

FRCCにおけるアラミドおよびPP単繊維の 拔出し挙動と架橋則の構築

橋本裕子*¹・牟 雨*²・山田 大*³・金久保利之*⁴

概要：著者らがPVA繊維および鋼繊維に対して検討してきている繊維補強セメント複合材料（FRCC）の架橋則の構築方法が異なる繊維種類に対しても可能であるか検討するため、アラミド繊維およびポリプロピレン（PP）繊維を対象として、単繊維拔出し挙動の把握と架橋則の構築を行い、一軸引張試験結果との比較を行った。単繊維引抜試験より、付着長（埋込長）の増大に伴う引抜荷重およびすべり量の増加、両者に対するスナッピング効果が確認された。繊維が損傷して荷重が低下する場合には、配向角が大きいほど損傷時荷重は小さくなった。それぞれの繊維に対して単繊維拔出し挙動のモデル化を行い構築した架橋則により、各FRCCの一軸引張試験結果の挙動を概ね再現できた。

キーワード：拔出し挙動、アラミド繊維、PP繊維、スナッピング効果、架橋則、引張試験

1. はじめに

繊維補強セメント複合材料（Fiber-Reinforced Cementitious Composites, 以下FRCC）とは、セメント系マトリクスに短繊維を混入した材料であり、ひび割れ発生後、繊維がひび割れを架橋することで引張力を負担し、ひび割れの開口が抑制され引張靱性能が向上する。しかしながらFRCCの引張性能は性能を直接求める引張試験の実施の困難さに伴って未解明な点が多く、定量的な評価が難しいことから、その性能が構造体の設計に生かされていないのが現状である。

FRCCの引張性能は繊維の架橋性能に基づいて発揮され、引張性能評価手法として、ひび割れを架橋する繊維の引張力をひび割れ幅の関数で表した架橋則がある。架橋則を用い、繊維の架橋性能からFRCCの引張性能を明らかにすることができれば、比較的容易な性能評価が可能となり、FRCCの適用範囲の拡大が見込まれる。

架橋則は繊維がマトリクスから拔出す挙動を基本として構築され、拔出し挙動は単繊維の引抜試験によって得られる^{1), 2)}。著者らはPVA繊維³⁾および鋼繊維⁴⁾に対して単繊維拔出し挙動のモデル化と架橋則の構築を行っている。しかしながら、繊維の拔出し挙動は繊維やマトリクスの種類によって大きく異なることが知られ

ている⁵⁾。使用する材料の種類によって異なる拔出し挙動を適切に反映し、FRCCとしての引張性能を精確に評価できる架橋則を構築することが重要である。

本研究では、アラミド繊維およびポリプロピレン（以下PP）繊維という物性の異なる2種類の繊維を対象として、単繊維の拔出し挙動から架橋則を構築し、FRCCの引張性能を評価するための検討を行った。具体的には、各繊維に対して単繊維引抜試験を行い、得られた単繊維マトリクス間の拔出し挙動を評価して架橋則を構築し、くびれ型供試体を用いたFRCCの一軸引張試験の結果との比較を行った。ここで、本研究における単繊維引抜試験では、繊維がひび割れ面に対して直角に埋め込まれている場合とした。架橋則と一軸引張試験結果の比較により、架橋則による引張性能評価の適合性をそれぞれ確認し、異なる繊維種類に対して、繊維の拔出し挙動の評価方法が適切であるか、および、架橋則により精確なFRCCの引張性能評価が可能であるか検討した。

2. 試験概要

アラミド繊維およびPP繊維に対して、単繊維マトリクス間の拔出し挙動を把握するための単繊維引抜試験、および引張性能を実験的に直接把握し架橋則の適合性を

*1 筑波大学大学院院生 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻（学生会員）〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

*2 筑波大学大学院院生 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

*3 筑波大学大学院院生 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻（学生会員）〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

*4 筑波大学教授 システム情報系構造エネルギー工学域 博士(工)（正会員）〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

表-1 繊維物性（メーカー試験値）

繊維種別	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
アラミド	0.5	30	(3432)*	(73)*
PP	0.7	30	580	4.9

* 収束前の原系物性値

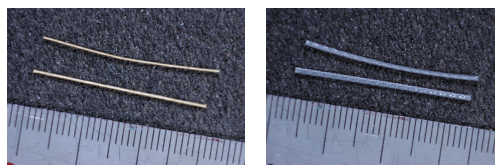


写真-1 アラミド繊維およびPP繊維

表-2 マトリックスの配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
	W	C	S	FA	Ad
56.0	380	678	484	291	6

S：7号珪砂 FA：フライアッシュII種

Ad：高性能減水剤

表-3 FRCCの圧縮特性

繊維種類	繊維体積混入率 V_f (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
アラミド	1.0	51.3	17.7
PP	1.0	51.5	17.2

Φ100-200mm シリンダー圧縮試験結果

検証するための一軸引張試験をそれぞれ行った。

2.1 使用材料

使用した繊維の物性を表-1に、外観を写真-1に示す。アラミド繊維は、撚りを加えて収束させたものであり、PP繊維は表面にエンボス加工が施されている。マトリックスの配合計画を表-2に、FRCCの圧縮特性を表-3に示す。一軸引張試験体の繊維体積混入率は1.0%とし、各繊維に対する、単繊維引抜試験体および一軸引張試験体は同一モルタルバッチより作製した。

2.2 単繊維引抜試験

試験体および型枠形状を図-1に示す。型枠は既往の研究⁴⁾と同様に、ゴム板3枚をアクリル板2枚で挟み、ねじで締め付けた構成となっており、中心のゴム板の厚さによって付着長を調節した。型枠中心にカットする前の繊維を位置させ、打設孔よりマトリックスを注入し、試験体を作製した。脱型後、試験体裏面に表出している繊維は切断した。

