

論文 架橋則に基づく DFRCC 部材のせん断架橋性能の評価

大圖 友梨子*1・金久保 利之*2

要旨: PVA 繊維を用いた DFRCC を対象として、せん断ひび割れ面における架橋則を算出し、部材中のせん断架橋性能の評価を試みた。せん断ひび割れに対する架橋則の計算では、最も基本となる単繊維の引拔挙動を検討するため単繊維の引拔実験を行い、既往の引拔モデルを修正した。DFRCC を用いた梁の曲げせん断実験では、繊維混入量の違いによる架橋性能の差異が実験結果から確認された。実験より得られたひび割れ性状を基に、DFRCC によるせん断補強効果をひび割れ角度を考慮した架橋則を用いて評価したところ、体積混入率 1%の試験体では精度良く評価できたが、2%の試験体では評価値が実験値を過大評価した。

キーワード: DFRCC, 架橋則, PVA 繊維, せん断性能

1. はじめに

高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC : Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites) は、ひび割れを跨ぐ繊維の架橋により優れた引張性能を有している。DFRCC を構造部材に適用することで、部材の損傷の低減やひび割れ幅抑制効果などが報告されている (例えば 1)。しかしながら、材料性能から構造性能に至るまでの性能評価手法が統一されておらず、実部材への適用例は少ない。特長である繊維の架橋性能を構造性能の評価に入れ込むことができれば、DFRCC の構造部材への利用を促進することが期待できる。

既往の研究 2) では、DFRCC における繊維の架橋性能に基づいた引張性能の評価手法として、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。ひび割れを跨ぐ各単繊維の引拔挙動をひび割れ面の全繊維分総和して、ひび割れ面の引張応力-ひび割れ幅関係として架橋則を算出する。著者らの研究 3) では、せん断力作用下の斜めひび割れ面における応力状態を想定し、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導出することで、せん断架橋性能の評価を試みている。せん断ひび割れ面における二軸応力状態を模擬した要素実験を行い架橋則の計算結果と比較しているが、ピーク値については架橋則の計算結果が実験結果を上回る結果となっている。

本研究では、PVA 繊維を用いた DFRCC を対象として、著者らの研究 3) において導出したせん断ひび割れ面に対する架橋則を見直すとともに、DFRCC を用いた梁部材の曲げせん断実験を行うことで、梁の実験結果における DFRCC によるせん断補強効果の評価を行う。架橋則の検討では、新たに単繊維の引拔実験を実施し、既往の単繊維引拔モデルを修正して計算に必要なパラメータを決定する。

2. せん断ひび割れ面に対する架橋則

2.1 架橋則の概要

架橋則は、単繊維の引拔実験により得られる繊維マトリックス間の付着性状および繊維配向角が繊維の引拔挙動に与える影響を考慮して算出される。繊維マトリックス間の付着は、実験より得られる引拔荷重-すべり量関係を基にモデル化される。繊維が配向角を有する場合、繊維の埋込口部の反力により引拔荷重が増大するスナビング効果 4)、および繊維表面が荒らされ繊維が破断しやすくなる繊維強度の低減効果 5) が確認されている。図-1 に示すように、架橋則の計算では、ひび割れを跨ぐ各単繊維に配向角 ψ を与え単繊維引拔モデルを適用し、スナビング効果および繊維強度の低減効果により引拔挙動を決定する。ここで、図-1 中の P_a および δ_a はそれぞれ第 1 ピーク時の荷重およびひび割れ幅 (引拔量) を、 P_{max} および δ_{max} はそれぞれ最大荷重およびその時のひび割れ幅 (引拔量) を示す。既往の研究 2) では繊維の配向性を架橋則に取り込むため、確率密度関数を用いて配向性を表現した上で各単繊維に配向角を与えている。配向性は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され、 $k=1$ 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なり、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。著者らの研究 3) では、せん断ひび割れ面に対する架橋則を算出するため、ひび割れ面にせん断力が作用する際の繊維の挙動を検討して (図-2 中央)、架橋則の

