

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

FRP 補強 FRCC 部材の付着性状とひび割れ幅評価

佐々木 秀人

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

FRP 補強 FRCC 部材の付着性状とひび割れ幅評価

論文概要

本研究では、FRP 補強 FRCC 部材の構造性能把握に資することを目的として、CFRP 補強 PVA-FRCC、GFRP 補強 PVA-FRCC、CFRP 補強アラミド-FRCC の付着試験を行い、付着性状の検討及び付着構成則のモデル化を行った。また、CFRP 補強 PVA-FRCC 及び GFRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験と CFRP 補強アラミド-FRCC 梁試験体の 4 点曲げ試験を行い、ひび割れ幅算定式によるひび割れ幅の評価を行った。

CFRP 補強 PVA-FRCC、GFRP 補強 PVA-FRCC の付着試験では、PVA 繊維の繊維体積混入率を 2% とし、FRP 補強筋の種類とふし高さ比を変動因子とした。ふし高さ比が大きいほど最大付着応力が大きくなる傾向が確認された。CFRP 補強アラミド-FRCC の付着試験では、アラミド繊維の体積混入率を変動因子とした。最大付着応力は、繊維混入率 0.25% 及び 0.5% でモルタル試験体のそれぞれ 1.67 倍、2.01 倍となり、FRCC の繊維による付着耐力の向上が確認された。また、トリリニアモデルによって付着応力-荷重端すべり量関係のモデル化を行った。

CFRP 補強 PVA-FRCC 及び GFRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験では、ふし高さ比の違いより、同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅に大きな差異は確認されなかった。GFRP 補強筋では CFRP 補強筋と比較して同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅が小さいことが確認された。荷重端ひずみ-ひび割れ幅関係の実験結果とひび割れ幅算定式との比較を行った。実験結果とひび割れ幅算定式は概ねよい適合性を示した。

CFRP 補強アラミド-FRCC 梁の 4 点曲げ試験では、単調加力と繰返し加力を行った。単調加力を行った試験体において、FRCC の繊維の混入率が大きいほど同一補強筋ひずみ時におけるひび割れ幅が小さくなる傾向が確認された。補強筋ひずみ-ひび割れ幅関係の実験結果とひび割れ幅算定式との比較を行い、実験結果とひび割れ幅算定式は概ねよい適合性を示した。

FRP 補強 FRCC 部材の付着性状とひび割れ幅評価

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 繊維補強セメント系複合材料.....	1
1.1.2 連続繊維補強材.....	1
1.1.3 FRP 補強 FRCC.....	2
1.2 研究目的.....	3
第 2 章 FRP 補強 FRCC の局所付着性状.....	4
2.1 はじめに.....	4
2.2 FRP 補強 PVA-FRCC の局所付着性状.....	4
2.2.1 FRP 補強 PVA-FRCC の付着試験概要.....	4
2.2.2 FRP 補強 PVA-FRCC の付着試験結果.....	7
2.2.3 FRP 補強 PVA-FRCC の付着構成則のモデル化.....	14
2.3 FRP 補強アラミド-FRCC の局所付着性状.....	17
2.3.1 FRP 補強アラミド-FRCC の付着試験概要.....	17
2.3.2 FRP 補強アラミド-FRCC 部材の付着試験結果.....	19
2.3.3 FRP 補強アラミド-FRCC の付着構成則のモデル化.....	22
2.4 まとめ.....	24
第 3 章 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムのひび割れ幅評価.....	25
3.1 はじめに.....	25
3.2 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験概要.....	25
3.2.1 使用材料.....	25
3.2.2 試験体.....	25
3.3 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験結果.....	26
3.3.1 ひび割れ及び破壊性状.....	26
3.3.2 荷重－全体変形関係.....	27
3.3.3 荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係.....	28
3.4 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムのひび割れ幅評価.....	30
3.4.1 ひび割れ幅算定式.....	30
3.4.2 実験結果とひび割れ幅算定式の比較.....	32
3.5 まとめ.....	34
第 4 章 FRP 補強アラミド-FRCC 梁のひび割れ幅評価.....	35
4.1 はじめに.....	35

4.2 FRP 補強アラミド-FRCC 梁の曲げ試験概要	35
4.2.1 使用材料	35
4.2.2 試験体	36
4.3 FRP 補強アラミド-FRCC 梁の曲げ試験結果	37
4.3.1 ひび割れ及び破壊性状	37
4.3.2 荷重－載荷点たわみ関係	38
4.3.3 補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係	38
4.4 FRP 補強アラミド-FRCC 梁のひび割れ幅評価	39
4.4.1 ひび割れ幅算定式	39
4.4.2 実験結果とひび割れ幅算定式の比較	41
4.5 まとめ	41
第 5 章 結論	43
謝辞	44
参考文献	45

図表リスト

図 1-1	FRCC の例 ^[2]	1
図 1-2	FRP 補強筋の例 ^[7]	2
図 2-1	CFRP 螺旋巻き	5
図 2-2	GFRP 螺旋巻き	5
図 2-3	PVA 繊維	5
図 2-4	試験体形状・加力方法	7
図 2-5	加力後の CS5/PVA200	7
図 2-6	加力後の CS10/PVA200	8
図 2-7	加力後の CS15/PVA200	8
図 2-8	加力後の補強筋	8
図 2-9	加力後の GS5/PVA200	9
図 2-10	加力後の GS10/PVA200	9
図 2-11	加力後の GS15/PVA200	10
図 2-12	加力後の補強筋	10
図 2-13	CS5/PVA200 の付着応力ー荷重端すべり量関係	11
図 2-14	CS10/PVA200 の付着応力ー荷重端すべり量関係	12
図 2-15	CS15/PVA200 の付着応力ー荷重端すべり量関係	12
図 2-16	GS5/PVA200 の付着応力ー荷重端すべり量関係	13
図 2-17	GS10/PVA200 の付着応力ー荷重端すべり量関係	13
図 2-18	GS15/PVA200 の付着応力ー荷重端すべり量関係	13
図 2-19	付着応力ー荷重端すべり量関係のトリリニアモデル	15
図 2-20	CS5/PVA200 の実験結果とモデルの比較	15
図 2-21	CS10/PVA200 の実験結果とモデルの比較	16
図 2-22	CS15/PVA200 の実験結果とモデルの比較	16
図 2-23	GS5/PVA200 の実験結果とモデルの比較	16
図 2-24	GS10/PVA200 の実験結果とモデルの比較	17
図 2-25	GS15/PVA200 の実験結果とモデルの比較	17
図 2-26	CFRP ストランド	18
図 2-27	アラミド繊維	18
図 2-28	試験体形状・加力方法	19
図 2-29	加力後の CSt7/MT	20
図 2-30	加力後の CSt7/AR025	20
図 2-31	加力後の CSt7/AR050	20

図 2-32	CS7/MT の付着応力－荷重端すべり量関係	21
図 2-33	CS7/AR025 の付着応力－荷重端すべり量関係	21
図 2-34	CS7/AR050 の付着応力－荷重端すべり量関係	22
図 2-35	CS7/MT の実験結果とモデルの比較	23
図 2-36	CS7/AR025 の実験結果とモデルの比較	23
図 2-37	CS7/AR050 の実験結果とモデルの比較	23
図 3-1	試験体形状・加力方法	26
図 3-2	加力後の CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200	27
図 3-3	加力後の GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200	27
図 3-4	CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重－全体変形関係	28
図 3-5	GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重－全体変形関係	28
図 3-6	CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係	29
図 3-7	GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係	30
図 3-8	繊維架橋則のトリリニアモデル	32
図 3-9	CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の実験結果とひび割れ幅算定式の比較	33
図 3-10	GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の実験結果とひび割れ幅算定式の比較	33
図 4-1	試験体形状・加力方法	36
図 4-2	加力履歴	37
図 4-3	加力後の試験体	37
図 4-4	荷重－載荷点たわみ量関係	38
図 4-5	補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係	39
図 4-6	繊維架橋則のバイリニアモデル	40
図 4-7	実験結果とひび割れ幅算定式の比較	41
表 2-1	補強筋材料特性	4
表 2-2	PVA 繊維の材料特性（メーカー公称値）	5
表 2-3	FRCC の配合計画及び圧縮性状	6
表 2-4	試験体一覧	6
表 2-5	付着試験結果一覧	14
表 2-6	モデルの特性値	15
表 2-7	補強筋の材料特性（メーカー公称値）	17
表 2-8	アラミド繊維の材料特性（メーカー公称値）	18
表 2-9	FRCC の配合計画及び圧縮性状	18
表 2-10	試験体一覧	19
表 2-11	付着試験結果一覧	22

表 2-12	モデルの特性値.....	22
表 3-1	試験体一覧.....	26
表 3-2	ひび割れ幅算に用いる特性値.....	31
表 3-3	繊維架橋則のトリニアモデルの特性値.....	32
表 4-1	補強筋の材料特性（メーカー公称値）	35
表 4-2	FRCC の配合計画及び圧縮性状.....	35
表 4-3	試験体一覧.....	36
表 4-4	最大荷重一覧.....	38
表 4-5	ひび割れ幅算定に用いる特性値.....	40
表 4-6	繊維架橋則のバイリニアモデルの特性値.....	41

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

一般にコンクリートなどのセメント系材料は圧縮応力に対して大きな強度を示すという特性を持っているが、引張応力に対しては圧縮強度の 1/10 程度の強度しか示さず、引張応力下でひび割れが生じ性能低下の要因となる。そこで、このような引張応力下での脆性を改善するため、セメント系材料に長さ数十 mm 程度の短繊維を体積率で数%程度混入させた繊維補強セメント系複合材料（fiber-reinforced cementitious composite : FRCC）の研究がなされてきた^[1]。FRCC は、図 1-1^[2] のように混入された繊維がひび割れの間で架橋し引張力を負担するため、ひび割れの発生及び進展が抑制され、通常のコンクリートと比べ高い引張性能が得られる。FRCC には、混入する繊維として鋼繊維のような金属繊維や、PVA、アラミドなどの有機繊維がある。

通常鉄筋コンクリート構造物の設計では、コンクリートは引張側の応力を負担しないものとして扱われる^[3]。高い引張性能を有する FRCC は、設計において引張側の応力を負担することが期待されるため、FRCC の引張性状を定量的に明らかにすることが重要となる。FRCC の引張性状は、繊維架橋則（引張応力-ひび割れ幅関係）によって定量的に記述される。既往の研究によって、PVA、PP、スチールワイヤ、アラミドなどを用いた FRCC の繊維架橋則が提案されている^{[4] ~ [6]}。

今後、FRCC を用いた耐ひび割れ性の高い構造物の実現が期待される。



図 1-1 FRCC の例^[2]

1.1.2 連続繊維補強材

鉄筋コンクリート構造物の課題として、コンクリートの中性化にともなう鉄筋の腐食がある。鉄筋の代替補強材として、図 1-2^[7] に示すような連続繊維を用いた繊維強化プラスチック（fiber-reinforced polymer : FRP）補強筋が提案されている。FRP 補強筋は耐腐食性、破断まで弾性挙動を示すなどの特徴があり、鉄筋と代替することで高寿命な構造物が期待できる。FRP 補強筋には、炭素繊維強化プラスチック carbon fiber-reinforced polymer : CFRP）、ガラス

繊維強化プラスチック（glass fiber-reinforced polymer : GFRP），アラミド繊維強化プラスチック（アラミド fiber-reinforced polymer : AFRP）などがあり，繊維によって引張強度や弾性率などの力学性能が異なる．したがって，FRP 補強筋の性能に合わせて FRCC も適切に選定することが重要である．

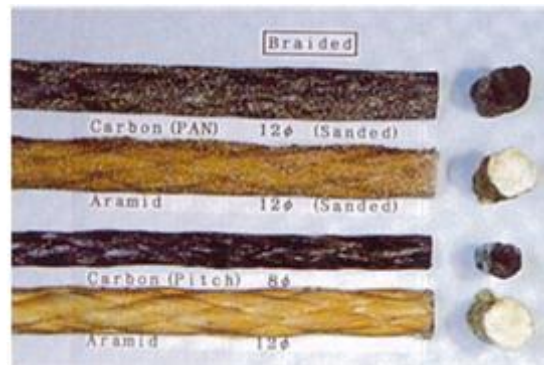


図 1-2 FRP 補強筋の例 [7]

1.1.3 FRP 補強 FRCC

近年の鉄筋コンクリート構造物の課題として，経年劣化によって生じる老朽化・維持管理コストの増大が挙げられる．耐腐食性を有し高強度かつ弾性挙動を示す FRP 補強筋と，高い引張性能と耐ひび割れ性を有する FRCC を組み合わせることで，高耐久かつ維持管理コストの低い構造物が期待できる．

FRP 補強 FRCC 部材の実用化のためには，構造性能を明らかにする必要がある．構造物の美観保持，耐久性維持の観点から部材に生じるひび割れ幅の定量的な評価が求められる．Sunaga らは，鉄筋補強 FRCC 部材のひび割れ幅評価式として，補強筋ひずみまたは荷重端ひずみからひび割れ幅評価を可能にしたひび割れ幅算定式を提案している [8]．算定式は補強筋と FRCC 間の付着構成則（付着応力－すべり量関係）を簡易的にモデル化して記述されたものであり，算定式を適用するためには補強筋と FRCC 間の付着構成則を明らかにする必要がある．算定式は補強筋の種類によらず FRP 補強筋にも適用可能であり，Takasago らは，組紐型 AFRP 補強筋と PVA-FRCC を組み合わせた部材のひび割れ幅の評価を行っている [9]．他の FRP 補強筋と FRCC を組み合わせた FRP 補強 FRCC 部材のひび割れ幅評価の事例は少なく，他の FRP 補強筋と FRCC の組み合わせでもひび割れ幅の評価を行う必要がある．

1.2 研究目的

本研究では、FRP 補強 FRCC 部材の構造性能を明らかにすることを目的として、異なる複数の組み合わせの FRP 補強 FRCC の付着試験を行い、FRP 補強筋と FRCC の付着性状の検討を行う。また、付着構成則をモデル化し、ひび割れ幅算定式によるひび割れ幅の評価を行う。

