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

繊維の配向性を考慮した HPFRCCの打込み方法

宮口 大

修士 (工学)

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2016年 3月

繊維の配向性を考慮した HPFRCC の打込み方法

論文概要

HPFRCC(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)とは、複数ひび割れを生じ ながらたわみ硬化性状や歪硬化性状を示す、極めて高靭性なセメント系複合材料である。HPFRCC の繊維配向性によりその力学性状が大きく変化することが考えられており、特に打込み方向およ び型枠寸法などの打込み時の状況によって影響を受けることが知られている。本研究では、 HPFRCCの繊維配向を制御する打込み方法として、棒状バイブレーターの振動によって強制的に 繊維を配向させる方法と、髪をとかす「くし」のような器具を作製し、くしの歯の間を繊維が通 過することで繊維を配向させる方法を提案し、その有効性を検証した。

打込み方法を変動因子として、テストピースレベルの試験体での水ガラスを用いた繊維配向性 可視化実験と HPFRCC の曲げ試験を行った。バイブレーターを移動させる方法とくしを移動させ る方法において、流込みのみの試験体よりも試験体軸方向に繊維の配向が強まり、最大荷重も2 倍程度大きくなった。

打込み方法が部材の構造性能,特にせん断性状に及ぼす影響を確認するために,せん断破壊型 に設計した短スパン梁の曲げせん断試験を行った。その結果,各試験体の最大荷重時の平均せん 断応力を各バッチの等価曲げ強度で除した基準化せん断強度は,流込みの試験体が最も大きくな り,次いでくしを試験体軸直交方向に移動させる打込み方法の試験体が大きくなった。試験体の ひび割れをデジタルカメラで撮影し,その画像からひび割れ幅を計測した結果,最大荷重時まで は流し込みのみの試験体のひび割れ幅が最も小さく,打込み方法の違いによりひび割れ性状にも 差が現れた。

加力後の試験体をひび割れに沿って2分割して,ひび割れ面の繊維配向を観察し,試験体内の 繊維配向を予想し,各試験体の基準化せん断強度の差異を考察した。その結果,流込みの試験体 は全体で見ると試験体軸直交方向に配向している繊維の割合が多いため,基準化せん断強度が大 きくなったと考えられる。

梁のせん断力に対して繊維が有効に働くためには,試験体軸直交方向に配向する繊維の割合が 深く関係しており,最も結果が良い打込み方法は流込みであったが,繊維配向を制御するという 点においては,くしを用いた打込み方法が有効であると考えられる。

繊維の配向性を考慮した HPFRCC の打込み方法

目 次

第1章 序論	1
1.1 HPFRCC の概要	1
1.2 HPFRCC における繊維配向性	2
1.3 研究目的	
第2章 繊維配向性を考慮した打込み方法	4
2.1 はじめに	4
2.2 打込み方法	5
2.3 繊維配向性可視化実験	7
2.3.1 実験概要	7
2.3.2 実験結果	
2.4 切欠き梁の3点曲げ試験	
2.4.1 実験概要	21
2.4.2 実験結果	24
2.5 まとめ	
第3章 打込み方法の違いが梁部材のせん断性状に及ぼす影響	
3.1 はじめに	
3.2 使用材料	
3.3 実験概要	
3.3.1 試験体	
3.3.2 打込み方法	41
3.3.3 加力・計測方法	
3.3.4 せん断ひび割れ幅の観測	
3.4 実験結果	
3.4.1 打込み状況	
3.4.2 破壊性状・せん断力-部材角関係・最大荷重	
3.4.3 試験体の変形	
3.4.4 せん断ひび割れ幅	54
3.5 試験体内の繊維配向性	73
3.5.1 ひび割れ面の繊維配向	73
3.5.2 考察	
24 + 14	78

第4章	章	結論	79
謝辞.			80
参考	文南	犬	81

第1章 序論

1.1 HPFRCCの概要

従来のコンクリートは引張強度が小さく、ひび割れ発生後に応力が急激に低下する脆性的な挙 動を示す材料である。コンクリートの引張靭性を改善するために、セメント材料に短繊維を混入 することによって靭性の確保をする繊維補強セメント複合材料(以下 FRCC: Fiber Reinforced Cementitious Composites)の研究が多く行われてきた。FRCCでは、マトリックスのひび割れ強度 に到達後、繊維がひび割れ面を架橋する形で引張靭性が大幅に向上し、従来のコンクリートのよ うな急激な応力低下を防ぐことが可能となった。

FRCC の中でも、高性能繊維補強セメント複合材料(以下 HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)は、図 1-1 に示すような複数のひび割れ性状を示しながら、曲げ応力下において応力上昇するたわみ硬化性状や、一軸引張応力下において初期ひび割れ発生以降に応力上昇する歪硬化性状を示す(図 1-2)、極めて高靭性なセメント系複合材料である。





図 1-1 複数ひび割れ性状(左:曲げ試験時,右:引張試験時)^{1),2)}



図 1-2 たわみ硬化性状および歪硬化性状

1.2 HPFRCC における繊維配向性

HPFRCC を構造部材に適用する場合,ひび割れ発生後も繊維がひび割れを架橋することで局所 的にひび割れが開口することを防ぎ,高耐久な部材を実現することが可能となり,今後の活用が 大きく期待できる。しかし,現状では構造物への実用化はあまり進んでいない。その理由として, 繊維を混入することでコンクリートよりも高コストになってしまう点もあるが,性能の定量的評 価の難しさ,および材料特性のばらつきが大きいことが報告されている。マトリックス中の繊維 の分散および配向が HPFRCC の力学挙動に強く関係することは既往の研究により明らかになって おり,打込み方向および型枠寸法などの打込み時の状況によって変化することが知られている^{3),4)}。 例えば,打込み方法を横打ちと縦打ちとした場合(図 1-3)の一軸引張試験の結果(引張応力-ひ び割れ幅関係)を図 1-4 に示す。打込み方向の違いにより繊維の配向性が異なり,繊維の架橋性 能に影響を及ぼしていることがわかる。

繊維が外力に対して有効な配向にない場合,HPFRCCの本来の性能が発揮されないことが危惧 される。むしろ、マトリックス中の繊維を強制的に配向させることができれば、HPFRCCに要求 される性能を確実に引き出すことができ、さらには、材料特性のばらつきも抑えることができる と考えられる。





図 1-3 型枠の写真(左:横打ち,右:縦打ち)⁴⁾



1.3 研究目的

HPFRCCの材料特性のばらつきを抑え,要求性能を確実に引き出すためには,安定した打込み 方法によって繊維の配向および分散を制御する技術が必要であるが,現状では繊維配向を考慮し た打込み方法は確立されていない。そこで本研究では,繊維配向を制御する打込み方法を提案し, その打込み方法の有効性を検証する。

まず、テストピースレベルの試験体において打込み方法を変動因子とし、打込み時のマトリックス中の繊維の挙動を把握するために、珪酸ナトリウム水溶液(水ガラス)を用いた繊維配向性可視化実験を行う。基準となる流込みと提案する打込み方法による繊維配向との差異を確認し、より繊維を試験体軸方向に配向させるための打込み方法を検討する。その後、HPFRCCでの打込みおよび加力実験を行う。HPFRCCで同様の打込み方法を行った場合、繊維を試験体軸方向に配向させられるかを確認するとともに、ひび割れ面で繊維の架橋性能が向上するかを加力実験にて検証する。

次に、テストピースレベルで有効性を確認した打込み方法が部材レベルにおいても有効である か確認するために、部材実験を行い最大荷重および変形を検証する。その際、デジタルカメラで ひび割れ状況を撮影し、画像からひび割れ性状も共に検証する。

なお,通常 HPFRCC には,0.04mm 径の PVA 繊維や0.012mm 径の PE 繊維が用いられることが 多いが,前述したように,HPFRCC では複数ひび割れが生じ,直接繊維の架橋性能を得ることは 難しい。本研究では,0.1mm 径の PVA 繊維を用いて複数ひび割れが生じにくい条件下で実験を行 い,単一のひび割れ面における架橋性能が評価しやすくなるよう配慮している。

