

論文 超高強度繊維補強コンクリート部材の疲労強度に及ぼす繊維配向性の影響

志村 彩^{*1}・湊 翔太^{*2}・河野 克哉^{*3}・岡本 享久^{*4}

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)部材の繊維量とその配向性が、静的曲げ強度および動的(疲労)曲げ強度に及ぼす影響を実験にて評価した。繊維の配向性の影響は UFC の繊維を部材軸方向にほぼ垂直にした場合とほぼ平行にした場合の2ケースを取り上げた。両試験結果から、繊維量とその配向性は静的曲げ強度、疲労曲げ強度、S-N 曲線にも顕著な影響を及ぼした。なお、X 線照射画像にて供試体内に配置した繊維の実際の配向状況も把握し、さらに設計疲労強度による考察も行った。

キーワード: 静的曲げ強度、動的(疲労)曲げ強度、超高強度繊維補強コンクリート、繊維量、配向性

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(Ultra high strength Fiber reinforced Concrete: 以下、UFC と略記)は、繊維補強コンクリート的一种で、特殊粉体材料と高強度鋼繊維を用いることで、適切な養生により、圧縮強度 200N/mm² 以上、引張強度 9.0N/mm² 以上を達成できるコンクリートである。通常のコンクリートの約7倍の圧縮強度を有し、高靱性が確保されているため、鉄筋を一切必要としないコンクリートである。UFC 製橋梁では、床版厚をコンクリート橋より薄く、鉄橋とほぼ同じ厚さにする事ができる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)』において、UFC の標準耐用年数が100年に設定されており、耐久性も極めて高く長寿命で、メンテナンスコストが不要とされている²⁾。図-1に示すように、マトリクスのみではなく、繊維に関しても研究が進められ、主流である鋼繊維以外にも多種の材料が開発されている。

例えば、UFC 製 PC 歩道橋である「酒田みらい橋」は、10年間に渡って継続的な圧縮強度の増進が認められ、曲げ強度は大きく変化せず10年間ほぼ一定であった。また実橋のウェブ部材から採取したコア供試体の塩化物イオンの浸透深さは10年経過時で1mm程度ときわめて小さかった。供用10年までの暴露供試体と実橋コア供試体の調査から、UFC は長期的な強度ならびに遮塩性に優れており、長期耐久性を有する材料であることが実証できたとの報告である³⁾。

しかながら、UFC 部材の疲労強度に関する論文は多くあるが、UFC 内の繊維の配向性が疲労強度に及ぼす影響を定量的に扱った論文は少ない。UFC 部材の疲労強度に関し、前掲の土木学会『超高強度繊維補強コンクリート

の設計・施工指針(案)』では、圧縮および曲げ圧縮の疲労強度 f_{rd} は、一般に、疲労寿命 N と永久荷重による応力 σ_p の関数として次式(1)により求めて良いとしている²⁾。

$$f_{rd} = 0.85f_d \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \left(1 - \frac{\log N}{17}\right) \quad [N/mm^2] \quad (1)$$

ここで、 $N \leq 2 \times 10^6$ 、 f_d : 圧縮強度とする。この場合の配向性に関しては施工の際、高流動なコンクリートとして配合し、橋軸方向に沿って流し込む方法が採用され、配向の影響は少ないとされてきた。

本研究では、UFC 部材の繊維量とその配向性が、静的曲げ強度および動的(疲労)曲げ強度に及ぼす影響を確認する実験を行った。繊維の配向性の影響では部材軸方向にほぼ垂直に繊維を入れた場合とほぼ平行に入れた2ケースを取り上げ、静的曲げ強度、疲労曲げ強度、ひび割れ発生荷重、設計疲労強度に関して考察を加え、X 線照射の結果も用いて繊維量とその配向性の検証をした。

