

## 論文 架橋則に基づく DFRCC のせん断架橋性能に関する検討

大圖 友梨子\*1・山田 大\*2・八十島 章\*3・金久保 利之\*4

**要旨：** PVA 繊維を用いた DFRCC を対象として、ひび割れ面における繊維の引張架橋性能に基づき、引張力とせん断力が同時に作用する際の繊維のせん断架橋性能の評価を試みた。既往の研究で構築された架橋則の計算方法に、引張主応力直交方向と角度を有するひび割れ面を想定し、繊維引抜角度に影響されるスナビング効果と強度低減効果にその角度を導入することで、せん断方向にも引抜力を受けるときの架橋則を計算した。二軸応力状態を模擬した斜めの切欠きを有する試験体の引張試験結果との比較では、引張応力ーひび割れ変位関係における最大応力以降の曲線の形状と、角度の増加に伴う最大応力の低下の度合いを表現できた。

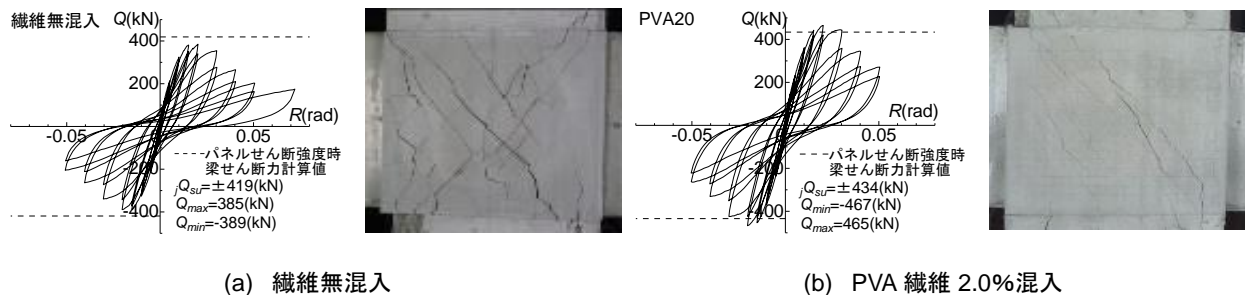
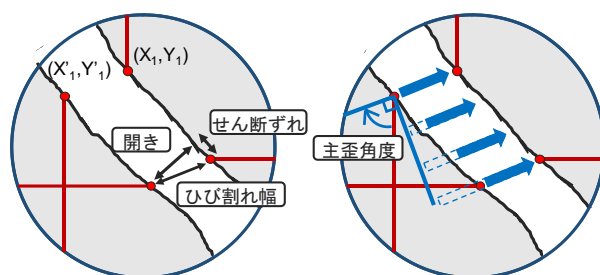
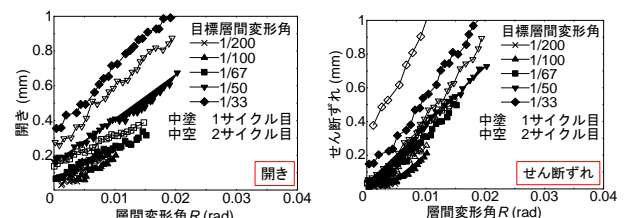
**キーワード：** DFRCC, 架橋則, 引張試験, せん断性状, ひび割れ角度

## 1. はじめに

近年、建築物の高層化や長寿命化といった社会の需要から、構造部材に対する性能要求も高まっている。モルタル等のセメント系材料に長さ 10mm 程度の短繊維を体積混入率で数%混入した高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC：Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites）は、ひび割れ発生後の繊維の架橋効果により部材の耐力および変形能を向上させるため、実部材への利用を念頭に置いた研究開発が急がれる。

既往の研究<sup>1,2)</sup>では、プレキャスト工法の特長を活かし、パネルゾーンだけに PVA 繊維を体積混入率で 2.0% 混入した DFRCC を用いた十字型柱梁接合部の接合部せ

