

論文 若材齢時のハイブリッド・ファイバー・コンクリートにおける拘束収縮下の引張力学特性に関する研究

中村 成春*1・小島 一樹*2

要旨: 本研究は、ハイブリッド・ファイバー・コンクリートの若材齢時の直接引張強度、引張ヤング係数、引張強度時歪、引張クリープ歪、引張クリープ作用後の引張強度、引張クリープ作用後の引張剛性を実験検討した。その結果、1) 乾燥の影響がある無拘束下において、引張強度及び引張強度時歪は、繊維補強効果によって、マトリクス単体よりも高まっており、また、自由収縮歪は小さくなっており、ひび割れ破壊しにくいこと、2) 繊維補強した場合、若材齢下の引張クリープはマトリクス単体よりも小さく現れ、引張クリープが作用した時の引張強度及び引張剛性は、無拘束の同一材齢とあまり変わらなかったこと、等を示した。

キーワード: 繊維補強, 若材齢, 引張強度, 引張ヤング係数, 引張クリープ, 拘束

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物は、供用中に収縮ひび割れが多々生じやすい。このようなひび割れの発生後の放置は、水、二酸化炭素、塩化物等の耐久性を低下させる劣化因子の浸入を促進させやすく、耐久性の保持に関して問題である。新築時の設計段階で、収縮ひび割れ抑制の事前対策を講じていても、施工中の不具合や供用中の不測の事態等で、収縮ひび割れを完全に予防することは困難である。このため、収縮ひび割れ発生後の鉄筋コンクリート造建築物における維持管理や補修補強等の事後対策の活用が重要となる。

日本建築学会より、2003年に刊行した鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ—メカニズムと対策技術の現状—では、短繊維補強を活用した収縮ひび割れ抑制技術を掲載されていたが、その後、2006年に刊行した鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説では、短繊維補強を活用した収縮ひび割れ抑制技術について、有効知見が現状では不明確なため、掲載を見送られた状況にある。しかし、短繊維補強技術は、事前対策として練混ぜ時に繊維混入したり、事後対策として補修補強材料に活用したりでき応用が利く。

収縮ひび割れは、主材料のコンクリートが硬化時や乾燥時に収縮し、それが部材や建築物として架構された時に拘束を受けることで、反作用として引っ張られ、やがて力学的に耐えきれなくなった時に発生する。収縮している材料を持続拘束すると、材料中に拘束引張力が作用し、引張クリープが影響する。また、変形を持続拘束すると、拘束引張応力の作用に対して引張りラクセーションが影響する。このため、拘束が作用した時の収縮ひび割れ特性を評価するには、拘束収縮下の引張クリープあるいは引張りラクセーションの定量が重要となる。

本研究は、繊維長が3mmの微細繊維と30mmの短繊維を組み合わせたハイブリッド・ファイバー・コンクリート（以下、HFCと略す）を対象に、収縮ひび割れ抑制対策技術の一つとして、繊維補強効果の有効性を基礎的に評価するため、直接引張強度発現、引張ヤング係数発現、引張強度時歪、引張クリープ歪、引張クリープ作用後の引張強度、引張クリープ作用後の引張剛性等、乾燥環境にある拘束収縮下の引張力学特性を実験検討した。

2. 実験概要

表-1 に使用材料の品質及び調査条件を示す。繊維はPVA繊維とし、繊維ヤング率29GPaで、直径0.2mmで長さ3mmの微細繊維faと、直径0.4mmで長さ30mmの短繊維fbの2種類を使用した。粗骨材は使用しない調査となるモルタルマトリクスmとHFC（以下、モルタルマトリクスタイプなのでhfcと称す）を比較することで、ハイブリッド・ファイバー補強効果を検討することにした。なお、m及びhfcのフレッシュ状態は、自己充填状態を確認している。

表-1 使用材料の品質及び調査条件

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						
シリカフェューム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) PVA繊維の品質							
繊維種類	長さ	直径	密度	引張強度	繊維ヤング率	繊維特性	繊維
	mm	mm	g/cm ³	GPa	GPa	表面積	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) 調査条件							
調査種類	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	繊維混入率	
マトリクスm	0.2(0.18)	10	40	3	1	fa vol%*hfc	fb vol%*hfc
hfc	0.2(0.18)	10	40	3	1	3	1.5

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

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科 工修 (正会員)

