

平成 27 年度

筑波大学工学システム学類卒業研究論文

繊維補強セメント複合材料における
スチールワイヤの架橋性能に関する研究

橋本 裕子

学籍番号： 201211170

(環境開発工学主専攻)

指導教員 金久保 利之

平成 28 年 3 月

繊維補強セメント複合材料における スチールワイヤの架橋性能に関する研究

論 文 概 要

セメント系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引張靱性能が向上する。しかしながら、FRCC の引張性能は、試験方法の困難さや基礎的性状のバックデータ不足に起因して未解明な点が多く、性能の定量的評価が困難となっていることから、現状では構造体の設計に生かされていない。

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支配される。直接的に引張性能を求める一軸引張試験を FRCC に対して実施することは非常に困難を伴うため、架橋則を用いて繊維の架橋性能から FRCC の引張性能を精確に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 の適用範囲の拡大につながる。

本研究では、スチールワイヤ（比較的細径の表面が滑らかな鋼繊維）を対象として架橋則の最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、繊維の架橋性能から FRCC の引張性能を評価するための検討を行った。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 の一軸引張試験結果と比較することで架橋則の適合性を検証した。続いて、架橋則を考慮した断面解析を行って曲げ性能を評価し、FRCC の曲げ試験結果と比較することで、FRCC の曲げ性能に対する架橋則の適用性について検討した。

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、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することで、繊維の架橋性能に基づく FRCC の引張性能を評価し、FRCC の一軸引張試験結果を概ね再現できた。さらに、繊維の配向性を考慮した架橋則を用いて断面解析を行うことで、FRCC の曲げ試験結果を概ね表現することができた。

繊維補強セメント複合材料における
スチールワイヤの架橋性能に関する研究

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 繊維補強セメント複合材料.....	1
1.2 FRCC の引張性能評価.....	2
1.3 単繊維拔出し挙動.....	3
1.3.1 繊維-マトリクス間の付着性状.....	3
1.3.2 繊維配向角の影響.....	4
1.4 研究目的.....	5
1.5 研究の流れ.....	6
第2章 使用材料.....	7
2.1 スチールワイヤ.....	7
2.1.1 単繊維引張試験.....	8
2.1.2 繊維の性能確認および治具の影響評価.....	9
2.2 マトリクス.....	11
第3章 引張性能に対する架橋則の適合性.....	12
3.1 はじめに.....	12
3.2 試験概要.....	13
3.2.1 単繊維引抜試験.....	13
3.2.2 一軸引張試験.....	15
3.3 試験結果.....	16
3.3.1 単繊維引抜試験.....	16
3.3.2 一軸引張試験.....	23
3.4 架橋則の構築.....	25
3.4.1 単繊維拔出し挙動のモデル化.....	25
3.4.2 架橋則構築方法.....	28
3.4.3 構築した架橋則と一軸引張試験結果の比較.....	30
3.5 まとめ.....	31
第4章 架橋則を用いた曲げ性能評価.....	32
4.1 はじめに.....	32
4.2 試験概要.....	33
4.2.1 単繊維引抜試験.....	33
4.2.2 曲げ試験.....	34
4.3 試験結果.....	36

4.3.1 単繊維引抜試験.....	36
4.3.2 曲げ試験.....	41
4.4 断面解析.....	47
4.4.1 架橋則モデル.....	48
4.4.2 繊維配向性と架橋則の関連性.....	49
4.4.3 FRCC の応力-ひび割れ幅関係のモデル化.....	53
4.4.4 繊維配向性と解析結果の関連性.....	55
4.4.5 解析結果と曲げ試験結果の比較.....	59
4.5 まとめ.....	63
第5章 結論.....	64
5.1 研究のまとめ.....	64
5.2 今後の課題.....	64
謝辞.....	65
参考文献.....	66
付録 一軸引張試験および曲げ試験結果詳細.....	67

第1章 序論

1.1 繊維補強セメント複合材料

コンクリートは引張応力下において脆性的な破壊性状を示す材料であり、コンクリートの引張靱性を改善するため、モルタルやコンクリート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）の研究が多数行われている。FRCCでは、ひび割れの発生に伴い、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（図 1-1）。FRCC に用いられる繊維としては、鋼繊維やポリビニルアルコール（PVA）繊維、ポリプロピレン（PP）繊維、アラミド繊維といった有機繊維などが代表的である。近年では、従来よりも細径の繊維を利用し、繊維がひび割れを細かく架橋することで、さらなる引張靱性の改善が目指されている。

FRCC を構造部材に適用した場合、FRCC のひび割れ発生抑制や引張性能を生かすことで、建築物の耐久性の向上や高寿命化が見込まれるが、現状ではその適用例は少ない。適用が進まない大きな要因としては、FRCC の性能評価の難しさが挙げられる。FRCC の引張性能を直接把握する方法として、一軸引張試験が考えられるが、明確な FRCC の一軸引張試験方法は確立されておらず、試験体の製作および加力も非常に困難なものとなっている。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、FRCC の特長である引張性能のメカニズムに未解明な点が多く、性能の定量的評価が困難となっているのである。



図 1-1 FRCC におけるひび割れ開口抑制（左：切欠き梁曲げ試験時，右：引張試験時）

1.2 FRCC の引張性能評価

FRCC の引張性能は、架橋応力を開口変位の関数でモデル化した架橋則により評価することができる。架橋則は単繊維－マトリクス間の引抜性状を基本とし、その性状をひび割れ面に架橋する多数の繊維分総和することによって、構築が可能となる。

FRCC の引張性能評価の流れを図 1-2 に示す。構造部材に FRCC を適用するにあたっては、単繊維の引抜挙動から架橋則を構築し、構築した架橋則からひび割れ面に架橋する繊維の引張性能を評価した後、構造部材における応力－歪関係といった巨視的な材料挙動に、得られた FRCC の引張性能を適用するという流れを踏むことになる。FRCC の特性を適切に評価するためには、各段階における性能評価を精確に行うことが求められ、中でも単繊維の引抜挙動から構築される架橋則は、FRCC の引張性能評価の流れにおいて最も基本となるものである。架橋則を説明することによって、マトリクスに繊維を混入させることで得られる引張性能の向上効果が、部材の構造性能に与える影響を正しく評価することができ、FRCC の適用分野のさらなる拡大が見込まれる。繊維やマトリクスの種類によって大きく異なる FRCC の性能を表現するためには、対象とする FRCC に対してそれぞれ架橋則を構築する必要があり、今後様々な FRCC に対するデータの蓄積が待たれている。

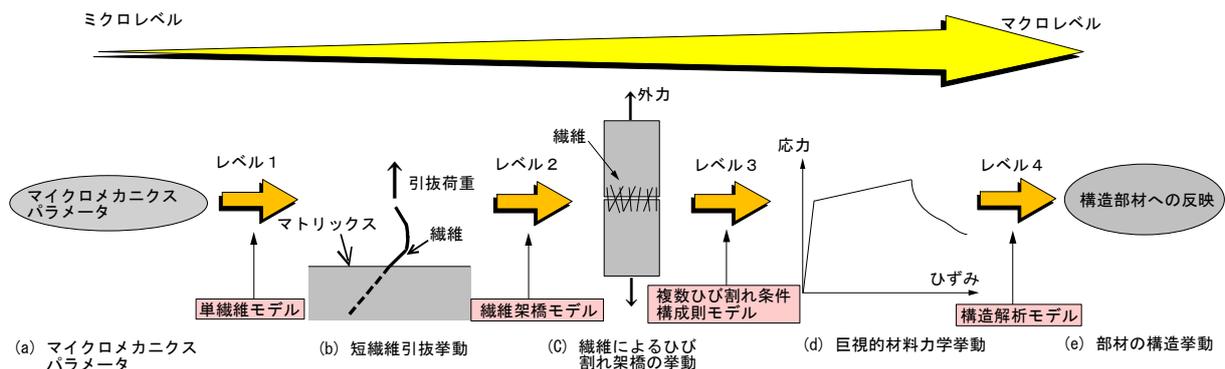


図 1-2 FRCC の引張性能評価の流れ¹⁾

1.3 単繊維拔出し挙動

架橋則の基本となる単繊維の拔出し挙動について、繊維-マトリクス間の付着性状および繊維配向角の影響が考えられる。

1.3.1 繊維-マトリクス間の付着性状

マトリクスに埋め込まれた繊維が引張力を受ける場合、繊維は付着を介して、せん断応力をマトリクスに伝達することで抵抗する。繊維-マトリクス間の付着の様子を図 1-3 に示す。繊維-マトリクス間の付着には、繊維-マトリクス界面における摩擦付着や、主に有機繊維とマトリクス間で生じる化学的な付着である化学付着が知られており、その性状は繊維やマトリクスの種類によって大きく異なる²⁾。付着性状は、単繊維引抜試験を行い、引抜荷重とひび割れ幅と関係するすべり量(図 1-4)を実験的に得ることで、直接把握することが可能である。しかしながら、単繊維引抜試験を行った研究は今までに必ずしも多くは報告されておらず、標準的な試験方法も存在しない。特に、近年注目されている細径の繊維に関しては試験体作製も難しく、情報は限られている。

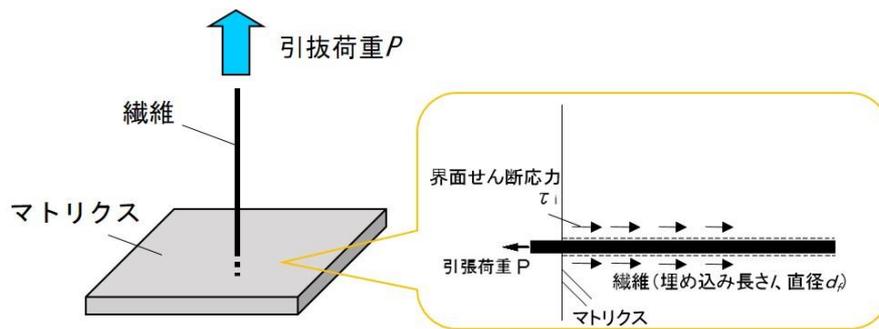


図 1-3 繊維-マトリクス間の付着

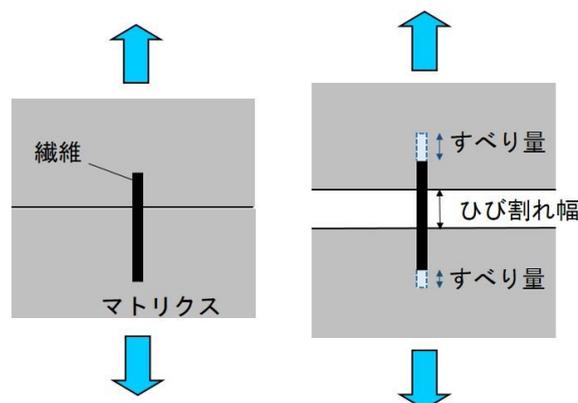


図 1-4 ひび割れ幅とすべり量の関係

1.3.2 繊維配向角の影響

実際の FRCC 内部では、繊維は様々な方向に配向しており、その配向角によって引抜抵抗力が変化するため、ひび割れ面に対する繊維配向角を考慮する必要がある。

図 1-5 に示すように繊維が配向角を有する場合には、埋め込み口部でのマトリクスからの反力の存在があり、反力を受ける部分での界面摩擦が強化され、全体的に引抜抵抗力が向上することが知られている。このような配向角を有する際の引抜抵抗力の増大は、スナビング効果と呼ばれる。スナビング効果は配向角が大きいほど増大するとされ、最大引抜荷重について増加の程度を示す指標としてスナビング係数を用い、実験式として式(1.1)で表現される³⁾。スナビング係数を実験的に求めた既往の研究は限られており、ポリビニルアルコール (PVA) 繊維、ポリエチレン (PE) 繊維、ナイロン繊維、ポリプロピレン (PP) 繊維、アラミド繊維について報告がある⁴⁾。

$$P = P_0 \cdot e^{f \cdot \theta} \quad (1.1)$$

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

θ : 配向角

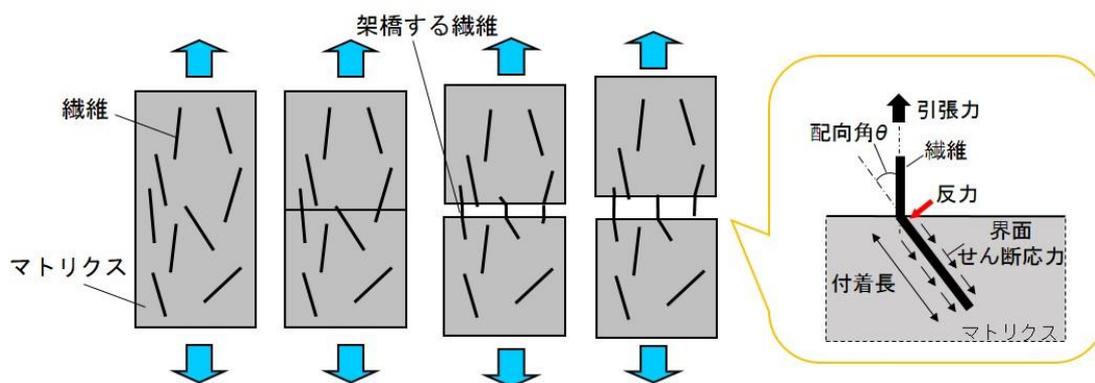


図 1-5 繊維配向角の影響

1.4 研究目的

FRCC の引張性能を構造部材に適用するには、FRCC の引張性能を適切に評価し、構造性能に反映する必要がある。FRCC の引張性能評価の流れの中で、架橋則（繊維架橋応力-ひび割れ幅関係）は繊維の架橋性能と FRCC の部材としての構造性能を結び付けるものであり、非常に重要な性能評価手法である。架橋則を用いて、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、その適用範囲の拡大が見込まれる。このような架橋則に対しては、単繊維の拔出し挙動から構築される架橋則が FRCC の引張性能を正しく表現していること、および、架橋則を適用することによって、FRCC の引張性能が構造性能に与える影響を精確に評価できることが求められる。

本研究では、架橋則の最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、繊維の架橋性能から FRCC の引張性能を評価するための検討を行う。破断することがなく、架橋則の構築および評価が比較的容易な細径のスチールワイヤを対象として、単繊維引抜試験から拔出し挙動を直接把握して架橋則の構築を行い、くびれ型供試体を用いた FRCC の一軸引張試験結果と比較することで架橋則の適合性を検証する。続いて、単繊維の拔出し挙動から構築される架橋則により、FRCC の引張性能を考慮して断面解析を行い、FRCC の曲げ試験結果と比較することで、FRCC の曲げ性能評価に対する架橋則の適用性について検討を行う。

1.5 研究の流れ

本研究では、繊維の架橋性能から FRCC の引張性能を評価するため、引張性能評価に対する架橋則の有用性について検討することを目的としている。まず初めに、単繊維の拔出し挙動から構築された架橋則により、FRCC の引張性能を精確に表現できるか、FRCC の引張性能に対する架橋則の適合性を検証する。続いて、架橋則により表現される引張性能を考慮した断面解析を行い、曲げ性能を表現することで、曲げ性能評価に対する架橋則の適用性について検討を行う。

架橋則の適合性に対しては、単繊維引抜試験結果および一軸引張試験を実施し、単繊維引抜試験結果より単繊維拔出し挙動を把握して構築される架橋則と、FRCC の一軸引張試験結果を比較することで検証する。

曲げ性能評価に対する架橋則の適用性に対しては、単繊維引抜試験および曲げ試験を実施し、単繊維引抜試験結果より構築される架橋則を考慮して断面解析を行うことで、解析により得られる曲げ性能と、FRCC の曲げ試験結果を比較することで検討する。

第2章 使用材料

2.1 スチールワイヤ

本研究で使用したスチールワイヤの物性（メーカー公称値）を表 2-1 に示す。ブラスめっきされた高強度スチールワイヤで、タイヤやクローラの補強に用いられるスチールコードは、スチールワイヤを多数本撚り合わせて製造される。スチールワイヤの表面は平滑で、コンクリートに混入する際には、10 数 mm にカットされて用いられることが多い。一軸引張試験および曲げ試験において、試験体を作製する際に混入するスチールワイヤの繊維長は 13mm である。

表 2-1 繊維物性（メーカー公称値）

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

2.1.1 単繊維引張試験

研究の事前準備として、スチールワイヤの単繊維引張試験を行った。スチールワイヤの単繊維引張試験を行い、試験結果を表 2-1 に示すメーカー公称値と比較することで繊維の性能を確認するとともに、加力装置治具が単繊維引抜試験に及ぼす影響を明らかにしておく。

加力には図 2-1 に示す万能ネジ式卓上試験機を使用し、加力装置の治具で直接スチールワイヤ単繊維をつかみ、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、境界条件はピンー固定である。引張荷重は容量 200N のロードセル、変位は試験機のヘッド間距離からそれぞれ試験機より出力される電圧を介して検出した。試験を行う繊維の長さは、単繊維引張試験では繊維両端に治具があるのに対し、単繊維引抜試験（第 3 章参照）では荷重端側のみとなることを考慮し、単繊維引抜試験の試験体における試験区間外の繊維長さの 2 倍とした。

単繊維引抜試験の試験体における、試験区間外の繊維長さを 2 種類設定したため、それぞれに対して試験本数は 10 本として、単繊維引張試験を行った。

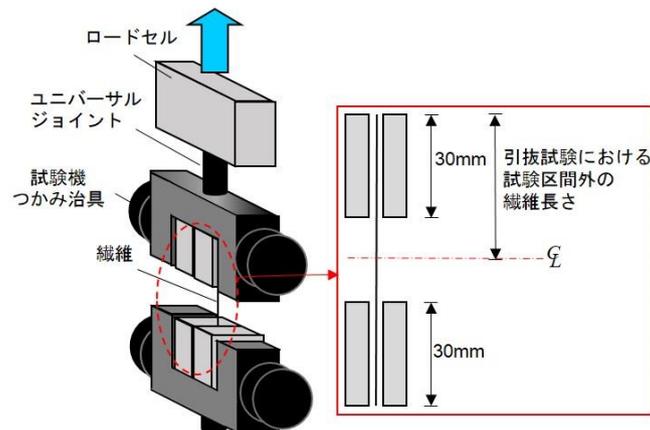


図 2-1 単繊維引張試験加力装置

2.1.2 繊維の性能確認および治具の影響評価

単繊維引張試験により得られた引張強度を表 2-2 に示す。繊維は、繊維長さ 80mm とした試験における 1 本目を除いて全て破断し、繊維の破断箇所は、上部もしくは下部の、つかみ治具との境目であった。引張強度は、表 2-1 に示すメーカー公称値 (=2825MPa) よりわずかに小さい値となった。これは、メーカーの性能評価方法と異なる試験方法によって引張試験を行っているためであると考えられる。

