

論文 架橋則に基づく DFRCC の曲げ性状における寸法効果の評価

大図 友梨子*1・渡邊 啓介*2・八十島 章*3・金久保 利之*4

要旨: 本研究では、PVA 繊維を用いた DFRCC を対象として、繊維配向性を考慮した架橋則の構築を介して、DFRCC の曲げ性状における寸法効果の評価を試みた。試験体寸法を変動因子とした試験体の 4 点曲げ試験を行った結果、寸法が大きくなるに従い強度が低下する寸法効果が確認され、各バッチ試験体のばらつきは、試験体寸法が小さいほど大きくなった。既往の研究に基づいて繊維配向性を考慮した架橋則を計算し、構築した引張側トリリニアモデルを用いた断面解析の結果、寸法が小さいほど試験体軸方向への配向性が強くなるモデルを用いて、実験でみられた寸法効果を表現できた。

キーワード: DFRCC, 繊維配向性, 架橋則, 曲げ試験, 断面解析

1. はじめに

モルタルに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) では、モルタルマトリックス中の繊維の配向性や分散性が、DFRCC の力学性状、特に引張性状に大きな影響を及ぼす(例えば¹⁾)。繊維補強コンクリートに関する研究も含めると、繊維の配向性や分散性に関する研究は 1960 年代から行われてきており、繊維配向性に関する種々の評価や提案がなされているが、それらと DFRCC の力学性状を定量的に結びつけた研究はほとんどみられない。

DFRCC の引張性状は架橋則と呼ばれる、ひび割れを架橋する繊維の引張力とひび割れ幅の関係により決定付けられる。架橋則は、1 本の繊維がマトリックスから引抜かれる挙動の総和で表現され、マトリックス中の繊維の配向性に大きく影響される。したがって、繊維の配向性を定量的に評価し架橋則に反映させることで、DFRCC の精確な力学性状の評価が可能となる。

一方、DFRCC を用いた部材の力学性能においても、コンクリートと同様に、試験体寸法によって特性が変化する寸法効果が存在する(例えば²⁾)。DFRCC では、特に繊維の配向性に起因する寸法効果が存在すると思われる。これは、ウォールエフェクトと呼ばれる、繊維が型枠に沿って 2 次元状に配向する性状により生じると考えられ、試験体寸法が小さいほど曲げ強度および変形能が増大する。

本研究では、PVA 繊維を用いた DFRCC を対象として、繊維配向性を考慮した架橋則の構築³⁾を介して、DFRCC の曲げ性状における寸法効果の評価を試みる。寸法を変動因子とした試験体の 4 点曲げ試験を行って実験的に曲げ性状を確認するとともに、繊維配向性を

考慮した架橋則をトリリニアモデルに置換し、断面解析を行う。また、寸法小・中の試験体では計 7 バッチの試験体作製を行ったので、それらのバッチ間の結果の差異とばらつきも検討する。なお、本研究では比較的太径である 0.1mm 径の PVA 繊維を使用し、マルチプルクラックが生じにくい DFRCC を用いてシングルクラックにおける架橋則を得やすい条件としている。

2. 架橋則の計算方法

2.1 概要

架橋則は、ひび割れ面を架橋している各単繊維において、繊維-マトリックス間の付着性状、配向角が生じることにより引抜力が増加するスナビング効果、および繊維破断強度が低下する繊維強度の低減を考慮し、各単繊維の挙動の総和として表される。繊維の配向性は、ひび割れ面を架橋している繊維の配向角分布を示す確率密度関数を与えることにより表現する³⁾。なお、本研究における座標系および繊維配向角の定義を図-1 に示す。

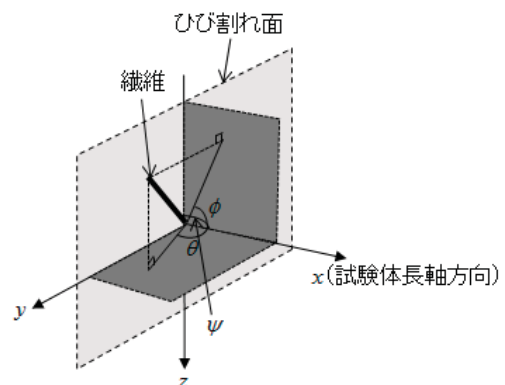


図-1 座標系および繊維配向角の定義

*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 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)

