

論文 若材齢時の高強度モルタルにおける引張クリープおよび引張リラクセーションに関する実験

小島 一樹^{*1}・中村 成春^{*2}

要旨: コンクリート構造物の収縮ひび割れを制御することは社会的に重要である。現在、その収縮応力予測には、引張クリープ特性が適用されている。しかし、応力を考える観点からは、応力緩和となる引張リラクセーション特性を考えるのが合理的である。そこで、本研究は、収縮応力予測のさらなる合理化のため、若材齢における高強度モルタルについて、拘束応力を一定に作用させた引張クリープ試験および自由収縮歪量の変化を一定に制御した引張リラクセーション試験を実施し、両者の表裏一体性を検討した。その結果、載荷開始後、短時間で大きな応力緩和が現れ、本研究の範囲内では両者の間に表裏一体性は見なかった。

キーワード: 引張リラクセーション, 引張クリープ, 若材齢, 直接引張, 高強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の早期劣化につながるコンクリートのひび割れの制御方法は、様々な要因が絡むためにまだ不明な点が多いのが現状である。しかし、近年の高性能コンクリート利用や構造物の高性能化などにより、コンクリートのより合理的なひび割れ制御方法の確立が求められている。コンクリートの収縮ひび割れは、基本的には自己収縮と乾燥収縮により生じる収縮歪が原因で引き起こされる。すなわち、構造物として架構すると、その収縮歪を拘束しようとする働きが生じる。その働きにより収縮応力が生じ、それがひび割れ発生限界を超えた時、ひび割れが発生する。

クリープやリラクセーションは拘束が作用してから現れる性質で、拘束状態により様々な変化を性質である。よって、クリープあるいはリラクセーション特性は、拘束度合に強く影響され、収縮ひび割れの発生を支配することが知られている。

そのため、収縮応力の算定にはこれらの拘束の影響を考慮して、クリープを組み入れたヤング率を用いて拘束引張歪を算定することで収縮応力を評価している。ここで、拘束引張歪から収縮応力を求めるということは、引張リラクセーションと引張クリープとの関係が表裏一体関係を仮定しているが、その関係を実証したものは少ない¹⁾。収縮応力を求めるには、応力緩和するリラクセーション特性を直接考慮した方が合理的であるが、様々な変化を歪を制御しながら、応力緩和量を測定することは難しいため、リラクセーション実験を行っている研究はほとんど無い。

本研究は、引張リラクセーション実験に基づく緩和応力（以降、拘束緩和応力とする）を直接測定するとともに、同条件で引張クリープ実験を実施し、引張クリープ

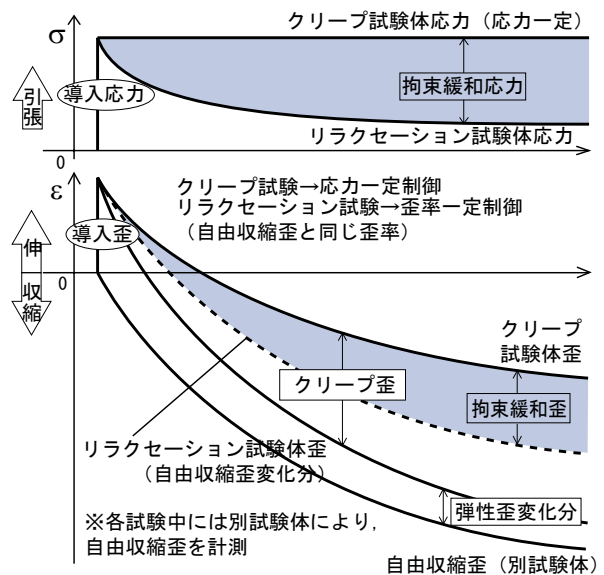


図-1 引張リラクセーション試験および引張クリープ試験時の応力および歪の関係

歪中の拘束緩和歪を測定し、両試験において生じる拘束時の歪、応力の関係を明らかにしたものである。

2. 引張リラクセーション試験と引張クリープ試験の関係

図-1 に引張リラクセーション試験および引張クリープ試験時の応力および歪の関係を示す。引張リラクセーション試験は、所定の歪を導入し、拘束応力歪作用に無関係な自由収縮歪を取り除いた制御をする試験である。別置きの試験体で測定した自由収縮歪の変化と同じ変化を与えることで、自由収縮歪の影響を無くし、純粋な拘束作用による拘束緩和応力を求める。

次に、引張クリープ試験は導入した拘束作用応力を一定のまま保持させる。引張リラクセーション試験と同様

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻地球環境デザイン学コース 准教授 博(工) (正会員)

