

論文 ひび割れを有する UHP-FRCC の曲げクリープ時のひび割れ変化

高桑 謙吾^{*1}・西脇 智哉^{*2}・Kwon Sukmin^{*3}・五十嵐 豪^{*4}

要旨：近年開発が行われている UHP-FRCC（超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料）を対象に、予めひび割れを導入した状態において曲げクリープ試験を実施した。クリープ試験期間中にはクリープ係数の計測と併せて、画像相関法を用いて試験体表面でのひび割れ形状を経時的に観察した。その結果、UHP-FRCC はクリープ試験期間中にも新たなひび割れが生じていることが確認された。これは、クリープ変形がひび割れ導入载荷の際に見られる、たわみ硬化の延長として生じているものと示唆される。

キーワード：UHP-FRC, 曲げクリープ, 画像相関法, たわみ硬化

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¹⁾。著者らはこれまで、大きさ、形状の異なる複数種類の補強繊維を組み合わせ、圧縮強度 200 N/mm^2 級のマトリックスに対して適用することで、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⁾。ここでは、マルチスケール繊維補強として、破壊進行領域で生じる極めて微細なひび割れから、これらが統合して形成する目視可能なサイズのひび割れまで、それぞれのレベルに応じた適切な大きさの補強繊維を組み合わせる手法を提案している。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、特に高い靱性能の発揮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。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。この一方で、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、特に長期使用時におけるひび割れが生じた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 の力学特性に関するこれまでの膨大な検討と比較して、ひび割れ発生後のクリープ性状などに関する検討は十分とはいえない。

これらの背景から、本研究では著者らが開発してきた

異なる補強鋼繊維を用いた UHP-FRCC²⁾を対象として、養生条件の異なる試験体を作製し、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 を対象として、養生期間の異なる試験体を作製し、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。試験期間中は、変形量の測定に加えて、試験体表面を撮影した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 試験体概要

本研究で使用した材料を表-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。メゾサイズ繊維（以下、OL）にはストレート形状のものを、マクロサイズ繊維（以下、HDR）には両端フック加工のものをを用いた。これに加えて、ミクロサイズ繊維には、鉱物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うこととした。表-3 に調合表を示す。W/B=0.15 は共通とした。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。

試験体寸法は、曲げクリープ試験については $100 \times 50 \times 400 \text{ mm}$ の角柱試験体を用いた。

試験体は材齢 1 日で脱型した後、蒸気養生を施した。蒸気養生条件は、昇温速度は $15 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$ とし、最高温度である 90°C に達した後は 24 時間もしくは 48 時間の 2 水準で保持した。降温は自然放冷とし、蒸気養生終了後は恒

*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 現五洋建設（学生会員）

*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授（正会員）

*3 韓国土地住宅研究院 公共住宅研究室 責任研究員

*4 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教（正会員）

表－1 使用材料

名称	略称	備考
セメント	SFCS	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	マイクロサイズ繊維（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 鋼繊維の物性

	密度 (g/cm ²)	長さ (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (MPa)	アスペクト比 (-)
HDR（マクロサイズ繊維）	7.85	30.0	0.38	3000	78.9
OL（メゾサイズ繊維）		6.0	0.16	2000	37.5

表－3 調合表 (kg/m³，OL・HDRのみVol.%)

SFCS	S	Wo	W	SP	D	OL	HDR
1514.3	530.0	196.9	180.2	24.2	0.3	1	1.5

温室（温度 20℃，相対湿度 60±10%）で気中養生を施した。試験体のシリーズ名は，表－4 に示すように，クリープ試験時の目標荷重比率と，蒸気養生を施した時間およびクリープ試験までの気中養生日数とした。

2.2 前荷重

クリープ試験に先立って，前荷重によりひび割れを導入した。曲げクリープ試験用試験体に対し，アムスラー型万能試験機を用いて 3 等分曲げ荷重を行ってひび割れを導入した。引張縁にはパイ型変位計（(株)共和電業社製 BCD-5B，定格出力 1 mV/V（2000×10⁻⁶ ひずみ）±5%，分解能 1/400，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。

