

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	若材令コンクリートの水和発熱及び乾燥による初期応力に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	堀田久人
Author(English)	HISATO HOTTA
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2340号, 授与年月日:1992年3月31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2340号, Conferred date:1992/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

若材令コンクリートの
水和発熱及び乾燥による
初期応力に関する研究

1992年 1月

堀 田 久 人

謝 辞

本研究を進めるに当り、東京工業大学建築学科教授、工学博士
滝口克己先生には、終始懇切丁寧な御指導を賜りました。厚く御礼
申し上げます。先生には、先生が本学に赴任された昭和60年以来、
修士論文、またその後の研究等を通し、コンクリート系の研究の難
しさや、工学系の論文のあり方など数多くの御教示を戴きました。
重ねて御礼申し上げます。

東京工業大学建築学科教授、工学博士、鈴木敏郎先生には、学部
4年で鈴木敏郎研究室に所属した当初から御指導を戴き、研究の方
法、研究者としてのあり方などを教えて戴きました。ありがとうございました。また、東京工業大学建築学科助教授、工学博士、小河
利行先生には学部時代から現在に至るまで構造問題を解析的に取り
扱う手法について数々の御教示を戴きました。紙面を借り、深く感
謝の意を表します。

また、本論文をまとめるまでの数年の間には、東京工業大学瀧口
研究室、鈴木研究室のの学生諸君に多大な御助力を戴いております。
特に小板橋裕一氏（現日建設計）には、解析プログラムの開発に当
たり、お手伝い戴きました。御礼申し上げます。

さらに、時期を同じくして研究室に所属しておられた諸先輩、特
に元結正次郎氏（工学博士、現東急建設）、宮下真一氏（現東急建
設）、井戸田秀樹氏（工学博士、現名古屋工業大学助手）には、折
りに触れ、励ましの言葉や暖かい御助言を賜りました。厚く御礼申
し上げます。

平成4年3月

目 次

第 1 章 序

- 1. 1 本研究の背景 2
- 1. 2 本研究の目的 5
- 1. 3 既往の研究 7

第 2 章 温度条件、乾燥条件を考慮したコンクリートの 水和反応式

- 2. 1 はじめに 14
- 2. 2 実験概要及び結果 15
- 2. 3 水和反応式 24
- 2. 4 まとめ 32

第 3 章 セメント硬化体の水分拡散係数

- 3. 1 はじめに 35
- 3. 2 セメント硬化体の電気的特性 37
- 3. 3 一面乾燥を受けるモルタルの
含水量分布の推定 49
- 3. 4 拡散係数の含水率および
材令依存性について 57
- 3. 5 まとめ 66

第4章 若材令のセメント硬化体のクリープ特性

4. 1	はじめに	68
4. 2	セメントペーストの引張クリープ特性 および持続荷重の引張強度に対する影響 . . .	70
4. 3	セメントペーストの圧縮クリープ特性 . . .	79
4. 4	まとめ	82

第5章 解析法および解析例

5. 1	はじめに	85
5. 2	温度解析および水分移動解析法	86
5. 3	応力解析法	99
5. 4	解析例	103
5. 5	まとめ	137

第6章 結 論 140

参考文献 146

既発表論文リスト 154

第 1 章

序

1. 序

1. 1 研究の背景

コンクリート構造の力学特性に関する論議は、外乱が作用する以前のコンクリートは、部材内部において均質で一様な力学特性を有しており、外乱が作用してはじめて、ひずみあるいは応力が生じるという前提で行われてきた。過去数十年間に渡るコンクリート構造の研究でこの前提をもとに説明、あるいは、解明されてきた事例は、部材の曲げ理論、せん断強度、断面の終局強度、靱性評価、壁のせん断強度、フレームの耐震性評価等、幅広く、コンクリート工学全般をカバーしており、今日の設計体系もほとんどこの前提のもとに成立しているといっても過言ではない。しかしながら、この前提に基づく理論、推論はほとんど、縮小モデル実験を通じて実証されてきたという経緯があり、実際に存在すると思われるコンクリートがドロドロの状態から硬化していく過程で受ける重力の影響、水和発熱の影響、あるいは乾燥現象の影響によるコンクリートの不均一性を無視したこの前提による論議は、かなりスケールの小さいコンクリートについて成立している論議であるともいえる。

実際、筆者もまた、現在までに行ってきた研究、例えば、鉄骨フープ筋コンクリート構造の部材あるいは接合部の力学特性に関する研究、コンクリートのひびわれを通過しての気体漏洩に関する研究、の中で、従前の前提に基づいた手法を多用しており、縮小モデルを用いたこれらの研究では、鉄骨コンクリート複合材については、柱および接合部のコンクリートと鉄骨の耐力分担等、応力伝達機構を

説明し得るまで、コンクリート壁のひびわれからの気体漏洩問題については、壁厚、壁両端のお圧力差、ひびわれ幅より、かなりの精度で気体漏洩量を推定し得る実験式を提示する段階までの成果をあげている。これらの研究成果は、既に、学会誌等で数編の論文にまとめられているが、これらの成果を一般化して、実構造に適応し得ないのも事実である。例えば、気体漏洩問題に関する研究成果を、原子力施設の隔壁等の長大構造物にそのまま適応し得ない要因は、やはり、コンクリートが硬化していく過程で受ける重力、水和発熱、乾燥により生じるコンクリートの不均一性の不明確さ、すなわち、コンクリートが構造物内に納まったときの、コンクリート自体の性質の不明確さに存する。

この問題、すなわち、縮小モデル実験から得られる成果が、実大しかも、かなり大きな構造物にはそのまま適応し得ないという問題の解決手法として、一極に、実大実験がある。しかしながら、例えば原子力施設等大規模の構造物に対して、実大実験をパラメトリックに行なうことはほとんど現状では不可能であり、たとえこれらの実験成果が得られたとしても、モデル実験結果との差異の検証のためには、前述の初期状態のコンクリートの不均一性の問題が基本的に存在することになる。しかも、このコンクリートの初期状態における不均一性の問題は、一部、例えば、マスコンクリートの温度応力の問題を除いて、ほとんど未解決の問題になっている。

また、特に、このコンクリートの不均一性の問題の中で、不均一収縮、あるいは膨張に関わる応力の問題は、その応力レベルによっては、コンクリート内部に生じるひびわれの問題に直結し、大構造物に限らず、これを解明する意義は大きい。

一方、コンクリートの性質には、骨材配置や空隙等が要因となって生じる不可避なばらつきがある。これまでに述べてきた問題は、このコンクリートのばらつきの中に埋没してしまうのではないかという懸念もある。また、これまでに、このコンクリートの不均一性の問題の究明が見送られてきた背景には「コンクリートは性質が非常にばらつくもの」という通念があったのも事実であろう。しかしながら、少なくとも実験室レベルの縮小モデル実験では、同一条件でされたコンクリートを用いた同一条件の実験結果の差異は極めて小さく、これに対して尚、実構造におけるコンクリートの挙動を正確には推定し得ない事実より、依然として、いわゆるコンクリートの骨材配置、空隙に関わるばらつきとは別に、コンクリートの打設時から硬化していく過程で否応なく持たされてしまったコンクリートの不均一性に関する問題は存在している。

1. 2 本研究の目的

本研究は以上の背景に基づき、コンクリート自体の構造体内における諸性質の内、水和発熱、及び乾燥脱水による初期状態のコンクリートの非均一性、即ち、水和の進行、初期応力を明らかにすることを目的とする。特に、水和発熱、乾燥の問題を取り上げたのは、この2点がコンクリートの初期応力の主要因であると考えられることと、初期応力が、コンクリートが引張応力に対して極めて脆弱な材料であることを考慮すれば、ひび割れの発生条件等、コンクリートの破壊条件に結び付くものであり、初期状態のコンクリートの性質を決定づける最も重要な因子であると考えたことによる。また、乾燥及び水和発熱を同時に考慮して初期状態のコンクリートの内部応力状態に着目した研究はなく、この問題を早急に解決されるべき、重要な課題であると考えている。

次に、この課題の研究手法であるが、コンクリートの比較的小さなスケール内でのひずみ、応力を実験的に測定する手段が今の所ないと思われることと、初期の内部ひずみ、応力状態をスケールの問題も含めて種々の条件のコンクリートについて把握するには実験的に研究を進めるよりもむしろ解析的なアプローチが望ましいことから、コンクリートの微小体積における乾燥、温度による微小体積ひずみ増分から、連続体理論に基づき、適合するひずみ分布を求めるという解析的手法による。この場合、解析解の正当性を直接的に検証し得る手段がないことが問題ではあるが、解析手法が適当な仮定、理論を基に構成されていること、及び、解析に用いる諸物理定数が、

実際のコンクリートの材料的性質に即したものであることを条件に、解析解の妥当性は保証されるものと考える。

尚、解析は、水和発熱による温度解析、乾燥による脱水量分布に関する解析、内部応力解析の3つよりなるが、それらはいずれもコンクリートの時間依存性の材料特性の変化という非線形性を伴うので、電算機による数値解析的手法を用いた。

1. 3 既往の研究

本節では、本研究に関連深い既往の研究成果として、コンクリートの水和の進行に関する研究、温度応力に関する研究、コンクリートの乾燥収縮に関する研究、及び、コンクリートのクリープに関する研究の4点について概観する。

コンクリートの水和の進行に及ぼす温度及び、乾燥の影響に関する研究

コンクリートの水和は、化学反応であることから温度による影響が著しいのは当然であり、養生温度の影響に関する研究の歴史は長い。1950年代当初は、型枠を脱型し得るだけの必要強度、あるいは構造体として機能し得る強度を発現するまでの養生期間を特定する必要性から、若材令時のコンクリートの養生温度と強度発現の関係が多く調べられた。^{5) - 9)} これらの研究成果は、積算温度方式として、現在、コンクリートの調合設計時に重要な役割を担っている。当時、コンクリートの最も重要な性質は、現在もそうであるが、圧縮強度であり、多くの研究が、圧縮強度とあるファクター（例えば材令、温度、湿度等）との関係を調べるという図式で行われたのも当然のことといえる。その後、水和の進行を表す指標として、より直接的に結合水率や結合セメント率が測定されるようになると、これらが圧縮強度を含むコンクリートの諸物性値を一義的に決定するという考え方が一般的になり、水和率とコンクリートの諸物性値を結び付ける研究が主流となった。³⁾ 例を挙げれば、仕入、地濃ら

の研究^{4), 10), 11)}がある。現在もコンクリートの水和の進行に関する研究はその延長線上にあるといえる。

さて、本研究は、解析的手法を取る以上、任意材令、任意温度条件、任意乾燥条件下のコンクリートの水和過程を、時間、温度、及び乾燥度合（本論文では含水量を用いる）の関数として具体的に定式化する必要がある。具体的に水和の進行を定式化した過去の研究成果としては、次の3つが本研究と最も関連深い。

Bazantら²⁶⁾は、水和の進行を表す指標をある基準温度、相対湿度 100% 下のコンクリートの材令におき、任意温度、任意相対湿度下の水和の進行過程を、材令に温度による影響係数、湿度による低減係数を掛け合わせた有効材令で表した。この手法は、過去、コンクリートの諸物性値が材令との関係で議論されてきたことを考えれば、解析に資するには至便な手法である。

一方、反応速度は、未反応物質の量に比例するという反応速度論に基づき定式化を行った例としては、河角ら²⁾、永松ら¹⁾の手法がある。河角らは水和反応速度に対する温度の影響を実験的に調べ、かなりの長期材令にわたる結合水量の推移の定式化を行った。この式は、終局時には、調合時の水あるいはセメントが完全に反応するまで水和反応が進行するものとして定式化が施されている。これに対し、永松らは、実用性を意識し、簡便な形で乾燥を受けるコンクリートの水和反応速度の定式化を行っている。永松らの式では、新たに終局結合水量なる概念を導入し、ある材令を過ぎると未水和物

を含むにも関わらずコンクリートの水和が見かけ上停止するような現象を、反応速度係数を材令、あるいは水和の進行度合により低減することなく、水和反応式を結合水量と時間の関係で表している。

温度応力に関する研究

コンクリートの温度応力の問題は、大きなスケールのコンクリート工事をせまられる土木構造物のコンクリート施工の場で主に取り上げられている。コンクリートのクリープ構成式のとり方、ひび割れ発生条件の設定法に今だに問題を残していると思われるが、土木学会のコンクリート標準示方書の施工編⁵⁾に明記されるごとく、マスコンクリートのうち、重要構造物においては、温度応力解析を行い、温度ひび割れの発生を抑制することが義務づけられるまでに至っている。温度解析自体は、Fourierの熱伝導方程式に基づいた熱拡散解析であり、これに用いられるコンクリートの水和発熱量、熱伝導率、熱伝達率についても既に研究され尽くした感がある^{12), 20), 21)}。もっとも、コンクリートの水和発熱量に関していえば、断熱温度上昇量^{22), 23)}という実験データに基づくものが用いられており、実際の水和の進行状態との関連づけが行われていないという問題もある。これらの研究の主流は、田辺、梅原、あるいは小野らの研究にみられるごとく、温度解析後の応力を求める段階においてのクリープ構成則の取扱の方に移ってきており、さらに応力とひび割れ発生条件という問題も重なり、この2点が現在の重要課題になっているものと思われる。(他、文献13)～19), 24))

但し、いずれの研究も、マスコンクリートを対象としており、乾燥との関連を論じた論文がないのが現状である。

乾燥収縮に関する研究

コンクリートの乾燥収縮ひずみと解析的に扱った研究としては古くは1946年のPickettの論文²⁵⁾がある。この論文では、コンクリート中の水分移動が熱伝導と同様の法則に支配されるとして、拡散方程式により、コンクリート中の水分分布を解析している。また乾燥収縮ひずみは脱水量に比例するという仮定と、コンクリートの応力ひずみ関係が弾性であるという仮定の基に、乾燥応力が求められている。

その後の研究により、乾燥収縮ひずみと脱水量の関係が比例関係ではないことが明らかにされてきた。それらによれば、乾燥収縮ひずみと脱水量の関係は、およそ次のように説明できる。即ち、コンクリート中のキャピラリー水が脱水する際の乾燥収縮率は、ゲル水脱水時の乾燥収縮率に比してかなり小さいということである。また、コンクリート中の水分移動を純粹には拡散現象として捉えきれないことも次第に明らかにされ、拡散係数に材令依存性、含水状態依存性を取り入れた非線形拡散方程式による水分移動の解析法がBazantや永松、佐藤らによって提示されてきている。上記の2文献は、本論文との関連が最も深いので詳述すればおよそ次のような問題を含んでいるものと思われる。

まず Bazant²⁶⁾ は、コンクリートの空隙内相対湿度が拡散方程式に従うとして解析を行っている。乾燥条件は通常外気の相対湿度におかれ、コンクリート内部の空隙相対湿度が外気の相対湿度に釣り合うまで乾燥が進行するであろうと考えられるので、乾燥収縮の基本変量を空隙相対湿度におくことは適当であると思われる。しかしながら、乾燥収縮ひずみはほとんど脱水量、含水量との関係で議論されてきており、空隙相対湿度を直接乾燥収縮ひずみと結び付けることは困難である。また、永松、佐藤らの研究^{27) - 29)} の場合は上記のことを踏まえ、基本変量を含水量という直接的に収縮ひずみを言及し得るものにおいているが、拡散係数の非線形性については含水量と空隙相対湿度の関係を介して、Bazantの空隙相対湿度を基本変量とした拡散係数を流用している。温度の影響についても全く触れられていない。いずれの研究においてもコンクリートの含水量と空隙相対湿度の関係の一般化が必要であるが、これに関する研究結果^{35) - 38)} にも相当の差異がみられ、必ずしも一般化されていないのが現状である。

このように、コンクリートの乾燥収縮応力の解析という分野では、水分移動を非線形拡散方程式により解析するという方向では、一応の見解の一致をみているが、拡散係数の材令依存性、含水量依存性の一般化はいまだに行われていない。

コンクリートのクリープに関する研究

温度応力解析の既往の研究でも述べたとおり、温度膨張、乾燥収

縮により生じたひずみと応力を結び付ける構成方程式には、コンクリートの材料特性上、クリープを考慮する必要があると考えられている。

最近の研究について概観すると、多軸応力下のクリープ性状が石川、松下^{47)・48)}、岡島⁵⁰⁾らにより、また変動応力下でのクリープ性状が鈴木⁴⁹⁾により、さらに水和過程にあるコンクリートのクリープ性状が永松、佐藤^{41)・44)}らによって報告されている。これらはいずれもコンクリートの初期応力解析においては関連の深い研究である。

第 2 章

温度条件、乾燥条件を考慮した
コンクリートの水和反応式

2. 温度条件、乾燥条件を考慮したコンクリートの水和反応式

2. 1 はじめに

コンクリートの水和反応速度が温度条件、乾燥条件に左右されることは周知の事実である。これら、温度条件、乾燥条件による影響は、構造体内のコンクリート強度の差異として現れるばかりでなく、初期応力を求める上でも重要である。温度解析における発熱量にはコンクリートの水和と密接な関係があることはもちろん、次章以下で述べる温度解析、乾燥解析、応力解析に用いられるコンクリートの諸物性値が全てコンクリートの水和の程度により変化するものと考えられるからである。従って、コンクリートの初期応力解析を行うに当たっては、任意温度、任意乾燥条件下におけるコンクリートの水和反応の度合の定式化が必要不可欠である。

本章では、実験的に温度条件、乾燥条件を変えたコンクリートの水和反応を調べた結果を述べると共に、解析に資するに簡便な形で定式化した任意温度条件下、任意乾燥条件下における水和反応式を提示する。この水和反応式は、最近の研究の多くがそうであるように結合水量を基に定式化が施されている。

2. 2 実験概要及び結果

供試体は、 $5\text{ cm } \phi \times 10\text{ cm h}$ の円柱で、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 (W/c) 30%、および50%のセメントペーストである。本来、供試体にはコンクリートを用いて議論を進めるのが適当であろうが、コンクリートの場合、骨材の影響により計測するヤング係数、強度等のデータのばらつきが大きくなる、骨材の表面水量の正確な算定が困難である等の理由で本実験ではセメントペーストを用いている。また、水和反応速度という観点では、骨材の影響はほとんど無視できるものと考えている。

実験は、水和反応に及ぼす温度の影響を調べる実験、硬化後の含水量の影響を調べる実験の2シリーズよりなっている。水和の程度を表す指標として、結合水量、ヤング係数、一軸圧縮強度の測定を行った。いずれのシリーズも供試体は鋼製型枠に打設後、表面をラップでくるみ、6時間室温（約22℃）で型枠内養生した後脱型した。脱型後、温度の影響を調べる実験では温度が、5℃、15℃、22℃ ($W/C=50\%$)、24℃ ($W/C=30\%$)、30℃、40℃、50℃の水中で養生し、含水量の影響を調べる実験では一定時間温度22℃の真空乾燥器で水分を散逸させ、その後試験材令まで室温（約22℃）でラップによるシール養生を行った。

乾燥時間及び脱水量 (w_d)、含水量 (w) の関係を表2.2.1及び表2.2.2に示す。 w/c は、乾燥後の見かけの水セメント比、 w/W は初期練り混ぜ水量に対する含水量の割合である。試験材令は、1、

2、3、7、14日とした。ヤング係数は、一軸圧縮試験の荷重・変形関係より求めた初期接線剛性、結合水量は、破碎した供試体を炉内温度105℃の乾燥炉に重量変化がなくなるまで入れ、その時の重量からセメント重量を差し引いたものである。

図2.2.1から図2.2.4に材令とヤング係数の関係を示す。水セメント比に関わらず温度が高いほど、また含水量が多いほど同材令におけるヤング係数は大きい。乾燥により含水量が少なくなった供試体ではヤング係数がある材令で頭打ちになっている。

図2.2.5および図2.2.6に結合水量とヤング係数の関係を示す。縦軸は結合水量とセメントの重量比である。結合水量とヤング係数の関係は、温度条件、含水量によらず、水セメント比毎にほぼ直線関係となっている。式で表せば、次式となる。

$$w_n/c = 3.72 \times 10^{-4} E + 5.13 \times 10^{-2} \quad (W/c=30\%) \quad (2.1)$$

$$w_n/c = 6.56 \times 10^{-4} E + 9.93 \times 10^{-2} \quad (W/c=50\%) \quad (2.2)$$

図2.2.7および図2.2.8に材令と圧縮強度の関係の一例を示す。強度もヤング係数とほぼ同様の性状を示しているが、全体的にばらつきが大きくなっている。また一般に高温で養生したコンクリートは初期強度の発現は早い、材令が4週程度から、通常の養生による強度を下回るという事実も認められており⁵⁷⁾、水和の進行を表す指標と言い難い部分もあるので、以下では、ヤング係数を水和の進行

を表す指標とし、論を進めることとする。

表2.2.1 乾燥時間と脱水量の関係 (W/c=30%)

	W(g)	c(g)	w _d (g)	w(g)	w/c(%)	w/W(%)
In water	95	315	-9.6	104.6	33.2	110.1
Sealed curing			1.3	93.7	29.7	98.6
5 hours			14.8	80.2	25.5	84.4
10 hours			24.7	70.3	22.3	74.0
19 hours			32.3	62.7	20.0	66.0
42 hours			43.7	51.3	16.3	54.0

表2.2.2 乾燥時間と脱水量の関係 (W/c=50%)

	W(g)	c(g)	w _d (g)	w(g)	w/c(%)	w/W(%)
In water	117	233	-6.8	123.8	53.1	105.8
Sealed curing			0.8	116.2	49.9	99.3
4 hours			13.3	103.7	44.5	88.6
16 hours			26.7	90.3	38.8	77.2
24 hours			42.6	74.4	32.0	63.6
41 hours			60.1	56.9	24.4	48.6

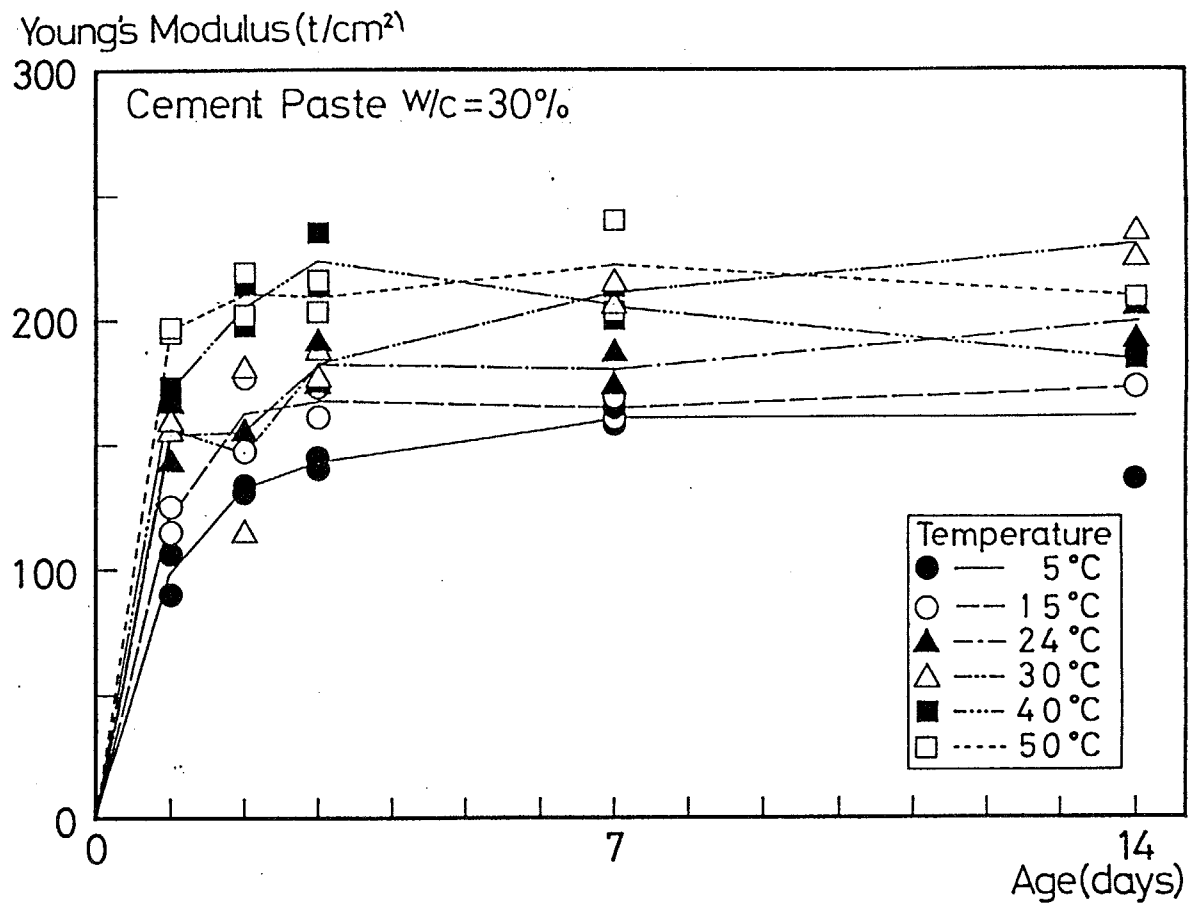


図2.2.1 異なる温度条件下における材令とヤング係数の関係 ($W/c=30\%$)

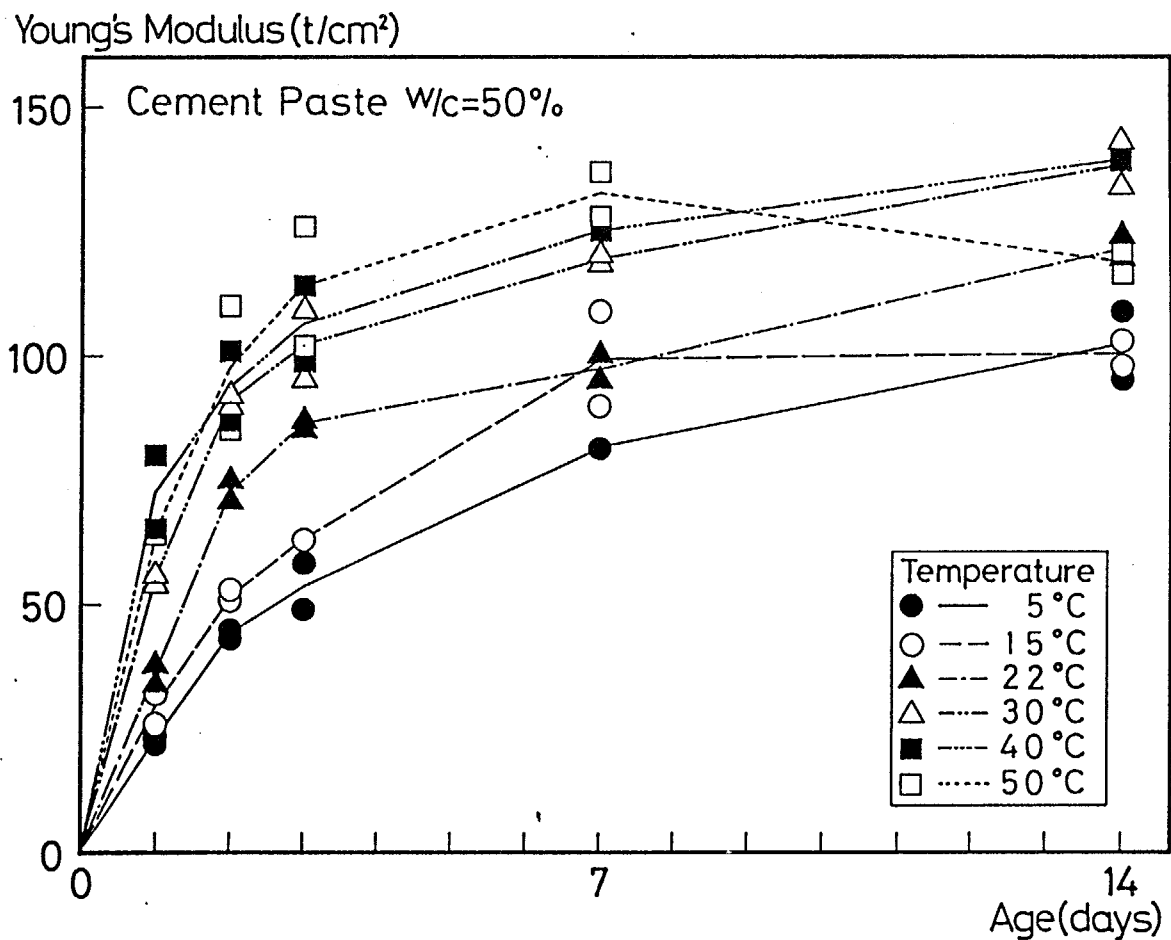


図2.2.2 異なる温度条件下における材令とヤング係数の関係 ($W/c=50\%$)

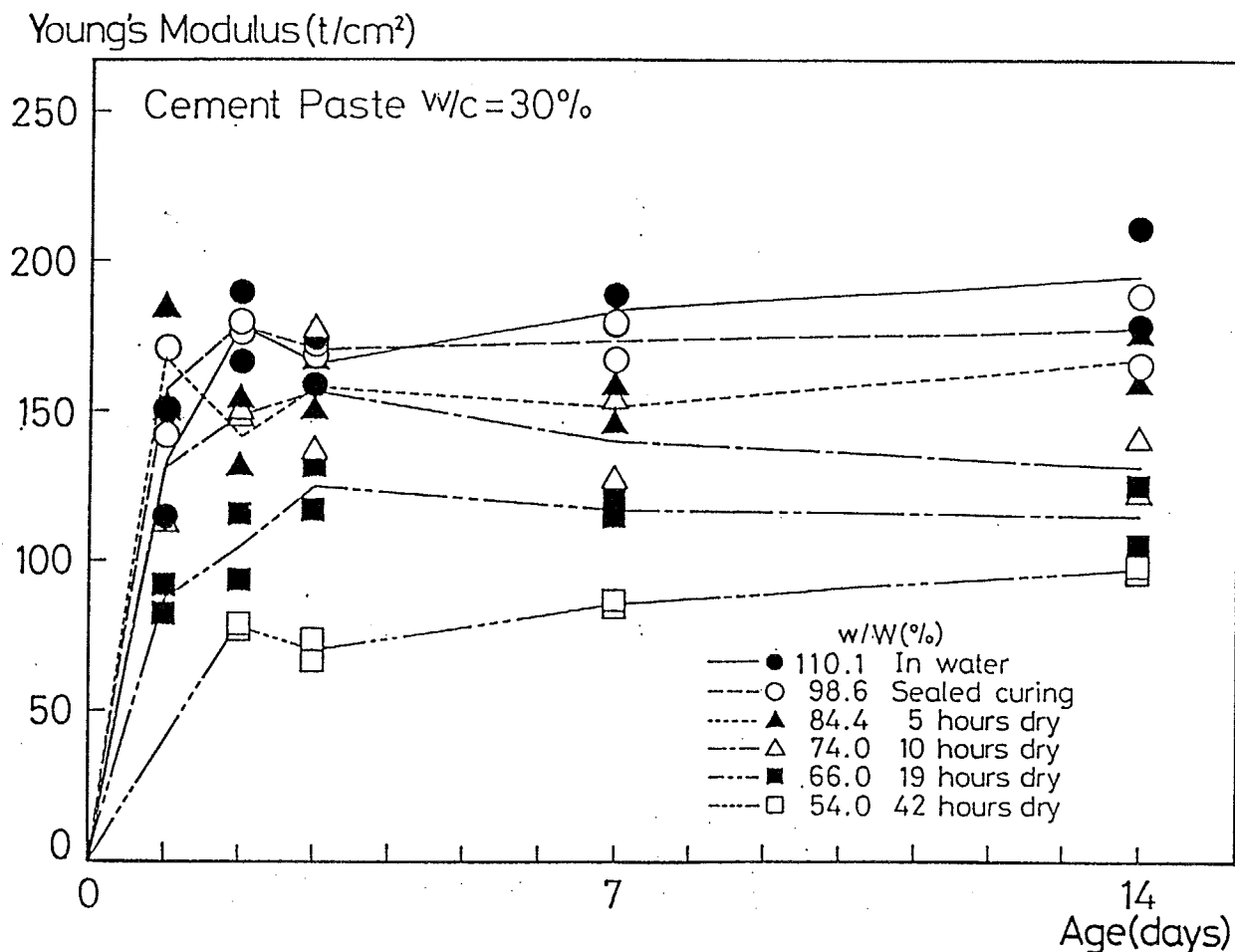


図2.2.3 種々の含水状態における材令とヤング係数の関係 (W/c=30%)

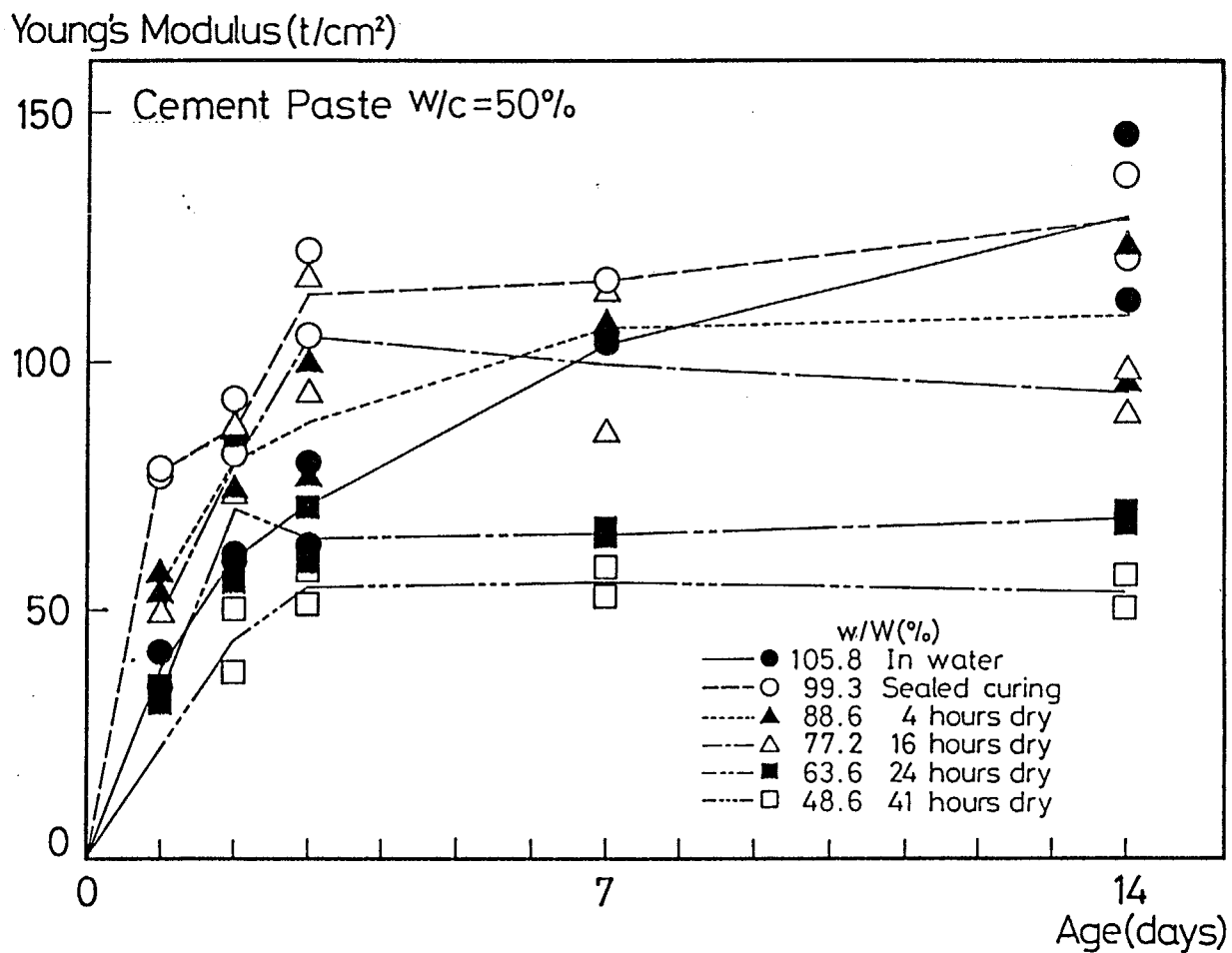


図2.2.4 種々の含水状態における材令とヤング係数の関係 (W/c=50%)

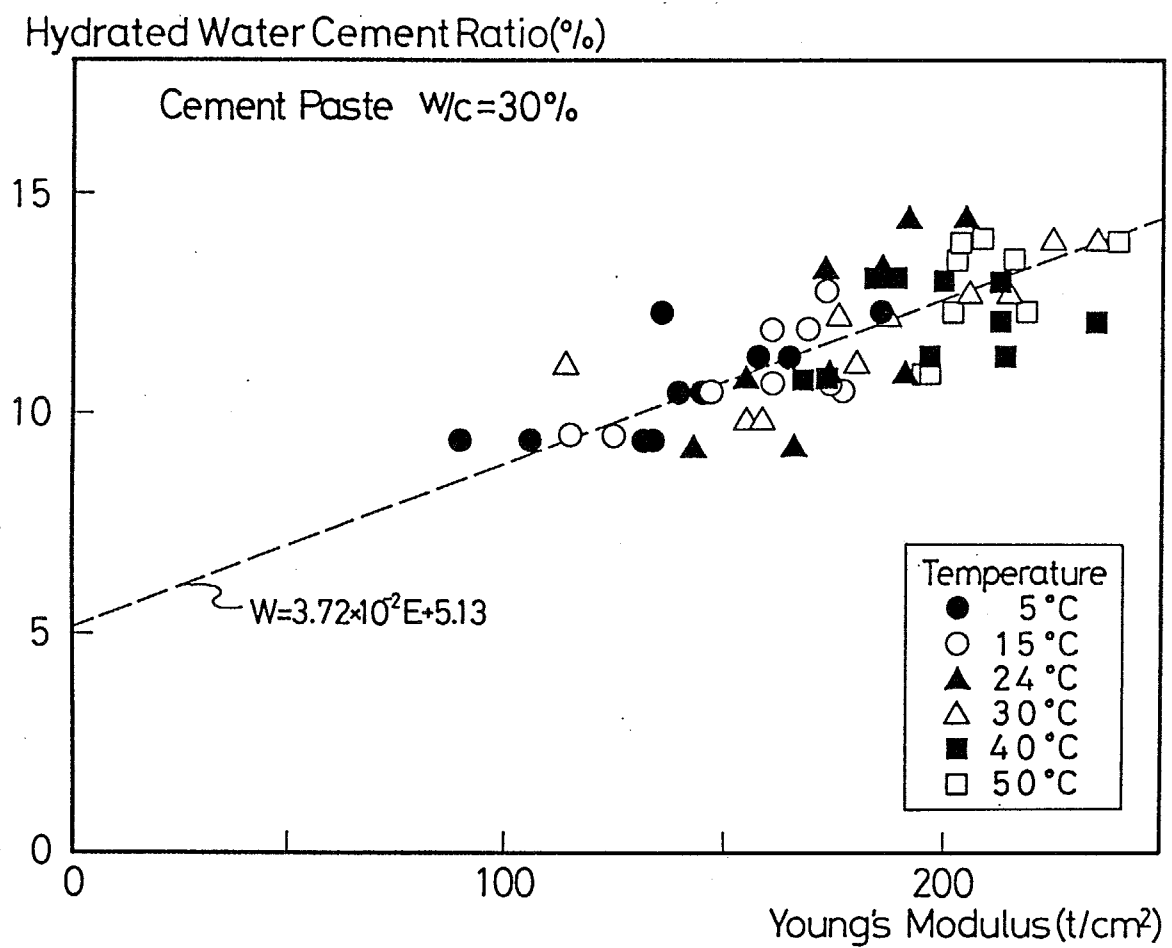


図2.2.5 ヤング係数と結合水率の関係 (W/c=30%)

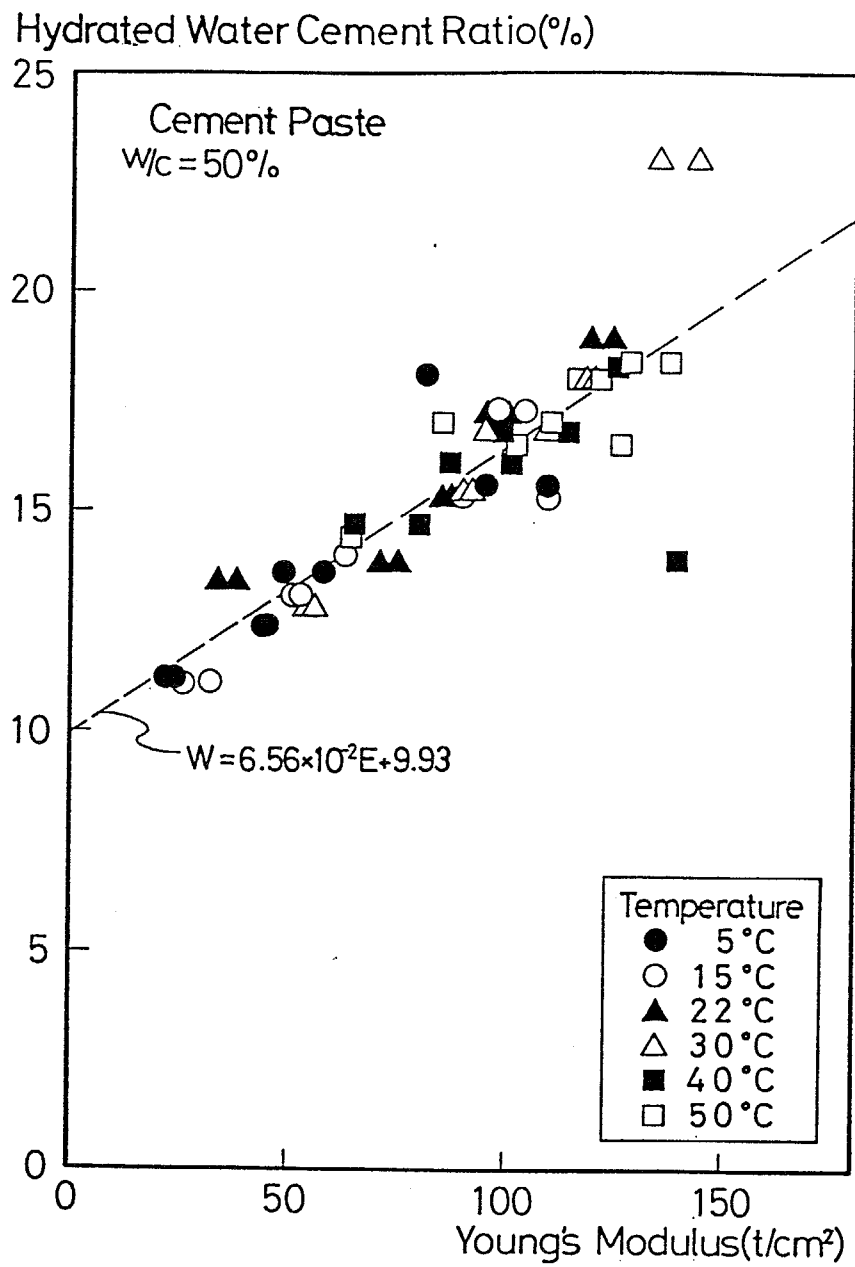


図2.2.6 ヤング係数と結合水率の関係 (W/c=50%)

Compressive Strength(kg/cm²)

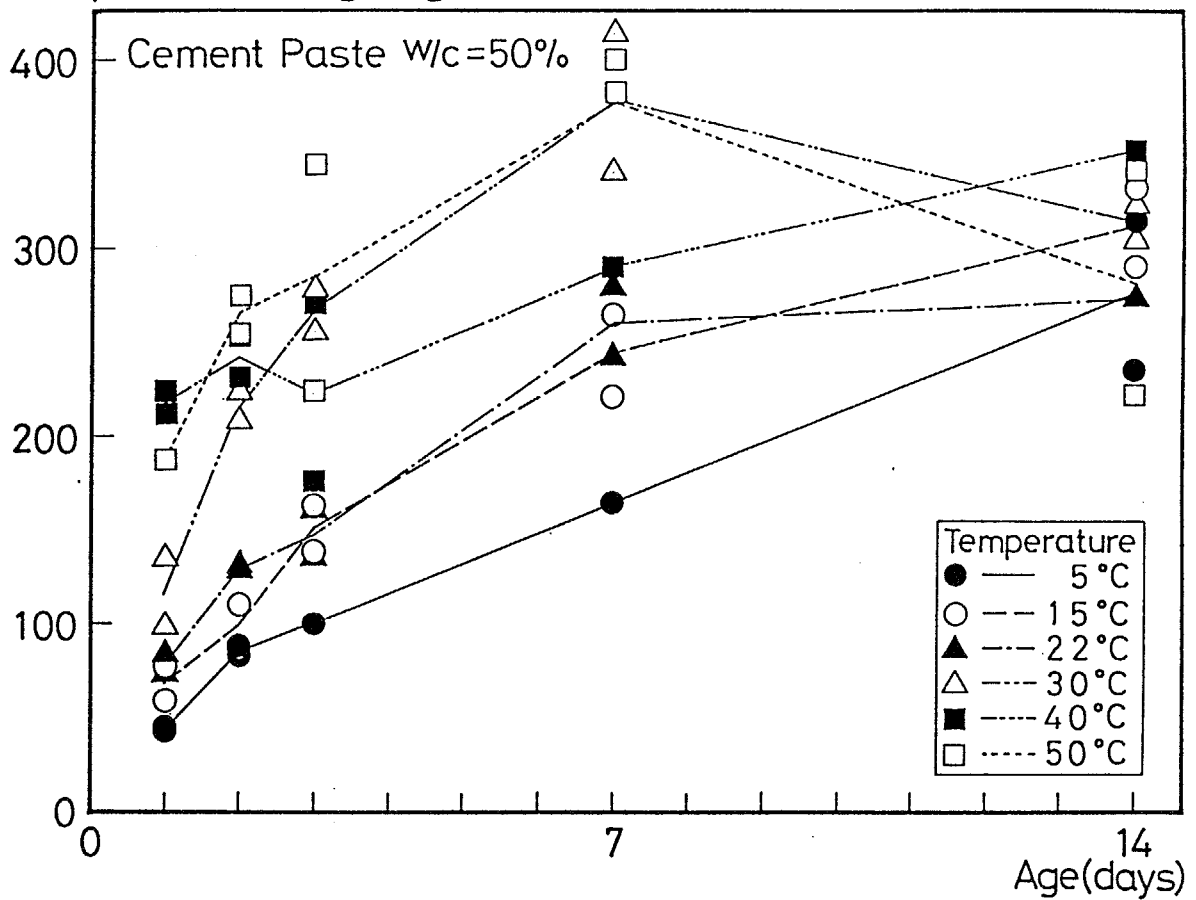


図2.2.7 異なる温度条件下における材令と圧縮強度の関係 (W/c=50%)

Compressive Strength(kg/cm²)

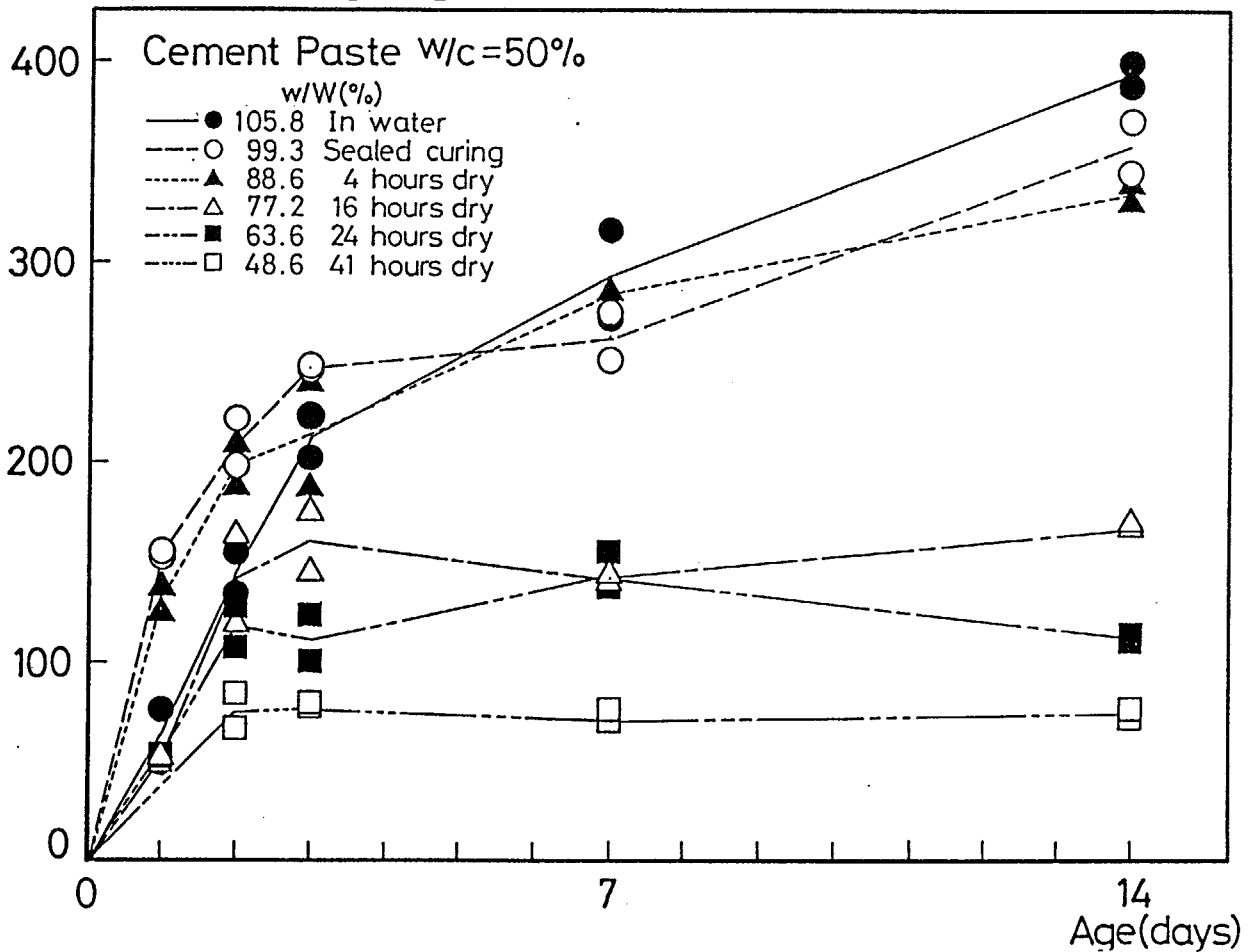


図2.2.8 種々の含水状態における材令と圧縮強度の関係 (W/c=50%)

