

論文 DFRCC 部材のせん断ひび割れ幅の評価

須永 大揮*1・金久保 利之*2・並木 啓恭*3

要旨: 本研究では、DFRCC 部材におけるせん断ひび割れ幅の評価を目的として、DFRCC 梁部材の曲げせん断実験を行い、既往の研究で報告された試験体とともに、肋筋径および繊維混入率がせん断ひび割れ性状に及ぼす影響を検討した。実験の結果、肋筋歪の増加に伴ってひび割れ幅もおおむね増加し、いずれの肋筋径においても、繊維混入に伴ってひび割れ幅は同程度小さくなった。付着解析に基づくひび割れ幅評価手法を適用し、肋筋歪-ひび割れ幅関係を導出した。せん断ひび割れの発生状況にもよるが、おおむね実験結果と対応した解析結果が得られた。

キーワード: DFRCC, 曲げせん断実験, 付着解析, ひび割れ幅

1. はじめに

繊維がひび割れを架橋することで高い引張性能を示す高靱性繊維補強セメント複合材料 (Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite : DFRCC) を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いる^{例えば1)}。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。

これまで DFRCC の材料レベルでは、架橋則と呼ばれる引張応力-ひび割れ幅関係が提案されており²⁾、ひび割れ幅に基づく引張性能評価が行われている。また、既往の研究³⁾では、DFRCC を用いた梁部材の曲げせん断実験が行われ、実験で得られたひび割れ性状を基に架橋則を用いたせん断耐力の評価が行われている。そこでは、最大荷重時や架橋応力最大時のひび割れ幅が検討されているが、最大に至るまでのひび割れ幅は検討されていない。また、肋筋量が実験因子ではなく、肋筋の負担する力と繊維のひび割れ架橋性能の相互作用に関しては未知の部分が多い。

DFRCC の特長を活かした部材設計を行うためには、ひび割れ幅の精確な評価が求められる。著者らはこれまでに、鉄筋補強された DFRCC 部材を対象とした、付着解析に基づくひび割れ幅評価手法⁴⁾を提案した。本手法を構造部材にも適用することができれば、DFRCC の構造

部材への利用の一助になると考えられる。

本研究では、DFRCC を用いた梁部材におけるせん断ひび割れ幅の評価を行うことを目的とする。既往の研究³⁾と同様の梁試験体を対象に、肋筋径を因子として曲げせん断試験を実施し、肋筋径および繊維混入率がせん断ひび割れ性状に及ぼす影響を実験的に把握するとともに、付着解析手法を用いてひび割れ幅の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状および配筋を図-1 に、試験体一覧を表-1 に示す。肋筋に D4 を用いた D4 シリーズは既往の研究³⁾で実験が行われた試験体、肋筋に D6 を用いた D6 シリーズが本研究で実験を行った試験体である。試験体は、断面が 160×220mm の矩形断面で、せん断スパン比は 1.5 である。せん断破壊先行型とするため主筋には SD490 を用い、肋筋には SD295 の異形鉄筋を 120mm 間隔で配置

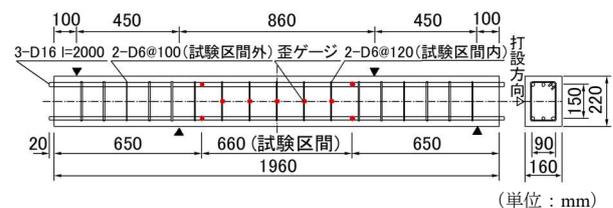


図-1 試験体形状および配筋 (D6 シリーズ)

表-1 試験体一覧

試験体名	共通事項	肋筋	繊維体積混入率
MT-D4 (No.1 ³⁾)	断面 : 160×220mm せん断スパン比 : 1.5 主筋 : 3-D16(SD490) $p_f=2.01\%$	2-D4 ($p_w=0.15\%$)	—
F1-D4 (No.2 ³⁾)			1.0%
F2-D4 (No.3 ³⁾)			2.0%
MT-D6	肋筋 : 120mm ピッチ(SD295) 繊維 : PVA	2-D6 ($p_w=0.33\%$)	—
F1-D6			1.0%
F2-D6			2.0%