ん断強度の評価を目的とした加力実験（正負交番漸増繰返し加力）が行われている。実験結果の梁せん断力ー層間変形角関係（ $Q-R$  関係）および最大耐力に達した層間変形角  $R=1/50$  rad 時の破壊性状を図-1 に示す。この試験体では、繊維無混入の試験体に比べ最大耐力が大幅に増大したほか、ひび割れが分散しひび割れ幅の拡大が抑制されたことから、繊維がひび割れを架橋して有効に働いたことによりパネルゾーンの損傷が低減することが確認された。しかしながら、せん断ひび割れ面における繊維の応力伝達機構は明らかでない。文献<sup>2)</sup>では、パネルゾーンに生じるせん断ひび割れ面を引張応力とせん断応力が同時に作用する二軸応力状態とみなし、ひび割れ

図-1  $Q-R$  関係および破壊性状<sup>1),2)</sup>図-2 ひび割れ性状の評価方法<sup>2)</sup>図-3 開きおよびせん断ずれと層間変形角の関係<sup>2)</sup>

\*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 大学院生 (学生会員)

\*2 株式会社 鴻池組 (元筑波大学大学院)

\*3 筑波大学 システム情報系准教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

に対し直交する方向の変位を「開き」、ひび割れに沿う方向の変位を「せん断ずれ」として（図-2），加力時に一定の時間間隔で撮影した写真から画像解析によりそれらを算出している。加力の各サイクルにおいて目標層間変形角に達するまでの，算出された開きおよびせん断ずれの推移を図-3に示す。図-3より，変形の進行に伴い，開きおよびせん断ずれの両者とも増加傾向を示している。

通常の鉄筋コンクリート部材では，ひび割れ面におけるせん断応力は，粗骨材の噛合いや鉄筋のダボ効果によって伝達されると考えられるが，DFRCC ではひび割れ面を跨ぐ繊維の架橋力により伝達されると考えられる。すなわち，ひび割れ面に対して直交方向に作用する応力と開きの関係，およびひび割れ面に沿う方向の応力とせん断ずれの関係を明確にすることが，せん断ひび割れ面における繊維の架橋性能の把握につながると考えられる。

一方，既往の研究<sup>3)</sup>では，DFRCCの引張性状を特徴付ける，架橋則と呼ばれる引張応力-ひび割れ幅関係を構築している。架橋則は，マトリックスに埋め込まれた単繊維の引抜実験から得られた単繊維引挙動を，ひび割れ面に存在する全繊維に適用して足し合わせることで算出されている。架橋則は，DFRCCの引張試験結果と良好な対応関係を示すことが報告されている<sup>4)</sup>。

本研究では，径 0.1mm の PVA 繊維を体積混入率で 2.0%用いた DFRCC を対象として，せん断ひび割れ面における繊維の挙動を考慮した架橋則を構築するとともに，ひび割れ面に引張応力とせん断応力が同時に作用するような新たな試験方法を提案する。具体的には，図-4に示すように，角柱試験体に斜めの切欠きを設けて引張試験を行うことで斜めひび割れを発生させ，ひび割れ面に対する二軸応力状態を模擬する。図-4中の左図は，引張力とせん断力が同時に作用した際のひび割れ面の様子を模擬した図である。この試験体を回転させると，図-4中の左図は，図-4中の右図のように，試験体に斜めの切欠きを設けた試験体の引張試験を行うことで模擬することが可能であると推測される。架橋則の計算結果と実験結果を比較し，架橋則による評価方法を検証する。

