論文　UFC パネルにおける繊維の配向と曲げ強度の関係

周　波[*1]・Ha Duy Nhi[*2]・内田裕市[*3]

要旨：繊維の配向が超高強度繊維補強コンクリート（UFC）パネル内の曲げ強度にどの程度を影響するかを検討するために，φ1200×50mm 円形パネルの中心に UFC を打込み，硬化後にパネルの半径方向に対して 0°，30°，60°および 90°の方向に曲げ供試体を切出し，載荷試験を行った。その結果，切出し角度が 90°の場合の曲げ強度に対して，60°，30°および 0°の場合はそれぞれ 8 割，4 割，および 1 割程度に低下し，繊維の配向により曲げ強度が著しく変化することが分かった。また，長方形パネルに中心から UFC を打込んだ場合もパネル内の位置と方向により曲げ強度が変化し，円形パネルと同様の繊維の配向になることが推察された。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，繊維の配向，曲げ強度，打込み

1. はじめに

短繊維補強コンクリート（Fiber Reinforced Concrete，以下 FRC とする）に関する研究は古くから行われており，ことに最近はひずみ硬化型のセメント複合材（Strain Hardening Cement Composites）や超高強度繊維補強コンクリート（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete，以下 UFC とする）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 の特徴はひび割れ発生後の繊維による架橋効果にあり，この架橋効果に対して繊維の配向・分散が大きく影響する。既往の研究によれば，硬化後のコンクリート中の繊維の配向・分散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，供試体の寸法などが挙げられ，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]。

自己充填性を有する UFC をパネル状の型枠に打ち込む場合，パネルの中央から打ち込むと繊維が同心円状に配向し，中心から離れるほどこの傾向が顕著になることが報告されている [2-6]。この配向のメカニズムは以下のように説明することができる。**図 - 1** に示すように，放射状に流動するマトリクス内では，中心に近いほど速度が速く，マトリクスの流動方向に対して斜めに存在する繊維周辺ではマトリクスに速度差が生じ，その結果，繊維は速度差がなくなる方向，すなわち周方向に回転（配向）する。

本研究では，円形パネルの中心から UFC を打込んだ場合に繊維の配向により曲げ強度がどの程度変化するかを実験的に確認することとした。実験では φ1200×50mm 円形パネルに UFC を打込み，コンクリート硬化後にパネルから 50×50×200mm の供試体を切り出し，曲げ載荷試験を行った。また，長方形パネルについても中心 1 点また 2 点同時に UFC を打込み，曲げ供試体を切り出し，曲げ強度と繊維の配向を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表 - 1 に使用材料および UFC の配合を示す。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

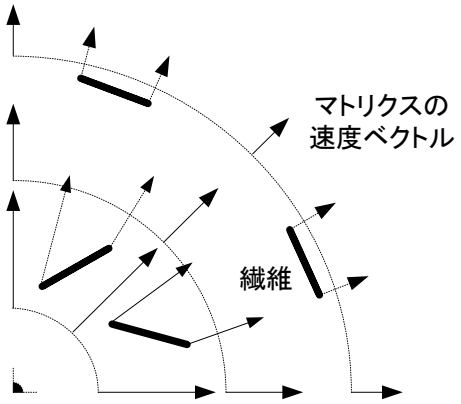


図 - 1　放射状流動中の繊維周辺の速度ベクトル

表 - 1　UFC の配合

UFC 配合	単位量(kg/m³)				
	W	PRA	PRB	Ad	Fi
	155	1322	932	25	157

W：上水道水
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　工学研究科生産開発システム工学専攻　(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
*3 岐阜大学　総合情報メディアセンター　博士(工学)　(正会員)

