

筑波大学大学院博士課程
システム情報工学研究科修士論文

架橋則に基づく
DFRCC のせん断架橋性能の評価

大圖 友梨子
修士（工学）
（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保 利之

2018年 3月

架橋則に基づく DFRCC のせん断架橋性能の評価

論 文 概 要

コンクリート自体の引張性能の改善を目的として、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%混させ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 の高い引張靱性を活かし構造部材へ適用することで、構造物の損傷の低減やひび割れ幅抑制効果が報告されている。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。

本論文では、DFRCC の性能評価手法として、ひび割れを跨ぐ各単繊維の引拔挙動を足し合わせて引張架橋性能を表現する架橋則に着目し、せん断力作用下のひび割れ面における二軸応力状態を考慮した架橋則を新たに構築するとともに、二軸応力状態を模擬する要素実験および繊維混入率を実験因子とした梁の曲げせん断実験を行い、実験より得られたせん断架橋性能の評価を行った。

せん断ひび割れ面における架橋則は、従来の架橋則の計算方法にひび割れ角度を導入することで算出した。架橋則の計算において、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、既往の単繊維引拔モデルを繊維の付着長（埋込長）を考慮したモデルに修正した。ひび割れ角度を考慮した架橋則を算出した結果、ひび割れ角度が増大するにつれて、最大引張応力が減少することが確認された。

せん断ひび割れ面における二軸応力状態を模擬する簡便な要素実験手法として、角柱試験体に斜めの切欠きを設けた試験体の引張試験を実施した。架橋則と同様に、ひび割れ角度が大きくなるに従い、最大ピーク時荷重が低下する傾向がみられた。実験結果と架橋則の計算結果の比較では、ひび割れ角度 0° 、 15° および 30° では、架橋則により実験結果を良く表現できた。ひび割れ角度 45° では、最大引張力以外の領域では良好な対応関係を示しているものの、最大引張力が過大評価となった。

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。一方、最大荷重に着目すると、モルタルのみの試験体に比べ繊維体積混入率 2%の試験体では耐力が大幅に上昇したものの、体積混入率 1%の試験体ではほぼ同等の耐力となった。実験時のひび割れ画像解析により得たひび割れ幅をもとに算出した繊維負担せん断力と、ひび割れ角度を考慮した架橋則から得られる繊維負担せん断力を比較すると、繊維体積混入率 1%の試験体では架橋則による評価値が実験値を精度良く評価できたものの、2%の試験体では評価値が実験値を過大評価した。

目次

第1章	序論	1
1.1	高靱性繊維補強セメント複合材料	1
1.2	架橋則を用いた DFRCC の引張性能の評価	3
1.2.1	架橋則の概要	3
1.2.2	繊維マトリックス間の付着	4
1.2.3	繊維配向角が引拔挙動に与える影響	6
1.2.4	ひび割れ面における繊維の配向性	7
1.2.5	架橋則の算出	8
1.3	ひび割れ面におけるせん断伝達機構	9
1.4	研究目的	11
第2章	ひび割れ面でのせん断架橋性能	12
2.1	はじめに	12
2.2	せん断ひび割れ面における架橋則	13
2.2.1	ひび割れ角度を考慮した架橋則の概要	13
2.2.2	単繊維引拔実験に基づく引拔モデルの修正	14
(1)	単繊維引拔実験概要	14
(2)	単繊維引拔モデルの検討	15
(3)	実験結果とモデルの比較	18
2.2.3	ひび割れ角度を考慮した架橋則の構築	19
2.3	実験概要	20
2.3.1	試験体	20
2.3.2	使用材料	22
2.3.3	加力・計測方法	23
2.4	実験結果	24
2.5	架橋則の計算結果と実験結果の比較	28
2.6	まとめ	29
第3章	DFRCC 部材のせん断性能の評価	30
3.1	はじめに	30
3.2	実験概要	31
3.2.1	試験体	31
3.2.2	使用材料	32
3.2.3	加力方法	33
3.2.4	計測方法	34
3.3	実験結果	36
3.3.1	破壊状況およびせん断力一部材角関係	36
3.3.2	鉄筋の歪	38
3.3.3	ひび割れ性状	39

3.4	DFRCC によるせん断補強効果の評価	43
3.5	まとめ	46
第 4 章	結論	47
	謝辞	48
	参考文献	49

図表目次

表 2.2.1	繊維の形状および力学性能（メーカー公称値）	14
表 2.2.2	マトリックスの調合計画（ kg/m^3 ）	14
表 2.2.3	引抜実験結果（破壊形式：引抜け）	16
表 2.2.4	単繊維引抜モデルへの入力値	17
表 2.3.1	繊維の形状および力学性能（メーカー公称値）	22
表 2.3.2	DFRCC の調合計画（ kg/m^3 ）	22
表 2.3.3	フレッシュ性状および圧縮試験結果	22
表 2.4.1	実験結果一覧	26
表 3.2.1	試験体一覧	31
表 3.2.2	DFRCC の調合計画	32
表 3.2.3	フレッシュ性状および圧縮試験結果	32
表 3.2.4	鉄筋の引張試験結果	32
表 3.3.1	実験結果一覧	37
表 3.4.1	繊維負担せん断力（実験値）	44
表 3.4.2	繊維負担せん断力の比較	45
図 1.1.1	繊維補強セメント複合材料の分類 ¹⁾	2
図 1.2.1	DFRCC の材料設計手法の概要 ⁴⁾	3
図 1.2.2	単繊維引抜実験の例 ³⁾	4
図 1.2.3	引抜荷重－すべり量関係の模式図 ⁶⁾	5
図 1.2.4	PVA 繊維に対する単繊維引抜モデルの例 ^{3),5)}	5
図 1.2.5	繊維が配向角を有する場合の引抜抵抗機構	6
図 1.2.6	繊維配向角分布の一例 ⁹⁾	7
図 1.2.7	配向強度および主配向角の定義 ⁵⁾	7
図 1.2.8	繊維配向角およびひび割れ面の定義	8
図 1.3.1	ひび割れ性状の評価方法 ²⁾	9
図 1.3.2	開きおよびせん断ずれの推移 ²⁾ （左：開き，右：せん断ずれ）	10
図 1.3.3	引張力下の一面せん断実験 ¹⁰⁾	10
図 2.2.1	ひび割れ角度の定義	13
図 2.2.2	ひびわれ角度を考慮した架橋則の考え方	13
図 2.2.3	引抜試験体形状および加力状況	14
図 2.2.4	引抜荷重－すべり量関係（破壊形式：引抜け）	15
図 2.2.5	第1ピーク荷重および最大荷重に対する付着長の影響	16
図 2.2.6	単繊維引抜モデル	16
図 2.2.7	引抜実験結果と引抜モデルの比較	18
図 2.2.8	架橋則の計算結果	19
図 2.3.1	ひび割れ面の二軸応力状態の模擬	20
図 2.3.2	試験体形状	21
図 2.3.3	切欠き詳細図	21

図 2.3.4	加力状況	23
図 2.4.1	加力後の試験体の様子	25
図 2.4.2	引張力ーひび割れ変位関係	25
図 2.4.3	切欠き部外ひび割れ	26
図 2.4.4	ひび割れ状況（切欠き 2 辺試験体）	27
図 2.5.1	実験結果と架橋則の計算結果の比較	28
図 3.2.1	試験体配筋	31
図 3.2.2	加力時の曲げモーメント図	33
図 3.2.3	加力方法	33
図 3.2.4	加力状況	33
図 3.2.5	全体変形用変位計位置	34
図 3.2.6	局部変形用変位計位置	34
図 3.2.7	歪ゲージ貼付位置	34
図 3.2.8	ひび割れ撮影箇所	35
図 3.3.1	最終破壊状況	37
図 3.3.2	せん断力ー部材角関係（右：最大荷重付近までの拡大）	37
図 3.3.3	肋筋の歪分布	38
図 3.3.4	ひび割れ幅の算出方法	39
図 3.3.5	No.1 ひび割れ性状（左：領域 A, 右：領域 B）	40
図 3.3.6	No.2 ひび割れ性状（左：領域 A, 右：領域 B）	41
図 3.3.7	No.3 ひび割れ性状（左：領域 A, 右：領域 B）	42
図 3.4.1	梁部材の評価に用いる架橋則	44
図 3.4.2	架橋則を用いた繊維負担せん断力の導出過程	44

第1章 序論

1.1 高靱性繊維補強セメント複合材料

コンクリートは圧縮強度に比べ引張強度が極めて小さく、引張応力下において脆性的な性質を示す。通常のコンクリート構造物は、コンクリート中に鉄筋を配筋して鉄筋コンクリート構造とすることで、鉄筋が引張力を負担する。コンクリート自体の引張性能の改善を目的として、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%混入した繊維補強セメント複合材料（FRCC : Fiber-Reinforced Cementitious Composites）の研究が長きに渡り行われている。ひび割れを繊維が架橋することで、繊維が引張力を負担し、靱性が向上する。使用する繊維も多岐にわたり、鋼繊維やポリビニルアルコール（PVA）繊維、ポリプロピレン（PP）繊維等の有機繊維も用いられ、力学性能はもちろん、耐久性や耐腐食性、コスト等においてそれぞれ長所を有している。古くから研究が行われており、主に鋼繊維を用いた繊維補強コンクリート（FRC : Fiber-Reinforced Concrete）も FRCC の範疇に含まれる。図 1.1.1 に繊維補強セメント複合材料の分類を示す¹⁾。

FRCC の引張性能をさらに向上させた材料として、高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC : Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites）がある。曲げ応力下において、初期ひび割れ発生後に応力上昇するたわみ硬化性状を発現し、複数ひび割れ特性を有する靱性の高い材料である。DFRCC の高い引張靱性を活かし構造部材へ適用することで、構造物の損傷の低減やひび割れ幅抑制効果が報告されており^{例えば 2)}、構造物の軽量化や耐久性の向上、通常のコンクリート構造には不可能な構造形態の実現等が見込まれる。

一方、DFRCC を構造部材に適用した例は少ない。DFRCC の範疇に含まれ、一軸引張応力下において歪硬化性状を発現する高性能繊維補強セメント複合材料（HPFRCC : High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites）は、高層集合住宅の境界梁として適用された例があるが、増厚補強などのあと施工の補修・補強材等の非構造部材としての適用や、高強度コンクリートの爆裂防止を目的とした利用など、繊維の架橋性能に期待して構造設計に反映させた例は極めて少ない。

実部材への利用が少ない要因として、特長である引張性能の統一した評価方法が確立されていないことが挙げられる。材料特性のばらつきや、型枠形状や打設時の流動等により繊維の配向性に差異が生じることが、定量的な引張性能評価の実現を難しくしている。

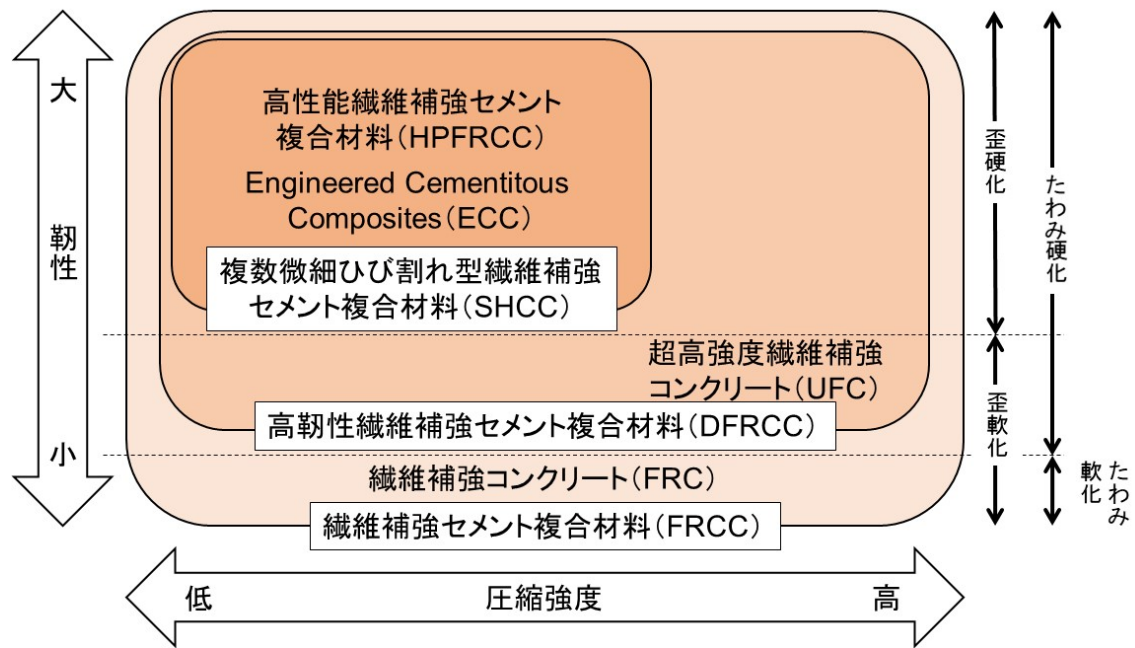


図 1.1.1 繊維補強セメント複合材料の分類¹⁾

1.2 架橋則を用いた DFRCC の引張性能の評価

1.2.1 架橋則の概要

DFRCC の優れた引張性能は、ひび割れ面における各単繊維の引拔挙動に起因する。繊維の引拔挙動は、繊維の種類や力学性状、マトリックスの性能、繊維－マトリックス間の付着特性などにより影響され、DFRCC の引張性能を定量的に評価するには、材料レベルからの検討が必要となる。そこで、既往の研究³⁾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いる。架橋則は、実験的に得られた単繊維の引拔挙動を、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る。架橋則を用いた材料設計手法の一連の流れ⁴⁾を図 1.2.1 に示す。架橋則を用いることで、繊維とマトリックスの付着や繊維の破断強度などのミクロレベルの材料構成要素から、マクロレベルの力学性状を得ることが可能となり、より精確な引張性能評価が実現される。既往の研究^{3),5)}では、PVA 繊維を対象として、単繊維の引拔実験により得られた繊維－マトリックス間の付着特性および繊維配向角が引拔挙動に与える影響を基に、繊維の配向性を考慮した架橋則を構築している。