付着長（4，8，12mm）および配向角 θ （0，15，30，45，60°）をパラメータとして、図-2に示す単繊維引抜試験を行った。加力には万能ネジ式卓上試験機を使用し、

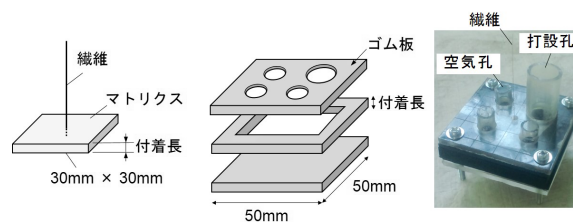


図-1 引抜試験体および型枠形状

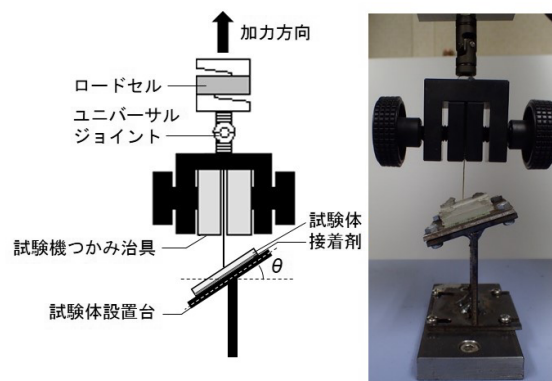


図-2 単繊維引抜試験概要

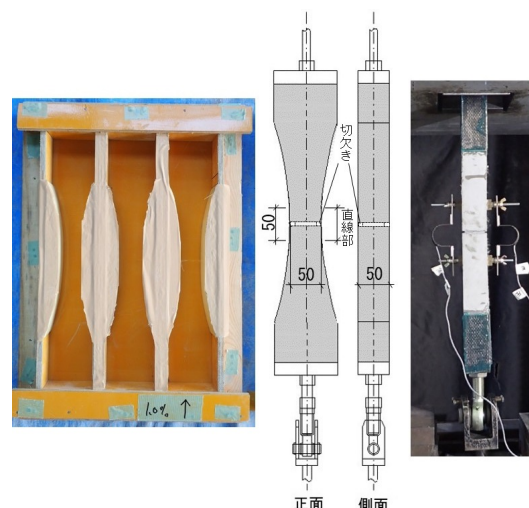


図-3 引張試験体型枠、形状および加力時の様子

変位制御により単調引張载荷を行った。载荷速度は毎分1.0mmとし、繊維のつかみ治具はピン支持とした。単繊維はつかみ治具で直接挟み込み、試験体側は各配向角毎に用意した設置台に、試験体に接着した鋼板を介して取り付けた。計測項目は引抜荷重およびヘッド間変位である。

ここで、実際のFRCCにおいては、繊維はひび割れ面に対して様々な角度をもって配置されており、ひび割れ発生後、傾いて埋め込まれた繊維に対して、ひび割れ面垂直方向の引張力がかかることになる。一方、本研究ではマトリックスに繊維を垂直に埋め込み、引張力を加える際に角度を設けているため、繊維の埋込口部でのエッジ角度が実際のFRCCにおける場合と異なる。そのため本