表-1 実験条件

| (a) 使用材料の品質 | | | | | |
|---------------|-----------|--|--------------|--------------|--------------|
| 材料 | 記号 | 特性・成分 | | | |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント, 3.16g/cm ³ | | | |
| シリカフェーム | SF | 2.2g/cm ³ | | | |
| 細骨材 | S | 鬼怒川産川砂, 表乾密度2.58g/cm ³ , f.m.=2.6 | | | |
| 化学混和剤 | SP | ポリカルボン酸系高性能減水剤, 1.1g/cm ³ | | | |
| (b) 調合条件 | | | | | |
| 調合種類 | W/C (W/B) | SF 置換率 wt%*C | S 混入率 vol%*m | SP 置換率 wt%*C | 設計空気量 vol%*m |
| mortar | 0.2(0.18) | 10 | 40 | 3 | 1 |
| (c) 実験条件 | | | | | |
| 試験名 | 導入応力強度比 % | | 載荷開始材齢 日 | | |
| リラクセーション90%-1 | 90 | | 1 | | |
| リラクセーション50%-1 | 50 | | 6 | | |
| リラクセーション50%-6 | 90 | | 1 | | |
| クリープ90%-1 | 50 | | 6 | | |
| クリープ50%-1 | 90 | | 1 | | |
| クリープ50%-6 | 50 | | 6 | | |

