

第5章 乾燥収縮ひび割れ実験および 乾燥を受けるコンクリートの力学特性

5.1 はじめに

実構造物におけるコンクリートの乾燥収縮ひび割れを、実験室レベルで忠実に再現することは困難であるが、相対的に評価する方法として乾燥収縮ひび割れ試験が行われる。コンクリートに乾燥収縮ひび割れを発生させるには、コンクリートの自由収縮ひずみを拘束する必要がある。従来、リング型、一軸内部拘束型、外部拘束型など種々のものがひび割れ試験装置として用いられてきたが [5.1] [5.2] [5.3] [5.4], ひび割れ試験方法や実験条件などは、それぞれの研究で特定され共通的なスケールがなかった。また、ひび割れ試験には、時間の経過とともに性質が変化していくコンクリートに対する装置の拘束率が試験期間中あまり変化してはならず、また、ひび割れ発生時期を拘束率を変化させて調整することも必要である。そこで、ひび割れ試験の標準化を図るために「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」の JIS 原案[5.5]が提案された。実際の構造物でのひび割れの発生は、乾燥収縮以外に、例えば温度変化などの多くの要因が影響する。従って、実構造物でのひび割れ発生を確実に推定できるとは必ずしも言えないが、コンクリートの相対的なひび割れ抵抗性の判定は十分にできるものである。本論文でも JIS 原案に準じて乾燥収縮ひび割れ試験を行った。

ところで乾燥収縮ひび割れ試験はコンクリート部材が極めてゆっくりとした荷重速度で引張られる直接引張強度試験に対応していると考えられる。従って、乾燥収縮ひび割れ供試体と同一の断面を持ち、同一の乾燥条件下に置かれたコンクリート供試体の直接引張強度の経時変化を測定しておけば、ひび割れの発生時期をある程度までは確認できるようになるものと思われる。コンクリートの直接引張強度試験に関してはこれまで各種の方法が提案されているが、供試体作製の型枠に工夫が必要であったり、また、引張用の特殊な治具が必要であるなど、それほど容易ではない。コンクリートの直接引張強度を求めることはそれほど容易ではなく、事実、乾燥過程下にある直接引張強度の変化についての実験・研究は少ない。そこで、簡単に行うことができ、かつ信頼性の高いデータを得ることのできる直接引張試験方法について検討すると同時に、乾燥過程にある場合の直接引張強度の経時変化を測定することにした。

5.2 実験計画

実験概要を表 5.2.1 に示す。実験はすべて調合の違うレディーミクストコンクリートを使用した。シリーズ I では 2 種類のコンクリート(普通コンクリートと高強度コンクリート)を使用し、コンクリートの強度がひび割れ発生にどのような影響を及ぼすかを検討した。また、乾燥収縮ひび割れ試験と同時に乾燥させた場合の、圧縮、割裂および曲げ強度変化を測定した。シリーズ II では、21-18-20N のコンクリートを使用し、直接引張強度を測定しひび割れ発生と比較することにした。シリーズ III では、シリーズ II においてひび割れが発生しなかったために呼び強度を落とし 18-18-20N のコンクリートを使用し実験を計画した。シリーズ IV では再び 21-18-20N のコンクリートを使用し拘束鋼材の種類を変えて実験を計画した。各シリーズとも、同時に自己収縮、自由収縮ひずみの測定および各種強度試験を計画した。乾燥収縮ひび割れ供試体は第 4 章で示したもので、圧縮強度、割裂強度試験用供試体は $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 、直接引張強度試験用供試体は $10 \times 10 \times 65 \text{cm}$ 、自由収縮ひずみ測定用および曲げ強度試験用の供試体は $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ とした。

5.3 供試体の作製、調合および養生

実験に使用したコンクリートはすべてレディーミクストコンクリートで、シリーズ I は 21-15-20N および 40-15-20N、シリーズ II は 21-18-20N、シリーズ III は 18-18-20N、シリーズ IV は 21-18-20N である。コンクリートの調合を表 5.3.1、使用材料の物理的性質を表 5.3.2 に示す。コンクリートの打設では、打設量が多いことから棒状の振動パイプレータを使用し、迅速かつ十分な打ち込みができるように注意を払って行った。

表 5.2.1 実験概要

	シリーズ I	シリーズ II	シリーズ III	シリーズ IV
コンクリートの種類	レディーミクスト コンクリート (21-15-20N) (40-15-20N)	レディーミクスト コンクリート (21-18-20N)	レディーミクスト コンクリート (18-18-20N)	レディーミクスト コンクリート (21-18-20N)
拘束鋼材	鋼材 A	鋼材 A, B	鋼材 A	鋼材 B
コンクリート用 ひずみゲージ	表面接着型 ゲージ (FLM-60-11)	表面接着型 ゲージ (FLM-60-11)	表面接着型 ゲージ (FLM-60-11)	小型埋込み ゲージ
乾燥開始材齢	3, 7, 28, 112 日 および 1 年	3, 7, 28, 440 日	3, 7, 28, 112 日	1, 3, 7, 28 日
ひび割れ 供試体本数	乾燥開始材齢ご とに 2 体ずつ	乾燥開始材齢ご とに 3 体ずつ	乾燥開始材齢ご とに 2 体ずつ	乾燥開始材齢ご とに 2 体ずつ
圧縮、曲げ、割裂強度 試験の乾燥期間	0, 1, 3, 7, 14, 28, 56, 365 日	—	—	—
直接引張強度の 乾燥期間	—	0, 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 56, 365 日	0, 1, 3, 7, 14, 28, 56, 365 日	0, 1, 3, 7, 14, 28, 56, 365 日

(2) サイズおよび形状の選定

サイズおよび形状の選定では、比較的小さな供試体にも埋込むことができるようにするために、具体的には、1x1x1inch の棒状供試体にも十分埋込むことができ、かつマトリクスとの

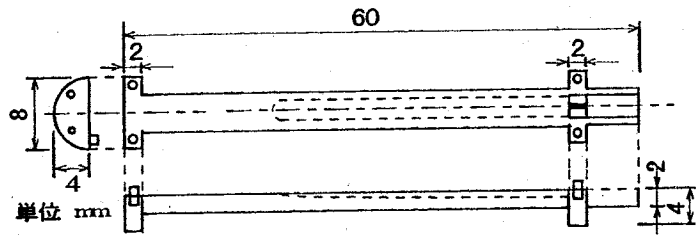


図 5.4.1 小型埋込みゲージの形状および寸法

付着を十分に取れることができる表面形状について検討を行った。その結果、形状は丸型とし、箔ゲージ長を 60mm とした試作ゲージが最も感度のばらつきが少ない。また、半割で製作し、ひずみゲージを接着し、リード線を結線後、張り合わせる方法を取ることによって、埋込み時にひずみゲージが中心に位置することができ、測定感度のばらつきを少なくすることができた。本実験で用いた小型埋込みゲージの形状および寸法を図 5.4.1 に示す。

(3) 小型埋込みゲージによる測定

試作した小型埋込みゲージを用いた静的圧縮強度試験時の「応力-ひずみ」曲線の一例を図 5.4.2 に示す。シリーズIVにおける材齢 7 日の結果である。小型埋込みゲージによるひずみは、ゲージファクターを考慮していないため、その絶対値には若干の差が見られるが、供試体の材齢および調合の違いによらず表面接着型ゲージのひずみとほぼ同様な傾向を示している。図中には、コン

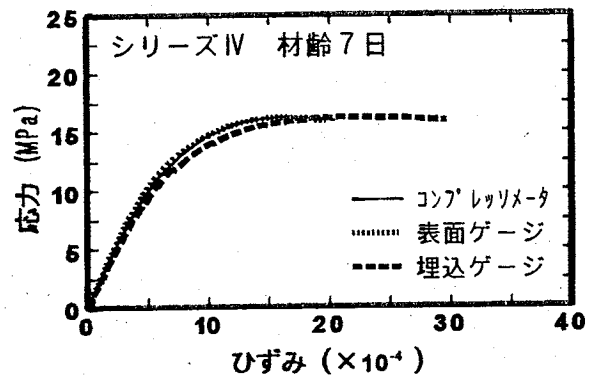


図 5.4.2 コンクリートの「応力-ひずみ」関係

プレッソメータによる測定結果も併せて示しているが、この値も表面接着型ゲージとよく一致しており、このことから小型埋込みゲージによるひずみ測定が十分可能であることが分かる。

小型埋込みゲージを用いて、強度試験、収縮試験およびクリープ試験を行い、測定ひずみの基礎データの収集を行った結果[5.7]では、①若材齢時からのひずみ測定が可能であること、②小型埋込みゲージを用いることによって表面接着型ゲージを使用する時に問題となる接着剤による影響を受けず安定したひずみの測定が可能であること、③乾燥収縮ひずみ、クリープひずみなどの長期間にわたる時間依存性のひずみにおいても小型埋込みゲージを用いた測定が可能であることなどが分かった。ゲージファクターによる問題は残されているが、今回新たに開発した小型埋込みゲージを用いることによってひずみの測定は十分可能であると思われる。

5.5 直接引張強度試験方法の検討

5.5.1 直接引張試験方法

コンクリートの直接引張試験方法[5.8]としては、①供試体端部にボルトを埋設して引張る方法、②供試体端部に接着剤を用いて鋼板を貼付けて引張る方法③供試体端部を試験部分の断面よりも大きくして端部を特別な治具でつかんで引張る方法(摩擦グリップ方法)などが提案されている。しかしながら、供試体作製の型枠に工夫が必要であったり、また、引張用の特殊な治具が必要である。コンクリートの直接引張強度を求めることはそれほど容易ではなく、事実、乾燥過程下にある直接引張強度の変化についての実験・研究は少ない。そこで、簡単に行うことができ、かつ信頼性の高いデータを得ることのできる直接引張試験方法について検討した。

5.5.2 接着剤方式による直接引張強度試験方法

乾燥収縮ひび割れ試験においてひび割れ発生時の応力と直接引張強度を比較しようとした場合、乾燥を受けるコンクリートの直接引張強度を頻繁に測定する必要がある。従って、簡便に実験できる方法ということを一に考えて接着剤方式を用いて引張強度試験を行うことにした。直接引張試験装置を図 5.5.1 に示す。供試体の両端についている鋼板は、本試験のために作製したもので、供試体と鋼板をエポキシ系接着剤で貼り合わせ、鋼板に取り付けたユニバーサルジョイントで供試体を引張る仕組みとなっている。コンクリート供試体の形状は 10x10x40cm で、鋼板の形状は 12x12x6cm、コンクリート供試体と接する部分は溝状となっており供試体が約 5mm ほど納まるようになっている。供試体への鋼板の取り付けは試験日の前日とし、約 1 日間養生するようにした。

シリーズⅡにおける直接引張強度試験は、この接着剤方式で行った。試験結果の詳細は後に述べるが、コンクリートの破壊強度に達する前にコンクリートと鋼板の接着面が剥がれる現象が起こった。これは、コンクリートが湿潤状態にある場合はエポキシ系の接着剤では十分な接着力を得ることができないこと、また、コンクリートの表層部(深さ 1cm 程度)の引張強度は若材齢では小さく[5.9]、表層部での破壊が生じたことが原因であると考えられる。拘束ひび割れ供試体の引張応力との比較をするには、直接引張強度を用いる方が適しているが、実験開始時の引張強度を測定できないことは致命的なことで、接着剤を用いる方法では本研究には適用できないことになる。

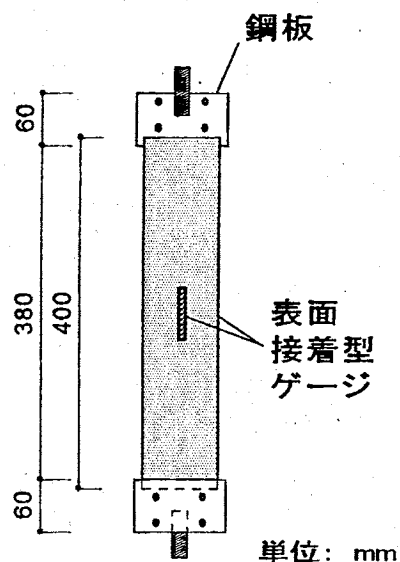


図 5.5.1 接着剤方式
引張試験装置

5.5.3 チャック方式による直接引張強度試験方法

接着剤を用いる直接引張試験方法では、コンクリートが湿潤状態にある場合に問題のあることを指摘した。この問題を解決するために、接着剤を使用せず、かつ簡単にコンクリートを引張る方法を模索した。その結果、図 5.5.2 に示すチャック(摩擦グリップ方式と同一)を作製し、これにコンクリートをはさんで引張るという方法を考案した。これはチャック部分を引張れば供試体を強くつかむことができるような機構になっている。この方法の問題は、コンクリートをチャックでつかんだ部分に応力集中が生じ、チャック内で実際の強度より低い応力で破断する可能性のあることである。そこでチャック方式による直接引張試験の有効性を確認することにした。まず、確認実験を行う前に有限要素法による応力解析を試みた。図 5.5.3 はつかみ歯の当たる部分に黒ゴムをはさんだ場合とそうでない場合の最大主応力の分布を示したもので、応力が一定となる中央部分を 1 にした時の供試体内の応力分布である。これによると、ゴムをはさむことで応力集中をかなり緩和できることが分かる。そこで応力集中を緩和し、つかみ歯の部分がコンクリート面に均一に当たるようにするために厚さ 8mm のゴムをコンクリート面に貼付けて引張ることにした。次いで、接着剤方式の引張試験でも測定できるように乾燥供試体を用いて接着剤方式とチャック方式との比較のための強度試験を行った。供試体の形状はチャックでつかむ部分の長さを考慮して 10x10x65cm としたものと接着剤方式で使用した 10x10x40cm の2種類である。ともに使用したコンクリートは呼び強度 21, スランプ 18 のレディーミクストコンクリート

