

論文 組紐型アラミド FRP 補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価

高砂 柊伍^{*1}・金久保 利之^{*2}・小林 寛弥^{*3}

要旨：組紐型アラミド FRP 補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価を目的とし、断面寸法および PVA 繊維の体積混入率を変動因子とした試験体の引抜き試験および両引き試験を行った。引抜き試験より、繊維体積混入率が大きい試験体ほど、ピーク以降の応力低下が小さい傾向が確認できた。また、付着応力—荷重端すべり量関係をトリリニアでモデル化した。両引き試験より、断面寸法が大きく、繊維体積混入率が小さい試験体ほどひび割れ幅が大きくなる傾向が確認できた。実験より得られた補強筋荷重端ひずみ—ひび割れ幅関係とトリリニアモデルを使用したひび割れ幅算定式の良い適合性を確認した。

キーワード：DFRCC, アラミド FRP, 付着構成則, ひび割れ幅, 架橋則

1. はじめに

耐腐食性を有し、高強度かつ弾性挙動を示す連続繊維補強材 (FRP) を、コンクリート構造物の鉄筋代替補強筋として用いることにより、外乱が生じた後も使用可能で修復性に優れた高寿命なコンクリート構造物が期待される¹⁾。しかしながら、FRP の弾性係数は鉄筋と比較して一般に小さいことから、FRP 補強コンクリート部材の変形が増加することが考えられる。部材変形の増加は、コンクリートに生じるひび割れ幅の増大によってもたらされるため、ひび割れ幅制御の方法として、繊維を数%混入させることで引張性能を向上させた高靱性繊維補強セメント複合材料 (Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite : DFRCC) を利用することが考えられる。DFRCC では、繊維がひび割れを架橋して引張力を負担するため、高い引張性能を示す。FRP 補強 DFRCC 部材が実用化されることで修復性の高い、高性能な構造物が期待されるが、そのためには、部材に生じるひび割れ幅の定量的な評価が求められる。既往の研究²⁾では、鉄筋補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価式として、補強筋と DFRCC 間の付着応力—すべり量関係を線形でモデル化

することで、簡易に補強筋ひずみからひび割れ幅評価を可能にした算定式が提案されている。この式には補強筋弾性係数が含まれており、FRP 補強 DFRCC 部材にも適用可能であると考えられる。

本研究では、FRP 補強 DFRCC 部材におけるひび割れ幅評価を目的とし、既往の DFRCC 部材ひび割れ幅評価式の適合性を検証する。そのために、DFRCC を用いて FRP 補強筋の引抜き試験を行い、FRP 補強筋と DFRCC 間の付着応力—すべり量関係のモデル化を行う。さらに、DFRCC に FRP 補強筋を配した試験体の両引き試験を行って、ひび割れ幅を実験的に把握し、引抜き試験より得られた付着応力—すべり量関係 (付着構成則) モデルを用いたひび割れ幅算定式との適合性を検証する。

2. 引抜き試験

2.1 概要

(1) 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体形状の一例を図-1 に示す。試験体は、断面が 100mm×100mm, 120mm×120mm, 140mm×140mm, 高さが 100mm の 3 種類の直方体プロ

表-1 引抜き試験体一覧

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

*1 筑波大学 理工学群 工学システム学類 (学生会員)

*2 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究群

ックで、その中心に組紐型アラミド FRP 補強筋を配置した。補強筋端部には試験機のチャック固定用に鋼製カブラーを取り付けた。付着長は補強筋径の約 4 倍の 54mm とした。変動因子は、試験体断面積（100mm×100mm，120mm×120mm，140mm×140mm），DFRCC の繊維体積混入率（外割で 0%，1%，2%）である。DFRCC には PVA 繊維を使用し、各試験体 3 体ずつ、計 27 体作製した。

(2) 使用材料

組紐型アラミド FRP 補強筋の表面形状を図-2 に、材料特性を表-2 に示す。直径および力学特性の算出は JIS A 1192 に依った。DFRCC に用いた PVA 繊維の形状を図-3 に、材料特性を表-3 に示す。DFRCC の調合計画およびφ100mm×200mm 円柱供試体圧縮強度試験による圧縮特性を表-4 に示す。PVA 繊維の繊維体積混入率は、0%（モルタル）、1%，2%とした。

