

論文 繊維配向性を考慮した打込み方法が DFRCC の曲げ性状に及ぼす影響

渡邊 啓介*1・大圖 友梨子*1・宮口 大*2・金久保 利之*3

要旨：著者らは、高靱性セメント複合材料の繊維配向性を考慮した打込み方法として、棒状バイブレータおよび髪をとかす「くし」を模した器具を用いた方法を提案している。本研究では、これらの打込み方法により断面 180×280mm の試験体を作製し、4 点曲げ載荷試験を行った。棒状バイブレータおよびくしを軸方向に移動させた試験体において耐力と変形能の向上が見られ、断面観察の結果から繊維が軸方向に配向する傾向が伺えた。流動解析により、試験体内部の繊維配向を把握するとともに、試験体断面位置ごとに異なるモデルを導入した断面解析により、配向強度 k によって各試験体の耐力の差異を表現した。

キーワード：繊維補強セメント複合材料, PVA 繊維, 繊維配向性, 打込み方法, 配向強度

1. はじめに

高靱性セメント複合材料 (DFRCC : Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites) はセメント系材料に PVA 繊維などの高性能短繊維を体積混入率で数%混入させた複合材料であり、曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上する材料である。一般的なコンクリートの脆弱性を克服した材料として、コンクリート構造物の性能や耐久性の向上が期待されている。

しかし、DFRCC が実構造物に適用された例は少ない。その一因として、マトリックス中の繊維の配向や分散が DFRCC の力学性状に大きく影響することが挙げられる。繊維の配向や分散は、打込み方法、型枠寸法、フレッシュ性状などに影響されることが知られており¹⁾、繊維が外力に対して有効な向きに配向していない場合、DFRCC の本来の性能が発揮されないことが危惧される。また、繊維配向性は DFRCC の材料特性のばらつきにも影響することから、実構造物へ適用するためには、繊維配向性を制御する打込み方法を確立し、DFRCC の性能を安定および向上させることが必要である。

著者らは、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を提案し^{2), 3)}、100×100×400mm の曲げ試験体に対して、その効果の確認を行った。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、力学性能が向上した。

本研究では、より大きい寸法の試験体に対して、これらの打込み方法を試みた。断面が 180×280mm の試験体を作製し、4 点曲げ載荷試験によって力学性状を把握するとともに、流動解析や断面解析によって打込み方法が曲げ性状に与える影響を把握する。

2. 繊維配向性を考慮した打込み方法

繊維配向性を考慮した打込み方法の模式図を図-1 に示す。打込み方法は、基準となる「流込み (N)」, DFRCC を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 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 を充填後に棒状バ

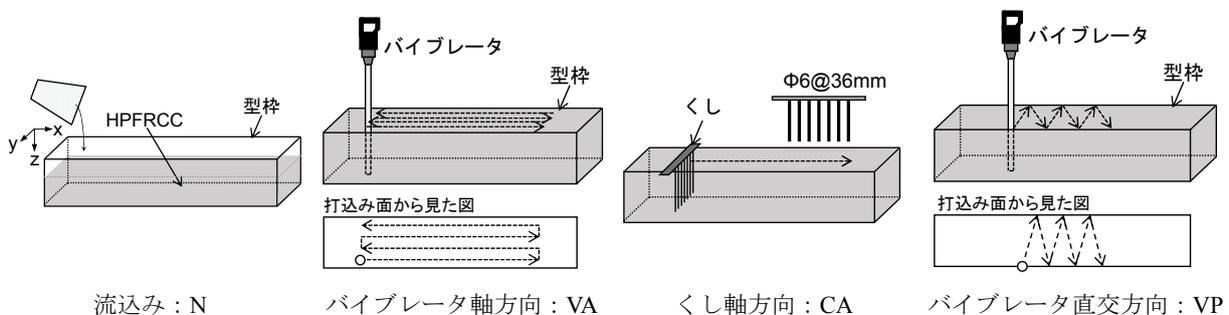


図-1 打込み方法の模式図

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (学生会員)
 *2 三井住友建設 (元筑波大学大学院)
 *3 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)