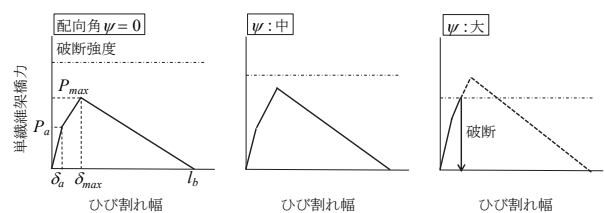


図-1 PVA 繊維に対する単繊維引拔モデルの例

*1 三井住友建設 (株) 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*2 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

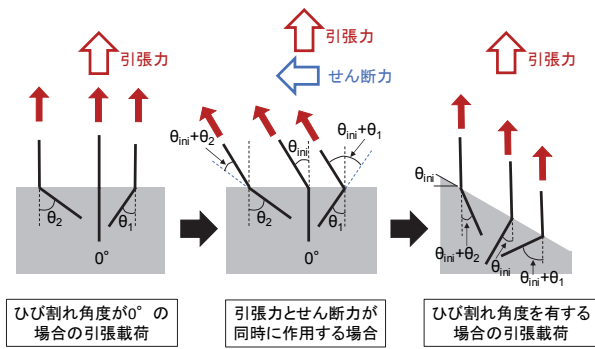


図-2 二軸応力状態下の架橋則³⁾

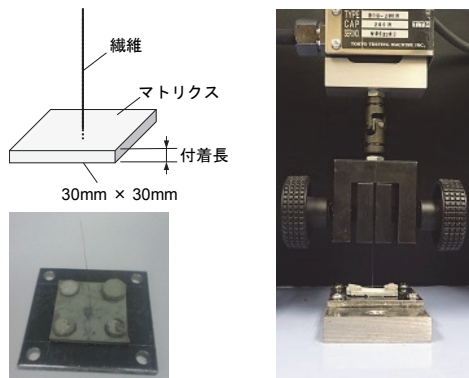


図-3 引抜試験体形状および加力状況

計算において各単繊維に与える配向角にひび割れ角度(図-2中 θ_{mi})を加算することで、引張架橋性能に基づき、ひび割れ角度を考慮した、せん断ひび割れ面に対する架橋則を算出している(図-2右図)。主応力方向に対するひび割れ角度が定まると、架橋力が算出可能である。

2.2 単繊維引抜モデルの修正

(1) 単繊維引抜実験概要

架橋則の計算を行う上で最も基本となるのは、単繊維の引抜カー引抜量関係で表される単繊維引抜モデルである。PVA 繊維に対する既往のモデル(図-1)では考慮されていない付着長(埋込長)の影響を加味してより正確なモデルを構築するため、次章の実験で使用するものと同一の繊維およびマトリックスによる PVA 単繊維の引抜実験を行った。使用する繊維の形状および力学的性能を表-1に、マトリックスの調合計画を表-2に示す。試験体形状および加力状況を図-3に示す。既往の研究²⁾を参考として、図-3左図に示す試験体を作製し、図-3右図に示す万能ネジ式卓上試験機を用いて変位制御により単調引張荷重を行った。実験因子は設計付着長(1, 2, 3mm)とした。

(2) 単繊維引抜モデルの検討

実験より得られた破壊形式が引抜けである試験体の引抜荷重-すべり量関係を図-4に示す。すべり量は、万能試験機のヘッド変位からマトリックス外の繊維変形および繊維つかみ部の変位を差し引き、繊維とマトリックスの相対変位に補正した値である。図-4より、試験体

表-1 繊維の諸元(メーカー公称値)

繊維の種類	繊維径(mm)	引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)
PVA	0.10	1200	28

表-2 マトリックスの調合計画(kg/m³)

