

論文 膨張型 HPFRCC でケミカルプレストレスを導入した RC 梁のひび割れ特性

高田 浩夫^{*1}・高橋 祐二^{*2}・浅野 幸男^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）と鉄筋を組み合わせる使用する場合、より高いひび割れ強度を実現するため、膨張材を添加した HPFRCC（以下 膨張型 HPFRCC）について、材料の長さ変化試験、鉄筋を配置したダンベル型供試体による一軸引張試験により膨張材の添加率を定め、RC 梁による曲げ載荷試験を実施した。本研究において膨張材を 6, 8, 10% 添加することにより、その添加率の増加に従いひび割れ荷重が顕著に増加し、載荷途中のひび割れ本数が減少すると共に引張鉄筋降伏時のたわみが減少することを確認した。

キーワード：HPFRCC, 膨張材, 長さ変化試験, ケミカルプレストレス, ひずみゲージ, ひび割れ発生荷重

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）は、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示し、微細で高密度の複数のひび割れを形成する高靱性材料である¹⁾。ひび割れ幅の制御を材料自身が行う点にこの材料の大きな特徴がある。引張抵抗を利用した適用、コンクリートへの劣化因子浸入抑制を目的とした適用や、大変形性能を活かした適用などが報告されている²⁾。

また、HPFRCC の一種に、マイクロメカニクスと破壊力学を設計原理としてミシガン大学の V. C. Li らにより開発された ECC（Engineered Cementitious Composite）があるが、この ECC と鉄筋を組み合わせた場合、ECC に多数のひび割れが分布して生じ、鉄筋降伏後も一体となって変形することが報告されている³⁾。

本研究では、遮水壁、水槽など高度に水密性の維持が要求される鉄筋構造物への適用を目的として、膨張材を添加した HPFRCC を膨張型 HPFRCC と定義し、HPFRCC と鉄筋を組み合わせる使用の場合に、より高いひび割れ強度の実現を目指し、膨張型 HPFRCC でケミカルプレストレスを導入した RC 梁の曲げ載荷試験によるひび割れ挙動を確認した。

2. 実験概要

表－1 使用材料

材料	仕様, 物性
高強度ポリエチレン繊維 (PE)	繊維径 12μm, 繊維長 12mm, 密度 0.98g/cm ³ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント (C)	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
膨張材 (EX)	JIS A6202 エトリンガイト・石灰複合系 密度 3.05 g/cm ³
細骨材 (S)	7 号珪砂, 密度 2.60g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (AD)	ポリカルボン酸エーテル系
増粘剤 (MC)	水溶性メチルセルロース系

2.1 HPFRCC の種類と配合

高強度ポリエチレン繊維を体積比で 1.5% 混入した HPFRCC を標準とした。膨張材は、結合材の質量に対する添加率で水準を設け、単位結合材量が一定となるようセメントと置換えて配合した。HPFRCC に用いた材料を表－1 に、標準とした配合を表－2 に示す。

2.2 膨張型 HPFRCC の長さ変化試験

膨張材添加率を 0, 2, 6, 10% とした HPFRCC について、JIS A 1129-3（ダイヤルゲージ法）により 40×40×160mm の供試体を用いて長さ変化試験を実施した。長さ変化率は、脱型時の測長を基準とした。供試体は、材齢 7 日まで 20℃ 水中で養生した後、JIS A 6202 附属書 1 に

表－2 HPFRCC の配合

配合	水結合材比 W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水 W	結合材 B		7 号珪砂 S	高性能 AE 減水剤 AD	増粘剤 MC	繊維 PE
			セメント C	膨張材 EX				
HPFRCC	30	379	1264		395	37.9	0.9	14.6

*1 岐阜県生コンクリート工業組合 技術センター所長（正会員）

*2 岐阜大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

*3 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士（工学）（正会員）

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博（正会員）

より 20℃の養生室内で臭化ナトリウムの飽和溶液を用いた平衡湿度 58%の雰囲気中で保存した。

また、HPFRCC の繊維による長さ変化への影響を確認するため、HPFRCC の配合から繊維を除いたマトリクスモルタルについても同様の膨張材添加率で試験を実施した。同時に円柱供試体を採取して膨張材の圧縮強度への影響を確認した。

