

論文 若材齢時の繊維補強高強度モルタルにおける引張りラクセーションおよび引張クリープに関する実験

井坂 幸俊*1・中村 成春*2

要旨：本研究は、若材齢時の高強度繊維補強モルタルにおいて、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りラクセーション試験を実施し、両者の関係を実験的に検討した。結果、1)引張りラクセーション試験時の拘束緩和応力の経時変化は、ある拘束期間を過ぎると変化しにくくなる傾向にあること、2)引張りラクセーション試験時の拘束緩和応力と引張クリープ試験時の拘束緩和歪の関係について、応力強度比が大きくなるほど、緩和応力が大きくなる傾向にあること、3)拘束緩和応力と拘束緩和歪の関係は、正比例の関係になく、指数関数的な関係であること、などを明らかにした。

キーワード：引張りラクセーション、引張クリープ、若材齢、繊維補強

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れは、一般に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。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、それが力学的なひび割れ発生限界を超えた時、ひび割れが発生する。ここで、拘束時のクリープ特性あるいはラクセーション特性は、収縮ひび割れの発生に大きな影響を及ぼす。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有効ヤング係数などを用いて拘束引張歪を算定することで、応力緩和した収縮応力を評価している。この、拘束引張歪から収縮応力を求めるということは、引張クリープと引張りラクセーションとの関係を表裏一体関係と仮定しているが、その関係を実証した研究はほとんどない。

コンクリートのラクセーション特性は 1950 年代にいくつか実測されてきたが、いずれも圧縮形式がほとんどである。一方、野中¹⁾²⁾や西林ら³⁾⁴⁾が引張形式の引張りラクセーション特性を報告しているが、拘束制御の方法に問題が見られる。また、ラクセーション特性はクリープ特性と表裏一体とされているが、その考察・検討は十分に行われていない。

小島・中村⁵⁾は、若材齢の高強度モルタルを対象に引張りラクセーション特性と引張クリープ特性の関係を実験検討した。この実験の類例は、世界的に探してもほとんど無いのが現状である。

本研究は、小島・中村⁵⁾の研究に続いて、若材齢時の繊維補強高強度モルタルを対象に、引張りラクセーション特性と引張クリープ特性の関係を実験検討することを目的とする。特に、大きなラクセーションを発生させるため、クリープは高応力強度比を対象とした。

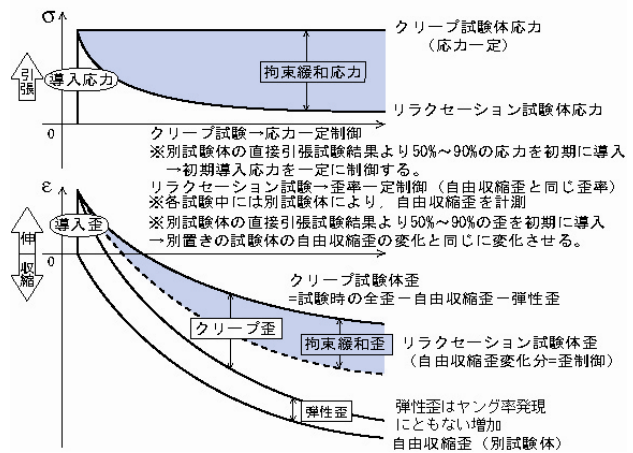


図-1 引張りラクセーション試験および引張クリープ試験時の応力および歪の関係

2. 引張りラクセーション試験と引張クリープ試験の関係

図-1 に引張り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。引張りラクセーション試験は、所定の歪を導入し、自由収縮歪を取り除いた制御をする拘束試験である。別置き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。引張りラクセーション試験と同様に、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とその自由収縮歪の変化分が拘束緩和歪となる。なお、若材齢ということ踏まえると、ヤング係数発現に伴う弾性歪の低減を考える必要があり、経時変化する弾性歪を減じたものを、クリープ歪の評価に適用した。

