

補強繊維周囲の微細ひび割れが UHP-FRCC のクリープに及ぼす影響

EFFECT OF FINE CRACKS AROUND REINFORCING FIBERS ON CREEP BEHAVIOR OF UHP-FRCC

高桑 謙吾 (リハビリテーション工学分野)

*Kengo TAKAKUWA***Abstract:**

Ultra-high-performance fiber-reinforced cementitious composite (UHP-FRCC) exhibits high tensile strength and high energy absorption capacity, by incorporating a combination of different sizes of fibers. Limited results are available on the time dependent behavior of UHP-FRCC under sustained loading, which are strongly related to the real-life-structures. Here, experimental results are illustrated concerning bending creep behavior of cracked UHP-FRCC specimens using Digital Image Correlation, and pull-out behavior of hook-end reinforcing fiber from mortar of UHP-FRCC matrix. The results showed that the new crack occurred under sustained load, and the toughness of pulling out fiber was improved by existence of the reinforcing finer fibers. The cracks that occurred in the creep test are self-repairable crack widths, which assures sufficient durability even in long-term use.

Keywords : Diversity Favorability, Single-view-point townscape, 4-view-points townscape, Station plaza, Repertory grid method

曲げクリープ, UHP-FRCC, ひび割れ, 画像相関, たわみ硬化, 単繊維引抜試験

1. はじめに

超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料 (Ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites, 以後 UHP-FRCC) とは, 圧縮強度が 150 N/mm^2 以上, 引張強度が 5 N/mm^2 以上の力学的性能を持つ繊維補強セメント複合材料として定義される。Kwonらは, 大きさ, 形状の異なる複数種類の補強繊維を組み合わせることで, 異なる幅のひび割れを架橋させ, 極めて優れた力学特性を実現した UHP-FRCC を提案してきた²⁾。その結果, 一軸引張応力下においても複数微細ひび割れの発生と, これに伴うひずみ硬化特性を示し, 引張強度 20 N/mm^2 および最大荷重時ひずみ 1% 以上の高い力学的特性の両立を実現している。

UHP-FRCC の高い力学性能, 特に高靱性を発揮するためには複数微細ひび割れの発生に伴う擬似ひずみ硬化を前提としており, 引張応力下における微細ひび割れの発生自体を抑制するものではない。ひび割れは微細なものであっても, 耐久性への影響が懸念されるため, 土木学会・UFC 指針³⁾においては, 供用期間中にひび割れの発生を許容しない設計が求められている。一方で, UHP-FRCC の構造物への適用を考える場合, ひび割れが生じた後にも力学性能を維持できる特徴を活かすためには, ひび割れ後の力学性能や挙動の把握が必要である。しかしながら, UHP-FRCC のひび割れ発生後の性状に関する検討は十分とはいえない。

これらの背景から, 本研究では UHP-FRCC に用いる先端をフック加工した鋼繊維 (HDR) 単独の引抜試験を行って複数種類の繊維を用いた場合の補強メカニズムを確認するとともに, 上述の UHP-FRCC²⁾を対象として, 事前にひび割れを導入した試験体に対して曲げクリープ試験を行い, その性状を

実験的に取得した。また, クリープ試験中に撮影した試験体のデジタル画像を用いて画像相関法を適用し, クリープ载荷中のひび割れの変化を確認した。

2. 実験概要

ここでは, UHP-FRCC マトリックス中の補強繊維と, これに埋設される HDR 繊維の埋め込み角度をパラメーターとして HDR 繊維の引抜試験を行った。また, UHP-FRCC を対象として, 事前にひび割れを導入した上で曲げクリープ試験を行った。クリープ試験期間中は, 試験体表面を撮影したデジタル画像を用いての画像相関法により, クリープ载荷中のひずみ, および, ひび割れの分布図を作成して, 試験体の変形量を可視化した。

