

若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究

入矢 桂史郎¹・服部達也²・梅原秀哲³

¹正会員 名古屋工業大学大学院博士後期課程社会開発工学専攻
(〒466-8155 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

²学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程社会開発工学専攻

³正会員 Ph.D. 名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻教授

コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの挙動の違いに着目し、モルタルと粗骨材量の異なる数種類のコンクリートにおいて、その両者の挙動の比較を行った。その結果、モルタルにおいては、同一条件下のクリープひずみは、引張クリープひずみが圧縮クリープひずみに比べ若干大きいことがわかった。また、同一条件下のクリープ係数はほぼ等しく、載荷期間による変化もほぼ同じであった。クリープ試験実施後のモルタル供試体において細孔構造の測定を行った結果、引張と圧縮ともにクリープによる細孔径の変化はほぼ同じで、細孔構造上也記のクリープ試験結果が裏づけられた。一方、コンクリートにおいては、若材齢かつ低応力強度比において、圧縮クリープひずみが引張クリープひずみより大きいことが認められた。その理由として、粗骨材のクリープ特性の影響を強く受けることがわかった。

Key Words: thermal stress due to heat of hydration, compressive creep, tensile creep, early age, pore structure

1. まえがき

コンクリートの水和熱による温度応力ひび割れを防止するために、その温度・応力を正確に予測し、適切な防止対策を採用することはきわめて重要である。

温度応力の予測手法として、3次元有限要素法やCPひび割れ幅法等、ひび割れ発生メカニズムを忠実に数式化した手法が採用されているが、未だ正確な予測は困難な状況にある。温度応力の予測を不確実なものにしている要因として、物性面においては、若材齢コンクリートのクリープの評価方法が不明確であることが挙げられる。

水和熱による温度応力は、温度の上昇とその後の降下にもなっており、一般に圧縮応力状態から引張応力状態に変化していくために、クリープに対してもこの2つの状態で時系列的に応力が変化することを考慮しながらモデル化しなければならない。さらに、対象とするコンクリートが若材齢であり、水和の進行にもなっており物性が時系列的に変化するため、物性の時間依存性をも考慮したクリープモデルが必要である。

コンクリートの圧縮クリープモデルについては、これまでかなり研究がなされ、応力強度比の影響を考慮した非線形クリープ予測式も提案されている¹⁾。また、若材齢コンクリートに対しても、影響が大きいとされる載荷材齢や温度、さらに配合や載荷応力強度比の影響をも考慮した若材齢クリープ予測式も提案されている²⁾。

一方、引張クリープについては、ここ数年研究が活発になされているものの、未だ研究成果の公表は少ない。土木学会コンクリート標準示方書においても、コンクリートのクリープ式は圧縮クリープ式が示されており、圧縮クリープと引張クリープの違いについては、明確に述べられていない。しかしこの式は、実際には引張応力状態にも適用されている現状を考えると、引張クリープ挙動を検討し、両者のクリープの違いを明確にすることは重要である。過去に発表された論文の中で引張クリープと圧縮クリープの比較について考察したものについてみると、引張クリープと圧縮クリープはほぼ同等³⁾あるいは引張クリープの方が圧縮クリープより大きいという報告がある程度であり⁴⁾、引張クリープと圧縮クリープの挙

動を比較して定量的に考察された論文はほとんどない。

筆者らは、一般的に用いられる鉄筋コンクリートの配合を対象に、若材齢コンクリートの圧縮・引張クリープについて研究を行い、20%程度の応力強度比において引張クリープが圧縮クリープより小さいことを指摘した⁹⁾。しかし、引張クリープが圧縮クリープに比較して小さい原因やその機構等については、十分解明していなかった。

本論文では、コンクリートのクリープにおけるモルタルと粗骨材のクリープ挙動の違いに着目して、「コンクリートは、モルタル部分のクリープと粗骨材部分のクリープという2材料のクリープを複合したもの」という考え方にに基づき、モルタルの配合を一定とし、それに粗骨材量を変化させた数種のコンクリートにおいて、同一試験条件で圧縮クリープと引張クリープ試験を行い、その違いを明らかにすることを試みた。また、セメント硬化体の微視的な構造変化からその違いを明らかにするために、モルタルにおいて、圧縮・引張クリープ試験前後の供試体の細孔構造を分析し、クリープによる細孔構造の変化について検討を行った。さらに、コンクリートにおいて、載荷材齢と載荷応力強度比を変化させたクリープ試験を行い、圧縮と引張のクリープ挙動を比較して、その違いを評価した。

2. コンクリートのクリープ発生機構に関する 既往の研究成果

(1) 塑性流動によるクリープ発生機構

クリープの発生機構は、塑性流動により生じる部分と微細ひび割れ等の内部欠陥の進行により生じる部分とに大別される。ここでは、既往の論文を調査し、クリープ発生機構についてまとめてみた。

コンクリートは、セメントペーストと細・粗骨材に分類される。骨材は、軽量骨材等ポーラスなものを除けば、一般に緻密でありセメントペーストよりクリープは小さいとされる。コンクリートと粗骨材を除いたモルタルを比較すると、モルタルの方がクリープは大きい²⁾。セメントペーストの部分を微視的に見ると、CSH ゲルや水酸化カルシウム等のゲルや鉱物結晶の部分（以下ペースト硬化体と称す）と自由水（evaporable water）とゲル水（結合水 non evaporable water）に分けられる⁷⁾。クリープの発生機構についての統一された説明は現在なされていないが、自由水・ゲル水が存在しないような高温下で実施したクリープ試験の結果では、クリープが生じないことが確認されていることから⁸⁾、クリープ挙動には間隙の存在と水の移動が深く関わっていると考えられる。実験的にこれを確かめるには、セメント硬化体中の空隙と自由水・ゲル水の移動が細孔構造の変化と密接に関連しているこ

とから、クリープ試験に合わせて細孔構造を調査すればクリープ挙動が理論付けられる可能性がある。

塑性流動によるクリープ機構の説明として、圧縮クリープに対しては、粘弾性理論や浸出理論で説明される場合が多い⁹⁾。粘弾性理論においては、圧縮応力が載荷された直後にペースト硬化体部分に変形が生じ（弾性変形・塑性変形）、その応力によって細孔径が減少し、自由水やゲル水が押し出されて水で飽和していない細孔に移動する。その結果、変形が生じるが、その移動は瞬間的なものではなく、持続的にゆっくり生じる。この水分の移動によってペースト部分は徐々に変形していくことになる。この変形がクリープ変形で塑性流動と称されるものである。荷重が取り除かれた（以下除荷と称す）場合は、逆にゆっくり水分が移動し変形が回復するが、その挙動は塑性流動と全く同じではない。この現象は塑性流動と区別して遅れ弾性変形と称される。

一方、引張クリープについては、クリープの機構を研究した文献は見当たらなかった。引張応力状態では、細孔径が増大することにより細孔内に負圧が生じ、載荷引張応力を見かけ上低減するとしてモデル化し解析した場合、実験値とよく一致したとの報告がある程度である¹⁰⁾。負圧の効果については実験的に解明されていないが、外部から水の供給がない限り、引張応力が載荷されたことにより細孔径が増大し、水で満たされない空隙が増加するという圧縮クリープでの現象と全く反対の現象が生じるであろう。空隙が増大することにより水の移動が生じ、また空気が外部から進入することにより負圧が解消されて安定した状態となるであろう。この仮定は、細孔構造の変化という観点から見ると引張クリープと圧縮クリープは全く逆の状態が生じることを意味しており、この仮定が正しければ、塑性流動による圧縮と引張のクリープ挙動は同一になるものと考えられる。また、水分の移動で生じるクリープは、細孔径の変形によるものであり、細孔径の変形が弾性的な変形であるとすれば可逆的な変形でありかつ載荷応力の絶対値と密接な関係があると推論できる。

(2) 微細ひび割れの進行

載荷応力がある一定値を越えるとセメント硬化体中に微細なひび割れ（micro crack）が発生し、それが進行することによって、クリープが進行する場合が考えられる。この原因によるクリープは、塑性ひずみであるから載荷応力よりも載荷応力強度比の影響を強く受け、かつ非可逆的な変形である。すなわち、上記の塑性流動によるクリープ成分とは区別して考えることができる。

