

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学術院
システム情報工学研究群修士論文

組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 部材 の構造性能に関する研究

高砂 柊伍

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

2024年 3月

論文概要

近年、鉄筋コンクリート（RC）構造物の経年劣化および低寿命化が懸念され、新たに建設される RC 構造物においても、適切な維持管理および長寿命化の検討が求められている。そこで、連続繊維補強材（Fiber-reinforced polymer : FRP）と繊維補強セメント複合材料（Fiber-reinforced cementitious composite : FRCC）の複合構造が提案されている。FRP 補強 FRCC 部材により、高耐久、長寿命な構造物が期待される。

本研究では、組紐型アラミド FRP 補強 PVA – FRCC 部材の構造性能の把握を目的とする。FRCC 角柱試験体の中心圧縮試験を行い、FRCC 部材の圧縮性状の検討を行った。また、FRP 補強筋と FRCC 付着性状に関して、既往の引抜き試験結果を用い、付着応力–すべり量関係（付着構成則）の再モデル化を行った。さらに、組紐型アラミド FRP 補強 PVA – FRCC 梁試験体の曲げ性状の把握を目的として、4 点曲げ試験を実施し、実験結果と既往のひび割れ幅算定式による補強筋ひずみ–ひび割れ幅関係の比較および断面解析による曲げ耐力の検討を行った。

中心圧縮試験体の実験結果より得られた圧縮強度は、円柱供試体と比較して、それぞれモルタル試験体で 0.85、繊維体積混入率 1% で 0.82、同 2% で 0.86 であり、断面形状と寸法の違いによる圧縮強度の減少を確認した。実験より得た応力–ひずみ関係を、円柱供試体の圧縮特性および低減係数をパラメータとして Popovics モデルを用いてモデル化を行い、実験結果と良い適合性を得た。

既往の引抜き試験結果を用い、付着構成則の再モデル化を行い、提案したトリリニアモデルは実験結果と良い適合性を示し、特に最大付着応力までの挙動を精確に表した。

組紐型アラミド FRP 補強 FRCC 梁試験体の 4 点曲げ試験より、繊維体積混入率 2% の試験体において FRCC の圧壊により最大荷重を迎え、その後、荷重を保持しつつたわみが増大した。繰返し加力による各サイクルでの荷重低下はみられなかった。同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、繊維体積混入率が増加するほど小さくなる傾向がみられた。既往の研究により導出されたひび割れ幅算定式と、実験結果より得られた補強筋ひずみ–ひび割れ幅関係は良い適合性を得た。応力–ひずみ関係の引張側に PVA 繊維架橋則、圧縮側に中心圧縮試験体の Popovics モデルを使用した断面解析結果と、実験結果により得た最大曲げモーメントは良い適合性を示した。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 連続繊維補強材	1
1.1.2 繊維補強セメント複合材料	2
1.1.3 FRP 補強 FRCC 部材	3
1.2 研究目的	4
第2章 PVA-FRCC 部材の圧縮特性	5
2.1 はじめに	5
2.2 中心圧縮試験概要	6
2.2.1 試験体	6
2.2.2 使用材料	7
2.2.3 加力方法	8
2.2.4 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体の圧縮試験	9
2.3 実験結果	10
2.3.1 破壊性状	10
2.3.2 応力-ひずみ関係	14
2.4 応力-ひずみ関係のモデル化	16
2.5 まとめ	18
第3章 組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 部材の付着性状	19
3.1 はじめに	19
3.2 実験概要	20
3.3 付着構成則のモデル化	23
3.4 まとめ	25
第4章 組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 梁部材の曲げ性状	26
4.1 はじめに	26
4.2 組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 梁部材の曲げ試験概要	27
4.2.1 試験体	27
4.2.2 使用材料	28
4.2.3 加力方法	29
4.3 組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 梁部材の曲げ試験結果	30
4.3.1 破壊性状	30
4.3.2 荷重-載荷点たわみ関係	32
4.3.3 補強筋ひずみ-ひび割れ幅関係	33
4.3.4 曲げモーメント-曲率関係	34

4.4 実験結果とひび割れ幅算定式の比較	35
4.4.1 ひび割れ幅算定式	35
4.4.2 実験結果と算定式の比較	36
4.5 断面解析による曲げ耐力の算定	39
4.5.1 FRCC の応力－ひずみ関係	39
4.5.2 断面解析による曲げ耐力の比較	41
4.6 まとめ	42
第 5 章 結論	43
参考文献	45

図表目次

図 2.2.1 試験体形状	6
図 2.2.2 PVA 繊維	7
図 2.2.3 変位計設置状況	8
図 2.2.4 円柱供試体の応力－ひずみ関係	9
図 2.3.1 試験体破壊状況	11-13
図 2.3.2 中心圧縮試験体の応力－ひずみ関係	14
図 2.4.1 テストピース圧縮試験の実験結果およびモデルとの比較	17
図 2.4.2 中心圧縮試験体の実験結果およびモデルとの比較	17
図 3.2.1 試験体の一例（A シリーズ）	21
図 3.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋	21
図 3.2.3 変位計設置状況	22
図 3.3.1 トリリニアモデル	23
図 3.3.2 実験結果とモデルの比較	24
図 4.2.1 梁試験体形状	27
図 4.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋の表面形状	28
図 4.2.3 変位計設置状況	29
図 4.2.4 片側繰返し加力の載荷履歴	29
図 4.3.1 試験体破壊状況	31
図 4.3.2 荷重－載荷点たわみ関係	32
図 4.3.3 補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係	33
図 4.3.4 曲げモーメント－曲率関係	34
図 4.4.1 FRCC 等価断面	36
図 4.4.2 繊維架橋則のトリリニアモデル	37
図 4.4.3 ひび割れ幅算定式と実験結果の比較	38
図 4.5.1 応力－ひずみ関係	39
表 2.2.1 試験体一覧	6
表 2.2.2 PVA 繊維の材料特性	7
表 2.2.3 FRCC の配合計画	7
表 2.2.4 円柱供試体の圧縮試験結果一覧	9
表 2.3.1 中心圧縮試験体の圧縮特性一覧	14
表 2.3.2 円柱供試体および中心圧縮試験体の圧縮特性の比較	15
表 2.4.1 Popovics モデルの各パラメータ	16
表 3.2.1 引抜き試験体一覧	20

表 3.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋の材料特性	21
表 3.2.3 FRCC の配合計画および圧縮特性	22
表 3.3.1 トリリニアモデルの各特性点	24
表 4.2.1 試験体一覧	27
表 4.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋の材料特性	28
表 4.2.3 FRCC の配合表及び圧縮特性	28
表 4.4.1 ひび割れ幅算定式に用いた各パラメータ	36
表 4.5.1 応力-ひずみ関係の各パラメータ	40
表 4.5.2 最大曲げモーメントの比較	41

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 連続繊維補強材

近年、構造物の経年劣化や耐用年数の低下が懸念され、鉄筋コンクリート（RC）構造物においても同様である。また、新たに建設される RC 構造物においても、環境負荷等への影響から、適切な維持管理と長寿命化の検討が求められる。RC 構造物における耐久性低下の要因の一つとして、鉄筋腐食が挙げられる。そこで、鉄筋に代替する材料として連続繊維補強材（Fiber-reinforced polymer：FRP）がある^{1, 2)}。

FRP は、繊維に樹脂を含浸させた材料であり、異形鉄筋と比較して優れた耐腐食性、引張強度および弾性挙動を示すことから、RC 部材において、鉄筋代替として FRP の利用が提案されている^{3~9)}。FRP の主な使用繊維は、有機繊維（アラミド繊維等）と無機繊維（炭素繊維、ガラス繊維、バサルト繊維等）に分類され、繊維ごとにそれぞれ特徴を有する。例えば、アラミド繊維は、軽量で扱いやすく、絶縁性を有する。炭素繊維は、他の繊維と比較して弾性率や引張強度が高い。FRP の材料特性の把握のために多くの研究が行われており、例えば、Aydın と Arslan は、異なる環境条件下における FRP の材料特性を調査し、炭素繊維 FRP（CFRP）の優れた特性を実証した¹⁰⁾。また、FRP のコンクリートとの付着特性は、表面形状に依存することが知られている¹¹⁾。

FRP の各特性を有効に活用することにより、長寿命かつ高耐久で、修復性に優れた構造物の実現が期待される。

1.1.2 繊維補強セメント複合材料

コンクリートは、圧縮応力下において高い強度を示す一方、引張応力下においては脆性的であり、鉄筋コンクリート構造物の設計においてもコンクリートは引張応力を負担しない。そこで、コンクリートに引張性能を付与するために、繊維補強セメント複合材料（Fiber-reinforced cementitious composite : FRCC）がある。

FRCC は、セメント系マトリックスに長さ数 mm から数十 mm の短繊維を混入させ、繊維が部材に生じたひび割れを架橋することでマトリックスの引張性能を向上させた材料である。FRCC 混入繊維として、鋼繊維および有機繊維（例えば PE 繊維、PVA 繊維および PP 繊維）が主に使用される。FRCC は部材に生じるひび割れ性状により分類される。例えば、曲げ応力下においてたわみ硬化性状を示す高靱性繊維補強セメント複合材料（Ductile fiber-reinforced cementitious composites : DFRCC）¹²⁾、引張応力下において微細なひび割れを生じながら疑似ひずみ硬化性状を示す（Strain hardening cementitious composites : SHCC）がある¹³⁾。FRCC は、繊維がひび割れを架橋しひび割れ幅を制御することで効力を発揮することから、引張応力-ひび割れ幅関係（以下：繊維架橋則）を把握することが重要であり、これまで多くの研究が行われてきた^{14 ~ 21)}。既往の研究では、繊維の配向および分散性を考慮した PVA 繊維^{22, 23)}およびアラミド繊維²⁴⁾の架橋則が提案されている。

