

超高強度繊維補強コンクリートにおける 繊維の配向と曲げ特性

Evaluation of fiber orientation in ultra high strength fiber
reinforced concrete and its effect on flexural properties

平成 27 年 3 月

岐阜大学大学院
工学研究科博士後期課程
生産開発システム工学専攻

周 波

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 超高強度繊維補強コンクリート.....	1
1.1.2 UFC の繊維の配向.....	1
1.2 研究の目的.....	3
1.3 論文の構成.....	3
第1章の参考文献.....	4
第2章 UFCに関する既往の研究.....	5
2.1 はじめに.....	5
2.2 UFC の歴史.....	5
2.3 UFC の一般物性.....	7
2.3.1 圧縮強度.....	7
2.3.2 引張強度および引張軟化特性.....	8
2.3.3 圧縮応力 - ひずみ曲線.....	8
2.3.4 収縮特性.....	9
第2章の参考文献.....	10
第3章 UFC の繊維の配向に関する既往の研究.....	11
3.1 はじめに.....	11
3.2 コンクリート中の繊維の観察手法.....	11
3.3 繊維の配向が力学特性に及ぼす影響.....	14
第3章参考文献.....	19
第4章 PVA 繊維を用いた UFC の特性と繊維の配向の影響.....	21
4.1 はじめに.....	21
4.2 実験概要.....	21
4.2.1 PVA 繊維を用いた UFC の特性.....	21
4.2.2 打込み方法が繊維の配向と曲げ挙動に及ぼす影響.....	23
4.3 実験結果.....	26
4.3.1 PVA 繊維を用いた UFC の特性.....	26
4.3.2 打込み方法が繊維の配向と曲げ挙動に及ぼす影響.....	27
4.4 まとめ.....	32
第4章の参考文献.....	33
第5章 UFC 曲げ供試体中の繊維の配向.....	34
5.1 はじめに.....	34
5.2 実験概要.....	34
5.2.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察.....	34
5.2.2 鋼繊維 UFC 供試体の切断面の観察.....	35
5.2.3 打込み方法が異なる合成繊維 UFC の曲げ挙動.....	35

5.3 実験結果	36
5.3.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察	36
5.3.2 鋼繊維 UFC 供試体の切断面の観察	39
5.3.3 打込み方法が異なる合成繊維 UFC の曲げ挙動	42
5.4 まとめ	43
第 5 章の参考文献	44
第 6 章 可視化モデルコンクリートによる UFC の繊維の配向の評価	45
6.1. はじめに	45
6.2. 実験概要	45
6.2.1 使用材料および UFC の配合	45
6.2.2 可視化モデルコンクリート	45
6.2.3 供試体	47
6.2.4 画像解析により繊維の配向	47
6.3. 実験結果	49
6.3.1 可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向	49
6.3.2 UFC 中の繊維の配向	57
6.4. まとめ	67
第 6 章の参考文献	68
第 7 章 標準曲げ試験体における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討	70
7.1. はじめに	70
7.2. 実験概要	70
7.2.1 使用材料および配合	70
7.2.2 練り混ぜおよび養生方法	70
7.2.3 供試体の作製方法	70
7.2.4 力学特性の試験方法	71
7.2.5 断面高さごとの引張軟化曲線	72
7.2.6 画像解析による破断面の繊維配向の評価	72
7.2.7 DIANA 解析ソフトによる J 積分の結果検証	73
7.3. 実験結果	75
7.3.1 フレッシュ性状および圧縮強度	75
7.3.2 曲げ試験結果	75
7.3.3 破断面の画像解析結果	77
7.3.4 最大引張応力と有効繊維本数 N_{ef} の関係	79
7.3.5 DIANA 解析結果	80
7.4. まとめ	81
第 7 章の参考文献	82
第 8 章 パネル部材における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討	83
8.1 はじめに	83
8.2 実験概要	83
8.2.1 使用材料および配合	83

8.2.2 練混ぜおよび養生方法	83
8.2.3 円形パネル	83
8.2.4 長方形パネル	84
8.2.5 曲げ試験方法	85
8.2.6 破断面の画像解析による繊維配向の評価	85
8.3. 実験結果	86
8.3.1 円形パネルから切出した供試体の曲げ強度	86
8.3.2 長方形パネルから切出した供試体の曲げ強度	88
8.3.3 供試体破断面の観察結果	91
8.3.4 破断面の画像解析結果	92
8.4 まとめ	93
第8章の参考文献	94
第9章 結論	95
9.1 はじめに	95
9.2 合成繊維を用いた UFC の特性および繊維の配向の影響	95
9.3 可視化モデルコンクリートによる UFC の繊維の配向の評価	95
9.4 UFC の力学特性と繊維の配向の定量的な関係	96
9.5 今後の展望	96
9.5.1 設計・施工における繊維の配向の考慮	96
9.5.2 繊維の配向の評価技術	96
9.5.3 繊維の配向の予測	97
9.5.4 繊維の配向と力学特性	97
9.5.6 繊維の配向の制御	97
9.6 まとめ	97
謝辞	98
発表論文	99

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 超高強度繊維補強コンクリート

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength fiber reinforced concrete, 以下 UFC とする) は、低水結合材比のモルタルマトリクスに高強度の短繊維を混入したもので、低水結合比でありながら優れた流動性を持ち、圧縮強度は 200N/mm^2 程度で通常のコンクリートの約 5~10 倍、曲げ強度は 30N/mm^2 程度で通常のコンクリートの約 10~15 倍の超高強度が得られるのが特徴である。また、ひび割れに対しても繊維が引張に抵抗するため、脆性的には破壊せず、韌性に富んだ破壊性状を示す。現行の土木学会の UFC に関する設計・施工指針では、圧縮強度の特性値が 150N/mm^2 以上、ひび割れ発生強度の特性値が 4N/mm^2 以上、引張強度の特性値が 5N/mm^2 以上のものが対象とされている [1]。現在日本国内で実用化されている超高強度繊維補強コンクリートとしてダクタル、サクセムおよびスリムクリートがある [2] [3]。

1.1.2 UFC の繊維の配向

短繊維補強コンクリートが登場して以来今日に至るまで、マトリクス中の繊維の配向の評価とそれが力学挙動に及ぼす影響に関しては、重要な課題と認識されているものの、いまだ解決されていない。その最大の理由は、コンクリートあるいはモルタルマトリクス中の繊維の配向を観察すること自体が難しいうえ、さらに現状では打込み時に繊維の配向を制御する技術が存在しないためであると考えられる。

従来から、部材厚が薄い場合には繊維が 2 次元配向になり易いことや、せき板効果 (型枠に接する面では、繊維は型枠面に対して平行に配向し易い) が存在することはよく知られている。しかし、従来の有スランプの短繊維補強コンクリートの場合、打込み時に材料分離がなければ、基本的に構造物内でもランダムな配向となる。ところが、UFC や打込み型のひずみ硬化型セメント複合材料 (Strain hardening cementitious composites) では高流動とするのが一般的であり、打込み時にコンクリートを型枠内で流動させるため、その流れに応じて繊維が配向することになる。

これまでに供試体中の繊維の配向が試験結果に影響することに関しては、多くの報告があり事実として認められている [4-10]。一例として S.T Kang ら [4] は図-1.1 に示すように、UFC を $1320 \times 1320 \times 100$ mm のパネルの中心から流し込み、硬化後に $100 \times 100 \times 400$ mm の曲げ供試体を切出し、切欠き梁の 3 点曲げ試験を行った。試験の結果、図-1.2 に示すように、パネルの中心から離れるほど、曲げ強度が徐々に高くなり、パネルの中心部と最外縁では、曲げ強度に 1:2 程度の大きな差が生じている。試験後の供試体の破断面を観察した結果、図-1.3 に示すように、図中の白い点が鋼繊維の切断面であり、強度の高い供試体は、白い点の面積が小さい、すなわち繊維は繊維軸に対して垂直に切断されているのに対して、強度の低い供試体では繊維が少なく、繊維の切断面が大きくなっており、切断面に対して繊維が斜めに配向している状況を示している。

このような構造物中の繊維の配向の影響を考慮するため、フランスの UFC の指針である Setra-AFGC [11] では配向係数 K を導入し、事前に実験で確認を行わない場合には、通常の荷重に対す

る照査では $K=1.25$ 、局所荷重に対する照査では $K=1.75$ として、引張強度を配向係数 K で除することで設計用値としている。一方、土木学会の UFC 指針[1]では材料係数 $\gamma_c=1.3$ とすることで繊維の配向について直接的には考慮していない。

構造物中の繊維の配向は打込み方法や構造物の寸法などによって変化することも知られている。しかしながら、これを設計において合理的に考慮するためには、コンクリート中の繊維の配向を評価するとともに配向を制御する技術が必要であるが、現状ではこれらの技術はまだ確立されていない。

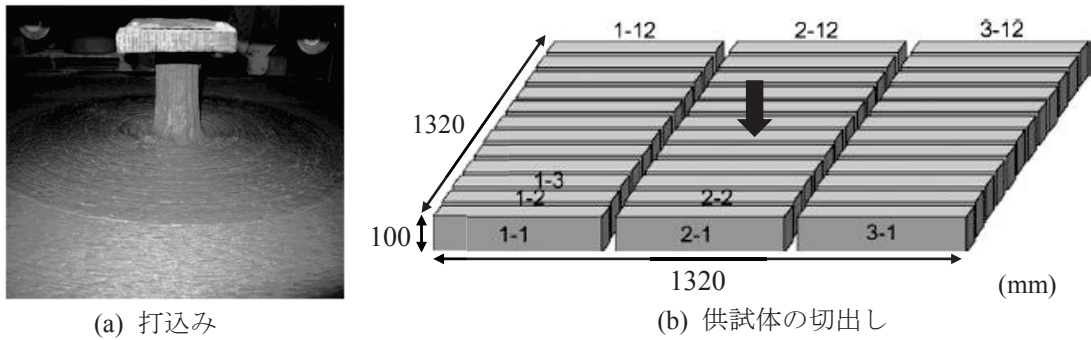


図-1.1 パネル試験体の打込みおよび供試体の切出し [4]

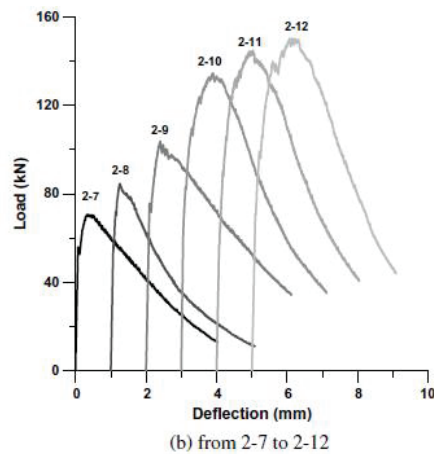


図-1.2 切出した供試体の荷重-開口変位曲線 [4]

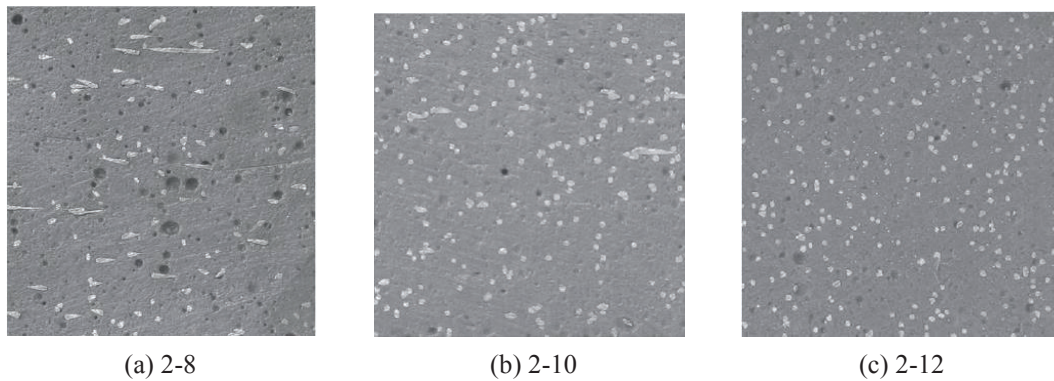


図-1.3 切出した供試体の破断面 [4]

1.2 研究の目的

本研究では、UFC を粘性を有する無色透明な高吸水性高分子材料でモデル化し、繊維を可視化することで、供試体中の繊維の配向を評価することを目的とした。さらに、繊維の配向が UFC の力学特性に及ぼす影響も検討した。

1.3 論文の構成

論文は、全 9 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、UFC の繊維の配向に関する課題と動向について述べ、本研究の目的を示すとともに本論文の構成を示した。

第 2 章「UFC に関する既往の研究」では、UFC の発展の経緯を簡単に説明するとともに UFC の一般物性に関する既往の研究を紹介した。

第 3 章「UFC の繊維の配向に関する既往の研究」では、繊維の配向に関する既往の研究成果を中心に述べた。

第 4 章「PVA 繊維を用いた UFC の特性と繊維の配向の影響」では、PVA 繊維を用いた UFC の特性およびコンクリートの打込み方法が繊維の配向と曲げ挙動に及ぼす影響について述べた。

第 5 章「UFC 曲げ供試体中の繊維の配向」では、繊維の配向の新たな評価手法として可視化モデルコンクリートを提案し、標準曲げ供試体中の繊維の配向を評価した。

第 6 章「可視化モデルによる UFC の繊維の配向の評価」では、可視化モデルコンクリートを用い、試験体の形状寸法・打込み方法などが繊維の配向に与える影響を検討した。また、実際 UFC 試験体も作成し、試験体の切断面の画像解析を行い、可視化モデルコンクリートによる UFC の繊維の配向の評価の適用性を確認した。

第 7 章「標準曲げ供試体における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討」では、繊維の分散・配向とコンクリートの引張強度の関係を定量的に評価することを目的とし、標準曲げ供試体を対象とし、切欠き深さが異なる UFC の曲げ供試体の 3 点曲げ試験を行い、J 積分法により断面高さごとの引張軟化曲線を推定した。また、デジタルマイクロスコープで撮影した切断面の写真の画像解析により繊維本数および配向角度を計算し、引張軟化曲線との関係を検討した。

第 8 章「パネル部材における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討」では、 $\phi 1200 \times 50 \text{mm}$ 円形パネルの中心に UFC を打込み、硬化後にパネルの半径方向に対して 0° 、 30° 、 60° および 90° の方向に曲げ供試体を切断し、繊維の配向性を有する供試体の载荷試験を行った。また、試験後に、供試体破断面の直近で切断し、切断面の画像解析により繊維本数と配向角度を計算し、繊維の配向が UFC の曲げ強度にどの程度に影響するかを検討した。

第 9 章「結論」では、本研究の成果をまとめるとともに、UFC の繊維の配向に関する今後の課題について述べた。

第1章の参考文献

- [1] 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工方針（案），2004
- [2] 財団法人土木研究センター：建設技術審査証明報告書「ダクタルフォーム」，2002.3
- [3] http://www.obayashi.co.jp/service_and_technology/related/tech080
- [4] S.H Kwon, S.T Kang, B.Y Lee, J.K Kim: The variation of flow-dependent tensile behavior in radial flow dominant placing of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPRCC). Construction and Building Materials, Vol.33, pp.109-121, 2012
- [5] P Stahli, R Custer, JGM van Mier: On flow properties, fiber distribution, fiber orientation and flexural behavior of FRC. Materials and Structures, Vol.41, pp.189-196, 2008
- [6] W Pansuk, H Sato, Y Sato, R Shionaga: Tensile behaviors and fiber orientation of UHPC. Proceedings of second international symposium on Ultra High Performance Concrete, pp.161-168, 2008
- [7] S.W Kim, S.T Kang, J.J Park, G.S Ryu: Effect of filling method on fiber orientation and dispersion and mechanical properties of UHPC. Proceedings of second international symposium on Ultra High Performance Concrete, pp.185-192, 2008
- [8] J Walraven: On the way to design recommendation for UHPFRC, Ultra High Performance Concrete (UHPC), Proceedings of second international symposium on Ultra High Performance Concrete, pp.45-56, 2008
- [9] 一宮利通, 大野俊夫, 野口孝俊, 南浩郎：超高強度繊維補強コンクリートを用いた床版の打込み方法が構造性能に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1453-1458，2008
- [10] M. Mohammed, Y. Sato, D. Yamazaki and W. Pansuk: Influence of Fiber Orientation on Tensile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Mortar, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.32, No.1, pp.245-250, 2010
- [11] Setra/AFGG : Ultra high Performance Fiber-Reinforced Concrete, Interim Recommendation, 2002

第2章 UFCに関する既往の研究

2.1 はじめに

コンクリートの高強度化、高耐久性は、常にコンクリート技術者の夢と目標であり、セメントコンクリートの歴史において、それぞれの時代の技術者、研究者が努力を重ねてきた。本章では、UFCの発展の経緯を簡単に説明するとともに UFCの一般物性に関する既往の研究を紹介する。

2.2 UFCの歴史

UFCの基礎となったのは、1977年にDenmarkにおいて超微粒子と高性能減水剤を組み合わせることにより開発された DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles) 材料と考えられている[1]。図-2.1に DSPペーストの模式図を示す[1]。DSPは高性能減水剤による粒子分散効果および超微粒子による充填効果の双方を利用した手法であり、極めて低水結合材比であっても優れた流動性を持つ高強度コンクリートを製造する技術である。

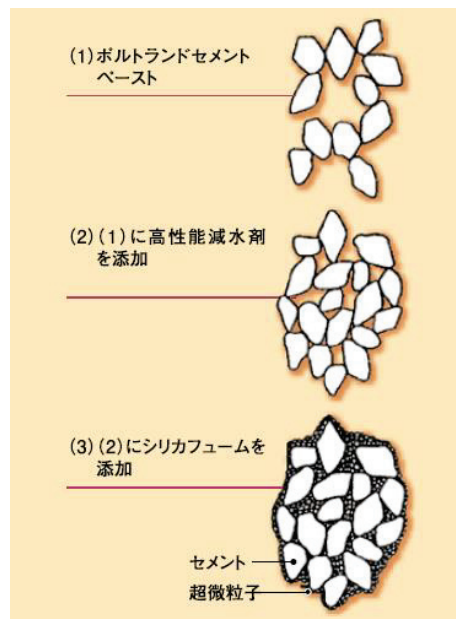


図-2.1 DSPの機構[1]

その後、1990年代前半にフランスの P Richard と M Cheyrezy[2]により RPC (Reactive Powder Concrete) の概念が提案され、さらに世界初のRPCがフランスの Bouygues 社の実験室で誕生した[3]。RPCは最密充填理論に基づいて開発されたセメント系マトリックスに金属繊維を混入した超高強度+高靱性コンクリートである。表-2.1[2]にRPCの使用材料および配合を示す。図-2.2[2]にRPC200とRPC800の相対密度と圧縮強度の関係を示す。

表-2.1 RPC 使用材料および配合比[2]

Typical RPC compositions (by weight)

	RPC 200				RPC 800	
	Non fibered		Fibered		Silica aggregates	Steel aggregates
Portland Cement	1	1	1	1	1	1
Silica fume	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Sand 150 - 600 μm	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Crushed quartz d ₅₀ =10μm	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Superplasticizer (Polyacrylate)	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
Steel fiber L=12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
Steel fiber L=3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
Steel aggregates <800 μm	-	-	-	-	-	1.49
Water	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Compacting pressure	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Heat treatment temperature	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

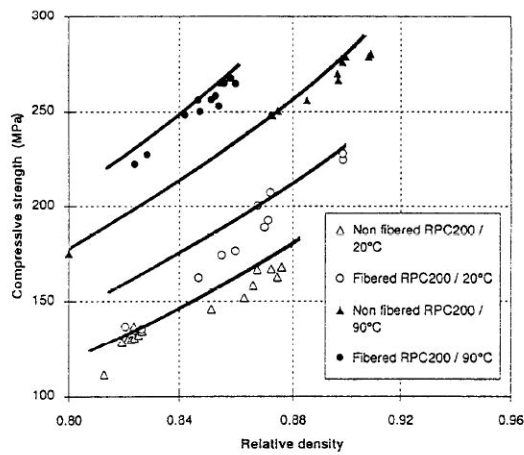


FIG. 2 : Envelop of optimum strength values obtained for different relative densities

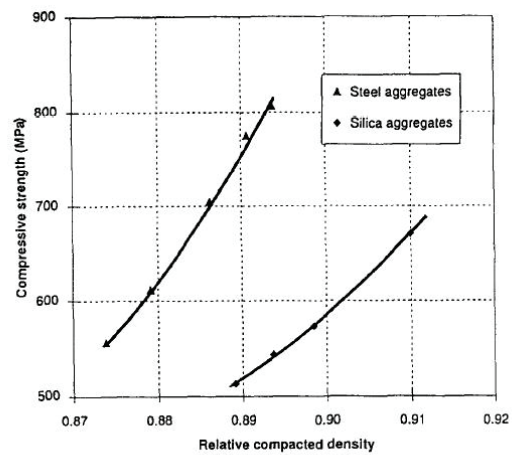


FIG. 3 : Variation in strength with relative density of RPC 800 concretes

図-2.2 RPC200 と RPC800 の圧縮強度[2]

そして、UFC が 1998 年に日本に技術導入され、2004 年に土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」[4]が刊行された。なお、欧米では UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) と呼ばれているが、同様なものと考えてよい。

2.3 UFCの一般物性

2.3.1 圧縮強度

UFCは、通常熱養生により強度発現が大きく促進されているので、養生終了後の強度は安定しており、材齢の違いが強度へ与える影響は小さい[4]。図-2.3は熱養生の一例を示す。図-2.4は養生終了後における超高強度繊維補強コンクリートの長期材齢での強度試験結果を示す。材齢によらず圧縮強度の値はほぼ一定の値である。また、近年常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートも開発され、熱養生UFCと同程度の圧縮強度で、現場打ちも可能となり、更なるUFCの適用が期待できる[5]。

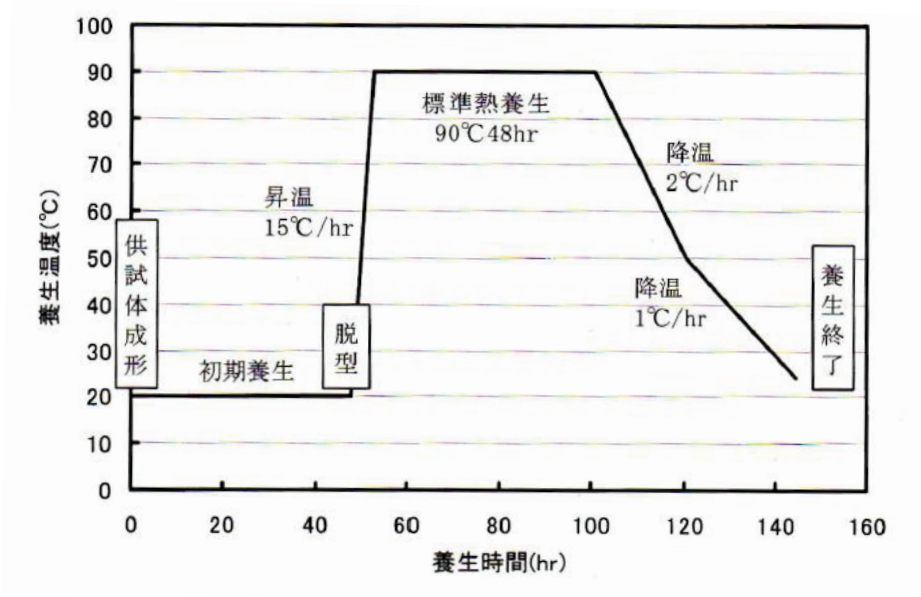


図-2.3 熱養生の一例[4]

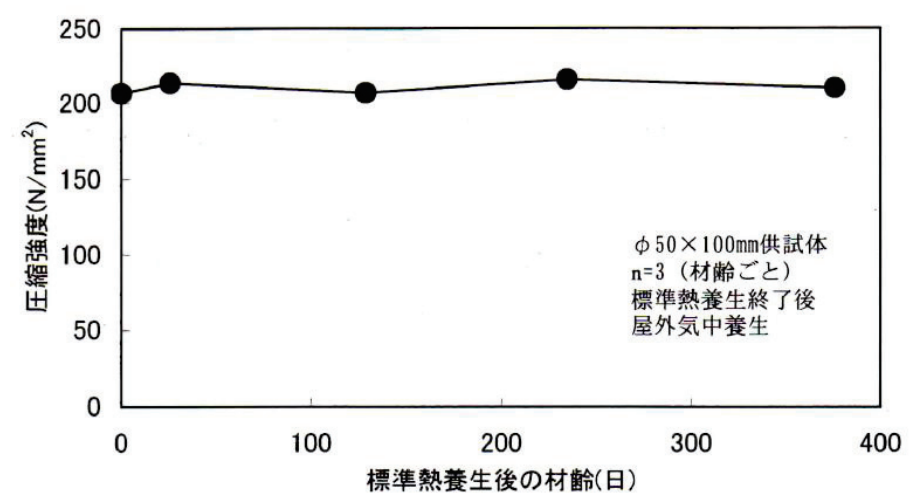


図-2.4 熱養生終了後におけるUFCの長期材齢での強度試験結果[4]

2.3.2 引張強度および引張軟化特性

指針（案）[4]では、UFCは、ひび割れ発生強度の特性値が 4N/mm^2 以上、引張強度の特性値が 5N/mm^2 以上とされている。UFCの引張強度および引張軟化特性は、本来直接引張試験により求めるのが望ましいが、それ以外にも曲げ試験結果の逆解析[6]やJ積分法[7]などがある。曲げ試験方法については、JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」もしくは、JSCE-G552「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度およびまげタフネス試験方法」などが挙げられる。このほか、JCI-S-002-2003「切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重 - 変位曲線試験法」やRILEMが推奨する試験法[8]などがある。

図-2.5には鋼繊維およびアラミド繊維を用いたUFCの引張軟化曲線のモデルを示す[9]。UFC指針（案）に示すように、ひび割れ発生後、ひび割れ幅の増加に伴いそこで伝達される引張応力は減少していき、最終的に完全に開口したひび割れを形成する。引張軟化曲線は、この伝達応力とひび割れ幅の関係を表したものである。

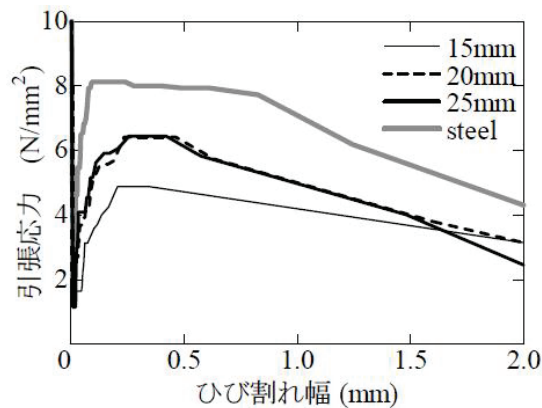


図-2.5 UFCの引張軟化曲線[9]

2.3.3 圧縮応力 - ひずみ曲線

図-2.6に円柱UFC供試体の圧縮試験時に計測された圧縮応力 - ひずみ曲線の一例を示す。ヤング係数は 42.4kN/mm^2 、圧縮強度は 167.0N/mm^2 。

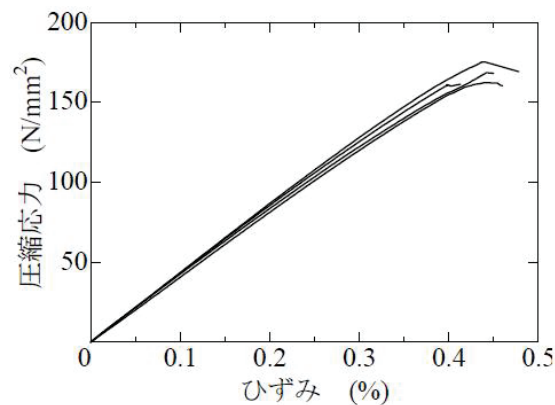


図-2.6 UFCの引張応力 - ひずみ曲線[9]

2.3.4 収縮特性

UFCの収縮は、自己収縮が主であり、材料の性質や養生条件などの様々の要因によって影響を受ける。図-2.6はUFCの収縮ひずみの一例を示す。標準熱養生中（一次養生20℃，48H；二次養生90°，48H）の収縮量は 450×10^{-6} 程度であり、養生終了後の収縮量は 50×10^{-6} 程度である。一方、標準熱養生を行わない場合、収縮ひずみは通常のコンクリートと同様、材齢とともに変化し、全収縮量は 550×10^{-6} 程度である。

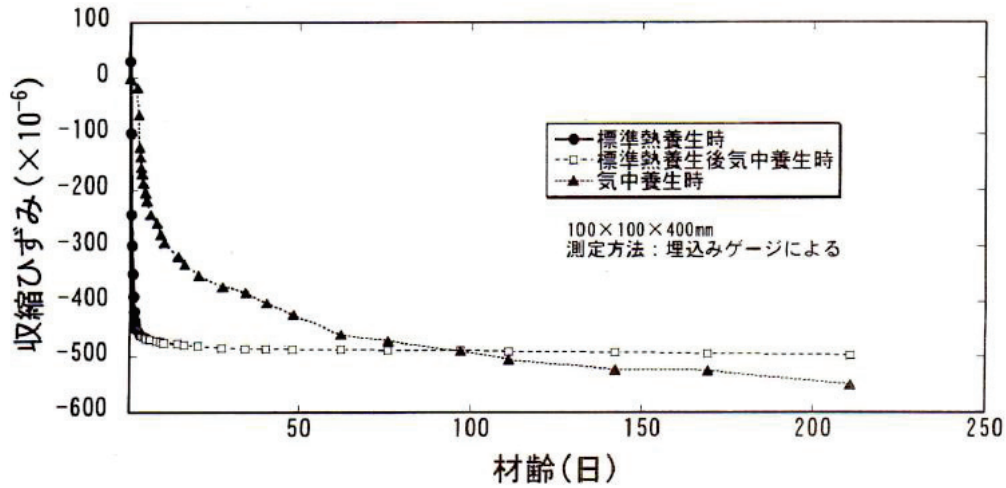


図-2.6 UFCにおける打込み時からの収縮ひずみ [4]

第2章の参考文献

- [1] H.H Bache: Densified Cement/Ultra-Fine Particle-Based materials. Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Canada, 1981
- [2] P Richard, M Cheyrezy: Composition of Reactive Powder Concrete. Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995
- [3] P.C Aitcin: Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research, Vol.30, No.9, pp.1349-1359, 1995
- [4] 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工方針（案），2004
- [5] 玉竜浩司，吉田浩一郎，石関嘉一，平田隆祥：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの諸特性，コンクリート年次論文集，Vol.34，No.1，pp.208-213，2012
- [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 JCI-S-002-2003
- [7] V.C Li, R.J Ward: A Novel Testing Technique for Post-peak Tensile Behavior of Cementitious Material, Fracture Toughness and Fracture Energy, pp.183-195, Balkema, 1989
- [8] Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.4, pp.285-290, 1985
- [9] N.K Thy, 周波，大森慎也，内田裕市：アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.233-238，2011

第3章 UFCの繊維の配向に関する既往の研究

3.1 はじめに

これまでに供試体中の繊維の配向が試験結果に影響することに関しては、多くの報告があり事実として認められている。また、構造物中の繊維の配向は、打込み方法や構造物の寸法によって変化することも知られている。しかしながら、これを設計において合理的に考慮するためには、コンクリート中の繊維の配向を評価するとともに配向を制御する技術が必要であるが、現状ではこれらの技術はまだ確立されていない。さらに、構造物全体の挙動に対して局所的な繊維の配向がどのような影響を与えるのかも必ずしも明確にはなっていない。繊維の配向の問題は今後の研究開発が強く望まれる課題である。

本章ではコンクリート中の繊維の観察手法、繊維の配向に影響する要因および繊維の配向と力学特性の関係に関する既往の研究成果を整理した。

3.2 コンクリート中の繊維の観察手法

コンクリート中の繊維の配向状態を観察するには、供試体の切断面を観察するのが簡便であり一般的である。また、画像解析技術を組み合わせることで配向状態の数値化が検討されている。J.L Chermant[1], A Amin[2], S.T Kang[3]は供試体の切断面を高画像数デジタルカメラで撮影し、ImageJ[4]などの画像解析技術を用い、繊維の配向状態を検討した。図-3.1にImageJを用いた切断面の画像解析手順を示す[2]。図-3.1(a)は供試体切断面をデジタルカメラで撮影した画像である。図中、白い面積が鋼繊維の切断面である。図-3.1(b)は切断面の画像を2値化したものである。これより鋼繊維の切断面を認識し、認識した鋼繊維の切断面を楕円で近似することで、繊維の配向角度を求る。

図-3.2に示すように、繊維の配向角度 θ は、式-3.1により計算できる。繊維が切断面に対して垂直に配向している場合 90° となり、繊維が切断面に対して平行に配向している場合 0° となる。なお、この方法が適用できるのは、鋼繊維の断面形状が真円であることが条件である。

P Stahli[5], 小倉ら[6]はX線CT-Scanにより供試体を切断せず、繊維の配向を検討している。

断層写真の一例を図-3.3に示す。黒い線状の部分が短繊維である。3次元画像解析ソフトウェアを用い、断層画像から繊維1本1本を検出し、3次元座標値を取得することが可能である。図-3.4には、得られた座標値を用いて、繊維を描画した結果を示す。さらに、図-3.5に示すように全繊維の3次元座標から、特定の断面を跨ぐ繊維の配向角度も算出できる。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{d_f}{d_{fi}}$$

式-3.1 繊維の配向角度[4]

