

# 論文 短繊維の配向に伴う繊維補強セメント系材料の曲げ特性のばらつき

小倉 大季\*1・高橋 圭一\*2・栗田 守朗\*3

**要旨:** 繊維補強セメント系材料の繊維配向に伴う曲げ挙動のばらつきを調べるために、2種類のフロー値を示す繊維補強モルタルを用いて平板を作製し、平板から切出した試験体の曲げ載荷を行った。さらに、繊維の分布およびばらつきを評価することを目的として、X線CT撮像により繊維の3次元座標値の検出を行った。その結果、フロー105mmの配合でモルタル投入口を移動させながら打込みを行った平板は、フロー205mmの配合と比較して、曲げ特性のばらつきが小さいことが確認された。また、試験体中の全繊維をCTデータから検出したところ、ひび割れ発生位置によってはひび割れを跨ぐ繊維数が2倍以上異なることが確認された。

**キーワード:** 短繊維, 配向性, X線CT, 3次元画像, 切欠きはりの3点曲げ載荷

## 1. はじめに

近年、ひずみ硬化型セメント系材料 (SHCC) をはじめとする短繊維補強セメント系複合材料 (以下, FRCC) の開発・適用が幅広く進められている。これらの複合材料のうち、スランプで管理する従来の鋼繊維補強コンクリートの場合は、構造物中の繊維はランダムに配向するとされているが、フロー値が150mm以上のFRCCの場合は、流動方向に伴う配向性が存在することが実験により確認されている<sup>1),2)</sup>。FRCC中の繊維配向は硬化後の力学性能に影響を与える場合もあり<sup>3)</sup>、配向状態の定量的な把握とともに力学性能に及ぼす影響を評価することが望まれる。また、筆者ら<sup>4)</sup>は、短繊維を離散化したメゾスケール解析手法を開発しており、繊維の配向情報を取得できれば、数値解析から繊維1本1本の拔出し挙動や破断を追跡でき、配向がFRCCの破壊挙動に与える影響をより詳細に検証できる可能性がある。

本研究では、短繊維の配向に伴う繊維補強モルタルの曲げ挙動のばらつきを調べるために、2種類のフロー値を示す繊維補強モルタルを用いて平板を作製し、平板から切出した試験体の曲げ載荷を行った。さらに、ひび割れ面の観察により面的な繊維の分布状況を、X線CT撮像により試験体中の繊維の3次元座標値を取得した。それらのデータをもとに、繊維の分布・配向が繊維補強モルタルの曲げ挙動に与える影響について考察を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

本研究で対象とした繊維補強モルタルの配合を表-1に示す。混入した繊維は、径0.7mm、長さ30mmのポリプロピレン繊維であり、体積混入率は1.0%とした。本実験では、混和剤の添加量のみを調整することで、フロー

が異なる2種類の配合 (配合AおよびB) を作製した。練上がり直後、配合A, Bは、それぞれ205, 105mmのフロー値を示した。

本実験で用いた試験体は、330×60×1800mmの平板試験体と60×60×240mmの曲げ供試体である。各配合で、平板試験体を1体、曲げ供試体を2体作製した。配合Aの場合、図-1に示すようにモルタル打込み口を固定し、平板の片側から流動させて平板試験体を製作した。使用したモルタル投入バケットの打込み口はφ100mmであり、型枠を充填するのに要した時間は10分程度であった。配合Bの場合、自己充填性を有さないため、一般的なスランプで管理するコンクリートを打ち込むように、投入口を移動させながら打ち込む方法を採用した。また、配合Bについては、打込み後に型枠パイプレータを補助的に使用して、締固めを行った。打込み後は、両配合ともに試験体を温度35°Cの環境下で24時間静置し、その後、温度85°C、湿度95%の環境下で24時間の蒸気養生を行った。養生後に得られた圧縮強度、ヤング係数は、配合Aでは101MPa, 38.9GPa, 配合Bでは100MPa, 37.6GPaであった。