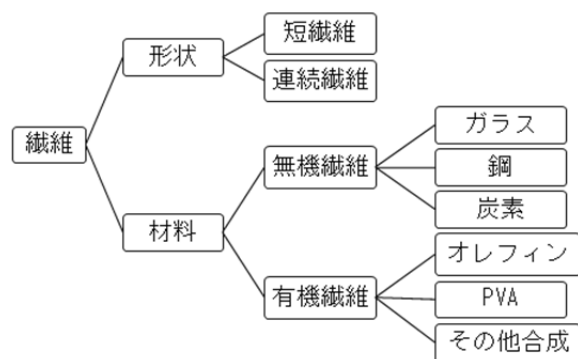


図-1 UFC に使用される繊維の分類

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 環境社会工学コース (学生会員)

*2 三重県 四日市建設事務所 事業推進室

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 立命館大学 理工学部 環境システム工学科教授 工博 (正会員)

2. 供試体概要

2.1 供試体の種類

UFCには、φ0.2mm、長さ15mm、断面は円形で表面加工のない鋼繊維を用いた。供試体は、混入量および配向性の影響を確認するために以下の4種類とした。(a) 繊維をUFC体積の2%混入した「FMH2」(Fiber Metal Horizontal Type 2%)、(b) 繊維をUFC体積の1%混入した「FMH1」(Fiber Metal Horizontal Type 1%)、(c) 繊維をUFC体積の2%混入し、内部の繊維を供試体軸方向に垂直となるよう配向性を施した「FMV」(Fiber Metal Vertical Type)、(d) 繊維を混入しない「NF」(Non Fiber Type)であり、寸法は80mm×80mm×960mmで同一とした。

FMH1、FMH2、およびFMVの繊維の配向イメージをそれぞれ図-2および図-3に示す。これらは供試体側面から見た様子を表し、枠内の短線が繊維である。



図-2 FMH2、FMH1の繊維配向イメージ



図-3 FMVの繊維配向イメージ

2.2. 配合および供試体の作製方法

FMH2とFMVの配合を表-1に示す。練混ぜにはモルタルミキサを用いた。UFCの練混ぜは以下の方法で行った。まず、UFC標準配合粉体Pを空練りし、その後水Wを入れる。PとWが完全に混ざった後、鋼繊維FMを少量ずつ混ぜ合わせる。

FMH2、FMH1、NFは流し込む位置を固定して、ペーストの自己流動・充填により供試体(型枠)軸方向に流し込んだ。FMVの供試体は、繊維の配向を供試体軸方向と垂直にするため、図-4に示すように以下の方法で打ち込んだ。まず、スリットを外側面に設けた型枠を用い、アクリル板をスリットの間隔(10mm)に合わせて型枠に差し込み、アクリル板同士の隙間にUFCを流し込んだ(図中①、②)。次に充填が不足している箇所には突き棒でペーストを詰め、アクリル板を抜いた(図中③)。スリットすなわちアクリル板の間隔10mmという基準は、鋼繊維の長さが15mmであるため、それ以下の幅に流し込むことで供試体軸方向に対して繊維が垂直に配向されると考えて設定したものである。

