試験

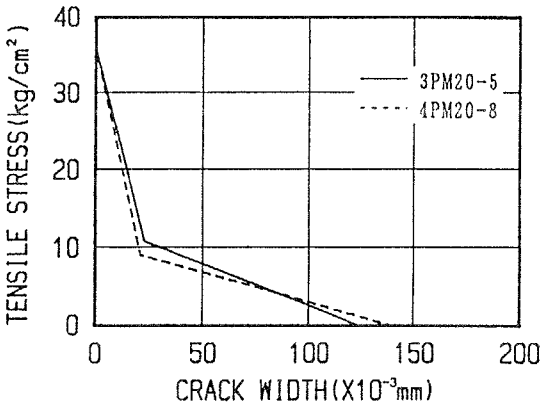


(2) 1年試験

(1) 3PM20-3シリーズ（3点曲げ）と4PM20-7シリーズ（4点曲げ）

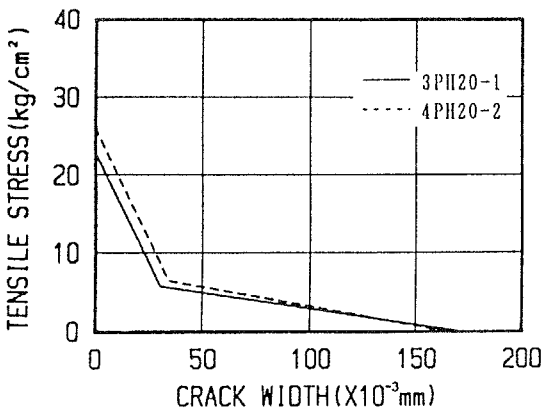


(1) 4週試験

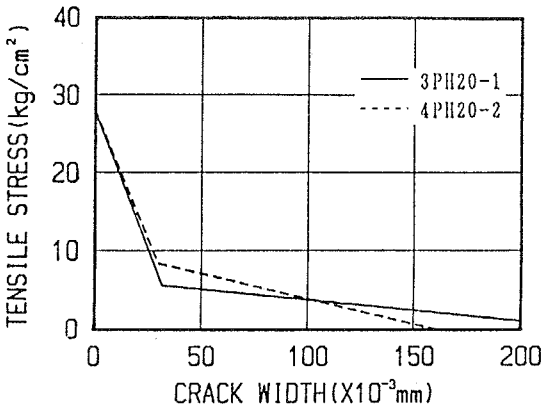


(2) 1年試験

(2) 3PM20-5シリーズ（3点曲げ）と4PM20-8シリーズ（4点曲げ）



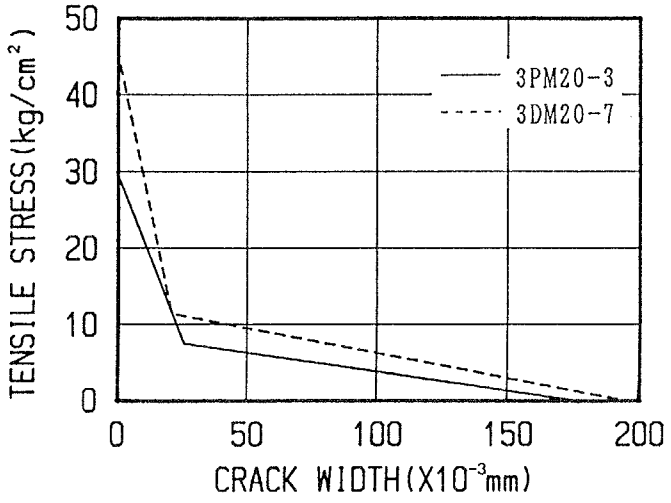
(1) 4週試験



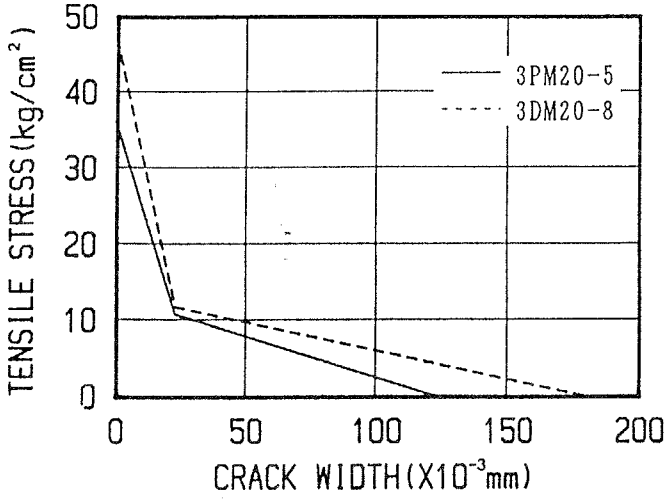
(2) 1年試験

(3) 3PH20-1シリーズ（3点曲げ）と4PH20-2シリーズ（4点曲げ）

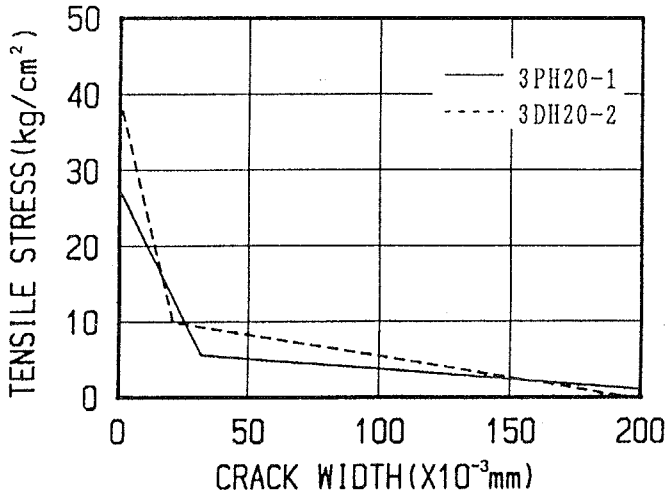
図－5.15 引張軟化特性に及ぼす4点曲げの影響



(1) 3PM20-3シリーズ（水中養生）と3DM20-7シリーズ（気中養生）

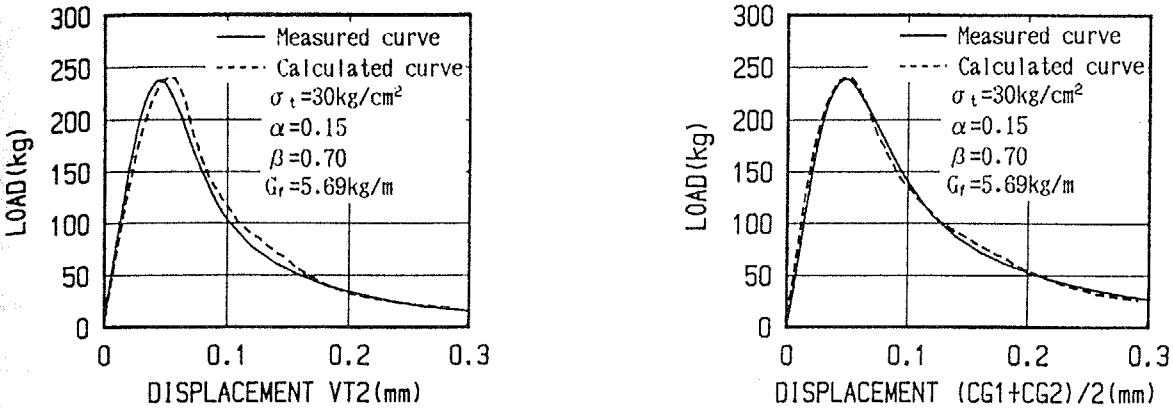


(2) 3PM20-5シリーズ（水中養生）と3DM20-8シリーズ（気中養生）

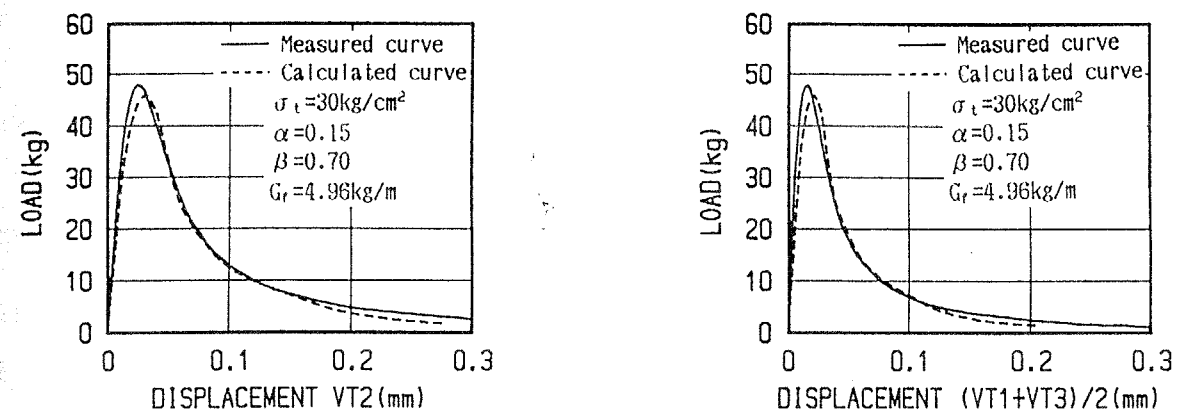


(3) 3PH20-1シリーズ（水中養生）と3DH20-2シリーズ（気中養生）

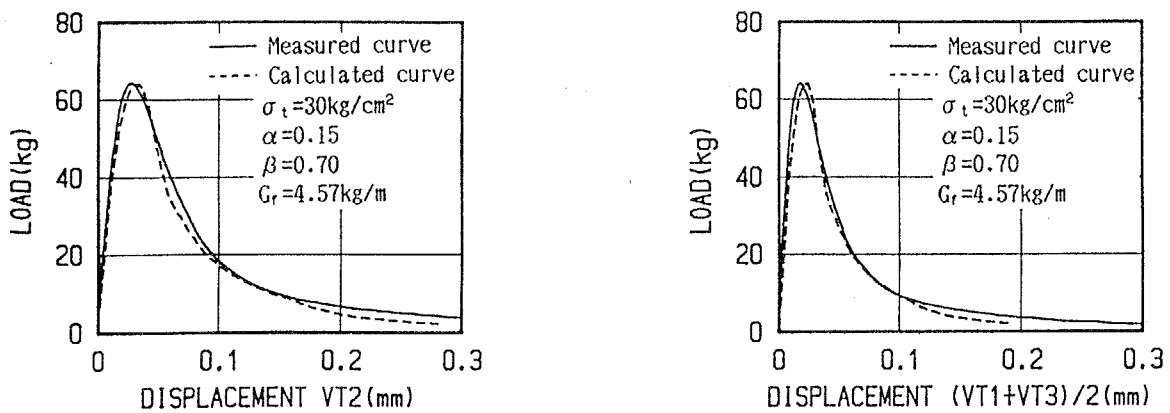
図－5.16　引張軟化特性に及ぼす養生条件の影響



(1) 3PM05-1シリーズ（4週試験、試験体寸法：100X100X400mm）



(2) 3PM5.0-1シリーズ（4週試験、試験体寸法：40X40X160mm）



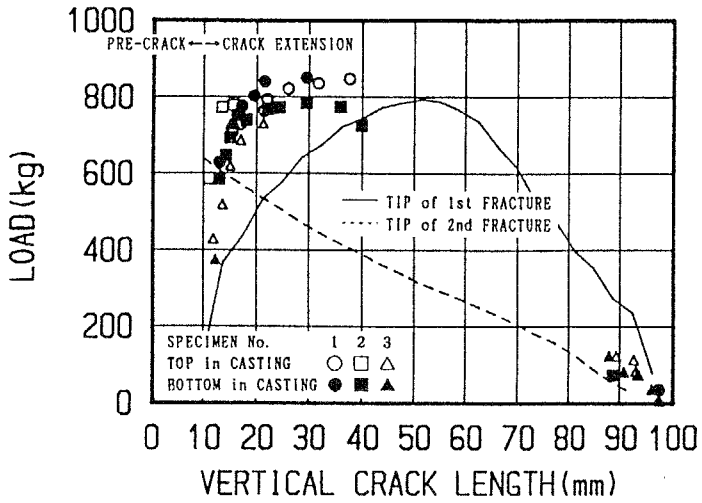
(3) 4PM5.0-2シリーズ（4週試験、試験体寸法：40X40X160mm）

図－5.17　異なる試験体寸法に対する引張軟化特性の適用性

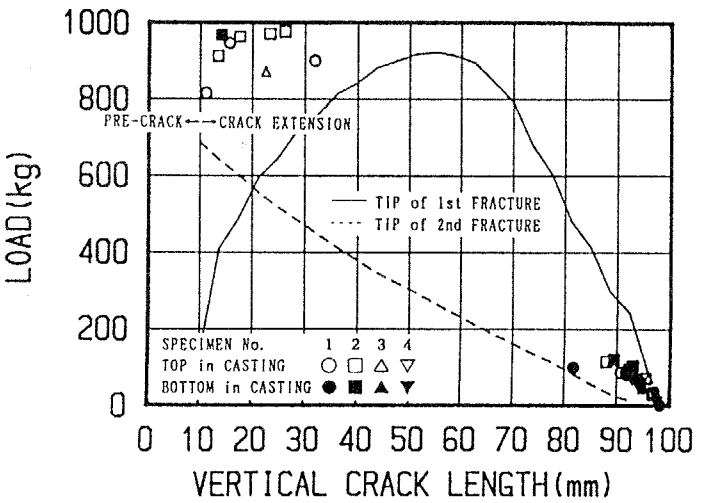
5．3．3　引張軟化特性とクラック進展の関係

解析による軟化領域の進展の様子をみるために、解析から求めた荷重と一次破壊を生じている要素の先端位置（図－5.1のＡ点）との関係および荷重と二次破壊を生じている要素の先端位置（図－5.1のＢ点）との関係を、それぞれ実線および点線によって、図－5.18～32に示す。また、解析による軟化領域進展を観測されたクラック進展と比較するために、荷重と50倍の顕微鏡によって観測したクラック進展の関係を、第３章と同様に、同図にプロットしている。これらの図より、解析による一次破壊はかなり低い荷重（最大耐力の１割程度）から始まり、最大荷重時にはクラックが進展するリガメントの約半分まで達しているのが読み取れる。しかしながら顕微鏡でクラックを観測できるのは、最大荷重の約８０％以上の荷重からであり、最大荷重時で10～15mm程度のクラック進展である。この観測値と予測値の相違は、堀井ら[9]が指摘するように、軟化領域における破壊メカニズムとそのモデル化に深くかかわる問題であり、詳細な検討を必要とする。本研究における両者の相違の主要因としては、１）顕微鏡の倍率が不十分なため、すべてのマイクロクラックを観測できていない２）顕微鏡でクラックとして観測することはできないが、軟化領域内のダメージ（塑性ひずみやモルタルと骨材間の分散化されたディボンディング）の影響をバイリニア型引張軟化モデルが表しているということが考えられる。１）の要因を検討するには、今後さらに高精度な観測を行う必要があるので、ここでは２）が主要因であるとして、軟化領域内の破壊メカニズムを、図－5.18～32を用いて推測する。まず、最大荷重の８０％以下では、最大耐力前の非線形性に影響を与えるダメージが軟化領域内に発生しているが、顕微鏡でクラックとして観測できるまでに成長してはいない。最大荷重の８０％の荷重を超えると、個々のダメージが成長、連結し始め、顕微鏡でクラックとして観察が可能になる。また、途中で分岐したクラックは、最大耐力後、徐々に閉じ始め、クラックとして確認するのが困難になる現象も観察された。さらに最大耐力後、一次破壊開始の予測値と観測値の相違が減少する傾向にある。これは、荷重が減少

していくと、ダメージを受けていない弾性部分は回復し、また、メインクラック以外の分岐クラックは徐々に閉じ始め、メインクラッキングゾーンへのひずみの局所化が進行するので[16]、顕微鏡によるクラック観察が容易になったためと考えられる。