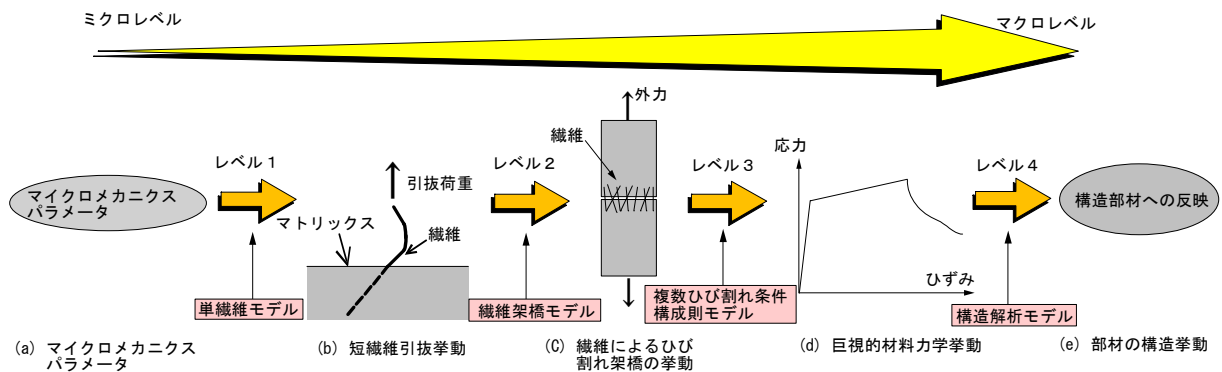


図 1.2.1 DFRCC の材料設計手法の概要⁴⁾

1.2.2 繊維－マトリックス間の付着

架橋則を構築する上で最も基本となるのが、単繊維引抜実験に基づく単繊維引抜挙動である。マトリックス中の繊維に引張力が作用すると、繊維はマトリックスとの付着によって抵抗することが知られており⁶⁾、繊維－マトリックス間の付着が単繊維引抜挙動を特徴付ける。単繊維引抜実験の例を図 1.2.2 に、PVA 繊維に対する実験から得られる荷重－すべり量関係の例を図 1.2.3 に示す。PVA 繊維とマトリックスの付着特性は、化学的な結合による付着と摩擦による付着により特徴付けられる。図 1.2.3 中の引抜荷重 P_d 時までの領域では弾性的な挙動を示し、化学的な結合による付着が埋め込み口部から徐々に剥離して、剥離した部分は摩擦による付着に切り替わる。引抜荷重 P_d 時、繊維の埋込長全長に渡り化学付着が剥離し、急激に荷重が低下する。その後摩擦による付着のみに移行して繊維の抜け出しが進展する。引抜荷重 P_d 後は、図 1.2.3 では荷重が減少しているが、これは、摩擦付着強度を一定とみなした場合であり、抜け出しの進展とともに繊維の表面が荒らされることで見かけの摩擦付着強度が上昇して引抜荷重が増大する例が報告されている⁶⁾。

実験により得られた引抜荷重－すべり量関係は、架橋則の計算に用いるためモデル化される。既往の研究^{3),5)}では、図 1.2.4 左図に示すように、化学付着の剥離点、見かけの摩擦付着強度の上昇により迎える最大荷重点、および荷重喪失点によるトリリニアモデルでモデル化されている。

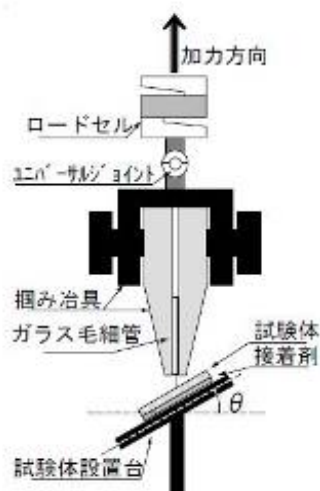


図 1.2.2 単繊維引抜実験の例³⁾

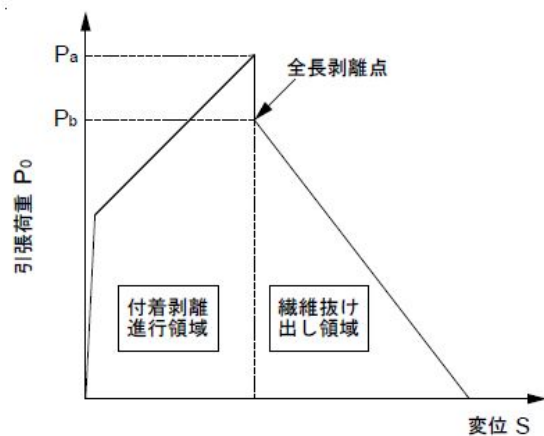


図 1.2.3 引拔荷重－すべり量関係の模式図⁶⁾

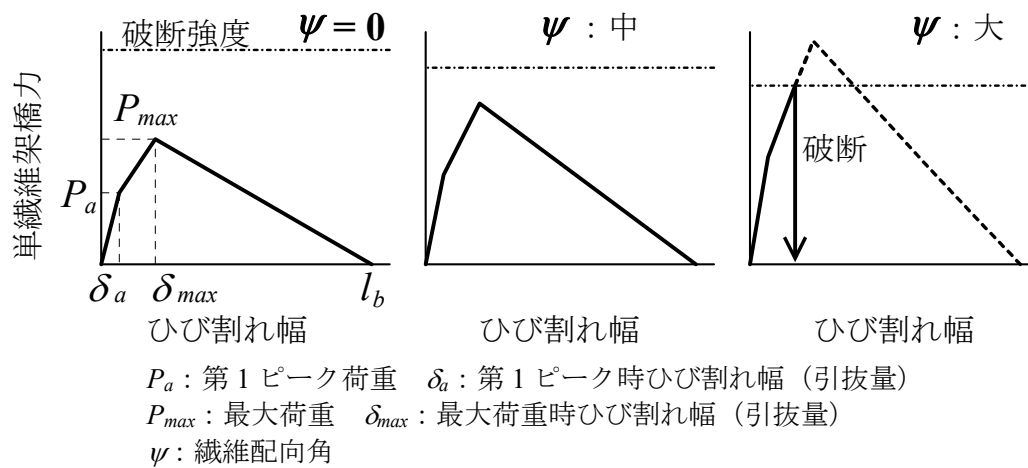


図 1.2.4 PVA 繊維に対する単繊維引拔モデルの例^{3),5)}

1.2.3 繊維配向角が引抜挙動に与える影響

ひび割れ面の繊維が配向角を有する場合の繊維の引抜抵抗機構を表す模式図を図 1.2.5 に示す。繊維に配向角がある場合、繊維の埋め込み口部に反力が生じ、見かけの摩擦付着強度が上昇して引抜荷重が増大する⁷⁾。この特徴はスナビング効果と呼ばれており、スナビング係数 f を用いて以下の式(1)により表される。

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

ここで、 P ：引抜荷重， P_0 ：配向角 0° の場合の引抜荷重， ψ ：繊維配向角

さらに、PVA 繊維のような柔らかい繊維において、繊維表面が荒らされ見かけの繊維破断強度が低下する⁸⁾。この現象は、繊維強度低減効果と呼ばれ、繊維強度低減係数 f' を用いて以下の式(2)により表される。

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

ここで、 σ_{fu} ：見かけの繊維強度， σ_{fu}^n ：配向角 0° の場合の繊維強度

スナビング係数 f および繊維強度低減係数 f' は、単繊維引抜実験の結果より算出される。図 1.2.4 に示すように、配向角 ψ が增大するとスナビング効果により引抜荷重が増大するが、配向角 ψ がさらに増大すると繊維が破断する。

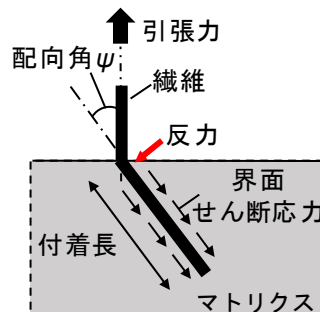


図 1.2.5 繊維が配向角を有する場合の引抜抵抗機構

1.2.4 ひび割れ面における繊維の配向性

既往の研究^{3),5)}では、繊維の配向性を架橋則に反映させるため、適当な確率密度関数として楕円分布を与えている。水ガラスを用いた繊維配向可視化実験において画像解析により算出した、繊維配向角の相対度数分布の例⁹⁾を図 1.2.6 に示す。図 1.2.6 中の実線が楕円分布を示す。楕円分布において、繊維配向性の指標として、配向強度 k および主配向角 θ_r なる値が用いられる。図 1.2.7 に示すように、繊維配向角分布における配向角の各階級の相対度数を、配向角を偏角として平面座標上に表し、最小二乗法により楕円に近似する。楕円の径の比 (a/b) を配向強度 k とし、径 a と座標軸のなす角を主配向角 θ_r とする。主配向角 θ_r の取り得る値は、 $-45^\circ < \theta_r \leq 45^\circ$ であり、径 a は楕円の長径にも短径にもなりうる。主配向角 θ_r へ配向性の強さが配向強度 k であり、 $k=1$ 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 θ_r 方向への配向性が強く、 k が 1 よりも小さい場合は θ_r と直交する方向への配向性が強いことを示す。配向強度 k および主配向角 θ_r を用いた楕円分布の式を、式(3)および式(4)に示す。

$$p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{C}{\cos^2 \theta + A \sin \theta \cos \theta + B \sin^2 \theta} \quad (3)$$

$$A = \frac{(1-k) \sin 2\theta_r}{1 + (k-1) \sin^2 \theta_r}, \quad B = \frac{k - (k-1) \sin^2 \theta_r}{1 + (k-1) \sin^2 \theta_r}, \quad C = \frac{1}{1 + (k-1) \sin^2 \theta_r} \quad (4)$$

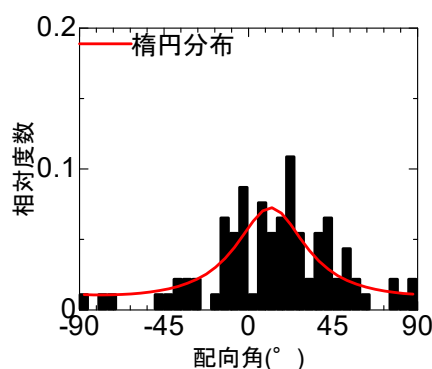


図 1.2.6 繊維配向角分布の一例⁹⁾

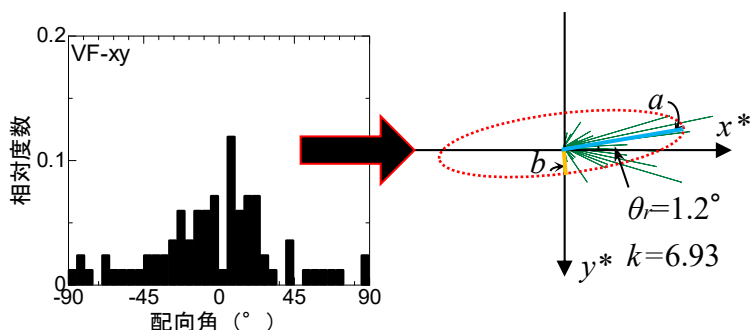


図 1.2.7 配向強度および主配向角の定義⁵⁾

1.2.5 架橋則の算出

架橋則の算出に必要な繊維配向角およびひび割れ面の定義を図 1.2.8 に示す。ひび割れを架橋している各単繊維に対して楕円分布に基づき配向角を与え、単繊維の引抜実験に基づく単繊維引抜モデルを適用して足し合わせることで、式(5)により架橋則が算出される。単繊維引抜挙動は、スナビング効果および繊維強度低減効果を考慮して式(6)により表される。

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_i \sum_j P_{ij}(\delta, \psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z) \quad (5)$$

$$P = P_{pull} \cdot e^{f \cdot \psi} < P_{rup} \cdot e^{-f' \cdot \psi} \quad (6)$$

ただし、 $P > P_{rup} \cdot e^{-f' \cdot \psi}$ となった場合は破断と判定し、以降は $P=0$

ここで、 P_{bridge} ：架橋力、 $P_{ij}(\delta, \psi)$ ：単繊維の引張力、
 $p_{xy}(\theta_i)$ ：x-y 平面における配向角分布を示す確率密度関数、
 $p_{zx}(\phi_j)$ ：z-x 平面における配向角分布を示す確率密度関数、
 $p_x(y_h, z_h)$ ：x 軸方向への繊維の分散性を示す確率密度関数、
 P_{pull} ：配向角 0° における単繊維の引抜荷重、 P_{rup} ：繊維破断荷重、 f ：スナビング係数、
 f' ：繊維強度低減係数、 ψ ：x 軸に対する繊維配向角、
 θ ：繊維を x-y 平面に投影した線と x 軸とのなす角 ($-90^\circ < \theta \leq 90^\circ$)、
 ϕ ：繊維を z-x 平面に投影した線と x 軸とのなす角 ($-90^\circ < \phi \leq 90^\circ$)

算出した架橋則は、一軸引張試験結果と良い対応関係を示すことが報告されている^{3),5)}。

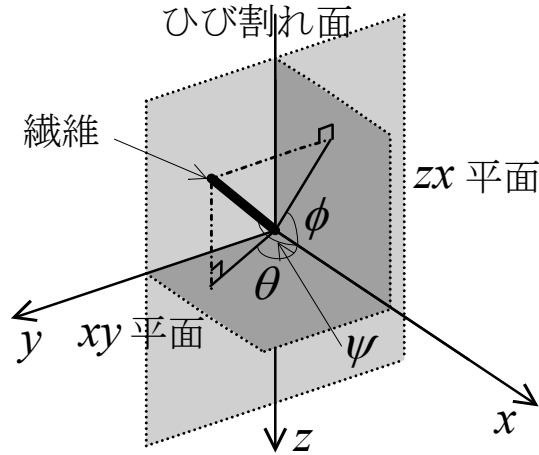


図 1.2.8 繊維配向角およびひび割れ面の定義

1.3 ひび割れ面におけるせん断伝達機構

既往の研究¹⁰⁾では、図 1.1.1 において歪硬化性状を示す SHCC の範疇に含まれる ECC (Engineered Cementitious Composites) を用いた梁部材の一方方向曲げせん断実験を行い、通常の RC 部材に対する既往の耐力式¹¹⁾による最大耐力の計算値を大幅に上回る実験結果を得ている。DFRCC 部材のひび割れ面では繊維の架橋力が力を伝達していると考えられ、繊維の架橋性能が構造性能の向上に大きく貢献していることが容易に想像できる。DFRCC 部材の構造性能の評価に、繊維の架橋効果を定量的に反映させることで、精確な構造性能の評価が可能となる。

既往の研究²⁾では、プレキャスト工法の特長を活かし、パネルゾーンのみに PVA 繊維を体積混入率で2%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。せん断ひび割れ面における応力伝達機構を検討するため、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 1.3.1）、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 1.3.2 に示す。図 1.3.2 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と考えられるが、DFRCC ではひび割れを跨ぐ繊維の架橋力が力を伝達しているとみられる。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。

既往の研究¹⁰⁾では、ひび割れ面でのせん断伝達機構の解明を目的とし、ECC を対象として引張力下の一面せん断実験を行うことで二軸応力状態を模擬している（図 1.3.3）。しかしながら、ひび割れ面の繊維の架橋性能に基づく応力伝達機構の評価は行われておらず、さらに、図 1.3.3 に示す試験方法は歪硬化性状を示さない DFRCC の場合、引張载荷のみで破壊する恐れがある。

