

論文 超高強度繊維補強コンクリートの流動性が繊維の配向に及ぼす影響

河村 有紀*1・周 波*2・石河 義希*3・内田 裕市*4

要旨: 超高強度繊維補強コンクリートの流動性が繊維の配向へ及ぼす影響を検討するために、はり試験体の切断面の目視による観察, X線CTシステムによる観察を行うとともに、同一の試験体から試験片を切り出し曲げ試験を行った。その結果、フローが小さいほうが繊維は投入口から流動方向に対して鉛直方向には放物線状に、水平方向には同心円状に配向し、また、型枠近傍ではフローが大きいほうが型枠の影響を受けて流動方向に配向する繊維が増加することが観察された。曲げ試験では破断面に垂直な繊維の数が多いほど曲げ応力が高くなり、繊維の配向と対応した結果が得られた。

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。しかしながら、コンクリートあるいはモルタル中の繊維の分散、配向の評価とそれが力学挙動に及ぼす影響に関しては、FRC が登場して以来、今日に至るまで重要な課題として認識されてはいるが、未だ解決されていない問題である。これはコンクリート中の繊維の分散・配向を観察することが難しく、さらに現状では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^{1) 2) 3)}。

そこで本研究では、UFC を対象として UFC の流動性が繊維の配向に及ぼす影響を検討することを目的とした。実験ではフローが異なる UFC を用いてはり試験体を作製し、硬化後に所定の位置で切断し、切断面を目視で観察するとともに X線CTシステムにより繊維の配向の観察を行った。また試験体から試験片を切り出し曲げ試験を行い、曲げ破壊挙動と繊維の配向の関係を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に UFC の使用材料および基本配合を示す。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。繊維混入量は体積で 2.0% である。またフロー値は打込み時の 0 打フローがそれぞれ 210mm, 280mm となるように減水剤の量を調整した。

*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 工学部社会基盤工学科 博士(工学)

*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)

2.2 試験体の種類および作製

試験体の型枠は 100×100×400mm (標準曲げ供試体)、と幅の広い 400×100×1000mm の 2 種類を使用した。表-2 に試験体の種類を示す。UFC を型枠の片端 (図-1 参照) から打ち込み、打込み時間は型枠の寸法ごとに同じになるように調節した。養生は打込み後 24 時間は打込み面をラップで覆った状態で 20°C の気中養生を行い、その後 90°C の蒸気養生を 48 時間行った。

2.3 試験体の切断

養生終了後、試験体中の繊維の観察および曲げ試験を行うことを考慮し、コンクリートカッターを用いて各試験体を図-1 のように切断した。

2.4 試験体の切断面の観察

切断した試験体のうち、試験体 A, B は型枠軸方向の中央から切り出した 100×100×50mm, 試験体 CD は 400×100×200mm の試験片について目視による観察, X線

表-1 UFC の使用材料および基本配合

単位量(kg/m ³)				
W	PRA	PRB	Ad	Fi
160	1278	934	20	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)

表-2 試験体の種類

試験体	型枠寸法(mm)	フロー値(mm)
A	100×100×400	210
B	100×100×400	280
C	100×400×1000	210
D	100×400×1000	280

CTシステムによる観察を行った。試験体 A, B は流動方向に対して平行面，試験体 C, D は平行面，垂直面，鉛直面を観察した。各々の観察面を図-2 に示す。

2.4.1 目視による観察

切り出した試験片の切断面をデジタルカメラで撮影し，繊維の配向の観察を行った。

2.4.2 X線CTシステムによる観察

X線CTシステムによる観察では，高密度であるコンクリートの透過画像を得るため，X線管電圧200kV，管

電流 $600 \mu A$ として，スライス厚 $0.15mm$ でCTスキャンを実施した。その後VGStudioMAXを用い，取得したCT画像から3D画像を生成した。また，コンクリートマトリクスと鋼繊維の密度が異なることを利用し，コンクリートマトリクスから鋼繊維を識別するために単一のグレーしきい値を使用して鋼繊維のみの画像を作製した。

