

論文 かき混ぜによる超高強度繊維補強コンクリート中の繊維の配向の変化

平岩 修人*1・周 波*2・河村 有紀*3・内田 裕市*4

要旨: 標準曲げ供試体の型枠に打込んだ超高強度繊維補強コンクリート (UFC) をかき混ぜた場合の繊維の配向の変化について検討するために、可視化モデルコンクリートを用いた観察、試験体切断面の画像解析、X線CTによる観察をそれぞれ行った。その結果、UFC 中で突き棒を移動させることで繊維は突き棒の移動方向に配向することが示された。また、突き棒を型枠の長手方向に往復移動させると繊維は試験体幅方向の中央付近で鉛直に配向する傾向が確認された。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 繊維の配向

1. はじめに

短繊維補強コンクリート (FRC) に関する研究は古くから行われており、ことに最近ではひずみ硬化型のセメント複合材 (SHCC) や超高強度繊維補強コンクリート (UFC) が開発、実用化され、国内外において活発に研究が行われている。

FRC の力学特性において、マトリクス中の繊維の分散・配向が強く影響することが認識されているが、繊維の分散・配向については未だ不明な点が多い。その理由はマトリクス中の繊維の分散・配向を観察することが困難なうえ、打込み時に繊維の分散・配向を制御する技術が存在しないためであると考えられる。また、コンクリート中の繊維の分散・配向に影響する要因として、コンクリートの流動特性、打込み方法、型枠せき板効果、供試体の寸法等が挙げられ、特にコンクリートの流動特性が繊維の配向・分散に大きく影響するとされている¹⁻³⁾。

本研究では、打込み時の繊維の配向の制御について検討するために、実際の現場において型枠中の UFC を突き棒を用いてかき混ぜることを想定して、かき混ぜる前後の繊維の配向の変化について検討した。本実験では、100×100×400mm 標準曲げ供試体の型枠に UFC を打込み、突き棒を用いて UFC をかき混ぜた試験体を作製し、透明な粘性流体でモデル化した可視化モデルコンクリート⁴⁾を用いた観察、試験体切断面の画像解析、X線CTによる観察を行い、繊維の配向を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に UFC の材料および配合を示す。本実験で使用した UFC は市販のプレミックスタイプのものであり、主

に結合材から成るプレミックス材、細骨材、鋼繊維および専用減水剤で構成されている。繊維混入量は 2.0% である。また、打込み時の 0 打フローが 280mm となるように水および減水剤の量を調整した。

2.2 試験体の種類

100×100×400mm 標準曲げ供試体の型枠に UFC を高さ 90mm まで打込んだ。型枠の高さ 100mm に対して試験体の高さを 90mm としたのは、UFC をかき混ぜた際に、型枠からこぼれないようにするためである。

表-2 に試験体の種類を示す。本実験では、打込み方法、かき混ぜ方法およびかき混ぜ位置を変化させた。

(1) 打込み方法

打込み方法は、試験体 A~F は自己充填性を有する UFC を型枠の片端から流し込む方法で打込みを行ったのに対し、試験体 G~J は型枠の両端から同時に打込みを行った。

(2) かき混ぜ方法

打込み後 UFC をかき混ぜる方法として、試験体 A~I は、図-1 に示すように、型枠端部に突き棒を底面まで挿入し、型枠側面と平行に一定の速度で移動させた。突き棒がもう一方の端部に到達後、試験体 A~E, H, I は

表-1 使用材料および UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				
W	PRA	PRB	Ad	Fi
155	1322	932	24	157

PRA: プレミックス材 PRB: 細骨材

Ad: 高性能減水剤

Fi: 鋼繊維 (密度 7.85 g/cm³, 引張強度 2700N/mm², 直径 0.2mm, 長さ 15mm)