*3 筑波大学 システム情報工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*4 筑波大学 システム情報工学研究科准教授 博士(工学) (正会員)

2.2 単繊維引抜モデル

単繊維引抜モデルへの入力値を表-1に、単繊維の引抜荷重 P と引抜量 δ の関係を図-2に、図-2中の P および δ の方向の定義を図-3に示す。単繊維引抜モデルは、PVA 繊維の化学的な付着力⁴⁾を考慮した図-2に示すトリニアモデルとした。第1ピーク荷重 P_a において繊維-マトリックス間の化学的な結合による付着が剥離し、摩擦による付着により引抜荷重が増加することで最大荷重 P_{max} となる。最大荷重 P_{max} 後、引抜が進展し、引抜量が埋込長 l_b に達して繊維が完全にマトリックスから引抜かれる。埋込長 l_b は図-4に示すように、繊維長 l_f の中点からマトリックスまでの距離 x_g と配向角 ψ を用いて定める。配向角 ψ は図-1中の ψ と同一である。表-1に示す第1ピーク荷重および最大荷重、それぞれに対応する引抜量は、PVA 単繊維の引抜実験^{5),6)}の結果を参考に定めた。第1ピーク荷重および最大荷重に関して、これらの実験で用いられたPVA 繊維の径は約0.04mmであり、本研究で用いる繊維は0.1mm径であるため、両者の引張応力が一致するように定めた。スナビング係数、繊維破断荷重および繊維強度低減係数は、既往の研究^{3),7)}にならない、それぞれ0.5、569MPaおよび0.3とした。

2.3 繊維配向角分布

繊維配向性を表現する確率密度関数として、楕円分布³⁾が提案されている。図-5に、水ガラスを用いた繊維の可視化実験⁸⁾で得られた繊維配向角の相対度数分布の例(角柱供試体 z-x 平面)を示す。図中の実線が楕円分布を示している。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 が用いられる。図-6に示すように、繊維配向角分布の各階級における相対度数を、配向角を偏角とする x^*-y^* 平面座標に変換し、最小二乗法により楕円に近似する。近似した楕円の径の比 (a/b) を配向強度 k とし、座標軸と径 a のなす角を主配向角 θ としている。 θ のとり得る値の範囲は $-45^\circ < \theta \leq 45^\circ$ であり、 θ の方向への配向の強さを表す指標が配向強度 k となる。 $k=1$ 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なり、1よりも小さい場合は試験体軸直交方向 (y 軸方向および z 軸方向) への配向が強いことを示す。なお、図-6中の x^* 軸および y^* 軸は、図-1中の x 軸および y 軸とは異なる座標軸である。

2.4 架橋則の計算

単繊維引抜モデルと繊維配向角分布を与える確率密度関数である楕円分布を統合させることで、式(1)により架橋則が構築される。

表-1 単繊維引抜モデルへの入力値

入力項目	入力値
第1ピーク時引抜量 δ_a (mm)	0.2
第1ピーク荷重 P_a (N)	1.5
最大荷重時引抜量 δ_{max} (mm)	0.45
最大荷重 P_{max} (N)	3.0
スナビング係数 f	0.5
繊維破断荷重 P_{rup} (MPa)	569
繊維強度低減係数 f'	0.3
繊維長 l_f (mm)	12

