

# 論文 ひび割れの開口・ずれを想定した単繊維引抜き試験

杉本 勝哉<sup>\*1</sup>・国枝 稔<sup>\*2</sup>・上田 尚史<sup>\*3</sup>・中村 光<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、短繊維補強コンクリート中に発生したひび割れの開口、およびずれが生じた際の繊維の架橋効果を明らかにすることを目的に、ポリプロピレン繊維および鋼繊維を用いた単繊維引抜き試験を行った。引抜き試験を行った結果、引張破壊やせん断破壊など、いずれの破壊モードに対応する試験体においても、配向角度の増加に伴い、引抜き抵抗力が増大すること、みかけの繊維強度が低下することが確認できた。また、ポリプロピレン繊維と鋼繊維とでは、配向角度等の諸条件が同じでも、引抜け挙動が大きく異なることが明らかとなった。

**キーワード**：単繊維引抜き試験、ポリプロピレン繊維、鋼繊維、引抜き抵抗力、みかけの繊維強度

## 1. はじめに

一般に短繊維補強コンクリートの靱性は、セメントマトリクス中のひび割れを架橋する繊維が引抜き抵抗を發揮しつつ引き抜けることでもたらされている。近年では、この引抜け挙動を単繊維引抜き試験により評価し、繊維マトリクス間の付着特性を数値解析の構成則として組み込むことで、短繊維補強コンクリートの力学性能を予測する取り組みが積極的に進められている<sup>1)</sup>。

例えば、短繊維補強コンクリートでは、繊維がひび割れ面に対してランダムに配向しており、各繊維の配向角度が大きくなるほど、見かけの引抜き抵抗力が向上することが既往の研究によって確認されている<sup>2)</sup>。また、配向角度は繊維のみかけの破断強度にも影響を与えることが既往の実験で確認されており、特に合成繊維に関しては、繊維が抜け出した時の繊維表面の損傷や、配向角度による曲げ応力が繊維の見かけ強度を低下させることが明らかとなっている<sup>3)</sup>。

このように既往の研究により、繊維マトリクス間の付着特性のデータが蓄積され、そのメカニズムが解明されつつあるが、これらはひび割れ面に対して繊維が垂直に引き抜かれた場合の評価が多く、ひび割れ面に対する繊維の引抜け挙動を想定している。一方、ひび割れ面のずれが卓越する場合の引抜け挙動に関しては、未だ不明な点が多いと言える。

そこで本研究では、ひび割れ面に対して引抜き方向を変えた2つの検討ケースを設け、単繊維引抜き試験を実施した。特に、繊維の配向角度による引抜き抵抗力の向上効果や、配向角度と繊維強度の関係について着目し、検討を行った。

## 2. 使用材料

### 2.1 マトリクス

本実験では水セメント比 W/C=0.5、砂：セメントの質量比を2:1としたモルタルをマトリクスとして使用した。また、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。使用した砂の密度は2.55g/cm<sup>3</sup>、粗粒率は2.81である。

### 2.2 繊維

繊維には、長さ48mmのポリプロピレン繊維(PP繊維)、および長さ30mmの両端フック付き鋼繊維(SF)を使用した(写真-1)。なお、鋼繊維はフック無しの場合の引抜け挙動を見るために、写真-1(c)に示すようにマトリクスに埋め込む側のフックを切除し、繊維長を25mmとした。表-1に各繊維の物性値を示す。

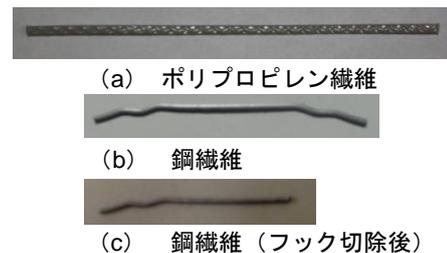


写真-1 使用繊維

表-1 物性値

	PP繊維	SF
断面積 (カタログ値)	0.385 (mm <sup>2</sup> )	0.6 (mm <sup>2</sup> )
引張強度 (カタログ値)	530.3 (N/mm <sup>2</sup> )	980 (N/mm <sup>2</sup> )
弾性率 (カタログ値)	10500 (N/mm <sup>2</sup> )	210000 (N/mm <sup>2</sup> )
破断時の荷重 (測定値)	204.2 (N)	277.1 (N)