Water	Cement	Sand	Fly Ash	Admixture
380	678	484	291	6

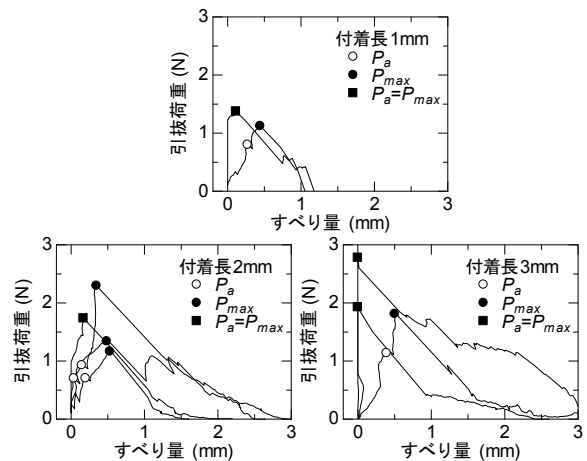


図-4 引抜荷重-すべり量関係

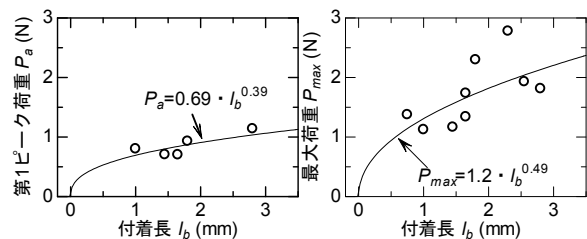


図-5 荷重に対する付着長の影響

によりばらつきはあるものの、概ね、第1ピーク荷重 P_a 時に初期勾配から勾配が緩やかな第2勾配に移行し、最大荷重 P_{max} に達した後荷重が低下する挙動を示した。この傾向は既往の研究²⁾と同様で、第1ピーク荷重 P_a 時にPVA繊維とマトリックスの化学的な付着が付着長全長に渡って剥離することで一度荷重が低下し、繊維とマトリックスの摩擦により再び荷重が増加して最大荷重を迎えたと考えられる。

第1ピーク荷重 P_a および最大荷重 P_{max} に対する付着長の影響を図-5に示す。付着長は、加力前に試験体の繊維埋込口付近の厚みを実測した値である。図-5より、付着長の増大とともに第1ピーク荷重 P_a および最大荷重 P_{max} は上昇している。付着長が大きくなるにつれて、繊維-マトリックス間の付着、特に摩擦付着領域が増加したとみられる。

以上より、本研究では、単繊維引抜モデルとして図-6に示すトリリニアモデルを適用し、単繊維引抜モデルへの入力値を表-3に示す値とする。第1ピーク荷重 P_a および最大荷重 P_{max} は、既往の研究⁶⁾に倣い、図-5中に示す最小二乗法による近似式を用いて算出することと

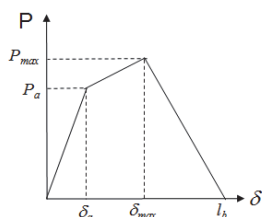


図-6 引抜モデル

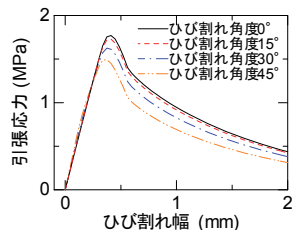


図-7 架橋則の計算例

表-3 単繊維引抜モデルへの入力値

入力項目	入力値
第1ピーク荷重 P_a (N)	$P_a = 0.69 \cdot l_b^{0.39}$
最大荷重 P_{max} (N)	$P_{max} = 1.2 \cdot l_b^{0.49}$
第1ピーク時引抜量 δ_a (mm)	0.32 ($= 0.21 \times 1.5$)
最大荷重時引抜量 δ_{max} (mm)	0.56 ($= 0.37 \times 1.5$)
スナビング係数 f	0.5
繊維破断強度 σ_{fu} (MPa)	569
繊維強度低減係数 f'	0.3
繊維長 l (mm)	12