FRCC を有効に活用することにより、構造物の設計の幅が広がることが期待される。

1.1.3 FRP 補強 FRCC 部材

FRP 補強コンクリートにおいて、FRP は破断するまで弾性挙動を示すことから、設計における終局はコンクリートの圧壊によることが想定される。しかし、コンクリートの圧壊は、脆性的な破壊を示す。そこで、FRCC との併用が考えられる。FRCC は、混入させた短繊維がひび割れを架橋することで応力伝達をすることから、FRCC の圧壊後も脆性的な破壊を避けることが期待される。FRP 補強 FRCC 部材により、高寿命・高耐久な構造物が期待され、いくつかの研究報告がある^{25 ~ 29)}。その多くが、鉄筋と FRP もしくは FRCC とコンクリートのハイブリッド構造である。また、使用されている FRP および FRCC 混入繊維も限定的であり、FRP 補強 FRCC 部材の基本的な構造性能の把握が求められる。

RC 構造物において、鉄筋とコンクリートの相互付着作用を考慮したひび割れ幅算定式が提案されている³⁰⁾。Sunaga らは、提案された算定式に繊維架橋効果を付与し、鉄筋補強 FRCC 部材にも適用範囲を拡張した³¹⁾。この算定式は、補強筋に関する項が補強筋物性値および FRCC との付着構成則（付着応力-すべり量関係）のみであるため、FRP を補強筋と用いた場合でも適用可能である。組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 試験体においても FRP の引抜き試験および両引き試験が行われ、FRP の付着性状および算定式の適合性が明らかにされている³²⁾。

1.2 研究目的

本研究では、FRP 補強 FRCC 部材の構造性能の把握を目的とする。FRP には組紐型アラミド FRP 補強筋を、FRCC 混入繊維には PVA 繊維を使用した。

第 2 章では、FRCC の圧縮特性の把握を目的として、角柱試験体の中心圧縮試験を実施し、実験結果の検討および応力－ひずみ関係のモデル化を行った。

第 3 章では、既往の FRP 補強筋の引抜き試験結果を用い、付着応力－荷重端すべり量関係の再モデル化を行った。

第 4 章では、組紐型アラミド FRP 補強 PVA－FRCC 梁試験体の構造性能の把握を目的として、4 点曲げ試験を実施し、実験結果の検討、既往のひび割れ幅算定式と補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係の比較および断面解析による曲げ耐力の検討を行った。

第2章 PVA－FRCC 部材の圧縮特性

2.1 はじめに

FRP 補強 FRCC 部材の実用化のためには、部材の終局状態を FRCC の圧壊とすることが想定されていることから、FRCC の圧縮特性の把握が重要である。本章では、PVA－FRCC 試験体の圧縮特性の把握を目的として、角柱試験体の中心圧縮試験を行った。試験体の断面寸法および試験区間は、第 4 章で述べる組紐型アラミド FRP 補強 PVA－FRCC 部材曲げ試験体に準拠した。実験により得られた応力－ひずみ関係のモデル化を行った。

2.2 中心圧縮試験概要

2.2.1 試験体

試験体一覧および寸法を表 2.2.1 および図 2.2.1 にそれぞれ示す。試験体は、180 mm 角の正方形断面とし、高さは 480 mm、試験区間は 280 mm である。補強筋は組紐型アラミド FRP 補強筋を、FRCC 混入繊維には PVA 繊維を使用した。パラメータは、繊維体積混入率 3 種とし、繊維を混入させていないモルタル（記号：MT）、1%（記号：PVA1%）および 2%（記号：PVA2%）である。各パラメータにつき 3 体ずつ作製し、計 9 体の試験体に対して加力を行った。

表 2.2.1 試験体一覧

試験体名	共通事項	繊維体積混入率	試験体数
MT	断面寸法：180mm×180mm 試験区間：280mm 全長：480mm FRCC 繊維：PVA 繊維	-	3
PVA1%		1%	3
PVA2%		2%	3

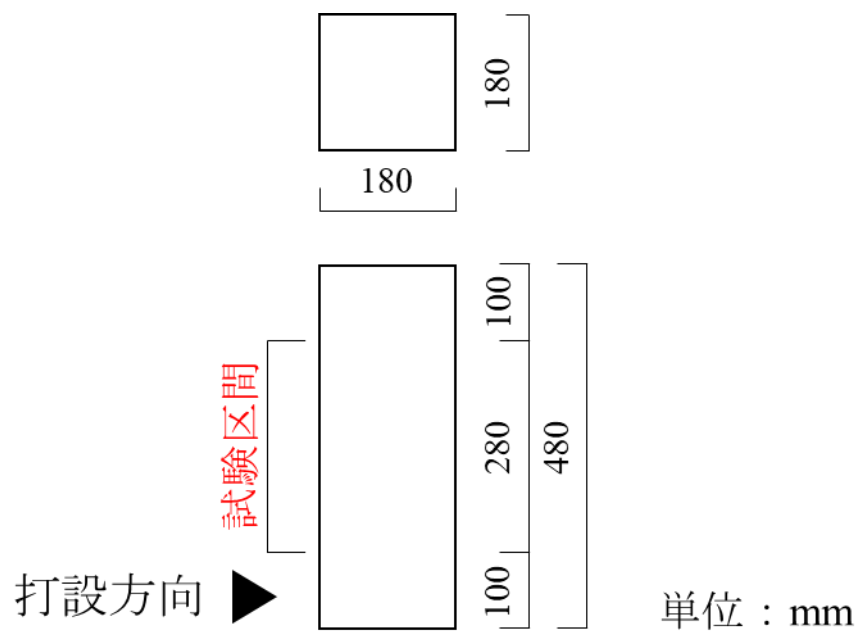


図 2.2.1 試験体形状

2.2.2 使用材料

PVA 繊維の表面形状を図 2.2.2 に、材料特性を表 2.2.2 に示す。配合計画を表 2.2.3 に示す。打設後約 2 週間後に加力を行った。

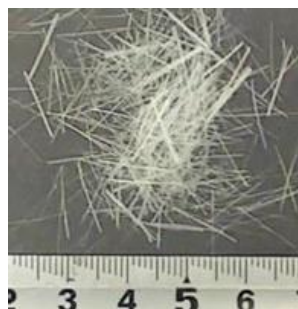


図 2.2.2 PVA 繊維

表 2.2.2 PVA 繊維の材料特性

繊維種別	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA	0.10	12	1200	28

表 2.2.3 FRCC の配合計画

試験体 種別	単位量(kg/m ³)				PVA 繊維 (kg)
	W	C	S	FA	
MT	380	678	484	291	0
PVA1%					13
PVA2%					26

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

2.2.3 加力方法

加力には 2 MN 万能試験機を用いた。変位計設置状況を図 2.2.3 に示す。試験体側面に π 型変位計を 4 体、加力版の 4 隅に全体変形計測用の変位計を設置した。計測項目は、荷重、 π 型変位計による試験区間の軸方向変形、変位計による軸方向の全体変形である。

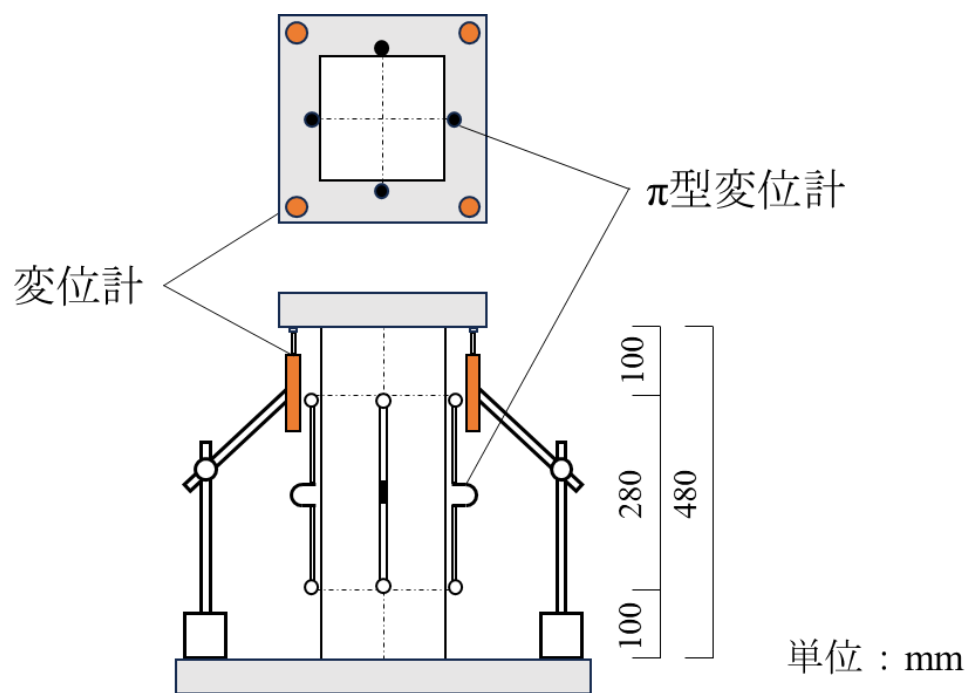


図 2.2.3 変位計設置状況

2.2.4 φ 100 mm × 200 mm の円柱供試体の圧縮試験

φ 100 mm × 200 mm の円柱供試体の圧縮試験結果を表 2.2.4 に示す。実験結果より得られた応力－ひずみ関係を図 2.2.4 に示す。応力は、荷重を各供試体の断面積で除することで求めた。ひずみは、コンプレッソメーターによる変形の値を計測区間長（100 mm）で除することで求めた。圧縮強度の平均は、MT : 48.5 MPa、PVA1% : 50.6 MPa、PVA2% : 50.3 MPa であり、繊維体積混入率による違いはみられなかった。MT 試験体では、最大荷重に到達すると同時に急激に荷重が低下し、その後のデータは計測できなかった。FRCC 試験体では、最大荷重に到達すると同時に荷重が急激に低下し、その後、荷重を保持しつつひずみが増大した。これは、繊維を混入させることで FRCC の剥落が抑制されたためと考えられる。

表 2.2.4 円柱供試体の圧縮試験結果一覧

試験体	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時のひずみ (%)	弾性率 (GPa)
MT-1	46.2	0.38	17.2
MT-2	50.4	0.43	17.5
MT-3	48.8	0.39	17.8
MT-平均	48.5	0.40	17.5
PVA1%-1	50.8	0.48	17.2
PVA1%-2	50.0	0.44	17.3
PVA1%-3	50.9	0.46	17.5
PVA1%-平均	50.6	0.46	17.3
PVA2%-1	49.8	0.45	17.1
PVA2%-2	50.6	0.48	18.1
PVA2%-3	50.5	0.50	16.8
PVA2%-平均	50.3	0.48	17.3

