

論文 短繊維補強セメント系材料の繊維配向が力学性能に及ぼす影響

小倉 大季^{*1}・高橋 圭一^{*2}・栗田 守朗^{*3}・国枝 稔^{*4}

要旨：短繊維補強セメント系材料中の有機繊維の配向性が力学性能に与える影響を検討するために、X線CT撮像により繊維の3次元座標値を検出し、配向角度を定量的に評価した。さらに、CT撮像した試験体を含む切出し試験体を対象に曲げ載荷実験を行い、力学性能を確認するとともに、載荷後のひび割れ面から繊維の本数と破断率を評価した。その結果、打設時のモルタルの流動方向に対して垂直と平行な面では、配向角度に顕著な差異が認められた。また、曲げ破壊挙動に対して繊維の配向角度が与える影響は小さく、ひび割れを跨ぐ繊維の本数と曲げひび割れ後の最大荷重に高い相関性があることが確認された。

キーワード：短繊維, 配向性, X線CT, 3次元画像, 切欠きはりの3点曲げ載荷

1. はじめに

近年、ひずみ硬化型セメント系材料 (SHCC) をはじめとする短繊維補強セメント系複合材料 (以下, FRCC) の開発・適用が幅広く進められている。これらの複合材料のうち、スランプで管理する従来の鋼繊維補強コンクリートの場合、構造物中の繊維はランダムに配向するとされているが、フロー値が150mm以上のFRCCの場合、流動方向に伴う配向性が存在することが実験により確認されている^{1),2)}。FRCC中の繊維配向は硬化後の力学性能に影響を与える場合もあり、配向状態の定量的な把握とともに、力学性能に及ぼす影響を評価することが望まれる。また、筆者ら³⁾は、短繊維を離散化したメゾスケール解析手法を開発しており、繊維の配向情報を取得できれば、数値解析から繊維1本1本の抜出し挙動や破断を追跡でき、配向がFRCCの破壊挙動に与える影響をより詳細に検証できる可能性がある。

繊維の配向を検討した既往の研究としては、例えば、浦野ら¹⁾による光透過性のモデルモルタルを用いた可視化実験がある。当該手法は、構造物中の3次元な繊維配向を可視的に捉えられるという利点があるが、モデルモルタルを用いるため、実際のFRCCの力学性能と配向との関係を直接調べることができない点に課題がある。一方、画像から配向を検討している例としては、供試体の切断面の繊維本数・面積を画像解析から計上する手法⁴⁾や、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を評価する方法⁵⁾がある。これらの手法を用いることにより、配向状態を評価した上で、力学性能との関係を検討することが可能となる。ただし、前者は、切断面における繊維の投影断面積から間接的に配向係数を算定するものであり、繊維断面が真円形状でない場合

は適用できない。また、後者は、透過撮影により3次元情報を2次元に落とし込むため、撮影画像の奥行き方向に配向・分散の偏りがある場合は、それらを評価することが難しいという課題を有する。

そこで本研究では、FRCC中の繊維の配向状態を直接的に捉えることを目的として、X線CT撮像により繊維の3次元座標値を抽出することを試みるとともに、CT撮像した試験体の載荷実験を行い、配向が力学性能に与える影響を検証した。

2. X線CT撮像による繊維配向の評価

2.1 試験体の概要

本研究で対象とした繊維補強モルタルの配合を表-1に示す。混入した繊維は、径0.66mm、長さ30mmのポリビニルアルコール (以下, PVA) 繊維であり、体積混入率は1.0%とした。当該繊維は、他の有機繊維よりも曲げ剛性が大きく、繊維がモルタル中で湾曲しないことが事前に確認されたため、本実験に採用した。練上がり直後の0打フローは、230~250mmの範囲であった。

作製した試験体を図-1に示す。モルタル打設口を固定し、平板の片側から流しこみ、1800×330×60mmの平板を製作した。使用したモルタル投入バケットの打設口はφ100mmであり、型枠を充てんするのに要した時間は10分程度であった。打設後に、温度90℃、湿度95%の環境下で24時間の蒸気養生を行った。養生後に得られた圧縮強度、ヤング係数は、それぞれ146MPa、40.2GPaである。