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工) (正会員)

\*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士(工) (正会員)

\*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)

### 3. 試験体の作製方法

マトリックスの練混ぜは手練りによって行った。セメント、砂、水を容器に入れた後、さじを使用して約1分間モルタルが均一になるまで練り混ぜた。練混ぜ後、埋込み長が10mm、角度が30°、60°、90°となるようあらかじめ単繊維を配置した内寸220×20×10mmの型枠にモルタルを流し込み、脱泡するために振動を与えながら成形し、写真-2に示すようなモルタルに繊維が埋め込まれた試験体を作製した。打設後、恒温室内（温度20℃）にて静置し、材齢1日において脱型し、その後水中養生を行った。なお、養生期間中に試験体を写真-3のような寸法になるようにダイヤモンドカッターでカットした。

### 4. 試験方法

本研究では、図-1に示す2つの検討ケースを設定し、単繊維引抜き試験を行うことで、検討ケースごとに配向角度の違いがPP繊維およびSFの引抜け挙動に与える影響を検討した。なお、本研究では自由端側の繊維軸方向（載荷方向）に対するマトリクス内の繊維の傾きを配向角度としている。

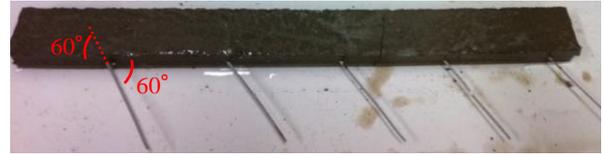
各ケースは引抜き方向が異なり、図-2に示すように、検討ケース1は開口型（モードI）、検討ケース2はずれ型（モードII）の破壊モードにおける繊維の引抜け挙動を想定している。

載荷方法を図-3に示す。試験体を試験機のつかみ具に固定し、試験体に埋め込まれた繊維を繊維固定用板に固定し、0.01mm/secの載荷速度を目安に変位制御にて載荷を行うことで、繊維の引抜き荷重および変位（試験機のストローク）を測定した。また、マトリクスにおける繊維の埋込み口と繊維固定用板との距離は、PP繊維が約15mm、SFが約10mmとなるように試験体を設置したが、PP繊維において、試験体とつかみ具間の距離を15mmとし、繊維の弾性率を10500N/mm<sup>2</sup>と仮定した場合、100Nの荷重による変形は約0.37mmであり、実験におけるピーク時の変位に対して小さいことから、載荷に伴う繊維の弾性変形は結果から取り除いていない。これはSFについても同様である。なお、全ての試験について材齢28~35日の間で実施した。

### 5. 試験結果

#### 5.1 検討ケース1（開口型）

引抜き試験によって得られた引抜き荷重-変位関係について、配向角度ごとにまとめたものを図-4から図-6に示す。黒線で示したものがPP繊維、赤線で示したものがSFの引抜き試験結果である。また、どちらの繊維の場合も結果は試験を行った5体の試験体のうち計測出来たものの結果である。



