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 AFRP 補強筋と PVA-FRCC の 付着性状に関する研究

小林 寬弥

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

2023年 3月

近年の構造物の高寿命化に伴い、長期利用に適した修復性、維持管理性能を有する高耐久部材の実現が求められている。高耐久部材の実現のためには、セメント系材料だけでなく、セメント系材料を補強する補強筋についても考慮する必要がある。繊維補強セメント系複合材料(FRCC: Fiber-Reinforced Cementitious Composites)は、混入した繊維の繊維架橋により通常のコンクリートと比べ引張性能が改善した材料である。また、連続繊維補強材(FRP: Fiber-Reinforced Polymer)は、高強度かつ耐腐食性を有する材料である。特に、FRP棒材は耐腐食性を有し、破断しない限り弾性で修復性に優れた材料であり、鉄筋の代替材料として期待されている。これらの材料を組合せた FRP 補強 FRCC は両者の優れた性能を発揮し、高耐久部材としての活用が期待される。しかし、FRP 補強 FRCC に関する研究は非常に少なく、FRP 補強 FRCC の活用のためには、FRP、FRCC 単体の性能評価に加え、FRP-FRCC に相互に働く付着性状について検討する必要がある。

本論文では、FRP-FRCC 間の付着性状について検討することを目的とし、組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体について引抜試験を実施した。付着区間の短い試験体につ いて実施した引抜試験から AFRP-FRCC 間の局所付着性状を、付着区間の長い試験体 について実施した引抜試験から実構造部材で想定される平均的な付着性状について確 認した。また、後者の付着性状について検討するため、数値計算による解析を行った。

付着区間の短い試験体について実施した引抜試験では、組紐型 AFRP 補強 FRCC 試験 体において、最大付着応力後の緩やかな軟化域が確認された。FRCC に混入する繊維の 体積混入率が増加すると、試験体に発生するひび割れの幅が小さくなることが確認され た。混入する繊維の径の違い、試験体の断面寸法の違いによる影響はあまりみられなか った。また、試験結果をもとに作成したトリリニアモデルは実験結果を概ねよく表現す ることができていることが確認された。

付着区間の長い試験体について実施した引抜試験では、組紐型 AFRP 補強 FRCC 試験体において、引抜荷重が最大に達した以降も、荷重端すべり量の増加をともないながら引抜荷重が低下する様子が確認された。また、PV(100)2、PV(40)1、PV(40)2 シリーズ試験体において、引抜荷重が最大に達した以降、引抜荷重の急激な低下がみられた。また、 急激な荷重の低下直後から、引抜荷重が再び上昇する様子が確認された。

付着長の長い試験体について数値計算による解析を行った。解析を行うにあたって、 2章で作成したトリリニアモデルの修正を行った。得られた解析結果は、PV(100)1シリ ーズにおいてよく対応していることが確認された。PV(100)2、PV(40)1、PV(40)2シリー ズでは、断面寸法の違いにより適応性に違いがみられた。解析結果は試験結果と比較し て小さく、試験体の割裂によって荷重が最大に達する際の局所付着性状のモデル化を行 う必要がある。

目次

第1章 序論	l
1.1 研究背景	l
1.1.1 繊維補強セメント系複合材料	L
1.1.2 連続繊維補強材	2
1.2 研究目的	3
第2章 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の局所付着性状	1
2.1 はじめに	1
2.2 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体の引抜試験(2 章)	5
2.2.1 実験概要	5
(1) 試験体概要	5
(2) 使用材料	7
(3) 加力・計測方法	2
2.2.2 実験結果	3
(1) 試験体破壊状況	3
(2) 付着応力-荷重端すべり量関係	5
(3) 最大付着応力19)
2.3 付着応力-荷重端すべり量関係のモデル化)
2.3.1 はじめに)
2.3.2 トリリニアモデル)
 トリリニアモデルの特性値について)
(2) 最大付着応力 <i>t_{max}</i>	2
(3) ひび割れ発生時の付着応力 τ ₁ および初期勾配 k ₁ 24	1
(4) 最大付着応力時の荷重端すべり量 S _{max} ·······24	1
(5) 軟化勾配 k3	1
2.3.3 トリリニアモデルと試験結果の比較	5
2.4 まとめ	3
第3章 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の付着性状)
3.1 はじめに)
3.2 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体の引抜試験(3 章))
3.2.1 実験概要)
(1) 試験体概要)
(2) 使用材料	2
(3) 加力・計測方法	7

3.2.2 実験結果
(1) 試験体破壊状況
(2) 平均付着応力-荷重端すべり量関係41
(3) 最大付着応力
3.3 まとめ
第4章 数値計算による付着性状の検討47
4.1 はじめに
4.2 数値計算の手法
4.3 付着長と割裂面長さの違いを考慮したモデル
4.4 解析結果と試験結果の比較
4.4.1 平均付着応力-荷重端すべり量関係の比較
4.4.2 最大平均付着応力の比較
4.5 まとめ
第5章 結論
謝辞
参考文献60

図表目次

义	1.1.1	連続繊維補強材の例 ⁷⁾ 2
义	2.2.2	試験体形状の例(aシリーズ)
义	2.2.2	PVA 繊維形状
义	2.2.3	組紐型 AFRP 補強筋形状
义	2.2.4	曲げ試験供試体(2章)
义	2.2.5	曲げモーメントー曲率関係(2章)
义	2.2.6	加力方法(2章)
义	2.2.7	試験体破壊状況例
义	2.2.8	付着応力-荷重端すべり量関係16-18
义	2.2.9	最大付着応力-かぶり厚関係19
义	2.3.1	トリリニアモデル
义	2.3.2	補強筋周辺の応力状態
义	2.3.3	Smaxの決定方法24
义	2.3.4	付着応力-荷重端すべり量関係比較
义	3.2.3	試験体形状の例(Aシリーズ)30
义	3.2.2	PVA 繊維形状33
义	3.2.3	組紐型 AFRP 補強筋形状
义	3.2.4	曲げ試験供試体 (3章)
义	3.2.5	曲げモーメントー曲率関係(3章)
义	3.2.6	加力方法 (3章)
义	3.2.7	試験体破壊状況例
义	3.2.8	平均付着応力-荷重端すべり量関係42-44
义	3.2.9	最大付着応力-かぶり厚関係45
义	4.2.4	i番目の微小区間の釣合い48
义	4.3.5	付着長と割裂面長さの違いを考慮したトリリニアモデル52
义	4.4.6	平均付着応力-荷重端すべり量関係比較
义	4.4.2	最大平均付着応力比(実験値/解析値)-かぶり厚関係56
表	2.2.7	試験体一覧(2章)6
表	2.2.2	FRCC 調合計画7
表	2.2.3	PVA 繊維物性値(メーカー公称値)
表	2.2.4	組紐型 AFRP 補強筋物性值
表	2.2.5	E縮試験結果(2章)

表 2.2.6	曲げ試験結果(2章)
表 2.3.1	特性值一覧
表 2.3.2	引張強度 σ _t 一覧 ······23
表 2.3.3	内部ひび割れ範囲 r _i 一覧
表 3.2.8	試験体一覧 (3章)
表 3.2.2	FRCC 調合計画
表 3.2.3	PVA 繊維物性値(メーカー公称値)
表 3.2.4	組紐型 AFRP 補強筋物性值
表 3.2.5	圧縮試験結果(3章)
表 3.2.6	曲げ試験結果(3章)
表 4.3.9	修正した特性値一覧52

