

報告 高流動繊維補強コンクリートスラブ中の繊維の配向

矢野 和輝*1・田中 章*2・横井 晶有*1・内田 裕市*3

要旨：高流動繊維補強コンクリートスラブ中における繊維の配向に影響を与える因子について検討した。可視化モデルコンクリートを用いて、溝形の斜めシュートと鉛直パイプを用いた打込みを行い配向の観察を行った。その結果、パイプで打込むと打込み位置を中心とした同心円状の配向が確認され、溝形シュートで打込んだ場合は同心円状に配向しない領域が現れることが確認された。これより高流動繊維補強コンクリート試験体の配向も打込み方法の影響を受ける可能性があることが示された。

キーワード：高流動繊維補強コンクリート、繊維の配向、スラブ、打込み位置、打込み方法

1. はじめに

短繊維補強コンクリート（FRC：Fiber Reinforced Concrete）は繊維の架橋効果によってひび割れの抑制、靱性や曲げ強度の改善が期待され、橋梁部材をはじめとする様々な構造物に適用が進められている。しかしながら、架橋効果は繊維の配向や分散に依存する。そのため FRC の特性を生かした設計を行うためには、部材中の繊維の配向や分散に影響を考慮する必要があり、研究が進められている。既往の研究¹⁾²⁾では、薄肉の円形パネル部材の打込み位置および打込み方法の違いによる配向と曲げ強度の関係の検討がなされている。また、FRC のスラブの繊維の配向は、型枠の中央から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¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、FRC スラブ部材の繊維の配向を X 線マイクロ CT を用いて観察したところ、同心円状に配向しない場合があることが確認された。そこで本研究ではスラブ中における繊維の配向に影響を与える因子について検討することとした。まず、高流動繊維補強コンクリートを用いて、スラブ部材の打込み位置を型枠端部と型枠中央として試験体を作製し、繊維の配向を確認した。続いて、繊維の配向を観察できる可視化モデルコンクリートを用い、打込み方法を溝形シュートとパイプを用いて行い、打込み方法の違いが繊維の配向に及ぼす影響について検討した。

2. X 線マイクロ CT による繊維の配向観察

2.1 高流動繊維補強コンクリート試験体

実際のコンクリートにおける繊維の配向を確認するために、高流動繊維補強コンクリートを用いて試験体を作製した。表-1 に高流動繊維補強コンクリートの配合を示す。使用材料はプレミックスの結合材 (B)、細骨材 (S)、繊維径 0.2mm、繊維長 15mm の鋼繊維 (F)、混和剤として高性能減水剤 (Ad)、消泡剤 (Ma) である。繊維混入

率は 1.0vol% とし、打込み時のモルタルフローは 290mm であった。打込みは自己充填とした。型枠は鋼製型枠とし、図-1 に示すように寸法は 1200×1200×100mm（幅×長さ×高さ）とした。打込み位置を型枠の中央（以下、中央打込み）、型枠端部から 100mm（以下、型枠端部打込み）とし、溝形の斜めシュート（幅 150mm）から打込んだ。ここで打込み時のシュートの方向、幅方向をそれぞれ x 軸、y 軸、高さ方向を z 軸とした。

2.2 X 線マイクロ CT の概要

今回使用した X 線マイクロ CT の空間分解能は 5 μ m であり、繊維径 0.2mm、繊維長 15mm の鋼繊維を 1 本 1 本のレベルで検知することが可能である。

X 線の強度を考慮して、図-2(c) に示すようにコンクリートカッターを用いて 60×50×100mm ないし 50×50×100mm（幅×長さ×高さ）の角柱に切り出した供試体を用いて撮影した。

表-1 高流動繊維補強コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)					vol (%)
B	S	W	Ad	Ma	F
1291	944	164	17	1	1.0

