

報告 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

横井 晶有*1・田中 章*2・矢野 和輝*3・内田 裕市*4

要旨：本研究では高流動繊維補強コンクリート梁の変断面部における繊維の配向を検討するために、マイクロ X 線 CT による観察及び画像解析を行い、変断面部における配向を定量的に評価した。その結果、突起の上部では繊維が梁軸方向に配向し、突起の前後では繊維が斜め方向に配向することが示された。また、突起周辺の有効繊維本数からひび割れ幅 0.5mm 時の引張軟化曲線の応力を推定したところ、突起上部では等断面部と同程度の応力となり、突起の前後では応力が小さくなることが示された。

キーワード：高流動繊維補強コンクリート、繊維の配向、変断面、有効繊維本数、引張軟化曲線

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抑制や靱性の向上が期待できる。しかし、繊維の架橋効果は FRC 中の繊維の配向、分散の影響を受けるため、FRC における繊維の配向、分散に関する研究が行われている。

著者ら¹⁾²⁾³⁾はこれまでスラブや梁部材等を対象として、打込み方による繊維の配向および力学的特性の検討を行ってきたが、いずれも様な断面を有する部材を対象としてきた。しかしながら実際の部材では、接合部や部品取り付け部などで断面形状が急変する場合がある。このような変断面変化部では当然のことながら繊維の配向が変化することが容易に推測される。そこで本研究では、断面変化部での繊維の配向に関して基礎的な知見を得ることを目的として、梁型枠の底部に突起を設けた場合の突起周辺の繊維の配向について検討することとした。実験では、まず初めに繊維の配向を容易に観察できる可視化モデルコンクリートを用いて観察を行った。続いて、高流動繊維補強コンクリートを用いた同一形状の梁試験体を作製し、繊維の配向をマイクロ X 線 CT を用いて観察し、可視化モデルコンクリートの結果と比較した。さらに X 線 CT で得られたデータから繊維の配向を考慮した引張軟化特性を推定した。

2. 実験概要

2.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の可視化実験

可視化モデルコンクリートは、高吸水性高分子材料（SAP：Superabsorbent polymer）に水を加えた無色透明の粘性流体であり、繊維として PVA 繊維（繊維径 0.5mm、繊維長 20mm）を添加したものである。本実験では、繊維混入率は体積比で 1.0%とし、モルタルフロー値は

250mm とした。型枠側方から繊維の配向を観察するためにアクリル型枠を用いた。試験体は図-1 に示すように寸法を 200×200×2000mm（幅×高さ×長さ）とした梁状のものを用いた。断面変化部を有する部材を対象とするために、型枠内に矩形の直方体 200×100×200 mm（幅×高さ×長さ）を突起として、打込み位置から 800mm と 1400mm に設置した。なお、試験体は実存する部材を想定したものではなく、断面変化部の基本的な挙動を確認することを目的に定めたものである。また、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型枠の場合と比べ、界面の粘着、摩擦が小さいためすべりが生じる。そこで、型枠底部に界面の粘着、摩擦を模擬するために人工芝を敷き、すべりが生じないようにした。なお、型枠側面は内部を観察するために、人工芝は貼り付けていない。同図のように型枠端部から可視化モデルコンクリートを流し込み、繊維の配向の観察を行った。

2.2 高流動繊維補強コンクリート試験体

本実験で用いる試験体は型枠寸法、突起の位置、打込み方法を可視化実験と同一の条件で作製した。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、早強ポルトランドセメント(C)、6号珪砂(S)、繊維径

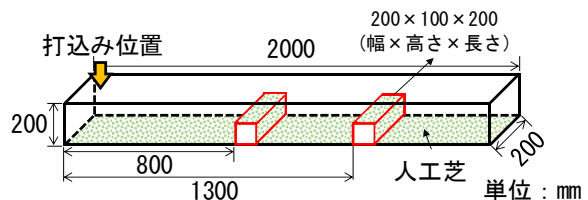


図-1 可視化実験に用いたアクリル型枠

表-1 高流動繊維補強コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)				(C×%)		%
W	C	S	増粘剤	Ad	Ma	F
253.8	900.0	927.5	1.0	5.0	0.04	1.0