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 繊維補強セメント系複合材料

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で、引張強度は圧縮強度と比 較して小さく、引張応力下において非常に脆性的な性質を示す材料である。通常、構造 物においてコンクリートは鉄筋によって補強され部材として用いられ、部材にかかる引 張力は鉄筋のみが負担するものとして設計されている。

コンクリートの脆性的な引張性能の改善を目的とし、セメント系材料に長さ数十 mm 程度の短繊維を体積混入率で数%程度混入させた繊維補強セメント系複合材料(FRCC: Fiber-Reinforced Cementitious Composites)の研究が長きにわたり行われている¹⁾。FRCC では混入した繊維がひび割れを架橋して応力を伝達し、通常のコンクリートと比較して 高い引張性能を示す材料であり、構造物の損傷低減を目指した FRCC 部材の構造物への 適用が報告されている²⁾。

FRCCは、近年需要の高まる高寿命な構造物への適用が期待されるが、FRCCを実構 造部材へ適用した例は少ない。FRCCの範疇に含まれ、一軸引張応力下において歪硬化 性能を示す高性能繊維補強セメント系複合材料(HPFRCC: High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites)が高層集合住宅の境界梁へ適用された例³⁾があるも のの、高強度コンクリートの爆裂防止を目的としてごく少量の繊維を混入する⁴⁾など、 FRCCの優れた引張性能、損傷低減性能を活かした構造部材の例は非常に少ない。

FRCCの性能を活かした部材設計を行うためには、FRCC単体の性能評価に加えて、 FRCCと併用される補強筋の相互作用である付着性状についても研究を行う必要がある⁵。またFRCC部材を高寿命高耐久な部材として構造物へ適用するためには、FRCCと併用される補強筋についても、構造性能に優れるだけでなく、長期利用に適した材料を選択する必要がある。

1.1.2 連続繊維補強材

鉄筋コンクリート構造物の経年劣化の代表的な要因としてコンクリート中の鉄筋の 腐食が挙げられ、コンクリート構造物の高寿命化を図るために腐食劣化の改善が求めら れている^の。

連続繊維補強材(FRP:Fiber-Reinforced Polymer)は長さ1m以上の長い繊維に樹脂を 浸透させ、硬化、整形した材料である⁷。FRPに用いられる繊維として炭素繊維、アラ ミド繊維、ガラス繊維等があり、用いられる繊維や樹脂の種類により、FRPの密度、強 度、弾性率等は大きく異なる。また、FRPの形状として、棒状、板状、格子等がある⁷)。 現在、FRPを構造物に適用する際の主な用途としてFRPシートの巻立てによる既存の 構造物の補修、補強があり、施工時の利便性により適用されている⁸。FRPは高強度か つ耐腐食性を有し、破断しない限り弾性であって修復性に優れた材料である。また、鉄 筋代替としての利用が想定されるFRP棒材(図1.1.1)には、直線状、より線状、組紐 状等の形状がある⁷。FRP棒材によってコンクリートを補強した連続繊維補強コンクリ ートは通常のRCと比較して高い耐腐食性を有し、修復性に優れた構造部材として活用 されることが期待され、研究が行われている⁹。

既往の研究¹⁰では、FRP 補強筋の形状によってコンクリートとの局所付着性状に違いが生じることが報告されており、FRP 棒材をセメント系材料の補強筋として活用するためには、セメント系材料とFRP 棒材間の付着性状について検討する必要性がある。



図 1.1.1 連続繊維補強材の例⁷⁾

1.2 研究目的

近年の構造物の高寿命化に伴い、長期利用に適した修復性、維持管理性能を有する高耐久部材の実現が求められている。引張性能に優れた FRCC と耐腐食性、修復性に優れた FRP を組合せた FRP 補強 FRCC は両者の性能を発揮し、高耐久部材としての活用が期待される。一方、FRP 補強 FRCC を対象とした研究は非常に少なく、FRP 補強 FRCC を部材として有効に活用するためには材料単体の性能評価に加え、FRP-FRCC の相互に働く付着性状についても研究を行う必要がある。

本研究では、PVA 繊維を混入した FRCC(以下 PVA-FRCC)と組紐型アラミド FRP 補 強筋(以下組紐型 AFRP)を組合わせた組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC を対象に研究を行 う。組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC は、化学的付着性能を有する PVA 繊維のひび割れ幅 抑制効果と、組紐型 AFRP 補強筋の形状による高い付着性能により、高寿命高耐久な部 材として期待される。引抜試験および数値計算による解析により、組紐型 AFRP-PVA-FRCC 間の付着性状について検討することを目的とする。

第2章では、付着区間の長さが補強筋径の数倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体について引抜試験を実施し、FRP-FRCC 間の局所付着性状を実験的に把握する とともに、付着応力-すべり量関係のモデル化を行う。

第3章では、付着区間の長さが補強筋径の数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体について引抜試験を実施し、部材中での挙動を想定した FRP-FRCC 間の付着性 状を実験的に把握する。

第4章では、第2章で得た付着応力-すべり量関係のモデルを利用し数値計算を行い、付着区間の長さが補強筋径の数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の付着性状について解析を行う。解析により得られた結果と、第3章での実験により得られた結果の比較検討を行う。

第2章 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の局所付着

性状

2.1 はじめに

本章では、付着区間の長さが補強筋径の数倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試 験体について引抜試験を実施し、FRP-FRCC 間の局所付着性状を把握する。また、試験 より得られた付着応力-荷重端すべり量関係を基に、各変動因子毎に付着応力-荷重端 すべり量関係のモデル化を行う。

2.2 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体の引抜試験(2章)

2.2.1 実験概要

(1) 試験体概要

試験体形状の例を図 2.2.1 に、試験体一覧を表 2.2.1 に示す。試験体は正方形断面を 有する長さ 100mm の直方体 FRCC ブロックとし、断面中心に組紐型 AFRP 補強筋を一 本配置した。補強筋端部には試験機のチャック固定用に鋼製カプラーを取り付けた。 FRCC ブロック両端部には塩ビ管によりアンボンド処理を施し、付着長は補強筋径の約 4 倍 (54mm)とした。変動因子は FRCC に用いる PVA 繊維の径 (40µm、100µm)、FRCC の繊維体積混入率 (0%、1%、2%)、試験体断面寸法 (a シリーズ: 100mm×100mm、b シ リーズ: 120mm×120mm、c シリーズ: 140mm×140mm)とした。各試験体 3 体ずつ、計 45 体作製した。

試験体の名称について、試験体の命名規則はFRCCに用いた繊維の径、繊維の体積混入率、試験体断面寸法を連続して表記するものとする。FRCCに用いた繊維の径はPV(40)、PV(100)、繊維の体積混入率は1、2、断面寸法はa、b、cと表記し、各々の単位は省略する。モルタル試験体についてはMTという表記に続けて断面寸法を表記する。また、同一変動因子における試験体は上記の命名規則に加え、試験体名称の末尾に試験体番号(1、2、3)を表記する。



図 2.2.1 試験体形状の例 (a シリーズ)

