

論文 HPFRCC の曲げクリープ挙動に関する実験的研究

畑 朋宏^{*1}・稲熊 唯史^{*2}・林 承燦^{*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）の曲げ応力下におけるクリープ挙動を把握するため、ひび割れ発生前とひび割れ発生後のひずみレベルで HPFRCC 梁の長期曲げ載荷試験を実施した。その結果、ひび割れ発生前の弾性領域における引張クリープ係数はおよそ 1.2 であった。ひび割れ発生後のクリープ係数は、載荷ひずみレベルに関わらず、1600 時間経過した時点で、ほぼ同程度の値を示した。曲げひび割れ発生以降の引張クリープひずみは、ひび割れ本数およびひび割れ幅の増加の両方を伴って進行することが確認できた。

キーワード：HPFRCC, 引張クリープ, 微細ひび割れ

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、引張および曲げ応力下において繊維の架橋効果により、複数の微細なひび割れを生じ、擬似ひずみ硬化を示す材料である¹⁾。HPFRCC は、従来のセメント複合材料と異なり、引張力を分担できるため、HPFRCC の引張性能を考慮した設計が可能である。そのため、HPFRCC の引張力分担を期待した適用の場合、永久荷重作用時に HPFRCC が引張状態となる場合や、さらに複数の微細なひび割れが生じている状態が考えられる。また、ひび割れ発生後の引張応力は、繊維の架橋応力により維持されることから、永久荷重作用時のクリープ挙動は、使用する繊維の特性に深く関係していると考えられる。このように HPFRCC においては、圧縮だけでなく引張応力下でのクリープ挙動についても検討する必要がある。そのためには、一軸引張応力下において引張クリープを検討するのが望ましいが、一軸引張試験における精度の確保や二次曲げの影響等が考えられ、引張クリープを検討することは容易ではない。また、実際

には曲げ応力を受ける場合が主であり、実構造物に近い曲げ応力下においてクリープ挙動を評価する事も有効であると考えられる。

そこで本研究では、高強度ポリエチレン繊維を用いた HPFRCC 梁を作製し、異なる目標載荷ひずみレベルで長期曲げ載荷試験を実施し、HPFRCC の曲げクリープ挙動とひび割れ特性を実験的に検討した。

2. 実験概要

本研究では、曲げクリープ挙動を検討する目的の長期曲げ載荷試験に先行して、静的な力学挙動を把握するための静曲げ試験、また HPFRCC の強度特性を把握するための一軸引張試験を実施した。

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に、配合の概要を表-2 に示す。供試体に使用した有機繊維材料には高強度ポリエチレン繊維（引張強度 2600MPa）を用い、体積比で 1.5%混入した。また、セメント量を減らし、水和熱を抑えるためにセメントの一部をフライアッシュで置換した。さらに、自己・乾

*1 岐阜大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 ジェイアール東海コンサルタンツ (株) 調査事業部開発技術部 (正会員)

*3 (株) デーロス メンテナンス事業本部 工博 (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)

表-1 使用材料

材 料	仕 様
高強度 ポリエチレン繊維	繊維径12μm, 繊維長12mm, 引張強度2600MPa, 弾性係数88000MPa
セメント	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント
フライアッシュ	JIS A 6201 II種
膨張材	エトリンガイト系
細骨材	7号珪砂
高性能AE減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系
収縮低減剤	低級アルコールアルキレンオキシド付加物

表-2 配合の概要

単位粉体量 B(kg/m ³)	フライアッシュ 置換率 FA/(C+FA+CS) (%)	水粉体比 W/B(%)	繊維添加量 (vol%)
1262	30	30	1.5