微細ひび割れの進行を実験的にとらえることは現状では困難で、この原因によるクリープの進行について実験的研究は少ない。筆者らは、圧縮クリープ後の除荷過程

表-1 使用材料表

| 使用材料名 | 種類・産地 | 比重・粒度 |
|-------|---------------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 比重：3.15 |
| 細骨材 | 豊田市産山砂 | 比重：2.55 粗粒率：2.82 |
| 粗骨材 | 春日井市産碎石 | 比重：2.65 粗粒率：6.67 G _{max} =20mm |
| 混和剤 | AE減水剤 AE助剤 | 比重：1.10 |

表-2 示方配合表

| 配合 | SI (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位置量(kg/m ³) | | | | |
|----|------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----|------|------|-------|
| | | | | | W | C | S | G | 混和剤 |
| A | 8 | 4 | 55 | 100.0 | 275 | 501 | 1221 | 0 | 1.904 |
| B | | | | 44.6 | 172 | 313 | 787 | 1015 | 1.188 |
| C | | | | 33.5 | 155 | 282 | 611 | 1267 | 1.188 |
| D | | | | 55.8 | 200 | 364 | 915 | 756 | 1.188 |

での非回復クリープひずみと載荷応力強度比の関係について調査し、載荷応力強度比が大きくなると急激に非回復ひずみが占める割合が大きくなることを確認した¹⁾。高応力強度比での非回復クリープひずみの急増は、微細ひび割れの進行によってひずみが増加し、除荷された後も回復せずに塑性ひずみとなった結果と考えられる。

(3) 圧縮クリープと引張クリープの比較の方法

圧縮クリープと引張クリープについて、その挙動を比較した文献を調査した結果、筆者らの実験結果の理論的解明に資する研究成果を見いだせなかった。ここでは、若材齢コンクリートの引張クリープと圧縮クリープの挙動を比較しその機構を検討するために、クリープ実験に基づいた次の3つの検討を行うこととした。

- ①材料構成上の原因を調査するために、粗骨材量をパラメータとしてモルタル・コンクリートでの圧縮クリープと引張クリープの挙動を比較する。
- ②細孔構造上の原因を調査するために、モルタルで圧縮クリープ試験と引張クリープ試験後の細孔径分布測定を行い、細孔構造の変化に関して比較する。
- ③荷重や材齢の影響を調査するために、コンクリートで載荷材齢・応力強度比をパラメータとして同一条件下で圧縮・引張クリープを比較する。

なお、微細ひび割れの進行がクリープ挙動へ及ぼす影響については、直接観察する方法がないために除荷後の永久ひずみ量から推論することとした。

3. クリープ試験

(1) 使用材料および配合

基本とするコンクリートは、一般に鉄筋コンクリート

表-3 材齢3,5日の物性比較

| 材齢 (日) | 細骨材率 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 割裂強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²) |
|-----------|-------------|------------------------------|------------------------------|--|
| 3 | 33.45 | 17.52 | 1.90 | 3.01 |
| | 44.60 | 17.59 | 1.48 | 2.87 |
| | 55.75 | 17.13 | 1.42 | 2.12 |
| | 100.00 | 20.96 | 1.93 | 2.03 |
| 5 | 44.60 | 21.53 | 2.12 | 3.50 |
| | 100.00 | 19.31 | 2.76 | 2.54 |

構造として土木構造物に使用されているものとし、目標強度を30N/mm²(28日圧縮強度)とした。実験に使用した材料を表-1に、使用した配合を表-2に示す。基本配合は、水セメント比55.0%、細骨材率44.6%のB配合とした。

骨材量の影響に関する試験は、基本配合から粗骨材を取り去ったモルタルと、それに粗骨材を加え粗骨材量(細骨材率)を変化させた3種類のコンクリートとした。ただし、粗骨材量の多い配合において分離が認められたために、細骨材率を固定してセメントペースト量を増大させて分離を極力抑制するよう試みた。

(2) 試験条件

載荷材齢は、既往の研究から^{2), 5), 6), 11)}、若材齢でかつ比較的挙動が安定する材齢として3日および5日とし、実験目的に合わせて選択した。

細孔径分布の測定を行い細孔構造を検討するシリーズは、すべてモルタルで行った。

クリープ試験用供試体と同じく30°Cで養生した供試体の材齢3日・5日(載荷材齢)の圧縮強度・圧縮静弾性係数・割裂引張強度試験結果を表-3に示す。

試験ケースと条件を表-4に示す。実験は、着目する1つのパラメータのみを変化させてその他は固定する方法を採用し、後でその影響のみ評価できるように計画した。

(3) 試験方法

a) クリープ試験の方法

圧縮・引張クリープ試験ともに、φ10×20cmの円柱供試体を用いて20°Cで打設し、打設後直ちに30°Cの温度に制御された恒温室内に静置した。24時間後に恒温室内で脱型し、水分の蒸発を防ぐため供試体側面を厚さ1mmのアルミ箔で覆い、試験材齢まで温度30°C、湿度100%に制御された養生槽内で養生した。圧縮・引張クリープ試験とも、供試体内部に埋込み型ひずみ計(T社製若材齢対応型)および熱電対を埋込み、ひずみ・供試体内部の温度を測定した。使用したひずみ計の仕様および形状を図-1に示す。クリープ試験機は、図-2に示す恒温恒湿槽を有するてこ比1:40の二重てこ式のもので、温度30°C、湿度

表-4 試験ケース

| ケース No | 応力 方向 | WC (%) | 配合 | SS (%) | 載荷材齢 (日) | 載荷応力 (N/mm^2) | 試験 目的 | |
|-----------|----------|-----------|----|-----------|-------------|-----------------------------|----------|-------|
| 1 | 圧 | 55 | A | 4.4 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 2 | | 55 | A | 20.0 | 3 | 4.8 | 同一応力強度比 | |
| 3 | | 55 | B | 4.3 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 4 | | 55 | B | 20.0 | 3 | 4.1 | 同一応力強度比 | |
| 5 | | 55 | C | 4.7 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 6 | | 55 | C | 20.0 | 3 | 3.5 | 同一応力強度比 | |
| 7 | | 55 | D | 4.1 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 8 | | 55 | A | 29.0 | 3 | 4.5 | 応力強度比 | |
| 9 | | 55 | A | 49.0 | 3 | 7.7 | 応力強度比 | |
| 10 | | 55 | A | 60.0 | 3 | 9.4 | 応力強度比 | |
| 11 | | 55 | B | 40.0 | 3 | 6.0 | 応力強度比 | |
| 12 | | 縮 | 55 | B | 50.0 | 3 | 7.7 | 応力強度比 |
| 13 | | | 55 | B | 70.0 | 3 | 11.0 | 応力強度比 |
| 14 | | | 55 | B | 20.0 | 5 | 3.4 | 応力強度比 |
| 15 | | | 55 | B | 40.0 | 5 | 7.3 | 応力強度比 |
| 16 | | | 55 | B | 50.0 | 5 | 10.1 | 応力強度比 |
| 17 | | | 55 | B | 70.0 | 5 | 13.4 | 応力強度比 |
| 18 | 引 | 55 | A | 48.5 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 19 | | 55 | A | 20.0 | 3 | 0.4 | 同一応力強度比 | |
| 20 | | 55 | B | 49.6 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 21 | | 55 | B | 20.0 | 3 | 0.4 | 同一応力強度比 | |
| 22 | | 55 | C | 53.2 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 23 | | 55 | C | 19.9 | 3 | 0.3 | 同一応力強度比 | |
| 24 | | 55 | D | 49.1 | 3 | 1.0 | 同一応力 | |
| 25 | | 張 | 55 | B | 40.0 | 3 | 0.7 | 応力強度比 |
| 26 | 55 | | B | 60.0 | 3 | 1.2 | 応力強度比 | |
| 27 | 55 | | B | 20.0 | 5 | 0.5 | 応力強度比 | |
| 28 | 55 | | B | 40.0 | 5 | 0.9 | 応力強度比 | |
| 29 | 55 | | B | 60.0 | 5 | 1.4 | 応力強度比 | |