*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 (学生会員)

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博(工) (正会員)

0.2mm, 繊維長 15mm の鋼繊維, 混和材として, 高性能減水剤(Ad), 増粘剤, 消泡材(Ma)である。また繊維(F)混入率は体積比で 1.0%とし, フロー値は 250mm とした。なお, コンクリートの配合は流動性(フロー値)が通常の UFC と同程度となるように定めたものであり, 強度特性の目標値は定めていない。打込み方法は 1 層打ちとし, 自己充填とした。型枠は鋼製型枠とした。

2.3 マイクロ X 線 CT による配向の解析

(1) マイクロ X 線 CT の概要

高流動繊維補強コンクリート試験体についてマイクロ X 線 CT により繊維の配向を観察した。マイクロ X 線 CT により, コンクリート内部を観察することが可能であり, これまでにコンクリート中の骨材の寸法や分布の研究⁴⁾⁵⁾などに用いられている。今回使用したマイクロ X 線 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 本のレベルま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 中の赤点線で示すように, コンクリートカッターを用いて 100 \times 50 \times 50mm (幅 \times 高さ \times 長さ) 角柱を切り出し, 突起周辺の各角柱について同図に示すように(X1, Y1)~(X7, Y4)の番号を付けた。ここで, 試験体軸方向を X 軸, 高さ方向を Y 軸, 幅方向を Z 軸とした。

(2) 配向の定量評価方法

繊維の配向を定量化するために, 図-3 に示すように, 各角柱について解析範囲を型枠側と中央側の 50 \times 50 \times 15 mm(幅 \times 高さ \times 長さ)の 2 つの領域に分割しそれぞれの範囲に対して繊維本数と配向角度を求めた。ここで, 配向角度は図-3 に示すように解析断面(Y-Z 断面)に対して垂直に配向する繊維を 90 $^{\circ}$, 平行に配向する繊維を 0 $^{\circ}$ と定義した角度である。配向角度は CT データの解析ソフト(VGstudioMAX)の繊維配向解析モジュールを用いて求めた。なお配向角度は解析領域内の空間においてスカラー値とベクトル値をもつボクセル数をカウントすることによって求められたもので, 繊維 1 本 1 本の配向角度ではなく, 解析領域内の繊維の平均的な配向を示している。また, 繊維本数はマイクロ X 線 CT により得られた断面画像を画像解析ソフト(WinROOF)で読み込み, 画像処理することで求めた。

2.4 引張軟化特性の推定

力学的評価として, 各角柱の引張軟化曲線の推定を行った。既往の研究²⁾において超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を対象として繊維本数と繊維の配向角度を考慮した有効繊維本数(繊維本数に配向角度の正弦値を乗じた値)と引張軟化曲線の関係が明らかにされており, 図-4 に示すように有効繊維本数が多いほど同一ひび割れ

