

ひび割れを有する繊維補強セメント系複合材料のクリープ性状

CREEP OF FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES WITH CRACKING

大瀧 浩人 (ライフサイクル工学分野)

Hiroto OTAKI

Abstract:

In the last four decades, fiber-reinforced cementitious composite (FRCC) has been developed, which is to overcome the brittleness of concrete with discontinuous and randomly distributed fibers in the matrix. Nowadays many kinds of advanced FRCC are available. Ultra-high-performance fiber-reinforced cementitious composite (UHP-FRCC) exhibits high tensile strength, and high energy absorption capacity by incorporating a combination of steel and mineral fibers with different sizes in the mixture design. The high ductility of UHP-FRCC shows pseudo-strain hardening behavior with multiple cracking after the occurrence of the first crack. While extensive research on the tensile and bending behavior of this composite under short-term loading is reported, only limited results can be found on time-dependent behavior of UHP-FRCC under sustained long-term loading, which are strongly related to the situation of real structures. This thesis presents experimental results concerning time-dependent behavior of cracked UHP-FRCC and conventional FRCC specimens under sustained tensile and bending load. In tensile creep test, sustained tensile load with 60% of the initial load was applied to dog born shape specimens. The results showed that UHP-FRCC exhibited smaller tensile creep deformation than deformation on conventional FRCCs reported on previous studies. In bending creep test, sustained load with 50% of the initial load was applied to a pair of prismatic specimens under 4-point bending setups. The performance of UHP-FRCC is compared with those of conventional FRCC. The results showed that UHP-FRCC exhibited smaller flexural creep deformation than the conventional FRCC, even when the initial deformation of the UHP-FRCC is much larger than the conventional FRCC. Cracking pattern, in terms of crack width and number of cracks, was also studied in both composites under sustained loads. As a result, superior resistance of UHP-FRCC was obtained with respect to conventional FRCC.

Keywords : *Creep, FRCC, UHP-FRCC, crack width and number, creep coefficient.*

クリープ, FRCC, UHP-FRCC, ひび割れ幅・本数, クリープ係数

1. はじめに

近年, 持続可能な社会の構築が求められる中, 長期にわたる建築物の安全性が求められている。この時, 鉄筋コンクリート構造物の長期供用時に構造耐久性に影響する因子のひとつとしてクリープが挙げられる。コンクリートに生じるクリープは, 一定荷重が持続する場合に, 時間依存性の水和生成物の微細構造の変化やそれに伴う微細ひび割れの進行によりひずみが増加する現象である。クリープが発生した材料は, ひずみの増加によりヤング係数が変化する。そのため, クリープの影響が考えられる部材では, クリープによるひずみの進行を考慮した有効ヤング係数が用いられる¹⁾。

繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以下 FRCC) は既に膨大な研究成果があり, 現在も研究開発が進められている²⁾。例えば上述のクリープについては, FRCC とすることによって, 変形を抑制できるという報告がある³⁾。近年では高強度 (圧縮強度 150MPa 以上, 引張強度 5MPa 以上) かつ高靱性 (最大荷重時ひずみ 1%以上) を実現した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, 以下 UHP-FRCC) が実用化されつつあり⁴⁾, 緻密な微細構造から極めて高い耐久性が確認されている⁵⁾。この一方で, UHP-FRCC の高い力学性能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, その性能を十分に発揮させるためには微細ひび割れの発生が不可避である。すなわち, ひび割れが生じた状態での耐久性の検討を行う必要があるが, 特にひび割れ存在下のクリープ性状については, 一般的な FRCC も含めて十分に明らかになっていない。そこで本研究では, 近年 Kwon によって開発された UHP-FRCC⁶⁾を対象に, ひび割れ発生後の引張クリープ性状および曲げクリープ性状を実験的に取得し, また, 一般的な FRCC についても曲げクリープ性状を取得して, これらの結果について比較, 考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に用いた UHP-FRCC および FRCC の調合表を表 1 に示す。ここで用いる通常強度の FRCC は, RILEM 内に設

表 1 UHP-FRCC および FRCC の調査表

シリーズ名	C (kg/m ³)	W(kg/m ³)	SP(kg/m ³)	D(kg/m ³)	S(kg/m ³)	G(kg/m ³)	Wo(kg/m ³)	繊維 (vol.%)	圧縮強度 (MPa)
UHP(7d)	1,513	205	21	0.3	530	-	167	OL1.0+	187.5
UHP(28d)								HDR1.5	204.1
ST	350	175	-	-	1,132	709	-	0.38	34.8
SY								0.10	35.7