2.2 X線CT装置による撮像

本研究では、繊維補強モルタル中の短繊維の配向状態を捉えるために、X線エネルギーが1MeVのX線CT装

*1 清水建設 (株) 技術研究所 修士(工) (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所

*3 清水建設 (株) 技術研究所 上席研究員 博士(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士(工) (正会員)

置を用いて撮像を行った。短繊維を明瞭に判別するためには、分解能を上げる必要があり、図-1の平板から赤線の範囲(210×184×60mm)を切り出した試験体を、X線CTによる撮像対象とした。撮像の結果、計1995枚の断層画像が得られた。一例を図-2に示す。黒い線状のものが短繊維であり、モルタル部との判別が可能であることが確認できる。

表-1 繊維補強モルタルの配合

W/C	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント*1	細骨材	混和剤*2	繊維
0.20	3.0	253	1265	782	13	13

*1: シリカフェームセメント

*2: 高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)

2.3 CT データを用いた繊維配向の評価

次に、3次元画像解析ソフトウェアを用いて、断層画像から繊維1本1本を検出し、3次元座標値を取得した。図-3は、得られた座標値を用いて、繊維を描画した結果である。繊維はランダムに分散せずに、方向性をもって配向されている様子が確認される。図-3(a)の緑色で着色した面は、型枠面に相当する。型枠近傍の多くの繊維は型枠と平行に配向しているが、型枠から100mm以上離れた領域では、流動方向と垂直に配向している繊維も確認される。図-3(b)は、側面からの視点で描画した図である。底枠近傍において、型枠に沿って繊維が配向していることならびに他の領域に比べ繊維の密度が大きいことがわかる。型枠近傍において繊維が型枠面に平行に配向しやすいことは、従来から知られているせき板効

果であり、得られたCTデータがその傾向をよく捉えていることから、データの妥当性が確認される。

さらに定量的に繊維の配向を検証するため、特定の断面を跨ぐ繊維の配向角度を算出した。配向角度を算出した面は、図-4に示すとおりであり、流動方向に対して垂直な断面である面V1, V2, V3と、水平な断面である面H1, H2, H3を対象とした。それぞれの面は、試験体の中央を横断する切断面を3等分した面となる。配向角度は、図-5に示すように定義し、断面の法線ベクトルと繊維配向方向のベクトルとの内積から求めた。断面に直交して配向された場合は、配向角度0°となる。