### 2.2 切出し試験体の曲げ載荷実験

平板試験体の力学性能の評価を目的として、平板試験体から切出した試験体 (以下、切出し試験体) の曲げ載

表-1 繊維補強モルタルの配合

配合	W/C	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				繊維
			水	セメント*1	細骨材	混和剤*2	
A	0.20	3.0	253	1265	782	10.1	9.1
B						6.3	

\*1: シリカフェュームセメント

\*2: 高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)

\*1 清水建設 (株) 技術研究所 修士(工) (正会員)

\*2 清水建設 (株) 技術研究所

\*3 清水建設 (株) 土木技術本部 博士(工) (正会員)

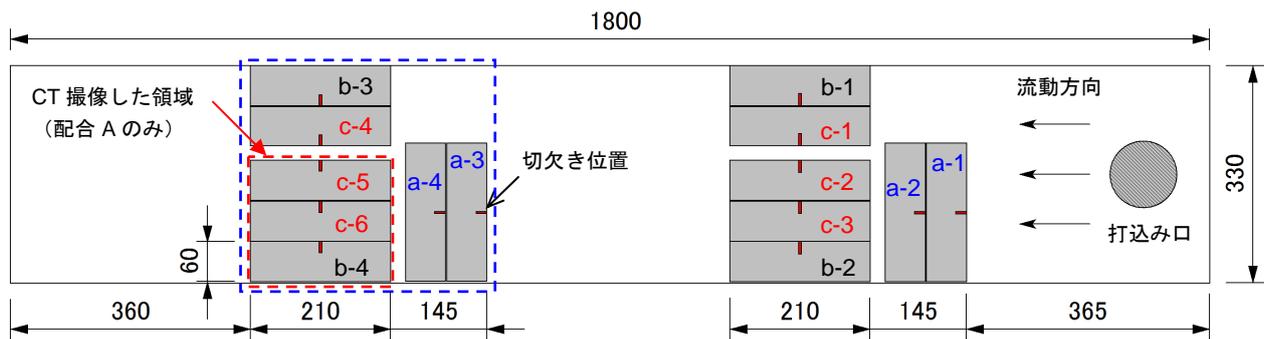


図-1 試験体の概要と切出し試験体の位置

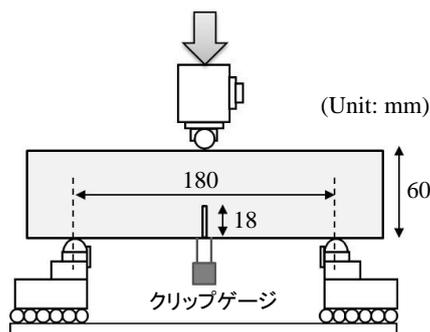


図-2 切欠きはりの3点曲げ载荷試験の概要

荷実験を行った。切出し位置は、図-1 に示すとおりであり、流動方向に対して垂直に切出した試験体を a シリーズとし、流動方向に対して水平に切出した試験体のうち、型枠（側枠）近傍に位置する試験体を b シリーズ、平板中央に位置する試験体を c シリーズとした。試験体の寸法は、 $60 \times 60 \times 210\text{mm}$  である。

切出し試験体は、図-1 に示す位置に高さ 18mm の切欠きを設けた後、図-2 に示す3点曲げ载荷実験を行い、ひび割れ肩口開口変位（以下、CMOD）を計測した。载荷方法は、JCI 規準<sup>5)</sup> に準拠して行った。ただし、試験体断面の高さおよび幅は、60mm とした。

### 2.3 载荷実験後のひび割れ面の観察

ひび割れ面の繊維分布が繊維補強モルタルの曲げ特性に及ぼす影響を評価するために、曲げ試験後の破断面（以下、ひび割れ面）で観察できる繊維を目視ならびに光学顕微鏡により検出した。まず、目視によりひび割れ面に存在する繊維の数を算定し、その後、光学顕微鏡により繊維 1 本 1 本に対して破断の有無を評価した。なお、繊維が破断している場合は、試験体のもう一方のひび割れ面に繊維の切れ端が存在する。この切れ端を検出し、ダブルチェックを行うことで、繊維破断の判定精度を高めた。