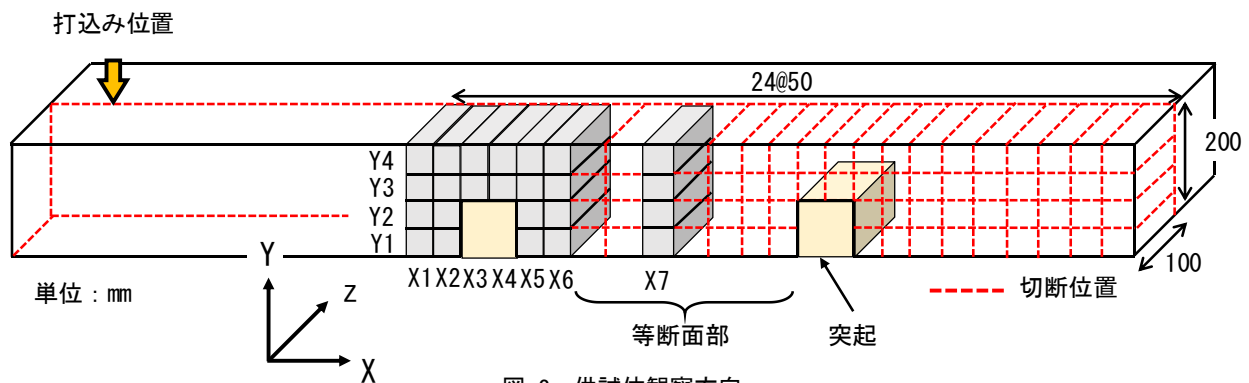


図-2 供試体観察方向

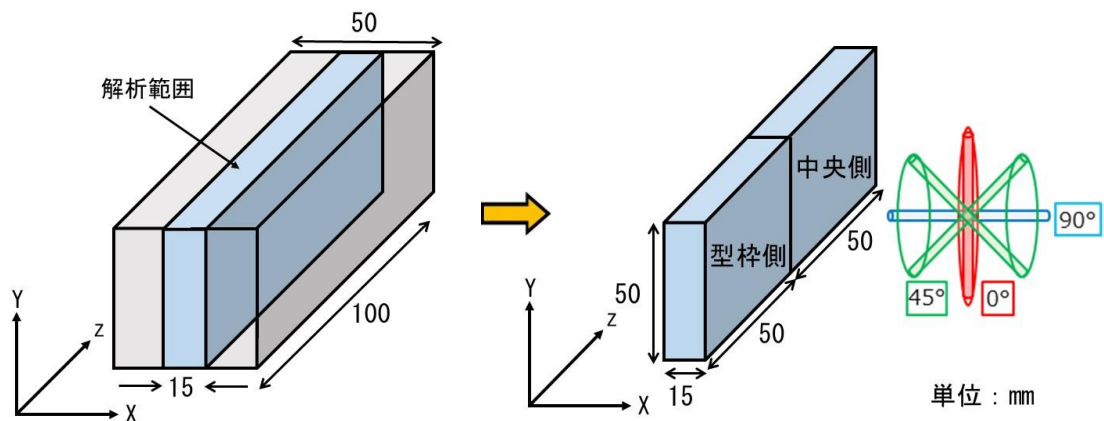


図-3 解析範囲及び配向角度の定義

幅における引張応力が高くなるということがわかっている。既往の研究で算出された引張軟化曲線と有効繊維本数の関係は次式で表される。

$$\sigma = (-0.16X)\omega + (0.61X + 0.9) \quad (1)$$

ここで、 σ 、 ω 、 X は、それぞれ軟化曲線の引張応力 (N/mm^2)、ひび割れ幅 (mm)、単位面積当たりの有効繊維本数 ($\text{本}/\text{cm}^2$)

ここでは、式 (1) を用いて突起周辺のコンクリートの引張軟化特性を推定した。なお、式(1)は直径 0.2mm、長さ 15mm の鋼繊維を用いた、市販の UFC を対象としたものである。本実験で用いたコンクリートは式(1)で対象にした UFC とほぼ同等の流動性(フロー値)を有しているが、強度特性は異なっている。ここでは、流動性が同じであれば繊維の配向が等しくなると考え、実験で用いた高流動繊維補強コンクリートを式 (1) で対象とした UFC と仮定して引張軟化特性を推定することとした。

3 実験結果

3.1 可視化実験の結果

可視化モデルコンクリートでの繊維の配向の状況を図-5に示す。突起周辺部は図中の赤線で示すように繊維が突起に沿うように配向することが確認された。また、突起の前面(図中、突起の左側)では繊維が上方に配向し、突起近傍では繊維数が少なくなる様子が確認された。一方、等断面部では図中の赤線で示すように、底面付近では底面に平行に配向するのに対し、上面付近では斜め上方に配向することが確認された。上面から観察すると、繊維は図中の赤線で示すように繊維が円弧状に配向することが確認された。

