# 論文　超高強度繊維補強コンクリート曲げ供試体中の繊維の配向

周　波[*1]・Ha Duy Nhi[*2]・内田裕市[*3]

**要旨**：超高強度繊維補強コンクリートの曲げ供試体中における繊維の配向を検討するために，可視化モデルコンクリートに繊維を混入して打込み時の繊維の配向を可視化した。その結果，コンクリートの注ぎ口を型枠の片端に固定して打ち込むと，繊維は斜め上方向に配向することが明らかになった。また，実際の UFC 曲げ供試体を切断して繊維の配向を観察した結果，可視化実験と同様の状況であることが確認された。

**キーワード**：超高強度繊維補強コンクリート，繊維の配向，繊維の可視化

## 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，マトリクス中の繊維の分散，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課題である。その最大の理由は，コンクリートあるいはモルタルマトリクス中の繊維の分散・配向を観察すること自体が難しいうえ，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と考えられる。

そこで，本研究では短繊維の特に配向に関する基礎的資料を得ることを目的として，曲げ供試体を対象として，コンクリートを透明な粘性を有する流体でモデル化することで供試体中の繊維の可視化を試みた。また，硬化した鋼繊維 UFC 曲げ供試体を切断して繊維の配向を観察し，可視化実験の結果と比較した。さらに，打込み方法を変えることにより繊維の配向を変えた合成繊維 UFC 供試体の曲げ試験を行い，繊維の配向が曲げ挙動に及ぼす影響を検討した。

## 2. 既往の研究

コンクリート中の繊維の配向状態を観察するには，供試体の切断面を観察するのが簡便であり一般的である。最近はさらに画像解析技術を組合わせることで配向状態の数値化が検討されている。横尾ら[1)]は，鋼繊維を用いた UFC 供試体の切断面の画像解析を行うことで，繊維の配向に及ぼす供試体厚さと打込み方向の影響を検討するとともに，載荷試験を行ない，繊維の配向と力学特性の関係について検討している。また，合成繊維を用いたコンクリートの場合，可視光では切断面の繊維を識別することが困難であることから，馬場ら[2)]は切断面にブラックライトを照射することで，合成繊維の切断面を識別する方法を提案し，画像解析により繊維の配向を評価している。

一方，鋼繊維の場合には X 線透過法を用いる方法が古くから適用されており，この場合には供試体を切断することなく内部を直接観察することができる。馬場ら[3)]は X 線透過撮影による画像からコンクリート中の鋼繊維の配向状態を評価する方法について検討している。しかしながら，X 線透過法は特別な設備機器と有資格者が必要であり必ずしも簡便な方法とは言えない。さらに合成繊維の場合には X 線が透過してしまうため適用することができないという問題がある。

一宮ら[4)]と M. Mohammed ら[5)]は打込み方法，あるいは切り出し方向を変化させた試験体について載荷試験を行い，繊維の配向の違いにより力学特性が変化することを報告している。

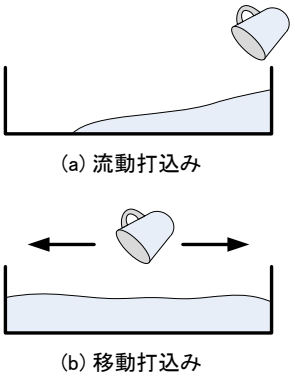
## 3. 実験概要

### 3.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察

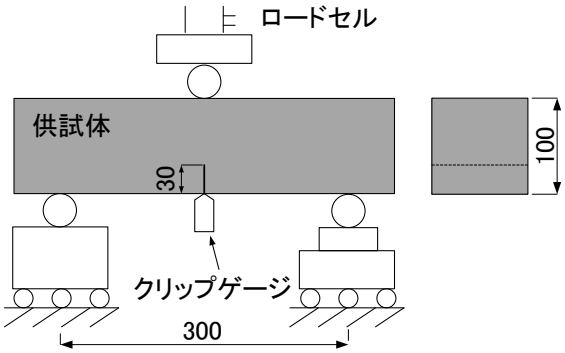
フレッシュコンクリートの可視化モデルには橋本ら[6)]が提案した高吸水性高分子樹脂（アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物）に水を添加して得られる無色透明の粘性を有する流体を用いた。水に対する樹脂の添加量は 3g/リットルを目安として，0 打フローが 200mm 程度となるように調整した。なお，実際の UFC と可視化モデルコンクリートでは密度やレオロジー特性が異なるために，フロー値を一致させたとしても可視化モデルコンクリートで実際の UFC の挙動を完全に再現できるわけではないが，繊維の配向の定性的な挙動は再現できると考えた。

