

筑波大学大学院博士課程  
理工情報生命学院  
システム情報工学研究群修士論文

アラミド繊維補強セメント複合材料の引張試験と  
架橋則の検討

朴 謙

修士（工学）

（構造エネルギー工学学位プログラム）

指導教員 金久保 利之

2025年 3月

## 概要

コンクリートの特性として、圧縮応力に対しては高い強度を示すものの、引張応力に対しては極めて強度が小さく、脆性的な挙動を示すことが挙げられる。コンクリートの引張性能を改善するための手法として、セメント材料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, FRCC)がある。

FRCC の性能評価の手法として、マトリクスに埋め込んだ単繊維を引き抜く実験があるが、径が小さい繊維においては同実験を実施することが困難である。本研究では、細径アラミド繊維を用いた FRCC を対象として、単繊維の引抜き試験に代わる引張試験を計画、実施し、試験方法の有効性について検討を行った。

試験区間断面が繊維長より小さい FRCC 試験体の引張試験を行い、単繊維の架橋モデルを作成した。架橋則の計算結果は、試験結果を再現することができた。次に、FRCC の 4 点曲げ試験を行い、架橋則の計算結果を用いて FRCC の引張応力-ひずみ関係を仮定し断面解析を行った。その結果、解析結果は実験結果とよい一致をみた。

したがって、細径アラミド繊維において、本手法によって単繊維引抜き試験によらない繊維の架橋モデルを得ることが可能であることがわかった。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	繊維補強セメント複合材料	1
1.2	架橋則を用いた FRCC の引張性能評価	2
1.2.1	架橋則の概要	2
1.2.2	単繊維の抜き出し挙動	3
1.3	研究目的	4
第2章	引張試験	5
2.1	使用材料	5
2.2	試験体概要	6
2.3	試験方法	7
2.4	試験結果	8
第3章	4点曲げ試験	9
3.1	試験体概要	9
3.2	4点曲げ試験	10
3.3	実験結果	11
第4章	架橋則の構築と検証	13
4.1	単繊維の架橋モデル	13
4.2	断面解析による検証	15
第5章	結論	17
	謝辞	18
	参考文献	19

## 図目次

図 1.2.1	FRCC を用いた構造部材の評価の流れ <sup>[2]</sup> .....	2
図 1.2.2	繊維が配向角を有する場合の引抜きに対する抵抗機構 .....	3
図 2.1.1	実験に使用したアラミド繊維 .....	5
図 2.2.1	試験体および型枠 .....	6
図 2.3.1	加力装置 .....	7
図 2.4.1	加力後の試験体およびその破断面 .....	8
図 2.4.2	引張応力-ヘッド間変位関係 .....	8
図 3.1.1	曲げ試験体 .....	9
図 3.2.1	4点曲げ試験方法 .....	10
図 3.3.1	加力後の試験体と破断面 .....	11
図 3.3.2	曲げモーメント-曲率関係 .....	12
図 4.1.1	単繊維の架橋モデル .....	13
図 4.1.2	架橋則の計算結果 .....	14
図 4.2.1	FRCC の $\sigma$ - $\epsilon$ モデル .....	15
図 4.2.2	断面解析と実験結果の比較 .....	16

## 表目次

表 2.1.1	アラミド繊維の物性(メーカー試験値) .....	5
表 2.1.2	FRCC の調合計画 .....	5
表 3.3.1	曲げ試験結果 .....	11
表 4.1.1	架橋則の計算に用いた諸値 .....	14
表 4.2.1	FRCC の $\sigma$ - $\epsilon$ モデルの特性値 .....	15
表 4.2.2	断面解析と実験結果の比較 .....	16

# 第1章 はじめに

## 1.1 繊維補強セメント複合材料

コンクリートの特性として、圧縮応力に対しては極めて高い強度を示すものの、引張応力に対しては極めて強度が小さく、脆性的な挙動を示すというものが挙げられる。実際の構造物においては、鉄筋を組み合わせることで圧縮応力をコンクリートが、引張応力を鉄筋が負担するという形にすることで引張強度を補うように設計されている。

一方で、コンクリート自体の引張性能を改善するための手法として、モルタルやコンクリートと言ったセメント材料に長さ数mm~数10mm程度の短繊維を混入するというものがあり、こうして得られたものを繊維補強セメント複合材料(Fiber-Reinforced Cementitious Composites, 以下 FRCC)という。FRCCの特性として、引張応力下で発生したひび割れの間を繊維が架橋することによって引張力を負担し、引張性能を向上させることがある。この際に用いられる繊維には、鋼繊維やガラス繊維といった無機繊維や、ポリビニルアルコール(以下 PVA)、ポリプロピレン(以下 PP)といった合成繊維などがある。

構造物に FRCC を用いることにより、上記の引張性能を活かして構造物の高耐久化や高寿命化といった効果が期待できる。一方で、FRCC の性能評価の難しさから、実際の構造物に適用された例は少ない。