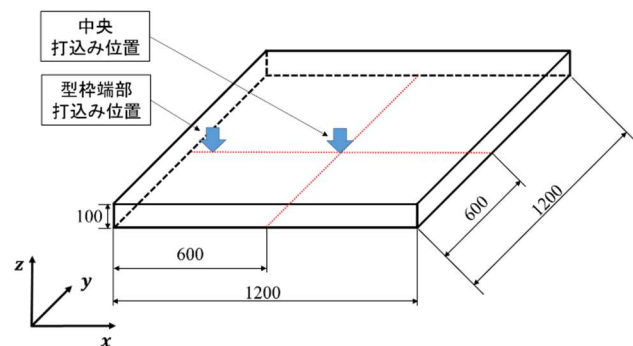


図-1 試験体寸法と打込み位置

*1 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）

*2 ジェイアール東海コンサルタンツ（株）

*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）

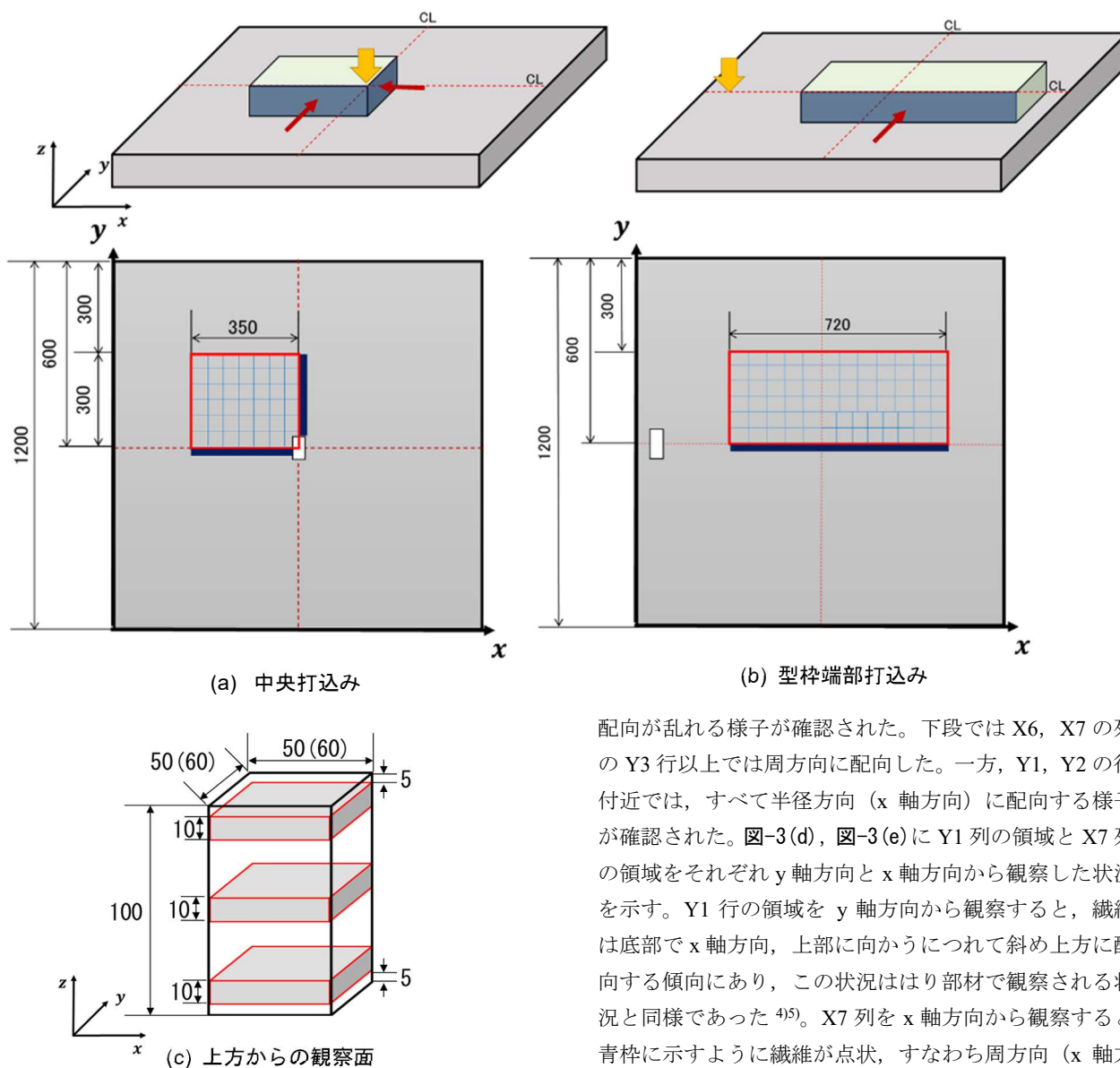


図-2 試験体の切り出し位置と観察面

2.3 繊維の配向

(1) 中央打込み

中央打込みでは、対称性から試験体の中央 $300 \times 350 \times 100\text{mm}$ （幅×長さ×高さ）を対象とした。図-2(a) (b)に各打込みにおける観察位置、観察面を示す。図-2(c)に示すように上方(z軸方向)からの観察位置は上面から5mm下がった上段、高さ中央の中段、底面から5mm上がった下段とし、厚みは10mmとした。上方から観察した上、中、下段における配向の状況を図-3(a)～(c)に示す。図-3, 4中の赤線は繊維の配向が明確に一方方向になっている箇所についてその配向方向を示したものである。ここで、図中の黒色の格子部分はコンクリートカッターの厚さに相当する。図-3(a)に示すように上段では多少の乱れがあるもののほぼ同心円状の配向が確認された。一方、中段では、打込み位置からx軸方向に離れると(X1~X3)