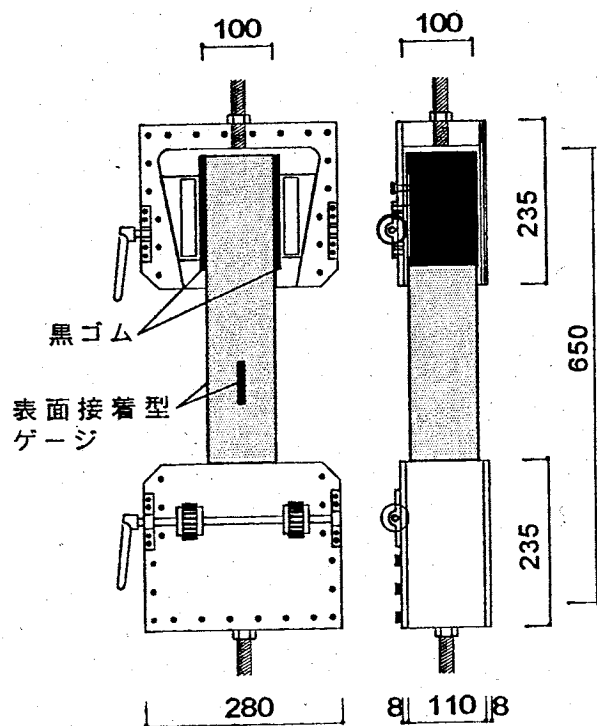


図 5.5.2 チャック式直接引張試験装置

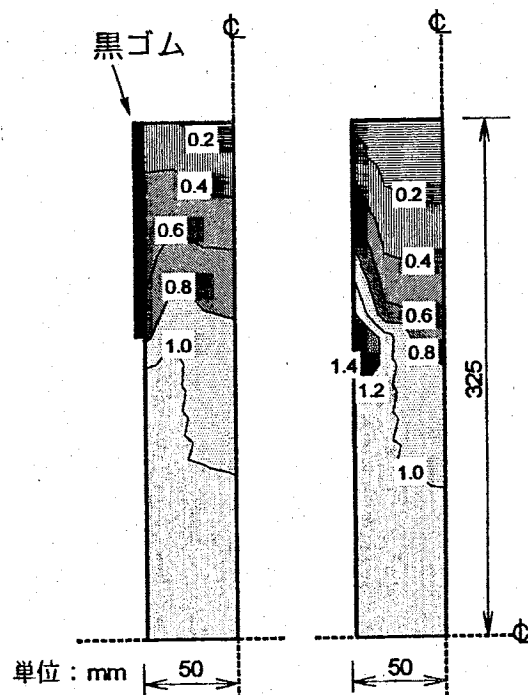


図 5.5.3 最大主応力の分布

(21-18-20N)であるが、打設時期が異なる。10x10x65cmの供試体は試験材齢約1年で打設後1日で脱型して、屋外に放置としたものである。10x10x40cmの供試体は試験材齢約2ヶ月で打設後1日で脱型し、2日間封かん養生した後養生室に放置したものである。その結果を表5.5.1に示す。これによると、供試体の長さが短い場合は両者の方法による強度に若干の差が見られるが、コンクリートの直接引張強度の値はほぼ同一であることが分かる。チャック方式の供試体の場合、破断はチャック部分の近傍に見られることが多かったが、チャック部分内での破断は認められなかった。また、供試体4面の中央に貼付けた表面接着型ポリエステルゲージ(PL-60-11、(株)東京測器研究所)によりひずみを測定した。図5.5.4に「応力-ひずみ」関係の一例を示す。若干のばらつきは見られたものの、各ひずみともほぼ同一の値を示し、偏心も生じていないことが分かる。以上のことから本研究での直接引張強度試験方法としてチャック方式を採用することにした。

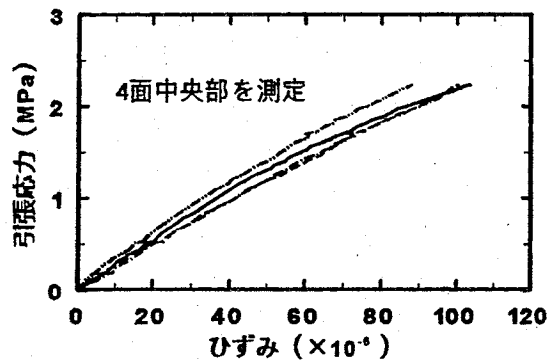


図 5.5.4 「引張応力-ひずみ」関係

表 5.5.1 引張強度の一覧

試験方法	最大荷重(kN)							
	10x10x40cm				10x10x65cm			
	①	②	③	平均	①	②	③	平均
接着剤方式	23.50	24.92	24.12	24.18	29.10	29.20	31.20	29.83
チャック方式	23.45	22.25	27.20	24.30	29.10	30.05	28.90	29.35

5. 6 各種強度試験

5. 6. 1 乾燥を受けるコンクリートの強度, ヤング係数

コンクリートの圧縮強度・ヤング係数はコンクリート中の水分によって著しく影響を受けることが知られているが、コンクリート中の水分が外気と湿度平衡状態にある場合と、コンクリート中に水分勾配が生じている乾燥過程にある場合とに分けて考える必要がある。前者の場合のコンクリート強度の増減は、Pihlajavaara[5.10]によれば、①水和の進行による強度増加(Hydration Hardening)、②乾燥による強度の増加(Drying Hardening)、③湿潤による強度の減少(Wetting Weakening)、④凍結による強度の増加(Freezing Hardening)、⑤融解による強度の減少(Thawing Weakening)に分けて説明している。後者の場合は、コンクリート中の水分勾配に伴って発生する内部応力が強度の増減に大きく影響する。

乾燥状態のコンクリートの圧縮強度は、湿潤状態に比べて大きくなるが、この現象を説明するために、Troxell ら[5.11]は、乾燥収縮によるセメントペーストの緻密化および骨材によって拘束されたセメントペーストに生じる引張応力、圧縮による空隙内の静水圧の発生によって生じる内部引張応力の増大を提案している。また、笠井[5.12]は水の潤滑作用であるとし、岡島[5.13]は水の付着による表面エネルギーの低下であるとしている。その他にも乾燥による摩擦係数の増加の影響による端面および内部摩擦力の増加[5.14]、乾燥によるセメントゲル粒子間の水層が薄くなる影響によるファンデルワールス結合力の増加[5.15]など様々な機構が提案されて

いる。コンクリートのヤング係数は、乾燥することにより低下し、強度と逆の傾向を示す[5.13]。乾燥によるヤング係数の低下の機構はほとんど解明されておらず、岡島ら[5.15]はセメントゲル中に3つのブロックからなる複合モデルを構築して水和過程中や水和終了後のコンクリートのヤング係数が水分を含むと大きくなることを推測し実験結果と良好な関係にあることを示している。

コンクリート供試体の含水率と圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比の関係を示した実験結果[5.16]の例を図 5.6.1 に示す。横軸は含水率で、湿潤状態の含水率に対する比率を示している。コンクリートは水セメント比が55%の普通コンクリート(φ10x20cm)で、シリーズA、Bの2つの実験を行っている。シリーズAは打設後1日で脱型後約7ヶ月間水中養生を行ったもので、シリーズBは約16ヶ月水中養生を行ったものである。乾燥方法は、含水率の小さい部分は乾燥炉で乾燥させ含水率を調整し、含水率の大きな部分は室内で乾燥させている。これによると、圧縮強度は乾燥の程度が7割程度までは若干の上昇が見られ、絶乾状態では湿潤状態とほぼ同程度の同程度の値となっている。これに対しヤング係数は含水率が減少するにつれ直線的に減少している。また、ポアソン比についてはそれほど差が見られない。

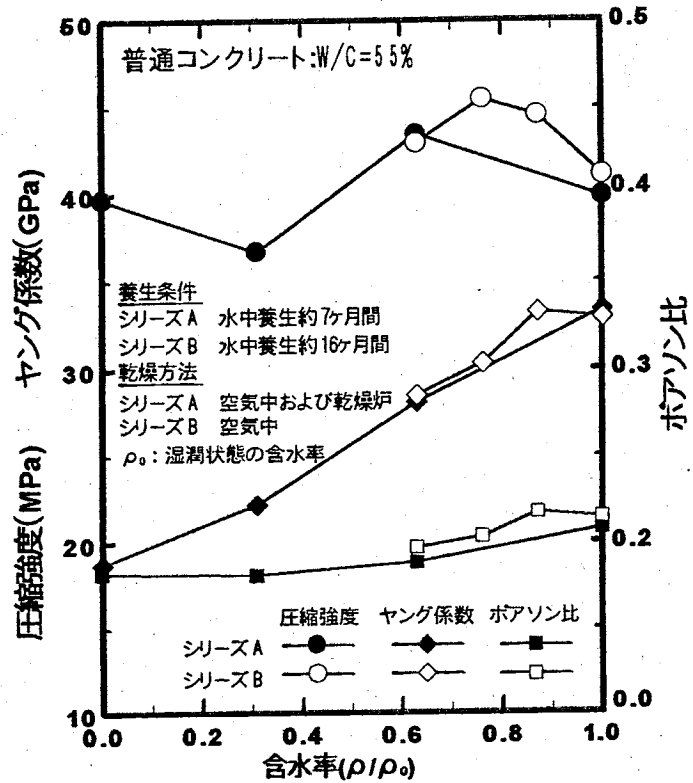


図 5.6.1 長期材齢コンクリートの圧縮強度・ヤング係数・ポアソン比と含有水分量の関係

5. 6. 2 試験方法

(1) 圧縮強度試験

シリーズ I では乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年において湿潤状態(乾燥期間 0 日)および乾燥開始後, 材齢 3, 7, 14, 28, 56 日および 1 年おける強度を測定した。シリーズ II ではシール養生した供試体を材齢 1, 3, 7, 28, 56, 112, 440 日, シリーズ III では材齢 3, 7, 28, 112, 378 日, シリーズ III では材齢 1, 3, 7, 28, 112, 275 日において強度試験をした。なお同時にコンプレッソメータ (CM10-B, (株)東京測器研究所)を用いて, 縦方向ひずみ 2 箇所, 横方向ひずみ 1 箇所を測定した。得られた実験データを用いて圧縮「応力-ひずみ」曲線を示し, 強度の 1/3 の点における割線弾性係数およびポアソン比を求めた。

(2) 割裂強度試験

JIS A 1113(コンクリートの引張強度試験方法)に準拠して, 各シリーズとも圧縮強度試験と同じ材齢で 3 本ずつ割裂強度試験を行った。

(3) 曲げ強度試験

シリーズ I において, スパン 10cm の 3 等分点載荷とし曲げ強度試験を各材齢 3 本ずつ行った。引張縁側に PS 接着剤で貼付けた表面接着型ポリエステルゲージを用いてひずみを測定した。なお, ヤング係数は最大応力の 1/2 までの「応力-ひずみ」関係を直線近似することから求めた。

(4) 直接引張強度試験

シリーズ II では接着剤方式によって直接引張試験を行った。供試体の大きさは 10x10x40cm とし, 乾燥開始材齢 3, 7, 28 日における乾燥期間 0, 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 56, 365 日における強度を測定した。なお, ひずみの測定は表面接着型ポリエステルゲージを供試体中央部 2 面に貼付けて行った。シリーズ III, IV ではチャック方式によって行った。シリーズ III は乾燥開始材齢を 3, 7, 28, 112 日, シリーズ IV は, 乾燥開始材齢を 1, 3, 7, 28, 112 日とし乾燥期間 0, 1, 3, 7, 14, 28, 56 日および 1 年における直接引張強度を測定することにした。供試体は試験ごとに 3 本ずつ用意し測定し, コンクリートの中央部 2 点に表面接着型ポリエステルゲージを貼付け, ひずみを測定し「応力-ひずみ」関係も求めるようにした。

(5) 動弾性係数試験

シリーズ I において強度試験を行う直前に, 超音波測定器(エルソニック ESI-P10, (株)東横エルメス)を用いて割裂強度供試体の超音波伝播速度を測定し, 次式より求めた。

$$Ea = \rho V^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)(1 - \nu) \quad (5.6.1)$$

ここに, ρ : 材料密度

V : 波動伝播速度

ν : 材料のポアソン比

(6) 中性化試験

シリーズ I において曲げ強度試験終了後, 角柱供試体の破断面に, フェノールフタレイン指示薬 (1g を無水エチルアルコール 65 ml に溶かし蒸留水を加えて 100 ml にしたもの) を噴霧し, 赤色反応を生じない中性化部分の最大中性化深さを測定した。

5.6.3 乾燥を受けるコンクリートの各種強度試験結果および考察(シリーズ I)

(1) 圧縮強度およびヤング係数

乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年における圧縮強度の経時変化および乾燥を受けたコンクリートのシール養生を継続した場合の強度に対する比率を図 5.6.2 に示す。横軸は材齢で対数表示としている。調合 A についてみると, 乾燥開始材齢 3, 7 日ではセメントの水和反応が阻害されているにもかかわらず乾燥後 2 週間程度まではシールを養生継続した場合同様に強度は上昇し, シール

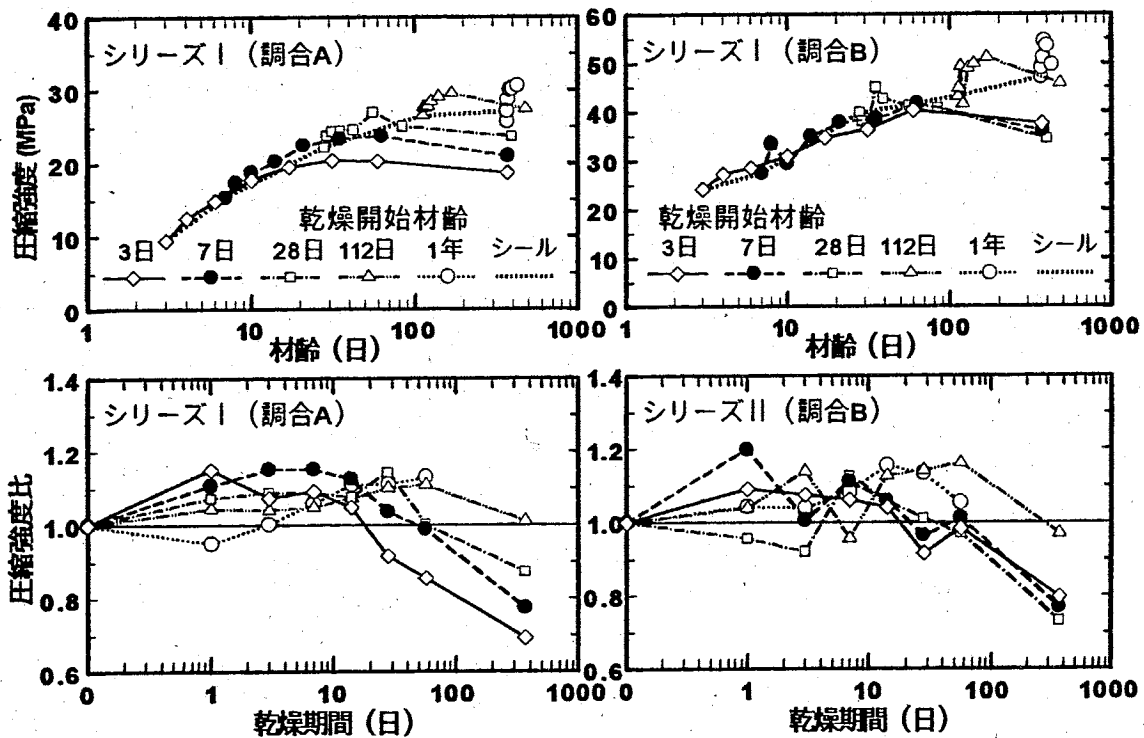


図 5.6.2 圧縮強度および圧縮強度比の経時変化

養生継続の強度を若干上回る。しかしながら、その後はシール養生に比べ強度は低下している。また、乾燥開始材齢28, 112日および1年では、乾燥後8週間まではシール養生の強度よりも上昇し、その後減少する。強度の上昇はシール養生継続の場合の圧縮強度変化を基準にすると、乾燥開始材齢が若いほどその割合は小さく、乾燥後1年では強度はシール養生に比べ大きく下回る。調合Bもほぼ同じ傾向を示しているが、調合Aに比べ強度の変動が大きい。

ヤング係数の経時変化を図5.6.3に示す。調合A, Bとも乾燥開始材齢3日の場合は水和が十分に進行していないため、乾燥開始直後は強度の上昇に伴い、シール養生の場合と同様にヤング係数は増加するが、乾燥後3日以降はほぼ一定となる。その他の乾燥開始材齢では、乾燥直後からヤング係数は低下しているが、乾燥開始材齢7日は水和の進行がまだ十分でないため水和による強度上昇が認められるため、乾燥によるヤング係数の低下は小さい。乾燥開始材齢28日以降のコンクリートは水和が十分に進行し、乾燥による含水率の低下の影響を大きく受け、ヤング係数は大きく低下する。このようにコンクリートのヤング係数の低下にはコンクリート中の含有水分量が大きく影響する[5.13]。また、ポアソン比の経時変化を図5.6.4に示す。ばらつきが大きく一概には言えないが、乾燥により若干値は低下するが、その後回復する傾向にある。また、強度の大きい調合Bの方が大きい。