図-2 繊維形状

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (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

した。実験因子は筋径および繊維体積混入率とした。筋径は D4 および D6 の 2 種類で、それぞれ筋比は 0.15% および 0.33% となる。DFRCC には既往の研究³⁾と同一の PVA 繊維を用い、混入率を 1%, 2% および 0% (モルタルのみ) の 3 種類とした。

2.2 使用材料

DFRCC に用いた PVA 繊維の形状を図-2 に、物性値を表-2 に示す。DFRCC の調合計画を表-3 に、材料特性(試験体加力材齢時)を表-4 に示す。試験体の打設は、型枠を勾配約 1/33 で傾斜させ、型枠の端から連続的に流し込むことにより行った。

2.3 加力方法

加力には 2MN ユニバーサル試験機を用い、試験機に加力梁を取り付け、変位制御により大野式逆対称曲げせん断加力(単調載荷, 載荷速度 1mm/min)を行った。加力方法を図-3 に、加力時の様子を図-4 に示す。試験区間に逆対称曲げモーメントを作用させるため、図-3 に示すように、試験体の試験区間外を 2 枚ずつ計 4 枚の鋼板により挟み込み、長ネジを通してボルトを締めこみ固定することで、試験区間外の変形および破壊を抑制するように配慮した。

2.4 計測方法

計測項目は、荷重値、全体変形、局部変形、主筋および筋の歪である。変位計の設置位置を図-5 に示す。全体変形は、試験体側面に試験体全長に渡って通した変位計ホルダーを支点位置で固定し、加力点位置に変位計を取り付け、変位計計測値から試験体中心の相対たわみを算出して求めた。局部変形は、図のように取り付けた変位計およびπ型変位計で計測した変形量をもとに、3 区間を対象として曲げ変形、軸方向変形およびせん断変形を算出した。歪ゲージは、試験体 1 体につき、主筋は 4 点、筋は 5 点貼付した(図-1)。

せん断ひび割れ性状を評価するため、図-6 に示す試験体のひび割れ観測面にてせん断ひび割れが発生すると予想される 2 箇所を、2 台の定点カメラにより撮影した。撮影範囲には、予め 10×10mm のメッシュを描き、1pixel が 0.02mm に相当する 120×80mm の範囲を撮影した。データの計測間隔を考慮し、それぞれのメッシュに対して撮影間隔は 10 秒毎とした。

これらの加力計測方法は、既往の研究³⁾と同一である。

3. 実験結果

3.1 破壊状況およびせん断力-変位関係

各試験体の最終破壊状況を図-7 に示す。最終破壊状況は、加力後にひび割れ観察面を撮影した写真(図-5 の裏側面)であり、写真画像の範囲は試験区間である。MT 試験体では、せん断ひび割れが局所化してかぶりの剥落

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

試験体種別	単位量(kg/m ³)				繊維* (kg)
	W	C	S	FA	
MT	380	678	484	291	-
F1					13
F2					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

*繊維量は外割で計算

表-4 DFRCC の材料特性

試験体種別	圧縮強度(MPa)		弾性係数(GPa)	
	D4 シリ ーズ ³⁾	D6 シリ ーズ	D4 シリ ーズ ³⁾	D6 シリ ーズ
MT	47.2	43.0	16.3	15.8
F1	45.3	47.3	16.8	16.3
F2	53.1	48.3	15.7	16.6

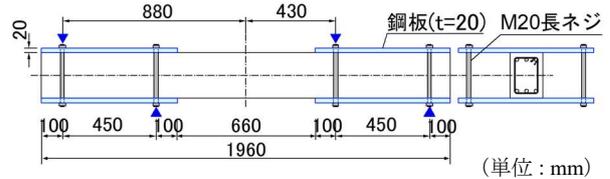


図-3 加力方法



図-4 加力状況

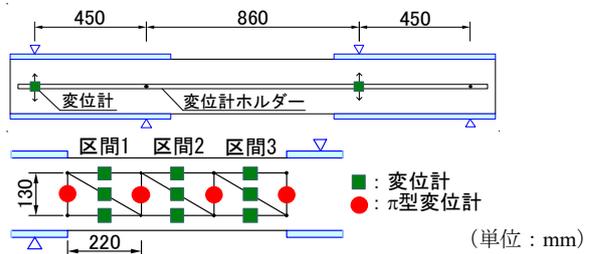


図-5 変位計位置(上: 全体変形, 下: 局部変形)