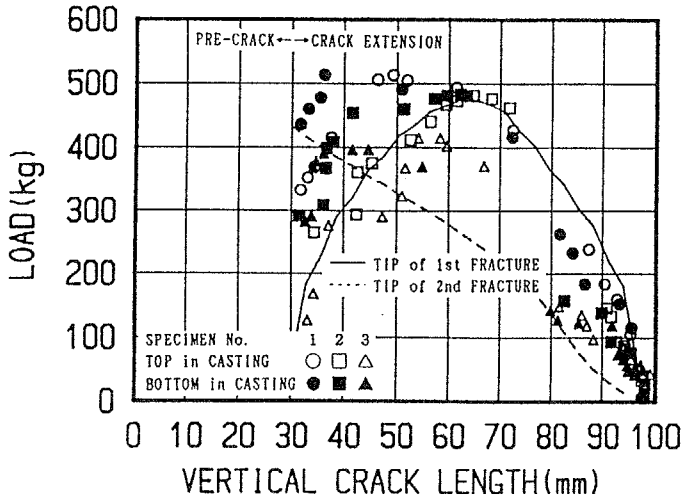


(1) 4週試験

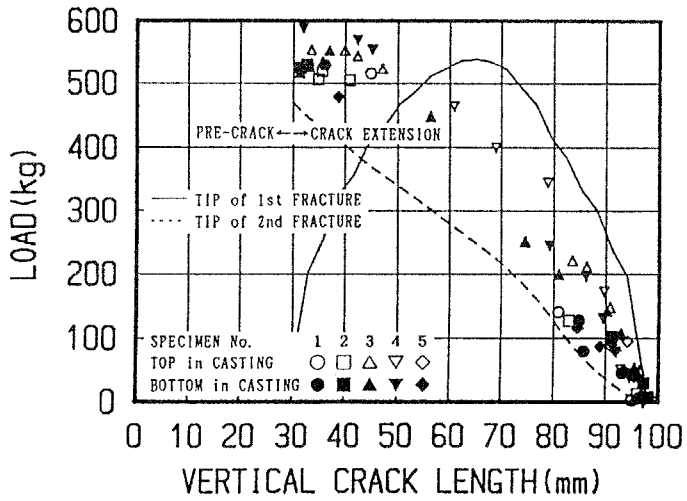


(2) 1年試験

図－5.18 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM20-1シリーズ

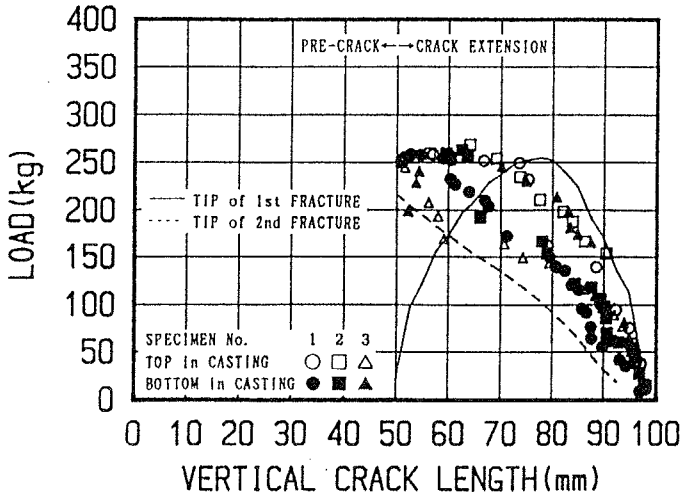


(1) 4週試験

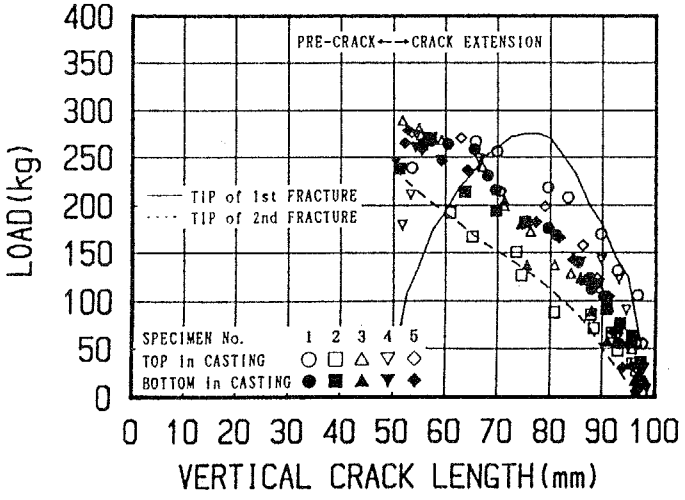


(2) 1年試験

図－5.19 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM20-2シリーズ

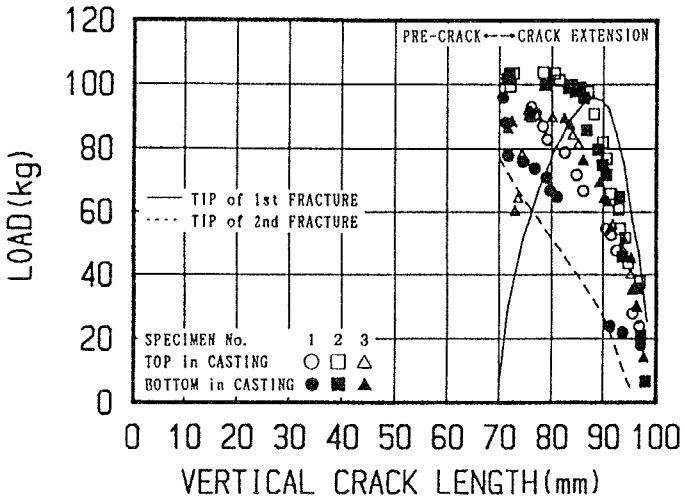


(1) 4週試験

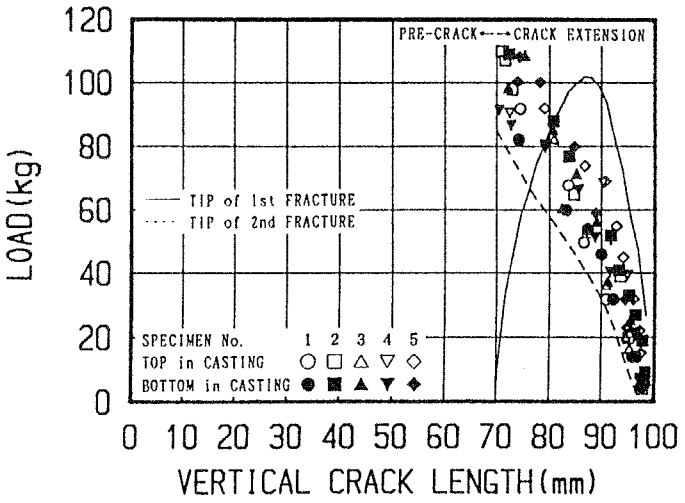


(2) 1年試験

図－5.20 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM20-3シリーズ

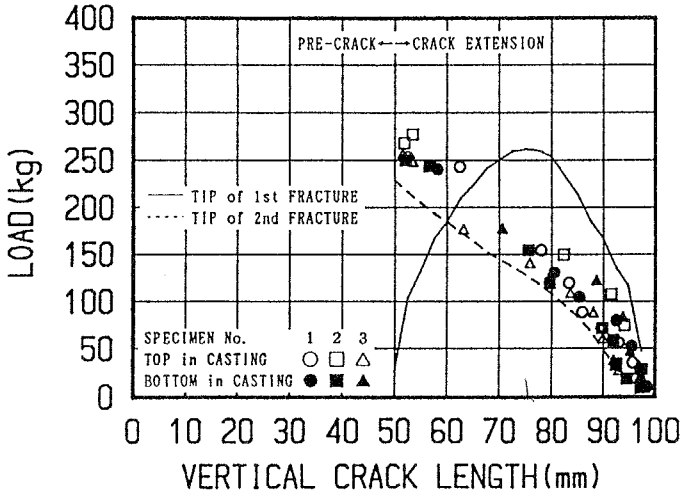


(1) 4週試験

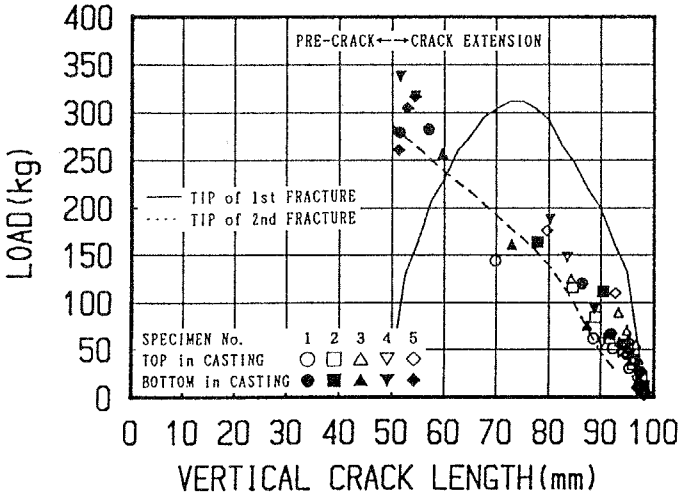


(2) 1年試験

図－5.21 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM20-4シリーズ

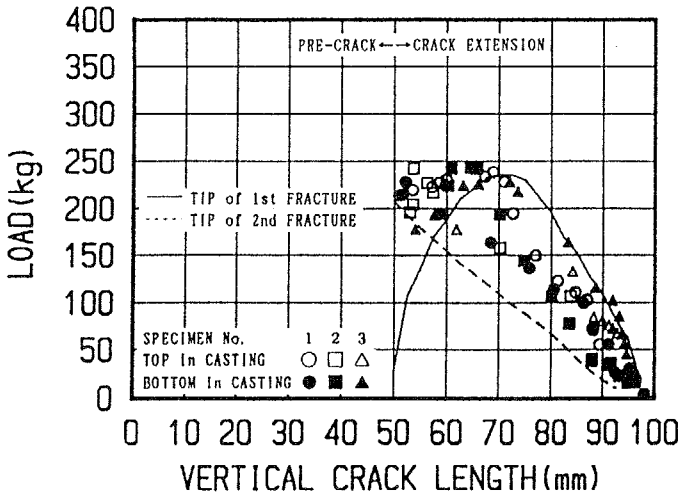


(1) 4週試験

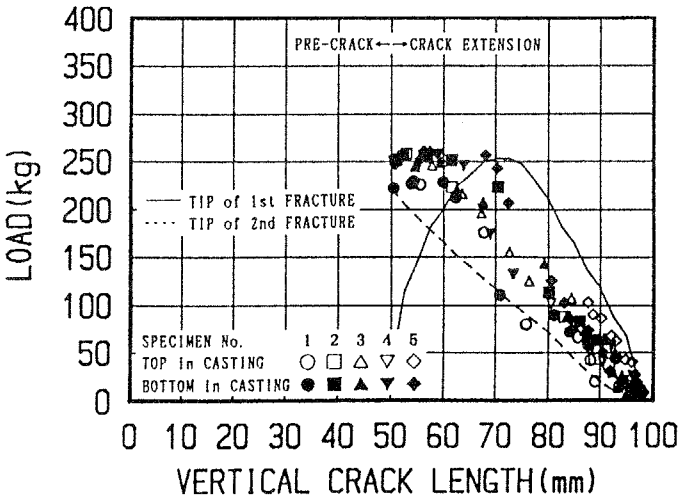


(2) 1年試験

図－5.22 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM20-5シリーズ

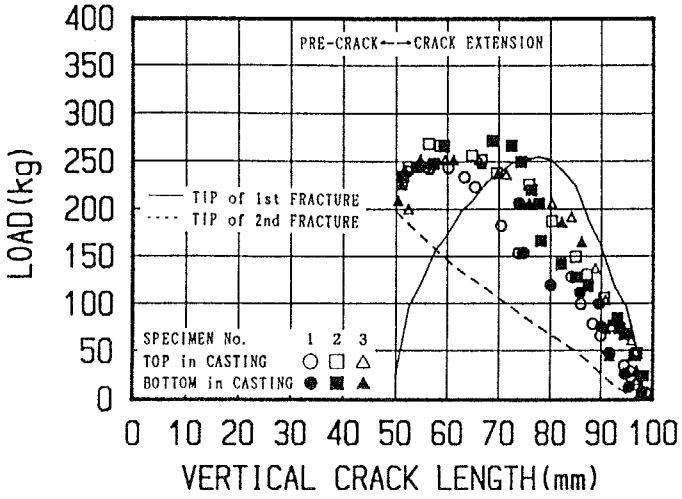


(1) 4週試験

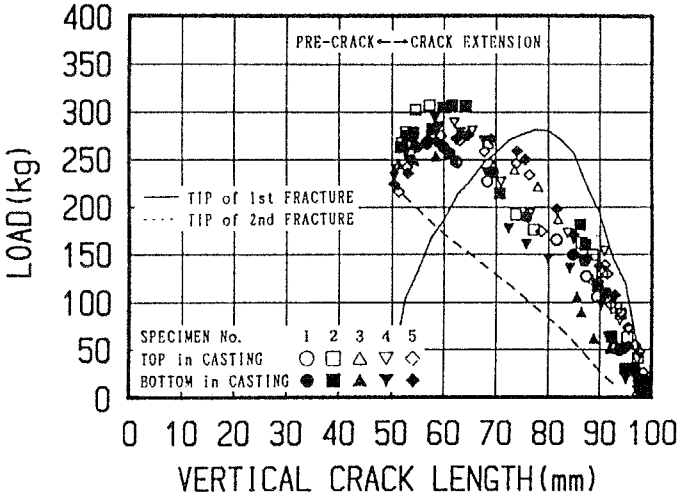


(2) 1年試験

図－5.23 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM05-1シリーズ

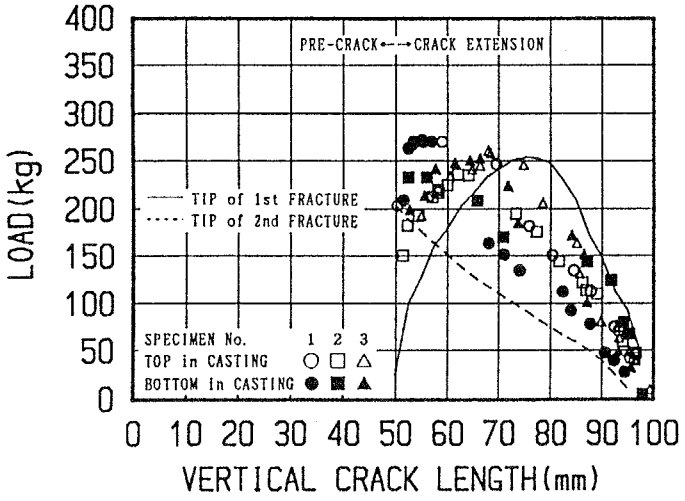


(1) 4週試験

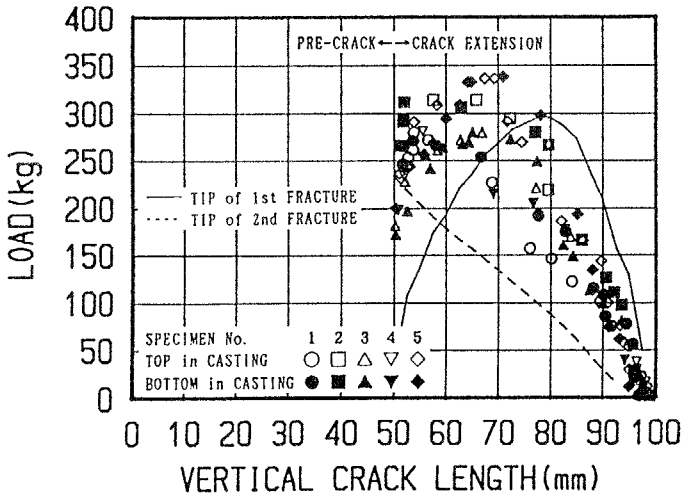


(2) 1年試験

図－5.24 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM10-1シリーズ

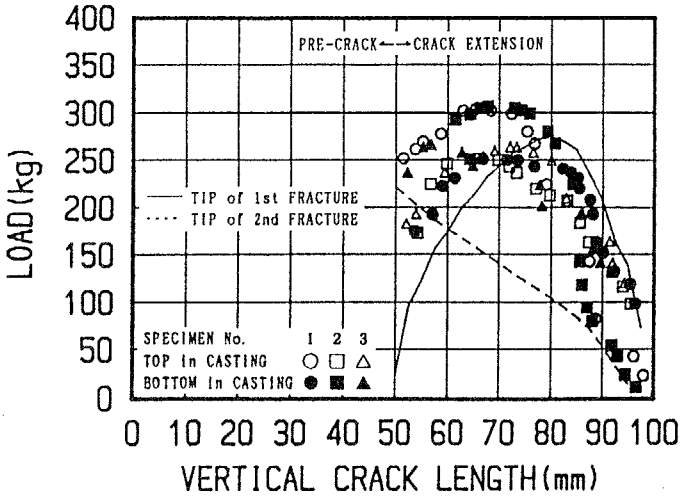


(1) 4週試験

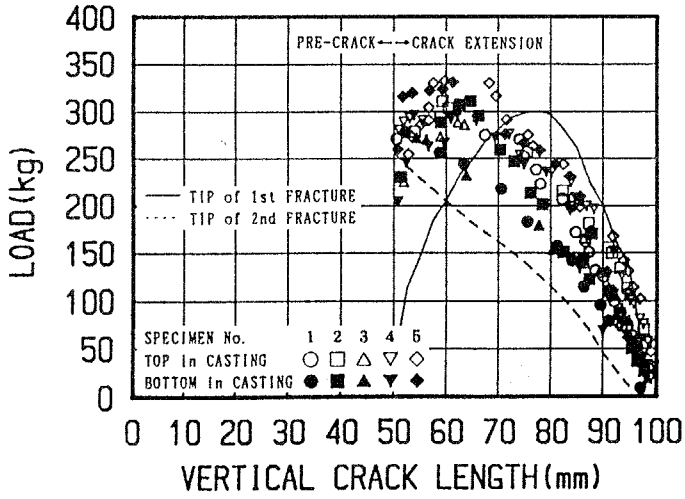


(2) 1年試験

図－5.25 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM15-1シリーズ

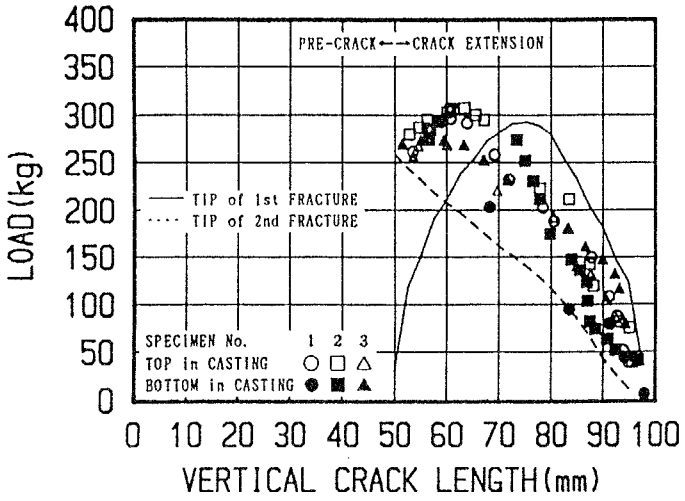


(1) 4週試験

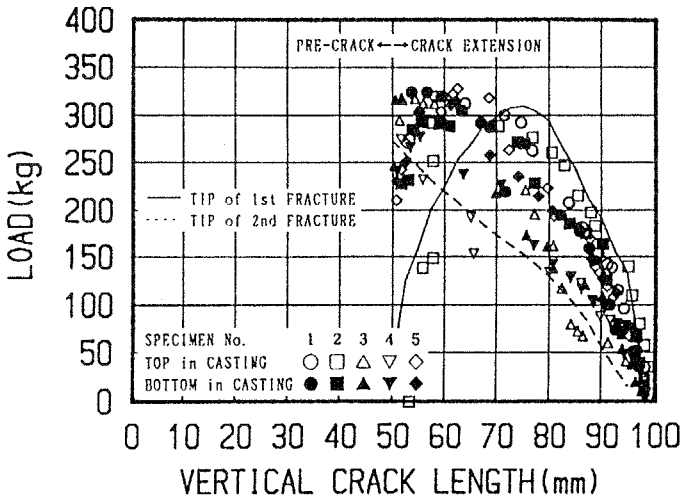


(2) 1年試験

図－5.26　解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PM25-1シリーズ

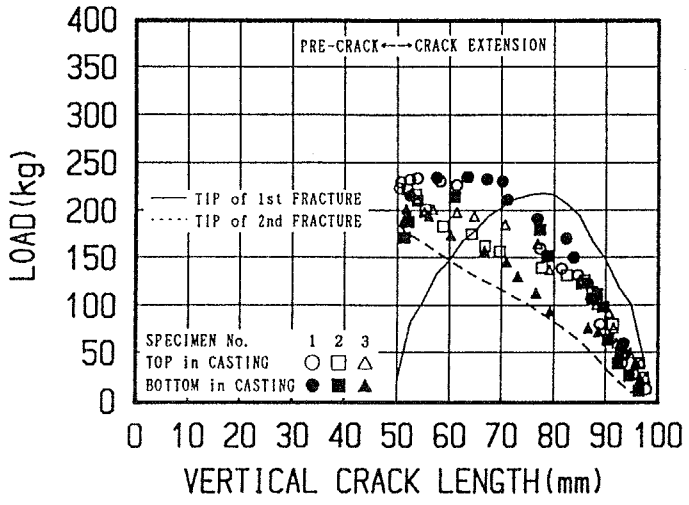


(1) 4週試験

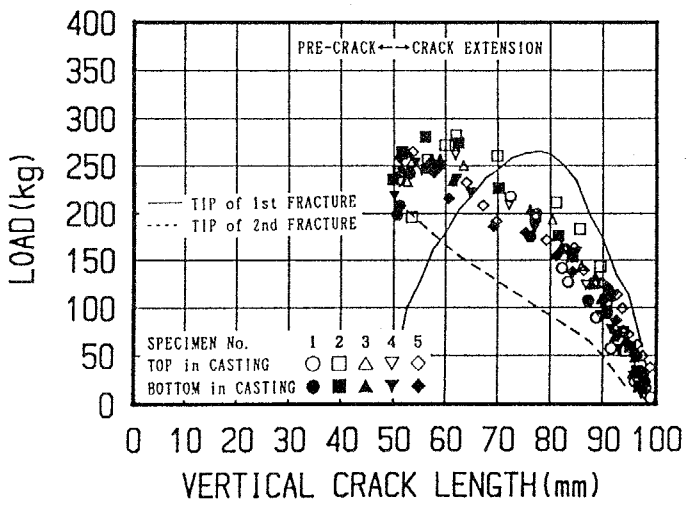


(2) 1年試験

図－5.27 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PL20-1シリーズ

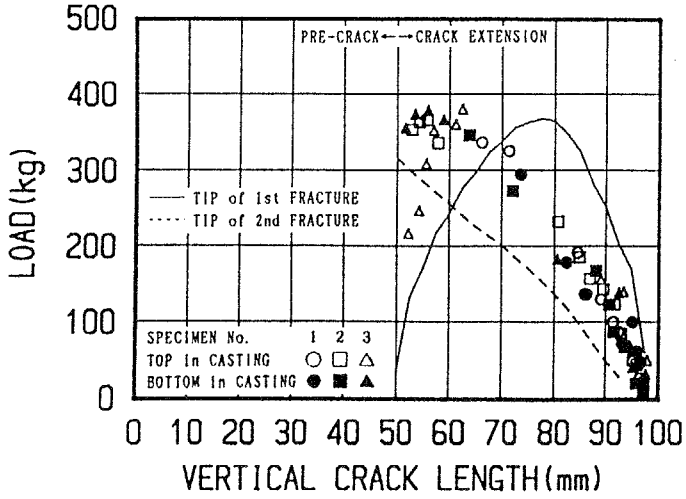


(1) 4週試験

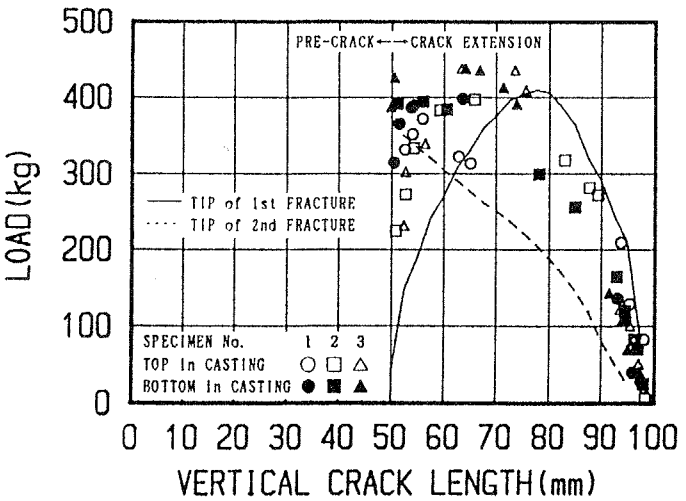


(2) 1年試験

図－5.28 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：3PH20-1シリーズ

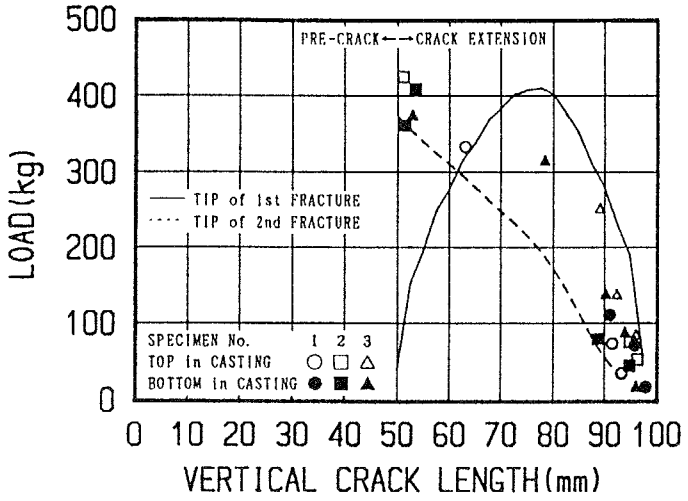


(1) 4週試験

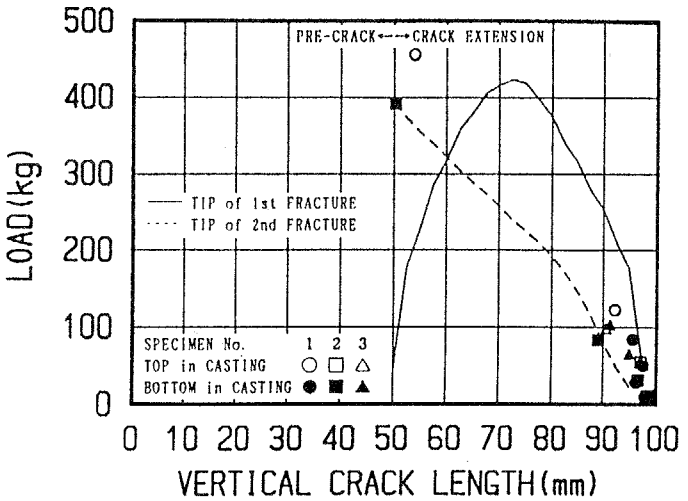


(2) 1年試験

図－5.29 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：4PM20-7シリーズ

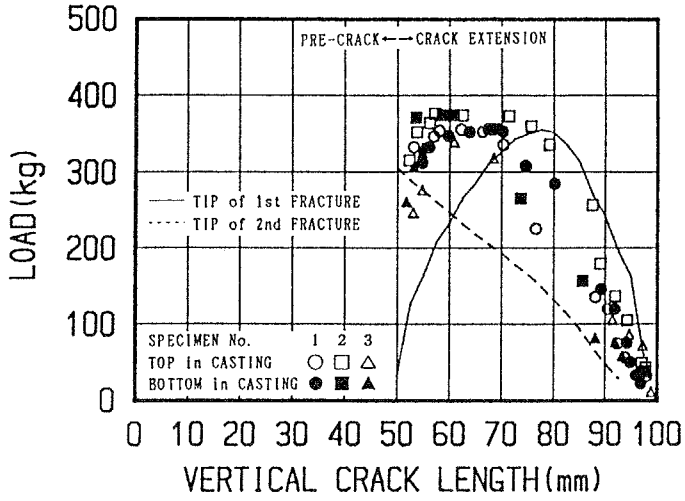


(1) 4週試験

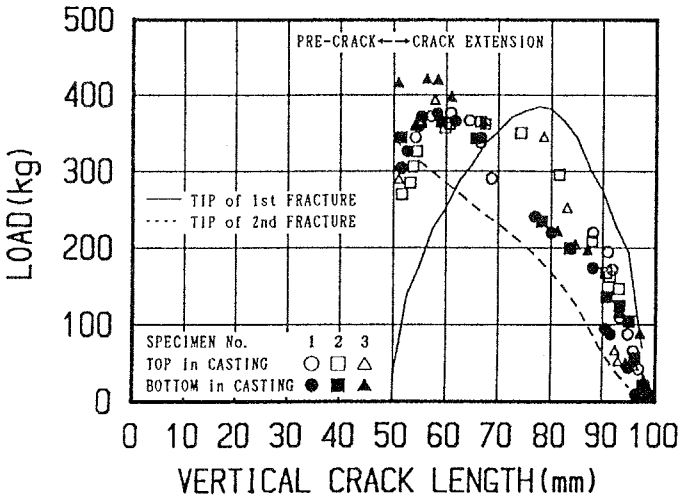


(2) 1年試験

図－5.30 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：4PM20-8シリーズ

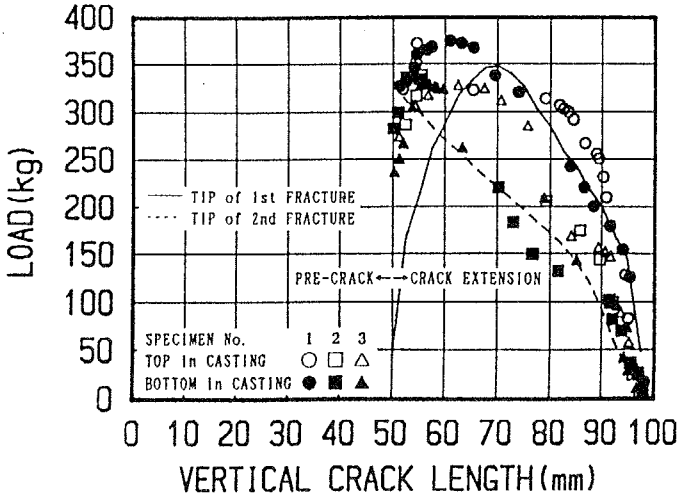


(1) 4週試験

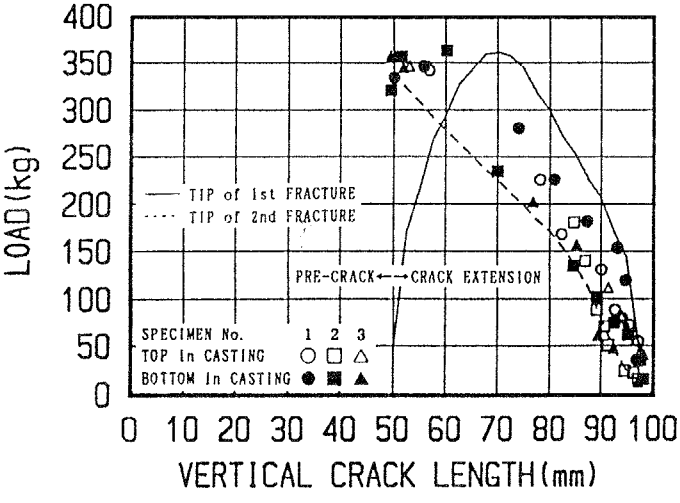


(2) 1年試験

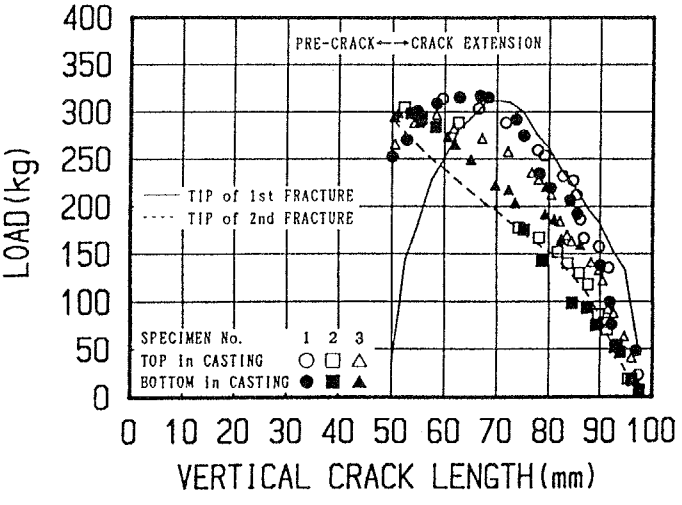
図－5.31 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：4PH20-2シリーズ



(1) 3DM20-7シリーズ



(2) 3DM20-8シリーズ



(3) 3DH20-2シリーズ

図－5.32 解析による軟化領域進展と顕微鏡観測によるクラック進展の比較：気中養生試験体

5.4 まとめ

本章では、ノッチを有するコンクリート曲げ試験結果に対して逆解析法により求めた引張軟化特性を用いて、初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、湿乾養生および材令が引張軟化特性に及ぼす影響について考察した。また、顕微鏡で観測したクラック進展挙動と引張軟化特性を用いた解析による軟化領域進展とを比較することによって、バイリニア型引張軟化モデルが、破壊現象の何を表し得るのかを検討し、軟化領域内の破壊メカニズムを各荷重段階に対して推測した。本章で得られた主な結論を以下に要約する。

(1) 本解析で推定された引張軟化特性は、クラック前方の軟化領域における力学的特性を良く近似している。

(2) ノッチ深さが増加すると、一次破壊の負勾配が大きくなり、より脆性的な軟化特性を示す傾向がみられる（1年試験）。

(3) 載荷速度が速くなるほど、引張強度および一次破壊の負勾配の値が増加し、より脆性破壊的な特性を示す。

(4) 引張軟化特性は、最大骨材寸法に大きく影響され、最大骨材寸法が小さくなると、一次破壊（マイクロクラッキング）が卓越し、大きくなると二次破壊（骨材のブリッジング）が卓越するという破壊メカニズムの相違を示している。したがって、本解析で用いたバイリニア型軟化モデルは、軟化領域内の力学的挙動を記述する最も簡単なモデルであるが、コンクリート内部の破壊のメカニズムを相対的に評価することができるといえる。

(5) 水セメント比が減少していくと、一次および二次破壊の負勾配が急勾配となり、それぞれの破壊終了時のクラック幅が減少して脆性化する。

(6) 4点曲げは3点曲げより、一次破壊の負勾配が減少し、二次破壊の負勾配が増加する傾向を示す。

(7) 気中養生試験体は水中養生試験体より、引張強度が30～50%増加し、一次破壊で消費されるエネルギーが減少するので、一次破壊の負勾配は水中養

生の２倍となるが、二次破壊に対する抵抗力（エネルギー）は大きい。

(8)材令１年の試験体は材令４週の試験体より、一次および二次破壊の負勾配が急勾配となり、それぞれの破壊終了時のクラック幅が減少して脆性化する。

(9)モルタルの引張軟化特性は、試験体寸法に依存しない材料特性であるといえる。

(10)最大荷重の80%以下では、最大耐力前の非線形性に影響を与えるダメージが軟化領域内に発生しているが（解析では最大荷重の約10%で軟化開始）、倍率50倍の顕微鏡ではクラックとして観測できるまでに成長していない。

(11)最大荷重の80%の荷重を超えると、個々のダメージが成長、連結し始め、倍率50倍の顕微鏡でもクラックとして観察が可能になる。

(12)最大耐力後、荷重が減少していくと、ダメージを受けていない弾性部分は回復し、また、メインクラック以外の分岐クラックは徐々に閉じ始め、メインクラッキングゾーンへのひずみの局所化が進行する。したがって顕微鏡によるクラック観察が容易になり、一次破壊開始の予測値と観測値の相違が減少する。

(13)顕微鏡観測の精度に関しては検討しておらず、したがって今後、軟化領域内の破壊メカニズムをより詳細に推測していくためには、より高感度な検出法による軟化領域の観測および実際の物理現象をより詳細に記述できるモデルの開発が必要である。

第６章　アコースティック・エミッションによる軟化領域の推定法

6.1 はじめに

前章までの考察により、軟化領域における応力伝達機構は、クラック先端前方の不連続なマイクロクラック、あるいはクラック先端後方の蛇行したクラック間における摩擦および粗骨材によるブリッジング（クラック拘束）に起因することが明らかになった。

第5章では、軟化領域における力学的特性を、伝達応力と仮想ひび割れ幅の関係でモデル化しており、粗骨材によるクラック拘束とは実際にどんなものなのか、あるいはどのように引張応力を伝達できるのかということについては不明である。

本章では、粗骨材のクラック拘束のメカニズムを解明するための一助として、円柱状の疑似骨材を含む簡単なモデルコンクリート試験体を用いて、クラック進展に及ぼす骨材の影響について検討する。また、軟化領域の進展および大きさを推定するために、アコースティック・エミッションを計測し、3次元位置標定およびスペクトル解析を行う。

6.2　アコースティック・エミッション

6.2.1　計測と信号処理

固体材料が変形もしくは破壊する際には、内部に蓄積されたエネルギーが急激に解放されるため、その一部は過渡的な弾性波となって伝播する。その弾性波がアコースティック・エミッション（Acoustic Emission、以後ＡＥと略す）である。

ＡＥの計測装置は、受信用センサー、増幅器、収集・選別・記録装置によって構成されている。本計測システムのブロック図を図－6.1に示し、写真を写真－6.1に示す。また、ＡＥ計測に用いたセンサー、プリアンプ、ローカルプロッセサ、ウェーブメモリの主な仕様および設定値を表－6.1に示す。

表－6.1　ＡＥ計測装置の仕様および設定値

センサー	共振周波数	140kHz
プリアンプ	ﾊｲﾊﾟｽﾌｨﾙﾀｰ	50kHz
	増幅	40dB
ローカル	増幅	20dB
プロセッサ	しきい値	0.2V
	ﾃﾞｯﾄﾞﾀｲﾑ	1msec
	ｺｲﾝｼﾃﾞﾝｽ	32μsec
	ﾋﾟｰｸｻｰﾁﾀｲﾑ	64μsec
	ﾘｿﾞﾙｰｼｮﾝ	64μsec
ウェーブメモリ	振幅	1Vp-p
	ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ	100nsec
	波形長	1k word
	ﾃﾞｨﾚｲ	-512 word

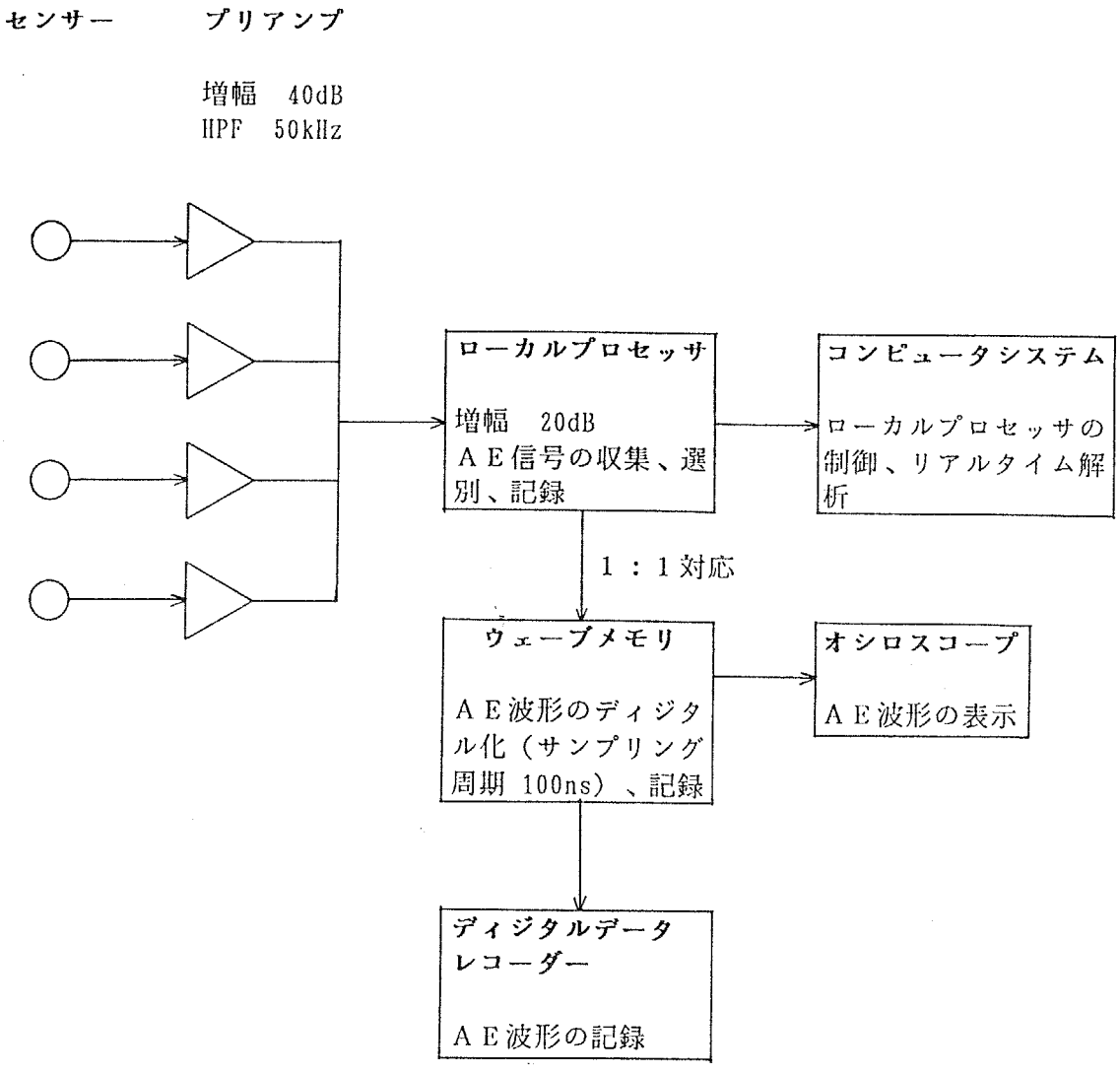
ＡＥは、試験体内部のダメージの状況を、リアルタイムで測定できる方法として有望視されており、多数の研究が報告されている[1)-5)]。ＡＥ信号は、主に次のように解析されている。

1）外力による内部のダメージの様子を知るために、ＡＥ発生頻度を計測する。
2）限界エネルギー解放率を決定するために、ＡＥエネルギーを使用する。
3）異なる荷重段階で生じるダメージのメカニズムの相違を区別するために、ＡＥ信号の周波数成分、振幅、立ち上がり時間を使用する。
4）複数個のＡＥセンサーに到達する同一ＡＥ信号の時間差から、ＡＥ発生源を標定し、クラックの進展や軟化領域の大きさを検討する。
5）ＡＥの波形解析により、マイクロクラックの大きさ、方向、タイプを識別する。

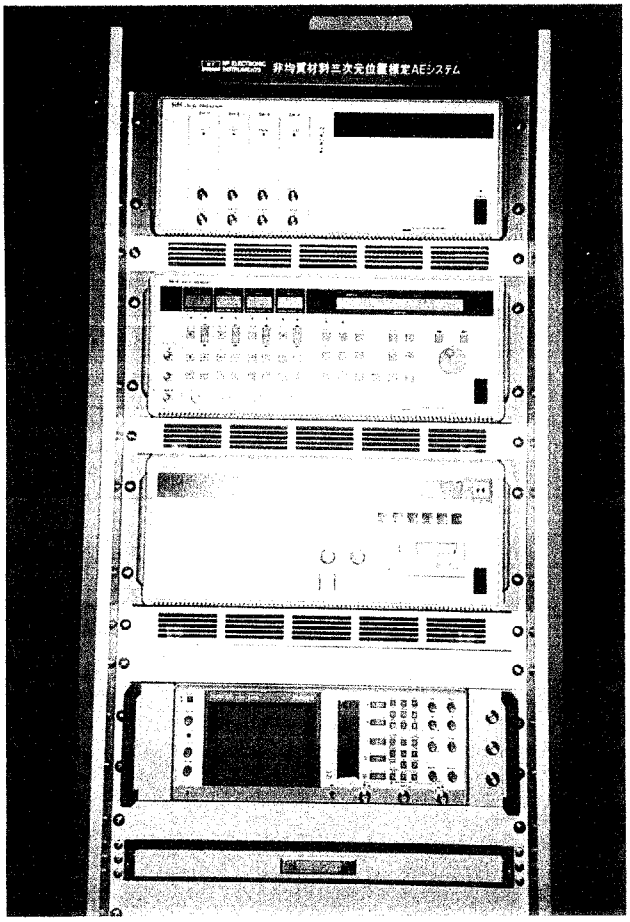
上記４）、５）の解析法は、コンクリート内部の破壊メカニズムを知る上で有力な方法である。しかしながら、複数個のＡＥセンサーに到達する同一ＡＥ信号の時間差から、ＡＥ発生源を標定する場合、その標定位置は、実際に観察されるひび割れを中心に、かなりランダムに分布する。その原因として次のようなものが考えられる。

1）観察されるひび割れ以外にもダメージが実際に存在する。
2）ＡＥ信号の到達時間をしきい値を超えた時間とした場合、真の到達時間より遅れることがある（図－6.2）。
3）荷重によるダメージとは関係のないＡＥ信号が存在する。
4）異なるＡＥ信号を同一ＡＥ信号として検出してしまう。