繊維としては φ0.66×15mm の PVA 繊維と φ0.2×

*1 岐阜大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻　修士　(正会員)
*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－1　打込み方法




図－2　切り欠きはりの 3 点曲げ試験

表－1　合成繊維 UFC の配合

| W/C | Air | 単位量(kg/m$^3$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (%) | (%) | W | C | S | P | Ad | F1 | F2 |
| 18.0 | 5.0 | 175 | 1166 | 632 | 229 | 35 | 13 | 26 |

C:シリカヒュームセメント，S:6 号珪砂，P:シリカパウダー，Ad：高性能減水剤，
F1:PVA 繊維(φ0.66×30mm)，F2: PVA 繊維(φ0.1×12mm)

15mm の鋼繊維を用いそれぞれ実験を行った。繊維の混入量が可視化モデルコンクリートの繊維の配向に与える影響を確認するために, PVA 繊維の場合は, 混入量 0.5%, 1.0%，2.0%，3.0%の 4 種類とした。また鋼繊維の場合には後述する PVA 繊維の試験結果を参考にして, 繊維の配向の観察をし易くするため繊維の混入量は 0.5%とした。

型枠には曲げ供試体用型枠を模擬した 100×120×400mm (幅×高さ×長さ) のアクリル製の容器を用いた。打込み方法は，**図－1** に示すようにコンクリートの注ぎ口を型枠の片端に固定しコンクリートを型枠内で流動させて打ち込む方法（以下，流動打込みと呼ぶ）と，型枠内のコンクリートの高さが供試体軸方向で均等になるように注ぎ口を供試体軸方向に連続的に移動させて打ち込む方法（以下，移動打込みと呼ぶ）の 2 通りとした。

観察は打込み状況をビデオカメラにより撮影することとした。

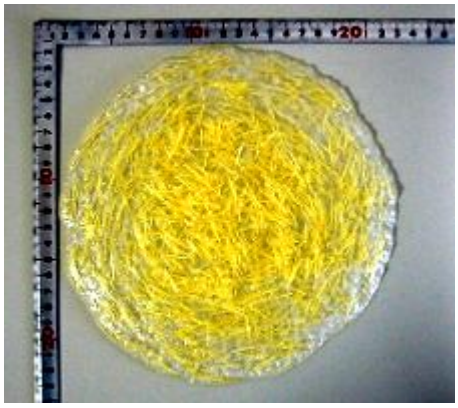
### 3.2 鋼繊維 UFC 供試体の切断面の観察

前項の可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向の挙動を実際の UFC 供試体で確認するため, 鋼繊維を用いた UFC 曲げ供試体を切断し, 切断面の繊維の状況を確認した。なお，鋼繊維 UFC を用いたのは，合成繊維の場合には切断面において繊維を肉眼で確認することが困難であるためである [2)]。ここで用いた UFC は，フランスで技術開発され我が国に導入されたもので，現在 T 社から供給されているプレミックスタイプのものである。材料，配合は仕様通りであり，φ0.2×15mm の鋼繊維を 2vol%混入したものである。打込み時の 0 打フローは 275mm であり，100×100×400mm 曲げ供試体に流動打込みを行った。標準熱熱養生を行ったのち，切欠きを設け，切り欠きはりの 3 点曲げ試験を行い，破断後の試験片をコンクリートカッターで切断して切断面の繊維の状況を観察した。