FRCC の性能評価の手法として一軸引張試験が挙げられるが、材料特性のばらつきや打設時の流動によって繊維の配向に差が出る事などの要因によって、定量的な引張性能の評価は困難なものとなっている。

## 1.2 架橋則を用いた FRCC の引張性能評価

### 1.2.1 架橋則の概要

FRCC を用いた構造部材の性能評価は、部材の巨視的な材料挙動に FRCC の引張性能を適用することで行われる。FRCC の引張性能を評価する手法として、単繊維の架橋モデルに繊維配向分布やスナッピング効果を考慮し、それらを足しあわせて引張応力-ひび割れ幅関係を得る、架橋則の評価方法が提案されている<sup>[1]</sup>。この架橋則を用いることで、繊維とマトリクスの付着や繊維強度などといった材料の構成要素から FRCC の性能を評価することが可能となる。架橋則を用いた FRCC の性能評価の流れを図 1.2.1<sup>[2]</sup>に示す。

架橋則の評価は繊維のマトリクスからの引抜き性状を基としており、繊維やマトリクスの種類によって得られる結果が異なるため、材料ごとに架橋則を構築する必要がある。

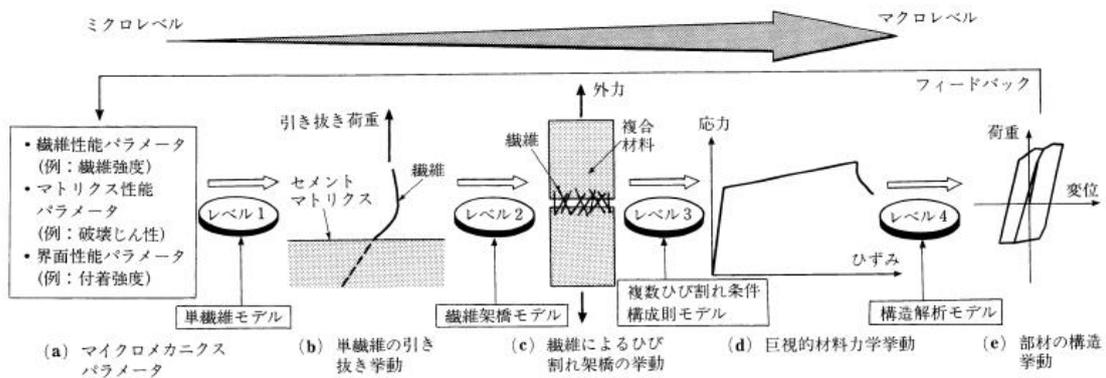


図 1.2.1 FRCC を用いた構造部材の評価の流れ<sup>[2]</sup>

### 1.2.2 単繊維の抜き出し挙動

実際の FRCC 部材内部では、単繊維は均一に並んでいるのではなく、様々な方向に配向している。このため、繊維はひび割れを架橋する際に様々な角度から架橋することとなる。このときの繊維の角度を配向角といい、この配向角によって引抜き挙動の際の抵抗に変化が生じるため、ひび割れ面に対する繊維の配向角を考慮する必要がある。

図 1.2.2 に示すように、繊維が配向角を有する場合、繊維の埋込み口でのマトリクスからの反力により、マトリクスとの摩擦が大きくなることで、引抜きに対する抵抗力が大きくなる。このように配向角を有する繊維の引抜き抵抗の増加はスナビング効果と呼ばれ、配向角が大きいほど増大するものとされており、最大引抜き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 $f$ を用いて以下の式(1.1)のように表される<sup>[3]</sup>。

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

$P$  : 引抜き荷重、 $P_0$  : 配向角  $0^\circ$  の場合の引抜き荷重、 $\psi$  : 繊維配向角

また、合成繊維においては繊維表面が荒らされ、見かけの繊維破断強度が低下する事例が確認されている<sup>[4]</sup>。この現象は繊維強度低減効果と呼ばれ、繊維強度低減係数 $f'$ を用いて、以下の式(1.2)のように表される。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^n \cdot e^{-f' \cdot \psi} \quad (1.2)$$

$\sigma_{fu}$  : 見かけの繊維強度、 $\sigma_{fu}^n$  : 配向角  $0^\circ$  の場合の見かけの繊維強度

スナビング係数 $f$ および繊維強度低減係数 $f'$ は単繊維引抜き試験の結果から得られる。図 1.2.2 に示すように配向角 $\psi$ が増大するにつれてスナビング効果により繊維の引抜き荷重は増加するが、さらに $\psi$ が増大すると繊維が破断する<sup>[5]</sup>。

