

DFRCCにおける繊維の分散性評価と 架橋強度のばらつきの検討

渡邊 啓介*¹・大圖 友梨子*¹・金久保 利之*²

概要 : DFRCCの引張特性のばらつきの評価を目的として, マトリックス内の繊維分散を考慮した引張応力-ひび割れ幅関係(架橋則)の構築を試みた。ケイ酸ナトリウム水溶液(水ガラス)を用いた繊維の可視化実験で得られた繊維撮影画像を基に繊維の分散性をポアソン分布で評価し, 架橋則へ導入した。モンテカルロ・シミュレーションによりポアソン分布に基づいた分散性を与え, 架橋則における最大引張応力(架橋強度)のばらつきを確認した。さらに, それらの架橋則をトリリニアモデルに変換して断面解析を行い, PVA 繊維を用いた DFRCC の4点曲げ載荷試験結果と比較した結果, 繊維の分散性に起因する強度のばらつきを推定できる可能性を示した。

キーワード : 高靱性繊維補強セメント複合材料, 分散性, 可視化, ポアソン分布, 架橋則, 断面解析

1. はじめに

高靱性繊維補強セメント複合材料(Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite : DFRCC)はセメントマトリックスにPVA 繊維やPE 繊維などの繊維を混入した複合材料であり, 従来のコンクリートに比べて高靱性な性能を示す。また, 混入する繊維の種類, 混入量によって性能を変化させることが可能なため, 構造部材や補修材などに幅広く活用されており¹⁾, セメント系材料の可能性を広げる材料として期待されている。

DFRCCにおける優れた力学性状は引張力の伝達を繊維が負担することによって発現する。そのため, ひび割れ面における繊維の配向や分散による影響を強く受けることが知られており, マトリックス内部の繊維の配向および分散を適切に評価することが求められる¹⁾。

繊維の分散性については, 1970年代に鋼繊維補強コンクリート(Steel Fiber-Reinforced Concrete : SFRC)を対象とした研究がいくつか行われている。例えば, 山王らはSFRCの引張強度の推定を目的に, 鋼繊維の分散を定量的に表示する手段として新たに分散係数 α を提案している²⁾。分散係数 α は任意断面における鋼繊維の本数を測定して確率統計学的に処理して求められており, 分散係数 α と締固め方法, 繊維混入量, 繊維のアスペクト比およびコンクリートの配合などの諸要因との関係性を加味した引張強度式を提案している。小林らの検討では, 加力後の曲げ試験体の任意断面および破断面の繊維本数を

目視でカウントし, 繊維本数の分布を正規分布で表現している³⁾。また, 得られた結果を基に, 繊維分散を考慮した繊維混入率のばらつきの範囲を示して, 実際に混入した繊維量から繊維分布における標準偏差を差し引いた量が強度を支配することを示している。

また, 鋼繊維がX線によって投影撮影できることを利用して, 試験体内部の繊維の分散を調べた研究^{例えば 4), 5)}もある。KasperkiewiczはSFRC試験体を要素分割してX線撮影を行い, 要素内の繊維がどの程度の間隔で分散しているかを計算し, 繊維の分散間隔が繊維混入量や繊維長さ, 繊維径から受ける影響を明らかにしている⁴⁾。

このように試験体断面の観察やX線投影撮影によって繊維の分散性の検討が行われているが, 未だに繊維分散性と力学性能を結びつけた定量的な評価には至っていない。また, DFRCCでは主たる使用繊維がX線での撮影が難しい有機繊維であることや, 大量の繊維本数が混入されるため試験体断面の繊維本数をカウントすることが困難なことから, 繊維の分散性の評価そのものが難しいことも考えられる。

本研究では, ケイ酸ナトリウム水溶液(水ガラス)を利用した繊維の可視化実験で得られた繊維撮影画像から繊維の分散性を確率関数で評価し, DFRCCの引張応力-ひび割れ幅関係で与えられる架橋則へ導入することを目標とする。架橋則の構築方法は既往の研究⁶⁾で提案された方法と同一であり, 既往の研究では繊維分散性を表現する確率には定数(一様分布を仮定)が用いられてい

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 大学院生 (正会員) 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

*2 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域 教授 博士(工学) (正会員) 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

る。この繊維分散性を表現する確率に、可視化実験から得られる確率関数を利用することで分散性に起因するばらつきの表現が可能であると考えられる。また、確率関数に基づいて繊維分散性を与えるモンテカルロ・シミュレーションを行い、繊維の分散性が架橋則のばらつきに及ぼす影響を検討する。その後、繊維の分散性に起因するばらつきを考慮した架橋則をモデル化して断面解析を行い、過去に行われた PVA 繊維を用いた DFRCC の 4 点曲げ載荷試験と比較し、分散性を考慮した架橋則の妥当性を検討する。

2. 確率関数による繊維分散性の評価

繊維分散性を確率関数で評価するため、著者らが既往の研究⁷⁾で実施した繊維の可視化実験で得た繊維撮影画像を使用した。まず、繊維の可視化実験の概要を示した後、繊維分散性の評価手順および評価結果を記す。

2.1 可視化実験の概要

可視化実験⁷⁾では繊維の観察を容易にするため、実際の DFRCC に使用している PVA 繊維（繊維長 12mm、繊維径 0.10mm）ではなく黒色ナイロン繊維（繊維長 12mm、繊維径 0.235mm）を使用し、体積混入率は 0.05% としている。実験状況を図-1 に示す。型枠は断面 180×280mm、全長 980mm でアクリル製である。図-2 に示す試験体中央部 280mm の位置の打込み面（x-y 平面）および打込み直交面（z-x 平面）を撮影するカメラを設置し、打込み完了後に静止画を撮影した。図中の破線で囲まれた領域で画像をトリミングし、画像解析を行う。撮影画像は 2 次元であり、撮影面に対して奥行き方向の繊維の位置の特定はできない。また、奥行き方向のすべての繊維を認識することはできず、目視で確認した結果、奥行き方向に 60mm 程度の範囲までの繊維を確認することができた。

