

報告 高流動繊維補強コンクリートパネル部材中の繊維の配向

中村 裕亮*1・PENI UOY*2・内田 裕市*3

要旨: 本研究では、高流動繊維補強コンクリートパネル試験体中の繊維の配向について検討した。コンクリートの打込み方法を片端打込みと幅方向一様打込みの2種類とした。繊維の配向を観察するためにX線マイクロCT解析を行うとともに可視化モデルコンクリートを用いた可視化実験を行った。X線マイクロCTで観察した結果、片端打込みの高さ方向下部では右上方向及び鉛直方向に配向し、上部では左上方向に配向していた。一様打込みでは試験体の厚さ方向から観察すると、コンクリートの落下位置を境界としたV字型の配向をしていた。実際のコンクリート中の配向の状況は可視化実験においても概ね確認することができた。

キーワード: 高流動繊維補強コンクリート, 繊維の配向, パネル, X線CT, 可視化モデルコンクリート

1. はじめに

高流動繊維補強コンクリート (High-Fluidity Fiber Reinforced Concrete 以下「HFFRC」と略す) は一般的な繊維補強コンクリートよりも流動性が高いため、施工性に優れ、複雑な形状を有する部材の製作も容易にできる。また、繊維の架橋効果によりひび割れの抑制や引張強度が向上し、薄肉化と軽量化を実現できる¹⁾。しかしながら、繊維の架橋効果は繊維の配向の影響を大きく受けることが既往の研究によりわかっており、繊維の配向に関する研究が多く行われている²⁾⁻⁸⁾。

著者ら^{6),7)}は、HFFRCを用いた梁部材やスラブ部材を対象に、打込み位置、打込み方法(固定打込みや移動打込み)、打込みに用いる容器の出口の形状、部材サイズなどを実験パラメータとし、繊維の配向状況をX線CTにより検討してきた。

梁部材の配向は部材サイズの影響を受けず、型枠端部から打込んだ場合、図-1(a)のように底部では水平方向、その上部では斜め上方もしくは鉛直方向に配向することが確認されている。シュートを用いて打込んだスラブの場合は、打込み位置に関わらず、試験体上部では円弧状に配向するが、試験体底部では一方向(コンクリートの流動方向)に繊維が向く領域が存在することが確認され

ている。(図-1(b))。

しかしながら、部材中の繊維の配向に関する研究は実験室レベルの比較的寸法の小さい供試体を対象として実施されたものが多く、実構造物レベルの寸法の試験体を対象とした研究が少ないのが現状である。そこで、本研究では実際に橋梁の主桁に用いられるボックス断面の部材のウェブ部分を想定したパネル試験体を対象とし、繊維の配向をX線マイクロCTによって観察することとした。また、可視化モデルコンクリートを用いた模擬実験を行い、繊維の配向を再現できるかを確認した。

2. 試験体の概要

実際のコンクリート中の繊維の配向を確認するために市販の超高強度繊維補強コンクリート用の材料を用いてHFFRCパネルを作製した。配合を表-1に示す。繊維の観察をしやすいするために繊維混入率は1.0vol%とした。打込みは自己充填とし、打込み時のモルタルフローは270mmであった。型枠は鋼製型枠とし、図-2(a), (b)に示すように寸法を100×1200×1200mm(厚さ×高さ×幅)とした。打込み方法は型枠端部から打込む場合(以下「片端打込み」と)と、幅方向に一様に打込む場合(以下「一様打込み」)の2種類とした。

図-3(a)に示すような橋桁に用いられるボックス断面の部材を製作する際は、上部の床版(スラブ)と下部の

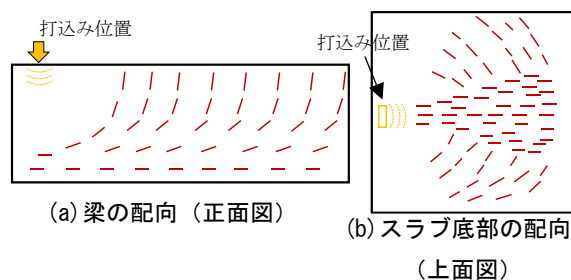


図-1 片端打込みした場合の梁とスラブの配向^{6),7)}

表-1 高流動繊維補強コンクリートの配合

単用量(kg/m ³)					繊維混入率 vol(%)
B	S	W	SP	MA	F
1,347	905	182	20	1.0	1.0

B: プレミックス結合剤, S: 珪砂, W: 水, SP: 高性能 AE 減水剤

MA: 消泡剤 (マスターエア 404), F: 鋼繊維

*1 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 (学生会員)