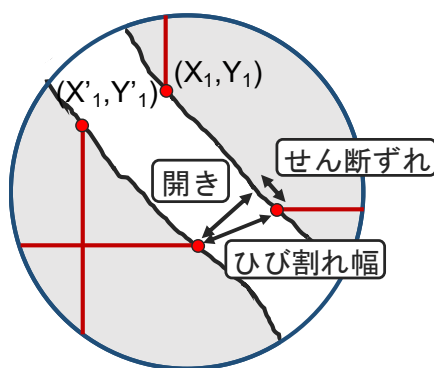


図 1.3.1 ひび割れ性状の評価方法²⁾

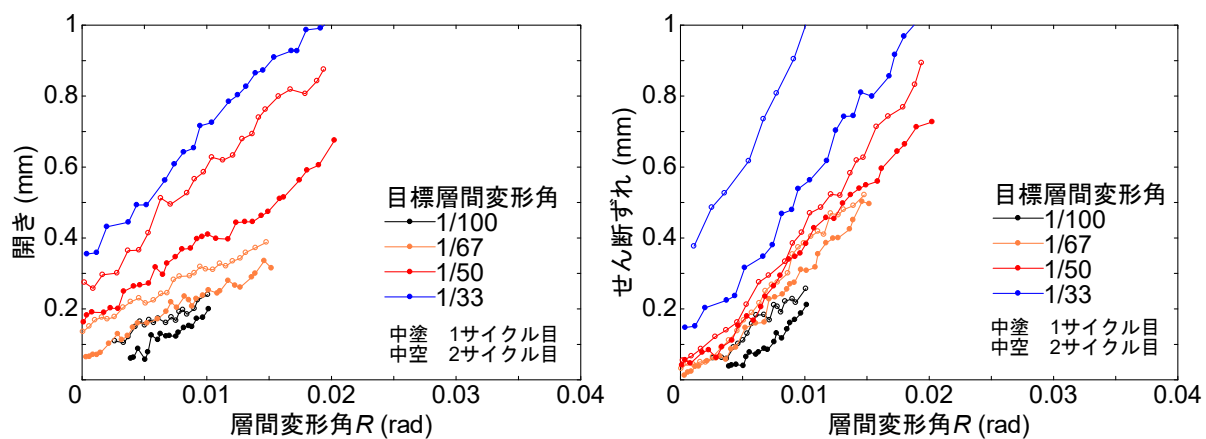


図 1.3.2 開きおよびせん断ずれの推移²⁾ (左：開き，右：せん断ずれ)

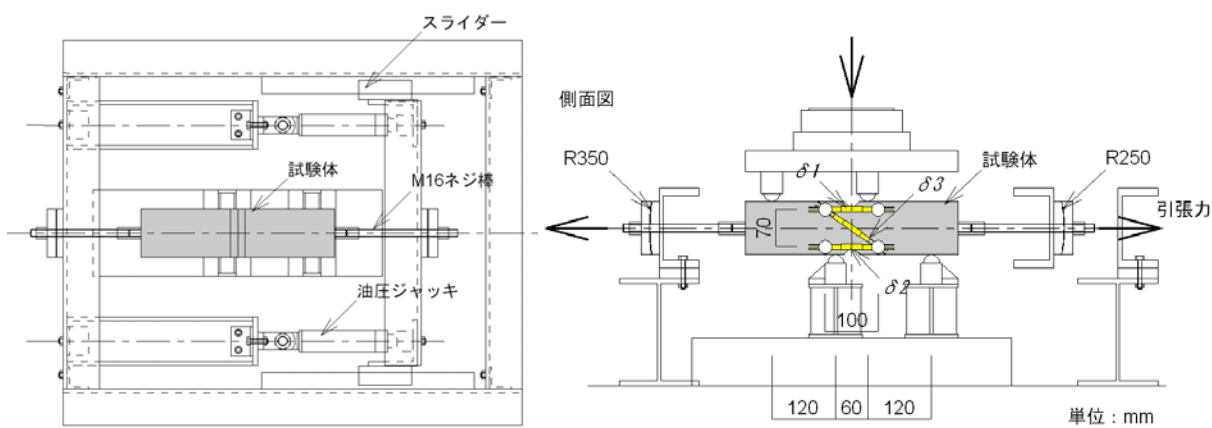


図 1.3.3 引張力下の一面せん断実験¹⁰⁾

1.4 研究目的

近年、建物の高層化や耐久性の向上といった社会の需要から、構造部材に要求される性能も高まってきている。優れた引張性能を有する DFRCC の構造部材への適用を促進することが大いに期待されており、統一された性能評価手法を提案することが急がれる。DFRCC の高い引張性能は、ひび割れを跨ぐ繊維の引拔挙動に起因しており、単繊維の引拔挙動を出発点とする架橋則を性能評価に適用することで、引張性能はもとより、せん断性能をも含む精確な力学性状の評価が可能となる。

本研究では、PVA 繊維を用いた DFRCC を対象に、性能評価手法として架橋則に焦点を当て、せん断ひび割れ面における繊維の架橋性能の評価を試みる。

第 2 章では、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算出する。ひび割れ面の繊維のせん断伝達性能を検討するため、せん断ひび割れ面における二軸応力状態を模擬した簡便な試験方法を考案し、繊維の架橋性能を実験的に得ることで、構築した架橋則の有用性を検証する。なお、同時に単繊維引拔実験を行って、既往の単繊維引拔モデルを、繊維の付着長（埋込長）を考慮したモデルに修正する。

第 3 章では、梁部材の曲げせん断実験を行い、DFRCC 部材の構造性能を実験的に得る。実験より得られた繊維によるせん断補強効果を架橋則により評価し、構造部材に対する架橋則の適用可能性を検証する。

第2章 ひび割れ面でのせん断架橋性能

2.1 はじめに

DFRCC 部材のせん断ひび割れ面は，引張応力とせん断応力が同時に作用する二軸応力状態であると考えられる。DFRCC では，ひび割れを跨ぐ繊維の架橋力によりせん断力が伝達されることが考えられることから，せん断架橋性能，すなわち二軸応力状態下の繊維の架橋性能を把握することが，DFRCC のせん断抵抗機構の解明につながると推測される。

本章では，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，ひび割れ面の二軸応力状態を模擬することでせん断架橋性能を検証する簡便な試験方法を導入し，架橋則の計算結果と実験結果の比較を行う。架橋則の計算では，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単繊維引抜実験の結果を考慮し，既往の単繊維引抜モデルを修正して計算に必要なパラメータを決定する。

2.2 せん断ひび割れ面における架橋則

2.2.1 ひび割れ角度を考慮した架橋則の概要

ひび割れ角度の定義を図 2.2.1 に示す。ひび割れ角度を有する場合の架橋則を図 2.2.2 のように考える。図 2.2.2 左図は、ひび割れ角度が 0° の場合に引張载荷を行った際の 3 本の繊維それぞれの配向角 (θ_1 , 0° , θ_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° の繊維の鉛直方向に対する繊維の向きを θ_{ini} とすると、3 本の繊維それぞれの配向角は図 2.2.2 中央のように θ_{ini} 分増大する。すなわち、架橋則を計算する際に配向角をひび割れ角度 θ_{ini} 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 2.2.2 右図)。

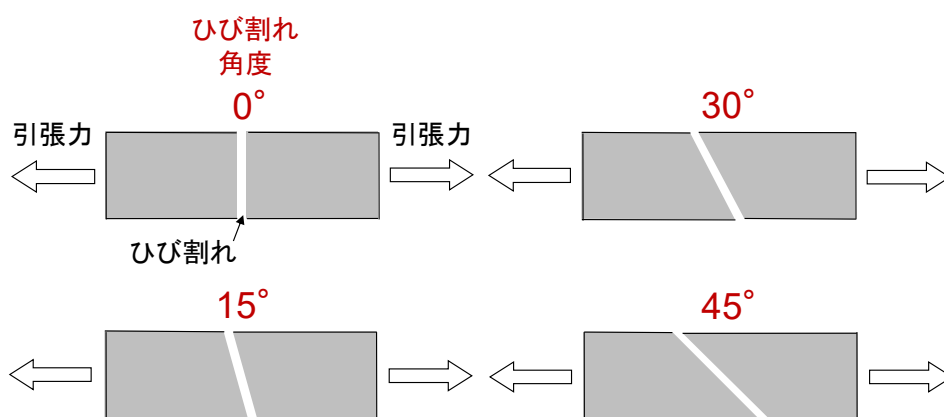


図 2.2.1 ひび割れ角度の定義

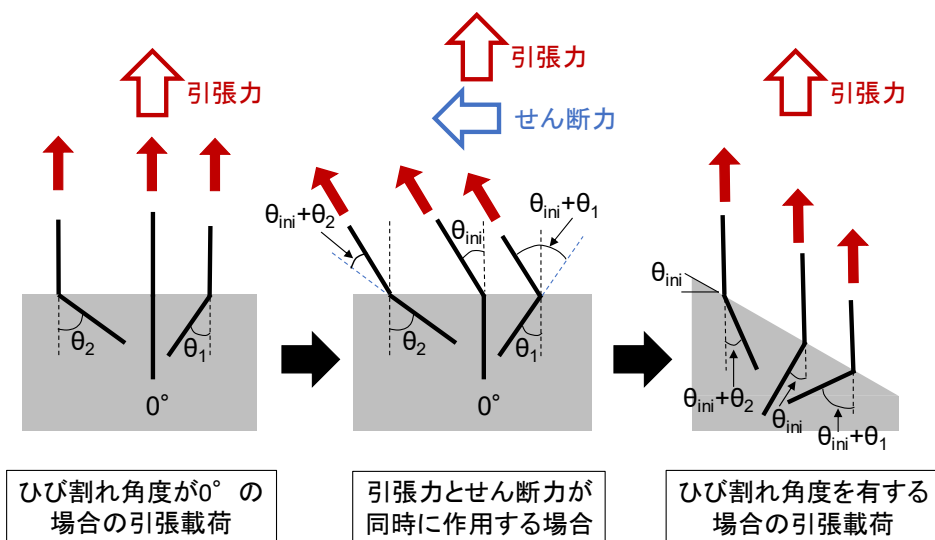


図 2.2.2 ひび割れ角度を考慮した架橋則の考え方

2.2.2 単繊維引抜実験に基づく引抜モデルの修正

(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，単繊維の引抜力ー引抜量関係で表される単繊維引抜モデルを検討するため，次節および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性能を表 2.2.1 に，マトリックスの調合計画を表 2.2.2 に示す。試験体形状および加力状況を図 2.2.3 に示す。既往の研究³⁾を参考として，図 2.2.3 左図に示す試験体を作製し，図 2.2.3 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载荷を行った。実験因子は付着長（1，2，3mm）とした。

表 2.2.1 繊維の形状および力学性能（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 2.2.2 マトリックスの調合計画 (kg/m³)

W	C	S	FA	Ad
380	678	484	291	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

Ad：高性能減水剤

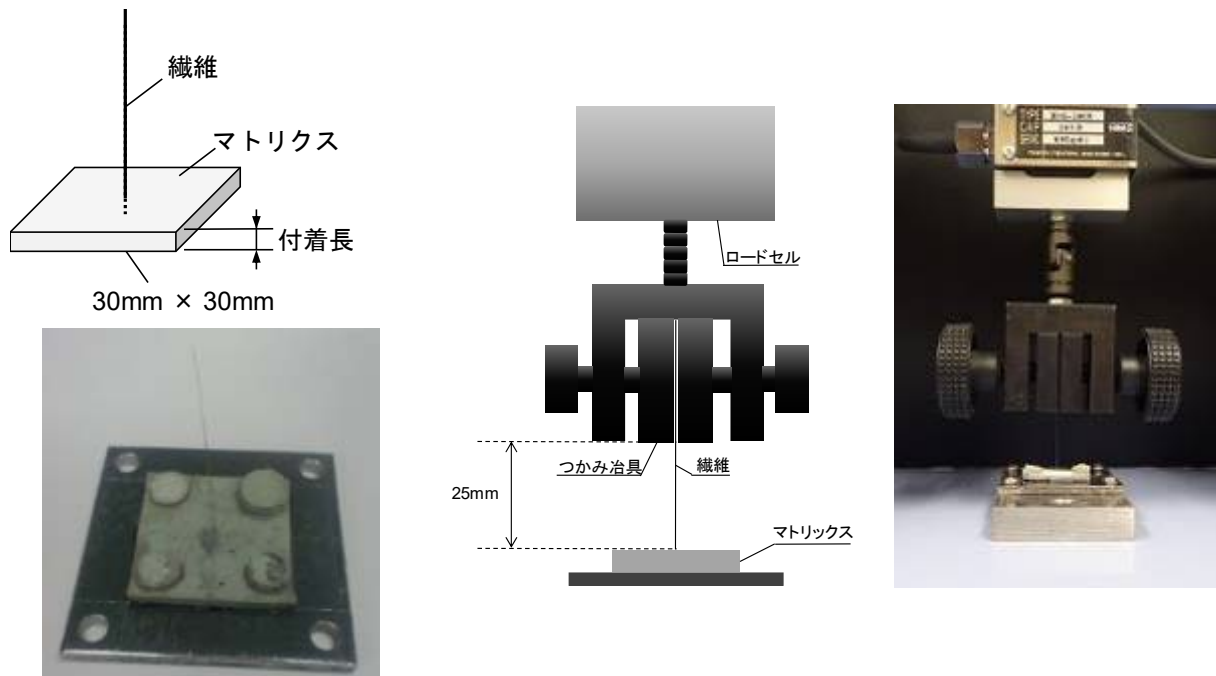


図 2.2.3 引抜試験体形状および加力状況

(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 2.2.4 に、引抜実験結果を表 2.2.3 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 2.2.4 より、試験体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^{3),5)}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。最大荷重後は多くの試験体で、大きな荷重低下とともに繊維がマトリックスから大きく抜け出し、その後徐々に引き抜かれた。これは、第 1 ピーク時に化学的な付着の剥離によって表面が荒らされた繊維の見かけの摩擦付着強度が上昇することで荷重が上昇し、最大荷重時に噛み合いが外れることで大きな荷重低下および抜け出しが生じたと考えられる。

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 2.2.5 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 2.2.5 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。この傾向は、第 1 ピーク荷重 P_a に比べ最大荷重 P_{max} において顕著にみられる。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、特に摩擦付着が強化されたとみられる。

以上より、本研究では、単繊維引抜モデルとして図 2.2.6 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 2.2.4 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¹²⁾に倣い、図 2.2.5 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、実部材中の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、繊維の拔出はどちらの端部においても進展すると考えられるが、付着長の長い方の拔出は短い方に比べ小さくなることが予想される。したがって、本研究では、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 2.2.4 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¹³⁾で用いられた値を適用することとした。