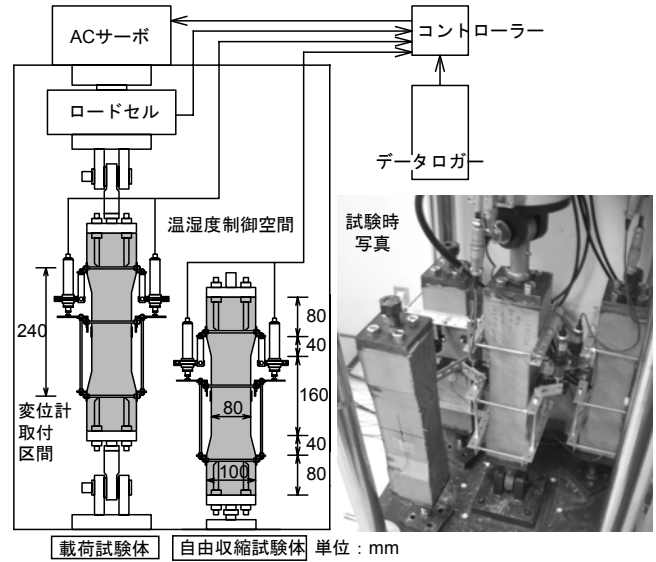


図-2 実験システム概要および実験フロー

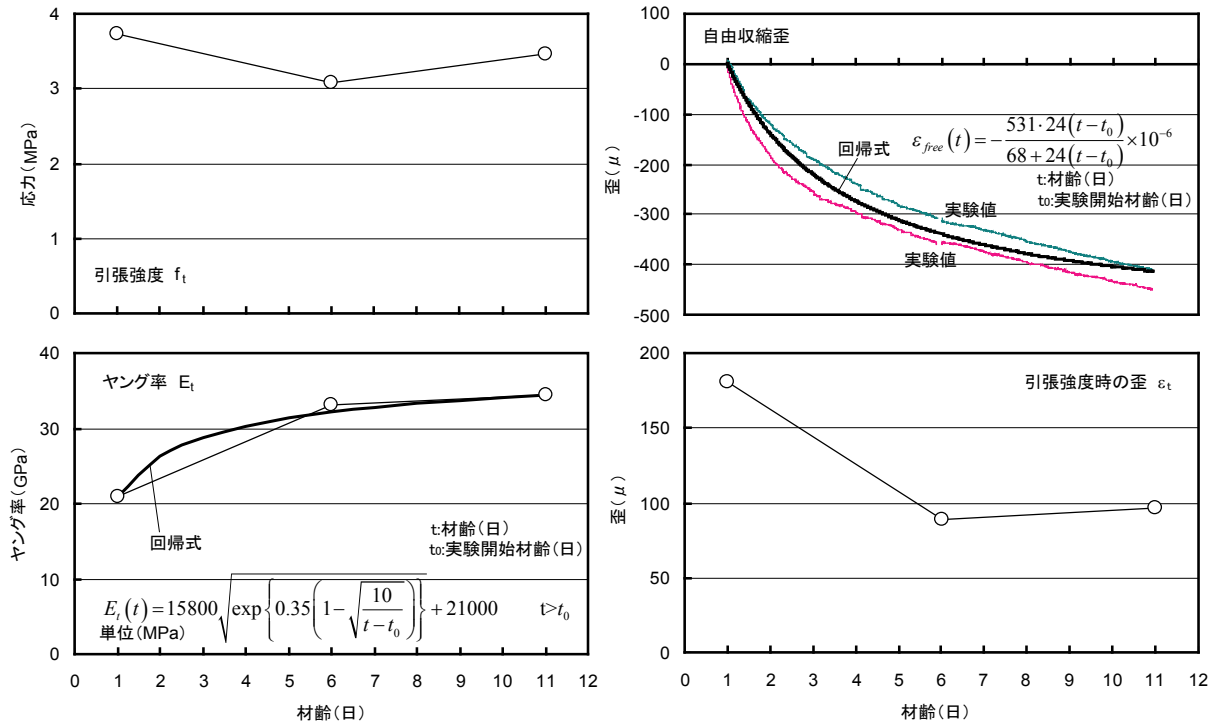


図-3 引張力学特性および自由収縮試験結果

に、同時に別置き試験体で自由収縮歪を測定し、クリープ試験時の計測歪からその自由収縮歪の変化分を引いたものが拘束緩和歪となる。なお、若材齢ということ踏まえると、ヤング率発現に伴う弾性歪の影響を考慮の必要があり、拘束緩和歪から弾性歪を減じたものが、クリープ歪となる。

本研究では、引張リラクセーションおよび引張クリープ時の両者の関係を明らかにするため、同一条件で比較の方が望ましく、ここでは、図-1に示すように弾性歪を考慮しない拘束緩和応力、拘束緩和歪で比較・検討を行った。

3. 実験概要

表-1に使用材料の品質調合条件、および実験条件を示す。実験は、粗骨材の影響を除いた W/C=20%の高強度モルタルを使用した。

図-2に実験システム概要および実験フローを示す。実験は図-2に示す多機能型拘束変形試験機によって行った。この実験で用いている試験機は筆者ら²⁾が独自に開発したもので、既存の収縮ひび割れ試験機を参考に、ACサーボを介したボールスクリュージャッキ載荷の拘束変形試験機である。これは、モニタ試験体により、自由収縮を計測し、その自由収縮量に応じた変形量を、コ