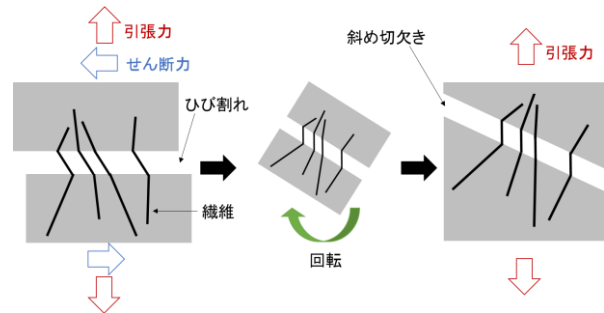


図-4 二軸応力状態の模擬

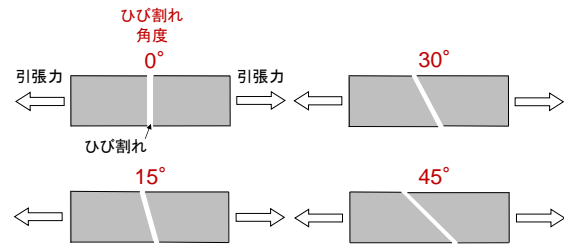


図-5 ひび割れ角度

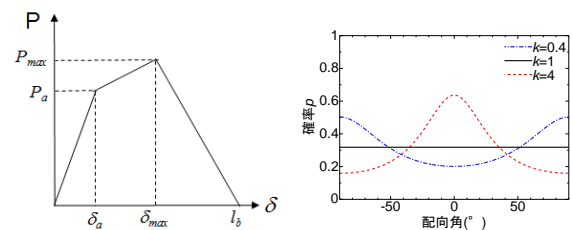


図-6 単繊維引抜モデル<sup>3,4)</sup>

図-7 繊維配向角分布

表-1 単繊維引抜モデルへの入力値<sup>4)</sup>

入力項目	入力値
第1ピーク時引抜量 $\delta_a$ (mm)	0.2
第1ピーク荷重 $P_a$ (N)	1.5
最大荷重時引抜量 $\delta_{max}$ (mm)	0.45
最大荷重 $P_{max}$ (N)	3.0
スナビング係数 $f$	0.5
繊維破断強度 $\sigma_{fu}$ (MPa)	774
繊維強度低減係数 $f'$	0.3
繊維長 $l_f$ (mm)	12

## 2. ひび割れ角度を有する場合の架橋則

### 2.1 ひび割れ角度が0°の場合

ひび割れ角度の定義を図-5に示す。ひび割れ角度は，試験体軸方向に対して直交する面がひび割れ面となる場合を0°とする。既往の研究<sup>3)</sup>では，ひび割れ角度が0°の場合，すなわち角柱試験体の引張試験で想定されるひび割れ面に対して架橋則を算出し，DFRCCの精確な引張性状の評価方法を構築している。

架橋則は，単繊維引抜実験により得られた引抜き力-引抜き量関係をモデル化した単繊維引抜モデルが基となつて

いる。本研究で用いた単繊維引抜モデル<sup>3,4)</sup>を図-6に，モデルへの入力値<sup>4)</sup>を表-1に示す。表中のスナビング係数および繊維強度低減係数は，繊維が配向角を有する場合の引抜荷重の増減に関する値であり，前者は配向角を有することにより引抜荷重が増大するスナビング効果を，後者は配向角を有することにより繊維が破断しやすくなる繊維強度の低減を表現し，次の式(1)および式(2)によりそれぞれ表される。これらは後述する繊維配向角分布により各単繊維の配向角 $\psi$ が決まり，引抜き力-引抜き量関係に反映される。

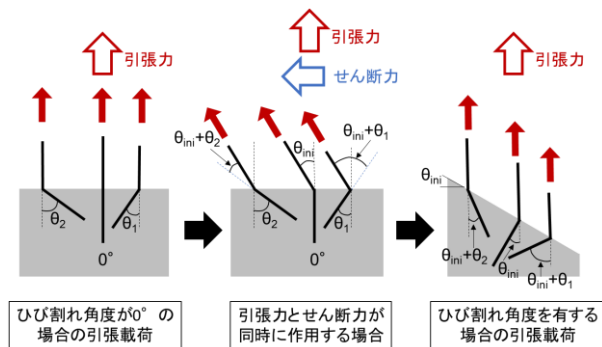


図-8 ひび割れ角度を有する場合の繊維の配向角

$$P = P_0 \cdot e^{f \cdot \psi} \quad (1)$$

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^n \cdot e^{-f' \cdot \psi} \quad (2)$$

ここで、 $P$ : 引抜荷重、 $P_0$ : 配向角  $0^\circ$  の場合の引抜荷重、 $\psi$ : 繊維配向角、 $\sigma_{fu}$ : 見かけの繊維強度、 $\sigma_{fu}^n$ : 配向角  $0^\circ$  の場合の繊維強度を表す。図-6 中の  $l_b$  は繊維の埋込長を表しており、架橋則の計算においては繊維の均一な分散を仮定し、各単繊維に対してランダムに与えられる。

一方、部材中の繊維の配向性は、打設時の流動や寸法等に強く影響されることが知られている<sup>3,5)</sup>。文献<sup>3)</sup>では、ひび割れ面に存在する各単繊維の配向角分布を適当な確率密度関数（図-7）で与えることで、各単繊維の配向角を決定している。ここで、繊維の配向性の違いを確率密度関数における配向強度  $k$  なる値により定量的に表現することで架橋則に反映させている。 $k=1$  の場合はランダム配向を示し、 $k$  が 1 よりも大きい場合は試験体軸方向への配向が強く、1 よりも小さい場合は試験体軸直交方向への配向が強いことを示す。

