

# 論文 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

宮口 大\*1・渡邊 啓介\*2・金久保 利之\*3

**要旨:** 高性能繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の繊維配向性を制御するために、棒状バイブレーターを用いて強制的に繊維を配向させる打込みを行った。力学性状の変化を把握するための切欠き梁の 3 点曲げ試験、マトリックス中での繊維挙動を把握するための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の可視化実験を行った。棒状バイブレーターを試験体軸方向に移動させた試験体において最大荷重および破壊エネルギーが大幅に増大した。可視化実験では、バイブレーターを移動させた場合の繊維の配向性が、試験体軸方向に強まることを確認した。

**キーワード:** HPFRCC, 繊維配向性, 棒状バイブレーター, 曲げ試験, 可視化実験

## 1. はじめに

高性能繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC : High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites) とは、モルタルマトリックスに短繊維を体積混入率で数% 混入させた材料であり、引張応力下において初期ひび割れ発生後も微細なひび割れを伴いながら耐力が上昇し、擬似歪硬化性状といった特有の挙動を示す、極めて高靱性な材料である。

一方で、HPFRCC の実構造物への適用はあまり進んでいない。その理由の一つとして、マトリックス中の繊維の分散および配向が HPFRCC の力学挙動に強く影響することが挙げられる。HPFRCC の力学挙動は打込み方向および型枠寸法などによって影響を受けることが知られており<sup>1)</sup>、繊維が外力に対して有効な配向にない場合、HPFRCC 本来の性能が発揮されないことが危惧される。しかし、繊維配向を考慮した打込み方法は現在確立されておらず、安定した打込み方法によって繊維挙動を制御する技術が必要である。本研究では、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て強制的に繊維を配向させる打込みを、PVA (polyvinyl alcohol)

繊維を用いた HPFRCC に対して試みた。打込み方法を変動因子とし、力学性状の変化を把握するために切欠き梁の 3 点曲げ試験を行うとともに、マトリックス中での繊維挙動を把握するために、HPFRCC のフレッシュ時の流動性を透明な粘性流体である珪酸ナトリウム水溶液 (以下水ガラス) で模擬した可視化実験を行い、棒状バイブレーターを用いた打込み方法の有効性を確認する。

## 2. 実験概要

### 2.1 打込みの方法

打込みの方法を図-1 に示す。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「流込みのみ (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)」<sup>2)</sup>、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)」<sup>3)</sup> の計 3 種類とする。対象とする試験体は 100mm × 100mm × 400mm の曲げ試験体である。また使用した棒状バイブレーターの諸元は、径 24.5mm、振幅 1.6mm、振動数 200~258Hz である。これらの打込み方法は切欠き

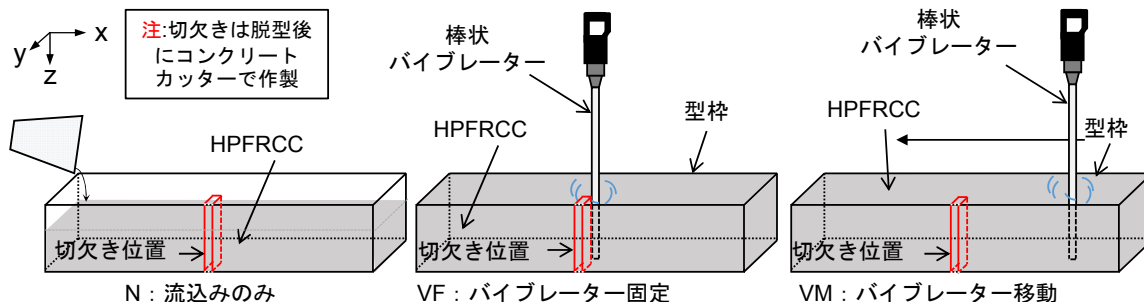


図-1 打ち込みの方法

\*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 大学院生 (学生会員)

\*2 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 大学院生

\*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)

梁の3点曲げ試験および可視化実験ともに共通であり、全ての試験において統一した。

## 2.2 切欠き梁の3点曲げ試験の概要

### (1) 使用材料

使用した繊維の形状および力学性能を表-1に、HPFRCCの調合計画を表-2に示す。PVA繊維の体積混入率は2.0%とした。フレッシュ時の空気量、曲げ試験実施時材令の圧縮強度、弾性係数を表-3に示す。なお、本研究で対象としたHPFRCCは自己充填性を有している。