### 2.4 X 線 CT 撮像による繊維配向の評価

配合 A の平板試験体については、平板中の繊維の分布・配向をより詳細に分析することを目的として、曲げ载荷する前に、X 線 CT 撮像により繊維の 3 次元座標値

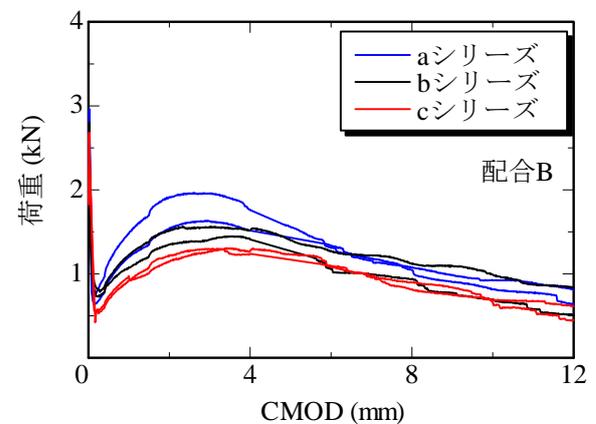
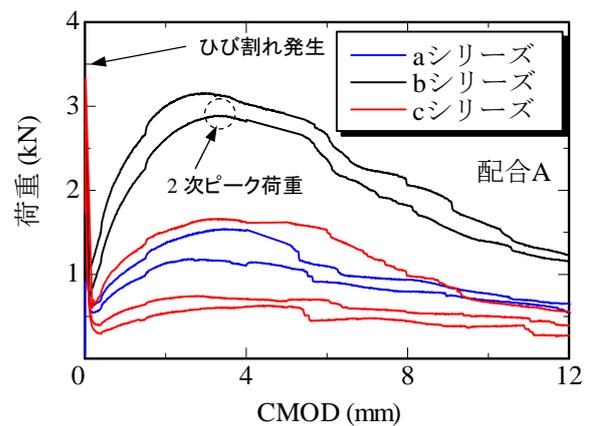


図-3 切出し試験体の荷重-CMOD 曲線  
（上：配合 A、下：配合 B）

を抽出した。撮像は、X 線エネルギーが 1MeV の X 線 CT 装置を用いた。短繊維を明瞭に判別するためには、分解能を上げる必要があり、切出し後の試験体 ( $60 \times 60 \times 210\text{mm}$ ) を 1 回の撮像範囲とし、図-1 の赤点線の範囲の 3 体の切出し試験体を X 線 CT 撮像に供した。撮像後、3 次元画像解析ソフトウェアを用いて、CT 断層画像から繊維 1 本 1 本を検出し、3 次元座標値を取得した。さらに、得られた座標値データの描画ならびにデータ処理をすることで、繊維の分布とばらつきに関する検証を行った。

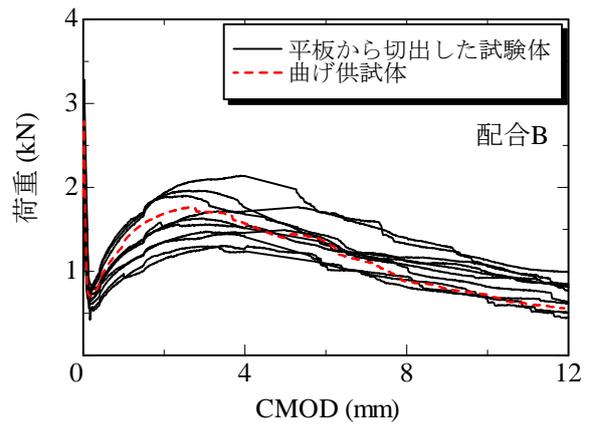
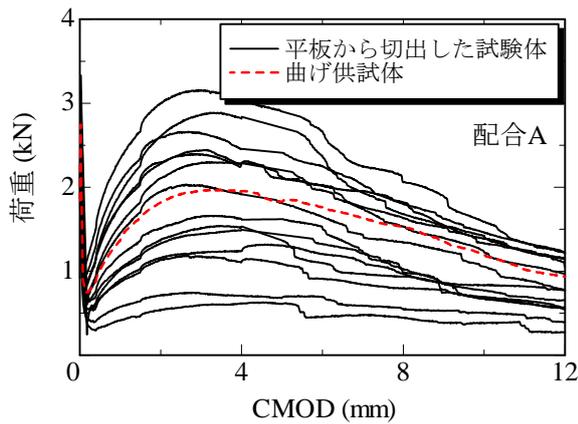


