

集束 PBO 繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの曲げ疲労特性

太平洋セメント(株) 正会員 ○河野 克哉 正会員 森 香奈子 正会員 曾根 涼太
立命館大学 学生会員 小川 真生 正会員 川崎 佑磨 フェロー会員 岡本 享久

1. はじめに

圧縮強度 150N/mm² 以上を有する超高強度繊維補強コンクリート(以下, UFC)は, 鋼繊維を混入することで引張性能を改善し, さらに流動性や耐久性に優れた材料である¹⁾.

しかし, UFC にひび割れが生じた場合には架橋した鋼繊維が露出して腐食することで伝達応力が低下するのではないかという懸念があった. このため, 筆者らは鋼繊維を超えるような力学性能と高い耐食性を併せもった合成繊維として, 図 1 に示すスーパー繊維(引張強度 2GPa 以上, 引張弾性率 50GPa 以上)に着目した. それらの中でも最高の力学性能を示すポリパラフェニレンベンズビスオキサゾール(PBO)繊維を集束させてから UFC の短繊維補強材として適用することで, 鋼繊維を用いた UFC に匹敵するような流動性能や引張性能が実現できることを明らかにしている²⁾.

本研究は, このような集束 PBO 繊維を用いた UFC の疲労特性について検討したものであり, 鋼繊維を用いた UFC の場合と比較する形で曲げ疲労試験を行った.

2. 実験概要

(1) 使用材料ならび配合

UFC の設計・施工指針(案)に準拠した標準粉体(以下, 結合材: B, 細骨材: S), 高性能減水剤(以下, SP), 表 1 に示す短繊維(以下, F)として, 集束 PBO 繊維(以下, PBO)ならびに鋼繊維(以下, STE)を用いた. PBO は, 表 2 に示したフィラメントを複数集めて束とし, 練混ぜ時に繊維束が解砕しないように繕りを与えて, その束を樹脂で固定したもので, 図 2 のような形状である. 表 3 に PBO ならびに STE を用いた UFC の配合を示した. UFC に対する繊維の体積混入率(以下, V_f)は, PBO の場合に 2%と 1%の 2 水準, STE の場合に 2%の 1 水準とした. なお, いずれの配合においても W/B を 14.1%で一定とした.

(2) 練混ぜならび養生

パン型強制練りミキサーに, B, S, 水(以下, W)および SP を投入して 6 分間練り混ぜ, さらに F を投入して 2 分間練り混ぜた. 1 次養生(封緘養生: 20℃, 48h)の後で脱型し,

表 1 短繊維の物性

繊維種類	略号	密度 (g/cm ³)	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (GPa)	引張弾性率 (GPa)
集束 PBO 繊維	PBO	1.51	0.23	15	3.5	141
鋼繊維	STE	7.85	0.20	15	2.8	210

表 2 PBO フィラメントの物性

直径 (mm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (GPa)	引張弾性率 (GPa)	破断伸び (%)	分解温度 (℃)
0.012	1.54	5.8	180	3.5	650

表 3 UFC の配合

No.	纖維 種類	V_f (%)	單位量 (kg/m ³)						フロー (mm)
			W	B	S	F		SP*	
						PBO	STE		
1	PBO	1	182	1291	943	15	—	17	279
2		2	180	1278	934	30	—	20	259
3	STE					—	157	17	284

* W の一部として内割置換.

2 次養生(蒸気養生: 昇温速度 15℃/h, 最高温度 90℃, 最高温度保持時間 48h, 降温速度 15℃/h)を行った.

(3) 供試体の概要ならびに疲労試験の方法

各配合の圧縮強度(以下, f'_c)を寸法 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体にて測定した. 曲げ供試体は, 図 3 に示すように寸法 $50 \times 100 \times 400$ mm とし, はじめに支点間距離 300mm の 3 等分点載荷にて静的曲げ強度(以下, f_m)を測定した. つぎに油圧サーボ式強度試験機を用いて, 供試体, 支点および載荷点を静的曲げ試験と同一の条件にて曲げ疲労試験を行った. 疲労載荷の方法は, 載荷サイクルを 5Hz とし, 載荷レベルは上限応力(以下, σ_{max})を f_m の 83%, 50%, 67%および 33%の 4 水準に変化させて, 下限応力(以下, σ_{min})を f_m の 10%とした. なお, 繰返し回数が 200 万回を超えても破壊しなかった場合, その載荷レベル以下となる試験水準は実施しなかった. また, 200 万回までに破壊しなかった試験水準では, 同じ条件にて 500 万回まで載荷を繰返し, いずれの場合にも破壊に至らないことを確認している.

