

四点曲げ疲労実験による UHPFRC の疲労挙動の検討

Study on the fatigue behaviors of UHPFRC under four-point flexural fatigue experiment

北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 桑垣 潤也(Junya Kuwagaki)
正員 鄧 朋儒(Pengru Deng)
正員 松本 高志(Takashi Matsumoto)

1. はじめに

橋梁構造物の床版は日常的に自動車荷重を直接受けており疲労損傷が発生している。加えてコンクリート床版の場合は、ひび割れからの雨水浸透による疲労劣化の促進や、凍結防止剤や海水飛沫による塩害の影響を受け内部鉄筋の腐食が生じる。以上のような床版の経年劣化による損傷の軽減・延命化を目的として、超高性能繊維補強コンクリート (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete、以下 UHPFRC) が補修に適用されることがある。鋼短繊維による補強が施されている UHPFRC は、通常のコンクリートと比較し高い強度を有する (圧縮強度 130MPa 以上、引張強度 9MPa 以上)。引張状態下ではひび割れ発生後にひずみ硬化・ひずみ軟化が見られ、高い靱性を持つ。また、非常に緻密な材料構造のため、透水性・透気性が極めて小さく耐久性に優れている。以上の点から、補修材料として UHPFRC の有用性は高いと言える。

しかし現在、UHPFRC の研究は増加しつつあるものの、S-N 曲線や架橋応力の劣化等、疲労状態下での挙動が明らかにはなっていない。UHPFRC を用いた適切な補修方法の提案や、安全性・効果性の高い設計を可能にする解析手法の開発には、疲労挙動や破壊メカニズムの解明は不可欠である。

本研究の目的は、四点曲げ疲労実験を通し、UHPFRC の疲労・破壊挙動を検討することである。まず一軸圧縮試験を行い UHPFRC の圧縮強度、ヤング率、ポアソン比を得た。これらの数値は UHPFRC の疲労挙動を再現する解析の材料モデルにおいて必要となる。続いて四点曲げ静的載荷実験を実施し、最大荷重を得た。その後、静的実験で得られた最大荷重から疲労実験に用いる荷重を設定し、四点曲げ疲労載荷実験を通して S-N 曲線 (応力比と疲労寿命の関係) や変位と繰返し数の関係などを検討した。また、顕微鏡を用いて疲労実験後供試体の微細なひび割れを観察し、疲労寿命とひび割れ数、ひび割れ幅の関係などを考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体

UHPFRC 供試体はセメント、補強用鋼繊維 (メゾ・マイクロ)、混和剤を用い作成された¹⁾。水セメント比は 20%程度とした。一軸圧縮試験には円柱状の供試体を用いた。寸法は直径 50mm、高さ 100mm とした。曲げの静的実験と疲労実験では長さ 240mm、幅 60mm、高さ 25mm の直方体供試体を使用した。圧縮試験では材齢

28、90、165 日で各 3 体の試験を行った。静的実験では材齢 28、45、90、165 日の供試体を各 5 体用意した。疲労実験では材齢 28 日以降の供試体を用いた。疲労実験の荷重比と供試体数を表 1 に示す。

2.2 一軸圧縮試験

JIS 規格「コンクリートの静弾性係数試験方法」²⁾を参考に行った。載荷は荷重制御で行い、載荷速度は 0.25MPa/sec とした。

2.3 四点曲げ静的実験

静的実験の載荷条件を図 1 に示す。支点間距離を 180mm、せん断スパンを 60mm とした。支間中央の供試体上面に 2 か所、下面に 1 か所ひずみゲージを貼り付けひずみを計測した。また、合計 4 つのレーザー変位計を用いて支間中央・支点上の変位を計測した。変位制御で行われ、材齢 28 日、90 日、165 日の実験では載荷速度を 0.1mm/min とし、材齢 45 日の実験では 60mm/min (3Hz の疲労実験に相当) とした。各供試体の名称は、例えば材齢 28 日の供試体 1 体目の実験では、頭文字に静的実験 (Static experiment) の S を付け、S28-1 というように設定された。