2.5 曲げ試験

前項で述べた繊維の配向の観察後に切欠きを設け，切欠きはりの3点曲げ载荷を行い，曲げ応力-開口変位曲

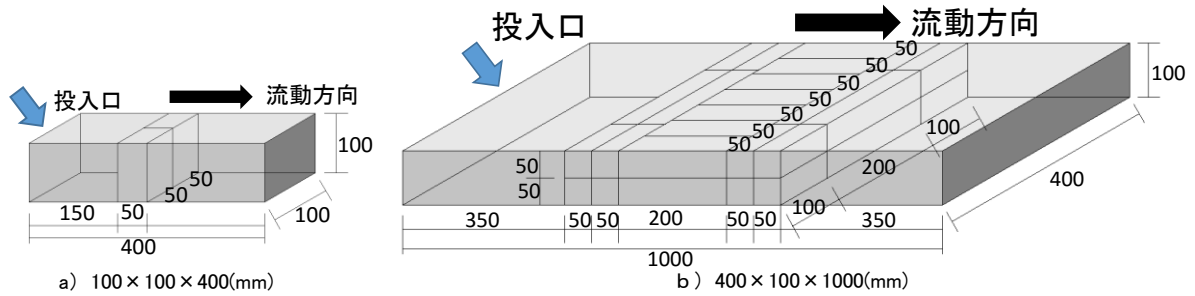


図-1 切断箇所 単位(mm)