対象とした切断面を跨ぐ繊維1本1本の配向角度を算定し、相対度数分布として整理した結果が、図-6である。図より、型枠近傍の面V1においては、配向角度20°

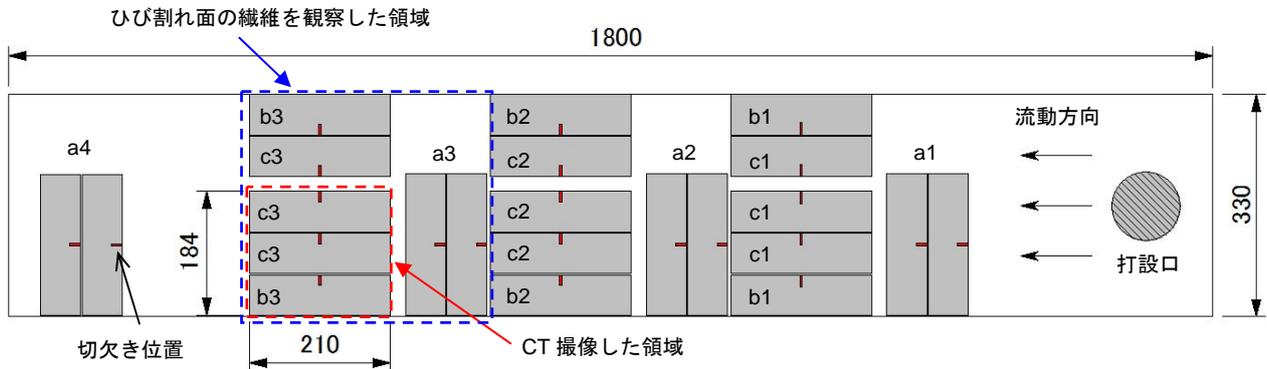


図-1 試験体の概要と切出し試験体の位置

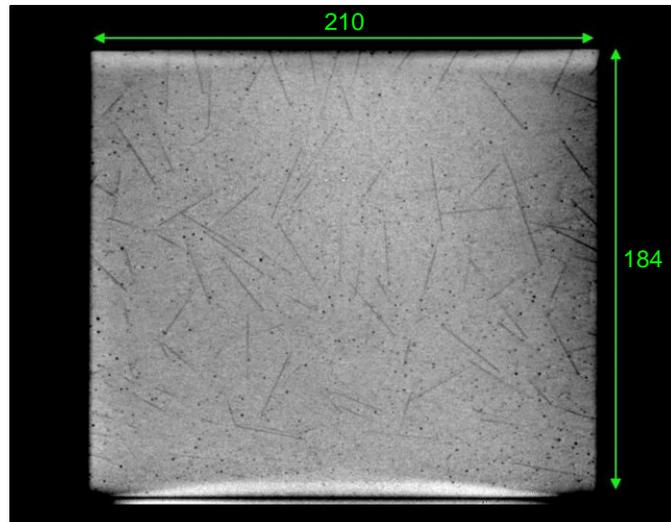


図-2 CT断層像の一例

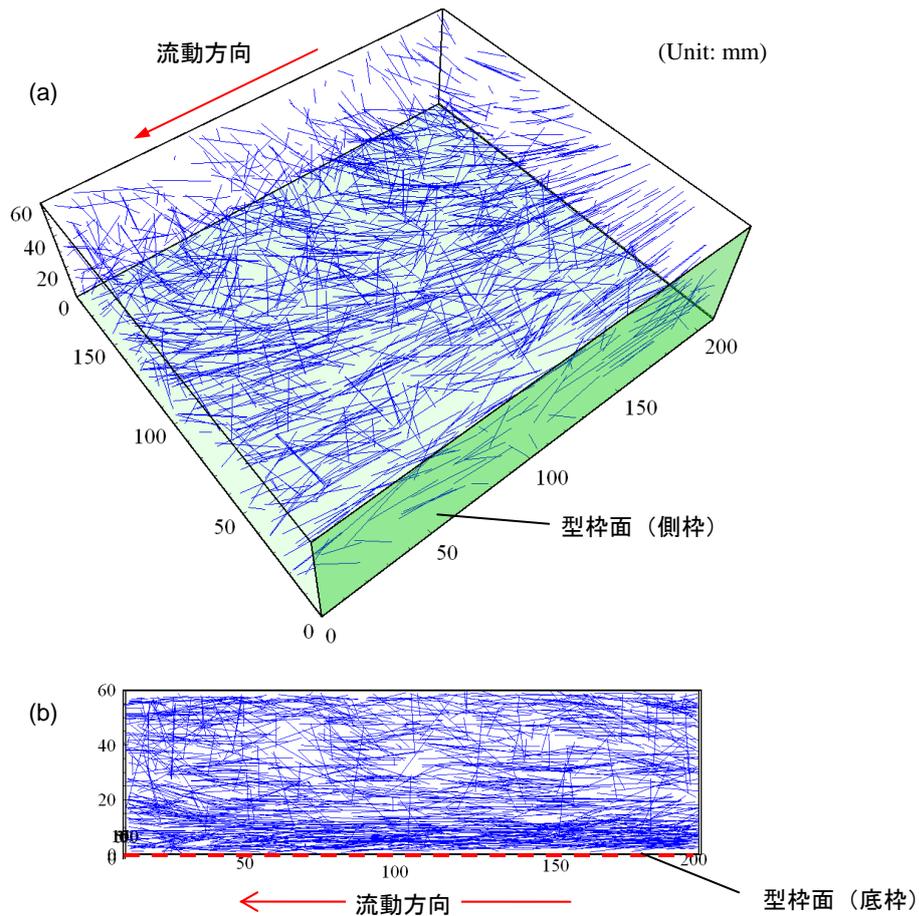


図-3 CT 画像から抽出された繊維配向 (a: 斜め上面からの視点, b: 側面からの視点)