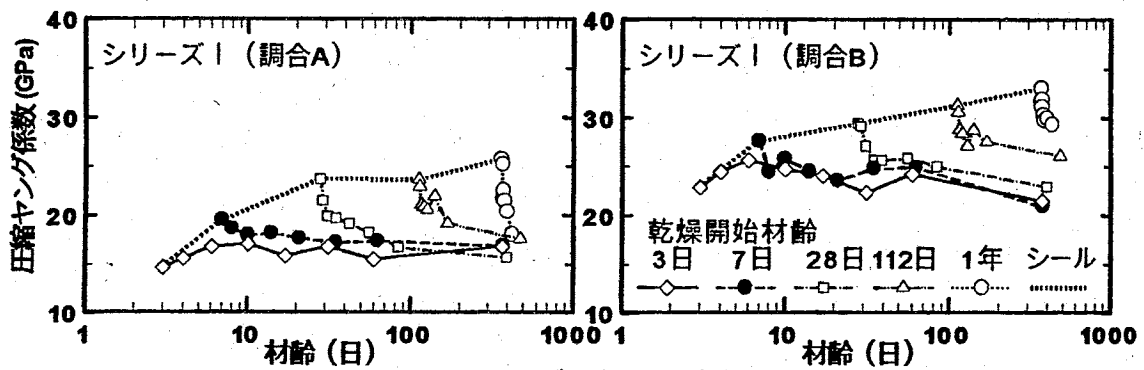


図 5.6.3 ヤング係数の経時変化

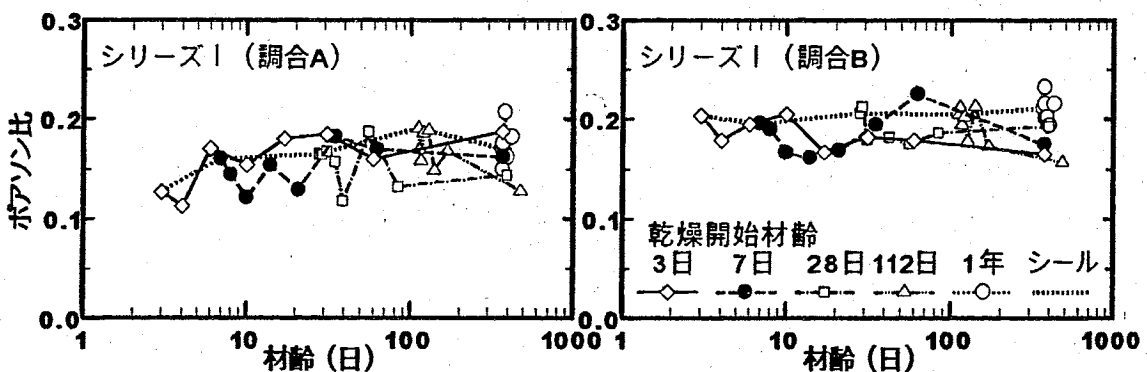


図 5.6.4 ポアソン比の経時変化

(2) 割裂強度

乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年における割裂強度の経時変化を図 5.6.5 に示す。割裂強度試験は供試体によるばらつきも大きく、明確な傾向が得られていない。特に調合 B の場合は変動が大きい。しかしながら、調合 A は圧縮強度の経時変化と同様の傾向を示している。

(3) 曲げ強度

含水率の変化に伴いコンクリートは長さ変化を起こすが、含水率の変化が断面内で一様に生じないため、長さ変化も断面内で一様でない。一方硬化体は平面保持が成り立つように変形を起こすの

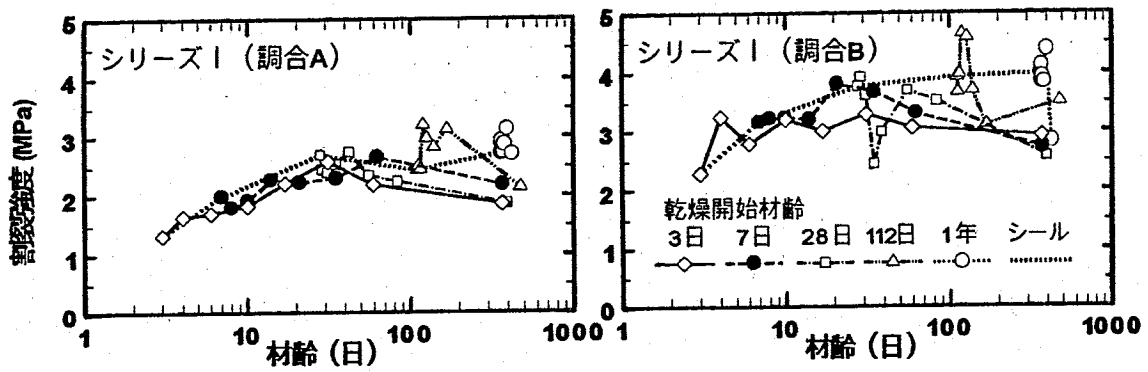


図 5.6.5 割裂強度の経時変化

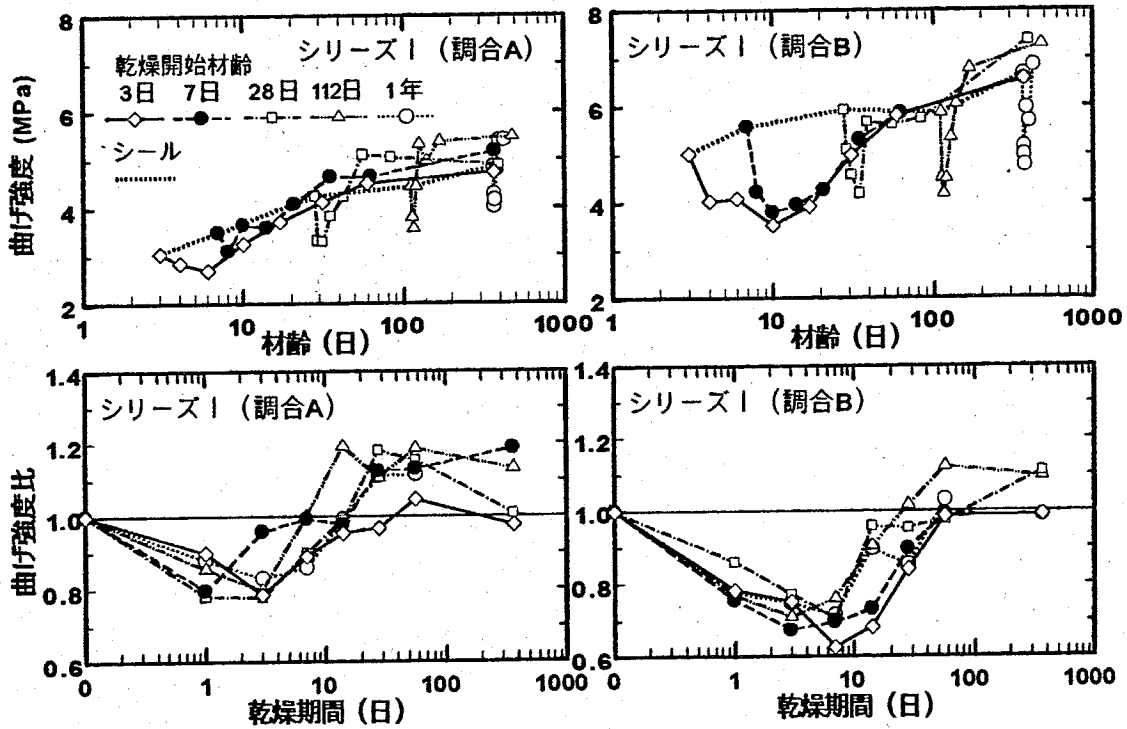


図 5.6.6 曲げ強度および曲げ強度比の経時変化

で、部材全体の変形状態に応じて長さ変化が部分的に拘束を受け、自己応力を発生させる。この応力が外力によって生じる応力と加算されるので、見かけ上の応力は変動する。

乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年における曲げ強度の経時変化を図 5.6.6 に示す。曲げ強度の経時変化は調合 A, B とで類似している。乾燥開始材齢 28, 112 日および 1 年の場合、乾燥後急に強度が低下し、その後回復する。この変化は調合 A よりも調合 B の方が大きい。

乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年における曲げヤング係数の経時変化を図 5.6.7 に示す。調合 A の場合、乾燥開始材齢 3, 7 日では乾燥直後に曲げヤング係数は上昇するが、直ちに減少しその後の変動は小さい。曲げ強度の経時変化は調合 A, B とで類似している。乾燥開始材齢 28, 112 日および 1 年の場合、乾燥後急に強度が低下し、その後回復する。この変化は調合 A よりも調合 B の方が大きい。

(4) 動弾性係数

乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年における動弾性係数の経時変化を図 5.6.8 に示す。経時

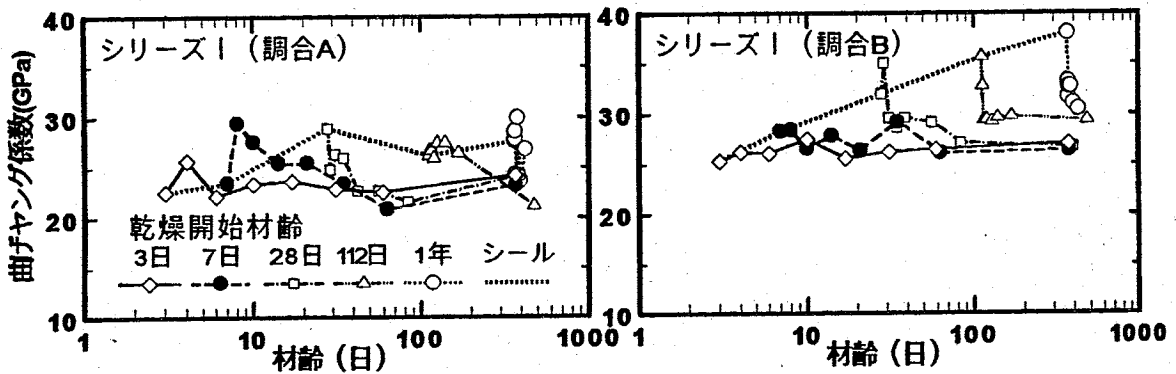


図 5.6.7 曲げヤング係数の経時変化

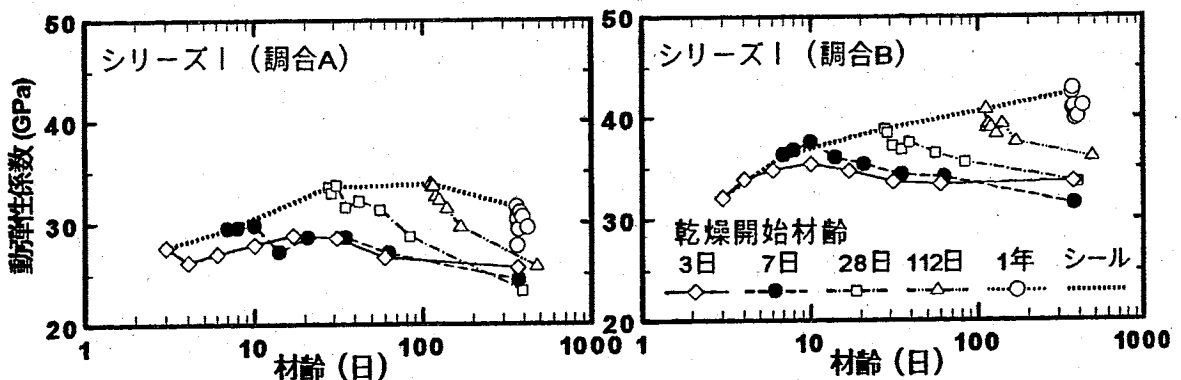


図 5.6.8 動弾性係数の経時変化

変化は調合 A, B とで類似している。乾燥開始材齢 3, 7 日の場合、乾燥後短期間は増加するが、その後は一定か若干減少する傾向にある。他の乾燥開始材齢では、乾燥に伴って減少している。動弾性係数測定時の応力レベルは微小であり、短時間の挙動に基づく値であるなどの理由により、静的载荷によって求めた弾性係数よりも大きくなっている。

(5) 中性化

中性化は「セメント硬化体のアルカリ性が低下する現象」であるが、一般には「セメントの水和生成物が、二酸化炭素と反応し、炭酸化合物およびその他の物質に分解する現象」である炭酸化のことを示している。その他に中性化の原因としては、腐食性ガスや酸性雨などがある。コンクリートが中性化すると、質量・細孔構造・容積・強度変化などを生じる。通常、これらはコンクリートの物理的性質に及ぼす影響はそれほど大きくない。

乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日および 1 年における最大中性化深さの経時変化を図 5.6.9 に示す。中性化の経時変化は、乾燥開始材齢の違いによる差異はあまり見られない。最大中性化深さは調合 A の方が大きく、乾燥直後から徐々に進行するのに対して、水セメント比の小さい調合 B の場合は乾燥直後の進行がほとんど見られない。コンクリートは水酸化カルシウムが空気中の炭酸ガスの使用により炭酸カルシウムに変化することでアルカリ性を失い中性化する。大気中の二酸化炭素濃度は平均的に 0.03% であるが、乾燥を行う恒温恒湿室内では、換気が十分に行われず二酸化炭素濃度が高いことが考えられ、試験結果は実際のコンクリート構造物における中性化の進行よりも早いものと思われる。

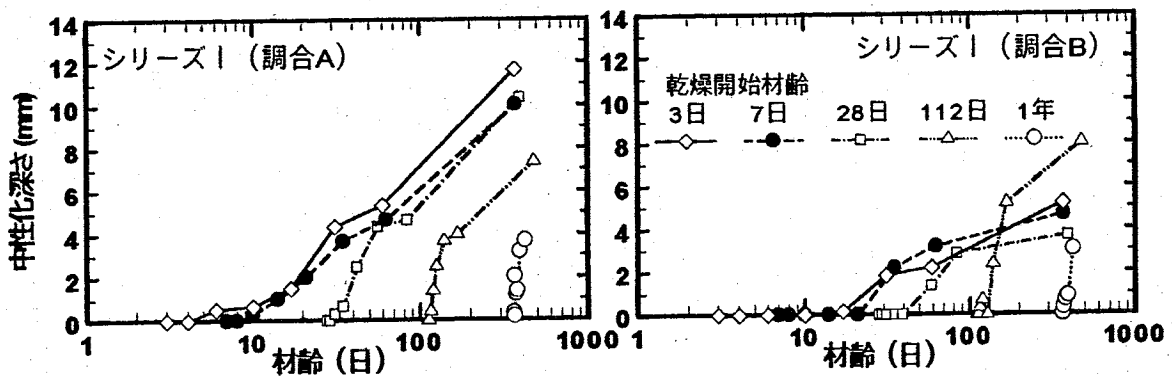


図 5.6.9 中性化深さの経時変化

5.6.4 各種強度試験結果および考察(シリーズII~IV)