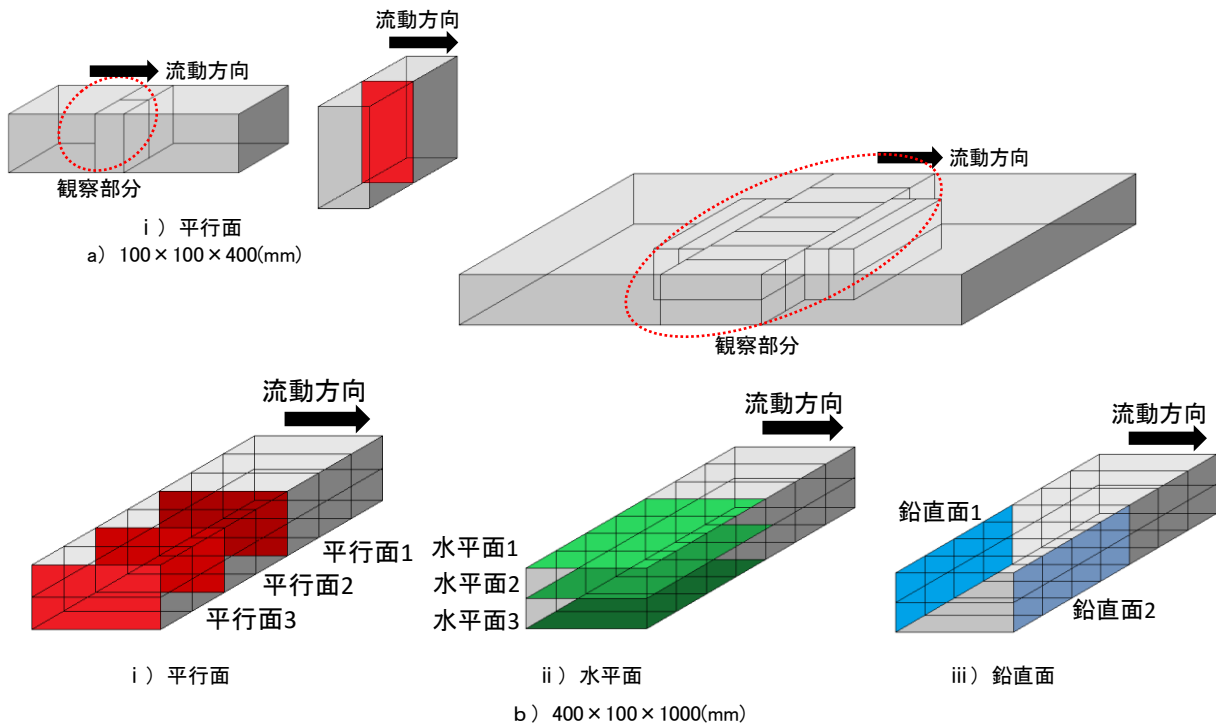


図-2 観察面

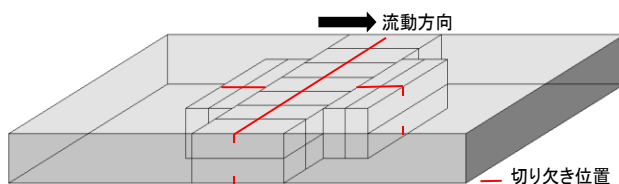


図-3 切欠き位置

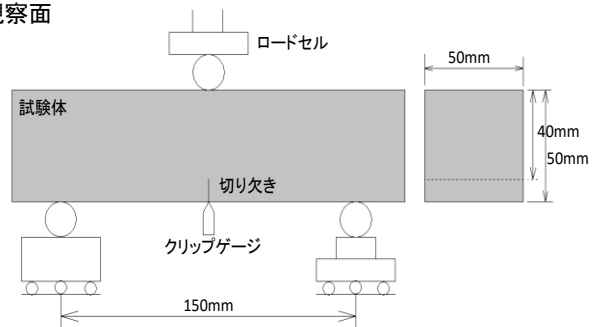


図-4 载荷方法

線を計測した。試験片の寸法は50×50×200mmであり、
 荷重スパンを150mmとした。試験体C, Dは面外曲げを
 受けることを想定し、図-3に示す位置に切り欠きを設け
 た。図-4に荷重方法を示す。切り欠きの深さはリガメン
 トが40mmになるように調整した。また計測結果の整理
 の際には、試験体の対称性を考慮し同一条件で2体ある
 ものは平均の値で示した。荷重には手動メカニカルジャ
 ッキを使用し、計測には容量100kNのロードセル、開口
 変位を容量5mm、感度1/2000mmのクリップゲージを用
 いた。荷重試験中は、開口変位をモニタリングして、ひ
 び割れ発生直後に不安定破壊が生じないように適宜、荷重
 ・除荷を繰り返した。荷重はクリップゲージが脱落した時
 点で終了とした。

3 実験結果

3.1 目視による切断面の観察

切断面の画像を図-5 から図-8 に示す。切断面の観察
 において、繊維が切断面に対して垂直に近くなるように
 配向すると繊維の断面はより真円に近づき、切断面に対
 して平行に近くなるように配向すると繊維の断面は楕円
 となる。図-5, 6の画像はそれぞれ試験体A, Bの流動
 方向に対して平行な面である。フローが小さい試験体A
 は図中の赤線で示すように繊維が型枠底面から試験体上
 面に向かって放物線状に立ち上がる様子が観察された。
 一方、フローが大きい試験体Bでは試験体Aのような配
 向は確認出来なかった。図-7, 8は試験体C, Dの流動
 方向に対して水平な面である。フローが小さい試験体C
 は図中の赤線で示すように投入口を中心とした同心円状
 の配向が確認出来たが(図中の赤線)、フローが大きい試
 験体Dではそのような配向は確認できなかった。

3.2 X線CTシステムによる観察

X線CTシステムにより得た鋼繊維のみの画像を図-9
 から図-12 に示す。X線CTシステムによる観察におい
 て、繊維が切断面に対して垂直に配向すると繊維の断面
 はより真円に近づき画面上では黒く写り、切断面に対
 して平行に配向すると繊維の断面は楕円となり画面上で
 は白く写る。

図-9の試験体A, Bでは流動方向に対して平行な面を
 比較している。フローの小さい試験体Aでは切断面の目
 視観察結果と同様、型枠底面から上方に向かって放物線
 状に配向する様子が明確にみられた。フローの大きい試
 験体Bでは試験体Aほど配向は明確ではないが試験体
 上面に向かって立ち上がる繊維の配向が観察された。

