

論文 拘束条件下における超高強度繊維補強コンクリートの応力状態に関する実験的研究

佐々木 一成^{*1}・朝居 一樹^{*2}・国枝 稔^{*3}

要旨：近年、高強度で耐久性が高い超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）の用途は多様化しており、例えば既設構造物に UFC を現場打設で打ち継いで耐久性を高める工法が採用されている。一方、UFC は水結合材比が低く自己収縮が大きいことから、拘束条件ではひび割れの発生が懸念され、ひび割れが発生していない場合においても、ひび割れ発生に対してどの程度余裕があるのか不明であった。そこで、UFC が常温で硬化する過程の応力状態について疑似完全拘束試験により確認し、拘束状態にあっても応力緩和によりひび割れが生じず、その余裕度も長期的に大きくなることがわかった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、疑似完全拘束試験、収縮、応力緩和

1. はじめに

近年、わが国ではインフラ構造物の老朽化が進んでおり、構造物の補修補強や更新が進められている。補修補強や更新技術には、耐久性が高く、再劣化しないことが求められる。このことから、高強度・高耐久である超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下、UFC と表記)¹⁾が補修・補強に活用されはじめている。なお、UFC は海外では UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) や UHPC (Ultra-High Performance Concrete) と呼ばれている材料である。

UFC は特殊なモルタルに高強度の鋼製短繊維を混入することにより、高い圧縮強度と引張強度を実現し、材料が緻密であるため外的因子が浸透しにくく、耐久性が高いといった特長がある。

UFC は高温熱養生により強度発現させるため、工場で作成されるプレキャスト部材として使用することが一般的であった。しかし、常温で高強度を発現する UFC が開発され、近年では、補修・補強や更新工事でコンクリート表面の被覆²⁾やプレキャスト床版の接合³⁾などに UFC を現場打設し、拘束した条件において常温で硬化させて使用するなど、使用方法は多岐にわたっている。

UFC は水結合材比が低く、自己収縮が大きいいため、収縮を拘束しない型枠とするなどの工夫が必要となる。また、拘束によりひび割れが生じないよう膨張材を混入するなど、材料の収縮を低減することにより対策を施す場合もある。一方、水が少ないため乾燥収縮がほとんどなく、全収縮量は一般的なコンクリートと同程度である。

コンクリート構造物の補修やプレキャスト床版接合部などでは、周囲が拘束された場所に UFC が打ち込まれ

ているが、多くの場合、ひび割れは発生しないか、発生しても軽微なものにとどまっている。適用にあたってはあらかじめモックアップを作製し、ひび割れの発生がないことが確認されているが、ひび割れが発生しないメカニズムやひび割れに対してどの程度の抵抗性（余裕度）があるのかは解明されていなかった。一方でセメント系材料では若材齢時のクリープ現象が知られており⁴⁾、応力緩和も考えられた。

そこで、常温で超高強度を発現する UFC を対象に、疑似完全拘束試験により、常温で硬化する UFC に発生している応力と強度の関係や収縮量などについて確認した。

2. 対象とする UFC

2.1 配合

本検討の対象とする UFC の配合を表-1 に示す。ポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体、粒径 5mm 以下の骨材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、標準養生により材齢 28 日で圧縮強度 180N/mm²、ひび割れ発生強度 8.0 N/mm²、引張強度 8.8N/mm² を満足する材料である⁵⁾。鋼繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2700N/mm² で 2vol.%混入している。

収縮によるひび割れ発生を抑制するため、膨張材を混入することを想定し、表-2 のように膨張材の有無をパラメータとした。膨張材の混入量は 20kg/m³ とした。

2.2 圧縮強度および静弾性係数

後述する疑似完全拘束試験と同一バッチ、同一条件 (20°C, 封緘) で養生した φ50×100mm の供試体の圧縮強度と材齢の関係を図-1 に、圧縮試験と同時に測定した静弾性係数と材齢の関係を図-2 に示す。なお、試験値は各 3 体の試験結果の平均値である。シリーズ 1~3

