

論文 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

中村 成春*1・榎田 佳寛*2

要旨: 繊維長さがマイクロとマクロのPVA繊維を使用したハイブリッド・ファイバー・コンクリートについて、直接引張、自由変形、完全拘束、高引張応力クリープ、高引張歪リラクゼーションに関する拘束収縮ひび割れ特性を検討した。その結果、マイクロ繊維多量混入の補強は、マトリクス内の繊維間分散距離が小のため、微細ひび割れ発生抑止の繊維架橋が有効に働くことを明らかにし、繊維分散間距離が小さくかつマクロ繊維量の多大なハイブリッド・ファイバー補強による微細と巨視の収縮ひび割れ発生抑止の有効性を示した。

キーワード: 繊維補強, 拘束, 収縮, ひび割れ, 直接引張, クリープ, リラクゼーション

1. はじめに

近年、コンクリートの高性能化のために、各種短繊維を複合高混入したハイブリッド・ファイバー・コンクリート(以下、HFC)の開発研究が活発である¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が、その繊維補強効果と実構造物適用で重要な時間依存性の拘束変形性能との関係を検討した事例はあまりなく、不明な点が多い。本研究は、新規開発した多機能型拘束変形試験機⁹⁾を用いて、直接引張、自由変形、完全拘束、高引張応力クリープ、高引張歪リラクゼーションを実験し、HFCのハイブリッド・ファイバー補強効果と拘束収縮ひび割れ特性の関係を検討することを目的とする。

2. 多機能型拘束変形試験機の開発概要

セメント系複合材料の拘束変形性能は、拘束条件により様々に変化するため、定量化には何らかの基準が必要である。そこで、完全拘束となる拘束率100%条件を基準にすることで、拘束変形時のポテンシャル性能が把握でき、種々のセメント系複合材料間の相対比較が可能と考える。完全拘束試験から、ひび割れ発生時の拘束歪(自由変形歪)、ひび割れ発生強度、ひび割れ発生材齢、またそのひび割れ発生時での直接引張試験から、その時に保有していた直接引張強度、引張ヤング率、直接引張強度時歪を得て、

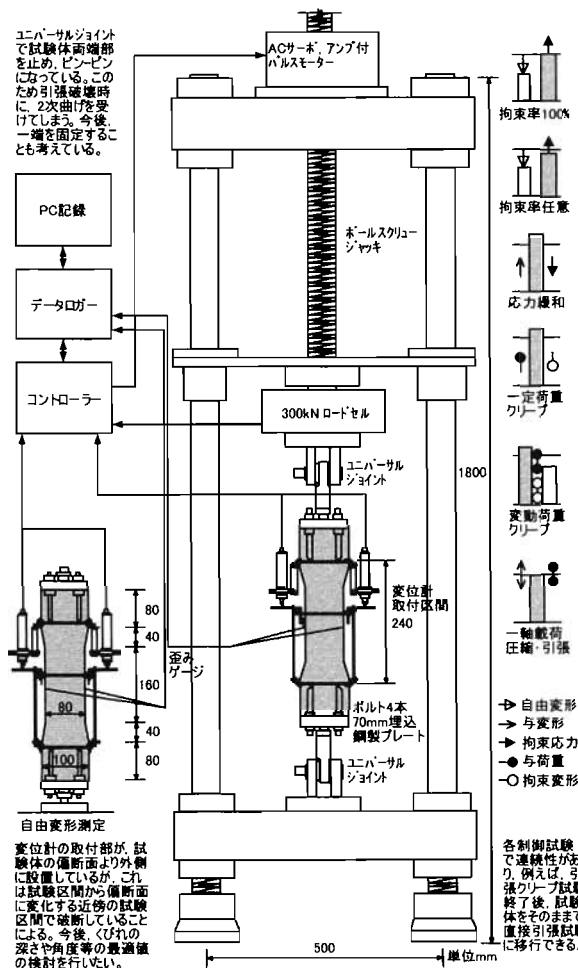
拘束歪との比較から見かけ変動拘束応力引張クリープ歪、可能であれば直接引張試験時に軟化領域を計測し、破壊エネルギー、引張軟化曲線等が得られる。本研究では、これらを拘束変形性能の多指標型評価値と位置づける。