実験により得られた引張荷重および変位を、応力および歪（つかみ治具間の繊維長さで除することにより算出）に変換して求めた応力-歪関係より弾性係数を得ることができるが、その値はメーカー公称値 (=210GPa) とは一致しない。これは、試験機つかみ治具全体ですべてなく繊維をつかむことは困難であり、実験によって得られる変形にはつかみ治具間の繊維長さにおける伸びに加えて、治具内での伸びの影響が含まれているためである。そこで、メーカー公称値を参照値とし、実験結果より得られる弾性係数がメーカー公称値と等価となるような試験区間の長さ（弾性変形仮定長さ） L_0 を算出した。算出した弾性変形仮定長さ L_0 を表 2-2 に示す。加力装置治具が単繊維引抜試験に及ぼす影響を補正する際は、算出した弾性変形仮定長さ L_0 の平均値を用いる。単繊維引張試験では繊維両端に治具があるのに対し、本試験である引抜試験では荷重端側のみであることを考慮し、単繊維引抜試験においては弾性変形仮定長さ L_0 の半分の長さを用いる（図 2-2）。

本試験である単繊維引抜試験において得られる変位に含まれる、埋込領域外における伸び δ は、単繊維引張試験より求めた弾性変形仮定長さ L_0 を用い、式(2.1)および式(2.2)によってマトリクスと繊維の相対変位（荷重端すべり量）に補正する。

$$s = x - \delta \quad (2.1)$$

$$\delta = \frac{P}{E_f \cdot A_f} \left(\frac{L_0}{2} \right) \quad (2.2)$$

ここで、

s : すべり量

x : ヘッド間変位

δ : 埋込領域外での伸び

P : 引抜荷重

E_f : 繊維の弾性係数

A_f : 繊維断面積

L_0 : 単繊維引張試験により求めた弾性変形仮定長さ

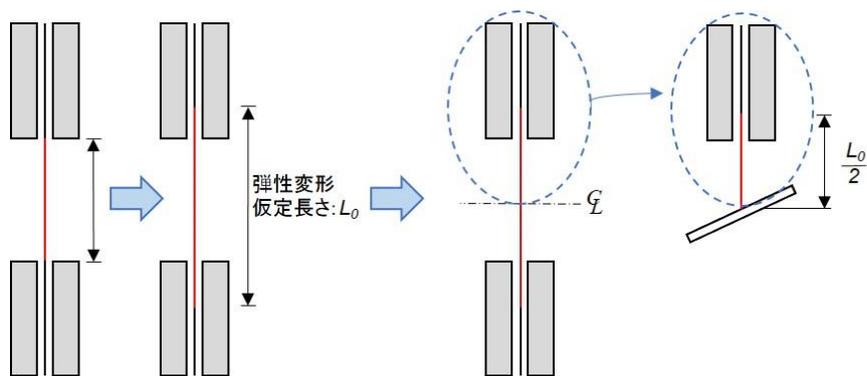


図 2-2 治具による影響の補正の流れ

表 2-2 単繊維引張試験結果による弾性変形仮定長さ

試験体番号	繊維長さ (=2×試験区間外の繊維長さ)			
	80mm (=2×40mm)		110mm (=2×55mm)	
	引張強度 (MPa)	L_0 (mm)	引張強度 (MPa)	L_0 (mm)
tensile-1	2512	41.8	2550	73.0
tensile-2	2629	49.8	2384	77.0
tensile-3	2718	36.7	2560	76.0
tensile-4	2672	38.6	2427	74.2
tensile-5	2728	40.8	2570	70.6
tensile-6	2704	40.3	2418	73.1
tensile-7	2639	41.7	2502	72.0
tensile-8	2574	46.6	2654	75.5
tensile-9	2569	51.6	2389	72.1
tensile-10	2732	38.9	2413	71.0
平均値	2648	42.7	2487	73.5

2.2 マトリクス

マトリクスの調合計画を表 2-3 に、本研究で用いた各試験体のマトリクス圧縮特性を表 2-4 に示す。超高強度コンクリートマトリクスについて、フレッシュ性状を表 2-5 に示す。マトリクスは、架橋則の適合性を確認する際は基礎的特性を得るためにモルタルとし、曲げ性能評価に対する架橋則の適用性を検討する際は、実際の構造物における FRCC 利用を考慮し、脆性的な破壊を防止するためスチールワイヤが混入されることが多い超高強度コンクリートとした。ただし、超高強度コンクリートを用いた単繊維引抜試験においては、試験体作製を可能とするため、粗骨材を混入する前のマトリクスを用いた。

表 2-3 マトリクスの調合

マトリクス種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	G	S	FA	Ad
モルタル	56.0	380	678	-	484	291	6
超高強度コンクリート	16.5	175	1061	594*	610	-	22.3

*：単繊維引抜試験 C(PO)においては除く

表 2-4 試験体マトリクス圧縮特性

マトリクス種類	試験	シリーズ名称	繊維体積混入率 V_f (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
モルタル	単繊維引抜 1	M(PO1)	-	36.1*	13.7*
	単繊維引抜 2 ⁺	M(PO2)	-	29.8*	14.6*
	一軸引張 ⁺	M(T)	1.0	56.8**	18.7**
			2.0	59.2**	19.6**
超高強度コンクリート	単繊維引抜 ⁻	C(PO)	-	106*	43.8*
	曲げ ⁻	C(B)	0.5	167**	44.6**
			1.0	172**	44.7**

+ , - : 同一バッチ

M : モルタル, C : 超高強度コンクリート

PO : 単繊維引抜試験, T : 一軸引張試験, B : 曲げ試験

* : Φ 50-100mm シリンダー圧縮試験結果

** : Φ 100-200mm シリンダー圧縮試験結果

表 2-5 超高強度コンクリートマトリクスのフレッシュ性状

マトリクス種類	繊維体積混入率 V_f (%)	空気量 (%)	フロー値 (mm)	コンクリート温度 (°C)
超高強度コンクリート	0.5	0.9	745×744	36.0
	1.0	1.2	602×523	35.0

第3章 引張性能に対する架橋則の適合性

3.1 はじめに

FRCC の引張性能に対する架橋則の適合性を検証するため、対象とするマトリクスをモルタルとして、単繊維引抜試験および一軸引張試験を行った。単繊維引抜試験より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比較することで、FRCC の引張性能を架橋則により精確に表現できているか検証する。

3.2 試験概要

3.2.1 単繊維引抜試験

単繊維引抜試験は、配向角を0度としたM(PO1)シリーズと配向角を0, 15, 30, 45, 60度としたM(PO2)シリーズに対して行った。引抜試験体諸元を表3-1に示す。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。パラメータは、繊維マトリクス間の付着長(2, 4, 6mm)および繊維のマトリクスに対する配向角(0, 15, 30, 45, 60度)である。

試験体および型枠形状を図3-1に示す。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⁵⁾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。ゴム板中心には極小の穴が明けられており、その穴に繊維を通しゴム板を貫通させることで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。

加力方法を図3-2に示す。加力には万能ネジ式卓上試験機を使用し、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。

表 3-1 単繊維引抜試験体 M(PO1), M(PO2)諸元一覧

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

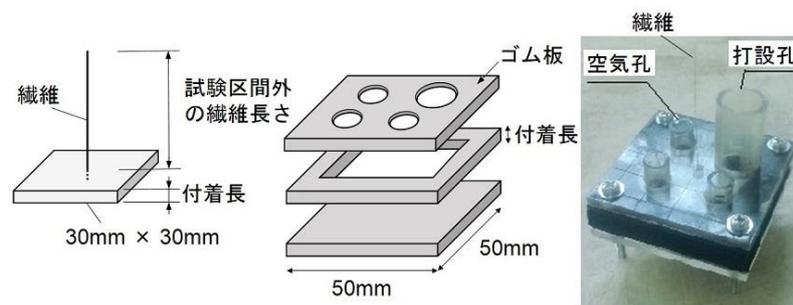


図 3-1 引抜試験体および型枠形状

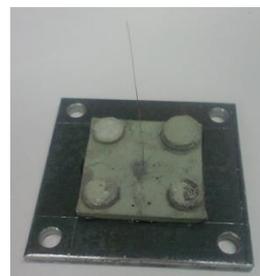
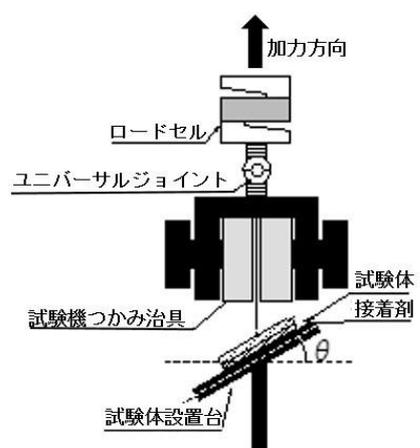


図 3-2 単繊維引抜試験加力方法（左：加力の様子，右：鋼板に固定した試験体）

3.2.2 一軸引張試験

一軸引張試験体諸元を表 3-2 に示す。モルタルバッチとしては M(PO2)シリーズと対応しており、試験体数は繊維体積混入率 1.0, 2.0% に対して各 6 体とした。試験体および型枠形状を図 3-3 に示す。試験体形状は既往の研究⁶⁾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。

加力時の様子を図 3-3 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载荷を行った。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⁷⁾。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。

表 3-2 一軸引張試験体 M(T)諸元一覧

シリーズ名称	パラメータ	試験体数
	繊維体積混入率 V_f (%)	
M(T)1.0	1.0	6
M(T)2.0	2.0	6

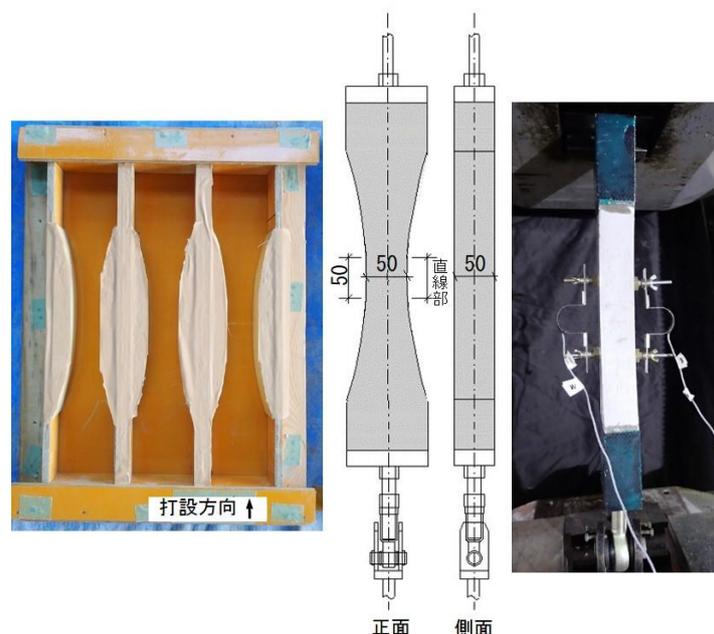


図 3-3 引張試験体型枠，形状および加力時の様子

3.3 試験結果

3.3.1 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 3-4～図 3-7 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を差し引くことで求めた(2.1.2節参照)。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。各試験における、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 の実験値を表 3-3～表 3-6 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。

拔出し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 M(PO1)シリーズの結果を用い、M(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時に用いる。

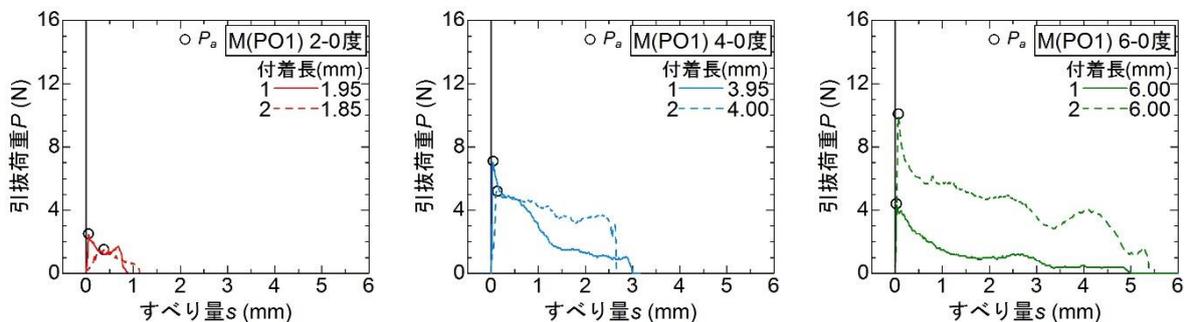


図 3-4 単繊維引抜試験結果 (M(PO1)シリーズ)

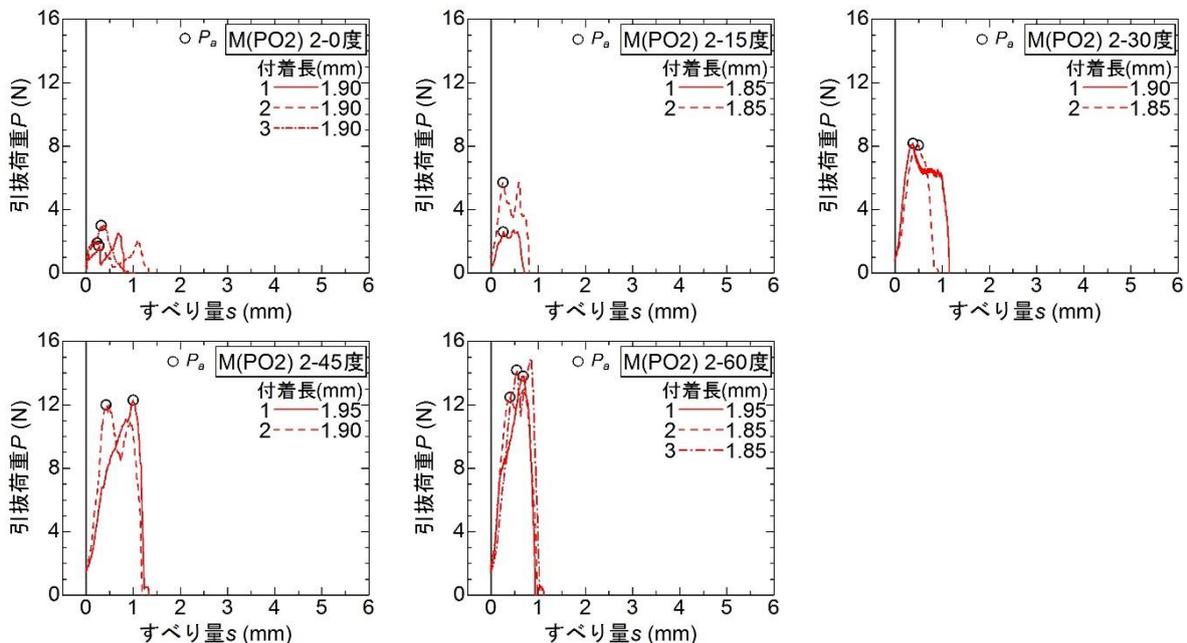


図 3-5 単繊維引抜試験結果 (M(PO2)シリーズ : 付着長 2mm)

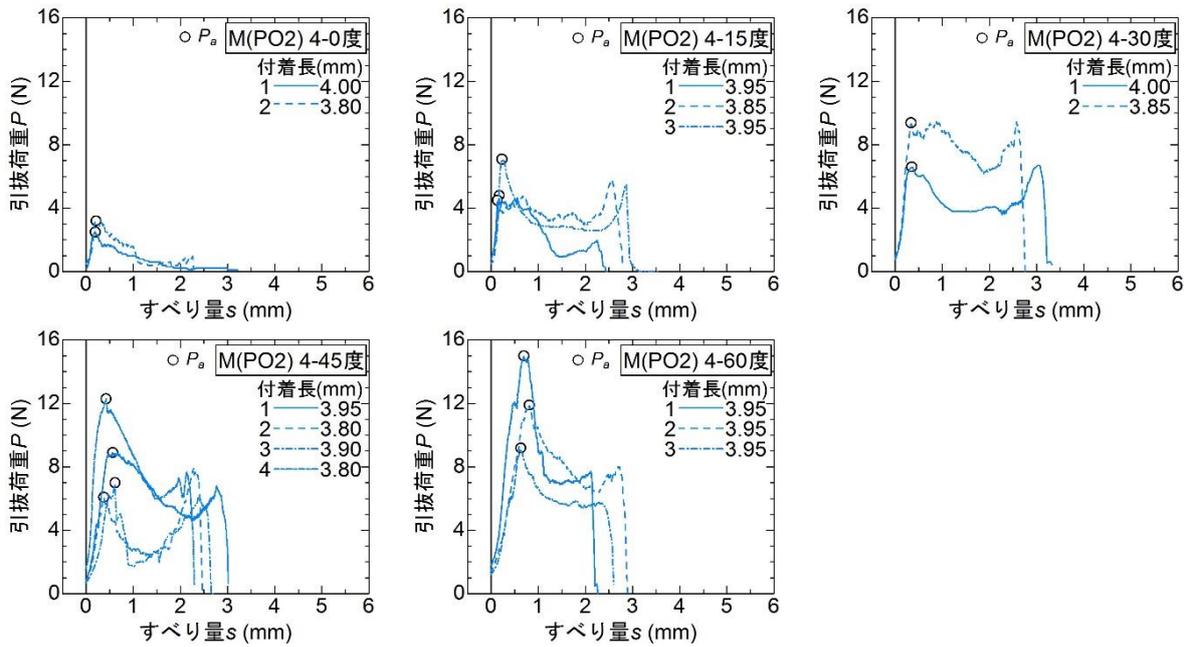


図 3-6 単繊維引抜試験結果 (M(PO2)シリーズ : 付着長 4mm)