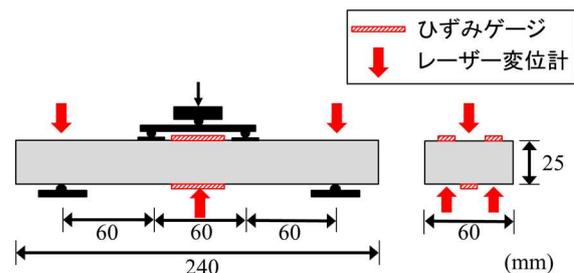


図 1 静的実験の載荷条件と計測

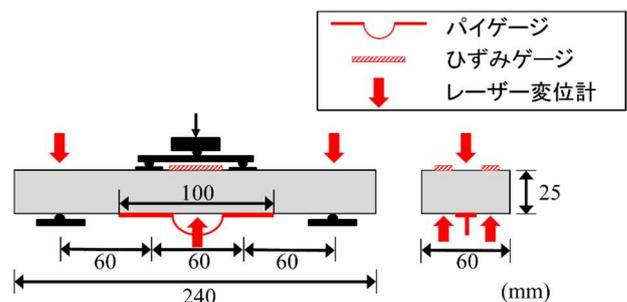


図 2 疲労実験の載荷条件と計測

表1 荷重比と供試体数

荷重比	下限荷重	上限荷重	供試体数
0.95	1.8kN	8.7kN	9
0.925	1.8kN	8.5kN	2
0.9	1.8kN	8.3kN	8
0.85	1.8kN	7.8kN	3
0.925(材齢165日)	2.1kN	9.5kN	6

表2 圧縮実験の結果

材齢(日)	平均圧縮強度(MPa)	平均ヤング率(GPa)	平均ポアソン比
28	151.61	38.99	0.27
90	168.37	39.27	0.26
165	145.27	38.31	0.25

表3 静的実験の結果

材齢(日)	荷重速度(mm/min)	平均最大荷重(kN)	平均曲げ強度(MPa)
28	0.1	7.344	30.42
45	60	9.231	39.44
90	0.1	7.714	35.11
165	0.1	7.486	35.93

2.4 四点曲げ疲労実験

疲労実験の荷重条件を図2に示す。本実験はSuthiwarapirakによる高靱性セメント系複合材料(ECC)の四点曲げ疲労実験³⁾を参考に行われた。支点間距離やせん断スパン、4か所のレーザー変位計と供試体上面2か所のひずみゲージは静的実験と同様に設置した。静的実験とは異なり、供試体下面にゲージ長100mmのパイゲージを取り付け、長さ方向の表面変位を計測した。現実の道路橋における荷重頻度は3Hzに近いため、疲労実験の荷重設定には材齢45日の静的実験による平均最大荷重を用いた。

各荷重比と供試体数を表1に示す。1サイクル間の下限荷重はいずれの荷重比においても静的実験で得られた最大荷重の20%とし、上限荷重は95%、92.5%、90%、85%と設定した。1サイクル目の間は徐々に荷重を上限荷重まで増加させ、その後繰返し荷重を開始した。疲労破壊の発生、もしくは繰返し数が200万回に達した時点を実験の終了とした。また、疲労荷重の周波数は3Hzとした。各供試体の名称は、例えば荷重比0.95の供試体1体目の実験では、頭文字に疲労実験(Fatigue experiment)のFを付け、F0.95-1というように設定された。荷重比0.925の実験では材齢165日となったため、材齢増加による強度への影響を考慮し6体の供試体に対し修正された荷重で実験が行われた。

ひび割れ観察の様子と実験後供試体を図3に示す。顕微鏡はAnMo ElectronicのDino-Lite Premier 500xを使用した。観察時の倍率は500倍とした。疲労実験終了後の供試体を対象に、図3(b)のように供試体下面の赤線に沿って100mmの範囲が観察された。観察対象は、疲労寿命100サイクル以下、100サイクルから1000サイクル、1000サイクルから1万サイクル、200万サイクル以上でそれぞれ供試体3体とした。

