

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

繊維配向性および分散性が
DFRCC の曲げ・引張性状に与える影響

渡邊啓介

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保利之

2017年 3月

繊維配向性および分散性が DFRCC の曲げ・引張性状に与える影響

論 文 概 要

コンクリートの引張性能を改善した材料に、高靱性繊維補強セメント複合材料（Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites : DFRCC）がある。DFRCC は、モルタルに長さ十数 mm の繊維を混入した材料であり、高い靱性能を有する。一方で、その性能は内部の繊維の配向および分散に大きく影響を受けることが知られており、今後 DFRCC の利用を広げていくためには繊維配向性および分散性の定量的な評価が必要となっている。既往の研究においては、繊維配向性を評価する手法として楕円分布が提案され、繊維の可視化実験および材料試験を通じて、打込み方向や寸法などの諸要因が与える影響を検証している。また、繊維配向性を積極的にコントロールする打込み方法も提案されており、先述した材料試験および可視化実験を通じてそれらの方法の有効性が示されている。本研究では、DFRCC における繊維配向性および分散性が曲げ・引張性状に及ぼす影響を把握することを目的に、4 つの実験を行った。

本論文は、全 6 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景および目的について示した。

第 2 章では、既往の研究で提案された打込み方法を DFRCC 梁部材に適用し、提案された方法が部材規模の試験体においても有効であるかどうかを検証した。曲げ試験結果および加力終了後のひび割れ状況、破断面の観察を基に、部材内の位置ごとに異なる繊維配向性を有していることを確認し、これらを考慮した断面解析を行って、配向性の違いによる各試験体の耐力の再現を行った。

第 3 章では、配筋を行った DFRCC 梁試験体に対して、繊維配向性を考慮した打込み方法を施工し、これらの打込み方法が鉄筋補強 DFRCC 部材の曲げ性状に及ぼす影響を検討した。試験体ごとの最大耐力には大きな違いは見られなかったものの、ひび割れの分散および進展に違いが見られた。

第 4 章では、梁試験体内部の繊維配向性を検証するため、繊維の可視化実験を行った。可視化実験では既往の研究と同様に、透明なケイ酸ナトリウム水溶液（水ガラス）をマトリックスに使用し、混入した繊維の配向をデジタルカメラで撮影し、画像解析を行った。打込み方法によって繊維が再配向することが確認でき、試験体寸法にかかわらずこれらの方法が繊維配向性を変化させる方法として有効であることを示した。

第 5 章では、DFRCC の材料特性のばらつきを評価する方法として繊維分散性に着目し、第 4 章の可視化実験で得られた撮影画像を基に繊維の分散性をポアソン分布で評価し、モンテカルロ・シミュレーションにより架橋則のばらつきを表現した。さらに、それらの架橋則をモデル化して断面解析を行い、DFRCC の 4 点曲げ載荷試験結果と比較して、得られた架橋則の妥当性を確認した。

第 6 章では、本論文の結論を記した。

繊維配向性および分散性が DFRCC の曲げ・引張性状に与える影響

目 次

第 1 章 序論	1
第 2 章 打込み方法の違いが DFRCC 梁部材の曲げ性状へ及ぼす影響	4
2.1 はじめに	4
2.2 実験概要	5
2.2.1 試験体	5
2.2.2 使用材料	6
2.2.3 载荷および計測方法	7
2.3 実験結果	8
2.3.1 打込み時の様子	8
2.3.2 曲げモーメントーたわみ関係	9
2.3.3 最終ひび割れ状況	10
2.3.4 破断面の観察	11
2.4 繊維配向性を考慮した断面解析	12
2.4.1 モデルの構築	12
2.4.2 断面解析結果	15
2.5 まとめ	16
第 3 章 打込み方法の違いが鉄筋補強 DFRCC 梁部材の曲げ性状へ及ぼす影響	17
3.1 はじめに	17
3.2 実験概要	18
3.2.1 試験体および使用材料	18
3.2.2 载荷および計測方法	20
3.3 実験結果	21
3.3.1 曲げモーメントー曲率関係	21
3.3.2 局部変形およびひび割れ開口状況	22
3.4 まとめ	25
第 4 章 可視化実験による繊維配向性の検討	26
4.1 はじめに	26
4.2 実験概要	27
4.2.1 型枠	27
4.2.2 使用材料	28
4.3 実験方法	29
4.3.1 撮影方法	29
4.3.2 画像解析	31
4.3.3 評価方法	32
4.4 実験結果	33
4.4.1 x-y 平面	33
4.4.2 z-x 平面	36
4.5 まとめ	37
第 5 章 繊維の分散性が DFRCC の曲げ・引張性状に与える影響	38
5.1 はじめに	38

5.2 繊維分散性の確率関数による評価	39
5.2.1 検討方法	39
5.2.2 検討結果	40
5.2.3 確率関数による評価	43
5.3 繊維分散性を考慮した架橋則の計算	45
5.3.1 架橋則の計算方法	45
5.3.2 モンテカルロ・シミュレーションによる架橋則のばらつきの検討	49
5.4 曲げ試験結果との比較	56
5.4.1 実験の概要	56
5.4.2 ファイバーモデルによる断面解析	58
5.5 まとめ	60
第6章 結論	61
謝辞	62
参考文献	63

繊維配向性および分散性が DFRCC の曲げ・引張性状に与える影響

図 表 目 次

表 2-1	DFRCC 調合表.....	6
表 2-2	PVA 繊維の形状および力学特性	6
表 2-3	練混ぜバッチごとのフレッシュ性状および圧縮性能.....	6
表 2-4	実験結果.....	9
表 2-5	ひび割れ本数および平均ひび割れ間隔.....	10
表 2-6	架橋則への入力値.....	14
表 2-7	トリリニアモデルの第 1 点および第 2 点の値.....	14
表 2-8	最大曲げモーメントの実験値と解析値の比較.....	15
表 3-1	鉄筋の力学特性.....	19
表 3-2	フレッシュ性状および圧縮性能.....	19
表 4-1	調合した水ガラスの物性値.....	28
表 4-2	黒色ナイロン繊維の物性値.....	28
表 4-3	z-x 平面における配向強度および主配向角.....	36
表 5-1	各打込み方法における繊維本数の平均および標準偏差 (x-y 平面)	41
表 5-2	各打込み方法における繊維本数の平均および標準偏差 (z-x 平面)	42
表 5-3	各打込み方法におけるポアソン分布の χ^2 検定結果	44
表 5-4	ポアソン分布による生起回数と区間数.....	47
表 5-5	架橋強度一覧.....	55
表 5-6	練混ぜバッチごとのフレッシュ性状および圧縮性能.....	56
表 5-7	モデルの特性値 (40×40mm 断面試験体)	58
表 5-8	モデルの特性値 (100×100mm 断面試験体)	58
図 1-1	提案された打込み方法.....	2
図 1-2	曲げ荷重－ひび割れ肩口開口変位関係.....	2
図 2-1	試験体形状.....	5
図 2-2	打込み方法模式図.....	5
図 2-3	載荷位置および変位計設置図.....	7
図 2-4	ひび割れの本数観測範囲.....	7
図 2-5	打込み時の様子.....	8
図 2-6	曲げモーメント－載荷点たわみ関係.....	9
図 2-7	最終ひび割れ状況.....	10
図 2-8	破断面の様子.....	11
図 2-9	応力－歪関係および断面の分割.....	13
図 2-10	引張側トリリニアモデルの構築フロー	13
図 3-1	試験体.....	18
図 3-2	打込み方法の模式図.....	18
図 3-3	主筋歪ゲージの貼付位置.....	20
図 3-4	曲げモーメント－曲率関係.....	21
図 3-5	引張側の各区間の局所変形の推移および曲率 0.10 (1/m) 時のひび割れ状況.....	23
図 3-6	ひび割れ箇所の模式図.....	24

図 4-1	水ガラス打込み用型枠	27
図 4-2	打込み方法の模式図	27
図 4-3	写真撮影方法の概要	30
図 4-4	撮影範囲および解析対象範囲	30
図 4-5	画像解析の流れ	31
図 4-6	配向強度および主配向角	32
図 4-7	流込み (N)	34
図 4-8	くし軸方向 (CA)	34
図 4-9	バイブレータ軸方向 (VA)	35
図 4-10	バイブレータ直交方向 (VP)	35
図 4-11	z-x 平面の画像解析結果	36
図 5-1	分散性の評価手順	39
図 5-2	x-y 平面における繊維本数に対する区間数のヒストグラム	41
図 5-3	z-x 平面における繊維本数に対する区間数のヒストグラム	42
図 5-4	ポアソン分布による確率関数 (x-y 平面)	43
図 5-5	ポアソン分布による確率関数 (z-x 平面)	44
図 5-6	採用するポアソン分布	46
図 5-7	理想的な生起回数の分布	48
図 5-8	架橋性能が最大または最小になる引張応力ーひび割れ幅関係	48
図 5-9	MCS による引張応力ーひび割れ幅関係	50
図 5-10	MCS によって得られた繊維重心位置に対する生起回数の分布例	51
図 5-11	MCS による最大応力の分布	53
図 5-12	MCS による最大および最小架橋強度時の生起回数の分布	54
図 5-13	試験体形状	56
図 5-14	曲げモーメントー曲率関係	57
図 5-15	曲げ応力ー曲げ歪関係	57
図 5-16	最大曲げ応力の分布 (40×40mm 断面試験体)	59
図 5-17	最大曲げ応力の分布 (100×100mm 断面試験体)	59

第1章 序論

近年、繊維補強セメント複合材料（Fiber-Reinforced Cementitious Composites : FRCC）の研究が盛んに行われている。FRCC は、従来のコンクリートの引張性能の改善を目的として、モルタルやコンクリートに長さ十数 mm の繊維を体積混入率で数%混入した複合材料である。混入された繊維がひび割れを架橋することによって、ひび割れ発生後も繊維が引張力を負担することで外力に抵抗することができ、従来のコンクリートに比べて非常に高靱性な特性を示す。混入する繊維の種類や配合によって力学性能を変化させられることから、構造部材のみならず補修・補修材料、埋設型枠など利用範囲も多岐に渡り¹⁾、今後のコンクリート構造物の可能性を大きく広げる材料として期待されている。

本研究で対象としている高靱性繊維補強セメント複合材料（Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites : DFRCC）は FRCC の一つであり、曲げ応力下において初期ひび割れ発生後も応力が上昇するたわみ硬化性状を示す特徴を有する。DFRCC の範疇に含まれる材料の一部はすでに構造部材や道路橋などに適用され^{例えば 2) , 3)}、徐々に適用の場を広げつつあるが、未だ限定的である。

その一因には、コストの問題や施工の難しさ等が挙げられるが、性能の定量的な評価の難しさや材料特性のばらつきが大きいことも報告されている¹⁾。DFRCC における優れた力学性能は、混入した繊維が均一に分散していることや繊維配向性に適度なばらつきがある場合にのみ正しく発揮される。そのため、要求性能を達成するためにはマトリックス中の繊維の分散および配向を把握し、コントロールすることが求められる。

既往の研究^{4), 5)}において、繊維配向性が DFRCC の力学性状に大きく影響を及ぼすことが明らかになっており、その繊維配向性は打込み方向や型枠形状によって変化することが知られている。また、繊維配向性を意図的にコントロールする方法が提案され、材料試験および繊維の可視化実験を通じてその有用性が確認されている^{6), 7)}。具体的に、これらの研究で提案された方法の一部を図 1-1 に示す。これらの打込み方法で作製した $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の試験体に対して切欠き梁の 3 点曲げ試験が行われ、図 1-2 に示す結果が得られている。バイブレータおよびくしを施した試験体では施していない試験体と比較して、耐力が大幅に向上している。これらの打込み方法によって繊維配向をコントロールして HPRCC の性能を向上させることが明らかになった。

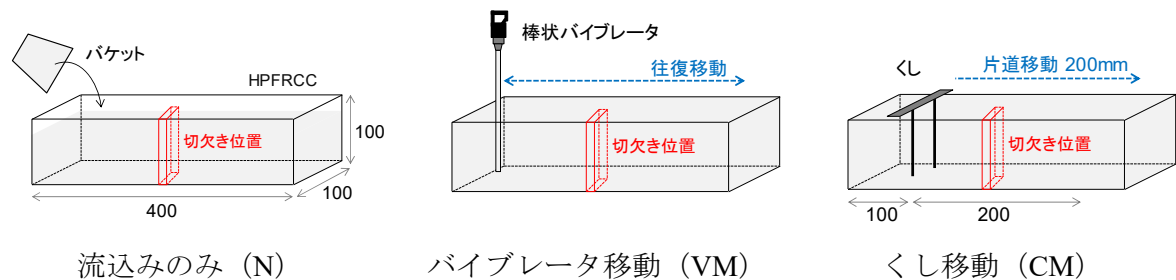


図 1-1 提案された打込み方法

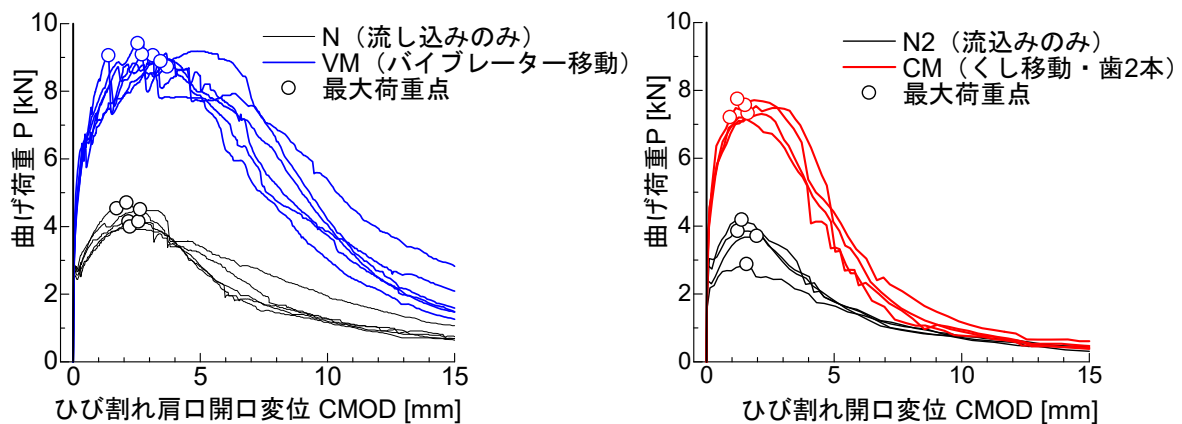


図 1-2 曲げ荷重－ひび割れ肩口開口変位関係

本研究では、DFRCC における繊維配向性および分散性が曲げ・引張性状に及ぼす影響を把握することを目的に、4 つの実験を行った。

第 2 章では、繊維配向性を考慮した打込み方法を無筋の DFRCC 梁部材に適用し、提案された方法が部材規模の試験体においても有効であるかどうかを検証した。曲げ試験結果および加力終了後のひび割れ状況、破断面の観察を基に、部材内の位置ごとに異なる繊維配向性を有していることを確認し、これらを考慮した断面解析を行って、配向性の違いによる各試験体の耐力の再現を行った。

第 3 章では、配筋を行った梁試験体に対して、繊維配向性を考慮した打込み方法を適用し、これらの打込み方法が鉄筋補強 DFRCC 部材の曲げ性状に及ぼす影響を検討した。試験体ごとの最大耐力には大きな違いは見られなかったものの、ひび割れの分散および進展に違いが見られた。

第 4 章では、梁試験体内部の繊維配向性を検証するため、繊維の可視化実験を行った。可視化実験では既往の研究^{6), 7)}と同様に、透明なケイ酸ナトリウム水溶液（水ガラス）をマトリックスに使用し、混入した繊維の配向をデジタルカメラで撮影し、画像解析を行った。打込み方法によって繊維が再配向することが確認でき、試験体寸法にかかわらずこれらの方法が繊維配向性を変化させる方法として有効であることを示した。

第 5 章では、DFRCC の材料特性のばらつきを評価する方法として繊維分散性に着目し、第 4 章の可視化実験で得られた撮影画像を基に繊維の分散性をポアソン分布で評価し、モンテカルロ・シミュレーションにより架橋則のばらつきを表現した。さらに、それらの架橋則をモデル化して断面解析を行い、DFRCC の 4 点曲げ載荷試験結果と比較して、得られた架橋則の妥当性を確認した。

第2章 打込み方法の違いが DFRCC 梁部材の曲げ性状へ及ぼす影響

2.1 はじめに

既往の研究では、繊維配向性を考慮した打込み方法として、棒状バイブレータや髪をとかす「くし」を模した器具を用いた打込み方法が提案され^{6), 7)}, 100×100×400mm の曲げ試験体に対して、その効果の確認が行われている。ケイ酸ナトリウム水溶液（水ガラス）を用いた可視化実験および切欠き梁の3点曲げ試験の結果より、これらの打込み方法により繊維の配向性が影響を受け、力学性能が向上することが確認されている。

本章では、より大きい寸法の試験体に対して、これらの繊維配向性を考慮した打込み方法を適用し、4点曲げ載荷試験を行う。構造部材レベルの試験体においてこれらの打込み方法が有効であるかどうかを確認するとともに、断面位置ごとに異なる構成則を導入した断面解析を行った。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体

試験体形状を図 2-1 に示す。梁部材を想定し、断面 $280\text{mm} \times 180\text{mm}$ 、全長 1680mm とした。DFRCC 打込み時に繊維配向性を考慮した打込み方法を行い、それらが曲げ性能に及ぼす影響を把握する。

繊維配向性を考慮した打込み方法の模式図を図 2-2 に示す。打込み方法は、試験体型枠を傾けた状態で DFRCC を充填していく基準試験体「流込み (N)」, DFRCC を充填後に髪をとかすくしを模した器具を試験体軸方向に移動させる「くし軸方向 (CA)」, DFRCC 充填後に棒状バイブレータを試験体軸方向に 2 往復させる「バイブレータ軸方向 (VA)」, DFRCC 充填後に棒状バイブレータを試験体軸方向と直交する向きに移動させる「バイブレータ直交方向 (VP)」の 4 種類とし、各方法 1 体ずつ作製した。流込み時には試験体を $1/35$ 程度傾けて流し込んだ。くしおよびバイブレータの移動速度は既往の研究^{6), 7)}と同一である。

