

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

太平洋セメント(株) 正会員 博(工) ○河野 克哉
 太平洋セメント(株) 修(工) 森 香奈子
 太平洋セメント(株) 修(工) 川口 哲生
 東洋紡(株) 修(理工) 奥山 幸成

Abstract : One of the common problems found with ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) is surface contamination induced by corrosion of the exposed steel fibers on the surface. Corrosion may also occur on steel fibers when they bridge cracks, if present, inside the UFC. In order to provide a solution to this problem, the authors investigated applicability of corrosion-resistant organic fibers with extremely high strength and elasticity, including twisted poly-p-phenylenebenzobisoxazole (PBO) fiber bundles. The important findings in this study were as follows: (1) tensile and flexural strengths of UFC were increased by using twisted PBO fiber bundles; (2) shrinkage behavior of UFC containing twisted PBO fiber bundles was the same as that of UFC containing steel fibers; and (3) fracture energy and abrasion resistance of UFC were slightly decreased by using twisted PBO fiber bundles.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC), Tensile strength, Fracture energy

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)は200N/mm²以上の高い圧縮強度を有しながら、鋼繊維の混入によって引張特性を改善し、流動性、耐久性を兼ね備えた材料となっている。この特長によって、薄肉軽量化、遮塩性、耐摩耗性、意匠性などの性能・機能を新設ならびに既設の構造物に付与できる。

2004年に土木学会から発刊された「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」(以下、UFC設計・施工指針(案))では、UFCに用いる補強用繊維は、直径0.1~0.25mm、長さ10~20mmで、引張強度が2GPa以上となるものを標準としている¹⁾。このような繊維として、一般に鋼繊維が適用されているものの、UFCの表面に存在する鋼繊維が点錆化する汚染のほか、人体接触時に刺傷する怪我など、美観性や安全性の面で問題を生じることがある。また、緻密なUFCに保護された内部に存在する鋼繊維は塩害環境下においても腐食しないが、UFCにひび割れを生じた場合には、ひび割れに架橋した鋼繊維が容易に腐食し、伝達応力の低下を引き起こす可能性が懸念される。このため、UFC設計・施工指針(案)では、UFCに発生する引張応力はひび割れ発生強度を超えない形での設計を原則としている²⁾。

このような背景の下、鋼繊維よりも優れた力学特性、耐食性および安全性を有する繊維として、図-1に示すような有機系のスーパー繊維(引張強度2GPa以上、引張弾性率50GPa以上)に着目した。その中でも現行市販の繊維では最高の力学性能をもつポリパラフェニレンベンズビスオキサゾール繊維(以下、PBO繊維)をUFCに適用することを検討した。UFCの流動性と強度を両立させるため、集束加工したPBO繊維を試作・混入し、UFCの力学特性、破壊力学特性、収縮特性、およびすりへり抵抗性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに配合

UFCの設計・施工指針(案)に準拠した標準粉体(以下、結合材：B、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、写真-1の集束PBO繊維(以下、PBO)ならびに鋼繊維(以下、

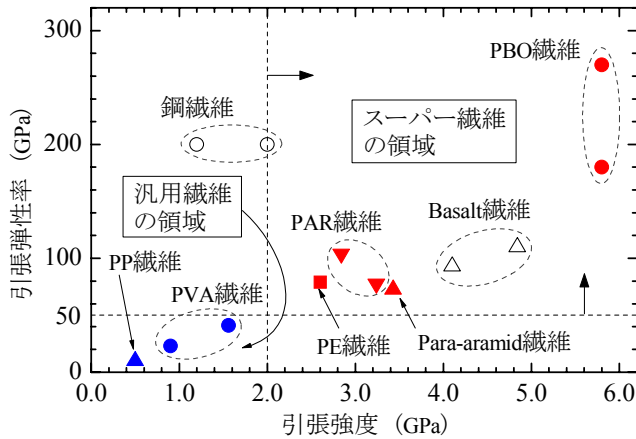


図-1 各種繊維の引張弾性率と引張強度の関係



写真-1 集束PBO繊維

ST)を用いた。表-2は、PBOフィラメントの物性を示したものであり、この繊維は高強度・高弾性率・高耐熱性・難燃性の四つを主な特長とし、ベルト・ロープ・消防服・安全保護手袋・スポーツ用品などに適用され、高分子配列の均質化や欠陥部分の消失によって繊維軸方向に高い引張特性を発現できる有機材料である。本研究で使用したPBOは、表-2に示す汎用型のPBO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撻りを与えて、その束を樹脂で固定している。