(a) 試験体（PP 繊維）



(b) 試験体（SF）

写真-2 試験体（カット前、角度60°）

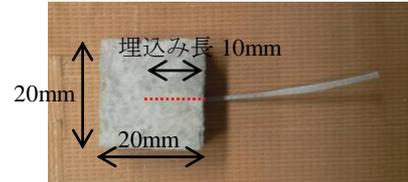


写真-3 試験体（カット後）

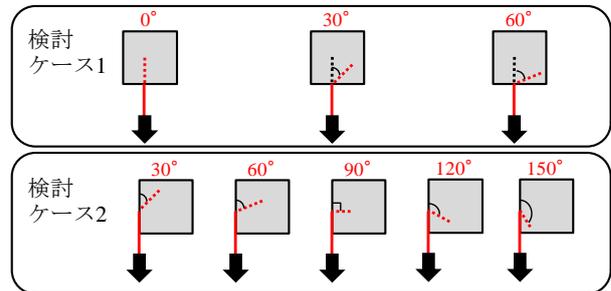


図-1 検討ケース

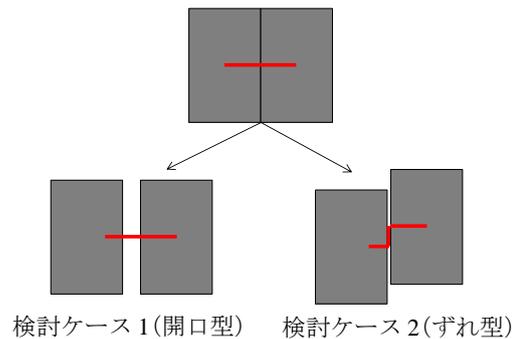


図-2 各検討ケースに対応する破壊モード

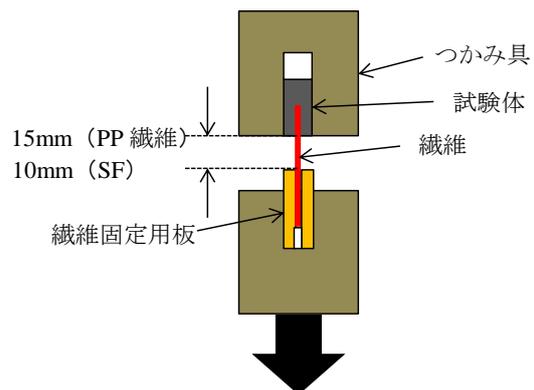


図-3 載荷方法

まず、PP 繊維の試験結果について見ると、配向角度が 0°と 30°のものに関しては、変位（試験機のストローク）の増加に伴って、荷重がほぼ直線的に増加し、ピークを迎えた後は、急激な荷重低下の後、繊維表面の凹凸（インデント）による影響で荷重の上下動を伴いながら緩やかに繊維が引き抜かれていく挙動が認められた。配向角度が 60°の PP 繊維の結果については、いずれの試験体においても荷重がピークに達した後繊維が破断した。また写真-4 (c) に示すように、荷重がピークに達する前に、埋込み口周辺のマトリクスの損傷が著しく見られた。そのため配向角度が 60°の試験体については、マトリクスの損傷による繊維の抜出しが卓越してしまい、結果のばらつきが大きく、配向角度が 0°や 30°の試験体に見られたような直線的な荷重の増加があまり認められなかった。

SF の試験結果について見ると、配向角度が 0°のものに関しては、荷重が初期ピークに達した後、緩やかに繊維が引抜けていく挙動が認められた。配向角度が 30°と 60°のものに関しては、PP 繊維の結果と異なり初期ピーク以降もあまり荷重が低下することなく、繊維が完全に抜け出す直前で荷重が再び増加する傾向が見られた。30°と 60°の試験体の抜け出した後の繊維は、写真-5 (b), (c) に示す通りであるが、荷重が再び増加するのは、繊維のマトリクスに埋め込まれていた部分が載荷軸方向に曲げ戻された影響であると考えられる。写真-5 (c) を見ると、60°の試験体で埋込み口周辺のマトリクスが大きく損傷している様子が見られるが、これは初期ピーク以降の抜出し過程において発達したものである。

検討ケース 1 の結果から得られた初期ピーク荷重の平均値、および繊維がマトリクスから完全に引抜けた試験体の数を表-2 に示す。

表-2 より、まず PP 繊維については、配向角度が 0°と 30°の間で、配向角度の増加に伴いピーク荷重が増加しているのが確認できる。これは埋込み口でのマトリクスからの集中反力によって引抜きに対する抵抗力が増加したものと考えられる。一方、配向角度が 30°と 60°の間でもピーク荷重は増加しているが、前述の通り 60°の試験体はいずれも繊維が破断し、マトリクスから完全に引き抜けなかった。

