

スーパー繊維で補強した超高強度コンクリートの特性とRCはりのせん断特性

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) 多田 克彦
 太平洋セメント(株) 博(工) 田中 敏嗣

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 super synthetic fibers with extremely high strength and elasticity, including twisted PBO fiber bundles (PBO) and twisted Aramid fiber bundles (ARM). The important findings in this study were as follows: (1) fracture energy of UFC containing PBO was the same as that of UFC containing steel fibers, and shear carrying capacity of RC beam was slightly increased by using PBO, and (2) fracture energy of UFC was slightly decreased by using ARM, and shear carrying capacity of RC beam containing ARM was the same as that of RC beam containing steel fibers.

Key words : Ultra high strength, Super fiber, RC beam, Fracture energy, Shear carrying capacity

1. はじめに

圧縮強度200N/mm²程度を有する超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)は、鋼繊維の混入によって引張性能を改善し、さらに流動性、耐久性を兼ね備えた材料である。しかし、UFCの表面に存在する鋼繊維が点錆となる汚染や人体接触時に刺傷する怪我など、部材によっては美観性や安全性が問題になることがある。また、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し、ひび割れ間で伝達応力(耐荷力)が低下するのではないかという懸念もある。そのため、本研究では、鋼繊維を超えるような力学性能と耐食性を有する合成繊維に着目した。図-1は、各種繊維のフィラメントの引張強度と引張弾性率の関係を示したものであり、引張強度2GPa以上かつ引張弾性率50GPa以上の性能を有する合成繊維がスーパー繊維と呼ばれている。

本研究では、スーパー繊維の中でも、コンクリート用補強材としてまだ適用されていないものの、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ズール(PBO)ならびにシートやロッドなどでコンクリート用補強材とし適用例があるパラ系アラミド(Para-aramid)を、いずれもUFCの補強用短繊維の形状に加工し、これらのスーパー繊維を用いたUFCの力学特性とRCはりのせん断特性について検討した。

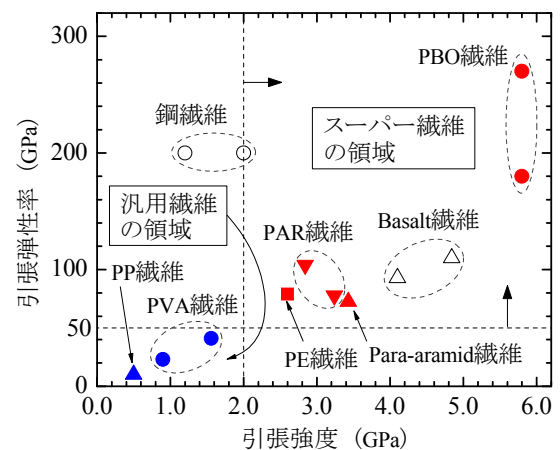


図-1 各種繊維の引張強度と引張弾性率の関係

表-1 補強用短繊維の物性

繊維の種類	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
集束アラミド繊維	ARM	1.31	0.24	15	3.0	60.8
ポリビニルアルコール繊維	PVA	1.30	0.30	15	0.96	28.2
鋼繊維	STE	7.85	0.20	15	2.8	210

表-2 各繊維を用いた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	ARM	PVA	STE		
1	PBO	1	8	182	1338	941	15	—	—	—	31	261
2		180		1322	932	30	—	—	—	32	252	
3	ARM	2		180	1322	932	—	39	—	—	32	271
4	PVA	3		178	1309	922	—	—	39	—	32	268
5	ST	2		180	1322	932	—	—	—	157	24	266

*Wの一部として内割置換。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに配合

土木学会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)、短繊維(以下、F)として表-1に示すような集束PBO繊維(以下、PBO)、集束アラミド繊維(以下、ARM)、ポリビニルアルコール繊維(以下、PVA)ならびに鋼繊維(以下、STE)を用いた。本研究で使用したPBOならびにARMは、いずれも複数本のフィラメントを集めて束とし、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たものである。

表-2は各繊維を用いた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2%と1%の2水準、ARMの場合2%の1水準、PVAの場合3%の1水準、およびSTE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-2に示した配合にて各繊維を混入したUFCは、いずれの繊維もマトリクス中において均一に分散しており、自己充填性を利用した型枠への打込みが可能なコンシステンシーを有している。