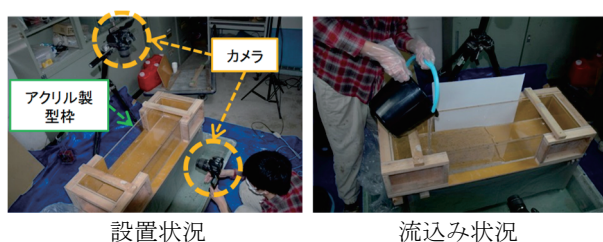


図-1 実験状況

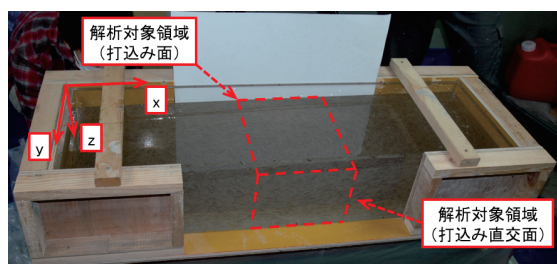


図-2 解析対象領域

この実験では、繊維の配向性を変化させることを目的とし、図-3 に示す 4 つの打込み方法を変動因子としている。流込み (N) は基準となる打込み方法で、打込み時型枠端部を図のように 1/35 傾けて流し込むものである。くし軸方向 (CA) は髪をとかす櫛を模した器具を流込み完了後に試験体の中央部 280mm×2 の範囲を移動させて、試験体軸方向に繊維を配向させる方法である。パイプ軸方向 (VA) およびパイプ直交方向 (VP) は、通常コンクリートの締固めに用いる棒状パイプを流込み完了後に試験体の中央部に施工するもので、VA は試験体軸方向に、VP は試験体直交方向に移動させて、移動方向に繊維を再配向させる方法である。各打込み方法につき 1 回ずつ実験を行った。

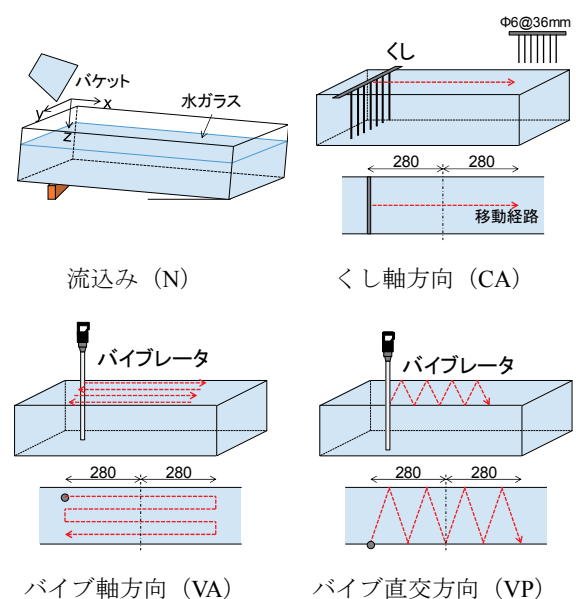


図-3 打込み方法

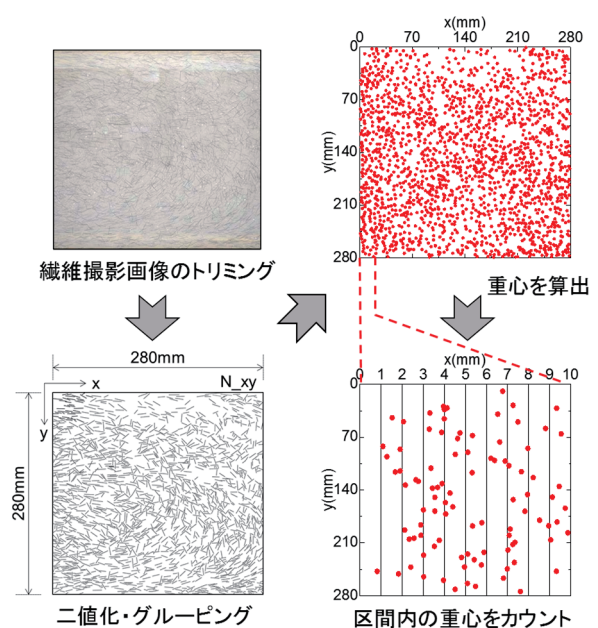
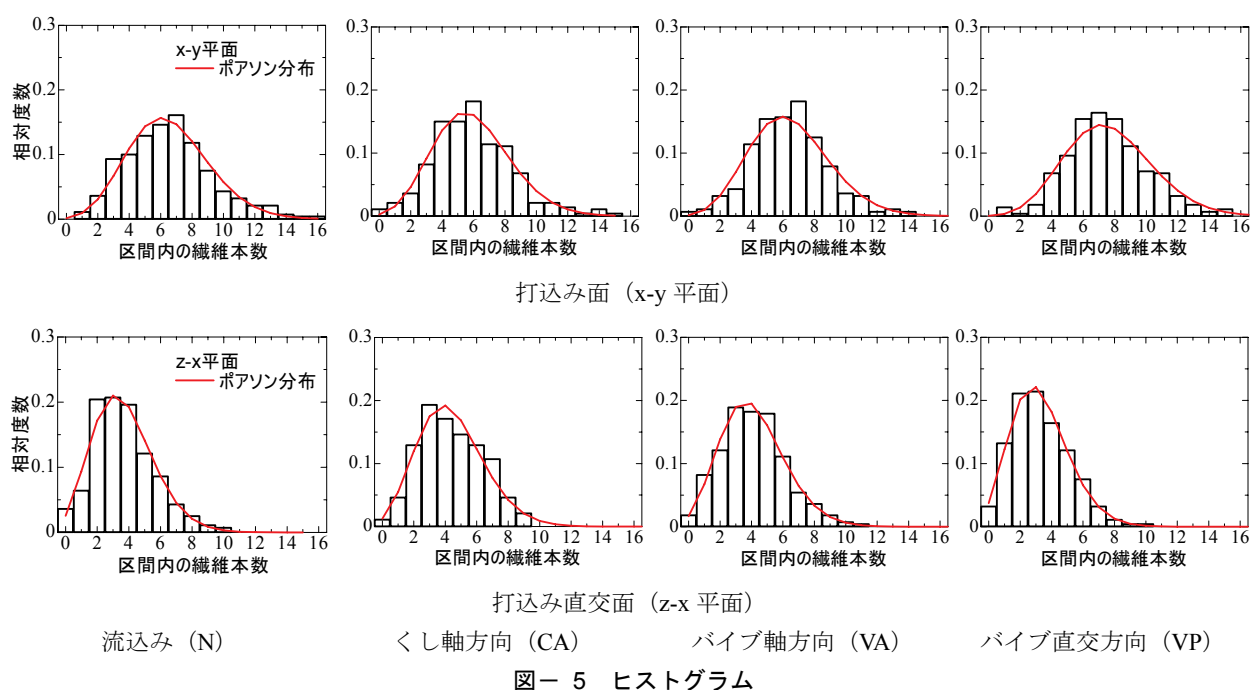