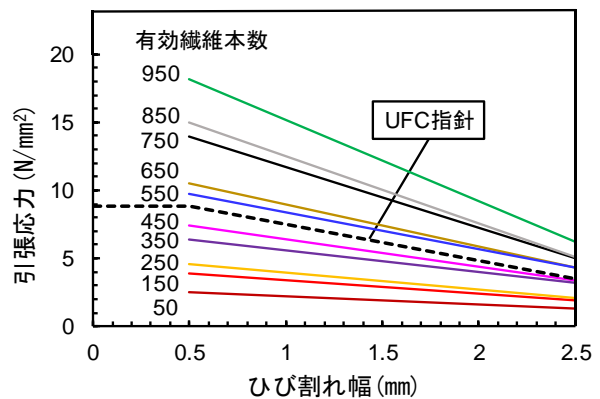


図-4 有効繊維本数と引張軟化曲線の関係

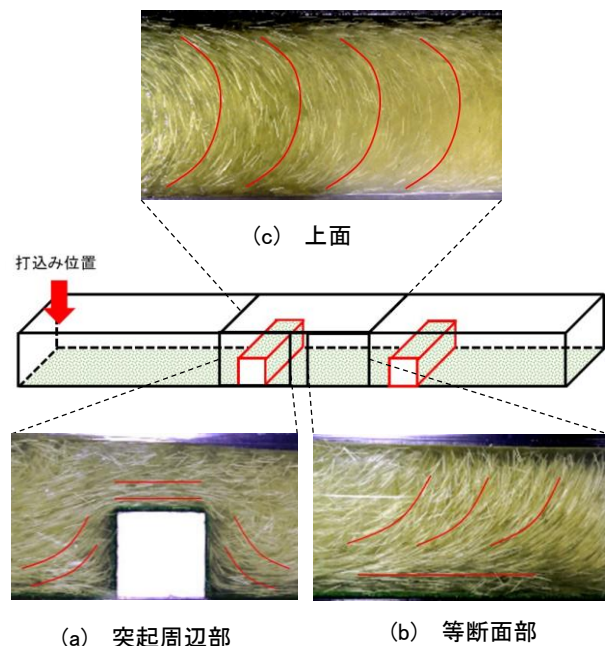


図-5 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向

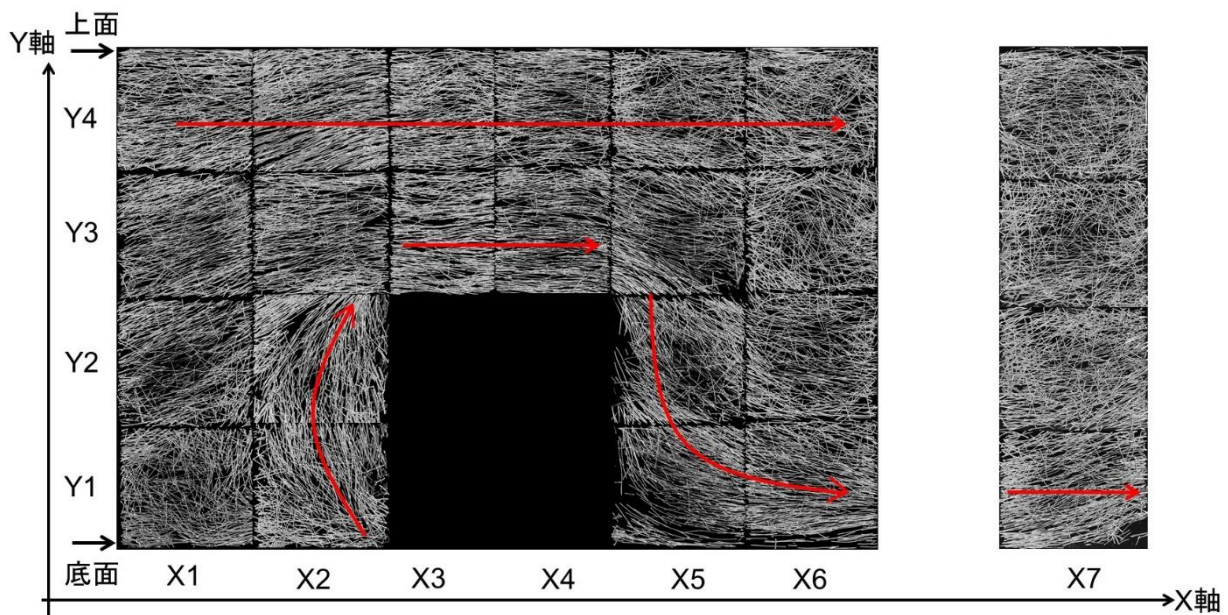


図-6 型枠近傍の X 線画像

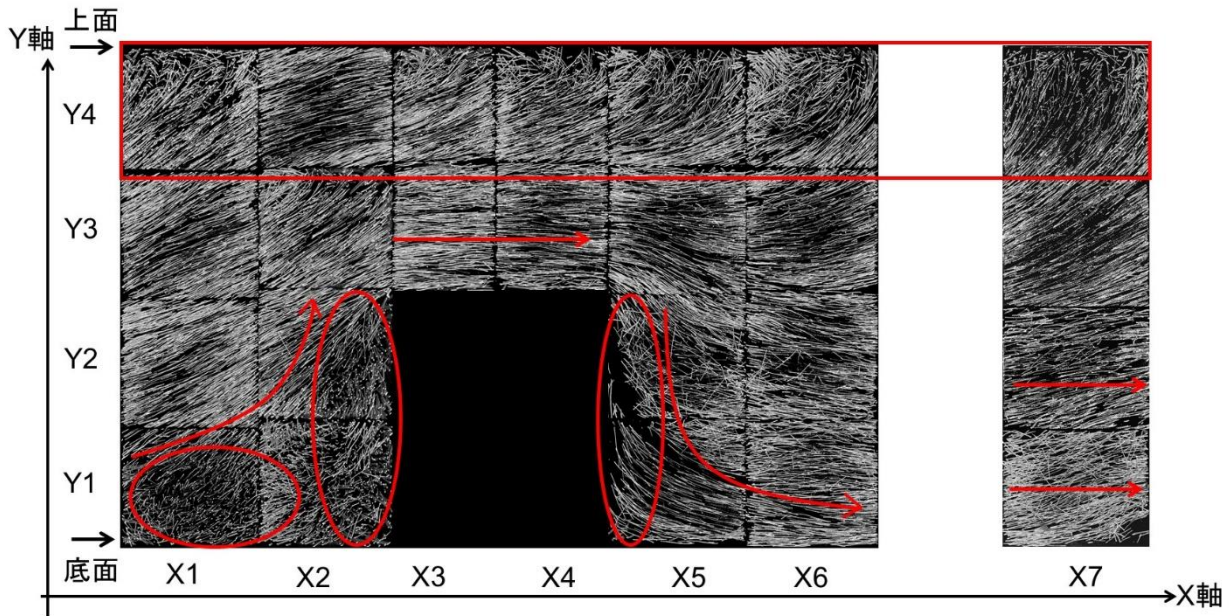


図-7 梁幅中央の X 線画像

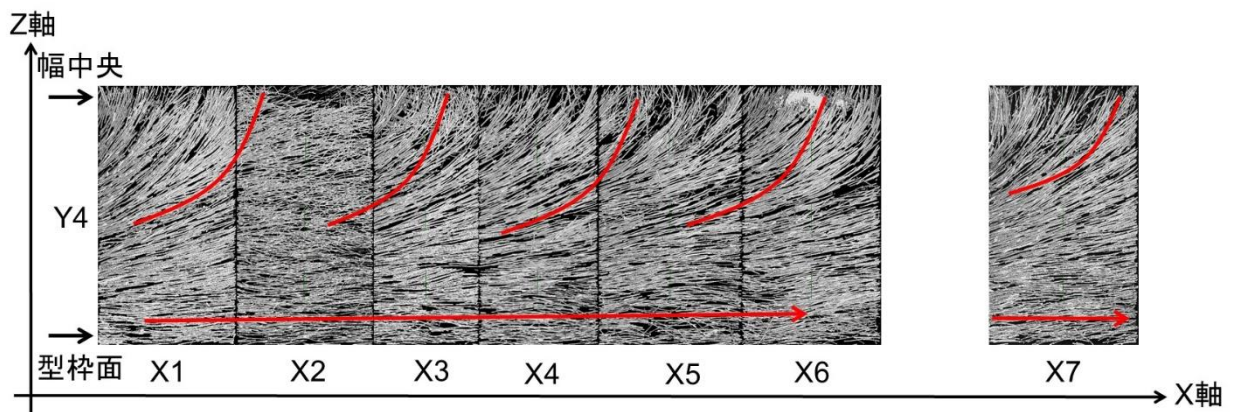


図-8 上面の X 線画像

3.2 X 線 CT による配向の結果

マイクロ X 線 CT で得られた画像を図-6~8 に示す。

図-6 および図-7 はそれぞれ型枠面近傍と梁幅中央を Z 軸方向から観察した様子であり、図-8 は上面から観察した様子である。

図-6 に示すように突起周辺では可視化コンクリート同様に突起に沿った配向を示すことが確認された。突起前面の(X2, Y1), (X2, Y2)では、図中の赤線で示すように、繊維が突起に沿って上方に押し上げられるような配向が確認できた。