配向が乱れる様子が確認された。下段ではX6, X7の列のY3行以上では周方向に配向した。一方、Y1, Y2の行付近では、すべて半径方向(x軸方向)に配向する様子が確認された。図-3(d), 図-3(e)にY1列の領域とX7列の領域をそれぞれy軸方向とx軸方向から観察した状況を示す。Y1行の領域をy軸方向から観察すると、繊維は底部でx軸方向、上部に向かうにつれて斜め上方に配向する傾向にあり、この状況ははり部材で観察される状況と同様であった⁴⁵⁾。X7列をx軸方向から観察すると青枠に示すように繊維が点状、すなわち周方向(x軸方向)に配向していることが確認された。

(2) 型枠端部打込み

型枠端部打込みでは、図-2(b)に示すように $300 \times 720 \times 100\text{mm}$ （幅×長さ×高さ）の領域で観察を行った。図-4(a)～(c)にそれぞれ上段、中段、下段における上方から観察した配向の状況を示す。上段では打込み位置を中心とする概ね同心円状の配向が確認された。一方で下段のY1, Y2行の領域では、幅中央に向かうにつれてx軸方向に配向した。また、下段の(X10, Y3~7), (X11, Y3~7)は繊維の配向が乱れている様子が確認できた。図-4(d)にY1行の領域をy軸方向から観察した結果を示す。底部では底面に沿った配向が確認され、X3~9では斜め上方に配向する様子が確認された。