*2 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博士 (工学) (フェロー会員)

U字型部材を別々に製作するのが一般的である。また、U字型部材を製作する場合は、図-3(b)に示すようにU字型部材を上下反転させ、フランジからコンクリートをウェブ部分に流下させる方法が用いられる。そこで、本研究ではこの製作方法を模擬することとし、ウェブをパネルとしてモデル化し、パネルの幅方向に様にコンクリートを打ち込む方法について検討した。

片端打込みではバケットを型枠の片端に固定した状態で連続的に打込んだ。一様打込みではパネルの幅と同一のスラブ状の容器にあらかじめコンクリートを充填しておき、スラブ型容器の側面を開放することで幅方向に様にコンクリートを打込んだ。このときコンクリートを厚さ方向の中央位置から自由落下させた。

3. X線マイクロCTによる配向の観察

3.1 観察の概要

コンクリート内部の繊維を観察するために、X線マイクロCTを用いた。本研究で使用したX線マイクロCTは最大出力230kV、空間分解能は5 μ mであり、直径0.2mm、長さ15mmの繊維1本1本を検知できる。

試験体の厚さは幅及び高さに対して十分に小さいため、片端打込みのパネルでは、厚さ方向の断面における繊維の配向は厚さ方向の中心面を対称面として対称であ

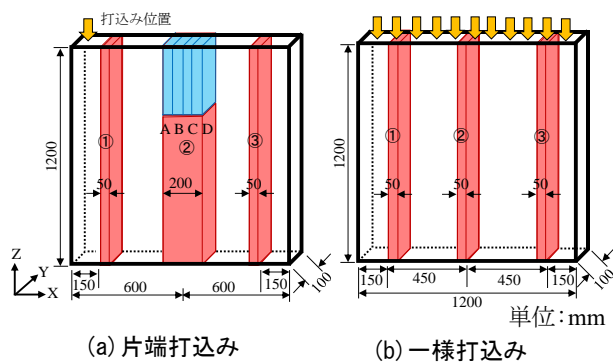


図-2 パネル試験体の寸法及び観察箇所

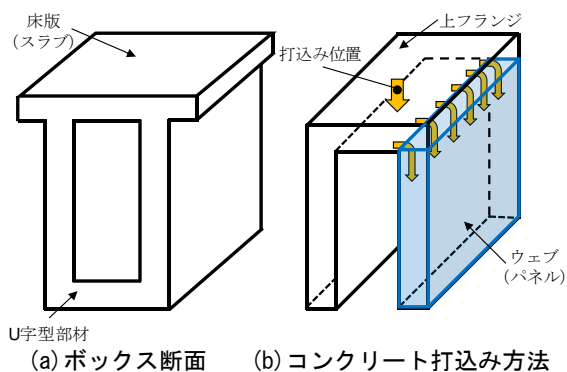


図-3 一様打込みの概要

ると考えられる。そこで、片端打込みの場合は厚さ方向の中央から型枠面までの50mmのみを観察の対象とした。また、X線の強度を考慮し、撮影に用いる供試体は断面が50 \times 50mm、高さが200mmの角柱とした。

図-2に示すとおり、パネル試験体の幅方向をX方向、厚さ方向をY方向、高さ方向をZ方向とし、以下ではX軸方向から観察した断面を側面、Y軸方向から観察した断面を正面、Z軸方向から観察した断面を上面と呼ぶ。なお、繊維の配向を見やすくするために、CT画像の出力領域の厚みは10mmとした。

