

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|--|
| 題目(和文) | コンクリート接合部のせん断力伝達機構に及ぼす表面形状の影響 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 香取慶一 |
| Author(English) | KEIICHI KATORI |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3356号, 授与年月日:1999年9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3356号, Conferred date:1999/9/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner: |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Type(English) | Doctoral Thesis |

コンクリート接合部のせん断力伝達機構に
及ぼす表面形状の影響

平成 11 (1999) 年 9 月

香取慶一

論文梗概

プレキャスト鉄筋コンクリート(PCa)構造の部材接合方法として一般に多用される「目粗し」あるいは「シアキー」といった部材表面の形状が接合部（接合面）の力学的挙動におよぼす影響を解明する研究は、すでに数多く行われている。しかし、目粗しについては、粗さを定性的に評価するという手法が中心で、定量的な評価方法の確立には至っておらず、またシアキーについても、その底面積とシアキー部分のコンクリート強度のみにより評価するという手法が一般的である。

そもそも、目粗しとシアキーは単に表面形状の相違しかないにもかかわらず、目粗しとシアキーに関する統一的な評価は全く行われていない。

この論文は、プレキャストコンクリート構造のうち耐震壁-梁（床）間の水平接合部を対象に、目粗しとシアキーの形状がせん断力伝達機構におよぼす影響とその評価方法を明らかにすることを目的として、接合部（接合面）表面形状の測定とその評価、接合部へのせん断力載荷実験および有限要素解析を行ったものである。論文は、6章より構成されているが、論文の根幹を成すのは「第3章」、「第4章」および「第5章」である。

「第1章 序論」では、目粗しあるいはシアキーによるせん断力伝達機構に関しての既往の研究について概説し、次いで、既往の研究の問題点およびこの論文の目的について述べ、あわせて論文の構成について説明した。

「第2章 接合面における目粗しの定量的評価」では、第3章における研究内容の前段階として、目粗しの粗さ測定結果によって目粗しに関係する力学的挙動がはたして定量的に評価可能かどうかの確認を行った。まず、レーザー光式変位計と精密機械工作用旋盤を組み合わせて接合面粗さ測定装置を構成し、この装置によりプレキャスト水平接合部の微小な要素を模擬した試験体のコンクリート硬化後の接合面の粗さを測定した。次いで、測定した粗さを数学的手法を用いて「粗さ評価値」という単一の数値に変換するとともに、その測定結果から一般に「目粗し」と認識される接合面粗さの形状の特徴を抽出した。そして、接合面せん断力載荷実験を行い、粗さ評価値と実験結果との対応を最小自乗法による回帰分析から探ることで、粗さ評価値を用いた目粗しの定量的評価が可能かどうかを検討した。

その結果、「目粗し」と認識される様な粗さ処理を施すと、粗さの高さに対する底辺長さの比が5を上回る様な粗さが多く形成されることが分かった。また、粗さ評価値として「十点平均粗さ」および「負荷値」を用いた場合について、接合面に直交する外部からの面圧縮力がない場合の接合面の化学的付着力（等価付着力）と、外部からの面圧縮力がある場合の接合面の摩擦係数（等価摩擦係数）が、粗さ評価値とコンクリートの圧縮強度の関数として表現できることを確認した。すなわち、目粗しの粗さ測定結果を用いて目粗しの力学的挙動を定量的に評価できると結論付けた。

「第3章 接合面上の目粗しの形状とその力学的挙動との関係」では、試験体の接合面に直交する接合筋を配筋することで、実際のプレキャスト水平接合部により近い状況を再現し、その様な状況下で接合面に施された目粗しの形状が接合面のせん断挙動におよぼす影響を明らかにすることを目的として、第2章と同様の粗さ測定とせん断力載荷実験を行った。また、この章では、接合面に直交する接合筋が存在する場合に発生するとされる「せん断摩擦力」と称されるせん断力伝達機構の定量的評価も行った。

その結果、載荷実験における最大耐力と粗さ評価値との間に弱いながらも一応の相関があることを確認した。そして、接合面の滑り変位が微小な範囲について同様の検討を行い、最大耐力の場合より強い相関を確認し、接合面に伝達されるせん断力が粗さ評価値を用いて評価可能であることを示した。これに関連し、実験結果より、せん断摩擦力発生的前提となる粗さの側面乗り上がりについては、滑り変位が微小な範囲においてもほとんど生じず、粗さの側面圧壊が生じてしまうことを示した。以上より、「せん断摩擦とは粗さの側面圧壊を摩擦という概念で置き換えたもの」と判断した。次いで、接合筋に生じる軸方向力を利用し、粗さ評価値を用いた接合面のせん断摩擦係数（等価せん断摩擦係数）の推定式を示し、せん断摩擦力の定量的評価が可能であることと、せん断摩擦係数と第2章における摩擦係数が全く別の値であることを示した。

「第4章 接合面上のシアキーとその力学的挙動との関係」では、シアキーのせん断耐力の評価基準となっているシアキー底面積やシアキーのせん断破壊性状の判別の目安として用いられているシアキーの高さ h と底面長さ t との比 h/t 以外に耐力や破壊性状を評価し得るファクターが存在するかどうかを、せん断力載荷実験と2次元有限要素解析を用いて検討した。あわせて、 h/t が2であり側面角度 θ が 45° である直角二等辺三角形形状のシアキーが複数個連続して配置される接合面を例にして、三角形形状シアキーを第3章と同じ様に「目粗し」として評価できるかどうかの検討も行い、目粗しとシアキーの形状に連続性があるかどうかの判断を行った。

その結果、シアキーの破壊性状は、既往の研究結果とは異なり、 h/t だけではなく、 θ によっても変化することを確認した。そして、 h/t および θ は、最大耐力の大きさにも影響をおよぼしていることを示し、あわせて、破壊性状がシアキー側面圧壊となる試験体に関しては、シアキー底面積による耐力評価よりも、シアキー側面面積により耐力評価をする方が有効であることを示した。また、三角形形状シアキーが複数連続する場合は、その高さを粗さ評価値に準用した「目粗し」的な評価方法では耐力を評価できないことを示し、目粗しとシアキーは形状という点で不連続であるという結論を得た。

「第5章 形状の評価方法の違いから見た目粗しとシアキーの大きさの上での境界」では、第4章で目粗しとシアキーが形状という点で不連続であるとの結果を受けて、第3章から得られた「目粗しの粗さ評価値とせん断耐力との間に相関があることを示す回帰式」と第4章から得られた「シアキーの粗さ評価値とせん断耐力とが無関係であることを示す回帰式」のすり合わせを行い、目粗しとシアキーの大きさの上での境界を求めた。

その結果、粗さ評価値で5mmから10mmまでの間に目粗しとシアキーの境界があるとの結果を得た。また、その領域を境に、粗さのせん断破壊性状が底面せん断破壊と側面圧壊の2つに分かれることを確認した。すなわち、目粗しあるいは直角二等辺三角形形状のシアキーを対象に、高さが10mm以上ではシアキーとして設計すること、高さが5mm以下では目粗しとして設計することが、破壊性状とせん断力伝達メカニズムの観点から妥当であることを示した。

「第6章 結論」では、以上各章で得られた結果を総括すると共に、この論文に関連して今後更なる検討を要する課題について述べた。

コンクリート接合部のせん断力伝達機構に及ぼす表面形状の影響

目次

| | |
|---|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 本研究の背景と目的 | 2 |
| 1.1.1 接合部（接合面）の形状の評価方法をめぐる現状と問題点 | 2 |
| 1.1.2 本研究の目的 | 3 |
| 1.1.3 本研究の流れと各章の位置付け | 3 |
| 1.1.4 本研究の試験体における基本的な考え方 | 4 |
| 1.2 本研究に関係する既往の研究 | 6 |
| 1.2.1 目粗しの粗さとしての定性的・定量的評価に関する既往の研究 | 6 |
| 1.2.2 せん断摩擦力の定性的・定量的評価に関する既往の研究 | 8 |
| 1.2.3 シアキーの形状が耐力および破壊性状におよぼす影響に関する既往の研究 | 12 |
| 第2章 接合面における目粗しの定量的評価 | 21 |
| 2.1 はじめに | 22 |
| 2.1.1 この章の目的 | 22 |
| 2.1.2 用語の定義 | 22 |
| 2.2 粗さの数学的評価方法 | 24 |
| 2.3 接合面における目粗しの定量的評価に関する実験 | 28 |
| 2.3.1 実験概要・試験体 | 28 |
| 2.3.2 接合面粗さ処理 | 28 |
| 2.3.3 粗さの測定と粗さの評価方法 | 29 |
| 2.3.4 接合面へのせん断力载荷 | 30 |
| 2.3.5 接合面圧縮力 | 30 |
| 2.3.6 接合面の滑り・目開き変位の測定 | 30 |
| 2.4 接合面粗さ測定結果と粗さ評価 | 38 |
| 2.4.1 粗さ曲線 | 38 |
| 2.4.2 粗さ評価値 | 38 |
| 2.5 目粗しの粗さの形状の特徴に関する考察 | 46 |
| 2.5.1 粗さ曲線のフーリエスペクトルを用いた目粗しの粗さの形状の特徴 | 46 |
| 2.5.2 目粗しの底面長さとの高さの比を用いた目粗しの粗さの形状の特徴 | 46 |
| 2.6 接合面せん断力载荷実験結果 | 52 |
| 2.7 粗さ評価値とコンクリート強度を用いた目粗しの定量的評価 | 63 |
| 2.7.1 粗さ評価値を用いた接合面の等価付着力の推定 | 63 |
| 2.7.2 等価付着力によるせん断抵抗機構のモデル化 | 63 |
| 2.7.3 粗さ評価値を用いた接合面の等価摩擦力の推定 | 63 |
| 2.8 第2章のまとめ | 78 |

| | |
|--|-----|
| 第3章 接合面上の目粗しの形状とその力学的挙動との関係 | 81 |
| 3.1 はじめに | 82 |
| 3.1.1 この章の目的 | 82 |
| 3.1.2 用語の定義 | 82 |
| 3.2 直交鉄筋を有する接合面の挙動と接合面粗さとの関係の解明に関する実験 | 83 |
| 3.2.1 実験概要・試験体 | 83 |
| 3.2.2 接合筋と緩衝材 | 83 |
| 3.2.3 接合面粗さ処理 | 84 |
| 3.2.4 粗さの測定と粗さの評価方法 | 84 |
| 3.2.5 接合面へのせん断力載荷 | 84 |
| 3.2.6 接合面の滑り・目開き変位の測定 | 84 |
| 3.3 接合面粗さ測定結果と粗さ評価 | 92 |
| 3.3.1 粗さ曲線 | 92 |
| 3.3.2 粗さ評価値 | 92 |
| 3.3.3 目粗しの底面長さとおよび高さの比を用いた目粗しの粗さの形状の特徴 | 92 |
| 3.4 接合面せん断力載荷実験結果 | 99 |
| 3.5 せん断力および接合筋の挙動と粗さ評価値との関係 | 110 |
| 3.5.1 最大耐力時および微小変形時におけるせん断力と粗さ評価値との関係 | 110 |
| 3.5.2 滑り変位と目開き変位との関係 | 111 |
| 3.5.3 接合筋に作用する軸方向力と粗さ評価値との関係 | 112 |
| 3.5.4 粗さ評価値を用いた等価せん断摩擦係数の推定 | 113 |
| 3.5.5 接合筋の負担せん断力 | 114 |
| 3.5.6 せん断力負担機構ごとの負担力の累加の妥当性 | 115 |
| 3.5.7 粗さ評価値を用いてせん断力を推定できる範囲 | 115 |
| 3.6 第3章のまとめ | 143 |
| 第4章 接合面上のシアキーの形状とその力学的挙動との関係 | 145 |
| 4.1 はじめに | 146 |
| 4.1.1 この章の目的 | 146 |
| 4.1.2 用語の定義 | 146 |
| 4.2 シアキーの形状が耐力および破壊性状におよぼす影響に関する有限要素解析 | 148 |
| 4.2.1 既往の研究における問題点とこの節における解析の目的 | 148 |
| 4.2.2 解析概要・解析対象 | 148 |
| 4.3 解析結果 | 158 |
| 4.3.1 最大耐力とせん断力-滑り変位関係 | 158 |
| 4.3.2 シアキーの破壊性状 | 158 |
| 4.4 シアキーの形状が耐力および破壊性状におよぼす影響に関する実験 | 166 |
| 4.4.1 実験の目的 | 166 |
| 4.4.2 実験概要・試験体 | 166 |
| 4.4.3 シアキーの形状と個数 | 167 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| 4.4.4 | 接合面へのせん断力載荷および外部拘束力 | 167 |
| 4.4.5 | 接合面の滑り・目開き変位の測定とシアキー部分の 主応力の測定 | 167 |
| 4.5 | 接合面せん断力載荷実験結果 | 177 |
| 4.6 | I類試験体のせん断力載荷結果より得られるシアキーの形状と耐力 および破壊性状との関係 | 199 |
| 4.6.1 | 最大耐力と側面角度との関係 | 199 |
| 4.6.2 | 最大耐力と長さ高さ比との関係 | 199 |
| 4.6.3 | 側面圧壊するシアキーの耐力評価 | 199 |
| 4.6.4 | シアキー本体部分で破壊を生じさせるために必要な 外部拘束力の大きさ | 200 |
| 4.6.5 | シアキーが複数個存在する場合の耐力評価 | 200 |
| 4.7 | II類試験体のせん断力載荷結果より得られるシアキーの形状と 耐力との関係 | 209 |
| 4.7.1 | シアキー高さを粗さ評価値と見なした場合の耐力評価 | 209 |
| 4.7.2 | シアキーの底面積を用いた耐力評価 | 209 |
| 4.8 | 第4章のまとめ | 213 |
| | | |
| 第5章 | 形状の評価方法の違いから見た目粗しとシアキーの大きさの 上での境界 | 215 |
| 5.1 | はじめに | 216 |
| 5.2 | 粗さ評価値を用いた目粗しの評価結果とシアキーの評価結果の すり合わせ | 217 |
| 5.3 | 目粗しとシアキーの境界付近の粗さのせん断破壊性状 | 220 |
| 5.4 | 第5章のまとめ | 224 |
| | | |
| 第6章 | 結論 | 225 |
| 6.1 | 本研究の結論 | 226 |
| 6.2 | 本研究の問題点と今後の課題 | 229 |
| | | |
| 参考文献 | | 231 |
| | | |
| 本研究に関連して著者が発表した論文一覧 | | 237 |
| | | |
| 謝辞 | | 241 |
| | | |
| 付録 | | 245 |

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

1.1.1 接合部（接合面）の形状の評価方法をめぐる現状と問題点

1980年代後半からのいわゆる「バブル経済」期の異常な建設需要時に、「省力化」や「工期短縮」などの要請から鉄筋コンクリート(RC)構造のプレキャスト(PCa)化に掛けられた期待は大きかった。未曾有の不況といわれる今日、建築現場における労働力確保という問題の一応の収束、建設需要自体の落ち込みや在来工法と比較しての工費の増加といった問題から、プレキャスト工法がその魅力を失いかけているのは事実である。しかし、いわゆる「熟練工」の不足は別の意味でいまだに深刻であり、長期的な視点に立つと人口減少による建設労働者全体の減少も心配される。また、建設業界でも「地球環境保護」の考え方が無視できなくなりつつあり、さらにISO 9000シリーズに対する関心の高さが示す様に建築物の「高品質化」も今後の重要な課題として挙げられる。これらの諸問題の解決策として、プレキャスト工法の採用はまさに理に適ったものであり、今後再びプレキャスト工法が注目を集めるであろうことは十分考えられる。

プレキャスト工法では部材同士の接合部が当然ながら存在するが、この接合部の処理(すなわち接合方法)の構造的性能および施工的性能が、建物(構造)全体の性能を決定付ける。接合方法には極めてバリエーションが多く、新たな接合方法の考案も比較的容易である。しかしながら、今まで数多く提案されている接合方法は、以下の数種類の接合方法の単独かそれらの組み合わせにほぼ大別できる。

- 1) コンクリートや合成樹脂など部材を結合する物質(結合材)と部材との間に作用する化学的接着力により部材の一体性を確保するもの(敷きモルタルなど)。

結合材の注入など施工に注意すれば、比較的簡単に一体性を確保できる。高強度グラウトや合成樹脂など化学的付着力の大きな結合材も実用化されている。

- 2) 鉄筋や鉄板など部材以外の固形物を接合部に挿入しその力学的効果によって部材の一体性を確保するもの(接合筋や継ぎ手スリーブ、接合プレートなど)。

固形物を部材内にあらかじめ挿入しておいたり、固形物を固定するための雌ネジインサートや継ぎ手ジョイントを挿入するなどの特別な前処理を必要とするケースが多いが、前処理の精度さえ確保できれば、固形物の強度に応じた一体性が容易に確保できる。

- 3) 接合される部材同士の表面の粗さ(凹凸)、または部材と上記1)の結合材の表面の粗さ(凹凸)に起因する摩擦力や機械的噛み合い力により部材の一体性を確保するもの(目粗しやシアキーなど)。

接合部表面(接合面)の目粗しや部材への事前のシアキー形成のための粗さ(凹凸)の準備が必要など特別な前処理が必要であるが、採用例は極めて多く、信頼性に優れた接合方法である。

「目粗し」あるいは「シアキー」といった粗さ(凹凸)を設けた接合部の力学的挙動(強度や剛性)を算定する研究は、すでに多く行われている。粗さ(凹凸)を設けた接合部のせん断強度という観点では、大略下記のような評価が行われており、取り扱い方が多少異なっている。

目粗し…粗さ(凹凸)を施すのに用いた道具と粗さ(凹凸)の大きさを対応させ、その粗さ(凹凸)に相応する摩擦係数を接合部に与えて、接合部としての強度評価式を提案することにより力学的評価を行う。

シアキー…シアキーの高さと底面長さとの比からシアキーのせん断力に対する破壊モードを与えて、「シアキーの底面がせん断破壊する」と判断される場合は、底面積に使用したコンクリート圧縮強度と比例乗数を乗じて接合部としての強度評価式を提案することにより力学的評価を行う。

しかしながら、目粗しおよびシアキーを今一度改めて考えてみると、一般的には、目粗し…接合面に存在する部材、あるいは結合材の表面に諸道具を用いて比較的小さな粗さ（凹凸）を施すもの。

シアキー…部材のコンクリート打設前に型枠を細工をするかあるいは部材のコンクリート硬化後に道具を用いるなどして結果的に部材に比較的大きな粗さ（凹凸）を施すもの。

程度の差でしか認識されておらず、厳密な形状の差による違いは分かっていない。そもそも、「粗さ」あるいは「凹凸」という観点からすると、両者は同一で、単に形状の相違でしかないはずである。そして、その両者についての統一的な評価は全く行われていない。統一的な評価はおろか、目粗しあるいはシアキー単独の定量的評価さえも現状では不十分であると考えられる。

1.1.2 本研究の目的

本研究は、鉄筋コンクリート構造のプレキャスト工法のうち耐震壁-梁（床）間のいわゆる水平接合部を対象に、目粗しとシアキーの形状が接合部におけるせん断力伝達機構におよぼす影響とその評価方法を明らかにすることを目的としている。その目的達成のために、

- 1) 接合部を模擬した試験体の接合面表面粗さの測定とその粗さの評価。
 - 2) 接合部へのせん断力載荷実験および有限要素解析。
- を行っている。

1.1.3 本研究の流れと各章の位置付け

本研究の根幹を成すのは、第3章、第4章および第5章である。

初めに、目粗しの定量的評価をするに際し、粗さ（凹凸）の測定方法および定量的評価方法が確立されていない現状を考慮し、第3章に至る前段階として、第2章「接合部における目粗しの定量的評価」では、目粗しを対象に、その粗さの測定方法を提案し、その方法により測定された粗さを数学的に処理することにより単一の数値（粗さ評価値）に置き換えることで目粗しの定量的評価が可能かどうかの確認を行う。

そして、実際のプレキャスト工法の耐震壁-梁（床）間水平接合部の様に、過大な圧縮応力下ではないものの接合部の目開き変位の発生がある程度拘束されている状況下を対象に、第3章および第4章で接合面上に形成された「目粗し」および「シアキー」について、それぞれの形状が接合部のせん断力伝達機構におよぼす影響を明らかにする。

まず、第3章「接合面上の目粗しの形状とその力学的挙動との関係」では、第2章で目粗しの定量的評価方法として妥当と認められた粗さ評価値を用いて、目粗しの力学的挙動が定量的に評価可能かどうかを確認する。

次いで、第4章「接合面上のシアキーの形状とその力学的挙動との関係」では、まず、従来より用いられている「シアキーの底面積」と「シアキーの底面長さとの高さの比」という2つの指標以外にもシアキーのせん断挙動を定量的に評価する指標があるかどうかを確認し、その結果を用いてシアキーの力学的挙動とその形状との関係について再度の評価を試みる。

この後、第5章「形状の評価方法の違いから見た目粗しとシアキーの大きさの上での境界」では、第3章および第4章の結果を基に、目粗しおよびシアキー各々で得られた形状の評価方法をそれぞれ相手方に当てはめ、「目粗し・シアキーの統一的評価方法が存在するのか」あるいは「目粗しとシアキーの間に形状評価の不連続があるのか」を確認し、目粗しおよびシアキーの一体性あるいは不連続性を確認する。この判定には、評価方法以外に

もせん断破壊性状なども考慮に入れる。

以上の研究の流れおよび各章同士の関係を、図 1-1 に示す。

1.1.4 本研究の試験体における基本的な考え方

プレキャスト接合部のせん断挙動の解明を目的とした研究は、内外を問わず数多く行われているが、その試験体形状や載荷方法も非常に多彩である。

本研究は、下記の様な考え方の基に試験体および載荷装置の設計・製作を行っている。

- 1) 本研究は、プレキャスト耐震壁-梁（床）間水平接合部を対象としているが、接合部全体を意図するのではなく、接合部の微小部分を対象とするものである。試験体は、実大の接合部の縮小模型ではなく、あくまで接合部上における「30cm×10cmの大きさを持つ要素」として考えている。
- 2) すなわち、実大の接合部で問題となりやすい、曲げモーメントに起因する部材接合部における不均一な目開き変位の発生を抑えるための工夫を施している。
- 3) 地震時の実大接合部の挙動を解明するには載荷にあたっては正負繰り返し載荷が重要となる。しかし、要素としての基本的な挙動を解明したいとの目的から、繰り返し載荷の影響を排除したいとの理由で、載荷せん断力は一方向単調載荷とする。
- 4) 同様な理由と試験体製作時のコンクリート製造および打設の難しさを考慮して、試験体のコンクリートの調合にあたっては、設計基準強度 $F_c=240\text{kgf/cm}^2$ 程度のごく一般的な値を採用する。
- 5) 本研究の根幹を成す第 3 章、第 4 章および第 5 章で用いる試験体では、接合面に過大な圧縮応力は作用していないものの、接合面の目開き変位の発生がある程度拘束されている状況を想定している。これは、実際のプレキャスト工法においては、建物の固定荷重や積載荷重などの鉛直力は柱に負担させる様設計するのが一般的であり、耐震壁-梁（床）間水平接合部には、さほど大きな鉛直力は作用していないと考えられるからである。そのため、第 3 章では、接合面に直交する鉄筋（接合筋）を配筋して目開き変位の発生を拘束する様な内力を発生させることで対処する。また、第 4 章では、外部に目開き変位拘束用のジャッキ（初期導入力ゼロ）を装着することで対処する。

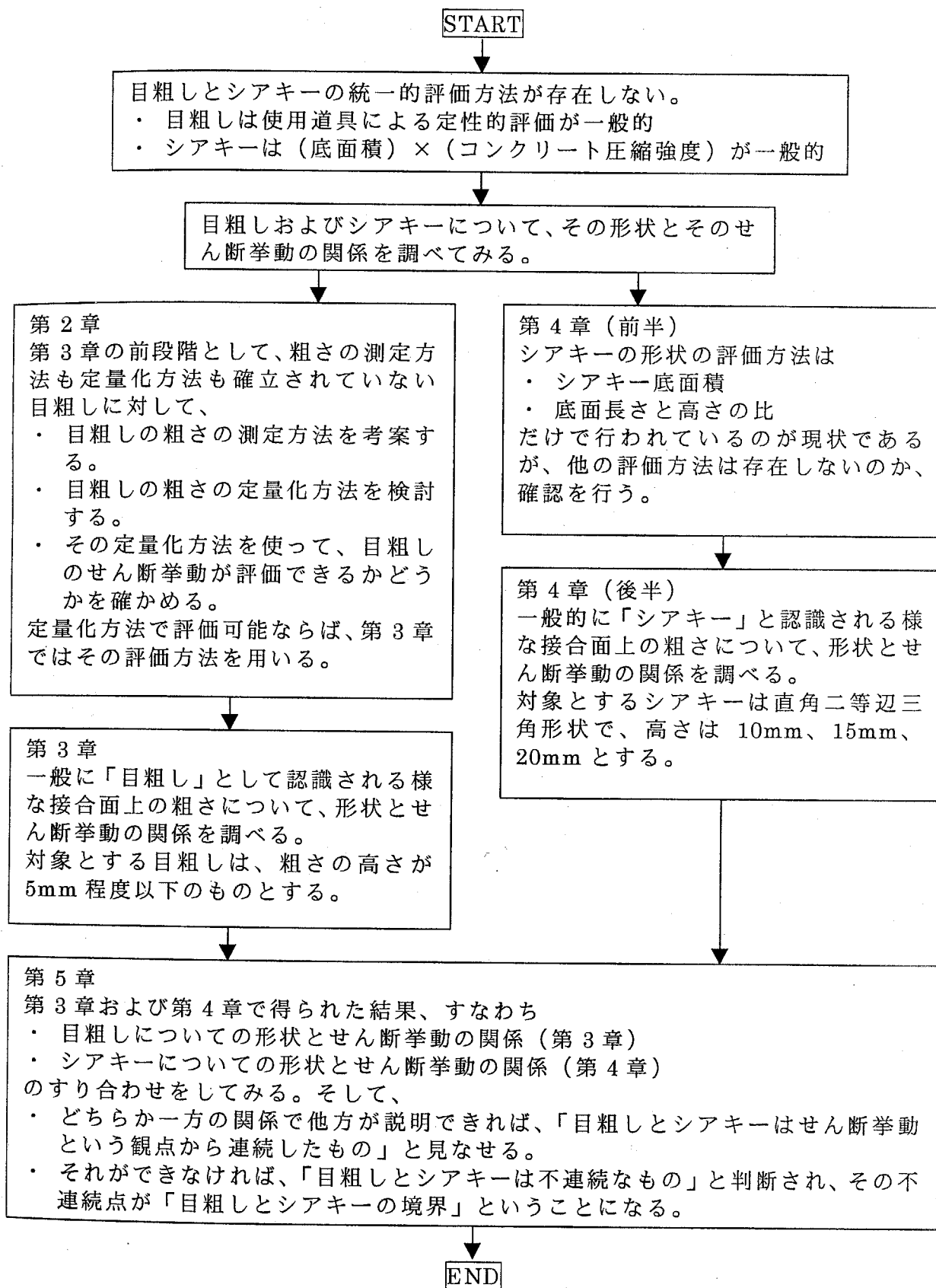


図 1-1 研究の流れと各章の関係

1.2 本研究に關係する既往の研究

1.2.1 目粗しの粗さとしての定性的・定量的評価に關する既往の研究

(1) 目粗し方法による一義的・定性的評価方法

第2章では目粗しの定量的評価を試みるが、目粗しの定量的評価を困難なものとしている理由の一つとして、粗さの統一的な測定方法が確立されていないことが挙げられる。そこで、以前は實際の粗さによらず、粗さを付与した方法（使用した道具やおおよその粗さの大きさ）によって一義的に粗さを評価する手法が一般的であった。すなわち、「ある道具を用いて接合面に粗さを付与すると、その接合面の摩擦係数はこれくらい、あるいは化学的付着強度はこれくらいになる」という様な表現方法で評価結果を示していた。

1. Bennet による提案式 (1976年) ^{1.1)}

柱梁接合部の曲げせん断実験から得られたせん断終局強度 $v_u(N/mm^2)$ の提案式

$$v_u = \alpha \cdot v_0 + \mu \cdot \sigma_N + 1.48 \cdot p \cdot \sqrt{f_y \cdot f_c} \dots \text{(式 1-1)}$$

ここで、 α ：接合面面積に対する接触面積の比

v_0 ：接合面単位面積当たりのせん断抵抗の定数成分

μ ：摩擦係数

p ：接合筋比（接合面の面積に対する接合筋断面積の比）

f_y ：接合筋の降伏強度

f_c ：使用するコンクリートの圧縮強度

のうち v_0 、 α 、 μ が接合面の粗さによって変化するとされており、特に μ は接合面における部材同士の摩擦係数に相当する係数となっている。しかし、

「平滑な面」で $v_0=0.4(N/mm^2)$ 、 $\alpha=0.5$ 、 $\mu=0.6$

「粗な、またはシアキーのある面」で $v_0=1.0(N/mm^2)$ 、 $\alpha=0.75$ 、 $\mu=0.8$ といった極めておおまかな評価方法である。

2. PCI による摩擦係数 (1988年) ^{1.2) 1.3)}

プレキャスト構造およびプレストレスとコンクリート構造を主対象に、接合面の定性的状態から相当する摩擦係数を与えるもので、表 1-1 に示す通りである。

3. 国分正胤によるコンクリート打継ぎ部における打継ぎ面処理方法と打継ぎ部の引張強度との対応に關する研究 (1950年) ^{1.4)}

対象は引張強度であるが、打継ぎ面の粗さの評価を試みた日本でのこの種の研究の最初と考えられる。表 1-2 に示す通り、上記 1. および 2. に示す値と比べて具体的であり、「粗さが大きいほど強度が大きくなる」という一般的に認められている傾向を裏付けている。

なお、建築計画の分野では、主にテクスチャーの評価指標として粗さ処理方法による官能的試験結果に基づいた研究が茶谷・大野らによって過去に行われている ^{1.5)}。

(2) 粗さのデジタル量としての測定

粗さの統一的な測定方法がなかなか確立されない理由として、

- 1) 粗さの大きさをデジタル量として求めるのが煩雑であること。
- 2) 面全体の粗さを精度良く測定することが極めて難しいこと。
- 3) 測定精度を高くしようとする結果として粗さの測定点数（データ）を多くする必要があり、その後のデータの取り扱いが煩雑であること。

が挙げられる。しかし、粗さの測定が難しいとはいえ、最近の技術の進歩により、測定の困難さは徐々にではあるが解消されつつある。粗さの測定は、本研究の様なプレキャスト構造の接合面を対象とする場合だけでなく、コンクリート構成則や破壊力学などの分野で重要になる「ひび割れ界面の凹凸の測定」でも行われている。粗さの測定は、使用する装置や原理から、

- 1) 粗さの模写図面をデジタイザーや定規などで測定することにより粗さを間接的に測定する方法。
- 2) 触針式粗さ検査器で粗さを直接測定する方法。
- 3) レーザー光式変位計で粗さを直接測定する方法。

の3つに大別できる。1)の方法による粗さ測定の代表例としては、李・前川の研究(デジタイザーを使用して測定)^{1.6)}や武井の研究(粗さを含む断面を複写機で拡大複写して定規により1/14mm間隔で測定)^{1.7)}が挙げられる。ただし、この手法は、デジタイザーの操作が煩雑なことや、定規での測定に多大な労力を要することなどの理由から、測定点数にもおのずと限界がある。また、模写の際の記入ペンの太さや複写機を用いての模写の場合は複写機特有のゆがみ、記録紙の紙質あるいは定規の精度などにより、測定誤差が生じることが考えられる。2)の触針式粗さ検査器による粗さ測定の代表例は、新井ら^{1.8)}や西村・藤井・宮本ら^{1.9)}などが挙げられる。しかし、一般的には触針式粗さ検査器は取り扱いが難しく、また粗さの測定精度を上げようとするると粗さの測定可能範囲が狭くなり、逆に粗さの測定可能範囲を大きくしようとするると測定精度が劣る傾向があり、加えて針の先端が鋭敏さに欠ける場合などは針が粗さに追従できず、正確な粗さの測定ができない。3)のレーザー光式変位計を用いた測定方法は、その測定原理から、スポットレーザー光式と光切断式に分けられる。スポットレーザー光式は、粗さの表面に極小のレーザー光を当て、その反射光を感知して粗さを測定する方法であり、先例として三橋ら^{1.10)}、三上・小野ら^{1.11)}の研究がある。光切断式は、粗さ表面に十分に細く平行な直線帯状の光を照射し、その反射光を幾何学的・光学的に処理することで粗さを測定する方法で、瞬時に大量の粗さデータを得ることができ、高価な専用装置を必要とする。和田・佐藤・上田らの研究が代表的である^{1.12) 1.13)}。

なお、上記のいずれの方法も、測定対象物上に設定(仮定)した線上の粗さを測定するのが一般的であり、この線を密にかつ多数本数測定すると、究極的には測定対象物の面全体の粗さを測定できることになる。上記の西村・藤井らの研究では、市販の電気式変位計(感度200 μ /mm)の先端を直径0.5mmの球状に加工して触針式粗さ検査器を製作し、150mm \times 150mmの大きさのコンクリート表面を、線の間隔を5mm、線上の粗さ測定の間隔を5mmとして多数本かつ多数点の粗さを測定している。また、三橋らの研究では、レーザー光式変位計を用いて100mm \times 100mmの大きさのコンクリート表面を、線の間隔を0.4mm、線上の粗さ測定の間隔を0.4mmとして粗さを測定し、あわせて行ったコンクリート表面の写真撮影結果と共に画像解析処理を施し、コンクリート表面全体の粗さ測定を行っている。同様に、和田らの行った光切断法による粗さ測定も、多数本かつ多数点の粗さの測定を行っている。和田らによると、測定に用いるCCDカメラの分解能(すなわち粗さの測定間隔)を0.125mm程度にすれば、コンクリートの亀裂表面の粗さは精度良く測定可能とされている。そして、光切断法によるサンプリング間隔(線の間隔)を1mm程度にすれば十分と結論付けている。

ただ、上記いずれの方法も、測定と撮影と画像解析などといった多段階の手順を要したり、多数本かつ多数点の測定が避けられないなどの問題は解消できておらず、面全体の粗さを「瞬時にかつ完全にそして簡便に」測定できる方法は、建築学あるいは土木工学の分野に限っての著者の調査の範囲内では前例が確認されず、いまだに確立されていないと考

えられる。

(3) 定量化された粗さとせん断耐力との関係

デジタル量として得られた粗さは、一般的には測定値の数が多くなるので、統計処理を施して何らかの値(2.1.2項の「粗さ評価値」)に変換する必要がある。

定量化された粗さと、その粗さを持つ接合面のせん断耐力との関係を求める研究としては、武井による研究^{1.7)}や石原・三橋らの研究^{1.14)}などがある。武井によると、試験体のコンクリート圧縮強度が $\sigma_B=303\sim 372\text{kgf/cm}^2$ で接合面の粗さの十点平均粗さが $R_z=0.35\sim 9.90\text{mm}$ の範囲では、 R_z と接合面のせん断耐力 P の間には一次の比例関係があるとしている。一方、石原・三橋らによると、試験体のコンクリート圧縮強度が $\sigma_B=247\text{kgf/cm}^2$ で接合面の粗さの中心線平均粗さが $H_{avo}=0.7\sim 3\text{mm}$ の範囲では、 H_{avo} の大きさによらず接合面のせん断耐力 P はほぼ一定に近い関係があるとしている。

1.2.2 せん断摩擦力の定性的・定量的評価に関する既往の研究

(1) せん断摩擦力の発生機構

接合面(コンクリート打継ぎ面)に接合筋が直交する場合、接合面に平行にせん断力を载荷すると、図1-2の様に、接合面に水平方向の変位(滑り変位)と同時に接合面の粗さ(凹凸)に起因する接合面に垂直方向の変位(目開き変位)が発生する。この目開き変位により接合筋が伸びて引張力が生じ、その引張力の反力として接合面上に圧縮力が発生する。以上の様な圧縮力により摩擦力(すなわち「せん断摩擦力」)が発生するといわれている^{1.3) 1.15) ~ 1.24)}。

(2) せん断摩擦力の算定式

せん断摩擦力の算定式としては、以下の式が提案されている。ただし、せん断摩擦力と接合筋の直接せん断(だぼせん断)により負担されるせん断力が明確に分離されていないとの指摘がなされている提案式もあり^{1.25)}、再考の余地がある。

1. Birkelandによる提案式(1966年)^{1.26)}

せん断摩擦を扱った提案式としては最古と思われる。

$$V_u = A_s \cdot f_y \cdot \tan \phi \cdots (\text{式 1-2})$$

$$v_u = p \cdot f_y \cdot \tan \phi \cdots (\text{式 1-3})$$

ここで、 V_u ：終局せん断力

v_u ：終局せん断強度($v_u \leq 56.2\text{kgf/cm}^2$)

A_s ：接合筋の断面積

p ：接合筋比(接合面の面積に対する接合筋断面積の比)($p \leq 0.015$)

f_y ：接合筋の降伏強度($f_y \leq 4220\text{kgf/cm}^2$)

$\tan \phi (= \mu)$ ：せん断摩擦係数に相当する数値であり、表1-3の様に与えられている。

なお、使用するコンクリートは圧縮強度 $f_c \geq 281\text{kgf/cm}^2$ 、接合筋の大きさの上限としてとしては米国における#6鉄筋または直径6.35cmの皿付きスタッドとするとの条件がある。

2. Mastによる提案式(1968年)^{1.27)}

式自体は1.のBirkelandの提案式と同じであるが、せん断摩擦係数 $\tan \phi (= \mu)$ が表1-4の様に与えられている。

3. Mattock、Hofbec らによる提案式 (1969年) ^{1.28)}

式自体は 1. の Birkeland の提案式と同じであるが、1. における条件付けをさらに明確にしたものである。すなわち、 $f_y \leq 4220 \text{kgf/cm}^2$ かつ $\tan \phi = 1.4$ とすると、 $p \cdot f_y < 0.15 \cdot f_c$ かつ $p \cdot f_y < 42.2 \text{kgf/cm}^2$ であれば (式 1-3) は合理的で有効としている。

4. Mattock、Hawkins による提案式 (1972年) ^{1.15)}

Mattock はせん断摩擦に関して継続的に研究を行っている。一連の研究から、接合面上に接合筋が直交する様な場合の接合面のせん断強度 τ' を下式の通り提案している。

$$\tau' = 14 + \mu \cdot (f_y \cdot p_s + \sigma_n) \cdots \text{(式 1-4)}$$

ただし、 $\tau \leq 0.3 \cdot f_c$ かつ $14 \leq f_y \cdot p_s + \sigma_n$

ここで、 μ : せん断摩擦係数 (表 1-5)

σ_n : 外部から接合面に作用する圧縮応力度 (外部からの圧縮力を打継ぎ面の面積で除した値)

f_y : 接合筋の降伏強度

p_s : 接合筋比 (接合面の面積に対する接合筋断面積の比)

f_c : 使用するコンクリートの圧縮強度

この (式 1-4) は、コンクリートの直接せん断に対する負担分 (14kgf/cm^2) を含んだ式となっており、この負担分 14kgf/cm^2 を除いた

$$\tau = \mu \cdot (f_y \cdot p_s + \sigma_n) \cdots \text{(式 1-5)}$$

が「せん断摩擦力」であると Mattock は述べている。

せん断摩擦係数 μ は、表 1-5 に示す通り、接合面の処理方法により一義的に定まるものとされている。

なお、Mattock らは式成立の条件として、

1) せん断摩擦力の発生を期待するには、摩擦力の発生機構の性質上、接合面にある程度の滑り変位の発生を許容すべきであり、(式 1-4) および (式 1-5) によるせん断摩擦力が発生する時点では、滑り変位が 1mm 程度は生じている。

2) 接合筋に生じる軸方向応力度が f_y に達するまで、接合筋のコンクリートへの定着が十分確保されなければならない。

としている。

Mattock による提案式では、接合筋は引張降伏するものとして扱われているが、この点に関して山田・青柳は、 p_s が 1.1% 程度かつ $f_y \cdot p_s$ が 40kgf/cm^2 程度までなら、接合筋はすべて降伏するものとしても問題ないとの結果を明らかにしている ^{1.29)}。なお、塩原により、「高強度の接合筋を使用する場合は、その軸方向応力度が降伏強度に達するまでに過大な滑り変位が生じる恐れがある。よって、Mattock の提案式における f_y には別途上限を求める必要がある」との指摘がなされている ^{1.3)}。さらに、せん断力が繰り返し載荷される様な場合は、(式 1-4) および (式 1-5) の計算結果に比べて、 $20 \sim 40\%$ ほどの耐力低下が認められることが、Mattock 自身によって指摘されている ^{1.16)}。

5. 榎谷らによる提案式 (1991年) ^{1.22)}

榎谷らは、「接合筋は引張降伏状態になっているとは必ずしもいえず、また接合面に外部から作用する圧縮力 N も接合部近傍のかぶりコンクリートのせん断破壊によって接合面全体に有効に作用しているとはいえない」状態も考えられるとして、せん断摩擦力 Q_s 。

を求める際に低減係数 C_r 、 C_f を導入して

$$Q_s = \mu \cdot (C_r \cdot a_t \cdot \sigma_y + C_f \cdot N) \cdots \text{(式 1-6)}$$

ここで、 a_t : 接合筋の断面積

σ_y : 接合筋の降伏強度

なる式を提案し、実験から低減係数を求める研究を行っている。

6. 岡本・菅野らによる提案式 (1992年) ^{1.23)}

プレキャストコンクリート部材と在来工法現場打ち部材との接合面で、5mmの直角二等辺三角形形状のシアキーと接合筋が併設された場合のせん断耐力を求める研究である。降伏強度が 6000kgf/cm^2 を越える様な高強度鉄筋については、上記4.の Mattock らの提案式の適用は難しいと結論付けており、新たに、コンクリート圧縮強度が 250kgf/cm^2 で、接合筋の降伏強度が $3800 \sim 8400\text{kgf/cm}^2$ の場合には、せん断強度 τ_u が、

$$\tau_u / \sigma_B = -0.47 + 0.62 \cdot \sqrt{p_v \cdot f_y / \sigma_B} \cdots \text{(式 1-7)}$$

ここで、 σ_B : コンクリートの圧縮強度 ($\sigma_B = 250\text{kgf/cm}^2$)

p_v : 接合筋比 (接合面の面積に対する接合筋断面積の比)

f_y : 接合筋の降伏強度

と、接合筋の強度の効果が平方根となる式を提案している。

7. 河野・田中らによる提案式 (1998年) ^{1.24)}

4.の塩原の指摘 ^{1.3)} にもある通り、Mattock らによる提案式は普通強度のコンクリートや鉄筋を対象としている。そこで、河野・田中らは、圧縮強度が 800kgf/cm^2 程度の高強度コンクリートと降伏強度が $8000 \sim 10000\text{kgf/cm}^2$ 程度の高強度鉄筋を用いて、せん断摩擦力の算定式の提案を行っている。すなわち、せん断強度 V_u は、

$$V_u = 20.4 + 0.51 \cdot f_y \cdot p_s \cdots \text{(式 1-8)}$$

ここで、 f_y : 接合筋の降伏強度

p_s : 接合筋比 (接合面の面積に対する接合筋断面積の比)

なお、 $f_y \cdot p_s$ が 122kgf/cm^2 程度以上の場合、 V_u を発揮する時点での接合面滑り変位が、9mm以上と相当大きくなることが指摘されている。

7. ACI 規準における扱われ方 (1983年) ^{1.32)}

ACI 318-83には、せん断摩擦力に関する設計式がある。

$$V_u \leq 0.85 \cdot A_{vf} \cdot f_y \cdot \mu \cdots \text{(式 1-9)}$$

ここで、 V_u : せん断強度 (lb)

A_{vf} : せん断摩擦鉄筋 (接合筋) の断面積 (in^2)

f_y : せん断摩擦鉄筋の降伏強度 ($f_y \leq 60000\text{psi} (4220\text{kgf/cm}^2)$)

μ : 摩擦係数 (表 1-6 の様に接合面の状態および下記入により与えられる)

λ : コンクリートの状態を表す係数 (表 1-6)

8. PCI における扱われ方 (1978年) ^{1.33)}

PCI の設計式は、せん断摩擦力の大きさを求めるのではなく、想定されるせん断摩擦力に対して必要な接合筋量を算定するという形になっている。

$$A_{vf} = V_{up} / (0.85 \cdot f_y \cdot \mu_e) \dots (\text{式 1-10})$$

$$\mu_e = 1000 \cdot \lambda^2 \cdot A_{cr} \cdot \mu / V_{up} \dots (\text{式 1-11})$$

ここで、 A_{vf} ：せん断摩擦鉄筋（接合筋）の断面積(in²)
 V_{up} ：仮定ひび割れ面に平行なせん断力(lb)
 f_y ：せん断摩擦鉄筋の降伏強度($f_y \leq 60000 \text{psi}(4220 \text{kgf/cm}^2)$)
 λ ：コンクリートの状態係数（表 1-6 の λ に同じ）
 A_{cr} ：ひび割れ面の面積(in²)
 μ ：せん断摩擦係数（表 1-7）

9. BS における扱われ方（1970 年）^{1.34)}

式自体は 1. と同じであるが、せん断摩擦係数 $\tan \phi (= \mu)$ が表 1-8 の様に与えられている。

10. 日本建築学会における扱われ方（1982 年）^{1.35)}

日本建築学会の「壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計基準・同解説（1982 改定）」には、せん断摩擦力のみを明確に算定する式は示されておらず、せん断摩擦力と接合筋のだぼせん断力を合算したものであるものとしての算定式が定められている。

$$\text{鉛直接合部で } Q_{DV} = 0.10 \cdot F_c \cdot A_{sc} + \sigma_y \cdot \Sigma a_v \dots (\text{式 1-12})$$

$$\text{水平接合部で } Q_{DH} = 0.7 \cdot \sigma_y \cdot \Sigma a_h + 0.7 \cdot N_h \dots (\text{式 1-13})$$

ここで、 Q_{DV} 、 Q_{DH} ：それぞれ鉛直および水平接合部の終局せん断耐力(kgf)
 F_c ：ジョイントコンクリートの設計基準強度(kgf/cm²)
 A_{sc} ：鉛直接合部シアキーの鉛直断面積（シアキー底面積）(cm²)
 σ_y ：接合筋（シアキー内蔵筋を含む）の材料強度(kgf/cm²)
 Σa_v および Σa_h ：接合筋（シアキー内蔵筋を含む）の断面積の総和(cm²)
 N_h ：耐力壁に作用する軸方向力（圧縮力を正とし引張力の場合は 0 とする）(kgf)

（式 1-13）における $\sigma_y \cdot \Sigma a_h$ の係数 0.7 がせん断摩擦係数なのかどうかについては、明示されていない。

11. 土木学会における扱われ方

土木学会の「昭和 61 年制定コンクリート標準示方書設計編」では、「せん断面に鉄筋が配置されている場合のせん断面における設計せん断伝達耐力 V_{cwd} 」として下式を挙げており、Mattock の提案式に類似したものとなっている^{1.36)}。

$$V_{cwd} = \mu \cdot (f_{yd} \cdot p \cdot \sin^2 \theta + \sigma'_{nd}) \cdot A_c / \gamma_b \dots (\text{式 1-14})$$

$$\mu = 1.1 \cdot (f'_{cd})^{0.5} / (f_{yd} \cdot p \cdot \sin^2 \theta + \sigma'_{nd})^{0.67} \dots (\text{式 1-15})$$

ただし、 $\mu \leq 0.12 \cdot (f'_{cd})^{0.5}$

ここで、 f_{yd} ：接合筋の設計引張強度(kgf/cm²)
 p ：十分な定着長を持つ接合筋の接合筋比
 θ ：接合面と接合筋のなす角度
 σ'_{nd} ：接合面に垂直に作用する外部からの応力度(kgf/cm²)で、下記の通りとする。

圧縮力の場合は、安全を見越して $\sigma'_{nd} = -0.5 \cdot \sigma_n$

引張力の場合はそのままの値（引張力を下記の A_c で除した値）

A_c : 接合面の面積 (cm^2)

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (kgf/cm^2)

γ_b : 安全率 (一般に 1.3 とする)

なお、示方書中には、「(式 1-13) がせん断摩擦係数である」旨の明確な記述はないが、飯島、原らはその研究報告で、「(式 1-13) がせん断摩擦係数である」と記している^{1.20)}。この式によると、せん断摩擦係数はコンクリート圧縮強度と接合筋比および外部から接合面に作用する圧縮力によって決まることになり、せん断摩擦係数は接合面の粗さとは無関係になる。

なお、同式は平成 8 年に下記の様に改定されている^{1.37)}。

$$V_{\text{owd}} = \{(\tau_c + p \cdot \tau_s \cdot \sin^2 \theta - \alpha \cdot p \cdot f_{yd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) \cdot A_c + V_k\} / \gamma_b \cdots \text{(式 1-16)}$$

$$\tau_c = \mu \cdot f'_{cd} \cdot (\alpha \cdot p \cdot f_{yd} - \sigma_{nd})^{1-b} \cdots \text{(式 1-17)}$$

$$\tau_s = 0.08 \cdot f_{yd} / \alpha \cdots \text{(式 1-18)}$$

$$\alpha = 0.75 \cdot \{1 - 10 \cdot (p - 1.7 \cdot \sigma_{nd} / f_{yd})\} \cdots \text{(式 1-19)}$$

$$V_k = 0.1 \cdot A_k \cdot f'_{cd} \cdots \text{(式 1-20)}$$

ここで、 f_{yd} : 接合筋の設計引張強度 (kgf/cm^2)

σ_{nd} : 接合面に垂直に作用する外部からの応力度 (kgf/cm^2) で、下記の通りとする。

圧縮力の場合は、安全を見越して $\sigma_{nd} = -0.5 \cdot \sigma_n$

引張力の場合はそのままの値 (引張力を下記の A_c で除した値)

p : 十分な定着長を持つ接合筋 (せん断面から両側に鉄筋径の 10 倍以上定着されたもの) の接合筋比

A_c : 接合面の面積

θ : 接合面と接合筋のなす角度

b : 接合面の形状を表す係数 ($0 \leq b \leq 1$)

一般には、普通強度コンクリートのひび割れ面は $b = 0.66$

処理を施した接合面あるいは高強度コンクリートの場合のひび割れ面もしくはプレキャスト部材の継ぎ目で接着剤を用いた場合は

$b = 0.5$

μ : 固体接触に関する平均摩擦係数で $\mu = 0.45$

V_k : せん断シアキーによるせん断耐力

A_k : せん断シアキーのせん断面の断面積

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

γ_b : 安全率 (一般に 1.3 とする)

1.2.3 シアキーの形状が耐力および破壊性状におよぼす影響に関する既往の研究

(1) シアキーの形状とシアキーの破壊性状との関係

せん断力を受けるシアキーの破壊性状 (パターンあるいはモード) としては、

1) シアキー底面でのせん断破壊。

2) シアキー側面でのコンクリートの圧縮破壊 (圧壊)。

の 2 種類が一般に想定されている。そして、どの様なパターンの破壊となるかは、シアキーの形状 (外形) により決まるとされ、下記の様な研究が過去になされている。

1. 黒正によるシアキー底面長さtと高さhの比と破壊パターンとの関係 (1963年)^{1.38)}

著者がさかのぼることのできた最も古い研究であり、我が国におけるシアキーの破壊性状の分類分けに関して最初に扱った研究と思われる。

いわゆる「押し抜き式直接せん断試験法」^{1.39)}により行われた実験から得られた関係で、シアキー底面長さhと高さt(図1-3)の比から、

1) h/t が5以下ならばシアキー底面でのせん断破壊。

2) h/t が5を越える場合はシアキー側面でのコンクリートの圧壊。

との結果が得られている。なお、この研究(文献)では、「シアキー」または「コッター」という名称は用いられておらず、「凹凸」あるいは「歯形」という記述がされている。また、研究対象となったシアキーは完全な矩形(直方体)をしており、その形状はtは3cmで一定とし、hは9cmから36cmの5種類で変化、bは15cmと20cmの2種類で変化となっている。そして、試験体の接合面上にあるシアキーの個数は1個または2個である。

2. 品川によるシアキー底面長さtと高さhの比と破壊パターンとの関係 (1968年)^{1.40)}

一般に、接合面上に配置されるシアキーの個数は複数個(多数個)である。1.の黒正の研究はシアキーが1個または2個の場合を想定しているが、品川によりさらに個数が多い3個または4個について研究が行われている。その結果、黒正の研究と同じ結果が得られている。

3. 後藤・長滝によるシアキー底面長さtと高さhの比と破壊パターンとの関係 (1976年)^{1.41)}

土木工学の分野では、長滝らにより研究が行われている。対象となったシアキーは、矩形をはじめ台形シアキーと三角形シアキーである。実験は「S型斜め方式試験法」^{1.39)}で行われたが、破壊パターンの境界は黒正および品川の研究と同じく $h/t=5$ であった。また、 θ の影響についても考察が行われているが、実験結果からは θ の大小によって破壊パターンが変わるとの結果は得られていない。

以上の研究成果から、現在、建築構造の分野でシアキーの形状から破壊性状を判別する場合、この黒正および品川の研究から得られた結果(すなわち h/t が5より大きい小さいか)がそのまま用いられている。

(2)シアキーの形状とせん断耐力(強度)との関係

単に「せん断耐力(強度)」といった場合、「せん断ひび割れ発生耐力(強度)」と「せん断終局耐力(強度)」の2種類が考えられる。シアキーを対象にした場合、シアキー内に鉄筋が配筋されていない場合は、得てしてせん断ひび割れの発生がすなわちせん断終局状態になることが多い。鉄筋が配筋されている場合には、鉄筋による補強効果により、せん断ひび割れが生じた後でも耐力上昇や接合部の滑り変位の増大が見られることが多い。

実験において、せん断ひび割れの発生を確認する際には、通常は目視あるいは顕著な発音によるか、実験結果のせん断力-滑り変位曲線上での剛性の変化点とするかのいずれかが用いられている。しかし、目視による場合はその発見が遅れることが往々にして生じ、またせん断力-変位曲線による場合も熟練が必要など困難がつきまとう。そのため、せん断ひび割れ発生強度については、実験値のばらつきが大きく、過去の研究でもその定量化に至ったものは極めて少ない^{1.39)}。よって、本研究では「せん断終局耐力(強度)」を対象とする。

1. Hansen らによる提案式 (1974 年) ^{1.42)}

シアキー付きのプレキャストコンクリート接合部のせん断終局耐力 (強度) 算定式としては、最も古い部類に属しており、シアキーの底面積 ($b \times h$) を評価の指標にした点で、後の研究に大きな影響を与えたことで著名な式である。

なお、この研究で対象になったのはシアキー単独ではなく、あくまでシアキーと接合筋が併用されている接合部であり、両者の強度の累加の形で式が表されている。また、対象となるシアキーの形状に制限が設けられている。

$$V_u = 0.09 \cdot f_c \cdot A_{sc} + (f_y \cdot \Sigma A_s + N) \cdots \text{(式 1-21)}$$

ただし、 $0.01 \leq (f_y \cdot \Sigma A_s + N) / (A \cdot f_c) < 0.08$ かつ $0.2 \leq A_{sc} / A \leq 0.5$

ここで、 A_{sc} : シアキーの断面積 (複数個ある場合は総和)

A_s : 接合筋の断面積 (ΣA_s は複数本存在する場合の断面積の総和)

A : 接合面の面積

N : 接合面に垂直に作用する圧縮力

f_c : 接合部 (シアキー) コンクリートの圧縮強度

f_y : 接合筋の降伏強度 ($f_y \leq 6000 \text{ kgf/cm}^2$)

2. Jensen による提案式 (1975 年) ^{1.43)}

Johansen の降伏線理論と修正 Mohr-Coulomb の破壊基準を用いて、鉛直接合部のせん断終局強度を極限解析により求めた提案式である。

$$q < 0.08 \cdot A_c / A_v \text{ では } \tau_u = 0.11 \cdot (A_c / A_v) \cdot F_{vc} + p_c \cdot \sigma_{cy} \cdots \text{(式 1-22)}$$

$$q \geq 0.08 \cdot A_c / A_v \text{ では } \tau_u = F_{vc} \cdot \sqrt{q \cdot (0.55 \cdot A_c / A_v - q)} \cdots \text{(式 1-23)}$$

ただし、 $q = p_c \cdot \sigma_{cy} / F_{vc}$ かつ $p_c = a_c / A$

ここで、 A_c : シアキーの断面積 (複数個ある場合は総和)

A_v : 接合面の面積

F_{vc} : シアキーを構成するコンクリートの圧縮強度

a_c : シアキー内に配筋された鉄筋の断面積の総和

σ_{cy} : シアキー内に配筋された鉄筋の降伏強度

3. Bennett による提案式 (1976 年) ^{1.1)}

1.2.1 項の (式 1-1) であり、ラーメン式プレキャストコンクリート構造のうち、柱梁接合部に設けられるシアキーのせん断終局強度の算定式である。

4. 後藤・長滝による提案式 (1976 年) ^{1.41)}

$$\tau_u = 0.16 \cdot (A_c / A_v) \cdot F_{vc} + (0.29 \cdot A_c / A_v + 0.83) \cdot \sigma_N \cdots \text{(式 1-24)}$$

ただし、 $\sigma_N = N / A$

ここで、 A_c : シアキーの断面積 (複数個ある場合は総和)

A_v : 接合面の面積

F_{vc} : シアキーを構成するコンクリートの圧縮強度

σ_N : 接合面に垂直に作用する圧縮応力度

5. Pume による提案式 (1978 年) ^{1.44)}

シアキー内に内蔵された鉄筋量が少ない場合では、

$$Q_u = a_c \cdot \sigma_{cy} \cdot \sqrt{((0.72 \cdot A_c \cdot F_{vc}) / (A_c \cdot \sigma_{cy})) - 1} \cdots \text{(式 1-25)}$$

シアキー内に内蔵された鉄筋量が多い場合では、

$$Q_u = 0.6 \cdot A_c \cdot F_{cv} + 0.9 \cdot a_c \cdot \sigma_{cy} \cdots \text{(式 1-26)}$$

ここで、 A_c ：シアキーの断面積（複数個ある場合は総和）
 F_{vc} ：シアキーを構成するコンクリートの圧縮強度
 a_c ：シアキー内に配筋された鉄筋の断面積の総和
 σ_{cy} ：シアキー内に配筋された鉄筋の降伏強度

6. 東らによる提案式（1981年）^{1.45)}

シアキー付き接合部のせん断終局強度算定式であるが、接合部周辺のひび割れの発生状況を考慮した点が特徴的である。

$$V_u = (1/A_v) \cdot \left\{ \sum \sqrt{0.1 \cdot F_{vc} \cdot (0.1 \cdot F_{vc} + \sigma_N)} \cdot t \cdot l_{cr} \right\} + \mu \cdot \sigma_N + p_c \cdot \sigma_{cy} / \sqrt{3} \cdots \text{(式 1-27)}$$

ただし、 $p_c = \sum a_c / A$

ここで、 A_v ：接合面の面積
 F_{vc} ：シアキーを構成するコンクリートの圧縮強度
 a_c ：シアキー内に配筋された鉄筋の断面積の総和
 l_{cr} ：ひび割れ経路の長さ
 p_c ：シアキー内蔵筋比
 t ：耐震壁の壁厚（シアキーの奥行き）
 μ ：摩擦係数
 σ_N ：接合面に垂直に作用する圧縮応力度
 σ_{cy} ：シアキー内に配筋された鉄筋の降伏強度

7. 望月らによる提案式（1985年、1986年）^{1.46) 1.47)}

プレキャストコンクリート構造の耐震壁一柱などの鉛直接合部を対象に、シアキーと接合筋を併用した接合部のせん断実験を「拘束ありS型試験法」^{1.39)}で行い、せん断終局強度を求めたものである。

面外拘束を受けない場合、

$$Q_u = 0.09 \cdot F_{vc} \cdot A_c + \mu \cdot C_e \cdot \sum A_s \cdot \sigma_{cy} + 1.48 \cdot \sum A_s \cdot \sqrt{\sigma_{cy} \cdot F_{vc}} \cdots \text{(式 1-28)}$$

面外拘束を受ける場合、

$$Q_u = 0.09 \cdot F_{vc} \cdot A_c + 0.45 \cdot \sigma_{cy} \cdot \sum A_s + 1.48 \cdot \sum A_s \cdot (0.59 + 0.41 \cdot \sqrt{t'/t}) \cdot \sqrt{\sigma_{cy} \cdot F_{vc}} \\ + \mu' \cdot (C_e \cdot \sum A_s \cdot \sigma_{cy} + A_v \cdot \sigma_0) \cdots \text{(式 1-29)}$$

ただし、 $1 \leq t'/t \leq 2.5$

ここで、 A_c ：シアキーの断面積（複数個ある場合は総和）
 A_s ：接合筋の断面積（ $\sum A_s$ は複数本存在する場合の断面積の総和）
 A_v ：接合面の面積
 C_e ：低減係数($C_e = 0.64$)
 F_{vc} ：シアキーを構成するコンクリートの圧縮強度

- t : 耐震壁厚さ
 t' : 耐震壁に直交する壁の張り出し長さに 0.5 倍を乗じたものと耐震壁厚さの和
 μ : 摩擦係数 ($\mu=0.7$)
 μ' : 摩擦係数 ($\mu=0.84$)
 σ_{cy} : シアキー内に配筋された鉄筋の降伏強度
 σ_0 : 接合面に垂直に作用する軸方向応力度

8. 望月・榎谷・永坂による提案式 (1991 年) ^{1.48)}

極限解析および拘束あり S 型試験法により行った実験結果から、壁式プレキャストコンクリート構造の鉛直接合部のせん断終局強度を求めた式である。

$$Q_u = 0.09 \cdot F_{cv} \cdot A_c + 1.28 \cdot \sum A_s \cdot \sqrt{\sigma_{cy} \cdot F_{cv}} + 0.54 \cdot \sigma_{cy} \cdot \sum A_s + 0.84 \cdot A_v \cdot \sigma_0 \cdots \text{(式 1-30)}$$

ただし、 $180 \text{kgf/cm}^2 \leq F_{cv} \leq 250 \text{kgf/cm}^2$

$$0.2\% \leq p_s \leq 0.8\%$$

$$0.2 \leq \lambda \leq 0.5$$

$$0 \leq \sigma_0 \leq 35 \text{kgf/cm}^2$$

ここで、 F_{vc} : シアキーを構成するコンクリートの圧縮強度

A_c : シアキーの断面積 (複数個ある場合は総和)

A_s : 接合筋の断面積 ($\sum A_s$ は複数本存在する場合の断面積の総和)

σ_{cy} : シアキー内に配筋された鉄筋の降伏強度

A_v : 接合面の面積

σ_0 : 接合面に垂直に作用する軸方向応力度

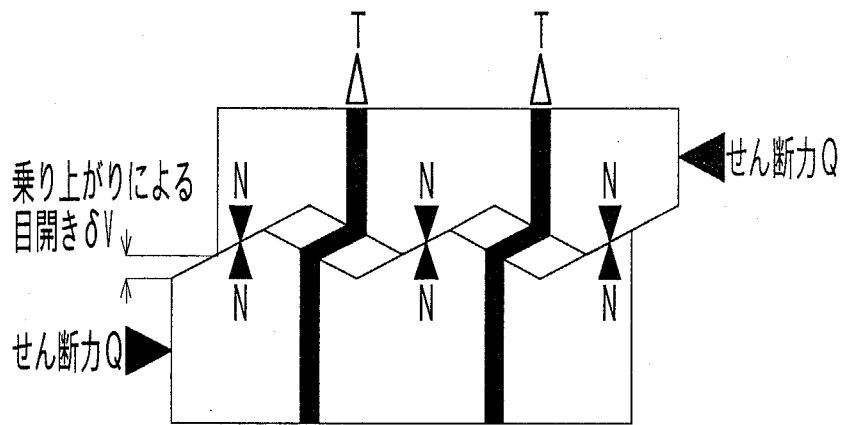
A : 接合面の面積

λ : シアキー断面積比 ($\lambda = A_c / A$)

このほか、ペテルによる提案式 (1974 年) ^{1.49)} や榎谷・油田・山下らによる弾塑性解析を基にした提案式 (1990 年) ^{1.50)} など多数の提案式がある。

9. 日本建築学会における扱われ方 (1982 年) ^{1.35)}

1.4.2 項でも述べた通り、日本建築学会の「壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造計算規準・同解説 (1982 改定)」には、Hansen の (式 1-21) を基にした (式 1-12) が、鉛直接合部に対して定められている。なお、水平接合部に対しては、(式 1-13) の様にシアキーの形状に関係する変数を持つせん断終局強度式は規定されていない。



N : Tの反力として接合面に発生する圧縮力
 T : δV により接合筋が伸びて発生する接合筋引張力

図 1-2 せん断摩擦力の発生機構

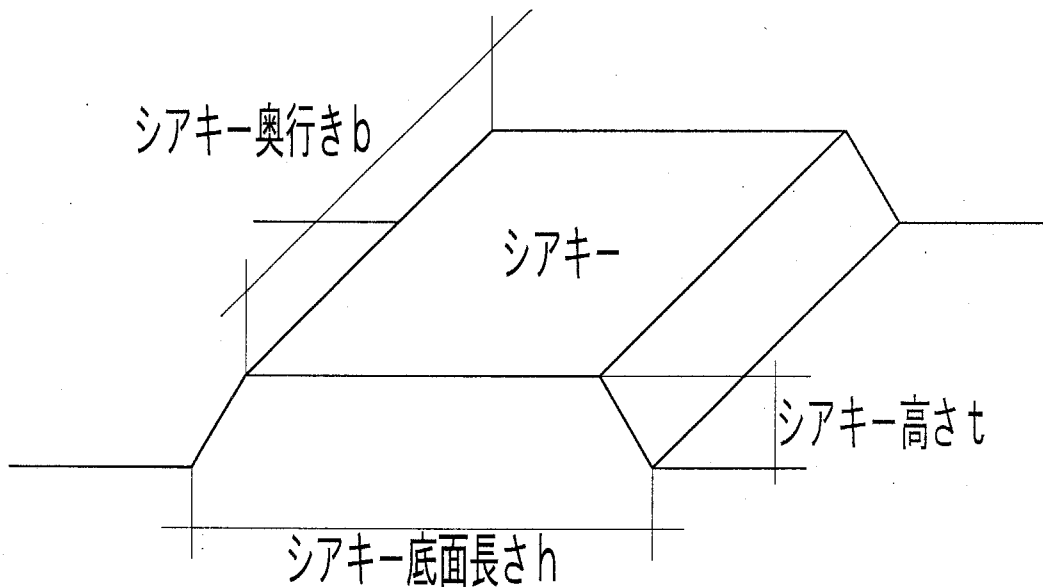


図 1-3 シアキー底面長さ・高さ・奥行き

表 1-1 PCIにおける接合面の定性的状態による摩擦係数

| 接合面の定性的状態 | 対応する摩擦係数 μ_0 |
|----------------|------------------|
| コンクリート打設時の型枠面 | 0.6 |
| 木ごとまたは金ごと仕上げ面 | 0.8 |
| 刷毛引きまたは箒引き面 | 1.0 |
| 5mm程度以上の人為的凹凸面 | 1.2 |
| 一体打ち | 1.4 |

表 1-2 コンクリート打継ぎ部の処理方法と引張強度との関係
(打継ぎ目のないコンクリートの引張強度を100%とした場合の引張強度の割合)

| 打継ぎ目の処理条件 | 水平打継ぎ目 | 垂直打継ぎ目 |
|--|--------|--------|
| 旧コンクリートの打継ぎ目のレイタンスを取り除かずに打ち継いだ場合 | 約 45% | 約 57% |
| 打継ぎ目を約 1mm 削って打ち継いだ場合 | 約 77% | 約 72% |
| 打継ぎ目を約 1mm 削り、セメントペーストを塗って打ち継いだ場合 | 約 93% | 約 77% |
| 打継ぎ目を約 1mm 削り、モルタルを塗って打ち継いだ場合 | 約 96% | 約 83% |
| 打継ぎ目を約 1mm 削り、セメントペーストを塗って打ち継ぎ、約 3 時間後に振動を与えて再び締め固めた場合 | 約 100% | 約 98% |

表 1-3 BirkeIndによるせん断摩擦係数

| 接合面の状態 | せん断摩擦係数 $\tan \phi (= \mu)$ |
|-------------------------|-----------------------------|
| 一体打ちコンクリート(打継ぎなし) | 1.7 |
| 表面が粗な構造接合面 | 1.4 |
| 一般の構造面あるいは鋼材とコンクリートの接合面 | 0.8~1.0 |

表 1-4 Mastによるせん断摩擦係数

| 接合面の状態 | せん断摩擦係数 $\tan \phi (= \mu)$ |
|---|-----------------------------|
| 一体打ちコンクリートのひび割れ面 | 1.4~1.7 |
| プレキャスト部材と現場打ちコンクリートとの粗い接合面 | 1.4 |
| コンクリートとコンクリートの粗面 | 1.4 |
| 鉄骨鉄筋コンクリート構造におけるコンクリートと鉄骨の接触面 | 1.0 |
| 鋼材や表面が滑らかなコンクリートとそれに接触する様に打設されたコンクリートとの界面 | 0.7~1.0 |
| 鉄筋コンクリート構造におけるコンクリートと埋め込み溶接金物との接触面 | 0.7 |
| コンクリートとコンクリートの平滑面 | 0.7 |

表 1-5 Mattock によるせん断摩擦係数

| 接合面の状態 | せん断摩擦係数 μ |
|-----------------|---------------|
| コンクリート打設時型枠面 | 0.6 |
| 木ごと・金ごと仕上げ面 | 0.8 |
| 刷毛引き・箒引き面 | 1.0 |
| 5mm 程度以上の人為的凹凸面 | 1.2 |
| 一体打ち | 1.4 |

表 1-6 ACI 318-83 におけるコンクリートの状態係数とせん断摩擦係数

| コンクリートの状態 | 状態係数 λ | 接合面の状態 | せん断摩擦係数 μ |
|-----------------|----------------|--|---------------|
| 普通コンクリート | 1.0 | 一体打ちコンクリート | 1.4 λ |
| 軽量細骨材 コンクリート | 0.85 | 硬化コンクリートに 接して打設された コンクリート | λ |
| 軽量コンクリート | 0.75 | スタッドや鉄筋で 鋼材に定着された コンクリート | 0.7 λ |
| | | 意図的に粗面とされて いない硬化コンクリート に接して打設された コンクリート | 0.6 λ |

表 1-7 PCI Handbook におけるせん断摩擦係数

| 接合面（ひび割れ面） の状態 | せん断摩擦係数 μ （「推奨値」とされる） |
|---------------------------|------------------------------|
| 一体打ちしたコンクリート に生じたひび割れ | 1.4 |
| 粗面の硬化コンクリートに 接するコンクリート | 1.0 |
| コンクリートと鋼材 | 0.6 |
| 平滑面で接する コンクリート同士 | 0.4 |

表 1-8 BS におけるせん断摩擦係数

| 接合面の状態 | せん断摩擦係数 $\tan \phi (= \mu)$ |
|-------------|----------------------------------|
| 滑らかな面 | 1.4 |
| 粗またはカスター状の面 | 配筋されている接合筋の 状態に応じて 1.4~1.7 |

第 2 章

接合面における目粗しの定量的評価

2.1 はじめに

2.1.1 この章の目的

「目粗し（目荒し）」とは、建築学の分野でよく用いられている用語ではあるが、その厳密な定義に関しては、はなはだ曖昧である。専門書^{2.1)}によると、

「目荒し」: ①表面を荒して凹凸をつけること。例えばコンクリートや石類にモルタルを塗るとき、下地が平滑でモルタルが付着しにくい時、その表面をはつり鑿で欠き取り粗面にすること。②左官の塗り物の下塗り面を鋺仕上げした後、金櫛の類で凹凸の櫛引きをすること。

程度のことしか書かれていない。また、日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(1997)」においても、例えば、

「打継ぎ処理方法には、…（中略）…グリーンカット法…（中略）…ワイヤブラシ法やサンドブラスト法などがある」^{2.2)}

など、固有の目粗しの方法については挙げられているが、具体的な数値的表現はなされていない。

いずれにしても、一般に「目粗し」として建築学で受け入れられている行為とは、「道具を用いてコンクリートの表面にあまり大きくない粗さ（凹凸）を付与すること」と捉えてよさそうである。

「目粗し」はこの様に道具を用いて接合面に人為的な粗さを施す手法であるが、特にコンクリートなどの結合材などがまだ固まっていない状態ならば、刷毛など簡易な道具を用いて接合面上に手軽に粗さを付与できるなどの長所を有している。一方、付与する粗さの再現性が極めて乏しいこと、すなわち粗さの凹凸の大きさを厳密に管理することが難しいという短所を有している。プレキャスト接合部のせん断耐力に接合面の粗さが大きな影響をおよぼすことは周知のことであるが、1.1.1 項にも示した通り、粗さに関してはあくまで定性的な評価が一般的で、定量的な評価は少ない。そもそも、粗さの測定方法についても統一的な手法は確立されていない。

第3章において、目粗しの粗さとせん断挙動の関係の解明を行うが、この章ではその前段階として、接合面に垂直に外部圧縮力が作用する状態を想定して、

- 1) 接合面上の粗さの測定方法の提案を行い、実際に測定を行う。
- 2) 測定結果を基に、一般に「目粗し」と称される粗さの形状の特徴を抽出する。
- 3) そして、その粗さの定量的評価を試み、接合面粗さを用いて接合面における部材と結合材との化学的付着および摩擦の性状が評価可能かどうかの確認を行う。

すなわち、この章では、接合面粗さの定量的評価が可能かどうかを検証することを目的としている。

2.1.2 用語の定義

この章において用いる、下記用語の定義は次の通りである。

接合面粗さ処理…接合面に人為的な粗さを施す作業をいう。

接合面粗さ測定…粗さ処理を施された接合面の粗さ（凹凸の大きさ、すなわち山の高さ・谷の深さ）を測定する作業をいう。

粗さ曲線…接合面上のある決められた線上の位置とその位置における粗さを連続的に描いたものをいう。

粗さ評価…接合面粗さ測定で得られた粗さの凹凸の結果を、数学的な手法（評価方法）を用いて「粗さ評価値」という単一の数値あるいは少数の複数の数値に数値化する作業をいう。

滑り変位発生荷重…接合面に垂直な外部からの圧縮力が作用する状態で 2.3.4 項の接合面

せん断力載荷実験を行った場合に、接合面の滑り変位が生じた時のせん断力の大きさをいう。

等価付着力…接合面に垂直な外部からの圧縮力が作用しない状態で、接合面上においてせん断力を伝達する（せん断力に抵抗する）機構の総称をいう。

等価摩擦力…接合面に垂直な外部からの圧縮力が作用する状態で、接合面上においてせん断力を伝達する（せん断力に抵抗する）機構の総称をいう。

等価摩擦係数…接合面に垂直な外部からの圧縮力に対する等価摩擦力の比をいう。

2.2 粗さの数学的評価方法

1.2.1 項でも述べた通り、粗さは一般にはある一定間隔ごとの多数箇所測定するものであるため、必然的にその測定値は数が多くなる。よって、デジタル量として得られた粗さはそのままでは用いることはできず、数学的処理方法に立脚した何らかの方法を用いて少数の値（粗さ評価値）に変換する必要がある。

表面粗さの評価方法としては、機械工学および金属工学の分野で盛んに研究がなされており、その成果の一部は建築学の分野でも利用されている。今までに種々の手法が提案されているが、主に下記の様な手法が多く用いられている。なお、一般にこれらの評価方法による評価値は、距離の単位(mm)を持っている。

1. 最大高さ R_{max}

粗さの凹凸の大きさのうち最も高い山の頂上からもっと深い谷の底までの距離をいう。簡便であり、現在最も広く用いられている粗さ評価方法といえる^{2.3)} (図 2-1)。

2. 十点平均粗さ R_z

粗さ曲線に対して基準線を引き、粗さ曲線の高い方から 5 番目までの山の高さ（正）の平均と、深い方から 5 番目までの谷の深さ（負）の平均の差（変化量）をいう^{2.3)} (図 2-2)。

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 P_i - \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 V_i \dots \text{(式 2-1)}$$

3. 自乗（二乗）平均粗さ H_{rms}

粗さ曲線に対して基準線を引き、その基準線から粗さ曲線までの距離（高さ・深さ）を f_1, f_2, \dots, f_n としてその自乗和を求め、測定点数 n で除し開平したものをいう^{2.3)} (図 2-3)。

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_n^2}{n}} \dots \text{(式 2-2)}$$

4. 中心線平均粗さ H_{ave}

基準線と粗さ曲線で囲まれる部分の面積 S_i の総和を測定長さ L で除した値をいう^{2.3)} (図 2-4)。

$$H_{ave} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^j S_i \dots \text{(式 2-3)}$$

以上の 4 種類は、JIS や BS、DIN、ISO などでも定義されており、粗さ評価の標準的方法ともいえる。

5. フーリエ振幅値 H_{fur}

粗さ曲線を地震波の様に多数の正弦曲線や余弦曲線の重ね合わせと考えると、フーリエ変換を行ってその卓越曲線を見出すことで地震波のスペクトルに相当する様な卓越したある特定の大きさの振幅を検出することができる^{2.4)}。そして、その検出された振幅は粗さ曲線全体を特徴付ける様な数値であろうことは十分に予想される。振幅値のうち最大値のみを用いたり、値の大きい上位いくつかの振幅値を平均して用いたり、あるいは粗さ曲線

をいくつかの区間に分割してその区間ごとに振幅値の最大値を求めそれらを平均するなどの手法が採られることが多い。

以上の5種類の方法は建築学の実用分野での利用例がある。しかし粗さの凹凸の大きさについての情報は得られるが、粗さの形状（粗さ曲線の傾斜など）についての情報は得られないとされている^{2.3) 2.5)}。

6. 負荷値 R_k

1.から5.の方法での欠点を改良するために、Abbotにより提案された方法が負荷値である。図2-5に示す通り、粗さ曲線に最小自乗法で求めた基準線と平行な直線を引き、これによって区切られた実質部分の長さの合計 Σs の、測定長さ L に対する比を図示したものを負荷曲線という。この負荷曲線に、曲線上に40%含まれる様に、かつ勾配が最小になる様な割線を引く。割線が $\Sigma s/L=0\%$ 、 100% の位置に引いた縦軸と交わった位置の値を R_1 、 R_2 とすると、 R_1 と R_2 の差が負荷値 R_k となる。粗さ曲線の傾斜など、粗さの凹凸の大きさ以外の粗さの形状の違いについてもある程度反映されるとされている。機械工学・金属工学から生まれた考え方であり、ISO/DIS13565-2で物質の表面粗さ評価方法として標準化されている^{2.3) 2.5) 2.6)}。建築学における利用例は確認されていない。

7. 床面仕上げ精度評価法(F-Number System)

新しい粗さ評価方法の一例である。床面の仕上げ精度の評価方法として1987年にASTMで採用された方法である(ASTM E 1155M-96)。床面の表面粗さの測定結果に統計的処理を施して得られる数値で、床面の粗さの評価値である F_F 値と、規準水平面に対する床面の傾斜を表す F_L 値からなる。アメリカではすでに多数の利用例が報告されているが、あくまで床面の仕上げの評価方法の域を出ず、また日本における積極的な利用例は報告されていない^{2.7)}。

また、これ以外にも、「平均傾斜 Δa (ISO 4287/1-1984)」、「自乗平均傾斜 Δq (ISO 4287/1-1984)」、「Waviness Index WI(ASTM E 1486M-94)」あるいは小野・三上・横山らによる「物理量(Y)」^{2.8)}といった評価方法が種々提案されている。

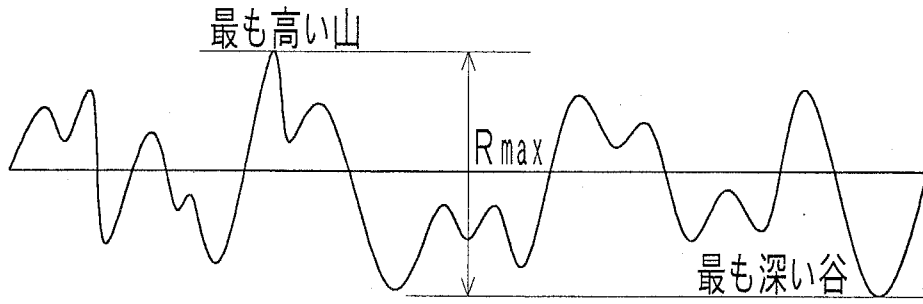


図 2-1 最大高さ R_{max}

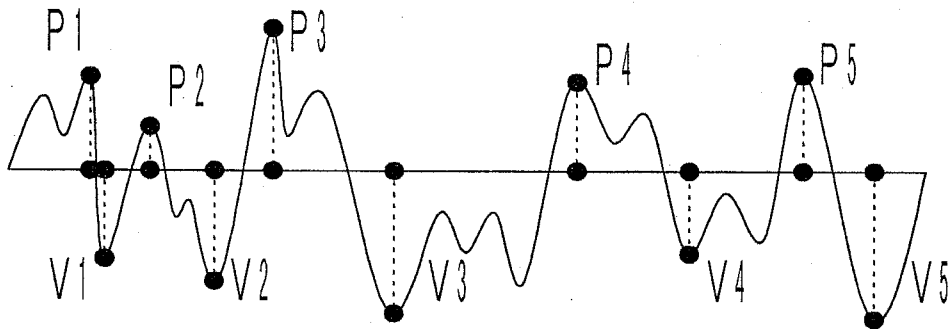


図 2-2 十点平均粗さ R_z

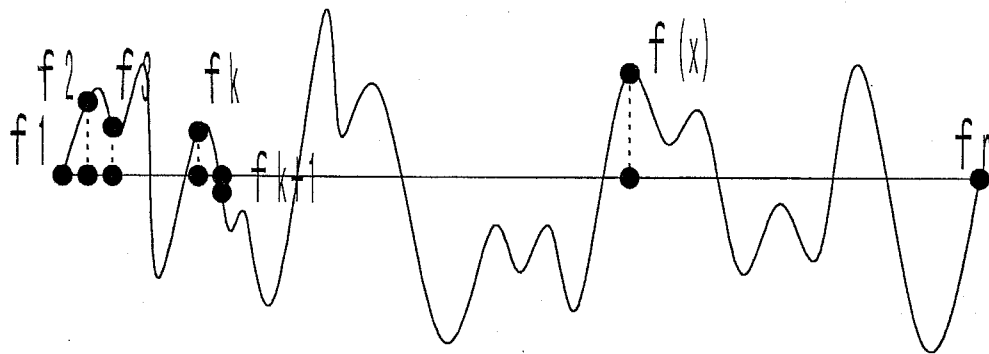


図 2-3 自乗平均粗さ H_{rms}

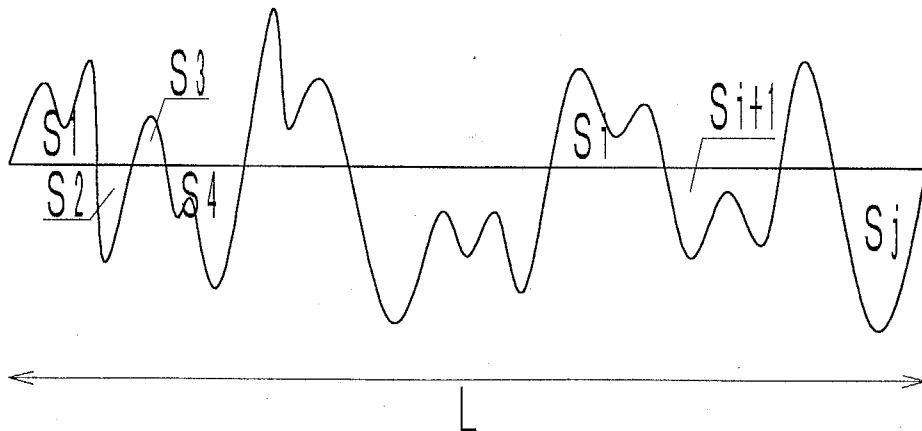


図 2-4 中心線平均粗さ H_{ave}

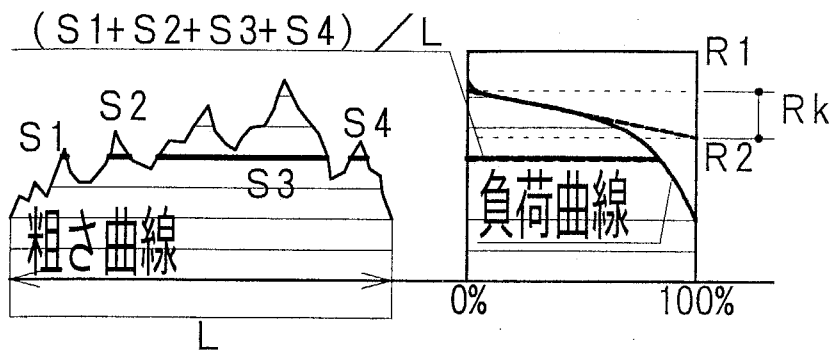


图 2-5 負荷值 R_k

2.3 接合面における目粗しの定量的評価に関する実験

2.3.1 実験概要・試験体

(1) 実験の構成と試験体の概要

実験は、次の6ステップに分けて行う。

①試験体「先打ち部分」製作→②接合面粗さ処理→③コンクリートの硬化を確認し接合面粗さ測定を行い粗さ曲線の作成と粗さ評価を行う→④試験体「後打ち部分」製作→⑤養生・脱型し「接合面せん断力載荷」→⑥検討

試験体における「接合面」とは、図 2-6 に示す試験体の「先打ち部分」と「後打ち部分」の境界、すなわち両部分コンクリートの打継ぎ面のことである。試験体は、接合面として 30cm（長さ方向）×10cm（幅方向）の大きさを持ち、先打ち・後打ち各部分がそれぞれ凸字型断面をなし、全体では I 型断面となっている。試験体一覧を表 2-1 に示す。試験体の変動要因は、2.3.2 項の「接合面粗さ処理」の方法と 2.3.5 項の「接合面圧縮力」の大きさの 2 種類である。

(2) 試験体の製作順序

試験体製作順序は次の通りである。まず先打ち部分型枠を組み、スタブ補強筋を配し、コンクリートを打設する。この際、コンクリート打設面が先打ち部分最上部となり、打継ぎ面（接合面）となる。打設終了後約 90 分を目標に、その接合面上に生じるブリーディング水を布などで除去し、接合面粗さ処理を施す。その後およそ 3 日間常温常圧空气中で養生後、2.3.3 項に記す方法で接合面粗さ測定を行う。測定後に後打ち部分型枠を組み、スタブ補強筋を配し、コンクリートを打設する。この際、コンクリート打設面は接合面とは反対側になる。後打ち部分打設後約 1 か月間常温常圧空气中で養生後に型枠を脱型し、試験体を完成させる。試験体製作順序の概念図を図 2-7 に示す。

(3) 試験体製作に使用したコンクリートと鉄筋

コンクリートは、JASS 5 に可能な限り準拠して調合、練混ぜを行った。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は三重県鳥羽産石灰石砕石（ふるいにより最大粒径寸法 20mm）、細骨材は宮城県広瀬川産川砂を用いた。骨材の粒度分布を図 2-8 および表 2-2 に、コンクリートの調合を表 2-3 に示す。なお、本研究における全ての試験体で同一の骨材を使用し、また同一の調合でコンクリートを製作した。

コンクリート硬化後の力学的性質を表 2-4 に示すが、先打ち・後打ち部分のコンクリートの材齢の違いによりそれぞれの部分の圧縮・割裂強度が異なるため、先打ち・後打ち両部分のコンクリートの強度のどちらか小さい方の値をその試験体の「代表圧縮・割裂強度」として、以後の検討に用いる。

鉄筋に関しては、JIS G 3112 の SD295A・D10 鉄筋を用いた。ただし、その用途はスタブの補強のみであり、接合面上には鉄筋は存在しないことから、鉄筋は接合面のせん断挙動には影響を与えないと判断し、その物性や強度はこの章の検討には用いない。

2.3.2 接合面粗さ処理

粗さ処理方法として、実際のプレキャスト部材の接合面の粗し方などを参考に、下記 3 パターンの合計 9 種類を採用した。

1) 面材による押し付け形成

ブリーディング水を除去した接合面に固形の面材を押し付け、試験体養生も兼ねておよそ 3 日間置き、粗さを形成するもの。この実験では、

- ① 市販の工作用杉材（「杉荒材」と称する物で厚さは 9mm 程度）。

- ② JAS（日本農林規格）第 932 号「コンクリート型わく用合板」に合致する合板（厚さ 12mm）。
- ③ 表面を磨き処理した鋼板（厚さ 15mm の SS400 鋼板の表面を JIS による▽▽記号で磨き処理したもの）。
- ④ 高さ 5mm、底辺（斜辺）10mm の直角二等辺三角形形状の凹凸処理を施した山形鋼板（凹凸の表面は特に磨き処理を施さない）。

の合計 4 種類を採用した。

2) コンクリート硬化前に行う手処理

ブリーディング水を除去した接合面に諸道具を用いて手作業で粗さを施すもの。実験では、

- ⑤ 高さ約 20mm、底辺約 25mm の不規則な形状の三角形形状の突起を持つ目粗し鉄板による粗し処理。
- ⑥ 左官用金鋺による鋺押さえ。
- ⑦ 左官用ささら刷毛を用いた刷毛引き。

の合計 3 種類を採用した。なお、粗さを施す際に粗骨材が接合面上に露出しない様に注意した。

3) コンクリート硬化後に行う手処理

⑥の金鋺押さえによって形成された接合面を基に、3 日間の養生後に硬化した接合面に諸道具を用いて手作業で粗さを施すもの。この実験では、

- ⑧ ワイヤブラシ掛けによる目粗し（粗骨材が露出しない程度の深さでの目粗し）。
- ⑨ 金のみによる手ばつり（粗骨材が露出しない程度の深さでのばつり）。

の合計 2 種類を採用した。

施した粗さ処理方法は、各試験体ごとに表 2-1 に示す。

2.3.3 粗さの測定と粗さの評価方法

先打ち部分コンクリートの硬化後に、粗さ処理を施された接合面の粗さ測定を行う。接合面全体についての凹凸の大きさを得るのが理想的であるが、1.2.1 項にも記した通り実際には極めて困難である。そこで、接合面の長さ方向に引いたある特定の線（以後「測線」と呼ぶ）上の凹凸によって接合面全体の粗さを代表できると仮定し、接合面粗さ測定を行い粗さ曲線を得た。また、粗さの評価に関しては、測線上での粗さ評価値が接合面全体の粗さ評価値となると仮定し、評価を行った。測線は実験の都合上、試験体により本数が異なり、図 2-9 に示す通り、1-1~3-7 試験体の 34 体では 1 本、4-1A~4-3C 試験体の 8 体では 2 本とした。

粗さ測定概念図を図 2-10 に示す。接合面粗さ測定については、1.2.1 項にも記したが、技術の進歩によりレーザー光式変位計を用いた非接触式粗さ測定が可能になったことから、本研究ではこの方式により測定を行った。すなわち、接合面粗さ処理を施した先打ち部分試験体を精密機械工作用旋盤の上に据え付け、試験体の位置を調整した後、試験体の接合面に前もって設定した測線の上にレーザー光式変位計を配置する。この後に旋盤を駆動し試験体を等速度で移動させる。これにより測線上の位置とその位置における凹凸の関係が得られ、粗さ曲線を作成するデータが得られる。

実際の測定では、型枠脱型時の接合面の欠損などを考慮して、測線の長さは接合面長さ 300mm のうち両側 10mm ずつを除いた 280mm とし、0.1mm ごとに凹凸の大きさの測定（測線 1 本の試験体では 2800 点、2 本の試験体では 1 本当たり 2800 点の合計 5600 点）を行った。なお、事前の検査の結果、旋盤の駆動速度のばらつきは約 70 回の測定で最大で 1.2%となっており、その等速性は十分確保されていると判断される。

粗さの評価方法として、2.2節で示した十点平均粗さ R_z 、自乗平均粗さ H_{rms} 、中心線平均粗さ H_{ave} 、およびそれら 3 種類の評価方法の欠点を改良したものとしての負荷値 R_k の合計 4 種類を採用した。

2.3.4 接合面へのせん断力載荷

1.4 節で述べた通り、試験体を接合部の微小要素と見なすためには、実際のプレキャスト接合部とは異なり、試験体の長さ方向には先打ち・後打ち両部分が常に平行な状態となる必要がある。そのためこの章では、この種の接合部へのせん断力載荷実験で数多く用いられているいわゆる S 型載荷方式に改良を加えて、載荷装置を計画した。すなわち、試験体の先打ち・後打ち両部分に緊結する L 型鉄製載荷フレームに鉄製の平行維持パンタグラフを表裏 1 組ずつ取り付けた。これにより、先打ち・後打ち両部分の平行状態を可能な限り確保しつつせん断力を載荷することができる。

載荷装置図を図 2-11 に示す。載荷用試験機のヘッドからピン（球座）を介して載荷フレームにせん断力を作用させる。試験体は PC 鋼棒を用いて載荷フレームに固定したが、PC 鋼棒のナットの支圧により試験体スタブ部分が損傷を受ける恐れがあったため、ナットの締め込みにはトルクレンチなどは用いず、ラチェットレンチを用いて人力で締め込んだ。そのため、締め込み力不足から生じる試験体の載荷フレームとの接触面での滑りを防ぐため、試験体と載荷フレームの間に滑り止め用の真鍮製の方形材を置いた。

プレキャスト部材としての耐震性を検討する場合、載荷は多数回正負繰り返し載荷とすることが望ましい。しかし、1.4 節に示す理由から、正負繰り返し載荷の影響については考慮せず、1 方向単調載荷を採用した。載荷用試験機は実験の都合上、1-1~3-7 試験体の 34 体では 300tf 油圧制御式アムスラー型試験機を、4-1A~4-3C 試験体の 8 体では 150tf ねじ制御式インストロン型試験機を用いた。一般にアムスラー型試験機では載荷速度の制御が難しいため、300tf 油圧制御式アムスラー型試験機を用いた場合の載荷速度は特段の条件を設けなかった。一方、インストロン型試験機では載荷速度（試験機ヘッドの降下速度）の設定が容易かつ自由であるので、150tf ねじ制御式インストロン型試験機を用いた場合の載荷速度は、2.3.6 項に示す滑り変位 δ_H を用いて、 δ_H が 1mm 以下ではヘッドの降下速度を 0.2mm/min、1mm 以上 6mm 以下では 1mm/min、6mm 以上では 2mm/min と定めた。

なお、本研究では、試験機より載荷された力はすべて接合面に伝達されると仮定している。よって、以下に記す「(接合面に伝達される)せん断力 Q 」とは、試験機の表示する載荷力と同じである。

2.3.5 接合面圧縮力

2-1~3-7 試験体の 24 体には、接合面圧縮力 N を接合面に垂直に載荷した。接合面圧縮力は摩擦係数を求める際の面圧縮力であり、実際のプレキャスト接合部に作用する建物の固定荷重や積載荷重などの軸方向力を想定したものである。載荷には、20tf オイルジャッキを用いた。大きさは $N=6tf$ (接合面面積 $A=300cm^2$ で除した接合面圧縮応力度 σ_N で $20kgf/cm^2$)、 $12tf$ ($\sigma_N=40kgf/cm^2$) の 2 種類である。

2.3.6 接合面の滑り・目開き変位の測定

変位については、接合面長さ方向の先打ち・後打ち両部分のスタブ間相対変位（滑り変位）と接合面に垂直の方向の両部分のスタブ間相対変位（目開き変位）を、2 軸型変位計により測定した。測定箇所は、図 2-12 に示す通り、1-1~3-7 試験体の 34 体では試験体の表裏 1 箇所ずつの合計 2 箇所とし、4-1A~4-3C 試験体の 8 体では表裏 2 箇所ずつの合計 4

箇所とした。なお、この章で「滑り変位 δ_H 」および「目開き変位 δ_V 」とは、それぞれ 2 箇所あるいは 4 箇所における滑り変位および目開き変位の単純平均をいう。ただし、2 軸変位計は接着剤で試験体表面に貼付したため、まれに载荷途中で脱落してしまう場合があったが、その様な試験体については、脱落した変位計の測定値は用いないこととした。

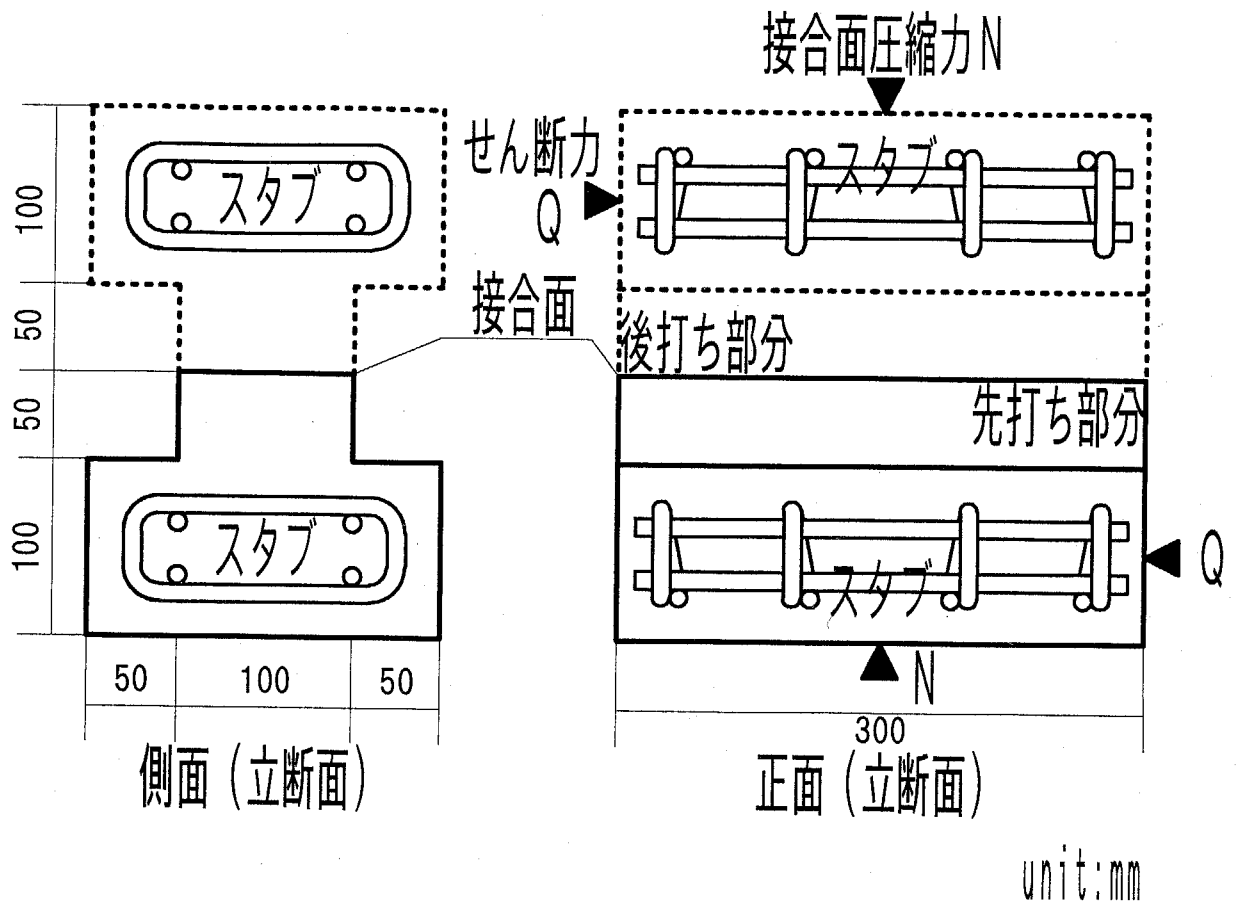


図 2-6 試験体形状・配筋図

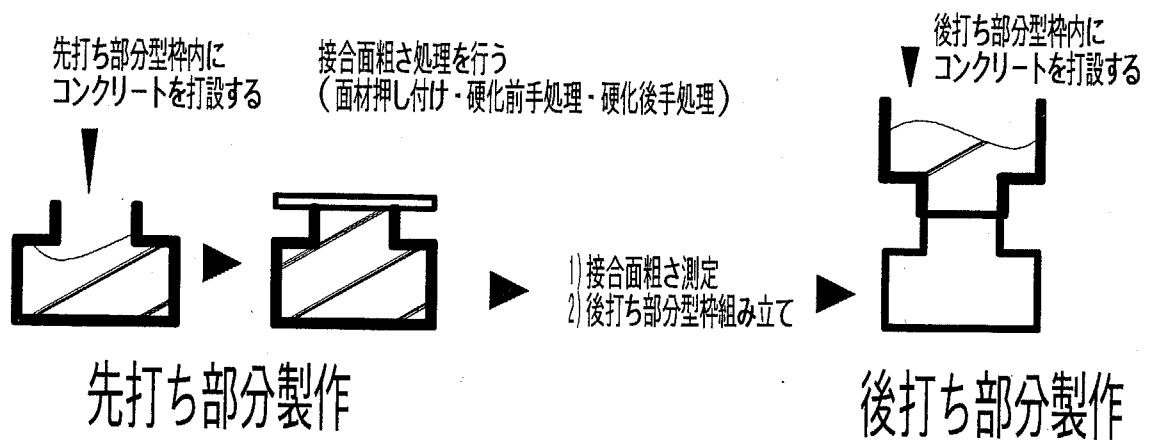
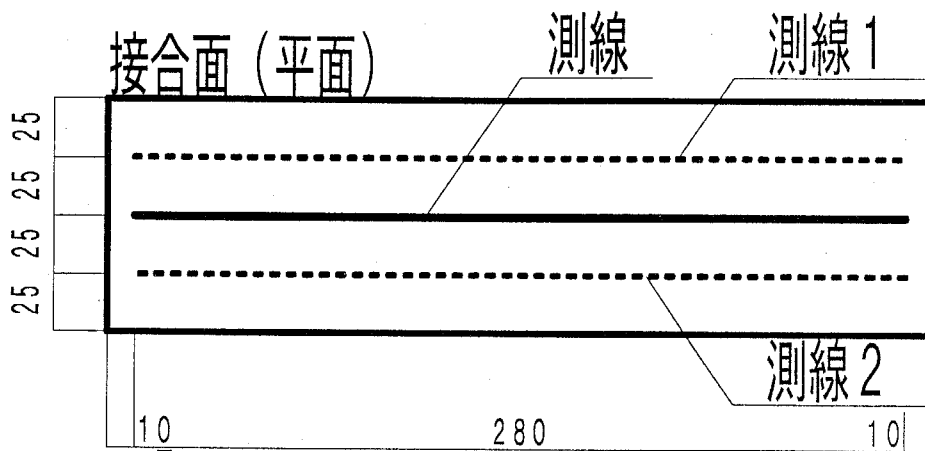


図 2-7 試験体製作の概念図



「測線」：1-1～3-7試験体

「測線1、2」：4-1A～4-3C試験体

unit:mm

図 2-9 接合面における側線の設定位置図

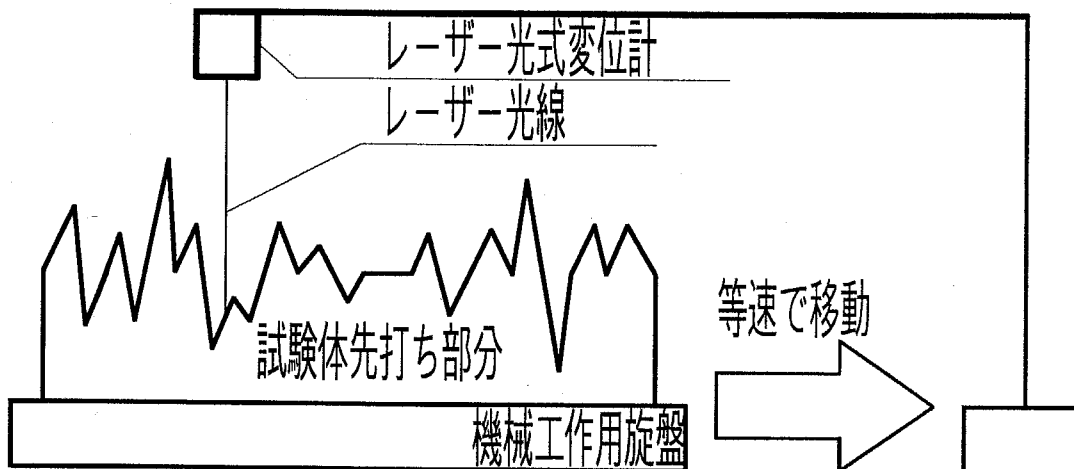


図 2-10 粗さ測定 の 概念図

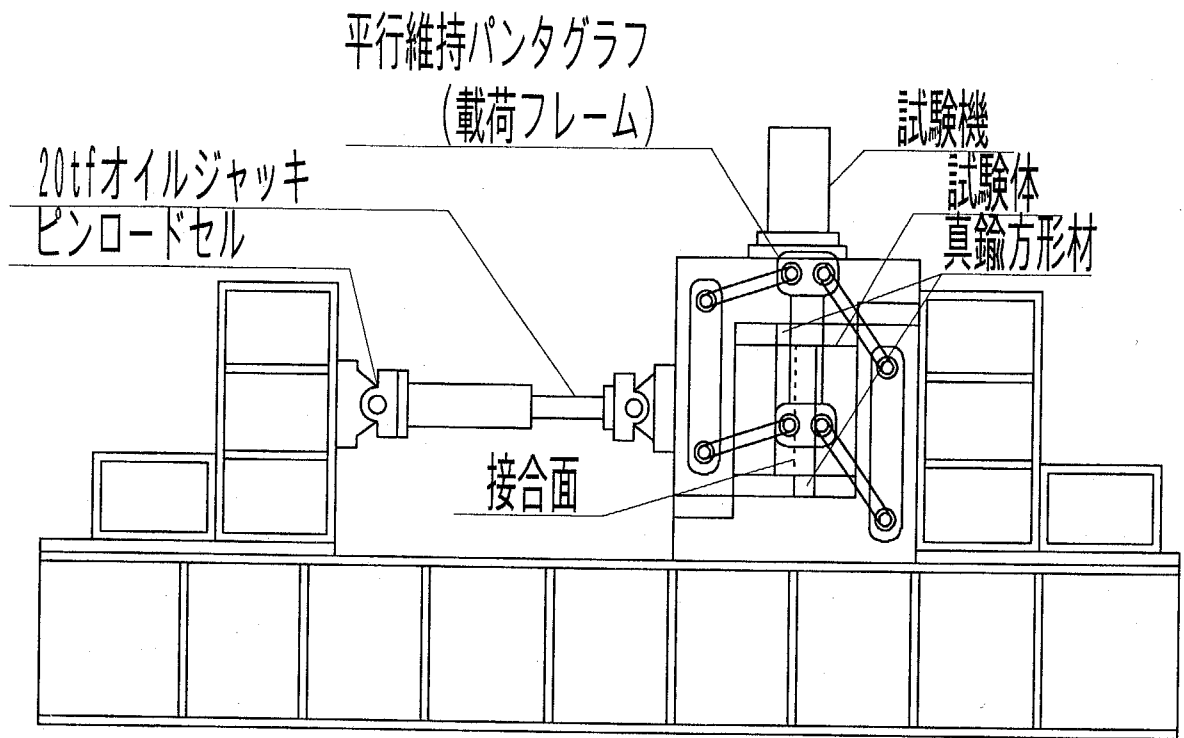
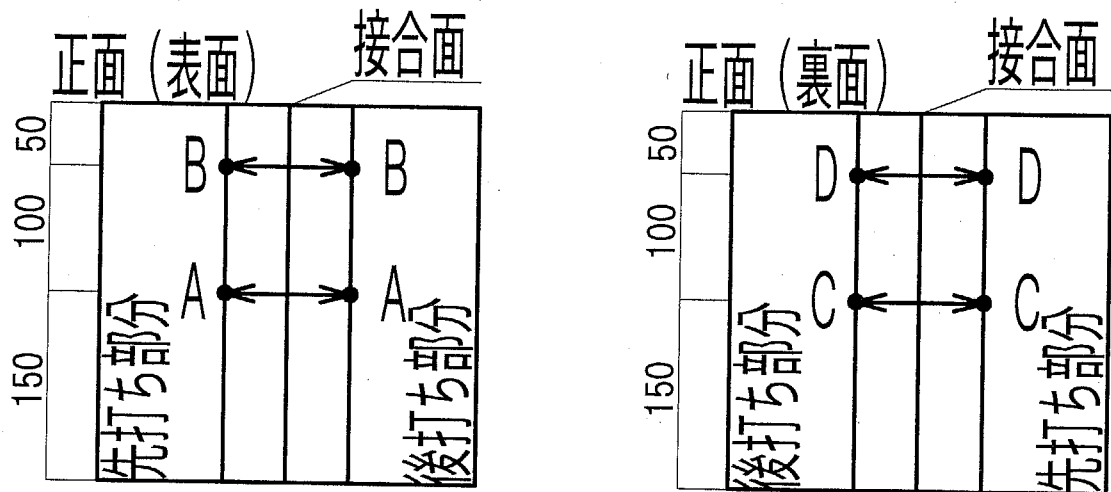


図 2-11 せん断力载荷装置図



1-1~3-7試験体：A-A間とC-C間の滑り変位・目開き変位を測定
 4-1A~4-3C試験体：A-A間・B-B間・C-C間・D-D間の
 滑り変位・目開き変位を測定

unit:mm

図 2-12 滑り変位・目開き変位の測定位置図

表 2-1 試験体一覧

| 試験体名 | 注 | 接合面粗さ処理方法 | 接合面圧縮力 N (圧縮応力度 σ_N) | 試験体名 | 注 | 接合面粗さ処理方法 | 接合面圧縮力 N (圧縮応力度 σ_N) | |
|------|---|-----------|---------------------------------------|----------------------|------|------------|--|---------|
| 1-1A | * | 杉材押し付け | N=0 | 3-1A | ※ | 目粗し鉄板掛け | N=12tf $\sigma_N=40\text{kgf/cm}^2$ | |
| 1-1B | | | | 3-1B | ※ | | | |
| 1-2A | | 3-1C | | | | | | |
| 1-2B | | 3-1D | | | | | | |
| 1-2C | * | 3-2A | | ※ | | | | |
| 1-3 | | 3-2B | | | | | | |
| 1-4 | | 3-3 | | ※ | | | | |
| 1-5 | | 3-4A | | ※ | | | | |
| 1-6A | | 3-4B | | | | | | |
| 1-6B | * | 3-5 | | | | | | |
| 2-1 | ※ | 杉材押し付け | N=6tf $\sigma_N=20\text{kgf/cm}^2$ | 3-6 | | JAS 合板押し付け | N=0 | |
| 2-2A | | 目粗し鉄板掛け | | 3-7 | | 左官用金鋲押さえ | | |
| 2-2B | | | | 4-1A | | 杉材押し付け | | |
| 2-2C | | | | 4-1B | | 山形鋼板押し付け | | |
| 2-2D | | | | 4-2A | * | 磨き鋼板押し付け | | |
| 2-3 | | | | 4-2B | * | | | |
| 2-4A | ※ | | | 4-2C | | | | |
| 2-4B | | | | のみ手ばつり JAS 合板押し付け | 4-3A | * | | ささら刷毛引き |
| 2-5A | | | | | 4-3B | * | | |
| 2-5B | ※ | | | 磨き鋼板押し付け 左官用金鋲押さえ | 4-3C | | | |
| 2-6 | | | | | | | | |
| 2-7 | ※ | | | | | | | |

「注」欄に*、※印のある試験体は、その粗さ測定結果および粗さ評価値を 2.4 節および 2.5 節で用い、2.7 節では扱わない。

表 2-2(a) 細骨材の粒度分布

| ふるい 呼び寸法 (mm) | 各ふるいにとどまる量 | | | ふるい通過量 百分率(%) |
|---------------------|--------------|-------------|----------------|------------------|
| | ふるい ごと(g) | 累計質量 (g) | 累計質量 百分率(%) | |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 5 | 2 | 2 | 0.2 | 99.2 |
| 2.5 | 146 | 148 | 15 | 85 |
| 1.2 | 245 | 393 | 39 | 61 |
| 0.6 | 199 | 592 | 59 | 41 |
| 0.3 | 172 | 764 | 76 | 24 |
| 0.15 | 196 | 960 | 96 | 4 |
| 受け皿 | 40 | 1000 | 100 | — |
| 粗粒率 FM | | | 2.85 | |

ふるい通過量から判断する品質

JASS 5-1997 4.3 Cにおける「普通骨材 砂の標準粒度」に合致
(旧 JASS 5 の II 級骨材に相当)

表 2-2(b) 粗骨材の粒度分布

| ふるい 呼び寸法 (mm) | 各ふるいにとどまる量 | | | ふるい通過量 百分率(%) |
|---------------------|--------------|-------------|----------------|------------------|
| | ふるい ごと(g) | 累計質量 (g) | 累計質量 百分率(%) | |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 15 | 1001 | 1001 | 20 | 80 |
| 10 | 2108 | 3109 | 62 | 38 |
| 5 | 1730 | 4839 | 97 | 3 |
| 2.5 | 161 | 5000 | 100 | 0 |
| 1.2 | 0 | — | 100 | — |
| 0.6 | — | — | 100 | — |
| 0.3 | — | — | 100 | — |
| 0.15 | — | — | 100 | — |
| 受け皿 | — | — | — | — |
| 粗粒率 FM | | | 6.79 | |

ふるい通過量から判断する品質

JASS 5-1997 4.3 Cにおける「普通骨材 砂利の標準粒度」に合致
(JIS A 5005 の 砕石 2005 に相当)

表 2-3 コンクリートの調合結果 (練り上がり量 1m³ に換算)

| | | | |
|---|--|------------------------------|------------|
| 設計基準強度 F _c (kgf/cm ²) | 調合強度 F ₂₈ (kgf/cm ²) | スランプ (cm) | 空気量 (%) |
| 240 | 284 | 18 | 4 |
| 水セメント比 W/C(%) | 細骨材率 (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 混和剤 |
| 65 | 42 | 188 | 使用せず |

| 容積 (リットル/m ³) | | | 重量(kg/m ³) | | |
|---------------------------|-----|-----|------------------------|-----|------|
| セメント | 細骨材 | 粗骨材 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 92 | 286 | 394 | 289 | 729 | 1004 |

表 2.4 使用コンクリートの力学的性質

| 試験体名 | 先打ち部分用 コンクリート | | | | 後打ち部分用 コンクリート | | | | 代表強度 | | |
|--------------------|---------------------|----------|------------|--------------|---------------------|----------|------------|--------------|---------------------|------------------|-------------------|
| | kgf/cm ² | | 空気量 (%) | スランプ (cm) | kgf/cm ² | | 空気量 (%) | スランプ (cm) | kgf/cm ² | | $\sqrt{\sigma_B}$ |
| | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | 圧縮 σ_B | 割裂 σ_t | |
| | | | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | | | | | |
| 1-1A、1-2A、1-2B、1-3 | 313 | 22.1 | 4.2 | 8.6 | 206 | 15.1 | 4.1 | 10.5 | 206 | 15.1 | 14.4 |
| 1-1B、1-2C、1-4 | 228 | 20.2 | 3.9 | 9.2 | 232 | 21.5 | 4.3 | 9.5 | 228 | 20.2 | 15.1 |
| 1-5、1-6A、1-6B | | | | | | | | | | | |
| 2-1 | 235 | 19.6 | 4.1 | 9.6 | 192 | 7.30 | 3.9 | 11.1 | 192 | 7.30 | 13.8 |
| 2-2A、2-2B、2-3 | 314 | 26.0 | 3.7 | 8.5 | 291 | 26.1 | 4.2 | 9.0 | 291 | 26.0 | 17.1 |
| 2-4A、2-5A | | | | | | | | | | | |
| 2-2C、2-2D、2-4B | 330 | 20.6 | 3.8 | 8.8 | 289 | 18.6 | 3.8 | 9.1 | 289 | 18.6 | 17.0 |
| 2-5B、2-6、2-7 | | | | | | | | | | | |
| 3-1A、3-1B、3-2A | 312 | 16.8 | 3.9 | 9.1 | 336 | 28.3 | 4.3 | 8.8 | 312 | 16.8 | 17.7 |
| 3-3、3-4A、3-5 | | | | | | | | | | | |
| 3-1C、3-1D、3-2B | 273 | 21.1 | 4.2 | 10.2 | 255 | 22.9 | 3.9 | 9.0 | 255 | 21.1 | 16.0 |
| 3-4B、3-6、3-7 | | | | | | | | | | | |
| 4-1A、4-1B | 244 | 22.8 | 3.7 | 9.5 | 277 | 19.3 | 4.0 | 9.3 | 244 | 19.3 | 15.6 |
| 4-2A、4-2B、4-2C | 241 | 18.0 | 3.8 | 8.2 | 212 | 17.3 | 4.2 | 9.6 | 212 | 17.3 | 14.6 |
| 4-3A、4-3B、4-3C | | | | | | | | | | | |

2.4 接合面粗さ測定結果と粗さ評価

2.4.1 粗さ曲線

粗さ測定により得られた各試験体の粗さ曲線の一例を図 2-13 に示す(全部の粗さ曲線は巻末の付録に掲載する)。各処理方法とも、事前に意図した粗さを施すことができたが、いくつかの問題も生じた。

1) 面材による押し付け形成

押し付けの際に空気が混入してしまい、接合面表面に多数の陥没孔が見られるものがあった。山形鋼板押し付けは目視によっても極めて周期性のあると判断される粗さの分布となった。

2) コンクリート硬化前に行う手処理

目粗し鉄板掛けは周期性のある粗さとなったが、測線ごとに凹凸が異なっており、再現性に問題があった。ささら刷毛引きは粗さが不規則であった。

3) コンクリート硬化後に行う手処理

ワイヤーブラシ掛けは金鋸押さえと目視上はあまり変わらない粗さ曲線の形状となった。

2.4.2 粗さ評価値

2.2 節で述べた通り、十点平均粗さ R_z 、自乗平均粗さ H_{rms} および中心線平均粗さ H_{ave} を求める際には、凹凸の高さや深さを決定する基となる「基準線」を決める必要がある。この章においては、この基準線は、負荷値 R_k の場合の「最小自乗法で求めた基準線」と同じとした。つまり、1 個の粗さ曲線については、最小自乗法により 1 本の直線を引き、これを粗さ曲線の横軸に相当する直線とした。

負荷値を求める前提となる負荷曲線の一例を図 2-14 に示す(全部の負荷曲線は巻末の付録に掲載する)。そして、各評価方法による測線上の粗さ評価値を表 2-5 に示す。

この実験で採用した 4 種類の評価方法は、代数学的にもまた幾何学的にも異なった手法である。よって、4 種類の評価値相互で常に成り立つ数学的関係はなく、いずれか特定の評価方法で他の評価方法を代用することは厳密にはできない。ただ、Schlesinger による研究から、評価値を統計的に検討するとある種の関係が成り立つ傾向にあることが分かっている^{2.3)}。よって、最小自乗法を用いて評価値相互の相関関係を調べる。

各評価値相互の相関関係について、図 2-15 および表 2-6 に示す。ほとんどの評価方法相互で相関係数が 0.95 以上と相関が極めて高い。よって、自乗平均粗さと中心線平均粗さは十点平均粗さにより代用可能と判断し、あわせて負荷値の有効性を確認すべく、2.7 節の検討では粗さ評価値として十点平均粗さと負荷値を用いる。

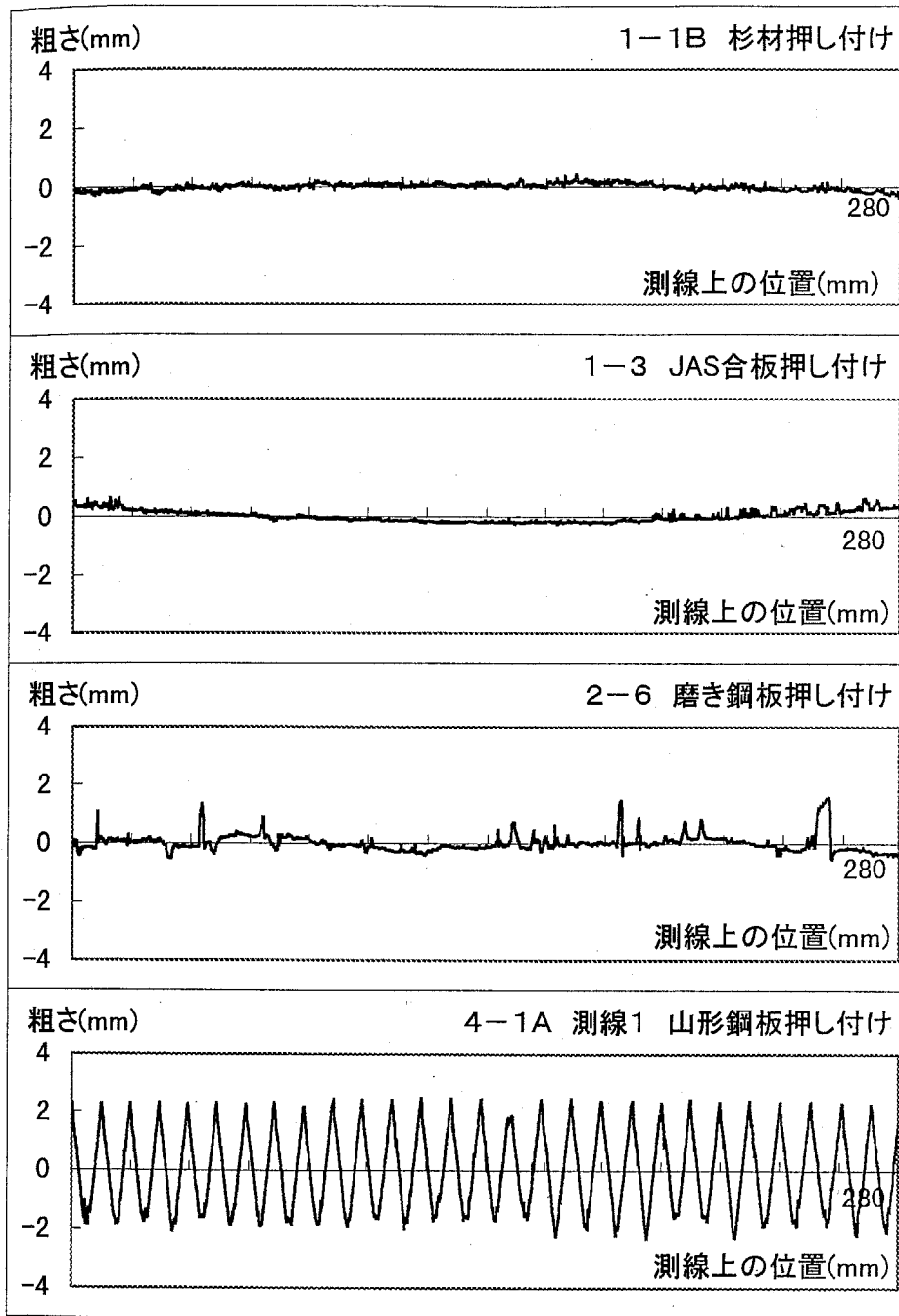


図 2-13(a) 各測線上の粗さ曲線の一例
(その 1) (面材押し付け)

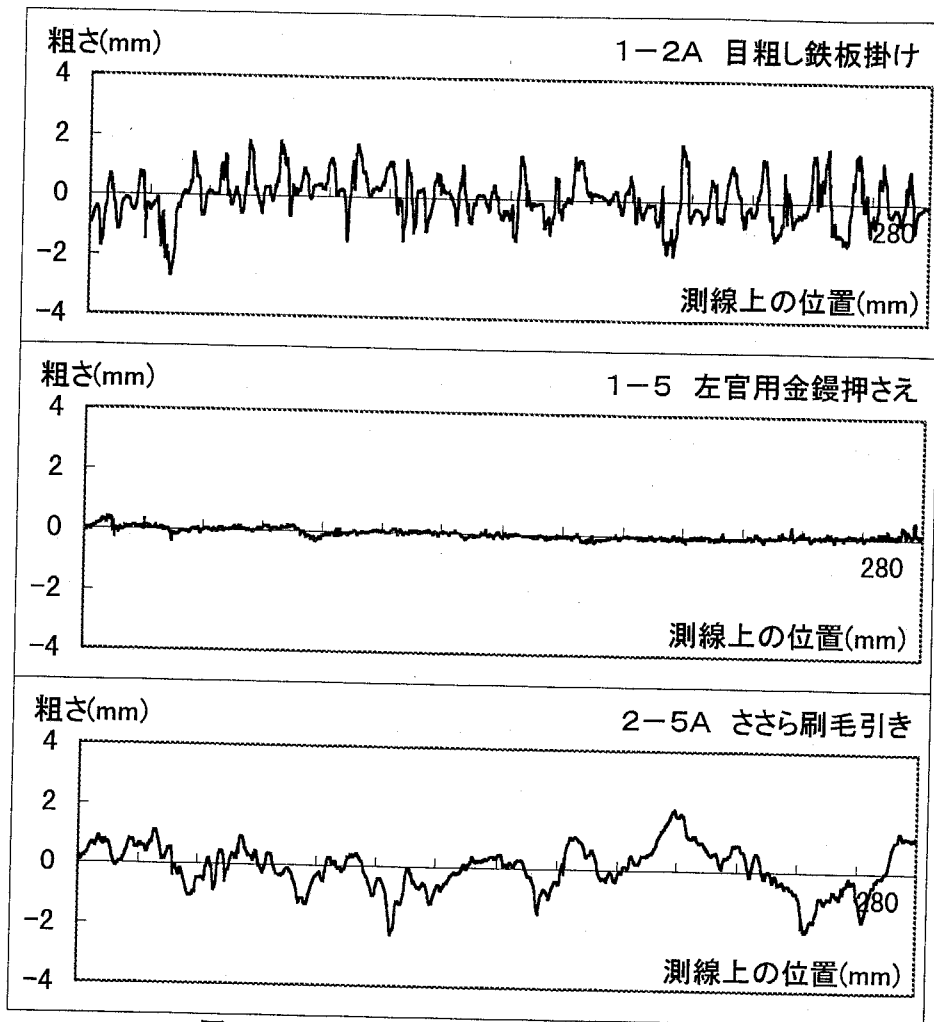


図 2-13(b) 各測線上の粗さ曲線の一例
(その 2) (硬化前手処理)

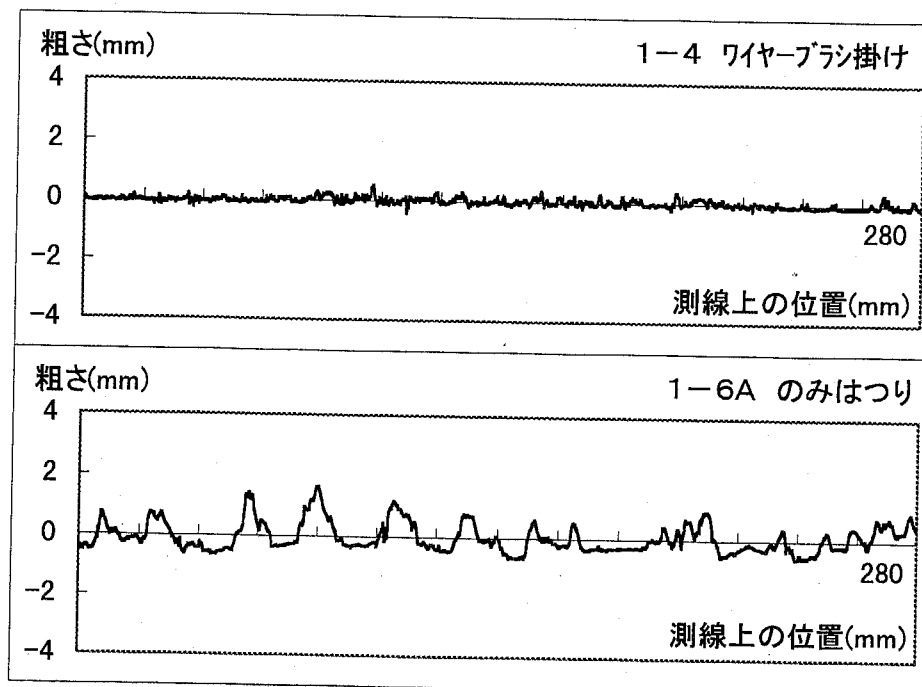


図 2-13(c) 各測線上の粗さ曲線の一例
(その 3) (硬化後手処理)

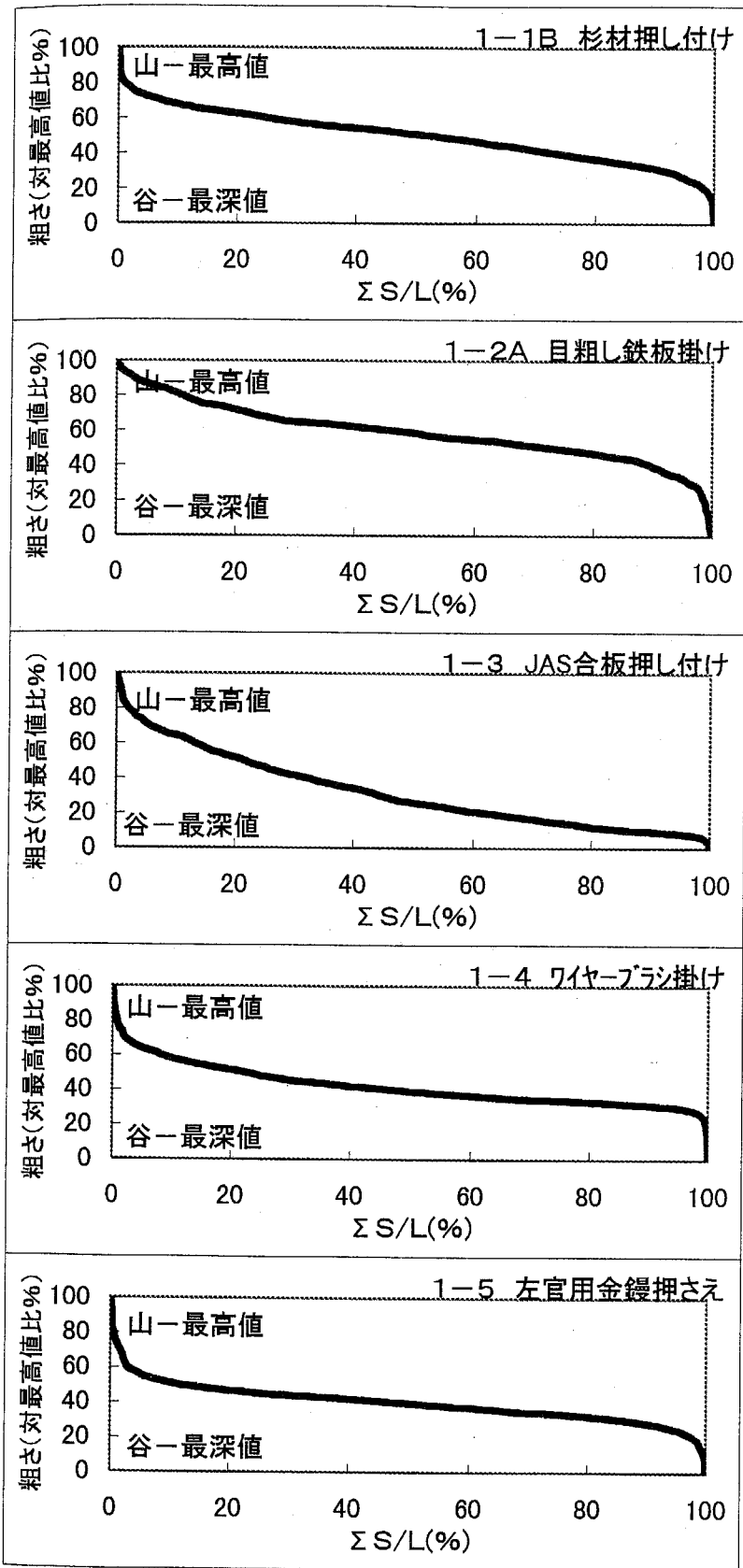


図 2-14(a) 粗さ曲線の負荷曲線の一例
(その 1)