### 3.3 打込み方法が異なる合成繊維 UFC の曲げ挙動

可視化実験の結果は次節で述べるが，実験の結果，打込み方法により曲げ供試体内の繊維の配向が異なることが確認された。そこで打込み方法を変えた場合に UFC の曲げ挙動がどのように変化するかを確認することとした。ここで用いた UFC は繊維として 2 種類の PVA 繊維を混合して用いたもので, 配合は著者らが合成繊維 UFC として開発を進めてきたものである。なお，ここで合成繊維 UFC を用いたのは可視化実験により繊維の配向の定性的な挙動は繊維の種類，混入量には依存しないことが示され，合成繊維 UFC によっても一般的な UFC における配向と曲げ挙動の定性的な関係は確認できると考えたためである。UFC の使用材料と配合を**表－1** に示す。打込み時の 0 打フローは 204mm であり，同一バッチの UFC を 100×100×400mm 曲げ供試体に流動打込みと移動打込みにより打ち込んだ。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℃の気中養生を行い，その後 90℃の蒸気養生を 48 時間行った。養生終了後，切欠きを設け，**図－2** に示すような切欠きはりの 3 点曲げ試験をおこない，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」[7)]（JCI-S-002-2003）に準じて行った。ただし，供試体数については 1 条件につき 6 体とした。



図－3　可視化モデルコンクリートのフロー

載荷には，手動メカニカルジャッキを使用し，荷重の検出には容量 100kN のロードセル，開口変位の検出には感度 1/2000mm のクリップゲージを用いた。

## 4. 実験結果

### 4.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察

**図－3** に φ0.66×15mm の PVA 繊維を 3%用いた可視化モデルコンクリートのフローの状況を示す。0 打フローは 210mm となり，　繊維の分散も良好であった。

**図－4** には φ0.66×15mm の PVA 繊維を 0.5%混入した可視化モデルコンクリートを用いて流動打込みを行った場合の打込み開始から完了までの状況を示す。**図－4(a)** のように流動するコンクリートの先端および型枠底面付近では繊維は水平になっているが，注ぎ口に近い側の上部では繊維が斜めに立っている状況が見られる。さらに，**図－4(b)**のように流れの先端が注ぎ口の反対側の妻型枠に達し，コンクリートが前方に流れなくなると，コンクリートは全体的に上方に流れ始め，その結果，最終的には**図－4(d)**のように繊維は底面から斜め前方に下に凸の放物線状に配向することが明らかとなった。このような配向の挙動は**図－5** に示すように鋼繊維の場合でも同様に観察された。

また，**図－6**，7，8 に 0.66×15mm の PVA 繊維を 1%，2%，および 3%混入した可視化モデルコンクリートの流動打込み完了時の状況を示す。繊維量が増えるにつれて配向の状況が見難くなるが，繊維が放物線状に配向する状況は繊維混入量が 0.5%の場合と同様であった。

従来，曲げ供試体の型枠に流動打込みを行った場合には，コンクリートは供試体の軸方向に流れ，繊維は水平方向に配向すると考えていたが，可視化モデルコンクリートを用いた観察の結果，コンクリートは供試体軸方向ではなく，型枠底面から上方に向かって流れ，その結果，繊維は水平ではなく鉛直に近い方向に配向することが明らかとなった。

(a) 流れの先端が妻型枠に到達時

(b) 打込み高さ 50%時

(c) 打込み高さ 80%時

(d) 打込み完了時

図－4　流動打込みの場合の PVA 繊維（0.5%）の配向

図－5　流動打込みの場合の鋼繊維（0.5%）の配向

以上のことより，自己充填型の UFC では，コンクリートが流動することで，その方向に繊維が配向する特性があり，このため供試体中の繊維の配向は繊維の種類や繊維量といったパラメータよりむしろ供試体中でのコンクリートの流れ方に直接的に依存するものと考えられる。