打ち込み1日後に脱型し、その後、標準熱養生(90°Cで48時間の蒸気養生)を行った。蒸気養生により早期の強度発現と密実な硬化体が得られる。

表-1 繊維混入率2%の配合表

単位量(kg/m ³)			
W	P	F	SP
水	UFC 標準配合粉体	鋼繊維	高性能減水剤
175	2254	157	24

*1: 水 175kg/m³ は高性能減水剤 24kg/m³ を含む
*2: 鋼繊維混入率 2vol%

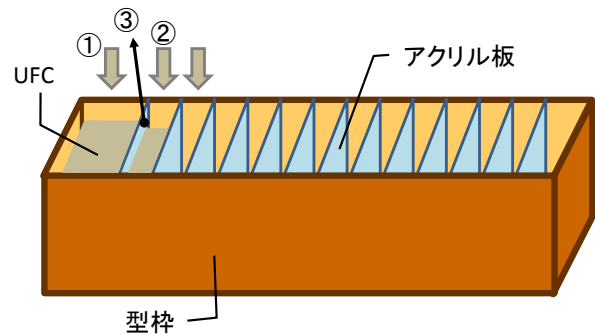


図-4 FMV 供試体の打ち込み方法概略図

3 曲げ試験

3.1 試験条件および計測項目

FMH2、FMH1、FMV、およびNFの曲げ試験をそれぞれについて3体行った。3等分点曲げ(支点間距離810mm)の単調載荷とした。載荷の寸法は図-5に示す。油圧式疲労試験機にて写真-1に示すように載荷した。試験は変位制御で行い、負荷速度は0.025mm/secに設定した。変位測定はアクチュエータのストローク変位計を用いた。

載荷中のたわみおよび初期ひび割れ荷重を計測項目とする。たわみ計測には高感度変位計を用い、計測位置は図-5に示した黒丸で、供試体中央部と支点部とした。静的曲げ試験における初期ひび割れの定義は、曲げモーメント区間で目視により最初に観測できたひび割れであり、ひび割れ開口幅は0.04mm程度であった。



写真-1 疲労試験機

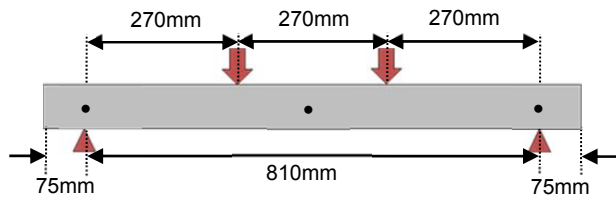


図-5 曲げ載荷方法

3.2 実験結果

3体の試験結果を平均した曲げ強度を表-2に示す。FMH1の曲げ強度はFMH2の86.5%(3.9N/mm²減)となった。この結果からUFC内の繊維混入量が多くなるほど曲げ強度が大きくなるのが分かる。次にFMH2とFMVを比較する。両供試体の繊維混入量は2%で同一だが、FMVの曲げ強度がFMH2の44.3%(16.1N/mm²減)、つまり半分以下となった。繊維の配向性はその混入量よりも曲げ強度に及ぼす影響が大きかった。

図-6に示した荷重-たわみ関係において、供試体の種類により変形性能が異なることが分かった。なお、横軸は中央たわみを表す。

FMH2およびFMH1では、最大荷重の70~75%程度の荷重時に初期ひび割れが発生した。その後、曲げスパンに複数のひび割れが発生しながら、特定の箇所のひび割れ幅が増大し延性的な破壊挙動を示した。

FMVは、最大荷重に到達するのとはほぼ同時に(最大荷重の95%程度で)初期ひび割れが発生し、急激に荷重が低下した。しかし、破壊には至らず、その後荷重が最大荷重

表-2 曲げ試験結果

	FMH2	FMH1	FMV	NF
最大荷重(kN)	18.3	15.7	8.4	4.8
曲げ強度 f _m (N/mm ²)	29.0	24.8	13.3	7.6