凝結終結時からの拘束試験法⁶⁾⁷⁾⁸⁾は、実構造物の拘束変形時のひび割れ発生を高精度に模擬しているが、試験操作性が煩雑である。また、拘束変形性能の多指標型評価値を得ることを目的としていない。そこで、既存の収縮ひび割れ試験機⁹⁾を参考に、载荷機構的に同一のACサーボを介したボールスクリュージャッキ载荷の拘束変形試験機を新規開発した。拘束試験に関する詳細なレビューは文献⁹⁾に報告している。

拘束変形性能の多指標型評価値を得る目的から、試験機1台で多種の拘束変形試験が行えるよう拘束変形制御をシステム化し、拘束率一定制御試験(別置き試験体の歪・変形をモニタし、その歪率と同値・同比率に保存制御)、歪率変動制御試験(別置き試験体の歪・変形を、一定速度増分・任意変動速度増分与えて、終局特性を把握)の複数試験をメニュー化した。図-1に多機能型拘束変形試験機の概要を示す。圧縮・引張静的载荷、自由変形、拘束率制御変形、圧縮・引張クリープ変形、圧縮・引張リラクゼーション変形が、自在に取り扱える。

*1 宇都宮大学 工学部建設学科建築学講座助教授 工博(正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科建築学講座教授 工博(正会員)



図一 多機能型拘束変形試験機の概要

表一 繊維補強条件等の概要

繊維混入率 vol%*HFC	fa; PVA繊維, 長さ3mm, 直径0.4mm		
fb; PVA繊維 長さ30mm 直径0.4mm	0	r-1, 2, 3 c-1, 2, 3 x-1, 2, 3 tm=∞mm	r-1, 2, 3 tm=1.16mm
	1.5	r-1, 2, 3 c-1, 2, 3 x-1, 2, 3 tm=5.44mm	tm=1.10mm
備考	r: 完全拘束, c: クリップ, x: リラクゼーション -1: 拘束変形試験前の直接引張試験体 -2: 拘束変形試験体 -3: 自由変形及び拘束後直接引張試験体 tm: 余剰マトリクス膜厚(文献2)~4)参照)		

3. 実験概要

実験は、HFCの繊維補強条件を無補強も含めて4種類に変化させ直接引張と完全拘束を試験したシリーズIと、繊維補強条件が有無の2種類で、直接引張、完全拘束、高引張応力一定クリップ、高引張歪一定リラクゼーションを試験し

たシリーズIIの2シリーズとした。

繊維はPVA繊維とし、密度1.3g/cm³、繊維引張強度0.9GPa、繊維ヤング率29GPa、直径0.4mm、長さ3mmのマイクロ繊維faと、30mmのマクロ繊維fbの2種類を使用した。セメントは密度3.16g/cm³の普通ポルトランドセメントを、混和材は密度2.2g/cm³のシリカフェームを、細骨材は表乾密度2.58g/cm³でf.m.2.6の鬼怒川産川砂を、高性能減水剤は密度1.1g/cm³のポリカルボン酸エーテルタイプを使用した。

HFCのマトリクスは、W/C=0.2(W/B=0.18)、セメント単位量に対するシリカフェーム置換率10wt%*Cement、セメント単位量に対する高性能減水剤添加率3wt%*Cement、マトリクス容積に対する細骨材容積率40vol%*Matrixの一定⁴⁾とした。そこに表一の所定繊維補強条件になるようPVA繊維を混合した。なおHFCのフレッシュ状態は、すべて自己充填状態⁴⁾を確認した。

自由変形及び拘束変形試験体は、端部にボルトを埋め込んだドッグボーン型試験体とし、打設面をラップした鋼製型枠内にて、打設直後から20°C60%RHの恒温恒湿室で、注水後材齢約20~24時間保管後、脱型した。

拘束変形試験は、約18~22°C30~60%RHの乾燥環境下で、脱型直後の注水後材齢20~24時間の拘束開始直前に直接引張試験で1本を、注水後材齢約24~27時間の各拘束変形試験時に拘束用1本と自由変形モニタ用1本を、拘束変形試験終了後に自由変形モニタ用1本を直接引張試験に供した。すなわち、各拘束変形試験ごとに3本の試験体を作製し、拘束変形試験前後に直接引張試験を組み合わせ実施した。なお、拘束変形及び自由変形の測定開始材齢は、注水後材齢約24~27時間となり、この拘束変形試験開始時点からの材齢を拘束材齢と呼ぶことにした。