2.1 使用材料

使用した材料を表 1 に, 繊維の物性を表 2 に示す。ここでは, 補強鋼繊維として, 大きさと形状の異なる 3 種類の繊維を用いた。上述の HDR をマクロサイズ繊維と位置づけ, これより小さいメゾサイズ繊維 (以下, OL) にはストレート形状のものを用いた。これに加えて, ミクロサイズ繊維には, 鈹繊維であるワラストナイトを用い, モルタルマトリックスの一部として扱った。表 3 に示す調査表のように, $W/B=0.15$ とし, OL 繊維, HDR 繊維は, モルタルマトリックスに対して外割の体積比でそれぞれ 1% と 1.5% 混入した。

2.2 引抜き試験

引抜試験体は表 3 に調査表の NF, WF, SF シリーズの 3 種の調査について作製した。図 1(a) に示すように, フック加工鋼繊維の片側を切り落とした繊維を引抜面に対して垂直に埋め込んだ円柱試験体を用意した。打設後は材齢 2 日で脱型し蒸気養生 (90°C , 48 時間) を施し, 試験開始まで恒温室 (温

表1 使用材料

名称	略称	備考
セメント	C	シリカフェームプレミックスセメント（低熱ポルトランドセメント：82%，シリカフェーム：18%）密度：3.01 g/cm ³ ，比表面積：6,555 cm ² /g
細骨材	S	珪砂6号 密度：2.61 g/cm ³ ，最大粒径：0.212mm
ワラストナイト	Wo	鈹物繊維（繊維長：50~2000μm，アスペクト比：3~20），密度：2.9g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物，密度：1.05g/cm ³
消泡剤	D	ポリエーテル系，密度：1.05g/cm ³

表2 使用繊維

略号	形状	密度 [g/cm ³]	長さ [mm]	直径 [mm]	アスペクト比
Wo	針状結晶	2.6	0.156	0.012	13
OL	ストレート	7.85	6	0.16	37.5
HDR	両端フック	7.85	30	0.38	78.9

表3 調合表

シリーズ名	C W SP D S Wo OL HDR								
	(wt.%) (vol.%)								
UHP	100	13.3	1.7	0.02	35	13	1.0	1.5	
NF						-	-	-	
WF						13	2	13	-
SF						-	-	1.0	-

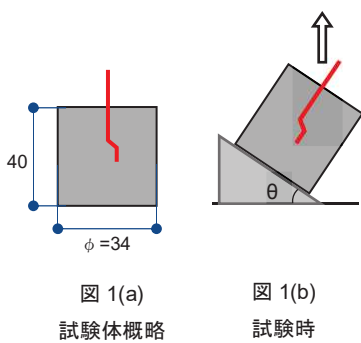
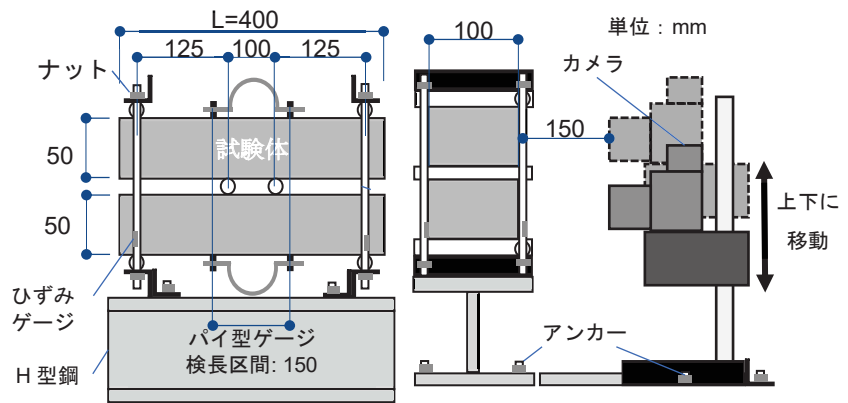


図1(a) 試験体概略

図1(b) 試験時

図1 引抜試験体概要図



(a) 試験体および荷重方法

(b) 画像相関法のための撮影装置

図2 曲げクリープ試験装置

度 20℃，相対湿度 60±10%）で気中養生を行った。

引抜試験に当たっては，図1 (b)のように引抜角度 θ が 0°と 30°となるように試験体を土台に固定し，繊維を鉛直方向に引抜いた。試験機のヘッドの変位を繊維の引抜量，すなわちすべり量とし，引抜速度はすべり量が 0.5mm/min とした。