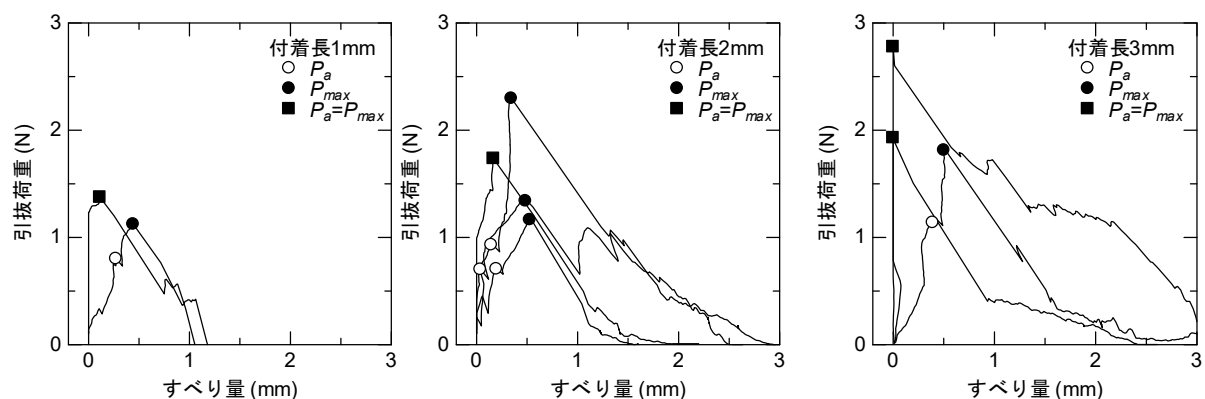


図 2.2.4 引抜荷重－すべり量関係（破壊形式：引抜け）

表 2.2.3 引抜実験結果（破壊形式：引抜け）

試験体名	実測付着長 (mm)	第 1 ピーク時		最大荷重時	
		荷重 P_a (N)	すべり量 s_a (mm)	引抜荷重 P_{max} (N)	すべり量 s_{max} (mm)
PO(1)-1	1.00	0.80	0.27	1.12	0.44
PO(1)-2	0.75	— ^{*1}	— ^{*1}	1.38	0.11
PO(2)-1	1.65	0.70	0.04	1.34	0.49
PO(2)-2	1.80	0.93	0.15	2.30	0.35
PO(2)-3	1.45	0.70	0.20	1.16	0.53
PO(2)-4	1.65	— ^{*1}	— ^{*1}	1.74	0.17
PO(3)-1	2.30	— ^{*1}	— ^{*1}	2.78	— ^{*2}
PO(3)-2	2.80	1.14	0.39	1.81	0.50
PO(3)-3	2.55	— ^{*1}	— ^{*1}	1.93	— ^{*2}

*1：第 1 ピーク荷重と最大荷重が一致するため省略

*2：補正すべり量が 0 以下となったため省略

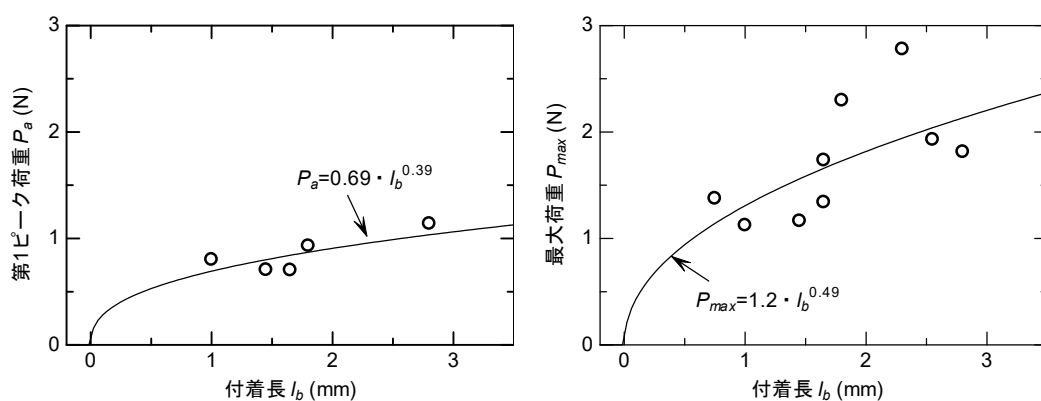


図 2.2.5 第 1 ピーク荷重および最大荷重に対する付着長の影響

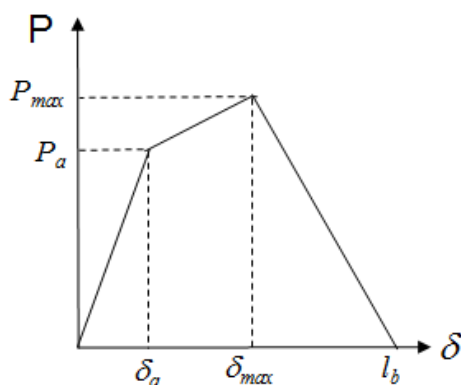


図 2.2.6 単繊維引抜モデル

表 2.2.4 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) $P_a = A_a \cdot l_b^{Ba}$	A_a	0.69
	B_a	0.39
最大荷重 P_{max} (N) $P_{max} = A \cdot l_b^B$	A	1.2
	B	0.49
第1ピーク時引抜量 δ_a (mm)		0.32 (= 0.21×1.5)
最大荷重時引抜量 δ_{max} (mm)		0.56 (= 0.37×1.5)
スナビング係数 f		0.5 ¹³⁾
繊維破断強度 σ_{fu} (MPa)		569 ¹³⁾
繊維強度低減係数 f'		0.3 ¹³⁾
繊維長 l_f (mm)		12

(3) 実験結果とモデルの比較

本研究で適用する単繊維引抜モデルと引抜実験結果の比較を図 2.2.7 に示す。図 2.2.6 中の引抜量は、表 2.2.4 中の第 1 ピーク時引抜量 δ_a および最大荷重時引抜量 δ_{max} の値を 1.5 で除してすべり量に換算することで、実験結果と比較している。適用モデルは破壊形式が引抜けの実験結果については、概ね良好な対応関係を示している。

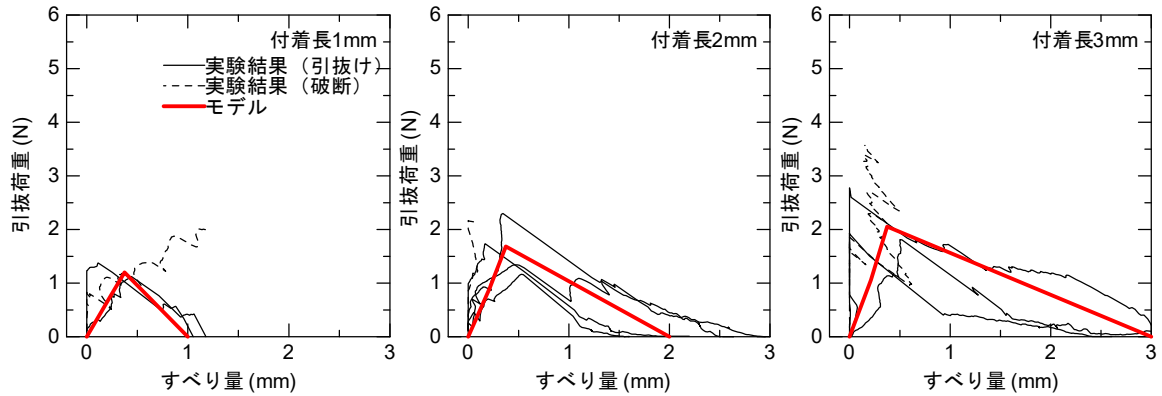


図 2.2.7 引抜実験結果と引抜モデルの比較

2.2.3 ひび割れ角度を考慮した架橋則の構築

架橋則は、ひび割れ面に存在する各単繊維に対して単繊維引抜モデルを適用し、それらを足し合わせることで算出される引張応力－ひび割れ幅関係である。図 2.2.2 に示すように繊維配向角を与え、第 1 章で述べた架橋則の算出方法に従い計算した結果を図 2.2.8 に示す。単繊維引抜モデルには図 2.2.6 および表 2.2.4 を適用し、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 2.2.8 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、繊維の破断が顕著に現れ、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拔量 (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。

ひび割れ角度が増大するにつれて、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と考えられる。

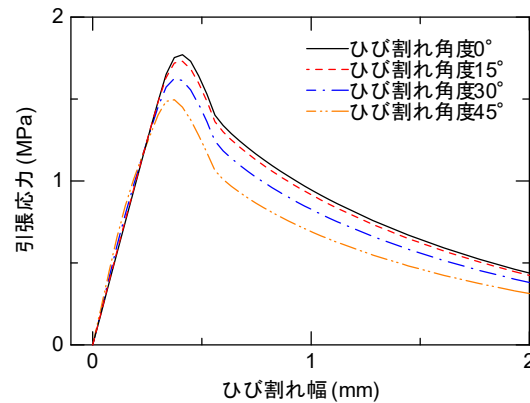


図 2.2.8 架橋則の計算結果

2.3 実験概要

2.3.1 試験体

ひび割れ面における二軸応力状態を模擬するため、図 2.3.1 に示すような試験手法を提案する。図 2.3.1 左図は、引張力とせん断力が同時に作用したときのひび割れ面に存在する繊維の様子のイメージ図である。これを回転させた状態を考えると（図 2.3.1 中央）、図 2.3.1 右図のように角柱試験体に斜めの切欠きを設けて引張载荷を行い斜めひび割れを発生させることで、二軸応力状態の模擬が可能であると推測される。

試験体形状を図 2.3.2 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 600mm 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° 、 15° 、 30° 、および 45° とし、各 3 体ずつ計 12 体作製した。切欠き部の詳細を図 2.3.3 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困難になるため、ひび割れ状況を目視で観察するために、角度 0° 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。

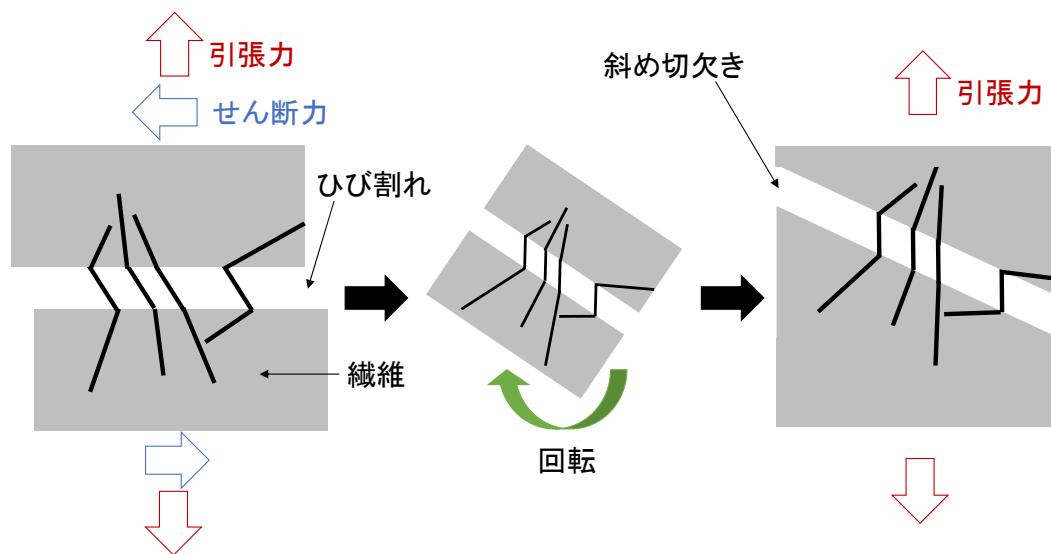
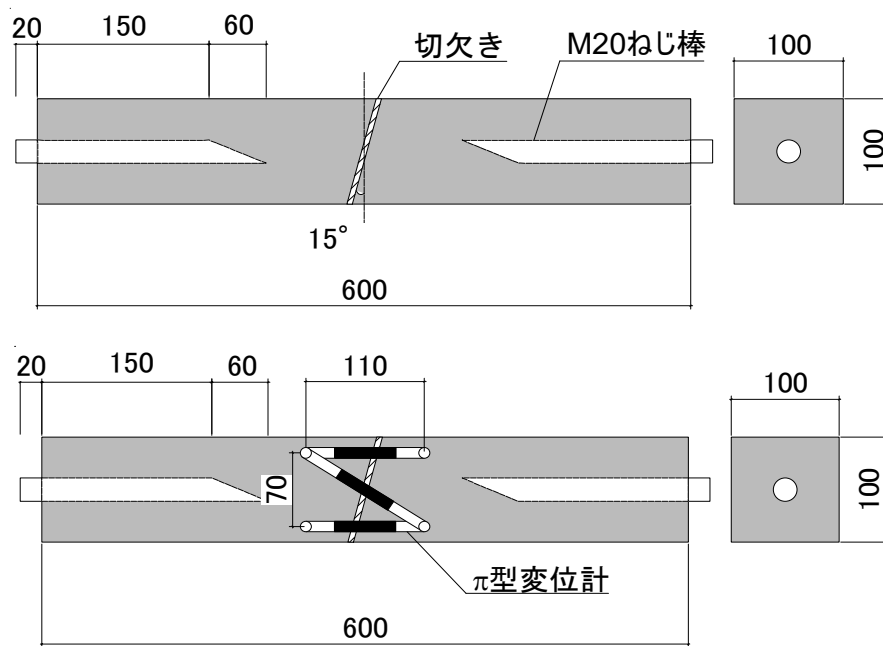


図 2.3.1 ひび割れ面の二軸応力状態の模擬



(単位：mm)