試験体	繊維・補強筋	断面寸法	繊維体積混入率	試験体数
МТа			-	3
PV(100)1a		100mm×100mm	1.0%	3
PV(100)2a	付着長:54mm		2.0%	3
MTb	補強筋:組紐型 AFRP		-	3
PV(100)1b	径:13.58mm	120mm×120mm	1.0%	3
PV(100)2b	FRCC 繊維: PVA(100)	-	2.0%	3
МТс	径:100µm、長さ12mm	140mm×140mm	-	3
PV(100)1c			1.0%	3
PV(100)2c			2.0%	3
PV(40)1a		100	1.0%	3
PV(40)2a	付着長:54mm	100mm×100mm	2.0%	3
PV(40)1b	補強筋:組紐型 AFRP 径:13.52mm FRCC 繊維:PVA(40) 径:40um 長さ 12mm	120	1.0%	3
PV(40)2b		120mm×120mm	2.0%	3
PV(40)1c		140 140	1.0%	3
PV(40)2c		140mm×140mm	2.0%	3

表 2.2.2 試験体一覧(2章)

(2) 使用材料

FRCCの調合計画を表 2.2.2 に、FRCCに使用した繊維、AFRP 補強筋の物性値をそれ ぞれ表 2.2.3、表 2.2.4 に、それらの形状を図 2.2.2、図 2.2.3 に示す。

試驗休			単位量	(kg/m ³)																			
	水	セメント	細骨材	フライアッシュ	PVA 繊維																		
MT					0																		
PV(100)1					13																		
PV(100)2	380	678	484	291	26																		
PV(40)1					13																		
PV(40)2																							26

表 2.2.2 FRCC 調合計画

表 2.2.3	PVA	繊維物性値	(メ・	ーカー	-公称値)
---------	-----	-------	-----	-----	-------

繊維種別	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)
PVA(100)	0.10	12	1200	28
PVA(40)	0.04	12	1690	40.6

表 2.2.4 組紐型 AFRP 補強筋物性值

補強筋種別	直径 (mm)	引張強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)	備考
如知刑 AEDD 補改符	13.58	1261	66.0	PV(100)シリーズ
	13.52	1315	66.6	PV(40)シリーズ



PVA(100)



PVA(40)

図 2.2.2 PVA 繊維形状



図 2.2.3 組紐型 AFRP 補強筋形状

引抜試験実施時材齢において、Φ100-200mm シリンダーによる圧縮試験および 100-100-400mm 角柱による 4 点曲げ試験を実施した。圧縮試験結果を表 2.2.5 に、曲げ試験 結果を表 2.2.6 に示す。また、曲げ試験後の供試体を図 2.2.4 に、曲げモーメントー曲 率関係を図 2.2.5 に示す。

試験体	圧縮強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)
MT	48.8	17.5
PV(100)1	46.2	17.0
PV(100)2	47.1	16.4
PV(40)1	36.2	14.0
PV(40)2	31.1	12.5

表 2.2.5 圧縮試験結果 (2章)

試験体	最大 曲げモーメント (kN・m)	最大曲げ モーメント時曲率 (1/m)	平均引張強度*1 (MPa)
MT	0.735	0.004	_
PV(100)1-1	0.873	0.060	
PV(100)1-2	0.873	0.004	2.58
PV(100)1-3	0.781	0.074	
PV(100)2-1	1.425	*2	
PV(100)2-2	1.424	0.076	3.40
PV(100)2-3	1.470	*2	
PV(40)1-1	1.369	0.132	
PV(40)1-2	1.102	0.059	2.82
PV(40)1-3	1.181	0.111	
PV(40)2-1	1.770	0.332	
PV(40)2-2	1.726	0.455	3.78
PV(40)2-3	1.621	*2	

表 2.2.6 曲げ試験結果(2章)

*1:曲げ試験(JCI-S-003-2007)¹¹⁾

*2:試験区間外にひび割れが発生したため曲率測定不可



図 2.2.4 曲げ試験供試体 (2章)



(3) 加力·計測方法

加力方法を図 2.2.6 に示す。加力には 2MN 万能試験機を用い、単調引抜載荷を行う。 試験体上部ヘッド上の直径 64mm の孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、試験機の 下部チャックで補強筋端の鋼製カプラーを掴み、引抜載荷を行う。なお、試験体の横方 向への変位を拘束しないよう、試験体と加力板の間にテフロンシートを設置した。計測 項目は引抜荷重および補強筋の自由端すべり量である。



図 2.2.6 加力方法 (2章)

2.2.2 実験結果

(1) 試験体破壊状況

試験終了後の試験体破壊状況例を図 2.2.7 に示す。MT シリーズでは、全試験体の自 由端側、側面にひび割れが発生した。また、ひび割れの発生とともに荷重が最大に達し た。PV(100)1、PV(100)2 シリーズにおいても、全試験体の自由端側、側面にひび割れが 発生した。各試験体に発生した平均的な自由端側のひび割れの本数は 2~3 本程度であっ た。また、発生したひび割れの幅は PV(100)1 シリーズと比較して、PV(100)2 シリーズ の方が小さかった。これは、試験体に混入した繊維の体積混入率の違いにより、PV(100)1 シリーズと比較して PV(100)2 シリーズではひび割れを架橋する繊維の本数が増加した ため、ひび割れの拡幅抑制効果が増大したためと考えられる。 また、PV(100)1、PV(100)2 シリーズそれぞれにおいて、断面寸法の違いが試験体の破壊状況に大きく影響すること はなかった。PV(40)1、PV(40)2シリーズにおいても、試験体の自由端側、側面にひび割 れが発生した。PV(40)1 シリーズにおいて、各試験体に発生した平均的な自由端側のひ び割れの本数は 2~6 本程度であり、PV(100)シリーズと比較して発生したひび割れの本 数は増加傾向にあった。また、PV(40)2 シリーズにおいて、各試験体に発生した平均的 な自由端側のひび割れの本数は 1~3 本程度であった。これは、PV(40)2 シリーズの試験 体の破壊形式が他のシリーズと異なったためと考えられる。PV(100)1、PV(100)2、 PV(40)1 シリーズでは、試験体が割れることにより荷重が最大に達した。一方で、PV(40)2 シリーズでは補強筋周辺の FRCC のせん断破壊によって荷重が最大に達したと考えら れる。

	自由端側	側面
	M	Г
a シリーズ		
b シリーズ		
c シリーズ		

図 2.2.7 試験体破壊状況例

	自由端側 側面		自由端側	側面
	PV(1	00)1	PV(100)2	
a シリーズ				
b シリーズ				
c シリーズ				
	PV(4	0)1	PV(4	40)2
a シリーズ				
b シリーズ	0.2022 11:30		COPPENRIO	2
			No. of the second se	

図 2.2.7 試験体破壊状況例(続き)

(2) 付着応力-荷重端すべり量関係

引抜試験によって得られた付着応力-荷重端すべり量関係を図 2.2.8 に示す。付着応 力は引抜荷重を付着区間における補強筋の表面積で除することにより算出し(式 (2.2.1))、荷重端すべり量は補強筋の自由端すべり量に自由端から荷重端までの補強筋 の伸びを加算することにより算出した(式 (2.2.2))。