2. 3 水和反応式

反応物質の時間的増加量は未反応物質の量に比例するという反応速度論を結合水量に用いると、結合水量 w_n は次式で仮定できる。

$$\frac{d w_n}{d t} = a \cdot (W_n - w_n) \cdot (C_n - c_n) \quad (2.3)$$

ここで結合セメント量 c_n は、完全結合水セメント比 α を介して、

$$w_n = \alpha \cdot c_n \quad (2.4)$$

の関係がある。完全結合水セメント比は25%程度^{5,6)}と言われている。本論文では、水和反応速度式が簡便な形で表されるように $C_n = \alpha \cdot W_n$ を仮定した。この仮定から(2.3)式を変形すれば次式を得る。

$$\frac{d w_n}{d t} = a' \cdot (W_n - w_n)^2 \quad (2.5)$$

(2.5)式を $t = 0$ で $w_n = 0$ の条件で解くと、

$$w_n = \frac{W_n \cdot t}{t + \frac{1}{a' \cdot W_n}} \quad (2.6)$$

となる。

(2.6)式の a' および W_n を実験結果より最小自乗法で回帰し、反応速度式を求めた。最小自乗法に用いた実験データは測定したヤング係数を(2.1)式、(2.2)式で結合水量の形に変換したものである。また、この際反応速度係数 a' は温度のみの関数、最終結合水量 W_n は含水量のみの関数であると仮定した。

養生温度 30°C 、 40°C で42日間養生したセメントペーストの結合水量を測定したところ、いずれの養生温度においても水セメント比30%のセメントペーストで結合水量セメント重量比15%、水セメント比50%のペーストで22%であったので、これを水中養生時における最終結合セメント量 W_n とし、養生温度をパラメータとした実験データを用いて反応速度係数 a' を回帰した結果を図2.3.1に示す。図中の実線、破線は文献[26]に示される温度に関する材令の低減係数 β_T を用いて、基準温度を、 22°C ($W/C=50\%$)、 24°C ($W/C=30\%$)としたときの反応速度係数を示している。式で表せば次式となる。

$$\beta_T = \exp \left(\frac{Q_h}{R T_0} - \frac{Q_h}{R T} \right) \quad (2.7)$$

$$a'(T) = a'(T_0) \cdot \beta_T \quad (2.8)$$

$$Q_h / R = 2500 \text{ K}$$

$a'(T_0)$: 基準温度における反応

速度係数の実験値

図より反応速度係数に及ぼす温度の影響は、ほぼ(2.7)、(2.8)式で表し得るといえる。

次に、温度22℃における反応速度係数を用いて、含水量をパラメータとした実験データより、最終結合水量 W_n を回帰した結果を図2.3.2に示す。横軸は、乾燥後の供試体の含水量セメント重量比(%)を、縦軸は最終結合水量セメント重量比(%)である。図中の実線は、水とセメントの結合比率を25%とし、調合時の水あるいはセメントが完全に消費されるまで水和が進行すると仮定した場合の最終結合水量を示す。実験結果より最終結合水量に及ぼす含水量の影響はほぼ図中破線で示した次式で表し得る。

$$W_n/c = -\frac{0.090}{w/c+0.31} + 0.29 \quad (W/c=30\%) \quad (2.9)$$

$$W_n/c = -\frac{0.122}{w/c+0.34} + 0.36 \quad (W/c=50\%) \quad (2.10)$$

図2.3.3から図2.3.6に、(2.6)式から(2.10)式を用いて計算した結合水量と、測定した結合水量を比較した結果を示す。図2.3.3が水セメント比30%、図2.3.4が水セメント比50%で温度による比較を行ったもの、図2.3.5が水セメント比30%、図2.3.6が水セメント比50%で含水量による比較を行ったものである。全体的に若材令時、即ち結合水量の小さいところで計算値が測定値を下回り、材令が進むとその関係が逆転する結果となっている。これは、水和反応速度式に(2.6)式という簡単な形の式を用いたためであり、水セメント比の小さい領域では水和反応速度式にさらに検討の余地を残す

ものの、通常のコンクリートの水セメント比（４５～６０％）では、
(2.6)式でも十分に水和の進行状態を表し得るものと考ええる。

結局、任意温度、任意含水量のコンクリートの水和反応速度は次
式で表せる。

$$\frac{d w_n}{d t} = a'(T) \cdot (W_n(w) - w_n)^2 \quad (2.11)$$

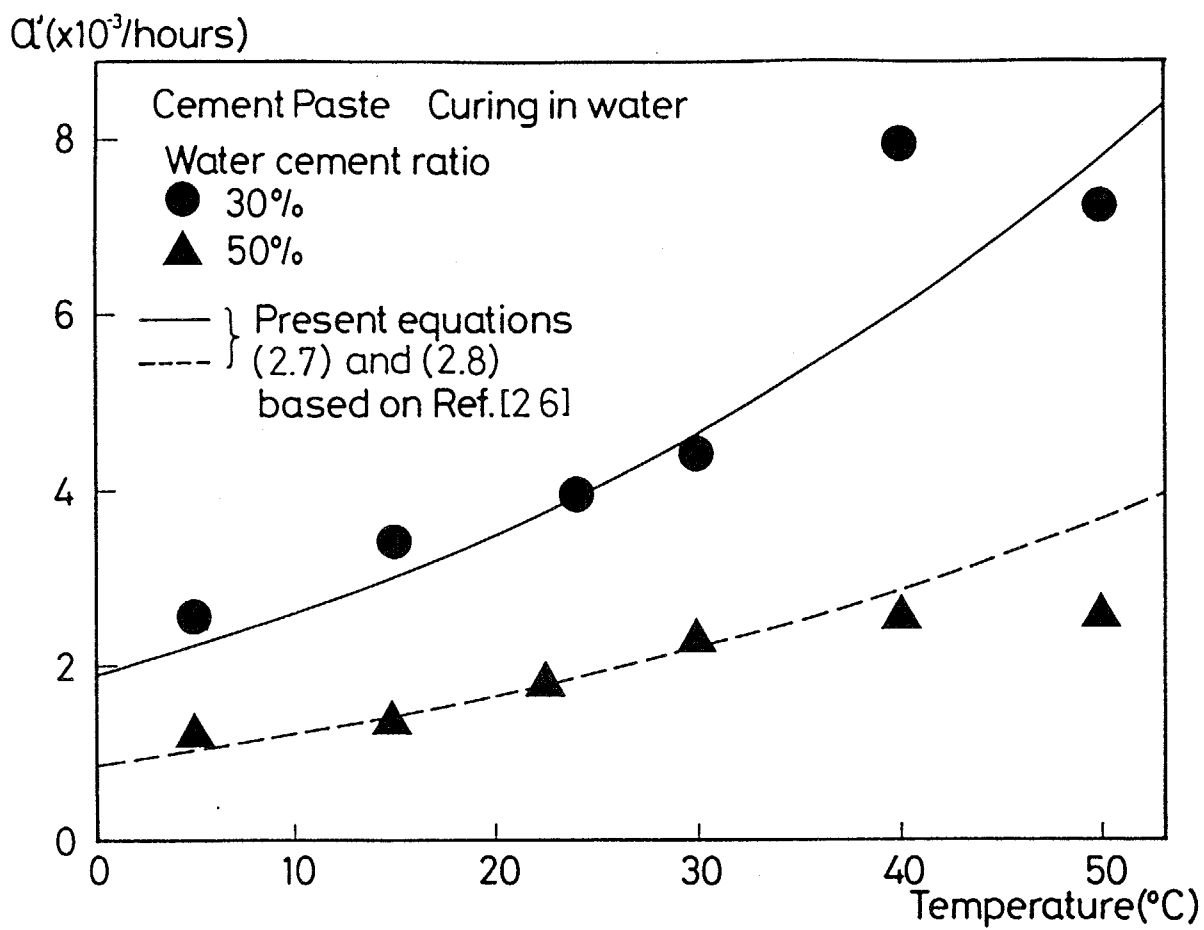


図2.3.1 反応速度係数の温度による変化

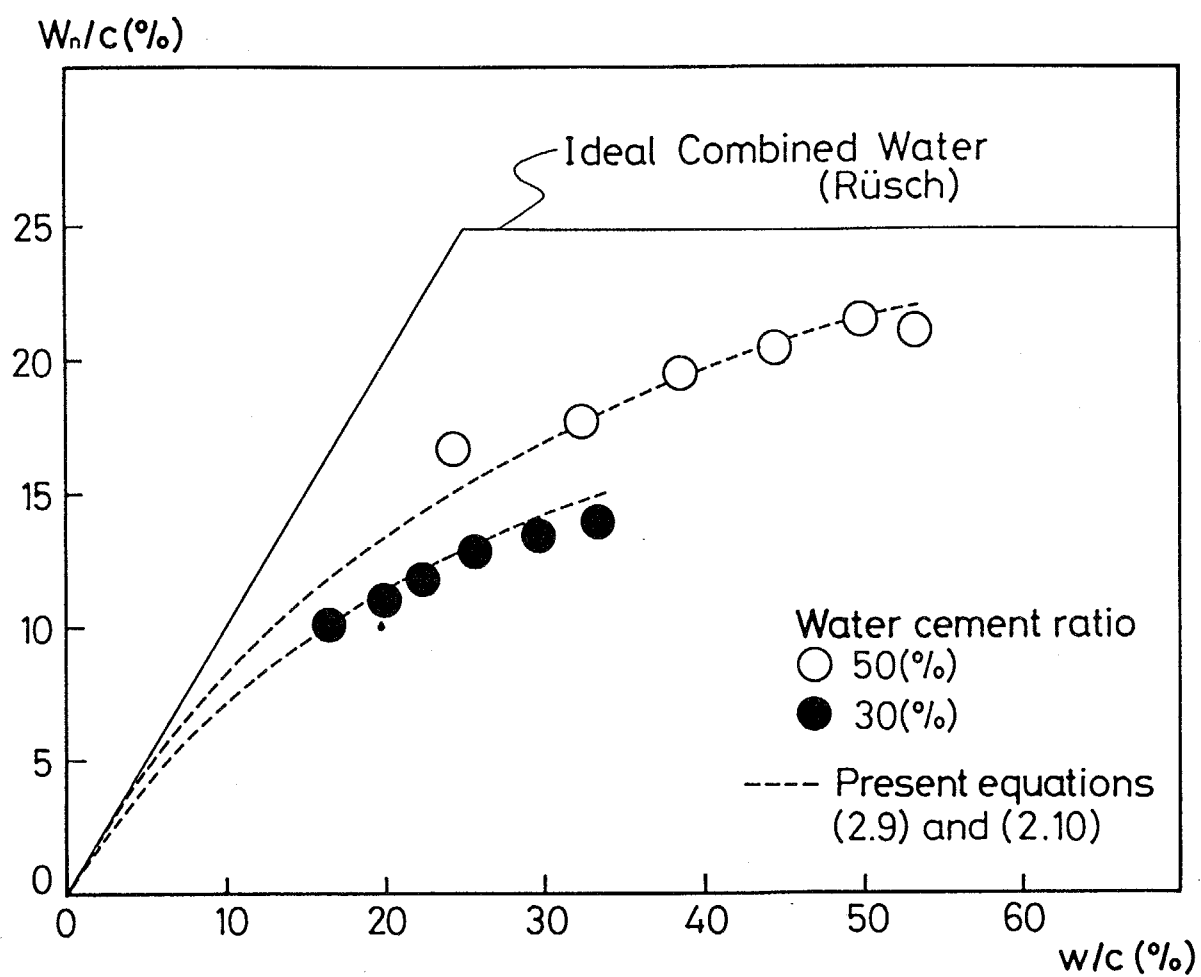


図2.3.2 種々の含水状態におけるセメントの最終結合水量

cal. Hydrated Water Cement Ratio(%)

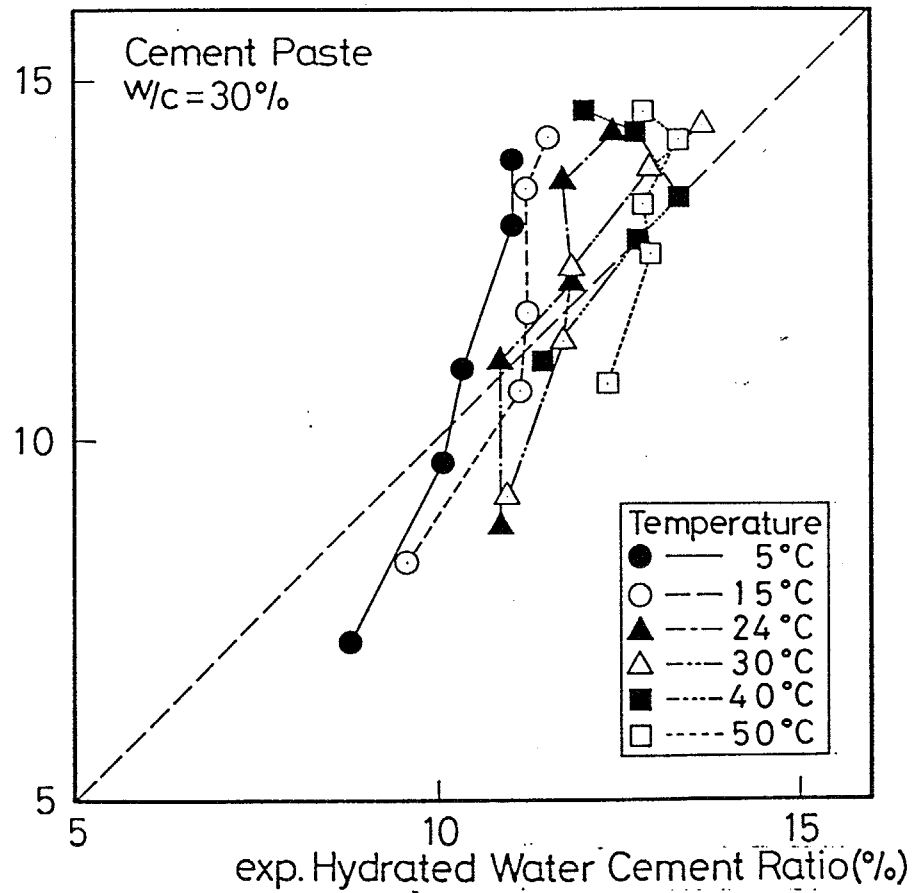


図2.3.3 結合水量の実験値と計算値の比較

cal. Hydrated Water Cement Ratio(%)

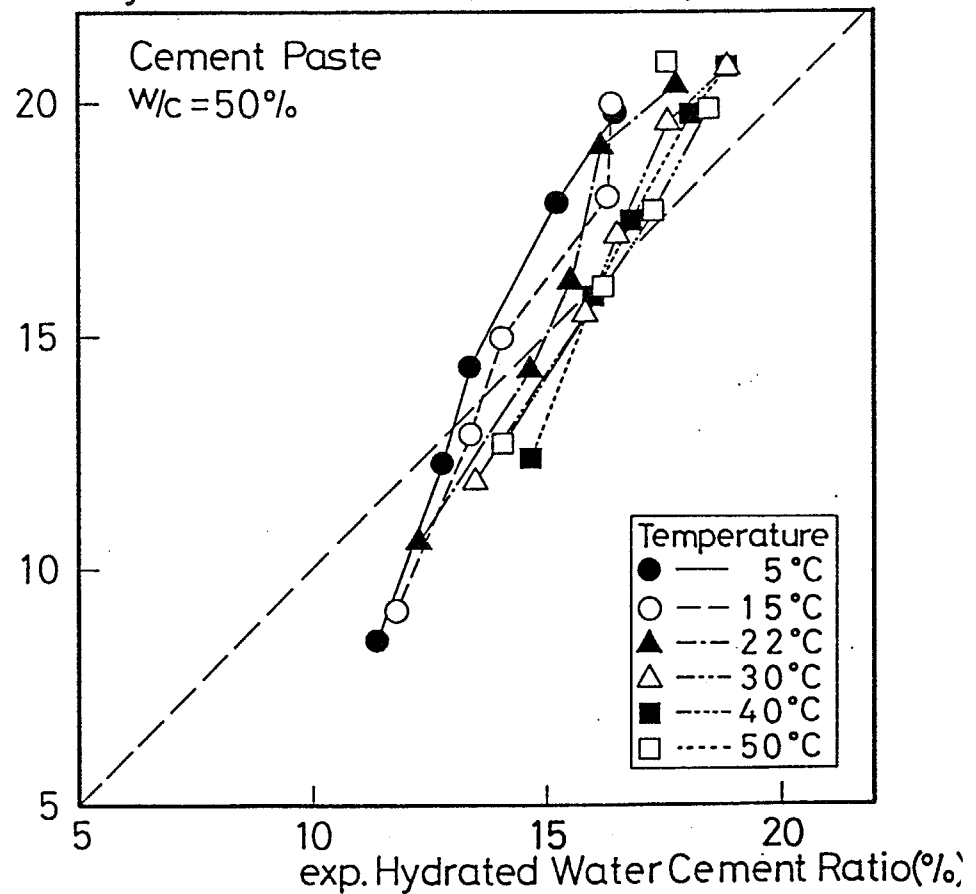


図2.3.4 結合水量の実験値と計算値の比較

cal. Hydrated Water Cement Ratio(%)

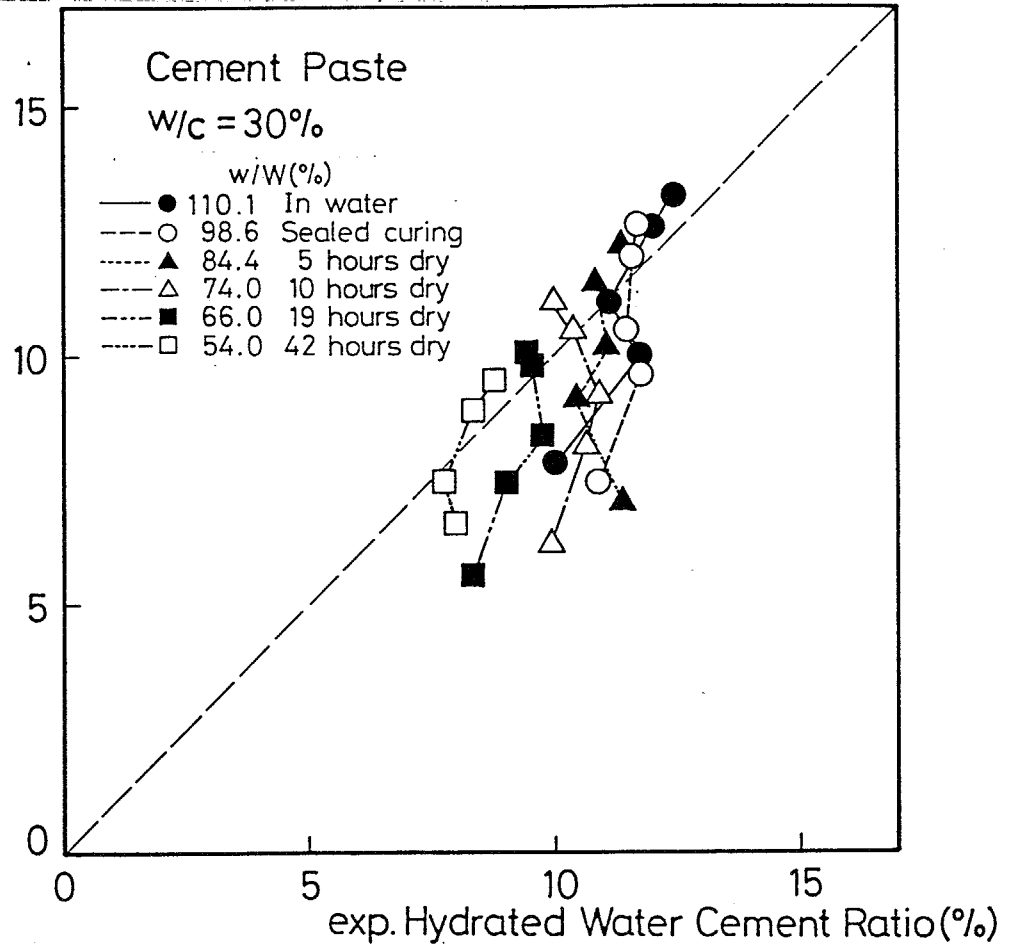


図2.3.5 結合水量の実験値と計算値の比較

cal. Hydrated Water Cement Ratio(%)

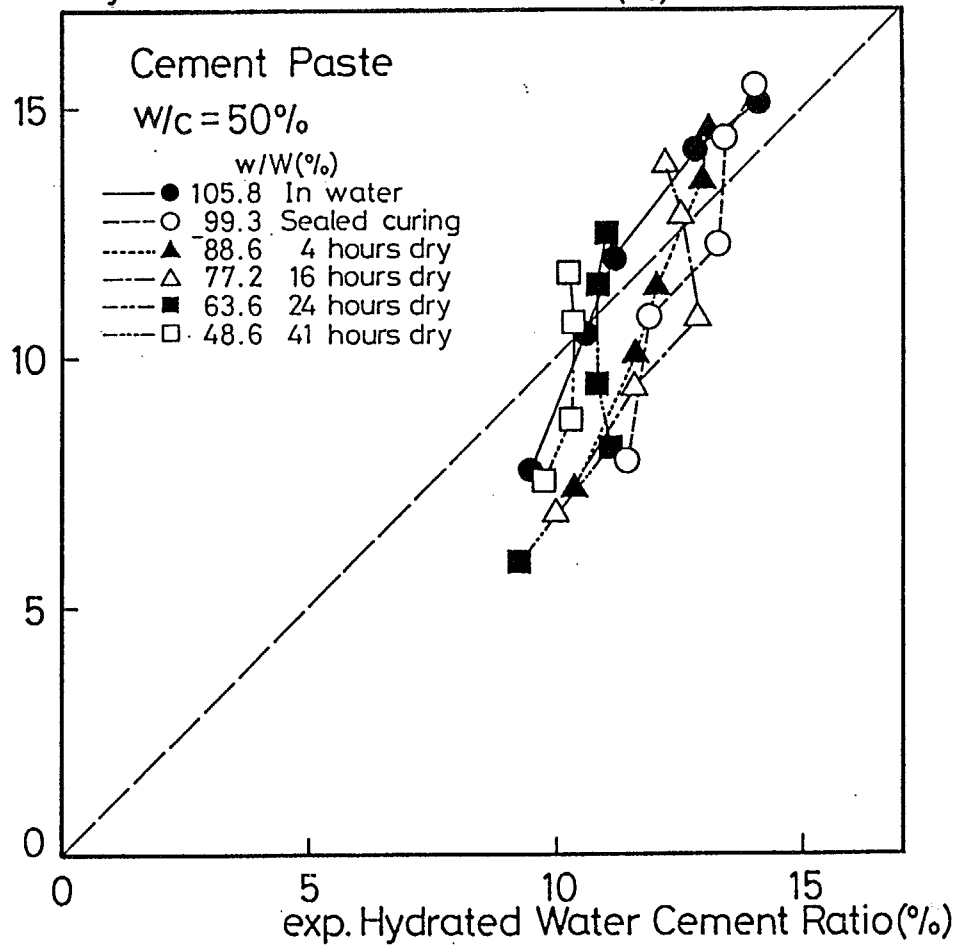


図2.3.6 結合水量の実験値と計算値の比較

2. 4 まとめ

極めて限られた範囲ではあるが、水セメント比30%及び50%のセメントペーストについて、異なる温度条件（5℃～50℃）、含水状態（初期練り混ぜ水量に対する含水量比で50%～100%）下における結合水量、ヤング係数圧縮強度を調べる実験を行った。また、実験結果を用いてセメントペーストの水和反応式を解析に資するに簡便な形で定式化した。第2章で得られた知見を要約して以下に示す。

- (1) ヤング係数はデータのばらつきも比較的少なく、結合水量との対応も良好であり、セメントペーストにおいては、水和の進行を表す指標となり得る。また、ヤング係数と結合水量の関係は、ほぼ1次関数式で表せる。
- (2) 反応速度論に基づき、(2.6)式を用いて実験結果を整理すると温度の反応速度係数に対する影響は、(2.7)式及び(2.8)式によって表せる。
- (3) 乾燥により水和反応速度が低下する現象は、最終結合水量を乾燥の程度によって低減することで表現できる。このとき、含水量と最終結合水量の関係は、ほぼ(2.9)式及び(2.10)式で表現できる。
- (4) (2.6)式という簡単な形で、材令と結合水量の関係を表した場合、低水セメント比のセメントペーストでは、実験結果と相当

の差異が見られるが、通常のコングリートの水セメント比付近では、実験結果との対応はほぼ良好である。従って、水和の進行に及ぼす骨材の影響は小さいという仮定の基に(2.11)式をコングリートの水和反応式とすることができる。

第 3 章

セメント硬化体の水分拡散係数

3. セメント硬化体の水分拡散係数

3. 1 はじめに

乾燥収縮応力の解析という分野では、セメント硬化体中の水分移動を非線形の拡散方程式により解析するという方向が主流になってはいるが、拡散係数の材令依存性、含水量依存性の一般化は未だに行われていないことは第1章の序で述べた通りである。この原因として考えられることは、乾燥を受けるセメント硬化体の含水量分布に関する実測データが、水分移動則を決定するには極めて乏しいことである。

含水量分布の実測データの乏しい理由としては、従来、乾燥収縮の研究といえば、例えば壁体の収縮ひびわれの問題のように外部拘束因子による収縮の問題が主流で、総脱水量が重要であり、内部拘束因子である含水量勾配に関する収縮応力の問題は軽視されていたという時代的背景と、実測が比較的困難であるということが考えられる。

含水量の測定方法として供試体をいくつかの小片に分割して、その重量を測定し、その後炉で水分を散逸させ、再び重量を測定するという重量測定法は、最も信頼性の高い測定法であるが、測定にかなり面倒な手順を踏むこと、試片は重量測定をし得るだけのある程度のマスを必要とすることから細かい領域での含水量の計測には不向きであること、含水量の経時的な変化を測定し得ないこと、等の

欠点を有する。一方、空隙相対湿度、あるいは電気抵抗をセンサーを埋め込むことにより測定し、これらと含水量の関係から間接的に含水量分布を知ろうとする方法もある。これらの方法は簡便で、測定部位での経時変化も知り得るという利点があるが、相対湿度、あるいは電気抵抗というファクターと含水量の関係が調合、水和の進行度合によって変化するであろうにも関わらず、これらの関係が詳細には調べられていないという問題がある。このことが含水量の間接的測定法による含水量実測データの信頼性を著しく損なっている。

このような背景から、特にセメント硬化体が水和過程にあるような若材令時の含水量分布に関するデータはほとんど皆無であるといっても過言ではない。少なくとも、若材令時の水分移動則を決定づけるだけのデータはないといえる。そこで、本章では、若材令のセメント硬化体について、電極法^{52), 53), 54)}により含水量の実測を行った結果を基に水分拡散係数についての考察を行っている。含水量の実測に電極法を用いたのは、同じ間接的測定法である相対湿度を測定する方法に比べ、水和のほとんど進行していない自由水量の極めて多い高含水状態において、より敏感に含水量変化に反応するであろうと考えたことによる。

3. 2 セメント硬化体の電気的特性

3. 2. 1 実験方法

セメントペースト及びモルタルについて、その電気抵抗特性に対する材令及び含水量の影響を調べる実験を行った。供試体は、普通ポルトランドセメントと小氷塊の調合による水セメント比 30%のセメントペースト及び砂・セメント・水重量比が 4 : 2 : 1 のモルタルで、図 3.2.1 に示す $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 2\text{cm}$ の直方体形状のものである。砂は陸砂（含水率 0.6%）を表乾状態で使用した。供試体中央部には図 3.2.2 に示す、市販の 100V 電源用プラグが埋め込まれている。電極間距離は 12mm、電極面積は約 34mm^2 で一定とした。また、電極は供試体表面に付着する水分の影響を除去するために供試体表面に露出する近傍まで絶縁処理が施されている。

供試体は打設後、相対湿度 100%、気温 20°C 下で約 15 時間型枠内で養生した後、脱型され、所定の材令に達するまで気温 20°C 下で封かん養生した。材令 1 日、3 日、7 日、14 日、28 日で供試体の上下面を解放し、真空乾燥炉（ 25°C ）で乾燥させた。乾燥直前及び乾燥中、数回供試体を炉から取り出し、その重量と電気抵抗の測定を行った。抵抗測定の回路図を図 3.2.3 に示す。電源は直流電源（電圧 3V）で、可変抵抗を操作することで電圧を 0.1V から 2.0V の範囲で変化させ、供試体に流れる電流を測定している。

3. 2. 2 実験結果

セメント硬化体は電解質であるので、埋め込まれた電極はコンデンサーの性質を有する。したがって直流電流下では電荷が蓄積される間、電気抵抗が導通時間とともに増大する性質を示す。電気抵抗の増加は約2分程度で収まるので、この時の電気抵抗を測定することとした。図3.2.4(a), (b)に、材令28日におけるセメントペースト及びモルタルの負荷電圧と電流の関係を示す。セメントペースト、モルタル共に電気抵抗は一定ではなく、負荷電圧の増加と共に、低下することが認められる。そこで、以下では固定条件として、電圧2.0Vにおける電気抵抗を用いることとする。図3.2.5(a), (b)に材令と電気抵抗の関係を示す。以下、図中の線の種別は供試体ごとの測定値のばらつきの程度を示している。水セメント比の低いセメントペーストでは材令による抵抗値の変化が大きいものに対して、通常のコンクリートの水セメント比に近いモルタルでは材令による電気抵抗の変化は小さい。このことは、水和反応に消費されない余剰水が電気抵抗を支配していることを示している。図3.2.6(a)～(e)にモルタルの各材令における含水率と電気抵抗の関係を示す。なお、縦軸の電気抵抗は対数目盛りで示している。また、含水率は打設時の含水量を1としたときの含水量の割合である。図より含水量の電気抵抗に対する影響は、材令の影響に比べ著しく大きいことがわかる。

水セメント比 50%のモルタルの電気抵抗を材令及び含水量の関数で表す実験式を作成した。実験結果より、含水率が小さくなると電気抵抗が増大するという結果を得ているが、モルタルに占める自由

水が零、すなわち全ての水量が結合した状態では、ほとんどモルタルは絶縁体となるという仮定を置けば、モルタルの電気抵抗と含水率の間の関係は一例として以下の式で表せる。

$$R = A \cdot (w - w_n)^{-r} \quad (3.1)$$

ここに R : 電気抵抗 ($k\Omega$)、 w : 含水率 (%) (初期練混ぜ水量に対する結合水量を含む含水量の割合)、 w_n : 結合水率 (%)、 A 、 r : 実験定数である。結合水量は文献1)の水和反応式により求めた。図3.2.7に水セメント比50%のモルタルの各材令における実験定数 A 及び r の値を示す。実験定数は、材令の進行と共に一定値に収れんする傾向がある。そこで実験定数 $\log A$ 及び r と結合水量の関係を調べてみた。結果を示したのが図3.2.8である。材令14日のデータを除いて、 $\log A$ 、 r とともに結合水量の一次関数で表せるといえる。回帰計算によってそれらの関係を求めた。式で表せば次式となる。

$$\log A = 17.8 \cdot w_n / c + 2.16 \quad (3.2)$$

$$r = 10.8 \cdot w_n / c + 0.65 \quad (3.3)$$

ここに w_n / c は結合水量のセメントに対する重量比 (kg/kg) である。(3.2)、(3.3)式を(3.1)式に代入することで、結局、水セメント比50%のモルタルの電気抵抗値は結合水量及び含水量より次式で表せる。

$$\log R = 17.8 \cdot w_n / c + 2.16$$

$$- (10.8 \cdot w_n / c + 0.65) \{ \log (w / c - w_n / c) + 2.30 \}$$

(3.4)

ここに R : 電気抵抗 (kΩ)、w / c : 含水量 (初期練り混ぜ水量から脱水量を差し引いたもの) のセメントに対する重量比 (kg/kg) である。

(3.4) 式の関係を図 3.2.6 中に実線で示した。データのばらつきが大きいものの、実験式 (3.4) は、実験結果と概ね良好な対応を示している。またデータはばらつくといっても、含水量 100% 時の抵抗値の大小が脱水後も関係が逆転することがないことから、含水量 100% 時の抵抗値を測定することで、補正が十分できるといった性質のばらつきであり、電気抵抗の測定から十分含水量の推定が可能であると思われる。

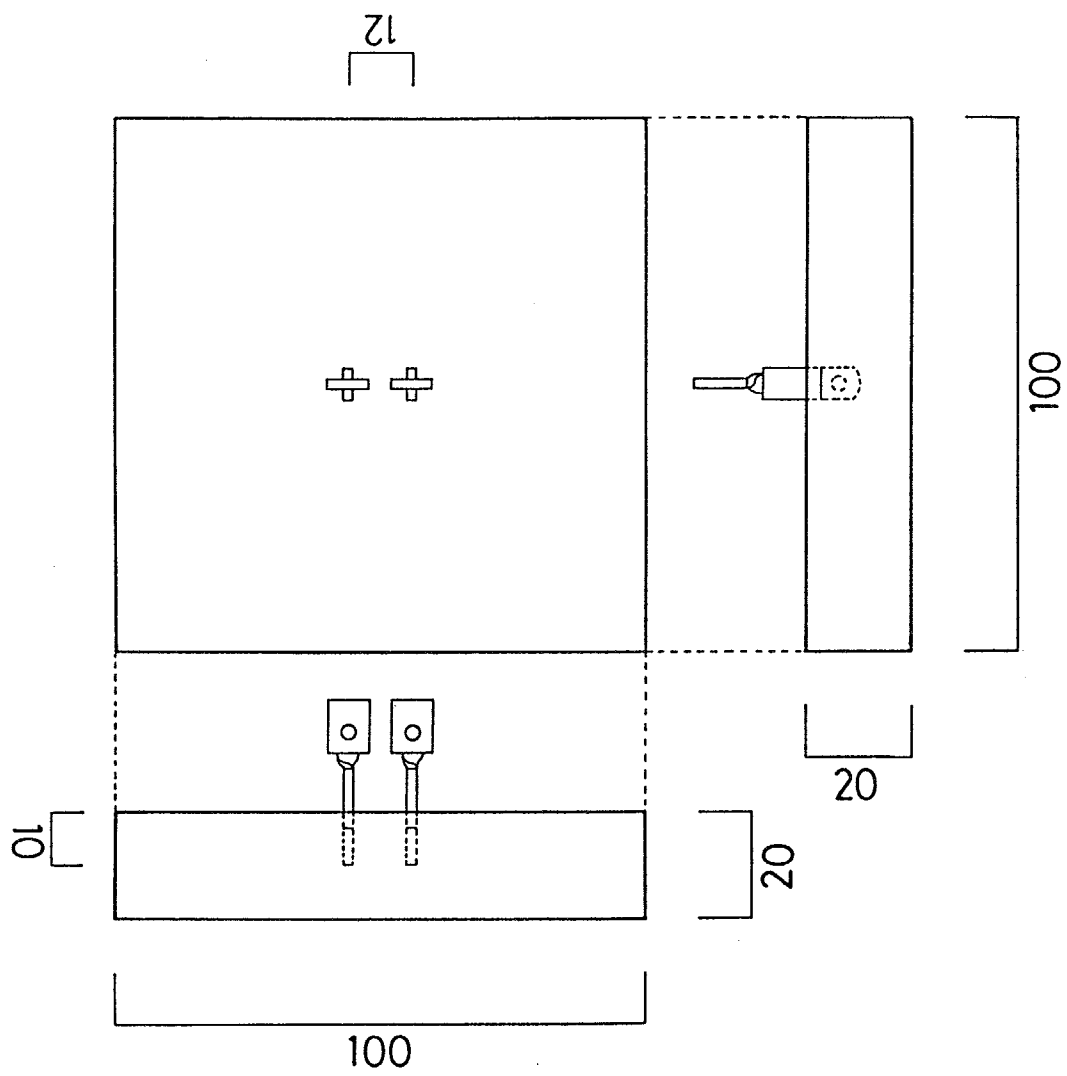


図3.2.1 供試体図

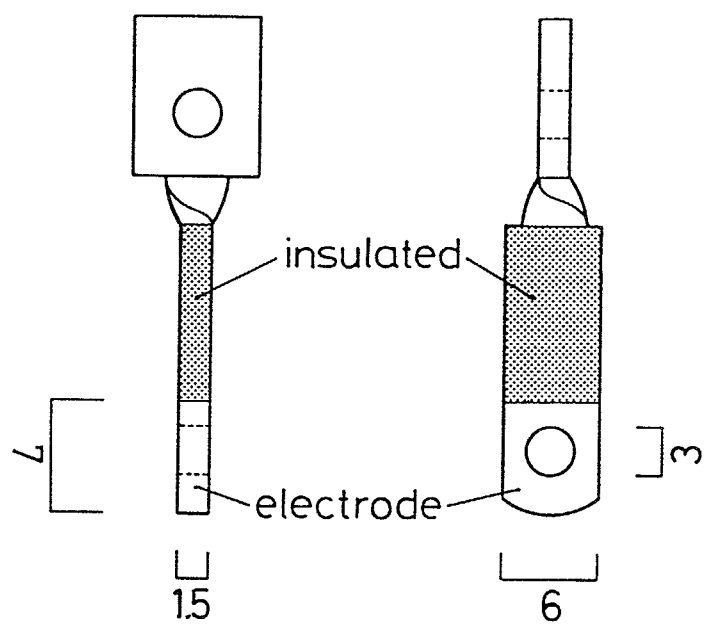


図3.2.2 電極詳細

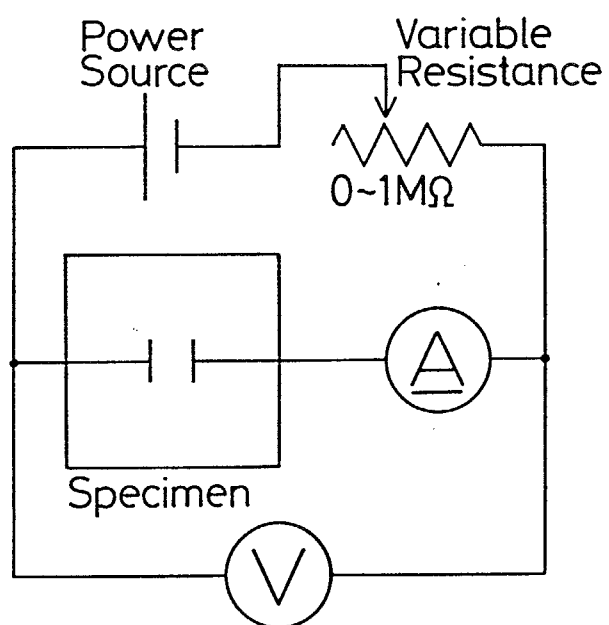


図3.2.3 測定回路

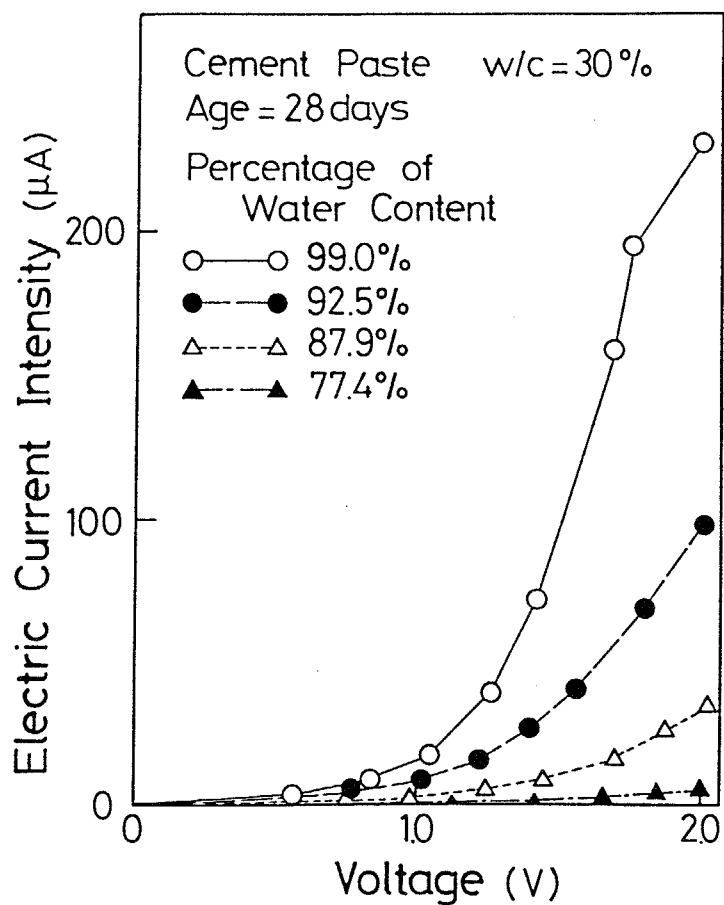


図3.2.4(a) 負荷電圧と電流の関係 (セメントペースト)

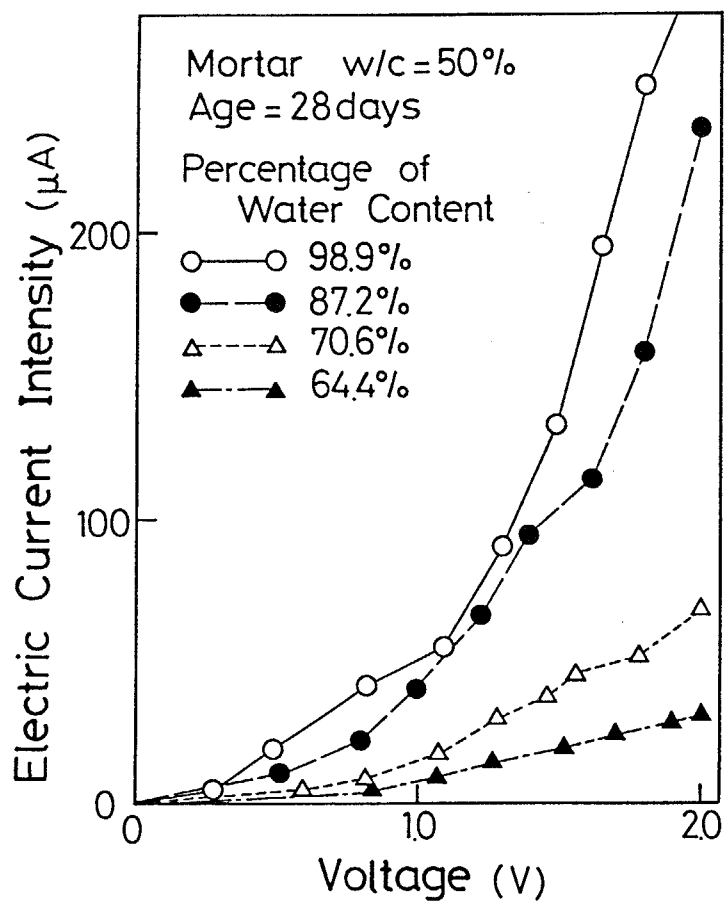


図3.2.4(b) 負荷電圧と電流の関係 (モルタル)

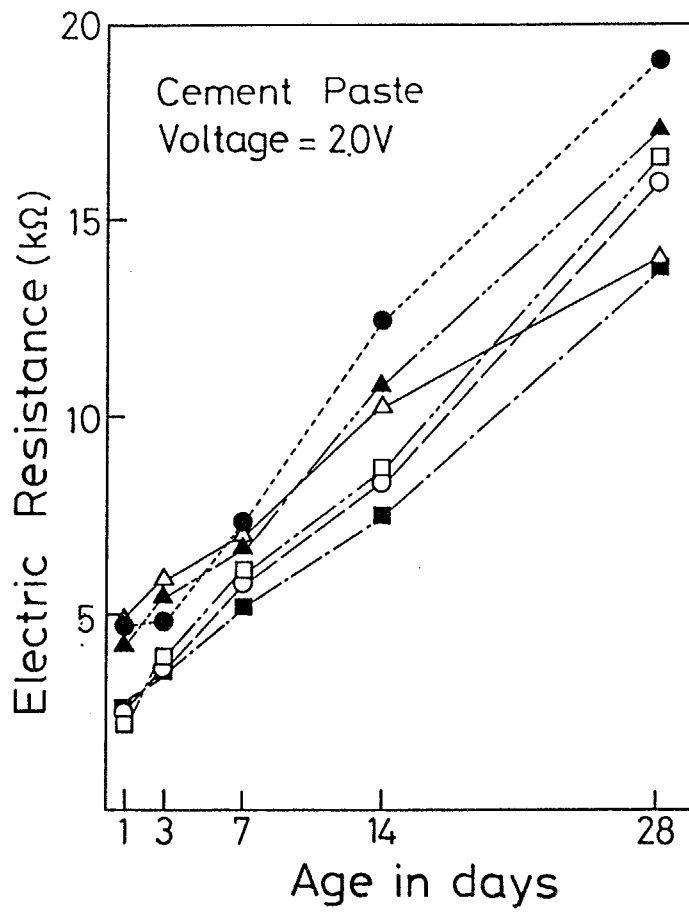


図3.2.5(a) 材令による電気抵抗値の変化（セメントペースト）

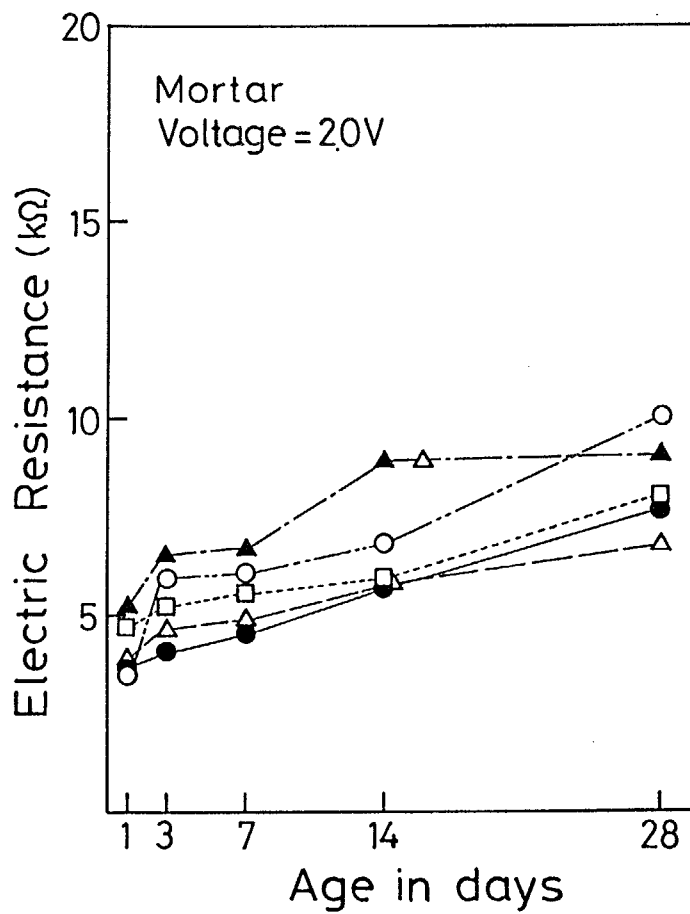


図3.2.5(b) 材令による電気抵抗値の変化（モルタル）

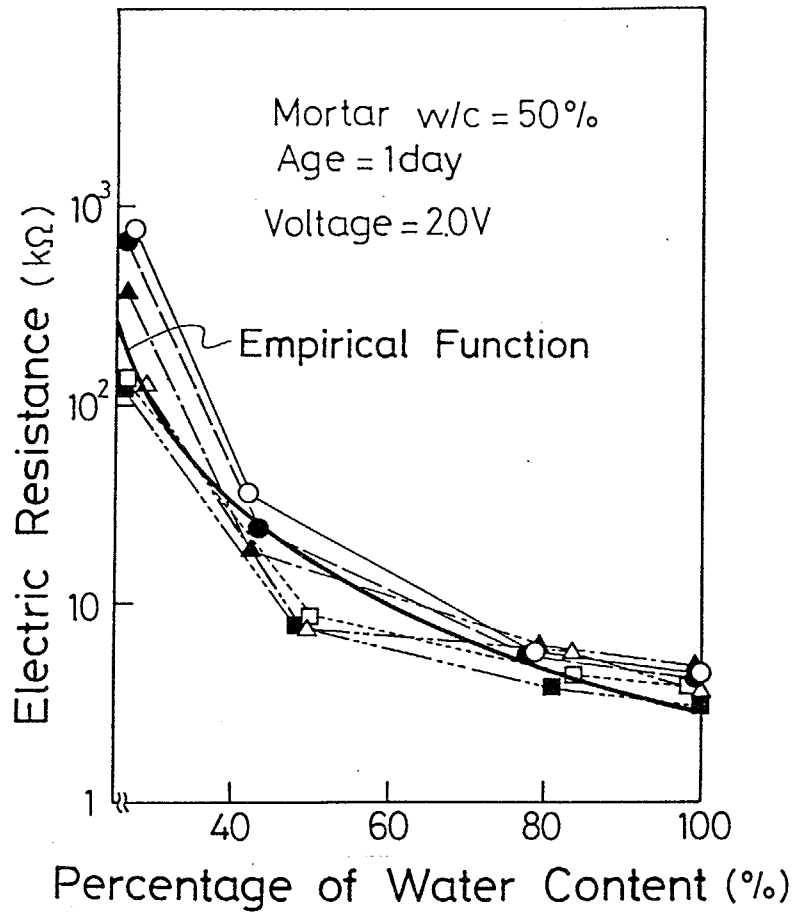


図3.2.6(a) モルタルの含水率と電気抵抗値の関係（材令1日）

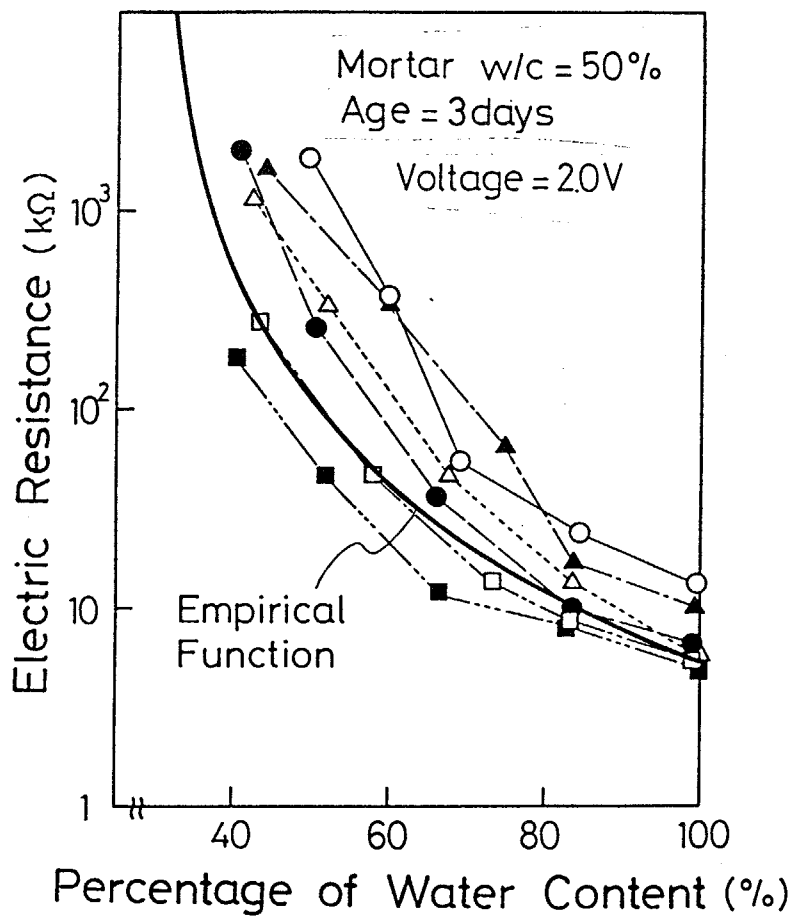


図3.2.6(b) モルタルの含水率と電気抵抗値の関係（材令3日）

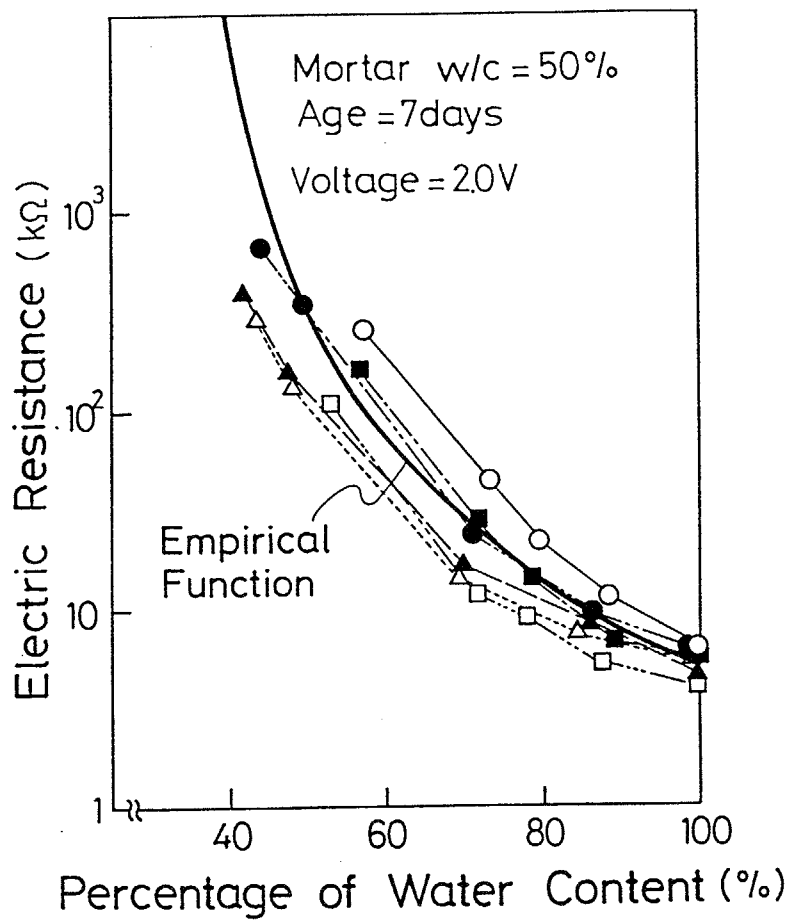


図3.2.6(c) モルタルの含水率と電気抵抗値の関係 (材令7日)