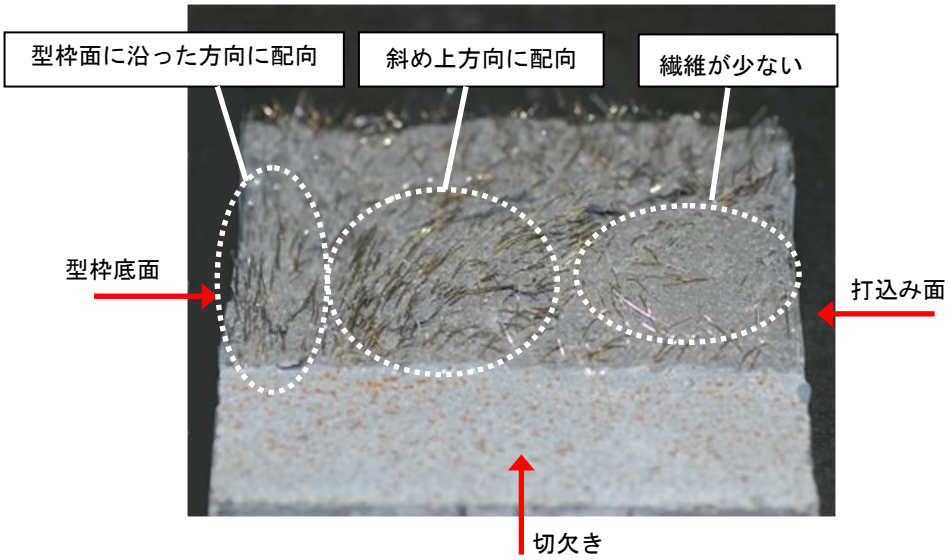
一方，移動打込みを行った場合には**図－9** に示すように繊維はランダムに配向する結果となった。

