

有機繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリート部材の 曲げ疲労特性に関する基礎的研究

日大生産工 ○水口 和彦, 阿部 忠

太平洋セメント(株) 河野克哉, 太平洋コンサルタント(株) 川口哲生

1. はじめに

近年, 土木構造材料の一つであるコンクリート材においては, 高強度かつ高じん性を有する超高強度繊維補強コンクリート(UFC)が開発され, 実用化されている¹⁾。UFCは, セメントを主成分とする細粒径の骨材およびボゾラン材を最密充填の概念により配合設計したセメントマトリクスに高強度の短繊維を混入したコンクリート材料であり, 超高強度, 高じん性, 高耐久性を有するなどの特長が挙げられる。また, UFCに混入する繊維には一般的に鋼繊維と有機繊維の二種類が挙げられるが, 鋼繊維を混入したUFCに関しては強度特性, 耐疲労性に関する研究が数多く実施²⁻⁴⁾されており, 橋梁をはじめとした多くの土木施設への施工実績が報告されている⁵⁻⁶⁾。一方, 有機繊維を用いたUFC部材は, 鋼繊維に比して引張強度が低いことから, 埋設型枠や建築の意匠部材などの主構造以外の部材へ適用されることが多い。また, 材料の強度特性は明らかにされているものの, 耐疲労性に関する検証はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では, 有機繊維を使用したUFC材を構造部材へ適用することを目的とし, 基礎実験として有機繊維を用いたUFCはり部材に静的載荷試験および定荷疲労試験を行った。実験では, 静的載荷試験より得られた最大耐荷力を基準として定荷疲労を行い, 変形特性, 破壊形状, 耐疲労性についての検討を行うことで, 疲労強度照査法の一助とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

UFCの使用材料は, 水, ポリカルボン酸系の高性能減水剤, 標準配合粉体と専用砂および有機繊維(1.30g/cm^3)である。有機繊維は直径 0.3mm , 長さ 15mm のPVA繊維を体積比で 3.0% 使用した。なお, PVA繊維の物性値

Table 1 Mix proportion of UFC

Unit weight (kg/m^3)				
Water (SP)	Premix	Sand	Organic fiber : FO	Super plasticizer
178	1,309	922	39	26

Table 2 Mechanical properties of UFC

Specimen	Compressive strength (N/mm^2)		Split-cylinder tensile strength (N/mm^2)	
UFC-S1	169	175 (Ave.)	9.0	9.0 (Ave.)
UFC-S2	175		9.0	
UFC-S3	179		9.1	

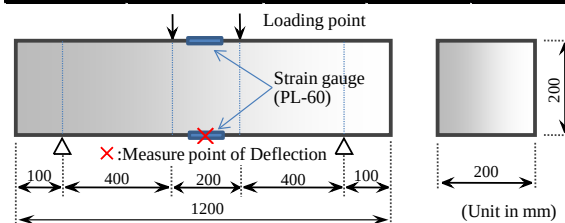


Fig. 2 Dimensions of test specimen

は引張強度 975N/mm^2 以上, 弾性係数 $2.6 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 以上である。プレミックス材料は, セメント, シリカフューム, 珪石粉末などが最密充填されるように配合されており, 粗骨材は使用せずに最大粒径 2.0mm の珪砂を混合した。混和剤使用量は, 目標フロー値を 260mm として決定した。UFCの配合をTable 1, 材料強度特性値をTable 2に示す。

2.2 供試体の作成

UFCはり供試体の寸法は, $200 \times 200 \times 1200\text{mm}$ とし, 静的載荷実験用を3本, 定荷疲労試験用を4本の計7体作製した。なお, 供試体作製における練混ぜにはパン型強制練りミキサーを使用し, 練混ぜ方法はプレミックス材料, 珪砂, 高性能減水剤および水を練り混ぜた後, 有機繊維を投入し, さらに練り混ぜる方法とした。打設後2日で脱型し, その後48時間の熱養生を行った。ここで, 供

Fundamental study on bending fatigue characteristic of ultra-high strength fiber reinforced concrete member using organic fiber