図 2.3.2 試験体形状

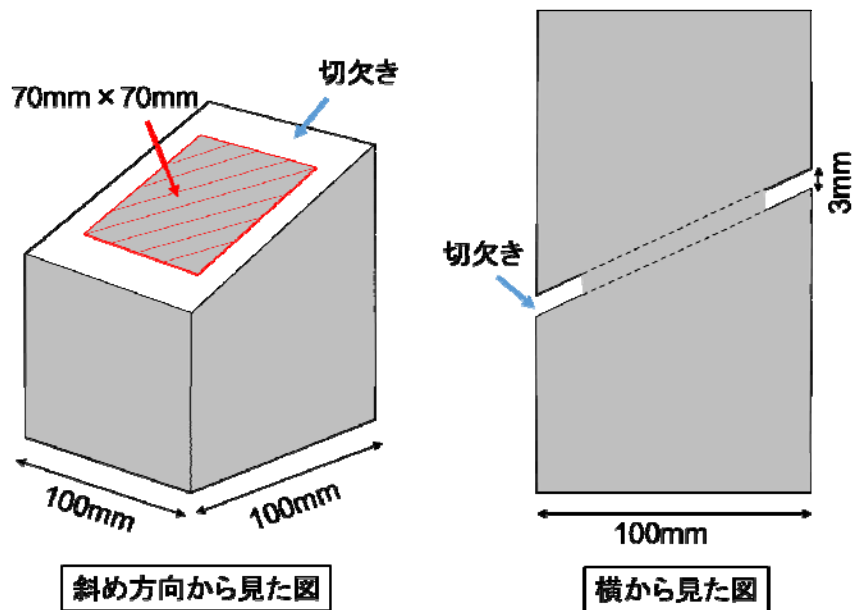


図 2.3.3 切欠き詳細図

2.3.2 使用材料

使用した繊維の形状および力学性能を表 2.3.1 に、DFRCC の調合計画を表 2.3.2 に示す。繊維には、前節の単繊維引抜実験で用いたものと同一径である径 0.1mm、長さ 12mm の PVA 繊維を用い、体積混入率は 2.0%とした。調合計画についても前節と同一であるが、繊維の均一な分散等を考慮し増粘剤を混入している。フレッシュ性状およびφ100-200mm シリンダーによる圧縮試験結果を表 2.3.3 に示す。

表 2.3.1 繊維の形状および力学性能（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 2.3.2 DFRCC の調合計画 (kg/m³)

W	C	S	FA	Fiber	Ad	Thickener
380	678	484	291	26	6	2

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 Thickener：増粘剤

表 2.3.3 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

2.3.3 加力・計測方法

加力状況を図 2.3.4 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 0.5mm として変位制御により単調引張载荷を行った。既往の引張試験^{例えば 5)}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 2.3.2）とした。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。

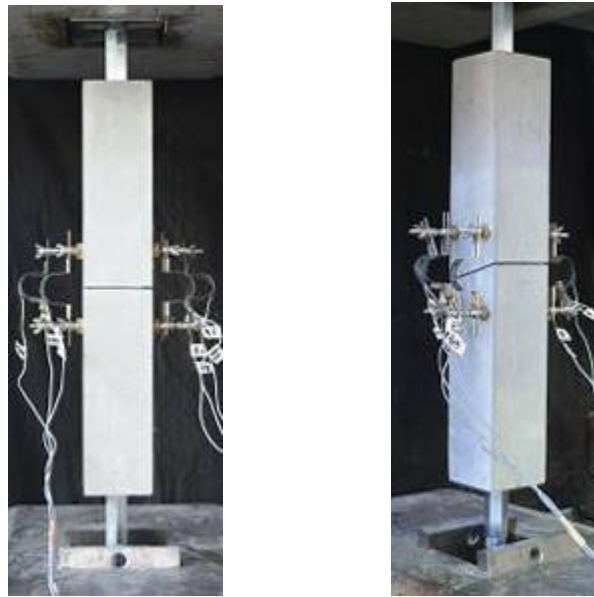


図 2.3.4 加力状況

2.4 実験結果

加力後の試験体の様子を図 2.4.1 に、各試験体の引張力－ひび割れ変位関係を図 2.4.2 に、実験結果一覧を表 2.4.1 に示す。図 2.4.2 における横軸のひび割れ変位は、軸方向に設置した 4 台の π 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° 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 2.4.3）ため、試験結果から省いた。なお、図 2.4.2 中の最大ピーク点は、初期ひび割れ発生後のピーク点であり、すなわちひび割れを跨ぐ繊維の架橋性能のピークを表している。また、表 2.4.1 中の最大ピーク時ひび割れ幅は、ひび割れ変位をひび割れ 1 本あたりのひび割れ幅に補正（後述）した結果である。

図 2.4.2 より、ひび割れ角度が 0° 、 15° 、および 30° 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° 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。

ひび割れ角度が大きくなるに従い、最大ピーク時荷重は低下している。これは、ひび割れ角度の増大とともに、スナビング効果よりも繊維強度の低減効果が顕著に現れたことに起因すると考えられる。

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 2.4.4 に示す。ひび割れは載荷中に目視によりペンでトレースした。図 2.4.4 から、すべての試験体で複数本のひび割れが発生していることがわかる。

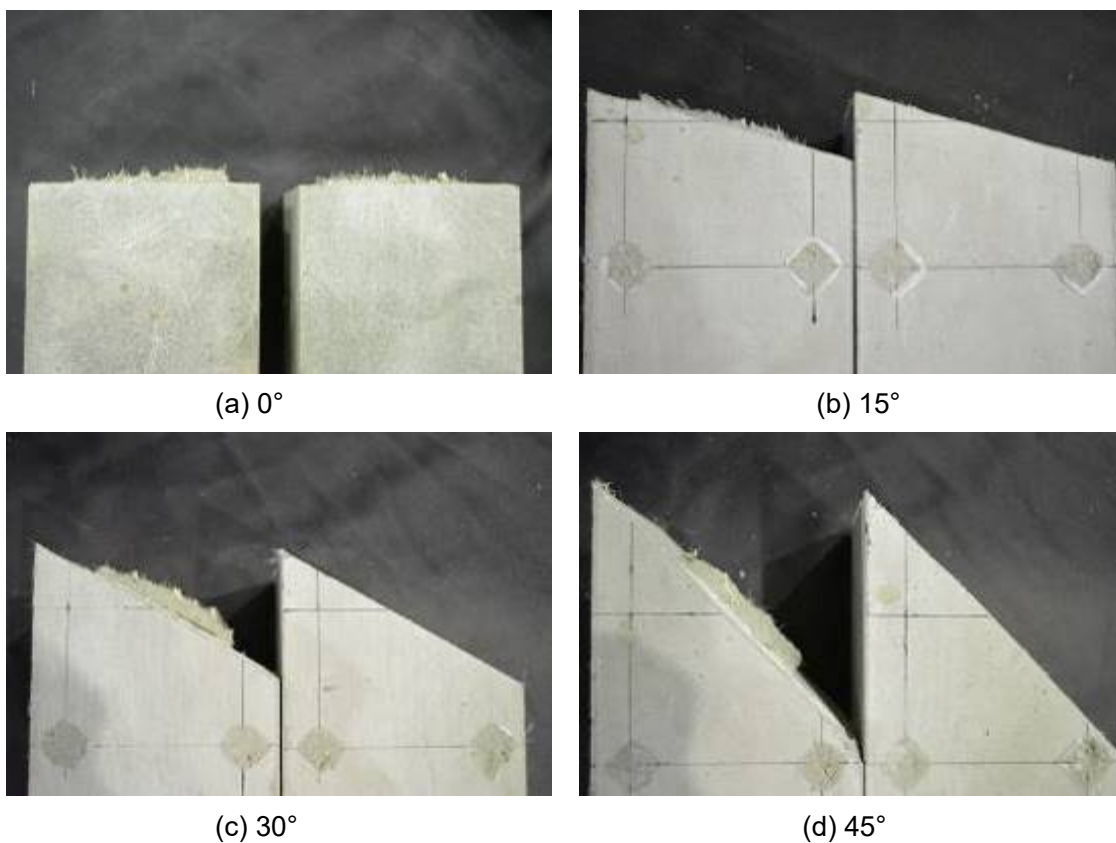


図 2.4.1 加力後の試験体の様子

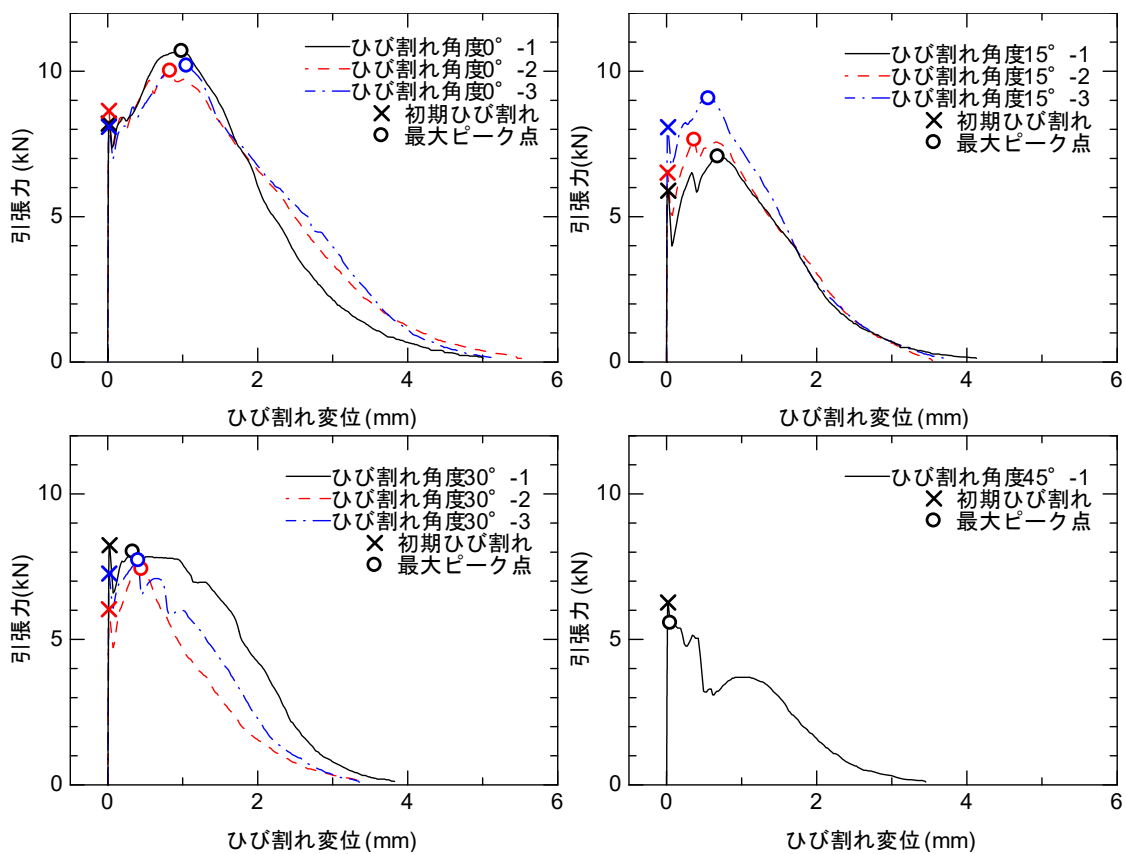


図 2.4.2 引張力ーひび割れ変位関係

表 2.4.1 実験結果一覧

試験体名	ひび割れ角度	初期ひび割れ時		最大ピーク時	
		引張力 (kN)	ひび割れ変位 (mm)	引張力 (kN)	ひび割れ変位 (ひび割れ幅) (mm)
PVA00-1	0	8.20	0.014	10.69	0.99 (0.31)
PVA00-2		8.64	0.016	10.01	0.83 (0.26)
PVA00-3		8.09	0.016	10.19	1.05 (0.33)
PVA15-1	15	5.89	0.023	7.06	0.69 (0.22)
PVA15-2		6.51	0.014	7.64	0.37 (0.12)
PVA15-3		8.08	0.020	9.06	0.56 (0.18)
PVA30-1	30	8.24	0.024	8.01	0.34 (0.11)
PVA30-2		6.04	0.017	7.41	0.45 (0.14)
PVA30-3		7.27	0.019	7.72	0.41 (0.13)
PVA45-1	45	6.27	0.020	5.57	0.050 (0.016)



図 2.4.3 切欠き部外ひび割れ

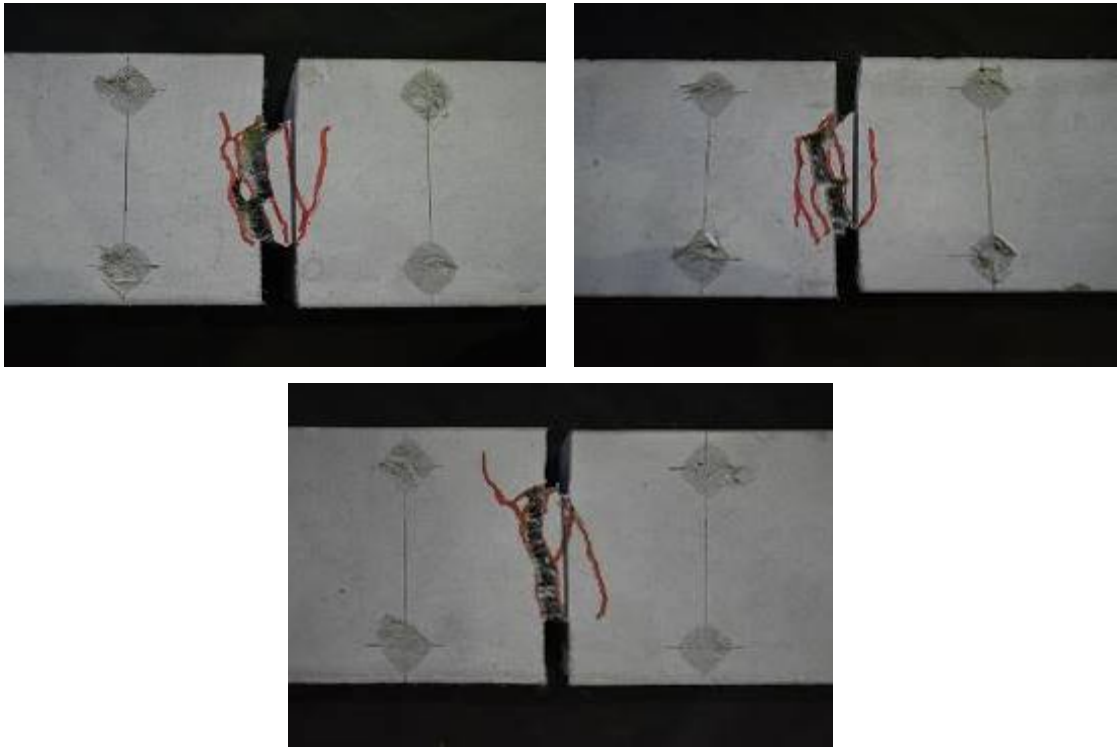


図 2.4.4 ひび割れ状況（切欠き 2 辺試験体）

2.5 架橋則の計算結果と実験結果の比較

図 2.4.2 および図 2.4.4 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想される。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ことから、実験結果と架橋則の計算結果を直接比較するため、実験結果のひび割れ変位をひび割れ1本あたりのひび割れ幅に補正する。

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荷重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幅とする。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 2.4.2 において最大ピーク時荷重までの変位を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本あたりのひび割れ幅とした。

補正を行った実験結果と架橋則の計算結果の引張力-ひび割れ幅関係の比較を図 2.5.1 に示す。架橋則における単繊維引抜性状は図 2.2.6 および表 2.2.4 に示す値を適用し、配向強度は、既往の研究¹³⁾において断面100×100mmの試験体に対して適合性のよい $k=1$ とした。図 2.5.1 より、ひび割れ角度 0° 、 15° および 30° では、架橋則により実験結果を良く表現できている。一方、ひび割れ角度 45° では、最大引張力以外の領域では良好な対応関係を示しているものの、最大引張力が過大評価となっている。ひび割れ角度 45° では、比較する実験結果が少ないため、さらなる実験データの蓄積が必要であると考えられる。