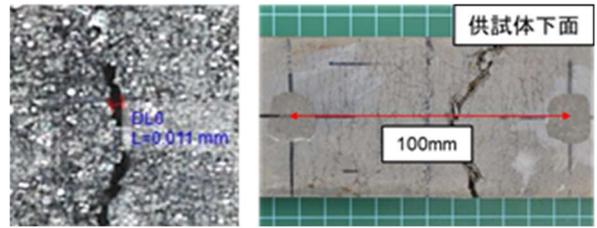


図3 ひび割れ幅計測(a)計測状況 (b)測線

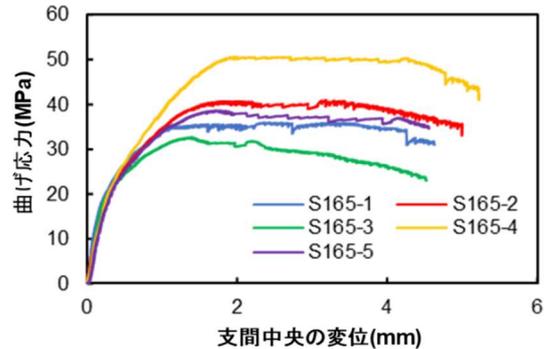


図4 曲げ応力と支間中央の変位の関係(材齢165日)

3. 実験結果・考察

3.1 一軸圧縮試験

圧縮実験の結果を表2に示す。表内の数値は供試体3体の平均値である。材齢28日から90日にかけて圧縮強度の増加が見られるが、165日では減少している。後述の3.2節、静的実験の結果からわかるように、材齢の増加に伴い強度も高まるはずだが、この圧縮実験の結果は供試体内部の繊維配向・分布の影響を受けやすく強度にばらつきが出やすいUHPFRCの特徴によるものと考えられる。

3.2 四点曲げ静的実験

静的実験の結果を表3に示す。表内の数値は供試体5体の平均値である。荷重速度が等しい材齢28日、90日、165日の実験では曲げ強度が増加し続けており、材齢に伴う強度発現が見られる。また、28日から90日では4.69MPa、90日から165日では0.82MPaの曲げ強度増加となっており、強度発現の減少が確認できる。疲労実験では材齢45日の平均最大荷重9.231kNから、各荷重比の上限荷重、下限荷重を決定した。

破壊挙動検討のために、曲げ応力と支間中央の変位関係の例として材齢165日の実験結果を図4に示す。いずれの供試体も荷重直後は線形に応力が増加しており、弾性状態にあることがわかる。微細なひび割れ発生後にひずみ硬化下で応力を保持しつつ変形している。その後、新たなひび割れが引張面で分散的に発生し続け、局所的なひび割れ発生とともにひずみ軟化に転じている。

3.3 四点曲げ疲労実験

(I) S-N 曲線

図5に応力比Sと疲労寿命 N_f の関係(S-N曲線)を示す。応力比は、1サイクル間の上限荷重による最大応

力と、静的実験により求められた平均曲げ強度の比を表す。また、図中の矢印は 200 万回の繰り返し後も破壊に至らなかった供試体を示す。UHPFRC の疲労劣化について検討するために、比較として Suthiwarapirak により得られた繊維補強コンクリート (FRC) の S-N 曲線³⁾を 図 5 に示す。