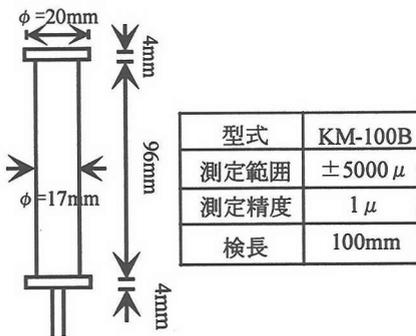


図-1 埋め込み型ひずみ計

100%に環境を制御してクリープ試験を行った。実験に使用した恒温恒湿槽は、外気温以上でのみ精度良い制御が可能となるという制限があったために、ここでは、載荷温度を 30℃とし、養生時からの温度変化をさけるために養生温度も 30℃とした。また、同一条件で作製した無載荷の供試体をクリープ試験機の恒温恒湿槽内に静置し、載荷供試体同様にひずみを測定し、クリープ試験を行った供試体のひずみから差し引くことによって、自己収縮等によるクリープ以外の収縮量について補正を行った。

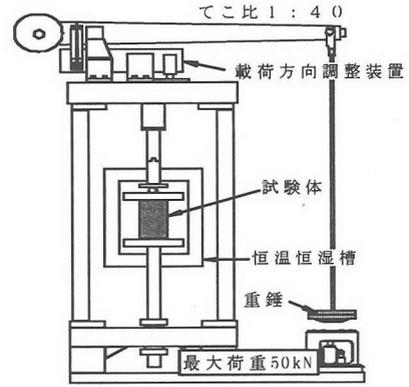


図-2 クリープ試験機

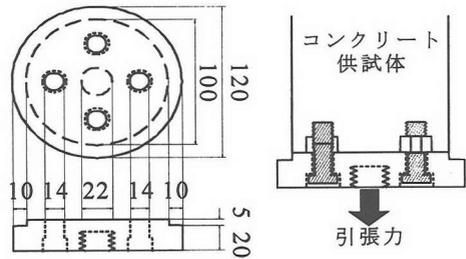


図-3 ボルト埋め込み治具構造図

引張クリープの応力載荷方法は、高応力でも確実に応力を伝達させるためにボルト埋め込み方式とし、ボルトを介して純引張応力がコンクリートに作用する方法を採用した。ボルト埋め込み治具の構造を図-3に示す。

各パラメータにおける供試体の本数については、これまでの研究から^{2), 9), 11)}、温度・湿度を制御した室内試験においては有意な誤差を生じないと判断し、それぞれ2本を原則とした。試験結果は、得られた2つの試験値を平均して用いることとした。

b) 細孔径分布の測定

細孔径の測定は、クリープ試験を実施したものと無載荷供試体の2種類について行い、両者を比較して、クリープの影響による細孔構造の変化を測定した。試料の調整は、裁断する力の影響により細孔構造に変化を与えないように、カッターによって切断する方法とした。手順として、クリープ載荷が終了し除荷した後、直ちに、コンクリートカッターにて1辺1cm程度の立方体に切断し、自由水を取り除くために低温乾燥法(通称 D-dry: -70°C 以下で真空吸引する方法)にて、72時間乾燥させた。乾燥の後、直ちに水銀圧入式(MIP)の細孔径分布測定装置により細孔径分布を測定した。

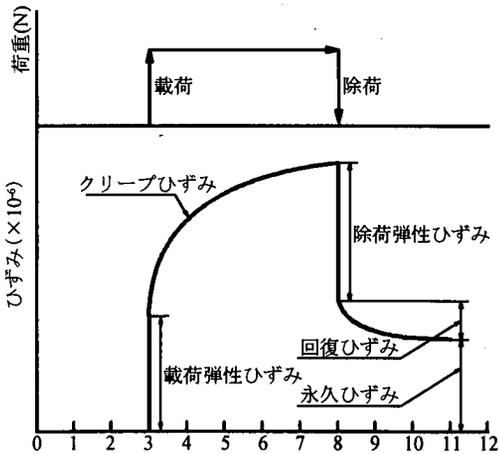


図-4 荷重パターンとひずみの発生パターン

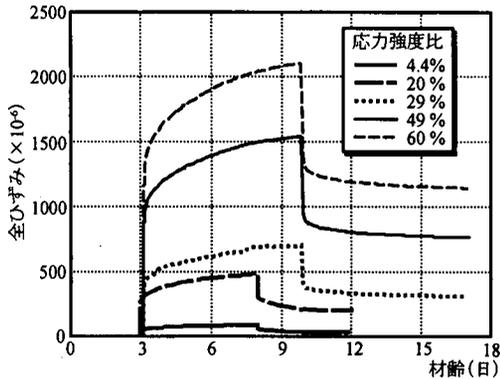


図-5 全ひずみの変化(モルタル)

c) 荷重方法とクリープひずみ

本研究における荷重の荷重方法とそれに伴うクリープひずみの発生パターンを図-4に示す。本論文では、クリープに伴う各ひずみを図-4の様定義した。さらに、荷重荷重期間は、原則5日とし、5日後のクリープひずみを実験範囲内の測定終了クリープひずみと言う点から、本論文では最終クリープひずみと称することとした。材齢5日を超えて荷重すると更にひずみは増加するが、その増加の割合は定常状態となり²⁾、若材齢の影響を考慮する上では5日の荷重期間で十分判断できると考えた。また、荷重の荷重速度は、圧縮クリープ試験の場合、1.0N/mm²/分、引張クリープ試験の場合、0.1N/mm²/分とした。

4. モルタルにおける圧縮・引張クリープ比較

(1) モルタルの圧縮クリープ

a) 応力強度比がクリープひずみに与える影響

モルタルの圧縮クリープに及ぼす荷重応力強度比(荷重応力/荷重時の強度)の影響について、測定された全

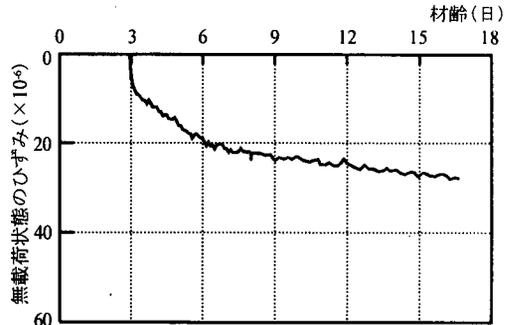


図-6 無荷重供試体のひずみ測定例 (モルタル)

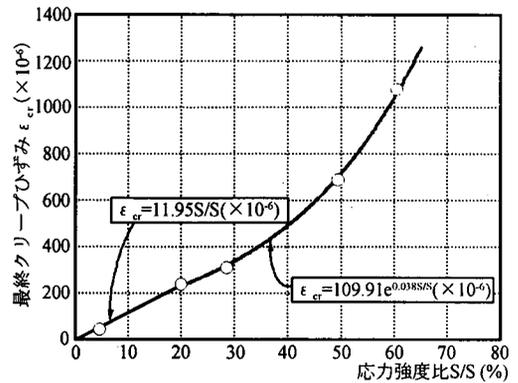


図-7 応力強度比と最終クリープひずみ(モルタル)

ひずみから無荷重供試体のひずみを差し引いたひずみ、すなわち荷重時弾性ひずみとクリープひずみの和(以下全ひずみと称す)の経時変化を図-5に示す。また、無荷重供試体のひずみを図-6に示す。さらに、最終クリープひずみと応力強度比の関係を図-7に示す。最終クリープひずみは、全ひずみより荷重時の弾性ひずみを引いた値となる。荷重応力強度比20%以下では、クリープひずみは荷重応力強度比に比例することが確認されているので^{3) 5)}、20%で原点を通る直線にすりつけた。荷重応力強度比35%程度までは応力強度比と最終クリープひずみの間に線形関係が認められる。しかしそれ以上では、最終クリープひずみとの間に、線形関係は認められず、応力強度比が大きくなると急激にクリープひずみが増加した。全体としては、応力強度比20%で直線と指数関数に分割した下記の式で応力強度比とクリープひずみの関係を表わすこととした。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{cr} &= 109.91 e^{0.038(S/S)} & (20 \leq S/S \leq 60) \\ \varepsilon_{cr} &= 11.95 (S/S) & (S/S \leq 20) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ε_{cr} : 最終クリープひずみ(μ) S/S: 応力強度比(%)