2.3 乾燥収縮

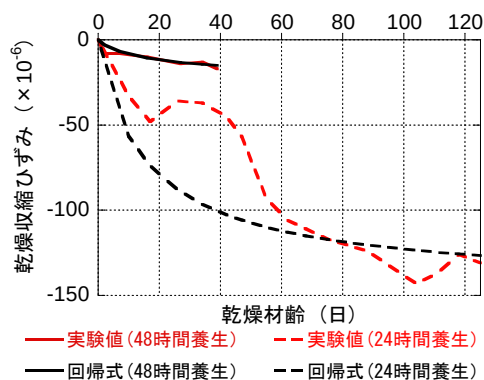
クリープ試験期間中の乾燥収縮ひずみを考慮するため，試験期間中に同調合のダンベル状試験体（土木学会指針⁴⁾による）を対象として長さ測定を行った。佐藤ら⁵⁾の提案する乾燥収縮ひずみ予測式を参考に式(1)を用いて図－1 に示す計測結果から試験期間中の収縮ひずみを算出した。

$$\varepsilon = \alpha \cdot \left[\frac{t}{1.1 \cdot (V/S)^{1.1} + t} \right] \quad (1)$$

ここで， ε は乾燥収縮ひずみ， V は計測試験体の体積（mm³）， S は計測試験体の表面積（mm²）， t はクリープ試験の時間（日）である。ここでは α を実験係数として

表－4 試験体名称

シリーズ名	蒸気養生期間—気中養生期間		
	目標荷重	蒸気養生	気中養生
60-24(7)	60%	24 時間	7 日
60-24(28)			28 日
60-48(44)	80%	48 時間	44 日
80-24(7)		24 時間	7 日
80-48(44)		48 時間	44 日



図－1 乾燥収縮計測結果

扱い，計測結果の近似曲線を最小二乗法により求め，蒸気養生を 24 時間とした場合には 144.3×10⁻⁶，48 時間の場合では 21.5×10⁻⁶と定めた。ただし，24 時間養生の場合は，明確な収縮挙動が確認可能な乾燥材齢となる 125 日までの実測値をもとに係数を算出した。以降の検討では，この式を用いてクリープ試験の結果から乾燥収縮の影響を差し引いた。

