

論文 スチールワイヤの拔出し挙動と架橋則の構築

橋本 裕子*1・山田 大*2・八十島 章*3・金久保 利之*4

要旨: 繊維補強セメント複合材料 (FRCC) の性能評価手法である架橋則について、その構築の流れおよび有用性を確認するため、スチールワイヤ単繊維の拔出し挙動を把握して架橋則を構築し、FRCC の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、付着長の増大に伴う引抜荷重の増加および配向角によって引抜荷重が増加するスナビング効果が確認された。スナビング効果は付着長が小さく繊維拔出し直前の荷重増加の影響を強く受ける試験体ほど大きく算出された。単繊維拔出し挙動のモデル化を行って構築した架橋則により、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, スチールワイヤ, スナビング効果, 架橋則, 引張試験

1. はじめに

モルタルマトリクスに短繊維を混入した繊維補強セメント複合材料 (Fiber-Reinforced Cementitious Composites, 以下 FRCC) では、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靱性能が向上する。

FRCC の引張性能は、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により評価されるが、架橋則は繊維やマトリクスの性質によって大きく異なる。そのため、基礎的性状に関するバックデータが不足しており、性能の定量的評価が困難となっていることから、FRCC の引張性能が構造体の設計に生かされていないというのが現状である。

本研究では、架橋則のもっとも基本となる単繊維マトリクス間の拔出し挙動を把握し、その性状をひび割れ面に架橋する多数の繊維分を総和することで架橋則の構築を行い、FRCC の引張性能評価に対する架橋則の有用性を検討した。着目する繊維としては、架橋則の構築の流れを確認するため、破断することがなく、評価が比較的容易な細径のスチールワイヤとした。拔出し挙動は、マトリクスからの単繊維引抜試験を行うことで直接把握し、実際のひび割れ面において繊維が配向角を有していることを考慮するため角度をつけて繊維を引き抜き、配向角による影響の評価を行った。単繊維の拔出し挙動から架橋則の構築を行い、くびれ型供試体を用いた FRCC の一軸引張試験¹⁾の結果と比較することで、構築した架橋則の有用性を確認した。

2. 試験概要

2.1 単繊維引抜試験

単繊維引抜試験は、配向角を 0 度とした PO1 シリーズ

と配向角を 0, 15, 30, 45, 60 度とした PO2 シリーズに対して行った。

(1) 試験体概要

使用したスチールワイヤの物性を表-1 に示す。マトリクスの調合計画を表-2 に、圧縮特性を表-3 に示す。試験体および型枠形状を図-1 に示す。表-4 の引抜試験体諸元に示すように、シリーズによって試験体の試験区間外の繊維長さは異なる。試験区間となる付着長を 2, 4, 6mm と変化させた試験体を作製した。型枠は既往の研究²⁾を参考として、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。型枠中心に繊維を位置させ、打設孔よりマトリクスを注入した。脱型後、試験体裏面に表出している繊維は切断した。

(2) 試験方法

加力装置を図-2 に示す。加力には万能ネジ式卓上試

表-1 繊維物性

繊維	繊維径 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
スチールワイヤ	0.16	2825	210

表-2 マトリクスの調合

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

表-3 マトリクス圧縮特性

(Φ50-100mm シリンダー)

シリーズ名称	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PO1	36.1	13.7
PO2	29.8	14.6

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 大学院生 (学生会員)

*3 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域助教 博士 (工学) (正会員)

*4 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域准教授 博士 (工学) (正会員)

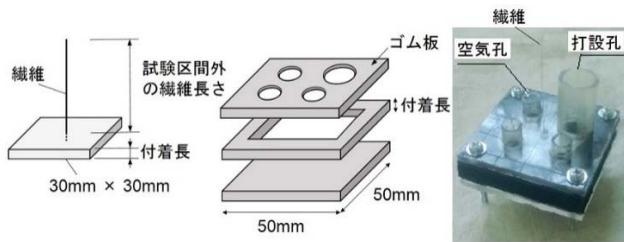


図-1 引抜試験体および型枠形状

表-4 引抜試験体諸元一覧

シリーズ名称	設計付着長 (mm)	配向角 (度)	試験区間外の繊維長さ (mm)
PO1	2, 4, 6	0	40
PO2		0, 15, 30, 45, 60	55