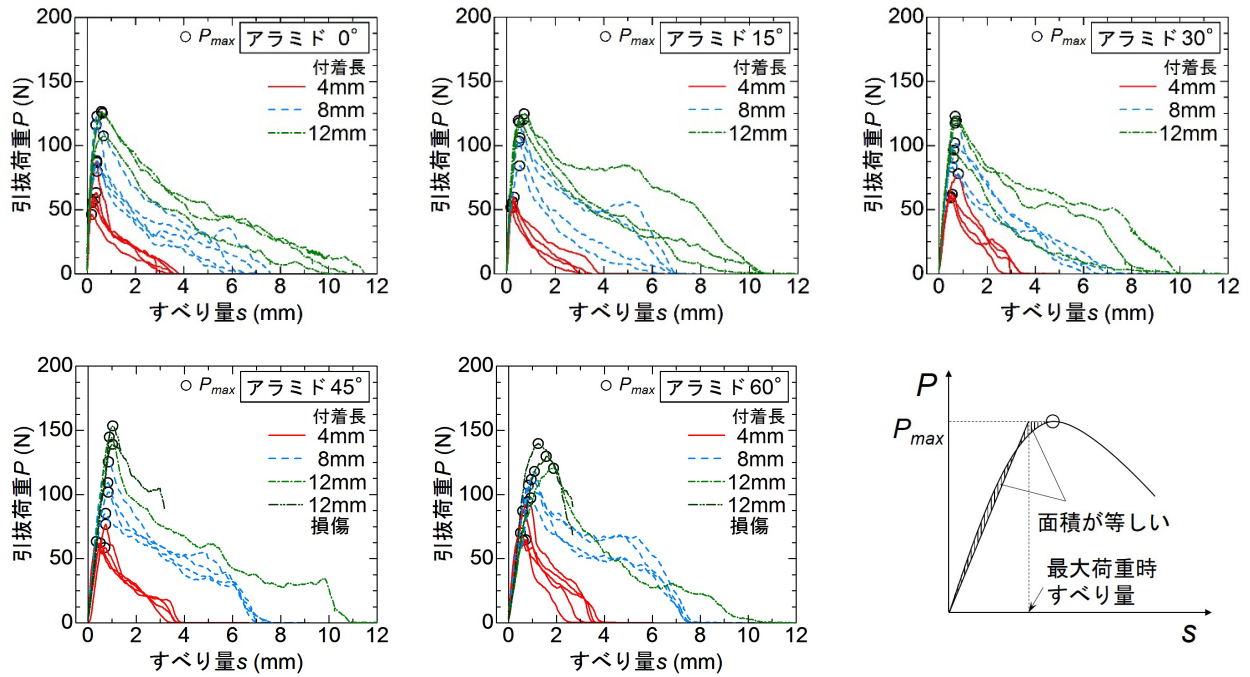


図-4 アラミド単繊維引抜試験結果

図-5 最大荷重時すべり量の求め方

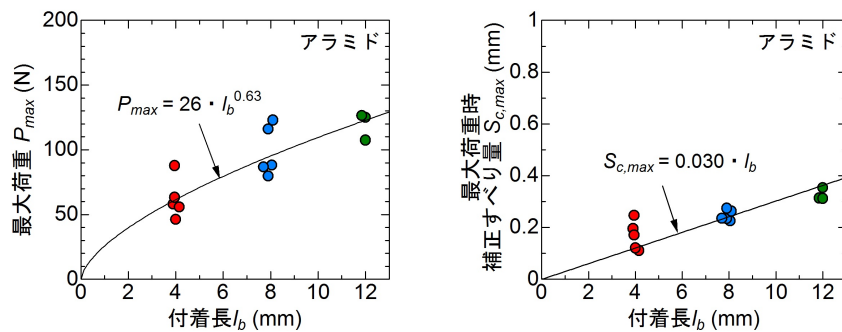


図-6 最大引抜荷重およびすべり量に対する付着長の影響（アラミド）

研究においては、引抜時に繊維がマトリクスから受ける損傷が実際の FRCC の場合と比較して大きいと予測される。実際の FRCC に対応するよう繊維をひび割れ面に対して傾けて配向させ、垂直に引張力を加えて試験を行った場合には、後述するスナビング効果の減少や、破断強度の減少程度の緩和が考えられる。単繊維引抜試験方法による影響については、今後の検討課題とする。

2.3 一軸引張試験

試験体、型枠形状および加力時の様子を図-3 に示す。試験体の形状は既往の研究³⁾と同様のくびれ型として、硬化後、試験体中央部周上に幅 5mm、深さ 5mm の切欠きを導入し、中央断面は 40×40mm とした。

加力には 2MN ユニバーサル試験機を用い、引張応力の伝達の境界条件は、初期不整および二次曲げの影響を考慮した固定-ピン⁶⁾とした。計測項目は引張荷重および軸方向変位（ひび割れ幅）である。ひび割れ幅は、試験区間直線部を中心とした検長 110mm の位置に固定した表裏 2 つの変位計により計測した。

3. 単繊維拔出し挙動の把握

3.1 アラミド繊維

単繊維引抜試験より得られた引抜荷重-すべり量関係を図-4 に示す。すべり量は、繊維とマトリクスの相対変位を表し、計測されたヘッド間変位から、別途行ったカットする前の繊維単体の引張試験から算定した試験区間外での繊維の変形を差し引くことで求めた。最大荷重を P_{max} として図中に示している。ほとんどの試験体で、荷重が最大に達した後、徐々に荷重が減少し、繊維全長が引抜かれて荷重が 0 となる引抜挙動が見られた。一方、付着長 12mm で配向角 45° 、 60° とした試験体の一部においては、荷重が最大となった瞬間に繊維断面の大部分がちぎれて繊維の撚りがほどけ、その後は繊維のごく一部で荷重が受け持たれ、最終的に繊維断面全てが引きちぎられた。

(1) 付着長の影響

付着長の影響は、配向角の影響のない配向角 0° の試

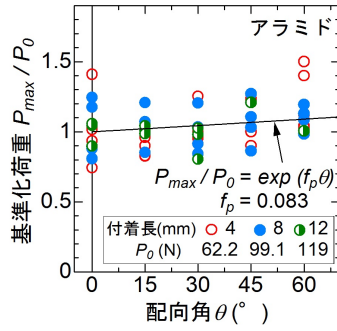


図-7 荷重に対するスナビング効果
(アラミド)

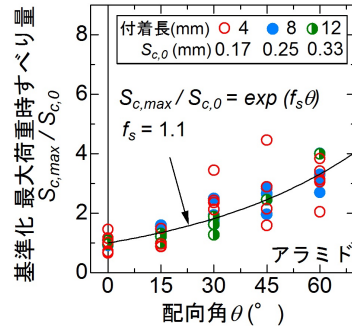


図-8 すべり量に対するスナビング効果
(アラミド)

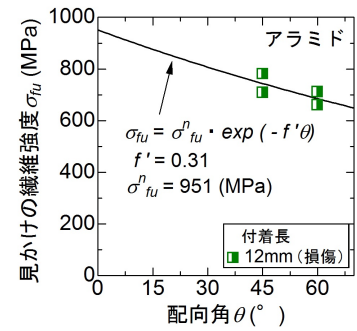


図-9 配向角による繊維強度の低減
(アラミド)

験結果より評価する。図-4 中の配向角 0° の結果より、付着長が大きいほど、大きな引拔荷重が得られる傾向があった。ここで、最大荷重時のすべり量については、4.1 節で後述するバイリニアモデルの適用を念頭に置き、最大荷重 P_{max} を基に、図-5 に示すようにコンプリメンタリーエネルギーが等価となる直線上で最大荷重にいたるすべり量 $S_{c,max}$ とした。