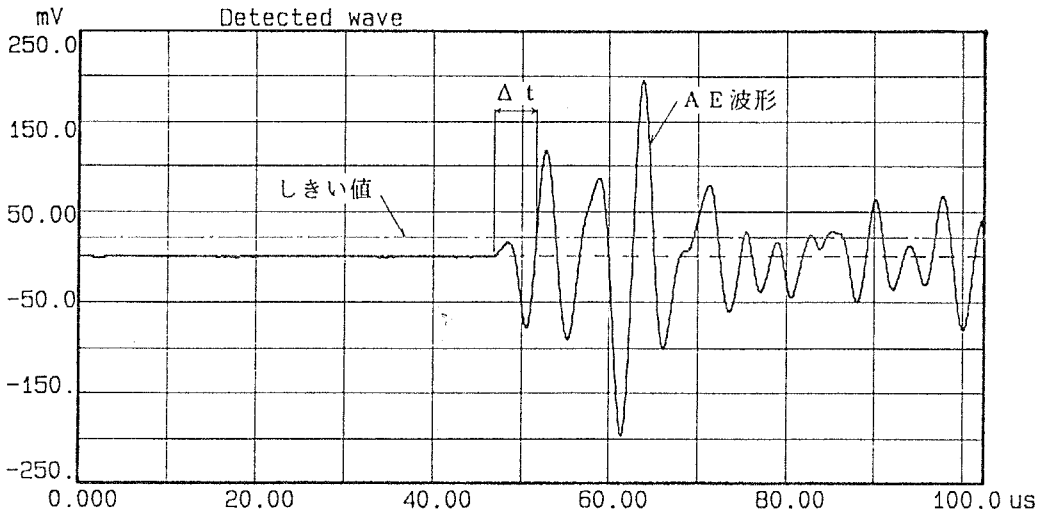
1）の場合、問題はない。２）の誤差は、到達時間をＡＥ波形データから読みとることによって解消できる。３）のようなＡＥ信号の存在は、載荷前よりＡＥ信号が散発的に発生する（図－6.3）ことからも明らかであるが、ダメージによるＡＥ信号と区別するためには、詳細なＡＥ波形のスペクトル解析が必要である。４）の問題もスペクトル解析により、解決できるものと考えられる。本章では、コンクリートの粗骨材によるクラック拘束挙動をより明確に把握するために、ＡＥ波形より真のＡＥ到達時間を決定し、さらに、ＡＥ波形のスペクトル解析を行い、そのスペクトルパターンを比較することによって、ダメージに起因したと考えられるＡＥ信号を識別する。



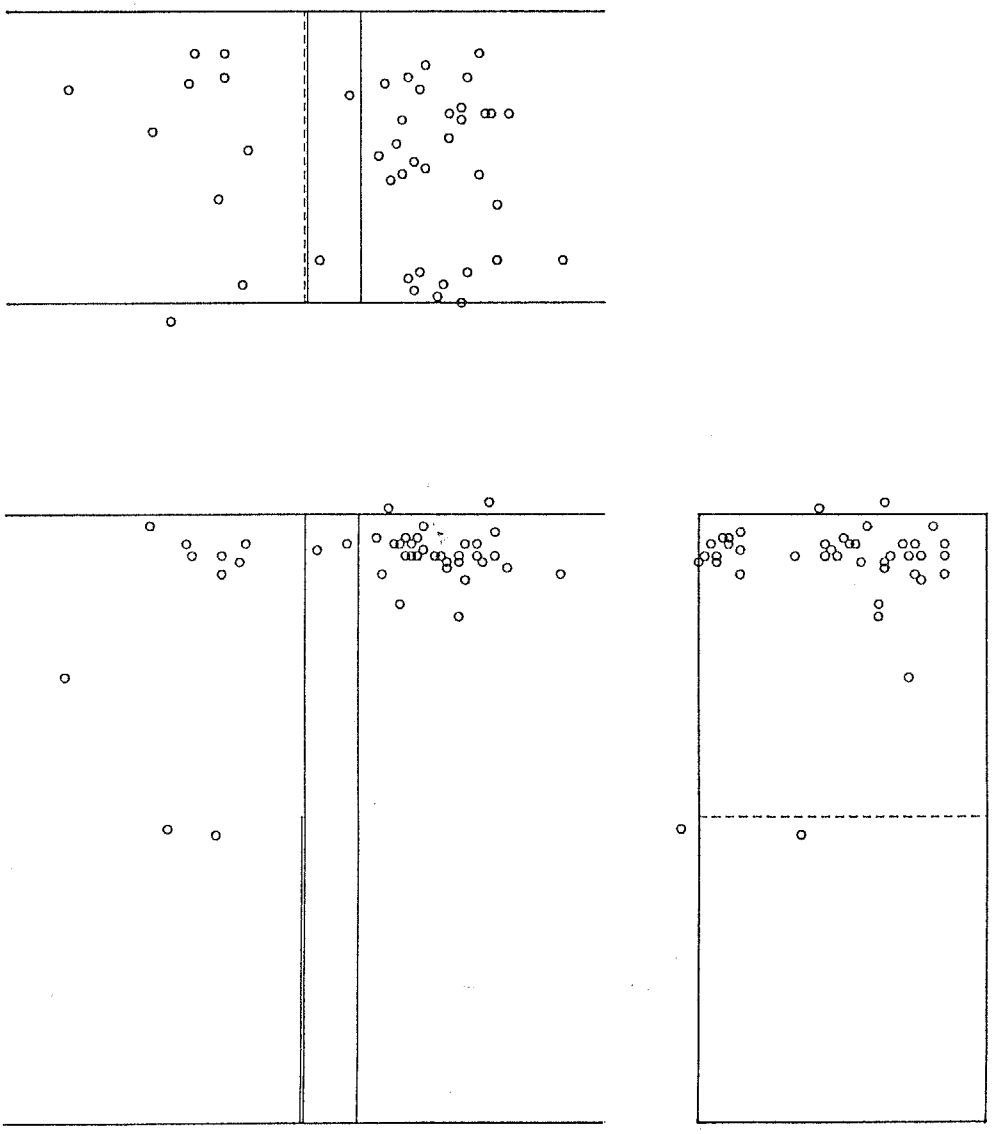
図－6.1　ＡＥ計測システムのブロック図


非均質材料三次元位置標定AEシステム
← ローカルプロセッサ
← ウェーブメモリ
← ディジタルデータレコーダー
← オシロスコープ

写真－6.1　ＡＥ計測装置



図－6.2　しきい値とＡＥ信号到達時間の関係



図－6.3　載荷前のＡＥ発生例：PL-61B

6．2．2　スペクトル解析法

本解析に用いたスペクトル推定法は、最大エントロピー法（以後、ＭＥＭと略す）である。信号処理において測定できるデータの数は有限であり、十分大きなラグに対する自己相関関数は未知である。それ故、高速フーリエ変換（以後、ＦＦＴと略す）によるスペクトル推定法では、データを補って処理するのである。一方ＭＥＭでは、未知のデータはできるだけ未知のままに、すなわち、信号の情報エントロピーをできるだけ大きくして、測定できるラグの自己相関関数からスペクトルを推定する。ＭＥＭは、ＦＦＴと比較すると、短いデータからもスペクトルの推定が可能であり、その分解能が極めて高いという優位性をもっている。また低い次数で解析を行うことにより、スペクトルが平滑化され、波形の特性を分類することができ、本研究の目的に適した方法であると考えられる。以下に、情報エントロピーとＭＥＭの考え方を要約する[6)]。

ある事象のとりうる状態がｍ個あり、m_jの起こる確率がp_jである場合を考える。もし、前もってすべてのp_jが等しいということがわかっていれば、この系についての不確定さはなく、新しい情報のもつ意味はない。これに反し、ある特別なp_jの値を規定できるならば、この系についてある情報量を得ることになる。ある事象の起こる確率は、情報量と関連づけられる。さらに、ある確率を規定した事象が起こりにくければ、その仕様書はこの系について大量の情報を知らせることになる。確率p_jをもつ事象m_jが生起したとすれば、これの与える情報量I_jを

$$I_j = k \ln \frac{1}{p_j} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (6.1)$$

と定義しうる。ここでｋは定数であり、対数の底が２のとき１である。情報を相加的な量として考えるので、上式で対数を使用している。

次に、長時間Ｔにわたって、この系を観察した場合を考える。時間Ｔが非常に長い場合、時間Ｔの間に、m_1、m_2などの事象が起こる期待値は $p_1 T$、

p_2Tなどである。したがってこの系についての全情報量は

$$I_{total} = k(p_1 T \ln \frac{1}{p_1} + p_2 T \ln \frac{1}{p_2} + \cdots\cdots\cdots) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6.2)$$

となる。単位時間当たりの平均情報量（H）はエントロピーと呼ばれている[7]。

$$H = \frac{I_{total}}{T} = -k \sum_{j=1}^{m} p_j \ln p_j \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6.3)$$

情報と確率に関する上述の議論から、エントロピーは一連の確率によって記述された不確定さの尺度である。p_jの一つが１で、その他すべて０である系のエントロピーは、ゼロである。この場合、系は完全に決定されており、不確定さは存在しない。その他の場合、エントロピーは正の値となる。エントロピーとは本来熱力学や統計学の分野で定義された概念で、無秩序あるいは不規則さの順位や程度を表す。転じて、情報理論では、未知（無知）の度合いを表す概念として導入された[6]。

最大エントロピーの概念をスペクトル解析に適用する場合、正規確率分布をもつ時系列のエントロピーH（正確にはエントロピー密度ｈ）と時系列のスペクトルP(f)の間の次の関係式を利用する[8),9)]。

$$h=\frac{1}{4f_N}\int_{-f_N}^{f_N}\log P(f)df+\frac{1}{2}\log 2f_N \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (6.4)$$

ここで、f_Nは Nyquist周波数であり、(6.4)式は、時系列のエントロピー密度hは、その時系列のスペクトルの対数を周波数について、f_Nの範囲で積分した量であることを示している。スペクトルを計算するのには、スペクトルと自己相関$\phi(k)$の関係（Wiener-Khintchineの関係式）

$$P(f)=\Delta t\sum_{k=-\infty}^{\infty}\phi(k)\exp(-i2\pi fk\Delta t) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (6.5)$$

を用いる。ここで、Δ tはデータのサンプリング間隔である。既知の自己相関φ(0)、φ(1)、・・・φ(m-1)に対しては(6.5)式が成立するという制約のもとで、未知の自己相関に対して(6.4)式を最大にするように推定するのが、ＭＥＭのスペクトル推定法である。この推定法は、未知の情報に対しては最大の不確定さを表すが、既知の情報に対しては整合性がある。条件付き変分法により、よく知られたＭＥＭスペクトルに対する次式が得られる[8),9)]。

$$P(f)=\frac{P_m}{2f_N\left|1+\sum_{j=1}^{m-1}\gamma_j\exp(-i2\pi fj\Delta t)\right|^2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (6.6)$$

ここで、係数 γ_j は予測誤差フィルター、P_m はこのフィルターからの平均出力であり、Burgアルゴリズム[10)]によって効率的に計算できる。

6.3　実験方法

6.3.1　試験体

モルタル、コンクリートおよび多孔質のアルミナセラミックスを疑似骨材としたモデルコンクリートの三種類の試験体を用意した。さらにモデルコンクリートは、疑似骨材（厚さ9mmのプレートまたは直径15mmの円柱棒）の配置により、図－6.4 に示す６タイプを用意した。使用した天然骨材は、第３章のコンクリート曲げ試験体と同一である。アルミナセラミックスの化学組成および物理的性質を表－6.2 に示す。アルミナセラミックスは、吸水率が大きいため、打設前に水に浸しておく必要があった。また、アルミナセラミックスとモルタル間の４週曲げ試験による付着強度は、約18kg/cm^{2}であり、安山岩（約14kg/cm^2）と花こう岩（約22kg/cm^2）の付着強度のほぼ中間の値である。

モルタルおよびモデルコンクリートの調合は、第３章の表－3.3 の調合名称Ｍ０５と同じであり、コンクリートはＭ２０と同じである。試験体は、100X100X400mmの鋼製型枠で製作したが、打設から脱型迄の間、疑似骨材が正確な位置を保持できるように、テンプレートを用いて打設した。約24時間後に脱型、その後20℃の恒温水槽に移して水中養生を行った。試験体は材令約１年で水槽から取り出し、ＡＥ波形の減衰をできるだけ抑えるため、試験体をダイヤモンドカッターで縦割りした。したがって試験体寸法は、約50(W)X100(H)X400(L)mmである。深さ50mmのノッチは、モルタルおよびコンクリートの場合は厚さ1.2mmのダイヤモンドカッターで導入し、モデルコンクリートの場合は、厚さ0.8mmのオイルを塗布したステンレスプレートを打設時に挿入することによって導入した。各試験体の寸法および重量の測定結果を、第３章に準じて表－6.3 に示す。ただし左右の値は、ＡＥセンサー位置（中央より左右にそれぞれ40mm）における寸法である。

個々の試験体名は以下のように表す。

Ｘ－試験体番号＋ＴまたはＢ

Ｘは、モルタルおよびコンクリートの場合、それぞれＭＴおよびＣＴとし、モ

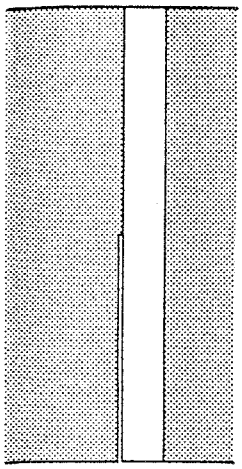
デルコンクリートの場合、図－6.4 に示す各タイプの記号（ＰＬ、Ａ１、Ａ２、Ｓ３、Ｓ４、Ｓ５）とする。最後のＴまたはＢは、縦割りした試験体が打設時の上半分または下半分を表す。

表－6.2　アルミナセラミックスの化学組成および物理的性質

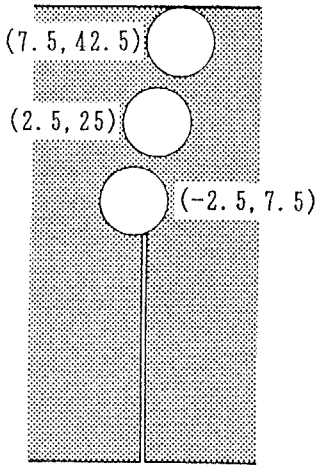
化学組成	(%)	物理的性質	
Al_2O_3	90.0	比　重	2.6
SiO_3	7.2	吸水率 (%)	13.0
Na_2O_3	0.5	耐圧強度 (kg/cm^2)	860.0
MgO	2.0	曲げ強度 (kg/cm^2)	280.0
Fe_2O_3	0.1	熱伝導率 (Kcal/mh℃)	3.0
		熱膨張係数 (10^{-4})	5.8

表－6.3　試験体寸法測定結果

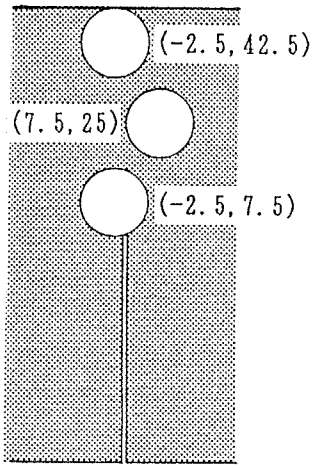
試験体	高さ(mm)			幅 (mm)			重 量
名称	左	中央	右	左	中央	右	(g)
PL-23T	100.30	100.30	100.30	46.00	46.25	46.40	4122
PL-23B	100.30	100.30	100.30	52.20	51.30	51.10	4652
PL-22B	100.40	100.40	100.40	49.90	49.20	49.10	4479
PL-61B	100.40	100.40	100.40	47.60	48.10	48.00	4445
A1-2T	100.10	100.10	100.10	52.10	51.95	51.80	4614
A1-2B	100.10	100.10	100.10	46.00	46.40	46.40	4357
A2-2T	100.00	100.00	100.00	45.90	47.20	47.50	4250
A2-2B	100.00	100.00	100.00	51.50	50.55	50.40	4738
S3-2T	100.00	100.00	100.00	46.40	46.65	46.50	4188
S3-2B	100.00	100.00	100.00	50.30	50.00	50.10	4678
S4-2T	100.10	100.10	100.10	47.00	47.85	48.40	4270
S4-2B	100.10	100.10	100.10	51.20	50.70	50.70	4757
S5-2T	99.90	99.90	99.90	43.80	44.90	45.10	4025
S5-2B	99.90	99.90	99.90	51.40	50.80	50.70	4753
MT-3T	100.65	100.65	100.60	45.70	46.45	46.45	4280
MT-4B	100.20	100.20	100.20	46.80	47.40	47.30	4420
CT-1T	100.70	100.70	100.70	47.10	48.15	48.20	4718
CT-2B	100.25	100.25	100.25	51.00	50.50	50.55	5020



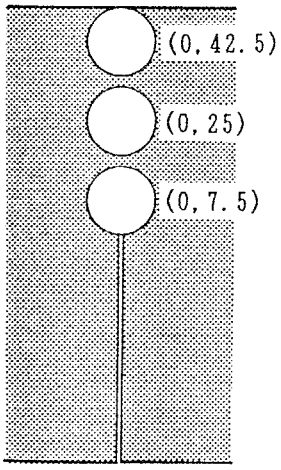
(1) ＰＬ



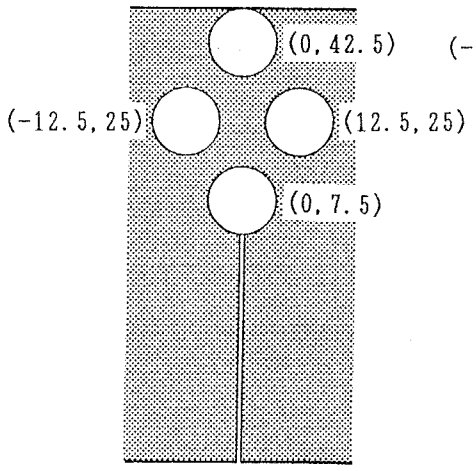
(2) Ａ１



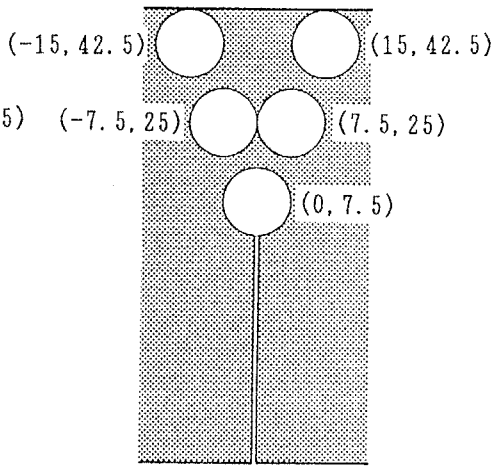
(3) Ａ２



(4) Ｓ３



(5) Ｓ４



(6) Ｓ５

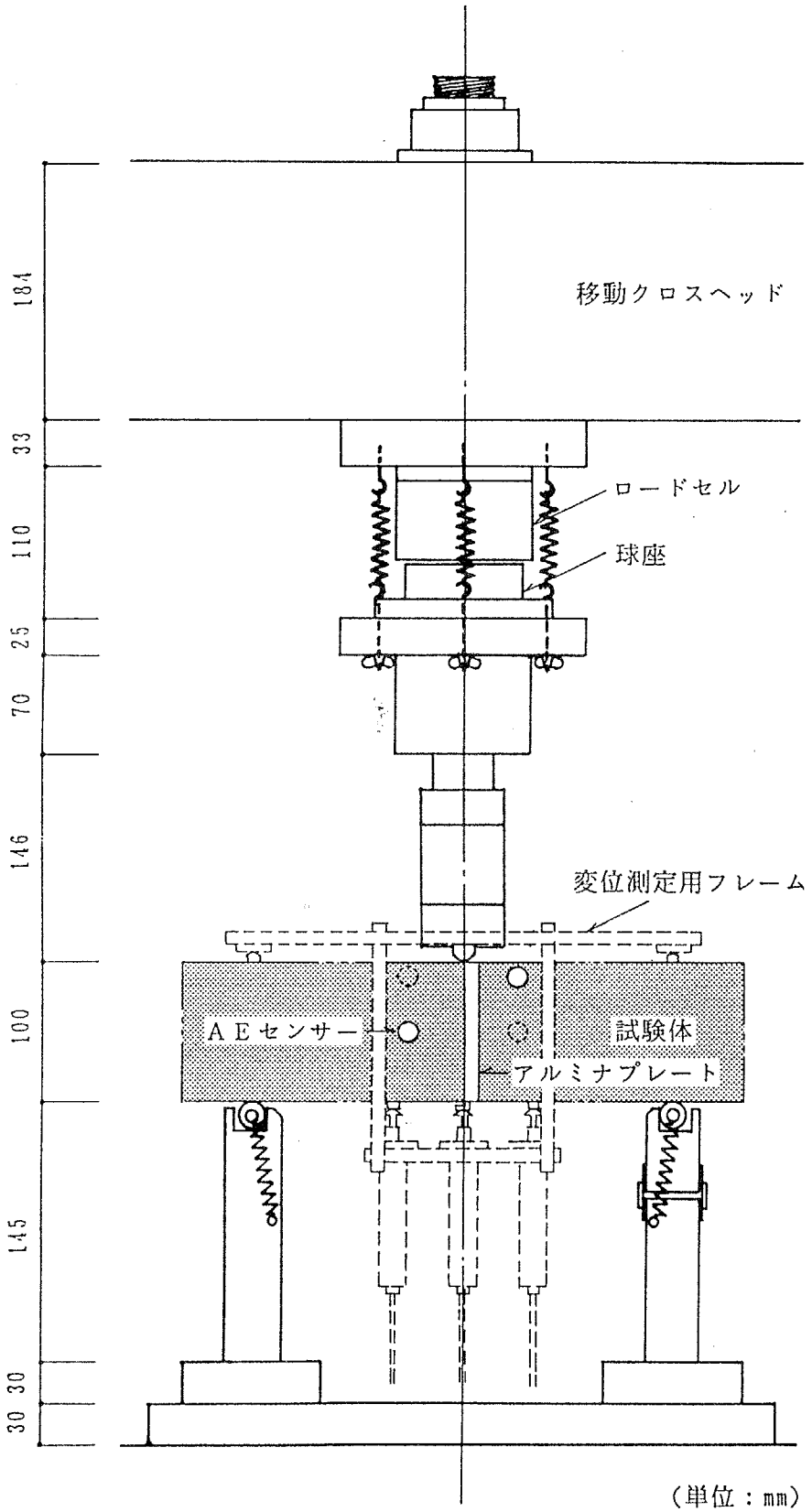
図－6.4　疑似骨材（9mm厚ﾌﾟﾚｰﾄと15mm直径ｼﾘﾝﾀﾞｰ）によるモデルコンクリートの種類と記号
（図中の数値は、ノッチ先端を原点とした場合のシリンダーの中心座標(mm)）

6．3．2　実験方法

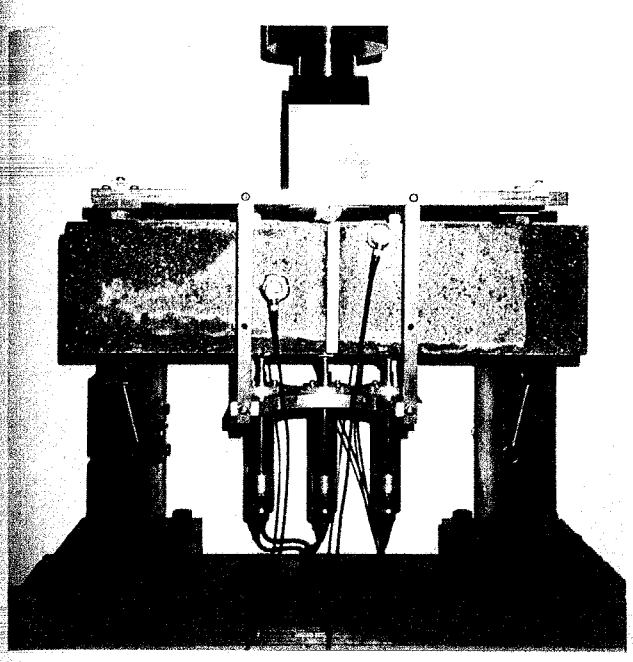
実験装置を図－6.5 に示す。また、実際のモデルコンクリート試験体の載荷の様子を写真－6.2～7 に示す。載荷方法および変位の測定方法は、第３章の曲げ試験と同じであるが、クリップゲージによる開口変位の測定は行っていない。本章の実験ではＡＥ計測を行うため、ＡＥセンサーを図－6.5 のように試験体に取り付ける必要がある。以下ＡＥセンサーの取り付け方法について述べる。

山田ら[2)]は、ＡＥの減衰特性に及ぼすセンサーの装着方法の影響を調べるための実験を行い、瞬間接着剤でセンサーを直接試験体に装着した場合が最も減衰が少なく、最適な方法であると述べている。しかしながら瞬間接着剤を用いる場合、取り外しの際、センサーを壊す恐れがある。それ故本実験では、瞬間接着剤と同じような密着性が得られる感熱接着剤を用いてセンサーを装着した。

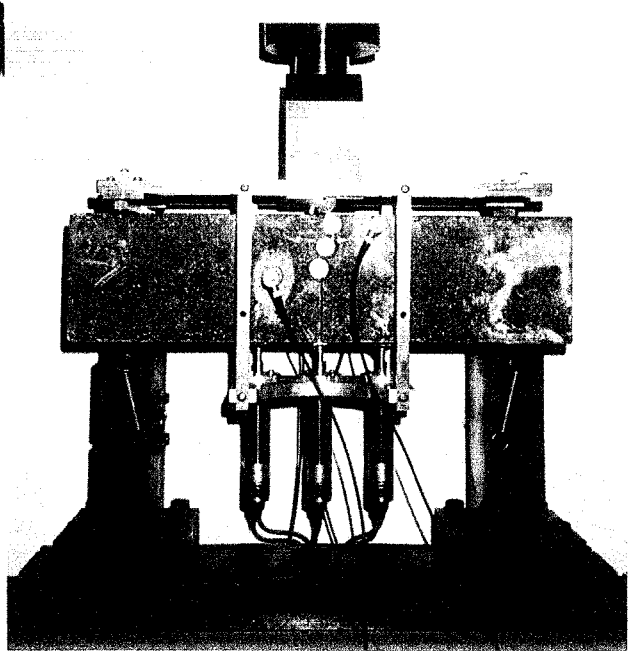
ＡＥ発生源の三次元位置標定を行う場合、同一平面上にない４個以上のセンサーが必要となるが、センサーの配置が三次元位置標定精度に影響を及ぼすと考えられる。そこで図－6.6 に示す４タイプのセンサー配置に対し、シャープペンシルの芯折による疑似ＡＥを用いて、三次元位置標定精度の検討を行った。疑似ＡＥは予測されるクラック経路上に入力し、その標定結果を図－6.7～9 に示す。ただし、ＡＥ伝播速度は、疑似ＡＥを用いて測定した結果（モルタル、モデルコンクリートは4000m/s、コンクリートは4500m/s）を使用している。図－6.7 からわかるように、標定結果は、TYPE－３、４よりＡＥ発生源に近い配置となるTYPE－１、２のほうが良く一致している。さらに図－6.8、9 から、TYPE－１は試験体上面で、TYPE－２は試験体背面で誤差が大きくなる傾向があるが、その他の誤差は１～２㎜以内である。それ故本実験では、TYPE－１または２のセンサー配置でＡＥ信号を検出した。


移動クロスヘッド
ロードセル
球座
変位測定用フレーム
AEセンサー
試験体
アルミナプレート
184
33
110
25
70
146
100
145
30
30
(単位：mm)