(3) 加力方法

加力方法を図-4 に示す。試験体を変位制御による加力を行う万能試験機の上部ヘッド上加力版の上にセットし、下部ヘッドのチャックでカブラーをつかみ単調引抜き加力を行った。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。計測項目は引抜き荷重および自由端での補強筋すべり量である。

2.2 実験結果

引抜き試験により得られた付着応力と荷重端すべり量の関係を図-5 に示す。なお、荷重端すべり量は DFRCC 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。付着応力は、計測した荷重を付着領域の補強筋表面積（ $\pi \times \text{直径} \times \text{付着長}$ ）で除することで求めた。MT 試験体では、最大付着応力到達後に、ひび割れの拡幅とともに急激な付着応力の低下がみられた。PVA1%および PVA2%試験体については、ひび割れ発生後も付着応力の上昇がみられ、MT 試験体よりも最大付着応力が高い。最大付着応力到達後は、緩やかな付着応力の低下がみられた。これは、繊維混入によりひび割れの拡幅が抑制されたためだと考えられる。

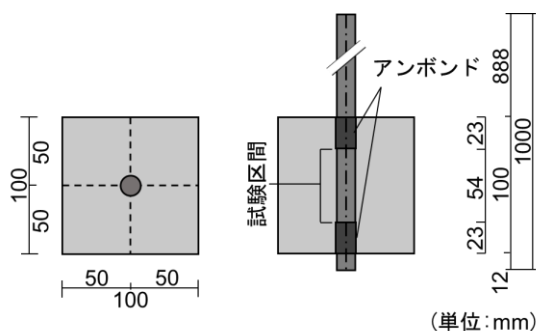


図-1 引抜き試験試験体形状



図-2 組紐型アラミド FRP 補強筋

表-2 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)
組紐型アラミド FRP 補強筋	13.58	1261	66.0



図-3 PVA 繊維

表-3 PVA 繊維の材料特性（メーカー公称値）

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

表-4 DFRCC 調合計画および圧縮特性

試験体種別	単用量(kg/m³)				F (kg)	σ_c (MPa)	E_c (GPa)
	W	C	S	FA			
MT					0	48.8	17.5
PVA 1%	380	678	484	291	13	46.2	17.0
PVA 2%					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，F：PVA 繊維
 σ_c ：圧縮強度， E_c ：弾性係数