3.2 片端打込みの配向

片端打込みにおける観察位置は図-2(a)に示すように型枠両端から150mmに位置する50mm(左から①、③)と、長さ中央の200mm(②)とした。正面から観察した配向の様子を図-4、図-5に示す。図中の水平方向の黒線は供試体の切断位置、もしくは切出した高さ200mmの供試体を高さ方向に2分割して撮影した際の画像の繋ぎ目である。また、図中の赤線は配向性が確認された対象領域の平均的な配向を示している。

パネル下段(底面から高さ600mmまでの範囲)における配向の様子を図-4に示す。型枠底部では水平方向に配向しており、その上部では右上方向及び鉛直方向に配向していることが確認された。

パネル上段(打込み面から深さ600mmまでの範囲)における配向の様子を図-5に示す。上段では左上方向に配向しており、打込み面から深さ200mmまでの領域では局所的に配向が急変しているように見えた。この配向状況をより詳細に確認するために、図-6に示すように観察

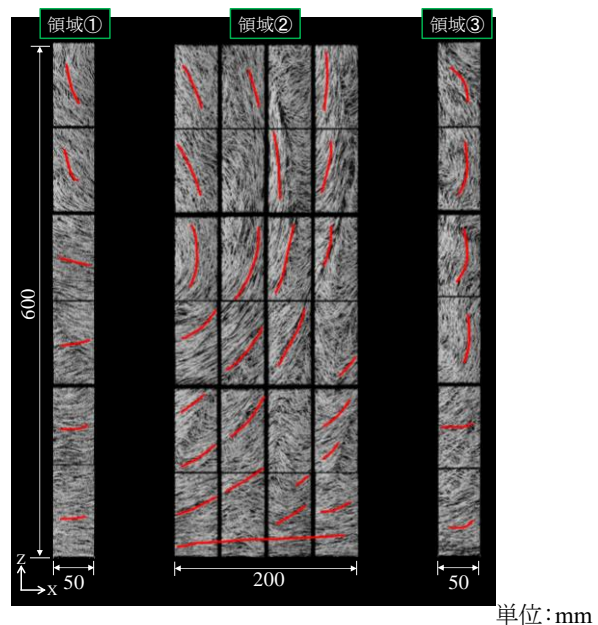


図-4 片端打込みパネルの下段の配向

箇所②の上部 400mm の領域 (青枠) を側面と上面から観察した。その結果、側面から観察した場合、概ね鉛直方向に配向しているが、青枠で示す領域では繊維が点状に観察され、繊維がパネルの X 軸方向に配向していることも確認された。上面から観察すると全体的に X 軸方向に配向していることが確認された。すなわち、試験体上段では正面から観察した場合、繊維が乱れているように見えるが、詳細に観察すると左上方向または鉛直方向の配向が多いことが確認された。

3.3 一様打込みの配向

一様打込みにおける観察位置は図-2(b)に示すように型枠両端から 150mm (左から①, ③) と、長さ中央 (②) とした。正面から観察した配向の様子を図-7に示す。繊維が斜め方向に配向している領域も存在するが、全体的に概ね鉛直方向に配向している様子が確認された。底部