(1) 圧縮強度

図 5.6.10 にシール養生を継続した供試体の圧縮強度およびヤング係数の測定結果を示す。シリーズIIは呼び強度 21, シリーズIIIは呼び強度 18, シリーズIVは呼び強度 21 のレディーミクストコンクリートである。圧縮強度の経時変化は各シリーズとも材齢が経過するにつれ大きくなっている。しかしながら、シリーズII,IIIでは材齢 1 年程度のものは強度の低下が見られる。材齢 28 日での圧縮強度の平均値は、シリーズIIは 25.57MPa, シリーズIIIは 23.07MPa, シリーズIVは 23.64MPa であり、シリーズIIが一番大きく、シリーズIII, IVでは呼び強度が異なるにもかかわらず、ほぼ圧縮強度は同じである。一方、ヤング係数は材齢が経過するにつれて増加し、圧縮強度の大きいシリーズIIがヤング係数も大きくなっている。また、図 5.6.11 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。コンクリートのヤング係数は、圧縮強度が 36MPa 程度以下の普通コンクリートでは、一般に圧縮強度の平方根に比例するが、より高強度の範囲になると圧縮強度の 3 乗根に比例するようになる。図中に日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準(RC 規準)に記載されている設計用計算式を示している。実験値は若干大きい値となっているが、両者の間には明確な相関関係がある。

図 5.6.12 に圧縮ポアソン比の経時変化を示す。各シリーズとも材齢初期では、圧縮強度の上昇に伴ってポアソン比も上昇するが、28 日以降は上昇が見られず低下する傾向にある。

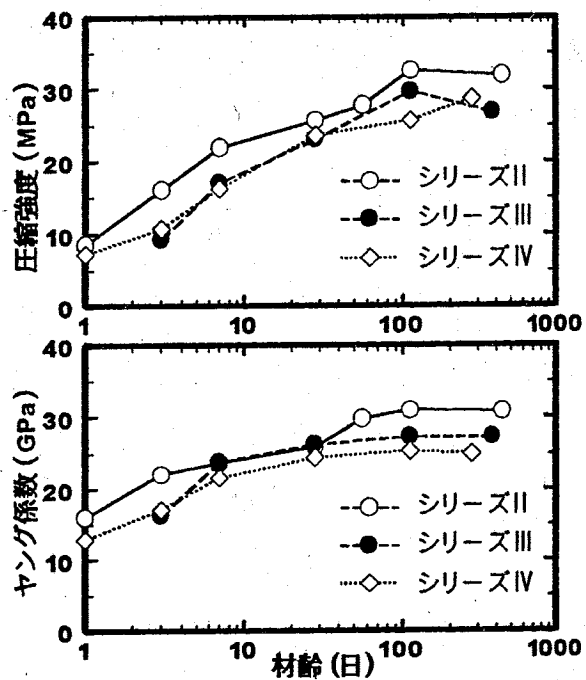


図 5.6.10 圧縮強度, ヤング係数の経時変化

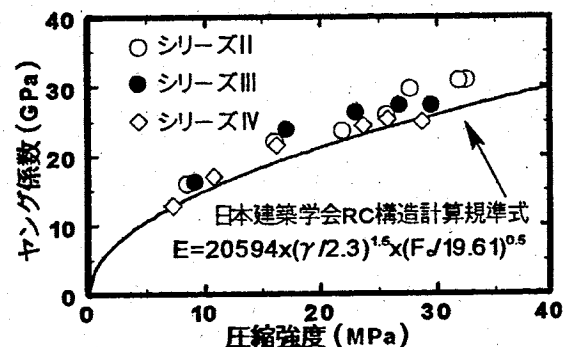


図 5.6.11 圧縮強度とヤング係数の関係

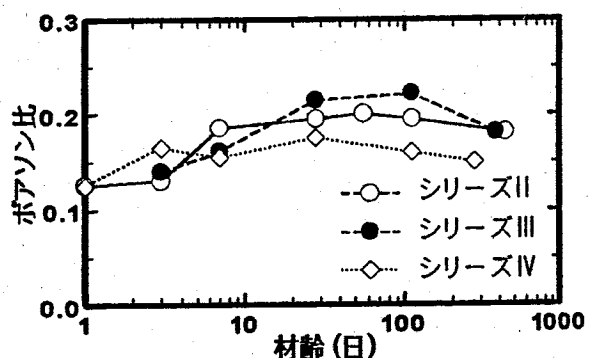


図 5.6.12 ポアソン比の経時変化

(2) 割裂強度

図 5.6.13 にシール養生を継続した供試体の割裂強度の経時変化を示す。シリーズIIは呼び強度21, シリーズIIIは呼び強度18, シリーズIIIは呼び強度21である。シリーズIIIは呼び強度が小さいにもかかわらず、他のシリーズとほぼ同じ値となっている。

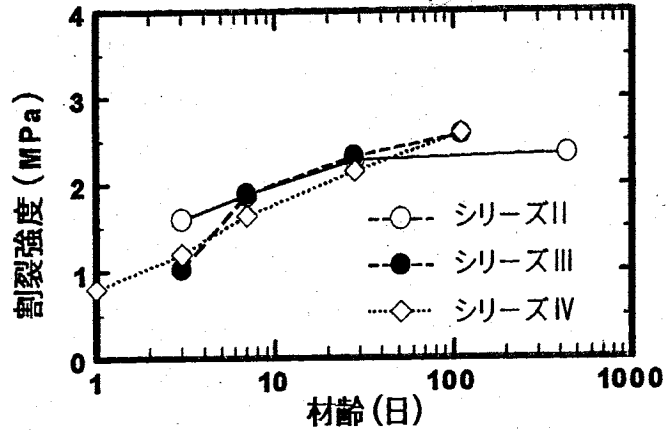


図 5.6.13 割裂強度の経時変化

(3) 直接引張強度

図 5.6.14 はシリーズIIにおいて各乾燥開始材齢の直接引張強度の経時変化を示したものである。これを見ると、各乾燥開始材齢とも乾燥期間が0, 1日のコンクリートが湿潤状態の場合、引張強度が極端に小さいのが分かる。これは前述した理由によるもので、引張強度を測定できていない。しかし、供試体がある程度乾燥してくれば強度試験は十分可能で、それによると、乾燥開始材齢3, 7日では乾燥期間3日から21日まで約0.7~0.8MPaの強度の上昇が見られ、その後は一定の値となっている。しかし、材齢28日の場合では、乾燥開始後3日以降の強度変化があまり見られない。引張ヤング係数の経時変化は、各乾燥開始材齢とも乾燥開始後7日までは上昇するがその後低下し、乾燥期間21日からほぼ一定の値(約25GPa)となっている。

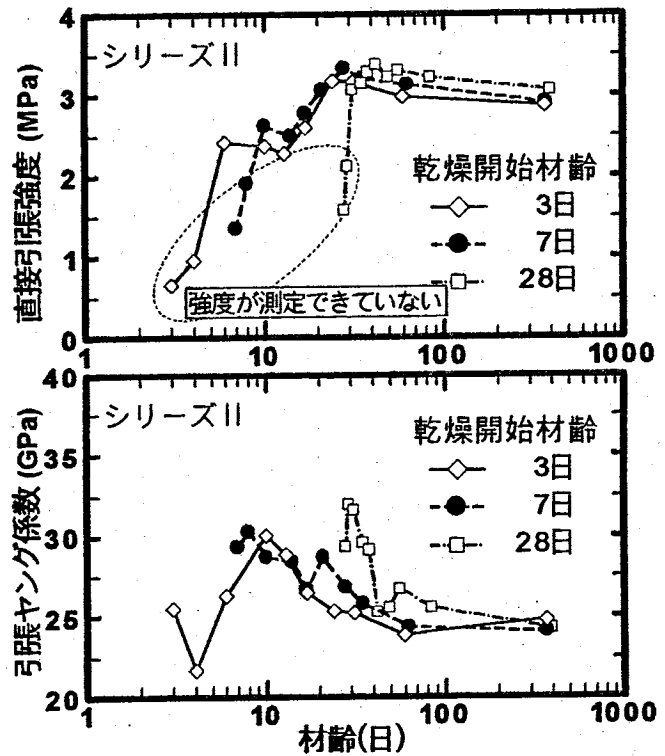


図 5.6.14 直接引張強度, ヤング係数の経時変化

図 5.6.15 にシリーズIIIにおける引張強度およびヤング係数の経時変化を示す。これによると乾燥開始材齢3日の場合、水和が十分に進行していないため、乾燥開始後水和反応が阻害されているにもかかわらず強度は上昇している。乾燥開始材齢7, 28日の場合、乾燥開始後一旦強度は低下す

るが、7日では乾燥期間7~28日間、28日では3~14日間で強度が上昇している。しかし、その後の強度に大きな変化はない。また、乾燥開始材齢7、28日の乾燥期間56日の強度は、ほぼ同一の値を示している。ヤング係数の経時変化を見ると、乾燥開始材齢3日の場合、乾燥後2週間程度はほぼ変化せず、その後減少する。乾燥開始材齢7、28、112日の場合は乾燥後直ちにヤング係数は低下し、乾燥後56日まで小さくなる。しかしながら、その後乾燥期間1年でのヤング係数は低下せず、乾燥開始材齢に関係せず、ほぼ同じ値となっている。

図 5.6.16 は各乾燥開始材齢ごとの強度変化を、封かん養生を継続した場合の強度に対する比率で表したものである。これによると、乾燥開始材齢にかかわらず乾燥開始直後の強度は一旦低下する。低下率はほぼ10~20%程度であるが、乾燥開始材齢が若いほど低下率は大きい。その後強度は回復するが、乾燥開始材齢7、28日の場合はシール養生を継続した供試体の強度よりおよそ10%程度大きくなり、徐々に減少していく。乾燥期間1年ではシール養生の強度を下回る。これに対して、乾燥開始材齢3日の場合は封かん養生供試体の強度まで回復していない。

図 5.6.17 にシリーズIVにおける直接引張強度およびヤング係数の経時変化を示す。チャック方式を用いて乾燥過程にある場合の直接引張強度の経時変化を測定した結果では、乾燥開始材齢が若い(1, 3日)場合、水和が十分に進行していないため、乾燥開始後水和反応が阻害されているにも

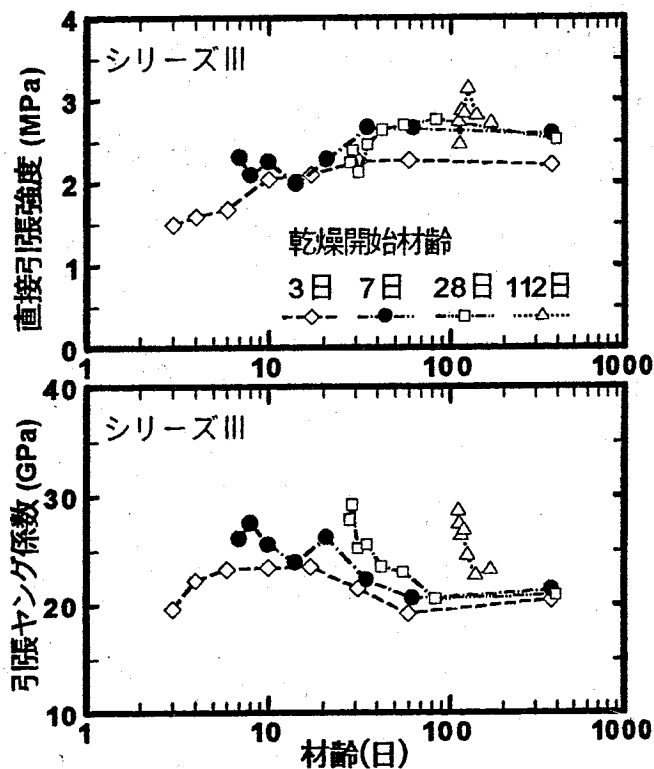


図 5.6.15 直接引張強度およびヤング係数の経時変化

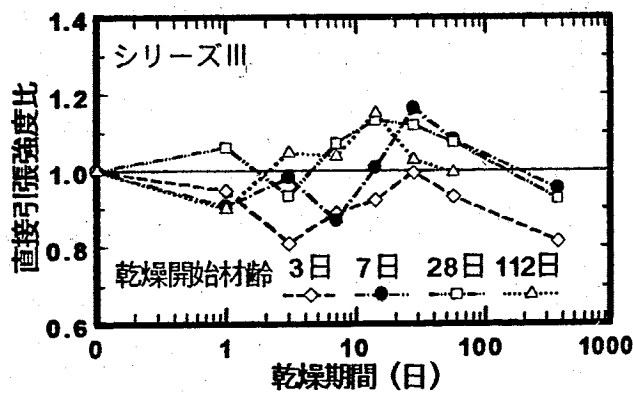


図 5.6.16 シール養生に対する直接引張強度比の経時変化

かかわらず強度は上昇している。また、乾燥開始材齢7, 28, 112日の場合では乾燥開始後一旦強度は低下するが、再び強度が上昇する。図5.6.18は各乾燥開始材齢ごとの強度変化を、封かん養生を継続した場合の強度に対する比率で表した結果である。乾燥開始材齢にかかわらず乾燥開始直後の強度は一旦低下すること、乾燥開始材齢1, 3, 7日の場合は乾燥期間56日でシール養生を継続した場合とほぼ同じであるが、乾燥開始材齢28, 112日では強度が10%程度大きくなる。このような強度の変化は、セメント水和反応が継続するための影響、供試体内部に発生する乾燥収縮応力の影響、乾燥すること自体の影響、炭酸化の影響などの要因が複雑にからみ合って生じるものと考えられるが、特に乾燥収縮応力は乾燥途中の強度に大きく影響する要因である。すなわち、乾燥開始後、コンクリートの表面部分では引張応力が発生するために、見かけ上の強度が低下する。