3. 結果と考察

表 4 は, PBO ならびに STE を用いた UFC の f'_c ならびに

キーワード 超高強度繊維補強コンクリート, 集束 PBO 繊維, 静的曲げ強度, 疲労, S-N 線図

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL. 043-498-3893

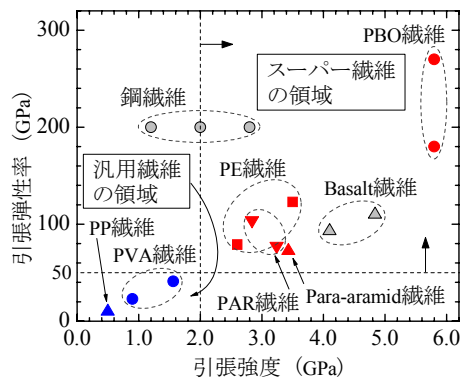


図1 各種繊維フィラメントの力学性能

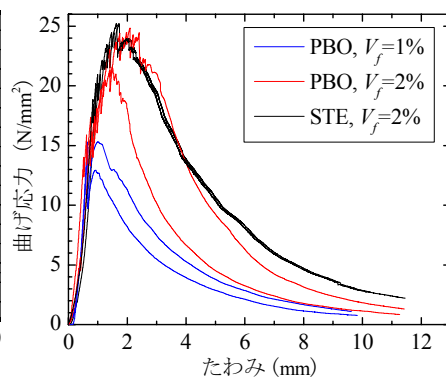


図4 UFCの曲げ応力-たわみ関係

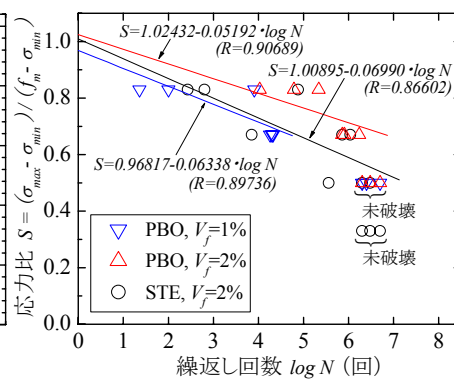


図5 UFCのS-N曲線



図2 集束PBO繊維の形状

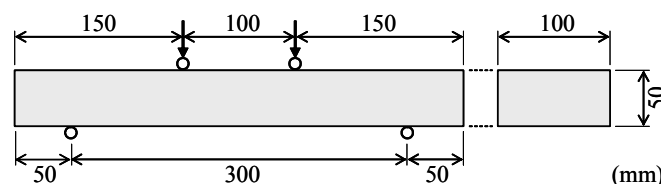


図3 供試体の形状ならびに荷重の方法

f_m を示したものである。PBOを用いた場合の f'_c は、STEを用いた場合に比べて約17%低下し、 V_f が f'_c に与える影響はほとんど認められなかった。一方、PBOを用いた場合の f_m は V_f にともなって増加し、同じ $V_f=2\%$ の場合ではSTEを用いた場合に比べてPBOの場合には約10%低下した。

図4は、PBOならびにSTEを用いたUFCの静的荷重時における曲げ応力-たわみ関係を示したものである。なお、図には f_m が最大ならびに最小となったものを記載した。PBOを $V_f=2\%$ で用いた場合、STEを $V_f=2\%$ で用いた場合とほぼ同等の f_m となった供試体も存在しているものの、ピーク以降の曲げ応力は同じ V_f でSTEを用いた場合よりもやや急に低下した。また、PBOを用いた場合の曲げ挙動には、STEを用いた場合よりもバラツキが認められた。

図5は、PBOならびにSTEを用いたUFCの曲げ疲労試験から得たS-N線図を示したものである。なお、S-N線図の縦軸は応力比 S を $(\sigma_{max} - \sigma_{min}) / (f_m - \sigma_{min})$ とし、横軸は破壊までの繰返し回数 N を常用対数としてプロットした。また、 $N=200$ 万回以上ではいずれの供試体も破壊しなかったため、これらのデータを除いた上で、さらに $(N, S)=(0, 1.0)$ の点を追加したデータに対して回帰した直線を図中に併記した。

表4 UFCの圧縮強度ならびに静的曲げ強度

No.	繊維種類	V_f (%)	f'_c (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)
1	PBO	1	199	15.0
2		2	201	23.2
3	STE	2	241	25.9

PBOを $V_f=1\%$ で用いた場合の回帰直線は、STEを $V_f=2\%$ で用いた場合とほぼ同等であった。これらに対して、PBOを $V_f=2\%$ で用いた場合の回帰直線はS-N線図の縦軸上方に位置している。このようにPBOを用いたUFCは、STEを用いたUFCよりも疲労に対する抵抗性が高くなった。疲労荷重で生じた曲げひび割れは、PBOならびにSTEのいずれの場合にも各繊維がひび割れに架橋した状態で開閉を繰り返している。PBOの場合にはひび割れに架橋した繊維の集束が解け、下限応力時にひび割れが閉じた際には繊維束が膨らんで屈曲する。そのため、下限応力時に解繊したPBOフィラメント自体に応力が作用せず、常に繊維に応力が作用するSTEとは、疲労挙動が異なったのではないかと考える。

4. まとめ

PBOを用いたUFCは、同じ $V_f=2\%$ でSTEを用いた場合に比べて、曲げ疲労試験から得たS-N曲線における回帰直線の傾きが小さく、疲労に対する抵抗性が高いと考えられる。

【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)，pp.1-2，2004。
- 2) 河野克哉ら：最高強度を有する有機系スーパー繊維で補強した超高強度コンクリートの特性，第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.377-382，2013。

【謝辞】

本研究の実施に当っては、東洋紡(株)の奥山幸成氏に集束PBO繊維をご提供して頂きました。ここに記して深謝致します。