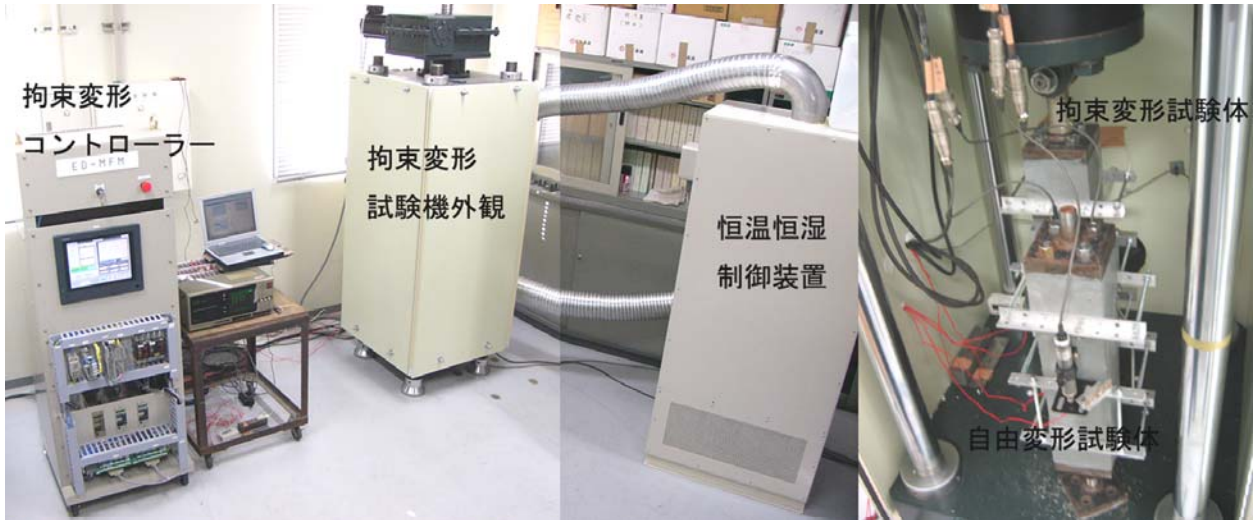


図-1 引張クリーブ試験及び各種引張力学特性試験に適用した多機能型拘束変形試験機の概要

図-1 に多機能型拘束試験機の概要を示す。試験体は、ドックボーン型直方体で、打込み直後から打込み面をラップした鋼製型枠を恒温恒湿室で、注水後材齢約 23~25 時間保管後、脱型した。実験時の周囲環境は、温湿度制御空調により、約 22℃一定の湿度 40%RH を基本に、拘束収縮下となる引張クリーブ試験関係を、注水材齢で、約 26 時間~材齢 6 日までと、材齢 6 日~11 日までの各拘束載荷期間を 5 日間で実施した。また、無拘束の自由変形試験を合わせて行い、自由収縮歪 ϵ_{free} を計測した。

引張クリーブ試験開始時の導入応力強度比は、脱型直後の注水材齢 24~26 時間と注水材齢 6 日に、直接引張強度 f_t 、引張ヤング係数 E 、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 50%程度になるよう調整した。なお、引張ヤング係数 E は、引張歪が 10μ 程度から直接引張強度 f_t の 1/3 時点までの範囲の引張応力-引張歪の計測データを直線回帰した傾きから評価した。

一方、乾燥の影響のない無拘束下における潜在的な引張力学特性の発現を検討するため、注水材齢で、脱型直後の 1 日、そして 3, 6, 11 日に、試験体を封緘した条件で、直接引張強度 f_t 、引張ヤング係数 E 、引張強度時歪 ϵ_{ft} を計測した。さらに、引張クリーブ試験の実験装置及び試験体は、文献¹⁾²⁾と同じで、拘束収縮下となる引張クリーブ試験直後、そのまま静的直接引張試験を行い、引張クリーブ試験の載荷期間中に拘束収縮の影響を受けた直接引張強度 f_{tr} 、引張剛性 E_r を計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 無拘束下の直接引張強度、引張ヤング係数、引張強度時歪の経時変化結果

無拘束下の引張力学特性の発現結果について、モルタルマトリクス m を図-2 に、 h_{fcm} を図-3 に示す。各調合種類 m あるいは h_{fcm} に対して、封緘養生を s とし、