*1 太平洋セメント(株) (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	
セメントC	普通ポルトランドセメント, 3.16g/cm ³
シリカフュームSF	2.2g/cm ³
細骨材S	鬼怒川産川砂, 表乾密度2.59g/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) PVA繊維の品質	
PVA繊維種類	長さ 直径 密度 引張強度 繊維ヤング率 繊維特性表面積 繊維実積率
fa	3 0.2 1.3 0.91 29.4 20.67 33.05
fb	30 0.4 1.3 0.9 29 10.07 9.20
c) 調合条件	
調合種類	W/C (W/B) SF置換率 wt%*C S混入率 vol%*mol SP置換率 wt%*C 設計空気量 vol%*mol 繊維混入率 fa vol% *hfcf fb vol% *hfcf
hfcf	0.2(0.18) 10 40 3 1 3 1.5
d) 実験条件	
試験名	導入応力強度比 % 記号
①リラクゼーション75%-1-5	75 x75-1-5
②リラクゼーション75%-6-11	75 x75-6-11
③リラクゼーション60%-1-6	60 x60-1-6
④クリープ60%-1-6	60 c60-1-6
①クリープ75%-1-6	75 c75-1-6
②クリープ75%-6-11	75 c75-6-11

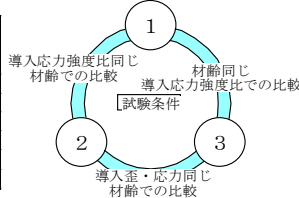


表-2 直接引張および引張拘束時の力学パラメータ結果

1) 無拘束実験結果

試験名	引張強度 ft MPa	引張ヤング係数 Et GPa	引張強度歪 ε ft μ	材齢 日
x60-d1	3.72	19.9	193.4	1
c75-d1	3.46	20.0	190.5	
x75-d1	3.50	18.9	169.0	
c75-d1	3.62	18.4	178.8	
平均	3.57	19.3	182.9	
x75-d5	2.67	28	109.8	5
x60-d6	2.72	29	97.8	6
c75-d6	2.47	26.2	92.9	
c60-d6	2.80	22.4	107.7	
平均	2.67	26.4	102.1	
c75-11d	3.04	28.3	108.9	11
x75-11d	2.86	25.4	106.4	
x75-d11	3.02	32.3	92.5	
平均	2.97	28.7	102.6	

1) 拘束後直接引張結果

試験名	引張強度 ft MPa	引張剛性 GPa	引張強度歪 - 拘束後歪 μ	材齢 日
x60-1-6d	2.47	27.9	48.1	6
x75-1-5d	2.58	22.7	48.1	
x75-6-11d	2.83	28.6	35.2	11

本研究では、引張リラクゼーションおよび引張クリープ時の拘束特性の関係を明らかにするため、同一条件で比較した方が望ましく、ここでは、図-1に示すように、拘束緩和応力および拘束緩和歪で比較・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% (W/B=18%)の繊維補強高強度モルタル(モルタルタイプのハイブリット・ファイバー・コンクリート hfcf)を使用した。

実験は、多機能型拘束変形試験機によって行った。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°C±1°C、湿度については約 40%±5%で推移させた。

実験は、100×100×400 mm(試験区間 80×100×240 mm)の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恒温恒室室内に材齢約 1 日になるまで保管後、ただちに脱型し各試験に供した。

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 条件の载荷期間で行った。また同時に、別置きは無拘束の自由収縮変形試験を行い、自由収縮歪を計測した。

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 ft、引張ヤング係数 Et、引張強度時歪ε_{ft}を計測して、その結果から、応力強度比が 75%または 60%になるように導入した。これにより、材齢の違いによる比較、応力強度比の違いによる比較などができるように計画した。なお、引張ヤング係数 Et は、引張歪が 10μ程度から、直接引張強度 ft 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。