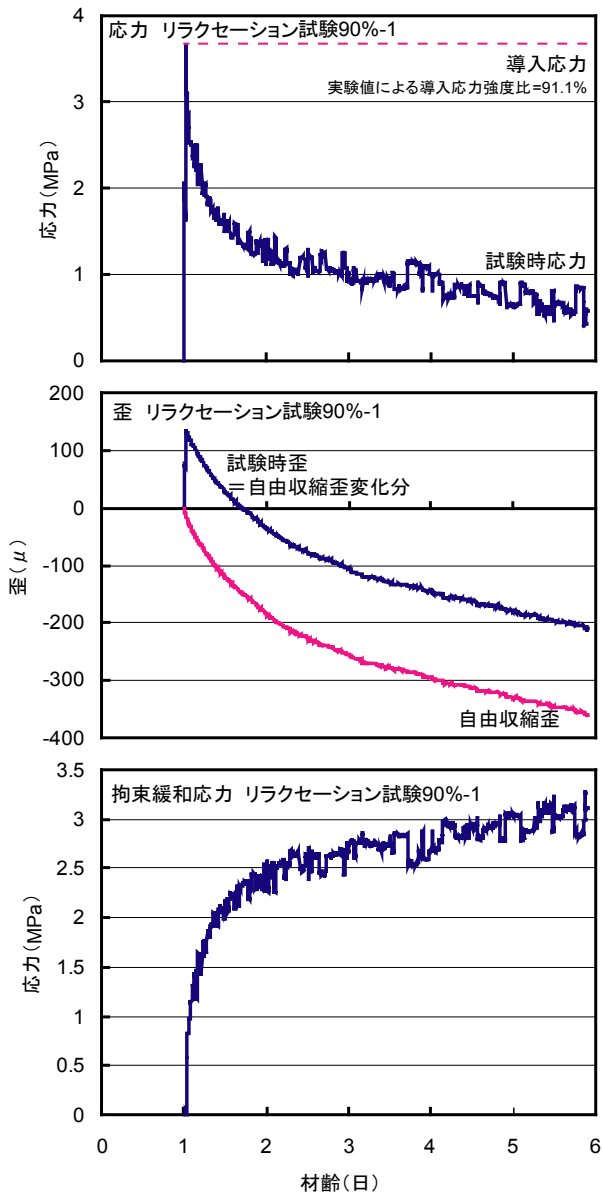


図-4 リラクゼーション試験 90%-1 結果

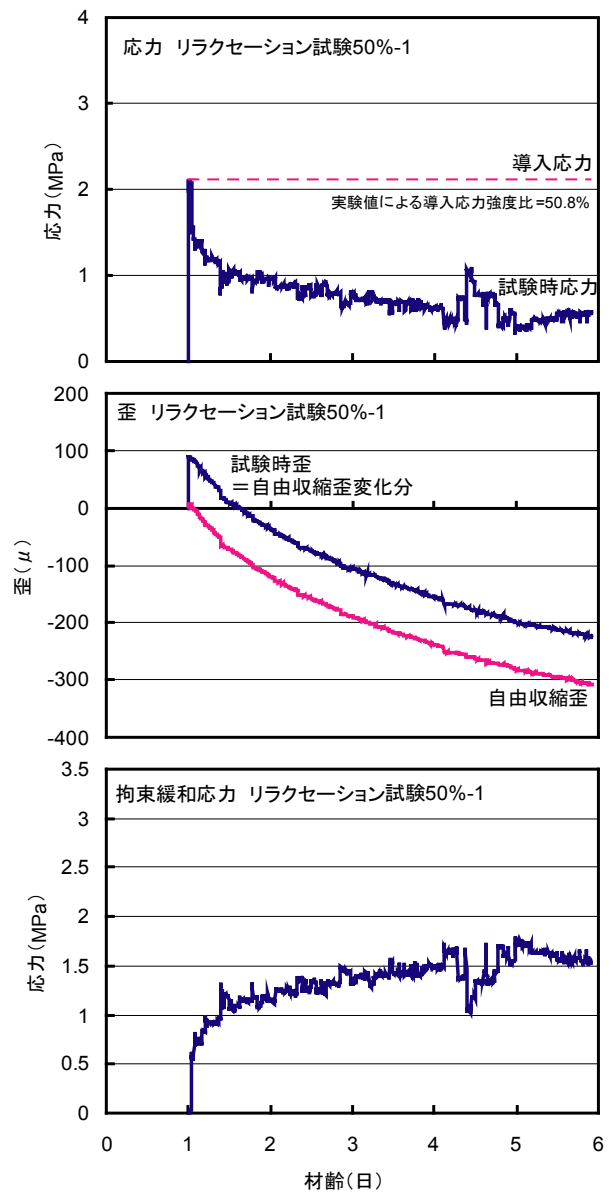


図-5 リラクゼーション試験 50%-1 結果

ントローラーに入力し、AC サーボ制御によって、拘束試験体の様々な拘束に対応する伸長変形量を与え、その時の作用応力をロードセルで直接計測する方法を採用している。また、試験機には、温湿度制御装置を導入し、本実験では、試験条件を温度については約 $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度については約 $40\% \pm 5\%$ で推移させた。

実験はドッグボーン型試験体を用い、打設直後から打設面をラップした状態で $20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$ の恒温恒湿室内に材齢約 1 日になるまで保管し、その後脱型した。脱型後は、載荷開始材齢まで、図-2 に示すように試験機庫内にて試験条件と同様の条件で養生した。

引張リラクゼーション試験および引張クリープ試験は、材齢 1 日～6 日までと、材齢 6 日～11 日までの 2 つの載荷期間で行った。また、同時に無拘束の自由収縮変形試験を行い、自由収縮歪 $\varepsilon_{\text{free}}$ を計測している。

試験開始時の導入応力強度比は、材齢 1 日と 6 日の各試験開始直前に、別試験体により、直接引張強度 f_t 、引張ヤング率 E_t 、引張強度時歪 ε_n を計測して、その結果から、応力強度比が 90% または 50% になるように導入した。なお、引張ヤング率 E_t は、引張歪が 10μ 程度から、直接引張強度 f_t の 1/3 時点までの範囲における引張応力-引張歪の計測データを直線回帰した傾きから評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 無拘束下の直接引張強度、引張ヤング率、引張強度時歪および自由収縮歪の経時変化

図-3 に無拘束下の引張力学特性および自由収縮試験結果を示す。引張強度 f_t は材齢 1 日に比べ、6 日で下がり、11 日でまた上がっているが、これは乾燥による内部拘束が材齢が進むにつれて強くなっていくと同時に、材