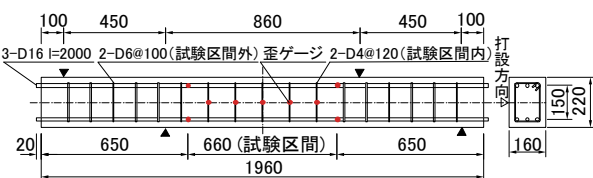


図-8 試験体形状 (単位: mm)

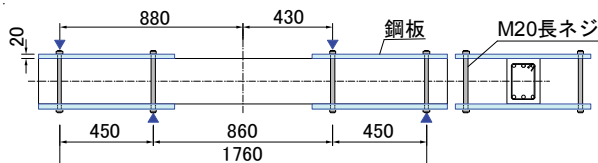


図-9 加力方法 (単位: mm)

表-4 試験体一覧

試験体名	共通事項	繊維混入率(%)
No.1	断面: 160×220 mm せん断スパン比: 1.5 主筋: 3-D16(SD490) $p_f=2.01\%$ 肋筋: 2-D4@120(SD295) $p_w=0.15\%$	-
No.2		モルタル
No.3		1.0
		2.0

表-5 フレッシュ性状および圧縮特性

試験体名	繊維混入率 (%)	温度 (°C)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
No.1	-	14.2	0.9	47.2	16.3
No.2	1.0	17.0	3.6	45.3	16.8
No.3	2.0	17.4	2.5	43.1	15.7

した。また、第1ピーク時引抜量 δ_a および最大荷重時引抜量 δ_{max} については、ひび割れを架橋している繊維は引抜実験時と異なり繊維の両端がマトリックスに埋め込まれていることを考慮する必要がある。このとき、繊維の抜出しはどちらの端部においても進展すると考えられるが、付着長の長い方の抜出しは短い方に比べ小さくなるのが予想される。本研究でも既往の研究⁶⁾に倣い、実験より得られた第1ピーク時すべり量 s_a および最大荷重

時すべり量 s_{max} の平均値の1.5倍をそれぞれの引抜量と仮定した。

繊維配向角の影響を表現する表-3中のスナビング係数 f 、繊維強度低減係数 f' 、ならびに配向角 0° における見かけの繊維破断強度 σ_{fu} については、既往の研究⁷⁾ で用いられた値を適用することとした。

2.3 架橋則の算出

以上のモデルを適用した架橋則の計算結果の例を図-7に示す。繊維配向性を表現する配向強度は $k=1$ として計算し、ひび割れ角度を $0 \sim 45^\circ$ の範囲で変化させた計算結果を図中に示している。図-7より、いずれの架橋則も最大引張応力までは線形的に荷重が上昇し、最大引張応力後は大きく荷重が低下する領域を経て、徐々に荷重が減少していることがわかる。これは、最大引張応力後、繊維の破断が現れ、その後ひび割れ幅が単繊維引抜モデルにおける最大引抜荷重時引抜量 (0.56mm) に一致した点を境に徐々に繊維が引抜けていることを示している。また、著者らの研究³⁾と同様に、ひび割れ角度が増大するにつれて配向角の影響、特に繊維強度の低減効果が支配的になり、最大引張応力が減少している様子が確認された。

3. 梁部材の曲げせん断実験

3.1 試験体

試験体配筋を図-8に、試験体一覧を表-4に示す。試験体は、断面が 160×220 mm の矩形断面で、せん断スパン比は1.5とした。せん断破壊先行型とするため、主筋にはSD490を用い、肋筋比は0.15%とした。実験因子はPVA繊維の体積混入率とし、No.1は比較対象として繊維を混入していないマトリックス (モルタル) のみの試験体、No.2はPVA繊維を体積混入率1.0%混入した試験体、No.3はPVA繊維を体積混入率2.0%混入した試験体である。試験体の打設は、型枠を勾配約1/33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。

3.2 使用材料

使用した繊維の諸元および調査計画は第2章と同一である。フレッシュ性状および $\phi 100-200$ mm シリンダーによる圧縮試験結果を表-5に示す。

3.3 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 (単調荷重) を行った。加力方法を図-9に、加力時の様子を図-10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-9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。

