

論文 集束 PBO 繊維を使用した超高強度繊維補強コンクリートの力学特性

森 香奈子^{*1}・河野 克哉^{*2}・奥山 幸成^{*3}・榎本 弘^{*4}

要旨：有機繊維の中で最も高い引張強度および弾性率を示す PBO フィラメントを樹脂により加工した集束 PBO 繊維を、超高強度繊維補強コンクリート (UFC) に適用した場合の流動性、力学特性および収縮特性について検討した。その結果、集束 PBO 繊維を適用した場合、型枠への自己充てん可能な流動性、所要の圧縮強度およびひび割れ発生強度が得られることが確認できた。さらに、繊維混入率を 2vol.%とした場合、鋼繊維を使用した場合と同等以上の曲げ強度および引張強度となり、高い引張特性を示すことがわかった。また、集束 PBO 繊維を適用した UFC の収縮ひずみは、鋼繊維を適用したときと同等となることも明らかとなった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、PBO 繊維、鋼繊維、破壊力学特性、収縮ひずみ

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) は、骨材、セメント、ポゾラン材から構成されるセメントマトリクスを、最密な充てんとなるような粒度構成とすることによって、流込みの際には良好な自己充てん性を有し、養生後には非常に緻密な硬化体組織となるように設計された 200N/mm² 程度の高い圧縮強度を有する画期的なコンクリートである。また、高性能な補強繊維を用いることにより、耐久性、じん性にも優れ、さらにコンクリートに引張力を負担させることができる材料でもある。土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」 (以下、指針 (案)) では、引張強度 2kN/mm² 以上の補強用繊維を使用することを標準としており、一般的には鋼繊維が使用されている。この鋼繊維の使用により UFC の高い引張特性を実現している反面、塩害環境下で UFC を使用した場合、UFC のごく表面に鋼繊維の点錆が発生し美観を損ねることがある。また、仮に UFC にひび割れが発生した場合、ひび割れ幅が極めて小さいとしても、架橋した鋼繊維に腐食が発生する可能性が懸念される。

このような背景の下、腐食に強く、鋼繊維を上回るような力学特性を示す有機繊維としてスーパー繊維に注目した。スーパー繊維の明確な定義はないが、日本化学繊維協会によれば、約 2 kN/mm² 以上の高強度、約 50 kN/mm² 以上の高弾性率を有する繊維がスーパー繊維と呼ばれている。さらに、現在商業化されているスーパー繊維の中で、最も高い強度・弾性率を示すことから、ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール (以下、PBO) 繊維¹⁾に着目した。しかし、PBO 繊維のコンクリートへの適用に関する既往の研究は限られており²⁾、特に UFC

に適用した研究は皆無である。現在市販されている PBO 繊維は、細径 (直径 0.012mm) の PBO フィラメントを数百本程度束ねたマルチフィラメントであるが、マルチフィラメントをそのまま UFC に混入した場合 UFC の流動性が著しく低下する。そこで本研究では、流動性と強度特性を確保する目的で樹脂により集束加工した PBO フィラメントを適用する方針とした³⁾。そして、この集束加工を施した PBO 繊維を使用した UFC について、流動性、圧縮・曲げ・ひび割れ発生強度、破壊力学特性および収縮特性を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。粉体は、指針 (案) に適合する結合材と骨材からなる市販の標準配合粉体である。補強用繊維としては、PBO フィラメントを樹脂により集束加工した PBO 繊維 (以下、集束 PBO 繊維) および鋼繊維を使用した。集束 PBO 繊維と鋼繊維の概要を表-2 に、参考として PBO フィラメントの概要を表-3 に示す。本試験で用いる繊維は、図-1 の写真に示すように繊維長 15mm の短繊維とした。また、専用の高性能減水剤 (以下、SP) も使用した。表-4 に UFC の配合を示す。水と粉体 (結合材+骨材) の比率を 8% で固定し、集束 PBO 繊維の混入率は 1vol.% および 2vol.%、鋼繊維の混入率は 2vol.% とした。この鋼繊維の構成および混入率は、指針 (案) に適合するものである。