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 修(工)(正会員)

*2 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 環境社会基盤工学専攻

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博(工)(正会員)

表-1 試験の対象とした UFC の配合

| 水結合材比 (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | 鋼繊維 (kg/m ³) | 膨張材 (kg/m ³) |
|-----------|-------------------------|---------|-------------------|--------|--------------------------|--------------------------|
| | 水 | プレミックス材 | 細骨材 | 高性能減水剤 | | |
| 15.5 | 230 ^{※1} | 1830 | 330 ^{※2} | 32 | 157 | 20 |

※1 高性能減水剤の水分を含む

※2 表乾状態の単位量

表-2 試験の対象とした UFC

| シリーズ | 膨張材 | 試験期間 |
|------|-----|------|
| 1 | なし | 7日 |
| 2 | あり | 7日 |
| 3 | なし | 120日 |
| 4 | あり | 120日 |

の材齢 1~28 日で試験している。

膨張材添加の有無によらず、圧縮強度は材齢 1 日で 80N/mm² 程度、28 日で 170N/mm² 程度、強度発現している。静弾性係数は材齢 1 日で 35kN/mm² 程度、28 日で 48kN/mm² 程度となっている。

圧縮強度、静弾性係数とも材齢 1 日から 2 日にかけて急激に増加している。

2.3 ひび割れ発生強度

2.2 節と同一の方法で養生した φ100×100mm 供試体の割裂引張試験によりひび割れ発生強度を測定した結果を図-3 に示す。端面にひずみゲージを貼り、ひずみの値が大きく伸びた時点をひび割れ発生としている。

シリーズ 1 は材齢 5 日、28 日の強度が材齢 3 日、4 日より低いなど、強度発現にばらつきが見られた。シリーズ 2 およびシリーズ 3 は材齢 1 日でひび割れ発生強度 5~7N/mm² 程度、28 日で 11N/mm² 程度となっており、膨張材添加の有無によるひび割れ発生強度の差は見られない。

2.4 収縮

自由収縮ひずみ試験を、JSCE-K 561-2013 で規定されている寸法安定性試験に進じて行った。この方法は 100×100×400mm の型枠内に長さ 100mm の埋込み型ひずみ計を埋設し、若材齢時の収縮ひずみを測定するものである。打設後は塩化ビニル製のシートでラップすることで乾燥を防いだ。打設後 24 時間経過後脱型を行い、以後シートでラップし密閉したコンクリートの自由収縮ひずみを埋め込み型ひずみ計で測定した。試験期間は表-2 のとおりである。

試験結果を図-4 に示す。膨張材を添加していないシリーズ 1、シリーズ 3 では材齢 1 日で 300×10⁻⁶ 程度、膨張材を添加したシリーズ 2、シリーズ 4 で 140~200×10⁻⁶ 程度の収縮量である。また、材齢 120 日でシリーズ 3 が 700×10⁻⁶ 程度、シリーズ 4 が 500×10⁻⁶ 程度である。若材齢において膨張材の添加による収縮低減効果があり、長期的にみても収縮量を 200×10⁻⁶ 程度低減する効果がある。

