

論文 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

佐々木 一成^{*1}・野村 敏雄^{*2}・田中 翔^{*3}・秋山 充良^{*4}

要旨：超高強度繊維補強コンクリート（UFC）部材の構造性能は、部材の各位置により異なる鋼繊維の量と配向を考慮することで、その評価精度の改善が期待される。本研究は、基礎検討として、鋼繊維の混入率と配向を変化させた UFC 板を製作し、その 2 次元 X 線撮影とデジタル画像処理を行った。画像処理の際は、用いた鋼繊維の太さ・長さを考慮して、ある大きさの領域内にある鋼繊維の量と配向をマクロに把握することにし、それらに基づき UFC はりの曲げ強度と相関性を有するパラメータを検討した。同定されたパラメータを用いることで、鋼繊維の混入率と配向により異なる曲げ実験結果の違いを概ね説明できることを示した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート, X 線撮影, デジタル画像処理, 曲げ載荷実験

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（UFC）は、引張強度の小さい普通コンクリートの弱点を補うばかりでなく、高強度かつ高じん性を併せ持つ材料として注目されている。通常の鉄筋コンクリート（RC）部材と比べて断面を小さくしても同等の構造性能を付与できる。一方で、同じ配合・手順で製作したとしても、繊維の分散と配向のため、UFC 部材の挙動が大きく異なる場合がある¹⁾。これは、UFC に限らず、繊維補強コンクリートが有する共通の課題である^{2), 3), 4)}。結果として、UFC を用いた部材の構造設計では、分散と配向の偏りへの配慮から、安全側の部分係数を用いて設計することになり、UFC が本来有する利点を活かしきれないことがある。この問題に対し、繊維がコンクリート内に分布する様子を可視化し、その情報に基づき、打込み方法の見直しや、繊維補強コンクリートの力学特性を評価する試みが行われてきた。可視化する最も直接的な方法の一つが X 線の利用である。

繊維補強コンクリートに X 線技術を適用した事例は、1970 年代に既に報告されており、鋼繊維の径や長さによる分散や配向の違いなどが観察されている^{5), 6)}。その後も、プレキャスト部材内の鋼繊維分布、あるいは、型枠の設置や打込み方法の違いが鋼繊維の分散や配向に及ぼす影響が X 線写真を通して観察されている^{7), 8)}。馬場ら⁹⁾は、鋼繊維（直径 0.8 mm, 長さ 60 mm）の配向の定量化に X 線技術を活用した例を報告している。X 線撮影を繊維補強コンクリート部材の力学特性評価に応用した研究もある。例えば、Robins ら¹⁰⁾は、鋼繊維補強コンクリートはりから厚さ 30 mm のテストピースを切り出し、鋼繊維分布の配向の確率密度を実験的に算出している。この

実験結果と、ひび割れ位置での鋼繊維の抜け出し挙動を組み合わせ、はりの曲げ強度の推定を試みている。Lim ら¹¹⁾は、長さ 60 mm, 直径 0.9 mm の鋼繊維を使用し、X 線画像から求められる鋼繊維一本一本の分布に基づき、鋼繊維の曲げ引張に対する抵抗性の大小を表わすパラメータ、representative number of fiber (RNF) を求め、RNF と鋼繊維補強コンクリートの力学特性を関係付けることで、はりの曲げ挙動を解析的に予測している。

X 線技術を繊維補強コンクリートに適用したこれら既往の研究では、可視化が容易な太径の長い鋼繊維が用いられており、繊維混入率も 0.5 vol.% 以下の場合がほとんどである。一方で、本研究で対象とする UFC の場合、鋼繊維の直径は 0.16 mm と細径で、繊維混入率は 2.0 vol.% と高い。本研究では、X 線技術を UFC に適用するため、RC 部材内の鉄筋腐食分布の可視化を行った参考文献^{12), 13)}に示されるデジタル画像処理方法を応用し、UFC はりの各位置により異なる鋼繊維の量と配向の可視化を試みる。また、可視化された情報と、UFC はりの曲げ載荷実験結果の比較から、X 線画像のみに基づき、UFC はりの曲げ強度を予測するための基礎検討を行う。

2. UFC はりの製作と X 線撮影

2.1 使用材料

使用した UFC は、鋼繊維を 2.0 vol.% 混入した場合に、標準養生により材齢 28 日で特性値として圧縮強度 180 N/mm², 引張強度 8.8 N/mm² を満足する。配合を表-1 に示す。繊維混入率は、1.0 vol.% と 2.0 vol.% の 2 種類とし、いずれの場合もマトリックスの配合は同じであり、混入した鋼繊維は、直径 0.16 mm で長さ 13 mm である。