図－6　混入率 1%の場合の配向

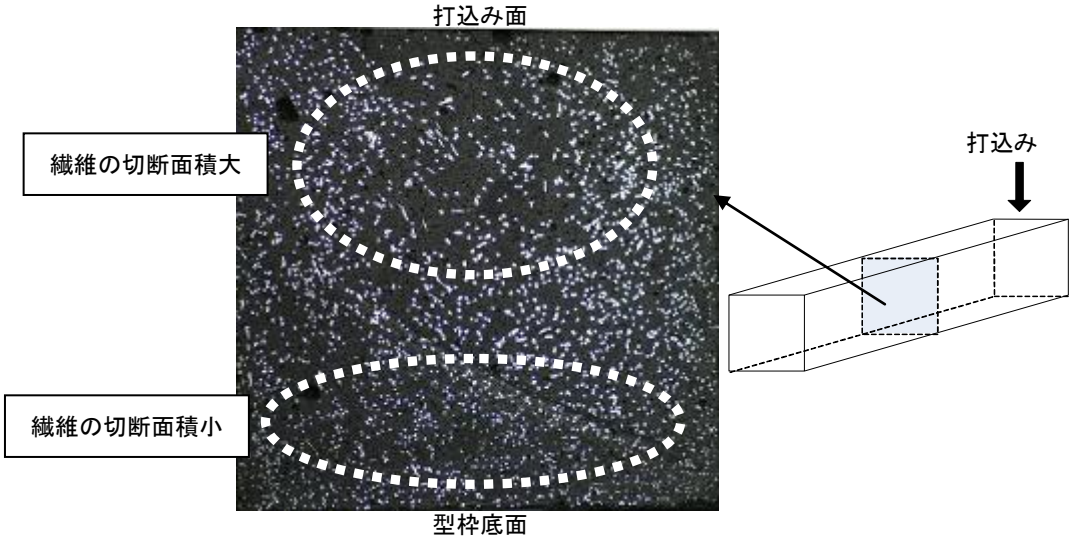
図－8　混入率 3%の繊維の配向

図－7　混入率 2%の場合の繊維の配向

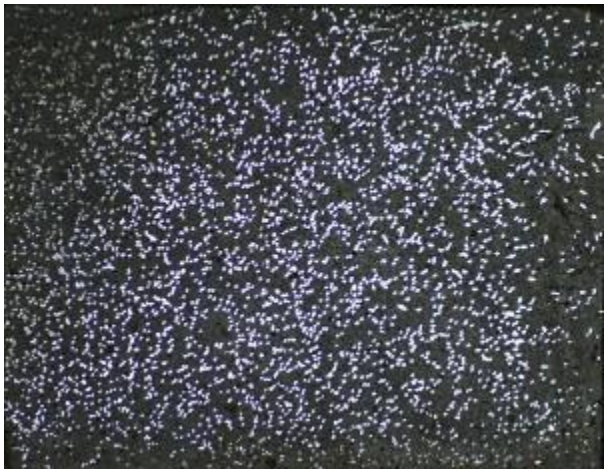
図－9　移動打込みの場合の PVA 繊維（0.5%）の配向




図－10　鋼繊維 UFC の破断面



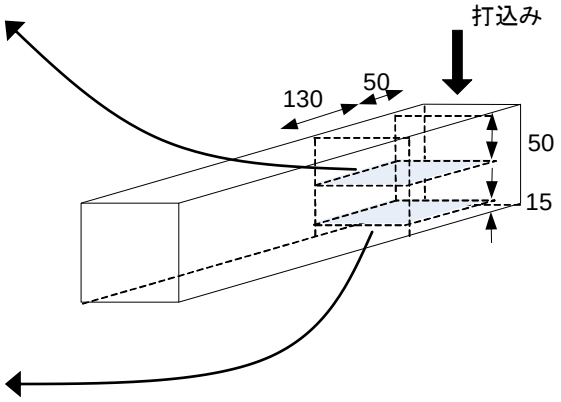

図－11　鋼繊維 UFC の垂直断面の繊維の配向



(a) 高さ中央の水平断面における繊維の配向

(b)型枠底面付近の水平断面における繊維の配向

繊維数多，切断面積小
→ 鉛直方向に配向




繊維数少，切断面積大
→ 型枠底面に平行に配向

図－12　鋼繊維 UFC の水平断面における繊維の配向

### 4.2 鋼繊維 UFC 供試体の切断面の観察

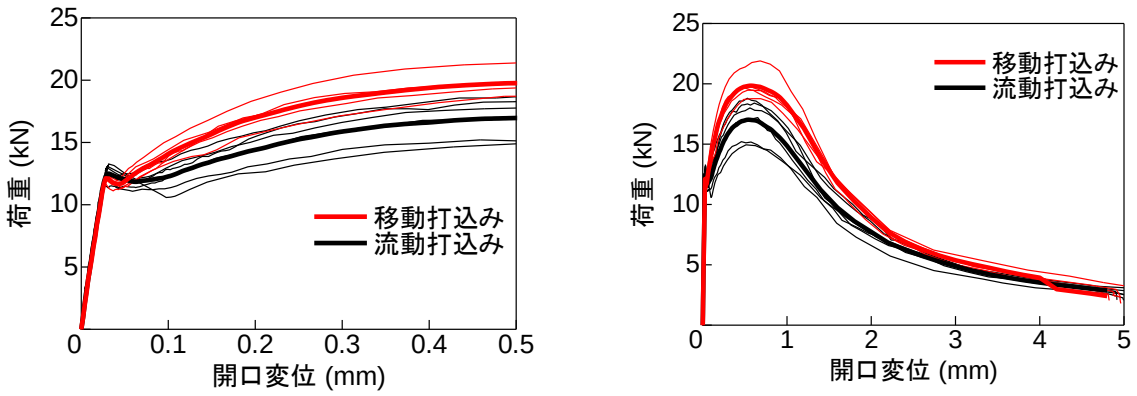
図－10 に 3 点曲げ試験後の破断面の状況を示す。型枠底面付近では繊維は破断面に対して垂直（供試体軸方向）に配向しているのに対して，断面の中央付近では繊維は破断面に対して斜め方向に配向している。さらに打込み面に近い部分では繊維が少なくなっている。

また，図－11 には供試体軸方向に垂直に切断した切断面を示す。図中の白い点が鋼繊維の切断面であり，型枠底面付近は白い点の面積が小さい，すなわち繊維は繊維軸に対して垂直に切断されているのに対して，断面の上部では繊維が少なく，繊維の切断面が大きくなっており，切断面に対して繊維が斜めに配向している状況を示していると考えられる。