2.3 ダンベル型供試体による一軸引張試験

2.2 で得られた膨張材添加率と長さ変化に関する情報を基に、膨張材添加率を 0, 6, 8, 10%とした HPFRCC のダンベル型供試体による一軸引張試験を実施した。ダンベル型供試体は、土木学会の設計・施工指針¹⁾に推奨する引張試験部の断面寸法 30×30mm、長さ 80mm のものを用いた。供試体は、JIS R 5201 に規定するテーブルバイブレータで型枠に振動を与えながら HPFRCC を打設した。材齢 1 日で脱型、7 日まで 20℃の水中で養生した後、試験室内で気中養生し材齢 13 日で載荷試験に供した。

また、膨張を鉄筋で拘束した場合のひび割れ特性を確認するため、膨張材添加率 0, 8%について上述のダンベル型供試体の軸方向中心部に D6 鉄筋 (SD295A) を配置したものを作製し一軸引張試験を実施した。

2.4 RC 梁による曲げ載荷試験

(1) 供試体の作製とケミカルプレストレインの計測

膨張材添加率を 0, 6, 8, 10%とした HPFRCC を用いた RC 梁を作製した。梁断面を図-1 に示す。せん断補強筋は配置せず、膨張による梁の反りを防ぐため複鉄筋

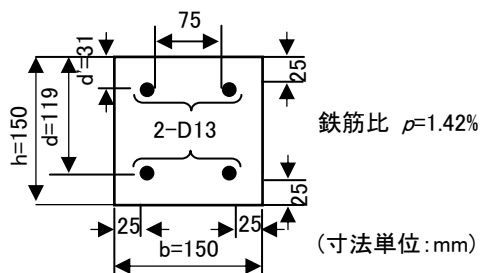


図-1 梁の断面

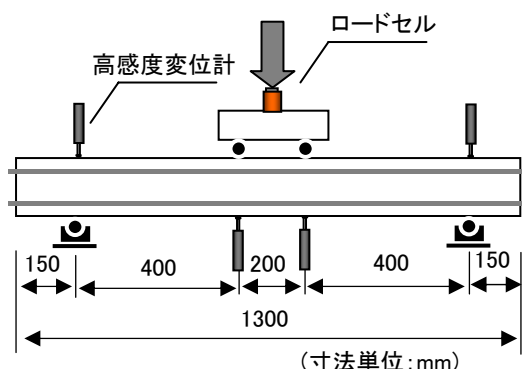


図-2 曲げ載荷試験方法

断面とした。HPFRCC の打設は、型枠に傾斜を設け端部から軸方向へ片側から一方向に HPFRCC を連続的に流し込み、型枠振動機を用いて締め固めた。材齢 1 日で脱型後、20℃の養生室において材齢 7 日まで湿布養生をした。

圧縮鉄筋にひずみゲージ (検長 3mm) 2 枚を相対する面に貼付し防水テープで養生して膨張材による鉄筋へのケミカルプレストレインを計測した。また同位置に熱電対を設置し、ひずみゲージを設置した近傍の部材温度を計測した。

(2) 曲げ載荷試験

梁供試体は、ケミカルプレストレスの経時変化と力学的性状の変化を確認するため各膨張材添加率において同時に 2 体作製し、その内 1 体を材齢 12 日で試験に供した。曲げ載荷試験方法は 4 点曲げ載荷とし、図-2 に示すよう等曲げスパンを 200mm、支点間距離を 1000mm とした。荷重をロードセル、支点、載荷点の変位を高感度変位計、圧縮縁のひずみをひずみゲージで計測した。

また、曲げひび割れの発生荷重を特定するため、検長範囲が等曲げ区間全てに及ぶよう検長 60mm のひずみゲージ 4 枚を一部検長区間が重なるよう引張縁に貼付した。

載荷試験においては、ひび割れ発生、30kN、40kN まで載荷した後除荷、次に 50kN、60kN、降伏まで載荷して再び除荷後たわみ 10mm、破壊に至るまで段階的に載荷を行い、各段階でひび割れ位置、幅を梁の等曲げ区間の引張縁でマイクロスコップを用いて計測した。