SF については、0°から 60°の間で配向角度が増加するに伴い初期ピーク荷重が増加しているのが確認できる。このように引抜き抵抗力が向上する傾向については、既往の研究<sup>2)</sup>により、繊維の引抜き抵抗力を簡単に表現するための係数としてスナビング係数を用いることで、以下の式で表せることが明らかとなっている。

$$F = F_0 e^{f\phi} \quad (1)$$

ここで、 $F$ : 引抜き荷重、 $F_0$ : 配向角度 0°における繊維

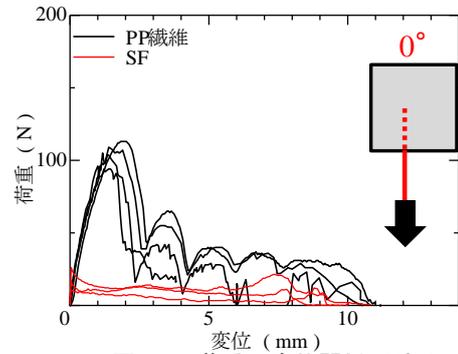


図-4 荷重-変位関係 (0°)

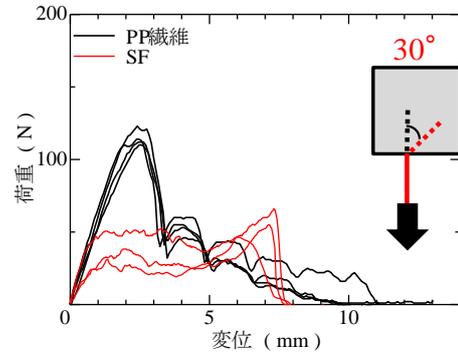


図-5 荷重-変位関係 (30°)

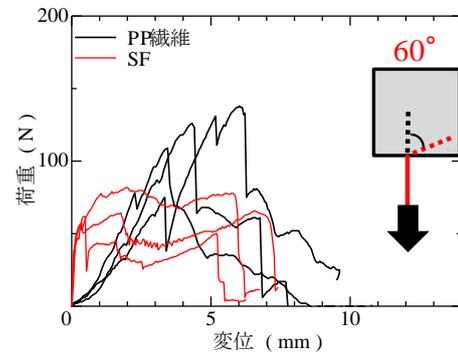
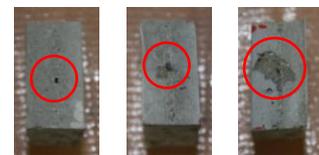


図-6 荷重-変位関係 (60°)



(a) 0° (b) 30° (c) 60°

写真-4 試験後の埋込み口の様子 (PP 繊維)



(a) 0° (b) 30° (c) 60°

写真-5 試験後の埋込み口と繊維の様子 (SF)

表-2 試験結果 (検討ケース 1)

		初期ピーク荷重の平均値(N)	繊維が抜け出した試験体の数
PP繊維	0°	104.3	4
	30°	114.8	4
	60°	124.3	0
SF	0°	17.9	3
	30°	34.9	3
	60°	53.6	3

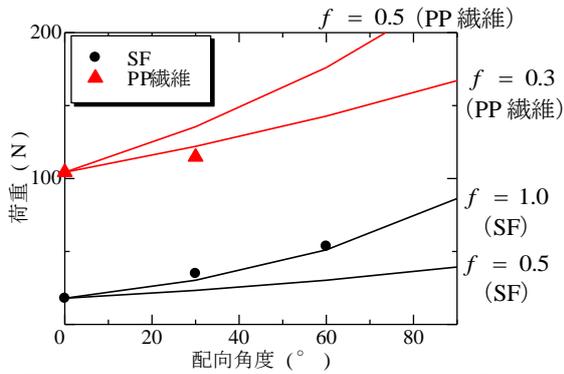


図-7 各配向角度における初期ピーク荷重

の引抜き荷重、 $\varphi$ ：繊維の配向角度である。なお、断面積  $0.202\text{mm}^2$ 、埋込み長  $25\text{mm}$  の PP 繊維では  $f=0.7$  が用いられている<sup>2)</sup>。