FA：フライアッシュ，C：セメント，CS：膨張材

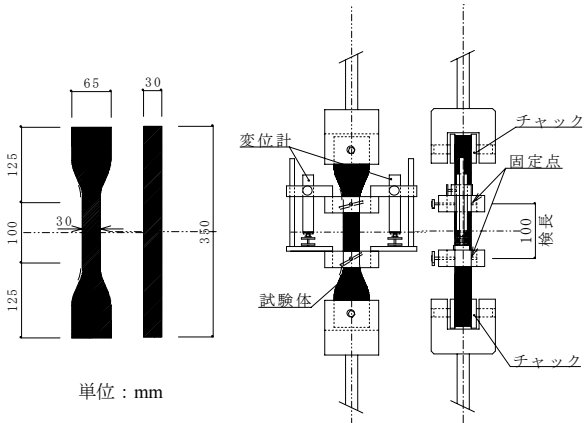


図-1 一軸引張試験

燥収縮を抑制するために膨張材と収縮低減材を用いた。なお、材齢約6ヶ月の圧縮強度は90.3N/mm²、ヤング係数は20.8kN/mm²であった。

2.2 一軸引張試験

供試体形状および試験方法を図-1に示す。ダンベル型の供試体を試験機に取り付けられた治具に直接固定し、両端固定として、変位制御型の油圧サーボ式試験機を用いて一軸引張試験を実施した。ひずみは、高感度変位計にて検長100mm区間の変位を計測し、検長で除して平均ひずみとした。なお、試験体数を6体とした。

2.3 静曲げ試験

試験状況を写真-1に示す。供試体の寸法は、幅100mm、高さ150mm、部材長1200mmとした。荷重方法は、支点間1000mm、等モーメント区間200mmの4点曲げ荷重とした。供試体中央部の引張縁と圧縮縁にコマを設置し、その上にパイ



写真-1 静曲げ試験

表-3 試験条件

シリーズ	供試体呼び名	目標荷重ひずみレベル	荷重荷重(kN)	初期引張縁ひずみ(μ)
Level-1	Level-1-1	初期ひび割れ発生	4.0	118
	Level-1-2	ひずみの2/3程度		134
Level-2	Level-2-1	引張縁ひずみ	12.5	1897
	Level-2-2	2000μ程度		3147
Level-3	Level-3-1	引張縁ひずみ	19.4	10495
	Level-3-2	11000μ程度		14411

型変位計(検長100mm)を取付け、変位を計測した。計測した変位を検長で除してひずみとし、曲率を式(1)から算出した。

$$\phi = \frac{\epsilon'_c + \epsilon_t}{l + 2h} \quad (1)$$

ここで、 ϵ'_c :計測した圧縮ひずみ、 ϵ_t :計測した引張ひずみ、 l :供試体高さ、 h :コマ高さである。また、コマ高さを考慮して供試体の圧縮縁ひずみ、引張縁ひずみを算出した。

また、荷重の過程で発生したひび割れに対してデジタルカメラを用いてひび割れを撮影し、画像解析によってひび割れの分布を計測した。

2.4 長期曲げ荷重試験

(1) 試験条件

試験条件を表-3に示す。HPFRCCの応力状態は、初期ひび割れ発生までの弾性領域、ひび割れ発生後のひずみ硬化領域、終局ひずみ以降のひずみ軟化領域の3段階に分けられる。実際にHPFRCCを適用する場合には、脆性的な破壊を防ぐために鉄筋と組み合わせることが不可欠であることから、鉄筋降伏ひずみ(約2000μ)程度のひずみ硬化領域までがHPFRCCの使用状態の上限レベルとして考えられる。

そこで、静曲げ試験結果をもとに、目標荷重

ひずみレベルを 3 水準に設定した。初期ひび割れ発生ひずみの 2/3 程度のひずみレベルを Level-1、鉄筋降伏ひずみレベルを Level-2、軟化開始ひずみの 1/5 程度のひずみ (1.1%) レベルを Level-3 とした。それぞれのひずみレベルにおいて供試体数は 2 体とした。また、供試体の材齢は、約 5 ヶ月とした。供試体を打設し、打設後 2 日で脱型を行い、養生室内で約 1 ヶ月間の湿潤養生を行った。その後、持続応力下で進行するひずみ量の中から乾燥収縮等の影響を小さくするため、気中養生を約 4 ヶ月間行った。なお、試験は温度変化による影響を小さくするため、室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の室内で実施した。

(2) 試験方法

載荷試験概要を図-2 に示す。供試体形状および計測方法は、静曲げ試験と同じとした。2 体の供試体を抱き合わせるように配置し、荷重は、4 本の PC 鋼棒を締め付けることにより導入した。供試体引張縁のひずみが、設定した目標載荷ひずみレベルとなった時の荷重を維持した。また、あらかじめ PC 鋼棒の引張試験を実施し、荷重ひずみ関係を取得し、PC 鋼棒に貼付したひずみゲージにてひずみを計測し、導入した荷重をひずみにより管理した。