*1 (株)大林組 技術研究所構造技術研究部 副主任研究員 修(工) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所構造技術研究部 上席研究員 博(工)

*3 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科

*4 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科 教授 博(工) (正会員)

表-1 実験に使用した UFC の配合 (2.0vol.%)

フロー 値 (mm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				鋼繊維 (kg/m ³)
		水	プレミ ックス	骨材	高性能 減水剤	
260	2.0	230	1830	330	32	157

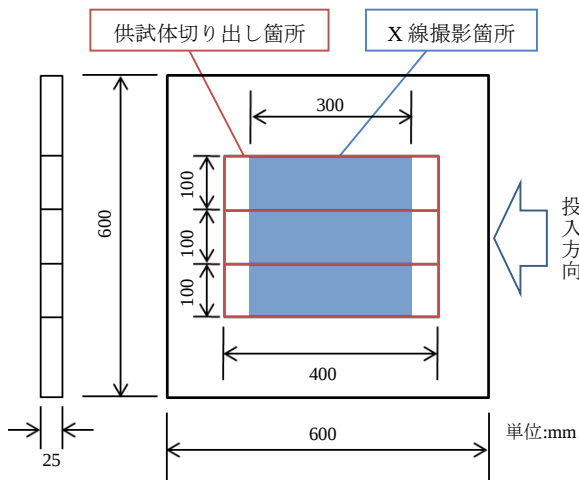


図-1 実験に用いた UFC 板の諸元

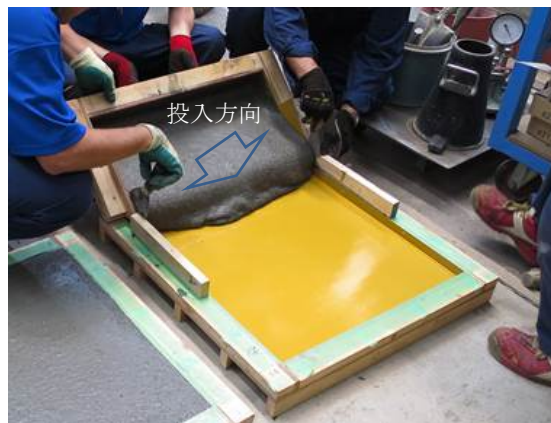


写真-1 打込み時の様子

2.2 供試体の製作手順

図-1 に示すように幅×高さ×長さ=600×25×600 (mm) の UFC の平板を、材料を端部から投入して 1 方向に流動させて製作し、硬化後、100×25×400 (mm) のはりをそれぞれ 3 体切り出した。鉛直方向の繊維配向の違いが表れないように、試験可能な範囲で薄い板厚とした。また、側面の型枠の影響を小さくするため、中央部からはりを切り出している。打込み時の様子を写真-1 に示す。

はりを切り出す際は、図-2 に示すように、各はりが持つ配向が異なるように、切り出し角度を打込み時の UFC の投入方向に対して、0°、45°、および 90°にしている。繊維混入率 1.0 vol.%と 2.0 vol.%の UFC 板をそれぞれ 3 枚ずつ、計 6 枚の UFC 板を製作し、それぞれから各 3 体のはり (計 18 体の UFC はり) を得た。表-2 に全供試体の製作条件の一覧を示す。

2.3 曲げ載荷試験

切り出した 18 体の UFC はりに対して、X 線撮影終了

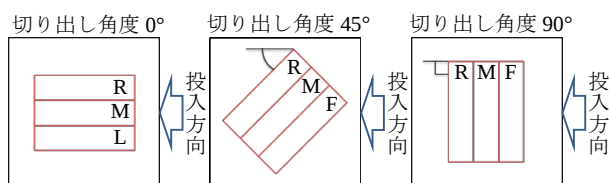


図-2 供試体切り出し角度

表-2 各供試体の打込み条件と曲げ強度

供試体名	繊維 添加量 (vol.%)	角度 θ (°)	位置	曲げ強度 (N/mm ²)	
				平均	
2.0-0-L	2.0	0	L	41.3	40.5
2.0-0-M			M	39.8	
2.0-0-R			R	40.6	
2.0-45-F		45	F	24.0	21.2
2.0-45-M			M	22.9	
2.0-45-R			R	16.6	
2.0-90-F		90	F	13.0	12.3
2.0-90-M			M	12.2	
2.0-90-R			R	11.8	
1.0-0-L	1.0	0	L	24.8	24.9
1.0-0-M			M	25.4	
1.0-0-R			R	24.5	
1.0-45-F		45	F	17.1	17.2
1.0-45-M			M	18.7	
1.0-45-R			R	15.7	
1.0-90-F		90	F	14.0	13.8
1.0-90-M			M	13.8	
1.0-90-R			R	13.6	