MT シリーズでは、全試験体において、付着応力がピークに達するとともに試験体が 割裂し、付着応力が急激に低下した。PV(100)1、PV(100)2、PV(40)1、PV(40)2 シリーズ の試験体では、ひび割れ発生後もすべりの増加を伴いながら付着応力が上昇し、ピーク に達した。付着応力がピークに達した際、いずれのシリーズの試験体においても、試験 体側面、自由端側にひび割れが確認された。また、同シリーズの試験体では、ピーク以 降も付着応力の急激な低下は見られず、すべりの増加を伴いながら緩やかに付着応力が 低下した。これは、FRCC に用いた PVA(40)、PVA(100)が試験体のひび割れを架橋し、 FRCC の補強筋に対する拘束力がピーク後も損なわれなかったためと考えられる。

$$\tau_b = P/(\pi \cdot d \cdot l_b) \tag{2.2.1}$$

$$S = S_0 + \{ (P \cdot l_b) / (2E_f \cdot A_f) \}$$
(2.2.2)

ここで、

- *τ*_b :付着応力
- *P* : 引抜荷重
- *d* : 補強筋径
- *l*_b : 付着長
- *S*₀ : 自由端すべり量
- *E_f*:補強筋の弾性係数
- *A_f*:補強筋の断面積



図 2.2.8 付着応力-荷重端すべり量関係





(3) 最大付着応力

最大付着応力-かぶり厚関係を図 2.2.9 に示す。断面寸法と使用した繊維の種類が同 じである試験体において、最大付着応力は繊維の体積混入率の増加にともない上昇する 傾向にあった。また、かぶりの増加にともなう最大付着応力の大きな増加傾向は見られ なかった。



図 2.2.9 最大付着応力ーかぶり厚関係

2.3 付着応カー荷重端すべり量関係のモデル化

2.3.1 はじめに

本節では、引抜試験より得られた付着応力-荷重端すべり量関係のモデル化を行う。 前節の付着応力-荷重端すべり量関係(図 2.2.8)より、組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の付着応力-荷重端すべり量関係は、いずれの変動因子においても、加力開始からひび 割れ発生までの初期剛性域、ひび割れ発生からピークまでの付着応力増加域、ピーク以 降の緩やかな軟化域に分けられる。よって本研究では、組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の 付着応力-荷重端すべり量関係をトリリニアモデルによってモデル化する。

2.3.2 トリリニアモデル

(1) トリリニアモデルの特性値について

モデル化を行うにあたって、図 2.3.1 に示すトリリニアモデルのように5つの特性値、 初期勾配 k_1 、ひび割れ発生時の付着応力 τ_1 、最大付着応力 τ_{max} 、最大付着応力時の荷重 端すべり量 S_{max} 、軟化勾配 k_3 を各変動因子毎に決定した。特性値の一覧を表 2.3.1 に示 す。各特性値の決定方法を次節から述べる。



図 2.3.1 トリリニアモデル

シリーズ	$ au_{max}$	$ au_1$	S_{max}	k_1	k_3
	(MPa)	(MPa)	(mm)	(N/mm^3)	(N/mm^3)
PV(100)1a	6.58	3.29	0.58	71.35	
PV(100)1b	6.67	3.34	0.56	58.28	
PV(100)1c	6.73	3.37	1.54	38.56	0.21
PV(100)2a	7.51	3.76	0.48	84.85	-0.51
PV(100)2b	7.63	3.82	1.22	60.79	
PV(100)2c	7.70	3.85	1.26	45.49	
PV(40)1a	6.18	3.09	0.47	53.23	-0.26
PV(40)1b	6.62	3.31	0.53	63.13	-0.36
PV(40)1c	7.03	3.52	0.66	38.83	-0.32
PV(40)2a			0.85	50.55	-0.25
PV(40)2b	7.94	3.97	0.72	50.19	-0.23
PV(40)2c			0.57	39.53	-0.17

表 2.3.1 特性值一覧

(2) 最大付着応力 Tmax

最大付着応力 *t_{max}*については各シリーズ毎の破壊形式を考慮し、次のように決定した。 補強筋周辺の FRCC のせん断破壊によりピークに達した PV(40)2 シリーズでは、シリ ーズ内の全試験体における最大付着応力を平均した値を *t_{max}*とした。

PV(100)1、PV(100)2、PV(40)1 シリーズでは、以下に示す既往の手法¹²により τ_{max}を 決定した。

歪硬化型繊維補強セメント複合材料 (SHCC: Strain-Hardening Cementitious Composites) の付着性状に関する既往の研究¹²⁾では、軸方向に力を受ける補強筋周辺の応力状態を 中空な厚肉円筒に模擬することで、最大付着応力の評価を行っている。補強筋周辺の応 力状態を図 2.3.2 に示すように、内部ひび割れの発生している範囲では応力一定の塑性 域とし、ひび割れの発生していない範囲を弾性域とする elastic plastic stage と仮定し、 式 2.3.1 より最大付着応力とかぶり厚の関係式を得ている。本研究においても、内部ひ び割れの発生している範囲において PVA 繊維の繊維架橋により応力が伝達されると考 え、elastic plastic stage を仮定し、式 2.3.1 より最大付着応力ーかぶり厚の関係式を表現 する。



図 2.3.2 補強筋周辺の応力状態¹²⁾

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma_t} = \frac{2}{d_b} \left\{ \left(r_i - \frac{d_b}{2} \right) + \frac{r_i (r_u^2 - r_i^2)}{r_u^2 + r_i^2} \right\} \cot \alpha$$
(2.3.1)

ここで、

τ_{max}:最大付着応力

- σ_t : FRCC の引張強度
- *d*_b : 補強筋径
- *r_i*:内部ひび割れ範囲
- *r*_u: かぶり厚に補強筋径の 1/2 を加えた値

 $\cot \alpha = 2.15$

本研究では、式 2.3.1 において、引張強度 σ_tは各変動因子毎に次のように決定した。 PV(100)1、PV(100)2 シリーズでは、PVA(100)繊維を用いた組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC について実施された両引試験 ¹³⁾の結果から得たひび割れ強度を用いた。PV(40)1 シリー ズでは、曲げ試験の結果より引張強度を算出した。計算に用いた FRCC の引張強度 σ_tを 表 2.3.2 に示す。

内部ひび割れ範囲 r_i に関して、式 2.3.1 において、各変動因子毎に r_i を漸近的に増加 させ、最大付着応力の平均を満たす r_i を決定した。PV(100)1、PV(100)2 シリーズでは、 得られた r_i を各繊維体積混入率毎に平均し、各繊維体積混入率における r_i とした。 PV(40)1 シリーズでは、得られた r_i について最小二乗法により線形近似を行い、式 2.3.2 のように r_i をかぶり厚に補強筋径の 1/2 を加えた値である r_u の関数とした。決定した内 部ひび割れ範囲 r_i を表 2.3.3 に示す。決定した σ_i 、 r_i を用いて式 2.3.1 により最大付着応 力を算出した。

×		
	PV(100)1 PV(100)2	PV(40)1
引張強度 σ _t	2.29MPa	2.82MPa

表 2.3.2 引張強度 σt 一覧

	PV(100)1	PV(100)2	PV(40)1
a シリーズ			6.95mm
b シリーズ	8.16mm	8.86mm	7.17mm
c シリーズ			7.38mm

表 2.3.3 内部ひび割れ範囲 r_i一覧

 $r_i = 0.021r_u + 0.436d_b$

(2.3.2)