各拘束変形試験の拘束制御用変形は、試験体ドッグボーン部上下の偏断面外側に変位計を取り付け測定した。偏断面外側の取り付けは問題と承知しているが、偏断面の際の試験面での破壊が多いことによる措置である。変位計計測値

は、取り付け基準長240mmを用いて、歪に換算した。また、ドックボーン部両側面中央に長さ10mmの歪ゲージを貼り付け、マトリクスの乾燥試験片に貼り付けたダミーゲージの室温変動歪を差し引いた室温変動補正歪ゲージ値を用いて、変位計換算歪の挙動をチェックした。本来、拘束制御用変形は、応答が鋭敏で高精度測定が望ましい。歪ゲージは応答が鋭敏であるが、ダミーゲージの室温変動歪を補正した歪を制御入力する対応をしていないこと、ひび割れ発生後の軟化挙動の測定を考慮、ゲージ長を長くすると長時間測定時に浮きや剥がれを頻発すること等から、現状では、歪ゲージ値の制御でなく、変位計計測値の制御とした。

4. 実験結果及び考察

4.1 直接引張

表-2及び図-2に直接引張試験結果を示す。載荷制御に用いた変位計の換算歪は、歪ゲージとほぼ同値を得たが、載荷初期変形の一部で若干の差異も見られた。偏断面部変形の応答の影響と思われる。繊維無補強及びマイクロ繊維補強条件下では、載荷速度を低速及び超低速で載荷したが、引張強度 f_t 近傍で脆性破壊した。マクロ繊維補強条件下では、 f_t 近傍で不安定破壊後、変位制御システムが回復し再載荷となった。注水材齢1日の超低速載荷は、 f_t 時歪が概ね200 μ を超え、 f_t も4MPa以上となり、注水材齢3日以降の f_t よりも高くなった。材齢1日では超低速時の引張変形導入に伴って、硬化途上の粘弾性挙動が顕著になり、伸び能力や強度に影響を及ぼしたと推察される。また、図示は省略するが、超低速載荷や偏心の影響を除いて、注水材齢と f_t 、 f_t 時歪、引張ヤング率 E_t の関係を記述すると、今回の f_t は材齢や繊維補強条件にあまり関係なく約3.8MPaとなった。 E_t 及び f_t 時歪は、注水材齢1日で約20GPaと200 μ 、材齢5日で繊維量少が約35GPaと100 μ で、繊維量多が約27GPaと150 μ となった。静的載荷時では、PVA繊維量が多いと全体系が軟らかく最終伸び能力も大きい。

軟化挙動は、マイクロ繊維補強では繊維長さがひび割れ幅進展と比較して小さく繊維架橋による補強効果が現れていない。マクロ及びハイブリッド繊維補強では補強効果が顕著だが、マクロ繊維混入率が同じため、その両者の差は小さい。

表-2 直接引張試験の力学特性結果

繊維混入率 vol%+HFC	注水 材齢 hr	載荷 速度 *1 mm/min	引張 強度 f_t MPa	f_t 時の歪		引張ヤング率 E_t *2		備考			
				変位計歪 μ	歪ゲージ μ	変位計歪 GPa	歪ゲージ GPa				
0	0	r-1	24.3	0.0002	4.31	180.4	183.8	23.9	24.3	*3	
		c-1	22.4	0.0002	3.99	275.8	249.8	14.8	15.9		
		x-1	22.5	0.0010	3.95	205.0	211.5	17.0	19.8		
		r-3	126.3	0.0010	3.74	110.8	103.0	36.9	33.7		*3
		c-3	70.1	0.0010	3.38	96.3	122.0	27.8	27.8		
		x-3	71.6	0.0010	—	—	—	28.0	28.7		*4
5	1.5	r-1	24.2	0.0010	3.83	148.3	179.3	26.8	19.1	*5	
		c-1	23.5	0.0010	3.65	194.2	200.2	19.5	18.2		
		x-1	23.8	0.0010	3.75	199.6	212.9	19.6	17.2		
		r-3	153.0	0.0010	3.09	140.4	113.9	26.3	31.2		
		c-3	146.0	0.0002	3.84	158.8	145.9	28.0	28.9		
		x-3	167.2	0.0010	3.81	136.3	140.7	25.9	28.7		
6.5	0	r-1	22.4	0.0010	3.88	200.0	195.4	22.9	21.3	*5	
		r-3	146.7	0.0001	3.82	144.6	129.0	28.2	30.3		
0	1.5	r-1	23.4	0.0002	4.34	207.1	226.2	22.2	20.4	*5	
		r-3	120.3	0.0010	3.81	82.1	108.2	44.0	35.6		