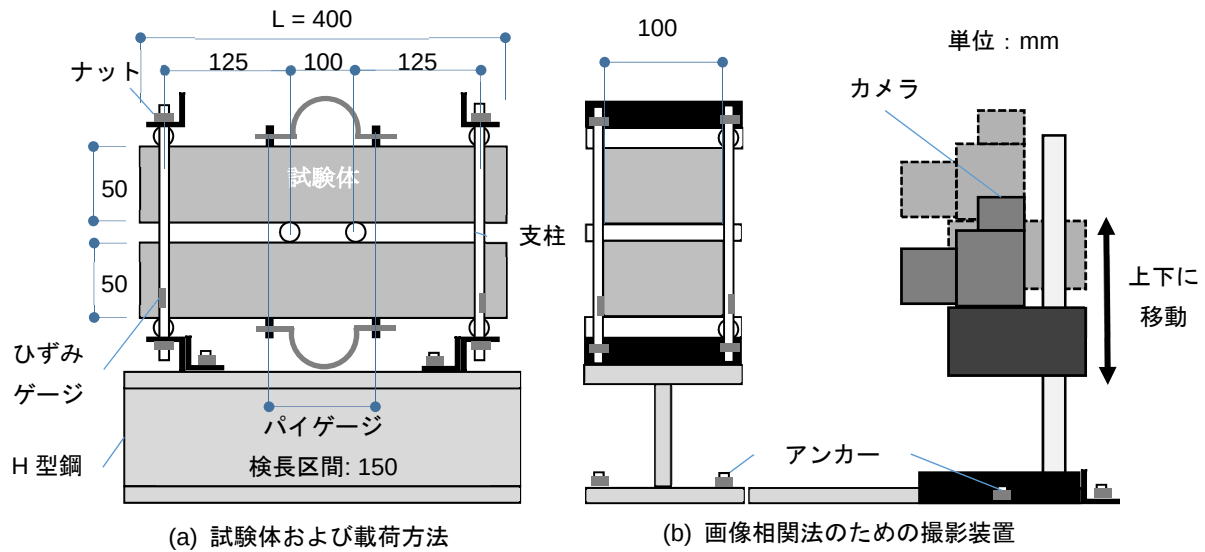


図-2 曲げクリープ試験装置

2.4 クリープ試験

曲げクリープ試験に用いた装置を図-2(a)に示す。ここに示すように、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。前載荷と同様に載荷点位置には丸鋼（S45C、直径30mm、ヤング率206GPa）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50mmのアンクルを試験体上下に設置した。このアンクル同士を支柱（ステンレス鋼（SUS304、M12、ヤング係数193GPa）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、このナットを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、載荷応力が時間と共に減少するため、目標応力からの誤差が10%を超えた場合に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、ひび割れ導入時の載荷試験における引張縁変位1mm時の荷重の60%と80%を目標値とした。クリープ試験は2体1組で行うため、各組では2体の平均値を目標値としている。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。本検討においては、クリープ試験中には前載荷と同じパイ型変位計を用いて引張縁変位を測定した。試験中は引張縁変位の増加に伴い載荷する応力が変化するため、引張縁変位を目標荷重当たりの値として、以下の式(2)を用いて補正した引張縁変位を算出した。

$$\delta' = \frac{\delta}{\sigma_t / \sigma_0} \quad (2)$$

ここで、 δ は計測した引張縁変位、 δ' は補正した引張縁変位、 σ_t はクリープ試験中の曲げ応力、 σ_0 はクリープ試験期間中の目標曲げ応力を示す。

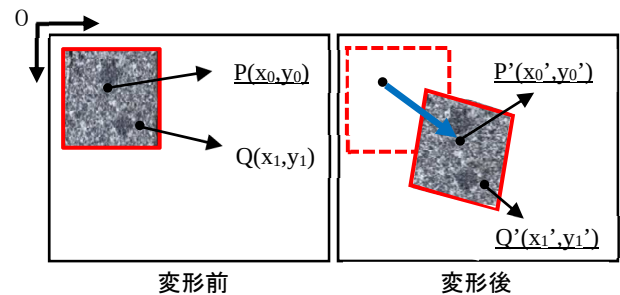
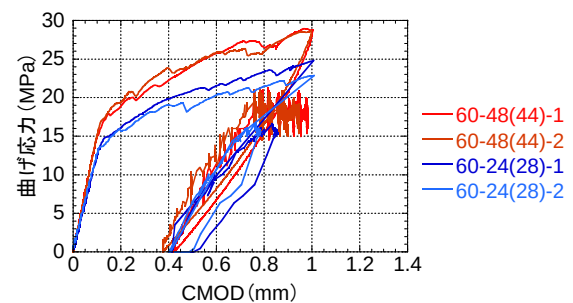
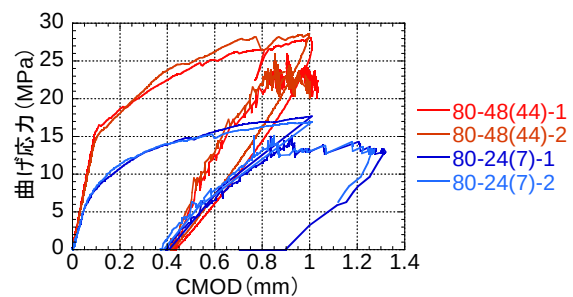


図-3 画像相関法のシステム⁶⁾



(a) 60%



(b) 80%

図-4 応力とCMODの変化

2.5 画像相関法によるひび割れの観察

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

(Nikon, D3300・D3400, 解像度 6000×4000 pixel (0.03 mm/pixel 程度)) で連続的に撮影した。このデジタル画像からクリープ時のひび割れの変化を画像相関法によって観察した⁹⁾。画像相関法は、変形前後の試験体表面を撮影したデジタル画像から、対象領域の差分を算出することにより、撮影した部分の変形前後の変位量を算出する手法である。図-3 に示すように、変形する物体を撮影し、変形前と変形後の画像を取得する。変形前の画像から一定の画素数の任意の領域(サブセット)を指定し、同一のサブセットを変形後の画像上から見つけ出す。このサブセットの移動量から変位量を求める。これを画像上のすべてのサブセットに対して行い、ひずみ分布をこれらの変位量から算出する。画像相関法を用いるためには、デジタル画像の差分を得る必要があるために、試験期間中、常に一定の位置関係で撮影を行う必要がある。ここでは、図-2(b)に示すように、まず土台となる H 型鋼を床にアンカーで固定し、これにクリープ試験体を固定したほか、カメラ台もアングルを介して床にアンカーで固定して、カメラと試験体の相対的な位置関係を一定に保った。また、リモコン式のシャッターを採用して、手振れなども含めてできる限り位置関係に動きがでないように配慮した。