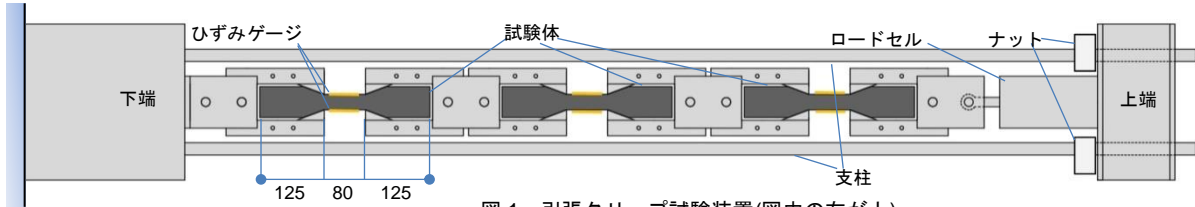


図 1 引張クリープ試験装置(図中の右が上)

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
St	両端フック	7.85	60	0.90	66.7
Sy	異形表面	-	40	0.60	66.7

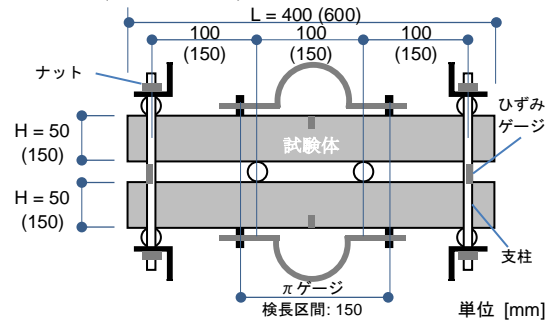


図 2 曲げクリープ試験装置

置された TC-CCF (Technical Committee - Creep behavior in Cracked Sections of Fiber Reinforced Concrete) が主導して実施しているラウンドロビンテストの一環として行われているものである。使用材料について、UHP-FRCC については結合材にシリカフェームセメント(C)、細骨材(S)に珪砂 6号、混和剤として高性能減水剤(SP)、消泡剤(D)を使用した。加えて、補強繊維として表 2 に示す Wo, OL, HDR の 3 種類の繊維を使用した。FRCC については結合材として普通ポルトランドセメント(C)、細骨材(S)として川砂、粗骨材(G)として石灰石を使用した。加えて補強繊維として表 2 に示す St (鋼繊維), Sy (合成繊維) をそれぞれ使用した。UHP-FRCC は打ち込みから 24 時間後の脱型まで養生室 (95%RH, 温度 20℃) へ静置し、その後、蒸気養生 (最高温度 90℃を 24 時間保持) を行った後、気中養生 (湿度 35%RH, 温度 20℃) を 7 日間行ってから試験に供した。加えて曲げクリープ試験では気中養生 28 日の試験体も試験に供した。FRCC 試験体は TC-CCF より提供されたものである。打ち込みから 24 時間後に脱型を行い、気中養生を 90 日以上行った。シリーズ名を FRCC は ST, SY とし、UHP-FRCC は 7 日養生を UHP(7d), 28 日養生を UHP(28d)とした。いずれのシリーズについても別途、無載荷の試験体の乾燥収縮ひずみを 7 日おきに測定し、佐藤ら⁷⁾の提案する式で内挿を行い、各クリープ試験のひずみから乾燥収縮によるひずみを減算した。そのため、以降に示す結果は全て乾燥収縮ひずみを減算した値として示す。

2.2 引張クリープ試験

ひび割れを導入した UHP(7d)の試験体を用いて一軸引張クリープ試験を行った。試験体はダンベル型試験体を使用した。ダンベル型試験体は試験体中央のくびれ部を検長区間

(80mm)とし、この区間の断面は 30×30mm である。引張クリープ試験に先立ち、インストロン型万能試験機を用いて 0.75%までひずみを与えてひび割れを導入した。図 1 に用いたクリープ試験装置を示す。試験体 3 体を連結した状態で、その上下端を装置に連結し、装置上端を支柱に取り付けたナットを締め上げ、上方向へ移動させることで、試験体に一定の引張応力を加えた。ひずみ 0.75%時の応力の 60%を持続応力として引張クリープ試験を行った。この時、荷重は装置に取り付けたロードセルにより、試験体のひずみは検長区間に設置したひずみゲージを使用して計測した。試験は、3 体の試験体を対象に恒温室で 28 日間行った。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。

2.3 曲げクリープ試験

ひび割れを導入した SY, ST, UHP(7d), UHP(28d)の試験体に対して曲げクリープ試験を行った。試験体は、SY, ST は 150×150×600mm の角柱試験体、UHP(7d), UHP(28d) は 100×50×400mm の角柱試験体とした。SY, ST はコンクリートカッターを用いて試験体中央底面に幅 5mm, 深さ 25mm の切欠きを導入した。