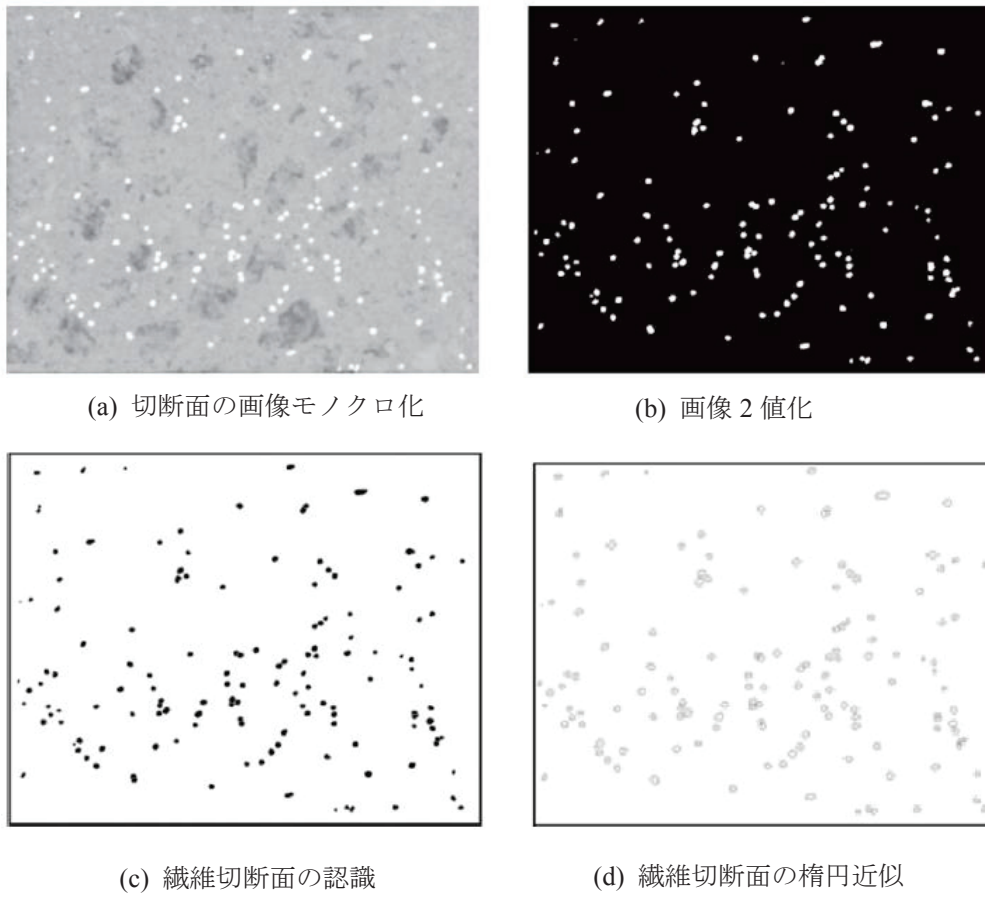


図 - 3.1 切断面の画像解析手順[2]

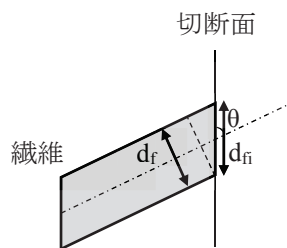


図 - 3.2 切断面における繊維の配向[4]

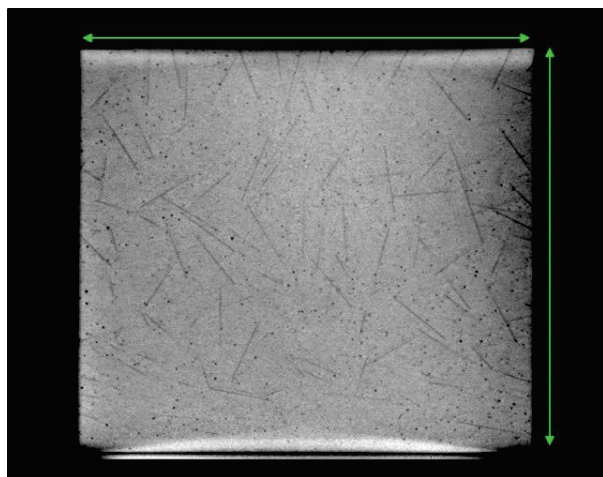


図 - 3.3 CT 断層写真[6]

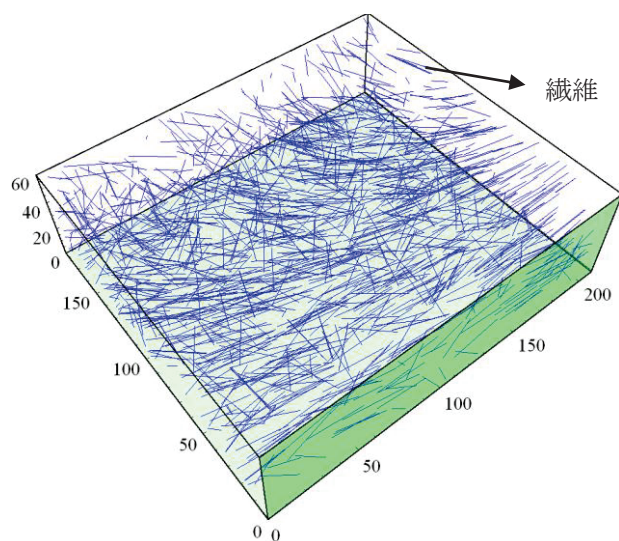


図 - 3.4 CT 画像から抽出された繊維配向[6]

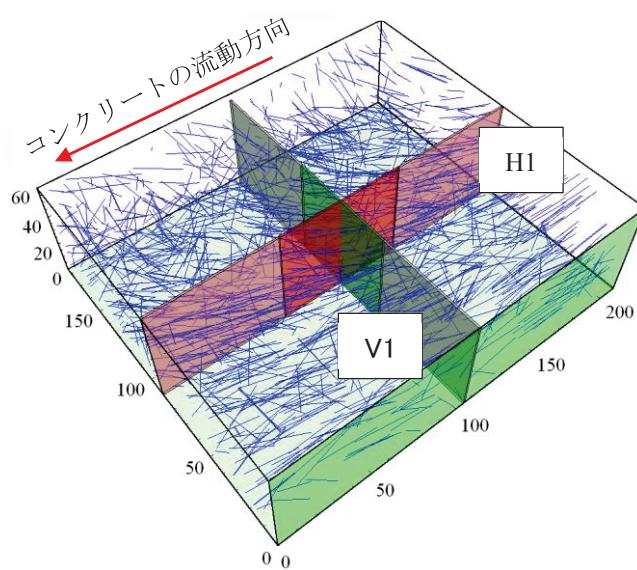


図 - 3.5 配向角度を算出した面[6]

鋼繊維の場合にはX線透過法を用いる方法が古くから適用されており、この場合はCT-Scanと同様に供試体を切断することなく内部を直接観察することができる。馬場ら[7]は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状態を評価する方法について検討している。しかしながら、X線透過法は特別な設備機器と有資格者が必要であり必ずしも簡便な方法とは言えない。

S.J. Barnett[8]は Electrical Resistivity を利用し、繊維の配向を評価した。M Faifer [9]は Magnetic Approach を用いて繊維の配向を評価した。

3.3 繊維の配向が力学特性に及ぼす影響

短繊維補強コンクリートの特徴はひび割れ発生後の繊維による架橋効果にあり、この架橋効果に対して繊維の配向・分散が大きく影響する。既往の研究によれば、コンクリート中の繊維の配向・分散に影響する要因として、練混ぜ後のフレッシュ性状、打込み方法、供試体の形状寸法、型枠せき板効果などが挙げられ、特に練混ぜ後のフレッシュ性状と型枠せき板効果が繊維の配向・分散に大きく影響するとされている。

M.C Torrijos[10]は図-3.6に示すように、打込み方法を変えて供試体を作製し、供試体中の繊維の配向を評価し、供試体の力学特性への影響を検討した。試験では、150×150×600mmの曲げ供試体を対象とし、供試体を立てて軸方向から打込む方法(図中Vで示したもの)、供試体の中央からコンクリートを打込む方法(図中Cで示したもの)、コンクリートをパイプ中で一定の距離を流動させた後、型枠の端部から打込む方法(図中Tで示したもの)の計3種類の打込み方法を用いた。

コンクリート硬化後、図-3.7に示すように3点曲げ試験を行い、曲げ強度を求めた。また、繊維の配向および本数を観察するため、図-3.8に示すように供試体を切断し、各切断面の繊維の配向および密度を計測した。

図-3.9に曲げ試験の結果を示す。供試体Tが一番高い曲げ強度を得られ、また、供試体をたてて軸方向から打込んだ供試体Vが曲げ強度が一番低くなった。打込み方法により、供試体の曲げ強度が大きく変化することを示された。

A Abrishambafら[2]、R Zerbinoら[11]、S.J Barnettら[12]、S.H Kwonら[13]、P Pujadasら[13]はパネル状の試験体を対象として、打込み方法、供試体の切出し方法など変化させ、繊維の配向の違いにより力学特性が変化した結果を報告している。

A Abrishambafら[2]は、図-3.10に示すように、長さ1600mm、幅1000mm、高さ60mmのパネルの中心からコンクリートを打込み、コンクリート硬化後、コア供試体を切出して、コンクリートの流動方向に対して 0° と 90° に切欠きを導入し、図-3.11に示すように割裂試験および一軸引張試験を実施し、供試体の引張強度を計測した。試験後、破断面の繊維配向状況を観察し、力学特性試験の結果と比較した。

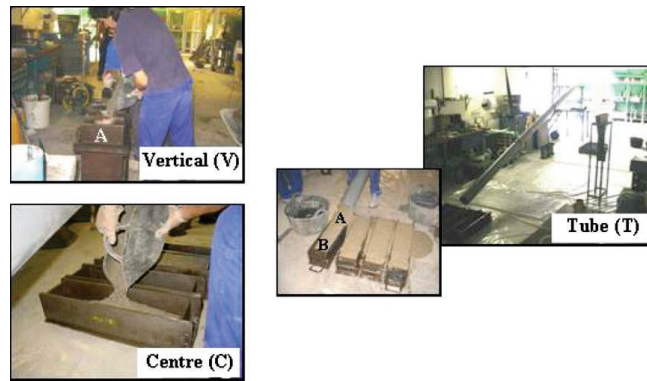


図 - 3.6 供試体の打込み方法 [10]

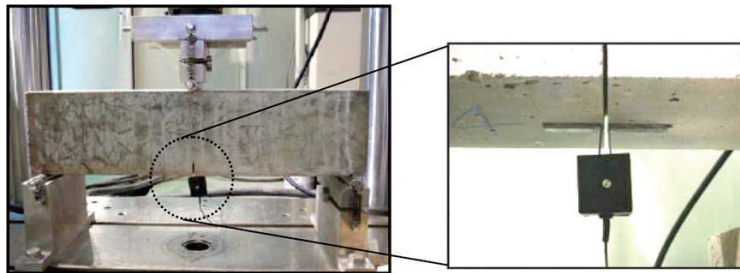


図 - 3.7 3点曲げ試験 [10]

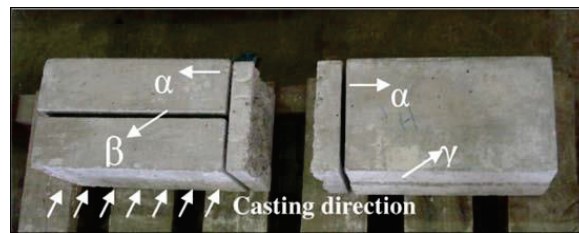


図 - 3.8 供試体内部の繊維の観察 [10]

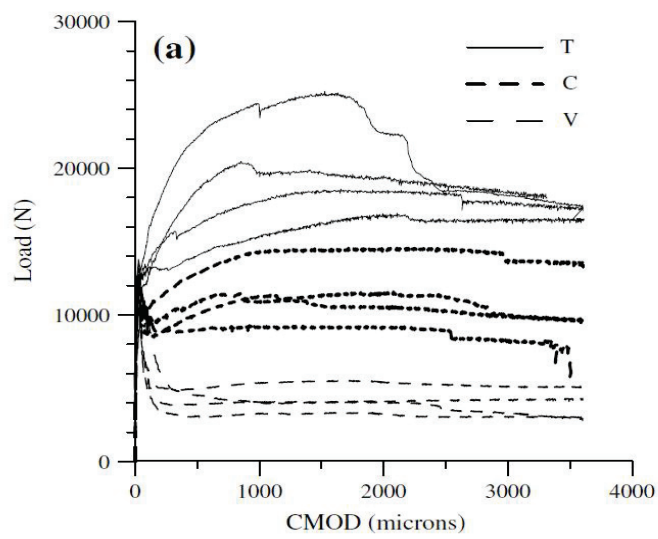


図 - 3.9 供試体の曲げ強度 [10]

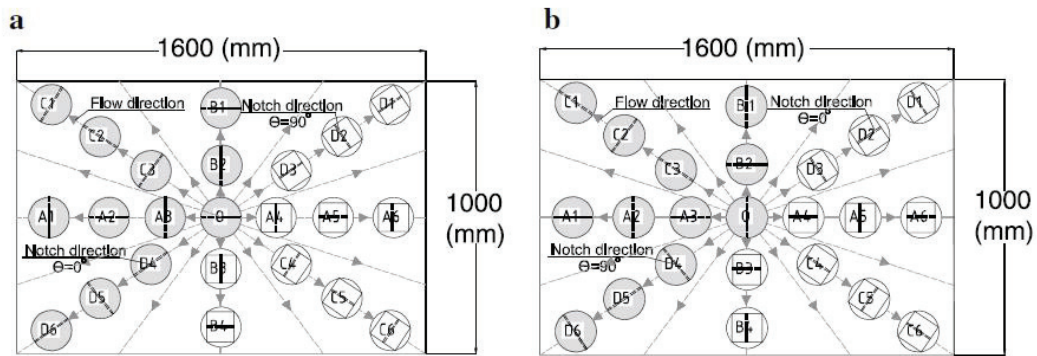
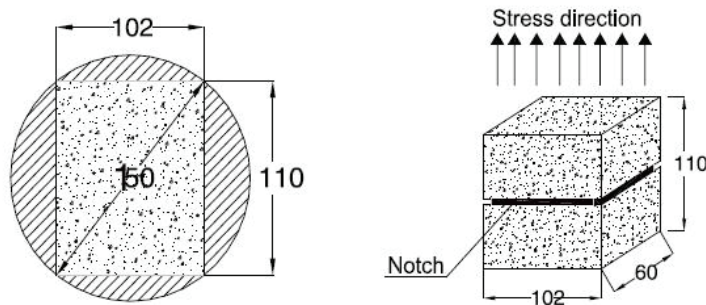
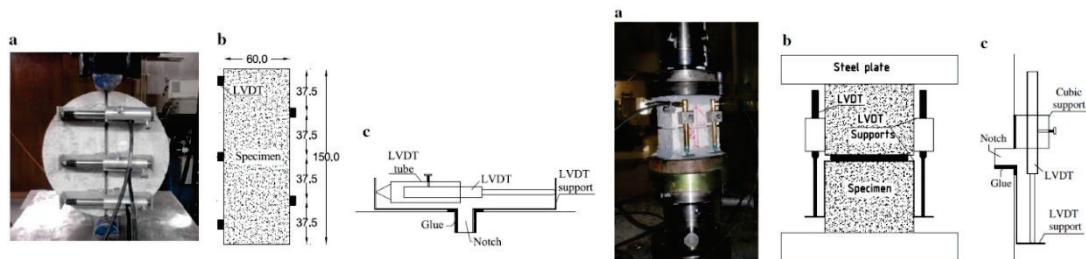


図 - 3.10 試験体の寸法とコア抜き供試体の位置 [2]



(a) 割裂試験供試体と一軸引張試験供試体の寸法



(b) 割裂試験と一軸引張試験装置

図 - 3.11 割裂試験と一軸引張試験装置 [2]

図 - 3.12 に割裂試験の結果を示す。図 - 3.13 に一軸引張試験の結果を示す。割裂試験は供試体の引張強度を過大評価しているが、いずれの試験方法においても、コンクリートの流動方向に対して平行に切欠きを導入した試験体は、高い引張強度を得られた。表 - 3.1 に各供試体の平均値を示す。また、図 - 3.14 に繊維の配向角度 η_0 および有効繊維本数 N_{eff} と引張軟化曲線の関係を示す。ここで、有効繊維本数 N_{eff} は供試体破断面において繊維の総本数と定義されている。同図より、供試体の引張強度は繊維の配向角度および破断面において有効繊維本数増加にともない大きくなった。

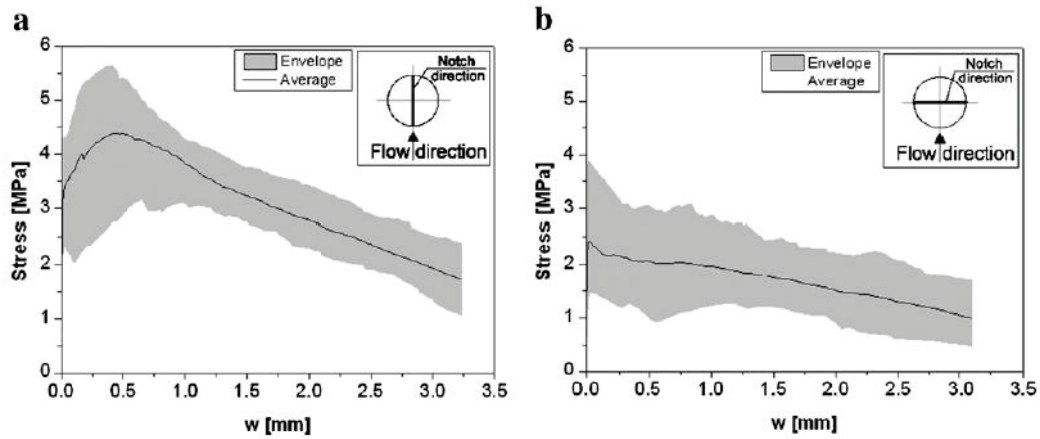


図 - 3.12 割裂試験における $\sigma - w$ 曲線: (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$ [2]

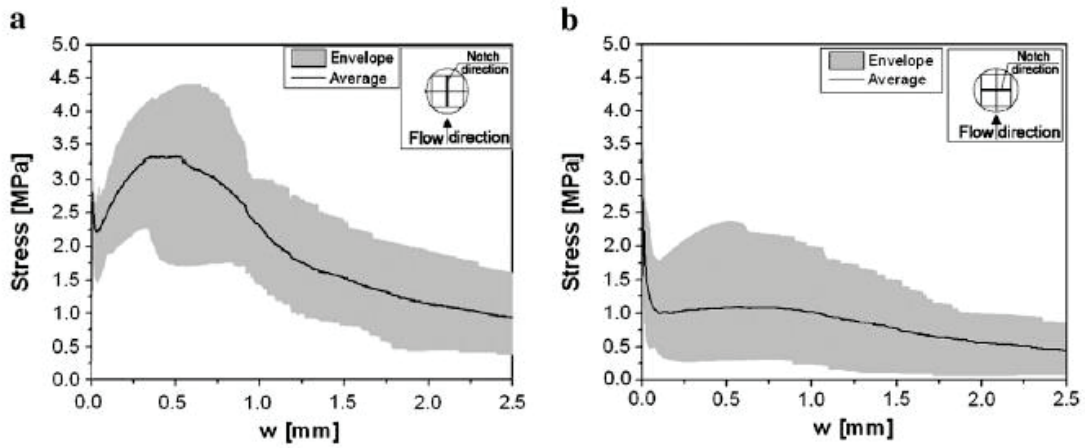
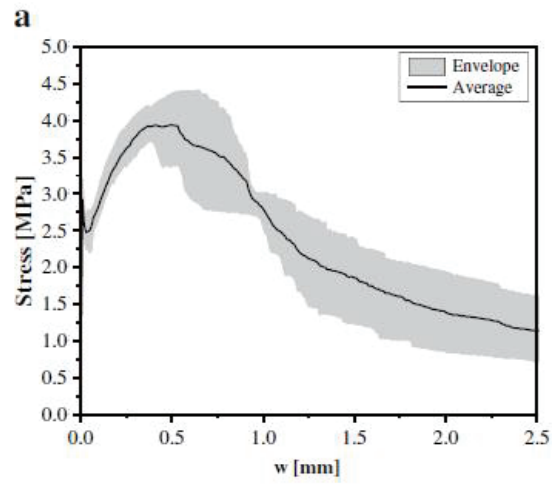


図 - 3.13 一軸引張試験における $\sigma - w$ 曲線: (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$ [2]

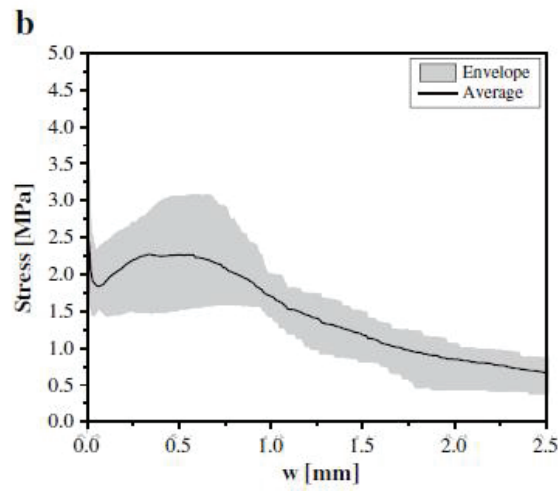
表 - 3.1 各供試体の引張強度の平均値[2]

Series	Parameter	σ_{peak} [MPa]	$\sigma_{0.3}$ [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	G_{F1} [N/ mm]	G_{F2} [N/ mm]	
Splitting tensile test	$\theta = 0^\circ$	Average	4.39	4.23	3.82	2.79	4.07	7.32
	$(\sigma_{\parallel})^a$	CoV(%)	25.6	29.7	24.3	30.2	27.2	25.2
		$K_{95\%}$	3.52	3.16	2.09	1.95	3.36	6.08
		$\theta = 90^\circ$	Average	2.47	2.13	1.96	1.50	2.08
	$(\sigma_{\perp})^a$	CoV (%)	33.1	48.6	37.9	35.3	35.9	33.2
		$K_{95\%}$	2.07	1.74	1.46	1.09	1.49	2.83
Uniaxial tensile test		$\theta = 0^\circ$	Average	3.33	3.24	2.30	1.14	2.94
	$(\sigma_{\parallel})^a$	CoV (%)	19.0	21.4	27.4	39.8	24.2	23.7
		$K_{95\%}$	3.10	2.73	1.83	0.80	2.42	3.72
		$\theta = 90^\circ$	Average	2.72	1.05	1.02	0.56	1.09
	$(\sigma_{\perp})^a$	CoV (%)	19.1	64.5	65.4	57.1	59.6	59.9
		$K_{95\%}$	2.34	0.51	0.48	0.30	0.57	0.96

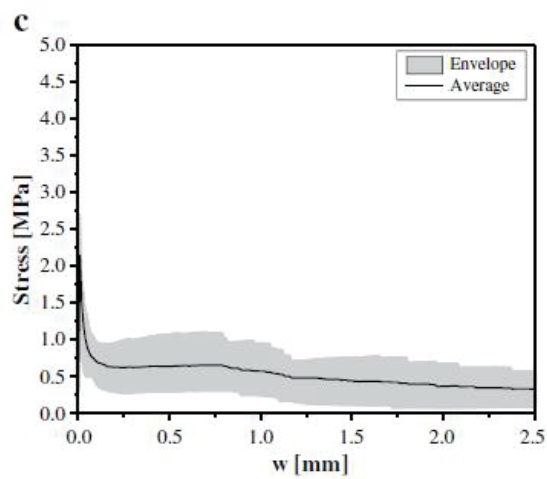
^a \parallel and \perp – notch direction parallel ($\theta = 0^\circ$) and perpendicular ($\theta = 90^\circ$) to the concrete flow direction, respectively.



(a) $\eta_0 \geq 0.80$, $N_{\text{eff}} \geq 1.20$



(b) $0.68 < \eta_0 < 0.80$, $0.41 < N_{\text{eff}} < 1.20$



(c) $\eta_0 \leq 0.68$, $N_{\text{eff}} \leq 0.41$

図 - 3.14 一軸引張試験結果 [2]

第3章参考文献

- [1] J.L Chermant, L Chermant, M Coster, A.S Dequiedt, C.Redon: Some field of applications of automatic image analysis in civil engineering, *Cement and Concrete Composite*, Vol.23, pp.157-169, 2001
- [2] A Abrishambaf, J.A.O Barros, V.M.C.F Cunha: Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, *Cement and Concrete Research*, Vol.(51), pp.57-66, 2013
- [3] S.T Kang, J.K Kim: The relation between fiber orientation an tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(UHPRFCC), *Cement and Concrete Research*, Vol.41, pp.1001-1014, 2011
- [4] E.S Lappa, C.R Braam, J.C Walraven: Static and Fatigue Bending Tests of Ultra High Performance Concrete, *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, pp. 449-458, Kassel, 2004.
- [5] P Stahli, R Custer, J.G.M.V Mier: On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC, *Materials and Structures*, Vol.41, No.1, pp.189-196, 2008
- [6] 小倉大季, 高橋圭一, 栗田守朗, 国枝稔: 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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.1, pp.295-230, 2013
- [7] 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
- [8] S.J Barnett, J.F Lataste, T Parry, S.G Millard, M.N Soutsos: Assessment of fiber orientation in ultra high performance fiber reinforced concrete and its effect on flexural strength, *Materials and Structures*, Vol. 43, No. 7, pp. 1009-1023, 2010
- [9] M Faifer, R Ottoboni, S Toscani, L Ferrara: Nondestructive testing of steel-fiber-reinforced concrete using a magnetic approach, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.60, pp.1709-1717, 2011
- [10] M.C Torrijos, B Barragan, R Zerbino: Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.1078-85, 2010
- [11] R Zerbino, J.M Tobes, M.E Bossio, G Giaccio: On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composite*, Vol.34, pp.191-200, 2012
- [12] S.J Barnett, J.F Lataste, T Parry, S.G Millard, M.N Soutsos: Assessment of fiber orientation in ultra high performance fiber reinforced concrete and its effect on flexural strength, *Materials and Structures*, Vol. 43, No. 7, pp. 1009-1023, 2010
- [13] S.H Kwon, S.T Kang, B.Y Lee, J.K Kim: The variation of flow-dependent tensile behavior in radial flow dominant placing of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPRFCC), *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 109 – 121, 2012

- [14] P Pujadas, A Blanco, S Cavalaro, A.D.L Fuente, A Aguado: Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels. *Construction and Building Materials*, Vol.64, pp.496-503, 2014

第4章 PVA 繊維を用いた UFC の特性と繊維の配向の影響

4.1 はじめに

本章では、超高強度繊維補強コンクリートの適用範囲の拡大とコストの低減を目指し、従来の鋼繊維の代わり、市販の各種ポリビニルアルコール(PVA)繊維を用いた場合の力学特性について検討した。

さらに、本章で選定した PVA 繊維を用いた UFC を 2 種類の打込み方法を用いて、長さ 2600mm、幅 450mm、厚さ 100mm のパネル部材に打込み、硬化後、100×100×400mm の曲げ供試体を切り出し、切り欠き梁の 3 点曲げ試験を行い、打込み方法および供試体の切り出しの方向、位置が曲げ挙動に及ぼす影響を検討した。

4.2 実験概要

4.2.1 PVA 繊維を用いた UFC の特性

4.2.1.1 使用材料および配合

表 - 4.1 に使用材料を示す。表 - 4.2 は使用したポリビニルアルコール繊維の概要を示す。使用した繊維を写真 - 4.1 に示す。UFC の配合を表 - 4.3 に示す。配合 I は各種繊維の特性を比較することを目的として、フレッシュ時の流動性を確保するために、W/C を大きくして繊維の混入量を少なくしたものである。配合 II は、配合 I の結果から混入量を増加できる繊維について、W/C を低減して混入量を多くしたものである。配合 III は、配合 II の結果から 2 種類の繊維を混合して用いたものである。配合 IV, V は繊維 FE シリーズに適用したものである。

表 - 4.1 使用材料

種類	名称	記号	物性
練混ぜ水	上水道水	W	
セメント	シリカフェームセメント	C	密度 : 3.08g /m ³ , 比表面積 0.6 m ² /g, シリカフェーム置換率 20%
細骨材	珪砂	S	6 号珪砂, 密度 2.6g/cm ³
微粉末材料	珪石粉末	P	密度 2.6g/cm ³ , 比表面積 0.812m ² /g
混和剤	高性能減水剤	Ad	ポリカルボン酸エーテル系化合物
繊維	ポリビニルアルコール繊維	F	市販の繊維 (仕様は表 - 4.2 参照)

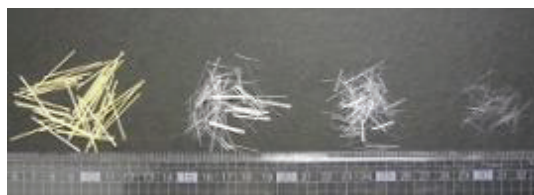


写真 - 4.1 PVA 繊維

表 - 4.2 PVA 繊維

繊維名称	密度 (g/cm ³)	直径 (μm)	長さ (mm)	引張強度 (MPa)	
FA	1.3	40	8	1400	
FB		40	12	1560	
FC		100	12	1200	
FD		200	18	975	
FE①		660		30	900
FE②				20	
FE③				15	

表 - 4.3 UFC の配合

配合	W/C (%)	Air (%)	単位量(kg/ m ³)							F (%)	繊維の種類
			W	C	S	P	Ad	Ad/C (%)			
I	22	5	231	1124	609	221	17	1.5	1.8	FA, FB, FC, FD, FE	
II	19		196	1152	624	227	23	2.0	3.0	FC, FD, FE①	
III	18		175	1166	632	229	35	3.0	3.0	FCE1 (FC1.0%とFE①2.0%) FCE2 (FC1.5%とFE①1.5%) FCE3 (FC2.0%とFE①1.0%)	
IV	17		165	1181	640	232				3.0	FE①, FE②, FE③
V			164	1168	633	230				4.0	FE②, FE③

4.2.1.2 練り混ぜ方法および供試体の作製・養生

練り混ぜは、配合 I, II, IIIは容量 10L のホバートミキサを用いた。配合IV, Vは 120L の 2 軸強制練りミキサを使用した。なお、いずれの配合も、繊維以外の材料を投入後、所要の流動性が得られるまで練り混ぜを行い、その後に繊維を投入し、練り混ぜを行った。

供試体の寸法は、配合 I については φ5×10cm の圧縮供試体と 4×4×16cm の曲げ供試体で、配合 II, III, IV, Vについては、φ10×20cm の圧縮供試体と 10×10×40cm の曲げ供試体を用いた。

供試体の養生は、打込み後、一次養生として 20℃-48 時間の封緘養生を行い、その後打型し、さらに二次養生として 90℃-48 時間(昇降温 15℃/hr)の蒸気養生を行った。

4.2.1.3 力学特性の試験方法

試験は、モルタルフロー (0 打) 試験、圧縮強度試験および曲げ強度試験とした。曲げ強度試験は図 - 4.1 に示すような切欠き梁の 3 点曲げ試験を行い、荷重-ひび割れ開口変位を計測した。試験は「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」(JCI-S-002-2003) [1]に準じて行った。

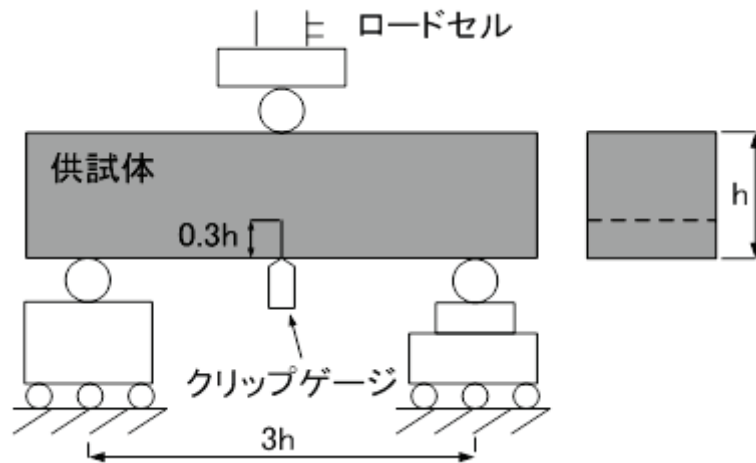


図 - 4.1 切欠き梁の3点曲げ試験

4.2.2 打込み方法が繊維の配向と曲げ挙動に及ぼす影響

4.2.2.1 PVA 繊維 UFC の配合

各種 PVA 繊維を用いた UFC の特性の実験結果は次節で述べるが、実験の結果、前節の配合Ⅲを用いて、繊維 FC2.0%と FE①1.0%を混入した場合、流動性を確保したうえで、高い圧縮強度と曲げ強度が得られた。そこで、本実験では配合Ⅲを用いた。

4.2.2.2 試験体の作製

本実験で用いた試験体の種類を表 - 4.4 に示す。供試体 A は 100×100×400mm の標準曲げ供試体であり、パネル試験体 B-1, B-2, C-1, C-2 は図 - 4.2 に示すように、長さ 2600mm, 幅 450mm, 厚さ 100mm ですべて同一寸法である。

打込み方法は、本実験のパラメータとして、図 - 4.3(a)に示すように、型枠を 5.7° 傾けて、コンクリートの注ぎ口（ホッパー）を型枠の片端に固定しコンクリートを型枠内で流動させて打ち込む方法（以下、流動打込みと呼ぶ）と図 - 4.3(b)に示すように、コンクリートの注ぎ口（ホッパー）を試験体軸方向に連続的に移動させて打ち込む方法（以下、移動打込みと呼ぶ）の2種類とした。

表 - 4.4 試験体製作仕様

バッチ NO.	試験体種別	打込み方法	数量 (体)
1.2.3.4	A	流動 打込み	20 (各バッチ 5)
1	B-1	流動	1
2	B-2	打込み	1
3	C-1	移動	1
4	C-2	打込み	1