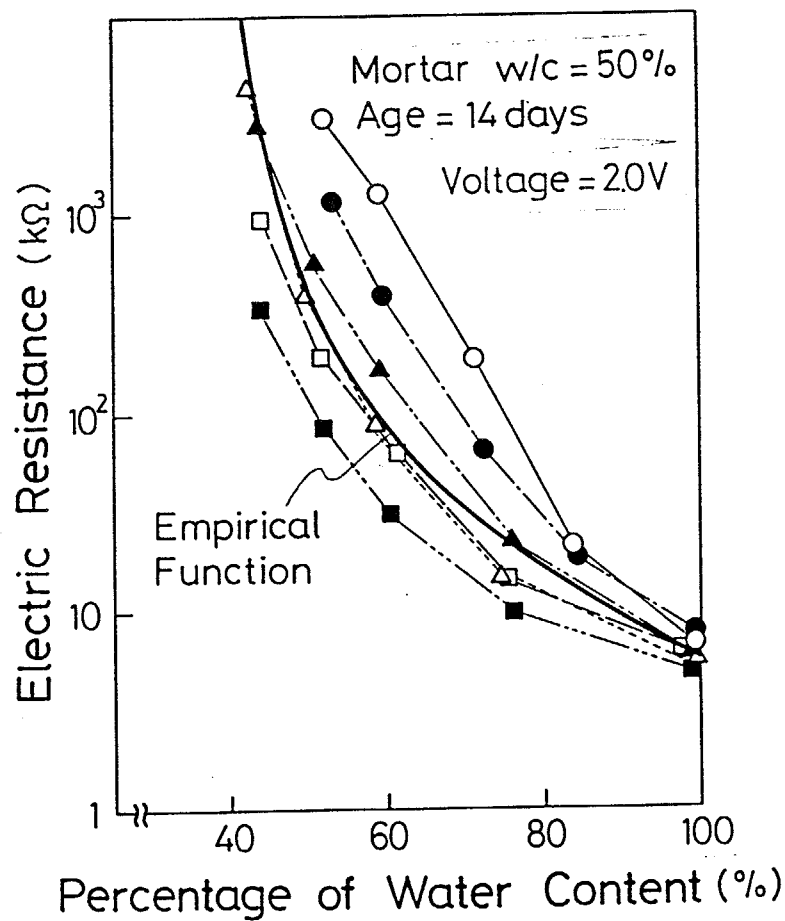


図3.2.6(d) モルタルの含水率と電気抵抗値の関係 (材令14日)

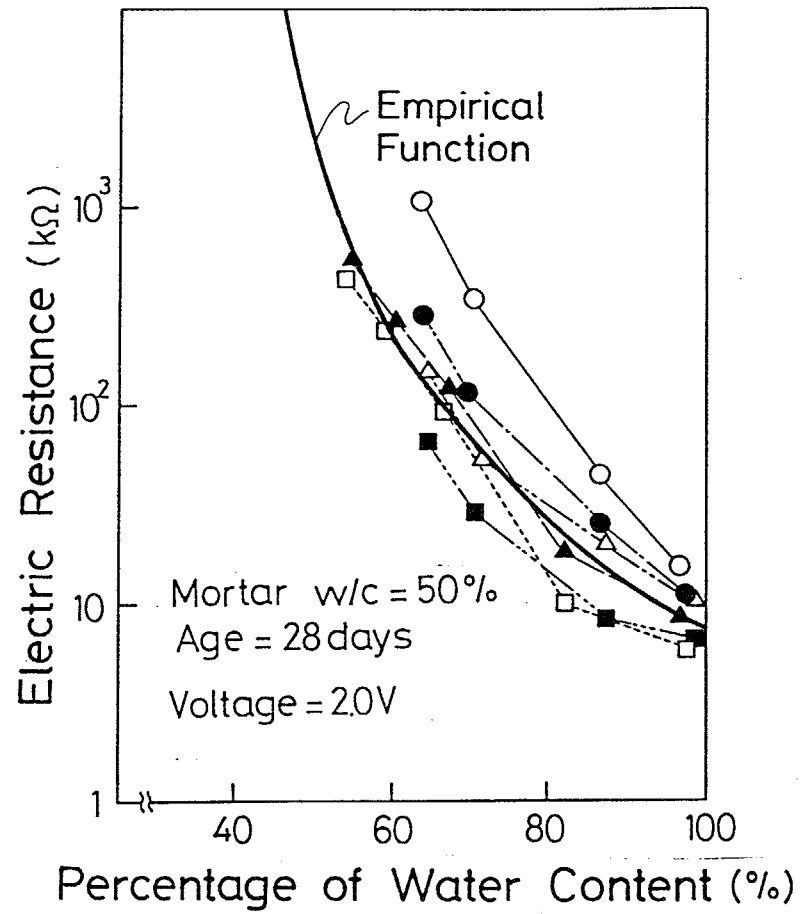


図3.2.6(e) モルタルの含水率と電気抵抗値の関係 (材令28日)

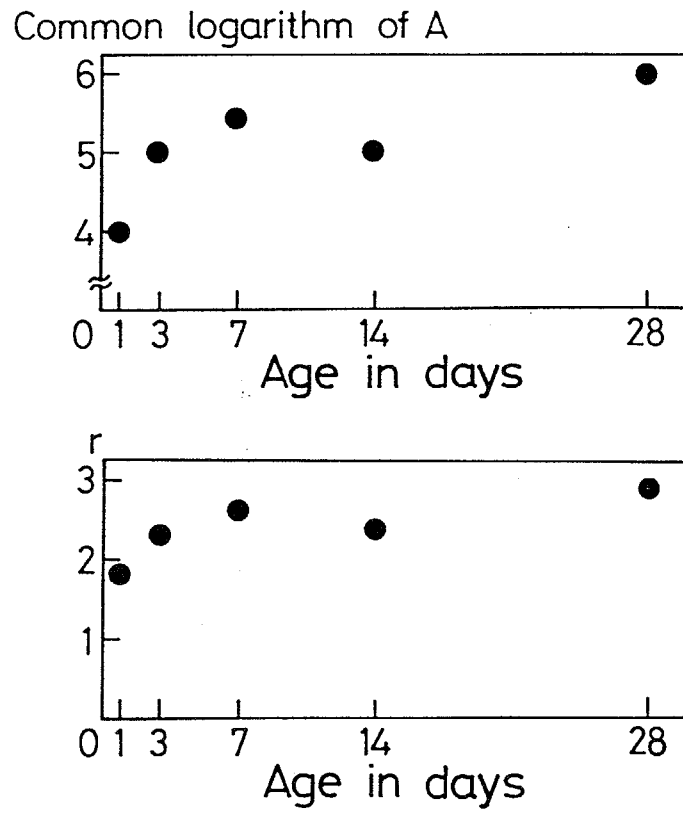


図3.2.7 実験定数Aおよびrの材令による変化

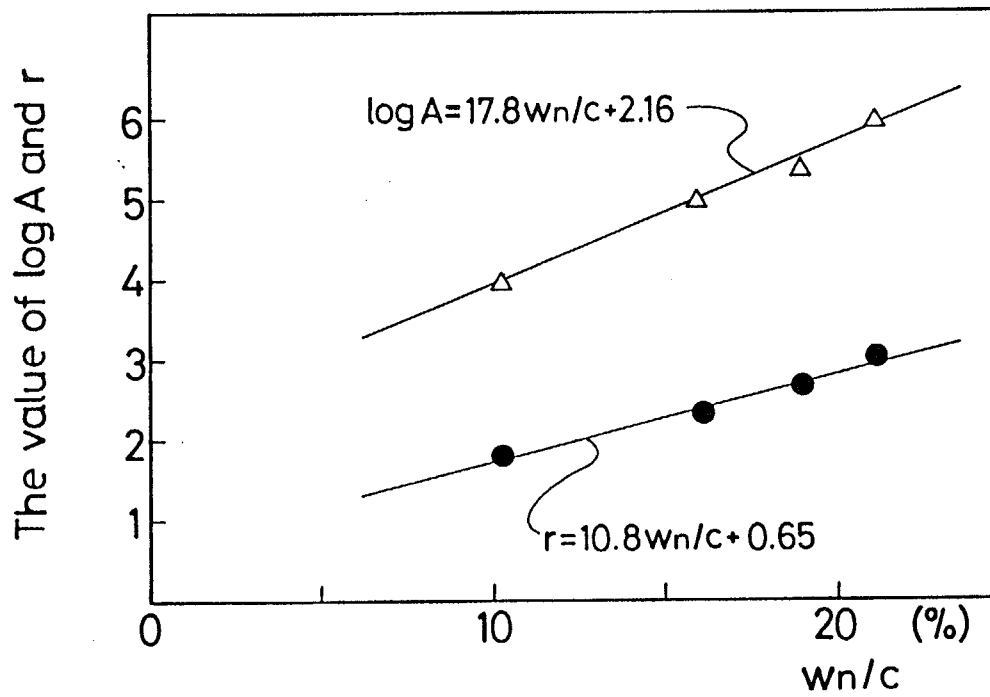


図3.2.8 実験定数と結合水量の関係

3. 3 一面乾燥を受けるモルタルの含水量分布の推定

3. 3. 1 実験概要

砂・セメント・水重量比 4 : 2 : 1 のモルタルについて、図 3.3.1 に示す供試体を作製し、一面脱水試験を実施した。供試体形状は、3 cm 角の正方形断面を持つ長さ 35 cm の棒状のものである。供試体には図に示す位置に、前述の実験と同じ電極が埋め込まれている。供試体は、前述の実験と同様、打設後約 15 時間、相対湿度 100%、気温 20℃ 下で型枠内養生が施された後脱型され、シリコン系接着剤及びゴム系テープによりシールされた。材令 2 日で一端を開放し、一面脱水試験を行った。乾燥条件は、気温 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿下での乾燥と真空乾燥の 2 種類とした。測定方法は前述の実験と同様である。

乾燥時間と総脱水量の関係の数例を図 3.3.2 (a), (b) に示す。(a) が相対湿度 60%、(b) が真空乾燥を表している。縦軸は脱水量の初期練り混ぜ水量に対する重量百分率である。また、電気抵抗測定結果を図 3.3.3 (a), (b) に示す。横軸は開放端から各電極位置までの距離を表している。開放端付近で電気抵抗値の変化が著しいことが認められる。

3. 3. 2 含水量分布の推定

(3.4)式は、含水量と結合水率が既知であれば電気抵抗値が計算できるといものである。前節の実験では、供試体は所定の材令まで封かん養生され、真空乾燥器により短時間で脱水されているので、結合水率は乾燥の影響をほとんど受けていないが、一般には脱水はある程度の期間を経るものであり、この間に結合水率は含水量の影響を受けるので、ある時点での電気抵抗値を知るにはその時点での含水量とその含水量に至るプロセスが既知であることが条件となる。したがって、測定された電気抵抗値から含水量を推定する場合も同様に含水量履歴（推定される含水量に至るまでの履歴の形状、矩形脱水、線形脱水etc.）が既知であることが条件となってくる。

総脱水量の時間履歴の形状は、図3.3.2に示したごとくわかっているのであるが、各電極端子位置での含水量の履歴形状は不明である。しかしながら、図3.3.2に示した総脱水量の履歴に近い形の脱水履歴をとると予想されるので、少なくとも実際の履歴形状は次の2つの履歴形状で上下限を押さえられるであろう。1つは、乾燥開始材令で、ほぼ瞬間的にある含水量まで脱水される場合（以下、矩形脱水と呼ぶ）で、もう一つは乾燥開始材令の含水量から抵抗測定時の含水量まで直線的に脱水が進む場合（以下、線形脱水と呼ぶ）である。両者による含水量の差異をいくつかの材令、電気抵抗値について示したのが表3.3.1である。乾燥開始材令は2日である。上段の値が矩形脱水を仮定したときの含水率を、下段が線形脱水を仮定したときの含水率を示す。また矩形脱水及び線形脱水の模式図を表の下

に示した。乾燥期間が長いほど、また測定される電気抵抗値が大きいほど、推定される含水量の差異は大きくなる。乾燥開始材令が7日あるいは14日となれば、その材令までにはかなり水和が進んでおり、この表に示すほどの差異は現れないであろう。表より、乾燥開始材令2日では、材令28日程度で70%程度の含水率であれば、含水量の履歴形状の影響はほとんどないといえる。

図3.3.4は計算された含水率分布を示したものである。(a)は乾燥条件が気温20℃、相対湿度60%の場合を、(b)は真空乾燥の場合を示している。いずれも含水量の履歴形状は矩形脱水を仮定して計算している。

なお、前節でも、データのばらつきについてふれたが、ここで含水量を推定するために用いた供試体の電気抵抗に関するデータは、乾燥開始直前に計測した含水率100%、材令2日の電気抵抗値が(3.4)式で計算される電気抵抗値にほぼ一致した供試体のものを選んでい
る。また、図3.3.4に示した含水率分布を材長にわたって積分し、総脱水量を計算したところ、総脱水量の実測値との差異は、湿度60%の乾燥条件のもので最大1割程度、真空脱水のもので最大2割強であり、図3.3.4に示す含水量分布は十分信用できるものであると考えられる。

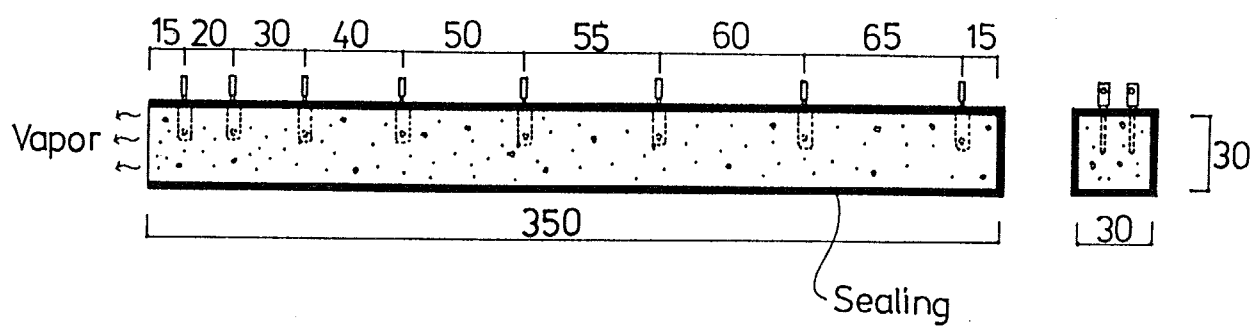


図3.3.1 供試体図

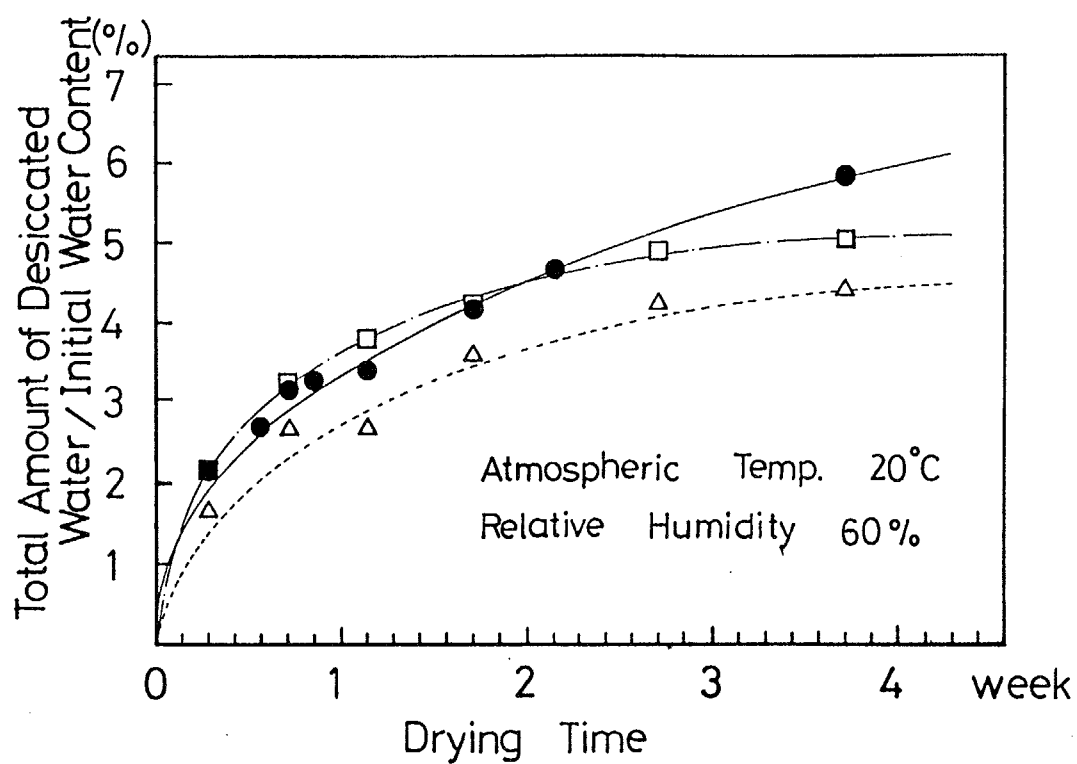


図3.3.2(a) 乾燥時間と総脱水量の関係 (相対湿度60%)

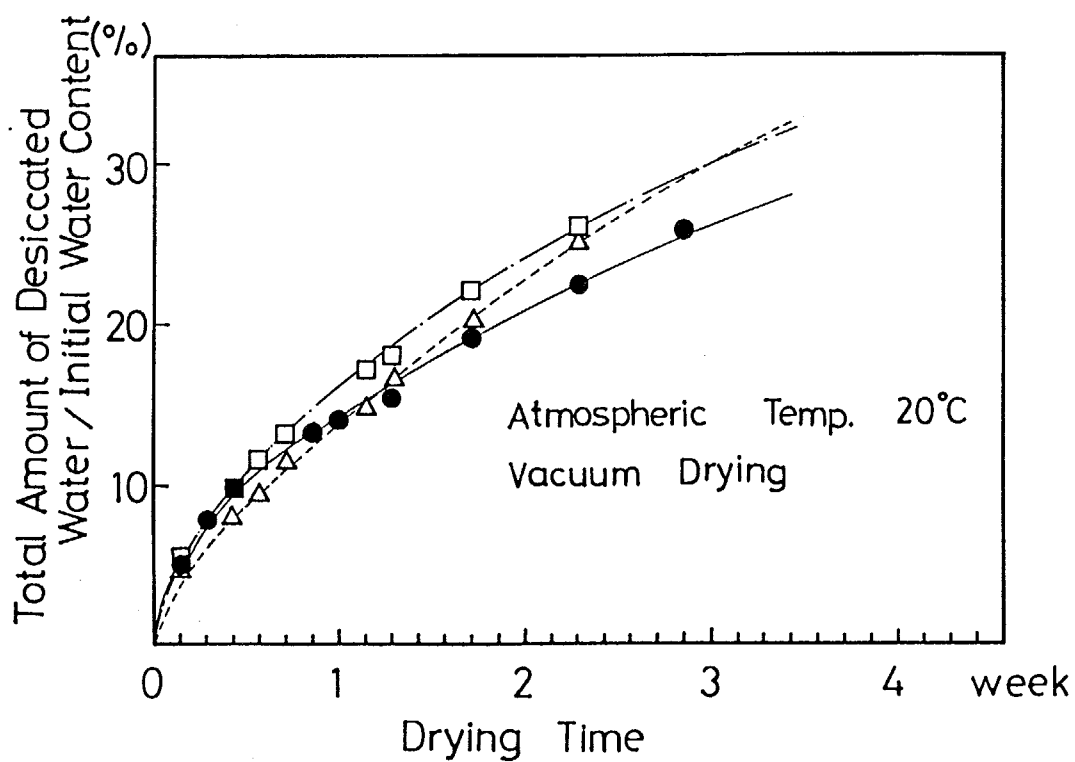


図3.3.2(b) 乾燥時間と総脱水量の関係 (真空乾燥)

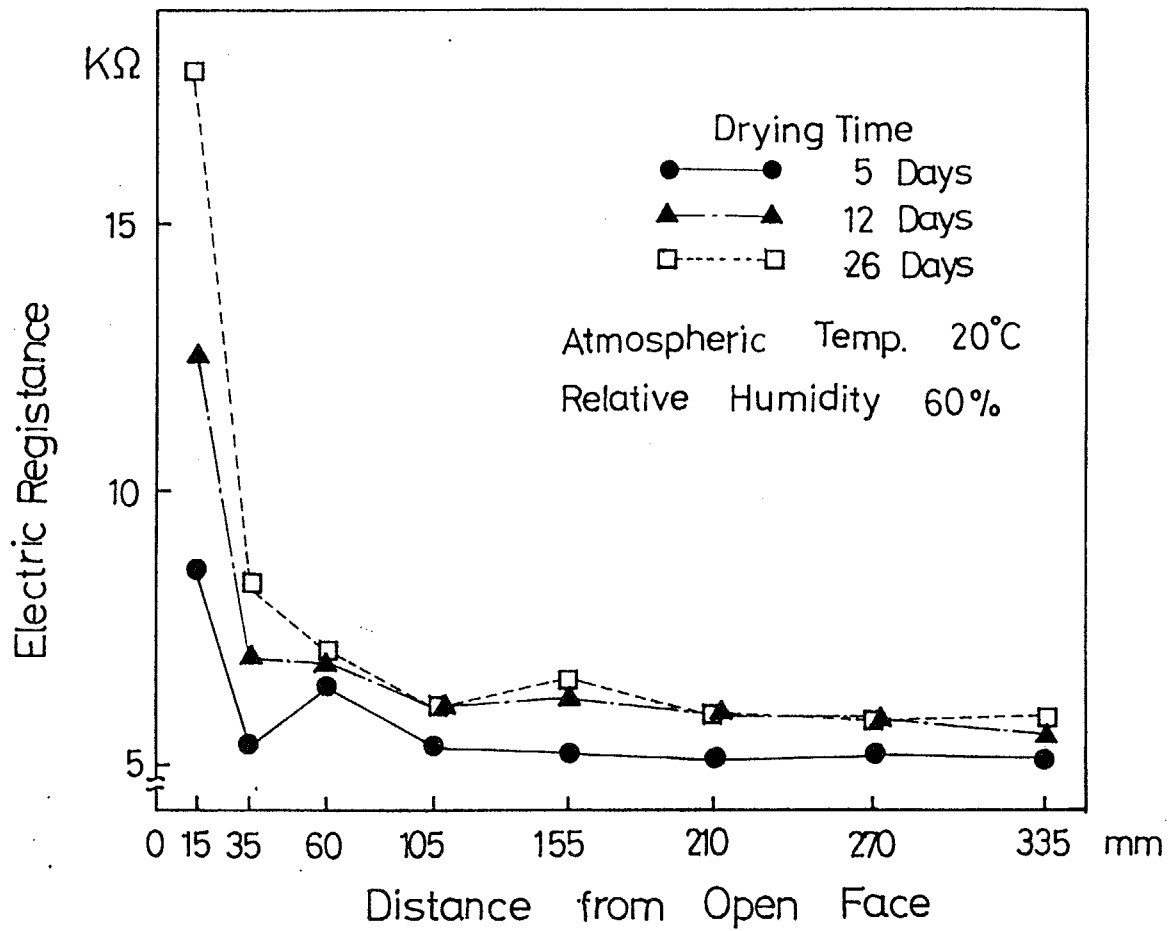


図3.3.3(a) 電気抵抗の材軸方向分布（相対湿度60%）

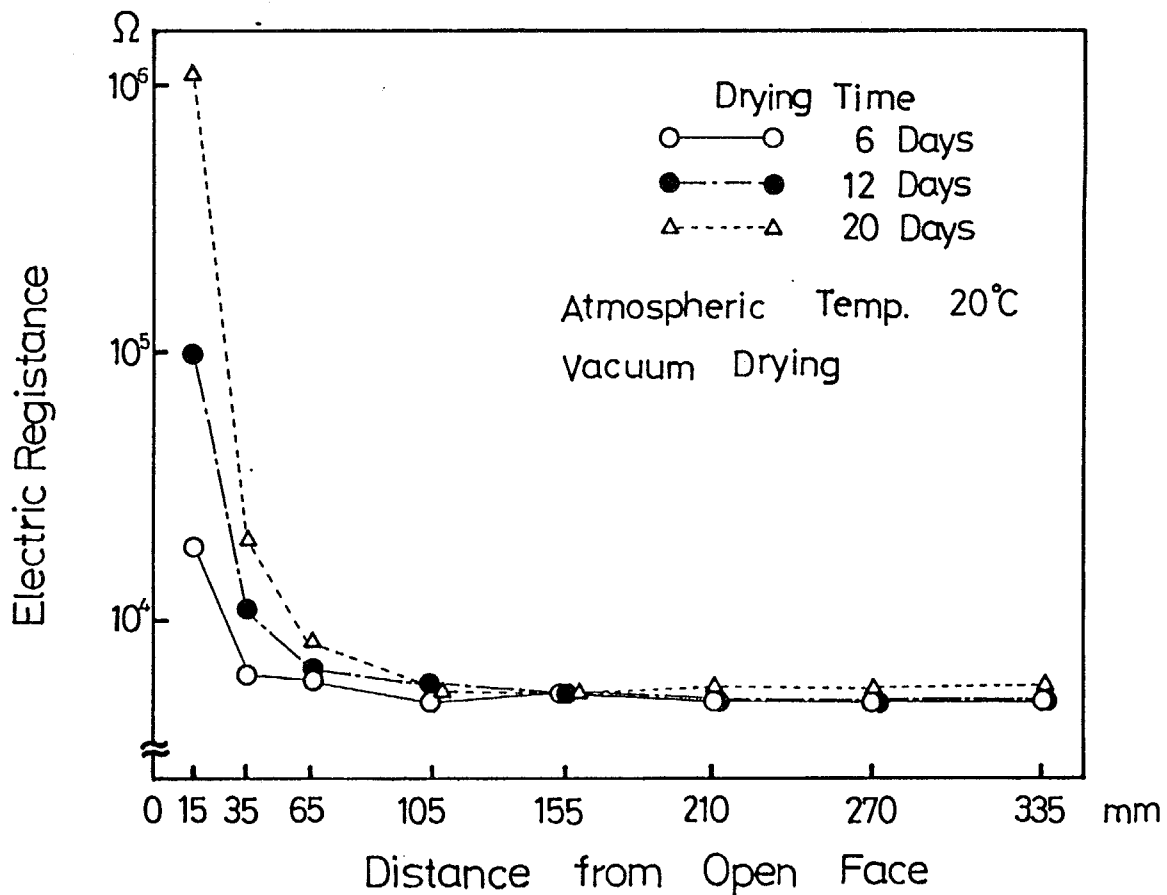


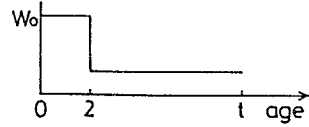
図3.3.3(b) 電気抵抗の材軸方向分布（真空乾燥）

表3.3.1 電気抵抗から推定される含水率

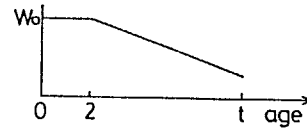
Age(days)	Predicted Water Content (%)							
	Electric Resistance (k Ω)							
	5	7	10	20	50	100	200	500
3	96.3	86.9	77.9	63.7	50.4	43.7	38.9	34.9
	96.4	87.3	78.8	65.4	52.8	46.2	41.4	36.9
7	99.3	90.8	82.3	67.4	51.7	43.8	39.1	35.7
	99.3	91.3	83.6	70.9	58.4	51.7	46.6	41.9
14		93.1	84.9	70.4	53.4	44.1	39.2	36.6
		93.6	86.2	74.1	61.9	55.4	50.3	45.5
28		94.6	86.7	72.5	55.4	44.6	39.4	37.8
		94.9	87.8	76.2	64.6	58.2	53.2	48.4

assuming time history of water desiccation as follows

upper:



lower:



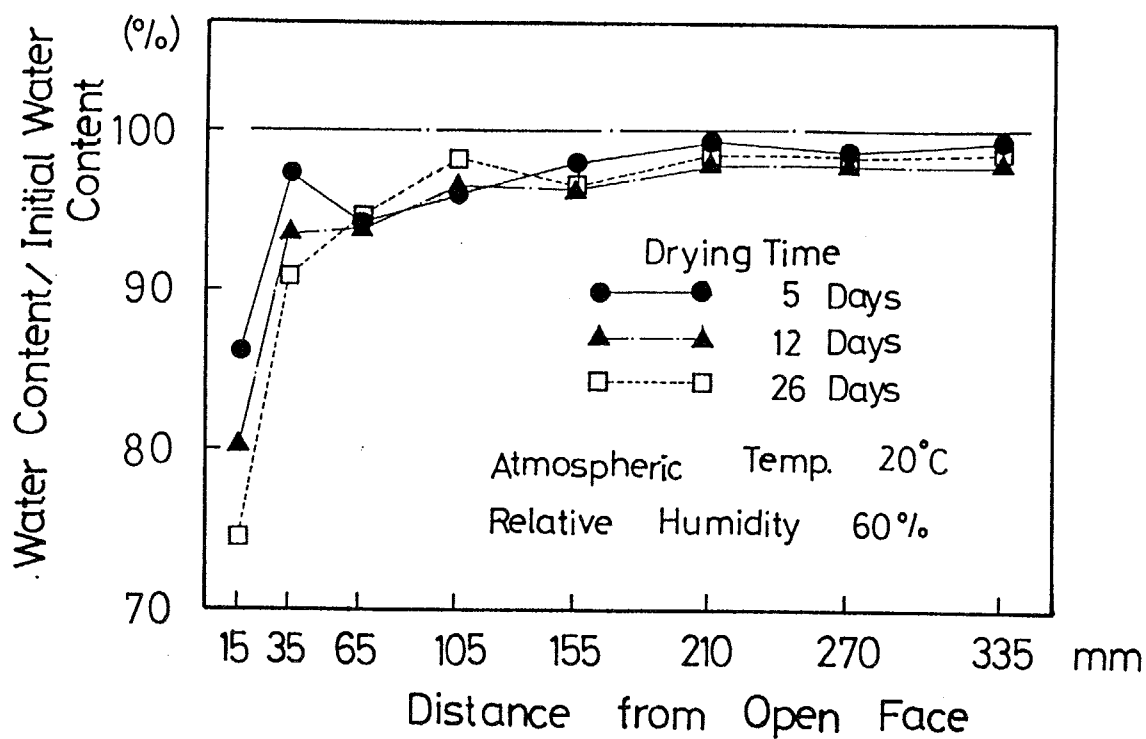


図3.3.4(a) 含水率の材軸方向分布（相対湿度60%）

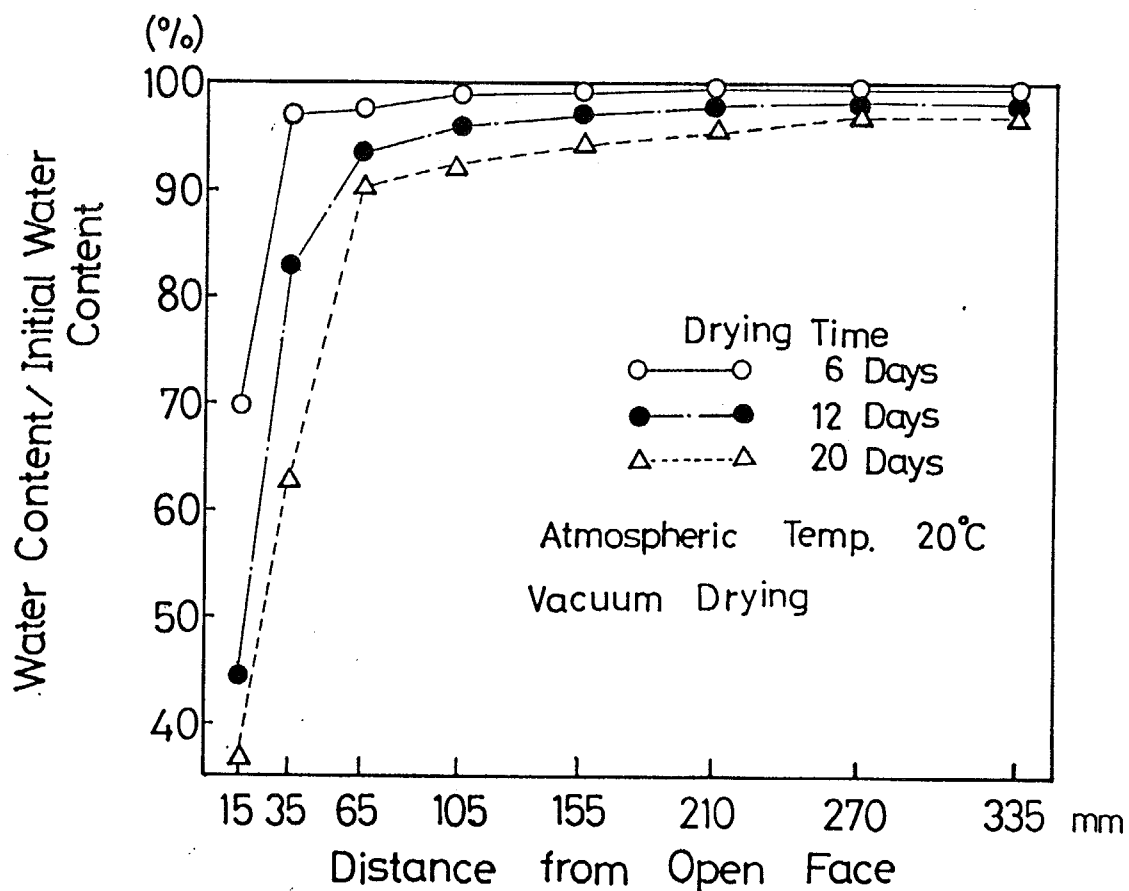


図3.3.4(b) 含水率の材軸方向分布（真空乾燥）

3. 4 拡散係数の含水率及び材令依存性について

3. 4. 1 解析概要

本節では、含水量分布に関する数値解析解と前節で示した実験データを比較することで拡散係数について考察する。拡散係数、表面係数の決定法としてはPickett²⁵⁾らの論文に、係数の含水率依存性が無視できる程度の高含水状態における数点の脱水量データから近似計算により両係数を決定する計算法が示されているが、若材令の場合両係数の値の変化が著しく、上記の方法が適さないとする、試行錯誤で計算値を実験値に合わせていくという方法を取らざるを得なくなる。含水率依存性あるいは材令依存性についてまで白紙の状態では拡散係数、表面係数をトライアンドエラーで突きとめていくのはほとんど不可能である。幸い、既往の研究でこれらの依存性はいぶん調べられているので、それらを基に拡散係数の含水率依存性、材令依存性についてはある程度の仮定をおいて解析を行った。

一口に拡散係数といっても、基本変量を含水率におくもの²⁷⁾、空隙相対湿度におくもの^{26), 35)}等様々である。また境界条件式のとり方によっても、拡散係数の値は変わってくる。そこで、まず、水分拡散に関する基礎方程式について述べる。

水分拡散の平衡状態はおそらく湿度平衡であろうことから基礎方程式及び境界条件式は次式で表せる。

$$\frac{dw_e}{dt} = k \nabla^2 w_e - \dot{w}_n \quad (3.5)$$

$$\nabla w_e = f (w_e - W_\infty) \quad (3.6)$$

ここに k : 拡散係数、 f : 表面係数、 w_e : 蒸発可能水量、 $\dot{w}_n$: 非蒸発可能水量の時間的増加量、 W_∞ : 外部湿度に釣合う蒸発可能水量、である。

本論文と同様に含水量を基本変量においた文献[27]では W_∞ として文献[35]の含水量と空隙湿度関係を与えていたが、この関係は水和の進行によって変わるであろうことを考慮していなかった。すなわち、結合水量が増加するとそれにともない比較的結合力の強い蒸発可能水である吸着水の量は増加する。吸着水は結合力が強いのでその蒸気圧は普通の水に比べ小さい。したがって、蒸気圧の小さい、すなわち、かなり低い湿度まで蒸発しない水量が増加するという図式である。図3.4.1に文献[59]に示された水セメント比 50%のセメントペーストの重量減少率、乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係を示した。このデータが水和の十分進行した状態におけるデータであると仮定し、さらに最終結合水セメント比を22% (2章による)、結合セメント量の25%を結合水量、15%を比較的結合力の強い蒸発可能水であるゲル水量、残りをキャピラリー水量とおくと、相対湿度85%時の重量減量はキャピラリー水量に、相対湿度7%時の重量減量は蒸発可能水量、すなわちキャピラリー水量とゲル水量の和にほぼ一致する。そこで蒸発可能水とその相対湿度の間に 図3.4.2に示す関係があるものと考えた。図3.4.2の相対湿度と減量の関係は図 3.4.1

の結果をそのままプロットしたものである。図 3.4.2が示す相対湿度と含水量の関係は、湿度 85%でキャピラリー水の全量が蒸発し、ゲル水は水量と相対湿度の関係がほぼ一次関数で表せるということである。例えば本実験条件である湿度 60%では、キャピラリー水の全量とゲル水の 1/3が蒸発可能水量であり、絶対量は水和の進行により当然のごとく変化する。

図 3.4.3に Bazant²⁶⁾らの研究による拡散係数の相対湿度依存性を示す。Bazantらの研究によれば、拡散係数が急変する湿度が認められその時の湿度を 75%にしているが、前述の蒸発可能水の様態を考慮すれば、拡散係数が急変する湿度を 85%におき、キャピラリー水とゲル水で拡散係数が異なると考える方が理論的にも妥当であると考えられる。実際、拡散係数の急変する相対湿度を 85%とした方が望ましいとの主張も文献[39]で為されている。ゲル水脱水時における拡散係数の値は、初期値の1/20としている。

また、拡散係数の材令依存性、すなわち結合水量依存性については気温 20℃、材令 2日における拡散係数 k_0 に対し、終局結合時の拡散係数を $k_0/4$ とし、その間は結合水量の増加に応じて直線的に変形するものと仮定した。1/4とする根拠は、永松・佐藤らの論文²⁷⁾のコンクリートに関する拡散係数の材令依存性に関する記述による。またこのデータによれば、表面係数は材令の進行に従って低下する結果になっているが、この程度の変化は前述の結合水の増加にともない蒸発可能水量を変化させることで十分表せる、すなわち、永松論文では(3.6)式において W は一定として f が低下すると主張して

いたのに対し、本論文では w_0 が水和の進行にしたがって低下するのであえて m を変化させる必要はないので表面係数の結合水量依存性は考慮していない。

3. 4. 2 解析結果

以上のような仮定の基に計算された、湿度 60%の乾燥条件下の総脱水量の経時変化を図 3.4.4に、材令35日における含水率分布を、図3.4.5に示す。両図とも●は実験データを、実線は材令2日でキャピラリー水脱水時の拡散係数を $0.03\text{cm}^2/\text{hour}$ とし結合水量依存性を無視した場合の計算結果を、破線は材令2日における拡散係数の初期値を $0.04\text{cm}^2/\text{hour}$ とし、結合水量依存性を考慮した結果を示す。係数の値は総脱水量の経時変化変化が実験値と最もよく対応することを目標にして決められている。総脱水量の経時変化変化は計算値と実験値が概ね対応しているが、含水量分布は、計算値は実験値に比べ、きりたった形になった。

ここで拡散係数の結合水量依存性、含水量依存性が含水量分布に与える影響を考えてみる。拡散係数は水和の進行、含水率の低下と共に低下する。このことは乾燥時間が長くなるにつれて、拡散係数を一定にした場合に比べ脱水量を減少させる。供試体内部での含水量分布は当然表面で小さく内部で大きいという形である。したがって、含水量依存性のみについて考えると拡散係数分布も同様に表面近くで小さく、内部で大きいという形になり、含水量分布は拡散係数を一定にした場合に比べ、なだらかな形状となる。結合水量分布は表面付近では乾燥の影響を受けるので表面小、内部大となり、結合水量依存性では拡散係数分布は逆に表面で大きく、内部で小さいという形になる。これは含水量分布を、逆にきりたった形状にする。したがって、計算精度の向上を望めば、拡散係数の含水量依存性に