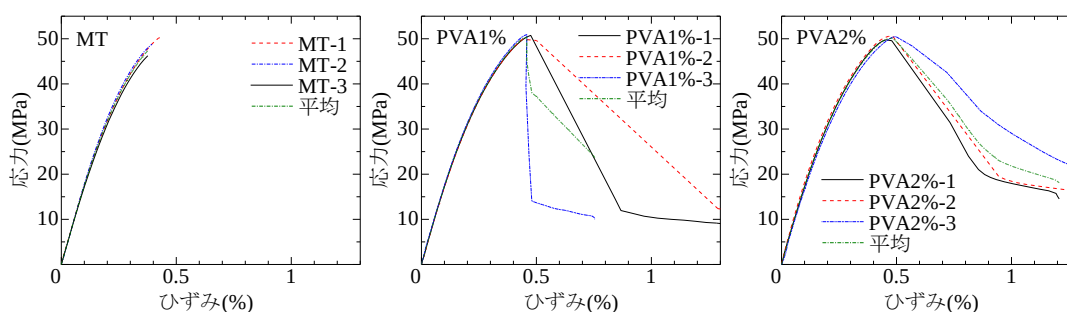


図 2.2.4 円柱供試体の応力－ひずみ関係

2.3 実験結果

2.3.1 破壊性状

試験体の加力終了後の破壊状況を図 2.3.1 に示す。MT 試験体において、最大荷重に達すると同時に、荷重が低下し、モルタルが剥落する様子が確認できた。FRCC 試験体では、最大荷重に到達した後、荷重が低下するとともに、試験体側面が損傷し、その後、荷重を保持しつつ変位が増大した。FRCC 試験体の繊維体積混入率の違いによる損傷の程度の違いは確認できなかった。

	MT-1	MT-2	MT-3
底面			
打設面			

图 2.3.1 試驗体破壊状況

	PVA1%-1	PVA1%-2	PVA1%-3
底面			
打設面			

図 2.3.1 試験体破壊状況（続き）

	PVA2%-1	PVA2%-2	PVA2%-3
底面			
打設面			

図 2.3.1 試験体破壊状況（続き）

2.3.2 応力-ひずみ関係

実験により得られた中心圧縮試験体の圧縮特性一覧を表 2.3.1 に示す。応力-ひずみ関係を図 2.3.2 に示す。応力は、荷重を各試験体の断面積で除することで求めた。ひずみは、変形を試験区間 280 mm で除することで求めた。変形は、最大荷重までは、 π 型変位計により得られた計測値を用い、その後は、 π 型変位計の計測値に全体変位計の計測値を盛替えすることで、試験区間の変形とした。繊維混入体積率による圧縮強度および圧縮強度時のひずみの違いはみられなかった。MT 試験体において、最大荷重到達後に荷重が急激に低下した。FRCC 試験体では、最大荷重到達後に荷重が急激に低下し、その後荷重を保持しつつ変位が増大した。これは、繊維が FRCC の剥落を抑制したためと考えられる。

表 2.3.1 中心圧縮試験体の圧縮特性一覧

試験体	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時のひずみ (%)	弾性率 (GPa)
MT-1	34.6	0.30	18.5
MT-2	46.3	0.37	18.6
MT-3	42.1	0.32	18.4
MT-平均	40.1	0.33	18.5
PVA1%-1	43.7	0.37	17.3
PVA1%-2	39.9	0.33	18.0
PVA1%-3	41.2	0.34	17.3
PVA1%-平均	41.6	0.35	17.6
PVA2%-1	43.3	0.37	17.2
PVA2%-2	43.9	0.36	17.4
PVA2%-3	42.6	0.37	17.6
PVA2%-平均	43.3	0.37	17.4

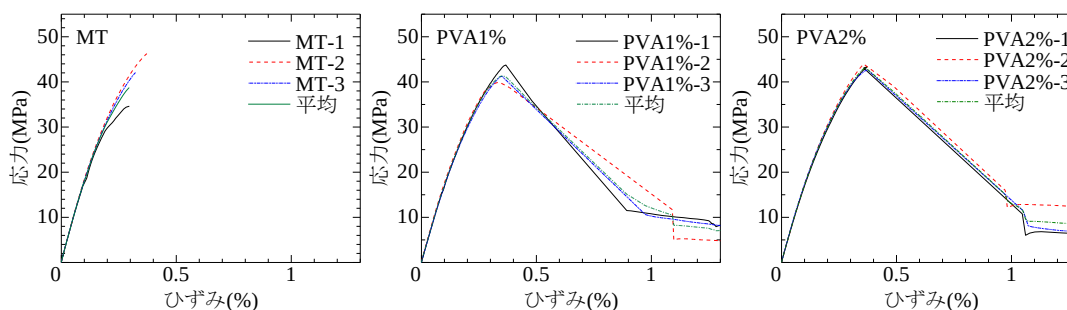


図 2.3.2 中心圧縮試験体の応力-ひずみ関係

円柱供試体および中心圧縮試験体の圧縮特性の比較を表 2.3.2 に示す。全試験体において、円柱供試体よりも中心圧縮試験体のほうが圧縮強度および圧縮強度時のひずみが小さく、断面形状および寸法の違いによる圧縮強度の減少が確認できた。繊維体積混入率による、減少率の違いはみられなかった。

表 2.3.2 円柱供試体および中心圧縮試験体の圧縮特性の比較

試験体		圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時 のひずみ (%)	弾性率 (GPa)	中心圧縮試験 /円柱供試体	
					圧縮強度比	圧縮強度時 のひずみ比
円柱 供試体	MT	48.5	0.40	17.5	—	
	PVA1%	50.6	0.46	17.3		
	PVA2%	50.3	0.48	17.3		
中心圧縮 試験体	MT	41.0	0.33	18.5	0.85	0.82
	PVA1%	41.6	0.35	17.6	0.82	0.76
	PVA2%	43.3	0.37	17.4	0.86	0.77

2.4 応力－ひずみ関係のモデル化

応力－ひずみ関係のモデルに用いた Popovics モデルを式(2.1) に示す。

$$\frac{\sigma_c}{k_1 f_c} = \frac{\varepsilon_c}{k_2 \varepsilon_0} \cdot \frac{n}{(n-1) + (\varepsilon_c / k_2 \varepsilon_0)^n} \quad (2.1)$$

ここで、 σ_c ：応力（MPa）、 ε_c ：ひずみ、 f_c ：FRCC 円柱供試体圧縮強度（MPa）、 ε_0 ：FRCC 円柱供試体圧縮強度時のひずみ、 n ：曲線の形状を示す定数、 k_1 、 k_2 ：低減係数である。

Popovics モデルの各パラメータを表 2.4.1 に示す。中心圧縮試験体の低減係数 k_1 、 k_2 は、表 2.3.2 に示す圧縮特性の減少率により決定した。FRCC 円柱供試体の終局ひずみ ε_u は、実験結果より経験的に 0.5 % とした。FRCC 中心圧縮試験体の終局ひずみ ε_u は、FRCC 円柱供試体の終局ひずみ ε_u (= 0.5 %) に低減係数 k_2 を乗ずることで決定した。モルタル試験体では、円柱供試体および中心圧縮試験体ともに、最大荷重以降のデータが取れなかったため、終局ひずみ ε_u は圧縮強度時のひずみとした。 n は、実験結果とモデルの終局ひずみ ε_u までの二乗誤差が最小となるように決定した。

表 2.4.1 Popovics モデルの各パラメータ

試験体		k_1	k_2	終局ひずみ (%)	n
円柱供試体	MT	1	1	0.400	3.92
	PVA1%			0.500	3.34
	PVA2%			0.500	2.94
中心圧縮 試験体	MT	0.85	0.82	0.330	3.75
	PVA1%	0.82	0.76	0.380	3.90
	PVA2%	0.86	0.77	0.385	3.97

円柱供試体および中心圧縮試験体の実験結果とモデルの比較を図 2.4.1 および図 2.4.2 にそれぞれ示す。実験結果とモデルの適合性は概ね良い。

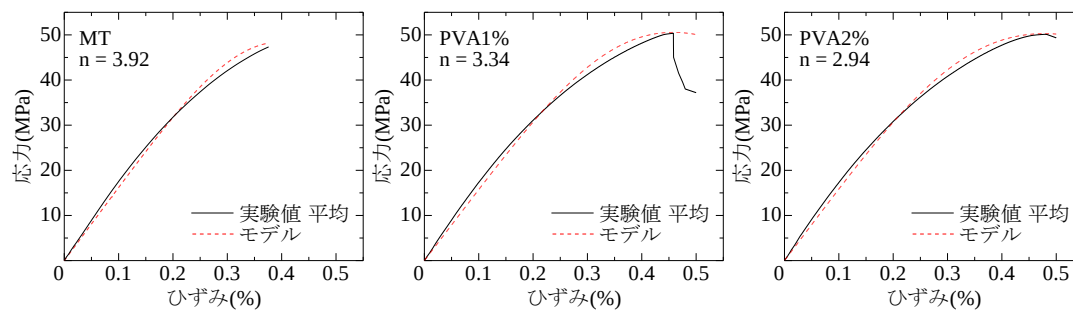


図 2.4.1 テストピース圧縮試験の実験結果およびモデルとの比較

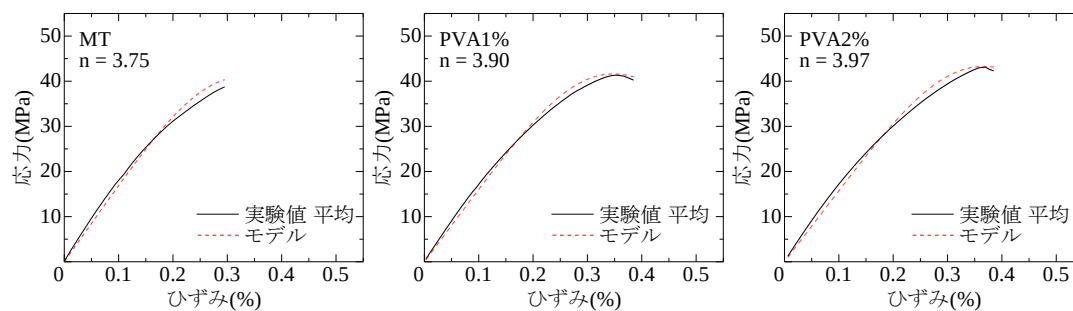


図 2.4.2 中心圧縮試験体の実験結果およびモデルとの比較

2.5 まとめ

PVA-FRCC 試験体の圧縮性状の把握を目的とし、角柱試験体の中心圧縮試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- ① $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体の実験結果より得られた圧縮強度の平均は、それぞれ MT : 48.5 MPa、PVA1% : 50.6 MPa、PVA2% : 50.3 MPa であった。繊維体積混入率による圧縮強度の違いはみられなかった。
- ② 中心圧縮試験体の実験結果より得られた圧縮強度の平均は、それぞれ MT : 41.1 MPa、PVA1% : 41.6 MPa、PVA2% : 43.3 MPa であった。円柱供試体との圧縮強度比は、それぞれ MT : 0.85、PVA1% : 0.82、PVA2% : 0.86 であり、断面形状および寸法の違いによる圧縮強度の減少が確認できた。
- ③ 実験より得られた応力-ひずみ関係を、円柱供試体の圧縮特性および低減係数をパラメータとして、Popovics モデルを用いて中心圧縮試験体のモデル化を行い、実験結果と良い適合性を得た。