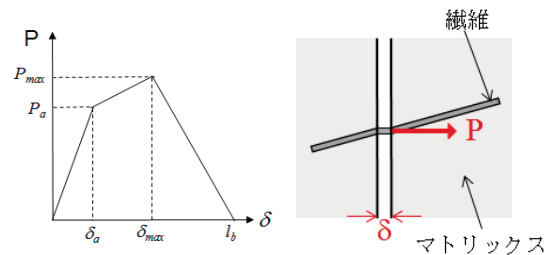


図-2 単繊維引抜モデル 図-3 P および δ の方向

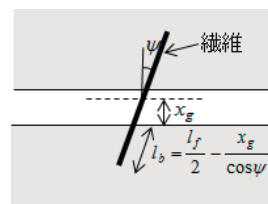


図-4 埋込長の定義

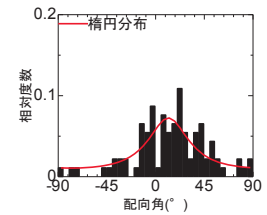


図-5 繊維配向角分布の一例

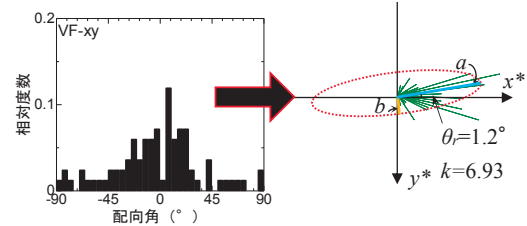


図-6 配向強度の定義

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_j \sum_i P_{ij}(\delta, \psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z) \quad (1)$$

ここで、 P_{bridge} : 架橋力、 $P_{ij}(\delta, \psi)$: 単繊維の引張力、 $p_{xy}(\theta)$: x - y 平面における配向角分布を示す確率密度関数、 $p_{zx}(\phi)$: 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を表す。本研究では繊維の x 軸方向の分散性は考慮せず、 $p_x(y_h, z_h)$ は一定値とした。

以上の方法により計算した架橋則の例を図-7に示す。単繊維引抜モデルは表-1に従い、簡単のため配向強度を $k_{xy} = k_{zx}$ とし、主配向角 $\theta_{xy} = \theta_{zx} = 0^\circ$ とした。

なお、縦軸の引張応力は、架橋力をマトリックス断面積で除すことで引張応力に換算した値であり、架橋則のみによる応力を示しているためマトリックスのひび割れ強度は含まれていない。ランダム配向を表す配向強度 k が 1 の場合の架橋則を基準とし、加えて、 k が 4 および 0.4 の場合の架橋則を図-7 中に示している。最大荷重後、繊維の破断による荷重低下を経て、緩やかな軟化勾配に移る形状となっている。配向強度 k の値が大きいくほど、すなわち試験体軸方向への配向性が強いほど引張強度が大きく、繊維配向性の差異が架橋則に顕著な影響を与えている。

後述する曲げ試験体の断面解析に架橋則を用いるため、架橋則を図-8 に示すトリリニアモデルに置換する。図-7 に示される架橋則の形状より、引張強度 σ_{max} 、引張強度時ひび割れ幅 δ_{max} 、引張強度後の荷重低下を経て傾きに変化する点の応力 σ_2 、その時のひび割れ幅 δ_2 および荷重喪失時のひび割れ幅 δ_{tu} により定める。

3. 曲げ試験概要

3.1 使用材料

使用した繊維の形状および力学性能を表-2 に、DFRCC の調査表を表-3 に示す。PVA 繊維の体積混入率は 2.0% とした。練混ぜ、試験体製作における材料のばらつきを検討することも目的として、同一調合で計 7 バッチの練混ぜを行った。

3.2 試験体

試験体は断面が正方形または長方形の角柱試験体で、曲げ試験体(小)、曲げ試験体(中)および曲げ試験体(大)の 3 種の寸法の試験体を作製した。試験体形状を図-9 に示す。曲げ試験体(小)および曲げ試験体(中)は各バッチ 3 体ずつ、曲げ試験体(大)は 1 体作製した(バッチ No.1)。打込みは、型枠の端から連続的に流し込むことにより行い、曲げ試験体(小)および曲げ試験体(中)では計側面と平行な面が、曲げ試験体(大)では計側面が打設面である。各バッチの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の結果を表-4 に示す。