*1: f_t までの値。0.0002mm/minは、変位計歪約120~160 μ まで0.0010mm/min載荷。
 *2: E_t は歪5 μ 近傍から1/3 f_t までの測定値の直線回帰(1/3割線法)。
 *3: 端部破壊。偏断面上下部100mm幅で破壊。応力は80mm幅で算定。
 *4: データ取得時の通信障害で、載荷途中までの取得データで分析。
 *5: 試験体端部の成形不良で、載荷時に偏心の影響が大きい。

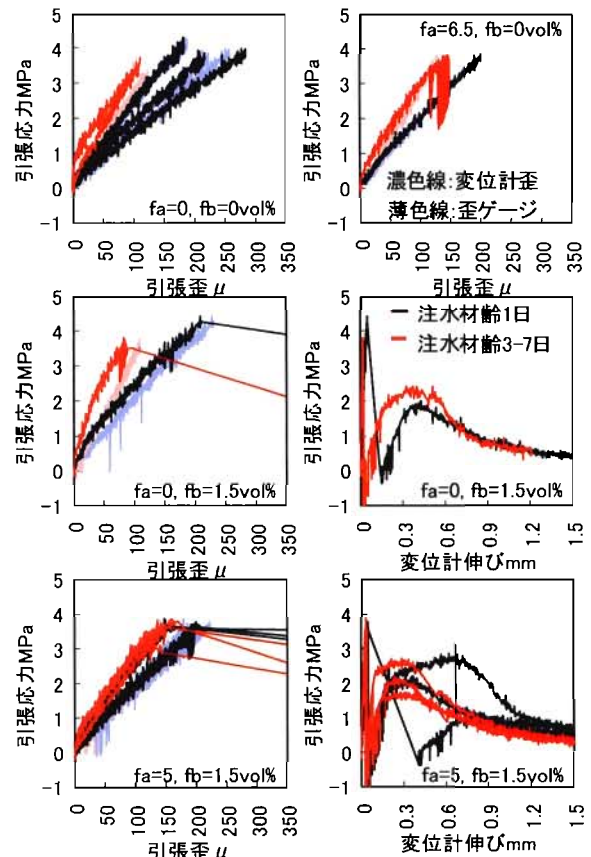


図-2 直接引張試験の応力-歪・変形結果

4.2 完全拘束

表-3及び図-3に完全拘束試験結果を示す。拘束歪は、拘束変形歪から自由変形歪を差し引いた歪である。変位計換算歪と歪ゲージに若干の差が見られるが、直接引張同様に偏断面部の変形応答の影響と思われる。拘束試験体の変位計歪の経時変化はほぼ0で、完全拘束を実現している。拘束応力計測は振動が見られたが、制御用変位計の応答分解性能が不十分なことによる。高精度変位計の使用で振動が除去できる。

完全拘束時のひび割れ発生挙動は、マイクロ繊維補強による発生材齢の遅延が顕著である。マ

クロ繊維補強のみは、無補強とほぼ同じ発生材齢となった。微細ひび割れ発生成長に伴って巨視ひび割れに至る破壊進行領域の形成機構を鑑みると、マイクロ繊維の多量混入に伴う補強は、

表-3 拘束変形試験の力学特性結果

繊維混入率 vol%*HFC			拘束開始 注水材齢				初期導入変形or最大拘束応力			ひび割れ発生		
fa	fb	記号	拘束材齢 hr	拘束材齢 hr	拘束応力 MPa	拘束歪*1 μ	拘束材齢 hr	拘束応力 MPa	拘束歪*1 μ	拘束材齢 hr	拘束応力 MPa	拘束歪*1 μ
0	0	r-2	27.70	53.14	3.37	111.7	53.29	2.89	111.3			
		c-2	24.28	0.05	3.40	178.8	22.98	3.35	401.7			
		x-2	24.65	0.47	3.19	190.4	24.15	3.10	263.8			
5	1.5	r-2	27.12	97.51	3.87	165.8	111.46	3.69	172.5			
		c-2	25.52	0.10	3.35	177.1	26.69	3.31	305.8			
		x-2	26.16	0.42	3.19	153.3	48.02	3.91	255.8			
6.5	0	r-2	24.30	101.09	3.68	218.3	107.06	2.63	224.2			
		c-2	26.37	44.25	3.34	135.4	54.82	2.09	160.0			