最大荷重 P_{max} および最大荷重時すべり量 $S_{c,max}$ について、付着長との関係を図-6 に示す。付着長の増加に伴い、最大荷重 P_{max} および最大荷重時すべり量 $S_{c,max}$ が増加することが確認された。図中の式は、試験結果に合わせ、最小二乗法によりそれぞれ累乗近似および線形近似を行った結果である。

(2) 繊維配向角の影響

配向角を有する場合、引拔挙動および繊維の損傷が確認された。

引拔挙動を示した試験体については、全体的な性状は配向角 0° の場合と同様であり、最大荷重 P_{max} および最大荷重時すべり量 $S_{c,max}$ は配向角 0° の場合よりも増加した。最大荷重 P_{max} および最大荷重時すべり量 $S_{c,max}$ の増加は、繊維が配向角を有する場合、埋め込み口部でのマトリクスからの反力の存在によって界面摩擦が強化され、全体的に引拔抵抗力が向上するというスナビング効果⁷⁾によるものであると考えられる。繊維に配向角 θ がある場合のスナビング効果は、式(1)で評価される⁷⁾。

$$P = P_0 \cdot e^{f_p \cdot \theta} \quad (1)$$

ここで、

P : 最大引拔荷重

P_0 : 配向角 0° における最大引拔荷重

f_p : 荷重に対するスナビング係数

θ : 配向角

最大引拔荷重 P_{max} を配向角 0° の試験体の P_{max} の平均値 P_0 で基準化した基準化荷重と、配向角 θ の関係を図-7 に示す。基準化は付着長ごとに行った。図中の曲線は式(1)により最小二乗法によって近似した結果である。配向

角 θ をラジアンに換算し、スナビング係数 f_p を算出した。抵抗力の向上効果を表す指標であるスナビング係数 f_p は 0.083 と比較的小さい値となった。

同様の方法で、式(2)を用いて最大荷重時のすべり量を評価する。

$$S = S_0 \cdot e^{f_s \cdot \theta} \quad (2)$$

ここで、

S : 最大引拔荷重時すべり量

S_0 : 配向角 0° における最大引拔荷重時すべり量

f_s : すべり量に対するスナビング係数

最大引拔荷重時すべり量 $S_{c,max}$ を配向角 0° の試験体の $S_{c,max}$ の平均値 $S_{c,0}$ で基準化した基準化すべり量と、配向角 θ の関係を図-8 に示す。最大引拔荷重時すべり量については、すべり量に対するスナビング係数の値は 1.1 となり、最大引拔荷重よりも配向角の影響を大きく受けることが示された。

一方で、繊維の損傷に至った試験体については、配向角が大きいほど最大荷重（損傷時荷重）が小さくなる傾向が見られた。これは、配向角による曲げ応力や、繊維抜け出し時の繊維表面の損傷により、繊維の見かけ上の強度が低下する⁸⁾ためであると考えられる。配向角による見かけの繊維強度の低下は、式(3)で評価される⁷⁾。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^n \cdot e^{-f' \cdot \theta} \quad (3)$$

ここで、

σ_{fu} : 見かけの繊維強度

σ_{fu}^n : 配向角 0° における埋込（破断）強度

f' : 見かけの繊維強度低減係数

見かけの繊維強度 σ_{fu} と配向角 θ の関係を図-9 に示す。図中の曲線は、式(3)により σ_{fu}^n および配向角の関数として σ_{fu} を回帰した結果である。配向角によって抵抗力を低下させる効果を表す指標である見かけの繊維強度低減係数 f' は 0.31、配向角 0° における破断強度は 951MPa