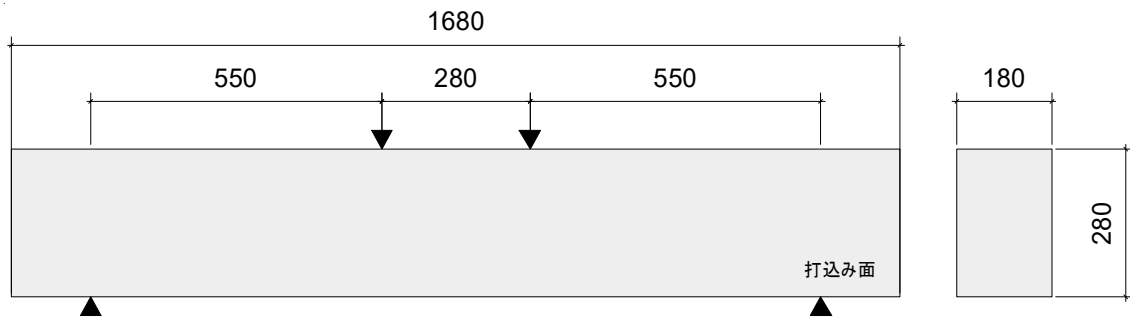


図 2-1 試験体形状

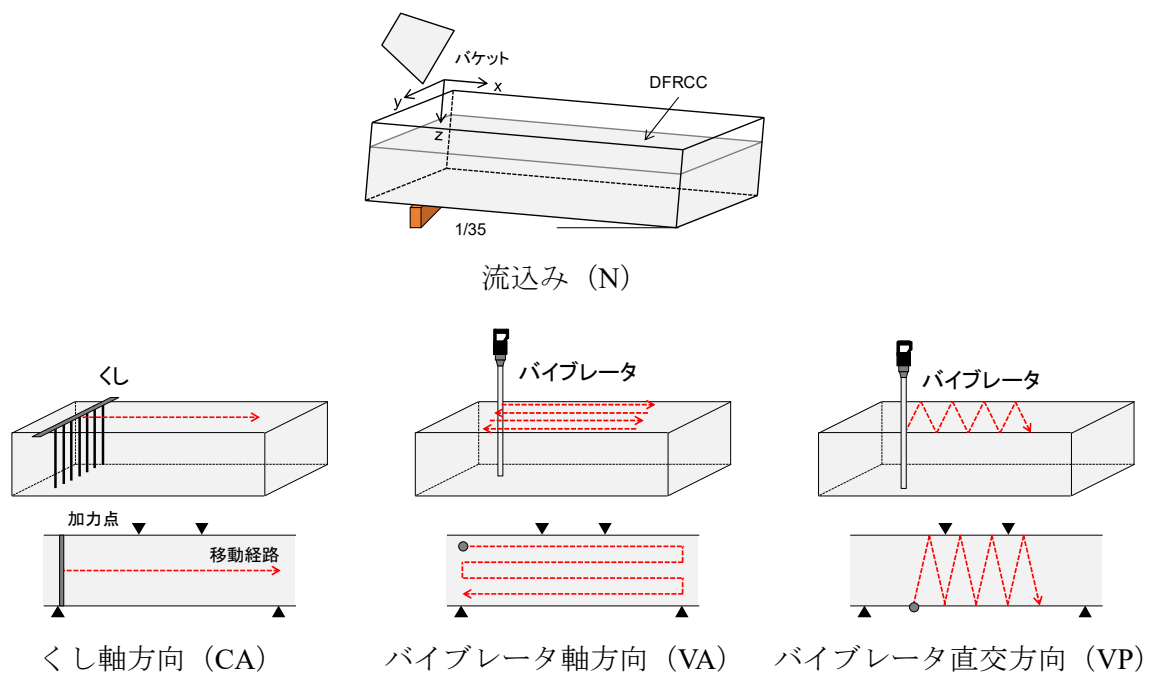


図 2-2 打込み方法模式図

2.2.2 使用材料

DFRCC の調合計画を表 2-1 に、PVA 繊維の形状および力学特性を表 2-2 に示す。PVA 繊維の体積混入率は 2.0%である。練混ぜバッチごとの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 に示す。試験体は、8 日間被膜養生した後に脱型し、その後実験室内に静置した。加力時の材齢は 29 日～31 日である。

表 2-1 DFRCC 調合表

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：2.0%），Ad：高性能減水剤

表 2-2 PVA 繊維の形状および力学特性

繊維 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	28.0

表 2-3 練混ぜバッチごとのフレッシュ性状および圧縮性能

試験体	日付 2015 年	流下時間* (s)	空気量 (%)	練上がり温度 (℃)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
N	9/9	34.5	1.8	26.8	44.8	14.2
CA	9/10	32.1	1.5	27.4	44.2	14.1
VA	9/10	37.4	1.7	27.1	45.9	13.5
VP	9/9	45.5	2.3	26.9	47.4	13.9

*土木学会規準「PC グラウトの流動性試験方法」(JSCE-F 531-1999)

2.2.3 載荷および計測方法

載荷位置および変位計設置図を図 2-3 に示す。変位制御により加力を行う 2MN ユニバーサル試験機を用いて、4 点曲げ載荷試験を行った。試験機のヘッド間速度は毎分 0.5mm に設定した。計測項目は、載荷力、載荷点たわみ（2 箇所）、ひび割れ幅および曲率計測用の局部変形（圧縮・引張各 6 箇所）の 3 つである。

ひび割れの本数観測範囲を図 2-4 に示す。加力終了後に、図のハッチ部（試験体純曲げ区間 280mm における引張縁から 42mm までの範囲）に発生したひび割れの本数を目視で確認した。

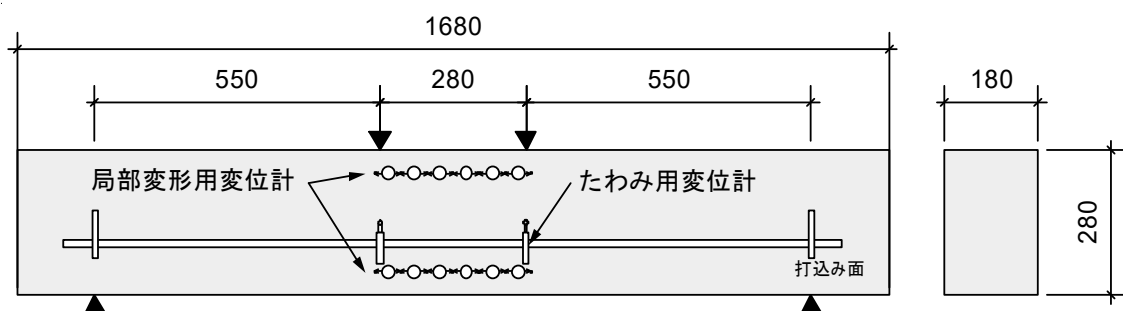


図 2-3 載荷位置および変位計設置図

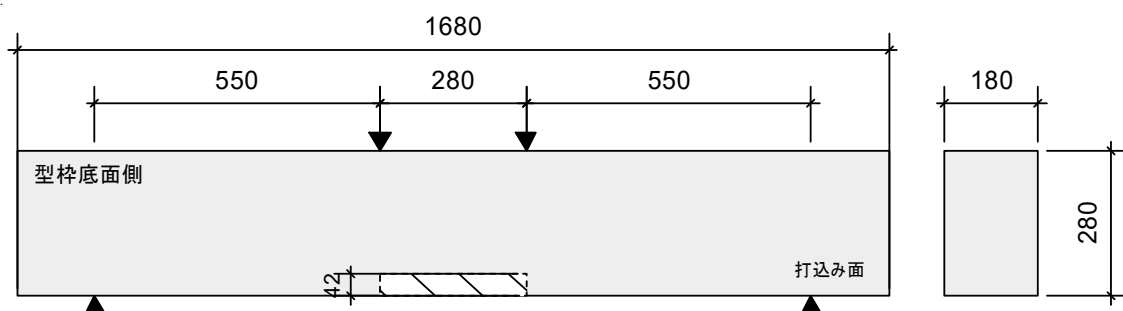


図 2-4 ひび割れの本数観測範囲

2.3 実験結果

2.3.1 打込み時の様子

打込み時の様子として、くし軸方向(CA)の流込み時とくし移動時の様子を図 2-5 に示す。流込み時、型枠に打ち込まれたマトリックスは、打込み点を中心に同心円状に広がりながら流れている。これより、通常流込みのみを行った試験体では、繊維は打込み点を中心に同心円状に配向していると推測される。また、ある程度打込みが進んだ段階から、打込み点においてマトリックスが型枠底面で跳ね返り、巻き上がりながら流れていく様子が見て取れた。

くし移動時では、繊維がくしの歯の間を通り抜けてくしの移動する向きと同じ方向に再配向している様子がみてとれた。バイブレータを移動させた試験体(VA・VP)でも同様に、バイブレータが移動する方向に繊維が配向し直している様子が確認できた。以上の観察から、くしおよびバイブレータを移動させた試験体では、それらの移動方向に繊維が配向していると考えられる。



流込み時



くし移動時

図 2-5 打込み時の様子

2.3.2 曲げモーメントーたわみ関係

曲げモーメントー载荷点たわみ関係を図 2-6 に、実験結果を表 2-4 に示す。载荷点たわみは、2 個の変位計の平均である。基準となる流込み (N) 試験体と比較して、くし軸方向 (CA) 試験体とパイプ軸方向 (VA) 試験体は最大耐力が上昇するとともに、変形能も大幅に向上している。くしおよびパイプを試験体軸方向に移動させることにより、繊維が試験体軸方向に再配向し、ひび割れに対する有効性が増加したと考えられる。試験体軸方向に直交する向きにパイプを移動させた (VP) 試験体は、流込み (N) 試験体と最大耐力はほぼ同じだが、変形能は高くなっている。

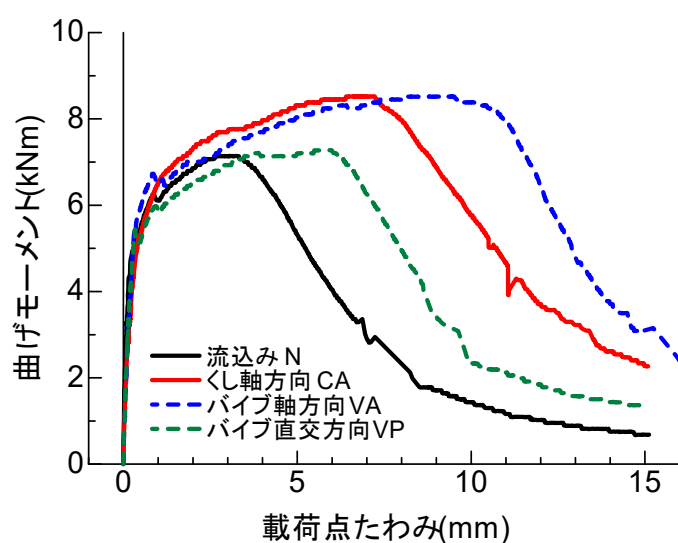


図 2-6 曲げモーメントー载荷点たわみ関係

表 2-4 実験結果

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時	
		たわみ (mm)	曲げモーメント (kNm)
N	26.0	3.04	7.14
CA	31.0	8.13	8.52
VA	31.0	6.63	8.53
VP	26.5	5.85	7.28

2.3.3 最終ひび割れ状況

加力終了後の最終ひび割れ状況を図 2-7 に、ひび割れ本数を表 2-5 に示す。いずれの試験体も 4～5 本のひび割れが生じたのち、1 本のひび割れに開口が集中した。

ひび割れ本数は、図 2-4 に示す範囲に生じたひび割れをカウントした。平均ひび割れ間隔は、純曲げ区間長 280mm を区間内に生じたひび割れの本数で除した値である。

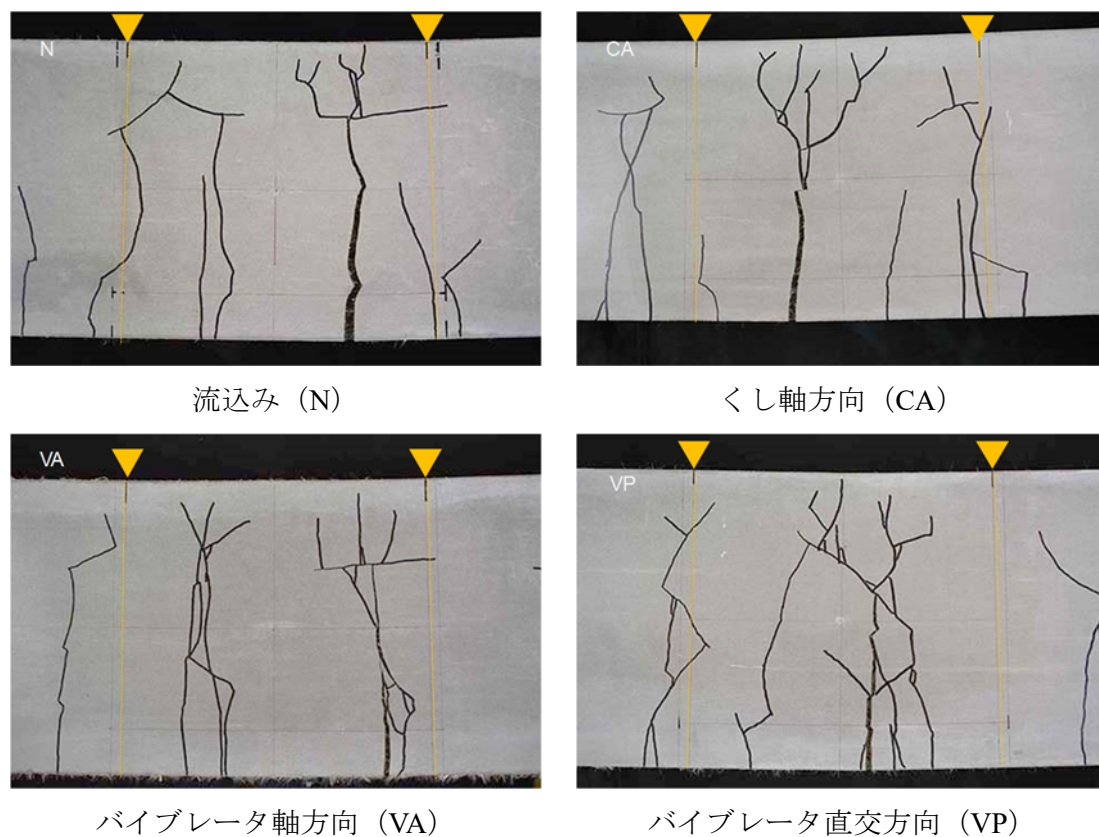


図 2-7 最終ひび割れ状況 (▼:加力点)

表 2-5 ひび割れ本数および平均ひび割れ間隔

試験体名	ひび割れ本数	平均ひび割れ間隔 (mm)
N	4	70
CA	5	56
VA	5	56
VP	4	70

2.3.4 破断面の観察

加力終了後に試験体をひび割れ面で割り、破断面を観察した。破断面を図 2-8 に示す。撮影時、破断面にブラックライトを照射し、PVA 繊維を観察しやすくした。図中の線は型枠面を示しており、打込み面は図の上側である。

すべての試験体において、型枠壁面近くの繊維が型枠面に沿って配向しており、試験体ごとの繊維配向の違いは、破断面の中心部に顕著に現れている。流込み (N) 試験体では、中心部の繊維が試験軸直交方向に配向しており、打込み時にマトリックスが z 軸負方向 (図中矢印) に巻き上がりながら充填されることが確認された。バイブレータ直交方向 (VP) 試験体においては、中心部で繊維が渦を巻くように配向している。くし軸方向 (CA) 試験体およびバイブレータ軸方向 (VA) 試験体では、型枠壁面付近、中心部ともに繊維が試験体軸方向に強く配向している。くしおよびバイブレータを移動させることで、流込み (N) 試験体で見られたマトリックスの巻き上がりによって生じた配向が軸方向に再配向しており、繊維配向を制御することができると考えられる。

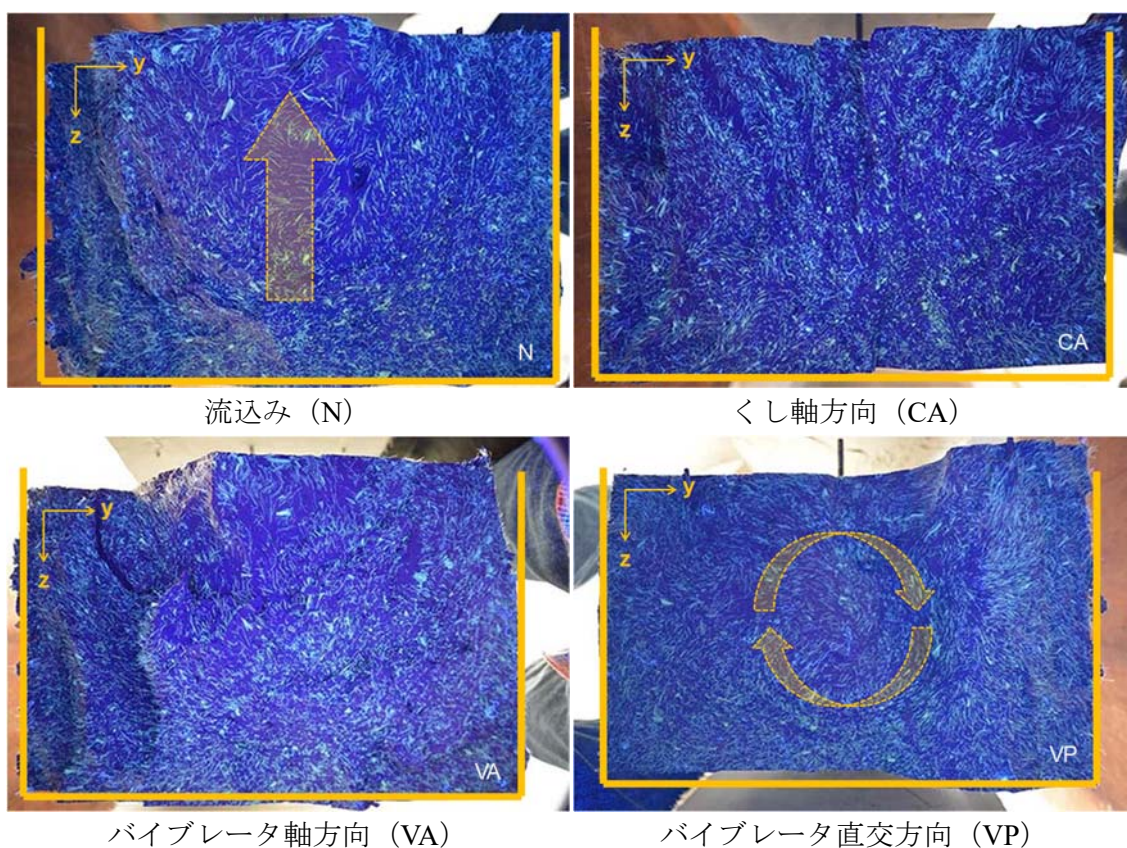


図 2-8 破断面の様子

2.4 繊維配向性を考慮した断面解析

曲げ試験により打込み方法による最大耐力、靱性能の変化が確認できた。また、打込み時の様子および破断面の観察から、内部の断面位置ごとの繊維配向の違いによるものであることが示唆された。本節では、試験体内部位置ごとの繊維配向の差異を表現した DFRCC の応力-歪モデルを構築し、そのモデルを用いた断面解析を行い、最大耐力を検討する。

2.4.1 モデルの構築

試験体の断面を梁せい方向に 8 分割し、層 (I~IV) ごとに異なる構成則を用いて断面解析を行う。採用した応力-歪関係および断面の分割を図 2-9 に示す。圧縮側は放物線モデル、引張側はトリリニアモデルとした。放物線モデルには $\Phi 100-200\text{mm}$ シリンダーによる圧縮試験結果の平均値より、圧縮強度 $\sigma_B=45.6\text{MPa}$ 、圧縮強度時歪 $\varepsilon_c=0.0046$ を用いた。

引張側トリリニアモデルの構築フローを図 2-10 に示す。トリリニアモデルを作成する前段階として、架橋則の計算を行う。架橋則 (引張応力-ひび割れ幅関係) は、単繊維の引抜性状と繊維配向性を表現する確率密度関数である楕円関数を統合させることで構築される⁸⁾。

架橋則への入力値を表 2-6 に示す。単繊維の引抜性状は、PVA 繊維の引抜実験の結果を参考に定めており、第 1 ピーク荷重 P_a および最大荷重 P_{max} はそれぞれ 1.5N および 3.0N 、それぞれに対応する引抜量 δ_a および δ_{max} は、それぞれ 0.2mm および 0.45mm とした。