表-3はPBOならびにSTを用いたUFCの配合を示したものであり、UFCに対する繊維の体積混入率(以下、 V_f)はPBOの場合1%と2%の2水準、STの場合2%の1水準とした。なお、いずれの配合においてもW/(B+S)を8%で一定とした。なお、表-3に示した配合ならびにコンシステンシーにてPBOならびにSTを混入したUFCを製造する場合には、いずれの繊維も均一に分散することを確認している。

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	ST	7.85	0.20	15	2.0	200

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 (°C)	水分率 (%)	LOI *	熱膨張係数 (1/°C)
汎用型	0.012	1.54	5.8	180	3.5	650	2.0	68	—
高弾性型	0.012	1.56	5.8	270	2.5	650	0.6	68	-6×10^{-6}

* 限界酸素指数

表-3 PBO ならびに ST を用いた UFC の配合

No.	繊維種類	V_f (%)	W/(B+S) (%)	単位量 (kg/m ³)					フロー (mm)	
				W	B	S	F			SP *
							PBO	ST		
1	PBO	1	8	182	1338	941	15	—	22	261
2		180		1322	932	30	—	24	235	
3	ST	2		—	—	—	—	157	21	266

* Wの一部として内割置換。

2.2 練混ぜならびに養生

パン型強制ミキサに、標準粉体、水およびSPを投入して11分間練り混ぜ、さらに繊維を投入して2分間練り混ぜた。1次養生(封緘養生：20℃，48h)の後で脱型し、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。

2.3 測定項目

(1) 圧縮強度，ひび割れ発生強度および曲げ強度

供試体の寸法は、圧縮強度(以下、 f_c)の場合 $\phi 5 \times 10$ cm，ひび割れ発生強度(割裂引張強度)(以下、 f_{cr})の場合 $\phi 10 \times 20$ cm，曲げ強度(以下、 f_b)の場合 $4 \times 4 \times 16$ cm(4点曲げ)とし、各強度試験を実施した。

(2) 破壊エネルギーならびに引張軟化曲線

破壊エネルギー(以下、 G_p)は、JCI-S-002-2003に準じて、**図-2**に示すような切欠きはり(寸法10×10×40cm，切欠き3cm)の3点曲げ試験から荷重-ひび割れ肩口開口変位(以下、 $CMOD$)曲線を求め、JCI-S-001-2003に準じて G_p を算出した。引張軟化曲線は、上述のより3点曲げ試験で得られた荷重- $CMOD$ 曲線から、繰返しひび割れ進展解析におけるひび割れ方程式の釣合条件を仮想ひび割れ先端での引張応力としてはり中央部に仮想ひび割れモデルを組み込んだFEMを用いて多直線近似法³⁾にて推定した。

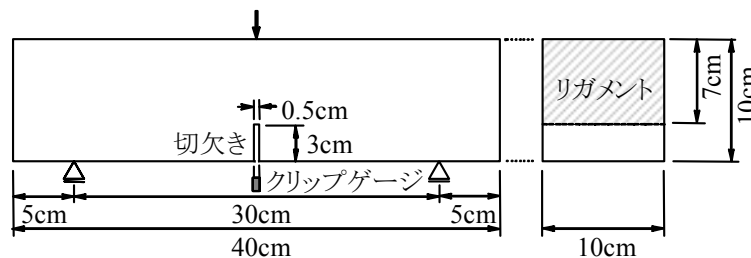
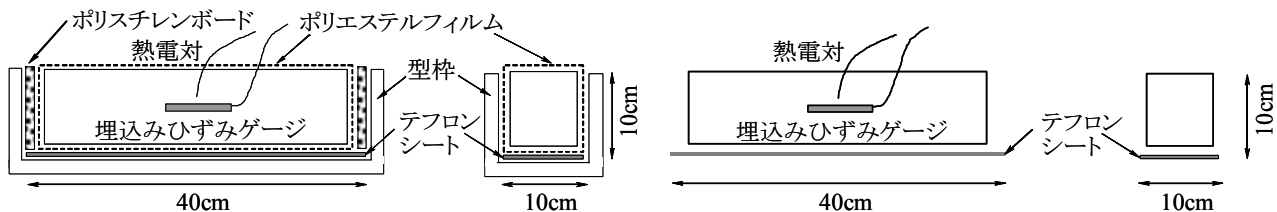