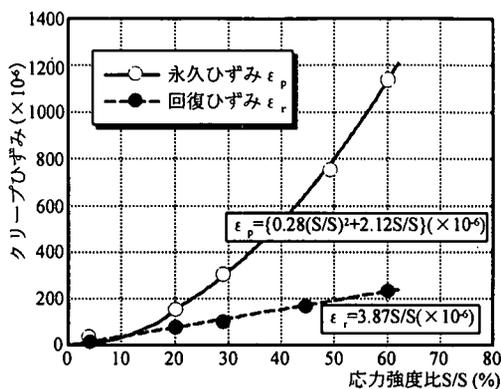


図-8 永久ひずみと回復ひずみの関係

ここで応力強度比が大きくなるとクリープひずみが増大する原因として内部欠陥を取り上げ検討した。

高応力強度比に伴う内部欠陥の発生について試算した結果を以下に示す。圧縮クリープにおける内部欠陥の発生は、せん断変形によって細孔構造に引張りひ割れが発生するものと考えて、その発生限界について試算した。微小ひび割れ発生限界は、圧縮応力と横方向引張りひずみの関係により次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{lim} &= \nu \cdot \sigma_{c,lim} / E \\ \sigma_{c,lim} / \sigma_c &= \sigma / \sigma_1 / \nu \end{aligned} \right\} (2)$$

ϵ_{lim} : 限界横方向引張りひずみ ($\times 10^{-4}$)
 ν : ポアソン比
 $\sigma_{c,lim}$: 限界圧縮応力 (N/mm^2)
 σ_c : 圧縮強度 (N/mm^2)
 E : 静弾性係数 (N/mm^2)
 σ_1 : 引張強度 (N/mm^2)

材齢 3 日の圧縮強度は $17.60 N/mm^2$ 、圧縮 (引張) 静弾性係数は $2.87 N/mm^2$ 、引張強度は $1.48 N/mm^2$ であるので式 (2) に代入すると、微細ひび割れ発生限界の応力強度比として 50% を得る。モルタルの圧縮クリープ試験における応力強度比とクリープひずみの比例限界よりやや大きい値となったが、局部的には、これより低い応力強度比で微細ひび割れが発生しクリープひずみが増大するものと考えられる。

b) 応力強度比が回復ひずみに与える影響

載荷応力強度比と除荷後の回復ひずみおよび永久ひずみの関係を図-8 に示す。永久ひずみは、応力強度比が大きくなるにつれて増加する。しかし、回復ひずみはそれと同じようには増加せず、ほとんど応力強度比に比例した関係となっている。内部組織の変化との関連として、永久ひずみは、滲出説 (Seepage Theory) に基づくゲル粒子間距離の変化¹²⁾や微細ひび割れなどの内部欠陥によるものと考えられ、回復ひずみは粘弾性説に基づく細孔径の変化による水分移動によるもの¹²⁾と考えられる。若材齢のクリープでは、低応力強度比においても永久ひずみ

表-5 載荷時のひずみと除荷後のひずみの比較

(ひずみ $\times 10^{-4}$)

| 応力強度比 (%) | 載荷時 弾性ひずみ | クリープ ひずみ | 全ひずみ | 回復ひずみ | 永久ひずみ | 除荷時 弾性ひずみ |
|-----------|-----------|----------|------|-------|-------|-----------|
| 4.4 | 45 | 45 | 90 | 6 | 41 | 43 |
| 20 | 241 | 240 | 481 | 48 | 235 | 197 |
| 29 | 388 | 336 | 724 | 107 | 314 | 303 |
| 49 | 806 | 705 | 1511 | 190 | 757 | 563 |
| 60 | 1051 | 1087 | 2138 | 254 | 1147 | 736 |

の占める割合が大きいことがわかる。また、先に求めた、内部欠陥の発生限界である応力強度比 35% を超えて、応力強度比が大きくなるにしたがって永久ひずみが増加することは、微細ひび割れ等内部欠陥の増加により永久ひずみが増加したものと判断できる。また、回復クリープすなわち水分移動によって生じているクリープについて回復ひずみが、応力強度比に比例していることは、細孔径の変化が応力に比例した弾性挙動を示し、それにもなつて水分移動が生じ、クリープの回復現象が起こるとした粘弾性理論と一致する。

次にひずみの大きさについて検討した。図-6 と図-8 を比べて、クリープひずみと永久ひずみの値を見てみると、両者はよく似た値を示している。除荷前に生じたひずみと除荷後のひずみを各応力強度比ごとに比較して表-5 に示す。各ひずみ量を比較すると、若材齢コンクリートでは、クリープひずみは、ほぼ永久ひずみと等しく、載荷期間内に生じた弾性係数の増加による弾性ひずみの差分程度しか回復ひずみとなって現れないという結果であった。除荷後の挙動が回復クリープと永久ひずみから成り立っており、クリープひずみの大部分が永久ひずみとなるとすればクリープ回復分は少なく、クリープの回復過程は進行過程とは異なったものであることがわかる。従って、温度応力などで載荷応力が圧縮応力状態から引張応力状態へ反転する時などのように、クリープの回復過程を考慮しなければならない場合には、単純なクリープの重ね合わせは適用できず、応力減少過程のクリープは弾性係数の変化程度のクリープひずみしか期待できないことがわかった。

c) 細孔構造と永久ひずみ

クリープによって細孔径分布や総細孔量はどのように変化するかについて、圧縮応力を $1 N/mm^2$ (応力強度比 4.5%) 作用させた供試体について測定した結果を図-9 に示す。総細孔量は、除荷後の値であるので、永久ひずみに影響を与える細孔径分布の変化とみなすことができる。圧縮応力載荷により、総細孔量が減少する傾向が認められ、特に直径 $5 \mu m$ 以上の大きい径の細孔量の減少が大きい。次に、この細孔量の変化をひずみの変化に換算してみる。この状態で永久ひずみは 1100μ 生じているが、総細孔量の変化がすべて 1 辺 1 cm の立方体供試体の上面に

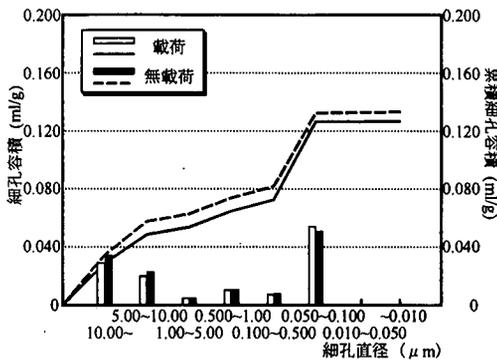


図-9 細孔径分布 (圧縮クリープ)

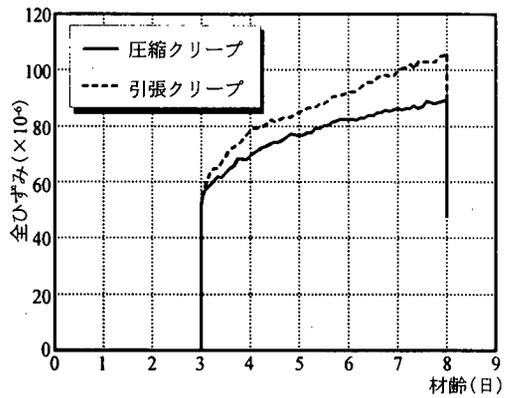


図-11 全ひずみによる比較(モルタル)
(同一応力 1N/mm²)