2.2 練混ぜならびに養生

パン型強制ミキサーに、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 材料特性に関する試験方法

(1) 圧縮強度ならびにひび割れ発生強度

圧縮強度(以下、 f_c')ならびにひび割れ発生強度(以下、 f_{cr})の測定は、それぞれ寸法φ5×10cm、φ10×20cmの供試体にて行った。なお、 f_{cr} は、UFCの設計・施工指針(案)に記載されている割裂引張試験から求める方法とし¹⁾、供試体端面にポリエステル箔ひずみゲージを貼り付け、このひずみの計測値が不連続になったときの荷重をひび割れ発生とした。

(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_f)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-

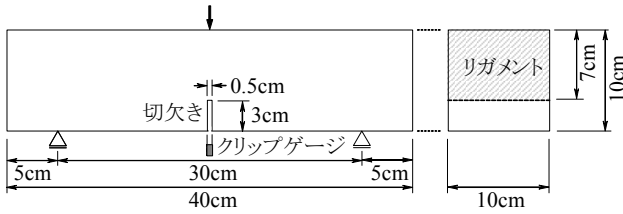


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験の方法

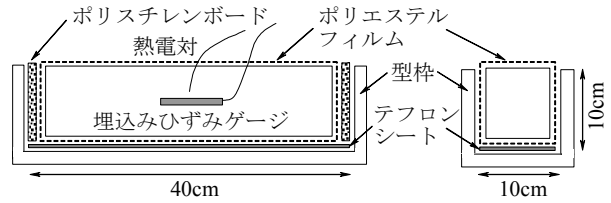


図-3 収縮ひずみの測定方法(材齢48時間以前)

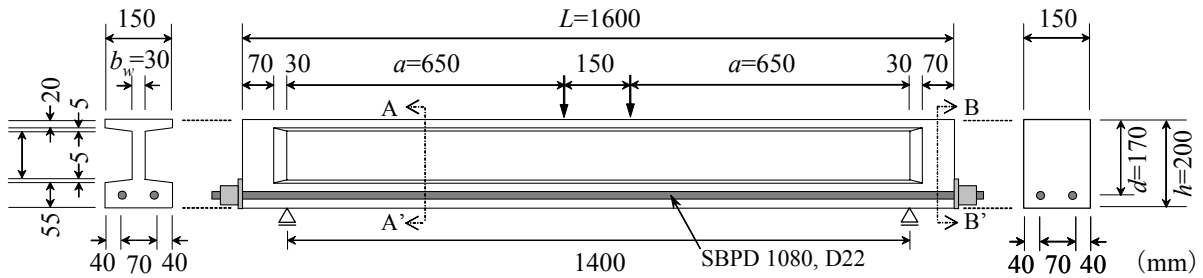


図-4 RCはりの断面諸元

001-2003に準じ、以下の式(1)を用いて G_F を算出した。引張軟化曲線は、上述のはり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²⁾にて推定した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_l) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ここで、 W_0 : 荷重-CMOD曲線下の面積(N・mm)、 W_l : 供試体の自重ならびに载荷治具が成す仕事(N・mm)、 A_{lig} : リガメントの面積(mm²)。

なお、供試体は最終的に破壊しないため、ひび割れ発生後の最大荷重とその下降域が十分に確認できた時点(CMOD=10mm)で曲げ試験を終了し、その時点で破壊したものと仮定して G_F を計算した。

(3) 収縮ひずみ

1次養生(封緘養生, 20°C)中の材齢48時間までは、図-3に示すように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°C)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、熱電対にて水和熱を実測し、UFCの線膨張係数を $13.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と仮定して³⁾、長さの補正を行った。

2.4 RCはりのせん断特性に関する試験方法

(1) RCはりの作製方法

図-3は、RCはりの断面諸元を示したものであり、ウェブ厚 $b_w=30\text{mm}$ 、有効高さ $d=170\text{mm}$ のI型断面を有する全長 $L=1600\text{mm}$ のはり部材とした。引張縁の軸方向には異形PC棒鋼(SBPD 1080, D22)を使用し、両側のせん断スパンにはせん断補強鉄筋を一切使用しない配筋状態とした。RCはりはUFCの自己充填性を利用して一方向から流込み成形し、標準熱養生を行った後で荷重に供した。なお、表-2に示した5通りの配合にてRCはりを作製し、供試体数は各配合につき1本ずつとした(計5本)。