3. 実験結果

3.1 曲げクリープ試験

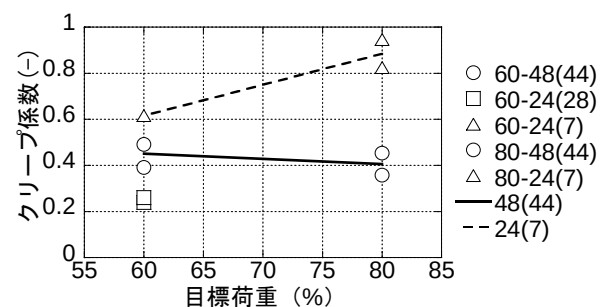
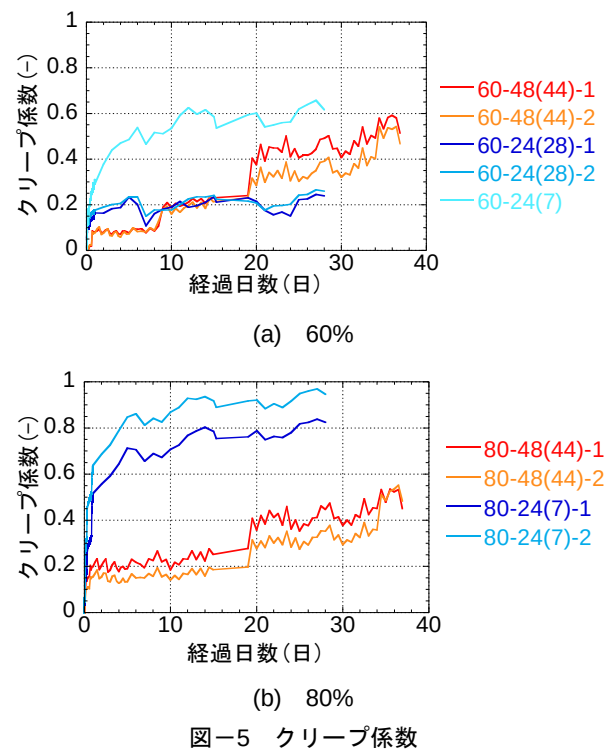
図-4 に、前载荷からクリープ試験 36 日目までの引張縁変位と曲げ応力の関係を示す。前载荷の段階においては、いずれの試験体もたわみ硬化領域で除荷されたことが確認できる。また、前载荷の結果からは、60-24(7)と 60-24(28)を比較すると、気中養生が長くなることで曲げ応力が増大していることが分かる。また、蒸気養生期間を 48 時間とした 60-48(44)については、曲げ応力が更に増加している。すなわち、本検討の範囲では 24 時間の蒸気養生では強度発現の途中段階であり、48 時間の蒸気養生によって十分な強度発現が得られたものと考えられる。