(3) ひび割れ発生時の付着応力 τ」および初期勾配 k」

全ての変動因子において、ひび割れ発生時の付着応力 τ₁ は経験的に最大付着応力 τ_{max}の 1/2 倍とした。また、PV(100)1、PV(100)2 シリーズの初期勾配 k₁ は経験的に最大付着 応力の 1/5 までの勾配とし、PV(40)1、PV(40)2 シリーズの初期勾配 k₁ は経験的に最大付 着応力の 1/2 までの勾配とした。

(4) 最大付着応力時の荷重端すべり量 Smax

PV(100)1、PV(100)2 シリーズにおいて、最大付着応力時の荷重端すべり量 Smax は図 2.3.3 (左) に示すように、加力開始からピークまでのコンプリメンタリーエネルギーの 等価を考え決定した。PV(40)1、PV(40)2 シリーズでは、Smax は図 2.3.3 (右) に示すよう にトリリニアモデルの第一折れ点を考慮し、加力開始からピークまでのコンプリメンタ リーエネルギーの等価を考え決定した。



図 2.3.3 Smax の決定方法

(5) 軟化勾配 k3

PV(100)1、PV(100)2 シリーズでは、各変動因子毎の平均化曲線における荷重端すべり 量が *S_{max}* から 15mm の範囲においてエネルギーの等価を考え軟化勾配を求めた。求めた 軟化勾配を平均し、PV(100)シリーズにおける軟化勾配 *k*₃ とした。PV(40)1、PV(40)2 シ リーズでは、各変動因子毎の平均化曲線において、付着応力が最大となる点と荷重端す べり量が補強筋径 13.52mm となる点までの勾配とした。

24

2.3.3 トリリニアモデルと試験結果の比較

トリリニアモデルと引抜試験の結果の比較を図 2.3.4 に示す。いずれの変動因子においても、原点から第一折れ点までの挙動および第一折れ点からピークまでの挙動をよく 表現できている。また、ピーク以降の緩やかな軟化域についても、その傾向を概ねよく 表現できている。





2.4 まとめ

付着区間の長さが補強筋径の数倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体につい て引抜試験を実施した。引抜試験を通して FRP-FRCC 間の局所付着性状を実験的に把 握した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 試験より得られた付着応力-荷重端すべり量関係では、FRCC を用いた全ての試験 体において、最大付着応力後の緩やかな軟化域が存在し、繊維の混入による靭性向 上が確認された。また、FRCC に混入する繊維の体積混入率が増加すると、試験体 に発生するひび割れの幅が小さくなることが確認された。
- ② 引抜試験の結果を基に作成したトリリニアモデルは、組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の付着応力-荷重端すべり量関係をよく表現できている。

第3章 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の付着性状

3.1 はじめに

一般的に、セメント材料と補強筋間における付着応力が区間内で一定とみなすことが できるのは、付着区間の長さが補強筋径の数倍程度の場合までと考えられている。しか し、実構造物における付着区間の長さは補強筋径の数十倍になると想定されるため、付 着区間の短い試験体に加え、付着区間の長い試験体についても検討を行うべきである。

本章では、付着区間の長さが補強筋径の数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体について引抜試験を実施する。試験の変動因子は FRCC に用いる PVA 繊維の径、繊維体積混入率、断面寸法とし、試験を通して FRP-FRCC 間の付着性状を実験的に把握 することを目的とする。

3.2 組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体の引抜試験(3章)

3.2.1 実験概要

(1) 試験体概要

100

単位:mm

試験体形状の例を図 3.2.1 に、試験体一覧を表 3.2.1 に示す。試験体は正方形断面を 有する長さ 600mm の直方体 FRCC ブロックとし、断面中心に組紐型 AFRP 補強筋を一 本配置した。補強筋端部には試験機のチャック固定用に鋼製カプラーを取り付けた。 FRCC ブロック両端部には塩ビ管によりアンボンド処理を施し、付着長は補強筋径の約 40 倍 (543mm) とした。変動因子は FRCC に用いる PVA 繊維の径 (40µm、100µm) お よび FRCC の繊維体積混入率 (0%、1%、2%)、試験体断面寸法 (A シリーズ: 100mm×100mm、B シリーズ:120mm×120mm、C シリーズ:140mm×140mm) とした。 試験体はモルタル試験体、繊維径 100µm の PVA 繊維を用いた FRCC 試験体を各一体ず つ、繊維径 40µm の PVA 繊維を用いた FRCC 試験体を各 3 体ずつ、計 27 体作製した。 試験体の名称について、試験体の命名規則は FRCC に用いた繊維の径、繊維の体積混 入率、試験体断面寸法を連続して表記するものとする。FRCC に用いた繊維の径は PV(40)、PV(100)、繊維の体積混入率は1、2、断面寸法は A、B、C と表記し、各々の単 位は省略する。モルタル試験体については MT という表記に続けて断面寸法を表記す

試験体番号(1、2、3)を表記する。

543

600

28.

る。また、同一変動因子における試験体は上記の命名規則に加え、試験体名称の末尾に

図 3.2.1 試験体形状の例 (A シリーズ)

試験体	繊維・補強筋	断面寸法	繊維体積混入率	試験体数
MTA			-	1
PV(100)1A		100mm×100mm	1.0%	1
PV(100)2A	付着長:543mm		2.0%	1
MTB	補強筋:組紐型 AFRP		-	1
PV(100)1B	径:13.52mm FRCC 繊維:PVA(100) 径:100µm、長さ12mm	120mm×120mm	1.0%	1
PV(100)2B			2.0%	1
MTC			-	1
PV(100)1C		140mm×140mm	1.0%	1
PV(100)2C			2.0%	1
PV(40)1A		100	1.0%	3
PV(40)2A	付着長:543mm	100mm×100mm	2.0%	3
PV(40)1B	補強筋:組紐型 AFRP 径:13.52mm FRCC 繊維:PVA(40) 径:40µm、長さ 12mm	120	1.0%	3
PV(40)2B		120mm×120mm	2.0%	3
PV(40)1C		140,000 × 140,000	1.0%	3
PV(40)2C		140mm×140mm	2.0%	3

表 3.2.2 試験体一覧(3章)

(2) 使用材料

FRCC の調合計画を表 3.2.2 に、FRCC に使用した繊維、AFRP 補強筋の物性値を表 3.2.3、表 3.2.4 に、それらの形状を図 3.2.2、図 3.2.3 に示す。

計驗休	単位量(kg/m³)					
1210次17	水	セメント	細骨材	フライアッシュ	PVA 繊維	
MT					0	
PV(100)1					13	
PV(100)2	380	678	484	291	26	
PV(40)1					13	
PV(40)2					26	

表 3.2.2 FRCC 調合計画

表 3.2.3	PVA	繊維物性値	(メーカ・	公称値)
---------	-----	-------	-------	------

繊維種別	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)
PVA(100)	0.10	12	1200	28
PVA(40)	0.04	12	1690	40.6

表 3.2.4 組紐型 AFRP 補強筋物性値

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







PVA(40)