また、突起の背面(X5, Y1), (X5, Y2), (X6, Y1)では、繊維が連続的に斜め下方に配向する様子が確認できた。また、突起上部の(X3, Y3)及び(X3, Y4)では梁軸方向(X 軸方向)に平行に配向していることが確認できた。一方、等断面部(X7)の底面では繊維が X 軸方向に配向しており、上部に行くほど繊維が乱れている様子が確認できた。

図-7 に示した梁幅中央では突起前面の(X2, Y1), (X2,

Y2)及び(X1, Y1)の楕円で繊維が点状になっており、梁

幅方向(Z 軸方向)に配向していることが確認できる。突起背面の(X5, Y1), (X5, Y2)では図-7 の型枠近傍と同様に繊維が連続的に斜め下方に配向している様子が確認できた。なお、楕円で示した部分は繊維が少なく、繊維が存在しない領域が現れた。突起上部の(X3, Y3), (X4, Y3)では型枠近傍と同様に梁軸方向(X 軸方向)に平行に配向していることが確認できた。しかし、上面の Y4 では斜め上方に配向した。この現象は等断面部(X7)でも確認でき、底部から上部に向かうにつれて斜め上方に配向する傾向が見られた。

図-8 に上面近傍の画像を示す。繊維は中央部では円弧状に配向しており、型枠近傍では繊維が型枠に平行に配向していることが確認できた。