図-11, 図-12の試験体C, Dでは流動方向に対して平
 行、鉛直、水平の各面を比較している。フローが小さい
 試験体Cの中央部分にあたる平行面1では、試験体Aと
 同様に流入口から放物線に配向する様子が観察された

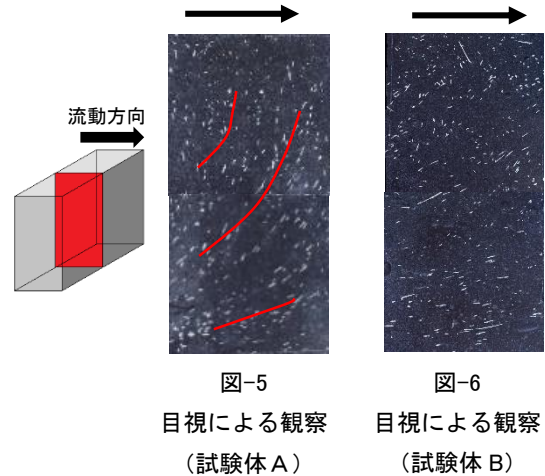


図-5
目視による観察
(試験体A)

図-6
目視による観察
(試験体B)

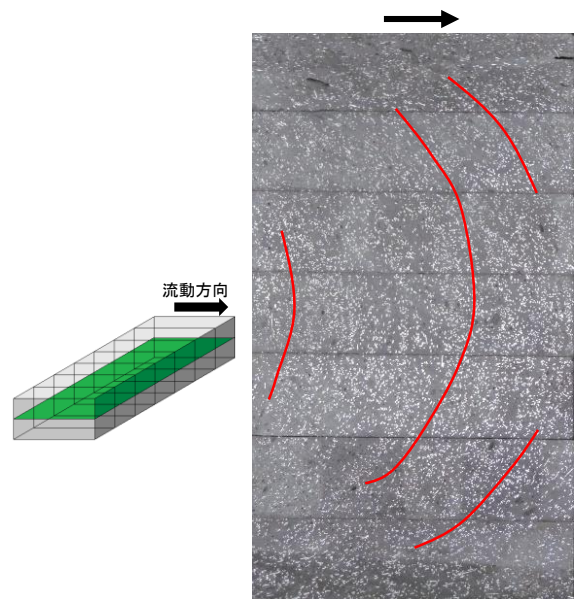


図-7 目視による観察 (試験体C)

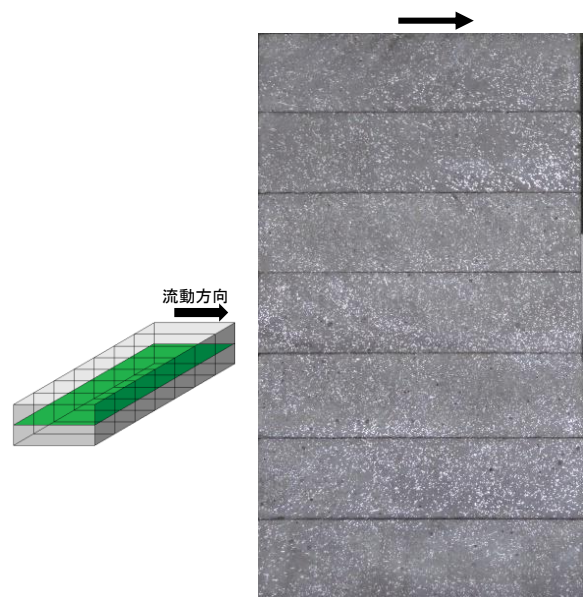


図-8 目視による観察 (試験体D)