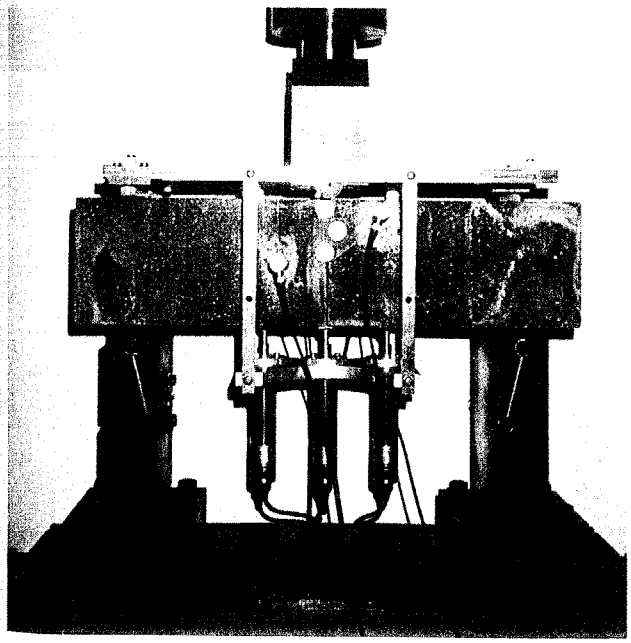
図－6.5　実験装置



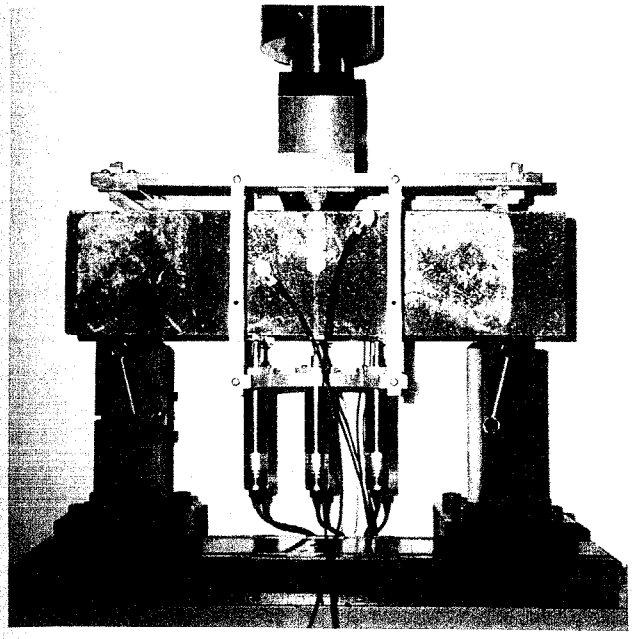
写真－6.2　ＰＬ型試験体と載荷装置



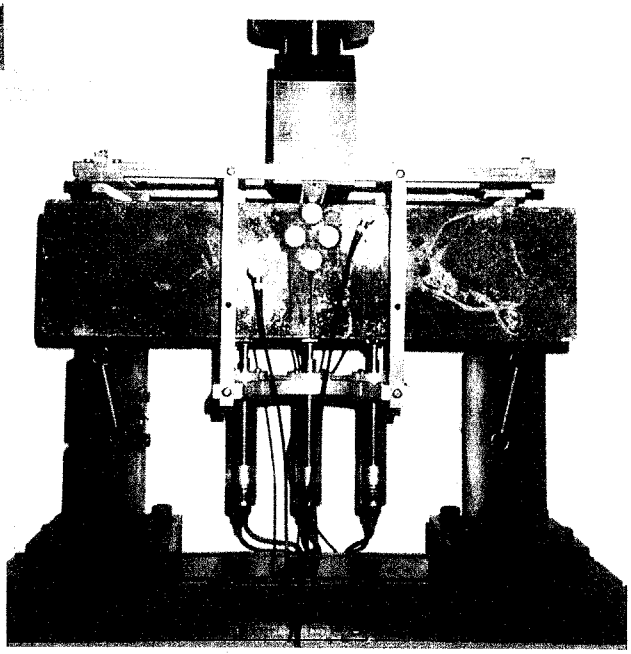
写真－6.3　Ａ１型試験体と載荷装置



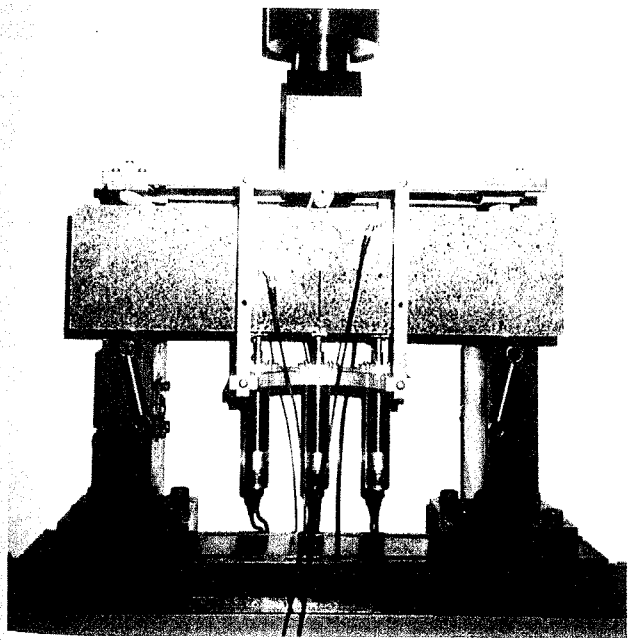
写真－6.4　Ａ２型試験体と載荷装置



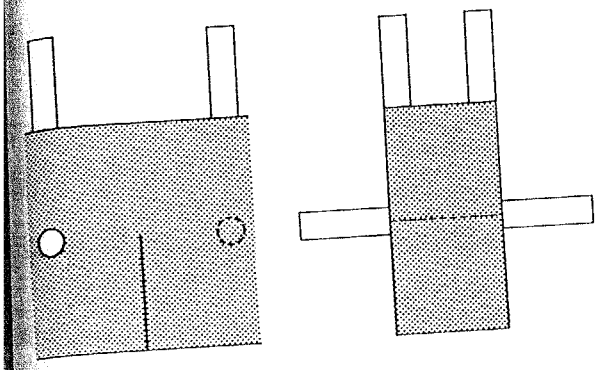
写真－6.5　S３型試験体と載荷装置



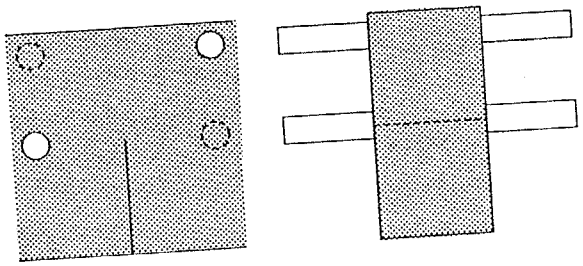
写真－6.6　S４型試験体と載荷装置



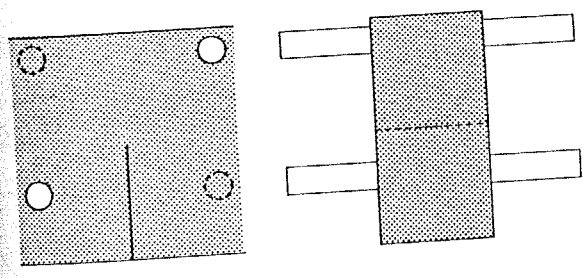
写真－6.7　S５型試験体と載荷装置



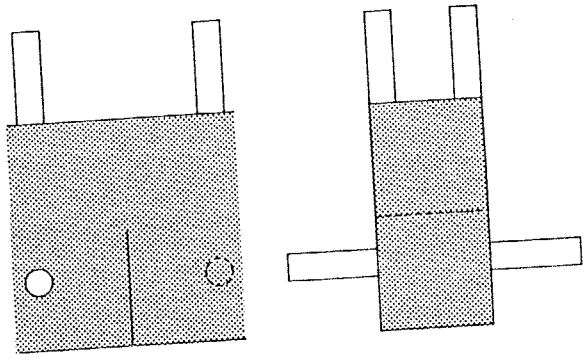
(1) TYPE-1



(2) TYPE-2

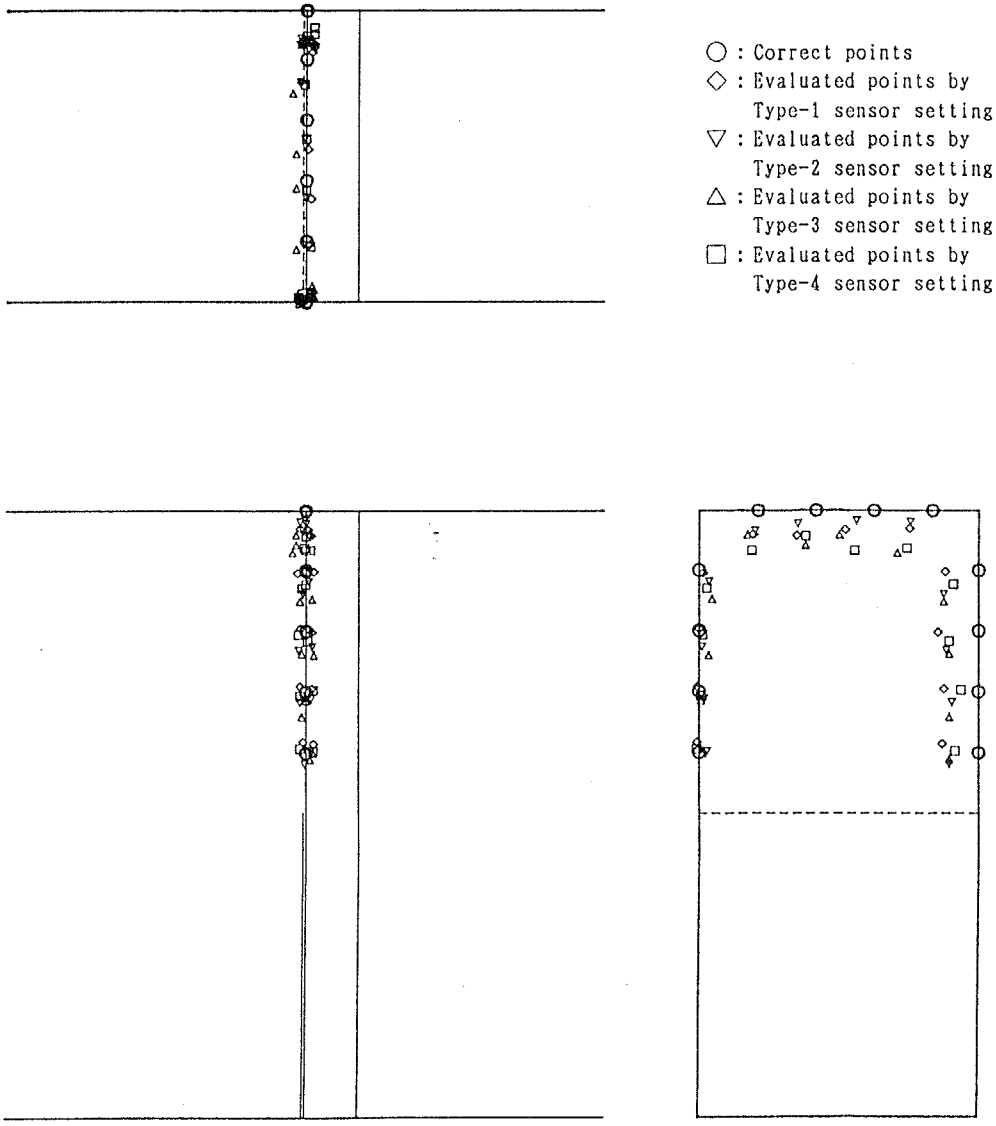


(3) TYPE-3

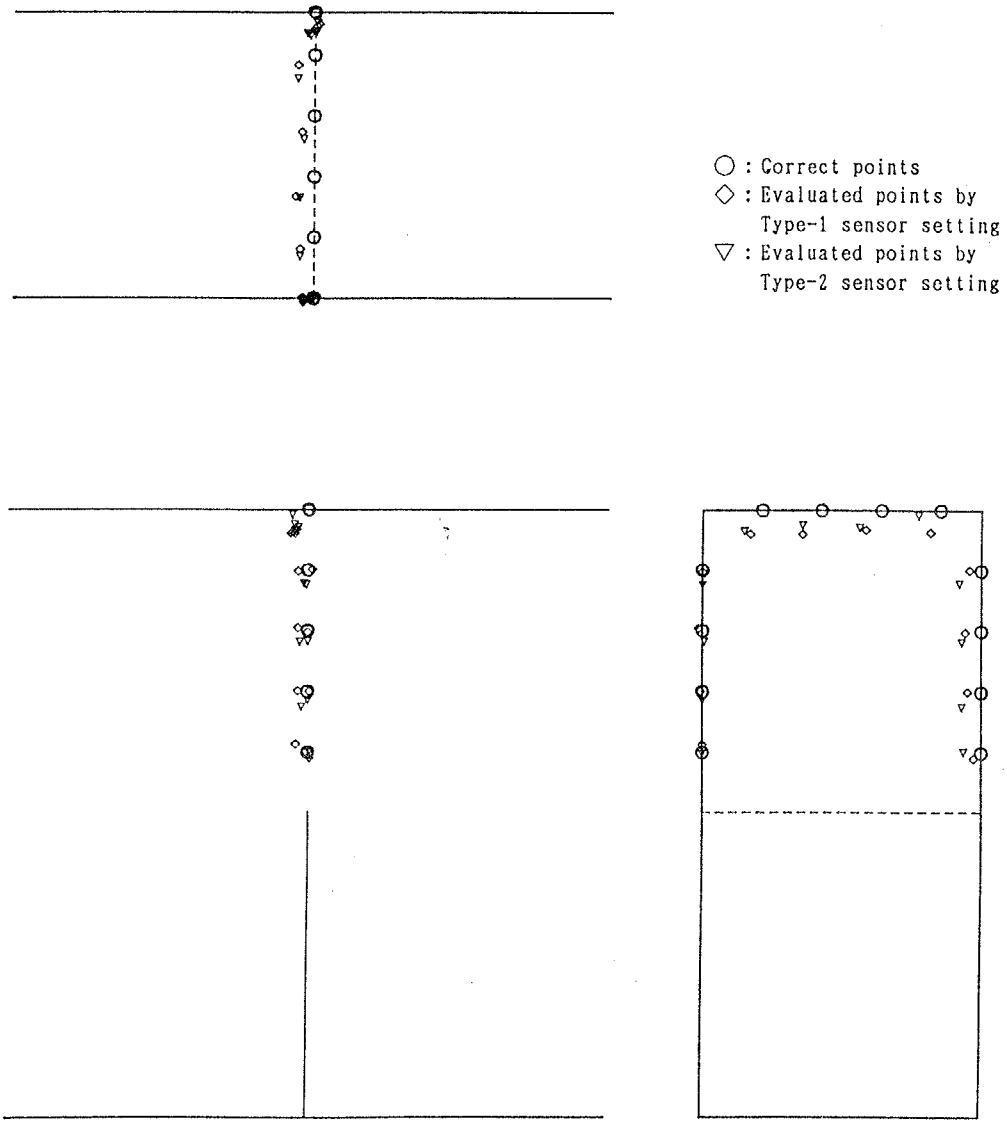


(4) TYPE-4

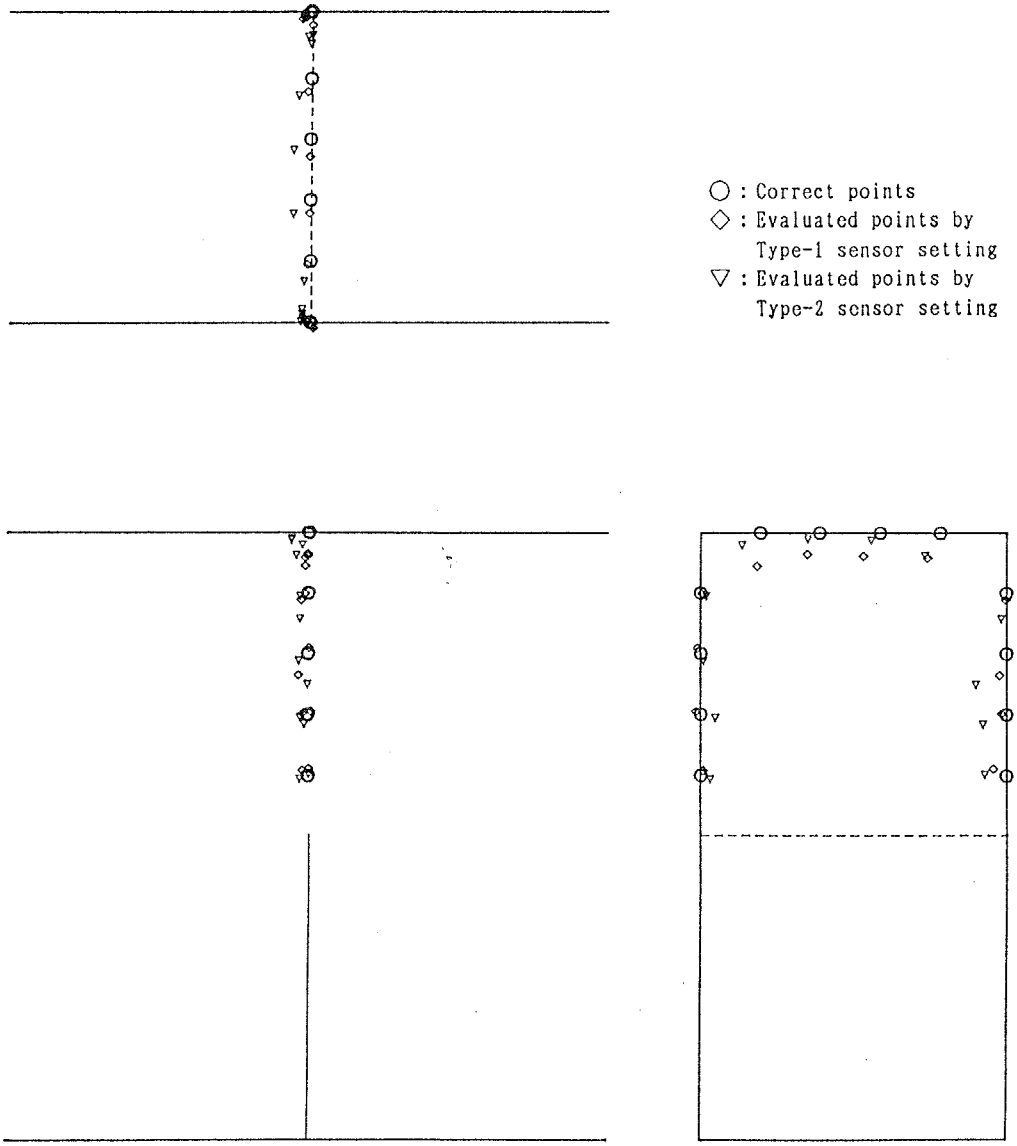
図－6.6　三次元位置標定精度検討用のセンサー配置



図－6.7　４タイプのセンサー配置によるＡＥ源位置標定結果：PL-61B



図－6.8　TYPE-1とTYPE-2のセンサー配置によるＡＥ源位置標定結果：MT-4B



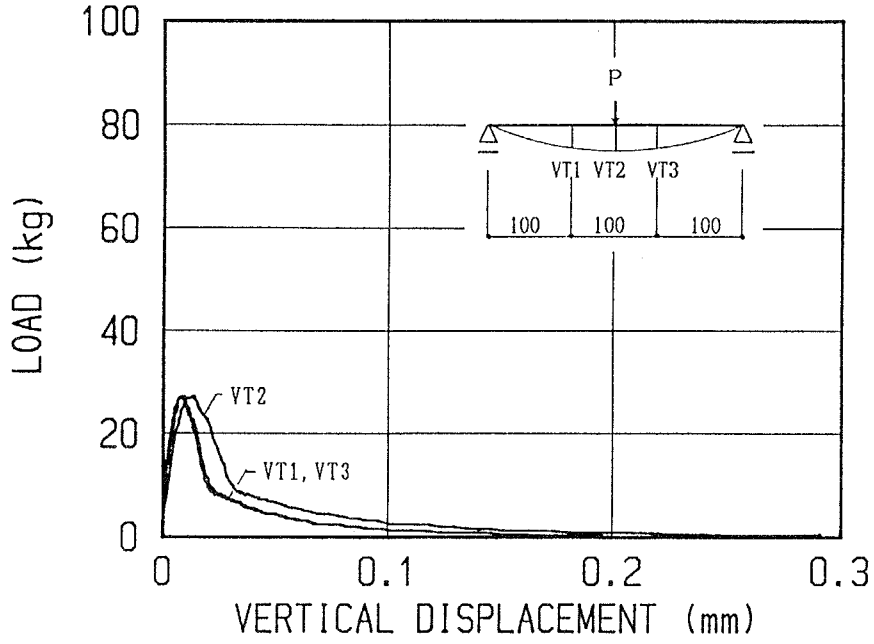
図－6.9　TYPE-1とTYPE-2のセンサー配置によるＡＥ源位置標定結果：CT-2B

6．4　実験結果および考察

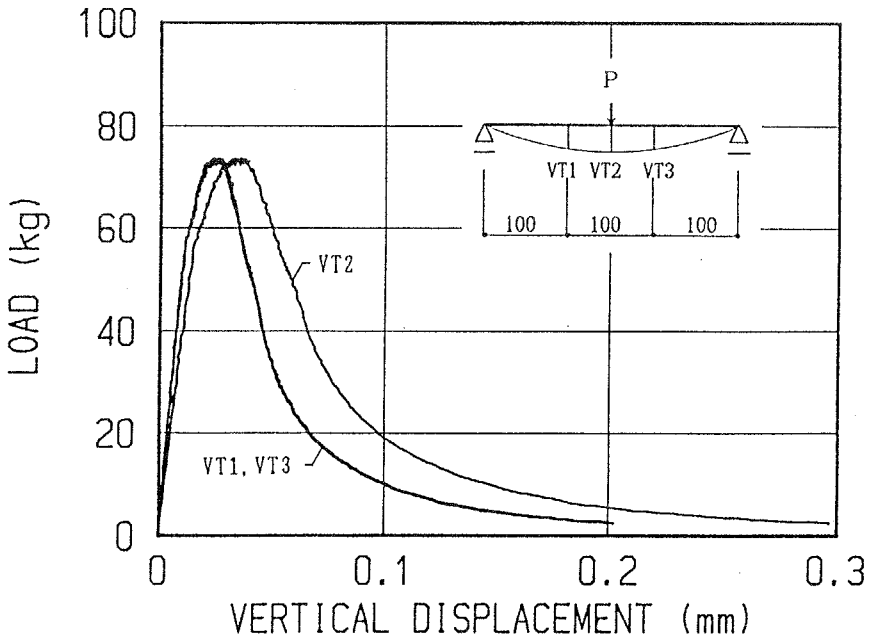
6．4．1　荷重－変位曲線

本実験により得られた荷重－変位曲線を図－6.10～18 に示す。図－6.10、11 から、プレート型のモデルコンクリートの荷重－変位曲線は、個々の試験体によって大きな相違がみられる。これは、個々の試験体の破断面の相違による（写真－6.8）。耐力の大きなPL-22BおよびPL-23Bは、アルミナプレートの半分以上にモルタルが付着した破壊面となっているが、耐力の小さなPL-23Tの破壊面は、モルタルはほとんど付着していない。さらに、PL-23B試験体は、PL-22B試験体より付着したモルタルが厚かったため、最大耐力後より大きな抵抗力を示したと考えられる。図－6.12～16 から、円柱型の疑似骨材を用いたモデルコンクリート試験体は、一般に、打設時下半分の試験体（試験体名の最後がB）のほうが、上半分の試験体（試験体名の最後がT）より耐力は大きくなっているが、最大耐力後の挙動は、よりなめらかな下に凸のモルタルに近い挙動となる。この原因も、両試験体の破断面の相違による（写真－6.8）。上半分の試験体は、モルタルと疑似骨材の境界面に沿ってクラックが進展し、破壊に至っている。一方、下半分の試験体は、モルタルと疑似骨材の付着強度が高く、境界面よりモルタルの中を進展するクラックが多くなり、よりなめらかな破壊面を形成している。したっがて、モデルコンクリートに対して、定量的な考察を行うためには、破壊面の詳細な検討が必要になる。しかしながら、これらの図は骨材によるクラック拘束挙動を、定性的に説明しているといえる。すなわち、クラックが疑似骨材に到達した場合、骨材を迂回してクラックがさらに進展するためには、より多くのエネルギーが必要になる。それ故、最大耐力後において、プレート型のモデルコンクリートにはない上に凸の曲線がみられるようになり、図－6.18 に示すコンクリートの荷重－変位曲線に近づく。本モデルコンクリート試験体は、ノッチの先端に骨材が存在しているため、Maji[3]らのモデルコンクリート試験のように、はっきりした二つのピークは現れなかった。しかし初期剛性はモルタルより高いが、最大荷重の60～80％の荷

重で剛性の低下が生じ、不連続な曲線となっている。これは、ノッチ先端の疑似骨材がモデルコンクリートの初期剛性に寄与するが、最大荷重の60～80% の荷重で、疑似骨材とモルタルの境界面の損傷が大きくなり、その境界面の剛性が支配的になったためと考えられる。