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

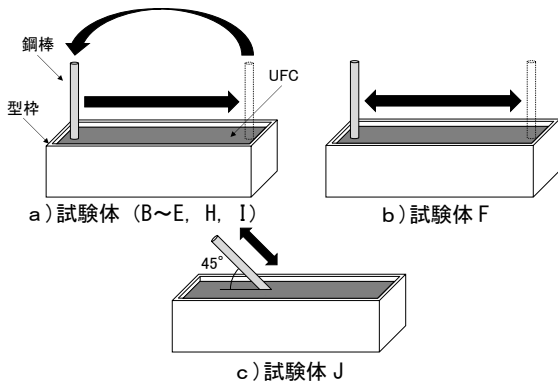
*2 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修士 (学生会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

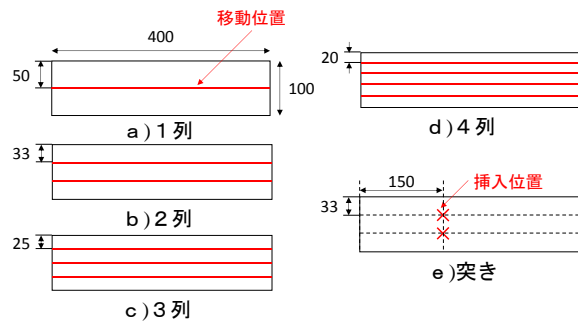
*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 博士(工学) (正会員)

表一2 試験体の種類

試験体	打設方法	かき混ぜ方法		移動位置	回数	
A	片端打設	なし				12
B		移動	片道	1列		
C		移動	片道	2列		
D		移動	片道	3列		
E		移動	片道	4列		
F		移動	往復	2列		
G	両端打設	なし				12
H		移動	片道	2列		
I		移動	片道	4列		
J		突き	—	—		



図一1 かき混ぜ方法



図一2 突き棒の移動位置

突き棒を引き抜き同じ操作を繰り返したのに対して、試験体 F は突き棒を抜かず往復移動させた。なお、片端打込みの試験体 A~F では、コンクリート投入側の端部から突き棒を移動させた。突き棒の移動位置は、図一2 の平面図に示すように、試験体 B は試験体の幅方向中央の直線 1 列のみを移動させ、同様にして、試験体 C, F, H は試験体の幅方向の 1/3 の間隔で 2 列を、試験体 D は幅方向の 1/4 の間隔で 3 列を、試験体 E, I は幅方向の 1/5 の間隔で 4 列を移動させた。また、複数列を移動させる場合は、片一方の側面に近い列から順番に移動させた。

一方、試験体 J は図一1、図一2 に示すように、突き棒を試験体の端部から 150mm の位置の 2 箇所を水平面に対して入射角 45° で挿入し、突き棒の先端が底面に到達後突き棒を引き抜き、以後この操作を繰り返した。

(3) 回数

突き棒の移動回数は試験体 1 本当たり 12 回とした。ただし回数は、突き棒を移動させる場合は片道 1 回を 1 回とした。したがって、試験体 F は 6 往復である。

2.3 可視化モデルコンクリートによる観察

可視化モデルコンクリート⁴⁾を用いて、前項と同様の打込みおよびかき混ぜを行い、繊維の配向の変化を観察した。可視化モデルには、高吸水性高分子樹脂（アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物）（SAP）に水を添加

して得られる透明な粘性を有する流体を用いた。本実験では、SAP を水 1L に対して 4g 混入した。繊維はφ0.66×15mm の PVA 繊維を 0.5% 混入した。型枠は 100×120×400mm の透明なアクリル容器を使用した。

2.4 試験体の切断面の画像解析

図一3に示すように試験体の型枠軸方向の中央から切り出した90×100×50mmのコンクリートをさらに高さ方向および幅方向の中央でそれぞれ切断した。切断後、切断面を顕微鏡により倍率20倍、視野範囲15×11mmで撮影し、撮影した画像をパノラマ合成して高精細な断面全体の画像を作製した。作製した画像から画像解析ソフトを用いて、単位面積（cm²）当たりの繊維本数N、繊維の断面（楕円）の長径方向の角度φ（0°≦φ<180°）を計測した。ただしφは、図一4に示すように、断面水平方向と繊維断面の長径方向のなす角度とする。