ひび割れの観察には、デジタルカメラおよびマイクロスコープを用いて、それぞれひび割れ本数および分布、ひび割れ幅を計測した。計測は、経時的に適宜行った。

3. 実験結果および考察

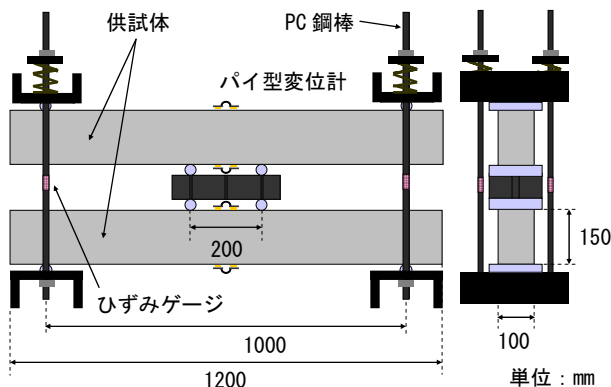


図-2 載荷試験概要

3.1 材料の引張特性

一軸引張試験より得られた応力ひずみ関係を図-3 に示す。いずれの供試体においてもひび割れ発生後に擬似ひずみ硬化を示し、複数の微細なひび割れが分散した。軟化が始まる終局ひずみが小さい供試体は、検長外でひび割れの局所化が起こったものである。

3.2 静曲げ試験結果

静曲げ試験より得られた荷重引張縁ひずみ関係をひび割れ本数の関係とともに図-4 に示す。なお、ひび割れ本数は供試体中央部 80mm 区間のひび割れを、引張縁にて計測した本数である。また、ひび割れの分布を写真-2 に示す。ひび割れ本数は、引張縁ひずみに比例して増加した。

3.3 長期曲げ載荷試験結果

実験開始前に、目視によりひび割れの有無を観察した。その結果、すべての供試体表面に収縮に起因すると思われるひび割れが発生していた。よって、本実験で示すひずみは、乾燥収縮等に起因するひずみの増減も含まれた値である。

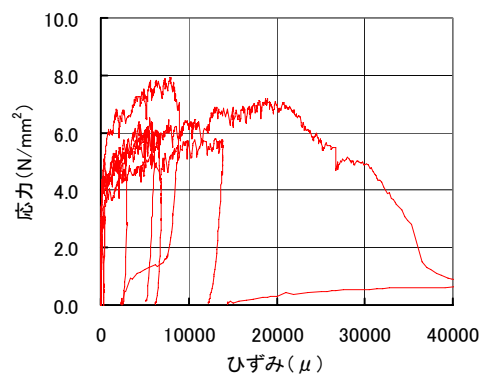


図-3 一軸引張試験応力ひずみ関係

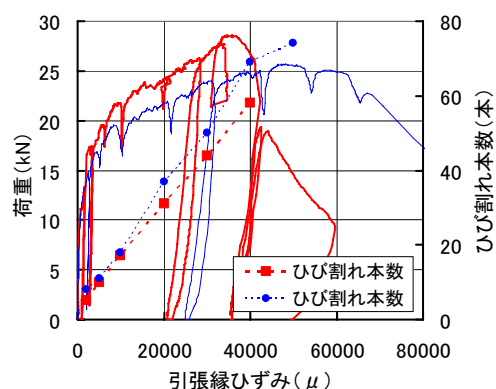


図-4 荷重引張縁ひずみ関係

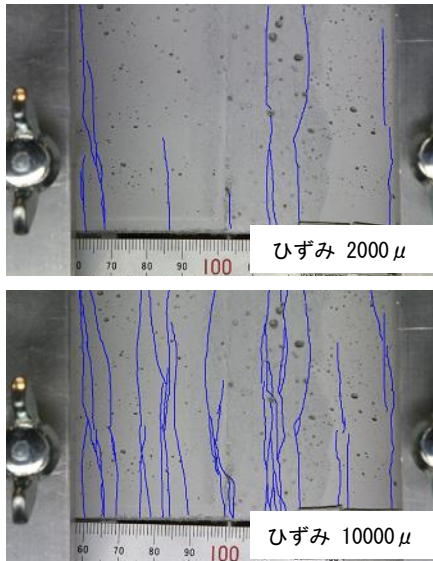


写真-2 ひび割れ分布

しかし、曲げ載荷開始材齢が乾燥開始後約 4 ヶ月であり、収縮の進行が収束に向かっていていると予想されること、曲げ載荷で導入する引張縁ひずみは 2000μ 以上であり、自己・乾燥収縮量に対して割合として大きいことから、持続応力下で進行するひずみ量に対し、その影響は比較的小さいと考えられる。