図-4 曲げ供試体と平板から切出した試験体との曲げ挙動の比較（左：配合 A，右：配合 B）

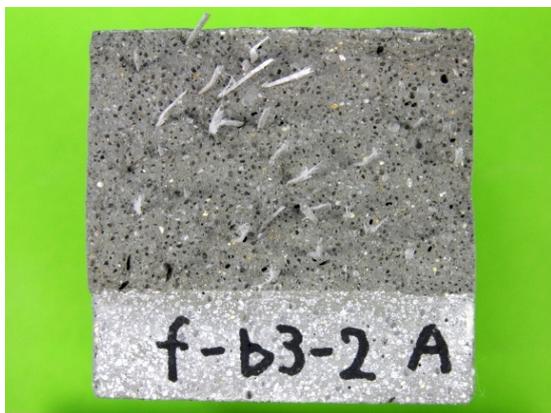


図-5 ひび割れ面の繊維分布の一例

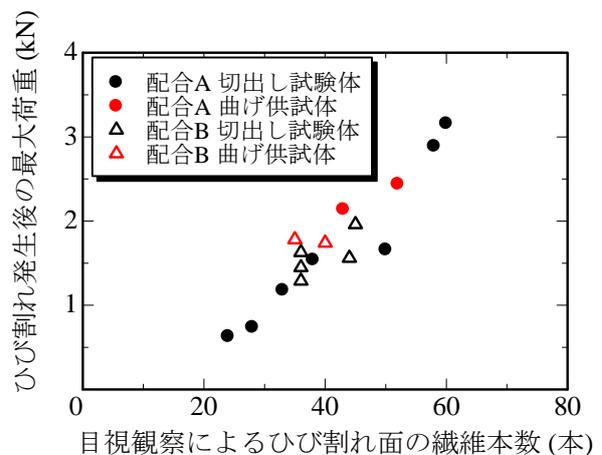


図-6 目視観察によるひび割れ面の繊維本数とひび割れ発生後の最大荷重の関係

### 3. 実験結果

#### 3.1 切出し試験体の曲げ挙動

図-1 の青点線で囲まれた領域の試験体における荷重-CMOD 曲線を図-3 に示す。いずれの試験体も曲げひび割れ発生後、一旦荷重が低下するものの、CMOD が 0.3mm 以上になると荷重が再上昇している。配合 A では、切出し位置に伴い、ひび割れ発生後の最大荷重（以下、2 次ピーク荷重）に差異が生じており、流動方向に対して垂直に切出した a シリーズに比べ、型枠近傍に位置し、流動方向に対して水平に切出した b シリーズが 3 倍程度の荷重を負担していることが確認される。また、流動方向に対して水平に切出した試験体の中でも、型枠近傍の b シリーズと比較して、平板中央の c シリーズは、2 次ピーク荷重が小さく、顕著な差異が認められた。一方、配合 B の場合、配合 A と比較して切出し位置に伴う曲げ挙動の差異は小さいことが確認された。

図-4 は、全ての切出し試験体から得られた荷重-CMOD 曲線である。平板製作時に採取した 60×60×240mm の曲げ供試体から得られた結果も併せて示した。曲げ供試体の結果は、2 体の試験データを用いて、任意