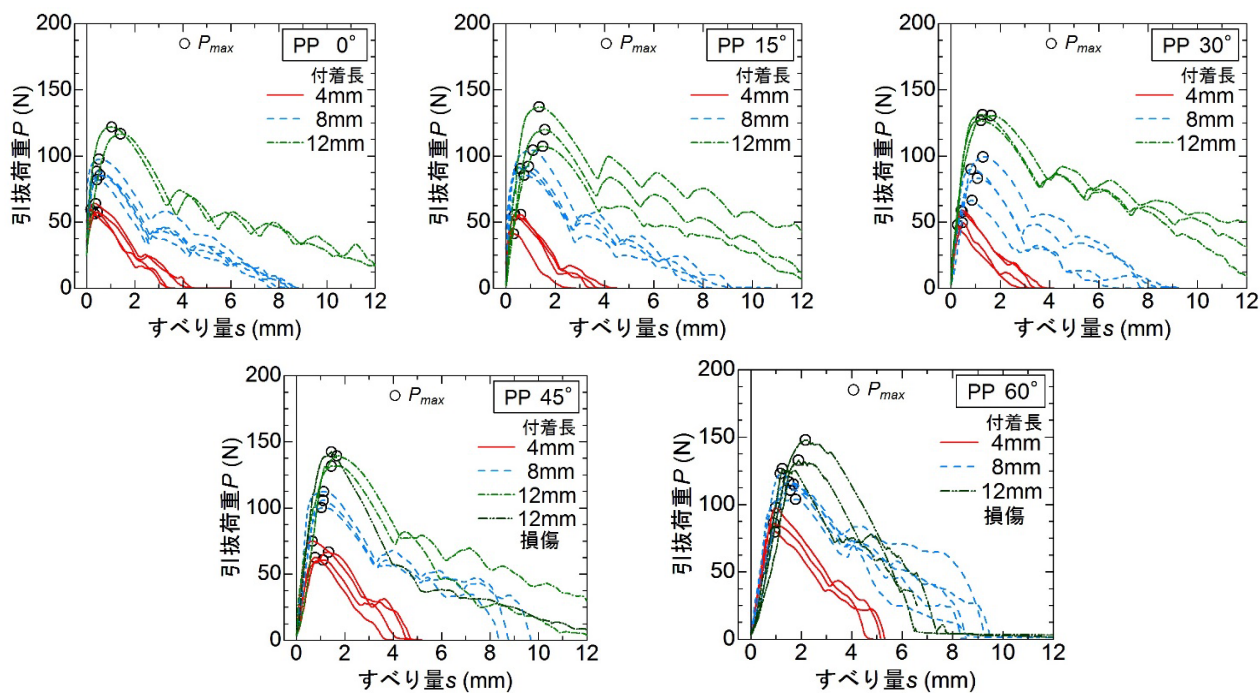


図-10 PP 単繊維引抜試験結果

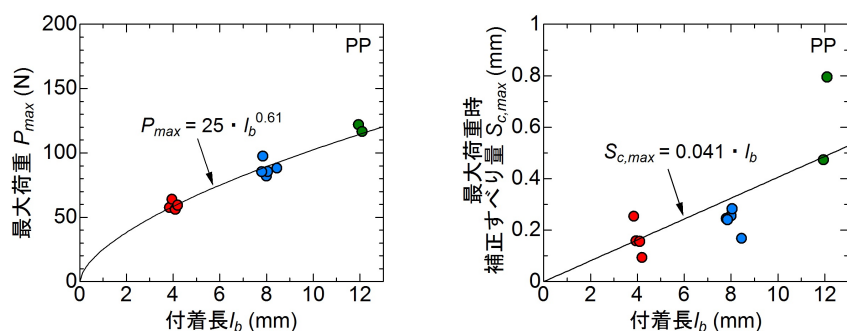


図-11 最大引抜荷重およびすべり量に対する付着長の影響 (PP)

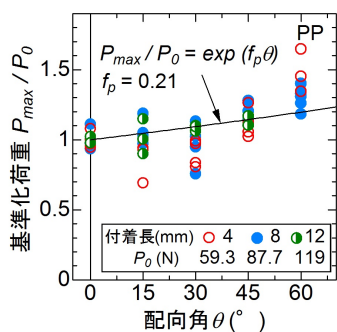


図-12 荷重に対するスナビング効果 (PP)

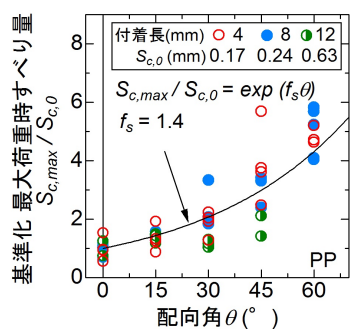


図-13 すべり量に対するスナビング効果 (PP)

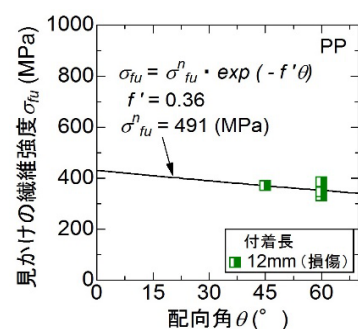


図-14 配向角による繊維強度の低減 (PP)

と算出された。

3.2 PP 繊維

単繊維引抜試験より得られた引抜荷重-すべり量関係を図-10に示す。PP 繊維においては、繊維表面のエンボス加工を反映して山型の荷重の増減が示されている。ほとんどの試験体で荷重が最大に達した後、徐々に荷重

が減少し、繊維全長が引抜かれて荷重が0となる引抜挙動が見られた。付着長 12mm で配向角 45°, 60° とした試験体の一部において、荷重が最大となった後、繊維が激しく損傷して繊維断面の大部分がちぎれ、急激に荷重が低下する挙動が見られた。

(1) 付着長の影響

最大荷重 P_{max} および最大荷重時すべり量 $S_{c,max}$ について、付着長との関係を図-11 に示す。なお、最大荷重時すべり量の算出方法は、アラミド繊維と同様（図-5）である。付着長の増加に伴い、最大荷重 P_{max} および最大荷重時すべり量 $S_{c,max}$ が増加することが確認された。図中の式は、試験結果に合わせ、最小二乗法によりそれぞれ累乗近似および線形近似を行った結果である。

（2）繊維配向角の影響

引拔挙動を示した試験体について、最大引拔荷重 P_{max} を配向角 0° の試験体の P_{max} の平均値 P_0 で基準化した基準化荷重と、配向角 θ の関係を図-12 に示す。基準化は付着長ごとに行った。図中の曲線は式(1)により最小二乗法によって近似した結果である。配向角 θ をラジアンに換算し、スナビング係数 f_p を算出した。スナビング係数 f_p は 0.21 となり、図-7 に示すアラミド繊維の試験結果と比較して大きい値が得られた。

最大引拔荷重時すべり量 $S_{c,max}$ を配向角 0° の試験体の $S_{c,max}$ の平均値 $S_{c,0}$ で基準化した基準化すべり量と、配向角 θ の関係を図-13 に示す。基準化は付着長ごとに行い、図中の曲線は式(2)により最小二乗法によって近似した結果である。図-8 に示すアラミド繊維を対象とした場合と同様に、最大引拔荷重時すべり量については、配向角に伴う増加の程度が最大引拔荷重よりも大きいという結果が得られた。

繊維が激しく損傷した試験体については、アラミド繊維の場合と同様に、式(3)で評価を行う。見かけの繊維強度 σ_{fu} と配向角 θ の関係を図-14 に示す。図中の曲線は、式(3)により σ_{fu}^n および配向角の関数として σ_{fu} を回帰した結果である。配向角によって抵抗力を低下させる効果を表す指標である見かけの繊維強度低減係数 f' は 0.36、配向角 0° における破断強度は 491MPa と算出された。