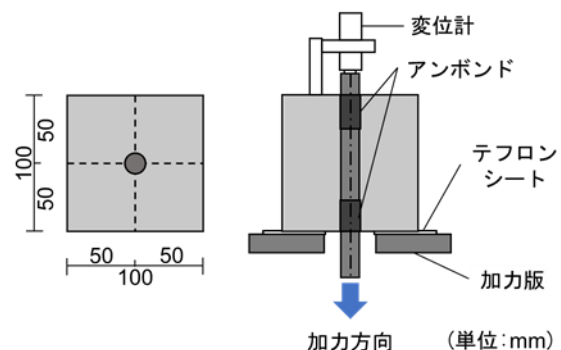


図-4 加力方法

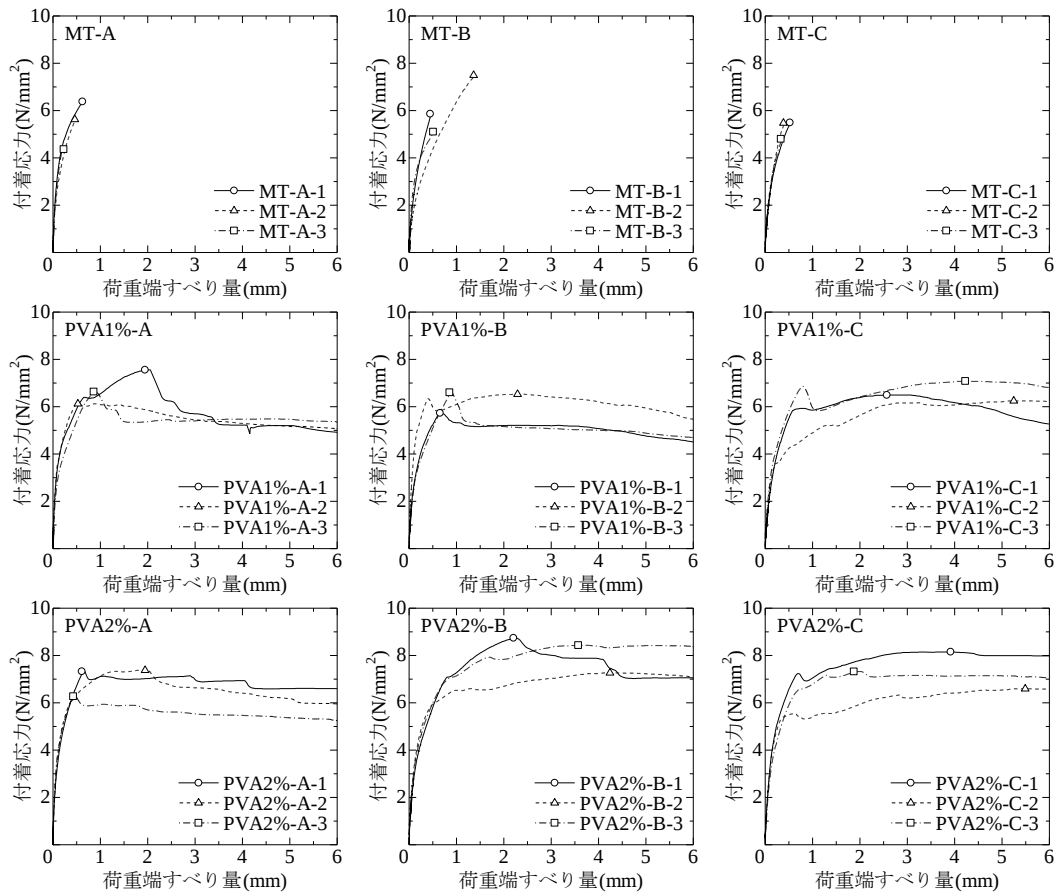


図-5 付着応力-荷重端すべり量関係

3. ひび割れ幅算定式の導出

須永ら²⁾は、鉄筋補強 DFRCC のひび割れ幅算定式として、局所区間の DFRCC、補強筋および繊維架橋において成立する力の釣り合い、変形の適合条件およびひび割れが発生する条件から、補強筋荷重端ひずみとひび割れ幅の関係を理論的に算出する式(1)を提案している。なお、繊維架橋則には、実験と同一の材料を用いた架橋則の計算結果をモデル化したトリリニアモデルを用いている³⁾。

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

ここで、

- $\varepsilon_{s(Load)}$: 補強筋荷重端ひずみ
- φ_s : 補強筋周長
- σ_{cr} : DFRCC ひび割れ強度
- w_{cr} : ひび割れ幅
- $\sigma_{br}(w_{cr})$: 繊維架橋則³⁾
- n : 弾性係数比 ($= E_s/E_c$)
- p : 鉄筋比 ($= A_s/A_c$)
- E_s : 補強筋弾性係数
- E_c : DFRCC 弾性係数
- A_s : 補強筋断面積
- A_c : DFRCC 断面積

s_l : 補強筋荷重端すべり量

式(1)は、補強筋種に依存しないため、補強筋として FRP 補強筋を用いた場合にも適用可能である。式(1)右辺の τ_x の s_x に関する積分は、付着応力-すべり量関係 (付着構成則) から求まる。付着構成則をモデル化し、この積分を解くことで、補強筋荷重端ひずみとひび割れ幅の関係式が得られる。本研究では、付着構成則として、トリリニアモデルを用いる。図-6 にトリリニアモデルを示す。以下に、各特性値の決定方法を述べる。