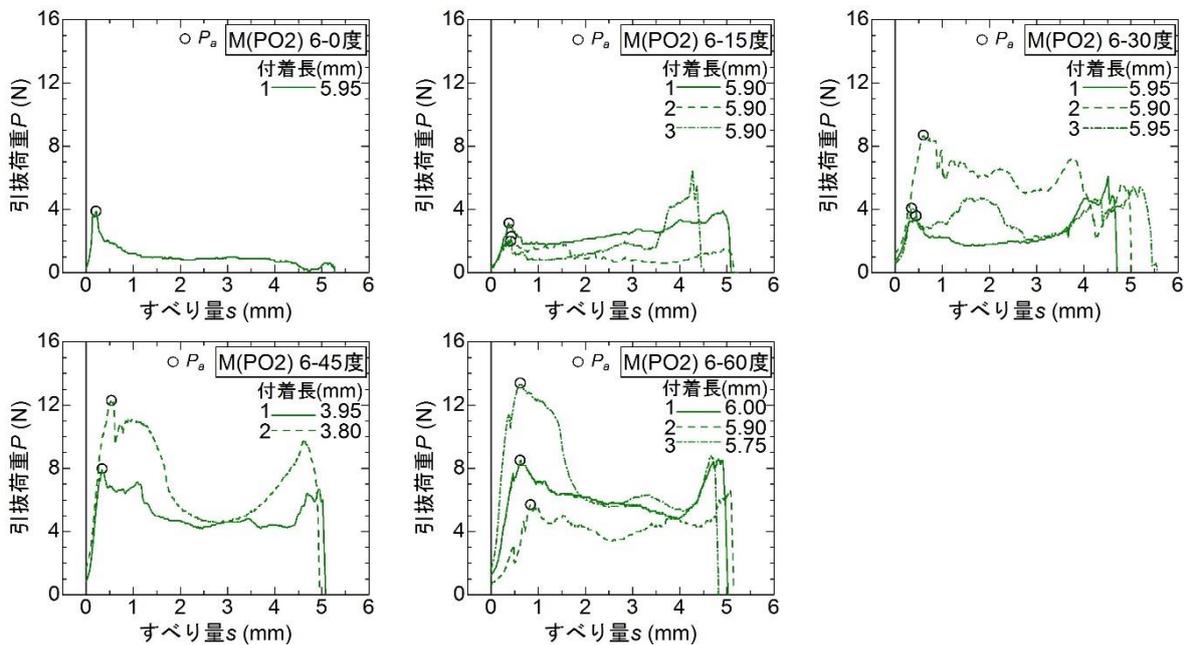


図 3-7 単繊維引抜試験結果 (M(PO2)シリーズ : 付着長 6mm)

表 3-3 単繊維引抜試験結果 (M(PO1)シリーズ)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
M(PO1)2-0-1	2	1.95	0	2.50	0.052
M(PO1)2-0-2		1.85		1.50	0.378
M(PO1)4-0-1	4	3.95		7.09	0.041
M(PO1)4-0-2		4.00		5.19	0.134
M(PO1)6-0-1	6	6.00		4.40	0.025
M(PO1)6-0-2		6.00		10.1	0.071

例)

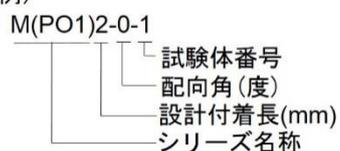


表 3-4 単繊維引抜試験結果 (M(PO2)シリーズ : 付着長 2mm)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
M(PO2)2-0-1	2	1.90	0	1.69	0.277
M(PO2)2-0-2		1.90		1.88	0.239
M(PO2)2-0-3		1.90		2.98	0.321
M(PO2)2-15-1		1.85	15	2.59	0.256
M(PO2)2-15-2		1.85		5.69	0.252
M(PO2)2-30-1		1.90	30	8.18	0.380
M(PO2)2-30-2		1.85		8.05	0.495
M(PO2)2-45-1		1.95	45	12.3	0.999
M(PO2)2-45-2		1.90		12.0	0.426
M(PO2)2-60-1		1.95	60	13.8	0.681
M(PO2)2-60-2		1.85		12.5	0.400
M(PO2)2-60-3		1.85		14.2	0.543

表 3-5 単繊維引抜試験結果 (M(PO2)シリーズ : 付着長 4mm)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
M(PO2)4-0-1	4	4.00	0	2.49	0.195
M(PO2)4-0-2		3.80		3.20	0.210
M(PO2)4-15-1		3.95	15	4.50	0.136
M(PO2)4-15-2		3.85		4.79	0.173
M(PO2)4-15-3		3.95		7.09	0.232
M(PO2)4-30-1		4.00	30	9.38	0.352
M(PO2)4-30-2		3.85		9.50	0.338
M(PO2)4-45-1		3.95	45	8.89	0.565
M(PO2)4-45-2		3.80		6.08	0.376
M(PO2)4-45-3		3.90		6.99	0.615
M(PO2)4-45-4		3.80		12.28	0.425
M(PO2)4-60-1		3.95	60	15.00	0.696
M(PO2)4-60-2		3.95		11.89	0.810
M(PO2)4-60-3		3.95		9.18	0.629

表 3-6 単繊維引抜試験結果 (M(PO2)シリーズ : 付着長 6mm)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
M(PO2)6-0-1	6	5.95	0	3.88	0.210
M(PO2)6-15-1		5.90	15	3.13	0.379
M(PO2)6-15-2		5.90		1.98	0.413
M(PO2)6-15-3		5.90		2.27	0.429
M(PO2)6-30-1		5.95	30	4.49	0.431
M(PO2)6-30-2		5.90		8.70	0.600
M(PO2)6-30-3		5.95		4.08	0.349
M(PO2)6-45-1		5.90	45	7.98	0.340
M(PO2)6-45-2		5.85		12.29	0.540
M(PO2)6-60-1		6.00	60	8.50	0.615
M(PO2)6-60-2		5.90		5.69	0.837
M(PO2)6-60-3		5.75		13.38	0.620

(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。M(PO1)シリーズの結果について、各付着長における引抜荷重-すべり量を比較したものを図 3-8 に、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 をまとめたものを表 3-7 に示す。

図 3-8 に示す試験結果より、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 3-7 に示す平均値を採用し、後述する単繊維拔出し挙動のモデル化の際に用いる。

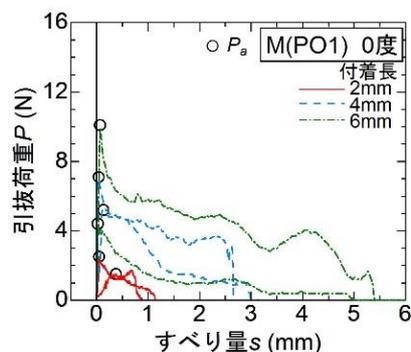


図 3-8 繊維-マトリクス間の付着性状 (M(PO1)シリーズ : 配向角 0 度)

表 3-7 単位付着長あたりのピーク時荷重および引抜剛性の算出 (M(PO1)シリーズ)

試験体名	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)
M(PO1)2-0-1	1.95	2.50	0.052	1.28	1.27	47.7	96.1
M(PO1)2-0-2	1.85	1.50	0.378	0.81		3.95	
M(PO1)4-0-1	3.95	7.09	0.041	1.80		171	
M(PO1)4-0-2	4.00	5.19	0.134	1.30		38.6	
M(PO1)6-0-1	6.00	4.40	0.025	0.73		173	
M(PO1)6-0-2	6.00	10.1	0.071	1.68		142	

(2) 繊維配向角の影響

M(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 3-9 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。スナビング効果の機構を図 3-10 に示す。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（図 3-11）、その形状を保ったまま引抜かれて荷重が低下し、形状が延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 ピーク点が見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、以下、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 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(3.1)で評価される³⁾。式(3.1)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 の関係を付着長ごとにまとめたものを図 3-12 に示す。図中の曲線は式(3.1)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 3-12 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くなる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 に繊維抜け出し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 3-13 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、後述する単繊維抜け出し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。

$$P = P_0 \cdot e^{f \cdot \theta} \quad (3.1)$$

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

θ : 配向角

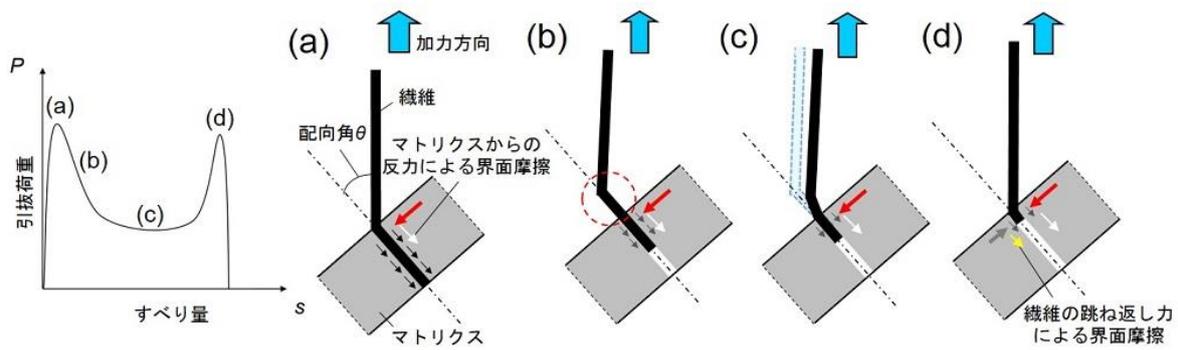


図 3-9 配向角を有する際の拔出し挙動

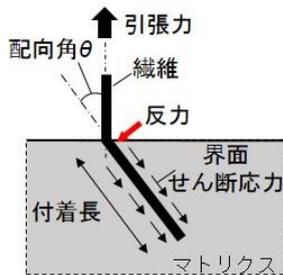


図 3-10 スナビング効果

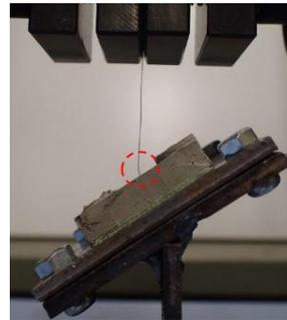


図 3-11 配向角の形状が残った繊維

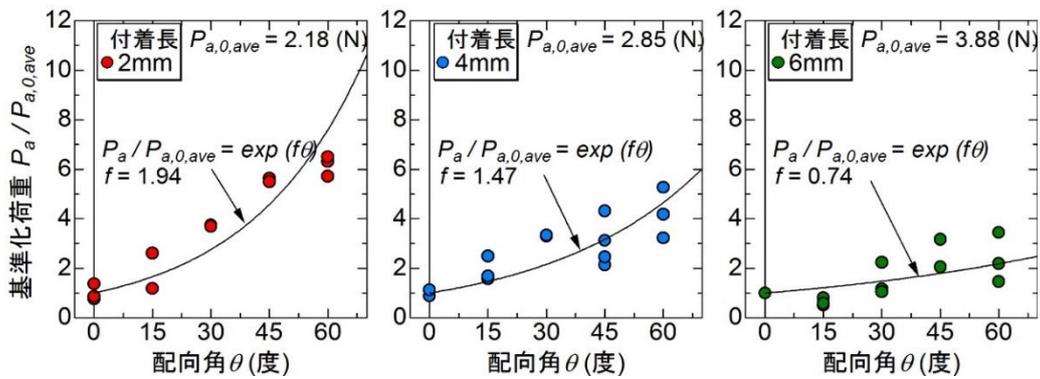


図 3-12 各付着長に対するスナビング係数 (M シリーズ)

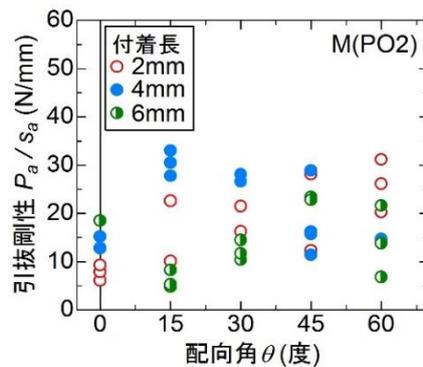


図 3-13 引抜剛性—配向角関係 (M シリーズ)

3.3.2 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 3-14 に、一軸引張試験結果一覧を表 3-8 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。

繊維体積混入率に対する試験結果の比較を図 3-15 に示す。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。

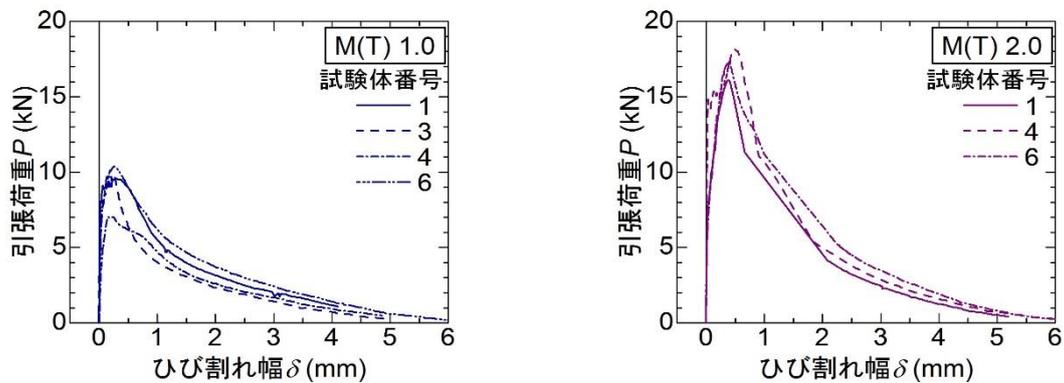


図 3-14 一軸引張試験結果（左：繊維体積混入率 $V_f = 1.0\%$ ，右： $V_f = 2.0\%$ ）

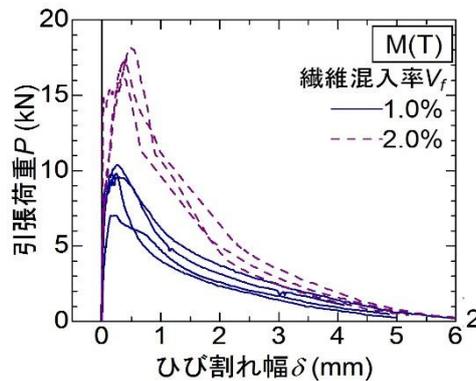


図 3-15 繊維体積混入率に対する試験結果の比較

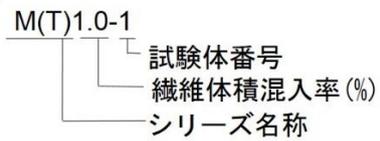
表 3-8 一軸引張試験結果

試験体名	繊維体積 混入率 V_f (%)	最大荷重 (kN)	平均値 (kN)	最大荷重時 ひび割れ幅 (mm)	平均値 (mm)
M(T)1.0-1	1.0	9.57	9.21	0.286	0.239
M(T)1.0-2		_*		_*	
M(T)1.0-3		9.83		0.255	
M(T)1.0-4		7.05		0.162	
M(T)1.0-5		_**		_**	
M(T)1.0-6		10.38		0.253	
M(T)2.0-1	2.0	16.11	17.2	0.388	0.419
M(T)2.0-2		_**		_**	
M(T)2.0-3		_**		_**	
M(T)2.0-4		18.18		0.472	
M(T)2.0-5		_**		_**	
M(T)2.0-6		17.28		0.397	

* : 加力準備時に破損

** : 圧縮変形が計測され、曲げ変形が卓越した

例)



3.4 架橋則の構築

3.4.1 単繊維拔出し挙動のモデル化

(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 (3.2), (3.3) で示す付着長に比例する式で定義し、繊維－マトリクス間の付着性状を表現する。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 (3.3) で評価する。

表 3-7 に示す単繊維引抜試験 M(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、 $\delta_{a,0,l}=0.03\text{mm/mm}$ ($\doteq 1.27 \div 96.1 \times 2$) と設定した。

$$P_{a,0} = P_{a,0,l} \cdot l_b \quad (3.2)$$

$$\delta_{a,0} = \delta_a = \delta_{a,0,l} \cdot l_b \quad (3.3)$$

ここで、

l_b : 付着長 (=ひび割れ面に対する埋込長)

$P_{a,0,l}$: 配向角 0 度、単位付着長あたりのピーク時荷重

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

(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なり、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(3.4)で表す。式(3.4)により求めたスナビング係数 f を用いて、式(3.5)により引抜荷重 P_a を表現する。

図 3-12 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 3-16 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。

$$f = f_0 + f_1 \cdot l_b \quad (3.4)$$

ここで、

f_0, f_1 : 定数

ただし、 $f < 0$ の時 $f = 0$ (本研究で扱っている繊維長は 13mm であり、理論上付着長が 6.5mm を超える場合は起こらない)

$$P_a = P_{a,0} \cdot e^{f \cdot \theta} \quad (3.5)$$

ここで、

$P_{a,0}$: 配向角 0 度におけるピーク時荷重

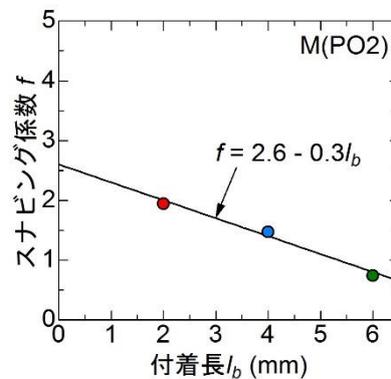


図 3-16 スナビング係数－付着長関係 (M シリーズ)

(3) 単繊維の架橋モデル

式(3.2)～(3.5)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を式(3.6)に、単繊維の架橋モデルの模式図を図 3-17 に示す。配向角 0 度の引抜試験結果より、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、繊維の拔出に伴って徐々に荷重が減少していくという挙動を簡易に表現するために、バイリニアモデルを採用した。引抜荷重はひび割れ幅が付着長 (=ひび割れ面に対する埋込長) に達した時に 0 とする。

$$P_{ij}(\delta, \theta, l_b) = \begin{cases} \frac{P_a}{\delta_a} \cdot \delta & (\delta \leq \delta_a) \\ P_a - \frac{P_a}{l_b - \delta_a} \cdot (\delta - \delta_a) & (\delta_a < \delta) \end{cases} \quad (3.6)$$