2.2 供試体の養生方法

供試体の養生は、指針 (案) に準拠し、標準熱養生として 20℃ 下で 48 時間の封緘養生 (以下、一次養生) を行い、脱型した後、90℃ 下で 48 時間の蒸気養生 (以下、

*1 太平洋セメント(株)中央研究所 セメント・コンクリート研究部 複合構造材料チーム 修(工) (正会員)

*2 太平洋セメント(株)中央研究所 セメント・コンクリート研究部 複合構造材料チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 東洋紡績(株)総合研究所 機能材開発研究所 新素材企画グループ リーダー 修(理工) (非会員)

*4 東洋紡績(株)総合研究所 機能材開発研究所 機能材応用開発グループ 修(農) (非会員)

表－1 使用材料

種類		記号	概要
練混ぜ水		W	上水道水
標準配合粉体	結合材	B	セメント，ポゾラン材等から構成される市販のプレミックス品
	骨材	S	粒径 2.5mm 以下に調整された市販のプレミックス品
補強用繊維	集束 PBO 繊維	F	市販の PBO マルチフィラメントを集束加工した試作品
	鋼繊維(Steel)		市販の専用品（仕様は表－2 参照）
混和剤	高性能減水剤	SP	市販の専用品

表－2 供試繊維の概要

繊維の種類	密度(g/cm ³)	直径(mm)	長さ(mm)	引張強度(kN/mm ²)	引張弾性率(kN/mm ²)
集束 PBO 繊維	1.51	0.23	15	3.5	141
鋼繊維(Steel)	7.85	0.20	15	2.0	200

表－3 PBO フィラメントの概要

密度 (g/cm ³)	直径 (mm)	引張強度 (kN/mm ²)	引張弾性率 (kN/mm ²)
1.54	0.012	5.8	180



図－1 供試繊維

表－4 UFC の配合

水準名	水粉体比 (%)	繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W※	B	S	F
集束 PBO 1vol.%	8	1.0	182	1338	941	15
集束 PBO 2vol.%		2.0	180	1322	932	30
Steel 2vol.%		2.0	180	1322	932	157

※W の一部として SP を含む

二次養生)を行った。二次養生時の昇温および降温速度は，15℃/hr として管理した。

2.3 力学特性の試験方法

(1) 圧縮，曲げおよびひび割れ発生強度の試験方法

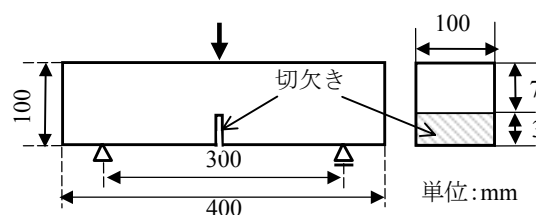
圧縮強度は，JSCE-G505-1999「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準拠し，φ5×10cm の供試体を使用して実施した。曲げ強度は，JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠し，4×4×16cm の供試体を使用して実施した。

また，ひび割れ発生強度は，UFC 指針（案）にて推奨されている JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠し，φ10×20cm の供試体を使用して実施した。載荷時には，供試体の端面中心に荷重方向と垂直になるようにポリエステル箔ひずみゲージを貼り付け連続的に計測を行い，ひずみの計測値が不連続となったときの荷重をひび割れ発生荷重とした。

各強度試験の実施は，二次養生終了後とした。

(2) 曲げ試験による破壊力学特性の試験方法

JCI-S-002-2003「切欠きはりを有した繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法」にしたがい作製した図



図－2 切欠きはりの3点曲げ試験の方法

－2 の切欠きを有するはりの3点曲げ試験により，荷重－ひび割れ肩口開口変位（以下，CMOD）曲線を求めた。そして，JCI-S-001-2003「切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法」にしたがって式(1)により，破壊エネルギー G_F を算出した。供試体の切欠きは，二次養生終了後にコンクリートカッターを用いて部分的に導入した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ここで， W_0 ：荷重－CMOD 曲線下の面積(N・mm)，
 W_1 ：供試体の自重および載荷時具がなす仕事(N・mm)，
 A_{lig} ：はりの破断部分面積(mm²)