ついて再考する必要があるだろう。

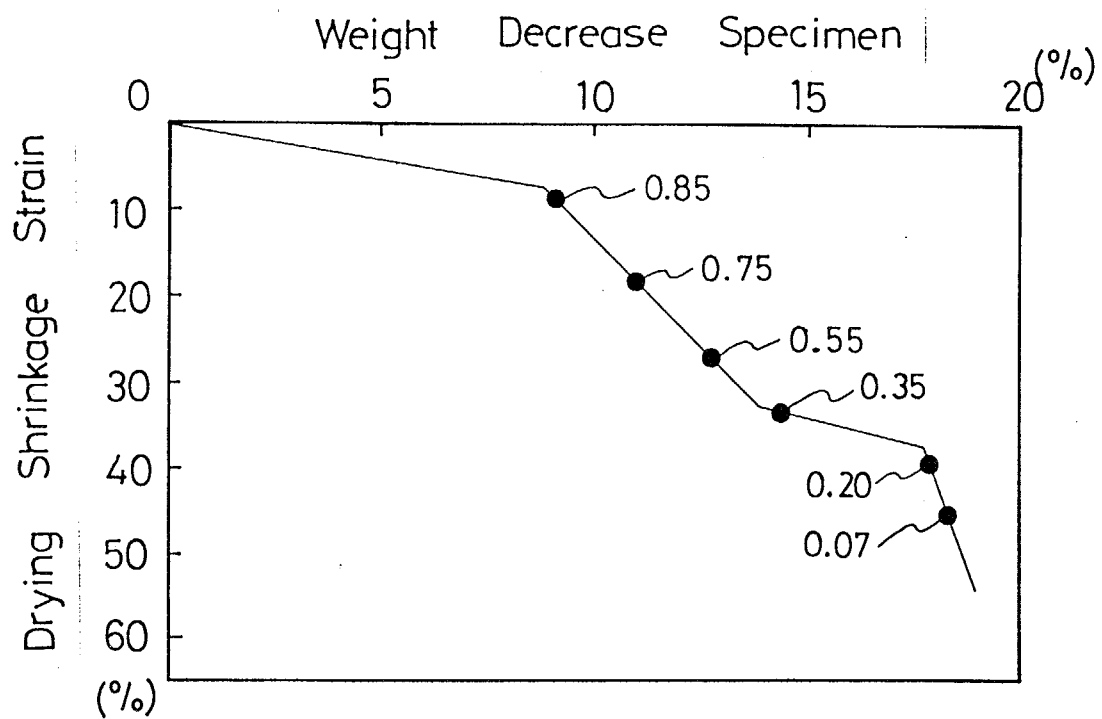


図3.4.1 セメントペーストの重量減少率と相対湿度の関係

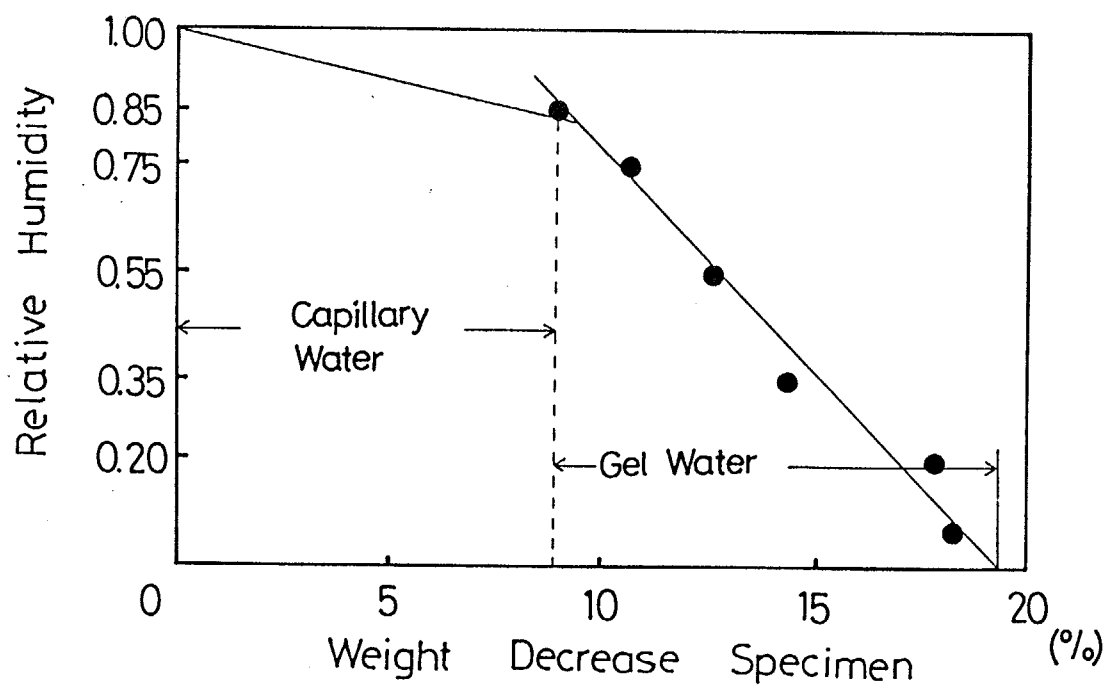


図3.4.2 非結合水（蒸発可能水）の水蒸気圧

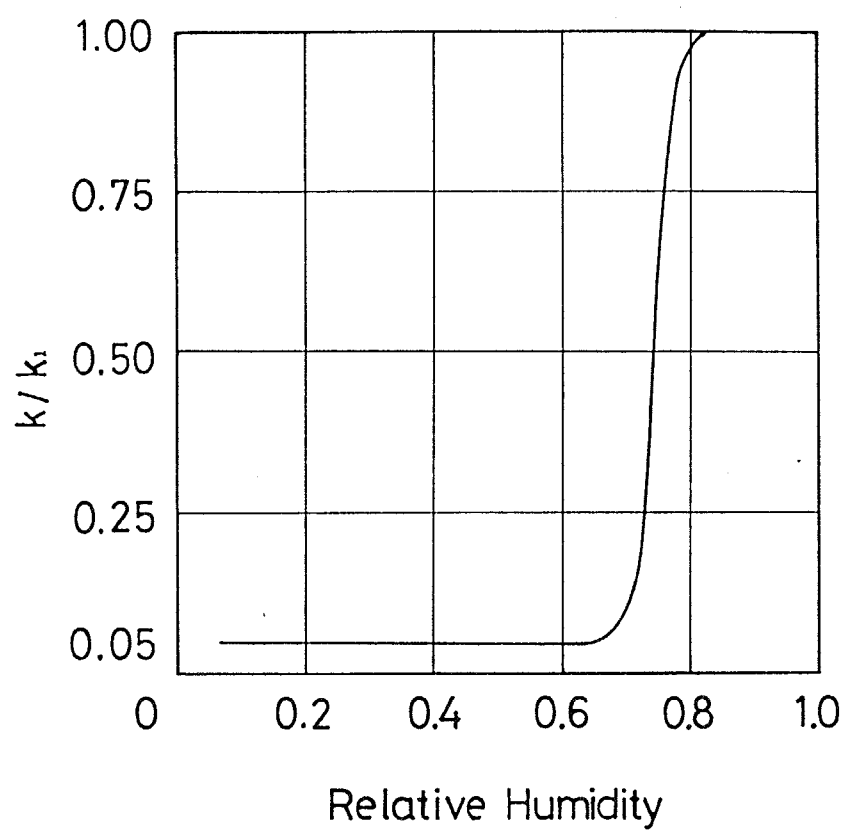


図3.4.3 拡散係数の相対湿度依存性

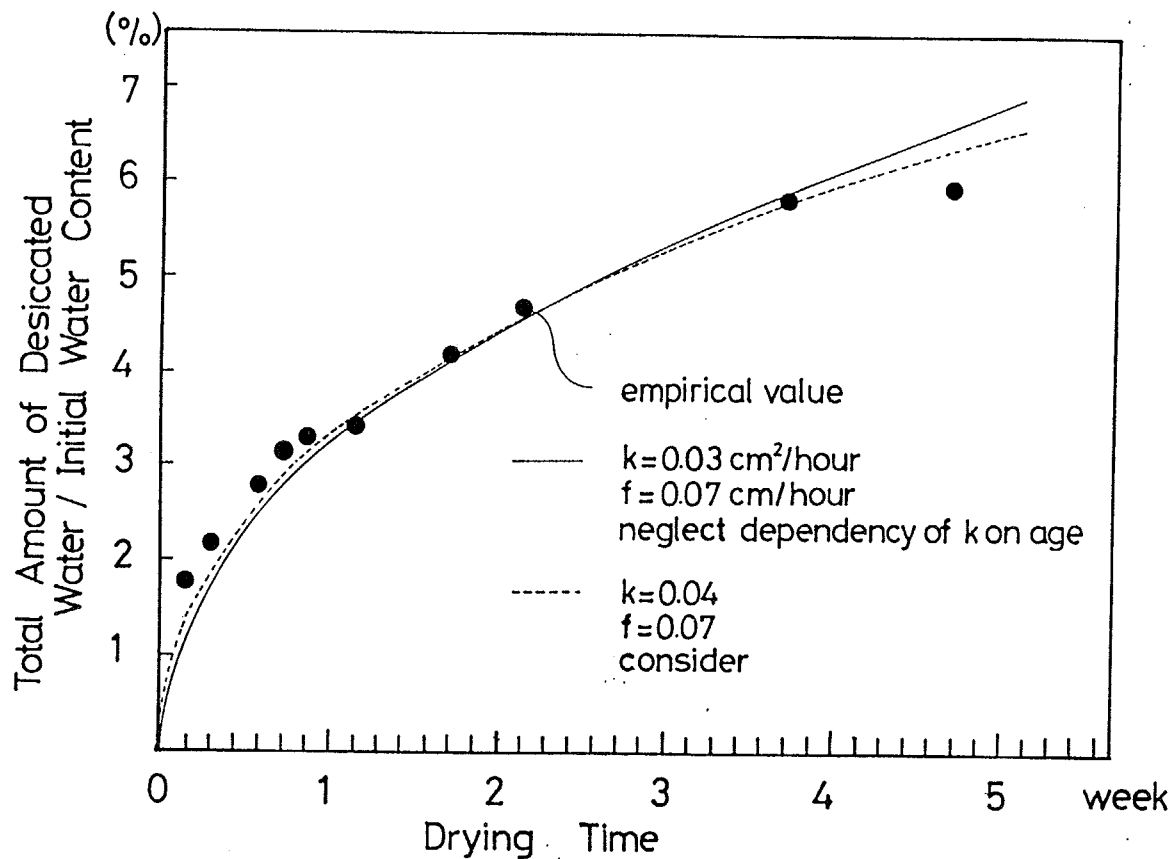


図3.4.4 解析結果（総脱水量の経時変化）

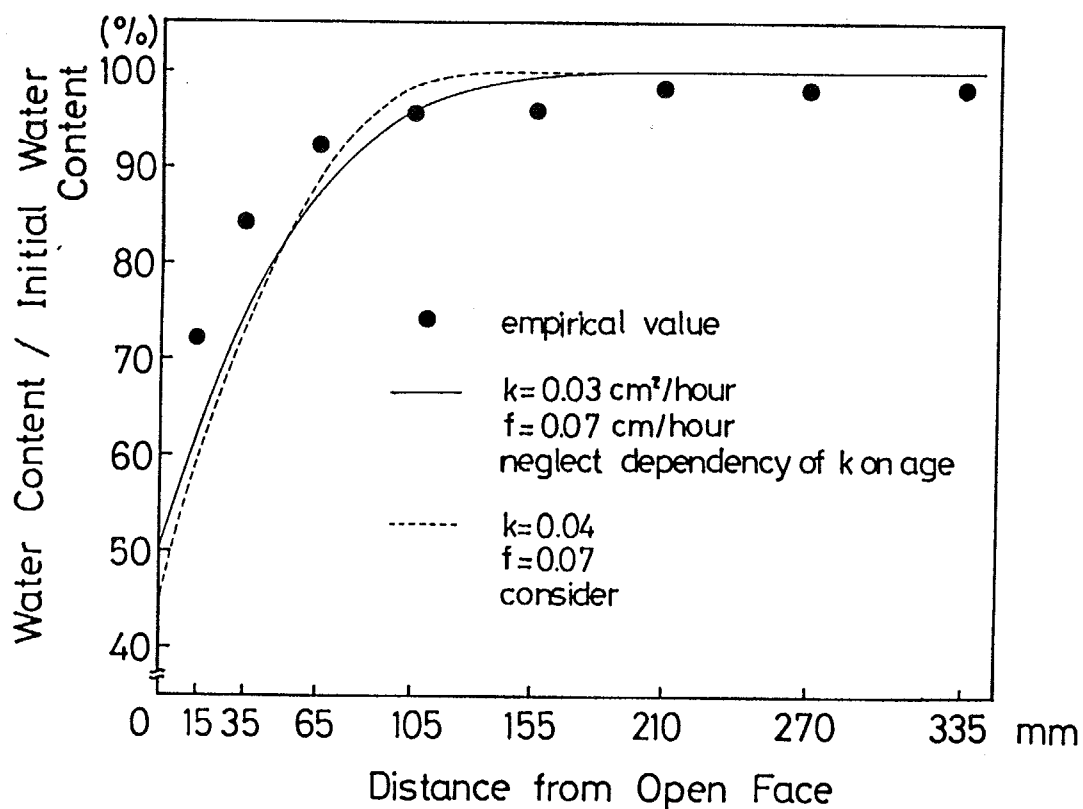


図3.4.5 解析結果（含水率分布）

3. 5 まとめ

本章で得られた知見を要約すれば、以下の通りである。

- (1) 砂・セメント・水重量比が 4 : 2 : 1 のモルタルの含水率と電気抵抗の関係は (3.4) 式で表せる。他のセメント硬化体についても定性的には本実験式の関係がいえる。
- (2) 水セメント比が 50% のモルタルを対象に実験を行い若材令から乾燥を受けるセメント硬化体の含水量分布をコンクリートの電気抵抗特性を利用して推定する手法を提示した。この手法は簡便であり、若材令時も含めたセメント硬化体の含水量の推定に有効である。
- (3) 含水量推定結果と脱水量の経時変化の実測データより拡散係数の推定を行った。具体的には、砂・セメント・水重量比 4 : 2 : 1 のモルタルでは、本解析仮定による拡散係数値は 20℃、材令 2 日で、 $0.04\text{cm}^2/\text{hour}$ 、表面係数値は、 $0.07\text{cm}/\text{hour}$ である。

現段階ではまだ実測データが少なく拡散係数に関する詳細な検討は行えなかったが、含水量分布の経時変化が推定できることで、拡散係数決定のための情報量は格段に増大したものと思われる。

第 4 章

若材令のセメント硬化体 のクリープ特性

4. 若材令のセメント硬化体のクリープ特性

4. 1 はじめに

次章の応力解析においては、コンクリートの応力ひずみ関係は弾性とし、コンクリートのクリープ特性は考慮していない。コンクリートに実際に生じている応力、ひずみを正確に再現することが本解析の目的であれば、当然のことながら、クリープ特性を構成方程式に組み込んだ解析が必要となるが、応力解析の最終的な目的が、「コンクリートのひびわれの発生予測」にあるのであれば、必ずしもクリープ特性を構成方程式に組み込まなくてもよいのではないかと考えている。

弾性解析解とクリープ解析解との間の差異は、自己平衡系の問題を扱っているので、応力緩和という形で生じる。この際、コンクリートの圧縮におけるクリープ係数と引張におけるクリープ係数がほぼ等しく、クリープひずみが応力に比例するならば、応力分布の形、応力の正負の符号は、弾性解析解においてもクリープ解析解においても同様である。差異は、応力の大きさのみに現れるはずである。。

コンクリートのひびわれ発生条件がコンクリートの引張強度を基準に考えられ、コンクリートの引張強度が、持続応力の影響を受けず一定であるならば、弾性解析解とクリープ解析解の差、即ち応力の大きさの差は、「ひびわれの発生予測」に大きな影響を及ぼす。しかしながら、クリープ破壊という例があるように持続応力がコン

クリープ強度に影響を及ぼすことは明かである。クリープ限度荷重以下の持続荷重下でも、持続荷重の影響による引張強度の低下は当然予想されるので、クリープ解析解から直ちにひびわれの判定を行うことはできないはずである。

本章では、引張持続荷重下でのセメントペーストの引張クリープ特性と、持続荷重の引張強度に対する影響を調べた実験結果、および圧縮クリープ特性に関する実験結果を提示し、上記の推論に対して実験的資料を付すことを目的とする。クリープ特性は本来は乾燥クリープをも含めたものについて言及するのが望ましいのであるが、本実験では、第1段階として乾燥を伴わない基本クリープについて調べている。

4. 2 セメントペーストの引張クリープ特性

および持続応力の引張強度に対する影響

4. 2. 1 実験概要

コンクリートのような脆性材料の引張強度は、空隙欠陥等の欠陥による影響が著しく、データが非常にバラつくことが一般である。このばらつきを最小限度に抑える目的から、脆性亀裂の発生点となる危険領域がきわめて小さい範囲に限定される中央集中載荷形式の曲げ試験によって引張クリープ特性を調べた。

供試体は、図4.2.1に示す4 cm×4 cm×16 cmの直方体で水セメント比30%のセメントペースト製である。中央部にはさらに破壊領域を限定する目的で深さ5 mmのノッチが設けてある。供試体打設後、28日間、約18℃下で水中養生し、水中から取り出し、パラフィンワックスで封ろうして水分蒸散を防ぎ14日間の曲げ引張クリープ試験を実施した。

装置の概要を図4.2.2に示す。ひずみは供試体の引張縁の中央部に貼付したゲージ長10 mmのひずみゲージにより測定した。載荷荷重は、引張縁の最大応力度が、4週引張強度の約45、55、64、73、82%に当たる100 kgf、120 kgf、140 kgf、160 kgf、180 kgfである。定荷重は加力部上部に設置されたコイルばねにより導入している。コイルのばね常数は荷重150 kgfでほぼ5 mm縮む程度のものでクリープ変形によって定荷重が変化することはほとんどないものと考えられる。

クリープ試験実施後、曲げ引張強度試験を行った。また、クリープ試験実施後の引張強度との強度比較の目的で、水中養生28日の供試体及び、水中28日養生後14日間封かん養生した供試体について曲げ引張強度試験を行った。供試体数は、28日養生のもので212体、その後封かん養生を行ったもので169体である。

4. 2. 2 実験結果

図4.2.3 に28日及び42日における供試体の引張強度分布を示す。持続荷重の影響により、引張強度が明らかに低下していることが認められる。材令28日のセメントペーストの強度を1とすると、材令42日目には1.91になるのに対し、その間に持続荷重を受けると持続荷重100kgfでは、1.82、120kgfで1.65、140kgfで1.50、160kgfで1.65、160kgfで1.26、180kgfでは1.14にしかない。但し、載荷荷重が180kgfのものについては、載荷直後、あるいは同日中に供試体が破壊したために、データ数は1個にとどまった。これは、180kgfがクリープ限度荷重に達していたためと考えられる。以上の結果より、ひびわれ発生条件に持続荷重の影響を考慮しなければならないことは明白である。

表4.2.1に持続荷重載荷前後のヤング係数の値を、図4.2.4には持続荷重載荷から曲げ引張強度試験までの期間の荷重と引張縁部のひずみの関係の一例を示す。載荷の前後でヤング係数は2～3%しか低下していないのに対して、引張強度は大幅に低下している。図4.2.4の破壊点を結べば、これはまさにセメントペーストの引張破壊曲面そのものである。データ数が現状では少なく確実なことは言えないが、本図を見る限り、引張破壊条件としては限界応力説、限界ひずみ説共に否定されている。このことはクリープ解析解の応力、あるいはひずみの内、どちらか単独ではひびわれの判定は行えないことを示している。

図4.2.5～図4.2.7に各載荷荷重におけるクリープひずみの経時変化を示す。実験データのばらつきは大きいですが、ほぼ載荷荷重に比例してクリープひずみは増大しており、載荷期間14日におけるクリープ係数は、ほぼ0.7～0.8である。表4.2.2に結果をまとめて示した。

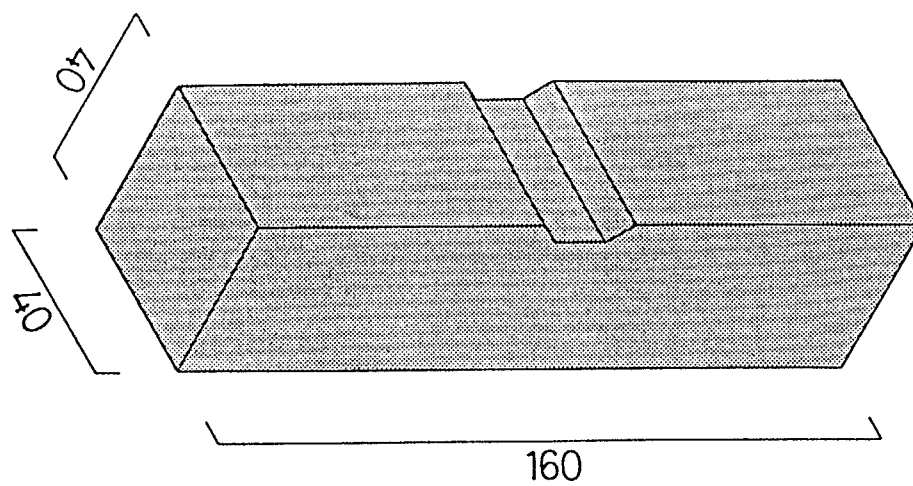


図4.2.1 供試体図

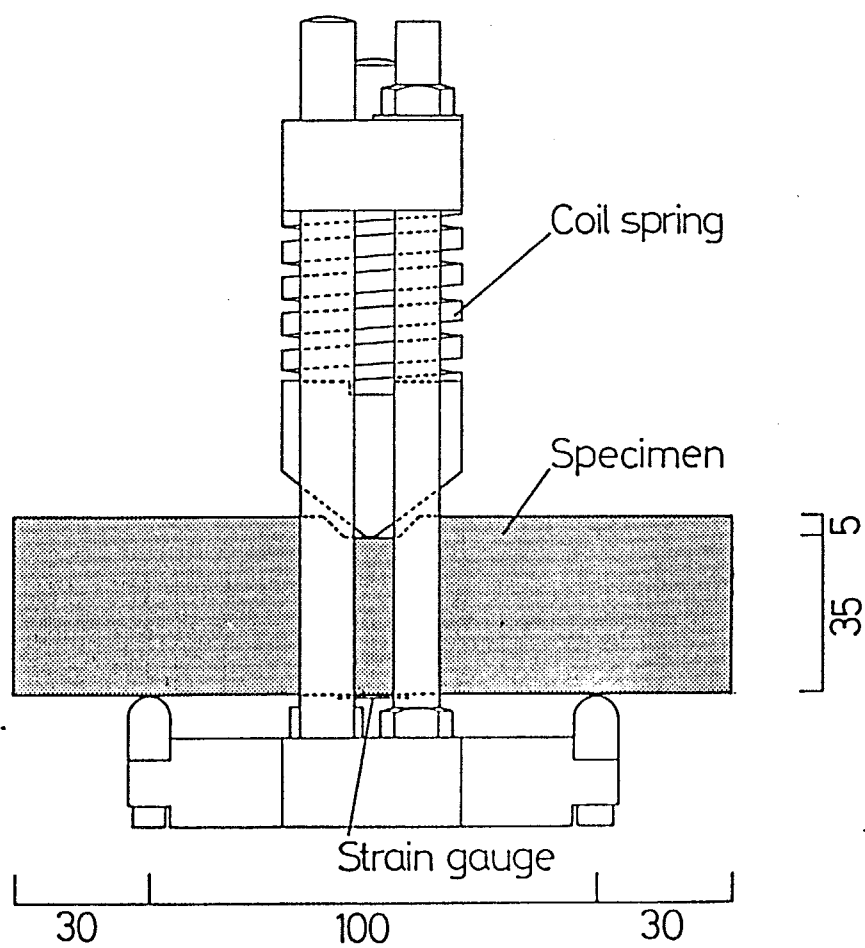


図4.2.2 クリープ試験装置

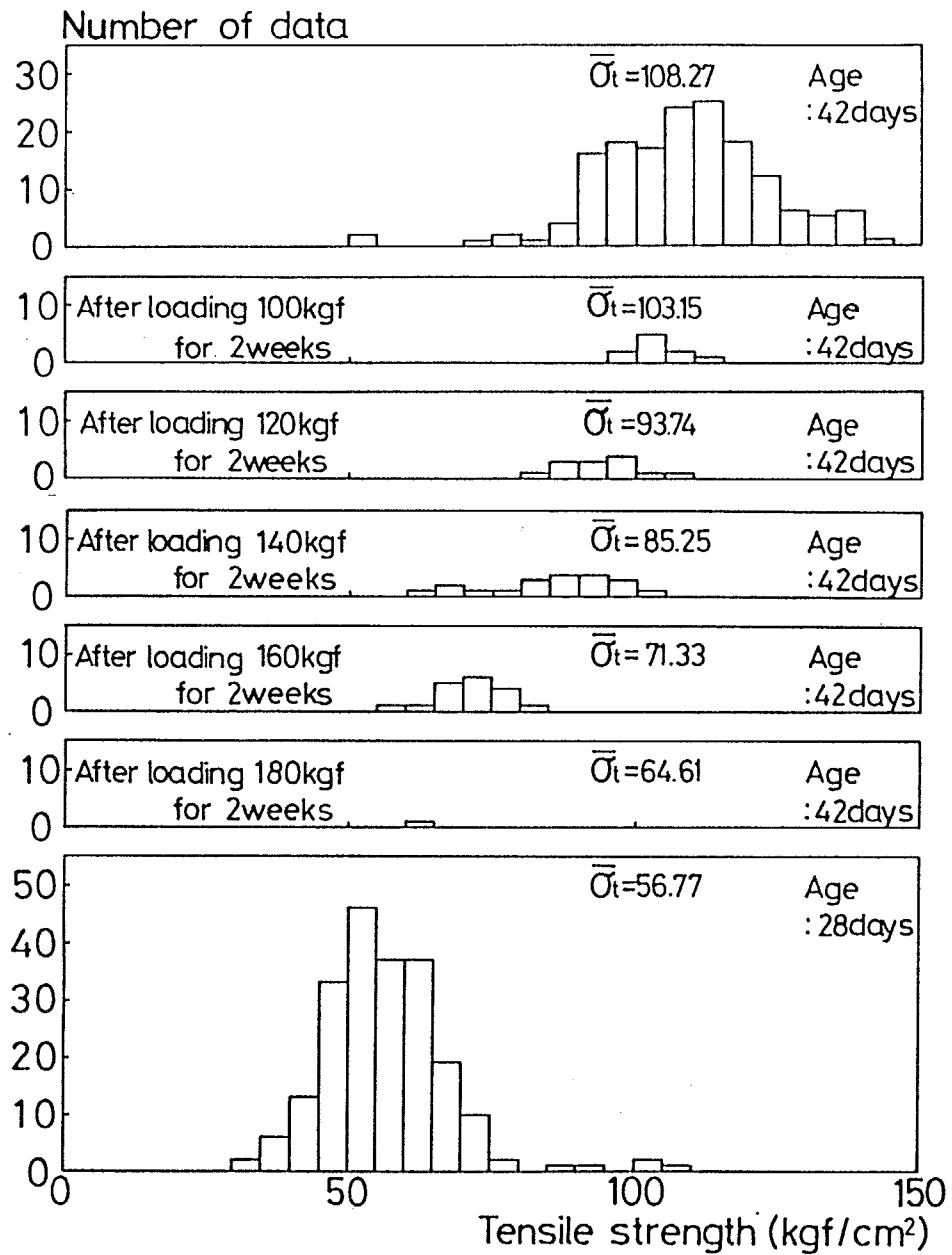


図4.2.3 4週、6週およびクリープ試験後の引張強度分布

表4.2.1 クリープ試験前後のヤング係数の変化

Loading Force (kgf)	Young's modulus (t/cm ²)	
	Before loading	After loading
100	306.8	298.6
120	305.7	299.7
140	326.0	312.3
160	310.0	289.1
180	276.8	265.0
Average	305.1	292.9

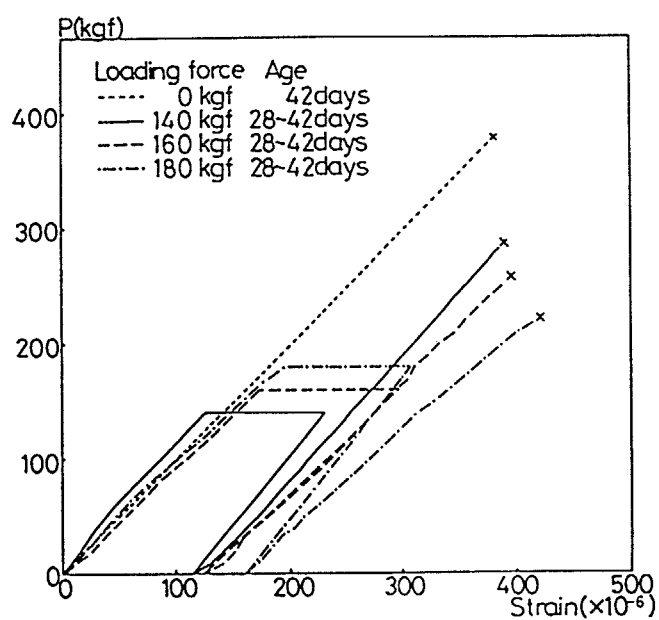


図4.2.4 試験中の荷重と引張線のひずみの関係

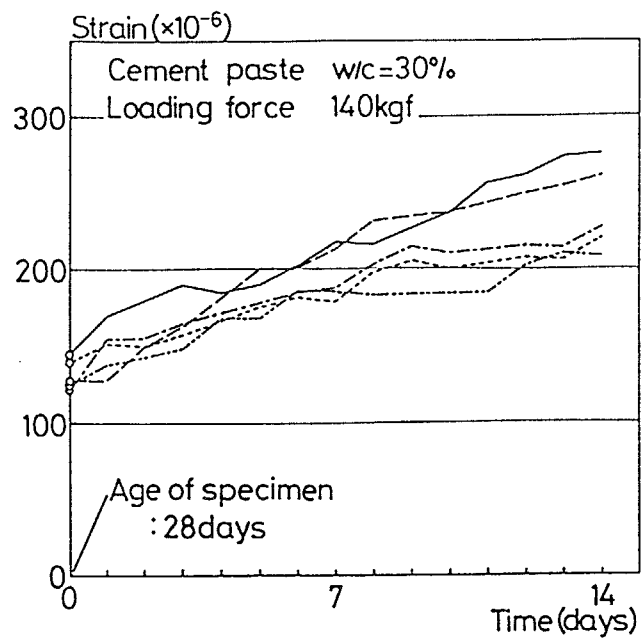


図4.2.5 クリープひずみの経時変化（載荷荷重140kgf）

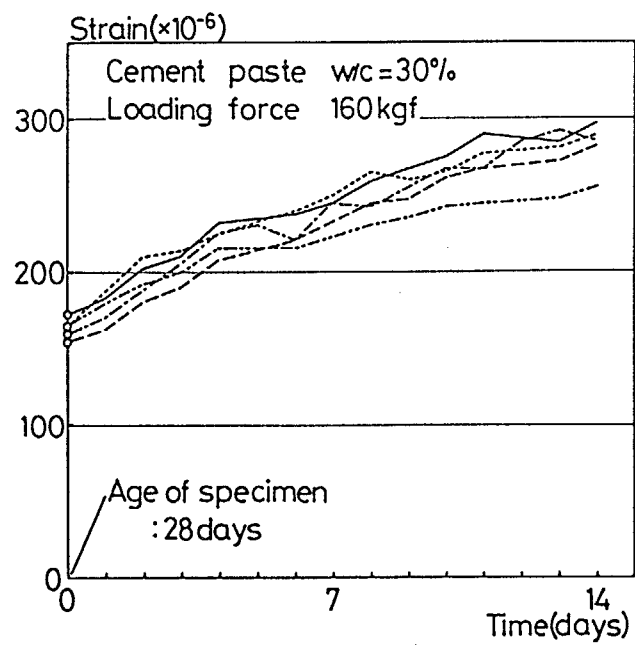


図4.2.6 クリープひずみの経時変化（載荷荷重160kgf）

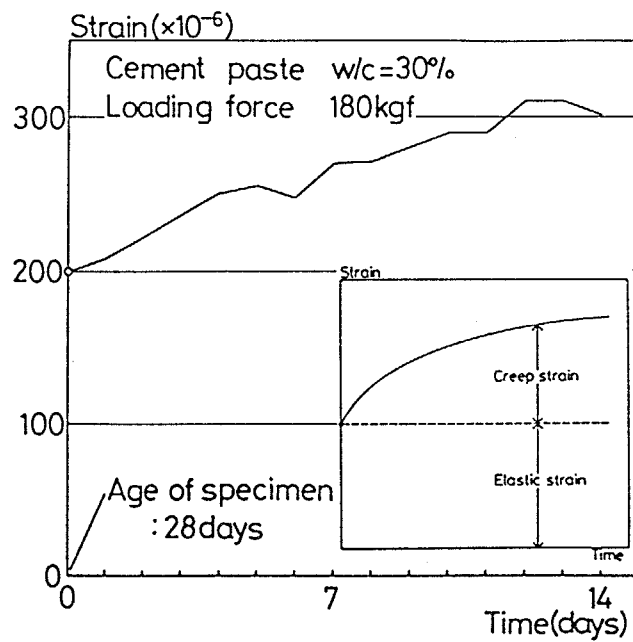


図4.2.7 クリープひずみの経時変化（載荷荷重180kgf）

表4.2.2 試験結果一覧

Loading force (kgf)	Tensile strength due to bending (kgf/cm ²)	Number of data	Average of tensile strength (kgf/cm ²)	Average of creep coefficient
100	30.61	10	103.15	—
120	36.73	13	93.74	—
140	42.86	20	85.25	0.75
160	48.98	18	71.33	0.73
180	55.10	1	(64.61)	(0.53)

4. 3 セメントペーストの圧縮クリープ特性

次にセメントペーストについて行った一軸圧縮クリープ試験の結果について述べる。供試体は5 cm×10 cmの円柱形であり、曲げ引張クリープ試験と同様に打設後28日間水中養生を行った供試体をパラフィンワックスで封ろうし、14日間のクリープ載荷試験を行った。供試体の水セメント比は20%、30%、40%、50%の4種類、載荷応力は、4週圧縮強度の平均値の30%、60%の2種類である。クリープ試験装置の概略を図4.3.1に示す。定荷重は、板ばねを介してP C鋼棒を締め付けることにより導入した。また、供試体の側面に取り付けた2つの変位形により初期長さ80mm間の変位を測定しひずみを計算している。

図4.3.2にクリープひずみの経時変化を示す。水セメント比の違いによるひずみの差異はほとんど見られない。また、載荷荷重の大きさとクリープひずみの間にはほぼ比例関係が認められ、載荷期間14日における圧縮クリープ係数は載荷荷重、水セメント比によらず0.8程度である。

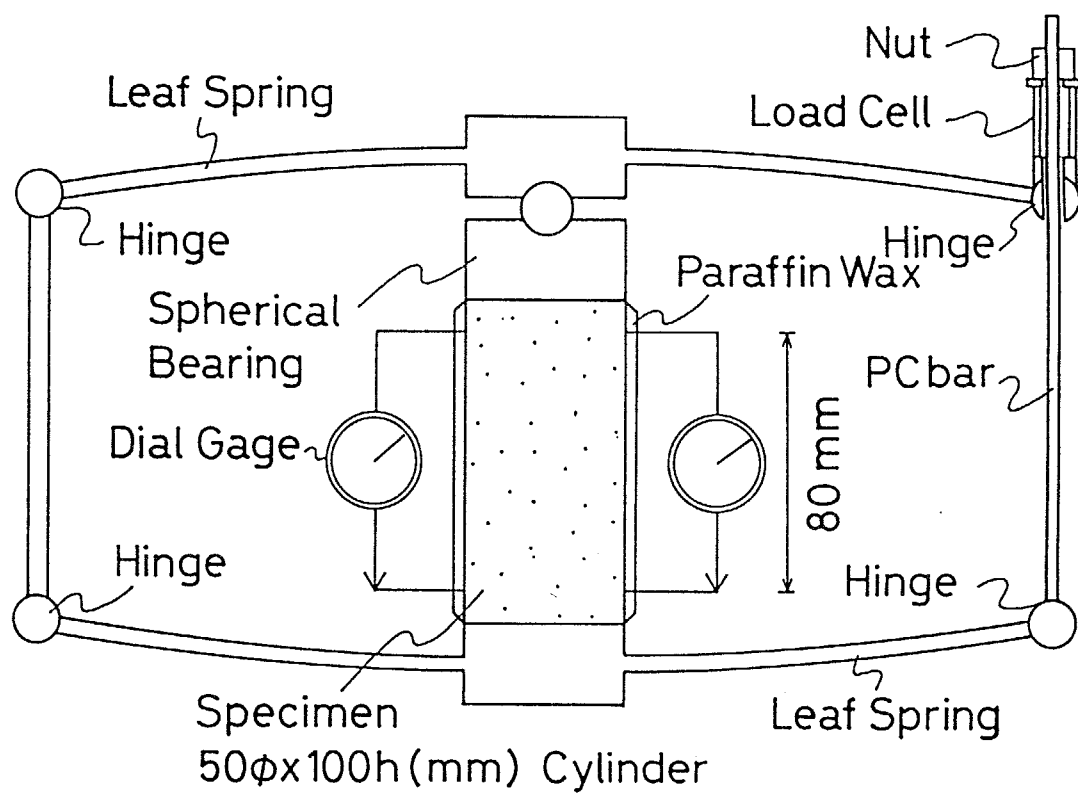


図4.3.1 クリープ試験装置

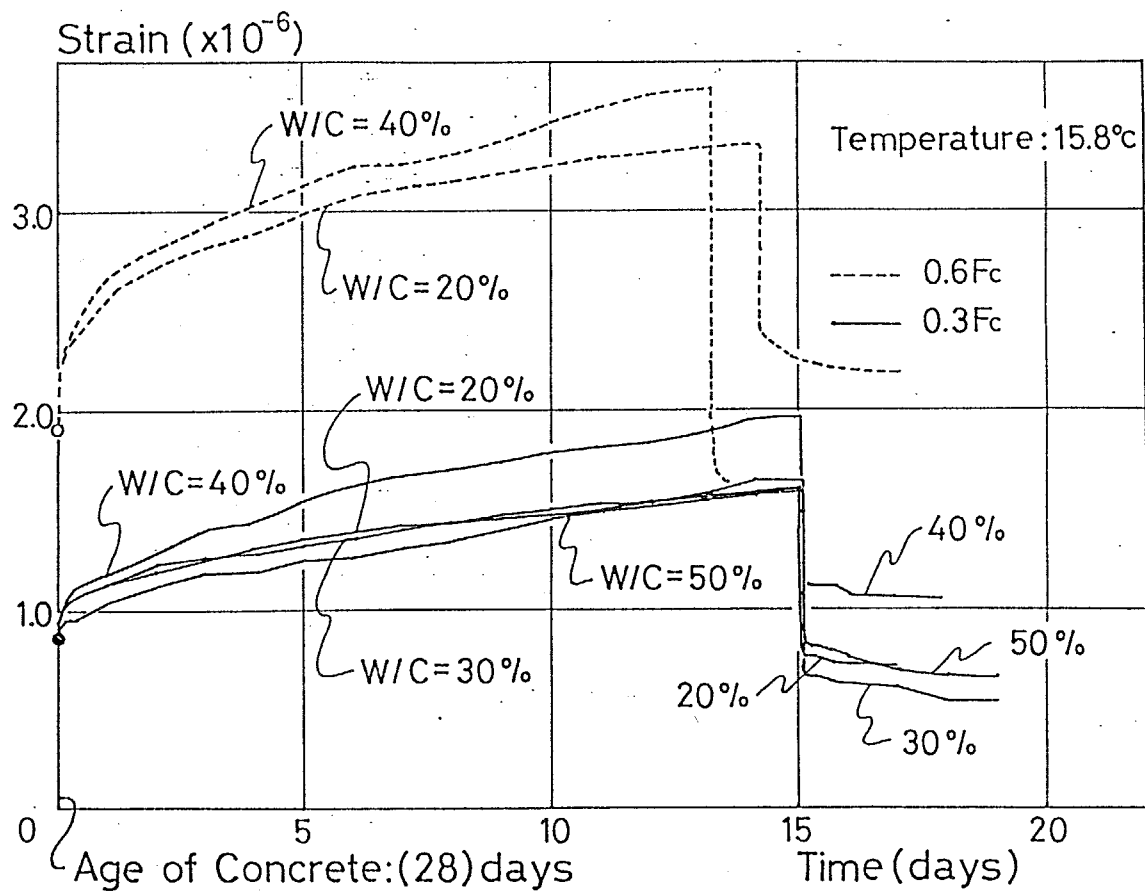


図4.3.2 セメントペーストの圧縮クリープひずみの経時変化

4. 4 まとめ

以上の実験結果より、曲げに対するクリープ係数と圧縮に対するクリープ係数が同等であることから、クリープによって引張応力に除荷が生じることはないといえる。また、持続応力は、クリープ限度荷重に相当する応力度以下であっても引張強度に明かに影響を及ぼしていることから、クリープによって引張応力が緩和される際には必ず引張強度もまた持続応力の影響によって低下するといえる。

応力解析時にコンクリートのクリープ特性を構成方程式に取り込み、クリープを考慮した内部応力を求めることは、実際の応力状態を把握する上では重要であるが、ひびわれの判定を行う際には、クリープ特性を陰的に構成方程式に取り込んでいることから引張強度がどのくらい低下するかという判定が難しくなる可能性がある。また、クリープ解析解からひびわれの判定を行うには応力とひずみの両方を考慮しなければならない。これに対して弾性解析解と引張強度の比較にクリープ特性を何等かの形で陽に考慮してひびわれの判定が行える可能性も存する。この場合は応力のみを用いてひびわれの判定ができる。

いずれにしても最終的にはコンクリートのクリープ特性を考慮する必要があるが、少なくとも応力解析の場においてクリープを考慮して解析を行うことに弾性解析と比較してそれほど大きな意味があるとは思われない。本章の結論としては以下のことが言える。

持続荷重は、コンクリートの引張強度に影響を及ぼす。このことから推し量って、持続的な内部応力もまた引張強度に影響するといえる。従って、単にクリープを考慮した初期応力と引張強度を比較してひびわれの発生を判定することは不可能である。コンクリートのクリープ特性を陰的に構成方程式に組み込んで初期応力解析を行うよりは、弾性解を用い、ひびわれ発生条件にクリープを含む持続荷重の影響を考慮した方が明解にひびわれの判定が行えるものと考ええる。

第 5 章

解析法および解析例

5. 解析法および解析例

5. 1 はじめに

本章では、若材令のコンクリートの初期応力解析手法を述べ、若干の解析例を提示する。解析法は、フーリエの熱伝導に関する法則を基礎とした温度・水分移動解析と線形応力解析よりなっている。

5. 2 温度解析および水分移動解析法

5. 2. 1 基礎方程式

まず、温度解析における熱の移動則について述べる。

コンクリートが等方均質材料であるという仮定のもとで、コンクリート内部に図5.2.1に示す微小六面体を考える。各辺の長さ δx 、 δy 、 δz を十分小さくとれば、各面は等温面と見なしてよい。この六面体の中心 P の座標を (x, y, z) 、温度を T とすれば、P 点から x 方向に $\pm \delta x / 2$ だけ離れた面 1 及び、2 の温度は、

$$\text{面 1 :} \quad T - \frac{dT}{dx} \cdot \frac{\delta x}{2} \quad (5.1)$$

$$\text{面 2 :} \quad T + \frac{dT}{dx} \cdot \frac{\delta x}{2} \quad (5.2)$$

である。したがって面積 $\delta y \cdot \delta z$ の面 1 から微小時間 dt にこの六面体に入ってくる熱量 dQ_1 は、個体内の熱伝導に関して

$$dQ_1 = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dA \cdot dt \quad (5.3)$$

λ : 熱伝導率、

A : 面積

となるのと同様に、

$$dQ_1 = -\lambda \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left\{ T - \frac{dT}{dx} \cdot \frac{\delta x}{2} \right\} \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.4)$$

となる。同様に、面 2 から流出する熱量 dQ_2 は、

$$dQ_2 = -\lambda \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left\{ T + \frac{dT}{dx} \cdot \frac{\delta x}{2} \right\} \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.5)$$

となる。したがって、 x 方向についての熱量の差引は次式で表せる。

$$x \text{ 方向: } dQ_1 - dQ_2 = \lambda \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.6)$$

同様に、 y 方向、 z 方向についても次式が成り立つ。

$$y \text{ 方向: } \lambda \cdot \frac{d^2 T}{dy^2} \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.7)$$

$$z \text{ 方向: } \lambda \cdot \frac{d^2 T}{dz^2} \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.8)$$

結局、この微小六面体中に残る差引正味の熱量は、3 方向についての和をとればよく、次式となる。

$$\lambda \cdot \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.9)$$

これだけの熱量がこの微小六面体の温度を、 dT 上昇させる。比熱を C 、密度を ρ とすれば dt 時間に温度を dT だけ上昇させるのに要する熱量は、

$$C \cdot \rho \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dT \quad (5.10)$$

である。これと先の正味の熱量が等しくなければならないから、結局、次式を得る。

$$C \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda \cdot \nabla^2 \cdot T \quad (5.11)$$

$$\nabla^2: \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

上式は、物体内部に発熱がない場合の熱伝導方程式である。単位体積、単位時間当りに一様な発熱 $\dot{Q}$ がある場合には、微小六面体に残る熱量は、

$$\lambda \cdot \nabla^2 \cdot T \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt + \dot{Q} \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \cdot dt \quad (5.12)$$

であるから、熱伝導方程式は次式となる。

$$C \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda \cdot \nabla^2 \cdot T + \dot{Q} \quad (5.13)$$

これが、一様な発熱がある場合の基礎方程式である。

続いて境界条件式について述べる。コンクリート表面からの熱の散逸は一般的に熱伝達現象と考えられている。熱伝達現象では、境界をまたいで伝達される熱量 Q は、両者の温度差 $(T - T_\infty)$ 、境

界の表面積 A 、及び時間 t に比例するので、その比例定数を α_c とすれば、

$$Q = \alpha_c \cdot (T - T_\infty) \cdot A \cdot t \quad (5.14)$$

と表せる。単位面積を単位時間に通過する熱量、すなわち熱流束を q とおけば、熱流束は、

$$q = Q / (A \cdot t) \quad (5.15)$$

であり、また、

$$q = \lambda \cdot \nabla T \quad (5.16)$$

$$\nabla : \frac{d}{dx} + \frac{d}{dy} + \frac{d}{dz}$$

と表せる。したがって、境界条件式は次式となる。

$$\lambda \cdot \nabla T = \alpha_c \cdot (T - T_\infty) \quad (5.17)$$

以上が温度解析における基礎式の概要である。

次に、水分移動に関する基礎方程式について述べる。フィックによれば、物質拡散は、熱伝達と相似の現象と考えられる。熱伝導方程式と同様に x 方向への拡散は、

$$\omega_i = -D \cdot \frac{dc_i}{dx} \quad (5.18)$$

ω_i : 物質*i*の物質拡散流束

D : 拡散係数

c_i : 物質*i*の質量濃度

となる。したがって、これを三次元に拡張すると、熱伝導方程式と同様の定式化により次式となる。

$$\frac{dc_i}{dt} = D \cdot \nabla^2 c_i \quad (5.19)$$

また、化学反応その他によって、物質*i*が生成あるいは消滅する場合には、単位容積、単位時間当りのその量を $\dot{W}$ とすれば、拡散方程式は次式となる。

$$\frac{dc_i}{dt} = D \cdot \nabla^2 c_i + \dot{W} \quad (5.20)$$

コンクリートの水分蒸散を考えているので、上式の物質*i*の質量濃度は、蒸発可能な水量(w_e)を示す。また、拡散係数 D をコンクリートの透湿率を表す k に書き換えて、次式のようなコンクリートに関する拡散方程式を得る。

$$\frac{d w_e}{d t} = k \cdot \nabla^2 w_e - \dot{w}_n \quad (5.21)$$

$\dot{w}_n$: 単位時間、単位体積当りに増加する非蒸発水量

また、境界条件は、温度解析の場合と同様に物質の拡散流束が時間、物質濃度差、表面積に比例するものと考えれば、次式となる。

$$k \cdot \nabla w_e = f \cdot (w_e - w_\infty) \quad (5.22)$$

以上、温度解析、水分移動解析における基礎式について述べた。

5. 2. 2 基礎方程式の有限要素定式化

温度解析における基礎式も、乾燥解析における基礎式も同様の形の式なので、本節では、温度解析を中心に基礎式の有限要素定式化について述べる。

基礎方程式(3.1)式、境界条件式(3.2)式は、いずれもコンクリートの状態変数を含んでいるため、非線形の微分方程式となっているが、微小空間内、微小時間では、コンクリートの状態変数を一定値と見なし得るならば、基礎式は、線形方程式として解析することができる。いま、微小要素内での温度分布を次式で仮定し得るものとする。

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \cdot \{\phi(t)\} \quad (5.23)$$

ここに、 $[N]$ は形状関数マトリックス、 $\{\phi\}$ は時刻 t における温度である。

$[N]$ を重み関数として(3.1)式にGalarkin法を適用すると、次式を得る。

$$\int_{V_e} [N]^T \left\{ \lambda \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) + Q - \rho c \frac{dT}{dt} \right\} dV = 0 \quad (5.24)$$

部分積分公式を用いて (3.6) 式の 2 階の微分項を変形すれば、次式を得る。

$$\begin{aligned}
& - \int_{V_e} \lambda \left(\frac{d[N]^T}{dx} \cdot \frac{d[N]}{dx} + \frac{d[N]^T}{dy} \cdot \frac{d[N]}{dy} + \frac{d[N]^T}{dz} \cdot \frac{d[N]}{dz} \right) dV \cdot \{\phi(t)\} \\
& - \int_{S_e} q \cdot [N]^T dS + \int_{V_e} Q \cdot [N]^T dV - \int_{V_e} \rho c \cdot [N]^T [N] dV \cdot \frac{d\{\phi(t)\}}{dt} \\
& = 0
\end{aligned} \tag{5.25}$$

ここに、(3.7) 式の第 2 項は、要素への熱流束を表す。結局、(3.7) 式を整理すると、非定常熱伝導問題に対する要素の有限要素式は次式となる。

$$[k]\{\phi\} + [c]\left\{\frac{d\phi}{dt}\right\} = \{f\} \tag{5.26}$$

$$[k] = \int_{V_e} \lambda \left(\frac{d[N]^T}{dx} \cdot \frac{d[N]}{dx} + \frac{d[N]^T}{dy} \cdot \frac{d[N]}{dy} + \frac{d[N]^T}{dz} \cdot \frac{d[N]}{dz} \right) dV \tag{5.27}$$

$$[c] = \int_{V_e} \rho c \cdot [N]^T [N] dV \tag{5.28}$$

$$\{f\} = \int_{V_e} Q \cdot [N]^T dV - \int_{S_e} q \cdot [N]^T dS \tag{5.29}$$

全ての要素に関して (3.8) 式の和をとると全体の有限要素式を得ることができるが、この際、(3.11) 式の第 2 項は隣接する要素の境界で互いに相殺され外部境界条件のみが残ることになる。本解析では、境界条件を熱伝達のみと考えているので (3.11) 式の第 2 項は次式で

表せる。

$$\int_{S_e} q \cdot [N]^T dS = \int_{S_e} \alpha c \cdot (T - T_c) [N]^T dS \quad (5.30)$$

以上の式展開により基礎方程式は、空間的に離散化が施され、全体の有限要素式は次式のように表現できる。

$$[K] \{\Phi\} + [C] \left\{ \frac{d\Phi}{dt} \right\} = \{F\} \quad (5.31)$$

次に時間についての離散化手法について述べる。時間的離散化については、本解析法ではCrank-Nicolson差分法を用いる。即ち、時刻 $t + \Delta t / 2$ (Δt : 微小時間増分) における温度を、

$$\{\Phi(t + \Delta t / 2)\} = \frac{1}{2} (\{\Phi(t + \Delta t)\} + \{\Phi(t)\}) \quad (5.32)$$

で与え、温度の時間微分を

$$\left\{ \frac{d}{dt} \Phi(t + \Delta t / 2) \right\} = \frac{\{\Phi(t + \Delta t)\} - \{\Phi(t)\}}{\Delta t} \quad (5.33)$$

で与えるものである。(3.14)式、(3.15)式を(3.13)式に代入すると次式が得られる。

$$\left(\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \cdot \{\Phi(t + \Delta t)\} =$$

$$\left(-\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C]\right) \cdot \{\Phi(t)\} + \{F\} \quad (5.34)$$

以上が、熱伝導方程式の有限要素定式化の概要である。乾燥解析における拡散方程式の離散化もほぼ同様の手法によることができる。

5. 2. 3 解析上の仮定

解析上の仮定および解析に必要な物理定数について以下に述べる。

a) 水和の進行は、水和反応速度に対する骨材の影響はそれほど大きくないものと考え、コンクリートを対象にする場合においても2章で提示した実験式(2.11)式により表し得るものとする。(3.1)式、(3.3)式中の単位時間単位体積当りの発熱量 $\dot{Q}$ 、結合水量 $\dot{w}_n$ はそれぞれ次式で定めた。

$$\dot{Q} = \frac{Q_0}{\alpha} \cdot \dot{w}_n \quad (5.35)$$

$$\dot{w}_n = a' \cdot (W_n - w_n)^2 \quad (5.36)$$

Q_0 はセメントが単位重量発熱したときの発熱量であり、本解析法では $Q_0 = 90 \text{ (kcal/kg)}$ とする。

b) 比熱 C および密度 ρ は、コンクリートの構成材料である水、セメント、砂、砂利毎に表5.2.1に示す値とし、調合に応じて算出する。比熱は水和物の生成によって変化することはないものとするが、脱水が生じた場合、含水量に応じて密度及び比熱を変化させる。

c) 熱伝導率 λ 、熱伝達率 α 、拡散係数 k 、表面係数 f は、以下の値を用いた。これらの物理定数はコンクリートの調合との関係を求めるまでには至っておらず、本解析例題のコンクリートの調合に

限り用いた値である。熱伝導率、熱伝達率は一般的なコンクリートの値を、拡散係数、表面係数については未だ不明な点も多いが、3章で調べた砂・セメント・水重量比が4:2:1のモルタルの値を準用した。これらの値は、文献[27]に示される拡散係数、表面係数と同オーダーの値を用いており、解析結果の妥当性を著しく損なうものではないものとする。

$$\lambda = 2.0 \quad \text{kcal/m} \cdot \text{hour} \cdot ^\circ\text{C} \quad (5.37)$$

$$\alpha_c = 10.0 \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{hour} \cdot ^\circ\text{C} \quad (5.38)$$

$$k_g = 4.0 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{hour} \quad (5.39)$$

$$f_g = 7.0 \times 10^{-4} \quad \text{m}/\text{hour} \quad (5.40)$$

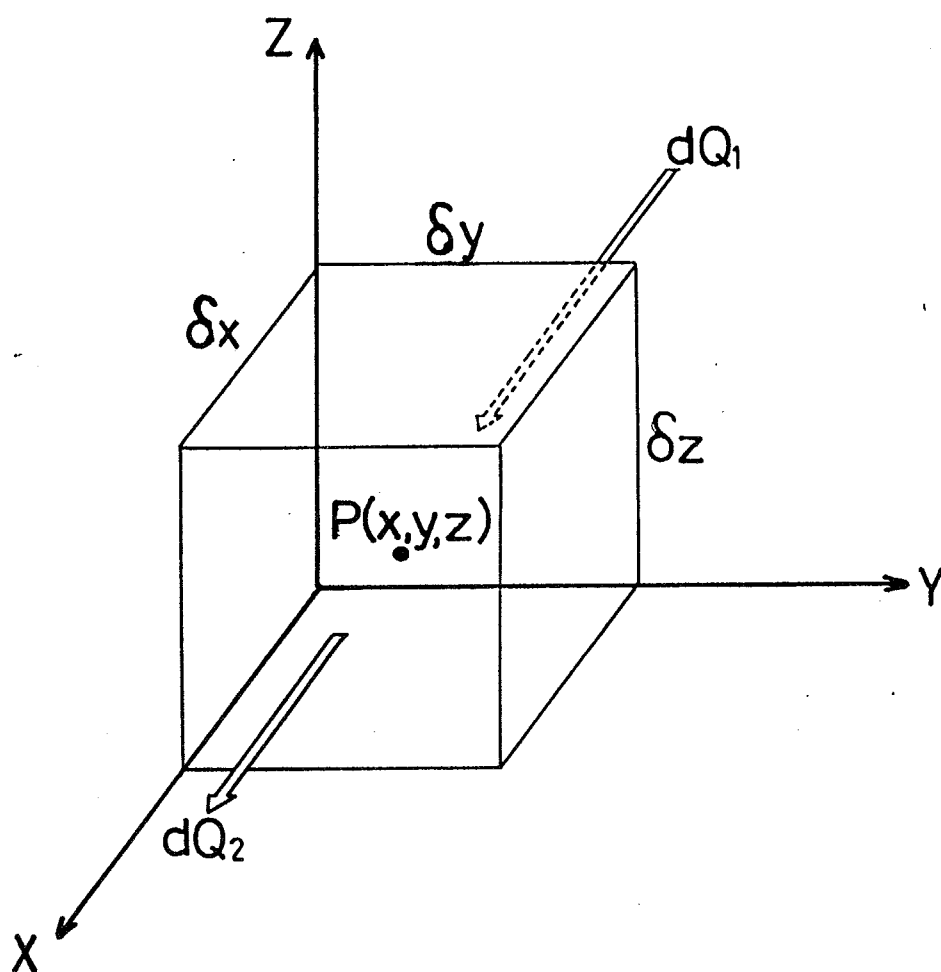


図5.2.1 コンクリート微小六面体

表5.2.1 コンクリートの構成材料の密度および比熱

	density ρ (kg/m^3)	specific heat C ($\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$)
water	1.0×10^3	1.0
cement	3.15×10^3	0.061
sand	2.3×10^3	0.2
gravel	2.6×10^3	0.2