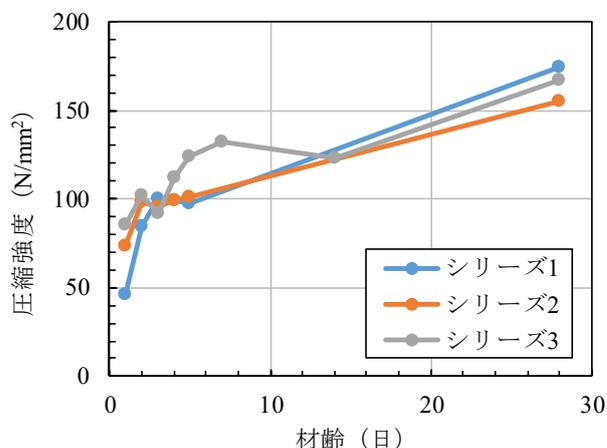


図-1 圧縮強度

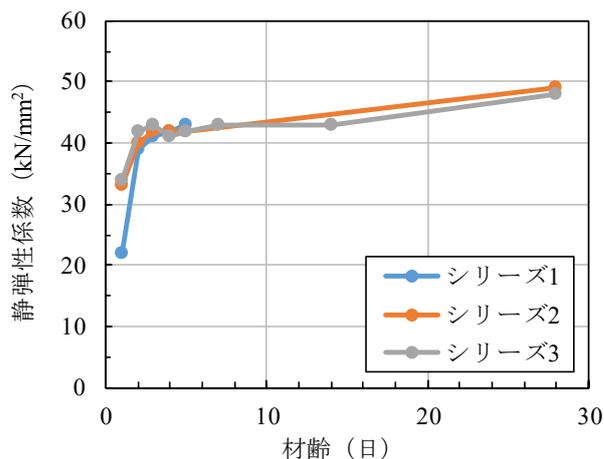


図-2 静弾性係数

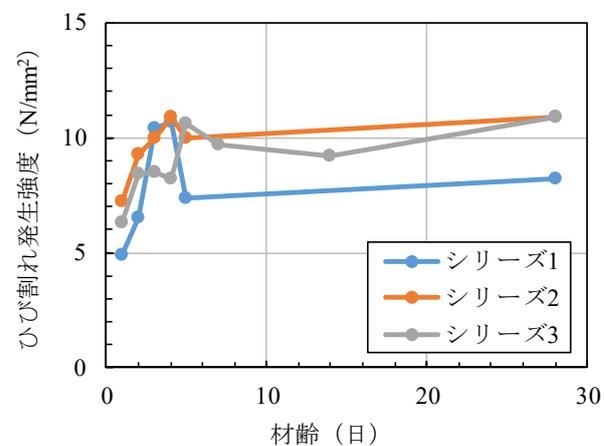
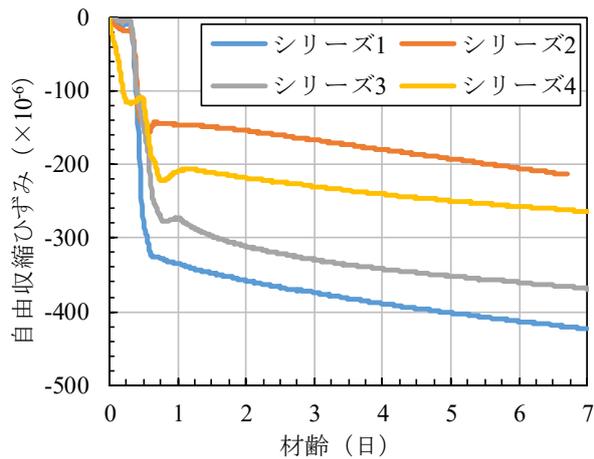
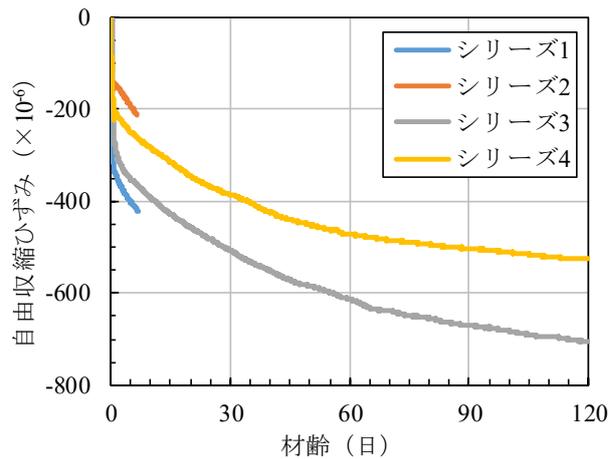