(図中の赤線)。この配向の傾向は平行面 1 から平行面 3 へと型枠側面に近づくにつれてみられなくなり、側型枠に最も近い平行面 3 では型枠面と平行な繊維が大半を占めていた。鉛直面では型枠底面および側面付近の繊維が鉛直面に対して垂直、つまり流動方向に配向する繊維が多いことが確認された (図中の赤破線)。鉛直面 1、鉛直面 2 は投入口からの距離が異なるが、顕著な差は見られ

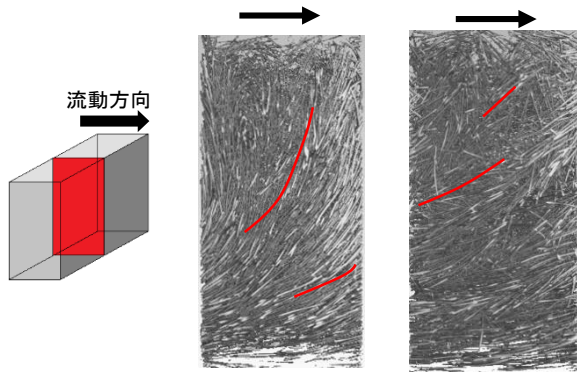


図-9 X線CTシステムによる観察(試験体 A)

図-10 X線CTシステムによる観察(試験体 B)

なかった。水平面では上面側では繊維は投入口から放物線状に配向し、水平面 1 から水平面 3 へと底面に近づくにしたがって放物線状の配向の傾向はなくなり、流動方向と平行な繊維が大半を占めている。フローが大きい試験体 D においても、繊維の配向の傾向は試験体 C と比較して大きな違いは見られなかった。試験体の中央から型枠側面、底面に近づくにつれて型枠底面と平行かつ流動方向を向く繊維が増加することは共通しているが、その傾向はフローが大きい試験体 D のほうが強くみられた。

以上より、フローの大小に関わらず繊維の配向は投入口から流動方向に対して平行面では放物線状に、水平面では同心円状となった。しかしフローが大きい方が型枠近傍では繊維が流動方向に配向する傾向が強くなった。

3.3 曲げ試験

図-13 に試験片の番号を示す。繊維補強コンクリートの力学挙動として、繊維は引張力を分担し、曲げ応力が高いほど断面を架橋する繊維本数が多いと予想される。そのため流動方向に対して平行に切り出した試験体中央部分の試験片 (1~8) は応力が高いほど、流動方向に対して垂直に切り出した試験片 (9~12) は応力が小さいほど、流動方向に配向する繊維が多いことを示すことに

