

# 論文 鉄筋補強 DFRCC 部材のひび割れ幅評価に関する研究

須永 大揮\*1・金久保 利之\*2・並木 啓恭\*3

**要旨:** 本研究では、鉄筋で補強された DFRCC 部材におけるひび割れ幅の評価を行うことを目的とし、変動因子を断面寸法および繊維体積混入率とした試験体の両引き試験を行った。実験の結果、断面寸法および繊維体積混入率が大きな試験体ほど、テンションスティフニング効果が増大する傾向が見られた。また、断面寸法が大きく、繊維体積混入率が小さな試験体ほど、ひび割れ幅が大きくなる傾向が確認できた。さらに、ひび割れ箇所における繊維の架橋効果を考慮した付着解析手法を用いて、両引き付着解析を行い、鉄筋歪-ひび割れ幅関係を算出した。おおむね実験結果に対応した解析結果が得られた。

**キーワード:** DFRCC, ひび割れ幅, 両引き試験, テンションスティフニング効果, 架橋則, 付着解析

## 1. はじめに

高靱性繊維補強セメント複合材料 (Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite : DFRCC) は、セメント系材料に長さ 10mm 程度の短繊維を混入させた複合材料であり、繊維がひび割れを架橋して引張力を伝達することで、従来のコンクリートに比べて高い引張靱性能を示す。DFRCC の高い靱性能を活かし構造部材へ適用することで、構造物の損傷低減やひび割れ幅抑制効果が報告されており<sup>例1)</sup>、構造物の軽量化や耐久性の向上、通常のコンクリート部材には不可能な構造形態の実現等が見込まれる。しかしながら、特徴である引張性能の統一した評価手法が確立しておらず、DFRCC を構造部材に適用した例は少ない。

構造物の損傷低減やひび割れ幅抑制効果を積極的に利用するためには、ひび割れ幅の正確な評価が必要となる。DFRCC の材料レベルでは、引張応力とひび割れ幅の関係で表される架橋則による評価が提案されている<sup>2)</sup>。

一方、実構造部材への適用においては、鉄筋との併用構造、すなわち鉄筋補強 DFRCC 部材としての利用が現実的である。鉄筋併用の場合のひび割れ幅評価には、DFRCC の架橋則とともに、鉄筋との相互作用として DFRCC と鉄筋との付着性状を考慮する必要がある。

本研究では、鉄筋補強 DFRCC 部材におけるひび割れ

幅評価を行うことを目的とする。DFRCC を用いて両引き試験を行い、鉄筋と DFRCC の付着性状およびひび割れ幅を実験的に把握するとともに、ひび割れ箇所における繊維の架橋効果を考慮した付着解析手法<sup>3)</sup>を用いて、両引き付着解析を行い、ひび割れ幅を評価する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体形状を図-1 に、試験体一覧を表-1 に示す。試験体は、正方形断面を有する長さ 800mm の角柱とし、断面中心に異形鉄筋 D16 (SD490) を一本配置した。DFRCC には PVA 繊維を使用した。変動因子は、断面寸法および DFRCC の繊維体積混入率とし、各試験体 3 体ずつ、全 18 体作製した。

### 2.2 使用材料

DFRCC に用いた PVA 繊維の形状を図-2 に、物性値

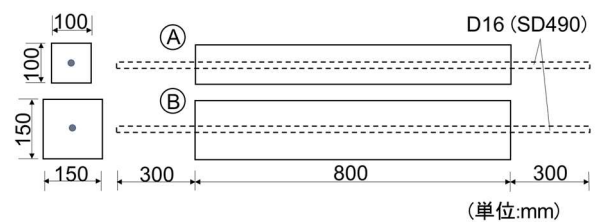


図-1 試験体形状

表-1 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	長さ: 800mm 鉄筋: D16 (SD490)	100mm×100mm	—	3
PVA1%-A			1.0%	3
PVA2%-A		2.0%	3	
MT-B		(長さ: 12mm, 径: 0.10mm)	150mm×150mm	—
PVA1%-B	1.0%			3
PVA2%-B	2.0%			3