第2章 繊維配向性を考慮した打込み方法

2.1 はじめに

本研究で提案する繊維配向を制御する打込み方法は大きく分けて2種類ある。1つは従来コン クリートの締固めに使用される棒状バイブレーターを用い、その振動によって強制的に繊維を配 向させる方法、もう1つは髪をとかす「くし」のような器具を作製し、それをフィルターのよう に試験体に設置し、くしの歯の間を繊維が通過することで、繊維を配向させる方法である。

本章では打込み時のマトリックス中の繊維の挙動を把握するために、透明な珪酸ナトリウム水 溶液(以下、水ガラス)で HPFRCC のマトリックスを模擬した繊維配向可視化実験を行い、打込 み方法による繊維配向の差異を評価する。

可視化実験で繊維を配向させる打込み方法を検討した後に,HPFRCC での打設および加力実験 を行う。HPFRCC の強度および靭性能を評価するために,JCI 規準「切欠きはりを用いたコンクリ ートの破壊エネルギー試験方法」(JCI-S-001-2003)⁵⁾に準拠した切欠き梁の3点曲げ載荷試験を行 った。

2.2 打込み方法

打込み方法を図 2-1 に示す。打込み方法は大きく分けて 2 種類あり、1 つは従来コンクリートの締固めに使用される棒状バイブレーター(図 2-2)を用いてその振動によって強制的に繊維を配向させる方法、もう 1 つは髪をとかす「くし」のような器具(図 2-3)を作製し、くしの歯の間を繊維が通過することで、繊維を強制的に配向させる方法である。

変動因子は、バイブレーターの掛け方、くしの歯の間隔およびくしの掛け方とし、計6種類の 試験体を用意した。打込み位置の型枠端を他端より12mm上げ(勾配1/33)、40秒程度で一度に 充填する「流込み(N)」を基準とし、HPFRCCを充填後、試験体中央部で固定して振動させる「バ イブレーター固定(VF)」、HPFRCCを充填後、振動をさせながら試験体の端部から移動させ往復 する「バイブレーター移動(VM)」、試験体端部から150mmの位置に歯2本のくしを設置して流 し込む「くし固定・歯2本(C2)」、同様に歯3本のくしを設置する「くし固定・歯3本(C3)」、 HPFRCCを充填後、歯2本のくしを200mm移動させる「くし移動・歯2本(CM)」を行う。くし の歯の間隔は打込みの際、使用するPVA繊維(繊維長12mm)が歯の間を通過できるように設定 した。繊維長の約2.5倍(33mm)の間隔で歯を2本取り付けたもの(図2-3:左)と、約2倍 (25mm)間隔で歯を3本取り付けたもの(図2-3:右)の2種類を用意した。

対象とする試験体は100mm×100mm×400mmの曲げ試験体で,この変動因子は可視化実験,加 力実験ともに共通である。





図 2-2 使用した棒状バイブレーター⁶⁾



図 2-3 くしの形状 (左:歯2本,右:歯3本)

2.3 繊維配向性可視化実験

2.3.1 実験概要

(1) 使用材料

繊維配向可視化実験で使用する HPFRCC のマトリックスを模擬した水ガラスを表 2-1 に示す。 土木学会規準「PC グラウトの流動性試験方法」(JSCE-F 531-1999)⁷⁾による JP 漏斗の流下時間を 指標として,水ガラスの流動性を HPFRCC のマトリックスと同様になるように調整した。

既往の研究⁴⁾で行われたモルタルの流下時間試験ではモルタルの JP 漏斗の流下時間は平均 37.0 秒であったため,本実験でもこの値を目標とした。水ガラスと水を混合したのち, JP 漏斗(図 2-4) による流動性試験を行った。

また,バイブレーターシリーズとくしシリーズは,別のバッチを用いたためそれぞれの比較が できるように流込みの試験体を両方のバッチで作製した。(ここではバッチ番号①は N1,バッチ 番号②は N2 として区別している。)

バッチ	質量比	密度	温度	JP 漏斗流下時間
番号	水ガラス:水	(g/cm ³)	(°C)	(秒)
(])*	12 . 1	1.60	25	33.6
②**	12:1	1.02	23	38.6

表 2-1 使用した水ガラス

*:バイブレーターおよび流込み(N1)

**:くしおよび流込み (N2)



図 2-4 JP 漏斗

使用した PVA (polyvinyl alcohol) 繊維の写真を図 2-5 に、物性値を表 2-2 に示す。体積混入率は 2.0%とした。また、繊維配向性の観察を容易にするため、表 2-3 に示すターゲットとなる 黒色のナイロン繊維を体積混入率で 0.05%混入し (図 2-6)、ターゲット繊維の配向を観察した。PVA 繊維とターゲット繊維の配向性は同等であると仮定して評価を行う。



図 2-5 使用した PVA 繊維

店田耕姓	繊維長	繊維径	密度	引張強度	弹性係数
1史/日秋淮	(mm)	(mm)	(g/cm^3)	(MPa)	(GPa)
PVA	12.0	0.10	1.30	1200	28.0

表 2-2 PVA 繊維の形状および力学性能

表 2-3 ナイロン繊維の物性値

(古田)(井)()()	繊維長	繊維径	密度	卢	体積混入率
使用繊維	(mm)	(mm)	(g/cm ³)	巴	(%)
ナイロン繊維	12.0	0.235	1.14	黒	0.05



図 2-6 繊維添加

(2) 実験方法

可視化実験で用いる試験体の寸法および座標軸の定義を図 2-7 に示す。型枠は透明なアクリル 板で作製し, HPFRCC の打込みと同様に開口部端部から水ガラスを流し込んだ。試験体軸方向を x 軸とし, 打込み面を xy 平面と定義する。

型枠の上部(xy 平面)と側面(zx 平面)を,打込み中は動画撮影し,打込み終了後に静止画で 撮影した。撮影状況を図 2-8 に示す。画像解析は,打設終了後に撮影した静止画に対して行う。 打込みと画像解析は,流し込み②では6回,他のシリーズについては各3回行った。



図 2-7 試験体および座標軸の定義(単位:mm)



図 2-8 撮影状況

(3) 画像解析の方法

撮影した画像から繊維配向角を算出するため、画像解析を行う。解析の対象は、ひび割れ面を 想定し、試験体中央の24mm(繊維長の2倍)区間内に存在する繊維とした。画像解析の手順を 図 2-9に示す。まず撮影した画像をトリミングし(a)、汎用ソフトにより二値化を行う(b)。そ の後ターゲット繊維の隣接するピクセルの座標情報をラベリングによりグルーピングし、繊維1 本ごとの座標群情報とする(c)。各繊維座標と回帰直線の距離の平方和が最小となるように回帰 直線を決定し(点と直線の距離最小法)、その傾きから繊維配向角を算出した(d)。得られた繊 維配向角をもとに繊維配向角分布を作成する。



(a) 撮影画像のトリミング



図 2-9 画像解析の手順

2.3.2 実験結果

(1) 打込み状況

各シリーズの打込み時の動画キャプチャーを図 2-10~図 2-14 に示す。

バイブレーターを固定した試験体 (VF) では, xy 平面ではバイブレーターの振動によって, バ イブレーターを中心とした円の接線方向に繊維が配向していく様子が見て取れ, 振動時間が経つ につれて徐々に円の径が大きくなっていった。zx 平面では, 試験体中央部において繊維がバイブ レーターの振動により動いている様子が見て取れた。(図 2-10)

バイブレーターを移動した試験体 (VM) では, xy 平面ではバイブレーターを移動した後の繊維が試験体軸方向に配向していく様子が見て取れた。一方 zx 平面では, バイブレーターを移動させた前後で繊維の変化はあまり見られなかった。これはバイブレーターの振動の影響が壁面まで達していないためであると考えられる。(図 2-11)

くしを固定した試験体(C2,C3)では,xy平面では打設開始時に繊維が勢いよく流れこみ,試 験体軸方向に向いていることがわかる。型枠への充填が進むにつれ,徐々に流れが遅くなってい き,打設完了間際では打設開始時と比較して軸方向への配向は弱まった。zx平面でも同様に,打 設開始時は流れが早く繊維が軸方向に向いているが,マトリックスが型枠の半分まで充填される と繊維の動きは遅くなり,繊維配向はxy平面と比べるとばらつきが見られるようになった。また, くしを通過する前と後で高低差が生じており,くしの両端からしか流れなくなり,型枠側面から 巻き込まれながら流れこむ様子も確認された。(図 2-12,図 2-13)