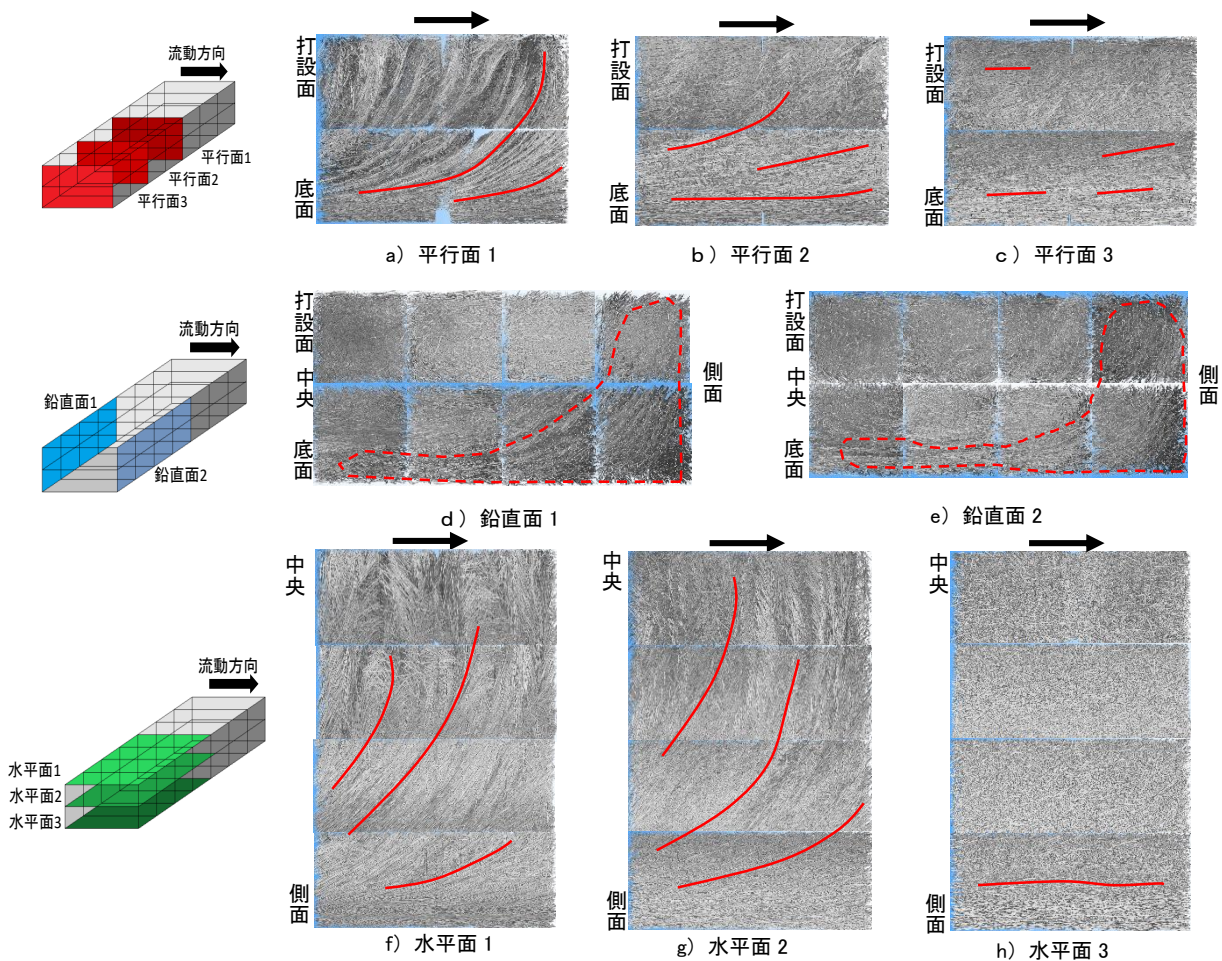


図-11 X線CTシステムによる観察(試験体 C)