図－12 には供試体を水平方向に切断した断面の状況を示す。図－12(b) は底面から 15mm の高さの切断面であり，繊維が少なく，繊維の切断面が長くなっているものが観察され，この位置では繊維は型枠底面に対して平行に配向していることを示している。また，図－12(a) は断面高の中央位置で水平に切断した断面であり，図－11 の垂直断面と比較して同程度以上の密度で繊維が存在し，しかも切断面の断面積が小さい繊維が多く観察でき，可視化モデルコンクリートで観察されたように繊維が供試体内で斜めに立った方向に配向していることを示していると考えられる。以上のことより，実際の鋼繊維 UFC 供試体内の繊維の配向の状況は，可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向状況と定性的に一致していると考えられる。

### 4.3 打込み方法が異なる合成繊維 UFC の曲げ挙動

上述の通り，流動打込みの場合には繊維は曲げ供試体内で型枠底面に対して斜め上向きに配向し，移動打込みの場合には繊維はランダムに配向する傾向があることが明らかになった。そこで，流動打込みと移動打込みで製作した曲げ供試体について切り欠きはりの 3 点曲げ試験を行い，打込み方法，すなわち繊維の配向が曲げ挙動に対してどのような影響を及ぼすかを PVA 繊維を用いた UFC を対象に検討した。図－13 には計測された荷重-開口変位曲線を示す。図中，細線は各供試体の計測データであり，太線は平均曲線である。ひび割れ発生荷重は打




(a)初期部分　　(b)全体

図－13　打込み方法が異なる場合の PVA 繊維 UFC の荷重－開口変位曲線

込み方法にかかわらず，ほとんど差は見られなかった。しかし，その後の荷重の増加は移動打込みの方が高く，最大荷重は移動打込みの方が流動打込みより 2 割程度高くなった。このような差が生じたのは，繊維の配向によるものと考えられ，流動打込みの場合には図-10 のように破断面に対して繊維が斜め，あるいは平行に配向する繊維が多くなるために架橋力が十分に発揮されず，移動打込みにより繊維がランダムに配向する場合より架橋力が低下したものと考えられる。なお，この UFC の圧縮強度は 150N/mm$^2$ であった。

## 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) 高吸水性高分子樹脂を用いた可視化モデルコンクリートにより，曲げ供試体中の繊維の配向状況を観察した。その結果，供試体の片端からコンクリートを流し込む方法の場合，繊維は供試体の軸方向には配向せず，斜め上方に配向することが示された。

(2) 鋼繊維を用いた UFC 曲げ供試体を切断して繊維の配向状況を観察した結果，可視化モデルコンクリートで観察された配向の性状と定性的に一致していることが示された。

(3) 打込み方法を変えることで供試体中の繊維の配向が異なる切欠き梁の曲げ試験を行った結果，打込み方法（繊維の配向）の違いにより最大荷重が 2 割程度変化することが示された。

## 謝辞

本研究にあたり実験材料を提供していただいた宇部三菱セメント(株)，BASF ポゾリス(株)，太平洋セメント(株)，クラレ(株) の各社に謝意を表します。

## 参考文献

1) 横尾彰彦，奥山 厚志，松尾 久幸，原田 益宏：超高強度繊維補強コンクリートの打込み方法が薄肉部材の曲げ性能に影響する因子について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1285-1290，2009

2) 馬場弘二他，コンクリート中におけるプラスチック系繊維の配向状態の評価方法，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.173-180，2004

3) 馬場弘二，伊藤哲男，吉武勇，中川浩二：X 線透過撮影による鋼繊維の配向係数の評価方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.259-264，2005

4) 一宮利通，大野俊夫，野口孝俊，南浩郎：超高強度繊維補強コンクリートを用いた床版の打込み方法が構造性能に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1453-1458, 2008

5) M. Mohammed, Y. Sato, D. Yamazaki and W. Pansuk: Influence of Fiber Orientation on Tensile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Mortar, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.32, No.1, pp.245-250, 2010

6) 橋本親典，平井秀幸，辻幸和，田村真：2 軸強制練りミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構の可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1037-1042, 1993

7) 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-002-2003