そこで SF の試験結果と式(1)との比較検討を行った。図-7 に配向角度ごとの初期ピーク荷重を黒のプロットで、スナビング係数  $f$  を  $0.5, 1.0$  とした場合に式(1)から得られる繊維の引抜き抵抗力を黒の実線で示す。式(1)で得られた曲線と各プロットを比較してみると、実験値は  $f=1.0$  の曲線と概ね一致していることが確認できる。このことから、SF の試験体における、配向角度の増加に伴い引抜き抵抗力が向上する傾向については、既往の式(1)により定量的に評価できることが明らかとなった。また、PP 繊維についても同様に図-7 中に赤で示しているが、引抜き抵抗力を計測することができた  $0^\circ$  と  $30^\circ$  の範囲内においては、式(1)で得られた  $f=0.3$  の曲線と概ね一致している事が確認できた。

PP 繊維と SF の結果を比較してみると、初期ピーク荷重やその時の変位は PP 繊維の方が極めて大きいことが分かり、PP 繊維の方がより大きなひび割れの開口に対しても引抜き抵抗力発揮し得ることが明らかとなった。一方で、SF は初期ピーク以降でもあまり荷重が低下せず、 $30^\circ$  の結果に見られるように、完全に繊維が抜け出す直前に最大荷重を示すものもあり、PP 繊維とは異なりピーク以降の抜出しが卓越する過程においても安定的な抵抗力を保持し続けることが明らかとなった。

## 5.2 検討ケース 2 (ずれ型)

引抜き試験によって得られた引抜き荷重-変位関係について、配向角度ごとにまとめたものを図-8 から図-12 に示す。黒線で示したものが PP 繊維、赤線で示したものが SF の引抜き試験結果である。また、どちらの繊維も結果は試験を行った 5 体の試験体のうち計測出来たものの結果である。

まず、PP 繊維の試験結果については、配向角度が  $30^\circ$  と  $60^\circ$  の試験体全てで繊維が完全にマトリクスから抜け出し、 $90^\circ$  と  $120^\circ, 150^\circ$  の試験体全てで繊維が破断した。図-8 から図-11 をみると、配向角度が  $30^\circ$  から  $120^\circ$

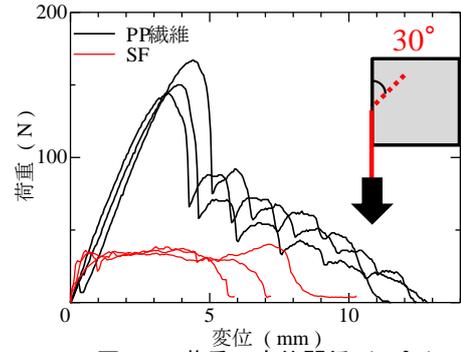


図-8 荷重-変位関係 ( $30^\circ$ )

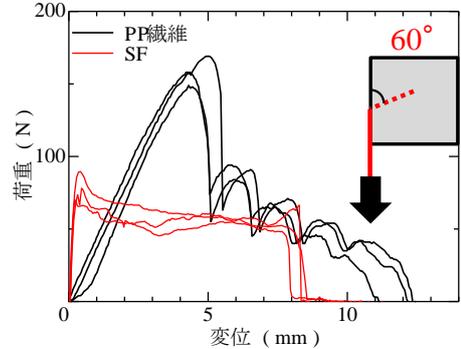


図-9 荷重-変位関係 ( $60^\circ$ )