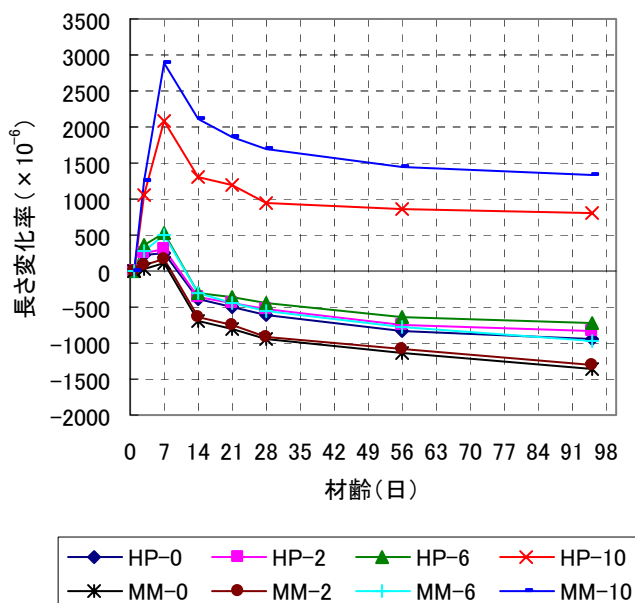


図-3 膨張材を添加した HPFRCC とマトリクスモルタルの長さ変化

3. 実験結果

3.1 膨張型 HPFRCC の長さ変化試験

長さ変化試験結果を図-3 に示す。図中の凡例は、HP は HPFRCC、MM はマトリクスモルタルを示し、添え字は膨張材添加率を表す。

いずれの供試体も、水中養生後に平衡湿度 58% の雰囲気中で保存すると一様な収縮傾向を示した。

HPFRCC における膨張材添加率と長さ変化の関係は、添加率 2% では膨張材の効果はあまり見られず、添加率 6% で 300×10^{-6} 程度収縮が低減され、添加率 10% で乾燥収縮後も 800×10^{-6} 程度膨張が維持されていた。また、繊維の影響について、HPFRCC はマトリクスモルタルに比べて長さ変化が小さく、乾燥収縮や膨張材による膨張が繊維に拘束されるものと考えられる。特に HPFRCC の乾燥収縮は、膨張材を添加しなくても、マトリクスモル