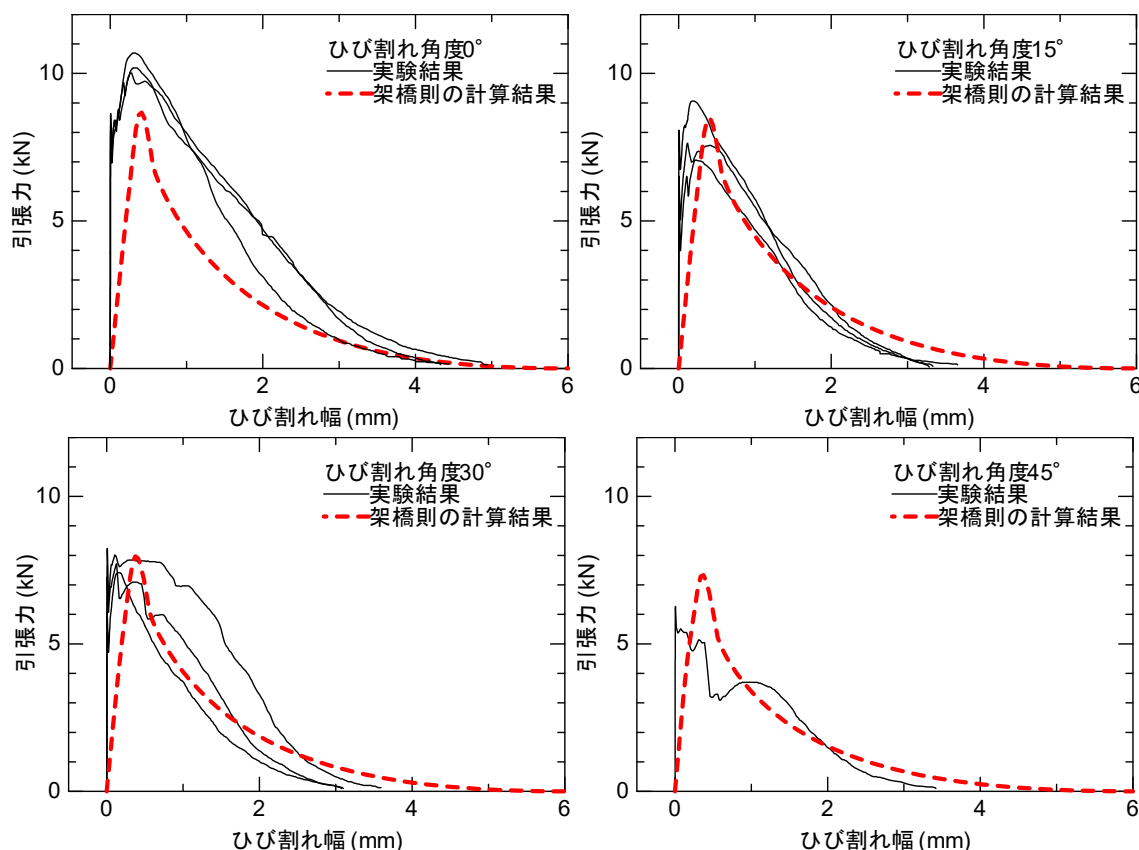


図 2.5.1 実験結果と架橋則の計算結果の比較

2.6 まとめ

本章では，単繊維引抜実験を基に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，ひび割れ面の二軸応力状態を模擬することでせん断架橋性能を検証する簡便な要素試験方法を導入し，架橋則の計算結果と実験結果の比較を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 繊維－マトリックス間の付着性状を既往のモデルと同様にトリリニアモデルによりモデル化し，第1ピーク荷重および最大荷重については付着長により変化するモデルとした。モデルは引抜実験結果と概ね良好な対応関係を示した。
- 2) ひび割れ角度を考慮した架橋則の計算では，ひび割れ角度が増大するにつれて，最大引張応力が減少することが確認された。
- 3) 斜め切欠きを設けた試験体の引張試験では，架橋則と同様に，ひび割れ角度が大きくなるに従い，最大ピーク時荷重が低下する傾向がみられた。
- 4) 斜め切欠きを設けた試験体の引張試験結果と架橋則の計算結果の比較では，ひび割れ角度 0° ， 15° および 30° では，架橋則により実験結果を良く表現できた。ひび割れ角度 45° では，最大引張力以外の領域では良好な対応関係を示しているものの，最大引張力が過大評価となった。

第3章 DFRCC 部材のせん断性能の評価

3.1 はじめに

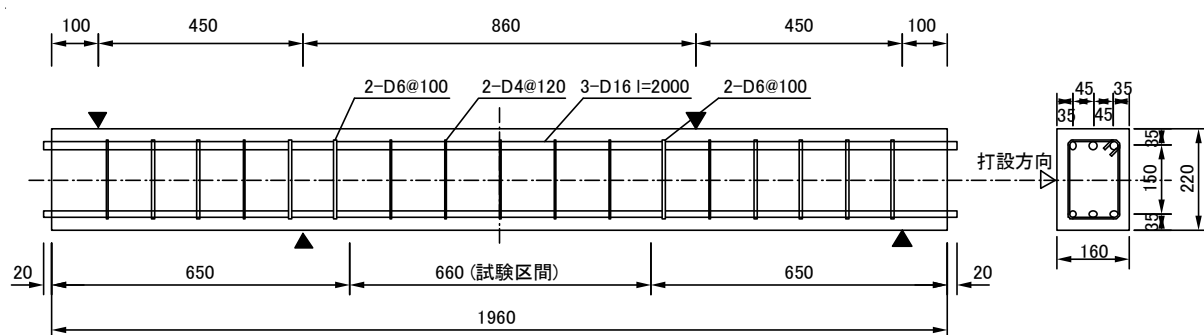
DFRCC では、繊維の架橋性能による優れた引張靱性を期待して、構造部材への適用を促進することが大いに期待されているが、実部材への適用例は数少ない。要因の一つとして、構造性能の評価体系が構築されていないことが挙げられる。長きに渡り DFRCC 部材の耐力評価を目的とした研究は数多く行われているが、耐力評価の要となる DFRCC の引張性能を精確に特徴付ける一般的な手法が確立されていない。

本章では、逆対称曲げモーメント作用下の DFRCC 部材のせん断性能に着目して、繊維混入率を実験因子とした梁部材の曲げせん断実験を行う。さらに、DFRCC の引張性能の評価手法として架橋則を適用し、第 2 章において算出した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に基づいて、繊維の架橋性能による部材に対するせん断補強効果の評価を試みる。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体

試験体配筋を図 3.2.1 に、試験体一覧を表 3.2.1 に示す。試験体は、断面が $160 \times 220 \text{ mm}$ 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。



(単位 : mm)

図 3.2.1 試験体配筋

表 3.2.1 試験体一覧

試験体名	共通事項	繊維	
		種類	体積混入率 V_f
No.1	断面 : $160 \times 220 \text{ mm}$ せん断スパン比 : 1.5	- (モルタル)	-
No.2	主筋 : 3-D16(SD490) $p_t=2.01\%$	PVA	1.0 %
No.3	肋筋 : 2-D4@120(SD295) $p_w=0.15\%$		2.0%

3.2.2 使用材料

使用した繊維の形状および力学性能は第2章表 2.3.1 と同一である。DFRCC の調合計画を表 3.2.2 に示す。DFRCC の調合計画は、繊維量を除いて第2章表 2.3.2 と同一である。フレッシュ性状およびφ100-200mm シリンダーによる圧縮試験結果を表 3.2.3 に、使用した鉄筋の引張試験結果を表 3.2.4 に示す。主筋には SD490 の D16 を、肋筋には SD295 の D4 を用いた。

表 3.2.2 DFRCC の調合計画

試験体名	繊維体積混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	S	FA	Fiber	Ad	Thickener
No.1	-	380	678	484	291	0	6	2
No.2	1.0					13		
No.3	2.0					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

Fiber：PVA 繊維

Ad：高性能減水剤 Thickener：増粘剤

表 3.2.3 フレッシュ性状および圧縮試験結果

試験体名	繊維体積混入率 (%)	温度 (°C)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
No.1	-	14.2	0.85	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

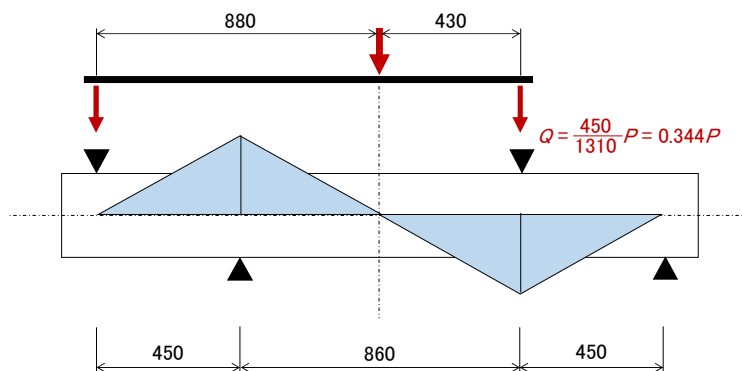
表 3.2.4 鉄筋の引張試験結果

鋼種	呼び名	使用箇所	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SD490	D16	主筋	513	196
SD295	D4	肋筋	391*	180

*0.2%オフセット耐力

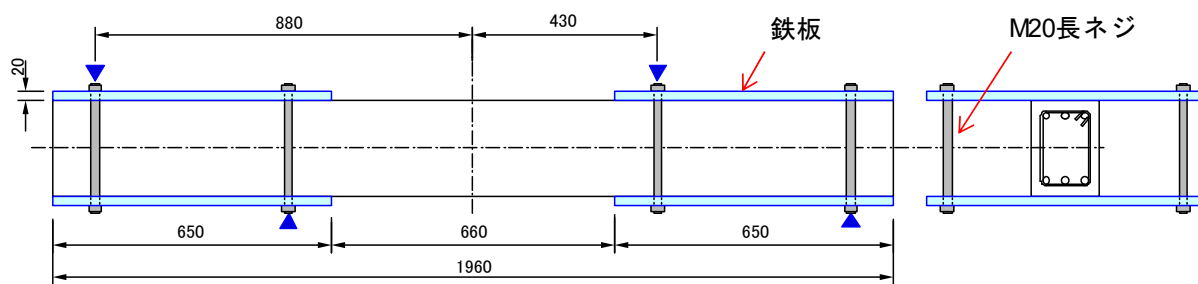
3.2.3 加力方法

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）を行った。加力時の曲げモーメント図を図 3.2.2 に、加力方法の図を図 3.2.3 に、加力時の様子を図 3.2.4 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 3.2.3 に示すように、試験体の試験区間外は 2 枚ずつ計 4 枚の鉄板により挟み込み、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。



(単位：mm)

図 3.2.2 加力時の曲げモーメント図



(単位：mm)

図 3.2.3 加力方法

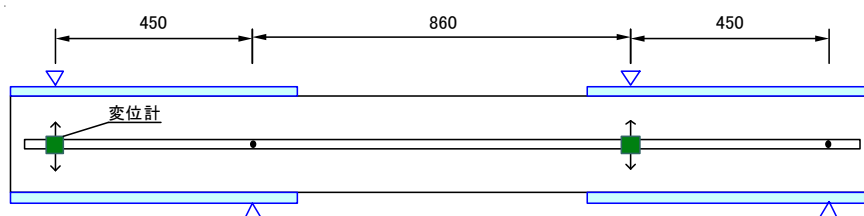


図 3.2.4 加力状況

3.2.4 計測方法

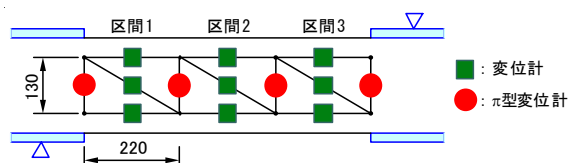
計測項目は、荷重値、全体変形、局部変形、主筋の歪、および肋筋の歪である。全体変形を算出するための変位計の設置位置を図 3.2.5 に、局部変形を算出するための変位計の設置位置を図 3.2.6 に、主筋および肋筋の歪を計測する歪ゲージの貼付位置を図 3.2.7 に示す。全体変形は、試験体側面に試験体全長に渡って通したアングルを支点位置で固定し、加力点位置に変位計を取り付け、変位計より得られた計測値から試験体中心のたわみを算出して求めた。歪ゲージは、試験体 1 体につき主筋は 4 点、肋筋は 5 点貼付した。

せん断ひび割れ性状を評価するため、図 3.2.8 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 $10 \times 10 \text{ mm}$ のメッシュを描き、1pixel が 0.02 mm に相当する $120 \times 80 \text{ mm}$ 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。



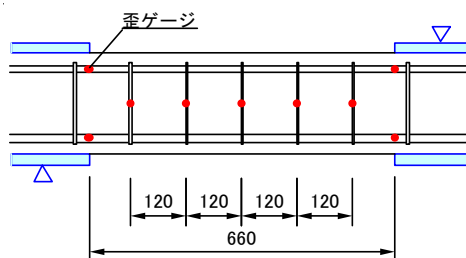
(単位：mm)

図 3.2.5 全体変形用変位計位置



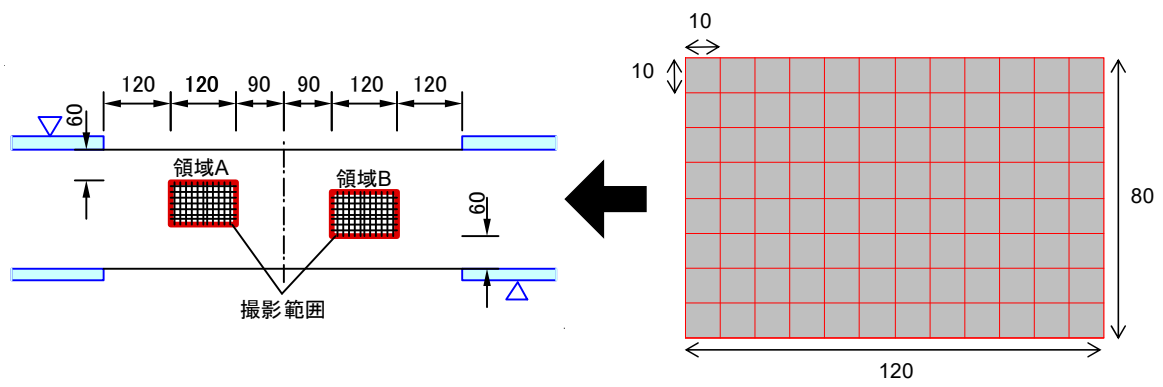
(単位：mm)