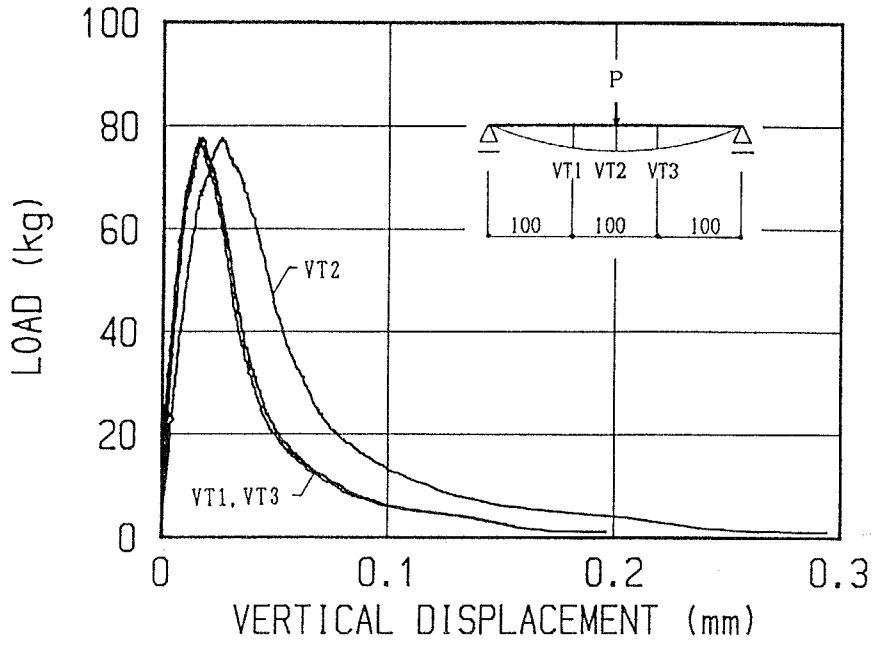


(1) PL-23T

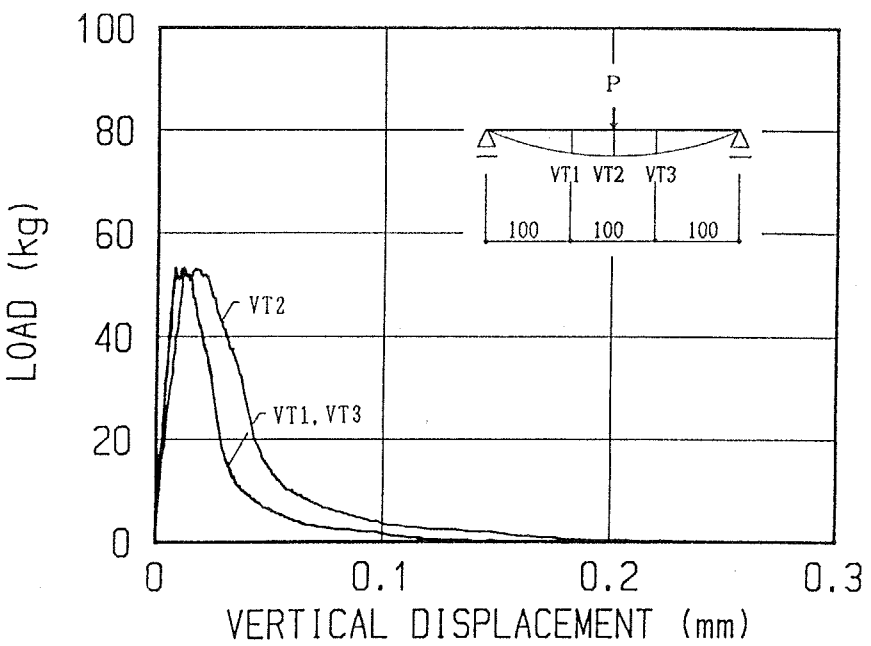


(2) PL-23B

図－6.10　荷重－変位曲線：PL-23T／PL-23B

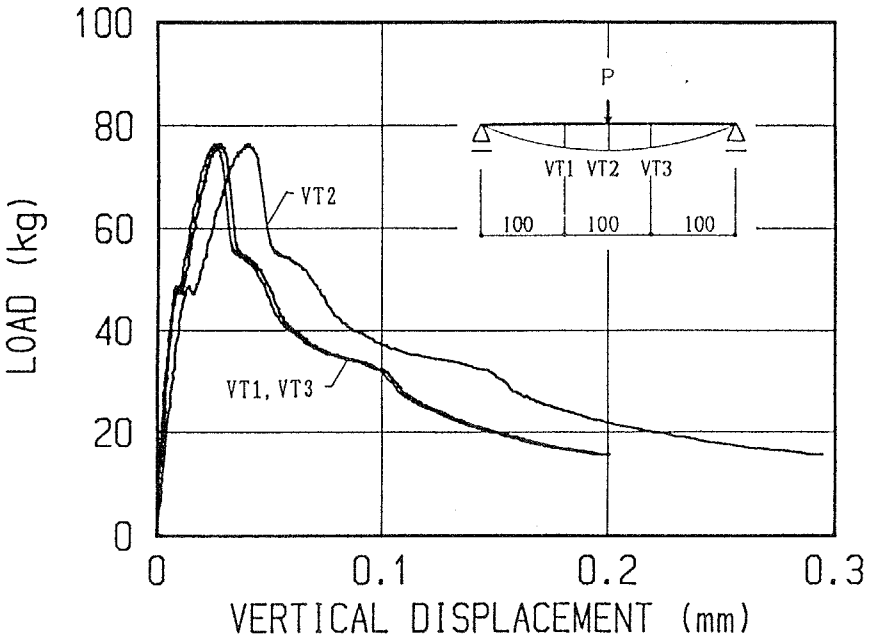


(1) PL-22B

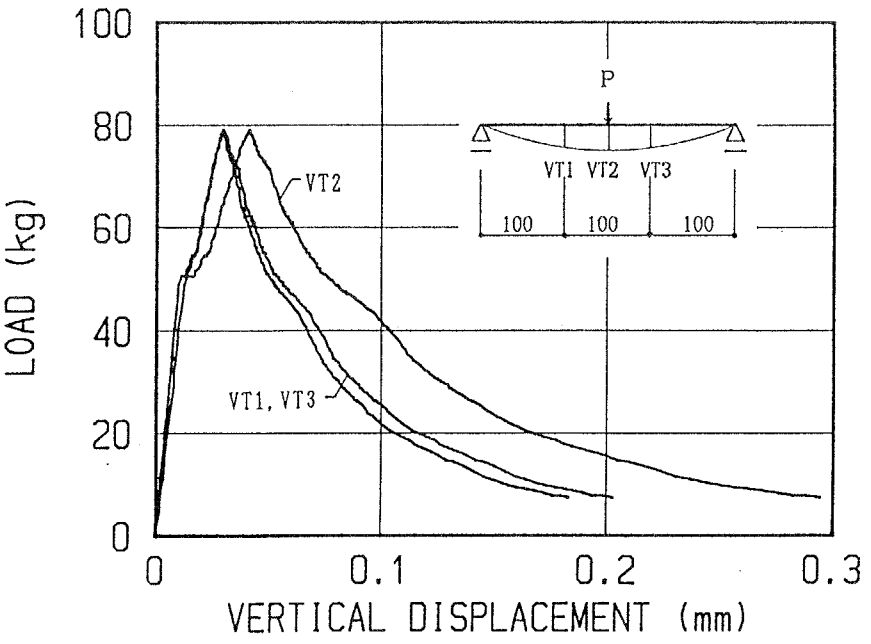


(2) PL-61B

図－6.11　荷重－変位曲線：PL-22B／PL-61B

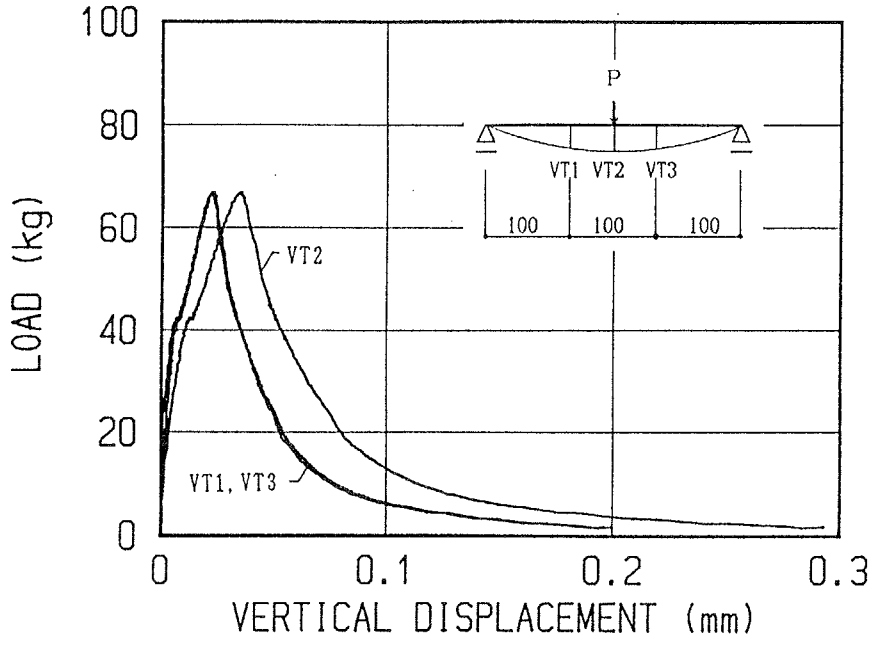


(1) A1-2T

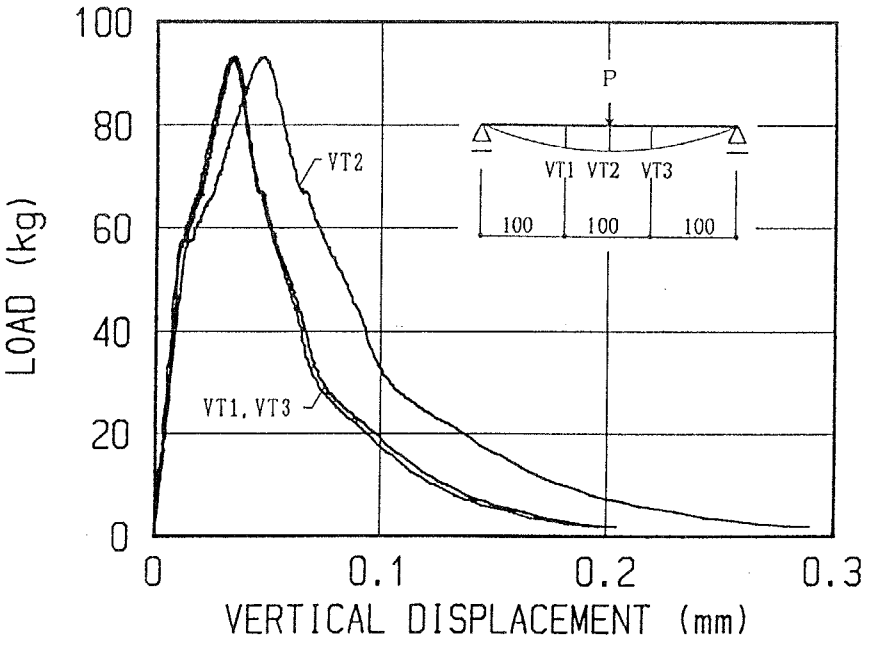


(2) A1-2B

図－6.12　荷重－変位曲線：A1-2T／A1-2B

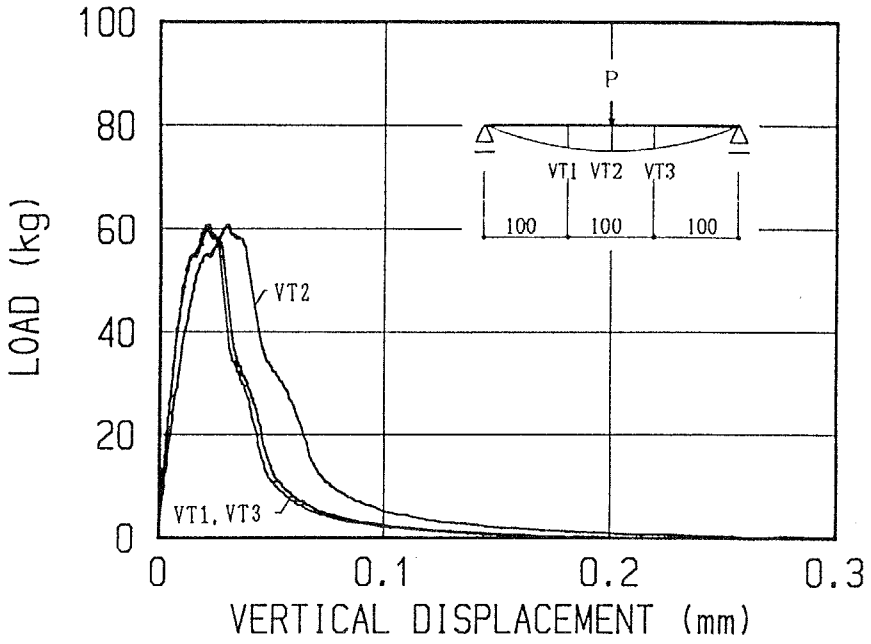


(1) A2-2T

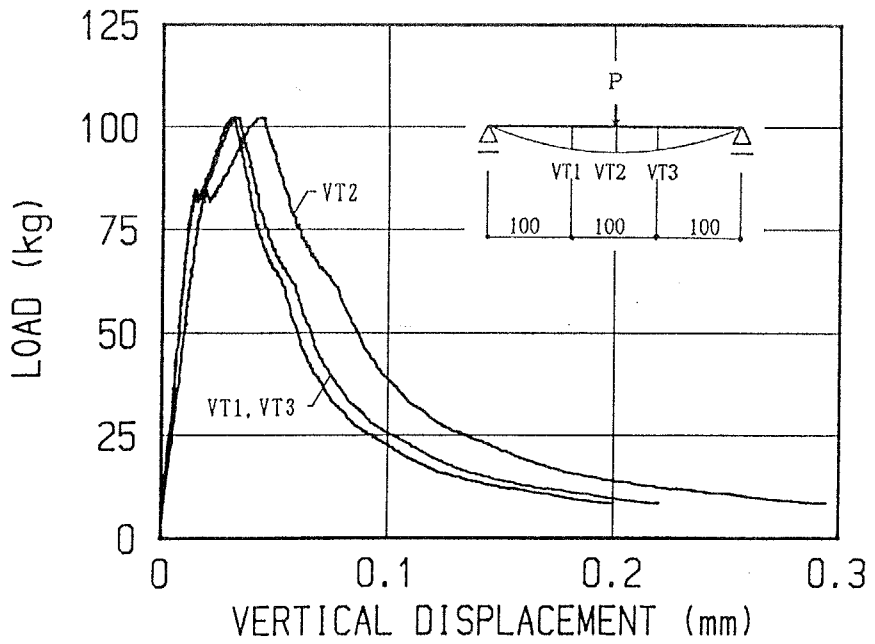


(2) A2-2B

図－6.13　荷重－変位曲線：A2-2T／A2-2B

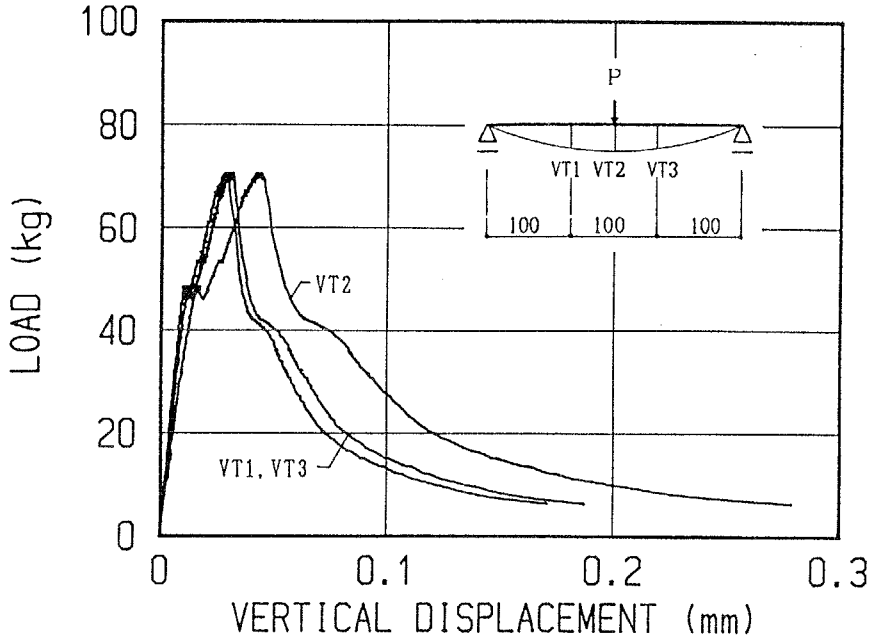


(1) S3-2T

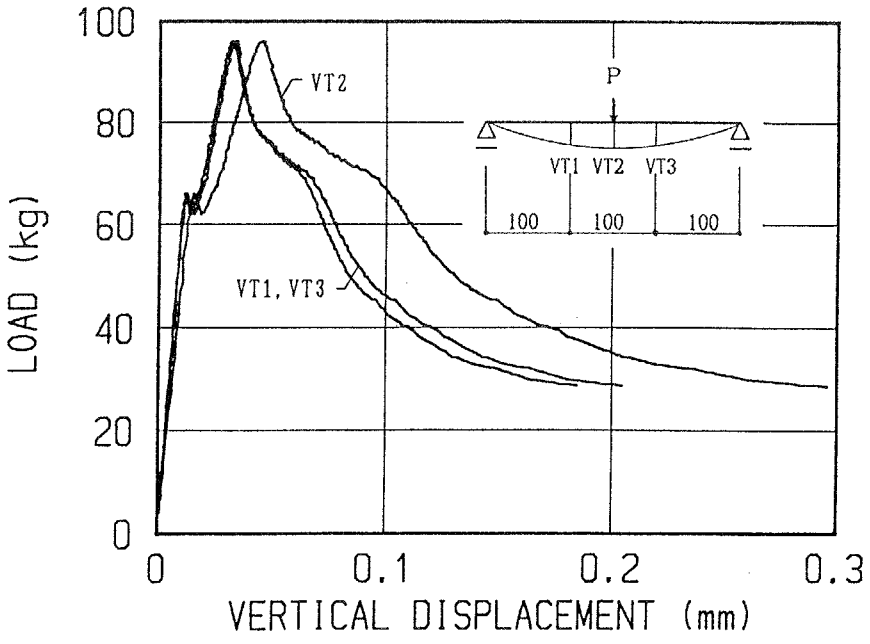


(2) S3-2B

図－6.14　荷重－変位曲線：S3-2T／S3-2B

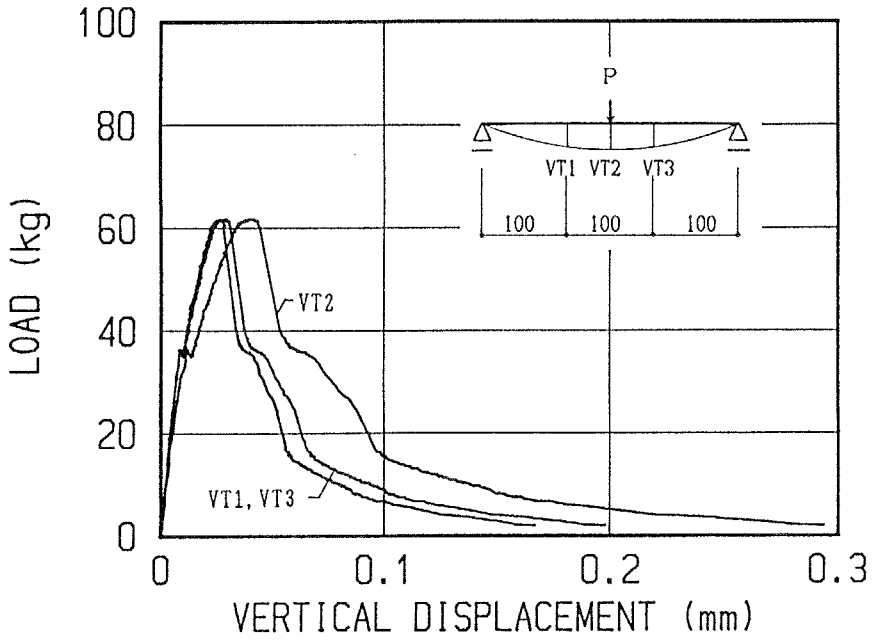


(1) S4-2T

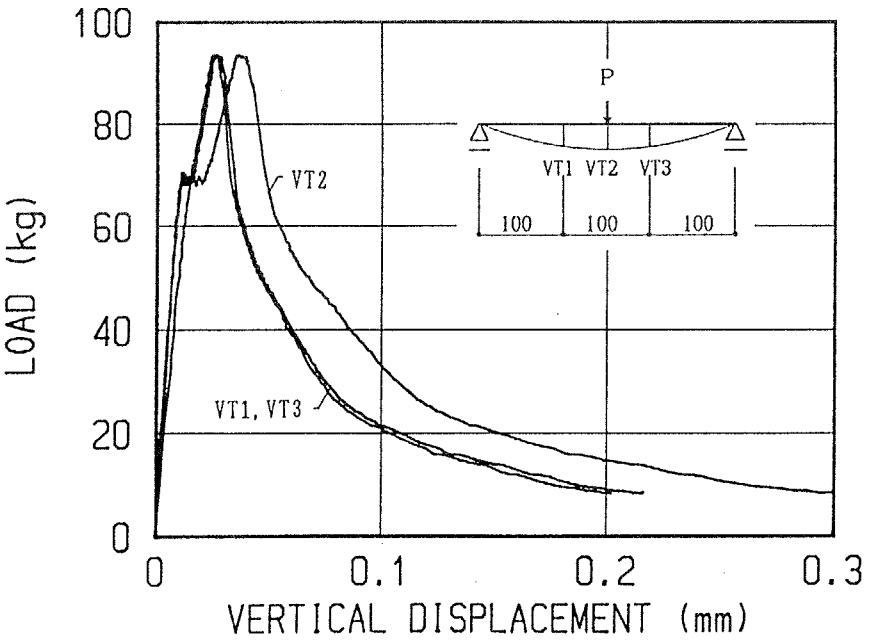


(2) S4-2B

図－6.15　荷重－変位曲線：S4-2T／S4-2B

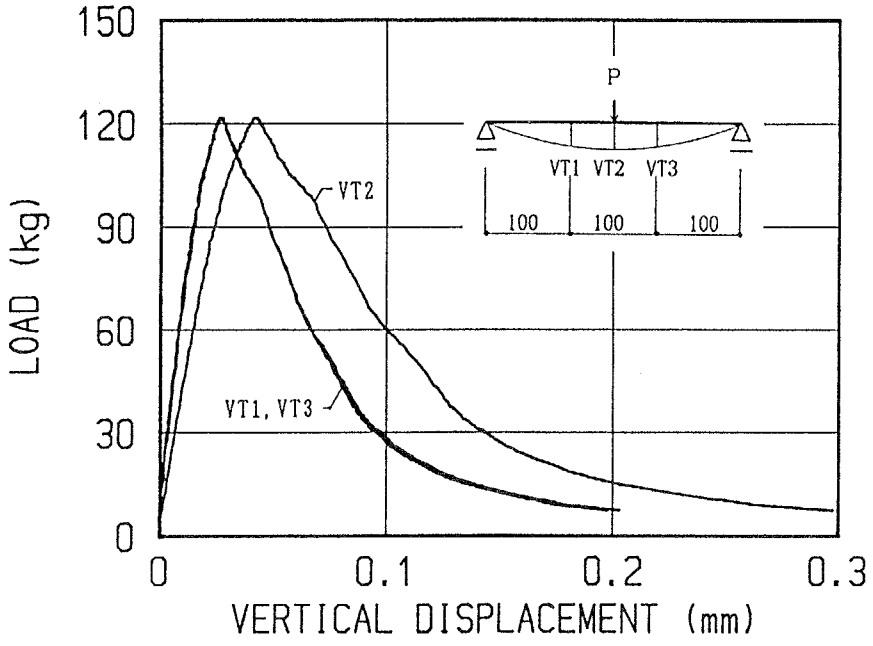


(1) S5-2T

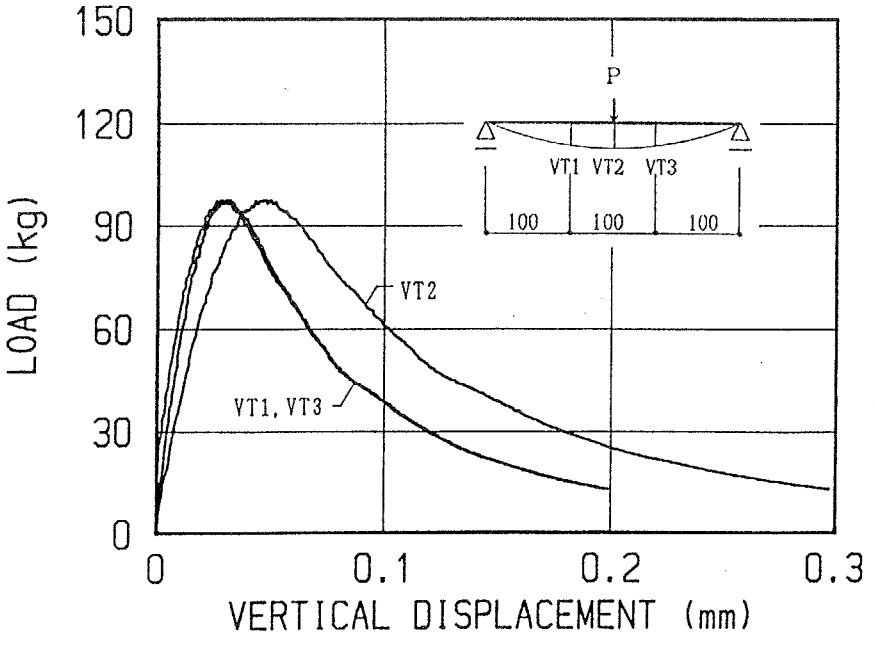


(2) S5-2B

図－6.16　荷重－変位曲線：S5-2T／S5-2B

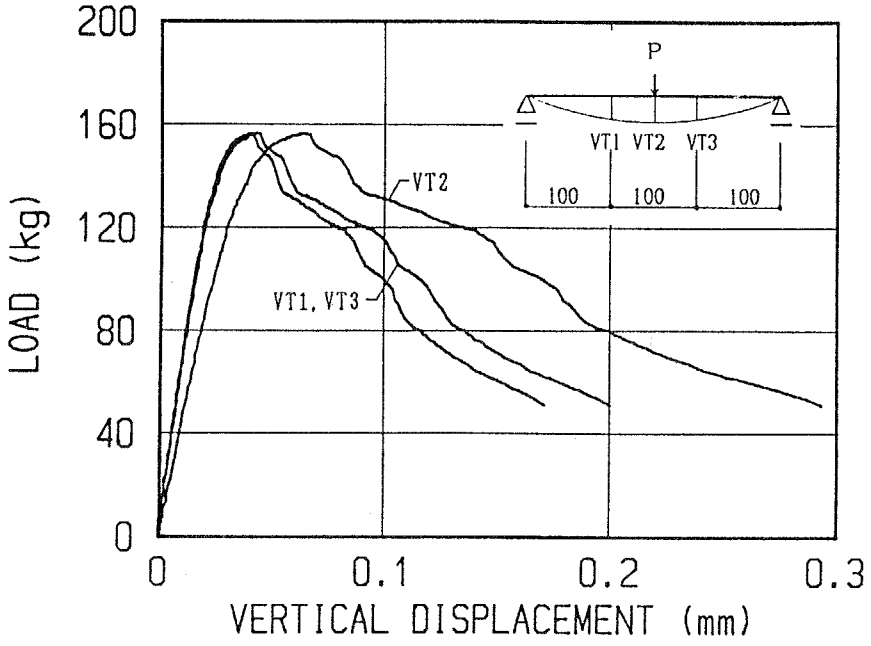


(1) MT-3T

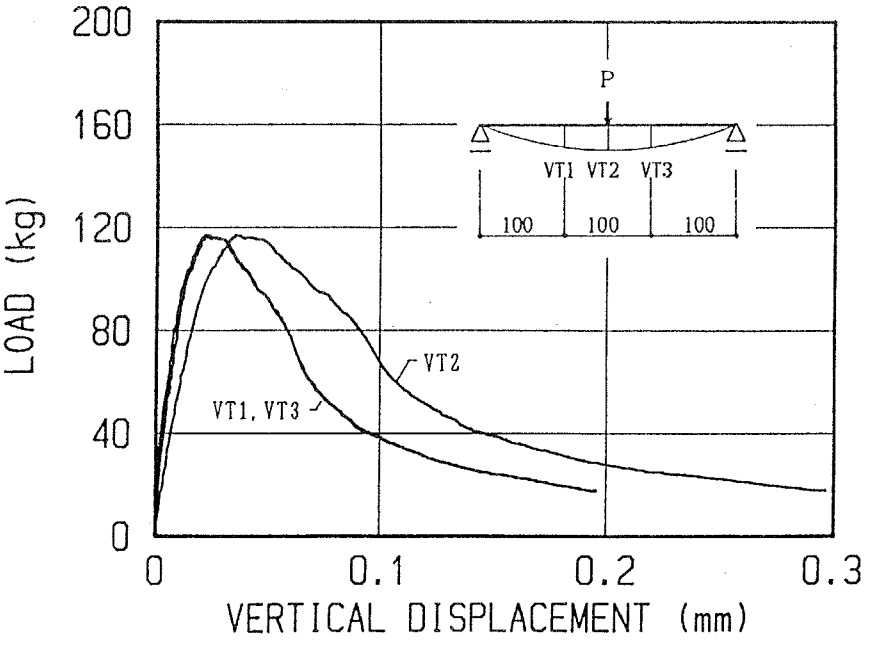


(2) MT-4B

図－6.17　荷重－変位曲線：MT-3T／MT-4B

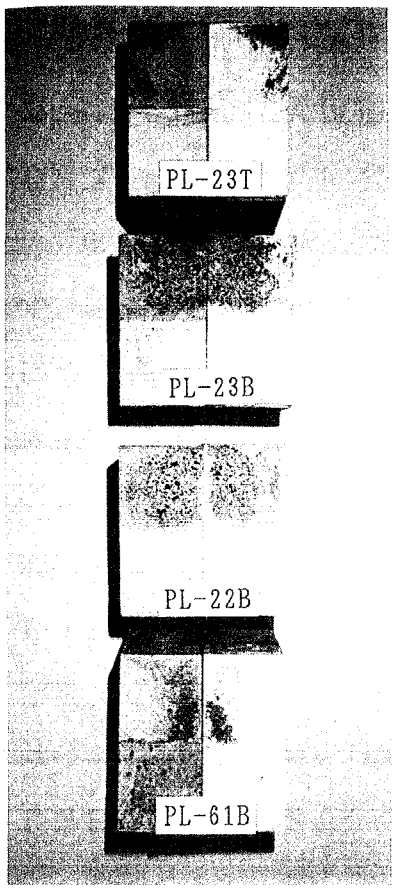


(1) CT-1T

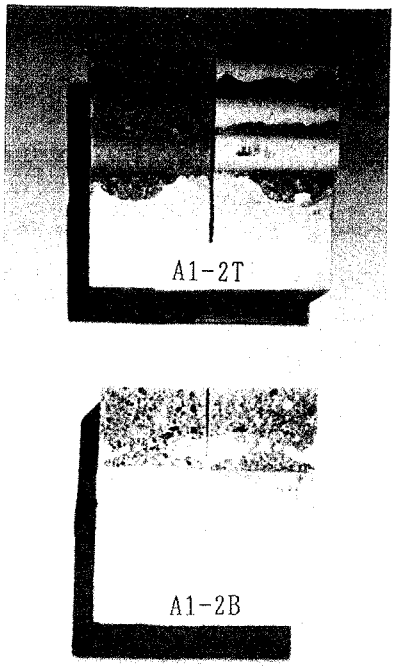


(2) CT-2B

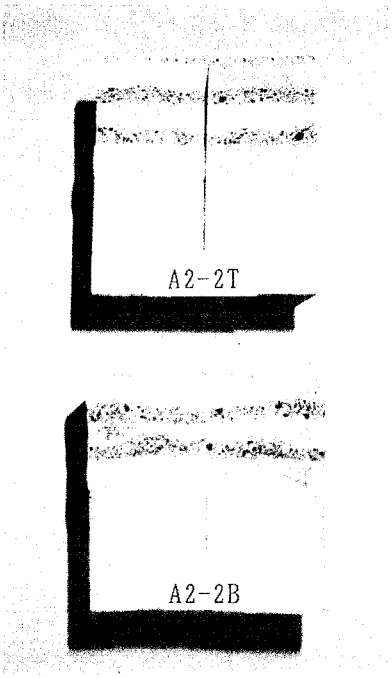
図－6.18　荷重－変位曲線：CT-1T／CT-2B



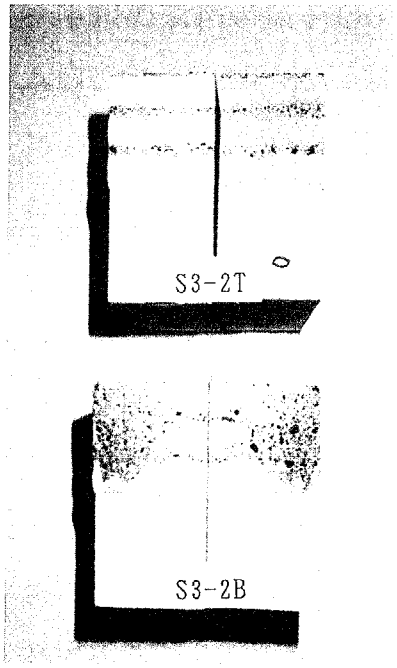
(1) ＰＬ型試験体の破壊面



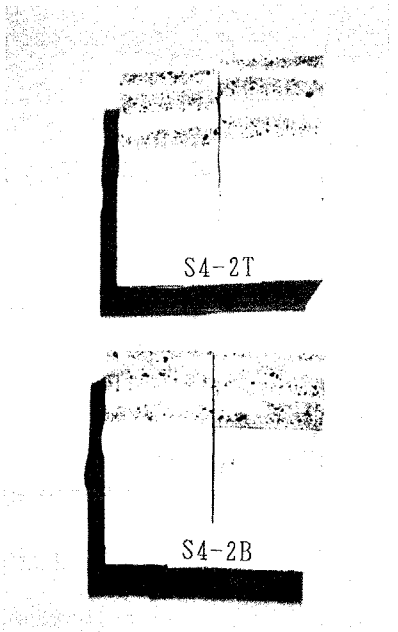
(2) Ａ１型試験体の破壊面



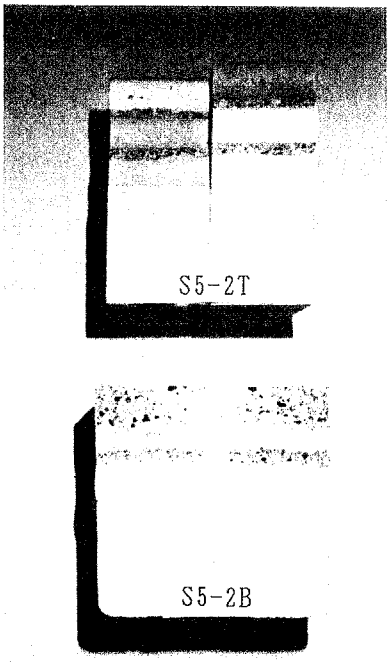
(3) Ａ２型試験体の破壊面



(4) Ｓ３型試験体の破壊面



(5) Ｓ４型試験体の破壊面



(6) Ｓ５型試験体の破壊面

写真－6.8　モデルコンクリートの破壊面

6．4．2　三次元位置標定

(1) プレート型モデルコンクリート

6.3.2節に述べた方法で三次元位置標定を行った結果を図－6.19～21 に示す。図－6.19、21 から、標定位置は、破壊面（ノッチのほぼ延長面）を中心にかなりばらついている。そこで、しきい値を超えてからの 512個／1 波形のディジタルデータについて、6.2.2節で述べたＡＥ波形解析を行った。ＭＥＭの欠点は、予測誤差フィルターの打ち切り次数（または項数）ｍを決定する合理的な基準のないことであった。しかし、ＭＥＭと自己回帰式（以後、ＡＲと略す）との関係が明らかにされたことから、ＡＲについての赤池[11),12)] の final prediction error（ＦＰＥ）によって、ｍを決定できる。実際にはＦＰＥがはっきりした極小値を示さない場合があるので、最適ラグｍは次の範囲以内でＦＰＥを最小にするように選ぶことが多い。

$$m < (2 \sim 3)\sqrt{N}$$

本解析では、N=512であるから、ｍは45～68以下となる。一般に次数ｍが小さくなると、スペクトルはなめらかになる。ｍを10、30、50と変えたときのスペクトルの変化の様子を、ＦＦＴによるスペクトルと一緒に図－6.22 に示す。本解析では、スペクトルパターンの分類を容易にするために、ｍ＝30のＭＥＭによってスペクトルを推定する。

次数30でＭＥＭ解析を行った結果、得られた代表的なスペクトルパターンを、０～512kHzの範囲で図－6.23 に示す。ＡＥ源の三次元位置標定の結果（図－19～21）から、150kHz付近と250-450kHzの２箇所にピークを持つＡＥ波形は、破壊面のその時点におけるほぼ最上位置からの信号であることがわかった。また、150kHz付近に１箇所だけピークを持つＡＥ波形は、実際の破壊面以外の位置および破壊面ではあるがその時点の最上位置より下側からの信号であった。したがって、２箇所にピークを持つＡＥ波形は処女破壊に対応する信号であると考えられ、これらの信号に対するＡＥ源を取り出すと、軟化領域の進展挙動をより明確に検討することができる。図－6.24～26にその進展挙動を、

各荷重段階毎に示す。図－6.24 から、PL-22B 試験体の軟化領域は、破壊面の左下より右上へ進展している様子が読み取れる。写真－6.8 と図－6.24～26 より、２箇所にピークをもつＡＥ波形は、アルミナプレートにモルタルが薄く（約１mm）付着した破壊面からの信号であり、付着したモルタルが厚くなると、２箇所にピークをもつＡＥ信号は少なくなる（PL-23B）。また、モルタルが付着していない破壊面からは、ほとんどＡＥ信号が検出されなかった。