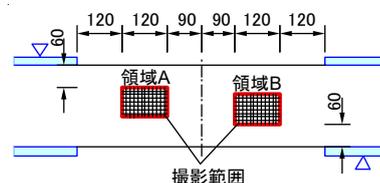


図-6 ひび割れ撮影箇所

が起こり、脆性的に破壊している。一方、繊維混入試験体ではひび割れが分散して発生し、かぶりの剥落は見られない。F1-D4 および F2-D4 では局所化したひび割れが確認できるが、F1-D6 および F2-D6 では多数のひび割れが発生することで局所的な破壊が抑制されており、肋筋径による破壊状況の違いが確認された。

実験により得られたせん断力-部材角関係を図-8 に、実験結果一覧を表-5 に示す。いずれの試験体も、肋筋が降伏した後、最大荷重を迎えた。D4, D6 シリーズいずれの試験体においても、MT と比べて、F1 および F2 の方が肋筋降伏時の荷重が大きい。これは、肋筋のみならず、ひび割れを架橋している繊維がせん断力を負担したことによると考えられる。

D4 シリーズにおいて最大荷重に着目すると、MT に比べ F2 では耐力が大幅に上昇したものの、F1 ではモルタル試験体とほぼ同等の耐力となった。図-8 より、F1-D4 の肋筋降伏時付近までの領域においては F1-D4 および F2-D4 の勾配に差異は見られず、任意の部材角に対して F1-D4 および F2-D4 の荷重は MT-D4 のそれを上回っているのに対し、部材角 0.01rad 以降は F1-D4 の勾配が緩やかになり最大荷重を迎えている。すなわち、F1-D4 では肋筋降伏時付近までの領域において、繊維の架橋効果がピークに達していることが推測される。一方、F2 では、肋筋降伏後も繊維の架橋効果が持続し、最大荷重が他試験体に比べ大幅に増大したと考えられる。

D6 シリーズ試験体では、MT に対して F1, F2 と順に最大荷重が大きくなっており、繊維混入率の増加に伴う繊維のひび割れ架橋効果向上が耐力の上昇に明確に影響している。また、D4 シリーズで見られたような肋筋降伏後のグラフ勾配の減少は見られない。肋筋径が大きい D6 シリーズでは、ひび割れ箇所における肋筋の負担力が D4 シリーズと比べて大きくなるため、繊維負担力が小さくて済む。そのため、繊維混入率 1% の F1 でも肋筋降伏後すぐには架橋効果のピークを迎えず、耐力上昇につながったと考えられる。

このように、繊維のひび割れ架橋効果には、鉄筋との相互作用も大きく影響することが確認された。

3.2 ひび割れ幅評価

実験において発生したせん断ひび割れのひび割れ幅の算出方法を図-9 に示す。既往の研究⁵⁾を参考に、図-6 において示した梁側面のメッシュが描かれた範囲を撮影した画像から、メッシュとひび割れの交点間の y 座標(材軸直行方向)の差分をひび割れ幅として算出した。

D6 シリーズ試験体の肋筋降伏時におけるひび割れ状況を図-10 に示す。試験体ごとに 2 箇所ある撮影範囲のうち、最初に降伏した肋筋が位置する領域の画像を示した。各試験体で、最も拡幅しているひび割れを画像の上