繊維配向性を与える確率密度関数には楕円分布⁸⁾を用い、繊維配向角分布を楕円関数で近似した際の、楕円の 2 つの径から得られる配向強度 k および座標軸とのなす角で示される主配向角 θ_r で表される。本解析では、主配向角は 0° (試験体軸方向) とし、配向強度 k の違いにより繊維の配向性を表現する。 $k=1$ 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。配向強度 k は x-y 平面 (打込み面)、z-x 平面 (型枠側面) とともに同一の値とした。スナビング係数および繊維強度低減係数は、既往の研究⁹⁾ に倣い、それぞれ 0.5 および 0.3 とした。繊維破断荷重は既往の研究⁸⁾ にて行われた引張試験で得られた破断荷重の平均値 569MPa とした。

配向強度 k ごとに得られた引張応力-ひび割れ幅関係を、最大応力点 (第 1 点: この点の応力を架橋強度と称する) および最大応力後に応力の低下度合いが変化する点 (第 2 点) を特性点としてトリリニアに置換し、各試験体の平均ひび割れ間隔 (表 2-5) で除して、引張応力-引張歪関係に変換する。引張応力-引張歪関係のトリリニアモデルの第 1 点 (架橋強度 σ_{bs} 、架橋強度時の歪 ε_{bs}) および第 2 点 (σ_2 , ε_2) の値を表 2-7 に示す。

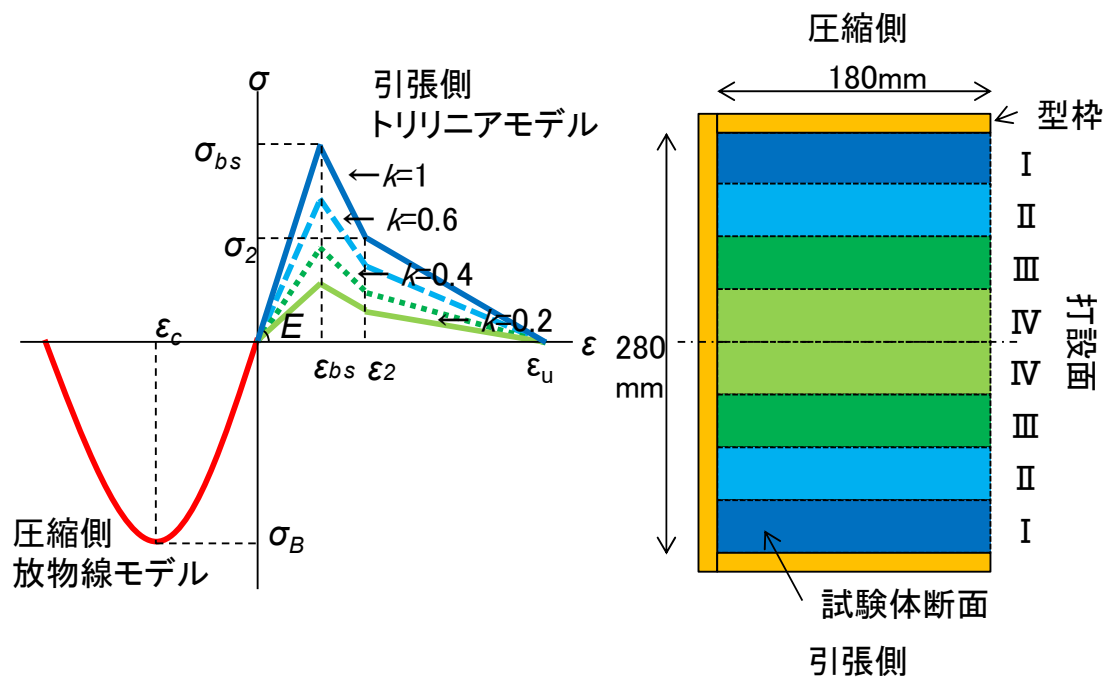


図 2-9 応力-歪関係および断面の分割

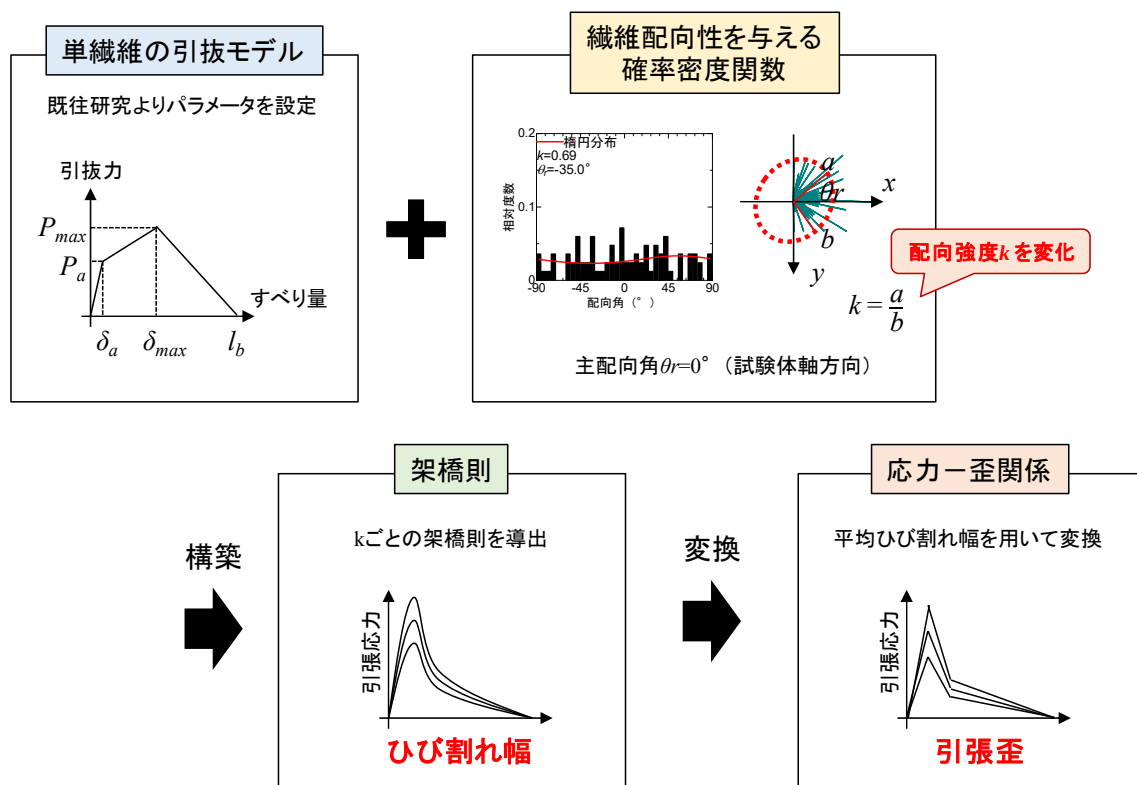


図 2-10 引張側トリリニアモデルの構築フロー

表 2-6 架橋則への入力値

単 繊 維 の 引 抜 モ デ ル	第 1 ピーク時の引抜量 δ_a (mm)	0.2
	最大荷重時の引抜量 δ_{max} (mm)	0.45
	スナビング係数 f	0.5
	第 1 ピーク荷重 P_a (N)	1.5
	最大荷重 P_{max} (N)	3.0
	繊維強度低減係数	0.3
	繊維破断強度(MPa)	569

表 2-7 トリリニアモデルの第 1 点および第 2 点の値

k	σ_{bs} (MPa)	ε_{bs}	σ_2 (MPa)	ε_2	ε_u
0.7	1.87	0.00325	0.45	0.0075	0.100
0.6	1.78	0.00300	0.39	0.0075	0.100
0.4	1.54	0.00300	0.27	0.0075	0.100
0.2	1.15	0.00300	0.14	0.0075	0.100

2.4.2 断面解析結果

実際の繊維配向を観察した結果を加味し、層ごとの配向強度 k をパラメータとして断面解析を行い、最大曲げモーメントの実験値と解析値が合致するように配向強度 k を決定した。採用した各層の配向強度 k と最大曲げモーメントの解析結果を実験結果と比較して表 2-8 に示す。

流込み (N) 試験体では、試験体断面中央部 (IV 層) の繊維が試験体軸方向に十分配向していないことから $k=0.2$ とし、型枠壁面に近づくにつれて配向強度を大きくした。くし軸方向 (CA) およびバイブレータ軸方向 (VA) 試験体では、試験体断面中心部の繊維が強く試験体軸方向に配向している様子から、中央部近辺 (II~IV 層) の配向強度 k を 0.7 とし、型枠付近を流込み (N) 試験体と同一の 0.6 とした。バイブレータ直交方向 (VP) 試験体については、バイブレータが直交方向に移動することによって、試験体全断面において軸方向への配向強度が弱まったと考えられるため、すべての層において $k=0.4$ とした。

表より、試験体断面位置ごとに異なるモデルを導入したことにより、配向強度 k によって各試験体の耐力の差異を表現することができた。

表 2-8 最大曲げモーメントの実験値と解析値の比較

試験体名	層の配向強度 k	実験値 (kNm)	解析値 (kNm)
N	I : $k=0.6$ II : $k=0.4$ III : $k=0.4$ IV : $k=0.2$	7.14	7.17
CA	I : $k=0.6$ II : $k=0.7$ III : $k=0.7$ IV : $k=0.7$	8.52	8.65
VA		8.53	8.65
VP	I : $k=0.4$ II : $k=0.4$ III : $k=0.4$ IV : $k=0.4$	7.28	7.22

2.5 まとめ

DFRCC 梁試験体に対して，繊維配向性を考慮した打込み方法を適用し，4 点曲げ載荷試験を行うことで打込み方法による曲げ性能の把握を行った。

くしおよびバイブレータを試験体軸方向に移動させた試験体は，流込み試験体と比較して，高い曲げ耐力と靱性能を示した。これより，くしおよびバイブレータを試験体軸方向に移動させることによって繊維が軸方向に配向し，架橋性能が向上したことを確認した。一方で，バイブレータを試験体軸と直交する向きに移動させた試験体では，流込み試験体と同程度の曲げ耐力を示した。

また，加力終了後のひび割れ状況および破断面の観察結果より，試験体の断面位置によって繊維配向性が異なることも確認できた。これらを参考に，断面位置ごとの繊維配向性を考慮した構成則を導入した断面解析を行った。繊維配向性を配向強度 k によって表現し，位置ごとに配向強度 k を変えることで，最大耐力を表現することができた。

第3章 打込み方法の違いが鉄筋補強 DFRCC 梁部材の曲げ性状へ及ぼす影響

3.1 はじめに

第2章では、無筋の DFRCC 梁部材に対して繊維配向性を考慮した打込み方法を適用し、打込み方法の有効性を検証した。本項では、梁部材内に主筋配筋を行った試験体を作製し、打込み方法による違いが鉄筋補強 DFRCC 部材の曲げ性状に及ぼす影響を検討する。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体および使用材料

試験体を図 3-1 に示す。断面は第 2 章の試験体と同一の 280mm×180mm、全長 1680mm とし、引張鉄筋、圧縮鉄筋ともに異形鉄筋 3-D13 とした。純曲げ区間には横補強筋を配筋せず、せん断破壊を防止する目的でせん断スパンの横補強筋を D6@100 とした。打込み方法の模式図を図 3-2 に示す。打込み方法は 3 種類で、型枠を 1/35 程度傾けた状態で DFRCC を充填する基準試験体「流込み (N)」, DFRCC 充填後にくしを試験体軸方向に移動させる「くし軸方向 (C)」および棒状バイブレータを試験体軸方向に移動させる「バイブレータ軸方向 (V)」とし、各 1 体ずつ試験体を作製した。

DFRCC の調合計画および使用した繊維は表 2-1、表 2-2 と同一である。使用した鉄筋の力学特性を表 3-1 に示す。主筋および横補強筋にはそれぞれ D13 (SD345) および D6 (SD295) を使用した。フレッシュ性状および力学特性を表 3-2 に示す。養生方法および養生日数とともに、第 2 章の試験体と同一である。

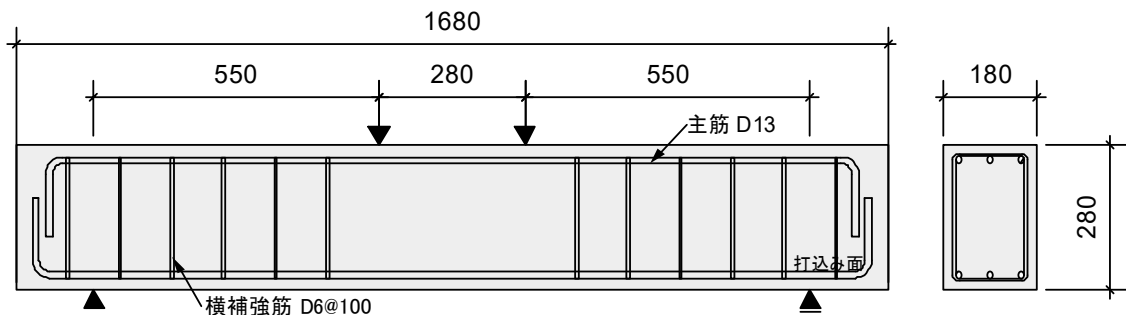


図 3-1 試験体

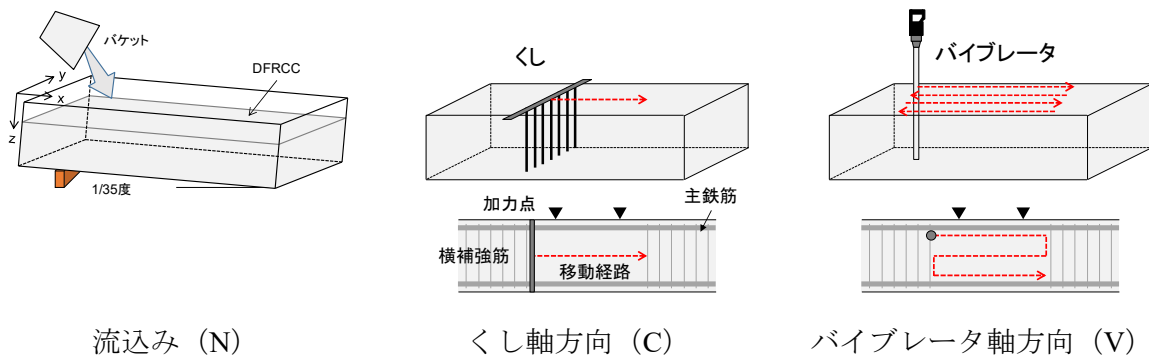


図 3-2 打込み方法の模式図

表 3-1 鉄筋の力学特性

鉄筋	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	備考
D13	391	186	570	主筋
D6	395*	187	542	横補強筋

*0.2%オフセット耐力

表 3-2 フレッシュ性状および圧縮性能

試験体	日付 2015 年	流下時間* (s)	空気量 (%)	練上がり温度 (℃)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
N	10/16	39.8	3.1	21.3	41.8	16.6
C		39.6	2.7	21.3	42.3	17.5
V		38.6	2.7	20.8	40.1	16.2

*土木学会規準「PC グラウトの流動性試験方法」(JSCE-F 531-1999)

3.2.2 載荷および計測方法

載荷方法は 4 曲げ載荷試験とし，使用した加力装置および載荷速度，変位計測方法は第 2 章と同一である。主筋歪ゲージの設置位置を図 3-3 に示す。主筋歪ゲージは主筋 6 本の各載荷点の位置 2 箇所 に貼付した。加力中は，試験体の純曲げ区間をデジタルカメラにより 10 秒間隔で撮影し，ひび割れの進展を観察した。

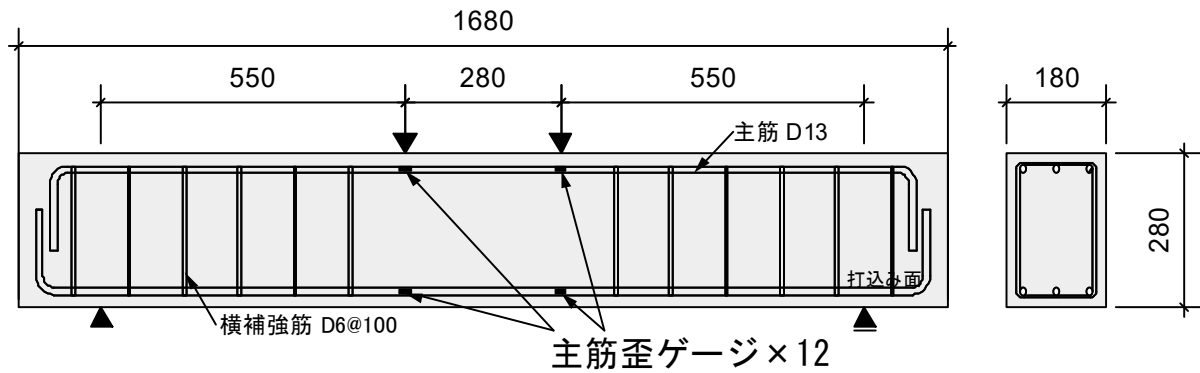


図 3-3 主筋歪ゲージの貼付位置

3.3 実験結果

3.3.1 曲げモーメントー曲率関係

曲げモーメントー曲率関係を図 3-4 に示す。曲率は局部変形用変位計で計測した各区間の曲率の平均である。各試験体とも主筋降伏時の耐力および最大耐力に大きな差はなかった。主筋の歪硬化に伴う曲げモーメントの上昇がみられた。流込み (N) 試験体では、曲率 0.05 (1/m) 以降、曲げモーメントが急激に増加している。くし (C) 試験体およびパイプレータ (V) 試験体では流込み (N) 試験体と比べてゆるやかに曲げモーメントが上昇している。

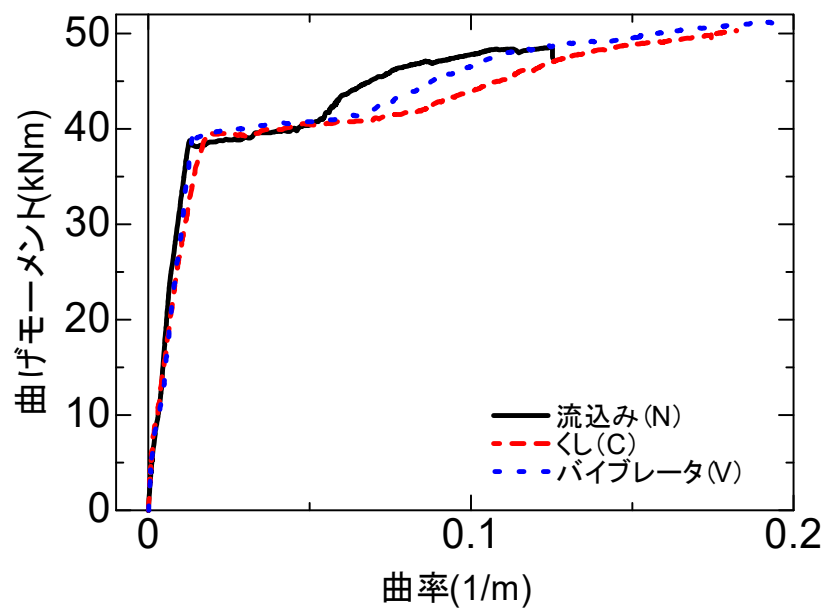
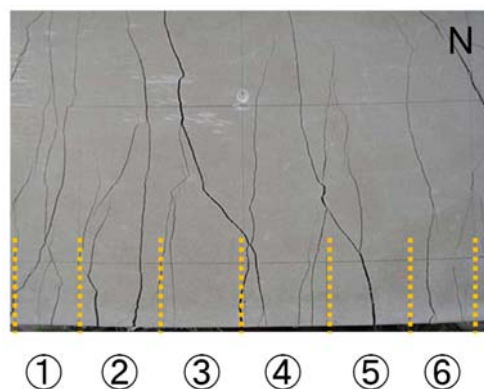
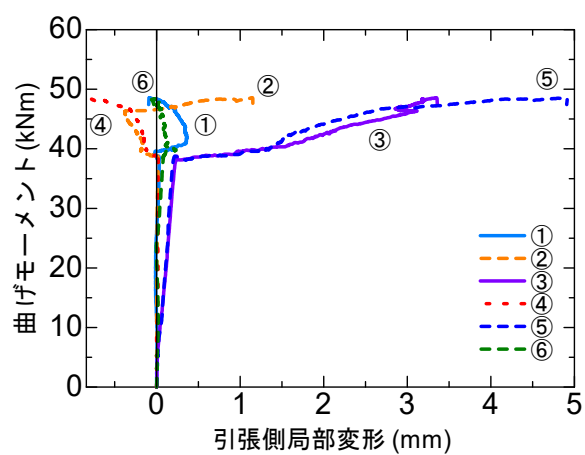