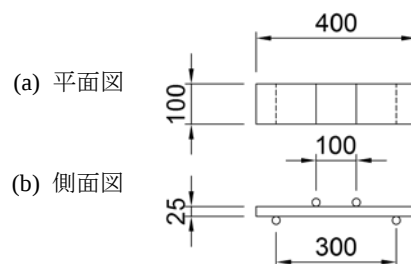
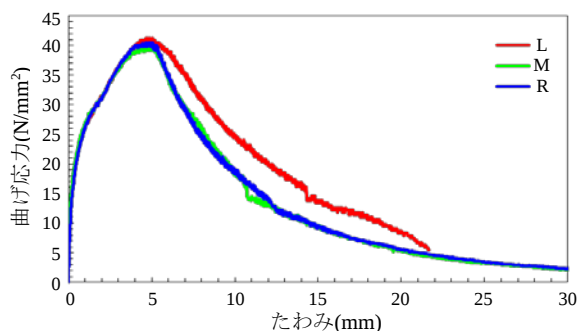


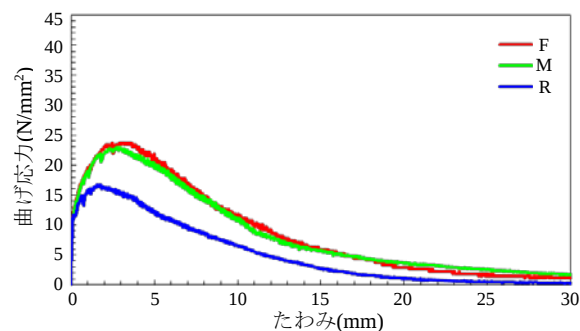
図-3 はり試験体載荷位置

後、4 点曲げ載荷試験を実施した。曲げ試験は、図-3 に示すように、スパン 300 mm、純曲げ区間 100 mm に設定して実施した。なお、図-1 に示したように、曲げを受ける 300 mm 区間を X 線撮影している。

表-2 には曲げ載荷試験で得られた曲げ強度 (載荷荷重から計算される発生曲げモーメントを断面係数で除した値として作用曲げ応力を定義し、その作用曲げ応力の最大値を本研究では曲げ強度と呼ぶ) を示し、図-4 には、繊維混入率 2.0 vol.%で、切り出し角度を 0°と 45°にしたときの作用曲げ応力-たわみ関係を示す。たわみは、スパン中央位置で計測したものである。切り出し角度 0°のとき、鋼繊維の向きは後述するように部材軸に対して



(a) 切り出し角度：0°



(b) 切り出し角度：45°

図-4 切り出し角度が曲げ応力-たわみ関係に及ぼす影響 (繊維混入率 2.0vol.%)

平行となり、他の角度よりも大きな曲げ強度を発現する。また、切り出し角度 90°の場合でも、部材軸に向けた鋼繊維は存在し、12N/mm²程度の曲げ強度を発現している。一方、図-4 (b) に示されるように、同じ製作条件であっても、切り出されるはりの位置によって曲げ強度やポストピーク挙動に有意な違いが表れるものもあった。

2.4 UFC はりの X 線撮影

表-2 に示す全 18 体の UFC はりの X 線撮影を行った。X 線撮影では、使用する X 線管電圧と管電流により被写体の大きさや画像の鮮明さが異なるため、本研究では、すべての撮影において、X 線管電圧は 78 kV、管電流は 0.7 mA に設定して X 線撮影を行った。結果の一例として、繊維混入率 2.0 vol.% で切り出し角度を 0°、45° および 90° にした場合の X 線写真をそれぞれ図-5～図-7 に示す。なお、X 線撮影は、支点間 (300 mm) を部材軸方向に 5 分割して行っており、撮影後にすべての写真を結合することで 1 つの画像としている。