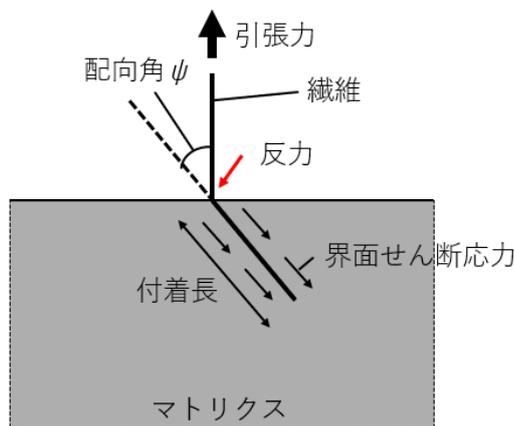


図 1.2.2 繊維が配向角を有する場合の引抜きに対する抵抗機構

### 1.3 研究目的

FRCC の引張性能を構造部材に適用する際には、FRCC の性能評価の方法を確立する必要がある。FRCC の引張性能の評価方法として期待される架橋則は、単繊維—マトリクス間の引抜き挙動を基に構築される。引抜き挙動に関する精確なデータを得るためには、FRCC のひび割れを架橋する繊維の挙動を把握し、データを蓄積する必要がある。

引抜き挙動を得るための手法として、マトリクスに埋め込んだ単繊維を引き抜くという手法がある。この手法は、引抜き挙動における短繊維の情報を得られるという利点があるものの、径が小さい繊維においては同実験を実施することが困難である。

そこで、本研究では、繊維径が  $0.012\text{ mm}$  であるアラミド単糸に着目し、単繊維の引抜き試験に代わる引張試験を計画、実施し、架橋則の構築を試みる。また、得られた架橋則に対する検討を行い、本研究における試験方法の有効性について検討を行う。

## 第2章 引張試験

### 2.1 使用材料

FRCC に使用したアラミド繊維の物性を表 2.1.1 に、写真を図 2.1.1 に、FRCC の調合計画を表 2.1.2 に示す。アラミド繊維の体積混入率は 0.5% とした。

表 2.1.1 アラミド繊維の物性(メーカー試験値)

繊維径(mm)	繊維長(mm)	引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)
0.012	12	3432	73



図 2.1.1 実験に使用したアラミド繊維

表 2.1.2 FRCC の調合計画

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
W	C	S	FA	F	Ad
380	678	484	291	6.95	6

W : 水道水、C : 早強ポルトランドセメント、S : 7号珪砂  
FA : フライアッシュⅡ種、F : アラミド繊維、Ad : 高性能減水剤

## 2.2 試験体概要

本実験で使用した試験体および型枠を図 2.2.1 に示す。試験体の全長は 210 mm、厚さは 5 mm である。繊維の配向分布やスナビング効果の影響を極力排除することを目的として、試験区間断面は繊維長より小さい 5 mm×5 mm とした。

試験体は、アクリル板とゴム板で作られた型枠に FRCC を流し込み、上からアクリル板で覆い、ねじで締め付けることによって作製した。

計 10 体の試験体を作製した。

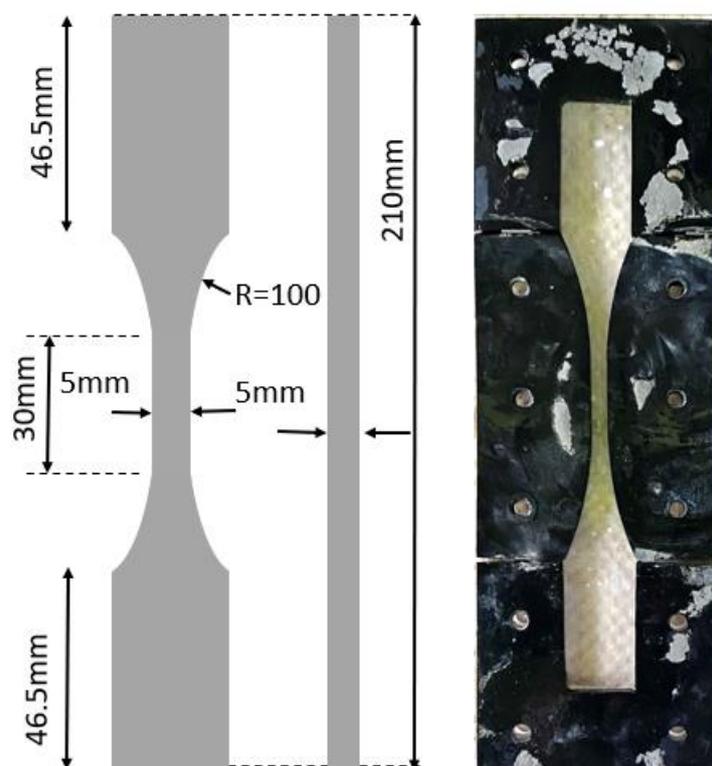


図 2.2.1 試験体および型枠

## 2.3 試験方法

加力には、図 2.3.1 に示す容量 200 N の小型卓上万能試験機を用いた。試験体の上下端を固定し、毎分 1 mm のヘッドスピードで加力を行った。計測項目は、引張荷重およびヘッド間変位である。



図 2.3.1 加力装置

## 2.4 試験結果

加力後の試験体およびその破断面を図 2.4.1 に、引張応力-ヘッド間変位関係を図 2.4.2 に示す。引張応力は、加力後の試験体の破断面の断面寸法を実測し、引張荷重を断面積で除算することにより求めた。引張応力-ヘッド間変位関係では、直線的に応力が上昇した後、剛性が低下する様子が確認されたが、目視上、試験体にひび割れを確認することはできなかった。最大荷重に達した後、繊維が破断するような音とともに荷重が急激に低下し、ひび割れが開口して試験体が破断した。試験体の破断面において、抜け出した繊維を確認することはできなかった。