乾燥養生を 40 と記号付けして区別した。また、直接引張強度 f_t 、引張ヤング係数 E 、引張強度時歪 ϵ_{ft} について、乾燥の有無及び繊維補強の有無に区分して、所定の注水材齢における発現状況を整理した。

さらに、これら無拘束下の引張力学特性の試験結果は、拘束試験機が 1 台しかないため、毎回、拘束試験を行うごとに、調合条件が同じ試験体を練混ぜ製造して、図-2 及び図-3 では、その時々複数回の実験結果を平均してプロットした。そして、結果の傾向を判読しやすくするため、回帰分析を行った。表-2 に各実験結果に対する回帰式の評価結果を示す。封緘時の回帰式は、強度が増分形式で発現する状況を考慮して最長材齢の実験値を通る指数関数で表現し、乾燥時の強度低下を鑑み、乾燥開始時の材齢 1 日の実験値も通るように表現した。

図-2 及び図-3 より、それぞれ、封緘養生と乾燥養生を比較すると、直接引張強度 f_t は、乾燥養生下では材齢が増しても引張強度の低下や頭打ちになっている。引張ヤング係数 E 及び引張強度時歪 ϵ_{ft} も乾燥養生の方が小さい。また、繊維補強の有無によるハイブリッド・ファイバー補強効果に着目すると、 f_t は少し大きく現れており、 E は小さめに現れている。しかし、 ϵ_{ft} は、大きめに現れており、ハイブリッド・ファイバー補強効果によって、高応力下で高変形することで、 h_{fcm} は、破壊しにくくなっていることがわかる。

表-2 無拘束下の引張力学特性発現の回帰分析結果

パラメータ	単位	調合種類	係数 a	係数 b	備考
$f_t(t)$	MPa	ms	0.35	0.2	t: 注水材齢(日)
		$h_{fcm}s$	0.72	0.2	回帰式は、 $t=1$ と $t=$ 最終値
		m40	0.87	0.5	を必ず通るようにモデル
		$h_{fcm}s$	0.72	0.5	化した。
$E(t)$	MPa	$h_{fcm}40$	1.99	0.5	E は、単位がMPaの評価
					になる。
$\epsilon_{ft}(t)$	μ		$\epsilon_{ft}(t) = f_t(t) / E(t)$		破壊まで線形関係と仮定
回帰式	$f_t(t) = \{ f_t(11) - f_t(1) \} * \exp[a * \{ 1 - \sqrt{ ((11-1)/(t-1)) } \}] * b + f_t(1)$				
	$E(t) = \{ E(11) - E(1) \} * \exp[a * \{ 1 - \sqrt{ ((11-1)/(t-1)) } \}] * b + E(1)$				

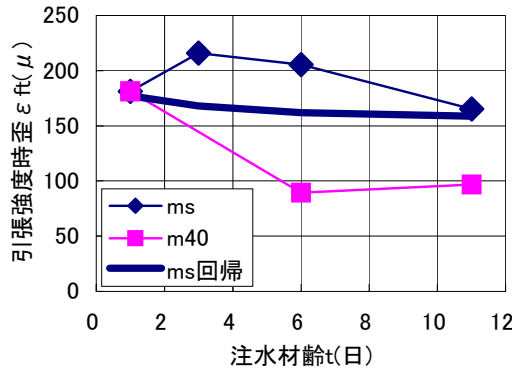
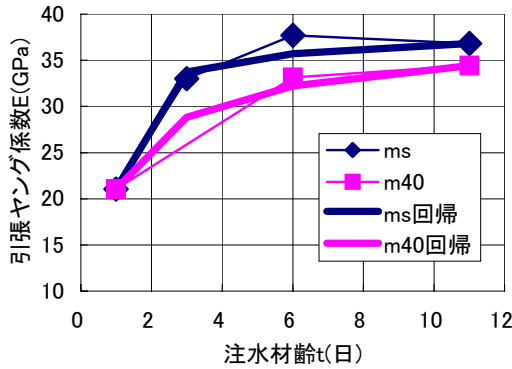
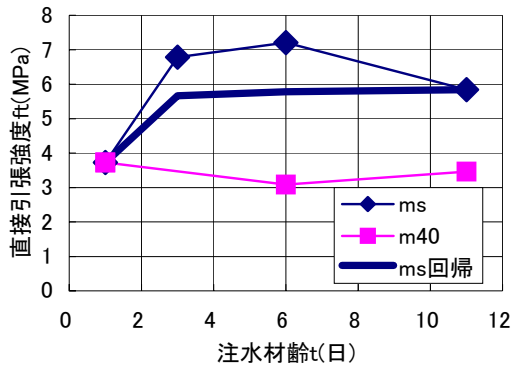