くしを移動した試験体 (CM) では, xy 平面では繊維の大きな動きを確認できた。くしの移動前 後では繊維の配向がより軸方向に強まっている。zx 平面ではくしの移動による繊維の動きは小さ かった。(図 2-14)



 xy 平面
 zx 平面

 図 2-10
 VF バイブレーター固定(バイブレーター施工中)



 xy 平面
 zx 平面

 図 2-11 VM バイブレーター移動(バイブレーター施工中)



 xy 平面
 zx 平面

 図 2-12 C2 くし固定・歯 2 本(打込み途中)



 xy 平面
 zx 平面

 図 2-13 C3 くし固定・歯 3 本 (打込み途中)



xy 平面 図 2-14 CM < L 移動

zx 平面

図 2-14 CM くし移動・歯 2 本 (くし移動後)

(2) 繊維配向角分布

画像解析により得られた各シリーズの繊維配向角分布を図 2-15 (a) ~ (g) に示す。図 2-15 中の配向強度 k および主配向角 θ_r については後述する。各図は同一パラメータにおける 6 回 (N2 シリーズ)または 3 回 (N2 以外のシリーズ)の実験により得られた繊維配向角分布の相対度数を 合計した繊維配向角分布となっている。なお,座標系は図 2-7 と同一であり,繊維配向角の定義 は図 2-16 に示す。各実験の平均配向角,標準偏差を表 2-4 に示す。

基準となる流込み(N1, N2)に比べ,バイブレーター移動(VM)試験体およびくし移動・歯2本(CM)試験体のxy平面では,ばらつきも小さく試験体軸方向に配向する傾向が強いことが確認できる。一方で,バイブレーター固定した試験体(VF)やくしを固定した試験体(C2, C3)では流込み(N1, N2)と分布形状はそれほど変わらない。xx平面では,各シリーズの分布形状や平均配向角,標準偏差に大きな違いはない。









図 2-16 繊維配向角の定義

		xy ²	平面	zx 平面	
試験体名	バッチ番号	平均配向角	標準偏差	平均配向角	標準偏差
		(°)	(°)	(°)	(°)
N1		10.5	37.8	1.3	42.2
VF	\bigcirc	0.4	38.6	-4.3	42.5
VM		-2.1	27.7	-7.0	47.6
N2		-4.3	40.8	-2.3	37.4
C2		-2.1	39.4	-9.7	40.6
C3	2	-0.2	43.9	-2.2	45.0
СМ		0.4	31.3	-6.0	39.0

表 2-4 平均配向角一覧

(3) 繊維配向性の評価

繊維配向角の分布を定量的に評価するために、図 2-17 に示す配向強度 $k \ge 1$, 主配向角 θ_r (-45° $\leq \theta_r \le 45°$)を採用する⁸。配向角分布の各階級の相対度数に対して、配向角を偏角とする平面座 標に変換した後、楕円による近似を行い、楕円の径 (a およびb) と、径と座標軸のなす角である 主配向角 θ_r を得る。配向強度 k は楕円の 2 つの径の比である (k = a/b)。図 2-17 上図に示すよう に、配向角分布が一様であると楕円による近似は円となり、配向強度は k=1 となる。配向角分布 が 0° 付近でピークを持つ分布となると、図 2-17 下図に示すように近似楕円は横長の楕円にな り、配向強度は k > 1 となる。主配向角と配向強度は、xy 平面および zx 平面のそれぞれの平面座 標に対して求める。繊維配向角に対応した相対度数を表す楕円分布は式(2-1)および式(2-2)で与え られる。主配向角 θ_r が 0°の時、楕円関数は式(2-3)で与えられる。楕円形状分布による近似結果お よび近似より得られた配向強度 k と主配向角 θ_r の値を図 2-15 中に示した。





$$p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{C}{\cos^2 \theta + A \sin \theta \cos \theta + B \sin^2 \theta}$$
(2-1)

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

$$p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta + k \cdot \sin^2 \theta}$$
(2-3)

各シリーズの, xy 平面および zx 平面に対する配向強度-主配向角関係を図 2-18 に, 打込み方 法による配向強度の比較を図 2-19 に示す。配向強度および主配向角を表 2-5 に示す。

xy 平面では,バイブレーターおよびくしを移動させた試験体(VM, CM)の配向強度の値が大 きく,かつ主配向角も 0°近傍であることがわかり,試験体軸方向に繊維配向が強まる傾向が確 認できる。一方で zx 平面では各シリーズ間の配向強度の差は小さい。



図 2-19 打込み方法による配向強度の比較

		xy ^{<u>x</u>}	平面	zx 平面	
試験体名	バッチ番号	配向強度	主配向角	配向強度	主配向角
		k	$ heta_r$ (°)	k	$ heta_r$ (°)
N1		2.91	24.3	4.20	7.4
VF	\bigcirc	7.23	0.1	3.78	-10.2
VM		10.3	-2.4	3.38	-16.5
N2		3.99	-6.6	4.42	-4.7
C2		5.47	1.3	4.95	-11.6
C3	2	6.58	-9.8	3.96	-20
СМ		13.7	0.6	3.60	-16.6

表 2-5 配向強度および主配向角

2.4 切欠き梁の3点曲げ試験

2.4.1 実験概要

(1) 使用材料および練り混ぜ方法

HPFRCC の調合計画を表 2-6 に、使用材料の調合単位量を表 2-7 に、フレッシュおよび圧縮性 状を表 2-8 に示す。練混ぜは、パン型強制ミキサーを使用し、粉体を1分間空練り後、水と高性 能減水剤、増粘剤、PVA 繊維の順に投入しそれぞれ4分間混練した(1 バッチ 0.05m³)。なお、増 粘剤の投入前後ではモルタルの流動性試験を JP 漏斗(図 2-4)によって行い、流動性を確認した。 なお、本研究で対象とした HPFRCC は自己充填性を有している。

また,バイブレーターシリーズとくしシリーズは,別のバッチを用いたためそれぞれの比較が できるように流込みの試験体を両方のバッチで作製した。(ここではバッチ番号①は N1,バッチ 番号②は N2 として区別している。)

設計強度	繊維混入率	W/C	W/ (C+FA)	S/C	S/ (C+FA)
(MPa)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
30	2.0	56.0	39.2	71.4	49.9

表 2-6 HPFRCC の調合計画

表 2-7 HPFRCC の調合単位量(kg/m³)

水 W	セメント*1 C	砂*2 S	フライ アッシュ ^{*3} FA	PVA 繊維 Fiber	高性能 減水剤 ^{*4} Ad	増粘剤 ^{*5} Thickener
380	678	484	291	26	6	1.91

*1:早強ポルトランドセメント

*2:7号硅砂

*3:フライアッシュⅡ種

*4:ポリカルボン酸コポリマー減水剤

*5:ヒドロキシプロピルメチルセルロース系

心,大王日	繊維体積混入率	空気量	圧縮強度	弹性係数
ハツフ 留方	(%)	(%)	(MPa)	(GPa)
①*	2.0	6.6	34.6	15.0
②**	2.0	6.6	33.0	14.3

表 2-8 HPFRCC のフレッシュおよび圧縮性状

*:バイブレーターおよび流込み (N1)

**:くしおよび流込み (N2)

(2) 試験方法

試験体形状を図 2-20 に, 試験状況を図 2-21 示す。切欠きの深さは 30mm, 幅 5mm とし, 硬 化後にコンクリートカッターによって設けた。試験体数はバッチ番号①で作製したバイブレータ ーシリーズと N1 は各 6 体, バッチ番号②で作製したくしシリーズと N2 は各 4 体とした。試験体 一覧を表 2-9 に示す。

試験は、JCI 規準「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」(JCI-S-001-2003)⁶に準拠した3点曲げ載荷試験を行った。加力には、変位制御により加力を行う2MNユニバーサル試験機を使用した。試験機のヘッド間速度は毎分0.5mmに設定した。計測項目は荷重値、ひび割れ肩口開口変位(以下、CMOD)を算出するための試験体中央部(100mm)での軸方向変形および荷重点たわみとした。打込み面と切欠きの位置関係は図2-1および図2-20中に示す通りである。