表-2 ひび割れ面の繊維本数と破断率（配合 A）

試験体	ひび割れ面の繊維本数 $N_f$ (本)	破断した繊維本数 $N_{fu}$ (本)	破断率 $N_{fu}/N_f$
a-3	33	8	0.24
a-4	38	10	0.26
b-3	58	13	0.22
b-4	60	11	0.18
c-4	50	8	0.16
c-5	28	7	0.25
c-6	24	8	0.33

の同一変位に対する荷重の平均値をとった平均化処理後の曲線である。配合 B と比較して、配合 A における切出し試験体の曲げ挙動は、ばらつきが大きく、2 次ピーク荷重が曲げ供試体の 1/3 倍および 2 倍程度である切出し試験体も存在した。これは、繊維がモルタル中でランダムに配向せず、繊維の配向・分散が力学性能に影響を及ぼしている可能性が考えられる。一方、フロー値を小さ

くした配合 B の切出し試験体では、ばらつきが小さく、曲げ供試体の 2 次ピーク荷重との差異は 3 割程度に抑えられた。切出し位置および方向によらず曲げ挙動に大きな差がみられなかったため、繊維がランダムに近い分散をしたものと考えられる。

### 3.2 ひび割れ面の観察による繊維分布の評価

図-5 は、曲げ試験後のひび割れ面における繊維の分布状況である。目視によりひび割れ面に存在する繊維の数を、光学顕微鏡により繊維の破断の有無を調べた結果が、表-2 である。表中の破断率の定義は、ひび割れ面で観察された繊維のうち、破断した繊維の割合とした。表には、配合 A の結果のみを示す。

配合 A の切出し試験体の場合、ひび割れ面に存在する繊維本数は、各シリーズで差異が大きい。ここで、算定したひび割れ面の繊維本数（以下、架橋本数）と前節の載荷実験で得られたひび割れ発生後の 2 次ピーク荷重との関係を考察するため、両者の関係を図-6 にプロットした。図には、配合 B および曲げ供試体の結果も併せて示す。図より、配合や試験体の種類によらず架橋本数と 2 次ピーク荷重には相関性があることがわかる。この結果は、本実験における繊維補強モルタルの場合、その曲げ特性はひび割れ面を跨ぐ繊維本数に大きな影響を受けることを示唆する。また、配合 B の切出し試験体における架橋本数は、36~45 本の範囲であり、配合 A と比較し