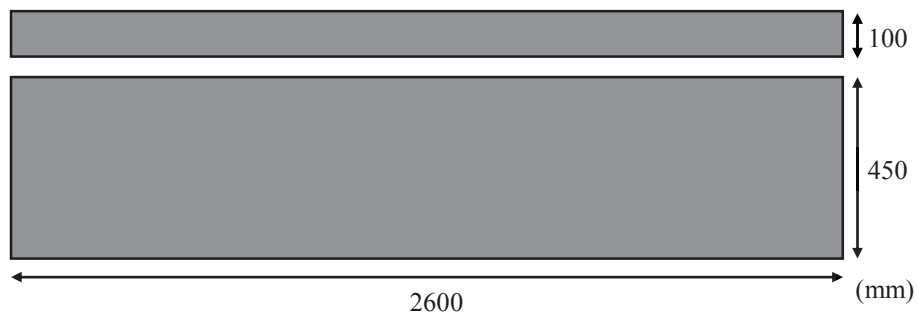
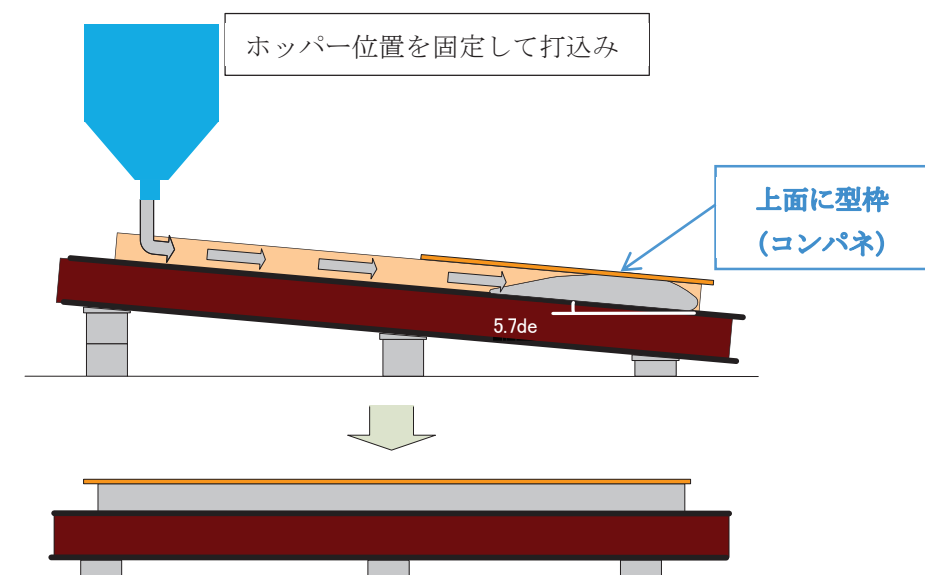
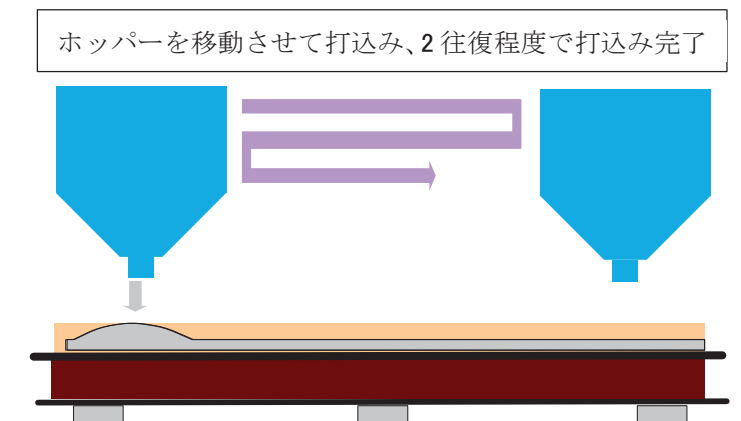


図 - 4.2 パネル試験体の寸法



(a) 流動打込み方法



(b) 移動打込み方法

図 - 4.3 打込み方法

4.2.2.3 養生方法

今回の実験では、打設終了後、一次養生として、型枠内で 50℃の蒸気養生を 12 時間行い、その後脱型し、さらに二次養生として、50℃の蒸気養生を 78 時間行った。なお、蒸気養生の昇温速度は、15℃/hr とした。

4.2.2.4 試験体の切断方法

養生終了後、図 - 4.4 に示すように、コンクリートカッターを用いて試験体 B-1, B-2, C-1, C-2 を切断した。試験体 B-1 と C-1 はパネルの長辺方向垂直に切断し、試験体 B-2 と C-2 は長辺方向平行に切断した。供試体 A はすべて側面に 30mm 深さの切り欠きを加工した。

試験体 B-1 と C-1 から切り出した供試体は打込み面と型枠底面で交互に 30mm 深さの切り欠きを加工した。

試験体 B-2 と C-2 から切り出した供試体はすべて型枠底面に 30mm 深さの切り欠きを加工した。

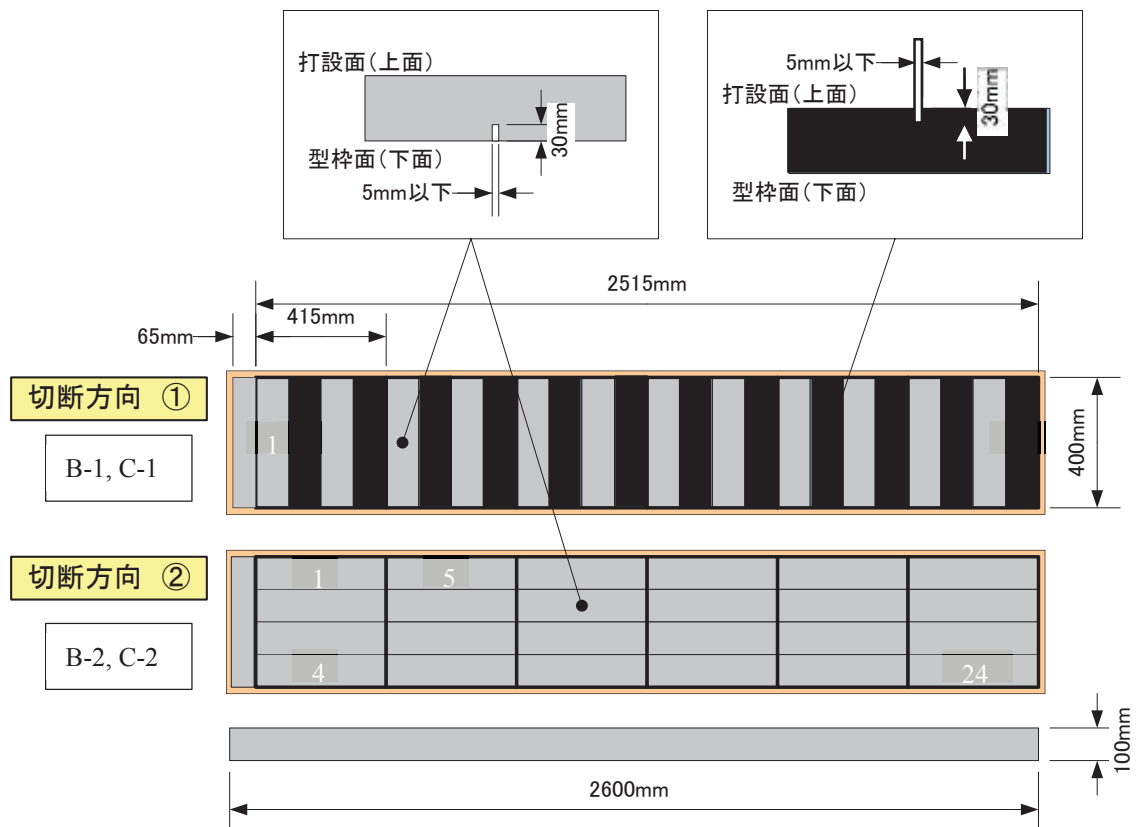


図 - 4.4 試験体の切断方法および供試体の切欠き作業

4.2.2.5 試験方法

フロー試験およびコンクリート硬化後の圧縮強度試験と切欠き梁の 3 点曲げ強度試験を実施した。

4.3 実験結果

4.3.1 PVA 繊維を用いた UFC の特性

4.3.1.1 フレッシュ性状

図- 4.5 にフロー試験の結果を示す。配合 I の場合、細い繊維 FA と FB ではフローが 160mm となり、これ以上繊維を混入することが困難となった。一方、太い繊維 FC, FD, FE①ではフローが 300mm 以上となり、さらに、混入率を増加できる状況であった。なお、UFC を自己充填する場合にはフローは 200mm 以上が必要であり、本実験ではこれを目安とした。

太い繊維 FC, FD, FE①について混入量を 3.0%とした配合 II では、フローは 200mm 程度となったが、写真 - 4.2 に示すように繊維 FE①ではモルタルが分離する傾向が見られた。そこで、配合 III では繊維 FC と FE①を混合して用いることとし、その混合割合を変化させることとした。その結果、繊維 FE①が多いと繊維とモルタルが分離する傾向が強くなり、繊維 FC2%と繊維 FE①1%とした場合にはフローが 200mm で分離もほぼ見られなかった。

また、繊維 FE①の分離を改善するために、繊維 FE①の長さを変化させて混入した配合 IV では、繊維長が短くした繊維 FE②と繊維 FE③を 3.0%混入した場合には、フロー値は 270mm になり、繊維とモルタルマトリクスとの分離も見られなかった。

さらに、繊維 FE②と繊維 FE③を 4.0%混入した配合 V では、フロー値は 270mm で、繊維の混入量を 3%と比べても、フロー値の低下は見られなかった。

以上から、同一配合と繊維混入量において、繊維径が太くなるほど、繊維長が短くなるほど、フロー値が大きくなる傾向を示された。

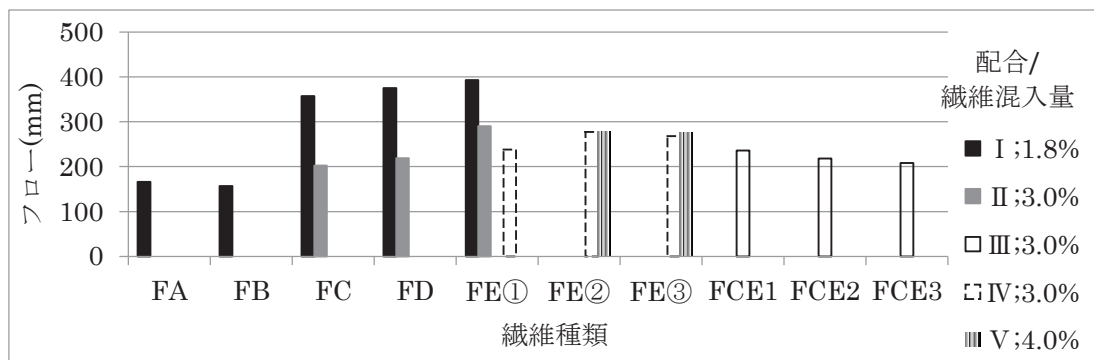


図 - 4.5 フロー試験結果



写真 - 4.2 材料分離状況

4.3.1.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図 - 4.6 に示す。水セメント比の低減により圧縮強度が大幅に増加した。配合 I では、水セメント比が 22% で、繊維種類に関わらず、圧縮強度がほぼ 100N/mm² 程度であった。配合 II では、水セメント比が 19% で、同一混入量下、繊維が細く、短いほど、高い圧縮強度が得られた。配合 III では、水セメント比が 18% で、二種類の繊維の混入割合が変化しても、ほぼ同程度の 140 N/mm² の圧縮強度が得られた。配合 IV では、水セメント比が 17% で、繊維 FE① が最も高い圧縮強度が得られたが、繊維長が短くした繊維 FE②、FE③では、圧縮強度が低下する傾向が見られた。その理由、太径の繊維に対して、繊維長が短すぎると、補強力が低下すると考えられる。配合 V では、配合 IV と比べて、繊維混入量が増加しても、圧縮強度は低下しなかった。

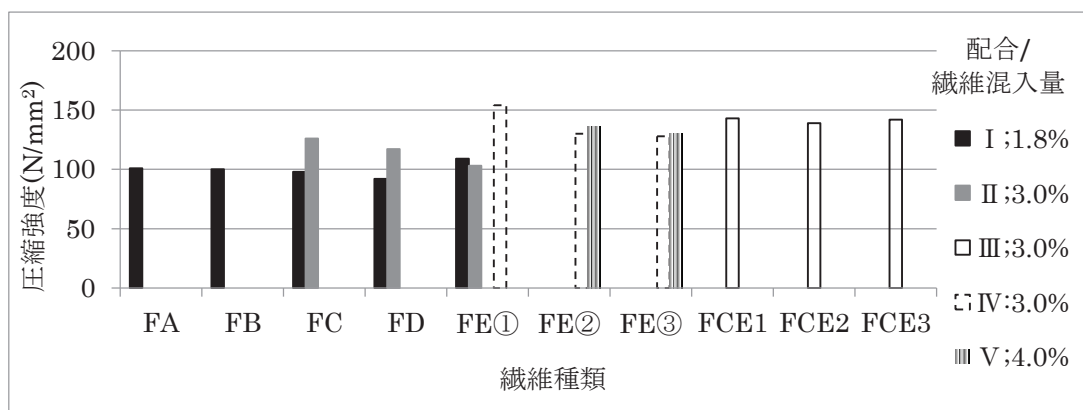


図 - 4.6 圧縮強度

4.3.1.3 曲げ強度試験結果

切り欠きはりの 3 点曲げ試験で得られた荷重-開口変位曲線を図 - 4.7 に示す。配合 I の場合、繊維 FA, FB は強度が高くなったが、強度点以降の応力低下が急激であった。繊維 FC, FD, FE①は繊維 FA, FB と比べると強度は低くなったが、延性的な挙動となった。繊維混入量を 3% とした配合 II では繊維 FE①が最も強度が高くなった。しかし、上述の通り繊維 FE①では材料分離が生じるため、このままでは使用できない。そこで、配合 II の結果より、繊維 FE①を混合したのが配合 III である。配合 III では繊維 FE①と FC の混合割合を変化させたが、曲げ特性はほとんど変化しない結果となった。

配合 IV では、FE①を使用した場合、材料分離が生じたが、高い曲げ強度が得られた。繊維長が短くなると、曲げ強度が低下する傾向が見られ、繊維とモルタルマトリクスの付着力が足りなくなるためと考えられる。

配合 V では繊維混入量を増加しても、曲げ強度は大幅には増加しなかった。

4.3.2 打込み方法が繊維の配向と曲げ挙動に及ぼす影響

4.3.2.1 フレッシュ性状と圧縮強度試験結果

各バッチのフレッシュ性状と圧縮強度試験結果を表 - 4.5 に示す。繊維混入後のフロー値はい

ずれも 220mm 程度で、バッチ間の差は無かった。圧縮強度試験の結果、今回の養生温度が標準熱養生と異なるため、若干低くなったが、バッチ間の差は無かった。

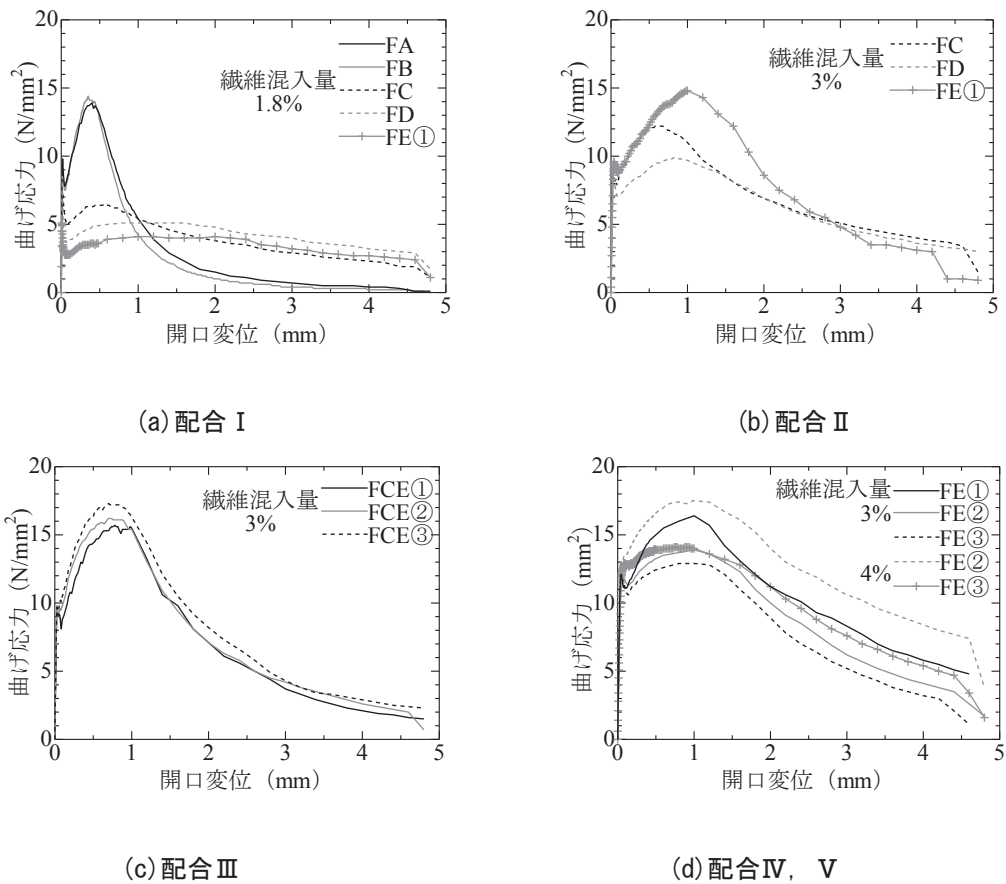


図 - 4.7 曲げ応力-ひび割れ開口変位曲線

表 - 4.5 フレッシュ性状と圧縮強度

バッチ NO.	試験体 NO.	練り上がり温度 (°C)	フロー (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (g/L)	圧縮強度 (N/mm^2)
1	B-1	33	229	7.8	2262	137
2	C-1	26	225	7.2	2281	138
3	B-2	25	208	6.0	2298	139
4	C-2	33	233	7.2	2255	134

4.3.2.2 標準曲げ供試体の試験結果

図 - 4.8 に各バッチの 100×100×400mm 標準曲げ供試体 A の 3 点曲げ試験結果を示す。バッチ間の差はほとんど見られなかった。

4.3.2.3 パネル部材から切り出した曲げ供試体の試験結果

流動打込み方法を用いたパネル B-1 で、コンクリートの流動方向に対して垂直に切り出した供試体の 3 点曲げ試験の結果を図 - 4.9 (a) に示す。ここでは、パネル内の位置に近い 8 本の供試

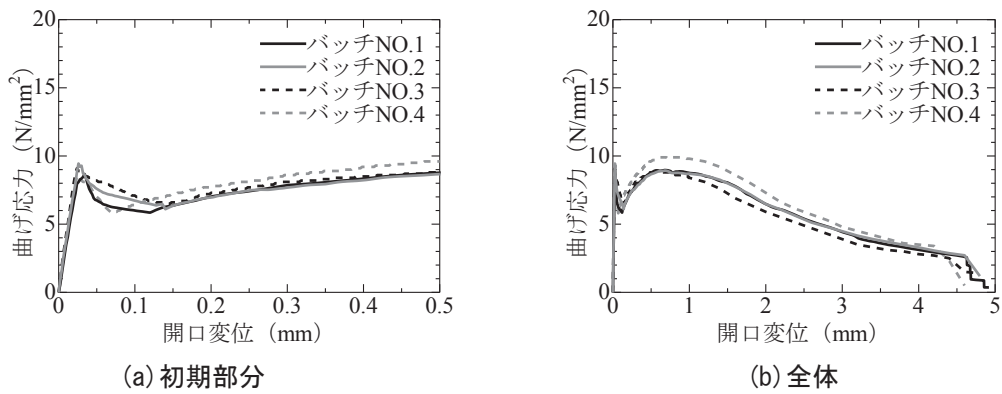


図 - 4.8 供試体 A (100×100×400mm) の曲げ試験結果

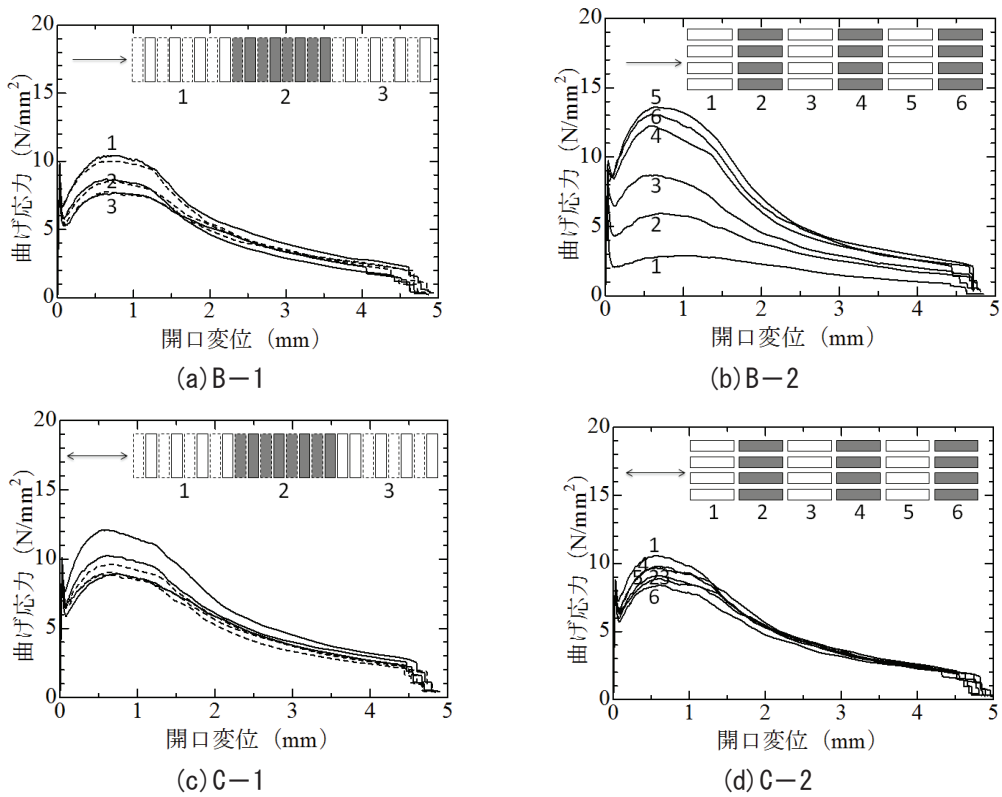


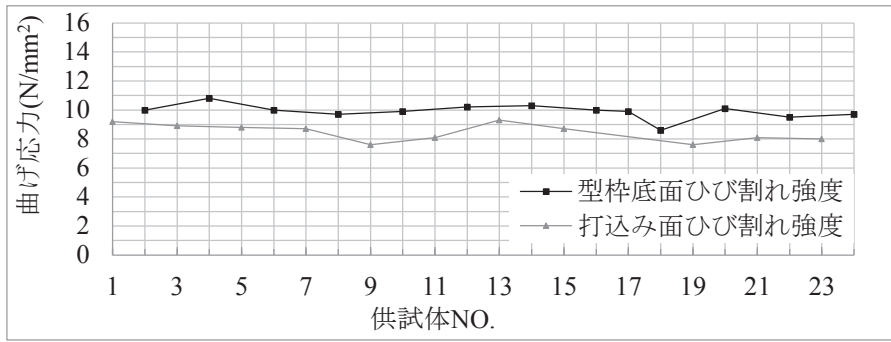
図 - 4.9 パネル部材から切り出した曲げ供試体の試験結果

体を一組とし、型枠底面側に切り欠きのある供試体 4 本、打込み面側に切り欠きのある供試体 4 本ずつ、3 組を分けて、それぞれの平均値で示した。

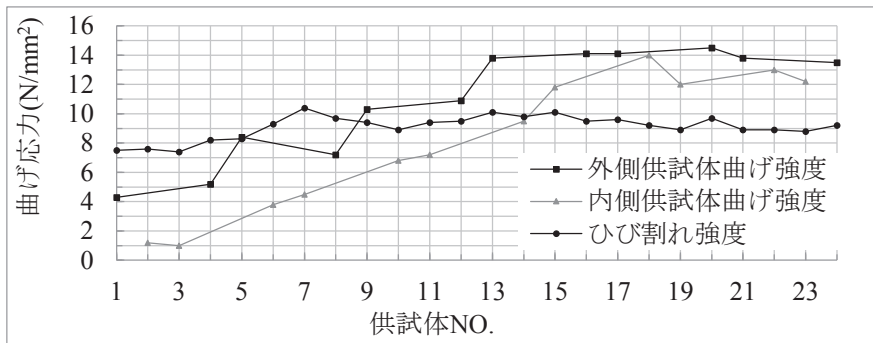
コンクリートの注ぎ口から離れるほど、すなわち、流動距離が長くなるほど、曲げ強度が低下する傾向が見られた。その理由として、注ぎ口から離れるほど、繊維がコンクリート中の流動方向に揃う傾向が供試体の破断面から確認された。

図 - 4.10 に全供試体のひび割れ強度と曲げ強度を示す。また、図 - 4.10(a) に示すように、同じ組での供試体では、打込み面と型枠底面の曲げ挙動がほぼ等しいが、型枠底面のひび割れ強度が打込み面より 20%高くなった。

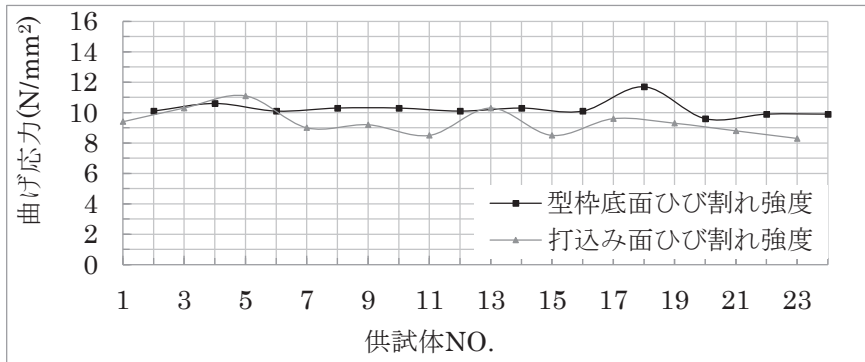
流動打込み方法を用いたパネル B-2 で、コンクリートの流動方向に対して平行に切り出した



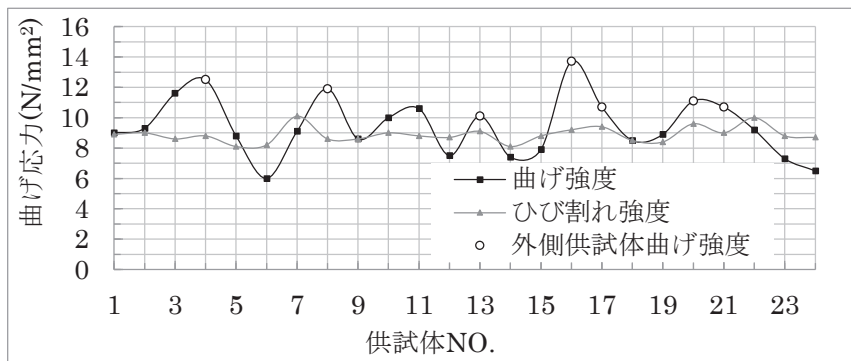
(a)B-1



(b)B-2



(c)C-1



(d)C-2

図 - 4.10 曲げひび割れ強度と曲げ強度

供試体の3点曲げ試験の結果を図 - 4.9 (b)に示す。ここでは、コンクリートの注ぎ口から同じ距離の4本の供試体を一組とし、4本の供試体の平均値で示した。図 - 4.9 (b)に示すように、コンクリートの注ぎ口から離れるほど、すなわち、コンクリートの流動距離が長くなるほど、曲げ強度が大幅に増加した。図 - 4.11 に示すように、曲げ強度が高くなった供試体 NO.19 では、繊維が破断面に対して垂直に配向しているのに対して、曲げ強度が低くなった供試体 NO.7 では、繊維が破断面に対して斜めに配向していた。これより、曲げ強度に対して繊維の配向が大きく影響すると考えられる。

なお、図 - 4.10 (b)に示すように、注ぎ口から離れる距離によって、曲げ強度が大幅に変化した。ひび割れ強度はほぼ一定で、繊維の配向の影響は小さかった。

さらに、図 - 4.10 (b)に示すように、注ぎ口から同じ距離での4本の供試体では、外側（型枠側面に近い側）の2本の曲げ強度が内側の2本より高くなる傾向が見られた。

移動打込み方法を用いたパネル C-1 で、パネルの長辺に垂直に切り出した供試体の3点曲げ試験の結果を図 - 4.9 (c)に示す。試験体 B-1 と同様に、パネル内の位置に近い8本の供試体を1組とし、型枠底面側に切欠きのある供試体4本、打込み面側に切欠きのある供試体4本ずつ、3組を分けて、それぞれの平均値で示した。

同じ組での型枠底面側の曲げ強度と打込み面側の曲げ強度が多少変わったが、その他は、パネル内の位置によらず、ほぼ同一の挙動となった。また、図 - 4.10 (c)に示すように、位置に近い供試体の型枠底面のひび割れ強度が打込み面より高くなる傾向が見られた、これは型枠底面付近の繊維が打込み面付近よりいい配向していることが供試体の破断面から確認された。

移動打込み方法を用いたパネル C-2 で、パネルの長辺に平行に切り出した供試体の3点曲げ試験の結果を図 - 4.9 (d)に示す。ここでは、試験体 B-2 と同様に、コンクリートの注ぎ口から同じ距離の4本の供試体を一組とし、4本の供試体の平均値で示した。

曲げ強度はある程度のバラツキがあったが、全体的にはほぼ同一の曲げ挙動を示された。また、図 - 4.10 (d)に示すように、外側（型枠側面に近い側）供試体では、曲げ強度が高くなる傾向も見られ、壁効果も確認された。

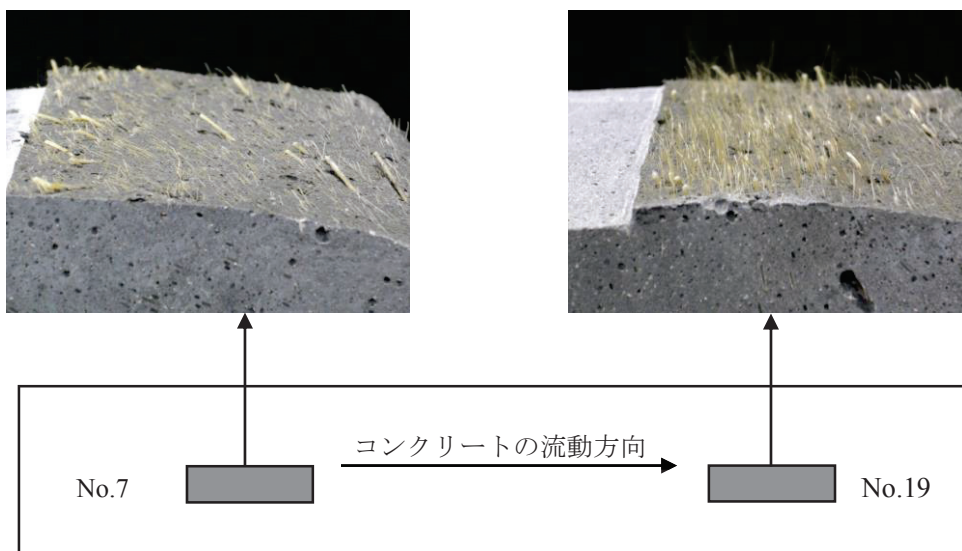


図 - 4.11 破断面の繊維の配向

4.4 まとめ

本章で得られた主な結果は以下の通りである。

(1)同一配合と繊維混入量において、繊維径が太くなるほど、繊維長が短くなるほど、フロー値が大きくなる傾向を示された。

(2)圧縮と曲げ特性に着目した場合、W/C を 18%として $\phi 0.66 \times 30\text{mm}$ を 3%混入した場合が最も優れていたが、材料分離する傾向が見られた。そこで、 $\phi 0.66 \times 30\text{mm}$ と $\phi 0.1 \times 12\text{mm}$ の繊維を 1:2 の割合で混合したところに材料分離を抑制でき、 140N/mm^2 の圧縮強度と 15N/mm^2 以上の曲げ強度が得られた。

(3)また、コンクリートの注ぎ口を型枠の片端に固定してコンクリートを型枠内で流動させて打ち込む方法を用いた場合、流動方向に対して平行に切り出した $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体では、パネル内の位置により曲げ特性が大きく変化することが示された。特に、コンクリート注ぎ口に近い供試体の曲げ強度は注ぎ口から最も遠い位置の強度に比べて 1/4 程度となった。これは供試体内の繊維の配向の影響であることが破断面の繊維の状況から推察された。

一方、コンクリートの注ぎ口を試験体軸方向に連続的に移動させて打ち込む方法を用いた場合、供試体の切り出す方向および位置によらず曲げ挙動に大きな差は見られなかった。

第4章の参考文献

- [1] 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 JCI-S-002-2003

第 5 章 UFC 曲げ供試体中の繊維の配向

5.1 はじめに

マトリクス中の繊維の分散・配向の評価とそれが力学挙動に及ぼす影響に関しては、FRC が登場して以来、今日に至るまで重要な課題として認識されてはいるが、未だ解決されていない課題である。その最大の理由は、コンクリートあるいはモルタルマトリクス中の繊維の分散・配向を観察すること自体が難しいうえ、さらに現状では打込み時に繊維の分散・配向を制御する技術が存在しないためであると考えられる。

そこで、本章では短繊維の特に配向に関する基礎的資料を得ることを目的として、曲げ供試体を対象として、コンクリートを透明な粘性を有する流体でモデル化することで供試体中の繊維の可視化を試みた。また、硬化した鋼繊維 UFC 曲げ供試体を切断して繊維の配向を観察し、可視化実験の結果と比較した。さらに、打込み方法を変えることにより繊維の配向を変えた合成繊維 UFC 供試体の曲げ試験を行い、繊維の配向が曲げ挙動に及ぼす影響を検討した。

5.2 実験概要

5.2.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察

フレッシュコンクリートの可視化モデルには橋本ら[1]が提案した高吸水性高分子樹脂（アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物）に水を添加して得られる無色透明の粘性を有する流体を用いた。水に対する樹脂の添加量は 3g/リットルを目安として、0 打フローが 200mm 程度となるように調整した。なお、実際の UFC と可視化モデルコンクリートでは密度やレオロジー特性が異なるために、フロー値を一致させたとしても可視化モデルコンクリートで実際の UFC の挙動を完全に再現できるわけではないが、繊維の配向の定性的な挙動は再現できると考えた。

繊維としては $\phi 0.66 \times 15\text{mm}$ の PVA 繊維と $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$ の鋼繊維を用いそれぞれ実験を行った。繊維の混入量が可視化モデルコンクリートの繊維の配向に与える影響を確認するために、PVA 繊維の場合は、混入量 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%の 4 種類とした。また鋼繊維の場合には後述する PVA 繊維の試験結果を参考にして、繊維の配向の観察をし易くするため繊維の混入量は 0.5%とした。