表-5 FRCC 圧縮特性 (Φ100-200mm シリンダー)

繊維体積混入率 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1.0	56.8	18.7
2.0	59.2	19.6

験機を使用し、変位制御により単調引張荷重を行った。荷重速度は毎分 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。

2.2 一軸引張試験

(1) 試験体概要

使用したスチールワイヤの物性、マトリクスの調査計画は表-1、表-2 に示す単繊維引抜試験と同一で、モルタルバッチとしては PO2 シリーズと対応している。スチールワイヤの繊維長は 13mm で、体積混入率は 1.0, 2.0% とした。FRCC の圧縮特性を表-5 に示す。試験体および型枠形状を図-3 に示す。試験体形状は既往の研究¹⁾と同様のくびれ型とし、中央断面は 50×50mm とした。試験体端部は鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で接着した後、炭素繊維シートで補強した。試験体数は、繊維の体積混入率 1.0, 2.0% に対して各 6 体とした。

(2) 試験方法

加力時の様子を図-3 に示す。加力には 2MN ユニバーサル試験機を用い、変位制御により単調引張荷重を行った。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。

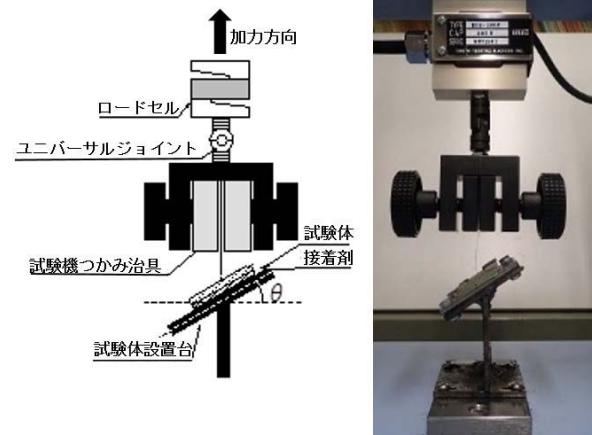


図-2 引抜試験加力装置

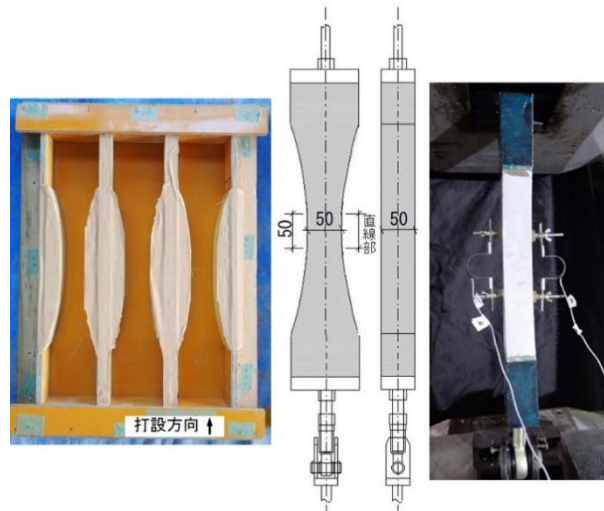


図-3 引張試験体形状、形状および加力時の様子

3. 試験結果

3.1 単繊維引抜試験

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、計測されたヘッド間変位から試験区間外での繊維の変形 (弾性を仮定) を差し引くことで求めた。初めに大きく荷重が増加しピークに達した点における荷重をピーク時荷重 P_a として図中に示している。拔出挙動の基本となる付着性状に対しては、試験体における試験区間外の繊維長さが短く、区間外の繊維変形等の影響が小さい PO1 シリーズの結果を用い、PO2 シリーズの配向角 0 度の試験結果は、配向角による影響評価を行うときに用いる。

(1) 繊維-マトリクス間の付着性状

付着性状は、配向角の影響のない配向角 0 度の試験結果より評価する。PO1 シリーズの結果について、実測付着長 l_b 、ピーク時の荷重 P_a およびすべり量 s_a 、それらの値より算出される単位付着長あたりのピーク時荷重 P_a/l_b 、引抜剛性 P_a/s_a を表-6 に示す。実測付着長とは、加力前にノギスによって実測した各試験体における繊維埋込孔付近の厚みである。