2.3 曲げクリープ試験

試験体は表3の UHP シリーズの調合で，100×50×400 mmの角柱試験体として作製した。打設後は材齢1日で脱型し蒸気養生（90℃，48時間）を施し，試験開始まで恒温室（温度 20℃，相対湿度 60±10%）で気中養生を行った。

曲げクリープ試験に先立ち，前荷重として万能試験機を用いた4点曲げ試験によりひび割れを導入した。引張縁にはパイ型変位計（検長区間 150 mm）を取り付けて引張縁での変位を計測した。4点曲げ試験の荷重速度は引張縁変位によって制御を行い，荷重開始から引張縁変位が 0.1 mm となるまでの区間は 0.05 mm/min，それ以降は 0.2 mm/min とした。引張縁変位が 1 mm となったところで荷重を止め，その後は 0.2 mm/min で除荷した。

曲げクリープ試験に用いた装置を図2に示す。これに示すように，曲げクリープ試験は2体の試験体を1組として実施した。前荷重と同様の荷重点位置に丸鋼を設置して試験体で挟み，支点となる位置にも丸鋼を設置し，これを固定したアングルを試験体上下に設置した。このアングル同士を支柱（ス

テンレス鋼の全ネジ）によって繋ぎ，ナットを締め付けることで試験体を固定した。クリープ荷重は，このナットの締め上げることで導入し，支柱に取り付けたひずみゲージから計測される支柱のひずみと，ステンレス鋼のヤング率から換算して算出した。また，試験装置の都合上，荷重応力が時間と共に減少するため，ナットの増し締めにより荷重を調整した。クリープ試験時の荷重は，前荷重における除荷時の荷重の 60%と 80%を目標値とした。クリープ試験は恒温室（温度 20℃，相対湿度 60±10%）にて実施した。なお本試験においては，クリープ試験中に引張縁変位の増加に伴い荷重する応力が変化するため式(1)を用いて補正した引張縁変位を算出した。

$$\delta' = \frac{\delta}{\sigma_t / \sigma_0} \quad (1)$$

ここで， δ' は補正変位， δ は計測した変位， σ_t はクリープ試験中の応力， σ_0 はクリープ試験期間中の応力を示す。

クリープ変形時のひび割れの変化を可視化するため，クリープ試験期間中に試験体側面をデジタルカメラで連続的に撮影した。このデジタル画像を用いて，クリープ時のひび割れの変化を画像相関法⁵⁾によって観察した。図2(b)に示すように，カメラと試験体の相対的な位置関係を一定に保った。