3.4 計測方法

計測項目は、荷重値、全体変形、局部変形、主筋の歪、および肋筋の歪である。変位計の設置位置を図-11に示す。

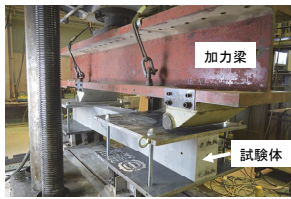


図-10 加力状況

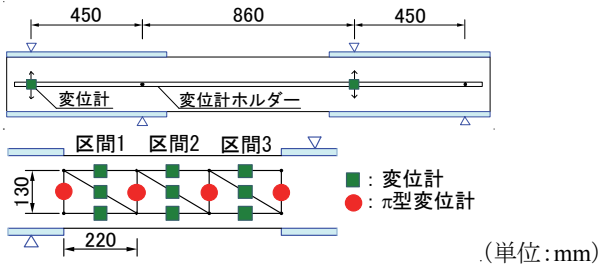


図-11 変位計位置 (上: 全体変形, 下: 局部変形) (単位:mm)

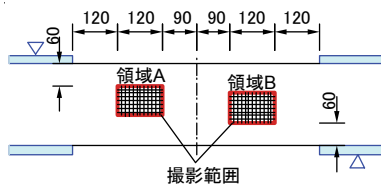


図-12 ひび割れ撮影箇所

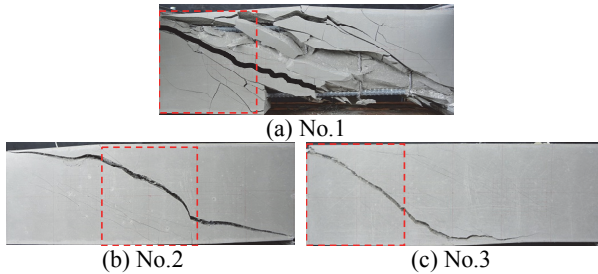


図-13 最終破壊状況

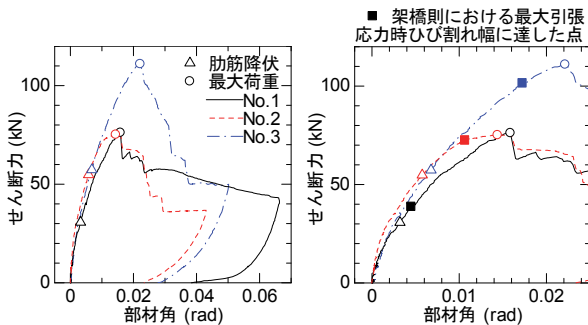


図-14 せん断力-部材角関係 (右: 拡大図)

表-6 実験結果一覧

試験体名	主たるせん断ひび割れの角度 (°)	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)	肋筋歪 (最大値) (μ)
No.1	21.5	30.7	0.0032	76.1	0.016	18543
No.2	34.5	54.8	0.0058	75.1	0.014	33557
No.3	32.0	57.4	0.0068	110.9	0.022	30359

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。歪ゲージは、試験体1体につき、主筋は4点、肋筋は5点貼付した (図-8)。

せん断ひび割れ性状を評価するため、図-12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。それぞれのメッシュに対し撮影間隔は、データの計測間隔を考慮し、10秒毎とした。

3.5 実験結果

(1) 破壊状況およびせん断力-部材角関係

各試験体の最終破壊状況を図-13に示す。最終破壊状況は、加力後にひび割れ観測面を撮影した写真 (図-11の裏側面) であり、写真画像の範囲は試験区間である。図中の破線の領域は後述する主たるせん断ひび割れの角度を計測した範囲であり、No.1のみ当該ひび割れをトレースして判別を容易にした。いずれの試験体も、曲げひび割れ発生後せん断ひび割れが順次発生し、1本のせん断ひび割れに開口が局所化することで結局に至った。