*1: 拘束変形制御に用いた変位計による換算歪。

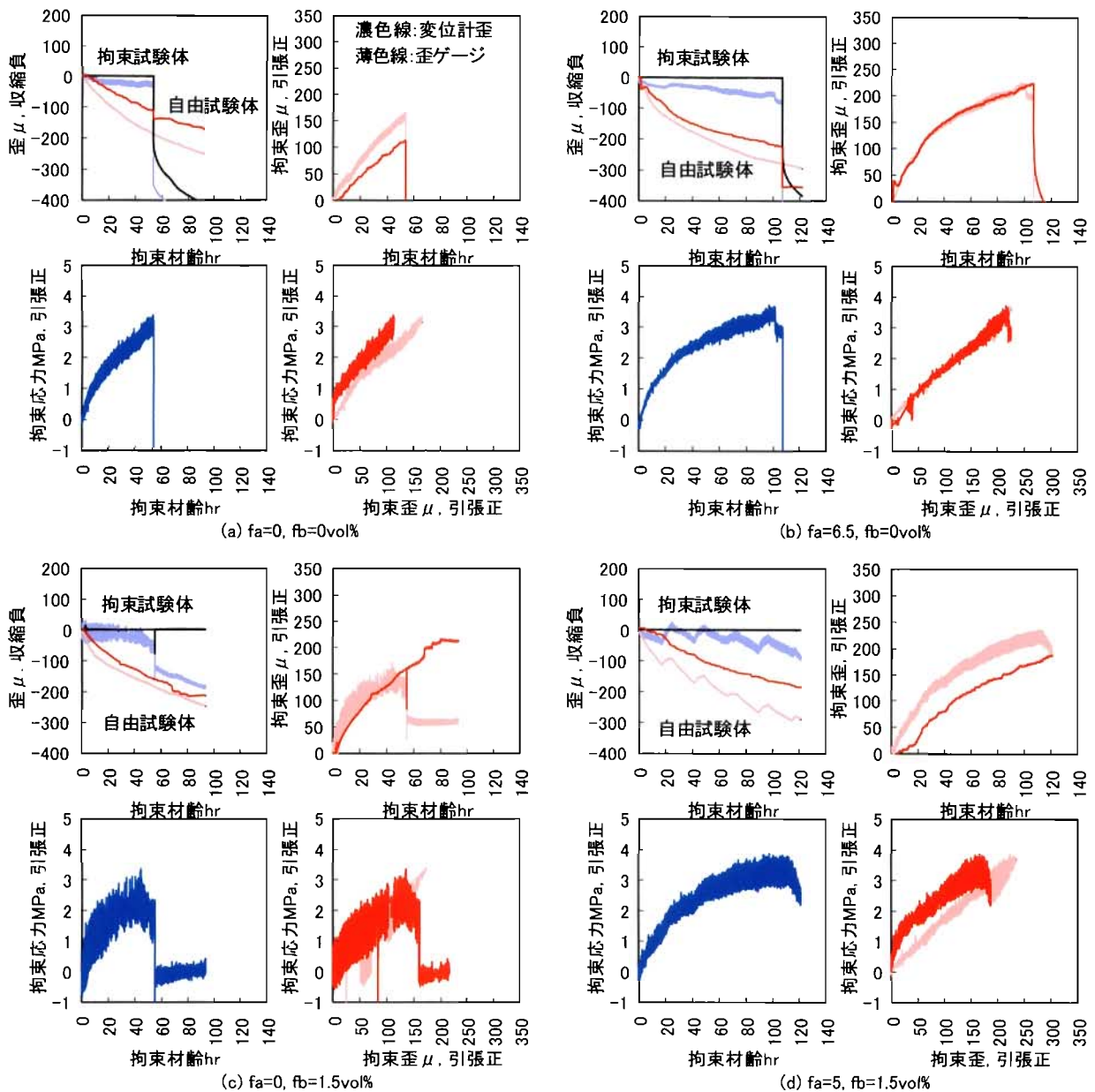


図-3 完全拘束試験の応力-歪・変形結果

マトリクス内のマイクロ繊維分散時の繊維間分散距離が小さくなるため、マトリクス系内の微細ひび割れ発生抑止に対する繊維架橋が有効に働き、その微細ひび割れ発生遅延結果が全体系の巨視ひび割れ抑止にもつながったと考えられる。マクロ繊維補強は、その混入量が少ないことで繊維間分散距離がかなり大きくなり、マトリクス系内の微細ひび割れ発生抑止に対する繊維架橋が行き渡らず、無補強と同じ状況になったと考えられる。ひび割れ発生抑止への繊維補

強では、繊維混入量や繊維寸法と合わせて、マトリクス内の繊維分散状況が重要である。

4.3 高引張応力一定クリープ

表-3中及び図-4に高引張応力一定クリープ試験結果を示す。引張クリープ载荷応力は、拘束開始 t_0 の約90%である。HFCは、無補強と比較して、自由変形はほぼ同じ状況だが、引張クリープは破壊時歪が小さく、全体系の最終伸び能力が小さい。しかし、拘束初期の拘束歪(引張クリープ)進行速度も小さく、このことが全