第3章 組紐型アラミド FRP 補強 PVA－ FRCC 部材の付着性状

3.1 はじめに

Takasago らは、組紐型アラミド FRP 補強筋の付着性状の把握を目的として、組紐型アラミド FRP 補強筋の引抜き試験を行い、付着応力－荷重端すべり量関係（付着構成則）のトリリニアモデルを提案している³²⁾。本章では、同実験結果を用い、最大付着応力までの挙動をより精確に示すために再モデル化を行った。

3.2 実験概要

表 3.2.1 に引抜き試験の試験体一覧を、図 3.2.1 に試験体の例を再掲する。試験体の高さは 100 mm で、断面の中央に 1 本の組紐型アラミド FRP 補強筋を配している。FRCC 混入繊維は第 2 章と同一である。付着長は、補強筋の約 4 倍の 54 mm であり、実験パラメータは、繊維体積混入率（0 %、1 %、2 %）および断面積（100 × 100 mm²、120 × 120 mm²、140 × 140 mm²）である。試験体名称は、繊維体積混入率（MT : 0 %、PVA1% : 1.0 %、PVA2% : 2.0 %）および断面積（A : 100 × 100 mm²、B : 120 × 120 mm²、C : 140 × 140 mm²）を示している。図 3.2.2 に FRP 補強筋の表面形状を、表 3.2.2 に FRP 補強筋の材料特性を再掲する。表 3.2.3 に、配合計画および φ 100 mm × 200 mm の円柱圧縮試験における FRCC の圧縮特性を示す。図 3.2.3 に、変位計設置状況を示す。同一パラメータにつき 3 体、計 27 体の試験体の加力が行われた。

表 3.2.1 引抜き試験体一覧

試験体	共通事項	断面寸法	繊維体積 混入率	試験体数
MT-A	付着長 : 54 mm (= 4 d) 補強筋 : 組紐型 AFRP 径 : 13.58 mm FRCC 繊維 : PVA	100 mm × 100 mm (A シリーズ)	-	3
PVA1%-A			1.0%	3
PVA2%-A			2.0%	3
MT-B		120 mm × 120 mm (B シリーズ)	-	3
PVA1%-B			1.0%	3
PVA2%-B			2.0%	3
MT-C		140 mm × 140 mm (C シリーズ)	-	3
PVA1%-C			1.0%	3
PVA2%-C			2.0%	3

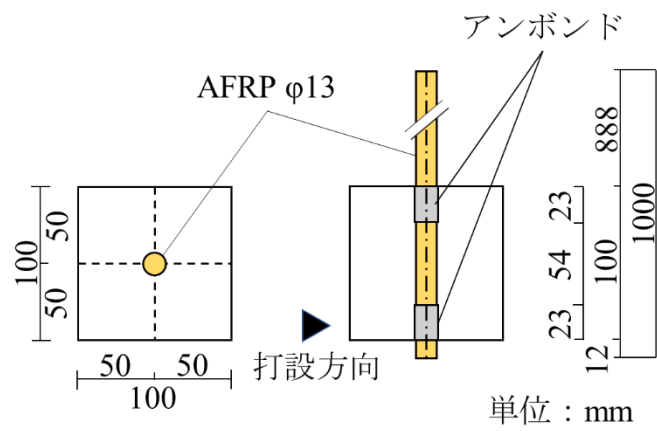


図 3.2.1 試験体の一例（A シリーズ）



図 3.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋

表 3.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋の材料特性

補強筋種別	直径 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
組紐型 AFRP 補強筋	13.58	1261	66.0

表 3.2.3 FRCC の配合計画および圧縮特性

試験体 種別	単位量(kg/m ³)				PVA 繊維 (kg)	圧縮強度 σ_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
	W	C	S	FA			
MT	380	678	484	291	0	48.8	17.5
PVA1%					13	46.2	17.0
PVA2%					26	47.1	16.4

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

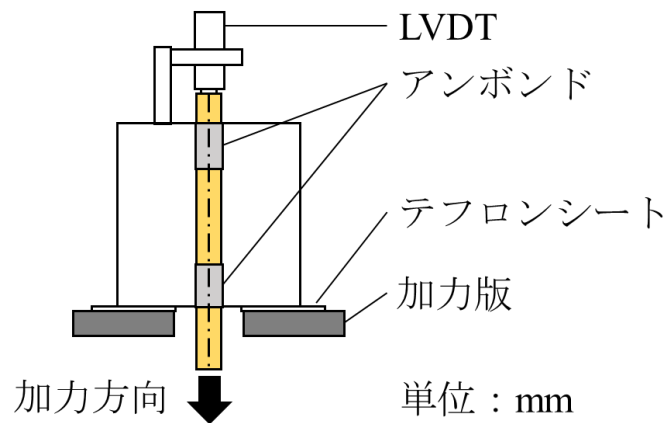


図 3.2.3 変位計設置状況

3.3 付着構成則のモデル化

引抜き試験より得られた付着応力－荷重端すべり量関係（付着構成則）のトリリニアモデルを図 3.3.1 に示す。最大付着応力 $\tau_{\max}$ は、同一パラメータの最大付着応力の平均とした。 $s_{\max}$ は、最大付着応力時の荷重端すべり量の平均とした。初期勾配 k_1 は、最大付着応力の 4/5 までの勾配とした。 τ_1 は最大付着応力の 4/5 である。FRCC 試験体において、軟化勾配 k_u は、繊維体積混入率および断面寸法による違いがみられないため、共通して -0.3 N/mm^3 とした。MT 試験体においては、軟化勾配における実験結果が得られていないため、終局すべり量を 1.5mm とした。表 3.3.1 にトリリニアモデルの各特性点を示す。図 3.3.2 に、付着応力－荷重端すべり量関係の実験結果とトリリニアモデルの比較を示す。黒色の点線で実験結果、赤色の実線でその平均、緑色の一点鎖線でトリリニアモデルを示す。トリリニアモデルは、実験結果と良い適合性を示し、特に、最大付着応力までの挙動を精確に表している。

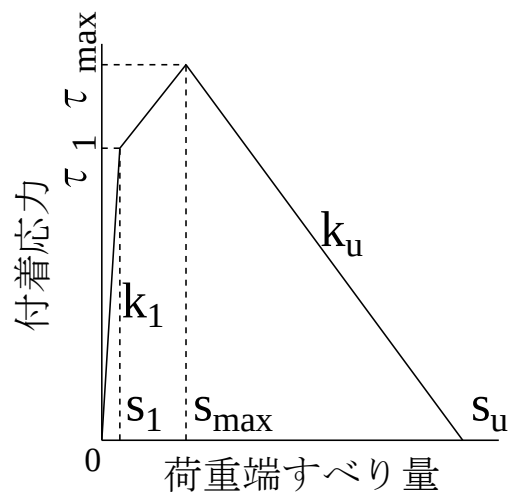


図 3.3.1 トリリニアモデル

表 3.3.1 トリリニアモデルの各特性点

試験体	τ_1 (MPa)	s_1 (mm)	k_1 (N/mm ³)	$\tau_{\max}$ (MPa)	$s_{\max}$ (mm)	k_u (N/mm ³)	s_u (mm)
MT-A	4.37	0.21	20.9	5.46	0.45	-0.30	1.50
MT-B	4.92	0.39	12.7	6.15	0.80		1.50
MT-C	4.21	0.26	16.5	5.26	0.44		1.50
PVA1%-A	5.42	0.38	14.2	6.77	1.16		23.7
PVA1%-B	5.03	0.31	16.2	6.29	1.30		22.3
PVA1%-C	5.29	0.55	9.55	6.61	4.05		26.1
PVA2%-A	5.59	0.29	19.6	6.99	1.03		24.3
PVA2%-B	6.52	0.61	10.7	8.15	3.39		30.5
PVA2%-C	5.89	0.42	14.0	7.36	3.80		28.3