実験により得られたせん断力-部材角関係を図-14に、実験結果一覧を表-6に示す。表-6中の主たるせん断ひび割れの角度とは、加力後、最大荷重時に最も開いたひび割れに対して、図-11における変形測定区間3区間のうち、主に当該ひび割れが開いている区間 (図-13破線の領域) においてそれぞれ実測した値である。いずれの試験体も肋筋が降伏した後、最大荷重を迎えた。最大荷重後、No.1では大きく荷重が低下し、細かな荷重の増減を経て、なだらかに荷重が減少した。No.2では、ある程度荷重を維持した後に急激に荷重が低下し、部材角0.02rad以降顕著な荷重低下がみられた。No.3では、徐々に荷重が低下し、部材角0.03rad以降比較的大きく荷重が低下した。最大荷重後の大きな荷重低下は繊維の拔出または破断によって引き起こされると考えられ、繊維混入率の差異が最大荷重後の挙動にも影響していると考えられる。

さらに、No.2およびNo.3では、No.1に比べ肋筋降伏時の荷重が大きい。これは、No.2およびNo.3では、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。一方、最大荷重に着目すると、No.1に比べNo.3では耐力が大幅に上昇したものの、No.2ではNo.1とほぼ同等の耐力となった。図-14より、No.2の肋筋降伏時付近までの領域においてはNo.2とNo.3の勾配に差異はみられず、任意の部材

角に対して No.2 および No.3 の荷重は No.1 のそれを上回っているのに対し、部材角 0.01 rad 以降は No.2 の勾配が緩やかになり最大荷重を迎えている。すなわち、No.2 では筋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、No.3 では、筋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。

(3) ひび割れ性状

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-15 に示す。既往の研究¹⁾を参考に、図-12 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距離である主応力方向の変位をひび割れ幅として算出した。

算出した各試験体のひび割れ幅の部材角に対する最大荷重時までの推移を図-16~図-18 に示す。各試験体と

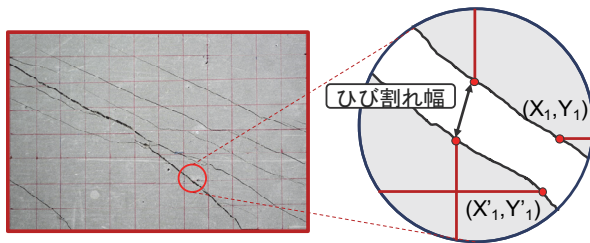


図-15 ひび割れ幅の算出方法

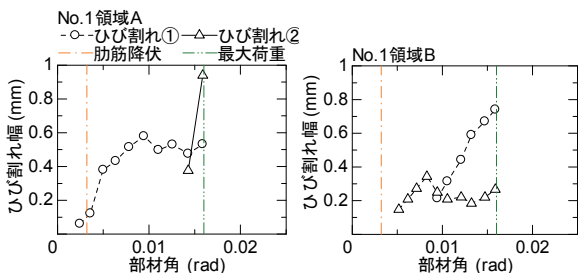


図-16 No.1 ひび割れ性状 (左: 領域 A, 右: 領域 B)

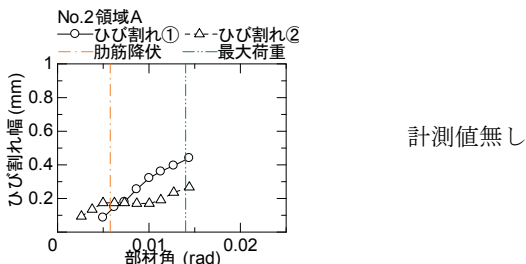


図-17 No.2 ひび割れ性状 (左: 領域 A, 右: 領域 B)

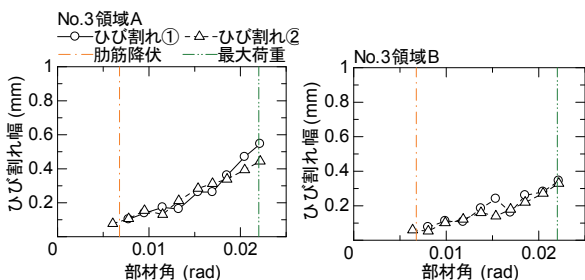


図-18 No.3 ひび割れ性状 (左: 領域 A, 右: 領域 B)