また、画像解析を行った断面を図一5に示す。試験体中央部分のコンクリート流動方向に対して垂直、平行および水平断面の画像解析を行った。

2.5 X線CTによる観察

画像解析を行った試験体について、X線CTシステムを用いてUFCのモルタル部分を透過した繊維のみの画像を作製した。画像は、切断面の画像解析を行った断面、すなわちコンクリート流動方向に対して垂直、平行および

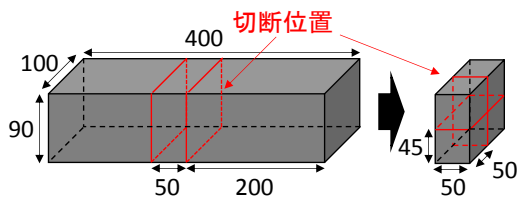


図-3 切断位置

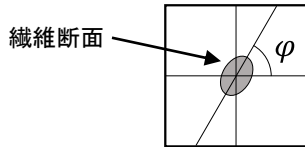


図-4 長径方向の角度

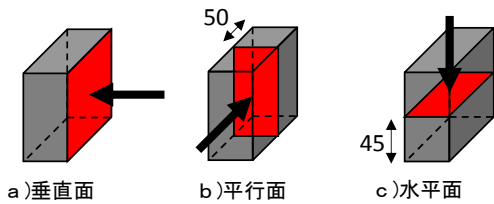


図-5 画像解析位置

び水平断面から見た場合の画像である。

3. 実験結果

3.1 可視化モデルコンクリートによる観察

(1) かき混ぜ前

図-6 に、試験体 A (片端打込み) の可視化モデルの繊維の配向を示す。繊維はコンクリート投入口を中心に放物線上に配向する傾向が示された。中央部分において、底面付近では底面と平行に配向している繊維が多く、上面付近では鉛直あるいは斜め上方に配向する繊維が多いことが示された。図-7 に試験体 G (両端打込み) の可視化モデルの繊維の配向を示す。片端打込みの場合と同

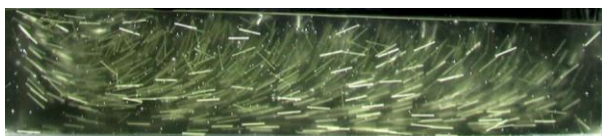


図-6 試験体 A(片端打込み)の可視化モデル



図-7 試験体 G(両端打込み)の可視化モデル



図-8 試験体 C(片端, 片道2列)の可視化モデル

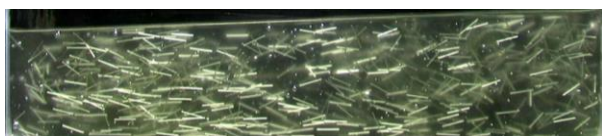


図-9 試験体 H(両端, 片道2列)の可視化モデル

様に流入口を中心に放物線上に配向する傾向が示された。ただし中央部分では、境界線が生じており、底面と鉛直に配向している繊維が多くなった。

(2) かき混ぜ後

図-8 に、試験体 C (片端, 片道 2 列) の可視化モデルの繊維の配向を示す。かき混ぜを行っていない図-6と比較して、繊維は明らかに水平方向に配向していた。図-9 に試験体 F (両端, 片道 2 列) の可視化モデルの繊維の配向を示す。図-8 と同様に、繊維は水平方向に配向する傾向が示された。このことから、かき混ぜを行うことでかき混ぜ前の配向に関わらず繊維は突き棒の移動方向に配向することが予測された。図-10 に試験体 J (両端, 突き) の可視化モデルの繊維の配向を示す。突き棒の周辺では、繊維が部分的に鉛直方向に対して斜めに配向しており、両端打込み時生じる境界が曖昧になった。ただし、配向の変化は部分的であり、全体的な繊維の配向には影響しなかった。図-11 に、試験体 F (片端, 往復 2 列) の可視化モデルの繊維の配向を示す。繊維は水平方向に配向しており、図-8 と比較しても、大きな違いは見られなかった。図-12、図-13 に試験体 B (片端, 片道 1 列)、試験体 E (片端, 片道 4 列) の可視化モデルの繊維の配向をそれぞれ示す。図-8、図-12、図-13 を比較すると、いずれも繊維は水平方向に配向するが、1 列のものはその傾向が弱くなった。