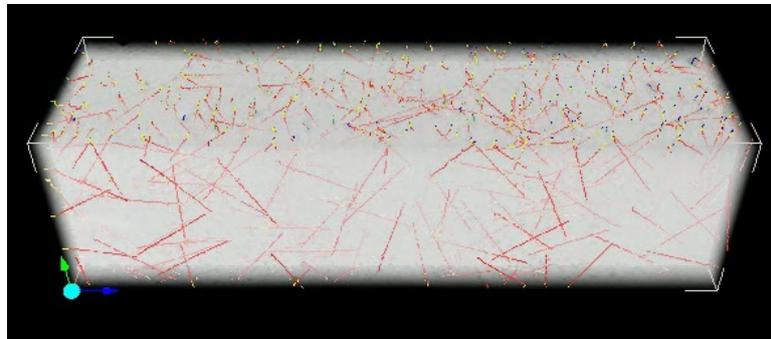
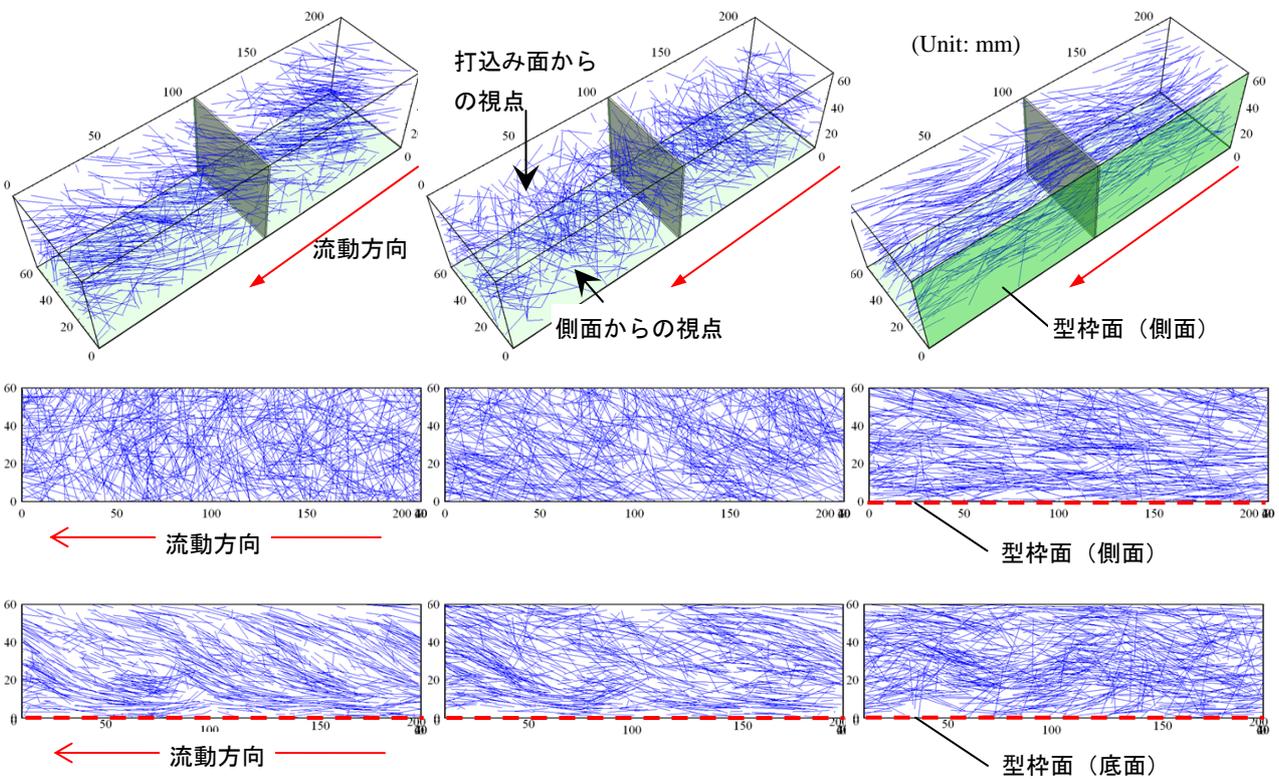


図-7 CT データから検出した繊維分布の一例



(a) 配合 A, c-5 試験体

(b) 配合 A, c-6 試験体

(c) 配合 A, b-4 試験体

図-8 CT 画像から抽出された繊維配向（上：斜め上面からの視点，中：打込み面からの視点，下：側面からの視点）

て切出し位置に伴う差異が小さく、配合 A の a シリーズに近い架橋本数であった。

表-2 より繊維の破断率は、配合 A では 16~33% の範囲であることがわかり、本研究で扱ったモルタルと繊維の組合せの場合、繊維の破断と抜出し挙動が共に生じて荷重低下に至っていることが確認された。配合 B の場合も、破断率は 16~31% の範囲であったため、荷重低下のメカニズムは同一であると考えられる。

### 3.3 CT データを用いた繊維配向の評価

前節では、ひび割れ面における面的な繊維分布を評価したが、CT データを用いて試験体中の繊維位置を空間情報として取得することで、繊維の配向ならびにばらつきをより詳細に検証し、力学性能に及ぼす影響を考察した。

CT データから検出した繊維の分布状態の一例を図-7 に示す。赤い線状のものが短繊維である。本研究で使用したポリプロピレン繊維はモルタル中で湾曲していないことが確認できる。図-8 は、図-7 のデータから取得した繊維の始点と終点座標値を用いて、配合 A の c-5、

c-6、b-4 試験体内の繊維を描画した結果である。

繊維はランダムに分散せず、打込み時のモルタルの流れに伴って配向されていることが確認される。図-8 の上段における緑色で着色した面は、型枠面に相当する。図-8 の中段は、打込み面からの視点で描画した図であり、側面型枠の近傍の b-4 試験体では、多くの繊維が型枠と平行に配向していることが確認できる。一方、側面の型枠から 60mm 以上離れた試験体である c-5 および c-6 では、流動方向と垂直に配向している繊維も確認される。型枠近傍において繊維が型枠面に平行に配向しやすいことは、従来から知られているせき板効果である。