図 3.2.3 組紐型 AFRP 補強筋形状

引抜試験実施時材齢において Φ100-200mm シリンダーによる圧縮試験および 100-100-400mm 角柱による 4 点曲げ試験を実施した。圧縮試験結果を表 3.2.5 に、曲げ試験 結果を表 3.2.6 に示す。また、曲げ試験後の供試体を図 3.2.4 に、曲げモーメントー曲 率関係を図 3.2.5 に示す。

試験体	圧縮強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)
MT	61.5	20.2
PV(100)1	58.7	19.0
PV(100)2	60.1	19.1
PV(40)1	48.2	17.6
PV(40)2	44.4	16.1

表 3.2.5 圧縮試験結果 (3章)

表 3.2.6 曲げ試験結果(3章)

	扒 0.2.0 Ⅲ		
試験体	最大 曲げモーメント (kN・m)	最大曲げ モーメント時曲率 (1/m)	平均引張強度*1 (MPa)
PV(100)1-1	0.952	0.005	
PV(100)1-2	0.923	*2	2.91
PV(100)1-3	0.799	0.155	
PV(100)2-1	1.260	0.218	
PV(100)2-2	1.330	*2	2.94
PV(100)2-3	1.344	0.129	
PV(40)1-1	1.122	0.150	
PV(40)1-2	1.115	*2	2.56
PV(40)1-3	1.105	0.048	
PV(40)2-1	1.923	0.225	
PV(40)2-2	2.070	0.118	4.56
PV(40)2-3	1.911	0.082	

*1:曲げ試験(JCI-S-003-2007)¹¹⁾

*2:試験区間外にひび割れが発生したため曲率測定不可



図 3.2.4 曲げ試験供試体 (3章)



(3) 加力·計測方法

加力方法を図 3.2.6 に示す。2 章で実施した引抜試験と同様に、加力には 2MN 万能試 験機を用い、単調引抜載荷を行う。試験体上部ヘッド上の直径 64mm の孔を設けた加力 板の上に試験体を設置し、試験機の下部チャックで補強筋端の鋼製カプラーを掴み、引 抜載荷を行う。なお、試験体の横方向への変位を拘束しないよう、試験体と加力板の間 にテフロンシートを設置した。計測項目は引抜荷重、補強筋の自由端すべり量、鋼製カ プラー上端部の左右に設置した変位計による荷重端変位である。次に示すように平均付 着応力および荷重端すべり量を算出した。



$$\tau_{ave} = P/(\pi \cdot d \cdot l_b) \tag{3.2.1}$$

$$S = (S_1 + S_2)/2 - \{ (P \cdot l')/(E_f \cdot A_f) \}$$
(3.2.2)

ここで、

- τ_{ave}:平均付着応力
- *P* : 引抜荷重
- *d* : 補強筋径
- *l*_b : 付着長
- *S* : 荷重端すべり量
- S₁:鋼製カプラー上端部に設置した変位計1の変位
- S2: :鋼製カプラー上端部に設置した変位計2の変位
- l': 鋼製カプラー上端部から試験体の付着領域下端部までの長さ
- *E*f::補強筋の弾性係数
- *A*f :補強筋の断面積

3.2.2 実験結果

(1) 試験体破壊状況

試験終了後の試験体の破壊状況例を図 3.2.7 に示す。全ての変動因子における試験体において、試験体の自由端側、側面にひび割れが発生した。MT シリーズでは、試験体にひび割れが発生するとともに、荷重が最大に達し、割裂破壊した。MTB シリーズ試験体が割裂破壊した際、試験体側面におけるひび割れが補強筋の軸方向だけでなく、軸直行方向にも発生した。PV(100)、PV(40)シリーズでは、FRCC に用いる繊維の体積混入率が 1%から 2%に増加すると、試験体側面におけるひび割れの幅が小さくなった。またPV(40)シリーズ試験体では、PV(40)1 シリーズ試験体の自由端側、側面および PV(40)2 シリーズ試験体の側面に微細なひび割れが複数確認された。MT、PV(100)1、PV(100)2、PV(40)1、PV(40)2 シリーズにおいて、断面寸法の違いによる試験体の破壊状況の変化はみられなかった。



図 3.2.7 試験体破壊状況例



図 3.2.7 試験体破壊状況例(続き)

(2) 平均付着応力-荷重端すべり量関係

引抜試験より得られた平均付着応力-荷重端すべり量関係を図 **3.2.8** に示す。MT シ リーズにおいて、全ての試験体がひび割れの発生とともに荷重が最大に達した。断面 寸法の違いによる平均付着応力-荷重端すべり量関係への影響はみられなかった。 PV(100)1 シリーズでは、全ての試験体において、試験体側面にひび割れが発生した後 も荷重が上昇する様子が確認された。引抜荷重がピークに達した後も、急激な荷重の 低下はみられず、緩やかに荷重が低下する様子が確認された。また、PV(100)1B およ び PV(100)1C シリーズ試験体の最大荷重は PV(100)1A シリーズ試験体の最大荷重と比 較して大きく、試験体の断面寸法の違いによる影響が確認された。断面寸法の増加に よる最大荷重の上昇傾向は PV(100)2、PV(40)1、PV(40)シリーズについても同様にみら れた。PV(100)2、PV(40)1A、PV(40)1B、PV(40)2シリーズの一部試験体では、引抜荷 重が最大に達した以降、試験体が割裂することにより荷重が急激に低下する様子がみ られた。急激な荷重低下直後の荷重の多くは、低下前の荷重によらず 30kN 程度であ った。また、急激に荷重が低下した試験体はそのまま荷重が低下していくのではな く、再び荷重が上昇する様子が確認された。PV(100)1A シリーズと PV(40)1A シリーズ のように、繊維体積混入率および試験体断面寸法が同じである試験体では、FRCC に 用いた繊維径の小さい PV(40)シリーズ試験体の最大荷重が、PV(100)シリーズの最大荷 重と比較して大きくなる傾向が確認された。また、PV(40)1A シリーズと PV(40)2A シ リーズのように、繊維径および試験体断面寸法の等しい試験体では、FRCC に用いる 繊維の体積混入率が増加することにより、最大荷重が上昇する様子が確認された。2 章で実施した付着長の短い試験体における引抜試験では、FRCCの繊維の体積混入率 の違いによる最大荷重への影響が確認された一方で、試験体の断面寸法による影響は 確認されなかった。一方、本章で実施した付着長の長い試験体における引抜試験で は、試験体の断面寸法、PVA 繊維の径、FRCC の繊維体積混入率のいずれの変動因子 についても FRP-FRCC 間の付着性状へ影響が確認された。

41







(3) 最大付着応力

最大付着応力-かぶり厚関係を図 3.2.9 に示す。2 章で実施した付着長の短い試験体 における引抜試験と同様に、付着長の長い試験体の引抜試験において、断面寸法と使用 した繊維の種類が同じである試験体の最大付着応力は、繊維の体積混入率の増加にとも ない上昇する傾向にあった。また、PV(100)2 シリーズにおける最大付着応力は PV(40)1 シリーズ試験体における最大付着応力と同程度であった。付着長の短い試験体ではかぶ りの増加にともなう最大付着応力の大きな増加傾向は見られなかったが、本章で実施し た付着長の長い試験体では、PV(40)、PV(100)シリーズのどちらにおいても、かぶりの増 加にともなう最大付着応力の増加傾向がみられた。