図-3 ひび割れ発生強度



(a) 若材齢時



(b) 全試験期間

図-4 自由収縮ひずみ

3. 疑似完全拘束試験

3.1 概要

疑似完全拘束試験とは、コンクリートの自己収縮や乾燥収縮といった変形に対してのコンクリートの挙動を評価するために開発された試験であり、打設直後からコンクリートの変形を一軸方向に擬似的に完全に拘束するものである。疑似完全拘束試験機はマスコンクリートの温度変化による内部応力を測定する目的で開発された試験機 (Temperature Stress Testing Machine) ⁶⁾ を応用したものである。試験機の概要を図-5 に示す。供試体の形状は図-6 のようにドッグボーン型をしており、試験機に設置された型枠に直接材料を打設することで供試体を作製する。試験機は固定グリップ、可動グリップと、高剛性フレームによって構成される。試験の制御として供試体中央に検長区間をとり、供試体の収縮によって変化する変位をパイゲージで計測する。ある一定の変位が生じた後、検長区間が元の長さとなるようにパイゲージの変位を確認しながら手動ジャッキにより可動グリップを動かす。可動グリップにはロードセルが接続されており荷重が計測される。

疑似完全拘束試験では、検長区間のひずみを0に補正した後の応力状態を一定とみなすことで、自由収縮ひずみからクリープひずみを求めることができる。図-7 のように拘束試験体の荷重が変化するとき(ひずみ補正時)の弾性ひずみを足し合わせた累積収縮ひずみ(収縮ひずみ+クリープひずみ)と自由収縮ひずみの差がクリープひずみとなる。

なお、弾性ひずみは供試体の長さを元に戻す際に変化させた変位量を、検長区間の長さで除することにより、収縮ひずみ+クリープひずみは検長区間で計測された変位量を検長区間の長さで除することにより、それぞれ求めることができる。