### (2) 試験方法

試験体形状を図-2に示す。切欠きの寸法は深さ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。変動因子は図-1に示す打込み方法とし、試験体数は各6体とした。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)<sup>2)</sup>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を算出するための試験体中央部(100mm)の軸方向変位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-1中に示す通りである。

## 2.3 繊維配向可視化実験の概要

### (1) 使用材料

繊維配向可視化実験では、流動性をHPFRCCのマトリックスと同等となるように、土木学会規準「PCグラウトの流動性試験方法」(JSCE-F 531-1999)<sup>3)</sup>によるJP漏斗の流下時間を指標として調整した水ガラスを用いた(表-4)。また、繊維配向性の観察を容易にするため、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、ターゲット繊維の配向を観察した<sup>4)</sup>。ナイロン繊維の弾性係数はPVA繊維より1オーダー小さいが、水ガラスの流し込み後に大きく湾曲したりする様子はなく、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。

### (2) 実験方法

繊維配向可視化実験の型枠は透明なアクリル板で作製し、型枠の開口部端部から水ガラスを流し込んだ。撮影状況を図-3に示す。型枠正面(zx平面)および上面(xy平面)をデジタルカメラで撮影した。変動因子は切欠き梁の3点曲げ試験同様、図-1に示す打込み方法とし、各シリーズについて水ガラスの打込み、撮影を3回ずつ行った。

### (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、画像解析を行った。解析の対象は、ひび割れ面を想定し、試験

表-1 使用繊維の形状および力学性能

使用繊維	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA	12.0	0.1	1.30	1200	28.0

表-2 HPFRCCの調合 (kg/m<sup>3</sup>)

W	C	S*	FA	Fiber	Ad	Thickener
380	678	484	291	26	6	1.91

\*7号珪砂

表-3 HPFRCCのフレッシュ性状および圧縮性能

体積混入率 (%)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
2.0	6.6	34.6	15.0

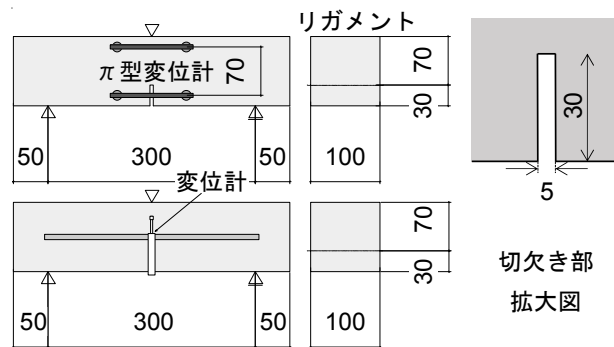


図-2 試験体形状 (mm)

表-4 使用した水ガラス

質量比 水ガラス：水	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	温度 (°C)	JP漏斗流下時間 (秒)
12：1	1.62	25	33.6

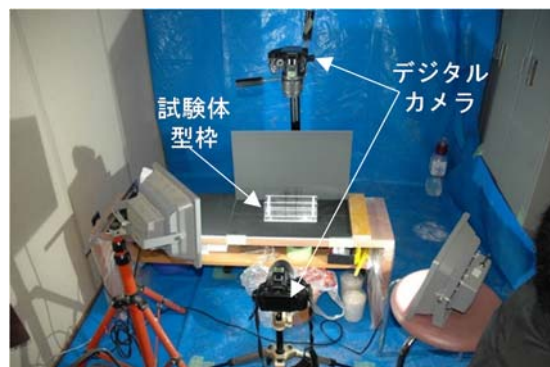


図-3 撮影状況

体中央の18mm(繊維長の1.5倍)区間内に存在する繊維とした。画像解析の手順を図-4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)。

### 3 実験結果

#### 3.1 切欠き梁の3点曲げ試験

曲げ試験体の最終破壊状況の例を図-5に、破断面の例を図-6に示す。破壊面は、抜け出した繊維が観察しやすい側面から撮影した写真を掲載している。図-5より、各シリーズとも大きなひび割れが1本入った後に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。図-6より、各シリーズ間で試験体軸方向の拔出し繊維量の違い

が見られ、特にVMシリーズの試験体では、N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よく観察された。