5. 3 応力解析法

5. 3. 1 解析手法

温度解析および水分拡散解析における時間ステップ毎の温度上昇量 ΔT 、脱水量 Δw_d より次式から体積ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_0$ を求め、応力解析を行った。

$$\Delta \varepsilon_0 = \alpha_T \cdot \Delta T - \alpha_s \cdot \Delta w_d \quad (5.41)$$

応力解析は、変位法による有限要素法に依った。以下に、有限要素定式化について述べる。

系が $\{\varepsilon_0\}$ なる内部ひずみにより、 $\{\varepsilon\}$ なるひずみ状態で平衡に達したものとすると、内部に生じる応力 $\{\sigma\}$ は次のように表せる。

$$\{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \quad (5.42)$$

また、系に蓄えられるひずみエネルギー U は次式で表せる。

$$U = \frac{1}{2} \int \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV - \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon_0\} dV \quad (5.43)$$

ここで、変位-ひずみマトリックス $[B]$ を介して $\{\varepsilon\}$ を変換すれば

$$\{\varepsilon\} = [B] \{U\} \quad (5.44)$$

となる。(4.4)式を(4.3)式に代入し、 $\{U\}$ に関して第1変分をとれば、系の平衡方程式は結局次式で表されることになる。

$$\int [B]^T [D] [B] \{U\} dV - \int [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV = 0 \quad (5.45)$$

以上が応力解析の有限要素定式化に関する概要である。具体的には、要素として6節点三角形要素を用い、(4.1)式で示される体積ひずみ増分および弾性係数は要素内で線形分布するものとした。要素内のひずみエネルギーの計算はガウス点を設け、数値積分によった。

5. 3. 2 解析上の物理定数に関する仮定

解析上の仮定および解析に必要な物理定数について以下に述べる。

a) 熱膨張率 α_T は、 1.0×10^{-5} ($1/^\circ\text{C}$)、乾燥収縮率 α_s は含水量 1kg/m^3 の散逸当り 2.0×10^{-6} (m^3/kg) とする。蒸発可能水 w_e 中、結合水量 w_b の 60% (結合セメント量の 15%) をゲル水と考え、これが散逸する際は、乾燥収縮率 α_s を 6.0×10^{-6} (m^3/kg) とする。熱膨張率は一般的なコンクリートの値を用いている。また、乾燥収縮率に関しては、完全に水和が終了し、蒸発可能水が全て散逸したときの乾燥収縮ひずみが 400×10^{-6} 程度となるように定めたものである⁵³⁾。この乾燥収縮率は本解析例題の水セメント比 50%、単位水量 180kg/cm^2 のコンクリートにおいてそれほど不自然な値ではないものとする。

b) 結合水量とヤング係数の関係はセメントペーストについて第 2 章で提示した (2.1)、(2.2) 式の関係が得られているが、いずれもある結合水量に達するまではヤング係数が発現しない結果となっている。セメントペーストでは、セメント粒子間の結合が供試体全体に及ばないと構造体として剛性を生じないので、この結果はほぼ妥当であると考えられる。しかし、コンクリートの場合骨材が存在するため、剛性を生じさせるためには骨材間の接着が起これば良いことから、セメントペーストに比べ少ない結合水量で剛性を生じる可能性がある。従ってコンクリートのヤング係数に (2.1)、(2.2) 式を用いることは不適當と考えられる。本解析では、体積弾性係数 K_v を

一定とし、偏差応力に対する弾性係数 K_s が結合水量に比例するものとした。解析例題では、完全に水和が終了した時点におけるヤング係数が $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比が $1/6$ となるように K_v 、 K_s を次式で定めた。

$$K_v = 3.75 \times 10^5 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (5.46)$$

$$K_s = \frac{4}{7} \cdot K_v \cdot \frac{w_n}{W_n} \quad (5.47)$$

なお、ヤング係数 E およびポアソン比 ν は、 K_v 、 K_s を用いて次式で表せる。

$$E = \frac{3 \cdot K_v \cdot K_s}{2 \cdot K_v + K_s} \quad (5.48)$$

$$\nu = \frac{K_v - K_s}{2 \cdot K_v + K_s} \quad (5.49)$$

5. 4 解析例

5. 4. 1 解析対象および解析条件

解析対象は、図5.4.1に示す 60cm×100cmのコンクリート柱の1/4部分である。コンクリートの調合を表3.5.1に示す。初期条件は、外気温20℃、初期コンクリート温度20℃、相対湿度60%とし、乾燥開始時刻は2日として解析を行った。また、応力解析は、2次元の変位自由度を有する2次元モデルを用いているが、柱の軸方向の境界条件としては、断面は平面を保持した状態で軸方向に収縮、あるいは膨張すると考えるのが適当であることから、軸方向の平均ひずみ ε_{z0} を考慮している。

5. 4. 2 温度解析および水分移動解析結果

境界条件を断熱、非乾燥とした場合の温度と材令の関係を図5.4.2に示す。プロットが解析結果、実線がコンクリート標準示方書⁵⁵⁾に示される同一調合、外気温20℃の標準的な断熱温度上昇曲線である。これより、コンクリートの水和反応速度式が、第2章で提示した実験式(2.11)式に従うこと、およびコンクリートの水和発熱量に関する仮定は妥当なものと言える。

図5.4.3に柱の中心部と隅角部の温度履歴を示す。温度は、打設1日後に中心部でほぼ40℃まで上昇した後、次第に降下する。中心部と縁部の温度差の最大値は本解析条件で、15℃程度である。また、図5.4.4の(a)から(g)には、断面内の温度分布を示した。

図5.4.5に総脱水量の履歴を示す。縦軸は、総脱水量の初期練り混ぜ水量に対する重量百分率である。3章で示した一軸脱水試験結果と同様な脱水履歴を示している。

図5.4.6に結合水量、含水量履歴を示す。実線が隅角部の、破線が中心部の履歴を示している。まず、結合水量の履歴についてみると、乾燥開始以前の材令においても温度差による結合水量の差異が相当認められる。非乾燥の場合、この結合水量の差異は、材令が進むにつれ減少し、最終的には零になるものであるが、途中で乾燥を受けると乾燥との相乗効果により中心部と縁部の水和の程度の差異は相当大きくなるといえる。また、含水量履歴より、隅角部では乾燥開

始後の脱水が著しく、乾燥開始1日後にはほぼ蒸発可能水の全量が蒸発してしまっているのが認められる。

乾燥開始後の断面内の脱水量分布を図5.4.7の(a)から(e)に示す。本解析によれば、周辺からほぼ5cm程度までの脱水が著しく、周辺部のコンクリートは乾燥による材料特性への影響が大きいと考えられる。

図5.4.8(a)および図5.4.8(b)に、柱の中心部と隅角部における練り混ぜ水の様態の経時変化を示す。初期練り混ぜ水は水和の進行にしたがって結合セメント量の25%が化学的にセメントと結び付いた結合水に、結合セメント量の15%が水和物に分子間力により吸着したゲル水に変わる。乾燥開始と共に蒸気圧の大きいキャピラリー水の蒸散が始まり、その後ゲル水が脱水する。柱の隅角部ではゲル水が乾燥後比較的早期に散逸することがわかる。

5. 4. 3 応力解析結果

図5.4.9(a)から図5.4.9(c)に乾燥前の柱の短辺方向応力、長辺方向応力、軸方向応力の履歴を示す。実線が長辺方向縁部、破線が短編方向縁部、点線が中心部、1点鎖線が隅角部の応力履歴を示している。はじめは、中心部の温度上昇が周辺に比べ大きいため、断面内の不均一な膨張により縁部は引張応力場、中心は圧縮応力場となる。材料性質に変化が無い場合はこの応力は温度降下とともに減小し、最終的には零になるのであるが、コンクリートでは、膨張過程においても水和が進行し硬化していくので、温度降下後には温度上昇時とは逆に周辺部が圧縮応力場、中心部が引張応力場となる。建築構造物の通常の柱程度のスケールのコンクリートでは温度応力は引張で約 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度に過ぎない。

図5.4.10(a)から図5.4.10(c)に乾燥開始材令後も含めた応力履歴を示す。前図と同様に柱の短辺方向応力、長辺方向応力、軸方向応力の順に示している。また、線種も前図と同様である。乾燥により、周辺部は急激に引張応力場に移行するのに対して、中心部ではほとんど応力が生じていない。周辺部の応力レベルは、いずれも通常のコンクリートの引張強度を明かに超えており、ひびわれの発生している可能性がきわめて大きい。解析では、周辺部の周方向の応力レベルは軸方向応力と同等であり、柱表面は等2軸引張場に近い状態になっているが、柱には通常、応力でいえば引張強度と同程度の軸圧縮力がかかるので、実際には、周方向応力が卓越する状態になっていることが考えられる。したがって、柱表面には軸方向に沿って

ひびわれが発生する可能性が高いといえる。

図5.4.11(a)から図5.4.11(h)に短辺方向応力分布の時刻歴を、図5.4.12(a)から図5.4.12(h)に長辺方向応力分布を、図5.4.13(a)から図5.4.13(h)に軸方向応力分布を示す。いずれの図からも温度応力が、周辺部が引張場から圧縮場へ変わる様子や乾燥により周辺部がきわめて大きい引張応力場に移行する様子が伺える。また、乾燥による周辺の引張応力は引張場となるコンクリートのすぐ内側のコンクリートの圧縮応力により釣り合っており、乾燥が中心部の応力に与える影響は小さいことがわかる。

図5.4.14に軸方向ひずみの履歴を示す。軸方向ひずみは乾燥の影響に比べて温度変化の影響が大きい。また、乾燥初期では断面内の含水状態の不均一性に起因するひびわれの問題に比べ、軸収縮による外部拘束的なひびわれの問題は小さいことがわかる。

表5.4.1 コンクリートの調合表

W/C (%)	Mix proportion (kg/m ³)				Air (%)
	water	cement	sand	gravel	
50	180	360	783	956	4

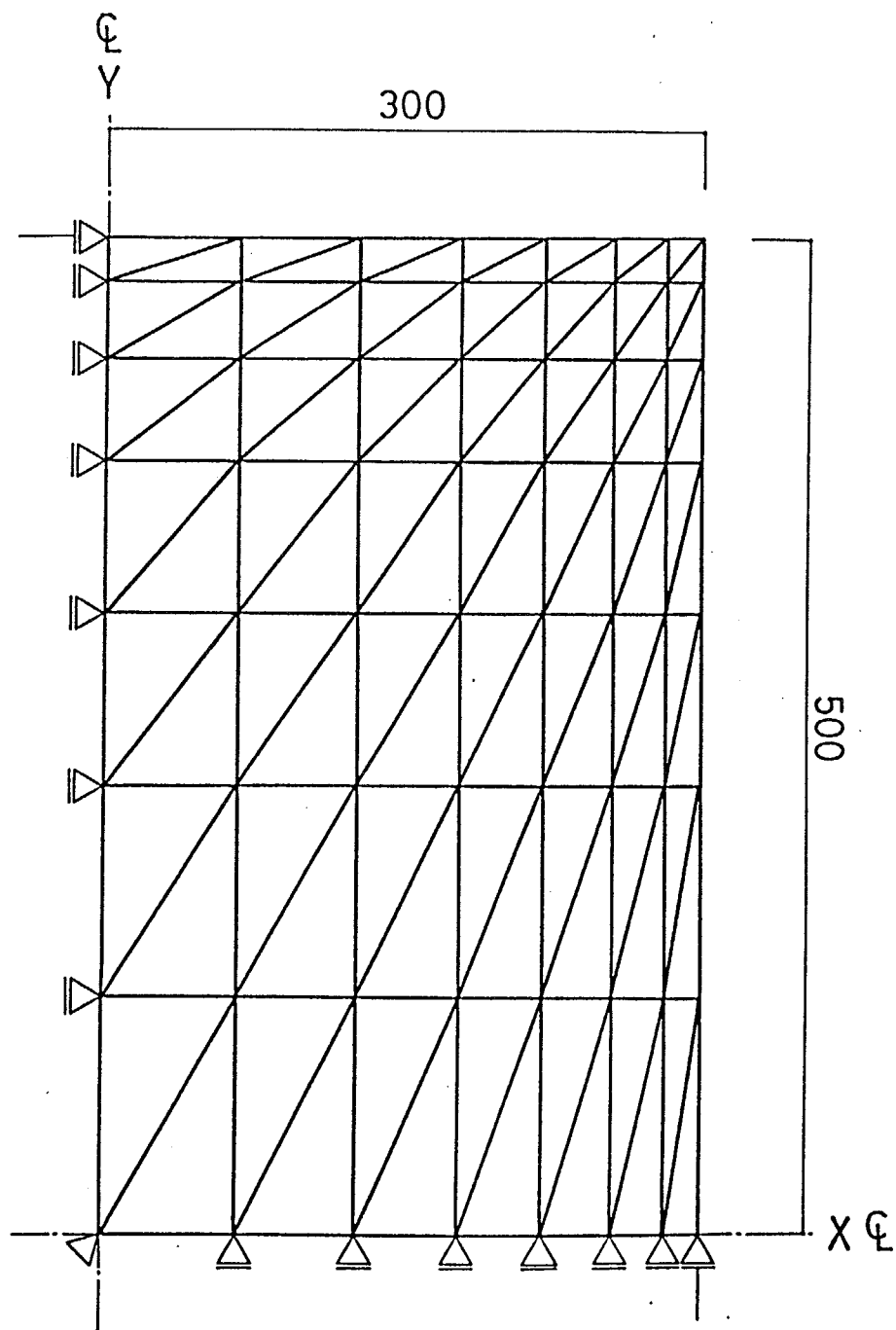


図5.4.1 解析対象および要素分割

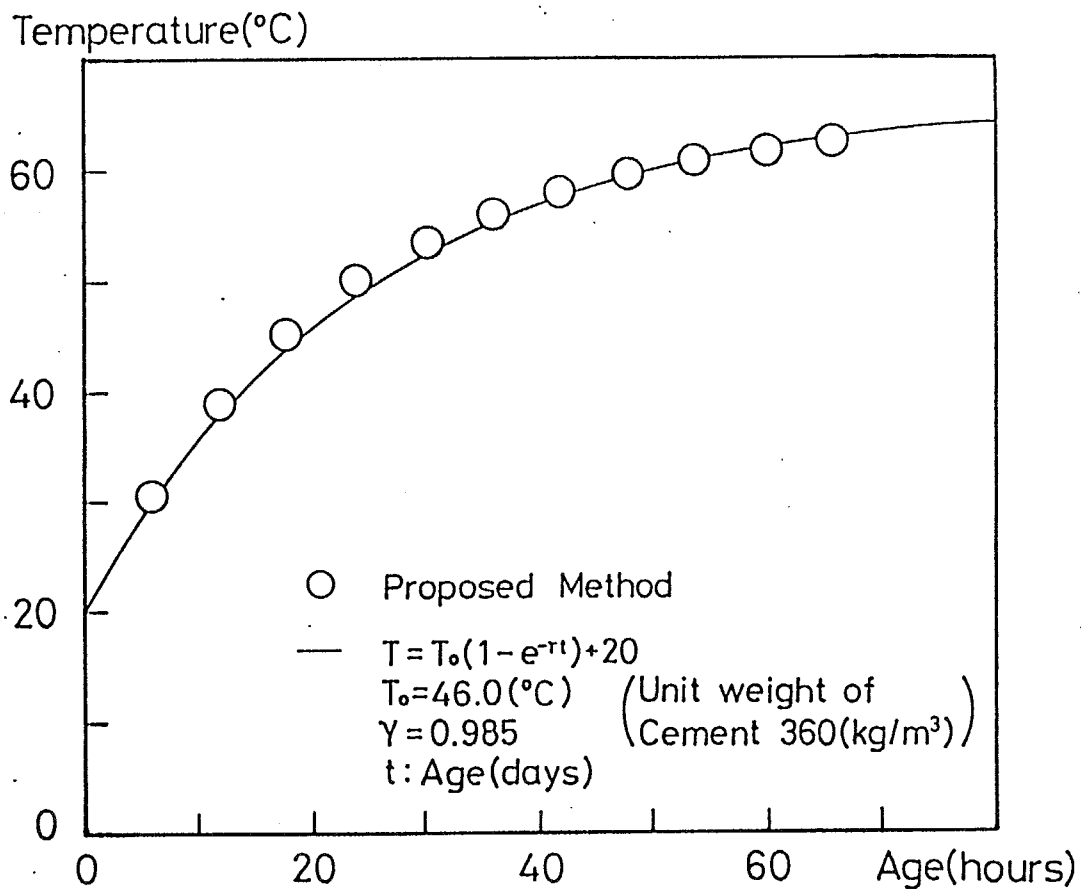


図5.4.2 コンクリートの断熱温度上昇

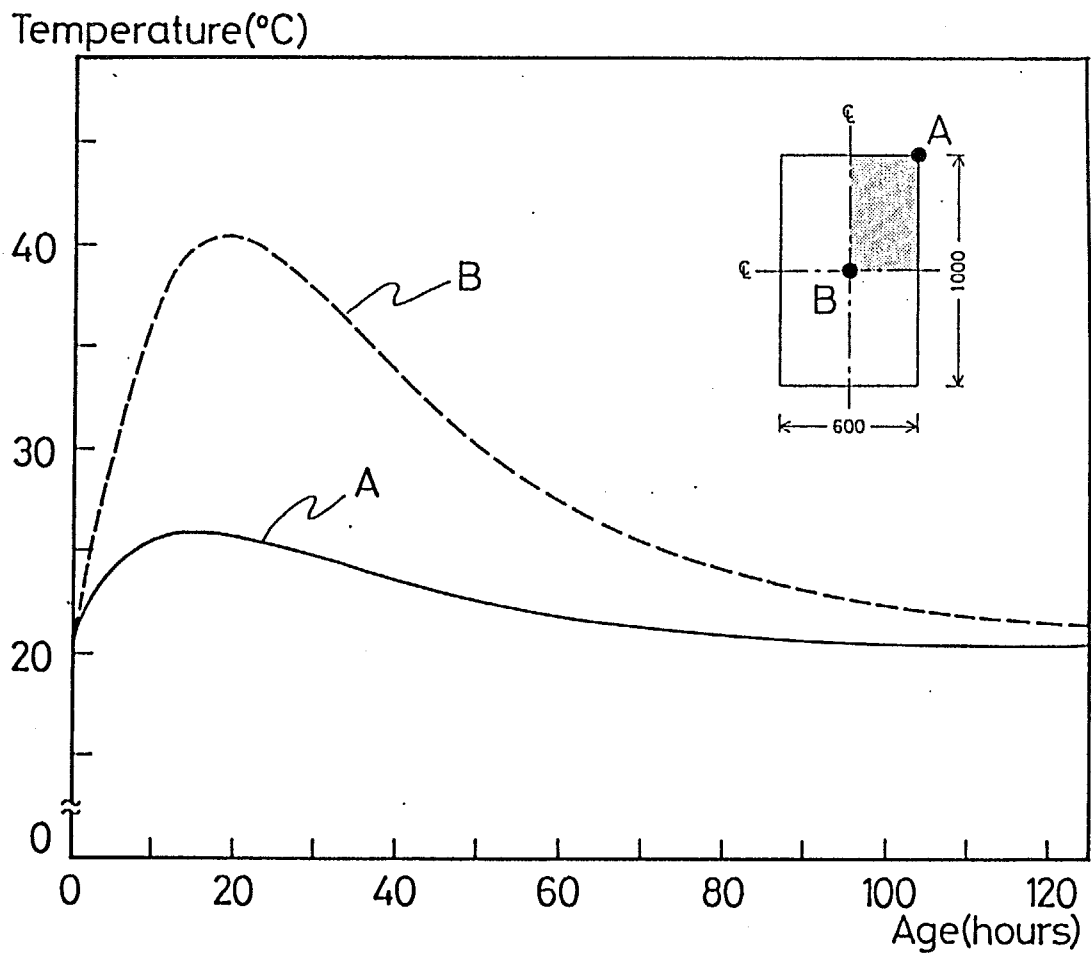


図5.4.3 コンクリート温度の経時変化

TEMP. DISTRIBUTION

5 STEP age = 6.00 (hour)

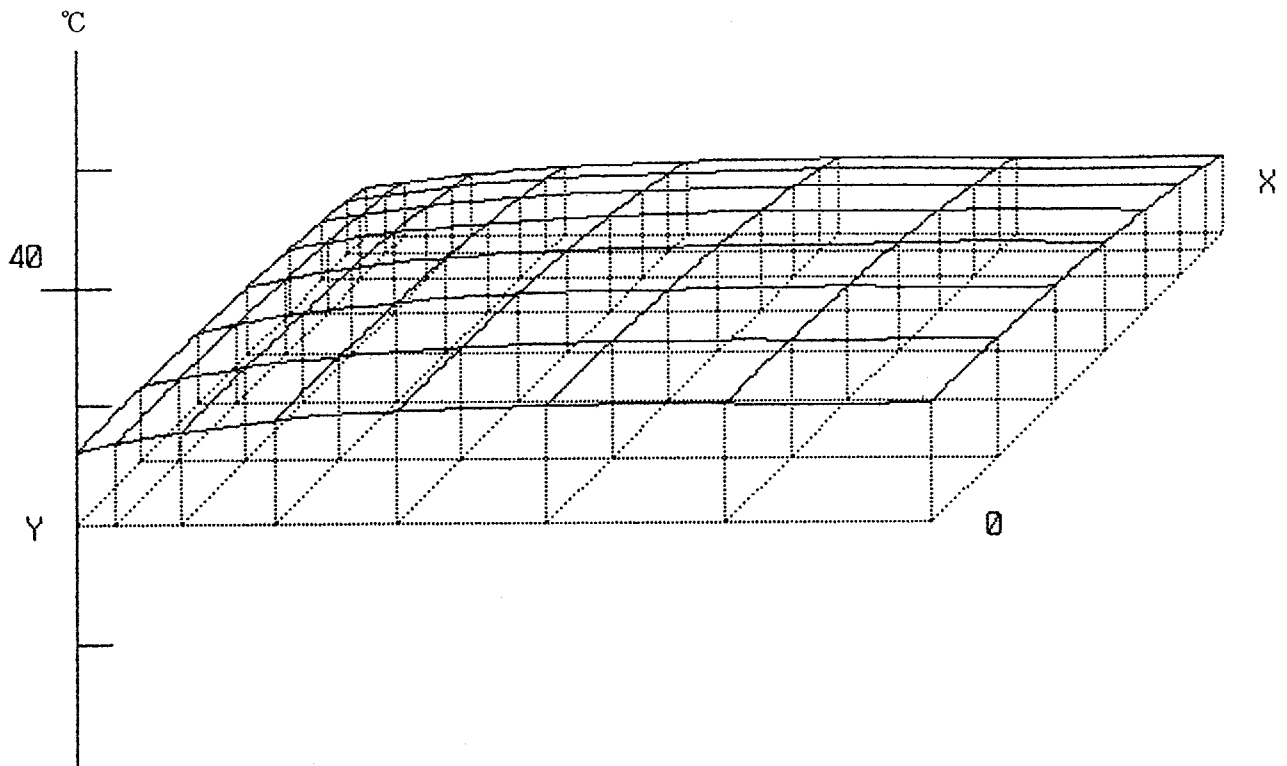


図5.4.4(a) コンクリート温度分布 (材令 6時間)

TEMP. DISTRIBUTION

10 STEP age = 12.00 (hour)

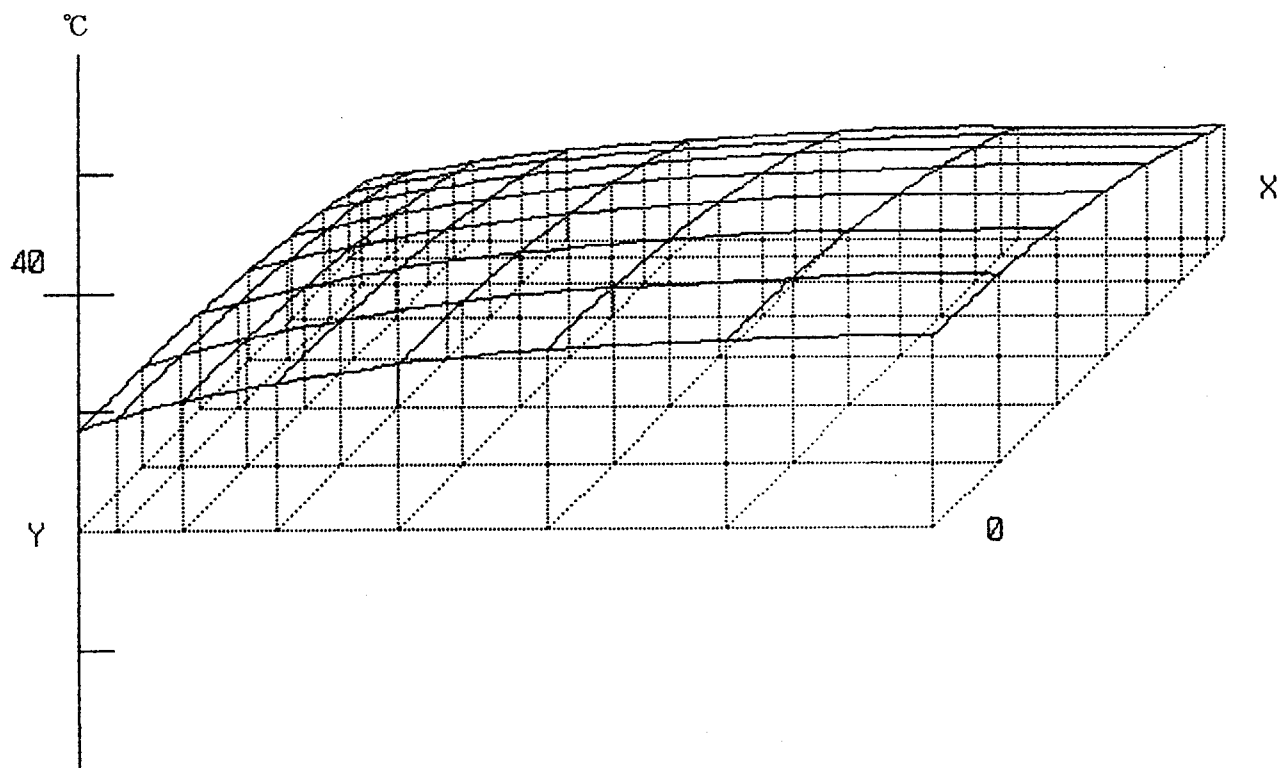


図5.4.4(b) コンクリート温度分布 (材令12時間)

TEMP. DISTRIBUTION

15 STEP age = 18.00 (hour)

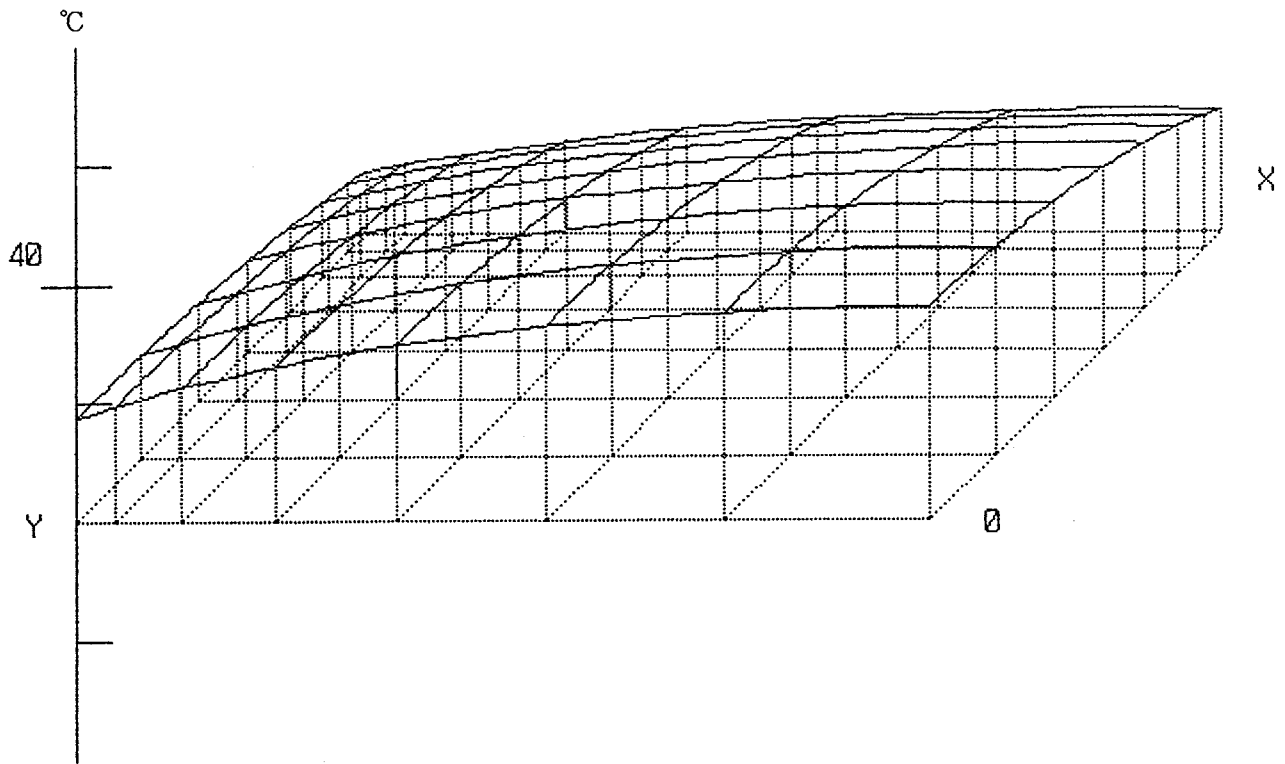


図5.4.4(c) コンクリート温度分布 (材令18時間)

TEMP. DISTRIBUTION

20 STEP age = 24.00 (hour)

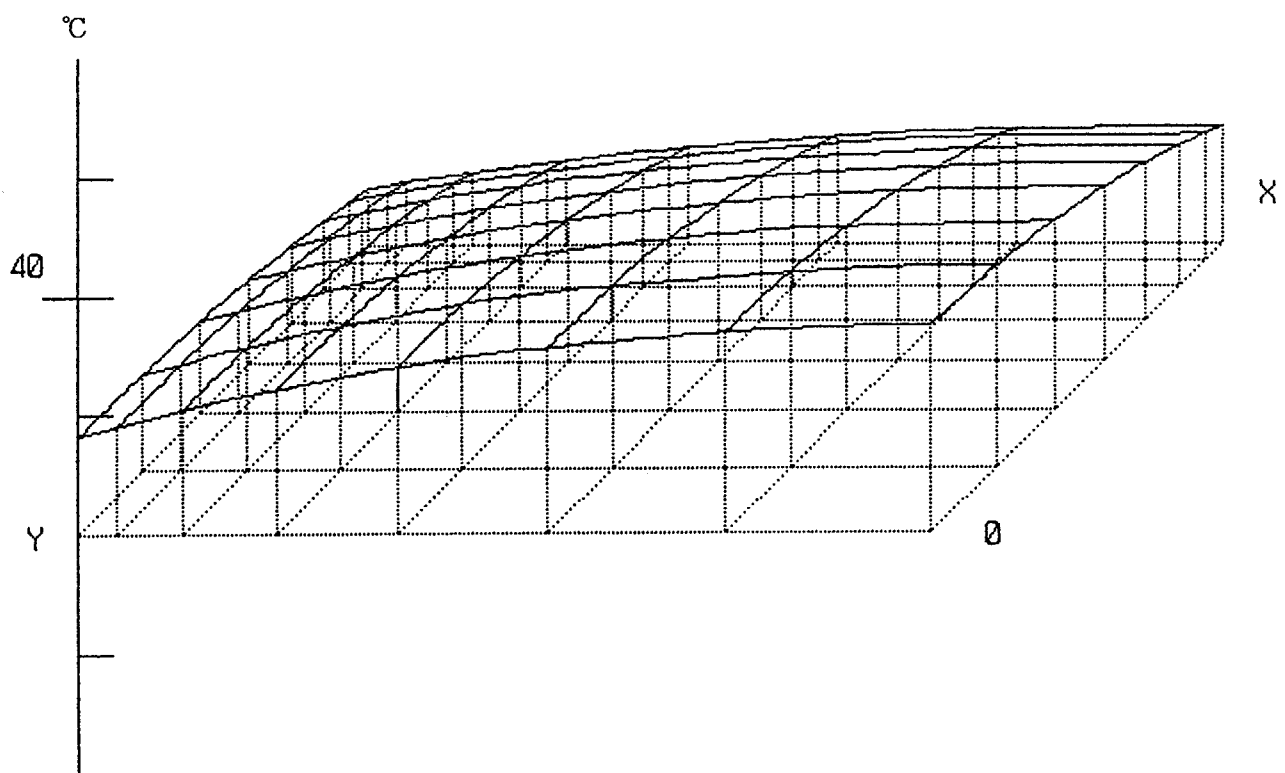


図5.4.4(d) コンクリート温度分布 (材令24時間)

TEMP. DISTRIBUTION

30 STEP age = 48.00 (hour)

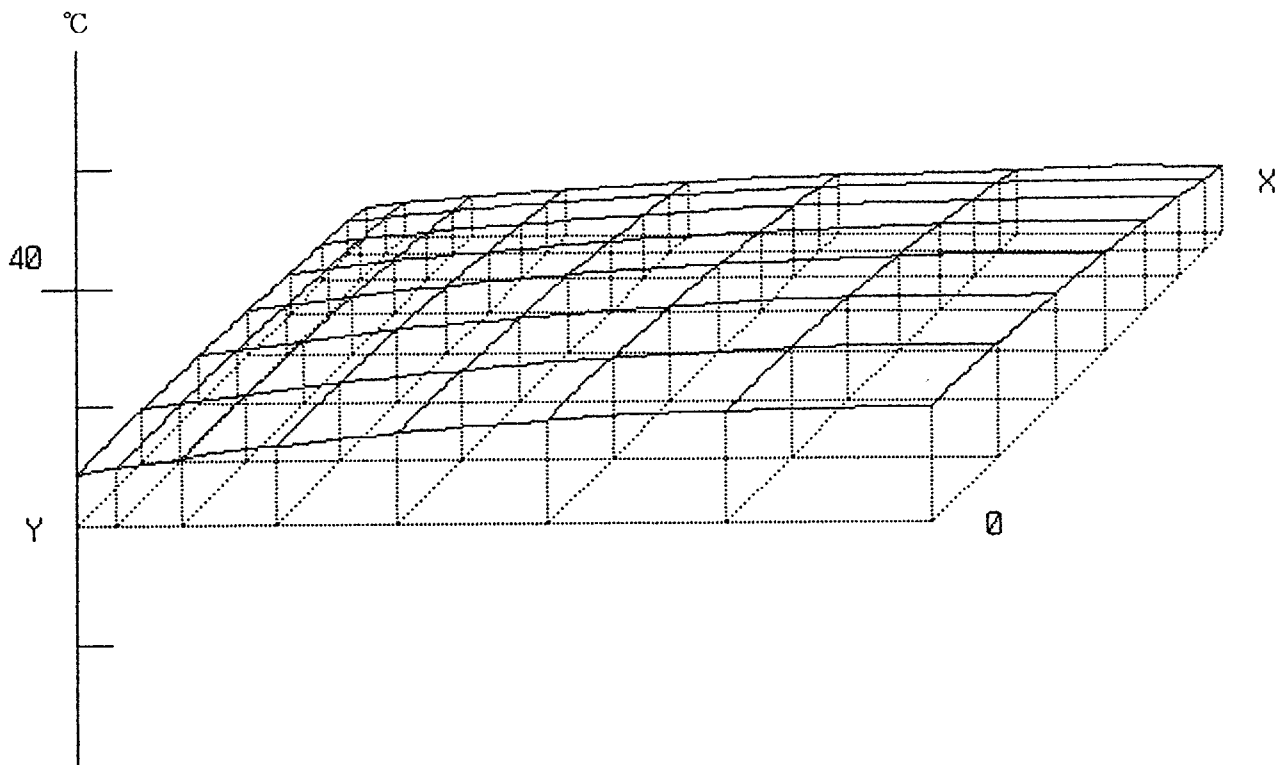


図5.4.4(e) コンクリート温度分布 (材令48時間)

TEMP. DISTRIBUTION

40 STEP age = 72.00 (hour)

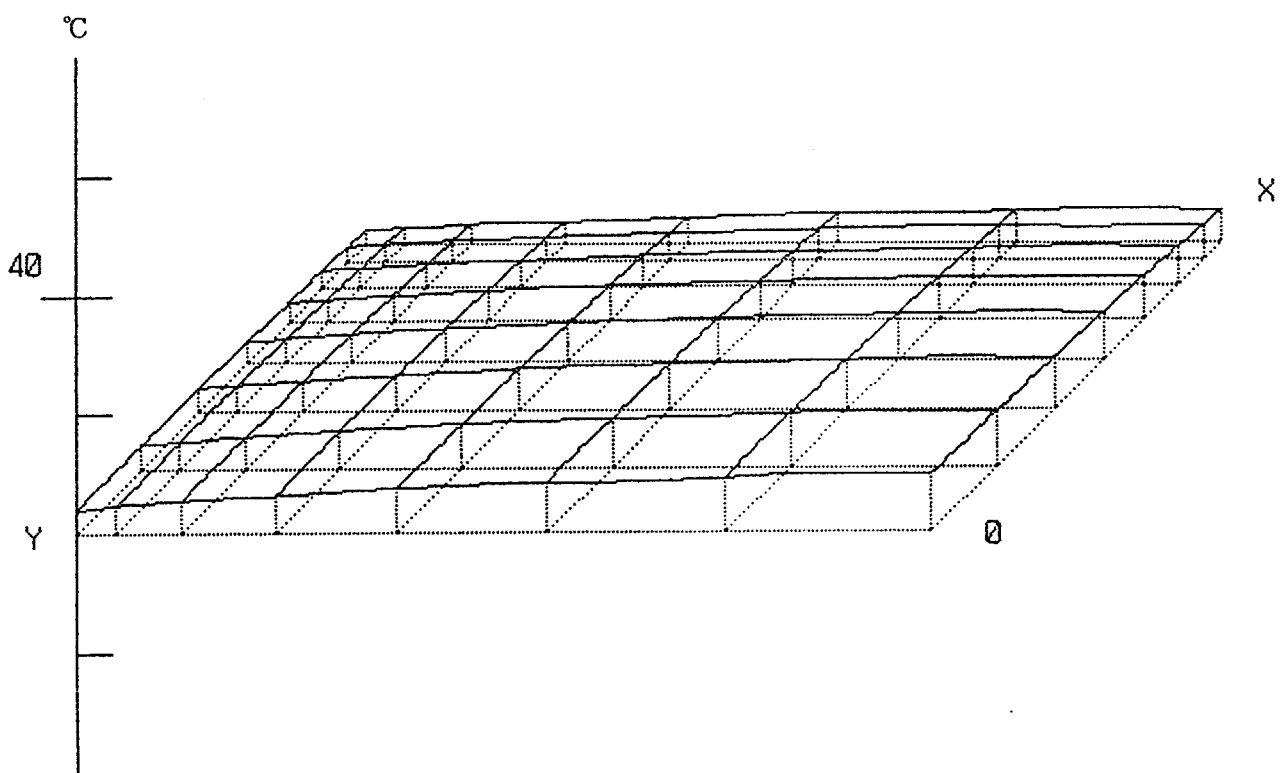


図5.4.4(f) コンクリート温度分布 (材令72時間)

TEMP. DISTRIBUTION

50 STEP age =120.00 (hour)

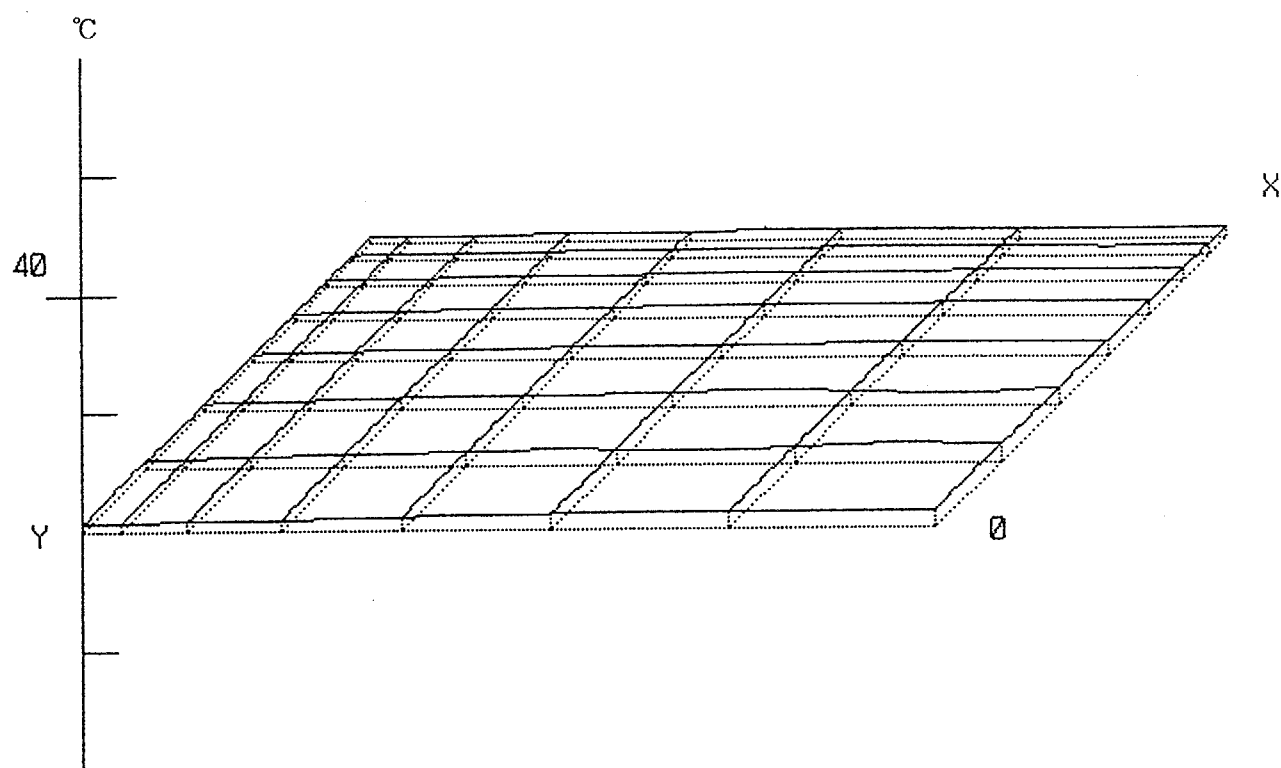


図5.4.4(g) コンクリート温度分布 (材令120時間)

Total amount of desiccated water (%)

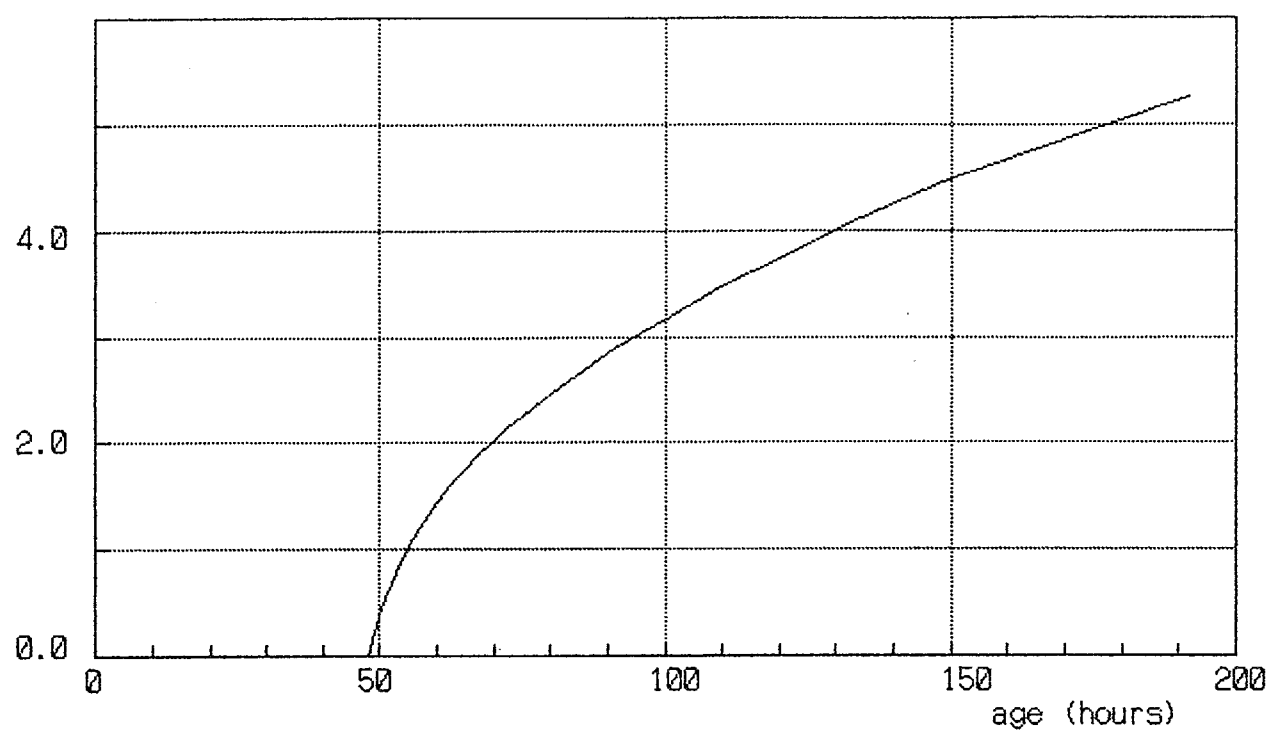


図5.4.5 総脱水量の経時変化

amount of combined water and contained water (kg/m³)

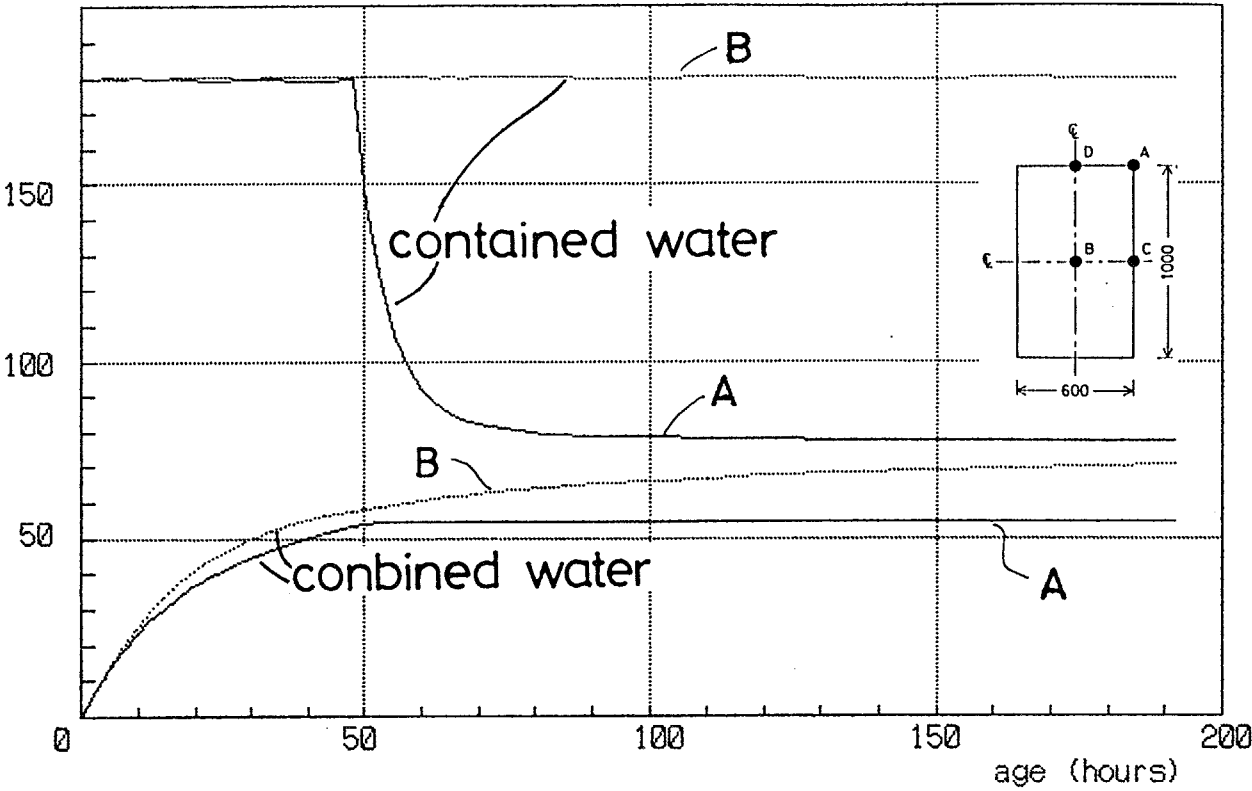


図5.4.6 結合水量および含水量の経時変化

WATER DISTRIBUTION

30 STEP age = 48.00 (hour)

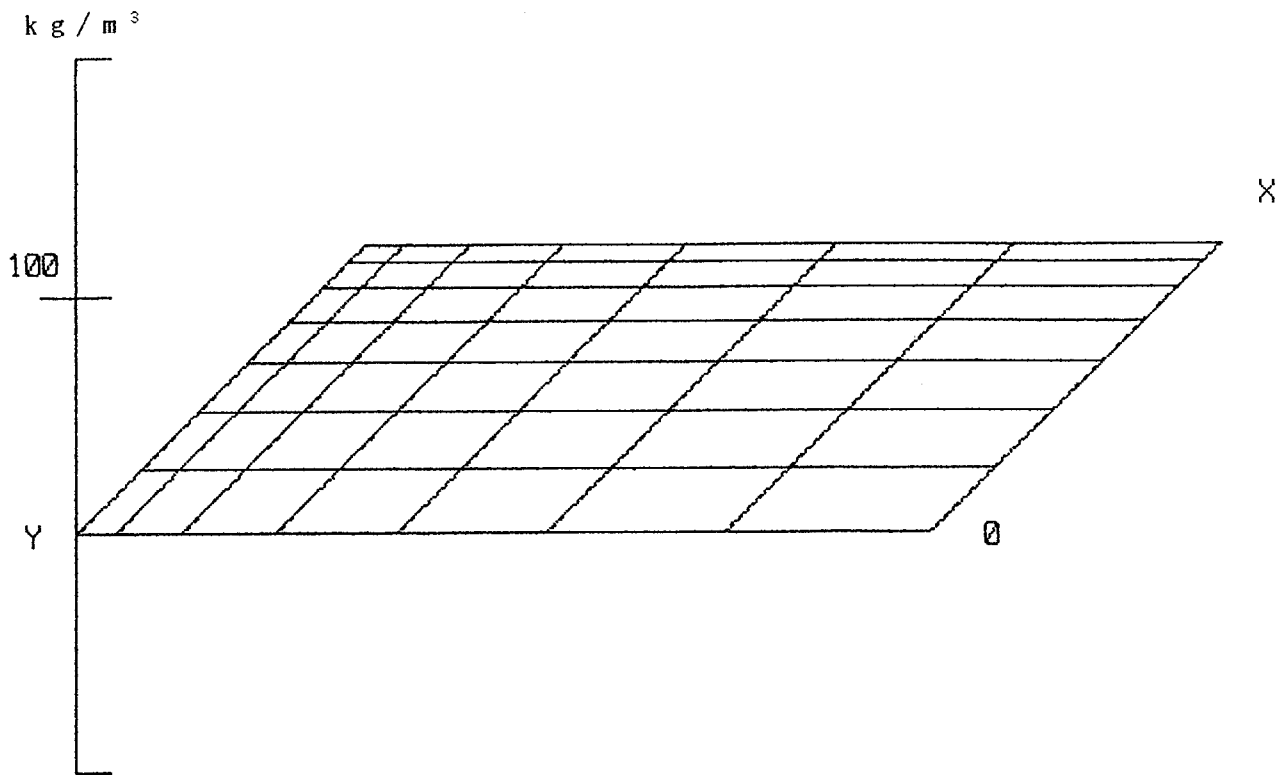


図5.4.7(a) 脱水量分布 (材令48時間)