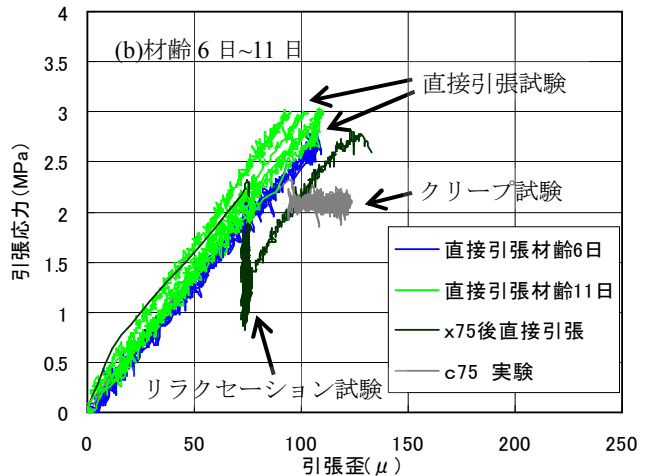
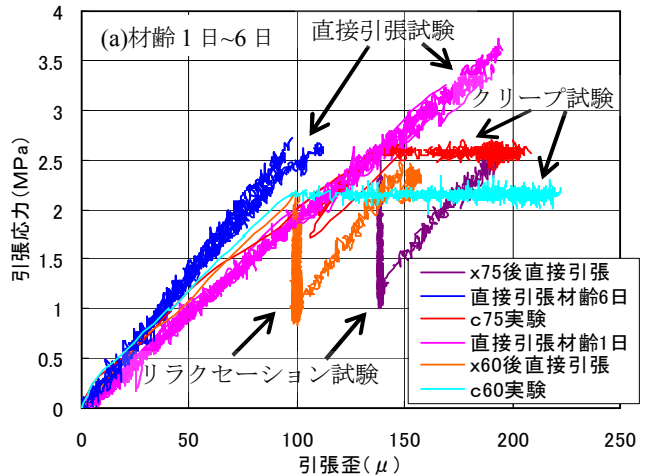


図-2 直接引張および引張拘束時の応力-歪関係

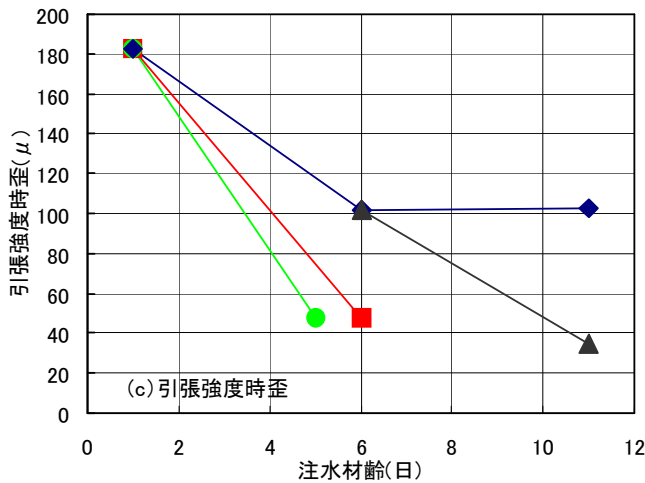
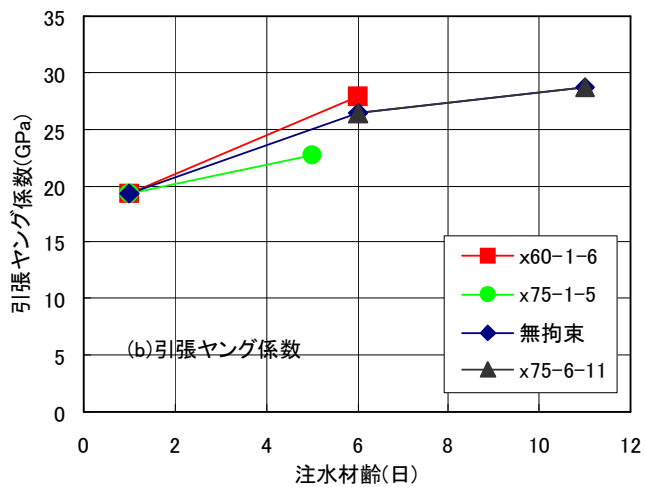
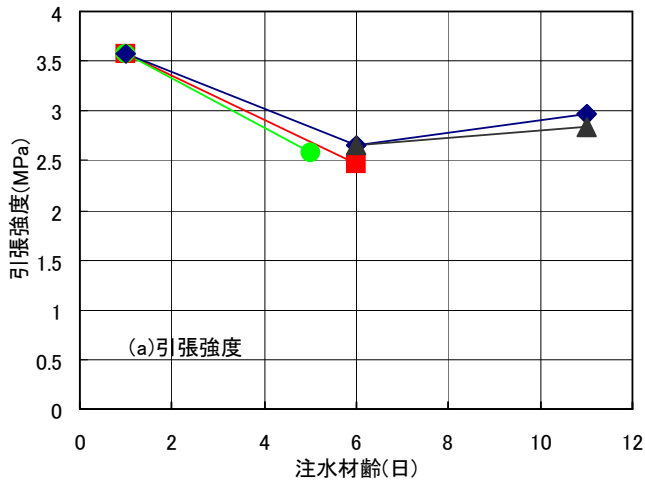