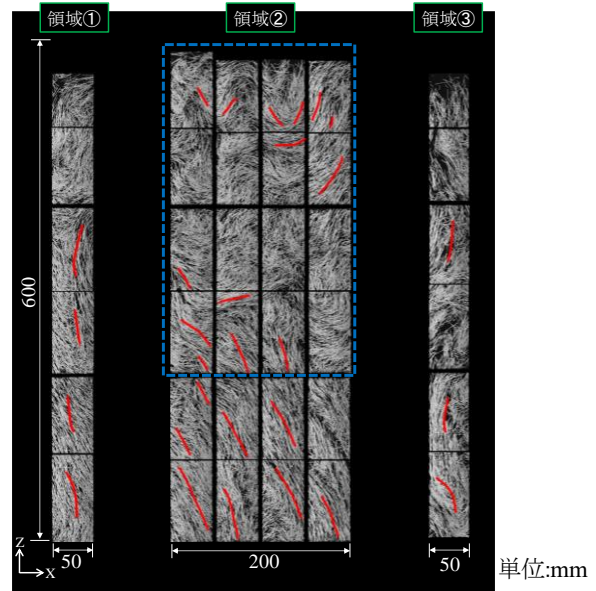


図-5 片端打込みにおけるパネル上段の配向

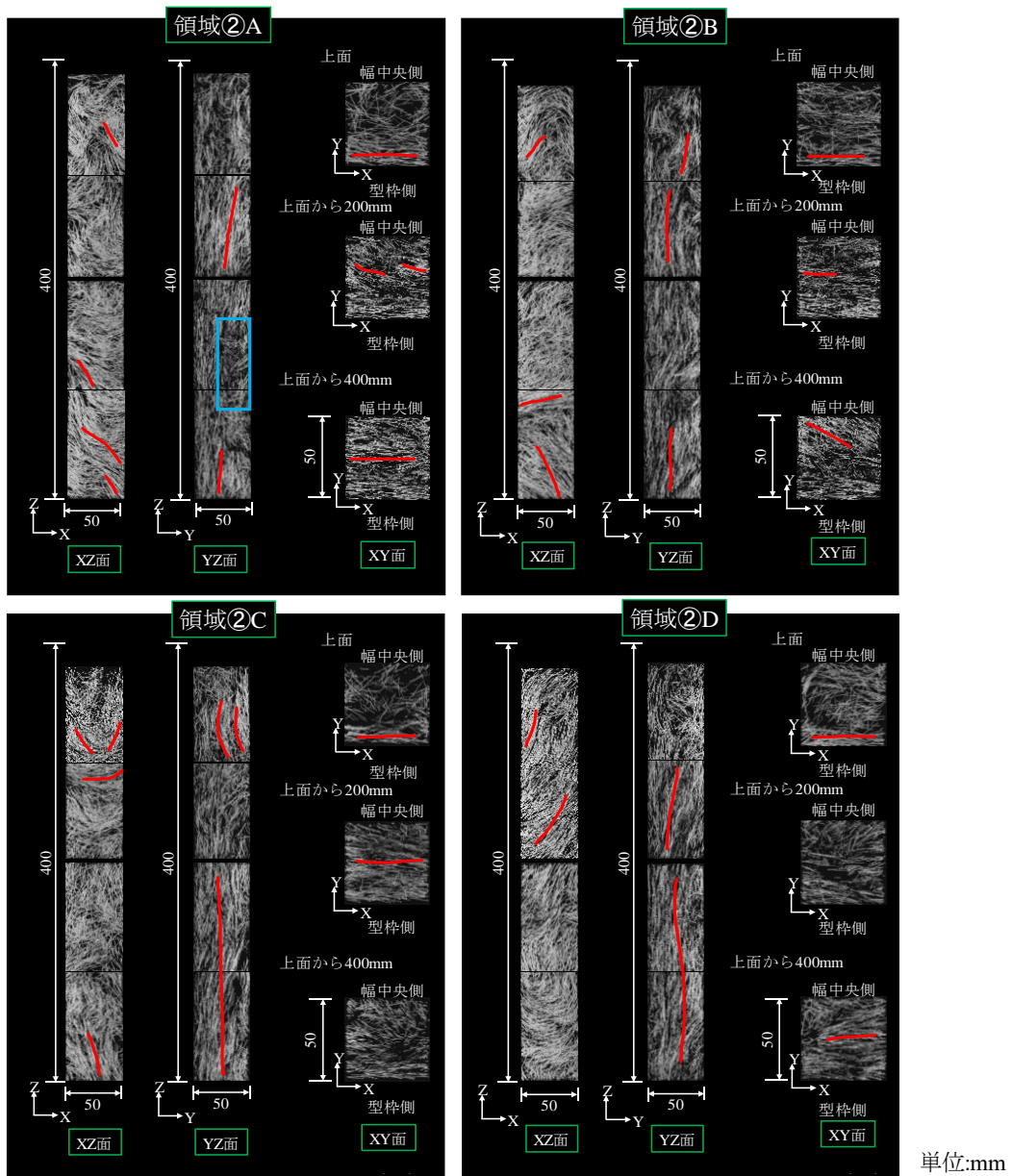


図-6 3方向からの配向観察

単位:mm

では、片端打込みと比較して水平方向に向いている繊維が少なかった。

側面から観察した配向の様子を図-8 に示す。①と③では下段から上段にかけてコンクリートの落下位置(青線)を境界としたV字型のような配向をしていることが確認された。なお、観察箇所②において、下段はV字型のような配向をしていたが、上段では鉛直方向に配向していることが確認された。その原因としては、打込みの際にコンクリートが厚さ方向の中央に落下しなかったことが考えられる。

4. 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察