WATER DISTRIBUTION

40 STEP age = 72.00 (hour)

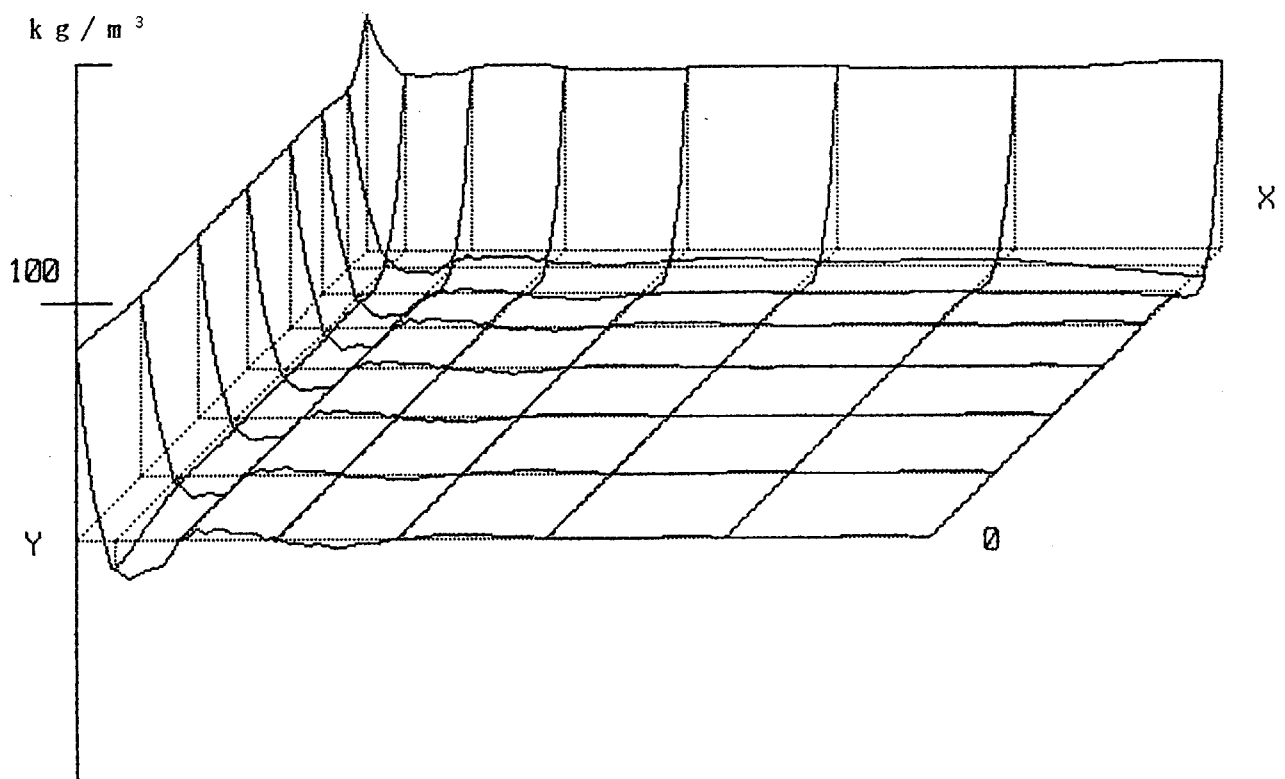


図5.4.7(b) 脱水量分布 (材令72時間)

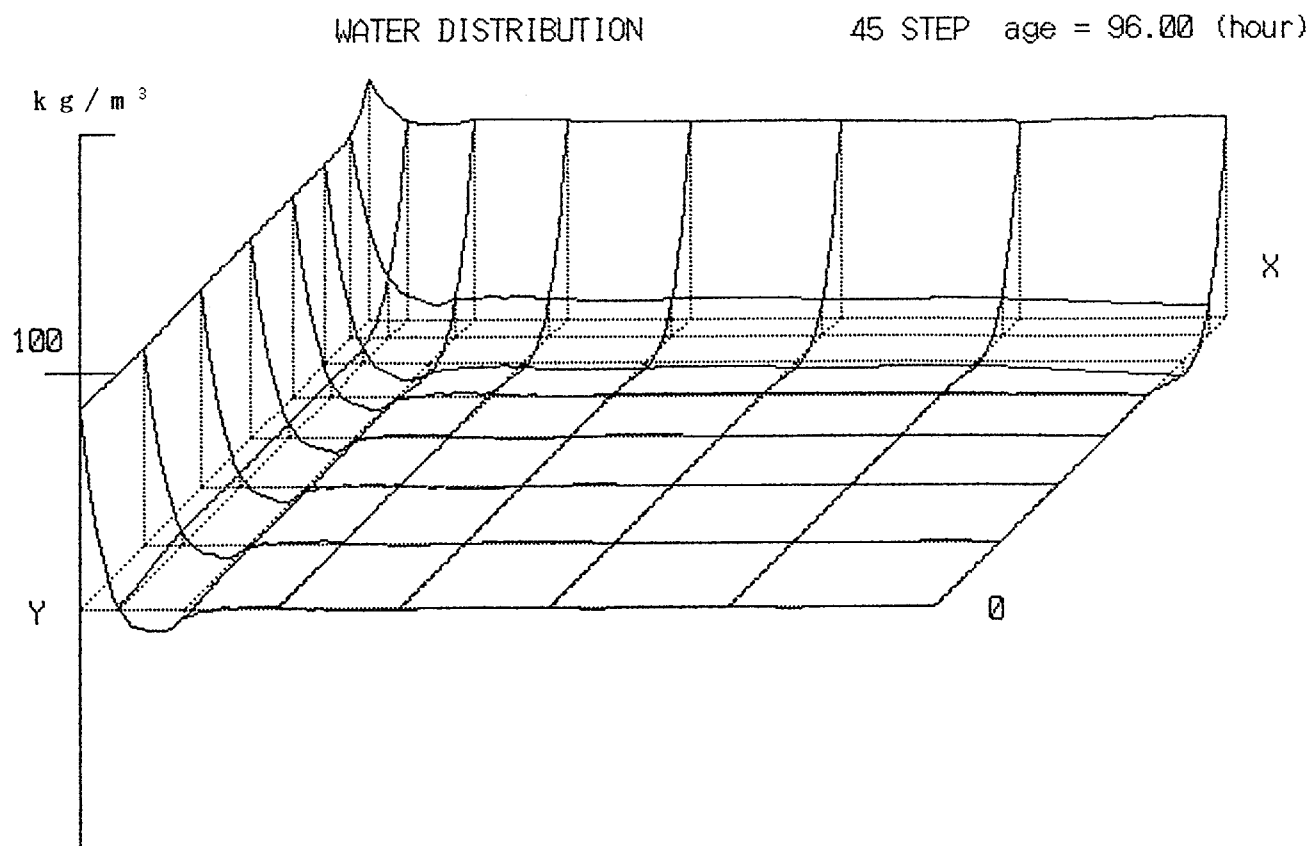


図5.4.7(c) 脱水量分布 (材令96時間)

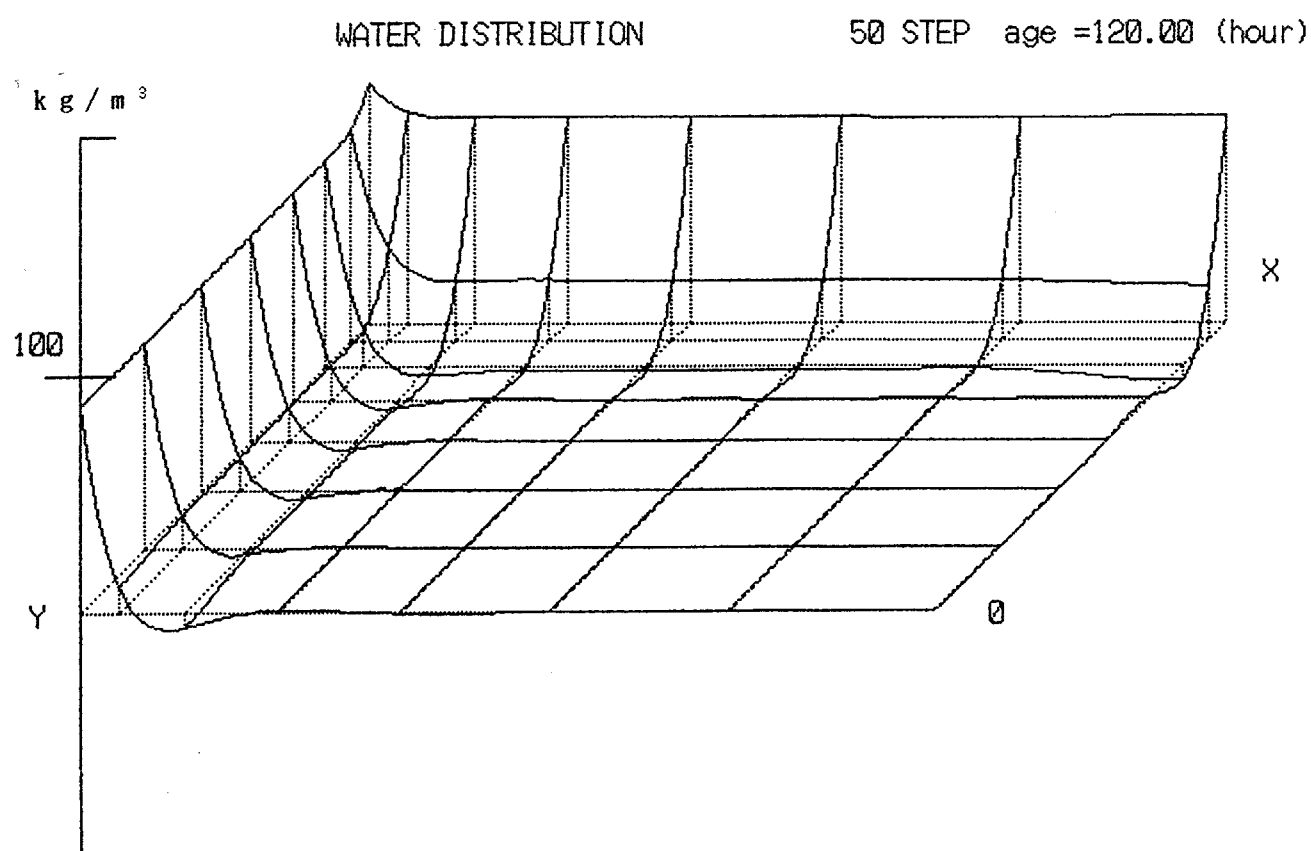


図5.4.7(d) 脱水量分布 (材令120時間)

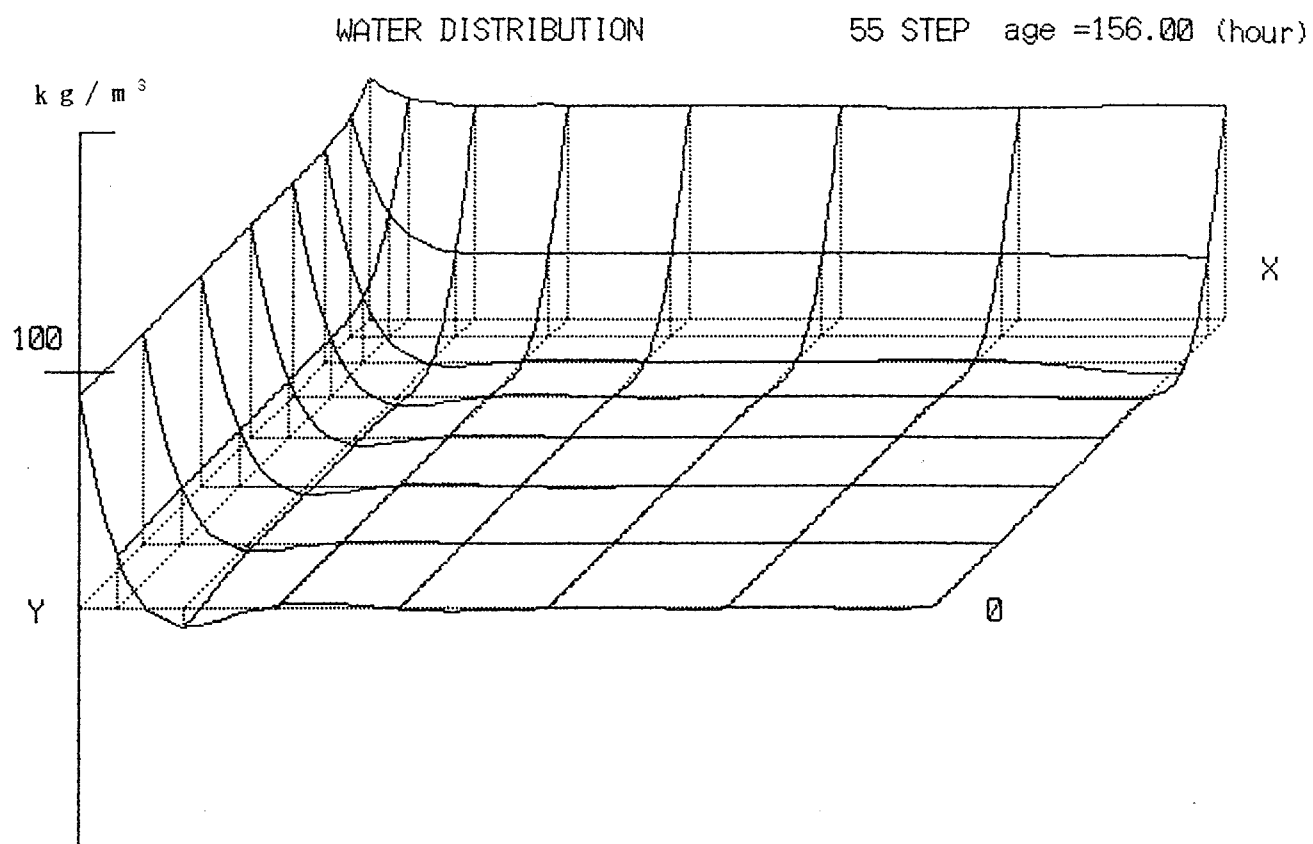


図5.4.7(e) 脱水量分布 (材令156時間)

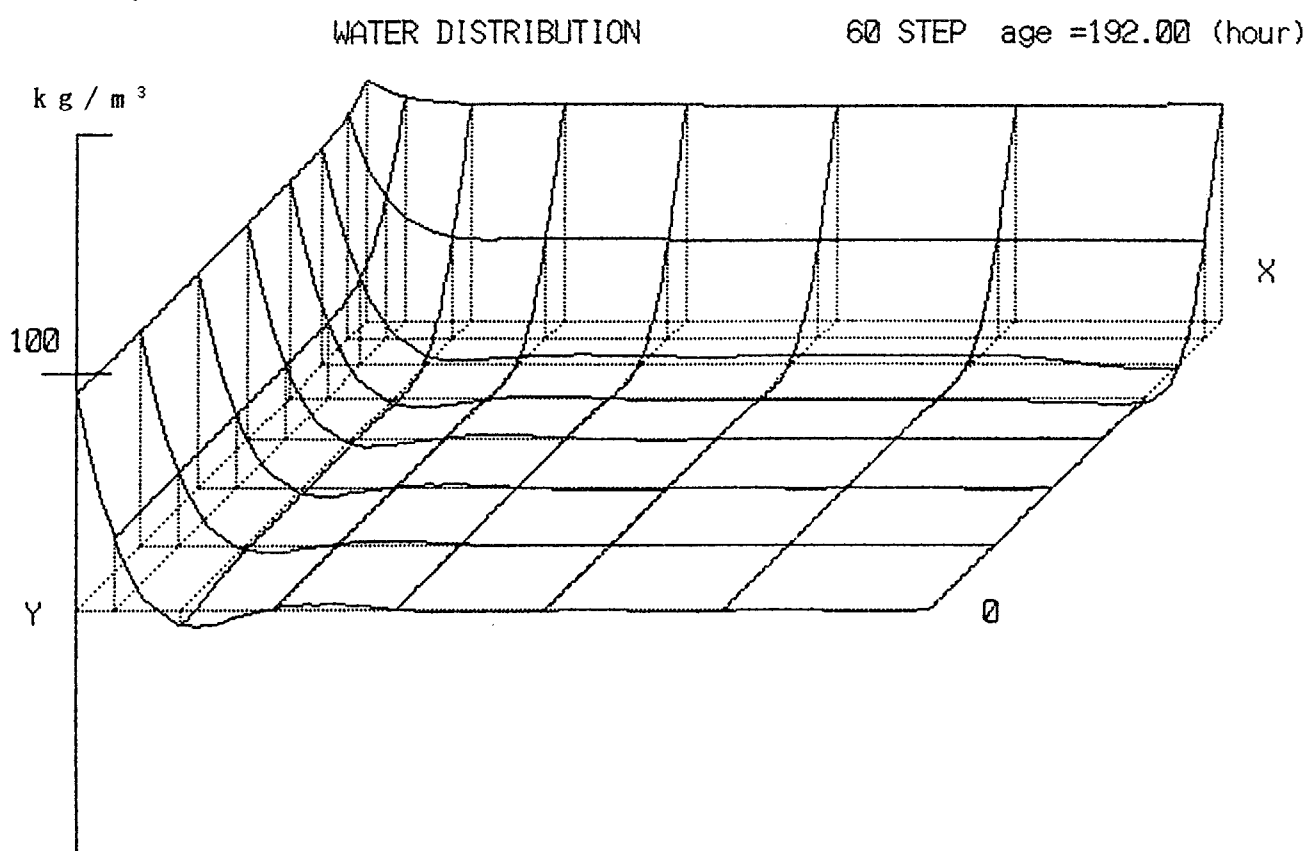


図5.4.7(f) 脱水量分布 (材令192時間)

rate of hydration (at center of column)

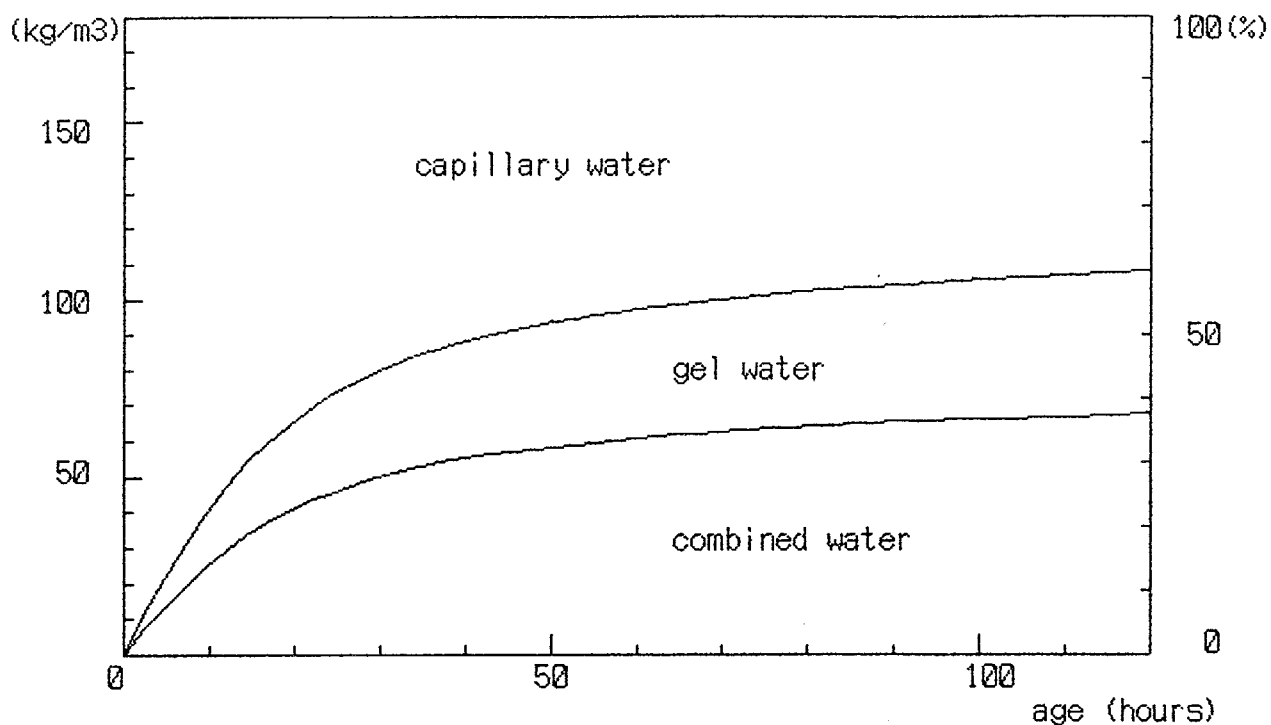


図5.4.8(a) 練り混ぜ水の様態 (中心部)

rate of hydration (at edge of column)

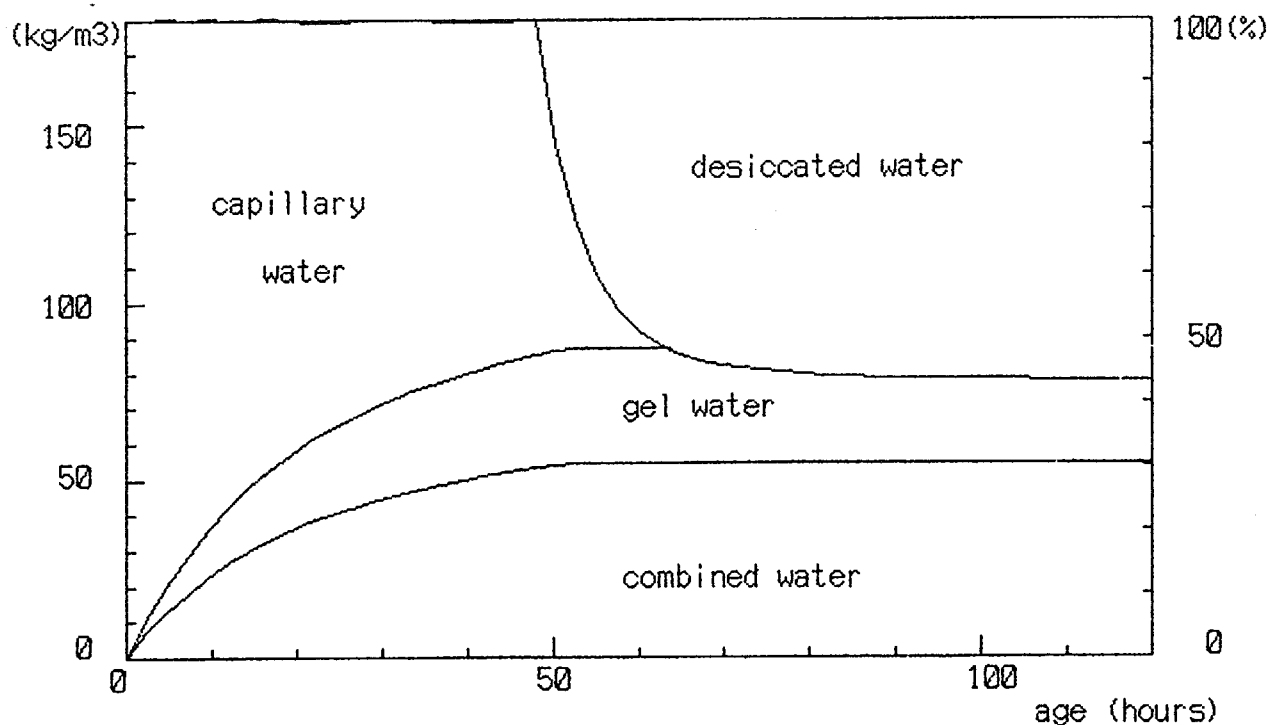


図5.4.8(b) 練り混ぜ水の様態 (隅角部)

sig xx (kg/cm²)

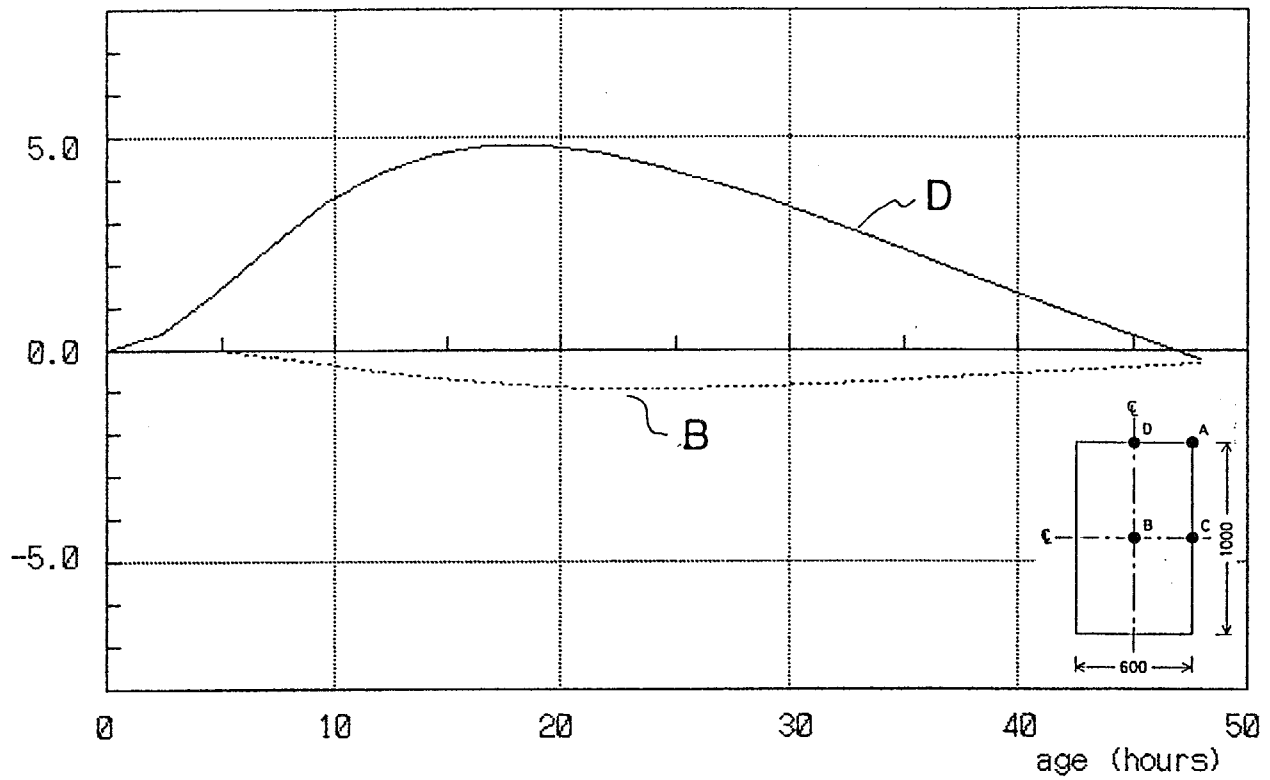


図5.4.9(a) 応力の経時変化 (短辺方向応力)

sig yy (kg/cm²)

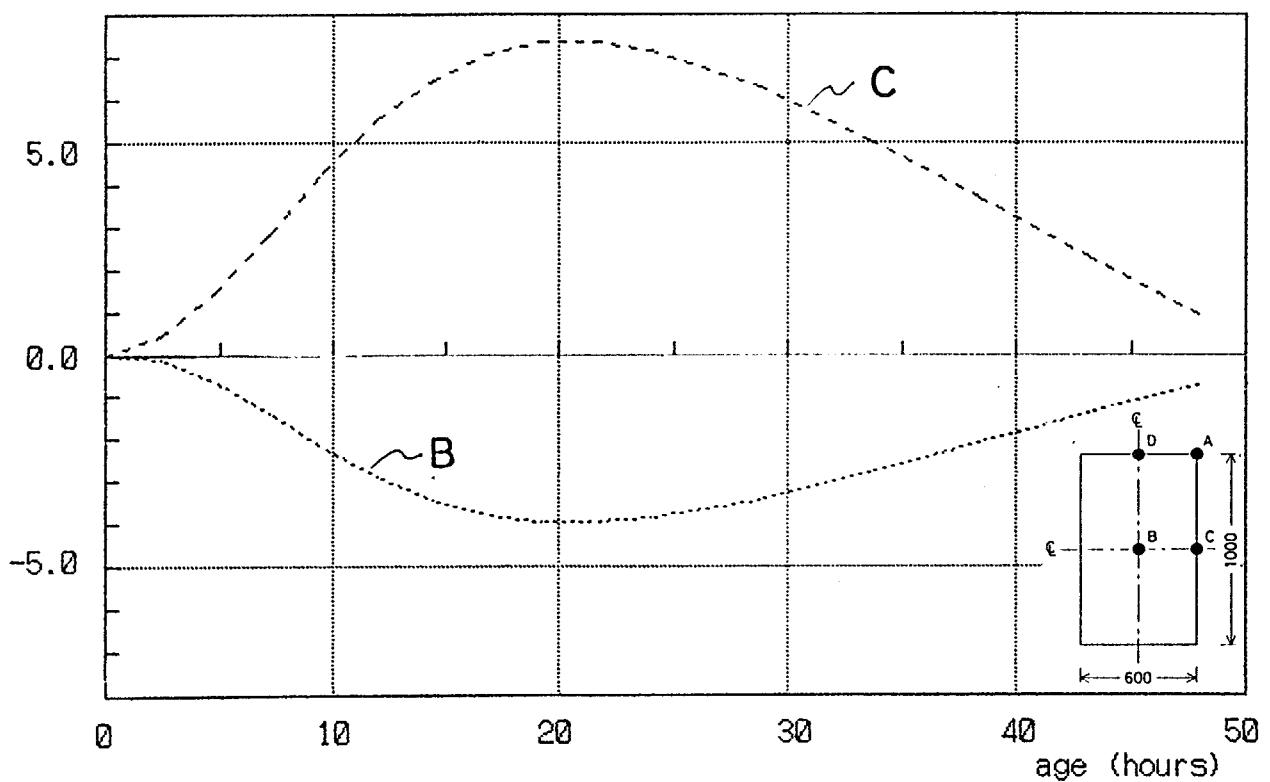


図5.4.9(b) 応力の経時変化 (長辺方向応力)

sig zz (kg/cm²)

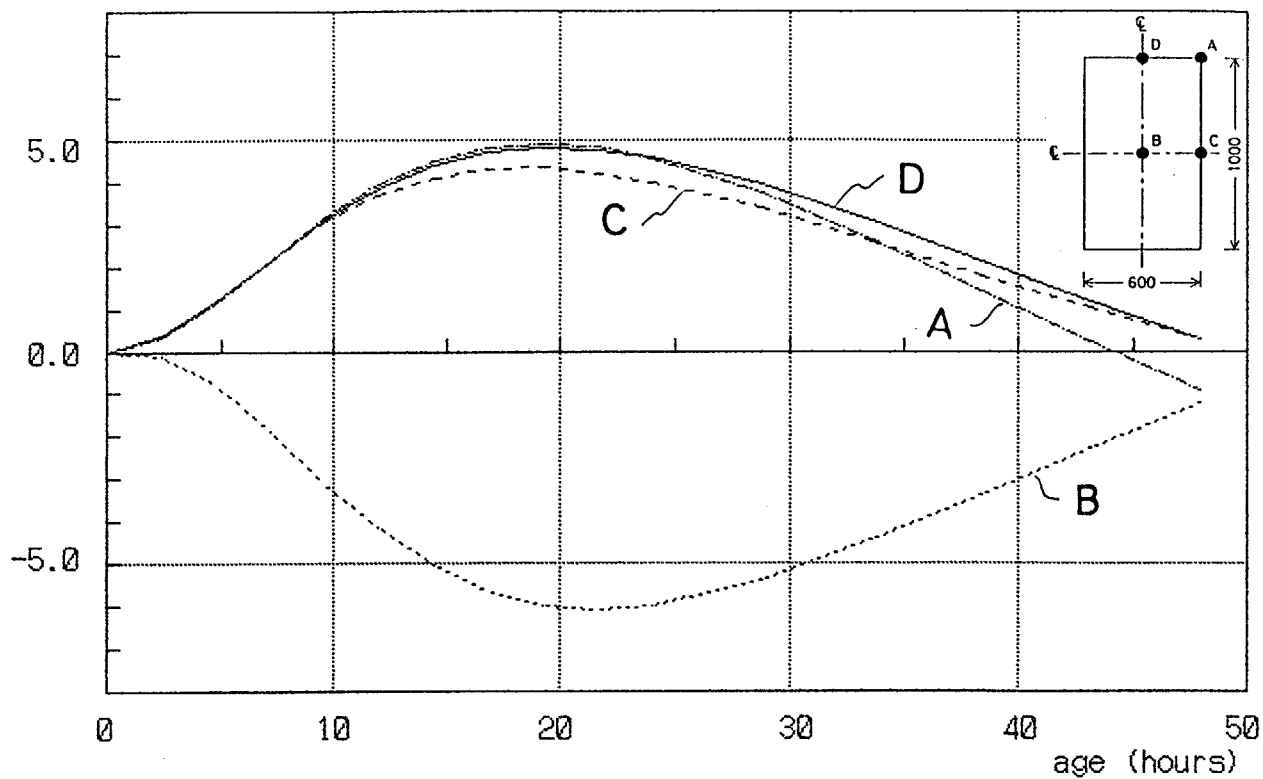


図5.4.9(c) 応力の経時変化（軸方向応力）

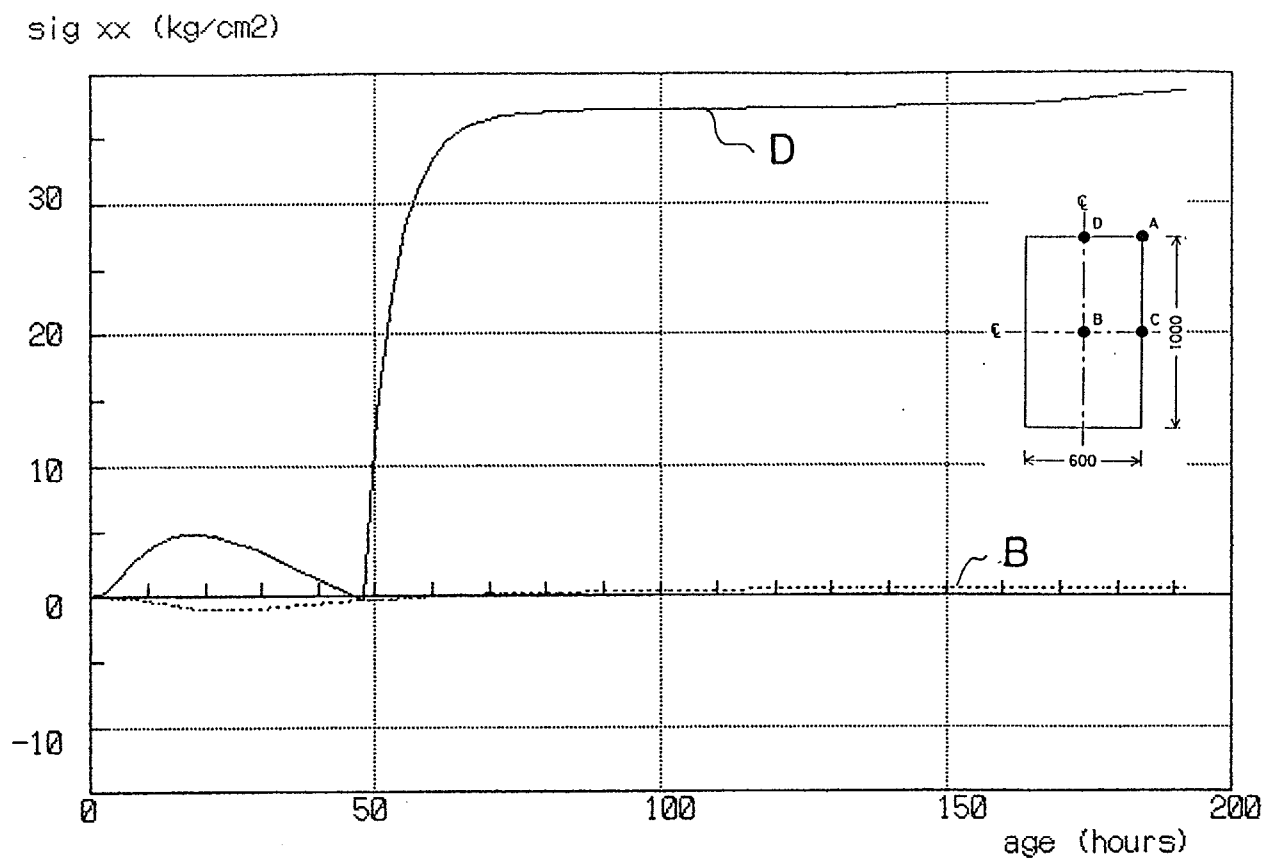


図5.4.10 (a) 応力の経時変化 (短辺方向応力)

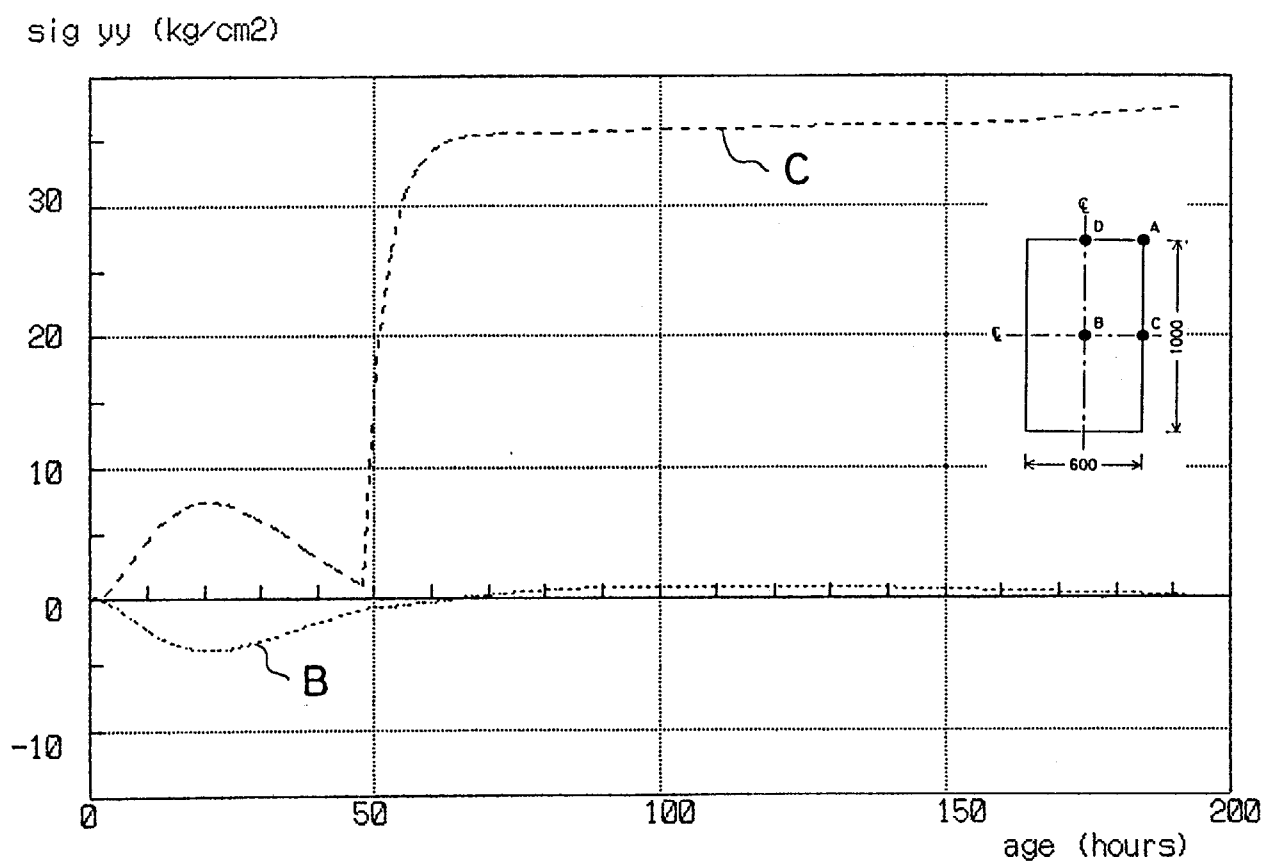


図5.4.10 (b) 応力の経時変化 (長辺方向応力)

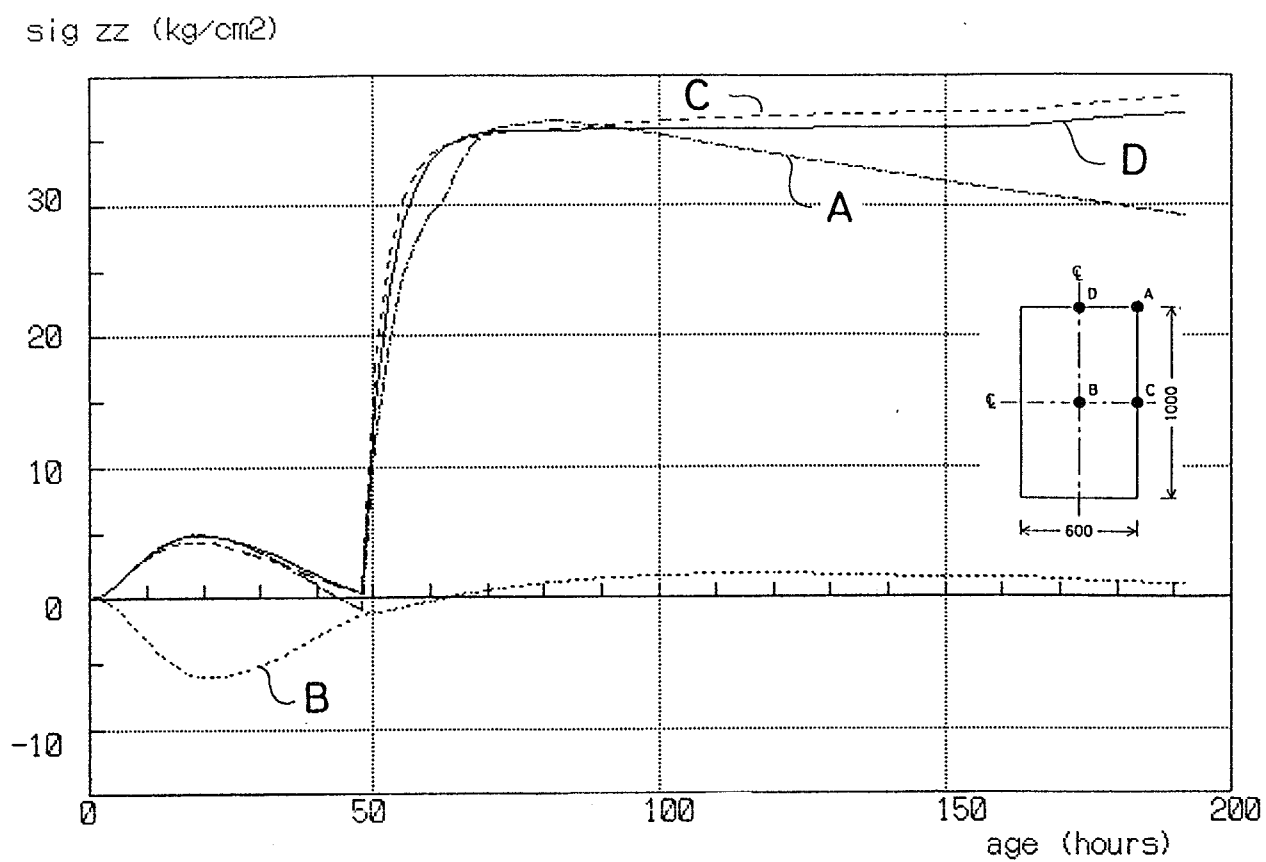


図5.4.10(c) 応力の経時変化（軸方向応力）

SIGX DISTRIBUTION

5 STEP age = 6.00 (hour)

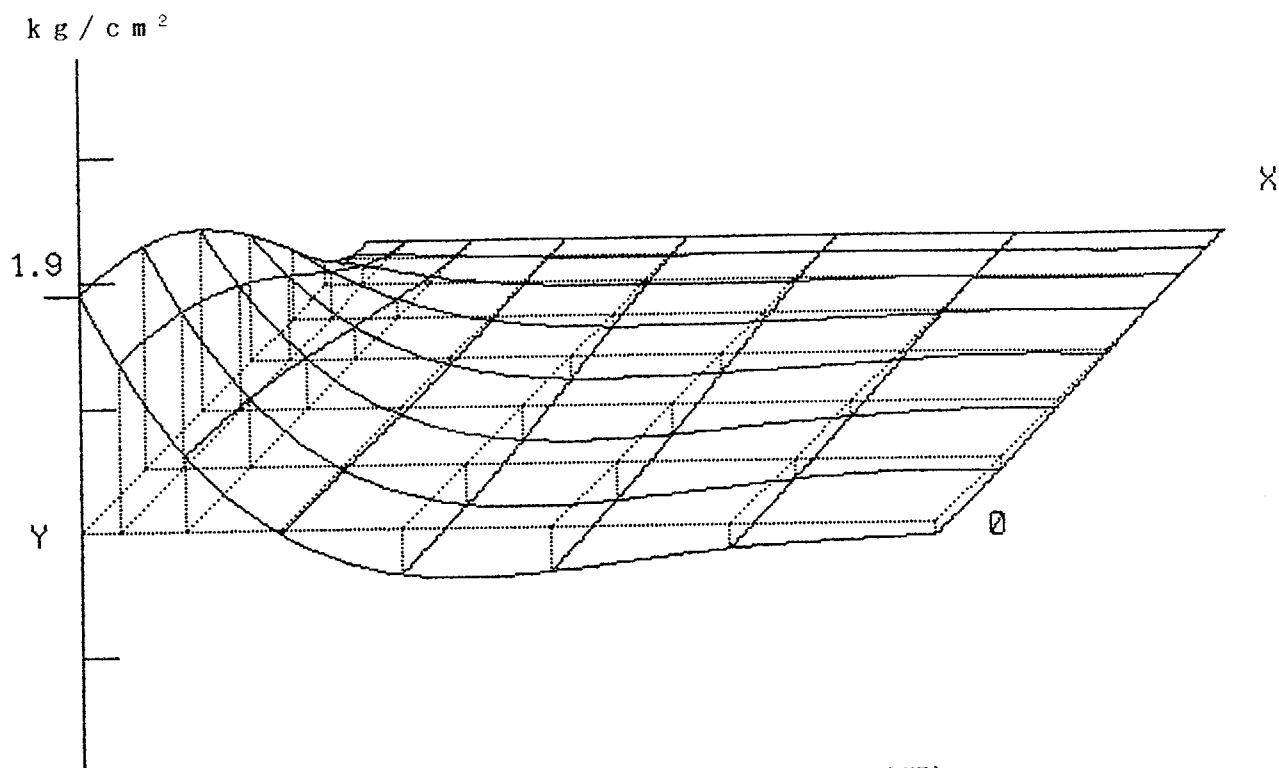


図5.4.11 (a) 短辺方向応力分布 (材令 6時間)