図-4 繊維本数のカウント方法



図ー 5 ヒストグラム

2.2 繊維本数分布ヒストグラムの作成

繊維の分散性を評価するために、着目した領域における繊維の本数をカウントし、繊維本数分布のヒストグラムを作成する。繊維本数のカウント方法を図ー 4 に示す。まず、画像のトリミングおよび二値化を行う。次に、隣り合う連続した黒色のピクセルを1つの群として、それらのピクセル群のグルーピングを行う。この際、繊維が交差している場合には同一の群にグルーピングされてしまうため、撮影画像を確認しながら繊維1本に対して1つの群を構成するようにグルーピングを修正する。これらの手法は既往の研究⁸⁾と同様である。以上の処理により、繊維1本を構成するピクセル群の座標がグルーピングされ、この座標群の平均値を取ることで繊維1本1本の重心座標を算出することができる。その後、x方向(引張応力が作用する方向)に1mm間隔で分割し、区間内に存在する繊維本数(重心点)をカウントし、区間内の繊維本数に対するヒストグラムを作成する。

2.3 繊維本数分布の評価

作成したヒストグラムを図ー 5 に、1mm区間における繊維本数の平均値および標準偏差を表ー 1 に示す。図ー 5 中の実線は後述するポアソン分布を示す。

x-y平面では、打込み方法によるヒストグラムの形状に明瞭な違いはみられず、平均値は6~8本、標準偏差は2.7本程度である。同様に、z-x平面においても打込み方法の違いによるヒストグラムの形状、平均値および標準偏差の違いはほぼみられないことから、繊維の分散は打込み方法による影響をほとんど受けないと考えられる。

全打込み方法の平均値は、x-y平面では6.7本、z-x平面では3.9本であった。奥行き方向への可視化領域が60mm程度であったため、両平面の解析対象領域の面積

表ー 1 繊維本数の平均値および標準偏差

	打込み方法	平均値(本)	標準偏差(本)	総本数(本)
x-y 平面	N	6.6	2.8	1835
	CA	6.0	2.6	1666
	VA	6.5	2.6	1812
	VP	7.7	2.8	2146
	平均	6.7	2.7	1865
z-x 平面	N	3.7	2.0	1027
	CA	4.4	2.0	1228
	VA	4.1	2.1	1151
	VP	3.9	2.0	1082
	平均	3.9	2.0	1082

の差が繊維本数の違いに表れていると考えられる。なお、打込み方法の違いが繊維の配向性に及ぼす影響に関する考察に関しては、文献7)を参照されたい。

時間や空間に対して事象がランダムに発生し、各々の事象が独立に生じる現象はポアソン過程と呼ばれ、それを表す確率分布としてポアソン分布がある。x方向に対して繊維はランダムに存在するとし、ある区間における繊維の有無(生起数)をポアソン分布で評価した。各打込み方法における繊維本数の平均値を平均生起数としたポアソン分布を図ー 5 に実線で示した。ポアソン分布は、可視化実験で得られたヒストグラムをよく表現している。

3. 繊維分散性を考慮した架橋則の計算

3.1 架橋則の計算方法

架橋則における引張力(架橋力)は、式(1)に示すように、x軸直交面に生じるひび割れを跨ぐ繊維の引抜挙動を総和することで求める⁹⁾。

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

ここで、 P_{bridge} : 架橋力、 $P_{ij}(\delta, \psi)$: 単繊維の引抜力、 $p_{xy}(\theta)$: 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 方向への繊維の分散性を示す確率関数、 δ : 繊維両端の抜き出し量の和、 ψ, θ, ϕ : それぞれ繊維、繊維の x-y 平面への投影線、繊維の z-x 平面への投影線と x 軸のなす角、 i, j, h : 各単繊維に対応する自然数を表す。

単繊維の引抜力モデルには、既往の研究⁹⁾と同様に、繊維配向によるスナビング効果と破断強度低減を考慮したトリリニアモデル(図-6)を用いて計算する。単繊維引抜モデルの特性値を表-2に示す。モデル中の l_b は、単繊維の埋込長(繊維が抜け出す側の埋込長で、繊維長の半分以上)を示す。

繊維配向性を示す確率密度関数である楕円分布を図-7に示す。楕円分布は配向強度 k と主配向角 θ_r によって決定される関数であり、配向強度 k が1以上では主配向角 θ_r への配向が強いことを、 k が1未満の場合は主配向角 θ_r に直交する向きに配向が強いことを示す。図-7には例として配向強度 $k=4.0, 1.0, 0.4$ の場合を示した。

x 方向の繊維の分散性については、図-8に示すポアソン分布を適用し、架橋力の計算に繊維の分散を考慮する。本研究では、計算の簡略化のため、x-y 平面および z-x 平面ともに、x-y 平面の平均である平均生起数 6.7 のポアソン分布を適用した。後述する数値計算の方法では、平均生起数が小さいポアソン分布を用いるとばらつきを小さく評価することになるため、両平面ともに平均生起