図-3 直接引張および引張拘束時の力学パラメータの経時変化

また、引張リラクゼーション試験後、そのまま直接引張試験を行い、引張ヤング係数の算出と同じ方法により、拘束後の影響を加味した引張剛性を評価した。さらに、拘束後の影響を加味した引張強度時歪を評価した。

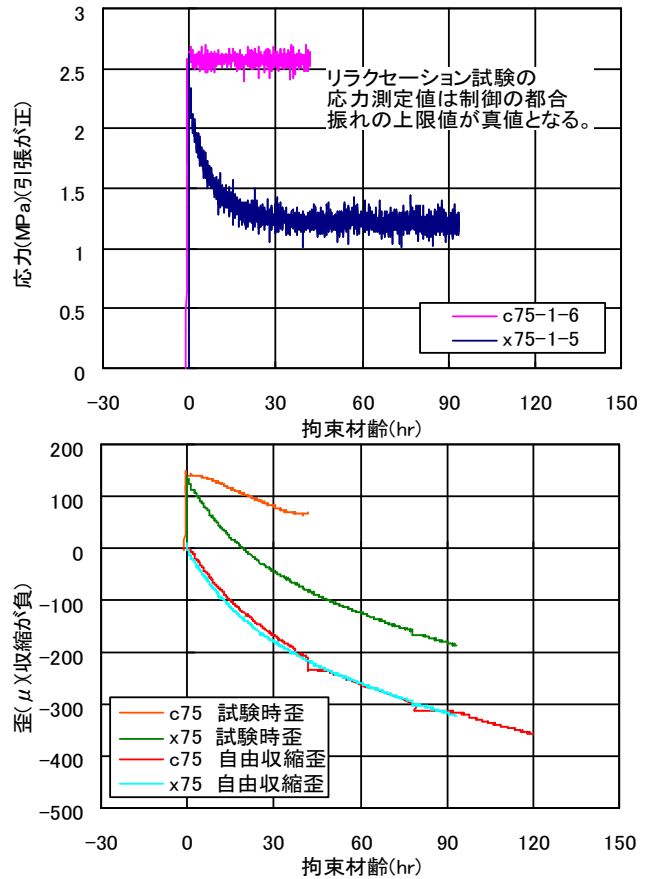


図-4 応力強度比 75%1-6 日試験結果

4. 実験結果および考察

4.1 直接引張および引張拘束時の力学パラメータ結果

表-2 に直接引張試験の力学パラメータの結果を、図-2 にすべての試験時の応力-歪関係を、図-3 に力学パラメータの平均値による経時変化をそれぞれ示す。

また、図-2 において、歪導入から、引張リラクゼーション試験(引張クリープ試験)、引張リラクゼーション試験後の直接引張試験までを 1 本の応力-歪関係として示した。

引張クリープ試験および引張リラクゼーション試験の引張拘束時の応力-歪関係は、導入時の引張剛性(引張ヤング係数)が、無拘束の同一材齢の結果とほぼ同じであった。また、クリープ試験は応力が一定で、リラクゼーション試験は自由収縮歪を除いた引張歪が一定で制御されている様子が分かる。

無拘束の直接引張試験では、材齢 1 日から材齢 6 日にかけて、引張強度 f_t が低下している。一方、材齢 11 日の引張強度 f_t は、材齢 6 日より少し増加している。これは、湿度 40%RH の低湿度で実験を行ったため、乾燥に伴う内部拘束の影響により材齢 6 日で強度が低下したが、乾燥の影響が落ち着いた材齢 6 日以降では、水和反応の増進により強度が増加したためと考えられる。また、引張ヤング係数は、条件に関係なく、材齢の経過とともに大