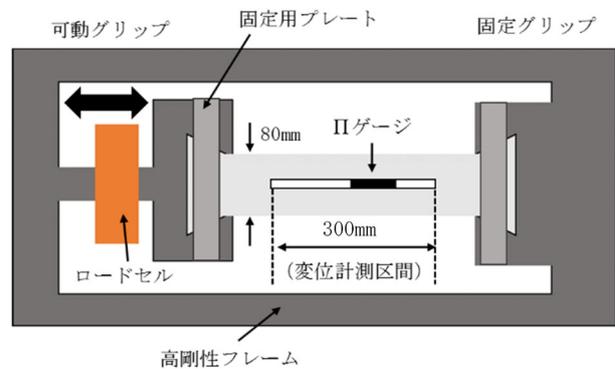


図-5 疑似拘束試験機の概要

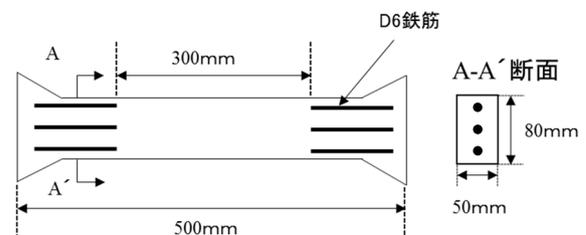


図-6 供試体の諸元

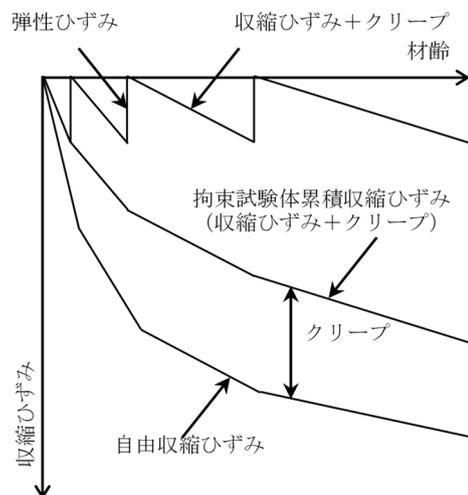


図-7 クリープひずみの概要⁶⁾

3.2 実験方法

室温 20℃の恒温室（湿度 40～50%）において、試験機にセットした型枠に厚さ 0.05mm の塩化ビニルシートを敷き、UFC を打設して供試体を作製した。UFC の練り混ぜは 20 リットルのホバートミキサーにより行った。供試体の寸法は長さ 500mm、幅 80mm、厚さ 50mm とし、試験中に検長区間でひび割れの発生および破壊が生じないように、長さ 70mm の D6 鉄筋を両端に各 3 本ずつ配置した（図-6）。打設後は乾燥収縮の影響を低減するために、塩化ビニルシートでラップを施した。打設後 12 時間で型枠を撤去し、再度塩化ビニルシートで供試体を覆って封緘状態とし測定を開始した。試験中は拘束荷重と検長区間の変位を計測した。検長区間は供試体中央に 300mm とり、供試体の収縮によって変化する点を精度 1/1000mm のパイゲージで計測した。ひずみの値が 10×10^{-6} 変化した時に、可動グリッパを動かして元の長さとなるように変位の補正を行った。実験ケースは表-2 に示したとおりである。

3.3 実験結果

(1) 概要

試験により計測された各材齢における拘束応力とひび割れ発生強度の比較を表-3～6 および図-8 に、累積収縮ひずみと自由収縮ひずみの比較を図-9 に、クリープひずみの経時変化を図-10 に示す。

いずれのシリーズにおいても試験期間中、UFC に目視によるひび割れは観察されなかった。クリープひずみが計測されており、拘束応力が緩和されたためと考えられる。

(2) 拘束応力

試験期間中、いずれのシリーズにおいても拘束応力は

表-3 各材齢におけるひび割れ発生強度と拘束応力の比較（シリーズ 1）

| 材齢 (日) | ひび割れ発生強度 (N/mm ²) | 拘束応力 (N/mm ²) | 比率 (%) |
|--------|-------------------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 4.9 | 1.8 | 37 |
| 3 | 10 | 3.3 | 32 |
| 5 | 7.4 | 3.5 | 47 |

表-4 各材齢におけるひび割れ発生強度と拘束応力の比較（シリーズ 2）

| 材齢 (日) | ひび割れ発生強度 (N/mm ²) | 拘束応力 (N/mm ²) | 比率 (%) |
|--------|-------------------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 7.2 | 1.4 | 19 |
| 3 | 10 | 1.6 | 16 |
| 5 | 10 | 1.8 | 18 |

表-5 各材齢におけるひび割れ発生強度と拘束応力の比較（シリーズ 3）

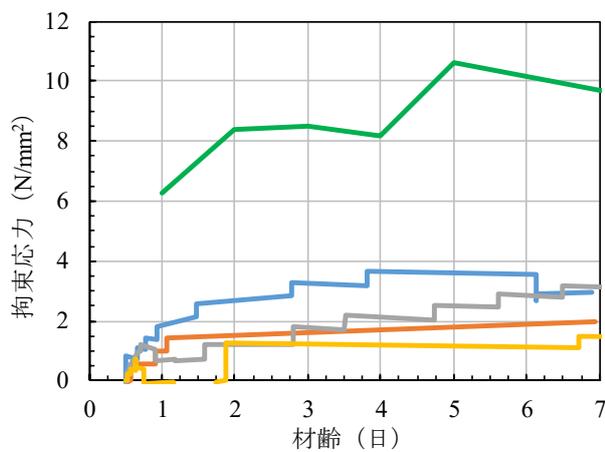
| 材齢 (日) | ひび割れ発生強度 (N/mm ²) | 拘束応力 (N/mm ²) | 比率 (%) |
|--------|-------------------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 6.3 | 0.7 | 11 |
| 28 | 11 | 3.8 | 35 |
| 120 | 11* | 3.1 | 28 |