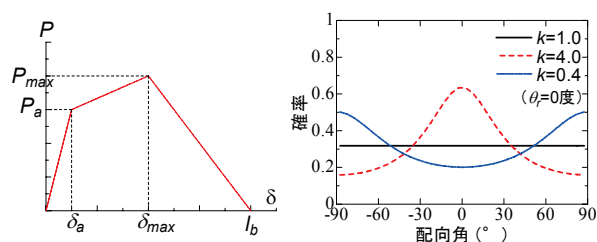


図-6 単繊維引抜モデル

図-7 楕円分布

表-2 単繊維引抜モデルの特性値

項目	特性値
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 (mm)	12

数 6.7 のポアソン分布を用いると、平均生起数 3.9 のポアソン分布を用いた場合よりもばらつきを大きめに評価することとなる。

具体的には、図-9に示すように、繊維重心とひび割れ面との距離 x_g ごとに異なる繊維の生起数をポアソン分布に基づき分配して計算を行う。繊維の重心位置の与え方により繊維の埋込長が変化し、図-6に示すトリリニアモデルの軟化勾配が変化し、ひび割れ幅(抜き出し量)の増加とともにひび割れを跨ぐ繊維の本数が変化する。

図-9における生起数と繊維重心位置(x_g)の関係(以下、分配図)は図-10のフローに従って作成する。

- ① ポアソン分布より、ある生起数の繊維が存在する確率を求め、任意の総区間数に対して確率を乗じ、その繊維が存在する区間数を求める。例として図-10では総区間数は20とした。同様に、すべての生起数に対して当該する区間数を求める。
- ② ①で得られた生起数(繊維本数)を有する区間をx方向に並べて生起数を分配する(分配の具体的な方法は次節以降で後述する)。
- ③ ②で得られたx方向位置と生起数の関係をグラフに示すことで、繊維重心位置に対する分配図を得る。

数値計算上、単繊維の軸方向の分布は繊維長の半分の長さを100分割(本研究の場合は6mm/100刻み)にして離散的に与えていることから、実際の計算では総区間を100として区間数を求めて繊維の生起数の分配を行う。