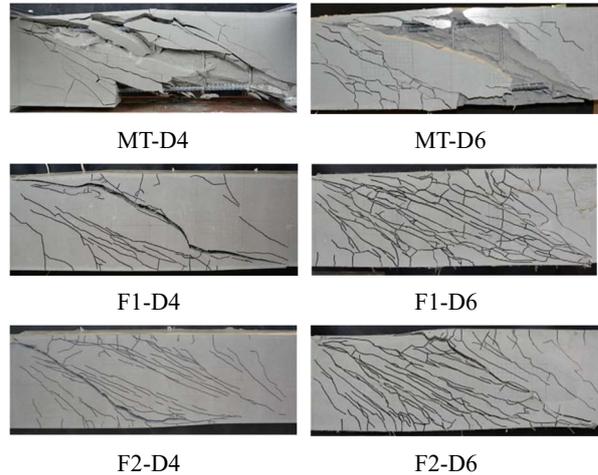


図-7 最終破壊状況

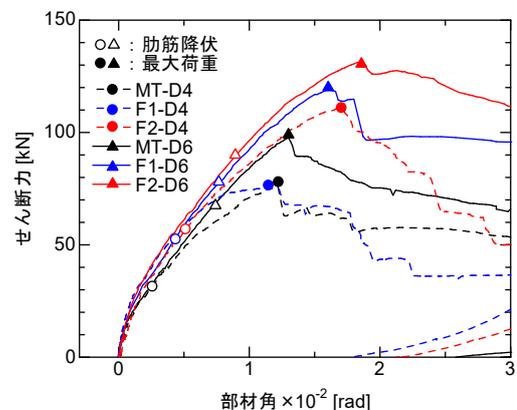


図-8 せん断力-部材角関係

表-5 実験結果一覧

試験体名	肋筋降伏時		最大荷重時	
	せん断力 (kN)	部材角 (rad)	せん断力 (kN)	部材角 (rad)
MT-D4	30.7	0.0032	76.1	0.012
F1-D4	54.8	0.0044	75.1	0.011
F2-D4	57.4	0.0052	110.9	0.017
MT-D6	69.0	0.0075	97.7	0.013
F1-D6	77.5	0.0077	119.3	0.016
F2-D6	90.7	0.0091	131.2	0.018

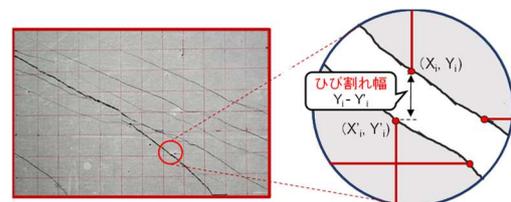


図-9 ひび割れ幅の算出方法

からトレースしている。このひび割れを対象に、領域内での最大ひび割れ幅を計測した。また同図中には、肋筋位置および歪ゲージ位置をそれぞれ示した。図中の歪ゲージで計測された肋筋歪と、画像から算出した最大ひび割れ幅の関係を、図-11 に示す。D4 シリーズについて

— : 最も拡幅したひび割れ(ひび割れ幅計測に使用), - - - : 肋筋位置, ● : 歪ゲージ位置

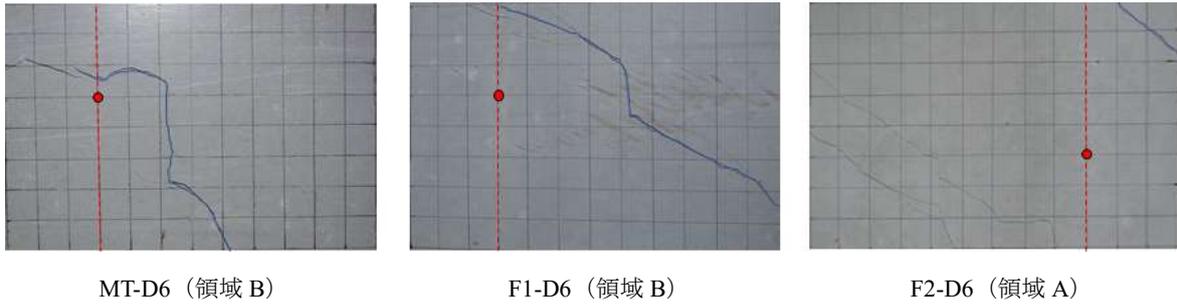


図-10 肋筋降伏時におけるひび割れ状況 (D6 シリーズ)

も同様の方法で関係を導出している。ただし、MT-D4 および F2-D4 では、最初に降伏した肋筋の位置に対応するひび割れ幅のデータを画像から得ることができなかったため、もう一方の撮影範囲に位置する肋筋の歪と、その画像から得られたひび割れ幅の関係を示した。