最大付着応力 τ_{max} は、同一因子の引抜き試験体 3 体

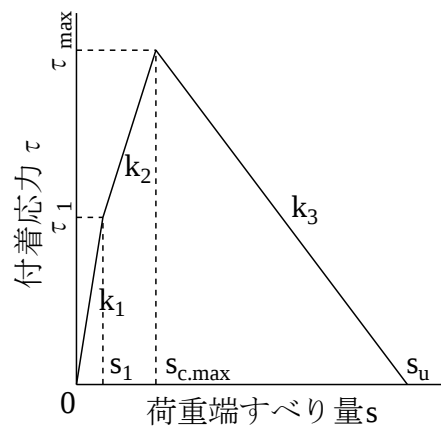


図-6 トリリニアモデル

の最大付着応力の平均値とした。最大付着応力時のすべり量は、実験で得られた計測値をそのまま用いるとトリリニアモデルの最大付着応力点のすべり量が過大になるため、図-7 に示すコンプリメンタリーエネルギーが等価となるように決定した補正荷重端すべり量 $s_{c,max}$ とした。初期勾配 k_1 は、経験的に最大付着応力の 1/5 までの勾配とし、 τ_1 は、最大付着応力の 1/2 とした。軟化勾配 k_3 は、 $s_{c,max}$ 以降の付着破壊エネルギーが等価となるように決定した。なお、MT 試験体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 1.5mm とした。トリリニアモデルの特性値の一覧を表-5 に示す。実験結果とトリリニアモデルの比較の一例を図-8 に示す。モデルは、次節で述べるひび割れ幅評価で重要となるすべり量数 mm までの範囲において、実験結果を概ね評価できていることが確認できる。

両引き試験体において、ひび割れ位置に対する対称性より、荷重端すべり量はひび割れ幅の 1/2 となるため、式(1)右边はひび割れ幅の関数となる。したがって、前述の方法により決定した付着構成則トリリニアモデルを用いると、補強筋荷重端ひずみ-ひび割れ幅関係の式(2)が

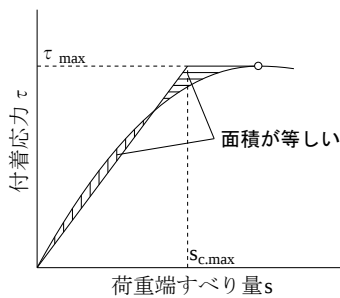


図-7 $s_{c,max}$ の決定方法

得られる。

$$(w_{cr} < 2 \cdot s_1)$$

$$\varepsilon_{s(Load)} =$$

$$\frac{k_1 \varphi_s}{8A_c \{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\}} w_{cr}^2 + \frac{1+np}{2npE_c} \{\sigma_{cr} + \sigma_{br}(w_{cr})\}$$

$$(2 \cdot s_1 < w_{cr} < 2 \cdot s_{c,max})$$

$$\varepsilon_{s(Load)} =$$

$$\frac{\varphi_s}{8A_c \{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\}} \{k_2 w_{cr}^2 + 4(\tau_{max} - k_2 s_{c,max}) w_{cr} -$$

$$4s_1(\tau_{max} - k_2 s_{c,max})\} + \frac{1+np}{2npE_c} \{\sigma_{cr} + \sigma_{br}(w_{cr})\} \quad (2)$$

$$(w_{cr} > 2 \cdot s_{c,max})$$

$$\varepsilon_{s(Load)} =$$

$$\frac{\varphi_s}{8A_c \{\sigma_{cr} - \sigma_{br}(w_{cr})\}} \{k_3 w_{cr}^2 - 4k_3 s_u w_{cr} + 4(k_3 s_u s_{c,max} +$$

$$\tau_1 s_{c,max} - \tau_{max} s_1)\} + \frac{1+np}{2npE_c} \{\sigma_{cr} + \sigma_{br}(w_{cr})\}$$

4. 両引き試験

4.1 概要

試験体形状の一例および変位計取付け状況を、図-9 および図-10 にそれぞれ示す。試験体は、断面が 100mm × 100mm, 120mm × 120mm, 140mm × 140mm, 長さが 600mm の 3 種類の直方体ブロックで、その中心に組紐型アラミド FRP 補強筋を配置した。補強筋両端部には、チャック固定用に鋼製カプラーを取り付けた。ひび割れ発生位置をコントロールするために、硬化後にコンクリートカッターによりスリットを設け、スリット深さは、スリットを入れた位置の DFRCC 断面積が全体の 60% とな