図-2 繊維形状

\*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科

を表-2に示す。DFRCCの調合計画および材料特性(試験体加力材齢時)を表-3に示す。なお、打込みは繊維の配向性を考慮して、型枠に1/33の勾配を設けて片側から流し込んだ。引張試験から得られた鉄筋の材料特性を表-4に示す。

### 2.3 加力・計測方法

試験体両端の鉄筋を万能試験機のチャックで掴み、一軸引張加力を行った。変位計設置位置を図-3に示す。

試験体両面に $\pi$ 型変位計を100mm間隔で取り付け、全7区間を対象として、それぞれのひび割れ幅を計測した。また、試験体両端の鉄筋に変位計設置器具を取り付け、全体変形量を計測した。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重-全体変形関係

両引き試験によって得られた荷重-全体変形関係を、変動因子ごとに3体ずつまとめて図-4に示す。変位計により計測した全体変形量は、試験体両端の鉄筋60mm分の変形を含んでいるので、鉄筋の引張試験で得られた弾性係数を用いて60mm分の鉄筋の変形を算出し、計測値から引くことで、試験体800mm分の全体変形とした。また、図中の破線は鉄筋単体の荷重-全体変形関係(降伏前)を示しており、引張試験で得られた弾性係数を用いて、長さ800mmにおける変形量を示した。なお、鉄筋の強度に個体差があったため、MT-Aの全試験体およびMT-Bの一部試験体において、他の試験体よりも降伏強度が低くなっている。

両引き試験における荷重は、鉄筋単体の荷重に比べて大きくなることが知られており、テンションステイフィング効果と呼ばれる。DFRCCにおけるテンションステイフィング効果の要因は、鉄筋との付着力によるものと、ひび割れ箇所における繊維の架橋力によるものがある。

図-4より、繊維架橋力のないモルタル試験体ではテンションステイフィング効果が小さい。同一断面の試験体間で比較すると、繊維体積混入率が大きい試験体ほどテンションステイフィング効果が大きい。また、100×100mm断面の試験体Aシリーズと150×150mm断面の試験体Bシリーズを比較すると、同じ繊維体積混入率の試験体において断面が大きいほどテンションステイフィング効果が大きく、モルタル試験体では効果が小さいことから、繊維の架橋が剛性増加に与える影響が大きいことがわかる。

### 3.2 ひび割れ状況

鉄筋降伏時におけるひび割れ状況を図-5に示す。各変動因子の3体の試験体のうち、軸方向ひび割れが最も少ない試験体のひび割れ状況を示した。青線は加力開始前のひび割れ(収縮ひび割れと考えられる)を示す。

表-2 繊維の物性値(メーカー公称値)

繊維種類	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-3 DFRCCの調合計画および材料特性

試験体種別	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
	W	C	S	FA	F		
MT						47.2	17.0
PVA1%	380	678	484	291		47.4	16.8
PVA2%						44.1	15.9