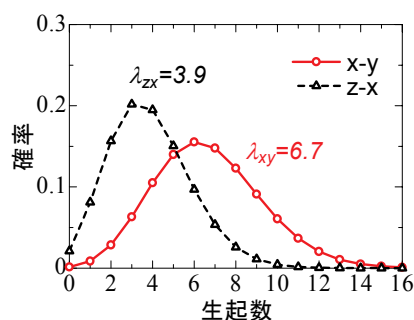


図-8 ポアソン分布

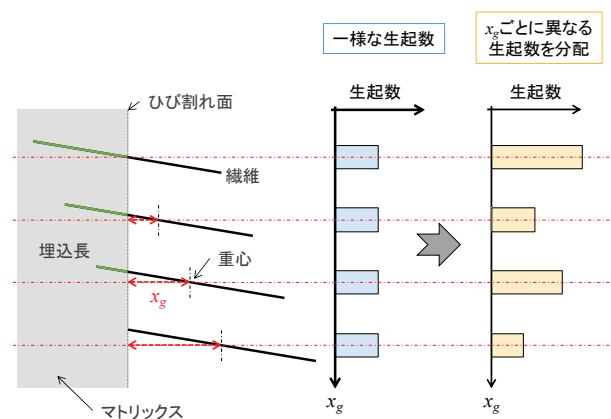


図-9 生起数の x_g への分配イメージ

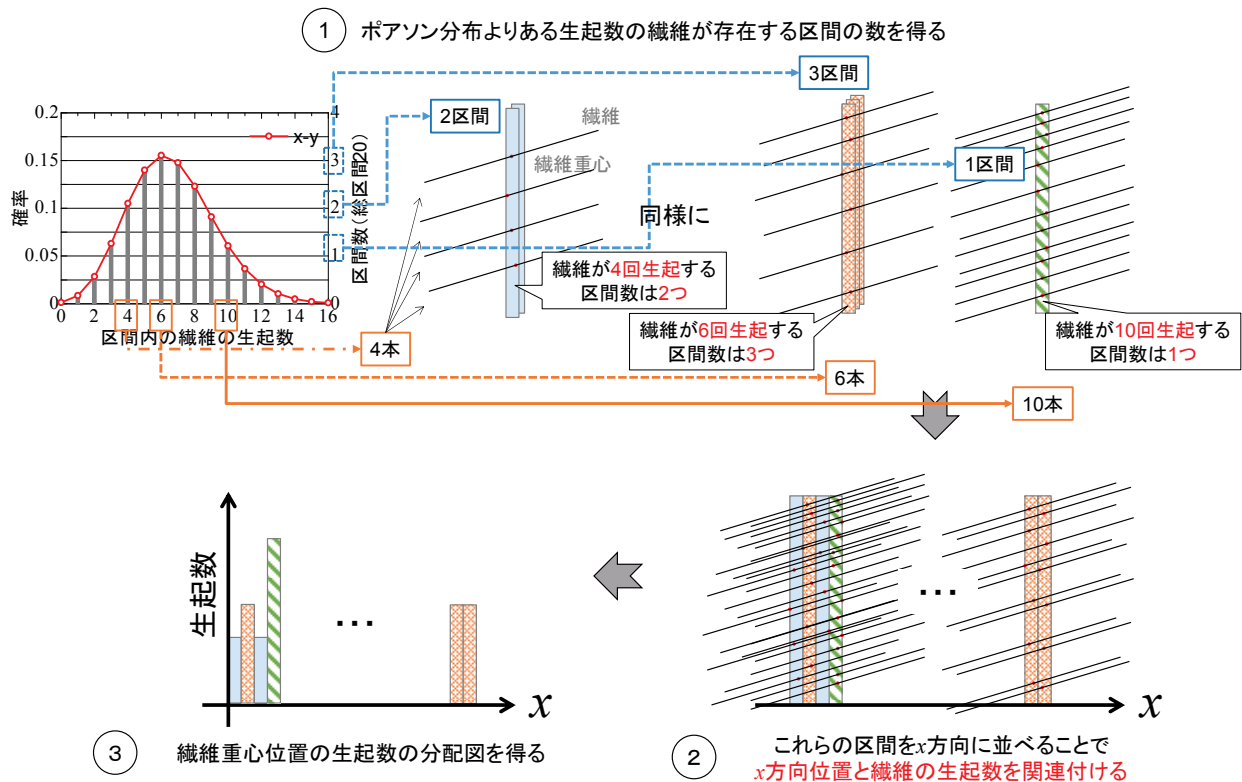
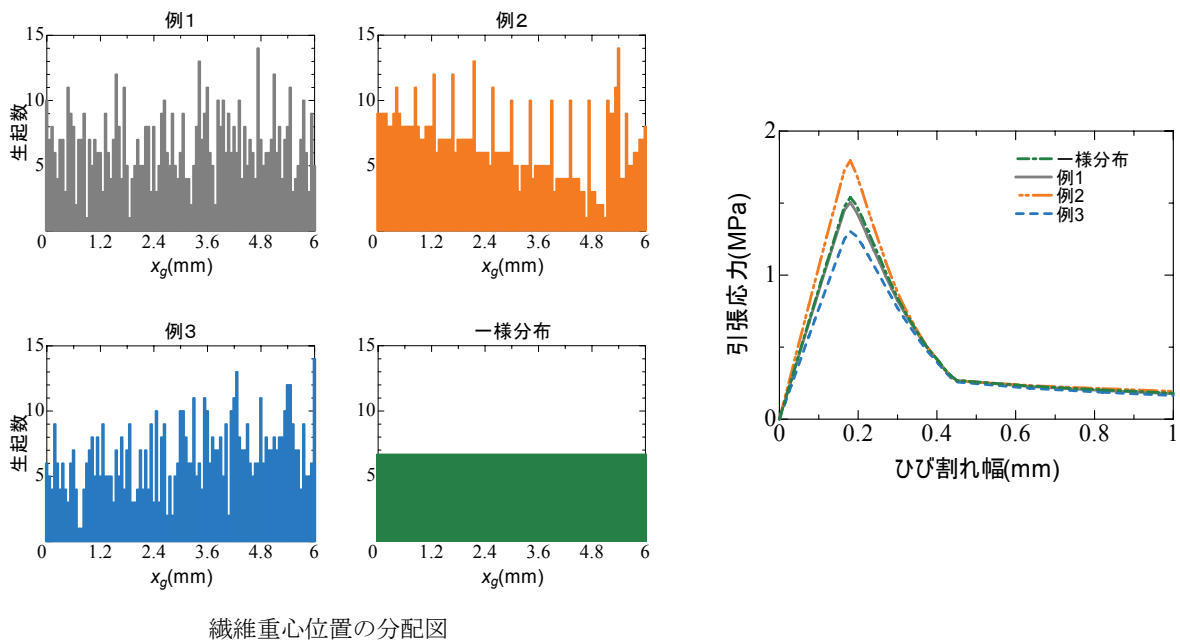


図- 10 分配図の作成フロー

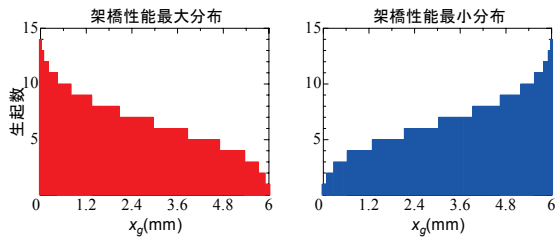


3.2 架橋則の計算結果

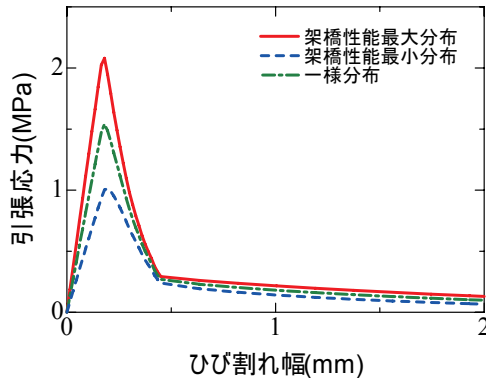
前節で得られたポアソン分布に基づく繊維の分散性が、繊維混入率 2%とした場合にも適用できると仮定した架橋則の計算例を図- 11 に示す。繊維の配向性を与える楕円分布は配向強度 $k=0.4$ 、主配向角 $\theta_0=0^\circ$ とし、いずれの重心位置の繊維に対しても同一の楕円分布を与えた。従来の一様分布と、任意に生起数の分配を与えた例 1～例 3 の 3 つの引張応力-ひび割れ幅関係を示してい

る。なお、引張応力は、架橋力を繊維混入率 2%に対応するマトリックスの断面積で除して求めている。繊維重心位置の分配状況によって引張応力の最大値（架橋強度）が異なる様子が分かる。

本計算方法によれば、抜け出す側の繊維の埋込長が長い（繊維重心位置がひび割れ面 $x=0$ に近い位置にある）繊維の本数が多いほど架橋性能は向上し、逆に埋込長が短い（繊維重心位置がひび割れ面 $x=0$ から遠い）繊維が