ひび割れ面に存在する各単繊維の引抜挙動および配向角が決定し、全繊維分足し合わせることで架橋則が算出される。

## 2.2 ひび割れ角度を有する場合

図-5 に示すひび割れが角度を有している場合の繊維の配向角を、図-8 のように考える。図-8 左図は、ひび割れ角度が  $0^\circ$  の場合に引張荷重を行った際の 3 本の繊維それぞれの配向角 ( $\theta_1, 0^\circ, \theta_2$ ) を示している。これらの配向角を有する繊維に、引張力とせん断力が同時に作用した場合を考える。配向角  $0^\circ$  の繊維の鉛直方向に対する繊維の向きを  $\theta_{mi}$  とすると、3 本の繊維それぞれの配向角は図-8 中央のように  $\theta_{mi}$  分増大する。すなわち、配向角をひび割れ角度  $\theta_{mi}$  分増大させることで、ひび割れ角度を有する場合の架橋則を構築することが可能であると考えられる（図-8 右図）。

以上の方法で計算した架橋則を図-9 に示す。横軸のひび割れ幅は単繊維の引抜量に対応し、図-8 右図の引

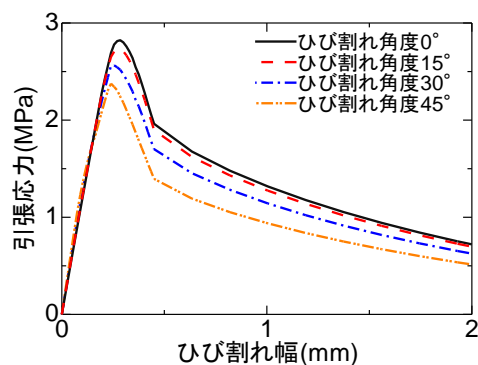


図-9 ひび割れ角度を有する場合の架橋則

表-2 繊維形状および力学性状（メーカー公称値）

繊維の種類	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 (kg/m<sup>3</sup>)

W	C	S	FA	Fiber	Ad
380	678	484	291	26	6

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

Fiber: PVA 繊維（体積混入率 2%）

Ad: 高性能減水剤

表-4 フレッシュ性状および圧縮試験結果

温度 (°C)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
14.1	3.5	45.4	16.4

張力方向（主応力方向）の変位である。すべて配向強度  $k=1$  として計算した。いずれの架橋則も、初期勾配から最大引張応力に達した後、緩やかな軟化勾配に移行している。ひび割れ角度が大きくなるにつれて、最大引張応力が減少している。これは、スナビング効果による引抜荷重の増加分よりも、配向角の増大による繊維強度の低下分の方が大きいことによるものと考えられ、ランダム配向である  $k=1$  においても両者が指数関数に従い増減するため、ひび割れ角度の変化とともに架橋則も変化する。

## 3. 引張試験

### 3.1 使用材料および試験体

使用した繊維の形状および力学性能を表-2 に示す。なお、表-1 に示す繊維破断強度は表-2 中の引張強度とは異なっており、繊維がマトリックスから抜け出の際に損傷を受け、破断強度が低下するとされている<sup>6)</sup>。DFRCC の調合表を表-3 に示す。PVA 繊維の体積混入率は 2.0% とした。これらの繊維および調合は、既往の研究

4.5)と同一である。打設は、型枠の端から連続的に流し込むことにより行った。フレッシュ性状および $\phi 100-200\text{mm}$ シリンダーによる圧縮試験結果を表-4に示す。

試験体形状を図-10に示す。試験体の断面は $100\times 100\text{mm}$ で、打設時の流動により繊維の配向が変化して試験体の一部分に弱部が生じることが想定されるため、試験体長さは比較的長い $600\text{mm}$ とした。ねじ棒を介して引張力を与え、試験体中の剛性の大きな変化を避けるためにねじ棒の先端を斜めに加工した。実験因子は切欠き角度（ひび割れ角度）で、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、および $45^\circ$ とし、各3体ずつ計12体作製した。切欠き部の詳細を図-11に示す。斜め方向のひび割れを確実に発生させるため、切欠きは外周4辺に設け、すべての試験体においてリガメント部の面積が一定（ $70\text{mm}\times 70\text{mm}$ ）となるようひび割れ角度が大きくなるにつれて切欠き深さを調節した。