SIGX DISTRIBUTION

10 STEP age = 12.00 (hour)

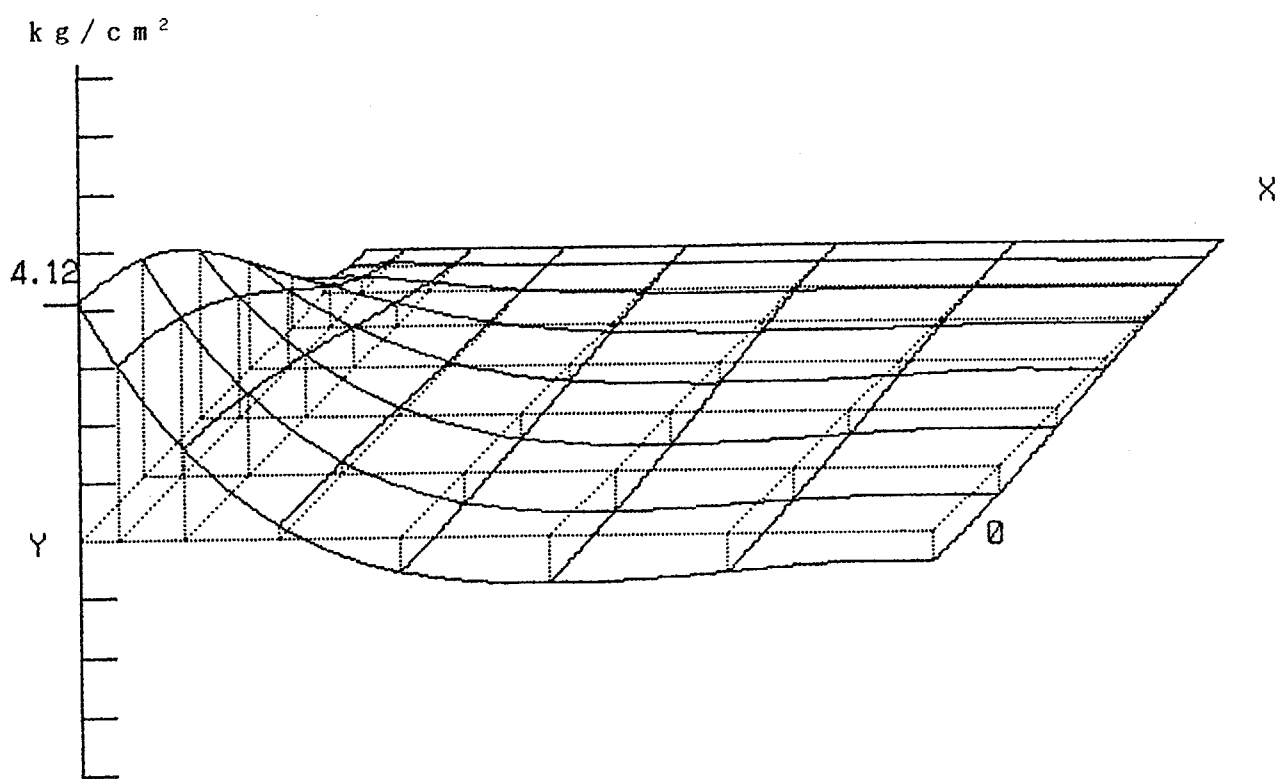


図5.4.11 (b) 短辺方向応力分布 (材令12時間)

SIGX DISTRIBUTION

15 STEP age = 18.00 (hour)

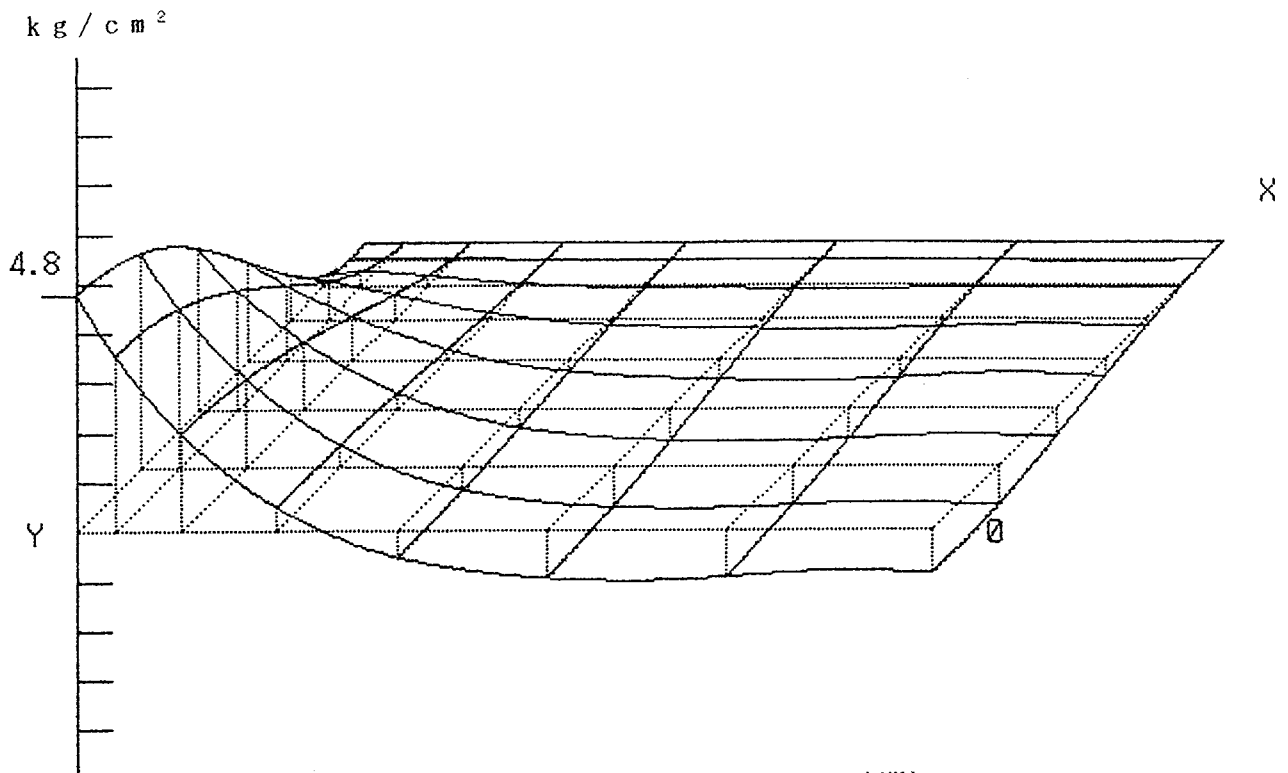


図5.4.11(c) 短辺方向応力分布 (材令18時間)

SIGX DISTRIBUTION

20 STEP age = 24.00 (hour)

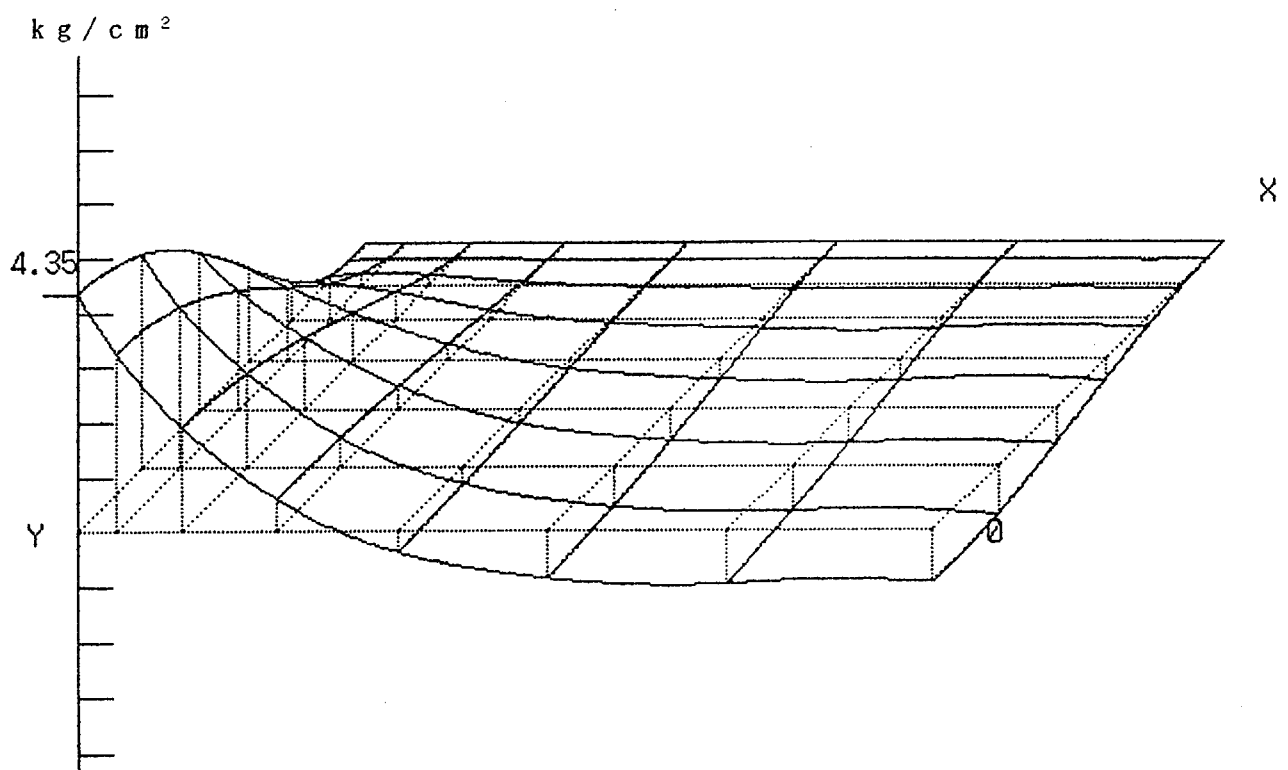


図5.4.11(d) 短辺方向応力分布 (材令24時間)

sigx DISTRIBUTION

30 STEP age = 48.00 (hour)

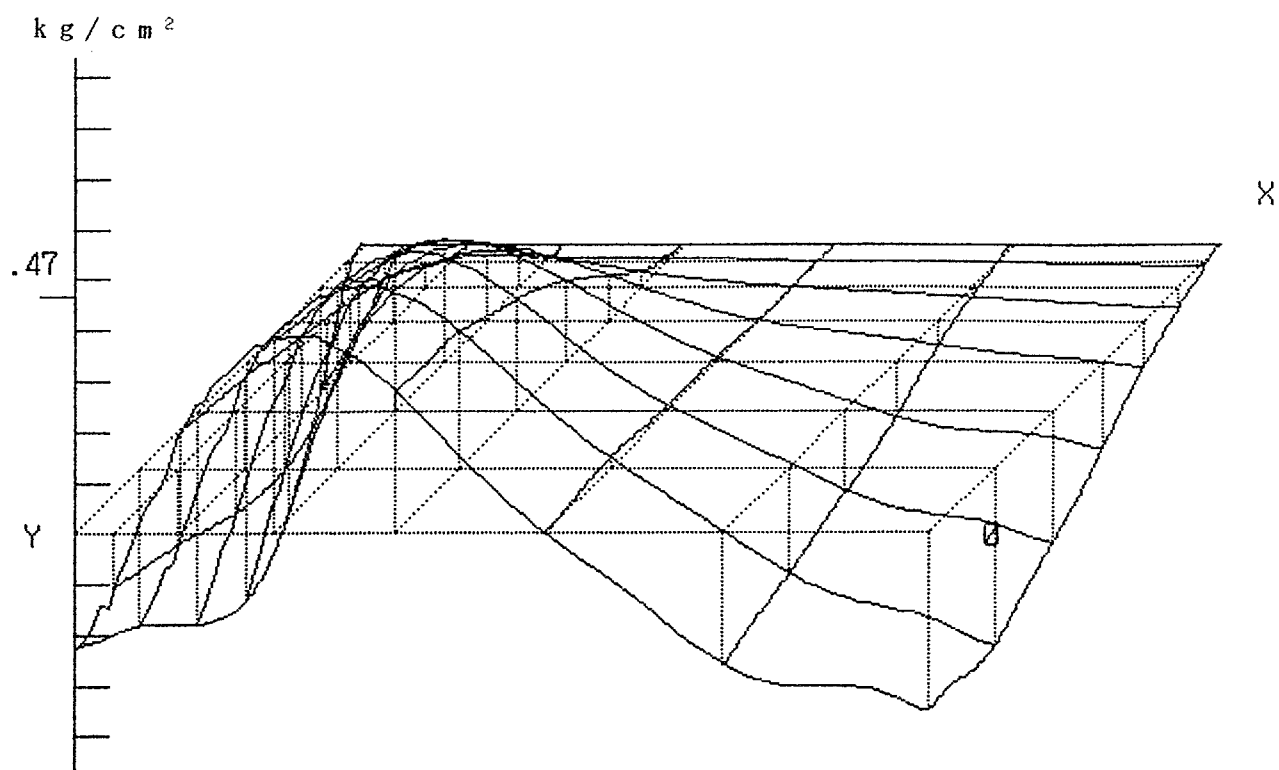


図5.4.11 (e) 短辺方向応力分布 (材令48時間)

sigx DISTRIBUTION

40 STEP age = 72.00 (hour)

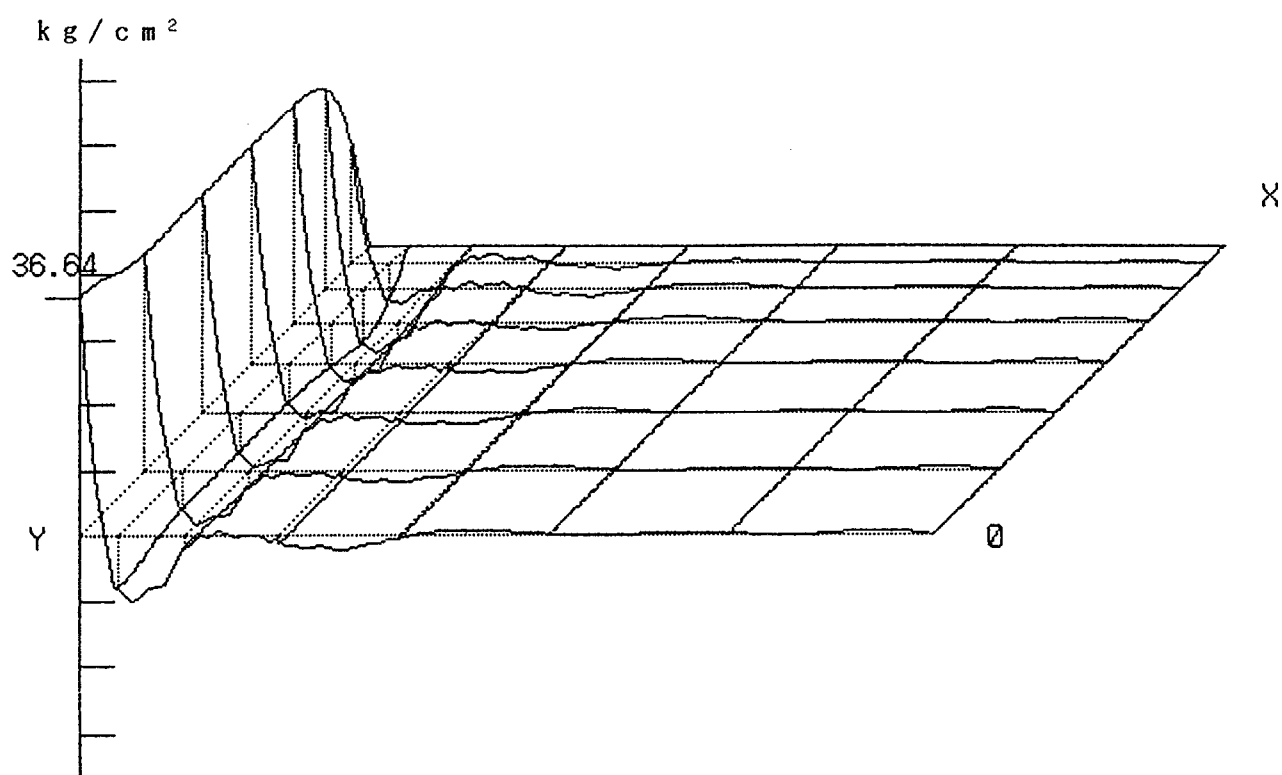


図5.4.11 (f) 短辺方向応力分布 (材令72時間)

sigx DISTRIBUTION

50 STEP age =120.00 (hour)

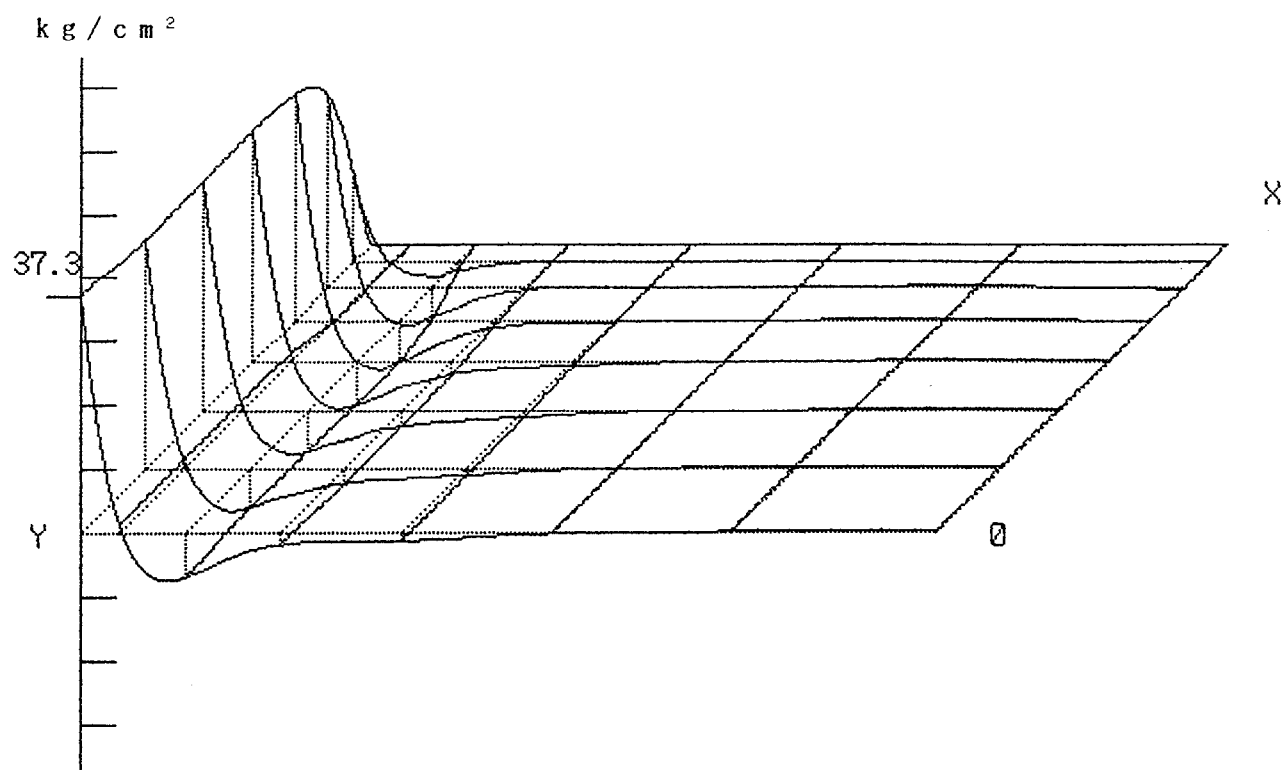


図5.4.11 (g) 短辺方向応力分布 (材令120時間)

sigx DISTRIBUTION

60 STEP age =192.00 (hour)

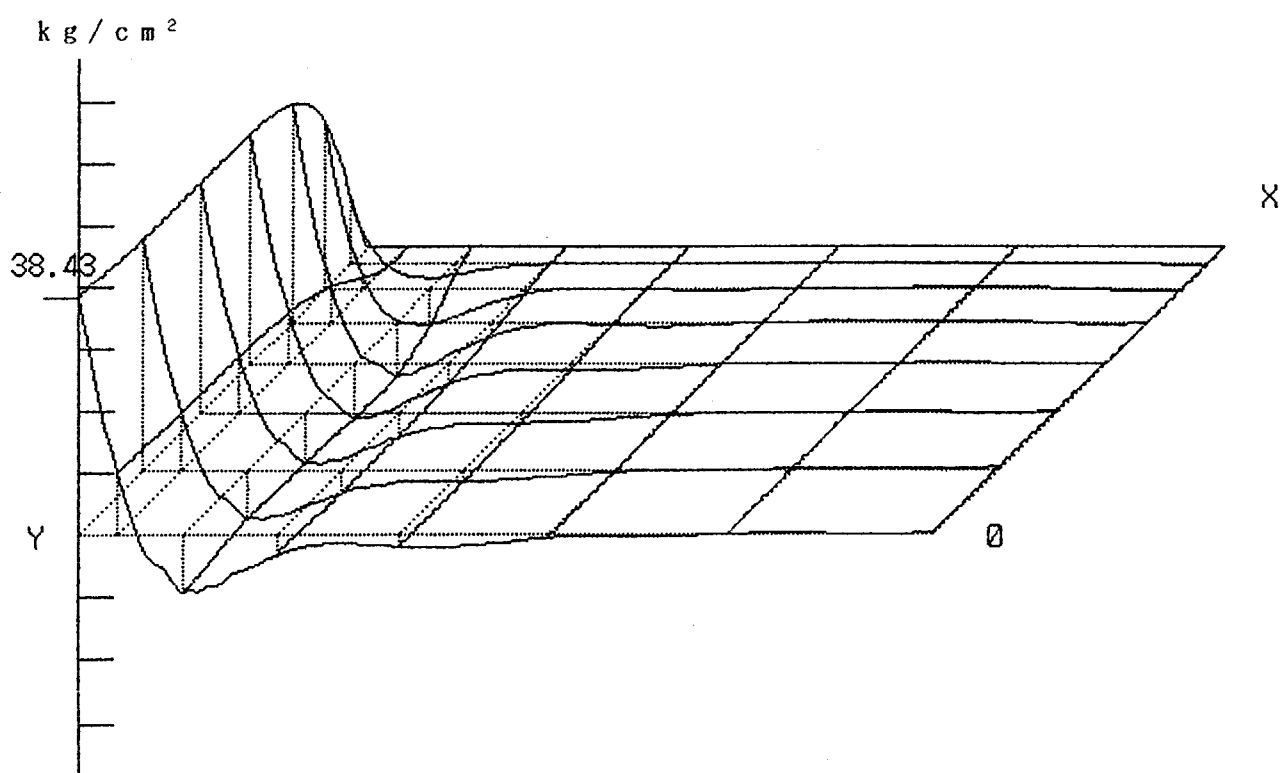


図5.4.11 (h) 短辺方向応力分布 (材令192時間)

SIGY DISTRIBUTION

5 STEP age = 6.00 (hour)

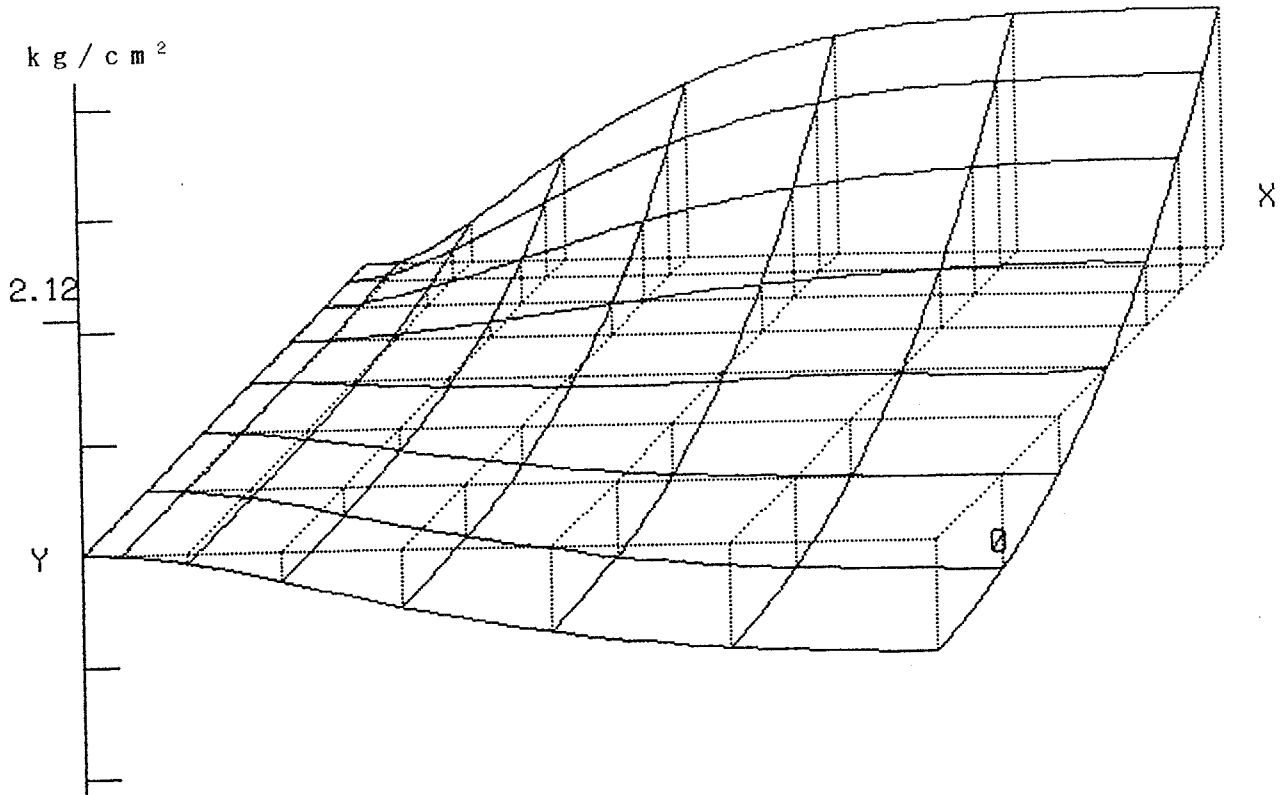


図5.4.12 (a) 長辺方向応力分布 (材令 6時間)

SIGY DISTRIBUTION

10 STEP age = 12.00 (hour)

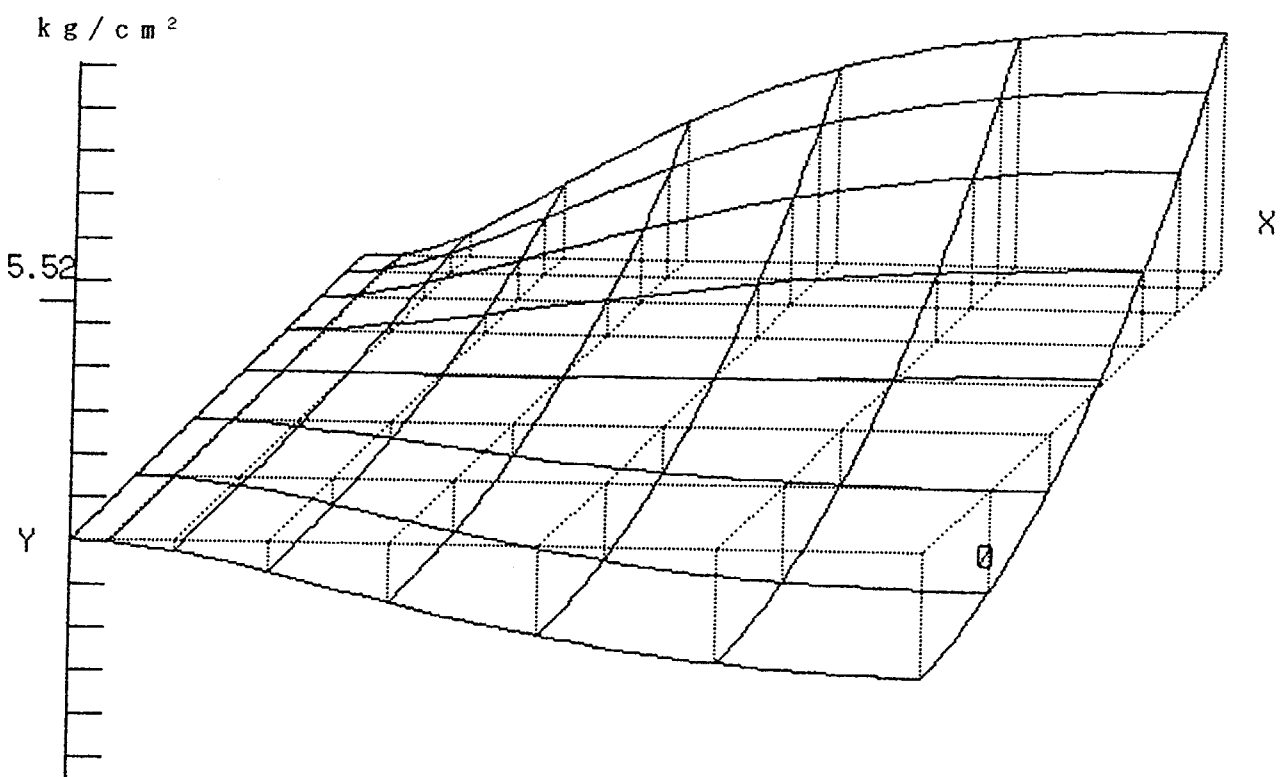


図5.4.12 (b) 長辺方向応力分布 (材令12時間)

SIGY DISTRIBUTION

15 STEP age = 18.00 (hour)

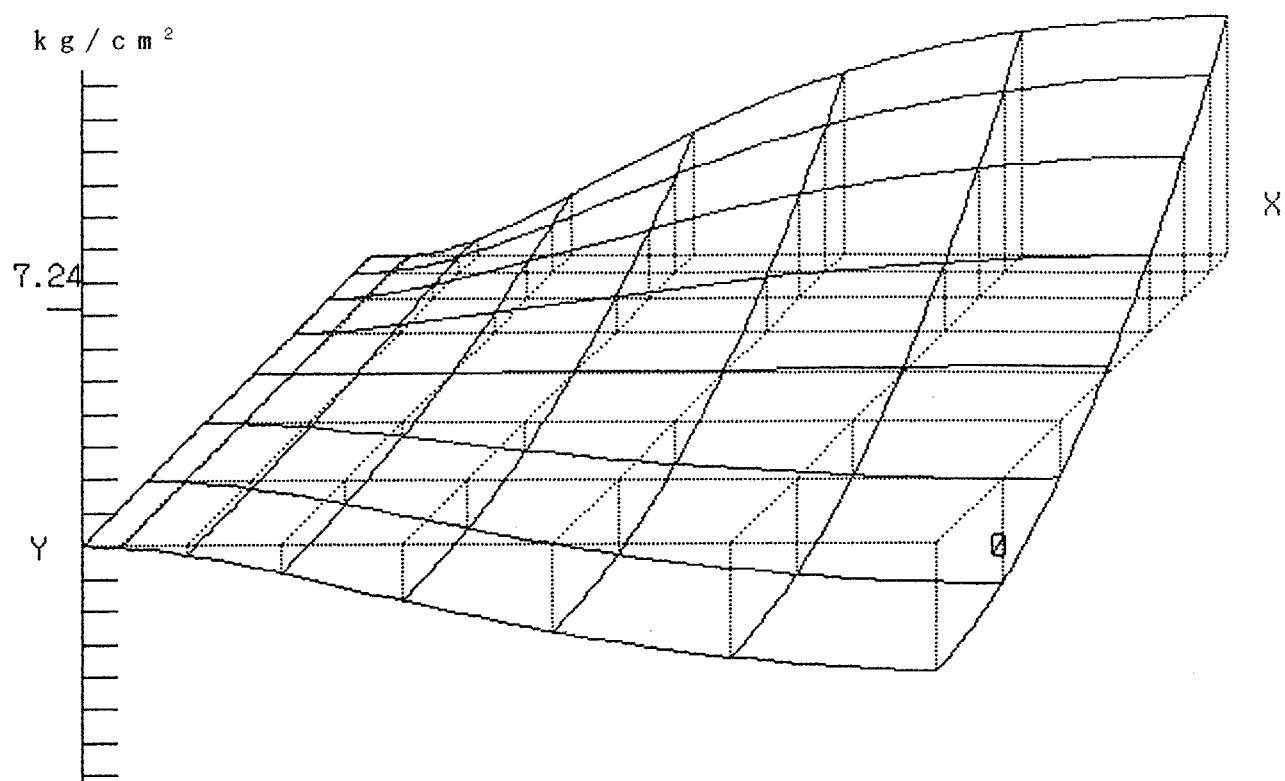


図5.4.12(c) 長辺方向応力分布 (材令18時間)

SIGY DISTRIBUTION

20 STEP age = 24.00 (hour)

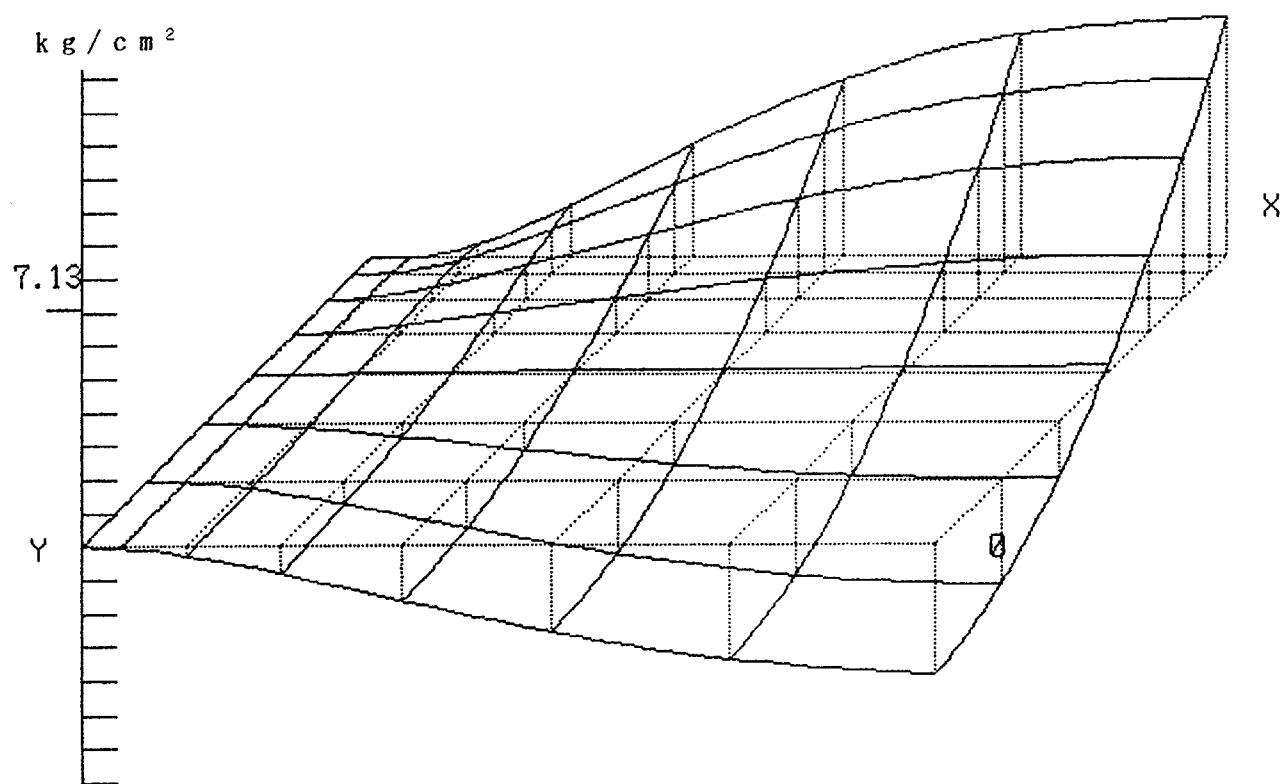


図5.4.12(d) 長辺方向応力分布 (材令24時間)

sigy DISTRIBUTION

30 STEP age = 48.00 (hour)

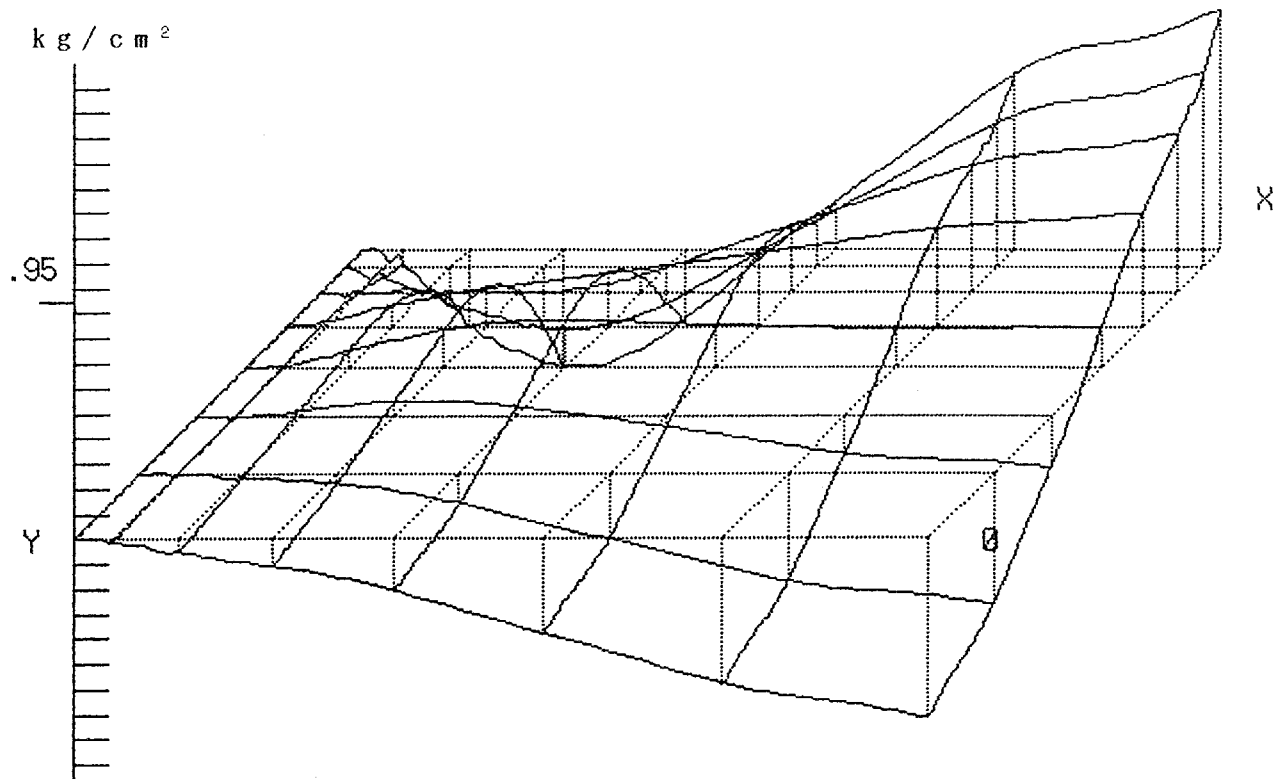


図5.4.12 (e) 長辺方向応力分布 (材令48時間)

sigy DISTRIBUTION

40 STEP age = 72.00 (hour)

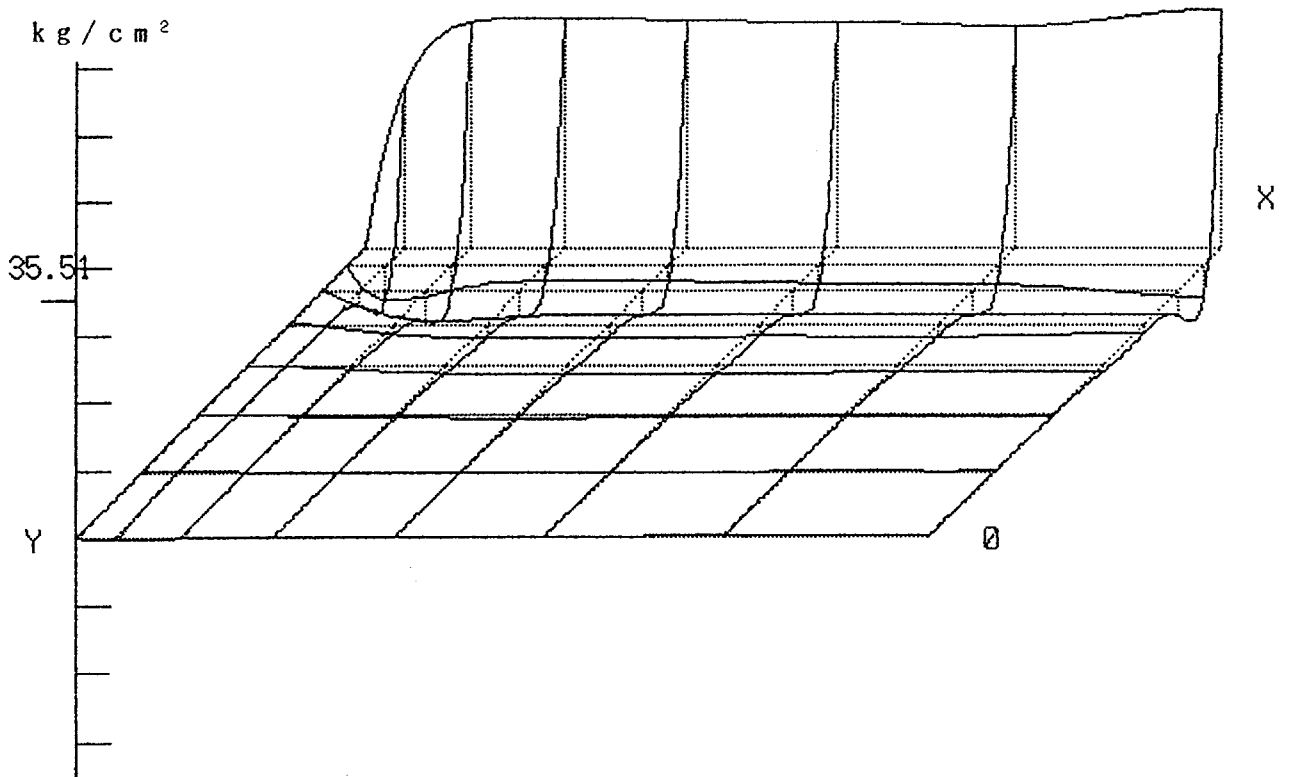


図5.4.12 (f) 長辺方向応力分布 (材令72時間)

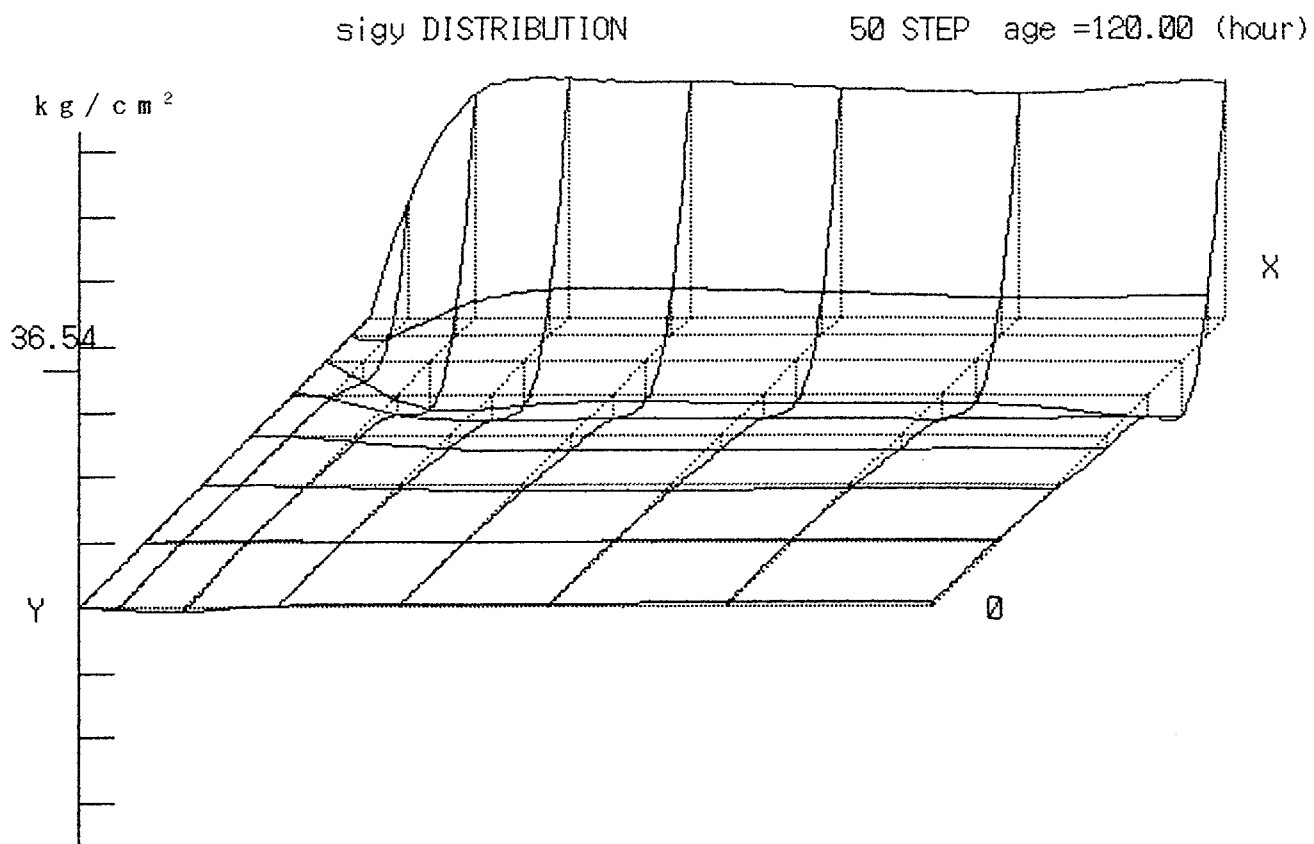


図5.4.12 (g) 長辺方向応力分布 (材令120時間)

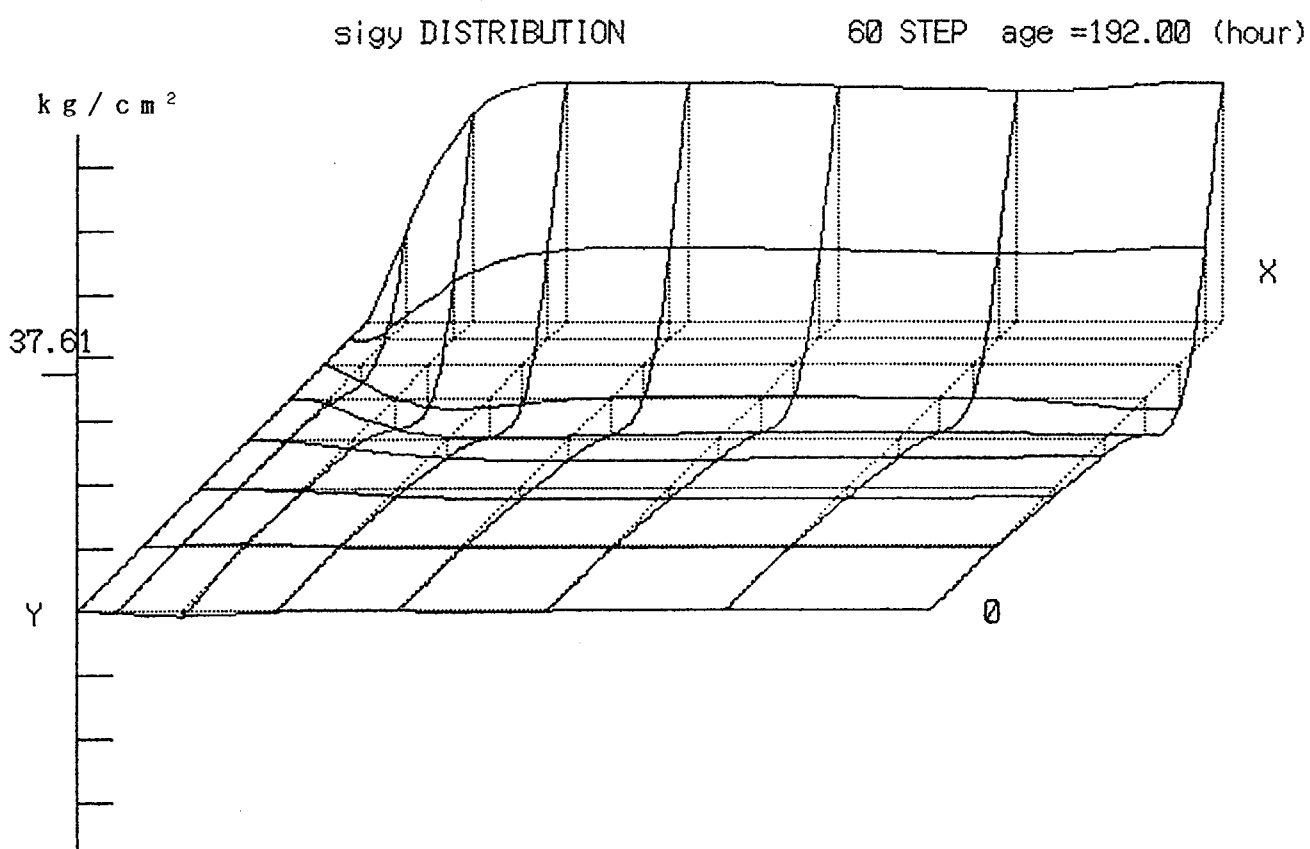


図5.4.12 (h) 長辺方向応力分布 (材令192時間)

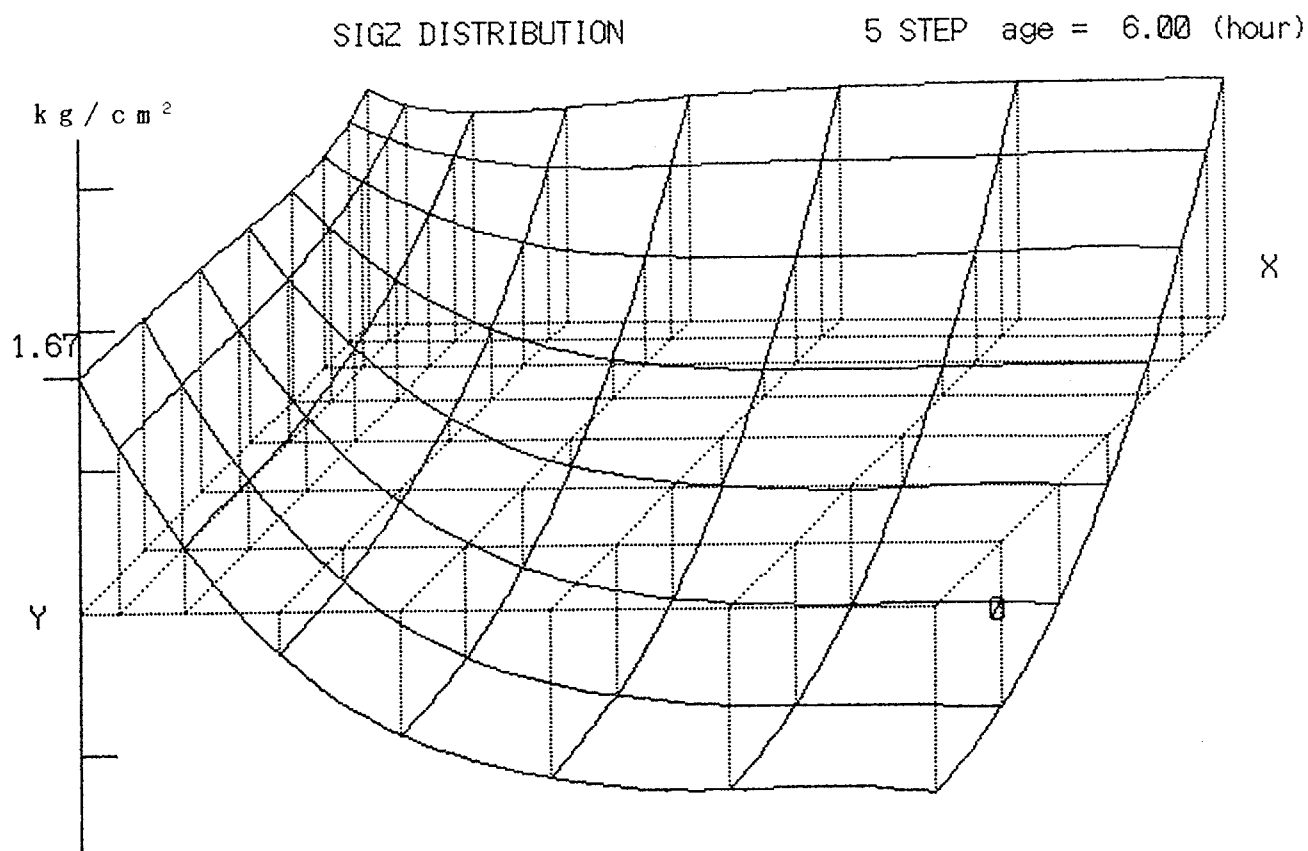


図5.4.13(a) 軸方向応力分布 (材令 6時間)