4. 架橋則の構築

4.1 単繊維拔出し挙動のモデル化

単繊維引拔試験結果を考慮して、単繊維拔出し挙動のモデル化を行う。配向角 0 度における最大引拔荷重 $P_{max,0}$ および最大引拔荷重時拔出し量 $\delta_{max,0}$ は、それぞれ式(4)および式(5)で示す付着長 l_b に関係する式で定義する。

$$P_{max,0} = A \cdot l_b^B \quad (4)$$

$$\delta_{max,0} = C \cdot l_b \quad (5)$$

ここで、

l_b : 付着長 (=ひび割れ面に対する埋込長)

A, B, C : 定数

繊維配向角の影響は最大引拔荷重 P_{max} および最大引拔荷重時拔出し量 δ_{max} に反映させ、それぞれ式(6)および式(7)により表現する。

$$P_{max} = P_{max,0} \cdot e^{f_p \cdot \theta} \quad (6)$$

$$\delta_{max} = \delta_{max,0} \cdot e^{f_s \cdot \theta} \quad (7)$$

ここで、

θ : 配向角

f_p : 荷重に対するスナビング係数

f_s : すべり量に対するスナビング係数

式(4)～式(7)より得られる最大引拔荷重 P_{max} および最大引拔荷重時拔出し量 δ_{max} を用いて構築した単繊維の架橋モデル（バイリニアモデル）を式(8)および図-15 に示す。引拔荷重は拔出し量が付着長（埋込長）に達した時に 0 とする。

繊維の破断（損傷）挙動は、式(3)により得られる見かけの繊維強度に繊維断面積を乗じて繊維の破断時荷重を求め、引拔荷重が破断時荷重を上回った際に以降の荷重を 0 とすることで表現する。

$$P(\delta, \theta, l_b) = \begin{cases} \frac{P_{max}}{\delta_{max}} \cdot \delta & (\delta \leq \delta_{max}) \\ P_{max} - \frac{P_{max}}{l_b - \delta_{max}} \cdot (\delta - \delta_{max}) & (\delta_{max} < \delta) \end{cases} \quad (8)$$

ただし、

$$P(\delta, \theta, l_b) = 0 \quad (P > A_f \cdot \sigma_{fu} \text{ のとき, およびそれ以降})$$

ここで、

A_f : 繊維断面積

σ_{fu} : 見かけの繊維強度

4.2 架橋則の構築方法

架橋則の構築は、既往の研究^{3), 4)}と同様に、単繊維の架橋モデルを繊維の配向性を考慮して図-16 に示すようなひび割れ面に存在する複数の繊維分総和することで行う。各単繊維は主配向角 θ_r と配向強度 k で表現される楕円分布を用いた繊維配向角分布に従うものとする。主配向角 θ_r とは、ひび割れ面に存在する様々な方向を向いた繊維の主たる配向の向きを示す角度であり、その主配向角 θ_r に対する配向の強さを表す指標が配向強度 k である。

拔出し量 δ における架橋力は単繊維の引拔荷重の総和として、式(9)によって得られる⁹⁾。繊維配向角分布は、試験体軸方向に対して平行な 2 平面から見た 2 つの繊維配向角分布によって決定され、ここでは簡単のため 2 つの繊維配向角分布が等しいと仮定する。ひび割れ面内の単繊維の x 方向の分布性状を示す確率密度関数 $p_x(y, z)$ は一様分布としている。

$$P_{bridge}(\delta) = N_f \cdot \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta, \psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{xz}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z) \quad (9)$$

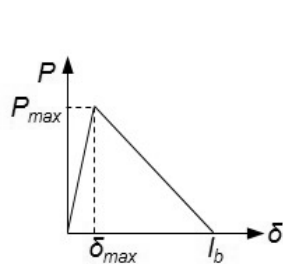


図-15 単繊維架橋モデル

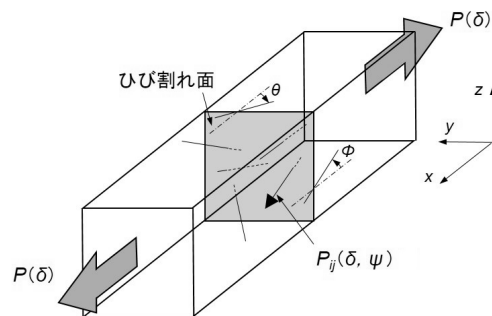


図-16 ひび割れ面を架橋する繊維群

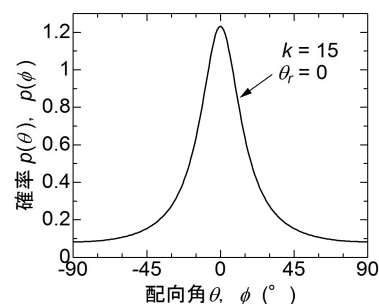


図-17 繊維配向角分布

ここで、

P_{bridge} : 架橋力

$$N_f = V_f \cdot A_m / A_f$$

N_f : 繊維本数, V_f : 繊維混入率

A_m : マトリックスの断面積, A_f : 繊維断面積

δ : 拔出し量

ψ : ひび割れ面に対する繊維配向角

θ, ϕ : 軸方向に平行な平面に対して ψ を投影した配向角

$P(\delta, \psi)$: 単繊維の引抜荷重

$p(\theta), p(\phi)$: 繊維配向角分布を与える確率密度関数

$p_x(y, z)$: 単繊維の分布性状を示す確率密度関数
(=一様分布)