(2) 円柱型モデルコンクリート

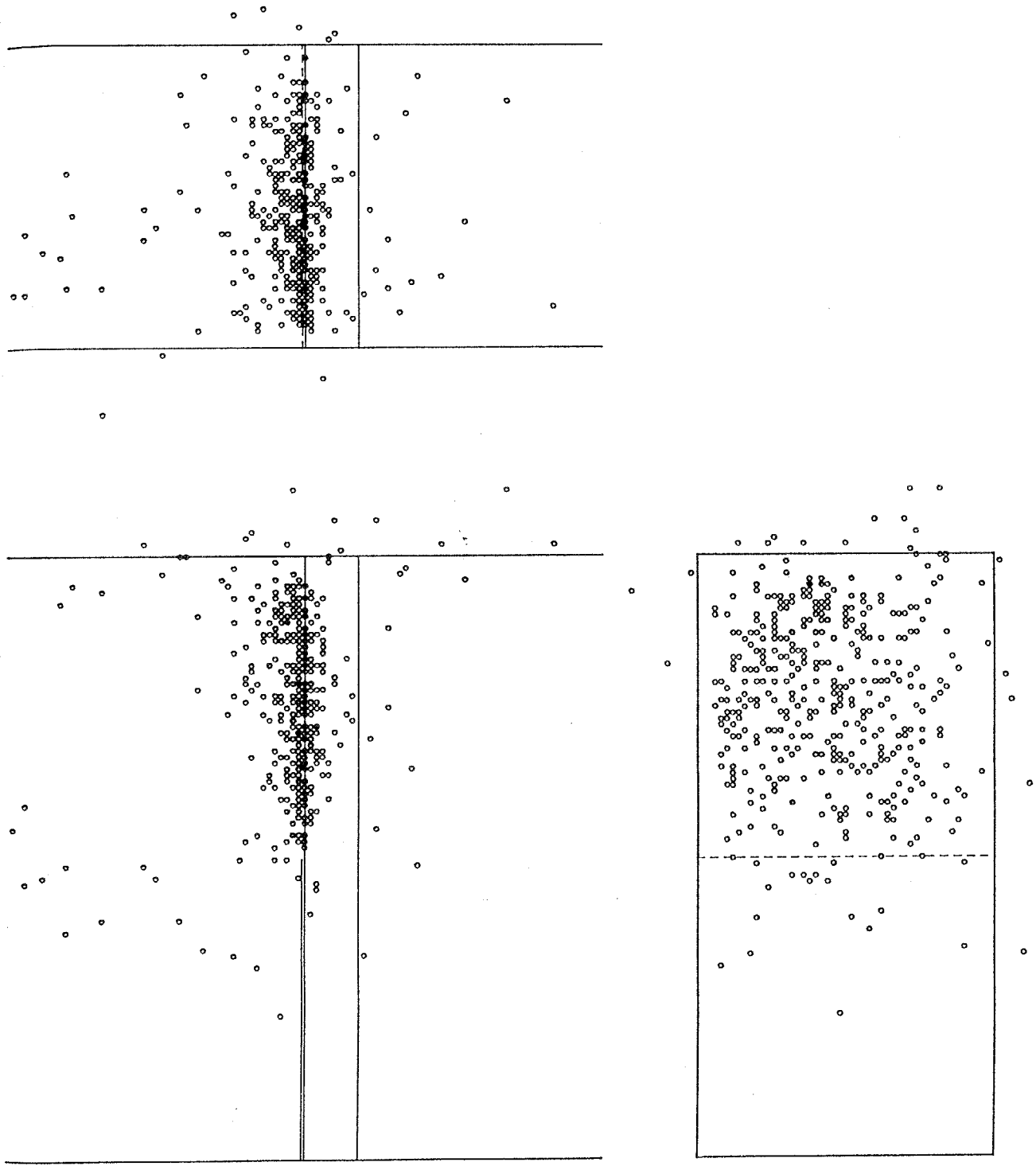
円柱型モデルコンクリート（A1、A2、S3、S4、S5）の三次元位置標定結果を、各荷重段階ごとに図－6.27～31 に示す。これらの図から、ＡＥ信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けていることがわかる。これは、ダメージは受けているが、応力を伝達できるいわゆる軟化領域の広がりを示していると考えられる。

同図の左下の図には、疑似骨材の位置と実際の破壊経路（太い点線）を示している。ＡＥはほぼ破壊経路に沿って発生しているといえる。ＡＥ信号がモルタル中で多く、境界面で少ないのは、疑似骨材に付着したモルタルが少なかったためである（写真－6.8）。

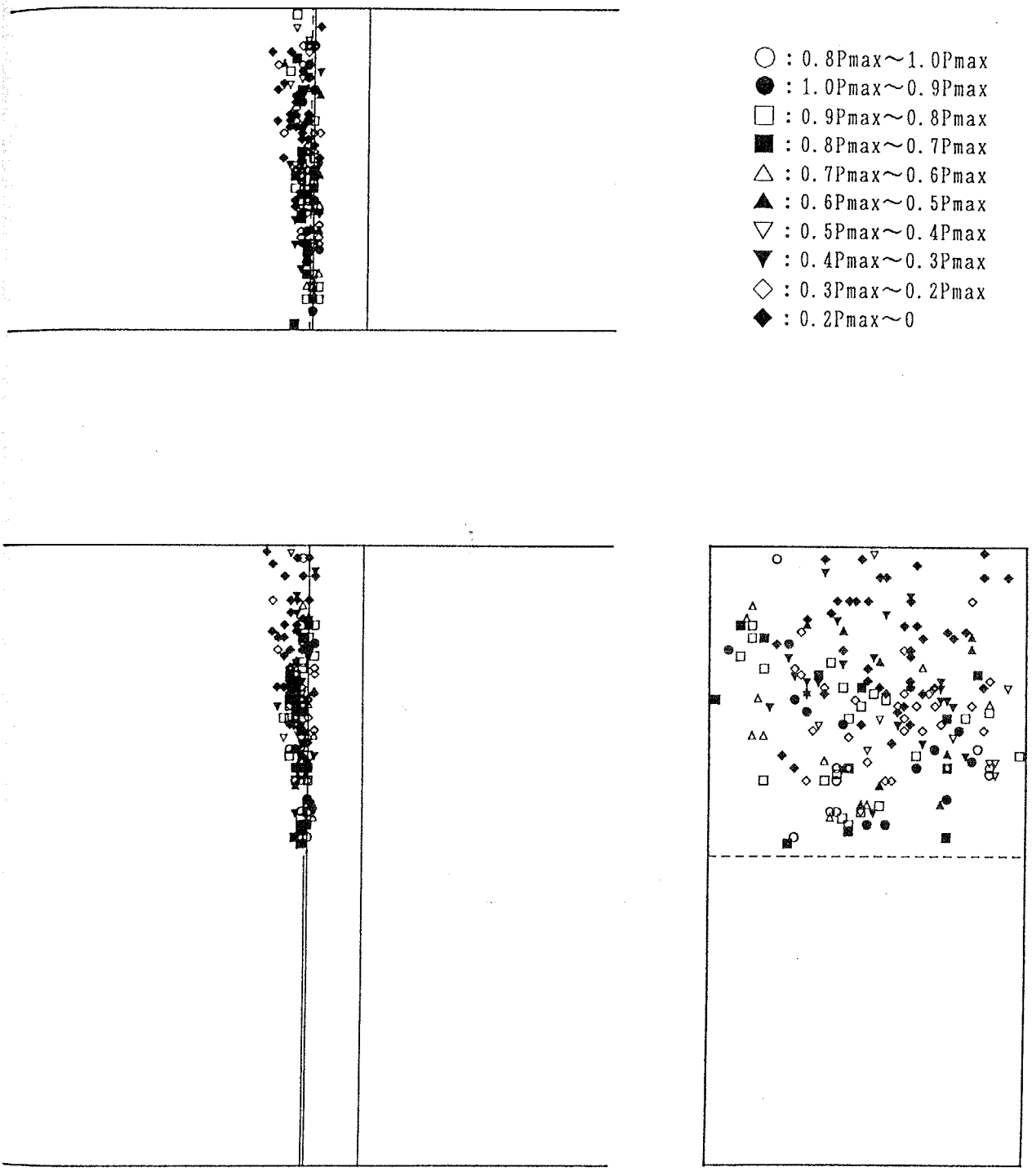
なお、ほとんどのＡＥ波形のスペクトルは、150kHz付近に１箇所だけピークを持つ形となり、スペクトルパターンの分類による評価はできなかった。したがって、ＡＥ波形の初期微動（到達時間）が明確なデータのみ用いて、位置標定を行った。

(3) モルタルおよびコンクリート

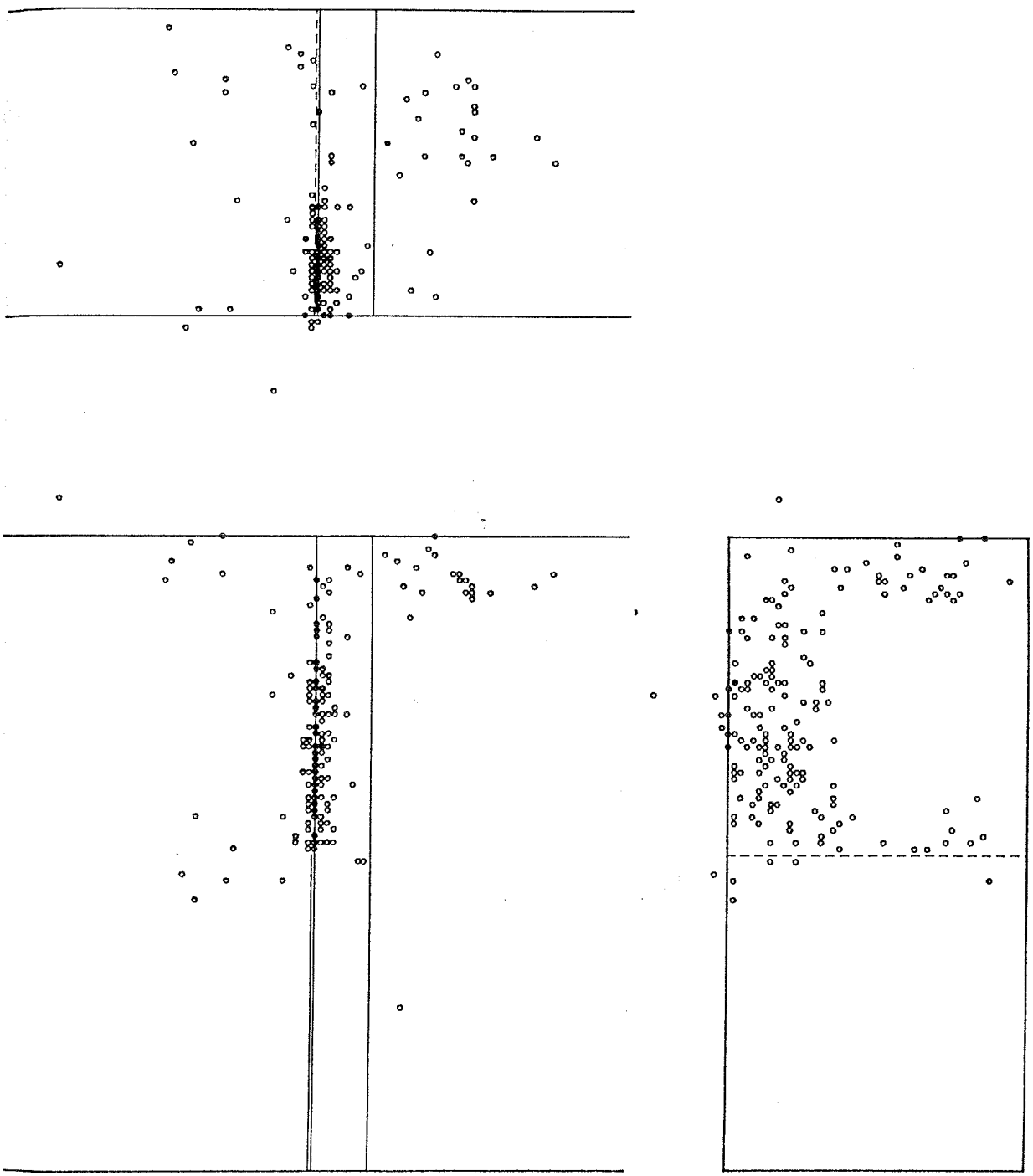
モルタルおよびコンクリートの三次元位置標定結果を、各荷重段階ごとに図－6.32、33 に示す。モデルコンクリートと同様に、ＡＥ信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けており、軟化領域の広がりを示している。モデルコンクリートのような弱い境界面がないため、ＡＥ信号はより多数発生している。