第 2 章では、FRP 補強 FRCC の付着試験を行い、付着性状の検討と付着構成則のモデル化を行う。

第 3 章では、FRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験を行い、ひび割れ幅評価を行う。

第 4 章では、FRP 補強アラミド-FRCC 梁部材の曲げ試験を行い、ひび割れ幅評価を行う。

第2章 FRP 補強 FRCC の局所付着性状

2.1 はじめに

本章では、FRP 補強 PVA-FRCC と FRP 補強アラミド-FRCC の付着試験を行い、付着性状の検討を行う。また、付着構成則のモデル化を行う。

2.2 FRP 補強 PVA-FRCC の局所付着性状

2.2.1 FRP 補強 PVA-FRCC の付着試験概要

(1) 使用材料

補強筋の材料特性を表 2-1 に示す。使用する FRP 補強筋は、CFRP 螺旋巻き（CS5, CS10, CS15）と GFRP 螺旋巻き（GS5, GS10, GS15）の 2 種類であり、既往の研究^[10]と同一のものである。2 種類の FRP 補強筋にはそれぞれ作製時のふし高さ比の目標値が 5%, 10%, 15% の 3 段階あり、補強筋種別は計 6 種類である。CFRP 螺旋巻きの形状を図 2-1 に示す。GFRP 螺旋巻きの形状を図 2-2 に示す。PVA 繊維の材料特性を表 2-2 に、形状を図 2-3 に示す。FRCC の配合計画及び圧縮性状を表 2-3 に示す。圧縮性状は、同一バッチの $\phi 100 \times 200$ のシリンドラー型供試体の圧縮試験により得た。FRCC の繊維の体積混入率は 2%である。

表 2-1 補強筋材料特性

補強筋種別	FRP 種別	断面積(mm ²)	平均径(mm)	周長(mm)	ふし高さ比(%)	弾性係数(GPa)
CS5	螺旋巻き CFRP	102	11.4	35.9	5.7	127
CS10		114	12.1	37.9	8.8	111
CS15		129	12.8	40.3	9.2	100
GS5	螺旋巻き GFRP	94	11.0	34.4	5.9	43.2
GS10		103	11.4	35.9	8.5	38.0
GS15		114	12.1	37.9	8.8	31.6

(JIS A 1192 : コンクリート用連続繊維補強材の引張試験方法による)



図 2-1 CFRP 螺旋巻き



図 2-2 GFRP 螺旋巻き

表 2-2 PVA 繊維の材料特性（メーカー公称値）

繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)	密度 (g/cm^3)
12	100	1200	28	1.3



図 2-3 PVA 繊維

表 2-3 FRCC の配合計画及び圧縮性状

試験体	単位量(kg/m ³)					圧縮強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
	W	C	S	FA	PVA		
CS5/PVA200	380	678	484	291	26	51.7	17.3
CS10/PVA200							
CS15/PVA200							
GS5/PVA200							
GS10/PVA200							
GS15/PVA200							

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) 試験体

試験体一覧を表 2-4 に、試験体形状・加力方法を図 2-4 に示す。試験体は、断面 100x100mm 高さ 120mm の長方形ブロックであり、中心に FRP 補強筋を配した。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。試験区間である付着長は、局所付着となるように補強筋径の約 4 倍の 48mm とした。試験区間の両端には、コーン状破壊を防ぐために軟質樹脂製のホースによってアンボンド区間を設けている。試験体は 2MN 万能試験機の上部ヘッド上の加力版にセットし、下部ヘッドのチャックでカプラーをつかみ単調引抜加力を行った。試験体の横方向への変位を拘束しないように、試験体と加力版の間にテフロンシートを配置した。計測項目は入力荷重及び自由端すべり量である。

表 2-4 試験体一覧

試験体	FRCC 繊維	補強筋	補強筋径 (mm)	付着長 (mm)	断面 寸法	繊維体積 混入率	試験 体数
CS5/PVA200	PVA 繊維長： 12mm 繊維径： 100μm	CFRP 螺旋巻き	11.4	48	100mm × 100mm	2%	3
CS10/PVA200			12.1				3
CS15/PVA200			12.8				3
GS5/PVA200		GFRP 螺旋巻き	11.0				3
GS10/PVA200			11.4				3
GS15/PVA200			12.1				3

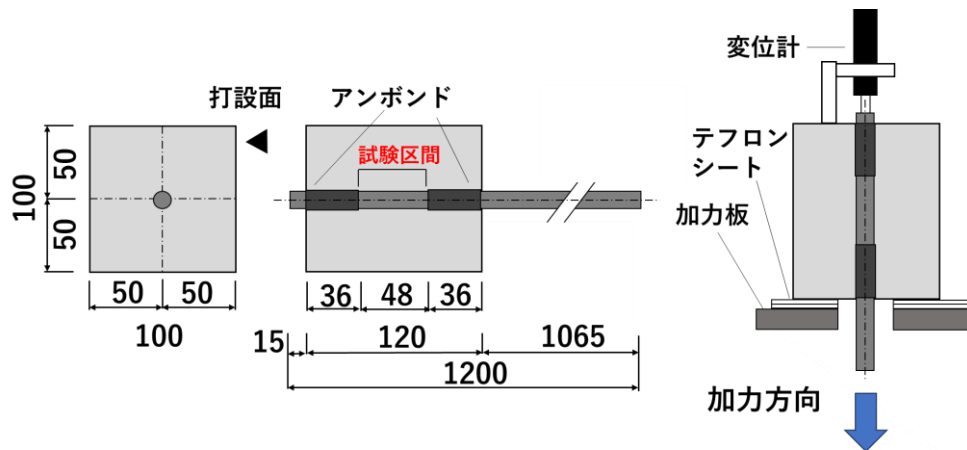
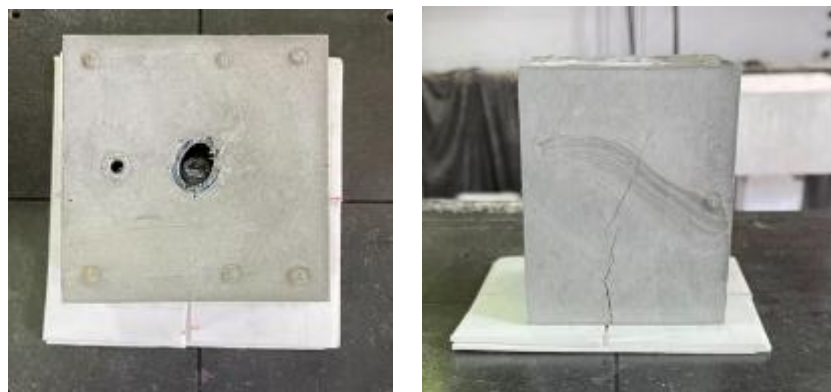


図 2-4 試験体形状・加力方法

2.2.2 FRP 補強 PVA-FRCC の付着試験結果

(1) 破壊性状

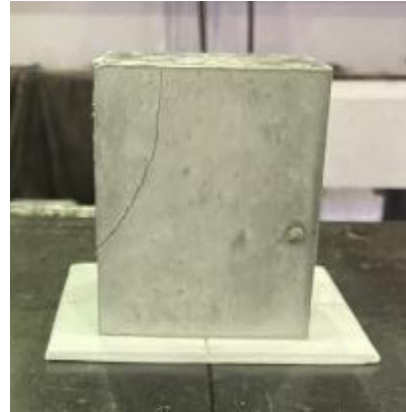
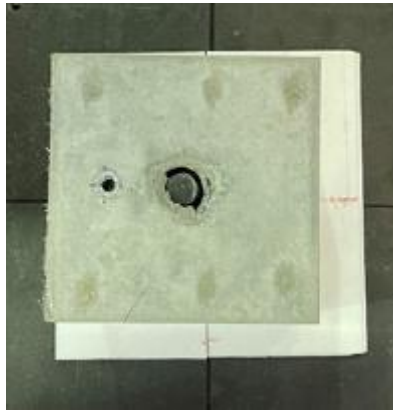
CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の加力後の写真の代表例をそれぞれ図 2-5, 図 2-6, 図 2-7 に示す。試験体は、いずれも最大付着応力に到達後ひび割れが生じ、ひび割れが拡幅して荷重が低下した。ひび割れの間では、繊維がひび割れを架橋している様子が確認された。ふし高さ比の違いによる FRCC のひび割れ状況に大きな差異は確認されなかった。加力後の補強筋の写真を図 2-8 に示す。補強筋は主に FRCC から補強筋が引き抜ける破壊形式（以降、引抜 A）となった。図 2-8 に示す赤丸で囲まれた一部の補強筋は、螺旋巻き部分がはがれ補強筋の心材のみが FRCC から引き抜ける破壊形式（以降、引抜 B）となった。



自由端面

側面

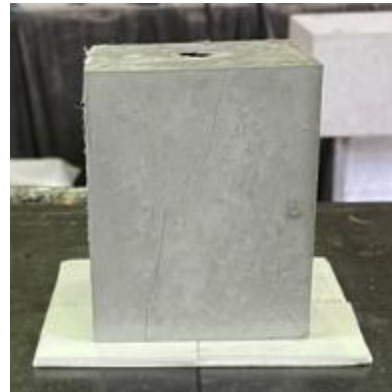
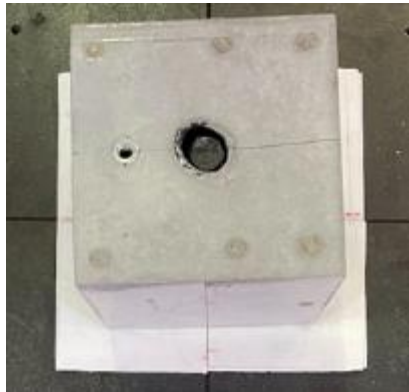
図 2-5 加力後の CS5/PVA200



自由端面

側面

図 2-6 加力後の CS10/PVA200



自由端面

側面

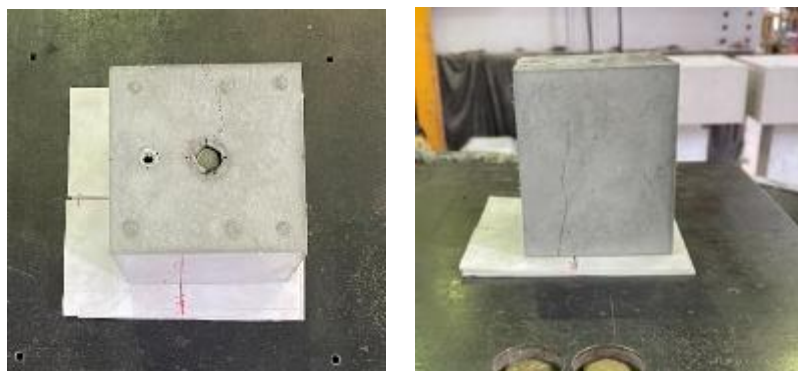
図 2-7 加力後の CS15/PVA200



図 2-8 加力後の補強筋

GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の加力後の写真の代表例をそれぞれ図 2-9, 図 2-10, 図 2-11 に示す。試験体は、いずれも最大付着応力に到達後ひび割れが生じ、ひび割れ

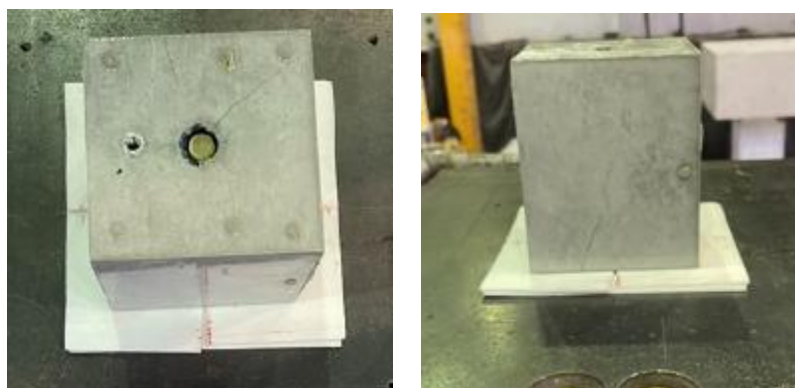
が拡幅して荷重が低下した。ひび割れの間では、繊維がひび割れを架橋している様子が確認された。ふし高さ比の違いによる FRCC のひび割れ状況に大きな差異は確認されなかった。加力後の補強筋の写真を図 2-8 に示す。補強筋は主に引抜 A となった。図 2-12 に示す赤丸で囲まれた一部の補強筋は、引抜 B となった。



自由端面

側面

図 2-9 加力後の GS5/PVA200



自由端面

側面

図 2-10 加力後の GS10/PVA200

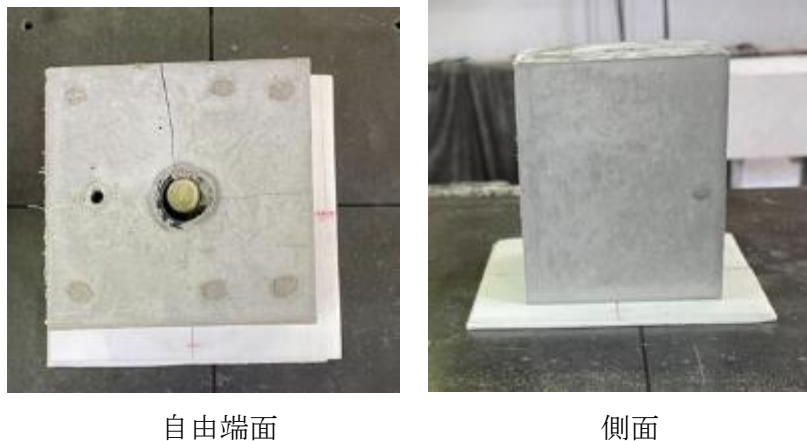


図 2-11 加力後の GS15/PVA200

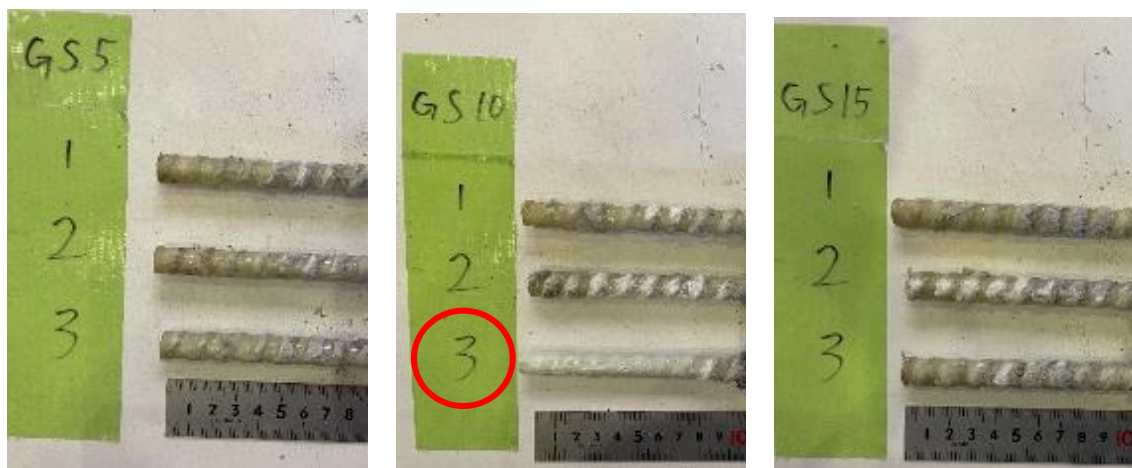


図 2-12 加力後の補強筋

(2) 付着応力－荷重端すべり量関係

荷重端すべり量は、FRCC の変形を無視し試験区間の付着応力が一様であるとして、自由端すべり量に補強筋の伸びを加算することで求めた (式(2.1))。付着応力は、引抜荷重を付着領域の補強筋表面積で除することで求めた (式(2.2))。

CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係をそれぞれ図 2-13, 図 2-14, 図 2-15 に示す。図中の記号が付いていない曲線は引抜 A、二重丸 (◎) 記号が付いている曲線は引抜 B の試験体である。CS5/PVA200 の引抜 A の試験体は、最大付着応力到達後、荷重端すべり量 5mm 程度まで緩やかに付着応力が低下した。その後、荷重端すべり量 9mm 程度まで急激に付着応力が低下した。CS5/PVA200 の引抜 B の試験体は、最大付着応力到達後、荷重端すべり量 10mm 程度まで緩やかに付着応力が低下した。CS10/PVA200 の引抜 A の試験体は、最大付着応力到達前に、一度付着応力が低下してから再び上昇した。最大付着応力到達後は、荷重端すべり量 9mm 程度まで急激に付着応力が低下した。CS10/PVA200 の引抜 B の試験体は、最大の付着応力到達後、荷重端すべり量 12mm 程度まで緩やかに付着

応力が低下した。CS15/PVA200 は、最大付着応力到達後、荷重端すべり量 10mm 程度まで急激に付着応力が低下した。CS15/PVA200-1 と CS15/PVA200-2 では、最大付着応力到達前に、一度付着応力が低下してから再び上昇した。

$$S = S_0 + \frac{Pl}{2E_s A_s} \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{P}{\pi dl} \quad (2.2)$$

ここで、

S : 荷重端すべり量

S_0 : 自由端すべり量

E_s : 補強筋弾性率

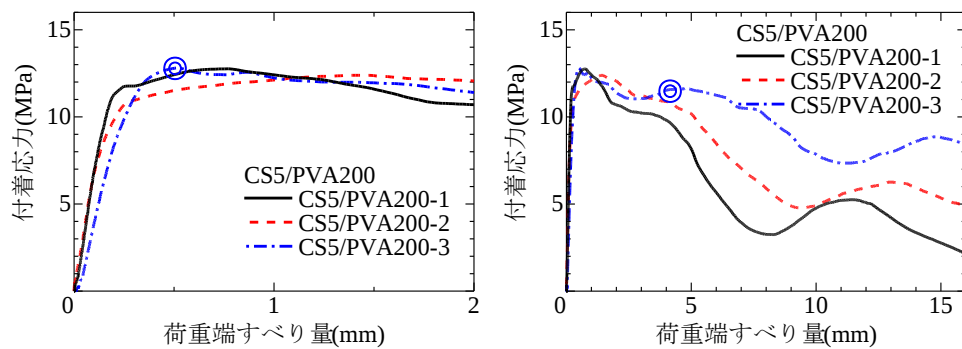
A_s : 補強筋断面積

τ : 付着応力

P : 引拔荷重

d : 補強筋径

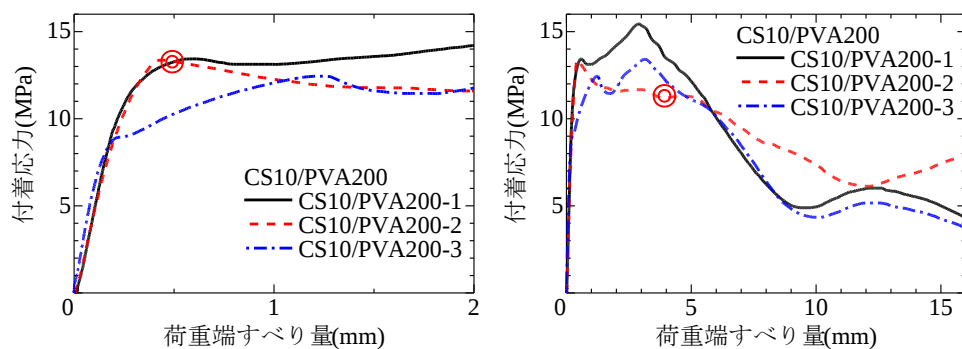
l : 付着長



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

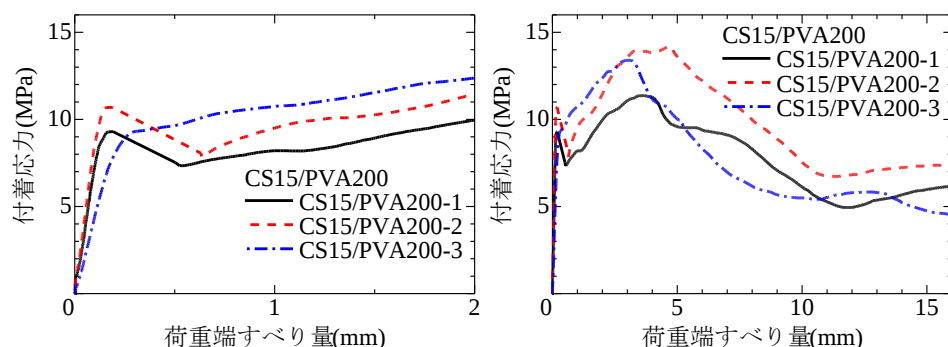
図 2-13 CS5/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

図 2-14 CS10/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係

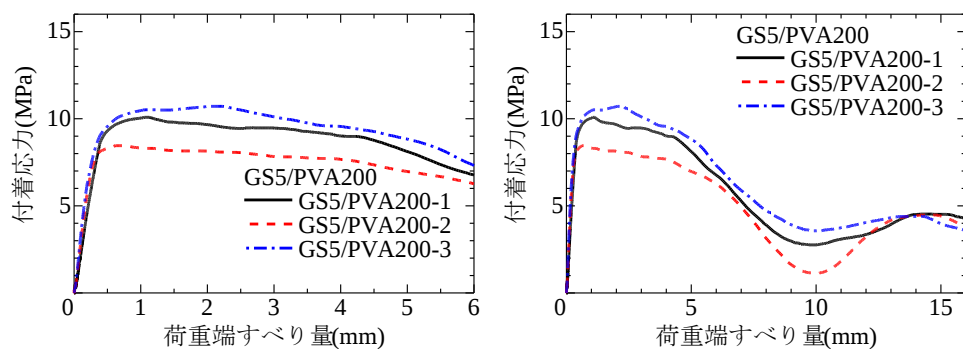


荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

図 2-15 CS15/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係

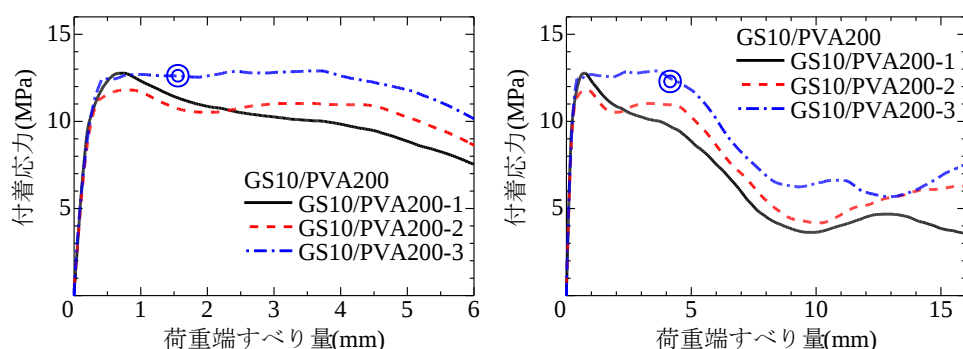
GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係をそれぞれ図 2-16, 図 2-17, 図 2-18 に示す. GS5/PVA200 は, 最大付着応力到達後, 荷重端すべり量 5mm 程度まで緩やかに付着応力が低下した. その後, 荷重端すべり量 10mm 程度まで急激に付着応力が低下した. GS10/PVA200 の引抜 A の試験体は, 荷重端すべり量 5mm 程度まで緩やかに付着応力が低下した. その後, 荷重端すべり量 10mm 程度まで急激に付着応力が低下した. GS10/PVA200 の引抜 B の試験体は, 最大の付着応力到達後, 荷重端すべり量 5mm 程度まで付着応力が横ばいとなった. その後, 荷重端すべり量 10mm 程度まで急激に付着応力が低下した. GS15/PVA200 は, 最大付着応力到達後, 荷重端すべり量 10mm 程度まで急激に付着応力が低下した.



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

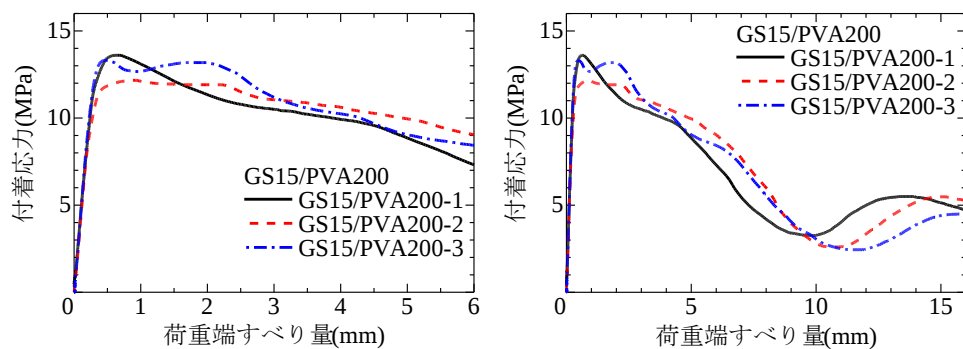
図 2-16 GS5/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

図 2-17 GS10/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

図 2-18 GS15/PVA200 の付着応力－荷重端すべり量関係

付着試験結果の一覧を表 2-5 に示す。平均は最大付着応力の平均であり、括弧内は引抜 B を除いた平均である。ふし高さ比が大きいくほど最大付着応力が大きくなる傾向が確認された。破壊形式の違いによる、最大付着応力の差異は小さい。

表 2-5 付着試験結果一覧

試験体種別	試験体	実験結果		
		破壊形式	最大付着応力(MPa)	平均(MPa)
CS5/PVA200	CS5/PVA200-1	引抜 A	12.8	12.7 (12.6)
	CS5/PVA200-2	引抜 A	12.4	
	CS5/PVA200-3	引抜 B	12.8	
CS10/PVA200	CS10/PVA200-1	引抜 A	14.6	13.5 (14.0)
	CS10/PVA200-2	引抜 B	12.6	
	CS10/PVA200-3	引抜 A	13.4	
CS15/PVA200	CS15/PVA200-1	引抜 A	11.4	13.0
	CS15/PVA200-2	引抜 A	14.2	
	CS15/PVA200-3	引抜 A	13.4	
GS5/PVA200	GS5/PVA200-1	引抜 A	10.1	9.75
	GS5/PVA200-2	引抜 A	8.45	
	GS5/PVA200-3	引抜 A	10.7	
GS10/PVA200	GS10/PVA200-1	引抜 A	12.8	12.5 (12.3)
	GS10/PVA200-2	引抜 A	11.8	
	GS10/PVA200-3	引抜 B	12.9	
GS15/PVA200	GS15/PVA200-1	引抜 A	13.6	13.0
	GS15/PVA200-2	引抜 A	12.2	
	GS15/PVA200-3	引抜 A	13.3	

2.2.3 FRP 補強 PVA-FRCC の付着構成則のモデル化

(1) モデル概要

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を行った。トリリニアモデルを図 2-19 に示す。モデルは、主な破壊形式である引抜 A についてのみモデル化を行った。 τ_{max} は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 2/5 までの実験結果の最小二乗法による回帰直線の傾きとした。最大付着応力までの実験結果とモデルの囲む面積の和が 0 になるように、傾き k_1 の直線上の点を τ_1 、 S_1 とした。終局勾配 k_u は、最大付着応力と軟化後に初めて付着応力が極小となる荷重端すべり量 S_{Lmin} の点を結んだ直線の傾きとした。モデルの各特性値一覧を表 2-6 に示す。

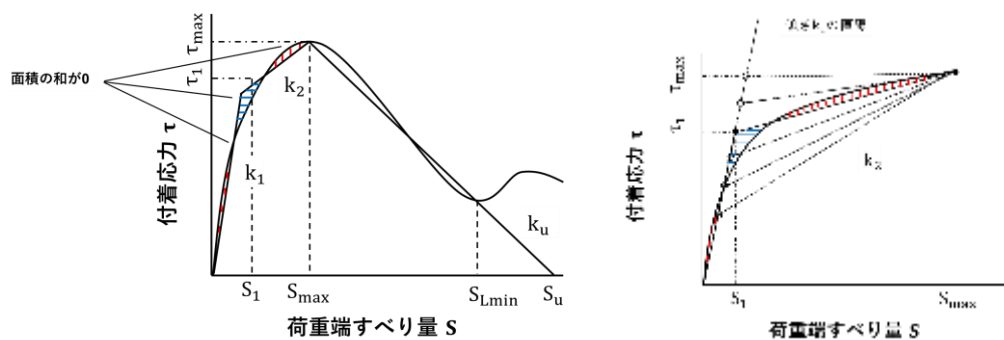


図 2-19 付着応力-荷重端すべり量関係のトリリニアモデル

表 2-6 モデルの特性値

試験体	τ_1 (MPa)	S_1 (mm)	k_1 (N/mm ³)	k_2 (N/mm ³)	τ_{max} (MPa)	S_{max} (mm)	S_{Lmin} (mm)	S_u (mm)	k_u (N/mm ³)
CS5/PVA200	11.4	0.174	65.2	1.34	12.6	1.10	8.79	12.4	-1.12
CS10/PVA200	10.9	0.193	56.2	1.10	14.0	3.03	9.56	12.7	-1.45
CS15/PVA200	9.13	0.136	67.2	1.04	13.0	3.84	11.2	17.0	-0.998
GS5/PVA200	8.74	0.300	29.3	0.926	9.75	1.35	10.0	13.0	-0.893
GS10/PVA200	10.9	0.218	50.1	2.64	12.3	0.751	9.90	14.2	-0.916
GS15/PVA200	11.7	0.266	44.0	3.08	13.0	0.698	11.4	14.3	-0.960

(2) 実験結果とモデルの比較

CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の実験結果とモデルの比較をそれぞれ図 2-20, 図 2-21, 図 2-22 に示す. GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の実験結果とモデルの比較をそれぞれ図 2-23, 図 2-24, 図 2-25 に示す. モデルは特に初期勾配をよく表現できている.