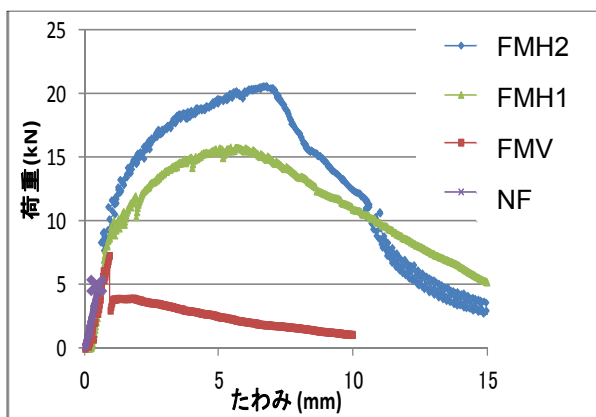


図-6 荷重-たわみ関係

の12%程度回復した。その後は緩やかに荷重が減少し、延性的な破壊となった。

一方、NFは補強が一切ないため、ひび割れ発生荷重が最大荷重となり、脆性的に破壊した。なお、図-6における×印はNFの破断点を表す。

4 疲労試験

4.1 試験条件および計測項目

曲げ強度の比較の結果、繊維の配向がより曲げ強度の大小に寄与すると考え、FMH2とFMVの2タイプについて曲げ疲労試験を行った。載荷寸法は静的曲げ試験と同様に図-5に準ずる。上限応力 σ_{max} は、表-2に示した静的曲げ強度の平均値 f_m の85%、80%、および70%の3水準に設定し、下限応力 σ_{min} は上限応力に関わらず曲げ強度の10%とした。載荷の周波数は5Hzに設定し荷重制御で実施した。供試体は各応力比水準で2本準備し疲労試験に供した。

4.2 実験結果

(1) S-N 図

曲げ疲労性能照査を行うために、設計疲労強度式および等価繰返し回数の算定に必要なS-N図を求めた。グッドマン線図の考え方に従い、試験結果を完全片振り時の状態に変換する⁵⁾。つまり、縦軸に応力比 $S = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / (f_m - \sigma_{min})$ 、横軸に破断までの回数、すなわち疲労寿命 $\log N$ をとった。

結果を図-7に示す。FMH2とFMV両者において、応力比 $S=1$ のときサイクル数1、つまり静的曲げ強度を表す点と、各上限応力比で得られた点をプロットしたものである。

各上限応力比における疲労寿命を平均して供試体種による相違を検討する。各応力比におけるFMH2、FMVにおける2体の平均の結果は表-3になった。

S-N図および表-3を見ると、上限応力比0.85においてFMVはFMH2よりも疲労寿命が長い、他の上限応力比0.80や0.70においてはFMH2がFMVよりも疲労寿命が長い。

曲げ試験の結果より、FMH2では終局荷重の70~75%程度ですでに初期ひび割れは発生するため、応力比0.85では試験開始とほぼ同時に大きなひび割れが発生することとなり、平均98回で破断に至ったと考えられる。それに対しFMVでは、終局荷重の90~95%程度で初期ひび割れが発生する。疲労試験の荷重は静的曲げ最大荷重に依存している。よって、上限応力比によりひび割れ発生までのサイクル数が異なったことが疲労寿命の逆転に大きく影響したと考える。

表-3 各応力比の平均疲労寿命

上限応力比	疲労寿命(回)	
	FMH2	FMV
0.85	98	1249
0.80	7157	3323
0.70	717070	87919

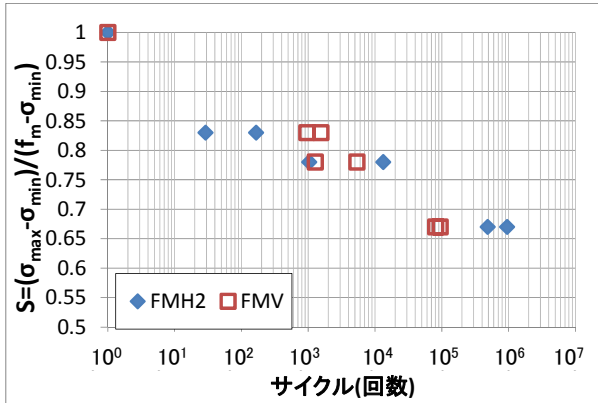


図-7 S-N 図

(2) ひび割れ幅

ひび割れが発生してからの疲労耐久性を確認するために、応力比 0.8 において、供試体の下面にπ型変位計(標点距離: 100mm)を取り付けて、疲労試験中のひび割れ幅の進展を確認した。π型変位計は、ひび割れが発生すると予想される曲げスパンに設置した。ただし、ひび割れ発生個所の正確な予測はできないため、曲げスパン全体を計測できるように、図-8 のように設置した。