パイプレータを試験体軸方向に直交する向きに移動させる「パイプレータ直交方向 (VP)」の4種類とした。流込み時には試験体の型枠端部を図-2のように上げ、傾斜角 1/35 程度で流し込んだ。

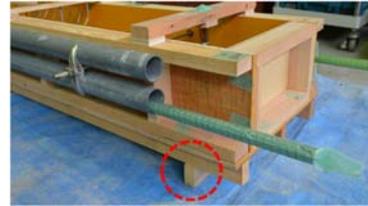


図-2 傾斜の付け方

3. 実験概要

3.1 使用材料

DFRCC の調合計画を表-1 に示す。使用した繊維は PVA 繊維 (繊維長 12mm, 繊維径 0.10mm) で、体積混入率 2.0% (外割) とした。フレッシュ性状およびφ100-200mm シリンダーによる圧縮試験の結果を表-2 に示す。試験体は打込み方法ごとに1体ずつ作製し、8日間現場封緘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-1 DFRCC の調合表 (kg/m³)

W	C	S	FA	Fiber	Ad	Thickener
380	678	484	291	26	6	2.52-3.03

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 JIS II 種, Ad : 高性能減水剤

Thickener : 増粘剤 (JP 漏斗試験結果より量を適宜決定)

3.2 加力および計測方法

試験体を図-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 とした。計測項目は、載荷力、載荷点たわみ (2箇所)、局部変形 (ひび割れ幅および曲率計測用、圧縮・引張各 6箇所) とした。加力終了後、試験体純曲げ区間 280mm に発生したひび割れの本数を目視で確認した。

表-2 フレッシュ性状および圧縮試験結果

JP 漏斗流下時間* (s)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
37.4	1.8	45.6	13.9

*繊維混入前

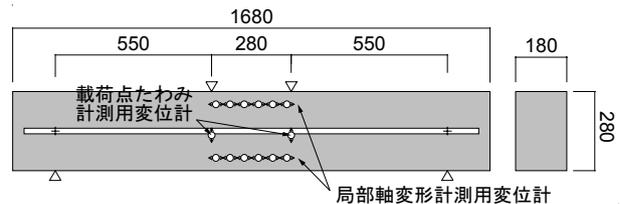


図-3 試験体図

4. 実験結果

4.1 打込み時の様子

打込み時の様子として、くし軸方向 (CA) の場合を図-4 に示す。流込み中、マトリックスは打込み位置を中心に同心円状に広がり両端の型枠壁面に接すると型枠に沿って流れている。流込み完了時、マトリックスの表面は打込み点を中心に同心円状に広がった模様が見られた。くし施工中では、くしの移動後にマトリックスにくしの移動跡が目視で確認できた。同様にパイプレータ軸方向 (VA) およびパイプレータ直交方向 (VP) においても、パイプレータの移動跡が確認できた。



流込み中

くし施工中

図-4 打込み時の様子

4.2 曲げモーメント-載荷点たわみ関係

曲げモーメント-載荷点たわみ関係を図-5 に、実験結果を表-3 に示す。載荷点たわみは、2つの変位計による値の平均である。基準となる流込み (N) に比べて、パイプレータ軸方向 (VA) およびくし軸方向 (CA) は最大耐力が上昇するとともに、変形能も向上している。パイプレータおよびくしを軸方向に移動させることにより、繊維が試験体軸方向に配向しやすくなり、ひび割れに対する有効性が増加したと考えられる。試験体軸方向と直交する向きにパイプレータを施したパイプレータ直交 (VP) は、流込み (N) と最大耐力はほぼ同じだが、流込み (N) よりも変形能が高い。