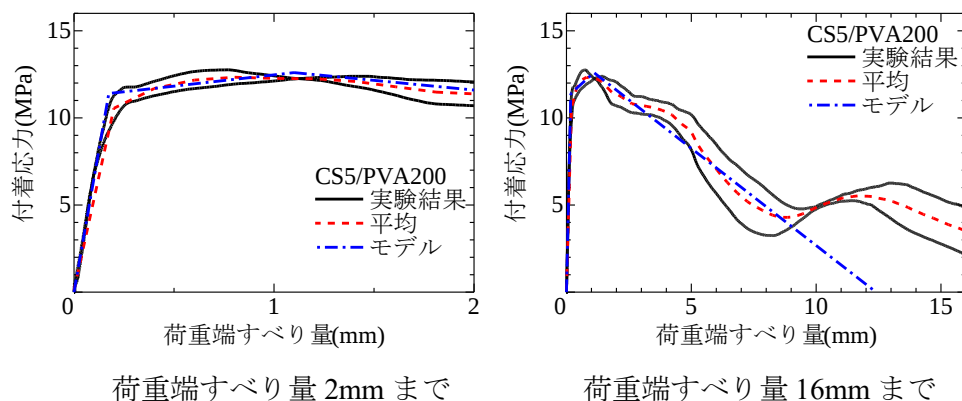


図 2-20 CS5/PVA200 の実験結果とモデルの比較

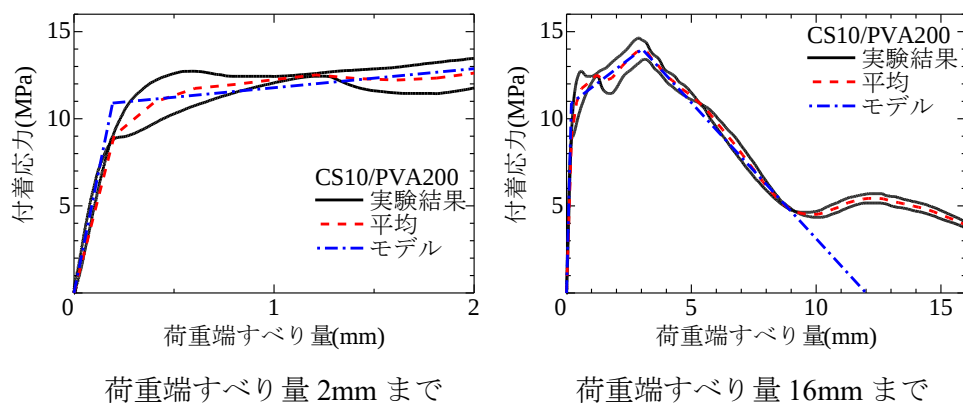


図 2-21 CS10/PVA200 の実験結果とモデルの比較

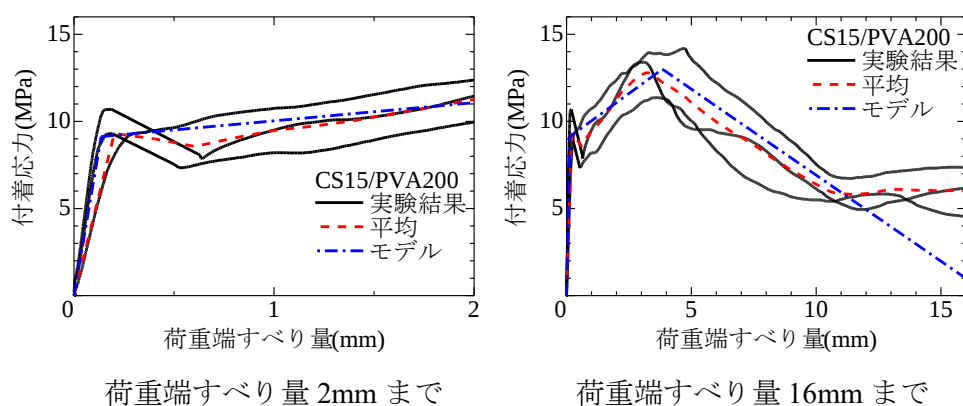


図 2-22 CS15/PVA200 の実験結果とモデルの比較

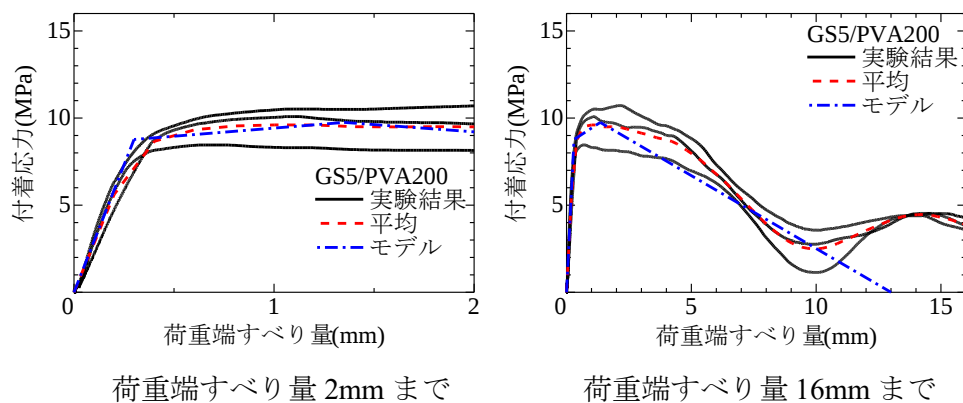
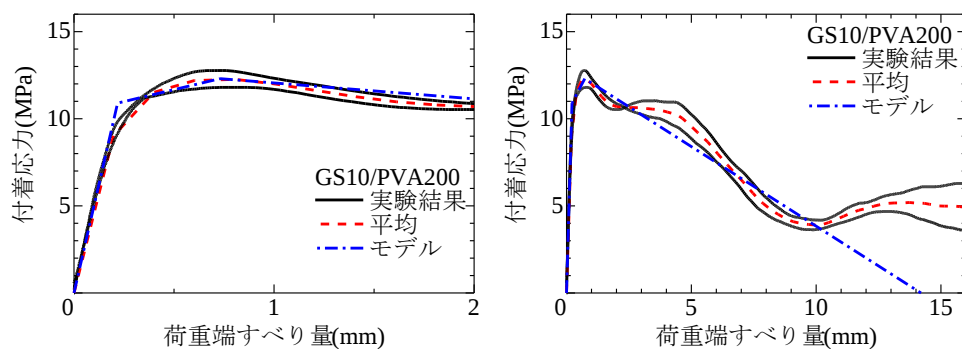


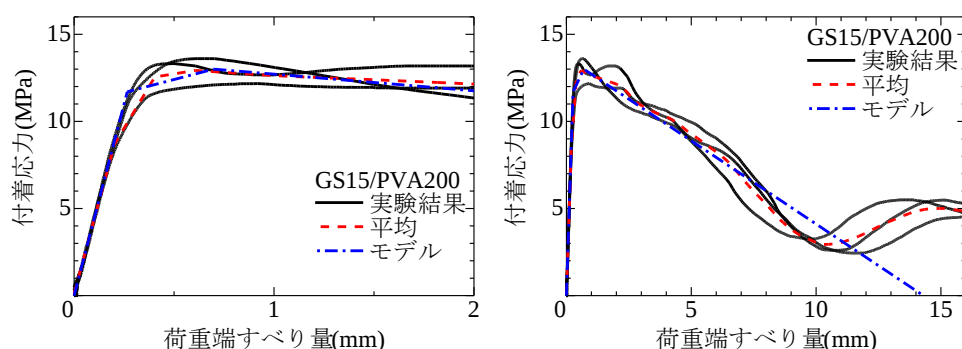
図 2-23 GS5/PVA200 の実験結果とモデルの比較



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

図 2-24 GS10/PVA200 の実験結果とモデルの比較



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 16mm まで

図 2-25 GS15/PVA200 の実験結果とモデルの比較

2.3 FRP 補強アラミド-FRCC の局所付着性状

2.3.1 FRP 補強アラミド-FRCC の付着試験概要

(1) 使用材料

補強筋の材料特性を表 2-7 に、形状を図 2-26 に示す。補強筋には、細径の CFRP を 7 本依った CFRP ストランド (CS7) を用いた。補強筋の表面には螺旋状に凹凸の加工が施されている。アラミド繊維の材料特性を表 2-8 に、形状を図 2-27 に示す。FRCC の配合計画及び圧縮性状を表 2-9 に示す。圧縮性状は、同一バッチの $\phi 100 \times 200$ のシリンダー型供試体の圧縮試験により得た。変動因子は FRCC の繊維体積混入率であり、繊維を混入しないモルタル、繊維体積混入率 0.25%, 0.5% (CS7/MT, CS7/AR025, CS7/AR050) の 3 種類である。

表 2-7 補強筋の材料特性 (メーカー公称値)

補強筋種別	FRP 種別	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
CS7	CFRP ストランド	15.9	125.0	1770	150



図 2-26 CFRP スtrand

表 2-8 アラミド繊維の材料特性（メーカー値）

繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)	密度 (g/cm^3)
12	12	3432	73	1.39



図 2-27 アラミド繊維

表 2-9 FRCC の配合計画及び圧縮性状

試験体	単位量(kg/m^3)					圧縮強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
	W	C	S	FA	AR		
CSt7/MT	380	678	484	291	0	47.6	18.3
CSt7/AR025					3.475	39.6	15.9
CSt7/AR050					6.95	39.0	16.3

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，AR：アラミド繊維

(2) 試験体

試験体一覧を表 2-10 に，試験体形状・加力方法を図 2-28 に示す．試験体は，断面 60x100mm 高さ 120mm の長方形ブロックであり，中心に CFRP 補強筋を配した．試験体断面は，第 4 章で述べる CFRP 補強アラミド-FRCC 梁試験体の引張側主筋 1 本あたりが負担する等価の断面積としている．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．試験区間である付着長は，局所付着となるように補強筋径の約 4 倍の 64mm とした．試験区間の両端には，コーン状破壊を防ぐために塩ビパイプによってアンボンド区間を設けている．

試験体は 2MN 万能試験機の上部ヘッド上の加力版にセットし、下部ヘッドのチャックでカブラをつかみ単調引抜加力を行った。試験体の横方向への変位を拘束しないように、試験体と加力版の間にテフロンシートを配置した。計測項目は入力荷重及び自由端すべり量である。

表 2-10 試験体一覧

試験体	FRCC 繊維	補強筋	補強筋径 (mm)	付着長 (mm)	断面 寸法	繊維体積 混入率	試験 体数
CSt7/MT	アラミド 繊維長： 12mm 繊維径： 12 μ m	CFRP ストランド	15.9	64	60mm × 100mm	-	3
CSt7/AR025						0.25%	3
CSt7/AR050						0.5%	3

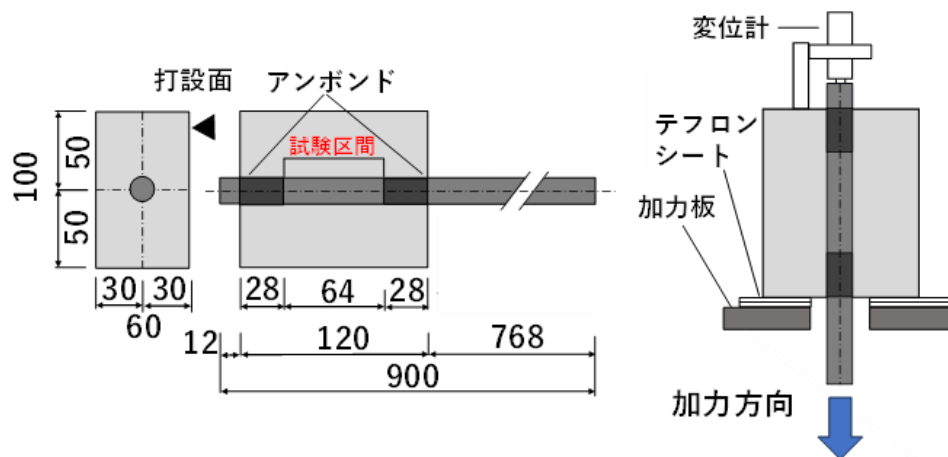


図 2-28 試験体形状・加力方法

2.3.2 FRP 補強アラミド-FRCC 部材の付着試験結果

(1) 破壊性状

CSt7/MT, CSt7/AR025, CSt7/AR050 の加力後の写真の代表例をそれぞれ図 2-29, 図 2-30, 図 2-31 に示す。CSt7/MT では、最大付着応力に到達後、割裂ひび割れが拡幅して荷重が低下した。CSt7/AR025 と CSt7/AR050 では、最大付着応力に到達後、試験体長辺方向にひび割れが生じ、そのひび割れが拡幅して荷重が低下した。ひび割れの間では、繊維がひび割れを架橋している様子が確認された。また、CSt7/AR050 では CSt7/AR025 よりもひび割れの拡幅が抑制される様子が確認された。