表-5 トリリニアモデルの特性値

試験体名	τ_{max} (MPa)	$s_{c,max}$ (mm)	τ_1 (MPa)	s_1 (mm)	s_u (mm)	k_1	k_2	k_3
MT-A	5.46	0.25	2.73	0.035	1.50	77.34	12.91	-4.35
PVA1%-A	6.77	0.47	3.39	0.047	20.95	71.35	7.99	-0.33
PVA2%-A	6.99	0.34	3.50	0.041	23.69	84.85	11.80	-0.30
MT-B	6.15	0.52	3.08	0.083	1.50	36.91	7.02	-6.29
PVA1%-B	6.29	0.43	3.14	0.054	20.38	58.28	8.46	-0.32
PVA2%-B	8.15	0.91	4.07	0.067	25.00	60.79	4.81	-0.34
MT-C	5.26	0.28	2.63	0.052	1.50	50.07	11.50	-4.31
PVA1%-C	6.61	0.94	3.30	0.086	24.03	38.56	3.88	-0.29
PVA2%-C	7.36	0.82	3.68	0.081	26.68	45.49	5.00	-0.28

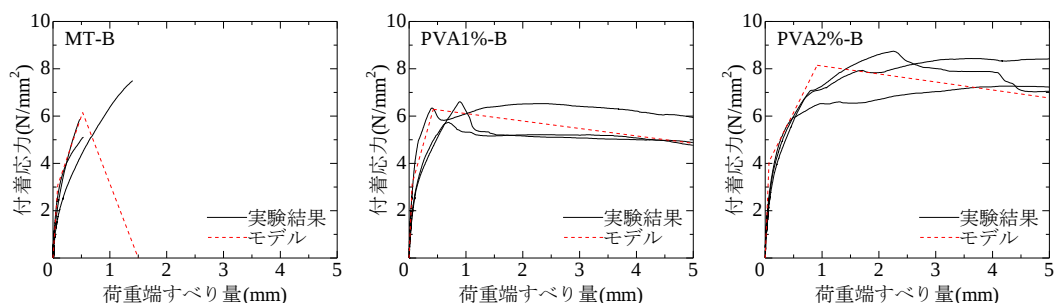


図-8 付着構成則のトリリニアモデル

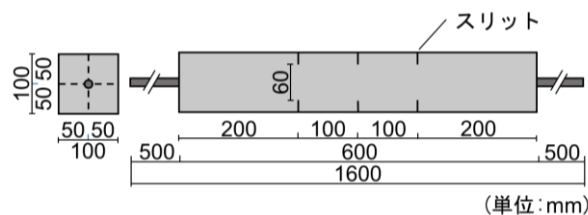
るようにした。変動因子は、引抜き試験と同様に、試験体断面積（100mm×100mm，120mm×120mm，140mm×140mm），DFRCC の繊維体積混入率（0%，1%，2%）である。DFRCC には PVA 繊維を使用し，各試験体 3 体ずつ，計 27 体作製した。使用材料は引抜き試験と同一であり，DFRCC は引抜き試験試験体と同一練混ぜバッチのものを使用した。なお，試験体名は引抜き試験体と同様に，DFRCC 種類－断面寸法で表している。加力は，変位制御による加力を行う万能試験機を用いて単調引張加力を行った。引張荷重約 105kN（補強筋応力で 725MPa）で加力を終了し，その後，除荷した。計測項目は，引張荷重，各スリット位置に設けたパイ型変位計によるひび割れ幅および全体変形である。

4.2 実験結果

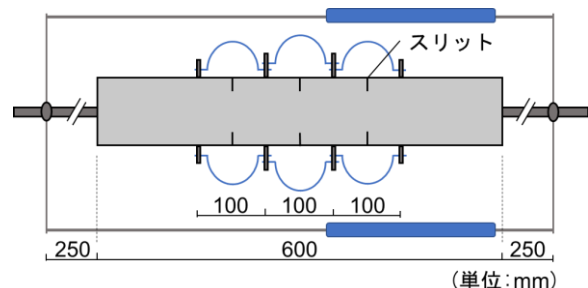
引張荷重約 105kN 時のひび割れ発生状況の一例を図－11 に示す。MT 試験体ではスリットを起点として 1 本のひび割れが発生し，その後引張荷重の増加にともなうひび割れが拡幅した。その他のひび割れは，ほぼ生じなかった。DFRCC 試験体では，スリット間に最初のひび割れが発生した後も複数のひび割れが生じる様子が確認できた。ひび割れ本数は，繊維体積混入率が大きく，試験体断面寸法が小さいほど増加する傾向が確認できた。全試験体において，荷重除荷によってひび割れが閉じる様子が確認できた。