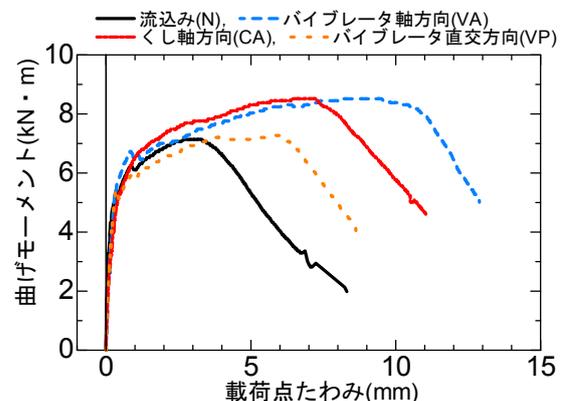


図-5 曲げモーメント-載荷点たわみ関係

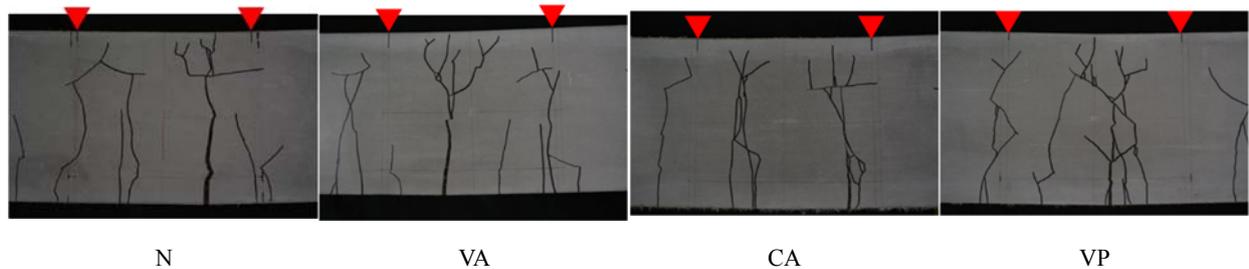


図-6 最終ひび割れ状況（三角：加力点）

（矢印は繊維の主たる配向方向を示す）

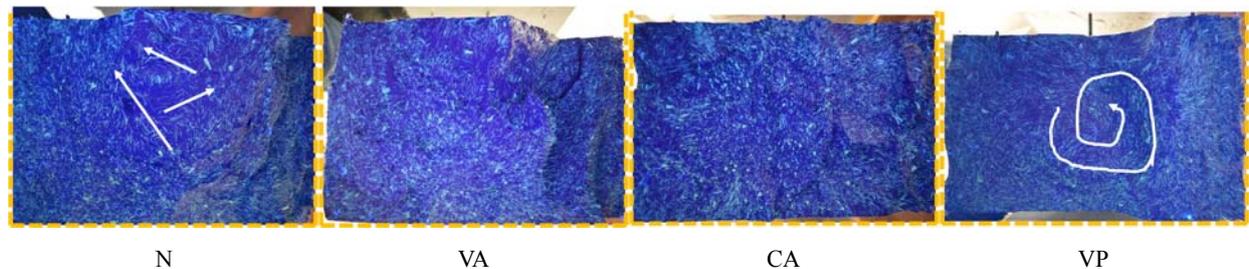


図-7 破断面の様子

4.3 最終ひび割れ状況

加力終了後に撮影した最終ひび割れ状況を図-6に、ひび割れ本数を表-4に示す。各試験体、4、5本のひび割れが入ったのち、1本のひび割れが開口した。ひび割れ本数は、試験体引張縁から42mm(試験体のせい280mm×0.15)の位置の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280mmを区間内に生じたひび割れの本数で除した値である。

4.4 破断面の観察

加力終了後に試験体を折り、破断面を観察した。破断面の様子を図-7に示す。撮影時、破断面にブラックライトをあて、PVA繊維を観察しやすくした。図中の点線は型枠位置を示す。打込み面は写真上側である。

流込み(N)では、型枠付近の繊維が型枠に沿って配向している傾向がみられるのに対し、中央部にある繊維は断面に沿って、試験体軸直交方向(白線の矢印方向)に配向している傾向が伺える。パイプレータ直交方向(VP)においても、同様に中央部の繊維がうずまいている様子(白線矢印)がみられる。パイプレータ軸方向(VA)およびくし軸方向(CA)では、全断面において繊維がほぼ軸方向(紙面手前方向)に向いており、特に中央部は型枠付近よりもよく軸方向に配向している。パイプレータ、くしを軸方向に移動させることによって繊維配向を制御できたと考えられる。

5. 流動解析

5.1 解析手法

試験体内部の繊維配向を知るため、流込み(N)試験体の流動解析を行った。解析には、コントロールボリュー

表-3 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
VA	31.0	8.13	8.52
CA	31.0	6.63	8.53
VP	26.5	5.85	7.28