各図より、UFC の投入方向と切り出し角度に応じた鋼繊維の向きを確認できる。また、いずれの場合も、投入方向に対して、投入位置から離れるほど鋼繊維は左右に広がっていることが確認された。なお、繊維混入率 1.0vol.% についても同様の傾向が確認された。

3. デジタル画像処理と鋼繊維の分散・配向の定量化

3.1 デジタル画像処理の手順

参考文献¹¹⁾などに示される太径の鋼繊維の X 線画像と異なり、図-5～図-7 に示されるように、UFC で用いられる鋼繊維の径は細く、繊維長も短いことから、繊維の一本一本の位置やその向きを把握することは難しい。使用した X 線装置は、供試体の回転が可能なものであり、腐食した RC はりの鉄筋腐食量を推定した際^{12), 13)}は、供試体を 30°毎に回転しながら X 線撮影し、12 枚の X 線画像に基づいて腐食量を求めているが、現時点のデジタル画像処理のレベルでは、奥行き方向の鋼繊維の向きを精度良く算定することは難しい。そこで、本研究では、3 次元空間上に分布している鋼繊維を 2 次元の投影面で見える。また、UFC はりを分割し、その分割された領域毎に

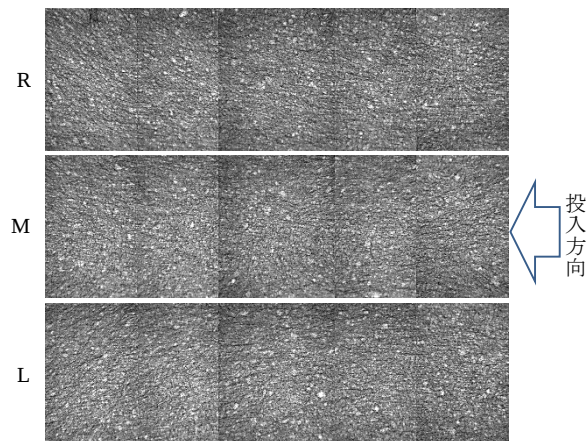


図-5 X 線画像 (2.0vol.%・角度 0°)

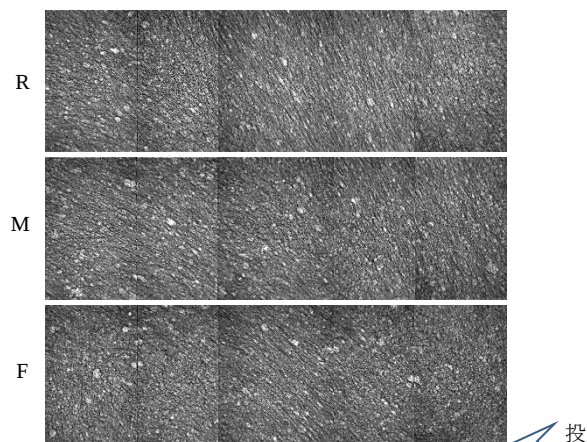


図-6 X 線画像 (2.0vol.%・角度 45°)

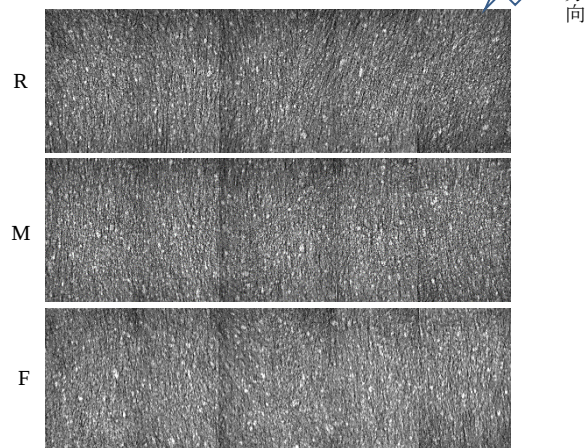


図-7 X 線画像 (2.0vol.%・角度 90°)