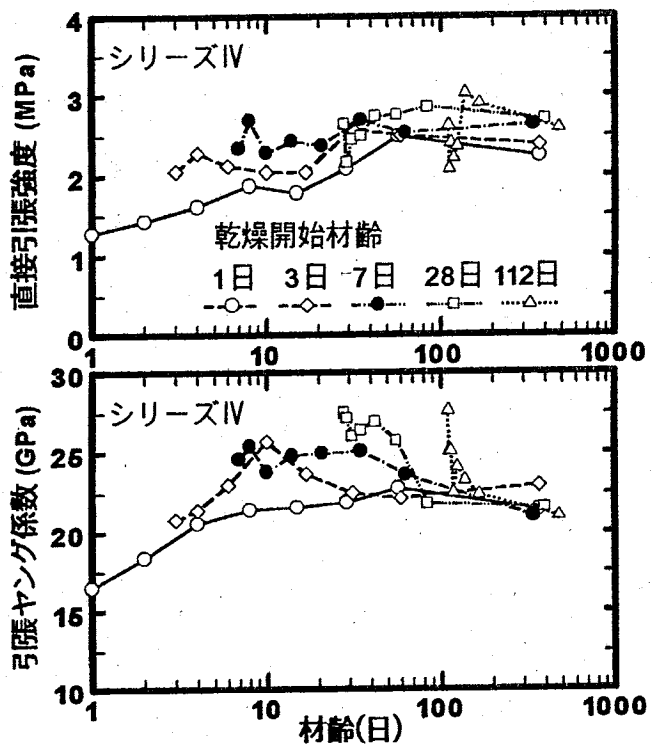


図 5.6.17 直接引張強度およびヤング係数の経時変化

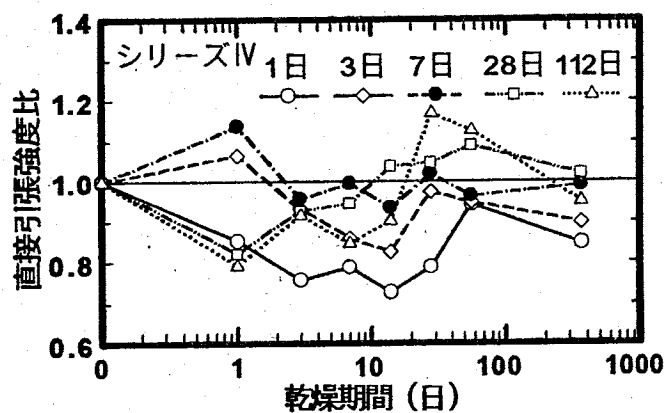


図 5.6.18 シール養生に対する直接引張強度比の経時変化

5.7 乾燥収縮ひび割れ実験

5.7.1 自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみのメカニズム

コンクリートの自己収縮は、最近の単位結合材量が多く、水結合材率の小さい高流動・高強度コンクリートの拡大とともに重要視されてきた現象であるが、セメントの水和に起因するコンクリートの収縮は古くから知られており、Davisにより Autogenous Shrinkage として定義されている[5.17]。セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの水和により凝結始発以後に巨視的な見かけの体積が、水和収縮により減少していく現象を自己収縮といわれている。自己収縮ひずみは水和によって水和組織内部に形成される空隙の相対湿度が低下していく現象である自己乾燥によって生じる。自己乾燥により毛細管空隙にメニスカスが形成され、毛細管張力が発生し自己収縮が発生する。コンクリートが乾燥を受ける場合、通常のコンクリートでは水分の逸散により乾燥収縮を生じる。また、マスコンクリートは硬化過程で水和熱により温度変化が生じ、これにより体積変化を生じる。質量や温度の変化するこのような条件下でも自己収縮は生じるので、従来測定されている乾燥収縮ひずみや温度ひずみは、同じ温度履歴で生じる自己収縮ひずみを含んでいる。コンクリートの自己収縮に影響を及ぼす要因として、材料、調合、製造方法および養生方法等が挙げられる[5.18]。

一般のコンクリートの自己収縮は乾燥収縮と比べて1桁程度小さいため、従来設計などにおいて考慮されることはなかった。しかし、近年研究、開発が進められている高強度コンクリートや高流動コンクリートのように、水結合材比が小さく、単位結合材量の多いコンクリートでは自己収縮ひずみが大きな値を示すことが報告されており、場合によっては自己収縮のみでひび割れが発生することも指摘されている。これらコンクリートの研究の進展と相まって、すでに土木学会の平成8年度版コンクリート標準仕様書には、ひび割れの発生原因として自己収縮を考慮する必要があることが記載されている。

コンクリートの乾燥収縮ひずみはセメントペーストに由来する。セメントペースト硬化体における乾燥収縮ひずみは、セメントペーストに含まれている水分の逸散に起因するもので、水和生成物であるゲル粒子の微視的構造組織と、そこに種々の形態で保持されている水と密接にかかわっている。水分の移動に伴う乾燥収縮ひずみの発生機構には種々の説が提示されている。主要なものを以下に示す。

①毛細管張力説(Capillary Tension) [5.19]

セメントペースト硬化体内の微細空隙に、外気と湿度平衡を保つためにメニスカスを形成し、毛細管水には負圧が生じ張力が発生する。その張力による力学的な変形が乾燥収縮ひずみであるとするとする説である。乾燥が進行し、空隙内に水分がなくなれば圧縮応力は解放され、ひずみも元に戻る。しかし、水の存在する毛細管空隙の大きさは相対湿度の低下とともに小さくなり、40~50%R.H.の時、対応する空隙の大きさはおよそ2.5mmとなる。この時に生じる張力は、水の強度(水分子の引張強さ

1100 気圧, 1.2kN/mm^2 まで達する。つまり, 毛細管張力は 40~50%R.H.以下では存在しないことを意味し, 低湿度域では, 毛細管張力は収縮に対して何ら影響はおよぼさない。

②分離圧説(Disjoining Pressure) [5.20]

分離圧説は, 吸着を妨げられた領域内において固体の表面上での物理的および化学的結合が十分でなく, そのために, 外部の領域から水分子を引き寄せようとする傾向があるという“hindered adsorption”の概念に基づいている。ゲル粒子が互いに接触する場合は, 完全に接着されているわけではなく, ごく狭い隙間をもって水がはさまれている。この水の圧力, 相対湿度, 固体間の引力は互いに釣り合っており, この隙間がくさび状であるとする, 互いに隣接する固体を引き離そうとする分離圧が生じ, この影響は固体間の接点に対して引張力を作用することになる。この分離圧は周辺の相対湿度が小さくなれば小さくなり, 収縮ひずみを発生させることとなる。

③表面張力説(Surface Tension of Solids) [5.21]

ゲル粒子の表面張力の変化によって乾燥収縮ひずみが発生するという説が表面張力説である。微細なセメント水和生成物のゲル粒子に吸着された水分は固体の表面層の一部と見なされ, 固体の表面張力を緩和させる。まわりの相対湿度の低下とともに吸着水が失われ, 表面張力(表面エネルギー)は増大し, 固体粒子中に圧縮応力が発生して収縮が起こり, その結果, 全体として乾燥収縮ひずみが発生する。

④層間水移動説(Loss of Interlayer Water) [5.22]

層間水移動説は, 蒸発可能水のうち, 水和生成物の固体内に保持されたい水分の移動に関連するものである。この水分は, 乾燥が進むにつれて, 高いエネルギー勾配のもとで外部へ移動し, その結果として収縮ひずみが発生するものである。

以上のことから, 乾燥収縮ひずみの発生を一つのメカニズムで全湿度領域にわたって説明するのが困難であることは明らかであり, 湿度領域によってあるメカニズムが卓越してくることになる。M.J.Setzer[5.23]は, セメントペースト硬化体の膨張は, 低湿度域(38%R.H.以下)では表面張力によるゲル粒子そのものの膨張が寄与し, 高湿度域では分離圧によるゲル粒子間隔の膨張が寄与するとしている。

乾燥収縮ひずみの基本的性状は, 上記したメカニズムに基づくものの, 実際には, セメントペースト硬化体のセメント水和物, 未水和セメント粒子, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の結晶および毛細管空隙などの構造組織成分の大きさや分布などによる複合則により支配される。そして, この構造組織は水セメント比および材齢により影響を受けるから, 乾燥収縮ひずみの大きさは, 直接的には水セメント比および材齢の関数となる。

5.7.2 実験方法

(1) 自己収縮ひずみ, 自由収縮ひずみ

ここでは拘束供試体のコンクリート部材のひずみと比較するために、自己収縮および自由収縮ひずみの測定を行った。自己収縮ひずみの測定はシリーズⅠ,Ⅱ,Ⅲでは材齢3日,シリーズⅣでは材齢1日を基準に測定した。ひずみの測定は,シリーズⅠでは埋込みゲージ(株東京測器研究所:KM-100B)を用いて行い,シリーズⅡ,Ⅲでは長さ60mmの表面接着型メタルベース付ポリエステルゲージ(株東京測器研究所:FLM-60-11),シリーズⅣでは小型埋込みゲージを用いた。自己収縮測定用の供試体は乾燥収縮の影響を受けないように,パラフィン,ビニールおよび防湿テープを用いて完全密封とした。供試体はすべての乾燥開始材齢で3体ずつ用意した。また,シリーズⅣでは,小型埋込みゲージの整合性を確認する意味で,コンタクトゲージ(基長:200mm,精度1/1000mm)による自由収縮ひずみの測定も行い,両者の比較を行った。

(2) 乾燥収縮ひび割れ試験

乾燥収縮ひび割れ試験装置は第4章で示したものをを用いた。拘束鋼材のひずみは,シリーズⅠではすべて鋼材中央1点だけの測定とした。また,シリーズⅡでは各乾燥開始材齢ごとに3体ずつ用意し,その内1体は鋼材のひずみ分布を測定するようにし,シリーズⅢ,Ⅳでは各乾燥開始材齢ごとに2体ずつ用意し,その内1体は鋼材のひずみ分布を測定するようにした。ひずみゲージは長さ3mmの表面接着型ポリエステルゲージ(株東京測器研究所:FLA-3-11)を使用したが,長期間にわたるひずみ測定を考慮して焼き付け貼付けとしている。乾燥収縮ひび割れ供試体は,乾燥開始前日にビニール袋から取り出し,拘束鋼材を取り付けた。その際にコンクリートの拘束部分に石膏セメントペースト(質量比,石膏:セメント:水=1:1:1)を流し込み, $\phi 12$ ボルトを締め付け固定し,これによって拘束を持たせるようにした。この作業は,石膏セメントペーストが短時間で硬化する特性を生かし,供試体を乾燥させないように作業開始から終了までを短時間で行うようにし,乾燥開始まで湿布養生とした。コンクリートのひずみは,シリーズⅠ,Ⅱ,Ⅲでは長さ60mmの表面接着型ゲージをエポキシ系接着剤で貼付けし,その上からパラフィンでコーティングし供試体の表裏2面の平均を測定した。シリーズⅣでは長さ60mm,直径8mmの小型埋込みゲージをあらかじめコンクリート中央部に埋込み測定した。この小型埋込みゲージは,湿潤状態の供試体でも容易に測定できるように新たに開発したもので,材齢1日からの測定にも対応できる。なお,実験は恒温恒湿室内(温度 $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,湿度 $60\pm 5\%\text{R.H.}$)で行った。

5.7.3 実験結果および考察

(1) 自己収縮, 自由収縮ひずみ

シリーズ I の自由収縮ひずみの経時変化を図 5.7.1 に示す。調合 A では、乾燥開始初期の収縮ひずみの変化量は乾燥開始材齢の違いによらずほぼ同じである。乾燥後 100 日程度まではひずみ速度は大きく、その後のひずみの増加は小さい。乾燥期間 20 日あたりから差が生じ、材齢が若いほどひずみも大きくなっている。しかし、乾燥開始材齢 3, 7, 28 日ではひずみ量に大きな差はなく、112 日、1 年では収縮量が小さい。一方、調合 B では、ほぼひずみ変化の傾向は調合 A と同様である。しかしながら、乾燥初期からの収縮速度は小さく、ひずみ量も小さい。水セメント比の小さい調合 B の方が自由収縮ひずみ量が小さくなる結果となった。

シリーズ II の自由収縮および自己収縮ひずみの経時変化を図 5.7.2 に示す。乾燥開始後 20 日あたりまでは乾燥開始材齢の違いによる差はあまりない。その後 3, 7, 28 日はほぼ同じ収縮量であるが、440 日は収縮量が小さくなる。この傾向はシリーズ I と同じである。自己収縮ひずみは材齢 3 日から測定したものであるが、30 日程度まで緩やかにひずみは進展し、その後のひずみはほとんど進展しない。

シリーズ III の自由収縮および自己収縮ひずみの経時変化を図 5.7.3 に示す。自由収縮ひずみの傾向はシリーズ I, II とほぼ同じようである。乾燥開始後 20 日あたりまでは材齢の違いによらずほぼ同じようなひずみの進展で、その後材齢が若いほどひずみが大きくなっている。また、60 日あたりからひずみの増加は小さい。また、シリーズ II とは使用材料および単位水量は同じで水セメント比が違うが、シリーズ III の自由収縮ひずみはシリーズ II よりも大きくなっている。自己収縮ひずみは材齢 3

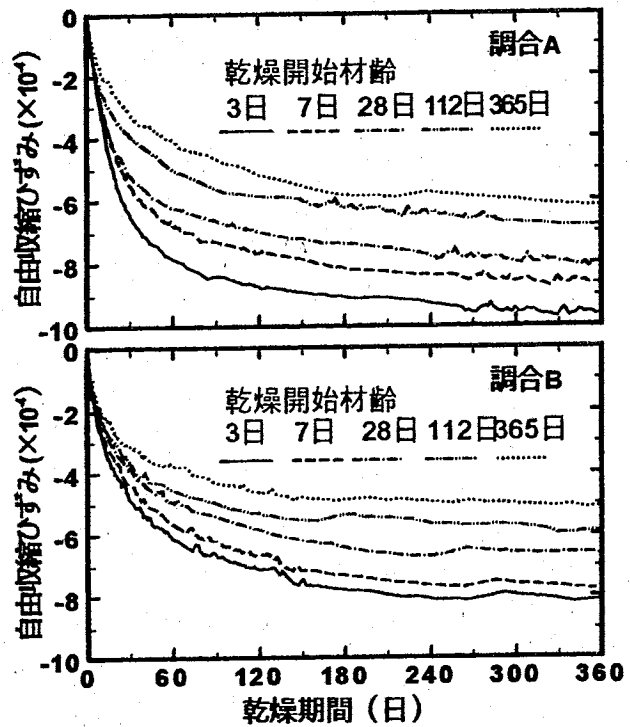


図 5.7.1 自由収縮ひずみの経時変化(シリーズ I)

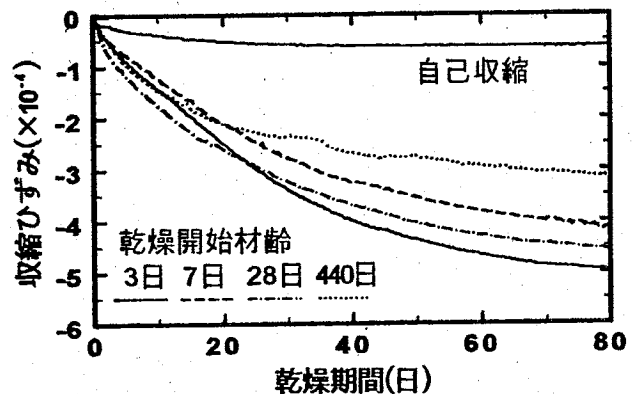


図 5.7.2 収縮ひずみの経時変化(シリーズ II)

日から測定したものであるが、シリーズIIより若干大きくなっている。

シリーズIVの自由収縮および自己収縮ひずみの経時変化を図5.7.4に示す。シリーズI～IIIと違って乾燥開始材齢の違いによる自由収縮ひずみ量の差が見られない。自己収縮ひずみは材齢1日から測定したものであるが、30日程度まで緩やかにひずみは進展し、その後のひずみはほとんど進展しない。図5.7.5に埋込みゲージとコンタクトゲージによる測定結果を示す。これを見るとコンタクトゲージと埋込みゲージでは測定されたひずみはほぼ等しくなっている。コンタクトゲージは機械的な測定方法で、測定誤差は入りやすいが、埋込みゲージのひずみは十分に満足のできる結果を示している。

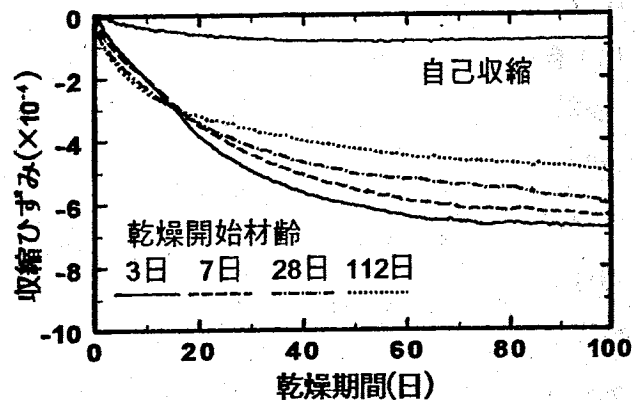


図 5.7.3 収縮ひずみの経時変化(シリーズIII)