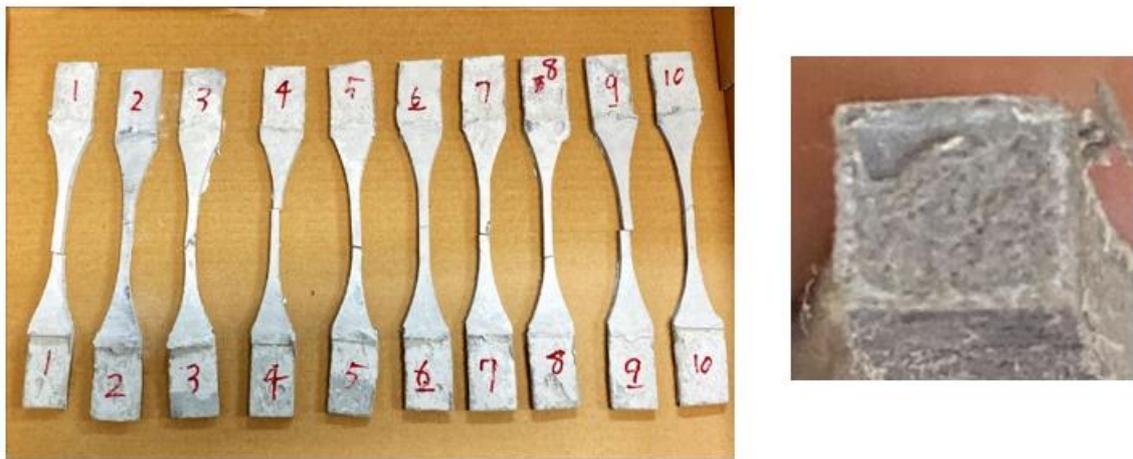


図 2.4.1 加力後の試験体およびその破断面

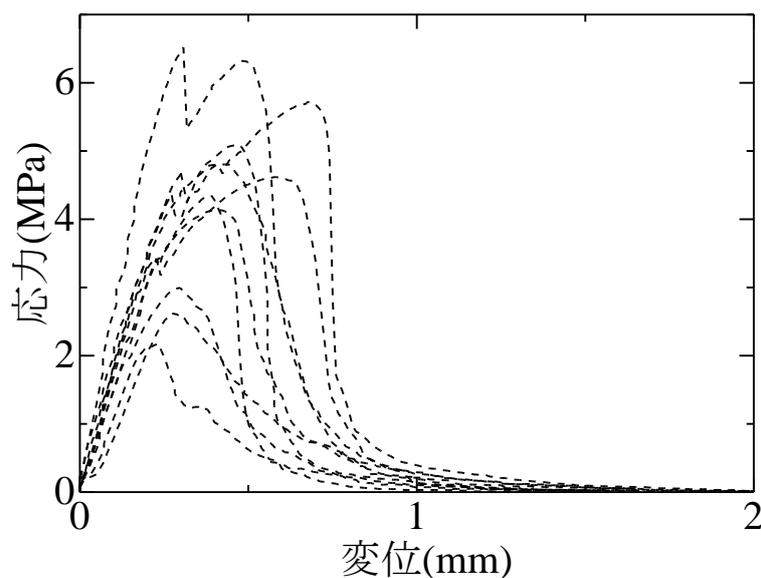


図 2.4.2 引張応力-ヘッド間変位関係

## 第3章 4点曲げ試験

### 3.1 試験体概要

試験体を図 3.1.1 に示す。試験体の断面は 100 mm×100 mm、長さは 400 mm である。使用材料は第 2 章の引張試験と同一である。FRCC を鋼製型枠に流し込んで作製した。試験体数は合計 5 体である。