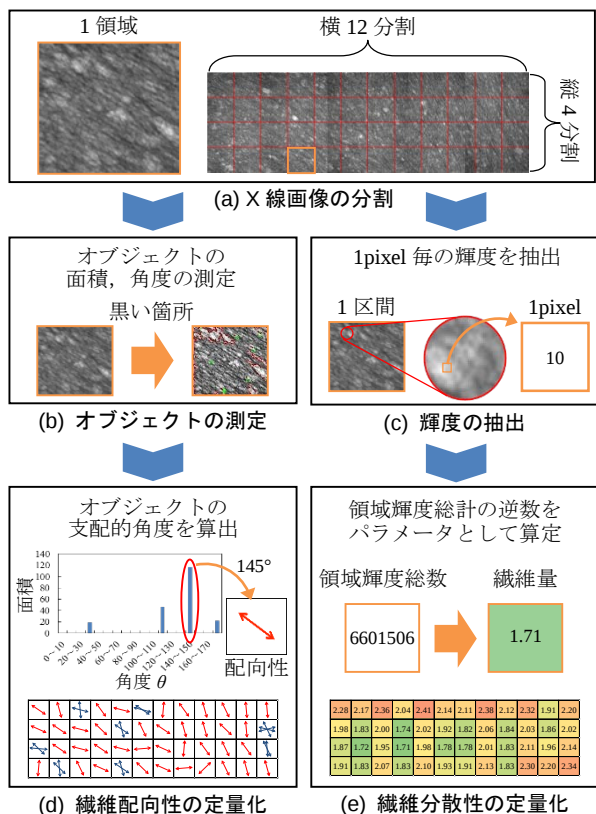


図-8 デジタル画像処理のフロー

鋼繊維の量および支配的な向きをマクロに可視化する。

デジタル画像処理の手順を図-8に示す。X線撮影区間（幅 100 mm，長さ 300 mm）を部材軸方向に 12 分割，直角方向に 4 分割する。つまり，一つの領域は，25 mm × 25 mm の正方形となる。この領域の中にある鋼繊維の量と，その支配的な向きを求める。白黒の濃淡を示す X 線画像では，密度の大きな鋼繊維は黒く表示され，その明るさは輝度（0～255）により定量化される。黒は 0，白は 255 となる。そこで，二値化処理の考えに基づき，輝度の大きさから鋼繊維と見なせるオブジェクトを同定し，各オブジェクトの面積とオブジェクトに相当する楕円の長軸の傾きから角度を算定する。次に，部材軸に対して 0～10°の向きを持つオブジェクトの面積 A_{10} を求め，これを 10～20°，…170～180°まで同様に繰り返し，各角度の範囲にあるオブジェクトの面積 A_{20} ，…， A_{180} を算定する。そして，最も面積が大きくなる角度の範囲の平均をその領域にある鋼繊維の向きの支配的な角度 θ として矢印にて表示する（図-8 (d) の例では $\theta = 145^\circ$ ）。なお，領域によっては，オブジェクトの面積が大きい角度の範囲が複数ある。そこで，面積 A_{10} ，…， A_{180} の中で，2 番目に面積が大きいものが最大の面積の 8 割以上ある場合には 2 本目の矢印，3 番目に面積が大きいものが最大の面積の 6 割以上ある場合には 3 本の矢印で示すことにした。