も、図-12 中の領域 A および領域 B それぞれにおいて、最大荷重時に比較的大きく開いたひび割れ 2 本に対してひび割れ幅を算出し、各試験体において最大荷重時に計測可能な最も大きく開いたひび割れのひび割れ幅推移を実線で表している。No.2 領域 B においては、メッシュ内に計測可能なひび割れが発生しなかったため省いた。

図-16~図-18 および表-6 より、いずれの試験体も、筋筋降伏後付近からひび割れが大きく開き始め、最大荷重時にひび割れ幅が最も大きくなっている。No.1 では、最大荷重時に最も大きく開いたひび割れは最大荷重直前に発生し、他のひび割れは最大荷重時に閉じる傾向にある。一方、No.2 および No.3 ではどのひび割れも、最大荷重時まで変形の進行とともにひび割れ幅も増大している。これは、最大荷重時、No.1 では 1 本のひび割れに変形が集中したものの、No.2 および No.3 では繊維の架橋性能により変形が複数本のひび割れに分散したことが要因として挙げられる。また、DFRCC によるひび割れ幅抑制効果により、No.1 に比べ No.2 および No.3 では最大荷重時ひび割れ幅が小さくなる様子が確認された。

4. DFRCC によるせん断補強効果の評価

実験において得られた繊維の架橋性能による梁部材のせん断補強効果を評価するため、第 2 章において導出したひび割れ角度を考慮した架橋則を用いる。ひび割れ角度は、実験より得られた表-6 中の主たるせん断ひび割れの角度 (PVA1% : 34.5°, PVA2% : 32.0°) を用い、配向強度には既往の研究⁷⁾において本研究の試験体寸法に比較的近い 180×280mm 断面の試験体に対して適用された $k=0.4$ を用いて、各単繊維に配向角を与えた。

繊維の架橋性能は、架橋則における最大引張応力時にピークに達すると考えられる。また、No.1 試験体の実験結果は、No.2 および No.3 試験体の実験結果から繊維の架橋性能によるせん断補強効果を除いたものであるとみなすことができる。したがって、図-16~図-18 に示す実験より得られた画像から算出したひび割れ幅推移において、架橋則における最大引張応力時ひび割れ幅に達したときのせん断力の No.1 と No.2 の差分、および No.1 と No.3 の差分が、No.2 試験体および No.3 試験体の実験結果から得られる繊維が負担するせん断力のピーク値であるとみなした検討を行った。各試験体において対象としたひび割れは、最大荷重時に比較的大きなひび割れ幅を示したひび割れのうち、架橋則における最大引張応力時ひび割れ幅 ($k=0.4$ の場合 0.34mm) に最初に達したひび割れとした。実験結果より算出した、架橋則における最大引張応力時ひび割れ幅に達したときのせん断力の差分 (繊維負担せん断力) を表-7 に示す。

架橋則の計算結果から繊維が負担するせん断力を導出

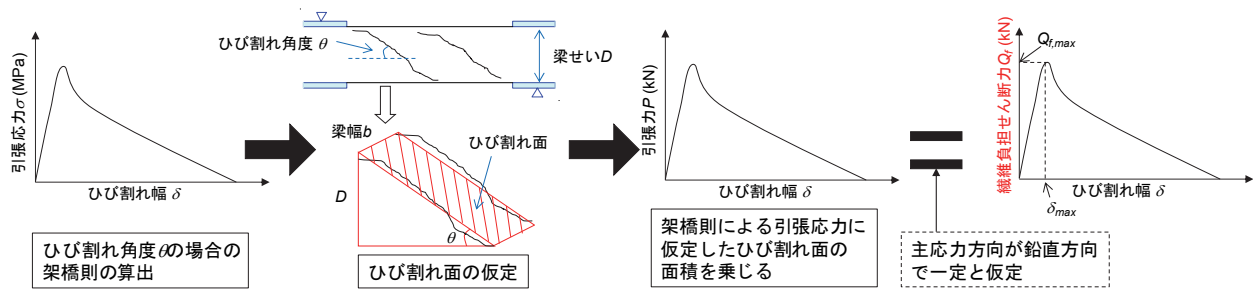


図-19 架橋則を用いた繊維負担せん断力の導出過程

表-7 繊維負担せん断力 (実験値)