※ 材齢 120 日におけるひび割れ発生強度は材齢 28 日時点と同等とした。

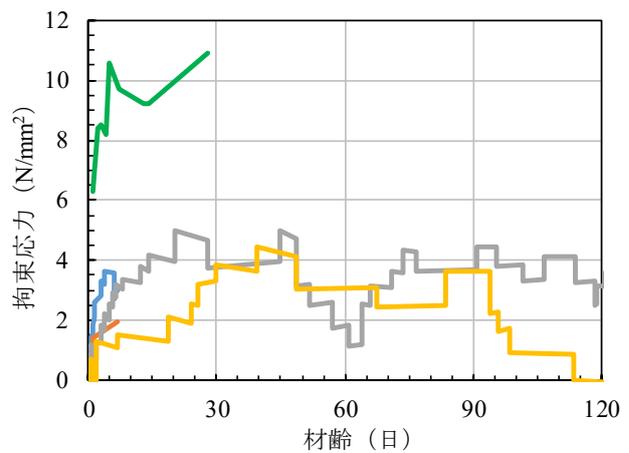
表-6 各材齢におけるひび割れ発生強度と拘束応力の比較（シリーズ 4）

| 材齢 (日) | ひび割れ発生強度 (N/mm ²) | 拘束応力 (N/mm ²) | 比率 (%) |
|--------|-------------------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 7.2 | 0.4 | 5.6 |
| 28 | 11 | 3.9 | 36 |
| 120 | 11* | 0.08 | 0.00007 |

※ 材齢 120 日におけるひび割れ発生強度は材齢 28 日時点と同等とした。



(a) 若材齢時



(b) 全試験期間

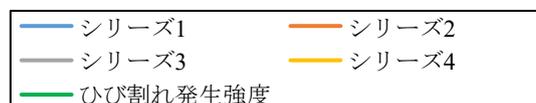
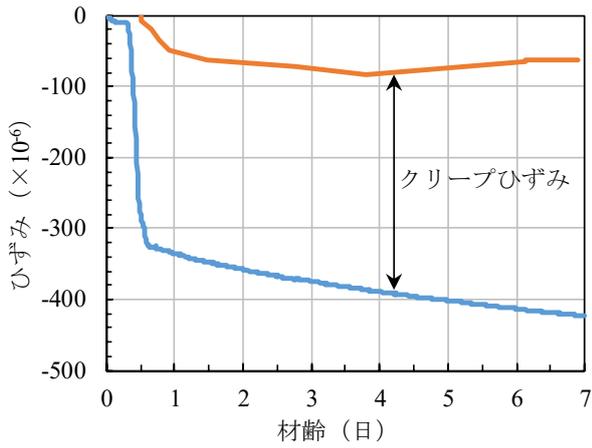
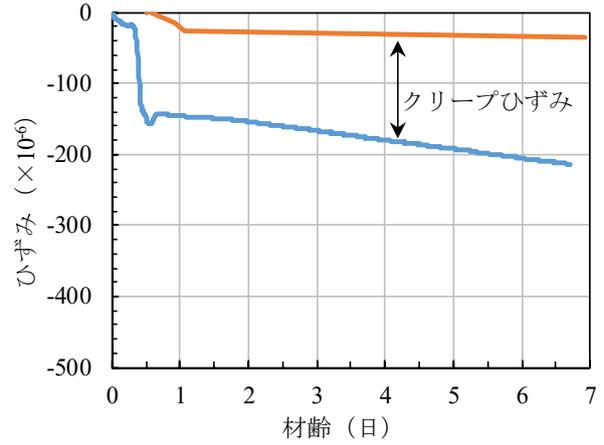