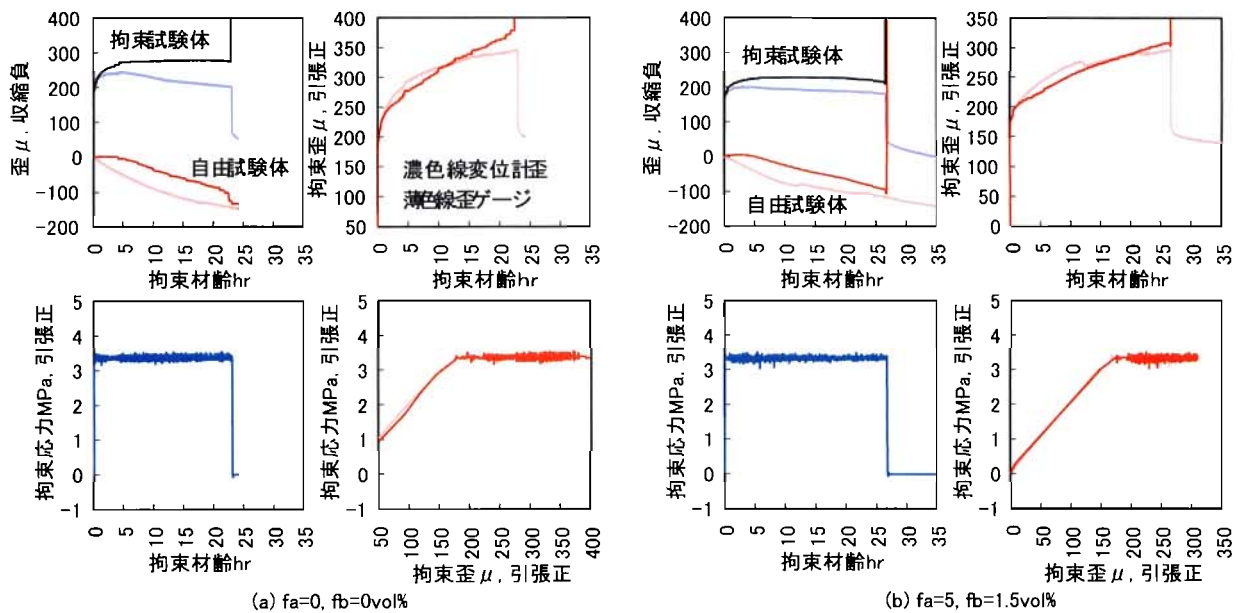


図-4 高引張応力一定クリープ試験の応力-歪・変形結果

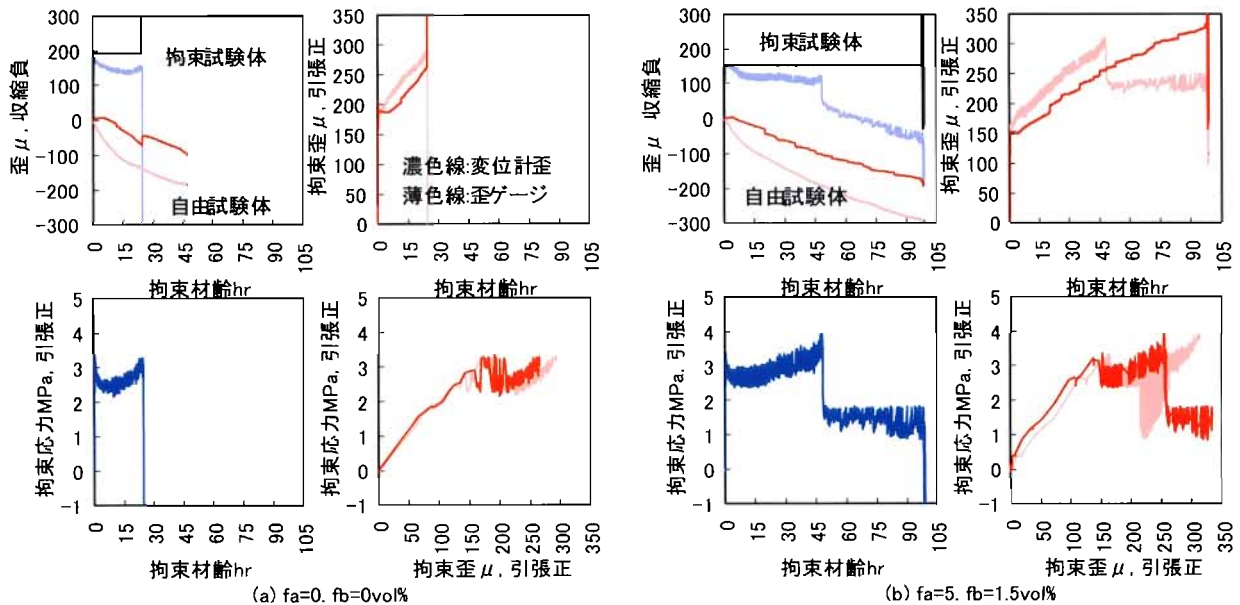


図-5 高引張歪一定リラクゼーション試験の応力-歪・変形結果

体系の最終伸び能力が小さいにもかかわらずひび割れ発生を遅延させたと推察できる。PVAマクロ繊維補強時の若材齢引張クリープが、無補強と比較して小¹⁰⁾と同じである。繊維補強によるマトリクス系内の拘束が強いほど、拘束歪進行速度が小となりえ、マトリクス系内の拘束の強さは、繊維寸法・混入量と繊維分散状況に伴う繊維付着に支配されていると考えられる。

4.4 高引張歪一定リラクゼーション

表-3中及び図-5に高引張歪一定リラクゼーション試験結果を示す。引張リラクゼーション載荷時歪は、拘束開始t時歪の約75~90%である。拘束応力は、拘束初期に若干緩和しているが、自由変形進行に伴う拘束歪の増加につれて漸増していき、破壊に至る。HFCは、ひび割れ発生後の繊維架橋時挙動も測定できた。繊維無補強のひび割れ発生までのHFCの拘束歪進行速度は、引張クリープと同様に無補強より小さい。このため、ひび割れ発生が遅延している。