Kazuhiko MINAKUCHI, Tadashi ABE, Katsuya KOHNO and Tetsuo KAWAGUCHI

試体の寸法を Fig. 1 に示す。

2. 3 実験方法

(1) 静的載荷試験

UFC はり供試体の静的載荷試験の載荷条件は二点載荷とした。静的載荷試験より得られた最大耐荷力を基準として、定点疲労試験における各供試体に載荷する荷重の最大値・最小値の設定を行う。荷重条件は、荷重を10kNずつ増加させる段階載荷とした。また、荷重50kN増加ごとに荷重を0kNに減少させる包絡荷重として供試体が破壊するまで荷重の増減を繰り返し行った。なお、計測は、供試体中央下面のたわみおよび供試体中央上下面のひずみを荷重10kN増加ごとに計測した。ここで、計測位置の詳細はFig.1に併記した。静的載荷試験に用いた供試体の名称を、それぞれUFC-S1, S2, S3とする。

(2) 定点疲労試験

UFC はり供試体の定点疲労試験は、載荷条件は静的試験と同様とし、周期5Hzの片振り荷重とした。また、荷重条件は、上限値を静的最大耐荷力の60, 70, 80, 90%の4段階設定し、下限値は一律に10%とした。また、たわみ(供試体下面中央)の計測は、載荷回数1, 10, 100, 1000, 5000回で実施し、5000回以降は5000回ごとに計測した。ここで、定点疲労試験に用いた供試体の名称を、それぞれUFC-60, 70, 80, 90とする。

3. 静荷重載荷試験の結果および考察

3. 1 最大耐荷力

本実験では、3本の供試体に対し二点載荷による静定載荷試験を行った。ここで、各供試体の最大耐荷力の結果をTable 3に示す。

同表より、供試体UFC-S1, S2, S3の最大耐荷力はそれぞれ100kN, 90kN, 100kNであり、平均最大耐荷力は97kNであった。なお、本実験では静定載荷試験より得られた最大荷重を基準荷重として定点疲労試験での荷重条件を設定する。

3. 2 破壊形状

静的載荷試験における各供試体側面の破壊形状をFig. 2に示す。

同図より、供試体UFC-S1, S2, S3ともに荷重載荷点位置の下面付近よりひび割れが発生し、荷重の増加に伴い鉛直方向にひび割れが進展し、最終的に曲げ破壊に至った。また、初期ひび割れ発生後も繊維による架橋効果によって急激な破壊はみられなかった。な

Table 3 Maximum load-carrying capacity of static test

Specimen (static)	Maximum load-carrying capacity (kN)	Average load-carrying capacity (kN)
UFC-S1	100	97
UFC-S2	90	
UFC-S3	100	

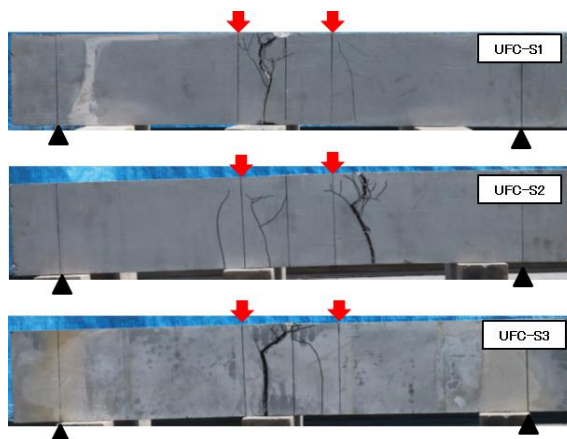


Fig. 2 Failure mode (static test)

お、供試体UFC-S2では等曲げモーメント区間外での破壊となったが、載荷位置からの応力分布範囲内であることから、供試体UFC-S1, S3と同様の曲げ破壊として考察した。

4. 定点疲労試験の結果および考察

本実験では、定点疲労試験を実施するにあたり、その評価基準となる静的耐荷力を静荷重載荷実験より得た。その結果、最大耐荷力は平均で97kNであったことから、疲労試験においては静的耐荷力100kNを基準荷重とする。また、載荷荷重の設定は鋼繊維を混入したUFCの定点疲労試験結果より、疲労限界は乾燥状態において耐荷力比 $S_{max}=0.6$ 程度であることが報告されている⁷⁾ことから、本実験においてもこの点を考慮して、載荷荷重の上限値を耐荷力比 $S_{max}=0.60, 0.70, 0.80, 0.90$ の4段階とした。なお、載荷荷重の下限値は実験装置の性能を考慮して耐荷力比 $S_{min}=0.10$ とした。