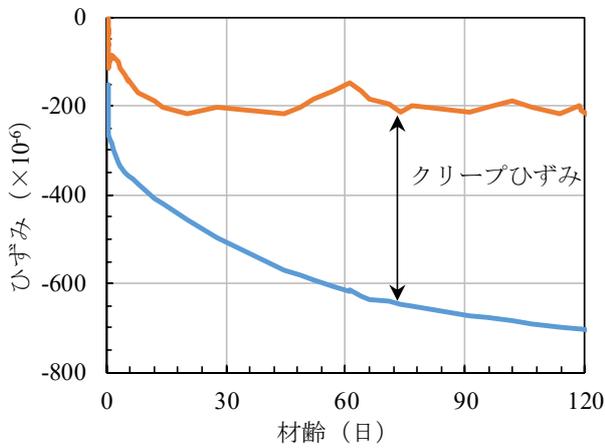
図-8 拘束応力とひび割れ発生強度



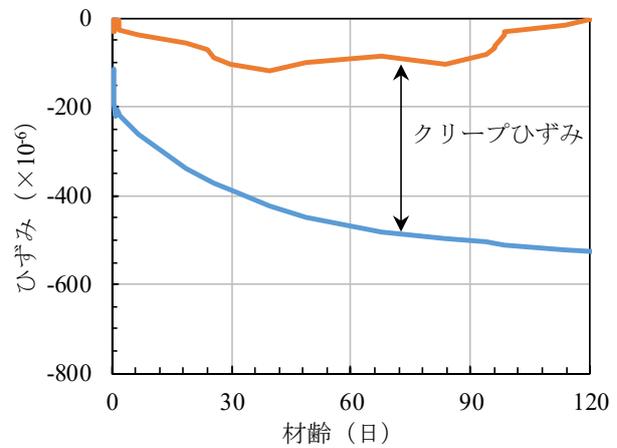
(a) シリーズ 1



(b) シリーズ 2



(c) シリーズ 3



(d) シリーズ 4

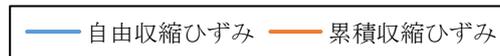
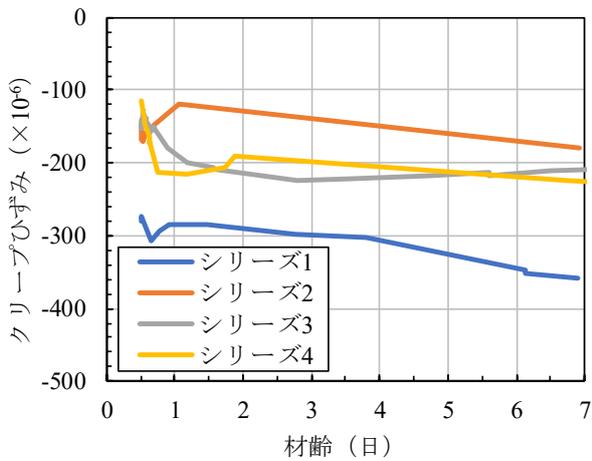
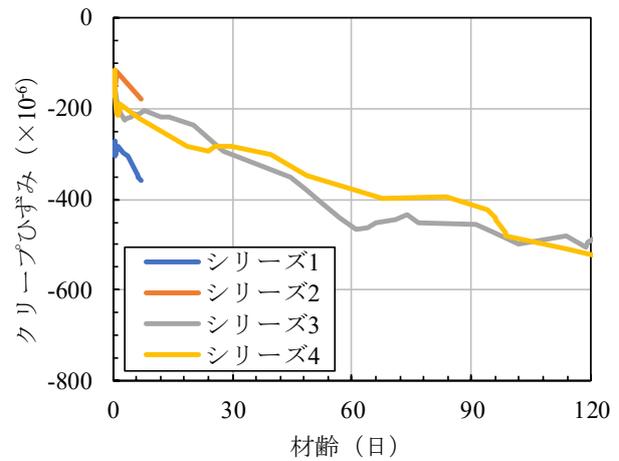


図-9 自由収縮ひずみと累積収縮ひずみ



(a) 若材齢時



(b) 全試験期間

図-10 クリープひずみの比較

UFC のひび割れ発生強度より小さかったため、ひび割れが発生しなかったと考えられる。ただし、ひび割れ発生強度に占める拘束応力の割合は膨張材添加の有無により異なり、膨張材を添加していないシリーズ 1 では材齢 5 日で比率が 47%に達していた。一方、膨張材を添加したシリーズ 2 は、材齢 5 日までの若材齢時において拘束応力がシリーズ 1 と比べて半分程度となっており、ひび割れに対する余裕度が大きくなっている。