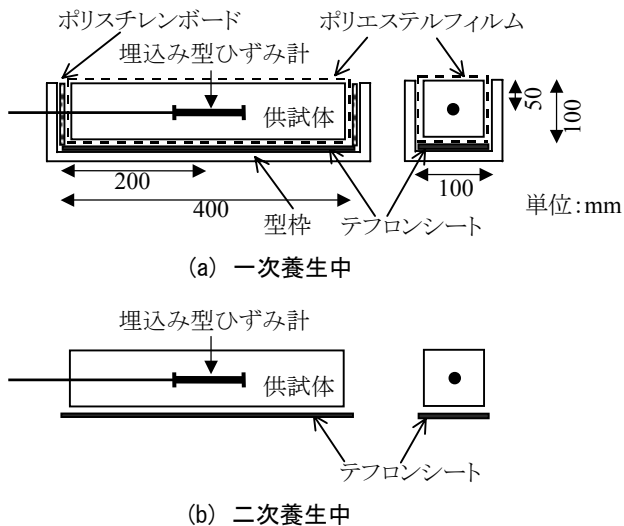


図-3 収縮試験の方法

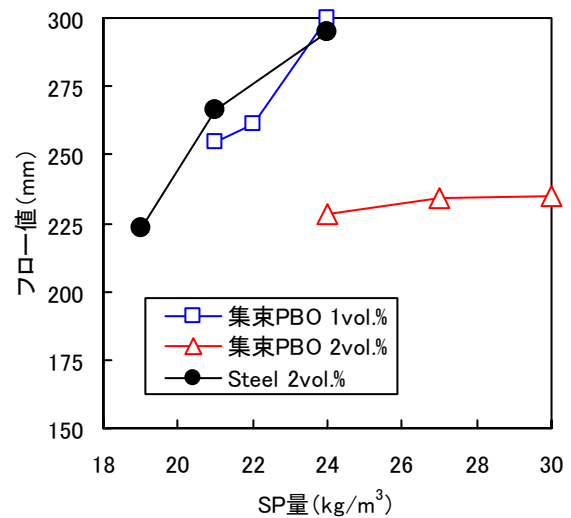


図-4 SP量とフロー値の関係

表-5 強度試験結果

試験水準	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)
集束 PBO 1vol.%	185	24.2	10.0
集束 PBO 2vol.%	177	38.3	10.4
Steel 2vol.%	222	37.6	11.3

なお、繊維を混入した供試体は最終的に破断しないため、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、 $CMOD=10mm$ の時点で破壊したものと仮定して計算を行った。

引張軟化曲線は、JCI-S-002-2003の試験で得られた荷重- $CMOD$ 曲線から、供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだFEMを用い、多直線近似法⁴⁾を用いた逆解析によって推定した。

(3) 収縮試験の方法

収縮ひずみの測定は、「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁵⁾に準拠し、 $10 \times 10 \times 40cm$ の供試体を使用して行った。図-3に示すように、供試体内部中央に埋込み型ひずみ計(標点距離:100mm,許容温度範囲:-20~180℃)を設置し、打込みから二次養生終了までの収縮ひずみを測定した。一次養生中は、供試体の自由な変形の拘束ならびに水分の逸散を防止した型枠内で測定を行った。一方、二次養生中は、脱型した供試体を蒸気養生槽内に敷いたテフロンシート上に設置し、底面摩擦を低減した状態で測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 UFCの流動性

SP量を変化させたときのUFCのフロー値を図-4に

示す。フロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠したが、落下運動を与えず、フローコーンを取り去ってから180秒後のフロー値を測定した。集束PBO繊維を1vol.%混入したUFCのフロー値は、SP量の増加に伴って増大し、鋼繊維を2vol.%混入した場合と同等の高い流動性が認められた。一方、集束PBO繊維を2vol.%混入したUFCは、SP量の増加に伴うフロー値の変化が小さく、ほぼ頭打ちとなった。これより、繊維混入率を同一とした場合、集束PBO繊維を使用したUFCは鋼繊維を使用した場合に比べ流動性が低下することがわかった。しかし、集束PBO繊維を使用した場合においても自己充填性を利用した供試体の成型は十分に可能であったことから、集束PBO繊維を2vol.%までUFCに混入できる可能性が認められた。各試験に用いる供試体の作製時には、230mm以上のフロー値となる配合にて練混ぜを行った。