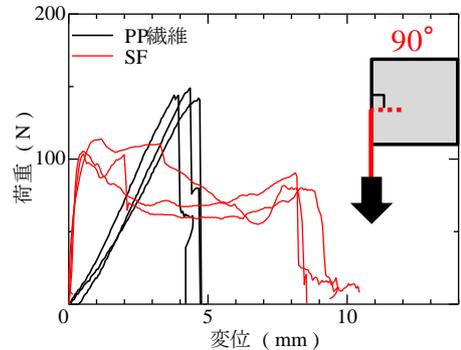


図-10 荷重-変位関係 ( $90^\circ$ )

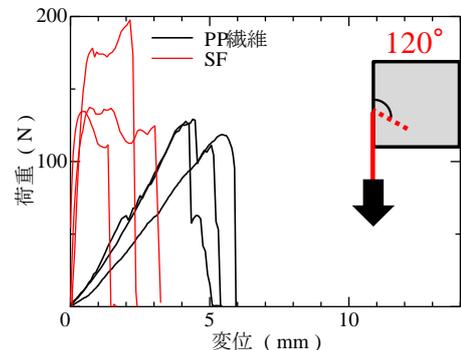


図-11 荷重-変位関係 ( $120^\circ$ )

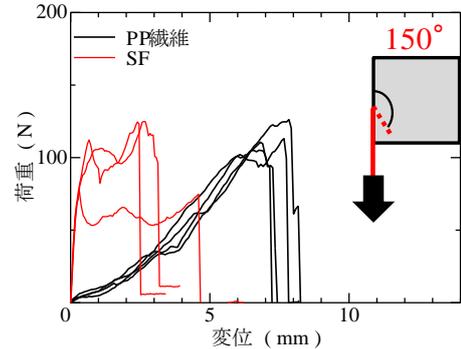


図-12 荷重-変位関係 ( $150^\circ$ )

の試験体の結果については、ピークに至るまで荷重がほぼ直線的に増加していることがわかる。また、これらの試験体については、周辺のマトリクスに大きな損傷が見られなかった(写真-6)。配向角度が150°のものについては、ピーク荷重時の変位が比較的大きいことが確認できる。これは、写真-6(e)に示すように、埋込み口周辺のマトリクスがピークに達する前に大きく損傷し、損傷による繊維の拔出しが卓越したことが原因であると推察される。

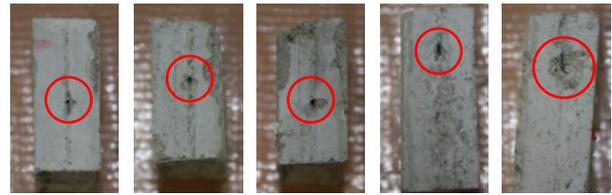
SFの試験結果については、配向角度が30°と60°、90°の試験体全てで繊維が完全にマトリクスから抜け出し、120°と150°の試験体全てで繊維が破断した。図-8から図-12をみると、いずれの試験結果においても初期ピーク以降もあまり荷重が低下することなく、繊維が完全に抜け出すか破断する直前で荷重が再び増加する傾向が見られた。これは先述の通り、载荷軸方向に繊維が曲げ戻された影響であると考えられる(写真-7)。また写真-7(d)、(e)を見ると、120°と150°の試験体では埋込み口で繊維が完全に破断している様子が観察できる。