材齢 28 日以降では、シリーズ 3、シリーズ 4 とも最大で 4~5N/mm²の拘束応力が発生し、ひび割れ発生強度に占める拘束応力の割合は材齢 28 日で 35%程度となる。その後、膨張材を添加していないシリーズ 3 は材齢 120 日で 3N/mm²程度の拘束応力が残留するが、膨張材を添加したシリーズ 4 は 0.1N/mm²以下まで低下している。

膨張材の効果が材齢初期から長期的に確認されたが、材齢 30~90 日付近で拘束応力が大きくなる時期もみられ、ひび割れ発生に対する余裕度が小さくなることから、引張が作用する場合には注意が必要である。

(3) 収縮ひずみ・クリープひずみ

累積収縮ひずみは材齢 5 日までの間で膨張材を添加していないシリーズ 1 が 80×10^{-6} 程度、膨張材を添加したシリーズ 2 で 30×10^{-6} 程度であり、拘束応力と同様、膨張材を添加することにより累積収縮ひずみ量も半分程度となっていた。材齢 5 日以降の累積収縮ひずみは、シリーズ 3 で 200×10^{-6} 程度であったのに対し、シリーズ 4 では最大 100×10^{-6} 程度と半分程度であった。拘束応力では材齢 28 日付近でシリーズ 3 とシリーズ 4 がほぼ同等であったが、累積収縮ひずみには差がみられた。

自由収縮ひずみから累積収縮ひずみを減じたクリープひずみを比較した図-10 をみると、シリーズ 1 のクリープひずみが他のシリーズと比べて大きい傾向にあるが、シリーズ 3 およびシリーズ 4 を長期的にみるとクリープひずみ自体は膨張材添加の有無の影響はなく、同様に推移している。材齢に従って増加しており、材齢 120 日までに収束する傾向は見られない。

4. まとめ

常温で高強度を発現する UFC を対象に、疑似完全拘束試験を実施した。20℃封緘状態で硬化する UFC に発生している応力と強度の関係や収縮量について、膨張材 20kg/m² の添加の有無をパラメータとして確認し、本研究の範囲内で以下の結果が得られた。

- ・UFC を拘束状態で硬化させてもひび割れは発生しない。
- ・拘束状態で硬化する過程で UFC にはクリープひずみが生じ、拘束応力が緩和される。

- ・UFC に膨張材を添加した場合、添加しない場合と比べて拘束応力は半分程度に低減され、ひび割れ発生に対する抵抗性（余裕度）は大きくなる。
- ・材齢 120 日における拘束応力（残留応力）は、膨張材を添加しない UFC で 3N/mm²程度、膨張材を添加した UFC で 0.1N/mm²以下となる。
- ・クリープひずみ量は膨張材の添加の有無に関係なく、材齢とともに増加する。

以上のように、拘束状態における UFC 内部に発生する応力を確認することができた。ひび割れが発生していても余裕度が小さい場合があり、材齢 28 日付近で余裕度が小さくなることから、注意が必要である。

なお、今回の試験結果は各シリーズ 1 体の結果であり、ばらつきが考慮できていない。また、硬化時に表面が乾燥するような養生不良や部材の厚さ、拘束条件などの違いによって、UFC にひび割れが発生する現象がみられる。その他、常温硬化と比べて急激な温度変化と強度発現がある熱養生では今回確認された応力状態と大きく異なると考えられる。養生条件の違いなども含めて、さらなるデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 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）、コンクリートライブラリー、第 113 号、2004
- 2) 平田隆祥、石関嘉一、武田篤史、小澤武史：常温硬化型 UFC の現場打設による護岸構造物のリニューアル、コンクリート工学年次論文集、Vol.36, No.2, pp.1249-1254, 2014
- 3) 佐々木一成、岩城孝之、富永高行、野村敏雄：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレキャスト床版接合構造に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.40, No.2, pp.583-588, 2018
- 4) 国枝稔、志水康祐、丸山一平、中村光：疑似完全拘束試験による断面修復材の収縮ひび割れ抵抗性の評価、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告書、第 10 巻、2010
- 5) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書、技術推進ライブラリー、No.10, 2012
- 6) K.Kovler: Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, Materials and Structures, pp.324-330, 1994