3.2 圧縮、曲げおよびひび割れ発生強度

圧縮、曲げおよびひび割れ発生強度の試験結果の一覧を表-5に示す。また、曲げ試験における試験機のクロスヘッド変位と曲げ応力の関係を図-5に示す。集束PBOを使用したUFCの圧縮強度は、繊維混入率の増加にしたがって低下し、いずれの混入率においても $200N/mm^2$ 以下となった。鋼繊維を2vol.%混入したUFC

の圧縮強度は 222N/mm^2 であったことから、集束 PBO 繊維を使用した UFC の圧縮強度は、鋼繊維を使用した場合に比べ約 20%低下することがわかった。しかし、PBO 繊維を使用した場合においても、指針（案）に示される特性値 150N/mm^2 以上となることが確認できた。鋼繊維は引張力に対して高い抵抗を示すだけでなく、圧縮力に対しても等方性材料のように抵抗できると考えられる。一方、集束 PBO 繊維は、集束軸方向とそれ以外の方向では力学的性質が異なる異方性材料であるため、集束軸方向の引張力には高い抵抗を示すものの、圧縮力に対しては鋼繊維のように抵抗できない。そのため、集束 PBO 繊維を使用した UFC の圧縮強度は、鋼繊維を使用した場合に比べ低下したと考えられる。

集束 PBO を使用した UFC の曲げ強度は、繊維混入率の増加にしたがって向上し、繊維混入率 2vol.% の場合、鋼繊維を使用した UFC と同等以上となった。さらに、集束 PBO 繊維を 2vol.% 使用した UFC の曲げ強度は、指針（案）に示される切欠きのない 3 等分点曲げ試験による曲げ強度の平均値 35.1N/mm^2 以上となった。これは、表-2 に示すとおり集束 PBO 繊維の力学性能が鋼繊維にほぼ匹敵しているため、高い曲げ性能を示したと考えられ

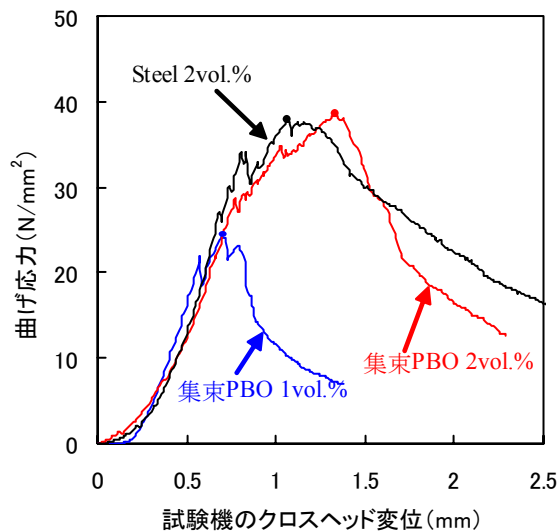


図-5 試験機のクロスヘッド変位と曲げ応力の関係
(切欠きのない 3 等分点曲げ試験)

る。図-5 より、集束 PBO 繊維を使用した UFC では、鋼繊維を使用した UFC に比べ最大曲げ応力以降の応力低下勾配が大きくなった。これについては、3.3 の破壊力学特性で考察する。

集束 PBO 繊維を使用した UFC のひび割れ発生強度は、繊維混入率によって変化せず、鋼繊維を 2vol.% 混入した場合と同等になることが確認できた。これは、繊維が補強効果を示すのは UFC にひび割れが発生した以降であり、UFC のひび割れ発生強度はセメントマトリクスに支配されるためと考えられる。すなわち、UFC のひび割れ発生強度は繊維の種類および繊維混入率の影響はほとんど受けないと考えられる。また、指針（案）に示されるひび割れ発生強度の平均値は 11.7N/mm^2 、特性値は 8.0N/mm^2 であることから、本試験結果はいずれも平均値には届いていないが、特性値以上であることが確認できた。