W: 水道水, C: 普通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

表-4 鉄筋の材料特性

種別	降伏強度(MPa)	弾性係数(GPa)	降伏歪( $\mu$ )	引張強度(MPa)
D16	491	188	2610	561

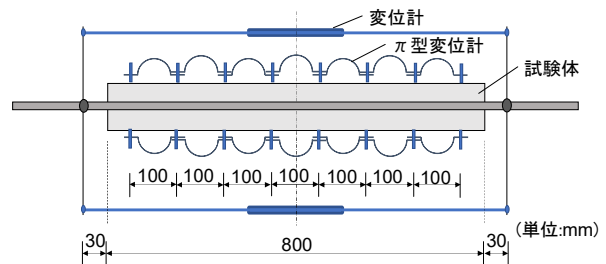


図-3 変位計設置位置

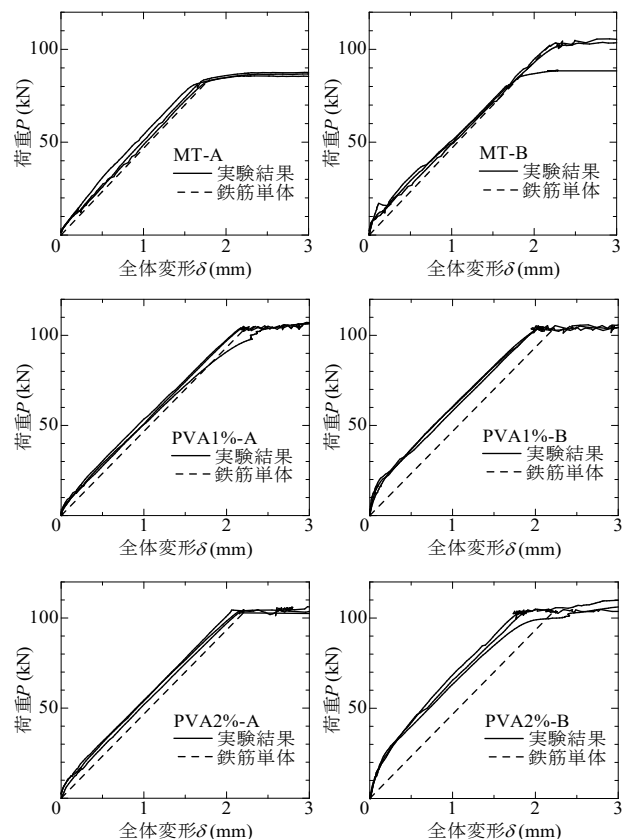


図-4 荷重-全体変形関係

降伏時におけるひび割れ（軸方向ひび割れを除く）の本数を比較すると、100×100mm 断面の試験体 A では、MT, PVA1%, PVA2%の順に7本、10本、13本と、繊維体積混入率が大きくなるほど、ひび割れ本数が増加する傾向が見られた。150×150mm 断面の試験体 B では、同じく順に4本、5本、5本であり、繊維体積混入率によるひび割れ本数の違いはあまり見られなかった。なお、各変動因子の他の2体の試験体についても、同様の傾向が確認された。

### 3.3 ひび割れ幅

変位計取付一区間に1本のひび割れが生じた場合について、各区間の両側面の $\pi$ 型変位計の計測値の平均をひび割れ幅とした。ひび割れは、目視観察および $\pi$ 型変位計の計測値により判断し、軸方向ひび割れ、2本目以降のひび割れ、または区間の境界上や区間を跨ぐ斜め方向のひび割れが生じた区間は、評価の対象外とした。

鉄筋歪 $\epsilon_s$ -ひび割れ幅関係を、変動因子ごとに3体ずつまとめて図-6に示す。グラフの縦軸は、鉄筋引張試験より得られた鉄筋の弾性係数を用いて、引張荷重を鉄筋歪に換算した。図中の破線は変動因子ごとの実験結果の平均を示しており、各測定区間の結果を最小二乗法で直線近似して傾きおよび切片を求め、同一変動因子ごとにそれらの値を平均した値によって定まる直線とした。

近似直線は断面寸法が大きな試験体ほど傾きが小さくなっており、ひび割れが拡幅しやすい傾向にあることがわかる。断面が大きな試験体ほどひび割れ本数が少なくなるため、同一歪時における1本あたりのひび割れ幅が大きくなると思われる。また、繊維体積混入率が大きな試験体ほど直線の傾きが大きくなっており、ひび割れ

が拡幅しにくい傾向にあることがわかる。繊維の架橋効果により、ひび割れの拡幅が抑制されたと考えられる。

なお、B断面の試験体ではひび割れ幅が小さい範囲で鉄筋歪が一定となる箇所が見られる。断面が大きいとひび割れ発生荷重が大きくなり、ひび割れ発生時に瞬時に変形が増大するため、その間の測定データはない。