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験の方法

(3) 収縮特性

図-3は、1次ならびに2次養生中におけるUFCの収縮の測定方法を示したものである。すなわち、1次養生(封緘養生，20℃)中の材齢48時間までは、供試体の自由な変形の拘束(底面にテフロンシートならびに両端面にポリスチレンボードの設置)，および水分の逸散を防止(全面にポリエステルフィルムの設置)した型枠(寸法10×10×40cm)内で凝結の始発に達した時点から供試体中心部に設置した埋込みひずみゲージ(弾性係数39N/mm²，標点距離10cm)にて測長した。その後の2次養生(蒸気養生，90℃)では、供試体を脱型(全面に施したポリエステルフィルムを除去)した状態にて同様に埋込みひずみゲージにて測長した。なお、収縮ひずみの算出では、熱電対にて水和熱による温度上昇を実測し、UFCの線膨張係数を $13.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して⁴⁾，長さの補正を行った。



(a) 打込みから48時間以前(1次養生中)

(b) 打込みから48時間以降(2次養生中)

図-3 収縮の測定方法

(4) すりへり抵抗性

PBOならびにSTを用いたUFC製平板(寸法30×30cm, 厚さ6cm)をASTM C779に準じて回転ディスクを用いてすりへり作用を与える形ですりへり抵抗性試験に供した。固定したUFC製平板に一定荷重を作用させた磨耗板に磨耗材を定量供給しながら回転(自転280rpm)させ、さらにこれを円周運動(公転12rpm)させることで表面に平行な磨耗を与えた。UFC製平板の削り取られた深さをマイクロメータにて測定し、その平均値をすりへり深さとした。すりへり試験は60分間継続して行い、試験開始から試験終了まで10分経過毎にすりへり深さを測定した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 強度特性

表-4はPBOならびにSTを用いたUFCの力学特性を示したものである。PBOを用いたUFCの f_c は V_f の増加とともに低下し、いずれの V_f の場合も200N/mm²以下となっており、STを用いたUFCの f_c よりも約20%低減した。これは、PBOは繊維軸方向に引張抵抗は示すが、それ以外の方向では十分抵抗できないことや、もともと圧縮抵抗は期待できないことなどに起因したものと考える。ただし、PBOを用いた場合においても、UFCの設計・施工指針(案)に規定された圧縮強度の特性値150N/mm²以上は十分に満足できるものと推察される。

PBOを用いたUFCの f_{cr} は V_f に依存せず一定で、STを用いた場合よりもやや低かった。しかし、母材がひび割れた後で初めて繊維への応力分担が生じるため、母材のひび割れ発生には繊維の種類や混入率があまり影響しないと考える。また、PBOを用いたUFCの f_b は V_f とともに増大し、 $V_f=2\%$ ではSTを用いた場合と同等以上を示した。

表-4 PBOならびにSTを用いたUFCの力学特性ならびに収縮特性

繊維種類	V_f (%)	力学特性			収縮特性		
		f_c (N/mm ²)	f_{cr} (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)	1次養生中(×10 ⁻⁶)	2次養生中(×10 ⁻⁶)	全ひずみ(×10 ⁻⁶)
PBO	1	185	10.0	24.2	277	600	877
	2	177	10.4	38.3	351	513	864
ST	2	222	11.3	37.6	223	626	849

3.2 破壊力学特性

図-4はPBOならびにSTを用いたUFCの荷重-CMOD曲線を示したものである。PBOを用いたUFCでは、ピーク荷重が V_f とともに増大し、 $V_f=2\%$ ではSTを用いた場合よりも向上したものの、ピーク以降の荷重は急に低下した。そのため、表-5に示すようにPBOを用いた場合の G_R は、 $V_f=2\%$ で比較して、STを用いた場合よりも小さくなった。

図-5はPBOならびにSTを用いたUFCの引張軟化曲線を示したものである。PBOを用いたUFCでは V_f が増加するほど応力低下を生じるまでの高原域(軟化開始応力)が向上し、PBOを $V_f=2\%$ とした場合の開始応力はSTを $V_f=2\%$ とした場合を上回った。なお、PBOを用いたUFCではSTを用いた場合にくらべて高原域以降に急激な応力低下を生じた。