図-4中のPO1シリーズの結果より、線形的に荷重が増加しピークに達して引抜荷重が最大となった後、徐々に荷重が減少していくという挙動が見られた。また、付着長が大きいほど、大きな引抜荷重が得られる傾向があった。これは、繊維-マトリクス間の付着が摩擦によって生じており、摩擦付着によってせん断応力が繊維全長に伝わって荷重が最大となった後、繊維が引き抜かれながら付着部分の長さが減少していくことで荷重が徐々に低下するためであると考えられる。本研究では、単位付着長あたりのピーク時荷重および引抜剛性について表-6に示す平均値を採用し、後述する単繊維抜き出し挙動のモデル化の際に用いる。

(2) 繊維配向角の影響

図-4中のPO2シリーズの結果より、繊維配向角の影響を評価する。配向角を有する際の挙動を図-5に示す。配向角を有する場合、初め荷重が増加してピークに達し(第1ピーク点)、その後荷重が低下していき、一定の荷重を保持する区間を経て、引抜け直前に再び荷重が増加しピークが現れる(第2ピーク点)という挙動が見られ

た。初期の荷重増加は、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、全体的に引抜抵抗力が向上するというスナビング効果³⁾によるものであると考えられる。続いて、スナビング効果により大きな荷重が加わったことで繊維に配向角の形状が残り、その形状を保ったまま引抜かれて荷重が低下し、形状が伸ばされる過程で一定の荷重が保たれたと推測される。さらに、繊維の抜け出しが進み全長が抜け出す直前に、繊維がマトリクスに対して跳ね返すような力を加えることによって摩擦が増大し再び大きな荷重が得られたと考えられる。また、付着長が小さい2mmの試験結果においては、2つのピーク点間のすべり量が小さく、2つのピーク点が合わさってピークが1つとなって現れる挙動が確認された。

繊維が配向角を有する場合にはピークが2点現れる結果が見られたが、第2ピーク点が現れるのは繊維が抜け出す直前であり、大きなすべり量が生じている時点のため、第1ピーク点のみに着目し、この初期の荷重増加点における荷重およびすべり量をそれぞれピーク時荷重

表-6 単繊維引抜試験結果 (PO1シリーズ)

設計付着長 (mm)	実測付着長 l_b (mm)	ピーク時荷重 P_a (N)	ピーク時すべり量 s_a (mm)	P_a/l_b (N/mm)	P_a/l_b 平均値 (N/mm)	引抜剛性 P_a/s_a (N/mm)	P_a/s_a 平均値 (N/mm)
2	1.95	2.50	0.052	1.28	1.27	47.7	96.1
	1.85	1.50	0.378	0.81		3.95	
4	3.95	7.09	0.041	1.80		171	
	4.00	5.19	0.134	1.30		38.6	
6	6.00	4.40	0.025	0.73		173	
	6.00	10.1	0.071	1.68		142	