図 3-4 曲げモーメントー曲率関係

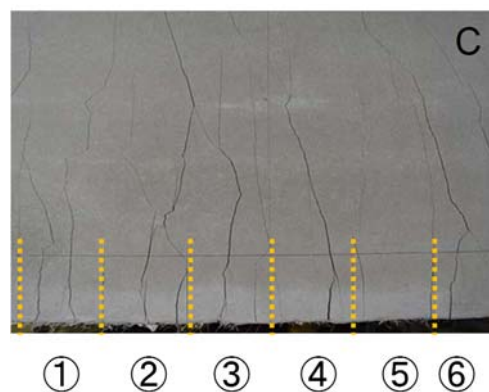
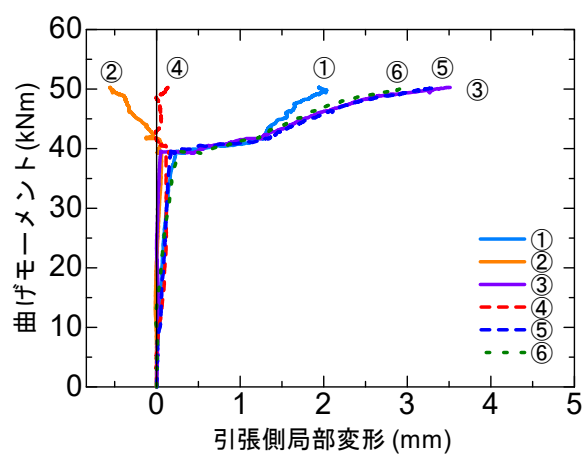
3.3.2 局所変形およびひび割れ開口状況

引張側の各区間の局所変形の推移および曲率 0.10 (1/m) 時のひび割れ状況を図 3-5 に示す。図中の引張側変位計の番号とひび割れ状況に示される区間の番号は対応している。

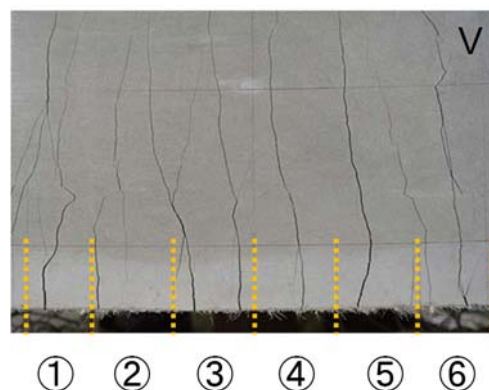
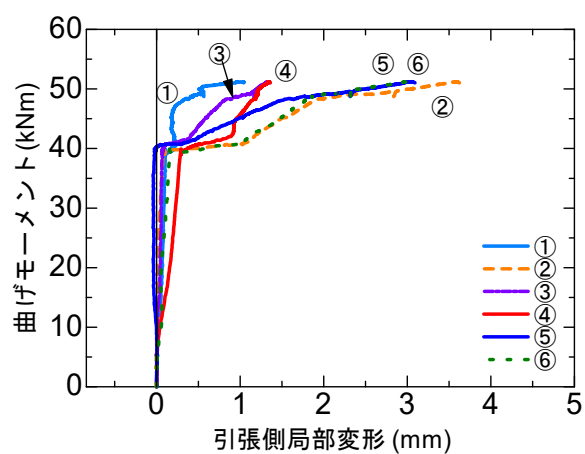
流込み (N) 試験体では、くし (C) 試験体およびバイブレータ (V) 試験体と比較して、引張側局所変形の増加が区間③および区間⑤に集中しており、ひび割れ状況においても同位置におけるひび割れの開口が確認できる。一方、くし (C) 試験体およびバイブレータ (V) 試験体では、ひび割れが均等に生じている。



流込み (N)



くし軸方向 (CA)



バイブレータ軸方向 (VA)

図 3-5 引張側の各区間の局所変形の推移および曲率 0.10 (1/m) 時のひび割れ状況

ひび割れ開口の局所化は打込み方法によって内部の繊維配向に差異が生じたためと考えられる。ひび割れ箇所の模式図を図 3-6 に示す。くしおよびパイプレータを施工することによって繊維が試験体軸方向に配向し、繊維の架橋性能が向上してひび割れ開口が分散したためであると考えられる。流込み（N）試験体では、他の試験体と比較して早期にひび割れ開口の局所化が生じ、その箇所において鉄筋の歪が局所的に増大して歪硬化したため、曲げモーメントー曲率関係において曲率 0.05 (1/m) 以降に曲げモーメントが急激に増加したと考えられる。

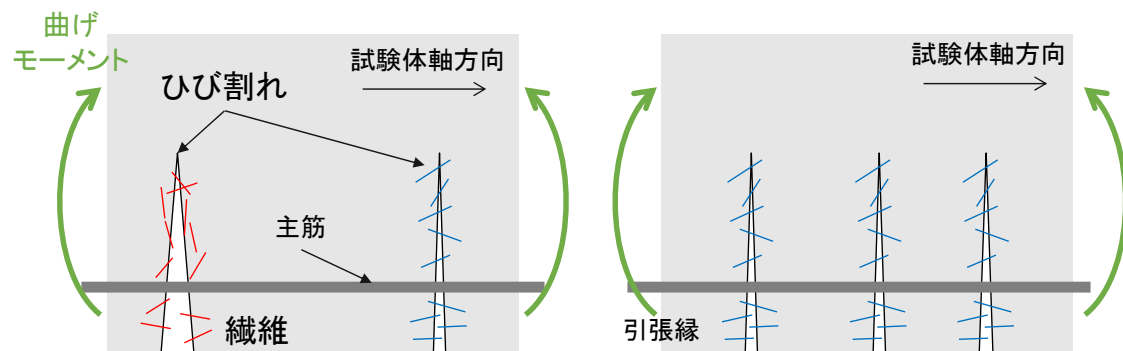


図 3-6 ひび割れ箇所の模式図

3.4 まとめ

鉄筋補強 DFRCC 梁部材に対して，繊維配向性を考慮した打込み方法を適用し，4 点曲げ載荷試験を通じて曲げ性状へ及ぼす影響を検討した。

バイブレータおよびくしを試験体軸方向に移動させた試験体において，繊維配向に差異が生じたことによるひび割れ開口の分散が確認できた。一方で，流込みのみを行った試験体では，早期にひび割れ開口が局所化し，その箇所では引張側主筋が歪硬化するため，曲げモーメントが急に増加した。

第4章 可視化実験による繊維配向性の検討

4.1 はじめに

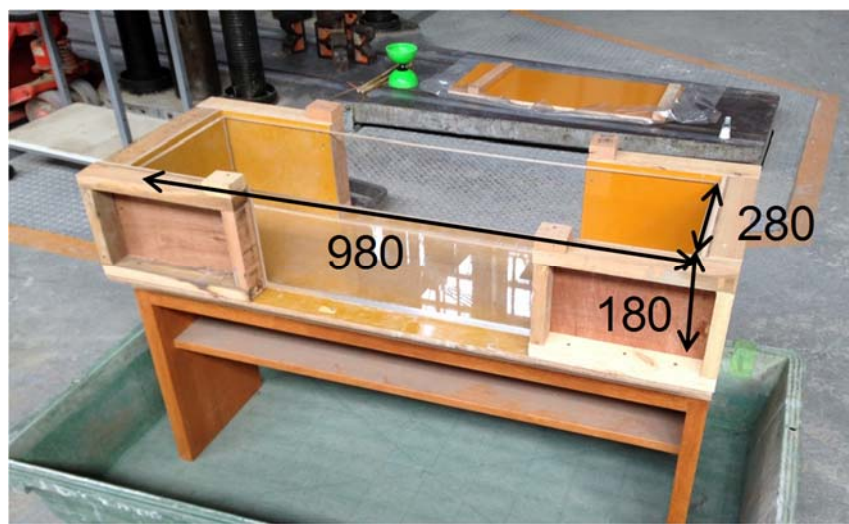
本章では，透明なケイ酸ナトリウム水溶液（水ガラス）を用いて第2章および第3章で対象とした DFRCC 梁部材の繊維可視化実験を行い，梁内部での繊維の配向を観察するとともに，提案された打込み方法を適用し，打込み方法の有用性を検討する。

4.2 実験概要

4.2.1 型枠

水ガラス打込み用型枠を図 4-1 に示す。断面は第 2 章および第 3 章の DFRCC 梁部材と同一の $280\text{mm} \times 180\text{mm}$ で、全長は 980mm とした。型枠を厚さ 12mm の透明なアクリル板で作製し、マトリックス充填後に図 4-2 に示す打込み方法を適用する。

打込み方法の施工範囲は、DFRCC 梁部材試験体の純曲げ区間に相当する範囲を基準に、アクリル型枠の中心部から 280mm の 2 倍の範囲とした。



(単位 : mm)

図 4-1 水ガラス打込み用型枠

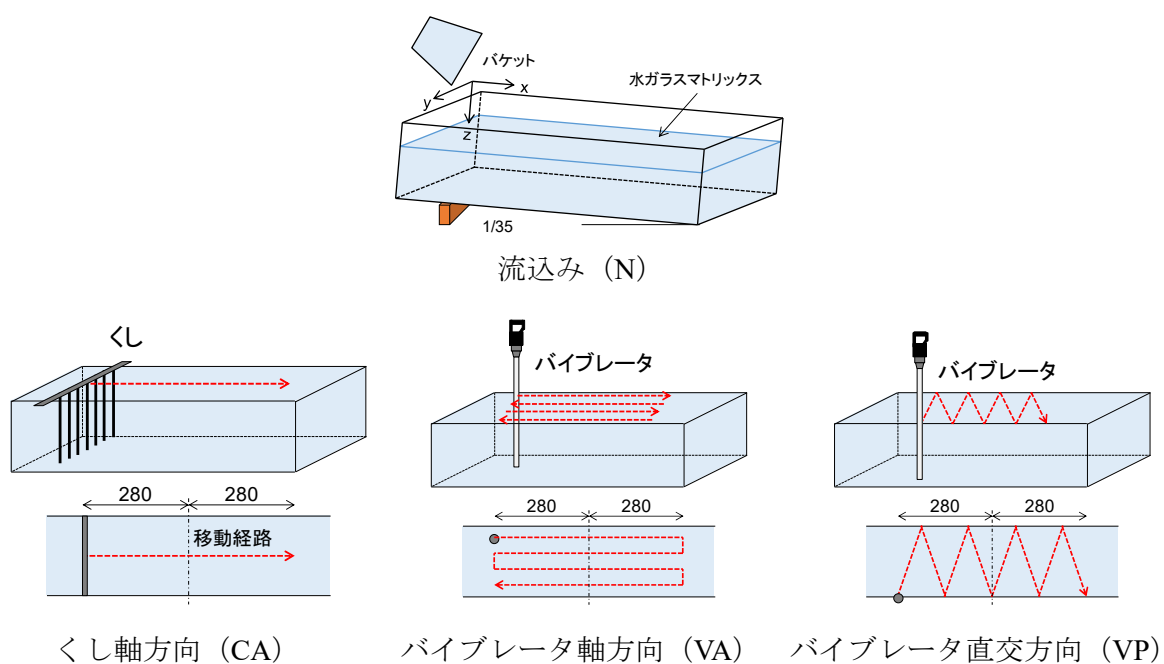


図 4-2 打込み方法の模式図

4.2.2 使用材料

調合した水ガラスの物性値を表 4-1 に、黒色ナイロン繊維の物性値を表 4-2 に示す。水道水と水ガラスを混合し、DFRCC の流動性と合致するように調節した。流動性の調整は、土木学会規準「PC グラウトの流動性試験方法（JSCE-F531-1999）」に準拠し、JP 漏斗を用いた DFRCC の流下時間を参考にした。

実際の DFRCC には PVA 繊維を用いているが、可視化実験の際には繊維の観察を用意にするため PVA 繊維は混入せず、黒色のナイロン繊維のみを使用した¹⁰⁾。黒色のナイロン繊維の体積混入率は 0.05%とした。

表 4-1 調合した水ガラスの物性値

水ガラス：水 (質量比)	密度 (g/cm ³)	温度 (°C)	流下時間* (s)
12：1	1.62	21.0	29.9

*土木学会規準「PC グラウトの流動性試験方法」（JSCE-F 531-1999）

表 4-2 黒色ナイロン繊維の物性値

繊維種類	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	密度 (g/cm ³)	色	体積混入率 (%)
ナイロン	12	0.235	1.14	黒	0.05

4.3 実験方法

4.3.1 撮影方法

写真撮影方法の概要を図 4-3 に示す。アクリル型枠の中央部 280mm の上面 (x-y 平面) と側面 (z-x 平面) にデジタルカメラを設置し、施工完了後に静止画を撮影した。

撮影範囲および解析対象範囲を図 4-4 に示す。画像解析の際にメートル座標への変換を容易にするため、純曲げ区間 280mm と写真の縦幅が一致するようにカメラを設置した。撮影した画像を純曲げ区間 280mm の範囲でトリミングし画像解析を行う。対象画像サイズは、x-y 平面では 280mm×280mm の正方形、z-x 平面では 280mm×180mm の長方形となる。トリミング後の画像は 1 ピクセルあたり 0.07mm となるため、繊維径 0.235mm のナイロン繊維を明瞭に撮影できる。x-y 平面では対象範囲内の位置の影響も検討するため、外力 (モーメント) の作用を考慮して対象範囲をさらに y 方向に 8 分割し、画像解析を行った。



図 4-3 写真撮影方法の概要

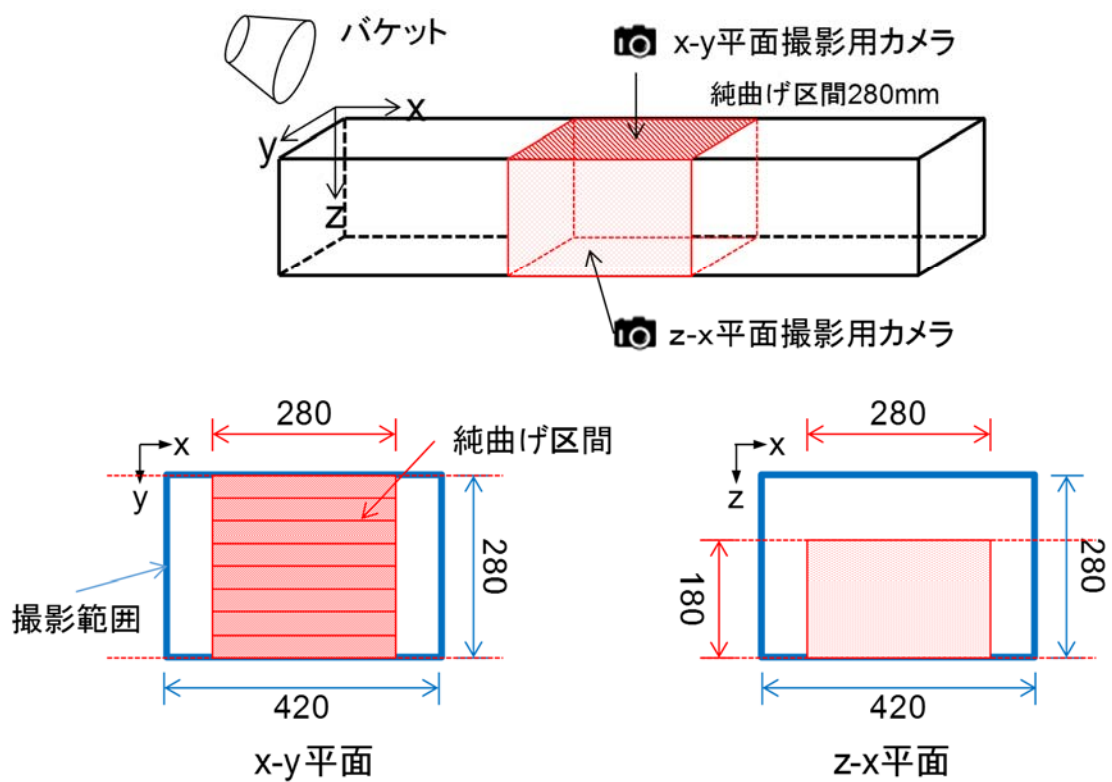


図 4-4 撮影範囲および解析対象範囲

4.3.2 画像解析

撮影した画像から繊維配向角を算出するために画像解析を行う。画像解析の手順を図 4-5 に示す。画像解析の手法は既往の研究¹⁰⁾と同一である。

撮影した画像を解析範囲でトリミングし、汎用ソフトウェアを用いて二値化する。その後、繊維ごとに隣接するピクセルをグルーピングし、各繊維を構成するピクセル座標群と回帰直線との距離の平方和が最小となるように回帰直線を決定する。その回帰直線の傾きを繊維の配向角として求める。

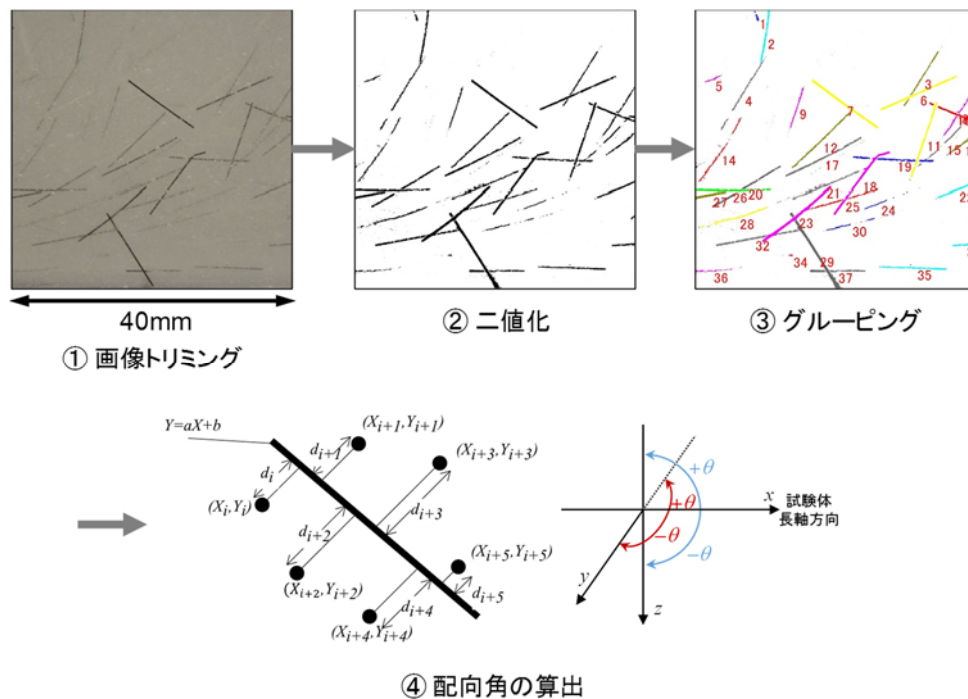


図 4-5 画像解析の流れ

4.3.3 評価方法

繊維配向性を定量的に評価する方法として、既往の研究⁸⁾において、図 4-6 に示す配向強度 k と主配向角 θ_r が提案されている。配向角分布の相対度数に対して、配向角を偏角とする平面座標に変換し、差の二乗が最小となるように楕円による近似を行う。算出した楕円の 2 つの径 a および b より、これらの比である k ($=a/b$) および径 a と座標軸とのなす角 θ_r を得る。