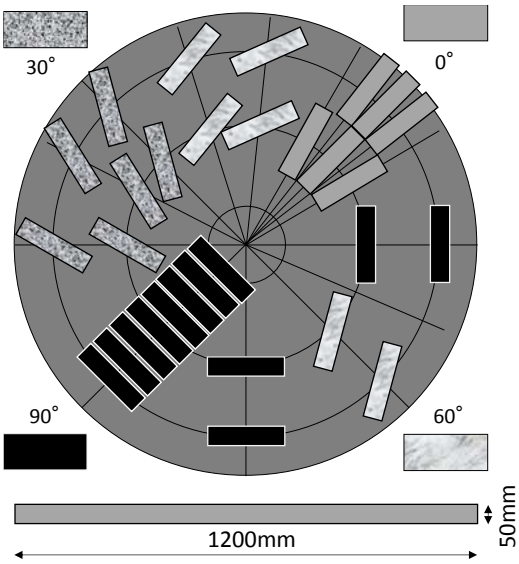


図 - 2　円形パネルと切断方法

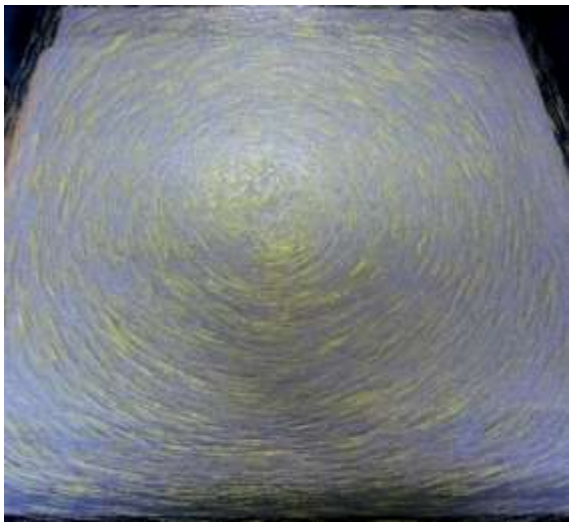


写真 - 1　可視化モデルによる繊維の配向 [7)]

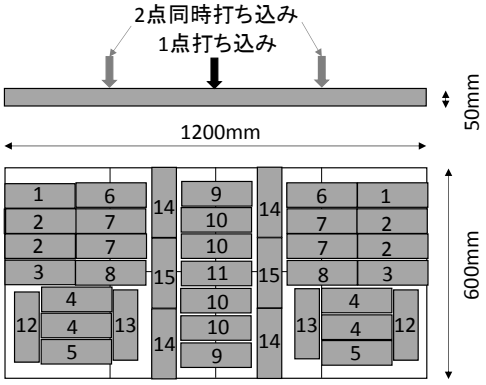


図 - 3　長方形パネルの切断方法

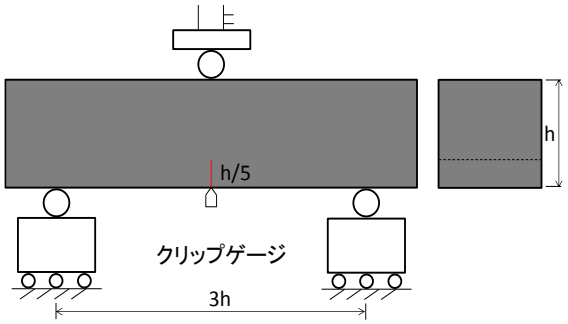


図 - 4　切欠きはりの 3 点曲げ試験

り，主に結合材から成るプレミックス材，細骨材，鋼繊維および減水剤で構成さている。

2.2 練混ぜおよび養生方法

練混ぜは，容量 120L の 2 軸強制練りミキサを使用した。打込み速度は約 3L/min とした。供試体の養生は，一次養生として 20℃±2℃の恒温室で 48 時間行い，その後二次養生として 90℃で 48 時間の蒸気養生を行った。

2.3 円形パネル

本研究で用いた円形パネルを**図 - 2** に示す。円形パネルの寸法は直径 1200mm，厚さ 50mm である。円形パネルの中心からコンクリートを連続的に打込んだ。前述の通り，既往の研究 [2-6)] によれば，パネルの中心からコンクリートを打込むと繊維が同心円状に配向することが報告されている。このことを確認するために予備試験として，著者らが提案した可視化モデルコンクリートを用いて 1 辺が 1m の正方形パネルの中心から打込む試験を行った [7)]。その結果，**写真 - 1** に示すように繊維が同心円状に配向することが確認された。