図 2-21 試験状況

試験体名(体数)	打込み方法	バッチ番号
N1 シリーズ (6)	N:流込み	
VF シリーズ (6)	VF:バイブレーター固定	1
VM シリーズ (6)	VM:バイブレーター移動	
N2 シリーズ (4)	N:流込み	
C2 シリーズ (4)	C2:くし固定・歯2本	\bigcirc
C3 シリーズ (4)	C3:くし固定・歯3本	2
CM シリーズ (4)	CM:くし移動・歯2本	

表 2-9 切欠き曲げ試験体一覧

2.4.2 実験結果

(1) 打込み状況

バイブレーターを用いた打込み状況の例 (VF, VM) を図 2-22 に示す。棒状バイブレーターを 固定した試験体 (VF) では、棒状バイブレーターの振動により同心円状に繊維が広がっていく様 子が見て取れた。棒状バイブレーターを移動した試験体 (VM) では、棒状バイブレーター通過後 の繊維配向は軸方向に強まっていた。

くしを用いた打込み状況の例(C3, CM)を図 2-23 に示す。くしを固定した試験体(C3)においては、くしを通過する前と後で高低差を生じ、くしを通過後の繊維配向は軸方向に強まっていた。一方で、くしの歯の間に繊維が絡まり、型枠側面から巻き込まれながら流れ込む様子が確認できた。C2 においても、C3 と同様の傾向が見られた。くしを移動した試験体(CM)では、マトリックス表面にあるいくつかの繊維が移動によって軸方向に向く様子が確認できた。



バイブレーター固定(VF)バイブレーター移動(VM)図 2-22 バイブレーターを用いた打込み状況の例



くし固定・歯3本(C3)図 2-23 くしを用いた打込み状況の例

(2) 破壊状況

加力後の試験体の破壊状況を図 2-24 (a) ~ (g) に示す。すべての試験体において、切欠き上 端から大きなひび割れが 1 本発生した後,その周りに小さなひび割れが複数発生するという挙動 を示し、局所的なひび割れで最終破壊に至った。N1 シリーズ,VM シリーズ,N2 シリーズ,CM シリーズ試験体では切欠きの直上から大きなひび割れが比較的直線状に進展しているのに対して、 VF シリーズ,C2 シリーズ,C3 シリーズ試験体では弧を描くようなひび割れや屈曲したひび割れ などが見られた。特に VM シリーズの試験体では,他のシリーズの試験体に比べてひび割れの数 が多く発生した。

加力後の破断面のうち,各試験体の代表的なものを図 2-25 に示す。各シリーズ間で試験体軸方向の抜出し繊維量の違いが見られ,特に VM シリーズ CM シリーズの試験体では,N1 シリーズ N2 シリーズと比べ型枠近傍だけでなくひび割れ面全体において,軸方向に配向する繊維量が多く 観察された。C2 シリーズ C3 シリーズの試験体では,繊維が破断面に沿っている箇所が見られる。



図 2-24 試験体の破壊状況(a) N1 シリーズ





VF-4





図 2-24 試験体の破壊状況(b) VF シリーズ





VM-4

VM-5

図 2-24 試験体の破壊状況 (c) VM シリーズ



VM-6



N2-1

N2-2



N2-3 N2-4 図 2-24 試験体の破壊状況(d)N2 シリーズ





図 2-24 試験体の破壊状況(e) C2 シリーズ





C3-2



C3-3 C3-4 図 2-24 試験体の破壊状況(f)C3 シリーズ





CM-3 CM-4 図 2-24 試験体の破壊状況(g) CM シリーズ



N1-3

VF-1

VM-1







C3-1



70mm

CM-1



(3) 荷重-ひび割れ肩口開口変位(CMOD)関係・最大荷重

荷重-ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 関係を図 2-26 に,最大荷重の比較を図 2-27 に示す。 ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) は,図 2-20 に示す π型変位計の測定値から平面保持を仮定し, 試験体下面の軸方向変形として求めた。VM シリーズの試験体の最大荷重が最も大きく,CM シリ ーズの試験体の最大荷重が次いで大きい。また,バイブレーターを固定した VF シリーズおよび くしを固定した C2, C3 シリーズは最大荷重にばらつきがあるが VM, CM シリーズはばらつきが 少ない。





(4) 破壊エネルギー

切欠き3点曲げ試験より得られた各試験体の荷重-ひび割れ肩口開口変位(CMOD)曲線から 破壊エネルギーを求めた。破壊エネルギーは、JCI規準「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊 エネルギー試験方法」(JCI-S-001-2003)⁶に準拠した式(2-4)で算出する。なお、加力終了時まで試 験体ブロックが分離するような明確な破壊は見られなかったため、CMODで15mmまでの曲線下 の面積(図 2-28)により破壊エネルギーを求めた。各試験体の破壊エネルギーの比較を図 2-29 に、試験結果一覧を表 2-10に示す。荷重-ひび割れ肩口開口変位(CMOD)関係と同様に、VM、 CM シリーズで破壊エネルギーのばらつきが少なく、平均値も大きい結果となった。

図 2-19 において xy 平面と zx 平面での繊維配向性の差異が確認されたが, zx 平面の画像によ り得られた繊維配向角分布は,図 2-1 に示したように,切欠き梁試験体の下面(切欠き面)での 繊維配向を強く示していることが予想され, xy 平面の画像より得られた繊維配向性の違いが切欠 き梁の曲げ試験結果の差異を生じさせていると考えられる。

$$G_F = \frac{0.75W_0}{A_{lig}}$$

(2-4)

ここで,

W_0	: CMOD 15mm までの荷重-CMOD 曲線下の面積
A_{lig}	:リガメント面積



図 2-28 荷重-CMOD 曲線



表 2-10 切欠き3点曲げ試験結果(バイブレーターシリーズ)

		試	最大荷重(kN)		最大荷重時		破壊エネルギー	
		験					(N/mm)	
試験体名	打込み方法	体番号		平均値 (標準偏差)	CMOD (mm)	荷重点たわみ (mm)	G_F	平均値 (標準偏差)
N1 シリーズ	N 流込み	1	4.53		-*	1.08	-*	
		2	4.14		2.19	1.69	3.41	
		3	3.99	4.33	2.24	1.35	3.44	3.52
		4	4.14	(0.28)	2.58	1.95	3.04	(0.34)
		5	4.50		2.65	1.89	4.26	
		6	4.70		2.11	1.49	4.11	
VF シリーズ	VF バイブレーター 固定	1	6.20		1.84	1.34	4.30	
		2	6.46		1.61	1.14	5.85	
		3	5.95	5.85	1.66	1.16	5.91	4.67
		4	6.89	(0.98)	2.71	2.13	6.94	(1.55)
		5	5.57		1.93	1.31	4.29	
		6	4.07		2.01	1.44	3.03	
VM シリーズ	VM バイブレーター 移動	1	9.05		1.40	0.98	10.00	
		2	9.05		3.15	2.32	8.54	
		3	9.08	9.03	2.72	1.84	8.40	8.81
		4	8.72	(0.23)	3.71	2.50	8.80	(1.13)
		5	9.41		2.55	1.81	9.57	
		6	8.88		3.45	2.40	7.99	

*未計測
		試験	最大	最大荷重(kN) 最大荷重時		破壊エネルギー (N/mm)		
試験体名	打込み方法	体番号		平均値 (標準偏差)	CMOD (mm)	荷重点たわみ (mm)	G_F	平均値 (標準偏差)
		1	4.18		1.39	1.01	2.42	
N2	Ν	2	2.87	3.65	1.58	1.19	2.05	2.35
シリーズ	流込み	3	3.85	(0.56)	1.23	0.86	2.48	(0.20)
		4	3.70		1.98	1.45	2.45	
		1	7.11		1.94	1.36	5.69	
C2	C2	2	5.81	6.85	2.76	1.90	4.90	4.67
シリーズ	くし固定・歯2本	3	7.25	(0.70)	1.85	1.31	4.36	(0.84)
		4	7.25		2.24	1.63	3.71	
		1	7.22		1.18	0.85	4.20	
C3	C3	2	6.01	6.12	0.96	0.75	2.99	3.65
シリーズ	くし固定・歯3本	3	4.79	(1.02)	0.45	0.32	2.85	(0.86)
		4	6.44		1.45	1.07	4.56	
		1	7.20		0.93	0.76	4.37	
СМ	СМ	2	7.32	7.45	1.63	1.61	4.27	4.62
シリーズ	くし移動・歯2本	3	7.56	(0.24)	1.52	1.23	4.79	(0.37)
		4	7.74		1.22	1.21	5.07	