実験結果を表-5に示す。ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) は、図-2に示す $\pi$ 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。荷重-荷重点たわみ関係を図-7に示す。破壊エネルギー $G_F^{LPD}$ は、荷重-荷重点たわみ関係より、式(1)によって算出した。

$$G_F^{LPD} = \frac{W_0}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここで、

$W_0$  : たわみ15mmまでの荷重-荷重点たわみ曲線下の面積

$A_{lig}$  : リガメント面積

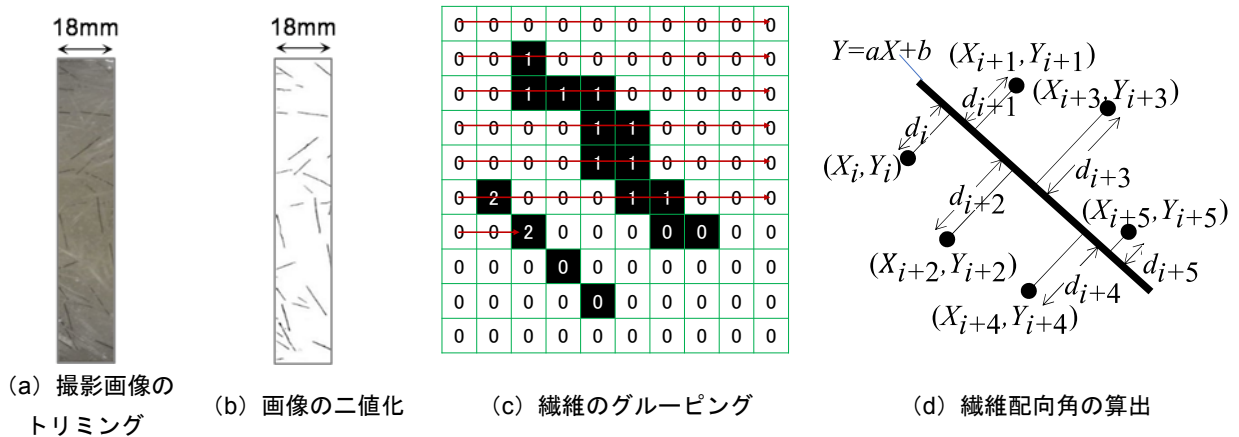


図-4 画像解析の手順

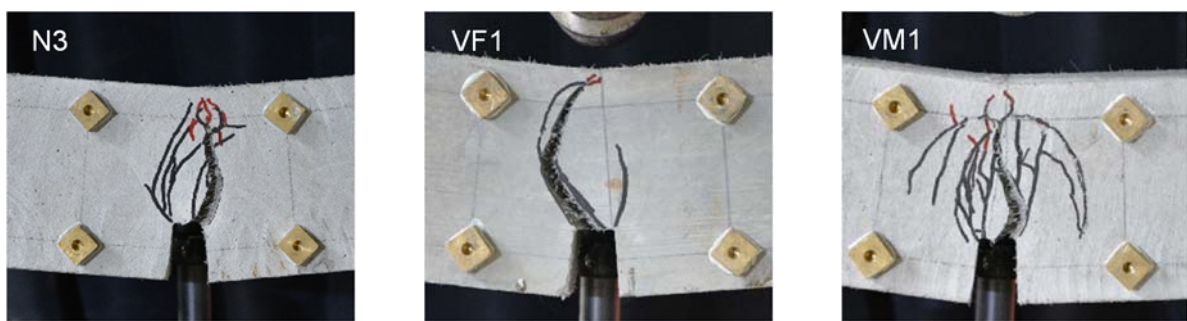


図-5 破壊状況の例

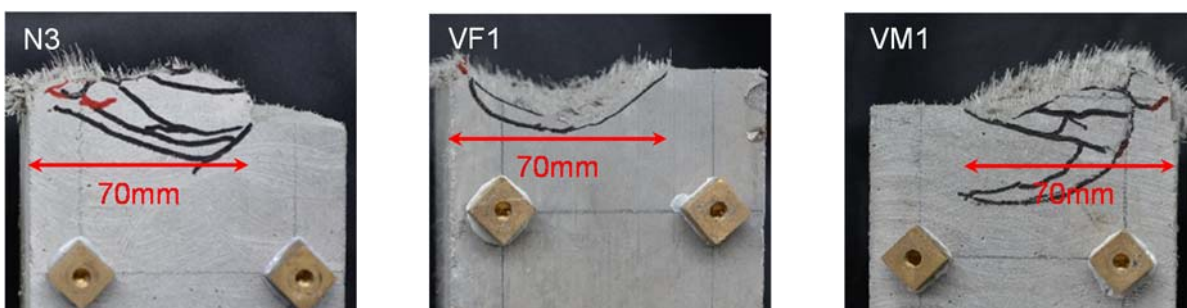


図-6 破断面の例

表-5 曲げ試験の実験結果一覧

試験体名	打込み方法	最大荷重 (kN)		最大荷重時の CMOD (mm)	最大荷重時の 荷重点たわみ (mm)	破壊エネルギー (N/mm)	
		平均 (標準偏差)				平均 (標準偏差)	
N1	流込みのみ	4.53	4.33 (0.28)	-	1.08	4.15	3.52 (0.34)
N2		4.14		2.19	1.69	3.58	
N3		3.99		2.24	1.35	3.47	
N4		4.14		2.58	1.95	3.17	
N5		4.50		2.65	1.89	3.26	
N6		4.70		2.11	1.49	3.51	
VF1	バイブレーター 固定	6.20	5.85 (0.98)	1.84	1.34	4.46	4.67 (1.55)
VF2		6.46		1.61	1.14	4.21	
VF3		5.95		1.66	1.16	4.46	