以上のことから、本実験では打込み位置に関わらず、中段、下段のスラブ幅中央では同心円状には配向せず、x軸方向（シュートの打込み方向）に配向することが確認された。

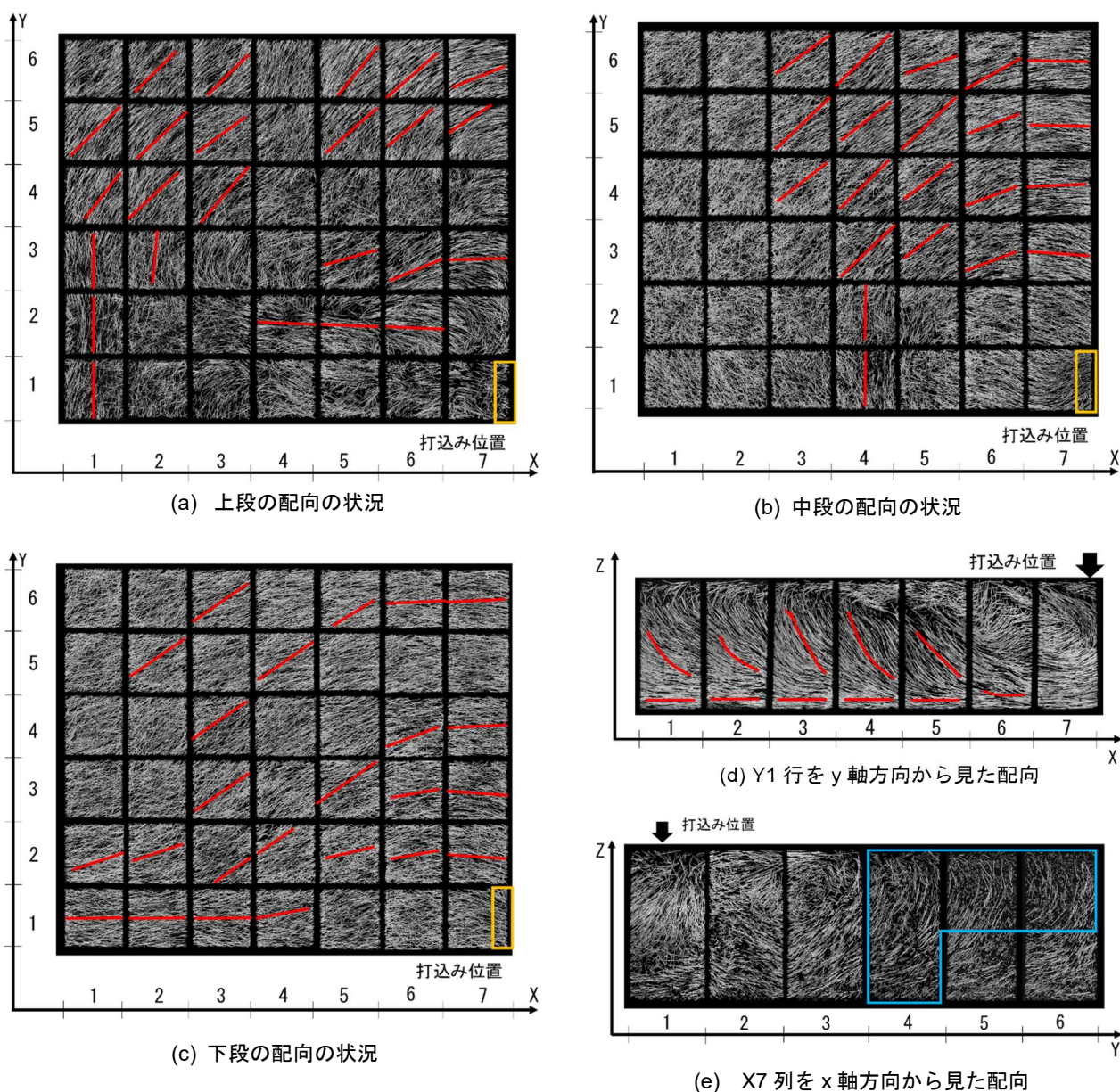


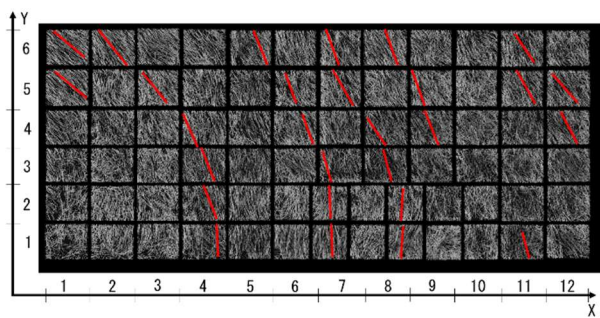
図-3 中央打込みによる繊維の配向の状況

3. 可視化モデルコンクリートによる繊維の観察

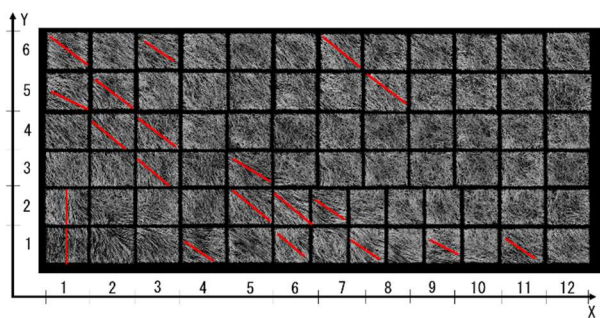
3.1 実験概要

前項の通り、実際の繊維補強コンクリートでは必ずしも打込み位置を中心とした同心円状には配向しないことが確認された。ここで、その原因を検討するために可視化モデルコンクリートによる観察を行った。可視化モデルコンクリートは、高吸水性高分子材料に水を加えた無色透明の粘性流体で、PVA 繊維（繊維径 0.5mm、繊維長 20mm）を添加したものである。繊維混入率は 1.0Vol% とし、モルタルフローは 230mm 程度になるよう調整した。既往の研究²⁵⁾から実際の高流動繊維補強コンクリートと可視化コンクリートにおいて、繊維の種類や密度などが異なっても繊維の配向は定性的に一致することが示されている。図-5 に示すようにスラブは 800×800×