3.2 画像解析の結果

(1) かき混ぜ前

図-14 に試験体 A (片端打込み) のコンクリート流動方向に対する垂直、平行、および水平断面の画像解析の結果を示す (図-5 参照)。各断面の単位面積当たりの平

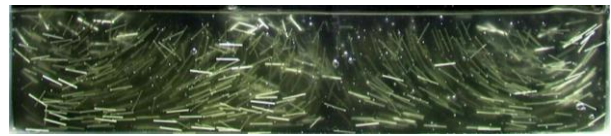


図-10 試験体 J(両端, 突き)の可視化モデル

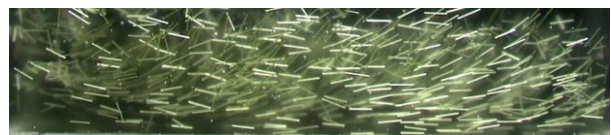


図-11 試験体 F(片端, 往復2列)の可視化モデル

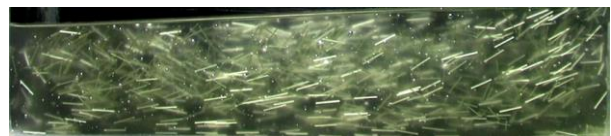


図-12 試験体 B(片端, 片道1列)の可視化モデル

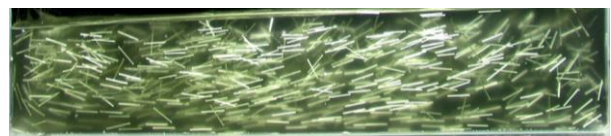


図-13 試験体 E(片端, 片道4列)の可視化モデル

均本数の結果では、垂直面と水平面で繊維本数が多くなっていることから、繊維はコンクリート流動方向に対して斜め上方に配向していることが予測された。平行面の長径方向の角度の結果では、高さ方向の下半分の領域で0°~90°の繊維が8割程度となり繊維はコンクリート流動方向に対して斜め上方に配向することが予測され、上半分の領域では60°~120°の繊維が7割程度となり鉛直に近い方向に配向することが予測された。

図-15に試験体G(両端打込み)の画像解析の結果を示す。各断面の平均本数の結果では、垂直面で非常に少なく水平面で多いことから、コンクリート流動方向に配向する繊維はほとんどなく鉛直に配向していることが予測された。平行面の長径方向の角度の結果では、試験体Aとほぼ同様の傾向となったが、より鉛直に配向する傾向が強くなった。

(2) かき混ぜ後

図-16に試験体C(片端、片道2列)の画像解析の結果を示す。各断面の平均本数の結果では、垂直面で多くなっていることから繊維は試験体の長さ方向(突き棒の移動方向)に配向することが予測された。試験体A(かき混ぜ前)と比較すると、打込み後コンクリート流動方向に対して斜め上方に配向する繊維が、混ぜることによって突き棒の移動方向に配向する傾向が強くなることが明確に示された。平行面の長径方向の角度の結果では、繊維はコンクリート流動方向に対して斜め下方に配向する傾向が示された。

図-17に試験体H(両端、片道2列)の画像解析の結果を示す。各断面の平均本数の結果では、試験体C(片端、片道2列)とほぼ同様の傾向となった。

図-18に、試験体J(両端、突き)の画像解析の結果を示す。各断面の平均本数の結果では、試験体C、Jと同様の傾向となり、繊維は水平方向に配向することが予測された。平行面の長径方向の角度の結果では、高さ方向の上半分の領域では試験体Cと同様に突き棒の移動方向に対して斜め下方に配向したが下半分の領域では突き棒の移動方向に配向した。ただし、画像解析の結果は試験体中央のものであり、突くことでどの程度の範囲まで繊維の配向に影響するかは未検討である。

図-19に、試験体F(片端、往復2列)の画像解析の結果を示す。各断面の平均本数の結果では、試験体Cと比較すると、繊維が水平方向に配向する傾向が弱いことが予測された。平行面の長径方向の角度の結果では、繊維は鉛直方向に配向する傾向が示された。よって、幅方向の中央において繊維は水平面に対して斜めあるいは鉛直に配向することが予測された。