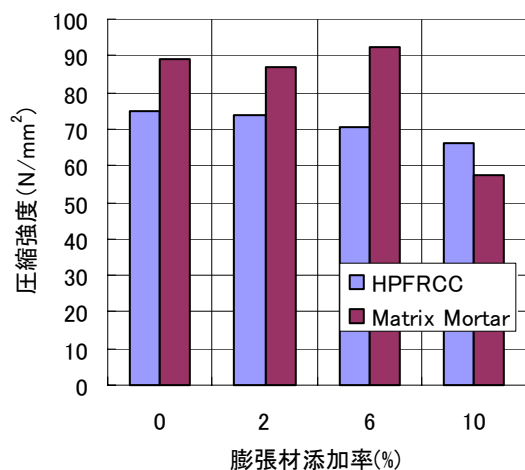


図-4 膨張材添加率と圧縮強度の関係

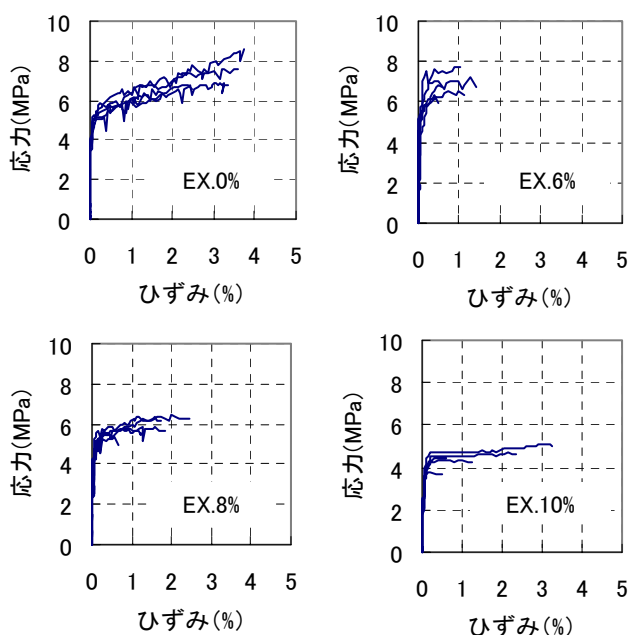


図-5 膨張材添加率と一軸引張試験結果

タルに膨張材を 6% 添加した場合と同程度の値を示した。

膨張材添加率と圧縮強度の関係を図-4 に示す。マトリクスモルタルでは、膨張材を 10% 添加すると過膨張による圧縮強度の低下が顕著であるが、HPFRCC では図-3 に示したよう膨張が拘束されることにより、強度低下の傾向は緩やかである。

3.2 ダンベル型供試体による一軸引張試験

膨張材添加率を 0, 6, 8, 10% とした HPFRCC のダンベル型供試体による一軸引張試験の結果を図-5 に、また鉄筋を配置したダンベル型供試体による一軸引張試験の結果を図-6 に示す。

自由膨張させた HPFRCC 単体による供試体の一軸引張試験では、膨張材添加による有効な効果はあまり見られなかった。膨張材を 10% 添加した供試体のひび割れは、複数の微細ひび割れが初期ひび割れの周辺に集中して発生した。これは、図-3, 4, 5 に示したように HPFRCC

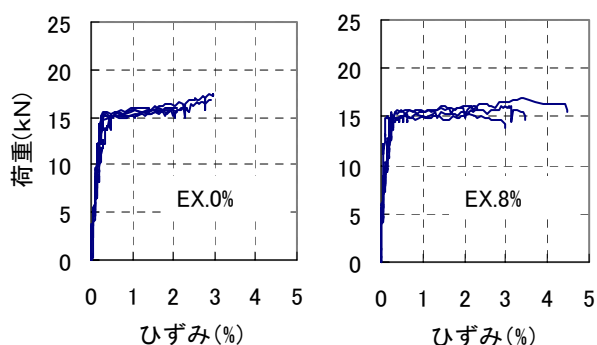


図-6 鉄筋を配置したダンベル型供試体による一軸引張試験結果

表-3 鉄筋を配置した供試体の引張特性値

膨張材添加率 0%							
供試体 No.	1	2	3	4	5	平均	標準偏差
ひび割れ荷重 (kN)	3.7	2.4	3.1	3.8	3.9	3.4	0.56
降伏荷重(kN)	15.1	15.6	15.5	14.9	15.1	15.2	0.27
最大荷重(kN)	16.8	17.4	16.0	15.8	16.0	16.4	0.61
終局ひずみ(%)	2.9	3.0	2.1	2.0	2.3	2.4	0.41

膨張材添加率 8%							
供試体 No.	1	2	3	4	5	平均	標準偏差
ひび割れ荷重 (kN)	5.1	5.4	4.7	4.6	4.3	4.8	0.43
降伏荷重(kN)	15.4	14.6	14.8	15.0	15.6	15.1	0.41
最大荷重(kN)	16.2	15.3	16.1	15.3	16.9	16.0	0.68
終局ひずみ(%)	2.3	2.1	3.1	0.6	3.4	2.3	0.98

に膨張材を 10% 添加すると大きな自由膨張が生じ強度が低下し、既往の研究⁴⁾によっても示されているように、ひび割れ強度と引張強度の差が小さくなったために、ひび割れが分散しにくくなったものと考えられる。

一方、供試体に鉄筋を配置した場合、表-3 に示すよう膨張材を 8% 添加した供試体は、添加していないもの比べて高いひび割れ強度を示した。これは、膨張材添加による HPFRCC の膨張を鉄筋が拘束することによりケミカルプレストレスが作用したためと考えられる。

3.3 RC 梁による曲げ載荷試験

(1) ケミカルプレストレインの計測

各梁供試体の圧縮鉄筋に貼付した 2 枚のひずみゲージの平均値の推移を図-7 に示す。曲げ試験に供した梁の鉄筋ひずみは、通常の HPFRCC を用いた梁では、自己収縮及び乾燥収縮により 356×10^{-6} の収縮を示した。