(1) ひび割れ発生以前の曲げクリープ挙動

Level-1 より得られたひずみの経時変化を図-5に示す。載荷開始から時間の経過とともに引張および圧縮ひずみが増加し、引張ひずみにおいて、載荷開始から 1008 時間前後より増加が収束している。圧縮ひずみにおいて、level-1-2 供試体では増加が収束しているが、level-1-1 供試体では増加量は小さいものの、緩やかに圧縮縁ひずみの増加が継続している。また、1600 時間経過後において、供試体に曲げひび割れが発生していないことを目視により確認した。これらより、ひび割れ発生前の弾性領域における引張クリープ係数の検討を行った。検討を行うにあたり通常のコンクリートの圧縮クリープで用いられる Davis-Granville の法則を仮定し、クリープ係数を式(2)から求めた。

$$\phi = \frac{\varepsilon_{all} - \varepsilon_{ini}}{\varepsilon_{ini}} \quad (2)$$

ここで、 ϕ : クリープ係数、 ε_{all} : ある時間の計

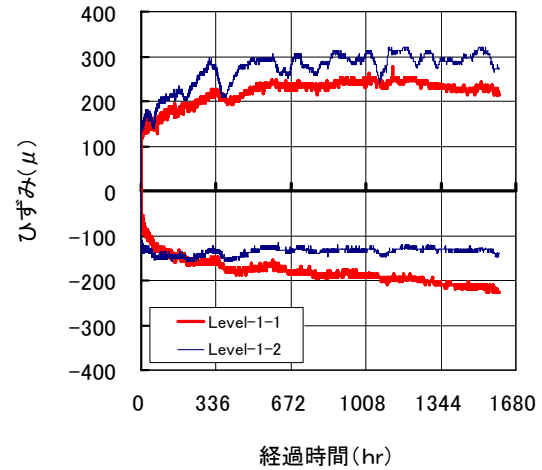


図-5 ひずみの経時変化

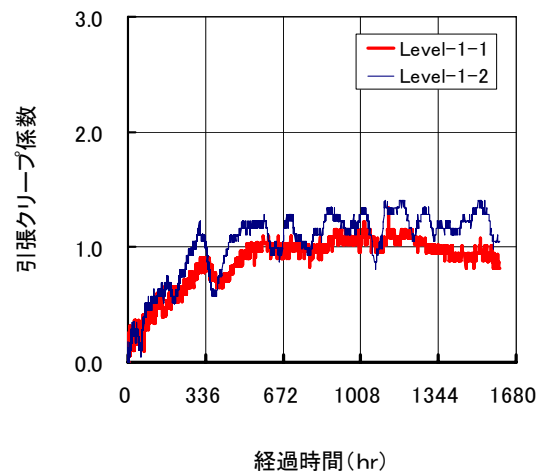


図-6 引張クリープ係数

測ひずみ、 ε_{ini} : 初期ひずみである。クリープ係数の経時変化を図-6に示す。引張クリープ係数は、およそ 1.2 と考えられる。

(2) ひび割れ発生以後の曲げクリープ挙動

Level-2, Level-3 より得られた引張縁ひずみ、圧縮縁ひずみの経時変化をそれぞれ図-7、図-8に示す。なお、ここでは載荷開始時の初期ひずみに対して、持続載荷により増加した圧縮縁および引張縁のひずみをクリープひずみとし、初期ひずみに対する比率をクリープ係数とした。引張縁および圧縮縁のひずみは、それぞれ各 2 体ずつ計測していたが、Level-3-2 供試体において載荷開始から 280 時間経過した段階で、複数のひび割れが生じ、大変形したため、引張縁に設置したパイ型変位計が脱落し、計測不能となった。すべての供試体において、載荷開始から