表 2-10 切欠き3点曲げ試験結果(くしシリーズ)

2.5 まとめ

本章では、繊維配向性を考慮した打込み方法を大きく分けて2種類(バイブレーターおよびく し)提案し、珪酸ナトリウム水溶液(水ガラス)でマトリックスを模擬した繊維配向性可視化実 験および切欠き梁の3点曲げ試験を行い、その有効性を確認した。

その結果,繊維配向性可視化実験では,バイブレーターを移動させた試験体およびくしを移動 させた試験体の配向強度が高い値を示し,繊維配向性が試験体軸方向に強まることが確認された。 切欠き梁の3点曲げ試験では,基準となる流込みの試験体と比較して,バイブレーターを移動さ せた試験体およびくしを移動させた試験体の最大荷重および破壊エネルギーの向上が見られ,繊 維配向性可視化実験の結果と対応する結果となった。

以上より,バイブレーターおよびくしを用いた打込み方法によって繊維配向性を制御し,力学 挙動を向上させることができた。

第3章 打込み方法の違いが梁部材のせん断性状に及ぼす影響

3.1 はじめに

第2章で繊維配向性可視化実験および切欠き梁の3点曲げ試験によって、棒状バイブレーター およびくしを用いた打込み方法の有効性を確認した。本章では、これらの打込み方法が部材の構 造性能、特にせん断性状に及ぼす影響を確認することを目的とする。対象とする部材は境界梁を 想定した短スパン梁とし、せん断破壊先行型に計画する。

3.2 使用材料

(1) フレッシュ性状および圧縮性状

使用する繊維は表 2-2 に示した PVA 繊維とし,体積混入率 2.0%とする。また HPFRCC の調合 計画は表 2-6 と同様のものとする。HPFRCC の調合単位量は表 2-7 とほぼ同様であるが,セメン トは普通ポルトランドセメントを使用し,増粘剤の投入量は JP 漏斗の流下試験から適宜設定し た。また,比較のために繊維を混入しないモルタルを使用した試験体も計画した。打設日の異な る計 6 バッチの材料を用いた。バッチごとの材料特性値を表 3-1 に示す。

バッチ番号		繊維体積 混入率 (%)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
	1		1.2	46.2	15.3
	2		1.8	43.1	15.0
HPFRCC	3	2.0	1.3	42.7	13.0
	4		3.7	41.0	12.9
	5		3.0	41.9	13.5
モルタル		0.0	0.3	38.8	14.3

表 3-1 HPFRCC のフレッシュおよび圧縮性状

(2) 曲げ性状

使用材料の曲げ性状を把握するために,JCI 規準「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネ ルギー試験方法」(JCI-001-2003)⁵⁾に準拠した 3 点曲げ載荷試験を行った。対象とする試験体は 100×100×400mmの曲げ試験体である。試験方法および試験体図,CMODの算出方法および破壊 エネルギーの算出方法は 2.4.1 節と同様とする。なお,全ての試験体は図 2-1 中の「N:流込み」 で打込みを行った。荷重-ひび割れ肩口開口変位関係を図 3-1 に,最大荷重の比較を図 3-2 に, 破壊エネルギーの比較を図 3-3 に示す。また,HPFRCC 試験体において,ひび割れ面に架橋する 繊維の有効性を評価するために,式(3-1)に示す等価曲げ強度 f_b をそれぞれ算出した⁹。曲げ試験 結果一覧を表 3-2 に示す。

$$\overline{f_b} = \frac{G_F \cdot A_{lig}}{0.75 \times 15} \cdot \frac{6}{4} \cdot \frac{S}{b \cdot h^2}$$
(3-1)
ここで,
$$\overline{f_b} : 等価曲げ強度 (N/mm^2) \qquad G_F : 破壊エネルギー (N/mm) A_{lig} : リガメント面積 (mm^2) \qquad S : スパン (mm) b : リガメント幅 (mm) \qquad h : リガメント高さ (mm)$$





図 3-3 破壊エネルギーの比較

		試	县十古重 (LNI)		县十世壬戌		破壊エネルギー		等価曲げ強度	
バッチ 番号		験	取力	└们里(KN)	取八刑里时		(N/mm)		(N/mm^2)	
		体番号		平均値 (標準偏差)	CMOD (mm)	荷重点 たわみ (mm)	G_F	平均値 (標準偏差)	$\overline{f_b}$	平均値 (標準偏差)
		1	4.20	3.06	2.82	1.96	4.08	3.05	2.32	2 23
	1	2	3.49	(0.33)	2.14	1.37	3.13	(0.63)	1.75	2.23 (0.36) 2.24 (0.33)
		3	4.18	(0.33)	1.51	0.89	4.65	(0.63)	2.63	
		1	3.19	3.77 (0.53)	2.03	1.43	3.24	3.96 (0.58)	1.83	
	2	2	4.46		1.20	0.78	3.99		2.26	
		3	3.66		1.69	1.06	4.66		2.63	
		1	3.15	3.63 (0.43)	3.70	2.37	3.13	3.64 (0.39)	1.75	2.03 (0.21)
HPFRCC	3	2	3.56		1.72	1.18	3.71		2.08	
		3	4.18		2.18	1.33	4.07		2.27	
		1	5.29	5.00 (0.22)	4.30	3.24	5.37	5.16	3.04	2.93 (0.08)
	4	2	4.77		2.28	1.47	5.07		2.89	
		3	4.95		3.20	2.29	5.03	(0.15)	2.86	
		1	3.63	3 /1	2.24	1.48	3.83	3.40	2.17	1 03
(F	5	2	3.59	(0.29)	1.23	0.72	3.38	(0.34)	1.90	(0.19)
		3	2.99	(0.2)	1.17	0.63	3.00	(0.34)	1.71	
エルタ	Ŀ	1	2.26	2.39	0.14	0.10	0.10	0.08		
モルタル	2	2.52	(0.13)	0.12	0.07	0.07	(0.07)		-	

表 3-2 切欠き曲げ試験結果一覧

(3) 主筋

試験体の主筋にはせん断破壊先行型とするため,高強度鉄筋のUSD785(異形鉄筋D13)を用いた。鉄筋の引張試験結果を表 3-3に示す。また、繊維の配向性が部材のせん断性状に及ぼす影響を把握するため、横補強筋は配していない。

名称	番号	降伏強度 [*] (MPa)	弹性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
	1	796	187	0.426	1015	12.0
D13	2	799	193	0.414	1008	11.2
USD785	3	798	192	0.417	1012	12.7
	平均	798	191	0.419	1012	12.0

表 3-3 鉄筋の引張試験結果

*0.2%オフセット耐力により算出

3.3 実験概要

3.3.1 試験体

試験体は断面が 180×280mm の矩形断面で, せん断スパン比を 1.5 として製作した。また, 繊維なしのモルタル試験体も同様に製作した。試験体の形状および配筋と変形計測位置を図 3-4 に, 試験体一覧を表 3-4 に示す。表 3-4 中の変動因子である打込み方法については, 次節で説明する。 いずれの試験体も曲げ破壊に先行してせん断破壊するように計画した。

HPFRCC 試験体およびモルタル試験体の製作は,梁試験部分を水平打設(加力方向直交方向: 図中▽が打込み方向)した後,スタブに普通コンクリートを打込み,製作した。試験部分のスタ ブ内にはコッターを設け,スタブとの一体性を確保した。



図 3-4 試験体形状・配筋

表 3-4	試験体一覧
-------	-------

試験体名	打込み方法	使用 バッチ	使用繊維	繊維体積 混入率 (%)	断面 b×D (mm)	せん断 スパン比	主筋
PVA20-N	流込み	\bigcirc					
PVA20-V1	バイブレーター1	2					(D12
PVA20-V2	バイブレーター2	3	PVA	2.0	190×290	15	0-D13
PVA20-C1	くし1	4			180 ~ 280	1.5	05D/85
PVA20-C2	くし2	5					$p_t = 1.0270$
MT-N	流込み	モルタル	-	0.0			