図-11 より、MT-D4 では肋筋降伏の直前にひび割れ幅が減少しているが、それ以外の試験体では肋筋歪の増加に伴ってひび割れ幅もおおむね増加している。MT-D4 の試験体では、肋筋降伏直前に新たなひび割れが発生したため、ひび割れ幅が減少したと考えられる。

試験体のシリーズごとに同一肋筋歪におけるひび割れ幅を比較すると、繊維混入率が増加するに伴い、ひび割れ幅が小さくなっており、繊維架橋によりひび割れ幅が抑制されていることが確認できる。特に繊維混入率2%のF2ではMTと比べてひび割れ幅が半分以下に小さくなっており、ひび割れ幅低減効果が顕著にあらわれている。

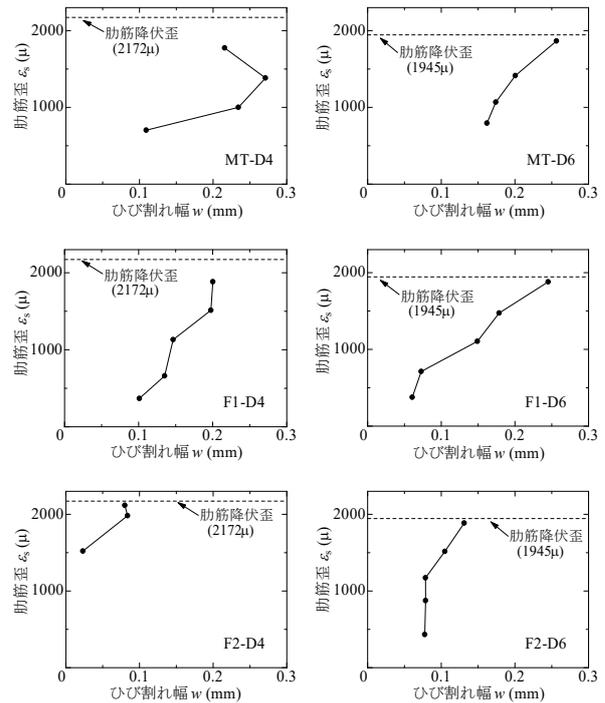


図-11 肋筋歪-ひび割れ幅関係

4. 付着解析によるひび割れ幅評価

文献⁴⁾において、著者らは、繊維のひび割れ架橋を考慮した付着解析⁹⁾を用いたひび割れ幅評価手法を提案した。本研究では、同手法を用いて鉄筋歪-ひび割れ幅関係を導出して実験結果と比較する。

4.1 付着解析を用いたひび割れ幅評価手法の概要

解析における内力の釣合いを図-12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、後述する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、式(1)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。

試験体長さを初期解析区間 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。すなわち、本解析では、ひび割れが等間隔に発生し、すべて均等に拡幅すると仮定している。