図-2 無拘束下のマトリクス m の引張力学特性発現

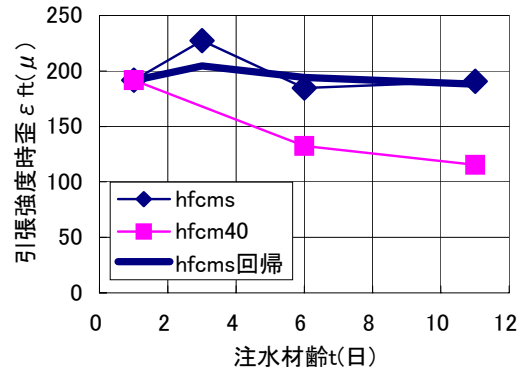
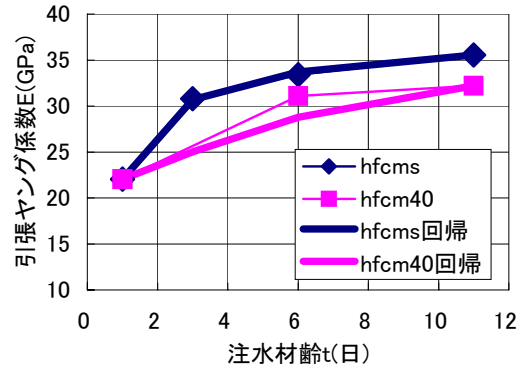
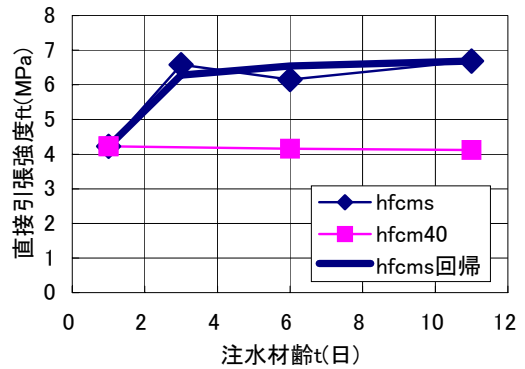


図-3 無拘束下の hfcms の引張力学特性発現

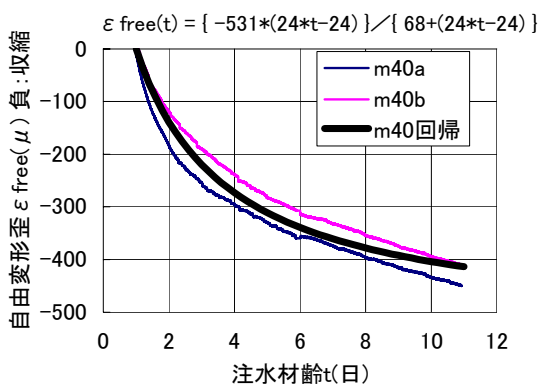


図-4 マトリクス m の自由変形試験結果

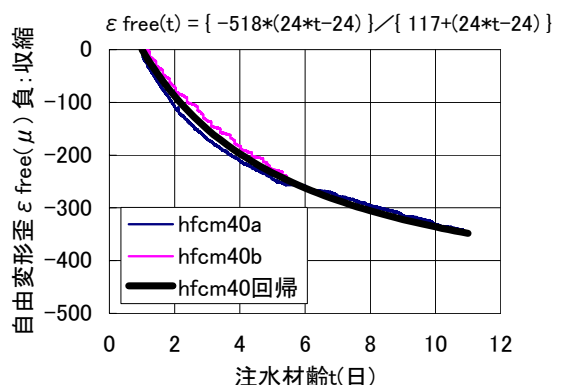


図-5 hfcms の自由変形試験結果

3.2 自由変形歪の経時変化結果

自由変形試験結果について、モルタルマトリクス m を図-4 に、hfcms を図-5 に示す。自由変形歪 ϵ_{free} は、脱型直後の注水材齢 1 日から計測した。複数試験結果について、大きなバラツキもなく、引張クリープ試験にお