3.3.2 打込み方法

試験体内の繊維配向の違いがせん断性状へ与える影響を把握するため、変動因子を打込み方法 とする。打込み方法は梁側面方向の端部から HPFRCC を流し込む「流込み (PVA20-N, MT-N)」 を基準とし、HPFRCC を充填後、バイブレーターを試験体軸方向に移動させる「バイブレーター 1 (PVA20-V1)」、鉄筋の間をジグザクに移動させる「バイブレーター2 (PVA20-V2)」、歯が3本の くしを試験体軸方向に移動させる「くし1 (PVA20-C1)」、歯が23本のくしを用い、梁を2回に分 けて試験体軸直交方向に移動させる「くし2 (PVA20-C2)」の計5 種類とする。打込み方法を図 3-5 (a) ~ (e) に示す。なお、ここで使用したバイブレーターは第2章で用いたバイブレーター (図 2-2) と同じである。打込みで用いたくしの形状を図 3-6 に示す。







図 3-5 (d) くし1 (PVA20-C1)



図 3-5 (e) くし2 (PVA20-C2)



くし1 (PVA20-C1)

くし2 (PVA20-C2)

図 3-6 くしの形状

3.3.3 加力·計測方法

加力は大野式一方向載荷とし、加力梁を取り付けた 2MN ユニバーサル試験機により加力を行った。試験体設置状況を図 3-7 に示す。計測項目は全体変形、局部曲げ変形・せん断変形、主筋 歪および荷重とした。全体変形の計測方法を図 3-8 に、局部変形の計測方法を図 3-9 に示す。鉄 筋歪の測定位置は、図 3-4 中に示す■である。



図 3-7 加力機と試験体設置状況



図 3-8 全体変形の計測方法



図 3-9 局部変形の計測方法

3.3.4 せん断ひび割れ幅の観測

試験体のせん断ひび割れの評価を行うにあたり、変位計設置面の裏面に 10×10mm のメッシュ を描き、2 台の定点カメラを用いて写真撮影を行った。撮影箇所はせん断ひび割れが入る箇所を 想定して、図 3-10 に示す 2 箇所(領域 1 および領域 2)とした。撮影範囲は 1pixel が 0.02mm 相 当となる 120×80mm とした。撮影間隔は、加力の計測ステップと同じタイミングとし、2 台のカ メラの同時撮影を行った。



図 3-10 ひび割れ幅の観測範囲

3.4 実験結果

3.4.1 打込み状況

試験体の打込み状況を図 3-11 (a) ~ (e) に示す。全ての試験体は、まず基準となる流込みで 試験体の打込み位置の型枠端を他端より 48mm 上げ勾配をつけて、バケツによって 5 分程度で型 枠に充填させた。前章で行ったテストピースレベルでの試験体と比べ、流込み (PVA20-N および その他の試験体) では試験体軸直交方向に繊維配向が強まっていることが見て取れた。バイブレ ーターを用いた試験体では (PVA20-V1, PVA20-V2)、前章と同様バイブレーターの通過後の繊維 が移動方向に配向が強まった。くしを用いた試験体 (PVA20-C1, PVA20-C2) においても前章と同 様に、くしが移動した後の繊維配向がその移動方向に強まった。また、くしの移動とともに繊維 を絡め取る挙動も顕著に現れた。



図 3-11 打込み状況(a)流込み(PVA20-N)



図 3-11 打込み状況 (b) バイブレーター1 (PVA20-V1)



図 3-11 打込み状況 (c) バイブレーター2 (PVA20-V2)



図 3-11 打込み状況 (d) くし1 (PVA20-C1)



図 3-11 打込み状況 (e) くし2 (PVA20-C2)

3.4.2 破壊性状・せん断カー部材角関係・最大荷重

(1) 破壊性状

ひび割れ最終状況を図 3-12 に示す。それぞれの試験体について、上図はひび割れ幅計測面を、 下図は変位計設置面を示す。いずれの試験体においても、部材角 1/400rad~1/300rad 程度までに、 曲げひび割れおよびせん断ひび割れが順次発生した。最大荷重付近になると、HPFRCC を用いた 試験体において一つのせん断ひび割れに変形が局所化し始め、最大荷重に達し、せん断破壊した。 なお、全試験体において、主筋の降伏は確認されなかった。



PVA20-N

PVA20-V1





PVA20-V2

PVA20-C1





PVA20-C2

MT-N



(2) せん断カー部材角関係・最大荷重

全試験体のせん断カー部材角関係を図 3-13 に, 各試験体の最大荷重実験値の比較を図 3-14 に 示す。図 3-13 中には, 曲げひび割れ, せん断ひび割れ発生点, 最大荷重点を示した。最大荷重時 の部材角はおおむね 1/100rad 程度である。最大荷重が最も大きい試験体は PVA20-C1 であり, 基 準試験体と比較して, 7kN の最大荷重の向上が見られた。PVA20-V1, PVA20-V2, PVA20-C2 の 3 体の最大荷重は, 基準試験体の PVA20-N より下回った。MT-N 試験体と他の 5 試験体を比較する と平均で 42.4kN の最大荷重の向上が見られ, 繊維混入による性能向上が確認された。また, 最大 荷重時の部材角は, 最大荷重が大きい試験体ほど大きくなる傾向が見られた。

実験結果一覧を表 3-5 に示す。最大荷重時の平均せん断応力は、せん断力を梁幅(180mm)と 主筋中心間距離(185mm)で除して求めた。また、主たるせん断ひび割れの角度とは、図 3-12 中 に示す変形測定 B 区間における主だったせん断ひび割れの角度を写真から測定した値である。表 中の値は、ひび割れ観測面および変位計設置面それぞれについて測定した値の平均値である。

同一調合の材料を用いたがバッチが異なり,表 3-2 に示したように各バッチの性能が必ずしも 同一でないと考えられるため,各試験体の最大荷重時の平均せん断応力を各バッチの等価曲げ強 度で除した基準化せん断強度を比較する。各試験体の基準化せん断強度の比較を図 3-15 に示す。 PVA20-Nの基準化せん断強度が最も大きく,次いで PVA20-C2 が大きい値となった。これらの試 験体では繊維配向が試験体軸直交方向に強まり,せん断力に対して繊維が有効に働いたためであ ると考えられる。また, PVA20-C1の基準化せん断強度は最も小さくなった。





図 3-15 基準化せん断強度の比較

表 3-5 実験結果一覧	Ī,
--------------	----

	ひび割れ (k	発生荷重 N)		最大荷	苛重時		主だった
試験体名	曲げ ひび割れ	せん断 ひび割れ	せん断力 (kN)	平均 せん断応力 (MPa)	部材角 (×10 ⁻³ rad)	基準化 せん断強度	セん町ひひ 割れの角度 <i>¢_{cr}(°)</i>
PVA20-N	7.60	45.3	87.0	2.61	8.17	1.17	20.7
PVA20-V1	35.0	46.9	79.0	2.37	6.38	1.06	13.7
PVA20-V2	41.5	49.3	68.4	2.05	6.03	1.01	23.9
PVA20-C1	13.5	59.4	94.0	2.82	13.10	0.96	11.9
PVA20-C2	46.7	52.1	72.6	2.18	6.21	1.13	17.4
MT-N	26.7	24.9	37.8	-	5.24	-	10.4

3.4.3 試験体の変形

図 3-9 に示した変位計から各部材角ごとのせん断変形量と曲げ変形量を算出した。曲げ変形量 およびせん断変形量の推移を図 3-16 に示す。なお、図中の値は全体変形量で除して変形割合とし ており、灰色の領域がせん断変形を、黒色の領域が曲げ変形をそれぞれ表している。どの試験体 も部材角が小さい時には曲げ変形の割合が多いが、加力が進むとせん断変形が徐々に支配的にな り、最大荷重時にはせん断変形の割合が約8割程度となった。また、部材角が小さい場合、HPFRCC の5 試験体において最大荷重が大きい試験体 (PVA20-C1 および PVA20-N) ほど、せん断変形の 割合が大きくなる傾向が見られた。



3.4.4 せん断ひび割れ幅

(1) せん断ひび割れ幅の算出方法

ひび割れ幅算出方法を図 3-17 に示す。梁部材のせん断破壊は、あるせん断ひび割れに変形が集 中して起こり、せん断ひび割れ面に着目すると、ひび割れ面に対する垂直応力(引張応力)およ びせん断応力が同時に作用する応力下で破壊に至ると考えられる。既往の研究¹⁰⁾を参考に、ひび 割れ面において引張応力が作用したことによる変位を開き、せん断応力が作用したことによる変 位をせん断ずれとし、開きとせん断ずれを考慮した主応力方向の変位をひび割れ幅とし、主応力 方向と水平方向のなす角(時計回りが正)を主歪角度とした。