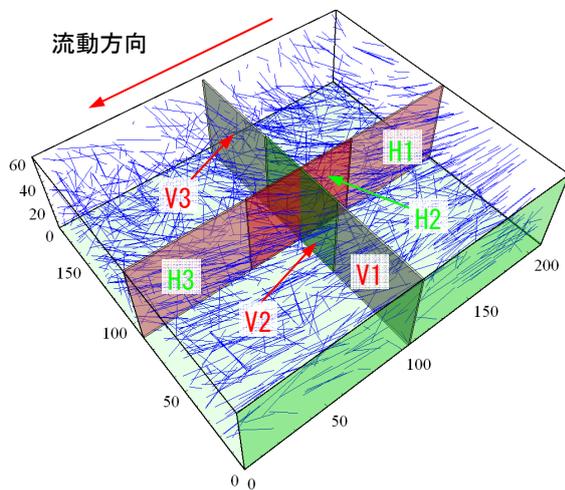


図-4 配向角度を算出した面

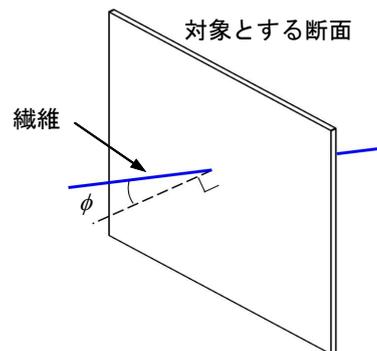


図-5 配向角度の定義

以下の繊維が 6 割を占めていることがわかり、面 V2, V3 の結果からは、型枠から離れるほど配向角度の大きい繊維が増加することが確認される。これは、前述したせき板効果によるものであると考えられる。流動方向と平行な面である面 H1~3 では、配向角度 40~60°にピークがあり、垂直な面とは傾向が異なる。また、面 H1~3 間での差異は、面 V1~3 間での差異よりも小さい。

以上の結果は、本研究で対象とした配合・打設方法の

場合、繊維はランダムに配向せず、せき板効果が存在するとともに、流動方向に対して垂直と平行な面とでは繊維の配向角度に顕著な差異が生じたことを示唆する。

3. 切出し試験体の曲げ荷重実験

3.1 実験概要

繊維配向が力学性能に与える影響を評価するために、前章で分析した試験体を含む、切出し試験体の曲げ荷重

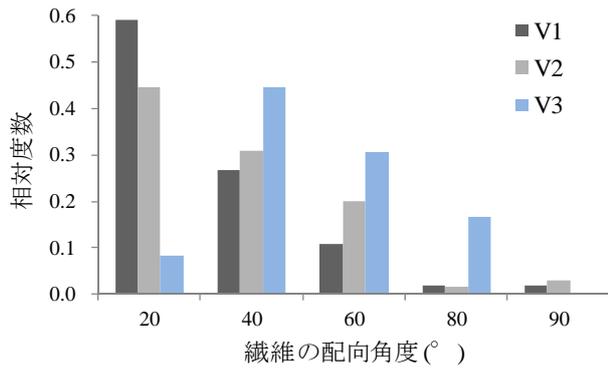


図-6 配向角度の相対度数分布（左：流動方向に対して垂直な面，右：流動方向に対して平行な面）

実験を行った。切出し試験体の寸法は、 $210 \times 60 \times 60 \text{mm}$ とした。切出し位置は、図-1に示すとおりであり、流動方向に対して垂直に切出した試験体をaシリーズとし、流動方向に対して水平に切出した試験体のうち、型枠(側枠)近傍に位置する試験体をbシリーズ、平板中央に位置する試験体をcシリーズとした。切出した試験体は、図-1に示す赤線位置に高さ18mmの切欠きを設けた後、図-7に示す3点曲げ載荷実験を行い、ひび割れ肩口開口変位(以下、CMOD)を計測した。載荷方法は、JCI規準⁶⁾に準拠して行った。ただし、試験体断面の高さ・幅は、60mmとした。

