

論文 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耐疲労メカニズム

小川 真生*1・志村 彩*2・河野 克哉*3・岡本 享久*4

要旨: 本研究では、ポリプロピレン繊維とアラミド繊維およびすでに実用化されているポリビニルアルコール繊維をそれぞれ用いた超高強度繊維補強コンクリートのひび割れ後の最大引張応力が同程度となるように供試体を作製した。そのうえで、静的曲げ試験、曲げ疲労試験を実施し、耐曲げ疲労性能の比較を行った。結果として、曲げ疲労試験では、繊維の種類によって疲労寿命に影響すること、供試体破壊断面における繊維の本数と疲労寿命が比例関係にあることがわかった。また、破断面における繊維の破壊性状の考察では、応力比が低下するにつれて、破断した繊維の割合が増加することが明らかとなった。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 有機繊維, 曲げ疲労試験, S-N 線図, 繊維の破壊性状

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）に混入される繊維として、主に鋼繊維と有機繊維がある。鋼繊維を用いた UFC については土木学会から刊行されている『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 指針）により製造方法などが規定されており、土木構造物としての施工事例が増えつつある。しかし、鋼繊維を用いた UFC はひび割れが発生することにより、繊維が腐食する可能性があるため、ひび割れを許容していない¹⁾。そこで、耐腐食性および非電導性を有する有機繊維の活用が考えられている。近年、有機繊維の中でもポリビニルアルコール繊維（以下、PVA）を用いた UFC が実用化されている。ただし、PVA を用いた UFC は、主に建築材料として使用されており、土木構造物には使用されていないのが現状である。土木分野でも、塩害を受ける海洋構造物や磁場の影響を受けない非磁性構造物の建設においては有機繊維を用いた UFC が有効活用できると考えられる。有機繊維を用いた UFC は強度特性については明らかにされている²⁾ものの、疲労特性に関する既往の研究³⁾は少ない。今後、有機繊維を用いた UFC を土木構造物に適応させるためには、強度特性だけでなく疲労特性も解明していく必要がある。

そこで、本研究では、ひび割れ後の最大引張応力が同程度となるように混入率を定めてポリプロピレン繊維（以下、PP）とアラミド繊維（以下、AF）をそれぞれ用いた UFC 供試体を作製した。加えて、すでに実用化されている PVA を用いた UFC 供試体を基準として比較対象とするために作製した。そのうえで、静的曲げ試験、曲げ疲労試験によって異なる種類の有機繊維を用いた

UFC のひび割れ発生から破壊に至るまでの挙動を明らかにするとともに耐曲げ疲労性能を比較することを目的とした。また、破壊した供試体の破断面を観察することにより、破断面における繊維の本数が疲労寿命におよぼす影響、繊維の破壊性状と疲労破壊の関係を定量的に明らかにした。

2. 有機繊維を用いた UFC の作製

2.1 使用する繊維と供試体への繊維混入量

UFC への混入繊維は、PP、AF および PVA の 3 種類とした。繊維の断面形状は、いずれも円形である。PP は繊維の表面に凹凸が施されており、AF は繊維径の小さい複数の繊維を集束加工したものである。また、PVA は表面加工を施していないモノフィラメントである。供試体への混入率 (vol.%) は、ひび割れ後の最大引張応力が同程度となるように、それぞれ 2.0、0.8、3.0 とした。PVA の混入率については、すでに実用化されている配合に基づいて決定した。使用した繊維を写真-1、繊維の物性を表-1 に示す。



写真-1 使用した繊維 PP (左) AF (中) PVA (右)

*1 立命館大学 理工学部 環境システム工学科 (学生会員)

*2 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 主任研究員 博 (工) (正会員)

*4 立命館大学 理工学部 環境システム工学科教授 工博 (正会員)

表-1 繊維の物性

繊維の種類	PP	AF	PVA
長さ (mm)	30	30	15
直径 (mm)	1.3	0.5	0.3
密度 (g/cm ³)	0.91	1.39	1.30
引張強度 (N/mm ²)	500	1716	975
弾性係数 (kN/mm ²)	10	42	26
アスペクト比	23	60	50