4.5 HFCのハイブリッド・ファイバー補強効果

HFCの適切なフレッシュ性状確保には繊維分散評価が重要で、繊維間分散距離の定量に、文献^{2),3),4)}で提案した余剰マトリクス膜厚 t_m を活用する。図-6に繊維補強とひび割れ発生抑制の関係概念を示す。図中のフレッシュ状況は文献⁴⁾による。繊維補強時のマトリクス内の拘束や拘束歪進行速度の程度は t_m 等高線で表現され、 t_m が小さくかつマクロ繊維量の多大なハイブリッド・ファイバー補強は、微細と巨視の拘束収縮

ひび割れ発生抑制に有効となりえる。

5. 結論

本研究は、繊維長さがマイクロとマクロのPVA繊維を使用したHFCについて、直接引張、自由変形、完全拘束、高引張応力クリープ、高引張歪リラクゼーションに関する拘束収縮ひび割れ特性を検討した。その結果、マイクロ繊維多量混入の補強では、マトリクス内の繊維間分散距離が小のため、微細ひび割れ発生抑制の繊維架橋が有効に働くことを明らかにし、繊維分散間距離が小さくかつマクロ繊維量の多大なハイブリッド・ファイバー補強による微細と巨視の拘束収縮ひび割れ発生抑制の有効性を示した。