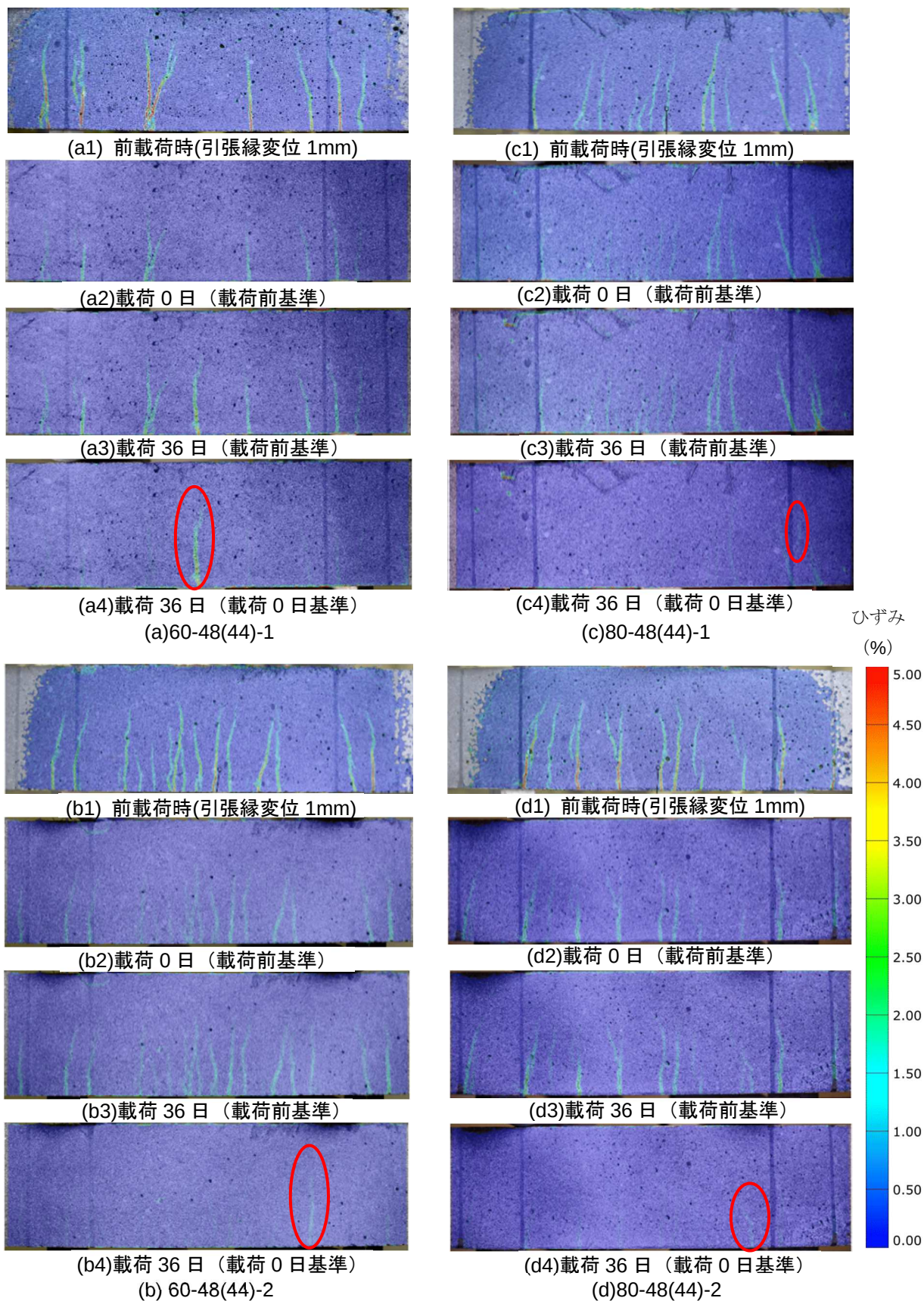
図-5 にクリープ係数の経時変化を示す。60-48(44)と 80-48(44)を比較すると、材齢 9 日までのクリープ係数は 80-48(44)の方が大きい、それ以降のクリープ係数の変化は荷重の大きさで差が見られず、载荷開始から 28 日時点でのクリープ係数は、80-48(44)では 0.45 と 0.36、60-48(44)では 0.39 と 0.49 とほぼ同じ値を示した。図-6 にそれぞれのシリーズのクリープ試験開始から 28 日時点でのクリープ係数示す。80-24(7)と 60-24(7)を比較すると、目標荷重を 80%とした 80-24(28)のクリープ係数が大きい。これに対して、80-48(44)と 60-48(44)を比較した場合、両者の差はほとんど見られない。これは、48 時間の蒸気養生、および、気中養生による水和反応の進展により、

ここでの载荷レベルではクリープ変形の抑制が可能であったためと考えられる。また、ここでは除荷時の応力を基準としているため、最大応力を基準に考えると、荷重レベルがやや抑えられている。ただし、限られた試験体数での結果のため、今後の追実験による検討が必要である。