表-4 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
VA	5	56
CA	5	56
VP	4	70

表-5 解析条件

粘性係数 (Pa・s)	4.36
流体の密度 (g/cm ³)	1.96
流込み時間 (s)	240
流体出口の半径 R (mm)	12
流体出口の高さ h (mm)	40
流体出口中心の位置 d (mm)	250
流速 V (mm/s)	78

ムによる有限差分法 FDM (Finite Difference Method) に基づく、汎用三次元数値流体力学ソフトウェア⁴⁾を用いた。FLOW-3D における繊維配向の計算は、各メッシュにおいて繊維を大きさ 1 の方向ベクトルに置き換え、流体の流動計算結果から、方向ベクトルの X, Y, Z 成分を求めて方向ベクトルを求める。なお、本解析では繊維同士の接触および繊維の流動が流体に及ぼす影響は考慮していない。繊維をベクトルに置き換えているため、繊維の体積混入率も考慮していない。

5.2 解析条件

解析条件を表-5 に、流動解析の様子を図-8 に示す。流体の密度は実際の DFRCC の密度とし、粘性係数は既往の研究⁵⁾ を参考に JP 漏斗流下時間より算出した。実験時の流込み時間を目標値として、解析による流込み時間を目標値と合致させるように流体出口の半径 R および流速 V を定めた。流体出口中心の位置および打込み方法は実験時と同様である。

5.3 解析結果

解析結果を図-9~図-12 に示す。xy 平面 (図-9) の流体充填時の様子を見ると、実際の打込み時と同様に、打込み点を中心に同心円状に繊維が配向しながら流れている。打込み位置から離れていくにつれ、型枠中央部の繊維はランダムに配向している。図-10 の拡大図より、流込み完了時には純曲げ区間で型枠中央部の試験体軸方向に直交している繊維が多く見られる。zx 平面 (図-11) では、打込み位置に繊維が放物線状に配向した跡がある。打込み時、流体が型枠底面にぶつかったあと、はねかえり、底面から上面にかけて巻き上がるためだと考えられる。巻き上がったことで、試験体軸直交方向に配向した繊維は、そのまま純曲げ区間へと流れている様子が確認できる。図-12 の拡大図より、純曲げ区間の型枠底面付近は繊維が型枠に沿って配向しているが、上面に行くにつれて繊維は立ち上がり、試験体軸方向に直交する向きに配向しており、流体の落下の影響が見られた。

6. 繊維配向性を考慮した断面解析

6.1 モデルの構築

打込み時の様子および破断面の観察より、断面内に繊維配向の差異が見られたため、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った。採用した応力-歪関係および試験体断面を図-13 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。放物線モデルには圧縮試験結果より $\sigma_B=45.6\text{MPa}$, $\varepsilon_c=0.0046$ の値を用いた。