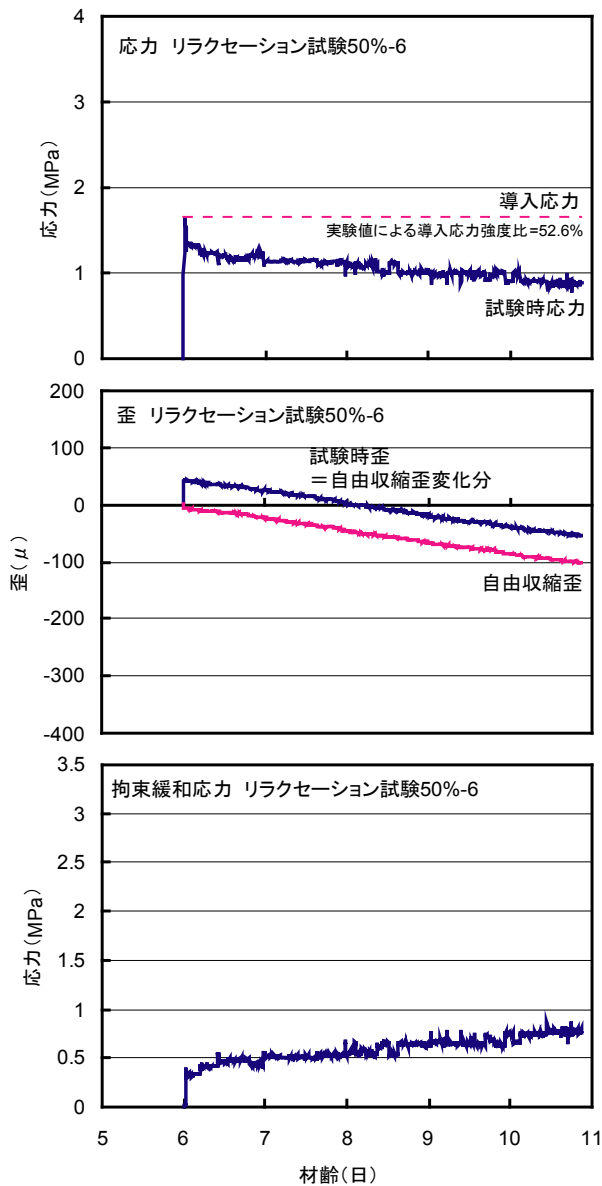


図-6 リラクゼーション試験 50%-6 結果

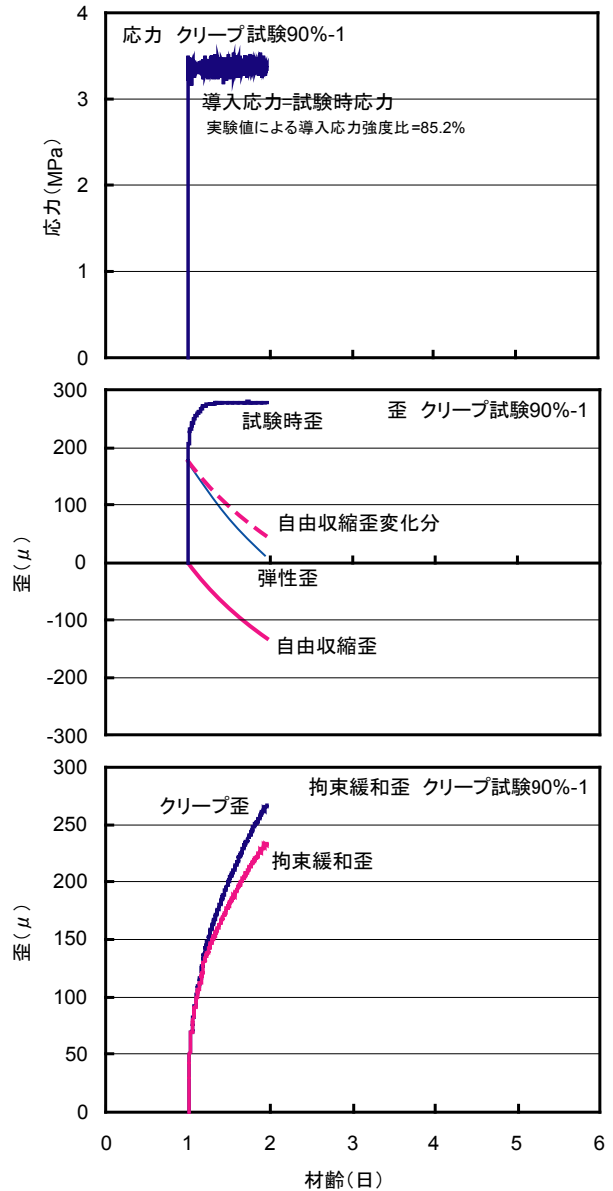


図-7 クリープ試験 90%-1 結果

齢が進むことにより強度発現も起こるといふ複雑な現象からこのような結果になったと考えられる。

引張強度時の歪 ϵ_{ft} は、材齢1日では、他の材齢に比べて大きくなる。6日以降になると、硬化も進んでいるため、 ϵ_{ft} の大きさに大きな違いは見られない。