3.3 破壊力学特性

切欠きはりの 3 点曲げ試験結果および逆解析結果の一覧を表-6 に示す。また、曲げ試験における荷重-*CMOD* 曲線を図-6 に、荷重-*CMOD* 曲線の結果から逆解析により求めた引張軟化曲線を図-7 に示す。図-7 には、指針（案）に示される切欠はりの曲げ試験の逆解析結果をモデル化した曲線（平均）を併記する。なお、表-6 の引張強度、平坦部終点 w_1 および応力 0 点 w_2 は、指針（案）にしたがって算出した値である。

集束 PBO 繊維を使用した UFC の 3 点曲げ試験における最大荷重は、繊維混入率の増加にしたがって向上し、破壊エネルギーも増大した。さらに、繊維混入率 2vol.% の場合の UFC の最大荷重は、鋼繊維を 2vol.% 混入した場合よりも大きくなった。しかし、図-6 より、集束 PBO 繊維を使用した UFC は、鋼繊維を使用した場合に比べ最大荷重以降の応力低下勾配が大きく、*CMOD* が約 2mm 以上のときの荷重は、集束 PBO 繊維を使用した UFC の方が小さくなった。この結果は、図-5 に示す 3 等分点曲げ試験の結果と同様である。これは、鋼繊維とセメントマトリクスの付着が非常に優れるのに対し、集束 PBO 繊維とセメントマトリクスの付着が弱いいため、繊維が引抜けやすくなったことが原因であると考えられる。

表-6 切欠きはりの 3 点曲げ試験および多直線近似法による逆解析結果

試験水準	荷重- <i>CMOD</i>		逆解析結果		
	最大荷重 (kN)	破壊エネルギー (N/mm)	引張強度(平坦部) (N/mm^2)	w_1 : 平坦部終点 ^{※1} (mm)	w_2 : 応力 0 点 ^{※2} (mm)
集束 PBO 1vol.%	20.8	5.56	8.12	0.24	3.3
集束 PBO 2vol.%	32.6	14.4	11.2	0.54	3.8
Steel 2vol.%	31.8	20.4	10.1	0.70	9.0

※1：ひび割れ発生後、応力が低下し始めるまで一定応力を保持できる開口変位

※2：ひび割れ発生後、応力が 0 となる開口変位

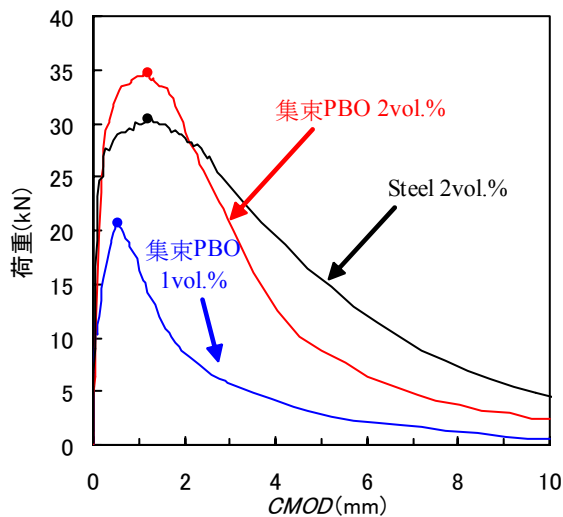


図-6 荷重-CMOD 曲線
(切欠きはりの 3 点曲げ試験)