VF4		6.89		2.71	2.13	7.65	
VF5		5.57		1.93	1.31	4.24	
VF6		4.07		2.01	1.44	3.02	
VM1	バイブレーター 移動	9.05	9.03 (0.23)	1.40	0.98	10.2	8.81 (1.13)
VM2		9.05		3.15	2.32	9.01	
VM3		9.08		2.72	1.84	8.20	
VM4		8.72		3.71	2.50	8.69	
VM5		9.41		2.55	1.81	9.74	
VM6		8.88		3.45	2.40	7.03	

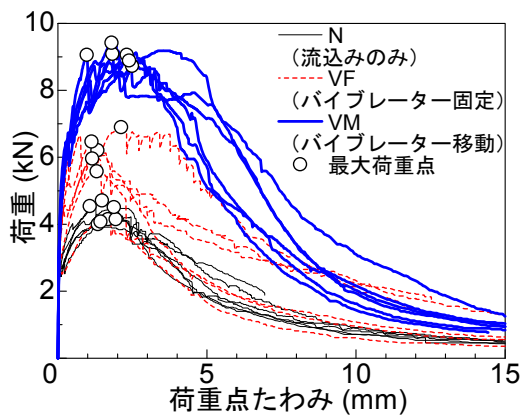


図-7 荷重-荷重点たわみ関係

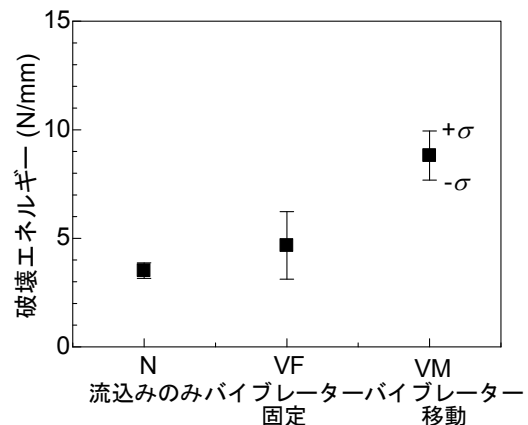


図-8 破壊エネルギー

表-5 および図-7 より、VM シリーズの試験体の最大荷重が最も大きく、N シリーズに比べ平均で 2 倍程度大きい。各シリーズ試験体の破壊エネルギーの比較を図-8 に示す。破壊エネルギーも VM シリーズ試験体で最も大きい。打込み時のバイブレーター使用により繊維の配向性に変化が起き、架橋効果が向上したと考えられる

### 3.2 繊維配向可視化実験

各シリーズについて水ガラスの打設、撮影を 3 回ずつ行い、繊維配向角分布度数を合計した、度数分布を作成

した。各シリーズの繊維配向角分布を図-9 に示す。なお、座標系は図-1 と同一であり、繊維配向角の定義を図-10 に示す。繊維配向角分布を定量的に評価する手法として、図-11 に示す配向強度  $k$  と、主配向角  $\theta_r$  ( $-45^\circ \leq \theta_r \leq 45^\circ$ ) を採用する<sup>5)</sup>。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  $\theta_r$  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-11 上図に