各ひび割れ間隔で、ひび割れ位置における鉄筋歪(鉄筋引張荷重 P_{sn} を歪に換算)とひび割れ幅(すべり量の2倍)の関係を導出する。

4.2 解析対象のモデル化

本解析における試験体のモデル化を図-13に示す。梁試験体の肋筋およびその肋筋が応力を負担するDFRCC

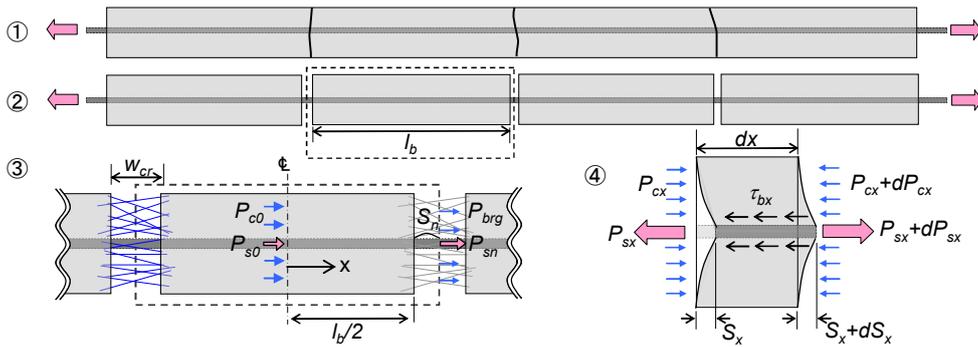


図-12 解析対象および内力の釣り合い⁶⁾

部分を、両引き試験体における鉄筋およびかぶりコンクリートに置き換えた。解析対象となる両引き試験体の形状を図-14に示す。試験体の断面寸法は筋間隔120mm×梁幅の半分80mmとし、試験体長さは梁せい220mmとした。両引き加力により試験体中央にひび割れが入った場合を想定し、中央ひび割れ位置における鉄筋歪とひび割れ幅の関係を付着解析により導出する。解析は鉄筋降伏までの範囲を対象とした。

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間の付着応力-すべり量関係、DFRCCにおける繊維の架橋則およびひび割れ発生強度である。

4.3.1 鉄筋の応力-歪関係

鉄筋の応力-歪関係は、鉄筋引張試験で得られた弾性係数を用いて、降伏強度までの弾性モデルとした。使用した鉄筋の物性値を表-6に示す。

4.3.2 付着応力-すべり量関係

DFRCCと異形鉄筋の局所付着性状を扱った研究は多くない。文献⁷⁾では、付着長を鉄筋径の4倍とした試験体の引抜付着試験が行われている。DFRCCの一種であるEngineering Cementitious Composites (ECC)の試験体(文献中の試験体名はR21)の結果によると、局所最大付着応力は、Tepfersの付着強度式を元に鉄筋周辺のECCの応力状態を“elastic plastic stage”と仮定することで、内部ひび割れ幅とかぶり厚に鉄筋径の1/2を加えた値の関係から式(2)、および式(3)によって求められる。

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

$$r_i = 0.120r_u + 0.911d_b \quad (3)$$

ここで、

σ_t : ECCの初期ひび割れ強度

d_b : 鉄筋径

r_p : 塑性化した領域の内径 (= $d_b/2$)

α : 付着応力と割裂応力のなす角度 (= $\cot\alpha = 1.46$)

式(2)、(3)より、D4およびD6における局所最大付着応力は、13.1MPaおよび9.2MPaと求められる。また、最大付

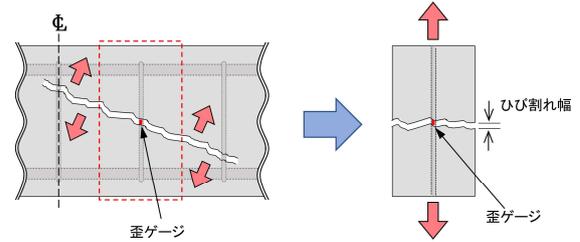


図-13 付着解析のモデル化

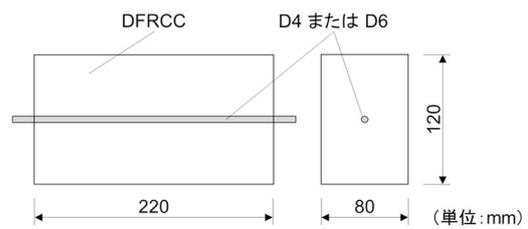


図-14 解析対象の試験体形状

表-6 鉄筋物性値 (引張試験結果)

鉄筋種別	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	降伏歪 (μ)
D4 (SD295)	180	391	2172
D6 (SD295)	202	393	1945

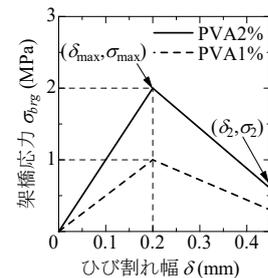


図-15 架橋則モデル

着応力時のすべり量は、かぶり厚に依らず0.765mmとされている。本解析における付着応力-すべり量関係は、上記の値で定まる最大付着応力までの弾性モデルとした。

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-15に示す。既往の研究⁸⁾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 (δ_2, σ_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。

$$\delta_{max} = 0.20k^{0.18} \quad (4)$$

$$\sigma_{max} = 2.0k^{0.30} \quad (5)$$

$$\delta_2 = 0.45 \quad (6)$$

$$\sigma_2 = 0.60k^{0.73} \quad (7)$$

本解析では、配向強度を $k=1$ (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では、 σ_{max} および δ_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