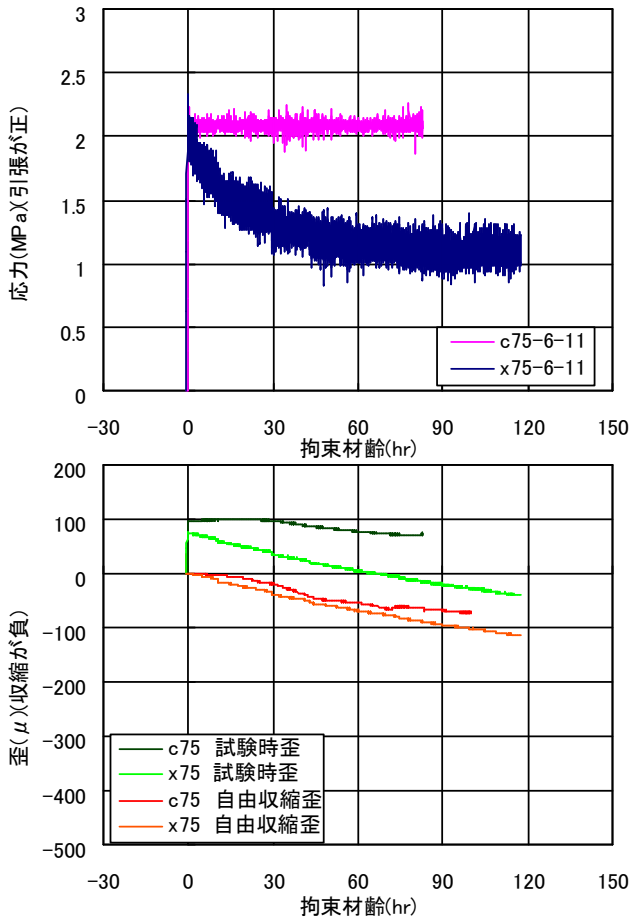


図-5 応力強度比 75% 6-11 日試験結果

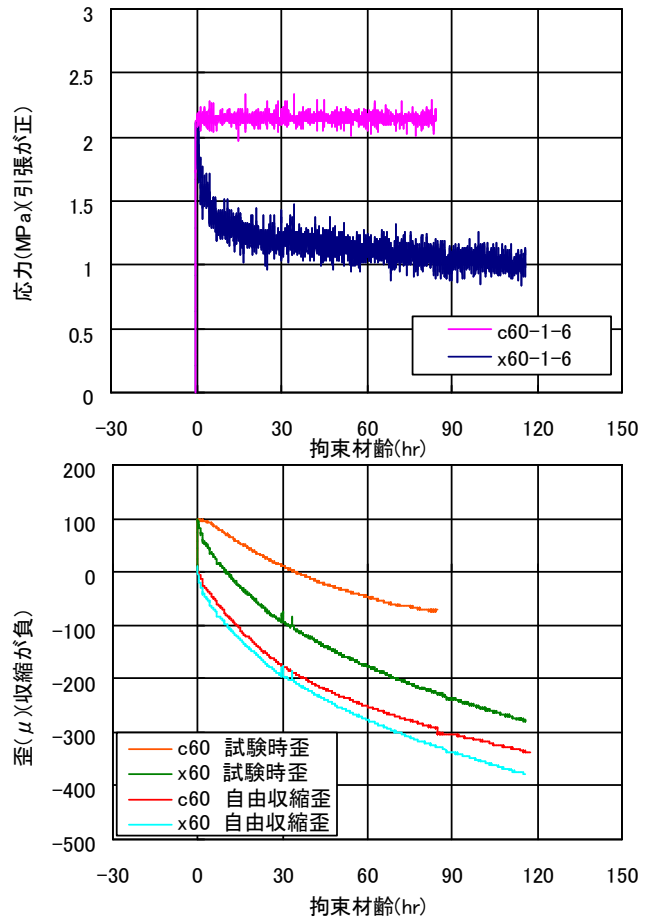


図-6 応力強度比 60% 1-6 日試験結果

きくなっている。なお、拘束が強い応力強度比 75%条件では、引張強度および引張ヤング係数(引張剛性)は、無拘束条件よりも、低下している傾向がみられた。

4.2 引張リラクセーションと引張クリープの試験結果

図-4~6に引張リラクセーションと引張クリープの試験結果を示す。図-4が導入応力強度比 75%の材齢 1~6 日試験結果で、図-5が導入応力強度比 75%の材齢 6~11 日試験結果で、図-6が導入応力強度比 60%の材齢 1~6 日試験結果である。引張リラクセーション試験では、拘束した試験体を自由収縮歪変化分と同様に制御することで、導入した応力の緩和が計測できた。なお、本図の引張リラクセーション試験の応力結果は、振れ幅の上限が拘束制御の真値となる。