以上より、可視化モデルコンクリートで確認された配向の状況と X 線 CT で観測された配向は定性的にはほぼ

一致していることが確認された。突起の前面と背面では繊維は上方に配向し、突起上部では梁軸方向に配向することが確認された。また、側方の型枠側と梁幅中央部では配向に差があることが確認された。

3.3 マイクロ X 線 CT による配向の定量的評価

図-9, 10 に画像解析によって得られた平均配向角度、繊維本数及び有効繊維本数を示す。有効繊維本数は繊維本数に平均配向角度の正弦値を乗じた値であり、梁軸方向(X 軸)に平行に配向するほど有効繊維本数が多くなる。

図-9 に型枠側の解析結果を示す。突起前面の X1, X2 では上部ほど繊維数および平均配向角度が大きく、有効繊維本数も上部ほど多くなった。特に (X2, Y1), (X2, Y2) では繊維が上方に配向するため、有効繊維本数が少ない

結果となった。突起上部の X3, X4 では繊維が梁軸方向(X 軸)方向に配向する繊維が多いため平均配向角度が大きく、有効繊維本数も多くなった。突起の背面(X5, Y1), (X5, Y2)では突起前面に比べて有効繊維本数が多くなった。また、等断面では X 軸に配向する繊維が多く、有効繊維本数が多くなった。