4.3 実験結果と算定式の適合性

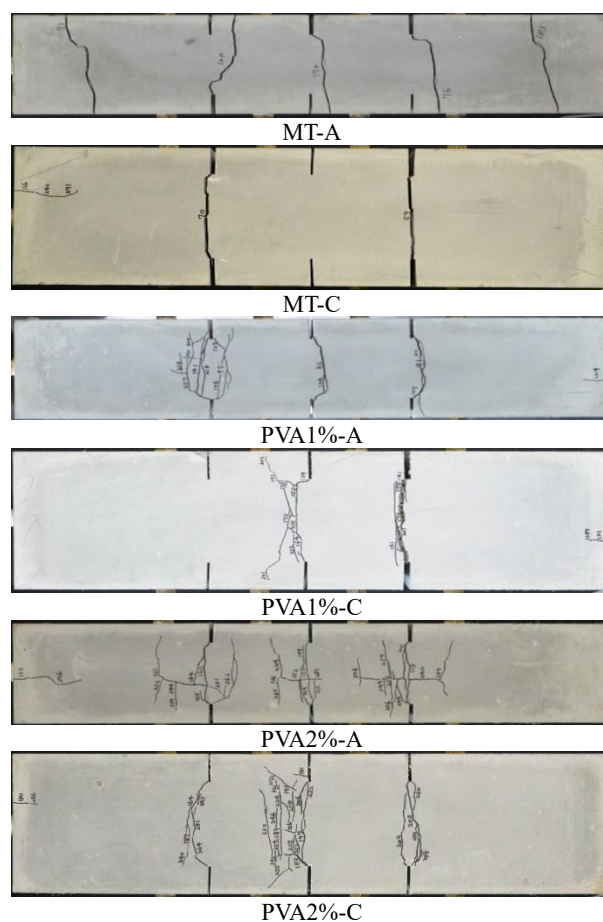
両引き試験より得た補強筋荷重端ひずみとひび割れ幅の関係を図－12 に示す。補強筋荷重端ひずみは，引張荷重を，表－2 に示す値から求まる補強筋断面積と弾性係数で除すことにより求めた。ひび割れ幅の実験値は，図－13 に示すように，ひび割れ測定区間（100mm）において，2 本目のひび割れが観察されるまでの計測値とした。平均線は，各試験体の実験値を最小二乗法により直線近似し，その傾きおよび切片の平均をとることで求めた。図－12 には，ひび割れ幅算定式による補強筋荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係も示した。なお，DFRCC の引張強度には，両引き試験により得られたひび割れ発生時引張荷重をスリット位置の断面積で除したひび割れ強度の平均値（2.29MPa）を用いた。また，繊維架橋則には，同一の材料および調合による DFRCC 架橋モデル³⁾を用いた。ひび割れ幅算定式による補強筋荷重端ひずみ－ひび割れ幅関係は，発生ひび割れ幅の上限値を与える関係式であり²⁾，算定式と実験結果の適合性は概ね良好である。PVA2%試験体では，ひび割れ幅 0.2mm においてひずみの低下が生じる。これは，繊維架橋が大きい試験体において，架橋則が軟化域に達するためである。実験結果では確認できておらず，軟化域における平衡状態の保持が難しく，計測できないためと思われる。実験結果は，繊維



図－9 試験体形状（試験体断面 100mm 角）



図－10 変位計取付位置



図－11 試験体ひび割れ状況

繊維体積混入率が大きくなるほど平均直線の勾配が大きくなる傾向を示す。これは，繊維がひび割れを架橋することで，付着応力の低下および同一補強筋ひずみの際のひび割れ幅が抑制されるためである。また，断面寸法が大きくなるほど平均直線の勾配が小さくなる傾向が確認できる。これは，断面寸法が大きくなるほどひび割れ本数が減少または発生が遅れることで，同一補強筋ひずみの