クリープ試験期間中の乾燥収縮ひずみを考慮するため，試験期間中に同調合の試験体の長さ測定を行った。佐藤ら⁴⁾

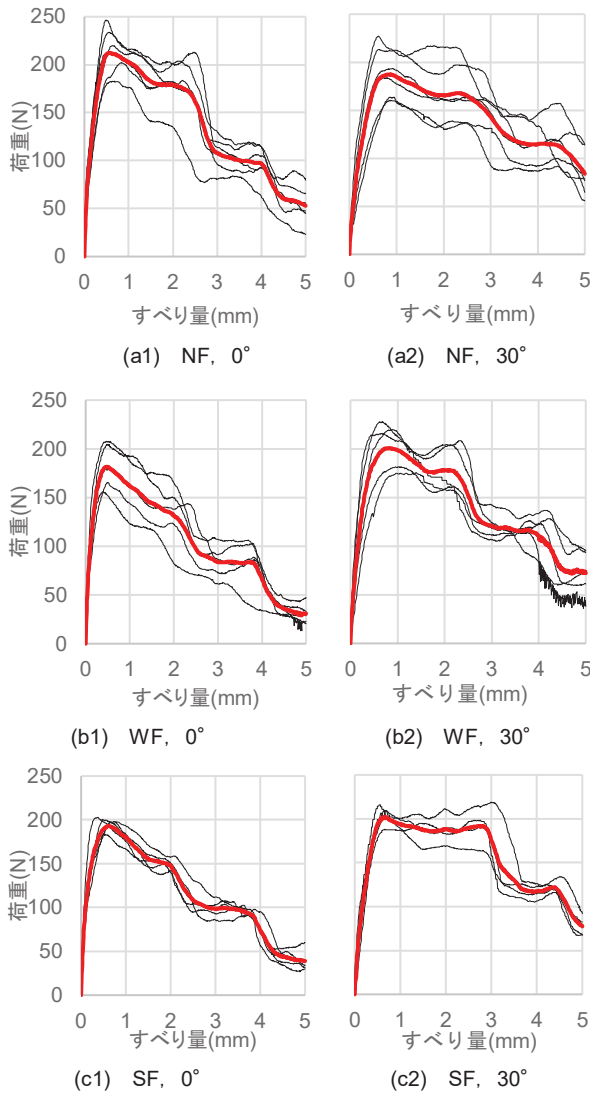


図3 各調合の引抜挙動

提案する乾燥収縮ひずみ予測式(2)を基に、計測値から試験期間中の収縮ひずみを算出した。

$$\varepsilon = \alpha \cdot \left[\frac{t}{1.1 \cdot (V/S)^{1.1} + t} \right] \quad (2)$$

ここで、 ε は乾燥収縮ひずみ、 V は計測試験体の体積、 S は計測試験体の表面積、 t はクリープ試験の時間、 α は係数を表す。係数 α は、乾燥収縮によるひずみの経時変化の実験値から得られる近似曲線を最小二乗法により求めて決定した。

3. 実験概要

3.1 引抜き試験

図3に各調合、各角度別のすべり量と荷重のグラフを示す。いずれの場合も、強度を維持したまますべり量のみが増加する部分が、2mmおよび4mm付近の2箇所を確認できる。これはフック部分が引き抜きの際に変形することで生じたものと考えられる。図4に最大強度、図5にすべり量5mmまでの破壊エネルギーを調合および角度ごとにまとめたグラフを示す。引抜角度を0°とした場合ではNFがやや大きいものの、その差は小さい。一方、引抜角度を30°とした場合では、マトリックス中の補強繊維の効果により強度の増加が見られる。これは、引抜表面部分でのマトリックスの破壊に伴うスナビ

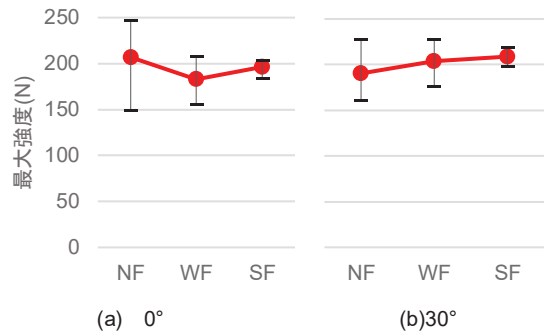


図4 最大荷重(左:角度0°, 右:角度30°)

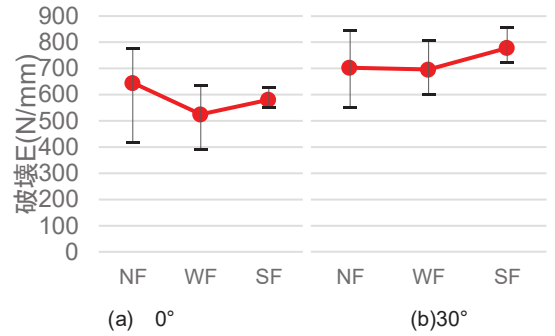


図5 破壊エネルギー(左:角度0°, 右:角度30°)