表-5 は切欠きはりの3点曲げ試験結果をまとめたものである。UFCの設計・施工指針(案)に示された引張強度(以下、 f_t)の平均値は11.3N/mm²であり、PBOを $V_f=2\%$ とした場合の f_t は11.2N/mm²で同等となった。なお、本研究で比較のために試験を実施した $V_f=2\%$ のSTを用いた場合には、 f_t が10.1N/mm²であった。また、表-5に示すようにPBOを $V_f=2\%$ とした場合、ひび割れ発生後に一定応力を保持できる開口変位 w_1 ならびにひび割れ発生後に応力が0となる開口変位 w_2 の値は、いずれも鋼繊維を2%混入

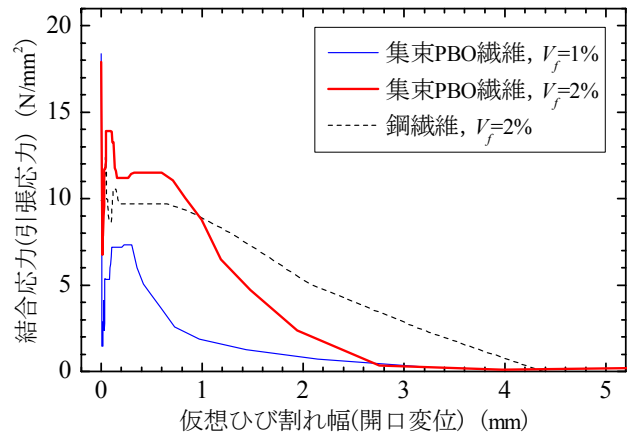
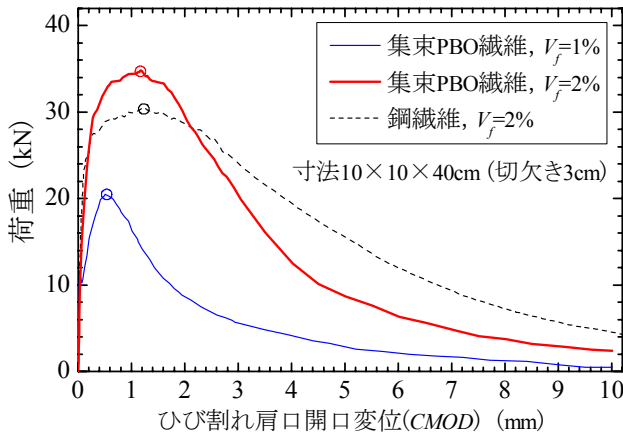


図-4 PBOならびにSTを用いたUFCの荷重-CMOD曲線 図-5 PBOならびにSTを用いたUFCの引張軟化曲線

表-5 PBOならびにSTを用いたUFCの切欠きはりの三点曲げ試験の結果

No.	繊維種類	V _f (%)	荷重-CMOD 曲線		引張軟化曲線		
			f _{b,max} (N/mm ²)	G _F (N/mm)	f _t (N/mm ²)	w ₁ (mm)	w ₂ (mm)
1	PBO	1	20.8	5.56	8.12	0.24	3.3
2		2	32.6	14.4	11.2	0.54	3.8
3	ST	2	31.8	20.4	10.1	0.70	9.0
Ref.	UFC 指針案	—	—	—	11.3	0.50	4.3

f_{b,max}: 曲げ強度, G_F: 破壊エネルギー, f_t: 引張強度

w₁: ひび割れ発生後に一定応力を保持できる開口変位

w₂: ひび割れ発生後に応力が0となる開口変位

した場合よりも小さいものの、UFC の設計・施工指針(案)における推奨値と比較するとほぼ同等となっている。

3.3 収縮特性

図-6はPBOならびにSTを用いたUFCの収縮ひずみの経時変化を示したものである。また、前述の表-4中に収縮量として1次養生中のひずみ(以下、 ϵ_1)、2次養生中のひずみ(以下、 ϵ_2)、各養生中を通じた全ひずみ(以下、 ϵ_t)の値を併記している。PBOを用いたUFCは、 V_f が増加するほど ϵ_1 が増大するものの、 ϵ_2 は減少するため、 ϵ_t は V_f にかかわらずほぼ一定であった。PBOを $V_f=2\%$ で用いた場合の ϵ_t は、STを $V_f=2\%$ で用いた場合とくらべて若干増加したものの(ϵ_1 は増大、 ϵ_2 は減少)、ほとんど同程度と判断できる。これは集束繊維を構成しているPBOフィラメントが高い弾性率を有する材料であることから、収縮変形に対して比較的高い抵抗性を発揮できたのではないかと推察している。