自由端面

図 2-29 加力後の CSSt7/MT



自由端面



側面

図 2-30 加力後の CSSt7/AR025



自由端面



側面

図 2-31 加力後の CSSt7/AR050

(2) 付着応力－荷重端すべり量関係

荷重端すべり量は式(2.1)を用いて、付着応力は式(2.2)を用いて算出した。

CSt7/MT, CSt7/AR025, CSt7/AR050 の付着応力－荷重端すべり量関係をそれぞれ図 2-32, 図 2-33, 図 2-34 に示す。CSt7/MT は、最大付着応力に到達後、急激に付着応力が低下した。CSt7/AR025 と CSt7/AR050 では最大付着応力に到達後、荷重端すべり量 2.2mm まで急激に付着応力が低下した。荷重端すべり量 2.2mm 以降、付着応力は 2.2mm 周期で上昇と下降を繰り返しながら緩やかに低下した。付着試験結果の一覧を表 2-11 に示す。最大付着応力の平均は、CSt7/AR025 が CSt7/MT の 1.67 倍、CSt7/AR050 が CSt7/MT の 2.01 倍であり、繊維による補強効果が見られた。

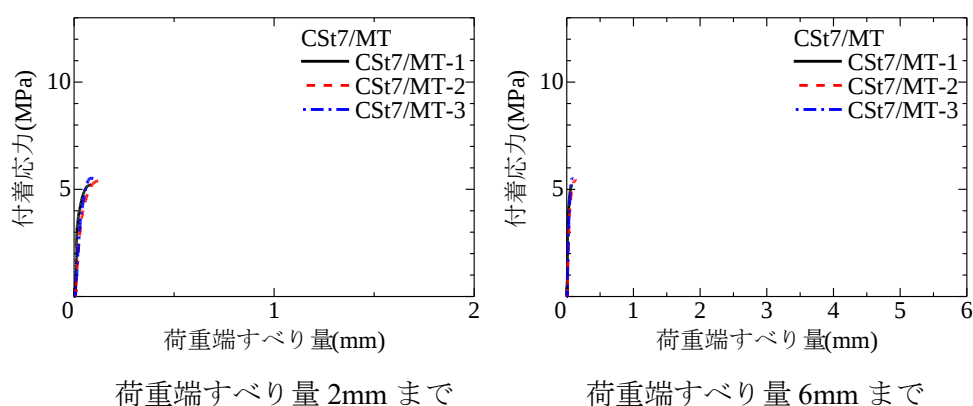


図 2-32 CSt7/MT の付着応力－荷重端すべり量関係

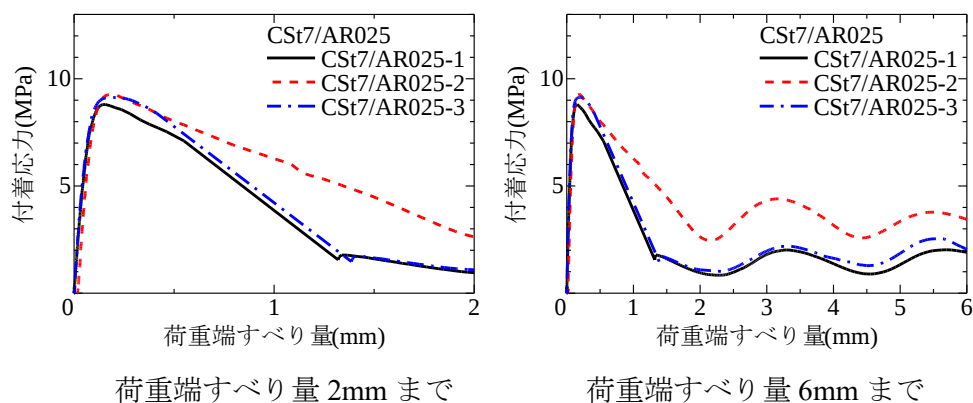
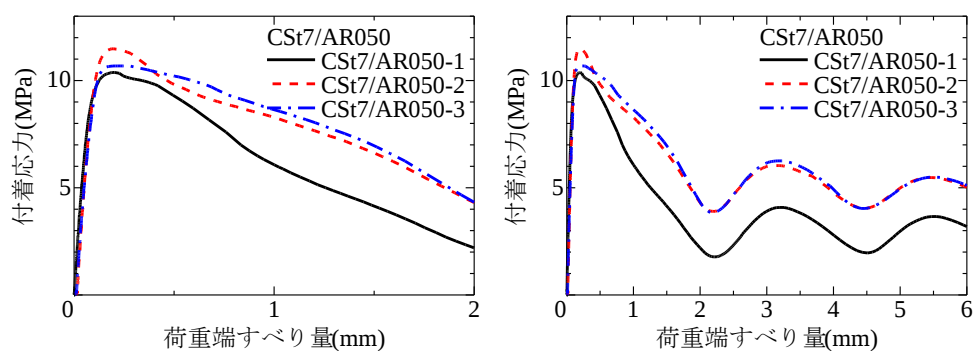


図 2-33 CSt7/AR025 の付着応力－荷重端すべり量関係



荷重端すべり量 2mm まで 荷重端すべり量 6mm まで

図 2-34 CSt7/AR050 の付着応力－荷重端すべり量関係

表 2-11 付着試験結果一覧

試験体種別	試験体	実験結果		
		破壊形式	最大付着応力 (MPa)	平均(MPa)
CSt7/MT	CSt7/MT-1	割裂	5.20	5.37
	CSt7/MT-2	割裂	5.42	
	CSt7/MT-3	割裂	5.49	
CSt7/AR025	CSt7/AR025-1	引抜	8.80	9.07
	CSt7/AR025-2	引抜	9.27	
	CSt7/AR025-3	引抜	9.13	
CSt7/AR050	CSt7/AR025-1	引抜	10.4	10.8
	CSt7/AR025-2	引抜	11.5	
	CSt7/AR025-3	引抜	10.7	

2.3.3 FRP 補強アラミド-FRCC の付着構成則のモデル化

(1) モデルの概要

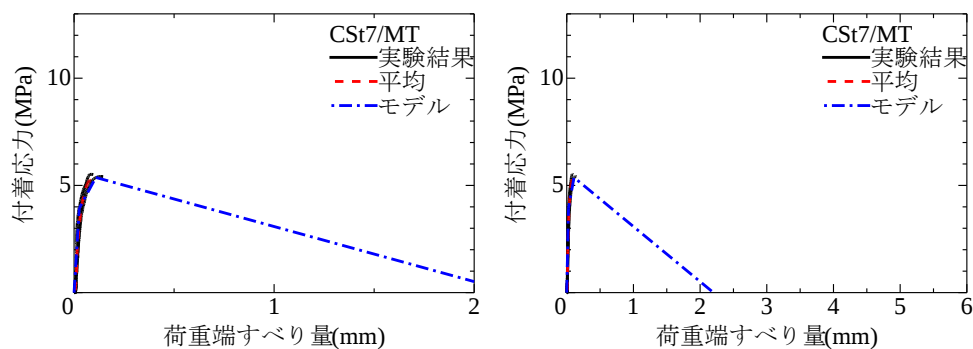
付着応力－荷重端すべり量関係を 2.2.3 のトリニアモデル（図 2-19）を用いてモデル化を行った。なお，CSt7/MT では軟化域の実験結果が得られなかったため，終局すべり量 S_u を 2.2mm とした。モデルの各特性値一覧を表 2-12 に示す。

表 2-12 モデルの特性値

試験体	τ_1 (MPa)	S_1 (mm)	k_1 (N/mm ³)	k_2 (N/mm ³)	τ_{max} (MPa)	S_{max} (mm)	S_{Lmin} (mm)	S_u (mm)	k_u (N/mm ³)
CSt7/MT	3.94	0.0264	149	17.3	5.37	0.109	-	2.2	-5.42
CSt7/AR025	6.69	0.0515	130	17.6	9.07	0.187	2.24	2.63	-3.71
CSt7/AR050	8.03	0.0597	135	18.8	10.8	0.209	2.20	3.02	-3.85

(2) 実験結果とモデルの比較

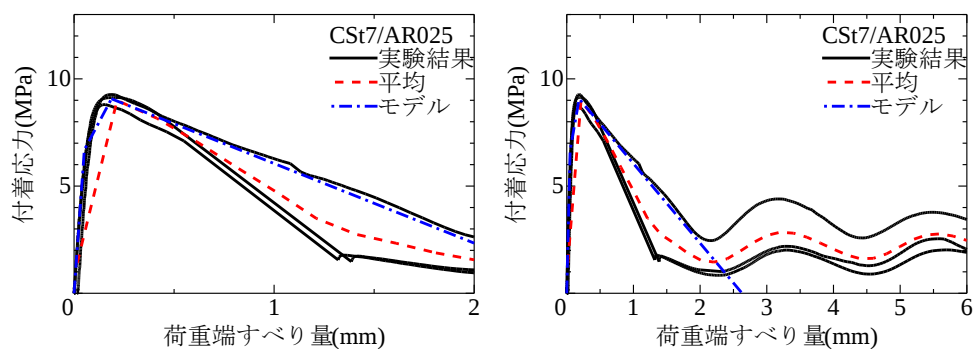
CSt7/MT, CSt7/AR025, CSt7/AR050 の実験結果とモデルの比較をそれぞれ図 2-35, 図 2-36, 図 2-37 に示す。モデルは実験結果を全体として概ねよく表現できている。



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 6mm まで

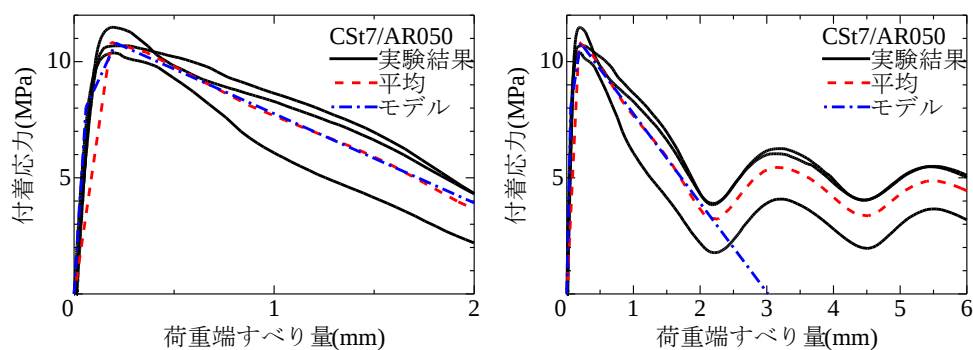
図 2-35 CSt7/MT の実験結果とモデルの比較



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 6mm まで

図 2-36 CSt7/AR025 の実験結果とモデルの比較



荷重端すべり量 2mm まで

荷重端すべり量 6mm まで

図 2-37 CSt7/AR050 の実験結果とモデルの比較

2.4 まとめ

FRP 補強 PVA-FRCC と FRP 補強アラミド-FRCC の付着試験を行い，付着性状の検討を行った．本章で得られた知見を以下に示す．

- (1) FRP 補強 PVA-FRCC 試験体では，ふし高さ比が大きいほど最大付着応力が大きくなる傾向が確認された．
- (2) FRP 補強アラミド-FRCC 試験体では，FRCC の繊維による付着耐力の向上が確認された．
- (3) 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を行った．モデルは，実験結果をよく表現できている．

第3章 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムのひび割れ幅 評価

3.1 はじめに

本章では、第2章2.2節と同一のFRP補強筋とFRCCを用いた、FRP補強PVA-FRCCプリズムの両引き試験を実施し、ひび割れ幅の評価を行った。

3.2 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験概要

3.2.1 使用材料

FRP補強筋及びFRCCの繊維は、第2章2.2節と同一のCFRP螺旋巻き、GFRP螺旋巻き及びPVA繊維である。FRCCは第2章2.2.1と同一バッチで、FRCCの配合計画及び圧縮性状は同一である。

3.2.2 試験体

試験体一覧を表3-1に、試験体形状・加力方法を図3-1に示す。試験体は、断面100x100mm長さ500mmの長方形ブロックであり、中心にFRP補強筋を配した。補強筋の両端部には、試験機のチャック固定用に鋼製カプラーを取り付けた。試験体は、ひび割れ位置をコントロールするために100mm間隔でスリットが設けられている。スリットは、打設面とその反対面に設けられている。スリットの幅は2.2mmで、深さはスリットを入れた位置のFRCC断面積が全体の60%となるようにした。試験体は2MN万能試験機の上部ヘッドと下部ヘッドのチャックで両端のカプラーをつかみ、単調引張加力を行った。計測項目は入力荷重、変位計による試験体全体の変形2箇所、 π 型変位計によるスリット位置の変形6箇所である。 π 型変位計の取付け間隔は110mmである。

表 3-1 試験体一覧

試験体	FRCC 繊維	補強筋	補強筋径 (mm)	断面 寸法	繊維体積 混入率	試験 体数
CS5/PVA200	PVA 繊維長： 12mm 繊維径： 100 μ m	CFRP 螺旋巻き	11.4	100mm × 100mm	2%	2
CS10/PVA200			12.1			2
CS15/PVA200			12.8			2
GS5/PVA200		GFRP 螺旋巻き	11.0			2
GS10/PVA200			11.4			2
GS15/PVA200			12.1			2

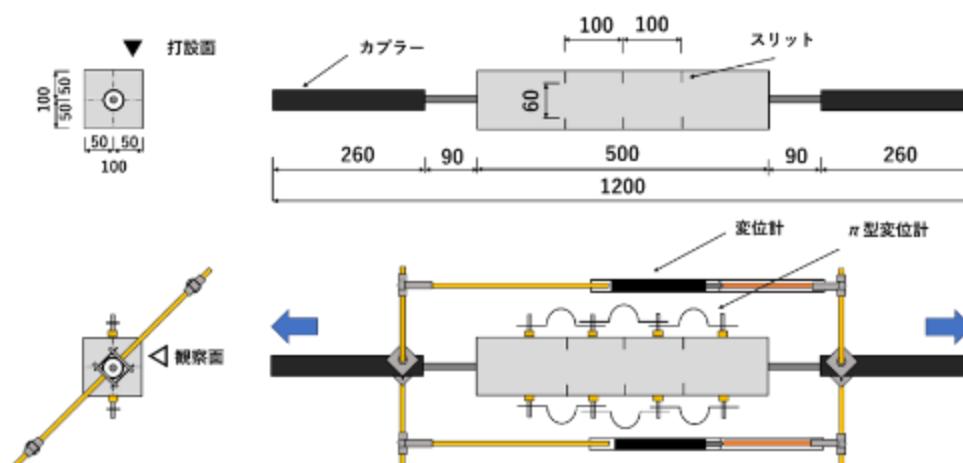


図 3-1 試験体形状・加力方法

3.3 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験結果

3.3.1 ひび割れ及び破壊性状

CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の加力後の写真の代表例をそれぞれ図 3-2 に示す. GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の加力後の写真の代表例を図 3-3 に示す. いずれの試験体も, スリット位置から最初のひび割れが生じた. 荷重が増加するとともに, 複数のひび割れがスリット付近に生じた. FRP 補強筋の種類及びふし高さ比による, 破壊性状の差異は確認されなかった.