引張クリープ試験では、無拘束の直接引張試験で得られた引張ヤング係数の経時変化の結果を参照して、導入応力強度比に対応する引張弾性歪を算出し、引張クリープ歪の評価に適用した。なお、今回の引張クリープ試験では、全ての条件で、拘束载荷中に破壊したため、所定の载荷期間前に試験が終了している。

破壊時間は、c75-1-6 が拘束材齢 42 時間、c75-6-11 が拘束材齢 83 時間、c60-1-6 が拘束材齢 85 時間であった。

材齢 1~6 日において、応力強度比 75%導入は 60%導入に比べ、導入応力が大きく、それに応じて歪が大きく現れ、その過大な歪が持続することで、結果的に短時間で壊れたと考えられる。

4.3 拘束緩和歪および拘束緩和応力の結果

図-7~9に引張クリープ試験から得られた引張クリープ歪および拘束緩和歪結果と、引張リラクセーション試験より求められた拘束緩和応力結果を示す。図-7が導入応力強度比 75%の材齢 1~5 日試験結果で、図-8が導入応力強度比 75%の材齢 6~11 日試験結果で、図-9が導入応力強度比 60%の材齢 1~6 日試験結果である。なお、本図の拘束緩和応力の結果では、振れ幅の下限が拘束制御の真値となる。

引張クリープ歪および拘束緩和歪は、いずれの条件でも両方の差がほとんどない。次に、材齢 1~6 日と材齢 6~11 日の歪では、同じ導入応力強度比 75%でも、2 倍近い歪差が生じている。すなわち、若材齢で、拘束緩和する歪の成長が著しい状況といえる。また、導入応力強度比 75%と 60%の歪では、同じ材齢でも導入応力強度比が高い方が早くに大きなクリープ歪および拘束緩和歪を生じている。

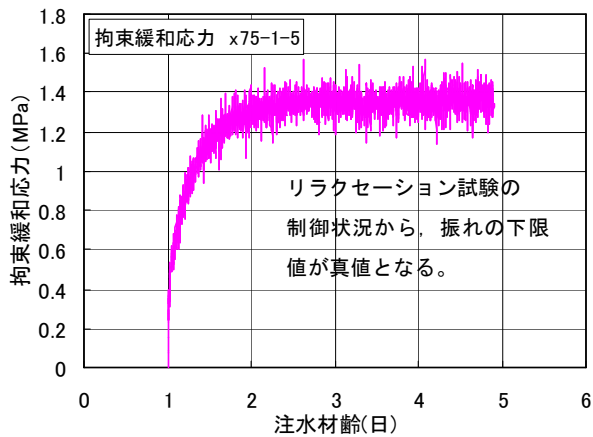
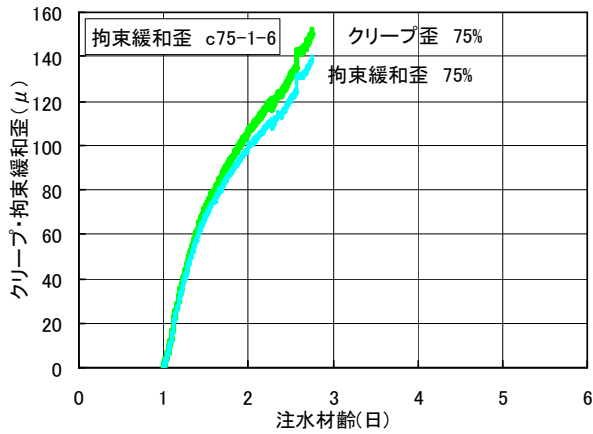