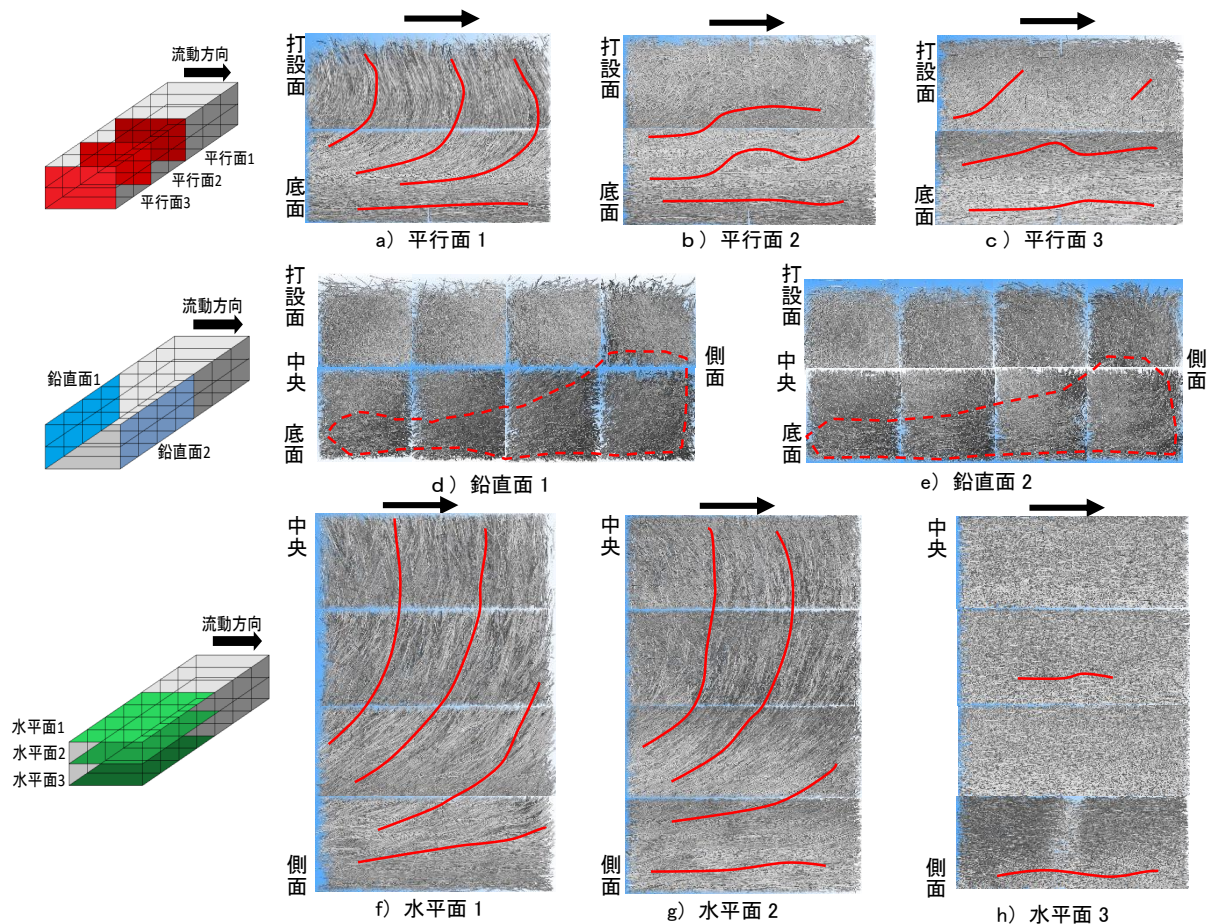


図-12 X線CTシステムによる観察(試験体D)

なる。

流動方向に平行な試験体の曲げ試験結果を図-14に示す。上面側(C1~C4, D1~D4)は最大応力が3~30 N/mm²程度となり、試験体の中心から側面(1から4)に近づくにつれて応力は高くなった。最大応力がばらつく理由は、断面を架橋する繊維本数が大きく異なるためと考えられる。各試験体の水平面の観察結果(図-11f), 12f)を見ると分かるように、中央部では流動方向に垂直に配向する繊維が多いのに対し、側面部では平行に配向する繊維が多くなっている。型枠側面に近づくにつれて流動方向に平行に配向する繊維が増加する要因は型枠との摩擦とせき板効果だと考えられる。底面側(C5~C8, D5~D8)は最大応力が30 N/mm²から55 N/mm²程度となり、上面側同様、試験体の中心から側面(5から8)に近づくにつれて応力は高くなった。試験体C, Dを比較すると、フローの大きい試験体Dのほうが全体的に応力は高い。すなわちフローが大きいほど型枠の影響が大きいと考えられる。

流動方向に垂直な試験体の曲げ試験結果を図-15に示す。上面側(C9, C10, D9, D10)は最大応力が30~35 N/mm²程度となった。底面側(C11, C12, D11, D12)は最大応力が15~35 N/mm²程度となった。試験体C, Dを比較すると、フローの小さい試験体Cは曲線のばらつき

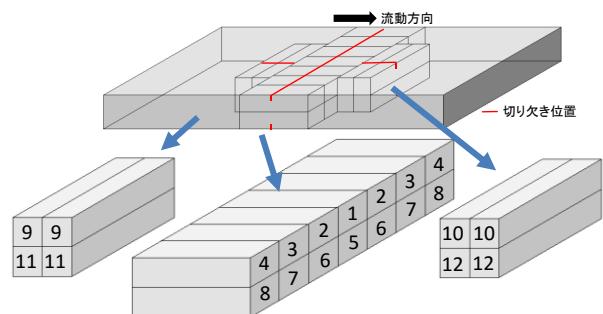


図-13 試験片の番号

が少ないのに対し、フローの大きい試験体Dでは上面側より底面側の応力がより小さくなった。このことから底面付近においてフローが大きいほうが型枠の影響が大きく、流動方向に平行に配向する繊維が多くなると予想される。