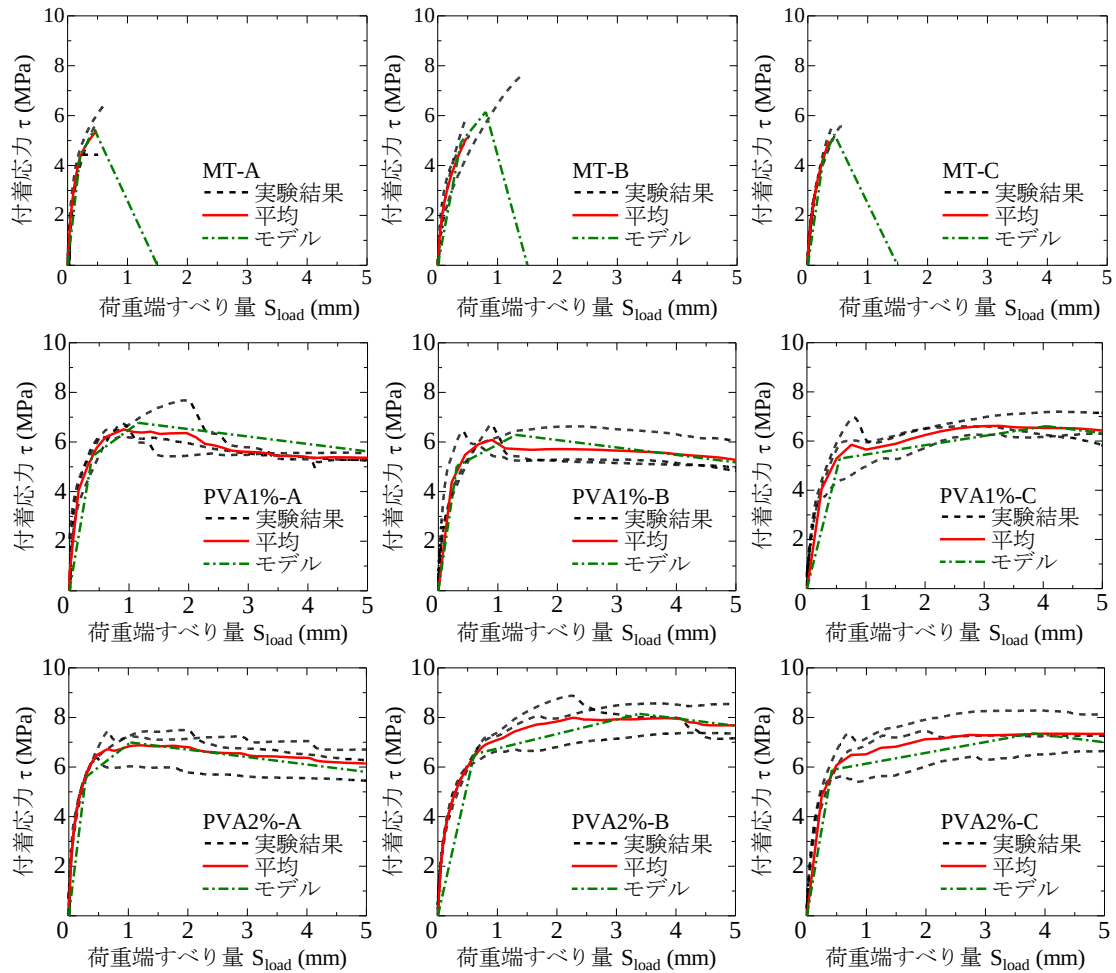


図 3.3.2 実験結果とモデルの比較

3.4 まとめ

既往の引抜き試験結果を用い、組紐型アラミド FRP 補強筋の付着構成則（付着応力－すべり量関係）の再モデル化を行った。提案したトリリニアモデルは、実験結果と良い適合性を示し、特に最大付着応力までの挙動を精確に表している。

第4章 組紐型アラミド FRP 補強 PVA－FRCC 梁部材の曲げ性状

4.1 はじめに

本章では、組紐型アラミド FRP 補強 PVA－FRCC 梁部材に対し、4 点曲げ試験を行い、その曲げ性状を把握する。実験結果と既往のひび割れ幅算定式により得られたひび割れ幅－補強筋ひずみ関係を比較、検討した。さらに、FRCC の応力－ひずみ関係として、圧縮側に第 2 章により得られた圧縮強度試験結果を、引張側に既往の研究により得られた FRCC の繊維架橋則を用いて断面解析を行い、実験より得られた最大曲げモーメントと比較した。

4.2 曲げ試験概要

4.2.1 試験体

表 2.2.1 に試験体一覧を、図 4.2.1 に試験体の詳細を示す。試験体は、幅 180 mm、せい 280 mm、全長 1680 mm とした。補強筋には組紐型アラミド FRP 補強筋を上端に 2 本、下端に 3 本配した。FRCC 混入繊維には PVA 繊維を用いた。試験区間は中央部の純曲げ区間 280 mm とし、せん断破壊を避けるために、せん断区間にはせん断補強筋 D10 を 80 mm 間隔で配した。アラミド FRP 補強筋端部には、静的破砕剤を充填した鋼製カプラーを設け、定着部とした。実験パラメータは、繊維体積混入率および加力方法である。繊維体積混入率は、繊維を混入していないモルタルのみのもの（記号：MT）、1 %（記号：PVA1%）および 2 %（記号：PVA2%）である。繊維体積混入率 2 % 試験体のみ、加力方法は単調加力および片側繰返し加力（記号：C）とした。同一パラメータにつき 1 体、計 4 体の試験体を作製した。

表 4.2.1 梁試験体一覧

試験体名称	共通事項	加力方法	繊維体積混入率
MT	補強筋： 組紐型アラミド FRP 補強筋 $p_t=1.04(\%)$ FRCC 繊維：PVA 繊維	単調	—
PVA1%			1%
PVA2%			2%
PVA2%C		片側繰返し	

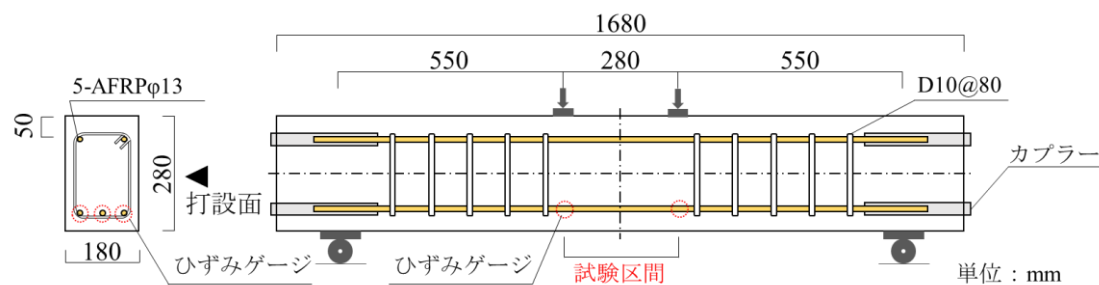


図 4.2.1 梁試験体形状

4.2.2 使用材料

組紐型アラミド FRP 補強筋の表面形状を図 4.2.2 に、FRP 補強筋の材料特性を表 4.2.2 に示す。PVA 繊維は、第 2 章と同様である（図 2.2.2 および表 2.2.2）。FRCC の配合計画および $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 円柱供試体による圧縮特性を表 4.2.3 に示す。



図 4.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋の表面形状

表 4.2.2 組紐型アラミド FRP 補強筋の材料特性

補強筋種別	直径 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
組紐型 AFRP 補強筋	13.52	1315	66.6

表 4.2.3 FRCC の配合表および圧縮特性

試験体 種別	単位量(kg/m ³)				PVA 繊維 (kg)	圧縮強度 σ_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
	W	C	S	FA			
MT	380	678	484	291	0	42.4	17.4
PVA1%					13	47.5	16.6
PVA2%					26	41.2	15.9
PVA2%C						47.0	16.4

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

4.2.3 加力方法

加力は 2 MN 万能試験機により、4 点曲げ載荷を行った。計測項目は、荷重、載荷点部 2 ヶ所に設けた変位計によるたわみ、引張側補強筋の載荷点部 6 ヶ所のひずみ、試験区間内の π 型変位計による軸方向変形である。変位計設置状況を図 4.2.3 に示す。試験区間に設置した π 型変位計の名称は、圧縮側が C1、C2、C3、引張側が T1、T2、T3 である。PVA2%C 試験体の載荷履歴を図 4.2.4 に示す。載荷履歴は、載荷点たわみにより制御し、たわみ 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm において各 5 回、回転角 3/100 rad (16.5 mm) において 2 回の繰返し加力を行い、その後終局まで加力した。

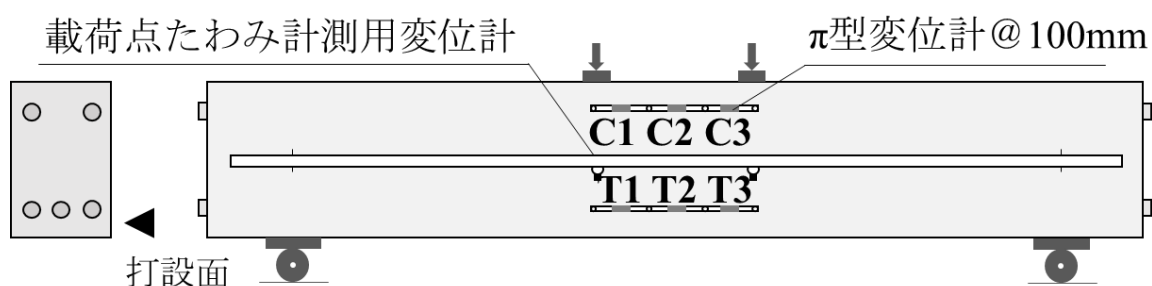


図 4.2.3 変位計設置状況

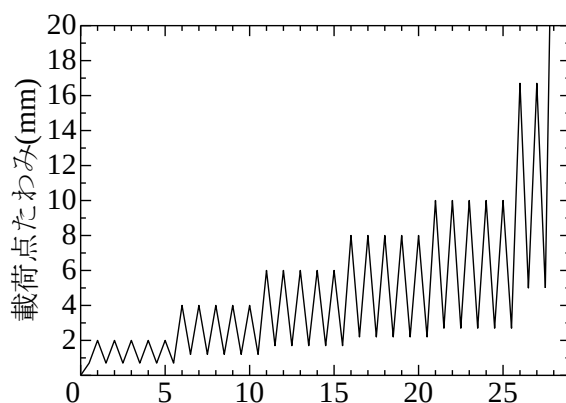


図 4.2.4 片側繰返し加力の載荷履歴

4.3 曲げ試験結果

4.3.1 破壊性状

加力後の試験体と試験区間（純曲げ区間）のひび割れ発生状況を図 4.3.1 に示す。MT および PVA1% 試験体では、試験体端部の定着部破壊により荷重が低下した。PVA2% および PVA2%C 試験体では、試験区間における FRCC の圧壊により最大荷重を迎え、その後、荷重を保持しつつたわみが増大した。FRCC の繊維体積混入率が増加するほど、計測区間のひび割れ本数が増加する傾向がみられた。PVA2%C 試験体のたわみ 10mm までの加力では、除荷時には目視確認が難しい程度にひび割れが閉じた。