3.2 実験結果

図-1の青線で囲まれた領域の試験体における荷重-CMOD曲線を、図-8に示す。いずれの試験体も曲げひび割れ発生後、一旦荷重が低下するものの、CMODが0.2mm以上になると荷重が再上昇している。切出し位置に伴い、ひび割れ発生後の最大荷重(以下、2次ピーク荷重)に差異が生じており、流動方向に対して垂直に切出したa3試験体に比べ、型枠近傍に位置し、流動方向に対して水平に切出したb3試験体が3倍以上の荷重を負担していることが確認される。また、流動方向に対して水平に切出した試験体の中でも、型枠近傍のb3試験体と比較して、平板中央のc3試験体は、2次ピーク荷重が6割程度であり、顕著な差異が認められた。

図-9は、得られた荷重-CMOD曲線を、各試験体シリーズで平均化した曲線である。平均化処理は、2体あるいは3体のシリーズ毎の試験データを用いて、任意の同一変位に対する荷重の平均値をとった。平均化の変位間隔は、0.002mmとした。aおよびcシリーズに着目すると、2次ピーク荷重は打設口近傍に位置するa1、c1試験体が小さく、打設口から遠方に位置する試験体ほど大きくなる傾向が認められる。

前章で分析した結果が示唆するとおり、繊維はモルタル中でランダムに配向していないため、繊維の配向・分散が力学性能に影響を及ぼしていると考えられる。

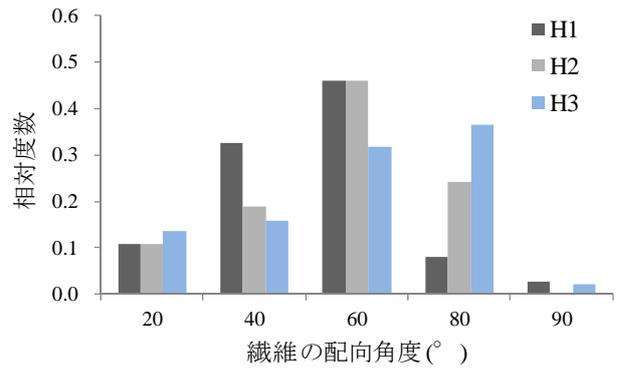


図-7 切欠きはりの3点曲げ載荷試験の概要

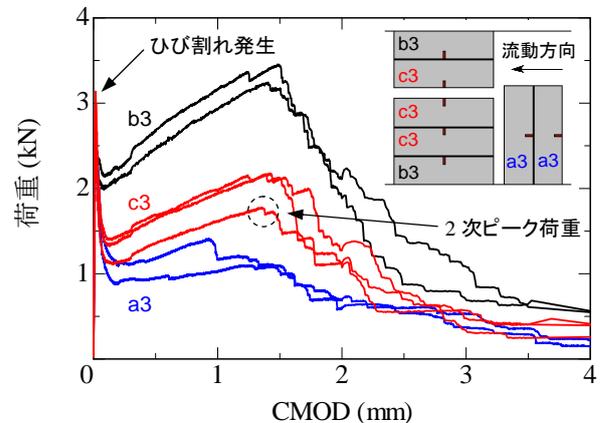
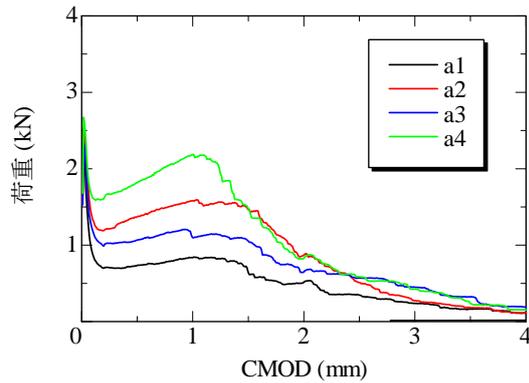