曲げクリープ試験に先立ち、アムスラー型万能試験機を用いて 4 点曲げ載荷でひび割れを導入した。SY と ST はひび割れ開口変位(CMOD)が 0.5mm まで、UHP-FRCC は引張縁変形が 1.0mm まで載荷してから除荷し、クリープ試験に用いた。クリープ試験の載荷は、図 2 のように 2 体の試験体を 1 セットとして行った。このとき図 2 中に示される数字は UHP(7d)と UHP(28d), 0内は SY と ST の試験に用いられる値である。4 本の全ねじボルトによる支柱端部に取り付けて

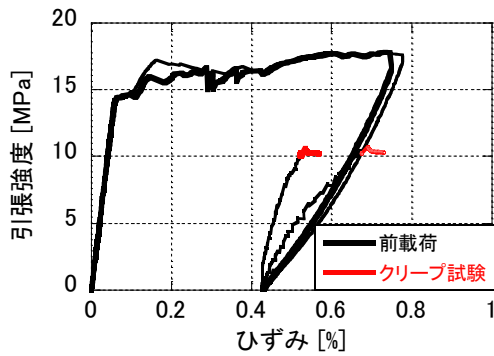


図3 引張クリープ試験の応力ひずみ関係

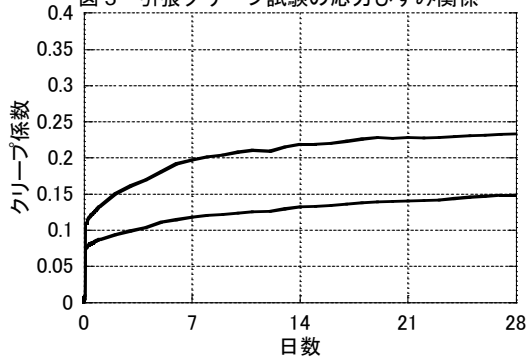


図4 クリープ係数の変化

あるナットを締め上げることで4点曲げ載荷を行い、前載荷の除荷開始時の応力の50%を目標として持続応力を与えた。このとき、荷重は支柱(SUS304, ヤング係数193GPa)に取り付けたひずみゲージの読み値から換算して算出した。CMODおよび引張縁の変位は、試験体底面の曲げ区間をまたぐように設置したπ型ゲージを用いて計測した。試験期間は28日間とし、SYを2体、STを4体、UHP(7d)を2、UHP(28d)を2体で実験を行った。

また、マイクロスコブを使用し、試験体底面において判別できたひび割れ(ひび割れ幅8μm以上程度)の本数を計測し、曲げクリープ試験前後でのひび割れ本数の変化も調べた。

3 実験結果

3.1 引張クリープ試験

前載荷と引張クリープ試験中の応力ひずみ曲線を図3に、式(1)より求めたクリープ係数の変化を図4に示す。

$$\phi = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{t0}}{\varepsilon_{t0}} \quad (1)$$

ここで、 ϕ :引張クリープ係数、 ε_t :時間 t での計測ひずみ、 ε_{t0} :初期ひずみである。ここでは、計測データが得られなかった1体を除く、2体分の結果について述べる。図3より、前載荷時にいずれの試験体も擬似ひずみ硬化を示す範囲内で除荷を行った。また、図4より引張クリープ係数は1日目に急激に変化し、その後は2次クリープが継続し、28日経過後の引張クリープ係数は0.15、0.23となった。Bissonnette et al.⁹⁾は、ひび割れを導入していない、鋼繊維を使用したFRCC(水セメント比40%、繊維添加量40~80kg/m³)の引張クリープ試験を行い、応力強度比0.4以下、28日の時点での引張クリープ係数が1.67~3.87となることを報告している。この

FRCCは表1に示したSTシリーズと大きく異ならない一般的なFRCCと分類され、本検討のUHP-FRCCで計測されたクリープ係数は、このようなFRCCに比べて優れた変形抑制性能を有しているといえる。これはUHP-FRCCの方がモルタルマトリックスの強度が高いことや、複数種類の繊維の使用によりひび割れ発生後の架橋性能が優れていることが理由として考えられる。