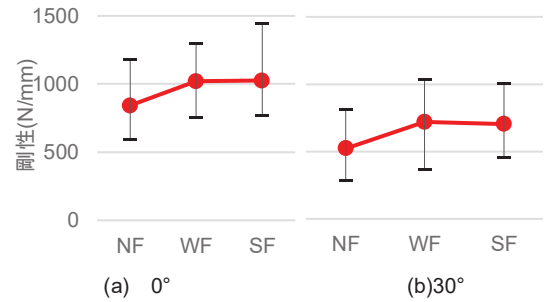


図6 各試験体の剛性

ング効果が、補強繊維の存在によりが大きくなったためと考えられる。

図5に各調合および角度の剛性を示す。いずれの埋め込み角度でもWF、SFの剛性がNFと比較して大きく、また、0°の方が30°よりも剛性が高い。このことから繊維の複数混入と繊維を荷重の方向に配向させることにより引抜抵抗性が向上すると考えられる。

3.2 曲げクリープ試験

図7に、前荷重からクリープ試験78日目までの引張縁変位と曲げ強度の関係を示す。この際、実測値から式(2)の係数 α を21.5として、乾燥収縮の影響を差し引いた。前荷重の段階においては、いずれの試験体もたわみ硬化領域で除荷されたことが確認できる。

図8にクリープ係数の経時変化を示す。60%の試験体と80%の試験体を比較すると、材齢50日程度までのクリープ係数の変化は荷重の大きさに差が見られなかった。それ以降は80%の試験体のクリープ係数は増大を続けているが、60%の試験体はその後の変化がほとんどない。荷重開始から78日時点でのクリープ係数は、80%の試験体では1.36と1.20、60%の試験体では0.88と0.79となっている。