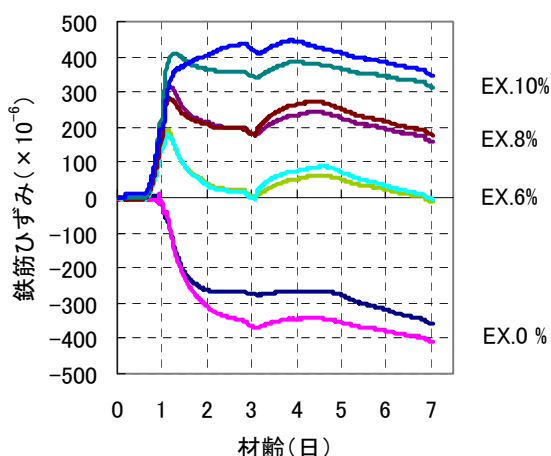


図-7 梁供試体に配置した鉄筋のケミカルプレストレイン

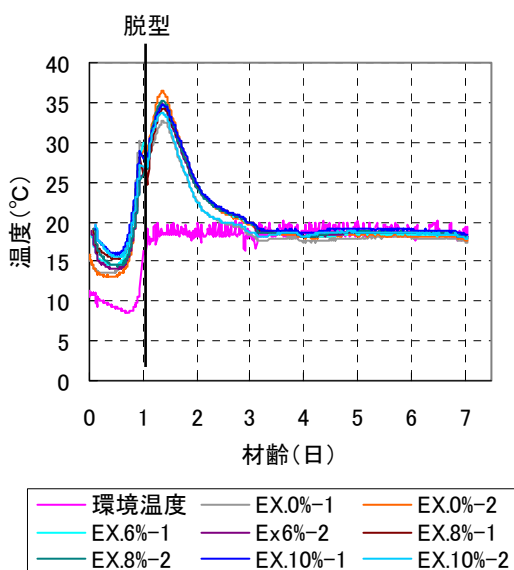


図-8 ひずみゲージを貼付した鉄筋近傍の部材温度

一方、膨張型 HPFRCC は、膨張材を 6% 添加したものは 350×10^{-6} 収縮が低減され 5×10^{-6} の収縮に留まり、添加率を増すと 8% で 178×10^{-6} 、10% で 347×10^{-6} のケミカルプレストレインが確認できる。このとき梁に導入されるケミカルプレストレスは、膨張材添加率 8% で 0.8 N/mm^2 、10% で 1.6 N/mm^2 となる。

梁の作製に当たっては、1 バッチ 70 リットルの HPFRCC を容量 100 リットルのパン型ミキサで練混ぜた。1 バッチの結合材量は 88.48kg となり、膨張材添加率 10% の場合セメント 79.63kg、膨張材 8.85kg の粉体を練混ぜて一体約 30 リットルの梁を 2 体打設した。大量の結合材を用いることで、化学変化が発熱などにより連鎖的に促進され、先に実験した小型の供試体と異なる長さ変化挙動を示すことが想定されたが、梁供試体における膨張材添加率と HPFRCC の膨張は、3.1 の長さ試験で実施した $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 供試体による結果と同様の傾向を示した。また、図-8 に示すようかぶり 25mm の圧縮鉄筋近傍で計測した部材温度は、膨張材の添加率に関係なく類似した履歴を示し、材齢 1.3 日頃に最高 35°C 程度に達した。

(2) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験において等曲げ区間の引張縁に貼付した 4 枚のひずみゲージによる各計測値と荷重の関係を図-9 に示す。4 個の計測値と荷重の関係をモニターしながら載荷すると、4 本の線は載荷に伴い弾性的に同一勾