2.2 配合と供試体の作製

PP, AF および PVA についての配合を表-2 に示す。PP と AF は天然砂とシリカフュームセメントを使用し、PVA は UFC 標準配合粉体のプレミックス材料と珪砂を使用した。練混ぜの手順は、砂とシリカフュームセメントまたはプレミックス材料を混合した後、水と混和剤を加えて混ぜた。その後、モルタルが完全に練り上がってから繊維を混入した。

圧縮試験用にはφ100×200mm の円柱供試体、静的曲げ試験用および疲労試験用には、100×100×400mm の角柱供試体を作製した。PP は 6 バッチ、AF は 5 バッチ、PVA は 2 バッチ作製した。それぞれのフローの平均値を表-3 に示す。なお、フロー値の測定は JIS R 5201 (フロー振動無し) に準拠して行った。

PP と AF については、気温 20℃、湿度 90% の恒温恒湿室において、容量 50 L の水平二軸強制練りミキサを使用し、練混ぜを行った。フレッシュコンクリートは粘性が高く、自己充填可能な流動性が得られなかった。そこで、静的曲げ試験および曲げ疲労試験用の供試体は図-1 に示すように、口径 40mm の筒状の容器を用いて、型枠の長辺方向に移動させながら、1 回 1L を 4 回流し込むことにより成型した。水平移動させることで、繊維が供試体長辺方向と平行に混入するようにした。混和剤が多いため硬化に時間を要するので、打込み後 2 日で脱型し、90℃で 48 時間の温水養生を行った。

PVA については、気温 20℃、湿度 90% の恒温恒湿室において、容量 100L のパン型強制練りミキサを使用して練混ぜを行った。フレッシュコンクリートに十分な流動

表-3 各供試体のフロー値

	フロー値 (mm)		Ave.(mm)
PP	233	× 218	225
AF	225	× 214	220
PVA	277	× 270	274

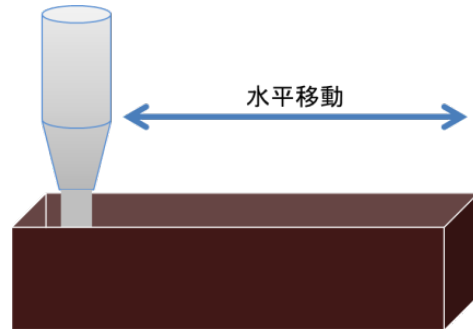


図-1 PP, AF の打込み方法

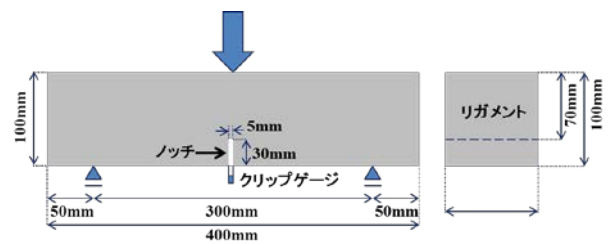


図-2 供試体寸法及び 3 点曲げ試験荷重方法

性があったので、角柱供試体は UFC 指針に記載されている通り、型枠の片側から流し込む自己充填により成型した。打込み後 1 日で脱型し、90℃で 48 時間の蒸気養生を行った。また、静的曲げ試験および疲労試験用の角柱供試体には、JCI-S-002-2003 に準じて 3 点曲げ試験を実施するために、図-2 に示すように高さ 30mm のノッチを供試体下面に施し、リガメント高さを 70mm とした。

3. 圧縮試験および静的曲げ試験

3.1 実験概要

(1) 圧縮試験

圧縮試験は円柱供試体に対して、2000kN 万能試験機にて 3kN/sec の荷重速度で実施した。PP と AF は 6 体、PVA は 3 体行った。

表-2 示方配合

供試体名	単位量 (kg/m ³)									V _f (vol.%)
	W	C	SF	P	S	Ad1	Ad2	SP	F	
PP	185	1110	123	-	990	25	25	-	18	2.0
AF					1022				11	0.8
PVA	178	-	-	1309	922	-	-	32	39	3.0