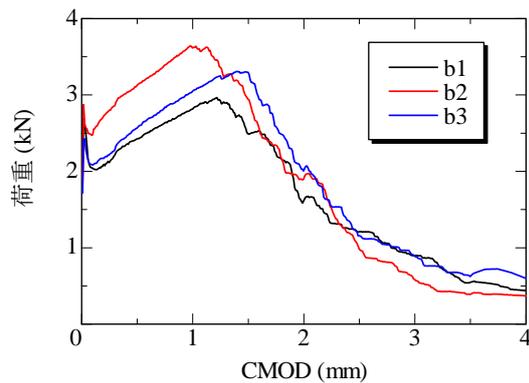
図-8 切出し試験体の荷重-CMOD曲線

4. 載荷実験後のひび割れ面の観察

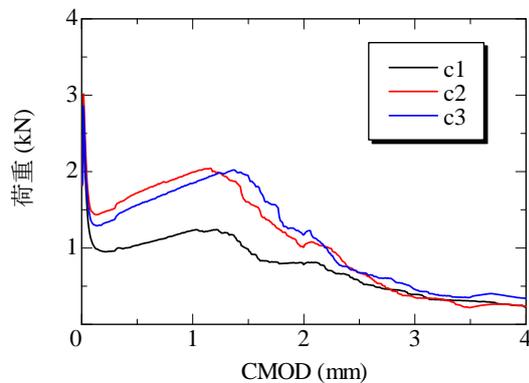
繊維配向が力学性能に与える影響をより詳細に検証するため、前章で載荷した試験体の破断面(以下、ひび割れ面)を目視ならびに光学顕微鏡を用いて観察を行った。観察した試験体は、図-1の青線で囲まれた部分の切出し試験体である。図-10は、ひび割れ面の繊維の分布状況、図-11は、光学顕微鏡を用いて観察した繊維の破断状況である。目視によりひび割れ面に存在する繊維の数を、光学顕微鏡により繊維の破断の有無を調べた結果が、表-2である。破断の有無は、図-11のように光学顕微鏡で繊維端部を倍率50倍に拡大して観察することで、判



(a) 流動方向と垂直に切出した試験体



(b) 流動方向と水平に切出した試験体（型枠近傍に位置）



(c) 流動方向と水平に切出した試験体（平板中央に位置）

図-9 切出し試験体の荷重-CMOD 曲線

定した。なお、ひび割れ面の繊維位置がわかれば、試験体のもう一方のひび割れ面に存在する繊維の切れ端が、繊維が破断している場合には観察できる。繊維破断の判定精度を高めるため、この切れ端を光学顕微鏡により検出し、ダブルチェックを行った。また、表中の破断率の定義は、ひび割れ面で観察された繊維のうち、破断した繊維の割合とした。

表-2の結果から、ひび割れ面の繊維の85%以上が破断していることがわかり、本研究で扱った繊維とモルタルの組み合わせの場合、荷重低下のメカニズムが繊維破断の卓越に起因するものであることが確認された。ひび割れ面に存在する繊維本数は、各シリーズで差異が大きい。ここで、算定したひび割れ面の繊維本数と3章の載荷実験で得られたひび割れ発生後の2次ピーク荷重との関係を考察するため、両者の関係を図-12にプロットした。図より、極めて高い相関性があることがわかる。一方、2章で分析したように繊維の配向については、流動方向に対して垂直な面と平行な面とは配向角度に顕著な差異が存在するとともに、せき板効果により型枠に沿った配向状態であった。また、図-4の面V1~3は、試験体b3およびc3で生じたひび割れ位置とほぼ一致するが、図-6より配向角度に顕著な差異が生じていたことは明らかである。このような配向状態であったにもかかわらず、繊維本数と2次ピーク荷重に高い相関性がある結果は、本実験における繊維補強モルタルの曲げ特性は、ひび割れ面を跨ぐ繊維（架橋繊維）の本数に依存し、繊維の配向角度が与える影響は小さいことを示唆する。

配向角度が繊維補強モルタルのマクロ挙動に与える影響が存在すると予想されたが、本研究で対象とした配合において顕著に現れなかった理由は、繊維の破断が卓越する破壊挙動を呈したためであると推測される。繊維の配向角度が及ぼす影響の一つとしては、配向角度が大きくなるほどみかけの引張抵抗力が向上する現象⁷⁾が挙げられる。図-13に示す繊維埋込み口でのマ