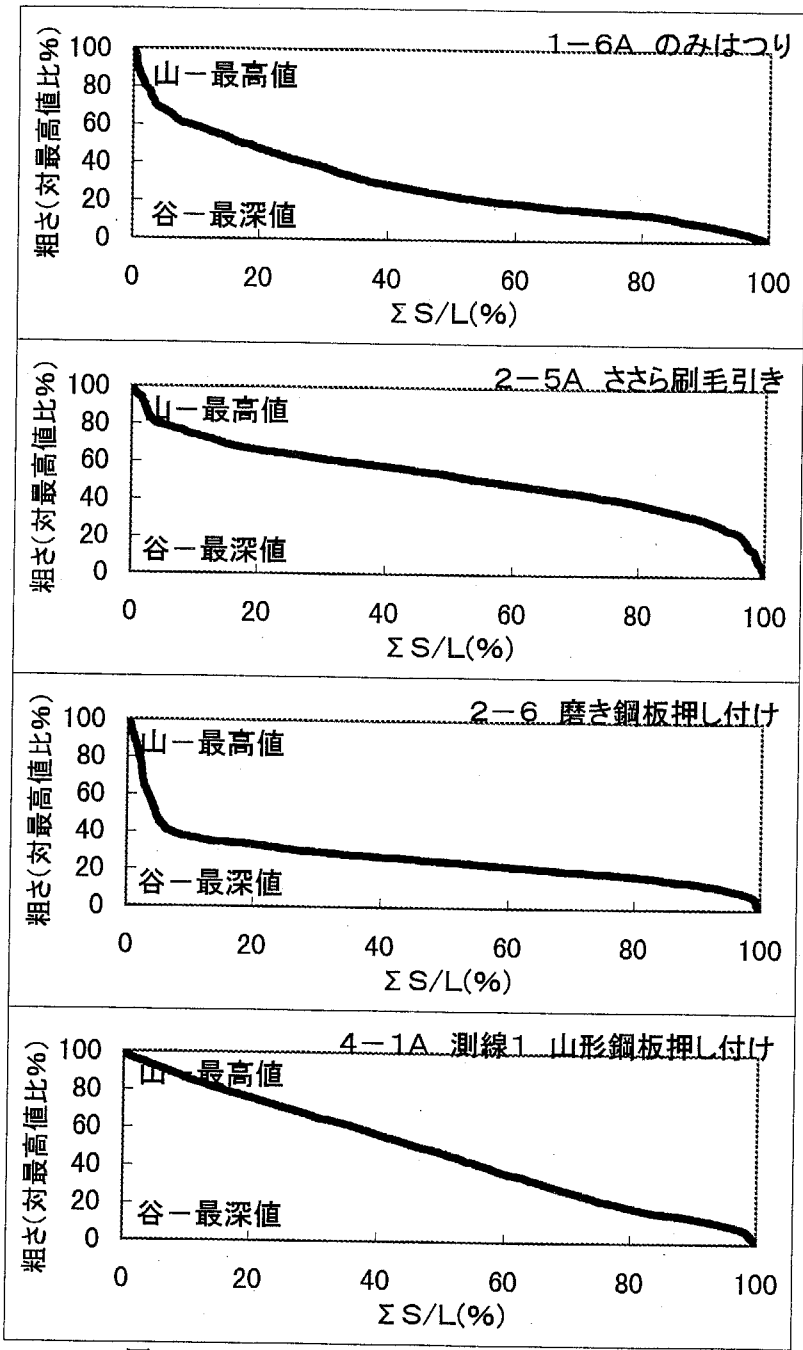


図 2-14(b) 粗さ曲線の負荷曲線の一例
(その 2)

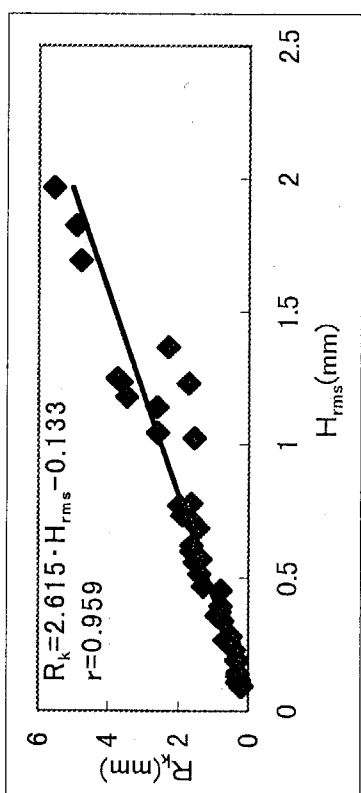
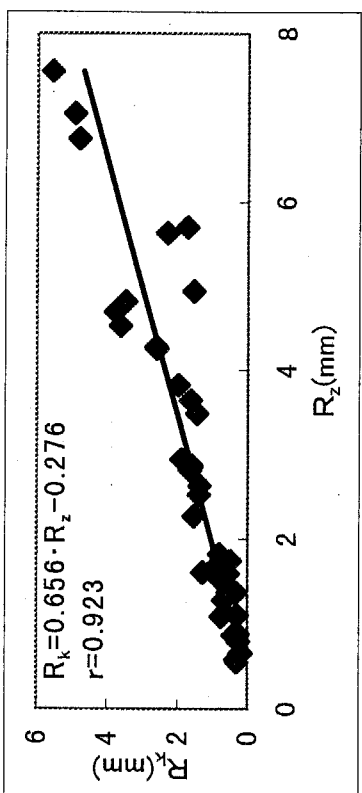
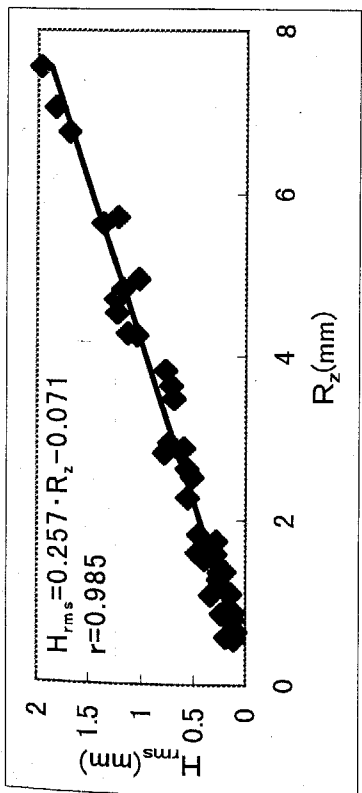
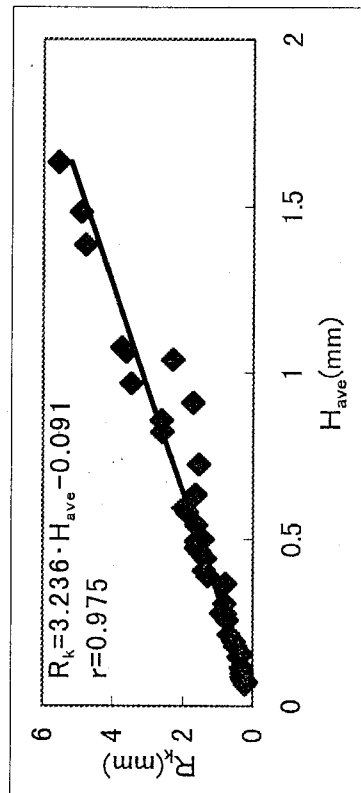
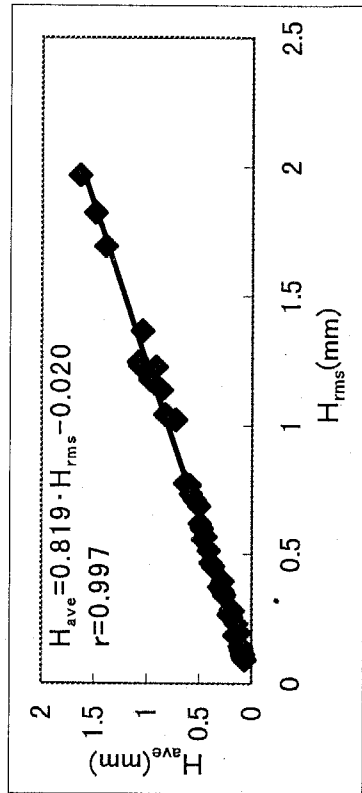
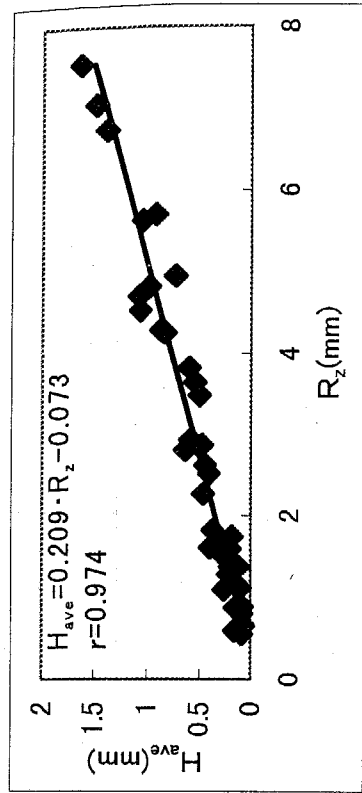


図 2-15 各粗さ評価値相互の相関

表 2-5(a) 粗さ評価値一覧 (その 1)

| 試験 体名 | 測線の粗さ評価値(mm) | | | 試験 体名 | 測線の粗さ評価値(mm) | | | | |
|----------|----------------|------------------|------------------|----------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| | R _z | H _{rms} | H _{ave} | | R _k | R _z | H _{rms} | H _{ave} | R _k |
| 1-1A | 0.873 | 0.233 | 0.147 | 0.406 | 2-4B | 1.597 | 0.287 | 0.194 | 0.541 |
| 1-1B | 0.554 | 0.110 | 0.087 | 0.308 | 2-5A | 2.947 | 0.735 | 0.582 | 1.881 |
| 1-2A | 3.644 | 0.713 | 0.542 | 1.628 | 2-5B | 2.632 | 0.569 | 0.443 | 1.367 |
| 1-2B | 4.951 | 1.025 | 0.726 | 1.548 | 2-6 | 1.748 | 0.282 | 0.180 | 0.491 |
| 1-2C | 3.831 | 0.771 | 0.595 | 1.980 | 2-7 | 1.534 | 0.397 | 0.277 | 0.788 |
| 1-3 | 0.588 | 0.188 | 0.156 | 0.333 | 3-1A | 5.712 | 1.229 | 0.913 | 1.719 |
| 1-4 | 0.661 | 0.094 | 0.071 | 0.176 | 3-1B | 6.748 | 1.694 | 1.385 | 4.780 |
| 1-5 | 0.652 | 0.093 | 0.067 | 0.218 | 3-1C | 4.828 | 1.179 | 0.969 | 3.473 |
| 1-6A | 1.830 | 0.454 | 0.368 | 0.803 | 3-1D | 4.289 | 1.140 | 0.860 | 2.603 |
| 1-6B | 2.815 | 0.779 | 0.636 | 1.644 | 3-2A | 1.379 | 0.196 | 0.118 | 0.332 |
| 2-1 | 1.115 | 0.139 | 0.099 | 0.300 | 3-2B | 1.684 | 0.359 | 0.277 | 0.908 |
| 2-2A | 7.052 | 1.825 | 1.484 | 4.919 | 3-3 | 1.688 | 0.375 | 0.309 | 0.807 |
| 2-2B | 1.287 | 0.267 | 0.215 | 0.687 | 3-4A | 4.263 | 1.044 | 0.824 | 2.587 |
| 2-2C | 5.639 | 1.368 | 1.042 | 2.294 | 3-4B | 3.489 | 0.687 | 0.501 | 1.448 |
| 2-2D | 7.552 | 1.969 | 1.633 | 5.557 | 3-5 | 0.899 | 0.144 | 0.111 | 0.316 |
| 2-3 | 2.278 | 0.558 | 0.465 | 1.540 | 3-6 | 1.096 | 0.341 | 0.258 | 0.745 |
| 2-4A | 1.612 | 0.469 | 0.391 | 1.293 | 3-7 | 1.375 | 0.261 | 0.194 | 0.549 |

R_z: 十点平均粗さ、H_{rms}: 自乗平均粗さ、H_{ave}: 中心線平均粗さ、R_k: 負荷値

表 2-5(b) 粗さ評価値一覧 (その 2)

| 試験 体名 | 測線 1 の粗さ評価値(mm) | | | 測線 2 の粗さ評価値(mm) | | | 測線 1 および 2 の 粗さ評価値の平均(mm) | | | | | |
|----------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| | R _z | H _{rms} | H _{ave} | R _k | R _z | H _{rms} | H _{ave} | R _k | R _z | H _{rms} | H _{ave} | R _k |
| 4-1A | 4.711 | 1.260 | 1.087 | 3.784 | 4.699 | 1.239 | 1.068 | 3.726 | 4.705 | 1.249 | 1.078 | 3.755 |
| 4-1B | 4.475 | 1.241 | 1.071 | 3.645 | 4.596 | 1.228 | 1.060 | 3.589 | 4.536 | 1.234 | 1.066 | 3.617 |
| 4-2A | 0.745 | 0.084 | 0.056 | 0.181 | 0.857 | 0.147 | 0.110 | 0.341 | 0.801 | 0.116 | 0.083 | 0.261 |
| 4-2B | 0.937 | 0.150 | 0.112 | 0.343 | 0.785 | 0.111 | 0.085 | 0.268 | 0.861 | 0.130 | 0.098 | 0.305 |
| 4-2C | 0.967 | 0.121 | 0.082 | 0.285 | 0.810 | 0.103 | 0.074 | 0.276 | 0.888 | 0.112 | 0.078 | 0.280 |
| 4-3A | 2.736 | 0.514 | 0.389 | 1.220 | 3.021 | 0.685 | 0.561 | 2.027 | 2.879 | 0.600 | 0.475 | 1.624 |
| 4-3B | 2.555 | 0.608 | 0.489 | 1.620 | 3.147 | 0.636 | 0.500 | 1.622 | 2.851 | 0.622 | 0.495 | 1.621 |
| 4-3C | 2.288 | 0.462 | 0.367 | 1.240 | 2.771 | 0.568 | 0.450 | 1.552 | 2.530 | 0.515 | 0.408 | 1.396 |

R_z: 十点平均粗さ、H_{rms}: 自乗平均粗さ、H_{ave}: 中心線平均粗さ、R_k: 負荷値

表 2-6 各粗さ評価値相互の相関

| 評価値 | 十点平均粗さ R_z (mm) | 自乗平均粗さ H_{rms} (mm) | 中心線平均粗さ H_{ave} (mm) | 負荷値 R_k (mm) |
|-----------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| R_z | | $H_{rms}=0.257 \cdot R_z - 0.071$ | $H_{ave}=0.209 \cdot R_z - 0.073$ | $R_k=0.656 \cdot R_z - 0.276$ |
| H_{rms} | 0.985 | | $H_{ave}=0.819 \cdot H_{rms} - 0.020$ | $R_k=2.615 \cdot H_{rms} - 0.133$ |
| H_{ave} | 0.974 | 0.997 | | $R_k=3.236 \cdot H_{ave} - 0.091$ |
| R_k | 0.923 | 0.959 | 0.975 | |

斜線右上部：回帰式 斜線左下部：相関係数

2.5 目粗しの粗さの形状の特徴に関する考察

2.5.1 粗さ曲線のフーリエスペクトルを用いた目粗しの粗さの形状の特徴

この節では、粗さ評価値以外のいくつかの方法を用いて、一般に「目粗し」といわれる粗さが持つ形状の特徴の解明を行う。

2.2 節で述べた通り、粗さ曲線を地震波と同じ様に、多数の正弦曲線と余弦曲線の重ね合わせと考えることもできる。そこで、粗さの周期性を確認するため、そのフーリエスペクトル分布を求め、その一例を図 2-16 に示す（全部のフーリエスペクトル分布は巻末の付録に掲載する）。

山形鋼板押し付けの粗さ曲線では、2 試験体の計 4 曲線全てで底辺長さ 10mm にほぼ対応する波長約 9.6mm に極めて強いスペクトルがあり、周期性が強いことが裏付けられる。

目粗し鉄板掛けの粗さ曲線では、一部を除き 2-2A 試験体でのスペクトル分布に似ており、いくつかのスペクトルの卓越波長が見られる。上記 2 種類以外の処理方法の粗さ曲線ではスペクトルの特に卓越した波長は見られず、粗さの周期性はないかさほど強くはないと判断される。

2.5.2 目粗しの底面長さと高さの比を用いた目粗しの粗さの形状の特徴

まず、粗さ測定の結果を基に、2.4.2 項で求めた基準線に対して、目粗しの「底面長さ h 」と「高さ t 」を図 2-17 の様に定義する。その上で、高さに対する底面長さの比（長さ高さ比） h/t の値の頻度分布を求める。

表 2-7 に、各測線上での粗さ測定結果から得られた長さ高さ比の値の頻度分布を示す。また、表 2-8 に、その頻度分布を粗さ処理方法ごとにまとめ直したものを示す。山形鋼板押し付けにより粗さ処理を施された試験体（長さ高さ比が 2 となる凹凸を形成する様に意図したもの）を除き、長さ高さ比が 5 を上回る凹凸の割合が大きい。すなわち、一般に「目粗し」と認識される様な接合面粗さ処理方法を行うと、概ね長さ高さ比が 5 を上回る様な凹凸がかなりの割合を占める様な接合面が形成されることが考えられる。

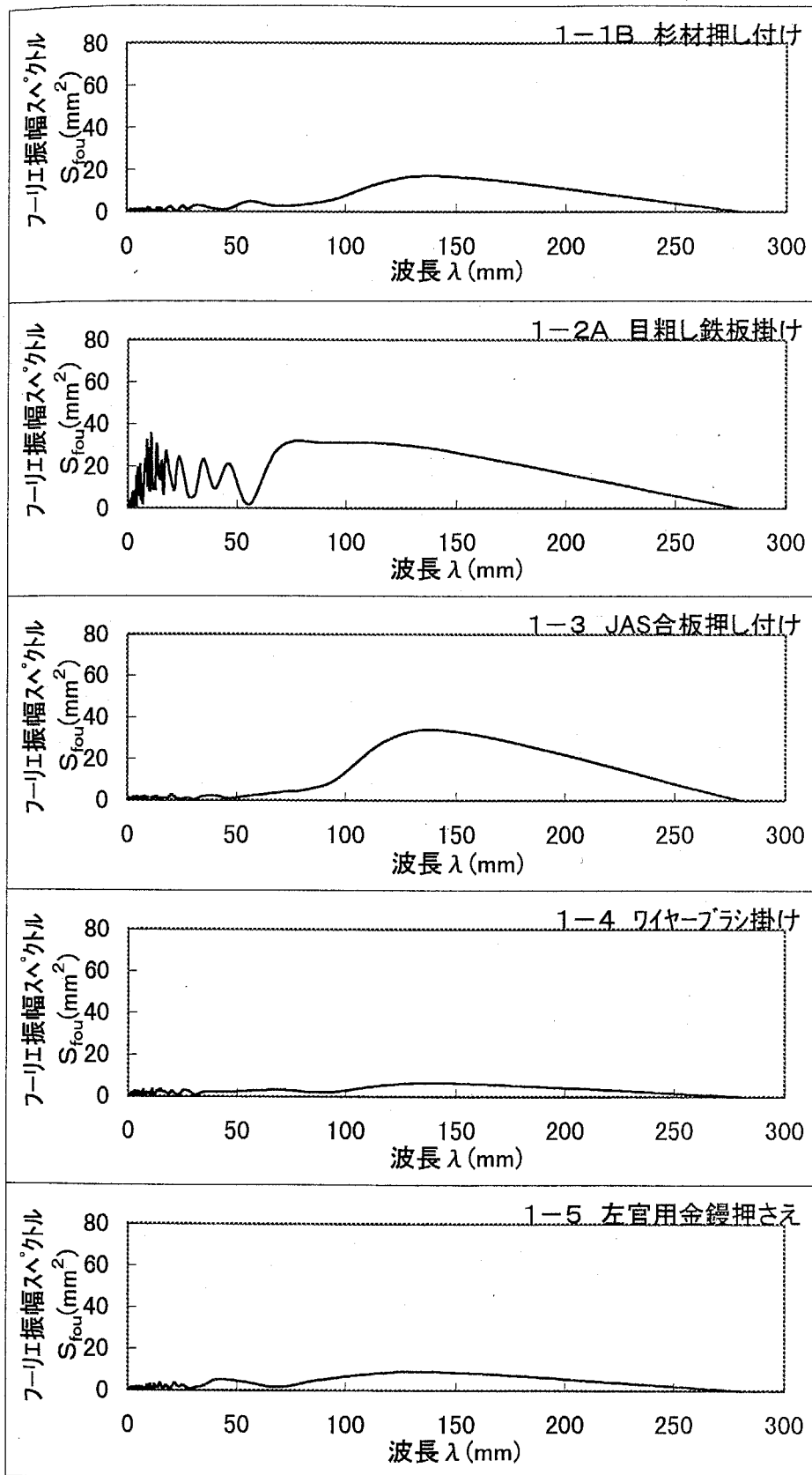


図 2-16(a) 粗さ曲線のフーリエスペクトルの一例
(その 1)

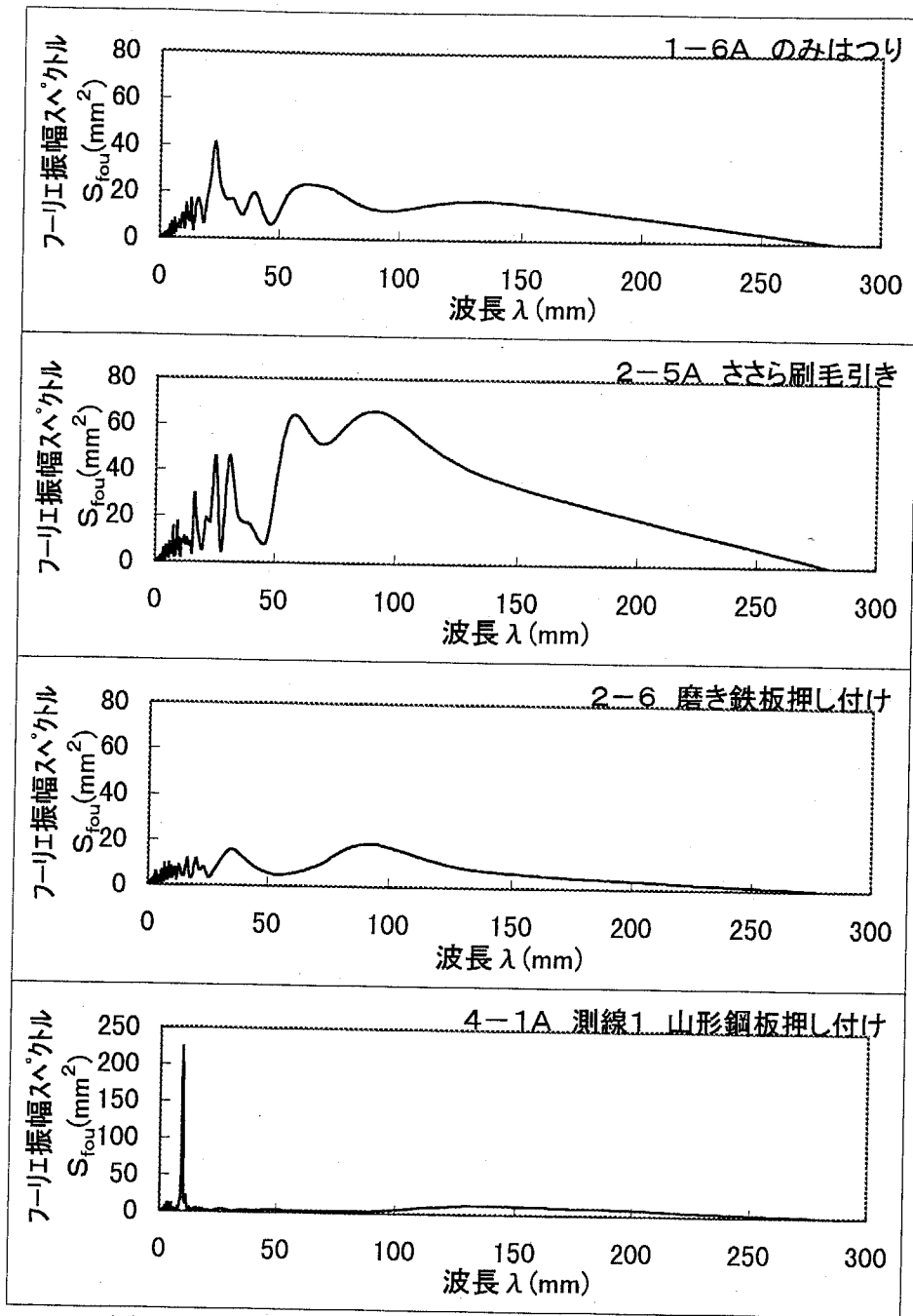


図 2-16(b) 粗さ曲線のフーリエスペクトルの一例
(その 2)

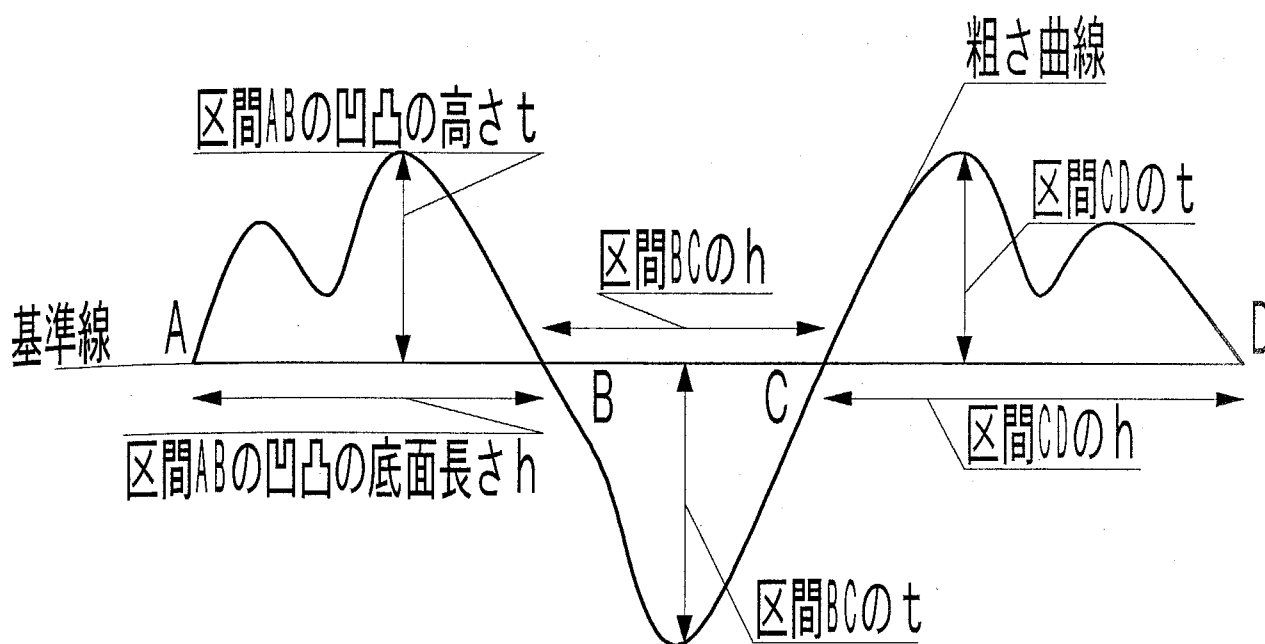


図 2-17 目粗しにおける底面長さ h と高さ t の定義

表 2-7(a) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 1)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 1-1A | 1-1B | 1-2A | 1-2B | 1-2C | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6A | 1-6B | 2-1 | 2-2A | 2-2B | 2-2C | 2-2D | 2-3 | 2-4A | 2-4B |
|-----------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 1以下 | 1 | 2 | 4 | 2 | 6 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 11 | 0 | 1 | 13 | 3 | 0 | 2 | 2 |
| 1~2 | 0 | 7 | 12 | 6 | 17 | 2 | 10 | 6 | 2 | 6 | 23 | 1 | 1 | 11 | 8 | 1 | 2 | 4 |
| 2~3 | 3 | 6 | 15 | 14 | 19 | 7 | 10 | 3 | 4 | 2 | 12 | 6 | 0 | 9 | 12 | 4 | 1 | 0 |
| 3~4 | 3 | 9 | 12 | 9 | 20 | 5 | 9 | 2 | 1 | 1 | 14 | 10 | 2 | 8 | 6 | 4 | 1 | 2 |
| 4~5 | 2 | 11 | 15 | 0 | 11 | 3 | 22 | 5 | 3 | 2 | 8 | 1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 1 | 6 |
| 5~10 | 19 | 41 | 23 | 20 | 18 | 17 | 65 | 32 | 17 | 22 | 50 | 13 | 17 | 13 | 3 | 17 | 7 | 25 |
| 10~1000 | 64 | 113 | 9 | 28 | 9 | 45 | 137 | 142 | 27 | 24 | 106 | 4 | 58 | 10 | 1 | 22 | 23 | 70 |
| 1000以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 2-7(b) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 2)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 2-5A | 2-5B | 2-6 | 2-7 | 3-1A | 3-1B | 3-1C | 3-1D | 3-2A | 3-2B | 3-3 | 3-4A | 3-4B | 3-5 | 3-6 | 3-7 | 4-1A 測線 1 | 4-1A 測線 2 |
|-----------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|--------------|--------------|
| 1以下 | 1 | 1 | 5 | 4 | 13 | 9 | 6 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 1~2 | 0 | 3 | 12 | 0 | 13 | 17 | 5 | 7 | 15 | 4 | 1 | 1 | 13 | 1 | 0 | 2 | 2 | 6 |
| 2~3 | 2 | 4 | 4 | 0 | 2 | 21 | 6 | 3 | 7 | 8 | 0 | 4 | 11 | 2 | 1 | 9 | 54 | 50 |
| 3~4 | 1 | 4 | 10 | 3 | 7 | 12 | 9 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 9 | 5 | 1 | 8 | 2 | 3 |
| 4~5 | 0 | 3 | 5 | 0 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 10 | 2 | 4 | 6 | 0 | 1 | 6 | 0 | 2 |
| 5~10 | 9 | 22 | 19 | 10 | 15 | 5 | 13 | 24 | 4 | 43 | 7 | 22 | 30 | 15 | 8 | 43 | 0 | 0 |
| 10~1000 | 17 | 29 | 70 | 32 | 8 | 1 | 6 | 10 | 43 | 32 | 32 | 13 | 22 | 65 | 36 | 66 | 2 | 1 |
| 1000以上 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

表 2-7(c) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 3)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 4-1B 測線 1 | 4-1B 測線 2 | 4-2A 測線 1 | 4-2A 測線 2 | 4-2B 測線 1 | 4-2B 測線 2 | 4-2C 測線 1 | 4-2C 測線 2 | 4-3A 測線 1 | 4-3A 測線 2 | 4-3B 測線 1 | 4-3B 測線 2 | 4-3C 測線 1 | 4-3C 測線 2 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 以下 | 1 | 1 | 23 | 20 | 9 | 6 | 30 | 35 | 10 | 2 | 3 | 3 | 9 | 5 |
| 1~2 | 9 | 6 | 31 | 25 | 28 | 20 | 49 | 63 | 12 | 9 | 10 | 8 | 13 | 10 |
| 2~3 | 42 | 43 | 51 | 37 | 30 | 22 | 51 | 76 | 18 | 11 | 6 | 5 | 20 | 9 |
| 3~4 | 12 | 11 | 40 | 27 | 25 | 25 | 47 | 48 | 15 | 7 | 13 | 12 | 16 | 18 |
| 4~5 | 2 | 0 | 66 | 29 | 20 | 23 | 46 | 47 | 19 | 7 | 6 | 10 | 16 | 17 |
| 5~10 | 1 | 4 | 147 | 95 | 60 | 66 | 104 | 127 | 52 | 20 | 30 | 39 | 44 | 37 |
| 10~1000 | 2 | 2 | 139 | 83 | 97 | 108 | 141 | 129 | 22 | 22 | 23 | 14 | 16 | 22 |
| 1000 以上 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 2-8(a) 接合面粗さ処理方法ごとの長さ高さ比の頻度分布 (その 1)

| 接合面粗さ処理方法 (試験体数および測線数) | 杉材 | | 目粗し | JAS 合板 | 7ヤ-7'シ | 左官用 | のみ |
|---------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | 押し付け (4 体 4 本) | 押し付け (4 体 4 本) | 鉄板掛け (11 体 11 本) | 押し付け (4 体 4 本) | 掛け (2 体 2 本) | 金罌押さえ (3 体 3 本) | 手ばつり (3 体 3 本) |
| 凹凸全体に占める | 範囲 (%) | 69.6~90.2 | 8.6~91.5 | 77.5~87.9 | 78.9~83.0 | 86.3~91.7 | 73.6~80.7 |
| h/t ≥ 5 の凹凸の割合 | 平均 (%) | 80.7 | 41.3 | 83.4 | 81.0 | 89.6 | 78.1 |

表 2-8(b) 接合面粗さ処理方法ごとの長さ高さ比の頻度分布 (その 2)

| 接合面粗さ処理方法 (試験体数および測線数) | 第 2 章で扱った試験体 | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | ささら 刷毛引き (7 体 10 本) | 磨き鋼板 押し付け (6 体 9 本) |
| 凹凸全体に占める | 範囲 (%) | 44.8~86.7 |
| h/t ≥ 5 の凹凸の割合 | 平均 (%) | 60.3 |
| | | 山形鋼板 押し付け (2 体 4 本) |
| | | 1.6~9.0 |
| | | 4.6 |

2.6 接合面せん断力載荷実験結果

載荷において、試験体と載荷フレームとの間に装着した真鍮製方形材は、試験体および載荷フレームとはだすきなく密着していることを全試験体について目視および指により確認した。すなわち、せん断力は、載荷フレームから方形材を介して試験体に伝わっていると判断され、スタブ間相対変位であるところの「滑り変位 δ_H 」は、試験体の接合面以外のせん断変形量をほとんど含まない、接合面での純粋な滑り変位であると考えられる。また、試験体の表裏の変位計の目開き変位はいずれの試験体でもほぼ同じであり、先打ち部分と後打ち部分がほぼ平行な状態だったと判断され、平行維持パンタグラフの装着が有効であったと考えられる。

載荷結果を表 2-9 に示す。最大耐力 Q_{max} を接合面面積 A で除した値を最大強度 τ_{max} とすると、各試験体の最大強度の大きさは、接合面圧縮力 N の大きさの大小でほぼ特徴付けられる。すなわち、 $N=0$ の試験体では τ_{max} はほぼ 30kgf/cm^2 以下、 $N=6\text{tf}$ では $30\sim 60\text{kgf/cm}^2$ 、 12tf では 60kgf/cm^2 以上となった。

せん断力と滑り変位の関係を図 2-18 に示す。2.7 節での検討に用いる試験体のせん断力と滑り変位および目開き変位の関係についてであるが、まず、 $N=0$ の試験体では、ほとんどの試験体で載荷にともなう滑り変位、目開き変位ともに全く生じずに最大耐力に達し、その瞬間に急激な耐力低下が生じて、接合面付近を境に先打ち・後打ち両部分が接合面に垂直な方向に完全に分離した。これらの試験体では、接合面を介した先打ち・後打ち両部分のコンクリート同士の化学的付着力以外にはせん断抵抗機構は生じていないはずである。よって、化学的付着力によるせん断抵抗機構は全く靱性のない機構だと判断される。なお、4-2A、4-2B、4-3A の 3 試験体では、載荷開始とともに滑り変位が生じたが、その理由については不明である。

一方、 $N=6$ 、 12tf の試験体では、せん断力が表 2-10 に示す滑り変位発生荷重 Q_{slp} (2.1.2 項で定義) に至るまでは滑り変位が生じず、その後載荷にともない滑り変位が生じて最大耐力に達した。滑り変位発生荷重時から最大耐力時に至るまでは、ほぼ弾性的に耐力上昇する試験体と剛性が変化して曲線的に耐力上昇する試験体が混在した。最大耐力後はほとんどの試験体で、まず先打ち・後打ち両部分が接合面垂直方向に完全には分離しない範囲で大きな滑り変位をともなって耐力低下が発生し、その後せん断力を完全に除荷した後、接合面圧縮力を除荷する途中で両部分が接合面垂直方向に完全に分離した。目開き変位 δ_V については、載荷初期ではほとんど変位を生じない試験体が多かったが、いずれも最大耐力時かそれ以前に変位が生じ始めた。最大耐力時で見ると、 $N=6\text{tf}$ 、 12tf の場合共に、目開き変位はほぼ $0\sim 0.148\text{mm}$ であった。

最終破壊形式は、接合面圧縮力の大小によらず、大別して図 2-19 に示す様な 2 種類が確認された。すなわち、接合面のみが滑り、接合面を境に先打ち・後打ち両部分が完全に分離した形式(「接合面滑り破壊 SL」と名付ける)、もう 1 つは、両部分が分離しながらも分離した面が接合面と完全には一致せず、一部スタブ部分で分離(破壊)した形式(「接合面滑りせん断破壊 SS」と名付ける)であった。同一変動要因で異なった形式の破壊となった試験体もあり、最終破壊形式は単純に接合面粗さ処理方法の違いでは分類できなかった。

1-1A 試験体は荷重失敗

1-2C は測定不能

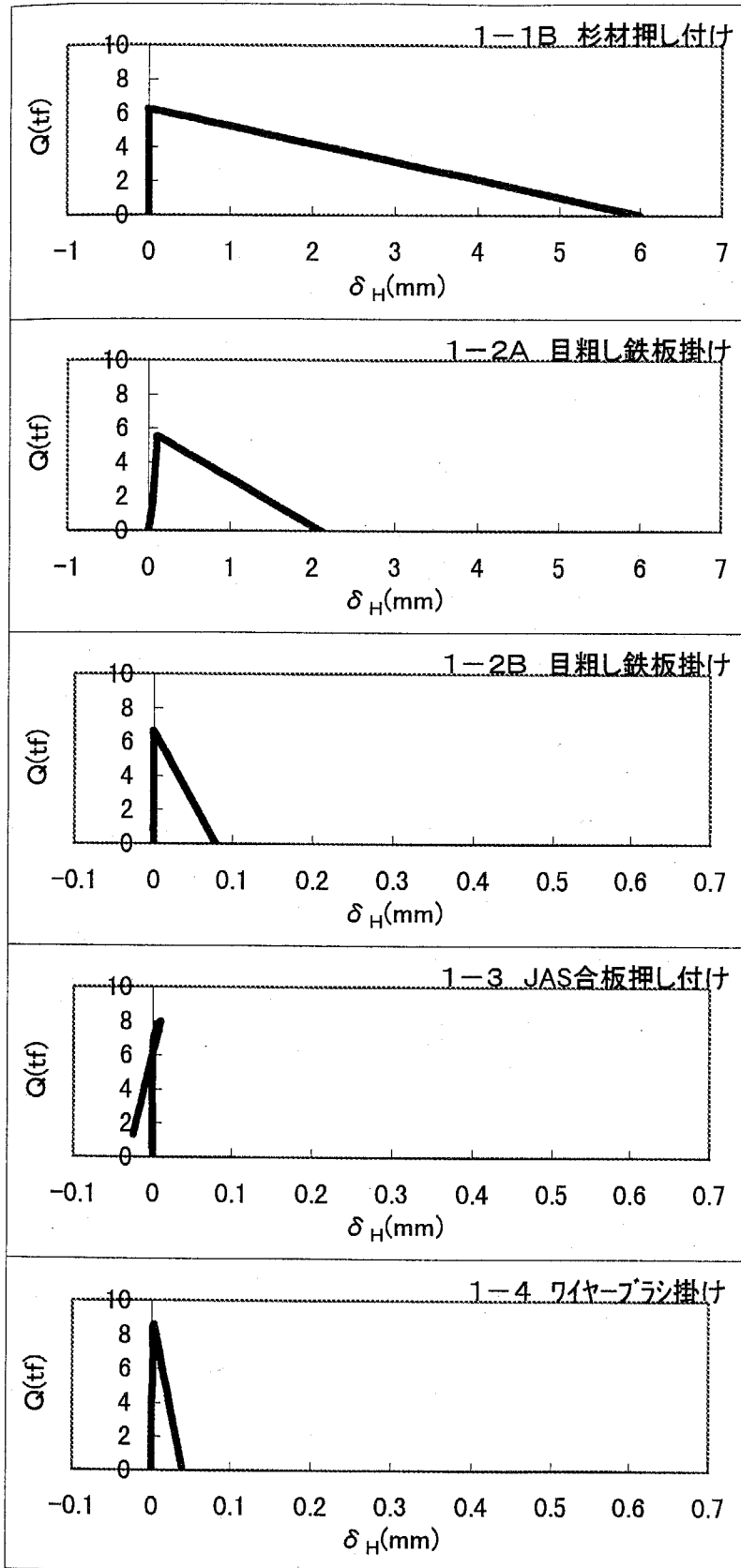


図 2-18(a) せん断力-滑り変位関係 (その 1)

1-6B 試験体は測定不能

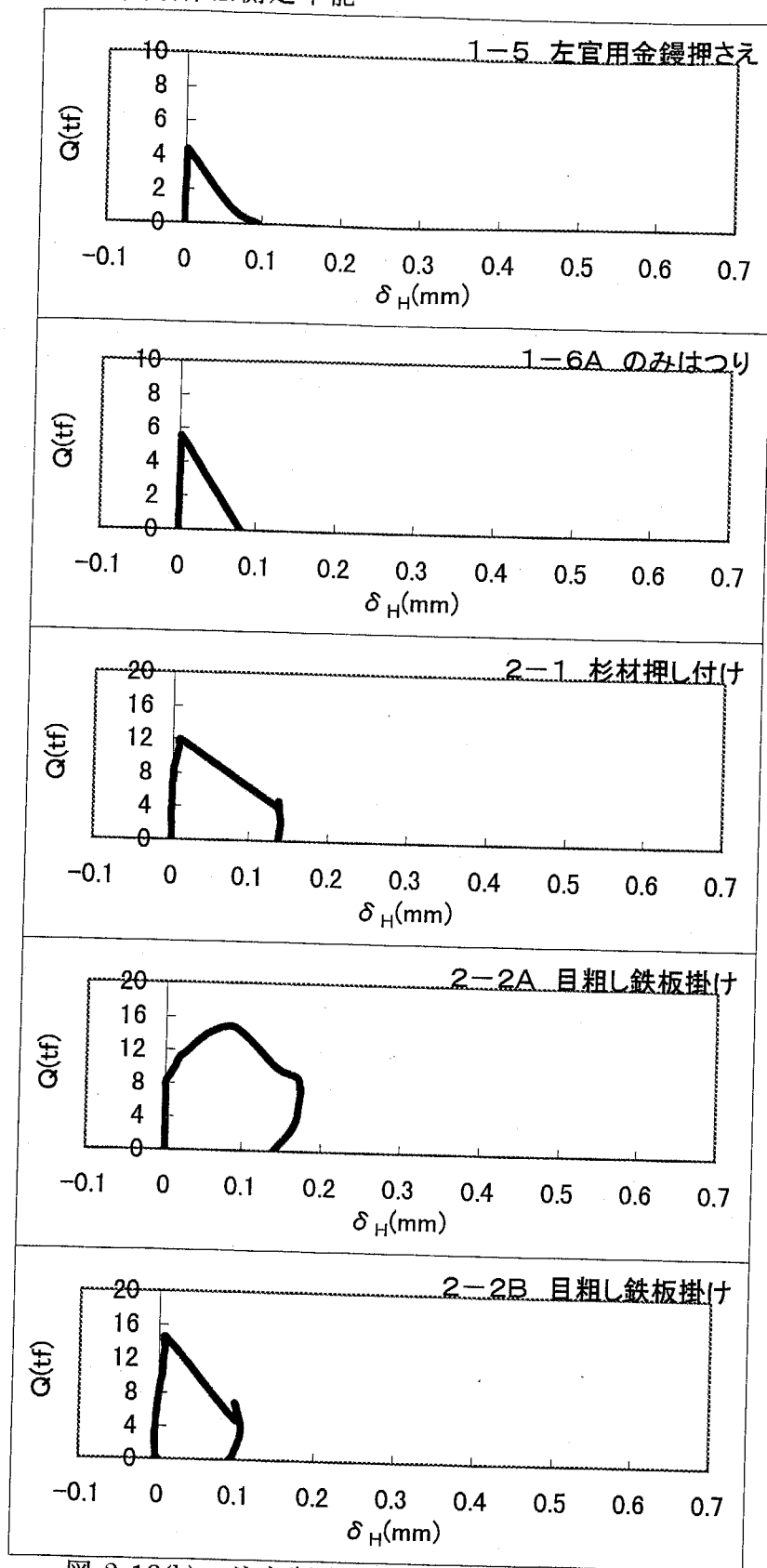


図 2-18(b) せん断力-滑り変位関係 (その 2)

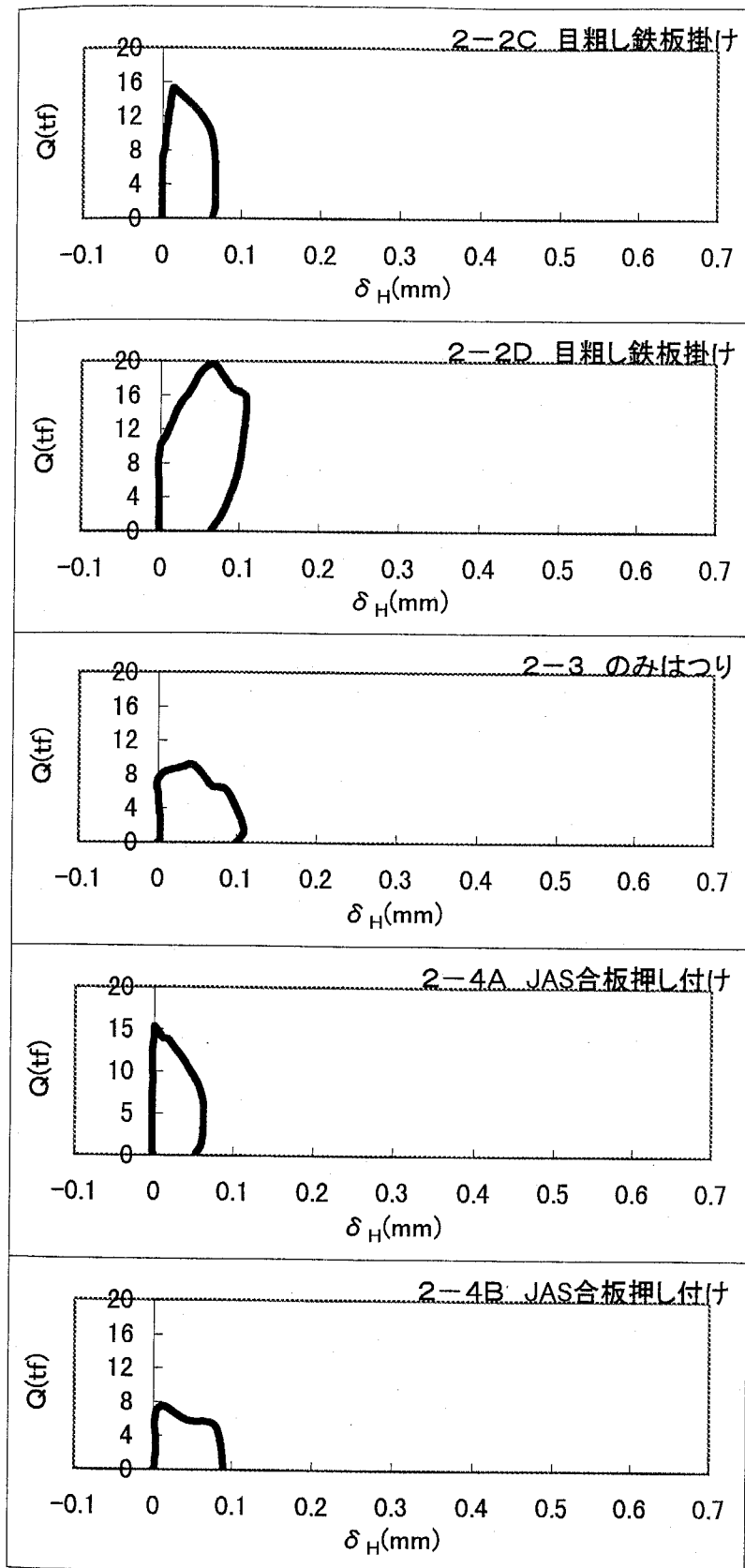


図 2-18(c) せん断力-滑り変位関係 (その 3)

3-1A 試験体は測定不能

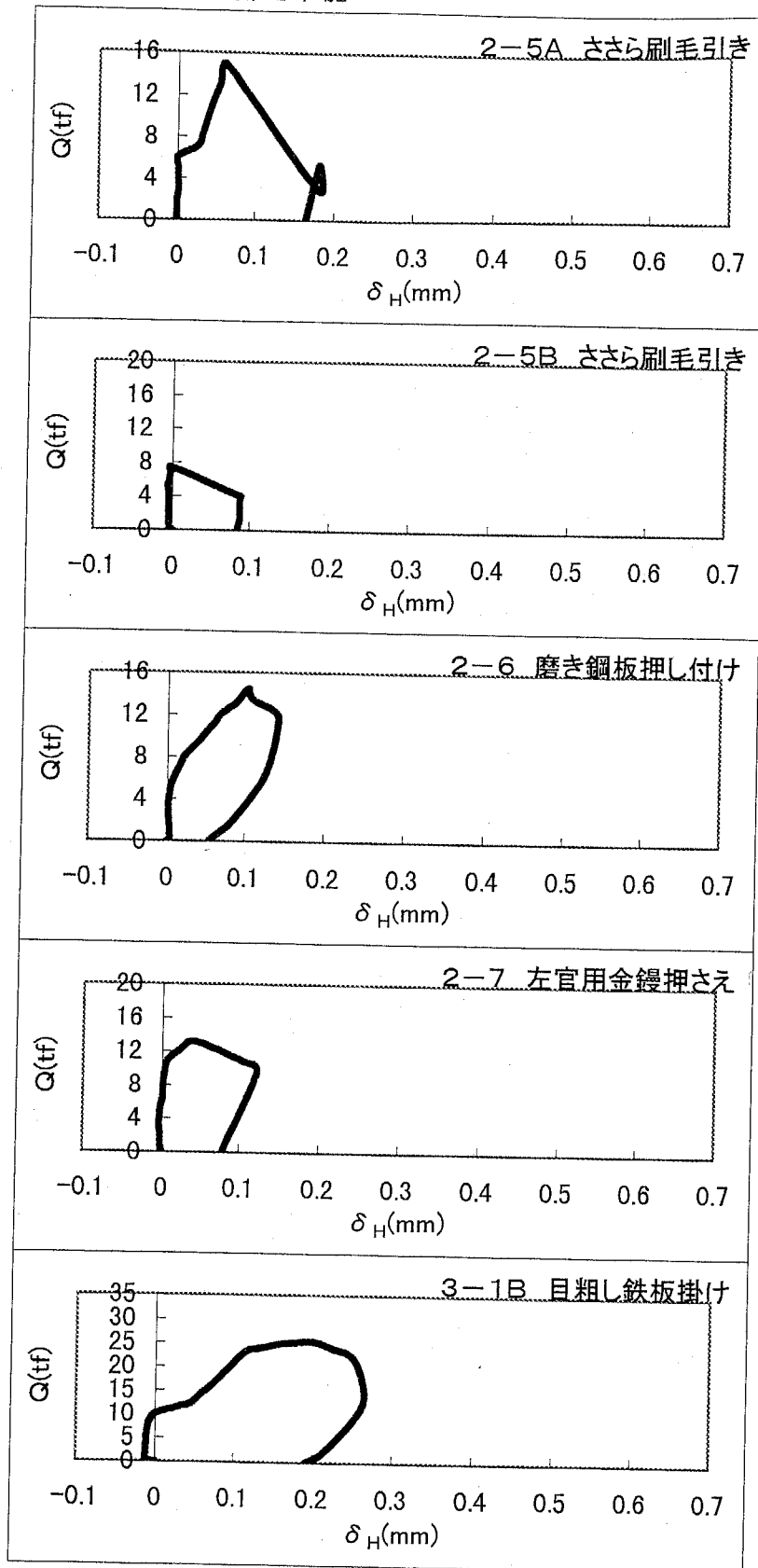


図 2-18(d) せん断力-滑り変位関係 (その 4)

3-2A、3-3 試験体は測定不能

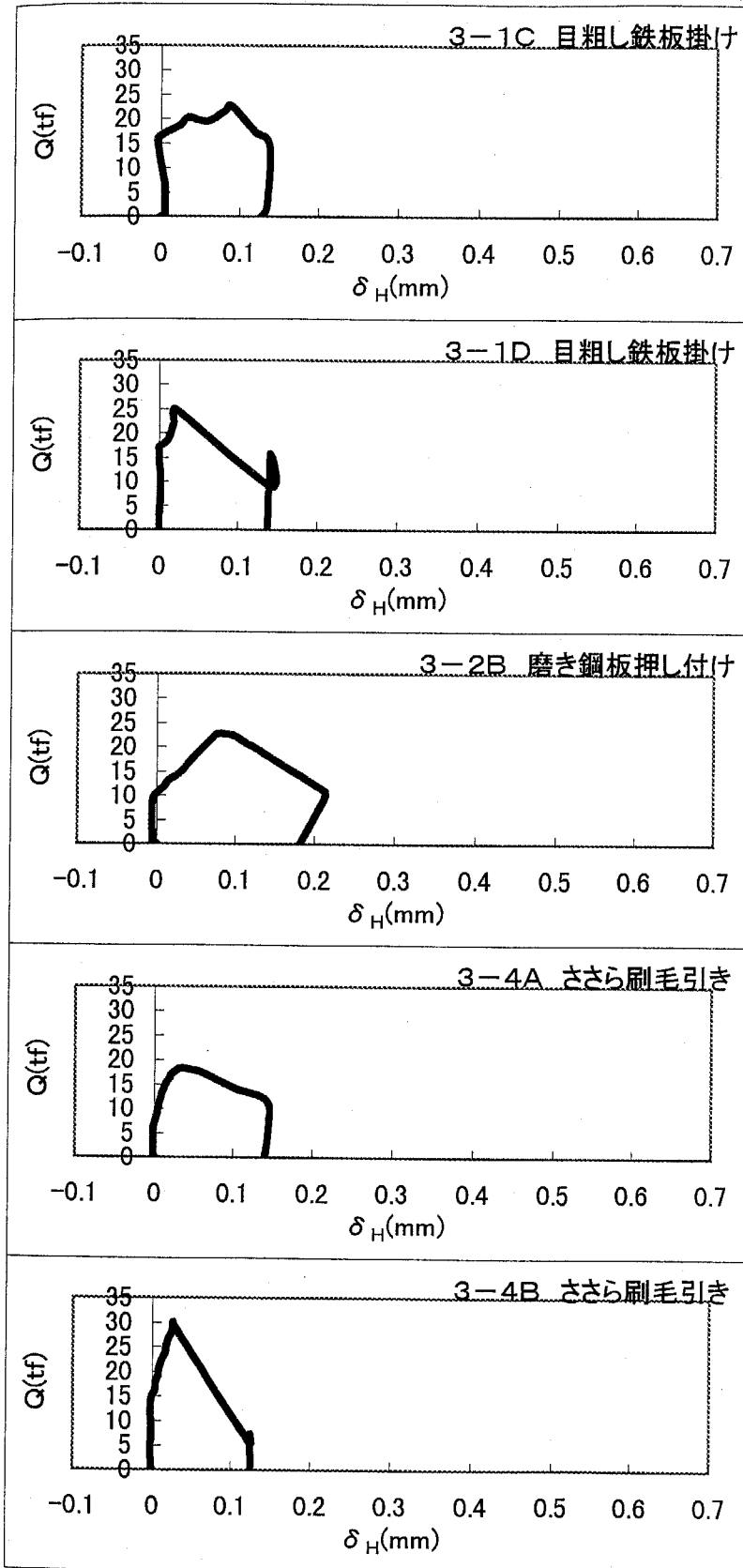


図 2-18(e) せん断力-滑り変位関係 (その 5)

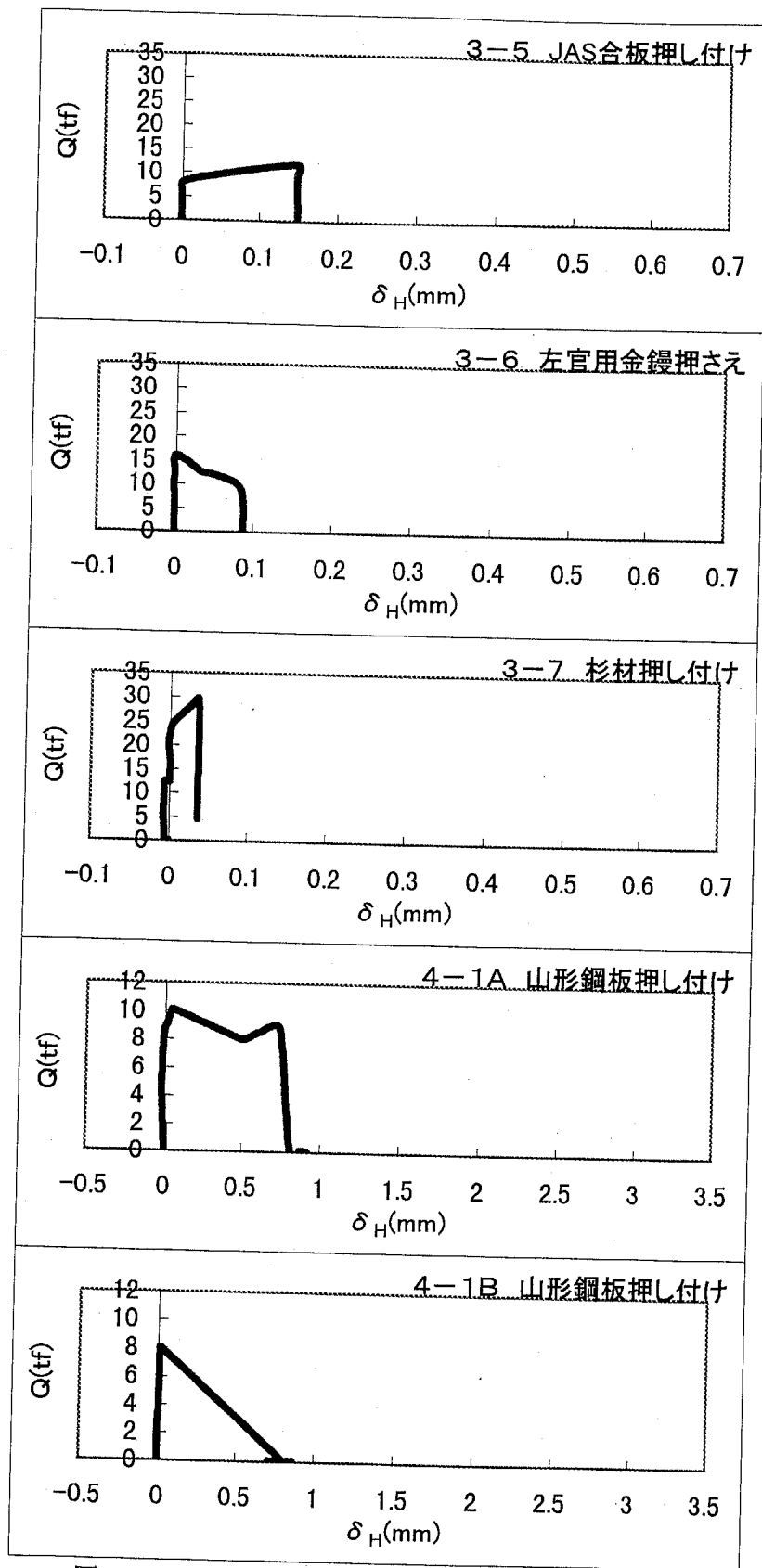


図 2-18(f) せん断力-滑り変位関係 (その 6)

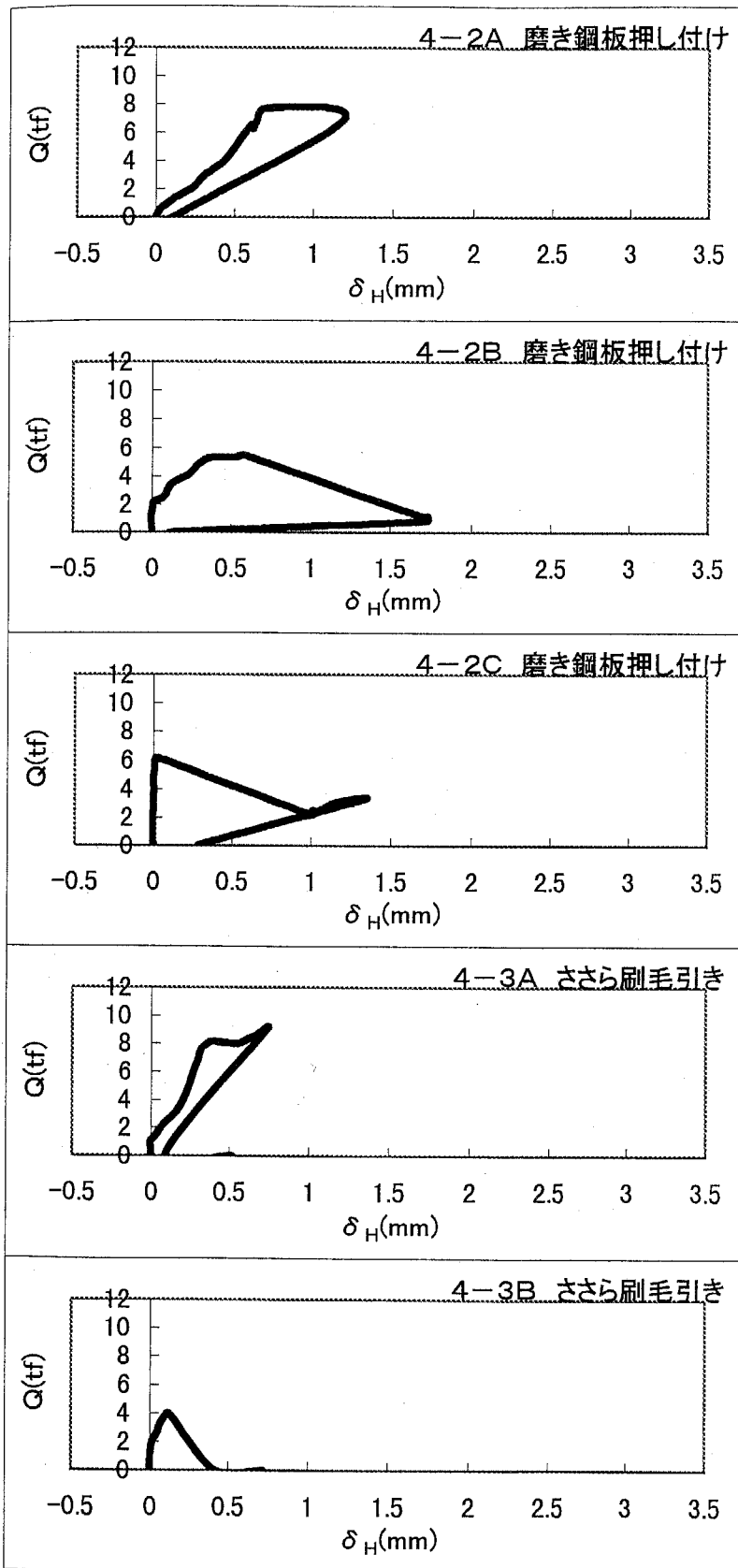


図 2-18(g) せん断力-滑り変位関係 (その 7)

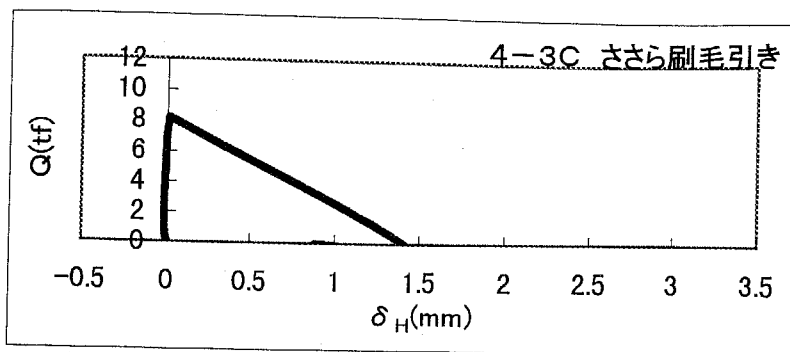


図 2-18(h) せん断力-滑り変位関係 (その 8)

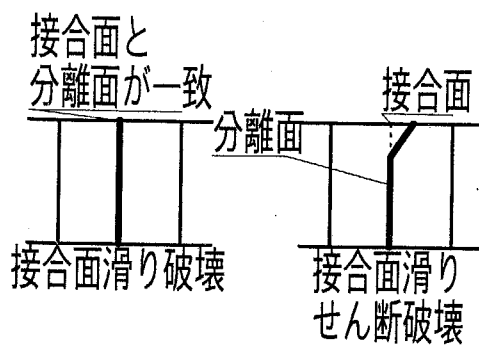


図 2-19 試験体の最終破壊形式

表 2-9 接合面せん断力載荷実験結果

| 試験 体名 | 最大耐力 Q_{max} 最大強度 τ_{max} (kgf/cm ²) | | 最大耐力時変位 (mm) | | 最終 破壊 形式 |
|----------|---|--------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| | Q_{max} (tf) | τ_{max} | 滑り δ_{Hmax} | 目開き δ_{Vmax} | |
| 1-1A | 載荷開始直前に破壊 | | | | |
| 1-1B | 6.25 | 20.8 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-2A | 5.50 | 18.3 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-2B | 6.60 | 22.0 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-2C | 7.91 | 26.4 | 測定不能 | 測定不能 | SS |
| 1-3 | 7.91 | 26.4 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-4 | 8.55 | 28.5 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-5 | 4.30 | 14.3 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-6A | 5.51 | 18.4 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 1-6B | 5.50 | 18.3 | 測定不能 | 測定不能 | SS |
| 2-1 | 11.87 | 39.6 | 0.011 | 0.003 | SL |
| 2-2A | 14.82 | 49.4 | 0.086 | 0.148 | SS |
| 2-2B | 14.53 | 48.4 | 0.009 | 0.005 | SS |
| 2-2C | 15.23 | 50.8 | 0.015 | 0.042 | SL |
| 2-2D | 19.71 | 65.7 | 0.065 | 0.097 | SS |
| 2-3 | 9.06 | 30.2 | 0.046 | 0.086 | SS |
| 2-4A | 15.32 | 51.1 | ほぼ 0 | 0.007 | SS |
| 2-4B | 7.42 | 24.7 | 0.015 | 0.014 | SL |
| 2-5A | 14.83 | 49.4 | 0.063 | 0.055 | SL |
| 2-5B | 7.42 | 24.7 | ほぼ 0 | 0.003 | SL |
| 2-6 | 14.42 | 48.1 | 0.103 | 0.100 | SS |
| 2-7 | 13.11 | 43.7 | 0.041 | 0.026 | SS |
| 試験 体名 | 最大耐力 Q_{max} 最大強度 τ_{max} (kgf/cm ²) | | 最大耐力時変位 (mm) | | 最終 破壊 形式 |
| | Q_{max} (tf) | τ_{max} | 滑り δ_{Hmax} | 目開き δ_{Vmax} | |
| 3-1A | 28.23 | 94.1 | 測定不能 | 測定不能 | SL |
| 3-1B | 25.34 | 84.5 | 0.191 | 0.115 | SL |
| 3-1C | 22.60 | 75.3 | 0.090 | 0.078 | SL |
| 3-1D | 24.81 | 82.7 | 0.021 | ほぼ 0 | SL |
| 3-2A | 22.43 | 74.8 | 測定不能 | 測定不能 | SS |
| 3-2B | 22.81 | 76.0 | 0.078 | 0.069 | SL |
| 3-3 | 25.17 | 83.9 | 測定不能 | 測定不能 | SS |
| 3-4A | 18.26 | 60.9 | 0.034 | 0.083 | SS |
| 3-4B | 30.05 | 100.0 | 0.026 | 0.030 | SL |
| 3-5 | 11.76 | 39.2 | 0.148 | 0.148 | SL |
| 3-6 | 15.97 | 53.2 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 3-7 | 29.40 | 98.0 | 0.037 | 0.069 | SL |
| 4-1A | 10.08 | 33.6 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 4-1B | 8.01 | 26.7 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 4-2A | 7.71 | 25.7 | 0.703 | 0.877 | SL |
| 4-2B | 5.42 | 18.1 | 0.556 | 0.532 | SL |
| 4-2C | 6.16 | 20.5 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |
| 4-3A | 9.12 | 30.4 | 0.742 | 0.812 | SL |
| 4-3B | 3.95 | 13.2 | 0.124 | 0.067 | SL |
| 4-3C | 8.12 | 27.1 | ほぼ 0 | ほぼ 0 | SL |

SL：接合面滑り破壊、SS：接合面滑りせん断破壊

測定不能：変位計の脱落などで滑り変位が測定できなかったことを示す。

表 2-10 滑り変位発生荷重

| 試験 体名 | 滑り変位発生荷重 Q_{slp} 滑り変位発生強度 τ_{slp} | | 試験 体名 | 滑り変位発生荷重 Q_{slp} 滑り変位発生強度 τ_{slp} | |
|----------|---|--|----------|---|--|
| | Q_{slp} (tf) | τ_{slp} (kgf/cm ²) | | Q_{slp} (tf) | τ_{slp} (kgf/cm ²) |
| 2-2A | 8.14 | 27.2 | 3-1C | 16.20 | 54.0 |
| 2-2B | 6.01 | 20.0 | 3-1D | 15.31 | 51.1 |
| 2-2C | 6.98 | 23.3 | 3-2B | 9.99 | 33.3 |
| 2-2D | 10.11 | 33.7 | 3-4B | 14.60 | 48.7 |
| 2-3 | 7.00 | 23.3 | 3-5 | 7.97 | 26.6 |
| 2-4B | 6.06 | 20.2 | 3-6 | 14.15 | 47.2 |
| 2-5A | 6.10 | 20.3 | 3-7 | 12.06 | 40.2 |
| 2-6 | 4.06 | 13.5 | | | |

2.7 粗さ評価値とコンクリート強度を用いた目粗しの定量的評価

2.7.1 粗さ評価値を用いた接合面の等価付着力の推定

接合面圧縮力 N が作用していない状態ならば、接合面には摩擦力は生じないはずである。すなわち、「等価付着力」を 2.1.2 項の通り定義し、 $N=0$ の試験体について、最大強度 τ_{\max} と粗さ評価値との相関を求めることにより、接合面での等価付着力と接合面粗さの関係が得られる。よってこの項では、粗さ評価値を用いた接合面の等価付着力の定量化を試みる。

定量化にあたっては、以下の仮定条件を設ける。

- 1) 相関については、粗さ評価値と最大耐力の関係が一義的にかつ直線的に表わされるものと仮定し、回帰は最小自乗法により行う。
- 2) 下記の 7 試験体 (表 2-1 で * 印を付したもの) は、下記の理由により回帰の対象から除外する。

1-1A… 載荷開始直前に破壊したため。

4-3B… 最大耐力が同一変動要因の他の 2 体に比べて異常に低かったため。

1-2C、1-6B… 破壊形式が接合面滑りせん断破壊となったため。

4-2A、4-2B、4-3A… 載荷開始とともに滑り変位が生じたため。

- 3) 最大耐力は接合面粗さと同時にコンクリート強度にも依存すると考えられる。よって、最大耐力の指標値としては、下記の 3 種類を比較検討することで決定する。

① 最大強度を試験体コンクリートの代表圧縮強度 σ_B で除した値 τ_{\max} / σ_B

② 最大強度を試験体コンクリートの代表圧縮強度の平方根で除した値 $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B}$

③ 最大強度を試験体コンクリートの代表割裂強度 σ_t で除した値 τ_{\max} / σ_t

回帰結果を図 2-20 および表 2-11 に示す。いずれの結果も相関は極めて良好とはいえないが、粗さ評価値が大きくなるほど最大耐力の指標値は大きくなっており、等価付着力が接合面の粗さに左右されるとの定性的な傾向は何える。

表 2-11 中の各式で、定数項値が 2.7.3 項での検討結果から得られる表 2-12 中の各式のそれよりも大きくなっている組み合わせがある。本来であれば摩擦力を加味した表 2-12 中の各式の定数項の方が値は大きくなるはずであるが、その逆の現象が認められることは下記の理由によるものと考えられる。

- 1) 等価付着力の中には接合面におけるコンクリートの化学的付着力が含まれており、その化学的付着力は、接合面の微小部分におけるコンクリート強度のばらつきや粗さにより、その大きさが著しく変わると考えられる。このような微小部分の物性や粗さの評価が不十分なために式の不合理が生じる。
- 2) 接合面圧縮力がない場合とある場合で、せん断力に対する抵抗機構が異なる。すなわち、等価付着力と摩擦力の累加が成り立たない (等価付着力と摩擦力の各々の大きさを係数倍して足し合わせることができない) ためによる。

さらに適切で厳密なコンクリート強度や接合面粗さの評価が可能ならば、上記の様な不合理も解消するものと考えられる。

2.7.2 等価付着力によるせん断抵抗機構のモデル化

等価付着力によるせん断力伝達機構は、2.6 節で述べた通り、そのせん断力-滑り変位関係の性状は、粗さ処理方法によらず図 2-21 の様に全く靱性のない性状にモデル化できる。

2.7.3 粗さ評価値を用いた接合面の等価摩擦力の推定

接合面圧縮力が作用する場合には、2.7.1 項で扱った等価付着力の他に摩擦力が作用す

る。「摩擦力」とは、物理学上の厳密な定義では、接触面の塑性変形による凝着によって生じるとされる^{2,3)}。しかし、一般の鉄筋コンクリート構造では、このような本来の摩擦力のほかに、骨材の噛み合いなど本来の摩擦とは異なる機構をあわせて「摩擦力」として扱うことが多い。これらのせん断力伝達機構を明確に分離して議論することが理想ではあるが、実際には極めて困難である。そこで、この項ではこれら分離困難な各機構を全て含めたせん断力伝達機構を、2.1.2項の通り「等価摩擦力」と定義する。2.6節で述べた通り、最大耐力時には微小ながら滑り変位が生じており、また滑り変位発生時から最大耐力時までのせん断力-滑り変位関係で剛性が変化している(図 2-18 でせん断力-滑り変位関係の傾きが変化している)試験体があることを考慮すると、最大耐力の値から得られる「等価摩擦力」よりも、表 2-10 の滑り変位発生荷重によって得られる「等価摩擦力」の方がより意味があると考えられる。

よって、この滑り変位発生荷重を用いて、等価摩擦力と粗さ評価値との相関を調べる。なお、2.7.1項と同様に、下記の仮定条件を設ける。

- 1) 相関については、粗さ評価値と滑り変位発生荷重の関係が一義的にかつ直線的に表わされるものと仮定し、回帰は最小自乗法により行う。
- 2) 下記の 7 試験体(表 2-1 で※印を付したものは、下記の理由により回帰の対象から除外する。

3-1A、3-2A、3-3…せん断力载荷途中で変位計が脱落し、滑り変位発生荷重が不明なため。

2-1、2-4A、2-5B、2-7、3-1B、3-4A…载荷開始とともに滑り変位が生じ、滑り変位発生荷重が不明なため。

- 3) 最大耐力と同様に、滑り変位発生荷重も接合面粗さと同時にコンクリート強度にも依存すると考えられる。よって、滑り変位発生荷重の指標値としては、滑り変位発生荷重を接合面面積 A で除した滑り変位発生強度 τ_{slp} を用い、下記の 3 種類を比較検討することで決定する。

- ① 滑り変位発生強度を試験体コンクリートの代表圧縮強度で除した値 τ_{slp} / σ_B
- ② 滑り変位発生強度を試験体コンクリートの代表圧縮強度の平方根で除した値

$$\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B}$$

- ③ 滑り変位発生強度を試験体コンクリートの代表割裂強度で除した値 τ_{slp} / σ_t

回帰結果を図 2-22 および表 2-12 に示す。接合面圧縮力の大小によらず、適切な粗さ評価とコンクリート強度の評価で、最大耐力が精度良く推定可能と判断される。

なお、 $N=6tf$ の場合と $12tf$ の場合で回帰を行う際の負荷値 R_k の範囲に違いが生じているが、表 2-12 に示す様に、仮に $N=6tf$ の場合で $R_k < 3.5$ の試験体に限定して回帰を行っても、 $R_k < 6$ の場合の回帰とほとんど同じ結果となる。

ここで、表 2-12 中の 2 つの式

$$N=6tf(\text{接合面圧縮応力度 } \sigma_N=20\text{kgf/cm}^2) \text{ で } \tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.159 \cdot R_k + 0.977 \cdots \text{ (式 2-4)}$$

$$N=12tf(\sigma_N=40\text{kgf/cm}^2) \text{ で } \tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.437 \cdot R_k + 2.045 \cdots \text{ (式 2-5)}$$

で比較すると、接合面圧縮力が倍増することで、回帰直線の傾斜値(両式の右辺第 1 項の定数値)が約 2.75 倍に、また切片値(両式の右辺第 2 項)が約 2.09 倍となっている。コンクリート強度のばらつきなどを考慮して、傾斜値、切片値ともほぼ 2 倍と判断する。よって、物理学上の摩擦力を表わす式

$$F = \mu \cdot N \cdots (\text{式 2-6})$$

の両辺を接合面面積で除して書き改めた式

$$\tau_{slp} = \mu \cdot \sigma_N \cdots (\text{式 2-6}')$$

がこの章の実験の条件下でも成立すると仮定すると、(式 2-4) および (式 2-5) の傾斜値と切片値を単純に平均した値 (傾斜 0.298、切片 1.511) を基に、下式

$$\tau_{slp} = (0.298 \cdot R_k + 1.511) \cdot (\sqrt{\sigma_B} / 30) \cdot \sigma_N \cdots (\text{式 2-7})$$

となる。そして、(式 2-6') における μ を 2.1.2 項の通り「等価摩擦係数 μ_e 」と定義すると、(式 2-6') と (式 2-7) を比較して、

$$\mu_e = (0.298 \cdot R_k + 1.511) \cdot (\sqrt{\sigma_B} / 30) \cdots (\text{式 2-8})$$

と、等価摩擦係数が接合面粗さとコンクリート強度による関数で表わせられる。また (式 2-8) は、表 2-6 中の十点平均粗さ R_z と負荷値との回帰式

$$R_k = 0.656 \cdot R_z - 0.276 \cdots (\text{式 2-9})$$

を用いて、

$$\mu_e = (0.196 \cdot R_z + 1.429) \cdot (\sqrt{\sigma_B} / 30) \cdots (\text{式 2-8}')$$

と表わすこともできる。

(式 2-8) および (式 2-8') の有効性を検証すべく、コンクリート接合面の粗さと摩擦係数について定性的な対応を示している既往の研究^{2.9) 2.10)}での結果との比較を試みる。ここで、各接合面粗さに対応すると思われる試験体をこの項で取り扱った試験体から表 2-13 の様に選定し、かつ (式 2-8) および (式 2-8') で $\sigma_B = 240 \text{kgf/cm}^2$ と仮定した、

$$\mu_e = 0.5164 \cdot (0.298 \cdot R_k + 1.511) \cdots (\text{式 2-10})$$

および

$$\mu_e = 0.5164 \cdot (0.196 \cdot R_z + 1.429) \cdots (\text{式 2-10}')$$

を比較の対象とする。

表 2-13 に示す通り、(式 2-10) および (式 2-10') による計算値は、既往の研究による摩擦係数と概ね対応している。

なお、(式 2-10) および (式 2-10') の適用条件は、この章の実験にあわせて下記の通りである。

条件 1) 接合面圧縮応力度は 40kgf/cm^2 以下。

条件 2) 普通強度コンクリート使用。

条件 3) 接合面粗さとして、負荷値が 5.557 以下 (6 未満) あるいは十点平均粗さが 7.552 以下 (8 未満)。

なお比較のために、2.6.1 項と同様に試験体の最大耐力と粗さ評価値との相関を図 2-23 および表 2-14 に示す。適切な粗さ評価とコンクリート強度の評価で最大耐力は推定可能と思われるが、前述の通り最大耐力時には滑り変位が生じており、これにともなう凹凸の破壊などで接合面粗さが変化している可能性がある。よって、載荷前の粗さ評価値を用いての一義的な評価は問題があると思われる。

なお、せん断力-滑り変位関係は程度の差こそあれ、ほぼ図 2-24 の様に近似できる形状

を示している。これは粗さ処理方法や接合面圧縮力の大きさには左右されていない。よって、図 2-24 はこの項で扱った試験体のせん断力-滑り変位関係のモデルと判断される。

以上、この節で得られた結果より、

- 1) 2.3.3 項に示した接合面粗さ測定方法が妥当である。
- 2) 2.2 節および 2.3.3 項に示した粗さ評価方法が妥当である。
- 3) これら粗さ評価方法で目粗しのせん断挙動を定量的に評価することが妥当である。つまり、接合面粗さにより接合面のせん断挙動を評価可能であると判断される。

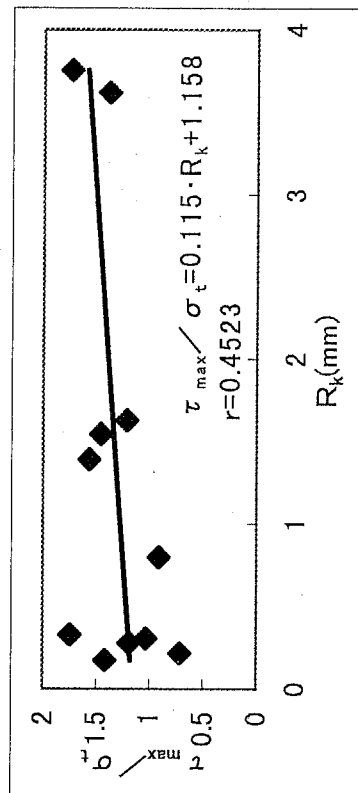
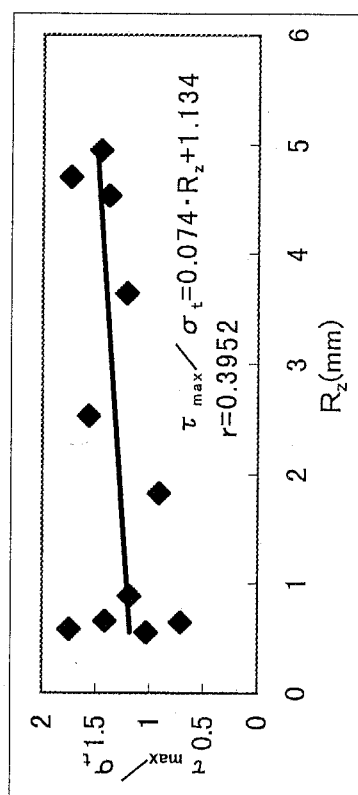
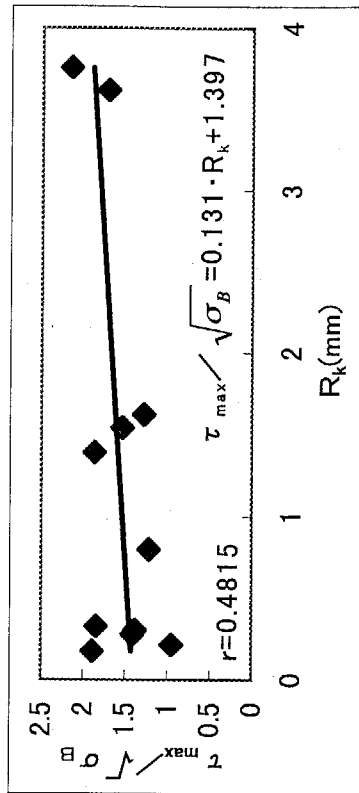
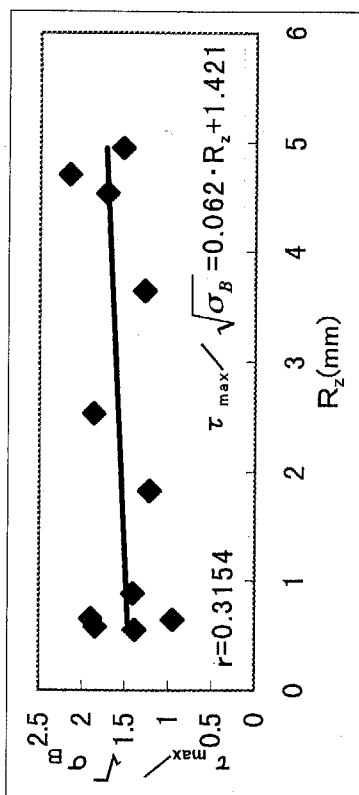
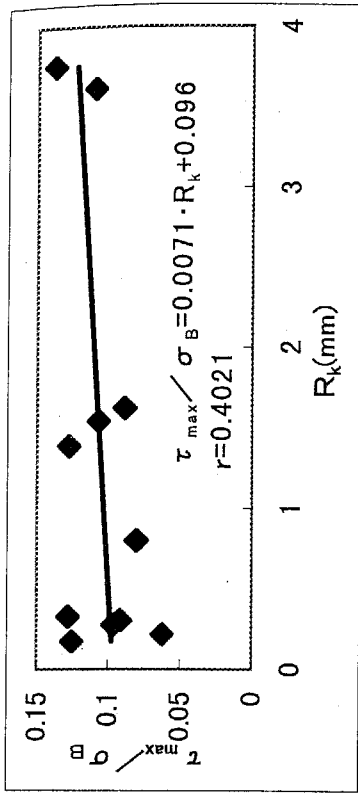
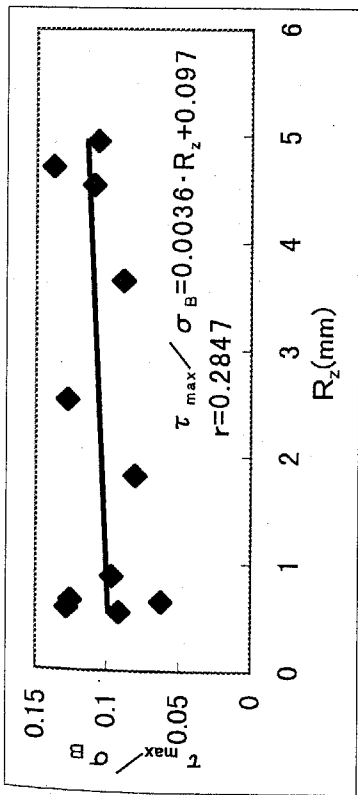


図 2-20 等価付着力と粗さ評価値との相関関係 (N=0)

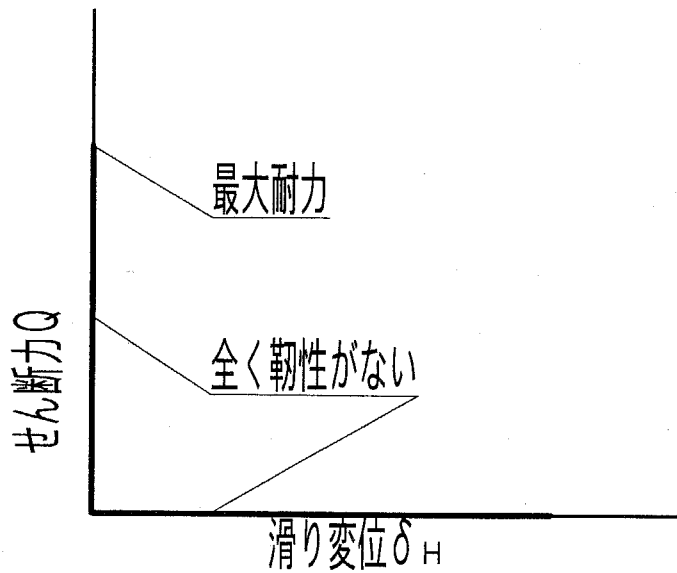


図 2-21 等価付着力のせん断力-滑り変位関係のモデル

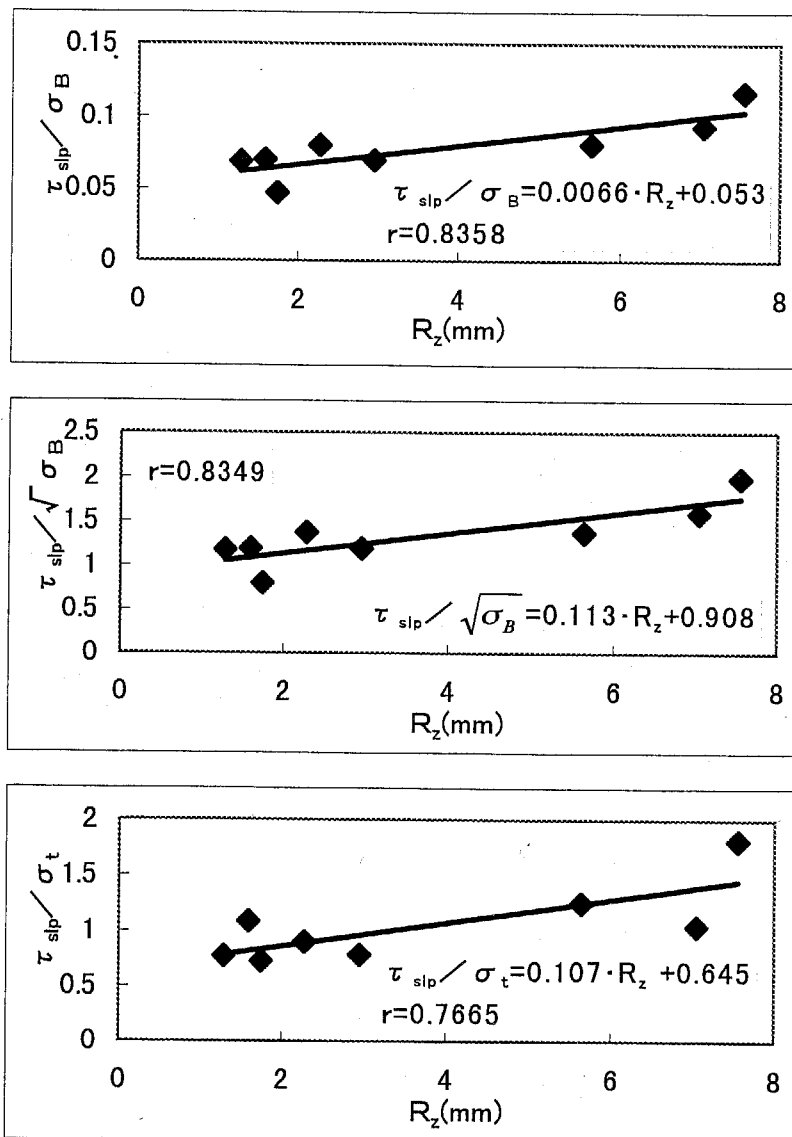


図 2-22(a) 滑り変位発生荷重による等価摩擦力と粗さ評価値との相関関係 (その 1) (N=6tf)

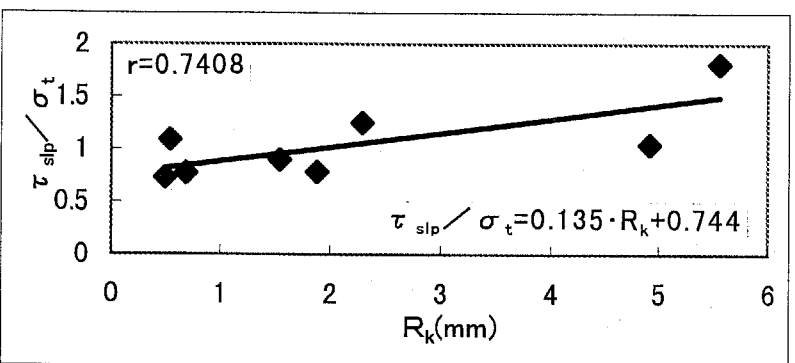
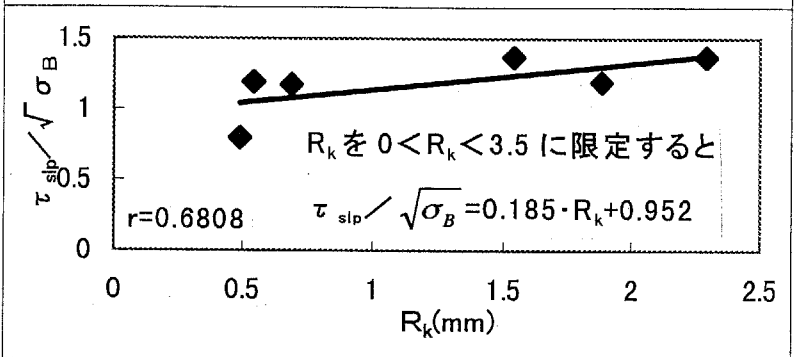
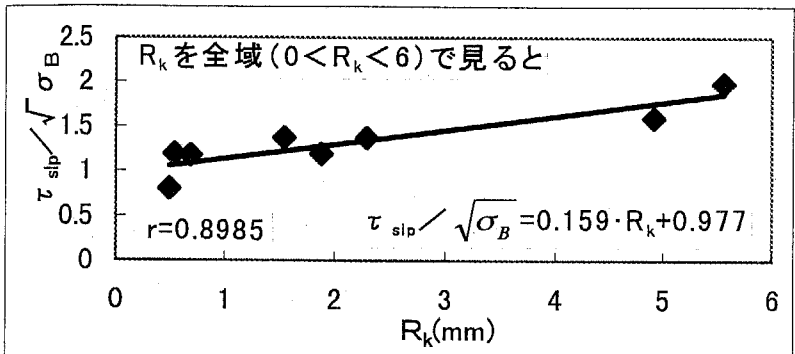
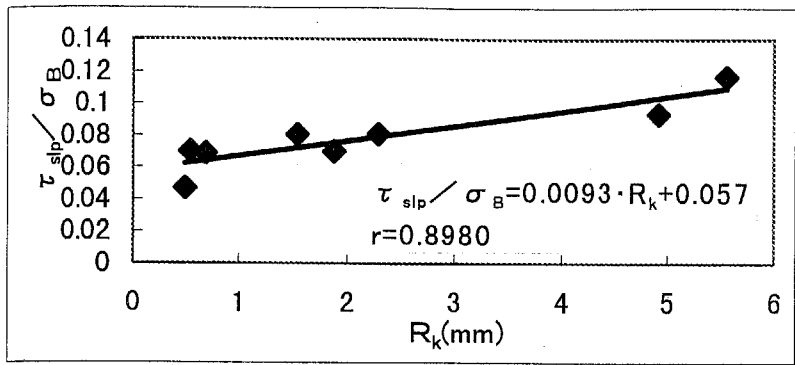


図 2-22(b) 滑り変位発生荷重による等価摩擦力と粗さ評価値との相関関係 (その 2) ($N=6tf$)

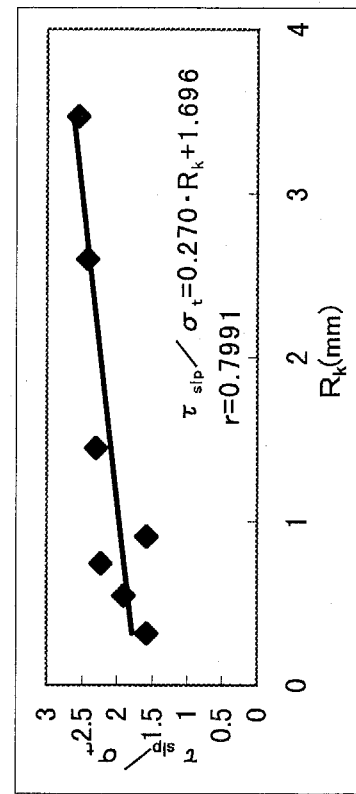
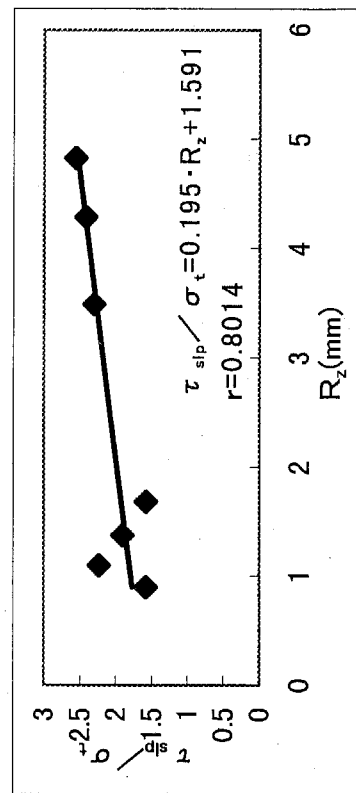
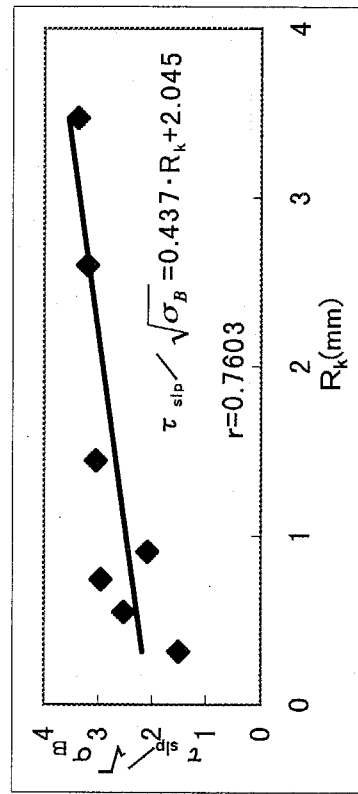
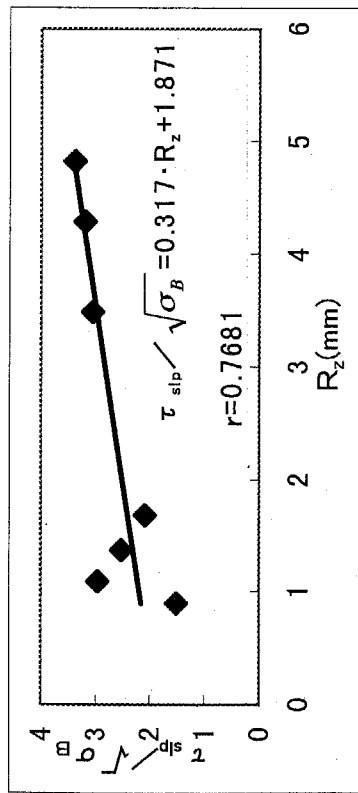
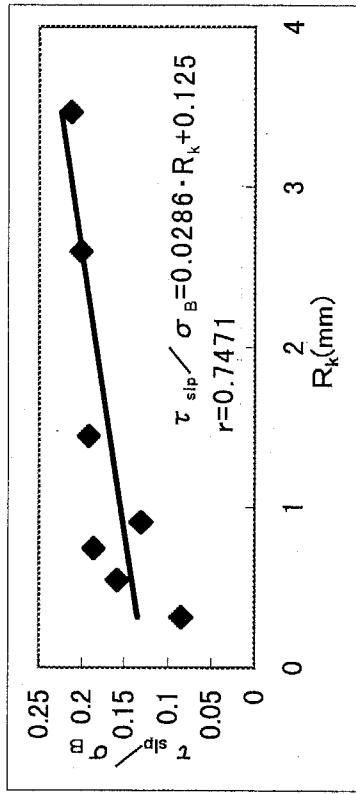
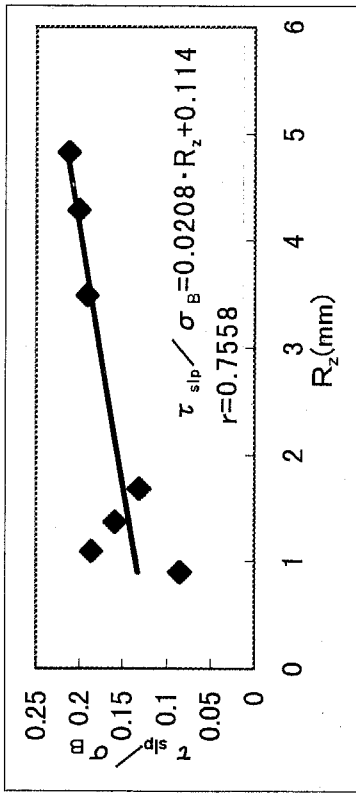


図 2-22(c) 滑り変位発生荷重による等価摩擦係数と粗さ評価値との相関関係
 (その 3) (N=12tf)

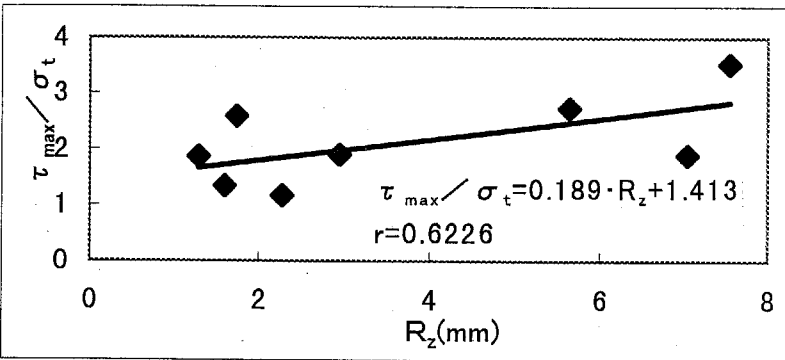
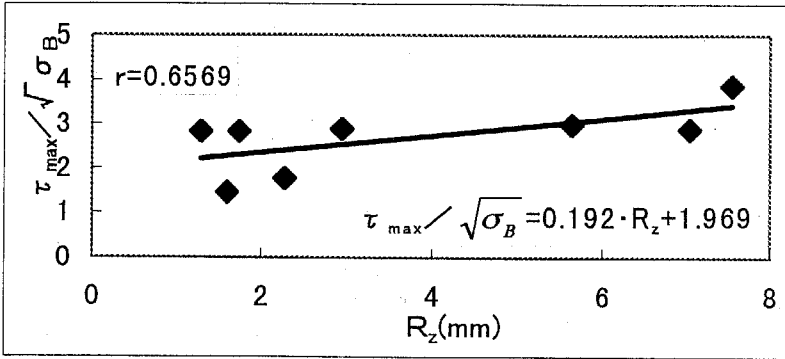
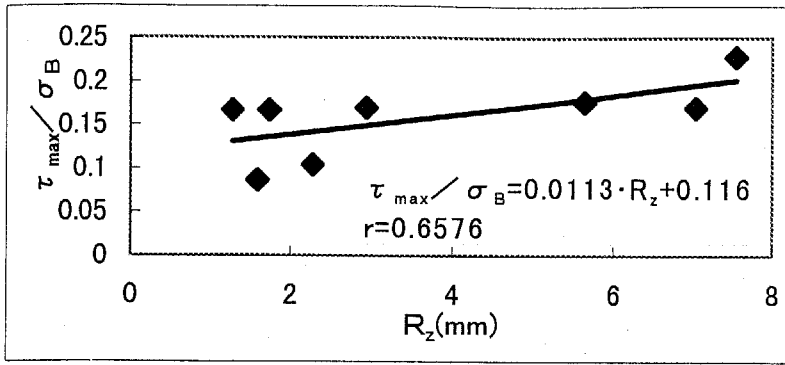


図 2-23(a) 最大耐力による等価摩擦力と粗さ評価値との相関関係 (その 1) (N=6tf)

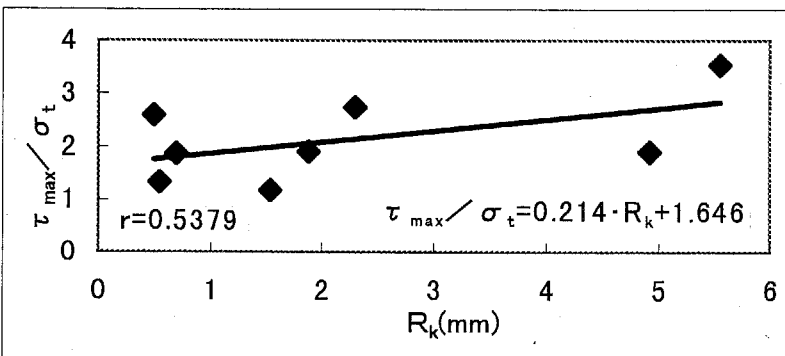
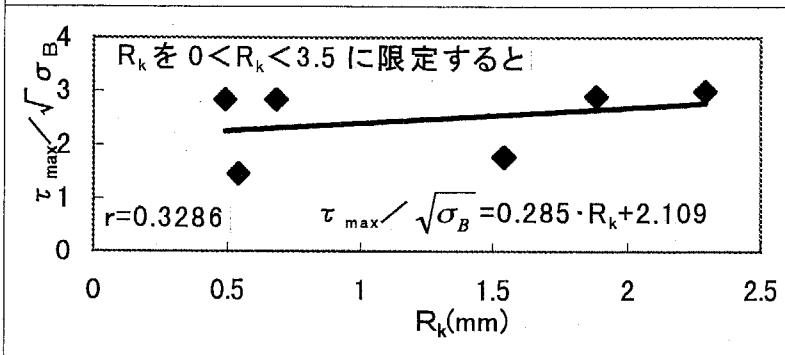
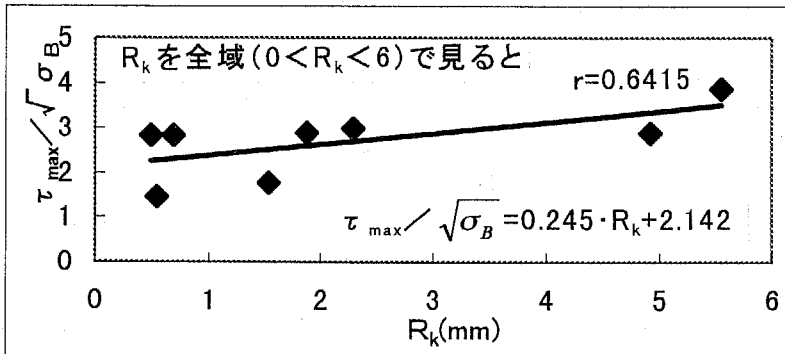
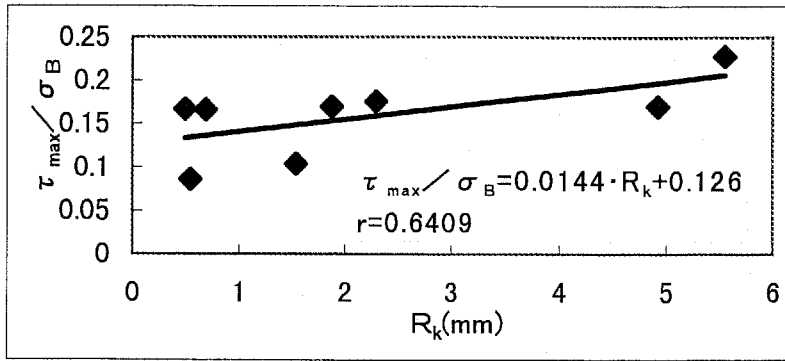


図 2-23(b) 最大耐力による等価摩擦力と粗さ評価値との相関関係 (その 2) (N=6tf)

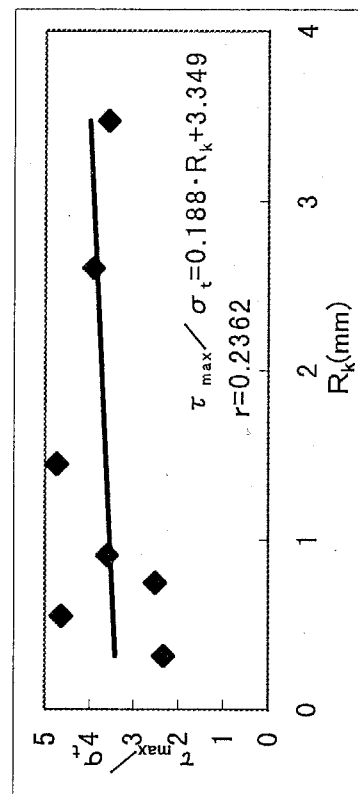
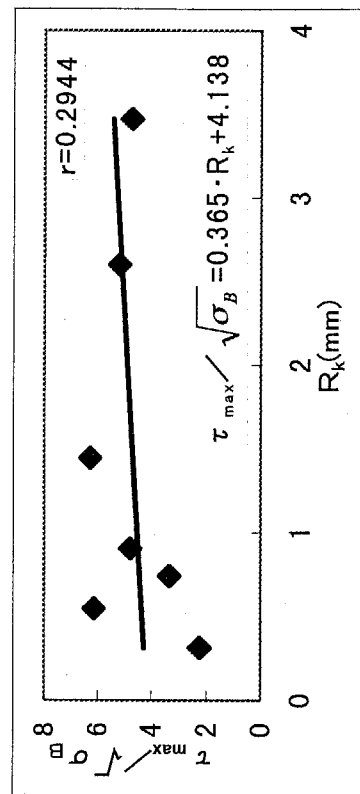
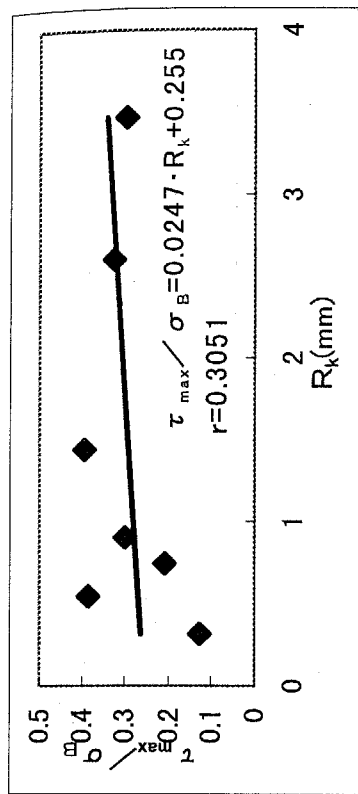
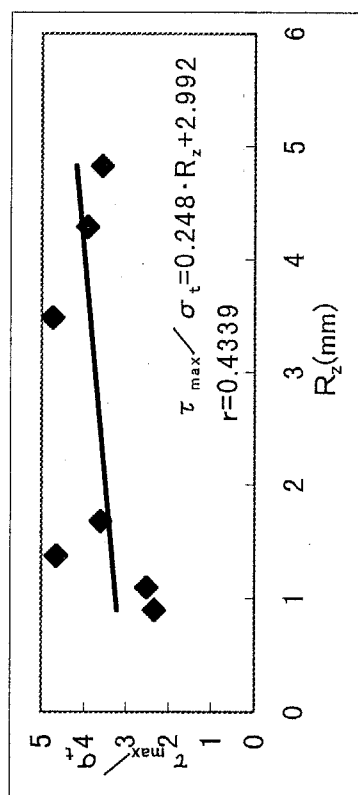
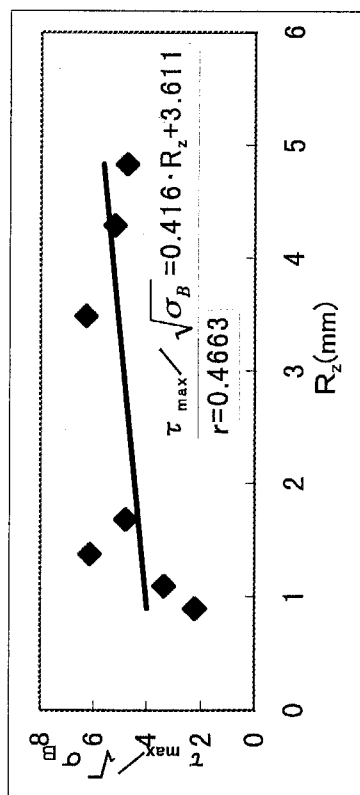
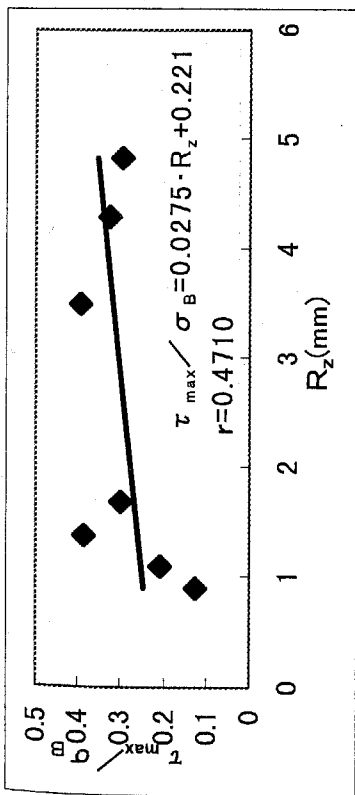


図 2-23(c) 最大耐力による等価摩擦係数と粗さ評価値との相関関係 (その 3) (N=12tf)

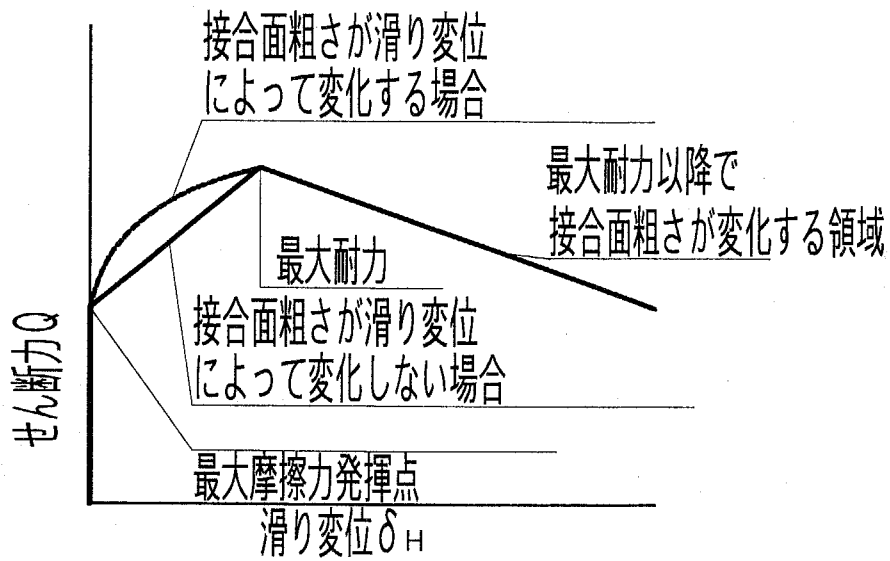


図 2-24 等価摩擦力のせん断力-滑り変位関係のモデル

表 2-11 等価付着力と粗さ評価値との相関(N=0)

| 耐力・粗さの指標 | 十点平均粗さ $R_z(0 < R_z < 6)$ | 負荷値 $R_k(0 < R_k < 4)$ |
|---------------------------------|---|---|
| τ_{\max} / σ_B | $\tau_{\max} / \sigma_B = 0.0036 \cdot R_z + 0.097$ r=0.2847 | $\tau_{\max} / \sigma_B = 0.0071 \cdot R_k + 0.096$ r=0.4021 |
| $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.062 \cdot R_z + 1.421$ r=0.3154 | $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.131 \cdot R_k + 1.397$ r=0.4815 |
| τ_{\max} / σ_t | $\tau_{\max} / \sigma_t = 0.074 \cdot R_z + 1.134$ r=0.3952 | $\tau_{\max} / \sigma_t = 0.115 \cdot R_k + 1.158$ r=0.4523 |

r : 相関係数

表 2-12(a) 滑り変位発生荷重による等価摩擦係数と粗さ評価値との相関 (その 1) (N=6tf)

| 耐力・粗さの指標 | $R_z(0 < R_z < 8)$ | $R_k(0 < R_k < 6)$ |
|--------------------------------|--|--|
| τ_{slp} / σ_B | $\tau_{slp} / \sigma_B = 0.0066 \cdot R_z + 0.053$ r=0.8358 | $\tau_{slp} / \sigma_B = 0.0093 \cdot R_k + 0.057$ r=0.8980 |
| $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.113 \cdot R_z + 0.908$ r=0.8349 | R_k を全域 ($0 < R_k < 6$) で見ると $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.159 \cdot R_k + 0.977$ r=0.8985 |
| τ_{slp} / σ_t | $\tau_{slp} / \sigma_t = 0.107 \cdot R_z + 0.645$ r=0.7665 | R_k を $0 < R_k < 3.5$ に限定すると $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.185 \cdot R_k + 0.952$ r=0.6808 |

r : 相関係数

表 2-12(b) 滑り変位発生荷重による等価摩擦係数と粗さ評価値との相関 (その 2) (N=12tf)

| 耐力・粗さの指標 | $R_z(0 < R_z < 7)$ | $R_k(0 < R_k < 3.5)$ |
|--------------------------------|--|--|
| τ_{slp} / σ_B | $\tau_{slp} / \sigma_B = 0.0208 \cdot R_z + 0.114$ r=0.7558 | $\tau_{slp} / \sigma_B = 0.0286 \cdot R_k + 0.125$ r=0.7471 |
| $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.317 \cdot R_z + 1.871$ r=0.7681 | $\tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.437 \cdot R_k + 2.045$ r=0.7603 |
| τ_{slp} / σ_t | $\tau_{slp} / \sigma_t = 0.195 \cdot R_z + 1.591$ r=0.8014 | $\tau_{slp} / \sigma_t = 0.270 \cdot R_k + 1.696$ r=0.7991 |

r : 相関係数

表 2-13 滑り変位発生荷重による等価摩擦係数の計算値

| 接合面の粗さ処理 方法と摩擦係数 μ_0 | 対応する 試験体 | $\sigma_B=240\text{kgf/cm}^2$ と仮定した 場合の等価摩擦係数 μ_e | | | |
|-----------------------------------|-------------|--|-------------------|---------------|--------------------|
| | | R_k (mm) | (式 2-10) での計算値 | R_z (mm) | (式 2-10') での計算値 |
| コンクリート 打設時型枠面 $\mu_0=0.6$ | 2-4B | 0.541 | 0.864 | 1.597 | 0.900 |
| | 3-5 | 0.316 | 0.829 | 0.899 | 0.829 |
| | 3-7 | 0.549 | 0.865 | 1.375 | 0.877 |
| 木鋳、金鋳押さえ $\mu_0=0.8$ | 3-6 | 0.745 | 0.895 | 1.096 | 0.849 |
| 刷毛引き、箒引き $\mu_0=1.0$ | 2-5A | 1.881 | 1.07 | 2.947 | 1.04 |
| | 3-4B | 1.448 | 1.00 | 3.489 | 1.09 |
| 5mm 以上の 人為的凹凸面* $\mu_0=1.2$ | 2-2A | 4.919 | 1.54 | 7.052 | 1.45 |
| | 2-2C | 2.294 | 1.13 | 5.639 | 1.31 |
| | 2-2D | 5.557 | 1.64 | 7.552 | 1.50 |
| | 3-1C | 3.473 | 1.31 | 4.828 | 1.23 |
| | 3-1D | 2.603 | 1.18 | 4.289 | 1.17 |

R_k : 負荷値、 R_z : 十点平均粗さ

* : この条件から $R_z=1.287$ となる 2-2B 試験体は対応しないと判断する。

表 2-14(a) 最大耐力による等価摩擦力と粗さ評価値との相関 (その 1) (N=6tf)

| 耐力・粗さの指標 | $R_z(0 < R_z < 8)$ | $R_k(0 < R_k < 6)$ |
|---------------------------------|---|---|
| τ_{\max} / σ_B | $\tau_{\max} / \sigma_B = 0.0113 \cdot R_z + 0.116$ r=0.6576 | $\tau_{\max} / \sigma_B = 0.0144 \cdot R_k + 0.126$ r=0.6409 |
| $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.192 \cdot R_z + 1.969$ r=0.6569 | R_k を全域 ($0 < R_k < 6$) で見ると $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.245 \cdot R_k + 2.142$ r=0.6415 |
| τ_{\max} / σ_t | $\tau_{\max} / \sigma_t = 0.189 \cdot R_z + 1.413$ r=0.6226 | $\tau_{\max} / \sigma_t = 0.214 \cdot R_k + 1.646$ r=0.5379 |

r : 相関係数

表 2-14(b) 最大耐力による等価摩擦力と粗さ評価値との相関 (その 2) (N=12tf)

| 耐力・粗さの指標 | $R_z(0 < R_z < 7)$ | $R_k(0 < R_k < 3.5)$ |
|---------------------------------|---|---|
| τ_{\max} / σ_B | $\tau_{\max} / \sigma_B = 0.0275 \cdot R_z + 0.221$ r=0.4710 | $\tau_{\max} / \sigma_B = 0.0247 \cdot R_k + 0.255$ r=0.3051 |
| $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.416 \cdot R_z + 3.611$ r=0.4663 | $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.365 \cdot R_k + 4.138$ r=0.2944 |
| τ_{\max} / σ_t | $\tau_{\max} / \sigma_t = 0.248 \cdot R_z + 2.992$ r=0.4339 | $\tau_{\max} / \sigma_t = 0.188 \cdot R_k + 3.349$ r=0.2362 |

r : 相関係数

2.8 第2章のまとめ

この章における実験を通して、下記の知見を得た。

- 1) プレキャスト構造の水平接合部を意図して、その接合面の表面粗さを、精密機械工作用旋盤とレーザー光式変位計を組み合わせた装置で測定可能なことを示した。そして、測定結果を基に、接合面の粗さを「粗さ評価値」という単一の数値に置き換えることを示した。
- 2) 粗さの測定結果を基に目粗しの粗さについて考察を加えた結果、一般に「目粗し」と認識される様な接合面粗さ処理方法を行うと、粗さの高さに対する底面長さの比（長さ高さ比） h/t の値が5を上回る様な凹凸がかなりの割合を占める様な接合面が形成されることが分かった。
- 3) 接合面圧縮力が作用しない場合に接合面上に作用する等価付着力を対象にして、接合面の粗さ評価値と試験体のコンクリート圧縮強度を用いて定量的な評価を試みた。その結果、十点平均粗さ R_z および負荷値 R_k と試験体のコンクリート代表圧縮強度 σ_B を用いて、

$$\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.062 \cdot R_z + 1.421$$

あるいは

$$\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.131 \cdot R_k + 1.397$$

を得たが、いずれも相関は弱く、定量的評価は難しかった。しかし、接合面の粗さ評価値が大きくなれば（すなわち接合面が粗くなるほど）、等価付着力も大きくなるとの定性的傾向は伺えた。

- 4) 接合面圧縮力が作用する場合に接合面上に作用する等価摩擦力を対象にして、同じく接合面の粗さ評価値と試験体のコンクリート圧縮強度を用いて定量的な評価を試みた。その結果、滑り変位発生荷重による等価摩擦力について、負荷値と試験体のコンクリート代表圧縮強度を用いて、

$$N=6tf \text{ で } \tau_{\text{slp}} / \sqrt{\sigma_B} = 0.159 \cdot R_k + 0.977$$

および

$$N=12tf \text{ で } \tau_{\text{slp}} / \sqrt{\sigma_B} = 0.437 \cdot R_k + 2.045$$

の回帰式を得た。この2式は相関係数も大きい。すなわち、滑り変位発生荷重による等価摩擦力は、粗さ評価値を用いて推定できるといえる。また、粗さ評価値が大きくなれば、等価摩擦力も大きくなるとの傾向も確認された。

- 5) 負荷値および十点平均粗さを用い、滑り変位発生荷重による接合面の等価摩擦係数 μ_0 を推定した。すなわち、粗さ評価値およびコンクリート代表圧縮強度を用いて、

$$\mu_0 = (0.298 \cdot R_k + 1.511) \cdot (\sqrt{\sigma_B} / 30)$$

あるいは

$$\mu_0 = (0.196 \cdot R_z + 1.429) \cdot (\sqrt{\sigma_B} / 30)$$

となる。

- 6) 最大耐力による等価摩擦力も、粗さ評価値およびコンクリート代表圧縮強度を用いて推定可能であることが分かった。すなわち、

$$N=6tf \text{ で } \tau_{\max}/\sqrt{\sigma_B}=0.245 \cdot R_k+2.142$$

および

$$N=12tf \text{ で } \tau_{\max}/\sqrt{\sigma_B}=0.365 \cdot R_k+4.138$$

となる。しかし、滑り変位発生荷重による等価摩擦力と比較して、粗さ評価値と最大耐力との相関は弱いことが分かった。

- 7) 接合面にせん断力を載荷した時の、せん断力と滑り変位関係のモデルを得た。
- 8) 以上の結果より、接合面粗さにより接合面のせん断挙動を評価することが妥当であることを示した。

以上の結果を利用し、第3章では、接合面の目開き変位の発生がある程度拘束される状況下での目粗しの粗さとせん断挙動の関係の解明を行う。

第 3 章

接合面上の目粗しの形状と その力学的挙動との関係

3.1 はじめに

3.1.1 この章の目的

この章および第4章と第5章において、接合面上に施された粗さの形状とそのせん断挙動との関係を探る。

第2章より、レーザー光式変位計と精密機械工作用旋盤を組み合わせた装置による目粗しの粗さ測定方法が妥当であることと、その測定結果を数学的に処理して得られた粗さ評価および試験体のコンクリート圧縮強度により目粗しの定量的評価が可能であることが示された。

そこでこの章では、「接合面上に施された粗さのうち大きさの小さいもの」であるところの目粗しについて、その形状とせん断挙動との関係を明らかにすることを目的として、接合面の粗さの測定およびせん断力載荷実験を行う。

この章および第4章と第5章においては、1.1.4項で述べた通り、試験体を「接合面に過大な圧縮応力は作用していないものの、接合面の目開き変位の発生がある程度拘束されている状況」下に置く。これは、実際のプレキャスト工法においては、建物の固定荷重や積載荷重などの鉛直力は柱に負担させる様設計するのが一般的であり、耐震壁-梁(床)間水平接合部には、さほど大きな鉛直力は作用していないと考えられるからである。そのため、この章では、接合面に直交する鉄筋(接合筋)を配筋して、目開き変位の発生を拘束する様な内力を発生させることとする。

なお、接合筋が存在する場合、その接合筋がコンクリート内に十分に定着されていると、滑り変位や目開き変位の発生にともない、1.2.2項に示す通り接合面に内力としての圧縮力が作用し、その圧縮力に起因する「せん断摩擦力」が生じるとされている。このせん断摩擦力の大きさは、1.2.2項でも示す通り、

- 1) コンクリートの圧縮強度。
- 2) 接合面の摩擦係数。
- 3) 接合筋の量および降伏強度。

により決定されるとされている。そして、この時用いられる接合面の摩擦係数 μ は、一般的には「せん断摩擦係数」と呼ばれ、接合面の処理方法により一義的に定まるものとされている^{3.1)~3.4)}。しかしながら、せん断摩擦を司る接合筋の挙動に大きな影響を与える接合面での滑り変位や目開き変位は、接合面の粗さによりその性状が大きく左右されることが明白であるため、粗さの定性的評価だけでは不十分と考えられる。この章においては、接合面形状がせん断力伝達機構におよぼす影響の一環として、このせん断摩擦力と表面粗さとの関係についても検討を加える。

3.1.2 用語の定義

この章において用いる、下記用語の定義は次の通りである。

接合面粗さ処理・接合面粗さ測定・粗さ曲線・粗さ評価…いずれも2.1.2項と同じ。

接合筋…接合面に直交する鉄筋のことで、本研究においては一般のプレキャスト部材接合部の「接合用鉄筋」を想定したもの。

等価せん断摩擦力…試験体コンクリート内に十分に定着された接合筋を有し、かつ接合面に垂直な外部からの圧縮力が作用しない状態で、接合面上においてせん断力を伝達する(せん断力に抵抗する)機構のうち、接合筋のだぼせん断力と2.1.2項の等価付着力を除外したもの。

等価せん断摩擦係数…接合面位置における接合筋の軸方向力に対する等価せん断摩擦力の比。

3.2 直交鉄筋を有する接合面の挙動と接合面粗さとの関係の解明に関する実験

3.2.1 実験概要・試験体

実験は 2.3.1 項と同じで、次の 6 ステップに分けて行う。

①試験体先打ち部分製作→②接合面粗さ処理→③コンクリートの硬化を確認し接合面粗さ測定を行い粗さ曲線の作成と粗さ評価を行う→④試験体後打ち部分製作→⑤養生・脱型し接合面せん断力載荷→⑥検討

試験体における接合面とは、2.3.1 項と同様に図 3-1 に示す試験体の先打ち部分と後打ち部分の境界のことである。試験体は、接合面として 30cm（長さ方向）×10cm（幅方向）の大きさを持ち、先打ち・後打ち各部分がそれぞれ凸字型断面をなし、試験体全体では I 型断面となっている。試験体一覧を表 3-1 に示す。試験体の変動要因は、3.2.2 項の「接合筋の径と本数」および「接合筋周囲に施す緩衝材の有無」と 3.2.3 項に示す「接合面粗さ処理」の方法の 3 種類である。

試験体製作順序は基本的には 2.3.1 項と同じで、次の通りである。まず先打ち部分型枠を組み、接合筋とスタブ補強筋を所定の位置に配し、コンクリートを打設する。この際、2.3.1 項とは異なり、試験体により打設方法に変更を加えた。すなわち、

- 1) 1-1 試験体から 8-3 試験体までの 24 体は接合面となる面から打設する（以下「順方向」打設と呼ぶ）。
- 2) 9-1 試験体から 12-3 試験体までの 12 体は接合面となる面に 3.3.2 項で述べる面材をセットした後にスタブ下面から打設する（以下「逆方向」打設と呼ぶ）。つまり、コンクリート打設面が先打ち部分最下部となり、接合面が型枠面になる。

順方向打設した試験体は、打設終了後約 90 分を目標に、接合面上に生じるブリーディング水を布で除去し、接合面粗さ処理を施す。逆方向打設した試験体はそのまま養生することで、粗さ型枠の粗さが接合面に施されることとなる。両試験体とも、その後およそ 3 日間常温常圧空気中で養生後、3.2.4 項に記す方法で接合面粗さ測定を行う。測定後に後打ち部分型枠を組み、スタブ補強筋を配し、コンクリートを打設する。この際、コンクリート打設面は接合面とは反対側になる。後打ち部分打設後約 1 か月間常温常圧空気中で養生後に型枠を脱型し、試験体を完成させる。試験体製作順序の概念図を図 3-2 に示す。

コンクリートは 2.3.1 項と同様に、JASS 5 に可能な限り準拠して調合、練混ぜを行った。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は三重県鳥羽産石灰石砕石（ふるいにより最大粒径寸法 20mm）、細骨材には宮城県広瀬川産川砂を用いた。力学的性質を表 3-2 に示すが、先打ち・後打ち部分のコンクリートの材齢の違いによりそれぞれの部分の圧縮・割裂強度が異なるため、2.3.1 項と同様に先打ち・後打ち両部分のコンクリートの強度のどちらか小さい方の値をその試験体の代表圧縮・割裂強度として以後の検討に用いる。

3.2.2 接合筋と緩衝材

試験体に配筋する接合筋には、接合筋の配筋位置出しと試験体内での定着の完璧を期すため、あらかじめ片端部に厚さ 6mm の定着用鉄板（SS400 相当）を溶接し、鉄板が先打ち部分スタブに置かれる様に配筋した。そして、後打ち部分コンクリート打設直前にもう一方の端部に同様の鉄板を溶接した。接合筋には、表 3-1 に示す通り、試験体により D13 を 2 本、あるいは D10 を 2 本または 3 本使用した。接合筋表面には、接合筋に生じる歪み度を測定するため、図 3-3 に示す位置に歪みゲージを貼付した。このうち、1-1 試験体から 8-3 試験体までの 24 体では、接合筋表面にゲージを直接貼付し、その上にゲージ養生テープを貼付してゲージの保護を図った。一方、9-1 試験体から 12-3 試験体までの 12 体では、接合筋のリップ部分に図 3-4 に示す様に軸方向に溝を施した上でその溝内に歪みゲージを貼付し、溝内に高分子粘性体を詰めてゲージ養生を行った。

接合筋 (D13 および D10) には JIS G 3112 の SD295A を用いた。力学的性質を表 3-3 に示す。D13 接合筋については、引張試験の他に図 3-5 に示す様な単純梁形式の曲げ試験を事前に行い、前もって鉄筋に生じるモーメントと曲率の関係を得た。

「緩衝材」とは、接合筋のだぼせん断剛性を低くして可能な限り接合筋に純粋な伸び歪み度だけを発生させる様にすると共に、接合筋表面に貼付した歪みゲージの養生のさらなる完璧を期す目的で施すものである。緩衝材の材料は、軟度があり取り扱いが容易な工作用油粘土で、接合筋周囲に厚さ約 2cm を目標に巻き付けることで施した。

スタブ補強筋には、1-1 試験体から 8-3 試験体までの 24 体には接合筋と同じ D10 を、9-1 試験体から 12-3 試験体までの 12 体には 2.3.1 項で用いたものと同じ D6 を用いた。なお、スタブ補強筋については 2.3.1 項と同様の理由から、その物性、強度はこの章の検討には用いない。

3.2.3 接合面粗さ処理

粗さ処理方法として、2.3.2 項で採用した粗し方などを参考に、下記 2 パターンの合計 3 種類を採用した。

① 面材による押し付け形成

接合面に固形の面材を押し付け、試験体の養生も兼ねておよそ 3 日間置き、粗さを形成するもの。この実験では、

(1) 表面を磨き処理した鋼板 (2.3.2 項で述べたものと同じで、厚さ 15mm の SS400 鋼板の表面を JIS による▽▽記号で磨き処理したもの)

(2) 高さ 5mm、底辺 10mm の二等辺三角形形状の凹凸処理を施した山形鋼板 (2.3.2 項で用いたものと同じで、凹凸の表面は特に磨き処理を施さない)

の合計 2 種類を採用した。

② コンクリート硬化前に行う手処理

接合面に諸道具を用いて手作業で粗さを施すもの。この実験では、左官用ささら刷毛 (2.3.2 項で用いたものと同じ) を用いた刷毛引きを採用した。

施した粗さ処理方法は、各試験体ごとに表 3-1 に示す。

3.2.4 粗さの測定と粗さの評価方法

先打ち部分コンクリートの硬化後に、粗さ処理を施された接合面の粗さ測定を行う。粗さの測定方法は、2.3.3 項の方法と全く同じである。なお、測線は図 3-6 に示す通り、全試験体で 2 本とした。