SF:シリカフューム, P:プレミックス材料, Ad1:高性能減水剤, Ad2:消泡剤, SP:高性能減水剤, F:繊維, V_f:繊維混入量

(2) 静的曲げ試験

静的曲げ試験は PP、AF および PVA をそれぞれについて 4 体ずつ実施した。試験方法は 3 点曲げ試験（支点間距離 300mm）の単調载荷として、油圧式疲労試験機（写真-2）にて図-2 に示すように载荷した。静的曲げ試験は変位制御で行い、载荷速度は 0.025mm/sec とした。载荷中のひび割れ肩口開口変位（以下、CMOD）を計測項目とした。CMOD には容量 5mm のクリップ型変位計を用いて計測した。

(3) 引張強度の算出

JCI-S-001-2003⁴⁾を参考に、静的曲げ試験から得た荷重-CMOD のデータを用いて、引張軟化曲線を推定し、引張強度を算出した。また、引張軟化曲線算出用に卓上形精密万能試験機（写真-3）にて、図-2 の通り载荷を行った。

3.2 実験結果および考察

(1) 圧縮試験結果

圧縮強度の平均値は、PP:166.6N/mm², AF:172.7 N/mm², PVA : 189.0 N/mm²であり、いずれも UFC 指針で規定されている 150N/mm² 以上であることを確認した。圧縮強度が PP よりも AF の方が上回った理由として、有機繊維の剛性はマトリクスの剛性よりも劣るため、繊維の混入量が多いほど圧縮強度は低下すると考えられる。また、PVA の供試体は、UFC 標準配合粉体のプレミックス材料と珪砂を使用したために、PP および AF の供試体よりもマトリクスが緻密となり、圧縮強度が高くなったと考えられる。

(2) 静的曲げ試験結果

4 体を平均した曲げ強度 f_m を表-4 に示す。試験結果は得られた最大荷重を、切欠きを除いた高さ 70mm の断面（リガメント）の断面係数で除して見かけ上の曲げ強度として評価した⁵⁾。

各繊維種で荷重-CMOD の関係について同様の傾向が得られたので、それぞれの代表 1 体を図-3 に示す。いずれの供試体もひび割れ発生後、一度荷重が低下し、繊維がひび割れ面を架橋すること（以下、架橋効果）によって再び荷重が上昇するという挙動が見られた。繊維長が 30mm の PP と AF はひび割れ発生後、架橋効果によって再び荷重が増加し、最大荷重に達した後も CMOD が拡大すると同時に荷重が緩やかに低下している。しかし、PVA は PP と AF よりも繊維長が短いので、最大荷重に達した後、CMOD が拡大するにつれて荷重が低下している。つまり、曲げ耐力の低下が速くなっている。繊維長が短い場合、ひび割れ幅が拡大することにより、ひび割れ面を架橋する繊維がマトリクス界面から破断および引抜ける時期が、繊維長が長い繊維よりも早くなるのが理由として考えられる。