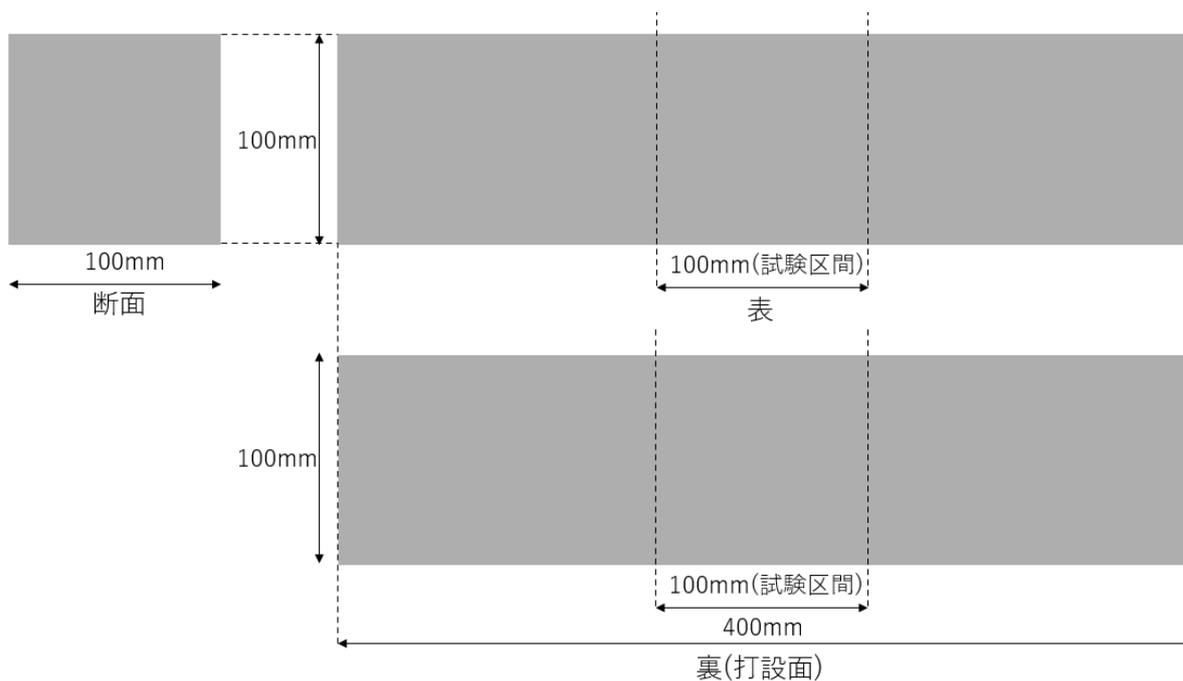


図 3.1.1 曲げ試験体

### 3.2 4点曲げ試験

加力および計測方法を図 3.2.1 に示す。加力には、容量 500kN の油圧作動型万能試験機を用いた。

計測項目は荷重、荷重点および中央たわみ、純曲げ区間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設置した  $\pi$  型変位計で計測した。

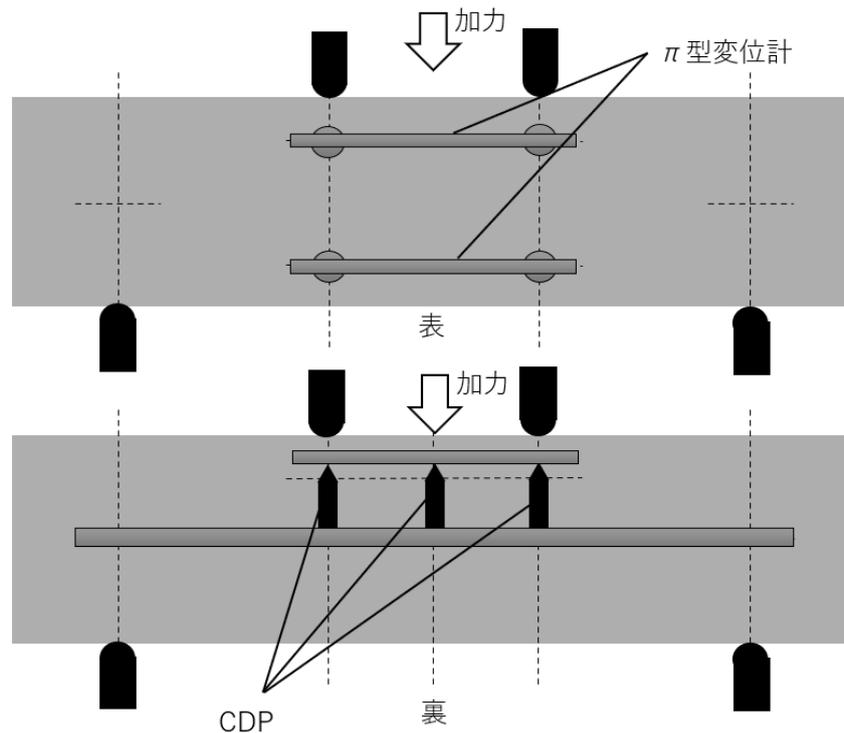


図 3.2.1 4点曲げ試験方法

### 3.3 実験結果

加力後の試験体および破断面を図 3.3.1 に、各試験体の最大曲げモーメントおよび最大曲げモーメント時の曲率を表 3.3.1 に、曲げモーメントー曲率関係を図 3.3.2 に示す。試験体 No.4(橙色)において、変位計測の不具合があった。