架橋則モデルへの入力値を表-4に示す。ひび割れを架橋する繊維は、ひび割れ面に対する埋込長が短い側から引抜かれると仮定し、既往の研究³⁾より、最大引抜荷重時すべり量 $S_{c,max}$ の1.5倍を最大引抜荷重時拔出し量として、その拔出し量がひび割れ幅に対応するものとした。一軸引張試験においては、ひび割れ発生面において繊維が軸方向に配向していると考えられるため、主配向角 $\theta_r=0$ とした。配向強度 k については、同一の形状および寸法のくびれ型一軸引張試験体を用いた著者らの研究⁴⁾と同一の $k=15$ を用いた。本研究で採用した繊維配向角分布を図-17に示す。

4.3 架橋則による引張性能評価

(1) 一軸引張試験結果

アラミド繊維およびPP繊維に対してそれぞれ実施した一軸引張試験より、得られた引張応力-ひび割れ幅関係を図-18に示す。軸方向変位(ひび割れ幅)の増加に伴って引張力が上昇し、極めて初期の段階で一度引張力が減少した後、再び引張力が上昇していくという挙動が見られ、切欠きを導入したくびれ中央部にひび割れが1本生じた。初期の引張力の低下は、試験体にひび割れが生じたことを表しており、その後の引張力はひび割れを架橋する繊維によって受け持たれる。すなわち、初期の

表-4 架橋則モデルへの入力値

繊維種類		アラミド	PP
入力項目		入力値	
$P_{max,0} = A \cdot l_b^B$	A	26	25
	B	0.63	0.61
$\delta_{max,0} = C \cdot l_b$	C	0.045 (=0.030×1.5)	0.062 (=0.041×1.5)
$P_{max} = P_{max,0} \cdot e^{f_p \cdot \theta}$	f_p	0.083	0.21
$\delta_{max} = \delta_{max,0} \cdot e^{f_s \cdot \theta}$	f_s	1.1	1.4
強度低減係数 f'		0.31	0.36
配向角 0° における 破断強度(MPa)		951	491
繊維長 l_f (mm)		30	
配向強度 k		15	

荷重減少後に再び引張力が上昇した際のピーク点(第2ピーク点)が、繊維の引張架橋性能を表す値である。

(2) 架橋則と一軸引張試験結果の比較

アラミド繊維およびPP繊維の架橋則構築結果を、それぞれ図-18中に示す。引張応力は架橋力をマトリックス断面積で除した値である。架橋則は試験結果の挙動を概ね表現できている。

架橋則は、ひび割れ面に存在する単繊維の架橋力を足し合わせて表現されている。ひび割れ開口が進展していく中で、ひび割れ面を架橋する単繊維の状態はひび割れ面に対する埋込長によりそれぞれ異なり、あるひび割れ幅の時点で、拔出しに伴い架橋性能を発揮している繊維がある一方で、埋込長が小さく既に繊維埋込長全長が拔出す、あるいは、繊維破断荷重を上回り破断して架橋力を負担していない繊維が存在する。

計算した架橋則における、アラミド繊維およびPP繊維の繊維有効率-ひび割れ幅関係を図-19に示す。繊維有効率とは、ひび割れ面においてマトリックスから拔出しておらず、架橋力を担っている繊維(有効架橋繊維)の本数 N_{fb} の、単位体積に含まれる理論上の繊維本数 N_f に対する比である。繊維有効率の減少勾配の変化箇所は織