3.3 加力・計測方法

加力には、曲げ試験体(小)および曲げ試験体(中)では 500kN 万能試験機を、曲げ試験体(大)では 2MN ユニバーサル試験機を使用した。曲げ試験体(小)および曲げ試験体(中)は三等分点曲げ載荷、曲げ試験体(大)は純曲げ区間 280mm の 4 点曲げ載荷である。すべての試験体に共通する計測項目は、荷重値および純曲げ区間の平均曲率を算出するための試験体中央部の軸方向変形(曲げ試験体(大)では検長 50mm の π 型変位計を上下各 6 台設置)とした。

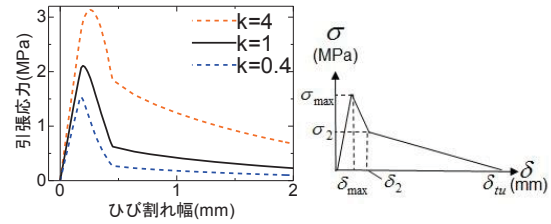


図-7 架橋則の例 図-8 架橋則のモデル化

表-2 繊維形状および力学性状

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 の調査 (kg/m³)

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

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
Fiber: PVA 繊維 (体積混入率 2%)
Ad: 高性能減水剤

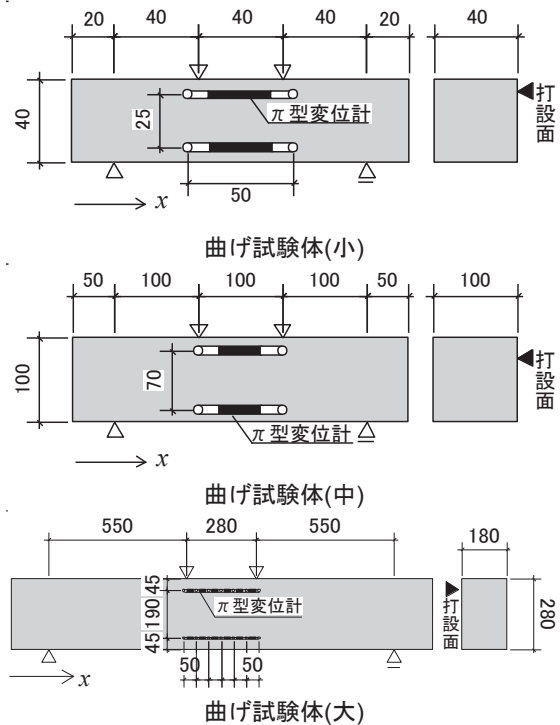


図-9 試験体形状 (単位: mm)

表-4 フレッシュ性状および圧縮試験結果

バッチ No.	打設日 (2015年)	練上がり温度 (°C)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1	9/9	26.8	1.8	44.8	14.2
2	9/10	27.1	1.7	44.2	14.1
3	9/10	26.9	2.3	45.9	13.5
4	9/9	27.4	1.5	47.4	13.9
5	10/16	21.3	3.1	41.8	16.6
6	10/16	21.3	2.7	42.2	19.0
7	10/16	20.8	2.7	40.5	18.3

4. 実験結果

加力後の試験体の例を図-10に示す。図中の矢印は加力位置を示す。曲げ試験体(小)では純曲げ区間に1本のひび割れが発生し、そのひび割れが開口して破壊した。曲げ試験体(中)では1本もしくは2本、曲げ試験体(大)では2本のひび割れが発生し、しだいに1本のひび割れに開口が局所化することで荷重が低下した。試験体寸法の差異が曲げ性状に与える影響を考慮するため、曲げ応力(=曲げモーメント/断面係数)および曲げ歪(=平均曲率×断面せい)を定義し、曲げ応力-曲げ歪関係を図-11に示す。なお、変形測定区間外でひび割れが開口して破壊した試験体の結果は除いた。曲げ試験体(小)では、初期ひび割れ発生後に荷重が低下した後荷重が再び増大し、その後徐々に荷重が低下する挙動を示した。曲げ試験体(中)および曲げ試験体(大)では、初期ひび割れ発生時にわずかに荷重が低下したものの、緩やかに荷重が上昇し、最大荷