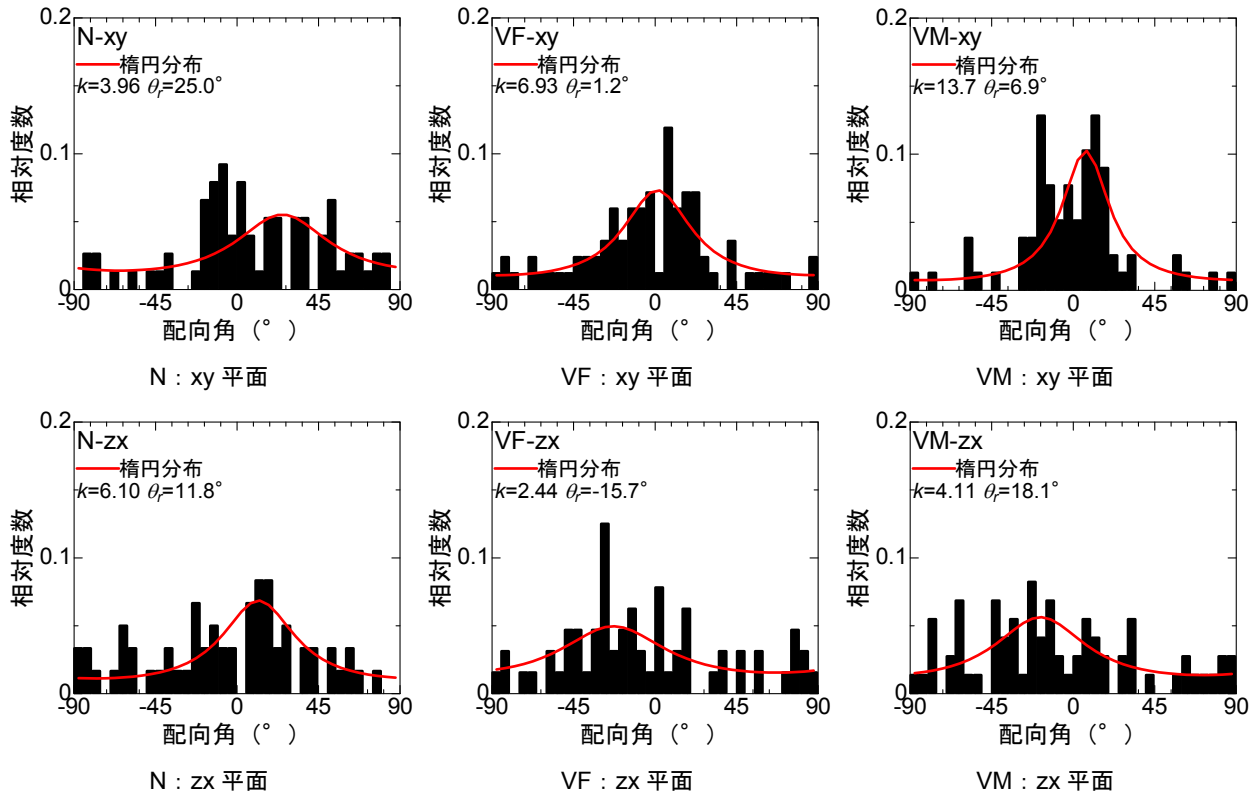


図-9 繊維配向角分布

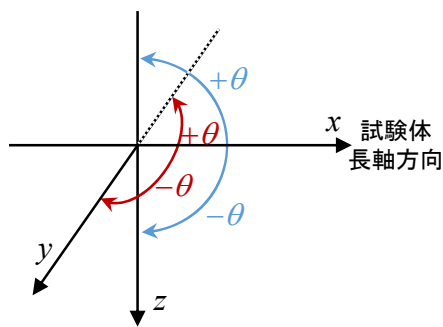


図-10 繊維配向角の定義

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  $0^\circ$  付近でピークを持つ分布となると、図-11 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。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  $\theta_r$  の値を図-9 中に示した。

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-12 に、配向強度-打込み方法関係を図-13 に示す。 $xy$  平面ではパイプレーターを使用することで配向強度の値が大きく、かつ主配向角も  $0^\circ$  に近づき、マトリックス中の繊維が試験体軸方向へ配向する傾向が強まることが分かる。一方、 $zx$  平面では各シリーズ間の配向強度の差異は小さい。