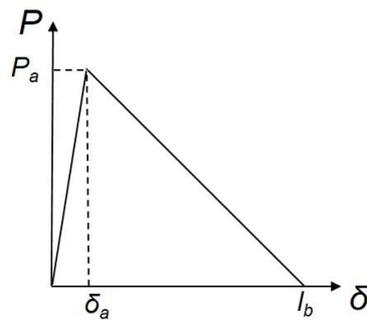


図 3-17 単繊維の架橋モデル

3.4.2 架橋則構築方法

架橋則の構築を、図 3-18 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⁸⁾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⁸⁾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 における架橋力は単繊維の引抜荷重の総和として、式 (3.7) によって得られる⁸⁾。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。

単繊維架橋モデルに入力するパラメータを表 3-9 に示す。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 $\theta=0$ 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⁶⁾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 $k=15$ を用いた。本研究で採用した繊維配向角分布を図 3-19 に示す。

$$P(\delta) = \sum_h \sum_i \sum_j \{ N_f \cdot P_{ij}(\delta, \psi, l_b) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_j) \cdot p_d(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot \Delta A \} \quad (3.7)$$

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

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

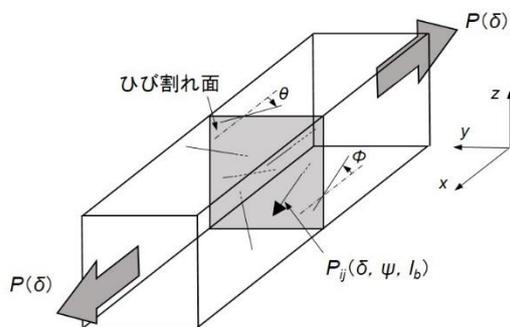


図 3-18 ひび割れ面を架橋する繊維群

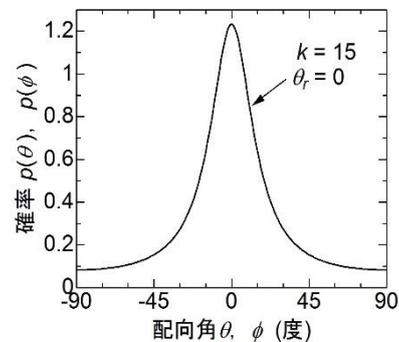


図 3-19 繊維配向角分布 ($k=15$)

表 3-9 架橋則モデルへの入力値 (M シリーズ)

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 $P_{a,0,1}$ (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 $\delta_{a,0,1}$ (mm/mm)	0.03
f_0 (スナビング係数 $f = f_0 + f_l \cdot l_b$)	2.6
f_l (スナビング係数 $f = f_0 + f_l \cdot l_b$)	-0.3
繊維長 l_f (mm)	13

3.4.3 構築した架橋則と一軸引張試験結果の比較

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 3-20 に示す。架橋則は試験結果の挙動を概ね表現できている。

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、繊維のひび割れ面に対する埋込長によって異なり、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、繊維拔出しによる架橋力の喪失が平衡する際に最大引張応力に達する（図 3-21）。架橋則により得られた最大引張応力は、繊維体積混入率 1.0%、2.0% に対してそれぞれ 3.14MPa および 6.28MPa であり、ひび割れ幅 0.18mm 時に算出された。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。その後繊維の拔出しが進行し、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。

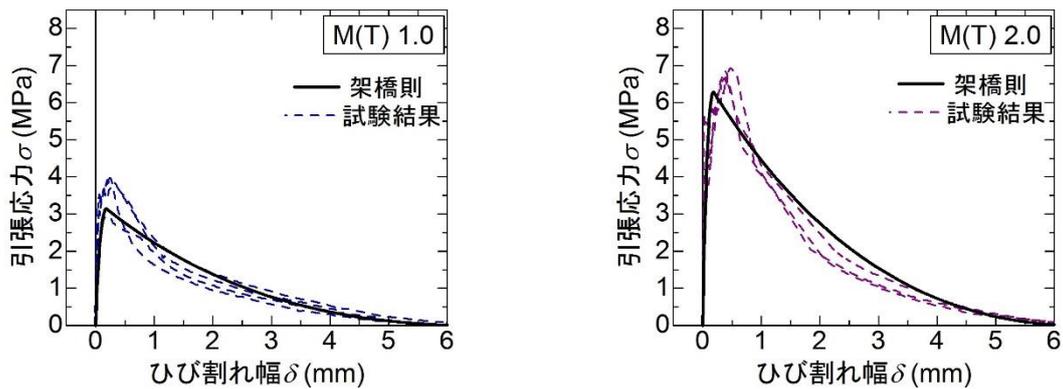


図 3-20 架橋則と一軸引張試験結果の比較（左： $V_f = 1.0\%$ ，右： $V_f = 2.0\%$ ）

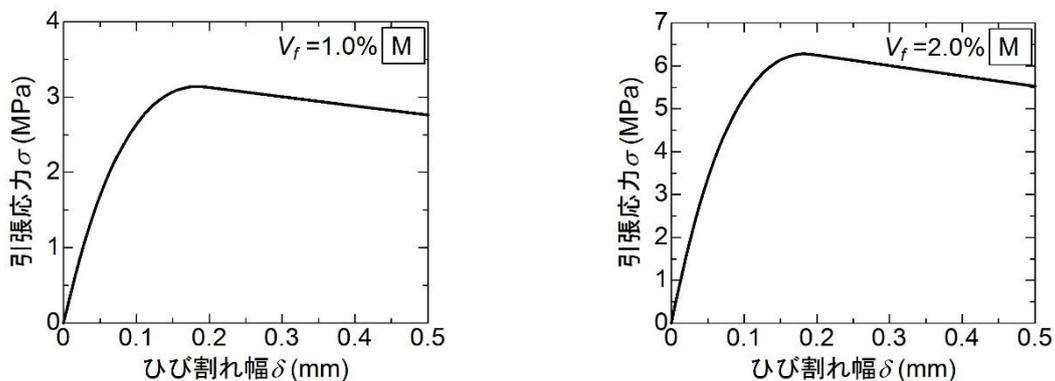


図 3-21 構築した架橋則の最大応力付近の拡大（左： $V_f = 1.0\%$ ，右： $V_f = 2.0\%$ ）

3.5 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。これより、構築された架橋則はFRCCの引張性能を精確に表現できており、引張性能評価に対して架橋則の適合性が確認された。

第4章 架橋則を用いた曲げ性能評価

4.1 はじめに

第3章において、引張性能評価に対して妥当であると確認された架橋則を用いて、FRCCの曲げ性能を表現することが可能であるか検討するため、対象とするマトリクスを超高強度コンクリートとして、単繊維引抜試験および曲げ試験を行った。ここで、単繊維引抜試験においては、試験体作製を可能とするため、粗骨材を混入する前のマトリクスを用いた。単繊維の拔出し挙動から架橋則を構築し、架橋則により得られる引張性能を考慮したFRCCの応力-ひび割れ幅関係のモデルを構築して断面解析を行い、FRCCの曲げ性能評価に対する架橋則の適用性を検討する。

4.2 試験概要

4.2.1 単繊維引抜試験

単繊維引抜試験は、C(PO)シリーズとして、配向角を0, 15, 30, 45, 60度とした単繊維引抜試験を行った。引抜試験体諸元を表 4-1 に示す。パラメータは、繊維マトリクス間の付着長（2, 4, 6mm）および繊維のマトリクスに対する配向角（0, 15, 30, 45, 60度）である。試験体作製方法および加力方法は、3.2.1 節におけるモルタルマトリクスを使用した実験と同一である。

表 4-1 単繊維引抜試験体 C(PO)諸元一覧

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

4.2.2 曲げ試験

曲げ試験体諸元を表 4-2 に示す。パラメータは体積混入率 (0.5, 1.0%) およびバイブレーター使用の有無 (バイブレーターなし, バイブレーターあり) であり, モルタルバッチとしては C(PO) シリーズと対応している。試験体は, 体積混入率 0.5, 1.0% に対してそれぞれ, 型枠端部より流込みを行い作製した C(B)0.5-N, C(B)1.0-N シリーズと, 流込み完了後にコンクリートの締固めに使用される棒状バイブレーターを型枠中央部近傍に挿入し振動を加えることで, 試験体中央部における繊維を, 試験体軸方向に対して直交方向に強制配向させた⁹⁾C(B)0.5-V, C(B)1.0-V シリーズを作製した。バイブレーターを使用した試験体作製の様子を図 4-1 に示す。硬化後, コンクリートカッターにより幅 5mm, 深さ 30mm の切欠きを導入した。

JCI-S-001-2003「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」¹⁰⁾に準拠して, 切欠きを有する 100×100×400mm の角柱供試験体に対して図 4-2 に示すような三点加力曲げ試験を行った。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载荷を行った。計測項目は, 荷重および荷重点たわみ, 試験体中央部 (100mm) における圧縮側および引張側の軸方向変位である。軸方向変位は, 試験体中央部の圧縮側および引張側の位置にそれぞれ固定した, 検長 100mm の 2 つの π 型変位計により計測した。

表 4-2 曲げ試験体 C(B)諸元一覧

シリーズ名称	パラメータ		試験体数
	繊維体積混入率 V_f (%)	バイブレーター使用の有無	
C(B)0.5-N	0.5	なし	各 3
C(B)0.5-V		あり	
C(B)1.0-N	1.0	なし	
C(B)1.0-V		あり	

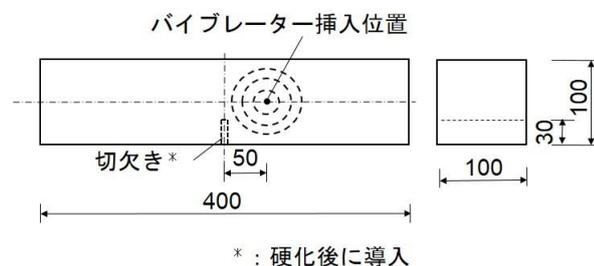


図 4-1 試験体作製方法 (バイブレーターあり)

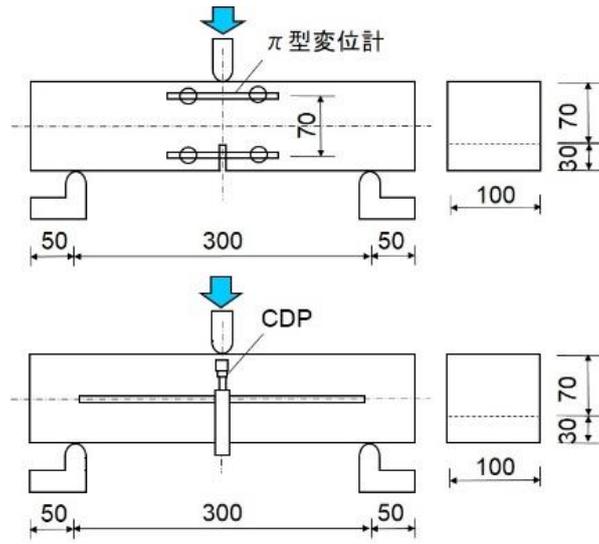


図 4-2 曲げ試験概要

4.3 試験結果

4.3.1 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 4-3～図 4-5 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を差し引くことで求めた(2.1.2節参照)。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。各試験における、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 の実験値を表 4-3～表 4-5 に示す。

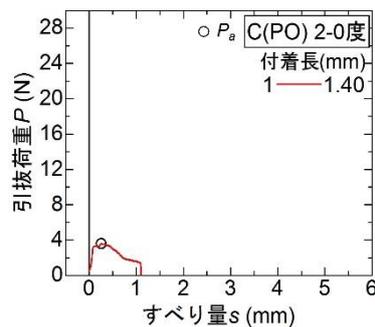


図 4-3 単繊維引抜試験結果 (C(PO)シリーズ : 付着長 2mm)

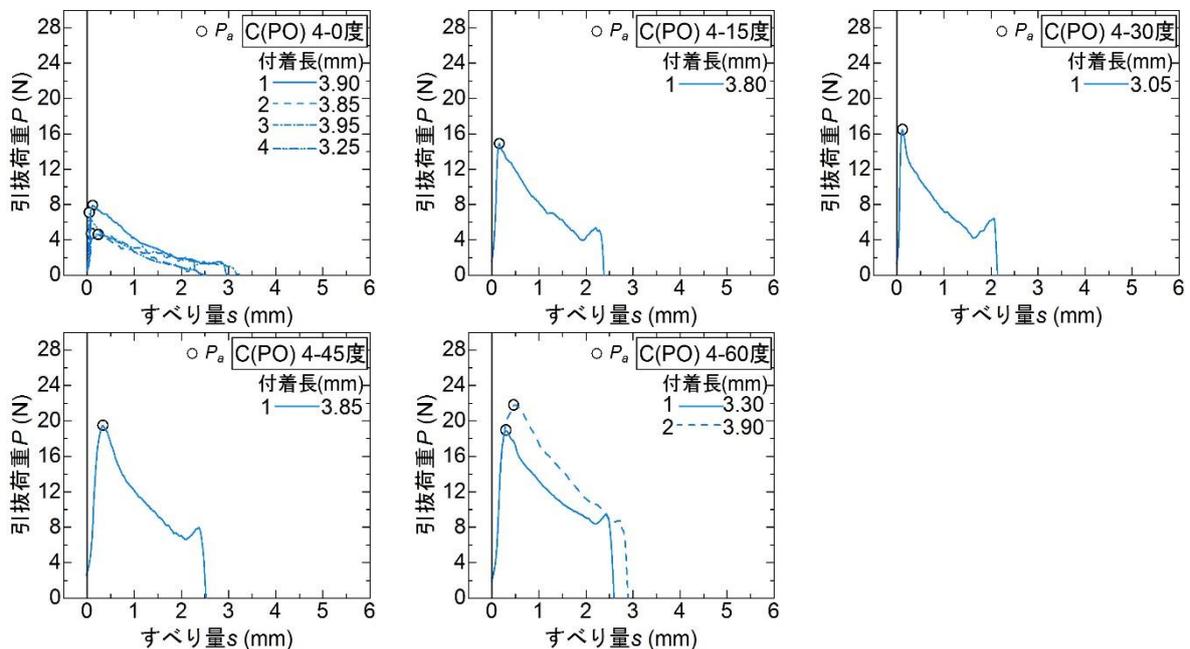


図 4-4 単繊維引抜試験結果 (C(PO)シリーズ : 付着長 4mm)

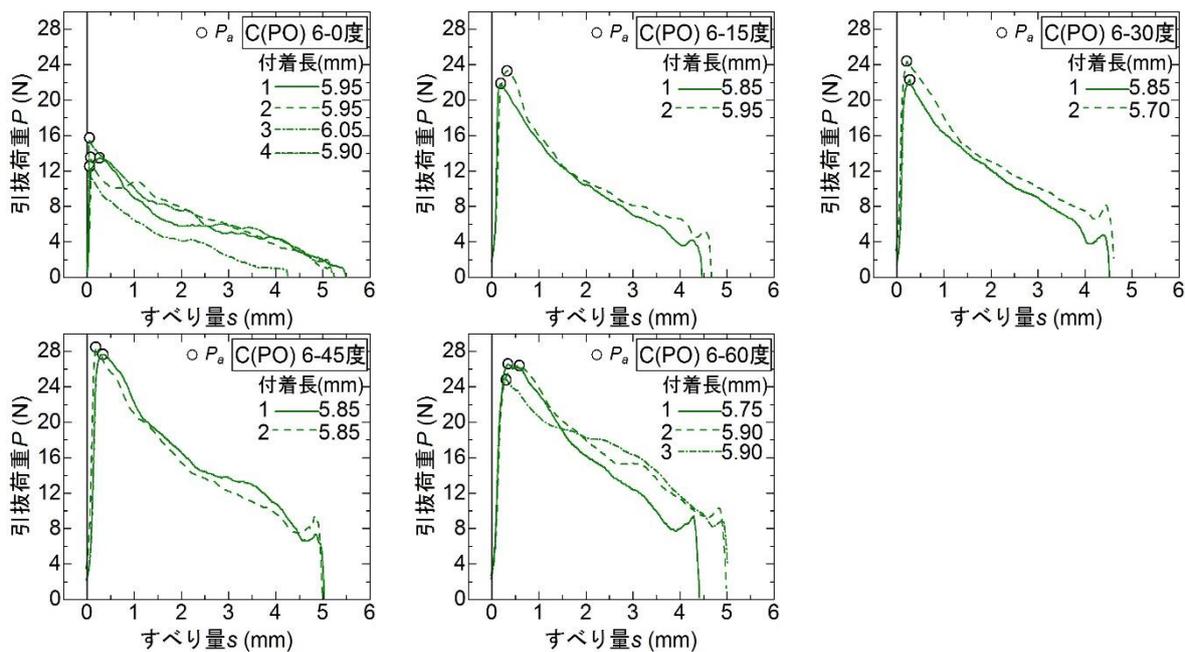


図 4-5 単繊維引抜試験結果 (C(PO)シリーズ : 付着長 6mm)

表 4-3 単繊維引抜試験結果 (C(PO)シリーズ : 付着長 2mm)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
C(PO)2-0-1	2	1.40	0	3.59	0.259

例)

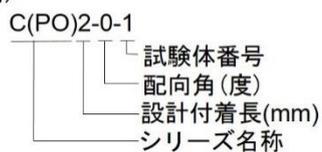


表 4-4 単繊維引抜試験結果 (C(PO)シリーズ : 付着長 4mm)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
C(PO)4-0-1	4	3.90	0	7.89	0.119
C(PO)4-0-2		3.85		4.70	0.090
C(PO)4-0-3		3.95		4.60	0.239
C(PO)4-0-4		3.25		7.09	0.048
C(PO)4-15-1		3.80	15	14.9	0.156
C(PO)4-30-1		3.05	30	16.5	0.118
C(PO)4-45-1		3.85	45	19.5	0.337
C(PO)4-60-1		3.30	60	19.0	0.298
C(PO)4-60-2		3.90		21.8	0.461

表 4-5 単繊維引抜試験結果 (C(PO)シリーズ : 付着長 6mm)