図-10 ひび割れ面の繊維分布



図-11 破断した繊維（光学顕微鏡による観察）

表-2 ひび割れ面の繊維本数と破断率

試験体 シリーズ	ひび割れ面の 繊維本数 N_f (本)	破断した 繊維本数 N_{fu} (本)	破断率 N_{fu} / N_f (%)
a3	48	43	90
	40	34	85
b3	80	76	95
	83	81	98
c3	62	60	97
	61	58	95
	53	53	100

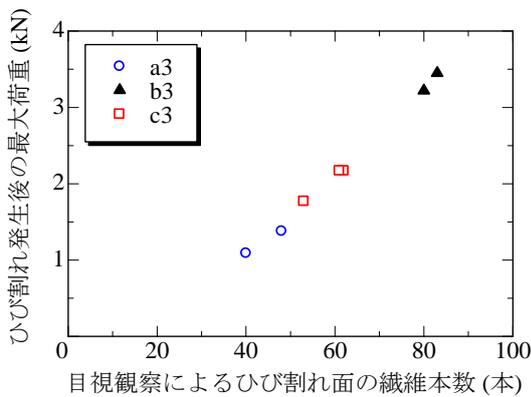


図-12 目視観察によるひび割れ面の繊維本数とひび割れ発生後の最大荷重の関係

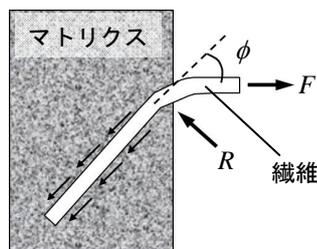


図-13 配向角度を有する繊維の引張力への抵抗機構

マトリクスからの反力 R の存在により、界面摩擦が強化され、引張抵抗力が向上するとされているが、本研究の配合のように緻密なモルタルマトリクスと付着が良好な PVA 繊維の組合せの場合、繊維はマトリクスとの化学的な付着が切れる前に破断に至っていると考えられ、すべり出し過程での引抜抵抗力の向上効果が現れなかったと推測される。したがって、配向角度が曲げ特性に与える影響が小さい結果は、繊維の破断が卓越する繊維補強モルタルの場合の結果であり、破断率が小さく、繊維の拔出し挙動が助長する破壊挙動を呈する配合の場合、配向角度の影響が大きくなる可能性があるため、別途検討を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、PVA 繊維を混入した繊維補強モルタル中の 3 次元的な繊維の配向状態を X 線 CT により評価することを試み、配向が繊維補強モルタルの力学性能に与える影響を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) X 線 CT による分析から、本研究で対象とした配合・打設方法の場合、短繊維はランダムに配向せず、せき板効果が存在するとともに、流動方向に対して垂直と平行な面とでは繊維の配向角度に顕著な差異が存在することが確認された。
- (2) 製作した平板から切出した試験体を用いて、切欠きはりの曲げ載荷実験を行った結果、切出した場所によっては、ひび割れ発生後の最大荷重に 3 倍の差異が認められた。
- (3) 曲げ載荷実験において繊維の破断が卓越する繊維補強モルタルの場合、繊維の配向角度が曲げ破壊挙動に与える影響は小さく、ひび割れを跨ぐ繊維本数と曲げひび割れ後の最大荷重に高い相関性があることが確認された。

参考文献

- 1) 浦野真次, 後藤茂, 栗田守朗: ECL 工法における鋼繊維補強コンクリートの充填性に関する検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-138, pp.276-277, 2001
- 2) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリートの曲げ供試体中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.268-273, 2012
- 3) 小倉大季, 国枝稔, 中村光, 吉武謙二: 短繊維を離散化したメソスケール解析による繊維補強コンクリートの剥落挙動解析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.417-424, 2012
- 4) 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
- 5) 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
- 6) JCI 規準: 切欠きはりを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) Kanda, T. and Li, V. C.: Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No. 1, pp. 5-13, 1998