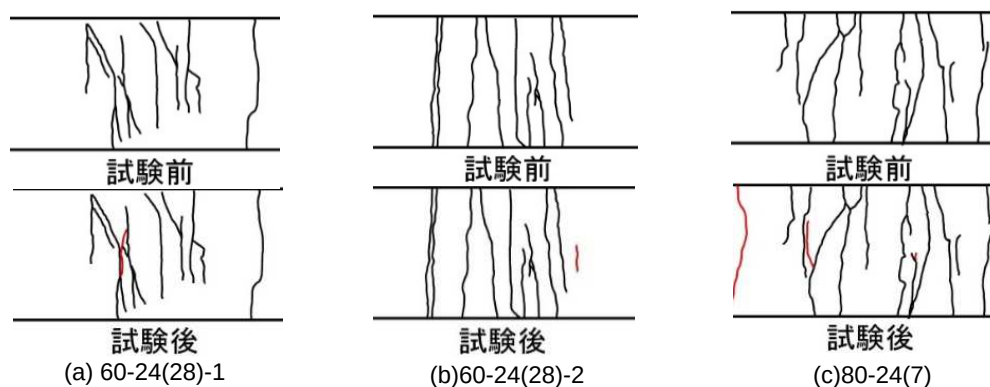
3.2 画像相関法によるひび割れ変化の観察

写真-1 に、画像相関法により得られた、60-48(44)および 80-48(44)シリーズの、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、写真-1(a)を例にとると、(a1)は前载荷により引張縁変位が 1 mm に達した時の画像、(a2)はクリープ载荷前の状態を基準とした、目標荷重到達直後の画像、(a3)はクリープ载荷前の状態を基準とした载荷 36 日での画像、および、(a4)は(a2)を基準とした载荷 36 日の画像を示している。また、図-6 に、60-24(28)および 80-24(7)のクリープ試験前後における引張面のひび割れ図を示す。このひび割れ図は、目視により取得した。写真-1(a1)か





写真—1 各試験体の画像相関法



図ー7 クリープ試験前後のひび割れ変化

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、写真ー1(a2)との比較からは、いずれの試験体においても、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を比較すると、同じ目標荷重の試験体では、ひび割れ本数の少ない試験体で計測されたクリープ係数が、ひび割れ本数の多い試験体よりも大きい値を示した。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、写真ー1(a4)~(d4)の赤丸部分に、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。60-48(44)シリーズ、および、80-48(44)-2では新たな1本のひび割れが引張縁側に発生しており、80-48(44)-1では既存のひび割れから分岐する形で新規のひび割れが発生している。この新規のひび割れが図ー5において載荷日数20日でクリープ係数が増大した要因と考えられる。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、60-48(44)シリーズを示した写真ー1(a4)、(b4)を見ると、既存のひび割れの幅が増大する一方で、クリープ後に発生したひび割れに変形がやや集中している。80-48(44)シリーズを示した写真ー1(c4)、(d4)では、変形は新規のものも含めてすべてのひび割れで均等に生じており、このことが図ー5に示した80-48(44)でのクリープ係数の変化量が60-48(44)と比較して小さかった要因と考えられる。

4. まとめ

本研究では、異なる種類の鋼繊維を複数混入したUHP-FRCCを対象に、予めひび割れを導入した試験体を用いて曲げクリープ試験を行い、画像相関法などによりクリープ中のひび割れの変化を観察・確認した。以下に、得られた知見をまとめる。

- 1) 本検証での載荷レベルでは、十分な水和進展によ

りクリープ変形の抑制が見られた。

- 2) 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。このことは、クリープ載荷期間中には既存のひび割れ幅の増大に加えて、新たなひび割れが生じていることから確認できる。
- 3) たわみ硬化の際にひび割れが分散して生じ、ひび割れ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。

謝辞

本検討は、日本コンクリート工学会・2016年研究助成、および、前田記念工学振興財団・平成29年度研究助成の一部として実施された。ここに記して謝意を表する。

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. et. al.: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, Vol.111, No.3, pp.309-318, 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)，総ページ数216pp., 2004
- 4) 土木学会：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)，総ページ数316pp., 2007
- 5) 佐藤嘉昭ら：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.70, No.597, pp.9-15, 2005
- 6) Pan, B. et al.: Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement, Measurement Science and Technology, Vol. 20, No. 6, Art.No.062001, 2009