試験体名	設計 付着長 (mm)	実測 付着長 l_b (mm)	配向角 (度)	ピーク時 荷重 P_a (N)	ピーク時 すべり量 s_a (mm)
C(PO)6-0-1	6	5.95	0	13.5	0.267
C(PO)6-0-2		5.95		13.6	0.076
C(PO)6-0-3		6.05		12.5	0.056
C(PO)6-0-4		5.90		15.7	0.050
C(PO)6-15-1		5.85	15	21.9	0.190
C(PO)6-15-2		5.95		23.3	0.323
C(PO)6-30-1		5.85	30	22.3	0.277
C(PO)6-30-2		5.70		24.4	0.209
C(PO)6-45-1		5.85	45	27.7	0.336
C(PO)6-45-2		5.85		28.5	0.185
C(PO)6-60-1		5.75	60	26.6	0.340
C(PO)6-60-2		5.90		26.4	0.584
C(PO)6-60-3		5.90		24.8	0.303

(1) 繊維マトリクス間の付着性状

単繊維の拔出し挙動は、3.3.1節におけるモルタルマトリクスを使用した単繊維引抜試験と同様であり、摩擦による付着が確認された。

C(PO)シリーズの結果について、各付着長における引抜荷重—すべり量を比較したものを図 4-6 に、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 をまとめたものを表 4-6 に示す。単繊維拔出し挙動のモデル化の際には、表 4-6 に示す単位付着長あたりのピーク時荷重および引抜剛性の平均値を採用する。第3章のモルタルマトリクスで得られた実験値と比較して、 P_a/l_b は 1.61 倍、 P_a/s_a は 1.23 倍となっており、特に P_a/l_b はマトリクスの強度の増大により大きくなっていると考えられる。

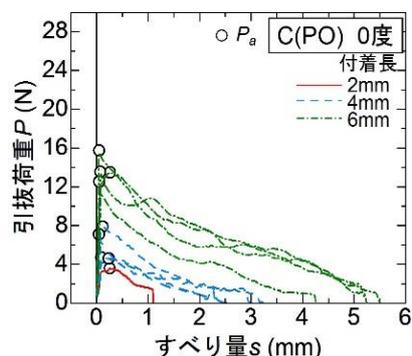


図 4-6 繊維マトリクス間の付着性状 (C(PO)シリーズ：配向角 0 度)

表 4-6 単位付着長あたりのピーク時荷重および引抜剛性の算出 (C(PO)シリーズ)

試験体名	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)
C(PO)2-0-1	1.40	3.59	0.259	2.57	2.05	13.9	118
C(PO)4-0-1	3.90	7.89	0.119	2.02		66.2	
C(PO)4-0-2	3.85	4.70	0.090	1.22		52.2	
C(PO)4-0-3	3.95	4.60	0.239	1.16		19.2	
C(PO)4-0-4	3.25	7.09	0.048	2.18		147	
C(PO)6-0-1	5.95	13.5	0.267	2.27		50.5	
C(PO)6-0-2	5.95	13.6	0.076	2.28		177	
C(PO)6-0-3	6.05	12.5	0.056	2.07		223	
C(PO)6-0-4	5.90	15.7	0.050	2.67	312		

(2) 繊維配向角の影響

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 4-7 に示す。図中の曲線は式(3.1)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。3.3.1 節と同様に、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。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 4-8 に示す。スナビング係数に関しては、第 3 章のモルタルマトリクスで得られた結果とほぼ同様であった。

引抜剛性と配向角の関係を図 4-9 に示す。3.3.1 節第 2 項に示すモルタルマトリクスを使用した実験と同様に、超高強度コンクリートマトリクスを使用した場合においても、引抜剛性に対する配向角の影響は確認できないため、後述する単繊維拔出し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。

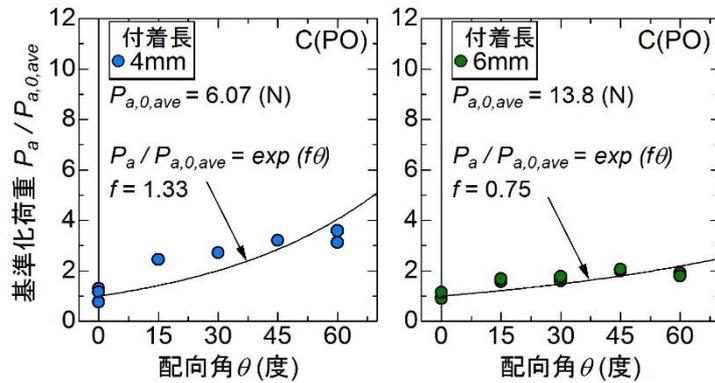


図 4-7 各付着長に対するスナビング係数 (C シリーズ)

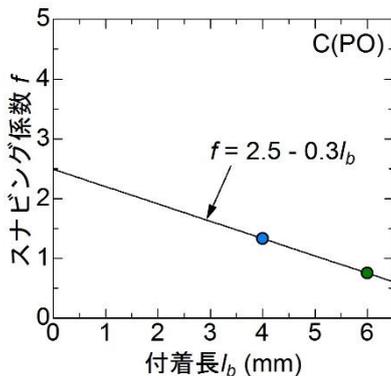


図 4-8 スナビング係数—付着長関係 (C シリーズ)

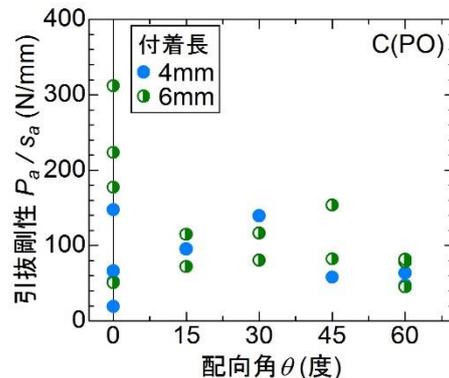


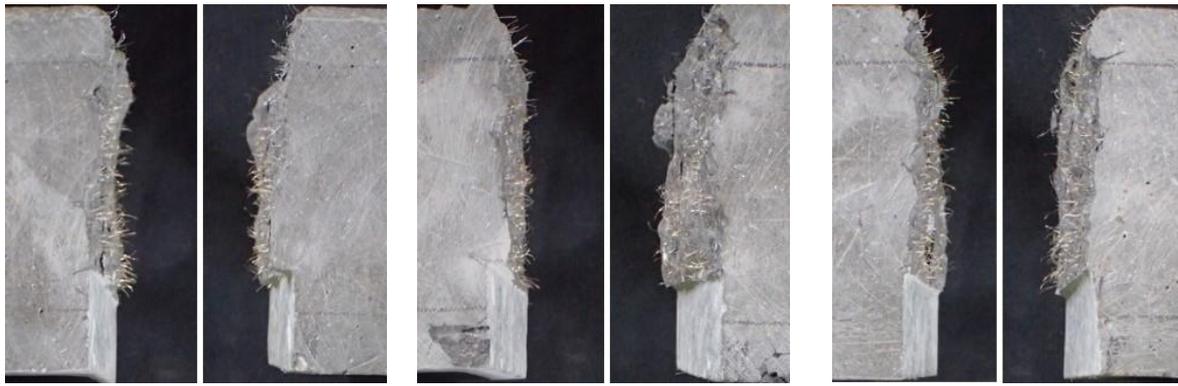
図 4-9 引抜剛性—配向角関係 (C シリーズ)

4.3.2 曲げ試験

曲げ試験加力終了後のひび割れ面における繊維配向の様子を図 4-10～図 4-13 に示す。試験体に導入した切欠き上部からひび割れが発生し、最終的に 1 本の大きなひび割れが開口した。曲げ試験加力終了後のひび割れ面の観察により、バイブレーターありの試験体におけるひび割れ面の繊維は、バイブレーターなしの試験体と比較して、試験体軸直交方向に配向する様子が確認された。

曲げ引張試験より得られた曲げ荷重－ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 関係を図 4-14, 図 4-15 に、曲げ荷重－荷重点たわみ関係を図 4-16, 図 4-17 に示す。CMOD は、平面保持を仮定し、 π 型変位計の測定値から試験体下面における軸方向変形として求めた。ひび割れの開口に伴い、曲げ荷重が増加し最大となった後、徐々に荷重が低下する挙動が見られた。ここで、繊維体積混入率 0.5%、バイブレーターありの試験体において、極めて初期の段階で荷重が最大となった後、一度荷重が低下し、その後再び荷重が増加しピークが現れる挙動をするものが確認された。繊維体積混入率 0.5%、バイブレーターありの試験体においては、繊維体積混入率が小さく、かつ、試験体軸方向に対して直交方向に繊維を強制配向させているため、ひび割れ発生面における繊維とマトリクスの一体性が低く、初めは概ねマトリクスが荷重を受け持ち、マトリクスにひび割れが生じた後、ひび割れ開口に伴い繊維が架橋して荷重を負担し、繊維の架橋性能が発揮されていったと考えられる。したがって、初期に得られる最大荷重はマトリクスのひび割れ強度時荷重であり、それ以降の軟化領域は繊維の架橋性能に基づく挙動を表していると推測される。このような挙動をした試験体においては、初期の最大荷重後の第 2 ピーク点における荷重を架橋時最大荷重とし、繊維の架橋能力を表現する値とした。曲げ試験結果一覧を表 4-7 に示す。

バイブレーター使用の有無による試験結果の比較を行うと、繊維体積混入率 0.5%、1.0% の試験体ともに、バイブレーターありの試験体の強度が、バイブレーターなしの試験体を下回る傾向が見られた。繊維の配向性に伴う引張性能の差異が、曲げ試験結果に影響を及ぼしていることが推測される。

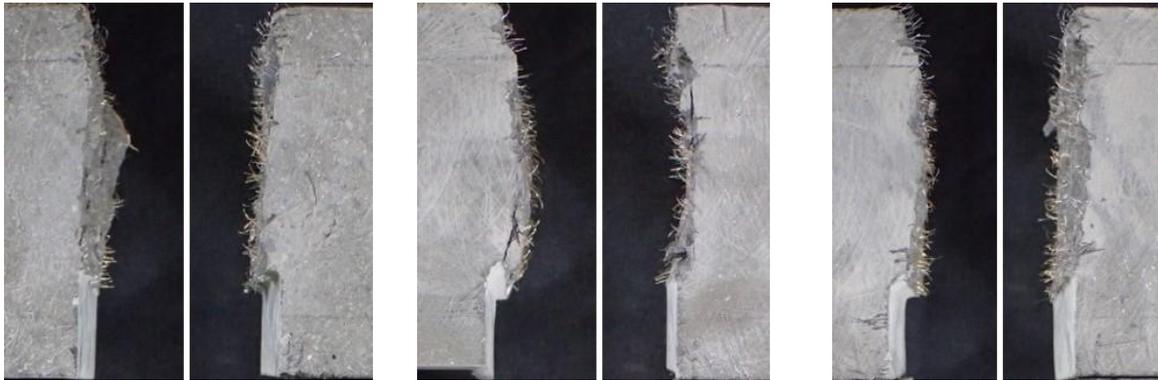


C(B)0.5-N-1

C(B)0.5-N-2

C(B)0.5-N-3

図 4-10 曲げ試験終了後のひび割れ面の様子 ($V_f = 0.5\%$, バイブレーターなし)



C(B)0.5-V-1

C(B)0.5-V-2

C(B)0.5-V-3

図 4-11 曲げ試験終了後のひび割れ面の様子 ($V_f = 0.5\%$, バイブレーターあり)

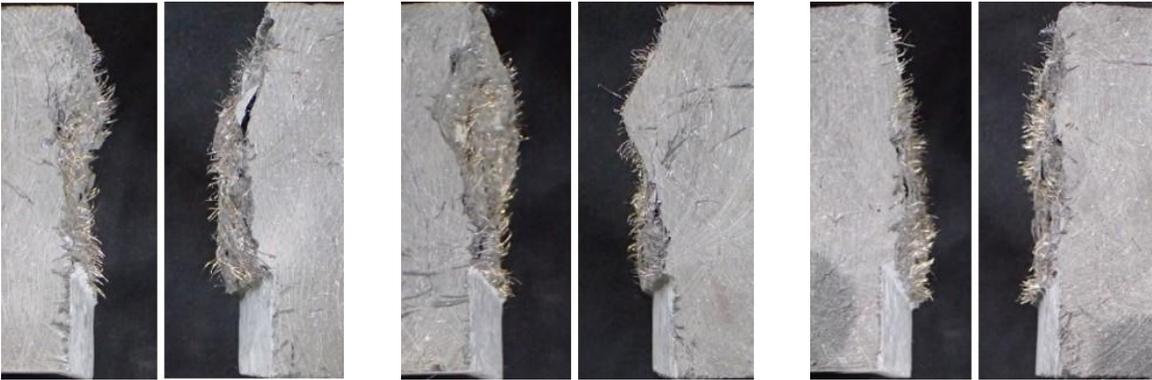


C(B)1.0-N-1

C(B)1.0-N-2

C(B)1.0-N-3

図 4-12 曲げ試験終了後のひび割れ面の様子 ($V_f = 1.0\%$, バイブレーターなし)



C(B)1.0-V-1

C(B)1.0-V-2

C(B)1.0-V-3

図 4-13 曲げ試験終了後のひび割れ面の様子 ($V_f = 1.0\%$, バイブレーターあり)

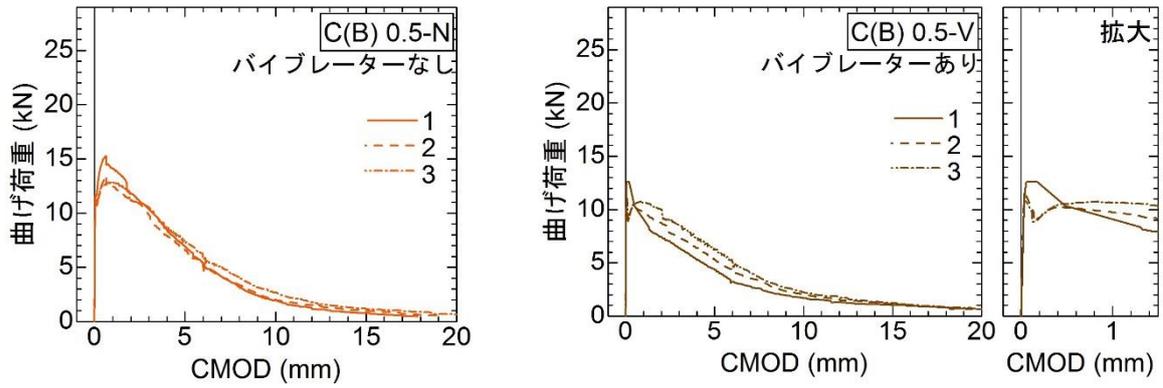


図 4-14 曲げ荷重-CMOD 関係 ($V_f = 0.5\%$)

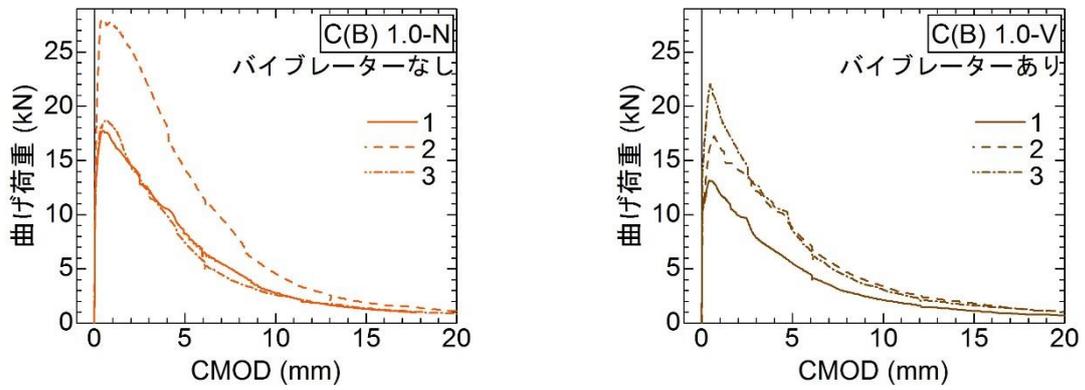


図 4-15 曲げ荷重-CMOD 関係 ($V_f = 1.0\%$)

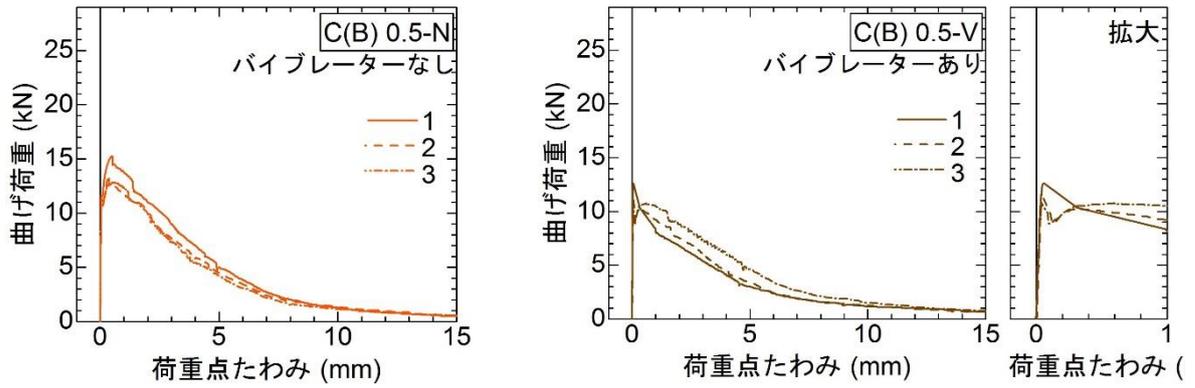


図 4-16 曲げ荷重—荷重点たわみ関係 ($V_f = 0.5\%$)