検討ケース2の結果から得られた初期ピーク荷重の平均値、および繊維がマトリクスから完全に引抜けた試験体の数をまとめたものを表-3に示す。

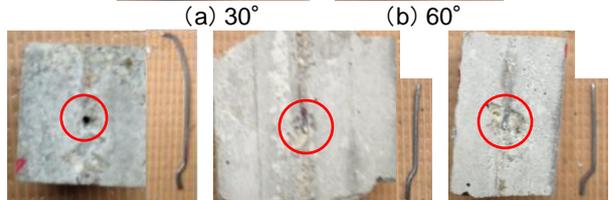
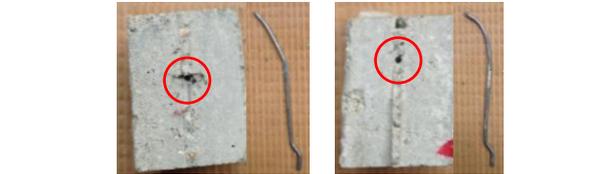
表-3より、まずPP繊維については、配向角度が30°と60°の間では、角度が大きくなることでピーク荷重が増加しているのが確認できる。配向角度が90°から150°のものについては、繊維が全てピーク荷重に達した直後に破断しているため、ピーク荷重の平均値は破断時の荷重の平均値となる。表-1と比較すると、破断時の荷重は配向角度が90°の時点で繊維本来の破断強度を大きく下回っており、配向角度が大きくなるにつれ、見かけ上、繊維強度が低下していく傾向が見られた。

SFについては、配向角度が30°から90°の間では、角度が大きくなることで初期ピーク荷重が増加しているのが確認できる。配向角度が120°と150°のものについては、繊維が全て破断しているが、初期ピーク以降の拔出し過程において繊維が破断したため、初期ピーク荷重の平均値は破断時の荷重の平均値とは異なる。SFの破断時の荷重の平均値を表-4にPP繊維と併せて示すが、SFもPP繊維の結果と同様に、配向角度が大きいくほど繊維強度が小さくなる傾向が見られた。

PP繊維とSFを比較してみると、配向角度が小さい30°と60°のものに関しては、検討ケース1と同様に初期ピーク荷重やその時の変位はPP繊維の方が極めて大きくなるのが確認できた。どちらの繊維も全て破断した120°と150°のものに関しては、表-4に示す通りPP繊維とSFの破断時の荷重がほぼ同程度となっている。表-1より、繊維本来の引張強度はSFの方が大きいこと



(a) 30° (b) 60° (c) 90° (d) 120° (e) 150°  
写真-6 試験後の埋込み口の様子 (PP 繊維)



(a) 30° (b) 60°  
(c) 90° (d) 120° (e) 150°  
写真-7 試験後の埋込み口と繊維の様子 (SF)

表-3 試験結果 (検討ケース2)

		初期ピーク荷重の平均値(N)	繊維が抜け出した試験体の数
PP繊維	30°	153.7	3
	60°	158.7	3
	90°	145.0	0
	120°	124.8	0
	150°	113.8	0
SF	30°	35.3	3
	60°	79.3	3
	90°	107.7	3
	120°	155.0	0
	150°	98.6	0

表-4 各繊維の破断時の荷重 (検討ケース2)

		破断時の荷重の平均値(N)	繊維が破断した試験体の数
PP繊維	90°	145.0	3
	120°	124.8	3
	150°	113.8	4
SF	120°	137.8	3
	150°	98.1	3

から、大きい配向角度をもつ場合(120°と150°)、SFの方が配向角度による繊維強度の低下の影響を顕著に受ける事が、本研究の範囲内では確認された。

### 5.3 繊維強度の減少

配向角度によるみかけの繊維強度の減少については、強度減少係数  $f'$  を用いて式(2)のように表されることが既往の研究<sup>3)</sup>により明らかとなっている。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^n e^{-f'\phi} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{fu}$ : 繊維の破断強度、 $\sigma_{fu}^n$ : 配向角度0°のときの破断強度、 $\phi$ : 繊維の配向角度である。

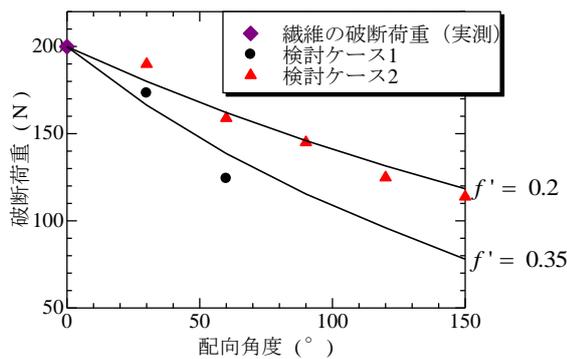


図-13 各ケースの破断時の荷重 (PP 繊維)