図-10 に中央部の解析結果を示す。突起前面(X2, Y1)は型枠側と同様に有効繊維本数が少なくなった。これは繊維が鉛直方向に配向していることが原因である。中央側における有効繊維本数は概ね型枠側と同様の傾向を示したが、最上部の Y4 ではどの位置においても有効繊維が少なくなった。これは上部では繊維が斜め上方に配向することと、繊維が中央に向かって円弧状に配向することが原因である。

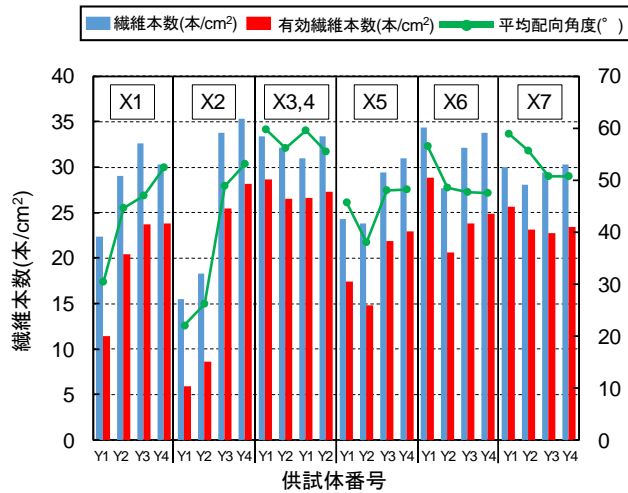


図-9 型枠側の解析結果

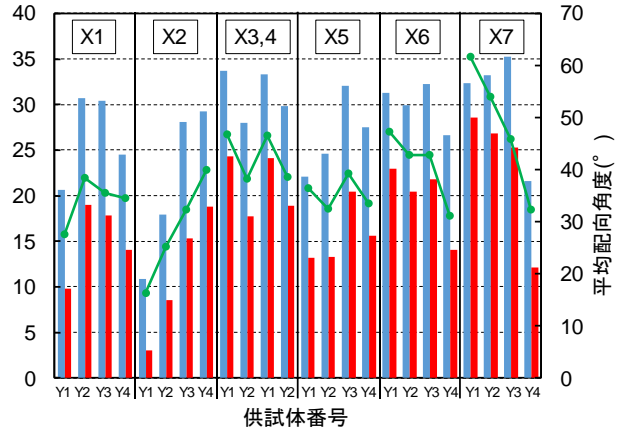


図-10 中央側の解析結果

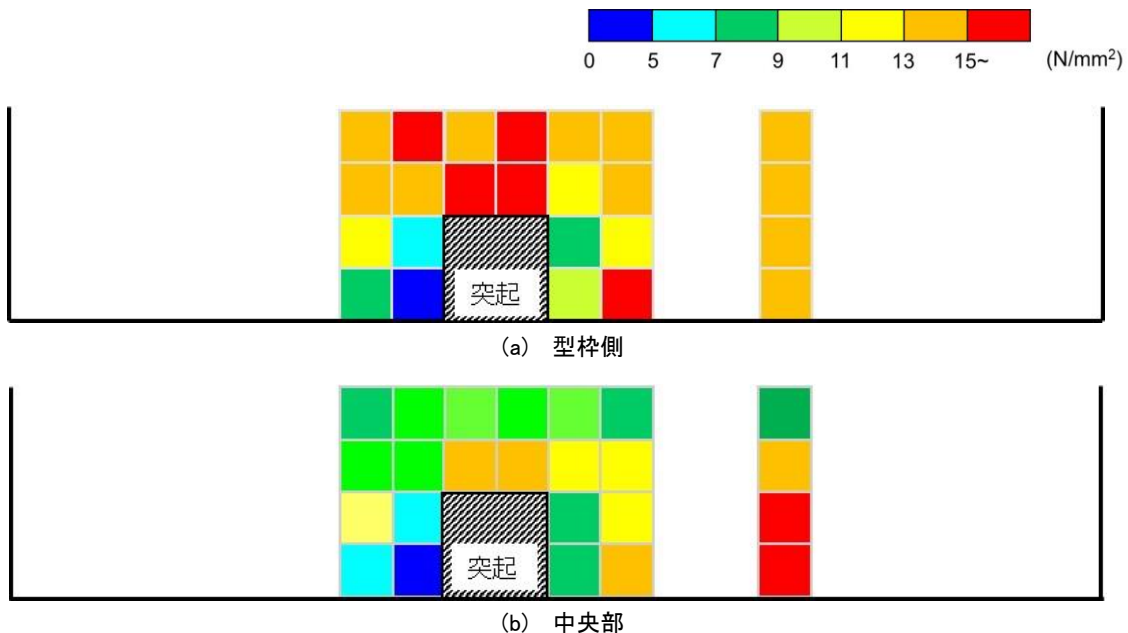


図-11 引張軟化特性の推定(ひび割れ幅 0.5mm 時の応力)

以上より、突起前面では有効繊維本数が極端に小さくなることが明らかになった。また、突起の有無にかかわらず、上面付近では有効繊維本数が少ないことが示された。

3.4 引張軟化特性の推定

前節の解析結果と式(1)を用いて各位置での梁軸方向に対する引張軟化曲線を推定した。ここでは引張軟化曲線のひび割れ幅 0.5mm 時の応力を軟化特性の代表値とすることとし、その応力のコンター図を求めた。

図-11(a)に型枠側の応力コンター図を示す。引張応力は突起上部が最も大きくなり、突起前面が最も小さくなった。一方、等断面では高さによる違いが見られなかった。図-11(b)に中央付近の応力コンター図を示す。引張応力は等断面の底面付近で最も大きくなり、突起前面で最も小さくなった。等断面では底面付近の引張応力が大きくなり、上部では引張応力が小さくなった。型枠側と比較すると、突起周辺では、やや引張応力が低くなった。

以上より、突起前面では引張応力が最も低くなり、突起上部で引張応力が大きくなることが明らかになった。また、突起周辺の引張応力は型枠側より中央側の方が小さくなることが確認された。

4. まとめ

本実験で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) マイクロ X 線 CT で高流動繊維補強コンクリートの繊維の配向を観察した結果、可視化モデルコンクリートで観察された配向と定性的にはほぼ一致することが示された。