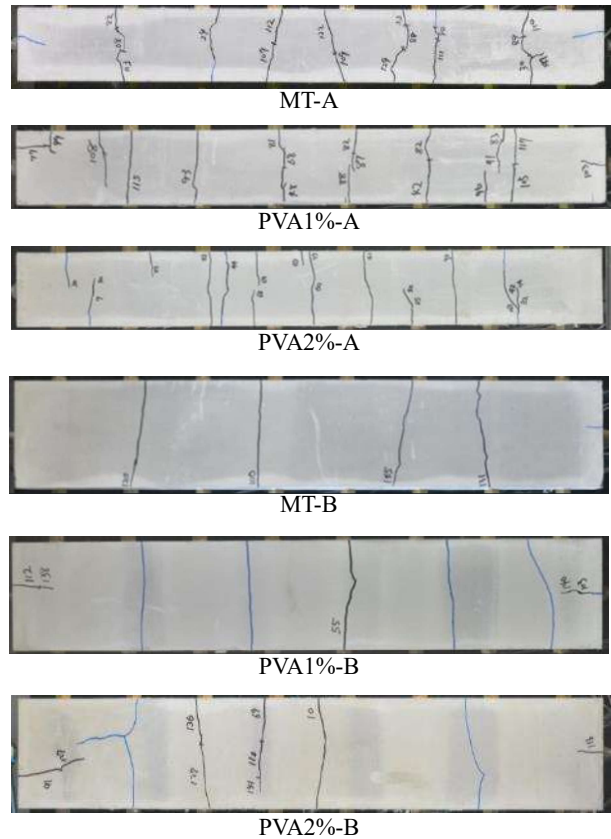


図-5 ひび割れ状況（鉄筋降伏時）

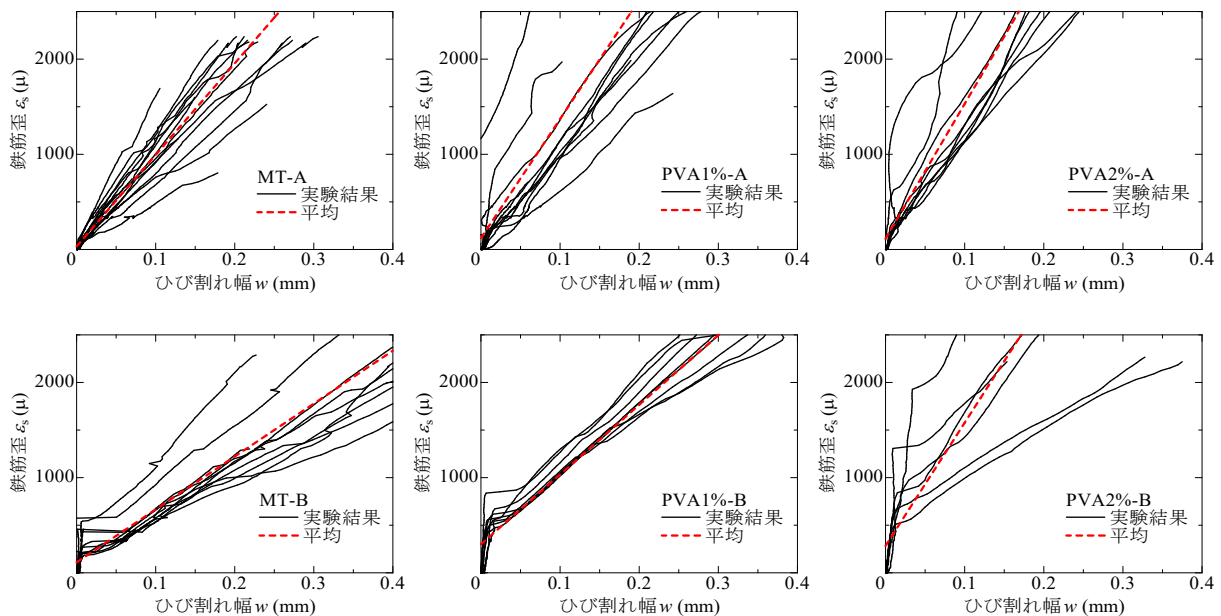


図-6 鉄筋歪 $\epsilon_s$ -ひび割れ幅関係

#### 4. 両引き付着解析

##### 4.1 解析概要

既往の研究で提案された、ひび割れ箇所における繊維の架橋効果を考慮した付着解析手法<sup>3)</sup>を用いて両引き付着解析を行い、荷重-全体変形関係を導出する。さらにその過程で鉄筋歪-ひび割れ幅関係を導出して実験結果と比較し、断面積および繊維体積混入率がひび割れ幅に及ぼす影響を検討する。解析は、鉄筋の降伏以前でひび割れ幅が0.4mm(すべり量0.2mmに対応)以下の場合を対象とした。