さらに、切欠きを外周4辺に設けるとひび割れ状況の確認が不可能となるため、ひび割れ状況を目視で観察するために、角度 $0^\circ$ の切欠きを外周のうちの平行な2辺のみに設けた試験体を3体作製した。

### 3.2 加力・計測方法

加力状況を図-12に示す。加力には、2MNユニバーサル試験機を用いて、試験体両端部のねじ棒を直接試験機のチャックで掴み、試験機のヘッド間速度を毎分 $0.5\text{mm}$ として変位制御により単調引張载荷を行った。著者らの行う引張試験<sup>例えば4)</sup>では、一端固定、一端ピンの境界条件とするが、本試験体では斜めにひび割れが発生することでピン側のブロックが回転してしまうと考えられたため、両端固定とした。

計測項目は、引張荷重値および切欠きを跨ぐ位置の軸方向および斜め方向変位（図-10）とした。これらの変位の計測によりひび割れ面に対して直交方向の変位（ひび割れ幅）およびひび割れ面に沿う方向の変位（ずれ）が算出可能である。変位計は試験体の2つの計測面にそれぞれ3台ずつ設置した。本報では、軸方向の変位をひび割れ変位と称する。

### 3.3 実験結果

引張応力-ひび割れ変位関係を図-13に、加力後の試験体の様子を図-14に示す。引張応力は、荷重値をリガメント部の試験体軸に直交する面に投影した面積で除すことで、引張主応力として算出した。ひび割れ変位は軸方向に設置した4台の $\pi$ 型変位計により計測した変位の平均値で、主応力方向の変位である。なお、ひび割れ角度が $45^\circ$ の試験体3体のうち2体は、切欠き部外で軸直交方向にひび割れが生じた（図-15）ため、試験結果から省いた。図-13より、ひび割れ角度が大きくなるに従い、最大ピーク時応力は概ね低下している。

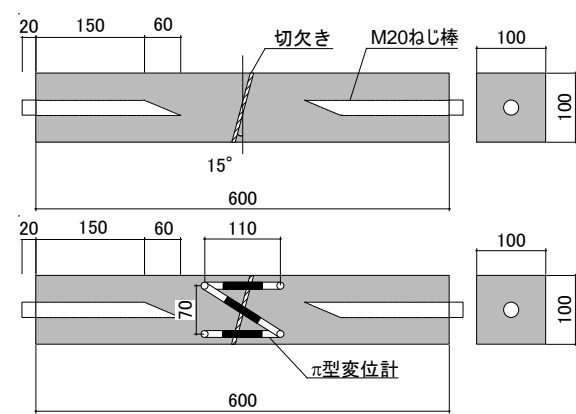


図-10 試験体形状（単位：mm）

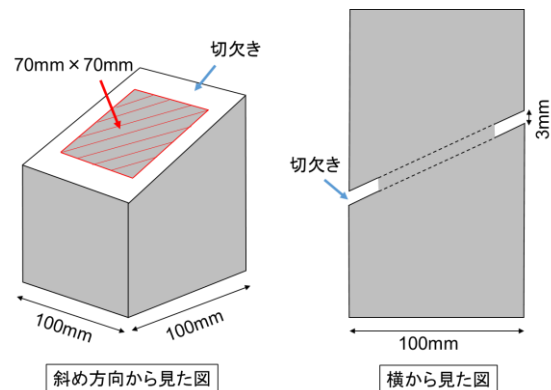


図-11 切欠き詳細図



図-12 加力状況

ひび割れ角度が $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、および $30^\circ$ の試験体では、初期ひび割れ発生後に荷重が低下した後、再び荷重がわずかな荷重低下を何度か起こしながらも増大し、最大ピークに達した後は緩やかに荷重が低下する挙動を示した。実験では何回かの荷重の増減が確認されたため、初期ひび割れ発生後に切欠き部で複数のひび割れが発生し、最大ピークに達した後に1本のひび割れに開口が局所化していることが予想される。

ひび割れ角度が $45^\circ$ の試験体では、初期ひび割れ発生後に細かな荷重の増減を繰り返した後大きく荷重が低下する領域を経て、その後緩やかに荷重が上昇して軟化勾