型枠には曲げ供試体用型枠を模擬した 100×120×400mm (幅×高さ×長さ) のアクリル製の容器を用いた。打込み方法は、図 - 5.1 に示すようにコンクリートの注ぎ口を型枠の片端に固定しコンクリートを型枠内で流動させて打ち込む方法（以下、流動打込みと呼ぶ）と、型枠内のコンクリートの高さが供試体軸方向で均等になるように注ぎ口を供試体軸方向に連続的に移動させて打ち込む方法（以下、移動打込みと呼ぶ）の 2 通りとした。

観察は打込み状況をビデオカメラにより撮影することとした。

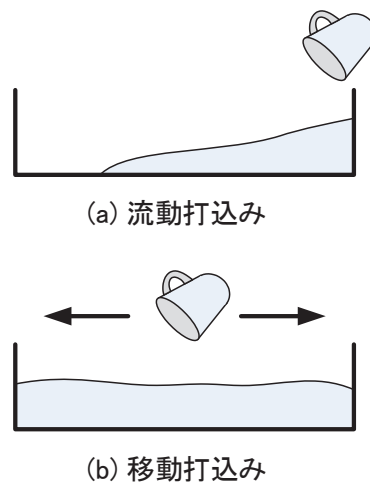


図 - 5.1 打込み方法

5.2.2 鋼繊維 UFC 供試体の切断面の観察

前項の可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向の挙動を実際の UFC 供試体で確認するため、鋼繊維を用いた UFC 曲げ供試体を切断し、切断面の繊維の状況を確認した。なお、鋼繊維 UFC を用いたのは、合成繊維の場合には切断面において繊維を肉眼で確認することが困難であるためである。ここで用いた UFC は、フランスで技術開発され我が国に導入されたもので、現在 T 社から供給されているプレミックスタイプのものである。材料、配合は仕様通りであり、 $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$ の鋼繊維を 2vol% 混入したものである。打込み時の 0 打フローは 275mm であり、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 曲げ供試体に流動打込みを行った。標準熱養生を行ったのち、切欠きを設け、切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い、破断後の試験片をコンクリートカッターで切断して切断面の繊維の状況を観察した。

5.2.3 打込み方法が異なる合成繊維 UFC の曲げ挙動

可視化実験の結果は次節で述べるが、実験の結果、打込み方法により曲げ供試体内の繊維の配向が異なることが確認された。そこで打込み方法を変えた場合に UFC の曲げ挙動がどのように変化するかを確認することとした。ここで用いた UFC は繊維として 2 種類の PVA 繊維を混合して用いたもので、配合は著者らが合成繊維 UFC として開発を進めてきたものである。なお、ここで合成繊維 UFC を用いたのは可視化実験により繊維の配向の定性的な挙動は繊維の種類、混入量には依存しないことが示され、合成繊維 UFC によっても一般的な UFC における配向と曲げ挙動の定性的な関係は確認できると考えたためである。UFC の使用材料と配合を表 - 5.1 に示す。打込み時の 0 打フローは 204mm であり、同一バッチの UFC を $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 曲げ供試体に流動打込みと移動打込みにより打込んだ。養生は打込み後 24 時間は打込み面をラップで覆った状態で 20°C の気中養生を行い、その後 90°C の蒸気養生を 48 時間行った。養生終了後、切欠きを設け、図 - 5.2 に示すような切欠きはりの 3 点曲げ試験をおこない、荷重-開口変位曲線を計測した。

試験は「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」[2]（JCI-S-002-2003）に準じて行った。ただし、供試体数については1条件につき6体とした。

載荷には、手動メカニカルジャッキを使用し、荷重の検出には容量 100kN のロードセル、開口変位の検出には感度 1/2000mm のクリップゲージを用いた。

表 - 5.1 合成繊維 UFC の配合

W/C (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)						
		W	C	S	P	Ad	F1	F2
18.0	5.0	175	1166	632	229	35	13	26

C:シリカヒュームセメント,
S:6号珪砂,
P:シリカパウダー,
Ad:高性能減水剤,
F1:PVA 繊維($\phi 0.66 \times 30\text{mm}$),
F2:PVA 繊維($\phi 0.1 \times 12\text{mm}$)

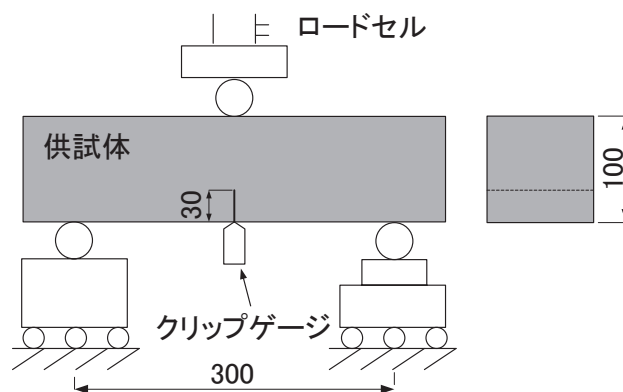


図 - 5.2 切欠きはりの3点曲げ試験

5.3 実験結果

5.3.1 可視化モデルコンクリートによる繊維の配向の観察

図 - 5.3 に $\phi 0.66 \times 15\text{mm}$ の PVA 繊維を 3%用いた可視化モデルコンクリートのフローの状況を示す。0打フローは 210mm となり、繊維の分散も良好であった。

図 - 5.4 には $\phi 0.66 \times 15\text{mm}$ の PVA 繊維を 0.5%混入した可視化モデルコンクリートを用いて流動打込みを行った場合の打込み開始から完了までの状況を示す。図 - 5.4(a)のように流動するコンクリートの先端および型枠底面付近では繊維は水平になっているが、注ぎ口に近い側の上部では繊維が斜めに立っている状況が見られる。さらに、図 - 5.4(b)のように流れの先端が注ぎ口の反対側の妻型枠に達し、コンクリートが前方に流れなくなると、コンクリートは全体的に

上方に流れ始め、その結果、最終的には図 - 5.4(d)のように繊維は底面から斜め前方に下に凸の放物線状に配向することが明らかとなった。このような配向の挙動は図 - 5.5 に示すように鋼繊維の場合でも同様に観察された。

また、図 - 5.6, 5.7, 5.8 に $0.66 \times 15\text{mm}$ の PVA 繊維を 1%, 2%, および 3% 混入した可視化モデルコンクリートの流動打込み完了時の状況を示す。繊維量が増えるにつれて配向の状況が見難くなるが、繊維が放物線状に配向する状況は繊維混入量が 0.5% の場合と同様であった。従来、曲げ供試体の型枠に流動打込みを行った場合には、コンクリートは供試体の軸方向に流れ、繊維は水平方向に配向すると考えていたが、可視化モデルコンクリートを用いた観察の結果、コンクリートは供試体軸方向ではなく、型枠底面から上方に向かって流れ、その結果、繊維は水平ではなく鉛直に近い方向に配向することが明らかとなった。以上のことより、自己充填型の UFC では、コンクリートが流動することで、その方向に繊維が配向する特性があり、このため供試体中の繊維の配向は繊維の種類や繊維量といったパラメータよりむしろ供試体中のコンクリートの流れ方に直接的に依存するものと考えられる。

一方、移動打込みを行った場合には図 - 5.9 に示すように繊維はランダムに配向する結果となった。

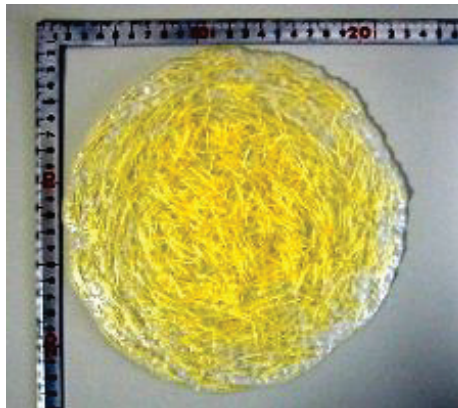
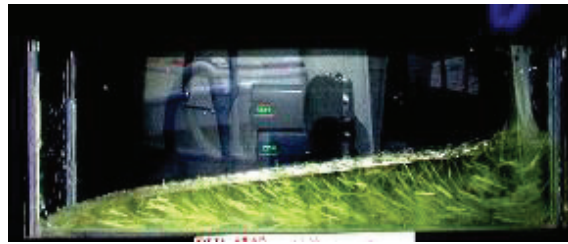
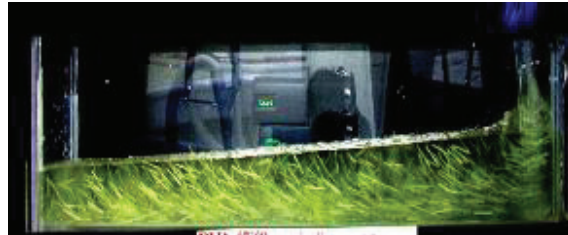


図 - 5.3 可視化モデルコンクリートのフロー



(a) 流れの先端が妻型枠に到達時



(b) 打込み高さ 50%時



(c) 打込み高さ 80%時



(d) 打込み完了時

図 - 5.4 流動打込みの場合の PVA 繊維 (0.5%) の配向

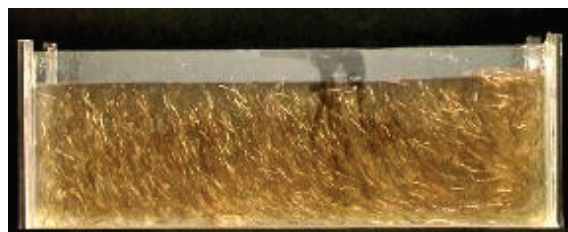


図 - 5.5 流動打込みの場合の鋼繊維 (0.5%) の配向

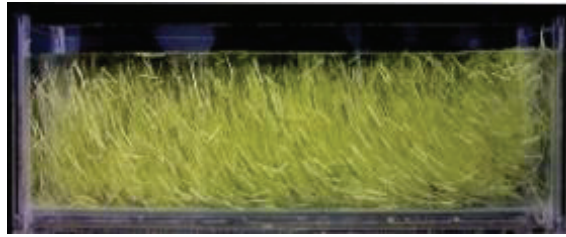


図-5.6 混入率 1%の場合の配向

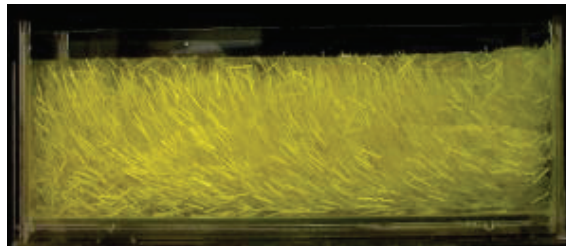


図-5.7 混入率 2%の場合の繊維の配向

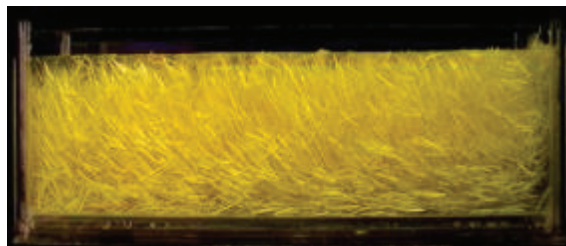


図-5.8 混入率 3%の繊維の配向



図-5.9 移動打込みの場合の PVA 繊維 (0.5%) の配向

5.3.2 鋼繊維 UFC 供試体の切断面の観察

図-5.10 に 3 点曲げ試験後の破断面の状況を示す。型枠底面付近では繊維は破断面に対して垂直（供試体軸方向）に配向しているのに対して、断面の中央付近では繊維は破断面に対して斜め方向に配向している。さらに打込み面に近い部分では繊維が少なくなっている。

また、図-5.11 には供試体軸方向に垂直に切断した切断面を示す。図中の白い点が鋼繊維の

切断面であり、型枠底面付近は白い点の面積が小さい、すなわち繊維は繊維軸に対して垂直に切断されているのに対して、断面の上部では繊維が少なく、繊維の切断面が大きくなっており、切断面に対して繊維が斜めに配向している状況を示していると考えられる。

図-5.12には供試体を水平方向に切断した断面の状況を示す。図-5.12(b)は底面から15mmの高さの切断面であり、繊維が少なく、繊維の切断面が長くなっているものが観察され、この位置では繊維は型枠底面に対して平行に配向していることを示している。また、図-5.12(a)は断面高の中央位置で水平に切断した断面であり、図-5.11の垂直断面と比較して同程度以上の密度で繊維が存在し、しかも切断面の断面積が小さい繊維が多く観察でき、可視化モデルコンクリートで観察されたように繊維が供試体内で斜めに立った方向に配向していることを示していると考えられる。以上のことより、実際の鋼繊維 UFC 供試体内の繊維の配向の状況は、可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向状況と定性的に一致していると考えられる。

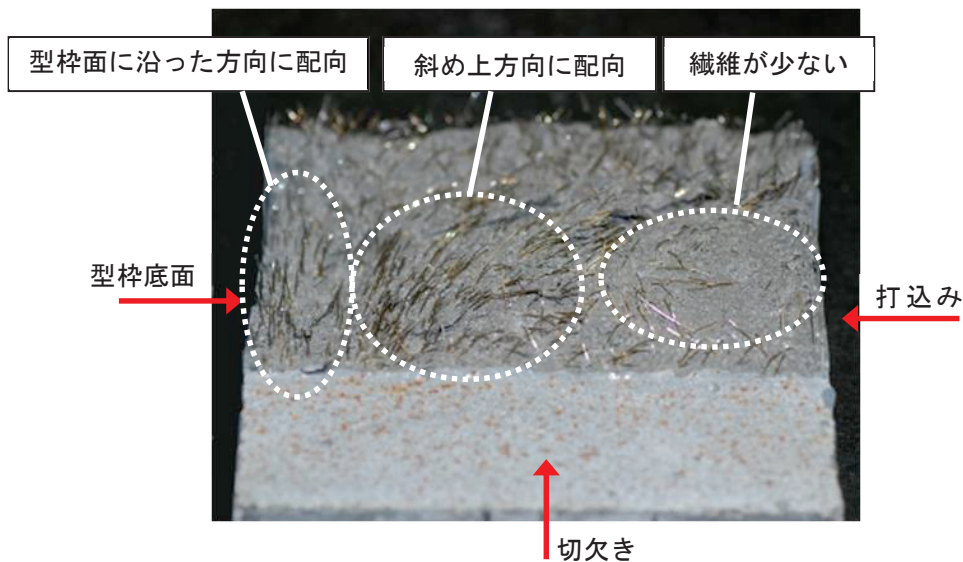


図-5.10 鋼繊維 UFC の破断面

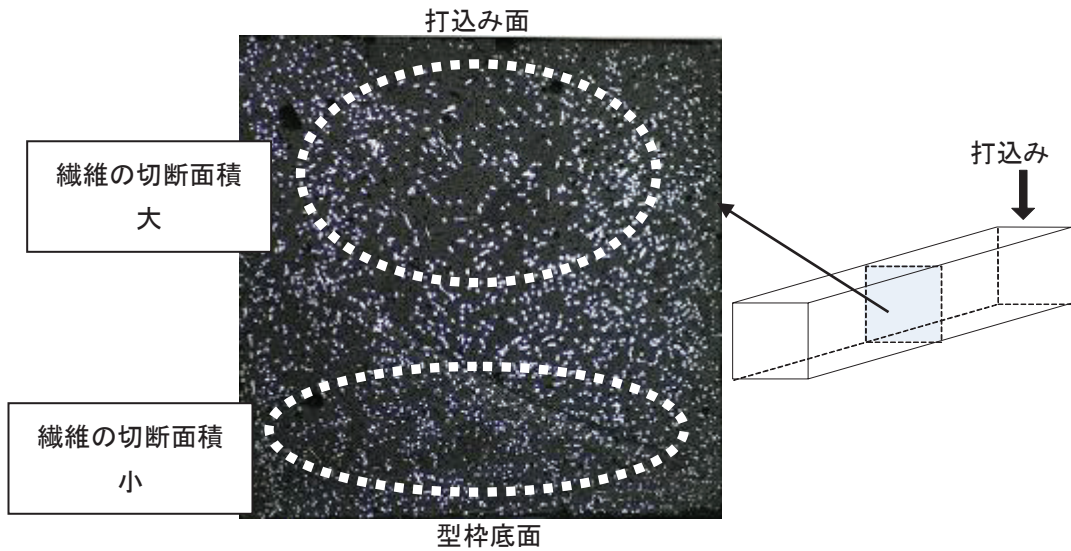
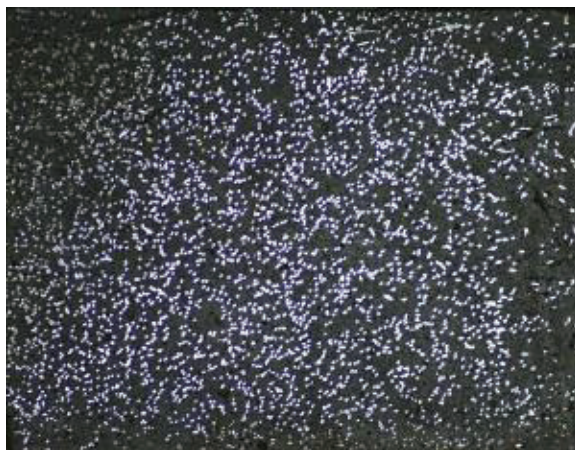
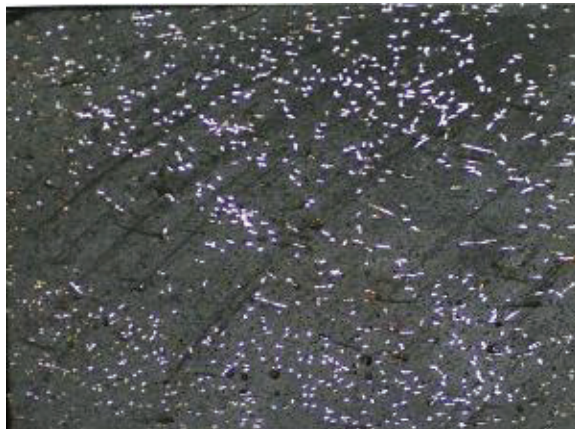


図-5.11 鋼繊維 UFC の垂直断面の繊維の配向



(a) 高さ中央の水平断面における繊維の配向



(b) 型枠底面付近の水平断面における繊維の配向

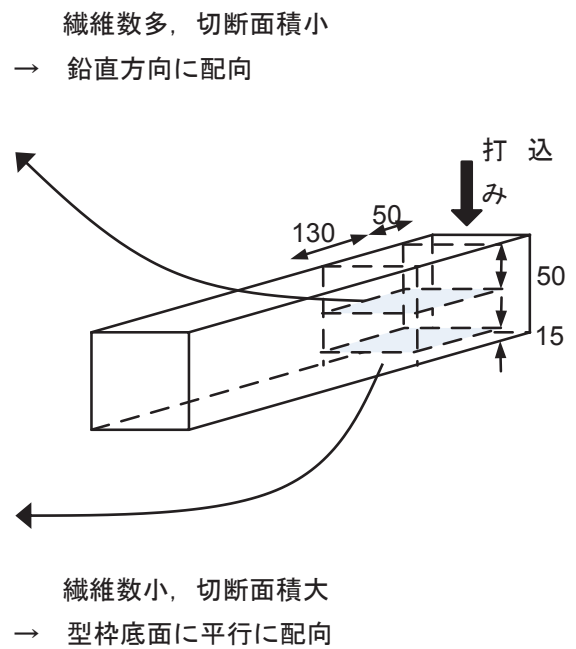


図-5.12 鋼繊維 UFC の水平断面における繊維の配向

5.3.3 打込み方法が異なる合成繊維 UFC の曲げ挙動

上述の通り，流動打込みの場合には繊維は曲げ供試体内で型枠底面に対して斜め上向きに配向し，移動打込みの場合には繊維はランダムに配向する傾向があることが明らかになった。そこで，流動打込みと移動打込みで製作した曲げ供試体について切り欠きはりの3点曲げ試験を行い，打込み方法，すなわち繊維の配向が曲げ挙動に対してどのような影響を及ぼすかを PVA 繊維を用いた UFC を対象に検討した。図-5.13 には計測された荷重-開口変位曲線を示す。図中，細線は各供試体の計測データであり，太線は平均曲線である。ひび割れ発生荷重は打込み方法にかかわらず，ほとんど差は見られなかった。しかし，その後の荷重の増加は移動打込みの方が高く，最大荷重は移動打込みの方が流動打込みより2割程度高くなった。このような差が生じたのは，繊維の配向によるものと考えられ，流動打込みの場合には図-5.10 のように破断面に対して繊維が斜め，あるいは平行に配向する繊維が多くなるために架橋力が十分に発揮されず，移動打込みにより繊維がランダムに配向する場合より架橋力が低下したものと考えられる。なお，この UFC の圧縮強度は 150N/mm^2 であった。

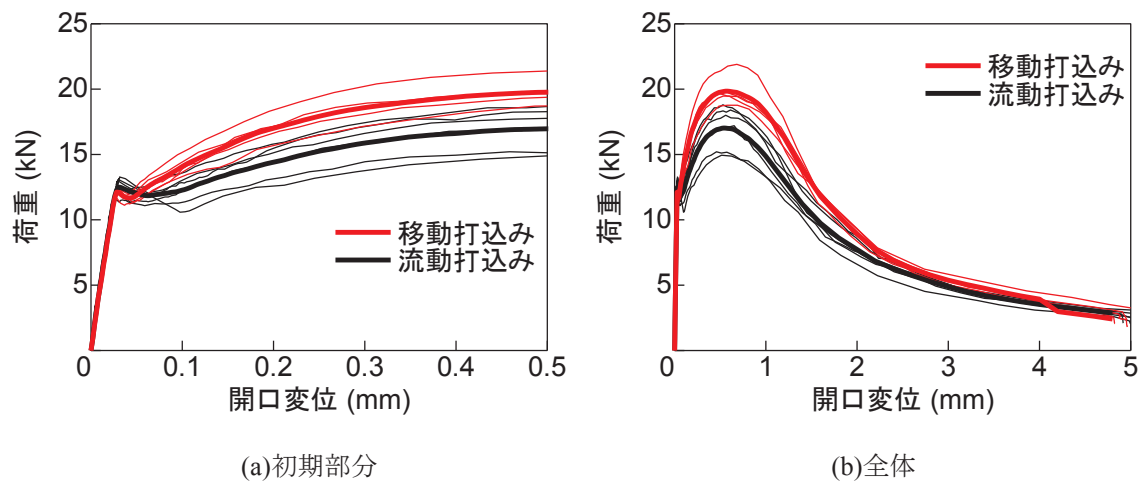


図-5.13 打込み方法が異なる場合の PVA 繊維 UFC の荷重-開口変位曲線

5.4 まとめ

本章で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 高吸水性高分子樹脂を用いた可視化モデルコンクリートにより，曲げ供試体中の繊維の配向状況を観察した。その結果，供試体の片端からコンクリートを流し込む方法の場合，繊維は供試体の軸方向には配向せず，斜め上方に配向することが示された。
- (2) 鋼繊維を用いた UFC 曲げ供試体を切断して繊維の配向状況を観察した結果，可視化モデルコンクリートで観察された配向の性状と定性的に一致していることが示された。
- (3) 打込み方法を変えることで供試体中の繊維の配向が異なる切欠きはりの曲げ試験を行った結果，打込み方法（繊維の配向）の違いにより最大荷重が 2 割程度変化することが示された。

第5章の参考文献

- [1] 橋本親典, 平井秀幸, 辻幸和, 田村真: 2軸強制練りミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構の可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1037-1042, 1993
- [2] JCI 規準: 切欠きはり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 JCI-S-002-2003

第6章 可視化モデルコンクリートによる UFC の繊維の配向の評価

6.1. はじめに

短繊維補強コンクリートの一つの特徴はひび割れ発生後の繊維による架橋効果にあり、この架橋効果に対して繊維の配向・分散が大きく影響する[1-4]。既往の研究によれば、硬化後のコンクリート中の繊維の配向・分散に影響する要因として、練り混ぜ直後のフレッシュ性状、打込み方法、供試体の形状寸法、コンクリートの流動特性と型枠せき板効果などが挙げられ[5-10]、特にコンクリートの流動特性と型枠のせき板効果が繊維の配向・分散に大きく影響するとされている[11-18]。

本章では形状寸法が異なる UFC 供試体中の繊維の配向を把握することを目的として、第5章において提案した可視化モデルコンクリートによる UFC の繊維の配向を評価した[19]。また、硬化した UFC 供試体を切断し、切断面の画像解析により繊維の配向を評価し、可視化実験の結果と比較した。

6.2. 実験概要

6.2.1 使用材料および UFC の配合

表 - 6.1 に使用材料および UFC の配合を示す。本実験で使用した UFC は市販のプレミックスタイプのものであり、主に結合材から成るプレミックス材、細骨材、減水剤および 2vol% の $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$ の鋼繊維で構成されている。練混ぜは、容量 120L の 2 軸強制練りミキサを使用した。

6.2.2 可視化モデルコンクリート

フレッシュコンクリートの可視化モデルには橋本らが提案した高吸水性高分子樹脂（アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物）に水を添加して得られる無色透明の粘性を有する流体（以下、SAP-モデルと呼ぶ）および水溶性セルロースエーテル（以下、セルロース-モデルと呼ぶ）を用いた[20]。SAP-モデルの水に対する樹脂の添加量は3g/リットルを目安として、0打フローが200mm程度となるように調整した。セルロース-モデルについては2.25%の溶液を用い、0打フローが280mm程度であった。

図 - 6.1 (a) に両モデルコンクリートからアクリル板を引抜く試験装置を示す。アクリル板をモデルコンクリート中に長さ10cmまで挿入し、糸の反対側に板の重さの2.5倍の重さを自由落下させ、両モデルコンクリートにおいて、板を5cmおよび完全に（10cm）を引抜いた時の時間を計

表 - 6.1 UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				
水	プレミックス A	細骨材	減水剤	鋼繊維
155	1322	932	25	157

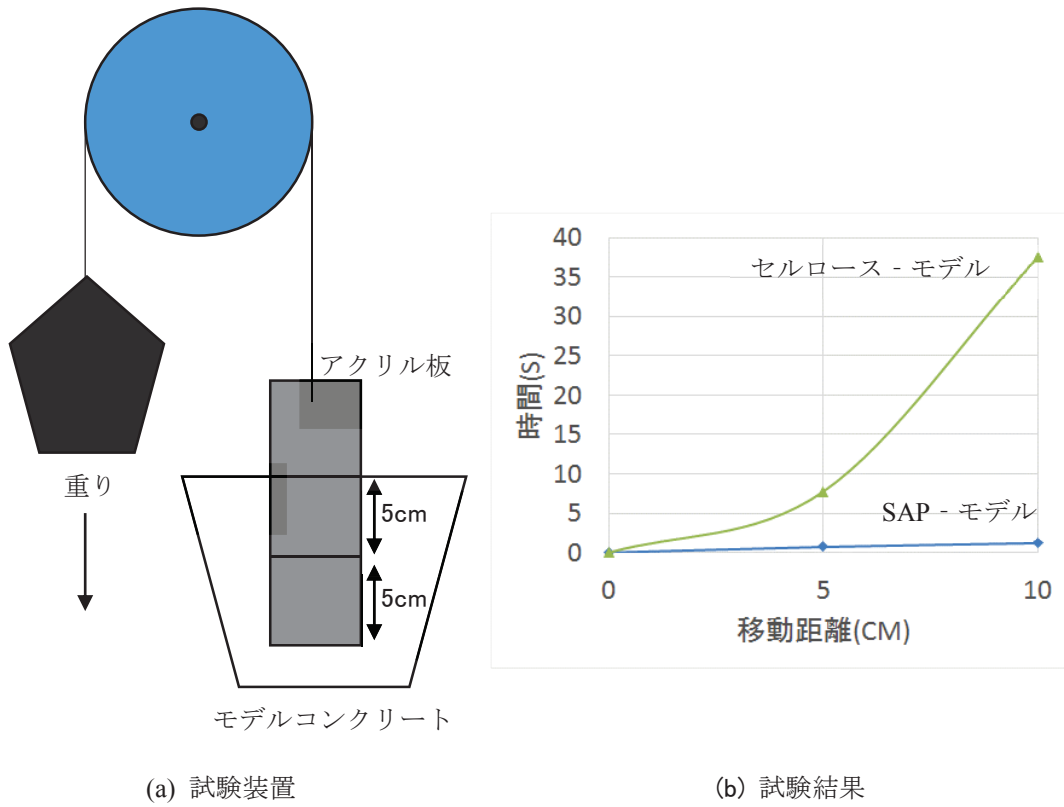


図 - 6.1 両モデルコンクリートの板を引抜く試験

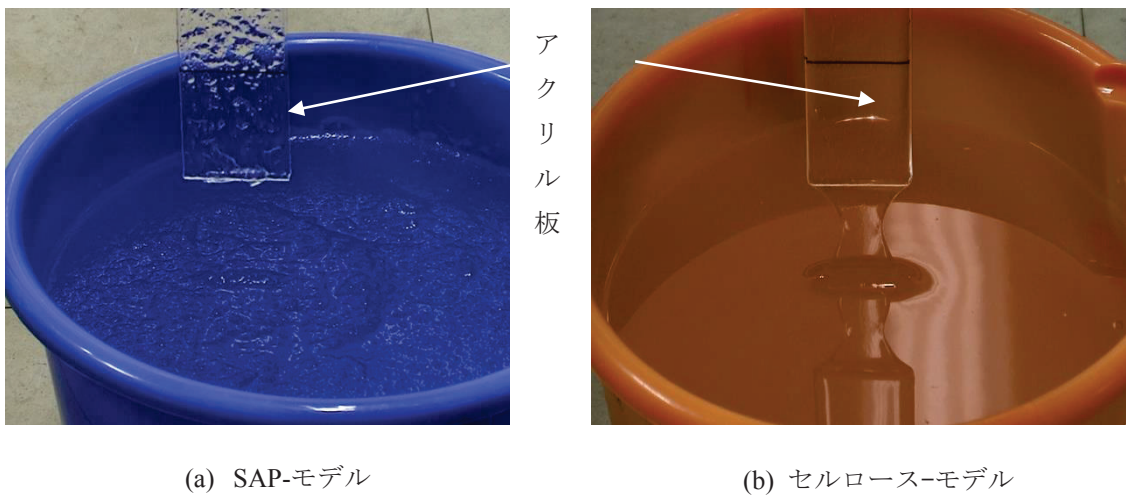


図 - 6.2 Sap-モデルとセルローズ-モデルの粘性

測した。その結果、図 - 6.1(b)に示すように、板を完全に引抜いた時の時間は、SAP - モデルを用いた場合の1秒に対して、セルローズ - モデルは37秒となった。また、図 - 6.2にアクリル板を両モデルコンクリートから引抜いた時の写真を示す。以上のことより、セルローズ - モデルはアクリル板に付着しSAP - モデルより高い粘着性を有している。

6.2.3 供試体

図-6.3 に本実験で用いた UFC 試験体の形状寸法を示す。試験体 A と B は、同じ幅と高さで、長さを変化させたものである。試験体 B と C は同じ幅と長さで、高さを変化させたものである。試験体 D は幅の広いものである。試験体 A、B、C、D についてはすべて型枠の片端からコンクリートを打込んだ。試験体 E は直径 1200mm、厚さ 50mm の円形パネルであり、円形パネルの中心からコンクリートを連続的に打込んだ

また、UFC 試験体と同一寸法のアクリル型枠も作製し、二種類の可視化モデルコンクリートを用いて可視化実験を行った。観察は打込み状況をビデオカメラにより撮影することとした。

6.2.4 画像解析により繊維の配向

可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向と比較するために、UFC 試験体を切断し、切断面の繊維の状況を確認した。図 - 6.3 には各試験体の切断位置を示す。

コンクリート中の繊維の配向状態を観察するにはコンピュータ断層撮影法 [4]、X線法 [21]、電気抵抗率法 [21] および切断面の画像解析方法 [22] などが存在している。本研究では、比較的に簡便な切断面の画像解析方法を用いることとした [22]。デジタルマイクروسコープにより切断面を 20 倍率で撮影し、撮影した画像を解析ソフト ImageJ [23] を用いて画像解析を行った。解析により、繊維の配向角度(θ)、切断面内の総繊維本数(N_T)、 1cm^2 あたりの繊維本数(N_{100})と繊維の方向角度(φ)を求めた。繊維の配向角度については、繊維が切断面に対して垂直に配向している場合 90° となり、繊維が切断面に対して平行に配向している場合 0° となる。また、繊維の方向角度は図-6.4 に示すように、繊維切断面の長径方向である。