##### 4.2 付着解析手法<sup>3)</sup>の概要

解析における内力の釣り合いを図-7に示す。図中のひび割れ間隔 $l_b$ の区間を解析対象とする。対象区間 $l_b$ の中央部における鉄筋の引張力 $P_{s0}$ (任意)および中央部における境界条件としてすべり量 $S_0=0$ を与える。付着応力-すべり量関係を用いて、中央部から右端まで微小区間の力の釣り合いを繰り返し計算することで、右端における鉄筋の引張力 $P_{sn}$ およびすべり量 $S_n$ を得る。すべり量を2倍して得られるひび割れ幅を用いて、架橋則によりひび割れ箇所における架橋力 $P_{brg}$ を得る。部材軸方向の力の釣り合いから、区間中央部におけるDFRCCの引張力 $P_{c0}$ が次式で求められる。

$$P_{c0} = P_{sn} + P_{brg} - P_{s0} \quad (1)$$

$P_{s0}$ を順次与えていき、(1)式を満たすように収束計算を行う。 $P_{c0}$ がDFRCCのひび割れ強度 $P_{cr}$ に達した時点で、区間中央部において解析上新たなひび割れが発生するとして、区間 $l_b$ における解析を終了する。

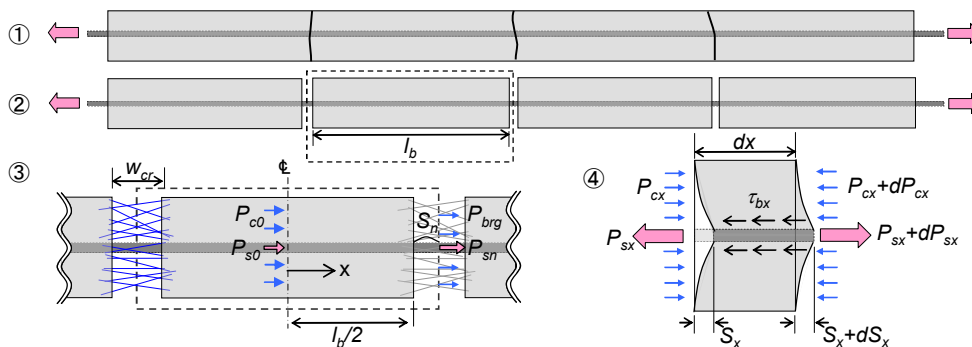


図-7 解析対象および内力の釣り合い<sup>3)</sup>

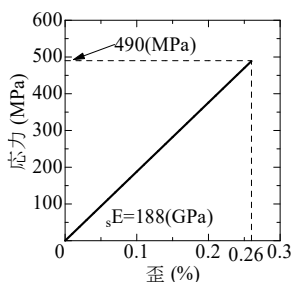


図-8 鉄筋の応力-歪関係モデル

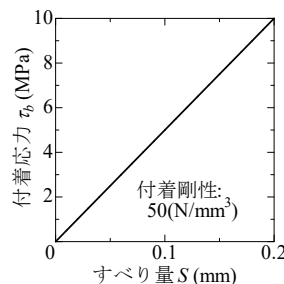


図-9 付着応力-すべり量関係モデル

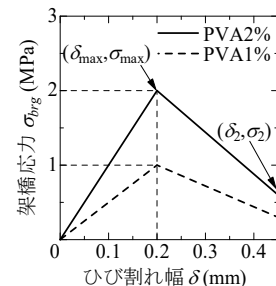


図-10 架橋則モデル

##### 4.3 構成則モデル

付着解析に用いる構成則は、鉄筋の応力-歪関係、鉄筋とDFRCCの付着応力-すべり量関係および繊維の架橋則である。加えて、荷重-全体変形関係を導出する際に、DFRCCのひび割れ強度を用いる。