4. 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中の繊維の配向はフローが小さいほうが投入口から流動方向に対して平行面では放射線状に、水平面では同心円状に配向する傾向が顕著であり、またフローが大きいほうが型枠の影響をより受けて流動方向に配向する繊維が増加する。

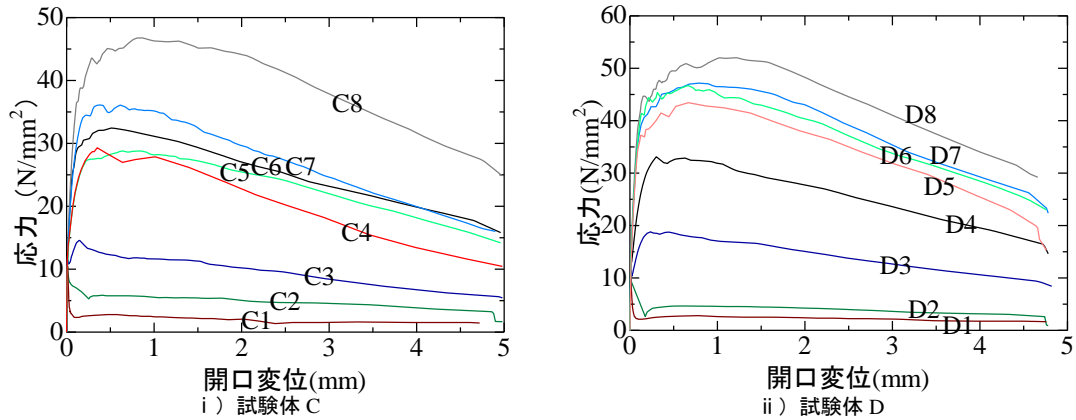


図-14 曲げ試験結果（流動方向に平行）

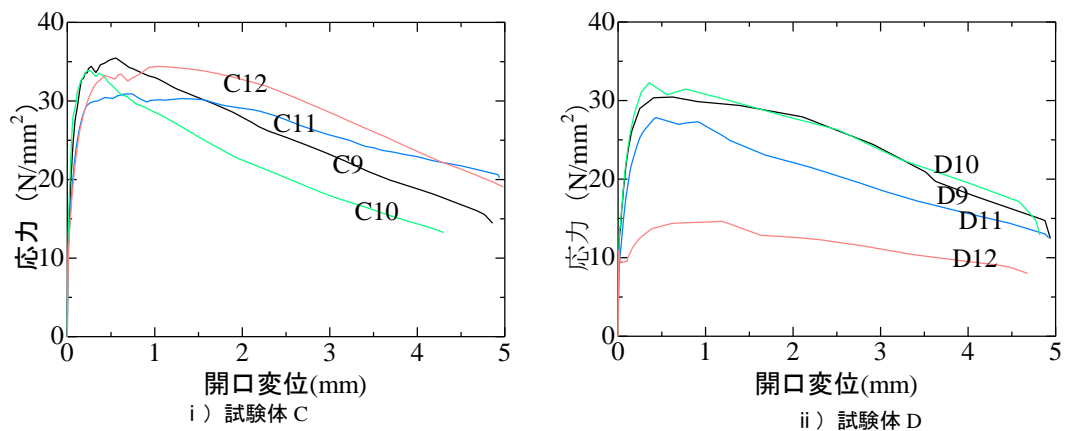


図-15 曲げ試験結果（流動方向に垂直）

(2) 曲げ試験時の応力の差は目視、X線CTシステムによる観察による繊維の配向と対応した結果が得られた。

参考文献

1) Stahl 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

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