引張ヤング率は材齢が進むほど上昇している。ここで、引張ヤング率 E_t は引張クリープ歪の算出に適用するため、回帰分析を行った。回帰関数は、実験開始材齢 $t_0=1$ 日における値と測定材齢の最終における値を必ず通るようにモデル化し、式(1)を適用した。

$$E_t(t) = 15800 \sqrt{\exp\left\{0.35 \left(1 - \sqrt{\frac{10}{t-t_0}}\right)\right\}} + 21000 \quad t > t_0 \quad (1)$$

ここで、 t は材齢 (日) を表す。また、式(1)は単位が MPa の評価になるが、図-3 では GPa に換算して示した。

自由収縮歪 ϵ_{free} は、脱型直後の材齢1日から計測した。

実験は複数回行ったが、大きなばらつきはなかった。また、引張ヤング率と同じように、引張クリープ歪の算出に適用するため、回帰分析を行った。 t を材齢 (日)、 t_0 を実験開始材齢 (日) として、分析結果を式(2)に示す。

$$\epsilon_{free}(t) = -\frac{531 \cdot 24(t-t_0)}{68 + 24(t-t_0)} \times 10^{-6} : \text{収縮が負, } t > t_0 \quad (2)$$

4.2 若材齢における引張リラクゼーション結果

引張リラクゼーション試験における引張応力と引張歪の経時変化および拘束緩和応力量について、リラクゼーション試験 90%-1 を図-4 に、リラクゼーション試験 50%-1 を図-5 に、リラクゼーション試験 50%-6 を図-6 にそれぞれ示す。試験体の歪変化を自由収縮歪の変化分と同様に変化させることで、導入した応力の緩和量を計測することができた。