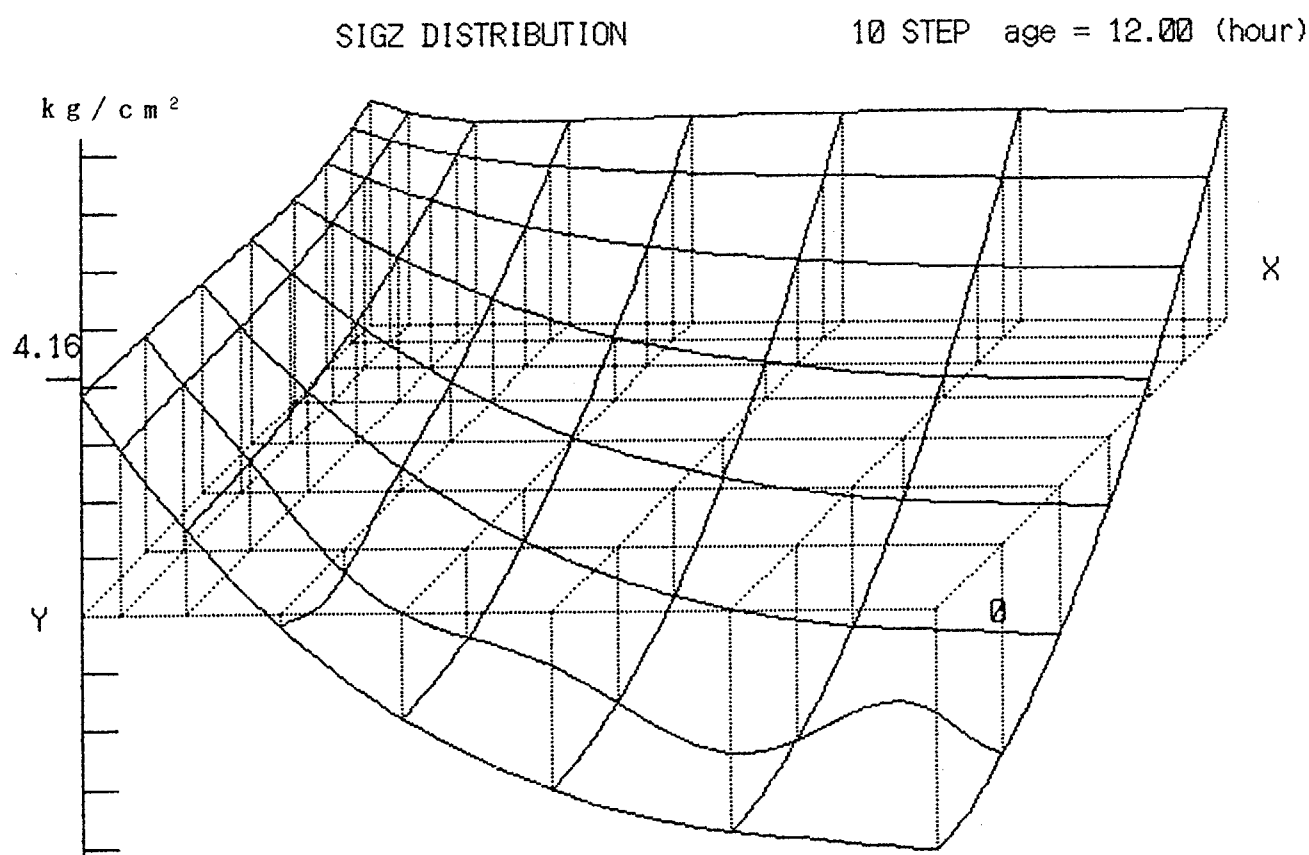


図5.4.13(b) 軸方向応力分布 (材令12時間)

SIGZ DISTRIBUTION

15 STEP age = 18.00 (hour)

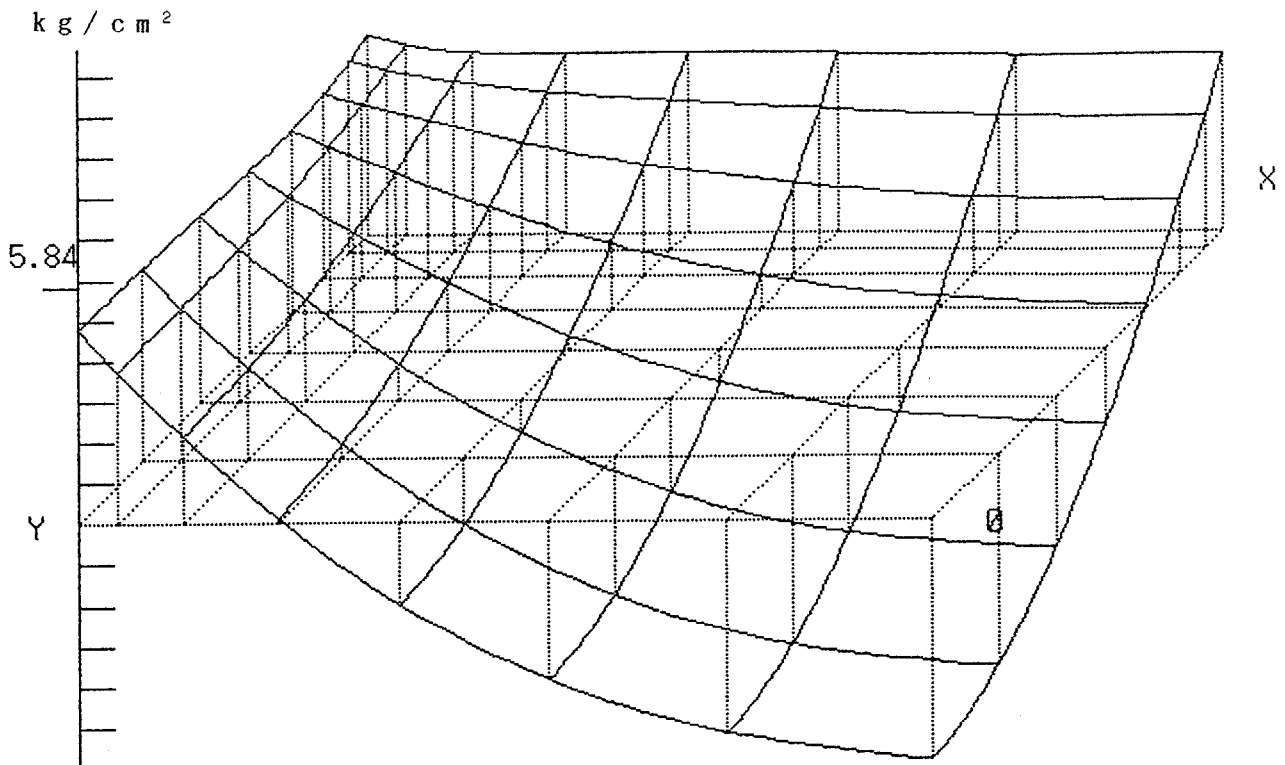


図5.4.13(c) 軸方向応力分布 (材令18時間)

SIGZ DISTRIBUTION

20 STEP age = 24.00 (hour)

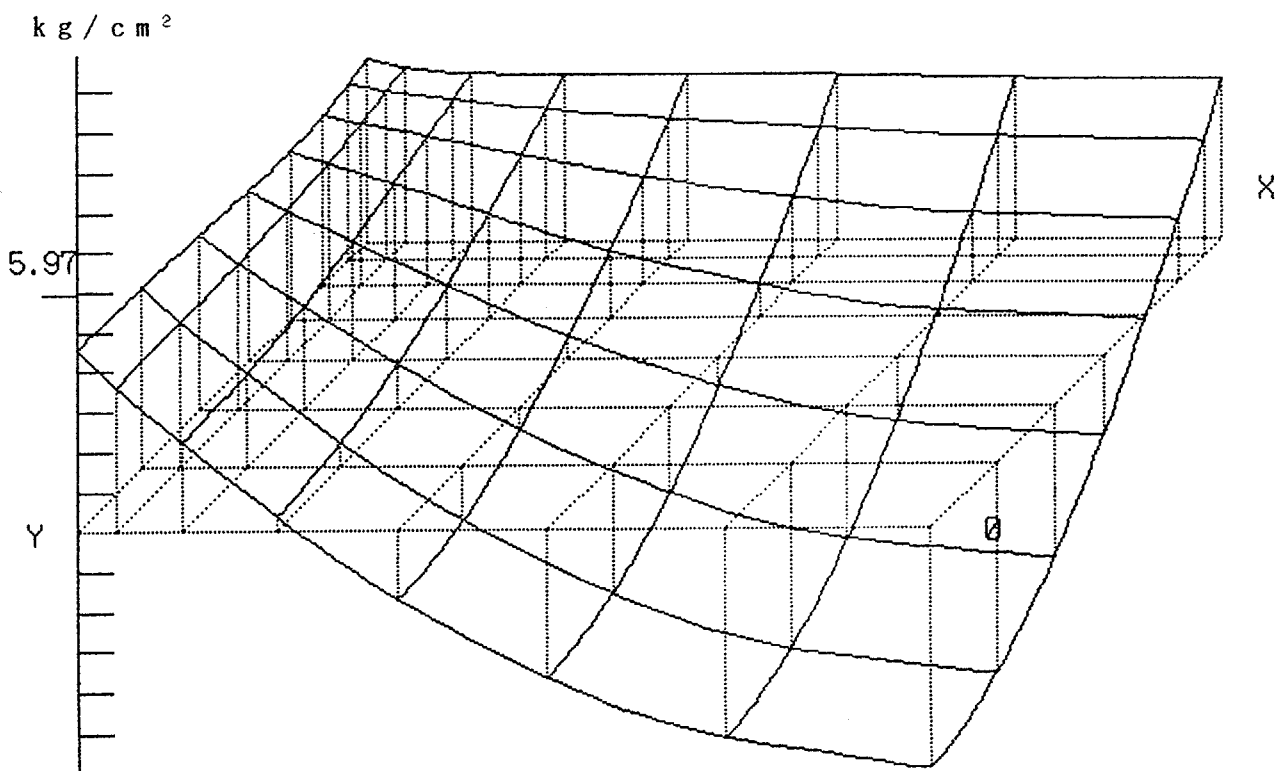


図5.4.13(d) 軸方向応力分布 (材令24時間)

sigz DISTRIBUTION

30 STEP age = 48.00 (hour)

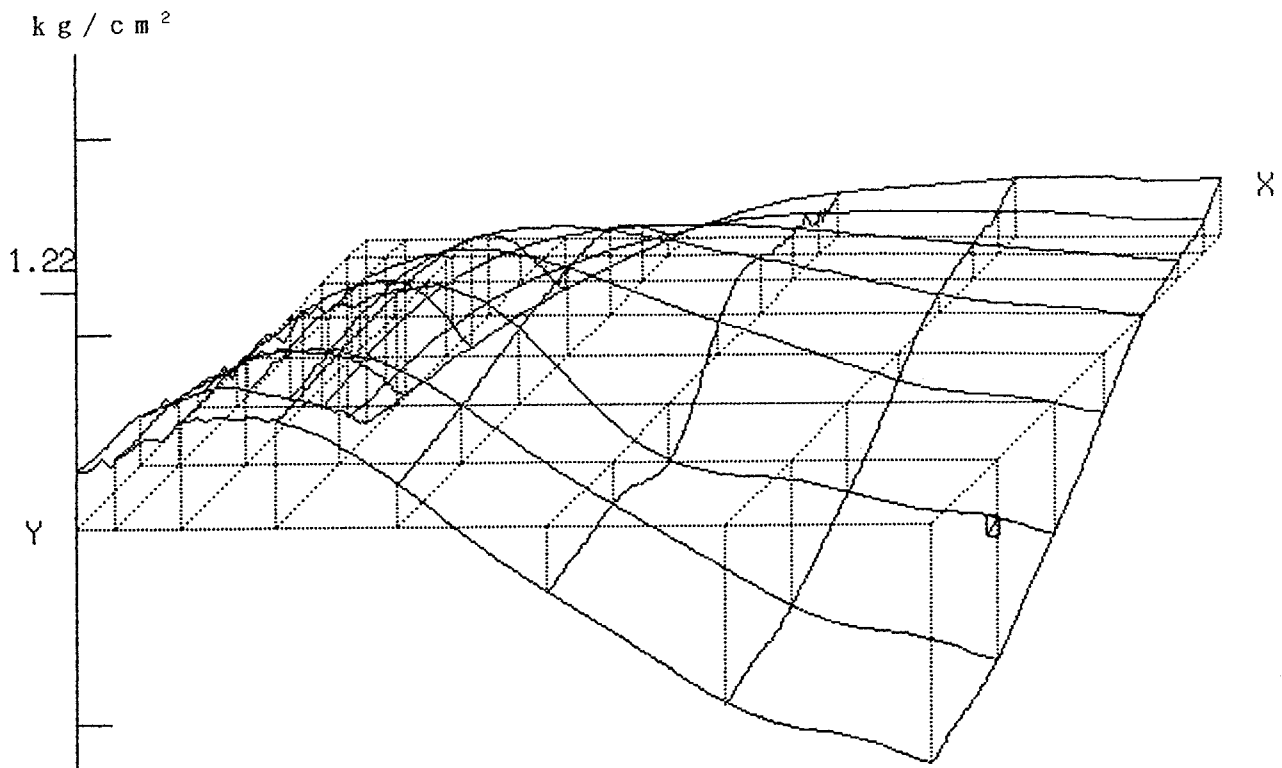


図5.4.13 (e) 軸方向応力分布 (材令48時間)

sigz DISTRIBUTION

40 STEP age = 72.00 (hour)

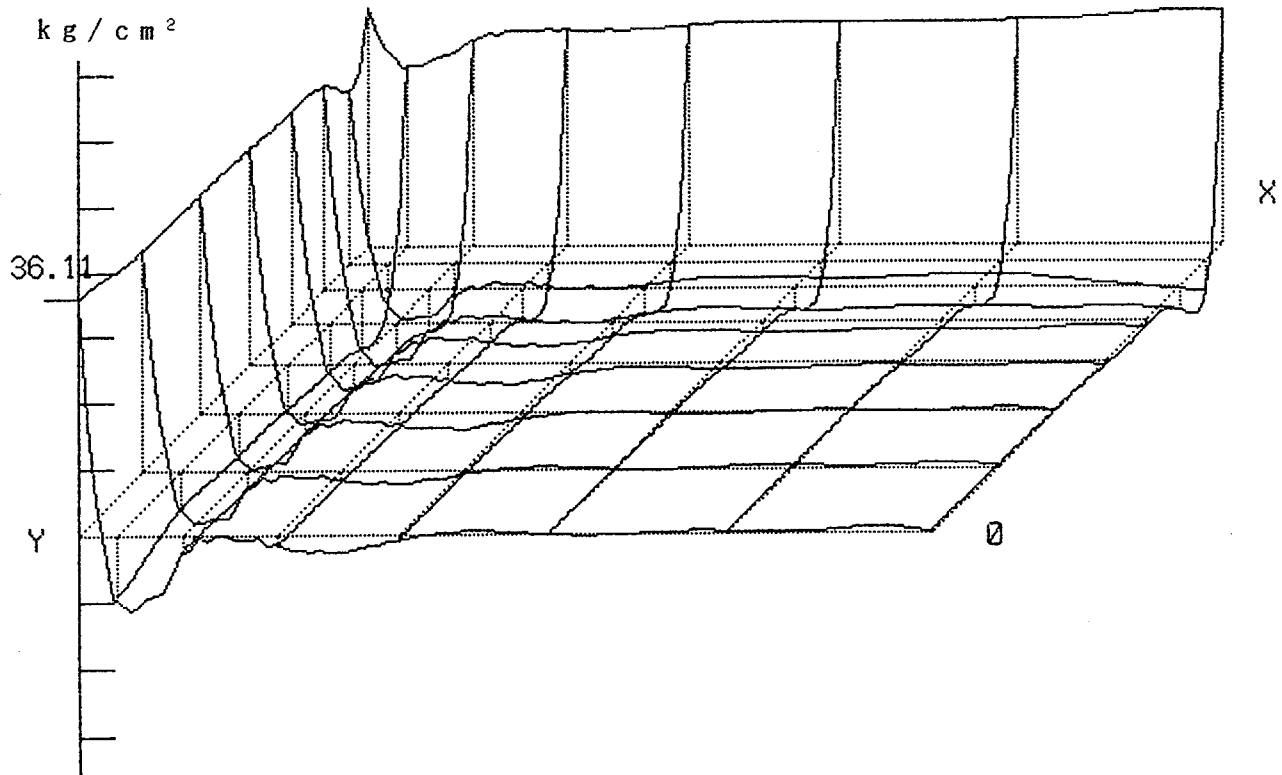


図5.4.13 (f) 軸方向応力分布 (材令72時間)

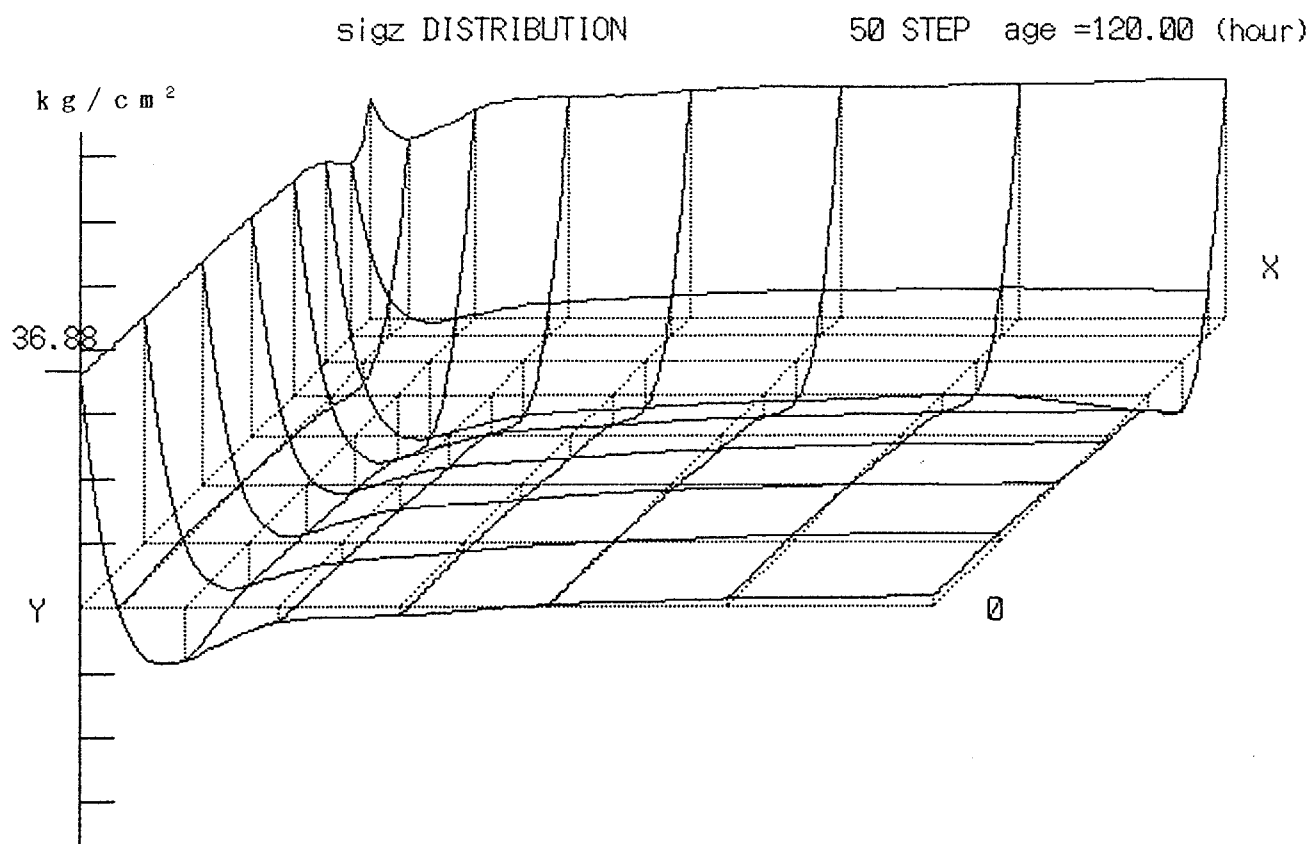


図5.4.13 (g) 軸方向応力分布 (材令120時間)

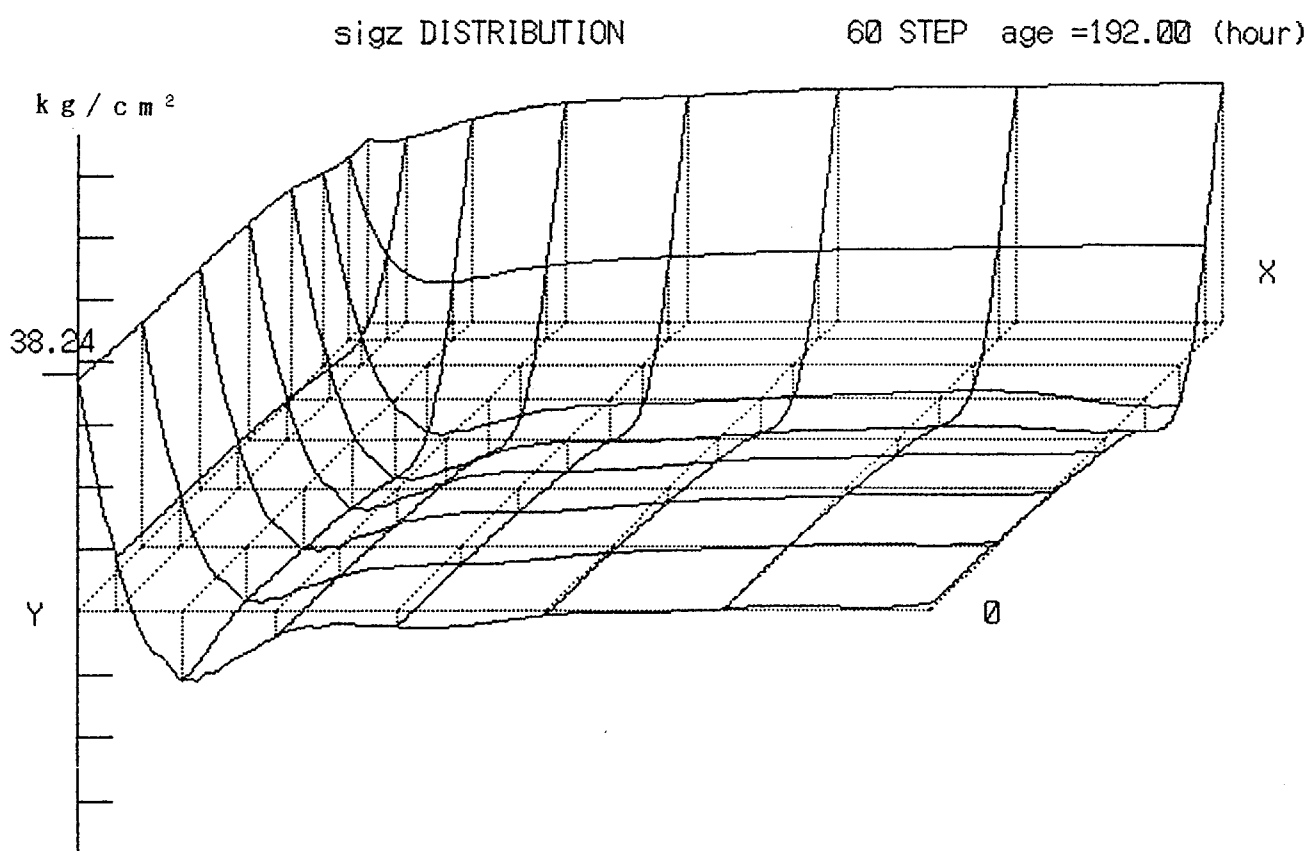


図5.4.13 (h) 軸方向応力分布 (材令192時間)

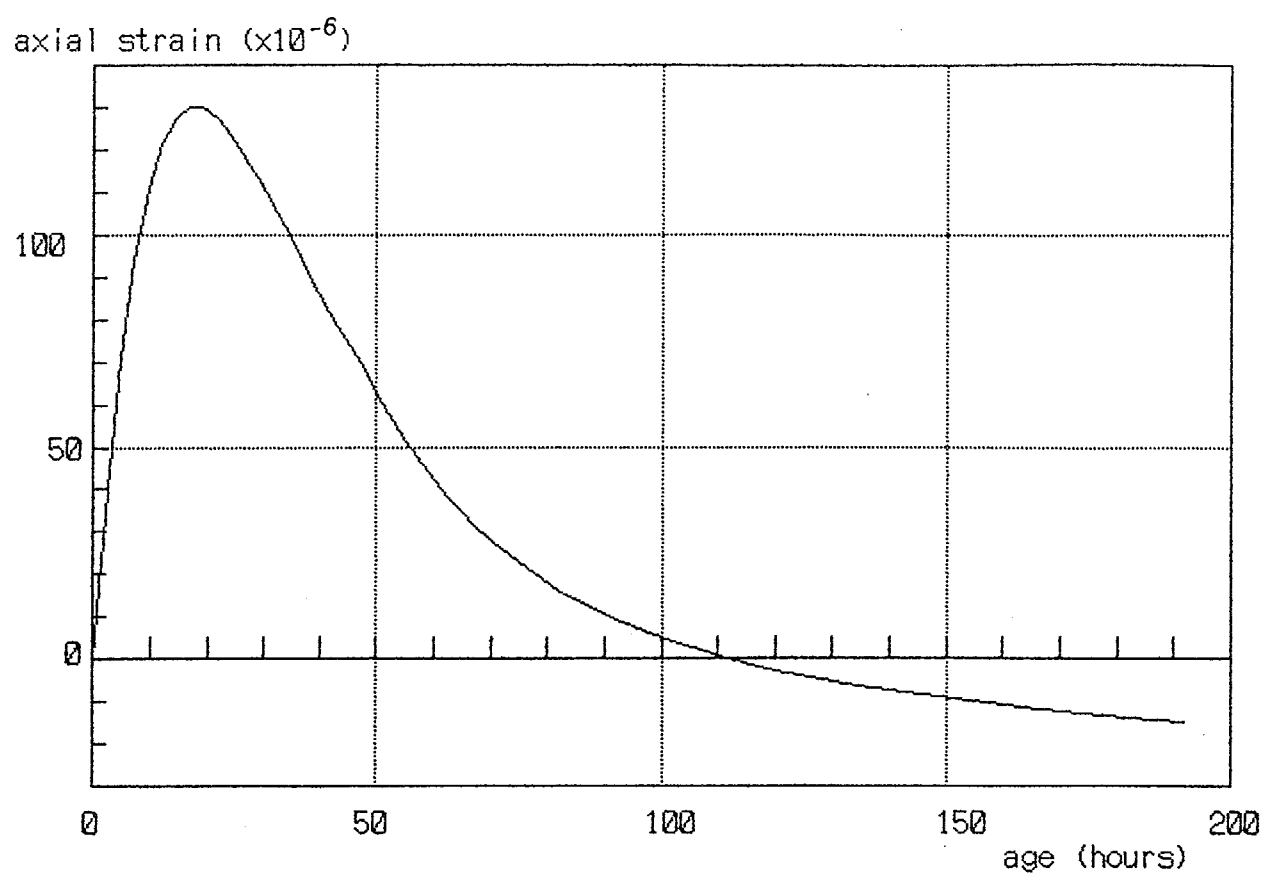


図5.4.14 軸方向ひずみの経時変化

5. 5 まとめ

若材令のコンクリートの水和発熱および水分散逸による内部応力解析法を提示し、建築構造物における実際のコンクリート構造物材に近いコンクリート柱について、2次元解析を行った。本章で得られた知見は、以下のように要約することができる。

- (1) (2.11)式をそのまま同一水セメント比のコンクリートに適用し、セメントの単位重量当りの発熱量を 90 kcal/kg として解析した断熱温度上昇量はコンクリート標準示方書に示される断熱温度上昇式とほぼ一致する。このことから、セメントペーストについての実験式(2.11)式は通常の水セメント比のコンクリートにはそのまま適用できるといえる。
- (2) 実際のコンクリート部材中における中心部と縁部のコンクリートの水和の程度の差異には、乾燥及び温度による影響が共に大きい。比較的早期から乾燥を受ける場合は、特に温度差によるコンクリートの水和の程度の差異を乾燥現象が長期材令まで回復させない方向に向けるので注意が必要である。
- (3) 建築構造物の柱程度のスケールのコンクリートでは、乾燥により断面内の含水量勾配が著しく大きくなり、乾燥収縮がコンクリートの初期応力の主要因となる。また、その応力レベルはコンクリート表面付近ではコンクリートの引張強度程度に達し、乾燥を受けるコンクリートの表面付近には、ひびわれが多数発

生している可能性がある。特に、柱部材では、通常軸力が作用していることからひびわれの方向は材軸方向に沿ったものと考えられる。

第 6 章

結 論

6. 結 論

本論文は、コンクリートは初期状態、すなわち外部から力が加わっていない状態においても、水和発熱および乾燥収縮による不均一収縮あるいは、不均一な膨張が生じており、このことによる内部応力がコンクリートの破壊条件、あるいは実構造物におけるコンクリートの挙動等に重大な影響を及ぼすであろうことを指摘し、この内部応力を推定し得る数値解析法の提案を行ったものである。数値解析法は温度解析、水分移動解析、応力解析よりなるが、これらの解析法を構築するに当たっては、任意温度、任意乾燥条件下におけるコンクリートの水和速度、コンクリート中の水分移動則、コンクリートの若材令時におけるクリープの問題の3点が未解明でしかも解析結果の妥当性に大きく影響を及ぼす問題であることを述べ、これらの事柄を若材令のセメントペースト、あるいはモルタルについての実験を通して検討した。。本論文で提示した実験は、いずれもセメントペースト、あるいはモルタルを対象とし、実験条件も水セメント比が1種類、または、2種類と限られた範囲での実験資料を得るにとどまっているが、本実験手法および結果の整理手法を用いれば、他の条件についても同様に扱うことができる。最終的に、前述の実験結果を、骨材の影響は小さいものとしてそのままコンクリートに適用し、建築構造物の柱程度のスケールのコンクリートのついて初期応力の解析を行った。本研究で得られた結論を要約すれば、以下の通りである。

- (1) 任意温度、任意乾燥条件下におけるコンクリートの水和反応速度は、骨材の存在が水和反応に及ぼす影響は殆ど無いという仮定の基に本論文で提示した水和反応式、すなわち以下の式により推定することができる。

$$\frac{d w_n}{d t} = a'(T) \cdot (W_n(w) - w_n)^2$$

w_n : 結合水量

$W_n(w)$: 最終結合水量 (含水量 w に依存)

$a'(T)$: 反応速度係数 (温度 T に依存)

$$\beta_T = \exp\left(\frac{Q_h}{RT_0} - \frac{Q_h}{RT}\right)$$

$$a'(T) = a'(T_0) \cdot \beta_T$$

$$Q_h/R = 2500K$$

$a'(T_0)$: 基準温度における反応

速度係数の実験値

$$W_n/c = -\frac{0.122}{w/c + 0.34} + 0.36 \quad (W/c = 50\%)$$

骨材の存在が水和反応速度という観点からは無視し得ることは、上式をコンクリートの水和反応式として用いて解析した断熱温度上昇曲線が土木学会刊のコンクリート標準示方書に示される同一条件での断熱温度上昇曲線にほぼ一致したことから、妥当な仮説であったといえる。

- (2) 若材令のセメント硬化体の含水量と電気抵抗の関係を調べた実験より、セメント硬化体の電気抵抗値は、含水量および結合水量の2要因に支配されることが明かとなった。これらの関係は、本実験手法に用いられた電極サイズでは具体的に以下の式で表される。

$$\log R = 17.8 \cdot w_n / c + 2.16 \\ - (10.8 \cdot w_n / c + 0.65) \{ \log (w / c - w_n / c) + 2.30 \}$$

R : 電気抵抗 (kΩ)

w / c : 含水量 (初期練り混ぜ水量から脱水量を
差し引いたもの) のセメントに対する重
量比 (kg/kg)

w_n / c : 結合水量のセメントに対する重量比 (kg/kg)

上式により、電気抵抗値から含水量を推定するためには、結合水量が含水量履歴に依存することから、厳密には電気抵抗測定位置での脱水量の履歴形状が既知であることが条件となるが、脱水履歴の形状が推定される含水量に与える影響は乾燥開始材令がきわめて若材令である場合を除いて小さく、脱水履歴を矩形状の脱水と仮定することで含水量を十分な精度で推定し得る。本論文における若材令のセメント硬化体の含水量測定方法は、ややばらつきが大きいという問題はあるものの、含水量分布の経時変化を簡便に追跡し得るという利点を有しており、後述のセメント硬化体中の水分移動則を確立するための実験資料の蓄

積に有効である。

また、本手法を用いて得られた、一面乾燥を受けるモルタルの内部含水量分布の経時変化に関するデータより、モルタルの水分移動を拡散現象と仮定した場合の拡散係数および表面係数の結合含水量依存性、含水量依存性について検討を行った結果、砂・セメント・水重量比が4 : 2 : 1のモルタルでは、拡散係数値は20℃、材令2日で、 $0.04\text{cm}^2/\text{hour}$ 、表面係数値は、 $0.07\text{cm}/\text{hour}$ という値が得られた。

- (3) コンクリートの内部応力解析に当たり、構成方程式にコンクリートのクリープ特性を考慮することは、持続的な応力によってクリープひずみが増大し応力緩和が生じることから、実際の応力状態の把握には必要であるが、と同時にひびわれの判定基準となる引張強度が持続応力の影響によってまた低下することから、初期応力によるひびわれの推定には、必ずしも有効ではない。持続応力の影響を考慮した引張ひびわれの発生条件は、応力-ひずみ平面上で双曲線形状となることから、クリープ現象を考慮した場合でも応力あるいは、ひずみのどちらか一方のみからひびわれの判定をすることはできない。ひびわれ発生条件が応力とひずみの両方を含む形でしか表せないとなれば、むしろ弾性解析解の方がひびわれの推定には都合がよい可能性がある。

- (4) 部材せい、あるいは幅が60cmから100cmという建築構造物の柱程度のスケールのコンクリートでは、乾燥により断面内の含

水量勾配が著しく大きくなり、乾燥収縮がコンクリートの初期応力の主要因となる。また、その応力レベルはコンクリート表面付近ではコンクリートの引張強度程度に達し、乾燥を受けるコンクリートの表面付近には、ひびわれが多数発生している可能性が高い。

- (5) 本解析手法は、硬化後、強度を発現していく過程でコンクリートに生じる水和発熱、および乾燥による内部応力、内部ひずみの把握に有効である。

参 考 文 献

参考文献

- 1) 永松静也、竹田吉紹、佐藤嘉昭：乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式：日本建築学会構造系論文報告集第361号・昭和61年3月
- 2) 河角 誠、関 慎吾、笠原 清、栗山武雄：セメントの水和と内部水の粘性からみたコンクリートのクリープ特性：土木学会論文報告集第321号・1982年5月
- 3) 寺田米男：コンクリート強度の推定式に関する研究(1)：日本建築学会構造系論文報告集第361号・昭和61年3月
- 4) 仕入豊和、地濃茂雄：温度条件がコンクリートの初期硬化におよぼす化学的影響に関する研究：セメント技術年報34、昭和55年
- 5) 笠井芳夫、横山 清：コンクリートの初期強度に関する研究：セメント技術年報20
- 6) 高野俊介、柳川晃夫：初期養生温度がモルタル及びコンクリートの強度に及ぼす影響：セメント技術年報7
- 7) 笠井芳夫、平賀友晃、横山 清：コンクリートの初期強度に関する研究：セメント技術年報18
- 8) 中村静磨：マスコンクリートの養生温度が圧縮強度に及ぼす影響：セメント技術年報14
- 9) 神田 衛：コンクリートの硬化時間に関する研究：セメント技術年報16

- 10) 仕入豊和、地濃茂雄：コンクリートの凝結硬化におよぼす温度条件の（ $20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ ）の影響 —セメントの水和反応過程からの考察—：日本建築学会構造系論文報告集第 293号昭和 55 年 7 月
- 11) 仕入豊和、地濃茂雄：コンクリートの初期強度におよぼす温度条件（ $20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ ）の影響：日本建築学会構造系論文報告集第 320号昭和 57 年 10 月
- 12) 庄谷征美、徳田 広：保温養生したコンクリートの若材令における熱拡散率：セメント技術年報 28、昭和 49 年
- 13) 大崎幸雄、吉川弘道、河田秋澄：マスコンクリートの温度応力解析に適用する構成方程式の検討：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1982、8 月
- 14) 長田晴道、小野 定：温度解析方法に関する既往の研究成果について：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1982、8 月
- 15) 森本博昭、小柳 洽：コンクリート構造物の温度応力解析における 2、3 の問題点：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1982、8 月
- 16) 小野 定、櫛田泰仁：温度応力解析方法に関する既往の研究成果について：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1982、8 月
- 17) 田辺忠顕、梅原秀哲：マスコンクリートの温度応力解析における解析モデル：RC 構造物の有限要素解析に関するコロキウム論文集、1984 年

- 18) 川上 洵、高橋 功、石崎寛治郎：多層コンクリート円柱の熱応力：セメント技術年報 40、昭和 61 年
- 19) Sadamu Ono, et al: Evaluations of external restraining effect and prediction method for thermal cracks in high strength lightweight concrete: Proc. of JSCE, NO. 354, 1985.2
- 20) 丸安隆和、竹内十三男：温度を媒体としたコンクリート性状変化の試験方法に関する研究：セメント技術年報 37、昭和 58 年
- 21) 川口 徹、梶田佳寛：コンクリートの熱伝導率、熱伝達率、比熱の測定方法とその応用：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1982、8 月
- 22) 横田紀男、他：断熱温度上昇試験方法に関する一考察：セメント技術年報 39、昭和 60 年
- 23) 佐藤利幸、他：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量：コンクリート工学年次論文報告集、1987
- 24) 岩城 良、他：セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究：鹿島建設技術研究所年報第 28 号、昭和 55 年
- 25) Gerald Pickett: Shrinkage Stresses in Concrete: Journal of ACI, Vol.17, No.3, 1946.1
- 26) Z.P.Bazant and L.J.Najjar: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete: Materiaux et constructions, Vol.5, 1972

- 27) 永松静也、佐藤嘉昭：非線形拡散方程式によるコンクリートの脱水量の分布に関する研究：セメント技術年報 35、昭和 56 年
- 28) 永松静也、佐藤嘉昭：モルタルの若材令時における脱水量と線非拘束収縮ひずみとの関係に関する研究：セメント技術年報 35、昭和 56 年
- 29) 永松静也、佐藤嘉昭：コンクリートの乾燥収縮実験ならびに応力解析：セメント技術年報 37、昭和 58 年
- 30) 竹田吉紹、永松静也、佐藤嘉昭：若材令時より乾燥を受けるモルタルの水和および強度に関する研究：セメント技術年報 38、昭和 59 年
- 31) 永松静也、竹田吉紹、佐藤嘉昭：若材令時より乾燥をうけるモルタル部材の圧縮強度の内部分布について：日本建築学会構造系論文報告集第 366 号昭和 61 年 8 月
- 32) 阪田憲次、他：コンクリートの乾燥収縮の予測に関する研究：セメント技術年報 35、昭和 56 年
- 33) 牧角龍憲、他：部材寸法を変化させたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験：セメント技術年報 40、昭和 61 年
- 34) 岡島達雄、他：コンクリートの強度及び弾性係数の含水量依存性：セメント技術年報 36、昭和 57 年
- 35) 西岡栄香、原田 有：コンクリートの透湿率および湿気拡散率について：セメント技術年報 15、昭和 36 年
- 36) 原田 有、仕入豊和、椎名國雄：乾燥を伴うコンクリート部材の湿気勾配に関する研究：セメント技術年報 23、昭和 44 年

- 37) Nilsson L.O.: Hygroscopic Moisture in Concrete-drying: Measurements and Related Material Properties, Report TVBM-1003, Lund Sweden, 1980
- 38) 岡島達雄、他：コンクリートの等温吸脱着特性：第43回セメント技術大会講演集、1989
- 39) 橋田浩、田中享二、小池迪夫：打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態、日本建築学会構造系論文報告集、第412号、pp.1-8、1990.6
- 40) Z.P.Bazant: Numerical determination of long-range stress history from strain history in concrete: Materiaux et constructions. Vol.5. 1972
- 41) 永松静也、佐藤嘉昭：水和の進行による影響が無視し得るとみなされるコンクリートの圧縮クリープ性状：日本建築学会論文報告集第340号昭和59年6月
- 42) 永松静也、佐藤嘉昭：水和過程にあるコンクリートの圧縮クリープ関数：日本建築学会論文報告集第344号昭和59年10月
- 43) 永松静也、佐藤嘉昭：モルタルのクリープ破壊強度に関する研究：セメント技術年報33、昭和54年
- 44) 永松静也、佐藤嘉昭：コンクリートのクリープ関数と水和度の関係について：セメント技術年報37、昭和58年
- 45) 藤井 学、他：2軸応力下のコンクリートのクリープに関する基礎的研究：セメント技術年報39、昭和60年
- 46) 森 徹、他：コンクリートの圧縮強度とクリープ強度との相関性に関する研究：セメント技術年報30、昭和51年

- 47) 松下博通、高垣泰雄、石川達夫：多軸応力下のモルタルのクリープ：セメント技術年報 26、昭和 50 年
- 48) 石川達夫、松下博通、徳光善治：多軸応力下のコンクリートのクリープ：セメント技術年報 28、昭和 49 年
- 49) 鈴木 計夫：変動応力を受けるコンクリートのクリープ近似係数：セメント技術年報 28、昭和 49 年
- 50) 岡島達雄、他：複合応力を受けるコンクリートのクリープ：セメント技術年報 30、昭和 51 年
- 51) 渡辺誠一、六車 照：コンクリートのクリープひずみに関する一考察：日本建築学会構造系論文報告集第 402 号 1989 年 8 月
- 52) 鎌田英治：電極法によるコンクリートの含水率の測定：日本建築学会学術講演梗概集<構造系>、pp.117-118、1976
- 53) 小池迪夫、田中享二：温度勾配のある仕上材下地コンクリートの含水状態に関する実験的検討、日本建築学会学術講演梗概集 A、pp.93-94、1987
- 54) 仕入豊和、鄭尚鎮、他：電極法による高温下のコンクリート中の含水量の測定：日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp.355-356、1985
- 55) コンクリート標準示方書 施工編、土木学会刊、1986
- 56) W.Czernin、建設技術者のためのセメント・コンクリート化学：技報堂出版
- 57) A.M.Neville、コンクリートの特性：技報堂出版
- 58) 荒井康夫、セメントの材料化学：大日本図書
- 59) 近藤連一、多孔材料：技報堂出版

- 60) W.F.Chen, Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill Book Company

既発表論文リスト

本論文に関連して著者が発表した論文

<日本建築学会構造系論文報告集>

1. 「若材令コンクリートの熱および乾燥による応力解析法」
：瀧口 克己、堀田 久人、小板橋 裕一：第396号、
1989(H.01), 2月：pp.118～124
2. 「若材令コンクリートの水和発熱および乾燥による初期応力
に関する研究」：瀧口 克己、堀田 久人：
第419号、1991(H.03), 1月：pp.153-162
3. 「若材令時より乾燥を受けるモルタルの含水量分布に関する
研究」：瀧口 克己、堀田 久人：投稿中
4. 「ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する
実験研究 ―気体の圧縮性を考慮した実験式の検討―」：
鈴木 敏郎、瀧口 克己、堀田 久人、井出 豊：第384号、
1988(S.63), 2月：pp.15～25
5. 「ひびわれの生じたコンクリート壁からの各種気体の漏洩に
関する実験」：鈴木 敏郎、瀧口 克己、井出 豊、
堀田 久人：第391号、1988(S.63), 9月：pp.10～18
6. 「鉄骨フープ筋コンクリート合成部材の力学特性」：
鈴木 敏郎、瀧口 克己、堀田 久人：第391号、
1988(S.63), 9月：pp.72～80

7. 「2自由度載荷を受ける鉄骨フープ筋コンクリート合成柱の
復元力特性」：鈴木 敏郎、瀧口 克己、市之瀬 敏勝、
堀田 久人、林 篤：第394号、1988(S.63),12月：
pp.49～59
8. 「ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩」：
鈴木 敏郎、瀧口 克己、堀田 久人、小島 直樹：
第416号、1990(H.02),10月：pp.17～26
9. 「三角スチフナを用いた鉄骨フープ筋コンクリート柱鉄骨は
り接合部の終局耐力」：鈴木 敏郎、瀧口 克己、
堀田 久人、加藤 征宏：第416号、1990(H.02),10月：
pp.71～78
10. 「鉄骨フープ筋コンクリート柱のせん断性状」：鈴木 敏郎、
瀧口 克己、堀田 久人、五十嵐 俊夫、加藤 征宏：
第430号、1991(H.03)、12月：pp.31～39

< Journal of Nuclear Engineering and Design >

11. 「Leakage of Gas through Concrete Cracks」：
T.Suzuki, K.Takiguchi and H.Hotta (掲載決定)

< 国際会議 >

Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering,
Tokyo, August 1988

12. 「Restoring Force Characteristics of a [STEEL-HOOP-
CONCRETE] Composite Column」 : T.Suzuki, K.Takiguchi,
H.Hotta and K.Kimura: Vol.IV, pp.725-730
13. 「Earthquake Damage Evaluation and Repair Techniques
of R/C Columns with Round Bars」 : K.Takiguchi,
T.Ichinose and H.Hotta: Vol.VII, pp.285-290

Proc. of the Second East Asia-Pacific Conference on
Structural Engineering and Construction, Chiang Mai, January
1989

14. 「Practical Use of New Concrete Useing Small Ice
Pieces」 : T.Suzuki, K.Takiguchi, H.Hotta and
S.Miyashita: Vol.1, pp.487-492
15. 「Development and Research of Steel-Hoop-Concrete
Composite Structure」 : T.Suzuki, K.Takiguchi,
H.Hotta, K.Kimura and M.Kato: Vol.1, pp.113-118

Trans. of the 10th International Conference on Structural
Mechanics in Reactor Technology, Anaheim, August 1989

16. 「Experimental Study on the Leakage of Gas through
Craked Concrete Walls」 : T.Suzuki, K.Takiguchi,
H.Hotta, N.Kojima, M.Fukuhara and K.Kimura: Vol.Q,
pp.145-150

Proc. of the Third East Asia-Pacific Conference on
Structural Engineering and Construction, Shang-Hai, April
1991

17. 「Mechanical Characteristic of SHC Structure Beam-
Column Joint Panel」 : T.Suzuki, K.Takiguchi,
H.Hotta and S.Nakamura: Vol.2, pp.1243-1248
18. 「Fundamental Study on Compactibility of Concrete in
Composite Structure」 : K.Takiguchi, H.Hotta, T.Sato
and S.Morita: Vol.2, pp.1269-1274
19. 「Practicability of Concrete with Small Ice Pieces」 :
T.Suzuki, K.Takiguchi, H.Hotta and S.Miyashita:
Vol.2, pp.1109-1114
20. 「Thermal and Drying Shrinkage Stress Analysis of
Concrete」 : K.Takiguchi and H.Hotta: Vol.1.
pp.269-274

Trans. of the 11th International Conference on Structural
Mechanics in Reactor Technology, Tokyo, August 1991

21. 「A Numerical Analysis Method on Thermal and Shrinkage
Stress of Concrete」 : K.Takiguchi and H.Hotta:
Vol.H, pp.49-54
22. 「Leakage of Gas through Concrete Cracks」 : T.Suzuki,
K.Takiguchi and H.Hotta: Vol.H, pp.187-192

< 日本建築学会大会学術講演梗概集 >

23. 「若材令コンクリートの発熱及び乾燥による応力解析法
(その1) 温度及び乾燥解析」：瀧口 克己、堀田 久人、
小坂橋 裕一：1988(S.63), 10月(関東) [構造Ⅰ]
24. 「若材令コンクリートの発熱及び乾燥による応力解析法
(その2) 応力解析」：瀧口 克己、堀田 久人、小坂橋
裕一：1988(S.63), 10月(関東) [構造Ⅰ]
25. 「若材令コンクリートの水和発熱および乾燥による初期応力
に関する研究(その1) 水和反応速度式」：瀧口 克己、
堀田 久人、鍋谷 弘治、田中 京介：1990(H.2), 10月
(中国) [材料・施工]
26. 「若材令コンクリートの水和発熱および乾燥による初期応力
に関する研究(その2) 温度および水分拡散解析」：
瀧口 克己、堀田 久人、田中 京介、鍋谷 弘治：
1990(H.2), 10月(中国) [材料・施工]
27. 「若材令コンクリートの水和発熱および乾燥による初期応力
に関する研究(その3) 応力解析」：瀧口 克己、
堀田 久人、田中 京介、鍋谷 弘治：1990(H.2), 10月
(中国) [材料・施工]
28. 「セメント硬化体の電気抵抗特性に及ぼす含水量の影響に関
する研究」：瀧口 克己、堀田 久人：1991(H.3), 9月
(東北) [材料・施工]

29. 「セメントペーストの曲げ引張強度に対する持続荷重の影響
及び曲げ引張クリープ特性」：滝口 克己、堀田 久人、
森田 修平：1991(H.3).9月(東北) [材料・施工]

<その他>

30. 「Characteristics of Concrete Produced by New Method
Using Small Ice Pieces」：T.Suzuki, K.Takiguchi and
H.Hotta: Transactions of JCI, Vol.8, 1986, pp.89-96
31. 「小氷塊を用いて製造するコンクリートの特性」：
鈴木 敏郎、滝口 克己、堀田 久人：第8回日本コンク
リート工学協会年次講演会 pp.357-360 1986