重を迎えた後はひび割れ本数が2本の試験体では変形しながらも荷重をある程度維持し、1本の試験体では比較的変形が小さいうちに荷重が低下した。また、試験体寸法が大きくなるにつれて曲げ強度が低下する寸法効果が確認できた。

各バッチの試験結果を比較するために、各バッチ試験体の最大曲げ応力および最大荷重時の曲げ歪を比較したグラフを、それぞれ図-12および図-13に示す。なお、最大曲げ応力は、繊維の架橋性能の観点から考察を行うため、ひび割れ発生後の最大曲げ応力を用いた。

各バッチ試験体の最大曲げ応力の平均値は、曲げ試験体(小)では5.21~7.70MPa、曲げ試験体(中)では3.03~4.62MPaの範囲にある。同様に最大荷重時の曲げ歪の平均値は、曲げ試験体(小)では0.57~3.72%、曲げ試験体(中)では0.97~3.24%の範囲にある。さらに、各バッチ試験体の最大曲げ応力の平均値の総平均は、

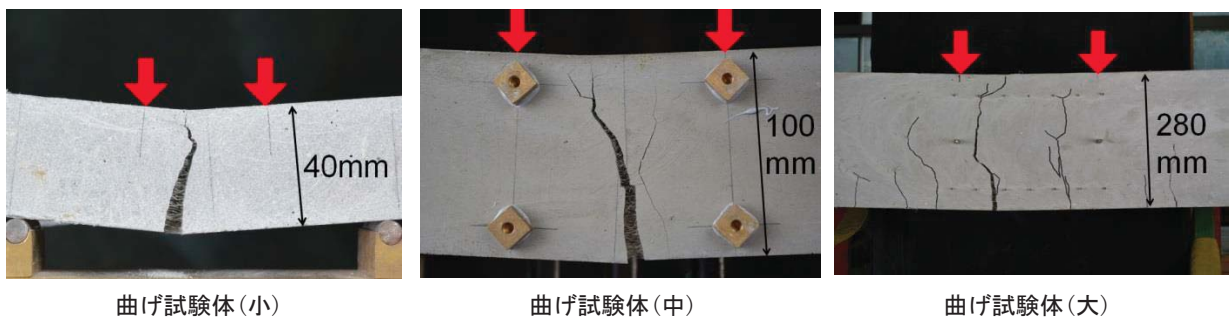


図-10 加力後の様子

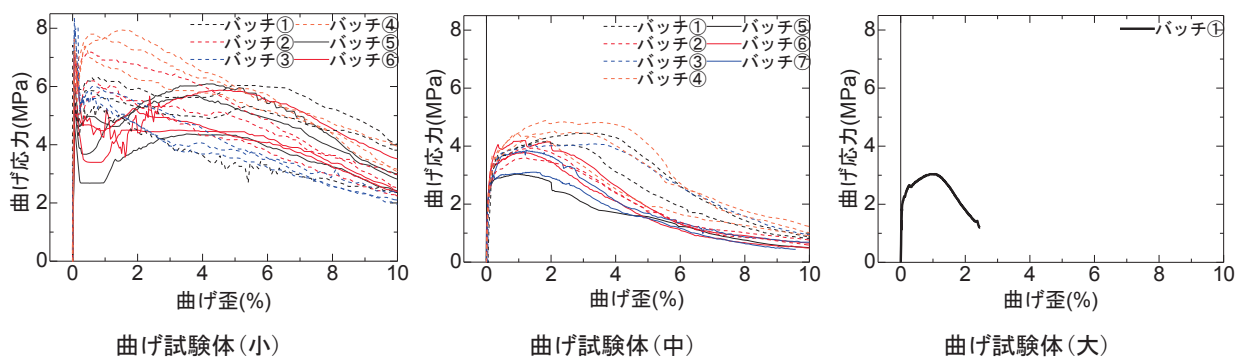


図-11 曲げ応力-曲げ歪関係

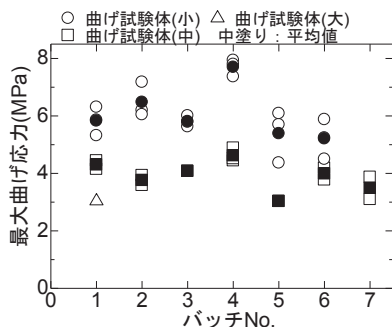


図-12 各バッチ試験体の最大曲げ応力の比較

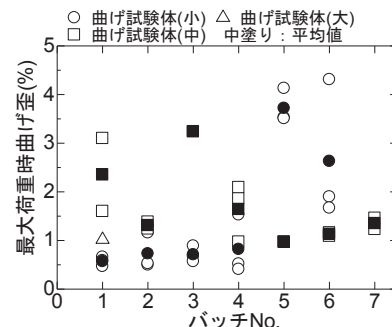


図-13 各バッチ試験体の最大荷重時曲げ歪の比較

曲げ試験体(小)では 6.07MPa, 曲げ試験体(中)では 4.00MPa であり, 変動係数はそれぞれ 0.16, 0.13 であった。同様に最大荷重時の曲げ歪に関しては, 曲げ試験体(小)では総平均 1.53%, 曲げ試験体(中)では 1.65%, 変動係数はそれぞれ 0.87, 0.44 であった。同一調合のバッチであるが, 試験体寸法が小さくなるに従えばつきが大きくなる結果となった。

5. ファイバーモデルによる断面解析

5.1 概要