DFRCC のひび割れ発生強度は材料試験等から直接得ることが難しい。著者らの既往の研究⁴⁾では、両引き試験の結果をもとにひび割れ発生強度 $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ を算出して付着解析を行っており、本解析でも同じ値を用いた。

4.4 解析結果および実験結果との比較

付着解析および実験により得られた鉄筋歪-ひび割れ幅関係の比較を図-16に示す。MTの2つの試験体では、解析結果と比べて実験結果の方が同一鉄筋歪におけるひび割れ幅が大きくなっている。実験結果において、MT-D4では鉄筋から離れた位置にひび割れが発生したため、MT-D6では鉄筋と平行方向にひび割れが入ったため (図-10参照)、解析において仮定している条件とは異なり、結果に差異が生じたと考えられる。一方、繊維を混入したF1およびF2の試験体では、解析結果はおおよそ実験結果に追従する結果となっている。付着解析によりひび割れ幅をおおむね評価できることが確認された。

5. まとめ

DFRCC 部材におけるせん断ひび割れ幅の評価を目的として、DFRCC 梁部材の曲げせん断実験を行い、鉄筋径および繊維混入率がせん断ひび割れ性状に及ぼす影響を検討した。また、付着解析に基づくひび割れ幅評価手法を梁部材に適用し、鉄筋歪-ひび割れ幅関係を導出した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 繊維混入率の違いにかかわらず、鉄筋降伏以前においては、鉄筋歪の増加に伴ってひび割れ幅も増大した。
- (2) 本研究で検討した範囲では、いずれの鉄筋径においても、繊維混入率の増加に伴ってひび割れ幅は同程度小さくなった。
- (3) 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。ただし、せん断ひび割れの発生状況によっては、十分に評価できない可能性がある。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(A)18H03802 による。

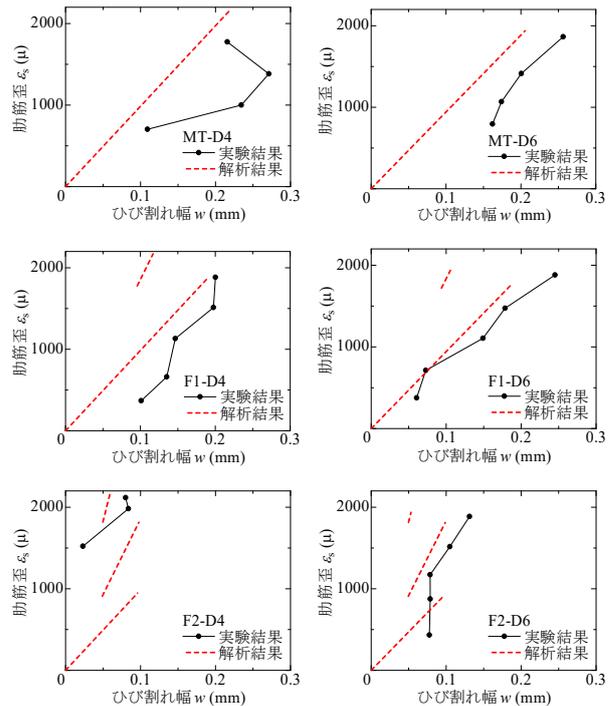


図-16 鉄筋歪-ひび割れ幅関係の比較

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) 浅野浩平：高靱性繊維補強セメント複合材料における繊維配向性と架橋則に関する研究，筑波大学大学院博士論文，2014.3
- 3) 大圖友梨子，金久保利之：架橋則に基づくDFRCC部材のせん断架橋性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1195~1200，2018
- 4) 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
- 5) 佐野直哉，八十島章，山田大，金久保利之：接合部にDFRCCを用いたPCa柱梁接合部の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1105~1110，2015.7
- 6) 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
- 7) 古田昌弘，金久保利之：高靱性繊維補強セメント複合材料の局所付着割裂性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演便外集梗概集 (北陸)，C-II 構造IV，pp.43~44，2002.8
- 8) 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, November 9, pp.651-661, 2018