粗さの評価方法は、2.4.3 項および 2.6.3 項の結果から負荷値 R_k が有効であると判断し、この章では負荷値のみにより行った。

3.2.5 接合面へのせん断力載荷

せん断力 Q の載荷方法は、接合面圧縮力 N を作用させるためのオイルジャッキがない以外は、2.3.4 項の方法と全く同じである。ただし、使用した試験機は、全試験体を通じて 150tf ねじ制御式インストロン型試験機とした。載荷装置図を図 3-7 に示す。

なお、2.3.4 項の仮定と同様、試験機より載荷されたせん断力は、すべて接合面に伝達されるものと仮定する。よって、以下で「せん断力 Q 」とは、試験機の示す載荷力と同じである。

3.2.6 接合面の滑り・目開き変位の測定

変位についても、2.3.6 項の方法と全く同じで、接合面長さ方向の先打ち・後打ち両部

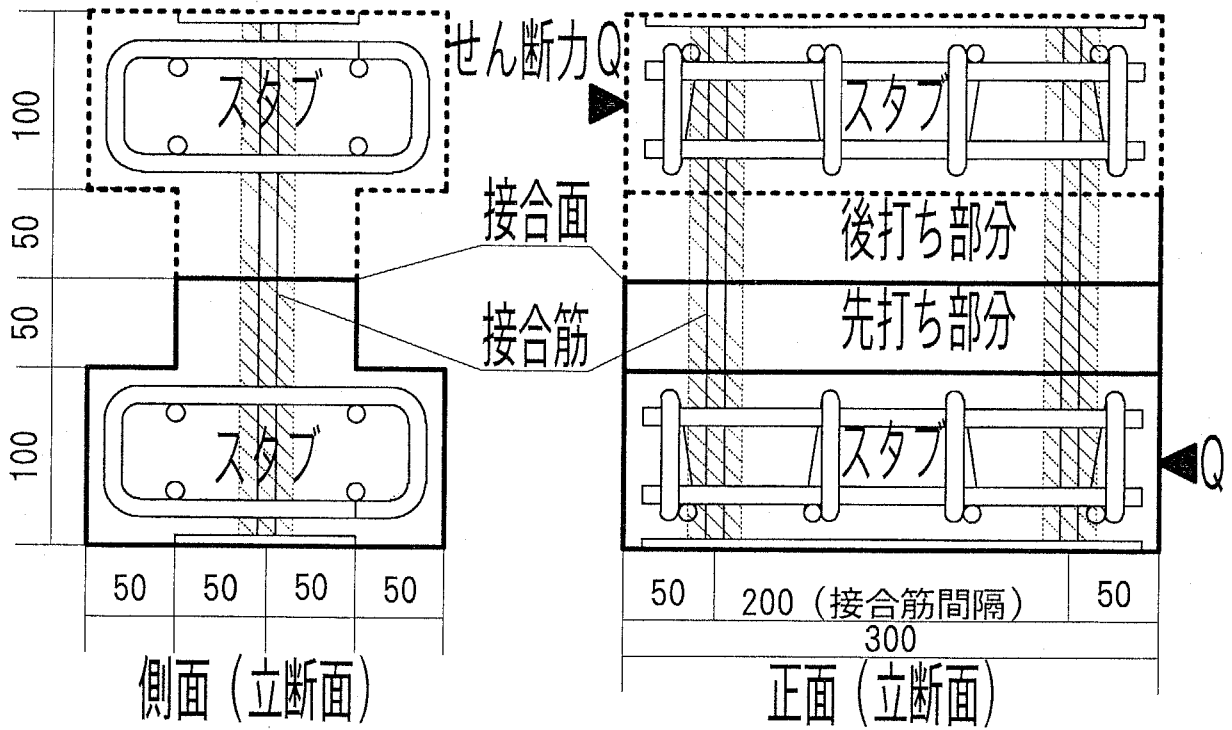
分のスタブ間相対変位（滑り変位）と接合面に垂直の方向の両部分のスタブ間相対変位（目開き変位）を、2軸型変位計により同時に測定した。ただし、測定箇所は全試験体を通じて、図3-8の通り表裏2か所ずつの合計4か所とした。また、この章においても2.3.6項と同じで、滑り変位 δ_H および目開き変位 δ_V とは、それぞれ図3-8に示す4箇所における滑り変位および目開き変位の単純平均をいう。

なお、接合面圧縮力が作用していないために、滑り変位がかなり大きくなると予想される。そこで、2軸型変位計の測定性能および接合筋に貼付した歪みゲージの健全性などを考慮し、便宜的に、

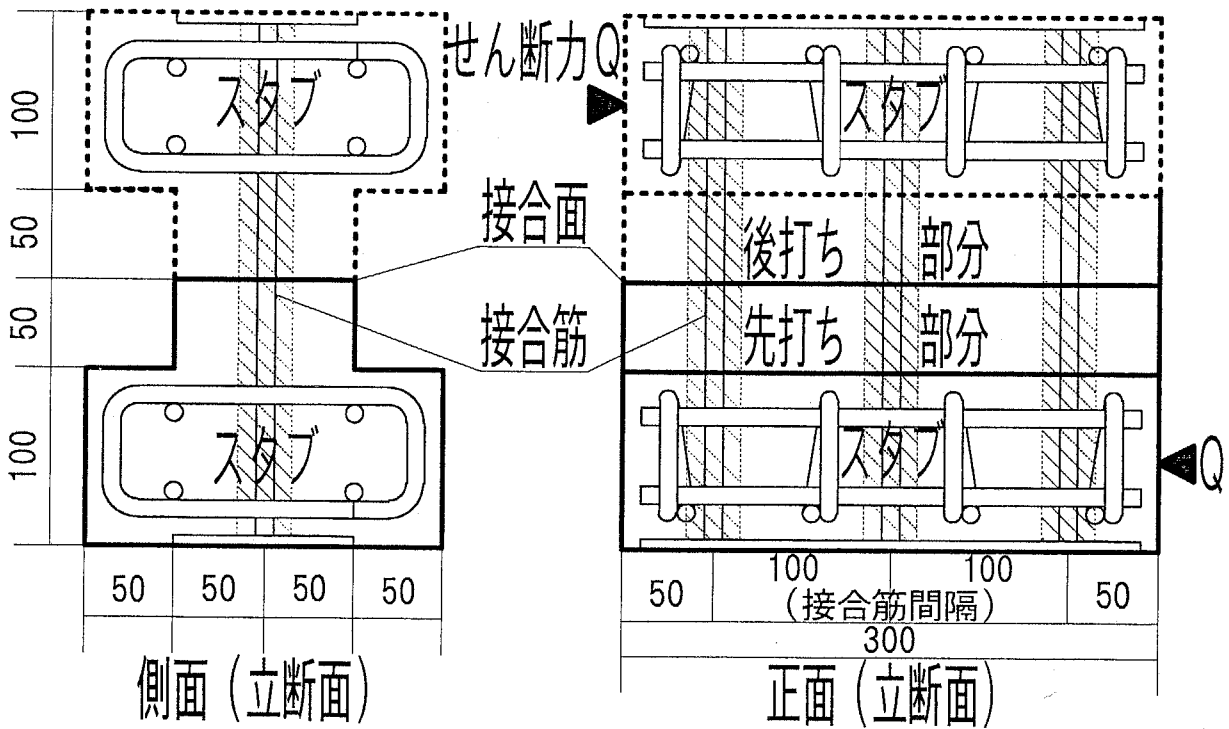
- 1) 滑り変位が概ね1mm以下の範囲を「微小変形時」。
- 2) 滑り変位が概ね1mm以上6mm以下を「中変形時」。
- 3) 滑り変位が概ね6mm以上の状態を「大変形時」。

と名付ける。

斜線部分：緩衝材



接合筋が2本の試験体



接合筋が3本の試験体

unit:mm

図 3-1 試験体形状・配筋図

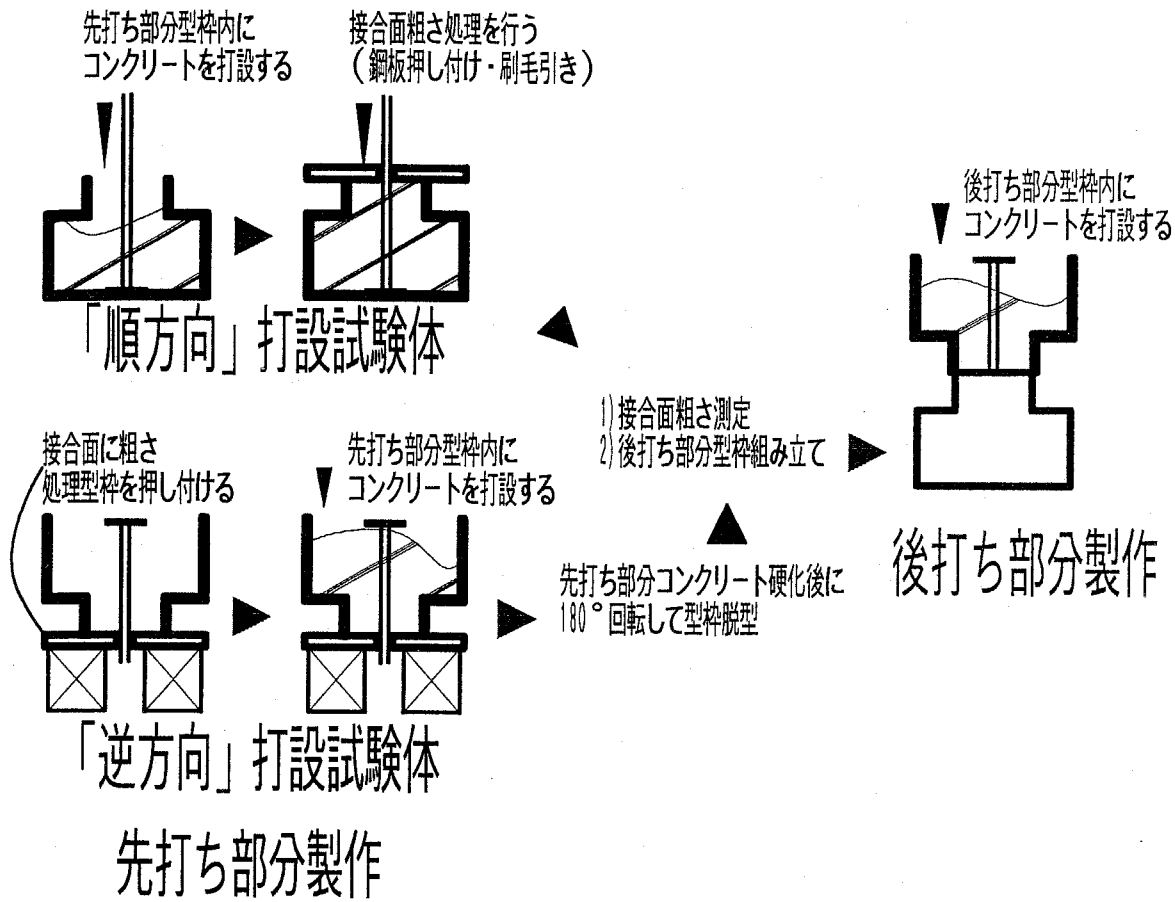


図 3-2 試験体製作の概念図

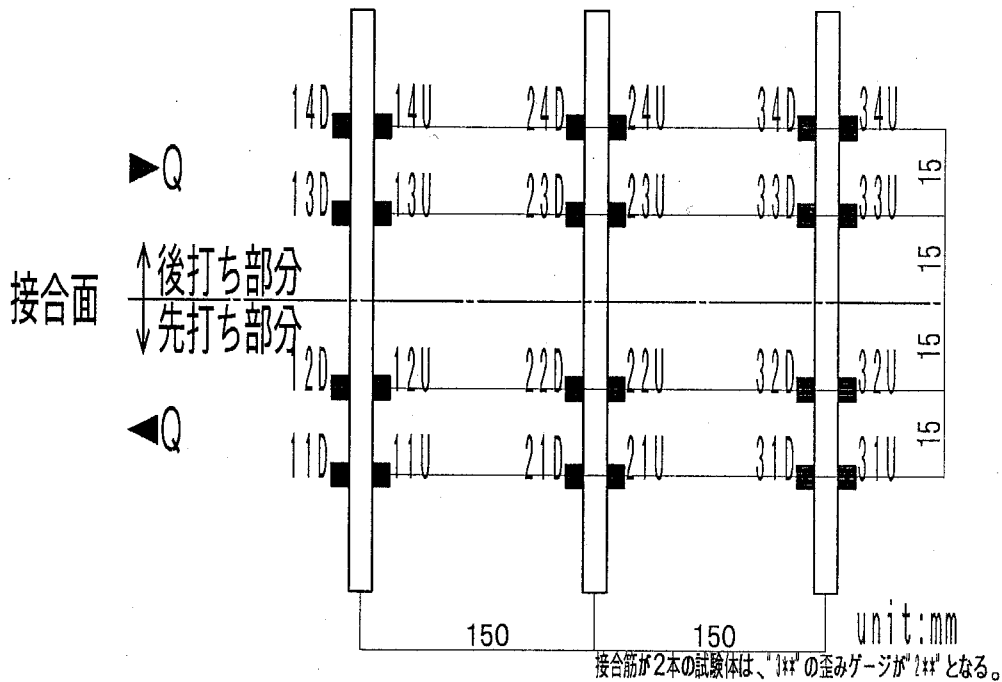


図 3-3 接合筋の歪みゲージ貼付位置

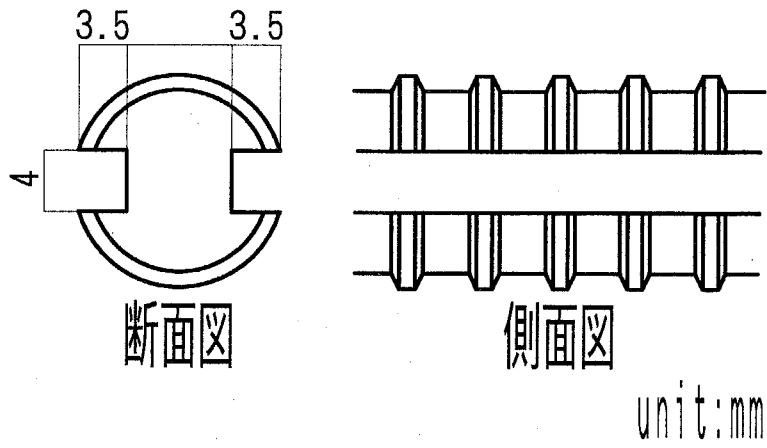


図 3-4 D13 接合筋の溝切り加工図

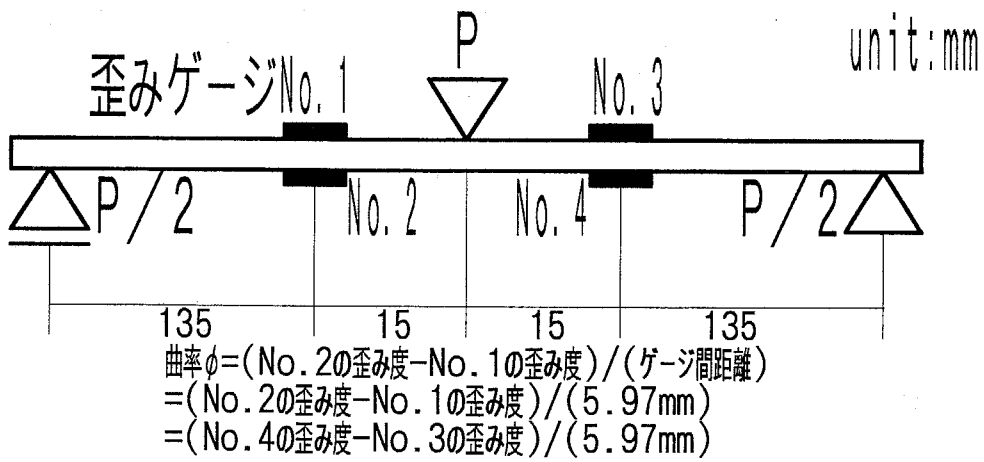


図 3-5 D13 接合筋（溝切り加工を施したもの）の曲げ試験

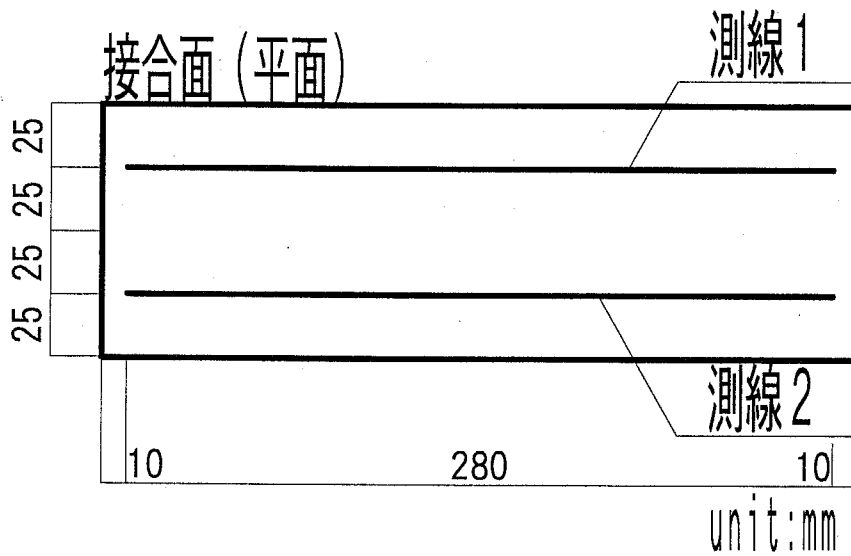


図 3-6 接合面における測線の位置図

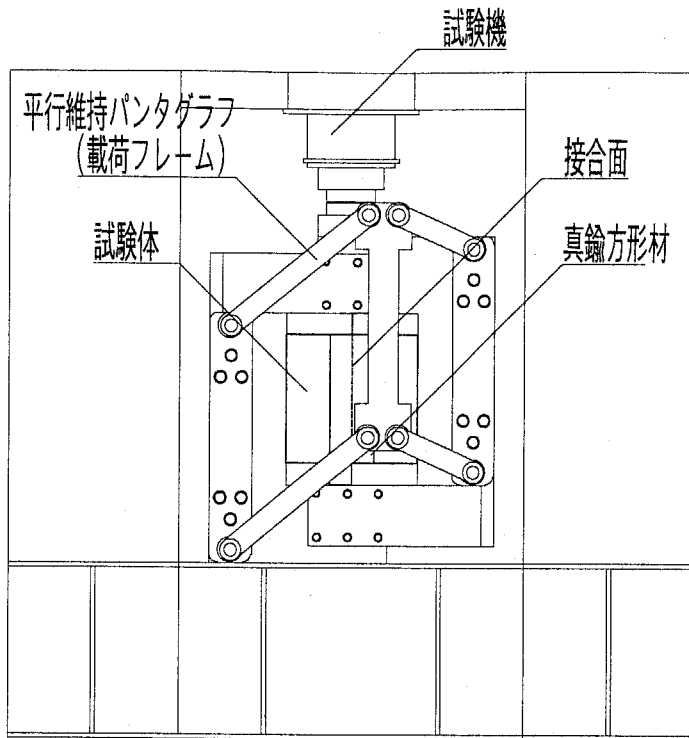
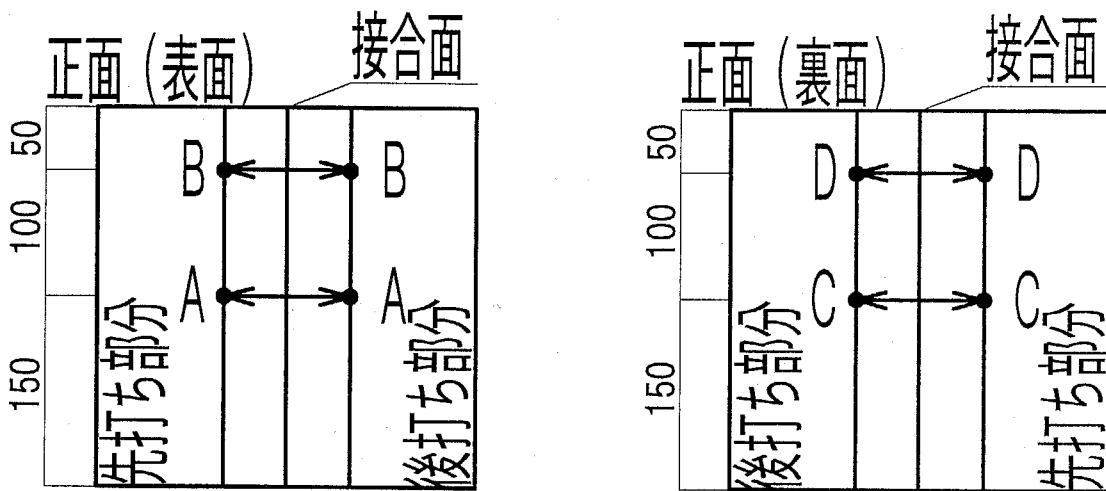


図 3-7 せん断力载荷装置図



A-A間・B-B間・C-C間・D-D間の滑り変位
・目開き変位を測定

unit:mm

図 3-8 滑り変位・目開き変位の測定位置図

表 3-1 試験体一覧

| 試験体名 | 注 | 接合面粗さ処理方法 | 接合筋種類・本数 | 緩衝材 | コンクリート打設方向 | 試験体名 | 注 | 接合面粗さ処理方法 | 接合筋種類・本数 | 緩衝材 | コンクリート打設方向 |
|------|---|--------------|--------------|------|------------|------|---|--------------|----------------|-----|------------|
| 1-1 | | 山形鋼板 押し付け | 3-D10 無加工 | なし | 順方向 | 7-1 | | 山形鋼板 押し付け | 2-D10 無加工 | なし | 順方向 |
| 1-2 | | | | | | 7-2 | | | | | |
| 1-3 | | | | 7-3 | | | | | | | |
| 2-1 | * | | | 8-1 | | * | | | | | |
| 2-2 | * | | | 8-2 | | | | | | | |
| 2-3 | * | | | 8-3 | | | | | | | |
| 3-1 | | 磨き鋼板 押し付け | 2-D10 無加工 | なし | 逆方向 | 9-1 | | 磨き鋼板 押し付け | 2-D13 溝切り加工 | なし | 逆方向 |
| 3-2 | | | | | | 9-2 | | | | | |
| 3-3 | | | | 9-3 | | | | | | | |
| 4-1 | | | | 10-1 | | | | | | | |
| 4-2 | | | | 10-2 | | * | | | | | |
| 4-3 | | | | 10-3 | | * | | | | | |
| 5-1 | * | 磨き鋼板 押し付け | 2-D10 無加工 | なし | 逆方向 | 11-1 | | 磨き鋼板 押し付け | 2-D13 溝切り加工 | なし | 逆方向 |
| 5-2 | | | | | | 11-2 | | | | | |
| 5-3 | | | | 11-3 | | | | | | | |
| 6-1 | | | | 12-1 | | | | | | | |
| 6-2 | | | | 12-2 | | | | | | | |
| 6-3 | | | | 12-3 | | | | | | | |

「注」欄に*印のある試験体は、3.5.1項における耐力と粗さ評価値との相関の対象から除外した試験体である(3.5.1項における「全試験体」から除外)。

試験体名に下線を付した試験体は、3.5.3項以降において接合筋に貼付した歪みゲージが健全であった試験体である(3.5.3項以降における「評価試験体」である)。

表 3-2 使用コンクリートの力学的性質

| 試験体名 | 先打ち部分用 コンクリート | | | | 後打ち部分用 コンクリート | | | | 代表強度 | | |
|----------------|---------------------|----------|------------|--------------|---------------------|----------|------------|--------------|---------------------|------------|-------------------|
| | kgf/cm ² | | 空気量 (%) | スランプ (cm) | kgf/cm ² | | 空気量 (%) | スランプ (cm) | kgf/cm ² | | $\sqrt{\sigma_B}$ |
| | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | σ_B | σ_t | |
| | | | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | | | | | |
| 1-1、1-2、1-3 | 295 | 30.5 | 4.2 | 9.2 | 228 | 24.5 | 4.0 | 9.5 | 228 | 24.5 | 15.1 |
| 2-1、2-2、2-3 | 228 | 24.5 | 3.9 | 8.6 | 212 | 21.9 | 4.3 | 9.2 | 212 | 21.9 | 14.6 |
| 3-1、3-2、3-3 | 232 | 25.0 | 4.0 | 9.0 | 227 | 21.7 | 3.7 | 10.2 | 227 | 21.7 | 15.1 |
| 5-1、5-2、5-3 | | | | | | | | | | | |
| 4-1、4-2、4-3 | 259 | 18.1 | 4.2 | 9.5 | 217 | 20.7 | 3.8 | 9.9 | 217 | 18.1 | 14.7 |
| 6-1、6-2、6-3 | | | | | | | | | | | |
| 7-1、7-2、7-3 | 230 | 26.1 | 3.7 | 8.6 | 258 | 21.7 | 4.1 | 9.7 | 230 | 21.7 | 15.2 |
| 8-1、8-2、8-3 | | | | | | | | | | | |
| 9-1、9-2、9-3 | 263 | 21.6 | 4.1 | 8.2 | 234 | 22.0 | 3.9 | 8.8 | 234 | 21.6 | 15.3 |
| 11-1、11-2、11-3 | | | | | | | | | | | |
| 10-1、10-2、10-3 | 235 | 22.2 | 3.8 | 9.3 | 232 | 22.0 | 4.2 | 9.3 | 232 | 22.0 | 15.2 |
| 12-1、12-2、12-3 | | | | | | | | | | | |

表 3-3(a) 使用接合筋の力学的性質 (その1) (引張試験)

| 鉄筋種類 | 降伏強度 σ_y (kgf/cm ²) | 引張強度 σ_s (kgf/cm ²) | ヤング率 E_s (kgf/cm ²) |
|------|---|---|--------------------------------------|
| D10 | 3681 | 4972 | 1.86×10^6 |
| D13 | 3606 | 5394 | 1.82×10^6 |

3.5.3 項に示す方法による D13 溝切り加工接合筋の

断面積 $A_s=1.02\text{cm}^2$

表 3-3(b) 使用接合筋の力学的性質 (その2) (曲げ試験)

| 曲率 ϕ (μ/mm) | 0 | この間 | | この間 | | 4050 | これ以降 |
|-------------------------------|---|-----|------------------------|-------------------------------|------|------|------------|
| | | 0 | $M_s=0.896 \cdot \phi$ | $M_s=0.0987 \cdot \phi + 601$ | 1001 | | |
| 曲げモーメント M_s (kgf·cm) | 0 | 0 | 754 | 676 | 1001 | | $M_s=1001$ |

3.3 接合面粗さ測定結果と粗さ評価および目粗しの形状の特徴

3.3.1 粗さ曲線

粗さ測定により得られた各試験体の粗さ曲線の一例を図 3-9 に示す（全部の粗さ曲線は巻末の付録に掲載する）。各処理方法とも 2.4.1 項の場合と同様に、概ね事前に意図した粗さを施すことができた。

3.3.2 粗さ評価値

負荷値 R_k を求める前提となる負荷曲線の一例を図 3-10 に示す（全部の負荷曲線は巻末の付録に掲載する）。そして、負荷値による測線上の粗さ評価値を表 3-4 に示す。

3.3.3 目粗しの底面長さ と高さの比を用いた目粗しの粗さの形状の特徴

2.5.2 項で「目粗しとは概ね長さ高さ比が 5 を上回る様な凹凸がかなりの割合を占める様な粗さである」との結果が得られたが、この章で対象とする試験体についても、この様な傾向にあるかどうかの確認を行う。

表 3-5 に、各測線上での粗さ測定結果から得られた長さ高さ比の値の頻度分布を示す。また、表 3-6 に、その頻度分布を粗さ処理方法ごとにまとめ直したものを示す。山形鋼板押し付けにより粗さ処理を施された試験体（長さ高さ比が 2 となる凹凸を形成する様に意図したもの）を除き、長さ高さ比が 5 を上回る凹凸の割合が大きいことが分かり、2.5.2 項で得られた結果に概ね沿っているといえる。

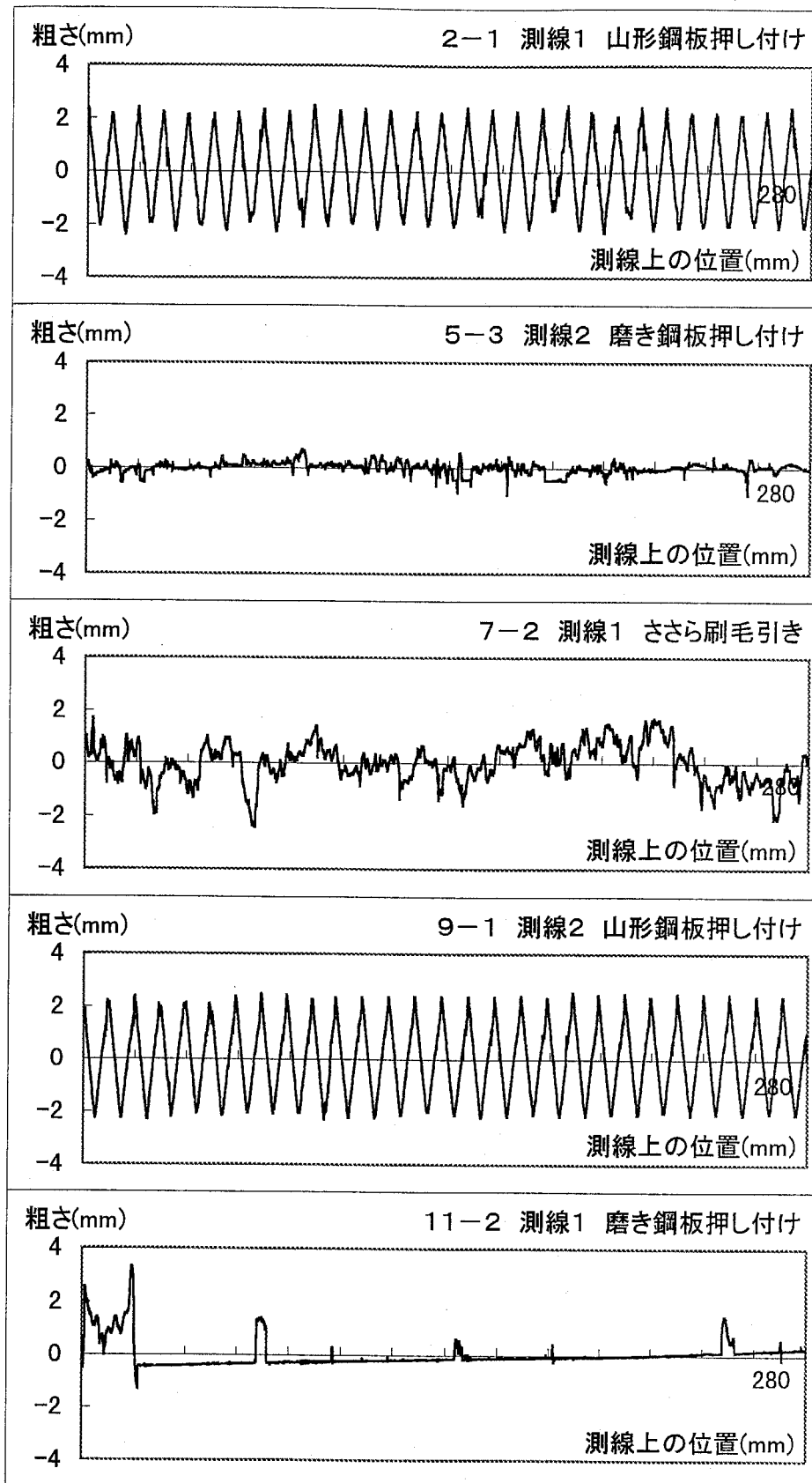


図 3-9 各測線上の粗さ曲線の一例

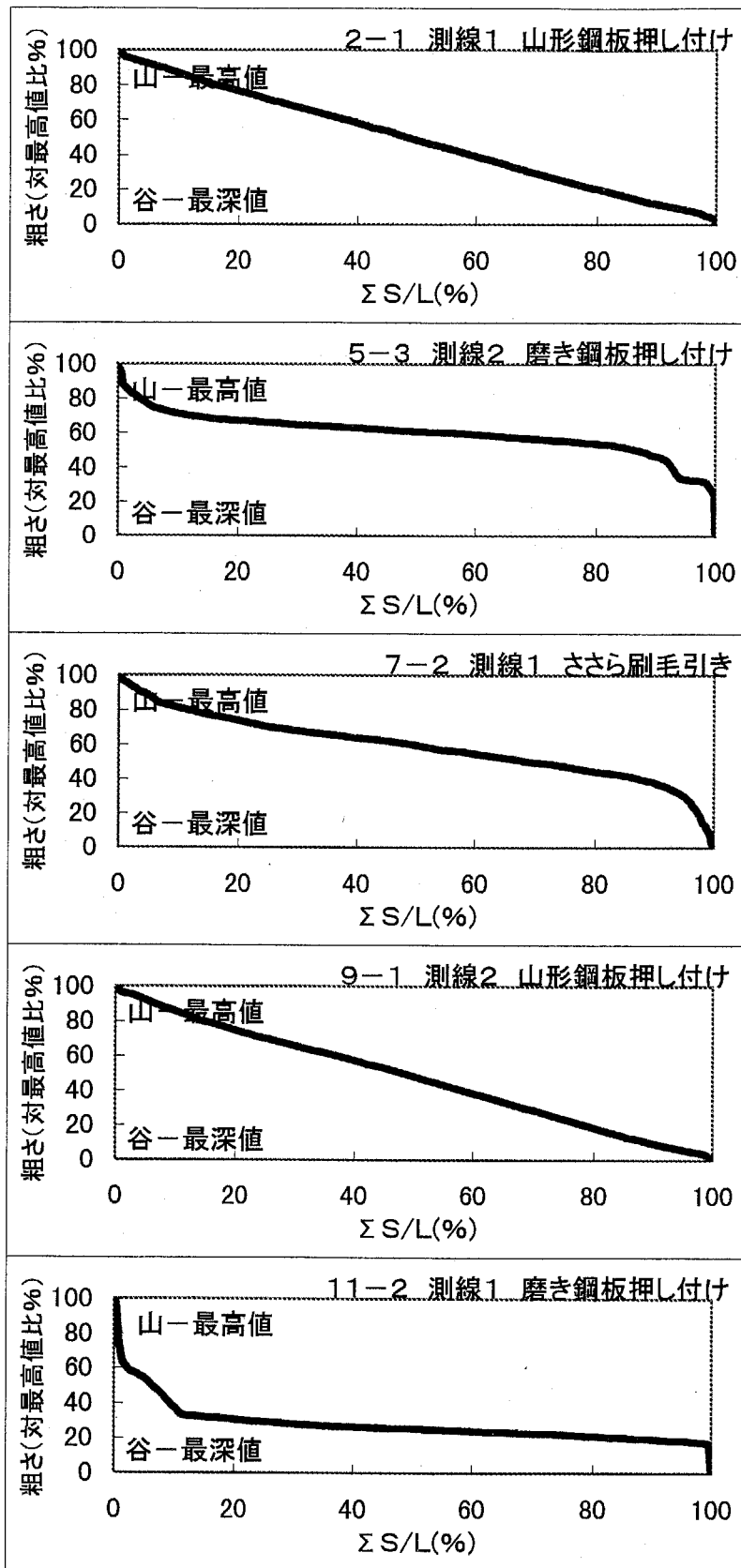


図 3-10 粗さ曲線の負荷曲線の一例

| |
|---|
| 誌 |
| 体 |
| 1 |
| 1 |
| 1 |
| 2 |
| 2 |
| 2 |
| 3 |
| 3 |
| 3 |
| 4 |
| 4 |
| 4 |
| 5 |
| 5 |
| 6 |
| 6 |
| 6 |

表 3-4 粗さ評価値一覧

| 試験 体名 | 負荷値 R_k による測線の粗さ評価値 (mm) | | | 試験 体名 | 負荷値 R_k による測線の粗さ評価値 (mm) | | |
|----------|-------------------------------|-------|-------|----------|-------------------------------|-------|-------|
| | 測線 1 | 測線 2 | 両者の平均 | | 測線 1 | 測線 2 | 両者の平均 |
| 1-1 | 3.213 | 3.190 | 3.210 | 7-1 | 1.315 | 1.161 | 1.238 |
| 1-2 | 4.206 | 3.714 | 3.960 | 7-2 | 1.871 | 1.394 | 1.633 |
| 1-3 | 3.667 | 4.270 | 3.969 | 7-3 | 1.914 | 1.328 | 1.621 |
| 2-1 | 4.308 | 3.628 | 3.968 | 8-1 | 1.365 | 1.945 | 1.655 |
| 2-2 | 3.741 | 3.562 | 3.652 | 8-2 | 0.949 | 1.700 | 1.325 |
| 2-3 | 3.614 | 4.184 | 3.899 | 8-3 | 1.073 | 1.171 | 1.122 |
| 3-1 | 4.253 | 4.026 | 4.140 | 9-1 | 4.235 | 4.376 | 4.305 |
| 3-2 | 4.037 | 4.083 | 4.060 | 9-2 | 4.237 | 4.306 | 4.272 |
| 3-3 | 4.305 | 4.444 | 4.375 | 9-3 | 4.431 | 4.280 | 4.355 |
| 4-1 | 4.076 | 4.060 | 4.068 | 10-1 | 4.213 | 3.230 | 3.722 |
| 4-2 | 2.416 | 4.010 | 3.213 | 10-2 | 4.263 | 4.389 | 4.326 |
| 4-3 | 3.960 | 3.754 | 3.857 | 10-3 | 4.487 | 4.178 | 4.332 |
| 5-1 | 0.228 | 0.576 | 0.402 | 11-1 | 0.095 | 0.071 | 0.083 |
| 5-2 | 0.573 | 0.649 | 0.611 | 11-2 | 0.563 | 0.100 | 0.332 |
| 5-3 | 0.336 | 0.358 | 0.347 | 11-3 | 0.160 | 0.139 | 0.149 |
| 6-1 | 0.283 | 0.153 | 0.218 | 12-1 | 0.048 | 0.050 | 0.049 |
| 6-2 | 0.119 | 0.148 | 0.133 | 12-2 | 0.109 | 0.116 | 0.113 |
| 6-3 | 0.213 | 0.064 | 0.139 | 12-3 | 0.057 | 0.040 | 0.049 |

表 3-5(a) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 1)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 1-1 測線 1 | 1-1 測線 2 | 1-2 測線 1 | 1-2 測線 2 | 1-3 測線 1 | 1-3 測線 2 | 2-1 測線 1 | 2-1 測線 2 | 2-2 測線 1 | 2-2 測線 2 | 2-3 測線 1 | 2-3 測線 2 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 以下 | 18 | 7 | 7 | 13 | 7 | 6 | 2 | 2 | 14 | 16 | 14 | 9 |
| 1~2 | 20 | 14 | 25 | 19 | 20 | 29 | 11 | 6 | 24 | 6 | 24 | 17 |
| 2~3 | 42 | 28 | 41 | 26 | 37 | 34 | 50 | 50 | 25 | 13 | 38 | 43 |
| 3~4 | 12 | 25 | 6 | 4 | 9 | 3 | 0 | 4 | 17 | 5 | 5 | 4 |
| 4~5 | 6 | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 0 |
| 5~10 | 11 | 6 | 3 | 7 | 2 | 0 | 1 | 3 | 2 | 3 | 6 | 3 |
| 10~1000 | 5 | 2 | 1 | 5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 | 46 | 6 | 0 |
| 1000 以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

表 3-5(b) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 2)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 3-1 測線 1 | 3-1 測線 2 | 3-2 測線 1 | 3-2 測線 2 | 3-3 測線 1 | 3-3 測線 2 | 4-1 測線 1 | 4-1 測線 2 | 4-2 測線 1 | 4-2 測線 2 | 4-3 測線 1 | 4-3 測線 2 | 5-1 測線 1 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 以下 | 3 | 1 | 0 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 28 | 3 | 10 | 9 | 4 |
| 1~2 | 16 | 5 | 12 | 12 | 17 | 8 | 9 | 3 | 4 | 8 | 17 | 18 | 18 |
| 2~3 | 44 | 51 | 45 | 41 | 43 | 52 | 47 | 51 | 4 | 47 | 45 | 39 | 10 |
| 3~4 | 4 | 8 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 4 | 23 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| 4~5 | 2 | 0 | 2 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 5~10 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 3 | 18 |
| 10~1000 | 3 | 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 87 |
| 1000 以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

表 3-5(c) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 3)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 5-1 | | 5-2 | | 5-3 | | 6-1 | | 6-2 | | 6-3 | | 7-1 | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 |
| 1 以下 | 5 | 9 | 5 | 17 | 2 | 15 | 44 | 25 | 10 | 8 | 19 | 12 | 15 | |
| 1~2 | 9 | 9 | 8 | 19 | 1 | 15 | 71 | 42 | 20 | 12 | 32 | 17 | 28 | |
| 2~3 | 7 | 11 | 11 | 28 | 1 | 16 | 61 | 34 | 15 | 16 | 22 | 21 | 28 | |
| 3~4 | 8 | 8 | 6 | 18 | 2 | 13 | 37 | 20 | 12 | 11 | 11 | 15 | 24 | |
| 4~5 | 8 | 6 | 13 | 20 | 4 | 7 | 30 | 24 | 16 | 3 | 15 | 16 | 23 | |
| 5~10 | 20 | 43 | 39 | 48 | 11 | 39 | 82 | 82 | 77 | 19 | 61 | 42 | 38 | |
| 10~1000 | 45 | 48 | 60 | 93 | 138 | 126 | 227 | 164 | 190 | 73 | 248 | 10 | 15 | |
| 1000 以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | |

表 3-5(d) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 4)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 7-2 | | 7-3 | | 8-1 | | 8-2 | | 8-3 | | 9-1 | | 9-2 | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 | 測線 1 | 測線 2 |
| 1 以下 | 4 | 8 | 8 | 10 | 27 | 15 | 11 | 3 | 23 | 8 | 3 | 0 | 3 | |
| 1~2 | 8 | 15 | 5 | 12 | 34 | 24 | 15 | 13 | 36 | 34 | 6 | 4 | 7 | |
| 2~3 | 7 | 18 | 10 | 17 | 30 | 15 | 16 | 20 | 41 | 27 | 49 | 52 | 47 | |
| 3~4 | 10 | 15 | 18 | 15 | 30 | 13 | 28 | 20 | 34 | 22 | 0 | 0 | 3 | |
| 4~5 | 14 | 10 | 10 | 17 | 24 | 9 | 14 | 13 | 20 | 18 | 0 | 0 | 0 | |
| 5~10 | 27 | 46 | 23 | 44 | 37 | 34 | 67 | 29 | 56 | 50 | 0 | 0 | 1 | |
| 10~1000 | 14 | 20 | 13 | 22 | 22 | 11 | 27 | 19 | 16 | 16 | 0 | 0 | 2 | |
| 1000 以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |

表 3-5(e) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 5)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 9-2 測線 2 | 9-3 測線 1 | 9-3 測線 2 | 10-1 測線 1 | 10-1 測線 2 | 10-2 測線 1 | 10-2 測線 2 | 10-3 測線 1 | 10-3 測線 2 | 11-1 測線 1 | 11-1 測線 2 | 11-2 測線 1 | 11-2 測線 2 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 以下 | 5 | 6 | 6 | 0 | 26 | 1 | 1 | 0 | 3 | 9 | 2 | 5 | 14 |
| 1~2 | 13 | 26 | 13 | 6 | 19 | 10 | 5 | 6 | 7 | 9 | 3 | 1 | 9 |
| 2~3 | 45 | 33 | 44 | 50 | 10 | 49 | 51 | 49 | 48 | 7 | 2 | 1 | 12 |
| 3~4 | 1 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 4 | 9 |
| 4~5 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 5 |
| 5~10 | 3 | 4 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 7 |
| 10~1000 | 1 | 1 | 5 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 | 20 | 69 | 26 | 35 |
| 1000 以上 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

表 3-5(f) 目粗しされた試験体の長さ高さ比の頻度分布 (その 6)

| 長さ高さ比 h/t の値 | 11-3 測線 1 | 11-3 測線 2 | 12-1 測線 1 | 12-1 測線 2 | 12-2 測線 1 | 12-2 測線 2 | 12-3 測線 1 | 12-3 測線 2 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 以下 | 5 | 5 | 14 | 11 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1~2 | 3 | 9 | 11 | 15 | 0 | 3 | 0 | 1 |
| 2~3 | 0 | 7 | 5 | 13 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 3~4 | 0 | 3 | 12 | 8 | 0 | 0 | 3 | 2 |
| 4~5 | 1 | 4 | 5 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 5~10 | 5 | 13 | 39 | 43 | 2 | 3 | 9 | 11 |
| 10~1000 | 58 | 81 | 269 | 277 | 43 | 51 | 156 | 257 |
| 1000 以上 | 1 | 2 | 6 | 1 | 3 | 0 | 4 | 9 |

表 3-6 接合面粗さ処理方法ごとの長さ高さ比の頻度分布

| 接合面粗さ処理方法 (試験体数および測線数) | ささら 刷毛引き (6体 12本) | | 磨き鋼板 押し付け (12体 24本) | | 山形鋼板 押し付け (18体 36本) | |
|---------------------------|-------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | 範囲(%) | 平均(%) | 範囲(%) | 平均(%) | 範囲(%) | 平均(%) |
| 凹凸全体に占める | 28.9~52.8 | 40.7 | 43.1~100 | 75.2 | 0~53.2 | 6.0 |
| h/t ≥ 5 の凹凸の割合 | | | | | | |

3.4 接合面せん断力載荷実験結果

載荷において、試験体と載荷フレームとの間に装着した真鍮製方形材は、試験体および載荷フレームとはだすきなく密着していることを全試験体について目視および指により確認した。すなわち、せん断力は載荷フレームから方形材を介して試験体に伝わっていると判断され、スタブ間相対変位であるところの滑り変位 δ_H は、試験体の接合面以外のせん断変形量をほとんど含まない、接合面での純粋な滑り変位であると考えられる。また、微小変形時から中変形時にかけての試験体の表裏同じ側の面における2箇所の変位計の目開き変位はいずれの試験体でもほぼ同じであり、先打ち部分と後打ち部分がほぼ平行な状態だったと判断され、平行維持パンタグラフの装着が有効であったと考えられる。

載荷結果を表3-7に示し、せん断力 Q と滑り変位の関係を図3-11に示す。せん断力と滑り変位の関係であるが、次の様に分類される。まず、約半数の試験体は、載荷初期には全く滑り変位が生じないか、またはわずかな変位が生じ、微小変形時に最大耐力 Q_{max} に達した。最大耐力時以降の性状については、滑り変位をともなって急激な耐力低下を生じる試験体や、さほどの耐力低下が生じず中変形時や大変形時にもほぼ耐力を維持した試験体、耐力低下を生じたものの中変形時以降に再度の耐力上昇を生じた試験体などが確認されたが、接合面粗さや接合筋の径および本数による明確な分類はできなかった。このうち、6-3試験体と7-2試験体、9-1試験体、9-2試験体、12-1試験体、12-2試験体の計6体は、微小変形時にせん断力が極大に達したものの中変形時から大変形時にかけて耐力上昇が生じ、最終的な最大耐力は大変形時に記録した。5-2試験体と10-2試験体は、微小変形時にはせん断力の極大値がなく中変形時に最大耐力に達した。また、10-3試験体は、中変形時にせん断力の極大値があったものの最大耐力は大変形時に記録した。11-1試験体から11-3試験体までと12-3試験体の計4体は、微小変形時から中変形時にかけてのせん断力の明確な極大値がなく、大変形時に最大耐力となった。

最終破壊形式は、全試験体とも接合面で滑る破壊形式(2.5節における接合面滑り破壊)となり、同じく2.5節における接合面滑りせん断破壊は発生しなかった。

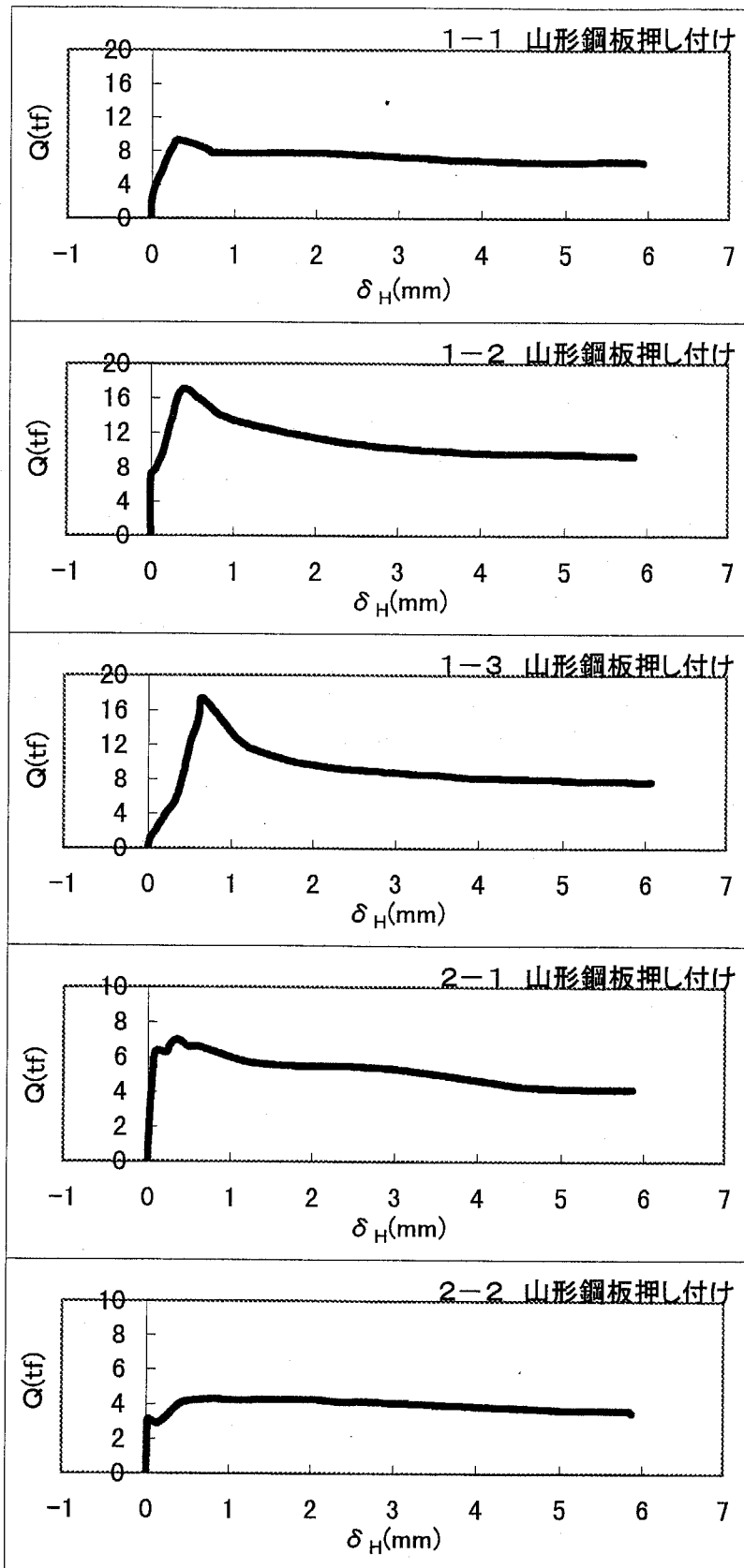


図 3-11(a) せん断力-滑り変位関係 (その 1)

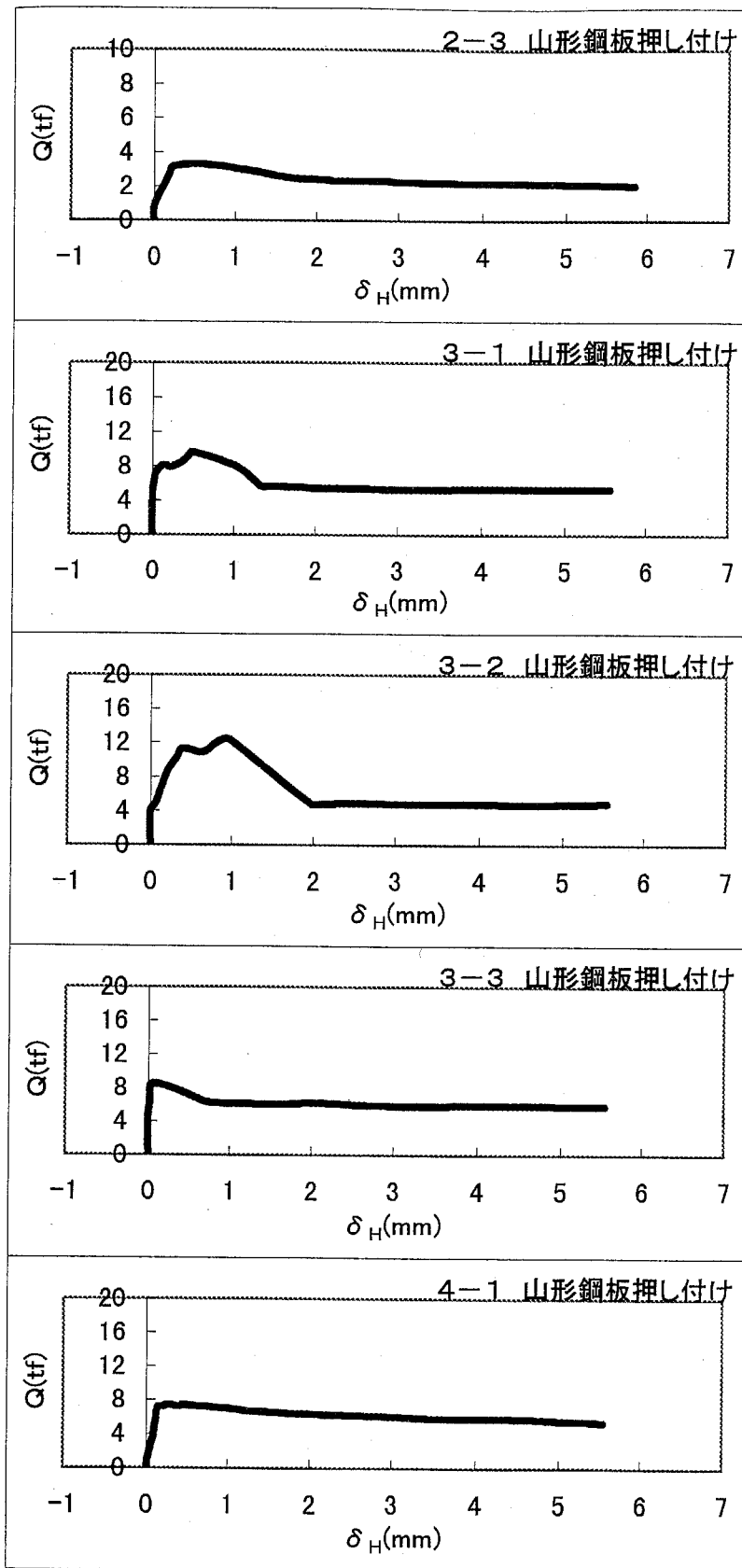


図 3-11(b) せん断力-滑り変位関係 (その 2)

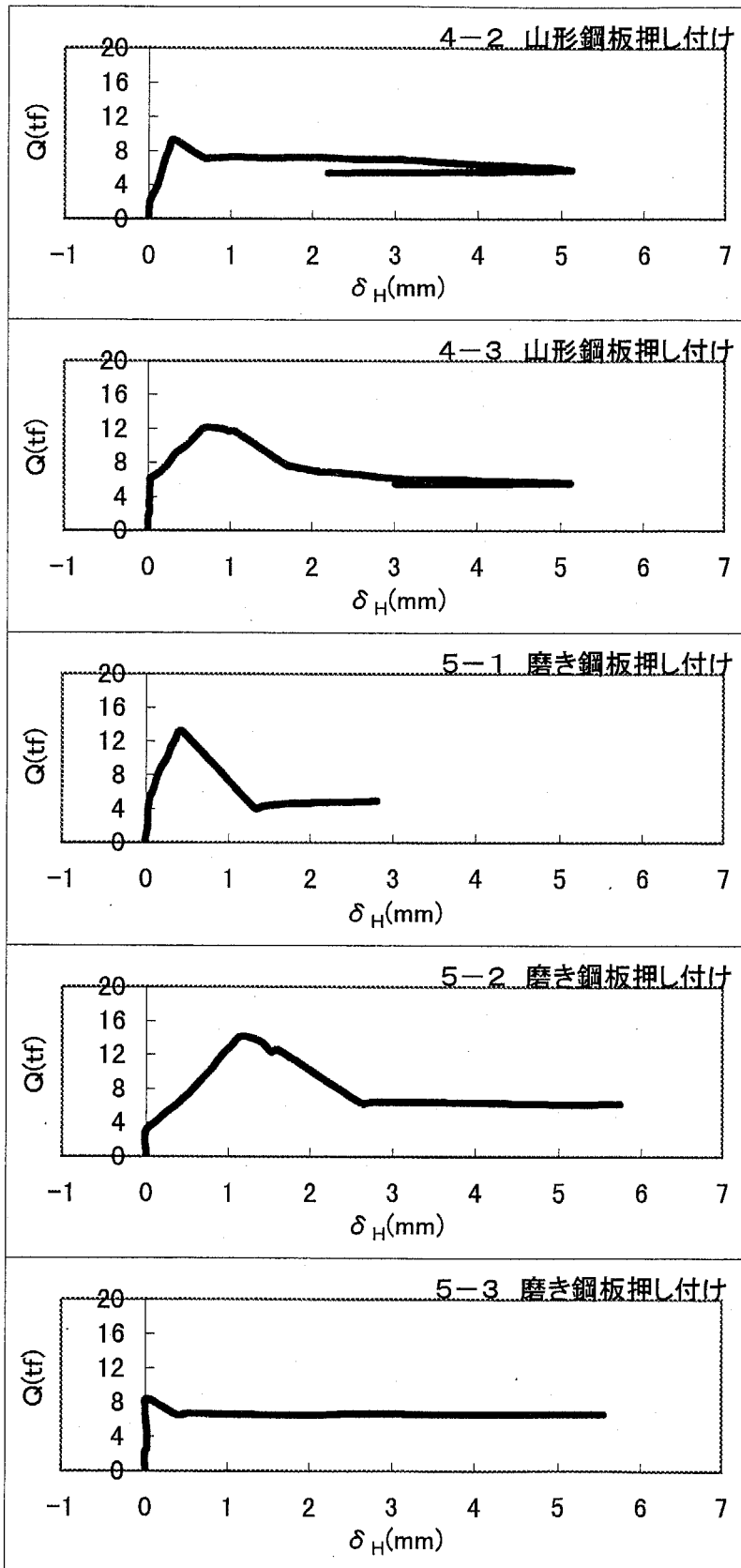


図 3-11(c) せん断力-滑り変位関係 (その 3)

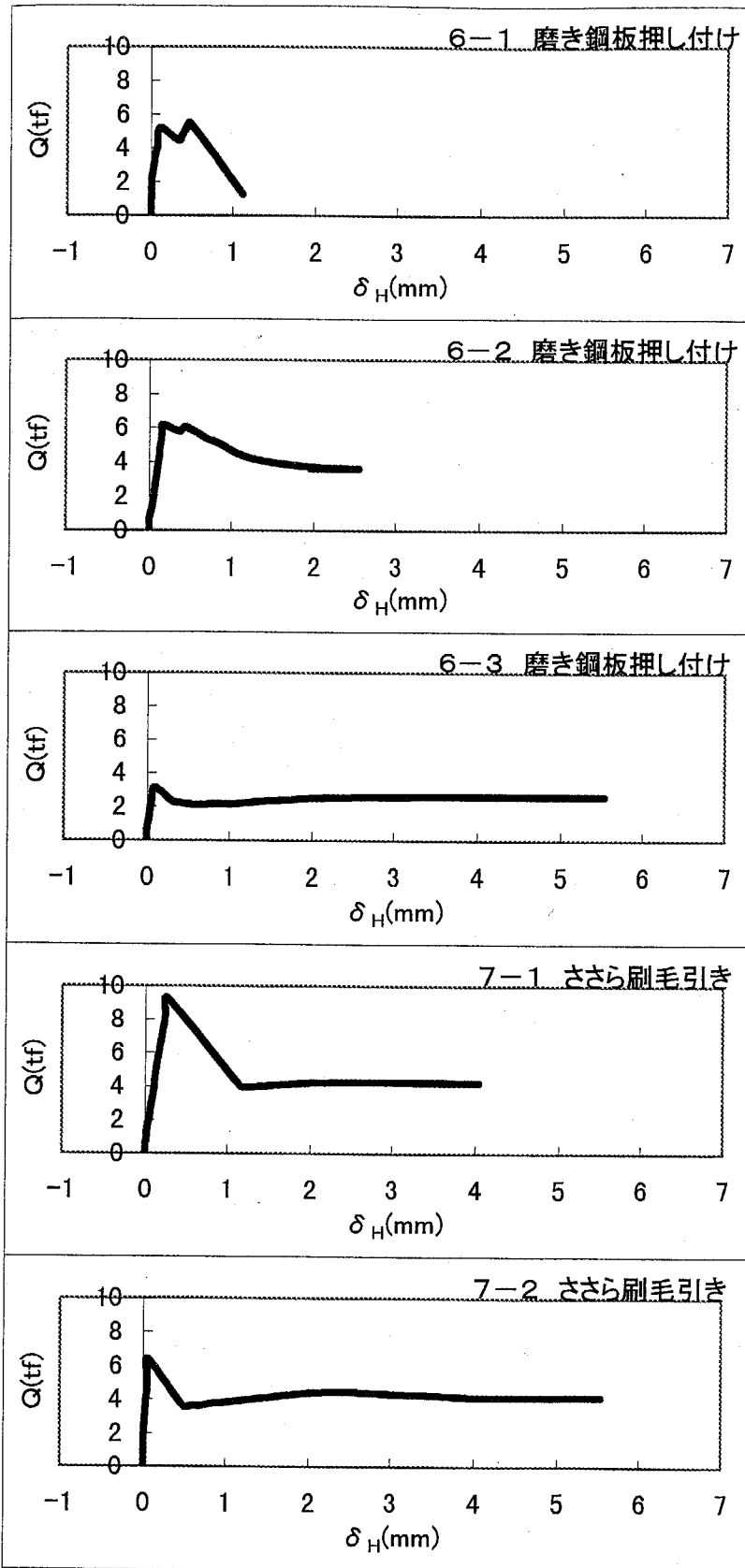


図 3-11(d) せん断力-滑り変位関係 (その 4)

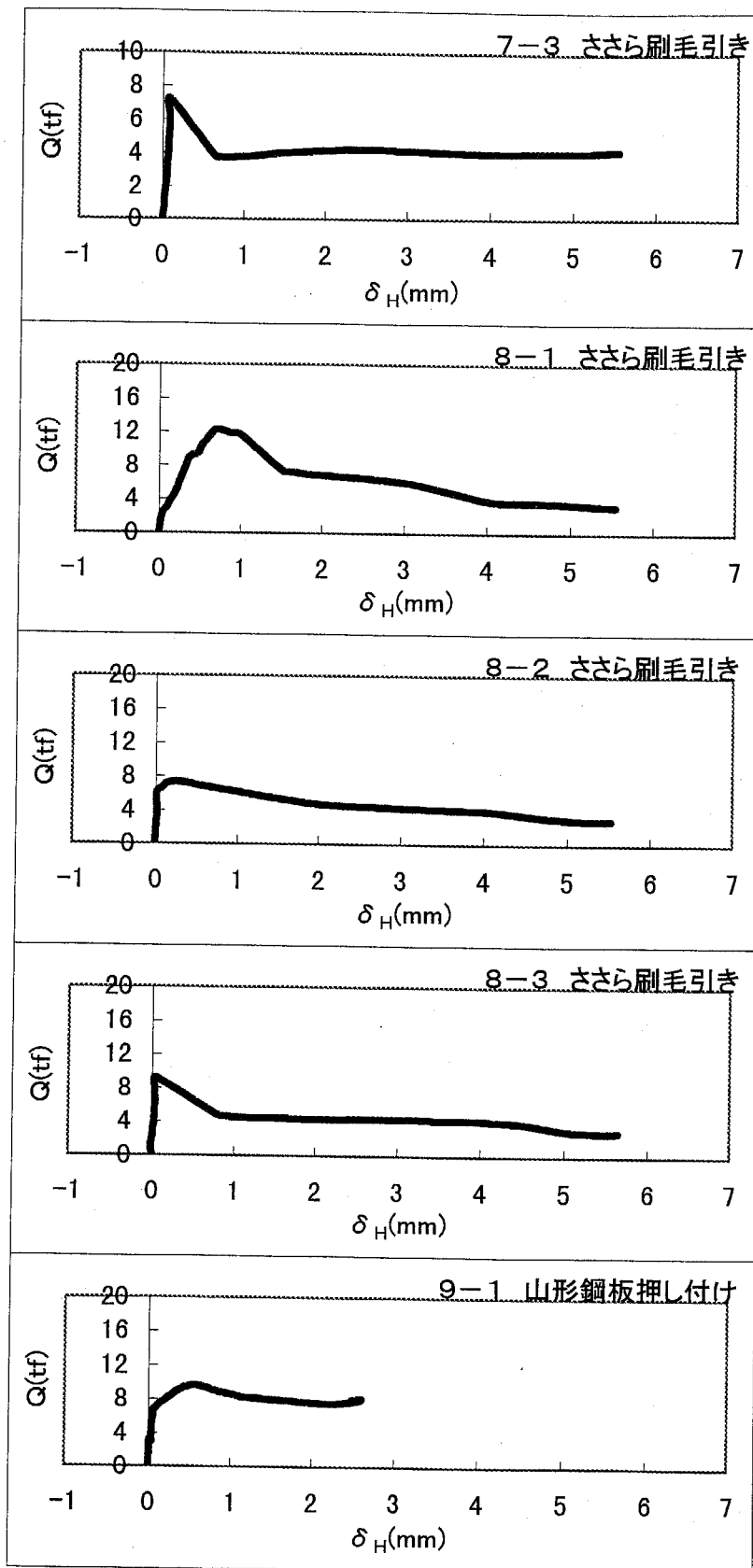


図 3-11(e) せん断力-滑り変位関係 (その 5)

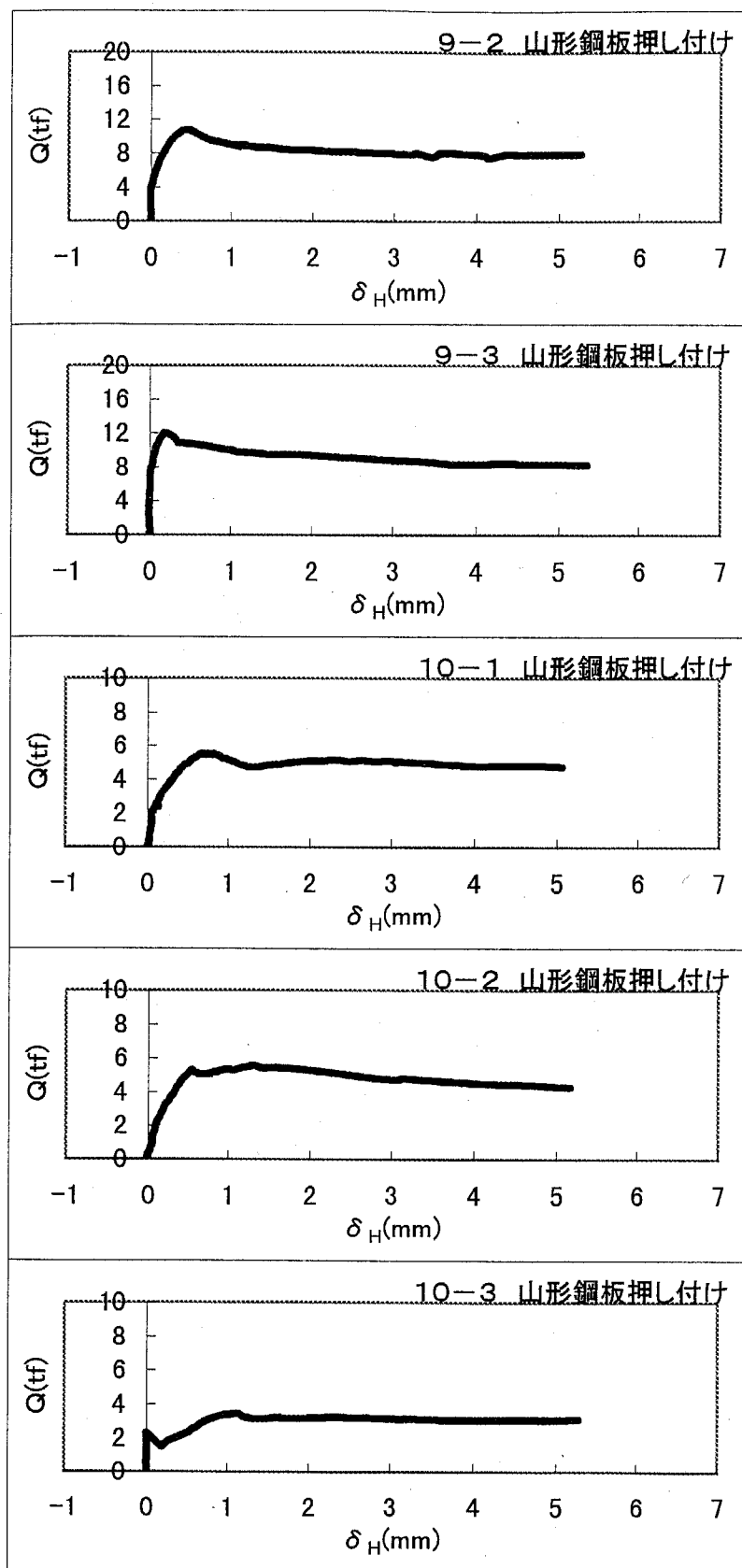


図 3-11(f) せん断力-滑り変位関係 (その 6)

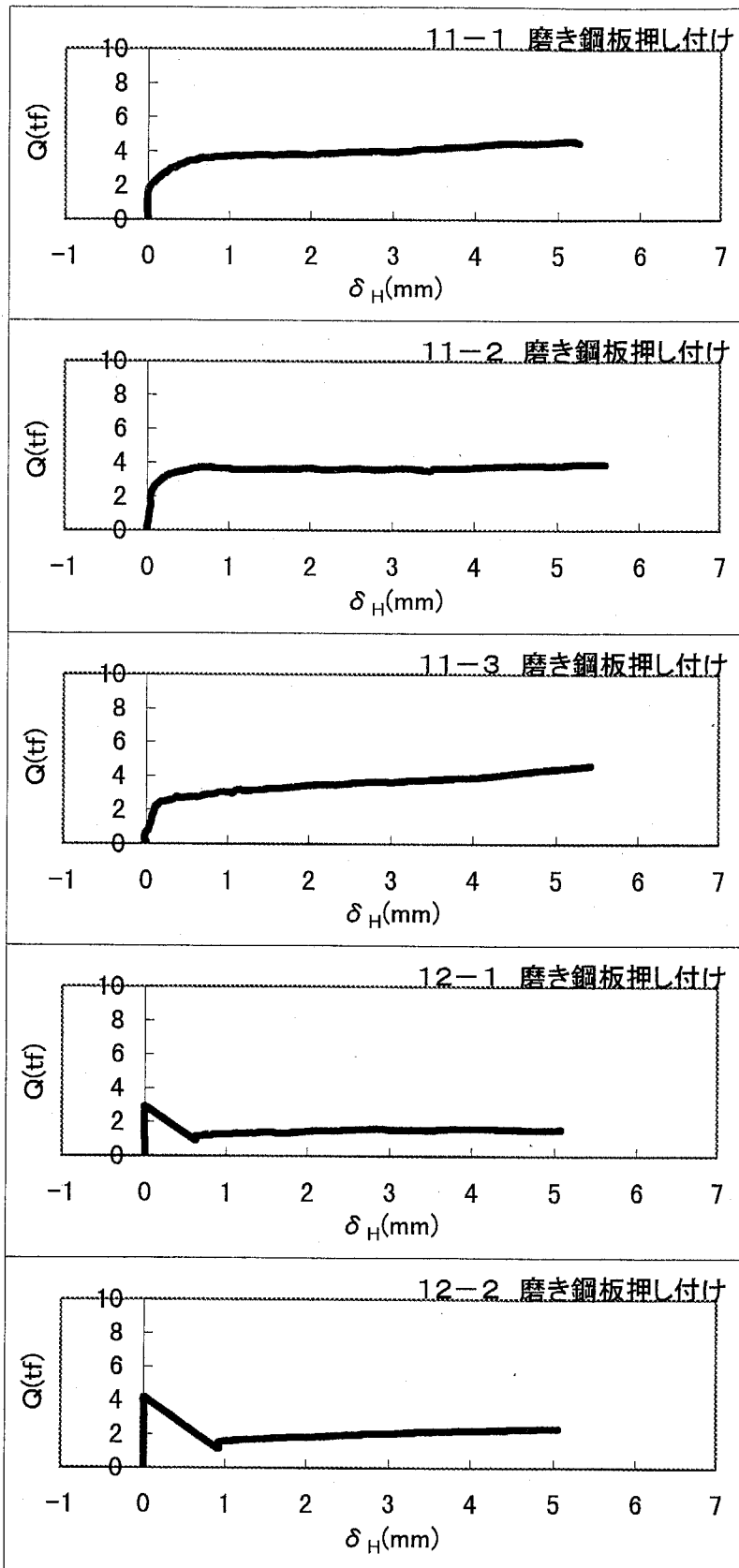


図 3-11(g) せん断力-滑り変位関係 (その 7)

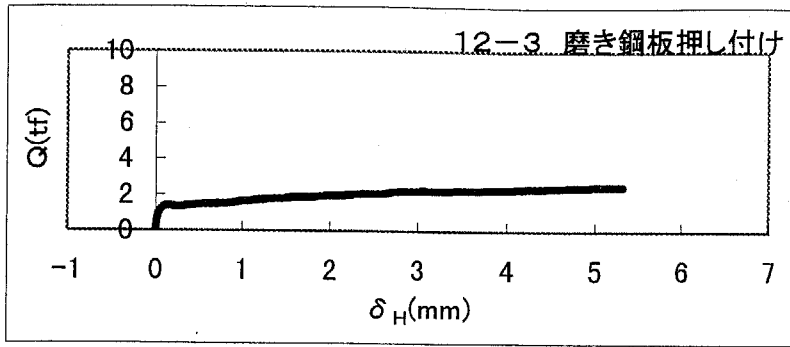


図 3-11(h) せん断力-滑り変位関係 (その 8)

表 3-7(a) 接合面せん断力載荷実験結果 (その1)

| 試験体名 | 微小変位時のせん断力 | | | | | | 微小変形時から中変形時にかけてのせん断力の極大値 | | | | | | 最大耐力 最大強度 | |
|------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------|--|
| | $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時 | | | $\delta_H=1\text{mm}$ 時 | | | せん断力・応力度 Q_{p6} (tf) | τ_{p6} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp6} (mm) | 目開き 変位 δ_{Vp6} (mm) | Q_{max} (tf) | τ_{max} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hmax} (mm) | |
| | せん断力・応力度 Q_{05} (tf) | τ_{05} (kgf/cm ²) | 目開き 変位 δ_{V05} (mm) | せん断力・応力度 Q_1 (tf) | τ_1 (kgf/cm ²) | 目開き 変位 δ_{V1} (mm) | | | | | | | | |
| | Q_{05} (tf) | τ_{05} (kgf/cm ²) | δ_{V05} (mm) | Q_1 (tf) | τ_1 (kgf/cm ²) | δ_{V1} (mm) | Q_{p6} (tf) | τ_{p6} (kgf/cm ²) | δ_{Hp6} (mm) | δ_{Vp6} (mm) | Q_{max} (tf) | τ_{max} (kgf/cm ²) | δ_{Hmax} (mm) | |
| 1-1 | 8.800 | 29.3 | 0.458 | 7.769 | 25.9 | 0.662 | 9.182 | 30.6 | 0.302 | 0.229 | 同左 | | | |
| 1-2 | 16.550 | 55.2 | 0.670 | 13.447 | 44.8 | 0.924 | 17.038 | 56.8 | 0.394 | 0.556 | 同左 | | | |
| 1-3 | 12.068 | 40.2 | 0.501 | 13.255 | 44.2 | 0.879 | 17.288 | 57.6 | 0.662 | 0.648 | 同左 | | | |
| 2-1 | 6.586 | 22.0 | 0.299 | 5.682 | 18.9 | 0.523 | 6.993 | 23.3 | 0.356 | 0.228 | 同左 | | | |
| 2-2 | 4.140 | 13.8 | 0.573 | 4.223 | 14.1 | 0.611 | 4.300 | 14.3 | 0.808 | 0.573 | 同左 | | | |
| 2-3 | 3.187 | 10.6 | 0.312 | 3.029 | 10.1 | 0.617 | 3.300 | 11.0 | 0.598 | 0.312 | 同左 | | | |
| 3-1 | 9.634 | 32.1 | 0.465 | 7.843 | 26.1 | 0.674 | 9.634 | 32.1 | 0.500 | 0.465 | 同左 | | | |
| 3-2 | 11.033 | 36.8 | 0.624 | 11.111 | 37.0 | 1.075 | 12.330 | 41.1 | 0.978 | 0.861 | 同左 | | | |
| 3-3 | 7.081 | 23.6 | 0.488 | 6.084 | 20.3 | 0.626 | 8.520 | 28.4 | 0.061 | 0.148 | 同左 | | | |
| 4-1 | 7.318 | 24.4 | 0.512 | 6.961 | 23.2 | 0.708 | 7.416 | 24.7 | 0.256 | 0.250 | 同左 | | | |
| 4-2 | 7.977 | 26.6 | 0.542 | 7.261 | 24.2 | 0.829 | 9.241 | 30.8 | 0.302 | 0.243 | 同左 | | | |
| 4-3 | 10.287 | 34.3 | 0.489 | 11.611 | 38.7 | 0.957 | 12.139 | 40.5 | 0.690 | 0.646 | 同左 | | | |
| 5-1 | 変位急増につき不明 | | | 4.247 | 14.2 | 0.692 | 13.121 | 43.7 | 0.431 | 0.384 | 同左 | | | |
| 5-2 | 7.270 | 24.2 | 0.285 | 12.689 | 42.3 | 0.676 | 14.168 | 47.2 | 1.160 | 0.783 | 同左 | | | |
| 5-3 | 6.691 | 22.3 | 0.278 | 6.571 | 21.9 | 0.397 | 8.326 | 27.8 | 0.032 | 0.019 | 同左 | | | |
| 6-1 | 変位急増につき不明 | | | 変位急増につき不明 | | | 5.437 | 18.1 | 0.486 | 0.313 | 同左 | | | |
| 6-2 | 5.920 | 19.7 | 0.399 | 4.685 | 15.6 | 0.485 | 6.160 | 20.5 | 0.163 | 0.080 | 同左 | | | |
| 6-3 | 2.151 | 7.17 | 0.284 | 2.16 | 7.20 | 0.364 | 3.117 | 10.4 | 0.093 | 0.129 | 3.843 | 12.8 | 21.14* | |

(応力度 τ) = (せん断力 Q) / (接合面面積 $A=300\text{cm}^2$)

*印は 1 軸型変位計による測定結果で参考値。なお、*印がある場合の最大耐力時の目開き変位は不明。

表 3-7(b) せん断力載荷実験結果 (その 2)

| 試験体名 | 微小変位時のせん断力 | | | | | | 微小変形時から中変形時にかけてのせん断力の極大値 | | | | | | 最大耐力 最大強度 | | |
|------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------|--------------------|---|----------------------------------|--|--|
| | $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時 | | | $\delta_H=1\text{mm}$ 時 | | | せん断力・応力度 | | その時の変位 | | Q_{\max} (tf) | τ_{\max} (kgf/cm ²) | 滑り変位 $\delta_{H\max}$ (mm) | | |
| | せん断力・応力度 | 目開き 変位 δ_{V05} (mm) | 変位 δ_{V1} (mm) | せん断力・応力度 | 目開き 変位 δ_{V1} (mm) | Q_{p6} (tf) | τ_{p6} (kgf/cm ²) | 滑り 変位 δ_{Hp6} (mm) | 目開き 変位 δ_{Vp6} (mm) | | | | | | |
| | Q_{05} (tf) | τ_{05} (kgf/cm ²) | | Q_1 (tf) | τ_1 (kgf/cm ²) | | | | | | | | | | |
| 7-1 | 変位急増につき不明 | | | 変位急増につき不明 | | | 9.240 | 30.8 | 0.267 | 0.236 | 同左 | | | | |
| 7-2 | 3.665 | 12.2 | 0.356 | 3.880 | 12.9 | 0.428 | 6.397 | 21.3 | 0.056 | 0.031 | 7.429 | 24.8 | 20.16* | | |
| 7-3 | 3.826 | 12.8 | 0.396 | 3.793 | 12.6 | 0.475 | 7.177 | 23.9 | 0.098 | 0.105 | 同左 | | | | |
| 8-1 | 10.000 | 33.3 | 0.317 | 11.554 | 38.5 | 0.675 | 12.193 | 40.6 | 0.687 | 0.445 | 同左 | | | | |
| 8-2 | 6.960 | 23.2 | 0.550 | 6.099 | 20.3 | 0.770 | 7.374 | 24.6 | 0.249 | 0.433 | 同左 | | | | |
| 8-3 | 変位急増につき不明 | | | 4.544 | 15.1 | 0.515 | 9.157 | 30.5 | 0.047 | 0.114 | 同左 | | | | |
| 9-1 | 9.592 | 32.0 | 0.521 | 8.443 | 28.1 | 0.686 | 9.623 | 32.1 | 0.551 | 0.547 | 10.973 | 36.6 | 25.14* | | |
| 9-2 | 10.594 | 35.3 | 0.492 | 8.934 | 29.8 | 0.730 | 10.714 | 35.7 | 0.465 | 0.452 | 11.397 | 38.0 | 23.93* | | |
| 9-3 | 10.733 | 35.8 | 0.540 | 9.993 | 33.3 | 0.685 | 12.001 | 40.0 | 0.197 | 0.351 | 同左 | | | | |
| 10-1 | 4.920 | 16.4 | 0.499 | 5.137 | 17.1 | 0.805 | 5.506 | 18.4 | 0.760 | 0.696 | 同左 | | | | |
| 10-2 | 5.071 | 16.9 | 0.403 | 5.337 | 17.8 | 0.579 | 5.538 | 18.5 | 1.328 | 0.619 | 同左 | | | | |
| 10-3 | 2.296 | 7.65 | 0.672 | 3.384 | 11.3 | 1.030 | 3.478 | 11.6 | 1.136 | 1.112 | 5.461 | 18.2 | 25.23* | | |
| 11-1 | 3.427 | 11.4 | 0.169 | 3.713 | 12.4 | 0.228 | 4.597 | 15.3 | 5.160 | 0.452 | 8.143 | 27.1 | 20.08* | | |
| 11-2 | 3.586 | 12.0 | 0.126 | 3.589 | 12.0 | 0.192 | 3.888 | 13.0 | 5.586 | 0.598 | 13.172 | 43.9 | 24.07* | | |
| 11-3 | 2.728 | 9.09 | 0.148 | 2.993 | 9.98 | 0.233 | 4.582 | 15.3 | 5.419 | 0.539 | 10.129 | 33.8 | 23.88* | | |
| 12-1 | 0.917 | 3.06 | 0.312 | 1.262 | 4.21 | 0.393 | 2.911 | 9.70 | 0.000 | 0 | 4.673 | 15.6 | 24.25* | | |
| 12-2 | 変位急増につき不明 | | | 1.576 | 5.25 | 0.400 | 4.149 | 13.8 | 0.007 | 0 | 5.292 | 17.6 | 24.86* | | |
| 12-3 | 1.438 | 4.79 | 0.166 | 1.632 | 5.44 | 0.258 | 2.464 | 8.21 | 5.317 | 0.595 | 6.025 | 20.1 | 25.02* | | |

(応力度 τ) = (せん断力 Q) / (接合面積 $A=300\text{cm}^2$)

*印は 1 軸型変位計による測定結果で参考値。なお、*印がある場合の最大耐力時の目開き変位は不明。

3.5 せん断力および接合筋の挙動と粗さ評価値との関係

3.5.1 最大耐力時および微小変形時におけるせん断力と粗さ評価値との関係

(1)最大耐力と粗さ評価値との関係

試験体のうち、表 3-1 中に*印のある 6 試験体 (2-2、2-3、5-1、8-1、10-2、10-3 試験体) については、実験後のデータ整理および目視などの結果から、

- 1) 実験終了後の目視検査で、接合筋の定着鉄板の溶接が切れていることが確認された。
- 2) 試験体の表面位置の変位計の目開き変位と裏側位置のその違いが甚だしかった。すなわち、载荷にともない先打ち・後打ち両部分の平行は保たれていたものの、試験体が接合面の面外方向に振れた (これに関しては、载荷フレームの構造上、平行維持パンタグラフの装着によっても接合面外方向の振れの発生を防止することができない)。

などのことが分かった。よって、これらの 6 試験体は実験結果に問題があると判断して、この項での検討の対象からは除外する。そして、この 6 試験体を除いた他の 30 試験体を「全試験体」と名付ける。

同一変動要因の試験体でありながら最大耐力時の滑り変位に大きな差が生じているものがあり、また、大変形時に最大耐力に達した試験体もある。ここではこれら滑り変位の大きさの違いを無視して、最大耐力と粗さ評価値との相関を求める。ここで、2.6 節と同様に、下記の仮定条件を設ける。

- 1) 相関については、粗さ評価値と最大耐力の関係が一義的にかつ直線的に表されるものと仮定し、回帰は最小自乗法により行う。
- 2) 最大耐力は接合面粗さと同時にコンクリート強度にも依存すると考えられる。よって、2.6 節での結果を参考に、最大耐力の指標値としては、最大耐力を接合面面積 A で除した最大強度 τ_{\max} をコンクリートの代表圧縮強度 σ_B の平方根で除した $\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B}$ を採用する。

まず、緩衝材の有無を区別せず、全評価試験体についての回帰結果を関係を図 3-12 および表 3-8 に示す。相関係数は $r=0.5115$ となり、相関結果は芳しいとはいえないものの、一応の相関は何える。

次に、緩衝材の有無を区別してみると、緩衝材を施した評価試験体では、図 3-12 および表 3-8 に示す通り、 $r=0.5976$ と相関は比較的良好である。一方、緩衝材を施さない評価試験体でも、 $r=0.4122$ と弱いながらも一応の相関は何える。

以上より、最大耐力と粗さ評価値との間には、一応の相関関係があるものと想像される。

(2)微小変形時におけるせん断力と粗さ評価値

(1)での相関があまり強くない原因として、最大耐力時の滑り変位の差が考えられる。滑り変位が大きくなるにつれて接合面粗さが崩れてしまうことは容易に想像でき、せん断力载荷前の測定結果から得られた粗さ評価値の意味合いも薄くなってしまふ。しかし、微小変形時にはせん断力载荷前の粗さが残っているか、あるいは崩れるにしてもさほど崩れずにせん断力载荷前の粗さを反映した粗さが残っていると考えられる。

そこで微小変形時に限定して、評価試験体でのある特定の滑り変位時におけるせん断力と粗さ評価値との相関を求める。ここで、微小変形時の特定の滑り変位時として、 $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時と $\delta_H=1\text{mm}$ 時の 2 時点を対象とする。なお、実験において滑り変位が厳密に 0.5mm あるいは 1mm の時点でのせん断力を測定できていない評価試験体もあるので、以後使用するせん断力としては、滑り変位が 0.5mm あるいは 1mm を挟む直近の 2 測定時点での測定結果から直線補間で求めた値を用い、それぞれ「 0.5mm 時せん断力 $Q_{0.5}$ 」および「 1mm 時せん断力 Q_1 」と名付ける。なお、急激な耐力低下による滑り変位の急増など

により直線補間が適当ではないと判断される場合は、それぞれのせん断力は測定不能として求めない。あわせて、0.5mm 時せん断力および 1mm 時せん断力を接合面面積で除したせん断応力度をそれぞれ「0.5mm 時せん断応力度 $\tau_{0.5}$ 」および「1mm 時せん断応力度 τ_1 」と名付ける。それぞれの値を表 3-7 に示す。

まず、緩衝材の有無を区別せずに全試験体についての相関を求める。せん断力の指標値としては、0.5mm 時せん断応力度および 1mm 時せん断力をコンクリートの代表圧縮強度の平方根で除した $\tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}$ および $\tau_1/\sqrt{\sigma_B}$ を採用する。

回帰結果を図 3-13 および表 3-9 に示す。いずれも相関係数は $r=0.700$ 近辺となり、3.5.1 項における最大耐力と粗さ評価値との関係よりも強い相関が認められる。

次に、接合筋での緩衝材の有無により評価試験体を区別し、それぞれについてせん断力と粗さ評価値との関係を求める。図 3-13 および表 3-9 に示す通り、一部を除き相関係数は $r=0.7500$ 近辺となり、いずれの場合もせん断力と粗さ評価値との相関は良好である。

以上から、微小変形時のせん断力は、粗さ評価値とコンクリート圧縮強度を用いて評価可能と判断される。

よって、この章で取り上げた様な「過大な圧縮応力下ではないものの、内力により接合面の目開き変位の発生がある程度拘束されている状況下」においては、目粗しを施された接合面のせん断耐力は、接合面の粗さ評価値とコンクリート圧縮強度により評価可能と判断される。

3.5.2 滑り変位と目開き変位との関係

1.2.2 項に示す通り、せん断摩擦力は粗さの側面への乗り上がりによって生じるものとされている。そこで、山形鋼板押し付けにより粗さを施された試験体について、滑り変位と目開き変位との関係を図 3-14 に示す。ここで、山形鋼板押し付け試験体を対象としたのは、

- 1) ささら刷毛引きおよび磨き鋼板押し付けにより粗さを施された試験体については、粗さの側面への乗り上がりが生じたどうかの確認が極めて困難である。
- 2) 山形鋼板押し付けによる粗さは他の二者に比べて明らかに粗さの凹凸の体積が大きく、側面での乗り上がりが他の二者の場合よりも発生しやすい状況下にあるはずである。との理由による。

山形の側面角度は 45° であるので、側面への乗り上がりが生じるならば滑り変位と目開き変位の値がほぼ等しくなるはずである。しかし、滑り変位と目開き変位がほぼ同じであるのは滑り変位がごく小さい範囲に限られており、 $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時点においてすでに目開き変位が滑り変位を下回っている場合が多い。これは、接合筋に緩衝材を施した試験体、すなわち接合筋の軸方向伸びに対する拘束が弱いはずである試験体であっても同じ傾向を示している。

よって、滑り変位がごく小さいせん断力载荷初期の状態以外では、側面への乗り上がりが生じているとは判断できない。さらに、目開き変位の値が滑り変位の値を下回っていることから考えて、山形の側面でコンクリートの圧壊が生じていると考えられる。写真 3-1 に示す载荷終了後の最終破壊状況からも、側面圧壊が生じていることがわかる。

以上より、「粗さの側面への乗り上がりによって生じる」せん断摩擦力は小さく、滑り変位が 0.5mm 程度以上の場合には、接合面におけるせん断力の伝達はせん断摩擦力ではなく、粗さの側面の圧壊による割合が大きくなると考えられる。

3.5.3 接合筋に作用する軸方向力と粗さ評価値との関係

目開き変位の発生を拘束する内力、すなわち接合筋に生じる軸方向力の大きさも、粗さ評価値との相関関係にあるのではないかと考えられる。そこで、この項では、接合筋に生じる軸方向力と粗さ評価値との関係を調べる。

全試験体のうち、滑り変位が増大しても接合筋に貼付した歪みゲージが健全で、微小変形時において接合筋の軸方向力の算定が可能であった試験体（表 3-1 中の試験体名に下線を付したものを）を「評価試験体」と名付け、この項においてはそれら評価試験体を対象とする。

評価試験体における接合筋の軸方向歪み度の測定結果を図 3-15 に示す。接合筋の歪みの挙動は、緩衝材の有無により区別される。緩衝材を施した評価試験体では、同一の接合筋に貼付した全ての歪みゲージがほぼ同じ様な伸び縮みの挙動を示した。すなわち、緩衝材を施すことにより、接合筋は軸方向の純引張力のみを受けている状態に近かったことが確認され、緩衝材の効果は有効であったといえる。一方、緩衝材のない評価試験体では、同一の接合筋に貼付した歪みゲージは接合面を境界としてその正負が逆転しており、いわゆるだぼせん断力を受けていることを示している。

なお、中変形時以降になると、評価試験体であっても歪みゲージの断線や剥離など測定不能となるものが見られた。よって、中変形時や大変形時での接合筋の挙動の把握は困難であった。

接合筋の応力状態は、緩衝材を施した接合筋では上記の通り微小変形時には軸方向純引張状態であり、緩衝材を施さない接合筋はだぼせん断力を受けていた。また、緩衝材の有無にかかわらず、微小変形時であっても降伏歪み度以上の歪み度が生じた部分も確認された。よって、接合筋の縁の部分が降伏している場合は、測定した接合筋の軸方向歪み度（すなわち同一箇所を表裏に貼付した歪みゲージの測定値の単純平均）にヤング率を単純に乗じた値では、真の軸方向力は求まらない。そこで、図 3-16 の様に接合面を挟む直近の 2 箇所において断面の平面保持を仮定した上で、表 3-3 の引張試験の結果を用いて断面内の軸方向応力度分布を積分し、その結果を平均した値を接合筋 1 本当たりの軸方向力とし、その値を全接合筋にわたって累積した値を「接合面位置における接合筋の軸方向力」と定義する。なお、ここで、

- 1) D10 接合筋は、節の存在を無視し、JIS G 3112 による D10 の公称直径と同一の直径を有する丸鋼と見なす。
- 2) D13 接合筋は溝切りを施しており、その厳密な実断面形が不明である。よって、接合筋として用いる溝切りを施した D13 鉄筋（以下 D13 溝切り鉄筋と呼ぶ）と同一製造ロットの溝切りなし D13 鉄筋を別途用意し、D13 溝切り鉄筋とあわせて引張試験を行い、両者の引張降伏時荷重を求める。そして、この降伏荷重の比および JIS G 3112 に示すところの溝切りなし D13 鉄筋の断面積から、溝切り D13 鉄筋の断面積を推定する。この結果を基に、溝切り D13 接合筋を溝切り D13 鉄筋と同一断面積を持つ丸鋼と改めて見なす。

との仮定を立てる。

なお、上記で用いる接合筋の歪み度は、滑り変位が厳密に 0.5mm あるいは 1mm の時点で測定できていない場合もある。よって、3.5.3 項での 0.5mm 時せん断力および 1mm 時せん断力と同様に、滑り変位が 0.5mm あるいは 1mm を挟む直近の 2 測定時点での歪み度測定結果から直線補完で求めた値とする。

表 3-10 に $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時と 1mm 時での各試験体の接合面位置における接合筋の軸方向力 $N_{s0.5}$ および N_{s1} を示す。また、図 3-17 および表 3-11 にその軸方向力と粗さ評価値との相関を、緩衝材の有無による区別をして表わす。いずれの場合も、相関係数は $r=0.7365$

から 0.8155 までと良好である。また、回帰式からは滑り変位が大きくなるほど、接合筋に作用する軸方向力が概して大きくなる傾向が伺える。

以上より、接合筋に生じる軸方向力は接合面粗さ評価値を用いて評価可能と考えられる。すなわち、粗さが大きくなるほど軸方向力は大きくなるといえる。

なお、「せん断摩擦力が生じる」と考えた場合、この接合筋の軸方向力の大きさがすなわち接合面に作用する圧縮力と同じになるはずである。1.2.2 項で示した様に、一般にはせん断摩擦力の算定には接合筋の降伏強度を用いている。しかし、図 3-15 の 4-1 試験体の様に山形鋼板で粗さを施され、また緩衝材も施されている（すなわち、粗さの側面乗り上がり）試験体であっても、接合筋の引張降伏は確認されていない。よって、接合筋の引張降伏を前提としたせん断摩擦力の算定は無理があると判断される。

3.5.4 粗さ評価値を用いた等価せん断摩擦係数の推定

3.5.3 項で示した通り、接合筋に緩衝材を施した評価試験体では、接合筋は純引張状態に近い状態と考えられ、すなわちせん断力は接合筋のだぼせん断力ではなく、すべて接合面付近のコンクリートによって負担されると推定される。微小変形時であってもすでにいくらかの滑り変位が生じているので、2.6.1 項で扱った様な等価付着力は消失しているはずで、せん断力はせん断摩擦力やコンクリート骨材の噛み合いあるいは粗さの側面の支圧などの機械的機構によって負担されていると考えられる。

3.5.2 項で「せん断摩擦力の影響は小さく粗さの側面圧壊の影響が大きい」ことを述べたが、ここでは便宜的にせん断摩擦力が発生すると仮定し、1.2.2 項に示されている「せん断摩擦係数」と粗さ評価値との関係を求める。

本来ならば、せん断摩擦力と他の機械的機構による負担せん断力を分離することが理想であるが、2.6.3 項でも述べた通り実際にはそれらの分離は極めて困難なため、ここではコンクリートによって行われるせん断力の負担はすべてせん断摩擦力によってなされると仮定する。すなわち、すべてのせん断力を負担する摩擦力を、3.1.2 項に示す通り「等価せん断摩擦力」とし、微小変形時における接合面位置における接合筋の軸方向力でその時点でのせん断力（すなわち等価せん断摩擦力）を除いた値を「等価せん断摩擦係数 μ_{es} 」と定義する。つまり、 $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時と $\delta_H=1\text{mm}$ を考えて、それぞれの時点での等価せん断摩擦係数を μ_{es05} および μ_{es1} と表わすと、

$$\mu_{es05} = Q_{05} / N_{s05} \dots \text{(式 3-1)}$$

$$\mu_{es1} = Q_1 / N_{s1} \dots \text{(式 3-2)}$$

となる。

表 3-12 に緩衝材あり評価試験体の等価せん断摩擦係数を示し、図 3-18 および表 3-13 に等価せん断摩擦係数と粗さ評価値との相関を示す。あわせて、2.6.3 項の (式 2-8) に示す等価摩擦係数と同様に、等価せん断摩擦係数もコンクリート強度の影響を受けることが予想されるので、(式 3-1) および (式 3-2) で求めた等価せん断摩擦係数をさらにコンクリートの代表圧縮強度の平方根で除した値 $\mu_{es05} / \sqrt{\sigma_B}$ および $\mu_{es1} / \sqrt{\sigma_B}$ についても同様の相関を示す。コンクリート強度を考慮しない場合の相関係数は $r=0.7436$ から 0.7855 までと相関は良好である。また、コンクリート強度を考慮する場合でも相関係数は $r=0.7789$ から 0.8077 までと同様に良好である。よって、等価せん断摩擦係数は粗さ評価値を用いて推定可能と判断される。また、コンクリート強度を考慮すると、相関が向上することから、コンクリート強度も等価せん断摩擦係数に影響をおよぼすと考えられる。 $\delta_H=0.5\text{mm}$

時よりも $\delta_H=1\text{mm}$ 時の方が回帰式の傾斜および切片が共に小さいのは、滑り変位の増加にともない接合面の粗さが崩れて、粗さが小さくなるためと考えられる。

なお、この項で求めた等価せん断摩擦係数が 1.2.2 項の表 1-5 から表 1-8 にかけての既往の研究による値よりも大きい。この原因としては、

- 1) 平行維持パンタグラフの存在により接合面の拘束が強くなったこと。すなわち、従来の S 型載荷方法による実験では、先打ち・後打ち両部分の平行が確保されず、接合面の目開き変位にアンバランスが生じやすかった。しかし平行維持パンタグラフの装着により、この点が解消され、結果として、先打ち・後打ち両部分の接着性が改善され、接合面の拘束が強くなった。
- 2) 既往の研究によるせん断摩擦力の評価には接合筋の降伏強度が用いられているが、この項では接合筋に実際に作用する引張力により近い「接合筋の軸方向力」を評価に用いている。よって、この項で得られた等価せん断摩擦係数には、接合筋の軸方向力に対する軸引張降伏荷重の比（すなわち 1.0 以上の値）の影響が見込まれた数値であること。などが考えられる。

また、2.6.3 項で得られた等価摩擦係数 μ_e と等価せん断摩擦係数の比較を図 3-19 に重ね書きして示す。なお、等価摩擦係数は（式 2-8）に示す様にコンクリート代表圧縮強度 σ_B による項を有するので、ここでは $\sigma_B=240\text{kgf/cm}^2$ と仮定した（式 2-10）を等価摩擦係数とする。

等価摩擦係数は滑り変位が生じる直前の状態を考慮しており、粗さの破壊がまだ生じていない状況を考慮した値である。しかし、3.5.2 項で示した通り、この項で考える等価せん断摩擦係数は、1.2.2 項で示した「側面の乗り上がりにより発生する摩擦力」ではなく、「側面の圧壊」の影響を多分に含んだ値となっている。つまり、「せん断摩擦係数」とは、実は「粗さの側面の圧壊の現象を摩擦に置き換えて表現したもの」と考えることができる。この様に、結果として等価摩擦係数と等価せん断摩擦係数は、互いに異なったせん断力伝達機構を「摩擦」という概念で表現したものであり、少なくとも両者を同一の値と見なすことはできないと判断される。

3.5.5 接合筋の負担せん断力

緩衝材を施さない試験体の接合筋には、だぼせん断力が作用する。そこで、D13 溝切り鉄筋を接合筋に用いた 9-1 試験体と 9-2 試験体、11-2 試験体の 3 体について、接合筋に貼付した歪みゲージによる $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時および $\delta_H=1\text{mm}$ 時での接合筋の歪み度測定結果から、各ゲージ貼付位置における接合筋の曲率を求める。そして、3.2.2 項で行った接合筋の曲げ試験結果との対応から、接合面直近の歪みゲージ貼付位置での曲げモーメントを求め、（式 3-3）および（式 3-4）により接合面位置で接合筋に作用する横方向力（「接合面位置における接合筋の負担せん断力」と定義する） Q_{s05} および Q_{s1} を算定する。

$$Q_{s05} = \Delta M_{s05} / x \cdots \text{(式 3-3)}$$

$$Q_{s1} = \Delta M_{s1} / x \cdots \text{(式 3-4)}$$

ここで、 ΔM_{s05} : $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時での接合面を挟んだ 2 箇所の歪みゲージ貼付位置（図 3-16）における接合筋の曲げモーメントの変化量

ΔM_{s1} : $\delta_H=1\text{mm}$ 時での接合面を挟んだ 2 箇所の歪みゲージ貼付位置（図 3-16）における接合筋の曲げモーメントの変化量

x : 上記の 2 箇所の歪みゲージ間の距離(=30mm)

$\delta_H=0.5\text{mm}$ 時および $\delta_H=1\text{mm}$ 時での接合筋の負担せん断力の大きさとせん断力に対する負担せん断力の割合を表 3-14 に示し、接合筋の負担せん断力と粗さ評価値との相関を

図 3-20 および表 3-15 に示す。標本数が少ないため、相関などの定量的な評価は難しいが、粗さ評価値が大きいほど、微小変形時における接合筋の負担せん断力は大きくなるとの定性的傾向は伺える。また、各微小変形時のせん断力に対する接合筋の負担せん断力の割合は、粗さ評価値が大きいほど小さく、滑り変位が大きくなるほど大きくなっている。すなわち、粗さ評価値の大きい接合面は小さい接合面に比べて相対的に剛性が大きくなり、コンクリートの負担するせん断力が大きくなること、また滑り変位が増えて接合面の粗さが崩れると、コンクリートが負担できなくなったせん断力を接合筋が負担する様になることを示している。

3.5.6 せん断力負担機構ごとの負担力の累加の妥当性

接合筋に緩衝材を施さない試験体では、3.5.4 項の等価せん断摩擦力（実際は粗さの側面支圧力）と 3.5.5 項の接合面位置における接合筋の負担せん断力によりせん断力を負担するはずである。そこで、表 3-13 による等価せん断摩擦係数と粗さ評価値の回帰式が正しいものと仮定した上で、接合筋に緩衝材を施さない 3 体の評価試験体について、実際の粗さ評価値を用いて回帰式から推定した等価せん断摩擦係数と実測した接合面位置における接合筋の軸方向力の積を「等価せん断摩擦力 F 」とし、その値と実測した接合面位置における接合筋の負担せん断力との和（単純累加）で、実際のせん断力が評価可能かどうかを確かめる。

表 3-16 に各機構ごとの負担せん断力の計算結果を示す。この表より各機構の負担せん断力の和（表 3-16 の右から 3 列目）では、実際のせん断力を大幅に過大評価することが分かる。よって、各機構ごとの負担せん断力の単純な累加による試験体の耐力評価は無理である。このことから、例えば実際のプレキャスト構造の接合部で、せん断力を負担する複数の機構の組み合わせにより接合部が構成されているとすると、その耐力評価をする場合、組み合わせに用いた機構のそれぞれの構成則（せん断力-滑り変位関係）を単独で求めた上でそれらを重ね合わせるにより接合部全体の耐力評価を行うことは危険であり、あくまで実際に用いられる組み合わせをそのまま用いた試験体により実験あるいは解析を行って接合部の安全性を確認することが必要といえる^{3.5)}。まして、その各機構の構成則から各機構の最大耐力のみを求め、それらの単純累加を接合部全体の最大耐力として評価することは慎むべきことといえる。

3.5.7 粗さ評価値を用いてせん断力を推定できる範囲

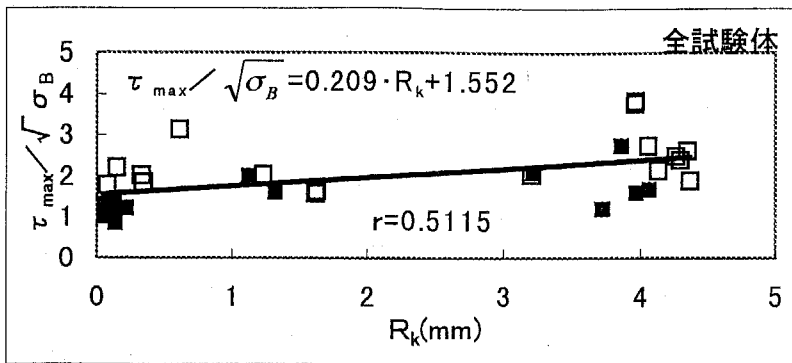
3.5.1 項では、微小変形時に限ってせん断力と粗さ評価値の相関が良好であるとの結果を得た。この項では、中変形時にも範囲を広げて、粗さ評価値とコンクリート代表圧縮強度で試験体のせん断力が推定可能な範囲を明らかにする。

なお、対象となるのは評価試験体であるが、8-2 試験体と 9-1 試験体については中変形時に変位計が脱落して滑り変位が不明になったため、この項の対象からは除外した。せん断力の指標値としては、せん断力を接合面面積で除したせん断応力度 τ_* （*は滑り変位の大きさを表す添え字で、例えば τ_2 とは $\delta_H=2\text{mm}$ 時のことであり、また $\tau_{3.5}$ とは $\delta_H=3.5\text{mm}$ 時のことである）をさらにコンクリートの代表圧縮強度の平方根で除した $\tau_*/\sqrt{\sigma_B}$ を採用

する。表 3-17 に滑り変位の大きさ別の $\tau_*/\sqrt{\sigma_B}$ を示す。

$\tau_*/\sqrt{\sigma_B}$ と粗さ評価値との相関を図 3-21 および表 3-18 に示す。相関係数の大きさを比較すると、滑り変位が大きくなるにつれて相関係数が単調に減少し、せん断力と粗さ評価

値との相関が弱くなっていることが分かる。相関係数の大小によりその回帰の可否を判断する場合、「相関係数がいくら以上で回帰が有意」を判断するのは難しい問題ではあるが、仮に相関係数 $r=0.7$ 程度以上を回帰有意とすると、粗さ評価値と試験体のコンクリート代表圧縮強度によるせん断力の推定の範囲の限界は、 $\delta_H=1.5\text{mm}$ 程度までと判断される。



■は緩衝材あり評価試験体
□は緩衝材なし評価試験体

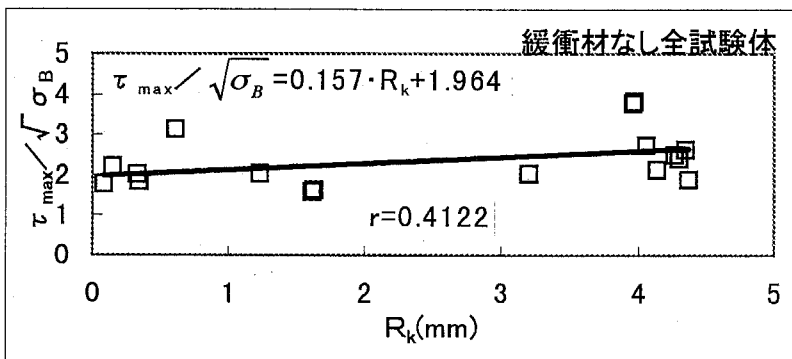
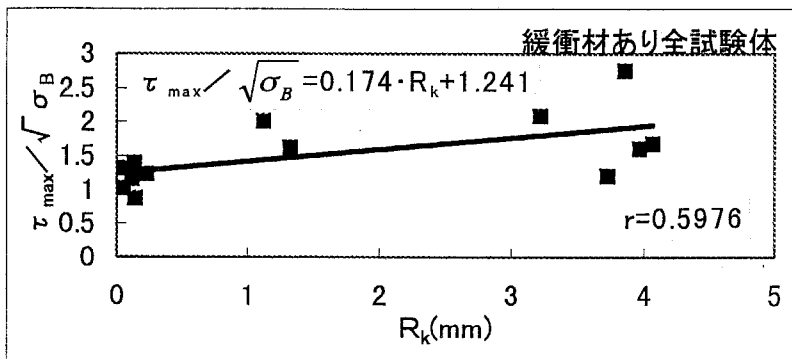
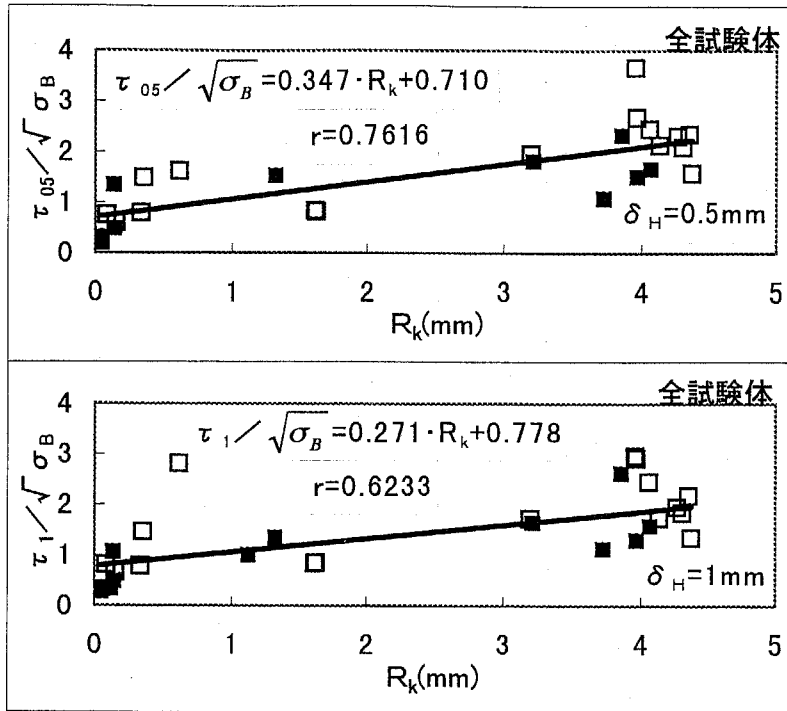


図 3-12 最大耐力と粗さ評価値との相関関係



■は緩衝材あり評価試験体
□は緩衝材なし評価試験体

図 3-13(a) 微小変形時のせん断力と粗さ評価値との相関関係 (その 1) (全試験体)

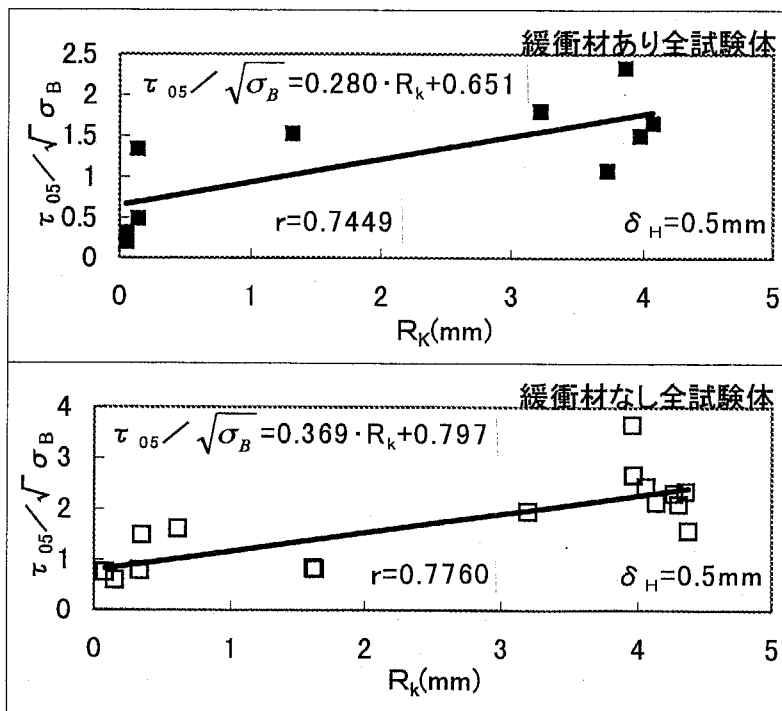


図 3-13(b) 微小変形時のせん断力と粗さ評価値との相関関係 (その 2) ($\delta_H = 0.5\text{mm}$)

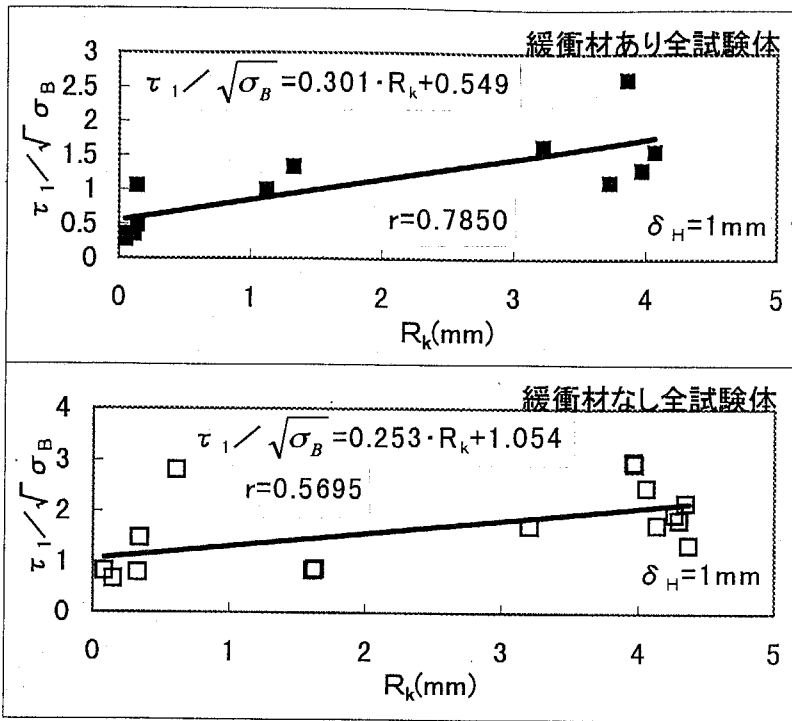


図 3-13(c) 微小変形時のせん断力と粗さ評価値との相関関係
(その 3) ($\delta_H = 1\text{mm}$)

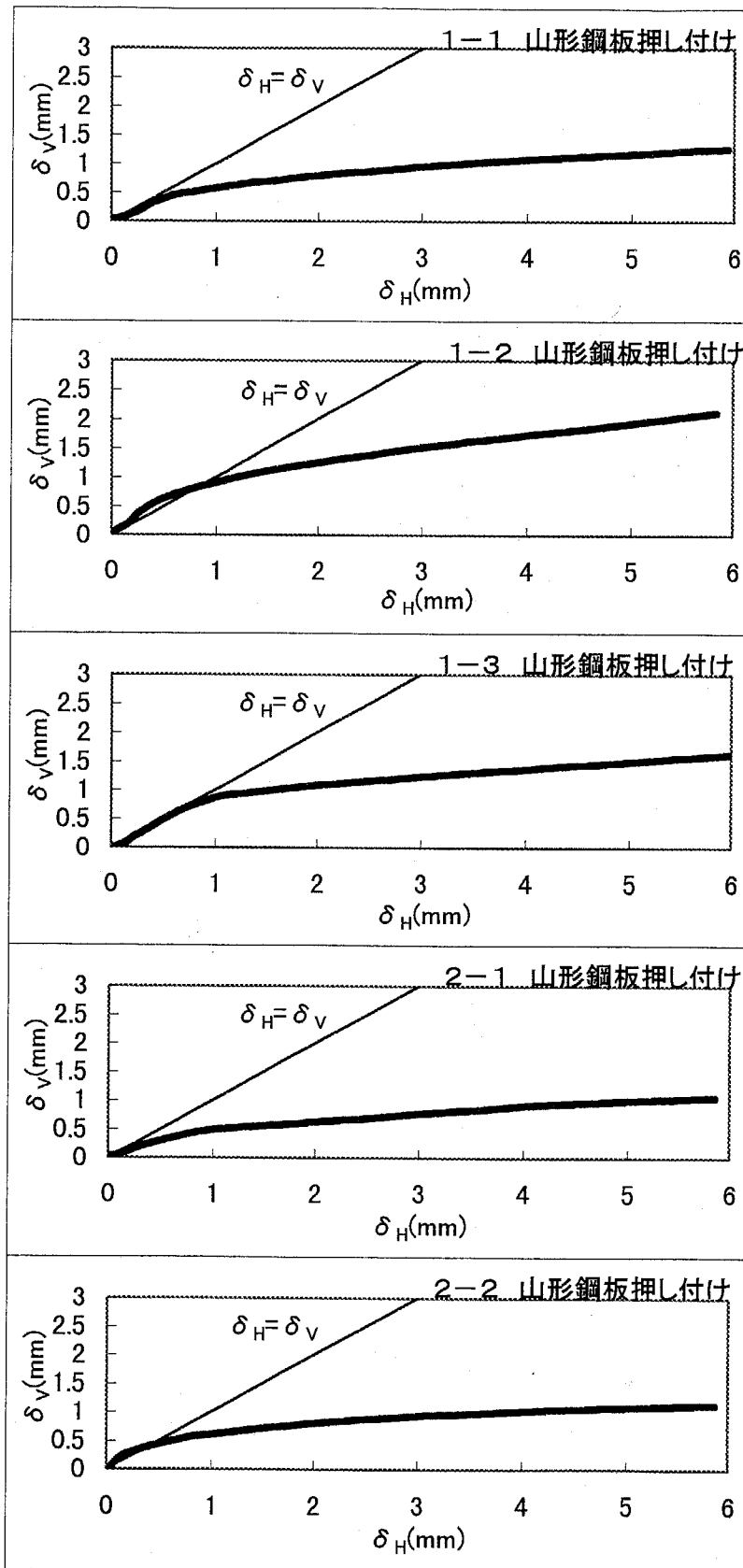


図 3-14(a) 山形鋼板押し付け試験体の
目開き変位-滑り変位関係 (その 1)

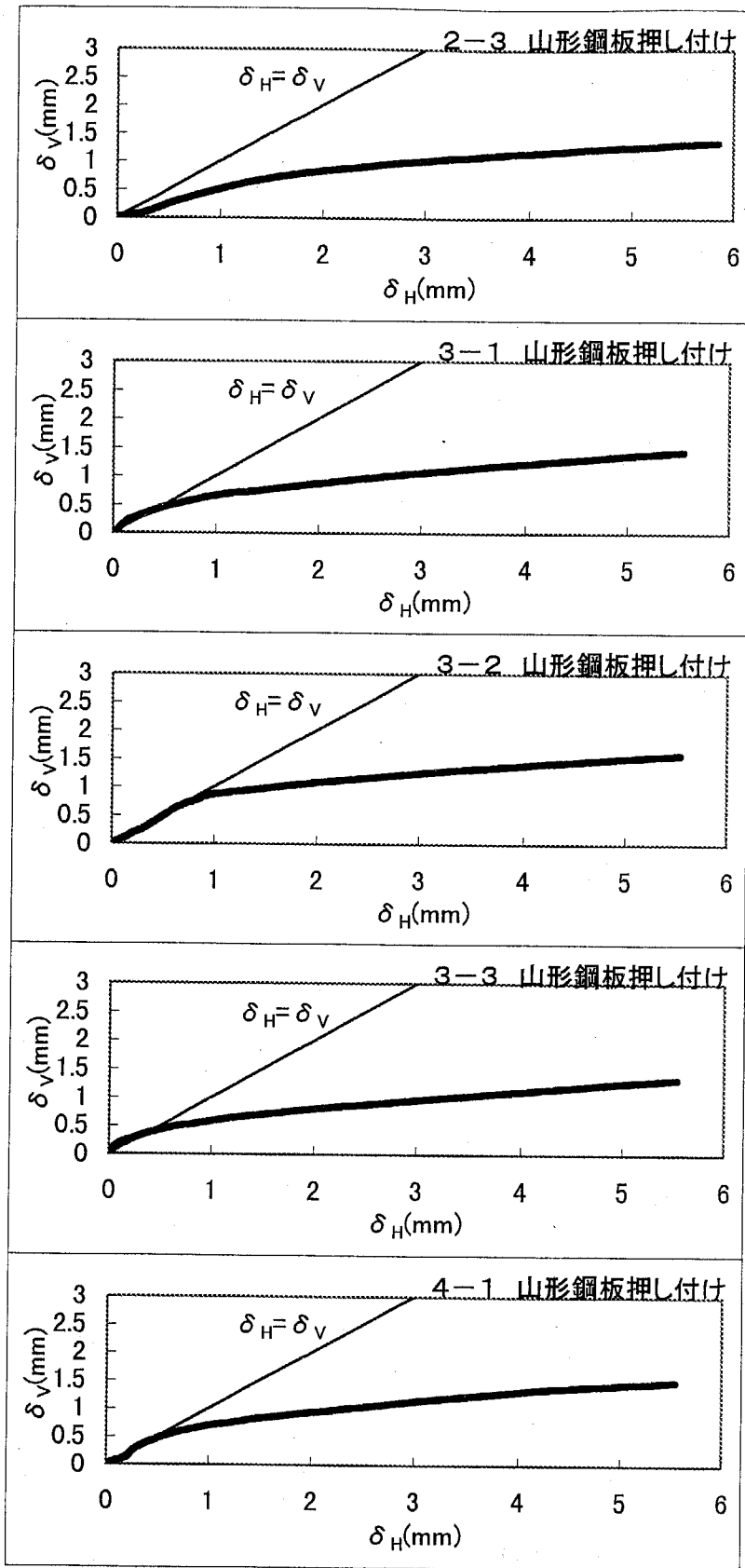


図 3-14(b) 山形鋼板押し付け試験体の
目開き変位—滑り変位関係 (その 2)

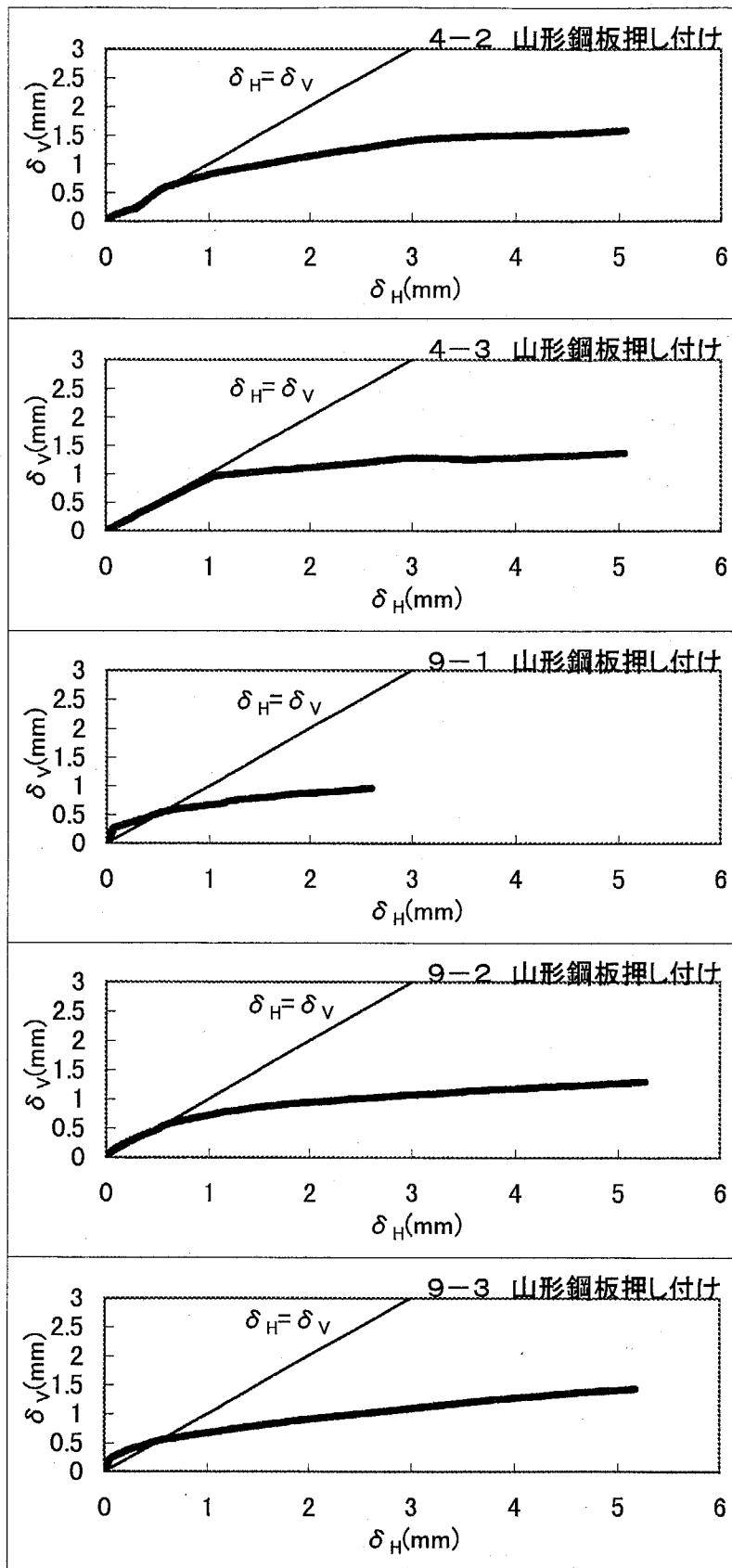


図 3-14(c) 山形鋼板押し付け試験体の
目開き変位-滑り変位関係 (その 3)

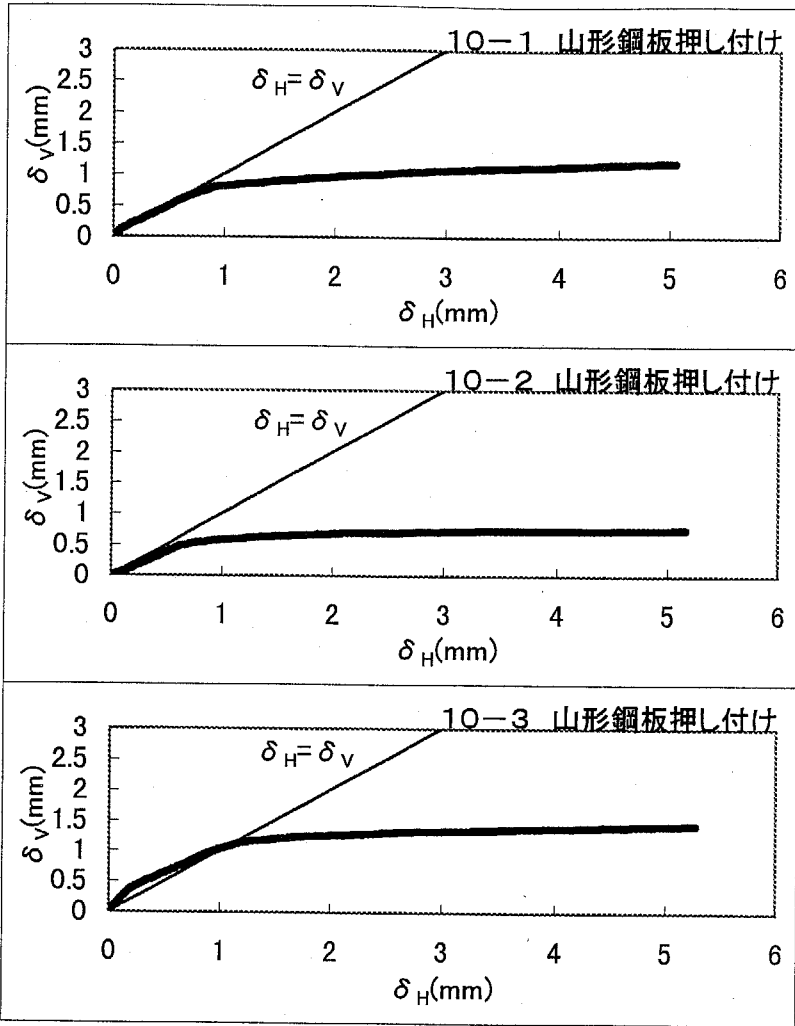


図 3-14(d) 山形鋼板押し付け試験体の
目開き変位-滑り変位関係 (その 4)

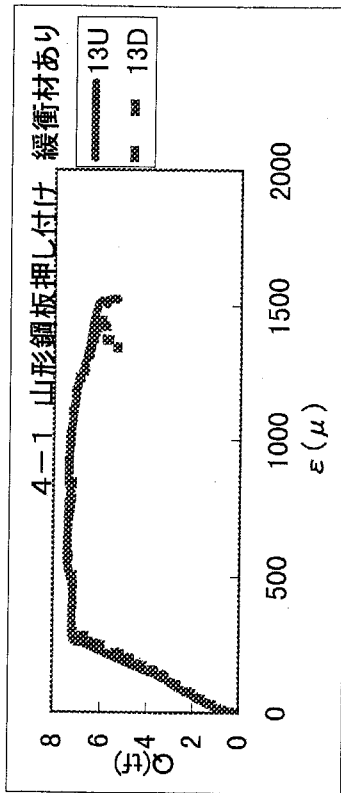
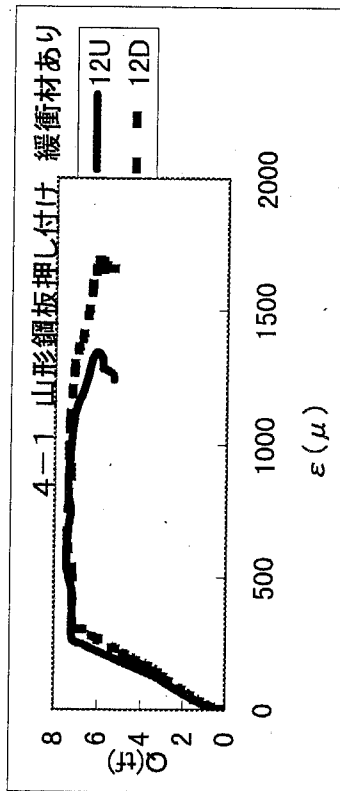
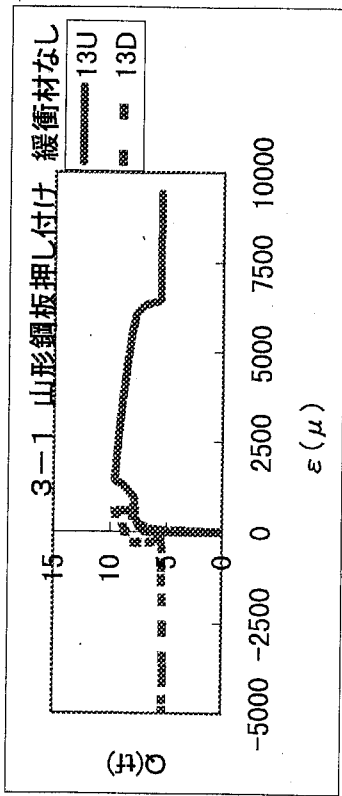
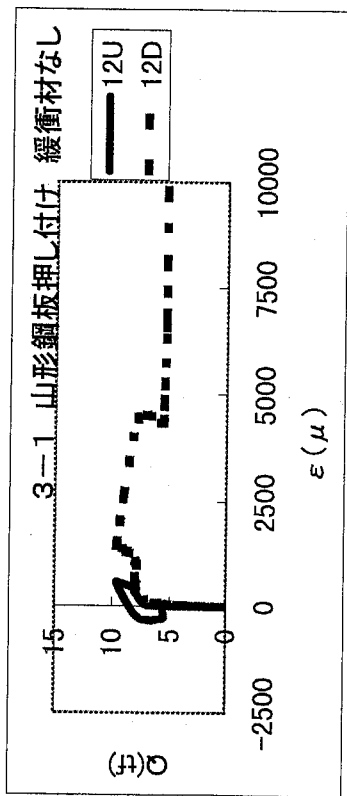