繊維の配向角の分布が一様の場合は配向強度 k が 1 となり、 k が 1 より大きい場合は主配向角の方向に配向性が強く、 k が 1 より小さい場合は主配向角と直交する方向に配向性が強いことを示す。

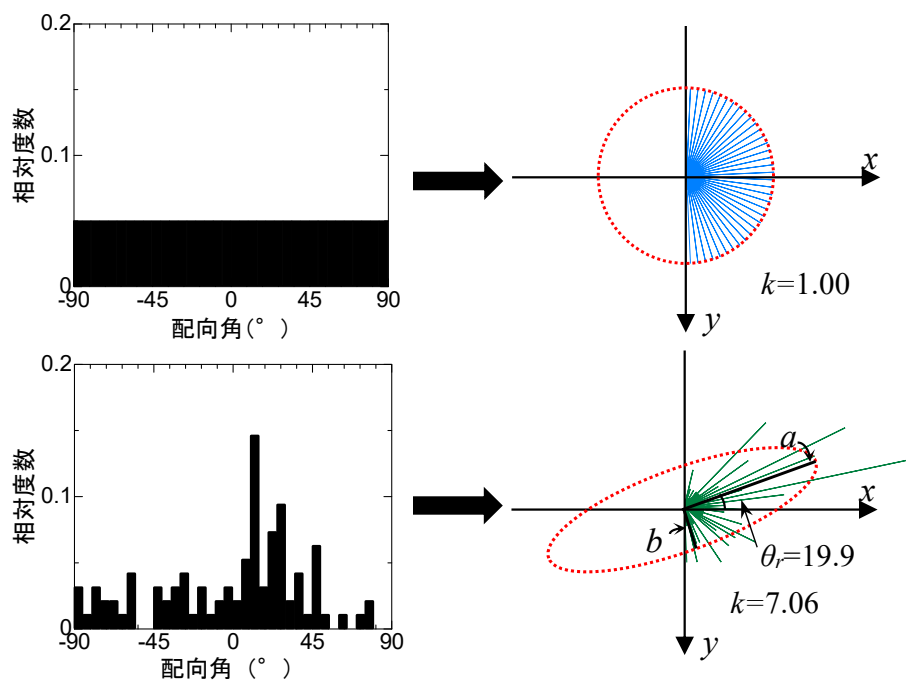


図 4-6 配向強度および主配向角

4.4 実験結果

4.4.1 x-y 平面

x-y 平面の画像解析結果および配向強度を図 4-7～図 4-10 に示す。x-y 平面においては、外力（モーメント）の作用を考慮して y 方向に 8 分割し、各層ごとに配向強度 k と主配向角 θ_r を算出した。

x-y 平面においては、打込み方法ごとに大きな違いが生じた。くしおよびバイブレータを軸方向に移動させた CA および VA において、高い配向強度を確認でき、特に型枠付近よりも中心部の繊維が軸方向に強く配向している。既往の研究^{6), 7)}と比較しても大きな配向強度を得られており、提案している打込み方法は、比較的大きな断面を有する試験体においても繊維配向を制御する方法として有効であると考えられる。一方で、バイブレータ直交方向（VP）では、繊維が軸方向と直交する向きに配向しているため、流込み（N）よりも平均配向強度が小さい。

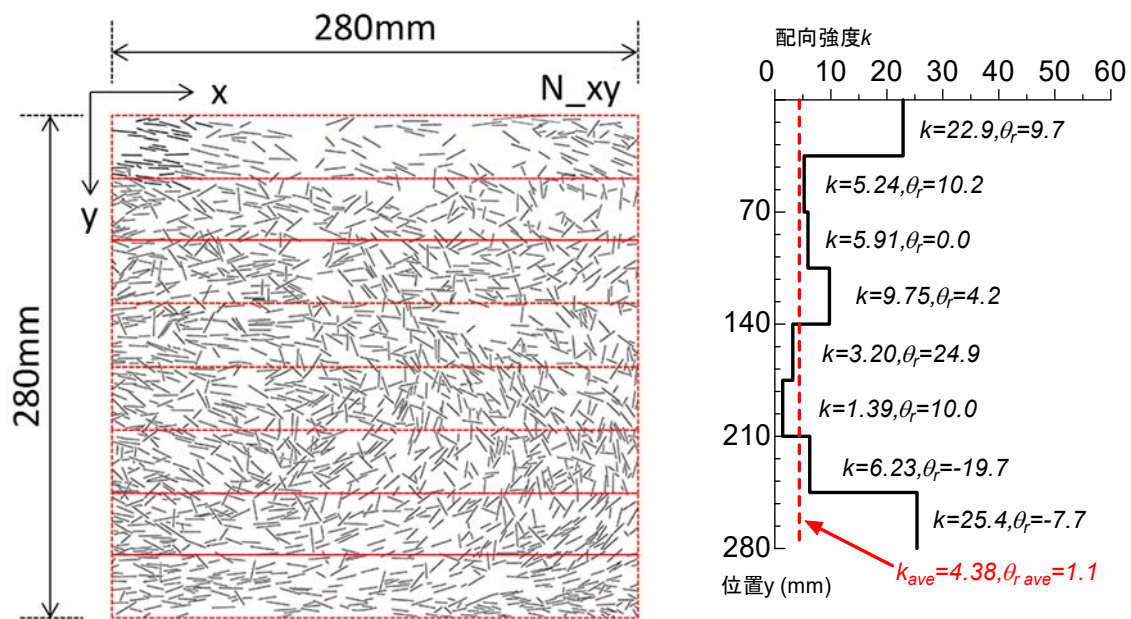


図 4-7 流込み (N)

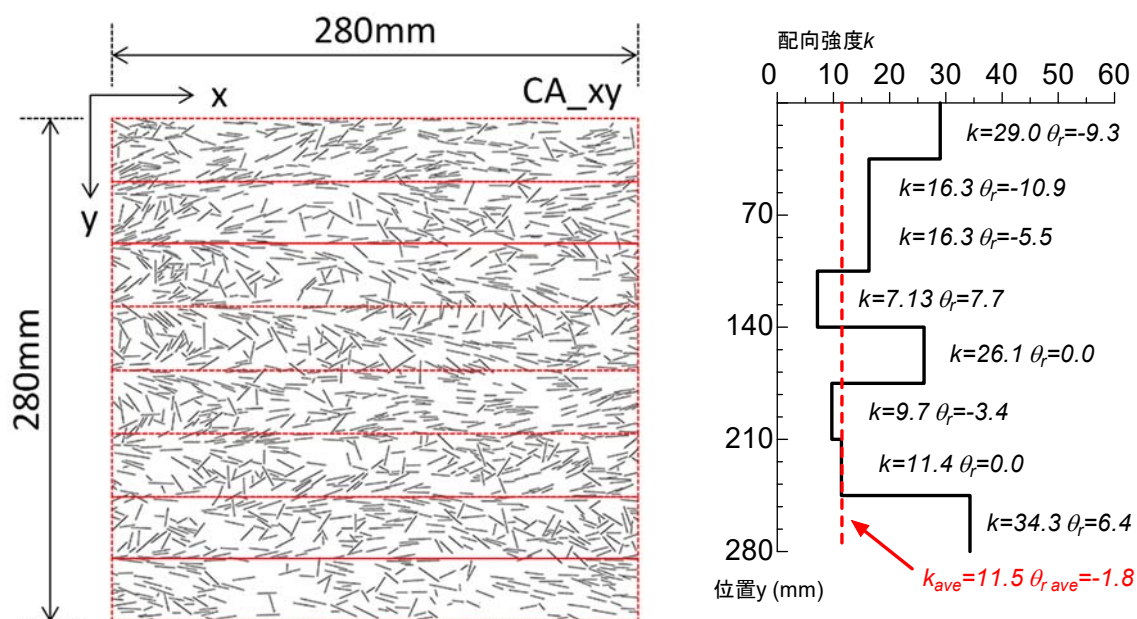


図 4-8 くし軸方向 (CA)

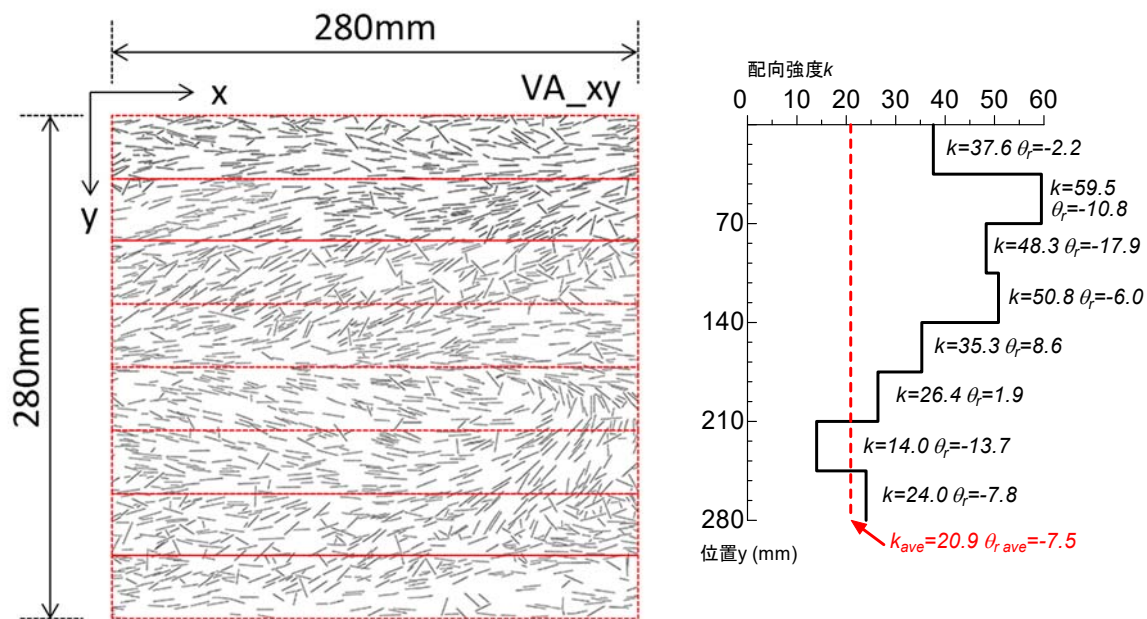


図 4-9 バイブレータ軸方向 (VA)

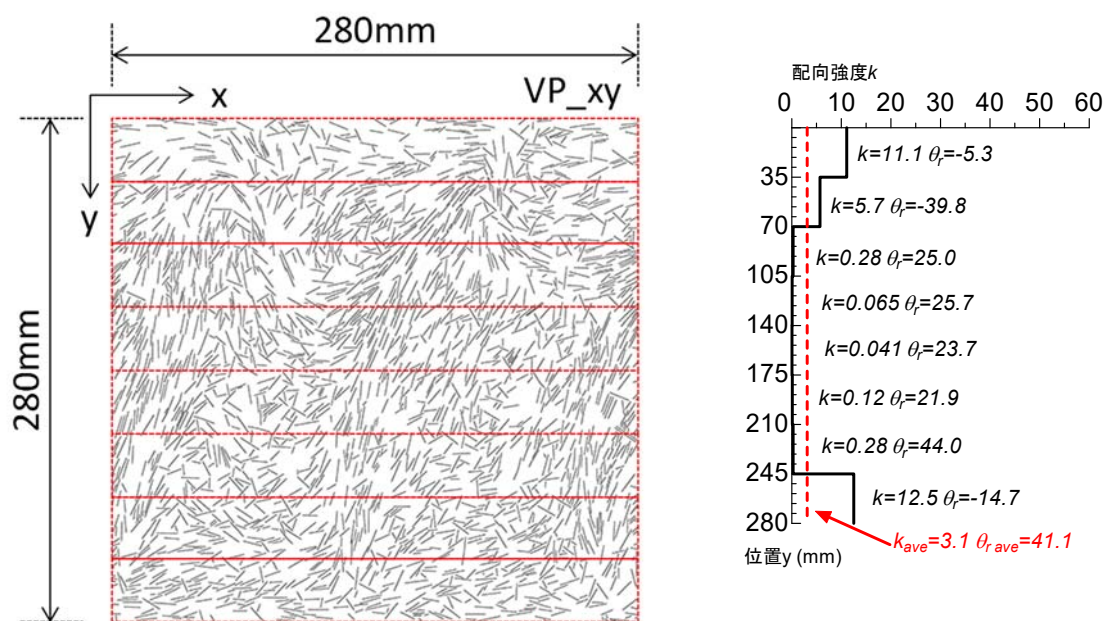


図 4-10 バイブレータ直交方向 (VP)

4.4.2 z-x 平面

z-x 平面の画像解析結果を図 4-11 に示す。z-x 平面については、x-y 平面のように層分割せず、平面全体で配向強度および主配向角を算出した。すべてにおいて、主配向角は概ね軸方向（x 方向）を示しており、配向強度についても大きな違いは見られない。z-x 平面における打込み方法による配向強度および主配向角への影響はほとんどないと考えられる。

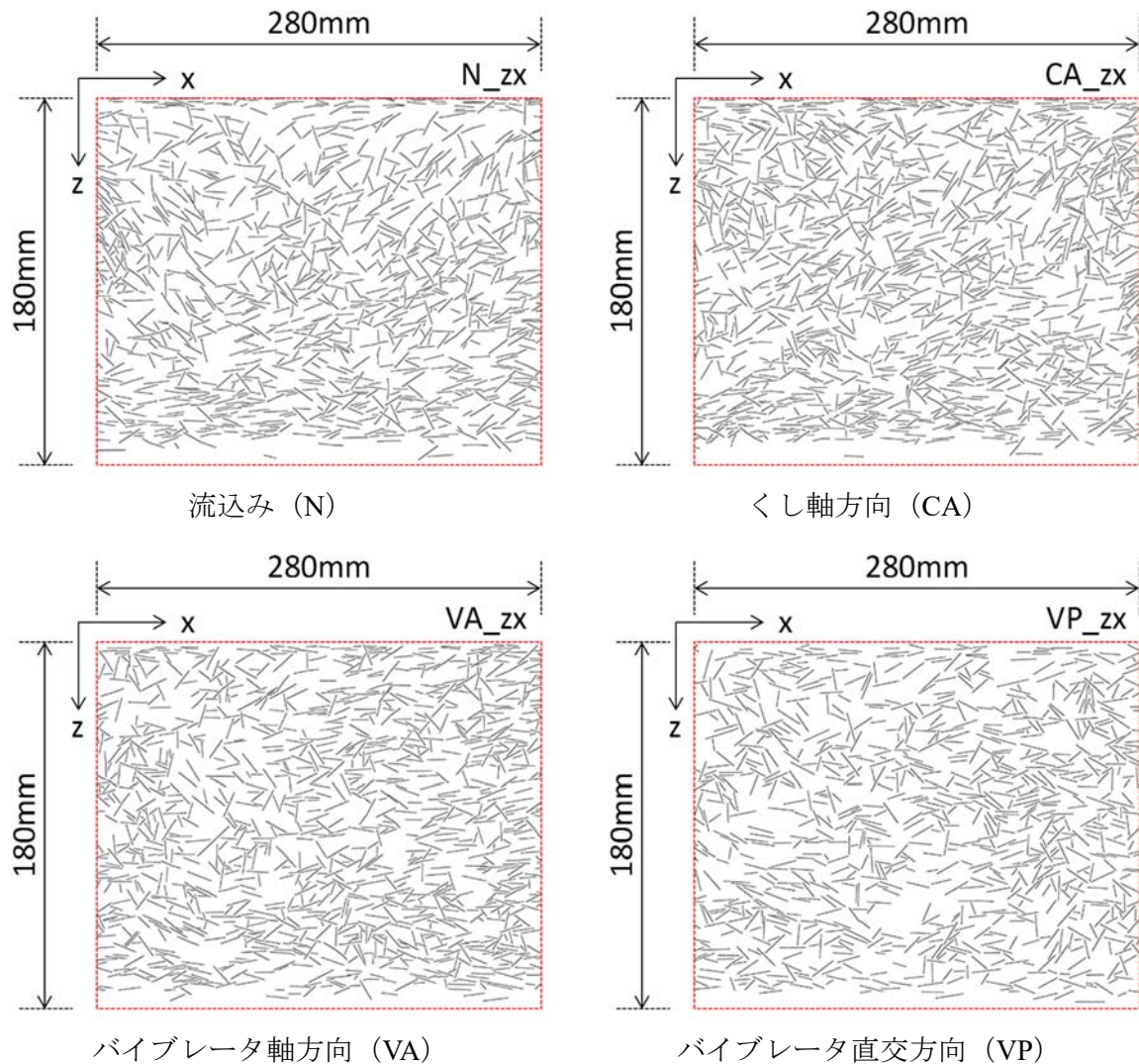


図 4-11 z-x 平面の画像解析結果

表 4-3 z-x 平面における配向強度および主配向角

試験体名	配向強度 k	主配向角 θ_r (°)
N	7.0	-6.4
CA	5.8	-8.6
VA	10.6	-2.8
VP	5.5	2.6

4.5 まとめ

梁部材を対象として、水ガラスを用いた繊維の可視化実験を行い、繊維配向性を考慮した打込み方法による繊維配向性の変化を確認した。

打込み面（ x - y 平面）においては、くしおよびバイブレータを軸方向に移動させた場合、型枠付近よりも、それらを移動させた中央部の方が配向強度は大きくなった。バイブレータを直交方向に移動させた場合では、配向強度が流込みよりも小さくなった。一方で、打込み直交面（ z - x 平面）では、打込み方法による影響は小さかった。

第5章 繊維の分散性が DFRCC の曲げ・引張性状に与える影響

5.1 はじめに

DFRCC において繊維がひび割れを有効に架橋し、期待される性能を発揮するためには、繊維の配向性ととともに繊維の分散性も重要な因子である。DFRCC では一般に径が数十 μm から 1mm 以下の細径の繊維が用いられるため、体積混入率に対して相対的に繊維の本数はかなり多く、マトリックス内に一様に分布すると想定され、繊維の分散性に関する検討はあまりなされてこなかった。しかしながら、既往の研究⁸⁾で行われている、繊維のひび割れの架橋性能を表す架橋則の評価では、単繊維のマトリックスからの拔出し性状を総和することにより架橋則を得ることから、例えば単純にひび割れを跨ぐ繊維の本数が半分になれば、架橋性能も半減する。