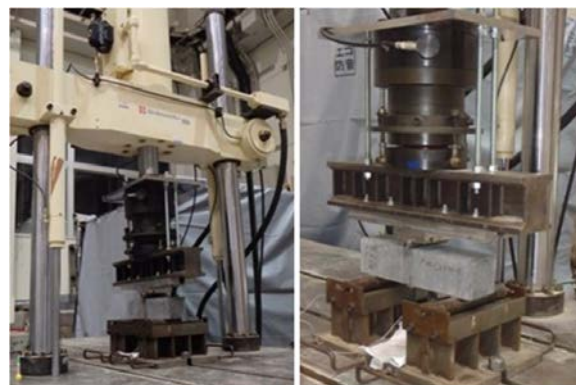


写真-2 油圧式疲労試験機

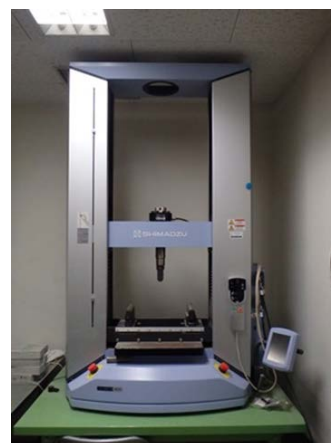


写真-3 卓上形精密万能試験機

表-4 曲げ試験結果（4 体平均）

	PP	AF	PVA
最大荷重 (kN)	16.1	17.8	14.1
曲げ強度 f_m (N/mm ²)	14.8	16.3	12.9

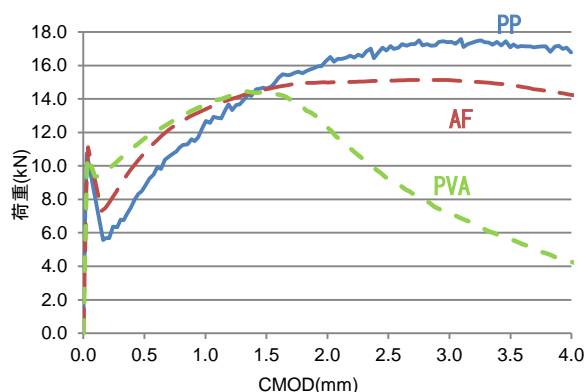


図-3 荷重-CMOD（代表の1体）

(3) 引張強度の算出

引張強度は引張軟化曲線の推定により算出した。PP、AF および PVA 供試体の引張軟化曲線を図-4 に示す。AF と PVA 供試体については、引張軟化曲線の推定のた

めに行った曲げ試験の結果を使用している。引張軟化曲線におけるマトリクスの引張強度に相当する軟化開始点は、PP : 13.4N/mm², AF : 13.5N/mm², PVA : 17.0N/mm² となった。ひび割れ発生後、引張応力が急激に低下するが、繊維の架橋効果によって再び引張応力が增大する。ひび割れ後の最大引張応力は、4.6~4.9N/mm² であり、いずれも同程度となった。PVA は繊維長が PP および AF より短いため、仮想ひび割れ幅増大に伴って応力の低下が進行したと考えられる。

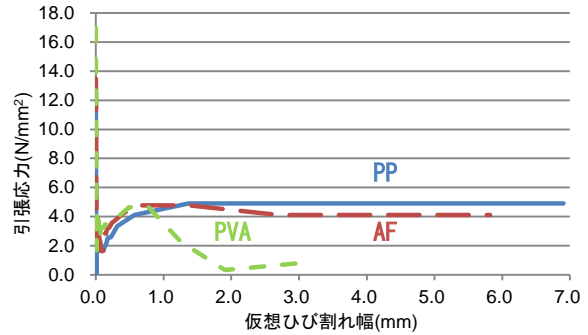


図-4 引張軟化曲線 (4 体平均)

4. 疲労試験 (動的曲げ試験)

4.1 実験概要

疲労試験における荷重方法は静的曲げ試験と同様、図-2 の通りである。静的曲げ試験の結果より、上限応力 σ_{max} は静的曲げ強度の平均値 f_m の 85%, 70%, 55% および 40% の 4 水準とし、下限応力 σ_{min} については f_m に対して 10% として設定した。荷重の周波数は 5Hz で荷重制御によって試験を行った。供試体は各応力比水準において、3 体ずつ試験を行い、破壊しない場合の上限サイクル数を 200 万回とした。また、1 体目にサイクル数が 200 万回に達した場合は、試験を行う供試体を 1 体のみとした。

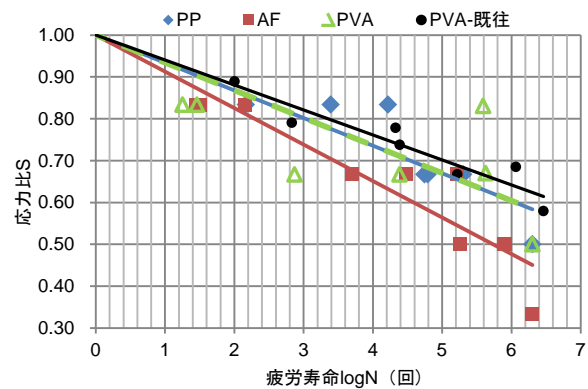


図-5 S-N 線図

4.2 実験結果および考察

(1) S-N 線図

各 UFC の耐曲げ疲労性能を明らかにするために S-N 線図を求めた。その結果を図-5 に示す。グッドマン線図の考え方に従い、試験結果を完全片振り時の状態に変換した。つまり、縦軸に応力比 $S = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / (f_m - \sigma_{min})$ を、横軸に $\log N$ をとりプロットした⁹⁾。