3.2 曲げクリープ試験

前載荷と曲げクリープ試験中の応力ひずみ曲線について、STシリーズを図5(A)に、SYシリーズを図5(B)に示す。UHP-FRCCの前載荷と曲げクリープ試験中の応力と引張縁変形の曲線を図5(C)に示す。図5(A)、図5(B)より、どちらの繊維も前載荷時にひずみ軟化が観察されたが、SYとSTを比較すると、SYの方が曲げクリープ試験中の変形が大きくなっている。このことから、曲げクリープ試験において、鋼繊維よりも合成繊維を使用したFRCCの方が、曲げクリープによる変形が進行しやすいと考えられる。この傾向は既往の研究でも見られ、両端フック加工による繊維の引き抜け抵抗性能⁹⁾や繊維自体のクリープによる変形性能¹⁰⁾が影響していると考えられる。図5(C)に示すように、UHP-FRCCはいずれの試験体も擬似ひずみ硬化を示す範囲内で除荷を行った。UHP(7d)とUHP(28d)を比較すると、UHP(28d)の方がクリープによる変形が小さくなった。これは、長期間の養生によるマトリックスの緻密化の影響であると考えられる。ひび割れが発生したUHP-FRCCにおいて、ひび割れ部分の引張力は繊維とマトリックスの付着によって負担されており、長期間の養生によってマトリックスの緻密化が進行することによって、繊維とマトリックスの付着強度が増加したと考えられる。前載荷時において、UHP(28d)がUHP(7d)に比べて強度が増加していることも同様の理由によるものであると考えられる。すなわち、ここで用いたUHP-FRCCは蒸気養生を施しているものの必ずしも十分な養生が得られておらず、追加的な養生期間を取ることによって強度が増大し、クリープの抑制効果についても得られたことが確認された。

式(2)、式(3)より求めた曲げクリープ係数の変化を図6に示す。

$$\phi = \frac{CMOD_t - CMOD_{t0}}{CMOD_{t0}} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{x_t - x_{t0}}{x_{t0}} \quad (3)$$

ここで、 ϕ :曲げクリープ係数、 $CMOD_t$:時間 t での計測CMOD、 $CMOD_{t0}$:クリープ試験開始時CMOD、 x_t :時間 t でのπゲージ変位、 x_{t0} :弾性変形時πゲージ変位である。図6に関して、SY、STのうち2体、UHP(7d)の試験体が5日程度まで急激に曲げクリープ係数が増加したが、その後ほぼ一定の割合で緩やかに増加した。SYの28日時点での曲げクリープ係数は1.22、1.46であった。この時、STは、収束した2体の試験体と収束しなかった2体の試験体がそれぞれ同じ試験装置に設置してあり、装置の違いがクリープの収束に関して影響を及ぼしたと考えられる。そのため、STのクリープ係数は0.52から1.17の範囲内の値であると考えられる。

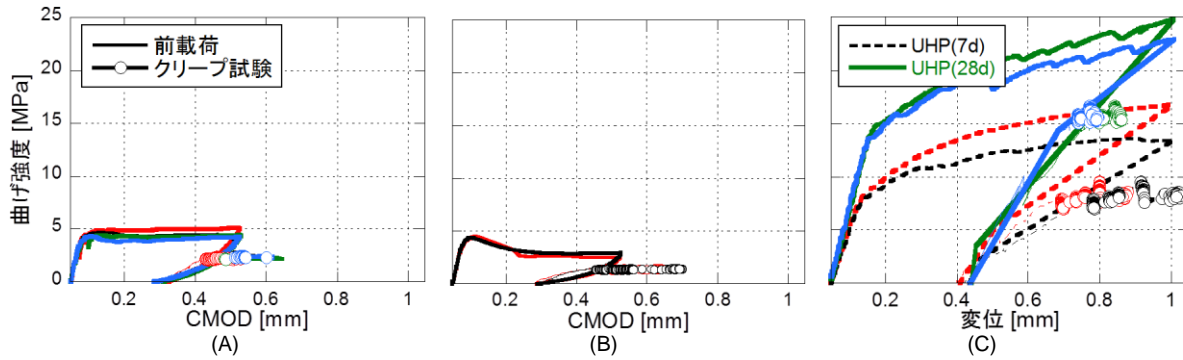


図5 CMOD/変形と曲げ応力の関係

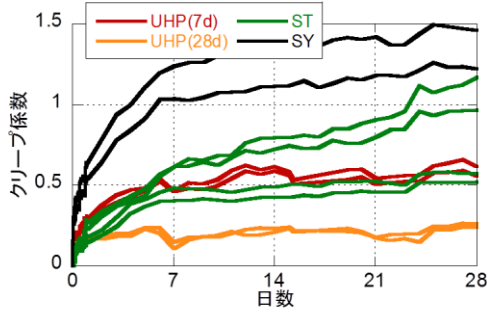


図6 クリープ係数の変化

また、UHP(7d)の曲げクリープ係数は0.55、0.62となった。UHP(28d)では、実験開始初日で急激に変化した但其後は緩やかに増加し、28日の曲げクリープ係数は0.25となった。SY、STと、UHP-FRCCの曲げクリープ係数を比較すると、UHP(7d)はSY、STと同等かそれ以下となり、UHP(28d)の値が最も小さい。本実験の試験体と3.2の試験体は試験体形状が異なるため、前載荷時における初期変形量を比較するために、式(4)を用いて曲率を求めた。

$$\phi = \frac{x}{(d/2) \times \Delta x} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