図－ 12 架橋性能最大および最小分布



図－ 13 最大・最小・一様分布の計算結果

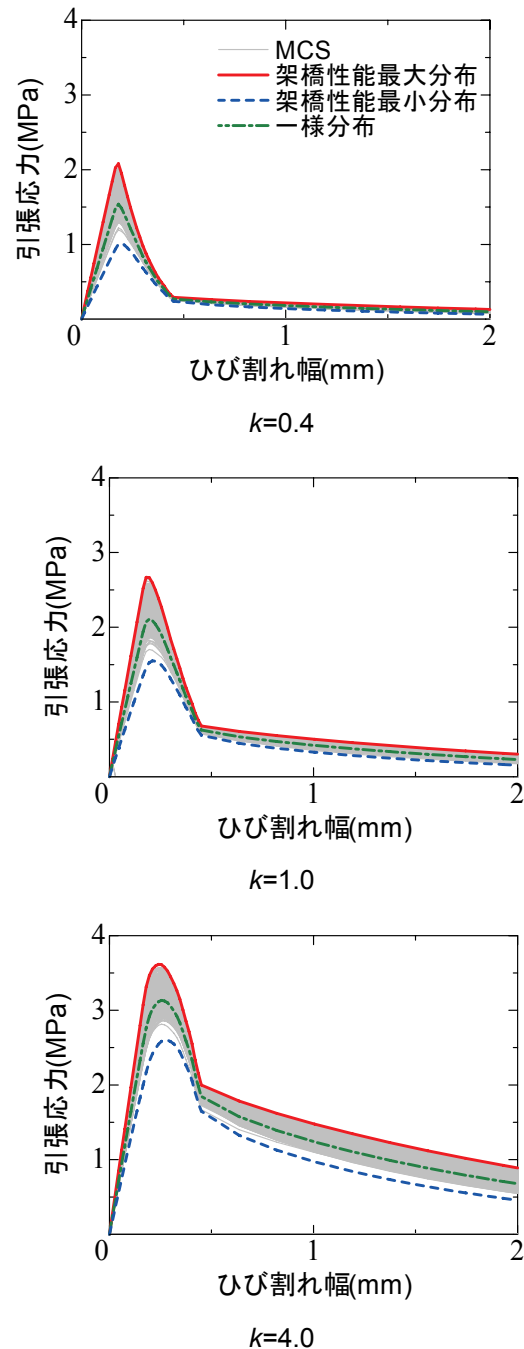
多いと架橋性能は低下すると推測される。平均生起数 6.7 のポアソン分布にしたがい、この両者に対応する「架橋性能最大分布」および「架橋性能最小分布」を図－ 12 に示すように作成し、架橋則を計算した。架橋則の計算結果を図－ 13 に示す。なお、配向強度は $k=0.4$ 、主配向角は $\theta_r=0^\circ$ とした。架橋性能最大分布では架橋強度は 2.08MPa、同最小分布では架橋強度は 1.01MPa となり、一様分布と比較して大きな差が生じた。

3.3 モンテカルロ・シミュレーション

モンテカルロ・シミュレーション (MCS) は、方程式の立式や解法が困難な場合に用いられる手法であり、計算機上に直接現象のモデルを作成し、その原因を乱数を用いて発生させ、事象の発生確率を利用して現象の様子を調べようとするものである¹⁰⁾。

本論では、平均生起数 6.7 のポアソン分布にしたがう繊維重心位置の分配を乱数によって試行ごとに作成し、数千通りの分散状況に対する架橋則を得ることで、架橋性能のばらつきの範囲を調べる。本シミュレーションでは配向強度 $k=0.4, 1.0, 4.0$ の 3 パターンに対し、各 3000 回の試行を行った。

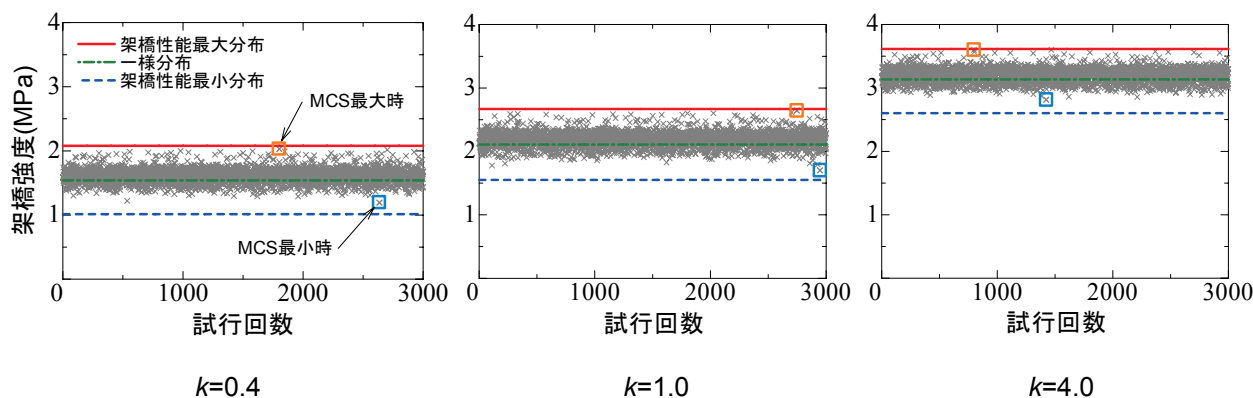
MCS による 3000 回分の架橋則の計算結果を図－ 14 に示す。図には合わせて架橋性能最大および最小分布、一様分布の計算結果も示す。シミュレーションの結果は灰色の帯状に分布し、いずれの配向強度においてもばらつきが確認できる。また、架橋強度 (引張応力の最大値) を縦軸に、試行回数を横軸に取った架橋強度の分布を図－ 15 に、架橋強度の一覧を表－ 3 に示す。図中の口プロットは MCS において架橋強度が最大となった試行時



図－ 14 MCS における架橋則の計算結果

および最小の試行時を示す。すべての配向強度において、MCS による架橋強度は一様分布よりも若干上側に分布している。表－ 3 より、MCS における架橋強度の平均値は一様分布のものよりも大きくなり、標準偏差は 0.11 ～ 0.12MPa であった。