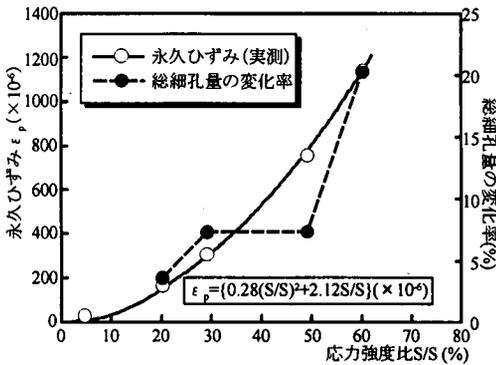


図-10 永久ひずみと細孔容積減少率

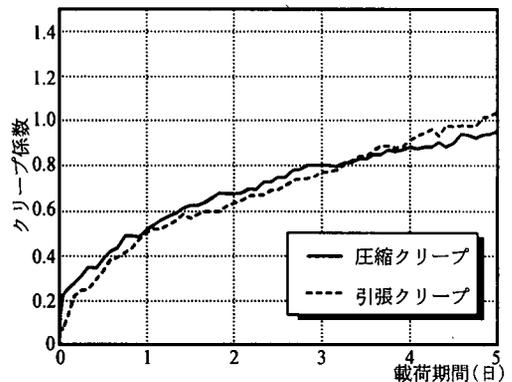


図-12 クリープ係数による比較(モルタル)
(同一応力 1N/mm²)

集中したとし、ひずみは1辺の変化率と仮定して求めたひずみ量は、 190μ であり、細孔量の変化が永久ひずみに占める割合はかなり小さく17%程度でしかないと計算される。従って、低応力強度比において、細孔構造はクリープによって大きくは変化しないか、あるいは回復クリープひずみとして復元したかのいずれかであると考えられる。

次に各応力強度比毎の永久ひずみの実測値と総細孔量の変化率の関係を図-10に示す。永久ひずみは、応力強度比が大きくなるにつれて増加するが、総細孔量の変化は応力強度比が50%までは変化が小さい。しかし60%となると細孔量の変化が大きくなった。これは応力強度比が高くなると、細孔構造の変化が永久ひずみに与える影響が大きくなることを示しているものと理解できる。細孔構造の調査結果から、次のことが推論できる。

- ・圧縮クリープでは、除荷後の細孔量は減少するが、換算した変化量は永久ひずみに比較して小さい。
- ・応力強度比が60%になると細孔量の増大が認められる。微細ひび割れ等の内部欠陥の進行によるものと考えられる。

(2) 圧縮クリープと引張クリープの比較

a) 載荷応力と載荷応力強度比による比較

モルタル供試体の圧縮クリープと引張クリープについて、全く同じ条件で同一の応力 1N/mm^2 を作用させて、クリープ試験を行った。図-11に全ひずみの比較を示す。モルタルにおいて同一条件での引張と圧縮クリープひずみを比較すると、引張クリープひずみの方が 19μ (23%増) 大きい値を示した。クリープ係数で両者を比較して図-12に示す。クリープ係数で比較すると、引張クリープ係数が圧縮クリープ係数より0.05 (5%) 大きい結果となった。載荷期間5日のクリープひずみで比較した上記の結果から、引張クリープひずみが圧縮クリープひずみよりやや大きい、クリープ係数で評価すると、引張弾性係数が圧縮弾性係数より小さいこともあって、有為な差が認められず同等と判断できる。

次に同一応力強度比20%でのクリープひずみの比較を図-13に示す。20%の同一応力強度比で比較すると、引張クリープひずみは 60μ で、圧縮クリープひずみの約1/6と引張クリープひずみの方がきわめて小さくなった。この結果をクリープ係数で比較して図-14に示す。同一応

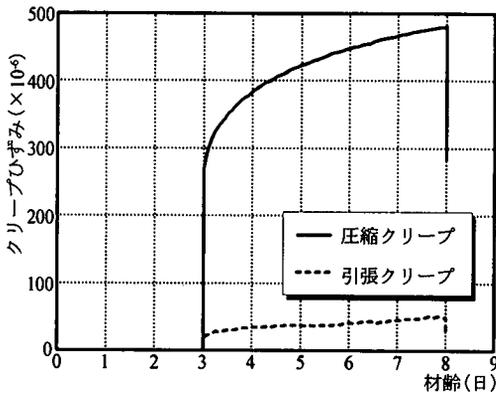


図-13 クリープひずみによる比較(モルタル)
(同一応力強度比20%)

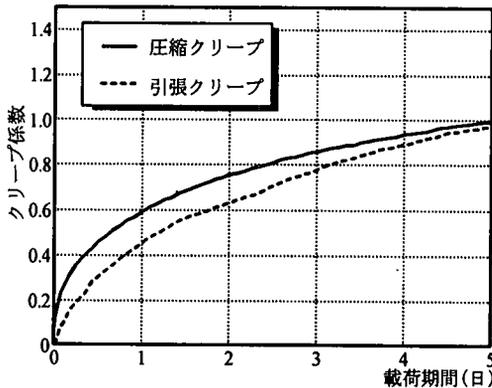


図-14 クリープ係数による比較(モルタル)
(同一応力強度比20%)

力強度比で載荷した場合、クリープ係数において、載荷中のクリープ係数の伸び方は異なるが、載荷期間5日のクリープ係数ではほぼ同等の値となった。

以上から、モルタルの圧縮・引張のクリープ挙動は、温度・載荷材齢・載荷応力が同じ条件下では、クリープ係数ではほぼ等しく、クリープひずみでは引張クリープの方が圧縮クリープより若干大きいですが、全体としてみるとほぼ同等と見なせることがわかった。引張クリープひずみが若干大きい理由として、引張クリープの方が同一載荷応力ならば、載荷応力強度比は大きくなるので、その分微細ひび割れの進行が大きくなり、全体としてのクリープひずみは引張クリープの方が大きくなるものと考えられる。

同一応力強度比載荷において、載荷後のクリープ係数の変化が圧縮と引張で異なっているので、本実験のみからは、引張と圧縮のクリープの発生機構が同一であるとはいえないが、5日程度の載荷期間では、クリープ係数で整理すれば、モルタルにおける両者の挙動はほぼ同等とみなせるといえる。

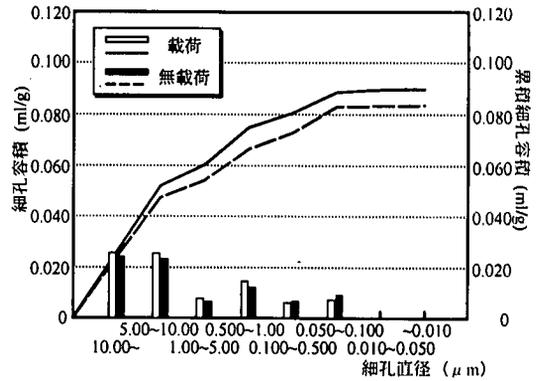


図-15 引張クリープによる細孔径分布の変化
(モルタル)

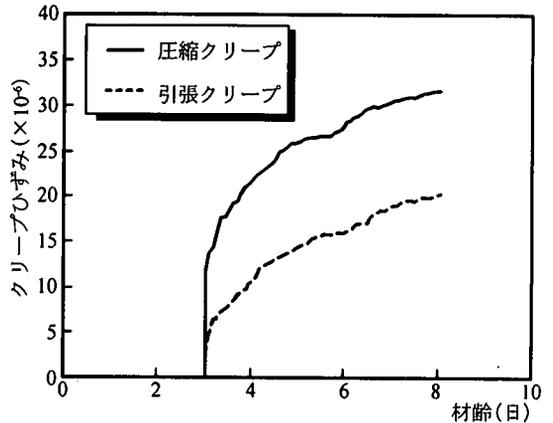


図-16 クリープひずみの変化(コンクリート)
(同一応力1N/mm²)

b) 細孔構造による比較

引張クリープ試験前後の細孔径分布の変化を図-15に示す。細孔径が大きい部分の細孔量が増加しているのがわかる。細孔構造の変化から見ても、圧縮クリープと引張クリープは、変化の正負は反対であるが同様の変化をしているものと判断できる。引張クリープ試験における載荷応力強度比と総細孔量の変化については、応力強度比20%と50%で測定し、応力強度比に依存せず総細孔量で10%程度増大した結果を得た。この傾向も圧縮クリープ試験で得られた結果とほぼ同様であった。