図 3-15(a) 評価試験体のせん断力-接合筋の軸方向歪み関係 (その 1)

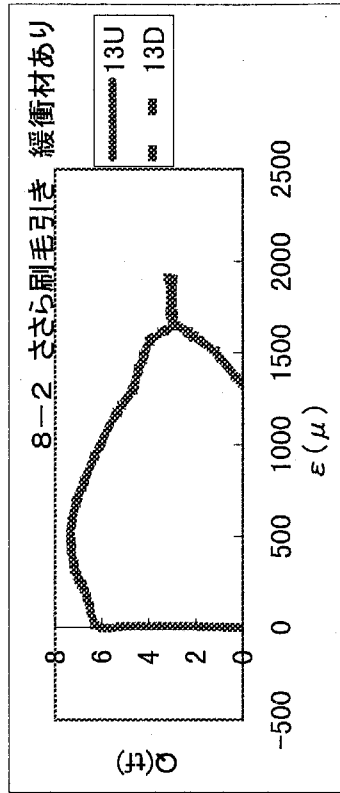
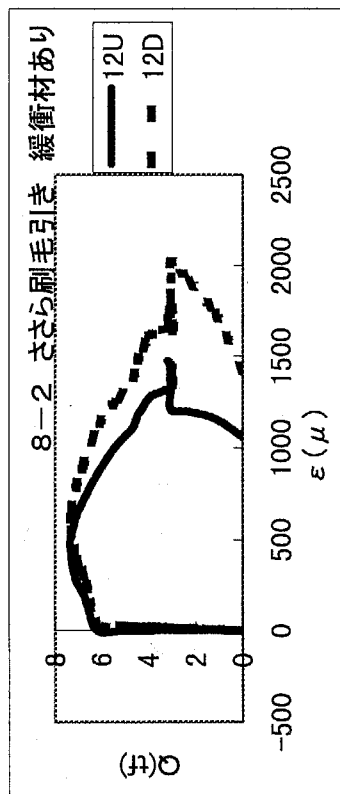
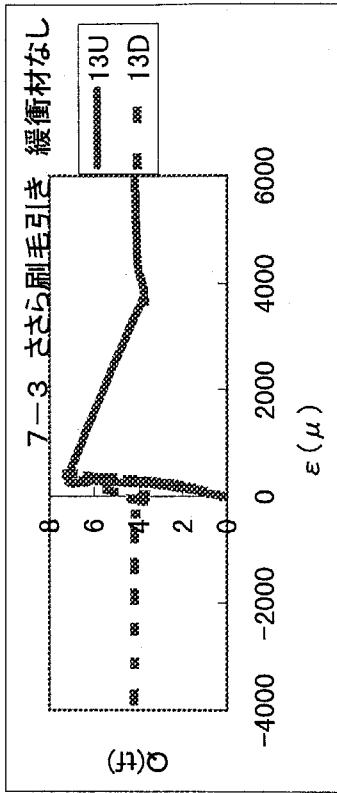
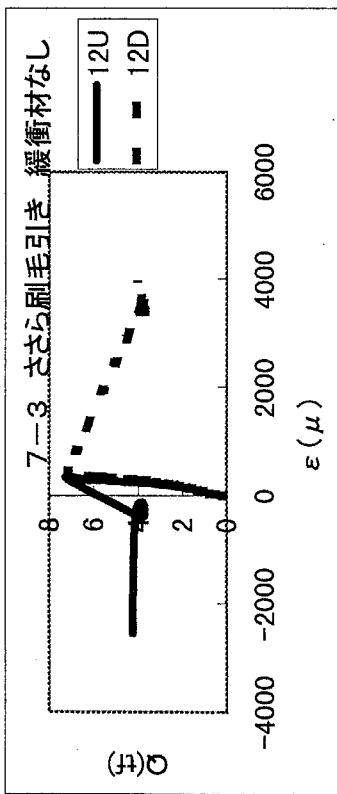


図 3-15(b) 評価試験体のせん断力-接合筋の軸方向歪み関係 (その 2)

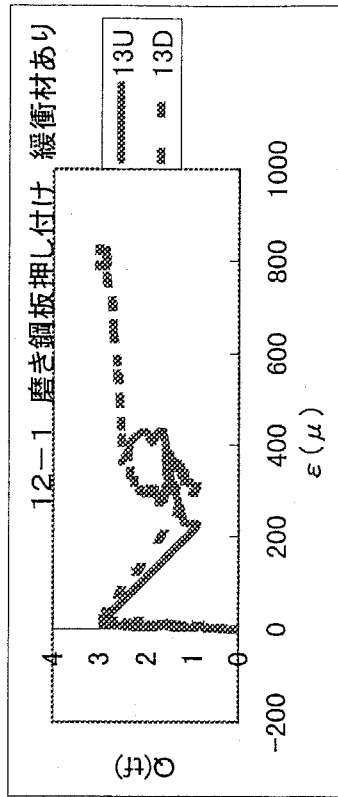
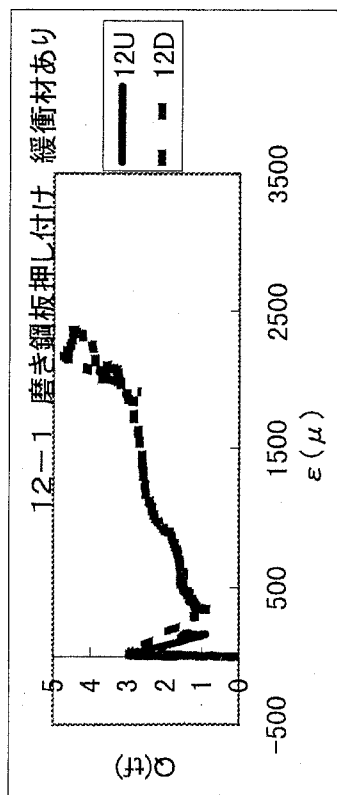
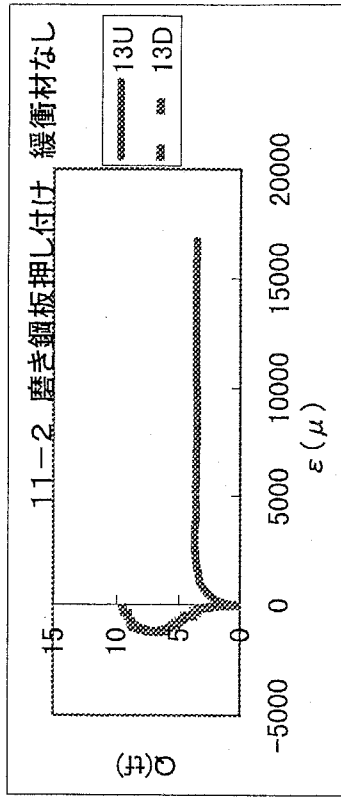
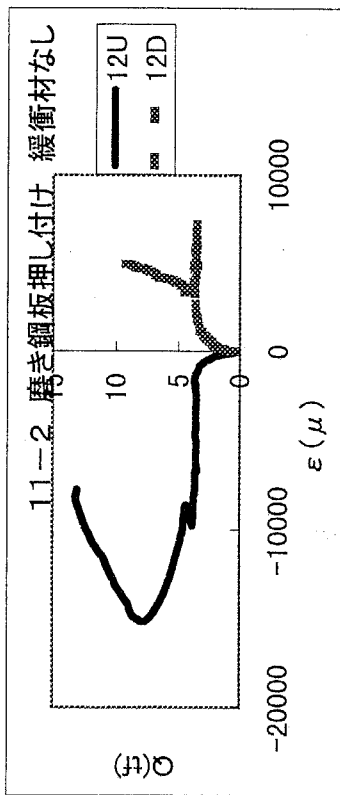


図 3-15(c) 評価試験体のせん断力-接合筋の軸方向歪み関係 (その 3)

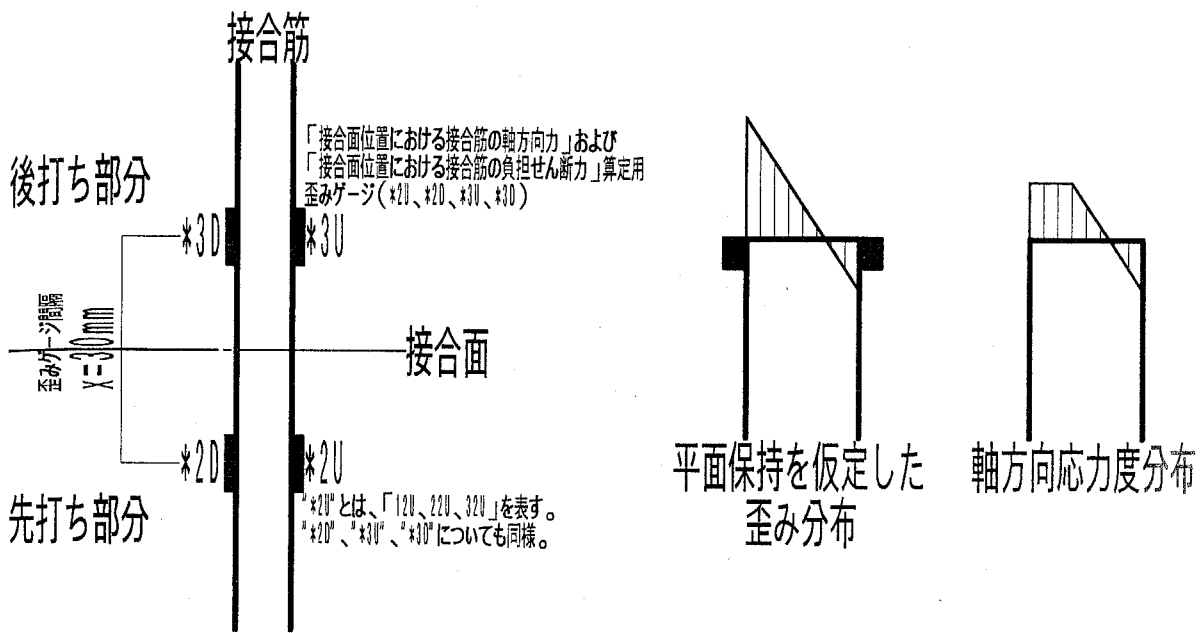


図 3-16 接合面位置における接合筋の軸方向力算定方法

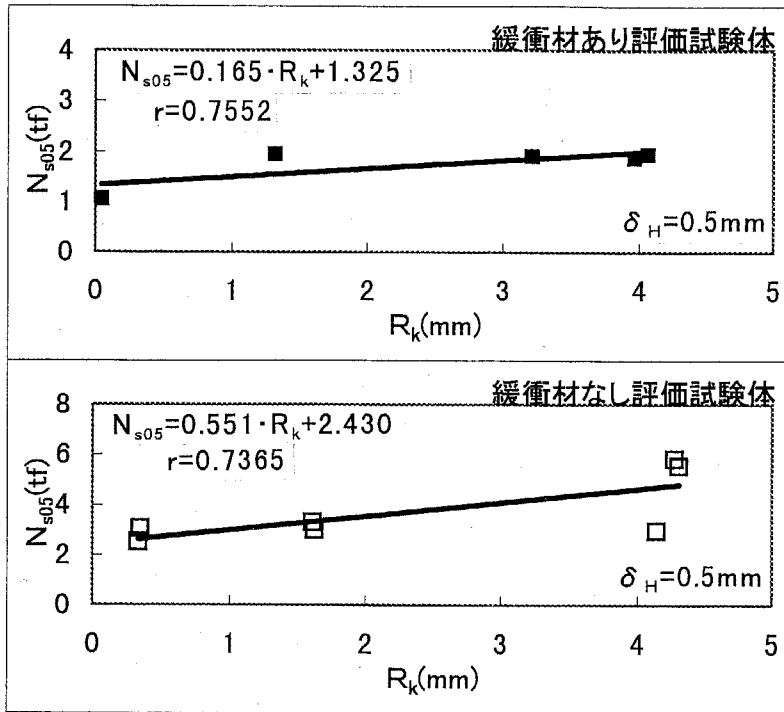


図 3-17(a) 微小変形時の接合面位置における接合筋軸方向力と粗さ評価値との相関関係 (その 1) ($\delta_H=0.5\text{mm}$)

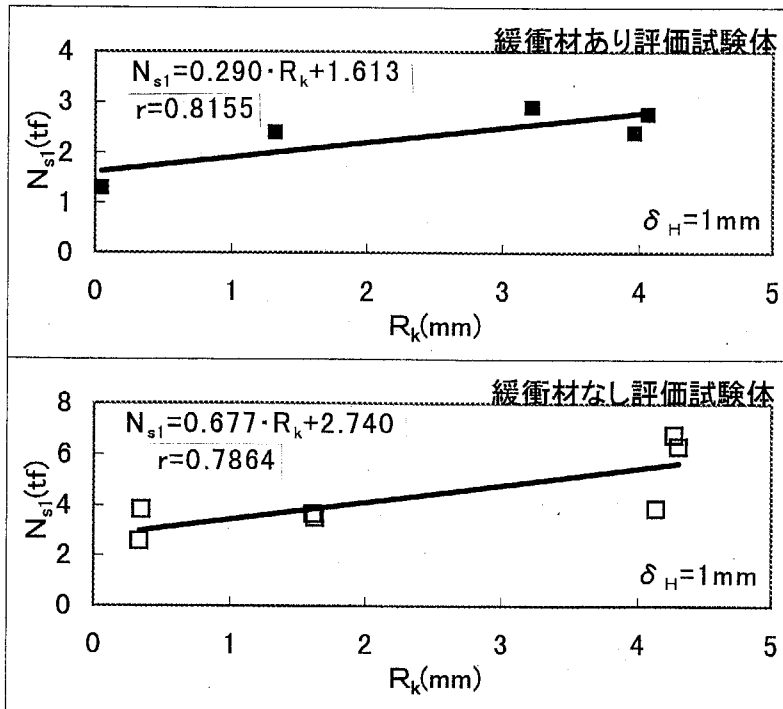


図 3-17(b) 微小変形時の接合面位置における接合筋軸方向力と粗さ評価値との相関関係 (その 2) ($\delta_H=1\text{mm}$)

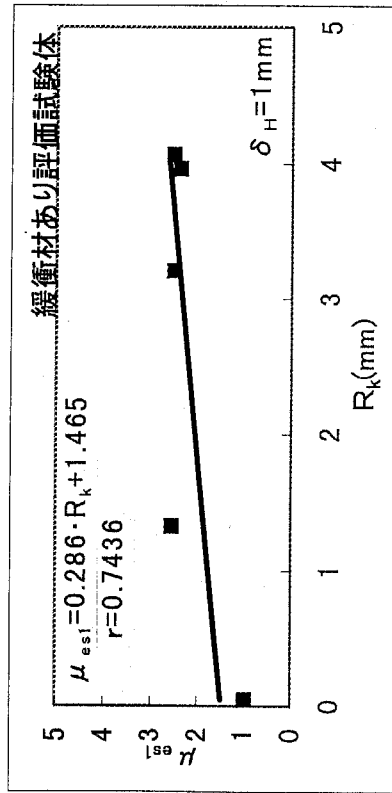
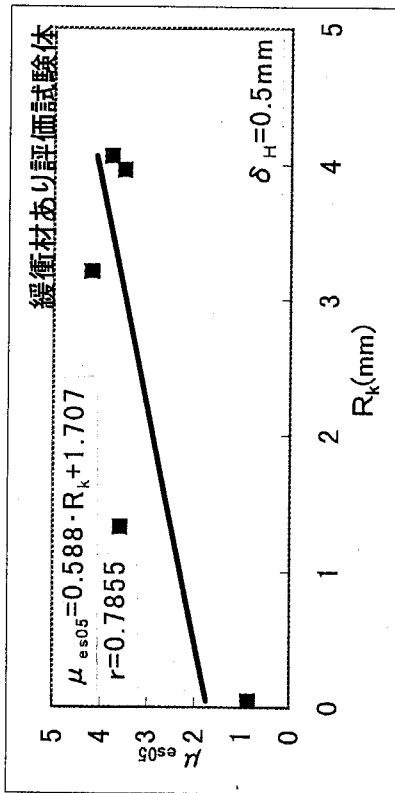
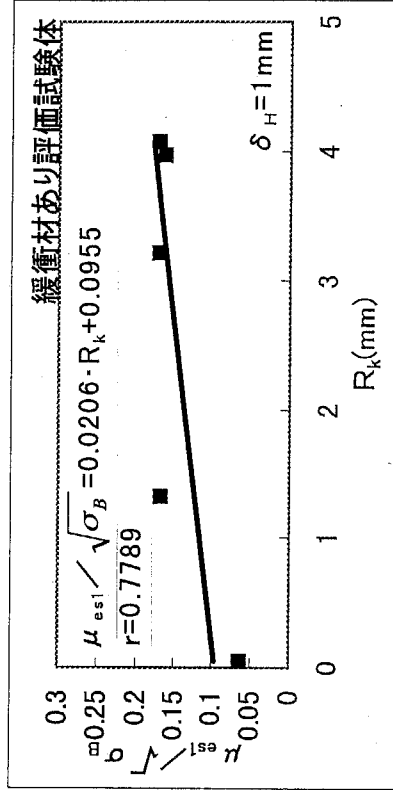
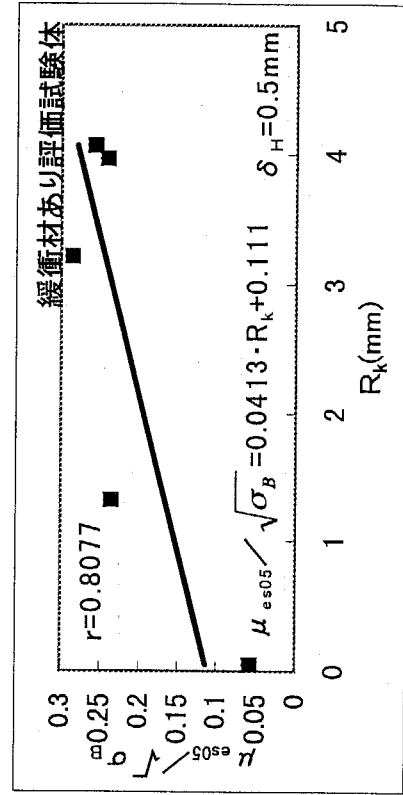
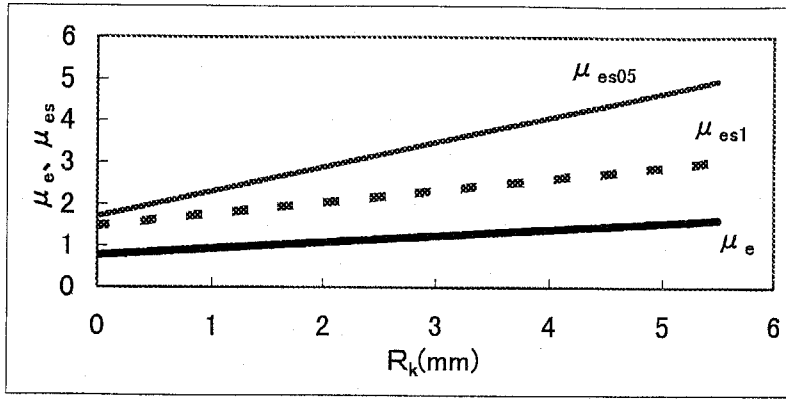


図 3-18 微小変形時の等価せん断摩擦係数と粗さ評価値との
相関関係



μ_e : 等価摩擦係数
 $\mu_{es0.5}$: $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時での等価せん断摩擦係数
 μ_{es1} : $\delta_H=1\text{mm}$ 時での等価せん断摩擦係数

図 3-19 等価摩擦係数と等価せん断摩擦係数

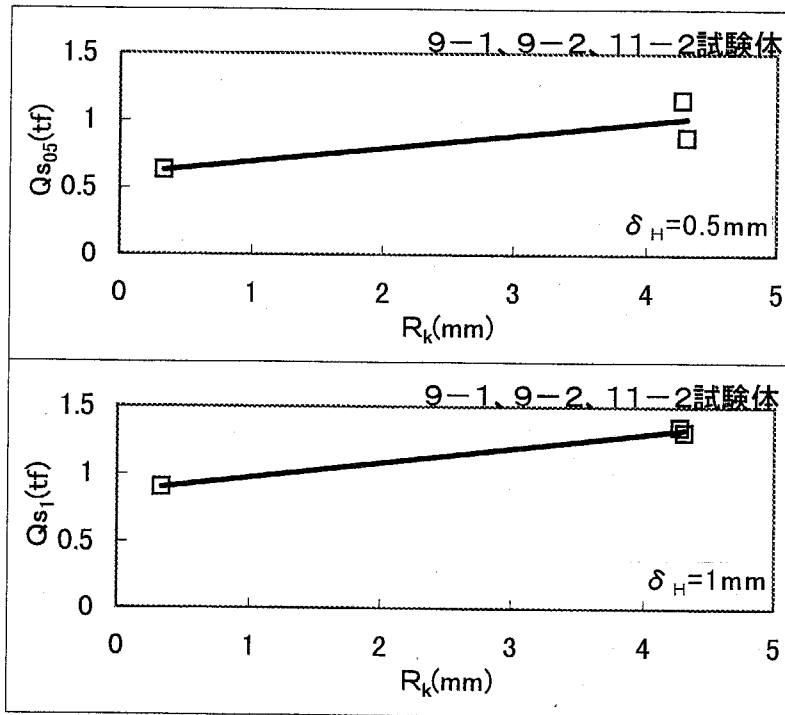


図 3-20 微小変形時の接合面位置における接合筋の負担せん断力と粗さ評価値との相関関係

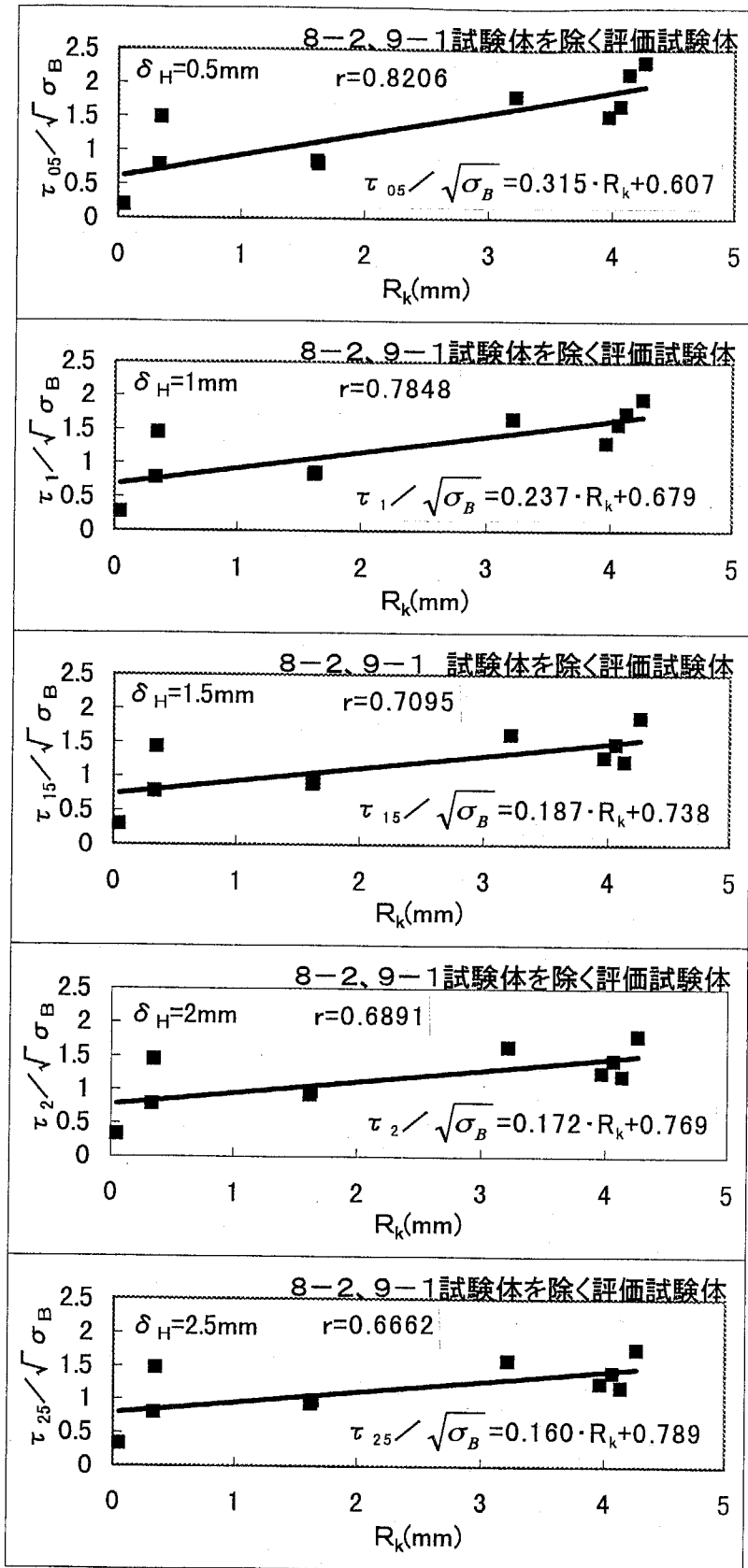


図 3-21(a) 中変形時のせん断力と粗さ評価値との相関関係 (その 1) ($\delta_H=0.5\text{mm} \sim 2.5\text{mm}$)

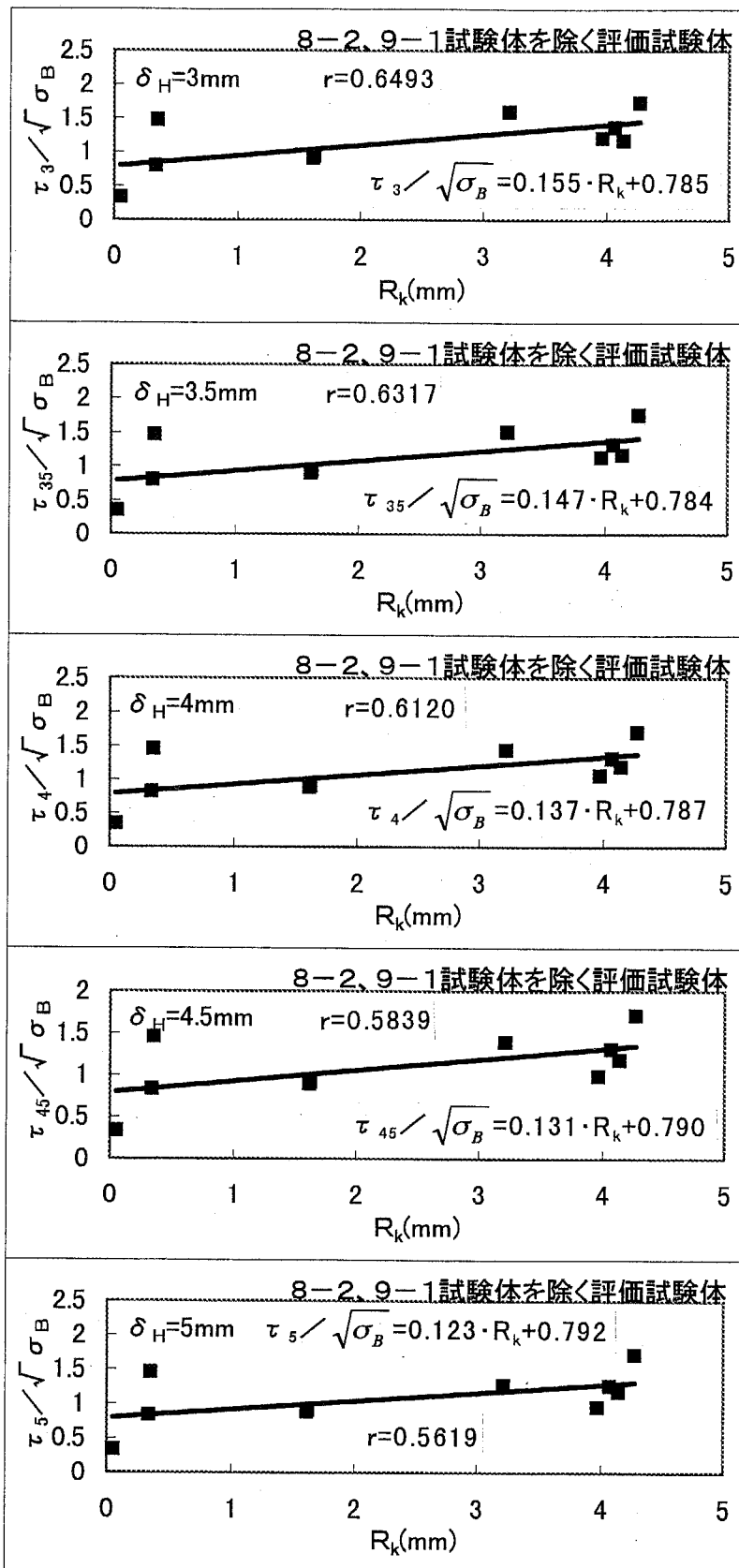


図 3-21(b) 中変形時のせん断力と粗さ評価値との相関関係 (その 2) ($\delta_H=3\text{mm} \sim 5\text{mm}$)

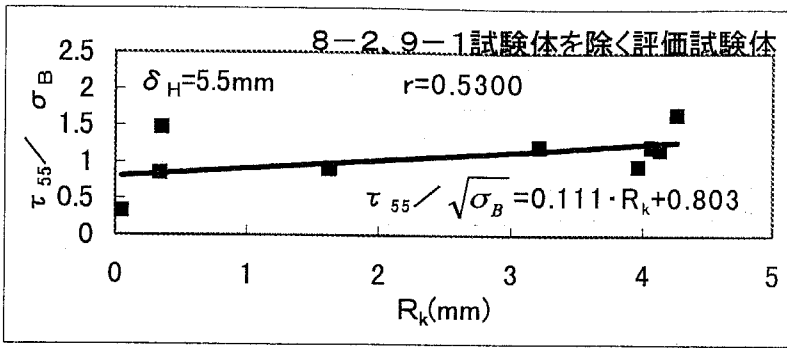


図 3-21(c) 中変形時のせん断力と粗さ評価値との相関関係 (その 3) ($\delta_H=5.5\text{mm}$)

表 3-8 最大耐力と粗さ評価値との相関

| 耐力・粗さの指標 | $R_k(0 < R_k < 5)$ | | |
|--------------------------------|--|--|--|
| | 全試験体* | 緩衝材を施した試験体のみ | 緩衝材を施さない試験体のみ |
| $\tau_{max} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.209 \cdot R_k + 1.552$ r=0.5115 | $\tau_{max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.174 \cdot R_k + 1.241$ r=0.5976 | $\tau_{max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.157 \cdot R_k + 1.964$ r=0.4122 |

* : 3.5.1 項の 6 試験体を除く。

表 3-9 微小変形時のせん断力と粗さ評価値との相関

| 耐力・粗さの指標 | 滑り変位 δ_H | $R_k(0 < R_k < 5)$ | | |
|---|--------------------|---|---|---|
| | | 全試験体* | 緩衝材を施した試験体のみ | 緩衝材を施さない試験体のみ |
| $\tau_{0.05} / \sqrt{\sigma_B}$ $\tau_1 / \sqrt{\sigma_B}$ | 0.5mm | $\tau_{0.05} / \sqrt{\sigma_B} = 0.347 \cdot R_k + 0.710$ r=0.7616 | $\tau_{0.05} / \sqrt{\sigma_B} = 0.280 \cdot R_k + 0.651$ r=0.7449 | $\tau_{0.05} / \sqrt{\sigma_B} = 0.369 \cdot R_k + 0.797$ r=0.7760 |
| | 1mm | $\tau_1 / \sqrt{\sigma_B} = 0.271 \cdot R_k + 0.729$ r=0.6233 | $\tau_1 / \sqrt{\sigma_B} = 0.301 \cdot R_k + 0.549$ r=0.7850 | $\tau_1 / \sqrt{\sigma_B} = 0.253 \cdot R_k + 1.054$ r=0.5695 |

* : 3.5.1 項の 6 試験体を除く。

表 3-10 微小変形時の接合面位置における接合筋の軸方向力

| 試験体名 | 微小変形時の接合面位置における接合筋の軸方向力 | |
|----------------|---|--|
| | $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時 $N_{s05}(\text{tf})$ | $\delta_H=1\text{mm}$ 時 $N_{s1}(\text{tf})$ |
| 緩衝材あり 評価試験体 | 2-1 | 1.87 |
| | 4-1 | 1.93 |
| | 4-2 | 1.90 |
| | 8-2 | 1.94 |
| | 12-1 | 1.05 |
| 緩衝材なし 評価試験体 | 3-1 | 2.96 |
| | 5-3 | 3.05 |
| | 7-2 | 2.99 |
| | 7-3 | 3.29 |
| | 9-1 | 5.55 |
| | 9-2 | 5.84 |
| 11-2 | 2.50 | |

表 3-11 微小変形時の接合面位置における接合筋の軸方向力と粗さ評価値との相関

| 滑り変位 δ_H | 接合面位置における 接合筋の軸方向力 | $R_k(0 < R_k < 5)$ | |
|--------------------|-----------------------|---|---|
| | | 緩衝材を施した評価試験体のみ | 緩衝材を施さない評価試験体のみ |
| 0.5mm | N_{s05} | $N_{s05}=0.165 \cdot R_k + 1.325$ $r=0.7552$ | $N_{s05}=0.551 \cdot R_k + 2.430$ $r=0.7365$ |
| 1mm | N_{s1} | $N_{s1}=0.290 \cdot R_k + 1.613$ $r=0.8155$ | $N_{s1}=0.677 \cdot R_k + 2.740$ $r=0.7864$ |

表 3-12 微小変形時の等価せん断摩擦係数

| 試験体名 | $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時 | | $\delta_H=1\text{mm}$ 時 | |
|------|---------------------------|---------------|-------------------------|------------|
| | N_{s05} (tf) | Q_{05} (tf) | N_{s1} (tf) | Q_1 (tf) |
| 2-1 | 1.87 | 6.586 | 2.39 | 5.682 |
| 4-1 | 1.93 | 7.318 | 2.76 | 6.961 |
| 4-2 | 1.90 | 7.977 | 2.90 | 7.261 |
| 8-2 | 1.94 | 6.960 | 2.39 | 6.099 |
| 12-1 | 1.05 | 0.917 | 1.29 | 1.262 |

$$\mu_{es05} = Q_{05} / N_{s05} \quad \mu_{es1} = Q_1 / N_{s1}$$

表 3-13 微小変形時の等価せん断摩擦係数と粗さ評価値との相関

| 滑り変位 δ_H | 等価せん断摩擦係数 | $R_k(0 < R_k < 5)$ | コンクリート強度を考慮した等価せん断摩擦係数 | $R_k(0 < R_k < 5)$ |
|-----------------|--------------|--|--------------------------------|---|
| | | 緩衝材を施した評価試験体のみ | | |
| 0.5mm | μ_{es05} | $\mu_{es05} = 0.588 \cdot R_k + 1.707$ $r = 0.7855$ | $\mu_{es05} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\mu_{es05} / \sqrt{\sigma_B} = 0.0413 \cdot R_k + 0.111$ $r = 0.8077$ |
| 1mm | μ_{es1} | $\mu_{es1} = 0.286 \cdot R_k + 1.465$ $r = 0.7436$ | $\mu_{es1} / \sqrt{\sigma_B}$ | $\mu_{es1} / \sqrt{\sigma_B} = 0.0206 \cdot R_k + 0.0955$ $r = 0.7789$ |

表 3-14 微小変形時の接合面位置における接合筋の負担せん断力

| 試験体名 | 微小変形時の接合面位置における接合筋の負担せん断力 Q_s | | せん断力に占める Q_s の割合 (%) | |
|------|--|---------------------------------------|------------------------|--------------------|
| | $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時 Q_{s05} (tf) | $\delta_H=1\text{mm}$ 時 Q_{s1} (tf) | Q_{s05} (tf) | Q_{s1} / Q_{s05} |
| 9-1 | 0.88 | 1.31 | 9.592 | 9.18 |
| 9-2 | 1.15 | 1.35 | 10.594 | 10.9 |
| 11-2 | 0.63 | 0.90 | 3.586 | 17 |

表 3-15 微小変形時の接合面位置における接合筋の負担せん断力と粗さ評価値との相関

表 3-15 微小変形時の接合面位置における接合筋の負担せん断力と粗さ評価値との相関

| 滑り変位 δ_H | 接合筋の 負担せん断力 Q_{s05} | $R_k (0 < R_k < 5)$ |
|--------------------|--|---------------------|
| | | 9-1、9-2、11-2 試験体 |
| 0.5mm | $Q_{s05} = 0.0975 \cdot R_k + 0.596$ $r = 0.8470$ | |
| 1mm | $Q_{s1} = 0.109 \cdot R_k + 0.866$ $r = 0.9958$ | |

表 3-16(a) 各機構ごとの負担せん断力 (その 1) ($\delta_H = 0.5\text{mm}$)

| 試験 体名 | $\delta_H = 0.5\text{mm}$ 時の各機構の負担せん断力 | | | | | せん断力 $Q_{05}(\text{tf})$ | $Q_{s05} + F_{05}$ (tf) | $Q_{05} / (Q_{s05} + F_{05})$ |
|----------|--|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | 接合筋 Q_{s05} (tf) | 等価せん断摩擦係数 F_{05} | | | | | | |
| | | 粗さ評価値 $R_k(\text{mm})$ | 等価せん断 摩擦係数 μ_{es05} | 接合筋 軸方向力 $N_{s05}(\text{tf})$ | $F_{05}(\text{tf})$ | | | |
| 9-1 | 0.88 | 4.305 | 4.24 | 5.55 | 23.5 | 24.3 | 0.395 | |
| 9-2 | 1.15 | 4.272 | 4.22 | 5.84 | 24.6 | 25.7 | 0.412 | |
| 11-2 | 0.63 | 0.332 | 1.90 | 2.50 | 4.75 | 5.38 | 0.667 | |

表 3-11 より $\mu_{es05} = 0.588 \cdot R_k + 1.707$ $F_{05} = \mu_{es05} \cdot N_{s05}$

表 3-16(b) 各機構ごとの負担せん断力 (その 2) ($\delta_H = 1\text{mm}$)

| 試験 体名 | $\delta_H = 1\text{mm}$ 時の各機構の負担せん断力 | | | | | せん断力 $Q_1(\text{tf})$ | $Q_{s1} + F_1$ (tf) | $Q_1 / (Q_{s1} + F_1)$ |
|----------|--------------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| | 接合筋 Q_{s1} (tf) | 等価せん断摩擦係数 F_1 | | | | | | |
| | | 粗さ評価値 $R_k(\text{mm})$ | 等価せん断 摩擦係数 μ_{es1} | 接合筋 軸方向力 $N_{s1}(\text{tf})$ | $F_1(\text{tf})$ | | | |
| 9-1 | 1.31 | 4.305 | 2.70 | 6.31 | 17.0 | 18.3 | 0.461 | |
| 9-2 | 1.35 | 4.272 | 2.69 | 6.78 | 18.2 | 19.5 | 0.458 | |
| 11-2 | 0.90 | 0.332 | 1.56 | 2.57 | 4.01 | 4.91 | 0.731 | |

表 3-11 より $\mu_{es1} = 0.286 \cdot R_k + 1.465$ $F_1 = \mu_{es1} \cdot N_{s1}$

表 3-17 微小変形時から中変形時にかけてのせん断力の指標値

| 試験体名 | | 2-1 | 3-1 | 4-1 | 4-2 | 5-3 | 7-2 | 7-3 | 9-2 | 11-2 | 12-1 |
|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| δ_H (mm) | 粗さ評価値 R_k (mm) | 3.968 | 4.140 | 4.068 | 3.213 | 0.347 | 1.633 | 1.621 | 4.272 | 0.332 | 0.049 |
| | $\tau_{0.5} / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.51 | 2.13 | 1.66 | 1.81 | 1.48 | 0.805 | 0.840 | 2.31 | 0.782 | 0.201 |
| | $\tau_1 / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.30 | 1.74 | 1.58 | 1.64 | 1.45 | 0.852 | 0.833 | 1.95 | 0.783 | 0.277 |
| | $\tau_{1.5} / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.29 | 1.22 | 1.49 | 1.62 | 1.44 | 0.913 | 0.900 | 1.87 | 0.785 | 0.300 |
| | $\tau_2 / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.26 | 1.20 | 1.44 | 1.63 | 1.45 | 0.976 | 0.921 | 1.80 | 0.777 | 0.326 |
| | $\tau_{2.5} / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.24 | 1.19 | 1.40 | 1.58 | 1.47 | 0.979 | 0.936 | 1.76 | 0.794 | 0.332 |
| | $\tau_3 / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.20 | 1.17 | 1.37 | 1.59 | 1.47 | 0.950 | 0.914 | 1.74 | 0.791 | 0.333 |
| | $\tau_{3.5} / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.14 | 1.17 | 1.32 | 1.51 | 1.46 | 0.933 | 0.892 | 1.76 | 0.795 | 0.348 |
| | $\tau_4 / \sqrt{\sigma_B}$ | 1.06 | 1.19 | 1.32 | 1.44 | 1.46 | 0.913 | 0.880 | 1.70 | 0.824 | 0.340 |
| | $\tau_{4.5} / \sqrt{\sigma_B}$ | 0.983 | 1.17 | 1.31 | 1.39 | 1.45 | 0.911 | 0.886 | 1.71 | 0.832 | 0.335 |
| | $\tau_5 / \sqrt{\sigma_B}$ | 0.960 | 1.18 | 1.26 | 1.27 | 1.46 | 0.911 | 0.888 | 1.72 | 0.833 | 0.338 |
| $\tau_{5.5} / \sqrt{\sigma_B}$ | 0.947 | 1.18 | 1.21 | 1.21 | 1.47 | 0.915 | 0.900 | 1.65 | 0.848 | 0.327 | |

τ^* : 各滑り変位時のせん断力を接合面積 $A(=300\text{cm}^2)$ で除したせん断応力度 (kgf/cm^2)

σ_B : コンクリートの代表圧縮強度 (kgf/cm^2)

表 3-18 せん断力と粗さ評価値との相関

| δ_H (mm) | 回帰式 $\tau_* / \sqrt{\sigma_B} = a \cdot R_k + b$ | | | 備考 |
|--------------------|---|---------|-----------|-------------|
| | 傾斜 a | 切片 b | 相関係数 r | |
| 0.5 | 0.315 | 0.607 | 0.8206 | 傾斜値最大・切片値最小 |
| 1 | 0.237 | 0.679 | 0.7848 | |
| 1.5 | 0.187 | 0.738 | 0.7095 | |
| 2 | 0.172 | 0.769 | 0.6891 | |
| 2.5 | 0.160 | 0.789 | 0.6662 | |
| 3 | 0.155 | 0.785 | 0.6493 | |
| 3.5 | 0.147 | 0.784 | 0.6317 | |
| 4 | 0.137 | 0.787 | 0.6120 | |
| 4.5 | 0.131 | 0.790 | 0.5839 | |
| 5 | 0.123 | 0.792 | 0.5619 | |
| 5.5 | 0.111 | 0.803 | 0.5300 | 傾斜値最小・切片値最大 |

τ_* : 各滑り変位時のせん断力を接合面面積 ($A=300\text{cm}^2$) で除した値。

τ_* 、 σ_B の単位は kgf/cm^2 、 R_k の単位は mm。

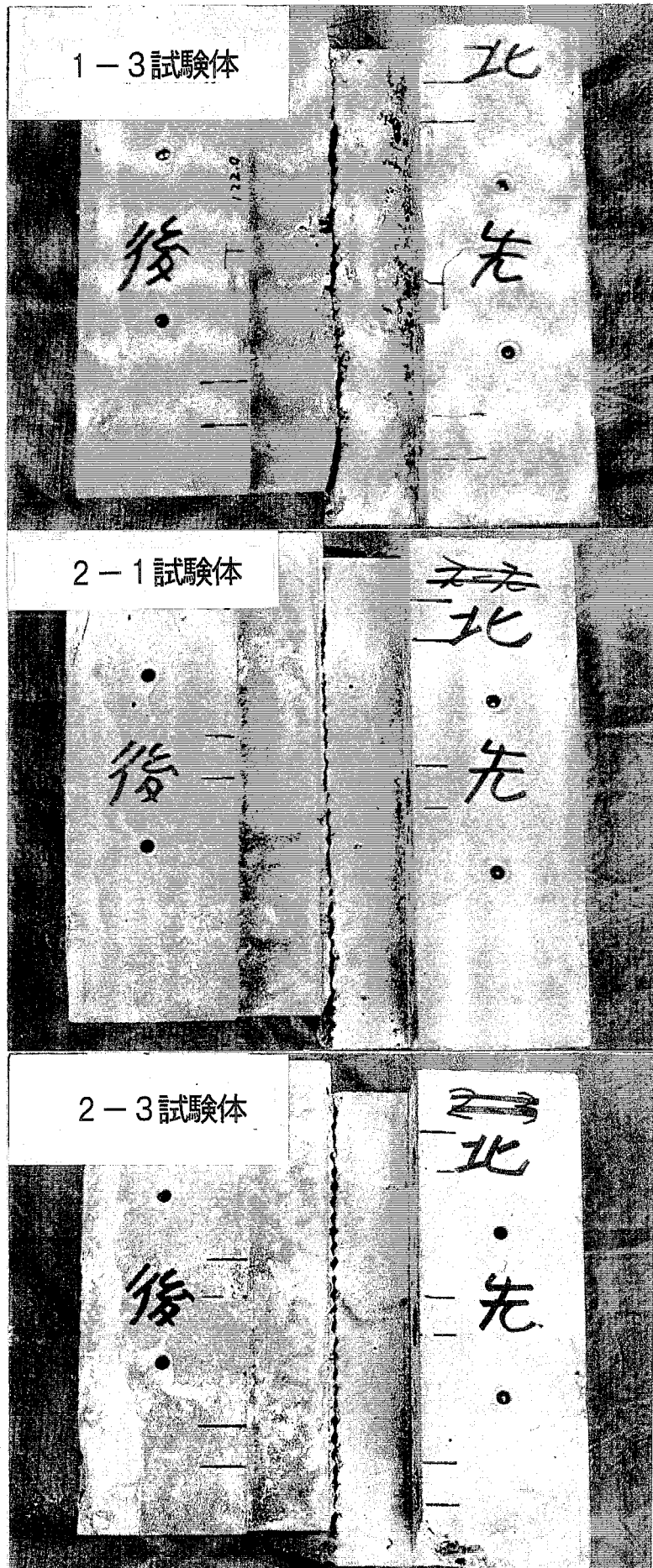


写真 3-1(a) 山形鋼板押し付け試験体の最終破壊性状 (その 1)

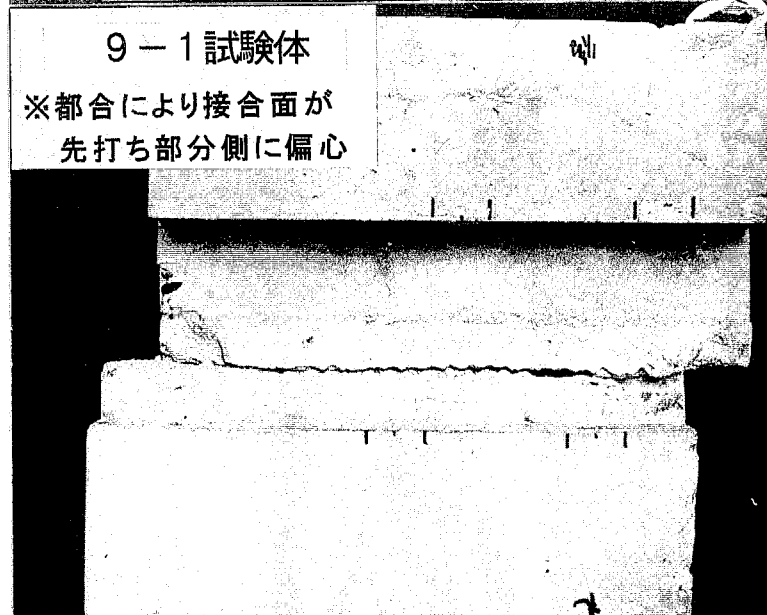
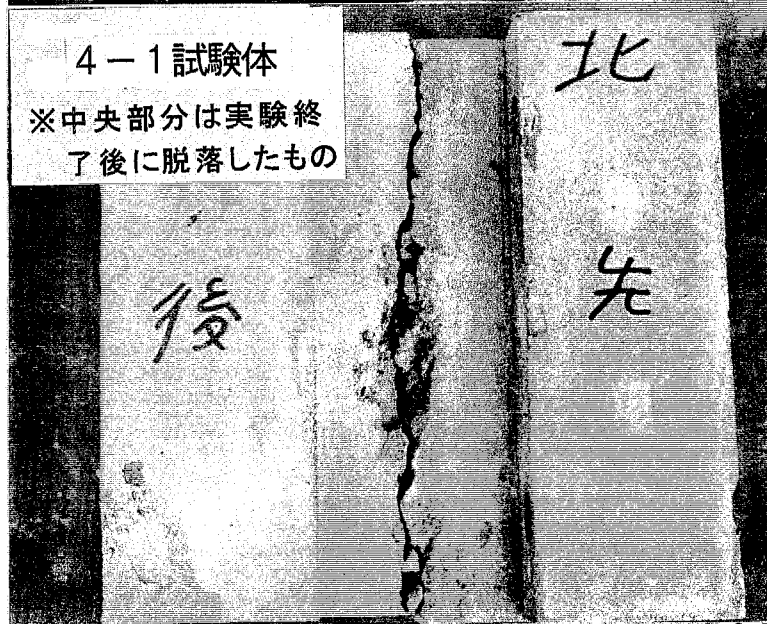
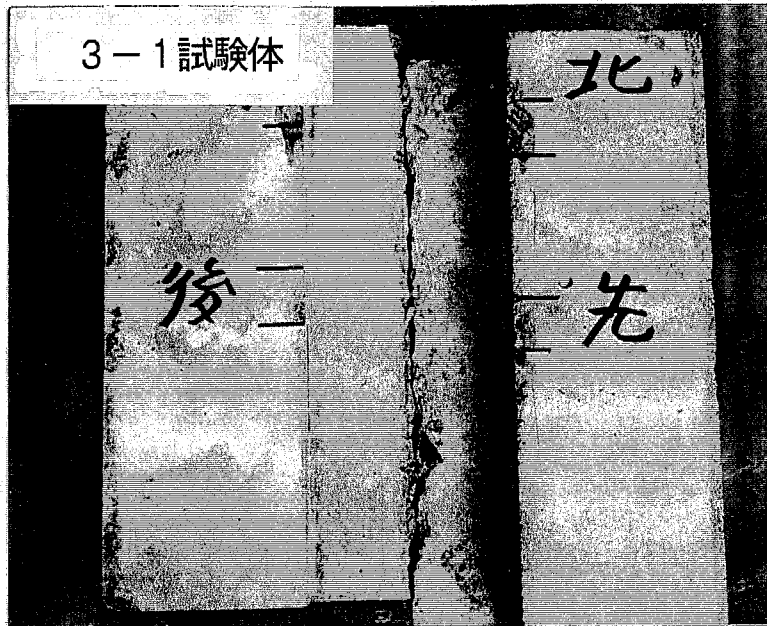


写真 3-1(b) 山形鋼板押し付け試験体の最終破壊性状 (その 2)

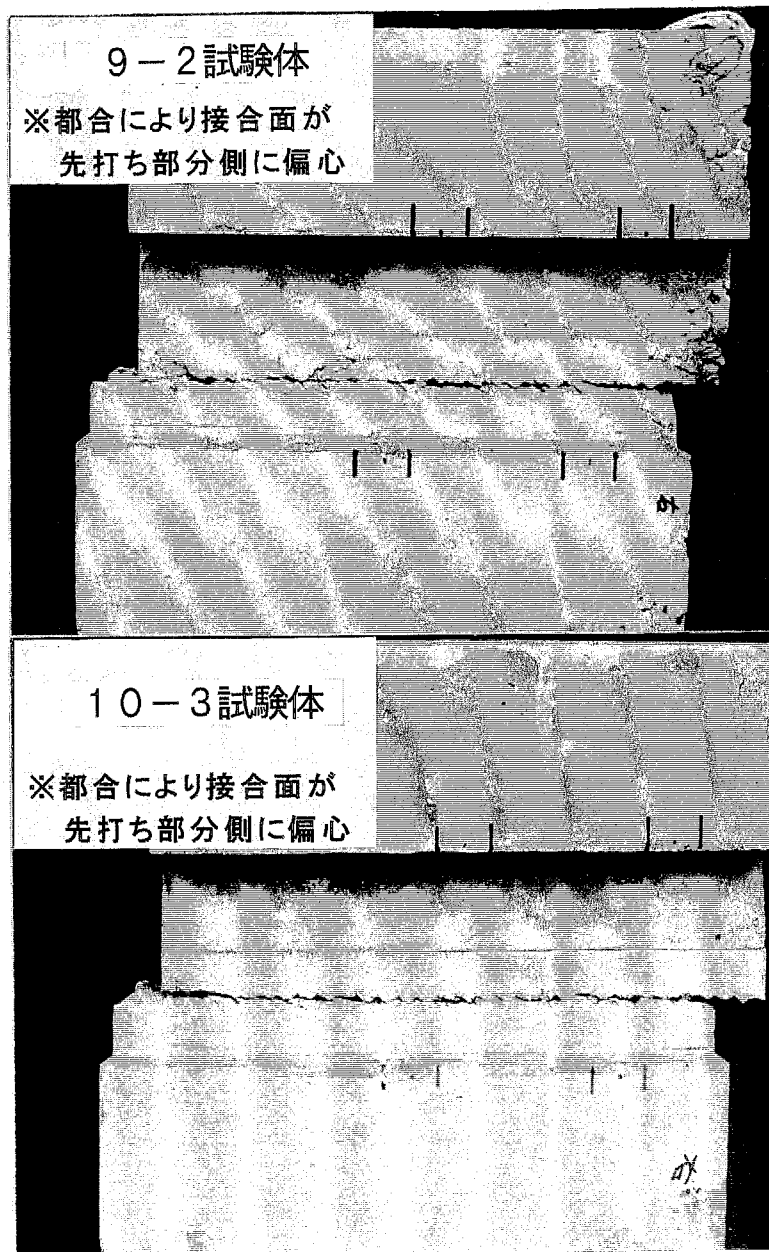


写真 3-1(c) 山形鋼板押し付け試験体の最終破壊性状 (その 3)

3.6
この
1) 第
き
値
評
全
の
験
た
た
2) 接
ン
例
 δ
お
 δ
な
 δ
 δ
 δ
 δ
な
3) 接
が
変
上
て
考
4) 緩
と
 δ
 δ
 δ
 δ
な
5) 接
微

3.6 第3章のまとめ

この章における実験を通して、下記の知見を得た。

- 1) 第2章で得られた知見を利用し、接合面に直交する接合筋を配筋することにより目開き変位の発生を拘束した接合面において、接合面上に施された目粗しの挙動が粗さ評価値により定量的に評価可能かどうか検討を行った。まず、実験における最大耐力を粗さ評価値を用いて推定しようとした場合、接合筋の周囲に施す緩衝材の有無を区別せずに全試験体を対象にして行くと、最大耐力と粗さ評価値の間に相関係数 $r=0.5$ 程度と一応の相関があることが確認された。次に、緩衝材の有無を区別した場合、緩衝材のある試験体およびない試験体それぞれにおいて、弱いながらも一応の相関があることがわかった。

- 2) 接合面の滑り変位を微小な範囲に限定すると、その時点でのせん断力は粗さ評価値とコンクリート代表圧縮強度を用いて推定可能である。 $\delta_H=0.5\text{mm}$ と $\delta_H=1\text{mm}$ の2時点为例にすると、接合筋の周囲に施す緩衝材の有無を区別せずに全試験体を対象にして、

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{ で } \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.347 \cdot R_k+0.710$$

および

$$\delta_H=1\text{mm} \text{ で } \tau_1/\sqrt{\sigma_B}=0.271 \cdot R_k+0.778$$

なる回帰式を得た。また、この回帰式は、緩衝材の有無を区別しても同等の相関を有し、

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{ で緩衝材を施した場合 } \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.280 \cdot R_k+0.651$$

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{ で緩衝材を施さない場合 } \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.369 \cdot R_k+0.797$$

$$\delta_H=1\text{mm} \text{ で緩衝材を施した場合 } \tau_1/\sqrt{\sigma_B}=0.301 \cdot R_k+0.549$$

$$\delta_H=1\text{mm} \text{ で緩衝材を施さない場合 } \tau_1/\sqrt{\sigma_B}=0.253 \cdot R_k+1.054$$

なる回帰式を得た。

- 3) 接合面の滑り変位と目開き変位の関係を見ると、両者がほぼ同じであるのは滑り変位がごく小さい範囲に限られており、 $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時点においてすでに目開き変位が滑り変位を下回っている場合が多かった。最終破壊状況を加味すると、粗さの側面への乗り上がりではなく、目粗しの側面圧壊が生じていると判断される。つまり、目粗しにおいては、せん断摩擦力ではなく、粗さの側面の圧壊によるせん断力伝達が支配的であると考えられる。

- 4) 緩衝材の有無にかかわらず、微小変形時において接合筋に生じる軸方向力と粗さ評価値との間に相関があることを示した。すなわち、

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{ で緩衝材を施した場合 } N_{s0.5}=0.165 \cdot R_k+1.325$$

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{ で緩衝材を施さない場合 } N_{s0.5}=0.551 \cdot R_k+2.430$$

$$\delta_H=1\text{mm} \text{ で緩衝材を施した場合 } N_{s1}=0.290 \cdot R_k+1.613$$

$$\delta_H=1\text{mm} \text{ で緩衝材を施さない場合 } N_{s1}=0.677 \cdot R_k+2.740$$

なる回帰式を得た。

- 5) 接合筋に緩衝材を施した評価試験体の実験結果を基に、粗さ評価値として負荷値を用い、微小変形時における接合面の等価せん断摩擦係数 μ_{ss} を推定した。すなわち、

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{ で } \mu_{es05}=0.588 \cdot R_k+1.707$$

および

$$\delta_H=1\text{mm} \text{ で } \mu_{es1}=0.286 \cdot R_k+1.465$$

となる。

しかし、目粗しの破壊性状を考慮すると、この式により推定される等価せん断摩擦係数は、第2章で得られた等価摩擦係数と全く別のせん断力伝達機構を示す値と考えられ、同一視することはできない。同様に破壊性状を考慮すると、「せん断摩擦係数」とは「粗さの側面圧壊を摩擦に置き換えた数値」であると考えられることができる。

- 6) 微小変形時において、緩衝材を施さない試験体の接合筋の負担せん断力と粗さ評価値との間に定性的な相関があることを示した。しかし、データ不足から定量的な相関関係は示すことができなかった。
- 7) 接合面に作用するせん断力は、等価せん断摩擦や接合筋のせん断力負担などの各せん断力負担機構により負担されるが、これら各機構の計算上の負担せん断力の単純な累加（和）では、実験結果は評価できないことを示した。
- 8) 中変形時において、せん断力を粗さ評価値で推定できる限界を示した。すなわち、滑り変位が1.5mm程度までなら、粗さ評価値と試験体のコンクリート代表圧縮強度を用いてせん断力の推定が可能である。
- 9) 以上より、接合面上に施された目粗しのせん断挙動は、その粗さ測定結果から得られた粗さ評価値とコンクリート強度で評価可能であると判断される。

以上、この章では、目粗しのせん断挙動の定量化に関する考察を行った。引き続き、第4章では、「目粗しに比べてその粗さがさらに大きくなった場合」と見なすことのできるシアキーについて、形状とせん断挙動との関係を考察する。

第 4 章
接合面上のシアキーの形状と
その力学的挙動との関係

4.1 はじめに

4.1.1 この章の目的

第3層では、目粗しの形状とその力学的挙動との関係について考察を行った。その結果、目粗しはその粗さ評価値により定量的な評価が可能であることを確認した。

接合面におけるせん断力伝達機構としては、目粗し以外にもシアキーなどが存在する。シアキーと目粗しに関しては、1.2節に示す通り、目粗しは粗さの大きさを評価し、一方シアキーはその底面積での評価が一般的で、その扱われ方は大きく異なっている。しかしながら、目粗しを「あまり大きくない粗さ」と定義するならば、「目粗しのうち粗さが十分に大きく、かつ粗さの体積が十分に大きくなったもの」がシアキーであるという考え方もできる。すなわち、粗さの評価という観点からすると、目粗しとシアキーは既往の研究の様な全く別個のものではなく、実は相互に連続した状態であるという考え方も成り立ち、「目粗しの持つせん断力伝達能力をさらに高めるために粗さを大きくした究極の状態がシアキーである」とすることも可能である。

シアキーのせん断挙動については、我が国においても昭和30年代後半から精力的に研究が行われている。しかし、年代の経過にともないシアキーの形状も徐々に変化してきており、既往の研究の様に端にシアキーの底面積とシアキー部分を形成しているコンクリートの圧縮強度だけによってそのせん断挙動を評価して良いのか、今一度見直す必要がある様に思われる。

この章では、第2章および第3章での結果を受けて、シアキーの形状がそのせん断挙動に与える影響についての考察を行う。まず、この章の前半(4.2項から4.6項まで)では、一般に既知のものとしてされているシアキーの形状とせん断耐力および破壊性状の関係について、既知の関係以外にも形状と耐力および破壊性状を結び付ける要因が存在しないかどうか再度の検討を行うことを目的に、2次元有限要素解析およびせん断実験を行う。そして、この章の後半(4.7項)では、第3章との連続性を考慮し、直角二等辺三角形形状のシアキーを有する接合面において、そのシアキーの形状とせん断挙動との関係を調べるためのせん断実験を行う。

4.1.2 用語の定義

この章において用いる、下記用語の定義は次の通りである。

シアキー底面長さ h 、シアキー高さ t 、シアキー側面角度 θ 、シアキー奥行き(幅あるいは要素厚み) b …図4-1に示す通り。

長さ高さ比 h/t …シアキー高さ t に対する底面長さ h の比。

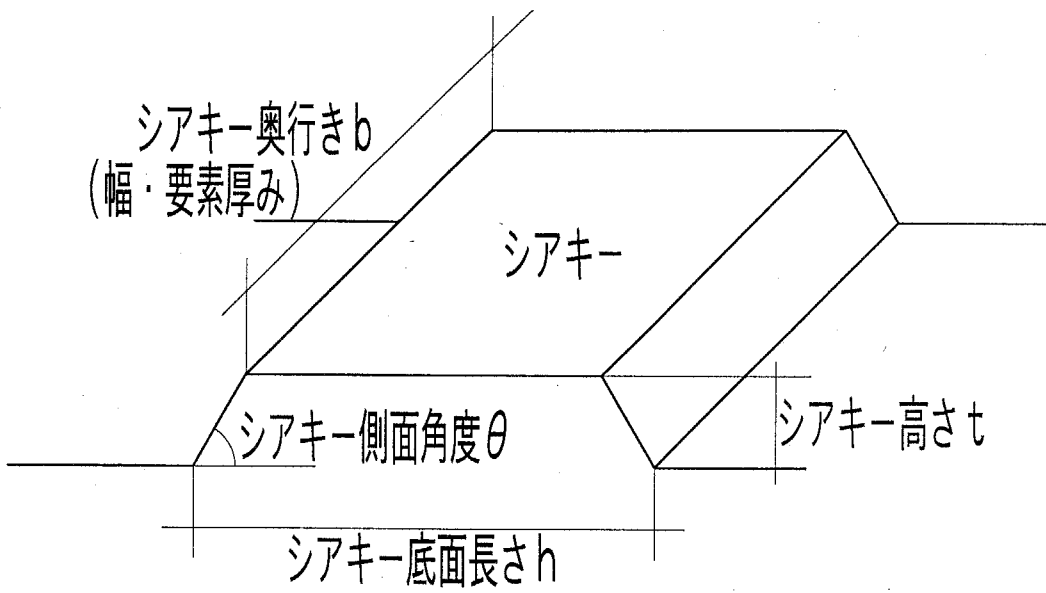


図 4-1 シアキー底面長さ・高さ・側面角度・奥行き

4.2 シアキーの形状が耐力および破壊性状におよぼす影響に関する有限要素解析

4.2.1 既往の研究における問題点とこの節における解析の目的

1.2.3項でも述べた通り、現在、せん断力を受けるシアキーの破壊性状を判別する目安として、黒正、品川、後藤および長滝の研究結果から、シアキー底面長さ h と高さ t を用いて、

- 1) 長さ高さ比 h/t が 5 以下ならシアキー底面におけるせん断破壊。
- 2) 長さ高さ比が 5 を越える場合はシアキー側面におけるコンクリートの圧壊。

が一般に用いられている。ところで、黒正および品川の研究で対象となったのは矩形（立方体および直方体）シアキーである。しかしながら、完全な矩形ではシアキー形成の際の型枠脱型が困難となるので、現在ではかなりのシアキーが台形（等脚台形）か三角形となっている。また、後藤および長滝の研究では、S 型斜め方式試験法を採用しており、実際のプレキャストコンクリート接合部での応力状態の再現という点で問題を残している。

そこでこの節では、側面が傾斜している等脚台形シアキー（一部三角形シアキー）を対象に、長さ高さ比の違いや側面角度の違いが、シアキーの耐力および破壊性状におよぼす影響について明らかにすることを目的に、2次元有限要素法を用いた解析を行う。

4.2.2 解析概要・解析対象

解析対象一覧を表 4-1 に、要素分割図を図 4-2 に示す。解析対象は、4.4.2 項に示す試験体および 2.3.1 項と 3.2.1 項に示す試験体との整合性を可能な限り確保させるため、かつ実際の建築物で用いられるプレキャスト接合部を想定して、先打ち部分と後打ち部分からなっている。シアキーの形状は、等脚台形を基本とし、幾何学的条件から一部三角形となるものを含む。解析対象の変動要因は、シアキーの長さ高さ比と側面角度 θ である。長さ高さ比の変化の方法については、4.4.2 項の試験体の条件に可能な限り合致させるべく、すべての解析対象で高さを一定とし ($t=30\text{mm}$)、長さを変化させる ($h=60\sim 150\text{mm}$) 方法を採用した。また、各要素の厚みはシアキー奥行き b と同じで一定の値（計算の都合上 $b=183\text{mm}$ ）としている。

解析には、2次元弾塑性有限要素法を用いる。せん断力の載荷は、先打ち部分に強制変位を生じさせる方法を採用する。強制変位を生じさせる際、後打ち部分の四周のうち左右辺をピンで固定し、先打ち部分の左右辺に等量のせん断力を作用させて先打ち部分に強制変位を生じさせるという方法を用いる。

解析の諸条件を表 4-2 に示す。コンクリートは本来非弾性材料であるが、この節では弾塑性として扱い、要素内のひずみは一定とする。二軸応力下でのコンクリートの構成則には、図 4-3 に示す Darwin および Pecknold による等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル^{4.1) 4.3) 4.4)}を用いる。破壊条件については、図 4-4 に示す Kupfer の 2 軸応力下での破壊包絡線^{4.2) ~4.4)}を用いる。

接合面に相当する部分とシアキーの底面に相当する部分は、コンクリートにひび割れの生じやすい箇所と一致する。よって、その相当箇所にクラックリンクを挿入し、それぞれクラックリンク 1（接合面に相当）およびクラックリンク 2（シアキー底面に相当）と名付ける。クラックリンクの剛性値および強度値を表 4-2 に、またその特性を図 4-5 に示す。ひび割れは、仮定したひび割れと法線方向および接線方向のばねに作用する力の合力がコンクリートの引張強度に達した時に発生するものとする。なお、接合面に相当する部分では、クラックリンク以外の要素は置かず、接合面滑り変位発生以降の摩擦力などは無視する。

解析におけるクラックリンクの剛性値および強度値の決め方についてであるが、クラッ

クリン
より形
鉛直に
表 4-
「 G_{LV}
面の滑
の鉛直
よるせ
付けを
ると予
的な値
ンク 2
鉛直引
水平方
なお
項の試
の不安
ので、
ではな
以後
作用さ
強制変
解析に
試験体
れ、こ

クリンク 1 に関しては、接合面（4.4.2 項に示す通り、実験では接合面は磨き鋼板型枠により形成された平滑な面およびコンクリート型枠用合板）を想定しているため、「接合面に鉛直に作用する力に対しては、圧縮は無無限大の剛性、引張に対しては無抵抗」と見なして、表 4-2 の鉛直方向剛性値 G_{LV} および鉛直方向引張強度値 σ_{LVT} を決定した。なお、「 $G_{LV}=9000000$ 」とは「無無限大」という意味である。水平方向の剛性値については、接合面の滑りを許容しているためにその値をあまり大きくは設定できないが、クラックリンクの鉛直方向の引張強度が零であり、いったんリンクが切れてしまうとその時点でリンクによるせん断抵抗はできなくなるため、結局のところ水平方向の剛性値はあまり厳密な意味付けをもって設定する必要はなく、せん断力の大部分はシアキー側面で伝達（抵抗）されると予想される。つまり表 4-2 での水平方向剛性値「 $G_{LH}=900$ 」とは、「900」という具体的な値ではなく、「 G_{LV} の一万分の一程度の小さな値」という意味で決定した。クラックリンク 2 については、接合面ではないため、「鉛直圧縮力および水平方向力は無無限大の剛性、鉛直引張力に対してはコンクリートの引張強度に相当する分の抵抗をする」と仮定して、水平方向剛性値 G_{LH} 、鉛直方向剛性値 G_{LV} および鉛直方向引張強度値 σ_{LVT} を決定した。

なお、解析に当たっては、線材としての鉄筋（接合筋）を接合面に垂直に配置した。4.4.2 項の試験体ではその様な鉄筋は実際には配筋されてはいないが、これは解析における計算の不安定を防ぐためのものであり、表 4-2 に示す様に降伏強度を極めて低く設定してあるので、4.4.2 項における「接合面上には鉄筋は存在しない」との条件に著しく反するものではないと考えられる。

以後、せん断力 Q とは、強制変位を生じさせるために解析対象の先打ち部分に左右から作用させた力（図 4-2 の矢印方向の力）の合力のこととする。また、解析において生じた強制変位が、接合面に相当する部分に生じる滑り変位に等しいと仮定し、その強制変位を解析における滑り変位 δ_H と定義する。実際のところ、4.5 節に示す通り、載荷フレームと試験体の間に装着する真鍮製の方形材を介してせん断力が試験体に作用していると考えられ、この仮定に近い状態であったと考えられる。

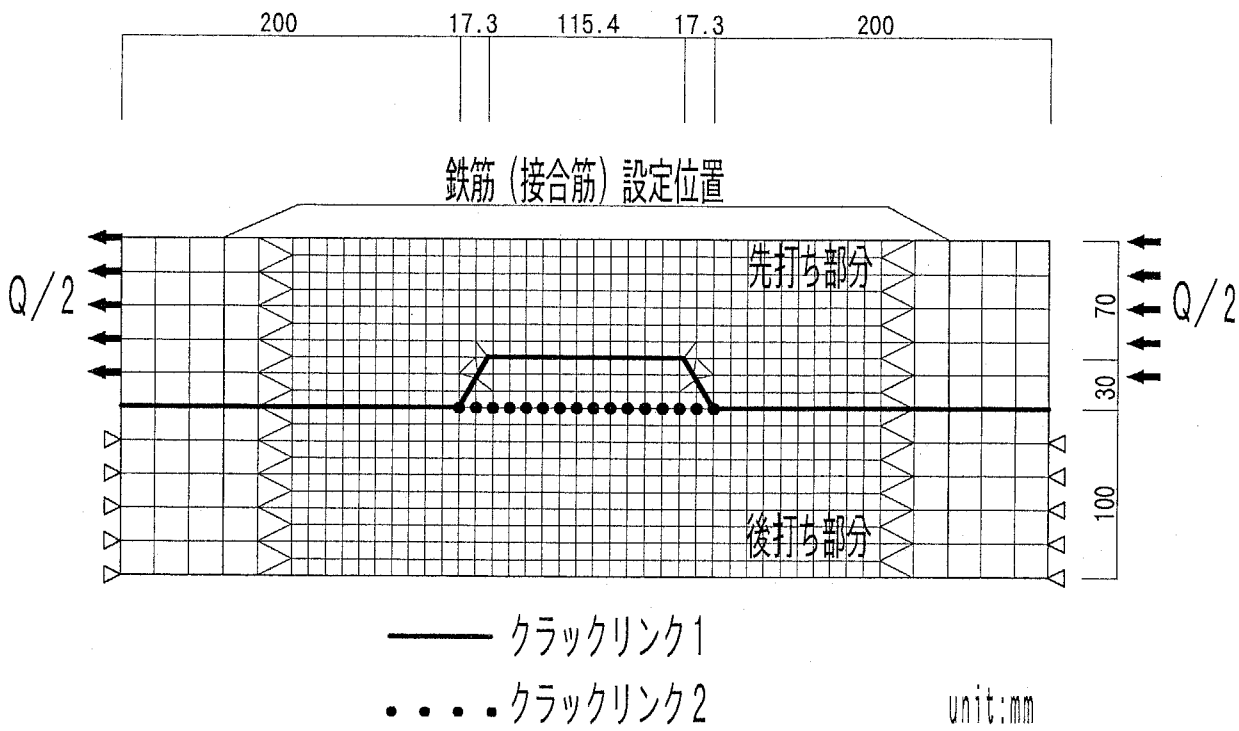


図 4-2(a) 要素分割図 (その 1) (解析対象 560)

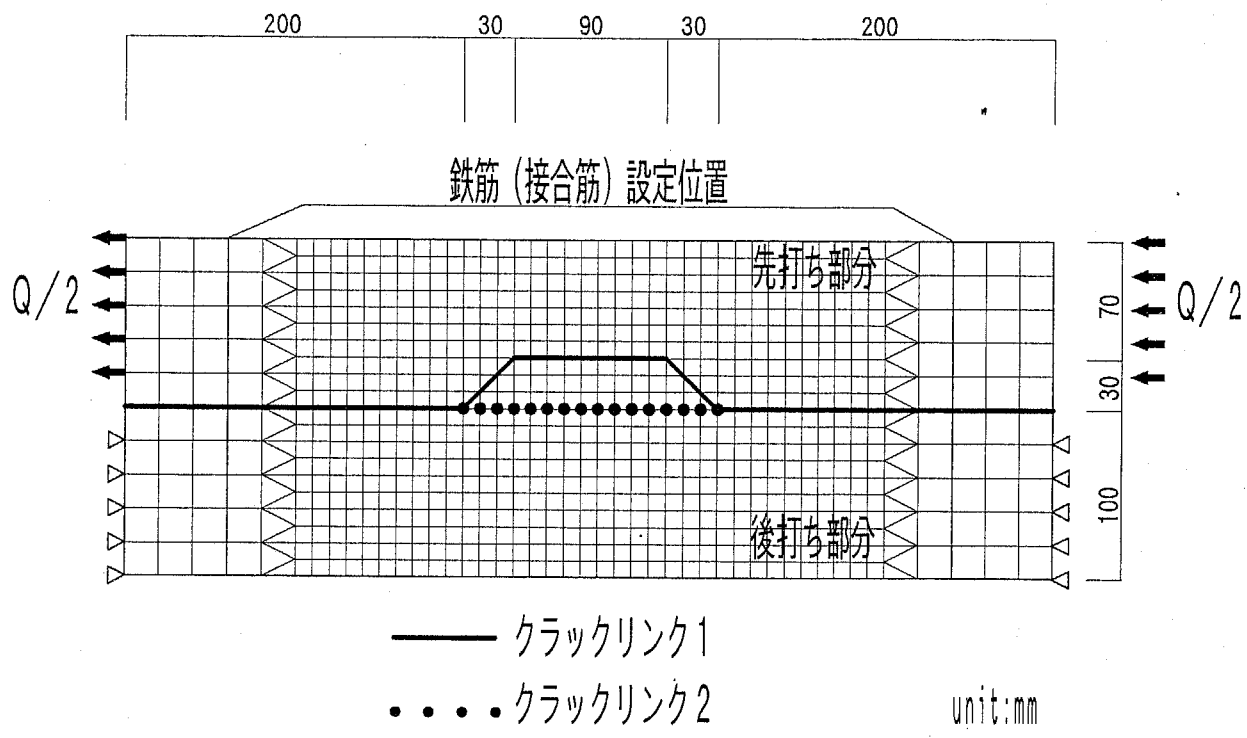


図 4-2(b) 要素分割図 (その 2) (解析対象 545)

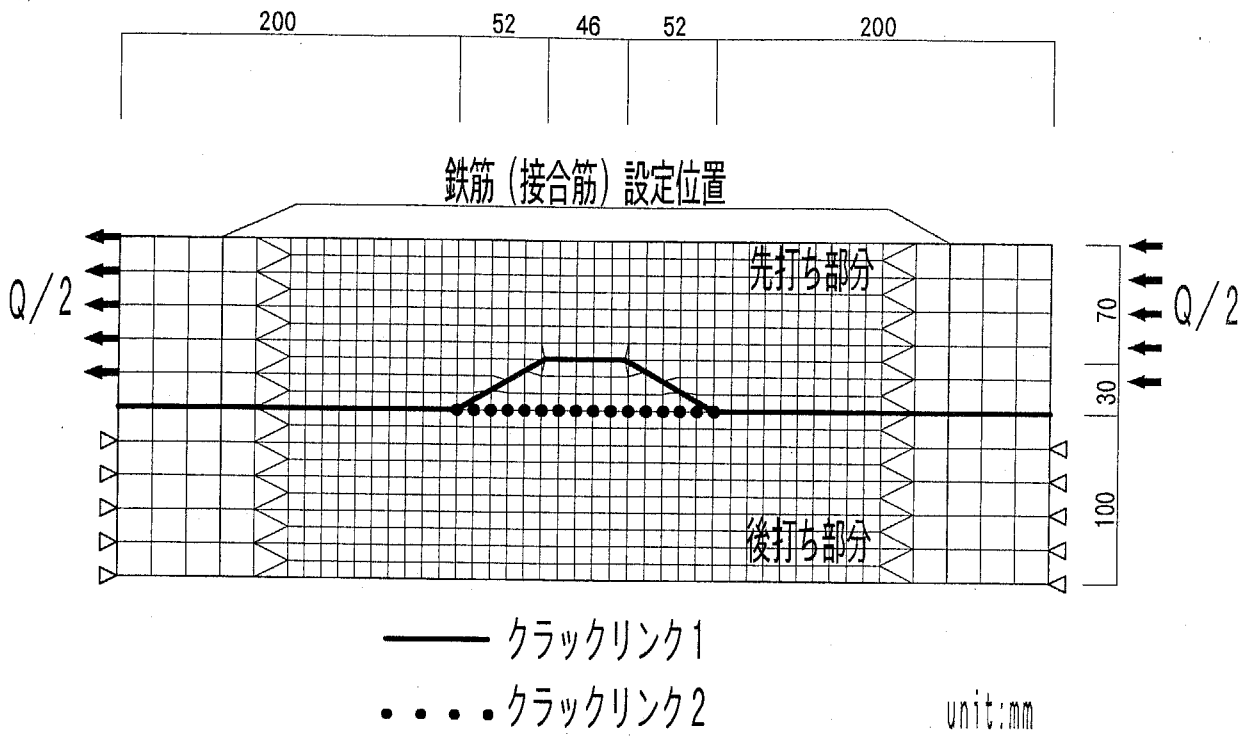


図 4-2(c) 要素分割図 (その 3) (解析対象 530)

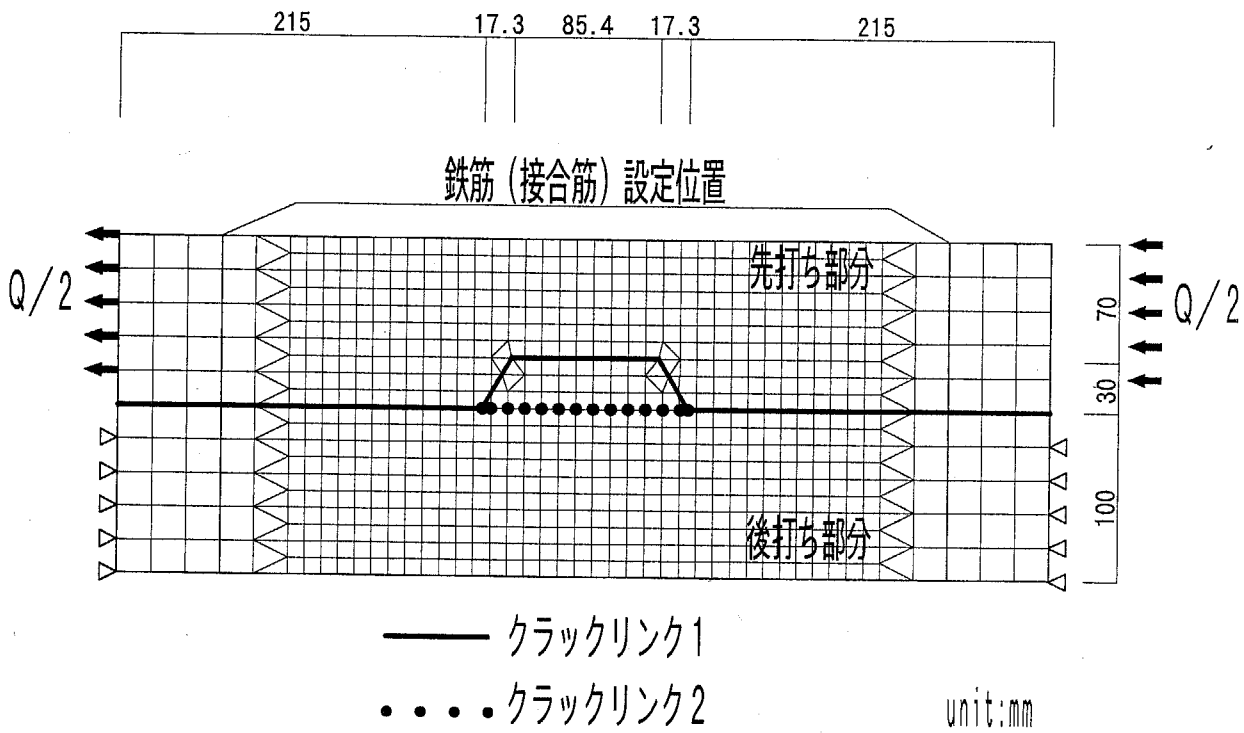


図 4-2(d) 要素分割図 (その 4) (解析対象 460)

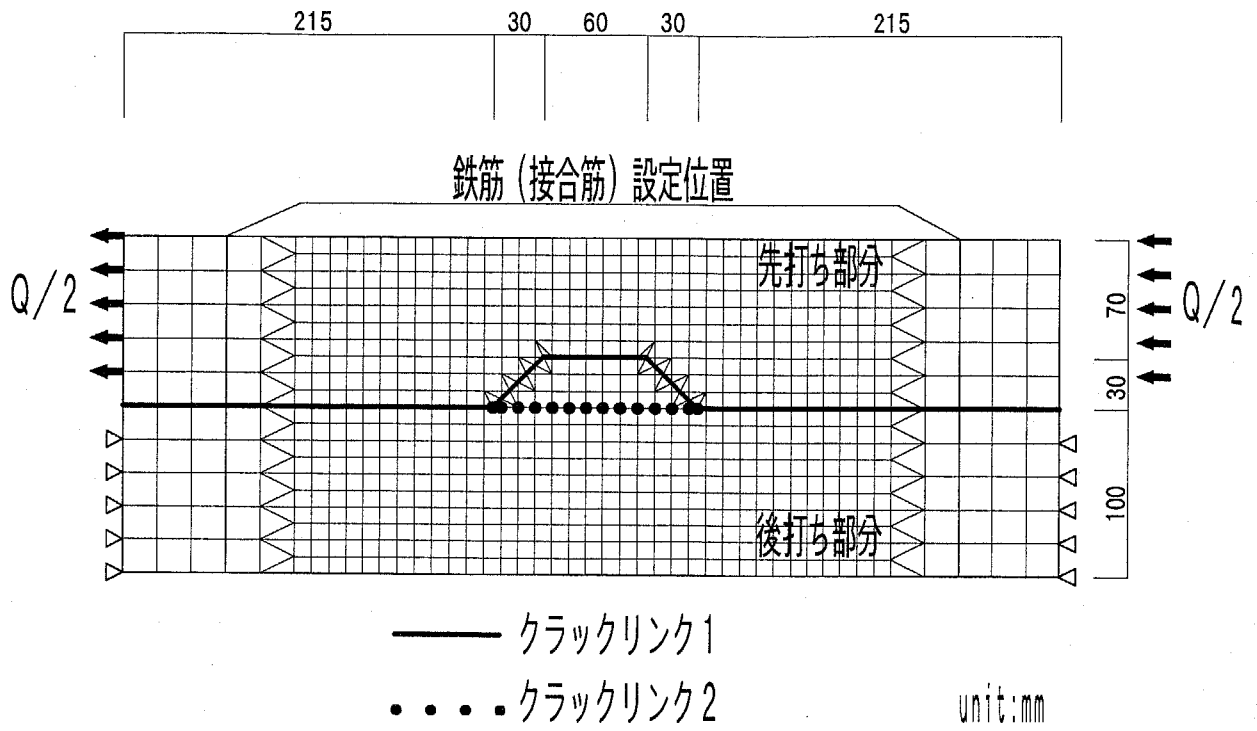


図 4-2(e) 要素分割図 (その 5) (解析対象 445)

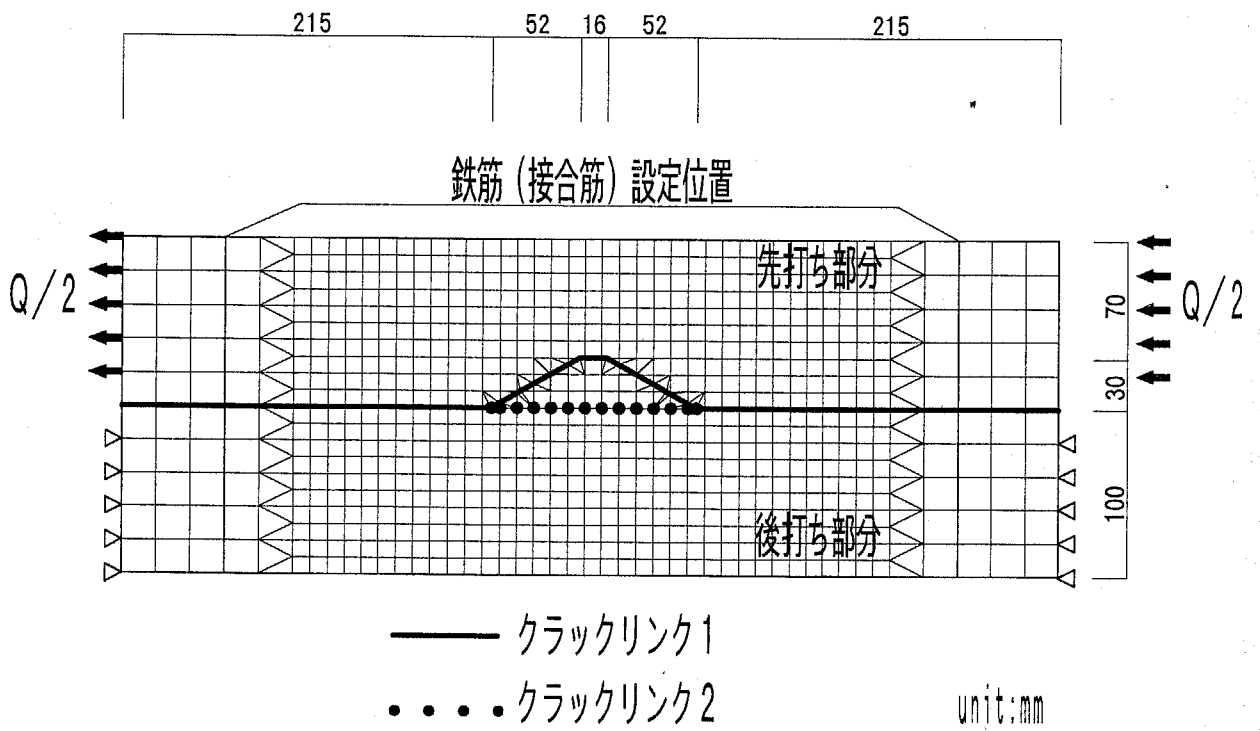


図 4-2(f) 要素分割図 (その 6) (解析対象 430)

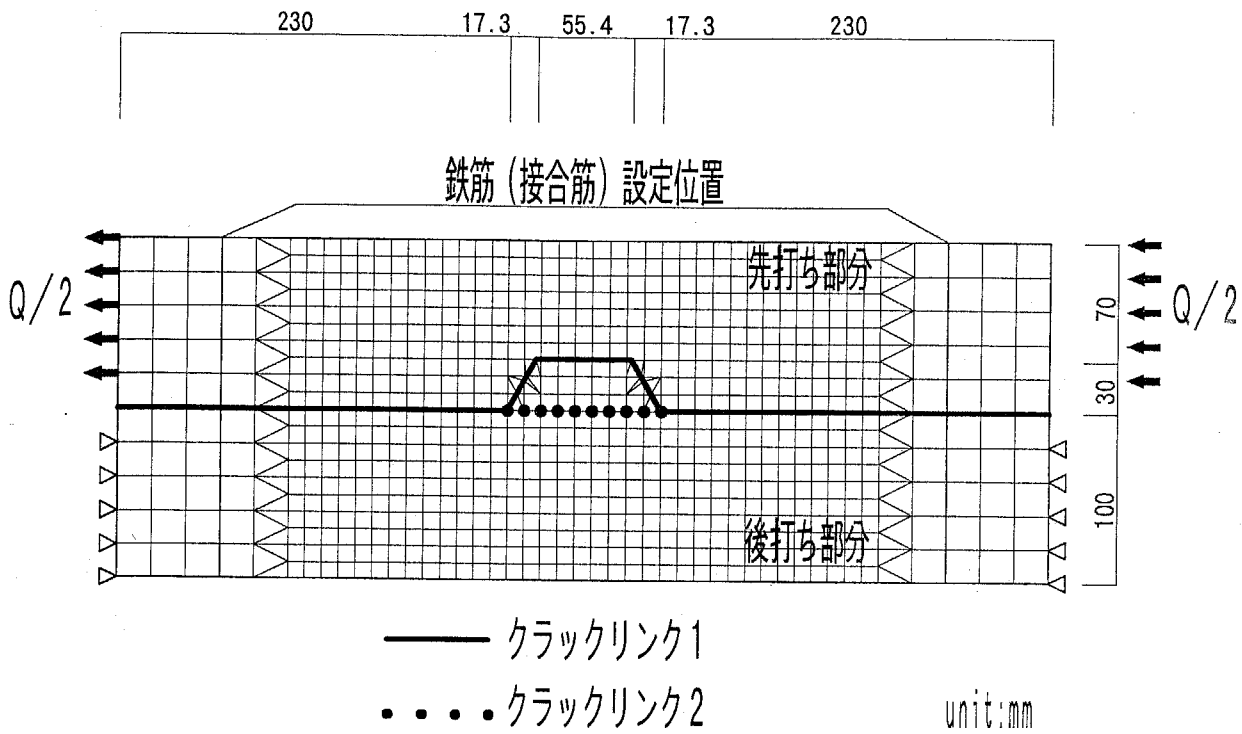


図 4-2(g) 要素分割図 (その 7) (解析対象 360)

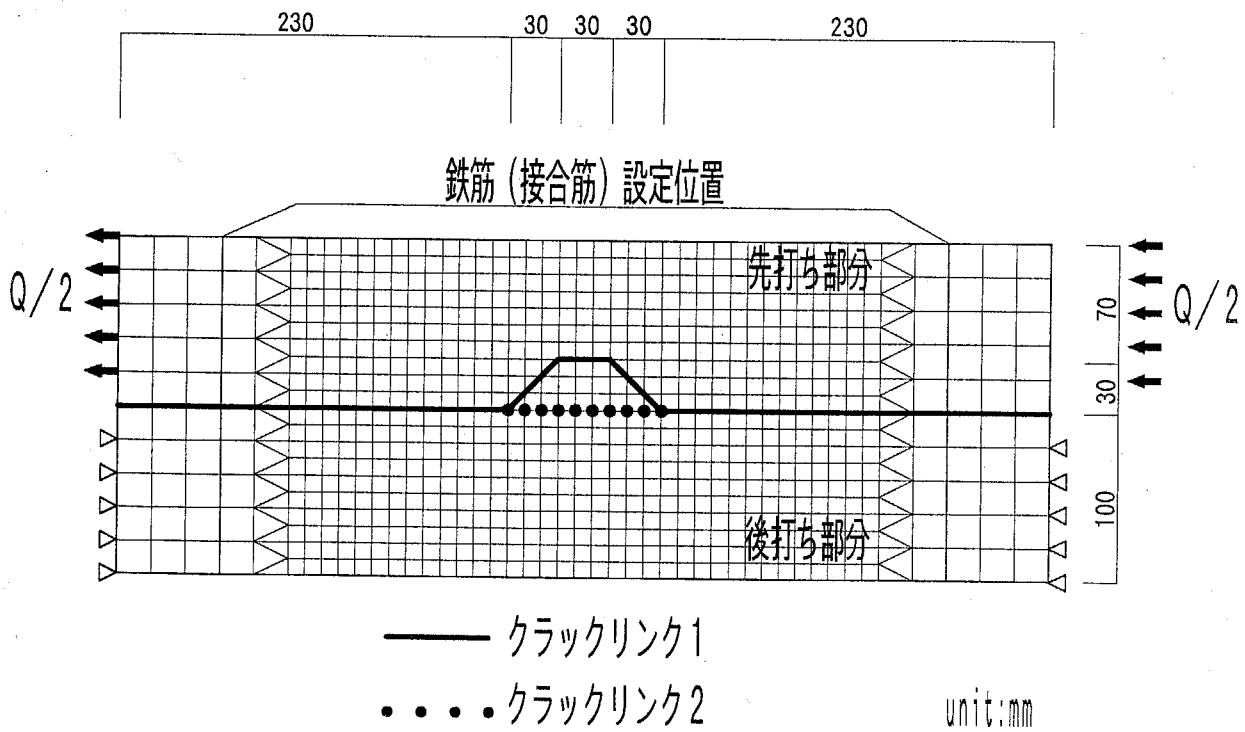


図 4-2(h) 要素分割図 (その 8) (解析対象 345)

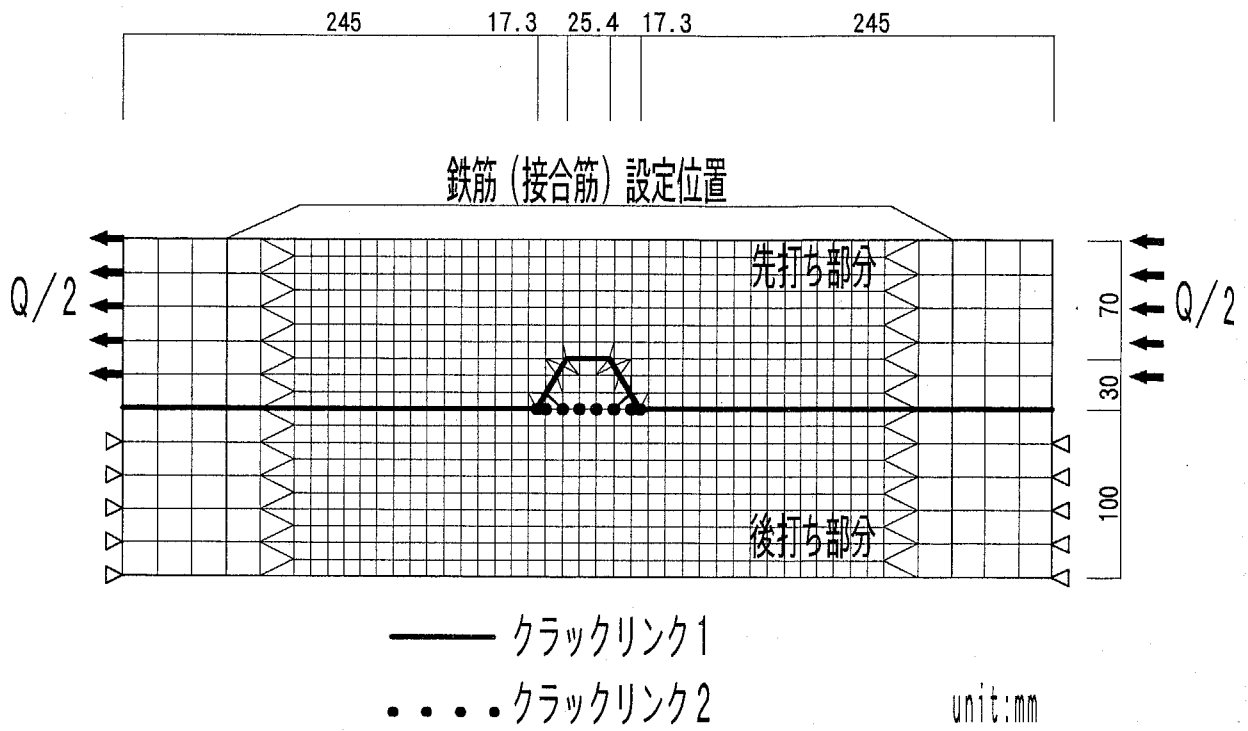


図 4-2(i) 要素分割図 (その 9) (解析対象 260)

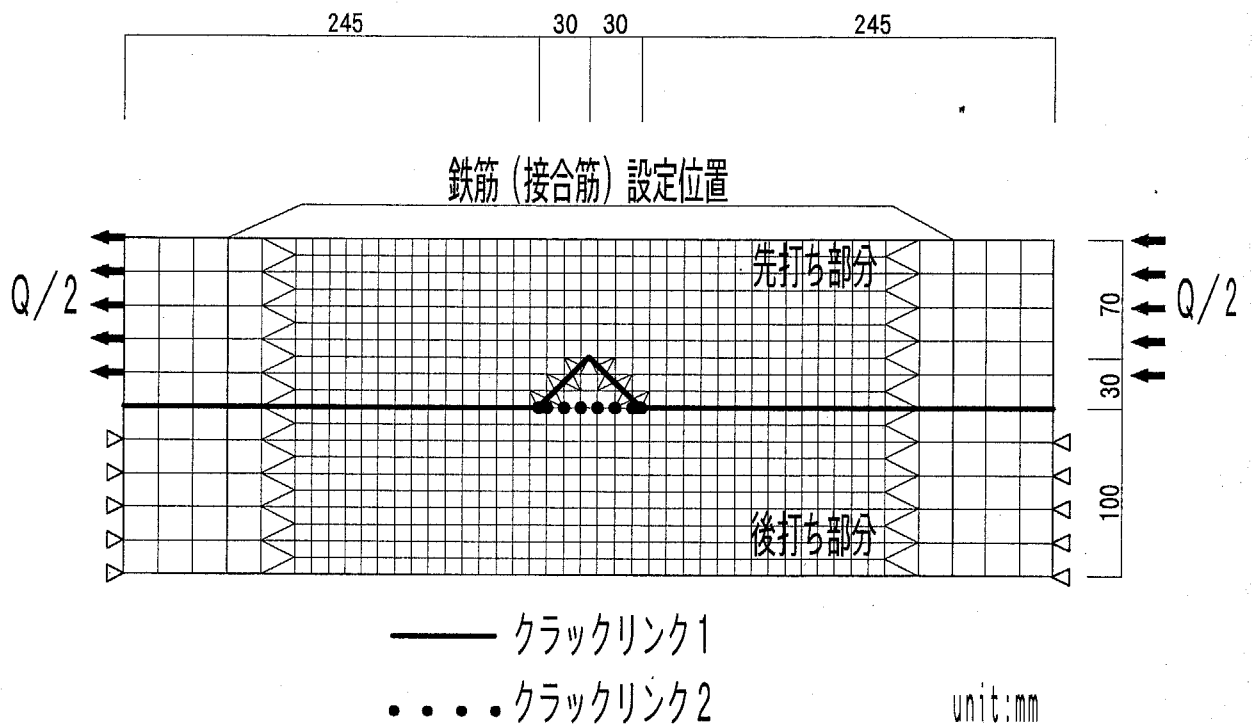


図 4-2(j) 要素分割図 (その 10) (解析対象 245)

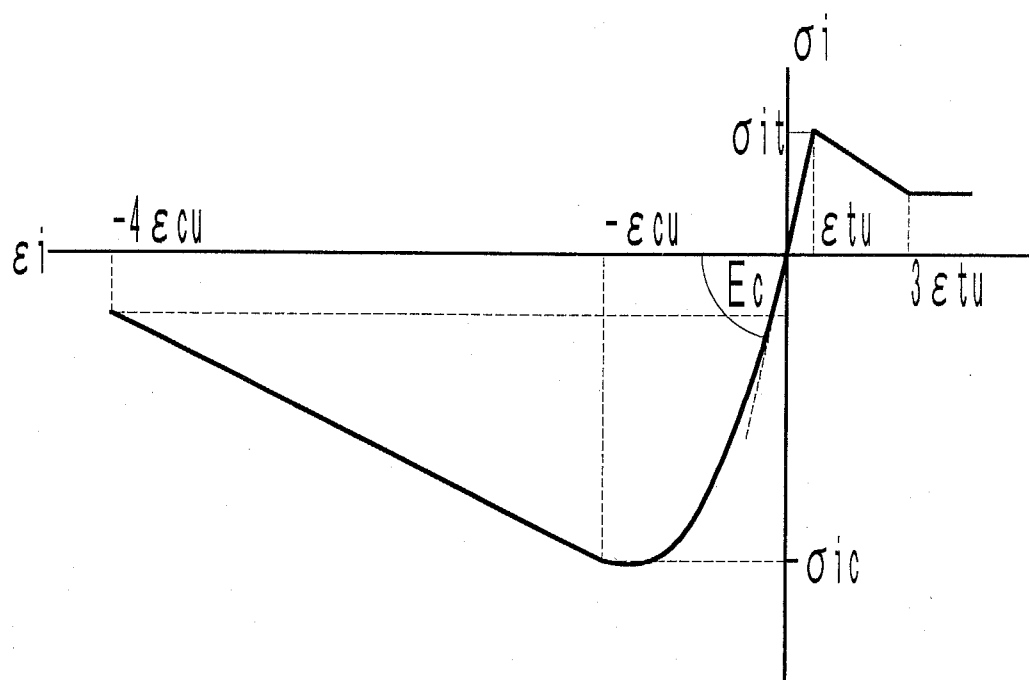


図 4-3 Darwin-Pecknold のコンクリートの応力-等価 1 軸歪みモデル

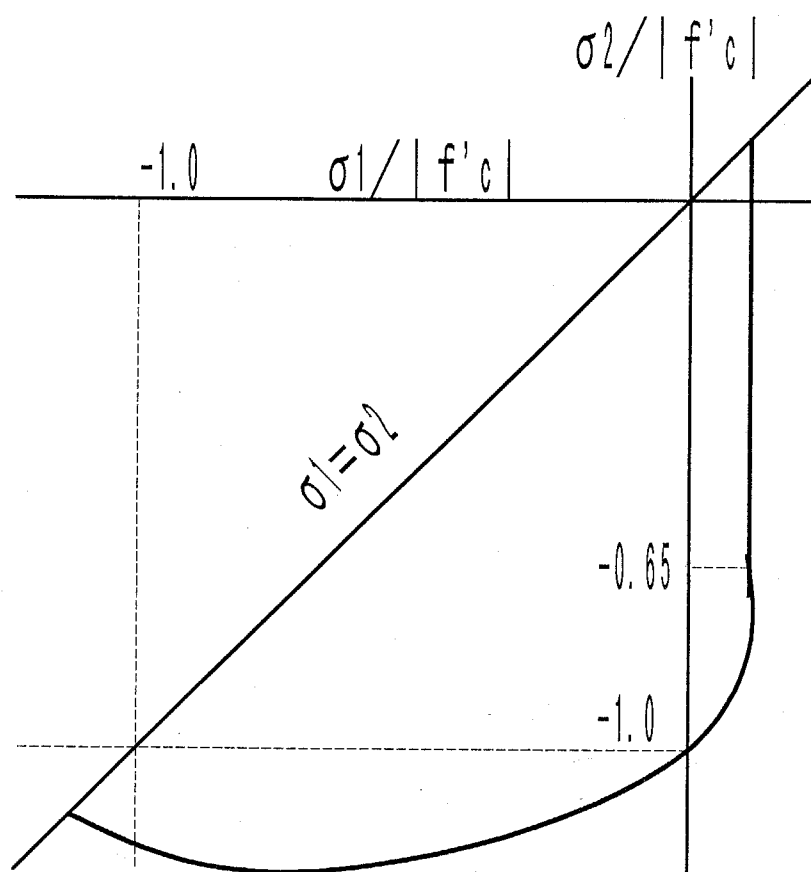


図 4-4 Kupfer のコンクリートの 2 軸応力下破壊包絡線

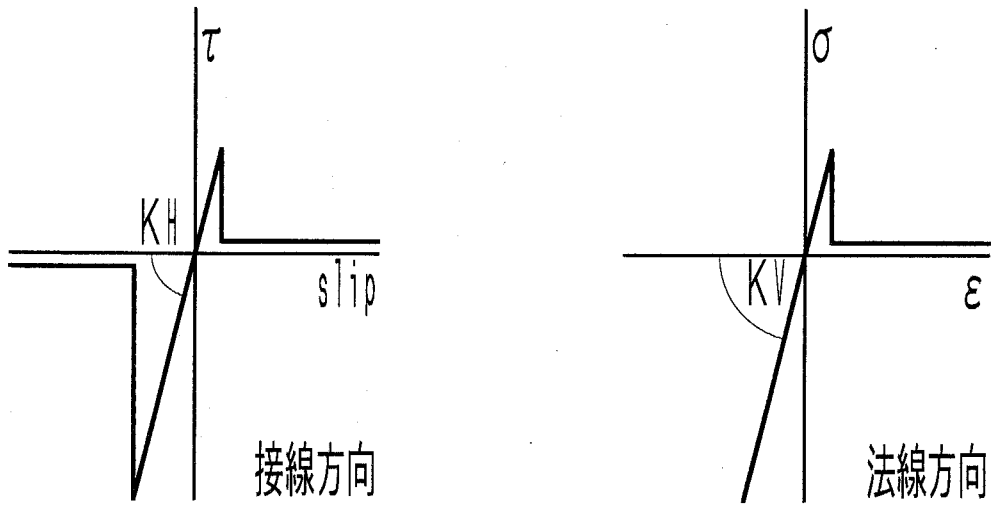


図 4-5 クラックリンクの特性

表 4-1 解析対象一覧

| 解析対象名 | シアキーの形状と個数 | | | | |
|-------|---------------|--------------|--------------|----------------------------|----|
| | 底面長さ h(mm) | 高さ t (mm) | 長さ高さ比 h/t | 側面角度 $\theta(^{\circ})$ | 個数 |
| 560 | 150 | 30 | 5 | 60 | 1 |
| 545 | | | | 45 | |
| 530 | | | | 30 | |
| 460 | 120 | | 4 | 60 | |
| 445 | | | | 45 | |
| 430 | | | | 30 | |
| 360 | 90 | | 3 | 60 | |
| 345 | | | | 45 | |
| 260 | 60 | | 2 | 60 | |
| 245 | | 45 | | | |

245は直角二等辺三角形となる。

表 4-2(a) 解析の諸条件 (その 1) (コンクリート)

| 設定部分 | 圧縮強度 $\sigma_B(\text{kgf/cm}^2)$ | ヤング率 $E_c(\text{kgf/cm}^2)$ | 割裂強度 $\sigma_t(\text{kgf/cm}^2)$ | ポアソン比 1/m |
|-------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 先打ち部分 | 210 | 2.1×10^5 | 21.0 | 0.17 |
| 後打ち部分 | 270 | 2.1×10^5 | 27.0 | 0.17 |

表 4-2(b) 解析の諸条件 (その 2) (鉄筋)

| 接合筋 1 本当たりの断面積 $A_s(\text{cm}^2)$ | 降伏強度 $\sigma_y(\text{kgf/cm}^2)$ | ヤング率 $E_s(\text{kgf/cm}^2)$ |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1.27 | 1 | 2.1×10^6 |

表 4-2(c) 解析の諸条件 (その 3) (クラックリンク)

| リンク種類 | 設定位置 | 水平方向 剛性 G_{LH} (kgf/cm^3) | 鉛直方向 剛性 G_{LV} (kgf/cm^3) | 鉛直方向 引張強度 σ_{LVT} (kgf/cm^2) |
|-----------|-------------|---|---|---|
| クラックリンク 1 | 図 4-2 の太線部分 | 900 | 9000000 | 0 |
| クラックリンク 2 | 図 4-2 の●部分 | 9000000 | 9000000 | 30.0 |

4.3 解析結果

4.3.1 最大耐力とせん断力-滑り変位関係

解析結果として、表 4-3 にせん断力 Q の最大値（以下「最大耐力」と呼ぶ） Q_{\max} とその時点における滑り変位 $\delta_{H\max}$ を示す。なお、ここではシアキーの破壊性状を対象としているので、「せん断応力度 τ 」および「最大強度 τ_{\max} 」を、解析によるせん断力および最大耐力をシアキーの底面積 $b \cdot h$ で除した値と定義する。

図 4-6 に、長さ高さ比 h/t が同一で側面角度 θ が異なる解析対象についてのせん断応力度と滑り変位の関係を示す。概して側面角度が小さくなるにつれて、最大耐力は大きくなる傾向が伺える。

また、図 4-7 に、側面角度が同一で長さ高さ比が異なる解析対象についてのせん断応力度と滑り変位の関係を示す。概して長さ高さ比が小さくなるにつれて、最大耐力は大きくなる傾向が認められる。

4.3.2 シアキーの破壊性状

解析終了時での要素の変形状態を図 4-8 に示す。表 4-3 に示す通り、ほとんどの解析対象で、シアキー底面のクラックリンク 2 の分離によるひび割れ発生と滑り変位の発生が見られた。要素の変形状態がシアキーの破壊性状を示していると見なすと、すべての解析対象で最終的にはシアキー底面におけるせん断破壊が生じたと判断される。

また、ほとんどの解析対象で図 4-8 に示す様な要素の重なりが見られ、特に側面角度が 30° で長さ高さ比が 4 または 5 の解析対象（430、530 および 545）では、表 4-4 に示す通り重なりが度合いが大きく、またシアキーの面内回転と思われる現象も見られた。このうち要素の重なりから、この重なり部分ではコンクリートの圧壊が生じる可能性がある判断される。すなわち、底面でのせん断破壊が生じると見なされているシアキーでも、その側面角度の大きさによっては側面のコンクリートの圧壊が生じることとなり、1.2.3 項および 4.2.1 項におけるシアキーの破壊性状の判別の目安が、シアキーの形状によっては変化する可能性があると考えられる。

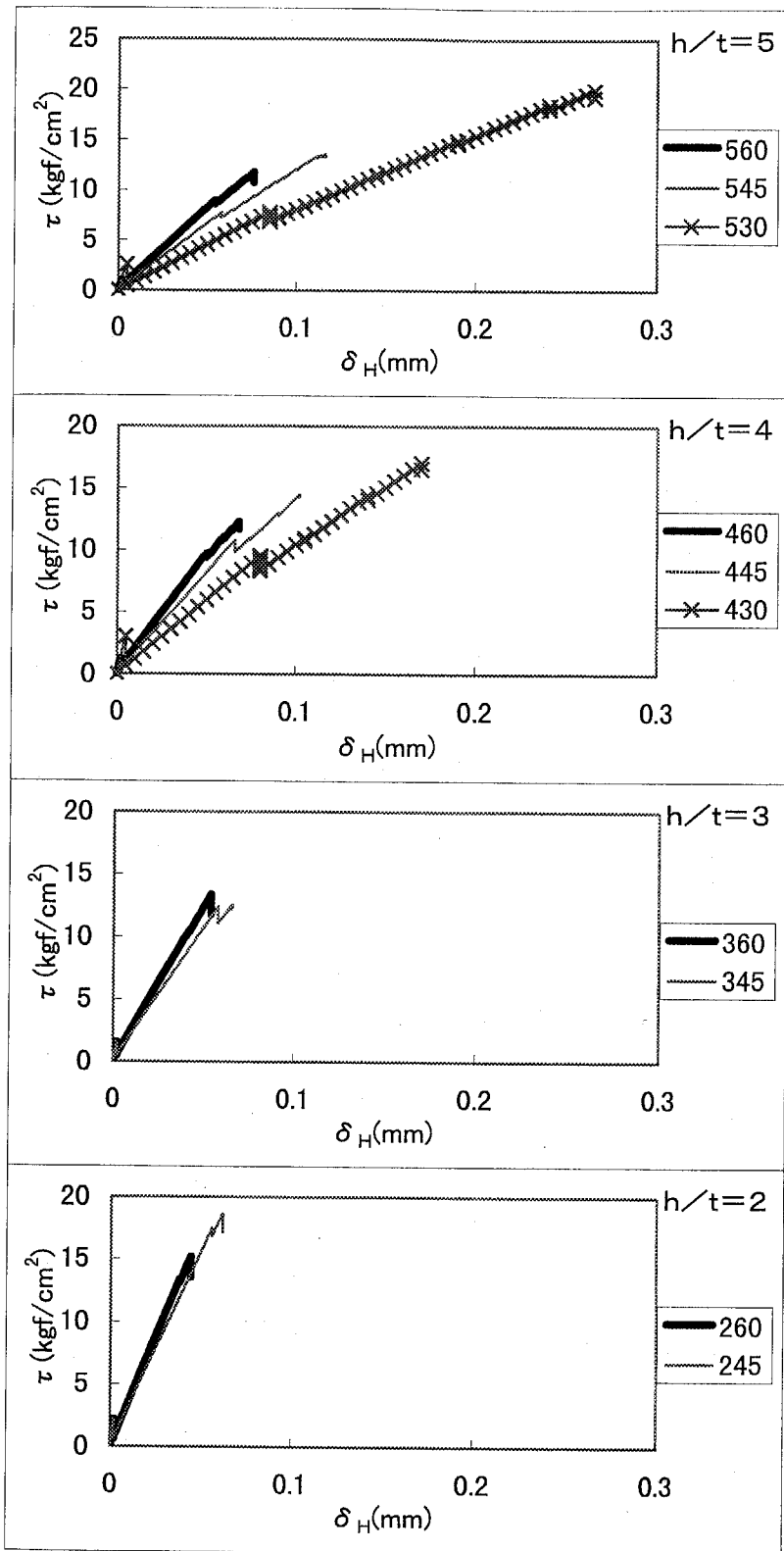


図 4-6 長さ高さ比が同じ解析対象のせん断応力度-滑り変位関係

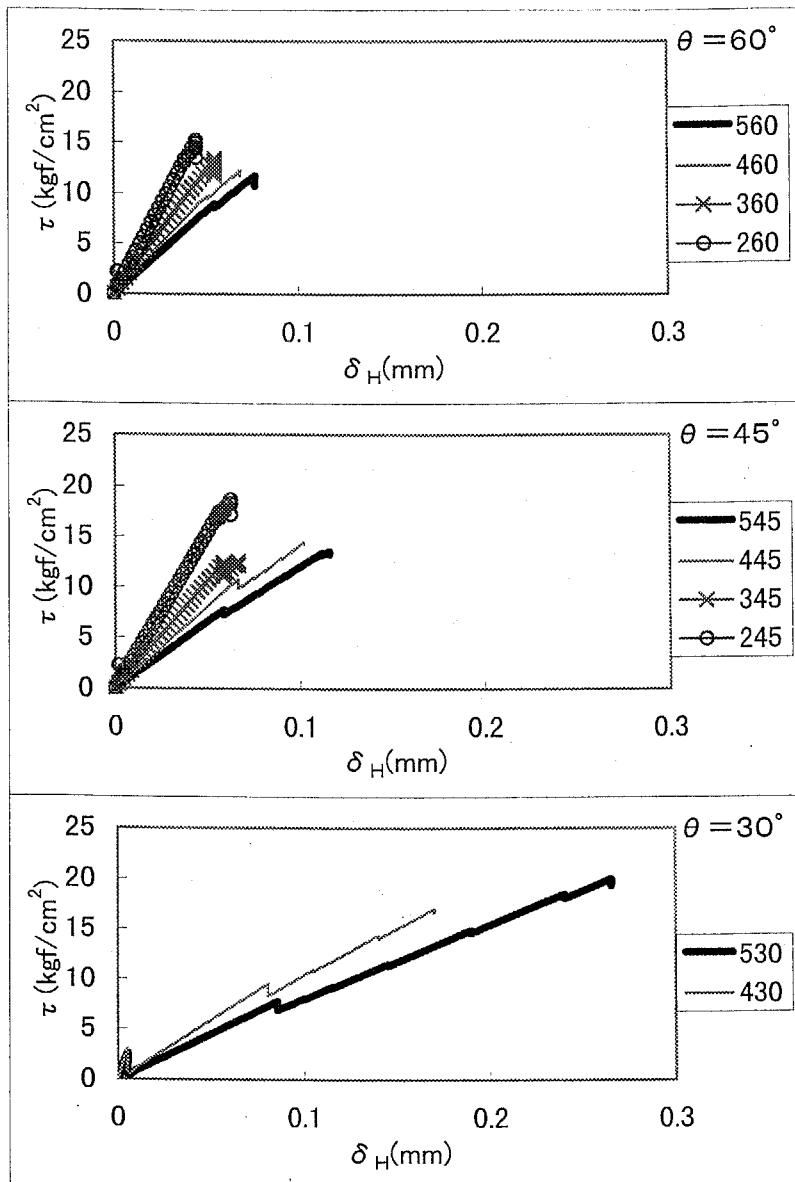


図 4-7 側面角度が同じ解析対象のせん断応力度-滑り変位関係

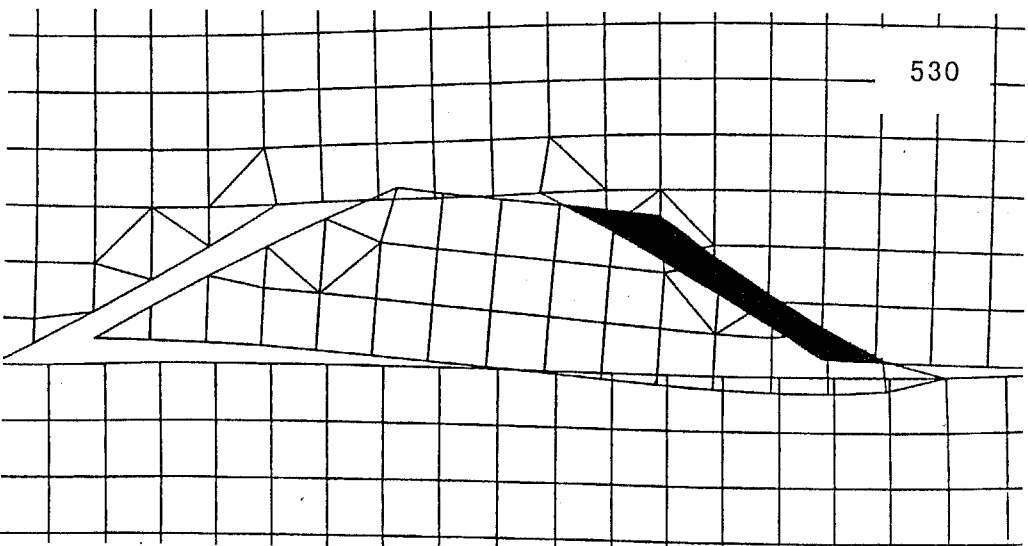
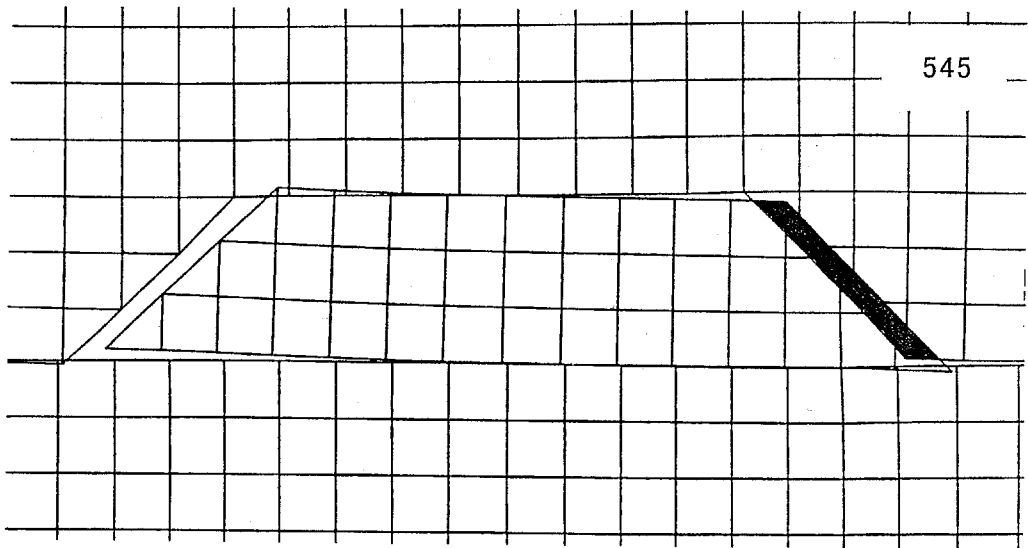
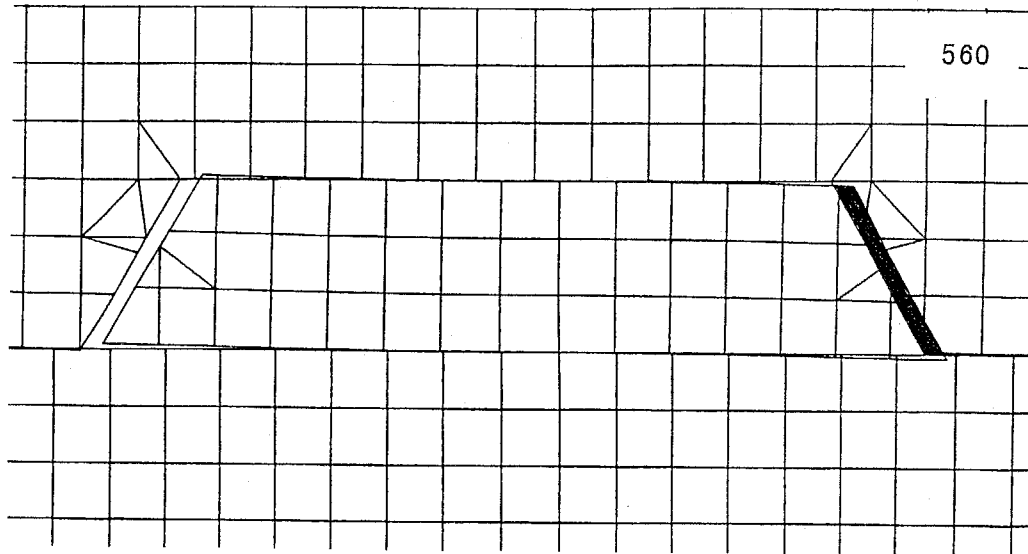


図 4-8(a) 解析対象の解析終了時要素変形図 (その 1)

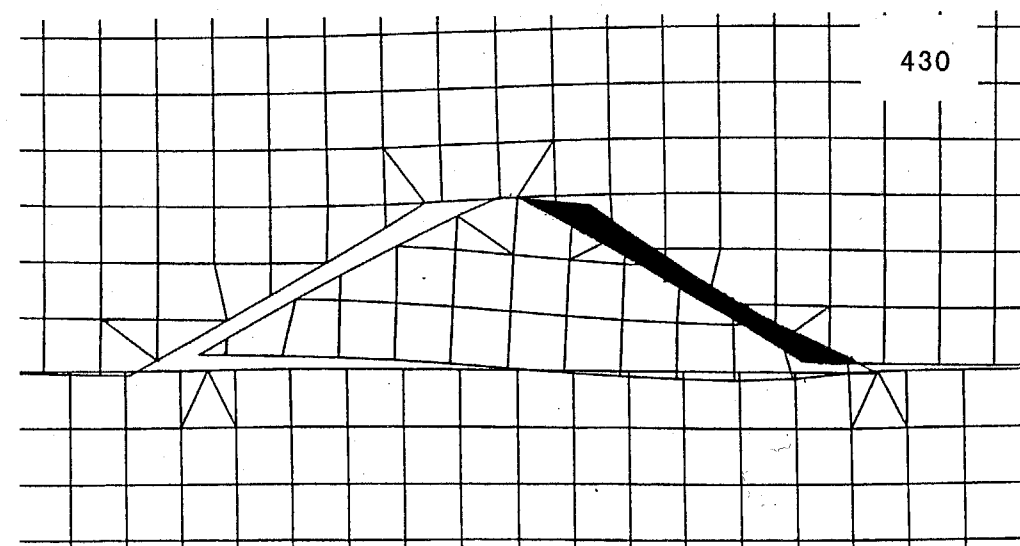
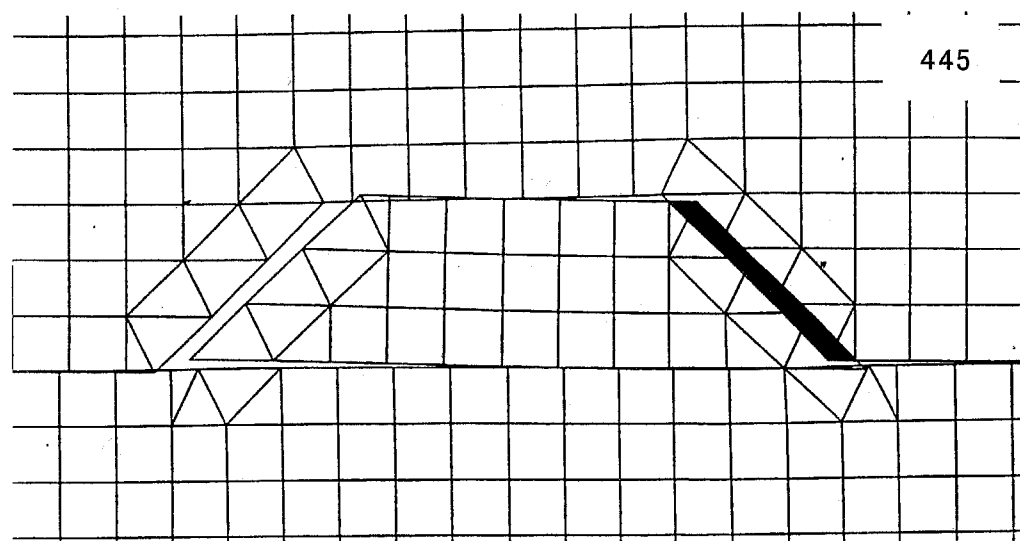
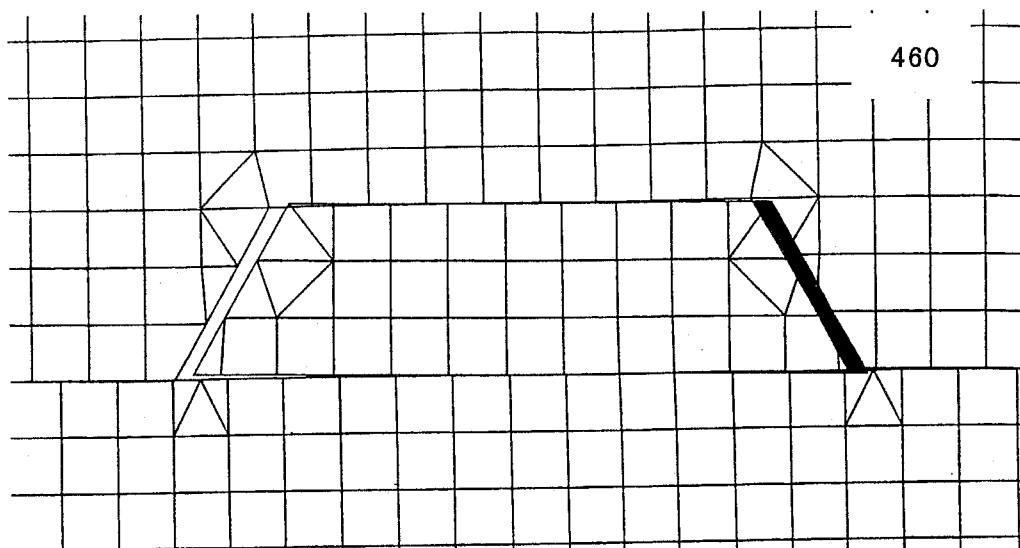


図 4-8(b) 解析対象の解析終了時要素変形図 (その 2)

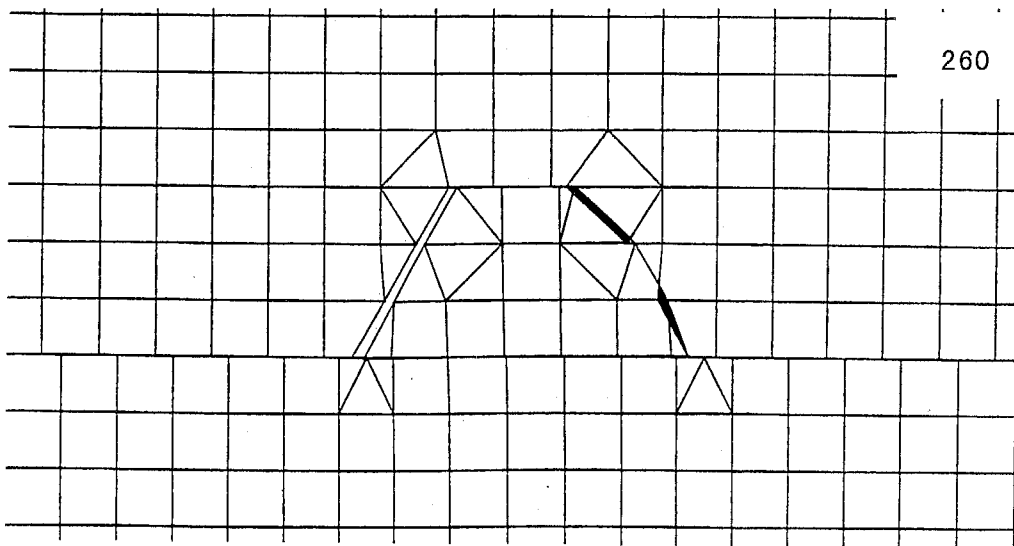
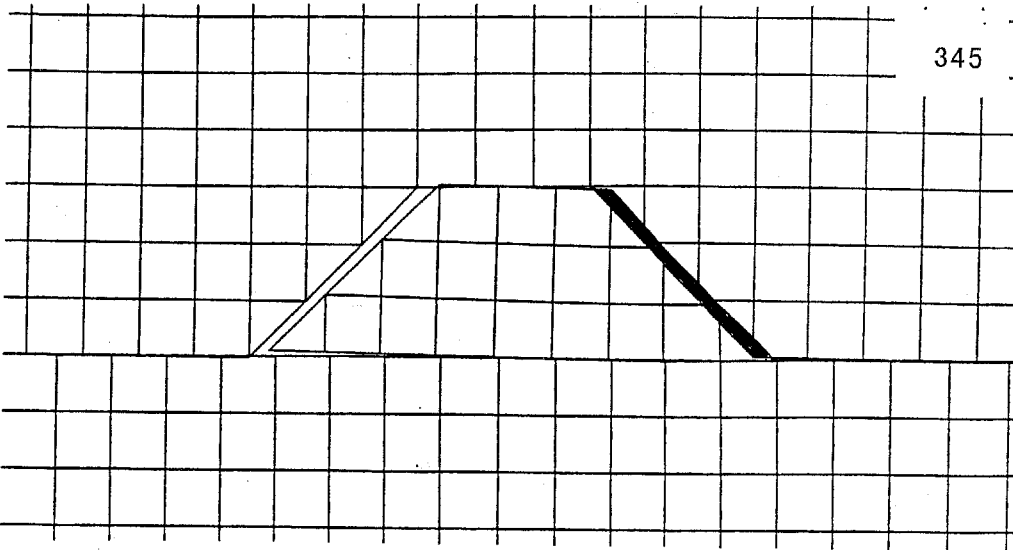
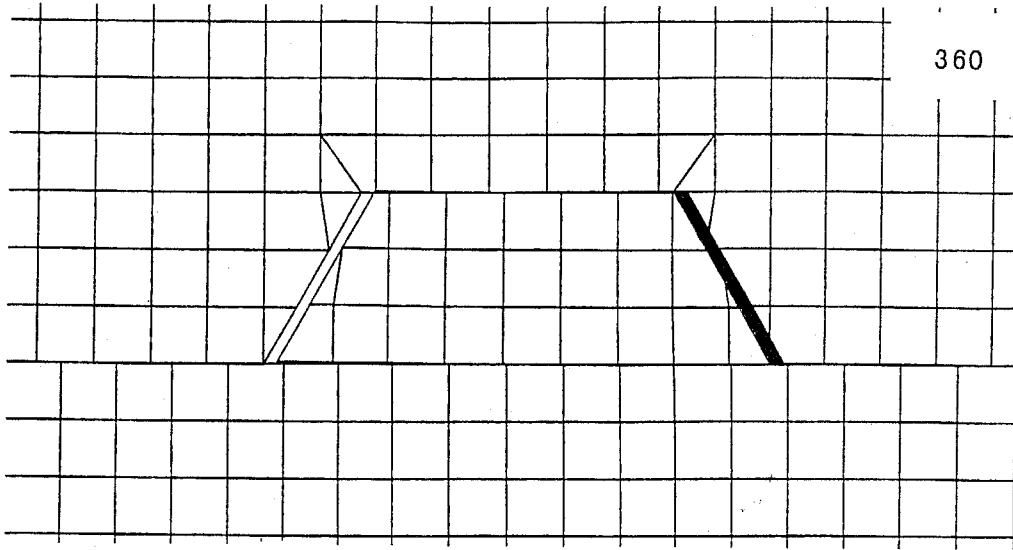