3.4 すりへり抵抗性

図-7はPBOならびにSTを用いたUFCのすりへり抵抗性試験の結果を示したものである。PBOの V_f が増加するほど試験時間の経過にともなうすりへり深さも減少しており、PBOがすりへりに対して抵抗できることがわかった。ただし、PBOを $V_f=2\%$ で混入した場合のすりへり深さ(60分間の試験後)は、STを $V_f=2\%$ で混入した場合よりも25%程度大きい値となっており、PBOを用いたUFCのすりへり抵抗性は、STを用いたUFCの場合にくらべて低下するといえる。これは、樹脂で硬化させたPBOフィラメントの集束が磨耗材を添加した回転ディスクによるすりへり作用で解砕するためと考えられる。

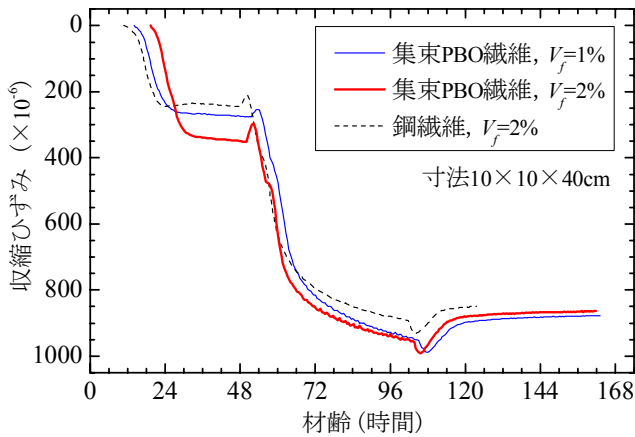


図-6 PBOならびにSTを用いたUFCの収縮特性

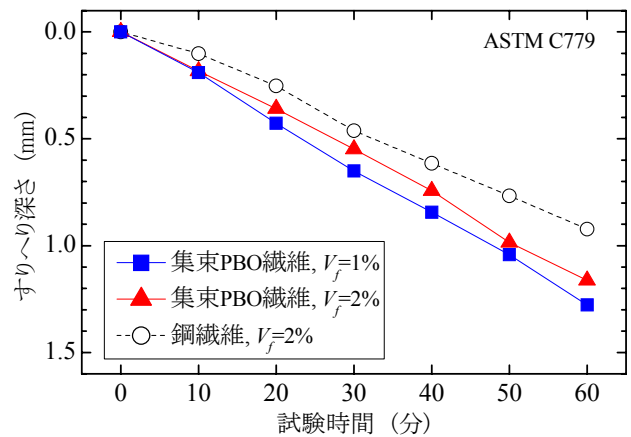


図-7 PBOならびにSTを用いたUFCのすりへり抵抗

4. まとめ

本研究では、有機系のスーパー繊維の中でも最高性能を有するPBO繊維を集束化してUFCに適用した場合の力学特性、破壊力学特性、収縮特性、およびすりへり抵抗性を評価し、適用の可能性を検討した。本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 集束PBO繊維はUFCに対する内割体積混入率を1%から2%まで増加すると圧縮強度が低下するものの、UFCの規準である150N/mm²以上となった。
- (2) 集束PBO繊維はUFCに対する内割体積混入率を1%から2%まで増加すると、引張強度、曲げ強度、破壊エネルギーは向上した。とくに集束PBO繊維を2%混入したUFCでは、鋼繊維を2%混入したUFCにくらべて引張強度ならびに曲げ強度が増大したものの、破壊エネルギーは若干低下する。
- (3) 集束PBO繊維の内割体積混入率は、UFCのひび割れ発生強度に対する影響は小さく、集束PBO繊維を用いた場合のひび割れ発生強度は鋼繊維を用いた場合と同等であった。
- (4) 集束PBO繊維の内割体積混入率は、UFCの1次養生ならびに2次養生中の収縮量に与える影響小さく、集束PBO繊維を用いた場合の収縮量は鋼繊維を用いた場合と同等であった。
- (5) 集束PBO繊維はUFCに対する内割体積混入率を1%から2%まで増加するとすりへり深さが低減した。集束PBO繊維を用いたUFCのすりへり抵抗性は、鋼繊維を用いたUFCよりも約25%低下した。

5. 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), p. 56-57, 2004
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), p. 38-39, 2004
- 3) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ性状, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 119-129, 1996. 2
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), p. 20, 2004