図-9 に示す FMH2 は破断までのサイクル数が 13276 回、図-10 に示す FMV は 5368 回の供試体である。FMH2 は、サイクル数が 10 回を超えた辺りで初期ひび割れが発生している。その後はひび割れ箇所が徐々に増え、特定のひび割れが幅を広げながら破断に至った。一方、FMV では破断直前にひび割れが発生した。上限応力比 0.85 のときの疲労寿命同様、ひび割れ発生荷重には曲げ強度が深く関連している。応力比 0.85 の荷重がかかる時、FMH2 はひび割れ発生荷重を超える荷重を受けるため、サイクル数が早い段階でひび割れが発生した。一方の FMV は、ひび割れ発生荷重よりも小さい荷重を受けるため、ひび割れ発生までのサイクル数は伸びる。ひび割れが発生した後は、繊維の架橋効果がひび割れの進展に影響している。FMH2 は架橋効果がはたらき繊維が引張力に抵抗するため、ひび割れ発生後も靱性を保っている。FMV は繊維が引張力に抵抗する方向に繊維が存在しないと予想されるため、ひび割れ発生後すぐに破断に至った。要するに、FMH2 は初期ひび割れが発生するまでのサイクルは短い、破断に至るまでのサイクルは長くなる。FMV で

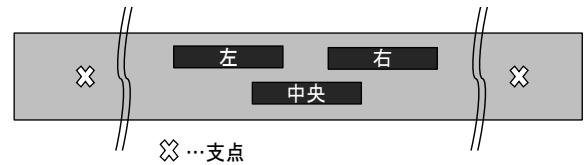


図-8 π型変位計位置(黒四角部分が設置箇所)

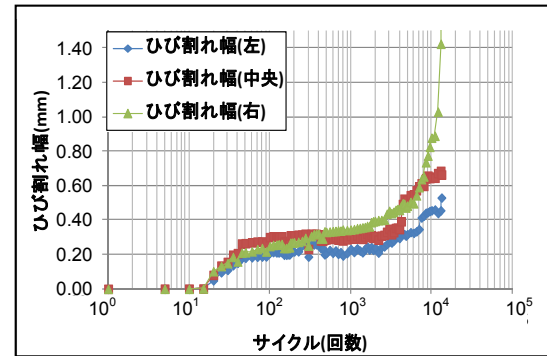


図-9 ひび割れ幅-サイクル数(FMH2)

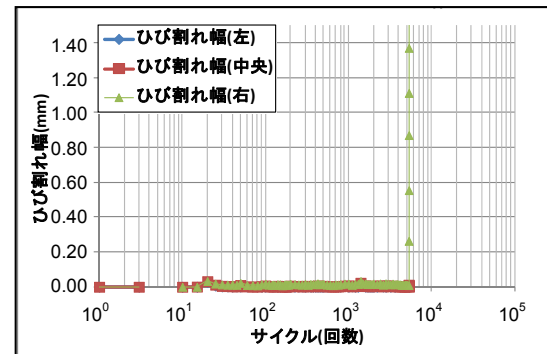


図-10 ひび割れ幅-サイクル数(FMV)

は、初期ひび割れが発生するまでのサイクルは FMH2 に比べると長い、破断に至るまでのサイクルは短くなる。

4.3 X線照射による繊維配向性の確認

曲げ試験と疲労試験の結果より、繊維の混入量と配向性が UFC の曲げ特性に影響を及ぼすことが分かった。そこで、各供試体の繊維の混入状態を明らかとするため、作製した UFC 供試体に X 線照射を行った。供試体の中心から水平方向および垂直方向に厚さ 15~30mm、断面 200mm×80mm にカットし、それぞれに X 線照射を行った。カット方法を図-11 に示す。