表-5 各ケースの破断時の荷重 (PP 繊維)

	検査ケース1	検査ケース2
0°	破断せず	—
30°	173.3	189.9
60°	124.3	158.9
90°	—	145.0
120°	—	124.8
150°	—	113.8

そこで本研究では、破断がより多く見られた PP 繊維について、配向角度が繊維強度に与える影響を検討した。

図-13 および表-5 に検査ケース、配向角度ごとに繊維が破断した時の荷重を示す。ここで、もともと破断が起こらなかった検査ケース 1 の 0° と 30°、検査ケース 2 の 30° と 60° については、繊維の埋込み長を 20mm とした試験体により破断時の荷重を計測した。なお、検査ケース 1 の 0° は埋込み長を 20mm とした場合でも破断が起こらなかった。

図中の実線は強度減少係数  $f'$  を 0.2 と 0.35 とした場合に式(2)より得られる繊維の破断時の荷重を表している。なお、 $W/C=0.42$  のマトリクスに埋込まれた場合の PVA 繊維 (埋込み長 5mm, 直径 0.037mm) では  $f'=0.3$  が用いられている<sup>3)</sup>。式(2)で得られた曲線と各プロットを比較してみると、検査ケース 1 に関しては  $f'=0.35$  の曲線に比較的近く、検査ケース 2 に関しては  $f'=0.2$  の曲線と概ね一致していることが確認できる。このことから、配向角度の増加に伴い繊維強度が減少する傾向については、開口型 (モード I) だけでなくずれ型 (モード II) の破壊モードにおいても既往の式により定量的に評価できることが明らかとなった。

## 6. まとめ

ひび割れの開口、ずれを想定した PP 繊維および SF の

単繊維引抜き試験を行い、繊維の配向角度による引抜き抵抗力の向上効果や、配向角度と繊維強度の関係について検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) いずれの検査ケースにおいても、配向角度の増加に伴い、引抜き抵抗力が増大する傾向にあった。中でも検査ケース 1 の SF については 0°, 30°, 60° 全ての配向角度で繊維の引抜き抵抗力が計測でき、既往の研究で明らかとなった式(1)によってその傾向を定量的に評価できることが明らかとなった。
- (2) いずれの検査ケースにおいても、配向角度の増加に伴い、繊維破断強度が減少する傾向にあった。本試験では破断がより多く確認できた PP 繊維について検討した結果、いずれの検査ケースにおいても既往の研究で明らかとなった式(2)によってその傾向を定量的に評価できることが明らかとなった。
- (3) いずれの検査ケースにおいても、PP 繊維と SF の引抜き挙動は大きく異なることが明らかとなった。PP 繊維はピーク荷重以降緩やかに荷重が低下していくのに対し、SF は初期ピーク荷重後も荷重があまり低下せず、繊維が完全に抜け出す直前で荷重が再度増加していく傾向が確認できた。また、初期ピーク荷重は PP 繊維の方が SF より極めて大きい事が明らかとなった。
- (4) 本研究の範囲内では、大きい配向角度をもつ場合 (120° と 150°), SF の方が配向角度による繊維強度の低下の影響を顕著に受ける事が観察された。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (B)「分散化された繊維補強材料のライフスパン解析手法の構築と新材料開発への応用 (課題番号 23360190)」(代表者: 国枝稔) により実施したものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 清田雅量, 三橋博三, 閑田徹志, 川又 篤: セメント系複合材料における繊維の付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.187-192, 2001
- 2) Li, V.C., Wang, Y., and Baker, S.: Effect of inclining angle, bonding and surface treatment on synthetic fiber pull-out from a cement matrix, Composites, 21(2), pp.5-13, 1990
- 3) Kanda, T. and Li, V.C.: Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, pp.5-13, 1998