引張側トリリニアモデルの構築フローを図-14 に示す。PVA 繊維の引抜き力および繊維配向性を与える確率密度関数から架橋則 (引張応力-ひび割れ幅関係) を導出

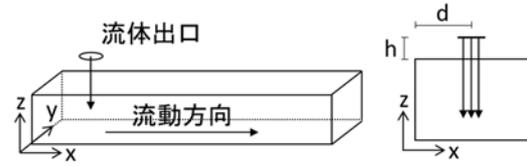


図-8 流体出口の位置

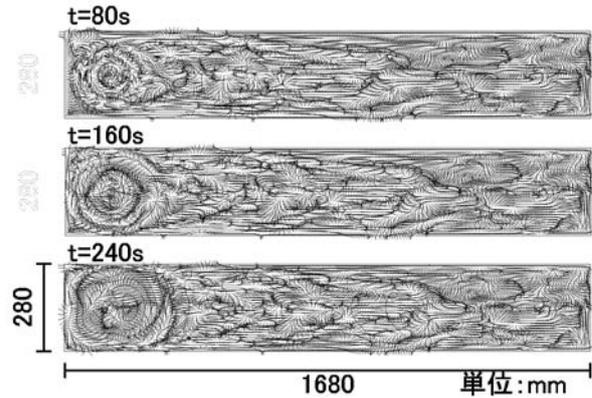


図-9 xy 平面 ($z=0\text{mm}$) 充填時の様子

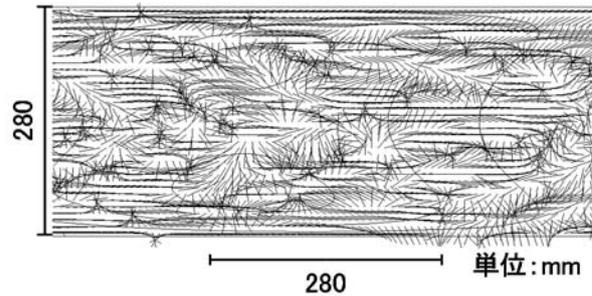


図-10 xy 平面 ($z=0\text{mm}$, $t=240\text{s}$) 純曲げ区間拡大

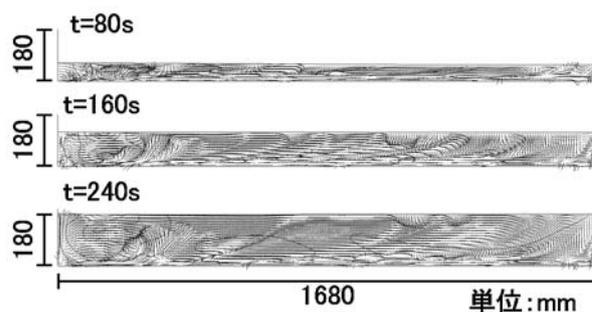


図-11 zx 平面 ($y=70\text{mm}$) 充填時の様子 (単位 : m)

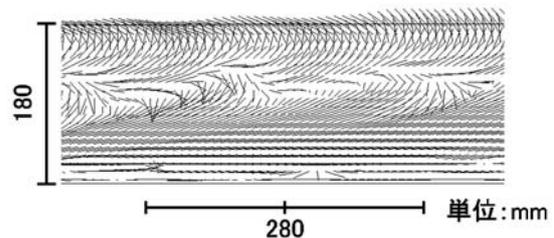


図-12 zx 平面 ($y=70\text{mm}$, $t=240\text{s}$) 純曲げ区間拡大

する⁶⁾。PVA 繊維の引抜モデル (図-14) は PVA 単繊維の引抜実験^{7), 8)}の結果を参考に定めた。具体的には、これらの実験で用いられた PVA 繊維の径は約 0.04mm であるので、本研究で用いた 0.1mm 径の繊維に対応するように、第 1 ピーク荷重 P_a および最大荷重 P_{max} 時の繊維引張応力が一致するように決定した。第 1 ピーク時のすべり量 δ_a と最大荷重時のすべり量 δ_{max} はそれぞれ 0.1mm, 0.3mm であるが、本実験では、ひび割れを架橋する繊維は両端を埋め込まれているため、 δ_a は 2 倍 (0.2mm) とした。 δ_{max} については、引抜荷重が埋込長の短いほうで小さくなりはじめると埋込長の長いほうの引抜量が減ること⁹⁾を考慮して実験値の 1.5 倍 (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⁶⁾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なり、1 よりも小さい場合は試験体軸直交方向への配向が強くなることを示す。配向強度 k は xy 平面 (打込み面), zx 平面 (型枠側面) とともに同一の値とした。架橋則への入力値を表-6 に示す。スナビング係数、繊維強度低減係数は、既往の研究¹⁰⁾に倣い、それぞれ 0.5, 0.3 とした。繊維破断荷重は既往の研究⁶⁾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-4) 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-7 に示す。

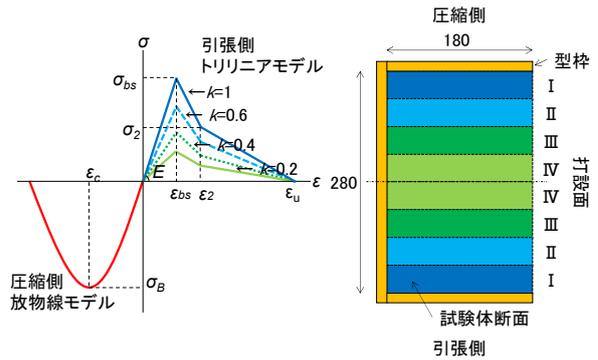


図-13 応力-歪関係および試験体断面

表-6 架橋則への入力値

単繊維の引抜モデル	第 1 ピーク時のすべり量 δ_a (mm)	0.2	
	最大荷重時のすべり量 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	
確率密度関数	配向強度 k	xy 平面	0.2~
		zx 平面	0.7
	主配向角 θ_r ($^\circ$)	xy 平面	0
		zx 平面	0