5. コンクリートの圧縮と引張クリープ比較

(1) 載荷材齢・載荷応力の影響

a) 同一応力比較

基本配合で載荷材齢3日において、載荷応力1N/mm²でのクリープひずみとクリープ係数の経時変化を図-16、17に示す。応力強度比に換算すると圧縮の場合は5.7%、引張の場合は50.0%であった。モルタルとは異なり載荷

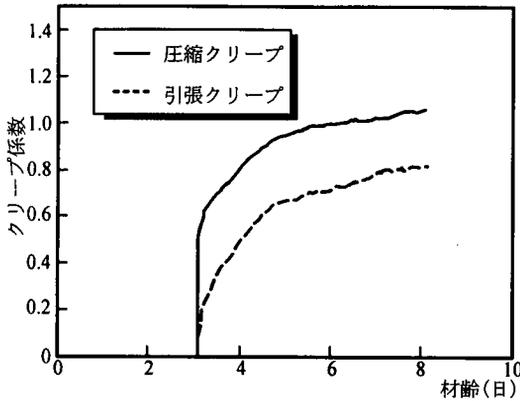


図-17 クリープ係数の変化(コンクリート)
(同一応力 1N/mm²)

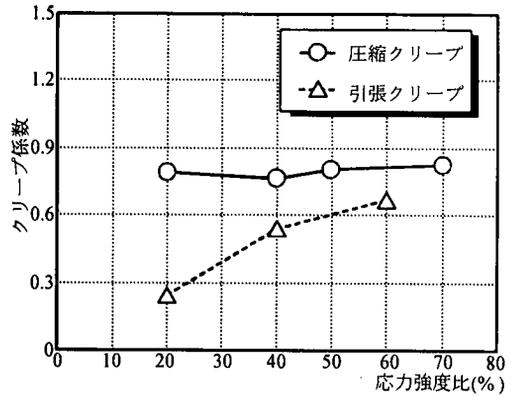


図-19 コンクリートにおけるクリープの比較
(載荷材齢 5 日)

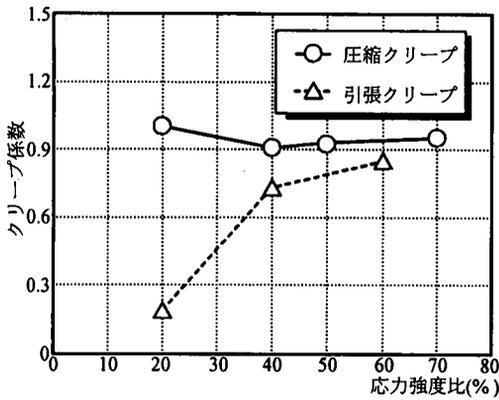


図-18 コンクリートにおけるクリープの比較
(載荷材齢 3 日)

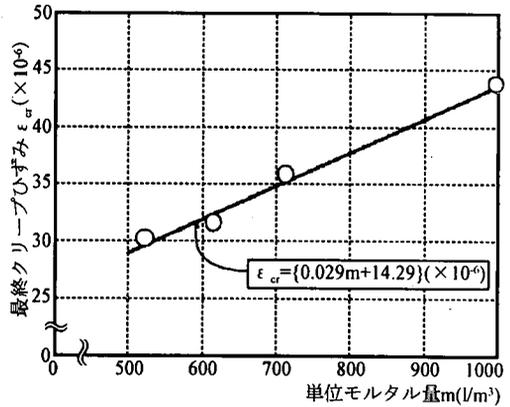


図-20 単位モルタル量とクリープひずみの関係
(圧縮クリープ)

直後から両者の挙動は異なり、圧縮クリープが引張クリープより大きくなっているのがわかる。引張載荷の応力強度比が高いこともあって、引張クリープ係数は圧縮の80%程度であった。

b) 載荷材齢と応力強度比の影響

基本配合において載荷材齢と応力強度比がクリープに与える影響について、モルタルで良い一致を見たクリープ係数で比較したものを図-18, 19 に示す。応力強度比が20%では、クリープ係数でみると圧縮クリープより引張クリープの方が小さい値を示している。しかし、40%では引張クリープ係数が小さいが、それ以上の高応力強度比になるにつれて両者の値は近づいてくる。また、応力強度比20%で載荷材齢の影響を見ると載荷材齢3日のほうが5日に比べて引張と圧縮の差が大きい。これまで、引張クリープが圧縮クリープに比べて小さいことを指摘してきたが、30℃の養生条件においてその傾向は、載荷材齢が小さいほど、また応力強度比が小さいほど顕著であるといえる。

6. 粗骨材がコンクリートのクリープに与える影響

(1) 圧縮クリープにおける粗骨材量の影響

若材齢や低応力強度比で引張クリープが小さくなる理由を調査するために、クリープに及ぼす粗骨材の影響を調査した。ここでは、モルタル部分はモルタル試験に用いたものと同一配合で、粗骨材量(モルタル量)を3種類変化させてクリープ試験を行った。圧縮クリープについて同一応力 1N/mm²を載荷した場合の単位モルタル量と最終クリープひずみの関係を図-20 に示す。また、単位ペースト量と最終クリープひずみの関係についても図-21 に示す。単位モルタル量または単位ペースト量と最終クリープひずみは、いずれも1次関数式で表される。クリープは主にセメントペースト硬化体部分の挙動であるといわれているが、ペーストにおいてもモルタルにおいても同じ形の関数でクリープひずみが表されることは、圧縮クリープ挙動において細骨材の影響は傾向を見る上では、無視して考えることができるということを意味している。

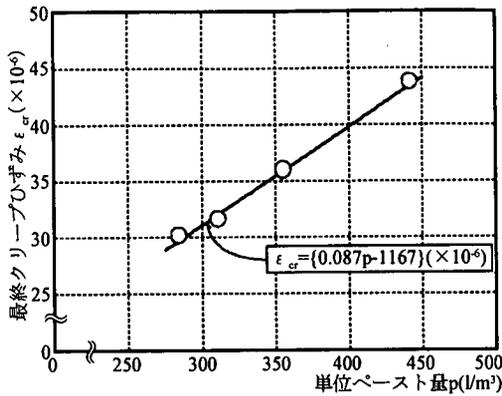


図-21 単位ペースト量とクリープひずみの関係
(圧縮クリープ)

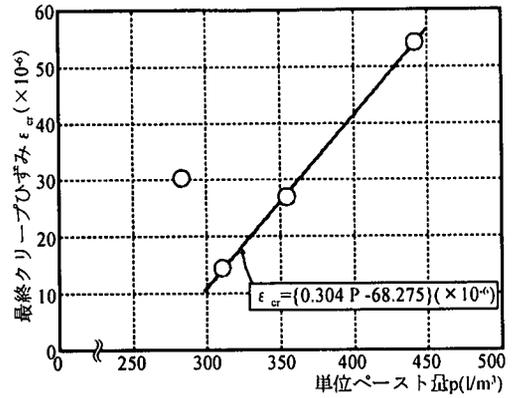


図-23 単位ペースト量とクリープひずみの関係
(引張クリープ)

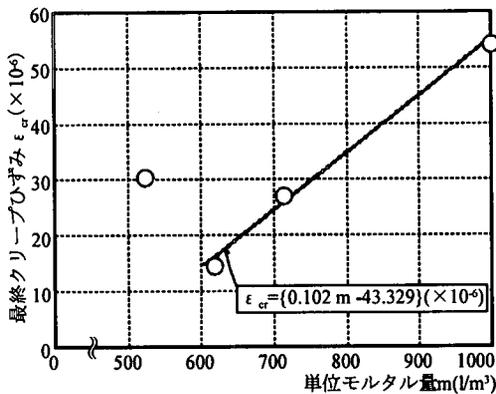


図-22 単位モルタル量とクリープひずみの関係
(引張クリープ)