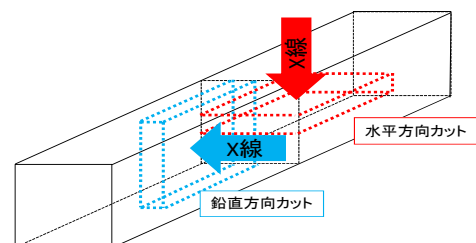


図-11 X線照射用部材の切断位置(破線部: 切断箇所)

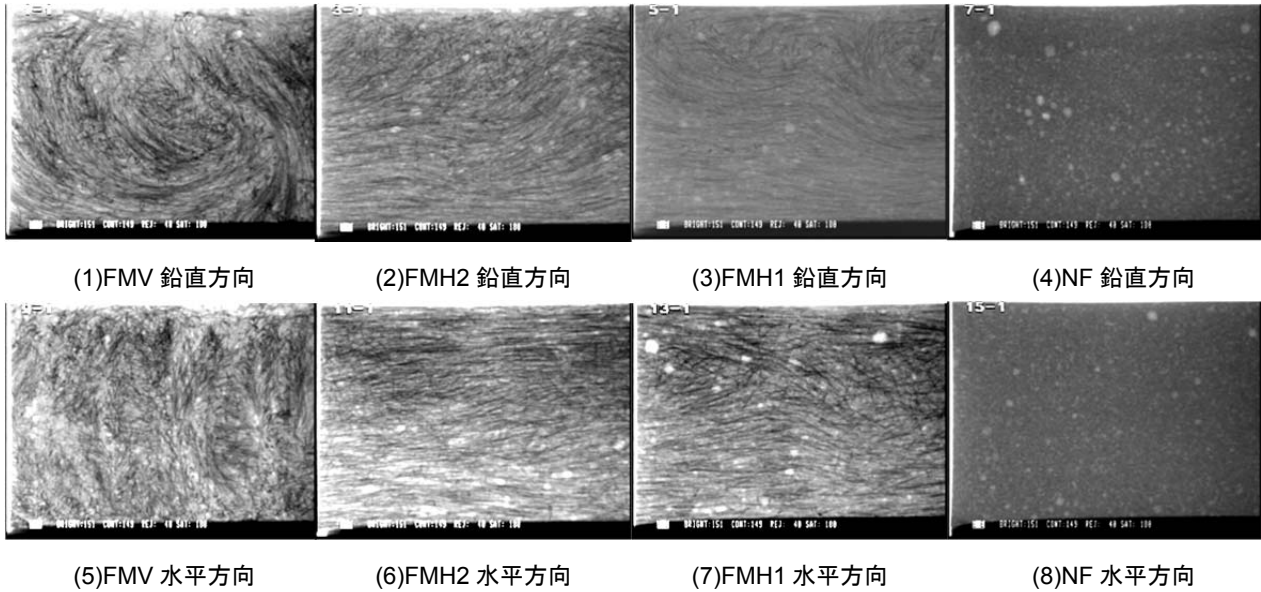


写真-2 X線照射した供試体内部の様子

写真-2はX線照射により得た供試体内部の様子である。各画像の名称は「供試体種(FMV, FMH2, FMH1, NF)」「カット方向(鉛直, 水平)」を表している。FMV, FMH2, FMH1に見られる黒い影が鋼繊維である。白色の丸い影は気泡である。写真-2(2)(FMH2)および写真-2(3)(FMH1)、並びに、写真-2(6)(FMH2)および写真-2(7)(FMH1)の画像を比較すると、FMH2がより全体的に黒っぽいことから、繊維量の違いを明確に撮影出来たとと言える。また、写真-2(2)(FMH2)と写真-2(3)(FMH1)を見ると、繊維が画像左右方向に対して水平、つまり供試体の上下方向に対して垂直に存在していることがわかる。一方、写真-2(1)(FMV)では繊維が供試体側面に対して斜めに存在し、配向性を施されたことが確認できた。