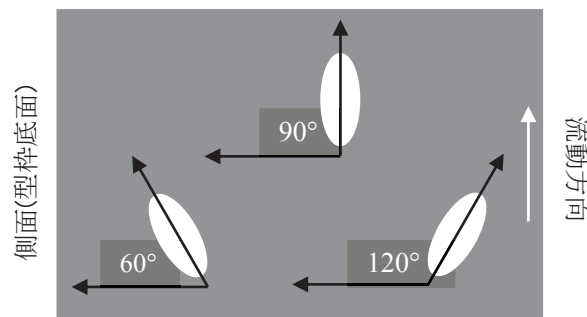


図-6.4 繊維の方向角度

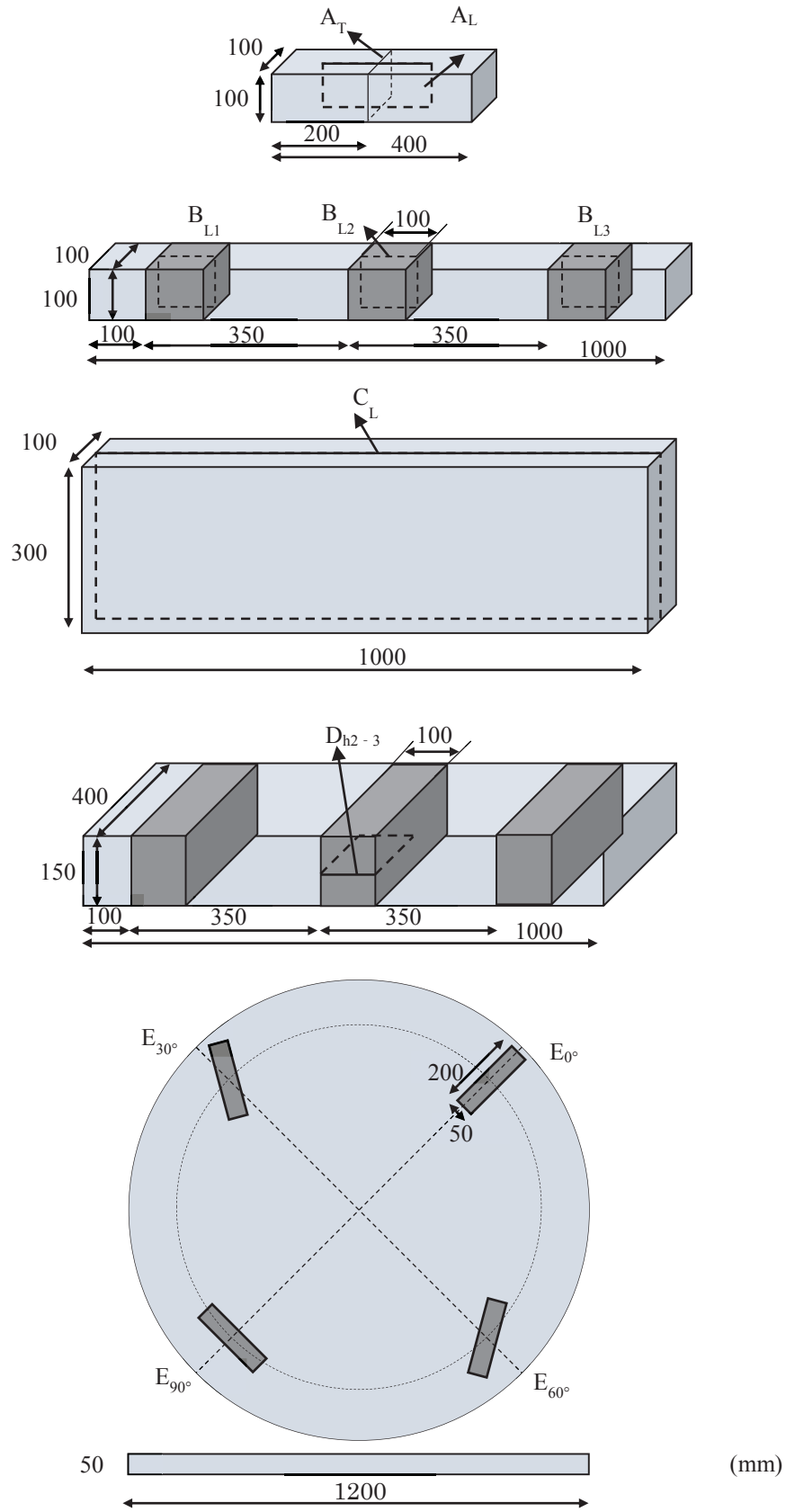


図 - 6.3 UFC 試験体の形状寸法と切断位置

6.3. 実験結果

6.3.1 可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向

図 - 6.5 に二種類の可視化モデルコンクリートを用いた $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 標準曲げ供試体の写真を示す。型枠の片端からモデルコンクリートを打込むと、両モデルコンクリートは同様な傾向となり、繊維が型枠底面から斜め上方に配向した。ただし、型枠底面付近では、繊維が水平に配向する傾向があり、セルロース-モデルのほうが顕著になった。これはモデルコンクリートと型枠の粘着性および粘性の違いによるものと考えられる。

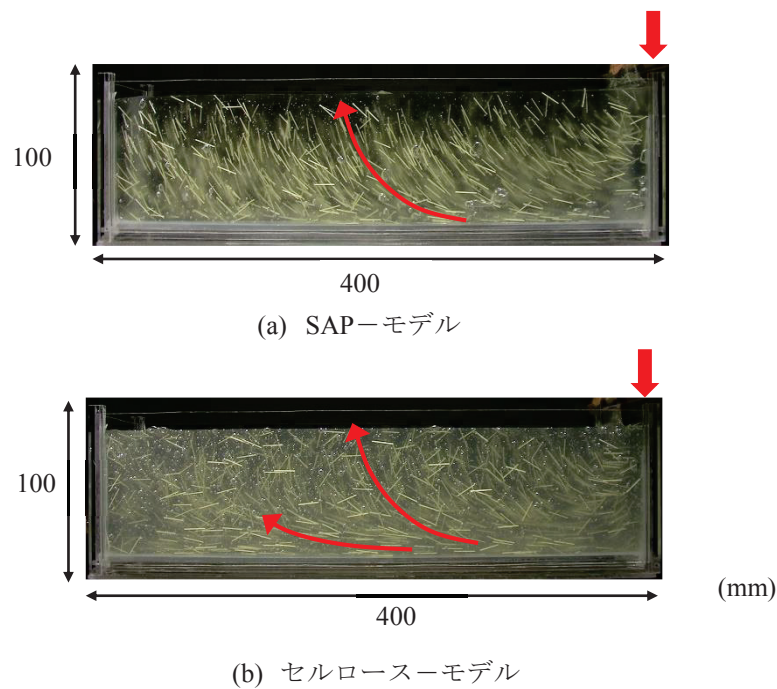


図-6.5 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 可視化モデルコンクリート

このような繊維の配向のメカニズムを解明するために、以下の実験を実施した。図 - 6.5 (a) に示すように、打込み中のコンクリートの流動特性を把握するために、3色の繊維を用いた SAP - モデルコンクリートを作製した。

図-6.6 には3色の繊維を用いた SAP - モデルを用いて打込み開始から完了までの状況を示す。図-6.6 (b) のように、最初の1色目のモデルコンクリートを打込んだ時、繊維は型枠底面に対してほぼ水平になっているが、図-6.6 (c) に示すように、2色目のモデルコンクリートを打込むと、先に打ち込んだモデルコンクリートの上面に流れるのではなく、先に打ち込んだモデルコンクリートを押し出すように、斜め上方に流動する様子を観察された。さらに、図-6.6 (d) のように3色目のモデルコンクリートを打込むと、供試体中の繊維が全体的に型枠底面から斜め上方に配向した。

このようなモデルコンクリートの流動挙動を図-6.7 にまとめた。図中、番号付き矢印は打込み中のコンクリートの前後順番を示す。つまり、②は①の次に打込んだ。また、このような配向

の挙動は図-6.8、6.9 に示すように、セルロースモデルおよび UFC の場合も同様に観察された。ただし、セルロースモデルおよび UFC は型枠側面との付着性が高いため、先に打込んだコンクリートは打込み位置から型枠側面に少量に付着している。なお、コンクリートの流動特性を観察するため、セルロースモデルは SAP - モデルと同様に色付け繊維を用いた。UFC は同粒径で色の異なる細骨材（廃瓦骨材）を用いた。



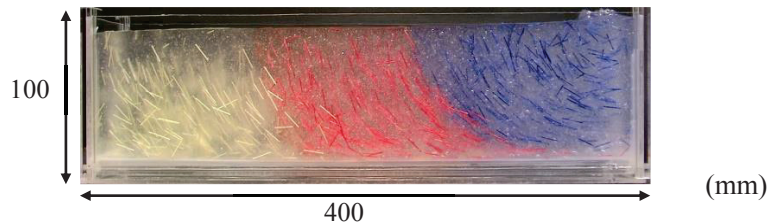
(a) 色付け繊維を用いた SAP - モデル



(b) 1 色目の打込み



(c) 2 色目の打込み



(d) 3 色目の打込み

図-6.6 色付け繊維を用いた SAP-model

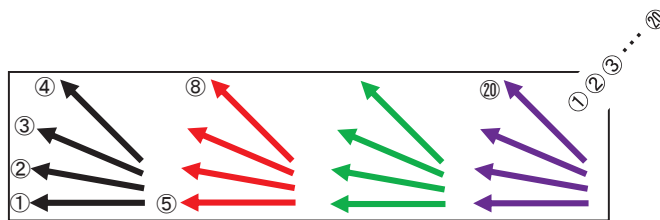


図-6.7 SAP - モデルコンクリートの流動挙動

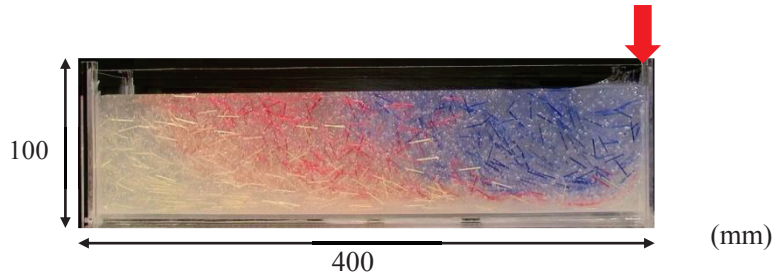


図-6.8 色付け繊維を用いたセルローズモデル

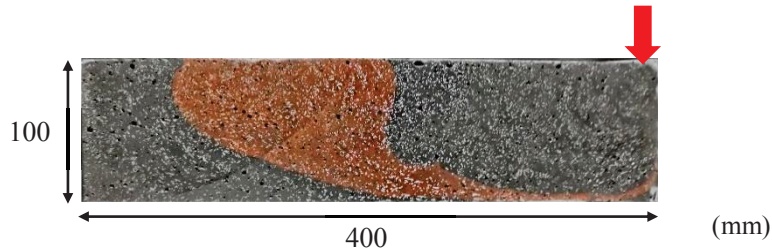


図-6.9 二種類の骨材を用いた UFC

図 - 6.10 に二種類の可視化モデルコンクリートを用いた $100 \times 100 \times 1000$ mm 試験体の写真を示す。 $100 \times 100 \times 400$ mm 標準曲げ試験体で観察された繊維の配向と同様に供試体長さ方向全体的に型枠底面から斜め上方に配向した。

試験体の高さが繊維の配向にどのような影響を与えるかを検討するために、図-6.11 に示すような $100 \times 300 \times 1000$ mm 試験体を作製した。図 - 6.11 (a) に示すように、SAP - モデルを用いた場合、 $100 \times 100 \times 400$ mm 標準曲げ試験体で観察された繊維の配向と同様に型枠底面から斜め上方に配向した。また、図 - 6.11 (b) に示すように、セルローズ - モデルを用いた場合、図中破線の矢印に示すように、型枠上部側面付近では、繊維が水平配向になったが、供試体内部では、繊維が実線の矢印に示すように、SAP - モデルと同様に型枠底面から斜め上方に配向した。

試験体の幅が繊維の配向にどのような影響を与えるかを検討するために、図 - 6.12 に示すような幅 400, 高さ 150, 長さ 1000mm の試験体を作製した。図-6.12 (a) と (b) に両可視化モデルコンクリートの上面から撮影した写真を示す。両モデルコンクリートにおいて同様な傾向になり、繊維が軸方向に湾曲する配向となった。ただし、図 - 6.12 (b) に示すように、セルローズ - モデルを用いた場合、繊維は軸方向に湾曲する傾向が顕著になった。また、試験体内部の繊維の配向状況を観察するために、幅 100, 高さ 200, 長さ 500 mm の無底の亚克力型枠を作製し、 $400 \times 150 \times 1000$ mm 試験体にモデルコンクリートを打込んだ後、図 - 6.12 (c) に示すように、中央に無底の型枠を挿入し、無底型枠周囲のモデルコンクリートを除去して、無底型枠中の繊維の配向を観察した。なお、モデルコンクリートと型枠の摩擦を減少させるため、無底の型枠の側面に食用油を塗った。

図-6.12 (d) と (e) は両モデルコンクリートを用いた場合、無底型枠中の繊維の配向を示す。SAP - モデルを用いた場合、図-6.12 (d) に示すように、 $100 \times 100 \times 400$ mm 標準曲げ供試体と同様に、繊維が型枠底面から斜め上に配向した。セルローズ - モデルを用いた場合、図-6.12 (e) に

示すように、型枠内部は全体的に斜め上に配向したが、モデルコンクリートの投入口に近い部分では、繊維が供試体軸方向に湾曲する配向となった。

図-6.13 に示すように、両可視化モデルコンクリートを用いてパネルの中心から打込んだ場合、繊維が同心円状に配向することが確認された。この配向のメカニズムは以下のように説明することができる。図-6.14 に示すように、流動するマトリクスは放射状になっているため、マトリクス中で有限長さを有する繊維はマトリクスとともに放射方向に移動しつつ、周方向のせん断力を受け、周方向に回転（配向）する。さらに、図-6.12(a)と(b)に示すように、幅の大きい試験体も円形パネルと同様に、繊維が同心円状配向することが観察された。

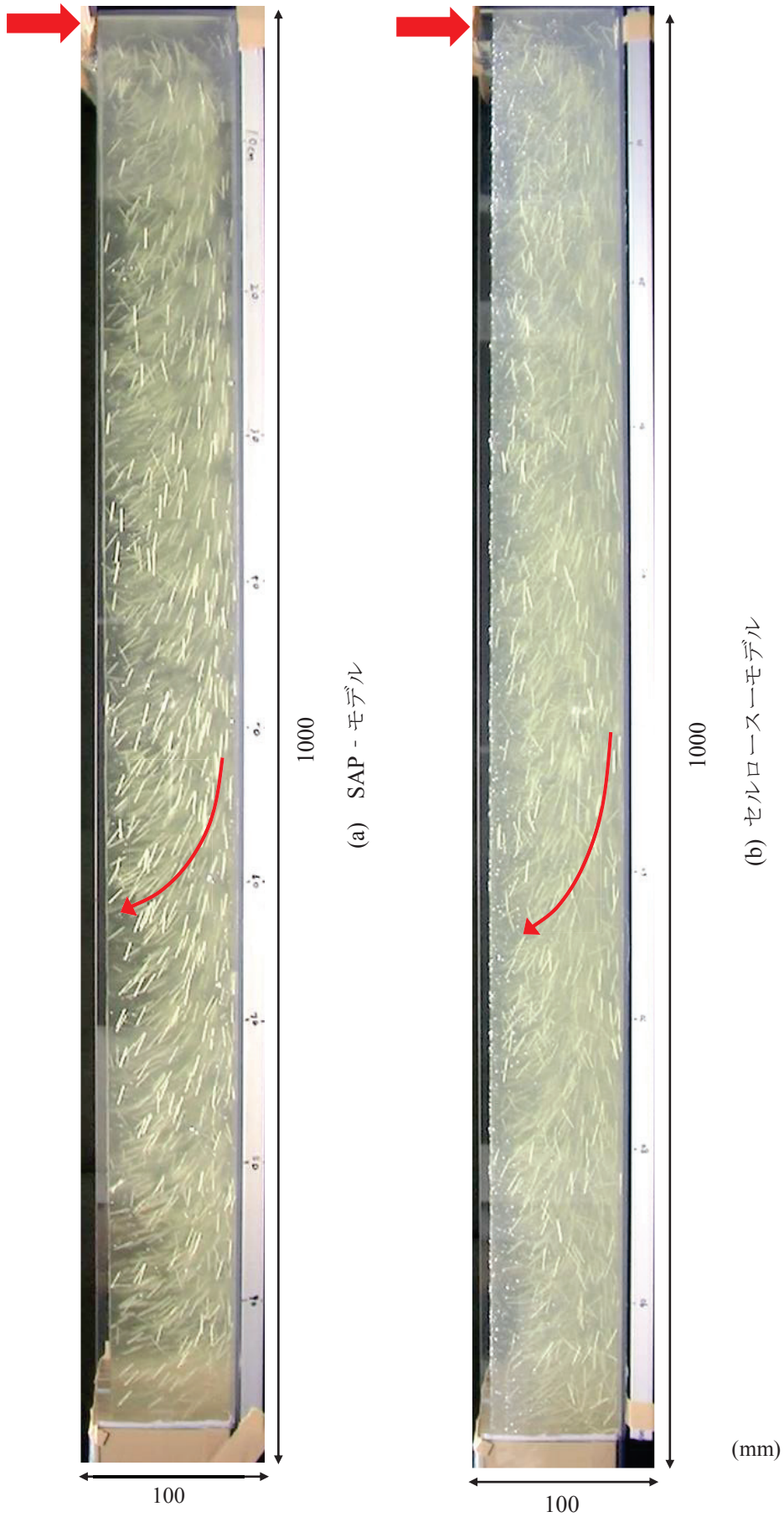
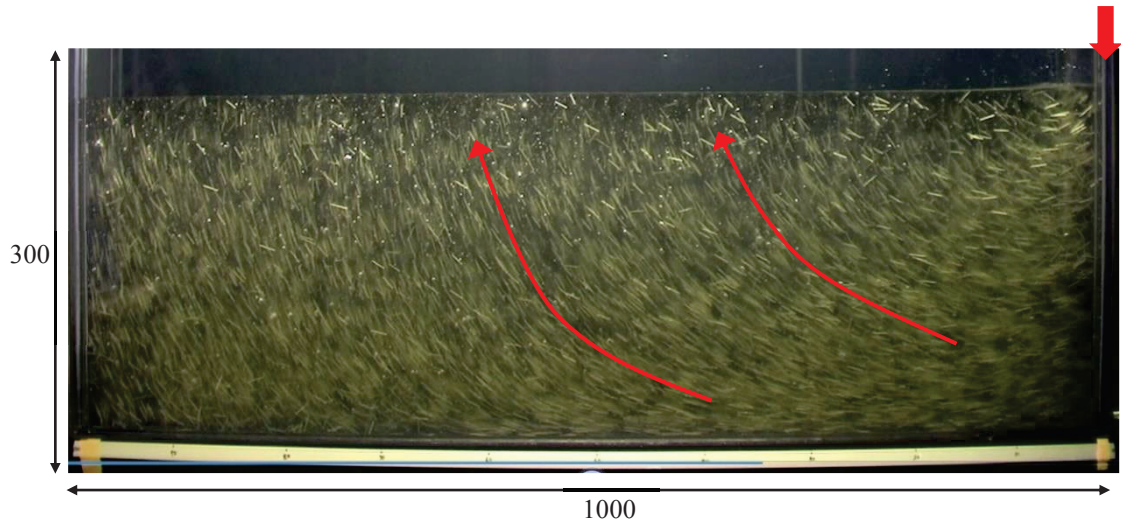
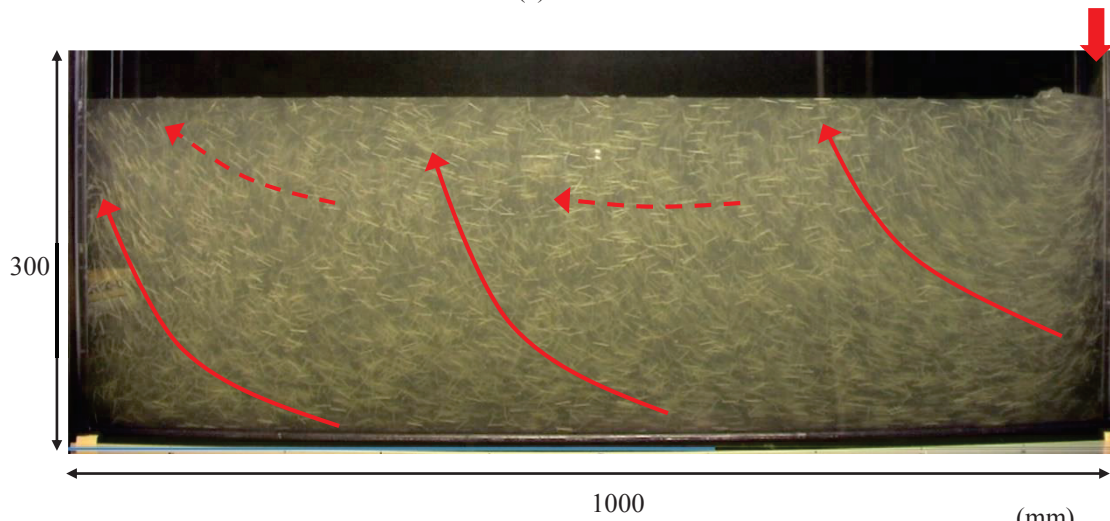


図-6.10 100×100×1000 mm 可視化モデルコンクリート



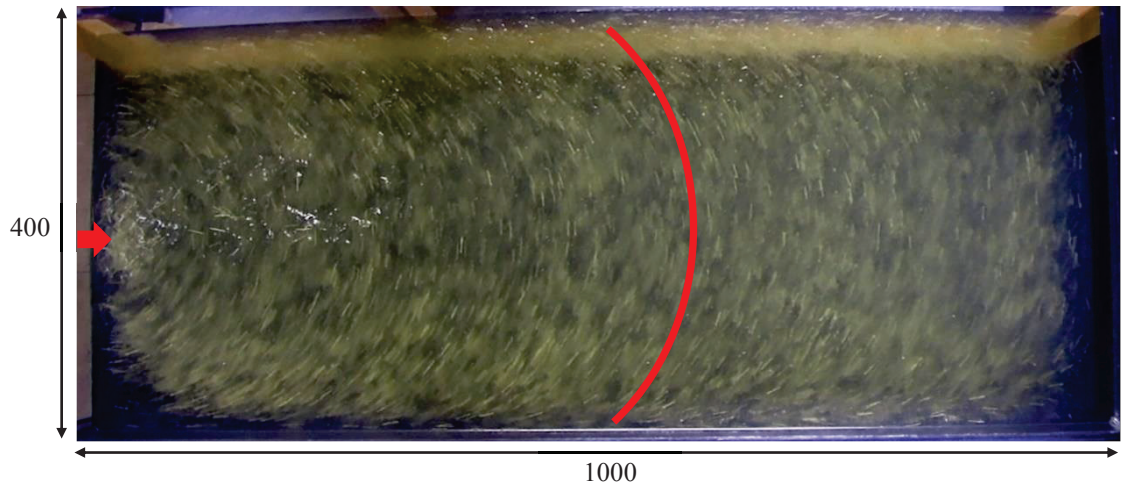
(a)SAP - モデル



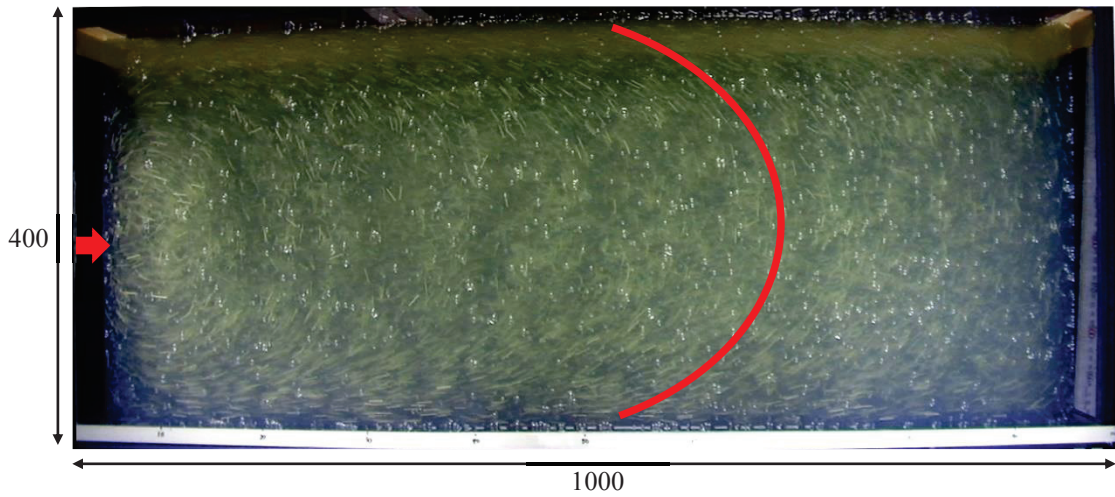
(b)セルロース - モデル

(mm)

図-6.11 100×300×1000 mm 可視化モデルコンクリート



(a)SAP - モデル



(b)セルロース - モデル

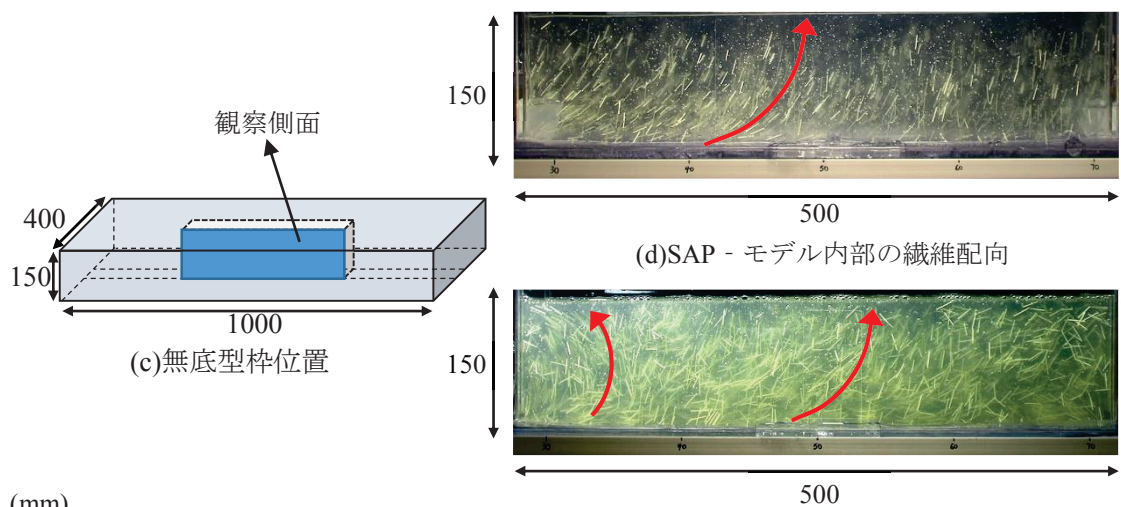


図 - 6.12 400×150×1000 mm 可視化モデルコンクリート

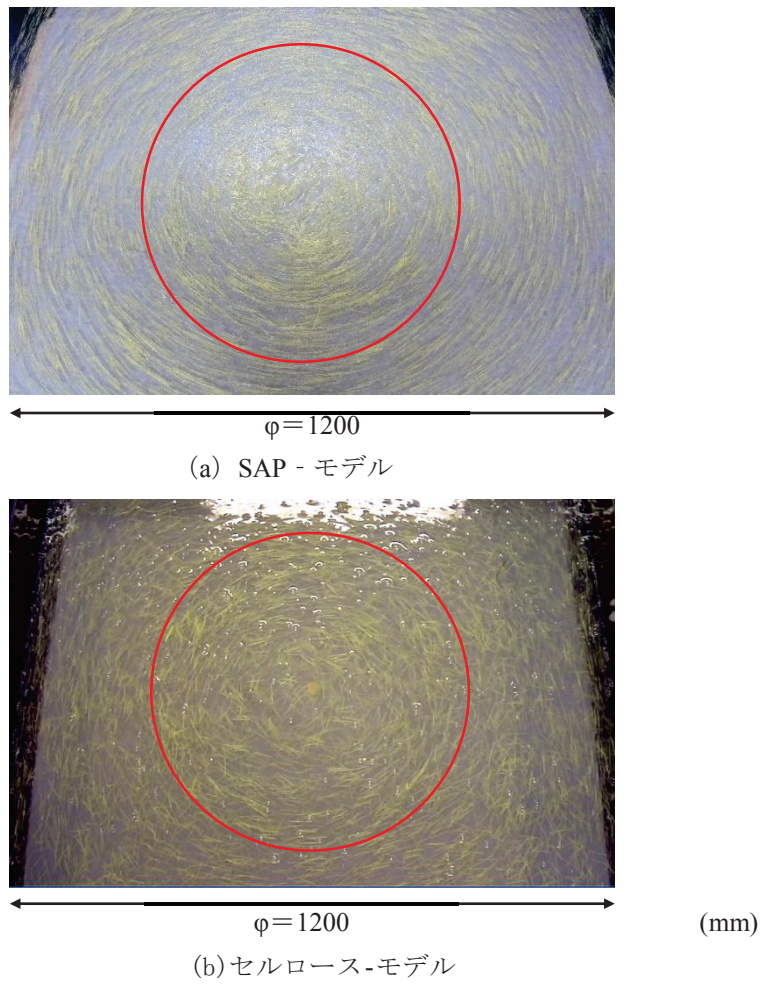


図 - 6.13 φ=1200 可視化モデルコンクリート

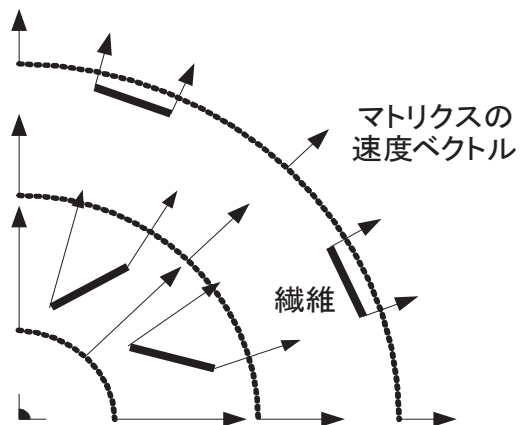
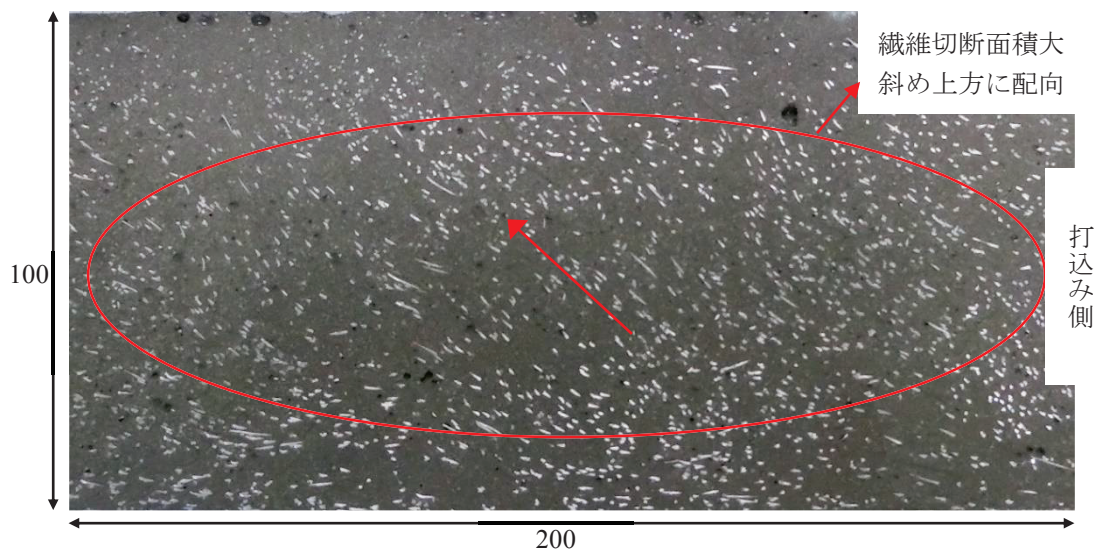


図 - 6.14 放射状流動中の繊維周辺の速度ベクトル

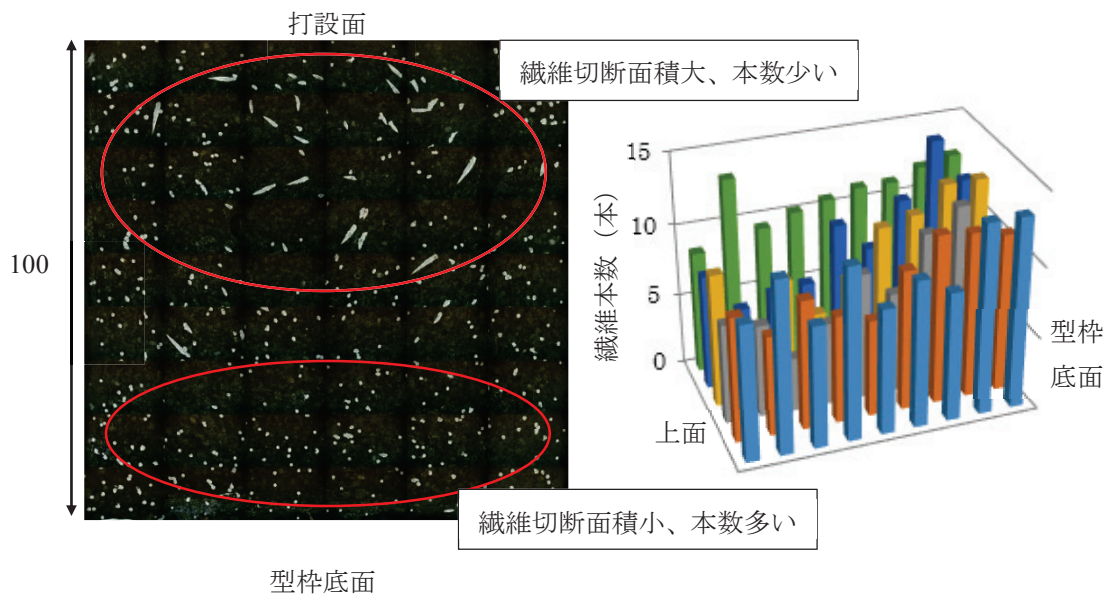
6.3.2 UFC 中の繊維の配向

前項の可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向の挙動を実際のUFC供試体で確認するため、図-6.3に示すように、UFC試験体を切断し、切断面の繊維の状況を確認した。

図-6.15(a)と(b)は試験体Aの試験体軸方向に平行に切断した縦断面 A_L と垂直に切断した横断面 A_T の写真を示す。図中、白い点が鋼繊維の切断面である。図-6.15(c)に切断面 A_T の単位面積あたりの繊維本数 N_{ua} を示す。図-6.15(a)により、試験体軸方向に平行に切断した断面では、繊維の切断面積が大きく、型枠底面から斜め上方に配向することが観察された。



(a)試験体軸方向に平行に切断した断面 A_L



(b) 試験体軸方向に垂直に切断した断面 A_T

(c) 流動方向垂直切断面 A_T の繊維本数 N_{ua}

図-6.15 試験体 A (100×100×400mm)

また、**図-6.15(b)**と**(c)**により、試験体軸方向に垂直に切断した断面の結果では、打設面付近は繊維の切断面積が大きく、繊維本数が少なくなっているのに対して、型枠底面付近は繊維の切断面積が小さく、繊維本数が多くなった。

100×100×400mm の試験体 A の繊維の配向は、100×100×400mm 可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向状況と同様に型枠底面から斜め上方に配向し、定性的に一致していると考えられる。

図-6.16に100×100×400mmの試験体Bの切断面 B_{L2} の結果を示す。**図-6.16(a)**は解析に用いた画像であり。**図-6.16(b)**と**(c)**は単位面積あたりの繊維本数(N_{ua})と繊維の配向角度(θ)、**図-6.16(d)**は切断面内の繊維の方向角度の分布である。

図-6.16(a)より、上面付近以外では繊維が少なく、繊維の切断面が長くなっているものが観察される。また、**図-6.16(d)**より、切断面内の繊維の方向角度について、約75%は $0\sim 90^\circ$ に分布しており、この切断面では、繊維が型枠底面に対して斜め上方に配向していることを示している。