試験体名	ひび割れ幅 (mm)	せん断力 (kN)	せん断力の No.1 との差分 (繊維負担せん断力) (kN)
No.1	0.35	38.6	-
No.2	0.34	72.3	33.7
No.3	0.34	101.4	62.7

表-8 繊維負担せん断力の比較

試験体名	繊維負担せん断力 (kN)	
	実験結果	架橋則の計算結果
No.2 (体積混入率 1%)	33.7	33.4 (ひび割れ角度 34.5°)
No.3 (体積混入率 2%)	62.7	72.4 (ひび割れ角度 32.0°)

する方法を図-19 に示す。せん断ひび割れの長さを $D/\sin\theta$ (D : 梁せい, θ : ひび割れ角度) と仮定し、それに梁幅を乗じることでひび割れ面の面積とする。ここで、仮定したひび割れ面は一樣な応力状態であるとみなし、ひび割れ面の面積を架橋則による引張応力に乗じてひび割れ面の引張力を算出する。求めた引張力-ひび割れ幅関係は、ひび割れ面において主応力方向が鉛直方向であると仮定すると、繊維負担せん断力-ひび割れ幅関係と一致する。この関係における繊維負担せん断力の最大値と実験結果との比較を行った。

以上の方法により実験結果と架橋則の計算結果からそれぞれ導出された繊維負担せん断力の比較を表-8 に示す。実験値と計算値を比較すると、No.2 では架橋則の計算結果が実験結果を評価できているが、No.3 では架橋則の計算結果が実験結果を上回っている。これは、架橋則は単繊維の引抜挙動の足し合わせであることから、繊維混入率が2倍になるとひび割れ面の引張応力も2倍の値に計算されるが、部材中では、繊維混入率と引張応力が必ずしも比例しないことによると考えられる。

以上の結果は、架橋則の計算方法において課題は残るものの、修正した単繊維引抜モデルによるひび割れ角度を考慮した架橋則を用いた、部材評価手法の一連の流れに対する適用可能性を示唆している。

5. まとめ

(1) 単繊維引抜実験結果を基に、せん断ひび割れ面における架橋則の修正を行った。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することを確認した。

- (2) DFRCC を用いた梁部材の曲げせん断実験を行い、繊維混入率の違いによる架橋効果の差異を確認した。
- (3) DFRCC によるせん断補強効果をひび割れ角度を考慮した架橋則により評価した。体積混入率1%の試験体では精度良く評価できたが、2%の試験体では評価値が実験値を過大評価した。

謝辞

本研究の一部は、第56回(2017年度)竹中育英会建築研究助成により実施しました。

参考文献

- 1) 佐野直哉ほか: 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
- 2) 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
- 3) 大圖友梨子ほか: 架橋則に基づく DFRCC のせん断架橋性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1123~1128, 2017.7
- 4) Li, V.C. et al.: Effect of Inclining Angle, Bundling, and Surface Treatment on Synthetic Fiber Pull-out from a Cement Matrix, Composites, vol.21, No.2, pp.132-140, 1990
- 5) Kanda, T., Li, V.C.: Interface Property and Apparent Strength of a High Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No.1, pp.5-13, 1998
- 6) 橋本裕子ほか: FRCC におけるアラミドおよび PP 短繊維の抜出し挙動と架橋則の構築, 日本コンクリート工学会コンクリート工学論文集, 第28巻, pp.103~111, 2017.11
- 7) 大圖友梨子ほか: 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