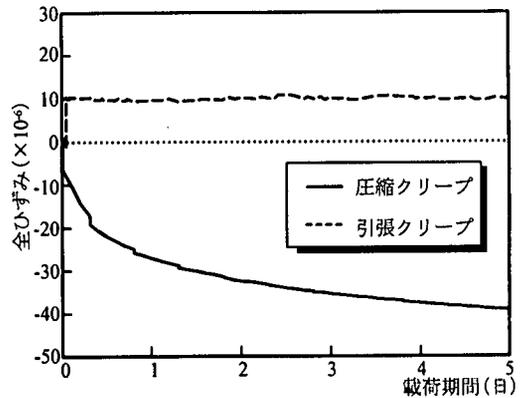


図-24 岩石クリープ試験結果

(2) 引張クリープにおける粗骨材量の影響

圧縮と全く同一条件で引張クリープ試験をおこなった。荷重応力 1N/mm^2 の場合の単位モルタル量 (粗骨材量) と最終引張クリープひずみの関係を図-22 に示す。また、単位ペースト量と最終クリープひずみの関係を図-23 に示す。最適細骨材率 44.6%より単位モルタル量が多い範囲では、モルタル量が多いほどクリープひずみは増加する傾向が認められる。しかし、細骨材率が 33.75%のように最適細骨材率より単位モルタル量が少ない場合にもクリープひずみが増大した。これは、単位モルタル量が少なくなると、コンクリートを包むモルタルが減り、材料分離の傾向が現れることとそれに伴って欠陥部ができやすくなることによるものと思われる。引張クリープでは、圧縮クリープに比べこのような欠陥部の影響を強く受けるものと推定される。

しかし実験上の特殊なケースを除いて、一般にコンクリートとして使用される範囲において、引張クリープひずみと単位モルタル量あるいは単位ペースト量は、圧縮クリープと同様、比例関係にあることがわかった。

以上の実験結果より、コンクリートはペーストと細骨材・粗骨材の複合というよりも、「コンクリートのクリープひずみをモルタル部分と粗骨材部分のクリープ挙動の複合」として考慮することは妥当であると言える。

(3) 粗骨材の圧縮と引張クリープの比較

これまでの実験結果から、コンクリートのクリープ挙動に与えるモルタル量の影響が大きいことが認められたが、粗骨材の物性がクリープに与える影響についての考慮はなされていなかった。ここでは、粗骨材のクリープ挙動を調べ、その物性がコンクリートのクリープに与える影響を検討することとした。しかし、粗骨材のクリープの実験データもほとんどないため、粗骨材のクリープ挙動を把握するために、粗骨材の原石より $\phi 5\text{cm} \times h 10\text{cm}$ のコアを採取して、コンクリートの試験と全く同じ条件で、荷重応力を 1N/mm^2 として、圧縮及び引張クリープ試験を行った。

クリープひずみの測定は、ひずみゲージ (ひずみ長 30mm 測定精度 1μ) を岩石供試体の 2 面に貼り付けて測定した。表面は、コンクリート試験同様アルミ薄膜で被

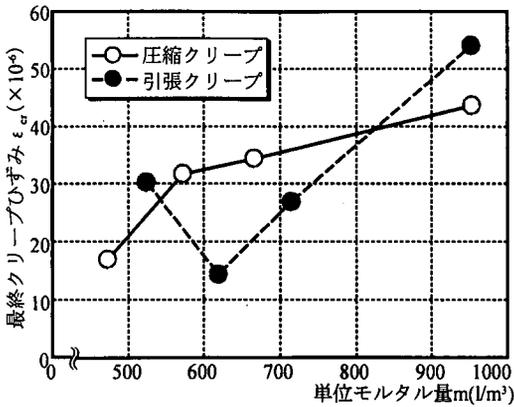


図-25 圧縮と引張りクリープにおける粗骨材の影響
(応力度 1N/mm²)

覆した。試験中の温度は、恒温恒湿槽を使用し、30℃一定に制御したが、湿度は大気湿度と同等とした。そのため、無載荷供試体を同じように恒温恒湿槽内に入れてひずみを測定し補正することとしたが、無載荷供試体にはほとんどひずみは生じなかった。引張治具についてはコンクリートに使用したものを接着剤で供試体に接着して試験を行った。圧縮・引張のクリープひずみを図-24に示す。その結果、岩石においては、上記の応力において圧縮応力状態ではクリープひずみが認められたが、引張応力状態では、クリープひずみが認められなかった。

(4) 粗骨材量が圧縮・引張クリープに与える影響

圧縮クリープと引張クリープにおける最終クリープひずみと単位モルタル量の関係を図-25に示す。同一モルタル量で比較して通常のコンクリートの範囲では、引張クリープは圧縮クリープに比べかなり小さい値を示している。しかし、モルタル量が多くなるにつれて、両者の差は小さくなる方向にあり、引張クリープの方が粗骨材量の影響を顕著に受けていることがわかる。引張クリープにおいては、粗骨材のクリープ挙動がコンクリートのクリープ挙動に影響を与えているものと推測される。モルタルのクリープひずみは、圧縮と引張が同様であるが、粗骨材のクリープひずみが引張のほうが小さいために、複合体としてのコンクリートのクリープは、引張のほうが小さくなると考えられる。この傾向は、粗骨材量が多くなるにしたがって顕著となる。

(5) 粗骨材量・載荷材齢・応力強度比の影響

これまでのモルタルとコンクリートにおける実験結果をまとめて、実験のパラメータとした粗骨材量・載荷材齢・応力強度比がコンクリートの圧縮および引張クリープに与える影響について検討した。図-18, 19から応力

強度比 20%では、コンクリートの引張クリープ係数は、圧縮クリープ係数に比較して小さいことがわかった。また、モルタルにおいて、応力強度比 20%での両者のクリープ係数は、載荷期間 5 日では差がなくなるが、載荷期間 1 日から 3 日程度までは引張クリープ係数が小さい傾向にあるという結果を得た。

これらの結果を基に内部組織の変化から、その理由を検討した。20%の応力強度比は、クリープひずみの中で滲出理論に基づく回復ひずみが卓越し、欠陥部の発生が少ない領域である。この領域では、粗骨材とペーストの付着が十分であり、粗骨材の拘束効果も大きいと考えられる。ただし、モルタルの結果でも見られるように、応力強度比 20%でのクリープ係数の時間的な変化は、引張クリープ係数が小さく推移するなど異なっているため、滲出理論による間隙水の移動の機構が異なる影響が含まれることも否定はできない。しかし、モルタルで見られた両者の差よりも大きな差がコンクリートで見られることから、応力強度比 20%では粗骨材のクリープ量の差による影響が大きいと判断した。なお、高応力強度比になると両者の差が縮まることについては、粗骨材とモルタルの付着面にひび割れ等が生じこの拘束効果が減少することにより、引張クリープ係数と圧縮クリープ係数の差が小さくなるものと考えられる。

一方、材齢とともに差がなくなることについては、材齢が大きくなるにつれてモルタルの弾性係数が大きくなり、粗骨材の影響が小さくなること、およびモルタルのクリープも小さくなるために、粗骨材クリープの影響が出にくくなるなどが考えられる。

7. コンクリートのクリープのモデル化

モルタルのクリープひずみと粗骨材のクリープひずみをもとに、コンクリートのクリープひずみをモデル化することを試みた。ここでは、応力が載荷された場合、各材料にクリープひずみが生じるが、コンクリートとしてのクリープひずみは、モルタル部分と粗骨材部分が互いに拘束してクリープひずみを構成するとの考え方に基づき、容積のみを考慮する方法と剛比を考慮する方法の 2 種類のモデル化を試みた。剛比を考慮する方法では、実際にはクリープひずみの増加によってそのまま内部応力が増加することはないが、粗骨材のモルタルに対するひずみの拘束効果をモデル化するために、クリープひずみの増加に対しても、静的な力の釣り合い式によってクリープひずみが配分されると考えた。

コンクリート中のモルタルと粗骨材の各々の容積率に、載荷応力に対する各々材料のクリープひずみを乗じたものを「剛比を考慮しないケース」と称し式(3)とした。次

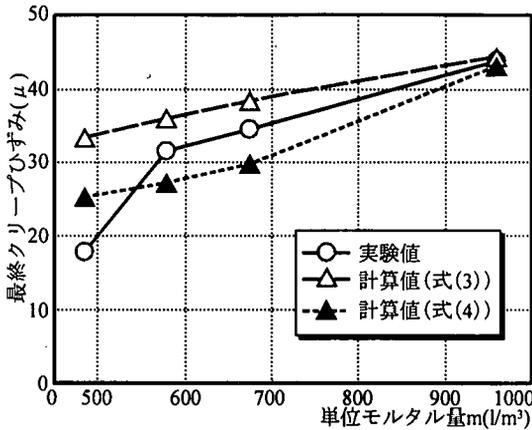


図-26 粗骨材の影響を考慮したモデル化の検討
(圧縮クリープ)