図 4-8(c) 解析対象の解析終了時要素変形図 (その 3)

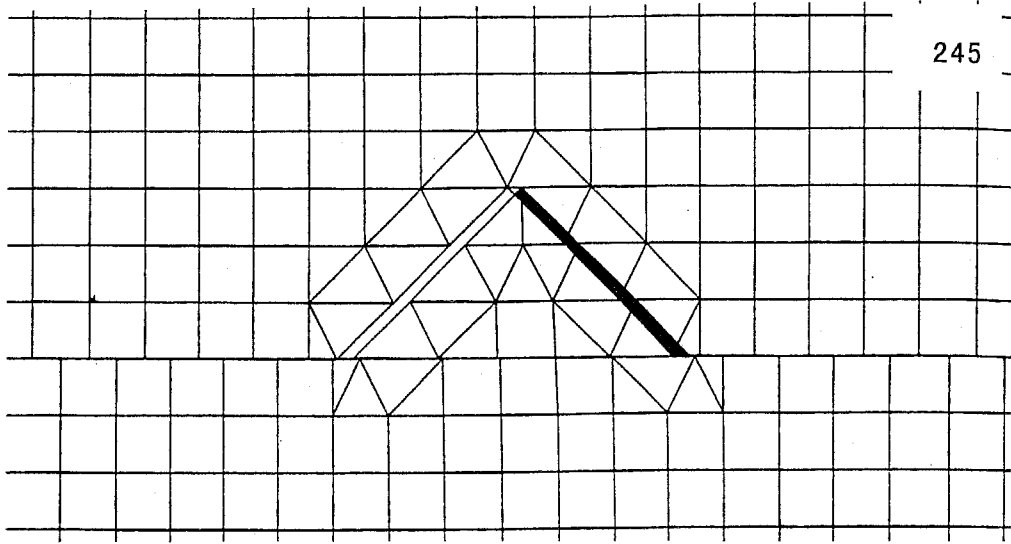


図 4-8(d) 解析対象の解析終了時要素変形図 (その 4)

表 4-3 解析による最大耐力と滑り変位

| 解析対象名 | シアキー底面寸法 b×h(mm) | 最大耐力 Q _{max} (tf) | 最大強度 τ _{max} (kgf/cm ²) | 最大耐力時の滑り変位 δ _{Hmax} (mm) | 生じた破壊パターン |
|-------|---------------------|----------------------------------|--|--------------------------------------|-----------|
| 560 | 150×183 | 3.23 | 11.75 | 0.076 | LB・OL |
| 545 | | 3.72 | 13.54 | 0.116 | LB・OL |
| 530 | | 5.48 | 19.95 | 0.265 | LB・OL・SR |
| 460 | 120×183 | 2.70 | 12.25 | 0.068 | LB・OL |
| 445 | | 3.18 | 14.47 | 0.102 | LB・OL |
| 430 | | 3.74 | 17.01 | 0.170 | LB・OL・SR |
| 360 | 90×183 | 2.21 | 13.38 | 0.054 | LB・OL |
| 345 | | 2.06 | 12.50 | 0.066 | LB・OL |
| 260 | 60×183 | 1.67 | 15.18 | 0.044 | LB |
| 245 | | 2.05 | 18.62 | 0.062 | LB・OL・SR |

$$\tau_{\max} = Q_{\max} / (b \cdot h)$$

LB：クラックリンク 2 の分離(シアキー底面せん断破壊に相当か)が認められる。

OL：シアキー側面の要素の重なり合い(シアキー側面圧壊に相当か)が認められる。

SR：シアキー部分の面内回転が認められる。

表 4-4 シアキー側面の要素の重なり合いの割合

| 解析対象名 | 解析終了時における要素の重なり合いの割合 (シアキー立面積に対する重なり部分の比)(%) |
|-------|---|
| 560 | 3.05 |
| 545 | 4.00 |
| 530 | 7.79 |
| 460 | 3.28 |
| 445 | 4.66 |
| 430 | 12.5 |
| 360 | 3.72 |
| 345 | 5.62 |
| 260 | 3.48 |
| 245 | 8.89 |

4.4 シアキーの形状が耐力および破壊性状におよぼす影響に関する実験

4.4.1 実験の目的

4.3節で得られた解析結果のうち、特に4.3.2項のシアキーの破壊性状については、1.2.3項および4.2.1項に示した既往の研究と一部異なると考えられる結果が得られた。そこで、この節では、4.3節での解析結果を検証すべく、シアキーの形状を変動要因としたせん断実験を行う。

4.4.2 実験概要・試験体

実験は、接合面粗さの測定を行わないことを除き、2.3.1項および3.2.1項の実験とほぼ同じで、次の4ステップに分けて行う。

①試験体先打ち部分製作→②試験体後打ち部分製作→③養生・脱型し接合面せん断力載荷→④検討

試験体における接合面とは、2.3.1項および3.2.1項と同様に図4-9に示す試験体の先打ち部分・後打ち部分の境界のことである。試験体は、接合面として30cm(長さ方向)×10cm(幅方向)の大きさを持ち、先打ち・後打ち各部分がそれぞれ凸字型断面をなし、試験体全体ではI型断面となっている。試験体一覧を表4-5に示す。試験体は、I類(4.6節での検討の主対象となる試験体)とII類(4.7節での検討の主対象となる試験体)に大別される。

試験体の変動要因は、

- 1) I類の試験体は、4.4.3項の「シアキーの形状」と「シアキーの個数」および4.4.4項の「外部拘束力の有無」の3種類。
- 2) II類の試験体は、4.4.3項の「シアキーの形状」と「シアキーの個数」の2種類。

I類の試験体の製作順序は、次の通りである。まず先打ち部分型枠を組み、接合面と接する型枠(JAS第932号の「コンクリート型わく用合板」に合致する合板)面上にシアキーを形成するための鉄製の台形突起(表面はJISによる▽▽記号で磨き処理したもの)を配置する。すなわち、シアキーにより凹む部分が存在する側は先打ち部分となる。次にスタブ補強筋を所定の位置に配し、コンクリートを打設する。この際、3.2.1項の逆方向打設と同じく、シアキー近傍にレイタンスなどの不純物が生成しない様にスタブ下面から打設する。つまり、コンクリート打設面が先打ち部分最下部となり、シアキーのある接合面が型枠面になる。先打ち部分打設後3日から6日間常温常圧空気中で養生後、後打ち部分型枠を組み、スタブ補強筋を所定の位置に配し、スタブ下面からコンクリートを打設する。よって、シアキーの突起部分は後打ち部分に含まれることになる。後打ち部分打設後およそ50日から100日間常温常圧空気中で養生後に型枠を脱型し、試験体を完成させる。

II類の試験体の製作順序は、以下の3点が異なる以外はI類の試験体と全く同じである。

- 1) I類の試験体では合板と鉄製の台形突起によりシアキーを形成したのに対し、II類の試験体では、接合面と接する型枠と一体に形成された鉄製の三角形突起(表面はJISによる▽▽記号で磨き処理したもの)を用いる。
- 2) 先打ち部分を打設して6日後に後打ち部分のコンクリートを打設する。
- 3) 後打ち部分打設後の養生期間をおよそ50日とする。

試験体製作順序の概念図を図4-10に示す。

コンクリートは2.3.1項および3.2.1項と同様、JASS5に可能な限り準拠して調合、練混ぜを行った。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は三重県鳥羽産石灰石砕石(ふるいにより最大粒径寸法20mm)、細骨材には宮城県広瀬川産川砂を用いた。力学的性質を表4-6に示すが、この節の実験はシアキーの破壊性状の把握が主目的のため、2.3.1

項および 3.2.1 項とは異なり、シアキーを形成している後打ち部分のコンクリート強度をその試験体の代表圧縮・割裂強度として以後の検討に用いる。

スタブ補強筋には、2.3.1 項および 3.2.1 項の実験で用いたものと同じ D6 を用いた。なお、試験体内に配筋される鉄筋はスタブ補強筋のみであり、シアキー内部および接合面上には鉄筋は存在しない。よって、2.3.1 項および 3.2.1 項と同様に、その物性、強度は実験の検討には用いない。

4.4.3 シアキーの形状と個数

試験体の変動要因のうち、I 類の試験体では、シアキーの形状を変化させる方法については、4.2 節の解析との整合性を確保するために、シアキーの底面長さ h と高さ t の比である長さ高さ比 h/t と、シアキーの側面角度 θ の 2 種類を変化させることとする。長さ高さ比の変化の方法としては、同じく 4.2 節の解析との整合性を確保するためと、シアキーがスタブ部分に貫入することを防ぐため、すべての試験体で高さは一定 ($t=20\text{mm}$) とし、底面長さを変化させる ($h=40\sim 100\text{mm}$) 方法を採用し、結果として長さ高さ比を 2 から 5 まで変化させる。なお、シアキーの奥行き (試験体の奥行きと同じ) b は、全ての試験体で一定 ($b=100\text{mm}$) とする。側面角度については、 $\theta=30^\circ$ 、 45° 、 60° と変化させる。また、比較のためにシアキーを全く設けない試験体も計画する。

シアキーの個数については 1 個を基本としたが、一部の試験体では形状の同じシアキーを複数個設けている。図 4-9 にシアキーの配列の詳細を示す。

II 類の試験体では、長さ高さ比が 2 で側面角度が 45° となるシアキーのみを対象とし、 $h=40\text{mm}$ で $t=20\text{mm}$ 、 $h=30\text{mm}$ で $t=15\text{mm}$ 、 $h=20\text{mm}$ で $t=10\text{mm}$ という 3 つの組み合わせを設定して、シアキーの形状を変化させる。シアキーの個数は表 4- の通り設定する。 $h=30\text{mm}$ で $t=15\text{mm}$ と $h=20\text{mm}$ で $t=10\text{mm}$ の場合のシアキーの配列を図 4-9 の試験体形状・配筋図中に示す。

4.4.4 接合面へのせん断力載荷および外部拘束力

せん断力 Q の載荷方法は、下記の外部拘束力を作用させるためのスクリーージャッキが新たに加わった以外は、2.3.4 項および 3.2.5 項の方法と全く同じである。使用した試験機は、全試験体を通じて 150tf ねじ制御式インストロン型試験機とした。載荷装置図を図 4-11 に示す。なお、2.3.4 項および 3.2.5 項の仮定と同様、試験機より載荷されたせん断力は、すべて接合面に伝達されるものと仮定する。よって、以下で「せん断力 Q 」とは、試験機の示す載荷力と同じである。

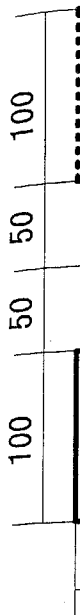
第 3 章では、目開き変位の発生を拘束するための内力 (外部拘束力) を発生させるために接合筋を配筋したが、この章で用いる試験体では、図 4-11 に示す様なスクリーージャッキにより目開き変位の発生を拘束した。スクリーージャッキの頂部にはロールベアリングを装着し、試験体とスクリーージャッキが常に垂直になる様にした。そして、実験開始時にはこのスクリーージャッキと L 型載荷フレームがごく軽く接触する程度 (すなわち外部拘束力 $N_f=0$) とし、せん断力載荷にともなう目開き変位の発生を拘束しようとするこゝで生じる外部拘束力が自然に増加する様にした。

4.4.5 接合面の滑り・目開き変位の測定とシアキー部分の主応力の測定

変位についても、3.2.6 項による方法と全く同じで、接合面長さ方向の先打ち・後打ち両部分のスタブ間相対変位 (滑り変位) を、2 軸型変位計により同時に測定した。この節においても 3.2.6 項と同じで、滑り変位 δ_H とは、図 4-12 に示す 4 箇所における滑り変位の単純平均をいう。

なお、外部拘束力により目開き変位は発生しないはずであるが、念のため 3.2.6 項と同じく、接合面に垂直の方向の両部分のスタブ間相対変位（目開き変位）を滑り変位と同時に測定した。

I 類試験体の一部には、シアキー部分表面に 3 軸型歪みゲージを貼付し、シアキー部分に生じる主応力の測定を行った。



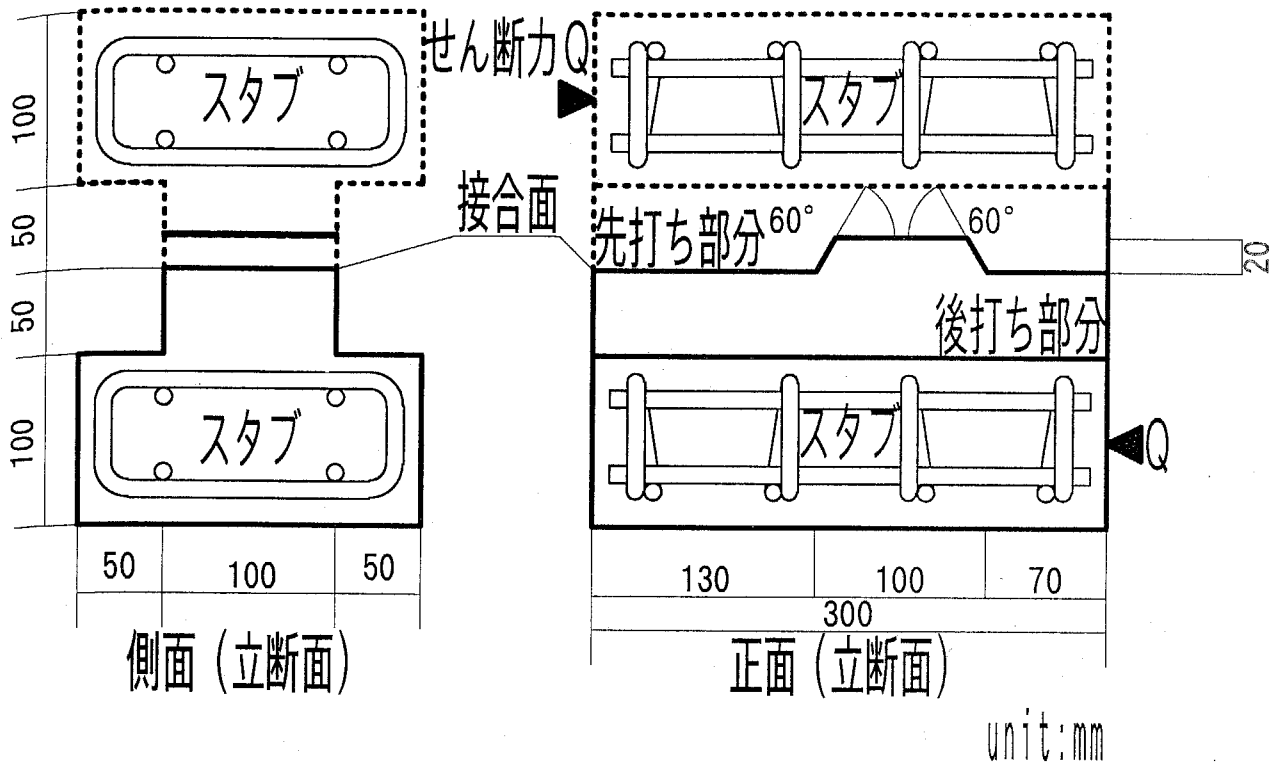
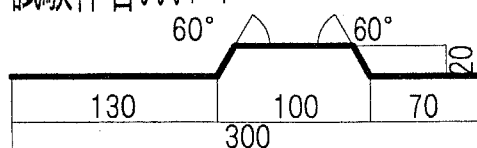
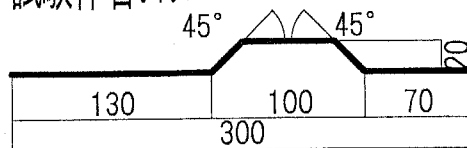


図 4-9(a) 試験体形状・配筋図 (その 1) (I 類試験体の全景)

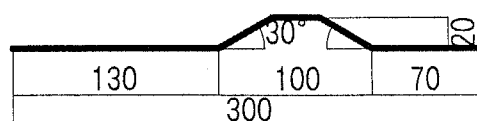
試験体名560*-*



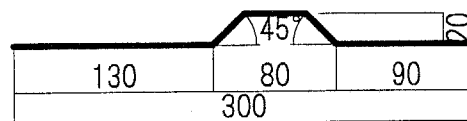
試験体名545*-*



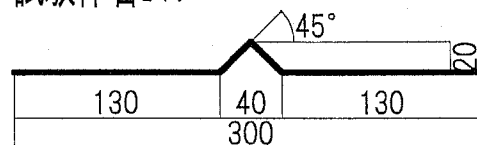
試験体名530*-*



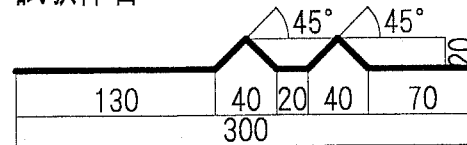
試験体名445*-*



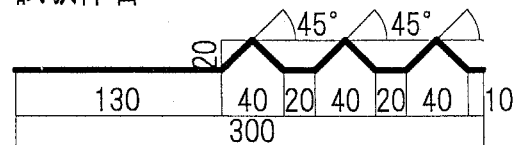
試験体名245*-*



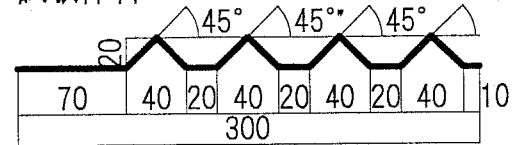
試験体名2452*-*



試験体名2453*-*

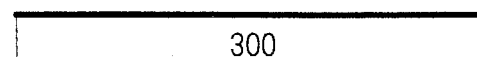


試験体名2454*-*



試験体名0*-*

シアキーなし



unit:mm

図 4-9(b) 試験体形状・配筋図 (その 2) (I 類試験体の接合面シアキーの詳細)

図 4

図 4

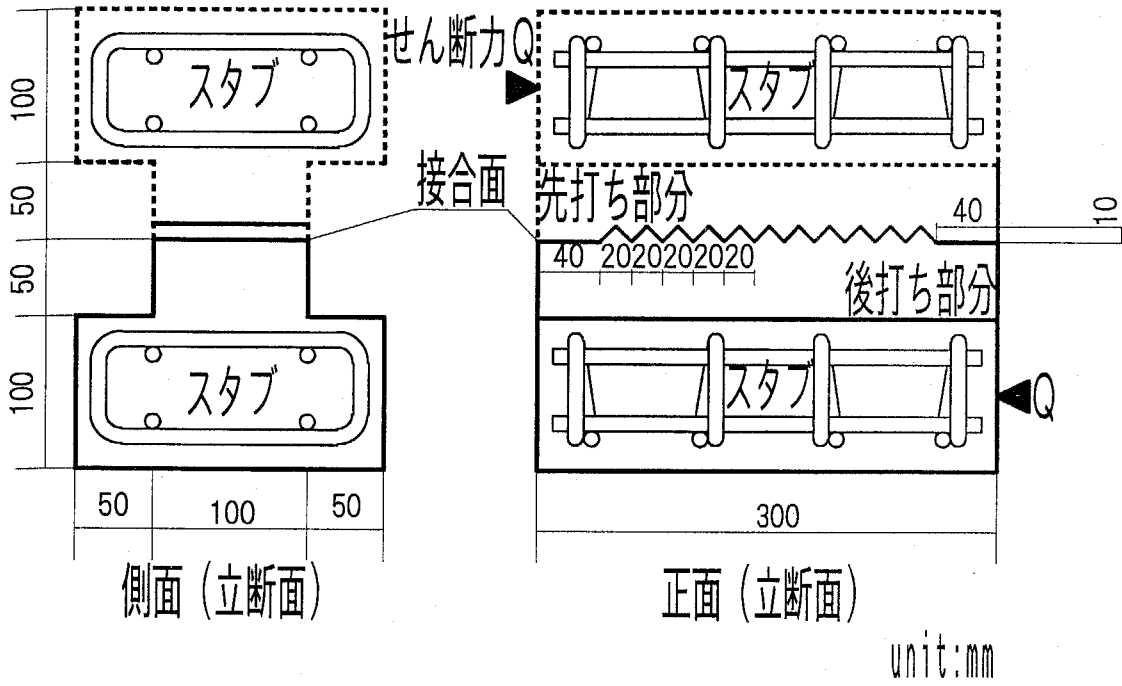


図 4-9(c) 試験体形状・配筋図 (その 3) (II類試験体<10-20 試験体>の全景)

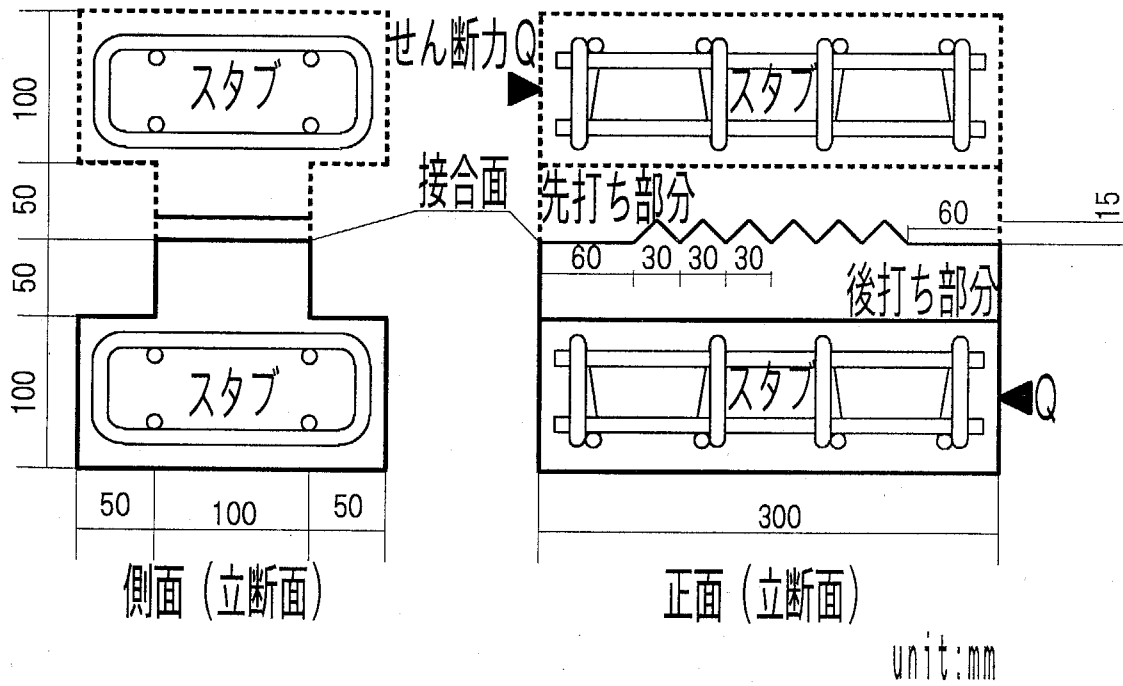


図 4-9(d) 試験体形状・配筋図 (その 4) (II類試験体<15-30 試験体>の全景)

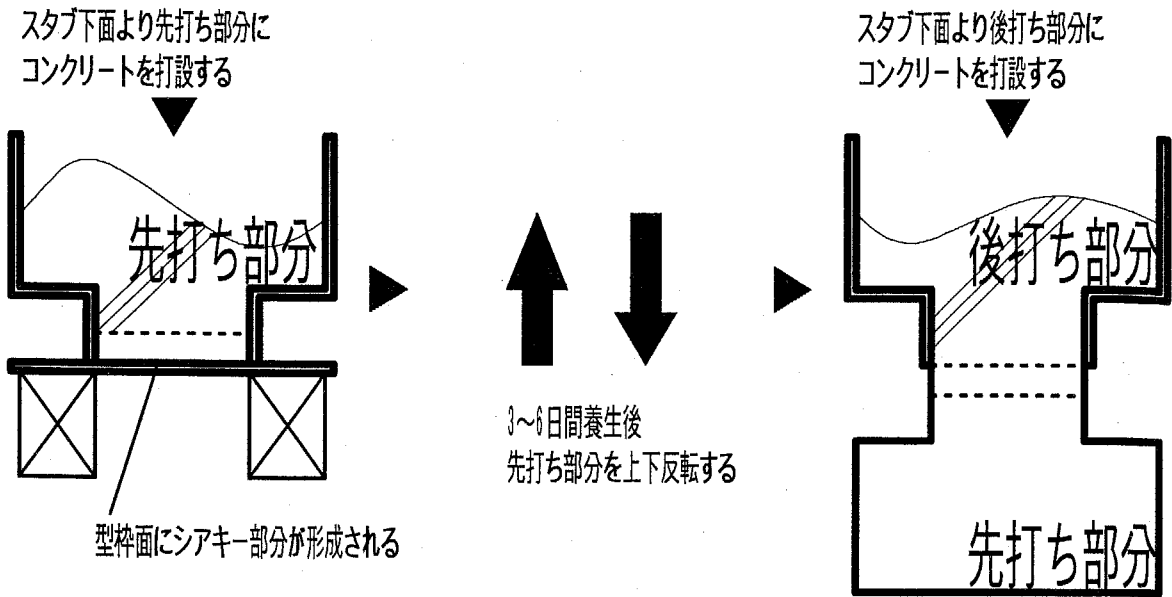


図 4-10 試験体製作の概念図

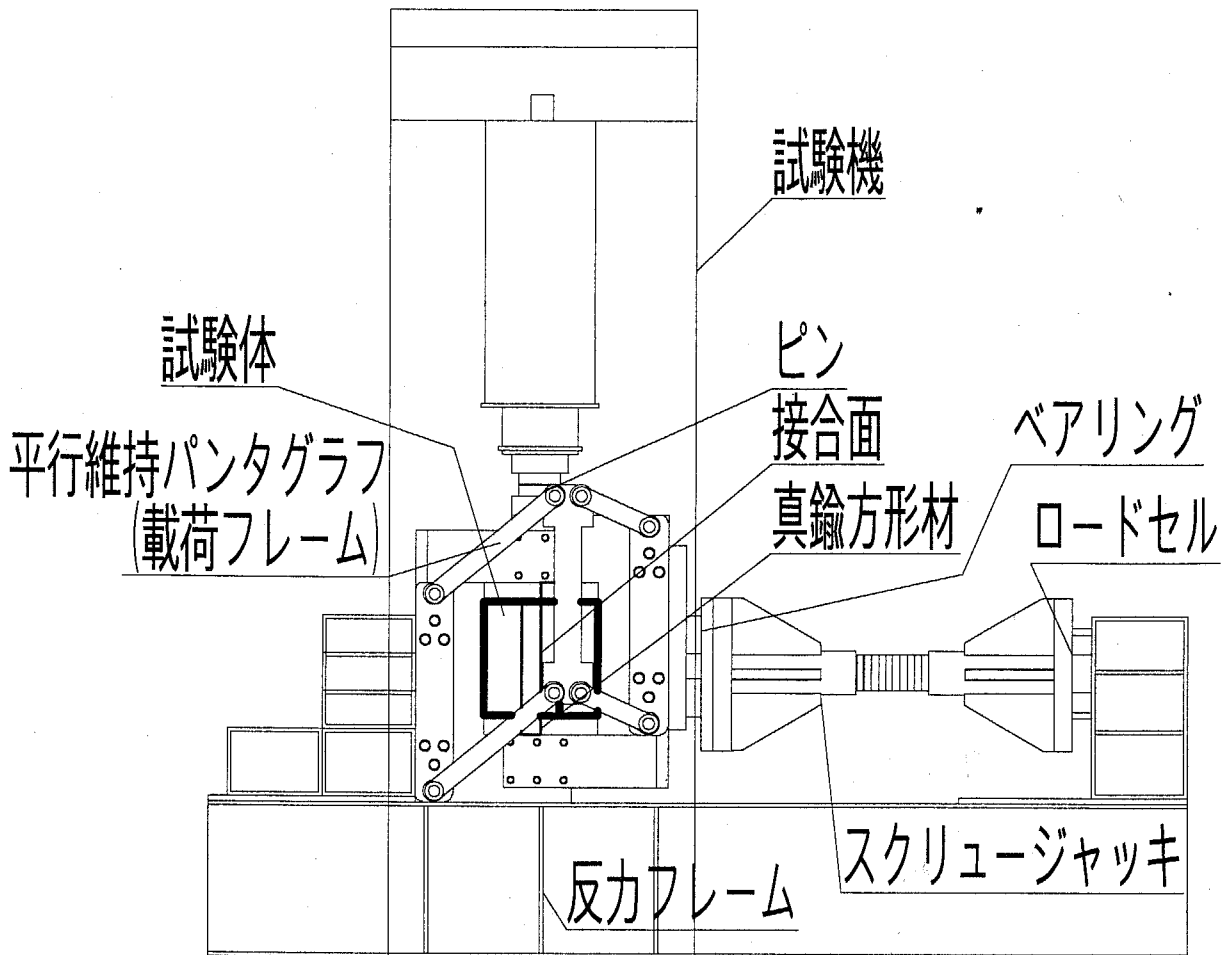
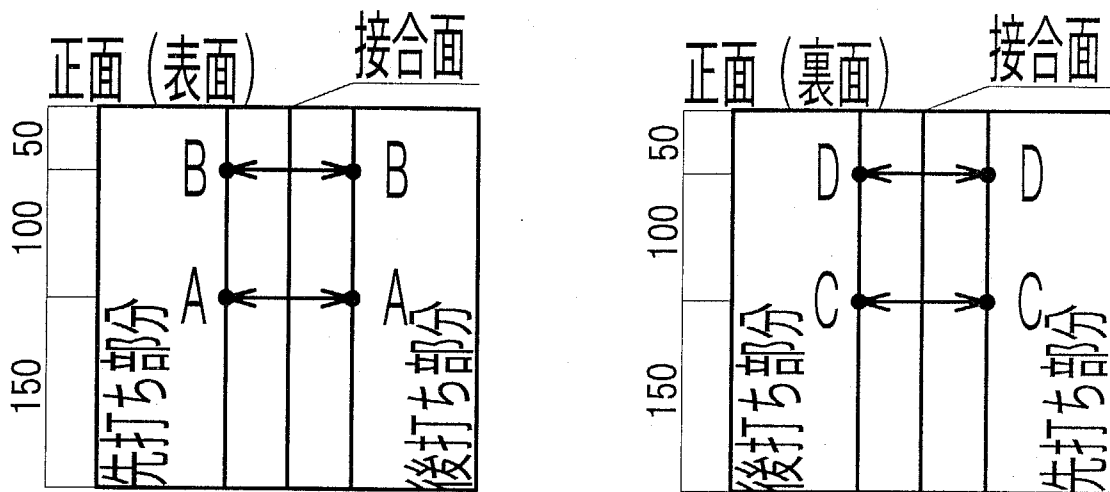


図 4-11 せん断力および外部拘束力载荷装置図



A-A間・B-B間・C-C間・D-D間の滑り変位
 ・目開き変位を測定

unit:mm

図 4-12 滑り変位・目開き変位の測定位置図

表 4-5(a) 試験体一覧 (その 1)

< I 類試験体 >

| 試験体名 | シアキーの形状と個数 | | | | | | 外部拘束力 N_f | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---------------------|-------------------|-------------|----|--------------------------|---------------------------|-------------|----|---|-----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|
| | 底面長さ $h(\text{mm})$ | 高さ $t(\text{mm})$ | 長さ高さ比 h/t | 個数 | 底面積総和 $A_c(\text{cm}^2)$ | 側面角度 $\theta(^{\circ})$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 560-1 | 100 | 20 | 5 | 1 | 100 | 60 | あり | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 560-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 560-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 560-4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 560N-1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 560N-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545-1 | | | | | | 100 | 20 | 5 | 1 | 100 | 45 | あり | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545-4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545-5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545-6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 545N-1 | | | | | | | | | | | 100 | 20 | 5 | 1 | 100 | 45 | なし | | | | | | | | | | |
| 545N-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 530-1 | 100 | 20 | 5 | 1 | 100 | | | | | | | | | | | | | 30 | あり | | | | | | | | |
| 530-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 530-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 530-4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 530N-1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 530N-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 445-1 | | | | | | 80 | 20 | 4 | 1 | 80 | | | | | | 45 | あり | | | | | | | | | | |
| 445-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 445-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 445-4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 245-1 | | | | | | 40 | | 20 | | 2 | | | | | | | | 1 | 40 | 45 | あり | | | | | | |
| 245-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 245-3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 245-4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2452-1 | 40 | 20 | 2 | 1 | 80 | | | | | | 45 | あり | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2452-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2453-1 | | | | | | | | | | | | | 40 | 20 | 3 | | | | 1 | | | 120 | 45 | あり | | | |
| 2453-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2454-1 | | | 40 | | 20 | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | 1 | | | 160 | 45 | あり |
| 2454-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-1 | | | | | | シアキーなし | | | | | | | | | なし | | | | | | | | | | | | |
| 0-2 | | | | | | JAS 準拠合板型枠面(先打ち部分)が接合面となる | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

試験体名が白抜きとなっている試験体は、II類試験体と共用。

表 4-5(b) 試験体一覧 (その 2)

< II 類試験体 >

| 試験体名 | シアキーの形状と個数 | | | | | | 外部拘束力 N_f | | |
|---------|---------------------|-------------------|-------------|-----|--------------------------|-------------------------|-------------|----|-----|
| | 底面長さ $h(\text{mm})$ | 高さ $t(\text{mm})$ | 長さ高さ比 h/t | 個数 | 底面積総和 $A_c(\text{cm}^2)$ | 側面角度 $\theta(^{\circ})$ | | | |
| 2452-1 | 40 | 20 | 2 | 2 | 80 | 45 | あり | | |
| 2452-2 | | | | 3 | 120 | | | | |
| 2453-1 | | | | | | | | 4 | 160 |
| 2453-2 | | | | | | | | | |
| 2454-1 | | | | | | | | 11 | 220 |
| 2454-2 | | | | | | | | | |
| 10-20-1 | | | | | | | | | |
| 10-20-2 | 20 | 10 | 6 | 180 | | | | | |
| 10-20-3 | | | | | | | | | |
| 15-30-1 | | | | | | | | | |
| 15-30-2 | 30 | 15 | 6 | 180 | | | | | |
| 15-30-3 | | | | | | | | | |

試験体名が白抜きとなっている試験体は、I 類試験体と共用。

表 4-6(a) 使用コンクリートの力学的性質 (その1) (I類試験体)

| 試験体名 | 先打ち部分用コンクリート | | | | 後打ち部分用コンクリート | | | | 代表強度 | | |
|---|--------------|---------------------------------|------------|--------------|--------------|---------------------|----------|------------|--------------|------------------|------------------|
| | 材齢 (日) | kgf/cm ² 圧縮 強度 | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 材齢 (日) | kgf/cm ² | | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 圧縮 σ_B | 割裂 σ_t |
| | | | | | | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | | |
| 560-1、545-1、530-1 445-1、245-1、0-1 | 98 | 256 | 4.1 | 10.2 | 94 | 231 | 20.9 | 3.8 | 10.2 | 231 | 20.9 |
| 560-2、545-2、530-2 445-2、245-2、0-2 | 88 | 263 | 3.8 | 9.5 | 85 | 254 | 20.1 | 4.6 | 9.8 | 254 | 20.1 |
| 560-3、560N-1、545-3 545N-1、530-3、530N-1 | 82 | 226 | 3.9 | 8.6 | 78 | 197 | 17.0 | 4.3 | 8.6 | 197 | 17.0 |
| 560-4、560N-2、545-4 545N-2、530-4、530N-2 | 64 | 255 | 3.7 | 9.1 | 58 | 225 | 21.3 | 4.5 | 9.5 | 225 | 21.3 |
| 545-5、445-3、245-3 2452-1、2453-1、2454-1 | 55 | 234 | 4.0 | 11.2 | 52 | 212 | 22.5 | 4.8 | 10.0 | 212 | 22.5 |
| 545-6、445-4、245-4 2452-2、2453-2、2454-2 | 50 | 235 | 3.8 | 8.8 | 43 | 224 | 20.5 | 3.8 | 9.9 | 224 | 20.5 |

「代表 (圧縮および割裂) 強度」は、後打ち部分用コンクリートの (圧縮および割裂) 強度と同じ。

表 4-6(b) 使用コンクリートの力学的性質 (その2) (II類試験体)

| 試験体名 | 先打ち部分用コンクリート | | | | 後打ち部分用コンクリート | | | | 代表強度 | | |
|---|--------------|---------------------------------|------------|--------------|--------------|---------------------|----------|------------|--------------|------------------|------------------|
| | 材齢 (日) | kgf/cm ² 圧縮 強度 | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 材齢 (日) | kgf/cm ² | | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 圧縮 σ_B | 割裂 σ_t |
| | | | | | | 圧縮 強度 | 割裂 強度 | | | | |
| 2452-1、2453-1 2454-1 | 55 | 234 | 4.0 | 11.2 | 52 | 212 | 22.5 | 4.8 | 10.0 | 212 | 22.5 |
| 2452-2、2453-2 2454-2 | 50 | 235 | 3.8 | 8.8 | 43 | 224 | 20.5 | 3.8 | 9.9 | 224 | 20.5 |
| 10-20-1、10-20-2 10-20-3、15-30-1 15-30-2、15-30-3 | 58 | 245 | 3.8 | 9.8 | 52 | 205 | 19.9 | 4.5 | 9.2 | 205 | 19.9 |

「代表 (圧縮および割裂) 強度」は、後打ち部分用コンクリートの (圧縮および割裂) 強度と同じ。

4.5 打
 載荷
 載荷フ
 認した
 と判断
 ん断変
 試験体
 同じ (行維持
 載荷
 面積A。
 せん断
 り変位
 下と共
 生じな
 の性状
 II類
 は全く
 その後
 試験
 試験体
 類に大
 1) 載荷
 (「
 2) シア
 ける
 3) ます
 りシ
 4) シア
 の破
 I類
 は、44
 用しか
 すなわ
 項およ
 った。し
 なる (何
 これは、
 に概ね
 すなわ
 側面角
 1) 長さ
 2) 長さ
 3) 長さ
 と判断

4.5 接合面せん断力載荷実験結果

載荷において、試験体と載荷フレームとの間に装着した真鍮製方形材は、試験体および載荷フレームとはだすきなく密着していることを全試験体について目視および指により確認した。すなわち、せん断力は、載荷フレームから方形材を介して試験体に伝わっていると判断され、スタブ間相対変位であるところの滑り変位 δ_H は、試験体の接合面以外のせん断変形量をほとんど含まない、接合面での純粋な滑り変位であると考えられる。また、試験体の表裏同じ側の面における2箇所の変位計の目開き変位はいずれの試験体でもほぼ同じ（ほぼ0）であり、先打ち部分と後打ち部分がほぼ平行な状態だったと判断され、平行維持パンタグラフの装着が有効であったと考えられる。

載荷結果を表4-7に示し、せん断力 Q と滑り変位の関係およびせん断力をシアキーの底面積 A_c ($A_c = b \cdot h$) で除したせん断応力度 τ と滑り変位の関係を図4-13および図4-14に示す。せん断力と滑り変位の関係であるが、I類の試験体では、全ての試験体で、せん断力が滑り変位発生荷重 Q_{slp} に達するまでは滑り変位は全く生じず、滑り変位発生荷重後に耐力低下と共に滑り変位が生じた。その後は再度や再々度の耐力上昇が生じたものと耐力上昇が生じなかったものが混在した。同一変動要因の試験体であってもせん断力-滑り変位関係の性状が異なる例が多く、性状の統一的な把握は困難であった。

II類の試験体では、全ての試験体で、せん断力が最大耐力 Q_{max} に達するまでは滑り変位は全く生じず、最大耐力後に耐力低下と共に滑り変位が生じた（すなわち、 $Q_{slp} = Q_{max}$ ）。その後は再度や再々度の耐力上昇が生じたものと耐力上昇が生じなかったものが混在した。

試験体の最終破壊状況の一例を写真4-1に示す（全部の写真は巻末の付録に掲載する）。試験体の破壊形式は、載荷途中での目視による観察の結果、表4-7に示す通り下記の4種類に大別できる。

- 1) 載荷にともないシアキー底面に沿ってひび割れが入りそのままシアキーが切れる形式（「シアキー底面せん断破壊 SS」と名付ける）。
- 2) シアキー側面のコンクリートが徐々に圧壊する形式（「シアキー側面圧壊 SC」と名付ける）。
- 3) まずスタブ部分に斜め方向のひび割れが生じ、最終的にはシアキー底面のひび割れによりシアキーが切れる形式（「斜めひび割れ破壊 DC+SS」と名付ける）。
- 4) シアキー底面あるいは側面のいずれにも該当しない箇所での破壊による形式（「その他の破壊 OT」と名付ける）。

I類の試験体では、外部拘束力 N_f が作用しかつ長さ高さ比 h/t が4以下となる試験体は、445-3試験体を除きすべてシアキー底面せん断破壊となった。一方、外部拘束力が作用しかつ長さ高さ比が5である試験体では、側面角度 θ の違いにより破壊形式が異なる。すなわち、側面角度が 60° の試験体では、4体すべてで斜めひび割れ破壊となり、1.2.3項および4.2.1項に示す「 $h/t \leq 5$ ならシアキー底面のせん断破壊」を裏付ける結果となった。しかし、側面角度が 45° 以下の試験体では、シアキー側面圧壊となる割合が大きくなる（側面角度が 45° では5体中4体、 30° の試験体では3体中2体）結果となった。これは、1.2.3項および4.2.1項に示す既往の研究結果とは異なり、4.3.2項での解析結果に概ね合致する結果となった。

すなわち、せん断力を受けるシアキーの破壊性状は、長さ高さ比によるほかにシアキー側面角度によっても変化するものと考えられ、実験結果および4.3.2項の解析結果から、

- 1) 長さ高さ比が4未満ではシアキー底面せん断破壊。
- 2) 長さ高さ比が5で側面角度が 60° 以上ではシアキー底面せん断破壊。
- 3) 長さ高さ比が5で側面角度が 45° 以下ではシアキー側面圧壊と判断される。

外部拘束力が作用しない試験体では、斜めひび割れ破壊かその他の破壊となった。

II類の試験体では、せん断力载荷による試験体の破壊形式は、10-20-1 試験体が斜めひび割れ破壊となり、15-30-1 試験体はその他の破壊となったが、他の4体はいずれも凹凸の底面せん断破壊となった。シアキーの側面圧壊は生じなかった。よって、 $h=20\text{mm}$ で $t=10\text{mm}$ および $h=30\text{mm}$ で $t=15\text{mm}$ のいずれでも、凹凸の底面せん断破壊が生じる可能性が極めて高いと判断される。これは、上記 1)の結果および 1.2.3 項と 4.2.1 項で示した既往の研究の成果と一致している。

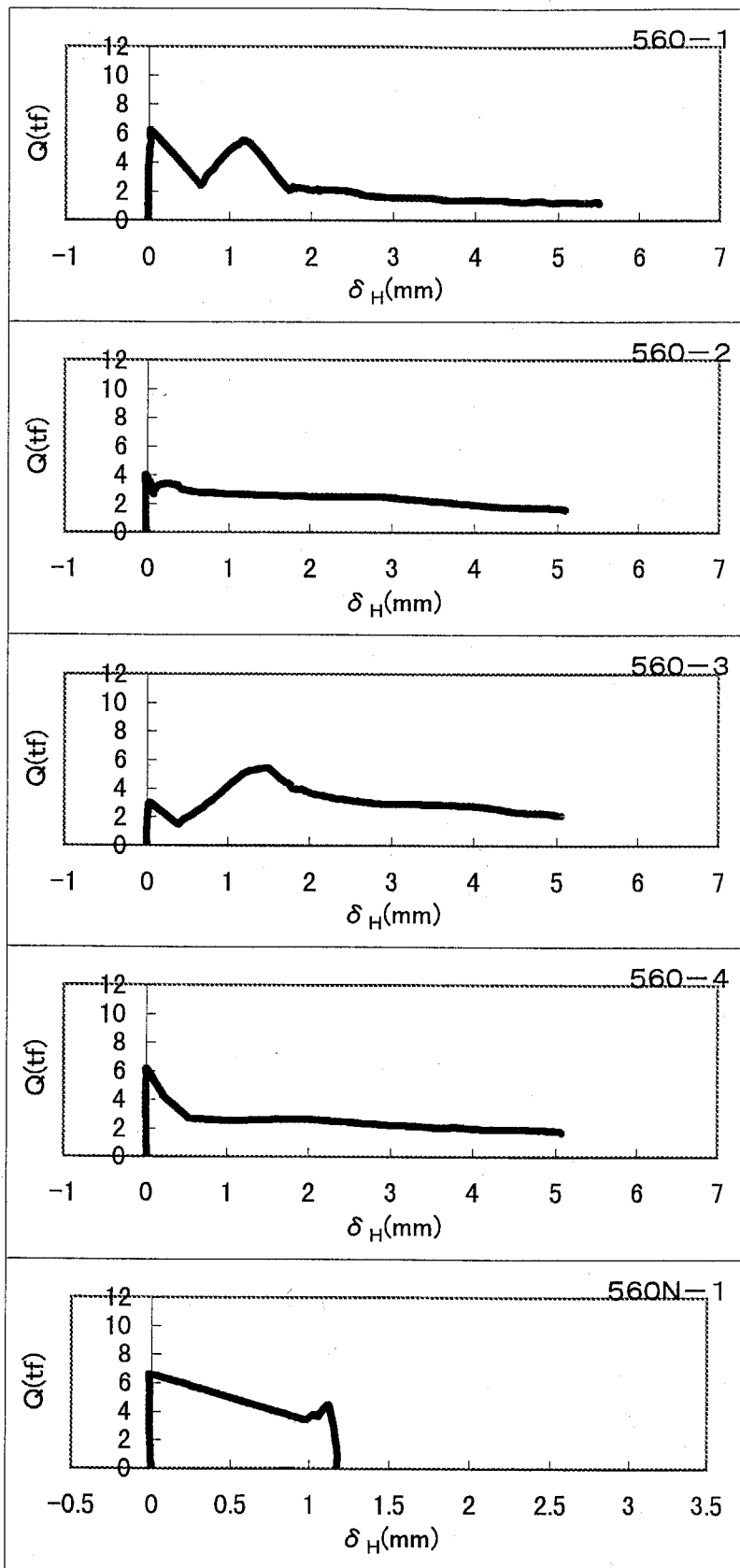


図 4-13(a) せん断力-滑り変位関係 (その 1)
(I 類試験体)

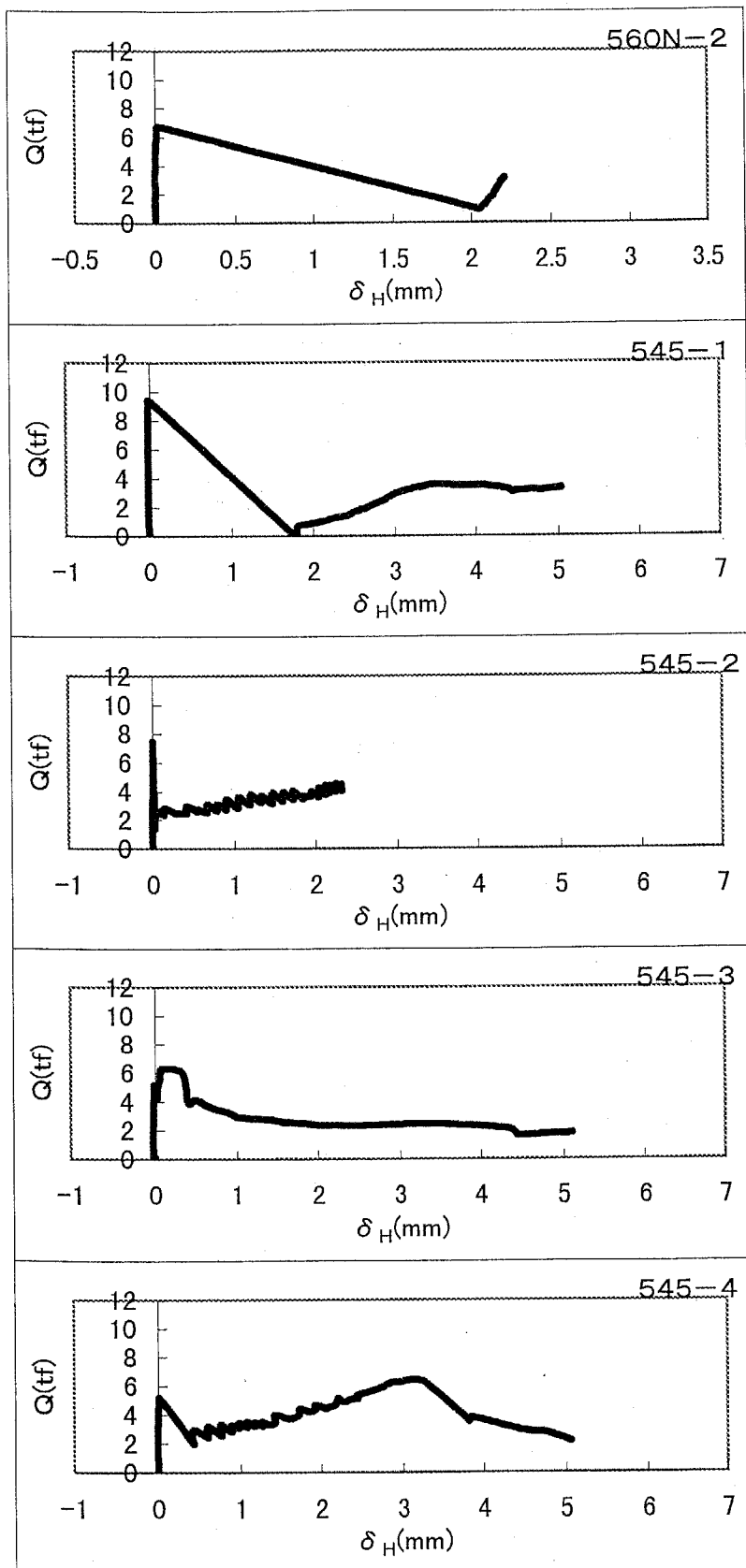


図 4-13(b) せん断力-滑り変位関係 (その 2)
(I 類試験体)

545-6 試験体は荷重失敗

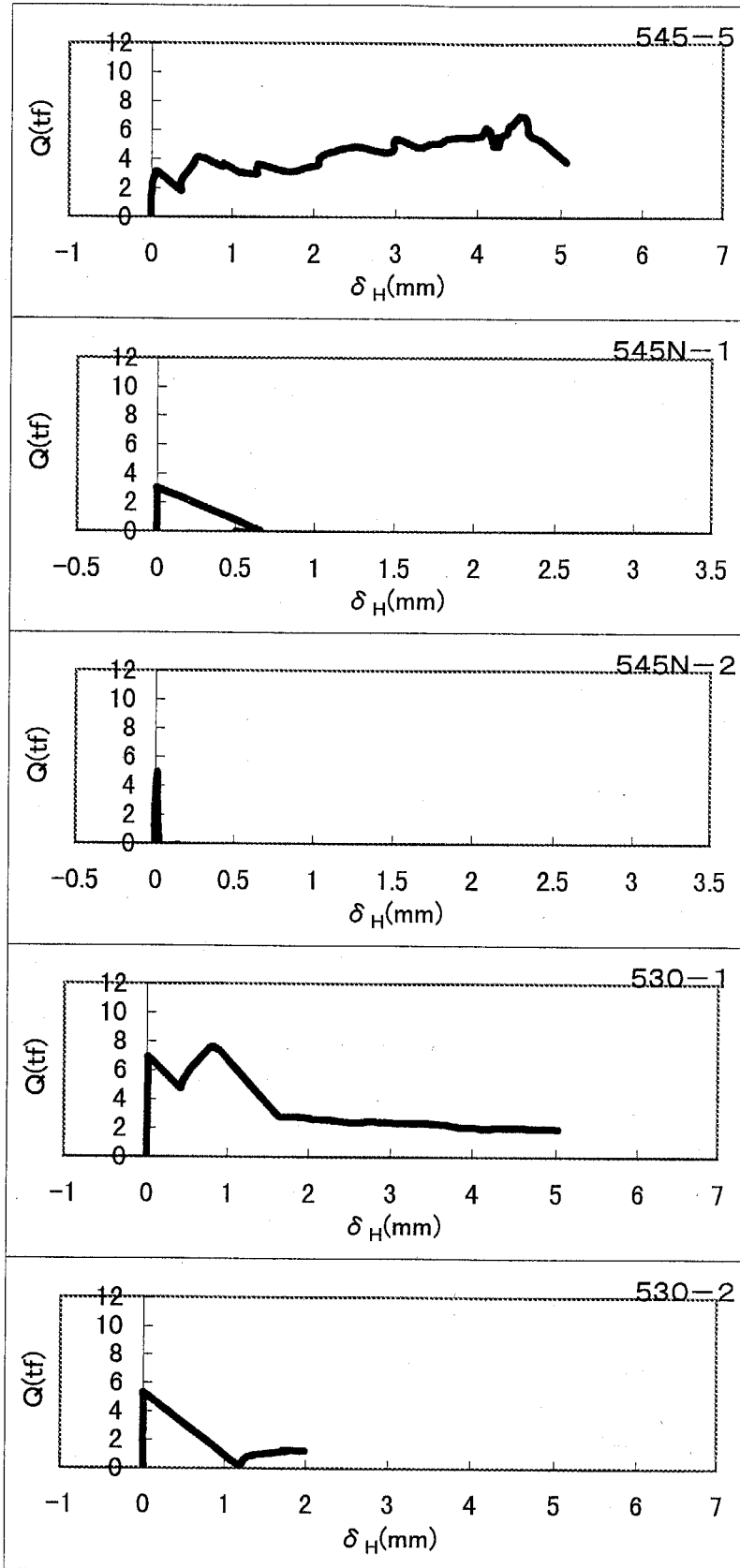


図 4-13(c) せん断力-滑り変位関係 (その 3)
(I 類試験体)

530-3 試験体は荷重失敗

530N-1 試験体は荷重失敗

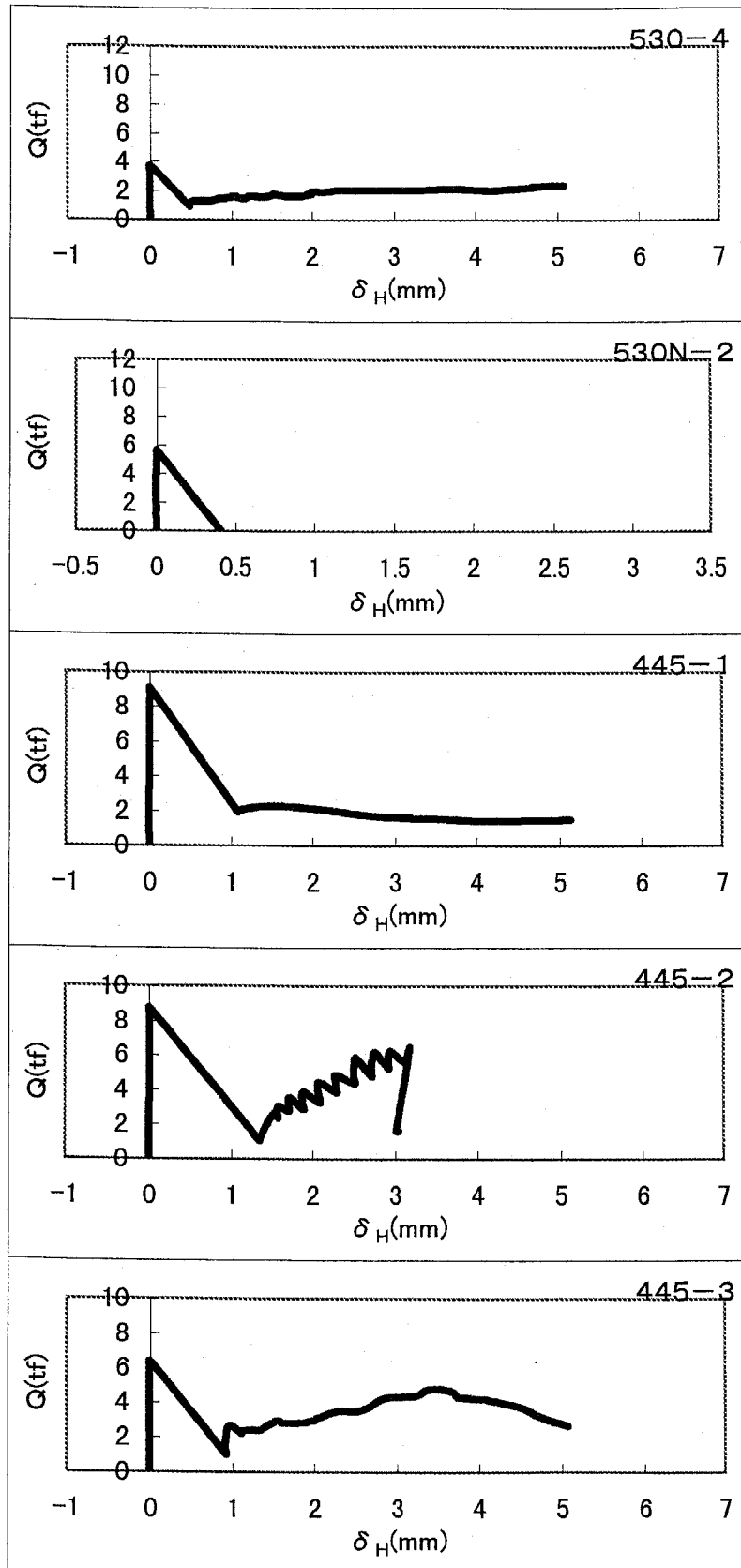


図 4-13(d) せん断力-滑り変位関係 (その 4)
(I 類試験体)

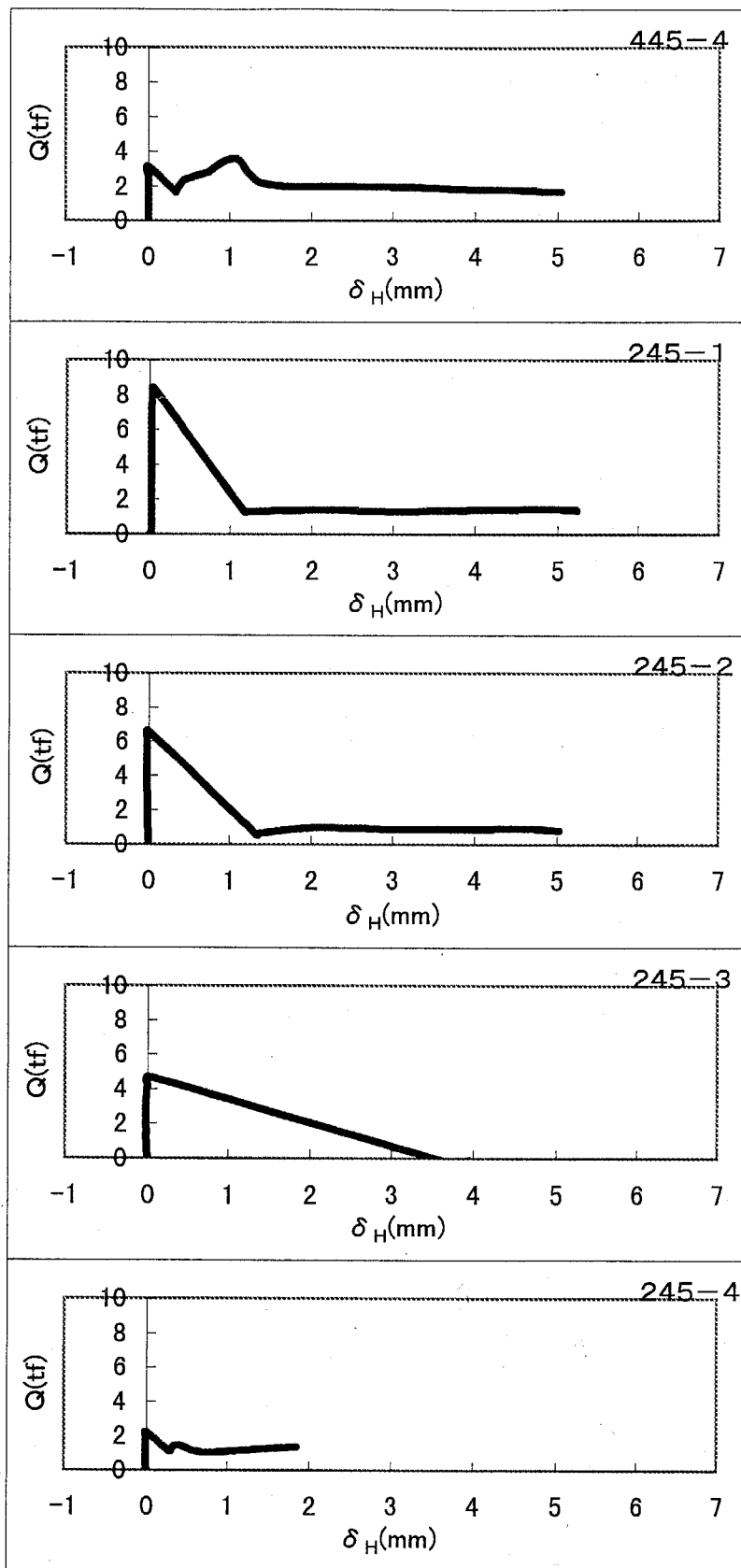


図 4-13(e) せん断力-滑り変位関係 (その 5)
(I 類試験体)

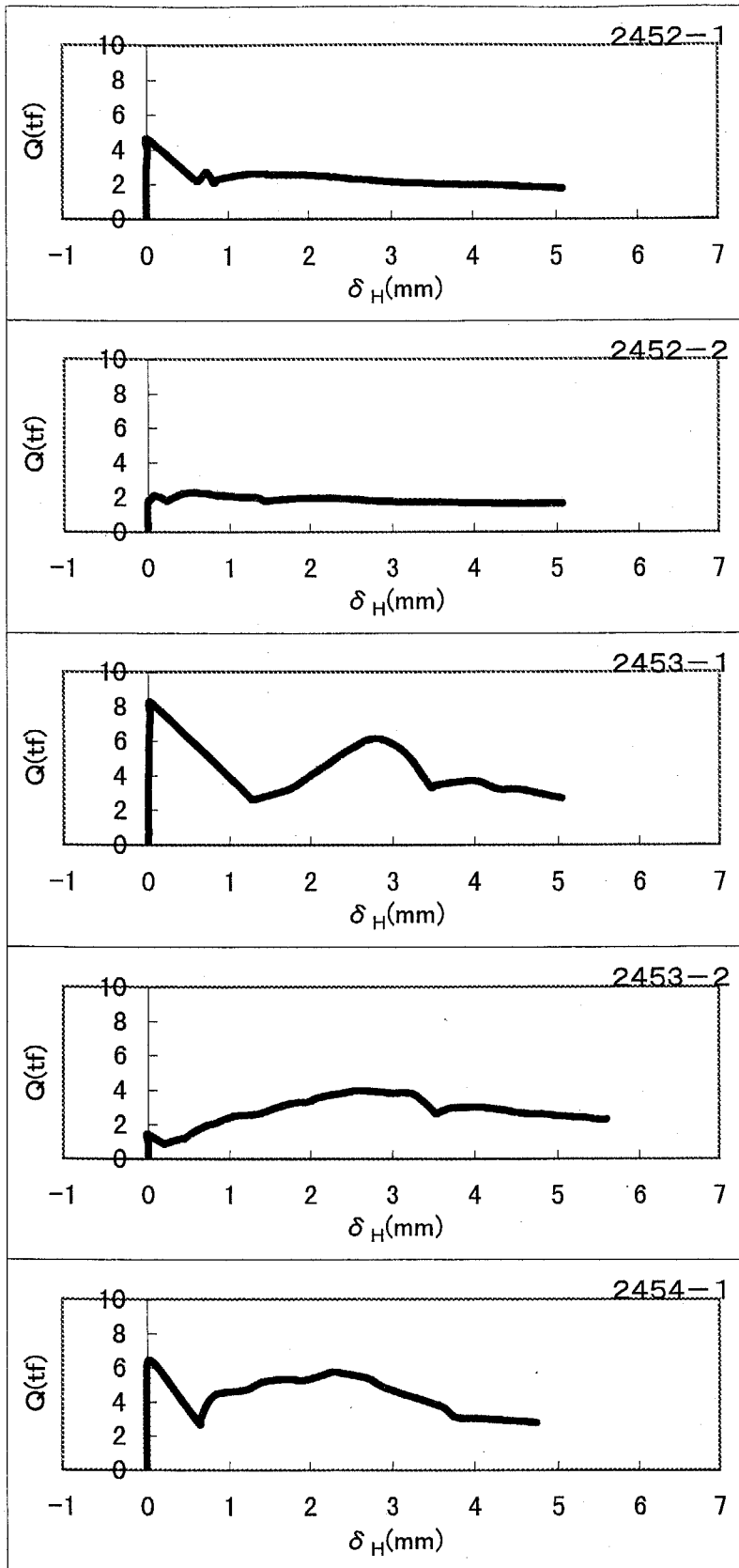


図 4-13(f) せん断力-滑り変位関係 (その 6)
(I 類試験体)

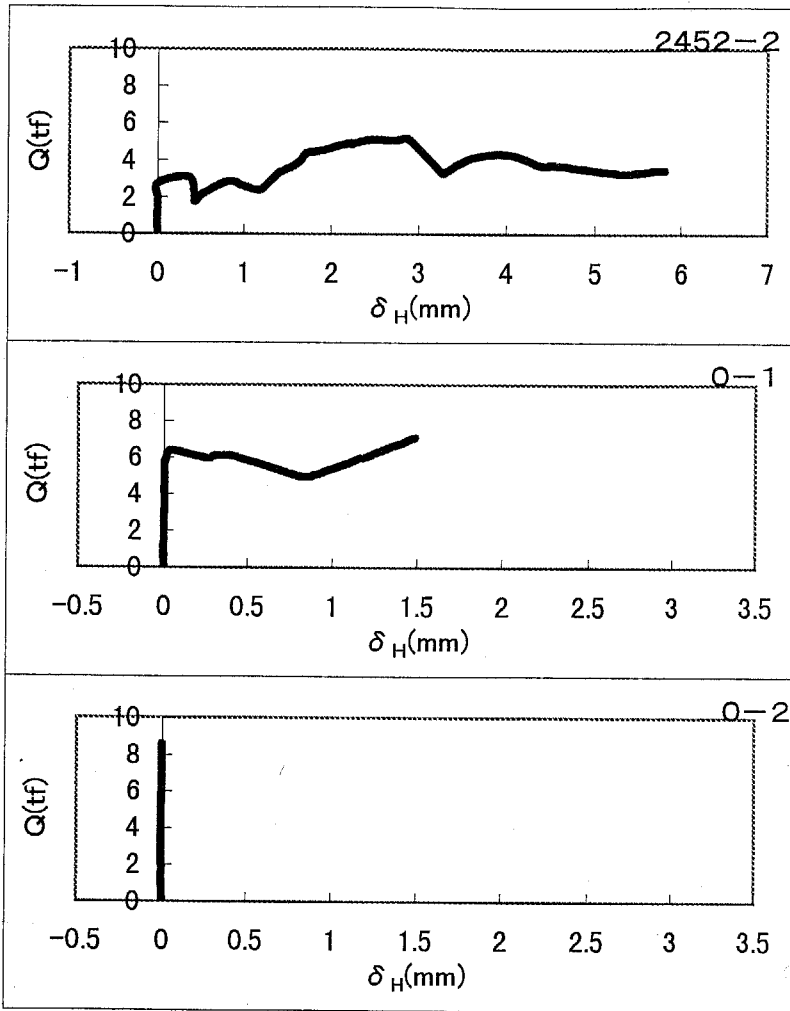


図 4-13(g) せん断力-滑り変位関係 (その 7)
(I 類試験体)

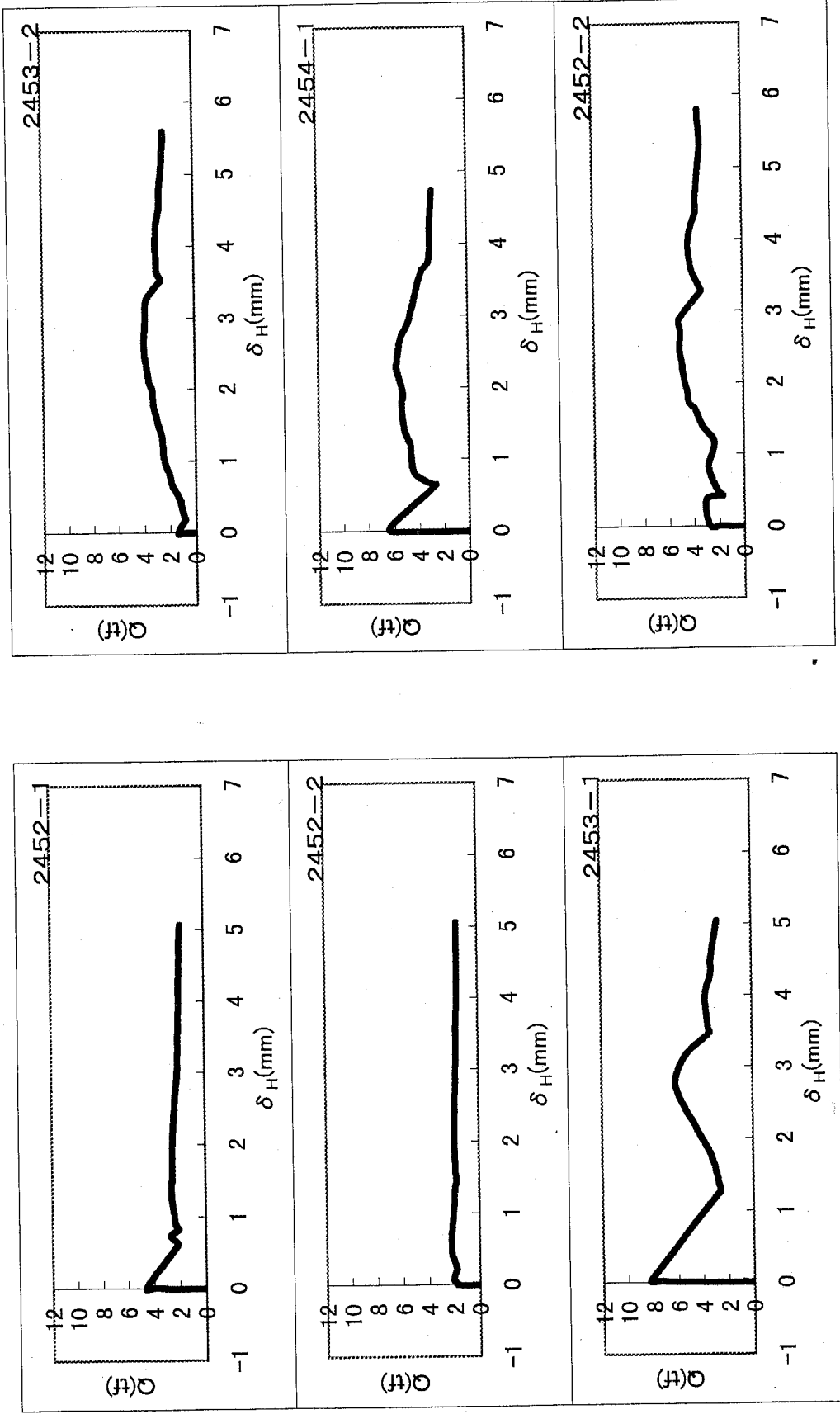
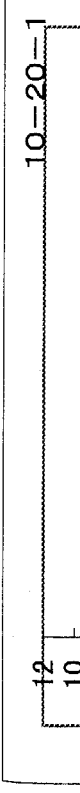


図 4-13(h) せん断力-滑り変位関係 (その 8)
(II類試験体)



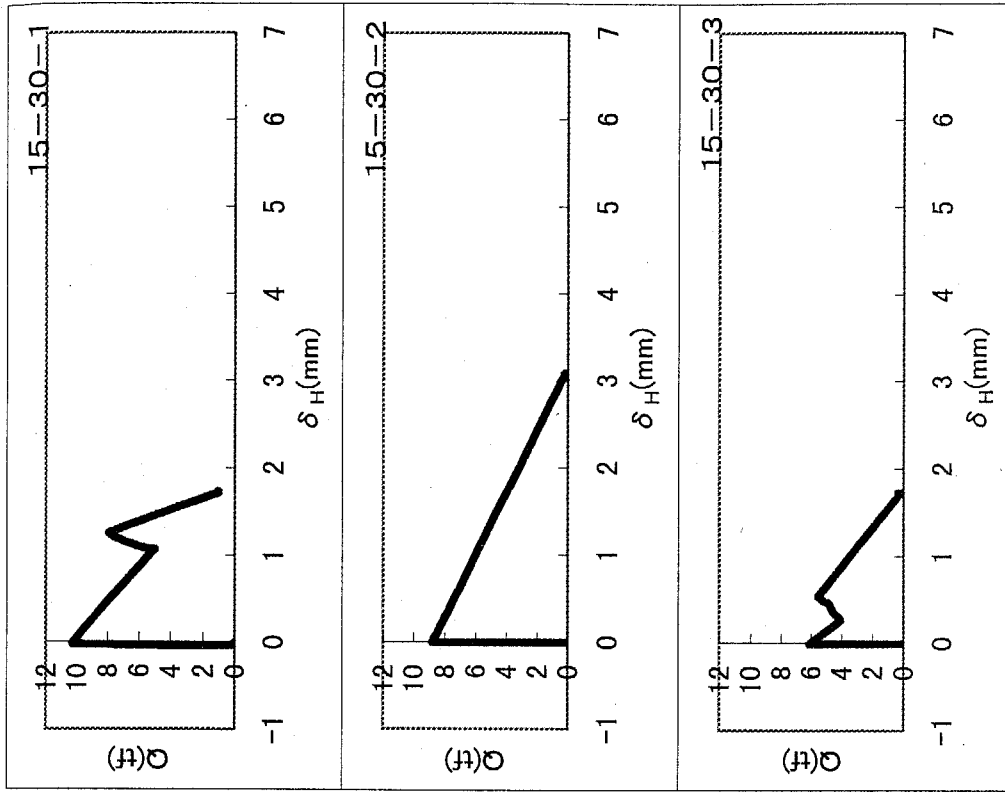
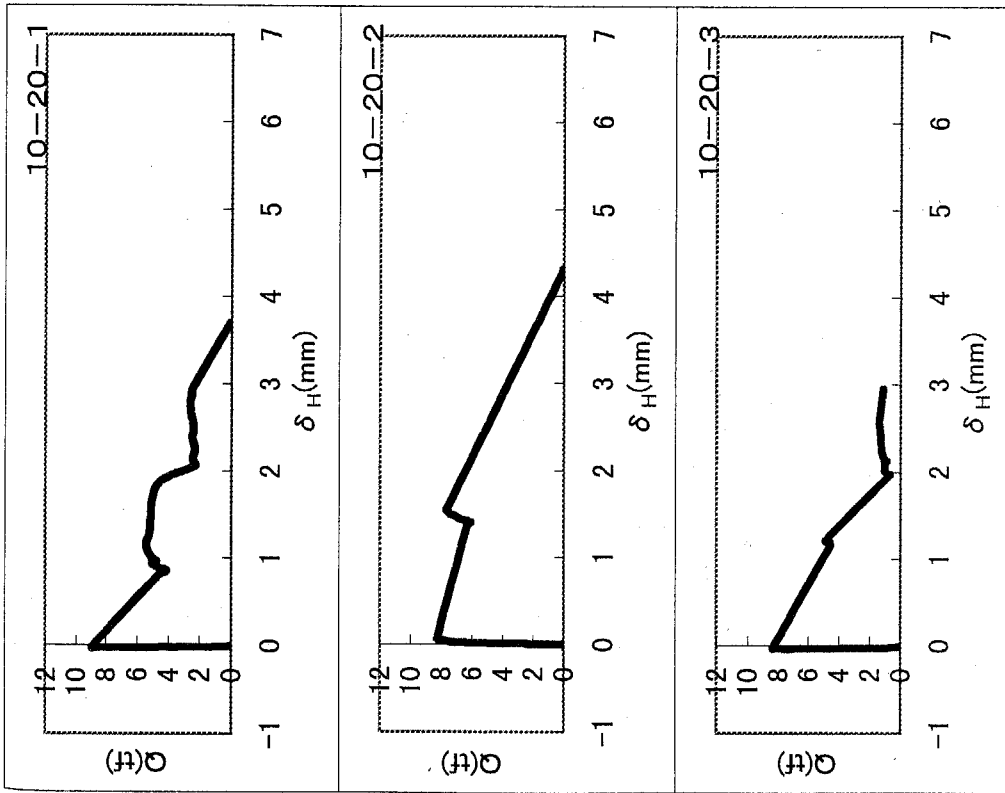
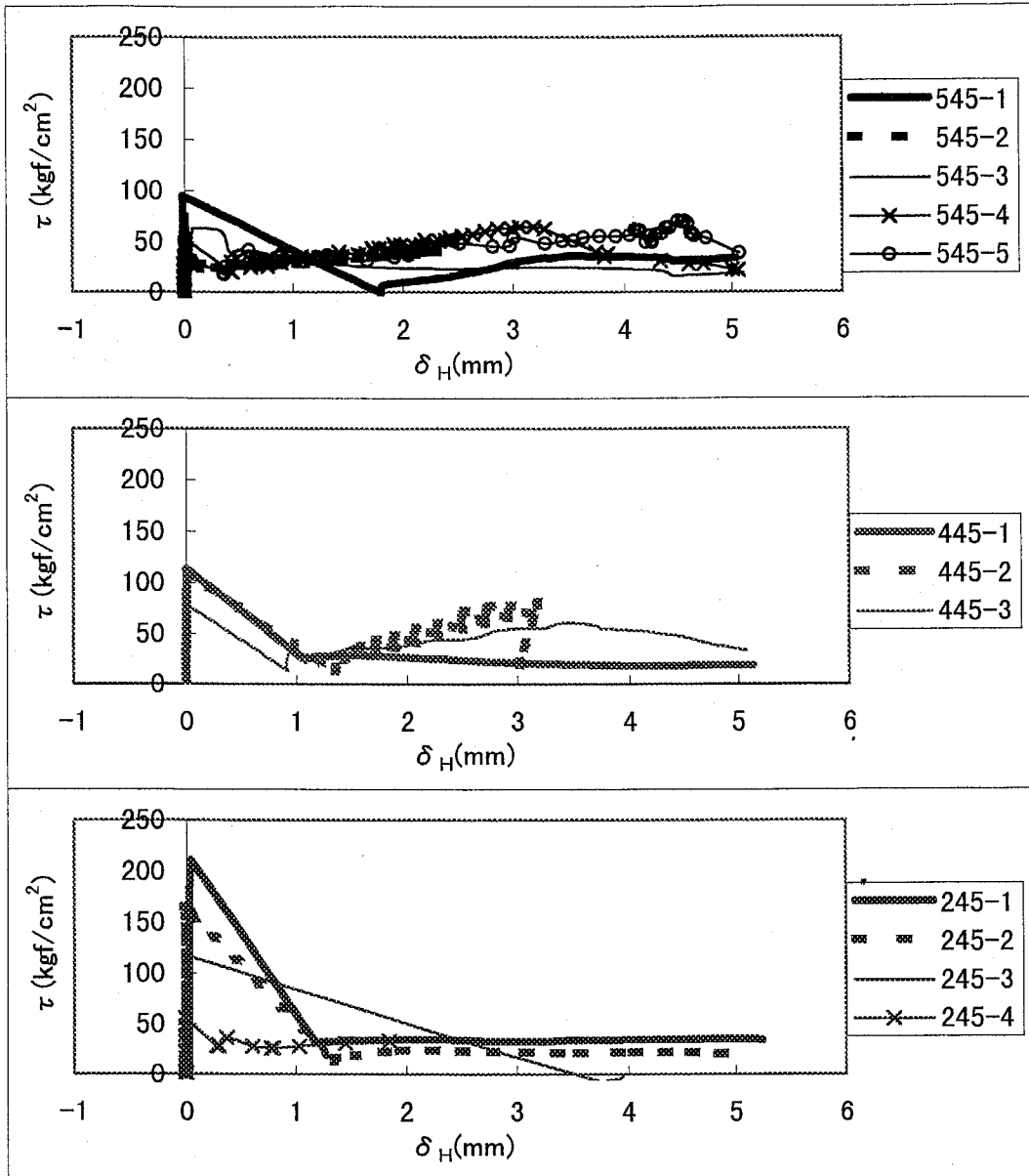
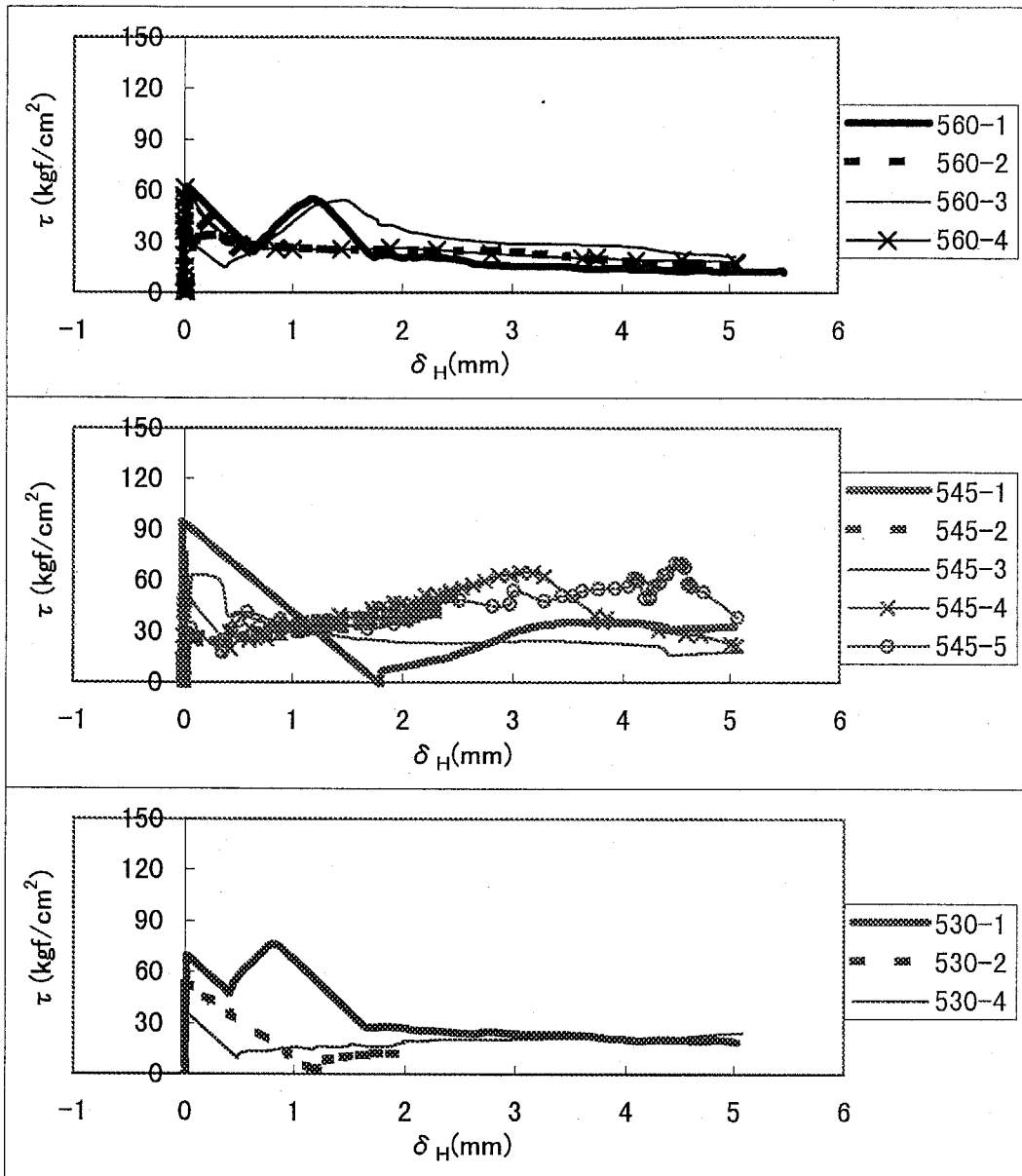


図 4-13(i) せん断力-滑り変位関係 (その 9)
(II類試験体)



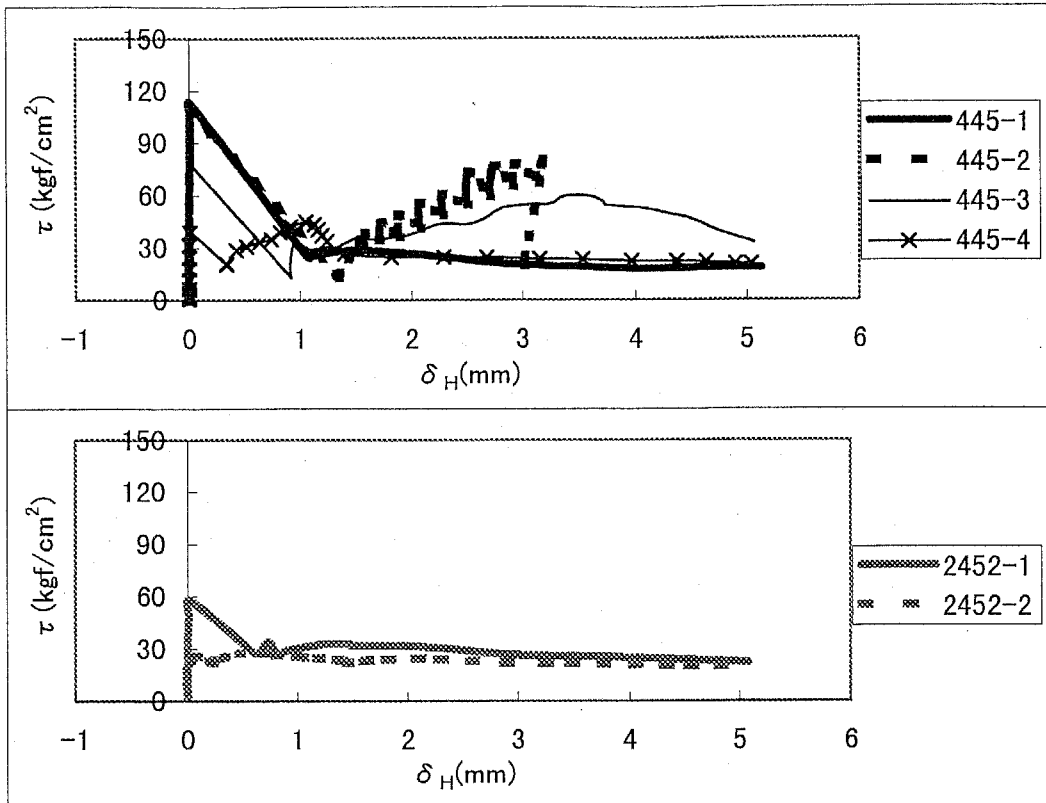
$$\tau = (\text{せん断力 } Q) / (\text{シアキー底面積 } A_c)$$

図 4-14(a) せん断応力度-滑り変位関係 (その 1)
 (I 類試験体)
 (シアキーが 1 個で側面角度が等しい試験体)



$$\tau = (\text{せん断力 } Q) / (\text{シアキー底面積 } A_c)$$

図 4-14(b) せん断応力度-滑り変位関係 (その 2)
 (I 類試験体)
 (シアキーが 1 個で長さ高さ比が等しい試験体)

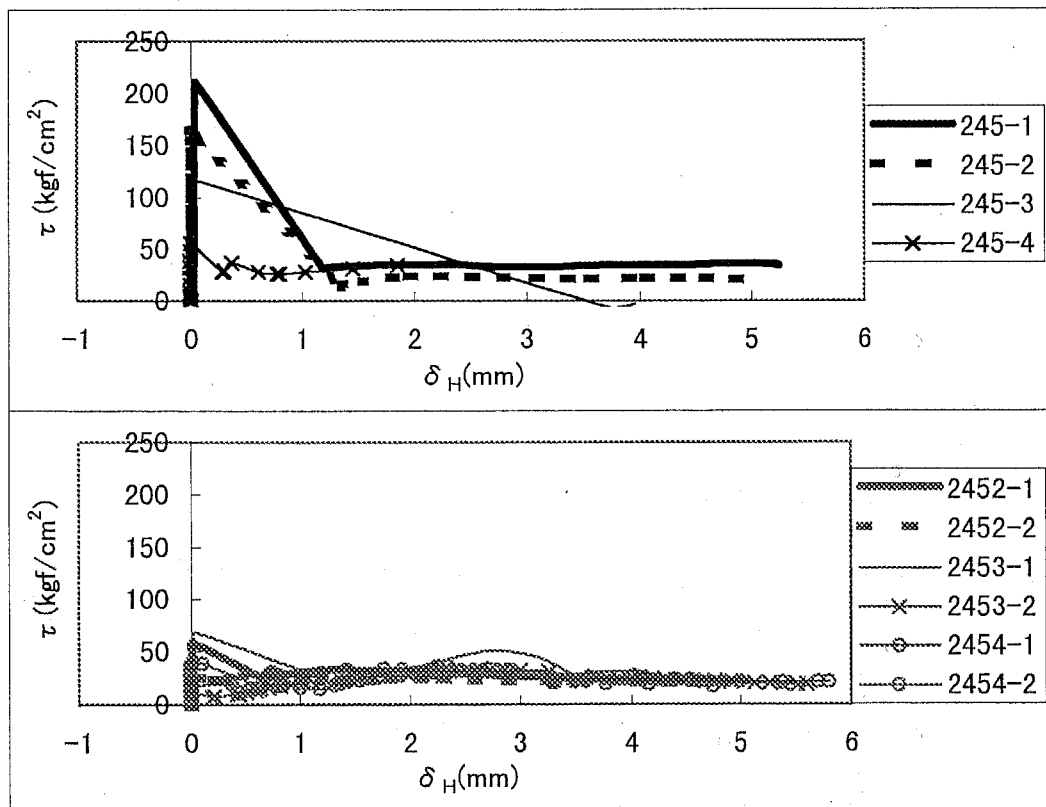


$\tau = (\text{せん断力 } Q) / (\text{シアキー底面積 } A_c)$

図 4-14(c) せん断応力度-滑り変位関係 (その 3)

(I 類試験体)

(シアキーの底面積の総和が等しい試験体)

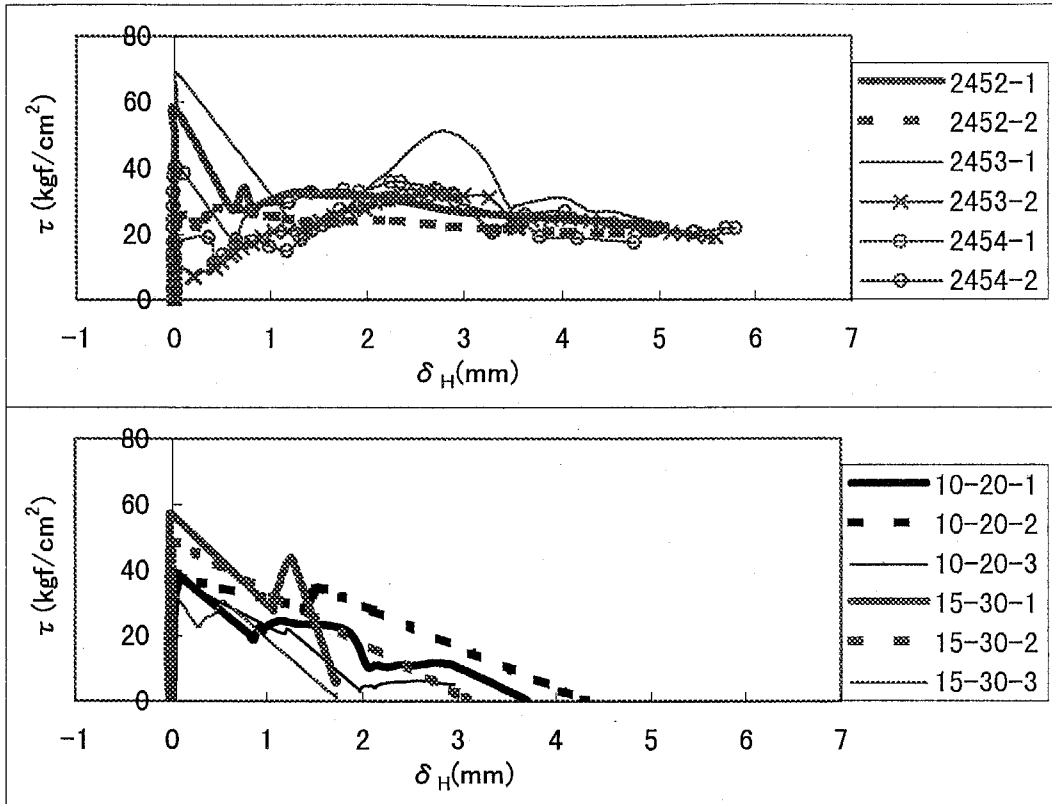


$\tau = (\text{せん断力 } Q) / (\text{シアキー底面積 } A_c)$

図 4-14(d) せん断応力度-滑り変位関係 (その 4)

(I 類試験体)

(シアキーの形状が等しく個数が異なる試験体)



$\tau = (\text{せん断力 } Q) / (\text{シアキー底面積 } A_c)$

図 4-14(e) せん断応力度-滑り変位関係 (その 5)
(II類試験体)

表 4-7(a) 実験結果一覧 (その 1)

< I 類試験体 >

| 試験 体名 | 滑り変位発生時 | | 滑り変位発生荷重後の せん断力の第 1 極大点 | | 滑り変位発生荷重後の せん断力の第 2 極大点 | | 最大耐力 最大強度 | | 破壊 形式 | | |
|----------|--------------------------|---|----------------------------|--|--------------------------------|------------------------|--|--------------------------------|---------------------|----------------------------------|--|
| | 荷重 Q_{slip} (tf) | 強度 τ_{slip} (kgf/cm ²) | 荷重 Q_{p1} (tf) | 応力度 τ_{p1} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp1} (mm) | 荷重 Q_{p2} (tf) | 応力度 τ_{p2} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp2} (mm) | | Q_{max} (tf) (括弧内は 相当個所) | τ_{max} (kgf/cm ²) |
| 560-1 | 6.204 | 62.04 | 5.493 | 54.93 | 1.174 | | | | 6.204(Q_{slip}) | 62.04 | DC+SS |
| 560-2 | 4.011 | 40.11 | 3.387 | 33.87 | 0.222 | | | | 4.011(Q_{slip}) | 40.11 | DC+SS |
| 560-3 | 2.994 | 29.94 | 5.413 | 54.13 | 1.478 | | | | 5.413(Q_{slip}) | 54.13 | DC+SS |
| 560-4 | 6.106 | 61.06 | | | | | | | 6.106(Q_{slip}) | 61.06 | DC+SS |
| 560N-1 | 6.586 | 65.86 | 4.416 | 44.16 | 1.124 | | | | 6.586(Q_{slip}) | 65.86 | DC+SS |
| 560N-2 | 6.754 | 67.54 | | | | | | | 6.754(Q_{slip}) | 67.54 | DC+SS |
| 545-1 | 9.433 | 94.33 | 3.565 | 35.65 | 3.491 | | | | 9.433(Q_{slip}) | 94.33 | SC |
| 545-2 | 7.471 | 74.71 | 5.374 | 53.74 | 2.923 | 7.273 | 72.73 | 8.82* | 7.471(Q_{slip}) | 74.71 | SC |
| 545-3 | 6.286 | 62.86 | | | | | | | 6.286(Q_{slip}) | 62.86 | DC+SS |
| 545-4 | 5.179 | 51.79 | 6.436 | 64.36 | 3.066 | | | | 6.436(Q_{p1}) | 64.36 | SC |
| 545-5 | 3.141 | 31.41 | 6.945 | 69.45 | 4.557 | | | | 6.945(Q_{p1}) | 69.45 | SC |
| 545-6 | せん断力載荷直前に分離 | | | | | | | | | | |
| 545N-1 | 2.989 | 29.89 | | | | | | | 2.989(Q_{slip}) | 29.89 | OT |
| 545N-2 | 4.923 | 49.23 | | | | | | | 4.923(Q_{slip}) | 49.23 | DC+SS |
| 530-1 | 6.913 | 69.13 | 7.612 | 76.12 | 0.805 | | | | 7.612(Q_{p1}) | 76.12 | SS |
| 530-2 | 5.299 | 52.99 | 8.589 | 85.89 | 18.94* | | | | 8.589(Q_{p1}) | 85.89 | SC |
| 530-3 | せん断力載荷途中で方形材が接合面上に移動 | | | | | | | | | | |
| 530-4 | 3.721 | 37.21 | 6.940 | 69.40 | 6.08* | | | | 6.940(Q_{p1}) | 69.40 | SC |

* : 載荷フレームの相対変位を測定する 1 軸型変位計による測定値で参考値。

(2 軸型変位計は最大測定範囲が 6mm のため)

τ_{slip} 、 τ_{p1} 、 τ_{p2} 、 τ_{max} はそれぞれ Q_{slip} 、 Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_{max} をシアキー底面積 (複数個の場合はその総和) A_c で除した値。

SS : シアキー底面せん断破壊 SC : シアキー側面圧壊

DC+SS : 斜めひび割れ破壊 (斜めひび割れ発生後最終的にはシアキー底面せん断破壊) OT : その他の破壊

表 4-7(b) 実験結果一覧 (その 2)

< I 類試験体 >

| 試験 体名 | 滑り変位発生時 | | 滑り変位発生荷重後の せん断力の第 1 極大点 | | 滑り変位発生荷重後の せん断力の第 2 極大点 | | 最大耐力 最大強度 | | 破壊 形式 | |
|----------|-------------------------|--|----------------------------|--|--------------------------------|------------------------|--|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| | 荷重 Q_{slp} (tf) | 強度 τ_{slp} (kgf/cm ²) | 荷重 Q_{p1} (tf) | 応力度 τ_{p1} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp1} (mm) | 荷重 Q_{p2} (tf) | 応力度 τ_{p2} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp2} (mm) | | Q_{max} (tf) (括弧内は 相当箇所) |
| 530N-1 | | | | | | | | | | |
| 530N-2 | 5.635 | 56.35 | | | | | | | 5.635(Q_{slp}) | 56.35 |
| 445-1 | 9.064 | 113.3 | | | | | | | 9.064(Q_{slp}) | 113.3 |
| 445-2 | 8.722 | 109.0 | 6.391 | 79.89 | 3.180 | | | | 8.722(Q_{slp}) | 109.0 |
| 445-3 | 6.354 | 79.43 | 4.773 | 59.66 | 3.373 | | | | 6.354(Q_{slp}) | 79.43 |
| 445-4 | 3.102 | 38.78 | 3.580 | 44.75 | 1.052 | | | | 3.580(Q_{pl}) | 44.75 |
| 245-1 | 8.413 | 210.3 | | | | | | | 8.413(Q_{slp}) | 210.3 |
| 245-2 | 6.588 | 164.7 | | | | | | | 6.588(Q_{slp}) | 164.7 |
| 245-3 | 4.678 | 117.0 | | | | | | | 4.678(Q_{slp}) | 117.0 |
| 245-4 | 2.214 | 55.35 | | | | | | | 2.214(Q_{slp}) | 55.35 |
| 2452-1 | 4.629 | 57.86 | 2.724 | 34.05 | 0.736 | 2.619 | 32.74 | 1.370 | 4.629(Q_{slp}) | 57.86 |
| 2452-2 | 2.070 | 25.88 | 2.217 | 27.71 | 0.452 | 1.929 | 24.11 | 2.273 | 2.217(Q_{pl}) | 27.71 |
| 2453-1 | 8.232 | 68.60 | 6.109 | 50.91 | 2.724 | | | | 8.232(Q_{slp}) | 68.60 |
| 2453-2 | 1.420 | 11.83 | 3.942 | 32.85 | 2.642 | | | | 3.942(Q_{pl}) | 32.85 |
| 2454-1 | 6.436 | 40.23 | 5.734 | 35.84 | 2.248 | | | | 6.436(Q_{slp}) | 40.23 |
| 2454-2 | 2.769 | 17.31 | 3.031 | 18.94 | 0.366 | 5.146 | 32.16 | 2.889 | 5.146(Q_{p2}) | 32.16 |
| 0-1 | 6.394 | | 7.098 | | 1.490 | | | | 7.098(Q_{pl}) | — |
| 0-2 | 8.560 | | | | | | | | 8.560(Q_{slp}) | — |

せん断力載荷直前に分離

τ_{slp} 、 τ_{p1} 、 τ_{p2} 、 τ_{max} はそれぞれ Q_{slp} 、 Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_{max} をシアキー底面積 (複数個の場合はその総和) A_c で除した値。
 SS: シアキー底面せん断破壊 SC: シアキー側面圧壊 OT: その他の破壊

表 4-7(c) 実験結果一覧 (その3)
 < II 類試験体 >

| 試験 体名 | 滑り変位発生時 | | 滑り変位発生荷重後の せん断力の第1極大点 | | | 滑り変位発生荷重後の せん断力の第2極大点 | | | 最大耐力 最大強度 | | 破壊 形式 |
|----------|-------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------------|--------------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|--|----------|
| | 荷重 Q_{slp} (tf) | 強度 τ_{slp} (kgf/cm ²) | 荷重 Q_{p1} (tf) | 応力度 τ_{p1} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp1} (mm) | 荷重 Q_{p2} (tf) | 応力度 τ_{p2} (kgf/cm ²) | 滑り変位 δ_{Hp2} (mm) | Q_{max} (tf) (括弧内は 相当箇所) | τ_{max} (kgf/cm ²) | |
| 2452-1 | 4.629 | 57.86 | 2.724 | 34.05 | 0.736 | 2.619 | 32.74 | 1.370 | 4.629(Q_{slp}) | 57.86 | SS |
| 2452-2 | 2.070 | 25.88 | 2.217 | 27.71 | 0.452 | 1.929 | 24.11 | 2.273 | 2.217(Q_{p1}) | 27.71 | SS |
| 2453-1 | 8.232 | 68.60 | 6.109 | 50.91 | 2.724 | | | | 8.232(Q_{slp}) | 68.60 | SS |
| 2453-2 | 1.420 | 11.83 | 3.942 | 32.85 | 2.642 | | | | 3.942(Q_{p1}) | 32.85 | SS |
| 2454-1 | 6.436 | 40.23 | 5.734 | 35.84 | 2.248 | | | | 6.436(Q_{slp}) | 40.23 | SS |
| 2454-2 | 2.769 | 17.31 | 3.031 | 18.94 | 0.366 | 5.146 | 32.16 | 2.889 | 5.146(Q_{p2}) | 32.16 | SS |
| 10-20-1 | 8.924 | 40.56 | 5.037 | 22.90 | 0.935 | | | | 8.924(Q_{slp}) | 40.56 | DC+SS |
| 10-20-2 | 8.286 | 37.66 | 7.662 | 34.83 | 1.552 | | | | 8.286(Q_{slp}) | 37.66 | SS |
| 10-20-3 | 8.370 | 38.05 | | | | | | | 8.370(Q_{slp}) | 38.05 | SS |
| 15-30-1 | 10.296 | 57.200 | 7.865 | 43.69 | 1.266 | | | | 10.296(Q_{slp}) | 57.200 | OT |
| 15-30-2 | 8.806 | 48.92 | | | | | | | 8.806(Q_{slp}) | 48.92 | SS |
| 15-30-3 | 6.144 | 34.13 | 5.535 | 30.75 | 0.550 | | | | 6.144(Q_{slp}) | 34.13 | SS |

τ_{slp} 、 τ_{p1} 、 τ_{p2} 、 τ_{max} はそれぞれ Q_{slp} 、 Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_{max} をシアキー底面積(複数個の場合はその総和) A_c で除した値。

SS: シアキー底面せん断破壊 DC+SS: 斜めひび割れ破壊 (斜めひび割れ発生後最終的にはシアキー底面せん断破壊)

OT: その他の破壊

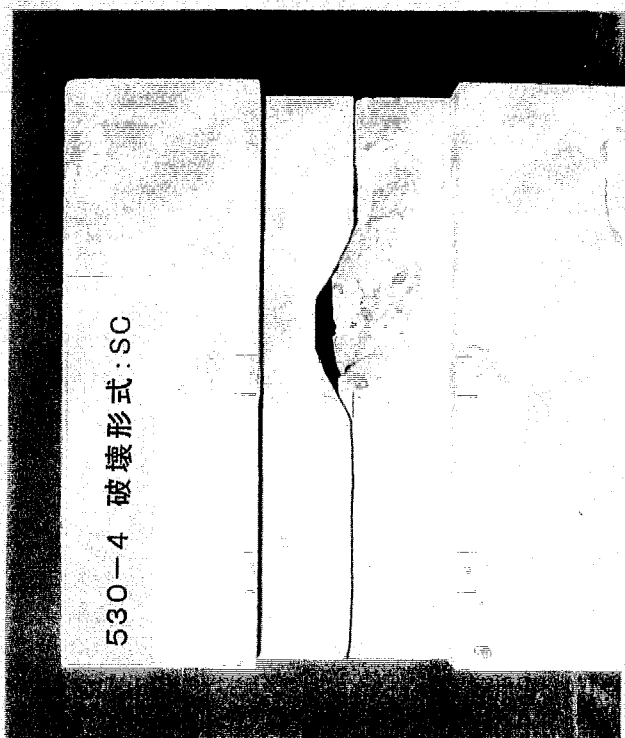
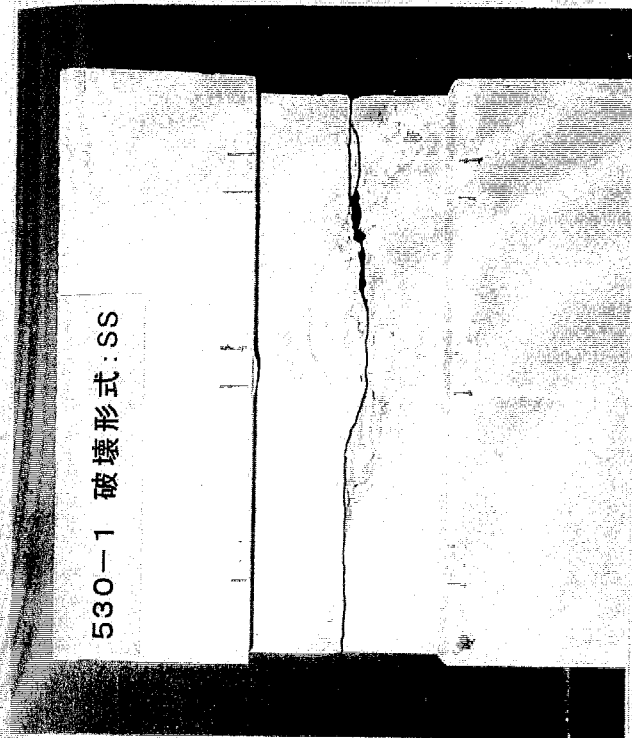
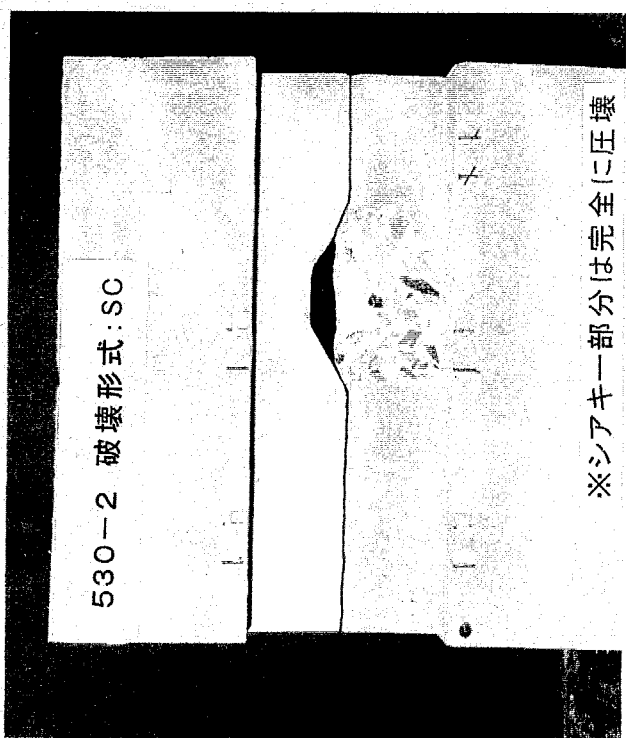
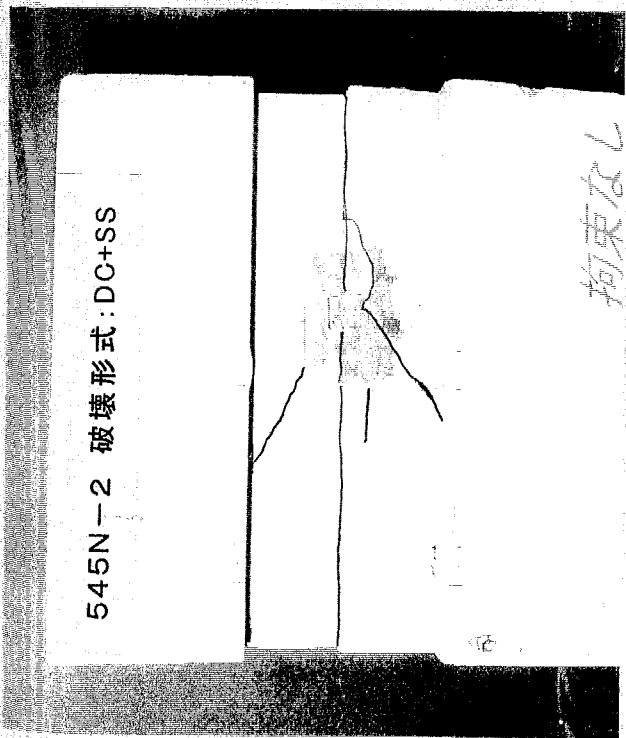


写真 4-1(a) 試験体の最終破壊状況の一例 (その 1)
(I 類試験体)

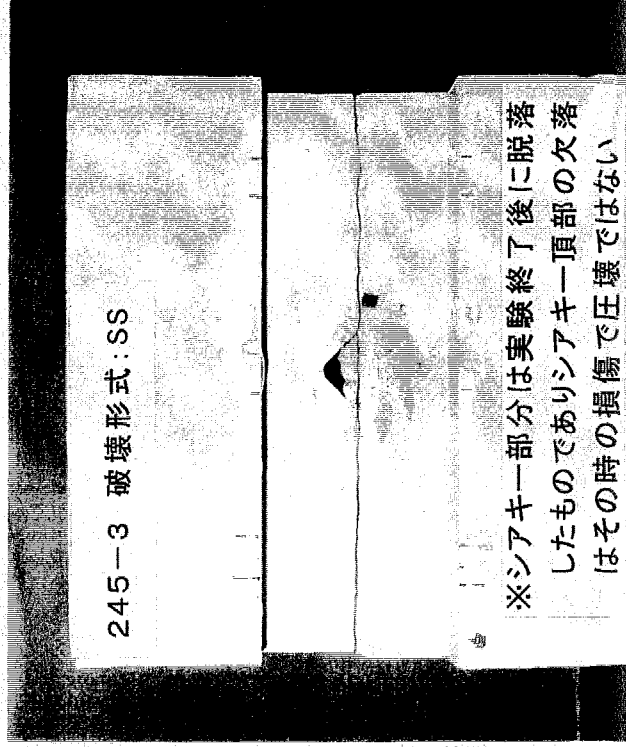
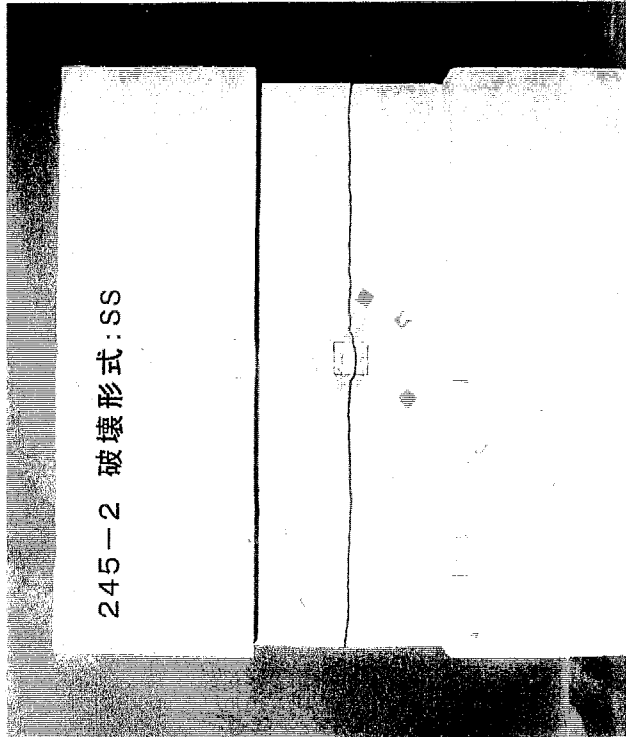
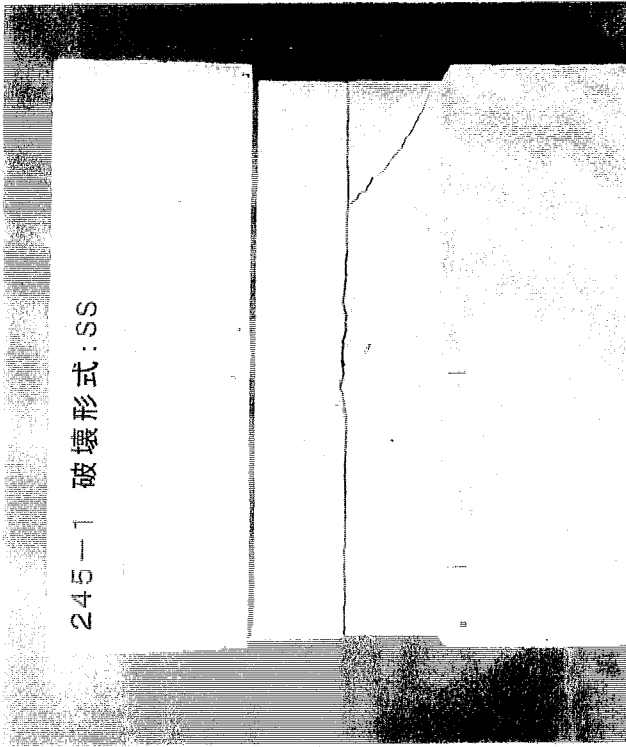
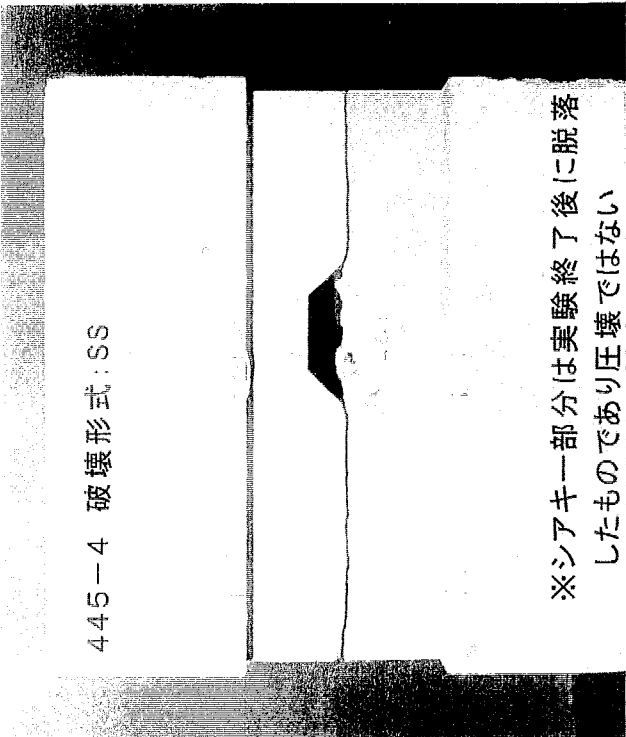
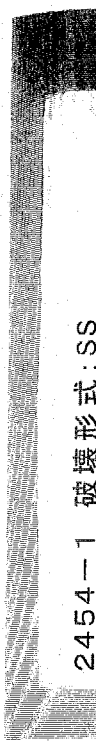
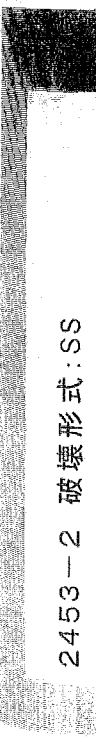
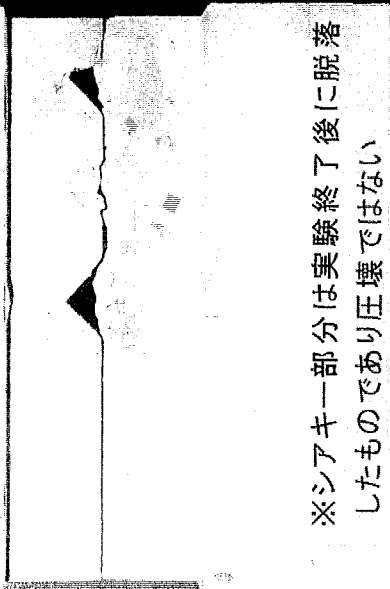


写真 4-1(b) 試験体の最終破壊状況の一例 (その2)
(I類試験体)

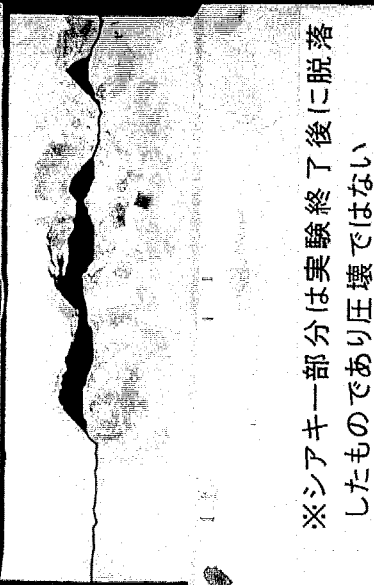


2453-2 破壊形式:SS



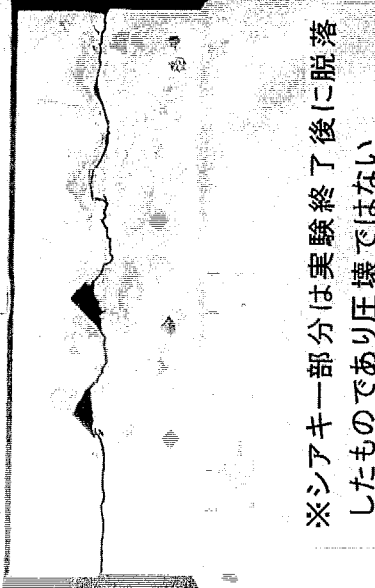
※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

2454-2 破壊形式:SS



※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

2454-1 破壊形式:SS



※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

0-1 破壊形式:OT



写真 4-1(c) 試験体の最終破壊状況の一例 (その3)
(I類試験体およびII類試験体)

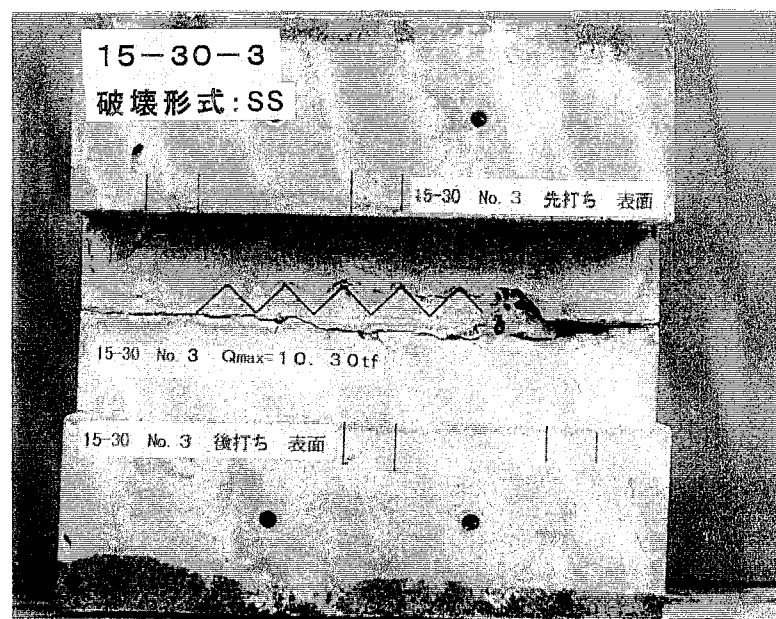
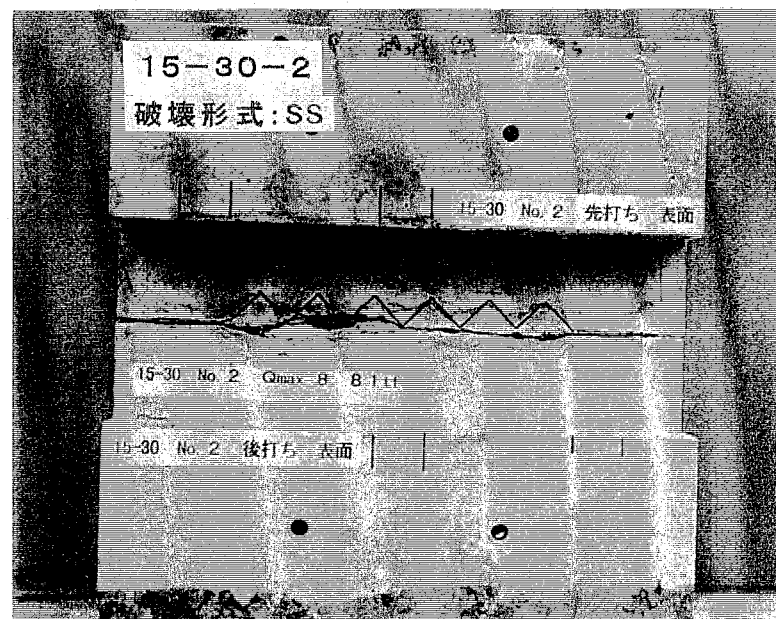
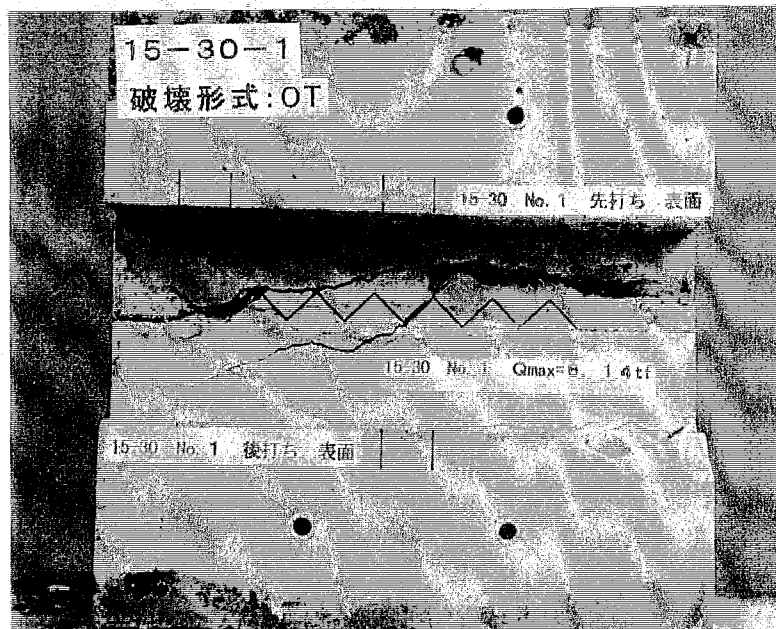


写真 4-1(d) 試験体の最終破壊状況の一例 (その 4)
(II類試験体)

4.6 破壊性

4.6.1

シア
がその
面角度
シアキ
キー底
度 σ_B
なる。

側面
長さの
よって
なお
る。よ
考えら
り変位
発生強
る。滑
項での
ト強度

4.6.2

シア
の破壊
図 4-17
いる。

長さ
らは長
の滑り
力が長
なお
通り、

4.6.3

1.2.3
分のコ
る。破壊
アキー
し、シ
の側面
法が有
ている
シア
および

4.6 I類試験体のせん断力載荷結果より得られるシアキーの形状と耐力および破壊性状との関係

4.6.1 最大耐力と側面角度との関係

シアキーが1個で長さ高さ比 h/t が5であり、外部拘束力 N_f が作用し、かつ破壊形式がその他の破壊 OT とはなっていない試験体 12 体について、最大耐力 Q_{max} とシアキー側面角度 θ との相関を求め、図 4-15 に示す。ここで、4.2.2 項と同じく「せん断力はすべてシアキーにて負担される」との仮定のもと、最大耐力の指標値としては、最大耐力をシアキー底面積 $A_c (A_c = b \cdot h)$ で除した最大強度 τ_{max} をさらに試験体のコンクリート代表圧縮強度 σ_B で除した τ_{max} / σ_B を用いる。なお、結果的に 12 体ともシアキー底面積は同じ値となる。

側面角度の増加にともない、逆に最大耐力は減少している。最大耐力時の滑り変位の大きさの違いを無視して、単に最大耐力の大きさのみに着目すると、最大耐力が側面角度によっても変化すると判断される。

なお、4.3.1 項での解析結果では、最大耐力時に生じている滑り変位はごくわずかである。よって、解析における「最大耐力」とは、滑り変位発生荷重 Q_{slp} に対応しているとも考えられる。そこで、滑り変位発生荷重と側面角度との相関を図 4-16 に示す。なお、滑り変位発生荷重の指標値としては、滑り変位発生荷重をシアキー底面積で除した滑り変位発生強度 τ_{slp} をさらに試験体のコンクリート代表圧縮強度 σ_B で除した τ_{slp} / σ_B を用いる。滑り変位発生荷重が側面角度によって変化する割合は極めて小さくなっており、4.3.1 項での解析結果との対応は良くない。この点については、試験体の微小部分のコンクリート強度のばらつきなどが影響しているものと考えられる。

4.6.2 最大耐力と長さ高さ比との関係

シアキーが1個で側面角度が 45° であり、外部拘束力が作用し、かつ破壊形式がその他の破壊とはなっていない試験体 13 体について、最大耐力と長さ高さ比との関係を求め、図 4-17 に示す。ここで、前項での仮定と同様、最大耐力の指標値としては τ_{max} / σ_B を用いる。

長さ高さ比が2の場合は τ_{max} / σ_B のばらつきが大きい、最小自乗法による回帰式からは長さ高さ比の増加にともない逆に最大耐力は減少していると判断される。最大耐力時の滑り変位の大きさの違いを無視して、単に最大耐力の大きさのみに着目すると、最大耐力が長さ高さ比に影響されることがわかる。

なお、前項と同様の理由で滑り変位発生荷重に対して同様の検討を行う。図 4-18 に示す通り、最大耐力の場合と同様の傾向が伺える。

4.6.3 側面圧壊するシアキーの耐力評価

1.2.3 項にも示す通り、一般にシアキーのせん断耐力は、シアキーの底面積とシアキー部分のコンクリート圧縮強度の積に比例常数 (0.9 や 1.0 など) を乗じた形で評価されている。破壊形式で、シアキー底面せん断破壊 SS や斜めひび割れ破壊 DC+SS など最終的にシアキー底面でのせん断破壊を生じた試験体に対しては、この手法も有効と思われる。しかし、シアキー側面圧壊 SC となった試験体に対しては、最大耐力を図 4-19 に示すシアキーの側面の実面積 $A_s (A_s = b \cdot t / \sin \theta)$ や側面の投影面積 $A_p (A_p = b \cdot t)$ などによって評価する手法が有効であると考えられ、すでに関連の研究結果が松崎・中野・奥本らにより報告されている^{4.5)}。

シアキーが1個で、破壊形式がシアキー側面圧壊となった試験体に関して、側面実面積および側面投影面積により最大耐力を評価した結果を表 4-8 に示す。標準偏差の比較から

は、底面積による評価がばらつきが小さいと判断されるが、側面実面積による評価は比例係数がほぼ1となり、側面実面積による評価が有効であると判断される。すなわち、シアキー底面積はシアキー底面長さに、また側面実面積はシアキー高さに依存することから、側面圧壊するシアキーの耐力評価はシアキー底面長さではなく、シアキー高さで行うことが妥当といえる。

4.6.4 シアキー本体部分で破壊を生じさせるために必要な外部拘束力の大きさ

4.5節にも示す通り、外部拘束力の有無によりシアキーの破壊性状は大きく異なる。外部拘束力のない試験体では、底面せん断破壊や側面圧壊などシアキー本体の破壊が起きていない。よって、接合面が鉛直方向に存在する様な場合は、外部拘束力（すなわち接合面の目開き変位の発生を抑える外力あるいは装置）の存在がシアキー本体での破壊の発生の前提条件になるといえる。

外部拘束力と滑り変位および外部拘束力と1軸変位形を用いて測定した載荷フレーム間の相対平均滑りとの関係の一例を図4-20に示す（全部の関係は巻末の付録に掲載する）と共に、特定の滑り変位の時点における外部拘束力の大きさについて表4-9に示す。滑り変位発生時においては、外部拘束力は高々0.6tf、シアキーの凹凸を無視した接合面（見付け）面積 $A=300\text{cm}^2$ で除した外部拘束応力度 N_f/A としても高々 2.0kgf/cm^2 である。また、すでにシアキー本体で破壊が生じていると考えられる $\delta_H=1\text{mm}$ 時点においても、外部拘束力は高々1.2tf、外部拘束応力度としても高々 4.0kgf/cm^2 となっており、外部拘束力としての最大値も530-2試験体で得られた5.60tf（外部拘束応力度で 18.7kgf/cm^2 ）となっている。

よって、シアキーを形成するコンクリートの圧縮強度が 240kgf/cm^2 程度の場合、接合面上のシアキー本体部分で底面せん断破壊や側面圧壊などの破壊を生じさせるには、外部拘束応力度で 19kgf/cm^2 程度の外部拘束力を作用させれば十分であるといえる。

4.6.5 シアキーが複数個存在する場合の耐力評価

長さ高さ比が2で側面角度が 45° のシアキーが複数個ある試験体での、シアキー本体部分の主応力分布図を図4-21に示す。これによると、複数個あるシアキーのそれぞれに主応力が均等に作用しているのではなく、複数個あるうちのいずれか1個にのみ集中して作用していることがわかる。主応力が集中するシアキーの位置は、同一パラメータの試験体同士でも異なり、統一性がなく確率的であると思われる。この実験は接合面に強制的な滑り変位を生じさせる方式であるため、シアキーに作用する主応力の不均一性は個々のシアキーの剛性の違いに起因していると考えられる。この場合、シアキーの剛性はシアキー本体部分のコンクリートのミクロ的な物性の違いに起因すると考えられ、その定量化は極めて難しいと考えられる。

長さ高さ比が2で側面角度が 45° とシアキーの外形が同じで個数が異なる試験体（245-1、245-2、245-3の各試験体と2452-1、2452-2、2453-1、2453-2、2454-1、2454-2の各試験体）、およびシアキーの外形と個数は異なるもののシアキー底面積が同じ試験体（445-1、445-2、445-3、445-4の各試験体と2452-1、2452-2の各試験体）の最大耐力の比較を図4-22に示す。同一変動要因の試験体同士で最大耐力のばらつきが大きく、定量的な傾向はつかめないが、「シアキーの個数倍だけ耐力が増加する」という様な傾向は認められない。シアキーが複数個存在する様な接合面の耐力を評価する場合に、シアキー1個だけの耐力を求めて、それを個数倍して評価する様なことは危険側の評価になってしまうものと考えられる。