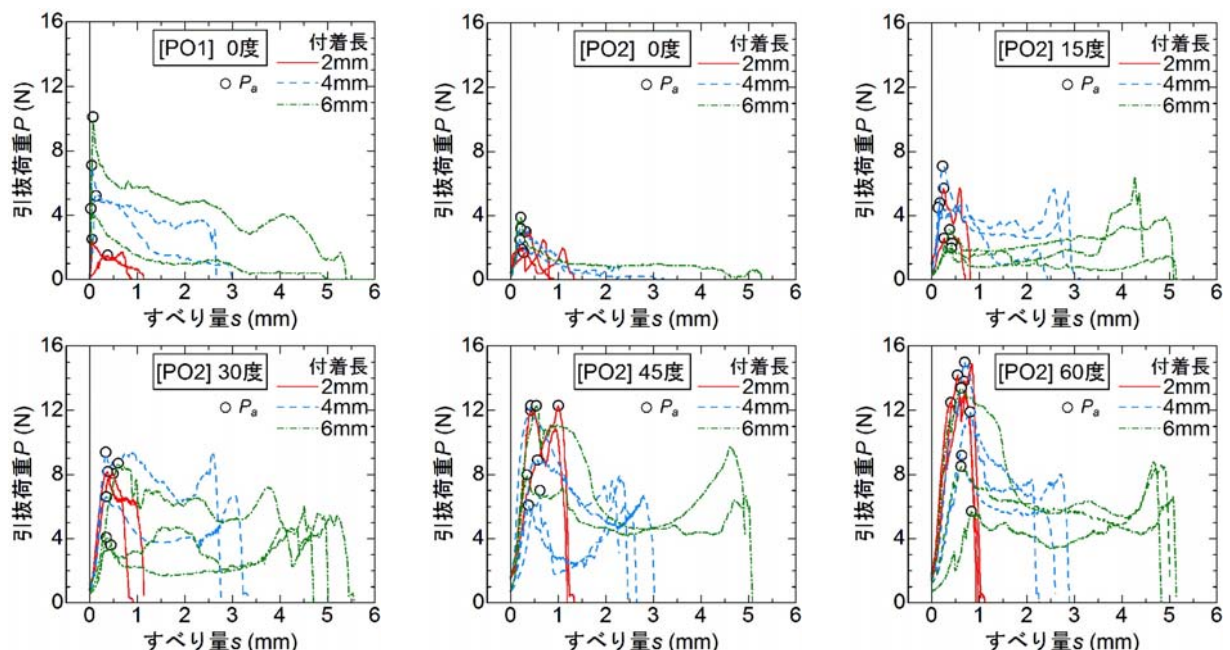


図-4 単繊維引抜試験結果

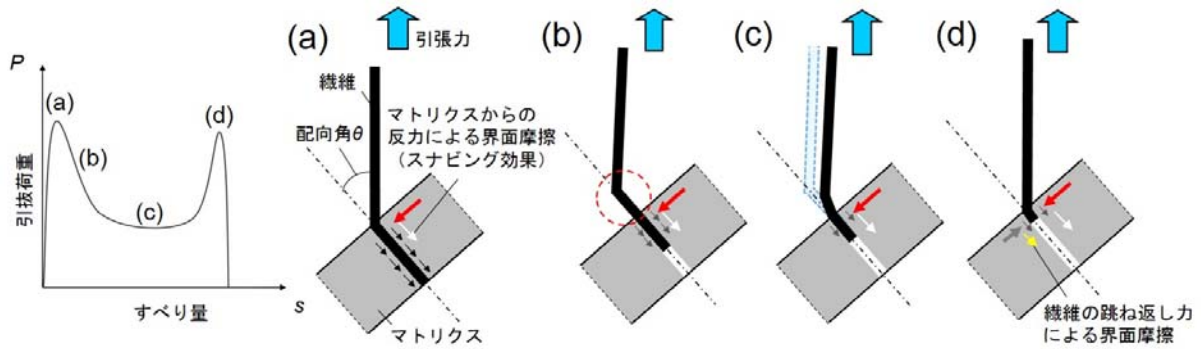


図-5 配向角を有する際の抜き挙動

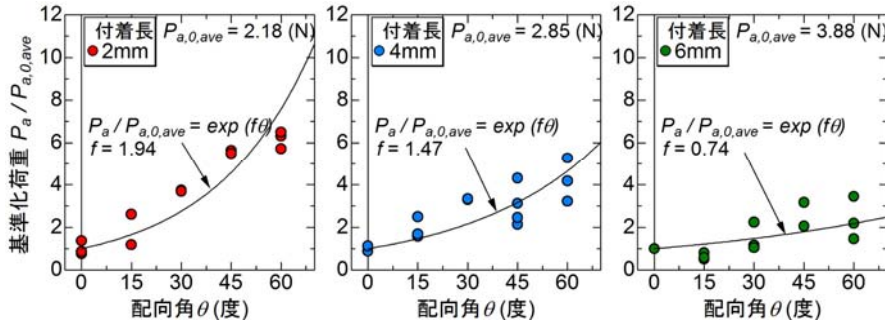


図-6 各付着長に対するスナビング係数

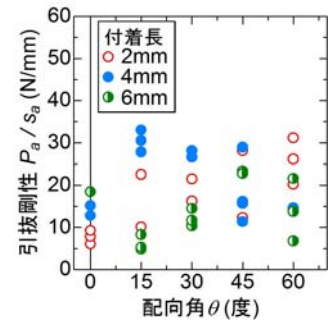


図-7 引抜剛性-配向角関係

P_a 、ピーク時すべり量 s_a として扱うことにした。

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³⁾。

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

ここで、

P : 最大引抜荷重

P_0 : 配向角 0 度における最大引抜荷重

f : スナビング係数

式(1)に示すように、スナビング係数の定義は最大引抜荷重について増加の程度を示す値である。第1ピーク点荷重 P_a を配向角 0 度の試験体のピーク時荷重の平均値 $P_{a,0,ave}$ で基準化した基準化荷重と、配向角 θ の関係が付着長ごとにまとめたものを図-6 に示す。図中の曲線は式(1)を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 を算出した。図-6 に示すように、付着長が小さいほど配向角による荷重の増大が大きく、スナビング係数の値が大きいという結果が得られた。これは、付着長が小さいほど2つのピーク点が近づき、第1ピーク点における荷重 P_a に繊維抜き直前の荷重増加の影響が含まれることになるためである。

引抜剛性と配向角の関係を図-7 に示す。引抜剛性に対する配向角の影響は確認できないため、後述する単繊維抜き挙動のモデル化において、引抜剛性は配向角にかかわらず一定とした。一定とする引抜剛性の値は、試験体における試験区間外の繊維長さが短く、区間外の繊維変形等の影響が小さい PO1 シリーズの結果を採用し、表-6 に示す引抜剛性の平均値より 96.1N/mm とした。