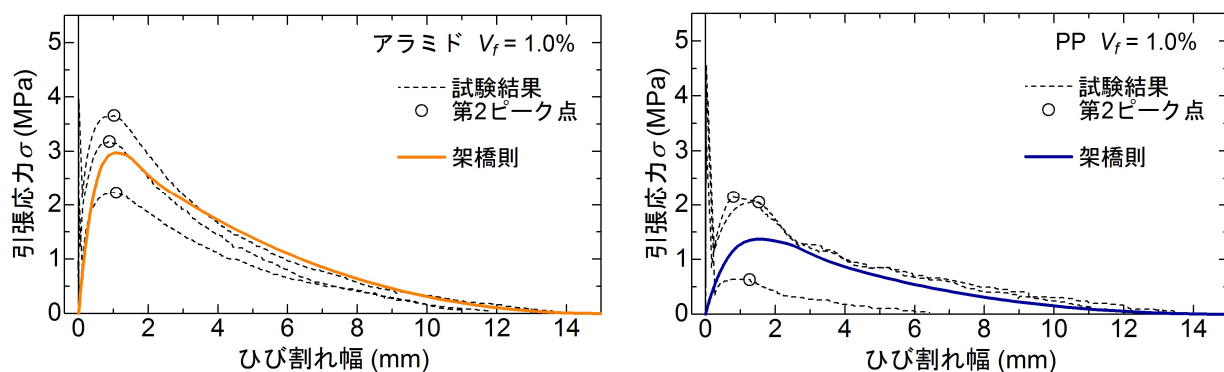


図-18 架橋則計算結果と試験結果の比較（左：アラミド，右：PP）

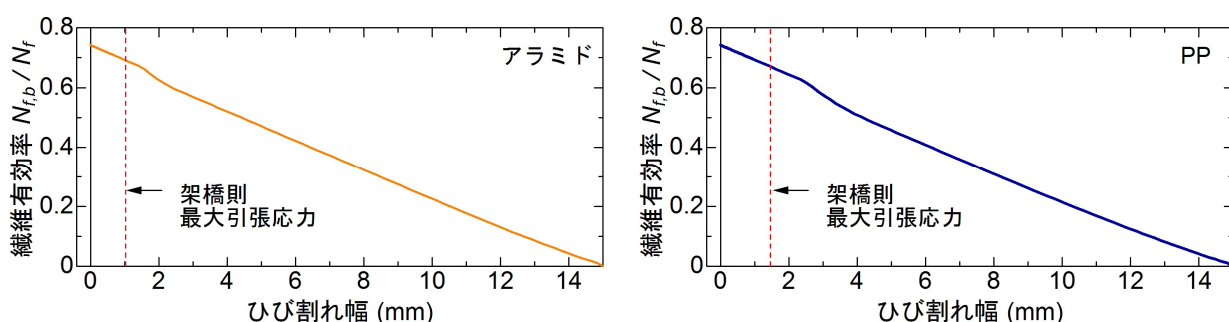


図-19 繊維有効率－ひび割れ幅関係（左：アラミド，右：PP）

繊維の破断が生じていることを表す。

アラミド繊維およびPP繊維どちらの繊維においても、架橋則による最大引張応力が得られるひび割れ幅において、繊維有効率の減少勾配は一定である。これは、ひび割れ開口に伴いひび割れ面を架橋する繊維が引抜かれていき、埋込長の小さい繊維から順に単調に抜出しが進む過程であることを表している。すなわち、最大引張応力が得られるのは、架橋する繊維全体において、ひび割れ開口に伴う繊維の架橋力の増加と、繊維抜出しによる架橋力の喪失が平衡した点であると推測される。続いて、アラミド繊維においてひび割れ幅 2mm 前後、PP 繊維においてひび割れ幅 3mm 前後において、繊維有効率の減少勾配がわずかに変化している。これは、繊維の一部が破断したことを表しており、図-18 に示す架橋則と照らし合わせると、繊維の破断を反映して引張応力の減少具合がわずかに大きくなっている。その後は、繊維有効率の減少勾配が再び一定となる。これは、ひび割れ開口の進展に伴い、ひび割れ面を架橋する繊維が抜出して引張力を受け持つ繊維が徐々に減少することを表しており、図-18 に示す引張応力は緩やかに減少していく。最終的に、ひび割れ幅が繊維長の 2 分の 1 である 15mm となった時点で引張応力は 0 となる。

5. まとめ

アラミド繊維および PP 繊維に対して単繊維引抜試験

を実施し、架橋則の最も基本となる単繊維抜出し挙動を把握した。どちらの繊維も、付着長に比例して引抜荷重およびすべり量が大きくなる傾向が見られた。配向角を有する場合には、配向角の増大に伴って引抜荷重が増加するスナビング効果が確認され、すべり量についても配向角による増大効果が見られた。繊維の損傷が確認され、損傷する場合には配向角が大きいほど損傷時荷重は小さくなった。

各単繊維引抜試験結果を基に、抜出し挙動のモデル化を行って架橋則を構築し、FRCC の一軸引張試験結果の挙動を概ね再現できた。

謝辞

PP 繊維は萩原工業（株）およびダイワボウポリテック（株）よりご提供いただいた。本研究は、科学研究助成基金基盤研究（B）課題番号 26289188 によっている。

参考文献

- 1) 清田雅量, 三橋博三, 関田徹志, 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) Redon, C., Li, V. C., Wu, C., Hoshino, H., Saito, T., and Ogawa, A., : Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.13, No.6, pp.399-406, 2001
- 3) Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K. : Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced

- Cementitious Composite, Materials Journal, American Concrete Institute, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016.3
- 4) 橋本裕子, 山田大, 八十島章, 金久保利之: スチールワイヤの拔出し挙動と架橋則の構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.249~254, 2016.7
- 5) 日本コンクリート工学会: 繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会報告書, 2012.9
- 6) 金久保利之, 清水克将, 関田徹志, 片桐誠, 福山洋, 六郷恵哲: DFRCC の引張性能評価—JCI 研究委員会による共通試験結果—, 日本コンクリート工学協会高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.101-111, 2003.12
- 7) Li, V. C. et al. : Effect of Inclining Angle, Bundling, and Surface Treatment on Synthetic Fiber Pull-out from a Cement Matrix, Composites, Vol.21, No.2, pp.132-140, 1990
- 8) Kanda, T., Li, V.C. : Interface Property and Apparent Strength of a High Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No.1, pp.5-13, 1998
- 9) 浅野浩平, 金久保利之: HPRCC における繊維の配向性が引張性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 692 号, pp.1673-1678, 2013.1
- (原稿受理年月日: 2017 年 3 月 6 日)

Slip-Out Characteristics of Aramid and PP Fibers and Calculation of Bridging Law

By Hiroko Hashimoto, Yu Mu, Hiroshi Yamada and Toshiyuki Kanakubo

Concrete Research and Technology, Vol.28, 2017

Synopsis: The purpose of this study is to calculate the bridging law based on the slip-out characteristics of aramid single fiber and polypropylene (PP) single fiber and to investigate its adaptability to tensile performance evaluation of fiber-reinforced cementitious composites (FRCC). The pullout load-slippage relationship, which is the most basic characteristic of bridging performance, was obtained by the pullout test of a single fiber embedded in a matrix. The bond behavior, snubbing effect and tensile strength degradation were confirmed by the experiment results. The pullout load-slippage relationship was modeled based on the experimental results. The bridging law was calculated by using the model. The calculated results were found to express well the results of the uniaxial tension test that was conducted for comparison purposes.

Keywords: Pullout Behavior, Aramid Fiber, PP Fiber, Snubbing Effect, Bridging Law, Tension Test