さらに、水平方向からも繊維の配向性の確認が出来る。写真-2(5)(FMV)を見ると、写真-2(6)(FMH2)と比較して繊維が短く投影されている。これは、X線照射の方向と繊維の長さ方向がほぼ一致するため、繊維の側面と断面の間を投影されているからであると考えられる。写真-2(5)(FMV)では、画像上下方向に筋が入っているようにも見えることから、繊維がスリットに沿うように配列した様子も確認できる。これらX線画像の結果より、繊維の量と配向性の確認ができた。

一般的には鋼繊維とマトリックス間の付着力と鋼繊維そのものの引張耐力の比較では、付着力のほうが小さいので鋼繊維は切れることなく、徐々に鋼繊維が抜け出してたわみ変位が増大することが予測される⁵⁾。写真-3より、FMH2 および FMV における破壊面では、繊維の抜け出しが見られる。また、FMV では、繊維があまり見えないことから、ひび割れが繊維の少ないところを伝わ

って進展したことが分かる。

繊維の配向性と疲労試験の結果より、疲労寿命にはひび割れの進展が大きく影響していると考えられる。側面から見たひび割れの進展の様子は図-12 のようになる。繊維の下縁が同じ位置にあっても、繊維が供試体軸方向に垂直に配向されていると、一本のひび割れが伸びることのできる距離が長くなる。一方で、繊維が供試体軸方向に水平に配向されていると、ひび割れの進展が抑制される。



写真-3 载荷後のひび割れ断面(左 : FMH2 右 : FMV)

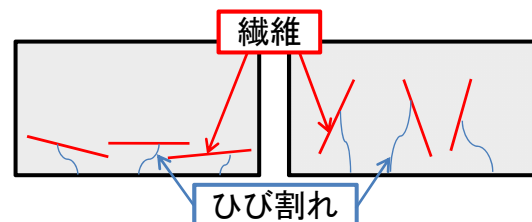


図-12 ひび割れ進展のイメージ図

4.4 疲労強度の検討

疲労強度とはある繰返し回数において破壊したときの応力度である⁴⁾。既往の研究において、前掲の式(1)を

用いて、田中氏らは繰り返し回数に応じて3区間に分類されたUFCに対する設計疲労強度式を用いている。設計曲げ強度を f_{bd} とし、以下にその設計疲労強度式を示す⁵⁾。 $N \leq 7.3 \times 10^4$ の場合：

$$f_{rd} = f_{bd} \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_{bd}}\right) \left(1 - \frac{\log N}{16}\right) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

$7.3 \times 10^4 < N < 1.3 \times 10^6$ の場合：

$$f_{rd} = f_{bd} \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_{bd}}\right) \left(2 - \frac{\log N}{3.7}\right) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

$N \geq 1.3 \times 10^6$ の場合：

$$f_{rd} = 0.36 f_{bd} \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_{bd}}\right) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4)$$

本研究での疲労試験の結果を式(2)、式(3)に代入し、縦軸に曲げ疲労強度 f_{rd} 、横軸に疲労寿命 N をとると、図-13のようになる。ただし、設計曲げ強度 f_{bd} は表-2に示したFMH2、FMVの静的曲げ強度、 N は疲労寿命とした。なお、永久荷重 σ_p に関しては、 $\sigma_p = \sigma_{\min} = 0.1 f_{bd}$ とした。図-13において、菱形および三角形のマーカーはそれぞれFMH2、FMVの結果を表す。また、塗りつぶしマーカーのグラフは、上記条件により算出した疲労強度(以下、期待値と呼ぶ)である。一方、白抜きマーカーのグラフは、疲労強度=破壊荷重と考え、 $0.70 f_{bd}$ 、 $0.80 f_{bd}$ 、 $0.85 f_{bd}$ の f_{bd} にFMH2およびFMVの設計曲げ強度を代入した結果を f_{rd} として表記した。