図 5 において、UHPFRC と FRC の S-N 曲線は以下の式(1)、(2)で表される。

$$\text{UHPFRC : } S = 1.021 - 0.0102 \text{Log}_{10}(N_u) \quad (1)$$

$$\text{FRC : } S = 0.983 - 0.0508 \text{Log}_{10}(N_u) \quad (2)$$

UHPFRC の S-N 曲線は FRC と同様に、片対数スケール上に一次関数の関係で表された。式(1)、(2)から、200 万サイクルまでの過程で UHPFRC の応力比は 6.3%減少、FRC では 32.6%減少と、UHPFRC の応力比減少が非常に緩やかであることがわかる。本実験では疲労寿命 1 万サイクルから 200 万サイクルの間に実験結果を得られなかったが、これはわずかな応力の増減で UHPFRC の疲労寿命が変化することによるもので、より荷重比を細かく設定する必要があると考えられる。

(2) 繰り返し数増加に伴う疲労劣化挙動

図 6 に、最大応力時の支間中央の変位と繰り返し数の関係を示す。本実験ではすべての供試体で 1 サイクル目の間にひび割れ発生が確認されている。開始から一定期間の変位増加がわずかであることから、微小ひび割れの分散により変形が抑えられていることがわかる。その後、応力伝達を担っていた繊維が繰り返し数の増加に伴い破断や引き抜けを起こし、変位の増加量が大きくなっている。破壊直前には局所的なひび割れが発生し、急激な変位の増加とともに破壊している。また、疲労寿命が 100 サイクル未満であった供試体の 1 サイクル目の変位は平均 1.06mm、疲労寿命 200 万サイクル以上の供試体では平均 0.49mm となっており、疲労寿命が長い供試体ほど 1 サイクル目の変位が小さくなる傾向が見られる。

図 7、8 に最大応力時のひび割れ開口変位と繰り返し数の関係、圧縮ひずみと繰り返し数の関係を示す。UHPFRC のような高靱性材料では供試体の弾性伸びはひび割れによる変位と比較しわずかなものであるため、パイゲージで得られた変位をおよそのひび割れ開口変位とする。図 7、8 からも図 6 と同様に、実験開始直後は一定のひび割れ開口変位や圧縮ひずみで推移し、破壊直前になり急激に増加する様子が確認できる。また、疲労寿命が長い供試体ほど 1 サイクル目のひび割れ開口変位や圧縮ひずみが小さくなっている。図 8 では F0.85-2 のように圧縮ひずみ値の頻繁なぶれが確認できる。これはひずみゲージの範囲外でひび割れが発生する際にゲージ範囲のひずみが解放され、計測値が減少するためだと考えられる。

(3) 1 サイクル目の変位と疲労寿命の関係

前項を踏まえ、図 9 に 1 サイクル目の支間中央の変位と疲労寿命の関係を示す。疲労寿命 1000 サイクル未満、1000 サイクル以上の実験結果に対する近似曲線をそれ

ぞれ図中に示す。疲労寿命 1000 サイクル未満では明確に 1 サイクル目の変位と疲労寿命の間に負の相関関係が見られる。2 本の近似曲線から、疲労破壊した供試体としていない供試体の間に閾値が存在すると考えられる。