3.2 一軸引張試験

一軸引張試験より得られた引張荷重-ひび割れ幅関係を図-8 に示す。なお、加力時において曲げの影響が著しかったものについては試験結果から除いた。

スチールワイヤとマトリクスが一体的に引張荷重を受け持ち最大まで達した後、くびれ中央部にひび割れが1本生じ、ひび割れ開口が進展してスチールワイヤが荷重を受け持つという挙動が見られた。最大引張荷重については、繊維混入率 2.0% とした試験体は、1.0% と比較して平均 1.87 倍であった。

4. 架橋則の構築

4.1 単繊維抜き挙動のモデル化

(1) 繊維-マトリクス間の付着性状

配向角 0 度におけるピーク時荷重 $P_{a,0}$ およびひび割れ幅 $\delta_{a,0}$ を、それぞれ式(2),(3)で示すように、付着長に比例する式で定義する。ここで、引抜剛性は配向角の影響を受けず一定としたことから、ひび割れ幅に関しては配向角を有する場合も含め式(3)で評価する。

$$P_{a,0} = P_{a,0,1} \cdot l_b \quad (2)$$

$$\delta_{a,0} = \delta_a = \delta_{a,0,1} \cdot l_b \quad (3)$$

ここで、

l_b : 付着長 (=ひび割れ面に対する埋込長)

$P_{a,0,1}$, $\delta_{a,0,1}$: 配向角 0 度, 単位付着長あたりのピーク時荷重, ひび割れ幅

表-6 に示す単繊維引抜試験 PO1 シリーズの結果に基づき、配向角 0 度における単位付着長あたりのピーク時

荷重 $P_{a,0,l}$ を 1.3N/mm と設定した。単位付着長あたりのピーク時ひび割れ幅については、実際に架橋する繊維は両端がマトリクスに埋め込まれていることを考慮して、すべり量の2倍とすることとし、配向角0度における単位付着長あたりのピーク時荷重と引抜剛性の平均値によりすべり量を算出することで、 $\delta_{a,0,l}=0.03\text{mm/mm}$ と設定した。