図4-

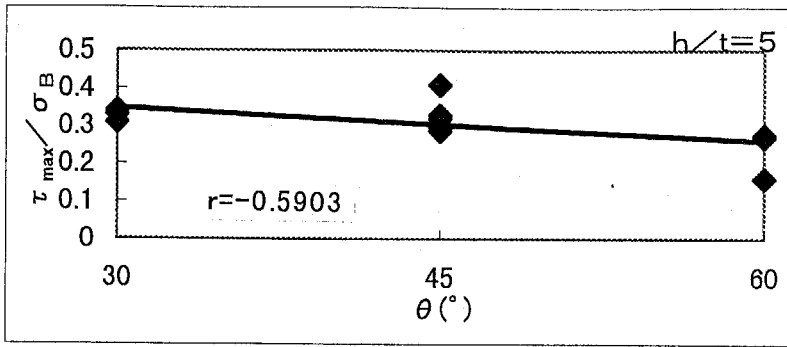


図 4-15 最大耐力とシアキー側面角度との相関関係

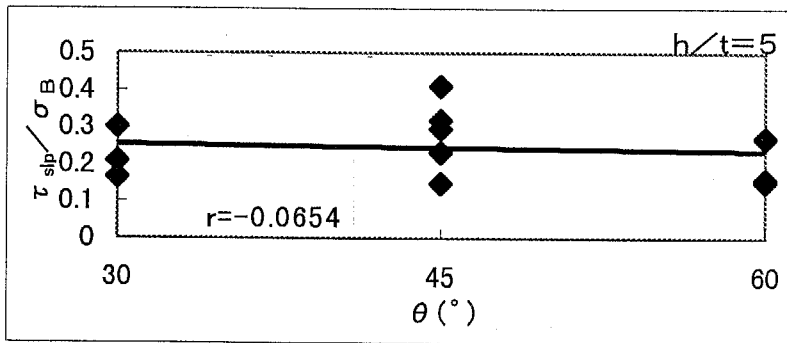


図 4-16 滑り変位発生荷重とシアキー側面角度との相関関係

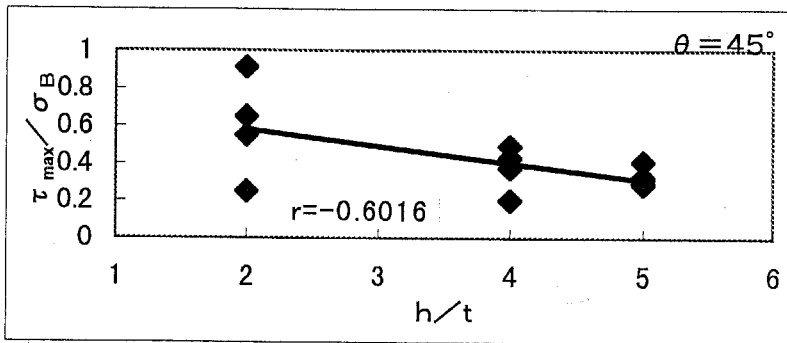


図 4-17 最大耐力とシアキー底面長さ高さ比との相関関係

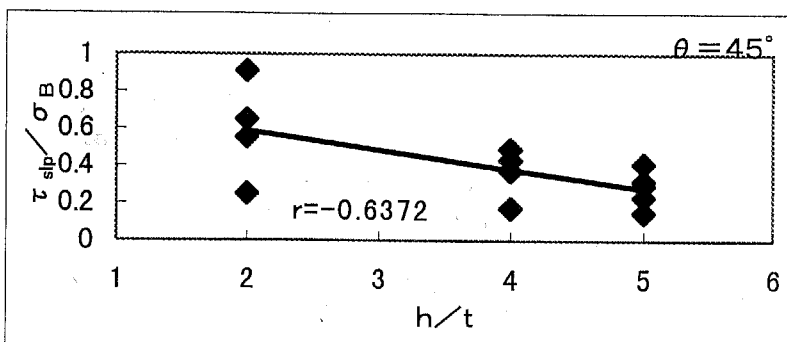


図 4-18 滑り変位発生荷重とシアキー底面長さ高さ比との相関関係

$$A_s = b \times t / \sin \theta$$

$$A_p = b \times t$$

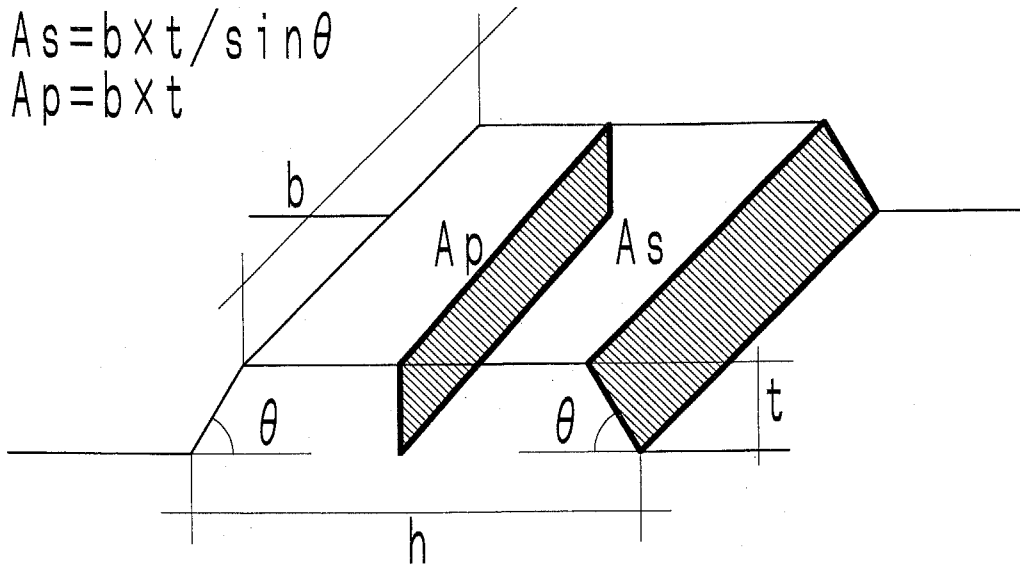
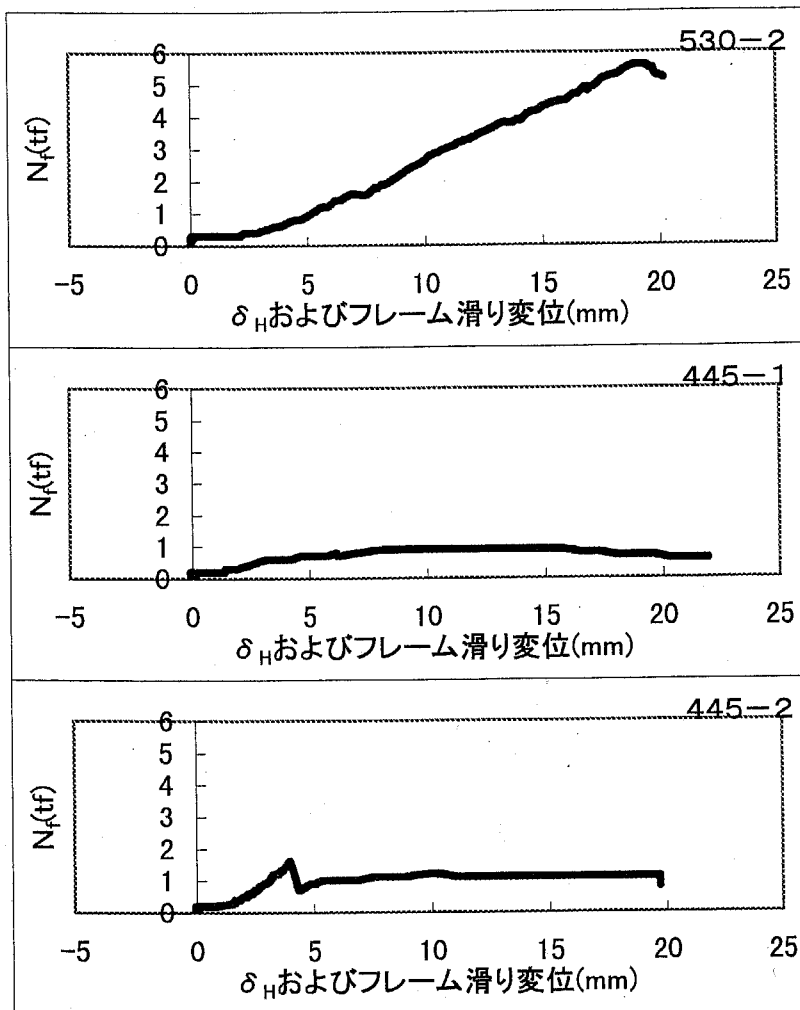


図 4-19 シアキー側面実面積 A_s と側面投影面積 A_p



横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 4-20 外部拘束力-滑り変位関係の一例

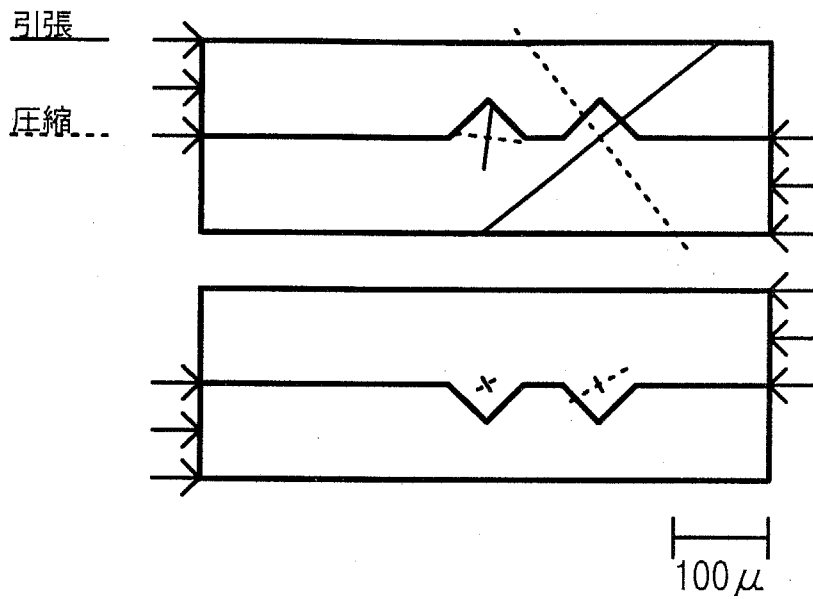


図 4-21(a) シアキーが複数個ある試験体の最大耐力時主応力分布図
(その 1) (2452-1 試験体)

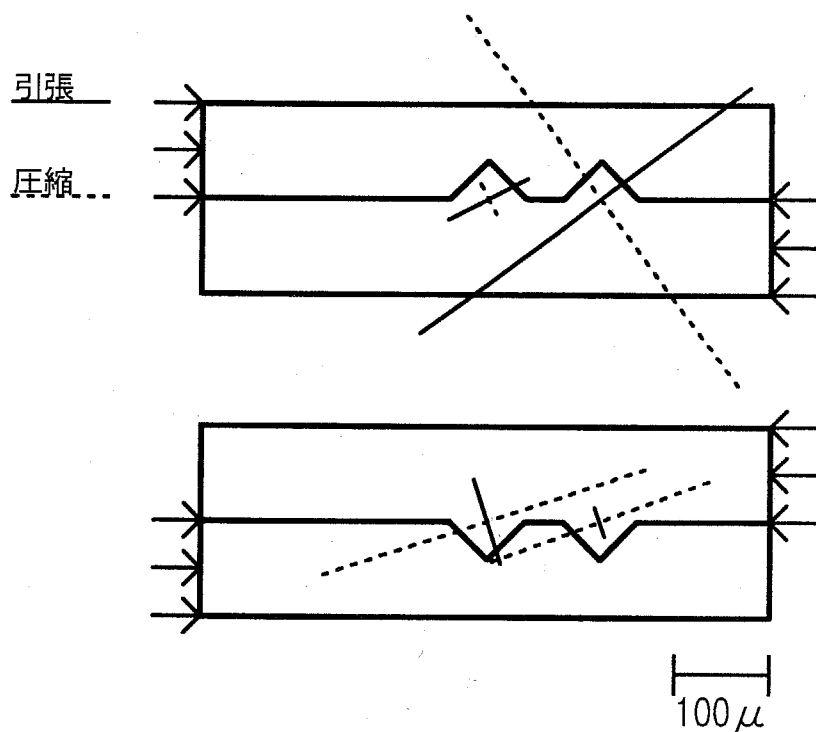


図 4-21(b) シアキーが複数個ある試験体の最大耐力時主応力分布図
(その 2) (2452-2 試験体)

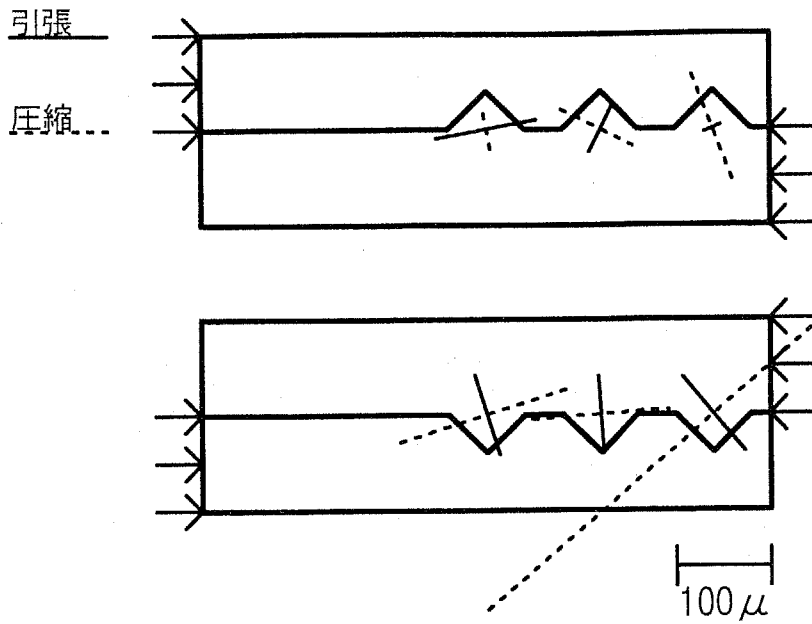


図 4-21(c) シアキーが複数個ある試験体の最大耐力時主応力分布図
(その 3) (2453-1 試験体)

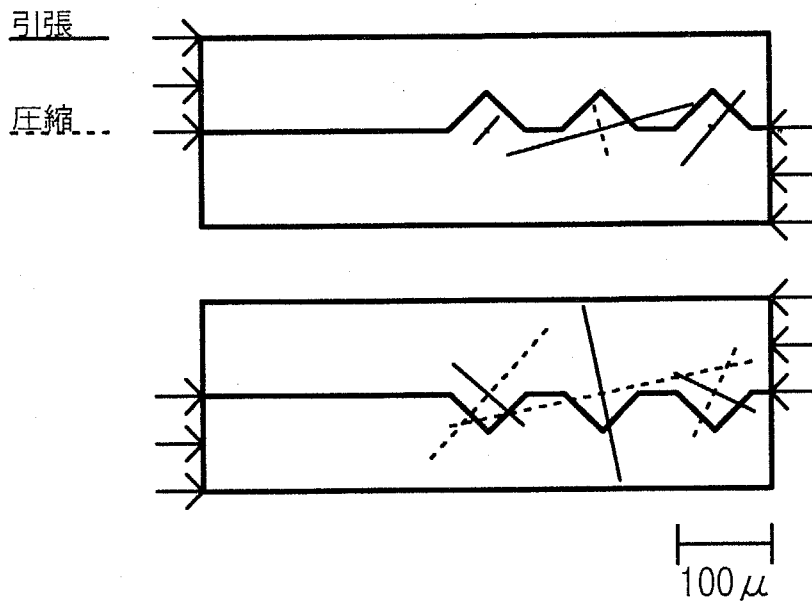


図 4-21(d) シアキーが複数個ある試験体の最大耐力時主応力分布図
(その 4) (2453-2 試験体)

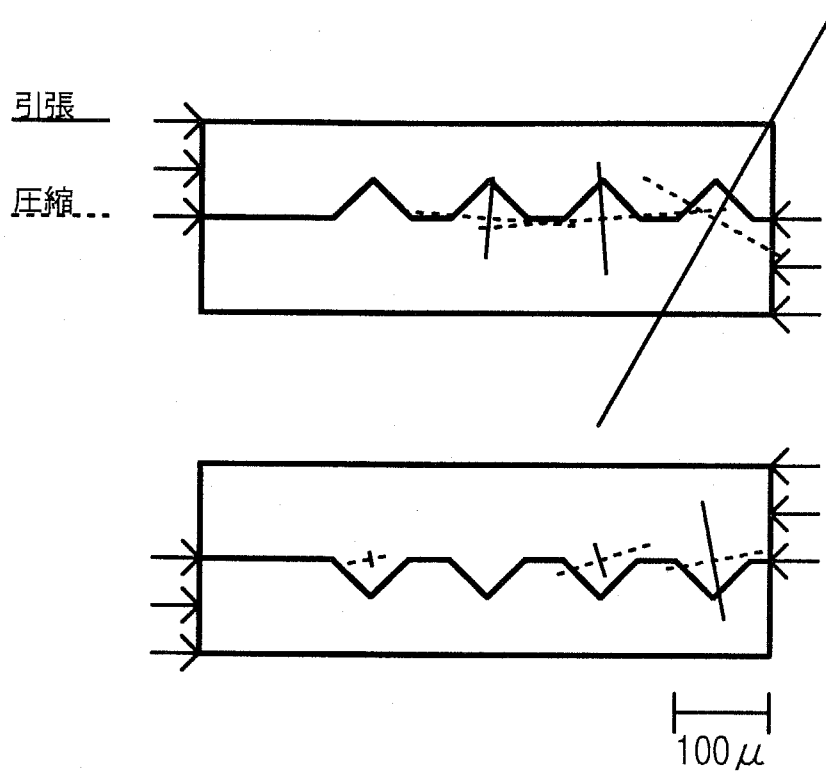


図 4-21(e) シアキーが複数個ある試験体の最大耐力時主応力分布図
(その 5) (2454-1 試験体)

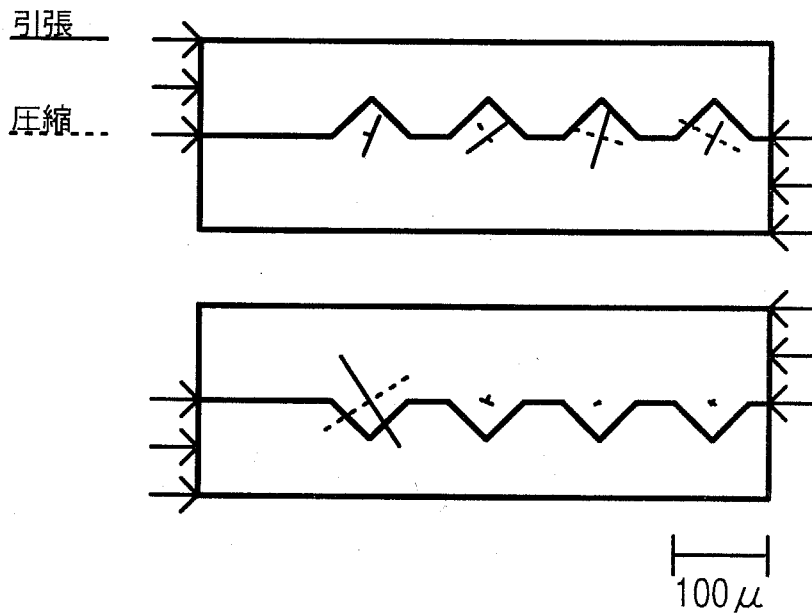


図 4-21(f) シアキーが複数個ある試験体の最大耐力時主応力分布図
(その 6) (2454-2 試験体)

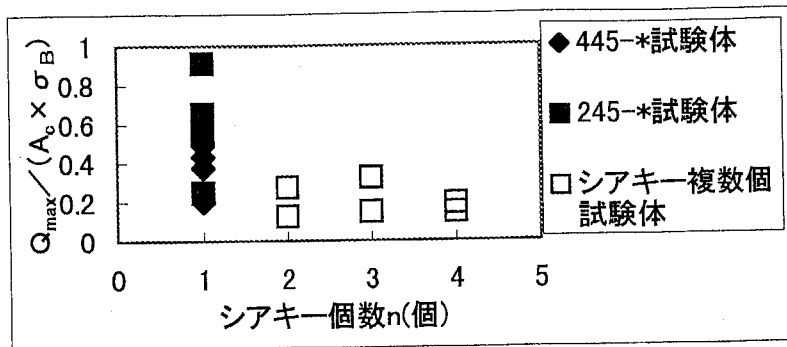


図 4-22 最大耐力とシアキー個数との相関関係

表 4-8 シアキ一側面圧壊を起こした試験体の最大耐力評価

| 試験 体名 | シアキ一面積 (cm ²) | | | 最大耐力の指標値 | | |
|----------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|
| | 底面積 A _c | 側面投影 面積 A _p =b・t | 側面実面積 A _s =b・t/sinθ | Q _{max} /(A _c ・σ _B) | Q _{max} /(A _p ・σ _B) | Q _{max} /(A _s ・σ _B) |
| 545-1 | 100 | 20 | 28.3 | 0.409 | 2.04 | 1.45 |
| 545-2 | | | | 0.295 | 1.47 | 1.04 |
| 545-4 | | | | 0.286 | 1.43 | 1.01 |
| 545-5 | | | | 0.327 | 1.64 | 1.16 |
| 530-2 | | | | 0.339 | 1.69 | 0.847 |
| 530-4 | 80 | 40 | 28.3 | 0.308 | 1.54 | 0.771 |
| 445-3 | | | | 0.374 | 1.50 | 1.06 |
| | | | | 0.334 | 1.62 | 1.05 |
| 平均 | | | | 0.0410 | 0.194 | 0.203 |
| 標準偏差 | | | | | | |

表 4-9 特定の滑り変位時点における外部拘束力の大きさ

| 試験 体名 | 破壊 形式 | 外部拘束力 N_f | | | | | | 外部拘束力の最大値 | |
|----------|----------|--------------------|--|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------|--|--|
| | | 滑り変位発生時 | | $\delta_H=1\text{mm}$ 時 | | $N_{f_{\max}}$ (tf) | その時の 滑り変位 δ_H (mm) | $N_{f_{\max}}/A$ (kgf/cm ²) | |
| | | N_{fslp} (tf) | N_{fslp}/A (kgf/cm ²) | N_{f1} (tf) | N_{f1}/A (kgf/cm ²) | | | | |
| 560-1 | DC+SS | 0 | 0 | 0.30 | 1.0 | 1.70 | 19.54* | 5.67 | |
| 560-2 | DC+SS | 0.20 | 0.67 | 0.50 | 1.7 | 1.10 | 22.13* | 3.67 | |
| 560-3 | DC+SS | 0.30 | 1.0 | 0.70 | 2.3 | 1.40 | 21.17* | 4.67 | |
| 560-4 | DC+SS | 0.30 | 1.0 | 0.70 | 2.3 | 1.40 | 15.18* | 4.67 | |
| 545-1 | SC | 0.10 | 0.33 | 0.10 | 0.33 | 2.60 | 20.39* | 8.67 | |
| 545-2 | SC | 0.50 | 1.7 | 1.20 | 4.0 | 3.00 | 8.82* | 10.0 | |
| 545-3 | DC+SS | 0.40 | 1.3 | 0.50 | 1.7 | 1.00 | 4.348 | 3.33 | |
| 545-4 | SC | 0.30 | 1.0 | 0.60 | 2.0 | 2.20 | 3.283 | 7.33 | |
| 545-5 | SC | 0.30 | 1.0 | 0.80 | 2.7 | 2.80 | 4.586 | 9.33 | |
| 530-1 | SS | 0.20 | 0.67 | 0.80 | 2.7 | 2.20 | 20.55* | 7.33 | |
| 530-2 | SC | 0.30 | 1.0 | 0.30 | 1.0 | 5.60 | 19.36* | 18.7 | |
| 530-4 | SC | 0.30 | 1.0 | 0.50 | 1.7 | 4.50 | 16.93* | 15.0 | |
| 445-1 | SS | 0.30 | 1.0 | 0.40 | 1.3 | 0.90 | 15.60* | 3.00 | |
| 445-2 | SS | 0.20 | 0.67 | 0.30 | 1.0 | 1.60 | 3.180 | 5.33 | |
| 445-3 | SC | 0.30 | 1.0 | 0.60 | 2.0 | 2.30 | 4.495 | 7.67 | |
| 445-4 | SS | 0.30 | 1.0 | 0.40 | 1.3 | 1.20 | 14.19* | 4.00 | |
| 245-1 | SS | 0.50 | 1.7 | 0.60 | 2.0 | 1.10 | 21.06* | 3.67 | |
| 245-2 | SS | 0.30 | 1.0 | 0.40 | 1.3 | 0.80 | 16.27* | 2.67 | |
| 245-3 | SS | 0.20 | 0.67 | 0.20 | 0.67 | 0.80 | 15.04* | 2.67 | |
| 245-4 | SS | 0.30 | 1.0 | 0.60 | 2.0 | 1.10 | 21.05* | 3.67 | |
| 2452-1 | SS | 0.40 | 1.3 | 0.70 | 2.3 | 1.60 | 17.87* | 5.33 | |
| 2452-2 | SS | 0.40 | 1.3 | 0.50 | 1.7 | 1.50 | 21.14* | 5.00 | |
| 2453-1 | SS | 0.60 | 2.0 | 0.70 | 2.3 | 1.90 | 19.62* | 6.33 | |
| 2453-2 | SS | 0.40 | 1.3 | 0.80 | 2.7 | 2.50 | 19.11* | 8.33 | |
| 2454-1 | SS | 0.20 | 0.67 | 0.70 | 2.3 | 1.70 | 4.742 | 5.67 | |
| 2454-2 | SS | 0.20 | 0.67 | 0.70 | 2.3 | 2.40 | 12.93* | 8.00 | |

A: シアキーの凹凸を無視した接合面(見付け)面積(A=300cm²)

*: 載荷フレームの相対変位を測定する1軸型変位計による測定値で参考値。

(2軸型変位計は最大測定範囲が6mmのため)

4.7 係

4.7.1

この測定はでき
キーのれと大
しか
状のシ
R_kと同
よっ
価値を
この際

するこ
位発生
と滑り
図4-
れる。
角形状
きない
となっ
は一般

4.7.2

前項
一の底
図4-
ている。
45°と
キー底
以上、
と目粗

4.7 II類試験体のせん断力載荷結果より得られるシアキーの形状と耐力との関係

4.7.1 シアキー高さを粗さ評価値と見なした場合の耐力評価

この章における実験では、2.3.3項や3.2.4項で示した方法でのシアキーの高さ（粗さ）の測定は行っていない。よって、シアキーの形状を粗さ評価値に置き換えることは厳密にはできない。また、仮に粗さ測定を行ったとしても、この章で対象としているようなシアキーのうち、台形シアキーについては、図4-23に示す様に負荷曲線が目粗しの場合のそれと大きく異なり、負荷値の定義ができない。

しかし、長さ高さ比が2で側面角度が 45° であるシアキー（すなわち直角二等辺三角形形状のシアキー）については、図2-13や図3-10の結果からシアキー高さが近似的に負荷値 R_k と同じになることが分かる。

よって、II類試験体について、シアキーの高さを準用することでそのシアキーの粗さ評価値をそれぞれ $R_k=10\text{mm}$ 、 15mm 、 20mm と与えて、耐力と粗さ評価値との相関を調べる。

この際、第2章および第3章と同様にコンクリート代表圧縮強度 σ_B の平方根 $\sqrt{\sigma_B}$ を考慮することで、試験体のコンクリート強度を反映させる。なお、II類試験体の全てで滑り変位発生荷重が最大耐力となっているわけではないので、最大耐力 Q_{\max} （最大強度 τ_{\max} ）と滑り変位発生荷重 Q_{slp} （滑り変位発生強度 τ_{slp} ）の両方との相関を調べる。

図4-24および表4-10に示す通り、耐力と粗さ評価値との相関はほとんどないと判断される。すなわち、II類試験体の様に長さ高さ比が2で側面角度が 45° となる直角二等辺三角形形状のシアキーが複数個連続する場合の接合面の耐力は、粗さ評価値を用いては評価できないといえる。これは、それらシアキーの破壊性状が概ねシアキー底面でのせん断破壊となっているため、シアキー底面積を考慮しないと適切な評価ができない（粗さ評価値では一般に高さのみの評価となる）ことが理由であると考えられる。

4.7.2 シアキーの底面積を用いた耐力評価

前項の結果を受けて、シアキーの底面積を用いた耐力評価を行う。評価方法は、シアキーの底面積の総和 A_c にコンクリート代表圧縮強度の積で行う。

図4-25および表4-11に示す通り、最大耐力・滑り変位発生荷重共に良好な相関を示している。よって、前項の結果と合わせて、II類試験体の様に長さ高さ比が2で側面角度が 45° となる直角二等辺三角形形状のシアキーが複数個連続する場合の接合面の耐力は、シアキー底面積の総和とコンクリート圧縮強度の積で行うべきであるといえる。

以上、前項およびこの項で得られた結果と第3章で得られた知見と合わせて、シアキーと目粗しを統一的な評価方法で評価することはできないものと判断される。

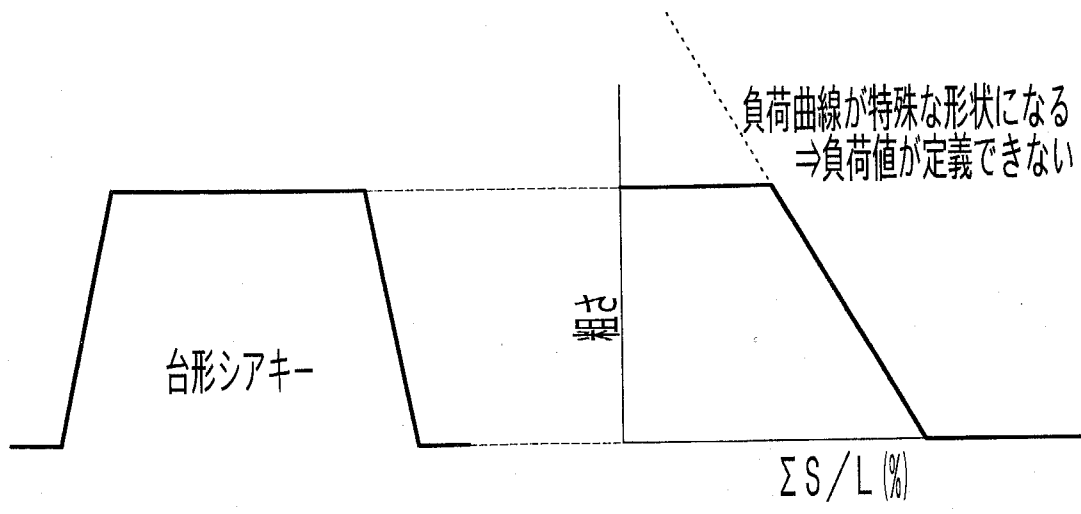


図 4-23 台形シアキーの負荷曲線

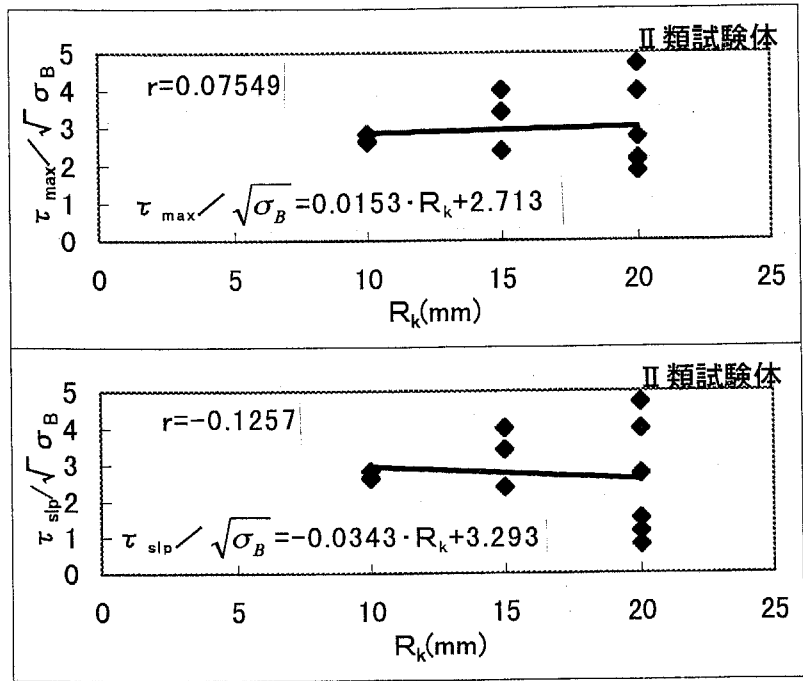


図 4-24 シアキーの最大耐力および滑り変位発生荷重と粗さ評価値（準用値）との相関関係

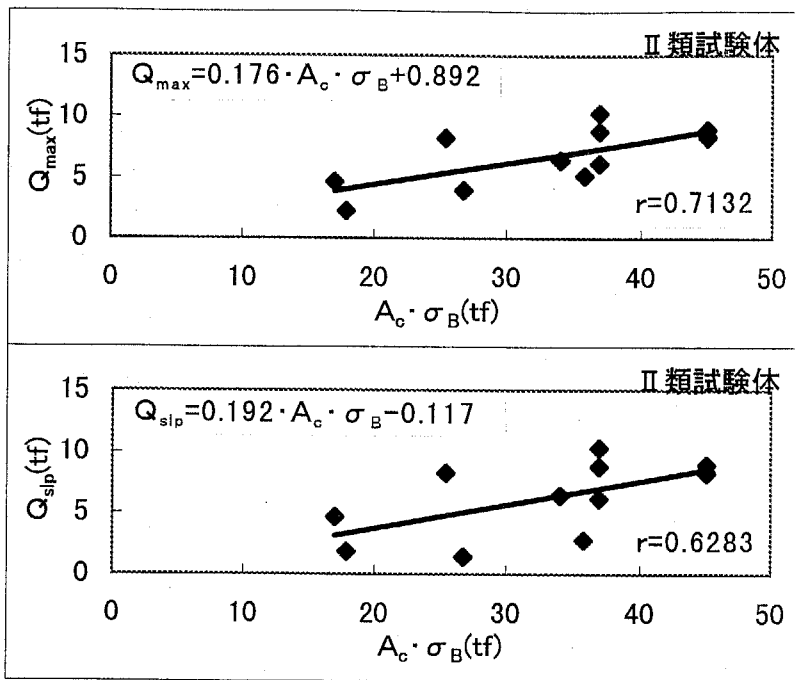


図 4-25 シアキーの底面積を用いた最大耐力および滑り変位発生荷重の評価

表 4-10 シアキーの最大耐力および滑り変位発生荷重と粗さ評価値（準用値）との相関

| 耐力・粗さの指標 | $R_k(R_k=10, 15, 20)$ |
|-------------------------------------|--|
| | II類試験体 |
| $\tau_{\max}/\sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{\max}/\sqrt{\sigma_B}=0.0153 \cdot R_k+2.713$ $r=0.07549$ |
| $\tau_{\text{slp}}/\sqrt{\sigma_B}$ | $\tau_{\text{slp}}/\sqrt{\sigma_B}=-0.0343 \cdot R_k+3.293$ $r=-0.1257$ |

表 4-11 シアキーの最大耐力および滑り変位発生荷重と底面積との相関

| 耐力・粗さの指標 | $R_k(R_k=10, 15, 20)$ |
|------------------|---|
| | II類試験体 |
| Q_{\max} | $Q_{\max}=0.176 \cdot A_c \cdot \sigma_B+0.892$ $r=0.7132$ |
| Q_{slp} | $Q_{\text{slp}}=0.192 \cdot A_c \cdot \sigma_B-0.117$ $r=0.6283$ |

A_c : シアキー底面積の総和

4.8

この

1) せ

一

シ

か

に

わ

①

②

③

2) 解

た。

長

3) 一

常

つ

A_c

価

は、

4) 底

め

で

ば

5) シ

様

6) 長

ア

用

あ

7) よ

以上

この章

価可能

解明す

4.8 第4章のまとめ

この章における実験および解析を通して、下記の知見を得た。

- 1) せん断力を受けるシアキーの破壊性状としては、シアキー底面でのせん断破壊とシアキー側面でのコンクリートの圧縮破壊（圧壊）の2種類が想定される。既往の研究では、シアキー底面長さ h と高さ t の比（長さ高さ比 h/t ）のみにより区別されていた。しかし、2次元有限要素解析ならびにせん断力載荷実験の結果から、シアキーの破壊形式には、長さ高さ比だけではなく、シアキーの側面角度 θ も影響をおよぼしている。すなわち、
 - ① 長さ高さ比が4以下では、シアキー底面でのせん断破壊となる。
 - ② 長さ高さ比が5で側面角度が 45° 以下では、シアキー側面部分での圧壊となる。
 - ③ 長さ高さ比が5で側面角度が 60° 以上では、シアキー底面でのせん断破壊となる。
- 2) 解析および実験から、側面角度の増加にともない、最大耐力が減少する現象が認められた。また同様に、長さ高さ比の増加にともない、最大耐力が減少する現象も得られた。長さ高さ比および側面角度は、最大耐力の大きさにも程度の影響をおよぼすといえる。
- 3) 一般にシアキーのせん断耐力は、シアキーの底面積とコンクリート圧縮強度の積に比例定数を乗じた形で評価されている。実験による破壊形式を考慮して最大耐力の評価を行ったところ、破壊形式がシアキー側面圧壊となった試験体に関しては、シアキー底面積 A_b による評価よりも、シアキー側面実面積 A_s またはシアキー側面投影面積 A_p により評価することが有効であるとの知見を得た。すなわち、側面圧壊するシアキーの耐力評価は、シアキー底面長さではなくシアキー高さを用いて行うのが妥当である。
- 4) 底面でのせん断破壊や側面での圧壊など、シアキー部分での破壊を確実に生じさせるための外部拘束力 N_f は、シアキーを形成するコンクリートの圧縮強度が 240kgf/cm^2 程度であるとすると、接合面（見付け）面積で除した圧縮応力度に換算して 19kgf/cm^2 あれば十分である。
- 5) シアキーが複数個存在する場合、シアキーの個数分だけ接合面のせん断耐力が上昇する様な効果は確認されない。
- 6) 長さ高さ比が2で側面角度が 45° であるシアキー（すなわち直角二等辺三角形形状のシアキー）が複数個連続する様な接合面の耐力は、シアキー高さを準用した粗さ評価値を用いては評価できず、シアキー底面積の総和とコンクリート圧縮強度の積で行うべきである。
- 7) よって、シアキーと目粗しを統一的な基準で評価することはできない。

以上、この章では、シアキーを対象にその形状とせん断挙動との関係の解明を行った。この章で得られた知見および第3章で得られた知見を基に第5章では、「粗さ評価値で評価可能」な目粗しと、「粗さ評価値では評価不可能」なシアキーの境界がどこにあるのかを解明する。

第 5 章

形状の評価方法の違いから見た
目粗しとシアキーの大きさの上での境界

5.1 はじめに

本研究では、「プレキャストコンクリート接合部において、目粗しやシアキーといった機械的噛み合いを設けることは、せん断力を伝達する観点から非常に有効である」との考えのもと、第2章から第4章までの研究を行ってきた。その結果、

- 1) 高さ 5mm 以下の目粗しに関しては、その粗さの大きさを数学的に処理して得られる値（粗さ評価値）とコンクリート圧縮強度によりせん断耐力を評価可能であること（第2章および第3章）。
- 2) シアキーに関しては、その底面積あるいは側面積とコンクリート圧縮強度によりせん断耐力を評価可能であること。そして、高さ 10mm 以上で長さ高さ比が 2 となりかつ側面角度が 45° である様なシアキーが複数個連続している設けられている接合面を例にすると、この様なシアキーは底面積とコンクリート圧縮強度によりせん断耐力を評価可能であり、シアキー高さを準用した粗さ評価値では評価できないこと（第4章）。

を明らかにした。

そして、4.7 節より、シアキーの高さを粗さ評価値として準用することによってはシアキーのせん断耐力は評価できず、目粗しとシアキーの両方を統一的な基準で評価することはできないと結論付けた。すなわち、「目粗し」と「シアキー」は連続なものとはいえず、目粗しとシアキーには境界があると考えられる。

3.5 節および 4.7 節で得られた結果を総合すると、「目粗し」として粗さ評価値を用いて評価できるもののうち粗さが最大のもので、「シアキー」として粗さ評価値では評価できないシアキーのうち高さが最小のものが一致する様な粗さの形状があると考えられ、すなわちそれが目粗しとシアキーの境界とすることができる。

この章では、3.5 節で得られた結果と 4.7 節で得られた結果をすり合わせ、さらに第2章、第3章および第4章の試験体のせん断破壊性状も再確認することで、目粗しとシアキーの形状の上での境界を探ることを目的とする。

5.2 粗さ

第3章
を有する
き変位の
に接合筋
ている。
最大耐力
期から滑
値 R_k を用
示された
第3章

第3章

τ

第3章

τ

第3章

τ

第3章

τ

を用いる

一方、

示された

第4章

τ

第4章

τ

を用いる

以上6

できない

図 5-1

を示す。

の交点が

間に目粗

2. 粗さ評価値を用いた目粗しの評価結果とシアキーの評価結果のすり合わせ
 第3章で取り扱った試験体（目粗しされた試験体）と第4章で扱った試験体（シアキー有する試験体）は、共に「接合面に過大な圧縮応力は作用しないものの、接合面の目開変位の発生がある程度拘束されている状況」にあるが、第3章ではその条件成立のため接合筋を用いており、一方第4章ではスクリージャッキによる目開き変位拘束を行っている。よって、厳密には両者は同じ応力状態の下に置かれているとはいえない。また、大耐力と滑り変位発生荷重が同一の試験体もあれば異なる試験体もあり、中には載荷初から滑り変位が発生して滑り変位発生荷重が定義できない試験体もある。そこで、負荷 R_k を用い、目粗しを評価しうる回帰式として 3.5.1 項で得られ、表 3-8 および表 3-9 にされた以下の式

第3章の全試験体の最大耐力を緩衝材の有無を区別せずに評価した式

$$\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.209 \cdot R_k + 1.552 \dots \text{(式 5-1)}$$

第3章の全試験体のうち緩衝材を施した試験体の最大耐力を評価した式

$$\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.174 \cdot R_k + 1.241 \dots \text{(式 5-2)}$$

第3章の全試験体の $\delta_H = 0.5\text{mm}$ 時での耐力を緩衝材の有無を区別せずに評価した式

$$\tau_{0.5} / \sqrt{\sigma_B} = 0.347 \cdot R_k + 0.710 \dots \text{(式 5-3)}$$

第3章の全試験体のうち緩衝材を施した試験体の $\delta_H = 0.5\text{mm}$ 時での耐力を評価した式

$$\tau_{0.5} / \sqrt{\sigma_B} = 0.280 \cdot R_k + 0.651 \dots \text{(式 5-4)}$$

用いる。
 一方、粗さ評価値では評価できないシアキーについては、4.7.1 項で得られ、表 4-10 にされた以下の式

第4章II類の試験体の最大耐力に対して評価を行った式

$$\tau_{\max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.0153 \cdot R_k + 2.713 \dots \text{(式 5-5)}$$

第4章II類の試験体の滑り変位発生荷重に対して評価を行った式

$$\tau_{\text{slp}} / \sqrt{\sigma_B} = -0.0343 \cdot R_k + 3.293 \dots \text{(式 5-6)}$$

用いる。
 以上6式を、表 5-1 の様な理由付けで組み合わせ、粗さ評価値で評価できる領域と評価できない領域の境界を探す。

図 5-1 にそれぞれの組み合わせについて、目粗しとシアキーの評価をすり合わせた結果を示す。いずれのパターンでも、粗さ評価値で負荷値が 5mm から 10mm までの間に両者の交点が存在する。よって、粗さ評価値の考え方からすると、負荷値が 5mm と 10mm の間に目粗しとシアキーの境界が存在すると考えられる。

表 5-1 目粗しの評価式とシアキーの評価式の組み合わせ

| | | |
|--|--|--|
| <p>第 3 章の接合筋の取り扱い方</p> <p>最大耐力時の滑り変位の違いの取り扱い方</p> | <p>第 4 章の試験体には接合筋がないが、そのことは無視して第 3 章の全試験体に対応させる。</p> | <p>第 4 章の試験体には接合筋がないので、第 3 章の試験体のうち緩衝材を施して接合筋の影響を可能な限り排除した試験体に対応させる。</p> |
| <p>最大耐力時の滑り変位の大きさの違いは無視し、目粗し・シアキー共に単に最大耐力の大きさで関連付ける。</p> | <p>(パターン I) 式 5-1 と式 5-5</p> | <p>(パターン II) 式 5-2 と式 5-5</p> |
| <p>最大耐力時の滑り変位の大きさの違いを考慮し、第 3 章の試験体に対しては $\delta_H=0.5\text{mm}$ 時の耐力を、第 4 章の試験体に対しては滑り変位発生荷重を考え対応させる。</p> | <p>(パターン III) 式 5-3 と式 5-6</p> | <p>(パターン IV) 式 5-4 と式 5-6</p> |

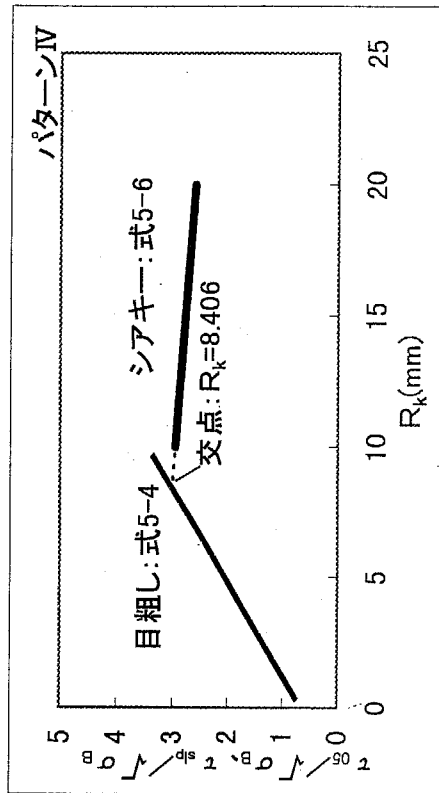
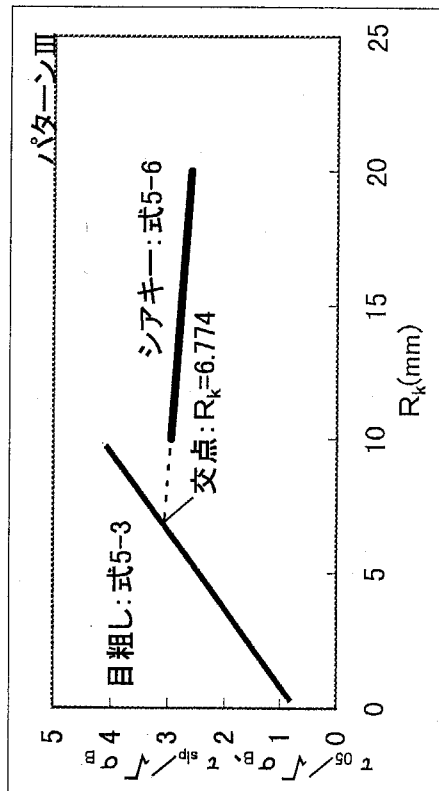
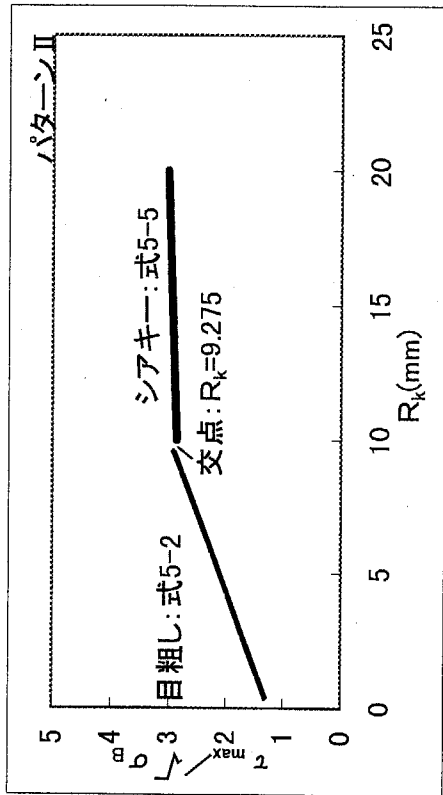
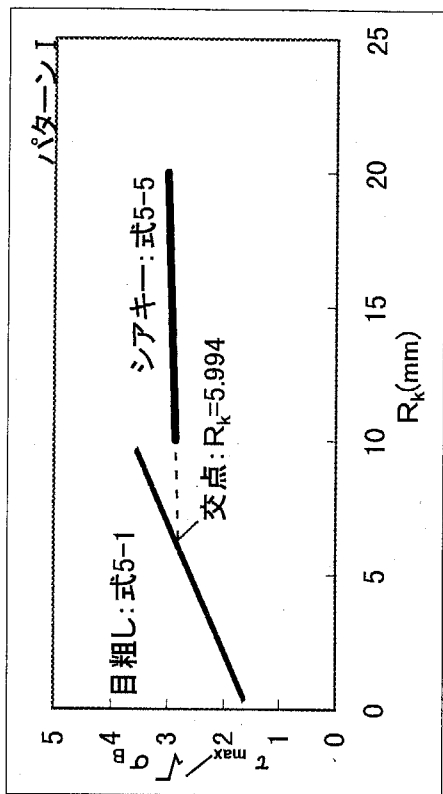


図 5-1 目粗しの評価方法とシアキーの評価方法のすり合わせ

5.3 目粗しとシアキーの境界付近の粗さのせん断破壊性状

前節での結果から、負荷値 R_k が 5mm から 10mm までの間に目粗しとシアキーの境界があると推定されるが、この点を目粗しおよびシアキーのせん断破壊性状から裏付けられるか確認する。

第 3 項の試験体については接合筋を有するため、載荷終了後に接合面を直接観察することができない。山形鋼板押し付け試験体については 3.5.2 項の写真 3-1 により粗さの側面圧壊が確認されたが、ささら刷毛引き試験体と磨き鋼板押し付け試験体では粗さの側面圧壊が生じたのかどうかわからない。そこで、第 2 章の試験体について、載荷終了後の接合面の状態の一例を写真 5-1 に示す。これによると、粗さの形状にほぼ似通った窪みが接合面上に生じている。粗さがその底面でせん断破壊をしているならばこのような窪みは存在していないはずで、粗さの側面圧壊が発生したことを示す現象といえる。

よって、写真 3-1 とあわせて、接合面上に施された負荷値が 5mm 以下の目粗しがせん断力を受ける場合に示す破壊性状は、側面圧壊であると判断される。

一方、第 4 章の II 類試験体は写真 4-1 に示す通り、シアキー底面のせん断破壊となっている。II 類試験体では、高さが 10mm になるまで底面せん断破壊である。

このことは、前項で得られた目粗しとシアキーの境界付近ではそのせん断破壊性状にも大きな違いが現れるということを示しており、前項で得られた両者の境界が妥当であることを示す現象のひとつともいえる。すなわち、粗さ評価値が 5mm 以下の粗さは目粗しとして、直角二等辺三角形形状という条件で高さが 10mm 以上の粗さはシアキーとして取り扱うべきであるといえる。

なお、「負荷値 R_k が 5mm から 10mm までの間に目粗しとシアキーの境界がある」なる推定は、あくまで長さ高さ比が 2 で側面角度が 45° である直角二等辺三角形形状シアキーを対象として得られた知見である。4.6 節に示す通り、三角形形状のシアキーであっても長さ高さ比や側面角度の違いによっては、耐力やせん断破壊性状が異なるので、その場合は上記の知見も幾分変わるものと思われる。さらに、シアキーが台形である場合などは、負荷値が定義できないため、上記の知見が大幅に変わる恐れがある。形状の更なる反映については、今後の課題といえる。

鉄板あらし仕上げ
3-1C(第2章試験体)
粗さ測定前

鉄板型枠仕上げ
2-6(第2章試験体)
粗さ測定前

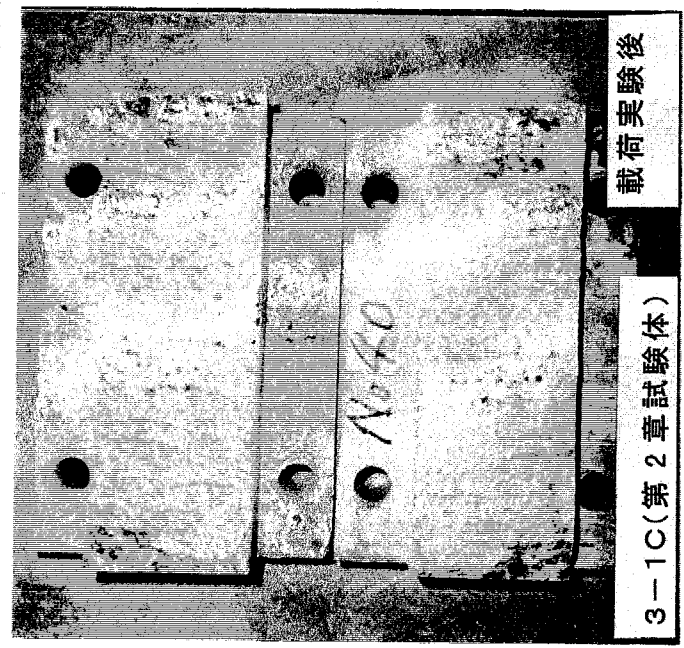
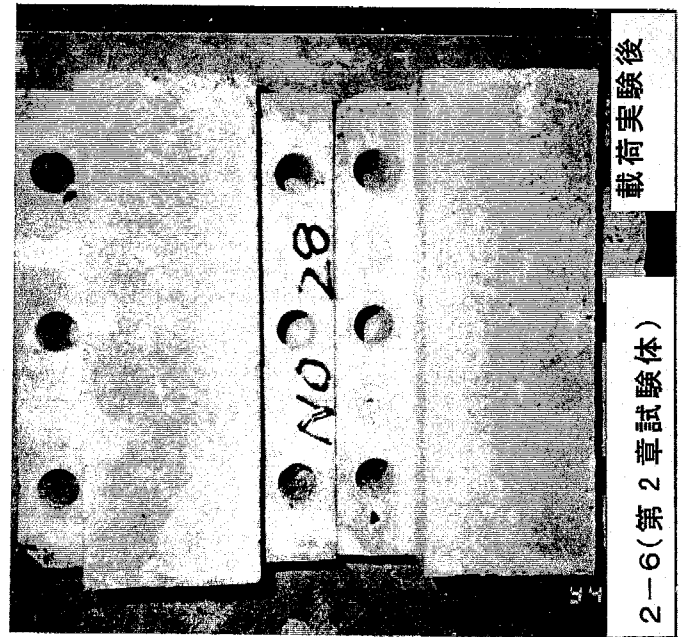
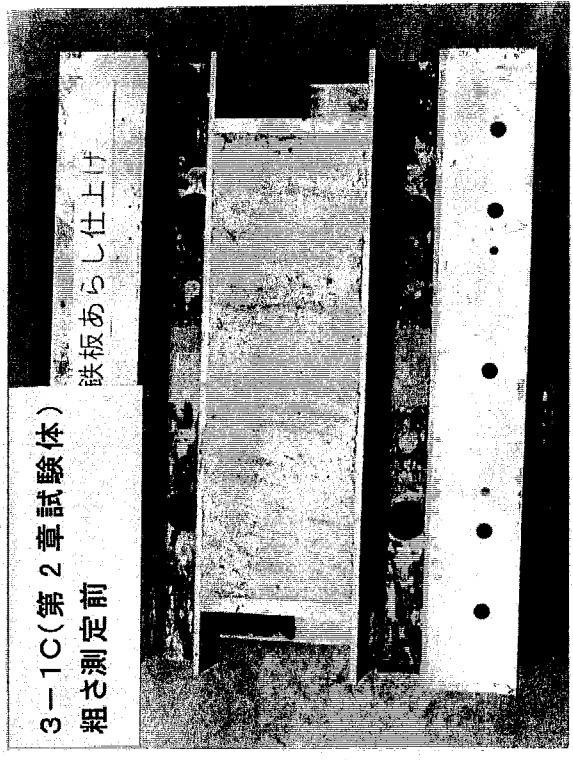
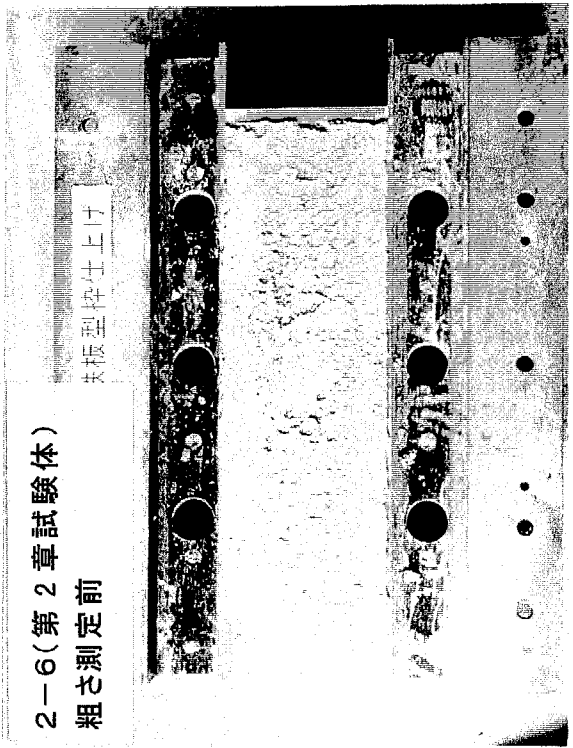


写真 5-1(a) 第2章の試験体（目粗しされた試験体）せん断破壊性状（その1）

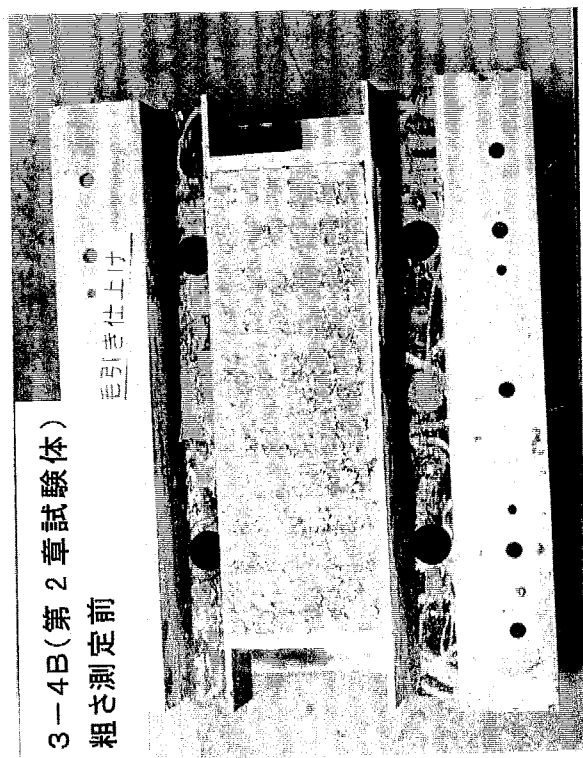
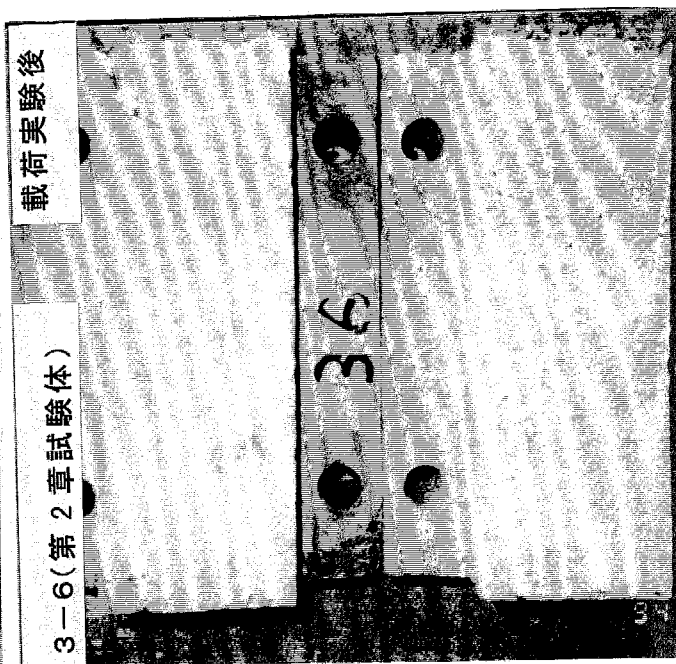
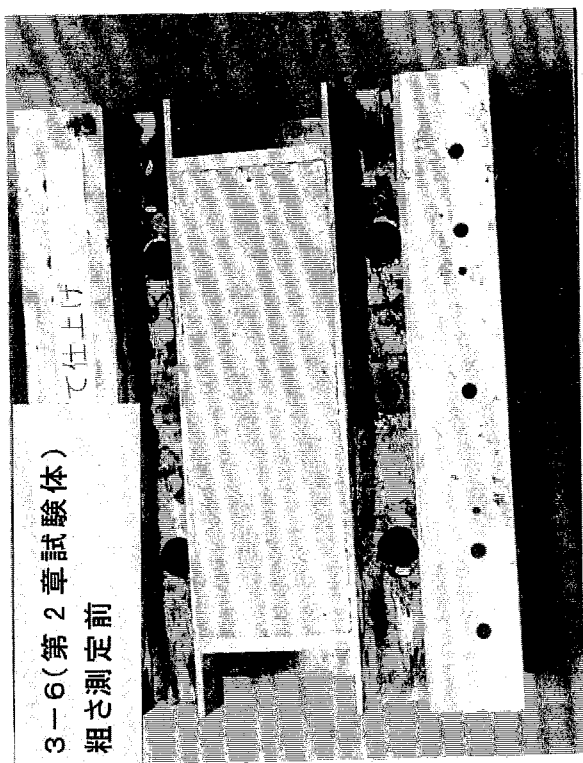


写真 5-1(b) 第2章の試験体(目粗しされた試験体)
せん断破壊性状(その2)

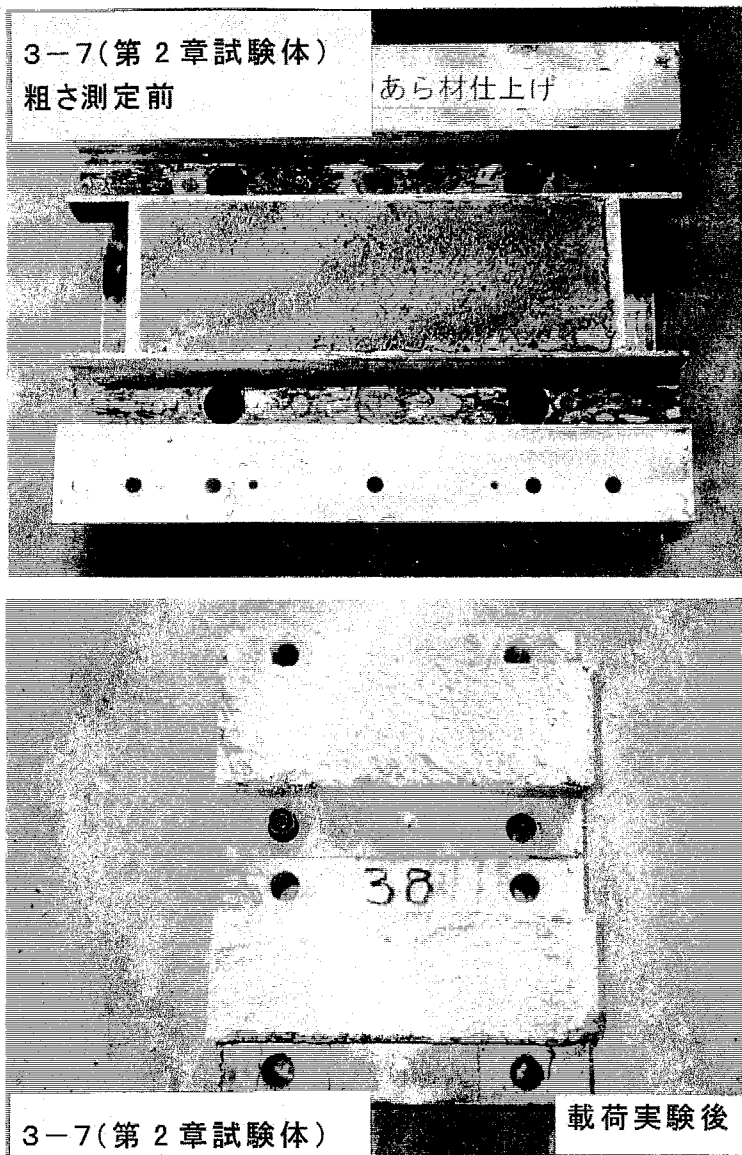


写真 5-1(c) 第2章の試験体 (目粗しされた試験体)
せん断破壊性状 (その3)

5.4 第5章のまとめ

この章における実験を通して、下記の知見を得た。

- 1) 第3章で得られた目粗しのせん断耐力と粗さ評価値との関係および第4章で得られたシアキーのせん断耐力と粗さ評価値との関係をすり合わせた。その結果、粗さ評価値として負荷値 R_k を使用した場合、 R_k が 5mm から 10mm までの間に「目粗し」と「シアキー」の境界があることが分かった。この領域を境に粗さのせん断破壊性状も側面圧壊から底面せん断破壊へと変化することもわかった。すなわち、粗さ評価値が 5mm 以下の粗さは目粗しとして、直角二等辺三角形形状という条件で高さが 10mm 以上の粗さはシアキーとして取り扱うべきであるといえる。
- 2) 三角形形状のシアキーであっても長さ高さ比や側面角度の違いによっては、上記の知見も幾分変わるものと思われる。さらに、シアキーが台形である場合などは、上記の知見が当てはまらない恐れがある。これらの点に関する検討は、今後の課題といえる。

第 6 章
結 論

6.1 本研究の結論

本研究は、プレキャスト構造のうち耐震壁-梁（床）間のいわゆる水平接合部を対象に、接合部を模擬した試験体の接合面表面粗さの測定とその粗さの評価、接合部へのせん断力載荷実験および有限要素解析により、「目粗し」と「シアキー」の形状の評価手法の提案を行い、せん断力伝達機構におよぼす接合面の粗さの形状の影響を明らかにすることを目的として行われたものである。

第2章では、プレキャスト構造の水平接合部において、接合面上の粗さの測定方法や粗さの定量化方法が統一的に定められていない状況を鑑み、レーザー光式変位計を用いた非接触式の粗さ測定方法を提案し、水平接合部を模擬した試験体の接合面表面粗さ測定を行った。そして、その結果を用いて、一般に「目粗し」と認識される様な接合面上の粗さの形状的特徴の抽出を図った。あわせて、多数点の測定結果を数学的に処理する方法で得た値（粗さ評価値）により、接合面における部材の化学的付着および摩擦の性状が定量的に評価可能かどうかの検討を行った。

その結果、精密機械工作用旋盤とレーザー光式変位計を組み合わせた装置で接合面の粗さを測定することができた。そして、その測定結果から、一般に「目粗し」と認識される様な粗さは、粗さの高さに対する長さの比（長さ高さ比）が5を上回る様な粗さが多くを占める形状であることが分かった。測定した接合面の表面粗さを数学的に処理して単一の数値に置き換えた「粗さ評価値」と試験体のコンクリート圧縮強度を用いて、接合面圧縮力が作用しない場合に接合面上に作用する等価付着力、および接合面圧縮力が作用する場合に接合面上に作用する等価摩擦力を定量的に表現できることを示した。

すなわち、等価付着力 τ_{max} については、負荷値 R_k と試験体のコンクリート代表圧縮強度 σ_B を用いて、

$$\tau_{max} / \sqrt{\sigma_B} = 0.131 \cdot R_k + 1.397 \dots \quad (\text{式 6-1})$$

接合面圧縮力 N が作用する場合の接合面の滑り変位発生荷重による等価摩擦力 τ_{slp} については、

$$N=6tf \text{ で、 } \tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.159 \cdot R_k + 0.977 \dots \quad (\text{式 6-2})$$

$$N=12tf \text{ で、 } \tau_{slp} / \sqrt{\sigma_B} = 0.437 \cdot R_k + 2.045 \dots \quad (\text{式 6-3})$$

を得た。

あわせて、粗さ評価値を用いて、滑り変位発生荷重による接合面の等価摩擦係数 μ_0 を、

$$\mu_0 = (0.298 \cdot R_k + 1.511) \cdot (\sqrt{\sigma_B} / 30) \dots \quad (\text{式 6-4})$$

と示した。

以上より、今まで定性的にいわれてきた「接合面の粗さが大きければせん断力伝達能力がある」という現象を、接合面の粗さ測定の結果を用いて定量的に示すことができた。すなわち、接合面粗さにより接合面のせん断挙動を評価することが妥当であるとの知見を得た。

第3章では、実際のプレキャスト水平接合部により近い応力状態である「過大な面縮力は作用していないものの、接合筋の存在により接合面の目開き変位の発生が拘束されている」状態において、第2章でその妥当性が確かめられた粗さ評価値を用いて、目粗しを施された接合面のせん断挙動が定量的に評価可能であるかどうかの検討を行った。あわせて、

接合面に発生が考
みた。

その結
との間に
評価が適
付け、接
力と粗さ
な状態に
とを示し

滑り変

$$\delta_H = 11$$

となった
ついで
と粗さ評
回帰式を

$$\delta_H = 0.$$

$$\delta_H = 11$$

の様を得
どから判
し、「せん
数値」で
数と等価
同一視す

また、
いことを
あわせ
を示した
以上よ

第4章
る」との
一ジャッ
けられた
すると共
複数個連
さ評価値
シアキ

接合面に直交しかつコンクリート内に十分に定着されている接合筋が存在する場合にその発生が考えられる「せん断摩擦力」について、その挙動を定量的に明らかにすることも試みた。

その結果、接合筋を有する様な接合面であっても、その最大耐力と接合面の粗さ評価値との間には弱いながらも一応の相関があることが分かり、粗さ評価値よる接合面の定量的評価が適切であるとの知見を得た。この場合、接合筋の周囲に油粘土による緩衝材を巻き付け、接合筋にだぼせん断力が作用しないようにすると、緩衝材のない場合に比べて、耐力と粗さ評価値との相関が良好になることも確認した。さらに、接合面の滑り変位が微小な状態に限定すると、その時点でのせん断力と粗さ評価値との間には良好な相関があることを示した。すなわち、

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{で緩衝材を施した場合} \quad \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.280 \cdot R_k+0.651 \cdots \text{(式 6-5)}$$

$$\text{緩衝材を施さない場合} \quad \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.369 \cdot R_k+0.797 \cdots \text{(式 6-6)}$$

$$\delta_H=1\text{mm} \text{で緩衝材を施した場合} \quad \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.301 \cdot R_k+0.549 \cdots \text{(式 6-7)}$$

$$\text{緩衝材を施さない場合} \quad \tau_{0.5}/\sqrt{\sigma_B}=0.253 \cdot R_k+1.054 \cdots \text{(式 6-8)}$$

となった。

ついで、緩衝材の有無にかかわらず、微小変形時において接合筋に生じる軸方向力 N_s と粗さ評価値との間に相関があることを示した。そして、このうち緩衝材を施した場合の回帰式を用いて、微小変形時における接合面の等価せん断摩擦係数 μ_{es} を、

$$\delta_H=0.5\text{mm} \text{で} \quad \mu_{es0.5}=0.588 \cdot R_k+1.707 \cdots \text{(式 6-9)}$$

$$\delta_H=1\text{mm} \text{で} \quad \mu_{es1}=0.286 \cdot R_k+1.465 \cdots \text{(式 6-10)}$$

の様に得た。しかしながら、接合面の滑り変位と目開き変位の関係および最終破壊性状などから判断して、 $\delta_H=0.5\text{mm}$ の時点ですでに目粗しの側面圧壊が発生していることを確認し、「せん断摩擦とは、目粗しの側面圧壊によるせん断力伝達機構を『摩擦』に置き換えた数値」である可能性が高いと判断した。同様に、第2章での結果とあわせて、等価摩擦係数と等価せん断摩擦係数は全く別のせん断力伝達機構を数値化したものであって、両者を同一視することはできないと結論付けた。

また、いわゆる単純累加による接合面のせん断耐力評価は危険側評価となり適当ではないことを示した。

あわせて、滑り変位が 1.5mm 程度までなら、せん断力を粗さ評価値で推定できることを示した。

以上より、目粗しのせん断挙動を、接合面の粗さを用いて定量的に評価した。

第4章では、「目粗しのうちその粗さと体積が十分に大きくなったものがシアキーである」との認識のもと、第3章と同じく「過大な面縮力は作用していないものの、スクリュージャッキにより接合面の目開き変位の発生が拘束されている」状態において接合面に設けられたシアキーについて、その形状が接合面のせん断挙動におよぼす影響について考察すると共に、高さに対する底面長さの比が2である様な直角二等辺三角形のシアキーが複数個連続して配置されている接合面を対象に、シアキーの高さ（すなわち第3章での粗さ評価値）のみでシアキーを定量的に評価できるかどうかの検討を行った。

シアキーの形状とそのせん断破壊性状との関係を考察するために行った2次元有限要素

解析およびせん断実験の結果、せん断力を受けるシアキーの破壊性状には、従来考えられていたシアキー底面長さ h と高さ t の比（長さ高さ比 h/t ）以外にも、シアキーの側面角度 θ も影響をおよぼしていることがわかり、

1) 長さ高さ比が 4 以下では、シアキー底面でのせん断破壊となる。

2) 長さ高さ比が 5 で側面角度が 45° 以下では、シアキー側面部分での圧壊となる。

3) 長さ高さ比が 5 で側面角度が 60° 以上では、シアキー底面でのせん断破壊となる。

ことを示した。さらに、解析および実験から、長さ高さ比および側面角度は、最大耐力の大きさにもある程度の影響をおよぼしていることを確認した。

ついで、従来、シアキーの底面積とコンクリート圧縮強度の積に比例常数を乗じた形で評価されているシアキーのせん断耐力に関して、シアキー側面圧壊となった試験体については、シアキー底面積による評価よりも、シアキー側面実面積またはシアキー側面投影面積により評価することが有効であることを示した。

あわせて、底面でのせん断破壊や側面での圧壊など、シアキー部分での破壊を確実に生じさせるための外部拘束力は、接合面見付け面に作用する圧縮応力度に換算して 6kgf/cm^2 程度あれば十分であることを示し、また、シアキーが複数個存在する場合、シアキーの個数分だけ接合面のせん断耐力が上昇する顕著な傾向がないことを確認した。

直角二等辺三角形形状のシアキーが複数個連続して設けられる接合面のせん断耐力について、シアキーの高さと耐力との相関を調べたところ、両者にはほとんど相関がないことがわかり、この様なシアキーを高さ（すなわち第 3 章における粗さ評価値に相当）で評価することはできないと結論付け、シアキーと目粗しを統一的に評価することはできないと判断した。

以上より、シアキーについて、従来の知見にはない定量的評価を行うことができた。

第 5 章では、「目粗しに関して、粗さ評価値とせん断耐力との間に相関があることを示す回帰式」と「シアキーに関して、シアキー高さを準用した粗さ評価値とせん断耐力とが無関係があることを示す回帰式」をすり合わせることにより、目粗しとシアキーの大きさの境界を求めた。第 3 章で得られた目粗しに対する粗さ評価値とせん断耐力との回帰式と第 4 章で得られたシアキーに対する粗さ評価値とせん断耐力との回帰式が不連続であることを利用し、その両者の交点が、目粗しに対する粗さ評価値（すなわち直角二等辺三角形形状シアキーではシアキー高さに相当）で 5mm から 10mm までの間に存在することを示した。そして、第 2 章から第 4 章までの試験体の破壊性状を調べ、この 5mm から 10mm までの間のある点を境に粗さのせん断破壊性状が底面せん断から側面圧壊に変化することを示した。これらのことにより、粗さ評価値で 5mm を下回る様な粗さは「目粗し」として、また 10mm を上回る様な粗さは「シアキー」として見なすのが妥当であると結論付けた。

以上により、接合面の粗さの形状が接合面のせん断力伝達機構におよぼす影響を明らかにした。

6.2

本研究
想定し
果を実

1) 本研
各章
の外部
端に変

2) 実構
本研
ト勾配
し、実
張軸力
想され

3) 正負
本研
荷は多

4) 試験
最近
製作す
ら大き

5) 試験
当性
本研
接合面
である

6) 接合
本研
面全体

上記
本研究
えられ

5)、
現状で
題もあ
物質表
炉内の
凸を 2

6.2 本研究の問題点と今後の課題

本研究は、プレキャストコンクリート構造の耐震壁-梁（床）水平接合部の微小要素を想定して行った基礎的研究である。本研究の成果は前項に示す通りであるが、これらの成果を実際のプレキャスト接合部に応用しようとする時、以下の様な問題点が考えられる。

- 1) 本研究で対象とした試験体はあくまで接合部の縮小模型である
各章で得られた成果のうちで、具体的な数値を明示したものがあるが（例えば 4.6.4 項の外部拘束力など）、これらは試験体の寸法が大きく変化した場合や想定する応力状態が極端に変化した場合についても保証するものではない。
- 2) 実構造では不均一目開きが発生する
本研究は、試験体の位置付けを「水平接合部の微小要素」としている都合上、モーメント勾配などに起因する先打ち部分と後打ち部分の不均一な目開きを許容していない。しかし、実際のプレキャストコンクリート構造物では、曲げモーメントの効果で接合面上に引張軸力が作用する可能性は十分にあり、接合面における不均一な目開きが起きることが予想される。
- 3) 正負多数回繰り返しせん断力の影響を考慮していない
本研究では載荷せん断力は一方向単調載荷であるが、実際の地震時挙動を考えると、載荷は多数回正負繰り返しを行うべきである。
- 4) 試験体のコンクリート圧縮強度が 240kgf/cm^2 と限られている
最近では部材接合用として高強度グラウトを用いたり、部材自体を高強度コンクリートで製作するケースが多い。よって、コンクリート圧縮強度が本研究で対象とした程度の値から大きく外れた場合の考察が行われていない。
- 5) 試験体のコンクリート圧縮強度の値をそのまま使ったり平方根を用いたりすることの妥当性を示すことができなかった
本研究では扱うことのできなかった接合面上のコンクリートの微細な強度のばらつきや、接合面上に生成するレイタンスに代表される不純物の影響についても当然検討されるべきである。
- 6) 接合面全体の粗さをもれなく測定し、もれなく評価することができなかった。
本研究での粗さ評価は、あくまで接合面上に設定した測線上の粗さの評価であり、接合面全体の評価は厳密にはできていない。

上記 1)、2)、3)、4)については、それぞれの指摘事項を考慮の上で改めて検討を行い、本研究で得られた知見を反映したり、あるいは修正したりすることで対処できるものと考えられる。

5)、6)については、微小領域のコンクリート強度評価や不純物の影響の定量的評価など現状では解決の極めて難しい問題や、接合面の計測技術の進歩など時間を要する性格の問題もあって、指摘事項の完全な解決は現段階では難しい。しかし、レーザー光線を用いて物質表面の性状を測定する技術はまさに日進月歩であり（例えば電炉鉄筋製造にあたって炉内の金属の組成を瞬時に測定できるレーザー光式センサーが開発されている）、面上の凹凸を 2 次元的に測定する技術もまたしかりである（ハイビジョンカメラとレーザー光式変

位計を組み合わせた 2 次元凹凸測定装置も、 μm オーダーの凹凸であれば測定可能という装置がすでに実用化)。これら測定装置の更なる改良を待って、いつの日か再度検討を行いたい。

参考文献

第 1 章 参考文献

- 1.1) E. W. Bennet and S. Banerjee : Strength of Beam-Column Connections with Dowel Reinforcement, *The Structural Engineer*, Vol.54, No.4, April 1976. 1.18)
- 1.2) PCI Committee on Connection Details : DESIGN AND TYPICAL DETAILS OF CONNECTIONS FOR PRECAST AND PRESTRESSED, *Prestressed Concrete Institute*, 1988 1.19)
- 1.3) 塩原 等 : コンクリートとコンクリートの接合、*コンクリート工学*、Vol.34、No.6、pp.14-24、1996.6 1.20)
- 1.4) 国分正胤 : 新旧コンクリートの打継目に関する研究、*土木学会論文集*、No.8、1950 1.21)
- 1.5) 茶谷正洋、大野隆造、小林啓明 : テクスチャの視覚に関する研究 第 2 報 石膏粒度板の見えるのあらさ、*日本建築学会論文報告集*、No.294、pp.123-128、1980.8 1.22)
- 1.6) 李 宝禄、前川宏一 : 接触面密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式、*コンクリート工学論文* No.88.1-1、*コンクリート工学*、Vol.26、No.1、pp.123-137、1988.1 1.23)
- 1.7) 武井一夫 : コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法、*日本建築学会構造系論文集*、No.455、pp.7-16、1994.1 1.24)
- 1.8) 新井一彦、坂野弘一、竹村健一 : コンクリート床の平坦さ及び表面粗さの測定と解析に関する研究、*コンクリート工学年次論文報告集*、Vol.20、No.2、pp.115-120、1988 1.25)
- 1.9) 西村 昭、藤井 学、宮本文穂、斉藤 功 : ひびわれ RC 部材のせん断伝達作用に対するひびわれ面性状の影響、*土木学会論文集*、No.360、V-3、pp.91-100、1985.8 1.26)
- 1.10) 三橋博三、梅岡俊治 : 骨材粒径を変えたコンクリートの破面解析、*日本建築学会構造系論文報告集*、No.453、pp.1-7、1993.11 1.27)
- 1.11) 三上貴正、荒川琢也、小野英哲 : コンクリート直仕上げ床の仕上りに及ぼす機械ごての仕様およびコンクリート性状の影響の考察、*日本建築学会構造系論文報告集*、No.453、pp.27-37、1993.11 1.28)
- 1.12) 和田俊良、佐藤龍司、石川千温、上田正生 : レーザビーム光線による亀裂面形状測定手法の開発とデータの 2 次元分析手法の提案 (コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究 (その 1))、*日本建築学会構造系論文報告集*、No.490、pp.179-188、1996.12 1.29)
- 1.13) 和田俊良、佐藤龍司、石川千温、上田正生 : 種々の応力モード下におけるコンクリート亀裂面の 2 次元形状分析 (コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究 (その 2))、*日本建築学会構造系論文報告集*、No.504、pp.81-86、1998.2 1.30)
- 1.14) 石原誠一郎、三橋博三、立松和彦、山崎順二 : コンクリート打継ぎ部のせん断伝達機構に関する研究、*日本建築学会大会学術講演梗概集*、C-2 分冊 構造Ⅳ、pp.755-756、1998.9 1.31)
- 1.15) Mattock, A. H. and Hawkins, N. M. : Shear Transfer in Reinforced Concrete, *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol.17, No.2, pp.55-75, 1972 Mar./Apr. 1.32)
- 1.16) Mattock, A. H. : Cyclic Shear Transfer and Type of Interface, *Journal of the Structural Division*, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.107, No.ST10, pp.1945-1964, 1981.10 1.33)
- 1.17) Mattock, A. H., Johal, L. and Chow, H. C. : Shear Transfer in Reinforced Concrete with Moment or Tension Acting across the Shear Plane, *Journal of the* 1.34)
- 1.35)

Prestressed Concrete Institute, Vol.20 , No.4, pp.76-93, 1975 Jul./Aug.

- 1.18) Mattock, A. H., Li, W. K. and Wang, T. C. : Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.21, No.1, pp.20-39, 1976 Jan./Feb.
- 1.19) Shiohara, H., Hosokawa, Y., Nakamura, T. and Aoyama, H. : Direct Shear Transfer Mechanism at the Interface of Reinforced Concrete Construction Joint, Transaction of the Japan Concrete Institute, Vol.6, pp.409-416, 1984
- 1.20) 飯島政義、大塚正博、佐藤正樹、原 夏生 : 打継目におけるせん断伝達耐力の評価について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.2、pp.311-314、1990
- 1.21) 金本清臣、壁谷沢寿海 : 曲げ・せん断・軸力を受けるプレキャスト接合面の要素実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.635-640、1991
- 1.22) 油田憲二、榎谷栄次、西岡幸一 : プレキャスト部材接合部のせん断挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.641-646、1991
- 1.23) 福田幹夫、窪田敏行 : 壁式プレキャスト構造水平接合部のずれ挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.647-652、1991
- 1.24) 古屋則之、菊池利武、津田和明、小島克朗 : 地中梁と後打ち壁からなる合成壁の設計法に関する研究 (その 4) 合成壁接合部の許容せん断応力度と地中壁洗浄処理面の品質管理手法、大林組技術研究所報、No.39、pp.82-86、1989
- 1.25) プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、日本建築学会、pp.159-248、1986.10
- 1.26) Birkeland, P. W. and Birkeland, H. W. : Connections in Precast Concrete Construction, Journal of the American Concrete Institute, Vol.63, No.3, pp.345-368, 1966.3
- 1.27) Mast, R. F. : Auxiliary Reinforcement in Concrete Connections, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.94, No.ST6, pp.1485-1504, 1968.6
- 1.28) Hofbec, J. A., Ibrahim, I. O. and Mattock, A. H. : Shear Transfer in Reinforced Concrete, Journal of the American Concrete Institute, Vol.66, No.2, pp.119-128, 1969.2
- 1.29) 山田一字、青柳征夫 : ひび割れ面におけるせん断伝達、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.19-26、1983.10
- 1.30) 岡本晴彦、菅野俊介、村井和雄、宮内靖昌 : プレキャスト部材と現場打コンクリートとの接合面のせん断耐力に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp.773-774、1992.8
- 1.31) 河野 進、柳田豊彦、田中仁史 : 高強度材料を用いた接合面におけるせん断力伝達性能の評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.3、pp.631-636、1998
- 1.32) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), 11-7 Shear friction, The American Concrete Institute, 1983.11
- 1.33) PCI Design Handbook-Precast and Prestressed Concrete, Part 5 Design of Connections, Prestressed Concrete Institute, 1978
- 1.34) British Standard Code for Practice, Large-panel Structures and Structural Connections in Precast Concrete, 913. Joints Transmitting Mainly Shear, 1970
- 1.35) 日本建築学会 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説、9 条 接合部 2.および 3.、1982.6

- 1.36) 土木学会 昭和 61 年制定コンクリート標準示方書 設計編、6 章 終局限界状態に対する検討 6.3.7、1986.10
- 1.37) 土木学会 平成 8 年制定コンクリート標準示方書 設計編、6 章 終局限界状態に対する検討 6.3.7、1996.3
- 1.38) 黒正清治：プレカストコンクリート構造接合部耐力に関する研究（打継ぎ部の形状と強度について）、日本建築学会論文報告集、No.89（臨時増刊 昭和 38 年度大会学術講演要旨集）、p.141、1963.9
- 1.39) 日本建築学会 壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法、pp.204-213、1989.4
- 1.40) 品川多美二 他：特殊コンクリート構造（建築構造学大系 21）、彰国社、pp.19-21、1968.3
- 1.41) 後藤祐司、長滝重義：コンクリート接合部のせん断耐力に関する基礎研究、土木学会論文報告集、No.254、pp.95-106、1976.10
- 1.42) Hansen, K., Kavyrchine, M., Olesen, S. φ., Pume, D. and Schwing, D.: Design of Vertical Keyed Shear Joint in Large Panel Buildings, Building Research and Practice, July/August, 1974, pp.202-205
- 1.43) Jensen, B. C.: On the Ultimate Load of Vertical Keyed Shear Joints in Large Panel Buildings, Institute of Building Design Report, Technical University of Denmark, No.108, pp.1-8, 1975
- 1.44) Pume, D.: Load-Bearing Capacity and Deformability of Joints under Shear and Compression, Proceedinds of the RILEM-CEB-FIP Symposium of "Mechanical Properties of Joints of PRC Elements", pp.99-124, 1978
- 1.45) 東 洋一、遠藤利根穂、磯 健一、沼本 学、本橋秀世：プレキャスト鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断挙動に関する研究（その 1 耐震壁接合部のせん断実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.1721-1722、1981.9
- 1.46) 望月 重、梅宮良之：鉛直接合部の面外拘束効果に関する実験、第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.373-376、1985
- 1.47) 望月 重、梅木芳人：プレキャスト鉄筋コンクリート構造接合部の面内・面外拘束効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp.335-336、1986.8
- 1.48) 望月 重、榎谷栄次、永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力（ダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合）、日本建築学会構造系論文報告集、No.424、pp.11-22、1991.6
- 1.49) J.ペテル：大型プレファブパネルの鉛直ウェットジョイントのせん断耐力について、第 4 回日仏建築工業化会議報告書、日本建築センター、1974.10
- 1.50) 山下淳一、油田憲二、榎谷栄次：壁式プレキャスト構造鉛直接合部におけるせん断伝達（その 1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp.559-562、1990.10

第 2 章 参考文献

- 2.1) 建築大辞典 第 2 版、彰国社、p.1927、1993.6
- 2.2) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事(1997)、日本建築学会、p.444、1997.6
- 2.3) 麻田 宏、小原嗣朗：金属材料表面工学（標準金属工学講座 7）、コロナ社、pp.271-289、1968.12
- 2.4) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、pp.25-80、1994.5
- 2.5) 岡本純三、中山景次、佐藤昌夫：トライボロジー入門、幸書房、pp.9-26、1990.2

- 2.6) ISO/
Prop
Cur
2.7) 草場
工学
2.8) 小野
床仕
冊
2.9) 第 1
2.10) 第 1

- 第 3 章
3.1) 第 1
3.2) 第 1
3.3) 第 1
3.4) 第 1
3.5) 松崎
の抽
p.43

- 第 4 章
4.1) Darv
Conc
pp.2
4.2) Kupf
Jour
1973
4.3) 荒井
考察
4.4) 郭
業大
4.5) 奥本
する

- 3) ISO/DIS 13565-2, "Characterization of Surface Having Stratified Functional Properties, Part 2 : Height Characterization Using the Linear Material Ratio Curve", International Organization for Standardization, 1994.2
- 7) 草場茂樹：文献調査 床面仕上げ精度の評価法(F-Number System)、コンクリート工学、Vol.30、No.12、pp.43-47、1992.12
- 8) 小野英哲、柳澤忠義、三上貴正、横山 裕、川村清志：視覚的観点から見た建築物床仕上面の凹凸の評価方法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A分冊 材料施工、pp.431-432、1989.10
- 9) 第1章 参考文献 1.2) と同じ。
- 10) 第1章 参考文献 1.3) と同じ。

3章 参考文献

- 1) 第1章 参考文献 1.15) と同じ。
- 2) 第1章 参考文献 1.26) と同じ。
- 3) 第1章 参考文献 1.27) と同じ。
- 4) 第1章 参考文献 1.28) と同じ。
- 5) 松崎育弘：プレキャスト工法の現状と将来への展望 一構造と接合部一 (4.問題点の抽出、4.1 接合部一般)、日本建築学会関東支部構造専門研究委員会シンポジウム、p.43、1997.12

4章 参考文献

- 1) Darwin, D. and Pecknold, D. A. :Nonlinear Biaxial Stress-strain Law for Concrete, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM2, pp.229-241, 1977.4
- 2) Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. :Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, 1973.8
- 3) 荒井雅子：コンクリート造耐震壁の耐力及び変形性能に与える壁筋の効果に関する考察、東京工業大学大学院修士論文、1989.3
- 4) 郭 濟蒼：地震時における鉄筋コンクリート建築物基礎構造の力学的挙動、東京工業大学大学院博士論文、1998.3
- 5) 奥本拓也、松崎育弘、中野克彦：プレキャスト部材接合部におけるせん断伝達に関する研究(その8)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.847-848、1996.9

本研究に関連して著者が発表した論文一覧

・各章の内容に直接関係のあるもの

<審査付き論文>

[日本建築学会構造系論文集]

- 1)コンクリート接合面の粗さを用いた接合面せん断耐力の推定と滑り変位挙動
香取慶一、林 静雄、楨谷貴光、牛垣和正
1998年5月号、No.507、pp.107-116
(第2章に關係)
- 2)直交鉄筋が配筋されたコンクリート接合面のせん断挙動と接合面表面粗さとの關係
香取慶一、林 静雄、牛垣和正、乗物丈巳
1998年6月号、No.508、pp.101-110
(第3章に關係)
- 3)形状の違いと複数個配置されることがプレキャスト接合部のシアキーのせん断挙動におよぼす影響(第1報 シアキーの形状と耐力および破壊性状との關係)
香取慶一、林 静雄、乗物丈巳
1999年4月号、No.518、pp.71-78
(第4章に關係)
- 4)コンクリート接合面におけるシアキーと目粗しの大きさの上での境界
香取慶一、林 静雄
1999年2月3日原稿受理 現在査読審査中
(第4章および第5章に關係)

[コンクリート工学年次論文報告集]

- 1)コンクリート打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断力伝達能力に関する実験研究
楨谷貴光、香取慶一、林 静雄
1995年、Vol.17、No.2、pp.171-176
(第2章に關係)
- 2)コンクリート打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断伝達に関する実験的研究
牛垣和正、香取慶一、林 静雄
1996年、Vol.18、No.2、pp.1205-1210
(第2章および第3章に關係)
- 3)プレキャスト接合部におけるシアキーのせん断挙動に関する研究
乗物丈巳、香取慶一、山本直孝、林 静雄
1997年、Vol.19、No.2、pp.1245-1250
(第4章に關係)
- 4)コンクリート打継ぎ面に直交する鉄筋の挙動と打継ぎ面粗さの關係に関する研究
香取慶一、林 静雄、乗物丈巳、羽田和幸
1997年、Vol.19、No.2、pp.1263-1268
(第3章に關係)
- 5)滑り変位の増大にともなうコンクリート接合面の表面粗さの破壊の進行と接合面せん断挙動との關係に関する研究
香取慶一、林 静雄
1998年、Vol.20、No.3、pp.625-630
(第3章に關係)

6)せん
の境
香取
1999
(第

<口頭
[日本建

1)コン
(そ

1998

(第

2)プレ

1996

(第

3)コン

1996

(第

4)コン

(そ

1997

(第

5)プレ

1997

(第

6)コン

究

1998

(第

・本研

<審査

[日本建

1)接合

林

1994

[コンク

1)プレ

香取

1990

2)プレ

宮原

1996

6)せん断破壊性状の違いから見たプレキャスト接合部における目粗しとシアキーの大きさの境界

香取慶一、林 静雄

1999年、Vol.21、pp.853-858

(第4章および第5章に關係)

<口頭発表>

[日本建築学会大会学術講演梗概集]

1)コンクリート打ち継ぎ面における表面粗さの評価とせん断力伝達能力に関する実験研究
(その1~2)

1995年度、構造Ⅳ、pp.657-660、1995年8月

(第2章に關係)

2)プレキャスト接合部におけるシアキーの形状とせん断挙動の關係に関する解析的研究

1996年度、構造Ⅳ、pp.835-836、1996年9月

(第4章に關係)

3)コンクリート接合面における表面粗さの評価とせん断伝達に関する実験的研究(その1~2)

1996年度、構造Ⅳ、pp.837-840、1996年9月

(第3章に關係)

4)コンクリート打ち継ぎ面に直交する鉄筋の挙動と打ち継ぎ面粗さの關係に関する研究

(その1~2)

1997年度、構造Ⅳ、pp.432-436、1997年9月

(第3章に關係)

5)プレキャスト接合部におけるシアキーのせん断挙動に関する研究(その1~2)

1997年度、構造Ⅳ、pp.441-444、1997年9月

(第4章に關係)

6)コンクリート接合面の表面粗さ評価値を用いた接合面載荷せん断力の推定の限界に関する研究

1998年度、構造Ⅳ、pp.753-754、1998年9月

(第3章に關係)

・本研究に關連する内容を含むもの

<審査付き論文>

[日本建築学会構造系論文集]

1)接合筋を傾斜配筋させたプレキャスト耐震壁一床接合部のせん断挙動に関する実験的研究

林 静雄、香取慶一、太田道彦、吉田啓喜、東端泰夫

1994年3月号、No.457、pp.47-59

[コンクリート工学年次論文報告集]

1)プレキャスト耐震壁の復元力特性に及ぼす接合部の影響について

香取慶一、林 静雄、伊藤千明、太田道彦

1990年、Vol.12、No.2、pp.521-526

2)プレキャスト連層耐震壁の柱一壁鉛直接合部に関する実験的研究

宮原貴昭、林 静雄、香取慶一

1996年、Vol.18、No.2、pp.1001-1006

<国際会議投稿論文>

[10WCEE]

- 1) Experimental studies on shear behavior of wall used precast concrete,
K.Katori, S.Hayashi, M.Ohta, H.Yoshida and Y.Higashibata
Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp.3257-3262,
July 1992 (on Madrid SPAIN)

<口頭発表>

[日本建築学会大会学術講演梗概集]

- 1)プレキャスト耐震壁のせん断挙動に関する実験的研究 (その 1~3)
1989年度、構造Ⅱ、pp.221-226、1989年10月
- 2)大型構造物のPCa複合化工法に関する研究 (その 2)
1990年度、構造Ⅱ、pp.465-466、1990年10月
- 3)プレキャスト耐震壁のせん断挙動に関する実験的研究 (その 4~10)
1990年度、構造Ⅱ、pp.475-488、1990年10月
- 4)鉄筋コンクリート造プレキャスト耐震壁のせん断伝達に関する解析的研究
1991年度、構造Ⅱ、pp.745-746、1991年9月
- 5)PCa外壁の設計法に関する実験的研究 (その 4~5)
1991年度、構造Ⅱ、pp.769-772、1991年9月
- 6)接合筋を斜め配筋したプレキャスト耐震壁水平接合部の耐震性能評価に関する研究
(その 1~2)
1994年度、構造Ⅱ、pp.757-760、1994年9月
- 7)プレキャスト連層耐震壁の柱-壁鉛直接合部に関する実験的研究
1996年度、構造Ⅳ、pp.849-850、1996年9月

-以上-

謝辭

謝辞

本研究を行うに際し、終始熱心で懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました、私の恩師でありまた上司でもあります、東京工業大学教授・工学博士・林 静雄先生に、深く感謝申し上げます。

東京工業大学教授・工学博士・和田 章先生、同教授・工学博士・田中享二先生、同教授・工学博士・瀧口克己先生、同助教授・工学博士・安部武雄先生、同助教授・工学博士・篠原保二先生には、日頃から貴重なご意見を賜り、また論文の審査を担当して戴きました。

東京工業大学教授・工学博士・笠井和彦先生、同助教授・工学博士・坂田弘安先生、同助教授・工学博士・山田 哲先生、同助手・工学博士・吉国一華先生、同助手・宮内博之先生からも、研究の進め方について、種々のご助言を賜りました。論文執筆にあたり、東京工業大学教授・工学博士・田村哲郎先生、同助教授・工学博士・三上貴正先生、同助教授・工学博士・山中浩明先生および同助教授・工学博士・元結正次郎先生からも、有益なご指導、ご鞭撻を賜りました。

接合面の粗さの評価方法に関して、東京工業大学名誉教授・工学博士・塚田忠夫先生から、貴重なご指導を賜りました。

ここに、厚くお礼申し上げます。

足利工業大学学長・工学博士・黒正清治先生および東京理科大学教授・工学博士・岸田英明先生からは、日頃より研究に携わる者としての心構えをご教示賜りました。また東京工業大学教授・工学博士・大町達夫先生、同教授・工学博士・瀬尾和大先生、同教授・工学博士・翠川三郎先生、同助教授・工学博士・年縄 巧先生、日本工業大学教授・工学博士・市橋重勝先生、株式会社日建設計・工学博士・堀井昌博様からは、怠惰な私に、折に触れ暖かい叱咤激励を賜りました。

ありがとうございます。

実験の遂行および論文の執筆に際し、東京工業大学 林研究室の歴代メンバーでもある、藤川昌作君、大村哲矢君、市塚貴浩君、杉浦泰樹君、羽田和幸君、山本直孝君、長江拓也君、大宮 幸嬢、川西浩史君、杉浦奈緒嬢、王 敬東君、本庄正樹君、松浦康人君、峯村守央君、岡田行江嬢、金 東範君、篠原研究室の室中英男君、川西克祥君、石飛幸子嬢および田中研究室諸氏からは、多大なご協力を賜りました。また、試験体の製作および粗さ測定に関して、東京工業大学応用セラミックス研究所・石井 元技術主任、人見美代志様、河島公夫様、中屋美智子嬢のご協力を賜りました。

株式会社フジタ・林 和也様、株式会社新井組・工学博士・東 健二様、株式会社風工学研究所・工学博士・向 秀元様、EQE インターナショナル・工学博士・郭 濟蒼嬢、東京工業大学応用セラミックス研究所研究員・工学博士・岸田慎司先生からも、多大なご尽力を賜りました。

清水建設株式会社・熊谷仁志様、福井県庁・坂川慶介様、財団法人鉄道総合技術研究所・武居 泰様、株式会社日本設計・荒井雅子嬢、大成建設株式会社・下妻 泰君、株式会社大林組・高見信嗣君、大須賀浩君、株式会社 NTT ファシリティーズ・下鳥利光君、東日本旅客鉄道株式会社・杉山俊彦君、株式会社青木建設・中川 洪君、三菱地所株式会社・岡西 努君からは、折に触れ暖かいご声援を戴きました。

日本
工学博
事務官
記し

私と
業後も
伏して

明治
任講師
小山明
工学博
よび明
あわ
の学生
那須秀
ここ

株式
キャス
また
宮原貴
コンク
株式
アドバ
あり

武蔵
士・植
彦先生
河野
で貴重
記し

以上
室卒業
ど考え

明治
の身勝
った弟
昌から
便宜を

日本大学生産工学部専任講師・工学博士・湯浅 昇先生、新潟工科大学工学部専任講師・工学博士・飯野秋成先生、東京理科大学工学部嘱託補手・飯野由香利先生、東京工業大学事務官・大山ひろみ様、同事務補佐員・薄葉千景様からも、日頃からご厚情を賜りました。記してお礼申し上げます。

私と林 静雄先生との出会いのきっかけを作って下さり、明治大学在学中はもとより卒業後も変わらぬご指導、ご鞭撻を賜りました、明治大学理事・工学博士・狩野芳一先生に、伏してお礼申し上げます。

明治大学助教授・工学博士・菊池雅史先生、同助教授・工学博士・野口弘行先生、同専任講師・高木仁之先生、同専任講師・工学博士・荒川利治先生、同専任講師・工学博士・小山明男先生、日本工業大学助教授・工学博士・白石一郎先生、職業能力開発大学校教授・工学博士・鈴木修三先生、同助教授・工学博士・遠藤龍司先生からは、明治大学在学中および明治大学勉強会を通じて種々有益なご意見を頂戴致しました。

あわせて、昭和 62 年度明治大学工学部建築学科 狩野研究室・洪研究室・野口研究室の学生諸氏からは、在学中から変わらぬご厚情を賜りました。特に現旭化成工業株式会社・那須秀行君、現大成建設株式会社・新田隆雄君からは、一方ならぬご助力を賜りました。ここに感謝申し上げます。

株式会社竹中工務店・太田道彦様、吉田啓喜様、工学博士・東端泰夫様には、私がプレキャストコンクリート構造と触れ合うきっかけを作って戴きました。

また、東急工建株式会社・真家秀夫様、一寸木貞夫様、株式会社熊谷組・吉松賢二様、宮原貴昭様、旭化成工業株式会社・今関一美様、桐山伸一様からは、実際のプレキャストコンクリート構造の製造、設計、開発に関する各種情報を賜りました。

株式会社巴技研・五十畑登様、木村時四郎様からは、実験装置の製作について、貴重なアドバイスを戴きました。

ありがとうございます。

武蔵工業大学工学部教授・工学博士・望月 重先生、関東学院大学工学部教授・工学博士・楨谷栄次先生、東京理科大学工学部教授・工学博士・松崎育弘先生、同助手・中野克彦先生、京都大学名誉教授・工学博士・六車 熙先生、同大学院工学研究科助手・Ph.D・河野 進先生からは、日本建築学会大会学術講演会およびコンクリート工学年次大会などで貴重なご意見、ご指導を賜りました。

記してお礼申し上げます。

以上の様にこの論文は多くの皆様のご協力の基にまとめられたものですが、特に林研究室卒業生の楨谷貴光君、牛垣和正君そして乗物丈巳君の献身的ご協力なくしては、執筆など考えられませんでした。ここに、改めて厚くお礼申し上げます。

明治大学卒業後、東京工業大学大学院への進学、そして東京工業大学助手への就職と私の身勝手を許して下さった、父良昌、母一江、そして結果的に多大な負担を負わせてしまった弟知治そして妹の渡辺久子に改めて感謝し、あわせてお詫びする次第です。特に父良昌からは、有限会社香取商店代表取締役として、試験体用骨材とセメントの調達に甚大な便宜を賜りました。

最後に妻悦子へ。ありがとう。あなたのご協力に対する感謝の念は、言葉では言い表せられません。

1999（平成 11）年 9 月 1 日

香取慶一

付録

図および写真

- 第 2 章 「各測線上の粗さ曲線」
- 第 2 章 「粗さ曲線の負荷曲線」
- 第 2 章 「粗さ曲線のフーリエスペクトル」

- 第 3 章 「各測線上の粗さ曲線」
- 第 3 章 「粗さ曲線の負荷曲線」

- 第 4 章 「試験体の最終破壊状況」
- 第 4 章 「外部拘束力-滑り変位関係」

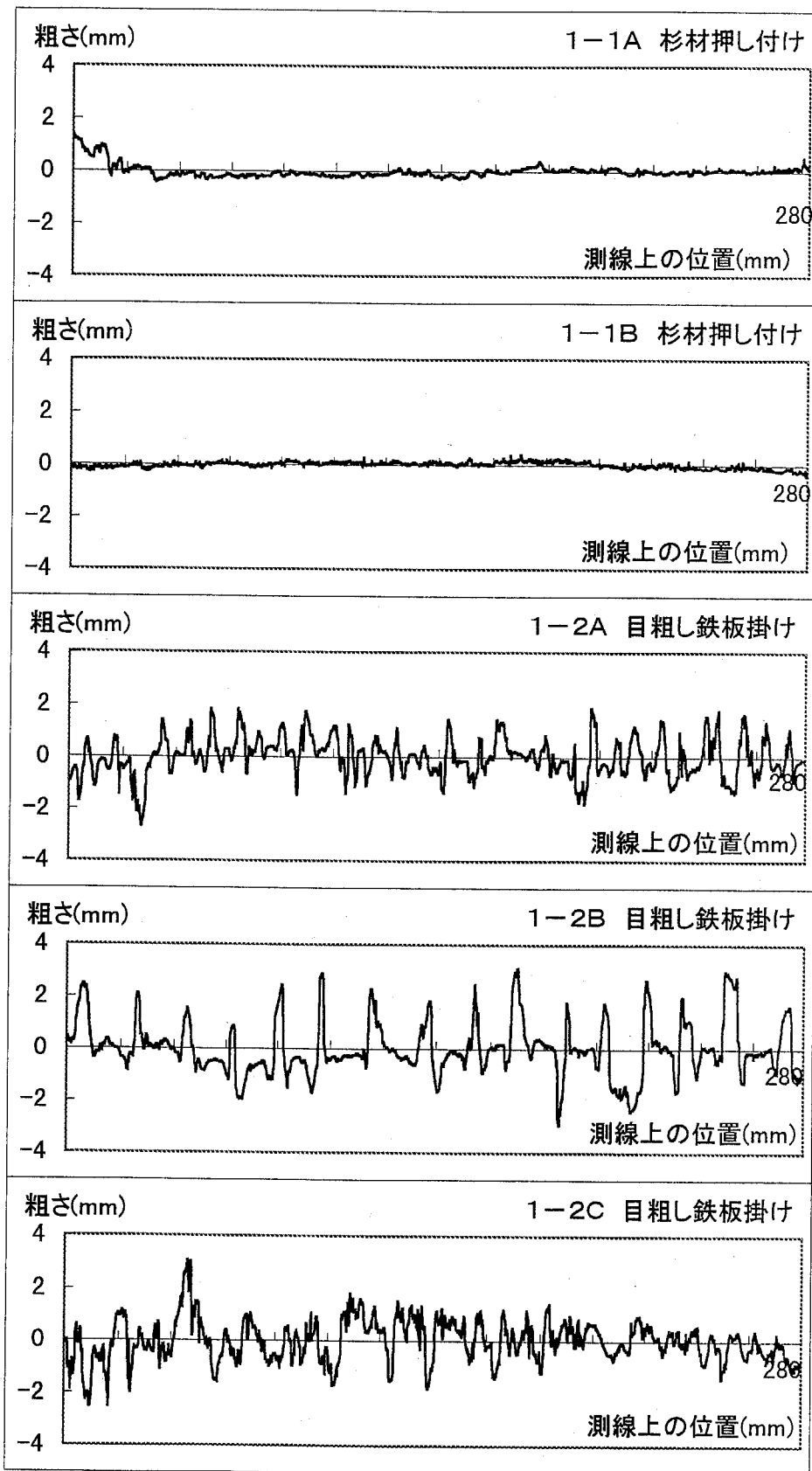


図 A-1(a) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 1)

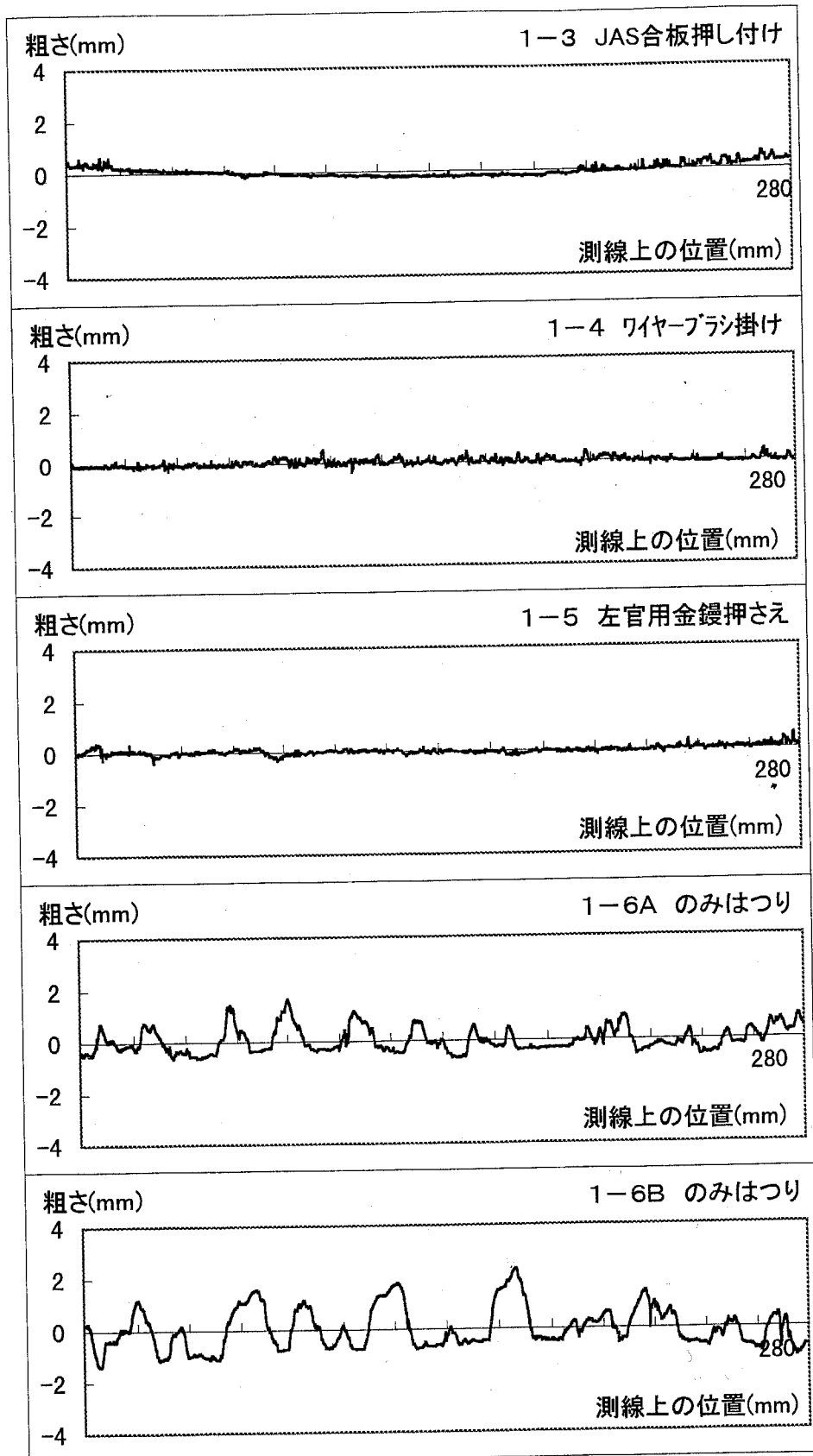


図 A-1(b) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 2)

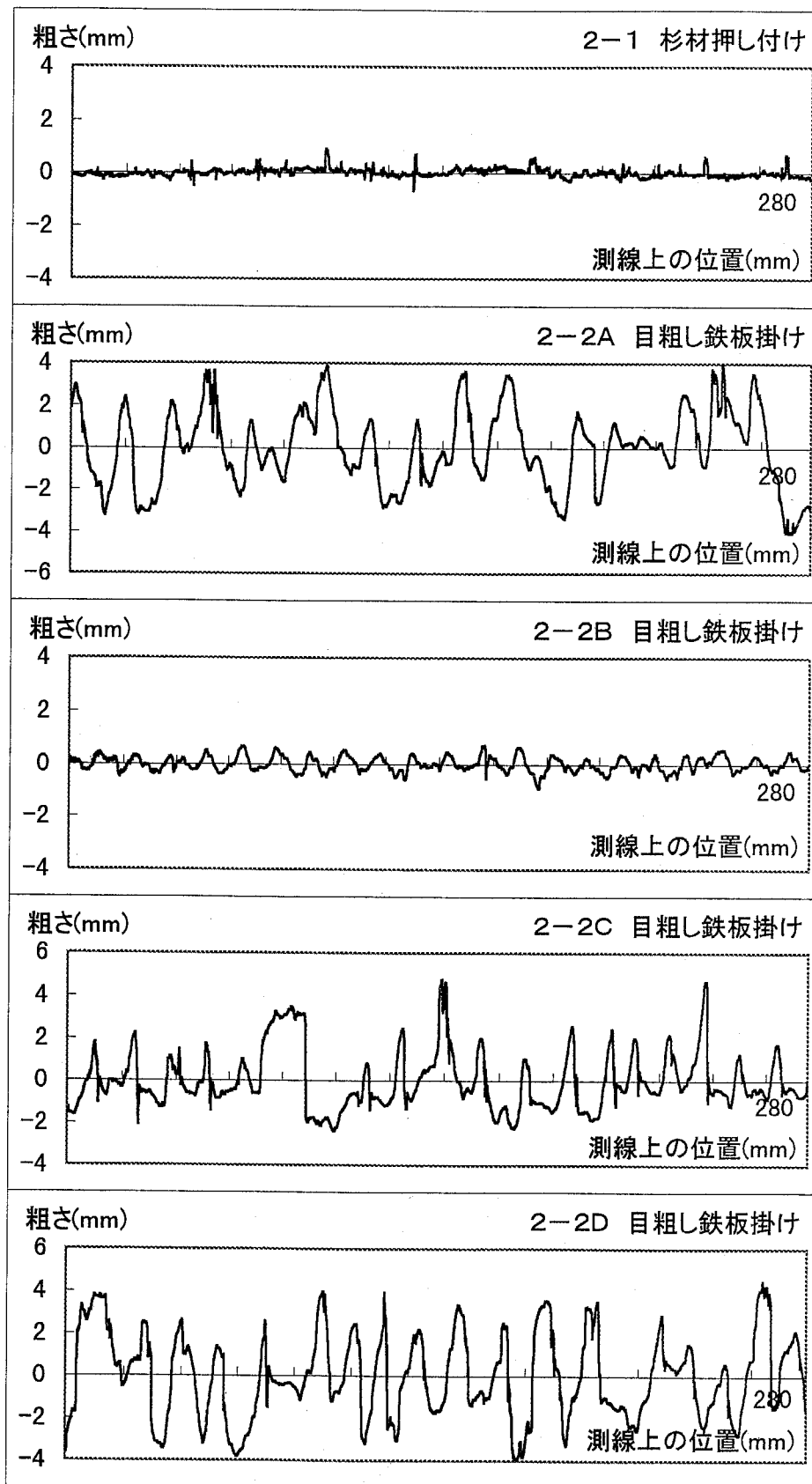


図 A-1(c) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 3)

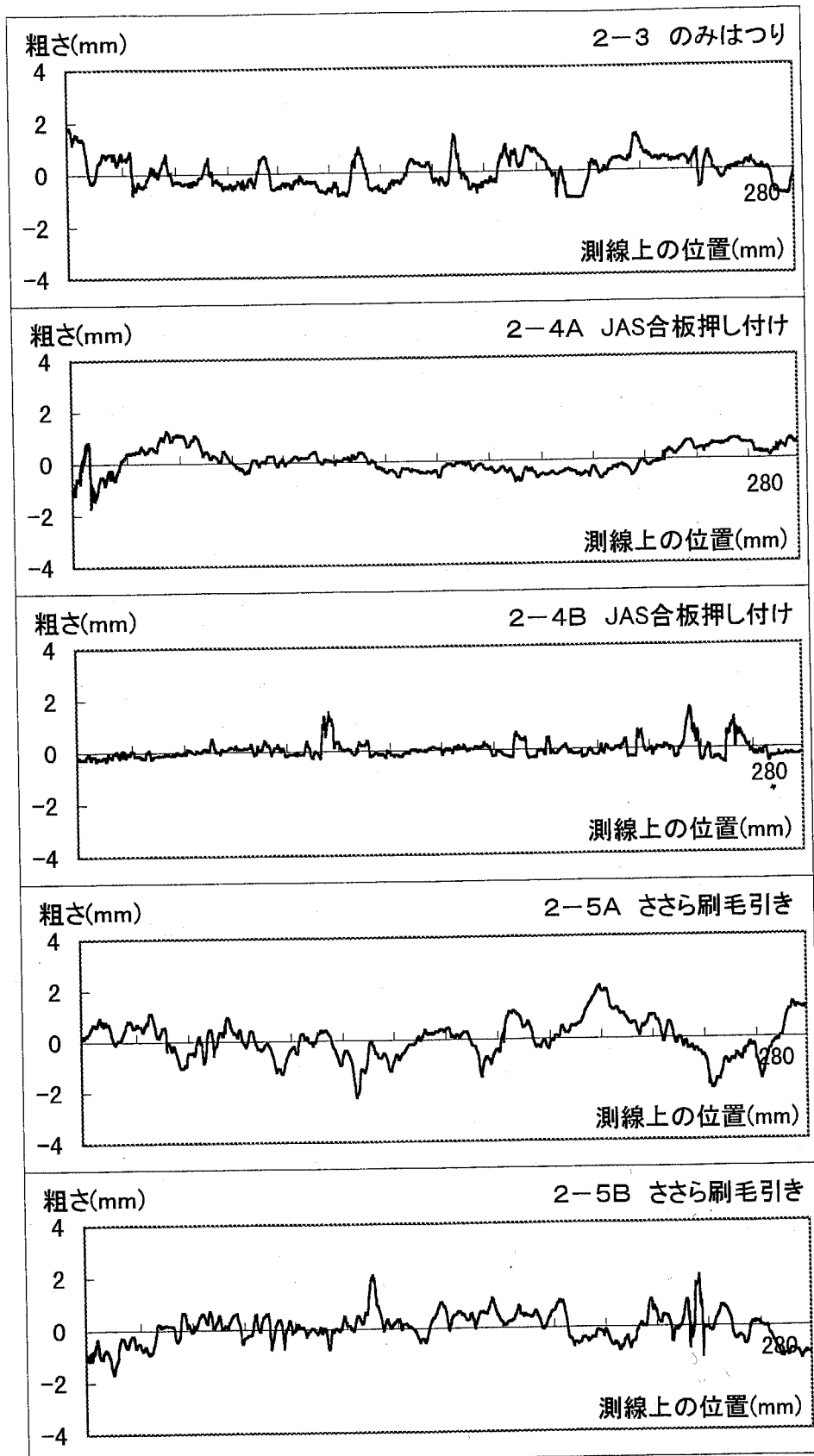


図 A-1(d) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 4)

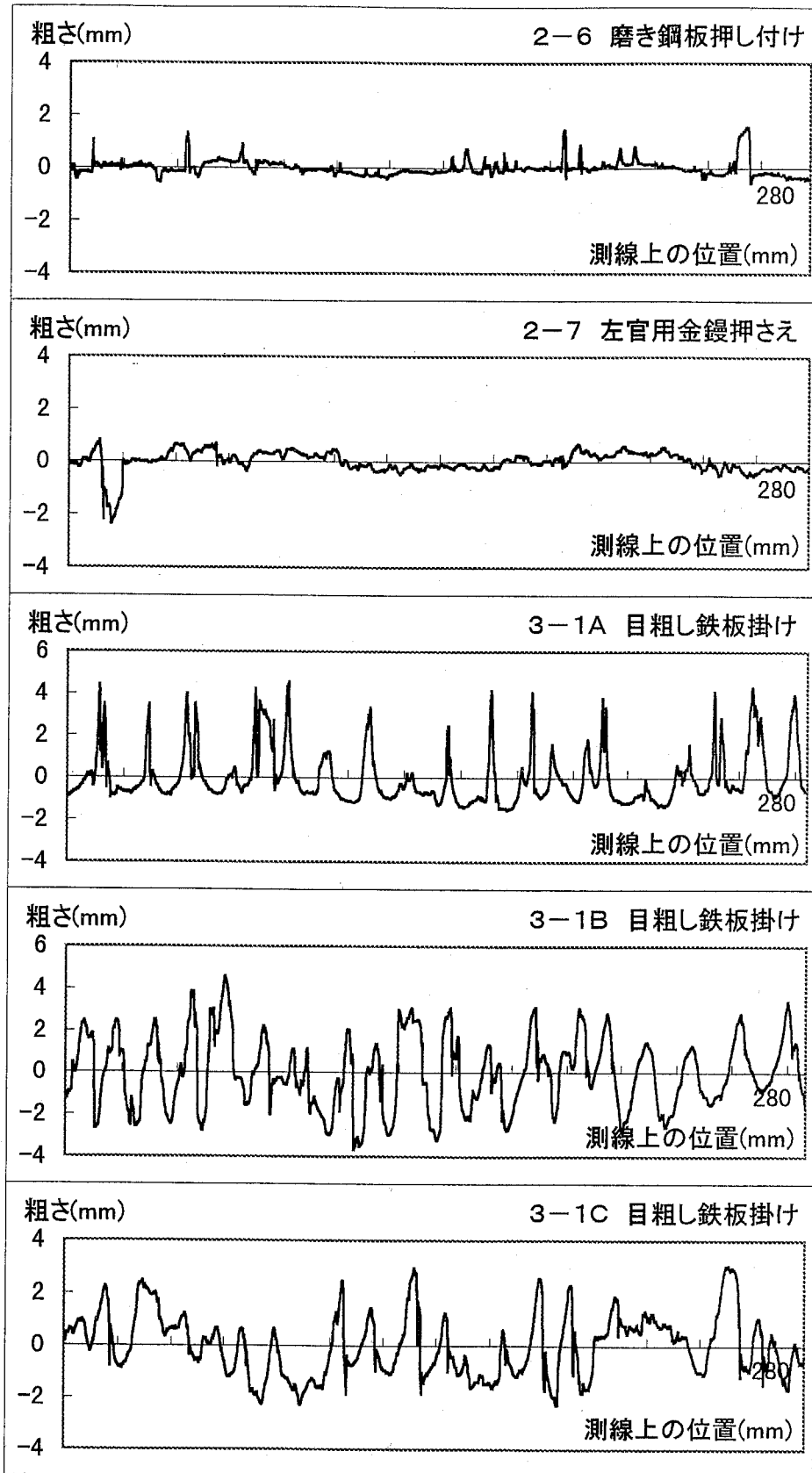


図 A-1(e) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 5)

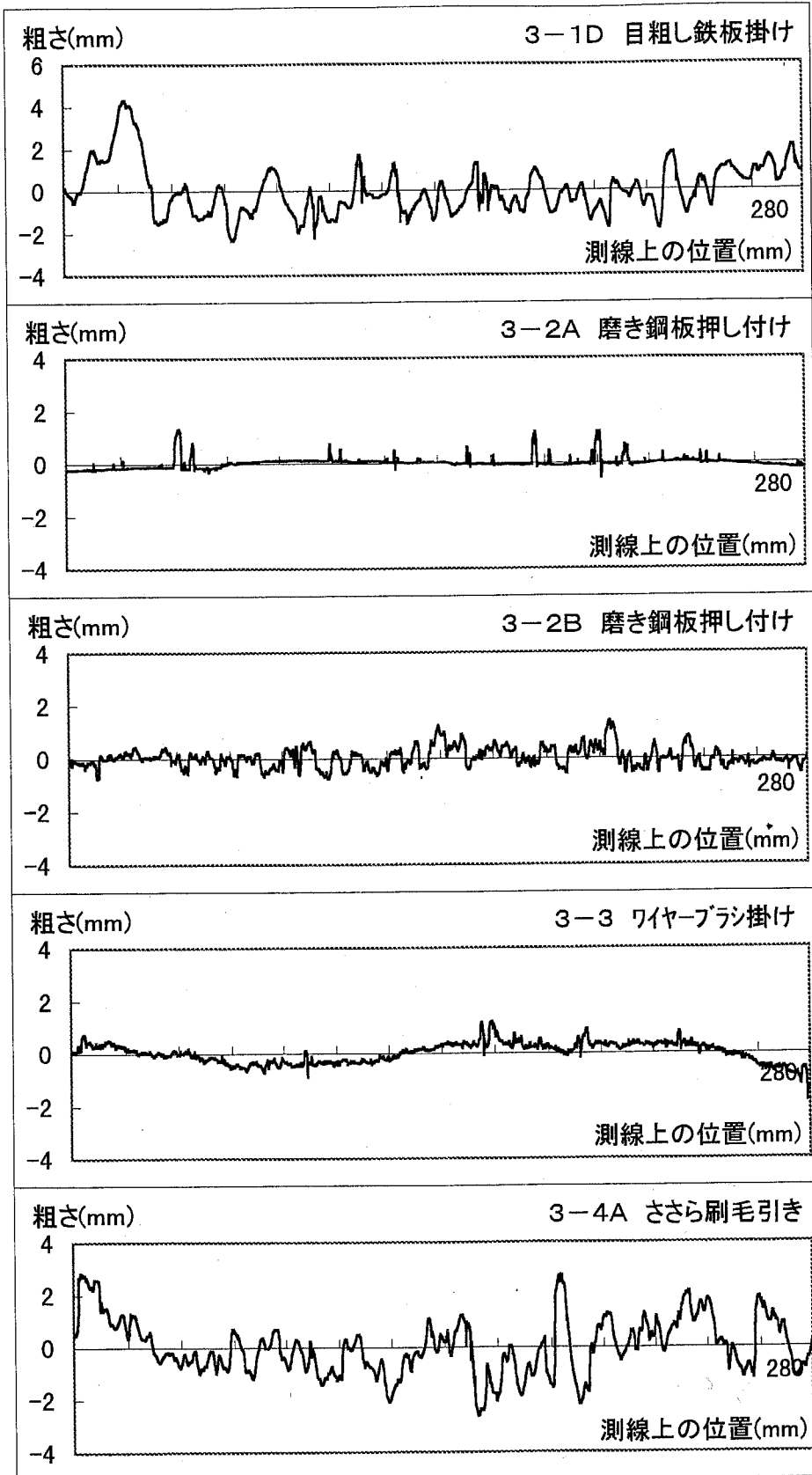


図 A-1(f) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 6)

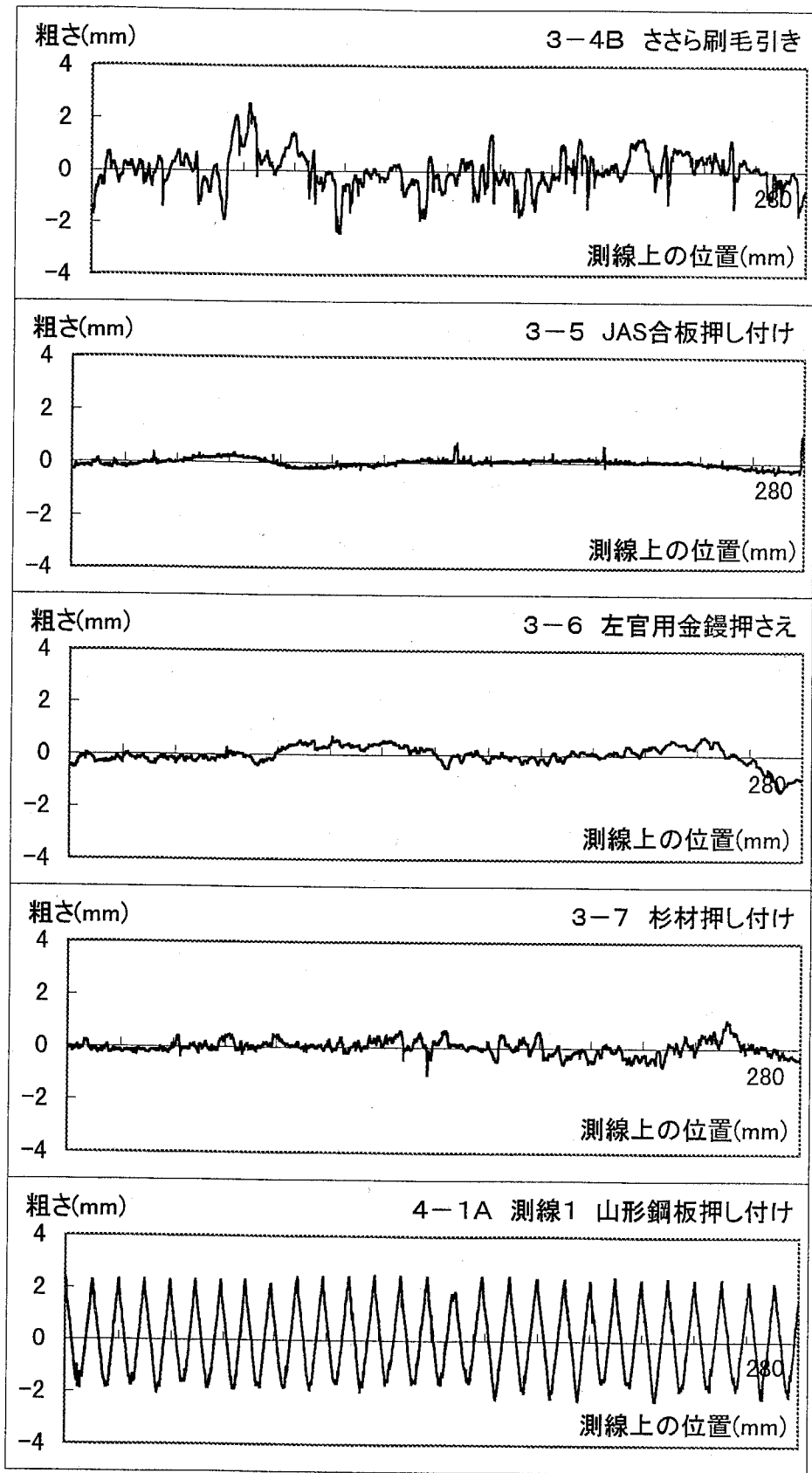


図 A-1(g) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 7)

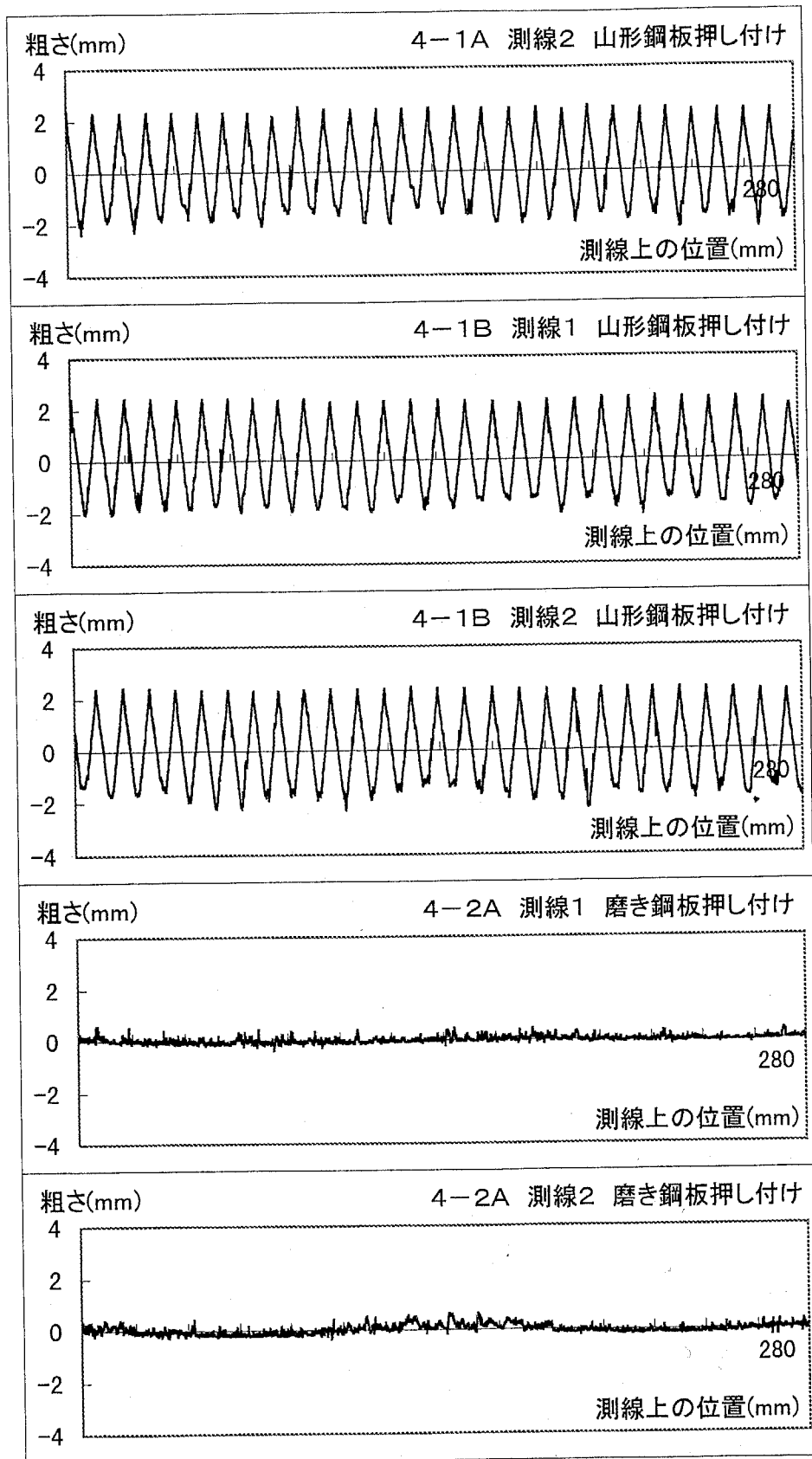


図 A-1(h) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 8)