ける引張クリープ歪の算出に適用するため、各図中に示した双曲線関数で回帰した。

m と hfcms の比較から、ハイブリッド・ファイバー補強効果によって、収縮歪が内部拘束され、小さく現れていることがわかる。

3.3 若材齢における引張クリープ特性の結果

(1) 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結果について、モルタルマトリクス m を図-6 に、hfc m を図-7 に示す。引張クリープ試験は、練混ぜ製造が同じ試験体を用いて実施したため、複数の実験結果を平均化して回帰した無拘束下の引張力学特性の結果と異なる個々の実験結果を尊重している。

引張クリープ試験開始時の導入応力強度比は、m 及び hfc m で、荷重開始の注水材齢 1 日及び 6 日も、ほぼ 50%程度にすることができ、そのまま荷重期間中で荷重一定に制御できている。

ここで、クリープ変形とは、作用拘束応力に対して、弾性変形を取り除いた変形である。このため、若材齢時

の引張クリープの評価では、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荷重応力に無関係の自由変形歪を取り除くこと以外に、若材齢時の引張ヤング係数発現に伴う引張弾性歪の減少を考慮すべきである。引張弾性歪の経時変化で減少していく状況は、図-2 及び図-3 の引張ヤング係数の回帰式を利用し、弾性歪変化分として評価した。

このようにして、m 及び hfc m における若材齢の引張クリープ試験における引張クリープ歪+弾性歪の結果が得られた。

(2) 引張クリープ試験における引張クリープ特性

引張クリープ試験における引張クリープ歪、引張単位クリープ、引張クリープ係数の各種引張クリープ特性の結果について、モルタルマトリクス m を図-8 に、hfc m を図-9 に示す。