一方、過去に注目された鋼繊維補強コンクリート (SFRC) では、ひび割れ断面内の繊維の本数を目視でカウントすることも可能な程度の繊維の本数であり、繊維の本数が直接的に SFRC の性能に影響すると考えられたため、繊維の分散性に関する検討がいくつか行われている。山王らは、SFRC の引張強度の推定を目的として、鋼繊維の配向と分散を定量的に表示する手段を示している¹¹⁾。ここで、配向性については従来用いられる配向係数 β を使用し、分散性は新たに提案した分散係数 α を導入している。分散係数 α は SFRC 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、 α および β が締固め方法、繊維混入率、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から受ける影響を加味した引張強度推定式を提案している。小林らの検討¹²⁾では、加力後の SFRC 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。また、得られた結果をもとに、ばらつきを考慮した繊維混入率の範囲を提案し、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。

本章では、第 4 章で得られた繊維の可視化画像から繊維の分散性を確率関数で評価し、架橋則へ導入することを目標とする。確率関数に基づいて繊維の重心位置をランダムに与えるモンテカルロ・シミュレーションを行い、繊維の分散性状が架橋則のばらつきに及ぼす影響を検討する。その後、ばらつきを考慮した架橋則をモデル化し、過去に行われた DFRCC の 4 点曲げ載荷試験と比較する。

5.2 繊維分散性の確率関数による評価

5.2.1 検討方法

第4章の繊維可視化実験で得た撮影画像より、繊維のx方向の分散性を検討する。x方向への繊維の分散状況の評価手順を図5-1に示す。第4章と同様に解析範囲を純曲げ区間内とし、トリミングから繊維のグルーピングまでを行う。その後、グルーピングされた繊維のピクセル座標群を元に繊維1本ごとの重心座標を算出する。重心は、繊維1本を構成するピクセル座標群の平均として求めた。その後、x方向幅1.0mmの分割区間内に含まれる繊維重心の数をカウントする。重心が各分割区間に含まれる繊維本数と、その本数を含む区間の数の度数分布を計算し、ヒストグラムに示す。

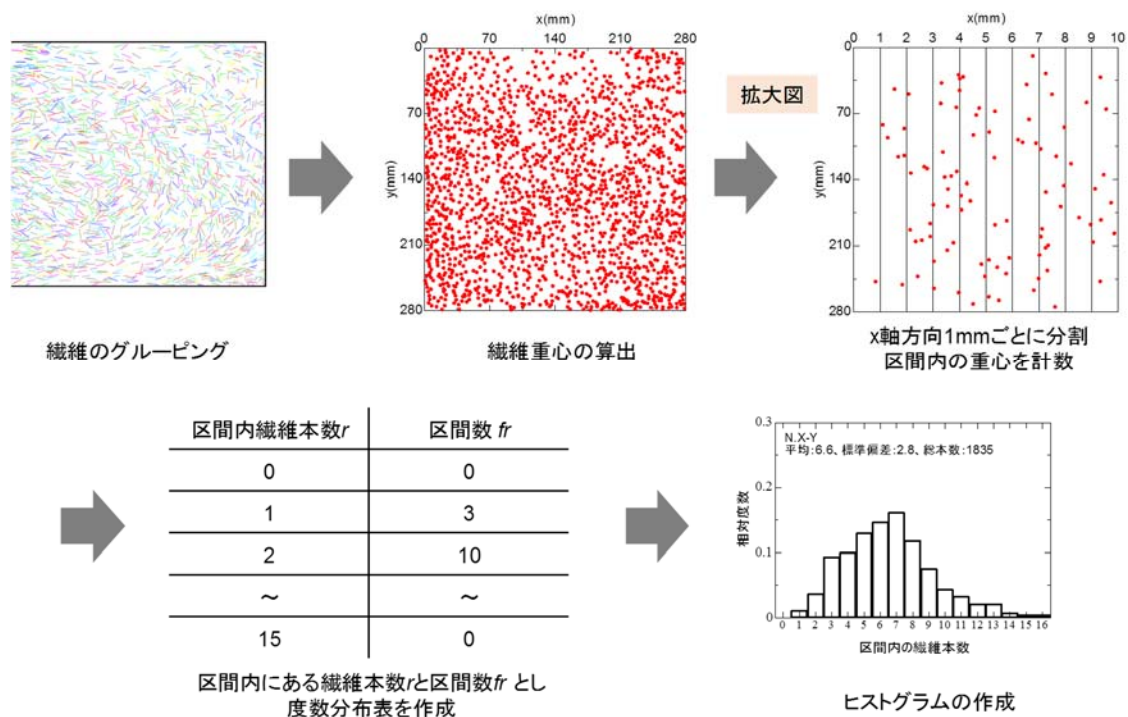


図 5-1 分散性の評価手順

5.2.2 検討結果

前節の方法によって得られた、各打込み方法による繊維本数のヒストグラムおよび繊維本数の平均値および標準偏差を、x-y 平面に関して図 5-2 および表 5-1 に、z-x 平面に関して図 5-3 および表 5-2 に示す。

x-y 平面では、各打込み方法における繊維本数の平均値、標準偏差およびヒストグラムの分布形状に大きな違いは見られない。総本数はバイブレータ直交方向（VP）の方が他の試験体と比較して多い。

z-x 平面でも、各打込み方法における繊維本数の平均値、標準偏差およびヒストグラムの分布形状には大きな違いはない。x-y 平面と z-x 平面のヒストグラムを比較すると、z-x 平面では全体的に山の位置が左方に寄っている。z-x 平面では撮影面に対する奥行き（部材せいに対応）が深く、画像解析によって認識できる繊維の本数が少なくなったものと考えられる。

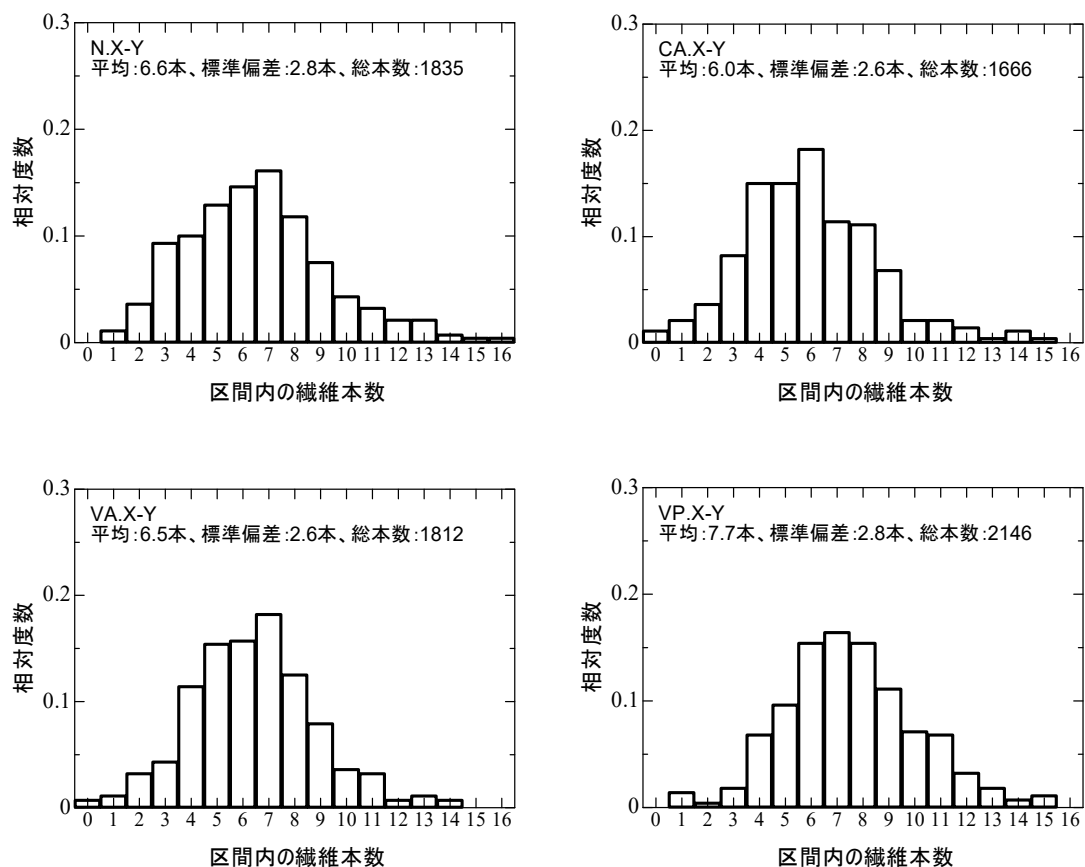


図 5-2 x-y 平面における繊維本数に対する区間数のヒストグラム

表 5-1 各打込み方法における繊維本数の平均および標準偏差 (x-y 平面)

試験体名	平均値 (本)	標準偏差 (本)	総本数 (本)
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

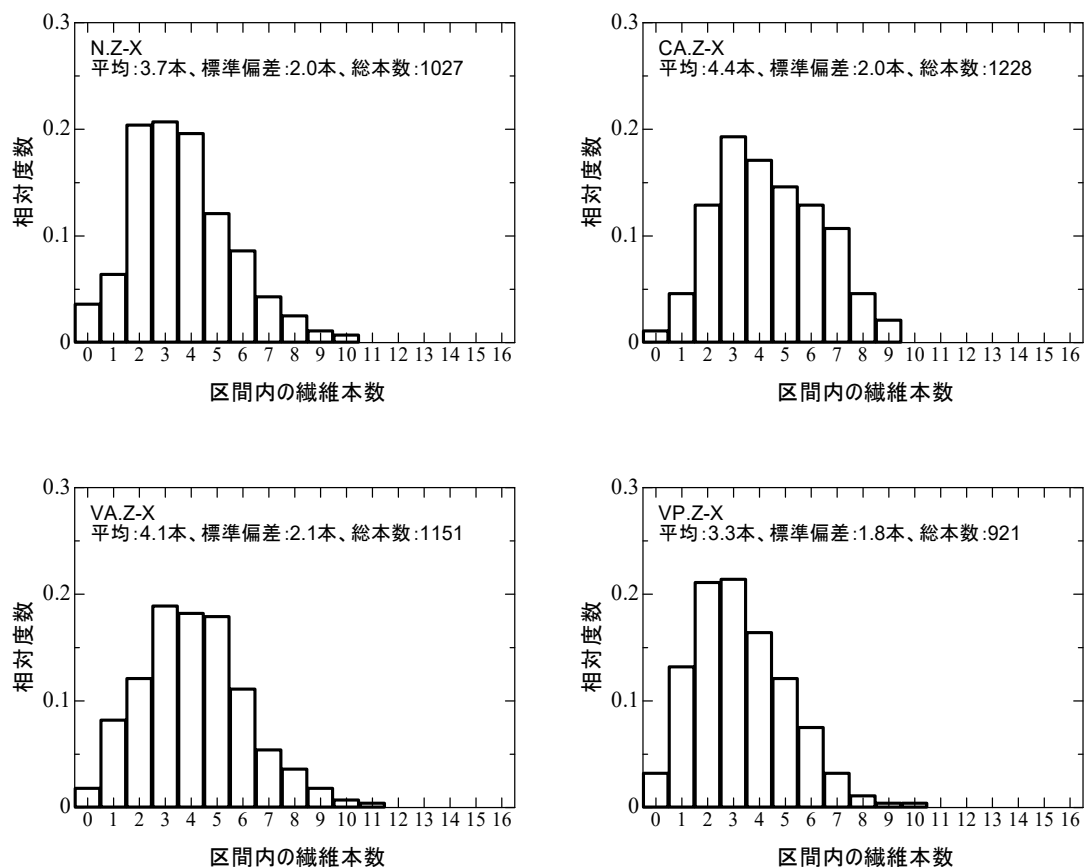


図 5-3 z-x 平面における繊維本数に対する区間数のヒストグラム

表 5-2 各打込み方法における繊維本数の平均および標準偏差 (z-x 平面)

試験体名	平均値 (本)	標準偏差 (本)	総本数 (本)
N	3.7	2.0	1027
CA	4.4	2.0	1228
VA	4.1	2.1	1151
VP	3.3	1.8	921
平均	3.9	2.0	1082

5.2.3 確率関数による評価

繊維の分散性を確率関数により評価する。繊維重心の x 方向位置に関して、繊維はランダムに存在すると考えると、ある区間における繊維の有無（生起数）はポアソン過程で評価できる。ポアソン過程は平均生起数を λ として、(5.1) 式のポアソン分布で表され、標準偏差は $\sqrt{\lambda}$ で与えられる。各打込み方法における繊維本数の平均値を平均生起数 λ としてポアソン分布を適用した確率分布を図 5-4 および図 5-5 に示す。

また、ポアソン分布の適合度を検定するため、 χ^2 検定を行った結果を表 5-3 に示す。いずれの自由度においても X^2 値は有意でなく、ポアソン分布を当てはめることができる。

$$P(r) = \frac{\lambda^r e^{-\lambda}}{r!} \quad (5.1)$$

ここで、 λ ：平均生起数、 r ：1.0mm 区間内に存在する繊維本数

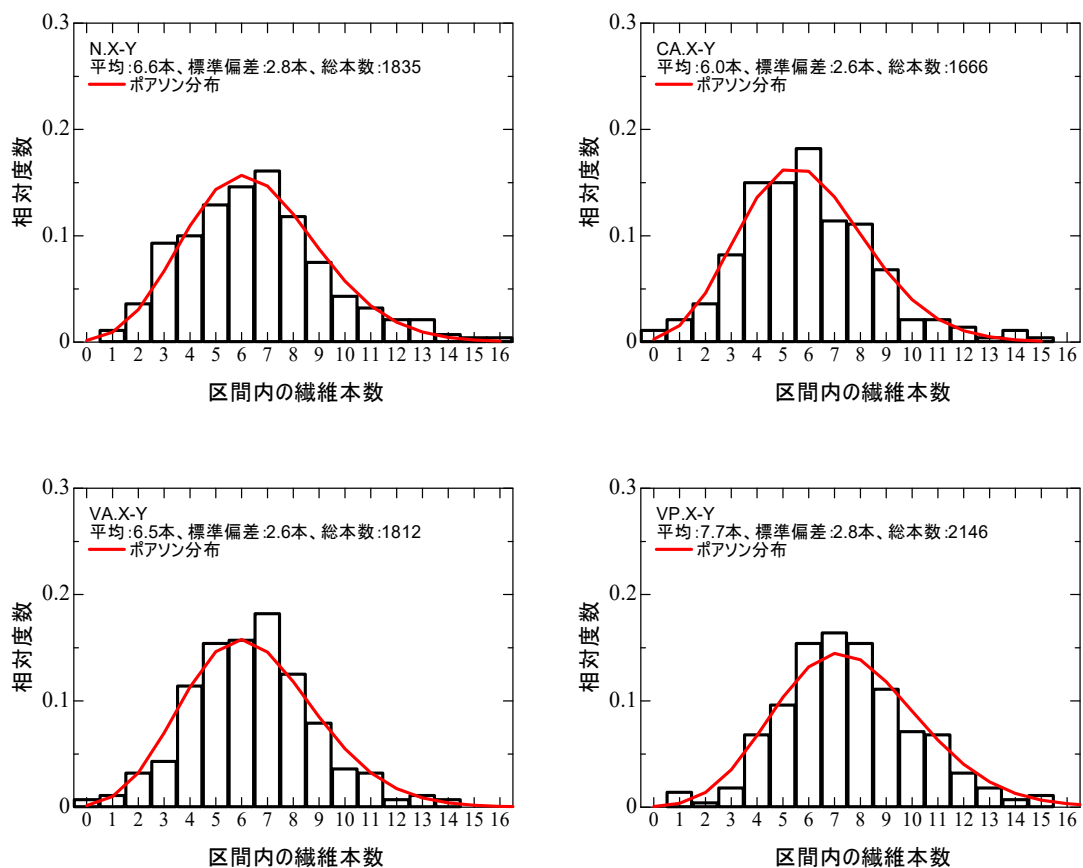


図 5-4 ポアソン分布による確率関数 (x-y 平面)

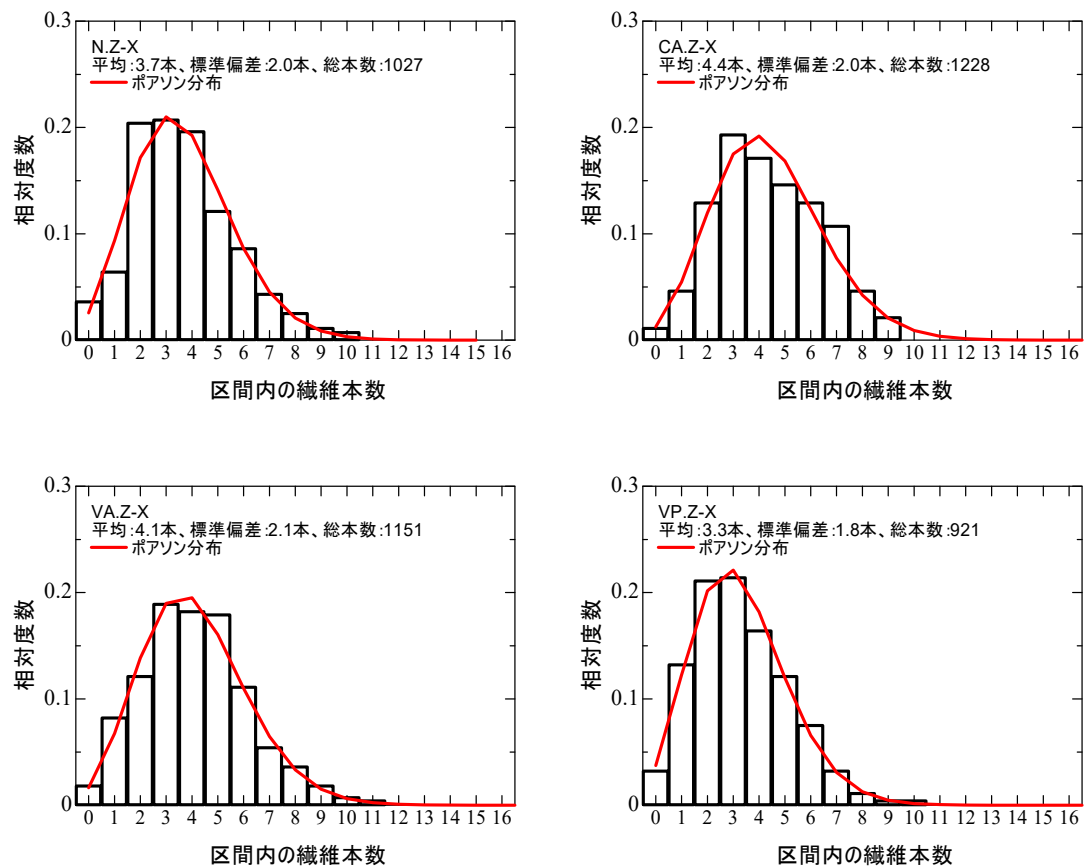


図 5-5 ポアソン分布による確率関数 (z-x 平面)

表 5-3 各打込み方法におけるポアソン分布の χ^2 検定結果

	打込み方法	級数	自由度	X^2
x-y 平面	N	11	9	9.5
	CA	12	10	11.6
	VA	11	9	8.3
	VP	13	11	6.8
z-x 平面	N	9	7	6.9
	CA	9	7	7.5
	VA	9	7	3.0
	VP	9	7	1.5