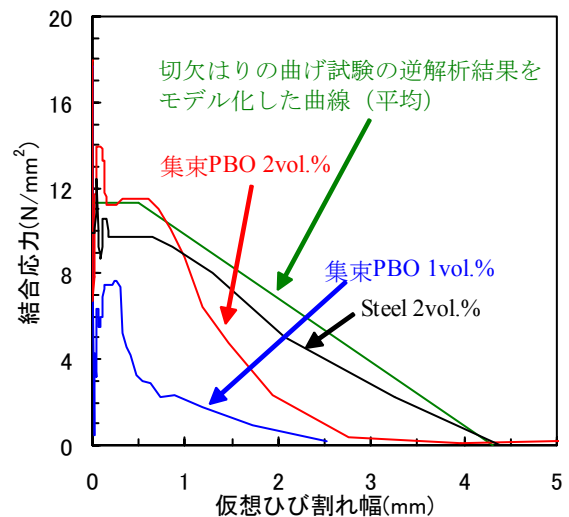


図-7 引張軟化曲線

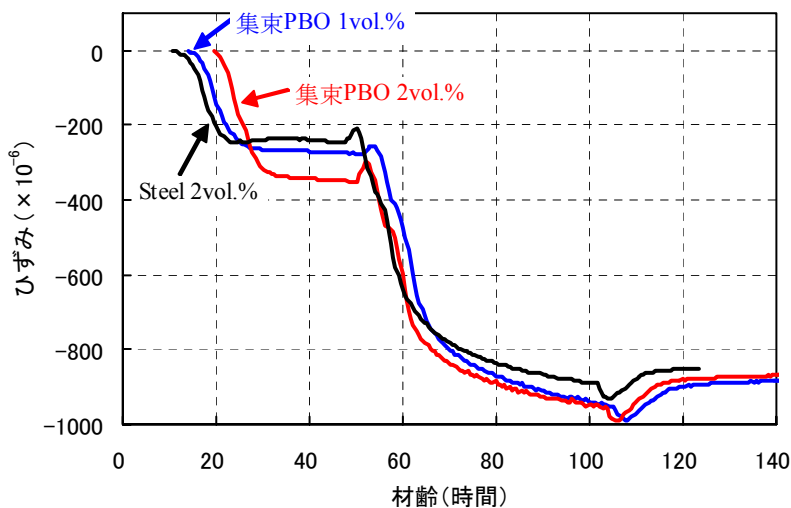


図-8 蒸気養生終了までのひずみ変化

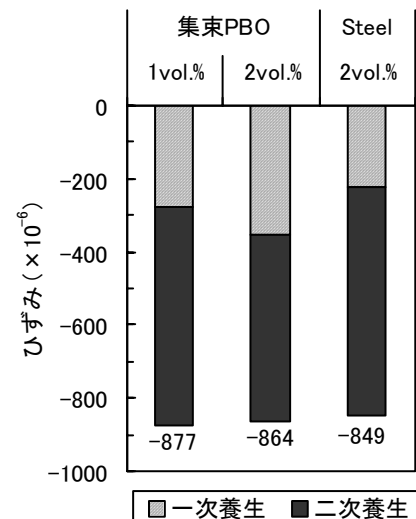


図-9 各養生期間のひずみ

以上より、集束 PBO 繊維を使用した UFC は、鋼繊維を使用した場合と同等以上の最大曲げ荷重となるが、ピーク以降の同一変位における曲げ荷重は鋼繊維を使用した場合よりも低下することがわかった。これより、荷重-CMOD 曲線下の面積から求められる破壊エネルギーは、鋼繊維を使用した UFC に比べ集束 PBO 繊維を使用した UFC の方が低くなった。

図-7 に示す引張軟化曲線において、応力が低下し始めるまでの平坦部で表される引張強度(軟化開始応力)は、集束 PBO 繊維を使用した場合繊維混入率の増加にしたがって向上し、さらに繊維混入率 2vol.% の場合、鋼繊維を使用した場合を上回った。また、指針(案)に示される、切欠きのある供試体の曲げ試験結果から逆解析した引張強度の平均値は 11.3N/mm^2 であることから、集束 PBO 繊維を 2vol.% 混入した UFC は指針(案)の平均値