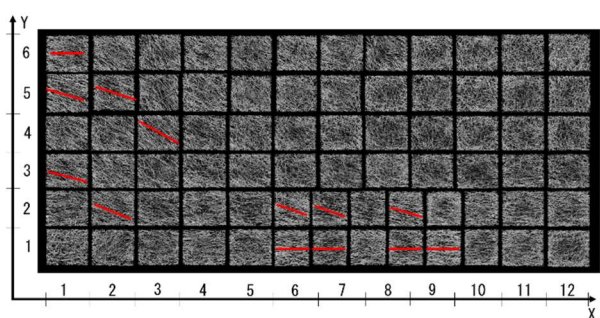
100mm（幅×長さ×高さ）とし、アクリル型枠を用い、打込み位置を中央打込みと型枠端部打込みの 2 種類とした。打込み方法の違いが繊維の配向に及ぼす影響を検討するために、幅 90mm の溝形の斜めシュートと鉛直パイプ（内径 30mm）を用い、それぞれの口から鉛直に落とす打込みを行った。打込みの高さは溝形の斜めシュートと鉛直パイプとも型枠の底面より 200mm とした。また、可視化モデルコンクリートとアクリル型枠では実際のコンクリートと鋼製型枠に比べ、界面の粘着および摩擦が小さいため、型枠底面には気泡梱包材を敷いてすべりが生じないようにした。型枠側面は観察を可能にするために梱包材は貼りつけていない。充填後に透明円筒状のサンプラー（内径 80mm）を所定の位置に押し込み、その後上部の空気口を閉じて静かに配向を乱さないよう引き上



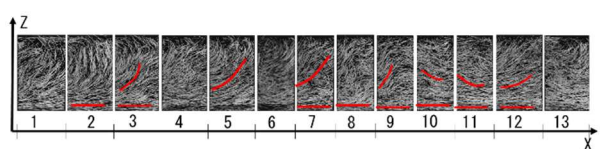
(a) 上段の配向の状況



(b) 中段の配向の状況

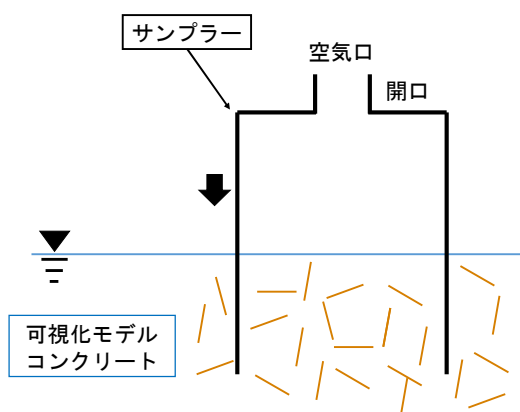


(c) 下段の配向の状況

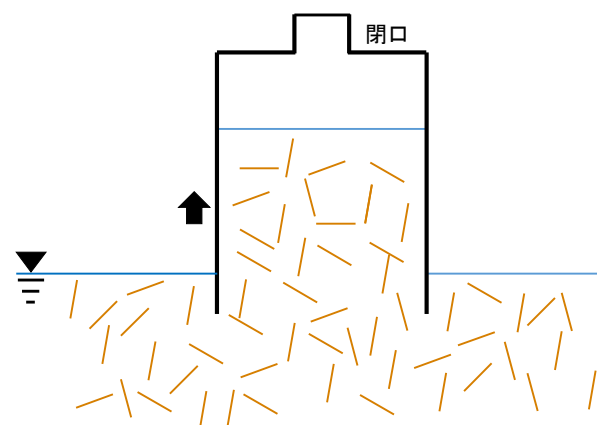


(d) Y 1 行を y 軸方向から観察した配向の状況

図-4 型枠端部打込みによる配向の状況



(a) サンプラーの挿入



(b) サンプラーの引き上げ

図-6 可視化モデルコンクリートのサンプリングの方法

げ内部の配向を確認した（図-6 参照）。ここで、サンプラーの側壁近傍における繊維の配向は、サンプラー挿入時に乱れるため内部の繊維のみを観察の対象とした

3.2 可視化モデルコンクリートの配向の状況

(1) 中央打込み

図-7 と図-8 に中央打込みにおける溝形シュートとパイプでそれぞれ中央に打込んだ場合の繊維の配向を示す。図-7 に示すように、溝形シュートを用いた場合の配向について3ヶ所でサンプリングを行い、それぞれ赤矢印で示す方向から確認をした。なお、①～③中の赤線はサンプラー内部の繊維の配向を示したもので、側壁近傍の繊維は乱れ、鉛直方向に配向している。その結果、①と②では水平方向すなわち周方向に配向していることが確認された。一方、③では斜め上方に配向していた。これは図-3 に示した実際のコンクリートの観察された傾向と同様である。なお上面から観察した場合には楕円状の配向が確認された。