ひび割れ幅は 3.3.4 節の方法で撮影した画像から,ひび割れとメッシュの交点(図 3-17 中の点 A₁,点 B₁)の座標を求め,その2点の座標を用いて算出した。主歪角度も同様にメッシュの座標 を用いて,モールの歪円(*ε_x*:水平方向の歪,:*ε_y*鉛直方向の歪,*ω*:主応力方向の歪)に基づいて 算出した。また,ひらきとせん断ずれは,ひらき,せん断ずれ,ひび割れ幅のベクトル図が,ひび 割れを斜辺とする直角三角形の関係にあることを利用し,ひび割れ幅と主歪角度,ひび割れ角度 を用いて算出した。なお,ひび割れ角度は,ひび割れとメッシュの次の交点の座標も用いて算出 した(図 3-17 中の点 A₂,点 B₂)。



図 3-17 ひび割れ幅および主歪角度算出方法

(2) 撮影画像

各試験体の部材角ごと(1/400, 1/200, 1/150, 1/100, 1/67, 1/50, 最大荷重時)のひび割れ撮影 画像を図 3-18 (a)~(f) に示す。最大荷重時の画像中の番号は,ひび割れの番号を示しており, 2 つの領域で同じ番号は同じひび割れに対応している。ひび割れ幅を計測したひび割れは 2 領域 を跨ぐものを選択し,複数ある試験体は最も局所化したひび割れを必ず含めるようにした。なお, PVA20-C2 の領域 2 においては,実験中の撮影不良により未計測の部分があるため,計測できたデ ータのみ示す。また,MT-N においては 2 つの領域を跨ぐひび割れは観測されなかったため,領域 2 のみ最大荷重時に観測されたひび割れの推移を計測した。







図 3-18 ひび割れ撮影画像 (c) PVA20-V2









図 3-18 ひび割れ撮影画像(f) MT-N

(3) ひび割れ幅

各試験体のひび割れ幅-部材角関係を図 3-19 (a) ~ (f) に,最大荷重時のひび割れ幅を表 3-6 に示す。なお,図中の値は画像のメッシュごとに算出したひび割れ幅の平均値としている。

ひび割れ幅は変形が進むに伴い拡大し、最大荷重以降に部材角の増加に比してひび割れ幅の増加割合が増しており、ひび割れ拡大の局所化と対応している。最大荷重時のひび割れ幅は PVA20-C1 と MT-N 以外は 0.5~1.0mm 程度であった。PVA20-C1 は最大荷重時の部材角が最も大きく、変形が進んでいたためひび割れ幅が 2.5mm 程度と他の試験体よりも大きい結果となった。

試験体ごとの比較の例として,領域1のひび割れ1のひび割れ幅を図 3-20 に示す。部材角が 0.013rad 程度までは PVA20-N が最もひび割れ幅が小さく,その時点で最もひび割れ幅の大きかった PVA20-V2 とは 2mm 程度の差があった。ひび割れ性状においても打込み方法の差異が現れている。また,MT-N は最大荷重を迎えた直後に急激に変形が進み,それに伴いひび割れ幅の拡大が進んだ。繊維混入による,ひび割れ幅抑制効果が見られた。





-62-



図 3-19 ひび割れ幅-部材角関係(f) MT-N(領域 2 のみ)

	領地	或 1	領域2		
試験体名	ひび割れ 1	ひび割れ 2	ひび割れ 1	ひび割れ 2	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
PVA20-N	0.69	0.44	0.85	0.91	
PVA20-V1	0.99	-	1.14	-	
PVA20-V2	1.31	0.26	0.63	0.46	
PVA20-C1	2.61	0.62	2.51	0.40	
PVA20-C2	0.66	-	-	-	
MT-N	-	-	3.50	0.65	

表 3-6 最大荷重時のひび割れ幅



(4) 開き

各試験体の開き-部材角関係を図 3-21 (a) ~ (f) に,最大荷重時の開きを表 3-7 に示す。 開きはひび割れ幅と同様に,変形が進むにつれて拡大する傾向であった。最大荷重時の開き は,ひび割れ幅同様 PVA20-C1 と MT-N 以外は 0.5~1.0mm 程度で, PVA20-C1 では 2.5mm 程度で あった。







図 3-21 開き-部材角関係(f) MT-N(領域2のみ)

	領地	或 1	領域 2		
試験体名	ひび割れ 1	ひび割れ 2	ひび割れ 1	ひび割れ 2	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
PVA20-N	0.69	0.42	0.78	0.86	
PVA20-V1	1.03	-	1.15	-	
PVA20-V2	1.20	0.24	0.61	0.42	
PVA20-C1	2.25	0.41	2.55	0.34	
PVA20-C2	0.54	-	-	-	
MT-N	-	-	2.73	0.30-	

表 3-7 最大荷重時の開き

(5) せん断ずれ

各試験体のせん断ずれ-部材角関係を図 3-22 (a) ~ (f) に,最大荷重時のせん断ずれを表 3-8 に示す。

せん断ずれはひび割れ幅や開きと同様に,変形が進むにつれて拡大する傾向であった。最大荷 重時のせん断ずれは, PVA20-C1, MT-N以外の試験体では 0.2~0.4mm 程度で, PVA20-C1 では 1mm 程度であり,開きよりも小さくなっている。






図 3-22 せん断ずれ一部材角関係(f) MT-N(領域 2 のみ)

	領域1		領域 2	
試験体名	ひび割れ 1	ひび割れ 2	ひび割れ 1	ひび割れ 2
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
PVA20-N	0.17	0.07	0.24	0.31
PVA20-V1	0.16	-	0.25	-
PVA20-V2	0.38	0.03	0.20	0.15
PVA20-C1	1.04	0.45	0.76	0.17
PVA20-C2	0.28	-	-	-
MT-N	-	-	1.86	0.56

表 3-8 最大荷重時のせん断ずれ

(6) 主歪角度

各試験体の主歪角度-部材角関係を図 3-23 (a) ~ (f) に,最大荷重時の主歪角度を表 3-9 に示す。

どの試験体も最大荷重に達するまではばらつきが大きいが,最大荷重以降には 70~80 度(圧縮 主歪角度にして 10~20 度)に収束していく傾向が見られた。







図 3-23 主歪角度-部材角関係(f) MT-N(領域2のみ)

	領域1		領域 2	
試験体名	ひび割れ 1	ひび割れ 2	ひび割れ 1	ひび割れ 2
	(°)	(°)	(°)	(°)
PVA20-N	75.8	77.6	79.2	81.0
PVA20-V1	76.0	-	76.1	-
PVA20-V2	77.2	77.3	70.3	73.8
PVA20-C1	64.7	127.0	70.6	75.2
PVA20-C2	77.1	-	-	-
MT-N	-	-	83.7	95.3

表 3-9 最大荷重時の主歪角度

3.5 試験体内の繊維配向性

3.5.1 ひび割れ面の繊維配向

試験体断面の繊維配向を調べるために、加力後の試験体をひび割れに沿って2分割し、ひび割れ面にブラックライトを照射し、繊維配向を観察した(図 3-24)。各試験体のひび割れ面の繊維配向の様子を図 3-25 に示す。観察領域1に関して、PVA20-V1およびPVA20-C1では、試験体軸方向に配向している繊維が確認でき、また PV20-V2 および PVA20-C2 では試験体軸に直交する繊維が確認できた。また、PVA20-N では試験体軸方向および直交方向の両方向ともに配向している繊維が確認できた。観察領域2に関して、どの試験体も主筋間の繊維は主筋に沿って試験体軸方向に配向していた。また、PVA20-C1において繊維の量が他の試験体よりも多かった。



試験体 (加力後)

試験体(2分割後)

ひび割れ面の繊維配向 拡大図(ブラックライト照射)





図 3-25 ひび割れ面での繊維配向 (左:2分割した試験体図 右:拡大図(ブラックライト照射))



PVA20-C2 図 3-25 ひび割れ面での繊維配向 (左:2分割した試験体図 右:拡大図 (ブラックライト照射))