側面からの視点で描画した図が図-8 の下段である。c-5 試験体では、型枠の底面から斜め上方に繊維が配向していることが観察される。モルタルの流れに伴い配向したものと考えられる。

さらに定量的に繊維の配向を検証するため、特定の断面を跨ぐ繊維の本数および配向角度を算出した。本数の算出は図-9 に示す面 1~9 に対して、配向角度の算出は面 5 に対して行った。それぞれの面は、試験体を長手方

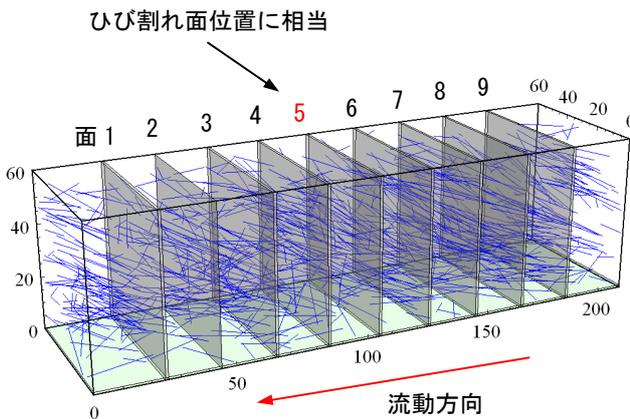


図-9 架橋本数と配向角度を算出した面

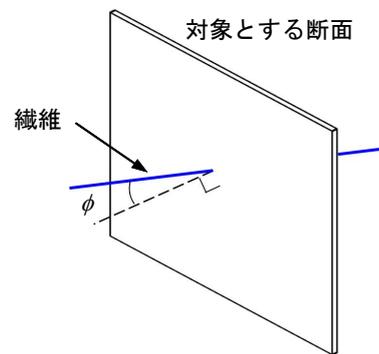


図-10 配向角度の定義

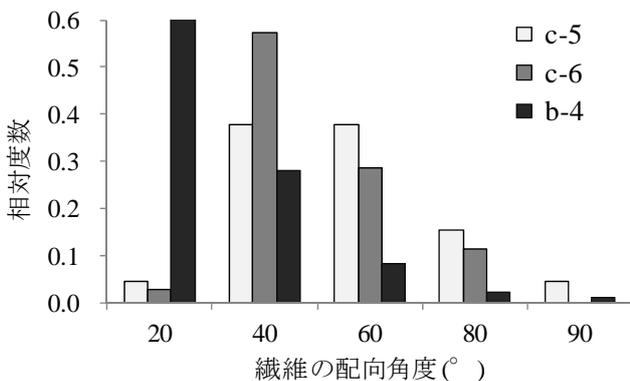


図-11 配向角度の相対度数分布

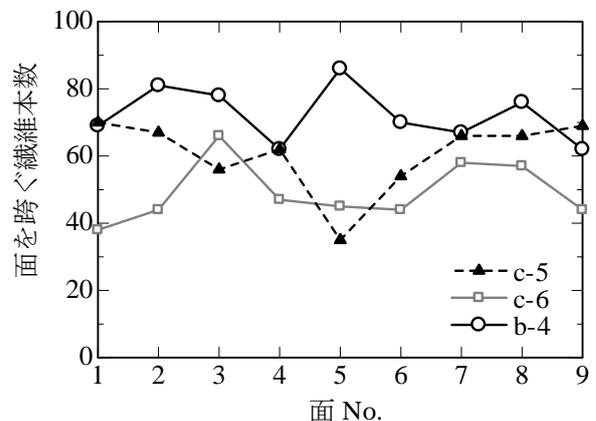


図-12 各面を跨ぐ繊維本数

向に 10 等分する切断面となり、面 5 は 3.1 節での曲げひび割れの位置とほぼ一致する。なお、配向角度は、図-10 に示すように定義し、断面の法線ベクトルと繊維配向方向のベクトルとの内積から求めた。断面に直交して配向された場合は、配向角度  $0^\circ$  となる。