5.3 繊維分散性を考慮した架橋則の計算

5.3.1 架橋則の計算方法

既往の研究⁸⁾で、繊維のひび割れの架橋能力を表す架橋則は、単繊維のマトリックスからの拔出し性状を総和することにより得られることが示されている。架橋則の計算方法を(5.2)式に示す。ひび割れ面を架橋している繊維群に対して、単繊維引抜性状と繊維配向性を表現する確率密度関数を統合し、架橋則が構築されている。繊維配向性を表現する確率密度関数には第2章で用いた楕円分布が提案されており、配向強度 k および主配向角 θ_r の2つの指標によって繊維配向性が決定される。

$$P_{bridge} = \sum_h \sum_i \sum_j P_{ij}(\delta, \psi) \cdot p_{xy}(\theta_i) \cdot p_{zx}(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot (\Delta y \cdot \Delta z) \quad (5.2)$$

$$P = P_{pull} \cdot e^{f \cdot \Psi} < P_{rup} \cdot e^{-f' \cdot \Psi}$$

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

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 方向への繊維の分散性を示す確率関数

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 ($-90^\circ < \phi \leq 90^\circ$)

具体的な計算を数値計算により行い、仮定したひび割れ幅に対して、 θ および ϕ をそれぞれ 180 分割 (1° ごと) して離散的に単繊維の引張力を足し合わせる。また、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 6/100mm) して離散的に与える。

繊維の x 方向の分散性を表す確率に前節で得られたポアソン分布を適用し、繊維分散性を考慮した架橋則を計算する。本研究で採用するポアソン分布を図 5-6 に示す。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 平面の各打込み方法における平均値によるポアソン分布を用いる。

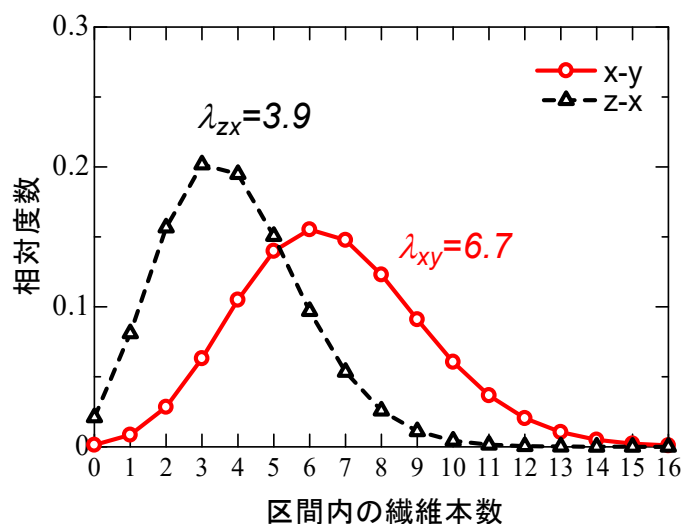


図 5-6 採用するポアソン分布

繊維の x 方向の分散性を表す確率 $p_x(y,z)$ にポアソン分布を適用するにあたり，数値計算を容易に行うため，繊維の断面内位置 (y,z) とは独立に，ある生起回数を有する区間数を繊維の重心位置 x_g ごとに配分することにより行う。本解析では x 方向の分割区間数を 100 とするため，表 5-4 に示すように，区間の総和が 100 となるように各生起回数を有する区間数をポアソン分布により求める。各区間の繊維本数 $Nx(x_g)$ は，繊維体積混入率に基づく定数を生起回数に乗ずることにより求められる。各生起回数を有する区間の与え方によって，異なる架橋則が得られることとなる。

表 5-4 ポアソン分布による生起回数と区間数

生起回数 (回)	ポアソン分布による 確率	区間数 (確率×100)
0	0.00	0
1	0.01	1
2	0.03	3
3	0.06	6
4	0.11	11
5	0.14	14
6	0.16	16
7	0.15	15
8	0.12	12
9	0.09	9
10	0.06	6
11	0.04	4
12	0.02	2
13	0.01	1
14	0.00	0
15	0.00	0
16	0.00	0
合計	1.00	100

架橋則の本計算方法によると，抜け出す側の繊維の埋込長が長いほど，すなわち重心位置がひび割れ面に近い繊維の数が多いほど架橋性能は向上し，逆に，抜け出す側の繊維の埋込長が短いほど，すなわち重心位置がひび割れ面に遠い繊維の数が多いほど架橋性能は低下することが推測される。理想的に，架橋性能が最大または最小となる場合の繊維重心位置に対する生起回数の分布を図 5-7 に示す。また，これらの分布を適用して計算した架橋則を図 5-8 に示す。計算への入力値は表 2-6 に示す値を用い，配向強度 k および主配向角 θ_r はそれぞれ 0.4 および 0° とした。架橋性能が最大となる分布の場合の架橋強度（最大応力）は 2.08MPa，同最小となる場合は 1.01MPa となり，両者に大きな差があることがわかる。なお， $p_x(y,z)$ に定数を用いた一様分布の場合の架橋強度（最大応力）は 1.54MPa である。

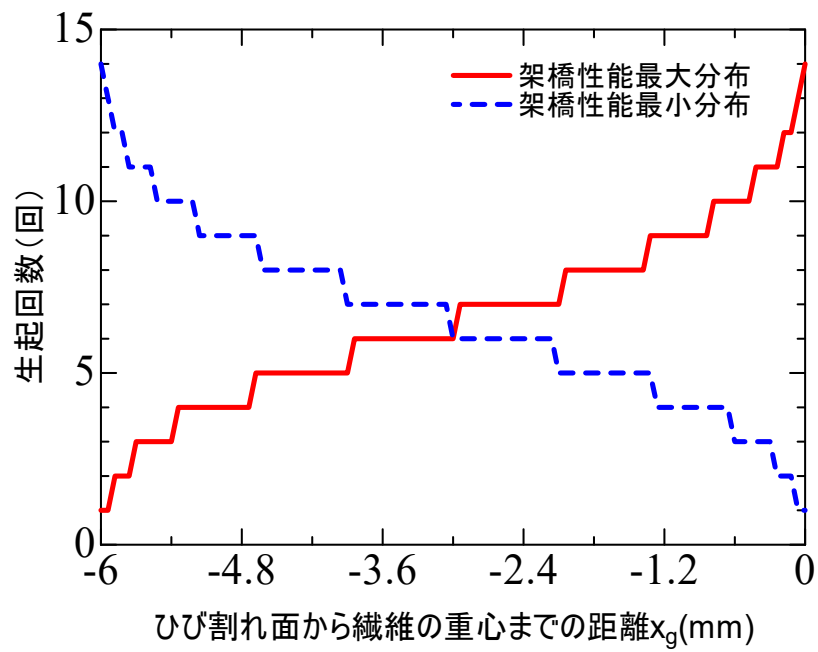


図 5-7 理想的な生起回数の分布

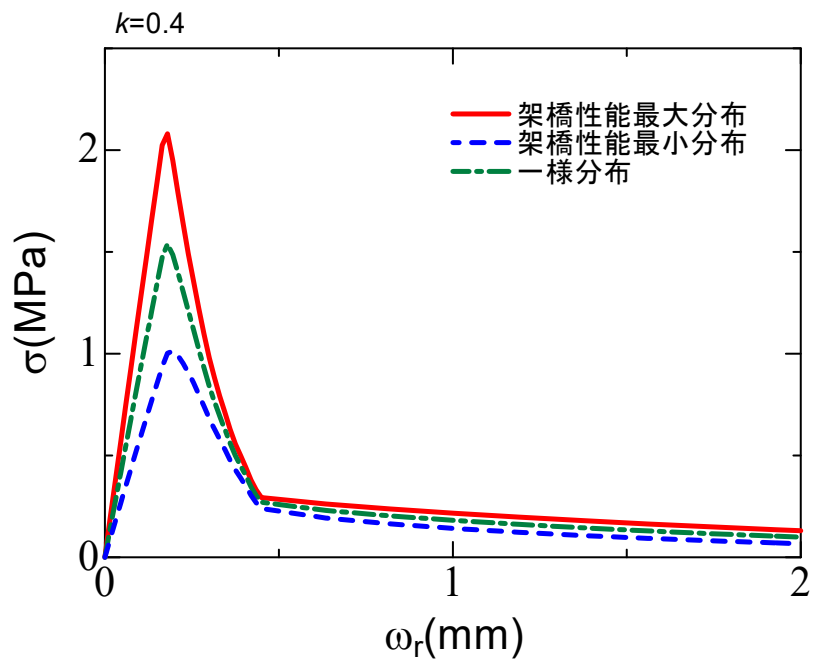


図 5-8 架橋性能が最大または最小となる引張応力－ひび割れ幅関係

5.3.2 モンテカルロ・シミュレーションによる架橋則のばらつきの検討

モンテカルロ・シミュレーション（MCS）とは，方程式の立式や解式が困難な場合にしばしば用いられる方法で，計算機上に直接事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¹³⁾。

前節の架橋則の計算により，ポアソン分布に従う各生起回数を有する区間の与え方によって，異なる架橋則が得られる。本計算手法にモンテカルロ・シミュレーションを導入することにより，架橋則の材料特性のばらつきを検討する。具体的には，表 5-4 に示すポアソン分布に従う各生起回数を有する区間をランダムに与え，前節の方法により架橋則を計算する。

架橋則の計算に用いる入力値には表 2-6 に示す値を用い，後述する DFRCC の 4 点曲げ試験結果と比較するため，配向強度 k は 0.4, 1.0, 4.0 の 3 ケースとし，各々 3000 回の試行を行った。

モンテカルロ・シミュレーション 3000 回分の引張応力-ひび割れ幅関係を図 5-9 に示す。シミュレーションの結果が灰色の帯状で示されており，すべての配向強度において架橋性能最大分布と架橋性能最小分布の間でばらついている。

モンテカルロ・シミュレーションにより得られた繊維重心位置に対する生起回数の分布の例を図 5-10 に示す。

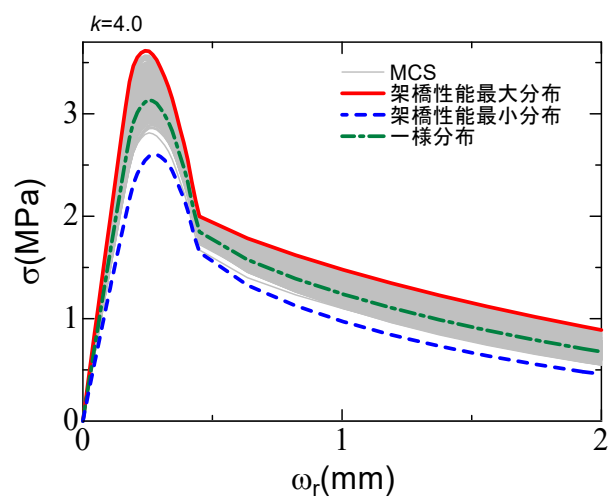
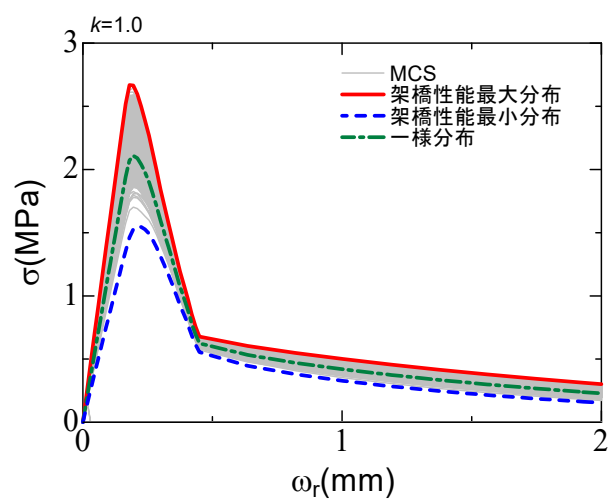
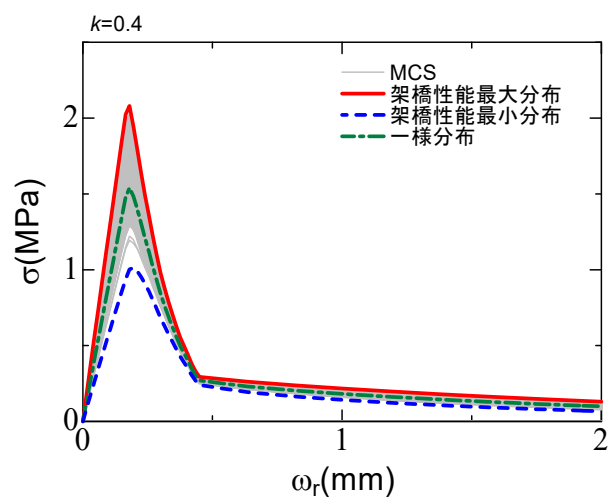


図 5-9 MCS による引張応力-ひび割れ幅関係

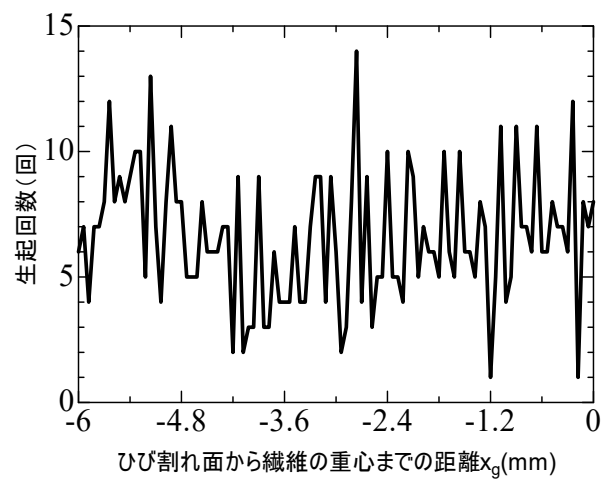
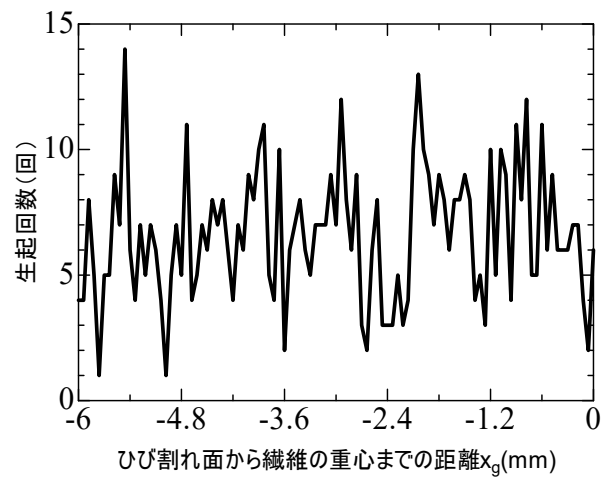
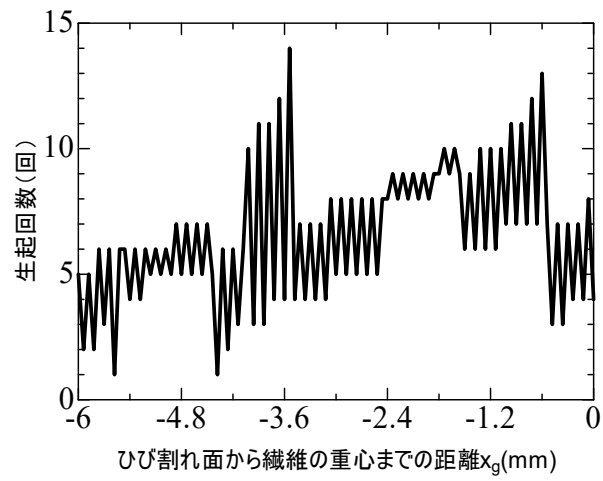


図 5-10 MCS によって得られた繊維重心位置に対する生起回数の分布例

また、引張応力ーひび割れ幅関係における架橋強度（最大応力）を、横軸に試行回数を取り図 5-11 に、MCS 最大時および最小時の生起回数の分布を図 5-12 に示す。MCS 最大架橋強度時にはひび割れ面に近いほど生起回数が大きくなり、分布形状は右上がりになっている。MCS 最小架橋強度時には、ひび割れ面に近い位置で生起回数が少なく、全体的に右下がりの分布形状となっている。

表 5-5 に架橋強度の一覧を示す。すべての配向強度において、MCS による架橋強度の標準偏差は 0.11～0.12MPa の値を示している。

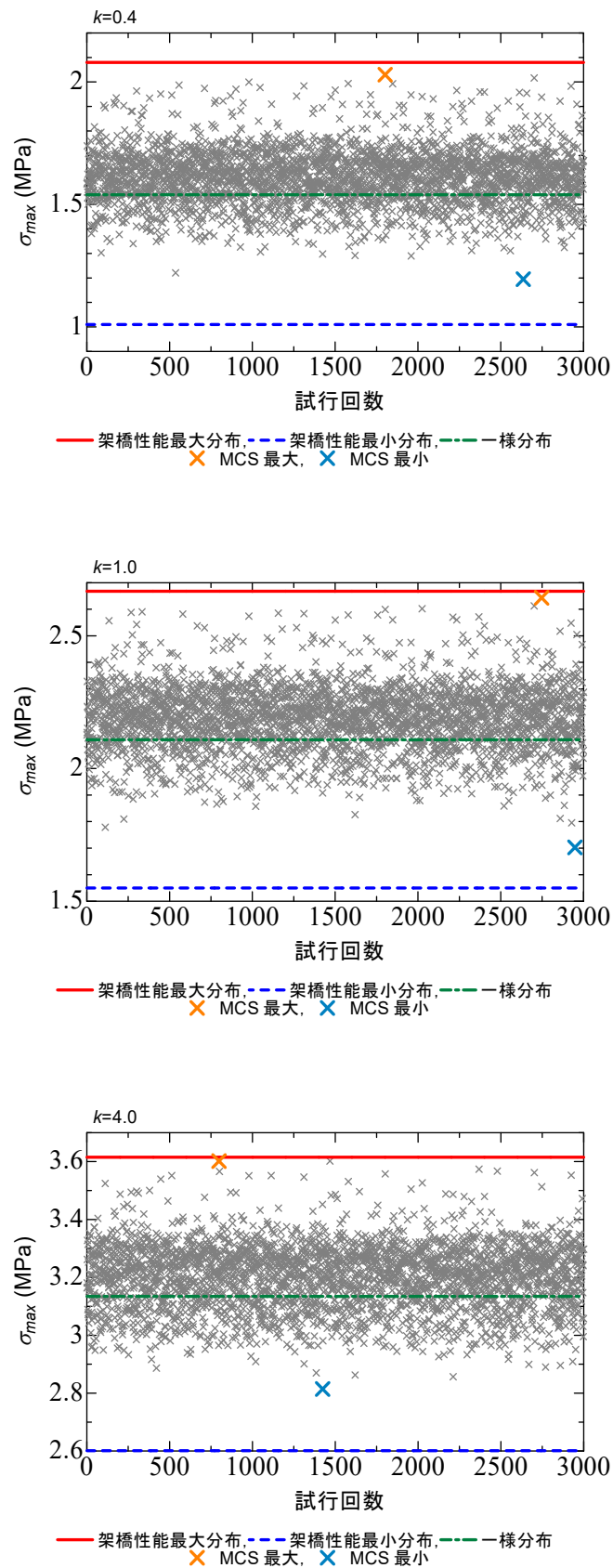


図 5-11 MCS による最大応力の分布

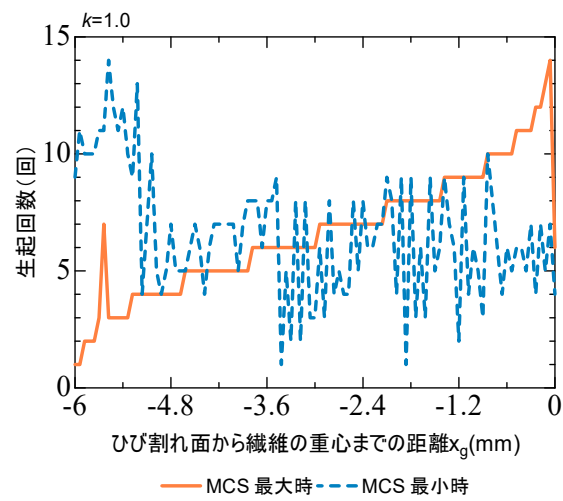
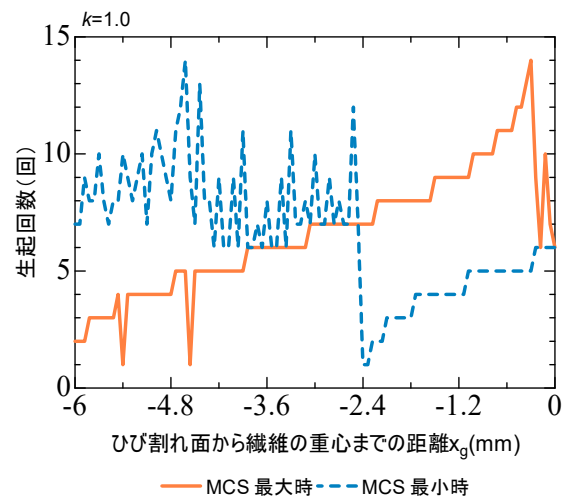
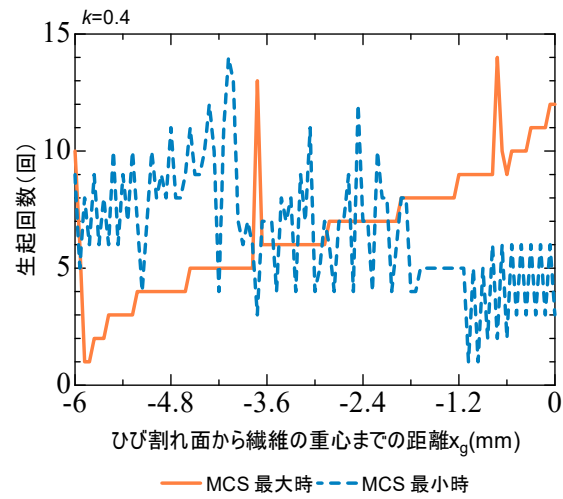