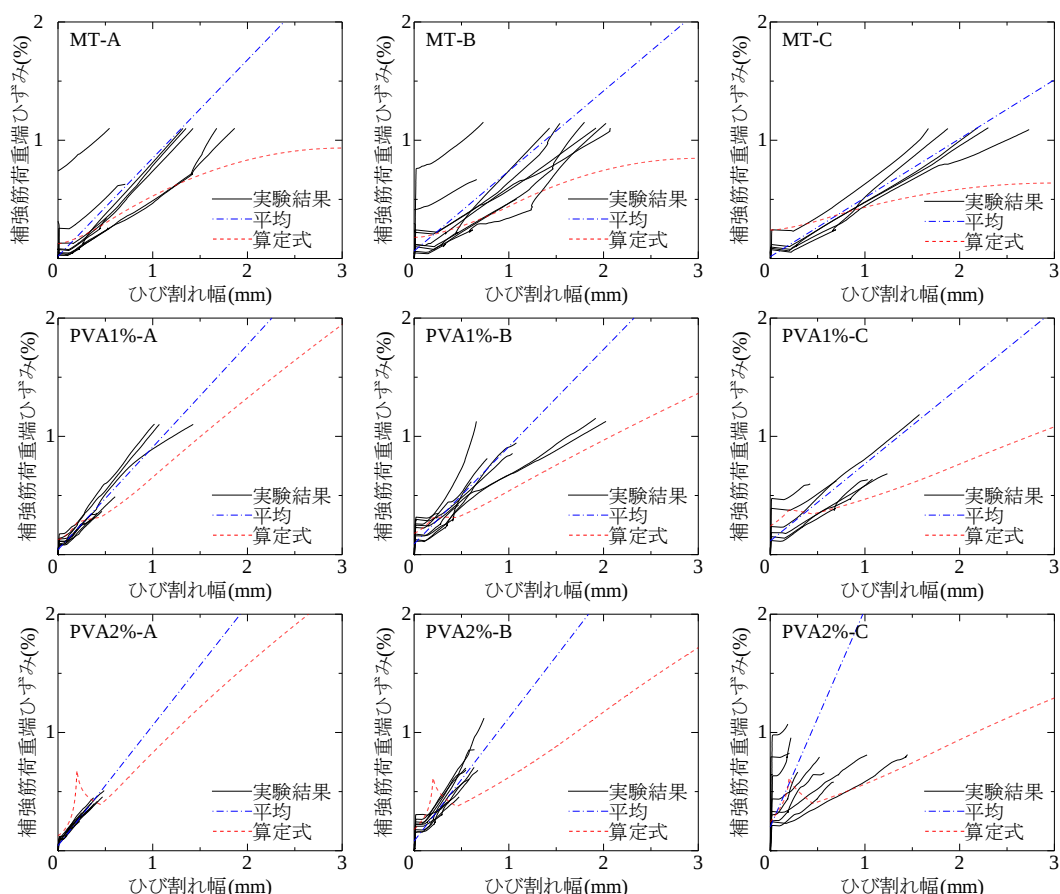


図-12 補強筋荷重端ひずみ-ひび割れ幅関係



図-13 試験体ひび割れ発生過程

際に一本あたりのひび割れ幅が大きくなるためである。
なお、PVA2%-C 試験体では架橋則が軟化域に達していない箇所のひび割れがあると思われ、平均直線の勾配が大きくなっている。

5. まとめ

本研究では、アラミド FRP 補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価を目的とし、断面寸法および DFRCC の繊維体積混入率を変動因子とした引抜き試験および両引き試験を行った。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 引抜き試験では、DFRCC の繊維体積混入率が大きくなるほど、最大付着応力到達後の付着応力低下が小さくなる傾向がみられた。
- (2) 引抜き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でモデル化し、補強筋ひずみ-ひび割れ幅関係式を示した。
- (3) 両引き試験では、断面寸法が大きく、DFRCC の繊維

体積混入率が小さくなるほど、ひび割れ幅が大きくなる傾向が確認できた。

- (4) 両引き試験より得られた補強筋ひずみ-ひび割れ幅関係は、ひび割れ幅算定式との良い適合性が確認できた。

謝辞

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いた。

参考文献

- 1) 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
- 2) Sunaga, D., Namiki, K., Kanakubo, T. : Crack width evaluation of fiber-reinforced cementitious composite considering interaction between deformed steel rebar, Construction and Building Materials, Vol.261, 119968, Nov, 2020
- 3) Ozu, Y., Miyaguchi, M., Kanakubo, T. : Modeling of Bridging Law for PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composite Considering Fiber Orientation, Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol.12, pp.651-661, 2018