図-6.17に試験体Bの両端部から切出した切断面 B_{L1} と B_{L3} のデジタルカメラ写真を示す。 B_{L2} と同様に、繊維が型枠底面に対して斜め上方に配向していることを示している。

試験体Bの中央部分および両端部分から切出した切断面 B_{L1} 、 B_{L2} と B_{L3} において、繊維の配向が同様に、型枠底面に対して斜め上方に配向している。

試験体Bにおいて、軸方向の繊維配向はほぼ同様に型枠底面から斜め上方に配向し、100×100×400mmの試験体Aと同様な繊維配向分布を示している。すなわち、幅が100mmの狭い試験体では、試験体の長さは繊維の配向に影響しなかった。また、100×100×400mmおよび100×100×1000mm可視化モデルで観察された繊維の配向と定性的に一致していることも示している。

試験体の高さが繊維の配向にどのような影響を与えるかを検討するために、幅100、高さ300、長さ1000mmの試験体Cを作製した。**図-6.18(a)**に試験体の軸方向の中心から切出した断面の C_L の写真を示す。なお、この試験体は**図-6.9**に示した100×100×400mm標準曲げ供試体と同様に、同粒径で色の異なる細骨材（廃瓦骨材）を用いて作製した。その結果、**図-6.9**と同様に、後に打込んだコンクリートは先に打ち込んだコンクリートの上面に流れるのではなく、先に打ち込んだコンクリートを押出すように、斜め上方に流動する様子を示している。

図-6.18(b)に切断面中央部の拡大図を示す。同図より、繊維が型枠底面から斜め上方に配向することを示している。また、100×300×1000mm可視化モデルで観察された繊維の配向と同様に型枠底面から斜め上方に配向することを明らかになった。さらに、100×100×400mmの試験体Aおよび100×100×1000mmの試験体Bで観察された繊維の配向と同様に型枠底面から斜め上方に配向した。すなわち、幅100mmの試験体では、試験体の長さおよび高さが繊維の配向に影響しなかった。

図-6.19に試験体Dから切出した水平切断面 D_{h2-3} の結果を示す。**図-6.19(a)**に示すように、切断面 D_{h2-3} は32分割して画像を撮影した。**図-6.19(b)**は切断面を8等分に分け、各部分の繊維の方向角度分布を示した。**図-6.20(c)**には切断面内の繊維の配向角度を示す。

図-6.19 (b)と(c)により、この切断面において、繊維の配向角度が $30\sim 40^\circ$ になっており、繊維の方向角度は、約 80%の繊維は $90\sim 180^\circ$ に分布していることを示している。配向角度の結果より、図-6.20 (a)に示すように、繊維が水平面に対して $30\sim 40^\circ$ の角度で斜め上方に配向している。また、図-6.20 (b)に示すように、方向角度（長径方向）の結果より、水平面において、繊維は試験体の幅方向の中心に傾いている。

試験体 D の端部から取出した切断面 D_{h1} と D_{h3} は、 D_{h2} と同様に、水平面に対して斜め上方に配向し、試験体軸方向の中心に傾く結果となった。

以上のことより、試験体 D において観察された繊維の配向は $400\times 150\times 1000\text{mm}$ の可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向状況と定性的に一致し、水平面に対して斜め上方に配向し、試験体軸方向の中心に傾く結果となった。

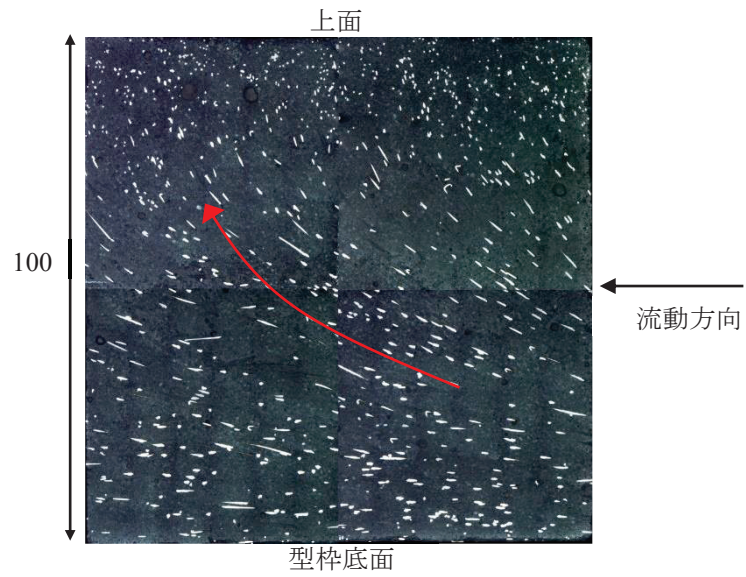
図-6.21 に円形パネルにおいて中心から 50 cm の位置で半径方向に対して 0° 、 30° 、 60° および 90° で切出した供試体の破断面の繊維の状況を示す。写真より、破断面において繊維が一定方向に配向していることが明確に観察され、その方向も繊維が同心円状に配向することから推定される方向とほぼ一致している。

図-6.22 に各破断面の画像解析に用いた写真を示す。断面を 16 (4×4) 分割し、各区画内の単位面積当たりの繊維配向角度の分布を図-6.23 に示す。図-6.23 より供試体 0° 、 30° 、 60° の場合、破断面内の繊維配向角度はほぼ供試体の切出し角度と同程度になり、パネル内の繊維が同心円状に配向することを裏付けている。供試体 90° の場合は配向角がやや小さい結果となった。この理由は繊維の切断面が真円に近くなるため、角度の推定精度が低下するためと考えられる。また、同図より、いずれの供試体においても、断面高さ方向での角度差が見られず、断面高さ方向では一定の配向となった。

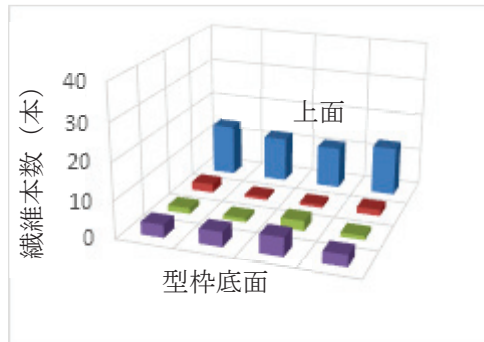
図-6.24 に各破断面内（切欠き部除き） 1cm^2 あたりの繊維本数の分布を示す。

図-6.25 に各破断面内（切欠き部除き）繊維の方向角度を示す。供試体 0° 、 30° 、 60° の場合、断面内約 75%以上の繊維が $150\sim 180^\circ$ と $0\sim 30^\circ$ の方向区間に配向しており、すなわち、繊維が供試体底面に対してほぼ水平になっていることが明らかになった。

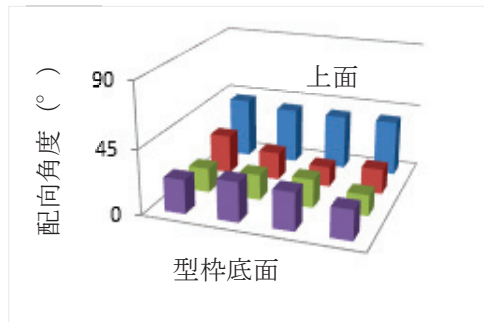
以上のことより、試験体 E において、パネルの中心から打込むと、 $\phi 1200\text{mm}$ 可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向と同様に同心円状に配向することが明らかになった。このような傾向は図-6.12 に示すように、幅 400mm、高さ 150mm、長さ 1000mm の可視化モデルコンクリートの上面からも観察された。



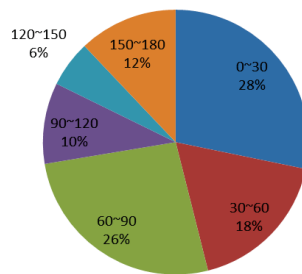
(a) B_{L2}



(b) 単位面積あたりの繊維本数(N_{ua})



(c) 繊維の配向角度(θ)



(d) 繊維の方向角度(φ)

図 - 6.16 切断面 B_{L2}

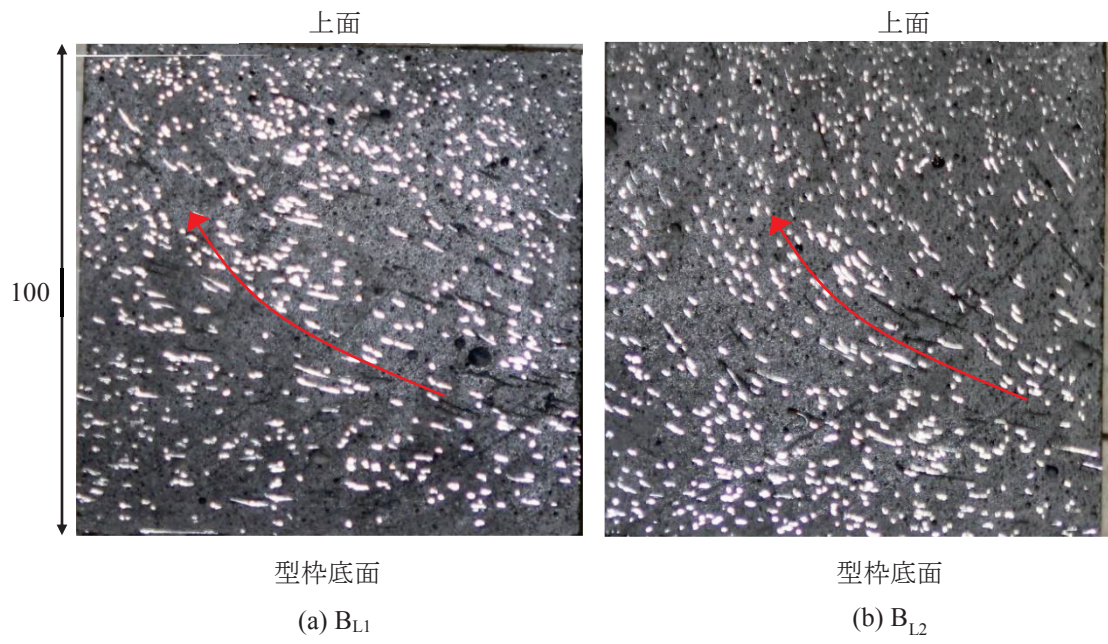


図 - 6.17 切断面 B_{L2} と B_{L3}

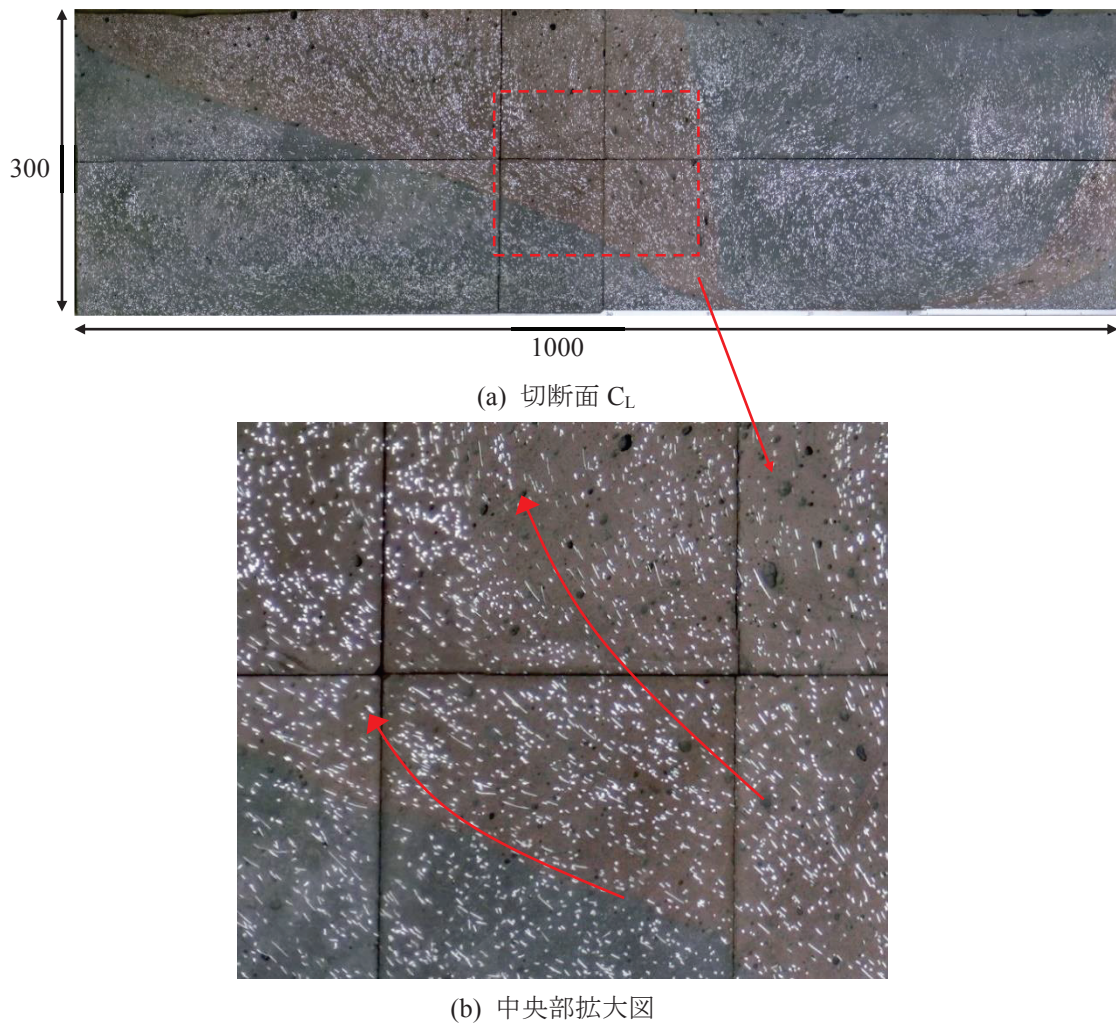
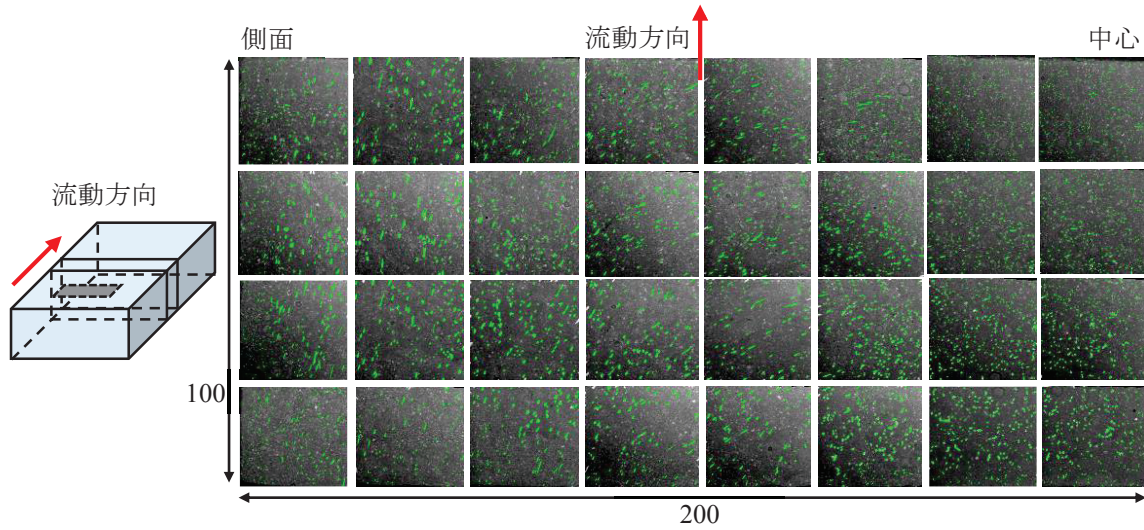
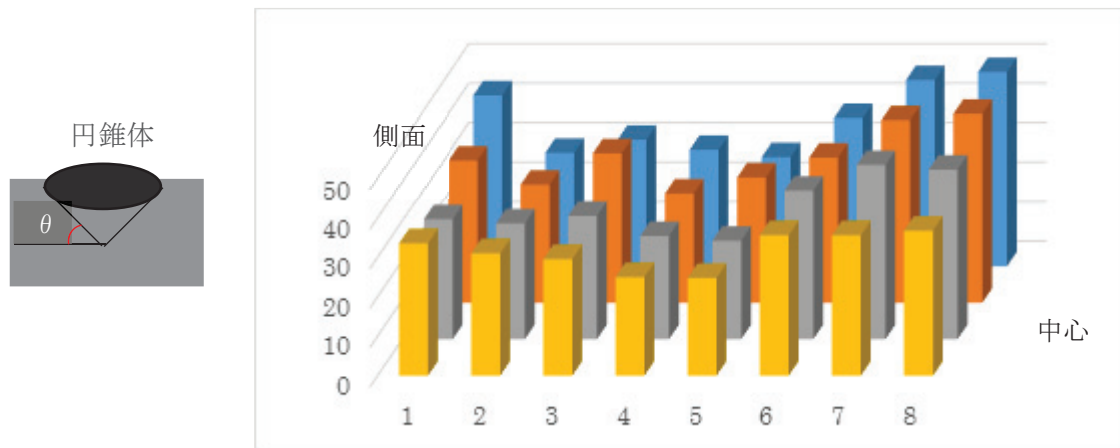


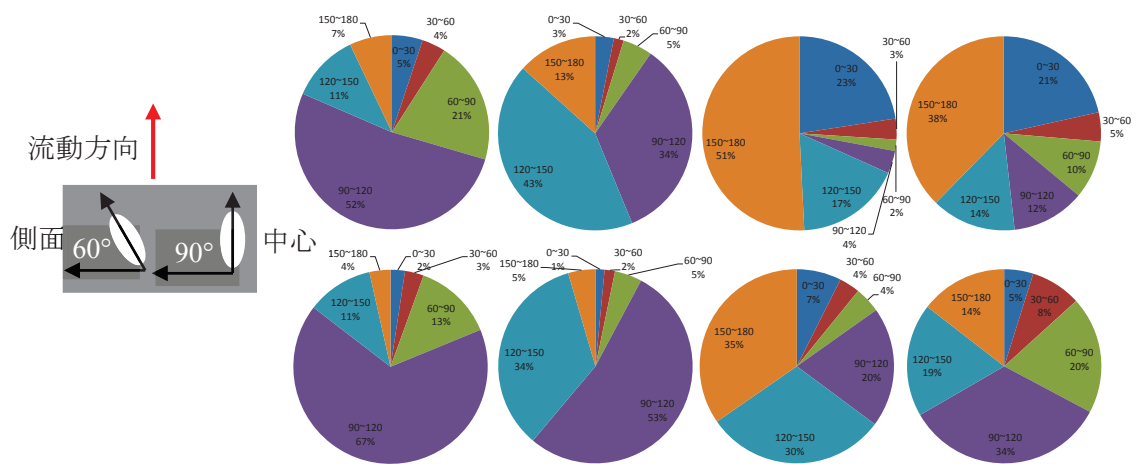
図 - 6.18 試験体 C



(a) 切断面 D_{h2-3}



(b) 切断面 D_{h2-3} の配向角度



(c) 切断面 D_{h2-3} の方向角度

図 - 6.19 切断面 D_{h2-3}

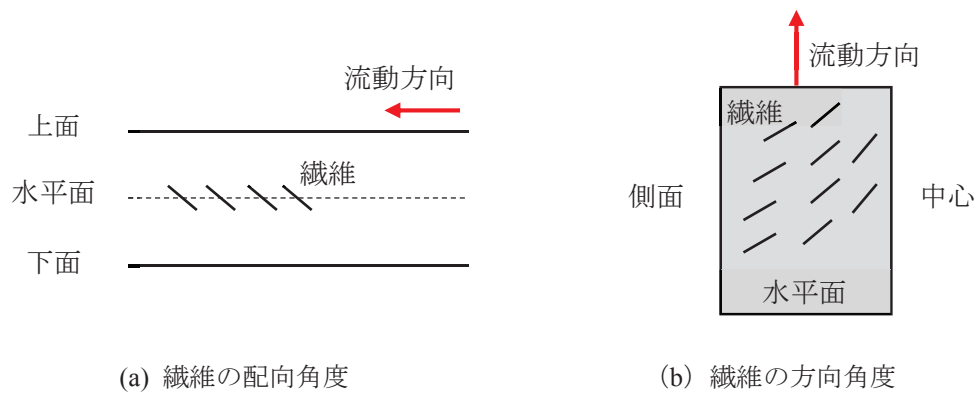


図 - 6.20 試験体 D 水平面における繊維の配向角度と方向角度

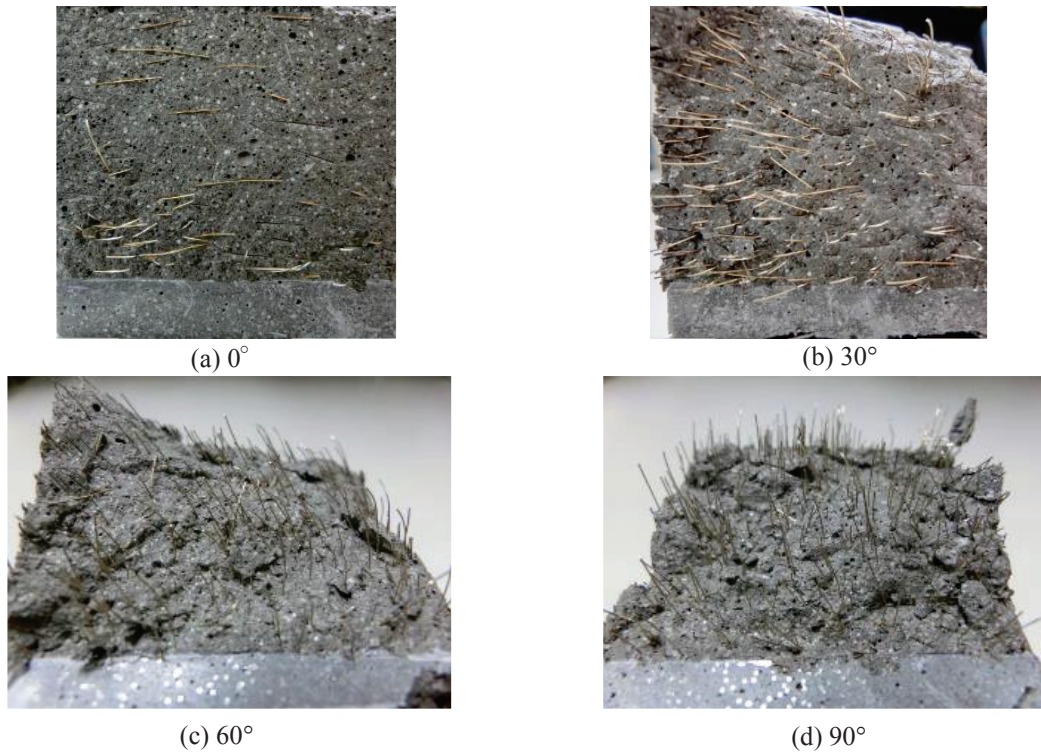


図 - 6.21 試験体 E 破断面の繊維配向状況

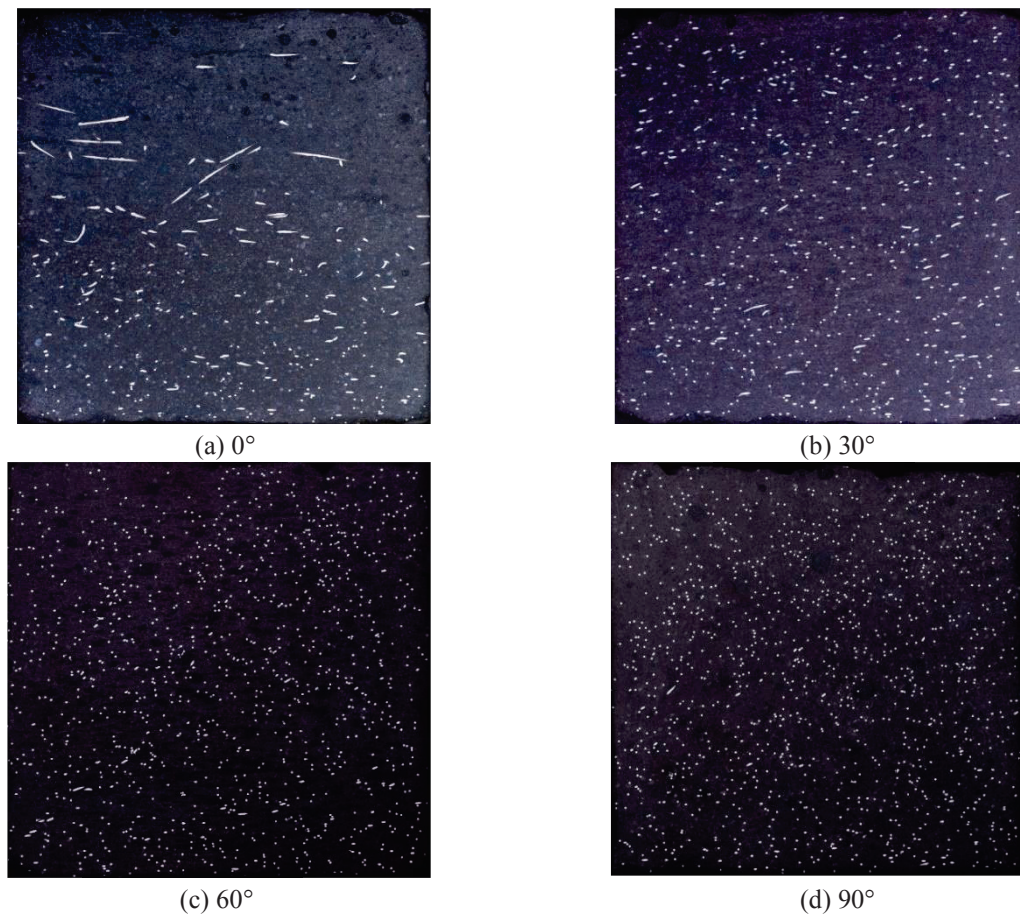


図 - 6.22 試験体 E の画像解析に用いた写真

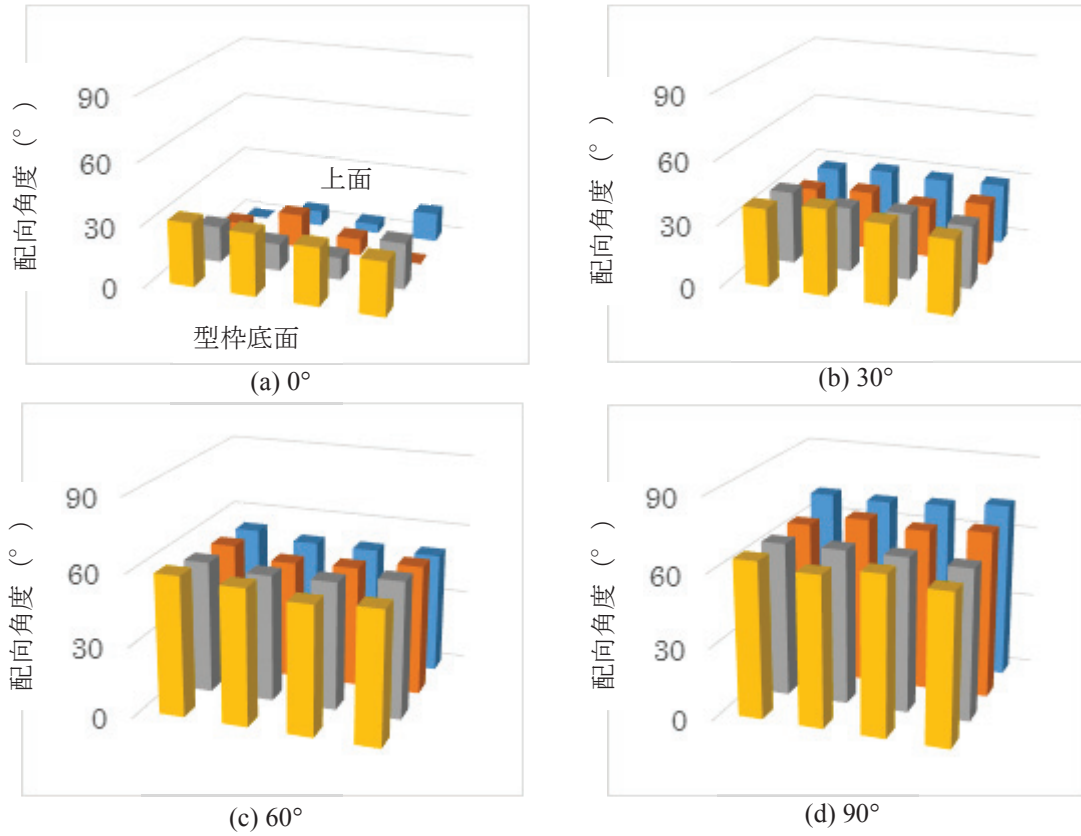


図 - 6.23 試験体 E 各破断面の繊維配向角度

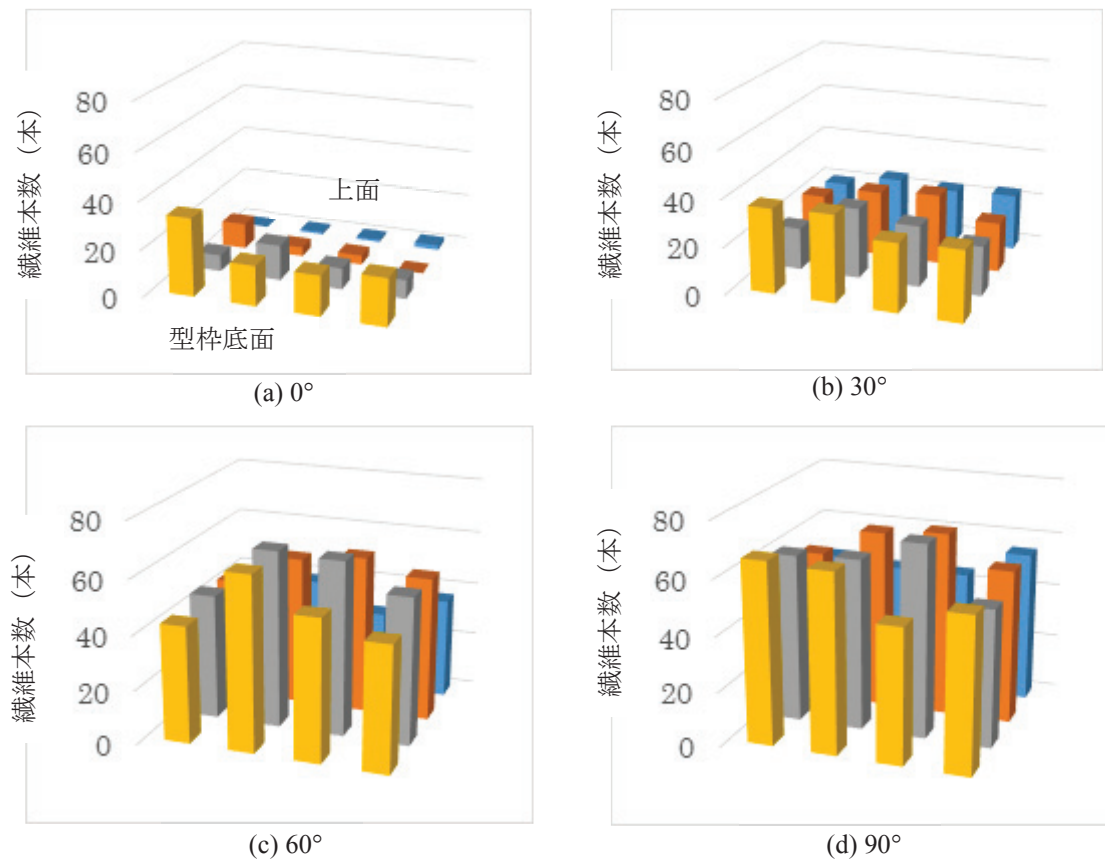


図 - 6.24 試験体 E 各破断面の繊維本数

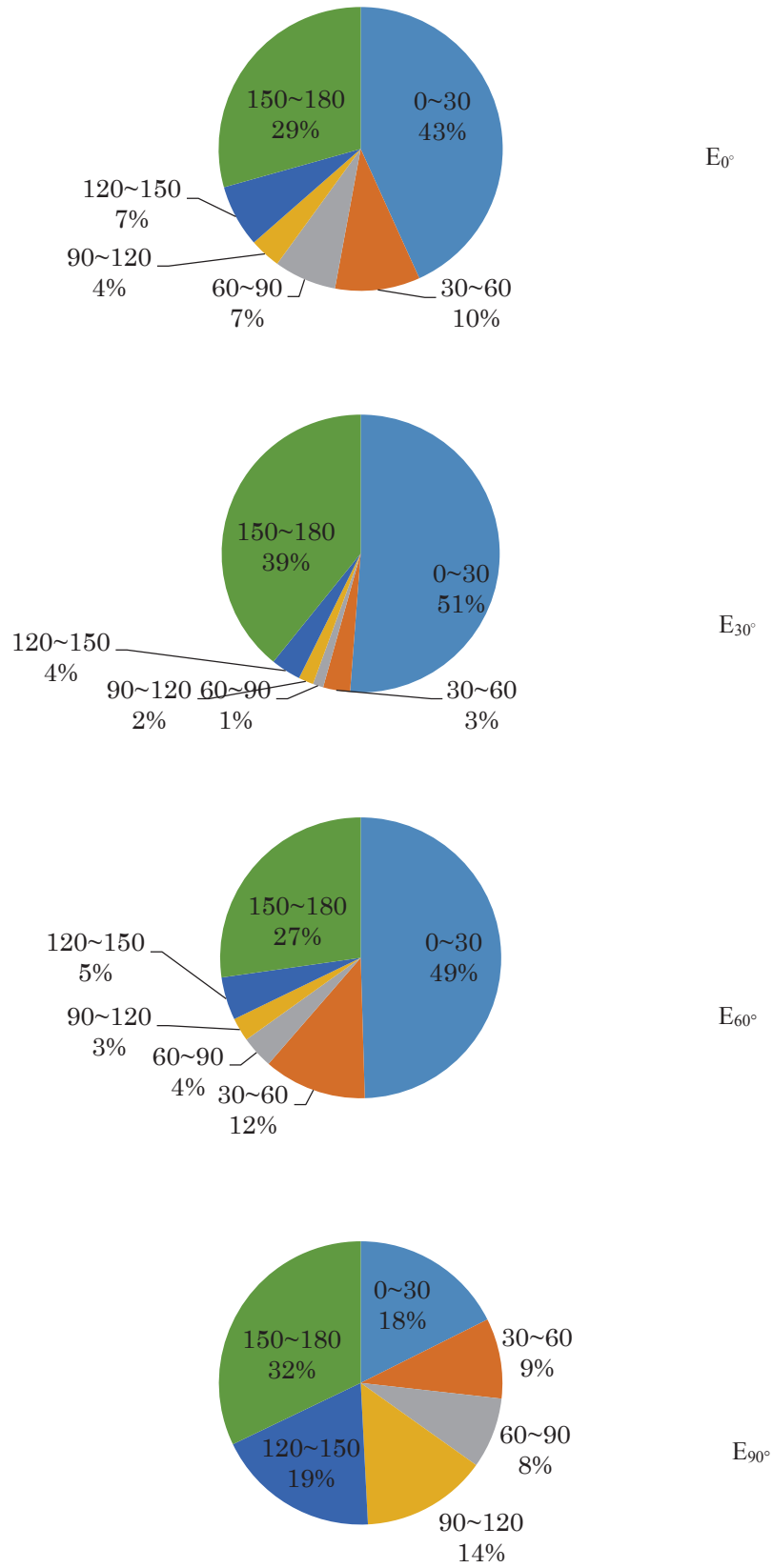


図 - 6.25 試験体 E 各破断面の繊維方向角度

6.4. まとめ

本章では、可視化モデルコンクリートによる UFC の繊維の配向を評価した。また、硬化した UFC 試験体を切断し、切断面の画像解析により繊維の配向を評価し、可視化実験の結果と比較した。