加力後の試験体	
MT	
PVA1%	
PVA2%	
PVA2%C	
試験区間のひび割れ発生状況	
MT	PVA1%
	
PVA2%	PVA2%C
	

図 4.3.1 試験体破壊状況

4.3.2 荷重－載荷点たわみ関係

荷重－載荷点たわみ関係を図 4.3.2 に示す。左図は各試験体の包絡線、右図は片側繰返し加力を行った PVA2%C 試験体の各サイクルの挙動である。載荷点たわみは、載荷点部 2 ヶ所に設置した変位計によるたわみの平均値とした。最大荷重は MT : 154 kN、PVA1% : 217 kN、PVA2% : 198 kN、PVA2%C : 229 kN であった。PVA2%C 試験体において、繰返し加力による各サイクルでの荷重低下および最大荷重の低下はみられなかった。繊維体積混入率 2% の試験体において、FRCC の圧壊により迎えた最大荷重後も、繊維の架橋効果による靱性がみられた。

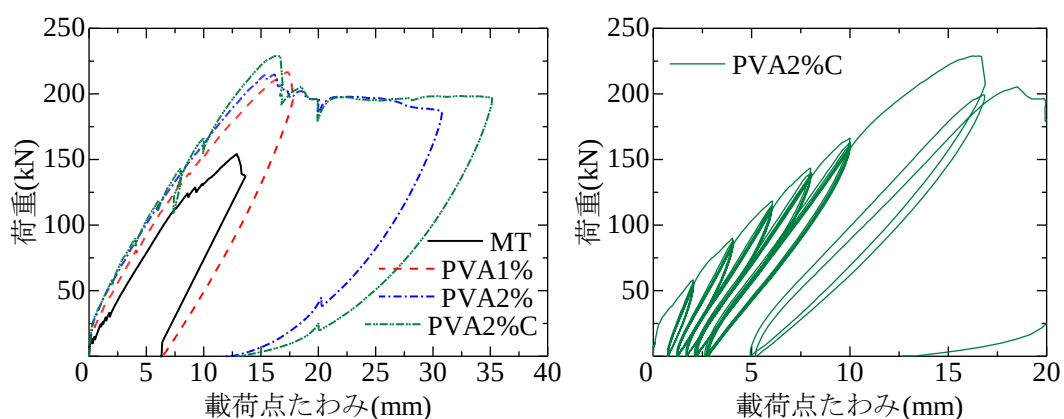


図 4.3.2 荷重－載荷点たわみ関係

4.3.3 補強筋ひずみーひび割れ幅関係

補強筋ひずみーひび割れ幅関係を図 4.3.3 に示す。補強筋ひずみは、載荷点部 6 ヶ所のひずみゲージの平均値とした。ひび割れ幅は、引張側 π 型変位計による各間の軸方向変形を、その区間に生じたひび割れ本数で除することで、1 本あたりのひび割れ幅とした。同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、繊維体積混入率が増加するほど小さくなる傾向がみられた。これは、PVA 繊維がひび割れを架橋することでひび割れ拡幅を抑制するとともに、繊維体積混入率が増加するほどひび割れ本数が増加するためと考えられる。

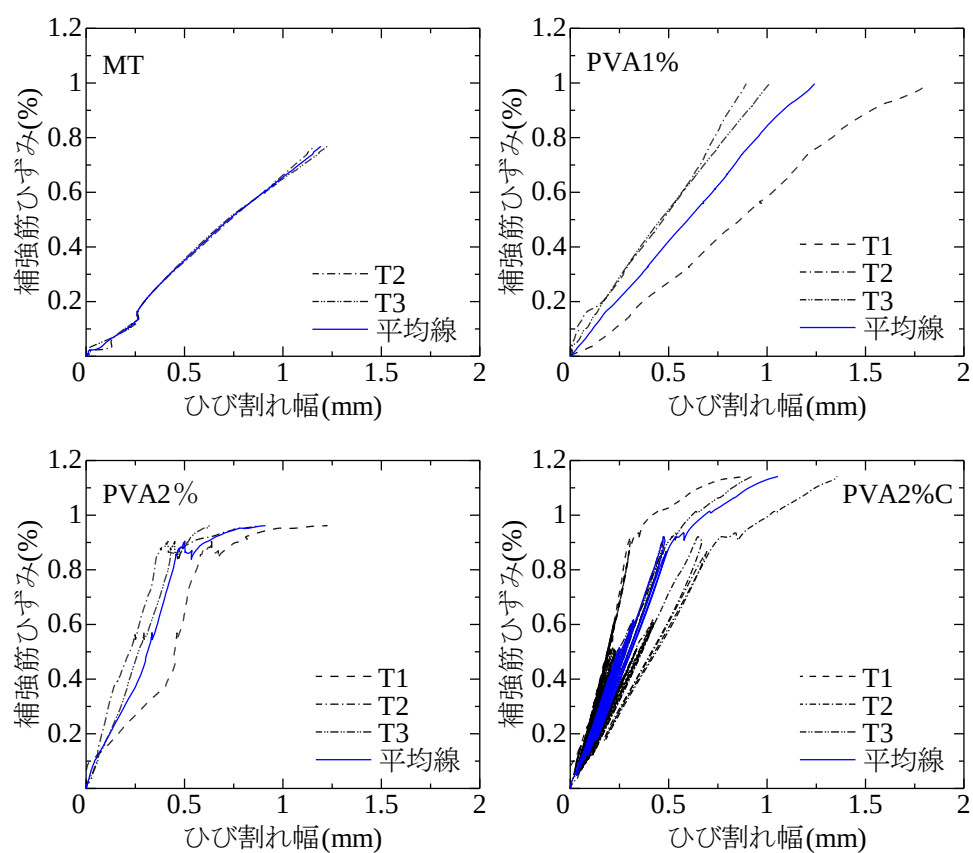


図 4.3.3 補強筋ひずみーひび割れ幅関係

4.3.4 曲げモーメントー曲率関係

FRCC の圧壊により終局を迎えた PVA2% および PVA2%C 試験体の、実験より得られた曲げモーメントー曲率関係を図 4.3.4 に示す。曲率は、対応する区間の圧縮側と引張側の π 型変位計により得た。最大曲げモーメントは、PVA2% : 59.1 kNm、PVA2%C : 63.0 kNm であり、片側繰返し加力による違いはみられなかった。

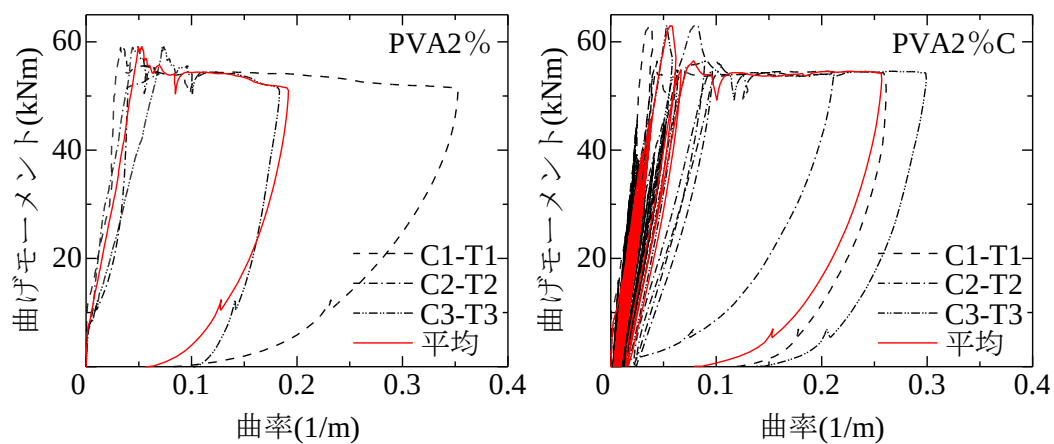


図 4.3.4 曲げモーメントー曲率関係

4.4 実験結果とひび割れ幅算定式の比較

4.4.1 ひび割れ幅算定式

Sunaga らは、補強筋と FRCC 間の付着構成則、FRCC における繊維架橋則および FRCC のひび割れ発生条件から、ひび割れ幅算定式を式(4.1)で与えている³¹⁾。

$$\varepsilon_s = \frac{\varphi_s}{A_c\{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\}} \int_0^{s_l} \tau_x ds_x + \frac{1}{E_c} \sigma_{br} + \frac{1+np}{2npE_c} \{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\} \quad (4.1)$$

ここで、 ε_s ：補強筋ひずみ、 φ_s ：補強筋周長、 σ_{cr} ：FRCC ひび割れ強度、 w_{cr} ：ひび割れ幅、 $\sigma_{br}(w_{cr})$ ：繊維架橋応力、 n ：弾性係数比（ $= E_s/E_c$ ）、 p ：補強筋比（ $= A_s/A_c$ ）、 E_s ：補強筋弾性係数、 E_c ：FRCC 弾性係数、 A_s ：補強筋断面積、 A_c ：FRCC 断面積を表す。

式(4.1) 右辺の積分は、補強筋と FRCC の付着性状を表した付着応力－すべり量関係（付着構成則）に関する積分であり、すべり量をひび割れ幅の 2 倍と定義すると、式(4.1) は補強筋ひずみと部材に生じるひび割れ幅の関係式となる。式(4.1) は、補強筋種別に依らず適用可能であり、Takasago らは、組紐型アラミド FRP 補強 PVA－FRCC 試験体に対し、引抜き試験および両引き試験を行い、組紐型アラミド FRP 補強筋の付着性状および算定式の適合性を明らかにしている³²⁾。

4.4.2 実験結果と算定式の比較

ひび割れ幅算定に用いた各パラメータを表 4.4.1 に示す。組紐型アラミド FRP 補強筋の物性値は、表 4.2.2 の値を使用した。FRCC の断面積 A_c は、図 4.4.1 に示す梁試験体の引張側 FRP 補強筋 1 本あたりの等価断面とした。FRCC の弾性係数 E_c は、表 4.2.3 に示す $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 円柱供試体の圧縮試験により得た値を用いた。FRCC ひび割れ強度 σ_{cr} は、同一バッチにより作製した $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 曲げ供試体の 4 点曲げ試験より導出した。FRP と FRCC の付着構成則には、3 章で導出した PVA2% A シリーズ試験体のトリリニアモデルを使用した (図 3.3.1)。