ここで、 ϕ ：曲率、 x ： π 型ゲージ変位、 d ：試験体高さ、 Δx ：曲げ区間である。前載荷時におけるUHP-FRCCの試験体の曲率の最大値は1/2500mm、SY、STの曲率の最大値は1/22500mmとなり、UHP-FRCCはSY、STに比べ9倍の変形を受けたことが確認された。UHP-FRCCは前載荷時にSY、STに比べて大きな変形を受けた状態においても、曲げクリープ係数が同等あるいはそれ以下になったことから、UHP-FRCCはFRCCに比べて曲げクリープによる変形を抑制できると考えられる。UHP-FRCCがSY、STに比べて曲げクリープによる変形抑制性能が優れている点は3.1節と同様の理由によるものだと考えられる。クリープ試験前と試験後の試験体底面におけるひび割れ観察の結果を図7に示す。図7より、UHP(7d)とUHP(28d)のどちらもクリープ試験後にひび割れ本数の増加が観察された。図7中のUHP(28d)画像中の赤線で囲われた部分の拡大図を図8に示す。図8より、クリープ試験前に生じていたひび割れ幅の増加がほとんどないことが観察された。このことから、持続荷重を受けるUHP-FRCCは、微細ひび割れ本数の増加を伴って変形が進行していると考えられる。このことから、UHP-FRCCの持続荷重による変形は擬似ひずみ硬化の延長として変形していると考えられる。

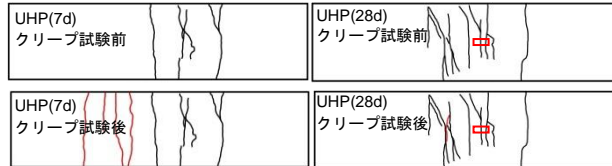


図7 クリープ試験前後の試験体底面のひび割れの変化
(黒：前載荷時のひび割れ、赤：クリープ試験のひび割れ)

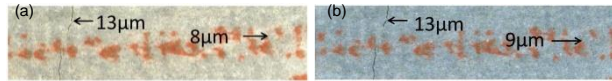


図8 ひび割れ部分拡大図(a)クリープ試験前、(b)試験後

4 結論

本研究では、ひび割れ発生後のFRCCとUHP-FRCCの引張クリープ性状と曲げクリープ性状の実験的取得を行い、両者の比較を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) UHP-FRCCのひび割れ発生時の60%持続荷重下における引張クリープ係数は0.15、0.23である。
- (2) UHP-FRCCの養生期間が長い方が、ひび割れ発生後のクリープによる変形の抑制性能が優れる。
- (3) UHP-FRCCは、FRCCに比べひび割れ発生時に大きな変形を受けているにもかかわらず、曲げクリープによる変形に対してクリープ係数が小さい。
- (4) UHP-FRCCの曲げクリープ変形はひび割れ本数の増加を伴って発生した。

参考文献

- 1) 社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、丸善株式会社、1987.9
- 2) 菊田 貴恒 他：繊維補強コンクリートの用語の定義と各種繊維補強材料、コンクリート工学、Vol.50, No.5, 2012.5
- 3) Nicola Buratti et al. : Long-Term Behavior of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete Beams, Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete RILEM Bookseries, Vol.1, pp.439-450, 2010
- 4) 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
- 5) 一宮 利通 他：高強度コンクリートの耐久性と構造物の高耐久化、コンクリート工学、Vol.49, No.5, 2011
- 6) Kwon S. : Development of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites Using Multi-Scale Fiber-Reinforcement System, Doctor Thesis of Tohoku University, 2015
- 7) 佐藤 嘉昭 他：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, 2005.11
- 8) Benoit Bissonnette et al. : Tensile creep of concrete : Study of its sensitivity to basic parameters, ACI materials journal, Vol.104, pp.360-368, 2007.7
- 9) R. Zerbio et al. : Creep behavior of cracked steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete, Materials and Structures, online first articles, 2016
- 10) Nicola Buratti et al. Temperature effect on the long term behavior of macro-synthetic and steel-fibre reinforced concrete, BEFIB2012, pp.715-725, 2012