弾性的挙動の後、剛性が急激に低下し、それに伴ってひび割れが伸長していく様子が確認された。試験後の破断面において、抜け出した繊維を確認することはできなかった。

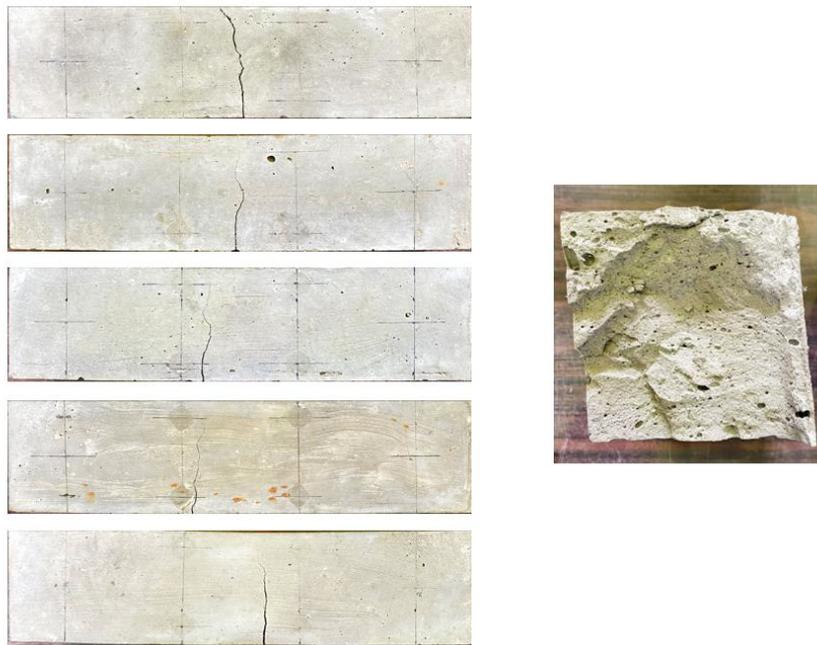


図 3.3.1 加力後の試験体と破断面

表 3.3.1 曲げ試験結果

試験体	最大曲げモーメント (kN・m)	最大曲げモーメント時の曲率 (1/m)
No.1	1.40	0.060
No.2	1.53	0.185
No.3	1.59	0.054
No.4	1.48	—*
No.5	1.67	0.087
平均	1.53	0.082

\*変位計測不具合

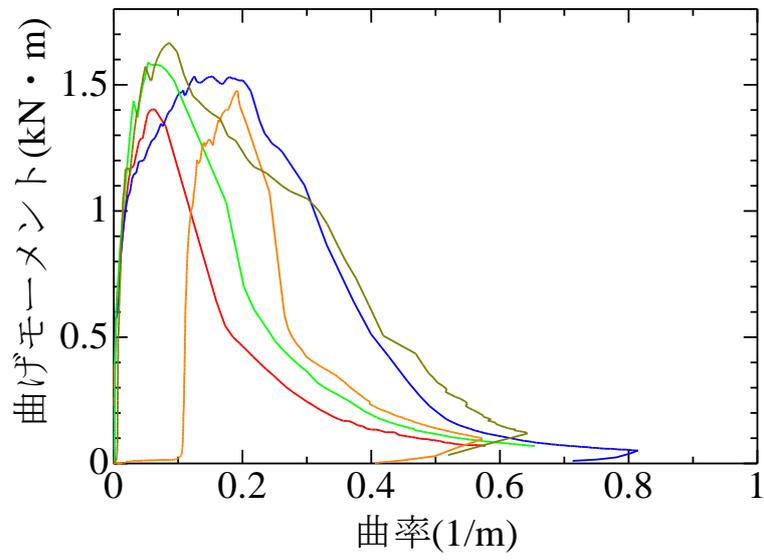


図 3.3.2 曲げモーメントー曲率関係

## 第4章 架橋則の構築と検証

### 4.1 単繊維の架橋モデル

既往の集束型アラミド繊維の架橋モデル<sup>[6]</sup>を参考にアラミド単繊維の架橋モデルを仮定し、文献[1]の手法で架橋則の計算を行った。架橋モデルは図 4.1.1 および式(4.1)に示す、直線的に荷重が増加し、最大荷重に達した後直線的に荷重が減少していくバイリニアモデルを採用した。

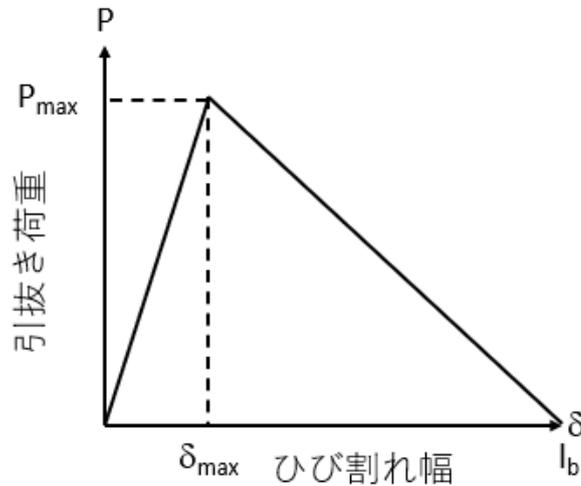


図 4.1.1 単繊維の架橋モデル

$$P(\delta) = \begin{cases} \frac{P_{\max}}{\delta_{\max}} \delta & (\delta > \delta_{\max}) \\ P_{\max} - \frac{P_{\max}}{l_b - \delta_{\max}} \cdot (\delta - \delta_{\max}) & (\delta_{\max} > \delta) \end{cases} \quad (4.1)$$