FMH2およびFMVの両方で、疲労寿命が大きいほど曲げ疲労強度は小さくなる傾向が出ている。また、FMH2は、同一疲労寿命に対する曲げ疲労強度がFMVよりも大きいことから、架橋効果の優位性が示唆される。FMH2はFMVに比べて疲労に対して強いというS-N図の傾向とも一致しており、本研究における疲労試験の結果が有効であると言える。しかし、FMVでは期待値と破壊荷重の傾向が同様であるのに対し、FMH2においては、疲労寿命が増加すると期待値と実際の破壊荷重との乖離が見られる。よって、 $7.3 \times 10^4 < N$ においては、設計疲労強度式の扱いに注意する必要があると考える。

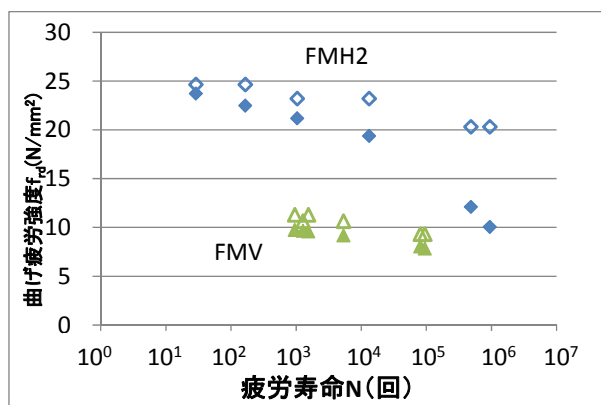


図-13 疲労強度と疲労寿命の関係

5. まとめ

本実験により得られた結論を以下にまとめる。

(1)UFC内部の繊維量と繊維の配向性は、静的曲げ強度に大きく影響した。特に、繊維の配向性の影響は著しい。静的曲げ試験において、繊維が部材軸方向に対し水平に存在する(FMH2、FMH1)場合には曲げ強度が大幅に改善され、繊維無混入のコンクリート(NF)の3倍から4倍の強度となった。繊維がひび割れ面を繋ぎ、ひび割れ幅の進展を抑制したと言える。

(2)疲労試験において、上限応力比の設定によっては繊維の配向の優位性を検証することが困難であった。これはひび割れ発生荷重が大きく影響している。ひび割れ発生荷重よりも大きい荷重を与えると、疲労試験開始直後にひび割れが発生する。

(3)ひび割れ発生荷重よりも小さい上限応力において、UFCの繊維の混入量が大きいほど、また配向性が引張力に抵抗する方向に存在するほど、部材の曲げ引張力に対する耐久性は向上すると結論付ける。また、FMH2つまり標準配合のUFCに対して $7.3 \times 10^4 < N$ の場合、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)』に基づく設計疲労強度式を適用できるかは今後の課題であると言える。

謝辞

本論文作成にあたり、立命館大学理工学部都市システム工学科助教：川崎佑磨先生、太平洋セメント株式会社：川口哲生様には多大なるご指導ならびにご協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表し謝辞とします。

参考文献

- 1)大成建設株式会社：超高強度繊維補強コンクリートを世界で初めて鉄道橋に適用、プレスリリース、2010.9.15
- 2)土木学会コンクリート委員会：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113、2004
- 3)河野克哉、武者浩透、川口哲生、江里口玲、小林忠司：供用10年を経過したPC歩道橋に用いた超高強度繊維補強コンクリートの耐久性、土木学会第68回年次学術講演会講演概要集、pp.3-4、2013.9
- 4)国土交通省 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 かしこい建築・住まいの実現のための建築技術体系に関する研究、pp.74-75、2006.12
- 5)田中良弘、横田弘、岩波光保、前堀伸平：超高強度繊維補強コンクリートの気中・水中曲げ疲労特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.27, No.2, pp.1312-1313、2005