表 4.4.1 ひび割れ幅算定式に用いた各パラメータ

パラメータ		MT	PVA1%	PVA2%	PVA2%C
組紐型 AFRP 補強筋	$A_s(\text{mm}^2)$	143.6			
	$\varphi_s(\text{mm})$	43			
	$E_s(\text{GPa})$	66			
FRCC	$A_c(\text{mm}^2)$	6000			
	$E_c(\text{GPa})$	17.4	16.6	15.9	16.4
	$\sigma_{cr}(\text{MPa})$	2.82			

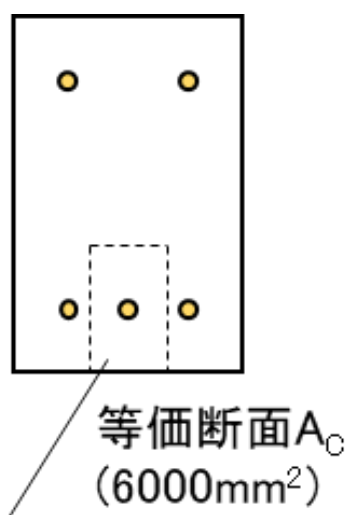


図 4.4.1 FRCC 等価断面

ひび割れ幅の関数である繊維架橋応力 $\sigma_{br}(w_{cr})$ には、式(4.2)および図 4.4.2 に示す、同一材料を用い、繊維の配向性を考慮した繊維架橋則のトリリニアモデルを使用した³³⁾。ここで、 k は繊維の配向の程度を示す係数であり、既往の研究より 0.4 とした³⁴⁾。繊維架橋則に用いた各パラメータを表 4.4.2 に示す。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{max} &= 2.0k^{0.30} \text{ (MPa)} \\
 \delta_{max} &= 0.20k^{0.18} \text{ (mm)} \\
 \sigma_2 &= 0.60k^{0.73} \text{ (MPa)} \\
 \delta_2 &= 0.45 \text{ (mm)} \\
 \delta_{fu} &= 6 \text{ (mm)}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

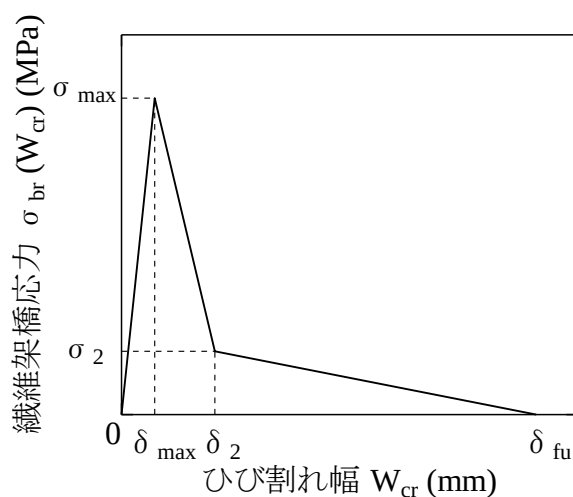


図 4.4.2 繊維架橋則のトリリニアモデル

表 4.4.2 繊維架橋則の各パラメータ

パラメータ	
σ_{max} (MPa)	1.52
δ_{max} (mm)	0.170
σ_2 (MPa)	0.307
δ_2 (mm)	0.450
δ_{fu} (mm)	6.00

補強筋ひずみーひび割れ幅関係の実験結果とひび割れ幅算定式の比較を図 4.4.3 に示す。緑色の一点鎖線でひび割れ幅算定式により得られた関係を示す。すべての試験体において、同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、実験結果よりもひび割れ幅算定式のほうが大きい。ひび割れ幅算定式は任意の補強筋ひずみにおいて、部材に生じるひび割れ幅の最大値を示す式であり、実際のひび割れ幅は、ひび割れ幅算定式により得られる値よりも小さくなる。実験結果は算定式より小さく、ひび割れ幅算定式の良い適合性が示された。

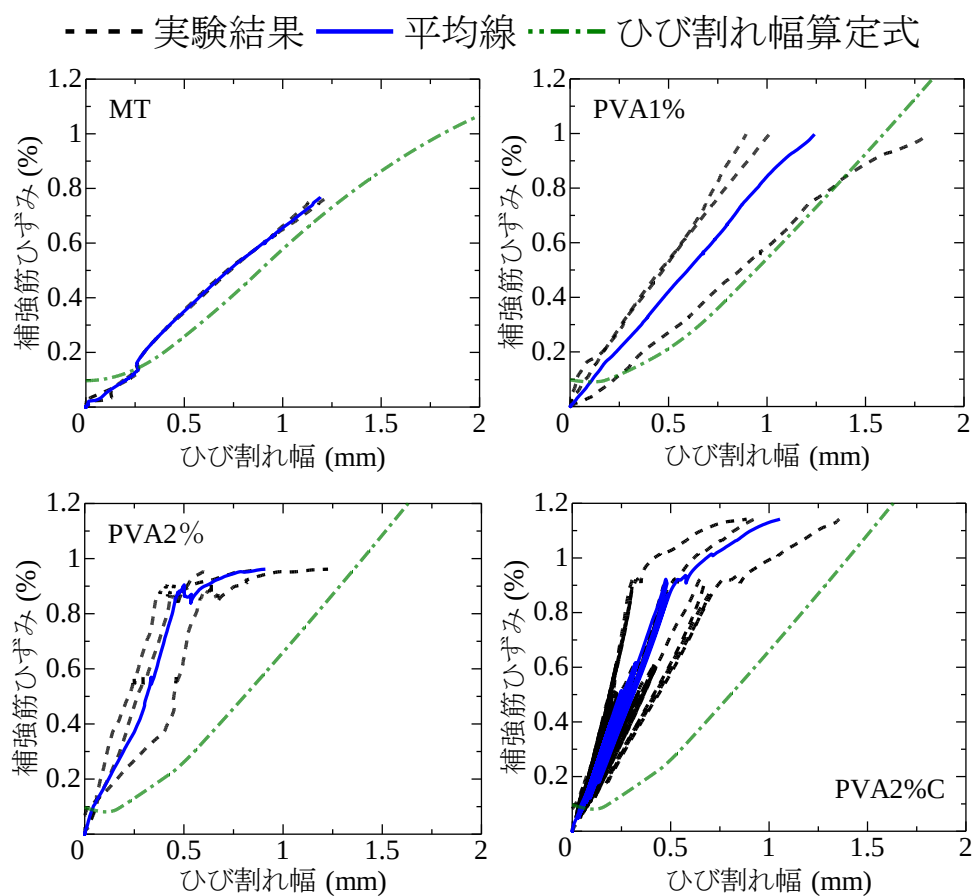


図 4.4.3 ひび割れ幅算定式と実験結果の比較

4.5 断面解析による曲げ耐力の算定

4.5.1 FRCC の応力-ひずみ関係

FRCC の圧壊により最大荷重を迎えた PVA2% および PVA2%C 試験体において、断面解析による曲げ耐力の算定を行った。

断面解析に用いた応力-ひずみ関係を図 4.5.1 に示す。応力-ひずみ関係の各パラメータを表 4.5.1 に示す。引張側には、前節と同一の繊維架橋則のトリリニアモデル（図 4.4.2）を使用し、ひび割れ幅を同一寸法の梁試験体の曲げ試験³⁴⁾により得られたひび割れ発生間隔（140 mm）で除することでひずみとした。圧縮側は、2.4 章により導出した PVA2% 試験体における中心圧縮試験の Popovics モデルを使用した（表 2.4.1）。圧縮強度 f_c および圧縮強度時のひずみ ε_0 は、 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 円柱供試体の圧縮試験結果を使用した。

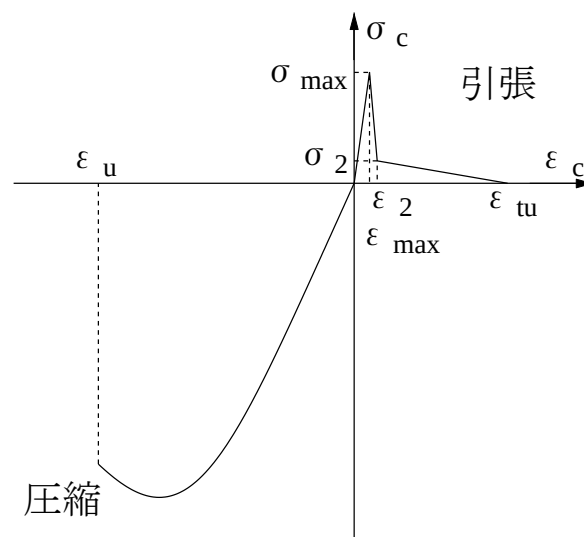


図 4.5.1 応力-ひずみ関係

表 4.5.1 応力-ひずみ関係の各パラメータ

パラメータ		PVA2%	PVA2%C
引張側	$\sigma_{max}(\text{MPa})$	1.52	
	ε_{max}	0.00121	
	$\sigma_2(\text{MPa})$	0.307	
	ε_2	0.00321	
	ε_{tu}	0.0429	
圧縮側	$f_c(\text{MPa})$	-41.2	-47.0
	ε_0	-0.00381	-0.00424
	k_1	0.86	
	k_2	0.77	
	ε_u	-0.00385	
	n	3.97	

4.5.2 断面解析による曲げ耐力の比較

断面解析および実験により得られた最大曲げモーメントの比較を表 4.5.2 に示す。実験値の解析値に対する比は、PVA2% : 0.990、PVA2%C : 0.995 であり、実験結果と解析値は良い適合性を示した。

表 4.5.2 最大曲げモーメントの比較

試験体	最大曲げモーメント M_{max} (kNm)		実験値/解析値
	解析値	実験値	
PVA2%	61.0	59.7	0.990
PVA2%C	64.7	63.3	0.995

4.6 まとめ

組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 梁試験体の曲げ性状を把握するために、4 点曲げ試験を実施し、以下の知見を得た。

- ① 繊維体積混入率 2 % の試験体において FRCC の圧壊により最大荷重を迎え、その後、荷重を保持しつつたわみが増大した。繰返し加力による各サイクルでの荷重低下はみられなかった。同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、繊維体積混入率が増加するほど小さくなる傾向がみられた。
- ② 既往のひび割れ幅算定式と、実験結果より得られた補強筋ひずみーひび割れ幅関係は良い適合性を得た。
- ③ 応力ーひずみ関係の引張側に PVA 繊維架橋則、圧縮側に第 2 章により導出した中心圧縮試験体の Popovics モデルを使用した断面解析結果と、実験結果より得られた最大曲げモーメントは良い適合性を示した。