と同等であることが確認できた。なお、本試験の鋼繊維の結果は、指針(案)に示される平均値は下回ったものの特性値 8.8N/mm^2 以上であった。仮想ひび割れ幅の値に着目すると、集束 PBO 繊維を 2vol.% 混入した場合、1vol.% の場合と比べ応力平坦部終点の仮想ひび割れ幅 w_1 は 2 倍以上大きくなり、応力が 0 となる仮想ひび割れ幅 w_2 はわずかに大きくなった。この集束 PBO 繊維 2vol.% 混入の場合の w_1 は、指針(案)に示される平均値 $w_{1k}=0.5\text{mm}$ と同等となったが、 w_2 は指針(案)の平均値 $w_{2k}=4.3\text{mm}$ より小さくなった。一方、鋼繊維を 2vol.% 混入した場合、 w_1 は 0.7mm 、 w_2 は 9.0mm となり、集束 PBO 繊維を使用した場合に比べ大きくなった。これは、前述したとおり、鋼繊維とセメントマトリクスの付着が優れているため繊維が引抜けにくいことによって、ひび割れが進展しにくく、ひび割れ幅の増加に伴い伝達される引

張応力の低下割合が小さくなるためと考えられる。

3.4 収縮ひずみ

注水時刻から蒸気養生終了後に長さ変化が落ち着くまでの UFC のひずみの時間変化を図-8 に、各養生期間のひずみの値を図-9 に示す。図では、収縮ひずみを負とした。なお、注水時刻を材齢の基点とし、始発時刻からのひずみの変化を示した。また、ひずみの算出では、熱電対にて実測した供試体内部の温度から、UFC の線膨張係数を $13.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して長さの補正を行った。

図-9 より、養生終了時のひずみは鋼繊維を 2vol.% 使用した場合が最も小さく -849×10^{-6} となった。集束 PBO 繊維を使用した UFC のひずみは、繊維混入率 2vol.% の方が小さく -864×10^{-6} となり、1vol.% の場合 -877×10^{-6} であった。これより、集束 PBO 繊維を使用した場合の収縮ひずみは繊維混入率によらず同等であり、さらに鋼繊維を使用した場合ともほとんど変わらないことがわかった。これは、PBO 繊維の弾性率が鋼繊維に匹敵するほど高いため、鋼繊維と同様に収縮変形を拘束したのではないかと考えられる。

4. まとめ

PBO フィラメントを樹脂により加工した集束 PBO 繊維を UFC の補強に使用することを目的とし、UFC に適用した場合の力学特性や収縮特性について検討を行った。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 繊維を使用した UFC は、1vol.% から 2vol.% まで繊維混入率を増加させるほど流動性が低下するが、型枠内に自己充てん可能な流動性は十分に有することが確認できた。
- (2) 集束 PBO 繊維を使用した UFC は、1vol.% から 2vol.%

まで繊維混入率を増加させるほど圧縮強度は低下するが、曲げ強度、引張強度および破壊エネルギーは向上することが明らかとなった。

- (3) 集束 PBO 繊維を 2vol.% 混入した UFC は、鋼繊維を 2vol.% 混入した UFC と同等以上の曲げ強度および引張強度となった。
- (4) UFC のひび割れ発生強度は、使用した繊維の種類および混入率の影響は小さいことがわかった。
- (5) 集束 PBO 繊維を使用した UFC は、1vol.% と 2vol.% の繊維混入率による養生中の収縮挙動はほとんど差がなく、鋼繊維を 2vol.% 使用した場合とほぼ同等の値となった。

参考文献

- 1) 村瀬浩貴：PBO 繊維の構造と特性，繊維学会誌，Vol.66, No.6, pp.P-176-P-180, 2010.6
- 2) 矢加部智子，三井宜之，村上聖，武田浩二，堂地利弘：PBO 繊維補強コンクリートの開発研究（その 1 モルタルマトリックスにおける調合と基礎物性），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1, pp.61-62, 1998.9
- 3) 石田征男，河野克哉，田中敏嗣，出井丈也：集束アラミド繊維を使用した超高強度繊維補強コンクリートの引張特性，土木学会第 65 回年次学術講演回講演梗概集，pp.706-707, 2010.8
- 4) 栗原哲彦，安藤貴宏，国枝稔，内田裕市，六郷恵哲：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破壊性状，土木学会論文集，No.532, V-30, pp.119-129, 1996.2
- 5) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（II），pp.209-210, 1994.5