図-20、図-21に試験体B(片端、片道1列)、試験体E(片端、片道4列)の画像解析の結果をそれぞれ示

す。図-16、図-20、図-21の各断面の平均本数を比較すると、いずれも突き棒の移動方向に配向する傾向が示されたが、試験体Bはその傾向が僅かに弱くなった。

3.3 X線CTによる観察

(1) かき混ぜ前

図-22に試験体A(片端打込み)の各断面のX線透過画像を示す。平行面の画像では、繊維は底面付近では底面と平行に配向しているのに対し、上面付近では鉛直方向に配向していた。水平面の画像では、側面に近い部分ではコンクリート流動方向に、幅方向における中央付近では中央に向かって配向していた。

図-23に試験体G(両端打込み)のX線透過画像を示す。垂直面および平行面では、鉛直方向に配向している繊維が多い結果となった。水平面では、繊維は中央に向かって斜めあるいは幅方向に配向していた。

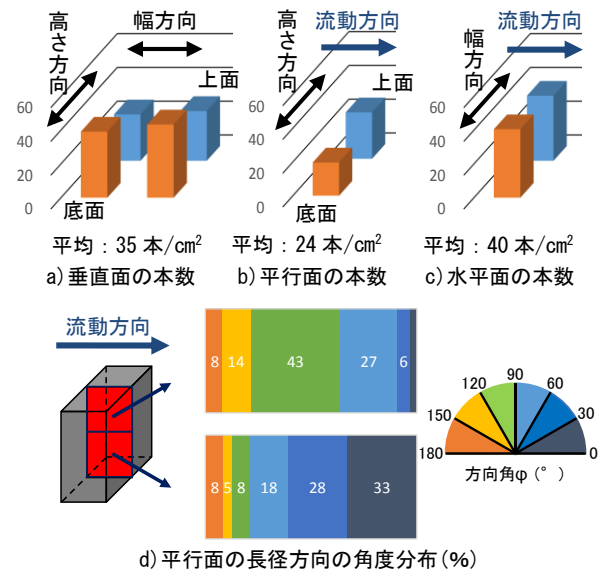


図-14 試験体A(片端打込み)の解析結果

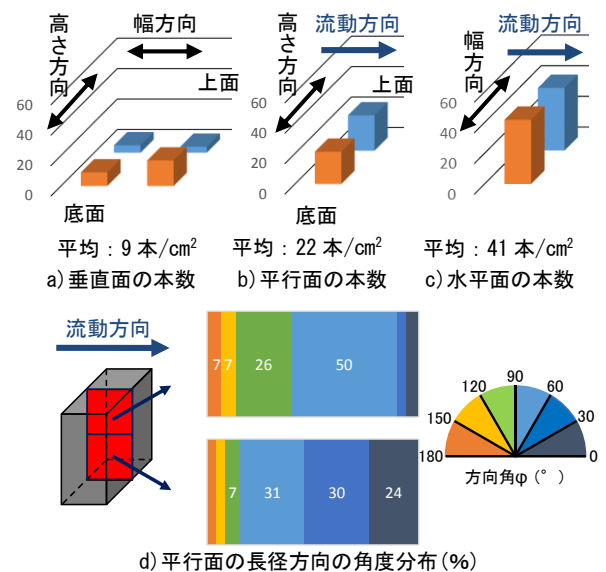


図-15 試験体G(両端打込み)の解析結果

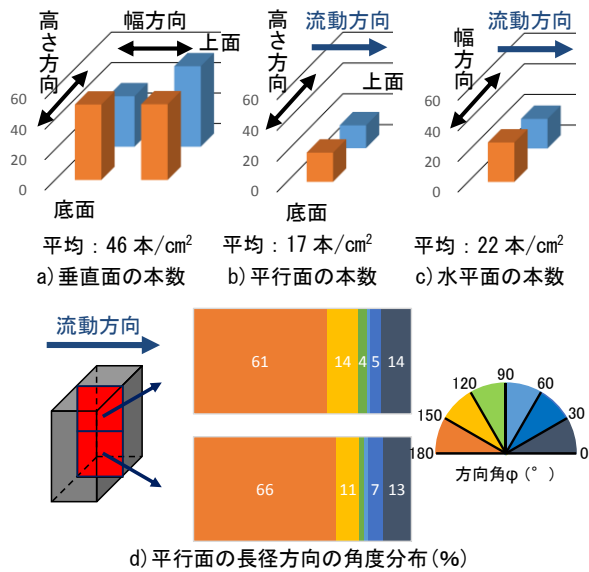


図-16 試験体 C(片端, 片道 2列)の解析結果

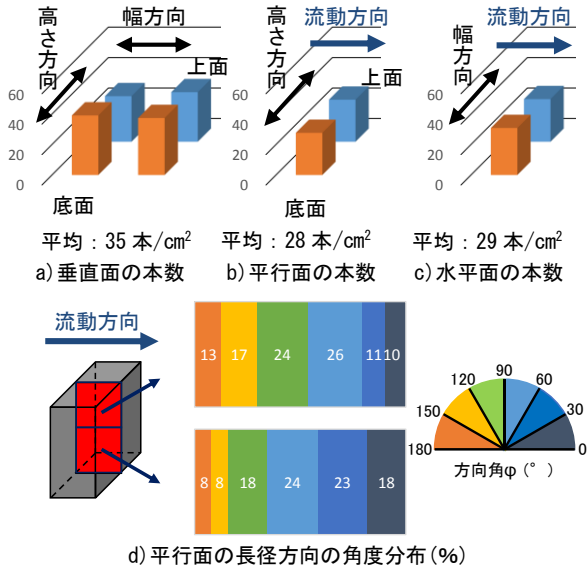


図-19 試験体 F(片端, 往復 2列)の解析結果