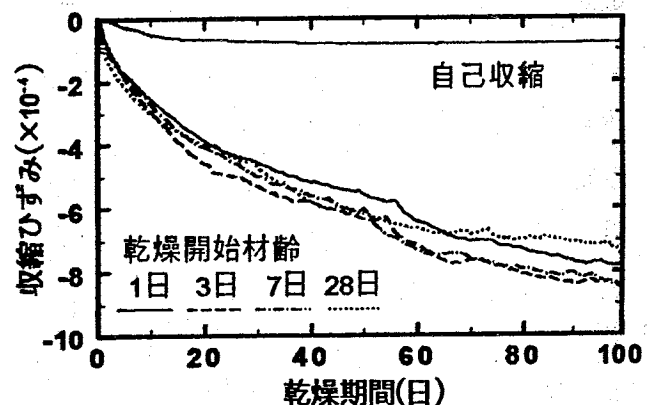


図 5.7.4 収縮ひずみの経時変化(シリーズIV)

(2) 乾燥収縮ひび割れ試験

シリーズIの調合Aにおいて各乾燥開始材齢の乾燥収縮ひび割れ供試体で測定されたひずみの経時変化を図5.7.6に、調合Bを図5.7.7に示す。拘束鋼材のひずみは左右の鋼材中央のひずみを示している。調合Aでは拘束供試体すべてに貫通ひび割れが発生し、調合Bでは乾燥開始材齢112日の1体および乾燥開始材齢365日の2体を除く7体の供試体に貫通ひび割れが発生した。図を見ると拘束コンクリートの収縮ひずみは鋼材により拘束されているため自由収縮ひずみより小さくなっているのが分かる。また、コンクリートの収縮に伴い鋼材のひずみが進展している。また、ひび割れが発生すると拘束鋼材のひずみは拘束が開放され0付近に戻り、逆に拘束コンクリートのひずみは急に進展している。

シリーズIIにおいて各乾燥開始材齢における収縮ひび割れ供試体で測定されたひずみの経時変化を図5.7.8に示す。拘束鋼材のひずみは左右中央のひずみの平均値、拘束コンクリートのひずみは打設面、裏側のそれぞれを示している。シリーズIIではすべての供試体にひび割れは発生しなかった。これは、自由収縮のひずみ量が小さかったためだと考えられる。

シリーズIIIにおいて各乾燥開始材齢における収縮ひび割れ供試体で測定されたひずみの経時変

化を図5.7.9に示す。シリーズIIにおいてひび割れが発生しなかったため、コンクリートの呼び強度を21から18に変えて実験を行った。その結果ひび割れは乾燥開始材齢3日の1体のみが発生した。

シリーズIVにおいて各乾燥開始材齢におけるひび割れ供試体で測定されたひずみの経時変化を図5.7.10に示す。シリーズII,IIIではひび割れが発生しなかったために拘束鋼材比を大きくして実験を行った結果である。すべての供試体に2週間以内にひび割れが発生した。

図5.7.11にシリーズI, 図5.7.12にシリーズII,III,IVにおける引張強度の経時変化と拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化を示す。引張応力は第4章で示したように偏心距離を0.2cmとして拘束鋼材のウェブ中央のひずみより算出した。引張強度はシリーズIでは割裂強度, シリーズII,III,IVでは直接引張強度である。また, 表5.7.1にひび割れ発生材齢, 拘束率(拘束引張ひずみ/自由収縮ひずみ), ひび割れ発生時の応力およびひび割れ発生材齢での引張強度比(鋼材のひずみより算出した引張応力/引張強度)を示す。応力を算出するための鋼材のひずみはひび割れ発生と同時に回復するが, 正確には0に戻ってない。これは, 拘束鋼材を取り付ける時のボルトの締め具合等に起因するものと考えられる。しかし, 本研究ではこれらの残留ひずみは無視して応力を算出した。先ず, ひび割れ発生材齢と乾燥開始材齢の関係に着目すると, 同一試験の間でもかなりのばらつきがあり, 乾燥開始材齢の違いによる影響は明確にあらわれてない。また, シリーズII,IIIでは1体の供試体でしかひび割れが発生していない。これは各シリーズによって乾燥条件が若干違うため, 乾燥条件に依存していると考えられる。呼び強度が同じ場合でもコンクリートの自由収縮量が大きく異なることもある。実際にひび割れの発生しなかったシリーズの自由収縮は小さくなっている。ひび割れの発

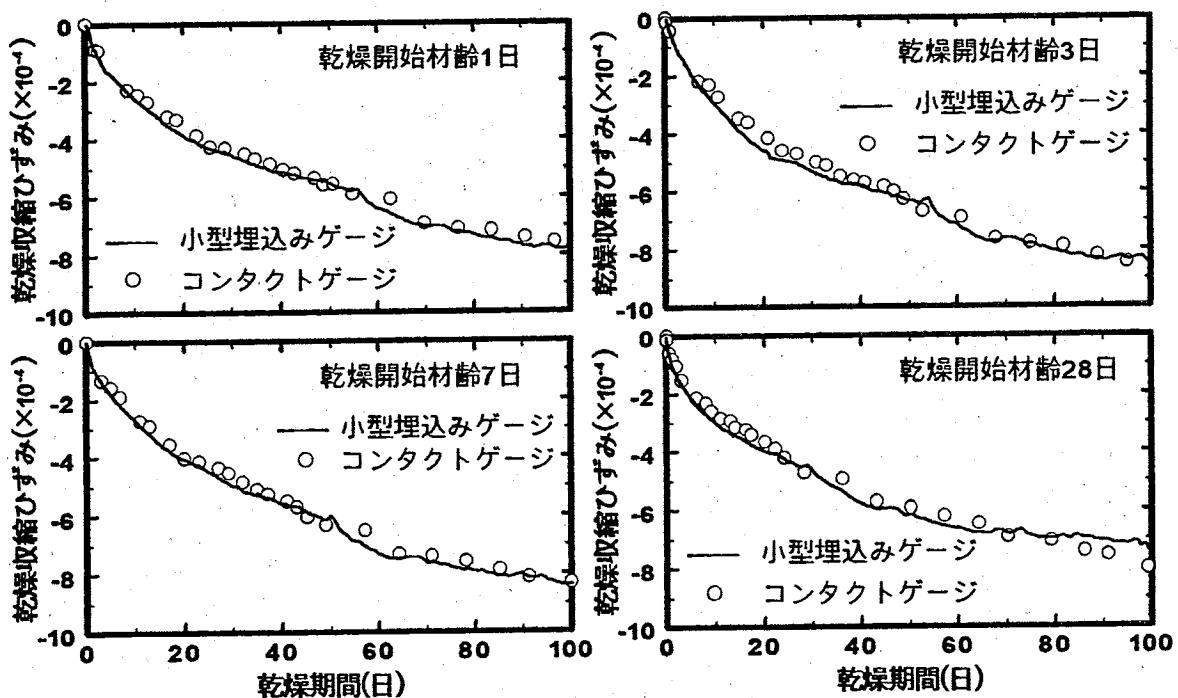


図5.7.5 収縮ひずみの経時変化

生時の拘束率は、大きくばらついているがコンクリートのひずみ測定の精度が影響する。また、これは拘束供試体とは別の供試体の自由収縮ひずみであるため、供試体間のばらつきも問題となる。このことも、ひび割れ発生材齢にばらつきがあることの一因になっている。次にひび割れ発生時の拘束率(拘束引張ひずみ/自由収縮ひずみ)を見ると、シリーズⅠでは40~74%程度、シリーズⅣでは56~85%程度であり、ばらつきが大きい結果を示した。ひび割れ発生時の平均引張応力は拘束鋼材のひずみを用い、ひずみ分布の計算式より算出した。引張強度比(平均引張応力/引張強度)を算出するための引張強度はシリーズⅠでは割裂強度、シリーズⅡ,Ⅲ,Ⅳでは直接引張強度の乾燥を受けた供試体の経時変化より、ひび割れ発生時の強度を推測した。これによると強度試験方法の違いはあるものの、シリーズⅠでは引張強度の54~87%、シリーズⅣでは75~108%の応力でひび割れが発生した。

図5.7.13にシリーズⅠ、図5.7.14にシリーズⅡ,Ⅲ,Ⅳにおけるひび割れ発生材齢と引張強度比の関係を示す。ひび割れの発生していないものは、引張応力が最大となる材齢での引張強度比を示している。これによると、ひび割れ発生材齢と引張強度比の間には相関性が認められ、ひび割れ発生材齢が長期になるほど引張強度比が大きくなる傾向にある。また、ひび割れの発生しなかったものは発生したものと比較すると引張強度比が小さくなっている。ひび割れは引張強度比が一定のレベルを超えた時に発生すると考えられるが、ひび割れ発生材齢が長期になるほどそのレベルが大きくなる傾向にあることが分かる。

ひび割れ発生試験では拘束鋼材比およびコンクリートの調合を変化させた実験を行い、拘束コンクリートに負荷される引張応力を求めることが重要となる。これを得ることができれば、コンクリートの調合と拘束率との関係を明らかにすることができ、ひび割れ発生時期を推定できるようになると思われる。

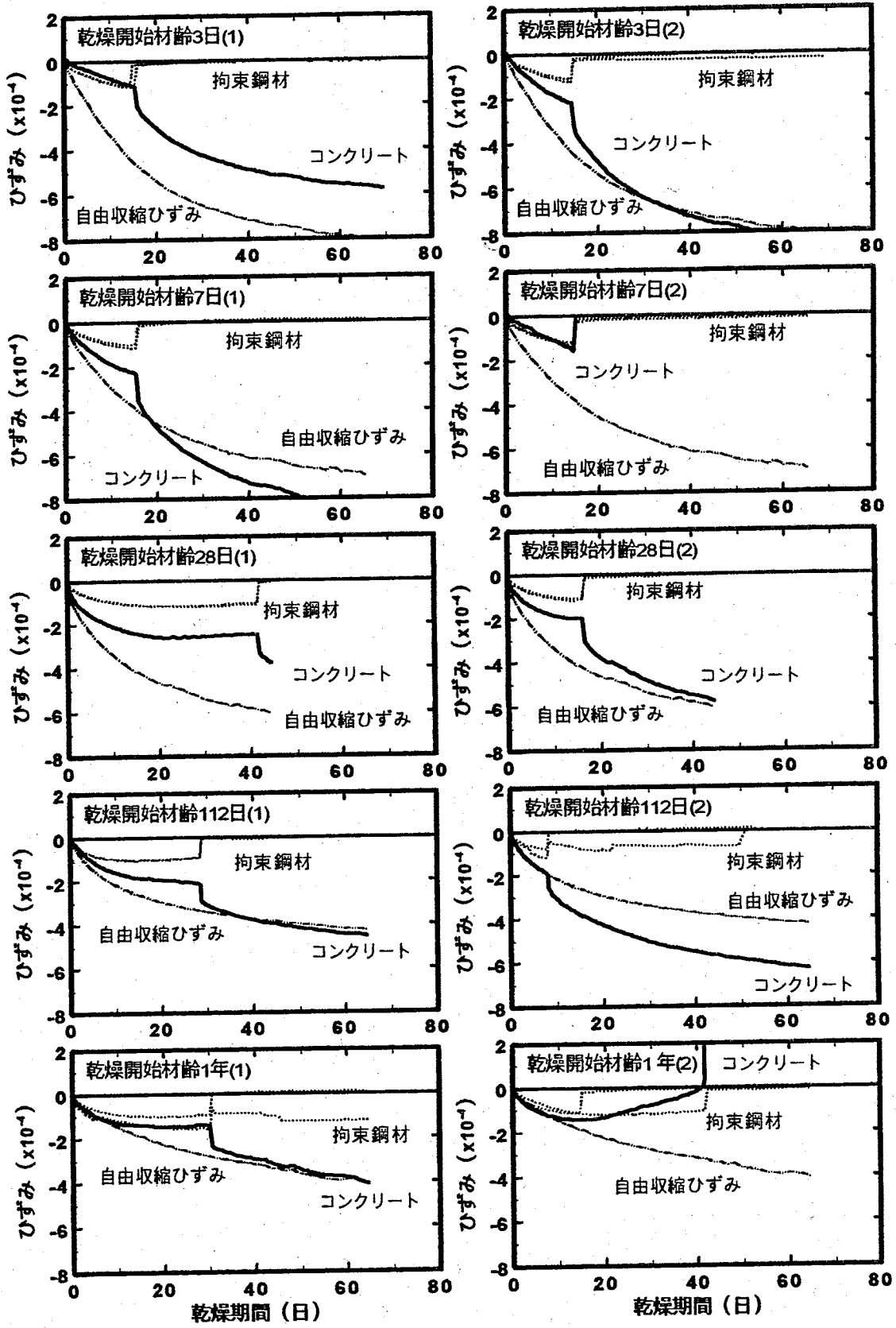


図 5.7.6 乾燥収縮ひび割れ実験におけるひずみの経時変化(シリーズ I, 調合 A)

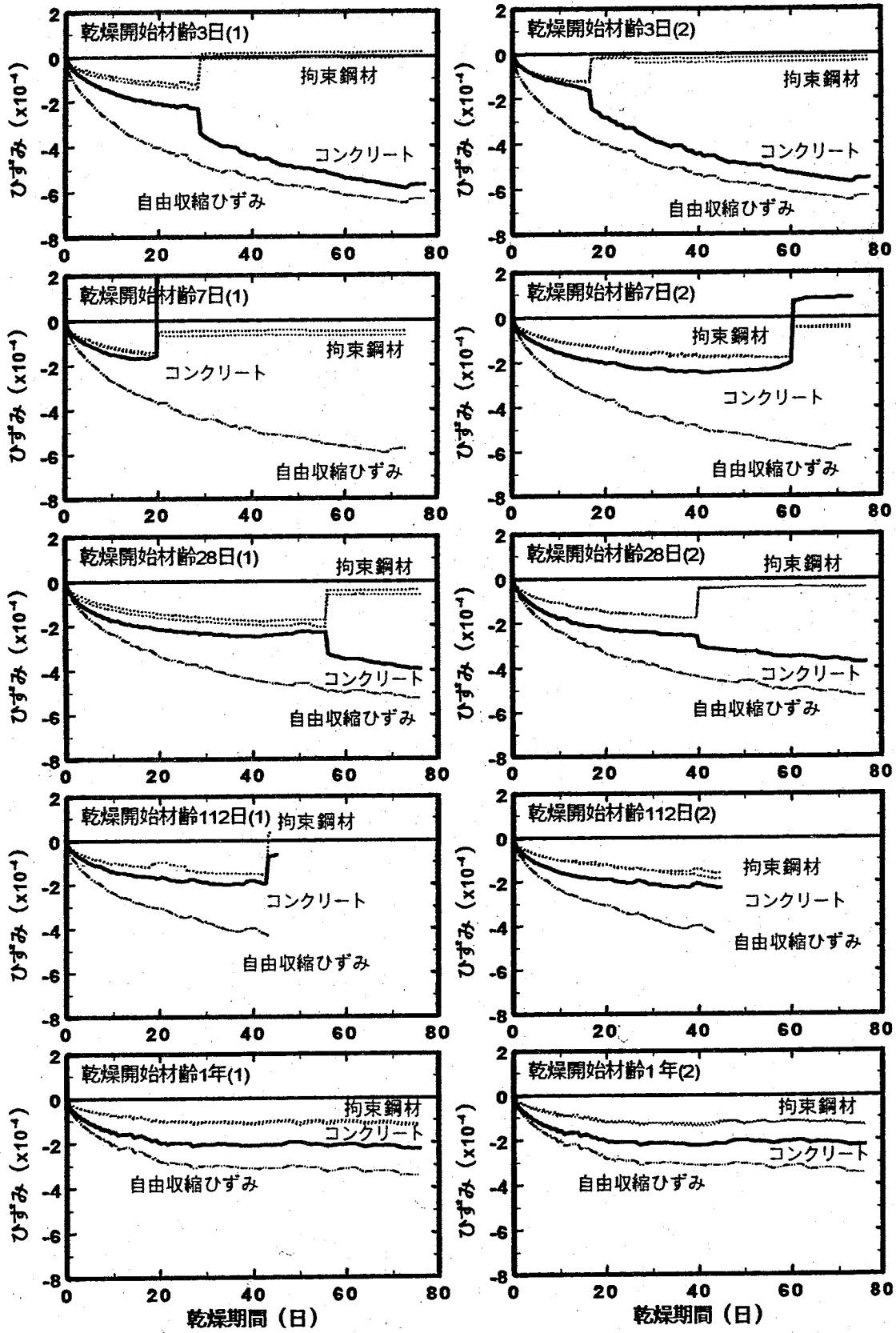


図 5.7.7 乾燥収縮ひび割れ実験におけるひずみの経時変化(シリーズ I, 調合 B)