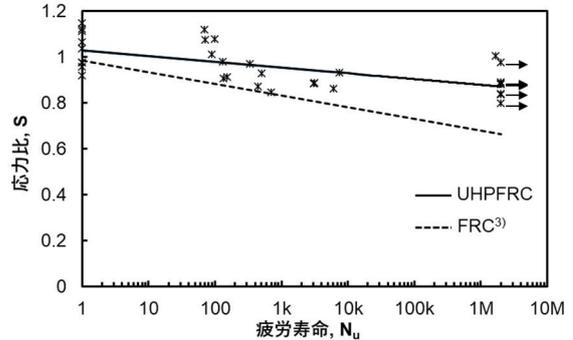


図 5 S-N 曲線

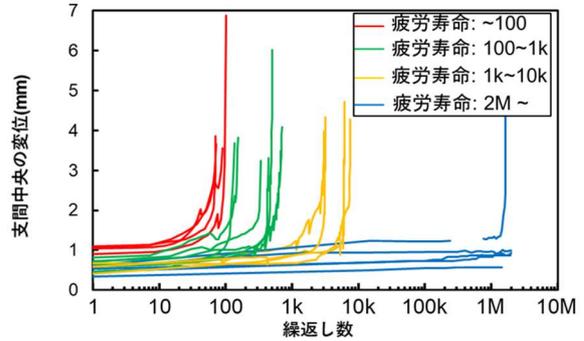


図 6 支間中央の変位と繰り返し数の関係

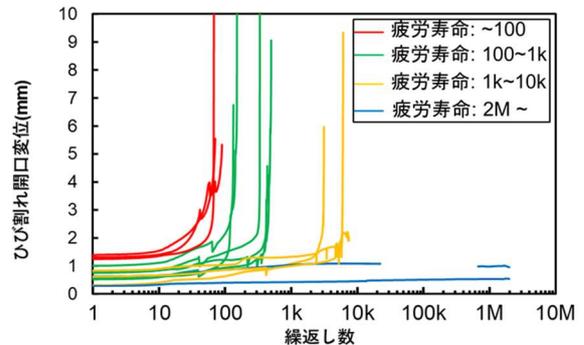


図 7 ひび割れ開口変位と繰り返し数の関係

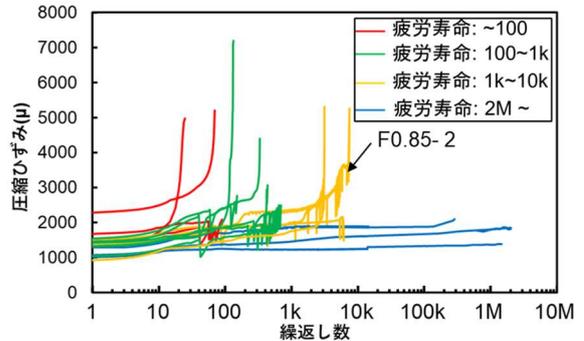


図 8 圧縮ひずみと繰り返し数の関係

(4) ひび割れ観察

図 10 にひび割れ幅の分布を疲労寿命で分類し示す。図 10(a)~(d)のいずれからも幅 20 μm 以下のひび割れが最も多いことが確認できる。また、疲労寿命の増加に伴う総ひび割れ数の増加が見られ、増加したひび割れは主に幅 20 μm 未満であることが各分布図の比較からわかる。これは、疲労寿命の長い供試体ではより多くの微細なひび割れが分散され、局所破壊が防がれていることを表す。本観察では、幅 200 μm 以上のひび割れは破壊時に生じる局所ひび割れを除き確認されなかった。Aldea らによるコンクリートの塩化物イオン浸透実験⁴⁾の結果、幅 200 μm 以下のひび割れは塩化物イオンの浸透に影響しないと結論づけられており、UHPFRC がひび割れ発生後も高い遮断性を有することがわかる。

4. まとめ

本研究では UHPFRC 供試体を用いた四点曲げ疲労実験を行った。実験により S-N 曲線が得られ、UHPFRC の応力劣化が非常に緩やかであることが FRC との比較を通して確認された。次に支間中央の変位、ひび割れ開口変位、圧縮ひずみと繰返し数の関係について検討され、疲労寿命の増加に伴い 1 サイクル目の値が減少することがわかった。このことから 1 サイクル目の変位と疲労寿命の関係に着目し、バイリニア曲線で近似されるため閾値を設けることができると考えられた。また、疲労実験後の供試体下面でひび割れを観察したことで、疲労寿命の増加に伴い幅 20 μm 以下のひび割れが増加することが明らかになり、UHPFRC の遮断性の高さが確認された。今後の課題は、UHPFRC の疲労挙動を再現する架橋応力劣化モデルの構築である。有限要素解析で実験結果と比較を行い、劣化モデルを同定する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K14808 若手研究と鹿島国際学術交流 2020 の助成を受けた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) J-ティフコム施工協会：パンフレット「J-THIFCOM 超緻密高強度繊維補強コンクリート」
- 2) JIS 規準：コンクリートの静弾性係数試験方法、JIS A 1149: 2017、2017.
- 3) Peerapong Suthiwarapirak : Fracture mechanics based fatigue life analysis of RC bridge slab repair by fiber cementitious materials、PhD Thesis、東京大学、2003.
- 4) Corina-Maria Aldea, Surendra P. Shah, Alan Karr : Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete、Journal of Materials in Civil Engineering、Volume 11、Issue 3、pp. 181-187、1999.