4. 1 破壊回数

実験より得られた各供試体の破壊回数をTable 4に示す。

同表より、破壊時の載荷回数は供試体UFC-60, 70, 80, 90でそれぞれ、6,674,046回、167,935回、21,528回、102回であった。

4. 2 破壊形状

定点疲労試験における各供試体側面の破壊形状をFig. 3に示す。

同図より、供試体UFC-60, 70, 80, 90ともに载荷回数1回目で初期ひび割れが確認された。ひび割れは両荷重载荷点位置付近より発生し、その後の载荷回数の増加に伴い鉛直方向にひび割れが進展し最終的に曲げ破壊に至った。しかしながら、初期ひび割れ確認後も繊維による架橋効果によって急激な破壊が生じることはなかった。また、破壊断面の状況に関しては、各供試体ともに下面から20~40mm付近までは繊維の破断が多く認められたが、その他の箇所では繊維の引抜きが顕著であった。

また、静的载荷試験における供試体 UFC-S1, S2, S3 および定点疲労試験における供試体 UFC-70, 80 などでは供試体上面付近よりひび割れの進展方向が不規則なものとなっているが、これは繊維補強コンクリート特有の挙動であると考えられる。

4.3 荷重－载荷回数の関係

実験より得られたたわみと载荷回数との関係をFig. 4に示す。なお、たわみの変化の推移を判読しやすくするために、グラフ縦軸の上限値はたわみ量5mmまでとした。

同図より、供試体UFC-60, 70, 80, 90ともに载荷回数1回目の荷重载荷時のたわみ値から、载荷回数に比例して緩やかなたわみの増加となっている。ここで、1回目の計測時のたわみ値は供試体UFC-60, 70, 80, 90でそれぞれ、0.50mm, 0.90mm, 1.03mm, 1.61mmであり、急激な増加がみられる直前のたわみ値は、2.05mm, 2.30mm, 1.70mm, 3.31mmであった。また、終局時のたわみは供試体UFC-60, 70, 80, 90でそれぞれ20.43mm, 22.92mm, 25.53mm, 24.16mmであった。

4.4 S－N曲線

実験より得られた結果を基に各供試体の耐荷力比 ($\Delta S / P_{\max}$)と载荷回数との関係をFig. 5に示す。

同図より、各供試体の耐荷力比と载荷回数との関係を見るとおおむね一定の傾向を示していることから、これらの関係には相関性があるものと判断できる。ここで、本実験より得られた結果より近似曲線を求めるとEq.(1)として与えられる。

$$\text{Log}(\Delta S / P_{\max}) = -0.025 \log N + 1.0136 \quad (1)$$

Table 4 Failure times

Specimen	Load condition		Failure times
	Max load: $S_{\max}$ (kN)	Min load: $S_{\min}$ (kN)	
UFC-60	60	10	6,674,046
UFC-70	70		167,935
UFC-80	80		21,528
UFC-90	90		102

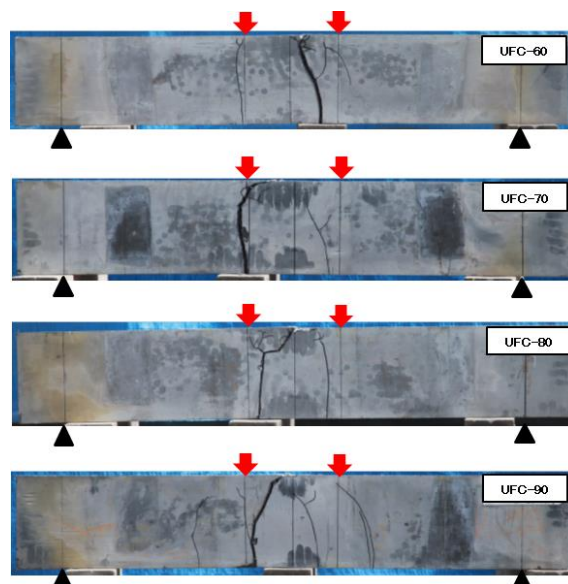


Fig. 3 Failure mode (fatigue test)