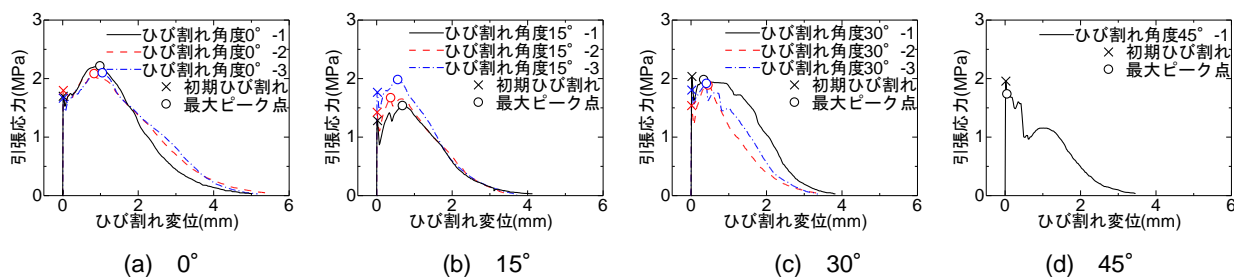


図-13 引張応力-ひび割れ変位関係



図-14 加力後の破断面の様子

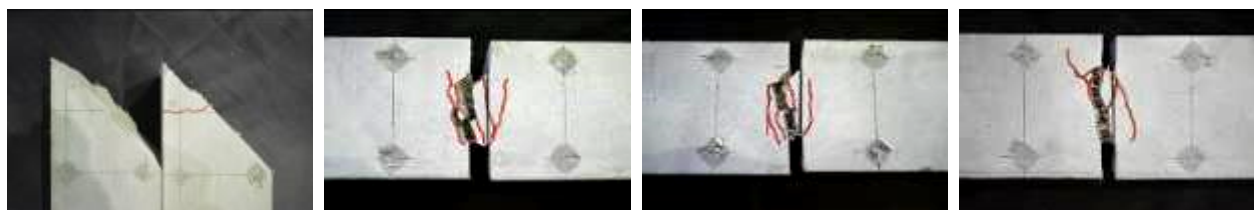


図-15 切欠き部外ひび割れ

図-16 ひび割れ状況 (切欠き 2 辺試験体)

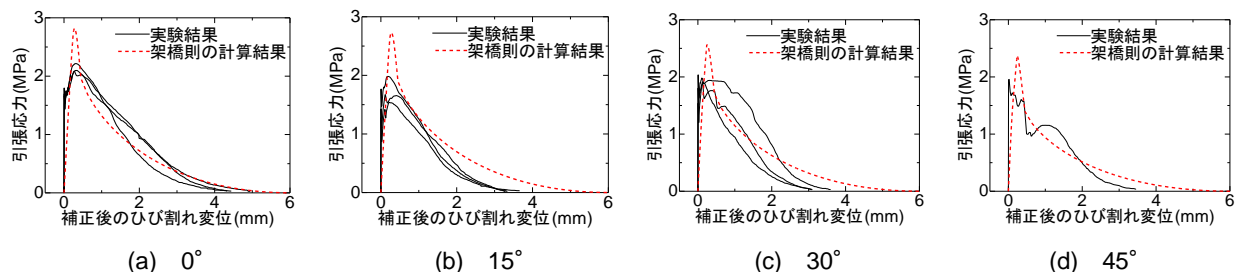


図-17 引張応力-ひび割れ変位関係の実験結果と架橋則の計算結果の比較

配に移る挙動を示した。荷重が大きく低下する領域では、ひび割れ角度が大きいことにより繊維が破断しやすくなり、荷重が大きく低下したと考えられる。

角度 0° の切欠きを外周の 2 辺のみに設けた試験体の最終ひび割れ状況を、図-16 に示す。ひび割れは载荷中に目視によりペンでトレースした。図-16 から、すべての試験体で複数ひび割れが発生していることがわかる。

#### 4. 引張試験結果と架橋則の計算結果の比較

図-13 および図-16 より、いずれの試験体においても複数ひび割れが発生していることが予測される。架橋則の計算は 1 つのひび割れ面に存在する繊維群に対して行うため、実験結果と架橋則の計算結果を比較するためにひび割れ変位の補正を行う。