図 3.2.6 局部変形用変位計位置



(単位：mm)

図 3.2.7 歪ゲージ貼付位置



(単位：mm)

図 3.2.8 ひび割れ撮影箇所

3.3 実験結果

3.3.1 破壊状況およびせん断力一部材角関係

各試験体の最終破壊状況を図 3.3.1 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であり、写真画像の範囲は試験区間である。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最大荷重を迎えた。図 3.3.1 より、No.1 に比べ繊維を混入した No.2 および No.3 では、繊維の架橋効果により損傷が低減され、特に No.3 では微細なせん断ひび割れが複数発生し、ひび割れの分散性やひび割れ幅が抑制される様子が目視にて確認された。

実験により得られたせん断力一部材角関係を図 3.3.2 に、実験結果一覧を表 3.3.1 に示す。表 3.3.1 中の主たるせん断ひび割れの角度とは、最大荷重時に最も開いたひび割れの角度を、加力終了後、図 3.2.6 における変形測定区間「区間 1」、「区間 2」または「区間 3」のいずれかにおいて実測した値である。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 0.02 rad 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 0.03 rad 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 3.3.2 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、No.3 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。



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

図 3.3.1 最終破壊状況

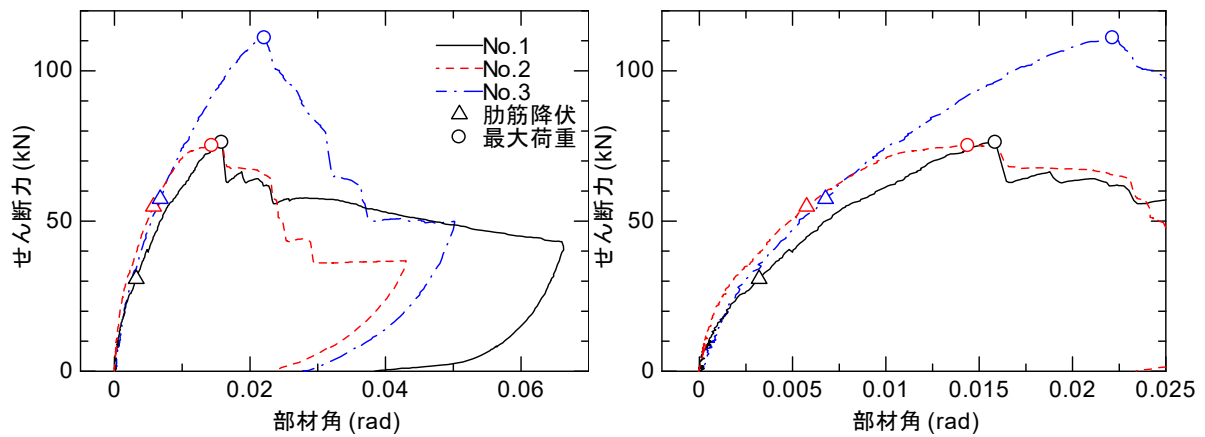


図 3.3.2 せん断力－部材角関係（右：最大荷重付近までの拡大）

表 3.3.1 実験結果一覧

試験体名	主たるせん断 ひび割れの角度 ($^{\circ}$)	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

3.3.2 鉄筋の歪

肋筋の歪分布を図 3.3.3 に示す。図 3.3.3 中の横軸は図 3.2.7 における試験区間の左端からの距離を示しており、破線は表 3.2.4 中の降伏強度を弾性係数で除すことで算出した降伏歪である。部材角 $1/200$ rad 時は No.1 のみ降伏しており、 $1/100$ rad 時には No.2 および No.3 においても降伏が認められる。最大荷重時、No.3 に比べ No.1 および No.2 では歪が局所的に大きくなっている。No.3 では複数の微細なひび割れが発生したため、変形が局所化せず一様に歪が大きくなったとみられる。一方、No.2 では肋筋の伸び能力が十分に発揮される前に、繊維の架橋効果がピークを迎え、最大荷重に達したことが、歪が局所的に大きくなった要因と考えられる。

なお、主筋については、いずれの試験体においても降伏はみられなかった。

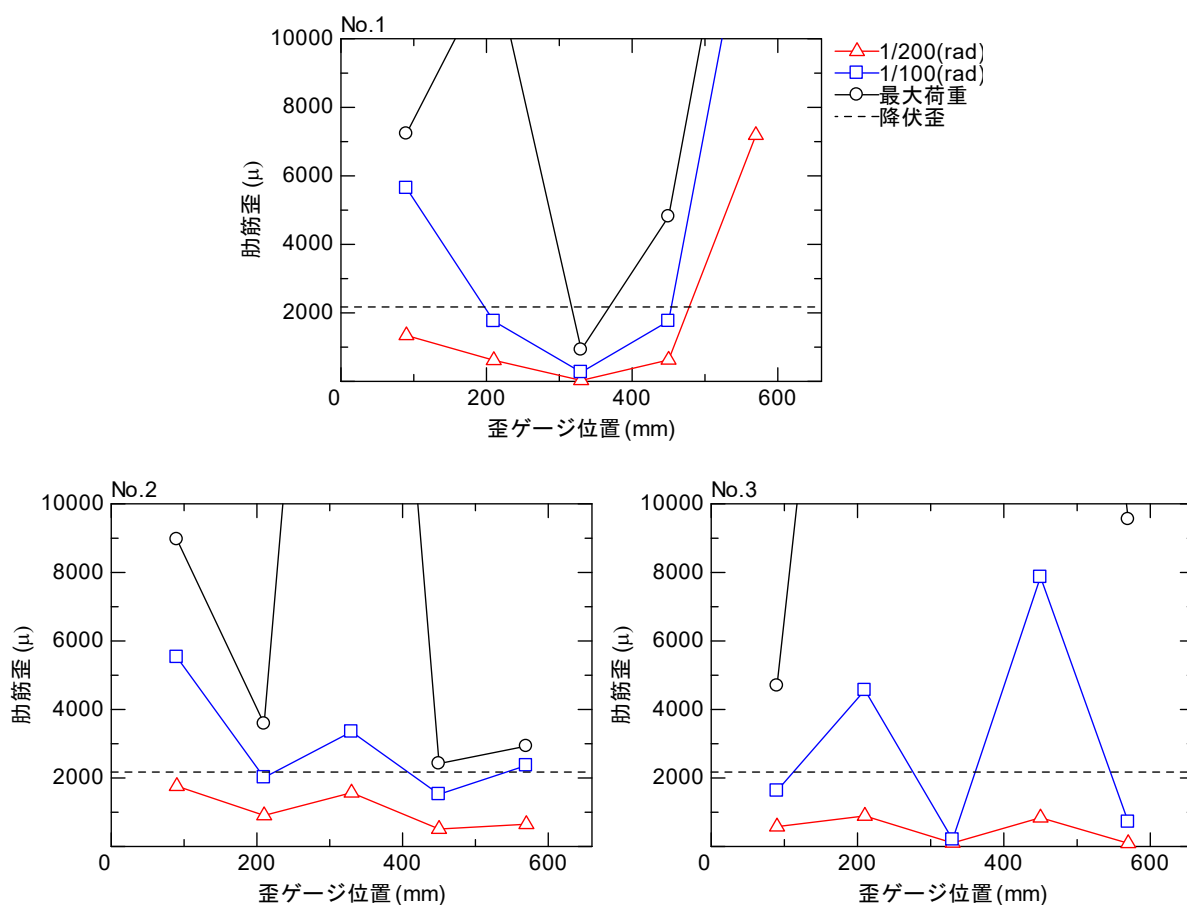


図 3.3.3 肋筋の歪分布

3.3.3 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 3.3.4 に示す。既往の研究²⁾を参考に、図 3.2.8 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 3.3.5～図 3.3.7 に示す。各試験体とも、図 3.3.4 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存在しないため省いた。なお、図 3.3.7 における画像中のひび割れは、判別を容易にするため画像の上からひび割れをトレースしている。

図 3.3.5～図 3.3.7 および表 3.3.1 より、いずれの試験体も、肋筋降伏後付近からひび割れが大きく開き始め、最大荷重において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。

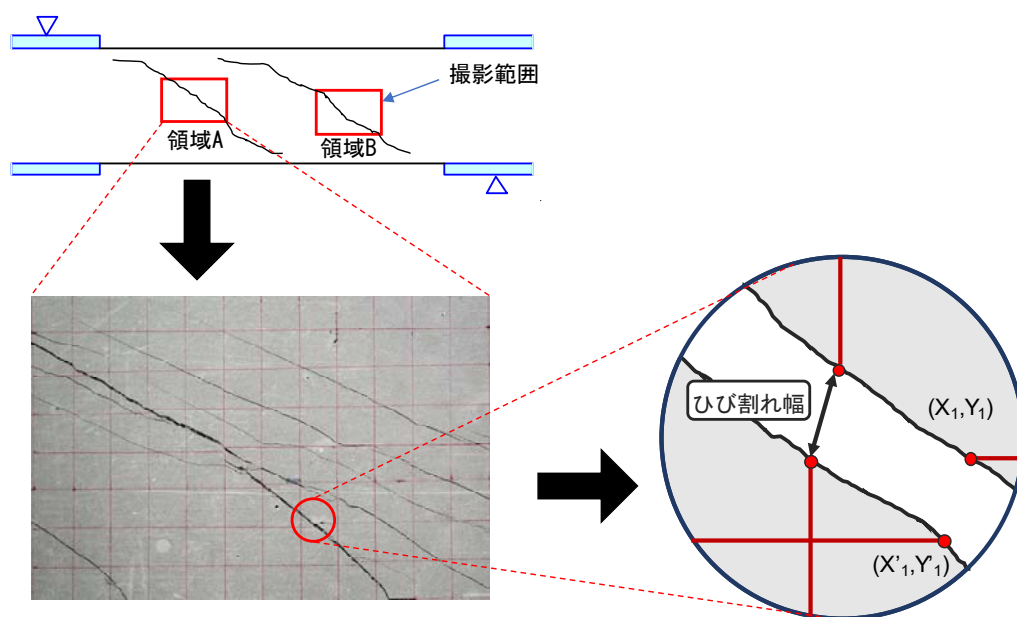


図 3.3.4 ひび割れ幅の算出方法

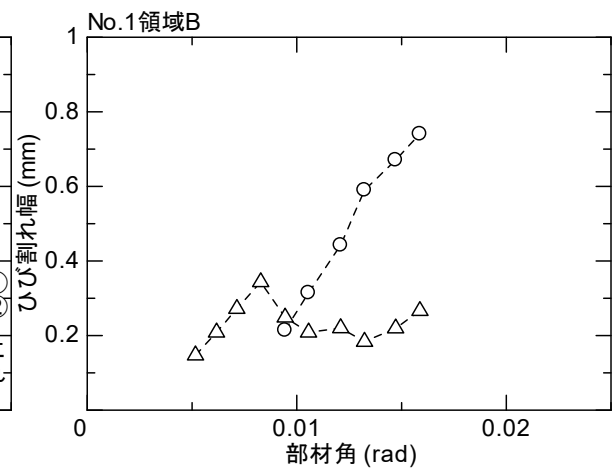
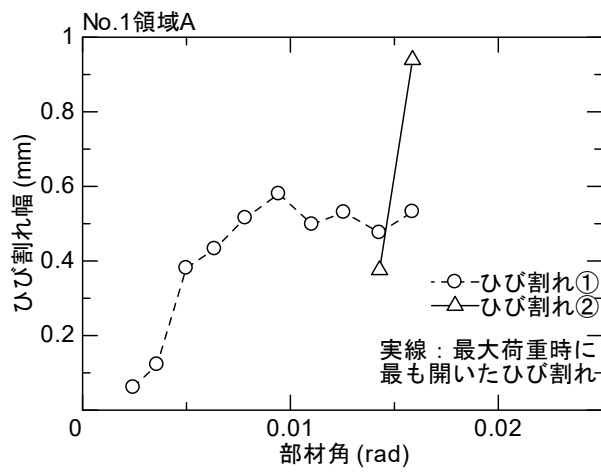
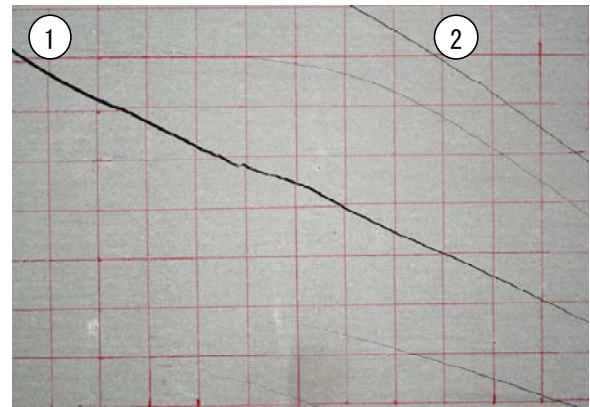
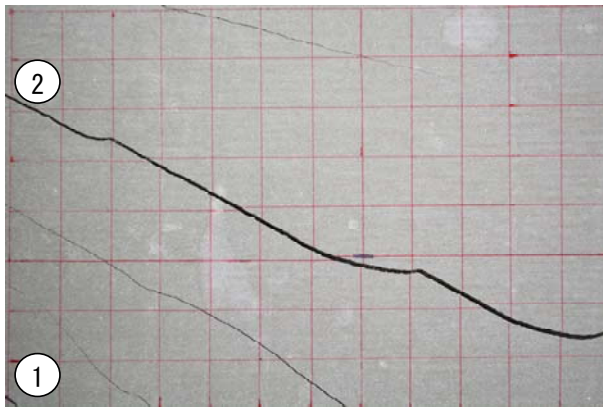
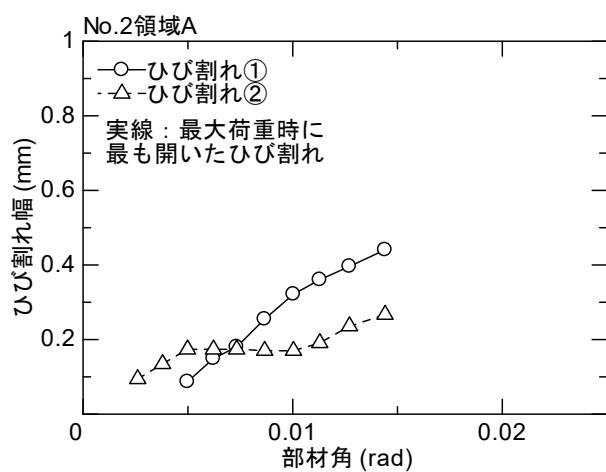
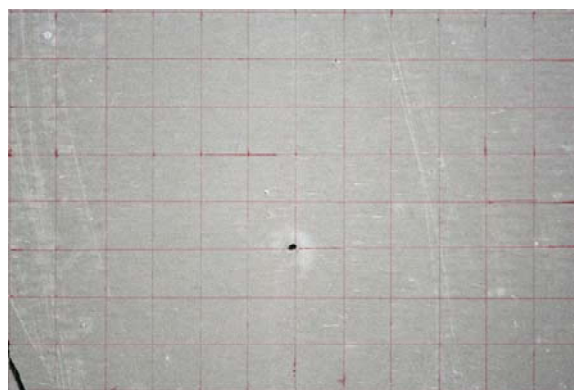
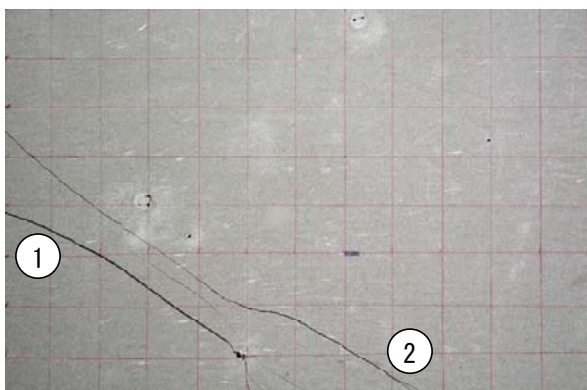