表-7 引張側トリリニアモデルの特性値

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

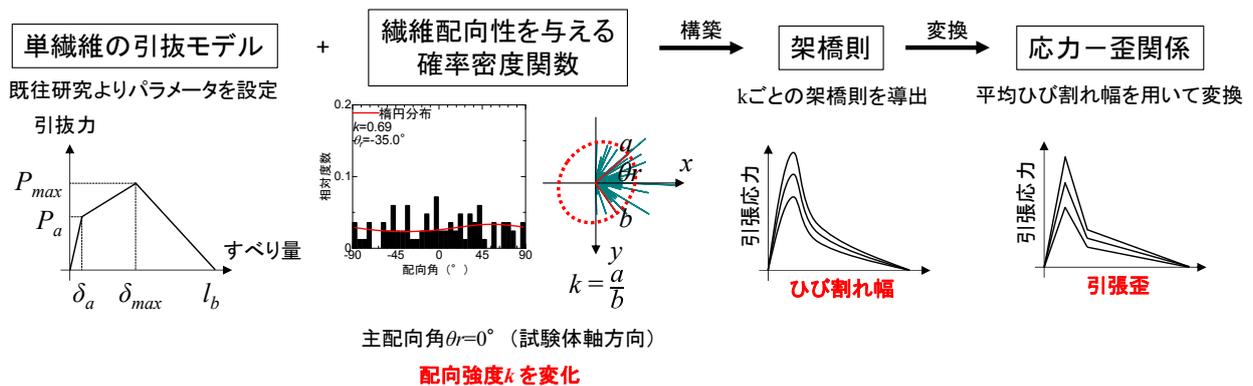


図-14 引張側トリリニアモデル構築のフロー

表-8 最大曲げモーメントの比較

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
VA	I : $k=0.6$	8.52	8.65
CA	II~IV : $k=0.7$	8.53	8.65
VP	I~IV : $k=0.4$	7.28	7.22

6.2 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-8 に示す。流込み (N) では、試験体中央部 (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、型枠に近づくにつれて配向強度を大きくした。バイブレータ軸方向 (VA) およびくし軸方向 (CA) 試験体では、試験体中央部が型枠付近よりも強く試験体軸方向に配向していることから、中央付近 (II~IV 層) の配向強度 k を 0.7 とし、型枠付近は $k=0.6$ とした。バイブレータ直交方向 (VP) では、バイブレータの直交方向の移動によって全断面において試験体軸方向への繊維配向が弱まったと考えられるため、すべての層において、流込み (N) よりも配向強度が小さい $k=0.4$ とした。

表-8 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。

7. まとめ

- (1) バイブレータ、くしを試験体軸方向に移動させた試験体では最大耐力が上昇し、変形能も向上した。
- (2) 流動解析では、型枠底と平行な面 (xy 平面) では打込み時に繊維が同心円状に配向する傾向があり、垂直面 (zx 平面) では下から上へ巻き上がる様子が確認できた。
- (3) 断面解析では、断面位置ごとに構成則の異なるモデルを導入し、各試験体の最大耐力を再現した。

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) 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
- 3) 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，材料施工，pp.507-508，2015.9
- 4) フローサイエンスジャパン：汎用 3 次元熱流体解析ソフトウェア FLOW-3D，<http://www.flow3d.co.jp/products/flow-3d/index.htm>
- 5) 万 子銘，宮口 大，月崎良一，浅野浩平，金久保利之：HPFRCC における繊維の配向性に関する研究（その 3：流動解析結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.183-184，2014.9
- 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) 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
- 8) 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
- 9) Li, V. C., Wang, Y., and Backer, S. : A Micromechanical Model of Tension-Softening and Bridging Toughening of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.39, No.5, pp.607-625, 1991
- 10) 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