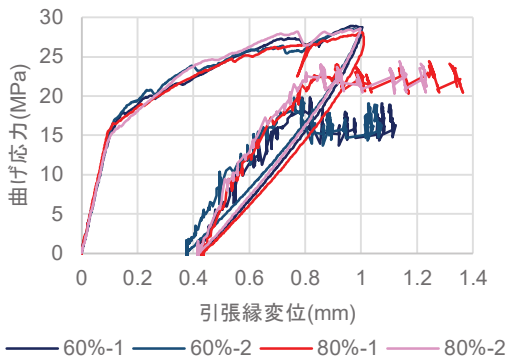


図7 応力と引張縁変位の変化

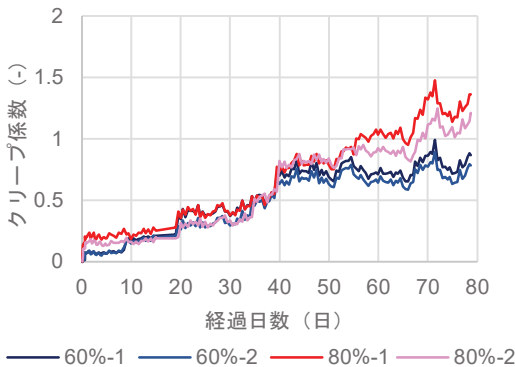


図8 引張縁変位の経時変化

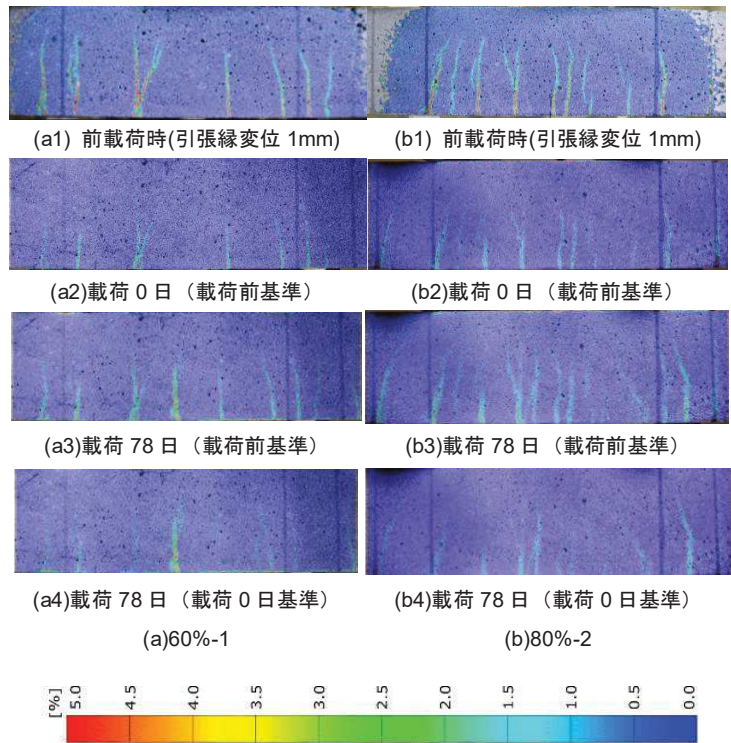


写真1 各試験体の画像相関法

写真1に画像相関法により得られた、60%-1 および 80%-2 の試験体側面の最大主ひずみ分布を示す。それぞれの試験体につき4枚の写真で示しており、(a)を例にとると、(a1)は前載荷により引張縁変位が1mmに達した時の画像、(a2)はクリープ載荷前の状態を基準とした、目標荷重到達直後の画像、(a3)はクリープ載荷前の状態を基準とした載荷78日での画像、および、(a4)は(a2)を基準とした載荷78日の画像を示している。(a1)図からは、前載荷時にはたわみ硬化の段階でひび割れが分散して生じており、また、(a2)図との比較から、前載荷で生じたひび割れの位置とクリープ載荷直後に開口していたひび割れの位置が一致していることが確認できる。クリープ載荷0日目時点で確認できたひび割れの本数は80%-1で13本、80%-2で10本であり、ひび割れ本数の少ない試験体の方がクリープ係数は大きい。ひび割れの分散化により、クリープ変形を抑制することが可能であることが示唆される。

また、写真1(a4)(b4)からは、既存のひび割れの幅が増大していると共にクリープ試験期間中の新たなひび割れの発生が確認できる。このことから、たわみ硬化段階の複数ひび割れを有するUHP-FRCCにおいては、クリープ時の挙動は単純に既存のひび割れの幅が増大するだけでなく、たわみ硬化の延長として変形しているものと考えられる。また、このとき60%-1に新しく生じているひび割れの幅は、画像相関法からは30 μ m程度と測定される。引抜結果から複数繊維混入によって引抜性状、とりわけ剛性の向上が見られており、これが既存のひび割れ幅の増大を抑制し、曲げ載荷時に見られる擬似たわみ効果をクリープ変形時にも生じさせたと考えられる。

4 まとめ

本研究では、混入繊維と埋め込み角度をパラメーターとしたフック加工鋼繊維の引抜試験と、事前にひび割れを導入したUHP-FRCCの曲げクリープ試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 繊維の複数混入と繊維を荷重の方向に配向させることにより、繊維の引抜抵抗性が向上する傾向が見られた。
- (2) クリープ載荷期間中に新たなひび割れが発生していることから、ひび割れを有するUHP-FRCCの曲げクリープ変形は、たわみ硬化が継続する形で生じる。
- (3) たわみ硬化の際に生じたひび割れの本数が多い場合には曲げクリープ係数が小さくなる傾向が見られる。
- (4) 引抜試験の結果と合わせて、複数繊維混入によってひび割れ幅増大が抑制され、たわみ効果の延長としてのクリープ変形が見られたものと考えられる。

参考文献

- 1) Naaman, A.E, Reinhardt, H.W.: Characterization of high performance fiber reinforced cements composites -HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC2), pp.1-24, 1995
- 2) Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T., Mihashi, H.: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, Vol.111, No.3, 2014.
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計，施工指針(案) 2004
- 4) 佐藤嘉昭，清原千鶴，寺西浩司，今本啓一，三橋博三，岡田秀敏：国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol. 597, 9-15, 2005
- 5) Pan, B., Qian, K., Huimin, X., Anand, A.: Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement, Measurement Science and Technology, Vol.20, No.6, Art.No.062001, 2009.
- 6) Kim, D.J., Kang, S.H., Ahn, T.H.: Mechanical Characterization of High-Performance Steel-Fiber Reinforced Cement Composites with Self-Healing Effect, Materials, pp508-526, 2014