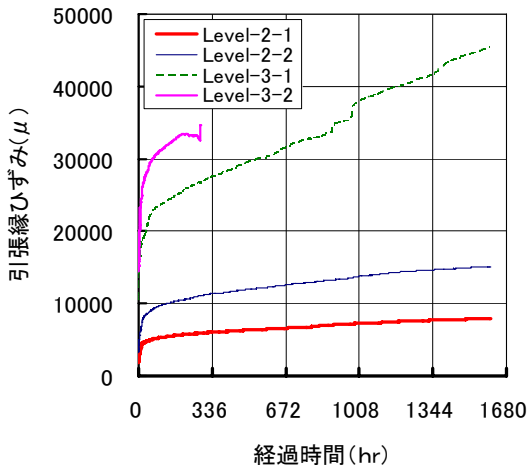


図-7 引張縁ひずみ

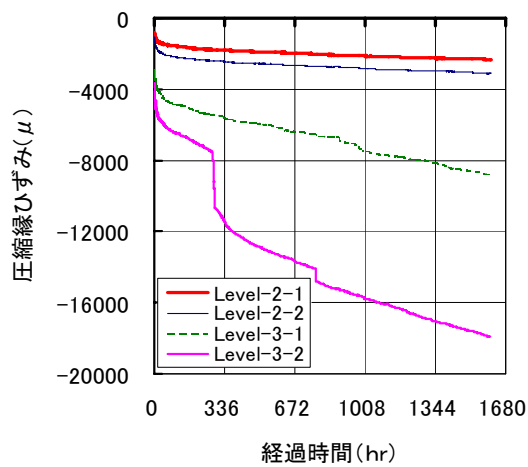


図-8 圧縮縁ひずみ

約 100 時間程度まで、ひずみは急激に増加したが、その後はほぼ一定の割合で緩やかに増加した。また、載荷ひずみレベルが大きいほどひずみが大きくなる傾向を示した。また、ひずみの不連続な部分において、急激なひび割れ幅の増加、もしくは急激なひび割れ本数の増加が起きたと考えられる。次に式(2)を用いて、引張クリープ係数および圧縮クリープ係数を算出した。クリープ係数の経時変化を図-9 に示す。ひび割れが複数発生した状態で開始した載荷ひずみレベル 2000~11000 μ の範囲において、クリープ係数は 1600 時間経過後で、ほぼ同程度の値を示した。

(3) ひび割れ発生以後のひび割れ特性

ひび割れ幅とひび割れ本数の計測は、経時的に適宜行ったため、1344 時間付近の計測が最終になっている。ひび割れ幅の経時変化の一例を

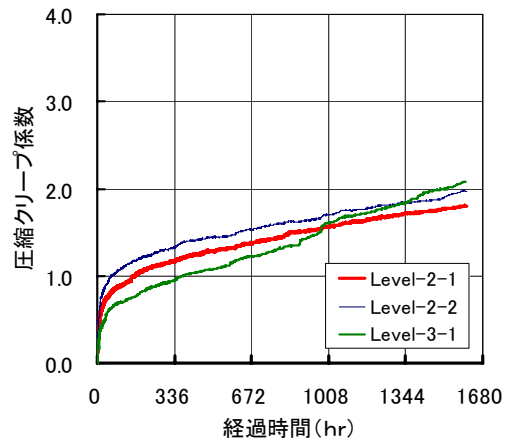
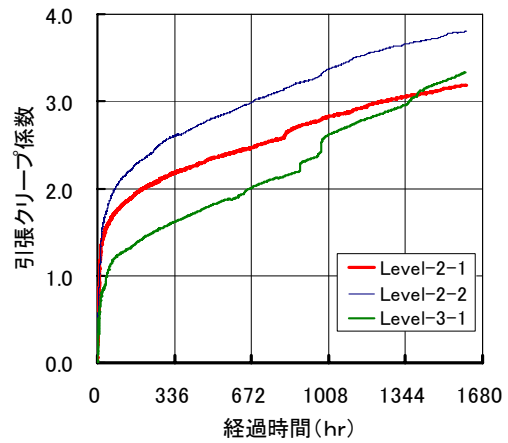


図-9 クリープ係数

図-10 に示す。すべての供試体に共通して、載荷開始の初期段階において、ひび割れ幅が増加し、ある一定時間が経過すると、ひび割れ幅はほぼ収束しているが、その値は個々にばらつきがあった。また 1600 時間経過後において、ひび割れ幅は、Level-2 において 0.1mm 以下、Level-3 において一部には、局所化の開始に移行すると思われるひび割れ幅が 0.4mm を超えるひび割れも確認できたが、ひび割れの大部分は、ひび割れ幅が 0.2mm 以下と微細であった。

ひび割れ本数の経時変化を図-11 に、ひび割れの分布を写真-3 に示す。ひび割れ本数は、検長 100mm 内のひび割れを引張縁にて計測した本数である。ひび割れ本数は、載荷開始の初期段階において顕著な増加が見られ、その後もひずみの増加に伴い新たなひび割れが発生した。