一方、パイプを用いて打込んだ場合には、図-8 に示すように①～④のいずれの位置においても周方向に配向することが確認された。

(2) 型枠端部打込み

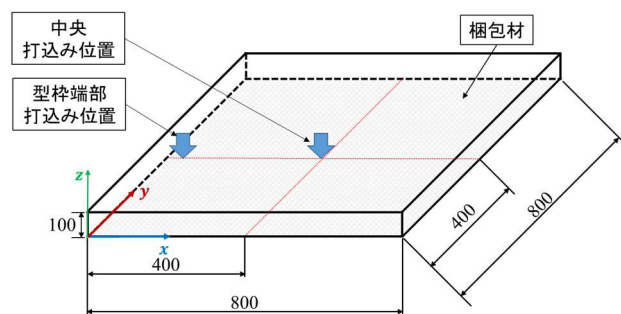


図-5 アクリル型枠の寸法と打込み位置

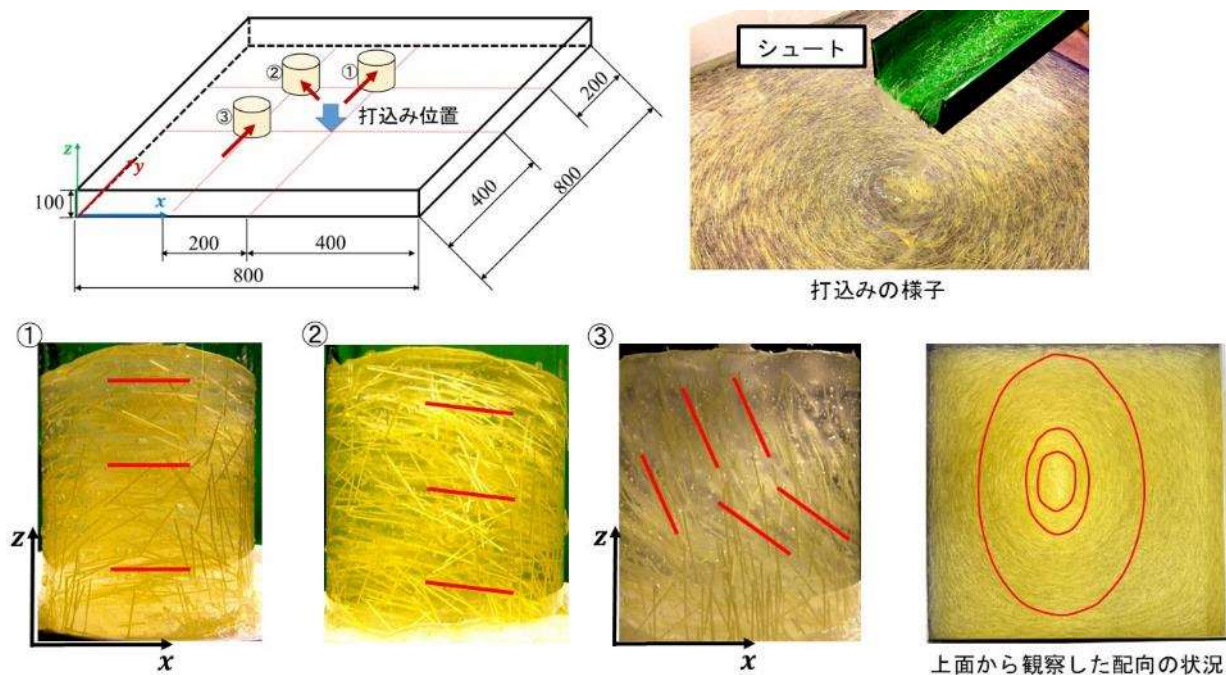


図-7 シュートを用いた中央打込み配向の状況

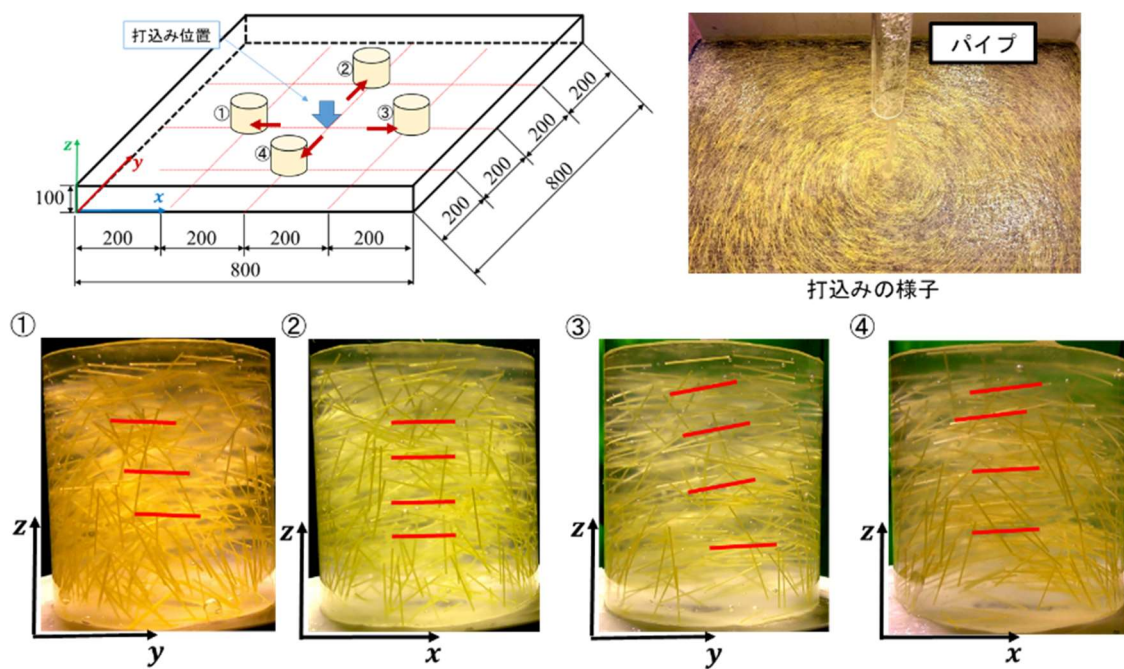


図-8 パイプを用いた中央打込みの配向の状況

図-9 に溝形シュートで打込んだときの繊維の配向を示す。型枠中央から連続して幅方向に3ヶ所と妻型枠側で1ヶ所でサンプリングを行った。①についてy軸方向から観察したところ水平方向（周方向）に配向が確認された。一方、②③では斜め上方に配向しており、④でも同様な配向であった。このスラブを上面から観察すると同心円状の配向が確認されたが、白線内側に示す暗い領域が見られた。これは、可視化モデルコンクリートは観察面に平行に配向している繊維は観察しやすいため色濃く見るが、観察面に対して直交するあるいはそれに近い

繊維は点状に見え、観察が難しくなり暗く見えるようになる特性のためであると考えられる。すなわち、白線の内側の暗い領域はy軸方向から観察した時には斜め上方もしくは上方を向いた繊維が多い領域であると考えられる。

以上のことから、溝形シュートで打込んだときに幅中央付近でx軸方向に配向することが分かった。これは図-10に示すように打込み時の繊維の配向に影響されていると考えられる。コンクリートがシュート内を流動するときに一様に流動方向に配向し、スラブに落下後、打込