4.1 可視化試験の概要

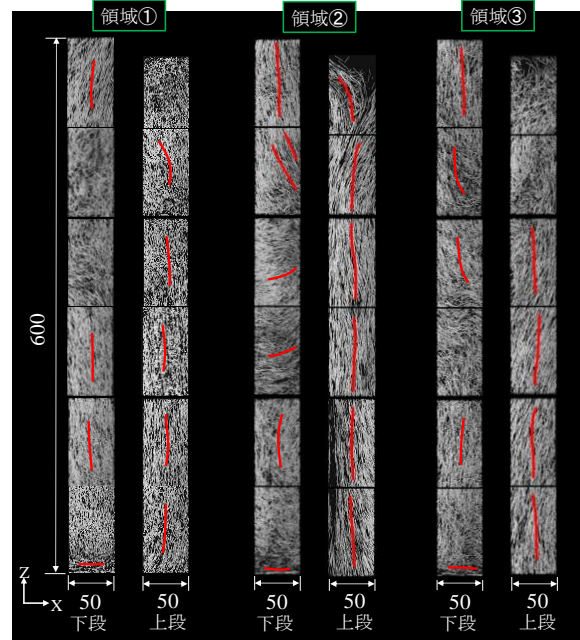
既往の研究⁶⁾⁸⁾では、可視化モデルコンクリートにより実際の繊維の配向を概ね再現でき、また、打込む際に流動の様子を観察できるため、配向メカニズムの推定にも有効であると報告している。そのため、本研究でも同様の可視化試験を行い、配向の再現を試みた。

可視化モデルコンクリートは、高吸収性高分子材料(SAP: Super Absorbent Polymer)に水を加えた無色透明の粘性流体にPVA 繊維を混入したものである。PVA 繊維は直径0.5mm、長さ20mmのものを使用し、繊維混入率は1.0vol%とした。フロー値は実際のHFFRCと同程度であれば繊維の分散・配向を模擬できるため、230mm程度とした。