3.3 まとめ

付着区間の長さが補強筋径の数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体について引抜試験を実施した。引抜試験を通して FRP-FRCC 間の付着性状を実験的に把握した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① MT シリーズ試験体はひび割れの発生とともに、試験体が割裂し、引抜荷重が最大に達した。PVA-FRCCを用いた PV(100)1、PV(100)2、PV(40)1、PV(40)2 シリーズ試験体では、引抜荷重が最大に達した以降も、補強筋の拘束力が完全になくなることはなく、荷重端すべり量の増加をともないながら引抜荷重が低下する様子が確認された。
- ② 同断面寸法、同繊維体積混入率である試験体では、PV(100)シリーズ試験体と比較して PV(40)シリーズ試験体の荷重の方が大きくなる傾向が確認された。
- ③ PV(100)2、PV(40)1A、PV(40)1B、PV(40)2 シリーズ試験体において、引抜試験荷重 が最大に達した以降、引抜荷重の急激な低下がみられた。また、急激な荷重の低下 直後から、引抜荷重が再び上昇する様子が確認された。
- ④ 付着区間の長い試験体では、断面寸法が 100mm×100mm である A シリーズ試験体 と比較して、断面寸法が 120mm×120mm、140mm×140mm である B、C シリーズ試 験体の引抜荷重が大きくなる傾向が確認された。

第4章 数値計算による付着性状の検討

4.1 はじめに

本章では、付着区間の長さが補強筋径の数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の付着性状について、数値計算による解析を行う。数値計算により得られた解析値を3 章で得られた引抜試験の結果と比較、検討する。解析を行うにあたっては、付着区間が 短い時の付着長と割裂面長さの違いを考慮し、2 章で作成したトリリニアモデルの修正 を行う。

4.2 数値計算の手法

補強コンクリート部材の付着性状に関する既往の研究¹⁵⁾では、部材の局所付着性状 を表す関係式を利用し、付着区間の長い部材の付着性状について数値計算により解析を 行っている。本研究においても、先行研究と同様に組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC の局 所付着性状を利用し、数値計算により付着区間の長い試験体の付着性状を解析する。以 下に数値計算の手順を示す。

既往の研究¹⁵⁾では、補強筋の任意の位置の微小区間について、力の釣合いと変形の適 合条件を満たすように数値積分を行っている。本研究においても、補強筋の任意の位置 において図 4.2.1 のように i 番目の微小区間を考える。以下に示す式 4.2.1 は i 番目の 微小区間におけるすべり量を表す関係式であり、その右辺は i-1 番目の微小区間におけ るすべり量に i-1 番目の微小区間から i 番目の微小区間までにおける補強筋の伸びを加 算し、FRCC の変形の増分を差し引いたものである。式 4.2.2 は i 番目の微小区間にお ける引抜荷重を表す関係式であり、その右辺は i-1 番目の引抜荷重に i-1 番目の微小区 間から i 番目の微小区間までにおける局所付着力を加算したものである。試験体の自由 端側から荷重端までの微小区間において、これらの計算を繰り返すことにより、試験体 の荷重端におけるすべり量、引抜荷重を計算した。また、式 4.2.2 における局所付着応 力 t_iについては、次節で述べるように、2 章で作成したトリリニアモデルの特性値を修 正して利用した。



図 4.2.1 i番目の微小区間の釣合い

$$S_{i} = S_{i-1} + \left(\frac{P_{i-1}}{E_{f}A_{f}} + \frac{\Delta P_{i-1}}{2E_{f}A_{f}} - \frac{\Delta P_{i-1}}{2E_{c}A_{c}}\right)\Delta x$$
(4.2.1)

$$P_{i} = P_{i-1} + \Delta P_{i-1} = P_{i-1} + \tau_{i-1} \cdot \Delta x \cdot \varphi_{f}$$
(4.2.2)

- ここで、
 - *S_i*: i番目の区間における補強筋のすべり量
 - *P_i*: i 番目の区間における引抜力
 - *∆x* : 微小区間の長さ
 - E_c : FRCC の弾性係数
 - *Ac* : FRCC の断面積
 - *E*f: :補強筋の弾性係数
 - *A*f : 補強筋の断面積
 - **Φ**f : 補強筋の周長
 - τ_i:i番目の区間における付着応力

4.3 付着長と割裂面長さの違いを考慮したモデル

数値計算による解析を行うにあたって、本節では 2.3.2 節にて作成したトリリニアモ デルにおいて、試験体の付着長と割裂面長さの違いを考慮し、特性値を修正する。

既往の研究¹⁴では、以下に示すように試験体の付着長と割裂面長さの違いについて 関係式を得ている。鉄筋補強 SHCC において補強筋が軸方向に力を受ける際に、付着区 間に加え、非付着区間においても SHCC が主筋を拘束するものと仮定している。また、 鉄筋周辺の応力状態は厚肉円筒で模擬し、鉄筋周辺は応力一定の塑性域であると仮定し ている。この仮定の下において、SHCC を押し広げる力の軸直行方向成分と SHCC によ る補強筋の拘束力には式 4.3.1 の関係が成り立つ。また、式 4.3.1 を付着応力と割裂応 力に成り立つ関係式(式 4.3.2)に代入することにより、式 4.3.3 を得ている。

$$\sigma_s \cdot d_b \cdot l_b = \sigma_t \cdot 2C \cdot l_s \tag{4.3.1}$$

$$\tau = \sigma_s \cdot \cot \alpha \tag{4.3.2}$$

$$\tau = \frac{l_s}{l_b} \left(2\sigma_t \cdot \frac{c}{d_b} \cdot \cot \alpha \right) \tag{4.3.3}$$

ここで、

 σs
 :割裂応力

 σt
 :周方向応力

 db
 :補強筋径

 lb
 :付着区間の長さ

 C
 :かぶり厚

 ls
 :試験体長さ

 τ
 :付着応力

 α =56°
 :

式 4.3.3 は付着長と試験体長さの比が付着応力に影響することを表している。2.3.2 節 にて作成したトリリニアモデルは、付着長 54mm および試験体の長さ 100mm の試験体 の引抜試験結果から作成したモデルである。本節では、各荷重端すべり量における付着 応力を 54/100 倍することで、前節のモデルを部材全域で組紐型 AFRP 補強筋が PVA-FRCC と付着している場合におけるトリリニアモデルとする。修正後の特性値の一覧を 表 4.3.1 に、モデルを図 4.3.1 に示す。

シノリーブ	$ au_{max}$	$ au_1$	S_{max}	k_1	k_3
	(MPa)	(MPa)	(mm)	(N/mm^3)	(N/mm^3)
PV(100)1a	3.55	1.78	0.58	38.53	
PV(100)1b	3.60	1.80	0.56	31.47	
PV(100)1c	3.63	1.82	1.54	20.82	0.17
PV(100)2a	4.06	2.03	0.48	45.82	-0.17
PV(100)2b	4.12	2.06	1.22	32.83	
PV(100)2c	4.16	2.08	1.26	24.56	
PV(40)1a	3.34	1.67	0.47	28.20	-0.14
PV(40)1b	3.57	1.79	0.53	34.09	-0.19
PV(40)1c	3.80	1.90	0.66	20.97	-0.17
PV(40)2a			0.85	27.30	-0.14
PV(40)2b	4.29	2.15	0.72	27.10	-0.12
PV(40)2c			0.57	21.35	-0.09