面 5 を跨ぐ繊維 1 本 1 本の配向角度を算定し、相対度数分布として整理した結果が、図-11 である。図より、側面の型枠近傍の b-4 試験体では、配向角度  $20^\circ$  以下の繊維が 6 割を占めていることがわかり、c-5 および c-6 試験体の結果からは、型枠から離れるほど配向角度の大きい繊維が増加する傾向が確認される。これは、前述したせき板効果によるものであると考えられる。

図-12 に、各面を跨ぐ繊維の本数を整理した。b-4 試験体は、他の試験体と比較して面を跨ぐ繊維本数が多いことが確認される。これは、せき板効果により対象としている面を跨ぎやすい方向（配向角度  $0^\circ$  に近い方向）に繊維が配向したことが要因であると考えられる。この効果によって、図-3 および表-2 で示したとおり、流動方向に対して水平に切出し、型枠（側枠）近傍に位置する b シリーズの架橋本数が増加し、ひび割れ発生後の最大荷重が他の試験体と比較して大きくなったと考えられる。なお、配合 B の平板の場合、前述したとおり CT 撮像を行っていないため、せき板効果の存在を直接的に確認することができなかったが、図-6 で示したとおり配合 A と比較して切出し位置に伴う架橋本数の差異が小さいことから、せき板効果の影響が小さかったと考えられる。

また、c-5 試験体に着目すると、面 5 の架橋本数 35 に対して、面 1 では 71 であり、繊維本数が同一供試体内でも 2 倍以上異なる結果であった。この結果と図-6 の結果を併せて考えると、同一の試験体でもひび割れ位置が変化すれば、曲げ挙動が大きく変化する可能性を示唆する。これらの局所の繊維の分布、ばらつきが構造全体の挙動に及ぼす影響を明らかにすることは、今後の課題である。

#### 4. まとめ

本研究では、2 種類のフロー値を示す繊維補強モルタルを用いて平板を作製し、平板から切出した試験体の曲げ載荷を行うとともに、X 線 CT 撮像による繊維の 3 次元座標値の検出を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で対象とした配合・打込み方法の場合、ひび割れ面を跨ぐ繊維本数と曲げひび割れ発生後の最大荷重に相関性があることが確認された。
- (2) 本研究で対象とした配合の場合、曲げ挙動のばらつきはフロー値に大きな影響を受けることが明らかとなった。フロー値が 205mm の配合の場合、平板製作時に採取した曲げ供試体と比較して、ひび割れ発生後の最大荷重が 1/3 倍および 2 倍程度となる切出し試験体が存在した。フロー値が 105mm の配合の場合は、曲げ供試体との差異は 3 割程度に抑えられた。
- (3) X 線 CT データを用いて  $60 \times 60 \times 210$ mm の試験体中の全繊維を検出し、分析したところ、ひび割れの発生位置によっては、ひび割れを跨ぐ繊維本数が 2 倍以上異なる可能性が確認された。

#### 参考文献

- 1) 浦野真次，後藤茂，栗田守朗：ECL 工法における鋼繊維補強コンクリートの充填性に関する検討，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-138，pp.276-277，2001
- 2) 周波，Ha Duy Nhi，内田裕市：超高強度繊維補強コンクリートの曲げ供試体中の繊維の配向，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.268-273，2012
- 3) 小倉大季，高橋圭一，栗田守朗，国枝稔：短繊維補強セメント系材料の繊維配向が力学性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.295-300，2013
- 4) 小倉大季，国枝稔，中村光，吉武謙二：短繊維を離散化したメゾスケール解析による繊維補強コンクリートの剥落挙動解析，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.12，pp.417-424，2012
- 5) JCI 規準：切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法