$zx$  平面の画像により得られた繊維配向角分布は、図-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。すなわち、打込み時にパイプレーター周辺の繊維がパイプレーター棒に直交する面に二次元状（パイプレーターを中心とした円の接線方向）に配向しやすくなり、パイプレーターを固定した場合には型枠付近の繊維の軸方向への配向性が強まると考えられる。さらにパイプレーターを軸

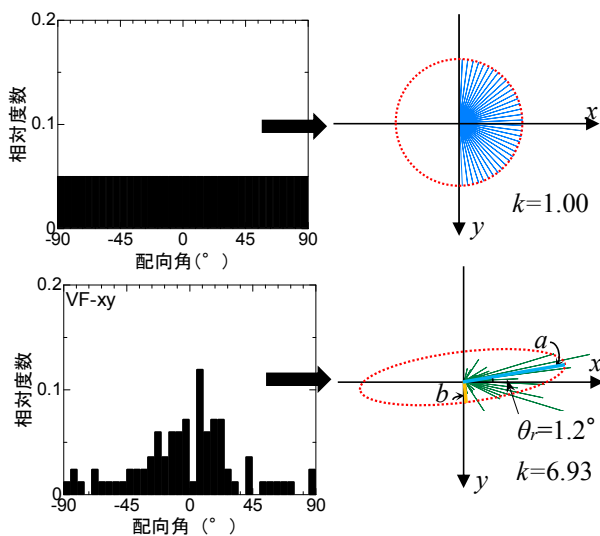


図-11 楕円形状分布の定義

方向に移動させることによって、試験体全体に渡って軸方向に配向しやすくなると考えられる。

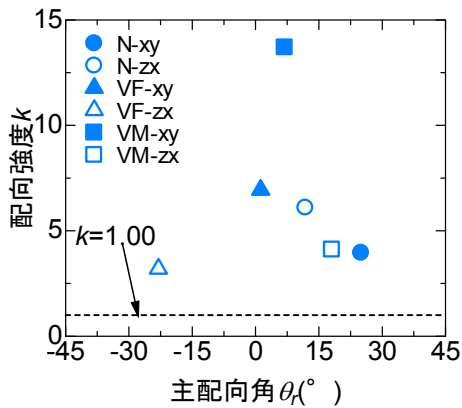


図-12 配向強度－主配向角関係

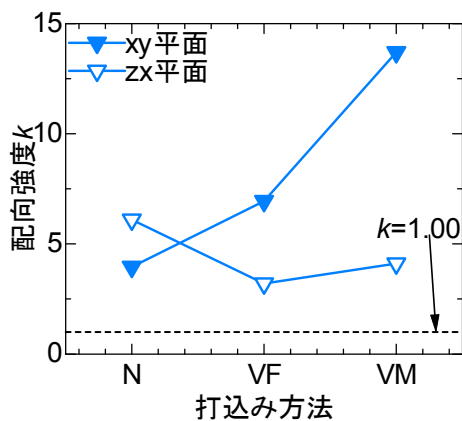


図-13 配向強度－打込み方法関係

#### 4. まとめ

- (1) バイブレーターを施した試験体において繊維配向性に変化が起き、繊維の架橋効果が向上したため、切欠き梁の曲げ試験における最大荷重および破壊エネルギーが向上した。
- (2) 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は、バイブレーターを施さない試験体と比較して2倍程度大きくなった。
- (3) マトリックスを水ガラスによって模擬した繊維配向可視化実験を行った結果、バイブレーターを施した試験体の配向性が試験体軸方向に強まることが確認された。

#### 謝辞

本研究は科学研究費助成事業（基盤研究(B)課題番号26289188）によっている。

#### 参考文献

- 1) 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井覚: HPRCCの一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響, コンクリート年次論文集, Vol25, No.1, pp.281-286, 2003.7
- 2) 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)
- 3) 土木学会規準「PC グラウトの流動性試験方法」(JSCE-F 531-1999)
- 4) 月崎良一, 宮口大, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.179-184, 2014.9
- 5) 浅野浩平, 金久保利之: HPRCCにおける繊維の配向性が引張性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第692号, pp.1673-1678, 2013.1