打込み方法は実際のパネル試験体と同様である。片端打込みではバケツを用いて打込み、一様打込みでは幅広

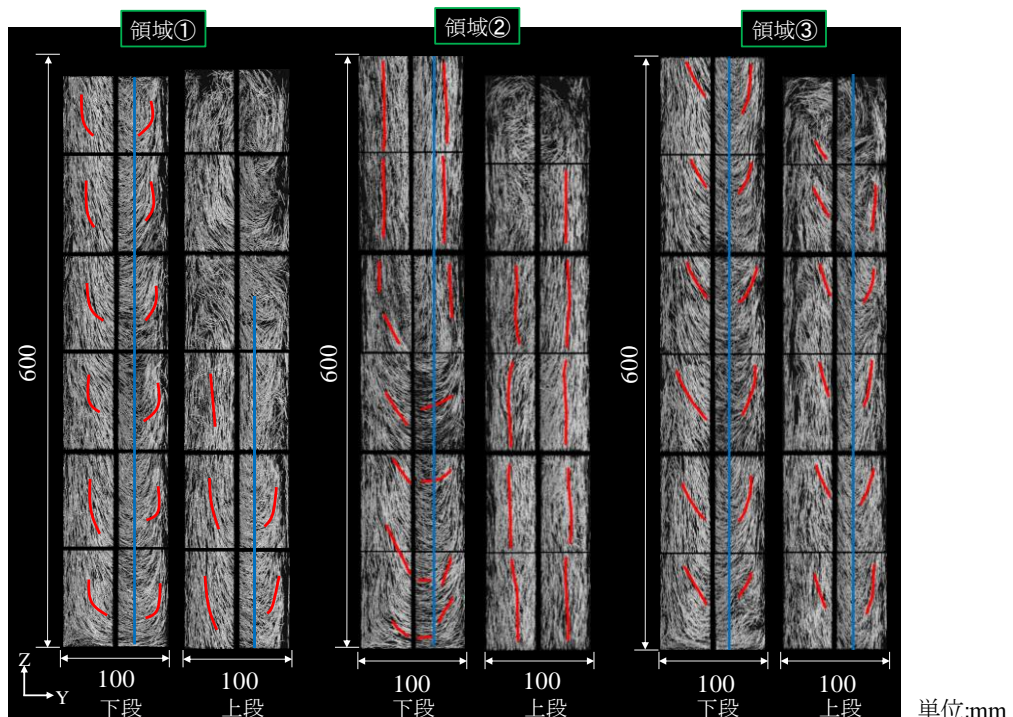
の容器に可視化モデルコンクリートを溜めてから幅方向に一様に流し込んだ。また、可視化モデルコンクリートと透明アクリル製型枠では実際のコンクリートと鋼製型枠に比べ、界面の摩擦が小さいため、型枠底面に梱包材を敷くことで実際の摩擦を模擬することとした。

使用した型枠は図-9 に示すように、寸法を100×500×1000mm(厚さ×高さ×幅)とした透明アクリル製樹脂のものを使用した。ただし、可視化モデルコンクリート



単位:mm

図-7 一様打込みにおける正面から観察した配向



単位:mm

図-8 一様打込みにおける側面から観察した配向

の側圧により亚克力型枠が破損しないようにするため、高さ中央の位置に幅 100mm の鋼材を固定し補剛した。そのため、片端打込みにおいて高さ方向中央の 100mm の領域では配向の観察はできない。

4.2 配向観察の結果

図-10 に片端打込みにおける試験体全体の繊維の配向を示す。型枠底部では、X 軸方向に配向しており、その上から補剛材で隠れた領域（型枠高さ中央）では、右上方向の配向をしていることが確認された。また、型枠上部では打込み位置周辺では右上方向の配向をしていたが、それ以外では概ね鉛直方向（Z 軸方向）に配向している結果となった。したがって、実際に片端打込みしたパネルにおける繊維の配向と比較し、高さ 500mm までは概ね一致していることが確認された。

次に一様打込みの場合における正面と側面から観察した配向の様子を図-11 に示す。正面からは鉛直方向と斜め方向、側面からは概ね打込み位置を境界とした V 字型の配向をしているが、乱れている箇所も確認された。可視化モデルコンクリート中の繊維の配向が実際のコンクリートの配向よりも、乱れている範囲が多いのは可視化モデルコンクリートの方が、粘性が小さく、実際のコン

クリートの落下状況を十分に再現できなかったためであると考えられる。

4.3 一様打込み試験体の配向のメカニズム

前述の同様打込みの可視化実験では高さが 500mm で実際のパネル試験体より高さが低く、また、上記のように実際の配向（X 線画像）のような明確な V 字型の配向を確認することができなかったため、コンクリートの落下位置が一定となるように工夫して追加実験を行った。使用型枠は図-12 に示すように寸法を 100×1000×200mm（厚さ×高さ×幅）とした透明亚克力製樹脂と鋼製型枠を組み合わせて作製した型枠を使用して可視化実験を行った。また可視化モデルコンクリートの落下位置を固定するために、片側の型枠面に添わせて打込むことで、実際の試験体の幅方向の半分の配向を模擬することとした。