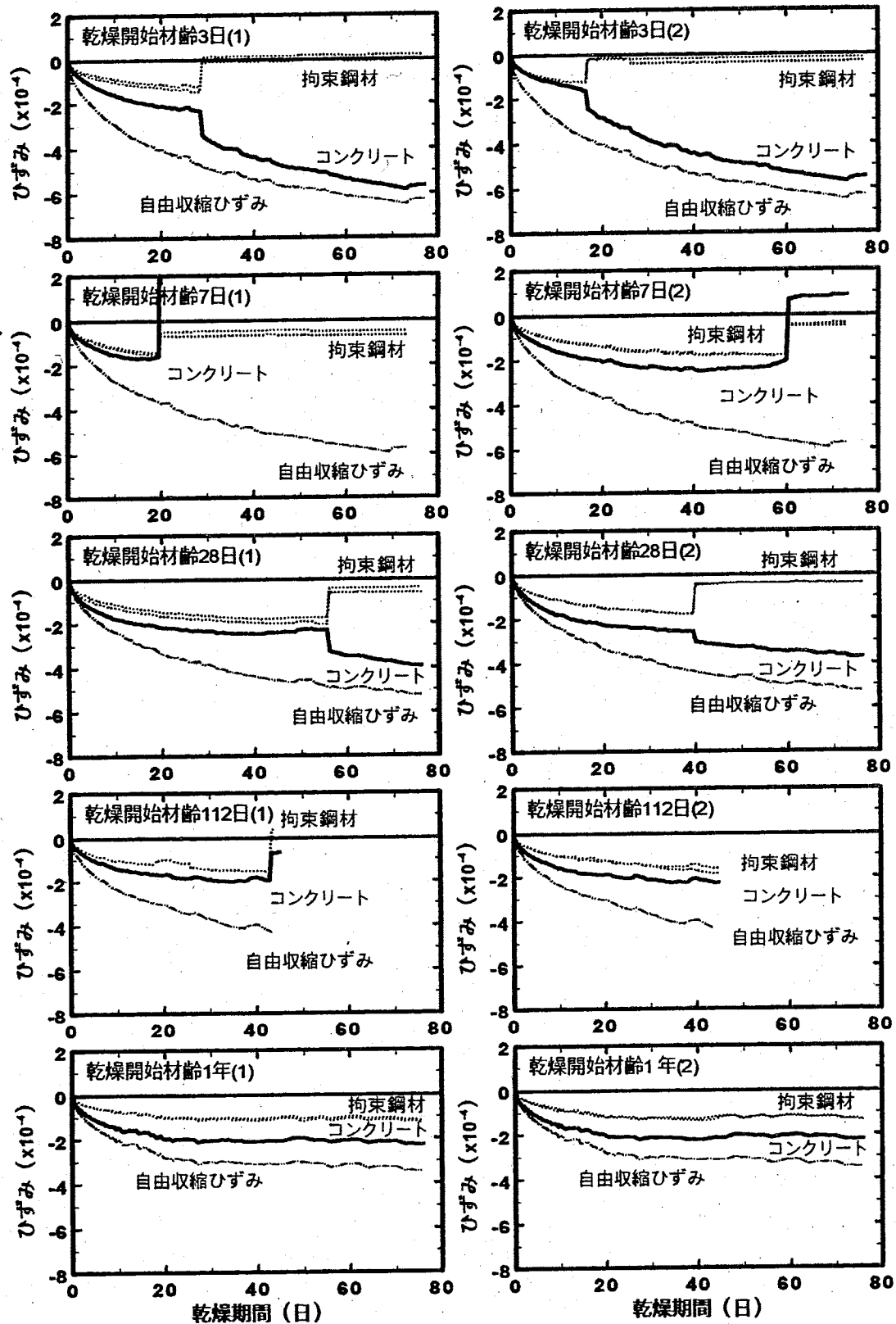


図 5.7.8 乾燥収縮ひび割れ実験におけるひずみの経時変化(シリーズII)

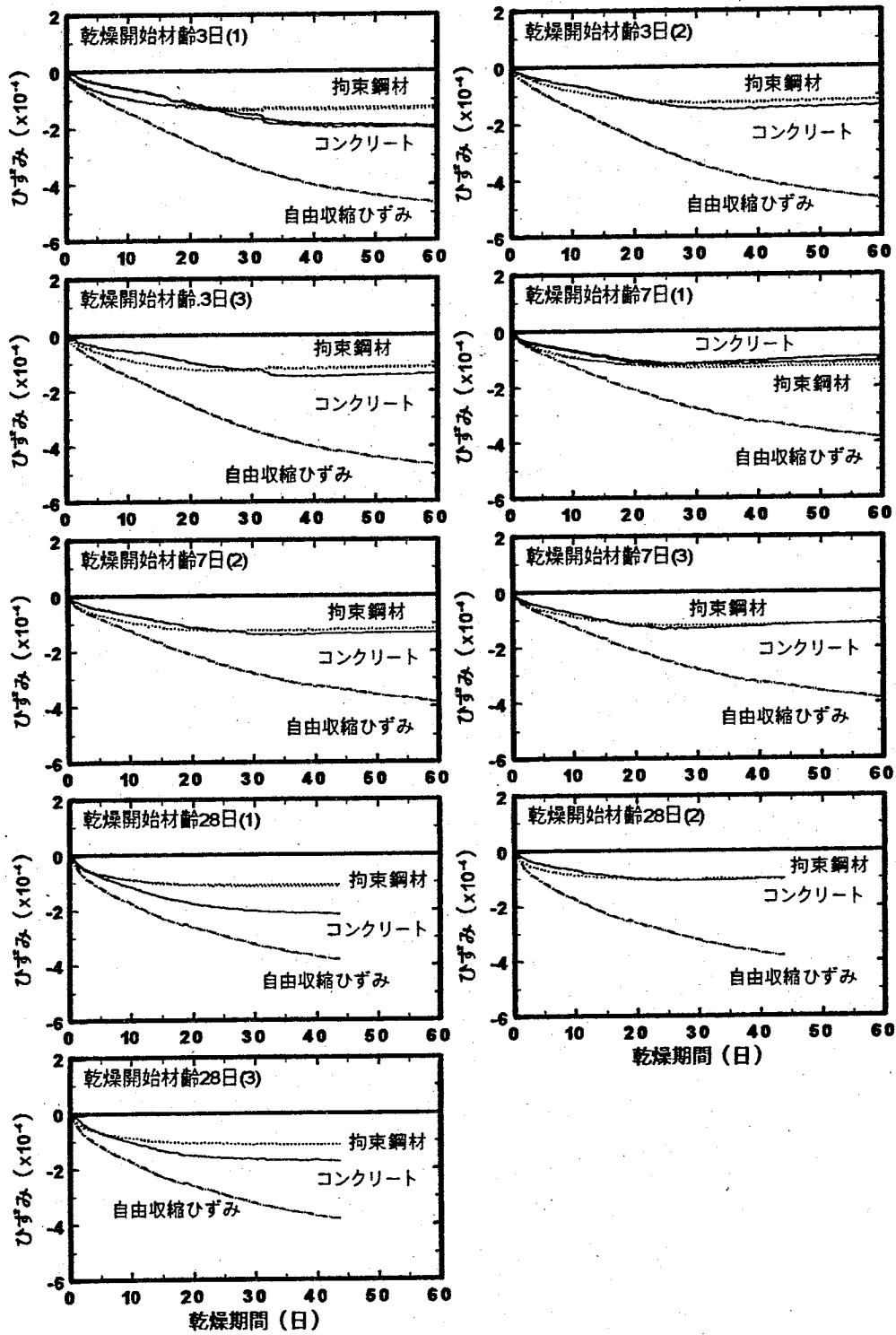


図 5.7.9 乾燥収縮ひび割れ実験におけるひずみの経時変化(シリーズⅢ)

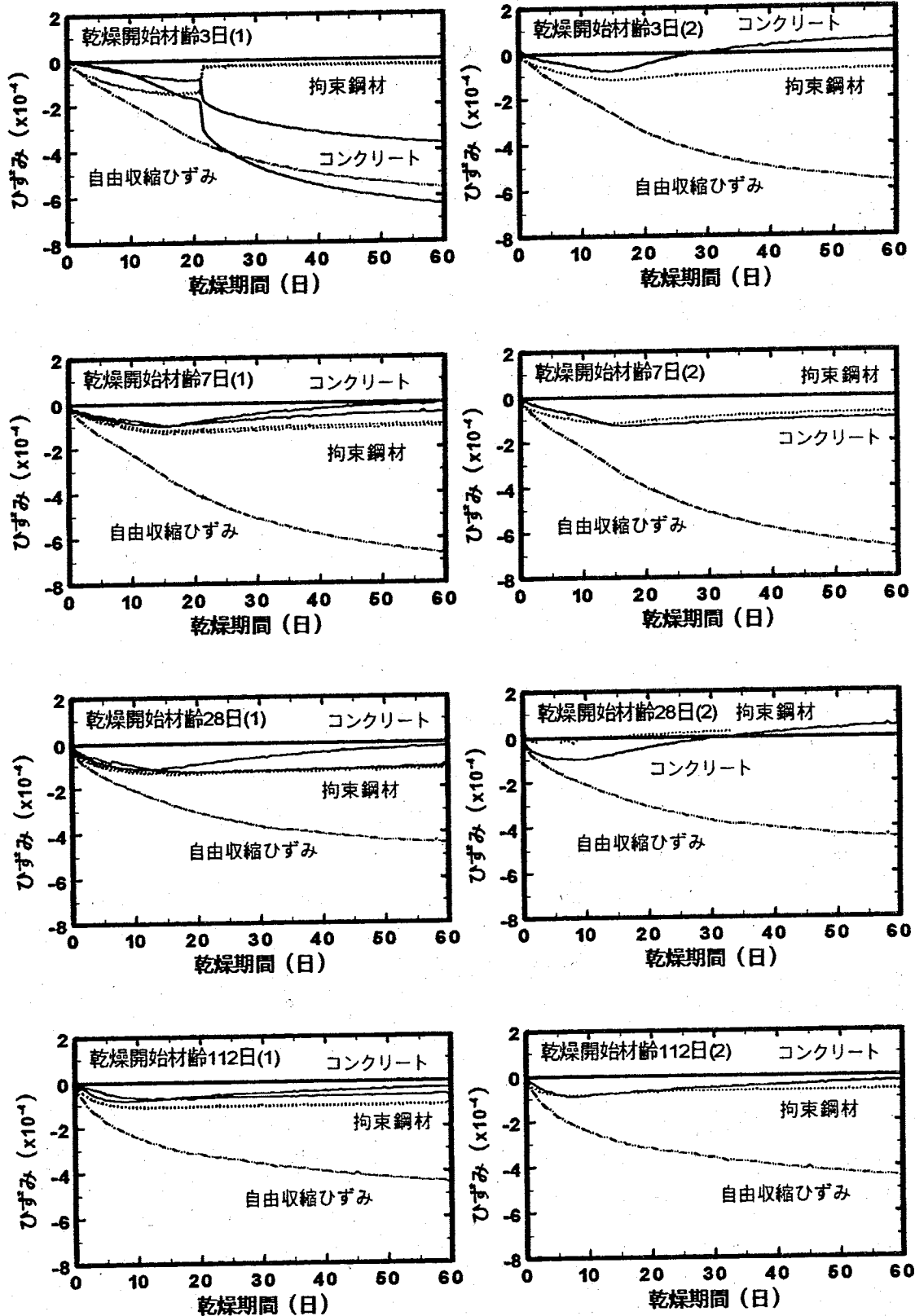
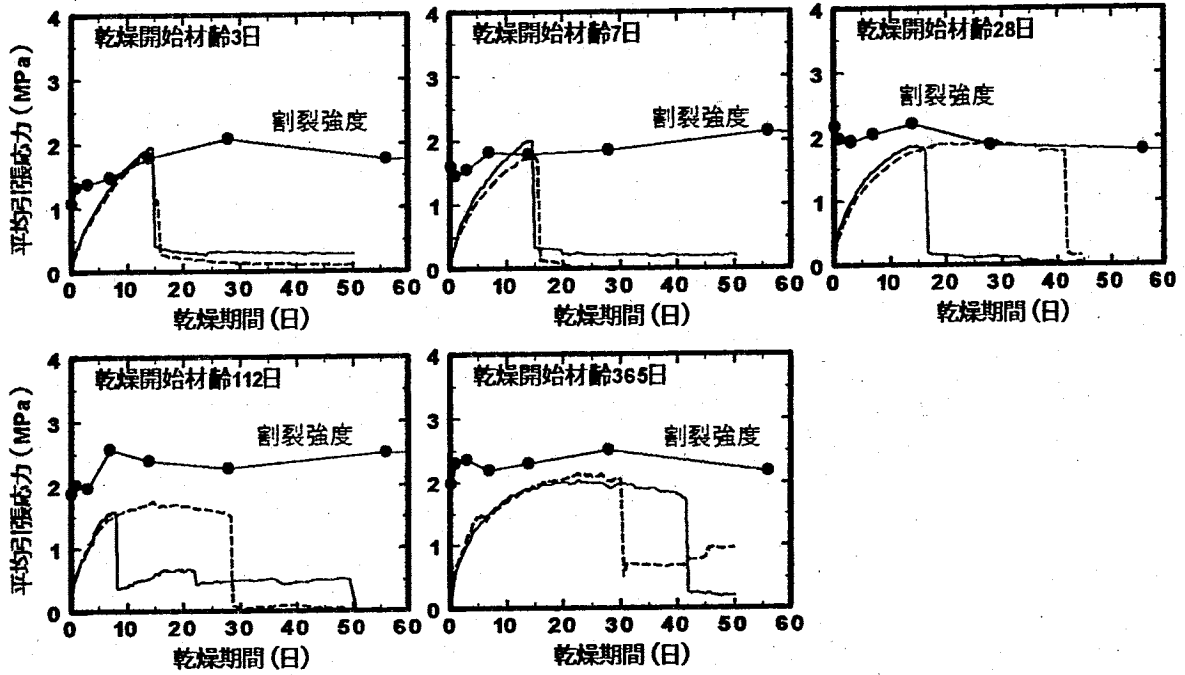