謝辞

本研究の一部は、平成15・16年度文部科学省科学研究費補助金、若手研究B(課題番号:15760416、研究代表者:中村成春)の助成を受けました。実験にて、宇都宮大学大学院生の中野麻子さんとシェイダ・アリシャリフさんにご協力いただきました。また、試験機製作にて、(株)A&T研究所の有馬文昭氏と高瀬憲克氏、(有)角田製作所の杉山国弦氏、制御システム製作にて、日本リライアンス(株)の鈴木肇氏と中岡良二氏らにご協力いただきました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) van Mier, J.G.M.: Cementitious Composites with High Tensile Strength and Ductility through Hybrid Fibres, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC) - BEFIB 2004, Edited by di Prisco, M., Felicetti, R. and Plizzari, G.A., Vol.1, pp.219-236, Varenna, Lake Como, Italy, Sep.2004
- 2) Nakamura, S., van Mier, J.G.M., Masuda, Y.: Self Compactibility of Hybrid Fiber Concrete Containing PVA Fibers, Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC) - BEFIB 2004, Edited by di Prisco, M., Felicetti, R. and Plizzari, G.A., Vol.1, pp.525-535, Varenna, Lake Como, Italy, Sep.2004
- 3) Nakamura, S., van Mier, J.G.M., Masuda, Y.: Fluidity of Hybrid Fiber Concrete Containing PVA Fibers, JCAセメントコンクリート論文集, No.58, pp.419-426, 2005.2
- 4) Nakamura, S., van Mier, J.G.M., Masuda, Y., Sato, S.: Fluidity of Hybrid Fiber Concrete Containing PVA Fibers of Multiple Combinations, JCAセメント・コンクリート論文集, No.58, pp.427-434, 2005.2
- 5) 中村成春, 有馬文昭, 高瀬憲克, 樹田佳寛, 小西敏正: セメント系複合材料に対する多機能型拘束変形試験機の開発, AIJ大会学術講演梗概集(北海道)材料施工, Vol.A-1, pp.291-292, 2004.8
- 6) Bentur, A., Kovler, K.: Evaluation of Early Age Cracking Characteristics in Cementitious Systems, Materials and Structures, Vol.36, pp.183-190, Apr.2003
- 7) 五十嵐心一, 川村満紀, 森下隆志: 若材齢における高強度コンクリートの内部組織の特徴と自己収縮拘束特性, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.173-186, 2002.5
- 8) 丸山一平, 朴宣圭, 野口貴文: 疑似完全拘束実験による若材齢コンクリートの時間依存力学特性, JCIコンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.357-362, 2002.6
- 9) 藤田敦正, 上田賢司, 佐藤嘉昭, 永松静也, 清原千鶴, 大谷俊浩: 自動制御機能を備えたひび割れ試験装置の開発, AIJ大会学術講演梗概集(関東)材料施工, Vol.A-1, pp.425-426, 2001.9
- 10) 中村成春, 萩原伸治, 樹田佳寛, 小西敏正: 繊維補強コンクリートの若材齢引張クリープ挙動における一考察, AIJ大会学術講演梗概集(関東)材料施工, Vol.A-1, pp.419-420, 2001.9

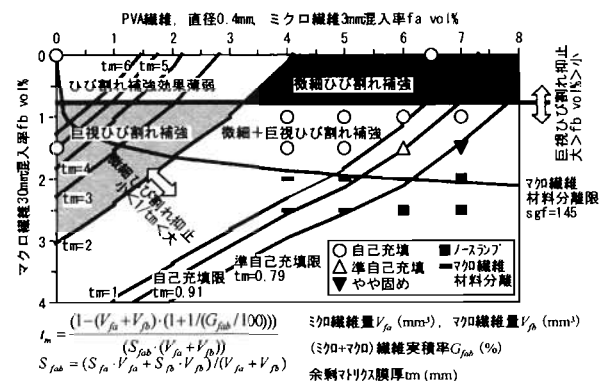


図-6 繊維補強とひび割れ発生抑制の関係