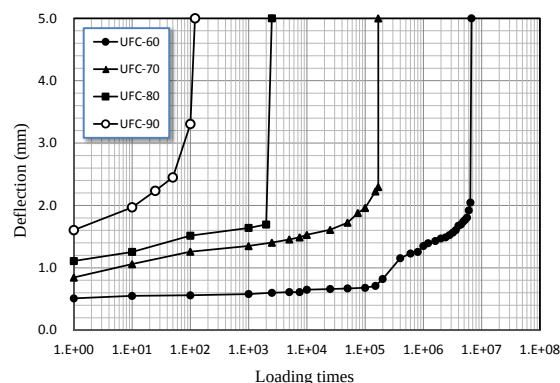


Fig. 4 Deflection and loading times relation

ここで、 ΔS : 荷重振幅($S_{\max} - S_{\min}$), $P_{\max}$: 静的耐荷力, N : 载荷回数

また、コンクリート部材の疲労特性に関する評価式としては、土木学会で気中におけるコンクリートの圧縮疲労試験結果より、Eq.(2)が与えられている^{8,9)}。

$$\text{Log} N = 17 \cdot \frac{1 - S_{\max}}{1 - S_{\min}} = 17 \cdot \left(1 - \frac{S_r}{1 - S_{\min}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $S_{\max}$, $S_{\min}$: 最小・最大荷重と静的

耐力比、 S_r ：荷重振幅と静的耐力比との比

Eq.(2)より算出した結果を載荷回数に換算し、近似曲線を求めたものをFig. 5に併記した。さらに、鋼繊維を用いたUFCの疲労試験結果¹⁾より得られた近似曲線もFig. 5に併記した。

同図より、有機繊維を用いたUFCとの比較を行うと、鋼繊維を用いたUFCに比してS-N曲線の傾きは若干大きい傾向にあるが、その差は比較的小さいことから、ばらつきの範囲内であると考えられる。また、土木学会式より算出した結果との比較では、通常のコンクリート部材に比して十分に耐疲労性を有していることが分かる。

以上の結果より、有機繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートは、鋼繊維を用いたUFCに近似した傾きを示しており、通常のコンクリートとの比較においても耐疲労性に優れた構造部材であることから、実用性があるものと判断できる。

5. まとめ

- ①静荷重載荷試験より、荷重たわみの関係および荷重ひずみの関係は、各供試体ともに荷重増加に対し線形的な増加がみられた。また、たわみの増加傾向が大きくなった後も終局時まで比較的線形的な挙動を示すことを確認した。
- ②破壊形状より、静的載荷および定点疲労試験ともに両載荷点直下付近に初期ひび割れ発生後も繊維の架橋効果によって急激な破壊は見られず、最終的には曲げ破壊を呈した。
- ③定点疲労試験におけるたわみと載荷回数の関係より、各供試体ともに初期荷重載荷時のたわみ値から載荷回数に比例して緩やかな増加が見られた。
- ④定点疲労試験における耐力比と載荷回数との間には相関性があることを示したうえで、有機繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの疲労寿命推定式を提案した。
- ⑤鋼繊維を使用したUFCおよび一般的なコンクリートとの疲労寿命推定式の比較において、鋼繊維を用いたUFCに近似する結果が得られたことから、十分な疲労耐久性

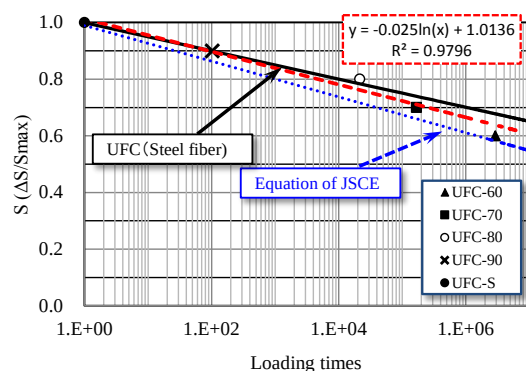


Fig. 5 S-N curve

を有するものと判断できる。

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113 (2004)
- 2) 結城和宏ほか：高強度鋼繊維コンクリートの破壊靱性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.445-451 (1995)
- 3) 白井一義ほか：RPCを用いたはり部材の力学性状に関する実験的研究，日本コンクリート工学協会，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.93-100 (2003)
- 4) 福浦尚之ほか：非線形有限要素解析による超高強度繊維補強コンクリートはり部材の挙動シミュレーション，土木学会論文集，No.795/V-68，pp.81-93 (2005)
- 5) 田中良弘ほか：超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC橋梁の長大スパン化に関する研究開発，コンクリート工学，Vol.42，No.8，pp. 30-36 (2004)
- 6) 野口孝俊，加藤浩司：羽田空港再拡張事業における超高強度繊維補強コンクリートの活用，セメント・コンクリート論文集，Vol.62，pp.34-38 (2008)
- 7) 田中良弘ほか：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.1309-1314 (2005)
- 8) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法試案，コンクリートライブラリー No.48 (1981)
- 9) 村田二郎ほか：鉄筋コンクリート工学，技報堂出版 (1995)