図 5.7.10 乾燥収縮ひび割れ実験におけるひずみの経時変化(シリーズⅣ)

シリーズI(調合A)



シリーズI(調合B)

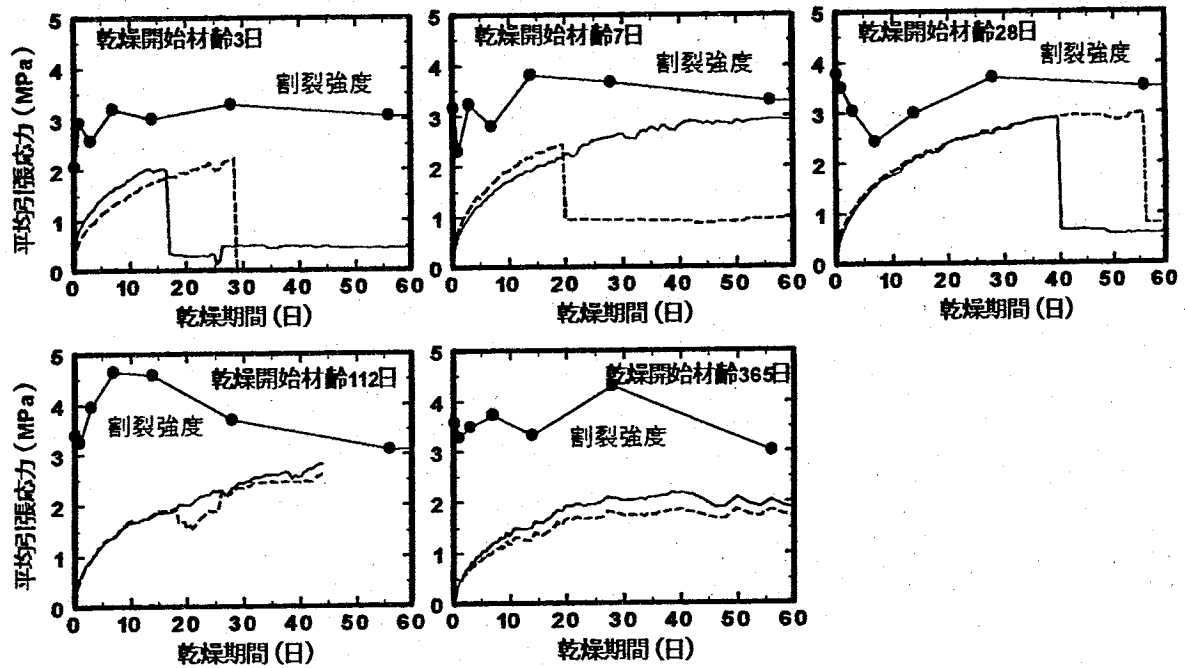


図 5.7.11 拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化 (シリーズ I)

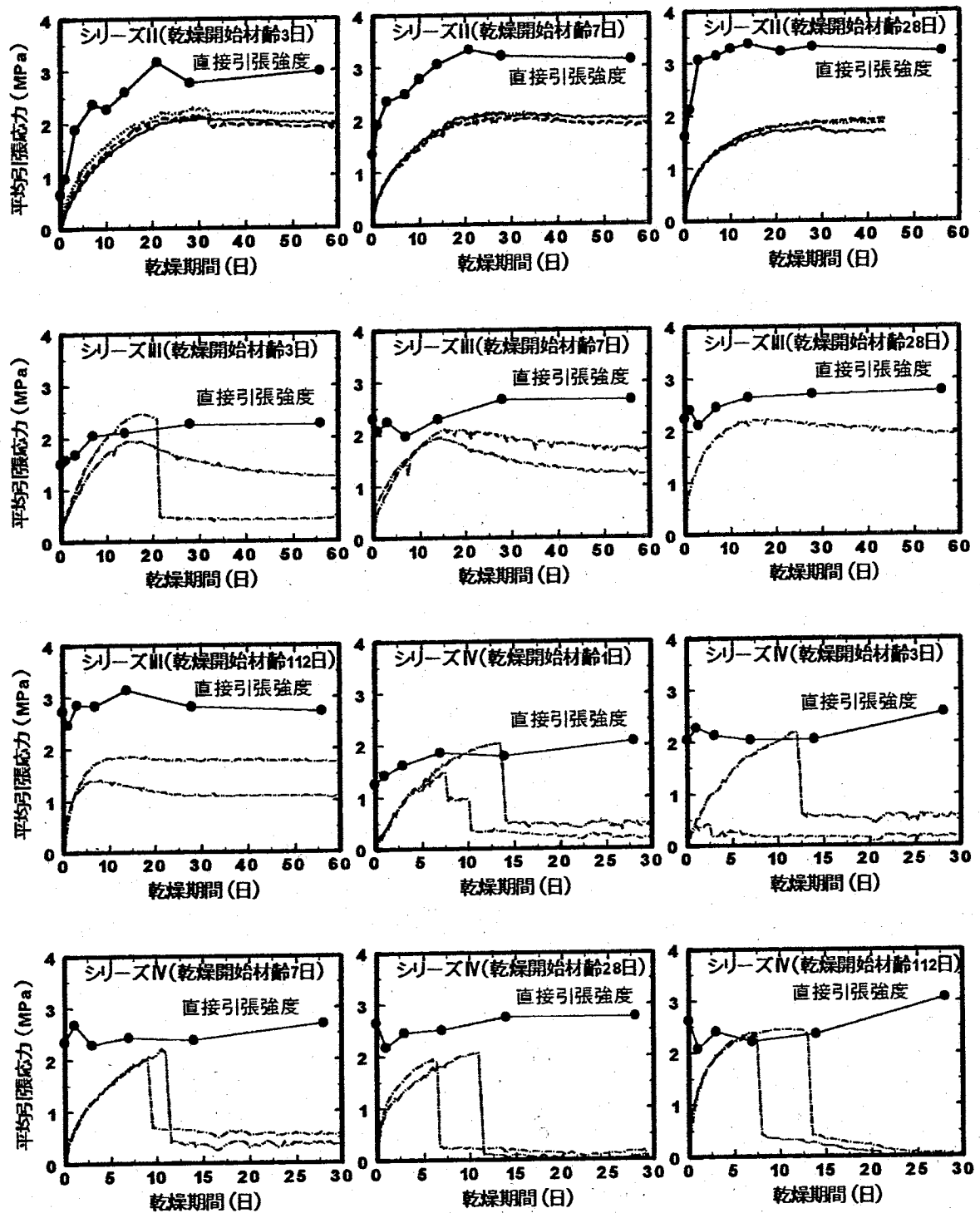


図 5.7.12 拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化 (シリーズII～IV)

表 5.7.1 ひび割れ発生時期の一覧

	乾燥開始材齢 (日)	拘束鋼材比 (%)	ひび割れ発生材齢(日)		ひび割れ発生時の拘束率(%)		ひび割れ発生時の応力 (MPa)		引張応力/引張強度	
シリーズ I (調合 A)	3	8.85	16	15	50.6	74.0	1.89	1.94	76	78
	7		15.5	14.6	40.4	58.2	1.67	2.00	73	87
	28		42	16.5	57.9	52.9	1.77	1.80	77	72
	112		28.5	8.2	40.5	—	1.49	1.51	56	54
	365		30	41.6	49.1	—	2.04	1.72	64	61
シリーズ I (調合 B)	3	12.12	28.5	16.5	50.7	55.9	2.21	1.98	67	62
	7		19.5	60	55.3	64.0	2.44	2.94	64	86
	28		55.7	39.6	52.7	40.9	2.98	2.91	83	81
	112		41.7	—	53.7	—	2.61	—	79	76
	365		—	—	—	—	—	—	61	59
シリーズ II	3	8.85	—	—	—	—	—	—	73	75
	7		—	—	—	—	—	—	66	63
	28		—	—	—	—	—	—	52	61
シリーズ III	3	12.12	21	—	63.0	—	2.57	—	109	89
	7		—	—	—	—	—	—	91	85
	28		—	—	—	—	—	—	85	—
	112		—	—	—	—	—	—	66	49
シリーズ IV	1	12.12	7.6	13.6	70.6	66.7	1.51	1.95	84	111
	3		12.1	—	72.5	—	2.25	—	108	—
	7		9	11	84.9	78.1	1.98	2.06	83	86
	28		6.5	11	65.6	56.4	1.88	2.06	75	78
	112		13	7.5	56.3	24.8	2.21	2.36	107	103

* 網掛けの部分はひび割れの発生しなかった供試体で「引張応力/引張強度」は引張応力が最大値の場合

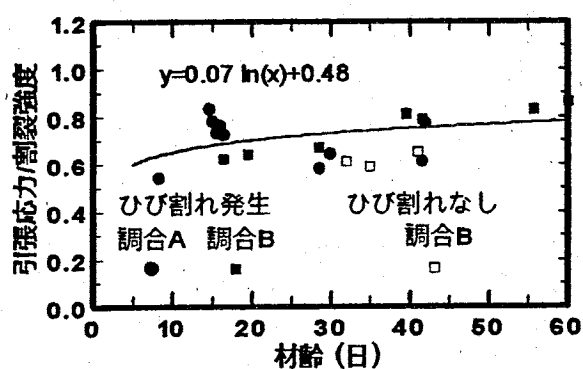


図 5.7.13 ひび割れ発生材齢と引張強度比の関係 (シリーズ I)

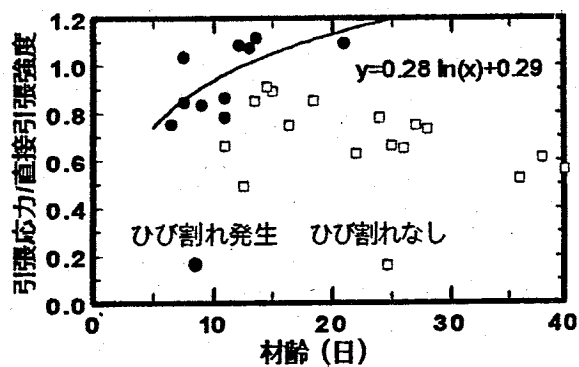


図 5.7.14 ひび割れ発生材齢と引張強度比の関係 (シリーズ II, III, IV)

5.8 第5章のまとめ

第5章では、数回にわたり乾燥収縮ひび割れ実験を行ったが、その結果をまとめると以下のようになる。

1. ひび割れ発生時期は、各調合で乾燥開始材齢ごとに2～3体ずつ実験を行ったが、供試体ごとにばらつきがあり、また、乾燥開始材齢に影響も明確にはあらわれていない。
2. 拘束率についても、各調合においてばらつきがあり、コンクリートのひずみ測定の精度や供試体のばらつきに問題がある。
3. 引張強度比はひび割れ発生材齢と相関性が認められ、ひび割れ発生材齢が長期になるほど大きくなる。また、ひび割れの発生しなかったものは発生したものに比べ引張強度比が小さい。ひび割れは引張強度比が一定のレベルを超えた時に発生すると考えられるが、ひび割れ発生材齢が長期になるほどそのレベルが大きくなる傾向にある。
4. 乾燥を受けるコンクリートの直接引張強度を測定するための試験方法は、まず簡便な方法として接着剤方式による直接引張試験を行ったが、湿潤状態ではエポキシ系接着剤では十分な接着強度を得ることができず、チャック方式による試験方法が有効である。
5. コンクリートのひずみ測定には、新たに開発した小型埋込みゲージによる方法が有効であり、若材齢からの測定に適している。

【第5章の参考文献】

- [5.1] 大野和男：モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究，北海道大学工学部研究報告 No.9, pp.49-110, 1953
- [5.2] 六車 照：モルタル収縮ひびわれ試験におけるリング供試体について，セメント技術年報 17, pp.160-164, 1963
- [5.3] Nagataki, S.: Studies of Shrinkage in Concrete Pavements, 東京工業大学土木工学科研究報告 No.7, pp.29-58, 1968
- [5.4] 牧角龍憲・徳光善治：拘束を受けたコンクリートの乾燥収縮に関する研究，第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.161-164, 1980
- [5.5] 仕入豊和・青柳征夫・川瀬清孝：コンクリートのひび割れ試験方法(案)－乾燥収縮ひび割れ・温度ひび割れ－，コンクリート工学, Vol. 23, No. 3, pp. 40-54, 1985. 3
- [5.6] 研究代表者・佐藤嘉昭：コンクリート用小型埋込みゲージの開発，平成7年度科学研究費補助金(試験研究(B)(1))研究成果報告書

- [5.7] 佐藤嘉昭・清原千鶴:コンクリート用小型埋込みゲージの開発(その1, その2), 日本建築学会研究報告九州支部第36号, pp. 65-72
- [5.8] RILEM INQUIRY: Direct Tensile Test of Concrete, Bulletin RILEM, No. 20, pp.84-90, 1963
- [5.9] 佐伯 昇・堀口 敬・菅原 隆:表層部のコンクリート強度について, コンクリート工学 Vol.33, No.10, pp. 5-12, 1995. 10
- [5.10] S. E. Pihlajavaara : Notes on the Effects of Moisture on the Strength Change in Concrete, Proc. RILEM/CIB Symp. on Moisture Problems in Buildings, Otaniemi, Finland, 1965. 8
- [5.11] Troxell, G. E., Davis, H. E. and Kelly, J. W. : Composition and Properties of Concrete, Mccgrow-Hill, New York, pp. 254-255, 1956
- [5.12] 笠井芳夫: 材料科学概説, 彰国社, pp. 183-184, 1970
- [5.13] 岡島達雄:コンクリートの力学的性質と水分, セメント・コンクリート, No. 464, pp. 18-25, 1985
- [5.14] 岩崎訓明:コンクリートの特性, 共立出版, p. 84, 1970
- [5.15] 岡島達雄・遠藤充彦・鈴木 誠:水和過程におけるコンクリートの弾性係数の変動, セメント技術年報 38, pp. 234-237, 1984
- [5.16] 永松静也・佐藤嘉昭・竹田吉紹:あらかじめ乾燥したコンクリートのクリープ性状および乾燥の程度を含んだクリープ関数, 日本建築学会論文報告集第351号, pp.12-21, 1985.5
- [5.17] Davis, H. E. : Autogenous volume change of concrete, Proc. ASTM, 40, pp.1103-1110, 1940
- [5.18] 自己収縮研究委員会報告書, 社団法人日本コンクリート工学協会, 1996
- [5.19] 近藤 実:硬化セメントペースト中の水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係, セメント技術年報 12, 1958
- [5.20] T. C. Powers : Mechanism of Shrinkage and Reversible Creep of Hardened Cement Paste, Proc. Int. Symp. Concrete, London, 1965
- [5.21] Z. P. Bazant : Thermodynamics of Hindered Adsorption and Its Implication for Hardened Cement Paste and Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.2, 1972
- [5.22] R. F. Feldman : Sorption and Length Change. Scanning Isotherms of Methanol and Water on Hydrated Portland Cement, Proc. Fifth Internat. Symp. Chem. Cement, Tokyo, Part III, Vol. III 1968,
- [5.23] M. J. Setzer : A Model of hardened Cement Paste for Linking Shrinkage and Creep Phenomena, Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete, Edited by F. H. Wittmann, Martinus Ni-jhoff Publishers, 1982