90%-1 と 50%-1 は、試験開始直後に急激に緩和し、材

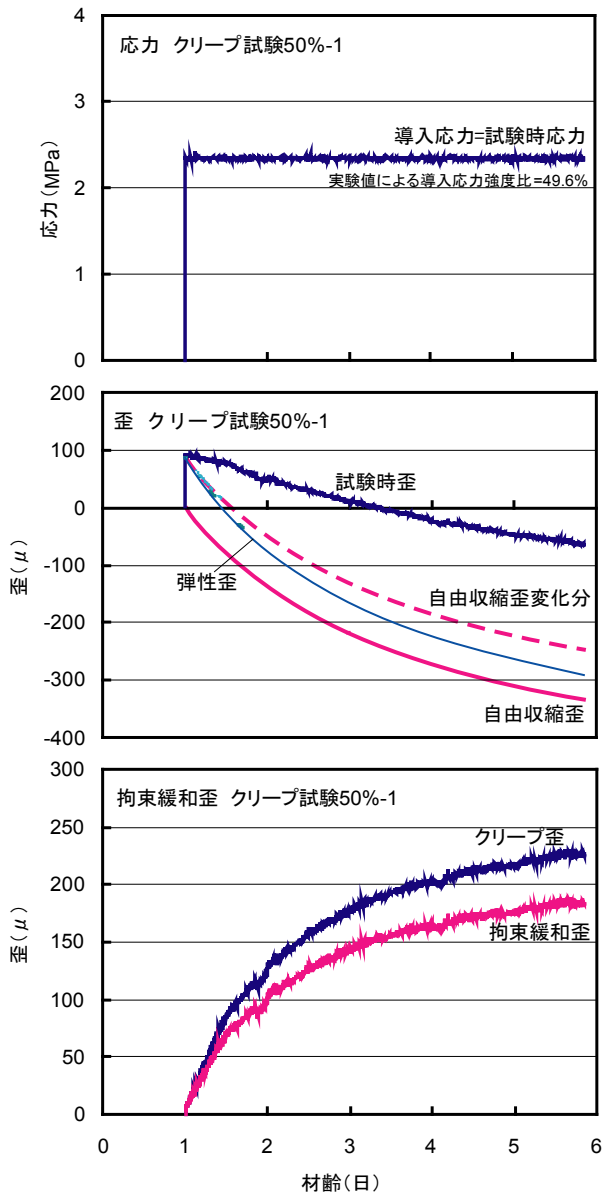


図-8 クリープ試験 50%-1 結果

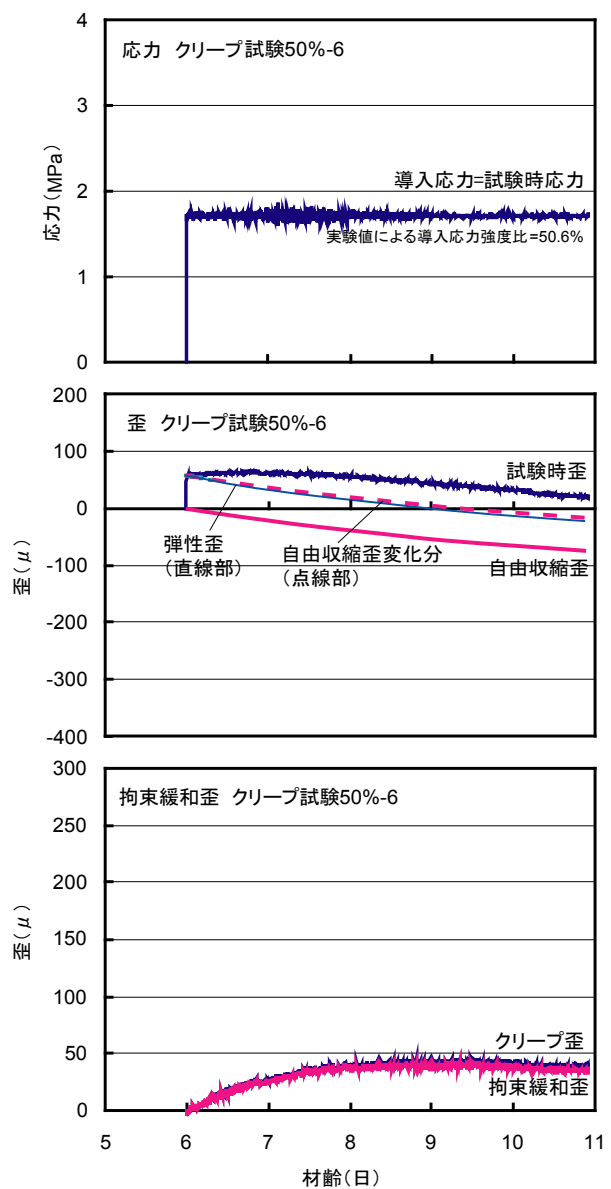


図-9 クリープ試験 50%-6 結果

齢 2 日目以降からは緩やかに低下している。50%-6 では緩和量は少ないが、応力緩和が極初期に大きく低下した後は、緩やかに低下している。この加力後数時間で応力が低下する現象は、瞬間的に引張弾性歪変形を導入した時に、内部組織の一部に、加力後短時間で局所的に微細ひび割れが発生し、応力低下が起きたと推察される。この場合、微細ひび割れ発生領域以外の非局所部の弾性変形が徐荷されたため、トータルの変形量は、導入変形量と同じまま、実験的制御はできていると考えられる。

4.3 若材齢における引張クリープ結果

引張クリープ試験における引張応力と引張歪の経時変化、拘束緩和歪量及びクリープ歪量について、クリープ試験 90%-1 を図-7 に、クリープ試験 50%-1 を図-8 に、クリープ試験 50%-6 を図-9 にそれぞれ示す。ここでクリープ試験 90%-1 については、文献³⁾の結果を参照した

ため、材齢 2 日で試験を終了している。

クリープ変形とは、現れた変形から応力を一定にした時の作用拘束応力に対して、弾性歪を取り除いた変形である。このため、若材齢時のクリープ評価では、引張クリープ試験時に現れた試験時の歪から、引張応力導入時の瞬間弾性歪と載荷応力に無関係の自由収縮歪を取り除くこと以外に、若材齢時の引張ヤング率発現に伴い変化する引張弾性歪の影響を考慮し、引張弾性歪発現の変化分を取り除く必要がある。引張弾性歪の経時変化は、式(1)を利用し、弾性歪変化分として評価した。また、自由収縮歪量は、式(2)で示した回帰式で評価した。

90%-1 は、50%のものとは違い、導入応力引張強度比が高く、応力導入以降、しばらく歪量が上昇する傾向が見られた。このため、拘束緩和歪およびクリープ歪量も極初期から大きくなった。90%-1 や 50%-1 など材齢初期に