CS5/PVA200



CS10/PVA200



CS15/PVA200

図 3-2 加力後の CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200



GS5/PVA200



GS10/PVA200



GS15/PVA200

図 3-3 加力後の GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200

3.3.2 荷重－全体変形関係

CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重－全体変形関係を図 3-4 に示す．GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重－全体変形関係を図 3-5 に示す．全体変形は 2 箇所の変位計の平均である．既往の研究^[10]の引張試験で得られた引張強度のおよそ 60% となる荷重まで加力を行い，その後除荷した．CS15/PVA200-2 のみ加力途中で荷重が低下したため，そのまま除荷を行った．ふし高さ比の違いによる，大きな差異は確認されなかった

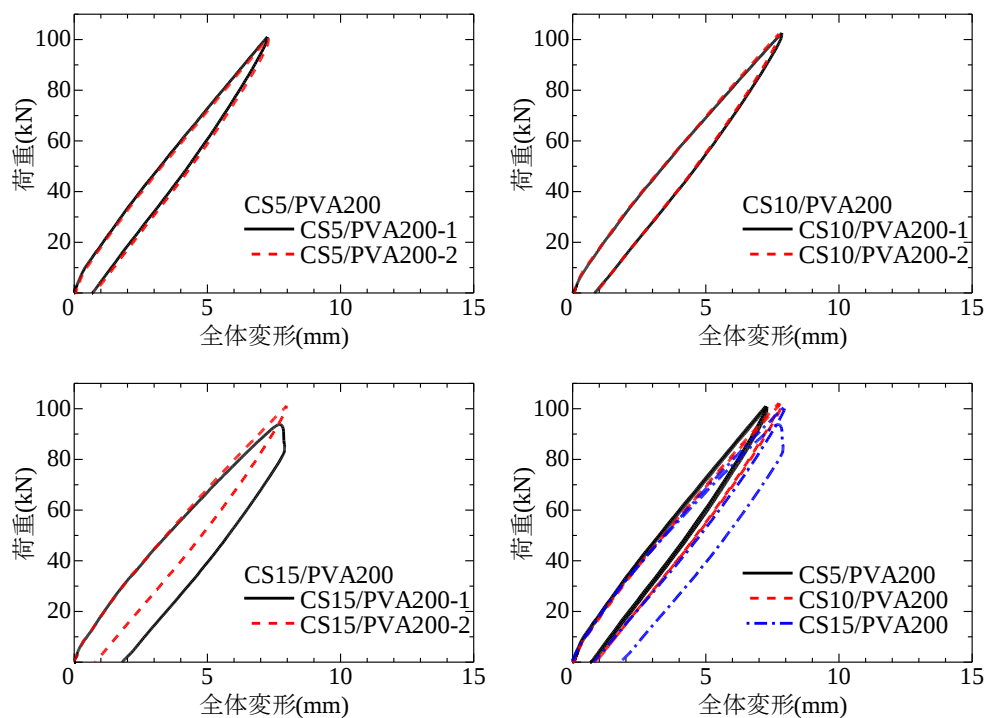


図 3-4 CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重－全体変形関係

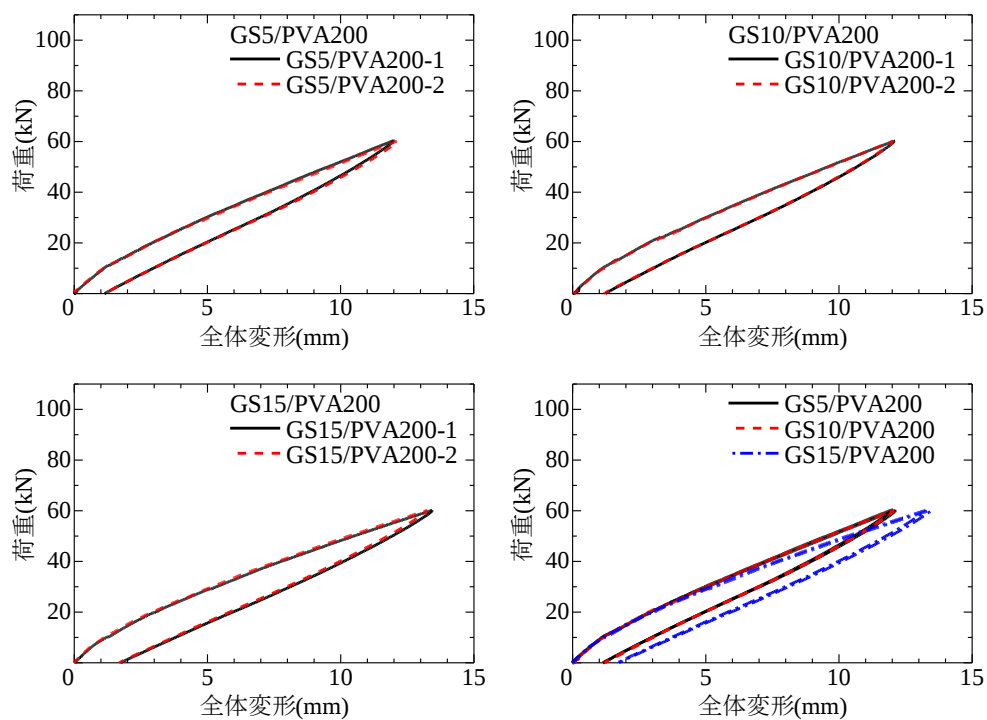


図 3-5 GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重－全体変形関係

3.3.3 荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係

荷重端ひずみは，入力荷重を補強筋断面積と弾性率で除することにより算出した．ひび割れ幅は，目視観察で 1 つのスリット箇所に 2 本目のひび割れが生じるまでの，向かい合う π

型変位計によって計測された変形の平均とした。

CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重端ひずみーひび割れ関係を図 3-6 に示す。いずれも荷重端ひずみ 0.08%程度でひび割れ幅の変化が大きくなっている。ふし高さ比の違いによる、同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅に大きな差異は確認されなかった。

GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重端ひずみーひび割れ関係をそれぞれ図 3-7 に示す。GS5/PVA200, GS10/PVA200 は荷重端ひずみ 0.3%程度でひび割れ幅の変化が大きくなり、GS15/PVA200 は荷重端ひずみ 0.25%程度でひび割れ幅の変化が大きくなっている。ふし高さ比の違いによる、同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅に大きな差異は確認されなかった。また、GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 は CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 と比較して同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅が小さいことが確認された。

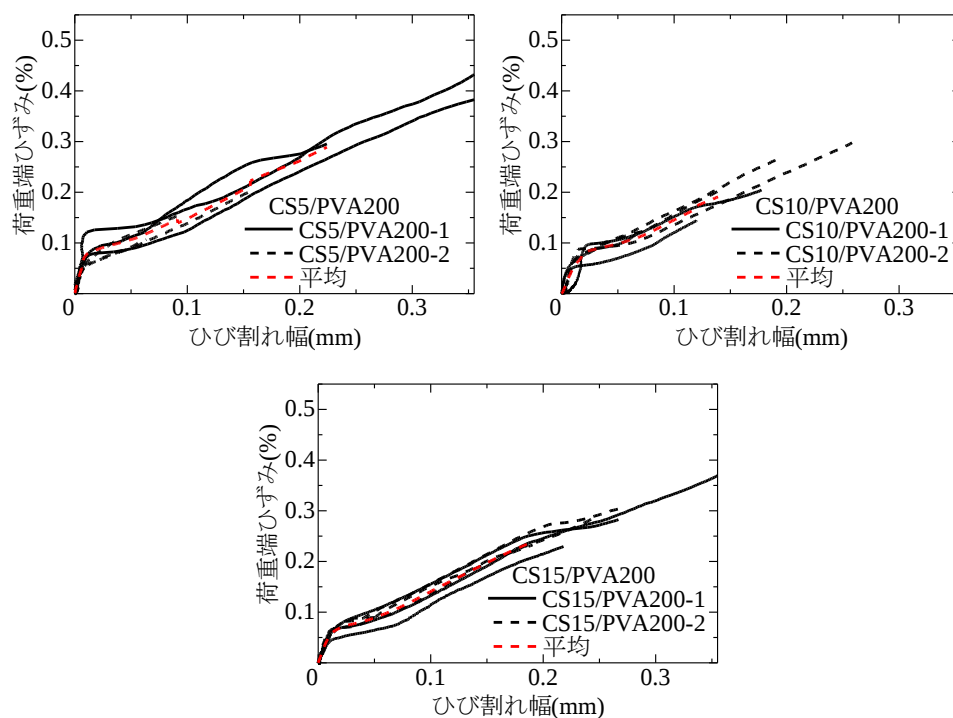


図 3-6 CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重端ひずみーひび割れ幅関係

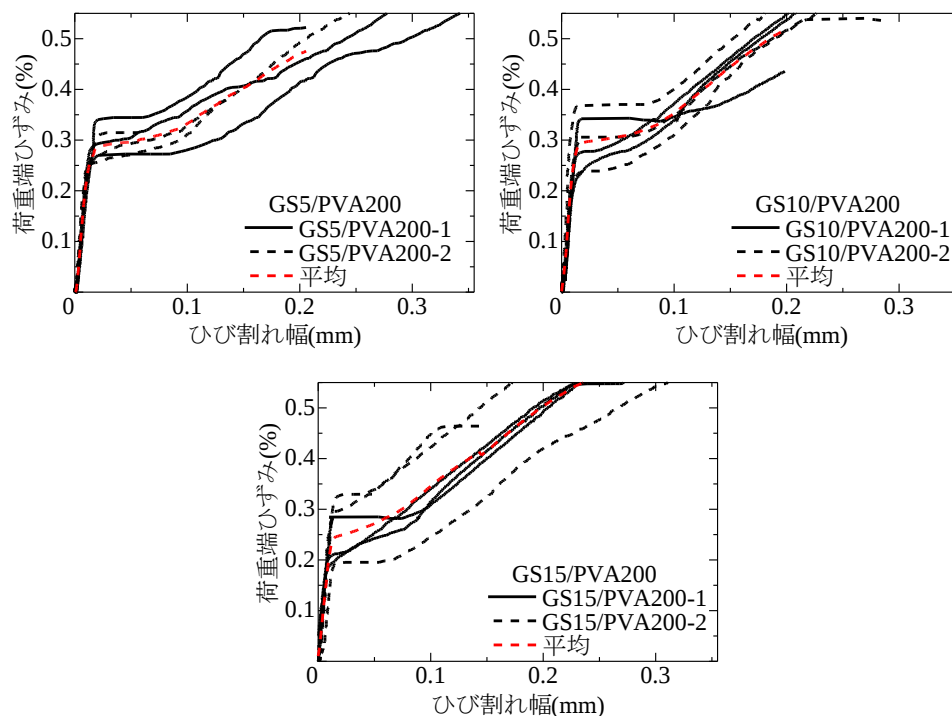


図 3-7 GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重端ひずみーひび割れ幅関係

3.4 FRP 補強 PVA-FRCC プリズムのひび割れ幅評価

3.4.1 ひび割れ幅算定式

Sunaga らによって, FRP 補強 FRCC 部材のひび割れ幅評価式として, 荷重端ひずみからひび割れ幅の評価を可能にしたひび割れ幅算定式 (式(3.1)) が提案されている^[8].