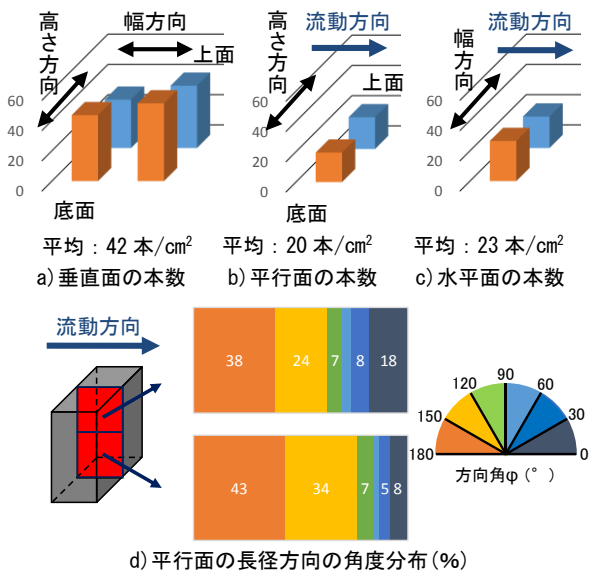


図-17 試験体 H(両端, 片道 2列)の解析結果

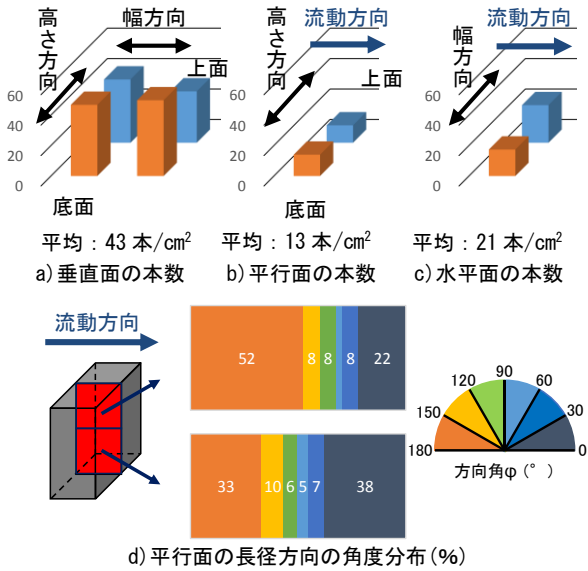


図-20 試験体 B(片端, 片道 1列)の解析結果

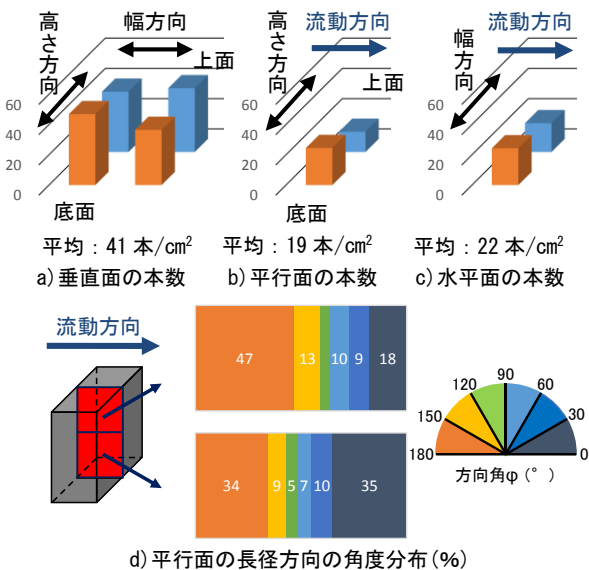


図-18 試験体 J(両端, 突き)の解析結果

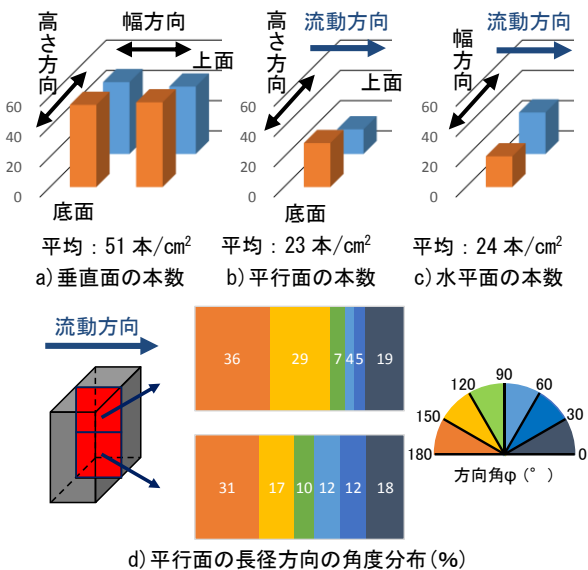
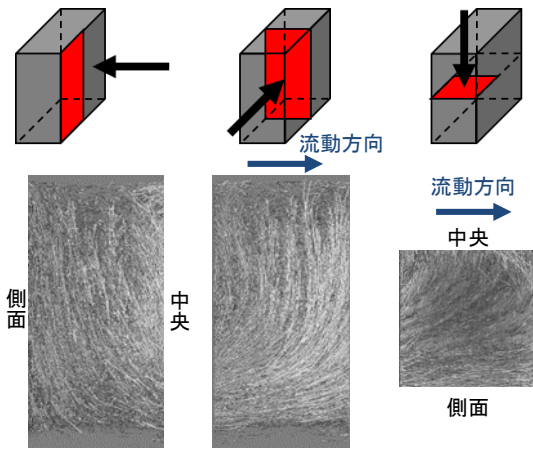
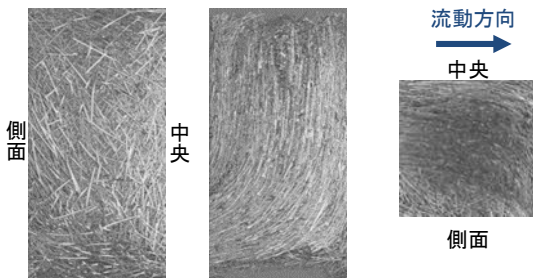