3.5.2 考察

本節では、試験体内の繊維配向を考えることで、基準化せん断強度の差異を考察する。試験体内の繊維配向の模式図を図 3-26 に示す。PVA20-N は半円を描くようにマトリックスが流れていくため、繊維がその円の接線方向に配向していくことが予想され、主筋付近では試験体軸方向に、断面の中央部分は試験体軸直交方向に配向していると考えられる。そのため、試験体全体で見ると試験体軸直交方向に配向している繊維の割合が多いため、基準化せん断強度が大きくなったと考えられる。PVA20-C2 はくしによって強制的に繊維を試験体軸直交方向に配向させたことで、せん断力に対して有効な繊維が多くなったと考えられる。PVA20-N よりも基準化せん断強度が小さくなった理由は、くしをかけたことにより繊維の巻き込みが起こり、繊維量の少ない部分があったためであると考えられる。PVA20-V2 は試験体軸直交方向に配向する繊維が多くあるが、バイブレーターの折り返し地点で試験体軸方向に配向する繊維があり、その領域が弱点となっために基準化せん断強度が PVA20-N と比較して小さくなったと考えられる。PVA20-N と比較して小さくなったと考えられる。

以上より,梁のせん断力に対して繊維が有効に働くためには,試験体軸直交方向に配向する繊 維の割合が深く関係しており,最も結果が良い打込み方法は流込みであった。また,繊維配向を 制御するという点においては,くしを用いた打込み方法が有効であると考えられる。





3.6 まとめ

第2章で有効性を確認した棒状バイブレーターおよびくしを用いた打込み方法を用いて,梁試 験体を作製し,曲げせん断実験を行った。その結果,各試験体の最大荷重時の平均せん断応力を 各バッチの等価曲げ強度で除した基準化せん断強度で比較すると,流込みの試験体が最も大きく なり,次いでくしを試験体軸直交方向に移動させる打込み方法の試験体が大きくなった。

試験体のひび割れをデジタルカメラで撮影し、その画像からひび割れ幅を計測した。ひび割れ 幅は、変形が進むに伴い拡大し、最大荷重以降に部材角の増加に比してひび割れ幅の増加割合が 増していった。最大荷重時までは、流込みの試験体のひび割れ幅が最も小さく、打込み方法の違 いによりひび割れ性状にも差が現れた。

試験体断面の繊維配向を調べるために,加力後の試験体をひび割れに沿って2分割し,ひび割 れ面にブラックライトを照射し,繊維配向を観察した。その結果から試験体内の繊維配向を予想 し,基準化せん断強度の差異を考察した。流込みの試験体は全体で見ると試験体軸直交方向に配 向している繊維の割合が多いため,基準化せん断強度が大きくなったと考えられる。また,最も 結果が良い打込み方法は流込みであったが,繊維配向を制御するという点においては,くしを用 いた打込み方法が有効であると考えられる。

第4章 結論

HPFRCCの繊維配向性に大きく影響を及ぼす打込み方法に注目し、棒状バイブレーターとくし を用いた打込み方法を提案した。テストピースレベルの試験体での可視化実験、曲げ試験、さら に梁試験体による部材実験を行い、提案した打込み方法の有効性を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 水ガラスを用いた可視化実験では、バイブレーターを移動させた試験体およびくしを移動させた試験体で高い配向強度を示し、繊維配向性が試験体軸方向に強まることが確認された。
- (2) 切欠き梁の3点曲げ試験では、バイブレーターを施した試験体およびくしを設置した試験体 において、基準となる流込みの試験体と比較して最大荷重および破壊エネルギーが増大した。
- (3) バイブレーターを軸方向に移動させた試験体の最大荷重が最も大きくなり、基準となる流込 みの試験体と比較して2倍程度大きくなった。
- (4) 可視化実験および切欠き梁の曲げ試験で有効性を確認した打込み方法を用いて、せん断破壊 先行型に計画した短スパン梁の曲げせん断試験を行った結果、各試験体の最大荷重時の平均 せん断応力を各バッチの等価曲げ強度で除した基準化せん断強度は、流込みの試験体が最も 大きくなり、次いでくしを試験体軸直交方向に移動させる打込み方法の試験体が大きくなっ た。
- (5) 試験体のひび割れをデジタルカメラで撮影し、その画像からひび割れ幅を計測した結果,打 込み方法の違いがひび割れ性状にも影響を与えた。最大荷重時までは、流込みの試験体のひ び割れ幅が最も小さかった。
- (6) 加力後の試験体をひび割れに沿って2分割して、ひび割れ面の繊維配向を観察し、試験体内の繊維配向を予想し、各試験体の基準化せん断強度の差異を考察した。その結果、流込みの試験体は全体で見ると試験体軸直交方向に配向している繊維の割合が多いため、基準化せん断強度が大きくなったと考えられる。
- (7) 梁のせん断力に対して繊維が有効に働くためには、試験体軸直交方向に配向する繊維の割合 が深く関係しており、最も結果が良い打込み方法は流込みであったが、繊維配向を制御する という点においては、くしを用いた打込み方法が有効であると考えられる。

今後の課題として、せん断強度算定式の確立のために試験体内の破壊メカニズムを明らかにす る必要がある。また、実部材に応用するためには横補強筋を配した時の繊維配向性への影響を確 かめなければならない。今後、それらの関係を検討し、部材実験のデータ蓄積を行うことによっ て、HPFRCC部材の構造性能の評価が可能となる。

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、多くの方々の御指導、御協力を頂きました。指導教員であります 筑波大学准教授 金久保利之先生には,研究に着手する際から実験準備および論文推敲に至るま で,終始懇切丁寧に御指導、御鞭撻を賜りました。また,研究だけでなく就職活動の際にも親身 に相談にのっていただき,多大な助言をいただきました。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,筑波大学助教 八十島章先生には,研究に対 する有益なご意見を頂きましたことを心より感謝致します。特に,副指導教員であります筑波大 学助教 八十島章先生には,実験や研究を行う上で,的確な助言を頂きました。筑波大学技官 小 島篤志氏には,実験を遂行するにあたり,試験体の設置や補助等,多くの御協力を頂きましたこ とを深く感謝致します。

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実験の御協力を頂き ました。特に,同じ研究グループであった元大学院生の月崎良一氏,現大学院生の渡邉啓介氏に は筆者の研究活動の多くの時間を共に過ごし,実験の実施や論文執筆において多くの有益な助言, 助力をいただきました。また,元大学院生である浅野浩平氏,張偉氏,佐野貴之氏,木村太一氏, 鈴木健二氏,五十嵐大騎氏,管祥瑋氏,岡崎仁美氏,元卒論生である武田惇志氏,高田怜史氏,尾 串祥吾氏,在学生である余剣華氏,万子銘氏,佐野直哉氏,墨野倉駿氏,村井凌氏,郝帥氏,藻川 哲平氏,山田大氏,大圖友梨子氏,佐野達彦氏,橋本京介氏,安藤麻衣氏,橋本裕子氏,掛川萌 子氏,銭暁鑫氏には数々の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表すると共に,今後のご活躍 を期待しております。最後に,私事で誠に恐縮ではありますが,陰ながら小生を温かく支えて下 さった家族,そして6年間のつくばでの生活の中で出会えた全ての方々に深く御礼を申し上げま す。

> 2016年1月吉日 宮口 大

参考文献

- 1) 高靭性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(II),日本コンクリー ト工学協会,2004.5
- Li, V. C., Mohamed Maalej : Toughening in Cement Based Composites, Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites, Journal of Cement and Concrete Composites. Vol. 18, No. 4, pp. 239 -249, 1996
- 3) 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
- 4) 月崎良一,宮口大,万子銘,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,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),材料施工,pp.179~184,2014.9
- 5) 日本コンクリート工学会規準 JCI-S-001-2003,「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊 エネルギー試験方法」
- 6) 三笠産業 電直バイブレーター「MGZ-L25A」
 http://www.mikasas.com/Japanese/products/catalogue/new/index book.html
- 7) 土木学会規準 JSCE-F 531-1999「PC グラウトの流動性試験方法」
- 8) 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
- 9) Yu Mu, Toshiyuki Kanakubo: Bending Test of FRC Notched Beam with Various Polymer Fibers, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),材料施工, pp.511~512, 2015.9
- 10) 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