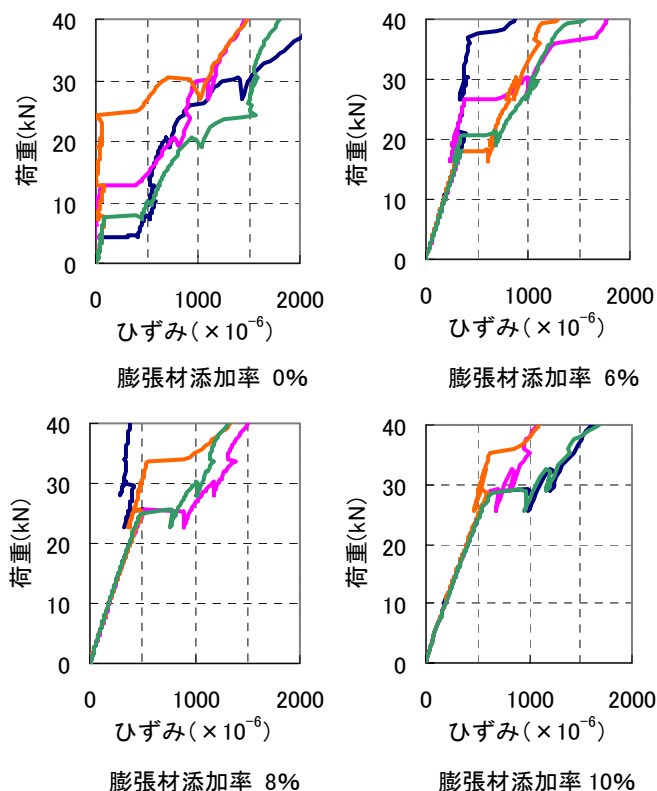


図-9 各梁の等曲げ区間に貼付した 4 枚のひずみゲージの計測値と荷重の関係

配で上昇するが、ある時点に一瞬で水平方向に移動する軌跡が1本現れた。このときに載荷を止め計測値が増大したひずみゲージの検長区間をマイクロSCOPEで観察すると、ひび割れの発生が確認できた。また、隣接するひずみゲージの検長区間でひび割れが発生した場合、ゲージは破断することなく、ひび割れの開口に伴い一方でひずみが減少する状況が確認できた。これにより、容易にひび割れ発生荷重と場所を特定することができた。

また、梁の降伏時には、前述の4枚のひずみゲージが一斉に大きなひずみを示し、梁が塑性変形に移る瞬間をモニターすることができた。これは、図-5に示したようなHPFRCCが鉄筋の弾性変形以上の変形性能を有し、鉄筋降伏点においてひび割れが局所化せず、複数微細ひび割れにより変形と共に開口幅が大きくならないため、ひずみゲージが部材の変形に追従できることによると考えられる。

以上の方法で特定した梁の載荷試験における荷重、たわみの計測値を表-4に示す。曲げ載荷試験における荷重とたわみの関係を図-10に示す。また、膨張材添加率と曲げ試験における各特性値との関係を図-11に、荷重とひび割れ本数、ひび割れ幅の合計の関係を図-12に示す。膨張材添加率が増えると、鉄筋の降伏荷重は僅かながら減少し、最大荷重（圧縮側のHPFRCCの圧壊開始点と一致）も減少した。これは、ケミカルプレストレスの影響により、中立軸位置が引張側へ少し移動し、断面内での圧縮合力と引張合力の距離（アームレングス）が減

表-4 梁の載荷試験における荷重、たわみ計測値

膨張材添加率 (%)	ひび割れ荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	降伏たわみ (mm)	最大荷重 (kN)
0	4.31	69.4	4.1	86.2
6	18.1	66.1	3.7	77.2
8	25.6	65.1	3.5	75.8
10	28.7	64.3	3.2	75.1

少したためと考えられる。

膨張材添加率が増えると収縮補償あるいはケミカルプレストレスの効果により、ひび割れ発生荷重は顕著に増加した。

また、膨張材添加率が増えると、ひび割れ本数が少ないために梁の剛性がさほど低下せず、引張鉄筋降伏時のたわみは明確に減少した。次頁に荷重 50 kN において RC 梁の等曲げ区間に発生したひびわれ幅のヒストグラムを次頁図-13に示す。