S-N 線図には、PVA を用いた UFC における既往の研究^{3),7)}の実験結果を含めている。ただし、本研究と比較するために 300 万回以内に破壊したデータをプロットしている。原点を応力比 $S=1.00$ とする近似曲線を引いた場合、本研究における実験結果は既往の研究よりも疲労強度が下回った。その理由として、既往の研究では、寸法 200×200×1200mm のはり供試体を使用しているため、本研究と供試体寸法が異なっていたこと、また、本研究では上限応力 σ_{max} が 15% ずつ下げたのに対し、既往の研究では 10% ずつ下げていることから、試験水準の違いも影響していると考えられる。

PP と PVA は応力比 $S=0.50$ の場合に 200 万回強度に達したが、AF は応力比 $S=0.33$ の場合に 200 万回強度に達した。また、静的曲げ試験では、PP よりも AF の方が曲げ強度 f_m が上回っているが、疲労試験では AF よりも PP の方が、疲労寿命が上回ったことが近似曲線よりわかる。これらの原因については、破断面における繊維が関係していると考えられるため、5 章で考察する。

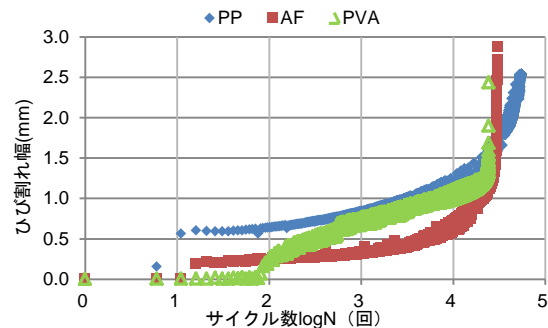


図-6 ひび割れ幅-サイクル数の関係

(2) 繰り返し回数とひび割れ幅の進展

図-6 に応力比 $S=0.67$ におけるひび割れ幅 - サイクル数の関係を示す。CMOD は見かけ上のひび割れ幅なので、実際のひび割れ幅に変換した。各繊維種で同一の傾向を示したので、代表の 1 体を記載している。いずれの供試体もひび割れ発生後、繰り返し荷重を受けることにより、徐々にひび割れ幅が増大している。しかし、PVA は、ひび割れ幅が 1.5mm 程度になると、ひび割れ幅が増大し、破断に至っている。これは、静的曲げ試験と同様に、繊維長が AF および PP よりも短いため起きたと考えられる。また、PP と AF はひび割れ幅が 3mm 程度になると破断していることから、疲労破壊に至る時のひび割れ幅は、繊維長の約 10% であることがわかる。

5. 破断面における繊維が疲労寿命におよぼす影響

5.1 繊維の本数が疲労寿命におよぼす影響

破断面における繊維の本数の算出方法は、リガメント断面 $100 \times 70 \text{mm}$ の部分に対して、破断した2面の繊維の本数を目視で数えて算出した。破断面にはマトリクスから引抜けた繊維と破断した繊維があり、破断した繊維については2面で一本として数えた。

繊維の破壊性状の判断は、写真-4に示すように、繊維の先端が原形を留めているものを「引抜け型」、繊維の先端が切れて籌状になっているものを「破断型」と見なした。PP、AFの疲労試験において、サイクル数が200万回以内で疲労破壊に至った供試体 PP:応力比 $S=0.83$, 0.67 , AF:応力比 $S=0.83$, 0.67 , 0.50 の合計5種類に対して検討を行った。PVAについては本数を数える際に、目視、ルーペおよび顕微鏡によって繊維の先端を確認した。しかし、繊維が集束していないモノフィラメントであるため、繊維の破壊性状(引抜け型・破断型)を判断することが困難であった。その繊維に対して、顕微鏡で撮影した画像を写真-5に示す。また、PVAについての考察は今後検討する。