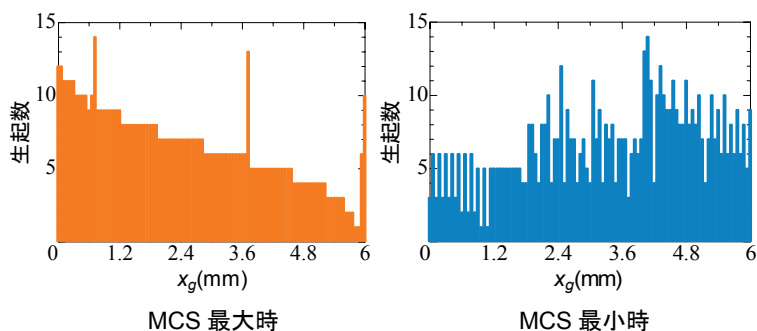
配向強度 $k=0.4$ の MCS において架橋強度が最大であった試行時の分布 (MCS 最大時) と同最小の分布 (MCS 最小時) を図－ 16 に示す。MCS 最大時の繊維重心位置の分配図は右下がりに、MCS 最小時は右上がりになっており、ひび割れ面に近い繊維が多いほど架橋性能が向上することが確認できる。この傾向は配向強度 $k=1.0$ および 4.0 でも確認された。



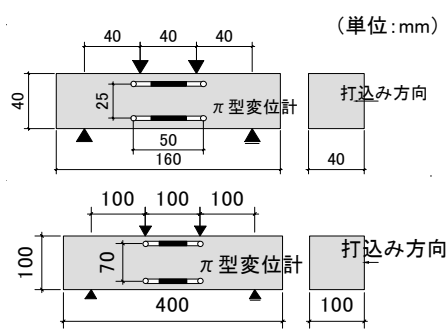
図一 15 架橋強度のばらつき

表一 3 架橋強度の一覧

配向強度 k	MCS				一様分布 (MPa)	架橋性能 最大分布 (MPa)	架橋性能 最小分布 (MPa)
	平均値 (MPa)	標準偏差 (MPa)	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)			
0.4	1.61	0.11	2.03	1.19	1.54	2.08	1.01
1.0	2.19	0.12	2.64	1.70	2.11	2.67	1.55
4.0	3.20	0.11	3.60	2.81	3.13	3.62	2.60



図一 16 繊維重心位置の分配図



図一 17 試験体形状および加力方法

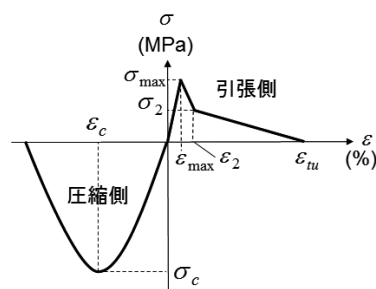
4. 曲げ載荷試験結果との比較

4.1 実験概要

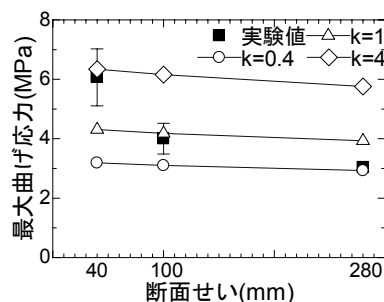
既往の研究⁹⁾における試験体形状および加力方法を図一17に示す。試験体は断面40×40mmおよび断面100×100mmの角柱試験体であり、加力方法は4点曲げ載荷である。いずれの試験体も図一3に示す流込みの打込み方法で作製した。試験体数は、断面40×40mmの試験体は18体、断面100×100mmの試験体は13体である。

同研究では寸法効果にともなう配向強度の差異を検討するため、図一18に示すDFRCCの構成則を用いてファイバーモデルによる断面解析を行っている。解析結果を図一19に再掲する。この解析により、断面40×40mm試験体では配向強度 $k=4$ が、断面100×100mm試験体では $k=1$ が妥当であることが示されている。

ここでは、前章で計算した架橋則を利用して断面解析を行い、これらの実験結果と比較する。



図一 18 DFRCCの構成則



図一 19 実験結果と解析結果の比較

4.2 ファイバーモデルによる断面解析

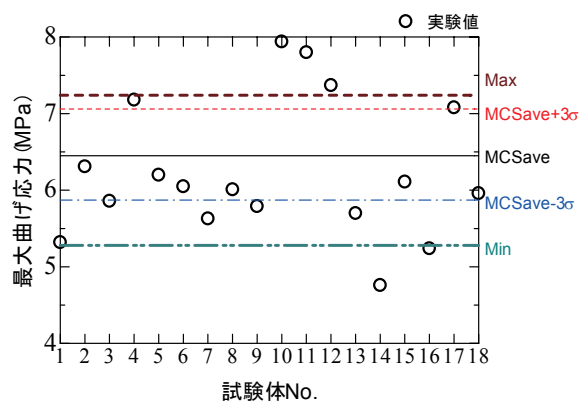
断面解析に用いる DFRCC の構成則は図－ 18 と同一で、圧縮側を放物線モデル、引張側をトリリニアモデルとした。圧縮側はΦ 100-200mm シリンダーの圧縮試験結果より $\sigma_B=43.6\text{MPa}$ 、 $\varepsilon_c=0.45\%$ とした。

DFRCC 構成則のパラメータのうち、既往の研究⁹⁾と異なる部分は引張側のトリリニアモデルの各特性値である。本解析では 5 つのケースを検討する。すなわち、架橋性能最大分布（モデル名：Max）および架橋性能最小分布（モデル名：Min）の 2 ケース、モンテカルロ・シミュレーションの架橋強度の平均値を用いたもの（モデル名：MCSave）、架橋強度の平均値から標準偏差の 3 倍を加減した 99%信頼限界を示すもの（モデル名：MCSave+3 σ 、MCSave-3 σ ）の 3 ケースである。