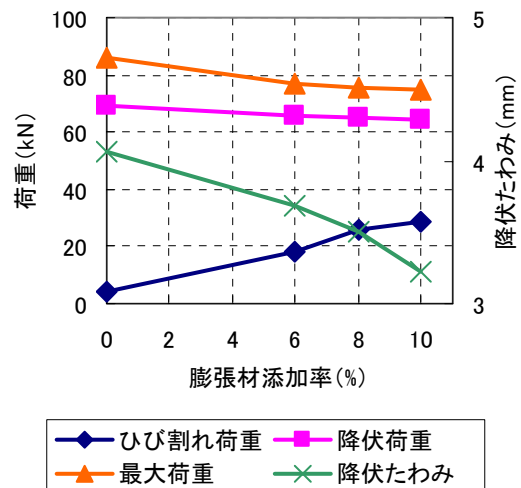


図-11 膨張材添加率と梁の曲げ特性の関係

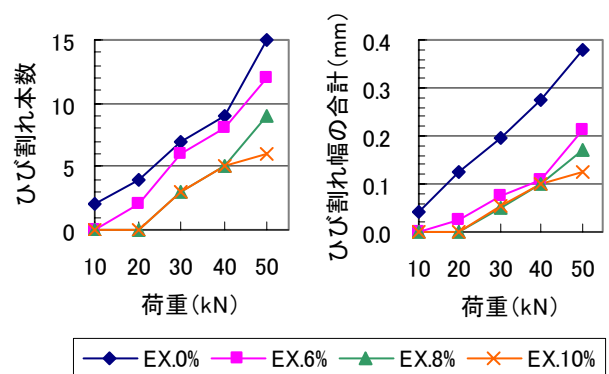


図-12 荷重とひび割れ本数、ひび割れ幅の合計の関係

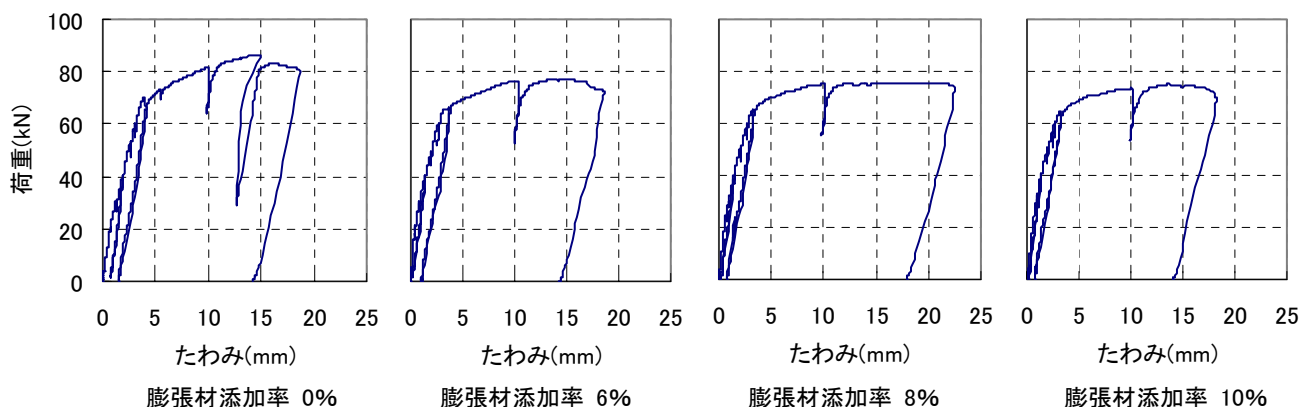


図-10 膨張型 HPFRCC を用いた RC 梁の荷重-たわみ曲線

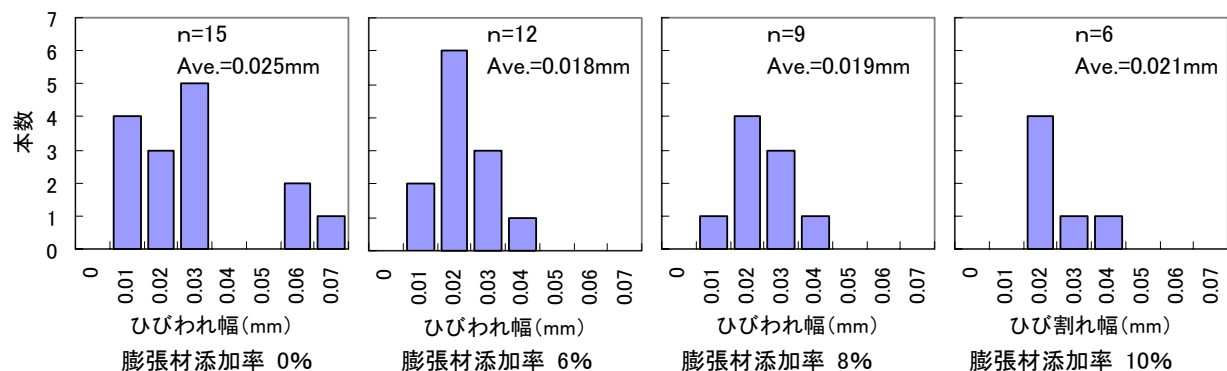
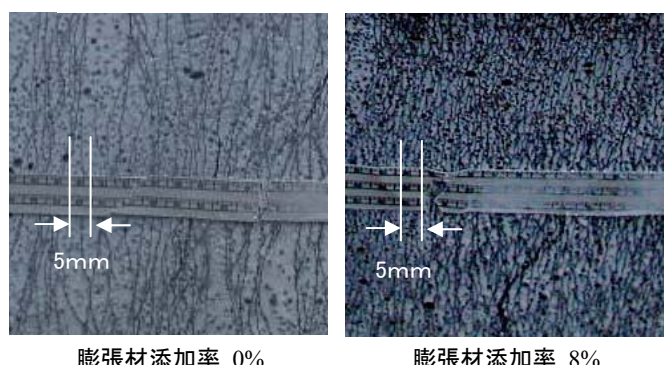


図-13 荷重 50 kN における膨張材添加率とひび割れ幅の分布



膨張材添加率 0%

膨張材添加率 8%

写真-1 曲げ荷重試験後の等曲げ区間引張縁における残留ひび割れの例

膨張材添加率ごとの平均ひびわれ幅に有意な差はないが、膨張材を添加すると 0.04mm を超えるひび割れが抑制されてひび割れ幅の分布は狭くなり、添加率の増加に従いひび割れ本数が減少した。

また、荷重試験後に残留したひび割れの特徴として、膨張型 HPFRCC は、写真-1 に示すように微細なひび割れが非常に密に発生する箇所があった。膨張が拘束されることによりマトリクスが緻密化して繊維のスリップが抑制されることなどにより、降伏まではひび割れ本数が少なく、その後、鉄筋が降伏して大きく塑性変形する領域の HPFRCC では、ひび割れ間隔が密になったと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) HPFRCC の膨張材による膨張と乾燥収縮による長さ変化挙動は、繊維により拘束される。積極的に膨張を与えるには 8% 以上の添加率が必要である。
- (2) ダンベル型供試体に D6 鉄筋を配置した一軸引張試験において、HPFRCC と鉄筋は一体性を維持して降伏後も変形した。膨張材を使用した場合は、鉄筋に