図 5-12 MCS による最大および最小架橋強度時の生起回数の分布

表 5-5 架橋強度一覽

配向強度 k	MCS				一樣分布 (MPa)	架橋性能 最大分布 (MPa)	架橋性能 最小分布 (MPa)
	平均值 (MPa)	標準偏差 (MPa)	最大 (MPa)	最小 (MPa)			
0.4	1.61	0.110	2.03	1.19	1.54	2.08	1.01
1.0	2.19	0.119	2.64	1.70	2.11	2.67	1.55
4.0	3.20	0.109	3.60	2.81	3.13	3.62	2.60

5.4 曲げ試験結果との比較

5.4.1 実験の概要

本研究と同一の DFRCC を用いた材料試験レベルの 4 点曲げ載荷試験が行われている¹⁴⁾。同研究では、断面が $40 \times 40 \text{mm}$ および $100 \times 100 \text{mm}$ の角柱試験体を用いて多数の載荷試験が行われていることから、実際の DFRCC の性能のばらつきを検討することができる。試験体形状を図 5-13 に、練混ぜバッチごとのフレッシュ性状および $\Phi 100\text{-}200 \text{mm}$ シリンダーによる圧縮試験の結果を表 5-6 に再掲する。

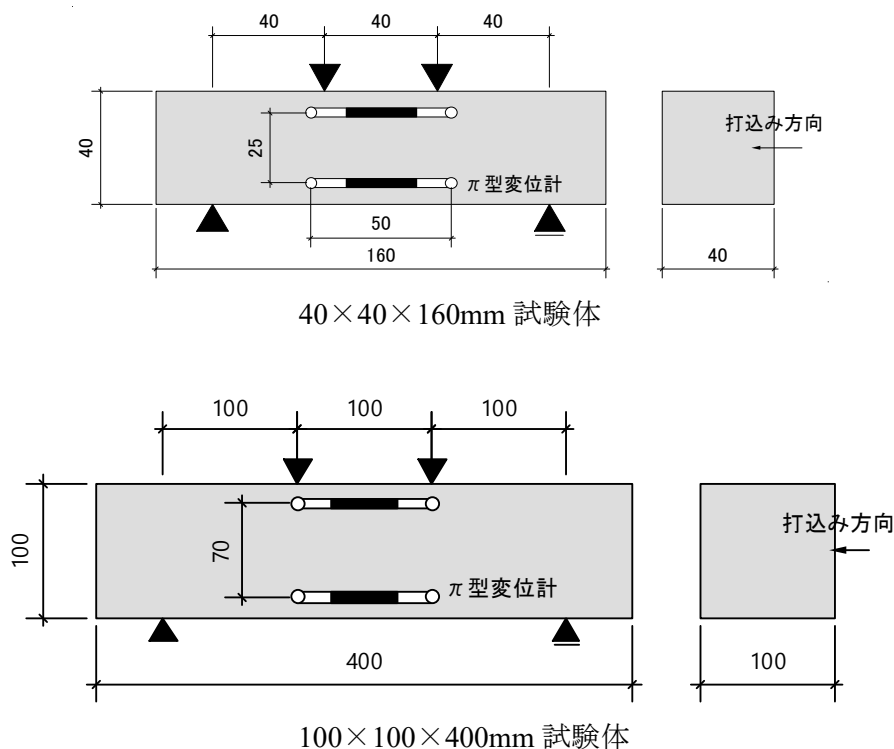


図 5-13 試験体形状

表 5-6 練混ぜバッチごとのフレッシュ性状および圧縮性能

試験体	日付 (2015 年)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1	9/9	1.8	26.8	44.8	14.2
2	9/10	1.7	27.1	44.2	14.1
3		2.3	26.9	45.9	13.5
4	9/9	1.5	27.4	47.4	13.9
5	10/16	3.1	21.3	41.8	16.6
6		2.7	21.3	42.2	19.0
7		2.7	20.8	40.5	18.3

各試験体の曲げモーメントー曲率関係を図 5-14 に、曲げ応力ー曲げ歪関係を図 5-15 に再掲する。

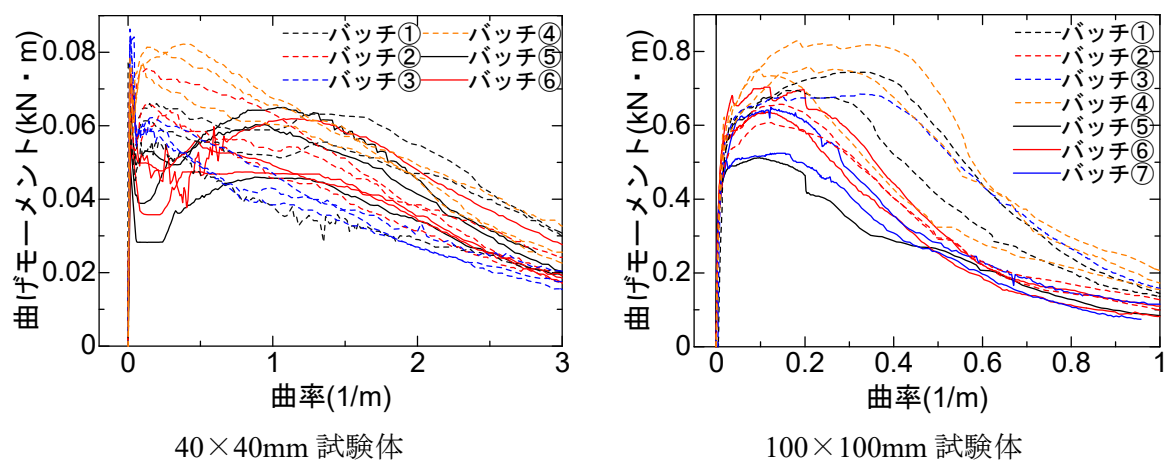


図 5-14 曲げモーメントー曲率関係

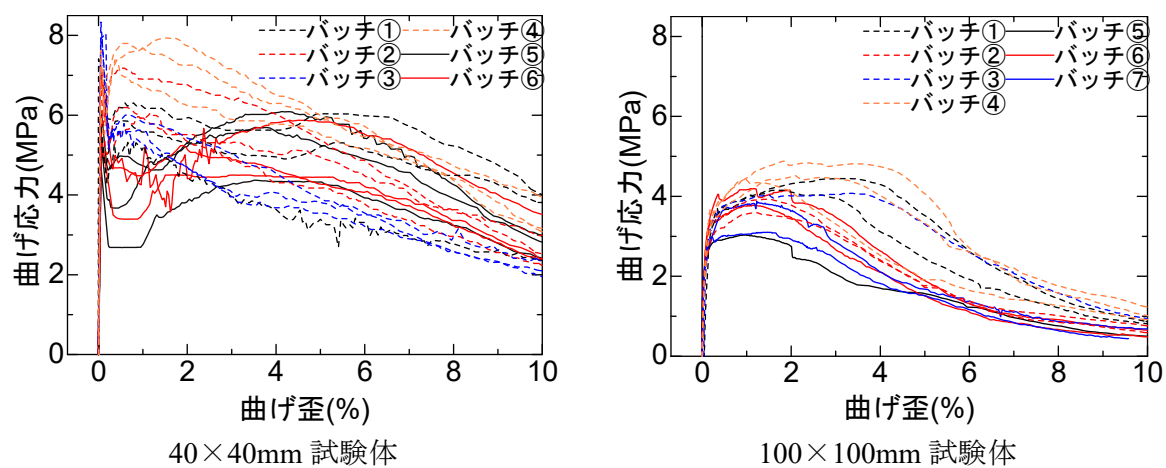


図 5-15 曲げ応力ー曲げ歪関係

5.4.2 ファイバーモデルによる断面解析

繊維分散性を考慮した架橋則によって得られた同一配向強度による引張応力-ひび割れ幅関係が、実際の DFRCC の曲げ試験結果を表現しているかを検証する。ファイバーモデルに用いるモデルは、第 2 章で用いた DFRCC の構成則と同一である。引張側トリリニアモデルは、5 ケースとした。架橋性能最大分布（モデル名 Max）および架橋性能最小分布（同 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（同 MCSave）および MCSave の 99.9%信頼範囲を示す（同 MCSave+3 σ , MCSave-3 σ ）の 3 ケースとした。

なお、配向強度については、既往の研究において、40×40mm 断面の試験体では配向強度は $k=4$ 程度が、100×100mm 断面の試験体では $k=1$ 程度が妥当であることが示されており、本解析でもそれらの値を用いた。

各構成則モデルの特性値を表 5-7 および表 5-8 に示す。

表 5-7 モデルの特性値（40×40mm 断面試験体）

モデル名	σ_c (MPa)	ε_c (%)	ひび割れ 間隔 (mm)	配向 強度	σ_{bs} (MPa)	ε_{bs} (%)	σ_2 (MPa)	ε_2 (%)	ε_{tu} (%)
Max	43.6	0.45	40.0	4.0	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

表 5-8 モデルの特性値（100×100mm 断面試験体）

モデル名	σ_c (MPa)	ε_c (%)	ひび割れ 間隔 (mm)	配向 強度	σ_{bs} (MPa)	ε_{bs} (%)	σ_2 (MPa)	ε_2 (%)	ε_{tu} (%)
Max	43.6	0.45	65.4	1.0	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

実験値と解析値の比較を図 5-16 および図 5-17 に示す。実験値は○で示し、モンテカルロ・シミュレーションで得られた最大曲げ応力のばらつきの範囲を $\pm 3\sigma$ の範囲で示している。40×40mm 断面の試験体では、試験体 18 体に対して $\pm 3\sigma$ の範囲内に 6 体含まれている。100×100mm 断面の試験体では、13 試験体中 10 体が $\pm 3\sigma$ の間にあることがわかる。実験結果には本章で検討した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、解析の $\pm 3\sigma$ の範囲外にある結果がある程度存在するが、モンテカルロ・シミュレーションの導入によって DFRCC における繊維の分散性に起因する強度のばらつきを表すことの可能性が示された。

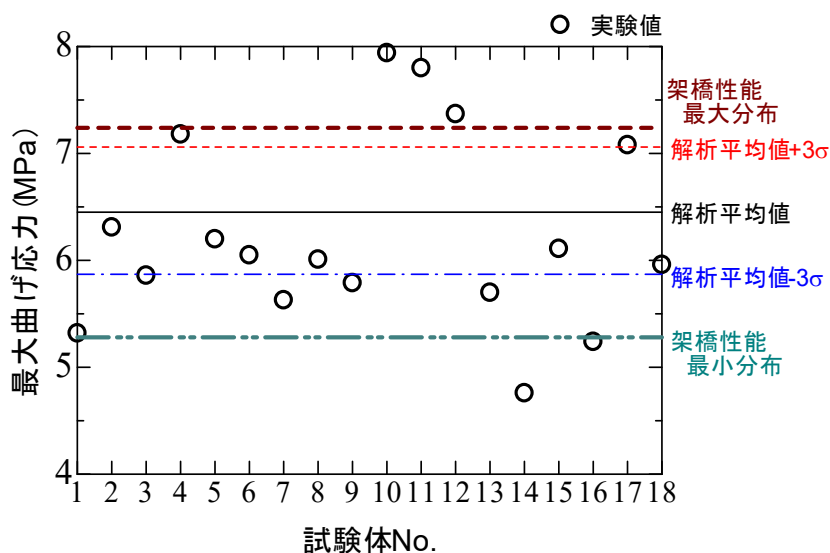


図 5-16 最大曲げ応力の分布 (40×40mm 断面試験体)

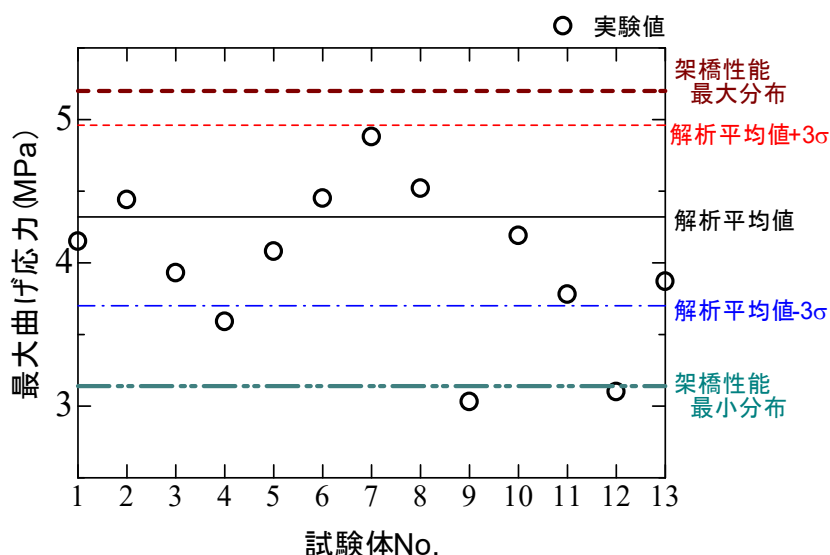


図 5-17 最大曲げ応力の分布 (100×100mm 断面試験体)

5.5 まとめ

可視化実験で得た繊維撮影画像から、繊維の分散性をポアソン分布で評価し、それを考慮した架橋則の構築を行った。また、モンテカルロ・シミュレーションを行い、ポアソン分布に基づく繊維配置を与えることにより、架橋則のばらつきを表現した。

実際の DFRCC の 4 点曲げ載荷試験結果との比較では、モンテカルロ・シミュレーションによって得られた架橋強度の平均値および標準偏差を用いてばらつきの範囲を示し、繊維の分散性に起因する強度のばらつきを評価できる可能性を示した。

第6章 結論

本研究では、DFRCC における繊維配向性および分散性が曲げ・引張性状に及ぼす影響を把握することを目的に、4 つの実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 既往の研究で提案された打込み方法を適用した梁部材試験体に対して 4 点曲げ載荷試験を行い、打込み時の状況、最終ひび割れ状況および破断面の観察から、試験体断面位置ごとに異なる配向性を有していることを確認した。それらを考慮し、断面位置ごとに異なる繊維の配向性を表現する構成則を導入した断面解析を行い、最大曲げ耐力の実験値を再現することができた。
- (2) 主筋を配した梁部材試験体に対して繊維配向性を考慮した打込み方法を施し、バイブレータおよびくしを試験体軸方向に移動させた試験体においてひび割れ開口の分散を確認した。この結果から、バイブレータおよびくしを軸方向に移動させることで繊維配向がそれらの移動方向に再配向して、架橋性能が向上したと考えられる。
- (3) 部材試験体断面寸法の型枠を作製し、水ガラスを用いた繊維の可視化実験を行った。バイブレータおよびくしを軸方向に移動させることで、繊維は軸方向に配向することが確認できた。打込み直交面においては、打込み方法による影響は小さかった。
- (4) 可視化実験で得られた撮影画像を元に繊維の分散性をポアソン分布で評価し、それらを考慮した架橋則の構築を行った。また、モンテカルロ・シミュレーションにより架橋則のばらつきを表現し、その結果を用いて架橋則をモデル化して断面解析を行った。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評価できる可能性を示した。

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院博士過程システム情報工学研究科の大学院生として、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。

本論文を執筆するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力を頂きました。指導教員であります筑波大学教授 金久保利之先生には、研究に着手する際の実験準備および論文推敲に至るまで、終始丁寧かつ熱心にご指導、ご鞭撻を賜りました。また、研究生活においても先生から得るものが多く、実りある充実した日々を過ごすことができました。ここに心より深く感謝の意を表します。副指導教員であります筑波大学教授 境有紀先生、筑波大学准教授 八十島章先生には、工学者としての考え方と研究に対する助言をご教授頂きました。特に、副指導教員であります八十島章先生には、研究に対して有益な助言を多数頂きました。筑波大学技術職員 小島篤志氏には、実験時に多くのご協力を頂きましたことを感謝致します。

本研究を行うにあたり、金久保・八十島研究室の多くの方々に実験のご協力を頂きました。特に、同じテーマでありました元大学院生の月崎良一氏、万子銘氏、宮口大氏、現大学院生の大圖友梨子氏には研究の助言や支援のみならず、様々な面で支えとなって頂きました。同期にあたる藻川哲平氏、山田大氏には研究の相談から手伝いまで多くの支援を頂きました。研究室の皆様から多数のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表するとともに、今後のご活躍を期待しております。

最後に、私事で誠に恐縮ですが、陰ながら小生を温かく支えてくださった家族と大学生活で多くの時間を共有した友に感謝いたします。

2017年1月吉日

渡邊 啓介

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) 武者浩透，渡辺典男，竹田康雄，松川文彦：東京国際空港 GSE 橋梁桁間ジョイントの実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1477-1482，2008.7
- 3) 丸田 誠，閑田徹志，永井覚，山本幸正：プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構，コンクリート工学，Vol.43，No.11，pp.18-26，2005
- 4) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井 覚：HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.281-286，2003.7
- 5) 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
- 6) 宮口 大，渡邊啓介，金久保利之：繊維配向性を考慮した棒状バイブレーターによる HPFRCC の打込み方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.265-270，2015.7
- 7) 渡邊啓介，宮口 大，月崎良一，金久保利之：繊維配向性を考慮した HPFRCC の新しい打設方法，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），材料施工，2015.8
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 宮口 大，月崎良一，万 子銘，浅野浩平，金久保利之：HPFRCC における繊維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.181-182，2015.8
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 大圖友梨子：繊維配向性が DFRCC 部材の曲げ性状に及ぼす影響，筑波大学工学システム学類卒業論文，2016.3