本解析では、鉄筋の応力-歪関係は鉄筋の引張試験結果を用い、付着応力-すべり量関係および架橋則は既往の研究からモデル化を行った。DFRCCのひび割れ強度については材料試験等から直接得ることは難しいため、実験結果をもとに算出した値を使用した。

##### 4.3.1 鉄筋の応力-歪関係

解析に使用した、鉄筋の応力-歪関係モデルを図-8に示す。鉄筋の引張試験で得られた弾性係数を用いて、降伏強度490MPaまでの弾性モデルとした。

##### 4.3.2 付着応力-すべり量関係

本実験と同程度の圧縮強度を有する、PVA繊維を用いたEngineering Cementitious Composites (ECC)の鉄筋引抜試験の結果<sup>4)</sup>を利用する。鉄筋D16、かぶり厚さ32mmの試験体の付着応力-荷重端すべり量関係を参考にし、本解析では同関係におけるすべり量がごく小さい範囲しか用いないため、図-9に示す弾性モデルとした。

##### 4.3.3 架橋則(架橋応力-ひび割れ幅関係)

解析に使用した、架橋則モデルを図-10に示す。既往の研究<sup>5)</sup>では、PVA2%のDFRCCにおいて架橋則のトリリニアモデルが提案されており、第1折れ点 $(\delta_{max}, \sigma_{max})$ および第2折れ点 $(\delta_2, \sigma_2)$ が、配向強度 $k$ の関数として以下の式で与えられている。



$$\delta_{max} = 0.20k^{0.18} \quad (2)$$

$$\sigma_{max} = 2.0k^{0.30} \quad (3)$$

$$\delta_2 = 0.45 \quad (4)$$

$$\sigma_2 = 0.60k^{0.73} \quad (5)$$

本解析では、100mm×100mm 断面を有する既往の研究<sup>9)</sup>の試験体と同一の配向強度  $k=1$  (ランダム配向) とし、第2折れ点までのモデルとした。PVA1%のDFRCCについては、 $\sigma_{max}$  および  $\delta_2$  をそれぞれ PVA2%の1/2とした。なお、モルタル試験体 (MT シリーズ) の解析では架橋則は用いない。

#### 4.3.4 ひび割れ強度

図-6に示した150×150mm断面試験体の鉄筋歪一ひび割れ幅関係において、鉄筋歪が増大すると明確にグラフの勾配が変化し、その時点からひび割れが拡幅を始めていることが確認できる。本研究では、この時点でひび割れが発生したとみなし、ひび割れ強度の算出を行った。ひび割れ幅がおよそ0.02mmを境に拡幅が始まっているので、各測定区間の結果について、ひび割れ幅が0.02mmを超えた時の引張荷重を試験体の断面積150×150mmで除し、ひび割れ強度とした。さらにそれらの値を平均し、ひび割れ強度  $\sigma_{cr}=1.0\text{N/mm}^2$  を得た。なお、この値は圧縮強度から想定される一般的な値に対して小さく、DFRCCの収縮による初期応力の影響があるものと考えられる。

### 4.4 解析結果および実験結果との比較

#### 4.4.1 荷重-全体変形関係

試験体長さ800mmを初期解析区間  $l_{b0}$  とし、解析上DFRCCにひび割れが発生した時点でひび割れ間隔  $l_b$  を  $l_b/2$  として、再度付着解析を行う。その後、順次新たなひび割れが発生した時点でひび割れ間隔を1/2にし、繰り返し解析を行う。解析から得られた荷重-全体変形関係を図-11に示す。同図中には、実験結果および鉄筋単体の荷重-全体変形関係を、それぞれ破線および一点鎖線で示した。

いずれの試験体においても、解析結果は実験結果と良く対応している。断面寸法および繊維体積混入率が大きな試験体ほどテンションステイニング効果が增大するという傾向が、解析においても確認された。