図 3.3.5 No.1 ひび割れ性状 (左：領域 A, 右：領域 B)



計測値無し

図 3.3.6 No.2 ひび割れ性状 (左：領域 A, 右：領域 B)

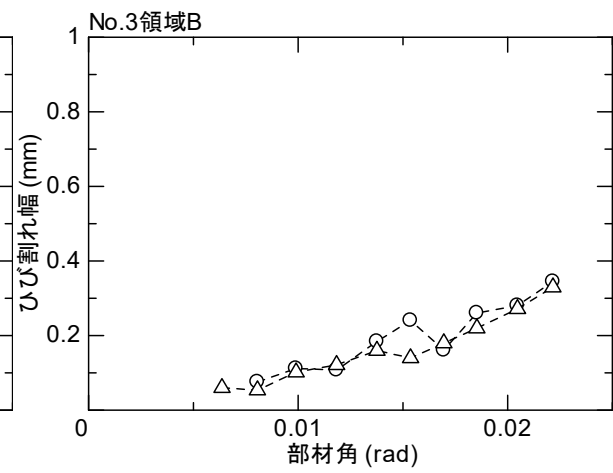
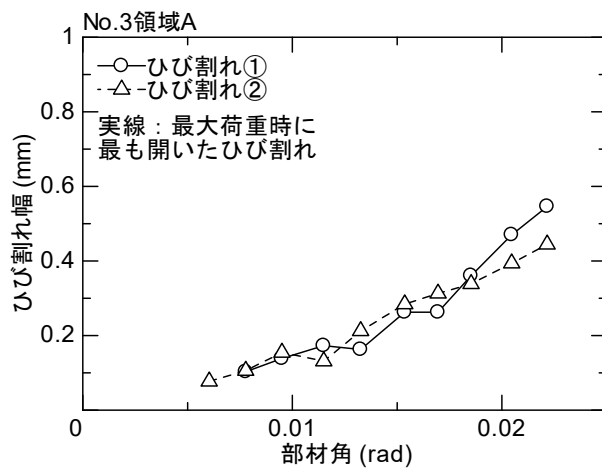
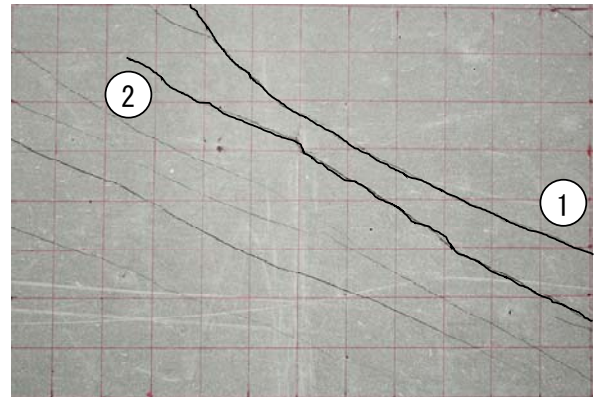
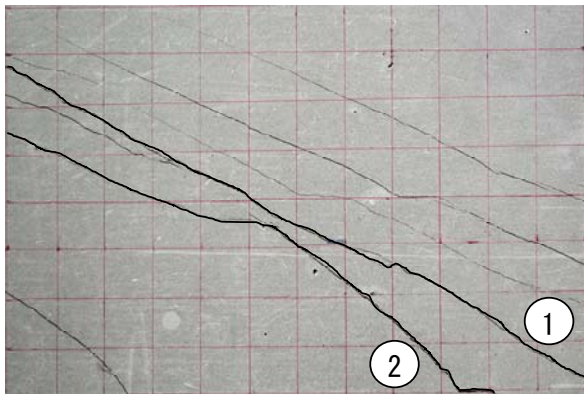


図 3.3.7 No.3 ひび割れ性状 (左：領域 A, 右：領域 B)

3.4 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。本検討で用いる架橋則を図 3.4.1 に示す。架橋則の計算における単繊維引抜モデルは第2章図 2.2.6 および表 2.2.4 の通りで、配向強度は、既往の研究¹³⁾において 180×280mm 断面の試験体に対して適用された $k=0.4$ を用いた。ひび割れ角度は、実験より得られた表 3.3.1 中の主たるせん断ひび割れの角度 (PVA1% : 34.5° , PVA2% : 32.0°) を用いた。

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 3.3.5～図 3.3.7 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、図 3.4.1 における最大引張応力時ひび割れ幅 (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 3.4.1 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する方法を図 3.4.2 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。求めた引張力ーひび割れ幅関係は、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、繊維負担せん断力ー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 3.4.2 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拔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を示唆している。

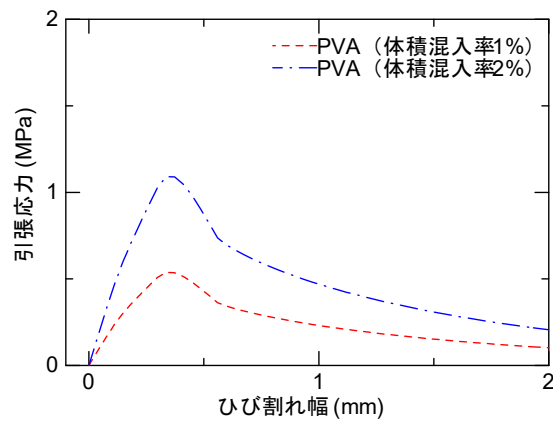


図 3.4.1 梁部材の評価に用いる架橋則

表 3.4.1 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

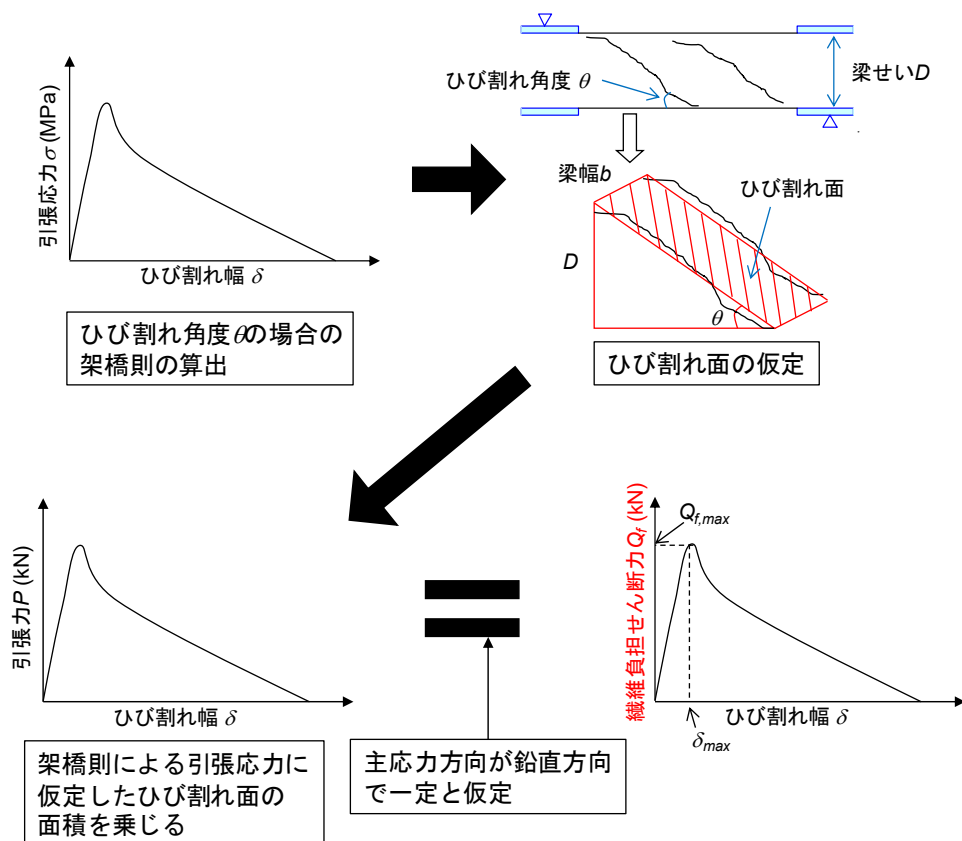


図 3.4.2 架橋則を用いた繊維負担せん断力の導出過程

表 3.4.2 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
No.3 (体積混入率 2%)	62.7	72.4

3.5 まとめ

本章では、DFRCC を用いた梁の曲げせん断実験を行い、第 2 章で算出したひび割れ角度を考慮した架橋則により DFRCC によるせん断補強効果の評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) DFRCC を用いることにより、ひび割れの分散性やひび割れ幅が抑制される様子が目視にて確認された。特に、繊維体積混入率 2%の試験体では、微細なせん断ひび割れが複数発生した。
- 2) 最大荷重に着目すると、モルタルのみの試験体に比べ体積混入率 2%の試験体では耐力が大幅に上昇したものの、体積混入率 1%の試験体ではほぼ同等の耐力となった。
- 3) 発生したせん断ひび割れは、モルタルのみの試験体では、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がみられた。一方、繊維を混入した試験体では、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、モルタルのみの試験体に比べ最大荷重時ひび割れ幅が小さくなった。
- 4) 実験より得られた繊維が負担するせん断力とひび割れ角度を考慮した架橋則から得られる繊維負担せん断力を比較すると、体積混入率 1%の試験体では架橋則による評価値が実験値を精度良く評価できたものの、2%の試験体では評価値が実験値を過大評価した。

第4章 結論

本研究では、PVA 繊維を用いた DFRCC を対象に、性能評価手法として架橋則に焦点を当て、単繊維引抜実験結果を基にせん断ひび割れ面におけるひび割れ角度を考慮した架橋則を構築した。計算した架橋則に基づき、せん断力作用下のひび割れ面における二軸応力状態を模擬する要素実験および梁の曲げせん断実験において得られたせん断架橋性能の評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 単繊維引抜実験では、繊維マトリックス間の付着性状を既往のモデルと同様にトリリニアモデルによりモデル化し、第 1 ピーク荷重および最大荷重については付着長により変化するモデルとした。モデルは引抜実験結果と概ね良好な対応関係を示した。
- 2) ひび割れ角度を考慮した架橋則の計算では、ひび割れ角度が増大するにつれて、最大引張力が減少することが確認された。
- 3) 斜め切欠きを設けた試験体の引張試験では、架橋則と同様に、ひび割れ角度が大きくなるに従い、最大ピーク時荷重が低下する傾向がみられた。
- 4) 斜め切欠きを設けた試験体の引張試験結果と架橋則の計算結果の比較では、ひび割れ角度 0° 、 15° および 30° では、架橋則により実験結果を良く表現できた。ひび割れ角度 45° では、最大引張力以外の領域では良好な対応関係を示しているものの、最大引張力が過大評価となった。
- 5) DFRCC を用いた梁の曲げせん断実験では、ひび割れの分散性やひび割れ幅が抑制される様子が目視にて確認された。特に、体積混入率 2%の試験体では、微細なせん断ひび割れが複数発生した。
- 6) 最大荷重に着目すると、モルタルのみの試験体に比べ繊維体積混入率 2%の試験体では耐力が大幅に上昇したものの、体積混入率 1%の試験体ではほぼ同等の耐力となった。
- 7) 発生したせん断ひび割れは、モルタルのみの試験体では、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がみられた。一方、繊維を混入した試験体では、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、モルタルのみの試験体に比べ最大荷重時ひび割れ幅が小さくなった。
- 8) 実験より得られた繊維が負担するせん断力とひび割れ角度を考慮した架橋則から得られる繊維負担せん断力を比較すると、繊維体積混入率 1%の試験体では架橋則による評価値が実験値を精度良く評価できたものの、2%の試験体では評価値が実験値を過大評価した。

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻の大学院生として、在学中の2年間に行った研究の成果をまとめたものです。

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。指導教員であります筑波大学教授 金久保利之先生には、実験準備から論文作成に至るまで、終始懇切丁寧にご指導ご鞭撻を賜りました。また、研究活動だけでなく、学生生活や進路の相談に対しても多大なご助言をいただきました。この場をお借りして、心より御礼申し上げます。副指導教員であります筑波大学准教授 八十島章先生には、研究活動全般において的確かつ丁寧なご助言をいただきました。同じく副指導教員であります筑波大学教授 松島亘志先生には、研究に対する有益な助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。筑波大学技術職員 小島篤志氏には、試験体製作や実験補助等、多大なご助力をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり、筑波大学 金久保・八十島研究室の多くの方々に研究のご協力をいただきました。特に、同期や同じ研究グループの先輩、後輩には、実験準備から論文執筆に至るまで丁寧なご助言、ご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げますと共に、今後のご活躍を期待しております。

最後に、私事ではございますが、6年間の大学、大学院生活で出会ったすべての方々に、深く御礼申し上げます。

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法研究委員会報告書，2012.9
- 2) 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
- 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) 閑田徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状，コンクリート工学，vol.38，No.6，pp.9-16，2000.6
- 5) 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
- 6) 清田雅量，三橋博三，閑田徹志，川又篤：セメント系複合材料における繊維の付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.187-192，2001
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 宮口大，月崎良一，万子銘，浅野浩平，金久保利之：HFRCC における繊維の配向性に関する研究（その 2：繊維の配向性可視化実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），材料施工，pp.181-182，2014.9
- 10) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井寛：PVA-ECC のひび割れ面でのせん断伝達機構と部材のせん断耐力評価，日本建築学会構造系論文集，第 619 号，pp.133-139，2007.9
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- 12) 橋本裕子，牟雨，山田大，金久保利之：FRCC におけるアラミドおよび PP 短繊維の拔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
- 13) 大図友梨子，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