以上のことを参考に，円形パネルにおいて繊維の配向が曲げ強度にどの程度に影響するかを検討するために，**図 - 2** に示すように，中心から 30cm と 50cm の位置において，パネルの半径方向に対して 0°，30°，60°および 90°の方向に 50×50×200mm の供試体を 3 体ずつ切出した。なお，90°場合はパネル中心から半径方向に連続的に 8 体の供試体を切出した。

2.4 長方形パネル

図 - 3 に示すように，1200×600×50mm の長方形パネルを対象にして，中心 1 点および 2 点からコンクリートを打込む方法により，長方形パネル試験体を 2 体作製した。コンクリート硬化後，**図 - 3** に示すように，70×50×200mm の供試体を切り出した。切出した供試体は対称性から 1 から 15 までの番号を付し，さらに番号の前に E（1 点打込み）と F（2 点打込み）を付けてパネル内の位置と打込み方法を表すこととした。

2.5 曲げ試験方法

円形パネルと長方形パネルから切出した供試体は型枠底面側に 10mm の切欠きを導入し，3 点曲げ試験を行った。曲げ試験は**図 - 4** に示すような切欠きはりの 3 点

曲げ試験であり，荷重－開口変位曲線を計測した。試験は「切欠きはり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」[8]（JCI-S-002-2003）に準じて行った。また，3 点曲げ試験を行った後に破断面における繊維の配向状況も観察した。

3. 実験結果

3.1 円形パネルから切出した供試体の曲げ強度

図 - 5 に半径方向に対して 90°の方向（周方向）に切出した供試体の曲げ応力－開口変位曲線（σ - CMOD 曲線）を示す。なお，同図に示した供試体は，**図 - 2** に示したように，中心から半径方向に連続的に切出したものである。**図 - 6**，**7** にパネル中心から 30cm および 50cm の位置において半径方向に対して 0°，30°，60°および 90°に切出した供試体の 3 点曲げ試験結果を示す。図中，細線は各供試体の結果であり，太線は平均値を示す。

図 - 5 に示すように，半径方向に対して 90°方向に切出した供試体の最大曲げ応力は 50 N/mm^2 程度で，中心からの距離にかかわらずほぼ一定となった。

一方，**図 - 6**，**7** に示すように供試体の切出し角度を変化させると，角度に応じて最大曲げ応力が大きく変化した。**図 - 6** に示すように，r=30cm の位置では半径方向に対して 60°と 90°で切出した供試体は，ひび割れ発生時に剛性は低下するが応力低下をすることはなく，応力は上昇し続け最大曲げ応力はそれぞれ 43N/mm^2 と 48 N/mm^2 程度になった。これに対して，半径方向に対して 0°と 30°で切出した供試体は，ひび割れ発生時に応力が一旦低下し，その後再び応力は上昇するが最大曲げ応力はそれぞ