#### 4.4.2 ひび割れ幅

ひび割れ幅は、対象区間(ひび割れ間)の変形(すべり量の2倍に等しい)で与えられる。荷重は鉄筋の歪に換算し、鉄筋歪一ひび割れ幅関係を得る。また、区間分割数からひび割れ本数を求めることができる。例えば、解析区間が全長の1/4の200mmであれば、分割数は4で、ひび割れ本数は3本となる。区間分割数は2, 4, 8, 16と増加していくので、ひび割れ本数は1本, 3本, 7本, 15本と順に増加していく。

解析により得られた鉄筋歪一ひび割れ幅関係を図-

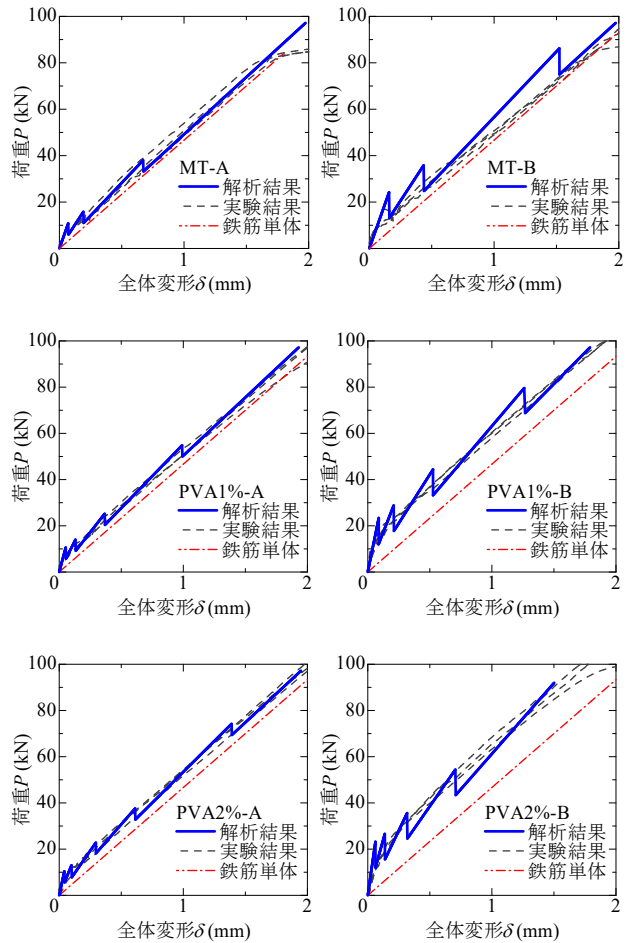


図-11 荷重-全体変形関係

12に示す。解析結果の実線は、鉄筋歪が小さいものから順に、ひび割れ本数が1本, 3本, 7本, 15本における値に対応している。同図中には、実験結果およびその平均を破線および一点鎖線で示した。

解析結果を比較すると、断面寸法が大きな試験体ほどひび割れが拡幅しやすく、繊維体積混入率が大きな試験体ほどひび割れが拡幅しにくい傾向にあることが確認できる。この傾向は実験結果と対応している。

モルタル試験体であるMT-A試験体ではひび割れ本数7本における解析結果が、MT-B試験体ではひび割れ本数3本における解析結果がそれぞれ実験結果の平均に近い値を示している。

PVAの試験体では、鉄筋歪がおよそ1000μまでの範囲において、おおむね解析結果と実験結果が対応している。なお、PVA1%-Bの試験体では、実験において3本ないし4本のひび割れがほぼ同時期に発生して拡幅を始めたため、ひび割れ3本の解析結果が実験結果の平均線と対応している。また、PVA2%-Bの試験体では、鉄筋歪1000μ以下の範囲でも実験結果のばらつきが大きいため、実験結果の平均線は参考程度にとどめるが、各区間の実験結果(破線)と解析結果はおおむね対応している。