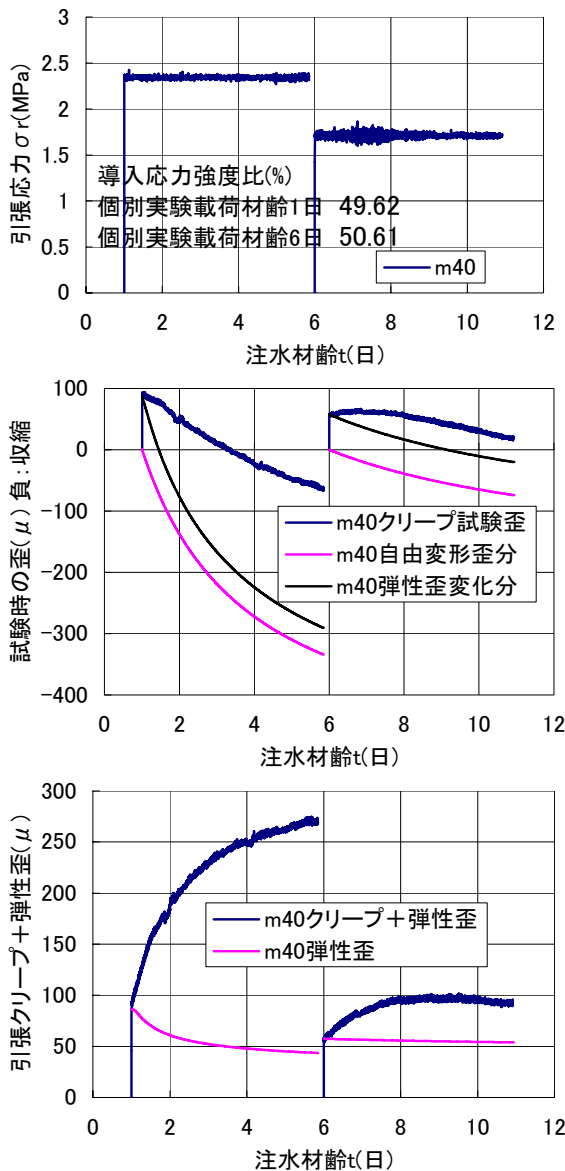


図-6 マトリクス m の引張クリープ試験の計測結果

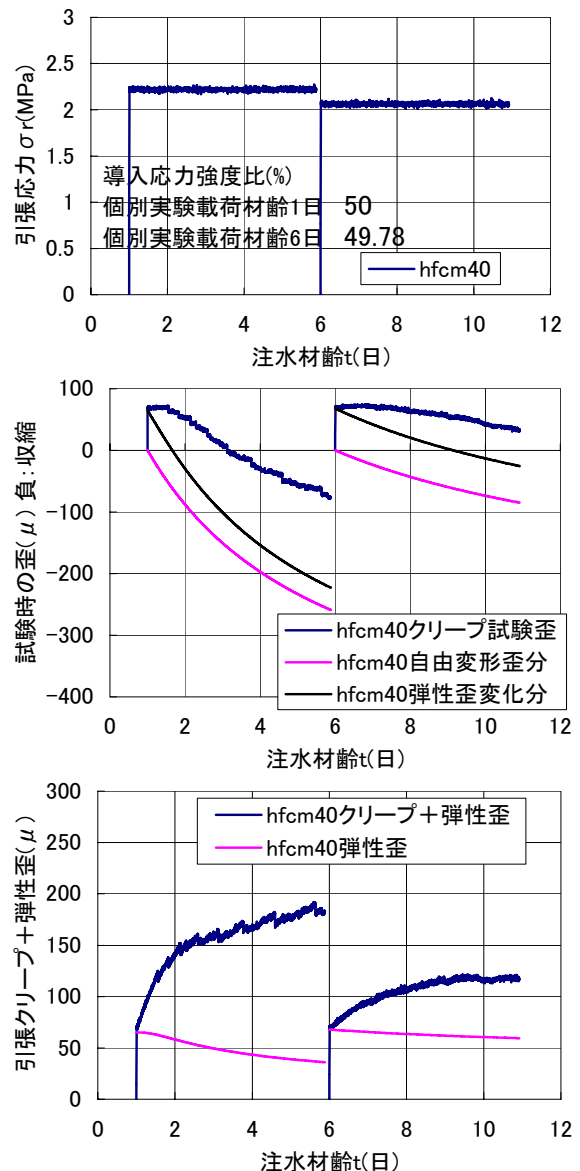


図-7 hfc m の引張クリープ試験の計測結果

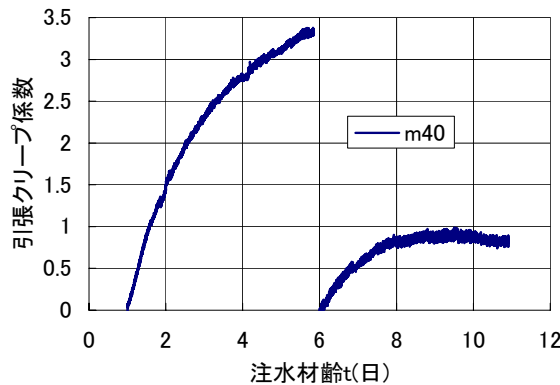
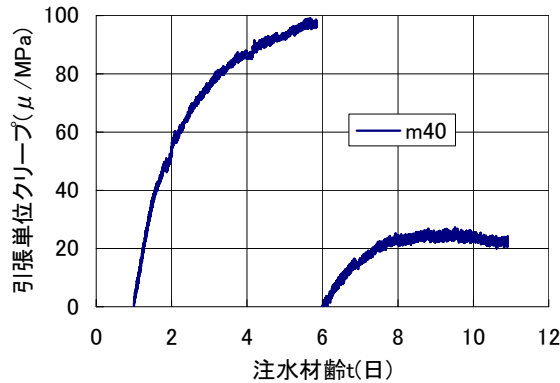
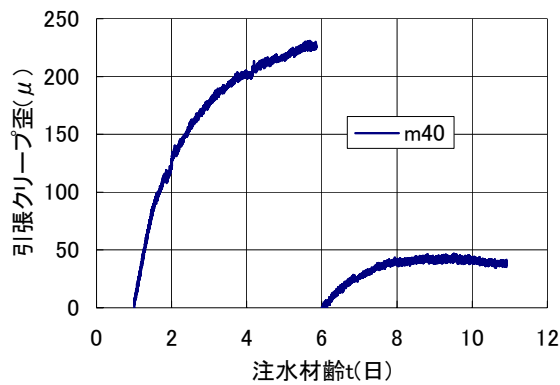