表-4 各繊維を用いた UFC の力学特性, 収縮特性, およびそれらの UFC 製 RC はりの力学特性

No.	繊維種類	V_f (%)	UFC の力学特性			UFC の収縮特性			RC はりの力学特性		
			f_c' (N/mm ²)	f_{cr} (N/mm ²)	G_F (N/mm)	ϵ_1 ($\times 10^{-6}$)	ϵ_2 ($\times 10^{-6}$)	ϵ_t ($\times 10^{-6}$)	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	破壊形式
1	PBO	1	201	9.5	6.2	277	600	877	16.1	77.8	斜め引張
2		2	189	10.1	15.8	351	513	864	18.9	160	斜め引張
3	ARM	2	189	9.6	12.4	264	537	801	16.8	154	斜め引張
4	PVA	3	187	10.3	5.7	484	358	842	17.5	85.6	斜め引張
5	STE	2	224	10.3	16.2	223	626	849	17.2	153	斜め引張

f_c' : 圧縮強度, f_{cr} : ひび割れ発生強度, ϵ_1 : 1次養生中の収縮ひずみ, ϵ_2 : 2次養生中の収縮ひずみ, ϵ_t : 各養生中を通じた全収縮ひずみ, P_c : 曲げひび割れ発生荷重, P_u : 終局荷重,

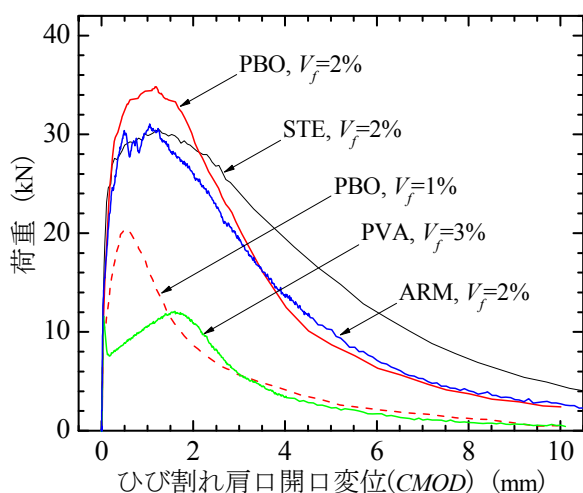


図-4 各繊維を用いたUFCの荷重-CMOD曲線

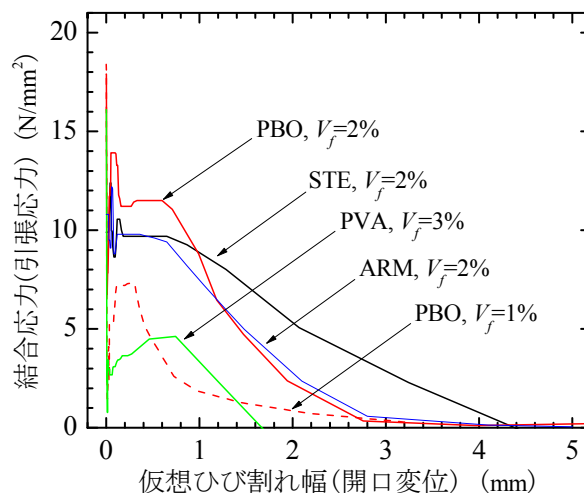


図-5 各繊維を用いたUFCの引張軟化曲線

(2) RCはりの載荷方法

RCはりは、図-3に示すように支間1400mm, 等モーメント区間150mm, せん断スパン有効高さ比 $a/d=3.67$ となるように支点と載荷点を設置し, 耐圧機にて2点集中荷重を静的に作用させた。荷重をロードセルで検出しながら, はり中央たわみを測定した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 各繊維を用いたUFCの力学特性ならびに収縮特性

表-4は, 各繊維を用いたUFCの力学特性を示したものである。PBOを用いたUFCは V_f の増加にともなって f_c' が低下するものの, f_{cr} はあまり変化せず, G_F は増大する傾向を示した。 $V_f=2\%$ でPBOを用いたUFCは, $V_f=2\%$ でSTEを用いた場合にくらべて, f_c' は約16%低下するものの, f_{cr} はほぼ同等で, G_F もほぼ同等となった。また, $V_f=2\%$ でARMを用いたUFCでは, $V_f=2\%$ でSTEを用いた場合にくらべて, f_c' は同様に約16%低下し, f_{cr} はほぼ同等であったものの, G_F は約23%低下した。PBOならびにARMをいずれも $V_f=2\%$ で用いた場合には, 同じ合成繊維であるPVAを $V_f=3\%$ で用いた場合にくらべて, f_c' ならびに f_{cr} はほぼ同等であったものの, G_F はいずれも大きく向上しており, STEを $V_f=2\%$ で用いた場合に匹敵するような性能を示した。