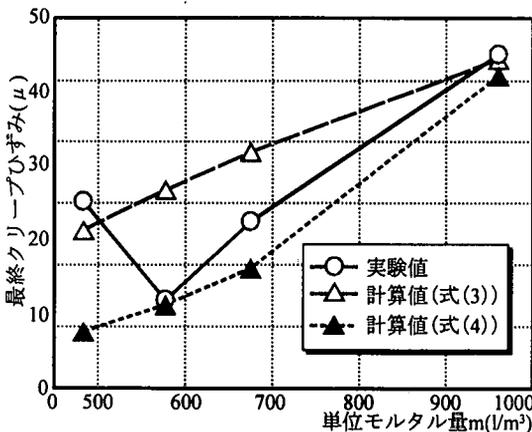


図-27 粗骨材の影響を考慮したモデル化の検討
(引張クリープ)

に剛比と力の釣り合い式から求めたものを「剛比を考慮したケース」として導いた式を式(4)に示す。

$$\epsilon_{cr} = V_m \cdot \epsilon_{mcr} + V_a \cdot \epsilon_{acr} \quad (3)$$

$$\epsilon_{cr} = \frac{E_m \cdot \epsilon_{mcr} \cdot V_m + E_a \cdot \epsilon_{acr} \cdot V_a}{E_m \cdot V_m + E_a \cdot V_a} \quad (4)$$

- ϵ_a : 最終クリープひずみ (μ)
- V_m : モルタルの容積率 (%)
- ϵ_{mcr} : モルタルのクリープひずみ (μ)
- E_m : モルタルの静弾性係数 (N/mm²)
- V_a : 粗骨材の容積率 (%)
- ϵ_{acr} : 粗骨材のクリープひずみ (μ)
- E_a : 粗骨材の静弾性係数 (N/mm²)

計算値と実験より得られた結果を比較して図-26, 27に示す。圧縮クリープひずみは両式の中央に、また引張クリープひずみは、ほぼ式(4)の近傍にプロットされた。この結果から、コンクリートの引張クリープが圧縮クリープに比べて小さいのは、粗骨材の引張クリープが小さいことによる拘束効果によるものであり、この影響を剛比で考慮することによりモデル化できることがわかった。

8. 結論

モルタルにおけるクリープの進行過程と回復過程の検討およびモルタルとコンクリートを用いた圧縮・引張クリープの違いの検討により、次の結論を得た。

- 1)モルタルの圧縮クリープにおける載荷応力強度比の影響は顕著で、応力強度比 35%以上では、クリープひずみと載荷応力の線形性は成立しない。
- 2)圧縮応力除荷後の永久ひずみは載荷応力強度比が大きくなるにつれて2次関数的に大きくなる。しかし、回復ひずみは、応力強度比に比例し、応力強度比が高いほど、永久ひずみが増大する。
- 3)若材齢コンクリートでは、低応力強度比でも永久ひずみの占める割合が大きい。ひずみの大きさについて見ると、クリープひずみと永久ひずみがほぼ見合う量であった。また、回復ひずみ量は、載荷時の弾性係数と除荷時の弾性係数の差によって生じる弾性ひずみの差程度であった。
- 4)圧縮クリープにより、総細孔量は減少するが、永久ひずみに占める割合は小さい。引張クリープにおける細孔構造の影響についても、細孔量は増加するが、圧縮クリープと同様永久ひずみに占める割合は小さい。
- 5)同一応力を載荷したモルタルにおいては、引張クリープひずみが圧縮クリープひずみよりやや大きい。また、クリープ係数では、両者はほぼ同等である。同一応力強度比では、クリープ係数で整理すると圧縮クリープの方が若干大きい。総合的に判断するとモルタルでのクリープ挙動は、圧縮・引張とも同じと考えられる。
- 6)コンクリートのクリープひずみはモルタル量と密接な関係があり、モルタル量が少ないほどクリープひずみは小さく、圧縮クリープと引張クリープの差が大きくなる。
- 7)若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープひずみにおいては、普通骨材を用いた場合には、20%以下の低応力強度比において圧縮クリープが引張クリープより大きい。しかし、その差は載荷材齢 5 日になると小さくなる。
- 8)岩石クリープ試験の結果、普通骨材の引張クリープ

が圧縮に比べて小さい結果を得た。コンクリートのクリープにおいて、粗骨材の拘束効果が卓越する若材齢かつ低応力強度比ではその影響が顕著となり、コンクリートのクリープは引張が圧縮より小さくなる。

- 9)コンクリートの引張クリープは、材料分離等の影響を受けやすいためにモルタル量が少ない領域ではクリープが増加する傾向がある。
- 10)コンクリートのクリープを表す材料モデルとして、モルタルと粗骨材に分割し、各々の拘束効果を剛比で考慮したモデルを用いてコンクリートの挙動を表すことができる。

- 3) Glanville. W. Hand Thomas. F. G.: Further investigations on the creep or flow of concrete under load, Building Research Technical Paper, No. 21, p. 44, 1939.
- 4) Illston, J. M.: The creep of concrete under uniaxial tension, Magazine of Concrete Research, Vol. 17, No.51, pp. 70-84, 1965.
- 5) 後藤忠広, 上原匠, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープ挙動, コンクリート工学年次論文報告集, VOL17, No. 1, 1133p, 1995
- 6) 平本昌生, 入矢桂史郎, Gupta Spratic, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープの載荷応力依存性, コンクリート工学年次論文報告集, VOL. 19, 1997.
- 7) 鈴木一孝: セメントペーストの水和と物性: コンクリート工学, VOL. 19, No. 11, Nov. 1981.
- 8) Glucklich. J. : Creep mechanism in cement mortar, Journal of American Concrete Institute, No. 59, pp. 923-48. 1962
- 9) 清水昭之: コンクリートの引張クリープ, コンクリート工学, VOL. 21, No. 6, June, 1983
- 10) 石川靖晃, 菊川浩治, 田辺忠顕: 遷移材齢時におけるコンクリートの時間依存挙動のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, VOL18. No. 1. 1996.
- 11) IRIYAK, HIRAMOTO.M, HATTORI.T, UMEHARA.H: CREEP BEHAVIOR FOR EARLY AGED CONCRETE, 1997 International Conference on Engineering Materials, 1997. 6. 8.
- 12) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版, pp117~122, 1975

謝辞: 本研究を行うにあたって、実験及び解析に参加してくれた名古屋市下水道局の平本昌生氏、実験を担当してくれた愛知県の長坂悟氏、名古屋工業大学大学院の根木崇文氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪田憲次, 綾野克彦: コンクリートの非線形クリープ予測式の提案, 土木学会論文集 No. 451/V-17, pp.179, 1992. 8.
- 2) 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, 1998. 8.

(1997. 8. 19 受付)

STUDY ON CHARACTERIZATION OF COMPRESSIVE AND TENSILE CREEP BEHAVIOR FOR EARLY AGED CONCRETE

Keishiro IRIYA, Tatsuya HATTORI and Hidetaka UMEHARA

An experimental study on compressive and tensile creep for concrete and mortar has been carried out for early aged concrete in order to define the difference of both creep mechanisms. Tensile creep strain was slightly bigger than compressive creep strain in the mortar, which had no coarse aggregate and tensile creep coefficient was equal to compressive creep coefficient. Change of pore size distribution supported the experimental results. However on both strain and coefficient, compressive creep was bigger than tensile creep in concrete which had the same mix proportion in part of mortar, and this tendency particularly observed in early age and low stress strength ratio below 20%. Since tensile creep of host rock of coarse aggregate was observed much smaller than compressive creep in creep test, it was concluded that the difference was influenced by creep behavior of coarse aggregates in early age and low stress strength ratio.