図-7 応力強度比 75% 1-6 時拘束緩和歪・応力結果

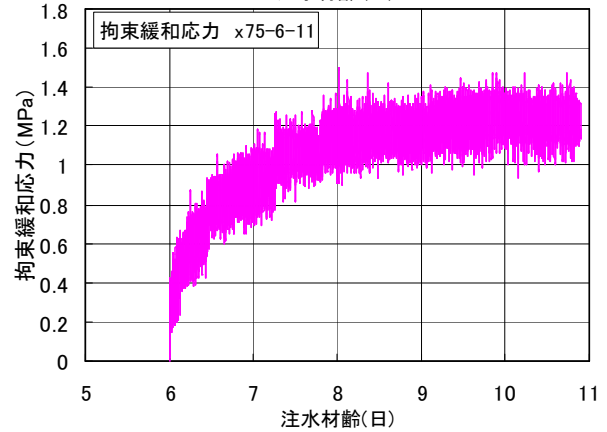
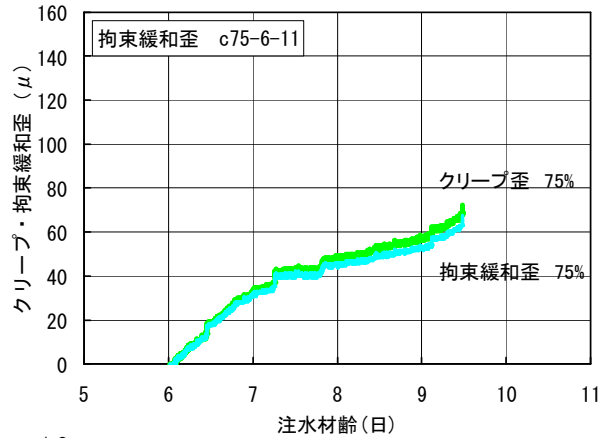


図-8 応力強度比 75% 6-11 時拘束緩和歪・応力結果

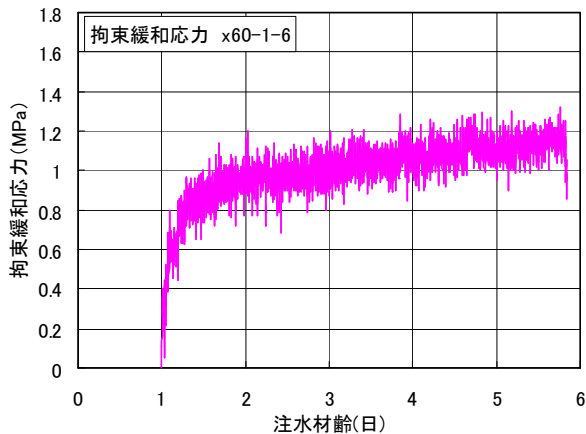
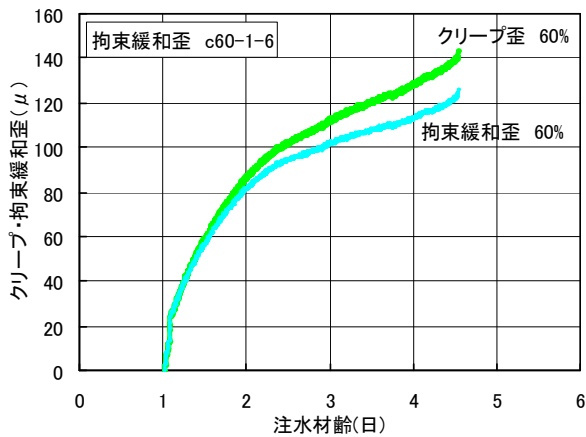