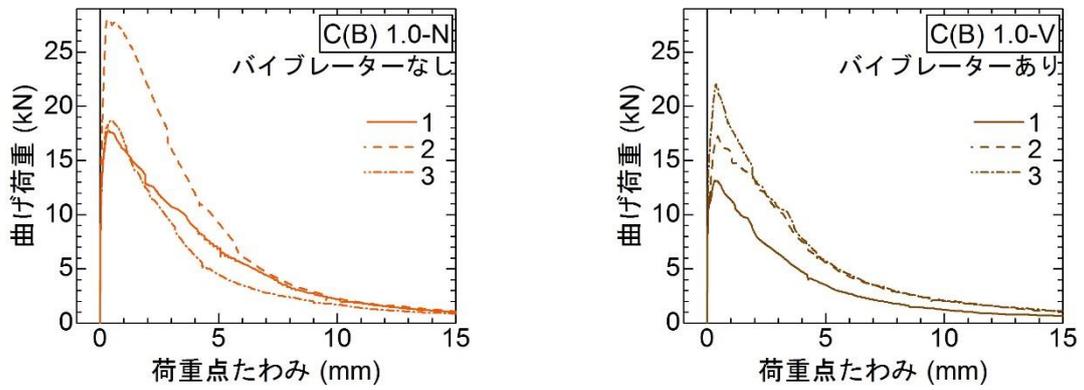
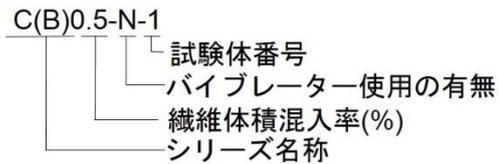


図 4-17 曲げ荷重—荷重点たわみ関係 ($V_f = 1.0\%$)

表 4-7 曲げ試験結果

試験体名	V _f (%)	バイブ レータ ー使用 の有無	最大荷重 [架橋時] (kN)	平均値 [架橋時 含む] (kN)	最大荷重時			
					CMOD [架橋時] (mm)	平均値 [架橋時 含む] (mm)	荷重点 たわみ [架橋時] (mm)	平均値 [架橋時 含む] (mm)
C(B)0.5-N-1	0.5	なし	15.3	13.9	0.646	0.761	0.514	0.499
C(B)0.5-N-2			13.5		0.646		0.378	
C(B)0.5-N-3			12.9		0.990		0.604	
C(B)0.5-V-1		あり	12.6	11.6 [11.2]	0.177	0.093 [0.466]	0.060	0.049 [0.315]
C(B)0.5-V-2			11.4 [10.3]		0.051 [0.421]		0.050 [0.320]	
C(B)0.5-V-3			10.8 [10.7]		0.050 [0.801]		0.038 [0.566]	
C(B)1.0-N-1	1.0	なし	17.7	21.4	0.410	0.449	0.326	0.349
C(B)1.0-N-2			27.9		0.358		0.284	
C(B)1.0-N-3			18.7		0.578		0.438	
C(B)1.0-V-1		あり	13.2	17.5	0.400	0.522	0.318	0.384
C(B)1.0-V-2			17.3		0.692		0.454	
C(B)1.0-V-3			22.1		0.474		0.380	

例)



4.4 断面解析

架橋則により得られる FRCC の引張性能を用いて、ファイバーモデルによる断面解析を行い、曲げモーメント－回転角関係を構築する。通常の断面解析では、構成則として応力－歪関係を用いモーメント－曲率関係を得るが、本研究では、引張応力－ひび割れ幅関係として与えられる架橋則を用い、また、切欠き梁の三点加力曲げ試験結果と解析結果を直接比較するために、モーメント－回転角関係を計算する。

ここで、断面解析を行う際に構成モデルとして用いる架橋則は、ひび割れ面に存在する繊維の配向性に影響されるため、試験体ひび割れ発生面における繊維の配向性を決定する必要がある。3.4 節においては、くびれ型供試体を用いた一軸引張試験体の配向強度を算出した既往の研究⁹⁾を参考として、繊維配向性を設定した。同既往研究において、流込みを行い作製される 100×100×400mm の角柱曲げ試験体についても繊維配向性が推定されており、試験体正面および側面の配向強度 k の平均値はおよそ $k=5\sim7$ とされている⁹⁾。しかし、くびれ型という試験体形状により、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一軸引張試験体と比較して、曲げ試験体における繊維の配向性は打設時の流込み作業方法に大きく影響を受けることが予測される。そのため、曲げ試験体における繊維配向性は一概に既往の研究と同一であるとは言えず、また、既往の研究では、流込み完了後にバイブレーターを使用して、試験体中央部における繊維を強制配向させた場合についての配向強度は算出されていない。以上のことから、曲げ試験体内部の繊維配向性を把握することは非常に困難であり、ひび割れ発生面における繊維配向性を想定する必要がある。

本研究においては、配向強度をパラメータとした断面解析を行い、曲げ試験結果と照らし合わせることで、ひび割れ発生面における繊維配向性を想定することとした。まず、仮想的に配向強度を設定して各配向強度の値に対応する架橋則を構築し、架橋則と繊維配向性の関連性を把握した。続いて、各配向強度に対応する架橋則を適用した断面解析を行うことで、繊維配向性に伴い変化する引張性能と FRCC の曲げ性能の関連性について検討した。ここで得られた、各配向強度に対応する断面解析結果の中から、曲げ試験結果とほぼ等しくなるものを選択することで、ひび割れ発生面における繊維配向性を想定した。

4.4.1 架橋則モデル

単繊維拔出し挙動をモデル化し、3.4.1節と同様の方法で架橋則モデルを構築した。繊維マトリクス間の付着性状に関しては、表 4-6 に示す単繊維引抜試験 C(PO)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 2.1N/mm、単位付着長あたりのピーク時ひび割れ幅 $\delta_{a,0,l}$ を 0.03mm/mm ($\div 2.05 \div 118 \times 2$) と設定した。繊維配向角の影響については、図 4-8 に示すスナビング係数と付着長の関係より得られた近似式を用いて、 $f_0 = 2.5$ 、 $f_l = -0.3$ とすることで表現した。架橋則モデルへの入力値を表 4-8 に示す。

表 4-8 架橋則モデルへの入力値 (C シリーズ)

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)	2.1
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 $f = f_0 + f_l \cdot l_b$)	2.5
f_l (スナビング係数 $f = f_0 + f_l \cdot l_b$)	-0.3
繊維長 l_f (mm)	13

4.4.2 繊維配向性と架橋則の関連性

断面解析を行う前段階として、解析時に構成モデルとして用いる架橋則と繊維配向性の関連性を把握するため、配向強度 k をパラメータとした架橋則の構築を行う。

架橋則構築の際、繊維配向性は繊維配向角分布によって表現され、繊維配向角分布を与える確率密度関数は、配向強度 k の値により決定される⁸⁾。配向強度 k の値に対応する繊維配向角分布を図 4-18 に示す。繊維配向角分布は、3.4.2 節と同様に、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は等しいと仮定し、主配向角 $\theta_p=0$ とする。

繊維体積混入率 0.5、1.0% の場合に対する、配向強度 k の値による架橋則の変化を図 4-19 および図 4-20 に示す。構築した架橋則の最大引張応力および最大引張応力時のひび割れ幅を表 4-9 に示す。配向強度 k の値による繊維有効率の変化を図 4-21 に示す。繊維有効率とは、ひび割れ面において抜出しておらず、架橋力を担っている繊維である有効架橋繊維の本数 $N_{f,b}$ 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¹¹⁾。

図 4-19 および図 4-20 より、配向強度 k の値が大きくなるにつれて引張応力は増大していき、 $k=6$ の時に最大となり、その後は徐々に低下していくことがわかる。一方で、図 4-21 より繊維有効率は $k=6$ 以後も配向強度が大きくなるにつれて増大しており、繊維が試験体軸方向に配向が強くなることで、ひび割れ面を架橋する繊維本数は増加していることが読み取れる。これより、配向強度が大きくなるにつれて、ひび割れ面に存在する繊維は試験体軸方向（配向角 0 度）に配向しているものが増え、ひび割れ面を架橋する繊維本数が増加する一方で、大きな配向角を有する繊維が減少することで、式(3.5)で表現されるスナビング効果の影響が小さくなる。すなわち、本章で検討している繊維とマトリクスとの組み合わせにおいては、配向強度 $k=6$ の時に、架橋性能を発揮する繊維本数が増加することによる引張応力の増加と、大きな配向角を有する繊維が減少することに伴うスナビング効果の減少が平衡し、引張応力が最大となると考えられる。その後は配向強度が大きくなっても、配向強度の増加に伴うスナビング効果の減少が、架橋性能を発揮する繊維本数が増加することによる引張応力の増加を上回るため、引張応力は減少していく。

以上のことから、本研究で対象繊維としたスチールワイヤにおいては、配向強度の増大に伴い配向角 0 度方向に配向が強くなることによる有効架橋繊維の本数の増加と、配向角 ± 90 度方向に配向が強くなるにつれて大きくなる、スナビング効果による荷重増加のバランスが最適となる繊維配向角分布が与えられる際に、最大の引張応力が得られると考えられる。

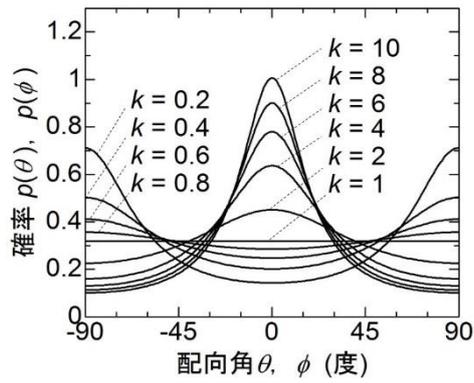


図 4-18 配向強度 k の値に対応する繊維配向角分布

表 4-9 最大引張応力時に対する配向強度による架橋則の変化

配向 強度 k	繊維体積混入率 V_f (%)			
	0.5		1.0	
	最大 引張応力 (MPa)	最大 引張応力時 ひび割れ幅 (mm)	最大 引張応力 (MPa)	最大 引張応力時 ひび割れ幅 (mm)
0.2	1.48	0.169	2.96	0.169
0.4	1.81	0.176	3.62	0.176
0.6	1.98	0.176	3.96	0.176
0.8	2.09	0.176	4.18	0.176
1	2.16	0.176	4.33	0.176
2	2.34	0.182	4.67	0.182
4	2.42	0.182	4.84	0.182
6	2.43	0.182	4.86	0.182
8	2.42	0.182	4.85	0.182
10	2.41	0.182	4.82	0.182

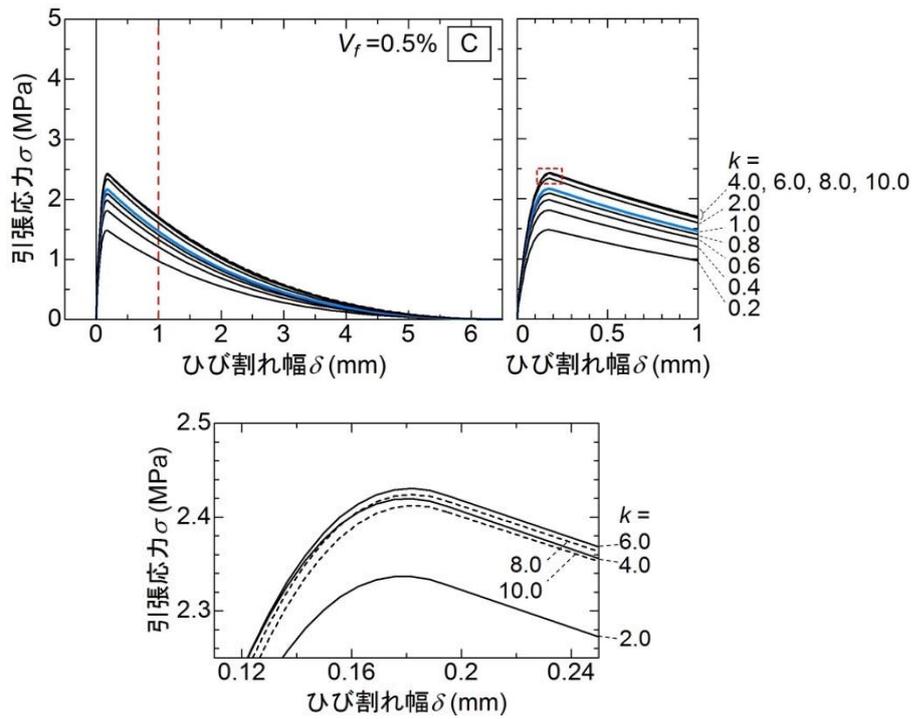


図 4-19 配向強度による架橋則の変化 ($V_f = 0.5\%$)

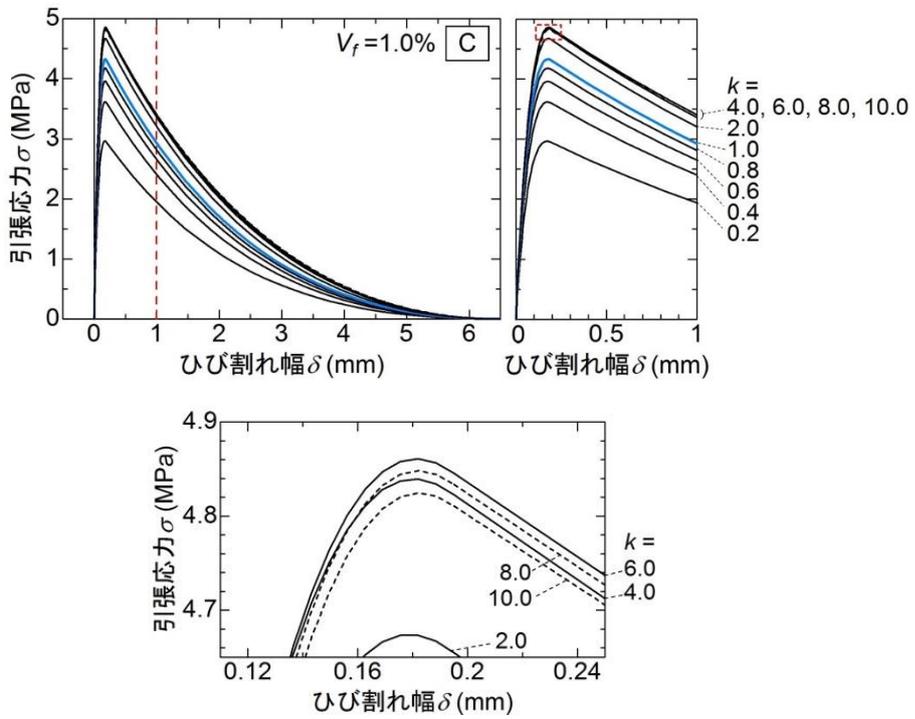


図 4-20 配向強度による架橋則の変化 ($V_f = 1.0\%$)

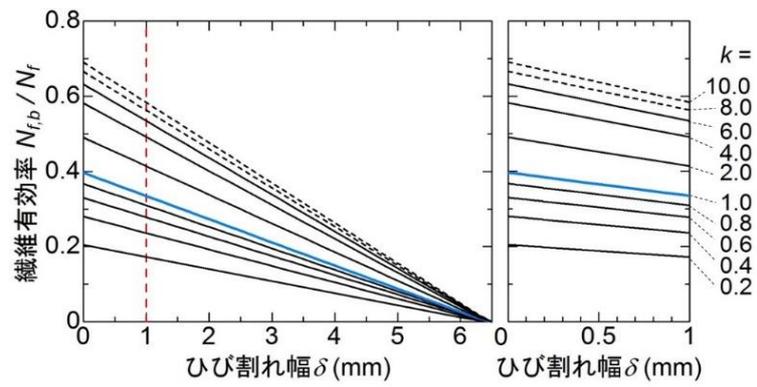


図 4-21 配向強度による繊維有効率の変化 ($V_f = 0.5\%$ および 1.0%)

4.4.3 FRCC の応力-ひび割れ幅関係のモデル化

断面解析を行う際に使用する、FRCC の応力-ひび割れ幅関係のモデルを図 4-22 に示す。FRCC の応力-ひび割れ幅関係の引張側はトリリニアモデル，圧縮側は弾性モデルとした。

引張側のモデルは架橋則より得られた応力-ひび割れ幅関係から構築し，架橋則の応力最大時を第 1 ピーク点，ひび割れ幅が繊維長 l_f の 4 分の 1 となった点を第 2 折れ点，ひび割れ幅が繊維長 l_f の 2 分の 1 となった点を終局点とした。

圧縮側のモデルは，圧縮試験より得られた弾性係数と，曲げ試験より得られた荷重-ひび割れ幅関係の初期勾配が等しくなるような等価圧縮域長さ l'_c を算出し，圧縮側の応力-ひび割れ幅関係の初期勾配 k_c を決定することで，式(4.1)および式(4.2)により表現することとした。圧縮側構成則の算定に使用した値を表 4-10 に示す。

断面解析は，変形に関しては平面保持を仮定し，任意の回転角に対して各要素のひび割れ幅（引張または圧縮変形）を求め，断面内の各要素の力の和が 0 になるように中立軸を決定した後に各要素のモーメントの和を計算することにより行った。

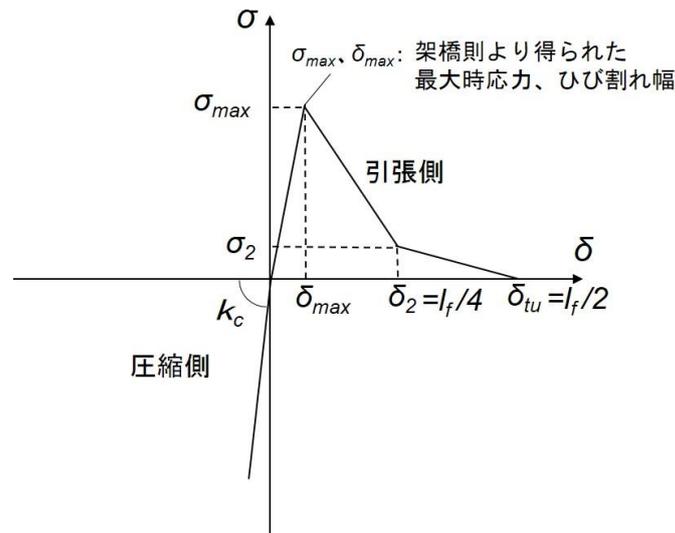


図 4-22 応力-ひび割れ幅関係モデル

$$\sigma = k_c \cdot \delta \quad (4.1)$$

$$k_c = \frac{E_c}{l'_c} \quad (4.2)$$

ここで，

σ : 圧縮応力

k_c : 圧縮側の応力-ひび割れ幅関係の初期勾配

δ : 圧縮側ひび割れ幅 (=圧縮変形)