破断面における繊維の本数と疲労寿命の関係を図-7に示す。疲労寿命と破断面における繊維の本数は概ね比例関係にあった。このことから、疲労寿命は破断面における繊維の本数が関係していることが明らかとなった。

5.2 繊維の破壊性状と疲労破壊の関係

破断面における繊維の破壊性状と疲労破壊の関係を図-8に示す。PPとAFでは繊維の破壊性状(引抜け型・破断型)の割合が異なっていた。PPでは静的曲げ試験、つまり、応力比 $S=1.00$ のとき、繊維の引抜け型の割合が約70%と最も高くなった。疲労試験においては、応力比が低下するにつれて引抜け型の割合も約10%ずつ低下した。AFでは、応力比 $S=1.00$ および応力比 $S=0.83$ において引抜け型の割合が約55%と破断型を上回っていたが、応力比 $S=0.67$ と $S=0.50$ では破断型の割合が約60%と逆転した。応力比が低下するにつれて、破断型の繊維が増加する理由として、高応力比の場合、繊維に対する引張力がマトリクス界面と繊維の付着強度よりも上回るため、繰り返し回数が少なくても繊維が引き抜かれて供試体が破壊に至る傾向を示すものの、低応力比の場合、繰り返し回数が増えてから繊維が引き抜かれて供試体が破壊に至る傾向を示すことによるものと考えられる。

また、静的曲げ試験と疲労試験ではAFとPPの強度が異なった理由として、試験時の挙動と繊維の形状が関係していると考えられる。静的曲げ試験は、一度供試体に荷重が作用し始めると、供試体のひび割れ幅は破断するまで増大し続けるため、繊維の損傷は少ない。しかし、疲労試験では荷重を始めると、ひび割れ幅は開閉を繰り返しながら、徐々に拡大していく。この過程でマトリクスと繊維の表面が何度も擦れ、AFの場合はPPと異なり、繊維を集束するためにコーティングした樹脂が剥がれる。さらに、マトリクスと付着していない部分の細かい繊維



写真-4 繊維の引抜け型・破断型(左:PP, 右:AF)



写真-5 PVAの破壊性状
(左:破断面における繊維, 右:繊維の原形)

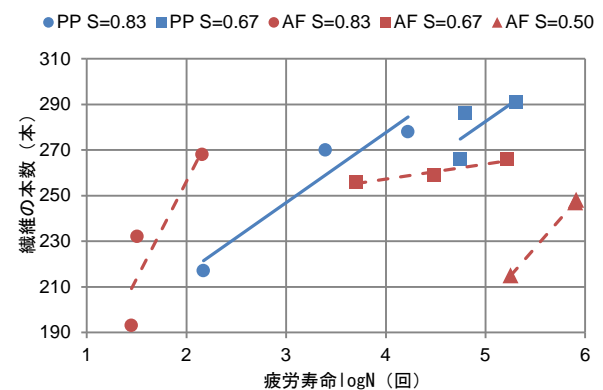


図-7 破断面での繊維の本数-疲労寿命の関係

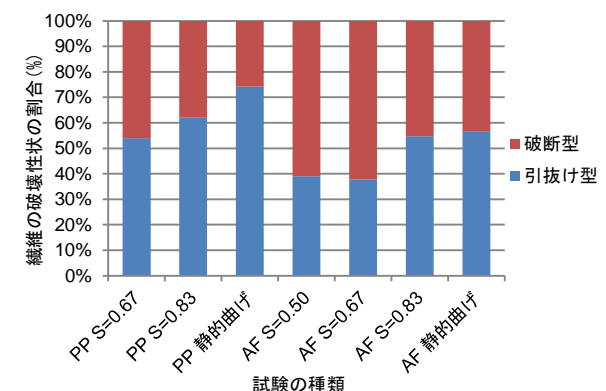


図-8 破壊性状の割合-試験の種類

返しながら、徐々に拡大していく。この過程でマトリクスと繊維の表面が何度も擦れ、AFの場合はPPと異なり、繊維を集束するためにコーティングした樹脂が剥がれる。さらに、マトリクスと付着していない部分の細かい繊維