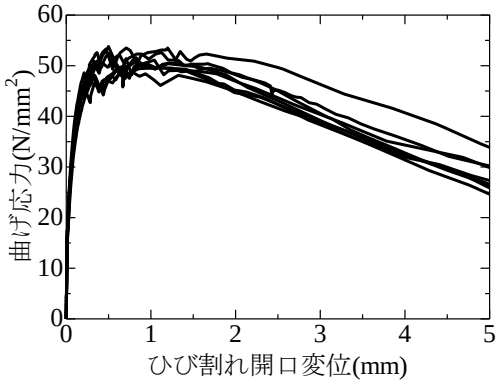
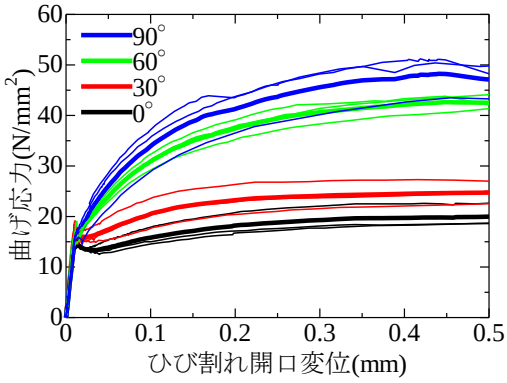
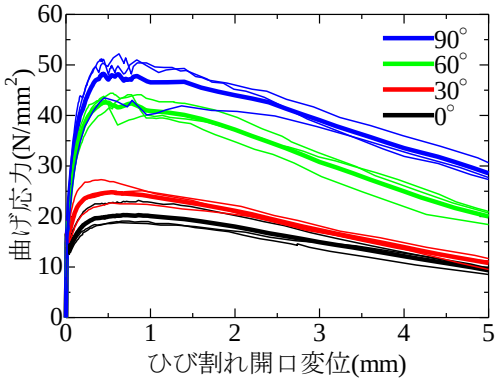


図 - 5　90°供試体のσ-CMOD 曲線

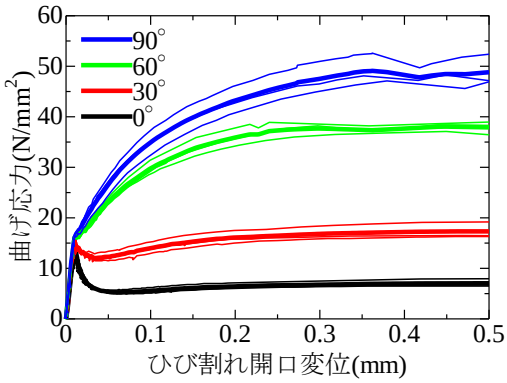


(a)前期部分

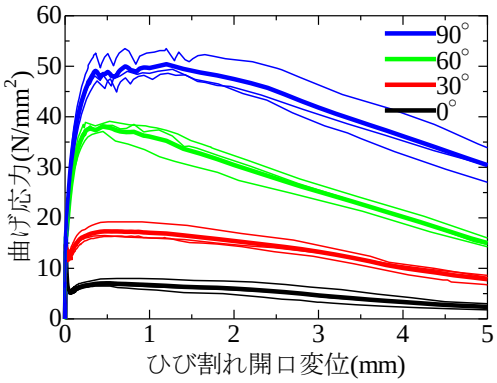


(b)全体

図 - 6　r=30cm のσ-CMOD 曲線



(a)前期部分



(b)全体

図 - 7　r=50cm のσ-CMOD 曲線

れ 20 N/mm^2 と 25 N/mm^2 程度となり，60°と 90°に切出した場合の 5 割程度になった。また，r=50cm の位置でのひび割れ発生後の最大曲げ応力は，90°で切出した場合に 50 N/mm^2 であるのに対して，60°，30°および 0°で切り出した場合には，それぞれ 38N/mm^2，17 N/mm^2，および 5 N/mm^2 となり，90°の場合と比べ，それぞれ 8 割，4 割および 1 割程度となった。

既往の研究 [2,5] ではパネルの中心から打込んだ場合，中心から離れるほどコンクリート中の繊維が同心円状に配向する傾向が強くなると報告されている。**図 - 6** と**図 - 7** を比較すると，切出し位置が中心に近い r=30cm に比べ r=50cm の方が切出し角度による曲げ強度の変化が顕著になっており，既往の知見と一致した結果となった。これは同一切出し角度の場合でも，切出し位置により，繊維の配向が異なることを示していると考えられる。しかし，90° の場合には**図 - 5** に示した通り中心からの距離にかかわらず最大曲げ応力はほぼ一定になっている。したがって，切出し角度 90° の場合では，最大曲げ応力に対する配向の影響が小さいが，60° 以下では配向の影響が大きいことが推測される。