図-8 マトリクス m の引張クリープ特性の結果

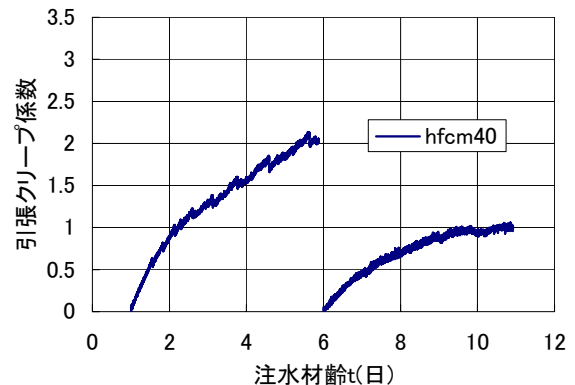
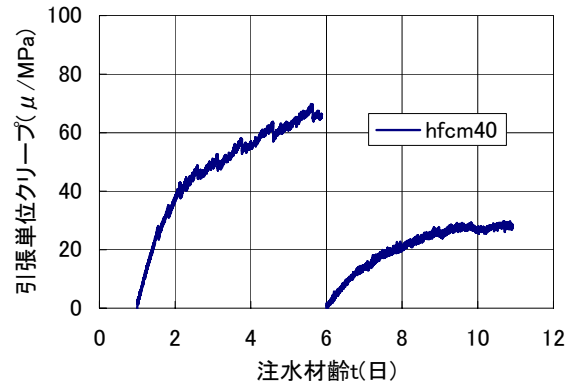
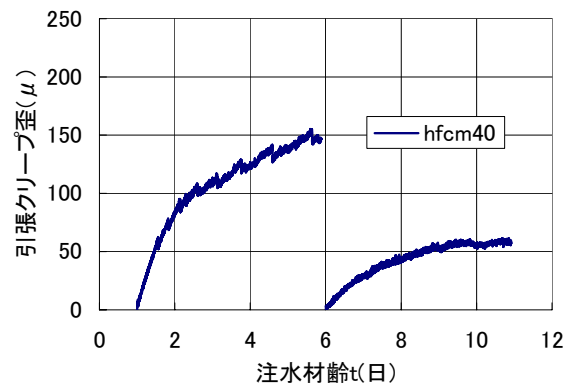


図-9 hfcm の引張クリープ特性の結果

m 及び hfcm とともに、荷重開始材齢 6 日以降の引張単位クリープやクリープ係数は、あまり変わらない結果となった。しかしながら、荷重開始材齢 1 日以降では、m の引張クリープの現れ方が、hfcm と比較して、1.5 倍ほど大きい。

引張クリープ歪は、引張荷重応力の持続作用によって、内部組織に、微細ひび割れが発生し、累積損傷していくことが主要因と考えられる³⁾。一方、若材齢では、セメント水和反応が活発で、累積した微細ひび割れに水和生成物が絡まり、損傷を回復させていることも考えられる。このため、繊維補強効果について、微細ひび割れの発生累積を抑制しているために、マトリクス単体よりも引張クリープ歪が小さく生じていることが考えられる。今回、得られたクリープ係数は、今後、文献⁴⁾で示したマトリクス単体をベースに繊維補強効果を組み込んだ複合則モデルに適用していくことを考えている。

3.4 引張クリープ試験に基づく拘束収縮下の引張力学特性の結果

所定期間の荷重を行った引張クリープ試験後の試験体を、除荷しないで、そのまま直接引張試験に切り替えて、拘束収縮の影響を受けた時の引張力学特性を実験的に評価した。完全拘束実験直後における引張力学特性は、文献⁵⁾で報告したが、いまだ不明な点が多い。

引張クリープ試験直後の引張応力と引張歪の計測結果について、同一に練混ぜ製造した個々に供した試験体における無拘束の計測結果と合わせて、モルタルマトリクス m を図-10 に、hfcm を図-11 に示す。

m と hfcm とともに、荷重開始材齢 1~6 日にかけて引張クリープを作用させた材齢 6 日目の引張強度 f_{tr} は、無拘束の材齢 1 日の引張強度 f_t よりも低下し、無拘束の材齢 6 日の引張強度 f_t に近い。また、その引張剛性 E_r も、材齢 1 日より 6 日に近い状況にある。