計測対象としたひび割れにおいて、ひび割れ幅の増加は収束しているが、引張ひずみの増加

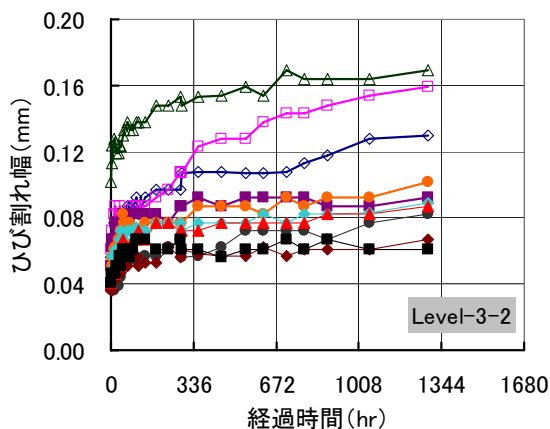


図-10 ひび割れ幅

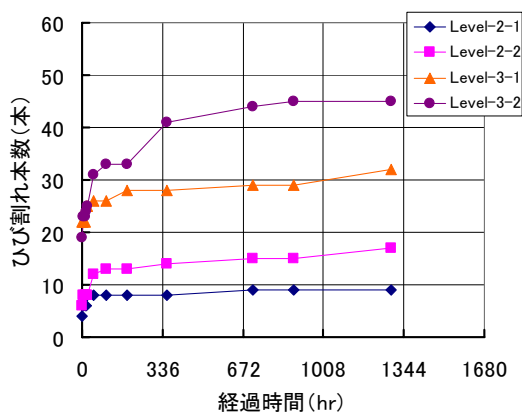


図-11 ひび割れ本数

が継続しているのは、一部のひび割れに局所化が発生したことによるものと考えられる。

ひび割れ発生後の引張クリープ特性については、主に繊維の架橋応力が大きな影響を及ぼしていると考えられる。今後は、異なる種類の繊維を用いた HPCRCC のクリープ特性を評価して、比較検討を行う計画である。また、一軸引張クリープ試験および圧縮クリープ試験をそれぞれ行い、それぞれのクリープ特性を明らかにする必要があり、それらを考慮した解析を行い、曲げクリープ挙動を検討していく予定である。

4. まとめ

HPCRCC の長期曲げ載荷試験を 3 水準の目標載荷ひずみレベルで実施した。1600 時間経過後までに得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ひび割れ発生前の弾性領域における HPCRCC の引張クリープ係数は、およそ 1.2

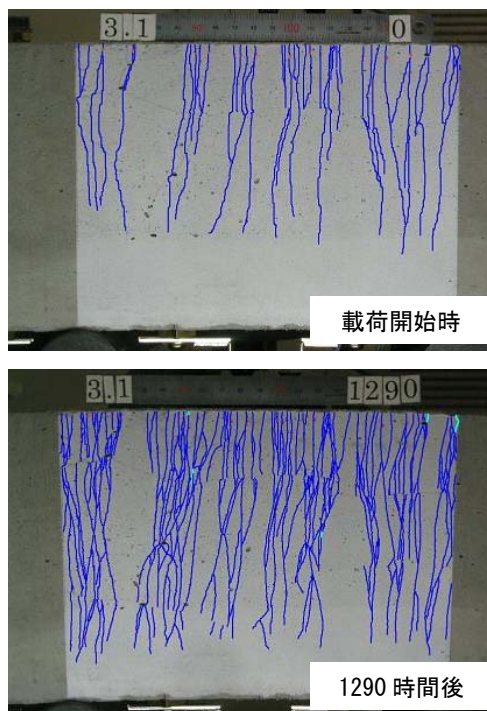


写真-3 ひび割れ分布 (Level-3-1)

であった。

- (2) ひび割れ発生以降のひずみレベルでは、載荷開始 1600 時間経過後においても、クリープひずみが収束しなかった。また、クリープ係数は、載荷ひずみレベルに関わらず、ほぼ同程度であった。
- (3) 初期引張ひずみとしてひび割れ発生以上のひずみレベルで曲げ載荷を開始した場合、引張クリープひずみはひび割れ本数の増加とひび割れ幅の増加の両方を伴って進行する。
- (4) 曲げひび割れ幅の変化は、時間の経過と共にある一定値に収束する傾向にあり、ひび割れ幅は、Level-2 において 0.1mm 以下、Level-3 において大部分は 0.2mm 以下であった。しかし、Level-3 においてひび割れ幅が 0.4mm を超えるようなひび割れの局所化が発生しており、今後クリープ破壊に至る可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書（Ⅱ），pp.4-7，2004.5