第5章 結論

本研究では、組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 部材の構造性能の把握を目的として、FRCC 角柱試験体の中心圧縮試験による圧縮性状の把握、組紐型アラミド FRP 補強筋の引抜き試験結果による付着性状の再モデル化、および組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 梁部材の 4 点曲げ試験による曲げ性状の把握を行った。得られた知見を以下に示す。

FRCC 中心圧縮試験体の実験結果より得られた圧縮強度の平均は、それぞれ MT : 41.1 MPa、PVA1% : 41.6 MPa、PVA2% : 43.3 MPa であった。円柱供試体との圧縮強度比は、それぞれ MT : 0.85、PVA1% : 0.82、PVA2% : 0.86 であり、断面形状と寸法の違いによる圧縮強度の減少が確認できた。実験より得た応力-ひずみ関係を、円柱供試体の圧縮特性および低減係数をパラメータとして、Popovics モデルを用いてモデル化を行い、実験結果と良い適合性を得た。

既往の研究による FRP の引抜き試験結果の再モデル化を行い、提案したトリリニアモデルは、実験結果と良い適合性を示し、特に最大付着応力までの挙動を精確に示した。

組紐型アラミド FRP 補強 PVA-FRCC 梁試験体の 4 点曲げ試験より、繊維体積混入率 2 % の試験体において FRCC の圧壊により最大荷重を迎え、その後、荷重を保持しつつたわみが増大した。繰返し加力による各サイクルでの荷重低下はみられなかった。同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、繊維体積混入率が増加するほど小さくなる傾向がみられた。既往の研究により導出されたひび割れ幅算定式と実験結果より得られた、補強筋ひずみ-ひび割れ幅関係は良い適合性を得た。応力-ひずみ関係の引張側に PVA 繊維架橋則、圧縮側に中心圧縮試験体の Popovics モデルを使用した断面解析結果と、実験結果より得られた最大曲げモーメントは良い適合性を示した。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々にご指導、ご協力を頂きました。指導教員であります筑波大学システム情報工学系教授 金久保利之先生には、研究テーマの設定から、実験の実施、論文の推敲に至るまで、終始懇切丁寧にご指導ご鞭撻を賜りました。この場をお借りして、心より御礼申し上げます。

副指導教員であります筑波大学教授 松島亘志先生には、研究、学生生活に対する多くのご助言を賜りました。同じく副指導教員であります筑波大学准教授 八十島章先生には、型枠作製から研究内容に至るまでの的確なご助言、ご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。筑波大学技術専門職員 小島篤志氏には、試験体作製や試験機の調整、実験の補助など多くの場面において、多大なご助力をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。

また、筑波大学 金久保研究室の方々には試験体作製から実験の補助、論文指導など多くの支援を賜りました。特に、小林寛弥氏、佐々木秀人氏には多大なご助力をいただきました。皆様に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、組紐型アラミド補強筋はファイベックス（株）に、PVA 繊維は（株）クラレにご提供いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、両親を初めてとする、学生生活において支えてくださった全ての方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) American Concrete Institute.: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, ACI 440.1R-15 2015.
- 2) 日本建築学会.: 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 2002
- 3) Nanni, A. Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement. *J. Struct. Eng.* 1993, 119, 3344–3359.
- 4) Pecce, M.; Manfredi, G.; Cosenza, E. Experimental Response and Code Models of GFRP RC Beams in Bending. *J. Compos. Constr.* 2000, 4, 182
- 5) Gravina, R.J.; Smith, S.T. Flexural Behaviour of Indeterminate Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Eng. Struct.* 2008, 30, 2370–2380.
- 6) Burgoyne, C.J. Should FRP Be Bonded to Concrete?; Special Publication Series; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 1993; SP-138, pp. 367–368.
- 7) Kanakubo, T.; Yonemaru, K.; Fukuyama, H.; Fujisawa, M.; Sonobe, Y. Bond Performance of Concrete Members Reinforced with FRP Bars; Special Publication Series; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 1993; SP-138, pp. 767–788.
- 8) Toutanji, H.; Deng, Y. Deflection and Crack-Width Prediction of Concrete Beams Reinforced with Glass FRP Rods. *Constr. Build. Mater.* 2003, 17, 69–74.
- 9) El-Nemr, A.; Ahmed, E.A.; El-Safty, A.; Benmokrane, B. Evaluation of the Flexural Strength and Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Different Types of GFRP Bars. *Eng. Struct.* 2018, 173, 606–619.
- 10) Aydın, F.; Arslan, Ş. Investigation of The Durability Performance of FRP Bars in Different Environmental Conditions. *Adv. Concr. Constr.* 2021, 12, 295–302.
- 11) Solyom, S.; Balázs, G.L. Analytical and Statistical Study of the Bond of FRP Bars with Different Surface Characteristics. *Compos. Struct.* 2021, 270, 113953.
- 12) Matsumoto, T.; Mihashi, H. JCI-DFRCC Summary Report on DFRCC Terminologies and Application Concepts. In *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)*, Takayama, Japan, 21-22 October 2002; pp. 59–66.
- 13) Rokugo, K.; Kanda, T. (Eds.) *Strain Hardening Cement Composites: Structural Design and Performance RILEM State-of-the-Art Re-ports 6*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; p. 90.
- 14) Lövgren, I. *Fibre-Reinforced Concrete for Industrial Construction—A Fracture Mechanics Approach to Material Testing and Structural Analysis*; Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden, 2005.
- 15) Balaguru, P.N.; Shah, S.P. *Basic Concepts and Mechanical Properties: Tension, Fiber-*

- Reinforced Cement Composites; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1992; pp. 37–84.
- 16) Amin, A.; Foster, S.J.; Muttoni, A. Derivation of the σ - w Relationship for SFRC from Prism Bending Tests. *Struct. Concr.* 2015, 16, 93–105.
 - 17) Pereira, E.B.; Fischer, G.; Barros, J.A.O. Direct Assessment of Tensile Stress-Crack Opening Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). *Cem. Concr. Res.* 2012, 42, 834–846.
 - 18) Yu, J.; Leung, C.K.Y. Novel Experimental Method to Determine Crack-Bridging Constitutive Relationship of SHCC Using Digital Image Processing. In *Strain-Hardening Cement-Based Composites SHCC-4*; Springer: Dresden, Germany, 2018; Volume 15, pp. 55–62.
 - 19) Li, V.C.; Stang, H.; Krenchel, H. Micromechanics of Crack Bridging in Fibre-Reinforced Concrete. *Mater. Struct.* 1993, 26, 486–494.
 - 20) Laranjeira de Oliveira, F. Design-Oriented Constitutive Model for Steel Fiber Reinforced Concrete. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2010.
 - 21) Yang, E.-H.; Wang, S.; Yang, Y.; Li, V.C. Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites. *J. Adv. Concr. Technol.* 2008, 6, 181–193.
 - 22) Kanakubo, T.; Miyaguchi, M.; Asano, K. Influence of fiber orientation on bridging performance of polyvinyl alcohol fiber-reinforced cementitious composite. *ACI Mater. J.* 2016, 113, 131–141.
 - 23) Yuriko, O.; Masaru, M.; Toshiyuki, K. Modeling of Bridging Law for PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composite Considering Fiber Orientation. *J. Civ. Eng. Archit.* 2018, 12, 651–661.
 - 24) Kanakubo, T.; Echizen, S.; Wang, J.; Mu, Y. Pullout behavior of bundled aramid fiber in fiber-reinforced cementitious composite. *Materials* 2020, 13, 1746.
 - 25) Fischer, G.; Li, V.C. FRP reinforced ECC structural members under reversed cyclic loading conditions, *Advances in Building Technology*. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Building Technology*, Hong Kong, China, 4–6 December 2002; Volume I, pp. 781–788.
 - 26) Tolou Kian, M.J.; Ghazizadeh, S.; Cruz Noguez, C.A. An Experimental Investigation of FRCC Shear Walls Reinforced with Steel and GFRP Bars. *J. Compos. Sci.* 2018, 2, 55.
 - 27) Hu, B.; Zhou, Y.; Xing, F.; Sui, L.; Luo, M. Experimental and Theoretical Investigation on the Hybrid CFRP-ECC Flexural Strengthening of RC Beams with Corroded Longitudinal Reinforcement. *Eng. Struct.* 2019, 200, 109717.
 - 28) Hou, W.; Li, Z.-Q.; Gao, W.-Y.; Zheng, P.-D.; Guo, Z.-X. Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with BFRP Bars-Reinforced ECC Matrix. *Compos. Struct.* 2020, 241, 112092.
 - 29) Ge, W.; Song, W.; Ashour, A.F.; Lu, W.; Cao, D. Flexural Performance of FRP/Steel Hybrid

- Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams. *J. Build. Eng.* 2020, 31, 101329.
- 30) Kanakubo, T.; Yamato, N. Crack Width Prediction Method for Steel and FRP Reinforcement Based on Bond Theory. *J. Adv. Concr. Technol.* 2014, 12, 310–319.
- 31) Sunaga, D.; Namiki, K.; Kanakubo, T. Crack Width Evaluation of Fiber-Reinforced Cementitious Composite Considering Interaction between Deformed Steel Rebar. *Constr. Build. Mater.* 2020, 261, 119968.
- 32) Takasago, S.; Kanakubo, T.; Kobayashi, H. Crack Width Evaluation of DFRCC Members Reinforced with Braided AFRP Bar. In *Strain Hardening Cementitious Composites. SHCC 2022; RILEM Bookseries*; Kunieda, M., Kanakubo, T., Kanda, T., Kobayashi, K., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2023; 39, pp. 156–166.
- 33) Ozu, Y., Miyaguchi, M. Kanakubo, T., Modeling of Bridging Law for PVA Fiber Reinforced Cementitious Composites Considering Fiber Orientation. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2018, 12, pp. 651-661
- 34) 大圖友梨子, 渡邊啓介, 八十島章, 金久保利之: 架橋則に基づく DFRCC の曲げ性状における寸法効果の評価, *コンクリート工学年次論文集*, 2016, 7, Volume 38, No.2, pp.1321-1326