FRCC の架橋則における架橋力 $P_{\text{bridge}}$ は、ひび割れ幅 $\delta$ に対する単繊維引抜き荷重の総和として、次の式(4.2)のように得られる。

$$P_{\text{bridge}} = N_f \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta, \psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z) \quad (4.2)$$

$N_f$ : 繊維の本数、 $P(\delta, \psi)$ : 単繊維の引抜き荷重、 $\psi$ : ひび割れ面に対する繊維配向角

$\theta, \phi$ : 軸方向に平行な平面に対して $\psi$ を投影した配向角

$p(\theta) \cdot p(\phi)$ : 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

架橋則の計算結果と引張試験の結果が合致するように単繊維の架橋モデルの $P_{max}$ と $\delta_{max}$ 、およびその他の値を設定し、架橋則を計算した。表 4.1.1 に架橋則の計算に用いた諸値を、図 4.1.2 に架橋則の計算結果と実験結果との比較を示す。

図 4.1.2 より、架橋則は最大荷重に達した後に急激に荷重が低下する挙動とよい一致を見せていることから、引張試験の結果と合う架橋則の構築に成功したと考えられる。

表 4.1.1 架橋則の計算に用いた諸値

単繊維架橋モデル	$P_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
	0.4	1
架橋則の計算	破断強度(MPa)	強度低減係数
	2300	0.3
	配向強度	スナビング係数
	6.5	0.5
計算結果	架橋強度(MPa)	最大時のひび割れ幅(mm)
	4.56	0.45

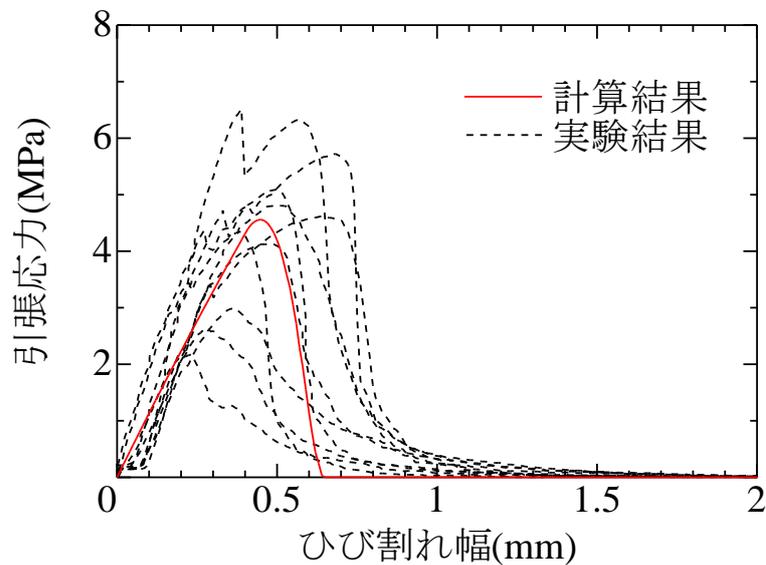


図 4.1.2 架橋則の計算結果

## 4.2 断面解析による検証

前節で計算した架橋則から、断面解析のための応力-ひずみモデルを作成して断面解析を行い、曲げ試験結果との比較を行う。FRCC の圧縮応力-ひずみ関係を放物線モデル、引張応力-ひずみ関係をバイリニアモデルとした。FRCC の $\sigma$ - $\varepsilon$ モデルを図 4.2.1 に、特性値を表 4.2.1 に示す。FRCC の圧縮強度 $\sigma_B$ 、圧縮強度時のひずみ $\varepsilon_{\max}$ は $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体を用いた一軸圧縮試験によって求めた。引張強度 $\sigma_t$ は、架橋則の計算から得た架橋強度とした。引張強度時のひずみ $\varepsilon_t$ は、架橋強度時のひび割れ幅を純曲げ区間長さで除した値とした。終局ひずみ $\varepsilon_{tu}$ は、架橋則の計算結果より概ねひび割れ幅が  $0.6 \text{ mm}$  で引張応力が消失すること、純曲げ区間内に 3 本のひび割れが生じると仮定して等価長さを  $100/3 \text{ mm}$  として除した値とした。