同様に，領域毎の鋼繊維量の違いも輝度に基づき定量化する。X 線撮影区間の各ピクセルの輝度の平均値（全

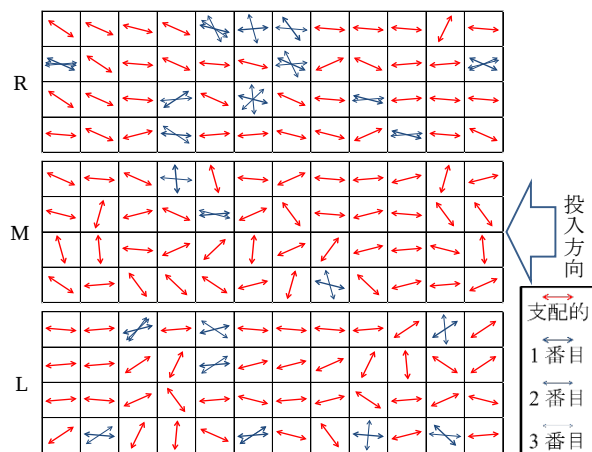


図-9 鋼繊維の向き（2.0vol.%・角度 0°）

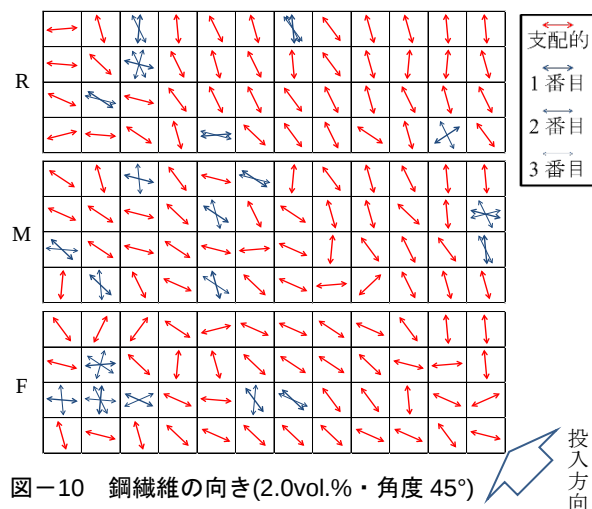


図-10 鋼繊維の向き（2.0vol.%・角度 45°）

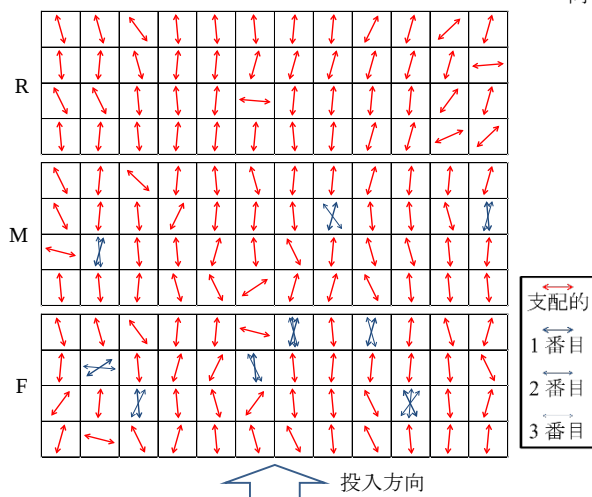


図-11 鋼繊維の向き（2.0vol.%・角度 90°）

ピクセル数は 2,522,880）が各供試体の繊維混入率 W_a （1.0vol.%，または 2.0vol.%）を表す輝度 B_a と仮定する。そして，各領域の輝度の平均値 B_i から，その領域の繊維混入率 W_i を次式で算定する（ $i = 1, 2, \dots, 48$ ）。

$$W_i = W_a \times B_a / B_i \quad (1)$$

本研究では，輝度の差が各領域の鋼繊維量の大小を表現していると考え，式(1)を仮定した。これにより，例えば，繊維混入率 $W_a = 2.0\text{vol.}\%$ の UFC はりにおいて，あ

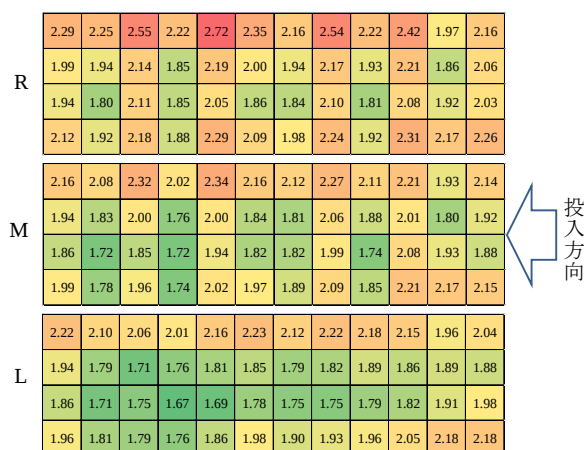


図-12 各領域で推定される繊維混入率 (vol.%)

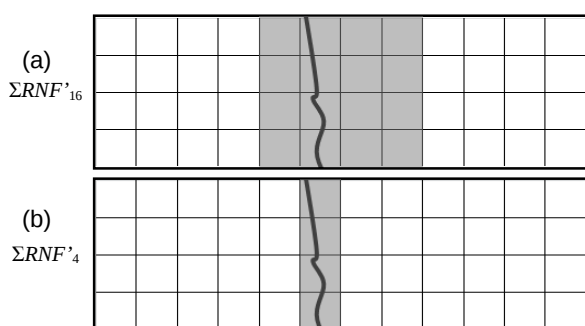


図-13 RNF'の計算条件

る領域の輝度の平均値 B_i が B_a よりも 2 割小さい ($B_a/B_i = 1.25$) とし、その領域に $W_i = 2.5\text{vol.}\%$ の鋼繊維があると推定することになる。これは、3.3 節で後述するように、X 線画像から求めた各領域の鋼繊維の量と配向から定められるパラメータ (RNF') と実験結果の比較に基づき、 B_a/B_i の大きさと鋼繊維量の関係として、現時点では式(1)が適当であると判断したことによる。ただし、本研究で用いた試験体数は表-2 の 18 体のみであり、後述するように、実験結果と RNF' の関係にはばらつきも認められる。今後の継続的な検証が必要である。