側面から観察した結果を図-13 示す。型枠底部は Y 軸方向に配向しており、上部にかけて左上方向に配向していた。

図-14 に示すように可視化モデルコンクリートの流動はまず、型枠に沿って流れ、左側の壁に達した後は繊維

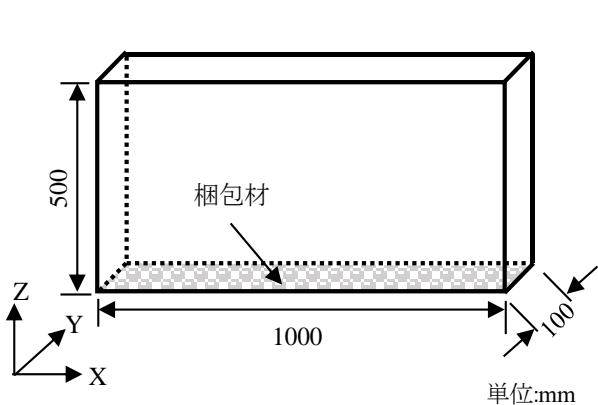


図-9 アクリル製型枠の寸法

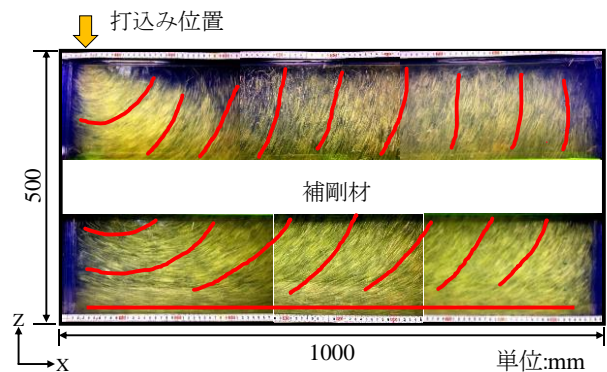
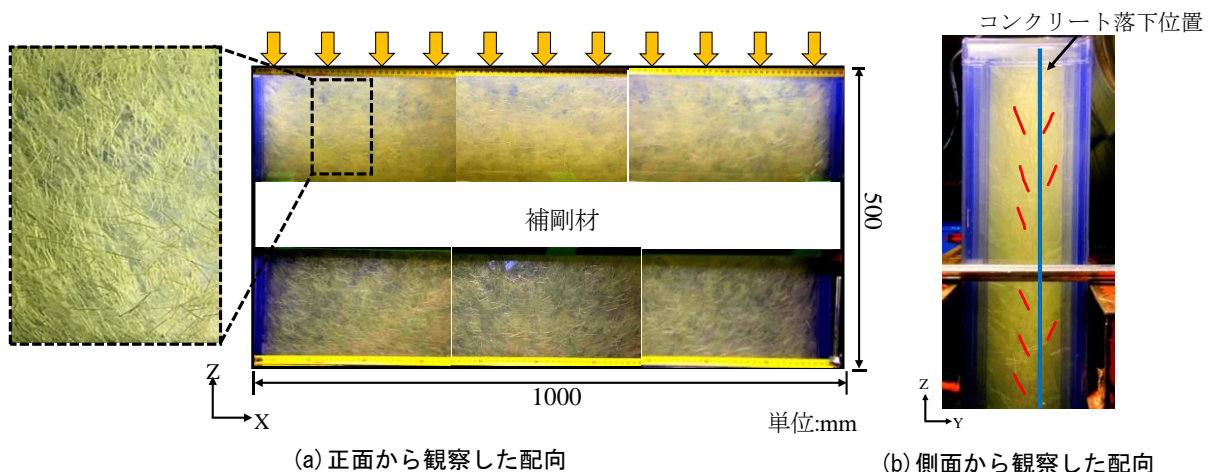