各寸法の試験体それぞれについて, 試験体中の繊維配向性を考慮し, 第 2 章でモデル化を行った架橋則に基づいてファイバーモデルによる断面解析を行い実験結果と比較する。断面解析に用いる DFRCC 構成則を図-14 に, パラメータを表-5 に示す。圧縮側は放物線モデルとし, σ_c および ϵ_c には材料試験により得られた圧縮強度および圧縮強度時歪の全バッチの平均値を用いた。引張側の各特性値は図-8 に基づき配向強度 k の値により決定し, 各寸法における試験体の平均ひび割れ間隔 (ひび割れ本数/純曲げ区間長) の平均値を用いてひび割れ幅を歪に変換した。なお, 本研究では簡単のため, $k_{xy} = k_{zx}$ および主配向角 $\theta_{xy} = \theta_{zx} = 0^\circ$ とした。

5.2 解析結果

(1) ランダム配向

配向強度 $k=1$, すなわち繊維配向性がランダムの場合の解析値と最大曲げ応力の実験値の比較を図-15 に示す。実験値プロット点の誤差棒は, 各寸法における標準偏差を示す。同一の架橋則を用いても寸法が大きくなるにつれて曲げ強度が減少する。これは, 曲げ応力下の断面内歪勾配が, 断面の増大にともなって見かけ上大くなるためである。実験値と比較すると, 曲げ試験体(中)では解析値が実験値を概ね表現できた。

(2) 繊維配向を考慮した場合

既往の研究において行われた繊維配向可視化実験では, 曲げ試験体(小)の配向強度は $k=4$ 程度であった⁸⁾。この結果を参考にして, $k=4$ および試験体軸直交方向への繊維配向性が強い場合の値として $k=0.4$ を用いて, それぞれ解析を行った。解析結果と実験値の比較を図-16 に示す。曲げ試験体(小)では $k=4$, 曲げ試験体(中)では $k=1$, 曲げ試験体(大)では $k=0.4$ とした解析結果が実験値を表現できていることがわかる。すなわち, 曲げ試験体(小)では試験体軸方向への配向性が強く, 寸法が大きくなるにつれて試験体軸直交方向への配向性が強まることを示している。試験体の打設時の様子を観察すると, 曲げ試験体(大)では流込み位置におい