3.2 長方形パネルから切出した供試体の曲げ強度

(1) 中心 1 点から打込む場合

図 - 8 に長方形パネルの長辺方向に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。なお，ここでは型枠の長辺からの距離ごとに分けて示した。パネル長辺方向中央断面の供試体 E9，E10，E11 の最大曲げ応力は 50N/mm^2 程度になり，円形パネルにおいて 90°方向に切出した供試体と同程度の曲げ応力を得られた。長辺方向の型枠に沿った供試体 E1，E5，E6 の最大曲げ応力は中央の E9 より若干低下し，40N/mm^2 程度になった。また，パネル短辺方向中央断面の E3, E8 の最大曲げ応力は 30N/mm^2 であった。

図 - 9 に長方形パネルの短辺方向に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。パネル中央付近の供試体 E15 の最大曲げ応力は 40N/mm^2 程度であるのに対して，長辺方向の型枠に近い E14 では 18 N/mm^2 程度に低下する結果となった。また，短辺方向の型枠に沿った E12 の最大曲げ応力は E15 と同程度となった。

(2) 2 点から打込む場合

図 - 10 に長辺方向に平行に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。供試体 F6，F7 の最大曲げ応力は 50N/mm^2 となり，円形パネルの 0°方向および 1 点打込みの E9，E10 と同程度になった。一方，コンクリートの合流部であるパネルの長辺方向中央部から切出した供試体 F9，F10，F11 では，ひび割れ発生後の最大曲げ応力は 2N/mm^2 程度となり，繊維による架橋効果がほとんどない結果となった。