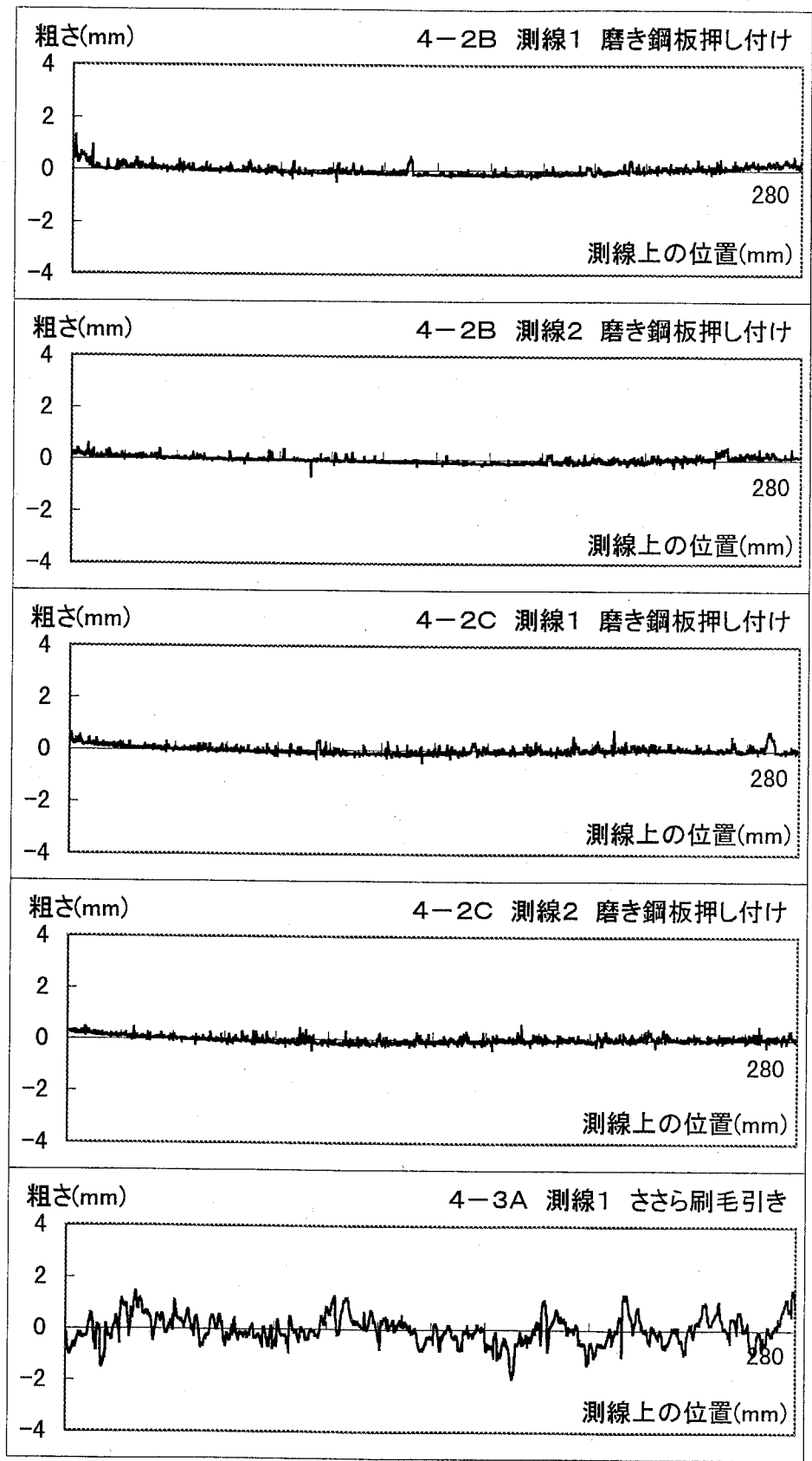


図 A-1(i) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 9)

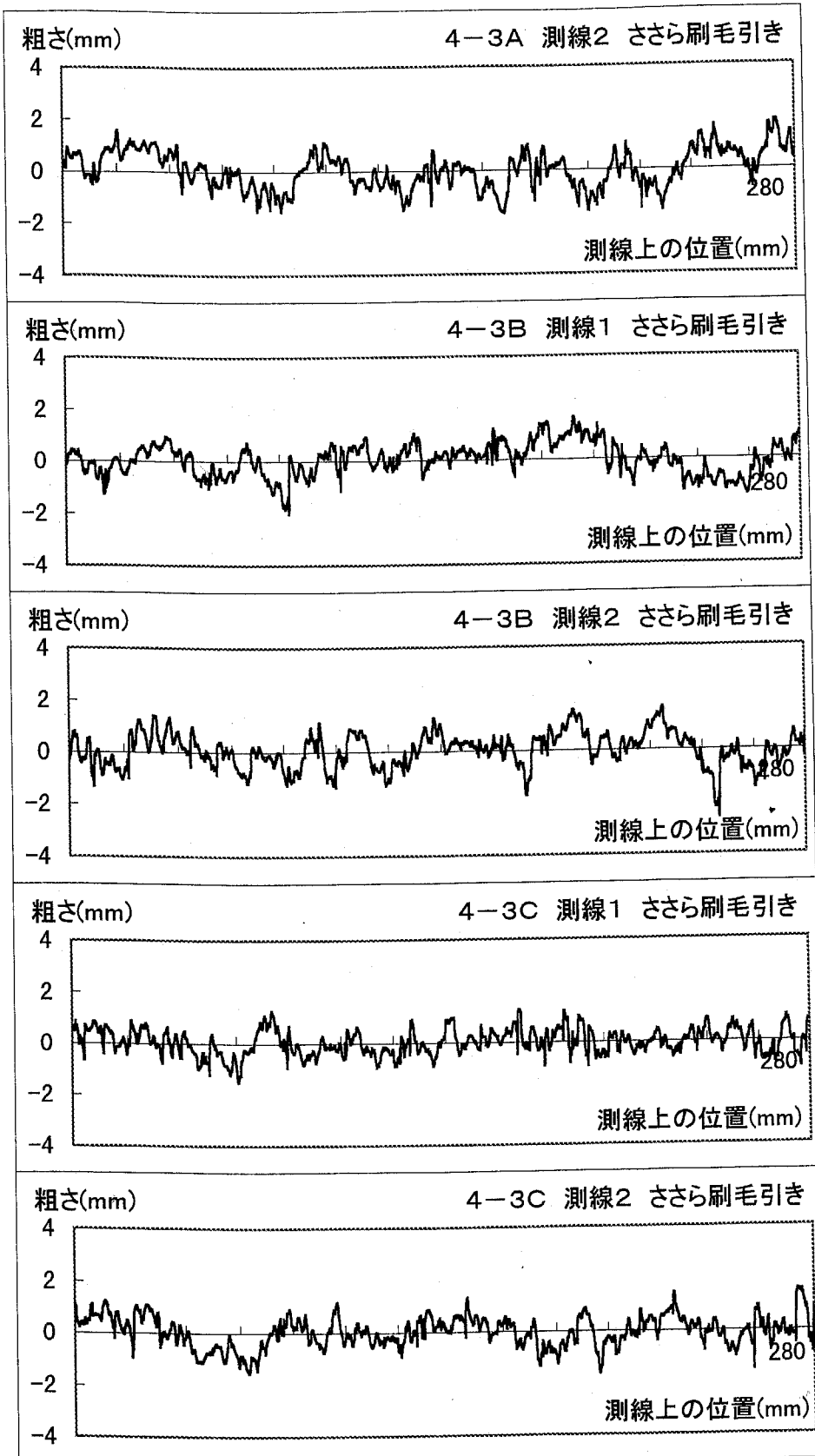


図 A-1(j) 第 2 章 各測線上の粗さ曲線 (その 10)

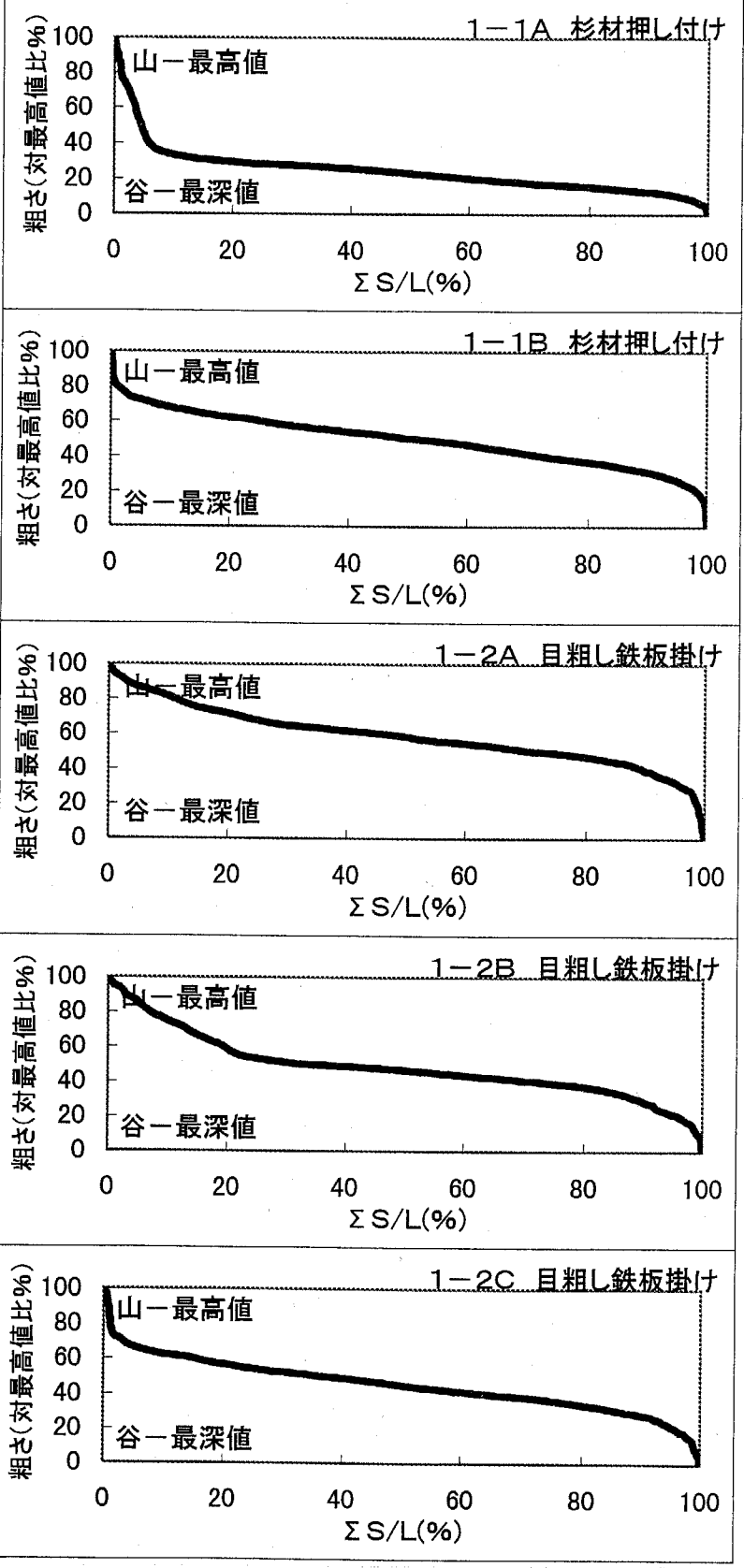


図 A-2(a) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 1)

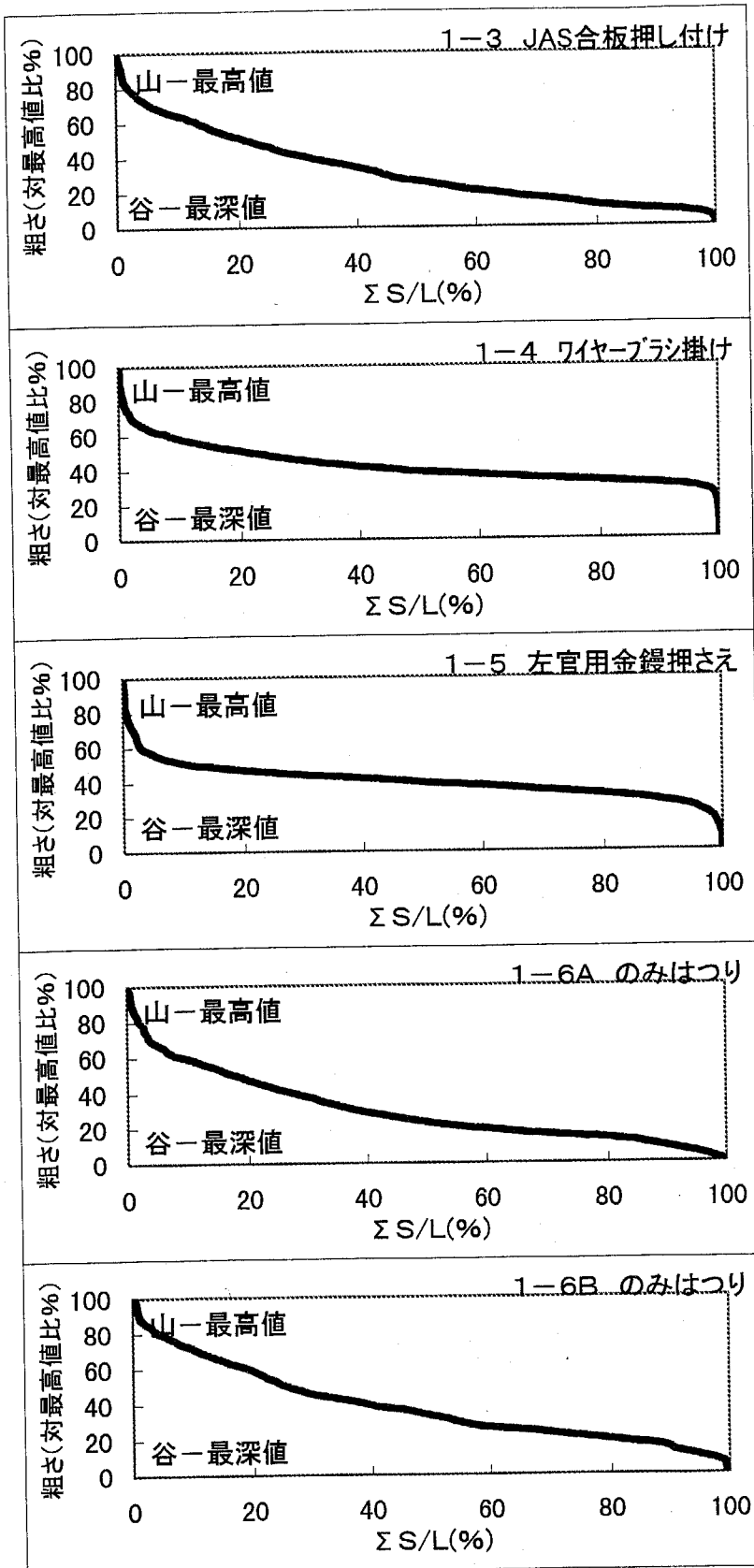


図 A-2(b) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 2)

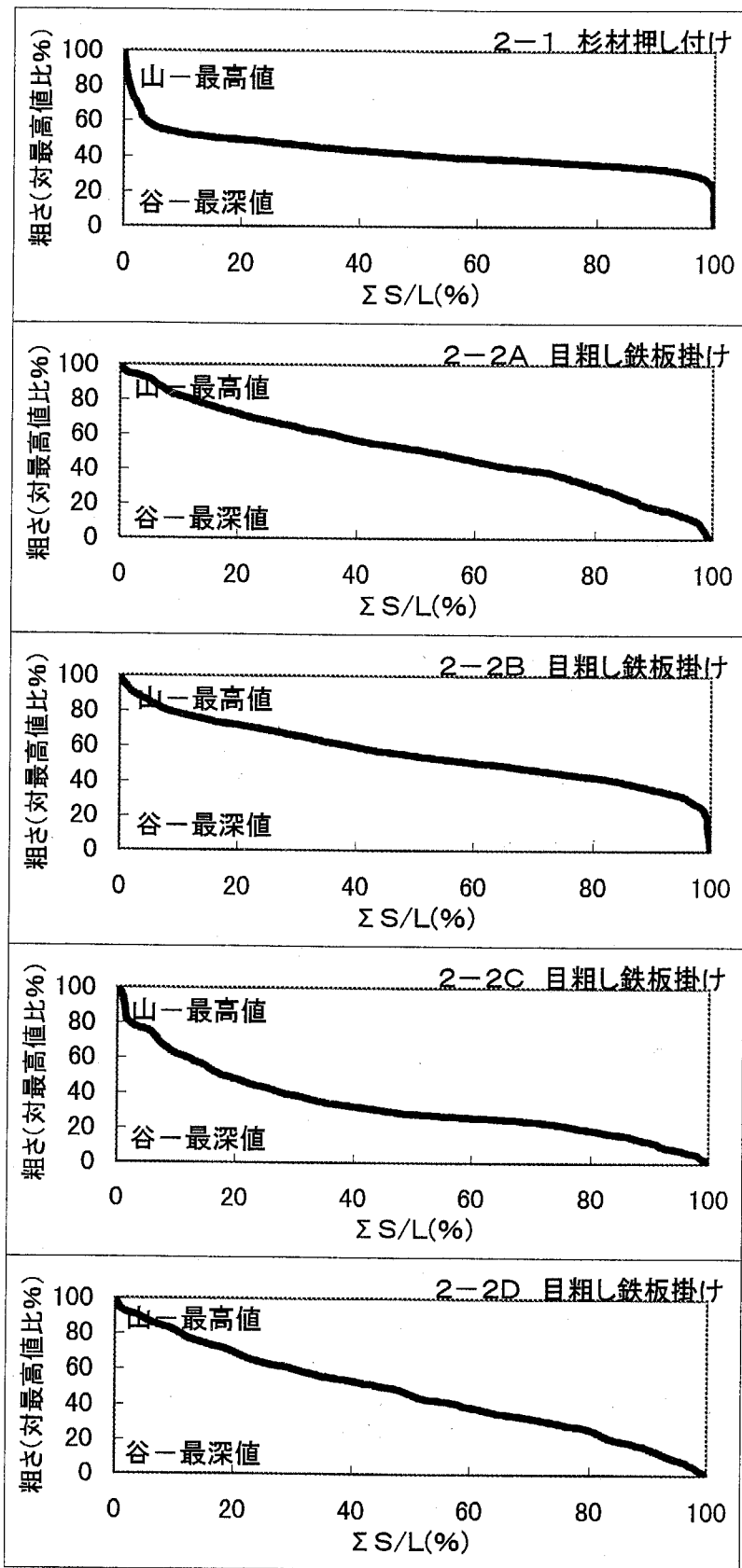


図 A-2(c) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 3)

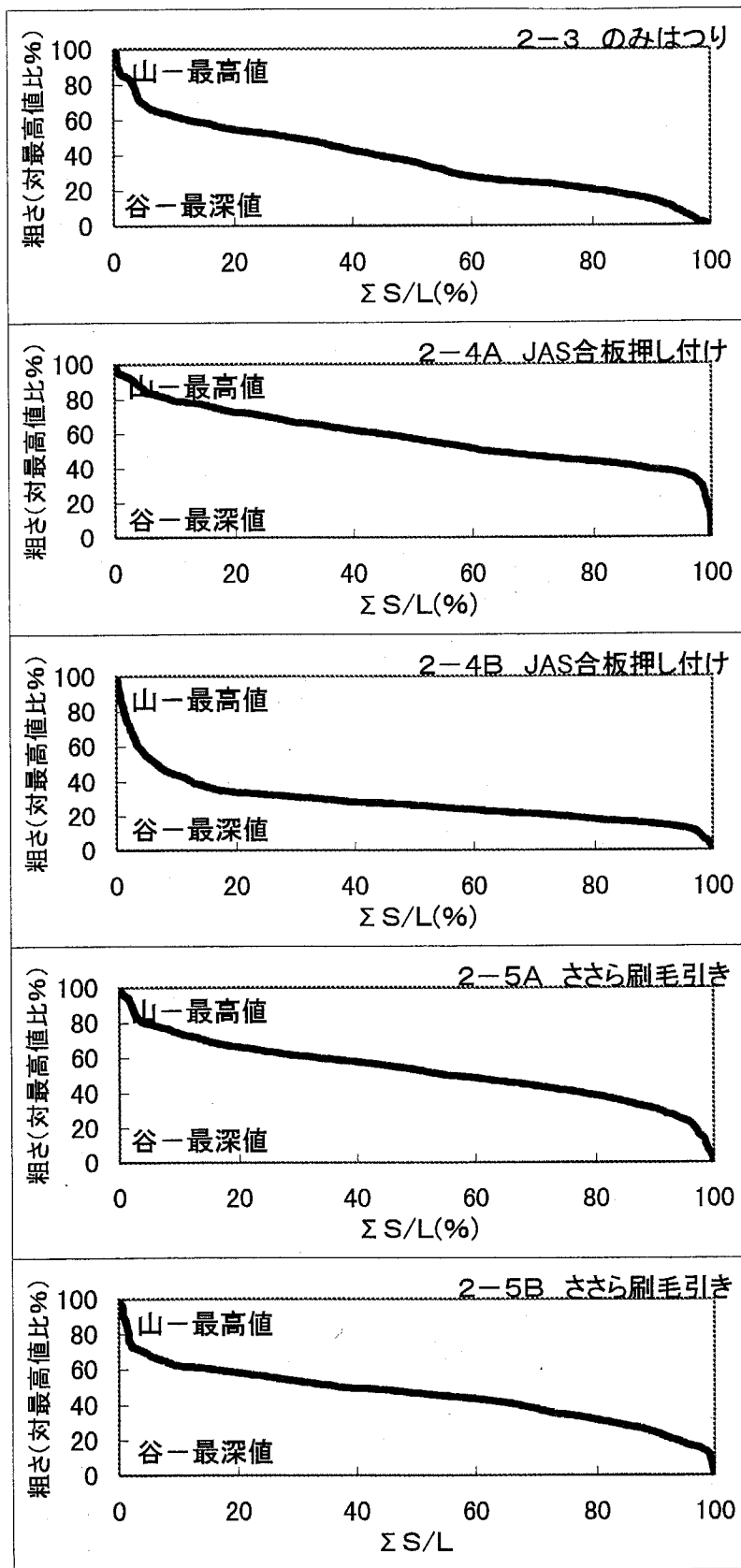


図 A-2(d) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 4)

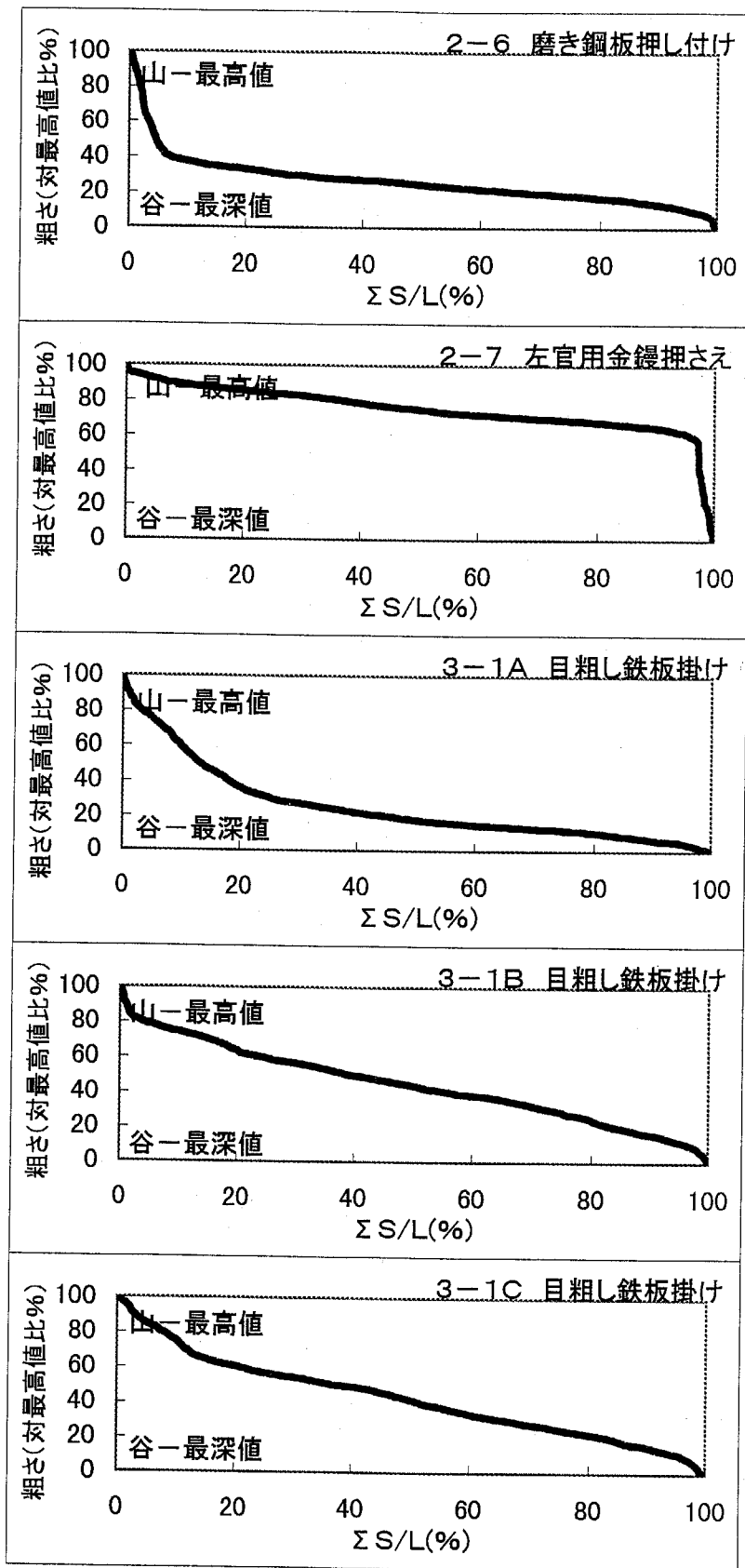


図 A-2(e) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 5)

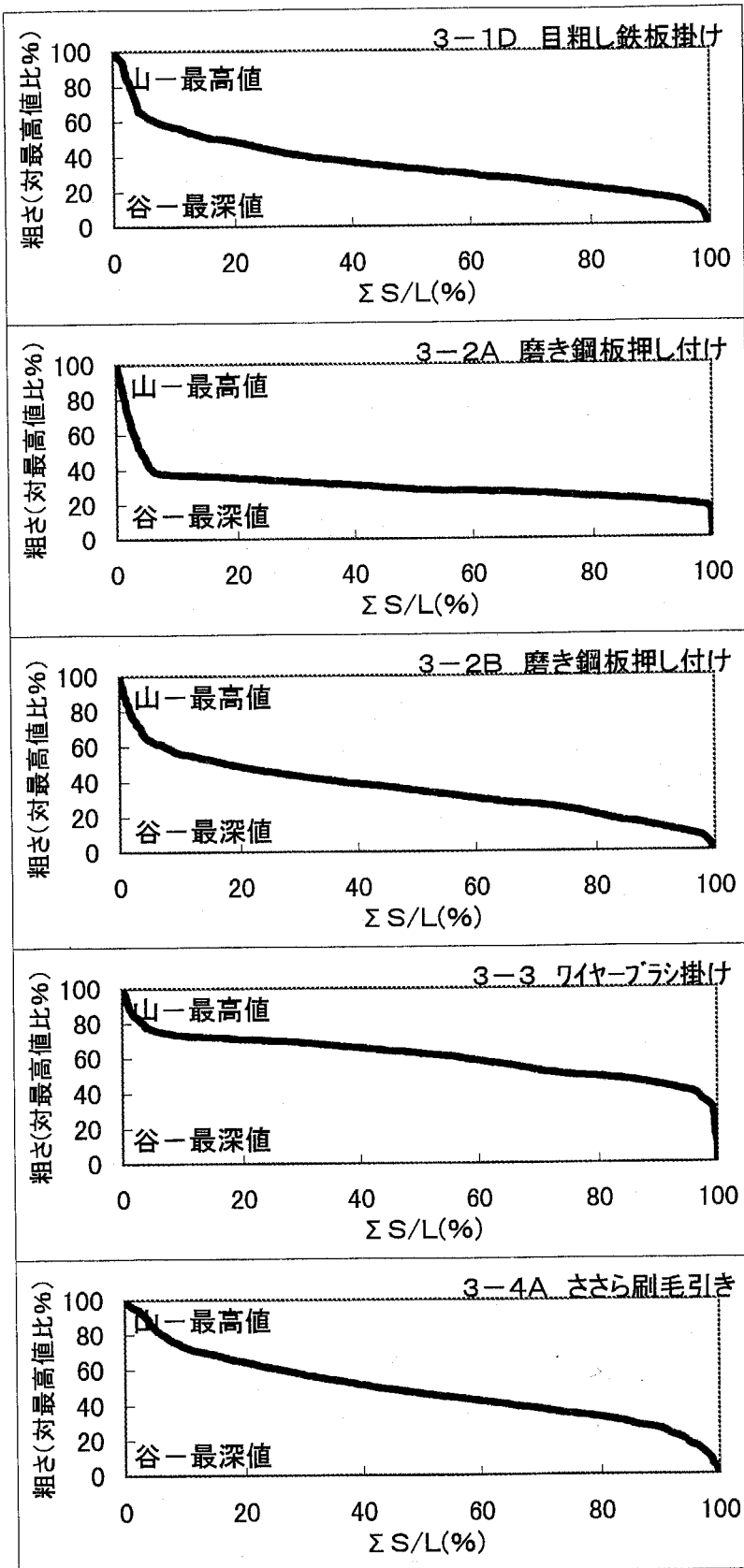


図 A-2(f) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 6)

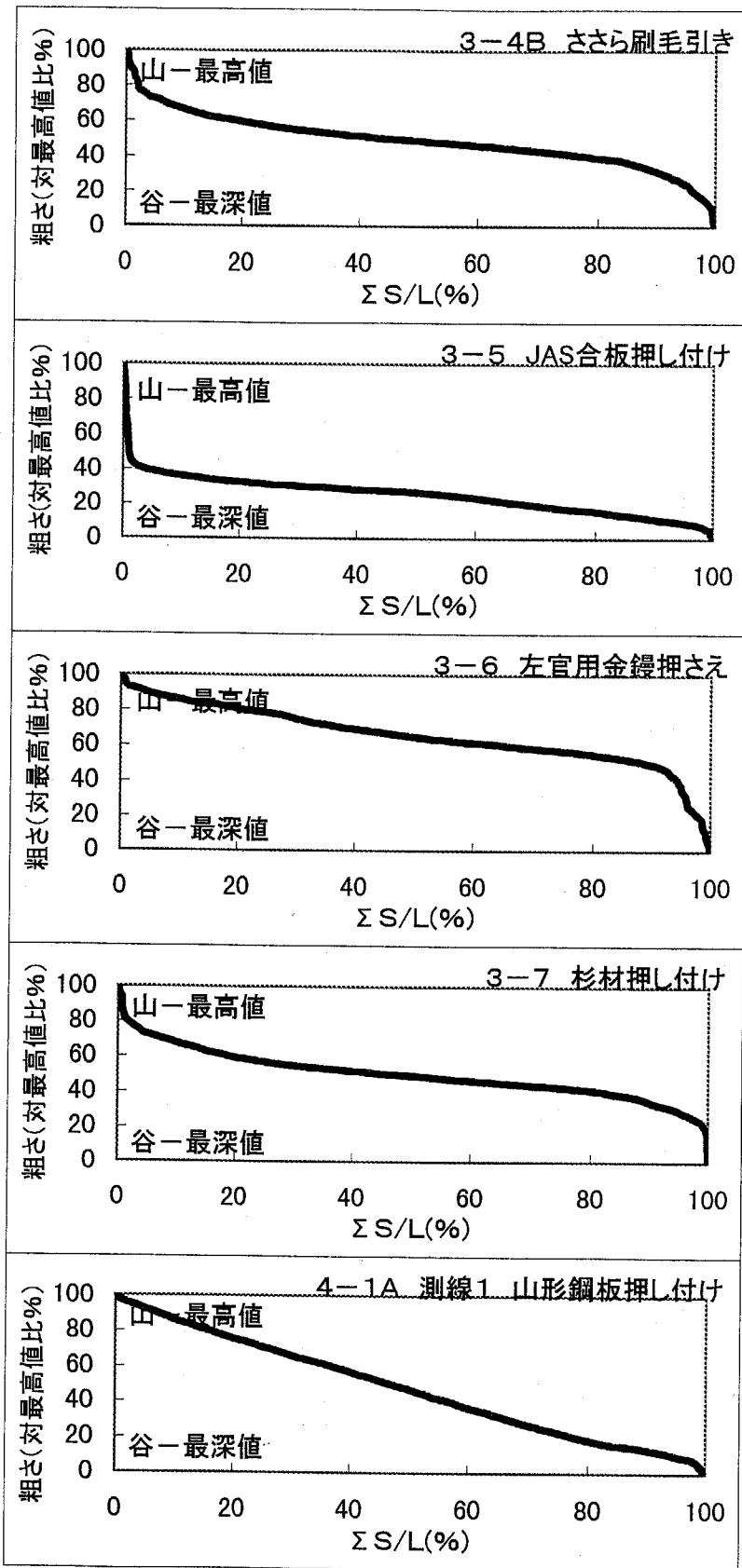


図 A-2(g) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 7)

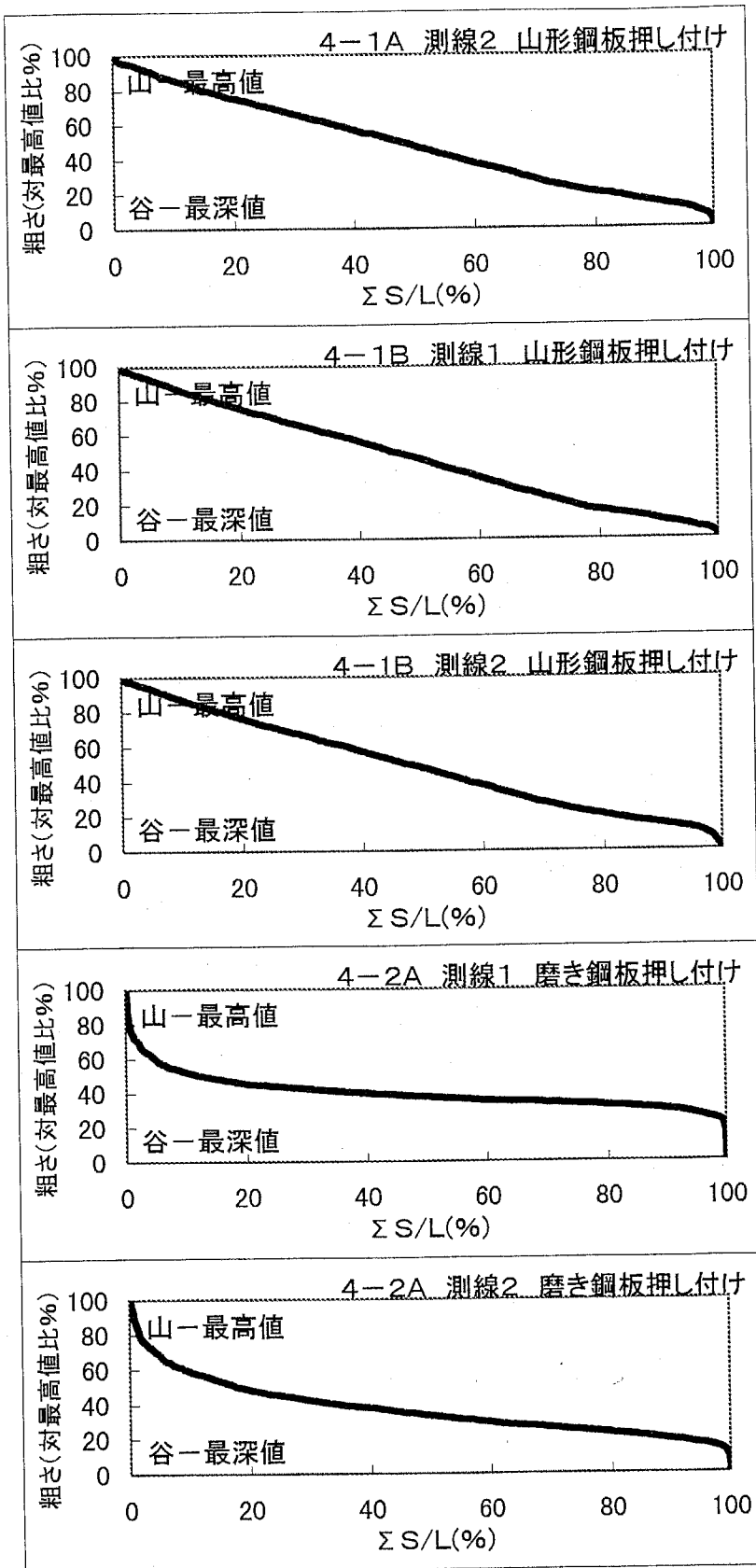


図 A-2(h) 第2章 粗さ曲線の負荷曲線 (その8)

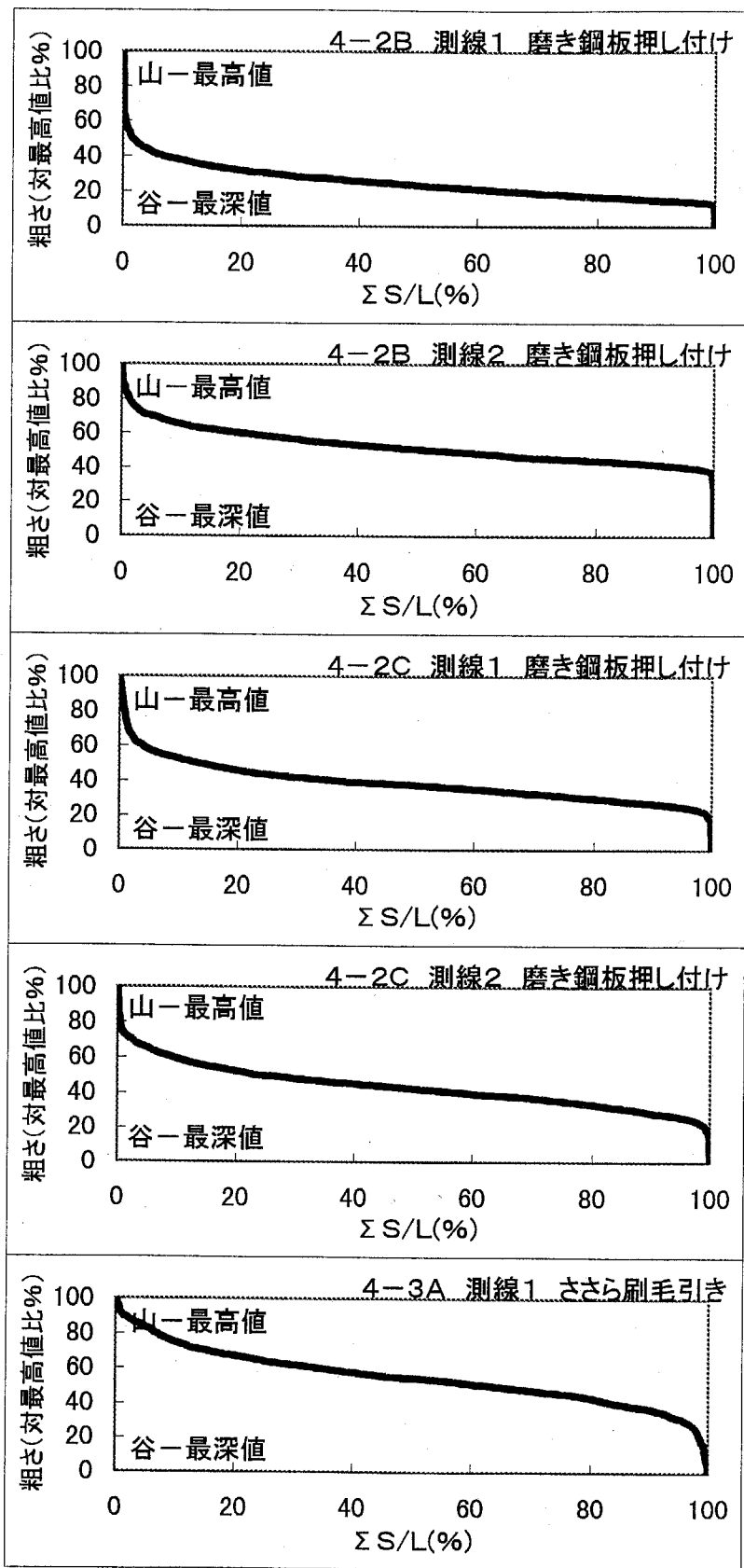


図 A-2(i) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 9)

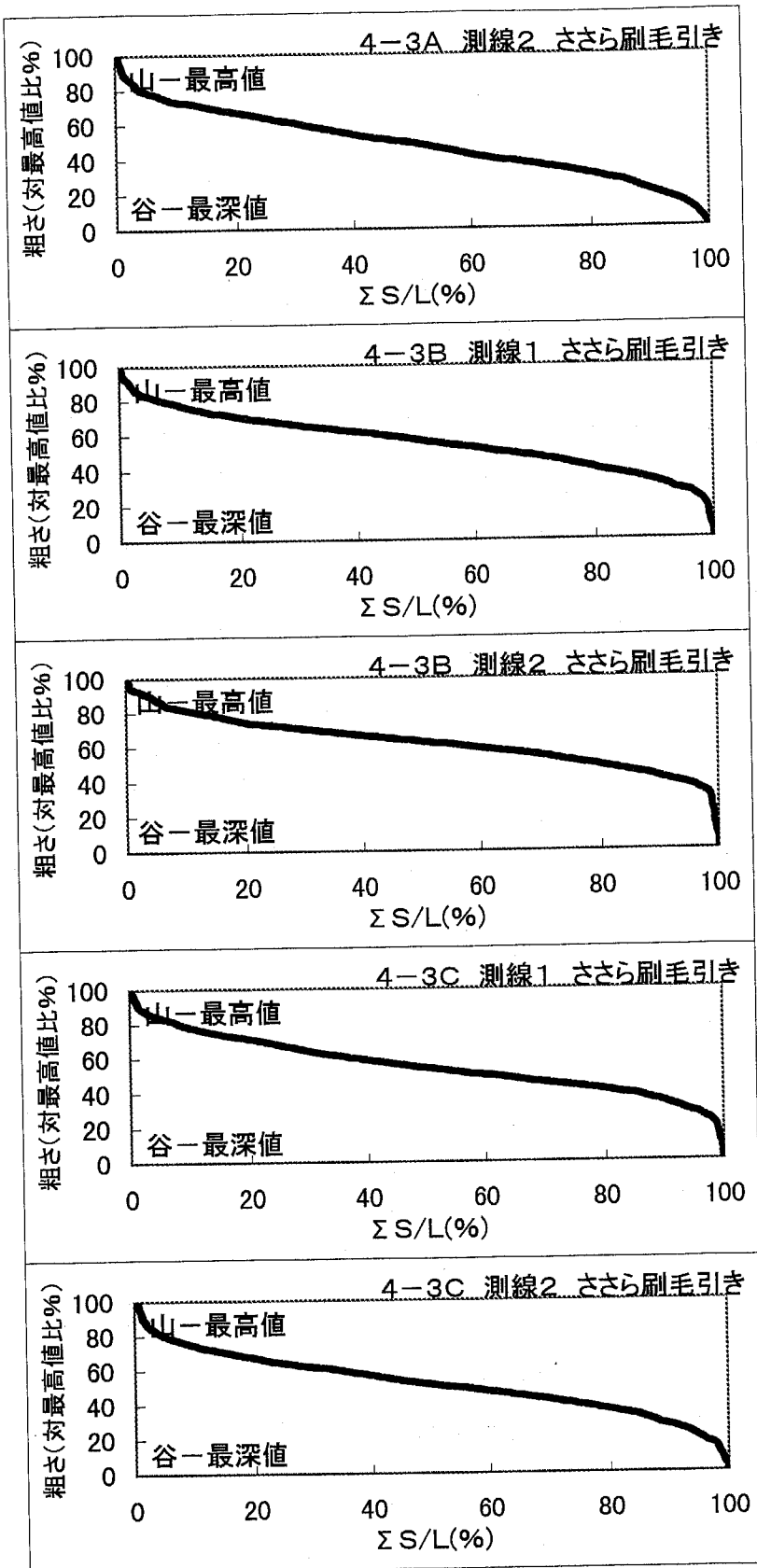


図 A-2(j) 第 2 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 10)

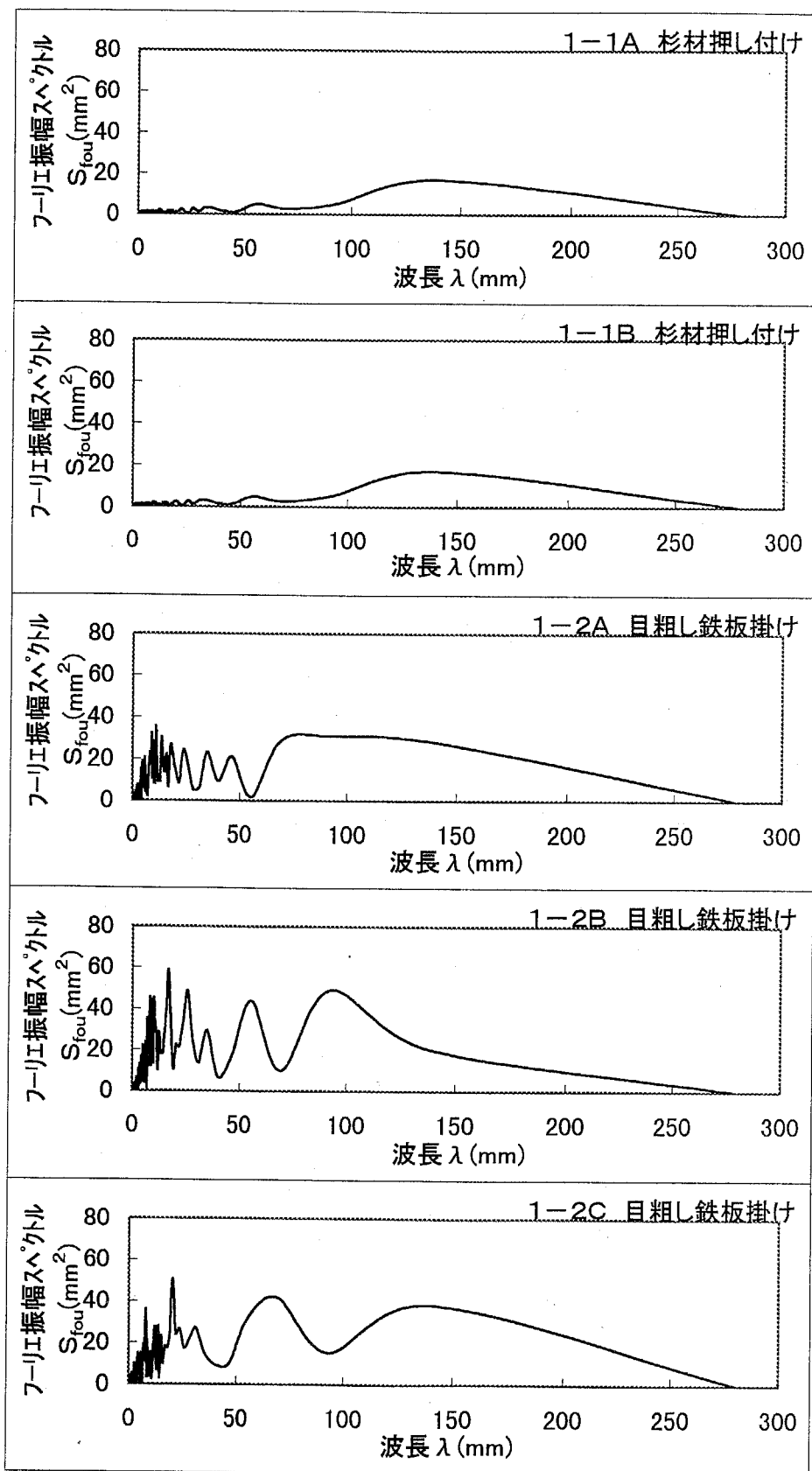


図 A-3(a) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 1)

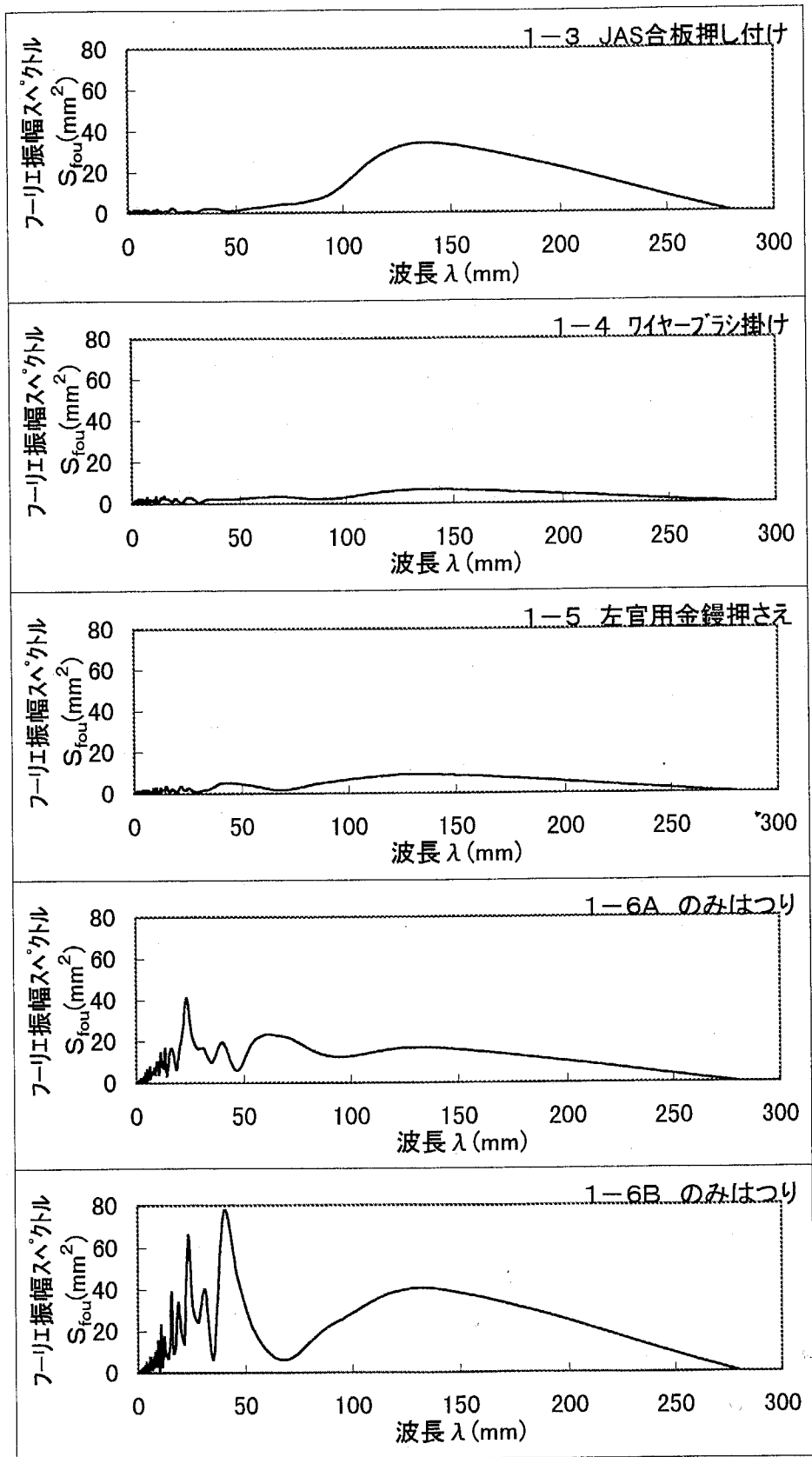


図 A-3(b) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 2)

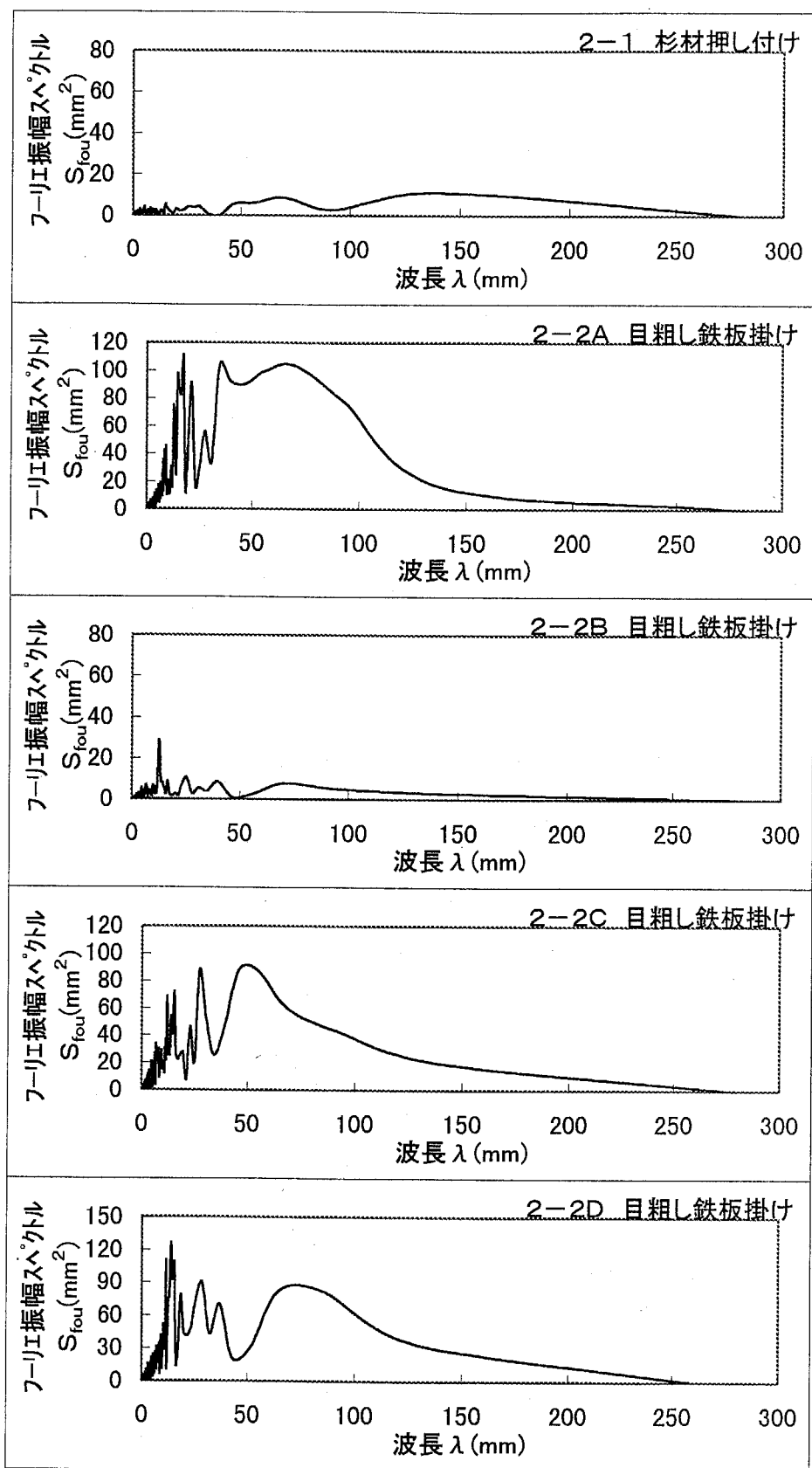


図 A-3(c) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 3)

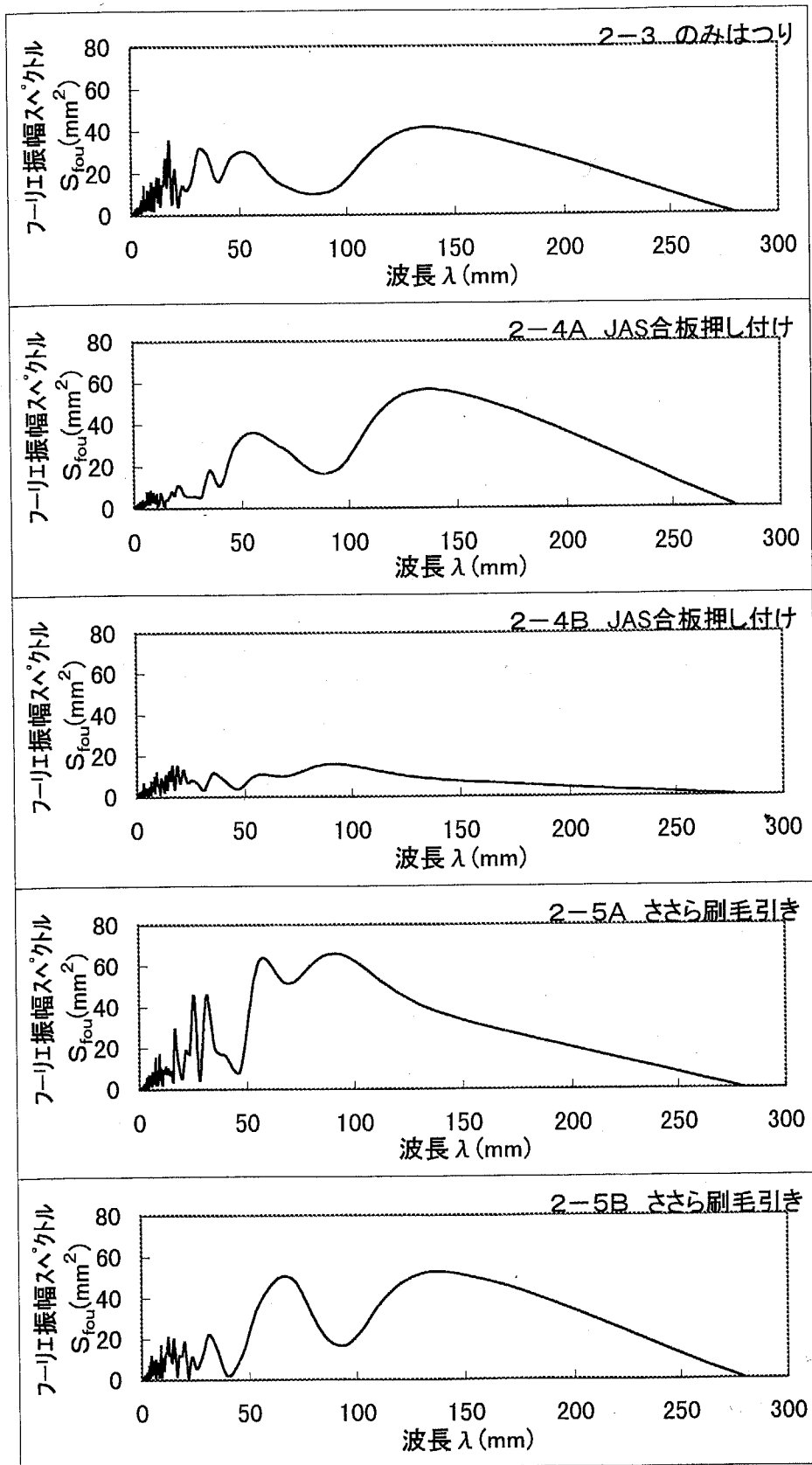


図 A-3(d) 第2章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その4)

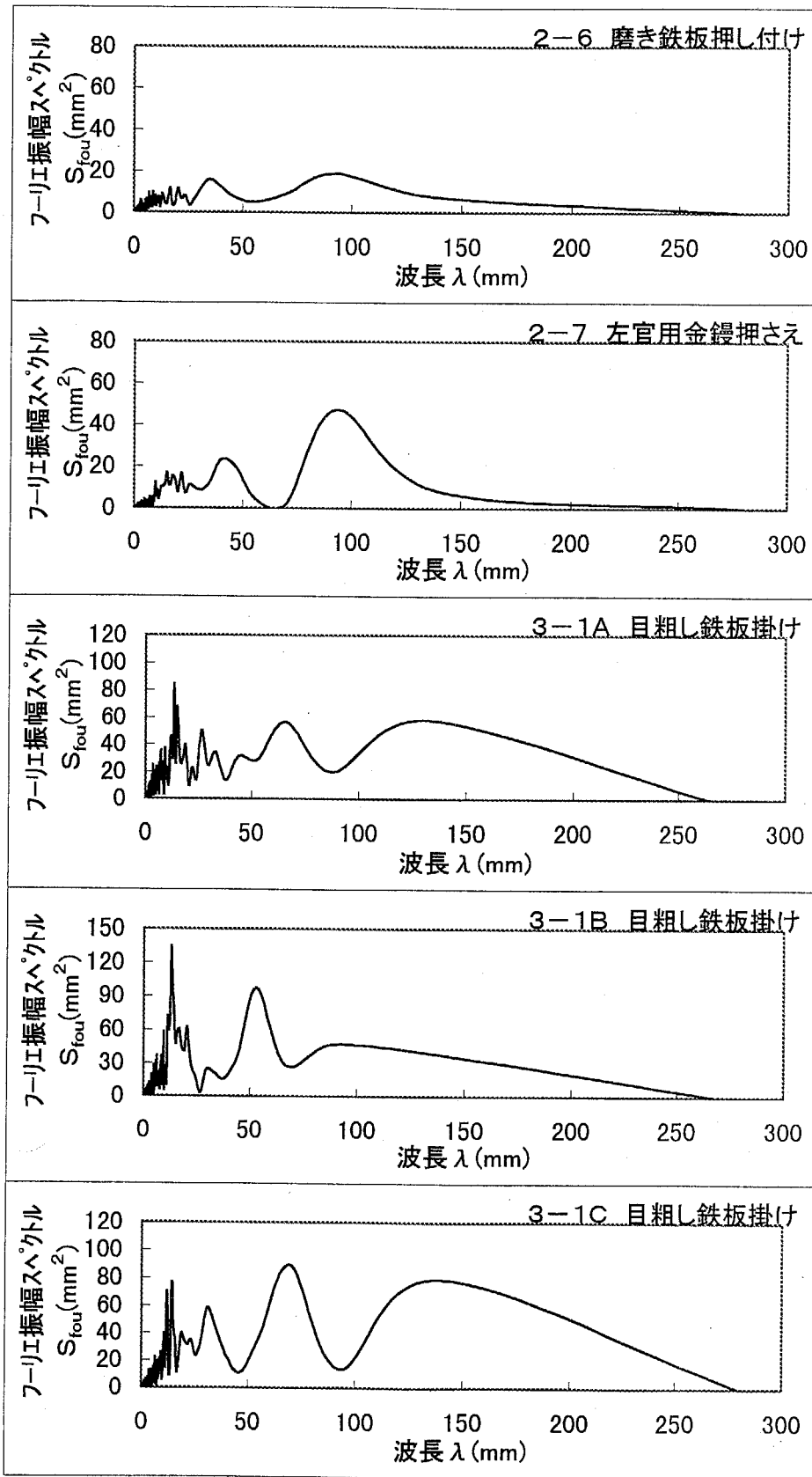


図 A-3(e) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 5)

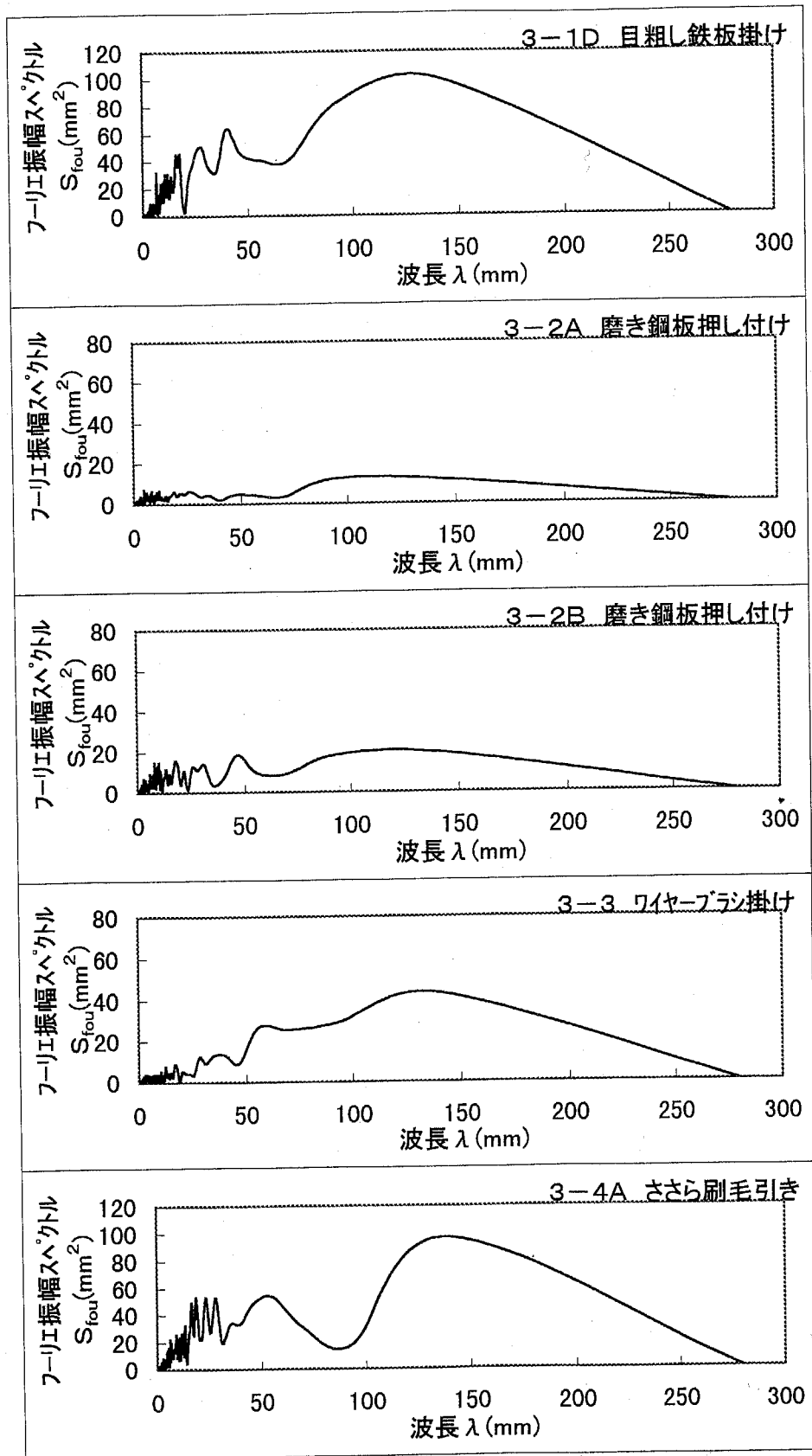


図 A-3(f) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 6)

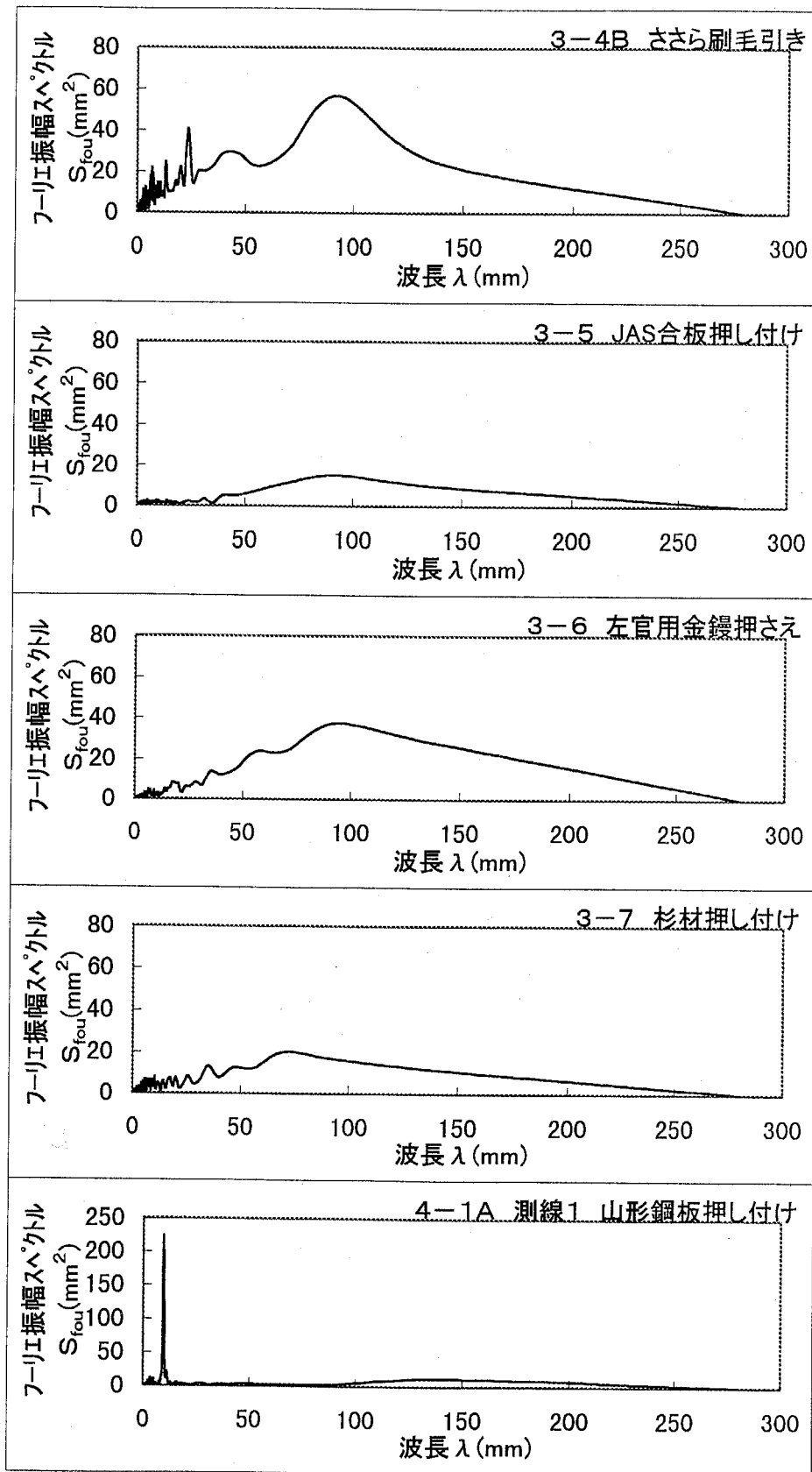


図 A-3(g) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 7)

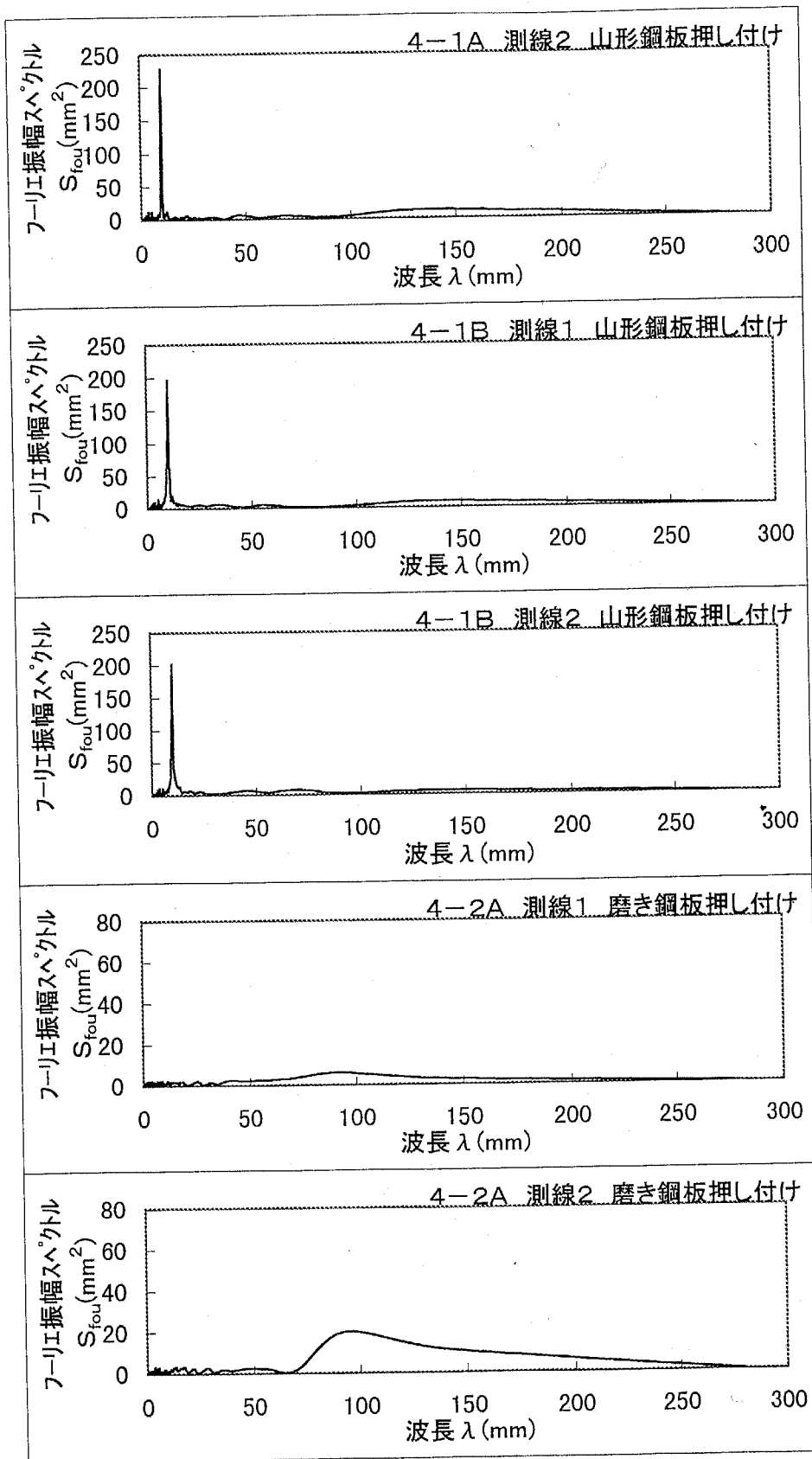


図 A-3(h) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 8)

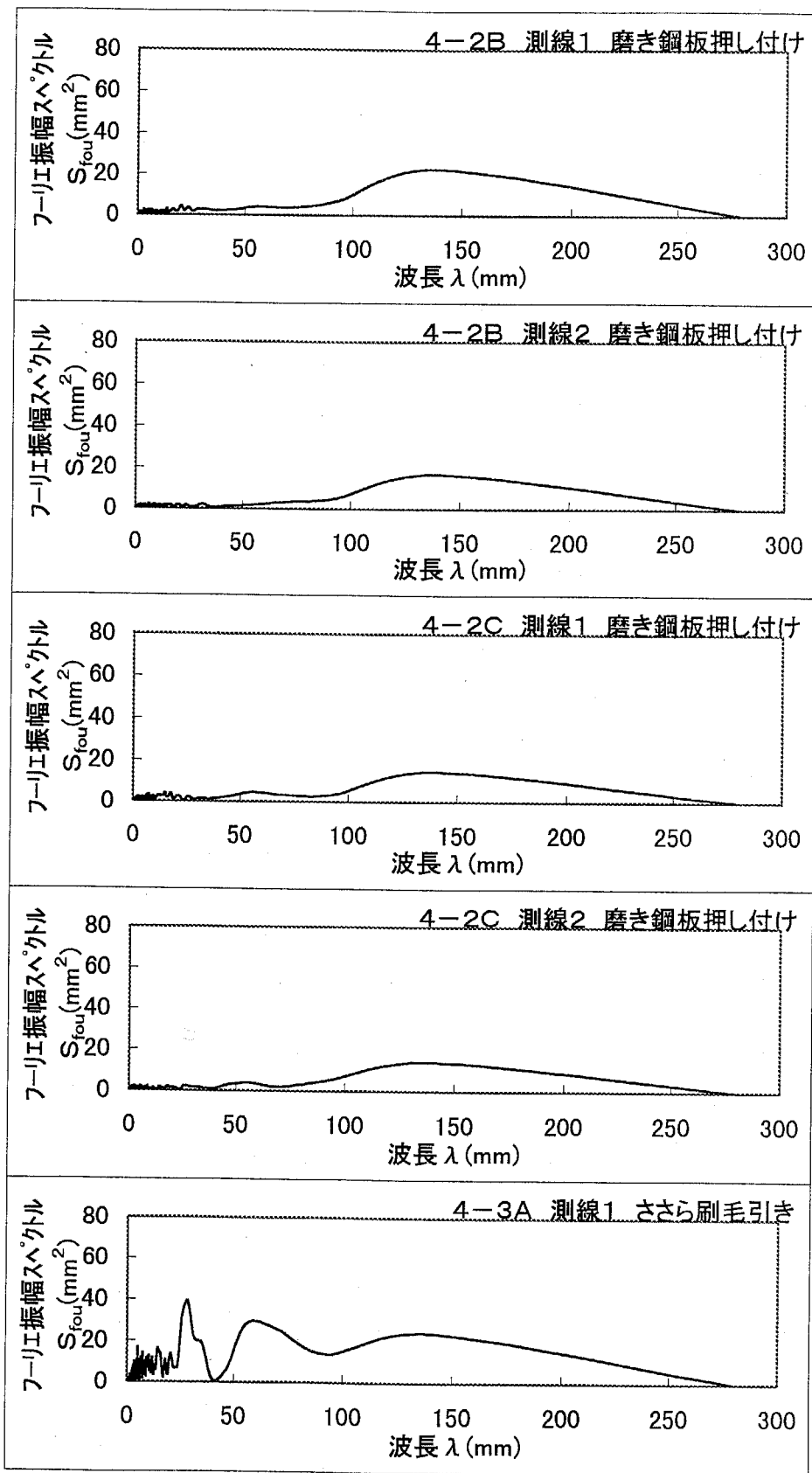


図 A-3(i) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 9)

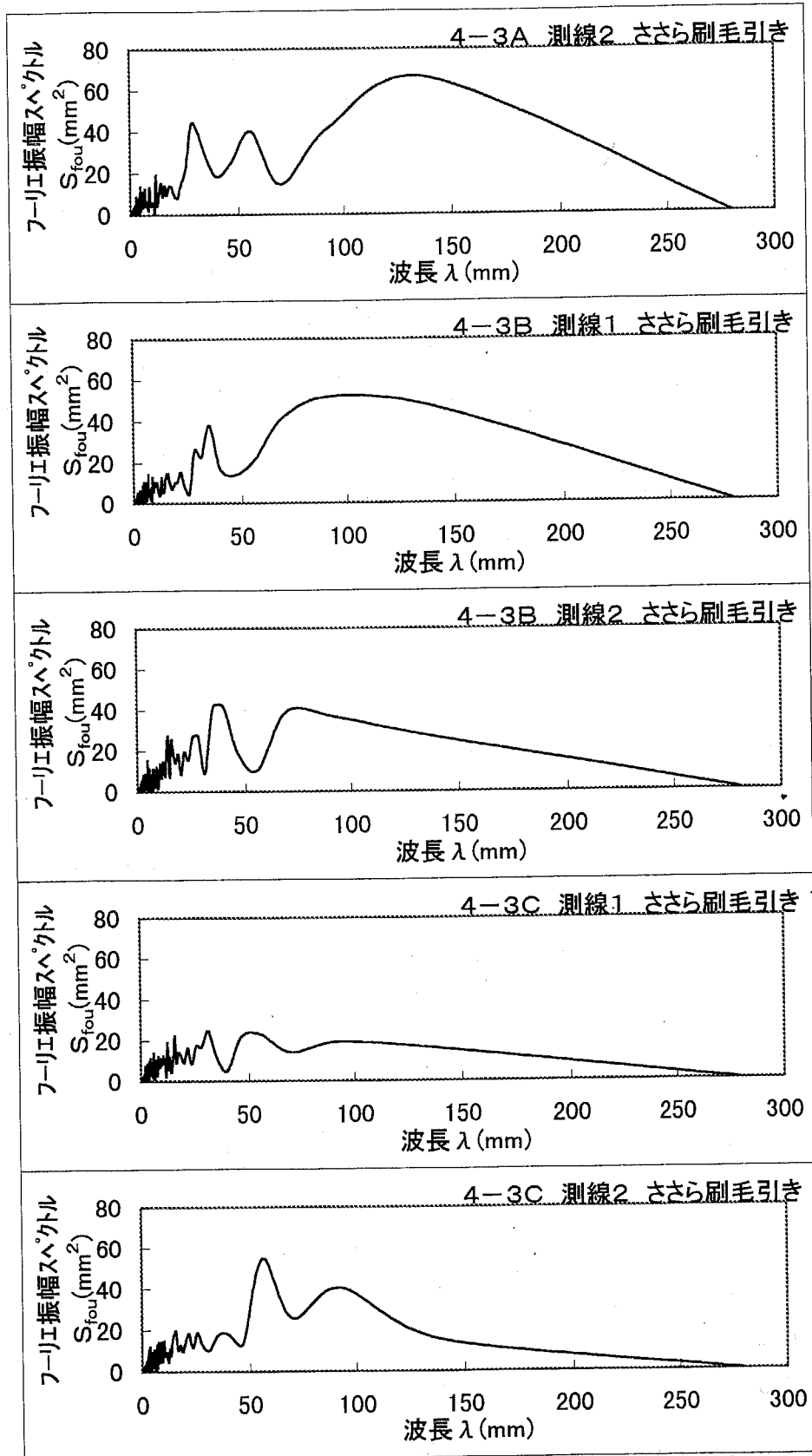


図 A-3(j) 第 2 章 粗さ曲線のフーリエスペクトル (その 10)

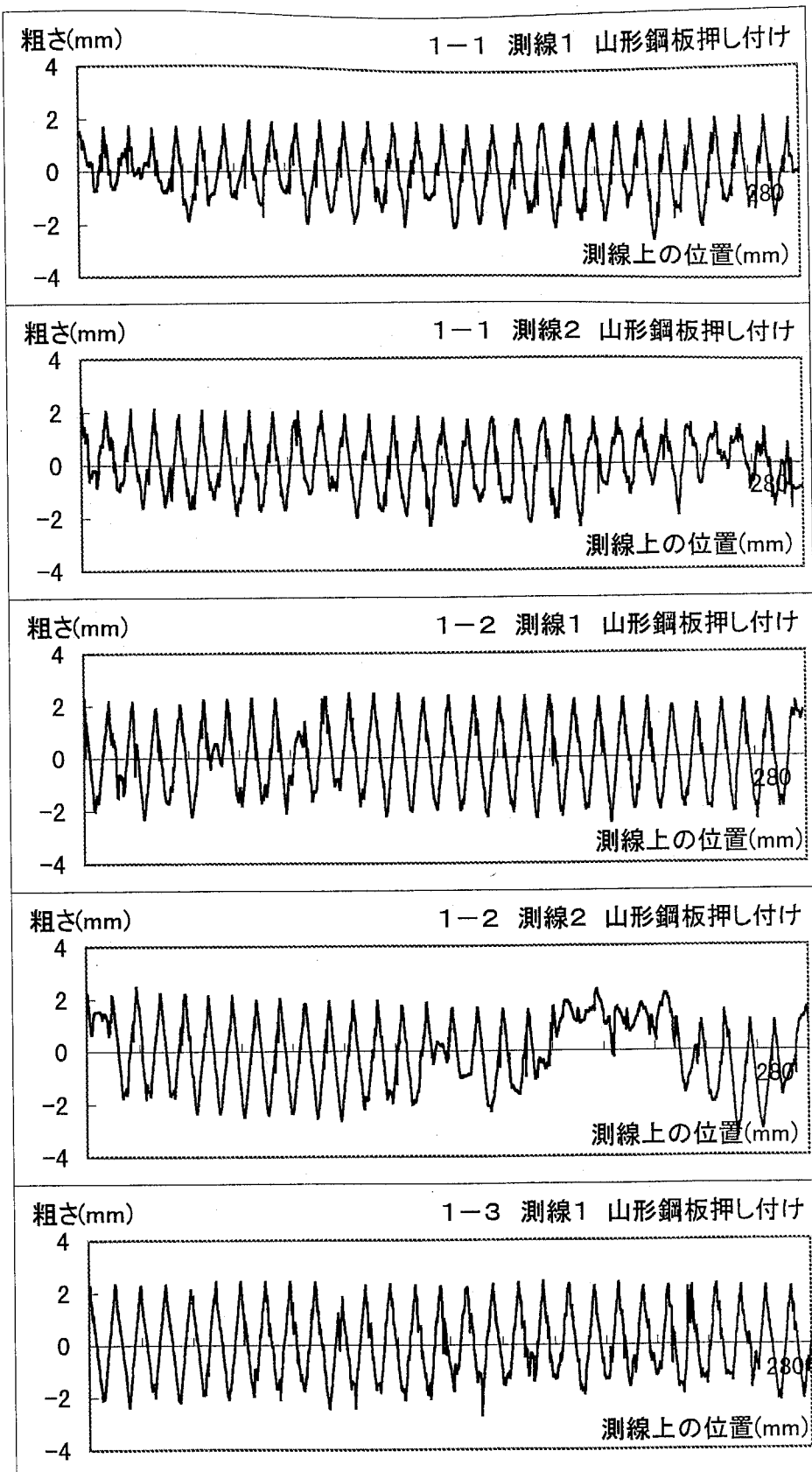


図 A-4(a) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 1)

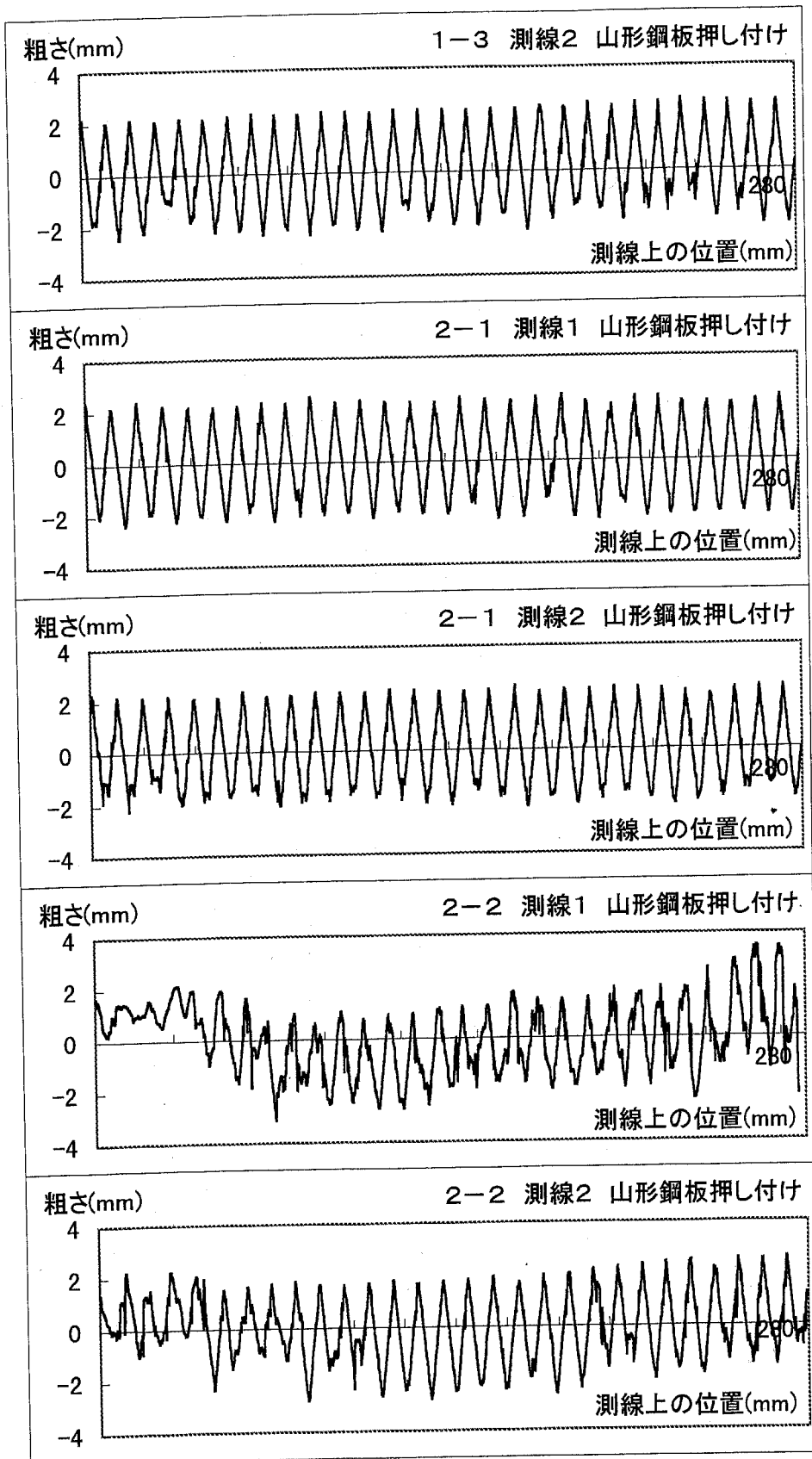


図 A-4(b) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 2)

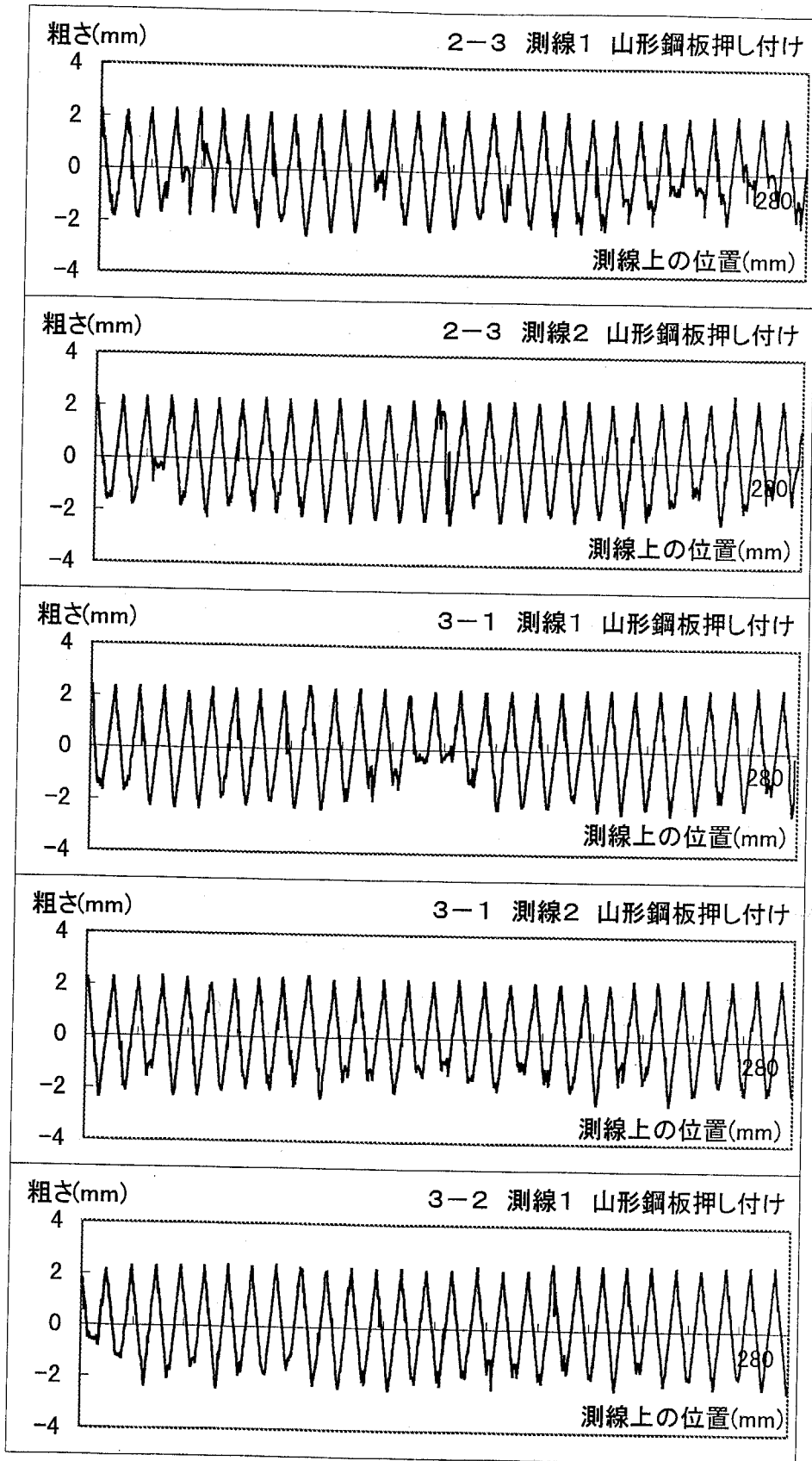


図 A-4(c) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その3)

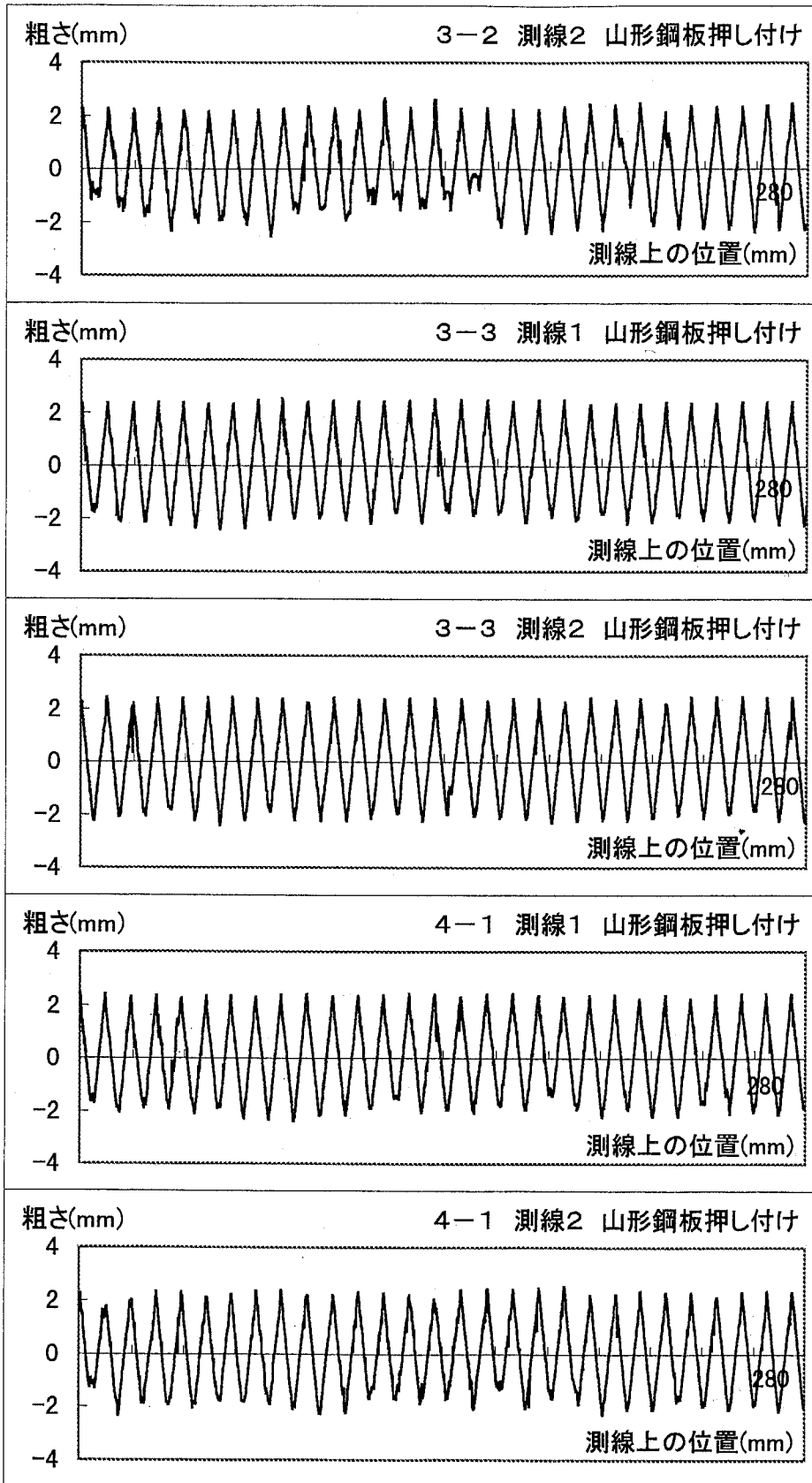


図 A-4(d) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 4)

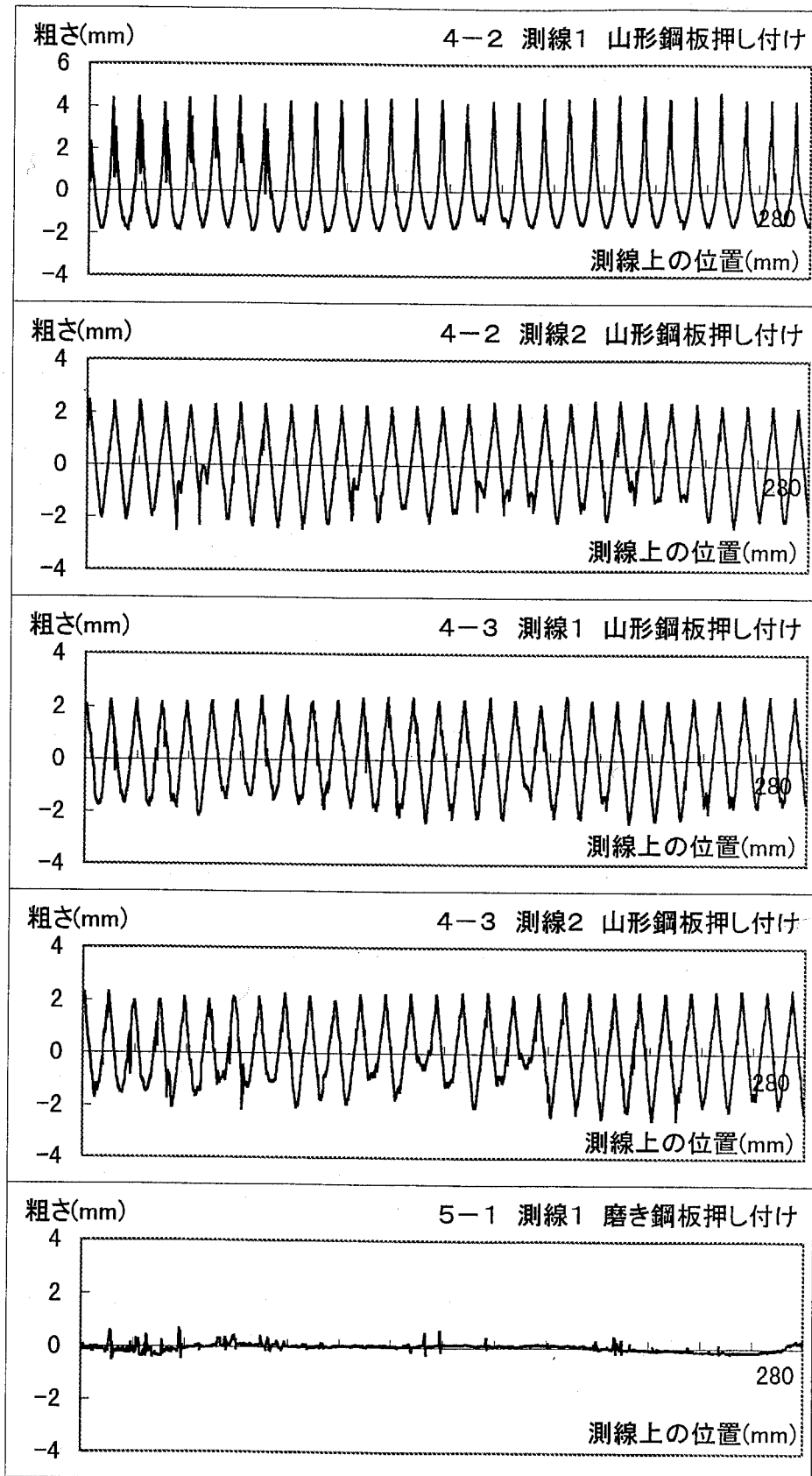


図 A-4(e) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 5)

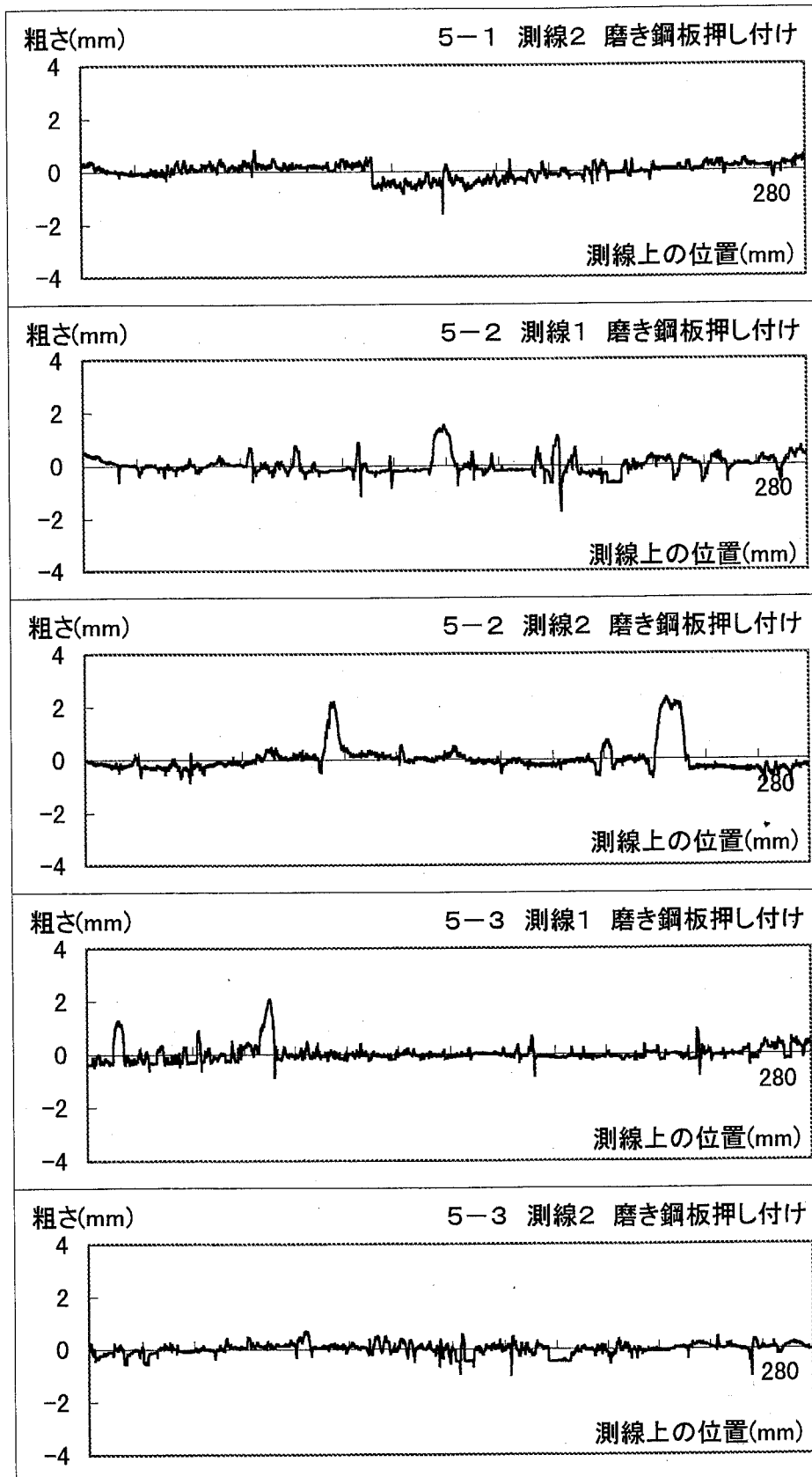


図 A-4(f) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その6)

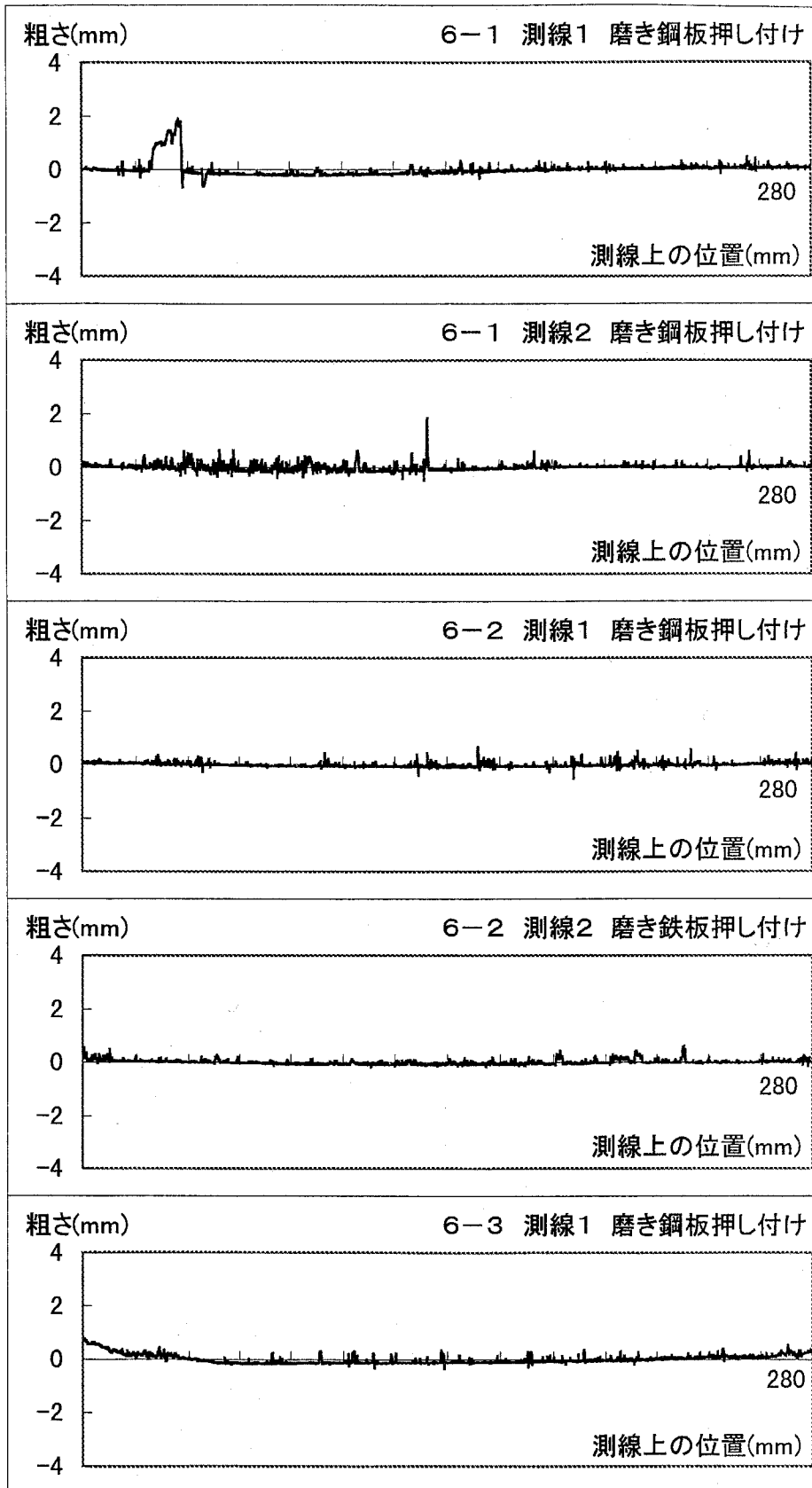


図 A-4(g) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 7)

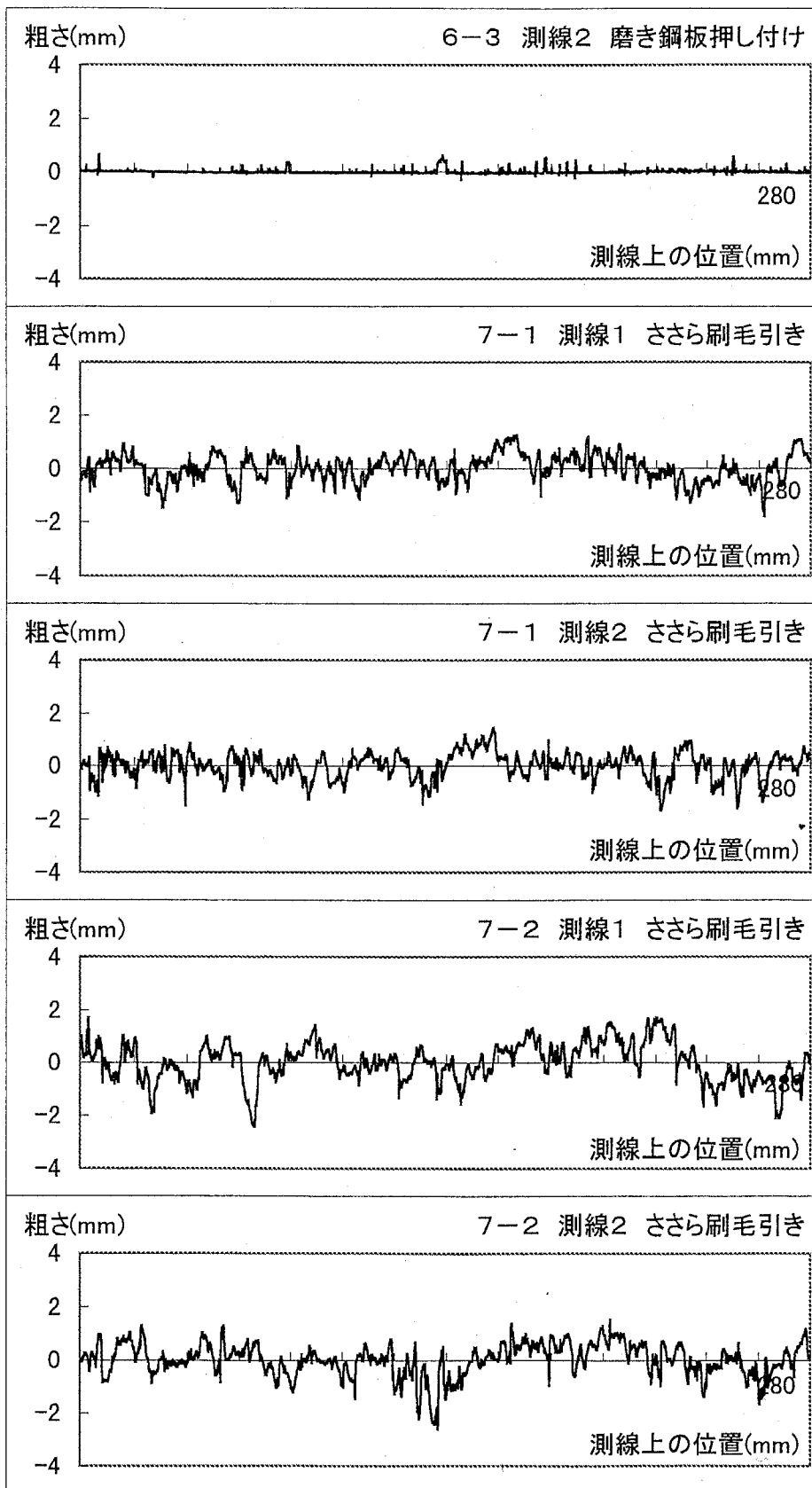


図 A-4(h) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その8)

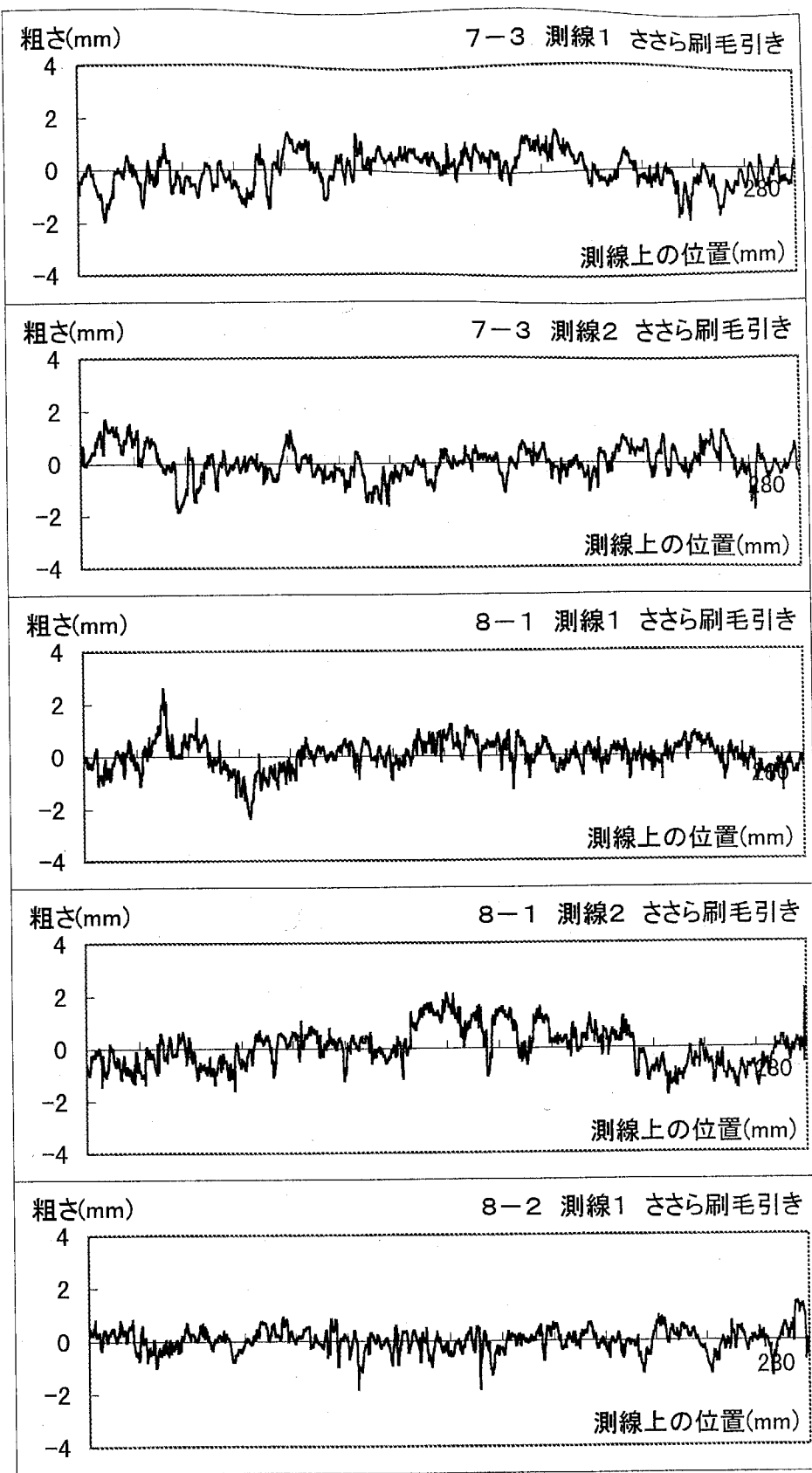


図 A-4(i) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 9)

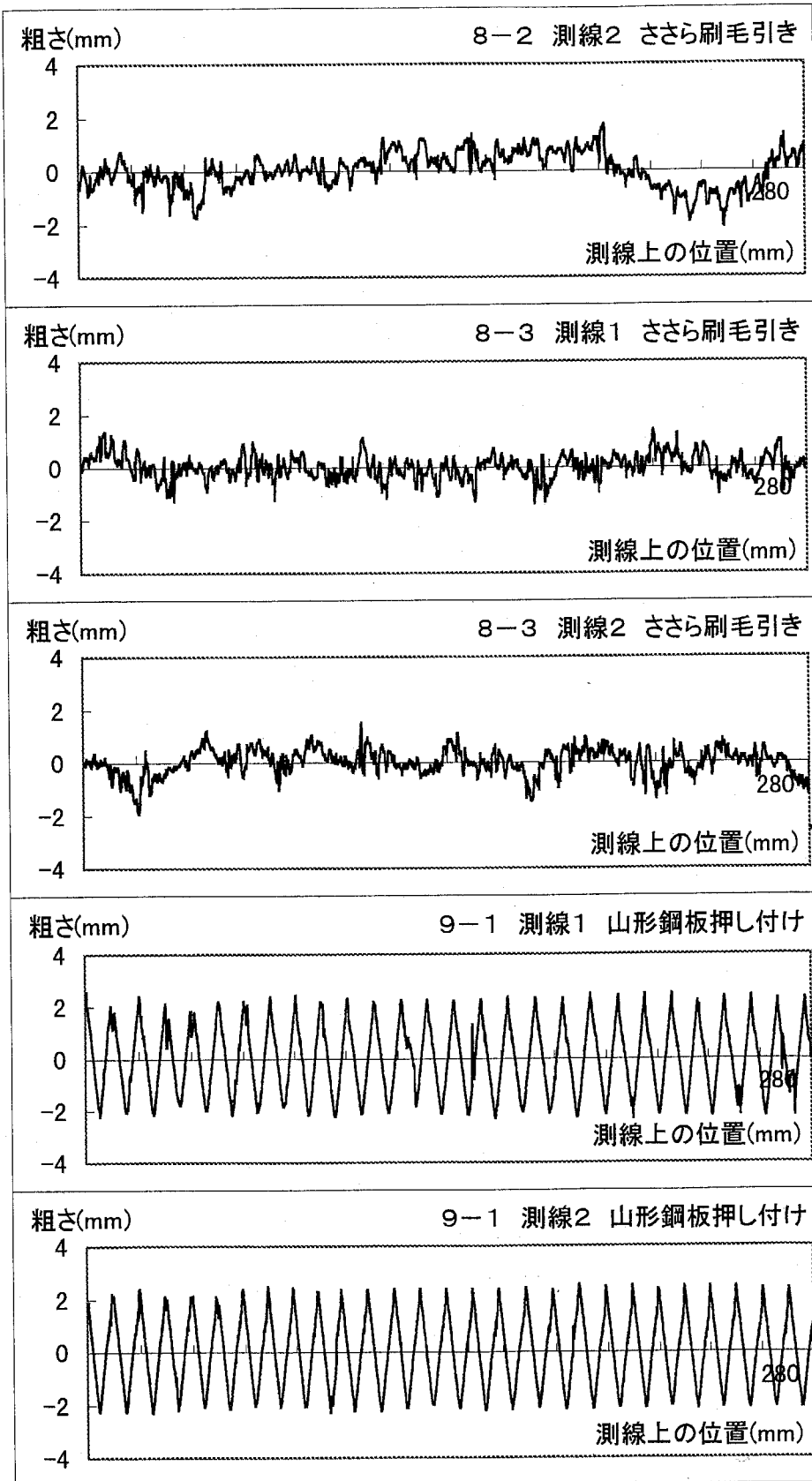


図 A-4(j) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その10)

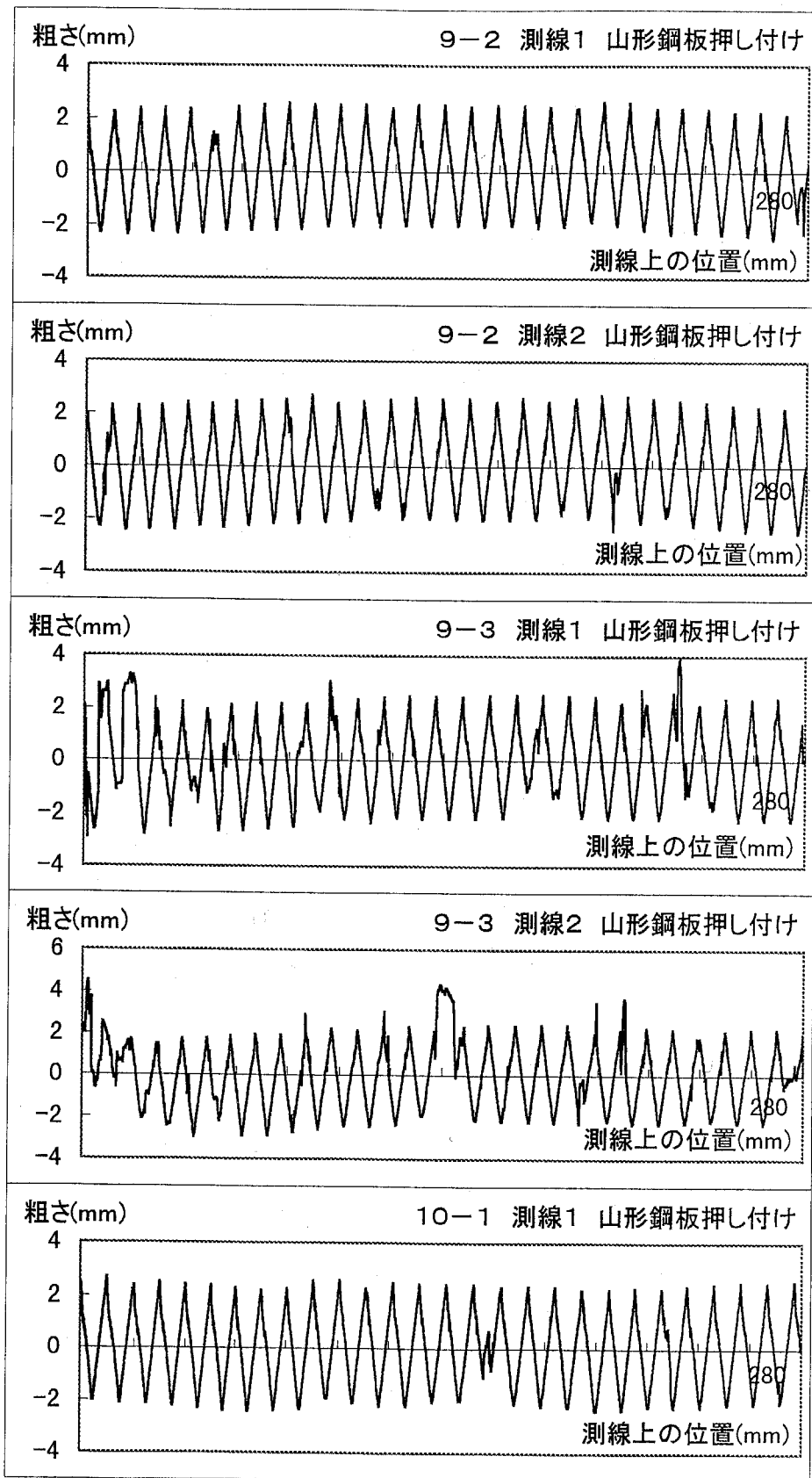


図 A-4(k) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その 11)

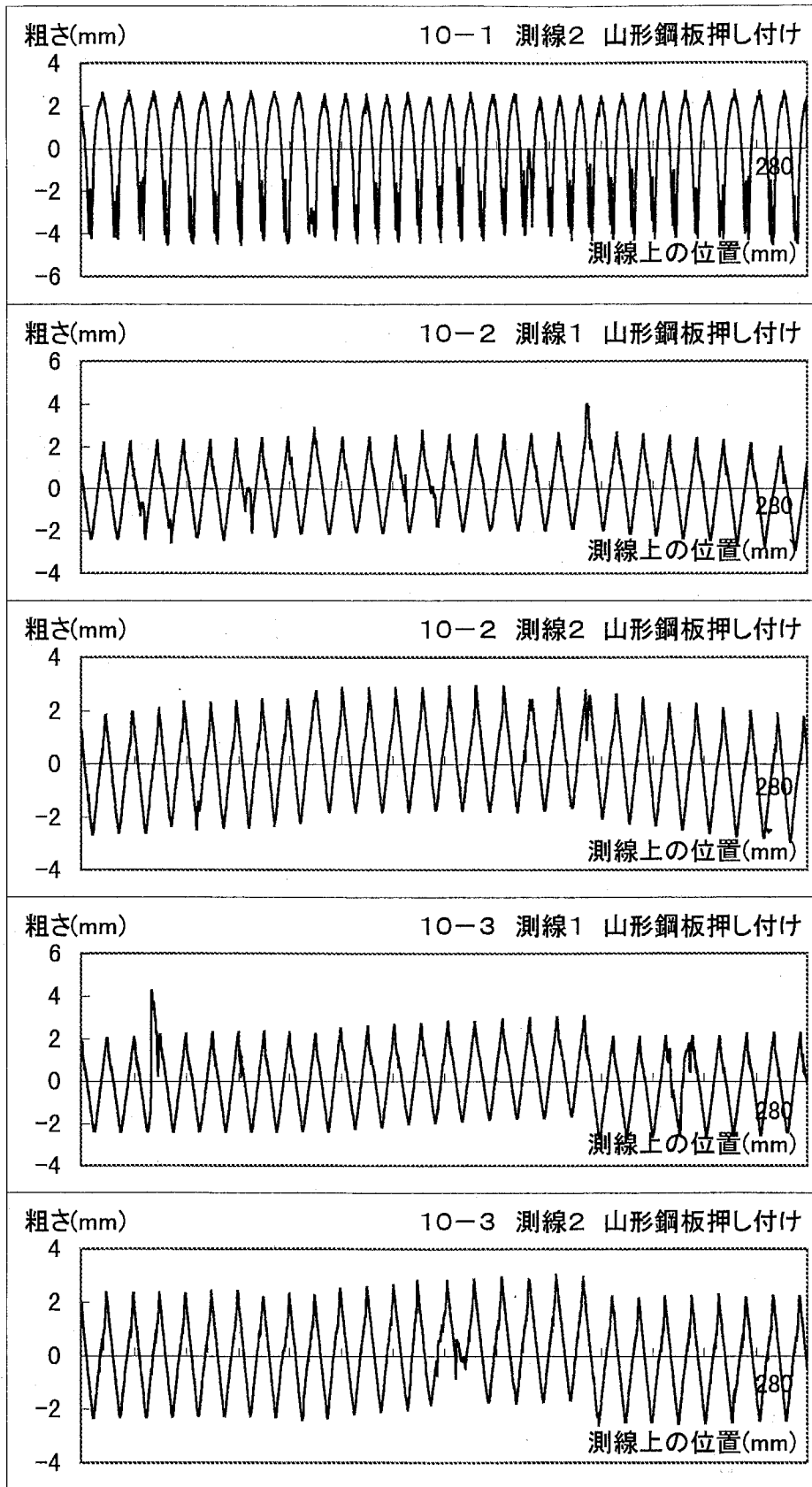


図 A-4(1) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その 12)

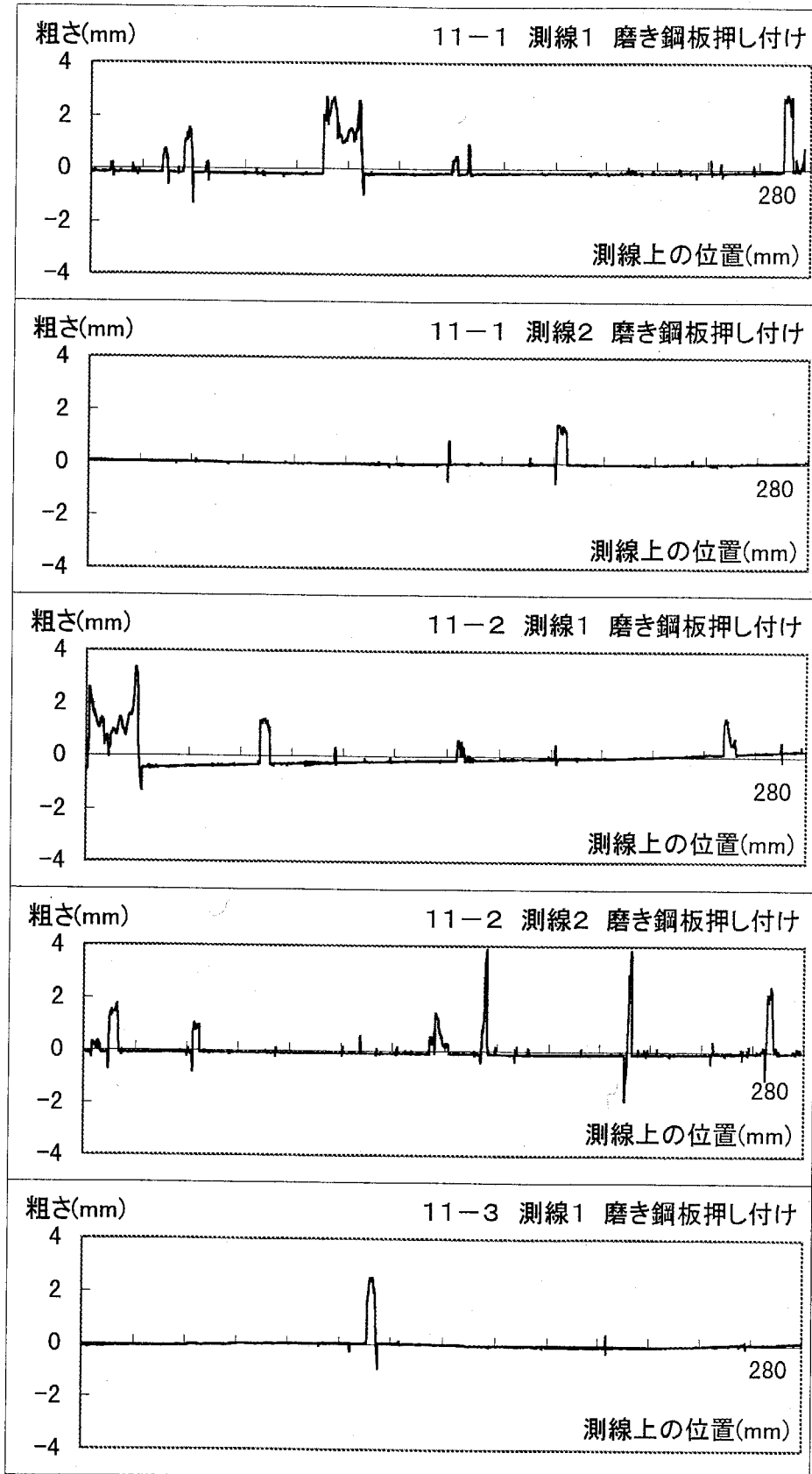


図 A-4(m) 第3章 各測線上の粗さ曲線 (その 13)

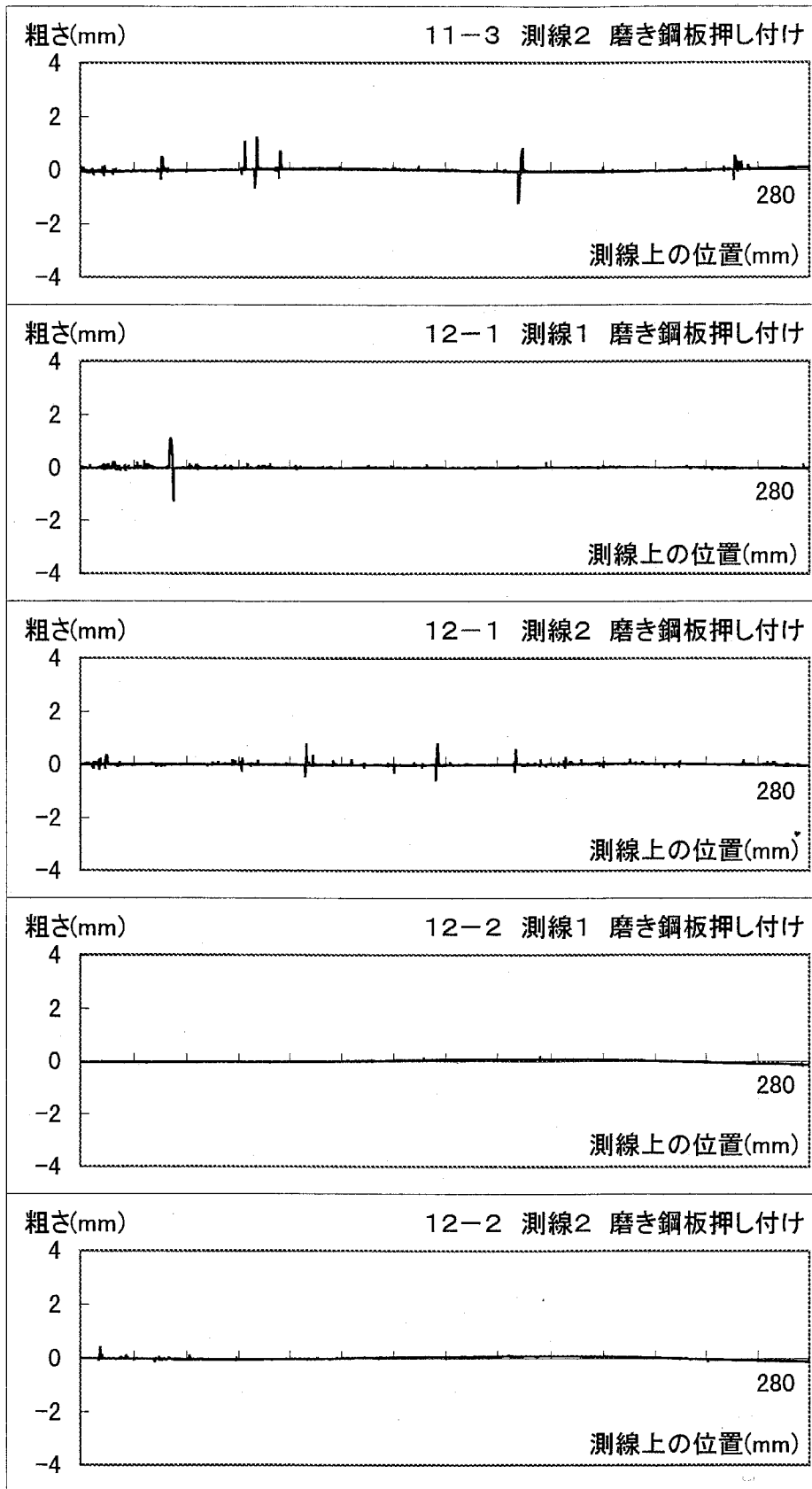


図 A-4(n) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 14)