表-5 パラメーター一覧

試験体寸法	σ_c (MPa)	ϵ_c (%)	ひび割れ間隔 (mm)	配向強度	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	σ_2 (MPa)	ϵ_2 (%)	ϵ_{tu} (%)
小	43.6	0.45	40.0	0.4	1.54	0.45	0.27	1.13	15.0
				1.0	2.11	0.49	0.62	1.13	15.0
				4.0	3.13	0.64	1.85	1.13	15.0
中	43.6	0.45	65.4	0.4	1.54	0.28	0.27	0.69	9.18
				1.0	2.11	0.30	0.62	0.69	9.18
				4.0	3.13	0.39	1.85	0.69	9.18
大	43.6	0.45	140	0.4	1.54	0.13	0.27	0.32	4.29
				1.0	2.11	0.14	0.62	0.32	4.29
				4.0	3.13	0.18	1.85	0.32	4.29

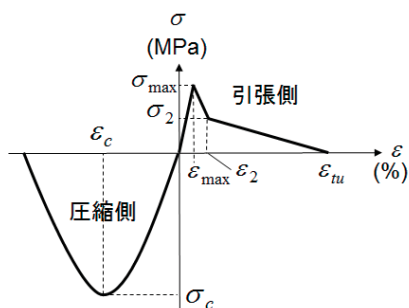


図-14 DFRCC 構成則

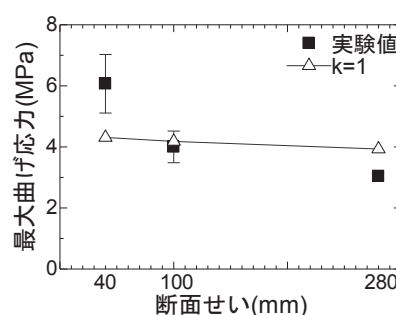


図-15 解析結果 (ランダム配向)

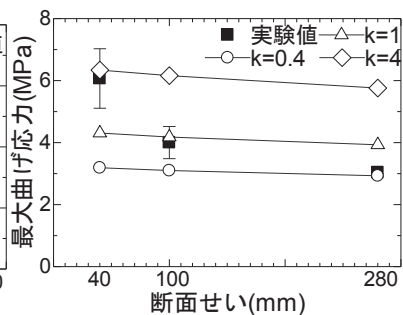


図-16 解析結果 (配向考慮)

て DFRCC が一度同心円状に広がったあと、そのまま軸方向に流れる様子が見られた。同心円状に繊維が配向しているとすると、試験体軸直交方向への配向性が強まることが考えられる。

6.まとめ

- (1) 試験体寸法を変動因子とした試験体の 4 点曲げ試験を行い、寸法が大きくなるに従い曲げ強度が低下する寸法効果を確認した。
- (2) 最大曲げ応力および最大荷重時曲げ歪の各バッチ試験体のばらつきは、寸法が小さいほど大きくなった。
- (3) 既往の研究に基づき、繊維配向性を考慮した架橋則を計算し、トリリニアモデルの構築を行った。寸法が小さいほど試験体軸方向への配向性が強くなるモデルを用いた断面解析により、実験でみられた寸法効果を表現できた。

謝辞

本研究は、科学研究助成基金基盤研究 (B) 課題番号 26289188 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法研究委員会報告書，2012.9
- 2) 清水克将，工藤脩平，金久保利之：高靱性繊維補強セメント複合材料の曲げおよびせん断性状における寸法効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1429-1434，2007.7
- 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) Redon,C., Li,V.C., Wu,C., Hoshiro,H., Saito,T., and Ogawa,A., : Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.13, No.6, pp.399-406, 2001.
- 5) Yang,E.H, et al. : Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, pp.181-193, 2008
- 6) 清田雅量，三橋博三，関田徹志，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) Kanda,T., and Li,V.C., : Effect of Fiber Strength and Fiber-Matrix Interface on Crack Bridging in Cement Composites, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.125, No.3, pp.290-299, 1999
- 8) 宮口大，月崎良一，万子銘，浅野浩平，金久保利之：HPRCC 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），pp.181-182，2014.9