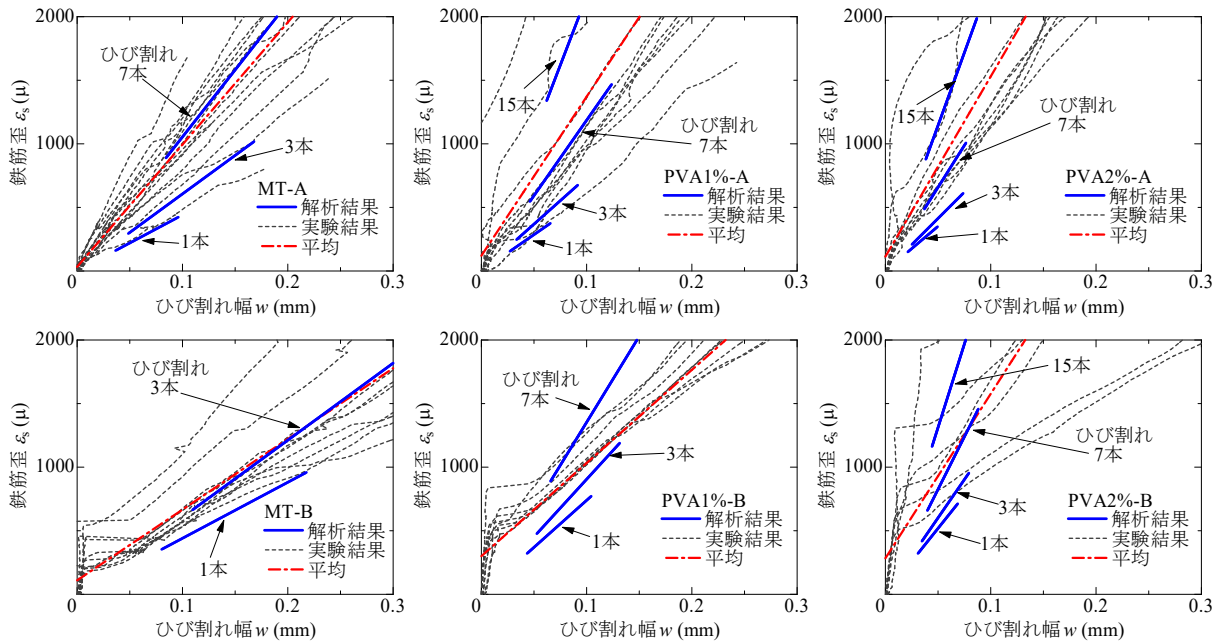


図-12 鉄筋歪-ひび割れ幅関係

PVA 試験体の鉄筋歪 1000 $\mu$  以降の範囲では、ひび割れ幅を過少評価している傾向が見られ、平均線を上回っていることが確認できる。解析では各ひび割れが均等に拡幅すると仮定しているが、実験では必ずしも試験体全体に渡ってひび割れが等間隔に生ずるわけではないことによるものと思われる。

## 5. まとめ

DFRCC におけるひび割れ幅評価を行うために、鉄筋を断面に 1 本配した試験体の両引き試験を行った。断面寸法および繊維体積混入率を変動因子とし、ひび割れ幅に及ぼす影響を検討した。さらに、繊維の架橋効果を考慮した両引き付着解析を行い、鉄筋歪-ひび割れ幅関係を導いた。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 断面寸法および繊維体積混入率が大きな試験体ほど、テンションスティフニング効果が増大する。
- (2) 断面寸法が大きな試験体ほどひび割れは拡幅しやすく、繊維体積混入率が大きな試験体ほどひび割れは拡幅しにくい。
- (3) 両引き付着解析より得られた鉄筋歪-ひび割れ幅関係は、おおむね実験結果と対応した。

なお、各変動因子がテンションスティフニング効果および鉄筋歪-ひび割れ幅関係に及ぼす影響の定量的な評価は、今後検討を行っていく予定である。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(A)18H03802 によって

いる。

## 参考文献

- 1) 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方法研究委員会報告書，2012.9
- 2) Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K., Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Material Journal, American Concrete Institute, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016.3
- 3) 鬼塚由佳，金久保利之：ECC のテンションスティフニング効果に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 653 号，pp.1327-1333，2010.7
- 4) Asano, K., Kanakubo, T., Study on Size Effect in Bond Splitting Behavior of ECC, Bond in Concrete 2012, Volume 2. Bond in New Materials and under Severe Conditions, pp.855-859, 2012.6
- 5) 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, Volume12, Number 9, pp.651-661, 2018.9
- 6) 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