表-4中には, 各繊維を用いたUFCにおける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)および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

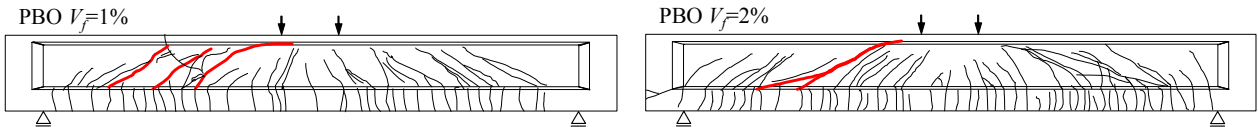


図-6 PBOを用いたUFGはりのひび割れ状況

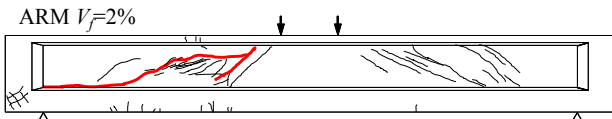


図-7 ARMを用いたUFGはりのひび割れ状況

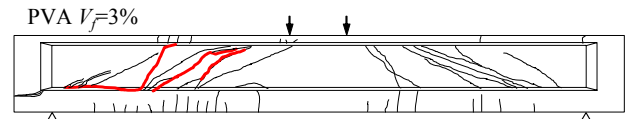


図-8 PVAを用いたUFGはりのひび割れ状況

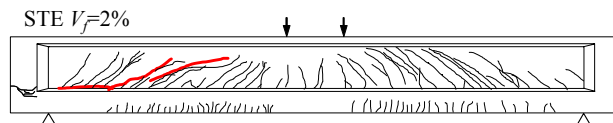


図-9 STEを用いたUFGはりのひび割れ状況

$V_f=2\%$ で用いた場合の ϵ_{t1} は、STE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_{t1} は増大し、 ϵ_{t2} は減少した)。また、ARMを $V_f=2\%$ で用いた場合の ϵ_{t1} は、STEを $V_f=2\%$ で用いた場合とくらべて若干減少した (ϵ_{t1} は増大し、 ϵ_{t2} は減少した)。なお、PVAを $V_f=2\%$ で用いた場合には、他の繊維を用いた場合にくらべて、 ϵ_{t1} がもっとも増大したものの、 ϵ_{t2} は減少しており、 ϵ_{t1} は同程度となっている。

3.2 各繊維を用いたUFGの破壊力学特性

図-4は、各繊維を用いたUFGの荷重-CMOD曲線を示したものである。PBOを用いたUFGでは、ピーク荷重が V_f とともに増大し、 $V_f=2\%$ ではSTE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-4に示したように $V_f=2\%$ でPBOを用いた場合の G_F は、 $V_f=2\%$ でSTEを用いた場合よりも若干小さくなったものとする。 $V_f=1\%$ でPBOを用いた場合には、 $V_f=3\%$ でPVAを用いた場合にくらべて、CMODが小さい値でピーク荷重に達したものの、ピーク以降は同様な挙動となっている。また、 $V_f=2\%$ ではARMを用いた場合には、ピーク荷重は $V_f=2\%$ でSTEを用いた場合とほとんど同等であり、ピーク以降は $V_f=2\%$ でPBOを用いた場合とかなり近い挙動を示している。

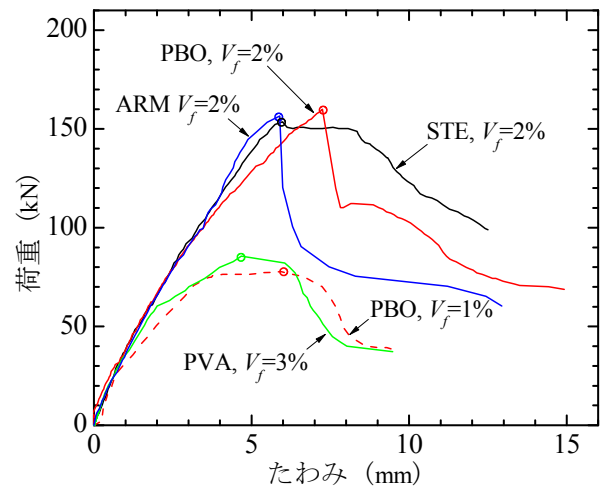


図-10 各繊維を用いたUFGはりの荷重-たわみ曲線

図-5は、各繊維を用いたUFGの引張軟化曲線を示したものである。PBOを用いたUFG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)が向上している。PBOを $V_f=2\%$ とした場合の軟化開始応力はSTEを $V_f=2\%$ とした場合を上回ったものの、高原域以降では急激な応力低下を生じた。また、ARMを $V_f=2\%$ とした場合、STEを $V_f=2\%$ とした場合にくらべて、軟化開始応力はほぼ同等であるものの、高原域を保持できるCMODの最大値は小さくなり、高原域以降の応力低下はPBOを $V_f=2\%$ とした場合とほぼ同等となった。