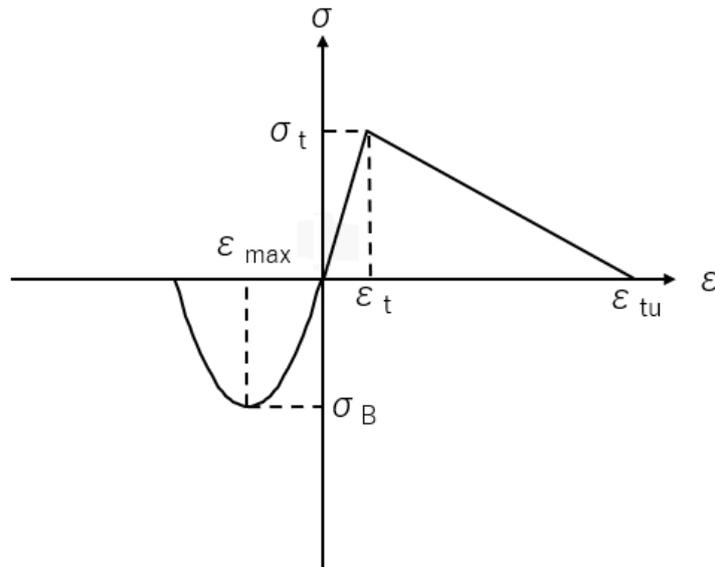


図 4.2.1 FRCC の $\sigma$ - $\varepsilon$ モデル

表 4.2.1 FRCC の $\sigma$ - $\varepsilon$ モデルの特性値

$\sigma_B$ (MPa)	$\varepsilon_{\max}$	$\sigma_t$ (MPa)	$\varepsilon_t$	$\varepsilon_{tu}$
36.6	0.00174	4.56	0.0045	0.018

曲げモーメントー曲率関係の解析結果と実験結果の比較を図 4.2.2 に、最大曲げモーメントおよび最大曲げモーメント時の曲率の実験値と計算値の比較を表 4.2.2 に示す。なお、変位計測の不具合があった試験体 No.4 は除外している。

解析結果と実験結果はよい一致を見せており、作成した単繊維の架橋モデルによって FRCC の曲げ挙動を再現することができたと考えられる。

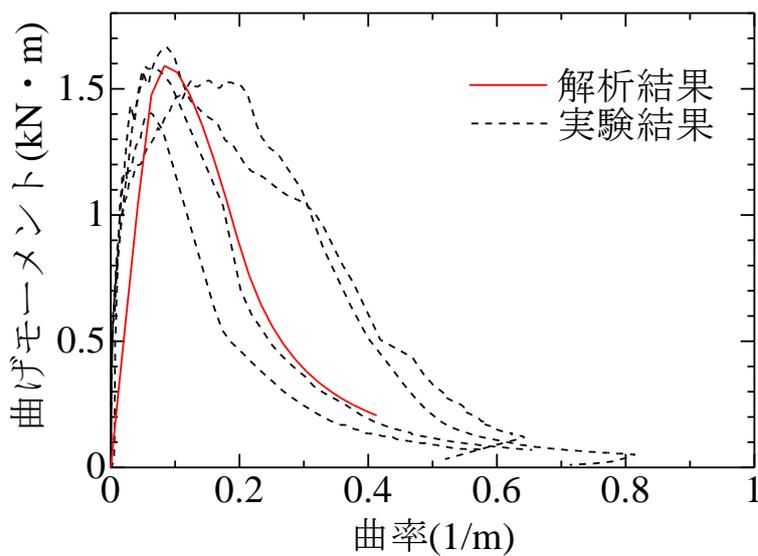


図 4.2.2 断面解析と実験結果の比較

表 4.2.2 断面解析と実験結果の比較

解析結果		実験結果	
最大曲げモーメント (kN・m)	最大曲げモーメント 時の曲率(1/m)	最大曲げモーメント (kN・m)	最大曲げモーメント 時の曲率(1/m)
1.59	0.083	1.53	0.082

## 第5章 結論

単繊維の引抜き試験が困難な細径の繊維を用いた FRCC の架橋性能の把握を目的とし、試験区間断面が繊維長より小さい試験体の引張試験を行い、その結果と合致するように架橋則を構築した。FRCC の 4 点曲げ試験を行い、架橋則から仮定した応力-ひずみ関係を用いた断面解析の結果を比較した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 試験区間断面が繊維長より小さい引張試験体の引張試験結果と合致するように単繊維の架橋モデルを作成した。架橋則の計算結果は、試験結果を再現することができた。
- (2) 架橋則の計算結果を用いて FRCC の引張応力-ひずみ関係を仮定し断面解析を行った。解析結果は実験結果とよい一致をみた。
- (3) 細径アラミド繊維において、本手法によって単繊維引抜き試験によらない繊維の架橋モデルを得ることが可能である。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、指導教員である筑波大教授・金久保利之先生には終始丁寧なご指導をいただきました。また、福指導教員である筑波大学教授・松島亘志先生および筑波大学准教授・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や同級生の皆様からも多くの知識や助言を頂き、研究の進展において多大な影響を齎していただきましたこと、深く感謝いたします。

本研究を行うにあたりご協力頂いた皆様に、この場を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K., : Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, *Materials Journal*, 113(2), pp.131-141, 2016.
- [2] 関田徹志 : 高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状、*コンクリート工学*、vol.38、No.6、pp.9-16、2000
- [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., 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
- [5] Kanda, T., Li, V. C. : Effect of Fiber Strength and Fiber-Matrix Interface on Crack Bridging in Cement Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.125, No.3, pp.290-299, 1999
- [6] Kanakubo, T., Echizen, S., Wang, J., Mu, Y. : Pullout Behavior of Bundled Aramid Fiber in Fiber-Reinforced Cementitious Composite, *Materials*, 13(7), 1746, 2020