(2) 繊維配向角の影響

繊維配向角の影響は引抜荷重に反映させる。付着長が小さいほど配向角による荷重の増大が大きく、スナビング係数が大きくなることを表現するため、スナビング係数 f を式(4)で表す。

$$f = f_0 + f_1 \cdot l_b \quad (4)$$

ここで、

f_0, f_1 : 定数

ただし、 $f < 0$ のとき $f = 0$

式(4)により求めたスナビング係数 f を用いて、式(5)により引抜荷重 P_a を表現する。

$$P_a = P_{a,0} \cdot e^{f \cdot \theta} \quad (5)$$

ここで、

$P_{a,0}$: 配向角0度におけるピーク時荷重

図-6 に示す各付着長に対して算出されたスナビング係数と、付着長の関係を図-9 に示す。図中の式は最小二乗法による直線近似を行った結果であり、この近似式より本研究では $f_0 = 2.6, f_1 = -0.3$ とした。

(3) 単繊維の架橋モデル

式(2)~(5)より得られるピーク時荷重 P_a およびピーク時ひび割れ幅 δ_a を用いて構築した、付着および配向角の影響を考慮した単繊維の架橋モデル(バイリニアモデル)を式(6)に示す。単繊維の架橋モデルの模式図を図-10 に示す。引抜荷重はひび割れ幅が付着長(埋込長)に達した時に0とする。

$$P_{ij}(\delta, \theta, l_b) = \begin{cases} \frac{P_a}{\delta_a} \cdot \delta & (\delta \leq \delta_a) \\ P_a - \frac{P_a}{l_b - \delta_a} \cdot (\delta - \delta_a) & (\delta_a < \delta) \end{cases} \quad (6)$$

4.2 架橋則構築方法

架橋則の構築を、図-11 に示すようなひび割れ面を架橋する繊維群に対して行う。構築方法は既往の研究⁴⁾と同様に、ひび割れ面に架橋する各単繊維に対して単繊維の架橋モデルを適用し、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⁴⁾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。ひび割れ幅 δ における架橋力は

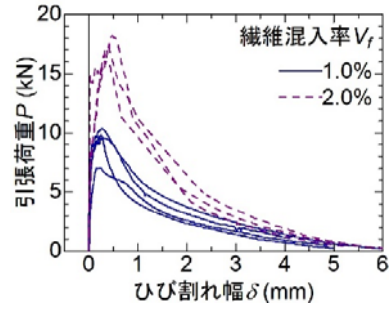


図-8 引張荷重-ひび割れ幅関係

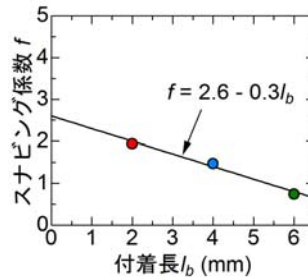


図-9 スナビング係数-付着長関係

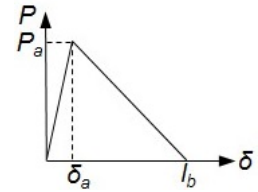


図-10 単繊維の架橋モデル

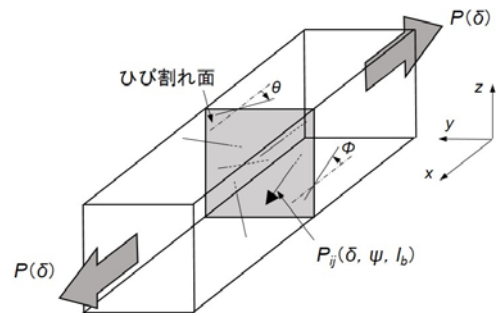


図-11 ひび割れ面を架橋する繊維群

単繊維の引抜荷重の総和として、式(7)によって得られる⁴⁾。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るが、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 $p_d(y_h, z_h)$ は一様分布としている。

$$P(\delta) = \sum_h \sum_i \sum_j \left\{ N_f \cdot P_{ij}(\delta, \psi, l_b) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_j) \cdot p_d(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot \Delta A \right\} \quad (7)$$