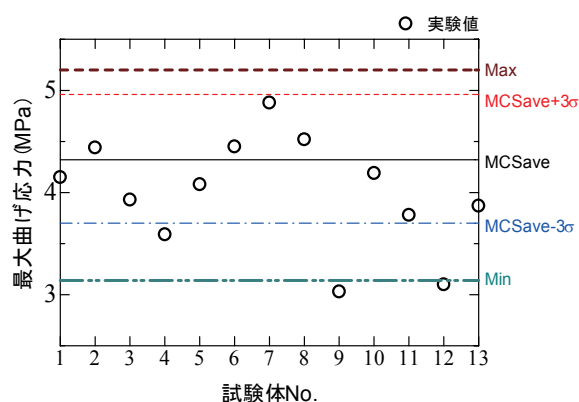
配向強度は、40×40mm 断面の試験体では $k=4$ 、100×100mm 断面の試験体では $k=1$ の値を用いた。構成則のパラメータを表－ 4 に示す。

実験値と解析値の比較を図－ 20 および図－ 21 に示す。実験値は○プロットで示し、各解析ケースで得られた最大曲げ応力を直線で示す。40×40mm 断面の試験体では試験体 18 体に対して 6 体が、100×100mm 断面の試験体では 13 体中 10 体が 99%信頼区間に存在する。

実験結果には繊維分散性に加えて配向性のばらつきも含まれると考えられるため、信頼区間外にある結果がある程度存在するが、架橋則に繊維の分散性を導入することにより、DFRCC における繊維分散性に起因する強度のばらつきを表すことがある程度可能であると考えられる。



図－ 20 最大曲げ応力の分布（40×40mm 断面）



図－ 21 最大曲げ応力の分布（100×100mm 断面）

表－ 4 パラメーター一覧

試験体 断面 (mm)	モデル名	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} (%)
40 × 40	Max	43.6	0.45	40.0	4	3.62	0.600	2.00	1.13	15.0
	MCSave +3 σ					3.31	0.638	1.91	1.13	15.0
	MCSave					3.20	0.638	1.86	1.13	15.0
	MCSave -3 σ					3.09	0.638	1.82	1.13	15.0
	Min					2.60	0.713	1.65	1.13	15.0
100 × 100	Max	43.6	0.45	65.4	1	2.67	0.275	0.68	0.688	9.17
	MCSave +3 σ					2.31	0.298	0.63	0.688	9.17
	MCSave					2.19	0.298	0.61	0.688	9.17
	MCSave -3 σ					2.07	0.298	0.62	0.688	9.17
	Min					1.55	0.321	0.55	0.688	9.17

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 水ガラスを用いた繊維の可視化実験にて得られた繊維撮影画像から、繊維の分散をポアソン分布で評価した。
- 2) ポアソン分布に基づき、ひび割れ位置に対する繊維重心位置の分配を行い、繊維の分散性を考慮した架橋則の構築を行った。埋込長が長い繊維の本数が多いほど架橋強度は増加し、埋込長が短い繊維が多いほど架橋強度は減少した。
- 3) モンテカルロ・シミュレーションにより繊維の分散性をポアソン分布に基づいて与え、架橋強度のばらつきの程度を把握した。
- 4) 分散性を考慮した架橋則を利用して断面解析を行い、4点曲げ試験結果と比較を行った。繊維の分散性に起因する強度のばらつきを推定できる可能性を示した。

なお、本論文では事象の生起（繊維の存在位置）がランダムに生じるとして得られる繊維混入率 0.05% の場合のポアソン分布を、繊維混入率が 2% の場合にも適用できると仮定して架橋則を計算し、考察した。繊維混入率が大きくなると繊維本数が多くなり、互いの繊維が影響しあってランダムに事象が生起しなくなる可能性が考えられる。繊維混入率が大きい場合の本論文の適応性については、引き続き検討していく予定である。

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) 繊維補強セメント系複合材料の新しい利用方法委員会報告書，日本コンクリート工学会，2012.9
- 2) 山王博之，小林一輔，富田 強：鋼繊維補強コンクリートの引張強度に及ぼす繊維の分散と配向の影響，生産研究，28 巻，9 号，pp.395-398，1976.9
- 3) 小林一輔，睦好宏史：繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形，土木学会論文報告集，第 299 号，pp.101-112，1980.7
- 4) Kasperkiewicz, J. : Fibre spacing in steel fibre reinforced composites, Materials and Structures, Vol. 10, No. 1, pp.25-31,1977.
- 5) Stroeven, P. : Morphometry of fibre reinforced cementitious materials Part I : Efficiency and spacing in idealized structures, Materiaux et Construction, vol. 12, No.1, pp.9-20,1979.
- 6) 浅野浩平：高性能繊維補強セメント系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
- 7) 渡邊啓介，大圖友梨子，金久保利之：繊維配向性を考慮した打込みによる DFRCC 部材の繊維可視化実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），材料施工，pp.461-462，2016.8
- 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），材料施工，pp.181-182，2014.9
- 9) 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
- 10) 宮本 修，脇本和昌：数学ライブラリー47 乱数とモンテカルロ法（第 1 版），森北出版，1978

（原稿受理年月日：2017 年 3 月 8 日）

Evaluation of Fiber Dispersion and Bridging Strength Variation in DFRCC

By Keisuke Watanabe, Yuriko Ozu and Toshiyuki Kanakubo

Concrete Research and Technology, Vol.28, 2017

Synopsis: Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) are cementitious materials mixed with short fibers. It is well known that tensile and bending characteristics of DFRCC are affected by fiber orientation and dispersion. In this study, the relationships between tensile stress and crack width (bridging law) are evaluated considering fiber dispersion in order to investigate the variation in tensile characteristic of DFRCC. The fiber dispersion is evaluated by Poisson distribution from the results of visualization simulations using sodium silicate solution (water glass) and introduced in the calculation of the bridging law. The variation of maximum tensile stress (bridging strength) can be confirmed by Monte Carlo simulation, in which the fiber dispersion following Poisson distribution is considered. The calculated bridging law is modeled by trilinear model, and section analysis is conducted to compare with test results. The possibility to assume the variation of bending strength can be found out by considering fiber dispersion.

Keywords: Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Fiber Distribution, Visualization, Poisson Distribution, Bridging Law, Section Analysis