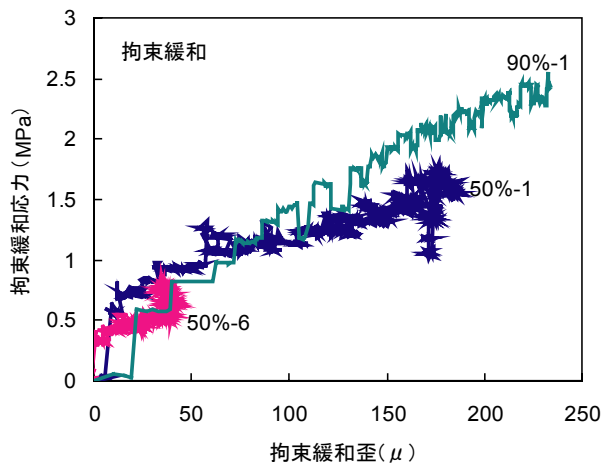


図-10 拘束緩和特性

拘束載荷試験したものは、ヤング率発現に伴う弾性歪の減少が大きく働き、拘束緩和歪とクリープ歪の差が大きくなるが、50%-6では、弾性歪の減少量が少なく、拘束緩和歪とクリープ歪の差はほとんど無くなった。

4.4 若材齢における引張クリープ試験と引張リラクセーション試験における拘束緩和特性の評価

図-10に同一実験条件の拘束緩和応力と拘束緩和歪の関係を比較した結果を示す。導入応力強度比が50%条件では、載荷開始材齢に関係なく、拘束緩和歪よりも拘束緩和応力の方が先に大きく発生し、その後、拘束緩和応力の増加とともに拘束緩和歪も増加していく傾向が見られる。導入応力強度比が90%条件の場合、拘束緩和歪は拘束緩和応力が低レベルから現れはじめ、拘束緩和歪に対して拘束緩和応力の変化が大きくなっている。

引張クリープ歪は、拘束引張作用によって、内部組織に微細ひび割れが発生累積した損傷状況を、見かけ歪として評価していると考えられる。導入応力強度比が50%条件では、拘束緩和応力の作用が、緩和歪の作用より早く現れるため、拘束載荷時に、収縮ひび割れしにくい状況を意味している。

その後、引張クリープ歪の主成分といえる拘束緩和歪が増えると、応力緩和することで、拘束をゆるめてひび割れ発生の危険性を低減しているとともに、内部組織の損傷を増やしている状況にあると言える。

導入応力強度比が90%条件では、内部組織の損傷がより高まり、ひび割れ発生の危険性を増している状況にあるといえる。

ここで、クリープとリラクセーションが表裏一体の場合、図-10において、原点を通る正比例の関係にあるが、

今回の結果では正比例関係は見られなかった。よって、本研究の範囲では引張リラクセーションと引張クリープは、表裏一体の関係とはいえず、今後さらに検証が必要である。

5. まとめ

本研究は、より合理的な収縮ひび割れ抑制技術の開発を目指して、若材齢時の高強度モルタルを対象に、引張リラクセーションおよび引張クリープ特性を実験検討した。その結果、以下のことが示された。

- (1) 引張リラクセーションは、載荷開始後の数時間で、かなり大きな応力緩和作用が現れる。
- (2) 引張クリープは、載荷開始材齢1日において、導入応力強度比が50%条件では、最終的にかなり大きな値となるが、拘束開始から徐々にクリープが作用していく。
- (3) 引張リラクセーションと引張クリープを比較すると、導入応力強度比50%条件では、拘束開始初期での応力緩和が顕著で、拘束を緩めて収縮ひび割れ発生の危険性が小さくなるが、徐々にクリープの影響が現れて、収縮ひび割れ発生の危険性も高まってくる。そして、導入応力強度比が90%条件では、クリープの影響が、すぐに現れ、ひび割れ発生の危険性を増している状況にある。
- (4) 本研究の範囲では、引張リラクセーションと引張クリープの間には正比例関係は見られなかった。

謝辞

本研究の実験実施にて、宇都宮大学大学院の井坂幸俊氏に協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森本博昭, 平田正成, 小柳洽: 若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価方法に関する研究, 土木学会論文集, V-9, pp.59-68, 1988.8
- 2) 中村成春, 有馬文昭, 高瀬憲克, 榎田佳寛, 小西敏正: セメント系複合材料に対する多機能型拘束試験機の開発, 日本建築学会大会学術梗概集(北海道), Vol.A-1, pp.291-292, 2004.8
- 3) Shayda ALSHARIF, 中村成春, 榎田佳寛, 小西敏正, 中野麻子: PVA 繊維を使用したハイブリッド・ファイバー・コンクリートの拘束収縮ひび割れ特性—その1 繊維補強効果と拘束変形特性—, 日本建築学会大会学術梗概集(近畿), Vol.A-1, pp.61.-62, 2005.9