図 - 11 には短辺方向に切出した供試体の σ - CMOD

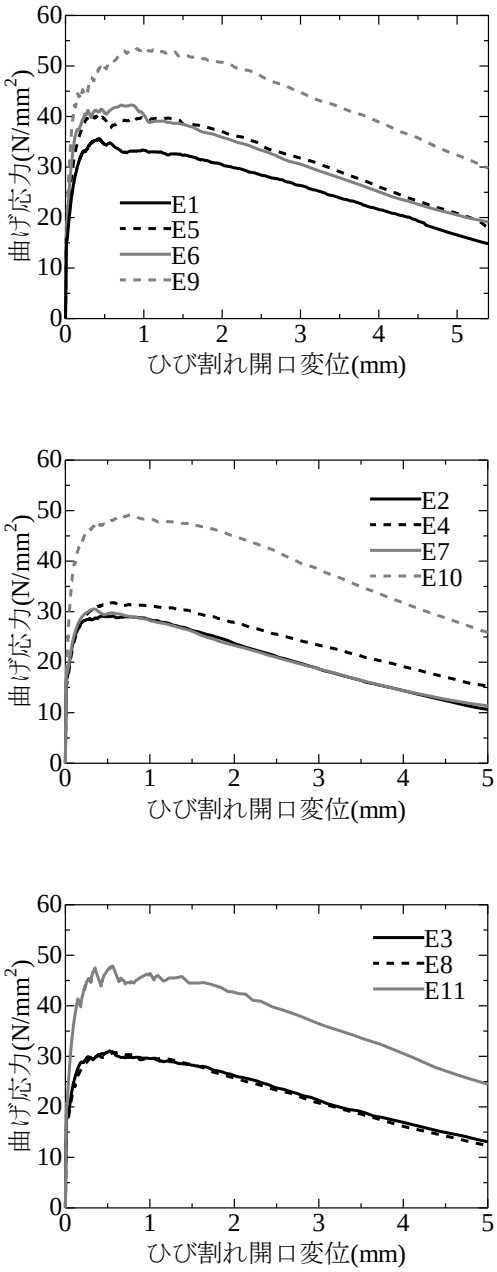


図 - 8　1 点打込みパネル長辺方向の曲げ強度

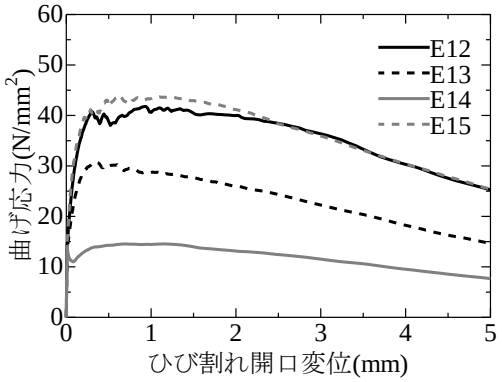


図 - 9　1 点打込みパネル短辺方向の曲げ強度

曲線を示す。供試体 F15 の最大曲げ応力は 50N/mm^2 程度であるのに対して，供試体 F13，F14 では応力が大きく低下し，供試体 F12 では低下の度合いは小さくなった。

以上，ひび割れ後の最大曲げ応力の変化の状況および供試体破断面の繊維配向状況から，長方形パネルの中心 1 点から打ち込む場合と 2 点から打込む場合の繊維の配向は**図 - 12** のようになっているものと推察される。

3.2 供試体破断面の観察結果

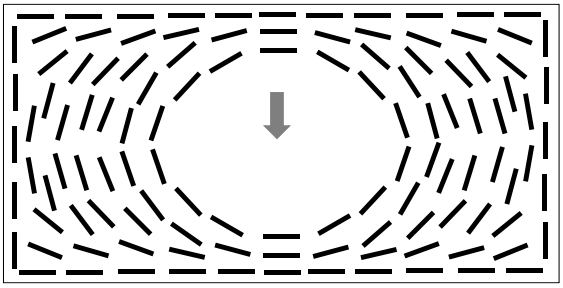
写真 - 2 には円形パネルにおいて半径方向に対して 0°, 30°, 60°および 90°で切出した供試体の破断面の繊維の状況を示す。写真より，破断面において繊維が一定方向に配向していることが明確に観察され，その方向も繊維が同心円状に配向することから推定される方向とほぼ一致している。

また，**写真 - 3** には長方形パネルで 2 点から打込んだ場合のコンクリートの合流部（供試体 F9,10,11）の破断面を示す。合流部では繊維の数が少なく，しかも破断面に対して平行に配向しており，繊維による架橋効果が期待できないことを示している。なお，長方形パネルから切出した供試体では，断面の高さ方向で配向が変化するものも見られたが，全体的な配向は**図 - 12** の通りであった。

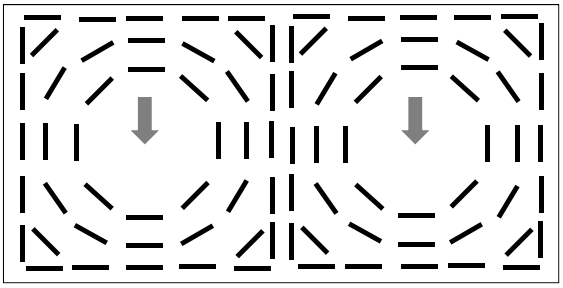
4. まとめ

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 円形パネルに UFC を中心から打込むと繊維は同心円状に配向し，その結果，パネルから切出した供試体のひび割れ発生後の最大曲げ応力は，切出した角度により変