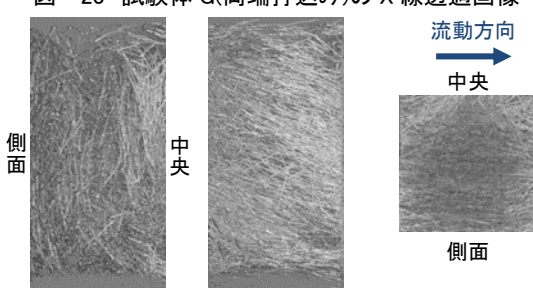
図-21 試験体 E(片端, 片道 4列)の解析結果



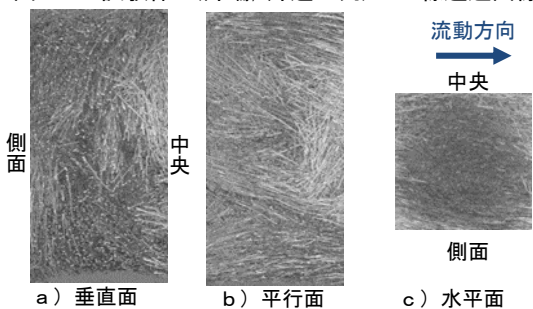
a) 垂直面 b) 平行面 c) 水平面
 図-22 試験体A(片端打込み)のX線透過画像



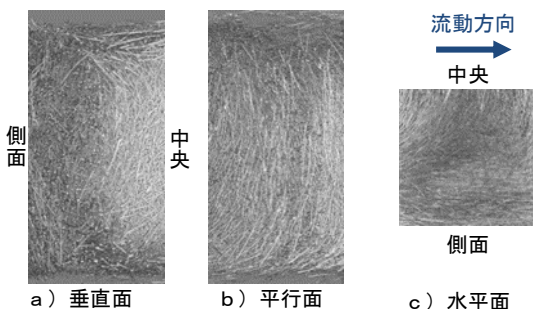
a) 垂直面 b) 平行面 c) 水平面
 図-23 試験体G(両端打込み)のX線透過画像



a) 垂直面 b) 平行面 c) 水平面
 図-24 試験体C(片端, 片道2列)のX線透過画像



a) 垂直面 b) 平行面 c) 水平面
 図-25 試験体J(両端, 突き)のX線透過画像



a) 垂直面 b) 平行面 c) 水平面
 図-26 試験体F(片端, 往復2列)のX線透過画像

(2) かき混ぜ後

図-24に試験体C(片端, 片道2列)のX線透過画像を示す。平行面では繊維は水平面に対して斜め下方に配向し、水平面では突き棒の移動方向に配向していた。また、試験体H(両端, 片道2列)においても、試験体Cとほぼ同様の状況であった。

図-25に、試験体J(両端, 突き)のX線透過画像を示す。平行面では水平面に対して斜め下方に配向していたが、底面付近では底面と平行に配向していた。また、可視化モデルの結果と比較して、実際のUFCではかき混ぜ(突き)が繊維に影響する範囲が広いことが示された。

図-26に、試験体F(片端, 往復2列)のX線透過画像を示す。平行面では繊維はほぼ鉛直に配向しており、試験体Cの結果と大きく異なった。この原因として、突き棒を同じ位置で往復移動することで配向が元に戻ってしまうことが考えられる。また、可視化モデルの図-11と比較して、繊維の配向が大きく異なっていた。この原因として、可視化モデルコンクリートは、実際のUFCと比較して、突き棒に対する附着性能が非常に小さく、突き棒の移動がマトリクスに与える影響が小さくなるためであると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) UFCをかき混ぜることによって、打込み方法に関わらず、繊維は突き棒の移動方向に配向する傾向が確認された。
- (2) UFC中を突き棒で往復移動させた場合、繊維は幅方向の中央で鉛直に配向する傾向が確認された。

参考文献

- 1) Stahli P, Custer R, Van Mier JGM: On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC, Mater Struct, Vol.41, No(1), pp.189-196, 2008
- 2) Kang ST, Park JJ, Ryu GS, Kim SW: Investigation of fibre alignment of UHSFRC in flexural members. Proceedings of 8th international symposium on utilization of high-strength and high-performance concrete, Tokyo, pp.709-714, 2008
- 3) Barnett S.J, Lataste J.F, Parry T, Millard S.G, Soutsos M.N: Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, Mater Struct, Vol(43), No.(7), pp.1009-1023, 2010
- 4) 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