- (2) 突起部周辺における繊維の配向をマイクロ X 線 CT で得られた画像で観察した結果、突起の前面と背面では繊維は上方に配向し、突起上部では梁軸方向に

配向することが確認された。また、側方の型枠側と梁中央部では配向に差があることが明らかになった。

- (3) マイクロ X 線 CT で得られた画像を定量的に評価した結果、突起の有無にかかわらず、上面付近では有効繊維本数が少ないことが示された。
- (4) 有効繊維本数と引張軟化曲線の関係から突起部周辺における引張軟化特性を推定した結果、突起前面では引張応力が小さくなり、突起上部及び等断面で引張応力が大きくなった。また、突起周辺の引張応力は型枠側より梁幅中央側の方が小さくなることが示された。

参考文献

- 1) 横井晶有, 吉見拳人, 奥西淳一, 内田裕市: 超高強度繊維補強 RC 梁部材内の繊維の配向と曲げ破壊挙動, 土木学会第 74 回年次学術講演会, pp52-53, 2019
- 2) 石川義希, 伊藤穂高, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリート中の繊維の配向と引張軟化曲線, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp273-278, 2018
- 3) 河村有紀, 周波, 石河義希, 内田裕市: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp255-260, 2016
- 4) 岩木伸也, 高橋良和, 澤田純男: X 線 CT 法を用いたコンクリート円柱供試体の内部構成情報の抽出, 土木学会論文集, Vol.65, No.1, pp.399-405, 2009
- 5) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート年次論文集, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008