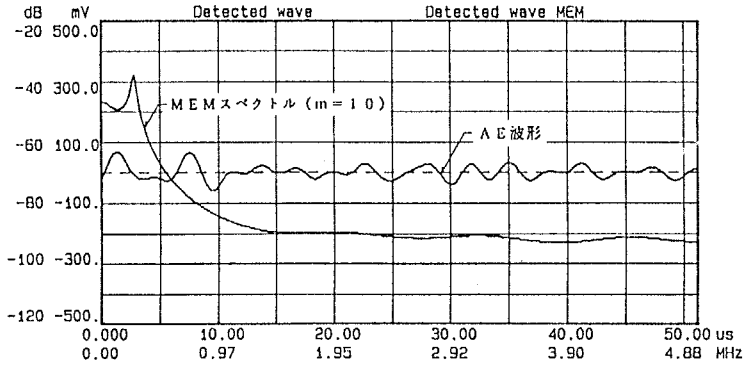
図－6.19　三次元位置標定結果（全データ）：PL-22B



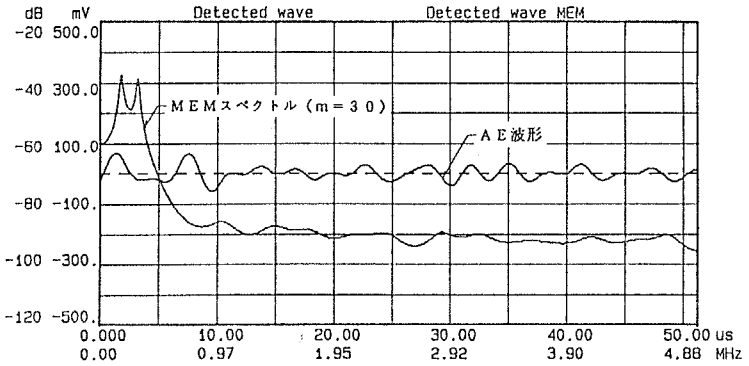
図－6.20　三次元位置標定結果（軟化領域内のデータ）：PL-23B



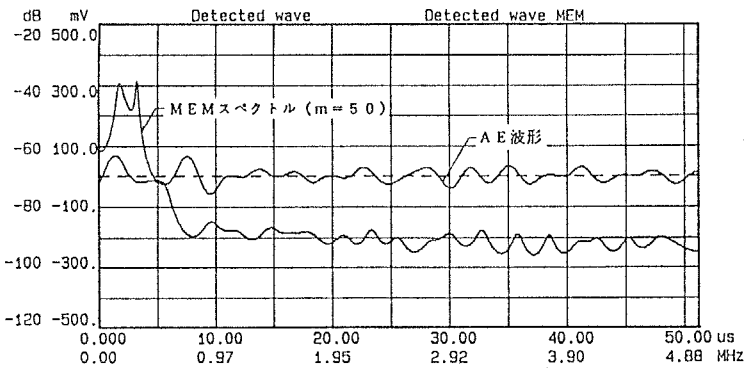
図－6.21　三次元位置標定結果（全データ）：PL-61B



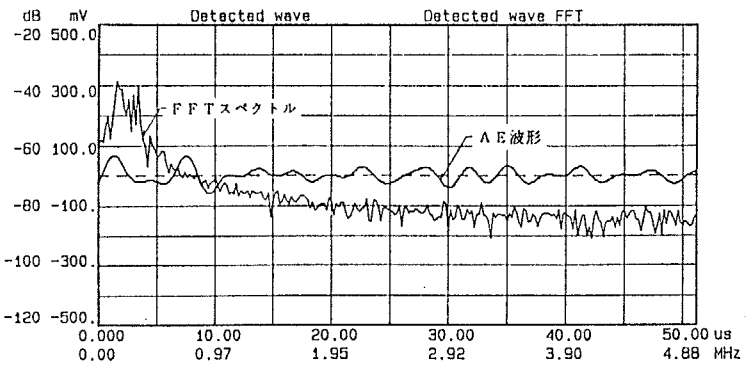
(1) MEMスペクトル（m＝10）



(2) MEMスペクトル（m＝30）

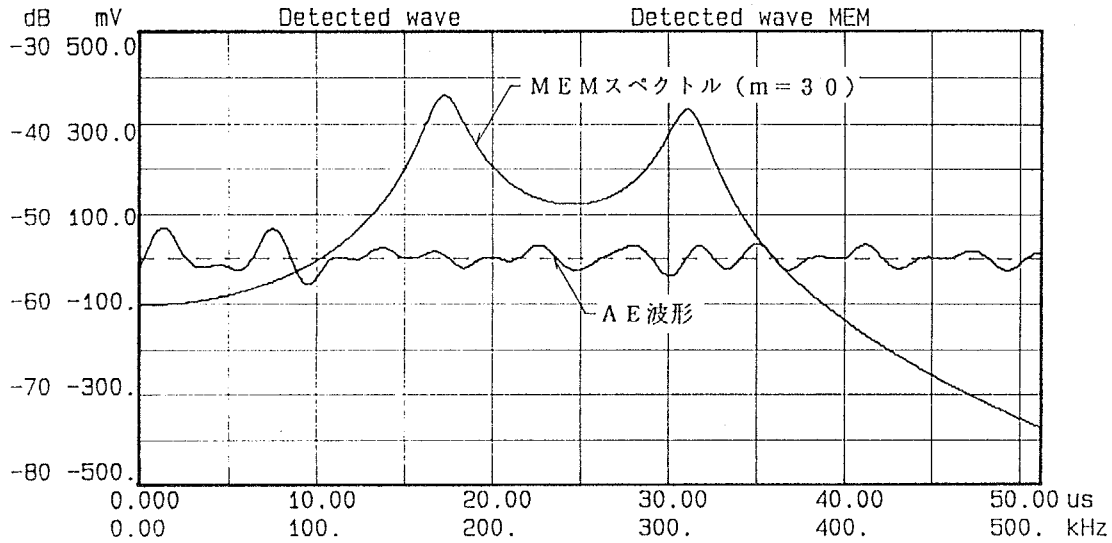


(3) MEMスペクトル（m＝50）

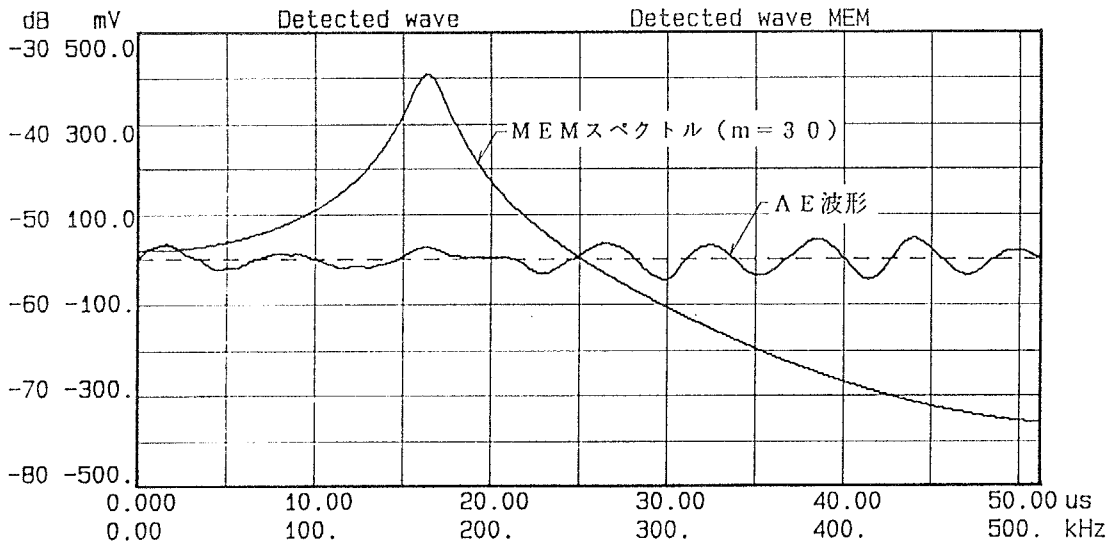


(4) FFTスペクトル

図－6.22 MEMスペクトルの項数mによる変化とFFTスペクトルの比較

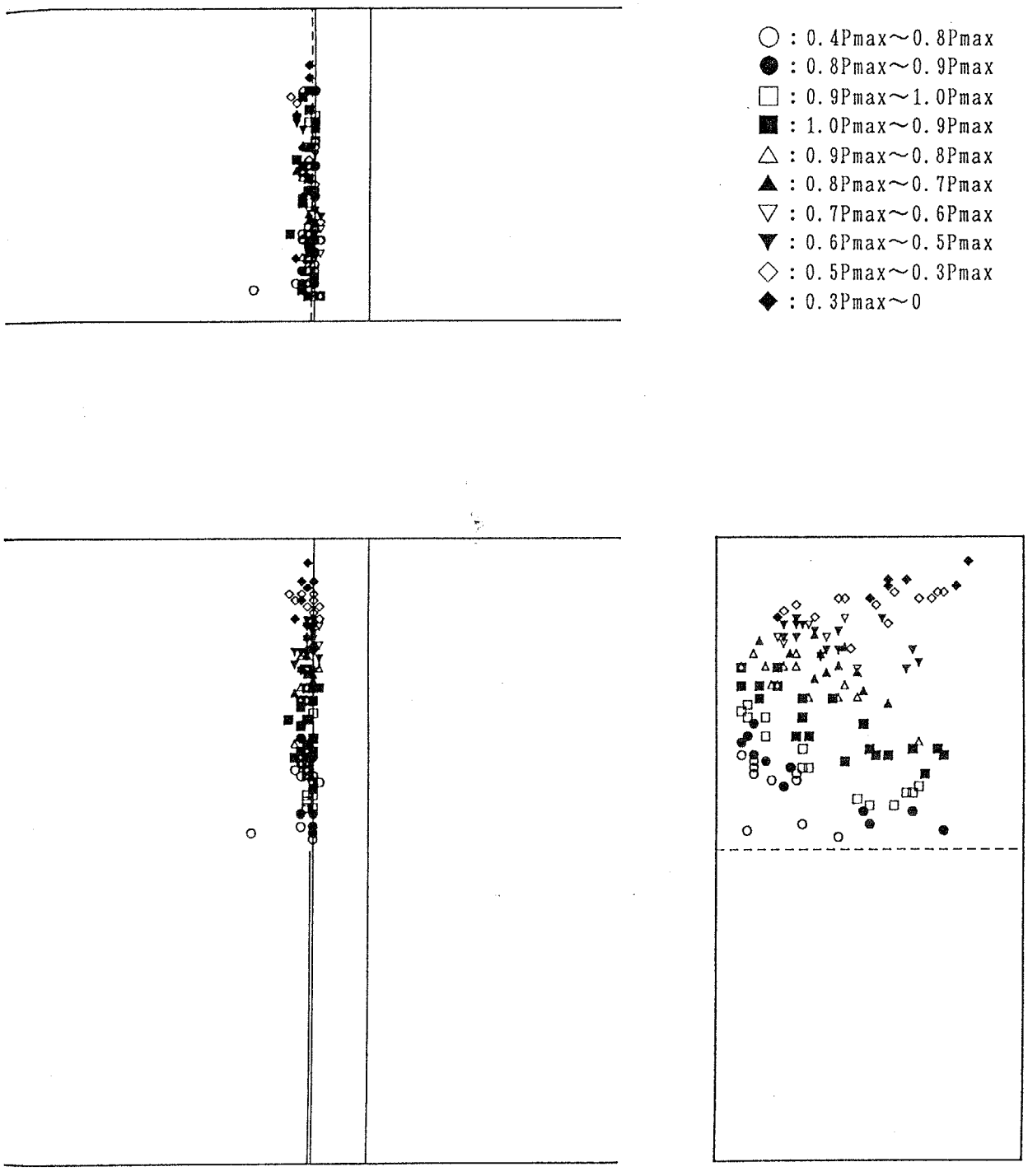


(1) ＭＥＭスペクトルに２個のピークをもつＡＥ波形

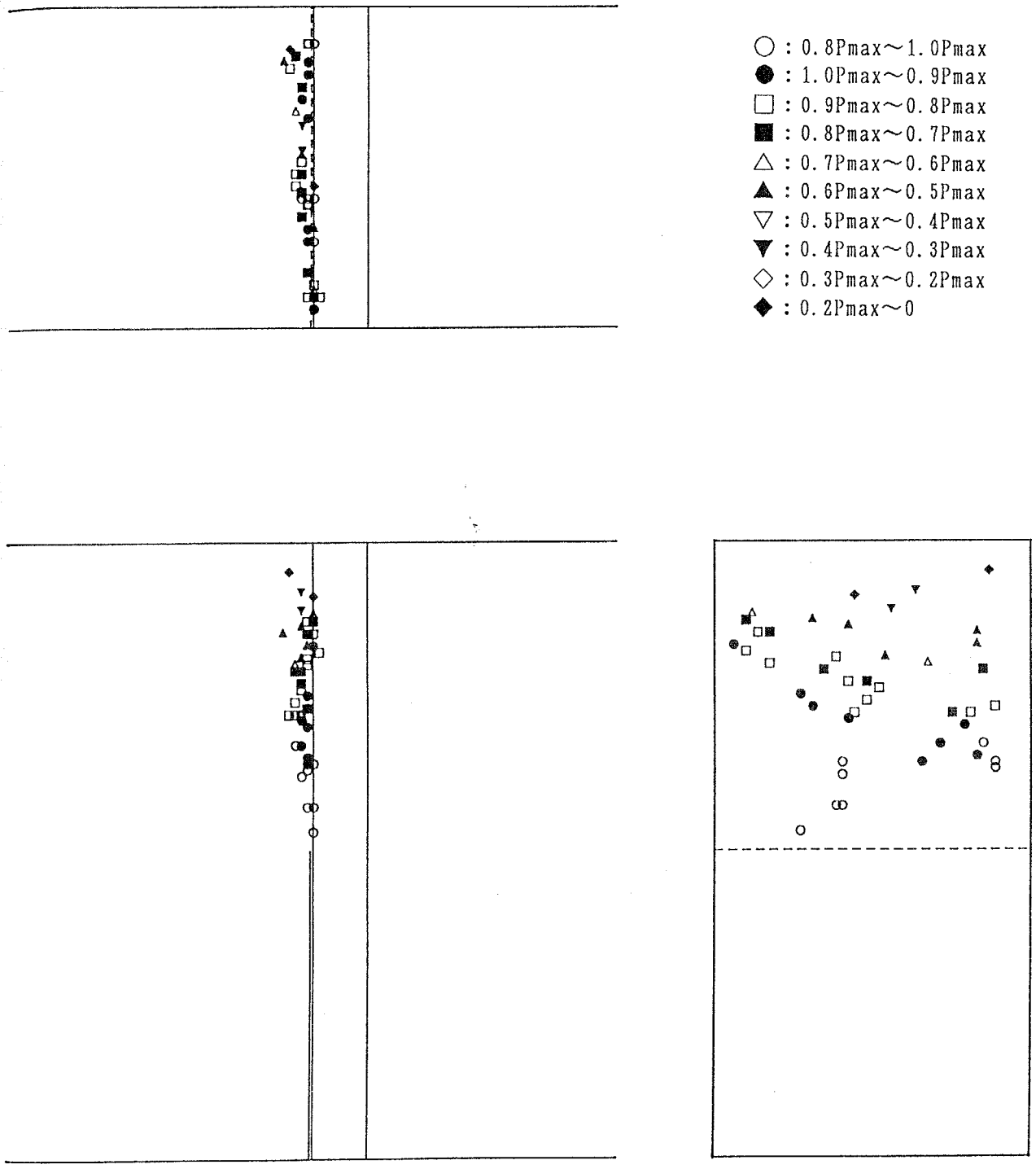


(2) ＭＥＭスペクトルに１個のピークをもつＡＥ波形

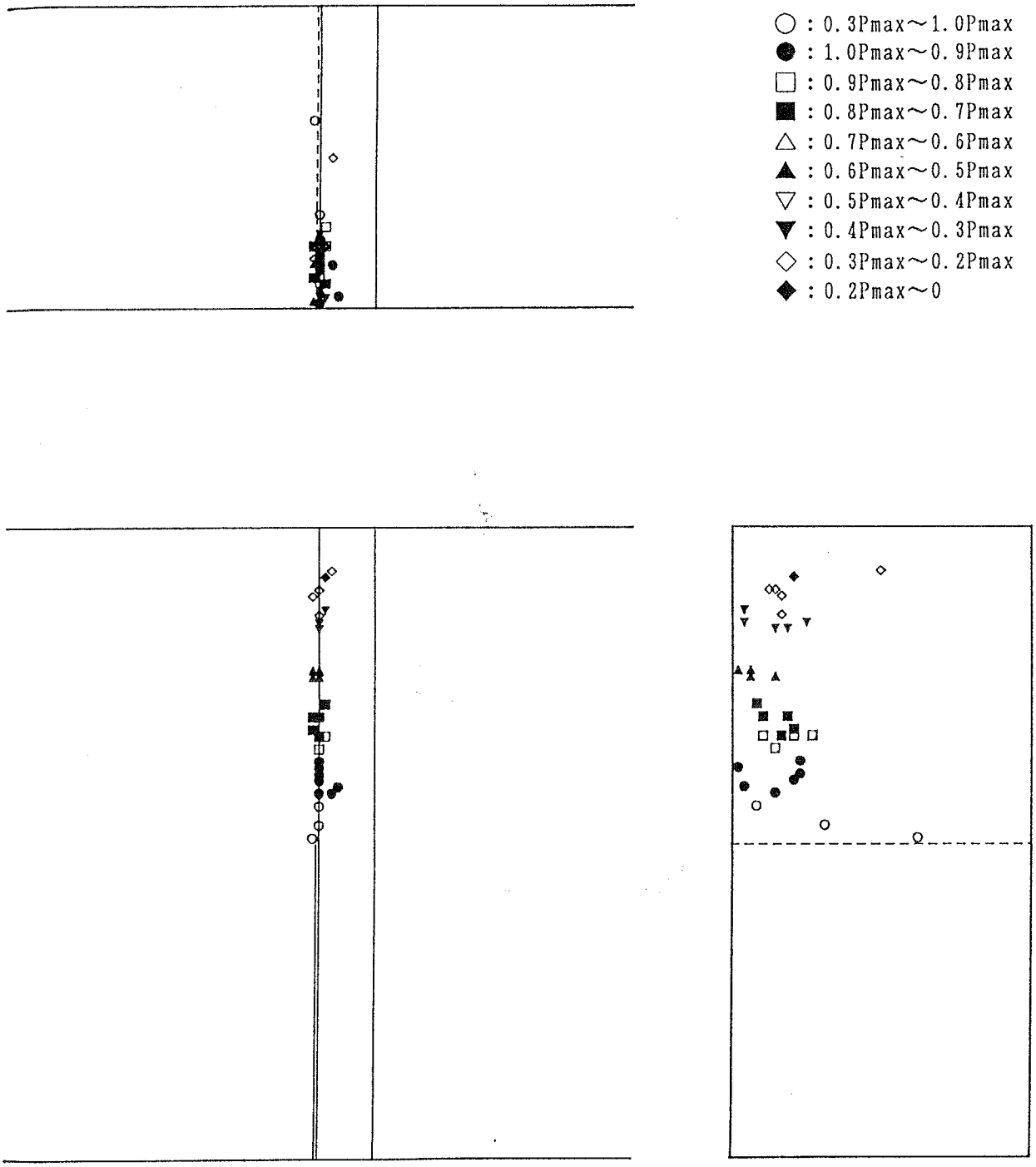
図－6.23　ＭＥＭ（Ｍ＝３０）による代表的なスペクトルパターン



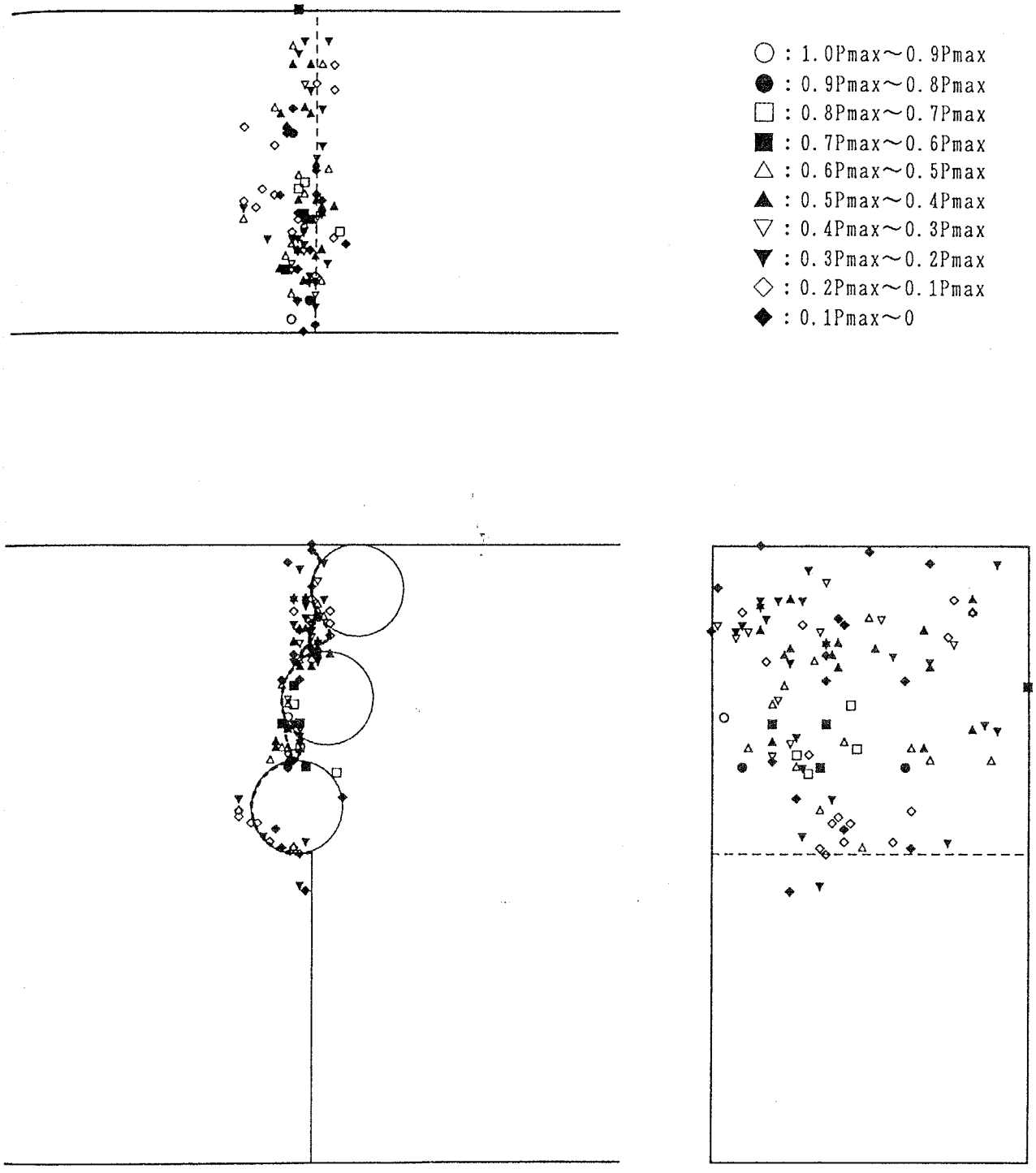
図－6.24　高周波成分をもつＡＥ波形による三次元位置標定結果：PL-22B



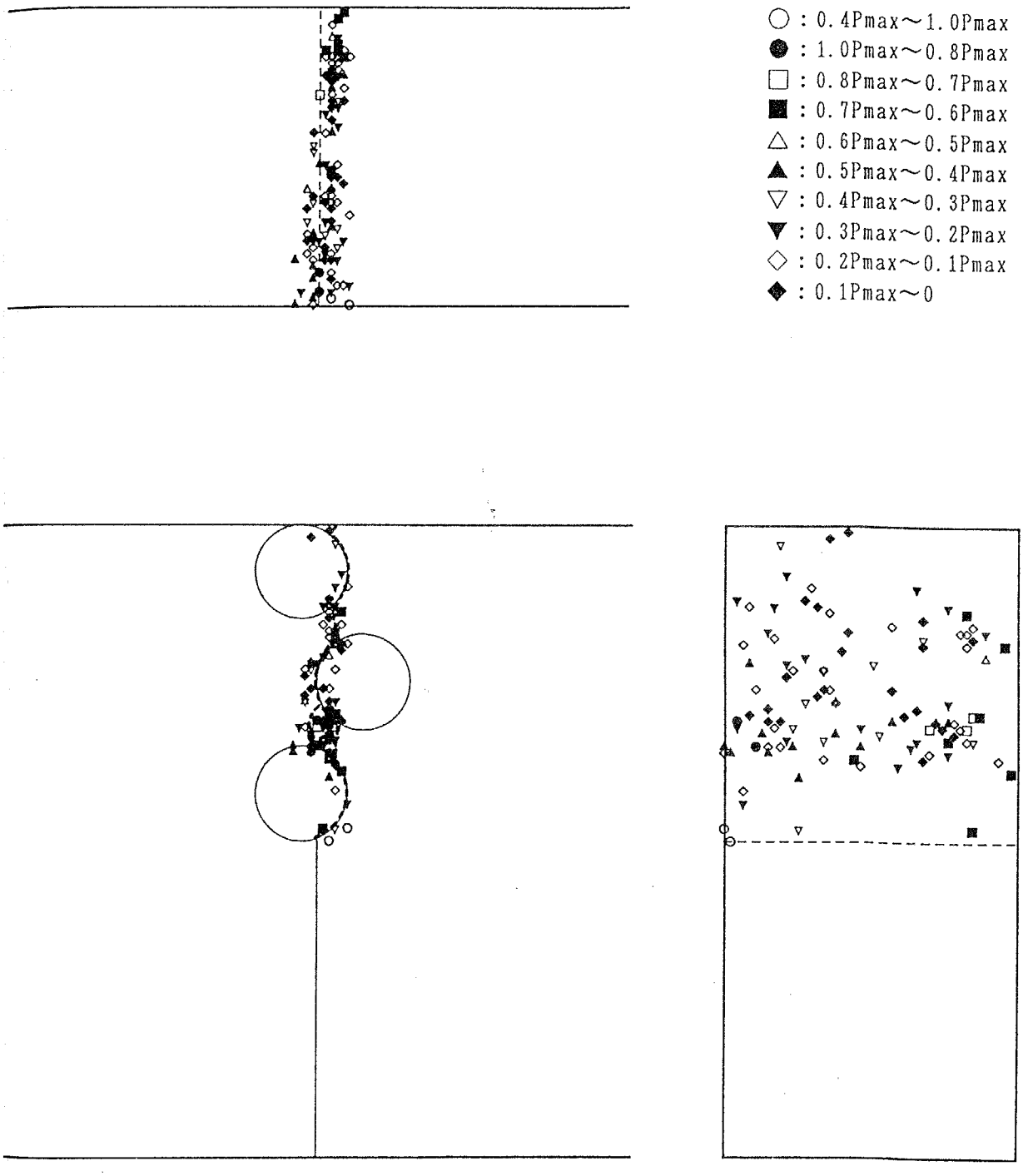
図－6.25　高周波成分をもつＡＥ波形による三次元位置標定結果：PL-23B



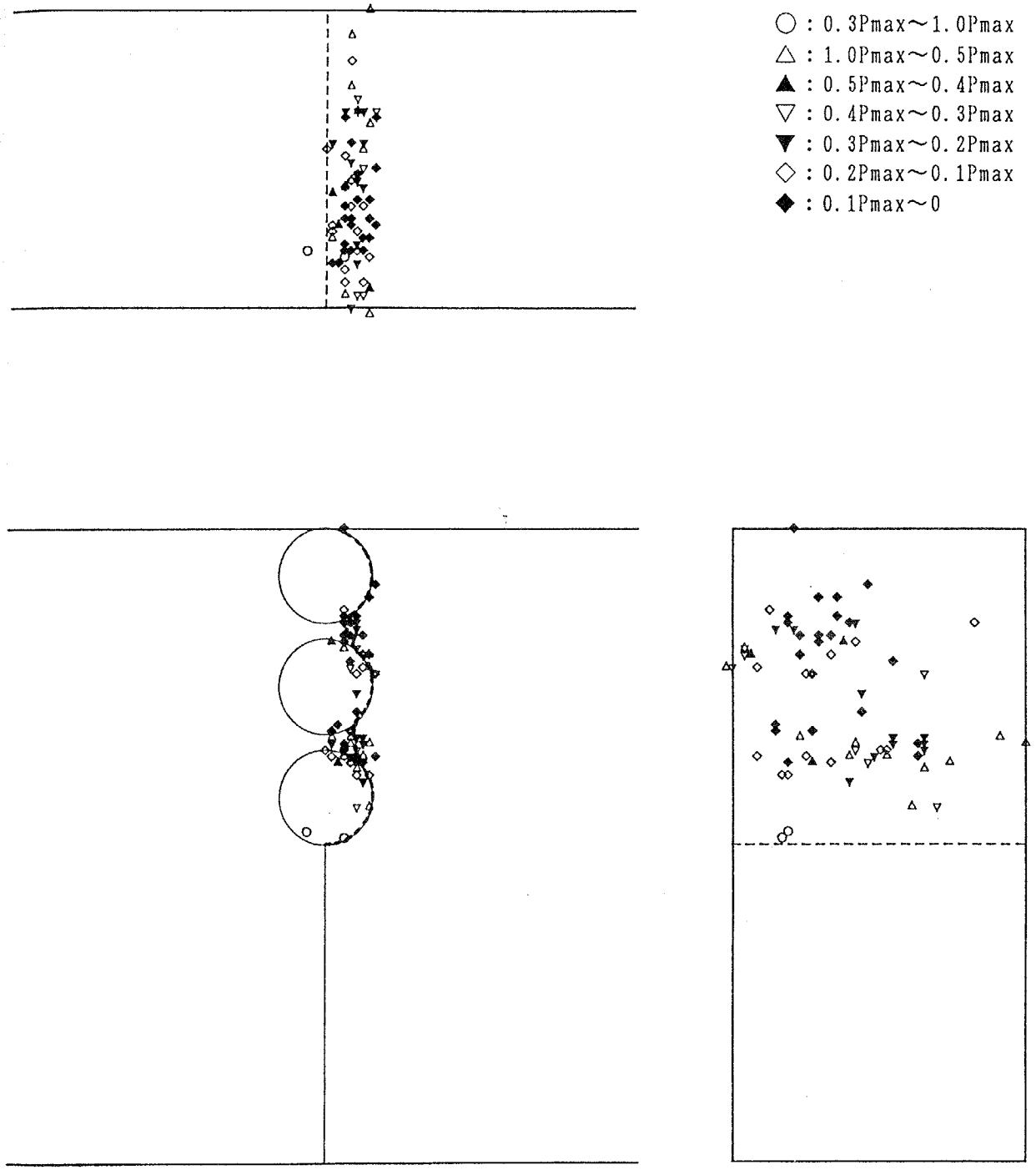
図－6.26　高周波成分をもつＡＥ波形による三次元位置標定結果：PL-61B



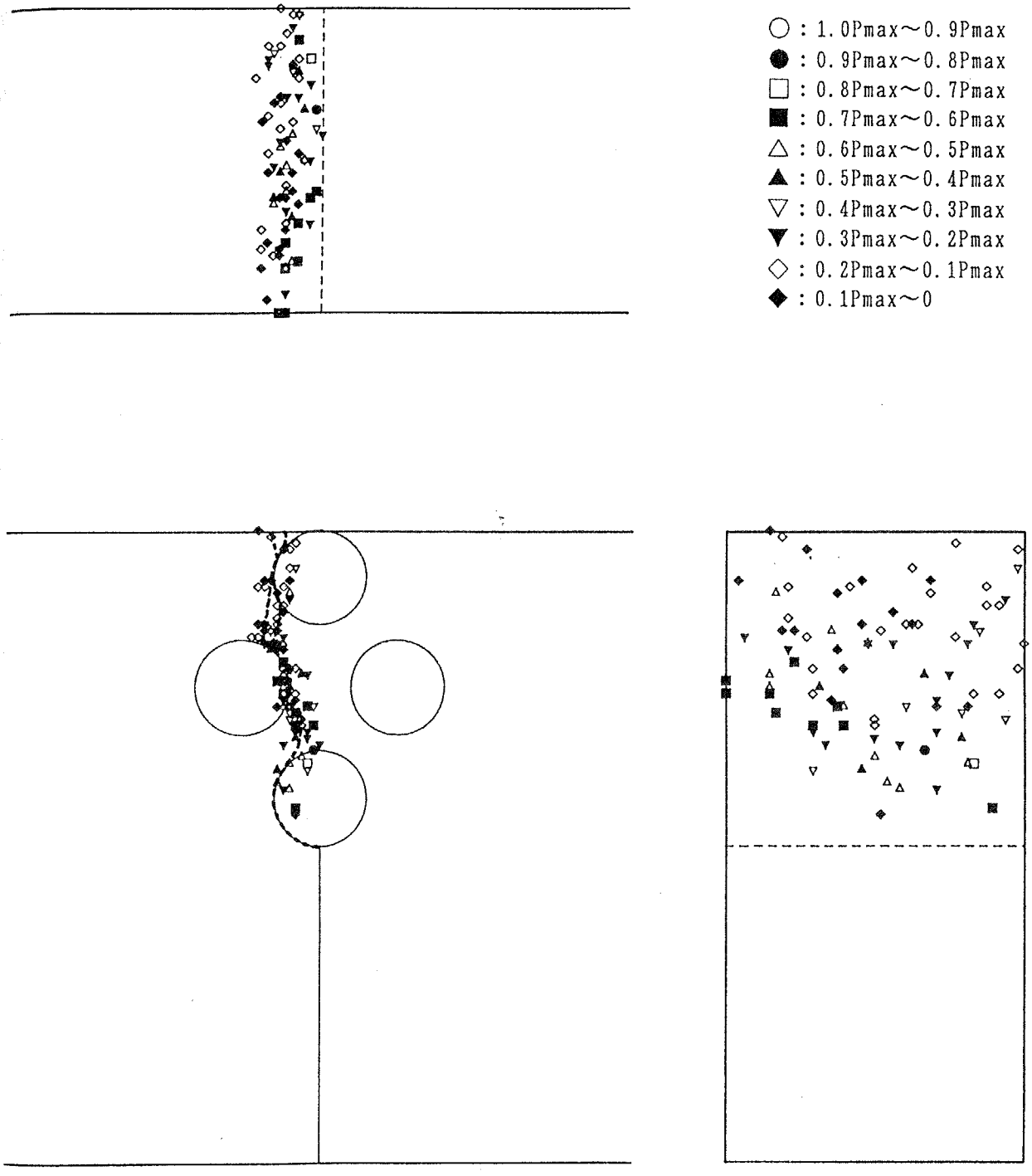
図－6.27　三次元位置標定結果と破壊経路：A1-2T



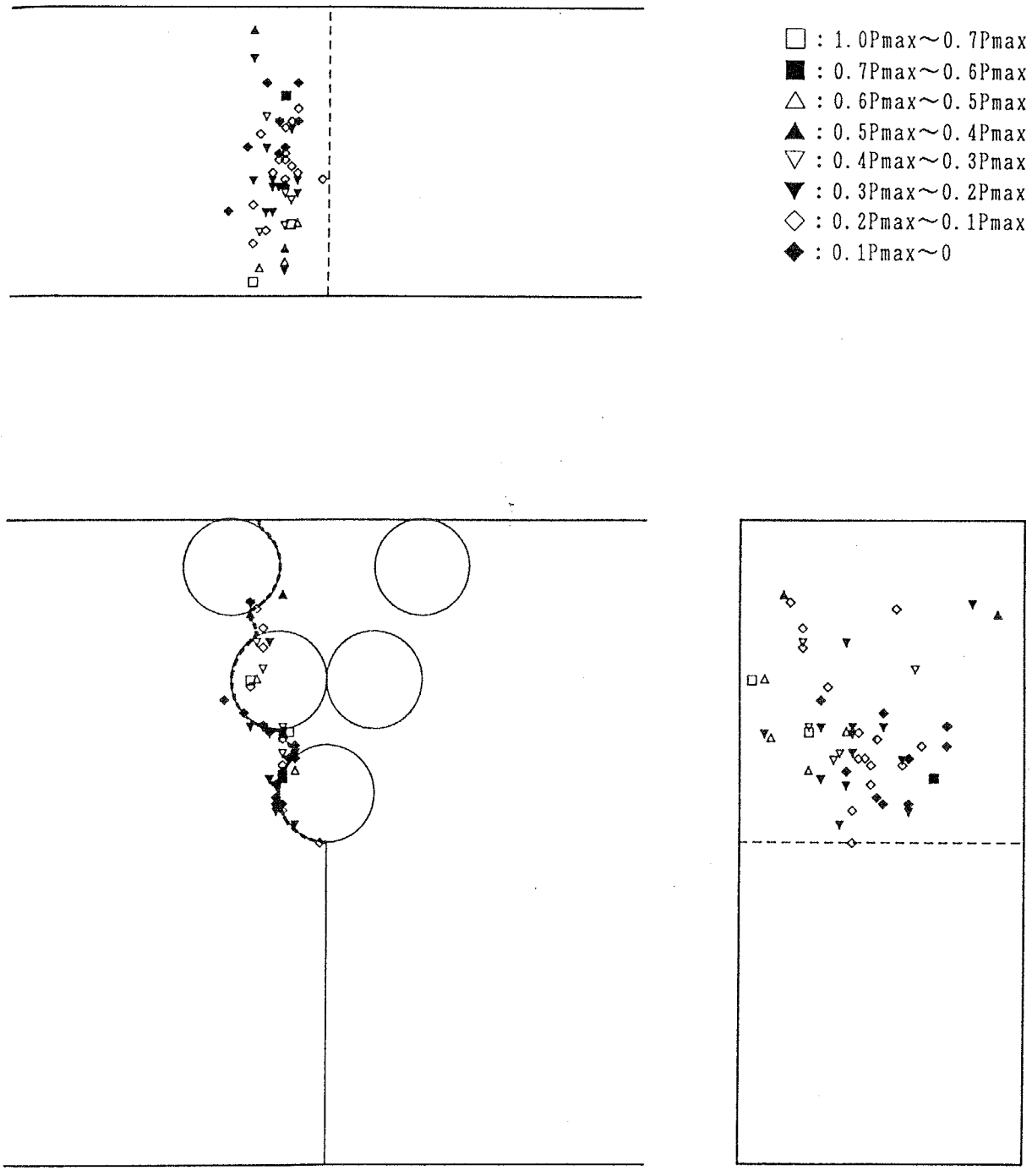
図－6.28　三次元位置標定結果と破壊経路：A2-2T



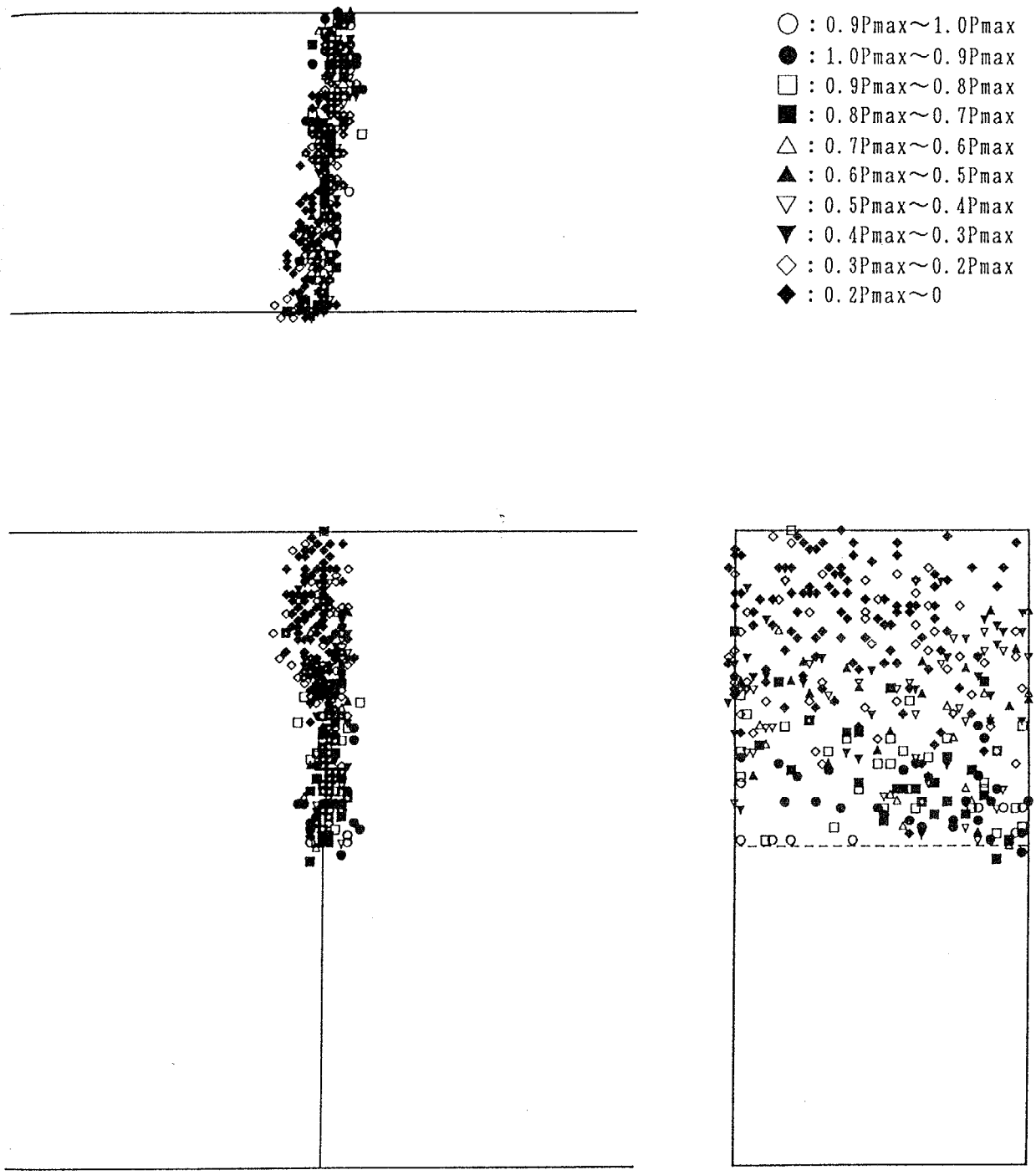
図－6.29　三次元位置標定結果と破壊経路：S3-2T



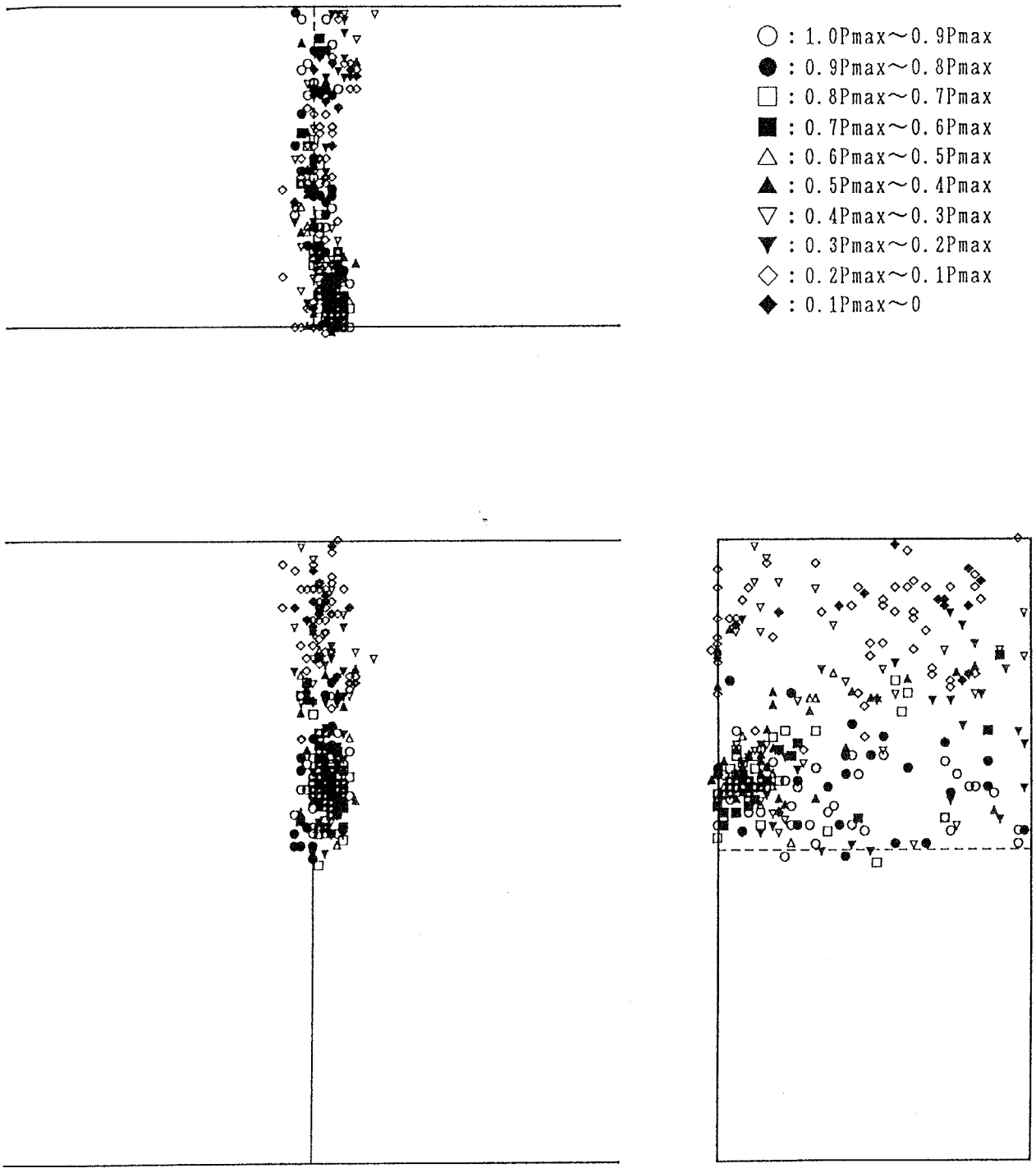
図－6.30　三次元位置標定結果と破壊経路：S4-2T



図－6.31　三次元位置標定結果と破壊経路：S5-2T



図－6.32　モルタル試験体の三次元位置標定結果：MT-4B



図－6.33　コンクリート試験体のの三次元位置標定結果：CT-2B

6.5 まとめ

本章では、円柱状の疑似骨材を含む簡単なモデルコンクリート試験体を用いて、クラック進展に及ぼす骨材の影響を検討した。また、軟化領域の進展および大きさを推定するために、アコースティック・エミッションを計測し、3次元位置標定およびスペクトル解析を行った。これから以下の結論を得た。

(1) モデルコンクリートに対して、定量的な考察を行うためには、破壊面の詳細な検討が必要である。

(2) クラックが疑似骨材に到達した場合、骨材を迂回してクラックがさらに進展するためには、より多くのエネルギーが必要になるため、最大耐力後において、上に凸の曲線がみられるようになる。このような骨材によるクラック拘束挙動が多数重なり合うことによって、コンクリートのような最大耐力後の抵抗力が得られる。

(3) 本モデルコンクリート試験体は、ノッチ先端の疑似骨材が初期剛性に寄与するが、最大荷重の60～80%の荷重で、疑似骨材とモルタルの境界面の損傷が大きくなり、その境界面の剛性が支配的になるため、剛性の低下が生じ、不連続な曲線となる。

(4) プレート型モデルコンクリートの場合、ＡＥ波形のスペクトル解析（ＭＥＭ）によって、軟化領域内の処女破壊と考えられる２箇所のピークをもつＡＥ波形を識別することができ、その進展挙動を示した。このＡＥ波形は、アルミナプレートにモルタルが薄く付着した破壊面からの信号であった。

(5) 円柱型モデルコンクリートの場合、スペクトル解析によるＡＥ波形の識別はできなかったが、到達時間の明確なＡＥ波形を用いることによって、精度の良い位置標定を行うことができた。

(6) モルタルおよびコンクリートの場合、モデルコンクリートのような弱い境界面がないため、ＡＥ信号はより多数発生し、最大耐力後の抵抗力も大きい。

(7) ＡＥ信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けており、軟化領域の広がりを示している。その領域をマイクロクラッキング領域とブリッジング領域に分けた場合、クラック先端より後方からの信号は、後者に対応するものと思われる。したがって、ＡＥ源の三次元位置標定により、軟化領域の大きさを評価できる。

第7章　結　論

本研究では、直接引張試験によってコンクリートの軟化領域の力学的特性（引張軟化特性）を直接定量化することは、コンクリート特有の不均質さに起因する曲げ変形が試験結果に大きく影響し、困難であることを線形破壊力学に基づいて示した。それ故間接的な方法であるが、最大耐力後も安定した荷重－変位関係を測定できる曲げ試験法を行い、コンクリートおよびモルタルのクラック抵抗性能に及ぼす各種要因（初期ノッチ深さ、載荷速度、最大骨材寸法、水セメント比、載荷方法、養生、試験体寸法、材令）の影響を検討した。次に、曲げ試験結果に対して最適な引張軟化特性を逆解析法によって決定し、各種要因が引張軟化特性に及ぼす影響について考察した。さらに実験中、顕微鏡で観察したクラック進展挙動と引張軟化特性を組み込んだ解析結果を比較し、そのモデルが何を表しているのかを検討し、軟化領域の破壊メカニズムについて考察した。また、アコースティック・エミッション（ＡＥ）の三次元位置標定精度を高めるために、ＡＥ波形より真のＡＥ到達時間を決定し、さらに、ＡＥ波形のスペクトル解析を行い、そのスペクトルパターンを比較することによって、ダメージに起因したと考えられるＡＥ信号を識別し、軟化領域の進展挙動およびその大きさについて考察した。

本論文の各章で得られた主な結論を以下に示す。

第２章　「直接引張試験」

(1) 球座の有無にかかわらず、試験体には曲げ変形が生じる。これはコンクリート内の骨材粒子がランダムに分布しており、各断面における引張剛性の中心は、断面の幾何学的中心とも、荷重の作用線とも一致しないためである。したがって、弾性範囲内から偏心が存在し、最大荷重後、クラックは不均一に進行するので、偏心も増大する。

(2) 球座を有する試験体の偏心距離は、最大荷重まで増加が少なく、曲げの影響は小さい。それ故、曲げの影響を無視して引張強度を算定してもその誤差は10%程度である。しかし、最大荷重後、クラックが進行すると球座が

回転するので安定した荷重－クラック開口変位関係を得ることはできない。

(3)最大荷重後も安定した荷重－クラック開口変位関係を得るために、球座を取り外して行なった試験では、最大荷重に近づいていくと偏心距離が急増し、曲げの影響が大きくなる。その結果、引張強度は、球座を有する試験体と比較すると、30%以上低下する。