ここで、

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

N_f : 繊維本数, V_f : 繊維混入率

A_m : 試験体断面積, A_f : 繊維断面積

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

$P_{ij}(\delta, \psi, l_b)$: 単繊維の引抜荷重

$p(\theta_i), p(\phi_j)$: 繊維配向角分布

単繊維架橋モデルに入力するパラメータを表-7 に示

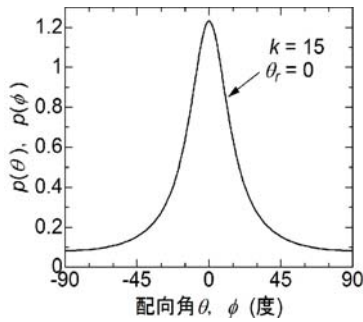


図-12 繊維配向角分布

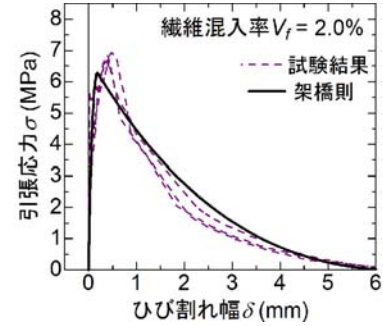
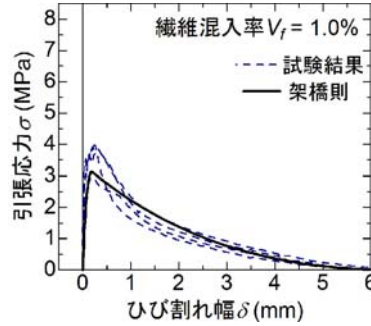


図-13 架橋則と試験結果の比較

表-7 架橋則モデルへの入力値

入力項目	入力値
配向角 0 度, 単位付着長あたりのピーク時荷重 $P_{a,0,l}$ (N/mm)	1.3
配向角 0 度, 単位付着長あたりのピーク時ひび割れ幅 $\delta_{a,0,l}$ (mm/mm)	0.03
f_0 (スナビング係数 $f=f_0+f_1 \cdot l_b$)	2.6
f_1 (スナビング係数 $f=f_0+f_1 \cdot l_b$)	-0.3
繊維長 l_f (mm)	13
配向強度 k	15

す。一軸引張試験においてはくびれ型供試体を使用しており、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 $\theta_c=0$ とする。配向強度 k については、くびれ型一軸引張試験体の配向強度を算出した既往の研究⁹⁾から、体積混入率 1.0, 2.0% に対してそれぞれ得られる、試験体正面および側面の配向強度の平均値を用いた。本研究で採用した繊維配向角分布を図-12 に示す。

4.3 モデルと一軸引張試験結果との比較

構築した架橋則と、一軸引張試験結果の応力-ひび割れ幅関係の比較を図-13 に示す。架橋則は試験結果の挙動を概ね表現できている。

摩擦付着により生じる引抜抵抗力と、スナビング係数で評価される、繊維配向角による抵抗力の増加を合わせることで表現した単繊維の架橋力は、ひび割れ面に対する繊維の埋込長の関数となっている。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各繊維の状態は、ひび割れ面に対する繊維の埋込長によって異なり、あるひび割れ幅の時点で、拔出に伴い架橋性能を発揮している繊維と、埋込長が小さく既に繊維埋込長全長が拔出して架橋力を負担していない繊維が存在する。そのため、ひび割れ面を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、繊維拔出による架橋力の喪失が平衡する際に、架橋則は最大引張応力に達する。最大引張応力後、曲線状になだらかに応力が低下する挙

動は、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拔出していき、引張力を受け持つ繊維が徐々に減少することを表現している。最終的に、ひび割れ幅が繊維長の 2 分の 1 の値である 6.5mm となった時点で引張応力は 0 となる。

5. まとめ

スチールワイヤ単繊維引抜試験より、付着長に比例して引抜荷重が大きくなる傾向が見られ、付着は摩擦によって生じることが確認された。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た。スナビング効果を表す指標であるスナビング係数は、付着長が小さく繊維拔出し直前の荷重増加の影響を強く受ける試験体ほど大きく算出された。

スチールワイヤの単繊維引抜試験結果を基に、拔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

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) 月崎良一ほか: HPRCC における繊維の配向性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.179-184, 2014.9
- 2) 浅野浩平, 金久保利之: 高性能繊維補強セメント複合材料における短繊維の付着性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.345-346, 2012.9
- 3) 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
- 4) 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