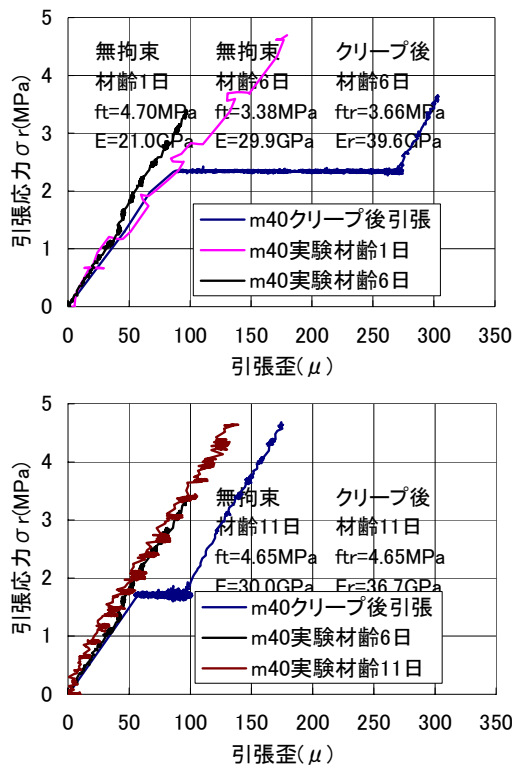


図-10 m の引張クリープ後の引張力学特性結果

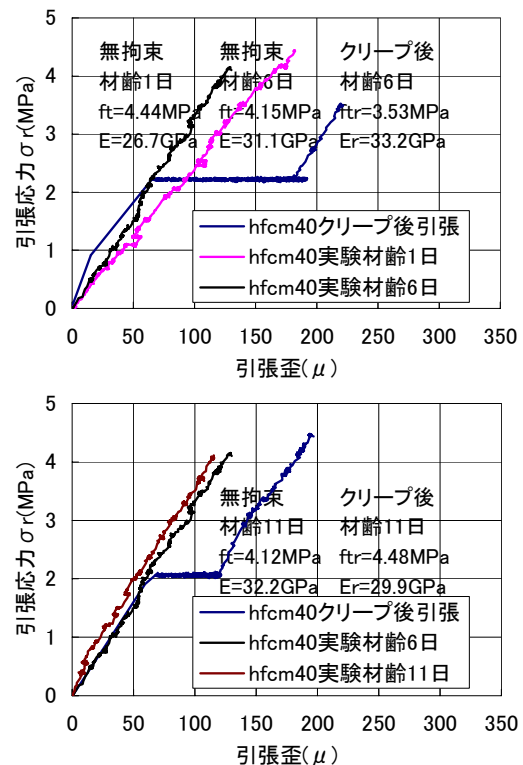


図-11 hfcM の引張クリープ後の引張力学特性結果

すなわち、引張クリープ歪がかなり大きく作用しているにも関わらず、無拘束時の同一材齢の結果とあまり変わらなかった。

また、m と hfcM とも、荷重開始材齢 6～11 日にかけて引張クリープを作用させた材齢 11 日目の引張強度 f_{tr} 及び引張剛性 E_r も、無拘束の材齢 11 日目の結果とあまり変わっていない。

以上のことは、若材齢下においては、内部組織が多少損傷していても、セメント水和反応等による新たな組織形成によって、損傷が回復していく可能性を示唆していると思われる。今後、さらに実験を重ねる所存である。

4. 結論

本研究は、ハイブリッド・ファイバー・コンクリートの若材齢時の直接引張強度、引張ヤング係数、引張強度時歪、引張クリープ歪、引張クリープ作用後の引張強度、引張クリープ作用後の引張剛性を実験検討した。

- (1) 乾燥の影響がある無拘束下において、引張強度及び引張強度時歪は、繊維補強効果によって、マトリクス単体よりも高まっており、また、自由収縮歪は小さくなっており、ひび割れ破壊しにくくなっている。
- (2) 繊維補強した場合、若材齢下の引張クリープはマトリクス単体よりも小さく現れた。
- (3) 乾燥の影響がある場合、本研究の範囲内で、引張ク

リーブが作用した時の引張強度及び引張剛性は、無拘束の同一材齢の特性とあまり変わらなかった。

謝辞

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

参考文献

- 1) 中村成春, 榎田佳寛: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.319-324, 2005.6
- 2) 中村成春: 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に及ぼす乾燥の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.383-388, 2006.7
- 3) 中村成春: 拘束収縮下の破壊進行領域の形成に基づく引張力学特性に関する一考察, JCI マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム論文集, pp.21-26, 2005.8
- 4) 中村成春: 若材齢コンクリートの拘束収縮におけるハイブリッド・ファイバー補強の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.399-404, 2007.7
- 5) 小島一樹, 中村成春: 拘束収縮下におけるハイブリッド・ファイバー・コンクリートの若材齢引張力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.627-632, 2007.7