ひび割れ幅算定に用いる特性値を表 3-2 に示す. 補強筋の材料特性には, 表 2-1 の値を用いた. FRCC の弾性率は, 表 2-3 の値を用いた. FRCC のひび割れ強度は, 両引き試験における, ひび割れ発生時の荷重を試験体すべてで平均し, 平均をスリット位置での FRCC の断面積で除することで算出した. 付着構成則には, 第 2 章でモデル化を行ったトリリニアモデルを用いた (図 2-19). FRCC の繊維架橋則には, Ozu らによって提案された, 両引き試験体と同一材料の PVA 繊維の配向性を考慮したトリリニアモデルを用いた^[11]. トリリニアモデルの各特性値は, 配向係数 k を用いて式(3.2)として与えられる. 配向係数 k は, Ozu らによる 100x100x400mm の切欠き梁の曲げ試験結果において, よい適合性を示した $k=0.4$ とした^[12]. 繊維架橋則のトリリニアモデルを図 3-8 に, トリリニアモデルの特性値を表 3-3 に示す.

$$\varepsilon_{Load} = \frac{\varphi_s}{A_c\{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\}} \int_0^{S_l} \tau_x dS_x + \frac{1+np}{2npE_c} \{\sigma_{cr} + \sigma_{br}(w_{cr})\} \quad (3.1)$$

ここで,

- ε_{Load} : 荷重端ひずみ
 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
 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
 n : 弾性係数比 (= E_s/E_c)
 p : 補強筋比 (= A_s/A_c)

表 3-2 ひび割れ幅算定に用いる特性値

試験体	$\varphi_s(\text{mm})$	$E_s(\text{GPa})$	$A_s(\text{mm}^2)$	$\sigma_{cr}(\text{MPa})$	$E_c(\text{GPa})$	$A_c(\text{mm}^2)$
CS5/PVA200	35.9	127	102	1.72	17.3	100mm × 100mm =1000mm ²
CS10/PVA200	37.9	111	114			
CS15/PVA200	40.3	100	129			
GS5/PVA200	34.4	43.2	94			
GS10/PVA200	35.9	38.0	103			
GS15/PVA200	37.9	31.6	114			

$$\sigma_{max} = 2.0k^{0.30}(\text{MPa})$$

$$\delta_{max} = 0.20k^{0.18}(\text{mm})$$

$$\sigma_2 = 0.60k^{0.73}(\text{MPa})$$

$$\delta_2 = 0.450(\text{mm})$$

$$\delta_u = 6(\text{mm})$$

$$k = 0.4$$

(3.2)

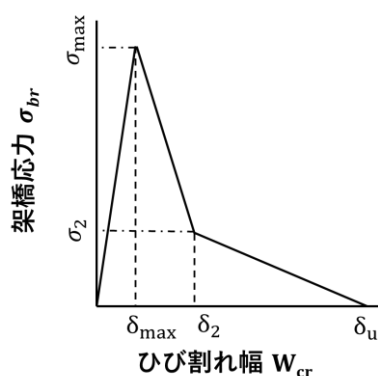


図 3-8 繊維架橋則のトリリニアモデル

表 3-3 繊維架橋則のトリニアモデルの特性値

σ_{max} (MPa)	δ_{max} (mm)	σ_2 (MPa)	δ_2 (mm)	δ_u (mm)
1.52	0.170	0.370	0.450	6

3.4.2 実験結果とひび割れ幅算定式の比較

CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の荷重端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 3-9 に示す. いずれの試験体も, 荷重端ひずみ約 0.08%以降で, 同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は, 実験結果の平均が算定式よりも小さくなっており, 実験結果と算定式はよく適合しているといえる.

GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の荷重端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 3-10 に示す. GS5/PVA200 と GS10/PVA200 では, 荷重端ひずみ約 0.23%以降で, 同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は, 実験結果の平均が算定式よりも小さくなっている. GS15/PVA200 は, 荷重端ひずみ約 0.3%以降で同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は, 実験結果の平均が算定式よりも小さくなっており, 実験結果と算定式は概ね適合しているといえる.

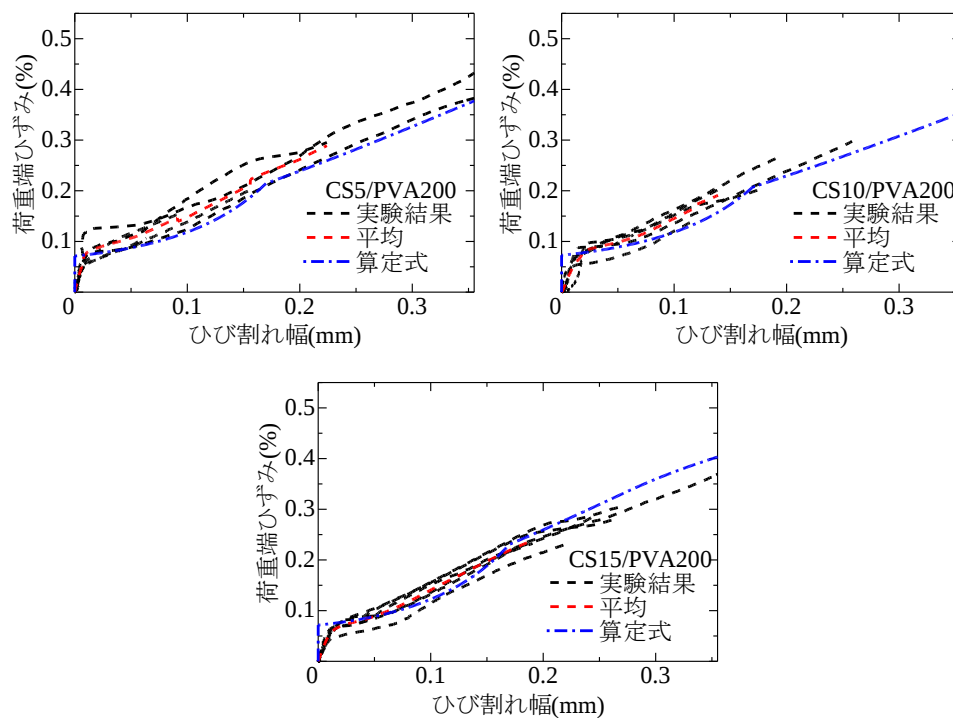


図 3-9 CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 の実験結果とひび割れ幅算定式の比較

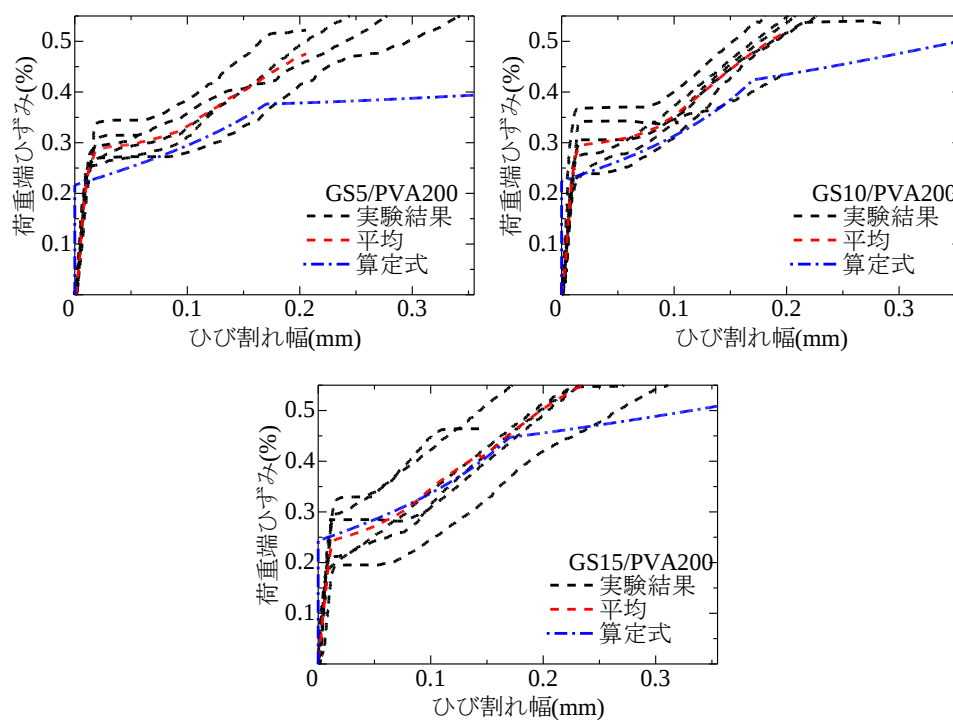


図 3-10 GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 の実験結果とひび割れ幅算定式の比較

3.5 まとめ

FRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験を実施し，破壊性状，ひび割れ幅の検討を行った．本章で得られた知見を以下に示す．

- (1) 試験体はいずれも，ふし高さ比の違いより，同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅に大きな差異は確認されなかった．
- (2) GS5/PVA200, GS10/PVA200, GS15/PVA200 は CS5/PVA200, CS10/PVA200, CS15/PVA200 と比較して同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅が小さいことが確認された．
- (3) 荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係の実験結果と算定式はよい適合性を示した．

第4章 FRP 補強アラミド-FRCC 梁のひび割れ幅評価

4.1 はじめに

本章では，第2章2.3節と同一のFRP補強筋とFRCCを用いた，CFRP補強アラミド-FRCC梁の4点曲げ試験を実施し，ひび割れ幅の評価を行った．

4.2 FRP 補強アラミド-FRCC 梁の曲げ試験概要

4.2.1 使用材料

CFRP補強筋の材料特性を表4-1に示す．引張側主筋は，第2章2.3節と同一のCFRPストランドである．FRCCの繊維は第2章2.3節と同一のアラミド繊維である．FRCCの配合計画及び圧縮性状を表4-2に示す．圧縮性状は， $\phi 100 \times 200$ のシリンダー型供試体の圧縮試験により得た．変動因子はFRCCの繊維体積混入率及び加力方法である．試験体は，繊維を混入しないモルタル，繊維体積混入率0.25%，0.5%で単調加力を行う試験体（CSt7/MT, CSt7/AR025, CSt7/AR050）と繊維体積混入率0.5%で片側繰返し加力を行う試験体（CSt7/AR025-C）の計4種類である．

表 4-1 補強筋の材料特性（メーカー公称値）

補強筋	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
CStU（圧縮側）	7.2	32.7	1770	160
CSt7（引張側）	15.9	125.0	1770	150

表 4-2 FRCC の配合計画及び圧縮性状

試験体	単位量(kg/m ³)					圧縮強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
	W	C	S	FA	AR		
CSt7/MT	380	678	484	291	0	51.6	18.1
CSt7/AR025					3.475	45.5	17.2
CSt7/AR050					6.95	39.2	13.7
CSt7/AR050-C						42.8	15.5

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，AR：アラミド繊維

4.2.2 試験体

試験体一覧を表 4-3 に、試験体形状・加力方法を図 4-1 に示す。補強筋は、圧縮側に 2 本、引張側に 3 本配筋されている。補強筋の定着部には鋼製カプラーを用いている。試験体断面は梁せい 280mm、梁幅 180mm である。試験区間は中央の 280mm で、試験区間外にはせん断破壊及び定着部の破壊を防ぐための鉄筋が配筋されている。加力は、2MN 万能試験機による 4 点曲げ単調加力と片側繰返し加力である。繰返し加力の履歴を図 4-2 に示す。加力履歴は、載荷点たわみによって制御を行い、たわみ 2mm、4mm、6mm、8mm において各 5 回、10mm において 2 回の繰返し加力を行い、その後終局まで加力を行った。計測項目は入力荷重、載荷点のたわみ 2 か所、 π 型変位計による圧縮側及び引張側の軸方向変形各 3 か所、載荷点の補強筋ひずみ 6 か所である。

表 4-3 試験体一覧

試験体	加力方法	FRCC 繊維	補強筋	断面寸法	繊維体積混入率	試験体数
CSt7/MT	単調	アラミド 繊維長： 12mm 繊維径： 12 μ m	CFRP 圧縮側主筋 径：7.2mm 引張側主筋 径：15.9mm	180mm × 280mm	-	1
CSt7/AR025					0.25%	1
CSt7/AR050					0.5%	1
CSt7/AR050-C	片側繰返し					1

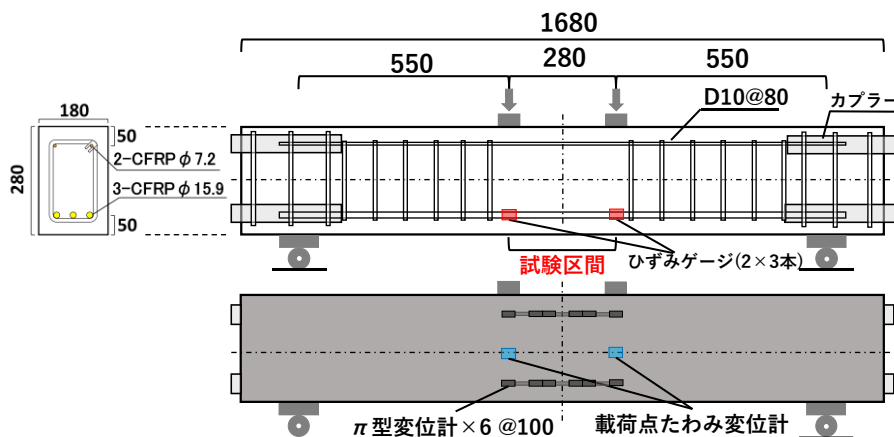


図 4-1 試験体形状・加力方法

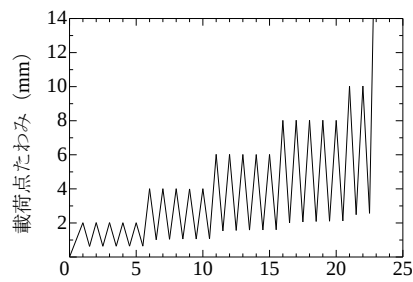


図 4-2 加力履歴

4.3 FRP 補強アラミド-FRCC 梁の曲げ試験結果

4.3.1 ひび割れ及び破壊性状

加力後の試験体の写真を図 4-3 に示す．CSt7/MT，CSt7/AR025，CSt7/AR050 では，試験区間外の定着部の破壊により荷重が低下した．CSt7/AR050-C では，試験区間における FRCC の圧壊により最大荷重となった．最大荷重後は，緩やかに荷重が低下しつつたわみが増大した．CSt7/AR050-C において，除荷時にはひび割れが目視できない程度にひび割れが閉じている様子が確認できた．

CSt7/MT	
CSt7/AR025	
CSt7/AR050	
CSt7/AR050-C	

図 4-3 加力後の試験体

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 4-4 に示す。CSt7/MT では試験機の不具合により、載荷点たわみ 7mm 程度で一度除荷を行い、その後再度加力を行った。最大荷重の一覧を表 4-4 に示す。CSt7/AR050-C では試験区間内の FRCC の圧壊で最大荷重を迎えた後も靱性がみられ、繊維による架橋効果が確認された。また、繰返し加力による各サイクルでの荷重低下は確認されなかった。