(4)コンクリートの直接引張試験は、荷重－クラック開口変位関係を決定する最も直接的な方法であるが、コンクリート固有の不均質さに起因する曲げ変形を避けることができないので、試験結果の評価は困難である。

第３章　「ノッチを有するコンクリートの曲げ試験」

(1)本実験で用いた鉛直変位測定用フレームおよびバネ支持の支点ローラーにより、微小な弾性変形が正確に測定でき、ノッチ深さ30mm以上の試験体に対して、最大耐力後も安定した荷重－変位曲線を得ることができた。

(2)コンクリートは、微小なクラック進展が破壊に直結しない場合があるため、線形弾性破壊力学から得られる破壊靱性パラメータより、クラック抵抗性能を評価できる破壊エネルギーの方が、重要なパラメータとなる。

(3)最大耐力後の抵抗力と破壊エネルギーは、試験体のリガメント長さが長くなると増大する。

(4)載荷速度を速くすると、最大耐力は増加するが、破壊エネルギーへの影響は少ない。

(5)最大耐力に近い荷重を持続させると、クリープ変形が進行し、その荷重を維持できなくなる限界変位に達する。したがって、荷重－変位曲線は頂の部分が欠けた曲線となる。

(6)最大骨材寸法が大きいほど破壊エネルギーも大きくなり、バラツキも大きくなる。

(7)水セメント比が大きくなると、最大耐力は減少するが、破壊エネルギーに関しては、明確な傾向がみられない。

(8)ノッチを有しているため、３点曲げと４点曲げの有効曲げ強度に有意な差異は認められない。また、破壊エネルギーは、４点曲げの方が３点曲げより大きくなる傾向がある。

(9)気中養生試験体は水中養生試験体に比べ、曲げ強度は約20%、破壊エネルギーは30～50%高くなる。

(10)材令に伴う破壊エネルギーの増加は、圧縮強度、曲げ強度と比べて小さい。

(11)クラックは最大荷重の70～80%の荷重から50倍率の顕微鏡で確認できるようになり、最大荷重時で10～20mm程度のクラック進展である。

(12)コンクリートの最大耐力後の軟化挙動は、骨材のクラック拘束によって大きく影響を受け、その他の影響が明確に現れない場合がある。

(13)ノッチを有するコンクリートの曲げ変形モードは、ノッチの上方のリガメント内に回転中心をもつ剛体の回転運動とみることができる。この回転中心は、最大耐力までリガメントの中央付近にあるが、その後、クラック進展に伴って、上へ移動する。

第４章　「モルタルの曲げ試験」

(1)小寸法試験体(40x40x160mm)の有効曲げ強度は、大寸法試験体(100x100x400mm)より軟化領域が破壊面に占める割合が高くなるため、25～30%上昇する。

(2)大寸法試験体の方がクラック径路が複雑になるため、破壊エネルギーは小寸法試験体より１割強高くなる。

(3)リガメント長さが長くなる（ノッチ深さが浅くなる）と、上記(1),(2)と同じ理由により、破壊エネルギーは増加するが、有効曲げ強度は減少する。

(4)載荷速度が速いほど、有効曲げ強度は高くなるが、最大耐力後の抵抗力は低くなる傾向がある。

(5)最大粒子径が大きくなると、有効曲げ強度および破壊エネルギーは上昇するが、水和反応が進行すると最大粒子径の影響は少なくなる傾向がある。

(6)破壊面を規定しない（ノッチの無い）曲げ試験では、最弱エレメント部の強度で耐力が決定し、水セメント比が0.45～0.65の範囲の曲げ強さは、ほぼ一定となる。

(7)ノッチを有する曲げ試験の有効曲げ強度（最大耐力）は、水セメント比が高くなると低下するが、最大耐力後の軟化挙動は、水セメント比より破壊面におけるクラック径路に大きく影響される。

(8)本実験で用いた各載荷方法（120mmスパン３点曲げ、120mmスパン４点曲げ、320mmスパン３点曲げ）によって得られた破壊エネルギーの値に差異はない。

(9)最弱エレメント部の材令に伴う強度上昇は小さい。

(10)水和反応の進行による破壊エネルギーの増加は、強度と比較して小さく、材令１年の試験体は最大耐力後、より脆性的な挙動を示す。

(11)繰り返し曲げ載荷による荷重－変位曲線は、繰り返し圧縮載荷による応力－ひずみ曲線と同様の挙動を示すが、再載荷曲線は常に上に凸な曲線である。

(12)時間効果試験後の軟化挙動は、単調漸増載荷における最大耐力後の軟化挙動とほぼ一致しており、全体の荷重－変位曲線は、単調載荷による曲線の頂が欠けた形となる。

(13)最大荷重の85%以上の一定荷重下では、ひずみ硬化はほとんどみられず、クラックの進展によって変形が進み、崩壊に至る。

(14)クラックを拘束する粗骨材が存在しない場合、クラックの開始が荷重低下に直結するため、クラックは最大耐力近くまで観測されない。

第５章　「逆解析によるコンクリートの引張軟化特性」

(1)本解析で推定された引張軟化特性は、クラック前方の軟化領域における力学的特性を良く近似している。

(2)ノッチ深さが増加すると、一次破壊の負勾配が大きくなり、より脆性的な

軟化特性を示す傾向がみられる（１年試験）。

(3)載荷速度が速くなるほど、引張強度および一次破壊の負勾配の値が増加し、より脆性破壊的な特性を示す。

(4)引張軟化特性は、最大骨材寸法に大きく影響され、最大骨材寸法が小さくなると、一次破壊（マイクロクラッキング）が卓越し、大きくなると二次破壊（骨材のブリッジング）が卓越するという破壊メカニズムの相違を示している。したがって、本解析で用いたバイリニア型軟化モデルは、軟化領域内の力学的挙動を記述する最も簡単なモデルであるが、コンクリート内部の破壊のメカニズムを相対的に評価することができるといえる。

(5)水セメント比が減少していくと、一次および二次破壊の負勾配が急勾配となり、それぞれの破壊終了時のクラック幅が減少して脆性化する。

(6)４点曲げは３点曲げより、一次破壊の負勾配が減少し、二次破壊の負勾配が増加する傾向を示す。

(7)気中養生試験体は水中養生試験体より、引張強度が30～50%増加し、一次破壊で消費されるエネルギーが減少するので、一次破壊の負勾配は水中養生の２倍となるが、二次破壊に対する抵抗力（エネルギー）は大きい。

(8)材令１年の試験体は材令４週の試験体より、一次および二次破壊の負勾配が急勾配となり、それぞれの破壊終了時のクラック幅が減少して脆性化する。

(9)モルタルの引張軟化特性は、試験体寸法に依存しない材料特性であるといえる。

(10)最大荷重の80%以下では、最大耐力前の非線形性に影響を与えるダメージが軟化領域内に発生しているが（解析では最大荷重の約10%で軟化開始）、倍率50倍の顕微鏡ではクラックとして観測できるまでに成長していない。

(11)最大荷重の80%の荷重を超えると、個々のダメージが成長、連結し始め、倍率50倍の顕微鏡でもクラックとして観察が可能になる。

(12)最大耐力後、荷重が減少していくと、ダメージを受けていない弾性部分は

回復し、また、メインクラック以外の分岐クラックは徐々に閉じ始め、メインクラッキングゾーンへのひずみの局所化が進行する。したがって顕微鏡によるクラック観察が容易になり、一次破壊開始の予測値と観測値の相違が減少する。

(13)顕微鏡観測の精度に関しては検討しておらず、したがって今後、軟化領域内の破壊メカニズムをより詳細に推測していくためには、より高感度な検出法による軟化領域の観測および実際の物理現象をより詳細に記述できるモデルの開発が必要である。

第６章　「アコースティック・エミッションによる軟化領域の推定法」

(1)モデルコンクリートに対して、定量的な考察を行うためには、破壊面の詳細な検討が必要である。

(2)クラックが疑似骨材に到達した場合、骨材を迂回してクラックがさらに進展するためには、より多くのエネルギーが必要になるため、最大耐力後において、上に凸の曲線がみられるようになる。このような骨材によるクラック拘束挙動が多数重なり合うことによって、コンクリートのような最大耐力後の抵抗力が得られる。

(3)本モデルコンクリート試験体は、ノッチ先端の疑似骨材が初期剛性に寄与するが、最大荷重の60～80％の荷重で、疑似骨材とモルタルの境界面の損傷が大きくなり、その境界面の剛性が支配的になるため、剛性の低下が生じ、不連続な曲線となる。

(4)プレート型モデルコンクリートの場合、ＡＥ波形のスペクトル解析（ＭＥＭ）によって、軟化領域内の処女破壊と考えられる２箇所のピークをもつＡＥ波形を識別することができ、その進展挙動を示した。このＡＥ波形は、アルミナプレートにモルタルが薄く付着した破壊面からの信号であった。

(5)円柱型モデルコンクリートの場合、スペクトル解析によるＡＥ波形の識別はできなかったが、到達時間の明確なＡＥ波形を用いることによって、精

度の良い位置標定を行うことができた。

(6) モルタルおよびコンクリートの場合、モデルコンクリートのような弱い境界面がないため、ＡＥ信号はより多数発生し、最大耐力後の抵抗力も大きい。

(7) ＡＥ信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けており、軟化領域の広がりを示している。その領域をマイクロクラッキング領域とブリッジング領域に分けた場合、クラック先端より後方からの信号は、後者に対応するものと思われる。したがって、ＡＥ源の三次元位置標定により、軟化領域の大きさを評価できる。

参考文献

［第１章］

1) A.A. Griffith; The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol.A221, 1920, pp.163-198

2) S.T.Rolfe and J.M. Barsom （横堀武夫＝監訳）：構造物における破壊疲労の防止＝破壊力学の応用、倍風館、1981

3) 矢川元基編：破壊力学－理論・解析から工学的応用まで、倍風館、1988

4) M.F. Kaplan; Crack Propagation and the Fracture of Concrete, Journal of the American Concrete Institute, Vol.58, 1961, pp.591-609

5) 森田司郎（代表研究者）：鉄筋コンクリート構造のＦＥＭ解析の精度向上に必要な基礎実験と解析モデルの開発，昭和63年度科学研究費補助金研究成果報告書，平成元年３月

6) コンクリートの破壊力学研究委員会（委員長：三橋博三）：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，日本コンクリート工学協会，1990

7) B.P. Hughes and G.P. Chapman; Direct tensile test for concrete using modern adhesive, Bulletin RILEM, No.26, 1965, pp.77-80

8) B.P. Hughes and G.P. Chapman; The complete stress-strain curve for concrete in direct tention, Bulletin RILEM, No.30,1966, pp.95-97

9) R.H. Evans and M. S. Marathe ; Microcracking and Stress-Strain Curves for Concrete in Tension, Materials and Constructions, No.1, 1968, pp.61-64

10) V.S. Gopalaratnam and S.P. Shah ; Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, Journal of American Concrete Institute, Vol.82, No.3, 1985, pp.310-323

11) Guo Zhen-hai and Zhang Xiu-qin ; Investigation of Complete Stress-Deformation curves for Concrete in Tension, ACI Materials Journal, Vol.84, No.4, 1987, pp.278-285

12) H. W. Reinhardt ; Fracture Mechanics of an Elastic Softening Materials like Concrete, HERON, Vol.29, No.2, 1984, pp.2-42

13) H.A.W. Cornelissen, D.A. Hordijk and H.W. Reinhardt; Experiments and Theory for the Application of Fracture Mechanics to Normal and Lightweight Concrete, in Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, ed. by F.H. Wittmann, Elsevier, 1986, pp.565-575

14) J. Glucklich; Fracture of Plain Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.89, No.EM6, 1963, pp.127-138

15) F. Moavenzadeh and R. Kuguel ; Fracture of Concrete, Journal of Materials, JMLSA, Vol.4, No.3, 1969, pp.497-519

16) S.P. Shah and F.J. McGarry ; Griffith Fracture Criterion and Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.97, No.EM6, 1971, pp.1663-1676

17) S. Mindess ; The Cracking and Fracture of Concrete : An Annotated Bibliography 1928-1981, in Fracture Mechanics of Concrete, ed. by F.H. Wittmann, Elsevier, 1983, pp.539-661

18) S. Mindess; The Cracking and Fracture of Concrete : An Annotated Bibliography 1982-1985, in Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, ed. by F.H. Wittmann, Elsevier, 1986, pp.629-694

19) A. Hillerborg, M. Modeer and P. E. Peterson; Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, 1976, pp.773-782

20) P.E. Peterson; Fracture Energy of Concrete : Method of Determination, Cement and Concrete Research, Vol.10, 1980, pp.78-89

21) P.E. Peterson; Fracture Energy of Concrete : Practical Perfomance and Experimental Results, Cement and Concrete Research, Vol.10, 1980, pp.91-101

22) A. Hillerborg; Analysis of One Single Crack, in Fracture Mechanics of Concrete, ed. by F. H. Wittmann, Elsevier, 1983, pp.223-249

23) A. Hillerborg; The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete, Materials and Constructions, Vol.18, No.106, 1985, pp.291-296

24) RILEM Draft Recommendation (50-FMC); Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Materials and Structures, Vol.18, 1985, pp.285-290

25) A. Hillerborg; Results of three comparative test series for determining the fracture energy G_F of concrete, Materials and Structures, Vol.18, N0.107, 1985, pp.407-413, 1985

26) L.J. Malvar and G. Warren; Fracture energy for three point bend tests on single edge notched beams : proposed evaluation, Materials and Structures, Vol.20, 1987, pp.440-447

27) G.V. Guinea, J. Planas and M. Elices; Measurement of the fracture energy using three-point bend tests:Part 1-Influence of experimental procedures, Materials and Structures, Vol.25, 1992, pp.212-218

28) M. Elices, G.V. Guinea and J. Planas; Measurement of the fracture energy using three-point bend tests : Part 3-Influence of cutting the P- δ tail, Materials and Structures, Vol.25, 1992, pp.327-334

29) P. Nallathambi, B.L. Karihaloo and B.S. Heaton; Effect of specimen and crack sizes, water/cement ratio and coarse aggregate texture upon fracture toughness of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.36, No.129, 1984, pp.227-236

30) P. Nallathambi, B.L. Karihaloo and B.S. Heaton ; Various Size Effects in Fracture of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.15, 1985, pp.117-126

31) Wittmann, F.H., Roelfstra, P.E., Mihashi, H., Yiun-Yuang Huang, Xin-Hua Zhang and Nomura, N.: Influence of age of loading, water-cement ratio and rate of loading on fracture energy of concrete, Materials and Structures, Vol.20, pp.103-110, 1987

32) Wittmann, F.H., Rokugo, K., Bruhwiler, E., Mihashi, H. and Simonin, P.: Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens, Materials and Structures, Vol.21, pp.21-32, 1988

33) Mindess, S.:Fracture Propcess Zone Detection, Fracture Mechanics Test Methods for Concrete, S.P.Shah and A.Carpinteri(eds.), Chapman and Hall, pp.231-261, 1991

34) Roelfstra, P.E. and Wittmann, F.H. :Numerical Method to Link Strain Softening with Failure of Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, F.H.Wittmann(ed.), Elsevier, pp.163-175, 1986

35) Carpinteri, A., Di Tommaso, A and Fanelli, M.: Influence of Material Parameters and Geometry on Cohesive Crack Propagation, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, F.H.Wittmann(ed.), Elsevier, pp.117-135, 1986

36) 野村希晶，三橋博三，鈴木　篤，和泉正哲：非線形破壊力学手法に基づく高強度の脆性化機構の考察；日本建築学会構造系論文報告集，第416号，pp.9-16，1990年10月

37) 野村希晶，三橋博三，加藤敏史，和泉正哲：コンクリートの内部構造と引張軟化特性；材料，第40巻，pp.1157-1163, 1990

38) 堀井秀之，一宮利通：レーザースペックル法によるフラクチャープロセスゾーンの計測；土木学会構造工学論文集，Vol.36A, 1990

39) Nomura, N, Mihashi, H. and Izumi, M.: Correlation of Fracture Process Zone and Tension Softening Behavior in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.21, pp.545-550, 1991

40) U. Diederichs, U. Schneider and M. Terrien; Formation and Propagation of Cracks and Acoustic Emission, in Fracture Mechanics of Concrete, ed. by F. H. Wittmann, Elsevier, 1983, pp.157-205

41) 小林昭一、大津政康：アコースティック・エミッションのコンクリート工学への応用；コンクリート工学, Vol.16, No.7, pp.9-17, 1978

42) 山田和夫、小阪義夫：コンクリート中を伝ぱするアコースティック・エミッションの減衰特性； 材料, 第36巻, 第406号, pp.38-44, 昭和62年

43) A. Maji and S.P. Shah; Process Zone and Acoustic-Emission Measurements in Cocrete, Experimental Mechanics, Vol.28, pp.27-33, 1988

44) P. Rossi, J.L. Robert, J.P. Gervais and D. Bruhat ; Acoustic emission applied to study crack propagation in concrete, Materials and Structures, Vol.22, pp.374-384, 1989

45) M. Ohtsu, M. Shigeishi, H. Iwase and W. Koyanagi; Determination of crack location, type and orientation in concrete structures by acoustic emission, Magazine of Concrete Research, Vol.43, pp.127-134, 1991

46) H. Duda; Grain-Model for the Determination of the Stress-Crack-Width-Relation, in Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics, ed. by L. Elfgren and S. P. Shah, Chapman andHall, 1991, pp.88-96

[第２章]

1) B.P. Hughes and G.P. Chapman; Direct tensile test for concrete using modern adhesives; Bulletin RILEM No.26 MARCH, 1965, pp.77-80

2) B.P. Hughes and G.P. Chapman; The complete stress-strain curve for concrete in direct tension; Bulletin RILEM No.30 MARCH, 1966, pp.95-97

3) V.S. Gopalaratnam and S.P. Shah; Softening Responce of Plain Concrete in Direct Tension; ACI Journal, Vol.82, No3, 1985, pp.310-323

4) Guo Zhen-hai and Zhang Xiu-qin; Investigation of Complete Stress-Deformation Curves for Concrete in Tension; ACI Material Journal, Vol.84, No.4, 1987, pp.278-285

5) H.W. Reinhardt; Fracture Mechanics of an Elastic Softening Materials like Concrete; HERON, Vol.29, No.2 1984, pp.2-42

6) H.A.W. Cornelissen, D.A. Hordijk and H.W. Reinhardt; Experiments and Theory for the Application of Fracture Mechanics to Normal and Lightweight Concrete; in Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, ed. by F.H. Wittmann, Elsevier, 1986, pp.565-575

7) A.A. Griffith; The Phenomena of Rupture and flow in Solids; Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. A221, 1920, pp.163-198

8) 岡村弘之：線形破壊力学入門；培風館, 1976, p.226

9) J.P. Benthem and W.T. Koiter; Asymptotic approximations to crack problems; in Mechanics of fracture 1 Methods of analysis and solutions of crack problems, ed. by G.C. Sih, Noordhoff, 1973, pp.131-178

10) A. Hillerborg; Analysis of One Single Crack; in Fracture Mechanics of Concrete, ed. by F.H. Wittmann, Elservier, 1983, pp.223-249

[第3章]

1) 中原一郎：「材料力学」 上巻；養賢堂、1965

2) J. E. Srawley; Wide range stress intensity factor expressions for ASTM E 399 standard fracture toughness specimens, International Journal of Fracture, Vol.12, 1976, pp.475～476

3) K. Kishitani, T. Hirai and K. Murakami; J-integral Method in analysis of stress intensity factor using boundary elements, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Ser. B., Vol.37, No.3, 1984, pp.529～547

4) W. F. Brown, Jr., and J. E. Srawley; Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials, ASTM Special Technical Publication, No.410, 1966, p.13

5) RILEM Technical Committee 50-FMC, RILEM Draft Recommendation, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, 1985, pp.285～290

6) 岡田清、六車熙 編 「コンクリート工学ハンドブック」 朝倉書店, 1981

7) 松藤泰典、吉岡俊二、石田修二：乾燥収縮過程におけるモルタルの曲げ強度について；日本建築学会大会学術講演梗概集, 1975, pp.81-82

8) F.H. ウィットマン（三橋博三訳）：コンクリートの内部構造と力学的特性；コンクリート工学、 Vol.21, No.3, 1983, pp.19～30

9) 鈴木泰生、田中寛、内田祐市、六郷恵哲、小柳洽：各種条件におけるコンクリートの破壊エネルギーと引張軟化曲線；コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、第２部論文集、1990, pp.87～90

10) Methods for COD Testing, BS 5762, The British Standard Institution, London, 1979

[第４章]

1) M.F. Kaplan; Crack Propagation and the Fracture of Concrete, Journal of the American Concrete Institute, 58, 1961, pp.591-609

2) F. Moavenzadeh and R. Kuguel; Fracture of Concrete, Journal of Materials, JMLSA, Vol.4, No.3, 1969, pp.497-519

3) D. J. Naus and J. L. Lott; Fracture Toughness of Portland Cement Concretes, ACI Journal, 66, 1969, pp.481-489

4) J. H. Brown and C. D. Pomeroy; Fracture Toughness of Cement Paste and Mortars; Cement and Concrete Research, Vol.3, 1973, pp.475-480

5) B. Hillemeier and H. K. Hilsdorf; Fracture Mechanics Studies on Concrete Compounds; Cement and Concrete Research, Vol.7, 1977, pp.523-536

6) S. P. Shah and F. J. McGarry; Griffith Fracture Criterion and Concrete; Proceedings of ASCE, Vol.97, No.EM6, 1971, pp.1663-1676

7) 大岸佐吉、小野博宣：セメントペースト、モルタルの破壊靭性に及ぼす試験要因効果；コンクリート工学　論文　Vol.25, No.2, 1987, pp.113-125

8) W.F. Brown, Jr., and J.E. Srawley; Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials, ASTM Special Technical Publication, No.410, 1966, p.13

9) S. Mindess; Fracture Process Zone Detection, in Fracture Mechanics Test Methods for Concrete, S.P. Shah and A. Carpinteri (eds.), Chapman and Hall, 1991, pp.231-261

[第５章]

1) Mindess, S.:Fracture Propcess Zone Detection, Fracture Mechanics Test Methods for Concrete, S.P.Shah and A.Carpinteri(eds.), Chapman and Hall, pp.231-261, 1991

2) Hillerborg, A., Modeer, M and Petersson, P.E.:Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, No.6, pp.773-782, 1976

3) Bazant, Z.P.and Oh, B.H.:Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, Vol.16, No.93, pp.155-177, 1983

4) Roelfstra, P.E. and Wittmann, F.H. :Numerical Method to Link Strain Softening with Failure of Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, F.H.Wittmann(ed.), Elsevier, pp.163-175, 1986

5) Wittmann, F.H., Roelfstra, P.E., Mihashi, H., Yiun-Yuang Huang, Xin-Hua Zhang and Nomura, N.:Influence of age of loading, water-cement ratio and rate of loading on fracture energy of concrete, Materials and Structures, Vol.20, pp.103-110, 1987

6) Wittmann, F.H., Rokugo, K., Bruhwiler, E., Mihashi, H. and Simonin, P. : Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens, Materials and Structures, Vol.21, pp.21-32, 1988

7) 野村希晶，三橋博三，鈴木 篤，和泉正哲：非線形破壊力学手法に基づく高強度の脆性化機構の考察；日本建築学会構造系論文報告集，第416号，pp.9-16，1990年10月

8) 野村希晶，三橋博三，加藤敏史，和泉正哲：コンクリートの内部構造と引張軟化特性；材料，第40巻，pp.1157-1163, 1990

9) 堀井秀之，一宮利通：レーザースペックル法によるフラクチャープロセスゾーンの計測；土木学会構造工学論文集，Vol.36A, 1990

10) Nomura, N, Mihashi, H. and Izumi, M.:Correlation of Fracture Process Zone and Tension Softening Behavior in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.21, pp.545-550, 1991

11) Carpinteri, A., Di Tommaso, A and Fanelli, M.:Influence of Material Parameters and Geometry on Cohesive Crack Propagation, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, F.H.Wittmann(ed.), Elsevier, pp.117-135, 1986

12) Mihashi, H, Nomura, N, Izumi, M and Wittmann, F.H. :Size Dependence of Fracture Energy of Concrete, Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics, Proceedings of the International RILEM/ESIS Conference, Vol.1, pp.441-450, 1991

13) F.H.ウイットマン（三橋博三訳）：コンクリートの内部構造と力学的特性；コンクリート工学，Vol.21, No.3, pp.19-30, 1983

14) 岡島達雄，石川時雄：セメント硬化体の力学的性質に及ぼす含水率の影響に関する一考察；第２回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.101-104, 1980

15) 大岸佐吉，小野博宣，棚橋　勇：セメントモルタルの強度、変形に及ぼす含浸液体の表面張力の影響；第３回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.101-104, 1981

16) Hillerborg, A. :Analysis of One Single Crack, Fracture Mechanics of Concrete, F.H.Wittmann(ed.), Elsevier, pp.223-249, 1983

［第６章］

1) 小林昭一、大津政康：アコースティック・エミッションのコンクリート工学への応用： コンクリート工学, Vol.16, No.7, pp.9-17, 1978

2) 山田和夫、小阪義夫：コンクリート中を伝ぱするアコースティック・エミッションの減衰特性； 材料, 第36巻, 第406号, pp.38-44, 昭和62年

3) A. Maji and S. P. Shah ; Process Zone and Acoustic-Emission Measurements in Cocrete, Experimental Mechanics, Vol.28, pp.27-33, 1988

4) P. Rossi, J. L. Robert, J. P. Gervais and D. Bruhat ; Acoustic emission applied to study crack propagation in concrete, Materials and Structures, Vol.22, pp.374-384, 1989

5) M. Ohtsu, M. Shigeishi, H. Iwase and W. Koyanagi ; Determination of crack location, type and orientation in concrete structures by acoustic emission, Magazine of Concrete Research, Vol.43, pp.127-134, 1991

6) J. Ulrych and T. N. Bishop ; Maximum Entropy Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.13, pp.183-200, 1975

7) 瀧　保夫、宮川　洋：情報論 I , 岩波講座基礎工学 19； 岩波書店, 1970

8) D. E. Smylie, G. K. C. Clarke and T. J. Ulrych ; Analysis of Irregularities in the Earth's Rotation, Methods in Computational Physics, Vol.13, pp.391-430, 1973

9) 日野幹雄：スペクトル解析； 朝倉書店, 1977

10) J. P. Burg ; Maximum Entropy Spectral Analysis, Proceedings of the 37th Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, 1967

11) H. Akaike ; Fitting autoregressive models for prediction, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Vol.21, pp.243-247, 1969

12) H. Akaike ; Power spectrum estimation through autoregressive model fitting, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Vol.21, pp.407-419, 1969

発表論文

［第２章］

1) 篠原保二、古村福次郎、安部武雄：コンクリートの引張強度に及ぼす曲げ変形の影響；日本建築学会大会学術講演梗概集A, 1991, pp.481-482

［第３章］

1) 古村福次郎、安部武雄、篠原保二：ノッチ付きコンクリート曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動に関する実験的研究；セメント・コンクリート論文集 No.43, 1989, pp.298～303

2) 安部武雄、古村福次郎、篠原保二、岩城英夫：ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動に関する研究　（その１　実験方法）；日本建築学会大会学術講演梗概集A，811～812 (1989)

3) 篠原保二、古村福次郎、安部武雄、岩城英夫：ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動に関する研究　（その２　実験結果）；日本建築学会大会学術講演梗概集A，813～814 (1989)

4) Fukujiro FURUMURA, Takeo AVE, Yasuji SHINOHARA and Hideo IWAKI: Softening Behavior of Concrete in Three Point Bend Tests on Single Edge Notched Beams Part 1 Influence of Notch Depth and Loading Rate; Report of RLEMTIT, [14] 121～133 (1989)

5) Fukujiro FURUMURA, Takeo AVE and Yasuji SHINOHARA: Softening Behavior of Concrete in Three Point Bend Tests on Single Edge Notched Beams Part 2 Influence of Maximum Aggregate Size and Water/Cement Ratio; Report of RLEMTIT, [15] 147～170 (1990)

6) Yasuji SHINOHARA, Fukujiro FURUMURA and Takeo ABE : Softening Behavior of Concrete in Three-Point Bend Tests on Single Edge Notched Beams; Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics, Proceedings of the International RILEM/ESIS [2] 523～532 (1991)

7) Fukujiro FURUMURA, Takeo AVE and Yasuji SHINOHARA: Softening Behavior of Concrete in Three Point Bend Tests on Single Edge Notched Beams Part 3 Influence of Age; Report of RLEMTIT, [16] 119～148 (1991)

8) 古村福次郎、安部武雄、篠原保二：ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の軟化挙動、コンクリート工学年次論文報告集、⑬ [1] 321～326(1991)

[第４章]

1) 古村福次郎、和田章、安部武雄、篠原保二、岩城英夫：モルタル曲げ試験体のクラック後の力学的挙動に関する実験的研究；日本建築学会大会学術講演梗概集Ａ，(1988), pp.337～338

2) 古村福次郎、安部武雄、篠原保二：モルタル曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動；第44回セメント技術大会講演集，(1990), pp.422～427

3) 安部武雄、古村福次郎、篠原保二：モルタル曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動（その１　実験方法及び結果）；日本建築学会大会学術講演梗概集Ａ，(1990) pp.355～356

4) 篠原保二、古村福次郎、安部武雄：モルタル曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動（その２　荷重－荷重点変位曲線と引張軟化モデル）；日本建築学会大会学術講演梗概集Ａ，(1990), pp.357～358

5) Fukujiro FURUMURA, Takeo ABE and Yasuji SHINOHARA: Softening Behavior of Mortar in Bend Tests on Single Edge Notched Beams; Report of RLEMTIT, [17], 1992, pp.183～205

[第５章]

1) 岩城英夫，古村福次郎，安部武雄，篠原保二：ノッチを有するコンクリート曲げ試験体の最大耐力後の軟化挙動に関する研究（その３　引張軟化モデル），日本建築学会大会学術講演梗概集Ａ，pp.815～816，1989

2) 篠原保二，安部武雄，古村福次郎：ノッチ深さ，載荷速度，骨材寸法，水セメント比，載荷法，養生および材令がコンクリート曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響；日本建築学会構造系論文報告集，第442号，pp.13～22，1992

3) Yasuji SHINOHARA, Takeo ABE and Fukujiro FURUMURA : Effect of Notch Depth, Loading Rate, Aggregate Size, Water/Cement Ratio, Loading Method, Curing and Age upon Tension Softening Properties of Concrete in Bend Tests ; Report of RLEMTIT, [18] pp.133～156, 1993

[第６章]

1) 篠原保二、安部武雄、古村福次郎：アコースティック・エミッションのスペクトル分析による破壊進行領域の推定法；日本建築学会大会学術講演梗概集Ａ、1993、PP.243～244

2) Yasuji SHINOHARA, Takeo ABE and Fukujiro FURUMURA ; A method of determining the extent of the fracture process zone based on spectral analysis of acoustic emissions, Report of RLEMTIT, [19] pp. ～ ,1994