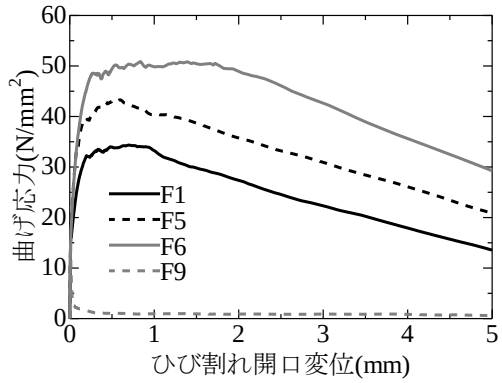


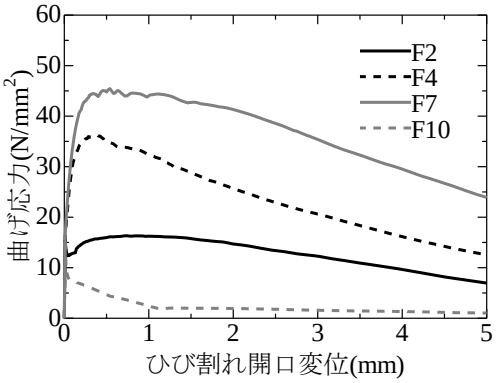
(a) 1 点打込み



(b) 2 点打込み

図 - 12　1 点と 2 点打ち込む場合の繊維配向予測図





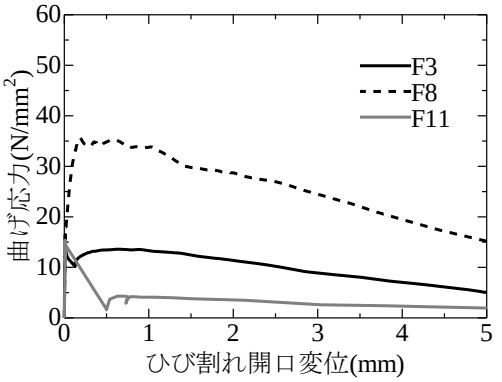


図 - 10　2 点打込みパネル長辺方向の曲げ強度

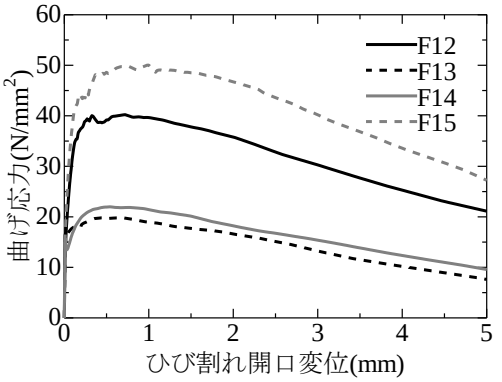
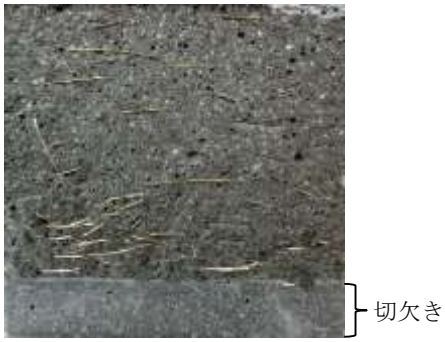


図 - 11　2 点打込みパネル短辺方向の曲げ強度



(a)0°

(b)30°

(c)60°

(d)90°

写真 - 2　円形パネル破断面の繊維配向状況

化し，半径方向に対して 0°と 90°で切出した場合では，1:10 程度の差が生じることが確認できた。

(2) 長方形パネルにおいて，中心 1 点から打ち込んだ場合，繊維の配向は楕円状になることがパネルから切り出した供試体のひび割れ発生後の最大曲げ応力から推測された。また，2 点から同時に打込んだ場合も，それぞれの打込み位置を中心に同心円状に配向することが推測された。さらにコンクリートの合流部が形成され，合流部では繊維の架橋効果がほとんど期待できない結果となることが確認できた。

写真 - 3　コンクリートの合流部の破断面

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 Sruct, Vol(43), No.(7), pp.1009-1023, 2010

4) Boulekbache B, Hamrat M, Chemrouk M, Amziane S. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, Constr Build Mater, Vo.l24, No.(9), pp.1664-1671, 2010

5) Kwon SH, Kang ST, Lee BY, Kim JK: The variation of flow-dependent tensile behavior in radial flow dominant placing of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(UHPFRCC), Constr Build Mater, vol.(33), pp.109-121, 2012

6) Amin Abrishambaf, Joaquim A.O.Barros, Vitor M.C.F Cunha: Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, Cem. Concr. Res, Vol.(51), 2013

7) 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

8) JCI 規準：切欠きはり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 JCI-S-002