E_c : 圧縮試験より得られた弾性係数

l'_c : 等価圧縮域長さ

表 4-10 圧縮側構成則の算定

シリーズ名称	C(B)0.5-N	C(B)0.5-V	C(B)1.0-N	C(B)1.0-V
曲げ試験における 荷重－ひび割れ幅関係の初期勾配 K_{bend} (N/mm)	416*	350*	390*	319*
圧縮試験における弾性係数 E_c (GPa)	44.6**		44.7**	
等価圧縮域長さ l'_c (mm)	842	1001	901	1102
圧縮側の 応力－ひび割れ幅関係の初期勾配 k_c (N/mm ³)	52.9	44.5	49.6	40.6

* : 切欠きを有する 100×100×400mm 角柱供試体に対する三点加力曲げ試験結果

** : Φ100-200mm シリンダー圧縮試験結果

4.4.4 繊維配向性と解析結果の関連性

4.4.2 節で把握した、ひび割れ面を架橋する繊維の配向性と構築される架橋則の関連性を踏まえ、各配向強度に対応する架橋則を応力-ひび割れ幅モデルの引張側に適用した断面解析を行うことで、繊維配向性に伴い変化する引張性能と FRCC の曲げ性能の関連性を検討する。

配向強度による解析結果の変化を図 4-23～図 4-26 に示す。解析により得られた、最大曲げモーメント M_{max} および最大曲げモーメント時の回転角を表 4-11 に示す。バイブレーター使用の有無および繊維体積混入率にかかわらず、配向強度 $k=6$ の時に曲げモーメントは最も大きな値となる。これは、配向強度 $k=6$ の時に、架橋則より得られる引張架橋応力が最大となることを反映しており、架橋則により表現される引張性能が曲げ性能に影響を及ぼしていることが確かめられた。また、繊維混入率 0.5%、1.0% の試験体ともに、同一の配向強度におけるバイブレーターの有無による最大曲げモーメントの差異、すなわち圧縮側モデルの違いによる最大曲げモーメントの差異はごくわずかである。

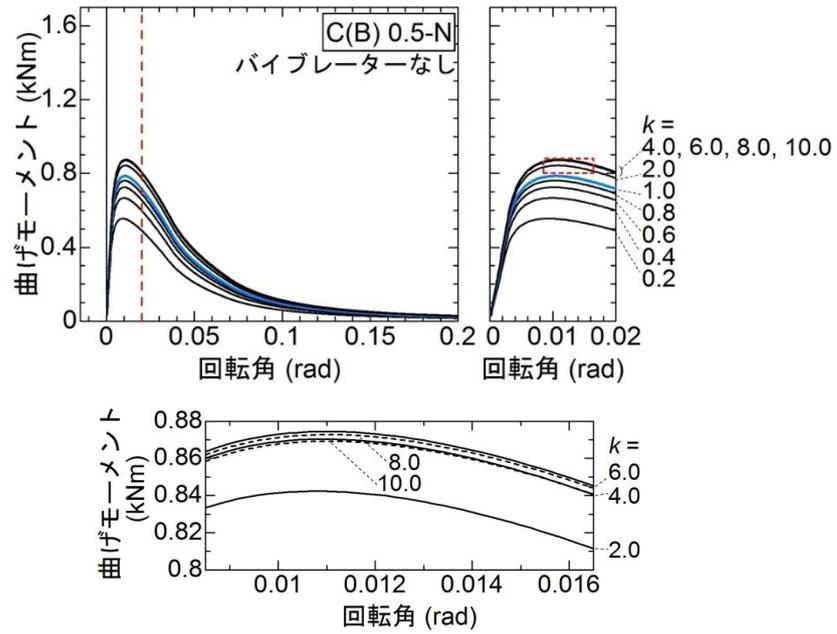


図 4-23 配向強度による解析結果の変化 ($V_f=0.5\%$, バイブレーターなし)

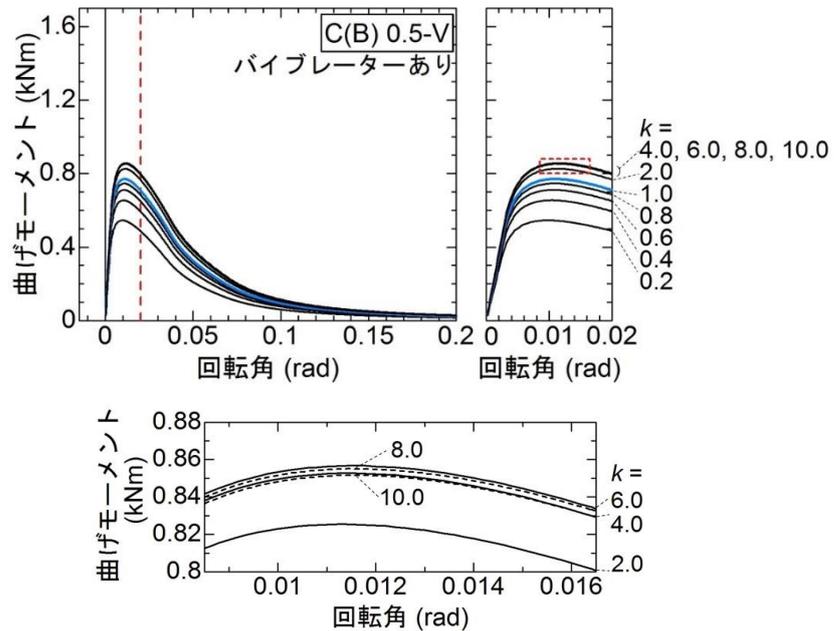


図 4-24 配向強度による解析結果の変化 ($V_f=0.5\%$, バイブレーターあり)

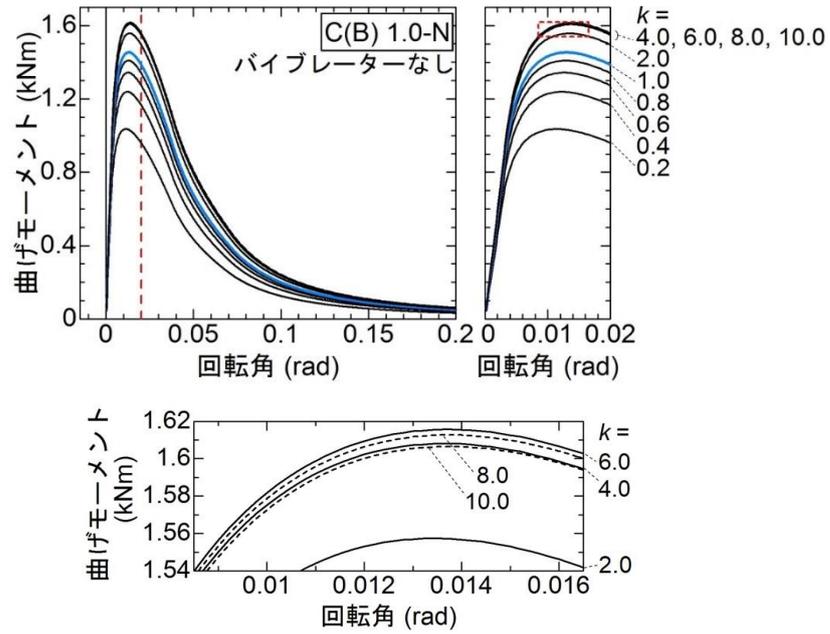


図 4-25 配向強度による解析結果の変化 ($V_f = 1.0\%$, バイブレーターなし)

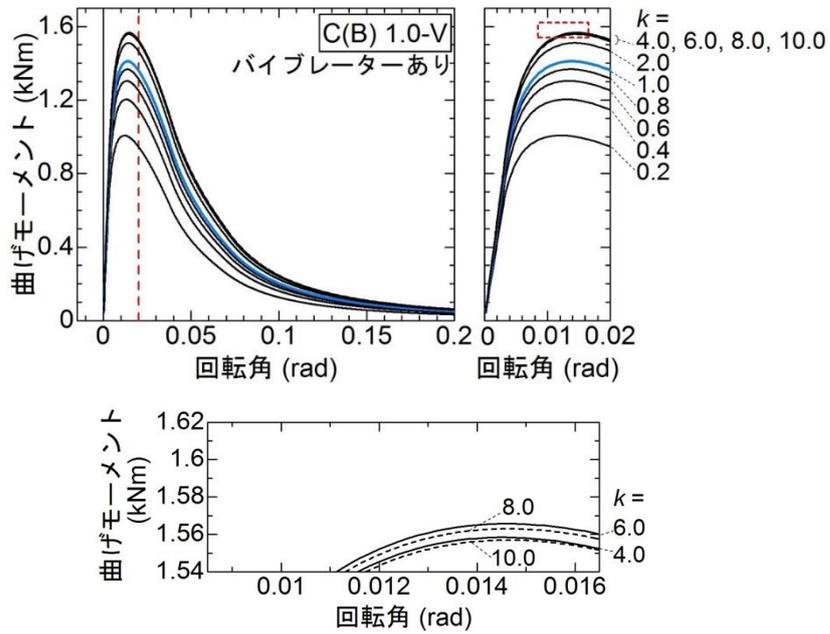


図 4-26 配向強度による解析結果の変化 ($V_f = 1.0\%$, バイブレーターあり)

表 4-11 配向強度による解析結果の変化

配向 強度 k	各シリーズに対する解析値							
	C(B)0.5-N		C(B)0.5-V		C(B)1.0-N		C(B)1.0-V	
	M_{max} (kNm)	M_{max} 時の 回転角 ($\times 10^{-2}$ rad)						
0.2	0.555	0.92	0.545	0.96	1.036	1.14	1.007	1.22
0.4	0.666	0.98	0.654	1.04	1.239	1.22	1.203	1.30
0.6	0.724	1.00	0.710	1.06	1.344	1.26	1.303	1.34
0.8	0.760	1.02	0.745	1.08	1.409	1.28	1.367	1.36
1	0.785	1.04	0.770	1.1	1.454	1.30	1.410	1.38
2	0.842	1.08	0.825	1.12	1.557	1.34	1.510	1.42
4	0.870	1.10	0.853	1.14	1.608	1.36	1.558	1.44
6	0.874	1.10	0.857	1.14	1.616	1.36	1.566	1.46
8	0.873	1.10	0.855	1.14	1.613	1.36	1.563	1.48
10	0.869	1.10	0.852	1.14	1.606	1.36	1.557	1.48

4.4.5 解析結果と曲げ試験結果の比較

ひび割れ面を架橋する繊維の配向性を想定して得られる解析結果と FRCC の曲げ試験結果を比較することで、FRCC の曲げ性能評価に対する架橋則の適用性について検討する。

4.4.4 節で算出した、異なる繊維配向性に対応して得られる解析結果より、最大曲げモーメントに関して断面解析結果と曲げ試験結果がほぼ等しくなるような配向強度 k の値は、表 4-12 に示すようになる。このときの各シリーズに対する FRCC の応力-ひび割れ幅関係モデルへの入力値を表 4-12 に再掲する。

断面解析の結果と、曲げ試験結果の曲げモーメント-回転角関係の比較を図 4-27 および図 4-28 に示す。最大曲げモーメントに対する解析結果と試験結果の比較を表 4-13 に示す。

断面解析において各シリーズに対して想定した繊維配向角分布と、曲げ試験加力終了後のひび割れ面における繊維配向の様子の比較をそれぞれ図 4-29 および図 4-30 に示す。想定した繊維配向角分布により、繊維混入率 0.5%、1.0% の試験体ともに、バイブレーターを使用して繊維を強制配向させたバイブレーターありの試験体は、バイブレーターなしの試験体と比較して、試験体軸方向（配向角 0 度）に対する繊維の配向が弱くなっており、これは試験体ひび割れ面における実際の繊維の様子と対応している。以上の検討より、繊維の配向性を適宜考慮することにより、構築した架橋則を用いて断面解析を行うことで曲げ試験結果を表現することが可能である。

表 4-12 FRCC の応力-ひび割れ幅関係モデルへの入力値

入力項目		各シリーズに対する入力値			
		C(B)0.5-N	C(B)0.5-V	C(B)1.0-N	C(B)1.0-V
引張側： トリリニアモデル	配向強度 k	6	2	4	0.6
	σ_{max} (MPa)	2.43	2.34	4.84	3.96
	δ_{max} (mm)	0.18	0.18	0.18	0.18
	σ_2 (MPa)	0.48	0.43	0.93	0.67
	$\delta_2 = l_f/4$ (mm)	3.25			
	$\delta_{tu} = l_f/2$ (mm)	6.5			
圧縮側： 弾性モデル	k_c (N/mm ³)	52.9	44.5	49.6	40.6

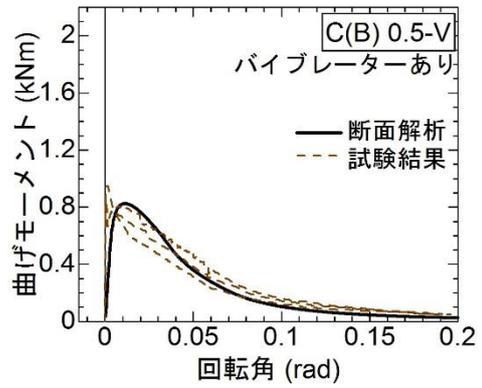
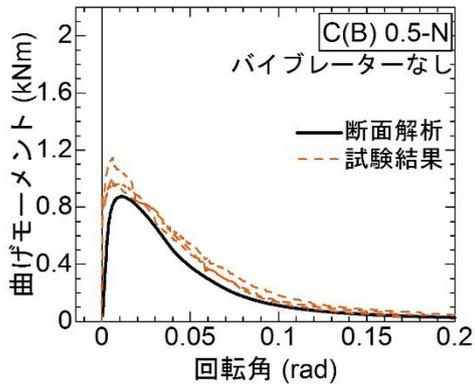


図 4-27 曲げ性能に対する解析結果と試験結果の比較 ($V_f = 0.5\%$)

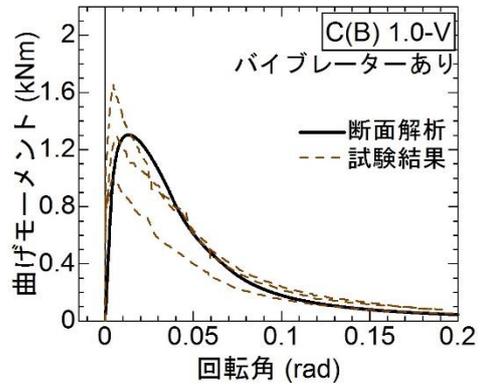
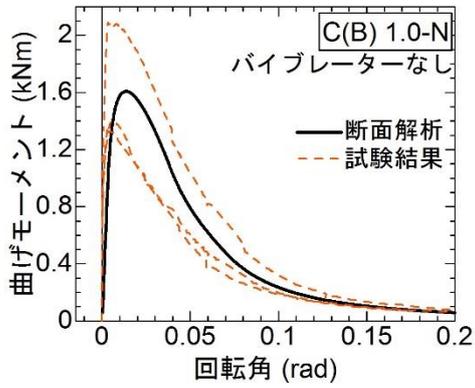


図 4-28 曲げ性能に対する解析結果と試験結果の比較 ($V_f = 1.0\%$)

表 4-13 最大曲げモーメントに対する解析結果と試験結果の比較

試験体名	繊維体積 混入率 V_f (%)	パイプ レーター 使用の有無	試験結果		解析結果	
			最大曲げ モーメント (kNm)	平均値 (kNm)	配向 強度 k	最大曲げ モーメント (kNm)
C(B)0.5-N-1	0.5	なし	1.14	1.04	6	0.87
C(B)0.5-N-2			1.01			
C(B)0.5-N-3			0.96			
C(B)0.5-V-1		あり	0.95	0.84		
C(B)0.5-V-2			0.78*			
C(B)0.5-V-3			0.81*			
C(B)1.0-N-1	1.0	なし	1.33	1.61	4	1.61
C(B)1.0-N-2			2.09			
C(B)1.0-N-3			1.40			
C(B)1.0-V-1		あり	0.99	1.31		
C(B)1.0-V-2			1.29			
C(B)1.0-V-3			1.65			

* : 繊維架橋時

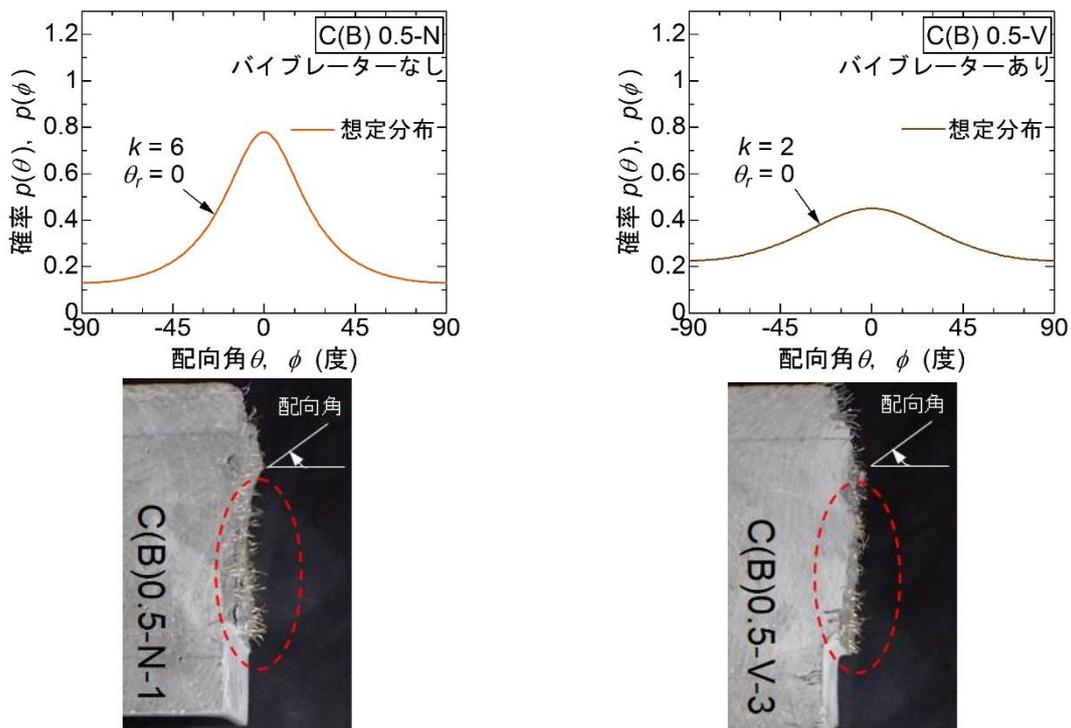


図 4-29 繊維配向性に対する解析結果と試験結果の比較 ($V_f = 0.5\%$)