よる膨張拘束によりひび割れ荷重が増加した。

- (3) 膨張材を 8% 及び 10% 添加した膨張型 HPFRCC を用いた RC 梁においてケミカルプレストレスの導入が確認できた。
- (4) HPFRCC と鉄筋を組み合わせた部材のひび割れ発生、鉄筋降伏の特定には、引張縁に貼ったひずみゲージによるモニターが有効であった。
- (5) 膨張型 HPFRCC を用いた RC 梁は、収縮補償あるいはケミカルプレストレスの導入により、膨張材添加率の増加に従いひび割れ発生荷重が顕著に増加した。
- (6) 膨張型 HPFRCC を用いた RC 梁において、鉄筋降伏までに発生したひび割れ幅の平均は 0.02mm、最大ひび割れ幅は 0.04mm であり、膨張材添加率を増すとひび割れ本数が減少した。

参考文献

- 1) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127, 土木学会, 2007.3
- 2) 閑田徹志ほか: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の研究と構造利用の実例, コンクリート工学, Vol.44, No.3, pp.3-10, 2006.3
- 3) Victor C.Li: REFLECTIONS ON THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC), Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation -, pp.1-21, October 2002
- 4) 稲熊唯史, 山田裕一郎, 水田武利, 六郷恵哲: 材料強度のばらつきに着目した HPFRCC の引張特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.241, 2008.7