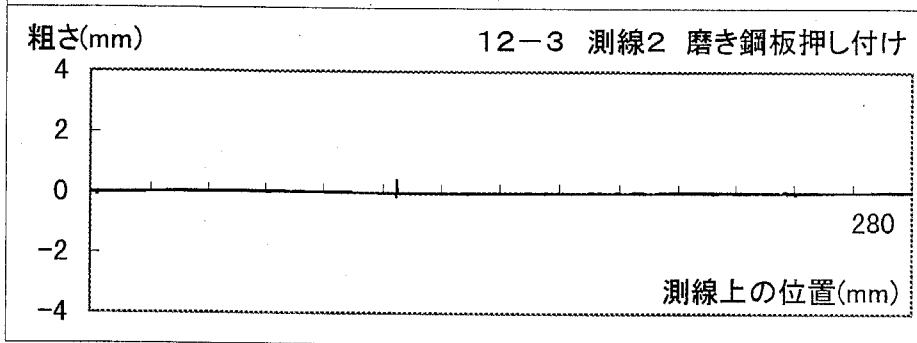
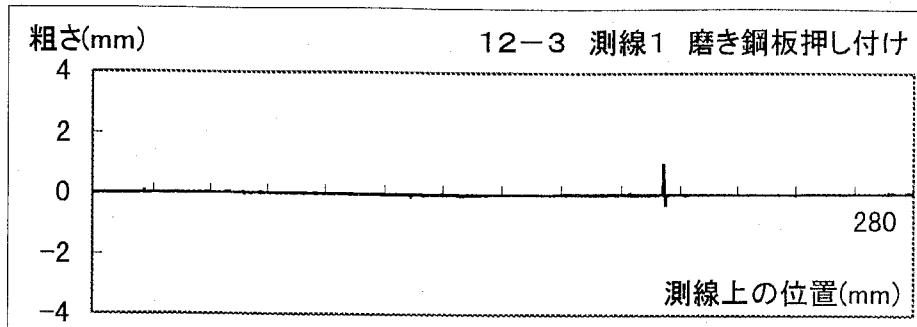


図 A-4(o) 第 3 章 各測線上の粗さ曲線 (その 15)

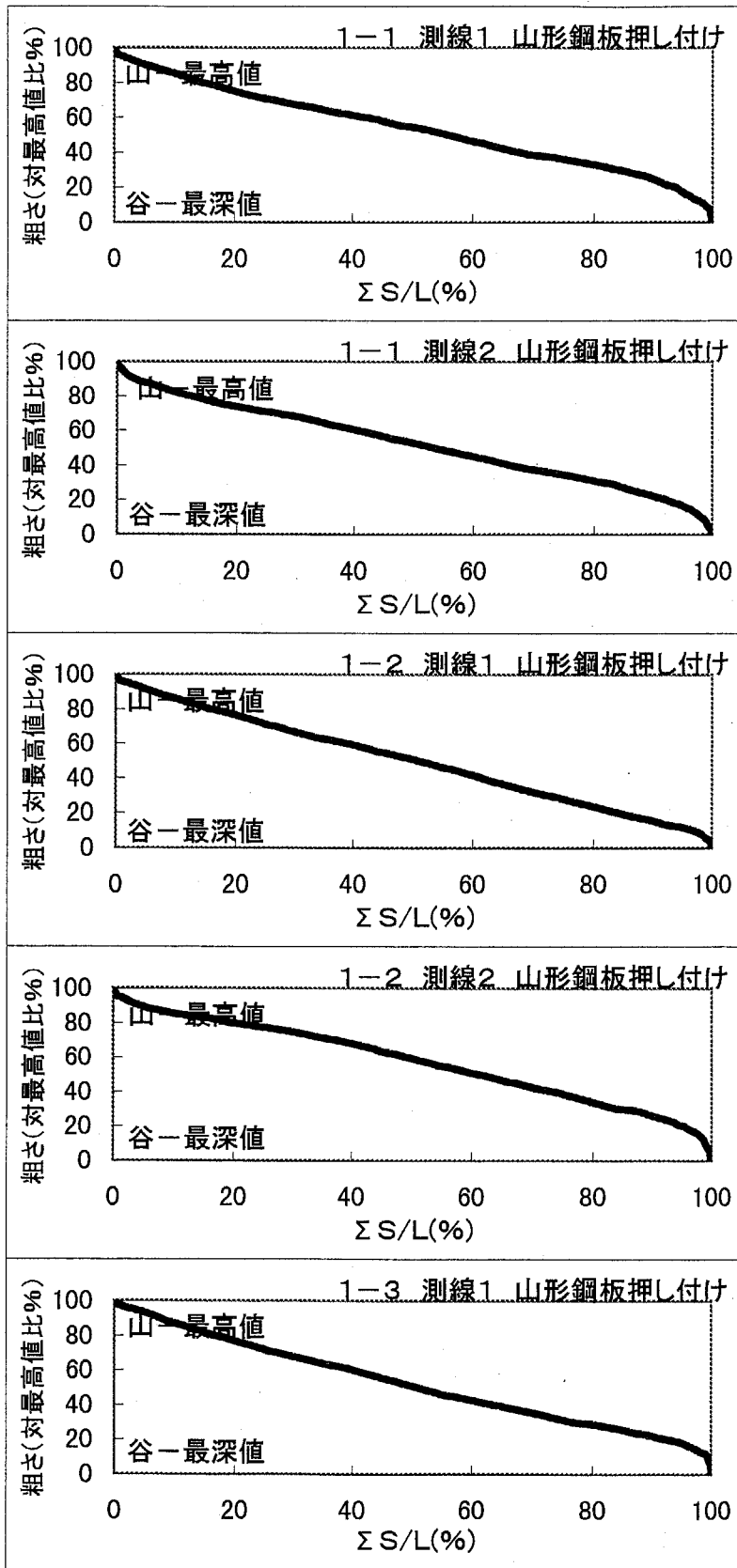


図 A-5(a) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 1)

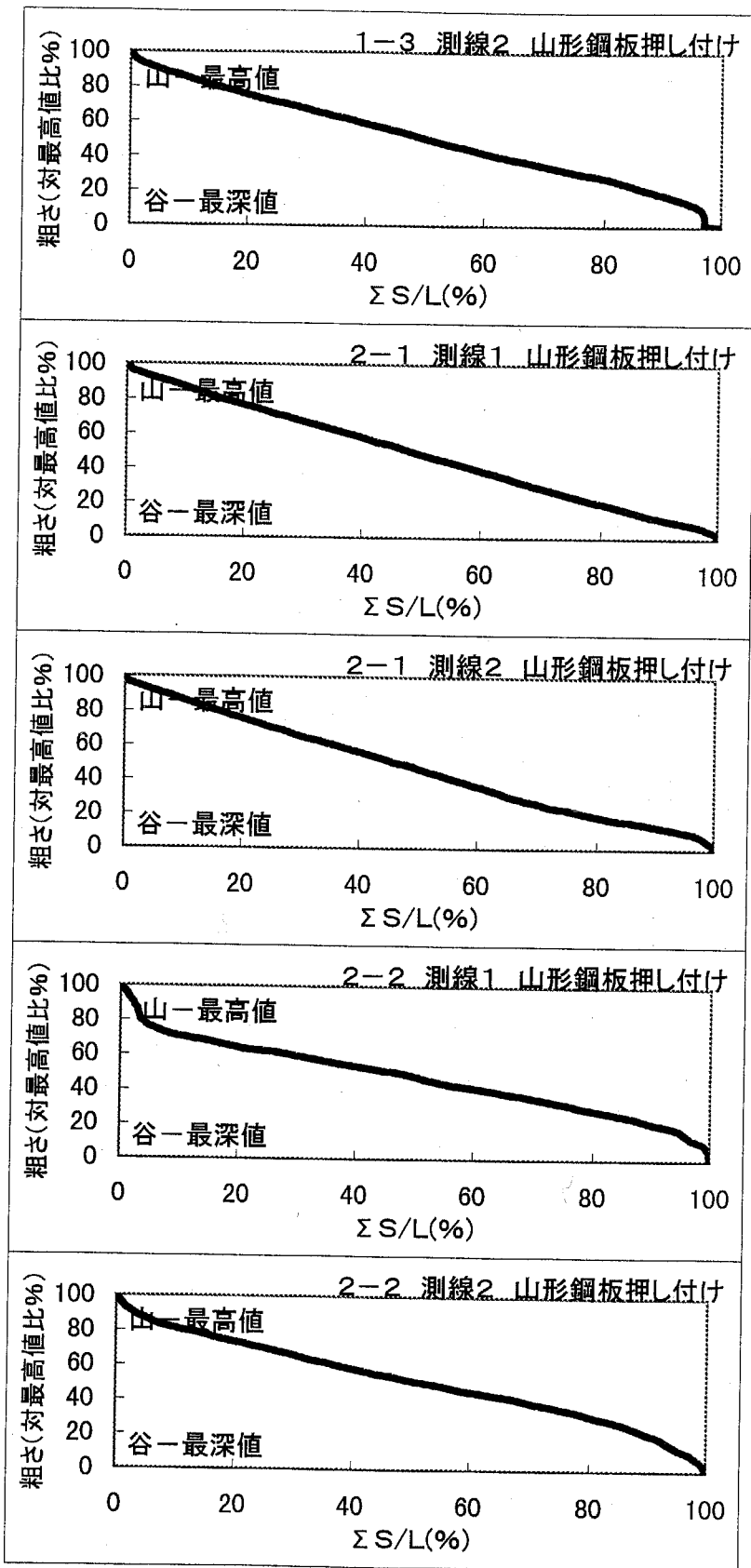


図 A-5(b) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その2)

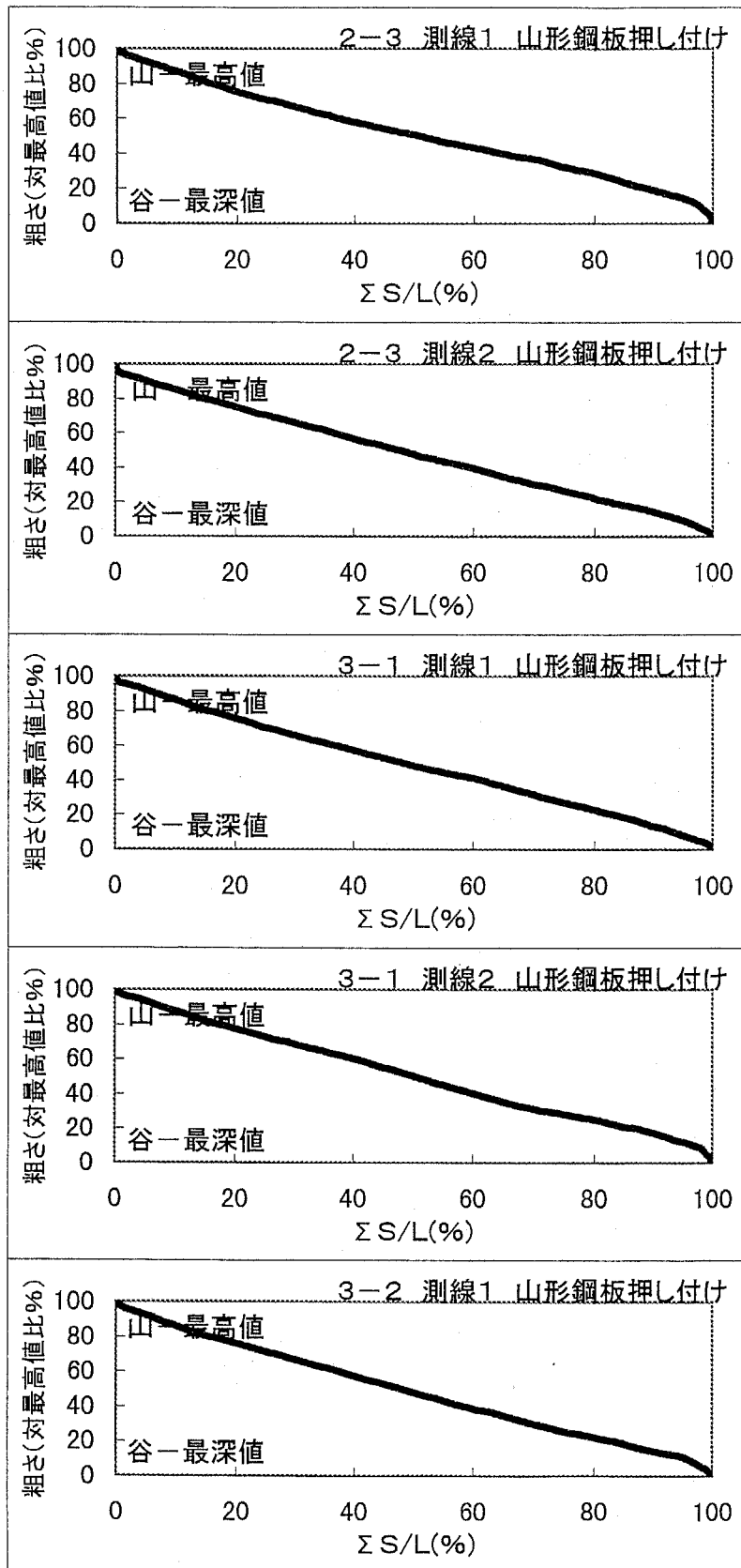


図 A-5(c) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 3)

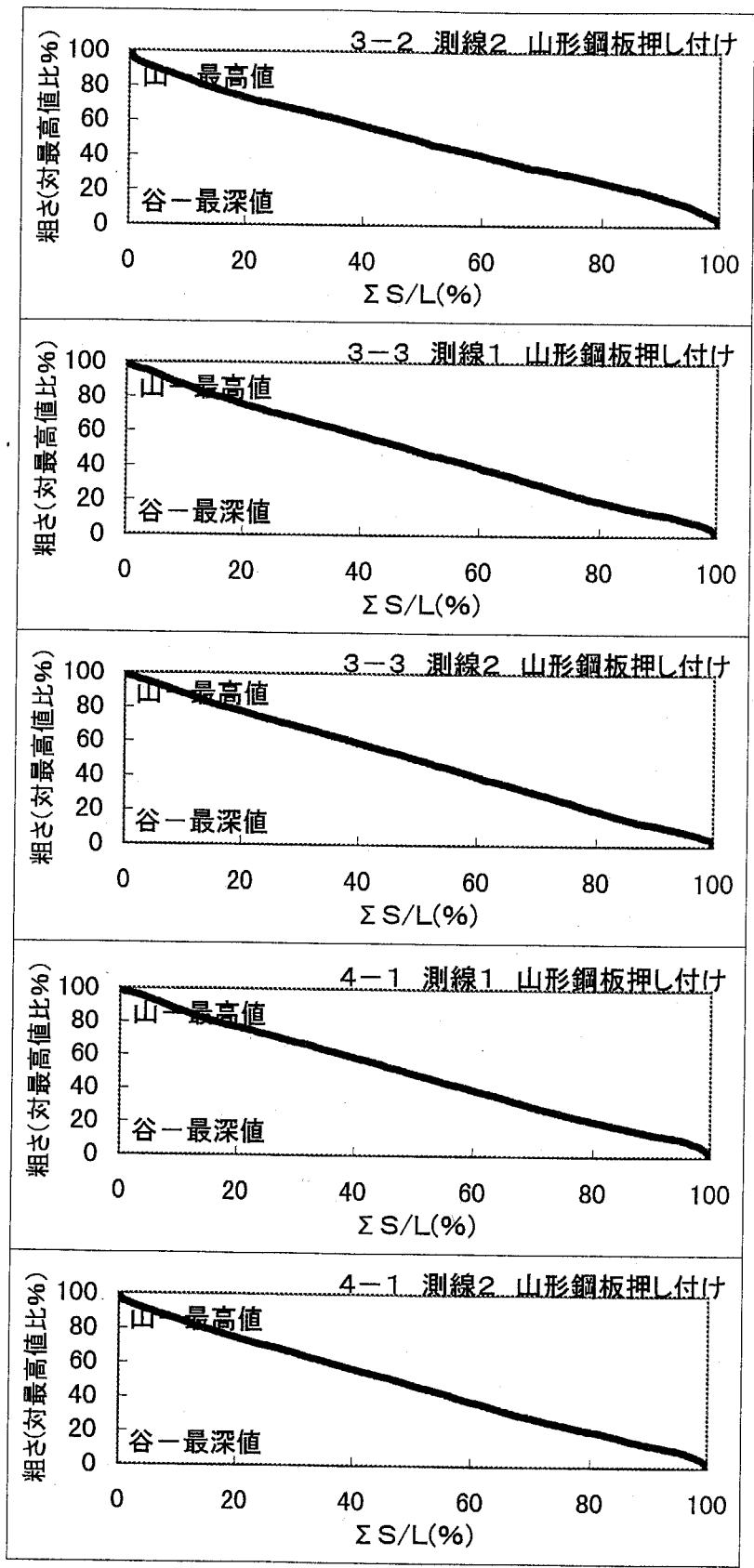


図 A-5(d) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 4)

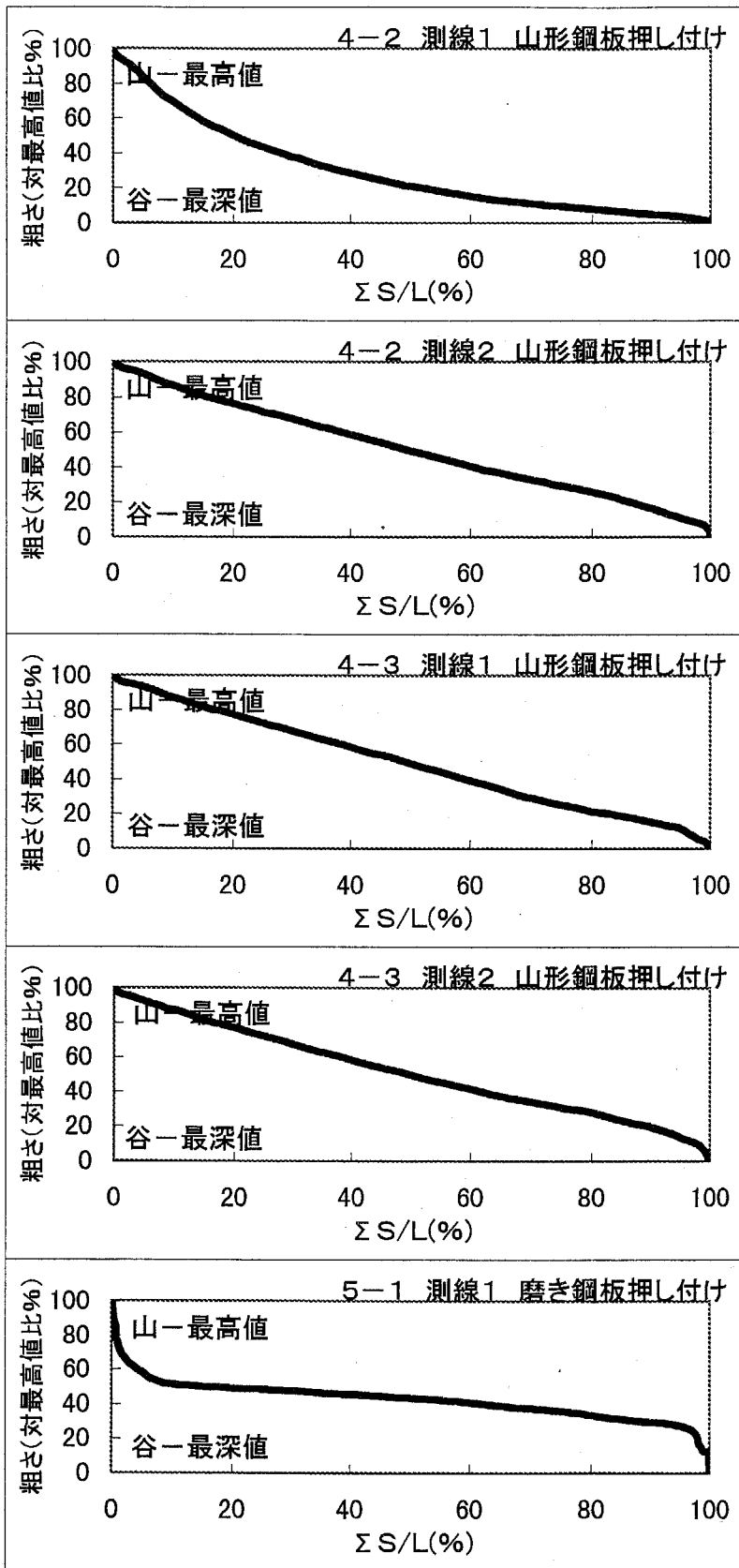


図 A-5(e) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その5)

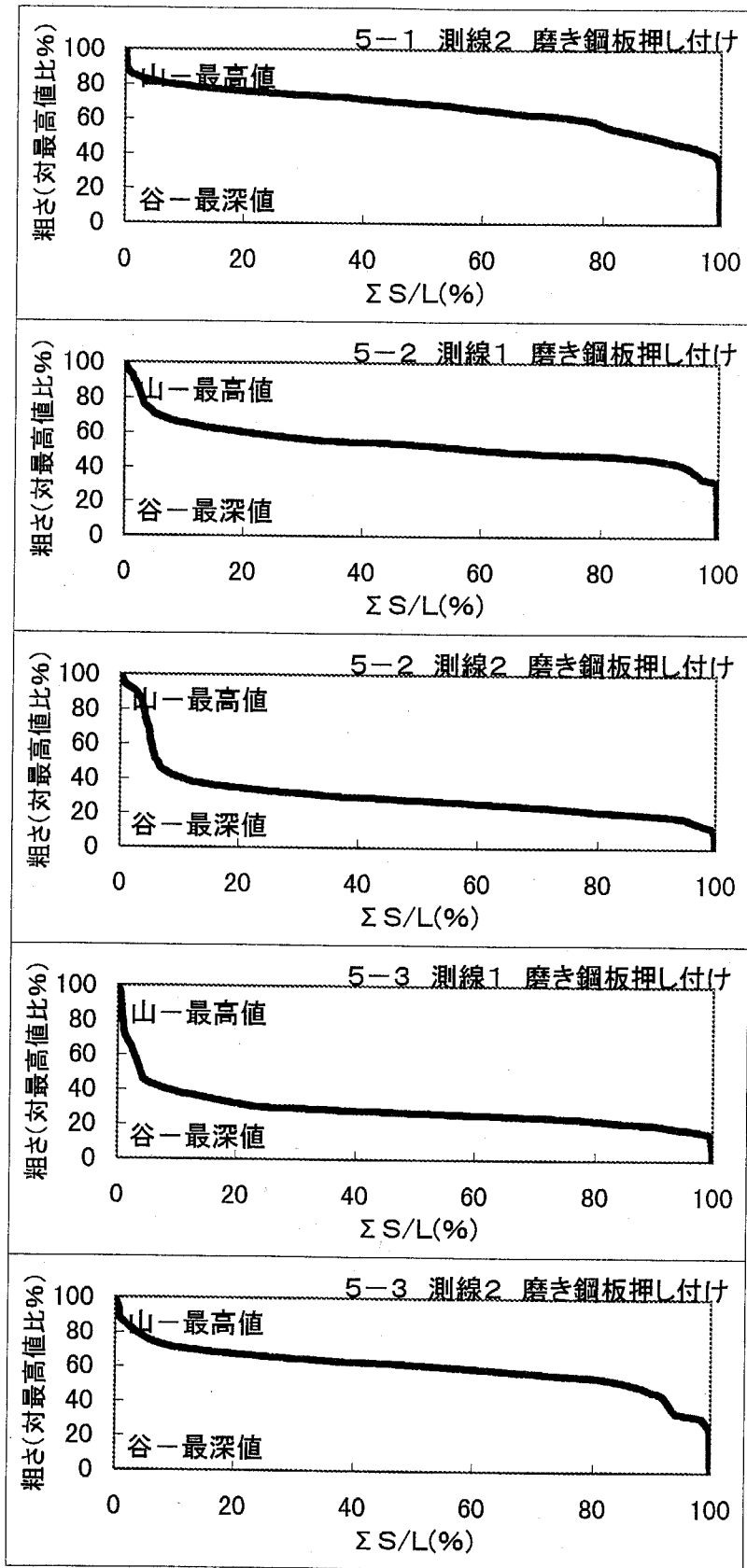


図 A-5(f) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 6)

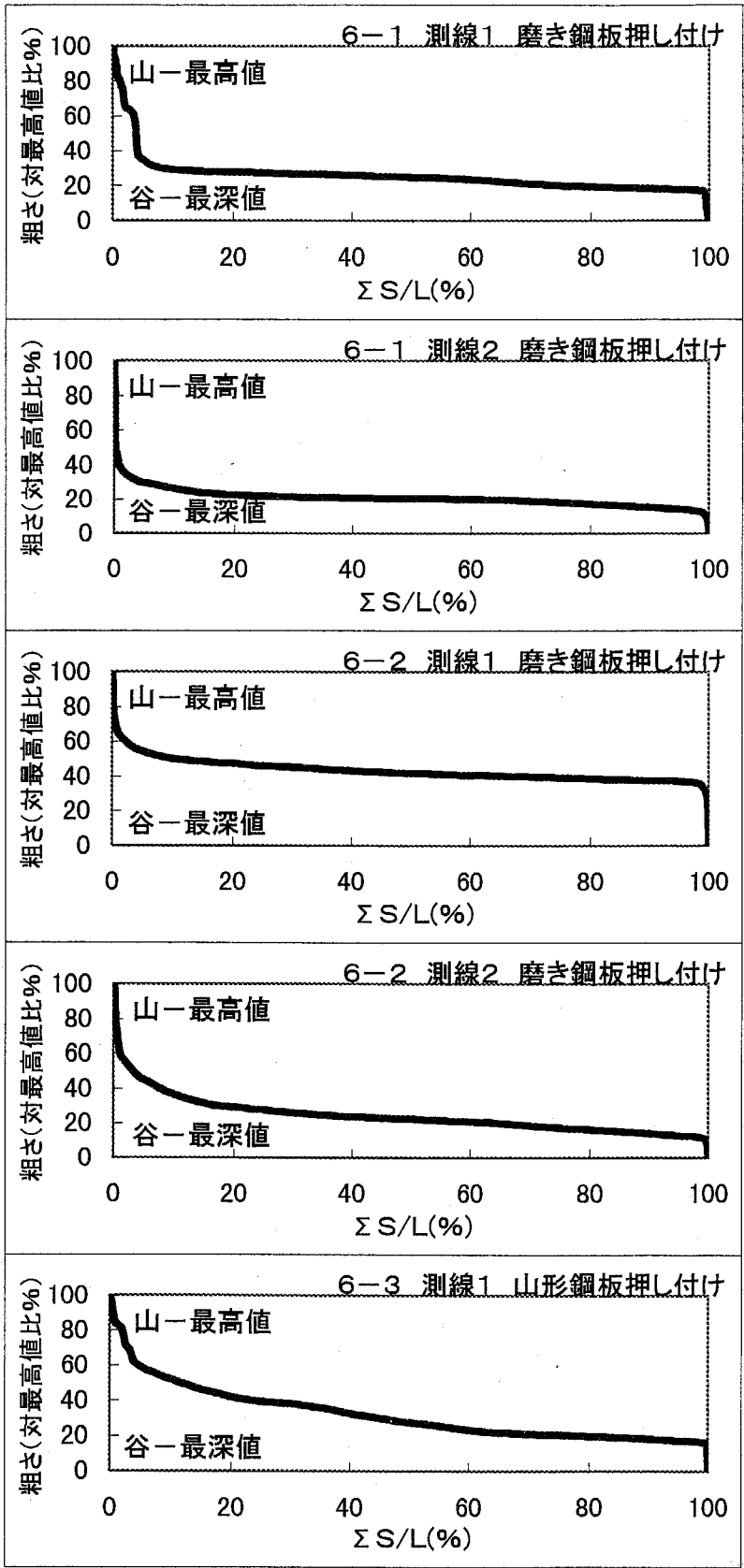


図 A-5(g) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 7)

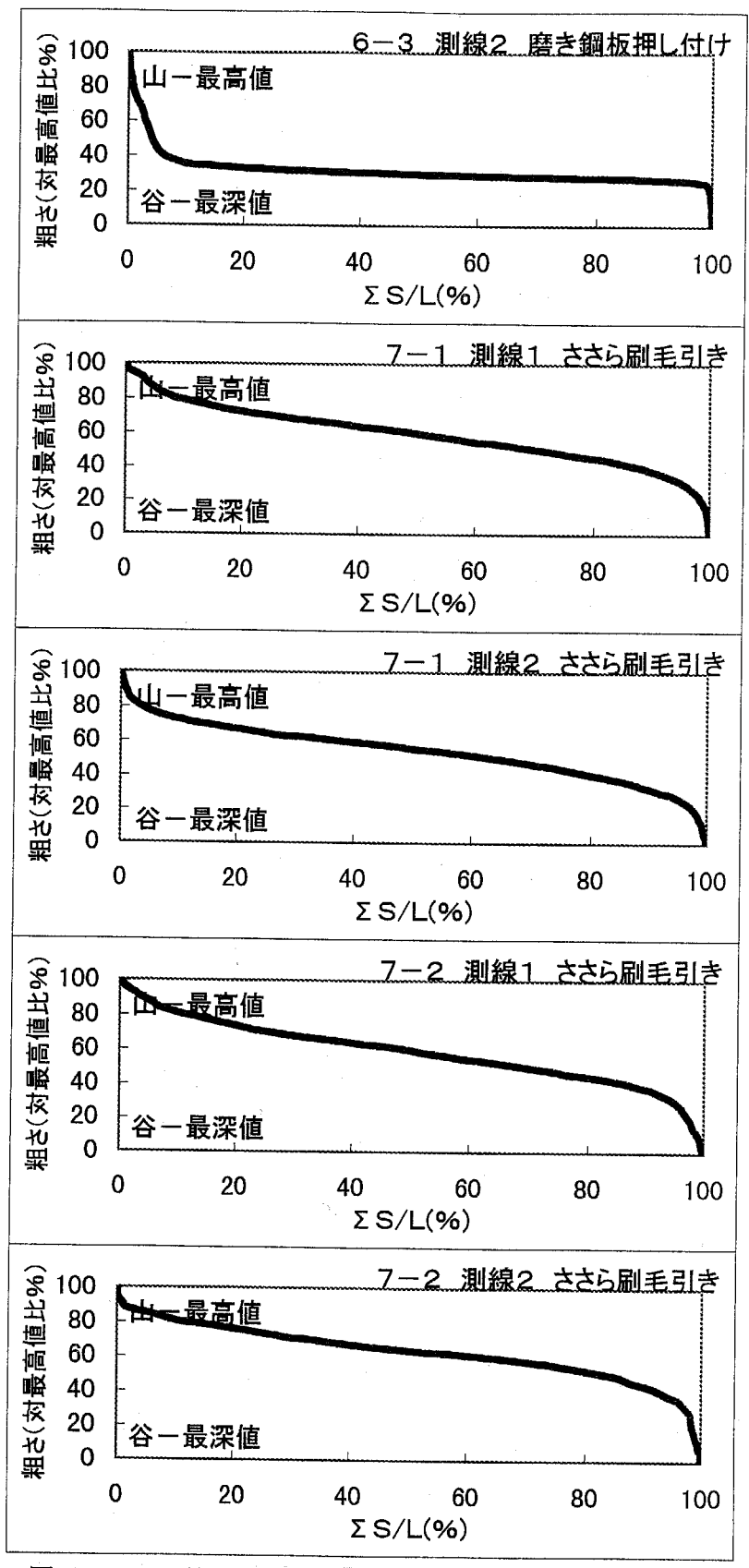


図 A-5(h) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その8)

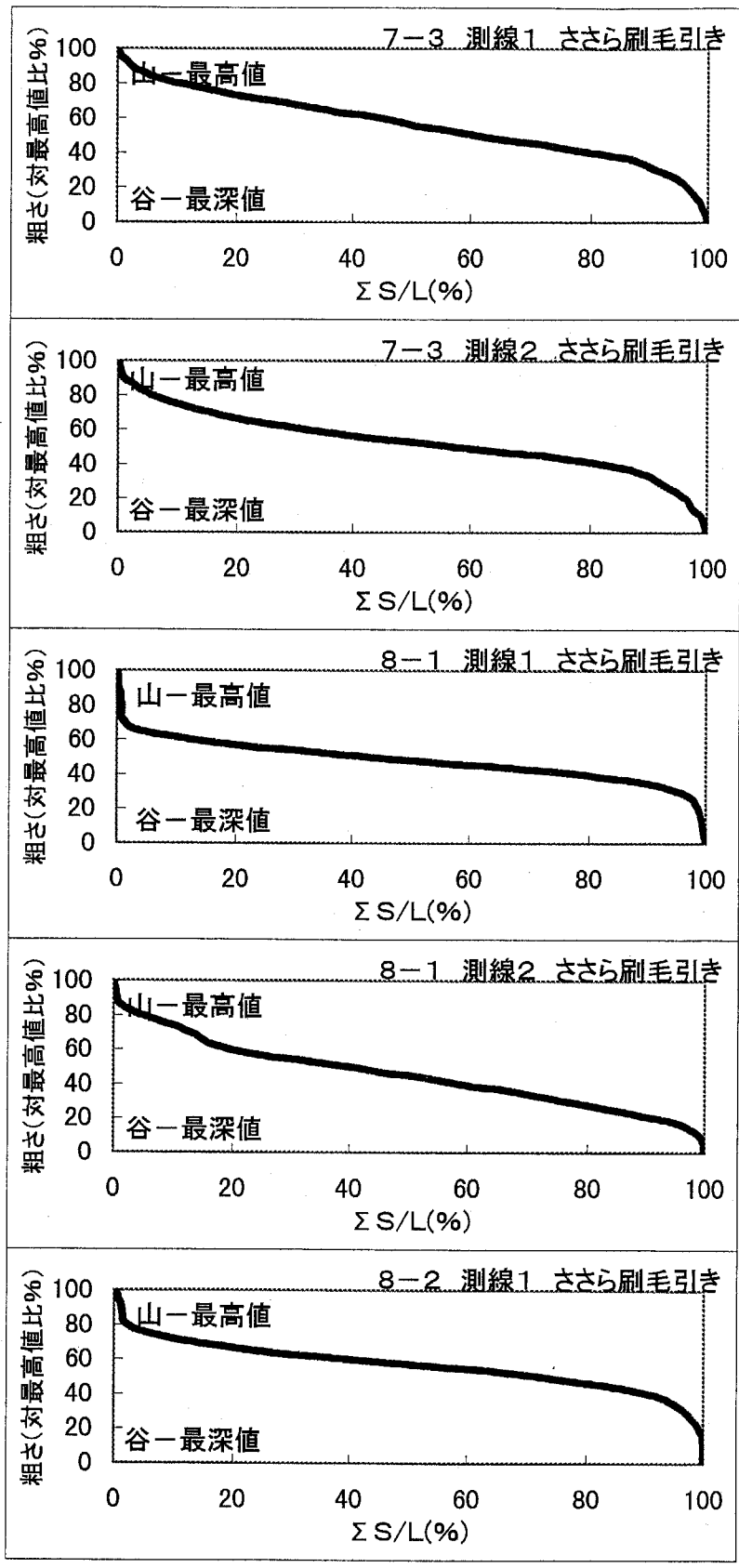


図 A-5(i) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その9)

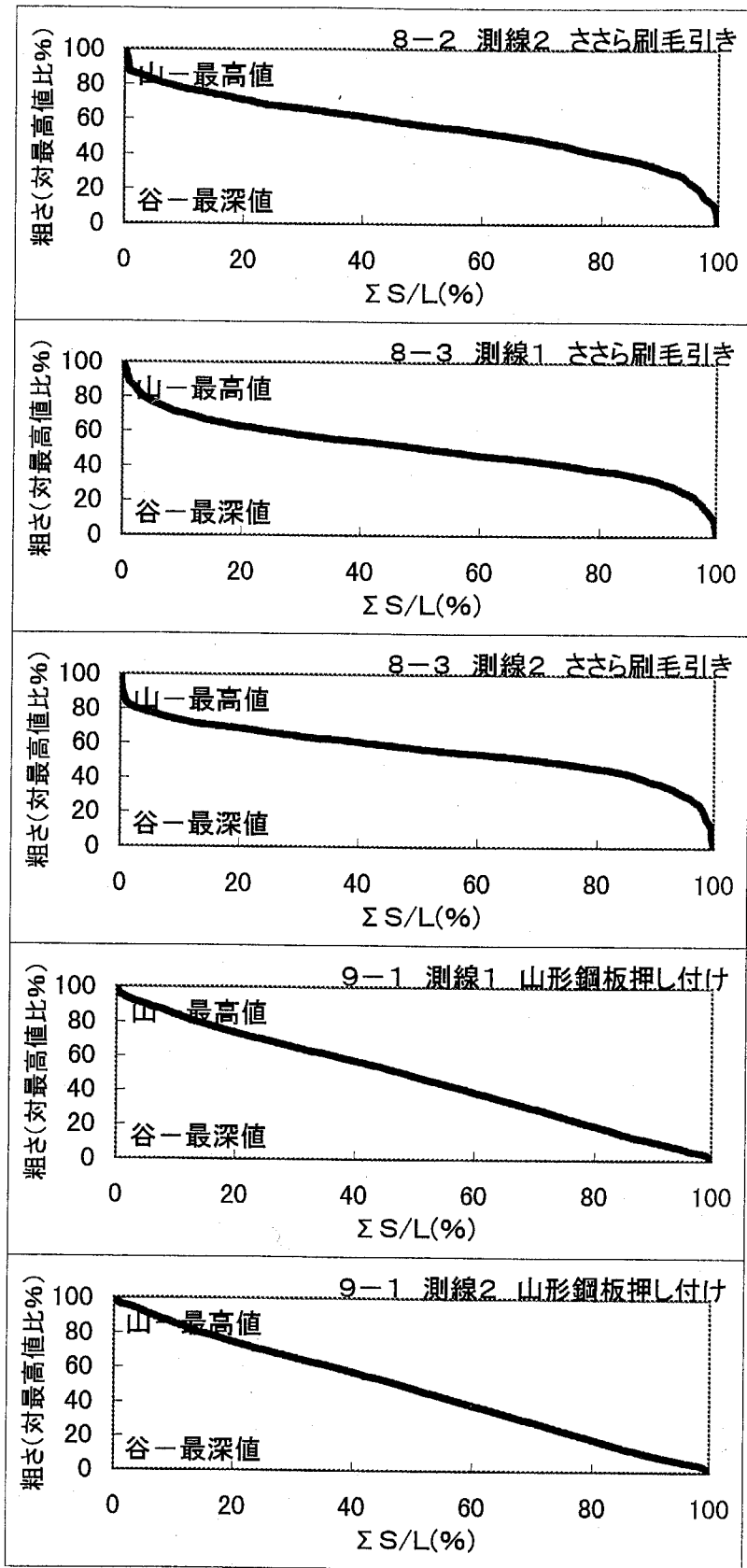


図 A-5(j) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その10)

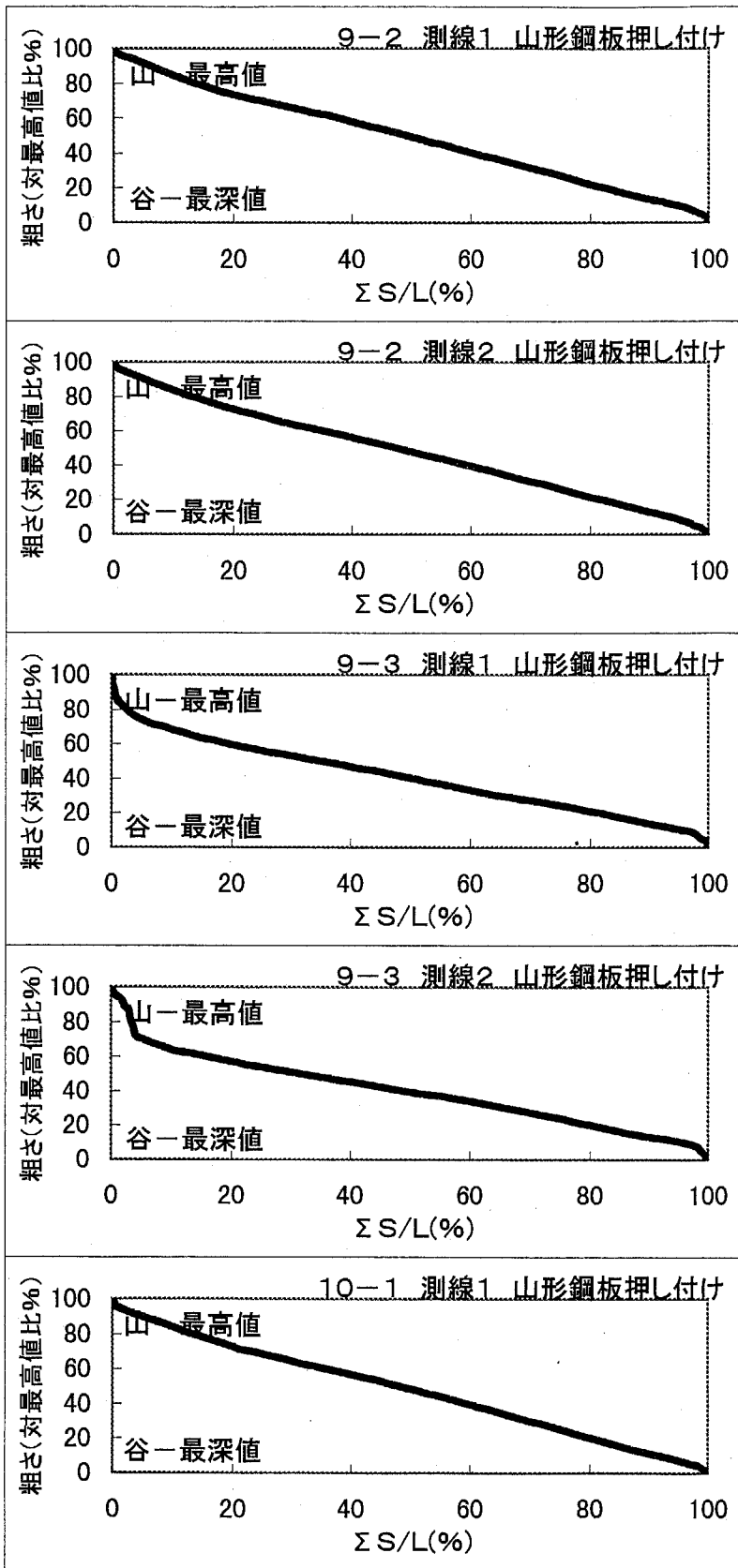


図 A-5(k) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 11)

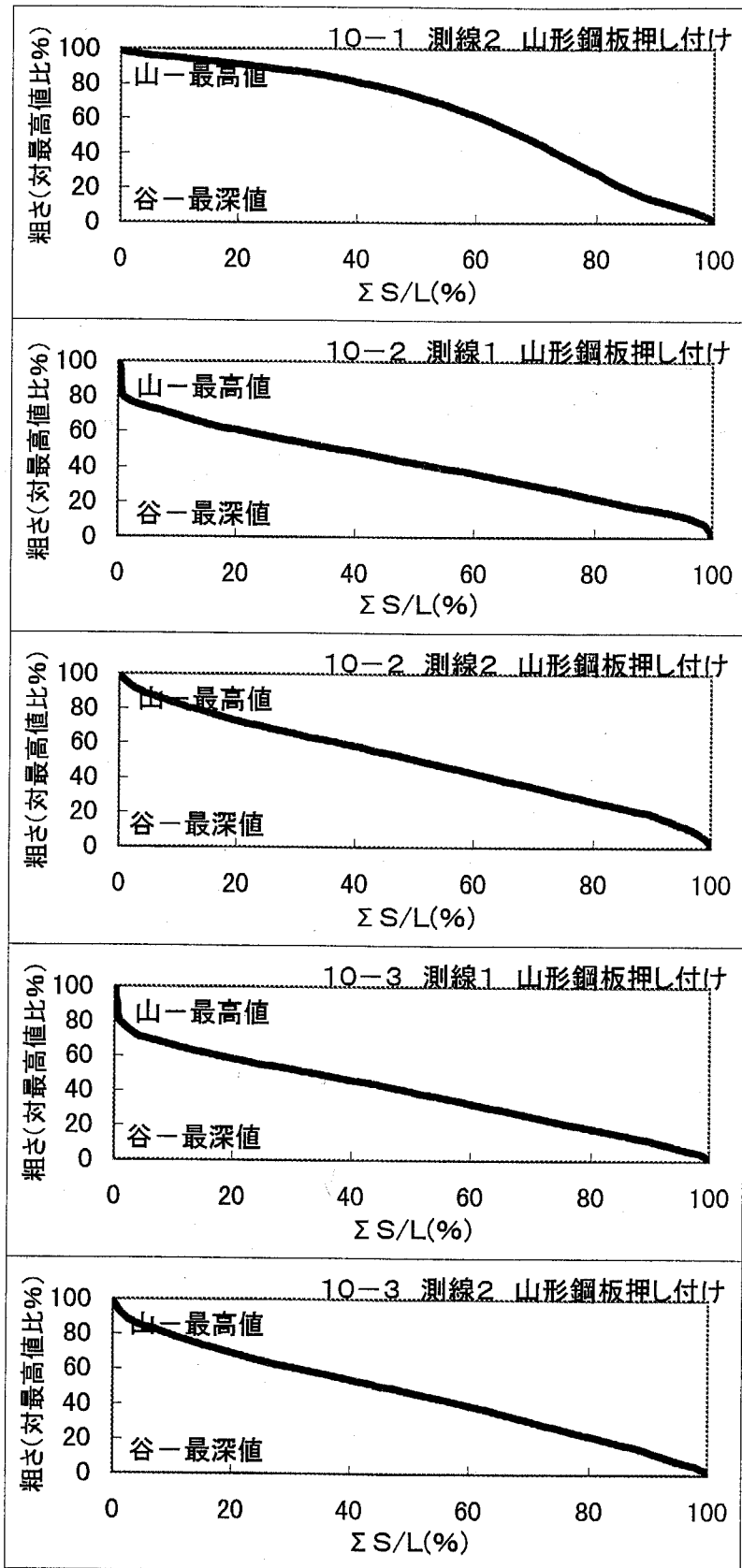


図 A-5(I) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その12)

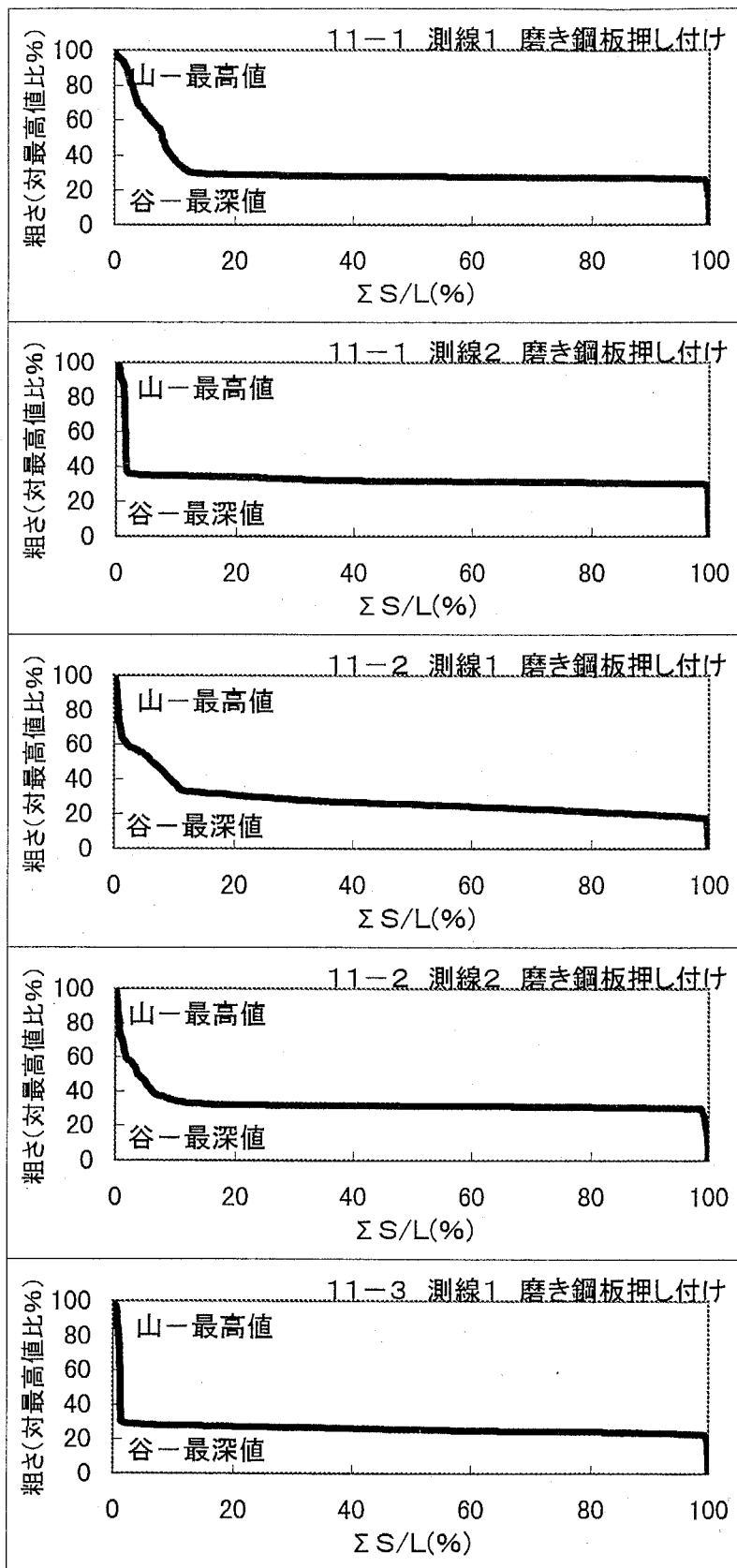


図 A-5(m) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 13)

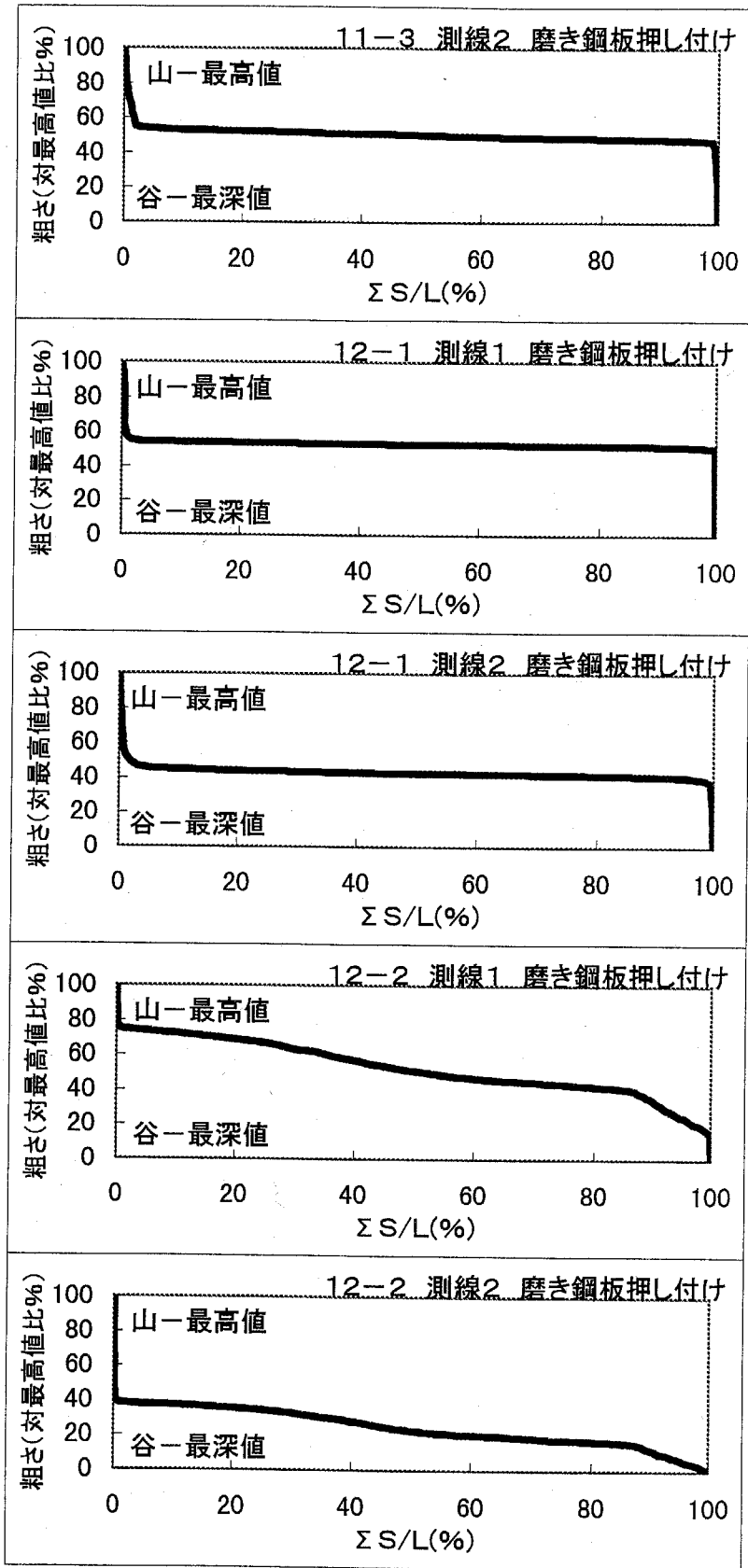


図 A-5(n) 第 3 章 粗さ曲線の負荷曲線 (その 14)

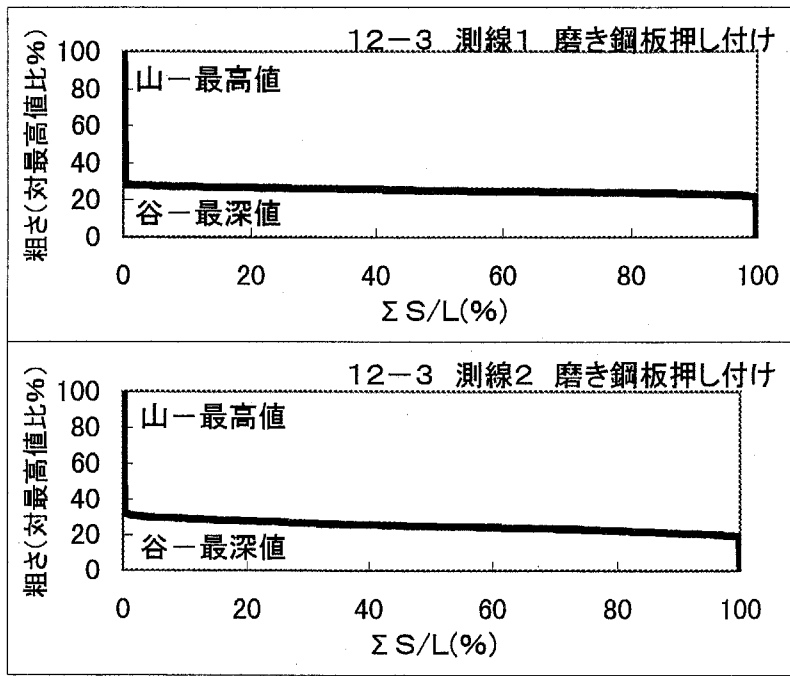


図 A-5(o) 第3章 粗さ曲線の負荷曲線 (その15)

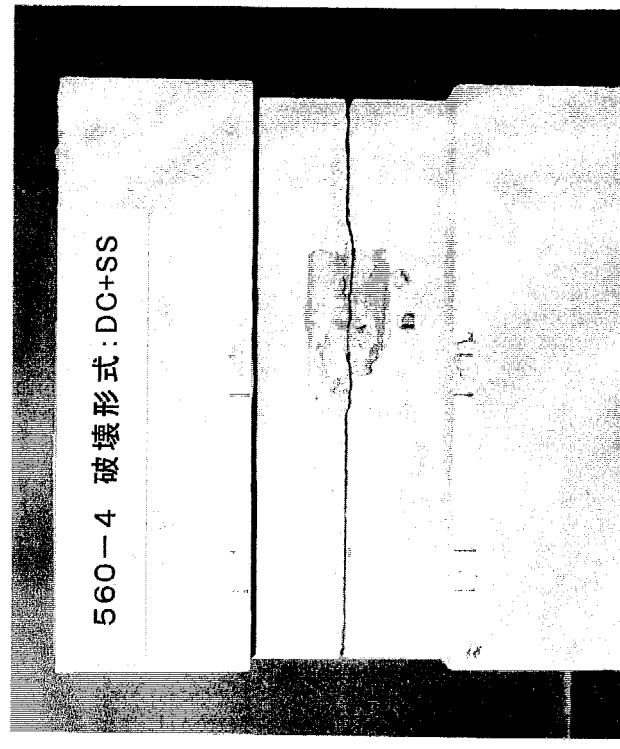
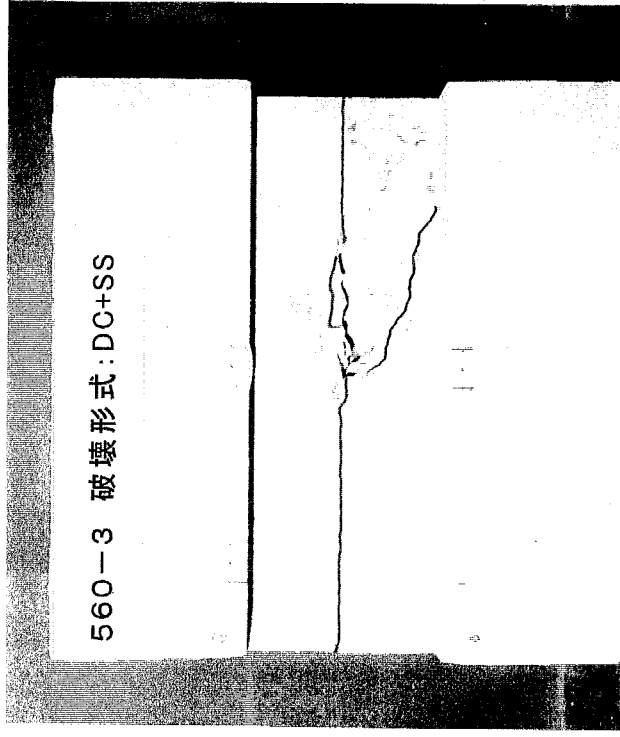
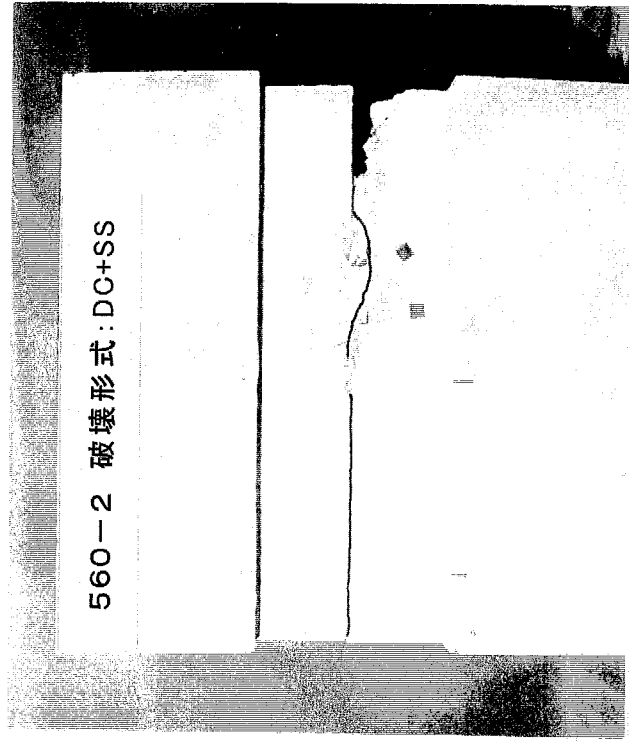
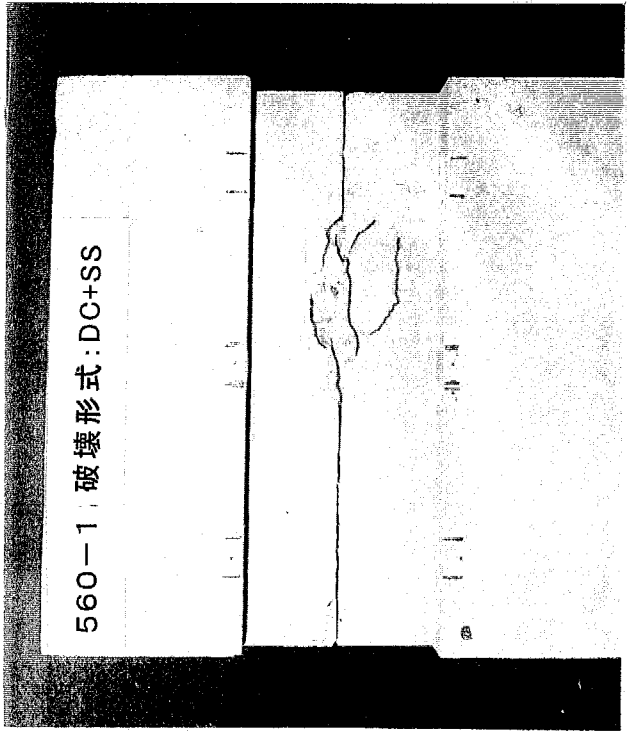


写真 A-1(a) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 1)
(I 類試験体)

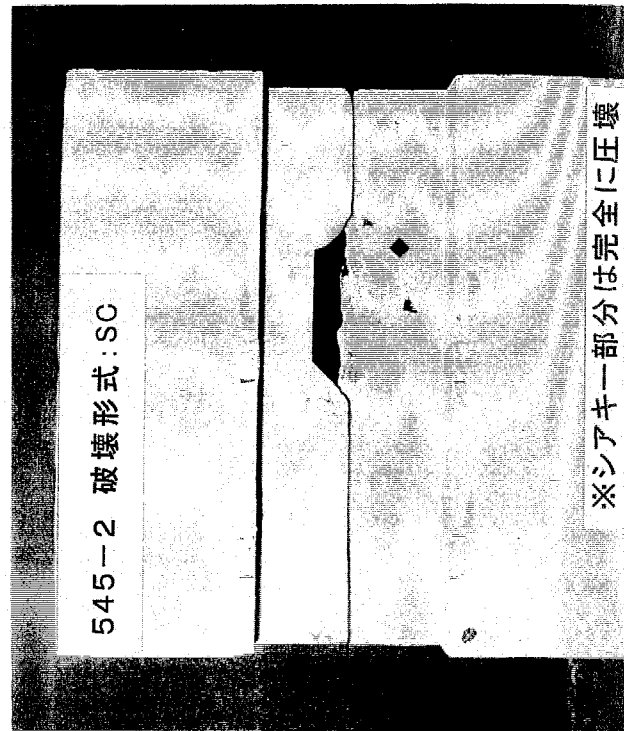
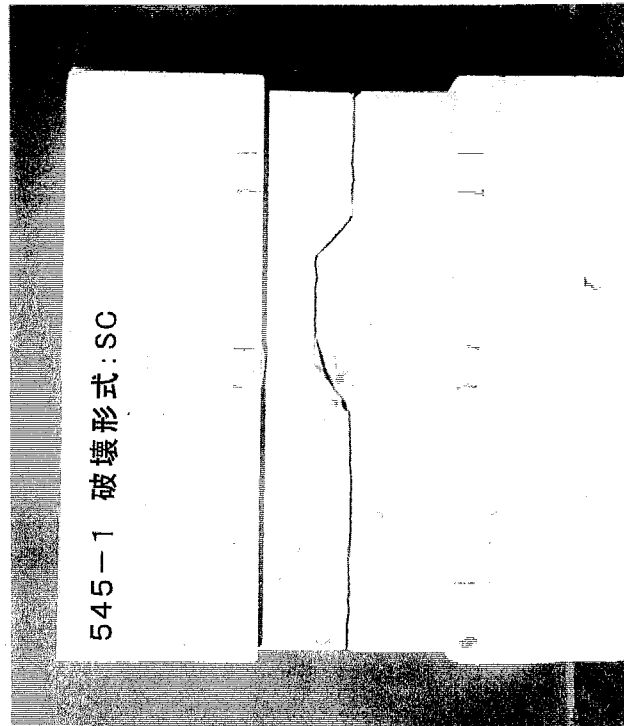
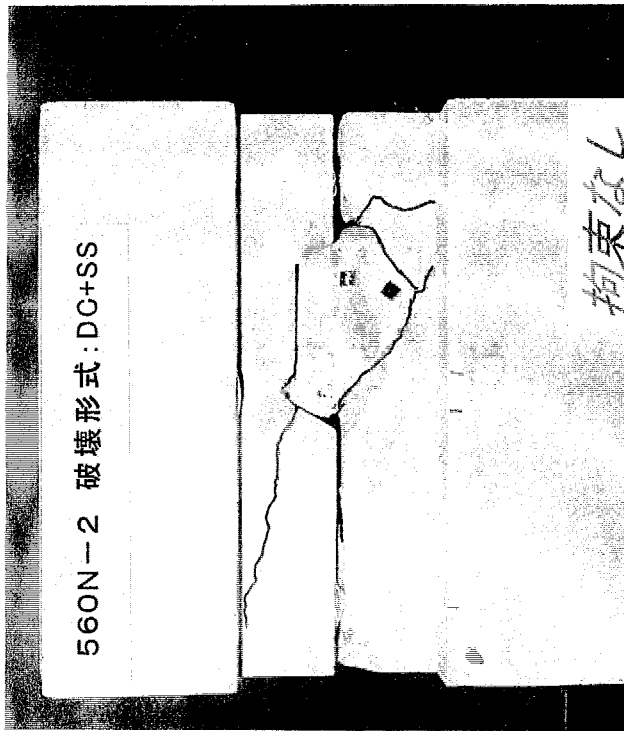
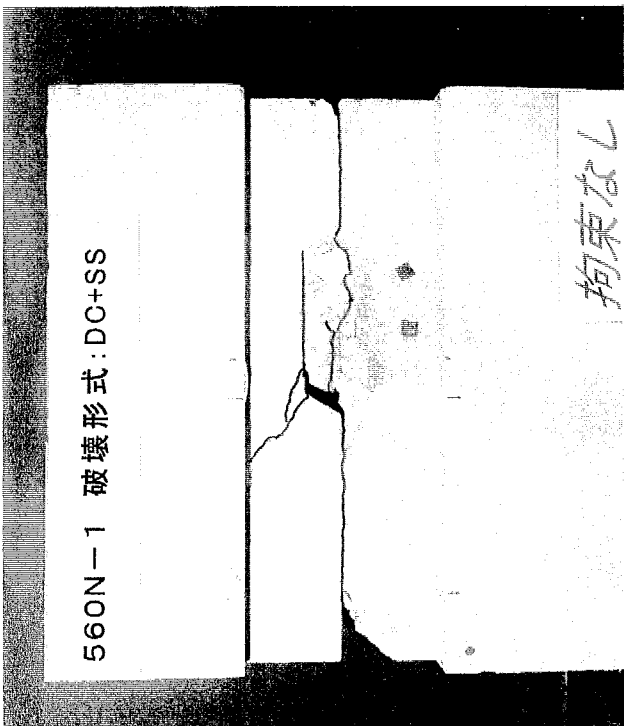
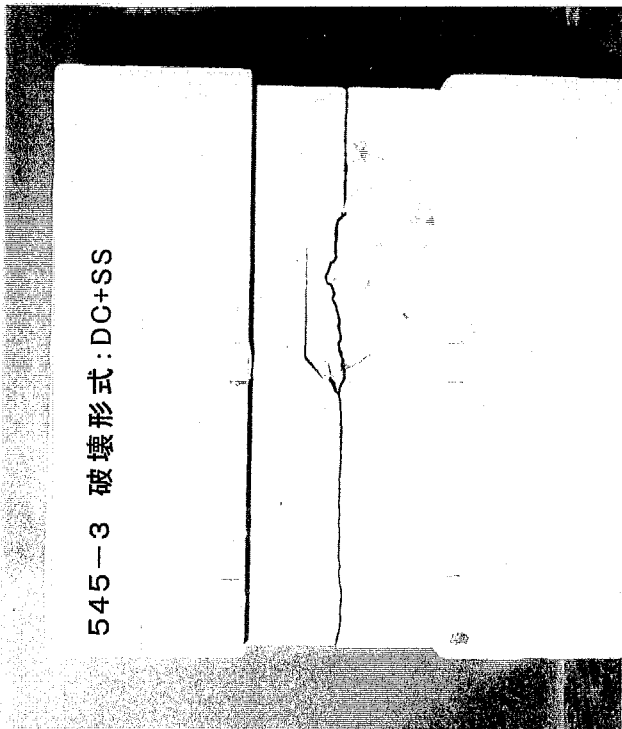
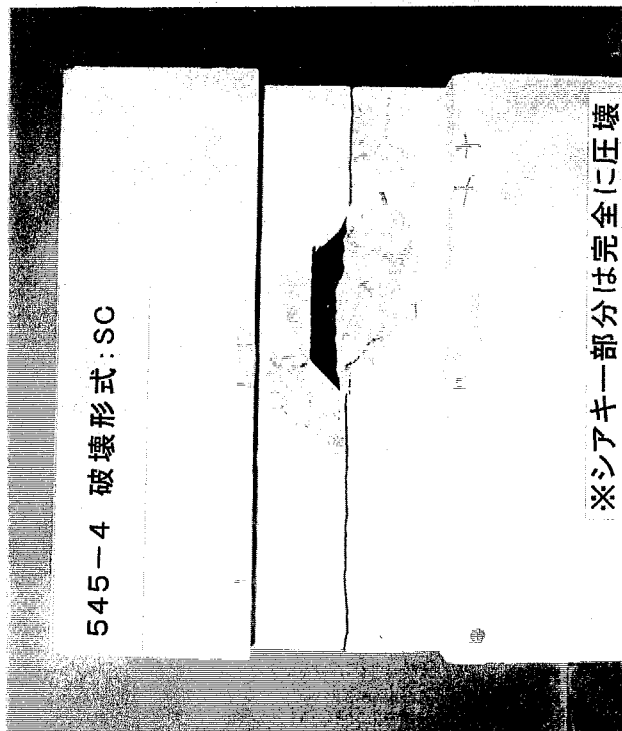


写真 A-1(b) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 2)
(I 類試験体)

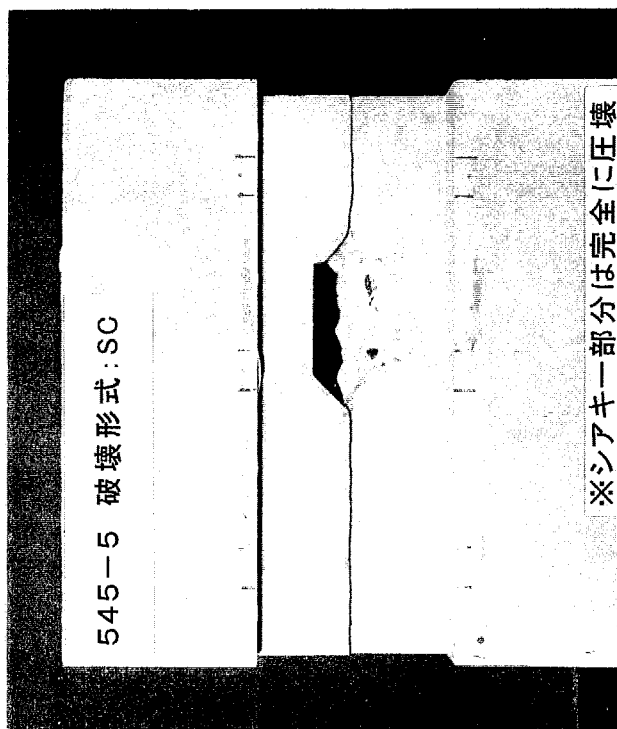


545-3 破壊形式: DC+SS



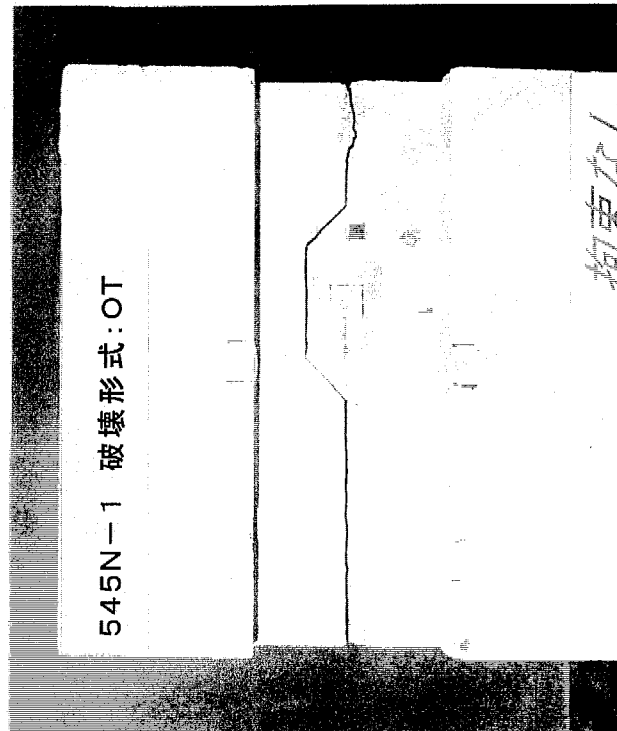
545-4 破壊形式: SC

※シアキー部分は完全に圧壊



545-5 破壊形式: SC

※シアキー部分は完全に圧壊



545N-1 破壊形式: OT

拘束なし

写真 A-1(c) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 3)

(I 類試験体)

※545-6 試験体は載荷失敗

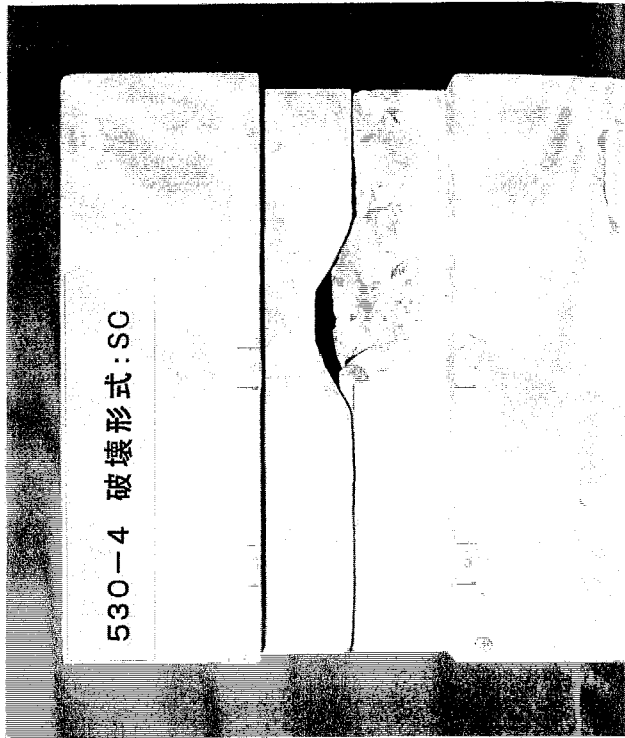
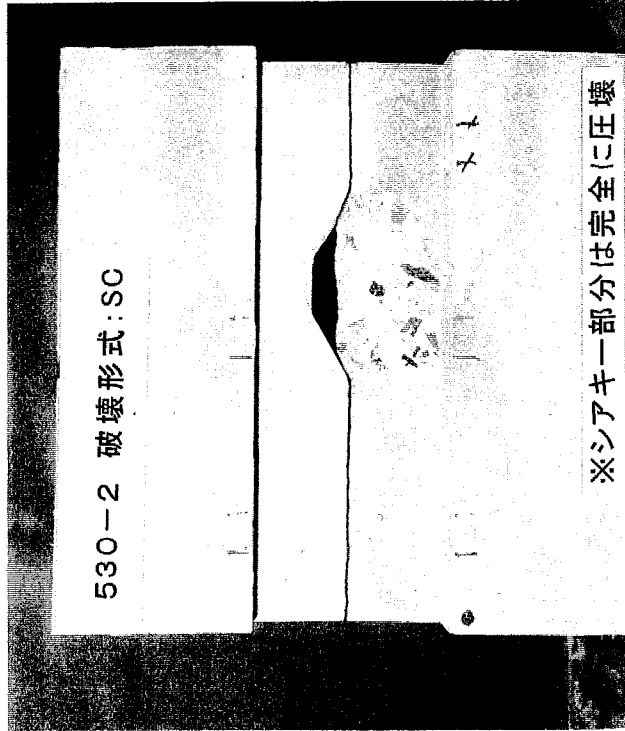
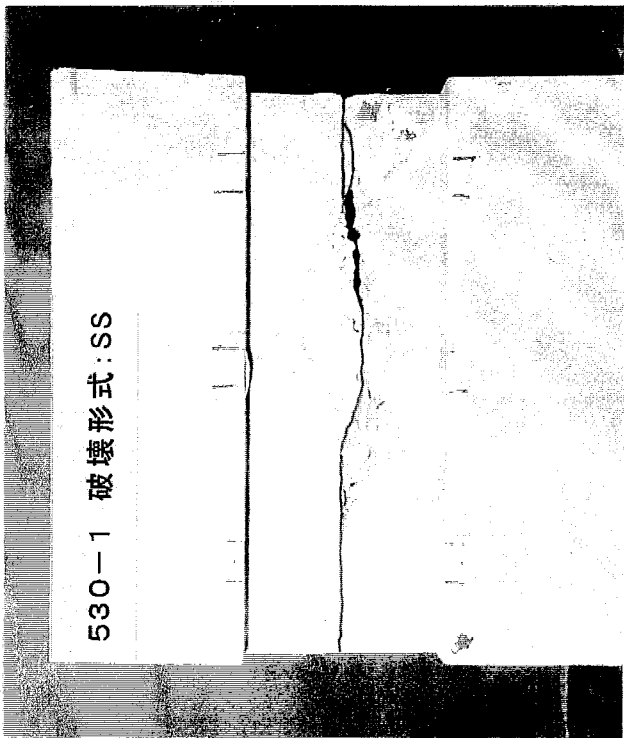
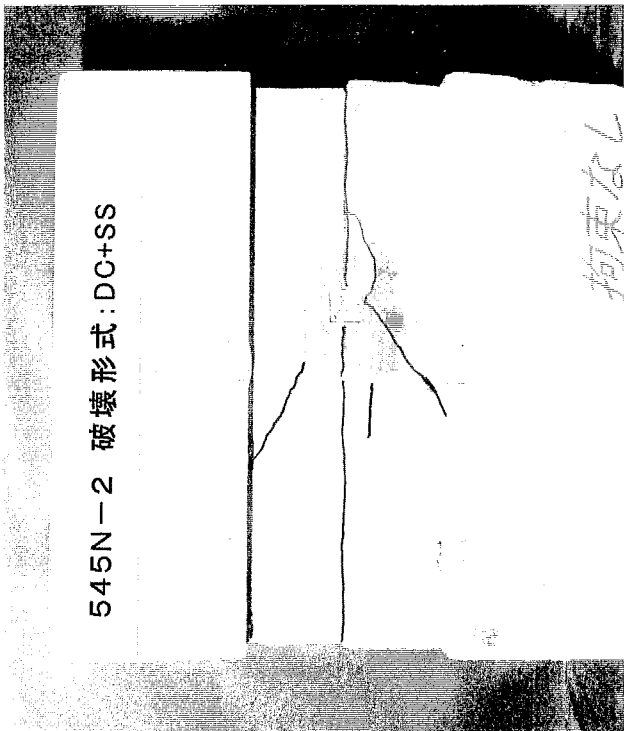


写真 A-1(d) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 4)

(I 類試験体)

※530-3 試験体は載荷失敗

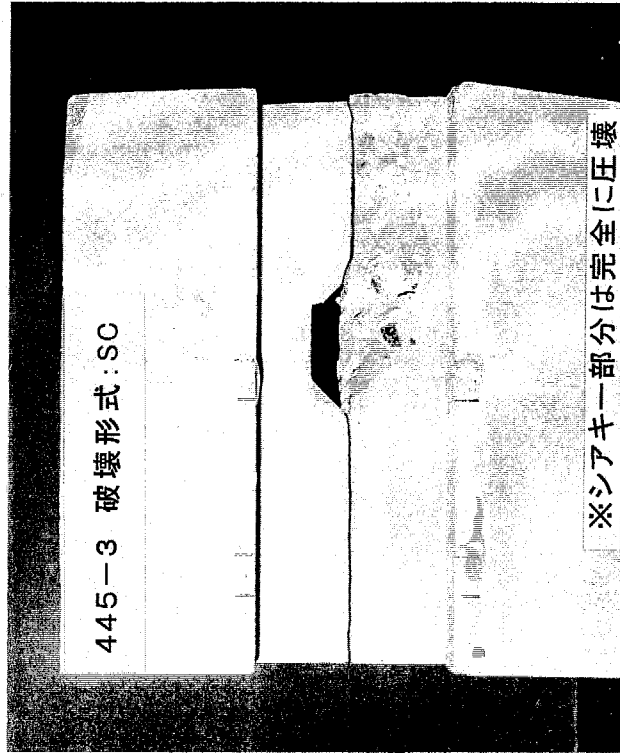
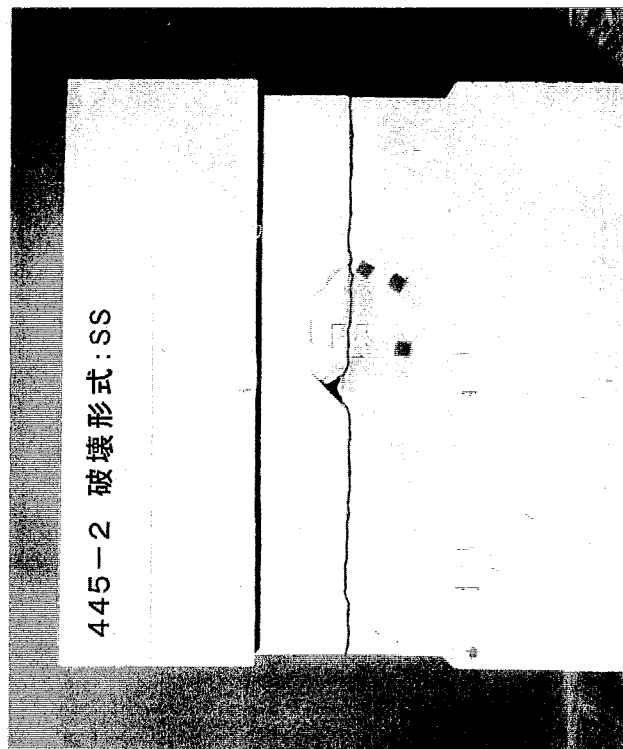
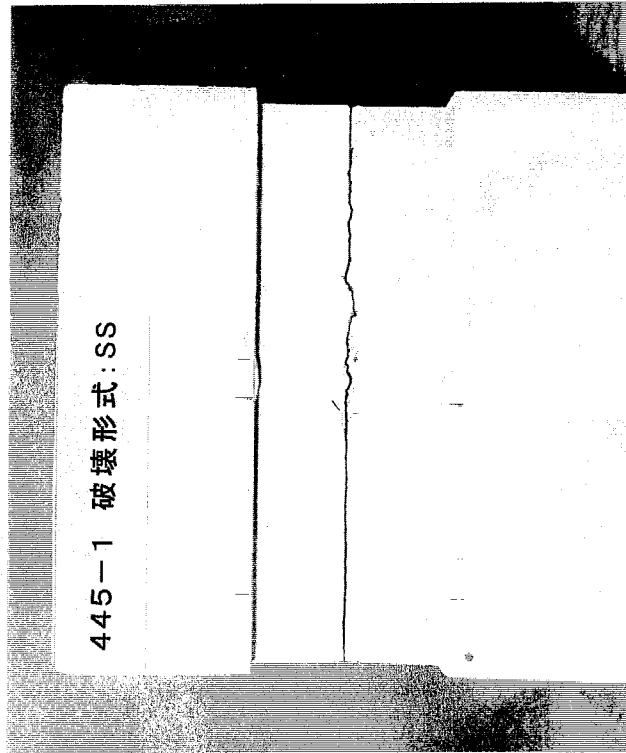
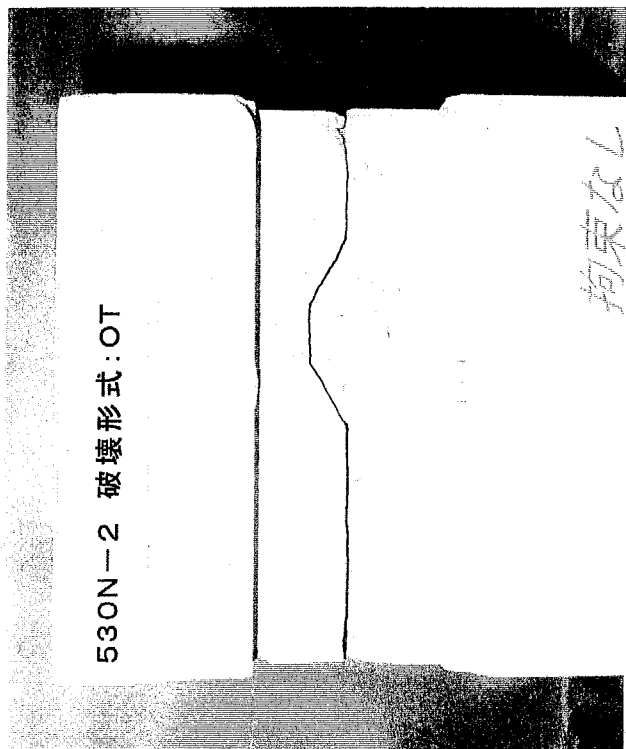


写真 A-1(e) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 5)
(I 類試験体)

※530N-1 試験体は載荷失敗

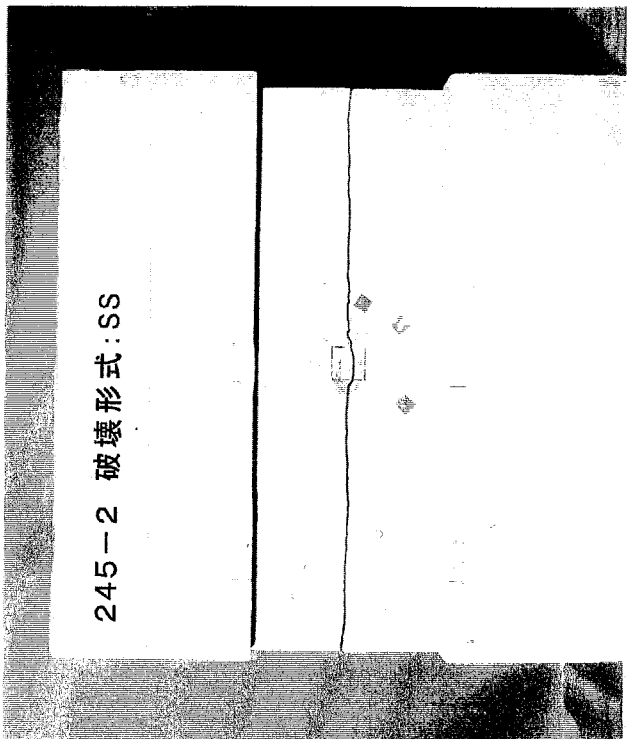
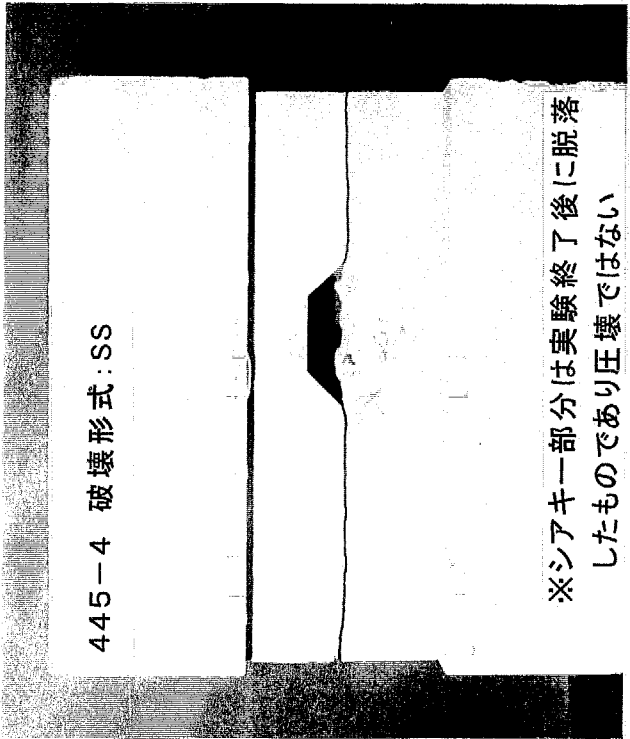
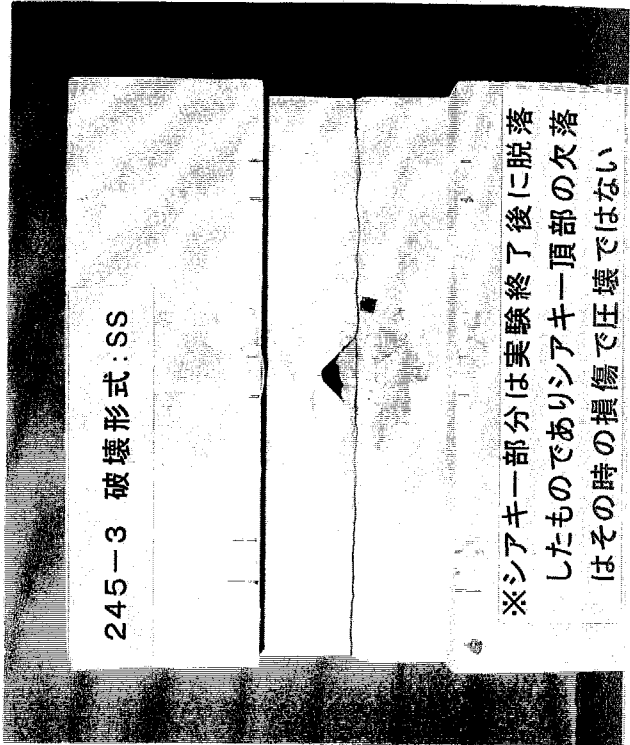
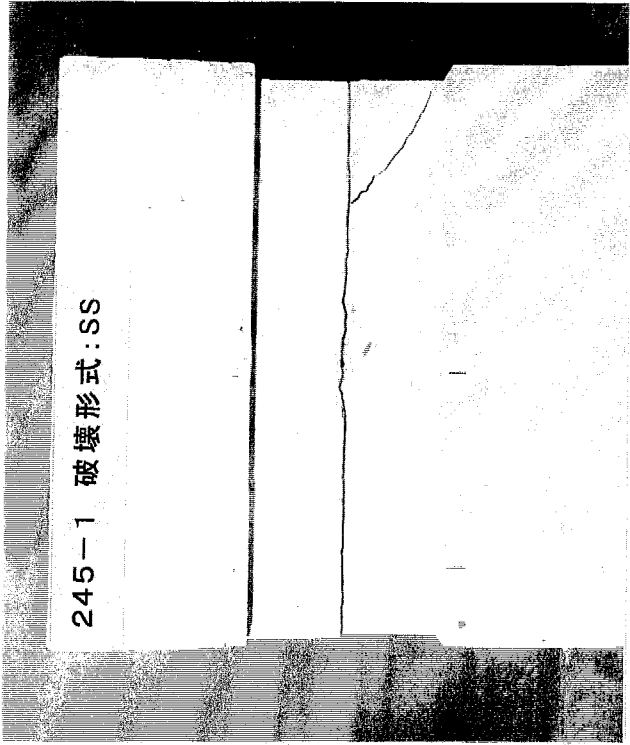
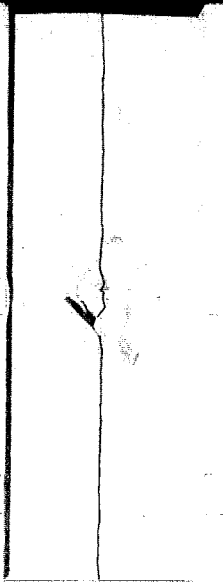


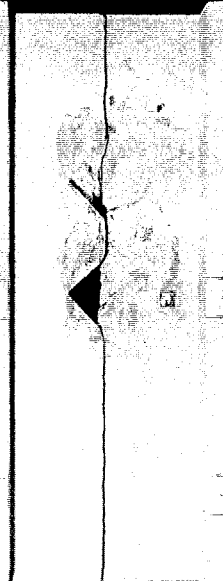
写真 A-1(f) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 6)
(I 類試験体)

245-4 破壊形式:SS



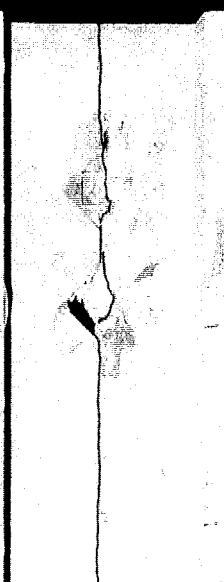
※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものでありシアキ一側面の欠落はその時の損傷で圧壊ではない

2452-1 破壊形式:SS



※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものでありシアキ一側面の欠落はその時の損傷で圧壊ではない

2452-2 破壊形式:SS



※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

2453-1 破壊形式:SS

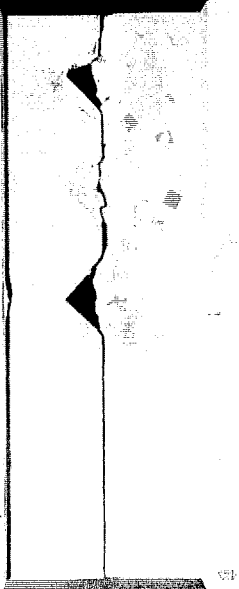


※シアキ一部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

写真 A-1(g) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 7)

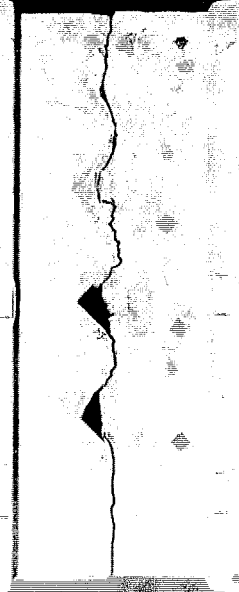
(I 類試験体および II 類試験体)

2453-2 破壊形式:SS



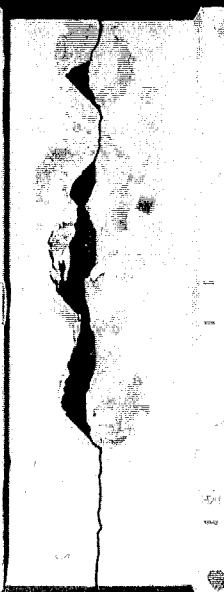
※シアキー部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

2454-1 破壊形式:SS



※シアキー部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

2454-2 破壊形式:SS



※シアキー部分は実験終了後に脱落したものであり圧壊ではない

0-1 破壊形式:OT

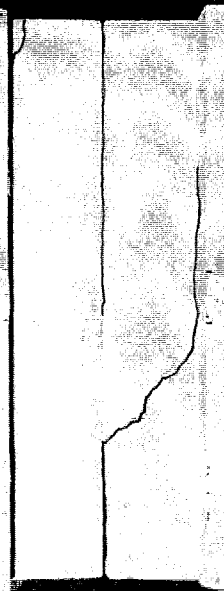


写真 A-1(h) 第4章 試験体の最終破壊状況(その8)

(I類試験体およびII類試験体)

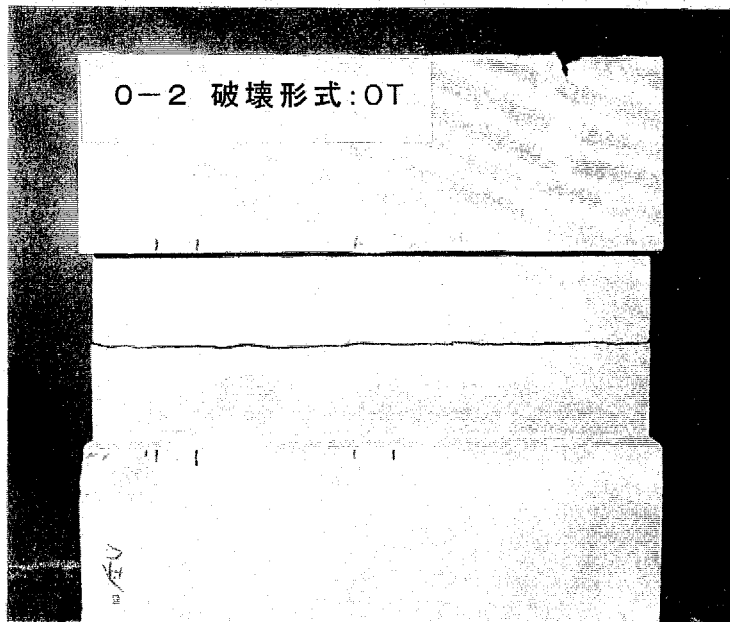


写真 A-1(i) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 9)
(I 類試験体)

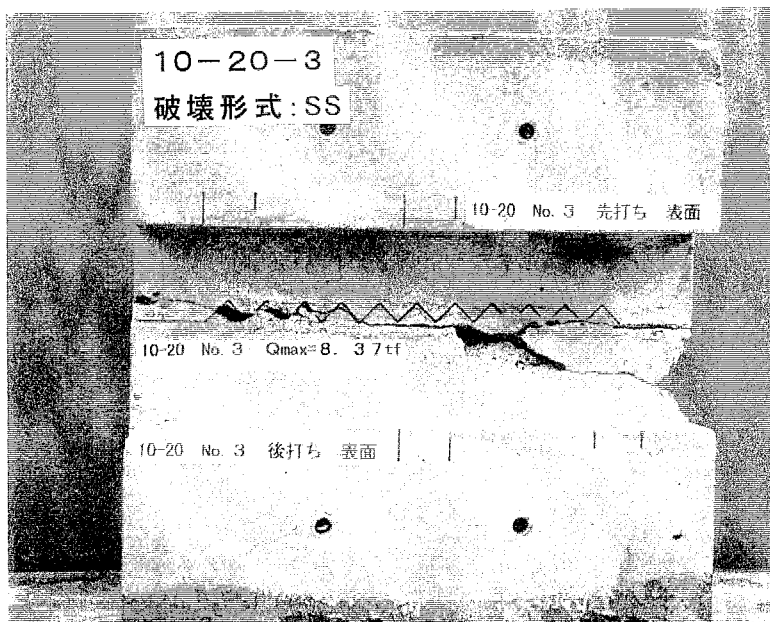
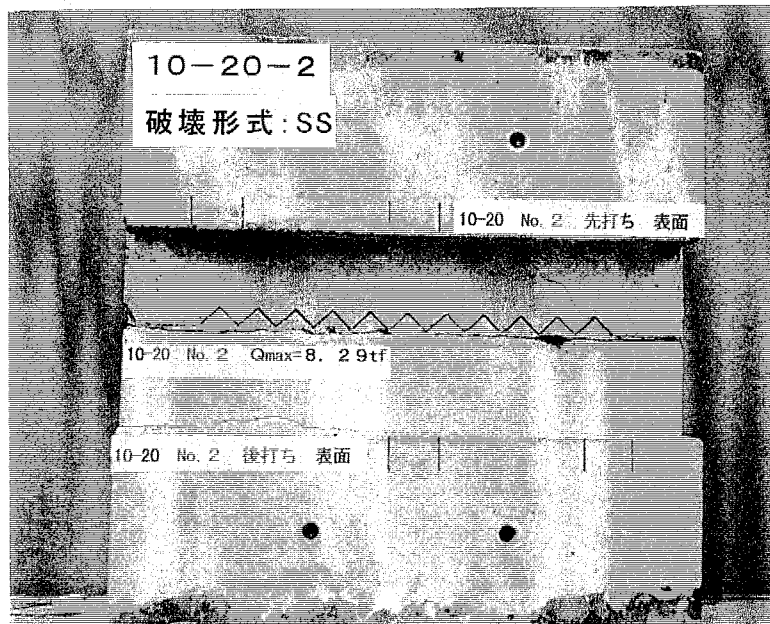
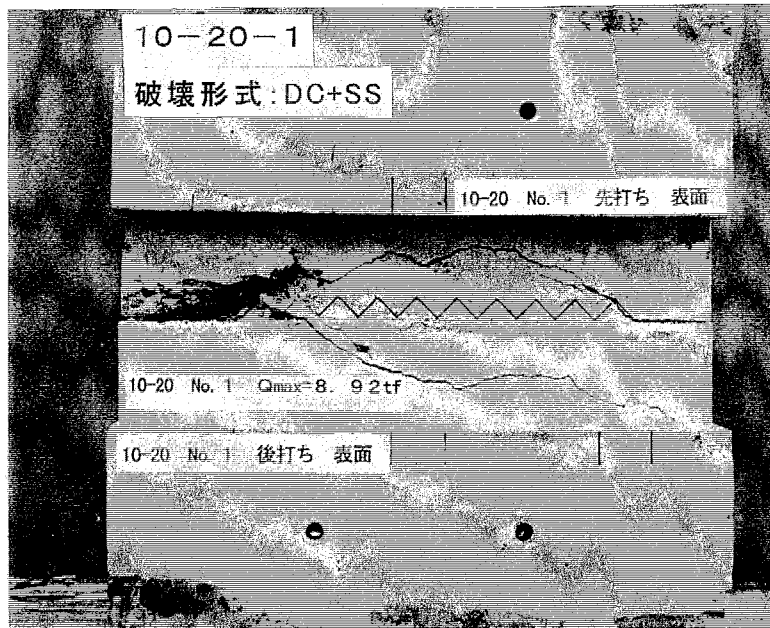


写真 A-1(j) 第4章 試験体の最終破壊状況 (その 10)
(II類試験体)

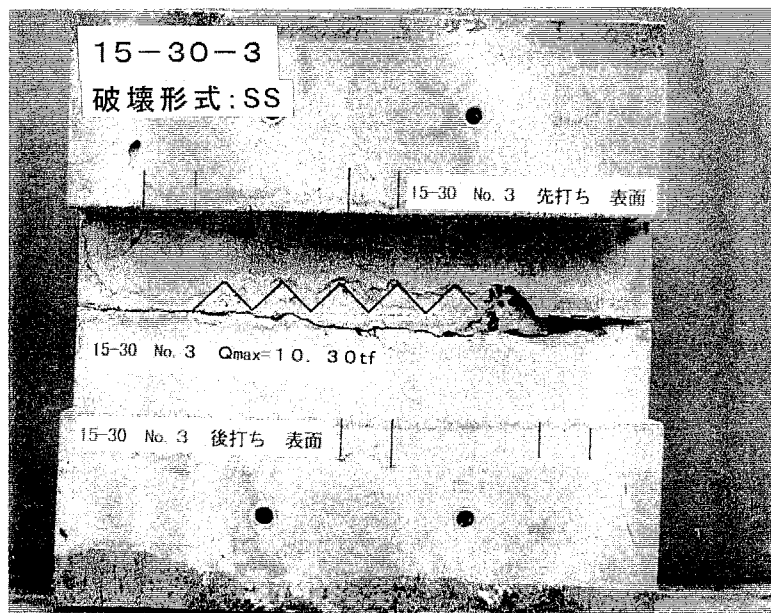
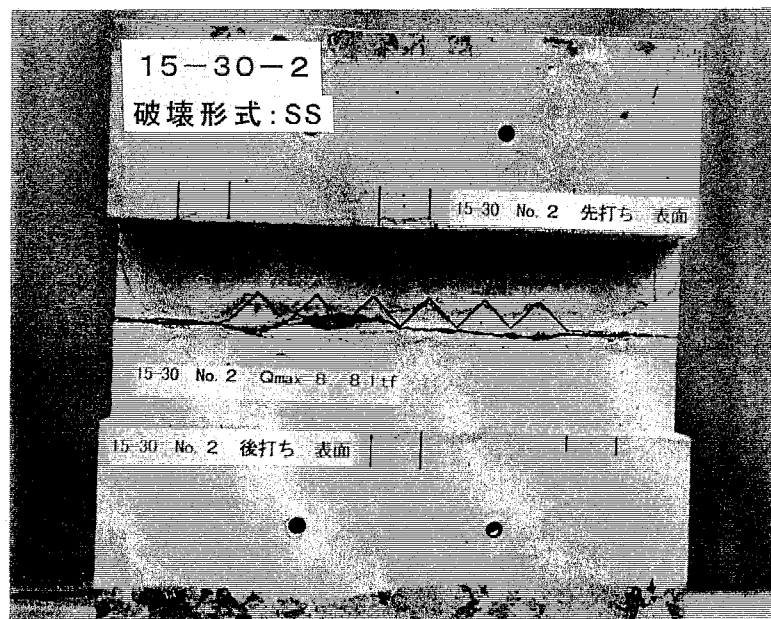
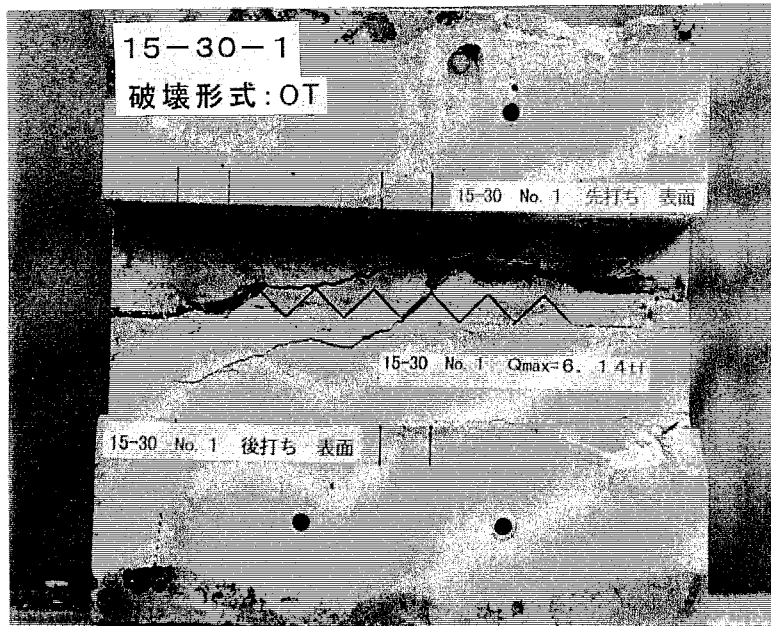
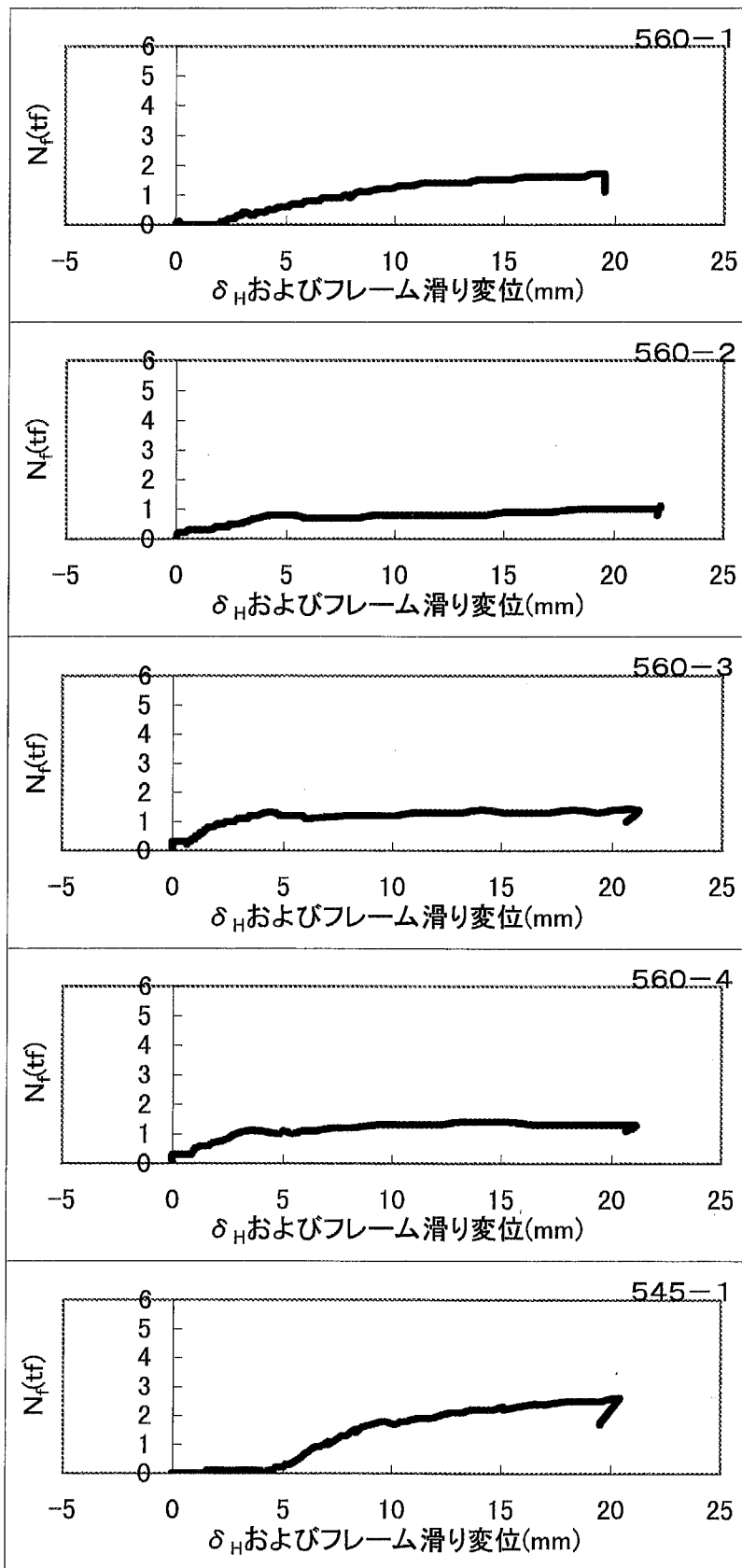
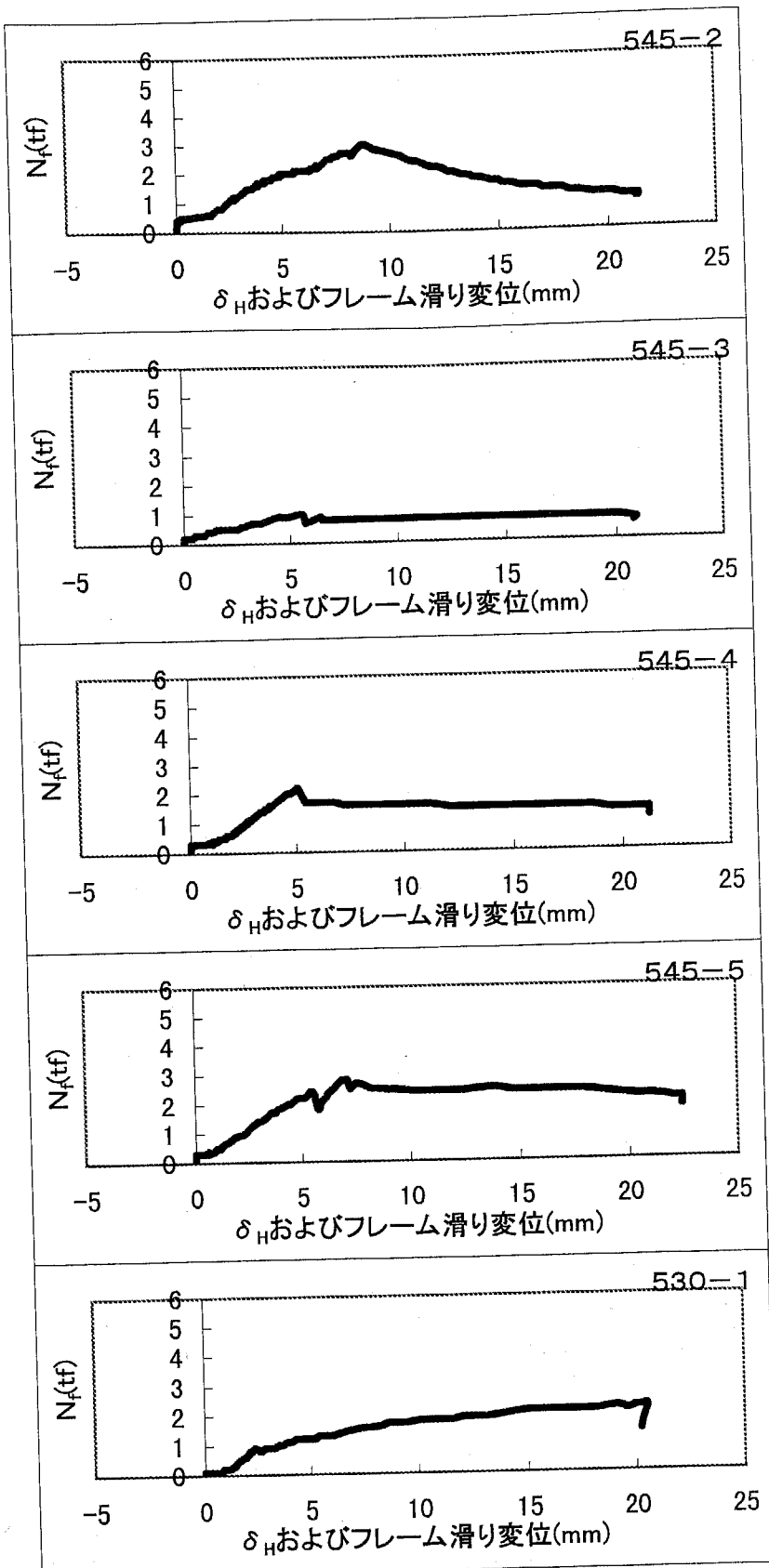


写真 A-1(k) 第 4 章 試験体の最終破壊状況 (その 11)
(II 類試験体)



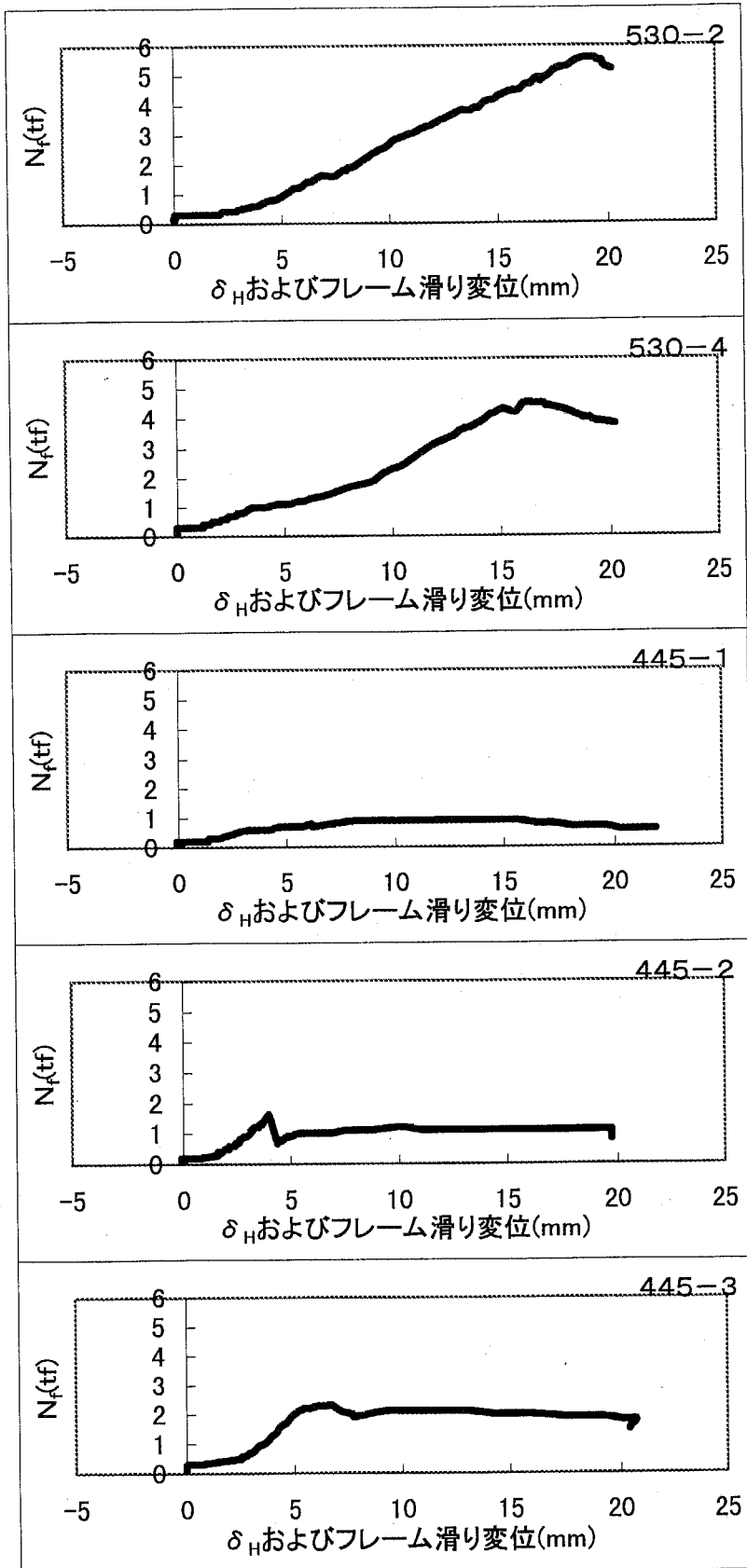
横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 A-6(a) 第4章 外部拘束力-滑り変位関係 (その1)
 (I類試験体)



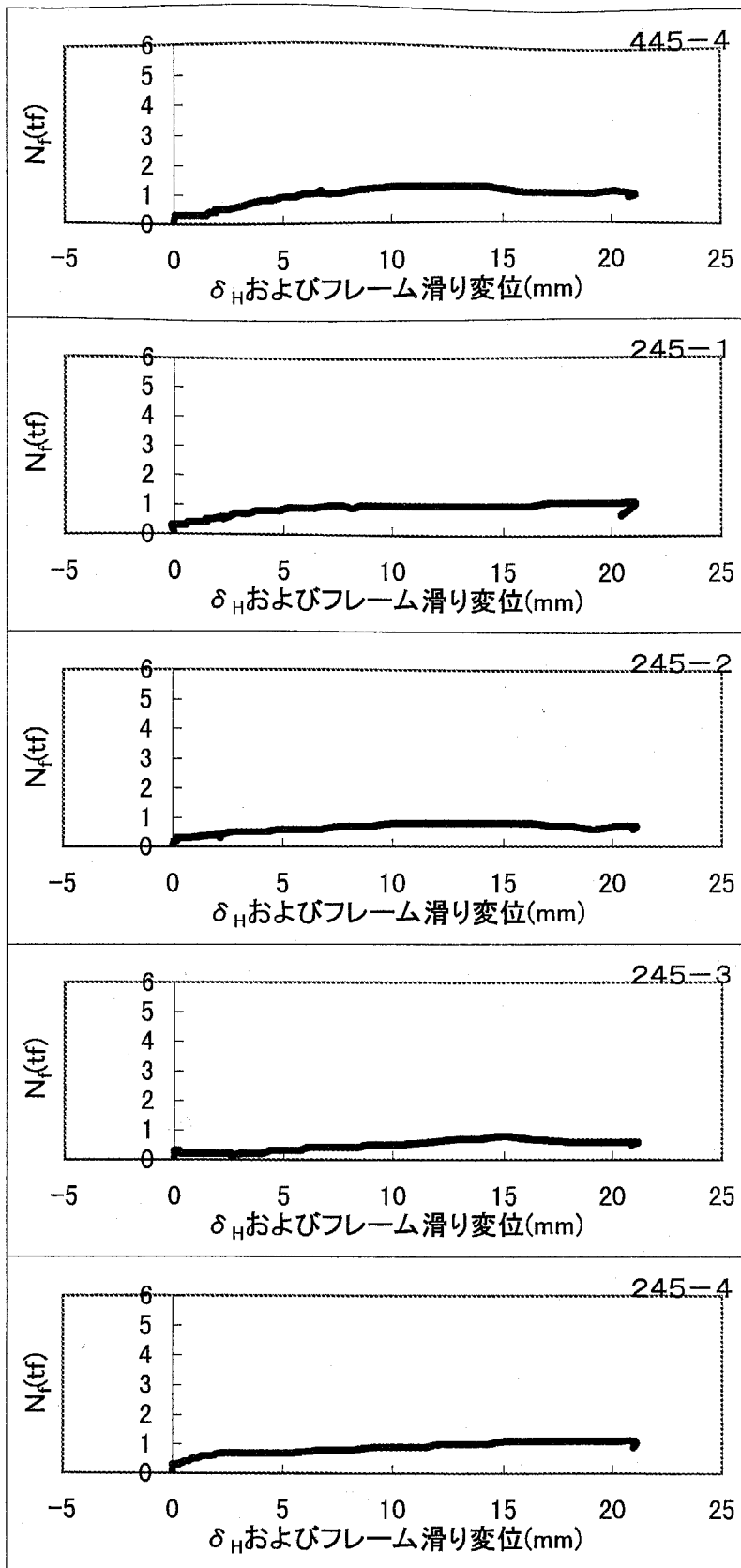
横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 A-6(b) 第 4 章 外部拘束力-滑り変位関係 (その 2)
 (I 類試験体)



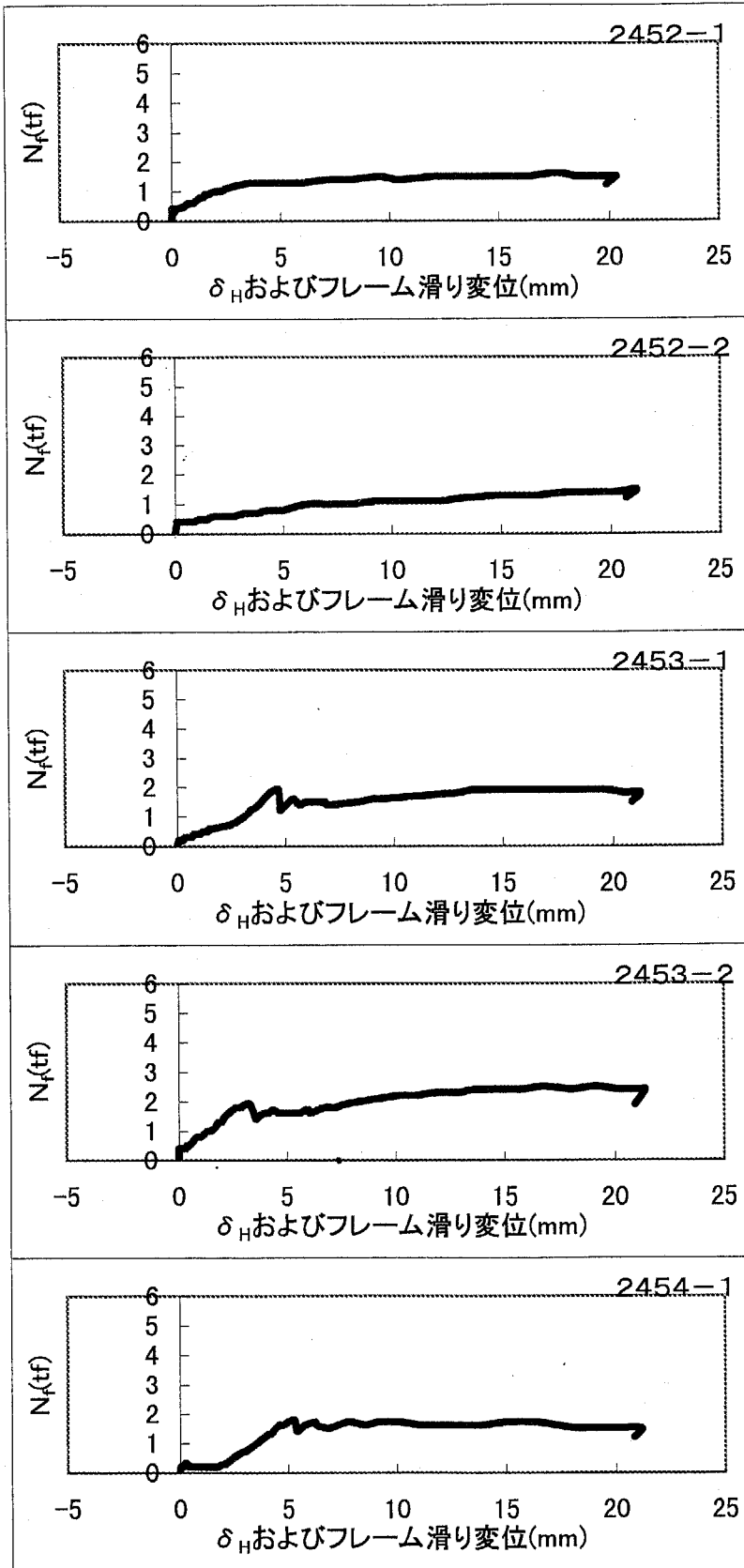
横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 A-6(c) 第 4 章 外部拘束力-滑り変位関係 (その 3)
 (I 類試験体)



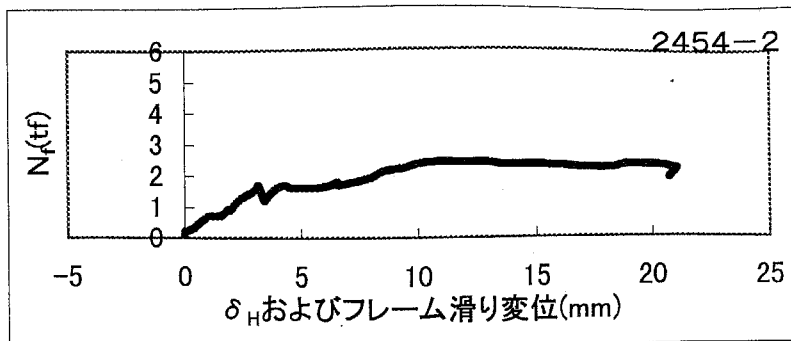
横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 A-6(d) 第4章 外部拘束力-滑り変位関係 (その4)
 (I類試験体)



横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 A-6(e) 第 4 章 外部拘束力-滑り変位関係 (その 5)
 (I 類試験体および II 類試験体)



横軸の5.5mm以下は2軸変位計による δ_H
 5.5mm以上は1軸変位計によるフレーム間相対滑り変位

図 A-6(f) 第4章 外部拘束力-滑り変位関係 (その6)
 (I類試験体およびII類試験体)

レーザー光式変位計の仕様

レーザー光式変位計は、(株)キーエンス製の拡散反射型レーザー変位計 LC シリーズ (コントローラー部は LC-2400、測定部 (レーザー光照射・受光部) は LC-2450) を用いた。表 A-1 にその仕様を示す。

表 A-1 レーザー光式変位計の仕様

| 型式 | コントローラ | | LC-2400 | | | |
|---------------|-----------------|---|---------------------------------|----------------|------------|------------|
| | ヘッド | | LC-2420 | LC-2430 | LC-2440 | LC-2450 |
| 測定範囲 | | ±0.2mm | ±0.5mm | ±3mm | ±8mm | |
| 作動距離 | | 10mm | 30mm | 30mm | 50mm | |
| 光源 | | 半導体レーザー | | | | |
| | | 波長 | 670nm | | | |
| | | 出力 | 最大1.9mW 平均950μW | | | |
| | | クラス | クラス2 | | | |
| | | パルス幅 | 10μs | | | |
| 最小スポット径 | | 20×12μm | 30×20μm | 35×20μm | 45×20μm | |
| 分解能 *1 | | 0.01μm | 0.02μm | 0.2μm | 0.5μm | |
| 直線性 *2 | | ±0.05% of F.S. | | | | |
| サンプリング周波数 | | 50kHz | | | | |
| 応答周波数 | | 20kHz (-3dB, 平均回数1回) | | | | |
| 応答時間 | | 100μs | | | | |
| 測定値平均回数 | | 1~131072 (18段階切換) | | | | |
| オフセット範囲 | | ±199.99μm | ±499.98μm | ±2.9998mm | ±7.9995mm | |
| ゲイン調整 | | オートゲイン、マニュアル4段階切換 | | | | |
| アナログ出力 | | 変位データ出力 | ±10V 出力インピーダンス0Ω、6段階切換 | | | |
| | | 受光量データ出力 | 0~5V 出力インピーダンス0Ω | | | |
| デジタル 入出力 | 96ピン *3 コネクタ | 変位データ出力 | TTLレベル、正論理 | | | |
| | | | 1LSB=0.01μm | 1LSB=0.02μm | 1LSB=0.2μm | 1LSB=0.5μm |
| | | 受光量データ出力 | TTLレベル、正論理 1LSB=2 | | | |
| | | 公差上下限出力 | TTLレベル、負論理 | | | |
| | | 受光量アラーム出力 | | | | |
| | | 測定範囲アラーム出力 | | | | |
| | 出力タイミング入力 | | | | | |
| | 50ピン *4 コネクタ | 変位データ出力 | 16bitパラレルNPNオープンコレクタ 負論理 | | | |
| | | | 1LSB=0.01μm | 1LSB=0.02μm | 1LSB=0.2μm | 1LSB=0.5μm |
| | | 受光量データ出力 | 16bitパラレルNPNオープンコレクタ 負論理 1LSB=2 | | | |
| 出力タイミング入力 | | TTLレベル、負論理 | | | | |
| コントロー ル入出力 | 制御入力 | ホールドタイミング入力 | 無電圧入力 (有接点、無接点) | | | |
| | | オートゼロ設定/解除入力 | | | | |
| | | プログラム切換入力 | | | | |
| | | 1CH/2CH切換入力 | | | | |
| | 制御出力 | 公差上下限出力 | NPNオープンコレクタ 最大100mA (30V以下) | | | |
| | | 受光量アラーム出力 | | | | |
| | | 測定範囲アラーム出力 | | | | |
| 制御入力 | レーザーリモート入力 | 無電圧入力 (有接点、無接点) | | | | |
| インターフェース | RS-232C | 変位/受光量データ出力及び制御入力(ボーレート75~19200bps可変) | | | | |
| | GP-IB *5 | 変位/受光量データ出力及び制御入力 | | | | |
| 安定度 (±5℃) *6 | | ±0.2% of F.S. | | ±0.03% of F.S. | | |
| 定格 | 電源電圧 | AC100~240V ±10% 50/60Hz (コントロールユニット部のみで使用する場合DC±15V ±3% 各0.5A、+5V ±5% 3A) | | | | |
| | 消費電力 | 45VA以下 | | | | |
| 耐環境性 | 使用周囲温度 | 0~40℃ | | | | |
| | 使用周囲湿度 | 35~85% RH (結露なきこと) | | | | |
| 重量 | ヘッド | 約500g | | 約250g | | |
| | コントローラ | 約6.8kg (ディスプレイユニットなしの場合約2kg) | | | | |

* 1、2 : 対象物が弊社標準の鏡面体 (LC-2420/2430) あるいは、白色拡散体 (LC-2440/2450) で、平均回数が512回に設定されている場合
 * 3 : コントロールユニット単体の場合のみ使用可能
 * 4、5 : オプション
 * 6 : 標準試料とヘッドを鉄板 (LC-2420/2430) あるいはアルミ板 (LC-2440/2450) に固定したときの値です。(20℃基準)