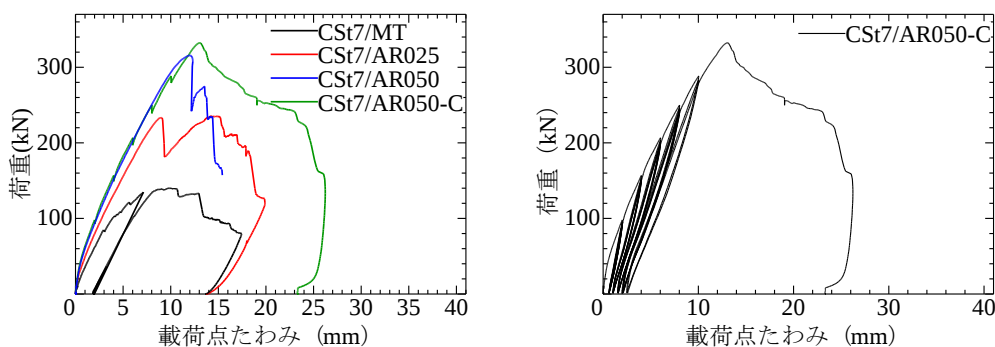


図 4-4 荷重－載荷点たわみ量関係

表 4-4 最大荷重一覧

試験体	最大荷重(kN)
CSt7/MT	140
CSt7/AR025	236
CSt7/AR050	316
CSt7/AR050-C	332

4.3.3 補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係

補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係を図 4-5 に示す。補強筋ひずみは、測定された 6 か所の載荷点ひずみの平均とした。ひび割れ幅は、引張側に設置された π 型変位計のそれぞれの区間で最大荷重到達時に生じたひび割れの本数で、それぞれの π 型変位計で計測された変形を除して求めた。単調加力を行った CSt7/MT, CSt7/AR025, CSt7/AR050 を比較すると、繊維体積混入率が大きいほど、同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅が抑制されていることが確認された。CSt7/AR050-C では、単調加力を行った CSt7/AR050 と比較して、同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅が大きくなっている。繰返し加力により試験区間に損傷が累積し、試験区間内でのひび割れが拡大した可能性がある。

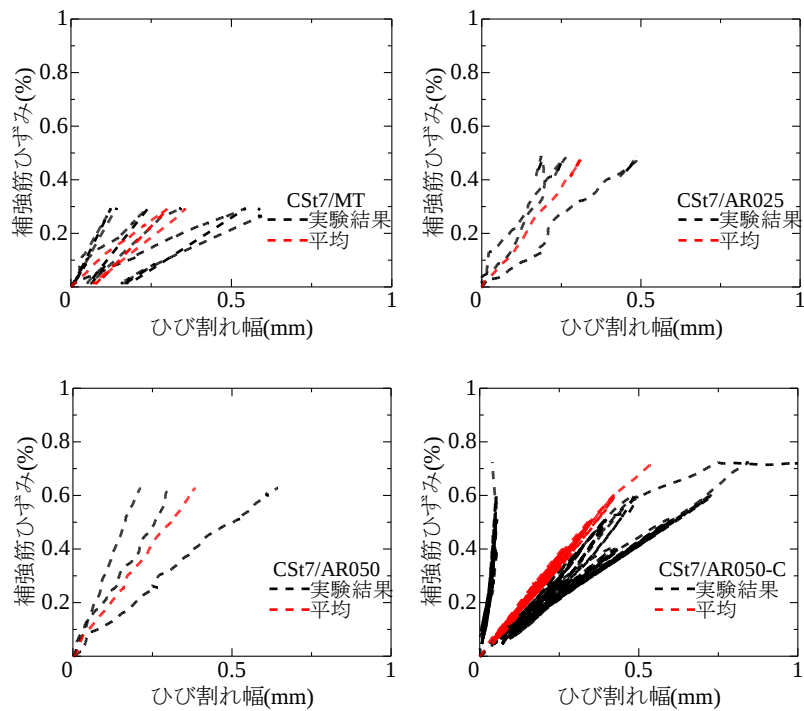


図 4-5 補強筋ひずみーひび割れ幅関係

4.4 FRP 補強アラミド-FRCC 梁のひび割れ幅評価

4.4.1 ひび割れ幅算定式

3.4.1 で前述した，荷重端ひずみに関するひび割れ幅算定式とともに，Sunaga らによって，FRP 補強 FRCC 部材のひび割れ幅評価式として，補強筋ひずみからひび割れ幅の評価を可能にしたひび割れ幅算定式（式(4.1)）が提案されている [8]．

ひび割れ幅算定に用いる特性値を表 4-5 に示す．補強筋の材料特性には，表 2-7 の値を用いた．FRCC の弾性率は，表 4-2 の値を用いた．FRCC のひび割れ強度は，第 4 章の梁試験体と同一バッチの 100x100x400 角柱曲げ供試体の 4 点曲げ試験結果より算出した．FRCC の断面積は，第 4 章の梁試験体の引張側主筋 1 本あたりが負担する等価の断面積とした．付着構成則には，第 2 章でモデル化を行ったトリリニアモデルを用いた（図 2-19）．FRCC の繊維架橋則には，浅山らによって行われた，本研究の梁試験体と同一材料の繊維体積混入率 0.5% のアラミド-FRCC の一軸引張試験の結果をバイリニアでモデル化したモデルを用いた [13]．繊維架橋則のバイリニアモデルを図 4-6 に，バイリニアモデルの特性値を表 4-6 に示す．

$$\varepsilon_{sl} = \frac{\varphi_s}{A_c\{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\}} \int_0^{S_l} \tau_x dS_x + \frac{\sigma_{br}(w_{cr})}{E_c} + \frac{1 + np}{2npE_c} \{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\} \quad (4.1)$$

ここで,

- ε_{sl} : 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

表 4-5 ひび割れ幅算定に用いる特性値

試験体	$\varphi_s(\text{mm})$	$E_s(\text{GPa})$	$A_s(\text{mm}^2)$	$\sigma_{cr}(\text{MPa})$	$E_c(\text{GPa})$	$A_c(\text{mm}^2)$
CSt7/MT	50.0	150	125.0	1.78	18.1	60mm
CSt7/AR025				4.44	17.2	×
CSt7/AR050				5.42	13.7	100mm
CSt7/AR050-C				5.30	15.5	=6000mm ²

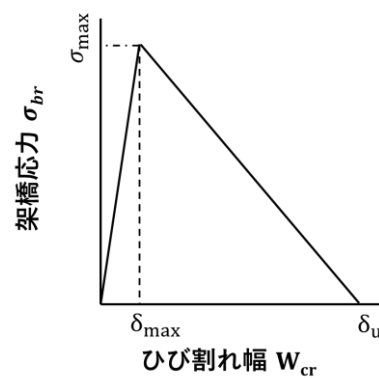


図 4-6 繊維架橋則のバイリニアモデル

表 4-6 繊維架橋則のバイリニアモデルの特性値

試験体	σ_{max} (MPa)	δ_{max} (mm)	δ_u (mm)
CSt7/MT	-	-	-
CSt7/AR025	1.67	1.4	2
CSt7/AR050	3.34		
CSt7/AR050-C			

4.4.2 実験結果とひび割れ幅算定式の比較

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 4-7 に示す。CSt7/MT では、除荷以前で、同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、実験結果の平均が算定式よりも小さくなっている。CSt7/AR025, CSt7/AR050, CSt7/AR050-C では、補強筋ひずみ約 0.1%以降で、同一補強筋ひずみ時のひび割れ幅は、実験結果の平均が算定式よりも小さくなっている。算定式は、任意の補強筋ひずみ上で起こり得るひび割れ幅の最大値を表しており、実験結果と算定式はよく適合しているといえる。

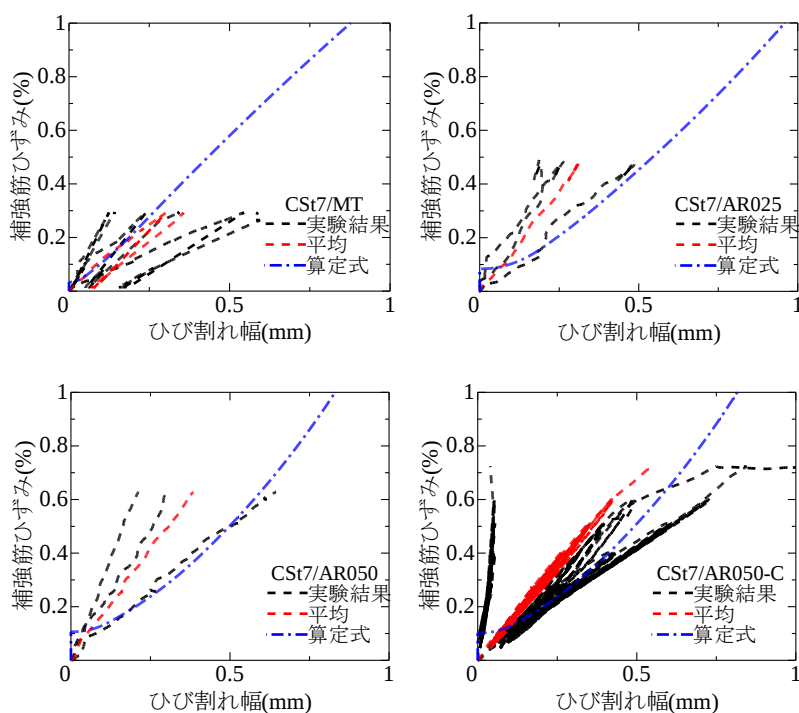


図 4-7 実験結果とひび割れ幅算定式の比較

4.5 まとめ

繊維体積混入率及び加力方法を変動因子として、FRP 補強アラミド-FRCC 梁試験体の曲げ試験を実施し、ひび割れ幅評価を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) CSt7/AR050-C では FRCC の圧壊により最大荷重を迎え、その後荷重が緩やかに低下しつ

つたわみが増大しており，FRCC による靱性が確認された．各サイクルでの荷重低下は確認されなかった．

- (2) 単調加力を行った試験体において，FRCC の繊維の混入率が大きいほど同一の補強筋ひずみ時におけるひび割れ幅が小さくなる傾向が確認された．
- (3) 補強筋ひずみ－ひび割れ幅関係の実験結果と算定式はよい適合性を示した．

第5章 結論

本研究では、FRP 補強 FRCC 部材の構造性能把握に資することを目的として、CFRP 補強 PVA-FRCC、GFRP 補強 PVA-FRCC、CFRP 補強アラミド-FRCC の付着試験を行った。また、付着構成則のモデル化を行い、ひび割れ幅算定式によるひび割れ幅の評価を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

ふし高さ比を変動因子として、CFRP 補強 PVA-FRCC、GFRP 補強 PVA-FRCC の付着試験を行い、ふし高さ比が大きいほど最大付着応力が大きくなる傾向が確認された。繊維体積混入率を変動因子として、CFRP 補強アラミド-FRCC の付着試験を行い、FRCC の繊維による付着耐力の向上が確認された。また、トリリニアモデルによって付着構成則のモデル化を行った。

CFRP 補強 PVA-FRCC、GFRP 補強 PVA-FRCC プリズムの両引き試験を行い、GFRP 補強筋ではCFRP 補強筋と比較して同一荷重端ひずみ時のひび割れ幅が小さいことが確認された。荷重端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との比較を行い、実験結果とひび割れ幅算定式はよい適合性を示した。

繊維体積混入率及び加力方法を変動因子として、CFRP 補強アラミド-FRCC 梁部材の4点曲げ試験を行い、単調加力を行った試験体において、FRCC の繊維の混入率が大きいほど同一の補強筋ひずみ時におけるひび割れ幅が小さくなる傾向が確認された。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との比較を行い、実験結果とひび割れ幅算定式はよい適合性を示した。

謝辞

本論文を作成するにあたって，多くの方々にご指導及びご協力を頂きました．

指導教員であります筑波大学教授金久保利之先生には，本研究における相談から実験の実施，論文遂行に至るまで終始丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました．心より御礼申し上げます．

副指導教員であります，八十島章先生には試験体の作製や研究に関して多くのご意見，ご教唆を頂きました．同じく，副指導教員であります，松島亘志先生には，研究ならびに学業において，多くの助言を頂きました．筑波大学技術職員の小島篤志氏には，実験の治具の製作及び実験方法など多大なる便宜を図って頂きました．深く感謝致します．

また，同研究室所属の方々から多くの知識や示唆を頂き，特に高砂柊伍氏，齊藤稜河氏，Shiferaw Helen Negash 氏，Hang ZHANG 氏には実験の補助や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．

本研究を行うにあたり，第 2 章及び第 4 章の CFRP 補強筋は東京製綱インターナショナル（株）にご提供いただきました．深く感謝いたします．

参考文献

- [1] 六郷恵哲ほか：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会の活動と成果の概要，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1～10, 2004.7
- [2] Yu Mu, Toshiyuki Kanakubo : Bending Test of FRC Notched Beam with Various Polymer Fibers, 日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.503～504, 2015.9
- [3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- [4] Toshiyuki Kanakubo, Masaru Miyaguchi, Kohei Asano : Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Materials Journal, American Concrete Institute, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016.3
- [5] 橋本裕子, 山田大, 八十島章, 金久保利之：スチールワイヤの拔出し挙動と架橋則の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.249～254, 2016.7
- [6] 橋本裕子, 牟雨, 山田大, 金久保利之：FRCC におけるアラミドおよび PP 短繊維の拔出し挙動と架橋則の構築，コンクリート工学論文集，第 28 巻，pp.103～111, 2017.11
- [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] Sunaga, D., Namiki, K., Kanakubo, T. : Crack width evaluation of fiber-reinforced cementitious composite considering interaction between deformed steel rebar, Construction and Building Materials, 61, 119968 (10pp.), 2020.11
- [9] Shugo Takasago, Toshiyuki Kanakubo, Hiroya Kobayashi, Hideto Sasaki : Bond and Cracking Characteristics of PVA-Fiber-Reinforced Cementitious Composite Reinforced with Braided AFRP Bars, Fibers, Vol.11, No.12, 107 (18pp.), 2023.12
- [10] 金久保利之, 米丸啓介, 福山 洋：簡易型試験体による連続繊維補強コンクリート部材の付着割裂強度の把握（その 1:実験概要と結果）（その 2:結果の検討），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造IV，pp.845～848, 1995.8
- [11] 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，Vol.38, No.2, pp.1321～1326, 2016.7
- [12] Y. Ozu, M. Miyaguchi, T. Kanakubo : Modeling of Bridging Law for PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composite Considering Fiber Orientation, Journal of Civil Engineering and Architecture, Volume 12, Number 9, pp.651-661, 2018.9
- [13] 浅山智, 八十島章：アラミド繊維を用いた FRCC ト型柱梁接合部の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.42, No.2, pp.1069～1074, 2020.7