その結果、可視化モデルコンクリートで観察された配向と UFC の繊維の配向が定性的に一致していることが示された。

幅の小さい試験体の片側から打込むと、繊維がコンクリートの流動方向と平行に斜め上方に配向し、幅の大きい試験体の片側から打込むと、繊維が斜め上方に配向し、中央側に傾く傾向となった。また、パネル状の型枠の中央から打ち込むと繊維が同心円状に配向する結果となった。

第6章の参考文献

- [1] L Vandewalle, D Dupont: Bending Test and Interpretation, Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete-Background and Experiences, RILEM publication PRO 31, pp.1-14, Bagneux, 2003
- [2] P Stahli, R Custer, J.G.M.V Mier: On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC, Materials and Structures, Vol.41, No.1, pp.189-196, 2008
- [3] W Pansuk, H Sato, Y Sato, R Shionaga: Tensile behaviors and fibre orientation of UHPC. Proceedings of second international symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany, pp.161-168, 2008
- [4] S.W Kim, S.T Kang, J.J Park, G.S Ryu: Effect of filling method on fibre orientation and dispersion and mechanical properties of UHPC. Proceedings of second international symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany, pp.185-192, 2008
- [5] P Stahli, J.G.M.V Mier: Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. Engineering Fracture Mechanics, Vol.74, pp.223-242, 2007
- [6] M.C Torrijos, B Barragan, R Zerbino: Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concrete. Construction and Building Materials, Vol.24, pp.1078-85, 2010
- [7] L Ferrara, M.D Prisco, R Khurana: Tailoring optimum performance for the structural use of self consolidating SRFC. Proceedings of 7th international RILEM symposium on fibre reinforced concrete, pp.739-750, Chennai, India, 2008
- [8] T.N.D Prasanth, R Gettu: On the distribution of fibres in self compacting concrete. Proceedings of 7th international RILEM symposium on fibre reinforced concrete, Chennai, India, pp.1147-1153, 2008
- [9] P Stahli, M Sutter, J.G.M.V Mier: Improving the mechanical properties of HFC by adjusting the filling method, Proceedings of the Fifth International RILEM workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5), Mainz, German, pp.23-30, 2007
- [10] I. Markovic, J.C Walraven, J.G.M.V Mier: Self-compacting hybrid-fibre concrete-mix design, workability and mechanical properties, Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp.763-775, 2003
- [11] S Grunewald: Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, 2004
- [12] L Vandewalle, G Heirman, F.V Rickstal: Fibre orientation in self-compacting Fibre reinforced concrete. Proceedings of 7th international RILEM symposium on fibre reinforced concrete, Chennai, India, pp.719-728, 2008
- [13] R Zerbino, J.M Tobes, M.E Bossio, G Giaccio: On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, Vol.34, pp.191-200, 2012
- [14] S.T Kang, B.Y Lee, J.K Kim, Y.Y Kin: The effect of fiber distribution characteristics on the flexural strength of steel fiber-reinforced ultra high strength concrete. Construction and Building Materials, Vol.25,

pp.2450-2457, 2011

- [15] D. Dupont, L. Vandewalle: Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, Vol.27, pp.391-398, 2005
- [16] L Martinie, P Rossi, N Roussel: Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.226-234, 2010
- [17] L Ferrara, A Meda: Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements, *Materials and Structures*, Vol.39, pp.411-420, 2006
- [18] B Boulekbache, M Hamrat, M Chemrouk, S Amziane: Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.1664-1671, 2010
- [19] 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
- [20] 橋本親典, 平井秀幸, 辻幸和, 田村真: 2軸強制練りミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構の可視化, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.15, No.1, pp.1037-1042, 1993
- [21] S.J Barnett, J.F Lataste, T Parry, S.G Millard, M.N Soutsos: Assessment of fiber orientation in ultra high performance fiber reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Materials and Structures*, Vol. 43, No.7, pp. 1009 – 1023, 2010
- [22] A Abrishambaf, J.A.O Barros, V.M.C.F Cunha: Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, *Cement and Concrete Research*, Vol.(51), pp.57-66, 2013
- [23] Rasband W (2008) ImageJ. National Institutes of Health, USA. <http://rsb.info.nih.gov/ij/>

第7章 標準曲げ試験体における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討

7.1. はじめに

第6章「可視化モデルによる超高強度繊維補強コンクリートの繊維の配向の評価」では、形状寸法が異なるUFC供試体中の繊維の配向を把握した。

本章では繊維の分散・配向とコンクリートの引張特性の関係を定量的に評価することを目的とし、切欠き深さの異なる曲げ供試体の3点曲げ試験を行い、J積分法 [1] により断面高さごとの引張軟化曲線を推定した。試験後、画像解析により破断面の繊維の配向を評価し、断面高さごとの引張強度と繊維本数および配向角度の定量的な関係について検討した。さらに、J積分で得られた引張軟化曲線を汎用解析ソフトDIANAを用いて解析を行い、J積分法による結果を検証した。

7.2. 実験概要

7.2.1 使用材料および配合

使用材料および配合は第6章、表-6.1と同様とした。材料、配合は仕様通りであり、 $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$ の鋼繊維を2vol%混入したものである。

7.2.2 練り混ぜおよび養生方法

練り混ぜは、容量120Lの2軸強制練りミキサを用い、一回の練り混ぜ量は55リットルとし、合計2バッチを行った。練り混ぜ方法は、プレミックス粉体をミキサに入れ30秒間空練りし、その後、水と減水剤を投入し、所要の流動性が得られるまで練り混ぜを行い、最後に繊維を投入し、さらに、2分間練り混ぜを行った。

養生方法については、土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」[2]に従って、打込み後、一次養生として20℃-48時間の封緘養生を行い、その後打型し、さらに、二次養生として90℃-48時間(昇降温速度15℃/hr)の蒸気養生を行った。

7.2.3 供試体の作製方法

表-7.1には本実験で用いた供試体の一覧を示す。図-7.1は供試体の仕様を示す。本実験では100×100×400mmの角柱供試体を用い、練り混ぜ後、コンクリートの注ぎ口を型枠の片端に固定しコンクリートを型枠内で流動させて打ち込む方法を用い、各種類5本ずつを作製した。標準養生終了後、型枠底面から切欠きをそれぞれに0, 15, 30, 45mmを導入した。また、前節に説明した通り、型枠側面のせき板効果を排除するために、筆者らのこれまでの研究成果を参考に、供試体の側面にも10mmの切欠きを導入した。

表-7.1 供試体の一覧

試験体	切り欠き深さ (mm)	数量 (本)
A	0	5
B	15	
C	30	
D	45	

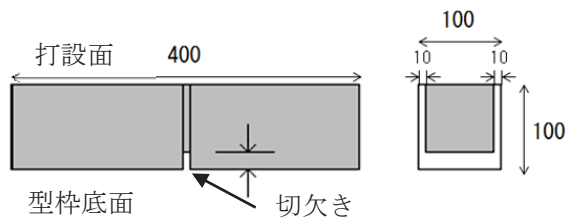


図-7.1 供試体

7.2.4 力学特性の試験方法

図-7.2 に力学特性の試験方法を示す。すべての供試体について、切欠きはりの3点曲げ試験を行い、荷重 (P) , 供試体底面ひび割れ開口変位 (CMOD) , ひび割れ先端開口変位 (CTOD) および載荷点変位 (LPD) を計測した。試験は「切欠きはり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」(JCI-S-002-2003) [3] に準じて行ったが、ただし、載荷方向は、打設面から載荷を行った。

載荷には、手動メカニカルジャッキを使用し、荷重の検出には容量 10kN のロードセル、開口変位の検出には精度 1/2000mm のクリップゲージ、載荷点変位の計測には精度 1/500mm の高感度変位計を用いた。

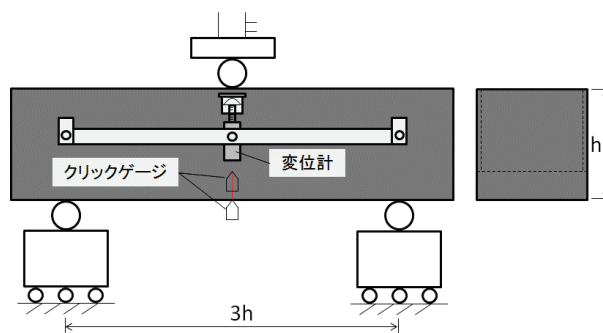


図-7.2 切欠きはりの3点曲げ試験

7.2.5 断面高さごとの引張軟化曲線

計測された荷重 (P) , 載荷点変位 (LPD) およびひび割れ先端開口変位 (CTOD) からJ積分により断面高さごとの引張軟化曲線を推定した。

7.2.6 画像解析による破断面の繊維配向の評価

切り欠きはりの3点曲げ試験を行った後に、各切欠き深さごとに計測された荷重-ひび割れ開口変位の結果から、平均値に近い特性を有する供試体を1本ずつ選定し、破断面直近でコンクリートカッターを用い切断し、切断面内の繊維本数および配向角度を測定した。測定方法は以下の通りである。

図-7.3に示すように、倍率50倍のマイクロスコープで1画面の寸法を4×6mmとして供試体切断面全体(54画面)を撮影した。図-7.4にデジタルマイクロスコープで撮影した写真の一例を示す。図中、白い面積が鋼繊維の切断面であり、繊維が切断面に対して垂直に配向している場合は真円になり、斜めに配向すると、繊維の切断面は楕円になる。1画面ごとに繊維の本数と各繊維の切断面の長径(L_a)と短径(L_b)を計測し、式[1]により繊維の配向を評価することとした。また、繊維の本数と配向係数 η の積を有効繊維本数として、1画面ごとに有効繊維本数 N_{eff} を求め、切断面内の有効繊維数 N_{eff} を計算した。

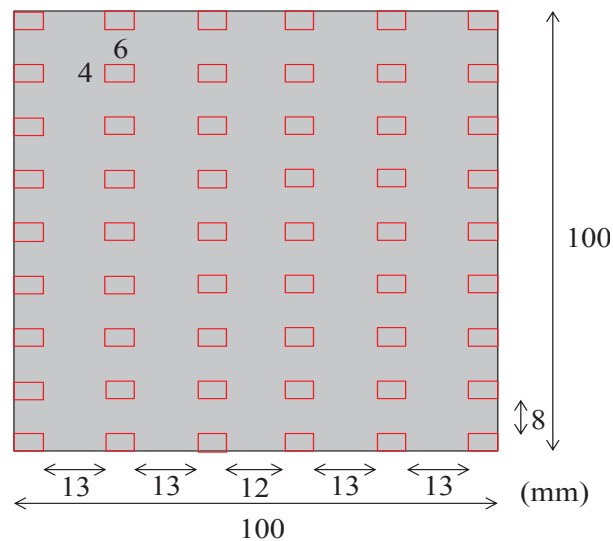
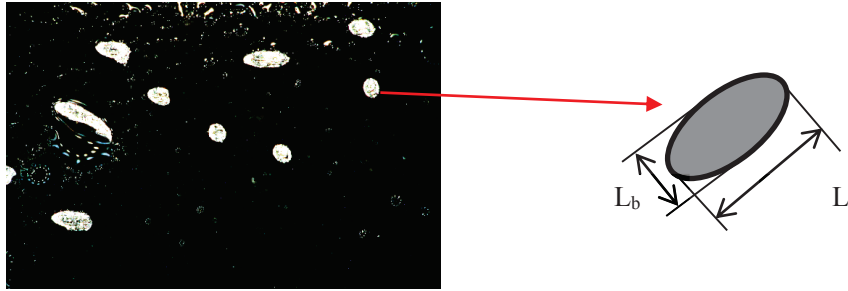


図-7.3 切断面撮影方法



$$\eta = \frac{1}{N} \sum_1^N \sin \theta = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{L_b}{L_a} \quad [1]$$

ここで、N：一画面あたりの繊維本数

η：配向係数

図-7.4 有効繊維本数

7.2.7 DIANA 解析ソフトによる J 積分の結果検証

J 積分と逆解析で得られた引張軟化曲線を入力値として汎用解析ソフト DIANA を用いて解析し、J 積分と逆解析の結果を検証した。供試体の要素分割は、図 - 7.5 に示すように、全体を弾性体とし、供試体中央に接合要素を配置しひび割れをモデル化した。解析は、逆解析および J 積分の結果に基づいて、接合要素に多直線引張軟化曲線を与え、曲げ応力と載荷点の変位を求めた。表-7.2 に解析の詳細を示す。逆解析および J 積分の結果は次節で述べるが、図 - 7.6 に各解析に用いた多直線引張軟化曲線を示す。

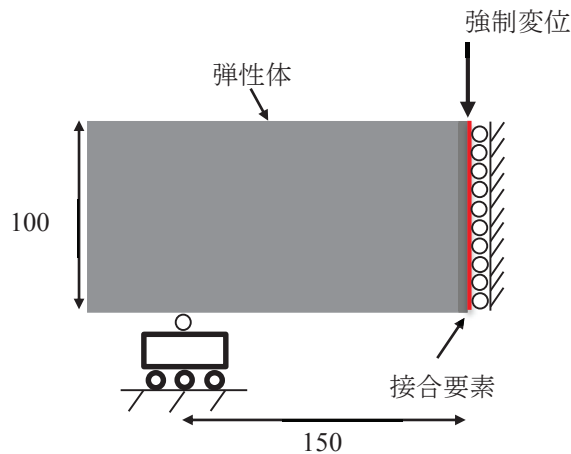


図 - 7.5 解析モデル

表-7.2 解析 Case 一覧

	入力した引張軟化曲線
Case1	全断面： 切欠き 0mm 供試体の逆解析結果
Case2	高さごとに引張軟化曲線を入力 断面 0-15mm： 切欠き 0-15mm の J 積分 断面 15-30mm： 切欠き 15-30mm の J 積分 断面 30-100mm： 切欠き 30-45mm の J 積分
Case3	全断面： 切欠き 0-15mm の J 積分
Case4	全断面： 切欠き 15-30mm の J 積分
Case5	全断面： 切欠き 30-45mm の J 積分

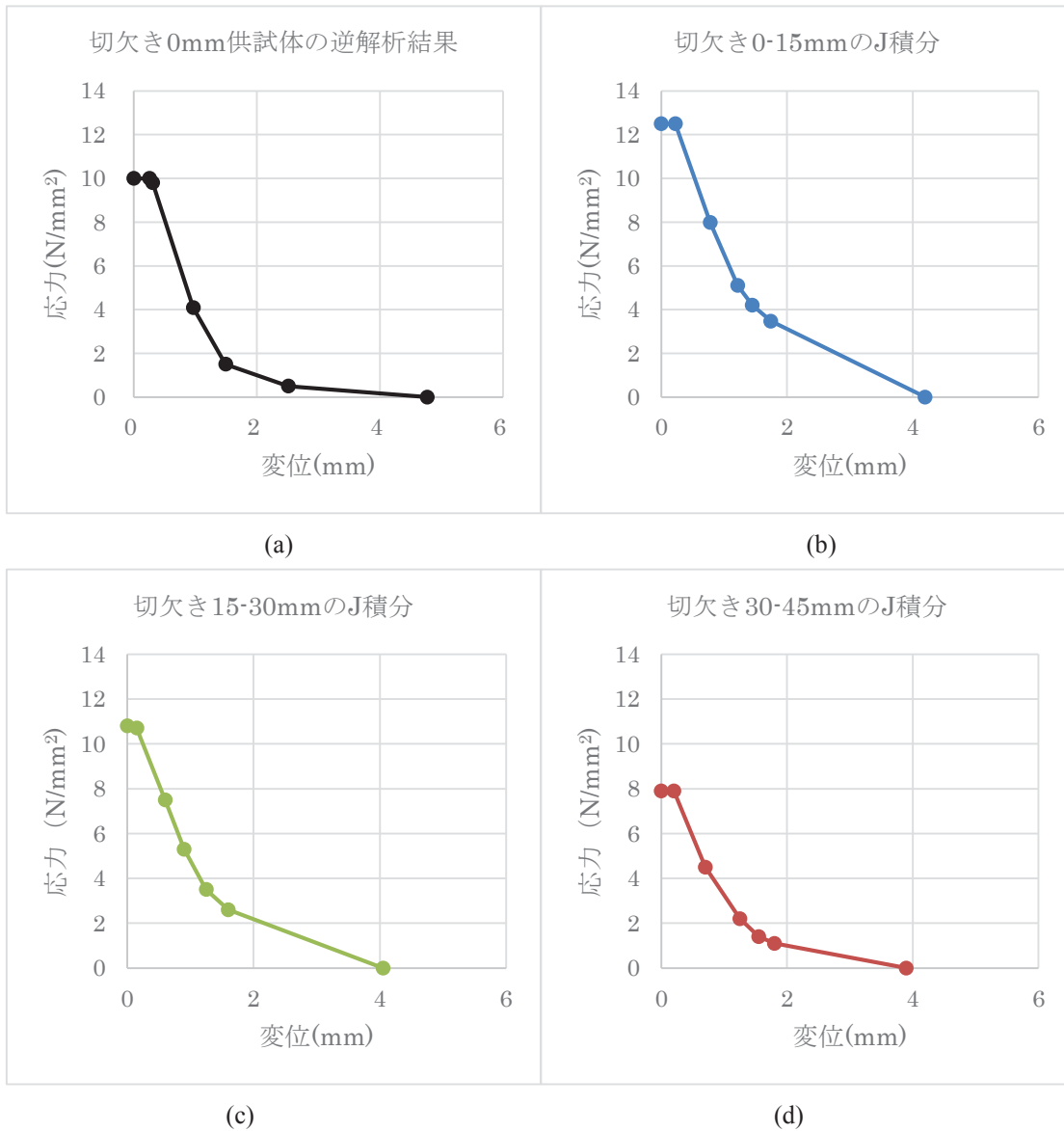


図 - 7.6 多直線引張軟化曲線

7.3. 実験結果

7.3.1 フレッシュ性状および圧縮強度

コンクリートのフレッシュ性状試験結果について、2バッチのコンクリートのフロー値はほぼ同程度でそれぞれに215mm, 220mmとなった。空気量はそれぞれに4.5%, 4.2%程度となった。図-7.7には圧縮応力-ひずみ曲線を示す。圧縮強度は 185N/mm^2 で、ヤング係数は 50.9KN/mm^2 となった。

7.3.2 曲げ試験結果

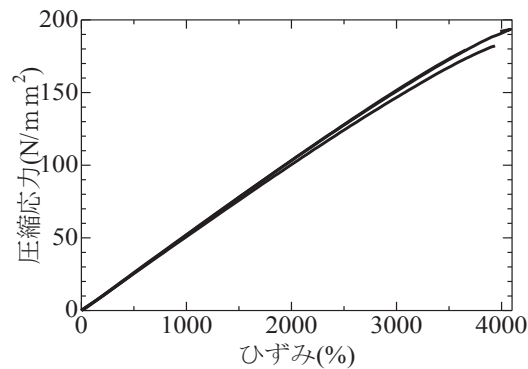


図-7.7 圧縮応力-ひずみ曲線

図-7.8には各切欠き深さ供試体の荷重-載荷点変位の平均曲線を示す。図-7.9には各切欠き深さ供試体の荷重-ひび割れ先端開口変位平均曲線を示す。図-7.10には各シリーズの曲げ応力-ひび割れ開口変位曲線を示す。図-7.11には各シリーズの供試体の実測値からJ積分方法により得られた断面高さごとの引張軟化曲線を示す。図-7.12には荷重-ひび割れ開口変位曲線から逆解析により求められた引張軟化曲線を示す。

図-7.11により、型枠底面から0~15mm, 15~30mmおよび30~45mmの位置において、断面高さごとに明確な差が生じ、型枠底面に近いほど、引張応力が高くなり、引張強度がそれぞれに 13N/mm^2 , 11N/mm^2 , 8N/mm^2 となった。

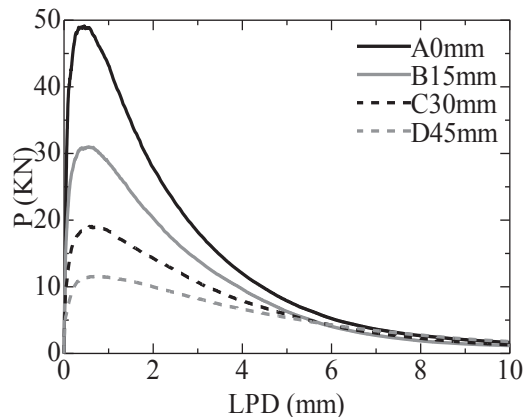


図-7.8 各切欠き深さ供試体のP-LPD曲線

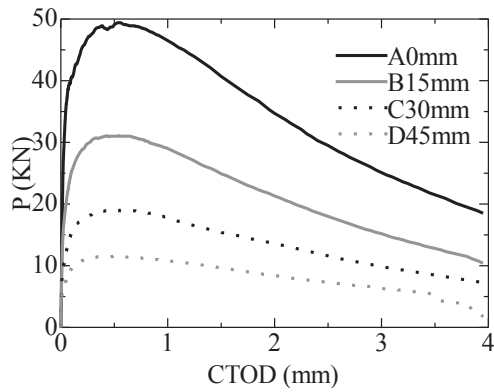


図-7.9 各切欠き深さ供試体のP-CTOD曲線

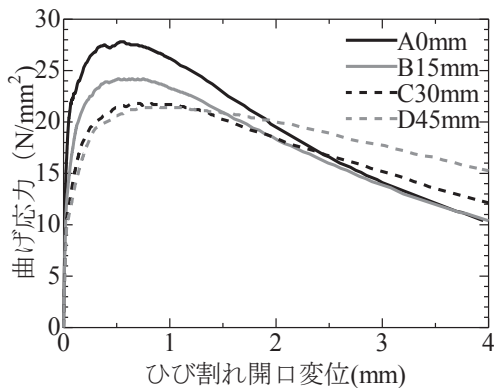


図-7.10 曲げ応力-ひび割れ開口変位曲線

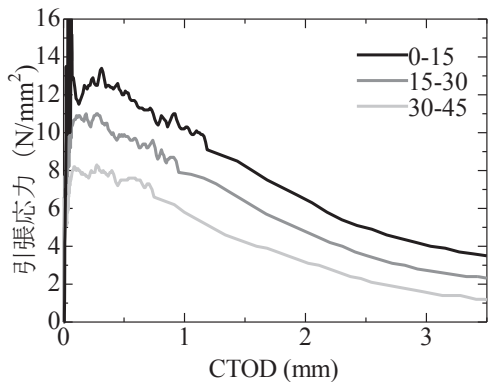


図-7.11 実測値からJ積分により引張軟化曲線

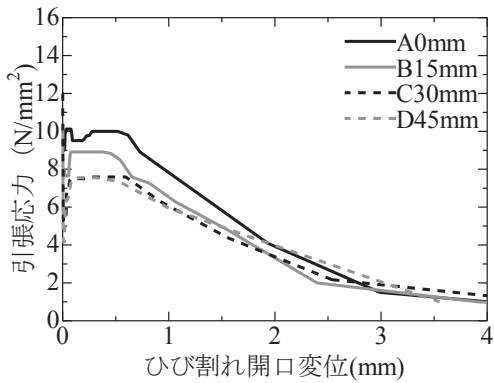


図-7.12 引張応力-ひび割れ開口変位曲線

7.3.3 破断面の画像解析結果

図-7.13にはマイクロ스코プの撮影範囲である(4×6mm)の区画あたりの繊維本数分布図を示す。打設面から型枠底面に近づくほど、繊維本数が増加する傾向が見られた。また、断面の中央部分は側面付近より繊維本数が少なくなった。

図-7.14には4×6mmの区画あたりの繊維の配向係数を示す。型枠底面から30mm以内、配向係数 η がほぼ0.8以上となった。すなわち、この範囲では繊維が切断面に対してほぼ垂直になっていると推定される。

切断面の幅方向の中央部分では、型枠底面から打設面に近づくにつれて、配向係数 η が低減する傾向が見られた。すなわち、繊維が切断面に対して徐々に斜め上に配向していることを推定される。特に、型枠底面付近と比べ、切断面上部では配向係数 η が3割程度低減した。

図-7.15には有効繊維数 N_{eff} の分布図を示す。特に、断面の幅方向の中央部分では打設面付近に比べ、型枠底面付近での N_{eff} は2倍以上になった。また、側面型枠付近では、切断面中央部分より N_{eff} が高くなる傾向も見られた。すなわち、型枠底面および側面付近では繊維は切断面に対して垂直に近い状態に配向しているのに対して、断面の上部では断面に対して繊維が斜めに配向していると推定される。

図-7.16にはデジタルマイクロ스코プで撮影した写真の一例を示す。図名は各写真の断面内での位置を示す。型枠底面および側面付近では繊維の形状は円となり、切断面の上部位置では繊維が楕円になっている。すなわち、型枠底面および側面では繊維は切断面に対して垂直に近い状態に配向しているのに対して、断面の上部位置では切断面に対して繊維が斜めに配向していると推定される。

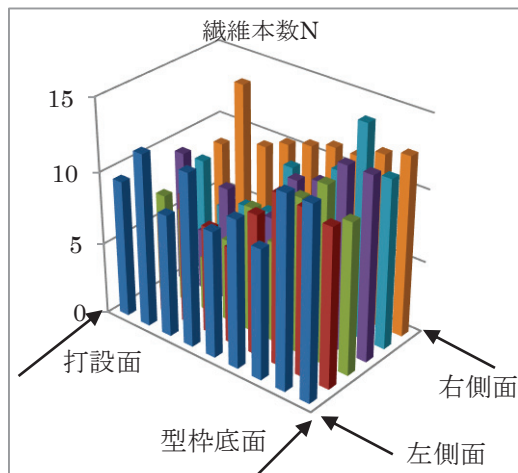


図-7.13 切断面の繊維分布図 ($N/4 \times 6\text{mm}$)

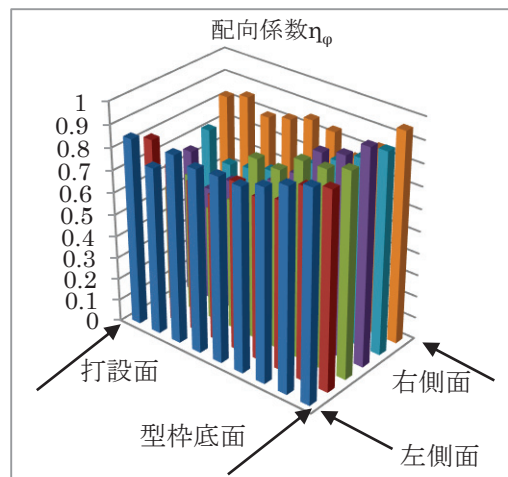


図-7.14 各写真中の配向係数 η_ϕ

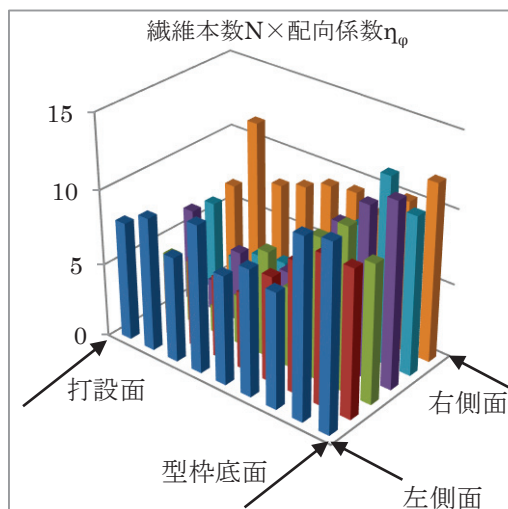


図-7.15 有効繊維数 $N_{\text{eff}}/4 \times 6\text{mm}$

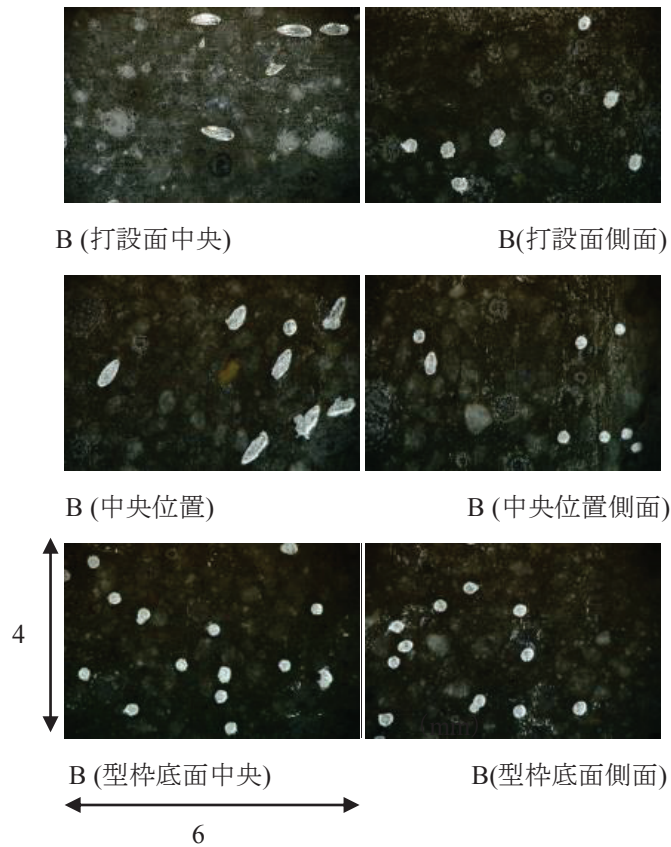


図-7.16 切断面の繊維の形状

7.3.4 最大引張応力と有効繊維本数 N_{eff} の関係

図-7.17 には断面高さごとの J 積分法で求められた引張軟化曲線のひび割れ発生後の最大引張応力と有効繊維本数の関係を示す。ただし、最大引張応力は高さ 0~15mm 区間の値を基準とした。また、有効繊維数はその高さ内の平均値とし、高さ 0~15mm 区間の値を基準としたものである。同図より、断面高さごとに最大引張応力の変化の割合は有効繊維数の変化の割合とほぼ同様な傾向が示された。

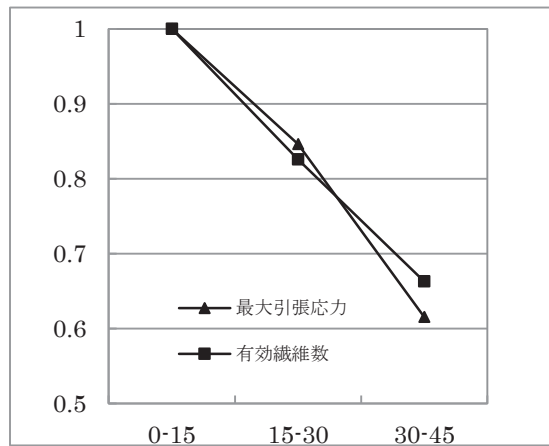


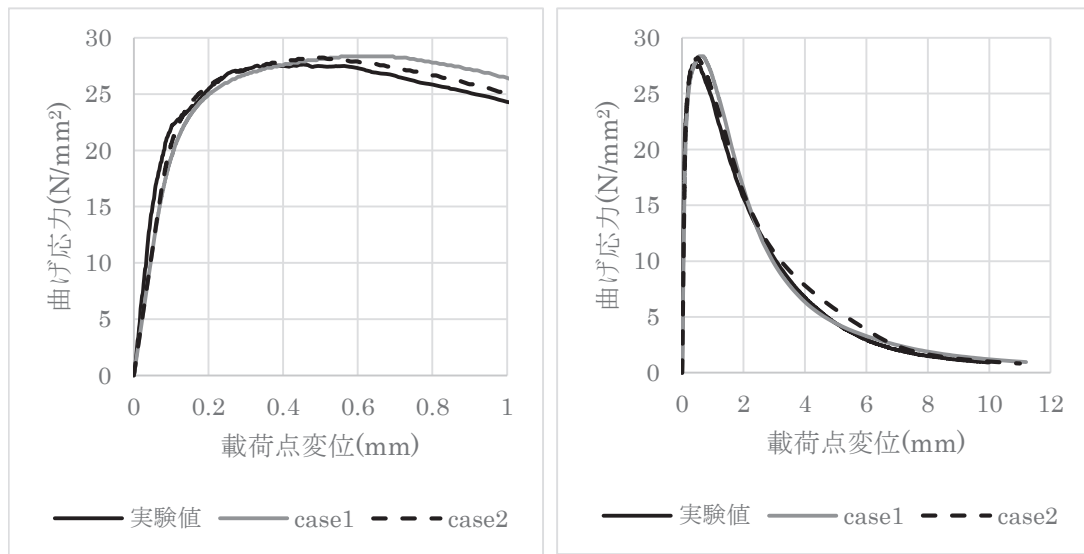
図-7.17 最大引張応力と有効繊維本数の関係

7.3.5 DIANA 解析結果

図-7.18 に切欠き 0mm 供試体の実験値および Case1 と Case2 の解析結果を示す。逆解析と J 積分で得られた引張軟化曲線を用いて解析した結果は、実験値とよく一致した。