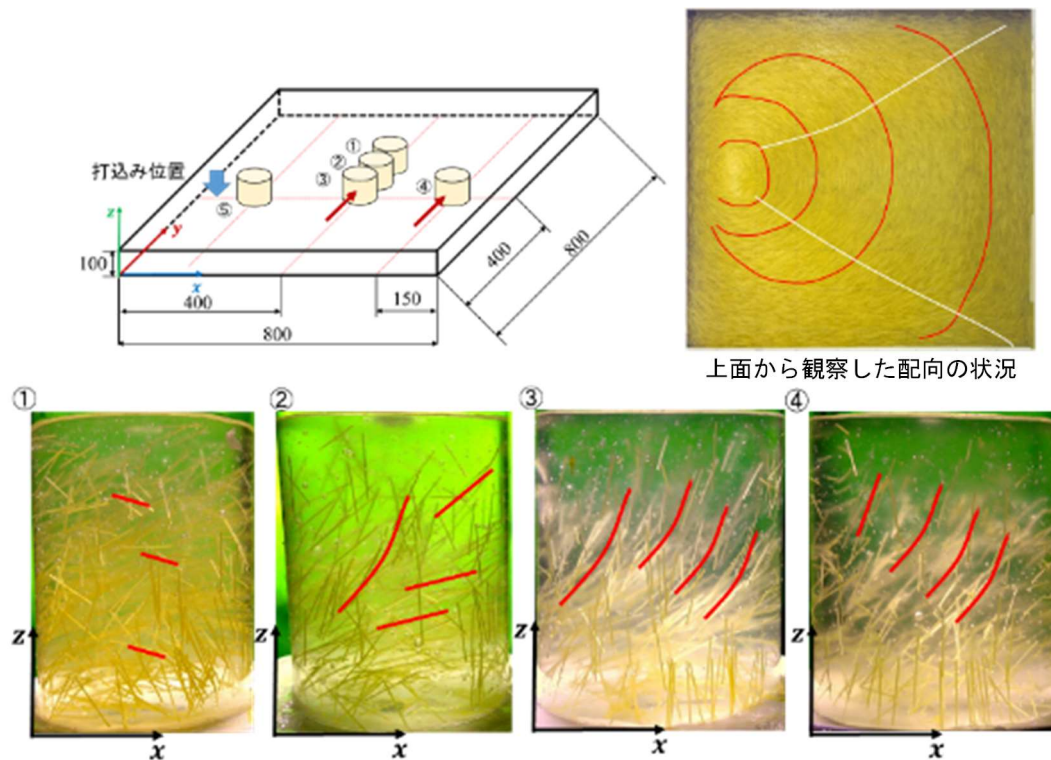


図-9 シュートを用いた型枠端部打込み配向の状況

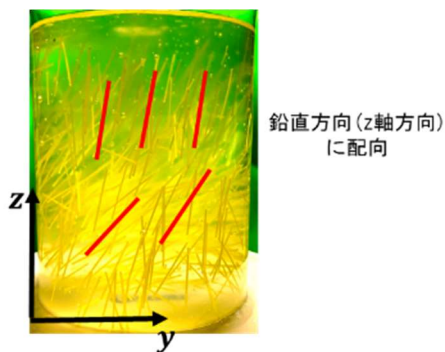


図-10 打込み位置の配向の状況

み位置の直近前方では繊維が鉛直方向に配向する状況がみられた。一方、パイプで打込んだ場合は、直後からランダムな状態で放射状に流動する傾向がみられた。スラブ内は基本的に二次元流動であるためいったん鉛直方向に配向した繊維は、その後は配向は変化するものと考えられる。すなわち、コンクリートが型枠内に打込まれた直後の配向が原因となり、溝形シュートの場合には必ずしも同心円状に配向しないと考えられる。

4. まとめ

本実験から得られた結果を以下に示す。

- (1)高流動繊維補強コンクリートスラブを一ヶ所から打込んだ場合、上部では打込み位置を中心とした同心円状に繊維は配向するが、下部では一方向に配向し、はり部材と同様の配向になる領域が存在することが確認された。
- (2)可視化モデルコンクリートによって観察された配向

と実際の高流動繊維補強コンクリートスラブ部材における繊維の配向を比較した結果、定性的に一致した。

- (3)可視化モデルコンクリートの繊維の配向の状況からスラブ内で繊維が一方向に配向する原因の一つが打込み位置での配向であることが推測された。

参考文献

- 1) Barnett, S.J. Lataste, JF., Parry. T. et al. : Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. Mater Struct 43, pp.1009-1023, 2010
- 2) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市 : UFC パネルにおける繊維の配向と曲げ強度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp286-291, 2014
- 3) Amin Abrishambaf Joaquim A.O.Barros Vitor.M.C.F. Cunha : Relation between fiber distribution and post cracking behavior in steel fiber reinforced self compacting concrete panels,Cem.Concres,vol51,pp56-66,2013
- 4) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市 : 超高強度繊維補強コンクリート曲げ試験体中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.268-273, 2012
- 5) 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, pp203-208, 2020