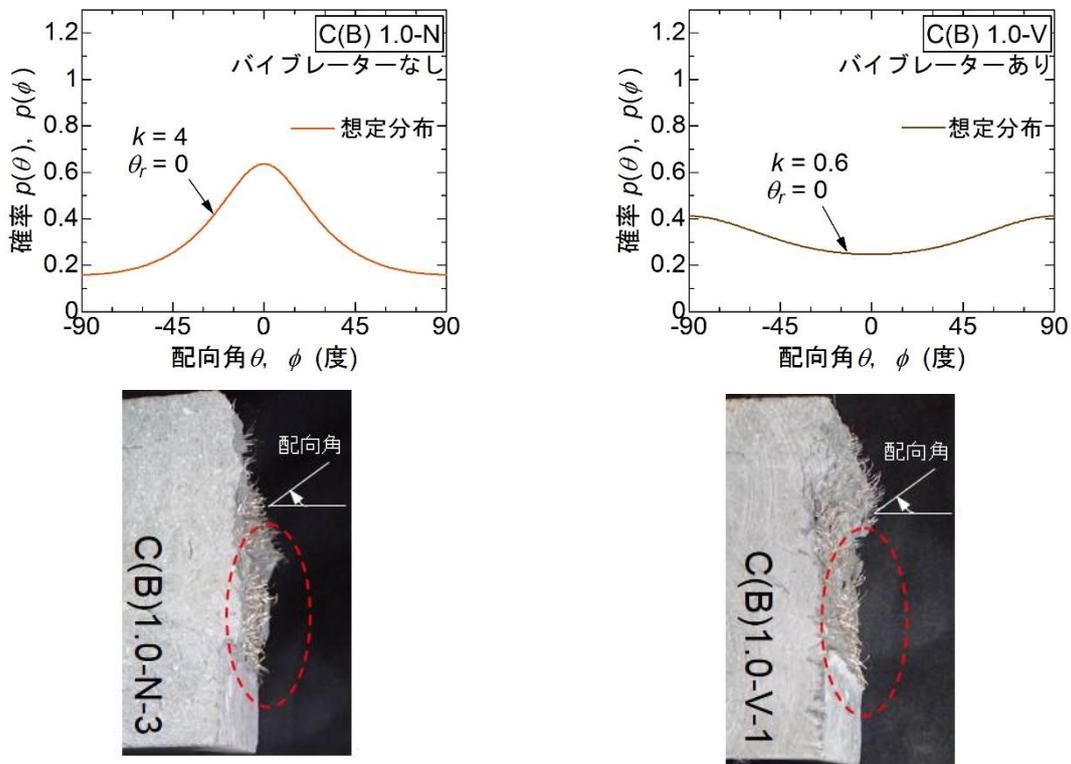


図 4-30 繊維配向性に対する解析結果と試験結果の比較 ($V_f = 1.0\%$)

4.5 まとめ

超高強度コンクリートにスチールワイヤを混入することを想定して行った単繊維の引抜試験で得られた拔出し挙動は、第3章で得られたモルタルの挙動と同様であり、引抜荷重はマトリクス強度の増大に伴って大きくなった。

配向強度をパラメータとして架橋則を構築することで、繊維配向性と架橋則の関連性を検討した結果、本研究で対象繊維としたスチールワイヤを使用した FRCC においては、ひび割れ面を架橋して架橋力を担っている繊維本数の増加と、スナビング効果による荷重増加のバランスが最適となる繊維配向角分布が与えられる際に、最大の引張応力が得られることが推測された。

単繊維の拔出し挙動から構築される架橋則を考慮して、試験体断面における応力-ひび割れ幅関係をモデル化し、ひび割れ面を架橋する繊維配向角分布を想定した断面解析を行った結果、FRCC の曲げ試験結果を概ね再現することができた。

第5章 結論

5.1 研究のまとめ

FRCC の引張性能評価に対する架橋則の有用性を検討することを目的とし、単繊維の拔出し挙動から構築される架橋則に関して、FRCC の引張性能に対する適合性を検証するとともに、架橋則により得られる引張性能を考慮して断面解析を行い、FRCC の曲げ性能評価に対する架橋則の適用性について検討をした。検討の結果、以下の知見を得た。

- (1) スチールワイヤの拔出し挙動に関して、付着長に比例して引抜荷重が大きくなる傾向が見られ、繊維-マトリクス間の付着は摩擦によって生じることが確認された。
- (2) スチールワイヤの拔出し挙動に関して、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、その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。
- (3) 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を概ね再現することができた。
- (4) 本研究で対象としたスチールワイヤを使用した FRCC においては、ひび割れ面を架橋して架橋力を担っている繊維本数の増加と、スナビング効果による荷重増加のバランスが最適となる繊維配向角分布が与えられる際に、最大の引張力が得られると推測された。
- (5) 単繊維の拔出し挙動から構築される架橋則を考慮して、ひび割れ面における繊維の配向性を想定した断面解析を行い、FRCC の曲げ試験結果を概ね再現することができた。

5.2 今後の課題

・繊維やマトリクスが異なる場合の架橋則

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。本実験においては、スチールワイヤを対象繊維とし、モルタルおよび超高強度コンクリートを対象マトリクスとして架橋則の有用性を検討したが、異なる繊維もしくはマトリクスを用いた場合、架橋則はまた違うものとなることが予想される。今後、様々な繊維とマトリクスの組み合わせに対する架橋則を構築して、それらの関係を明らかにし、FRCC の引張性能の基礎的性状に関するバックデータの蓄積を行うことが求められている。FRCC の引張性能の定量的評価が可能となれば、FRCC の引張性能を構造体の設計に生かすことにつながるだろう。

謝辞

本卒業論文を作成するにあたり、指導教員である筑波大准教授 金久保利之先生には終始丁寧なご指導を賜りました。同研究グループの筑波大助教 八十島章先生には研究に関してご意見、ご教唆をいただきました。ここに感謝の意を表します。また、実験の遂行にあたり多くのご助力を頂いた筑波大学システム情報工学等支援室技術職員 小島篤志氏に深く感謝致します。

同研究室所属の先輩方から多くの知識や示唆を頂き、特に山田大氏には実験から論文作成に至るまで多くのご協力を頂きました。ご協力頂いた皆様に感謝の意を表します。

参考文献

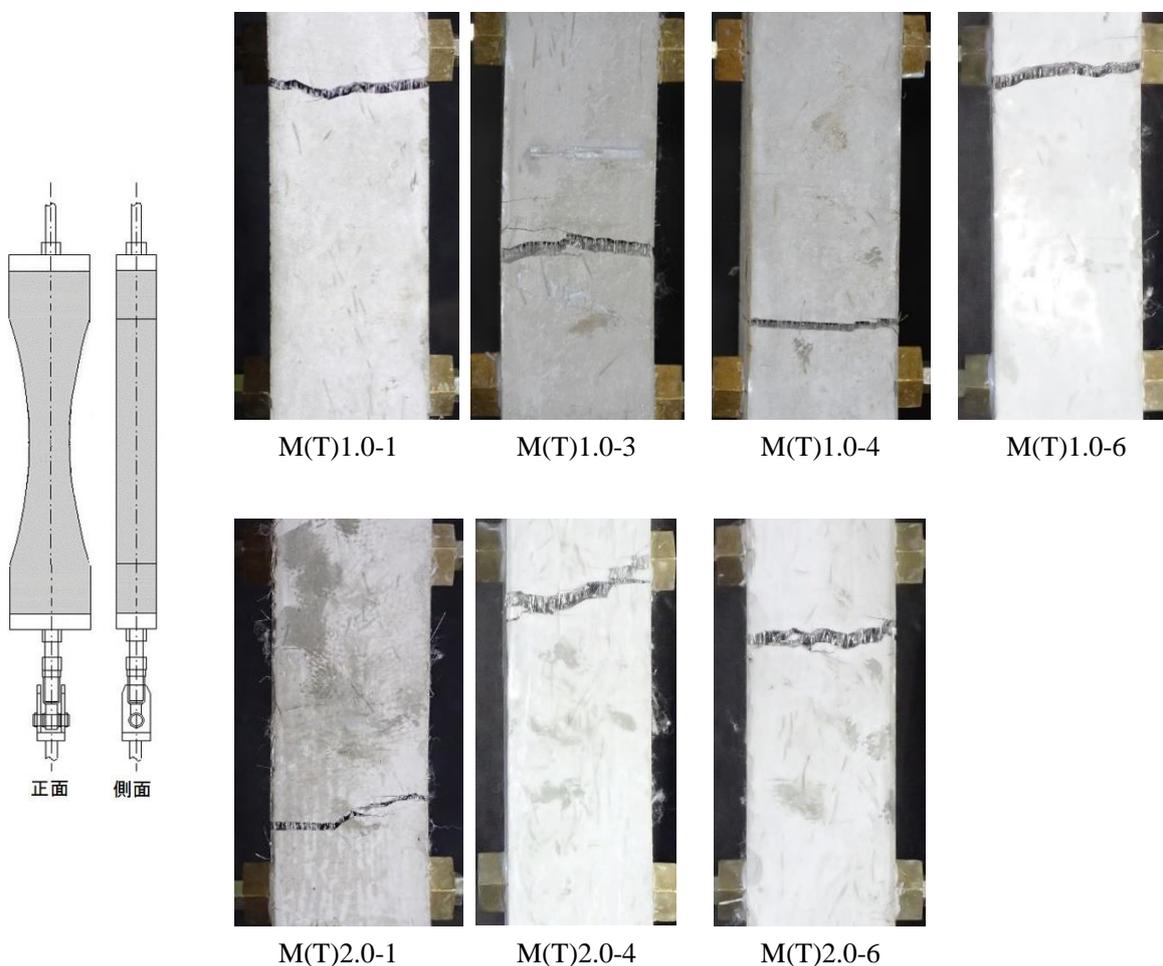
- 1) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会報告書，2012.9
- 2) 清田雅量，三橋博三，閑田徹志，川又篤：セメント系複合材料における繊維の付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.23，No.2，pp.187-192，2001
- 3) Li, V. C. et al.: Effect of Inclining Angle, Bundling, and Surface Treatment on Synthetic Fiber Pull-out from a Cement Matrix, Composites, Vol.21, No.2, pp.132-140, 1990
- 4) Kanda, T., and Li, V.C.: Effect of Fiber Strength and Fiber-Matrix Interface on Crack Bridging in Cement Composites, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.125, No3, pp.290-299, 1999
- 5) 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
- 6) 月崎良一，宮口大，万子銘，浅野浩平，金久保利之：HPFRCC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（近畿），材料施工，pp.179-184，2014.9
- 7) 金久保利之，清水克将，閑田徹志，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
- 8) 浅野浩平，金久保利之：HPFRCC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
- 9) 宮口大，渡邊啓介，金久保利之：繊維配向性を考慮した棒状バイブレーターによるHPFRCCの打込み方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.265～270，2015.7
- 10) 日本コンクリート工学会規準 JCI-S-001-2003，「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」
- 11) 浅野浩平：高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性と架橋則に関する研究，筑波大学大学院博士論文，2014.3

付録 一軸引張試験および曲げ試験結果詳細

本研究で行われた一軸引張試験（第3章参照）および曲げ試験（第4章参照）について、実験結果詳細をここに記す。

A.1 一軸引張試験

付図1に示す一軸引張試験体の各面に対して、加力終了時におけるひび割れ開口の様子（試験体側面）を付図2に、ひび割れ面における繊維配向の様子（試験体正面）を付図3および付図4に示す。ひび割れを多数の繊維が架橋しており、ひび割れ発生面において、繊維は試験体軸方向に強く配向している。



付図1 一軸引張試験体の各面

付図2 加力終了時におけるひび割れ開口の様子



M(T)1.0-1



M(T)1.0-3



M(T)1.0-4



M(T)1.0-6

付図 3 一軸引張試験終了後のひび割れ面の様子 ($V_f = 1.0\%$)



M(T)2.0-1



M(T)2.0-4

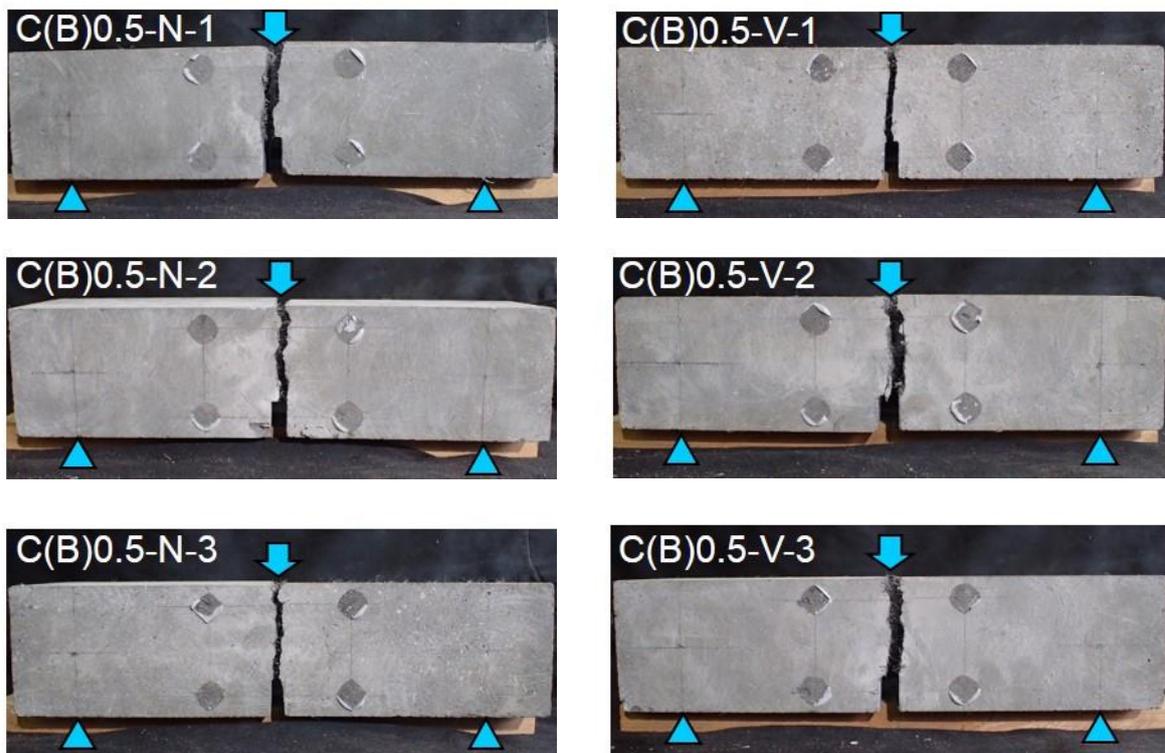


M(T)2.0-6

付図 4 一軸引張試験終了後のひび割れ面の様子 ($V_f = 2.0\%$)

A.2 曲げ試験

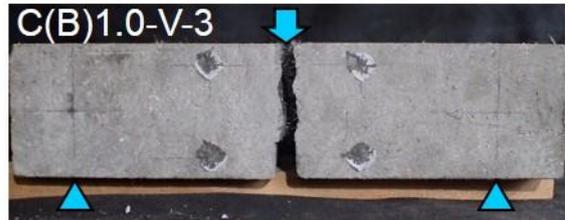
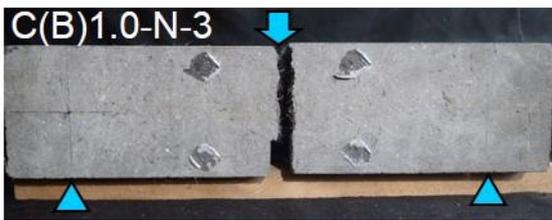
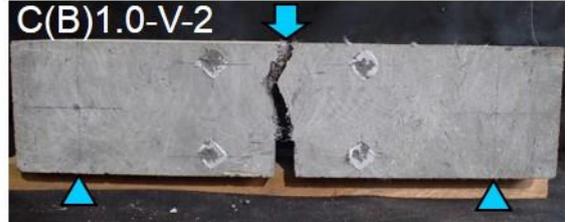
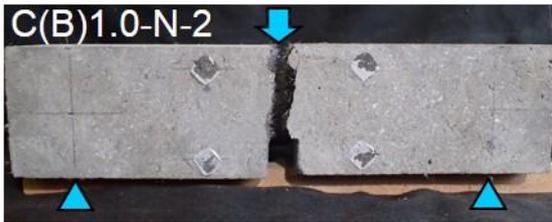
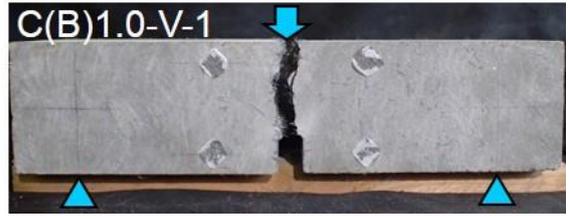
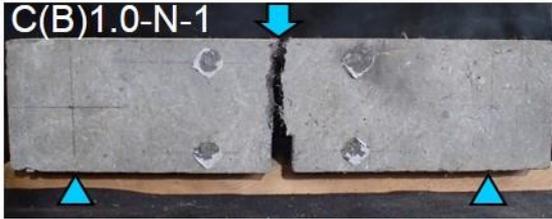
曲げ試験体におけるひび割れ発生の様子を付図 5 および付図 6 に示す。ここで、曲げ試験体は加力終了後、発生したひび割れに沿って分断した。試験体に導入した切欠き上部からひび割れが発生しており、ひび割れは試験体上部に向かって直線的に進展している。



バイブレーターなし

バイブレーターあり

付図 5 曲げ試験体におけるひび割れ発生の様子 ($V_f = 0.5\%$)



バイブレーターなし

バイブレーターあり

付図 6 曲げ試験体におけるひび割れ発生の様子 ($V_f = 1.0\%$)