図-10 片端打込みの配向



(a) 正面から観察した配向

(b) 側面から観察した配向

図-11 一様打込みの配向

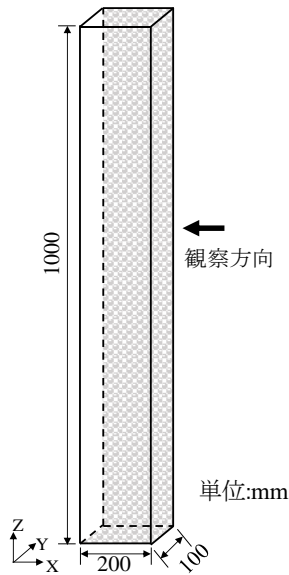


図-12 型枠の寸法

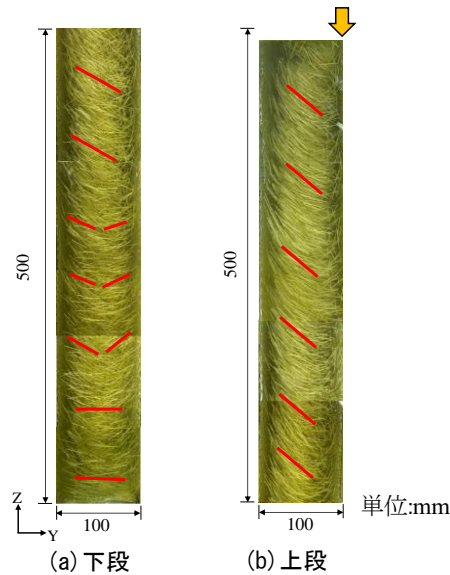


図-13 側面から観察した配向

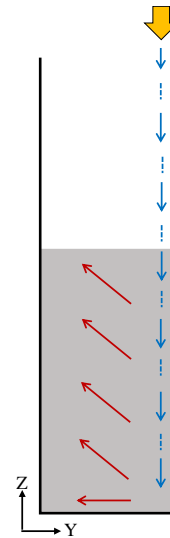


図-14 コンクリートの流動の様子

が斜め下方向に配向している。したがって、コンクリートがパネル厚さ方向の中央付近に一樣に落下した場合は、落下位置を境界とした V 字型の配向をされると考えられる。

5. まとめ

本研究では HFFRC パネル部材を対象に、打込み方法の異なる場合における部材中の繊維の配向を X 線マイクロ CT によって観察した。また、可視化モデルコンクリートを用いて可視化試験を行い、コンクリートの流動状態の確認や配向のメカニズムを検討した。本実験より得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 型枠端部から打込んだ場合、正面から見た配向は底部では水平方向、試験体中段では右上方向もしくは鉛直方向、試験体上部では左上方向となる。
- (2) 幅方向に一樣に打込んだ場合、側面から見た配向は落下位置を境界とした V 字型となる。
- (3) 可視化モデルコンクリートを用いた実験では、実際の配向を概ね再現することができ、また、流動状態の確認ができるため、配向メカニズムの推定が可能である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H0229 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Mahmoud, H.A. et al.: Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Part I: Developments, Principles, Raw materials, Case Studies in Construction Materials, Vol.17, pp.e01290, 2022

- 2) Zhou, B. and Uchida, Y.: Relationship Between Fiber Orientation/Distribution and Post-Cracking Behaviour in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPC), Cement and Concrete Composites, Vol.83, pp.66-75, 2017
- 3) 佐々木一成, 野村敏雄, 田中翔, 秋山充良: 超高強度繊維補強コンクリート供試体の X 線撮影と鋼繊維の分散・配向を考慮した曲げ強度評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1093-1098, 2017
- 4) Yoo, D.Y. et al.: Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different fiber lengths and placement methods, Cement and Concrete Composites, Vol.63, pp. 51-66, 2015
- 5) 渡邊啓介, 大圖友梨子, 宮口大, 金久保利之: 繊維配向性を考慮した打込み方法が DFRCC の曲げ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.273-278, 2016
- 6) 矢野和輝, 田中章, 岩崎雄也, 内田裕市: 高流動繊維補強コンクリート梁部材中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.946-951, 2022
- 7) 矢野和輝, 田中章, 横井晶有, 内田裕市: 高流動繊維補強コンクリートスラブ中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.209-214, 2021
- 8) 横井晶有, 田中章, 矢野和輝, 内田裕市: 高流動繊維補強コンクリートの変断面部における繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.209-214, 2020