図-9 応力強度比 60% 1-6 時拘束緩和歪・応力結果

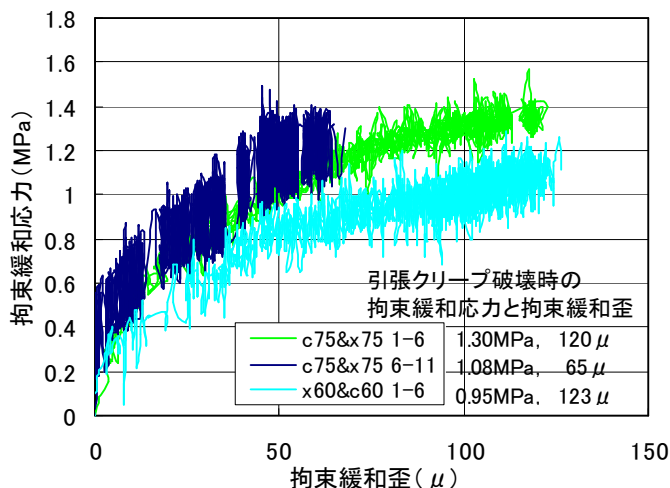
注水材齢 1~6 日の拘束緩和応力は、若材齢で拘束緩和歪の著しい成長に応じて短時間で著しく応力が変化している。しかし、拘束材齢 24 時間程度で応力緩和の変化が小さくなる傾向にある。注水材齢 6~11 日の拘束緩和応力は、拘束材齢初期から徐々に応力変化していくが、拘束材齢 4 日間程度で変化が小さくなる傾向にある。すなわち、拘束緩和応力の経時変化は、ある拘束期間を過ぎると変化しにくくなる様子が明らかになった。

4.4 拘束緩和応力と拘束緩和歪の関係

図-10 に同一条件の拘束緩和歪と拘束緩和応力の関係を比較した結果を示す。拘束緩和応力の結果と同様に、本図の応力は、下限値が真値となる。

歪発現に対する応力発現の割合(図の傾き)は、応力強度比 75% 導入において、注水材齢 1~6 日と材齢 6~11 日で同じ程度であった。また、材齢 1~6 日において、応力強度比が大きいほど、拘束緩和歪に対する拘束緩和応力が大きくなった。これは、小島・中村の若材齢高強度モルタルの結果と一致している。

一方、材齢 6~11 日の引張クリープ破壊時の拘束緩和歪は、材齢 1~6 日より半分程度の 65 μ であった。また、材齢 1~6 日での 75% 導入と 60% 導入の拘束緩和歪は、75% の方が短時間で引張クリープ破壊しているにも関わ



図一10 同一条件での拘束緩和歪と拘束緩和応力結果

らず、ほぼ同じ 120μ であった。

さらに、拘束緩和歪と拘束緩和応力は、正比例の表裏一対関係にはなく、指数関数的変化であることが分かる。すなわち、拘束緩和歪あるいは引張クリープ歪の発現に応じて、非線形ながらも応力緩和している状態が確認できた。

5. まとめ

本研究は若材齢における繊維補強高強度モルタルの引張りラクセーションおよび引張クリープについて、実験検討した。その結果、以下のことが示された。

- (1) 応力強度比 75% の高拘束条件の拘束後の引張強度および引張剛性は、無拘束時の同一材齢の値よりも、低下傾向にある。
- (2) 引張りラクセーション試験時の拘束緩和応力の経時変化は、ある拘束期間を過ぎると変化しにくくなる傾向にある。

(3) 引張クリープ試験の拘束緩和歪は、拘束の経過時間(拘束材齢)に関わらず、ある限界値に達すると引張クリープ破壊を引き起こした。本研究の調査条件では、拘束開始材齢 1 日において、 120μ であった。

(4) 引張りラクセーション試験時の拘束緩和応力と引張クリープ試験時の拘束緩和歪の関係について、応力強度比が大きくなるほど、緩和応力が大きくなる傾向にある。

(5) 拘束緩和応力と拘束緩和歪の関係は、正比例の関係ではなく、指数関数的な関係であった。

なお、引張クリープ試験において、今回はクリープ破壊したが、その破壊直前までの引張りラクセーションとの比較を行うことができた。今後は破壊を起こさない低応力強度比での実験も検討し、拘束後の力学特性を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 野中資博：普通ポルトランドセメントコンクリートの温度ひび割れ発生の関与する諸物性について、農業土木学会論文集, 91 号, pp.51~58, 1981
- 2) 野中資博：コンクリートの引張応力緩和に関する研究, 農業土木学会論文集, 96 号, pp.58~63, 1986
- 3) 西林新蔵, 木山英明：コンクリートの応力緩和に関する一研究, 土木学会論文報告集, 214 号, pp.145~153, 1975
- 4) 西林新蔵, 木山英明, 井上正一, 北村安朗：コンクリートの引張緩和現象に関する一考察, 鳥取大学工学部研究報告, 第 7 巻, pp.75~84, 1976
- 5) 小島一樹, 中村成春：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りラクセーションに関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.441~446, 2008.7