外周 4 辺に切欠きを設けた試験体でも外周 2 辺のみに設けた試験体と同様に複数ひび割れが発生していたとみなし、架橋則による引張応力の最大値と考えられる初期ひび割れ発生後の最大ピーク時応力までの変位をひび割れ本数で除し、ひび割れ 1 本あたりのひび割れ変位とする。外周 2 辺に切欠きを設けた試験体で観察されたひび割れ本数の平均は 3.2 本であったため、図-13 において最大ピーク時応力までの変位を 3.2 で除した値とし、その後は 1 本のひび割れに開口が集中すると考えて、その時の変位に計測値を足し合わせてひび割れ 1 本のひび割れ変位とした。

補正を行った実験結果と架橋則の計算結果の引張応力-ひび割れ変位関係の比較を図-17 に示す。架橋則における単繊維引抜性状は図-6 および表-1 に示す値を

適用し、配向強度は、既往の研究<sup>5)</sup>において断面 100mm × 100mm の試験体に対して適合性のよい  $k=1$  とした。いずれのひび割れ角度においても、最大ピーク時応力の実験結果に対して計算結果が上回っており、引張試験において両端固定の境界条件としたため曲げモーメントが生じた影響<sup>7)</sup>が考えられる。しかしながら、最大引張応力以外の領域では、良い対応関係を示している。

ひび割れ角度の影響を検討するために、各試験体の初期ひび割れ発生後の最大ピーク時応力の実験値と、架橋則による最大引張応力の計算値の比較を図-18 に示す。両者とも、各試験体（各角度）の最大ピーク時応力（最大引張応力）を角度 0° の最大応力の平均値で除した、基準化強度とした。切欠き角度、すなわちひび割れ面に対する引抜き力の角度が大きくなるにしたがって、最大応力が低下する傾向はよく捉えている。これは、実験結果においても架橋則の計算結果と同様に、スナビング効果による引抜き荷重の増加分よりも、配向角の増大による繊維強度の低下分の方が大きいことを示唆している。架橋則による検討を通して、二軸応力状態の繊維の架橋性能に影響を及ぼす要因を把握することは、実構造物のひび割れ面におけるせん断伝達性能の解明の一助となるものと考えている。

## 5. まとめ

- (1) ひび割れ面に引張力とせん断力が同時に作用する状態を模擬する新たな試験方法を提案した。ひび割れ角度が大きくなるにつれて、引張応力が減少することを確認した。
- (2) ひび割れ角度を有する場合の架橋則の計算方法を考案し、実験結果との比較を行った。最大引張応力については計算結果が実験結果を上回ったものの、最大応力以降の曲線の形状および角度の増加にともなう最大応力の低下の度合いを表現できた。

## 参考文献

- 1) 安藤麻衣, 佐野直哉, 山田大, 八十島章, 金久保利之: 繊維架橋則に基づく DFRCC 柱梁接合部のせん断強度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.411-414, 2016.8
- 2) 山田大, 八十島章, 佐野直哉, 金久保利之: DFRCC

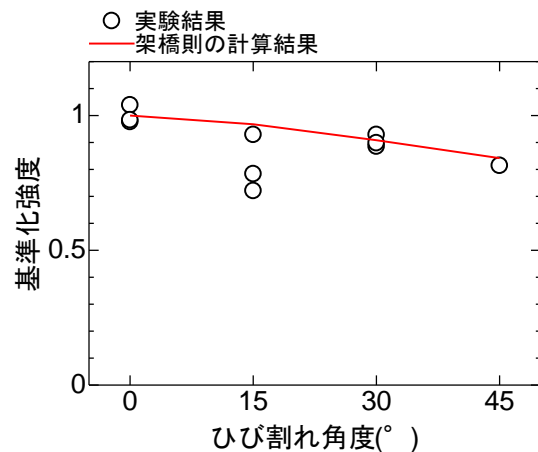


図-18 基準化強度の比較

を用いた PCa 柱梁接合部のせん断性能における繊維種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1327-1332, 2016.7

- 3) 浅野浩平: 高性能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
- 4) Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K.: Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, ACI Materials Journal, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016.3
- 5) 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
- 6) Kanda, T., Li, V. C.: Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V. 10, No. 1, pp.5-13, 1998
- 7) T. Kanakubo: Tensile Characteristics Evaluation Method for Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.3-17, 2006