表 4.3.1 修正した特性値一覧



4.4 解析結果と試験結果の比較

4.4.1 平均付着応カー荷重端すべり量関係の比較

4.2 節の手法から求めた解析結果と3章で実施した引抜試験の試験結果の比較を図 4.4.1 に示す。PV(100)1、PV(100)2のAシリーズにおいて、解析値による平均付着応力 ー荷重端すべり量関係は実験値とよく適応していることが確認された。PV(100)2、 PV(40)1、PV(40)2シリーズでは断面寸法が100mm×100mmであるAシリーズと、断面 寸法が120mm×120mm、140mm×140mmであるB、Cシリーズにおいて、解析値と実 験値の適応性に違いがみられた。これは2章で実施した短い付着区間における引抜試験 では、断面寸法が局所付着性状に影響していなかった一方で、3章で実施した長い付着 区間における引抜試験では断面寸法が付着性状へ影響を与えていたためと考えられる。 試験体の寸法を考慮したモデルが必要であると思われる。





4.4.2 最大平均付着応力の比較

最大平均付着応力の解析値に対する実験値の比とかぶり厚の関係を図 4.4.2 に示す。 PV(100)シリーズでは実験値と解析値がよく適応している。PV(40)シリーズでは解析値 が実験値より小さい。これは、2章で実施した引抜試験と3章の引抜試験の試験体の破 壊形式の違いが影響していると考えられる。圧縮強度のより大きい PV(40)シリーズの 付着区間の短い引抜試験を実施し、試験体の割裂によって荷重が最大に達する際の局所 付着性状のモデル化を行う必要がある。



4.5 まとめ

付着区間の長さが補強筋径の数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC について、 数値計算により解析を行い、得られた解析結果と引抜試験の結果を比較、検討した。本 章で得られた知見を以下に示す。

- 解析を行うにあたって、付着区間が短い時の付着長と割裂面長さの違いを考慮し、
 2章で作成したトリリニアモデルの修正を行った。
- ② PV(100)1 シリーズでは、数値計算による解析結果と引抜試験の結果がよく対応して いることが確認された。
- ③ PV(100)2、PV(40)1、PV(40)2 シリーズでは、断面寸法の違いにより適応性に違いが みられた。解析結果は試験結果と比較して小さく、試験体の割裂によって荷重が最 大に達する際の局所付着性状のモデル化を行う必要がある。

第5章 結論

本研究では、組紐型 AFRP-PVA-FRCC 間の付着性状について検討することを目的として、付着区間の長さが補強筋径の数倍および数十倍程度の組紐型 AFRP 補強 PVA-FRCC 試験体について引抜試験を実施した。また、付着区間の長さが数十倍程度の場合の付着性状の数値計算を行い、解析結果と引抜試験の結果を比較、検討した。

付着区間の短い試験体について実施した引抜試験では、全ての組紐型AFRP補強PVA-FRCC 試験体において、最大付着応力後の緩やかな引抜荷重の低下が確認された。FRCC に混入する繊維の体積混入率が増加すると、試験体のひび割れ幅が小さくなり、最大付 着応力が上昇することが確認された。PVA 繊維の径、試験体の断面寸法の違いが AFRP -FRCC 間の局所付着性状に与える影響は小さかった。また、引抜試験より得られた付 着応力-荷重端すべり量関係をトリリニアモデルにモデル化した。作成したモデルは実 験結果とよく適合しており、AFRP-FRCC 間の局所付着性状を概ねよく表現できてい る。

付着区間の長い試験体について実施した引抜試験において、MT シリーズ試験体はひ び割れの発生とともに割裂し、荷重が最大に達した。PVA-FRCC 試験体は引抜荷重が最 大に達した以降も、補強筋の拘束が完全になくなることはなく、荷重端すべり量の増加 をともないながら引抜荷重が低下した。PV(100)2、PV(40)1A、PV(40)1B、PV(40)2 シリ ーズ試験体では、引抜荷重の急激な低下がみられた。急激な荷重の低下以降、引抜荷重 が再度上昇する様子が確認された。

付着区間の長い試験体において、数値計算による解析を行い、解析結果と引抜試験の 結果を比較、検討した。解析を行うにあたって、付着区間の長さと割裂面長さの違いを 考慮し、2章において作成したトリリニアモデルの修正を行った。PV(100)1シリーズで は、解析結果と試験結果がよく対応していることが確認された。PV(100)2、PV(40)1、 PV(40)2シリーズでは、断面寸法の違いにより適応性に違いがみられた。解析結果は試 験結果と比較して小さく、試験体の割裂によって荷重が最大に達する際の局所付着性状 のモデル化を行う必要がある。

58

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、実験の準備、実施、論文の推敲などに至るまで、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、研究活動全般において、的確かつ丁寧なご助言、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、ご助言およびご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表し ます。

また、筑波大学 金久保研究室に所属する SYLL AMADOU SAKHIR 氏、下河邉大貴 氏、高砂柊伍氏、LI SICONG 氏、ABRHA SELAMAFIT FTHANEGEST 氏、佐々木秀人 氏、三谷龍世氏、ZHANG HANG 氏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。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。

参考文献

- 日本コンクリート工学協会:高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書、高靭性セメント複合材料を知る・作る・使う、2002
- 2) 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
- 3) 丸田誠、閑田徹志、永井覚、山本幸正:プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構、コンクリート工学、Vol.43、No.11、pp.18-26、2005
- 4) 黒岩秀介、陣内浩、小林裕、川端一三、西川泰弘、木村雄一、阿部剛士、島田孝一: 耐火性能向上を目的にポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートの実用化 および適用、日本建築学会技術報告集、No.16、pp.17-22、2002.12
- 5) 須永大揮、金久保利之、並木啓恭:鉄筋補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価に関す る研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.2、pp.1171-1176、2019
- 6) 日本コンクリート工学会:鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化研究委員会報告書、2013
- 7) 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
- 8) 日本建築防災協会:連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋 コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針、2010
- 9) 丸山久一、島弘、福山洋、下村匠:連続繊維補強コンクリート研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.1、1998
- 10) 菅哲治、島弘、本間雅人:片引き試験による連続繊維補強材の局所付着応カーすべ り関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.859-864、1993
- 11) 日本コンクリート工学会:繊維補強セメント 複合材料の曲げモーメントー曲率曲 線試験 方法、JCI 規準 JCI-S-003-2007
- 12) 重水法弘、矢野正剛、細矢博、金久保利之: 歪硬化型繊維補強セメント複合材料を 用いた梁部材の付着割裂性状に関する研究-その2 局所付着割裂実験-、日本建築 学会大会学術講演梗概集、C-2 構造 IV、pp.117-118、2010
- 13) 高砂柊伍、金久保利之、小林寛弥: 組紐型アラミド FRP 補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.44、2022
- 14) 重水法弘、金久保利之、細矢博:鉄筋あき間隔を小さくした SHCC 部材の付着割裂
 強度、日本建築学会技術報告集、Vol17、No.37、pp.903~908、2011.10
- 15) 金久保利之、小島浩一、米丸啓介、福山洋:補強コンクリート部材の付着割裂性状 に関する研究、その2:横補強のない場合の性状に与える構造因子の影響,日本建 築学会構造系論文集、No.506、pp.163~169、1998、4