3.3 各繊維を用いたUFG製RCはりのせん断特性

図-6、図-7、図-8および図-9は、それぞれPBO、ARM、STEおよびPVAを用いたUFG製RCはりに生じた載

荷試験後のひび割れ状況を示したものである。いずれのRCはりにおいても、載荷中に生じた斜めひび割れが拡大することで最終的な破壊に至っている(斜め引張破壊)。PBOを用いた場合とほぼ同様な形ではり全体にひび割れが分散しており、PVAを用いた場合よりも多くのひび割れを生じることがわかった。また、ARMを用いた場合には、STEを用いた場合よりもはり全体におけるひび割れの分散性が低く、ひび割れの分散状態はSTEを用いた場合に近いものとなっている。

図-10は、各繊維を用いたUFC製RCはりの荷重-たわみ曲線を示したものである。 $V_f=1\%$ でPBOを用いたUFCはり、 $V_f=3\%$ でPVAを用いたUFCはり、初期剛性、ピーク荷重およびポストピーク挙動のいずれもほぼ同様となった。また、 $V_f=2\%$ でPBOを用いたUFCはり、 $V_f=2\%$ でSTEを用いたUFCはりにくらべて、初期剛性ならびにピーク荷重はほぼ同等となるものの、ピーク直後に荷重低下する傾向を示した。また、 $V_f=2\%$ でARMを用いたUFCはりでは、 $V_f=2\%$ でSTEを用いたUFCはりにくらべて、初期剛性ならびにピーク荷重はほぼ同等であったものの、ピーク直後に荷重低下する挙動はPBOを用いたUFCはりと同様の傾向を示すことがわかった。

前述の表-4中に、各繊維を用いたUFC製RCはりの載荷試験結果を併記している。いずれのUFCはりにおいても P_{cr} はほぼ同等となっており、UFCはりの P_{cr} は繊維の種類や量に大きく左右されないことがわかった。また、UFCはりの P_u は、 $V_f=1\%$ のPBOを混入した場合に $V_f=3\%$ のPVAを混入した場合よりもやや低下し、 $V_f=2\%$ のPBOを混入した場合には $V_f=2\%$ のSTEを混入した場合よりもやや増大し、 $V_f=2\%$ のARMを混入した場合には $V_f=2\%$ のSTEを混入した場合とほぼ同等となることがわかった。

4. まとめ

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繊維を混入率2%で用いたUFCは、STEを混入率2%で用いたUFCに比べて、圧縮強度は約16%低下するものの、ひび割れ発生荷重ならびに破壊エネルギーは同程度であり、養生中を通じた全収縮ひずみは若干増加した。
- (2) 集束アラミド繊維を混入率2%で用いたUFCは、鋼繊維を混入率2%で用いたUFCに比べて、圧縮強度は約16%低下し、ひび割れ発生強度は同程度で、破壊エネルギーは約23%低下したものの、養生中を通じた全収縮ひずみは若干低下する程度であった。
- (3) 集束PBO繊維を混入率2%で用いたUFC製RCはりは、鋼繊維を混入率2%で用いた場合にくらべて、初期剛性ならびにせん断耐荷力はほぼ同様となるものの、ピーク直後に荷重低下する傾向を示した。
- (4) 集束PBO繊維を混入率1%で用いたUFC製RCはりは、PVA繊維を混入率3%で用いた場合にくらべて、と初期剛性、せん断耐荷力およびポストピーク挙動のいずれもほぼ同様となった。
- (5) 集束アラミド繊維を混入率2%で用いたUFC製RCはりは、鋼繊維を混入率2%で用いた場合にくらべて、初期剛性ならびにせん断耐荷力はほぼ同等であったものの、ピーク直後に荷重低下する挙動はPBOを用いた場合と同様となった。

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)，pp.11-12，2004
- 2) 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
- 3) 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