3.2 鋼繊維の分散と配向

前節に示した手順に従い、各供試体の鋼繊維の分散と配向を各領域で求めた。結果の一例として、繊維混入率 2.0 vol.% で切り出し角度を 0° 、 45° および 90° にした場合の各領域における鋼繊維の支配的な角度をそれぞれ図-9～図-11 に示す。視覚的に図-5～図-7 の X 線画像から認識される鋼繊維の向きに対応した結果になっている。また、多くの領域で矢印は一本のみであり、鋼繊維の向きはある一つの角度の範囲に入っている。

図-12 には、2.0-0-L, M, および R の各供試体について、式(1)から推定された各領域の繊維混入率を示す。各領域の繊維混入率の平均値は 2.0 vol.% となるが、繊維混入率は UFC はりの場所毎に異なり、ばらついていることが確認される。1.0vol.% についても傾向は同様であった。

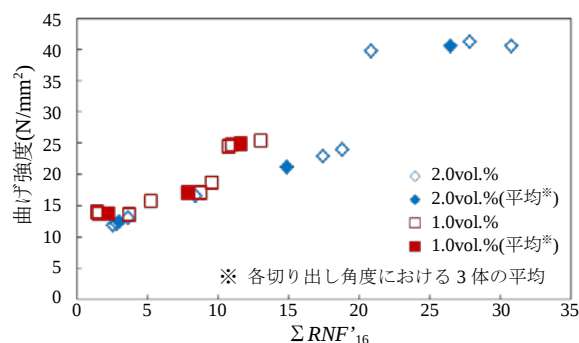


図-14 曲げ強度と $\Sigma RNF'_{16}$ の関係

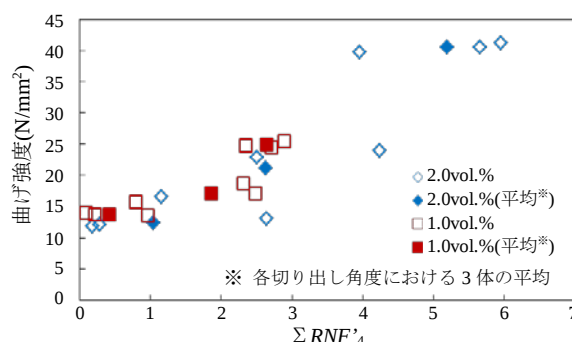


図-15 曲げ強度と $\Sigma RNF'_4$ の関係

3.3 X 線画像を用いた曲げ強度の推定

UFC で使用されている鋼繊維の径と長さを考慮し、本研究ではマクロに鋼繊維の分散と配向を評価した。ここでは、図-9～図-12 など示される各領域の鋼繊維の情報から、各 UFC はりの曲げ強度の違いの説明を試みる。Lim ら¹⁴⁾は、仮想ひび割れ面を跨ぐ鋼繊維一本一本の向きや位置、あるいは埋め込まれた長さからパラメータ RNF を定義し、それと鋼繊維補強コンクリートの力学特性を関係付けている。本研究では、UFC 部材の X 線画像に基づいた力学特性評価の基礎検討として、マクロに評価された鋼繊維の情報からパラメータ RNF' を算定し、これと曲げ強度の実験値との関係を検討する。各領域の RNF'_i は、繊維が部材軸方向に抵抗する分力 ($\cos\theta$) と繊維量 ($\cos\theta$) を考慮し¹⁴⁾、式(2)にて算定する。

$$RNF'_i = W_i \times \cos^2\theta_i \quad (2)$$

ここで、 θ_i は、領域 i における鋼繊維の向きの支配的な角度であり、 $A_{10}, \dots, A_{180}$ の中で最も面積が大きくなっている角度の範囲の平均値である。

各 UFC はりの RNF' は、図-13 に示す 2 つの条件で算定することにした。一つは、純曲げ区間にある領域から求められる RNF'_i を合計する ($RNF' = \Sigma RNF'_i, i = 1, 2, \dots, 16$) (図-13(a))。もう一つは、曲げ載荷試験中に発生した最も大きな曲げひび割れを含む領域の RNF'_i を合計する ($RNF' = \Sigma RNF'_i, i = 1, 2, 3, 4$) (図-13(b))。このようにして求めた RNF' と実験で得られた曲げ強度との関係を図-14 および図-15 に示す。曲げ載荷の間に UFC はりに発生するひび割れは複数あり、最大荷重の発現後に特定のひび割れ幅が大きく開いて破壊に至っている。