が解れることによって劣化部ができ、破断しやすくなると考えられる。そのため、図-8 に示すように、AF は PP よりも同じ応力比の場合において破断型の繊維の割合が多くなった。また、結果として、PVA では疲労寿命にばらつきが生じているが、この原因は既往の研究⁷⁾にも示されているように、短繊維補強材料の配向、分散のばらつきが影響していると考えられる。写真-6 に示すように、各供試体破断面を見ると、PP と AF は、意図的に供試体長辺方向に繊維が混入するように供試体を作製したため、繊維が破断面に対して垂直になっていた。しかし、PVA は供試体型枠の片側から流し込んで作製したため、破断面に対して水平に混入している繊維も見られた。

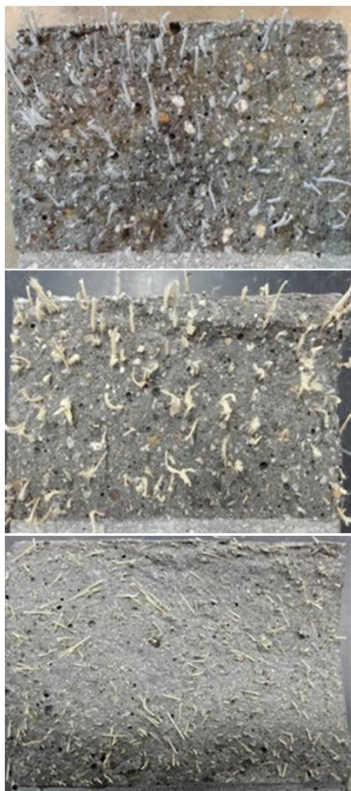


写真-6 PP (上) AF (中央) PVA (下) の破断面

6. まとめ

本研究では、ひび割れ後の最大引張応力が同程度の PP と AF 供試体、すでに実用化されている PVA 供試体について静的曲げ試験および疲労試験を実施した。本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 静的曲げ試験では PP、PVA よりも AF の曲げ強度が高くなったが、疲労試験では、AF の疲労限界が最も低くなった。
- (2) 疲労試験において有機繊維はひび割れ発生後、繰返し荷重により、徐々にひび割れが進展しながら破壊に至った。また、破壊に至るときのひび割れ幅は

繊維長の約 10%であった。

- (3) 供試体破断面における繊維の本数は疲労寿命とほぼ比例関係にあった。
- (4) 繊維の破壊性状と疲労破壊の関係において、静的曲げ強度、つまり、応力比 $S=1.00$ で引抜け型の繊維の割合が最も高くなった。また、疲労試験における応力比が下がるにつれて破断型の繊維の割合が増加した。

謝辞

本論文作成にあたり、ジェイアール東海コンサルタンツ(株): 稲熊唯史様、一柳昌志様には多大なるご指導ならびにご協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会: 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, p.4, 2004
- 2) 竹山忠臣, 小川義宏, 出井丈也, 内田裕市: アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp313-318, 2009
- 3) 水口和彦, 阿部忠, 川口哲生, 河野克哉: 有機繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートはり部材の耐疲労性に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.479-484, 2012
- 4) JCI 規準: 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 JCI-S-001-2003 付属書(案) 引張軟化曲線の推定
- 5) 志村彩, 平川彩織, 稲熊唯史, 一柳昌志, 岡本享久: 高強度繊維補強コンクリートのひび割れ発生後の引張疲労特性, 土木学会年次学術講演会, 5-258, 2014/9
- 6) 田中良弘, 横田弘, 岩波光保, 前堀伸平: 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.1312-1313, 2005
- 7) 水口和彦, 阿部忠, 河野克哉, 川口哲生: 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, 日本大学生産工学部第 47 回学術講演会講演概要, pp.679-682, 2014/12
- 8) 周波, Ha Duy Nhi, 稲熊唯史, 内田裕市: PVA 繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの特性と繊維の配向の影響, 日本コンクリート工学会, 繊維補強セメント系複合材の新しい利用法に関するシンポジウム, pp.303-310, 2012/10