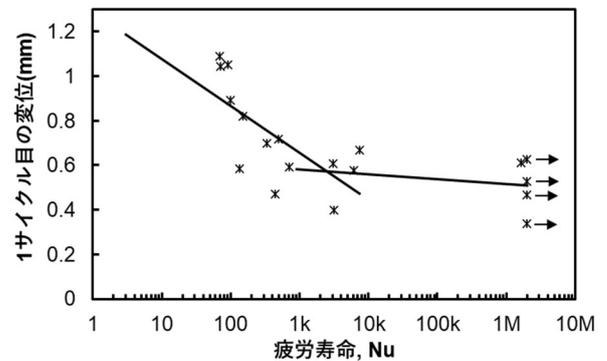
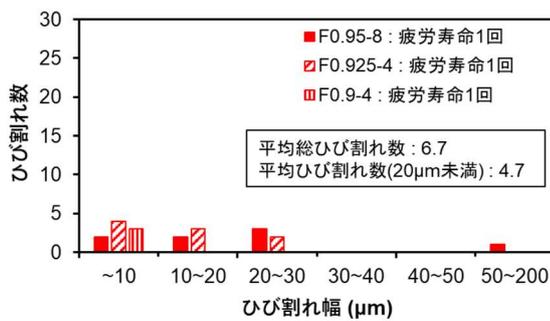
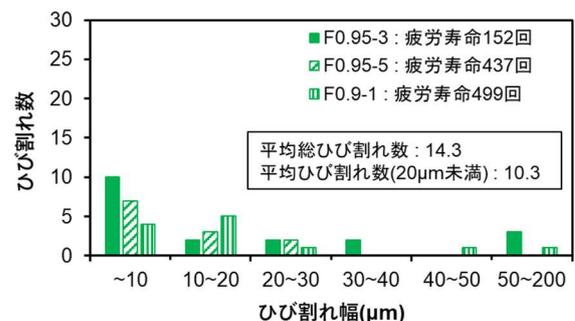


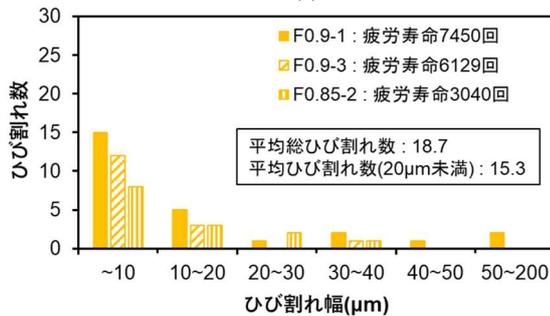
図 9 1 サイクル目の変位と疲労寿命の関係



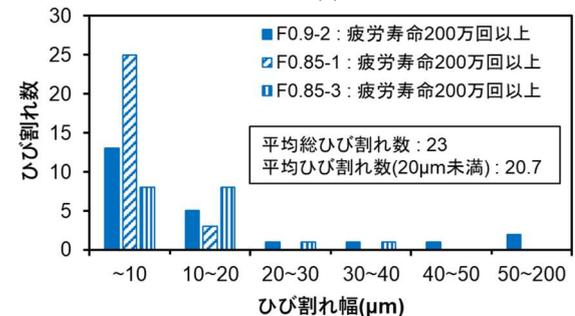
(a)



(b)



(c)



(d)

図 10 ひび割れ幅の分布 (a)疲労寿命 100 サイクル以下 (b)100~1000 サイクル (c)1000~1 万サイクル (d)200 万サイクル以上