このことから、曲げ強度は純曲げ区間全体の繊維配向が影響しており、最も大きな曲げひび割れを含む領域のみから定めた RNF_i' は、図-15 に示されるように曲げ強度の実験値との相関が図-14 に比べて悪くなったと考えられる。

図-14 では、繊維混入率によって横軸の変化に対する曲げ強度の増え方に違いが出ており、式(1)の見直しも、今後、必要である。一方、図-8 に示したデジタル画像処理の手順に従い、UFC はりの各位置の量とそこでの支配的な鋼繊維の向きを求め、それらを使い RNF_i' を定めることで、UFC はりの曲げ強度を概ね評価できる。これは、将来的には、例えば FEM 解析において、各領域を要素と見なし、 RNF_i' に基づいて各要素の UFC の構成則を定めることで、UFC 部材の各位置により異なる鋼繊維の量と配向を考慮した数値解析が可能であることが示されたと言える。

4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 鋼繊維の混入率と配向を変化させた UFC 板の X 線撮影を行い、デジタル画像処理を施した。画像処理の際は、用いた鋼繊維の太さ・長さ、あるいは混入した鋼繊維量を考慮して、ある大きさの領域内にある鋼繊維の分散と配向をマクロに把握するための手順を示した。配向に関しては、X 線画像から視覚的に認識される鋼繊維の向きに対応した結果になっていることを確認した。
- (2) UFC 板の曲げ強度と相関性を有するパラメータ (RNF_i') を検討した。同定された RNF_i' は、繊維混入率や配向によって異なる UFC はりの曲げ強度の実験値と相関関係を有していることを示した。

今後、パラメータ RNF_i' や、分散性と配向性のマクロな評価法の継続的な見直しが必要である。また、現状、X 線装置の屋外での使用には制約があり、その透過強度の問題から、実構造物全体の X 線撮影は困難な状況にある。本研究成果の実構造物への適用は今後の課題である。

参考文献

- 1) 佐々木一成, 野村敏雄: 超高強度繊維補強コンクリート梁部材の曲げ引張強度分布に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.2, pp.1309-1314, 2016
- 2) de Montaignac, R., Massicotte, B., and Charron, J-P.: Design of SFRC structural elements: flexural behavior prediction, Materials and Structures, Vol. 45, pp. 623-636, 2012
- 3) di Prisco, M., Colombo, M., and Dozio, D.:

Fibre-reinforced concrete in fib Model code 2010: principles, models and test validation, Structural Concrete, Vol. 14, pp. 342-361, 2013

- 4) 土木学会コンクリート委員会繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会: 繊維補強コンクリートの構造利用小委員会成果報告書, コンクリート技術シリーズ, No. 106, 2015
- 5) Kasperkiewicz, J.: Fibre spacing in steel fibre reinforced composites, Materials and Structures, Vol. 10, No. 1, 25-31, 1977
- 6) Stroeven, P.: Morphometry of fibre reinforced cementitious material. Part I: Efficiency and spacing in idealized structures, Matériaux et Construction, Vol. 11, No. 1, pp. 31-38, 1978
- 7) Stroeven, P.: Stereological principles of spatial modeling applied to steel fiber-reinforced concrete in tension, ACI Materials Journal, Vol. 106, No. 3, pp. 213-222, 2009
- 8) Ferrara, L., Ozyurt, N., and Prisco M-D: High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of casting-flow induced fibre orientation, Material and Construction, Vol. 44, pp. 109-128, 2010
- 9) 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
- 10) Robins, P. J., Austin, S. A., and Jones, P. A.: Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 55, No. 3, 225-235, 2003
- 11) Lim, S., Okamoto, T., Matsuda, M., Akiyama, M.: Flexural behavior prediction of SFRC beams: A novel X-ray technique, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.2, pp.1351-1356, 2016
- 12) Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, Engineering Structures, Vol. 127, pp. 189-205, 2016
- 13) Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Jiang, H.: Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of RC members: Novel X-ray and digital image processing techniques, Structure and Infrastructure Engineering, 2016. DOI: 10.1080/15732479.2016.1198397
- 14) 佐々木一成, 野村敏雄: UFC の繊維混入率および繊維配向に着目した曲げ引張性能に関する実験的検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, pp.1173-1174, 2016