逆解析は断面の平均的な $\sigma - \omega$ を与えるのに対して、J 積分法は局所的な $\sigma - \omega$ を与える。Case1 は一致するのは当然であるが、Case2 もよく一致し、J 積分法により求められた $\sigma - \omega$ が妥当であることを示していると考えられる。

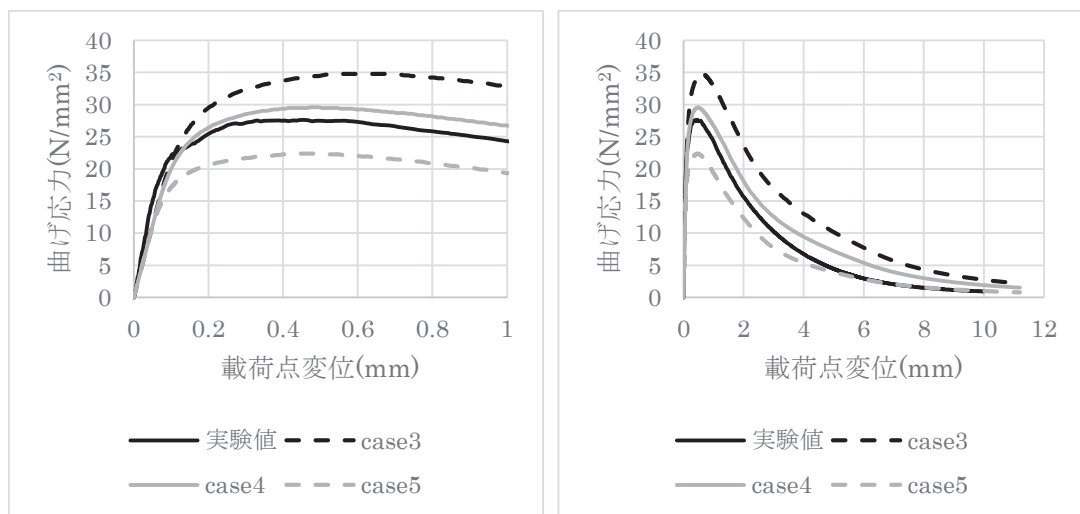
また、図-7.19 に Case3, 4, 5 の解析結果を示す。引張軟化曲線の違いにより供試体の曲げ応力-載荷点曲線は変化し、Case3 と Case5 では最大曲げ強度に 4 割程度の差が生じることが示された。



(a)初期

(b)全体

図 - 7.18 case1, 2 の解析結果



(a)初期

(b)全体

図 - 7.19 case3, 4, 5 の解析結果

7.4. まとめ

本章で得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 曲げ供試体を対象として、切欠き深さの異なる供試体の3点曲げ試験を行い、J積分により断面高さごとの引張軟化曲線を推定した。その結果、型枠底面に近いほど、最大引張応力が高くなることが明らかになった。

(2) 3点曲げ試験後、切欠き直近の切断面の繊維情報をデジタルマイクロスコープで撮影し、有効繊維本数を計算した。その結果、型枠底面および側面付近では有効繊維本数が大きくなり、切断面高さ方向に沿って低下する傾向が示された。


(3) 断面高さごとに最大引張応力の変化の割合は有効繊維数の変化の割合とほぼ一致した。

第7章の参考文献

- [1] V.C Li, R.J Ward: A Novel Testing Technique for Post-peak Tensile Behavior of Cementitious Material, Fracture Toughness and Fracture Energy, pp.183-195, Balkema, 1989
- [2] 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工方針（案）
- [3] 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 JCI-S-002-2003

第 8 章 パネル部材における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討


8.1 はじめに

自己充填性を有する UFC をパネル状の型枠に打ち込む場合、パネルの中央から打ち込むと繊維が同心円状に配向し、中心から離れるほどこの傾向が顕著になることが報告されている [1-5]。この配向のメカニズムは第 6 章、 に示すように説明ことが出来る。

本章では、繊維の配向により曲げ強度がどの程度変化するかを実験的に確認するため、繊維が同心円状に配向している円形パネルから、所定の角度で供試体を切出し、曲げ載荷試験と破断面の画像解析を行った。また、長方形パネルについても中心 1 点また 2 点同時に UFC を打込み、曲げ供試体を切り出し、曲げ強度と繊維の配向を確認した。

8.2. 実験概要



8.2.1 使用材料および配合


使用材料および配合は第 6 章、 と同様とした。材料、配合は仕様通りであり、 $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$ の鋼繊維を 2vol% 混入したものである。

8.2.2 練混ぜおよび養生方法

練混ぜは、容量 120L の 2 軸強制練りミキサを使用した。打込み速度は約 3L/min とした。供試体の養生は、一次養生として $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室で 48 時間行い、その後二次養生として 90°C で 48 時間の蒸気養生を行った。

8.2.3 円形パネル

本研究で用いた円形パネルを に示す。円形パネルの寸法は直径 1200mm、厚さ 50mm である。円形パネルの中心からコンクリートを連続的に打込んだ。前述の通り、既往の研究 [1 - 5] によれば、パネルの中心からコンクリートを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。このことを確認するために予備試験として、著者らが提案した可視化モデルコンクリートを用いて 1 辺が 1m の正方形パネルの中心から打込む試験を行った [6]。その結果、 に示すように繊維が同心円状に配向することが確認された。

以上のことを参考に、円形パネルにおいて繊維の配向が曲げ強度にどの程度に影響するかを検討するために、 に示すように、中心から 30cm と 50cm の位置において、パネルの半径方向に対して 0° 、 30° 、 60° および 90° の方向に $50 \times 50 \times 200\text{mm}$ の供試体を 3 体ずつ切出した。なお、 90° 場合はパネル中心から半径方向に連続的に 8 体の供試体を切出した。

8.2.4 長方形パネル

図 - 8.2 に示すように、1200×600×50mm の長方形パネルを対象にして、中心 1 点および 2 点からコンクリートを打込む方法により、長方形パネル試験体を 2 体作製した。コンクリート硬化後、図 - 8.2 に示すように、70×50×200mm の供試体を切り出した。切出した供試体は対称性から 1 から 15 までの番号を付し、さらに番号の前に E (1 点打込み) と F (2 点打込み) を付けてパネル内の位置と打込み方法を表すこととした。

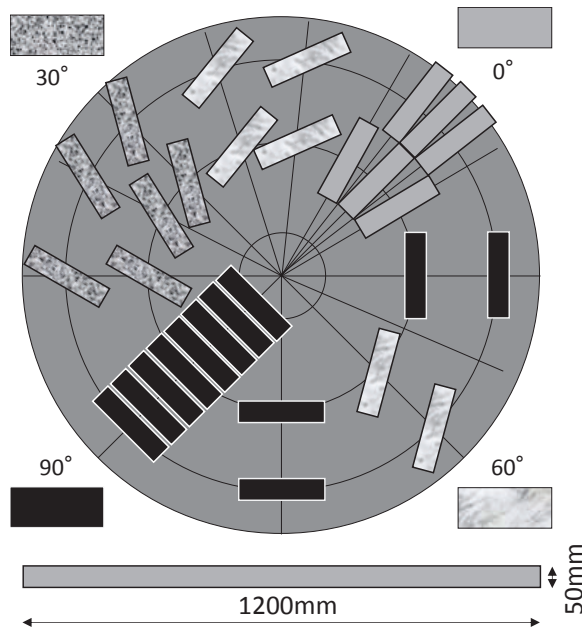


図 - 8.1 円形パネルと切断方法

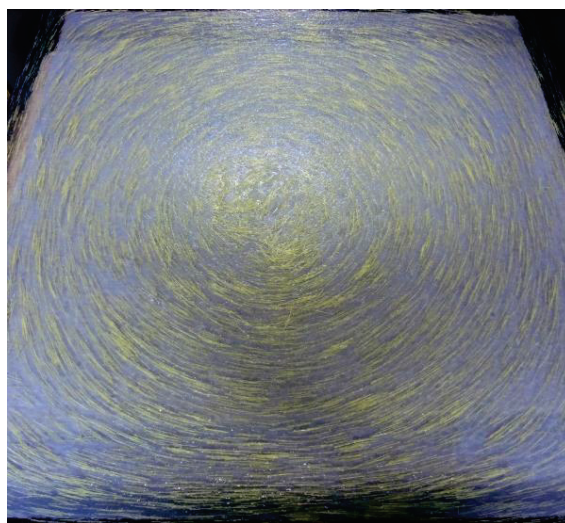


写真 - 8.1 可視化モデルによる繊維の配向 [6]

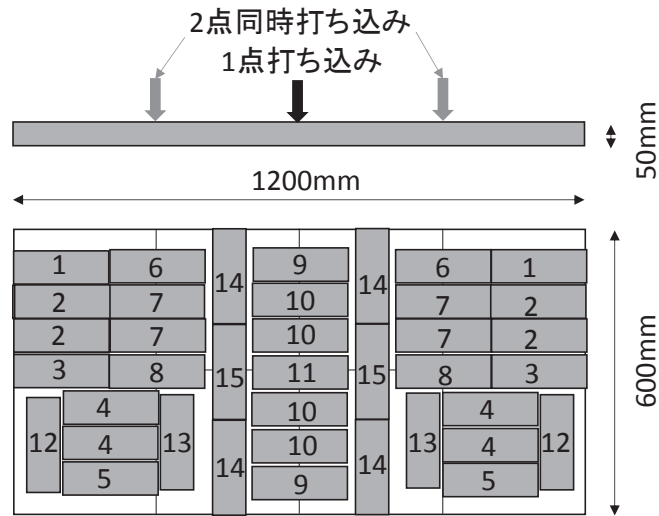


図 - 8.2 長方形パネルの切断方法

8.2.5 曲げ試験方法

円形パネルと長方形パネルから切出した供試体は型枠底面側に 10mm の切欠きを導入し、3 点曲げ試験を行った。曲げ試験は図 - 8.3 に示すような切欠きはりの 3 点曲げ試験であり、荷重－開口変位曲線を計測した。試験は「切欠きはり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]（JCI-S-002-2003）に準じて行った。また、3 点曲げ試験を行った後に破断面における繊維の配向状況も観察した。

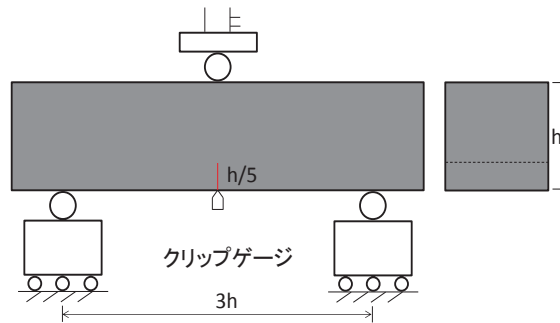


図 - 8.3 切欠きはりの 3 点曲げ試験

8.2.6 破断面の画像解析による繊維配向の評価

3 点曲げ試験を行った後に、円形パネルにおいて中心から 50 cm の位置で切出した供試体の破断面を対象にして、画像解析を行い、繊維の配向を評価するとともに曲げ強度との関係も検討した。

画像解析の手順は以下の通りである。まず、破断面をサンドペーパーを用いて研磨する。その次に、デジタルマイクロスコープを用いて破断面の写真を撮影する。最後に、撮影した写真を画

像解析ソフト ImageJ[8]を用いて画像解析を行う。解析後、繊維の配向角度(θ)、切断面内の総繊維本数(N_T)、 1cm^2 あたりの繊維本数(N_{ua})と繊維の方向角度(φ)を求めた。繊維の配向角度は、繊維が切断面に対して垂直に配向している場合 90° となり、繊維が切断面に対して平行に配向している場合 0° となる。また、繊維の方向角度は繊維の軸方向と破断面の底辺方向の角度と定義する。また、断面内の総繊維本数と平均配向角度の正弦値の積を断面内有効繊維本数 (N_{eff}) として計算した。

8.3. 実験結果

8.3.1 円形パネルから切出した供試体の曲げ強度

図 - 8.4 に半径方向に対して 90° の方向 (周方向) に切出した供試体の曲げ応力-開口変位曲線 (σ - CMOD 曲線) を示す。なお、同図に示した供試体は、図 - 8.1 に示したように、中心から半径方向に連続的に切出したものである。図 - 8.5, 8.6 にパネル中心から 30cm および 50cm の位置において半径方向に対して 0° , 30° , 60° および 90° に切出した供試体の 3 点曲げ試験結果を示す。図中、細線は各供試体の結果であり、太線は平均値を示す。

図 - 8.4 に示すように、半径方向に対して 90° 方向に切出した供試体の最大曲げ応力は 50 N/mm^2 程度で、中心からの距離にかかわらずほぼ一定となった。

一方、図 - 8.5, 8.6 に示すように供試体の切出し角度を変化させると、角度に応じて最大曲げ応力が大きく変化した。図 - 8.5 に示すように、 $r=30\text{cm}$ の位置では半径方向に対して 60° と 90° で切出した供試体は、ひび割れ発生時に剛性は低下するが応力低下をすることはなく、応力は上昇し続け最大曲げ応力はそれぞれ 43 N/mm^2 と 48 N/mm^2 程度になった。これに対して、半径方向に対して 0° と 30° で切出した供試体は、ひび割れ発生時に応力が一旦低下し、その後再び応力は上昇するが最大曲げ応力はそれぞれ 20 N/mm^2 と 25 N/mm^2 程度となり、 60° と 90° に切出した場合の 5 割程度になった。また、表 - 8.1 に示すように、 $r=50\text{cm}$ の位置でのひび割れ発生後の最大曲げ応力は、 90° で切出した場合に 50 N/mm^2 であるのに対して、 60° , 30° および 0° で切り出した場合には、それぞれ 38 N/mm^2 , 17 N/mm^2 , および 5 N/mm^2 となり、 90° の場合と比べ、それぞれ 8 割, 4 割および 1 割程度となった。

既往の研究ではパネルの中心から打込んだ場合、中心から離れるほどコンクリート中の繊維が同心円状に配向する傾向が強くなると報告されている。図 - 8.5 と図 - 8.6 を比較すると、切出し位置が中心に近い $r=30\text{cm}$ に比べ $r=50\text{cm}$ の方が切出し角度による曲げ強度の変化が顕著になっており、既往の知見と一致した結果となった。これは同一切出し角度の場合でも、切出し位置により、繊維の配向が異なることを示していると考えられる。しかし、 90° の場合には図 - 8.4 に示した通り中心からの距離にかかわらず最大曲げ応力はほぼ一定になっている。したがって、切出し角度 90° の場合では、最大曲げ応力に対する配向の影響が小さいが、 60° 以下では配向の影響が大きいことが推測される。

表 - 8.1 各供試体の最大曲げ応力比率

切出し角度	最大曲げ応力	応力比率
90°	50	1.0
60°	38	0.8
30°	17	0.4
0°	5	0.1

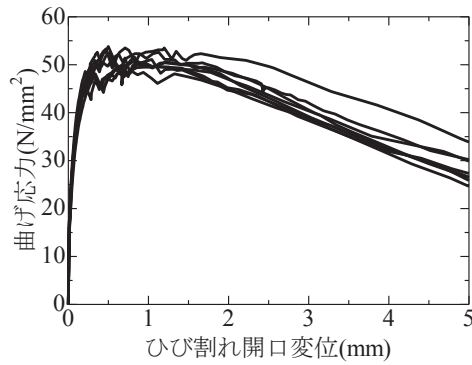


図 - 8.4 90° 供試体のσ-CMOD 曲線

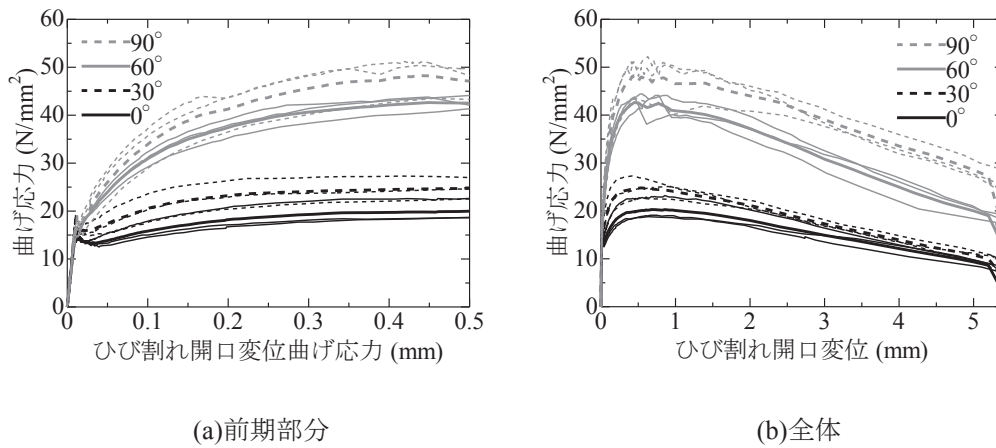


図 - 8.5 r=30cm のσ-CMOD 曲線

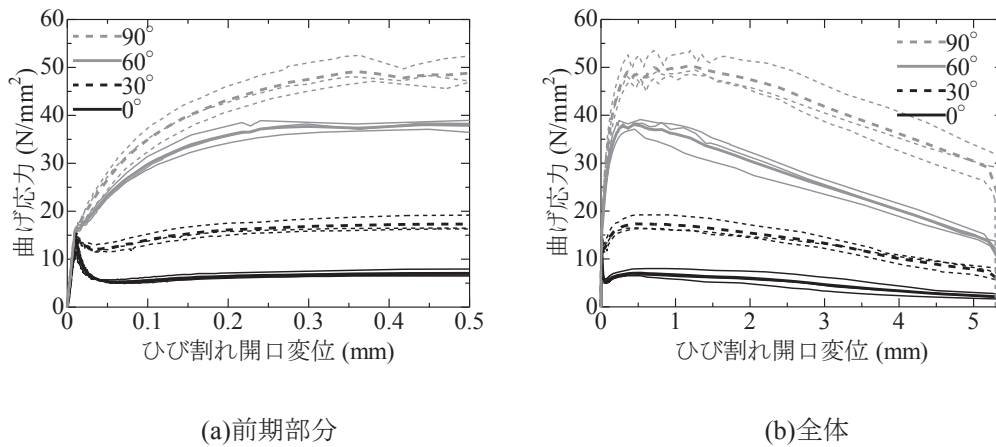


図 - 8.6 r=50cm のσ-CMOD 曲線

8.3.2 長方形パネルから切出した供試体の曲げ強度

(1) 中心 1 点から打込む場合

図 - 8.7 に長方形パネルの長辺方向に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。なお、ここでは型枠の長辺からの距離ごとに分けて示した。パネル長辺方向中央断面の供試体 E9, E10, E11 の最大曲げ応力は 50N/mm^2 程度になり、円形パネルにおいて 90° 方向に切出した供試体と同程度の曲げ応力を得られた。長辺方向の型枠に沿った供試体 E1, E5, E6 の最大曲げ応力は中央の E9 より若干低下し、 40N/mm^2 程度になった。また、パネル短辺方向中央断面の E3, E8 の最大曲げ応力は 30N/mm^2 であった。

図 - 8.8 に長方形パネルの短辺方向に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。パネル中央付近の供試体 E15 の最大曲げ応力は 40N/mm^2 程度であるのに対して、長辺方向の型枠に近い E14 では 18N/mm^2 程度に低下する結果となった。また、短辺方向の型枠に沿った E12 の最大曲げ応力は E15 と同程度となった。

(2) 2 点から打込む場合

図 - 8.9 に長辺方向に平行に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。供試体 F6, F7 の最大曲げ応力は 50N/mm^2 となり、円形パネルの 0° 方向および 1 点打込みの E9, E10 と同程度になった。一方、コンクリートの合流部であるパネルの長辺方向中央部から切出した供試体 F9, F10, F11 では、ひび割れ発生後の最大曲げ応力は 2N/mm^2 程度となり、繊維による架橋効果がほとんどない結果となった。

図 - 8.10 には短辺方向に切出した供試体の σ - CMOD 曲線を示す。供試体 F15 の最大曲げ応力は 50N/mm^2 程度であるのに対して、供試体 F13, F14 では応力が大きく低下し、供試体 F12 では低下の度合いは小さくなった。

以上、ひび割れ後の最大曲げ応力の変化の状況および供試体破断面の繊維配向状況から、長方形パネルの中心 1 点から打ち込む場合と 2 点から打ち込む場合の繊維の配向は図 - 8.11 のようになっているものと推察される。

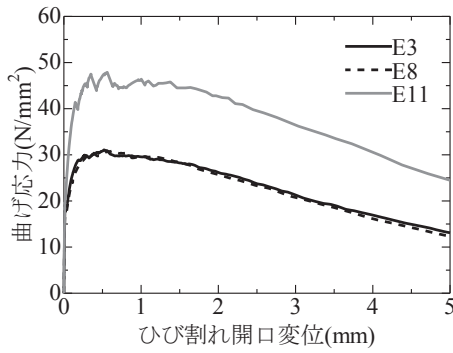
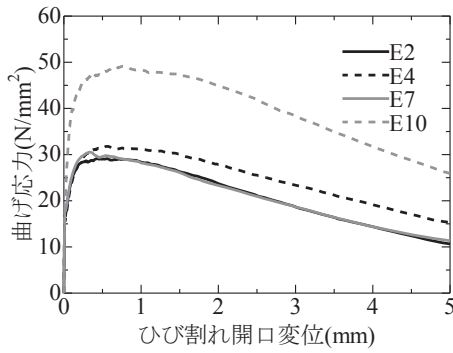
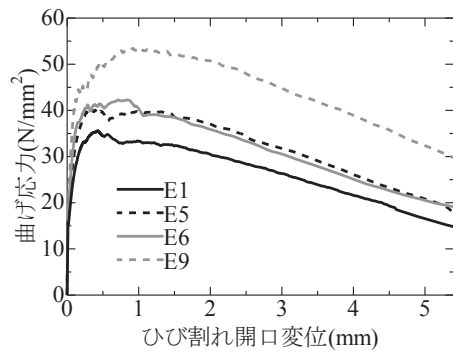


図 - 8.7 1点打込みパネル長辺方向の曲げ強度

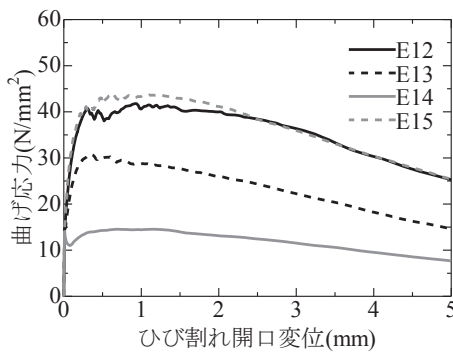


図 - 8.8 1点打込みパネル短辺方向の曲げ強度

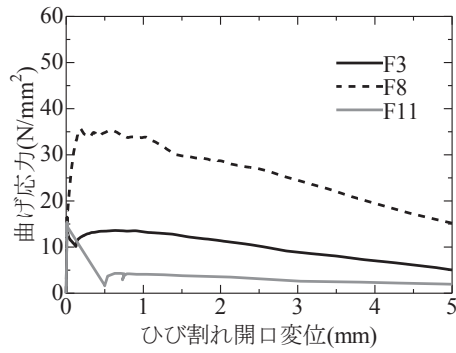
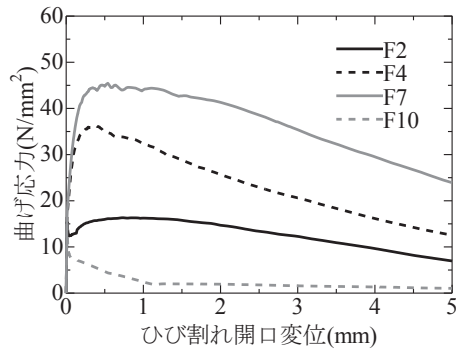
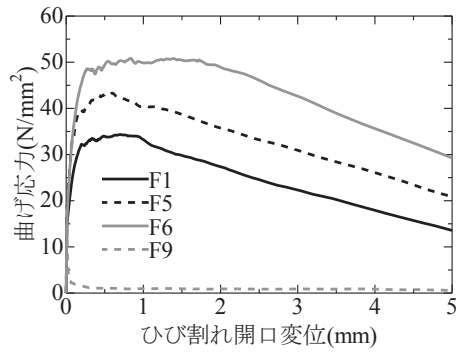


図 - 8.9 2点打込みパネル長辺方向の曲げ強度

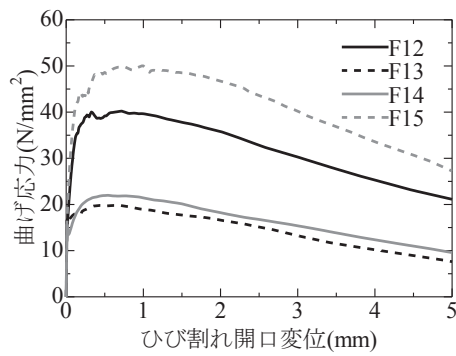


図 - 8.10 2点打込みパネル短辺方向の曲げ強度

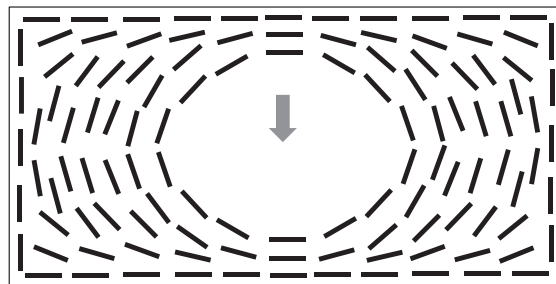
8.3.3 供試体破断面の観察結果

円形パネルにおいて半径方向に対して 0° 、 30° 、 60° および 90° で切出した供試体の破断面の繊維の状況は第6章、図 - 6.21 に示す。写真より、破断面において繊維が一定方向に配向していることが明確に観察され、その方向も繊維が同心円状に配向することから推定される方向とほぼ一致している。

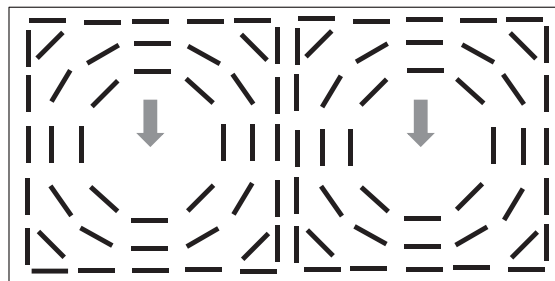
また、図 - 8.11 には長方形パネルで2点から打込んだ場合のコンクリートの合流部（供試体 F9,10,11）の破断面を示す。合流部では繊維の数が少なく、しかも破断面に対して平行に配向しており、繊維による架橋効果が期待できないことを示している。なお、長方形パネルから切出した供試体では、断面の高さ方向で配向が変化するものも見られたが、全体的な配向は図 - 8.12 の通りであった。



図 - 8.11 コンクリートの合流部の破断面



(a) 1点打込み



(b) 2点打込み

図 - 8.12 1点と2点打ち込む場合の繊維配向予測図

8.3.4 破断面の画像解析結果

画像解析結果の詳細を第 6 章, 6.3.2 に述べた。

表 - 8.2 に画像解析結果（切欠き部除き）の一覧を示す。図-8.13 に 90° 供試体を基準し、各供試体の曲げ強度と有効繊維本数の関係を示す。同図より、繊維の配向角度の変化にともなう曲げ強度の変化の割合は、配向角度の変化にともなう破断面における有効繊維本数の変化の割合とほぼ一致することを明らかにした。

表-8.2 画像解析結果

供試体	平均配向角度 θ (°)	総繊維本数 N_T (本)	総有効繊維本数 (本)	曲げ強度 (N/mm ²)
0°	23	166	65	6.6
30°	33.5	475	262	16.45
60°	54	810	655	38.1
90°	64.5	907	819	49

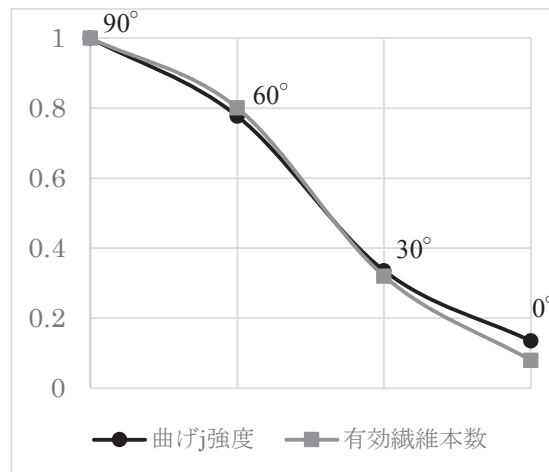


図-8.13 曲げ強度と有効繊維本数の関係

8.4 まとめ

本章で得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 円形パネルに UFC を中心から打込むと繊維は同心円状に配向し、その結果、パネルから切出した供試体のひび割れ発生後の最大曲げ応力は、切出した角度により変化し、半径方向に対して 0° と 90° で切出した場合では、1:10 程度の差が生じることが確認できた。また、破断面の画像解析の結果から、繊維の配向角度の変化にともなう曲げ強度の変化の割合は、配向角度の変化にともなう破断面における有効繊維本数の変化の割合とほぼ一致することを明らかにした。

(2) 長方形パネルにおいて、中心 1 点から打ち込んだ場合、繊維の配向は楕円状になることがパネルから切り出した供試体のひび割れ発生後の最大曲げ応力から推測された。また、2 点から同時に打込んだ場合も、それぞれの打込み位置を中心に同心円状に配向することが推測された。さらにコンクリートの合流部が形成され、合流部では繊維の架橋効果がほとんど期待できない結果となることが確認できた。

第 8 章の参考文献

- [1] S.T Kang, J.J Park, G.S Ryu, S.W Kim: Investigation of fibre alignment of UHSFRC in flexural members. Proceedings of 8th international symposium on utilization of high-strength and high-performance concrete, pp.709-714, Tokyo, 2008
- [2] S.J Barnett, J.F Lataste, T Parry, S.G Millard, M.N Soutsos: Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, Materials and Structures, Vol.43, No.7, pp.1009-1023, 2010
- [3] B Boulekbache, M Hamrat, M Chemrouk, S Amziane: Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, Construction and Building Materials, Vol.124, No.9, pp.1664-1671, 2010
- [4] S.H Kwon, S.T Kang, B.Y Lee, J.K Kim: The variation of flow-dependent tensile behavior in radial flow dominant placing of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(UHPRCC), Construction and Building Materials, Vol.33, pp.109-121, 2012
- [5] A Abrishambaf, J.A.O Barros, V.M.C.F Cunha: Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, Cement and Concrete Research, Vol.51, pp.57-66, 2013
- [6] 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
- [7] JCI 規準: 切欠きはり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 JCI-S-002
- [8] W Rasband (2008) ImageJ. National Institutes of Health, USA. <http://rsb.info.nih.gov/ij/>

第9章 結論

9.1 はじめに

本論文は圧縮強度が通常のコンクリートの約5~10倍となるUFCを対象として、その力学特性に大きな影響を及ぼすコンクリート内部の繊維の配向について検討したものである。UFCは自己充填型のコンクリートであり高流動性を有しており、施工時に型枠内でコンクリートが流動するため、繊維の配向性が顕著に現れることが特徴である。

本論文では、UFCを粘性を有する無色透明な高吸水性高分子材料でモデル化し、繊維を可視化することで、供試体中の繊維の配向を評価した。さらに、繊維の配向がUFCの力学特性に及ぼす影響も検討した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

9.2 合成繊維を用いたUFCの特性および繊維の配向の影響

第4章「PVA繊維を用いたUFCの特性と繊維の配向の影響」では、UFCの適用範囲の拡大とコストの低減を目指し、従来の鋼繊維の代わり、市販の各種PVA繊維を用いた場合の力学特性について検討した。さらに、本章で選定したPVA繊維を用いたUFCを2種類の打込み方法を用いて、長さ2600mm、幅450mm、厚さ100mmのパネル部材に打込み、硬化後、100×100×400mmの曲げ供試体を切り出し、切欠き梁の3点曲げ試験を行い、打込み方法および供試体の切り出しの方向、位置が曲げ挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、圧縮と曲げ特性に着目した場合、W/Cを18%として $\phi 0.66 \times 30\text{mm}$ を3%混入した場合が最も優れていたが、材料分離する傾向が見られた。そこで、 $\phi 0.66 \times 30\text{mm}$ と $\phi 0.1 \times 12\text{mm}$ の繊維を1:2の割合で混合したところに材料分離を抑制でき、 140N/mm^2 の圧縮強度と 15N/mm^2 以上の曲げ強度が得られた。さらに、型枠の片端から打ち込んだ場合と打込み位置を移動させ均等に打ち込んだ場合で、パネルから切り出した供試体の曲げ強度が大きく異なることを示した。また、供試体の破断面の観察結果から、コンクリートの打込み方法により繊維の配向が異なり、その結果として曲げ強度が変化することを明らかにした。

9.3 可視化モデルコンクリートによるUFCの繊維の配向の評価

第5章「UFC曲げ供試体中の繊維の配向」では、曲げ供試体を対象として、コンクリートを透明な粘性を有する流体でモデル化することで供試体中の繊維の可視化を試みた。また、硬化した鋼繊維UFC曲げ供試体を切断して繊維の配向を観察し、可視化実験の結果と比較した。その結果、高吸水性高分子樹脂を用いた可視化モデルコンクリートにより、曲げ供試体中の繊維の配向状況を観察でき、供試体の片端からコンクリートを流し込む方法の場合、繊維は供試体の軸方向には配向せず、斜め上方に配向することが示された。

第6章「可視化モデルコンクリートによるUFCの繊維の配向の評価」では、形状寸法が異なるUFC供試体中の繊維の配向を把握することを目的として、第5章において提案した可視化モデルコンクリートを用い、供試体中の繊維の配向を評価した。また、同一の形状寸法の型枠を用いて実際のUFCを作製し、硬化後に供試体を切断して、繊維の切断面を画像解析することによ

り繊維の配向を評価し、可視化実験の結果と比較した。その結果、可視化モデルコンクリートで観察された繊維の配向と実際の UFC の繊維の配向は定性的に一致していることを明らかにした。具体的には UFC を水平のパネル状の型枠の中央から打ち込むと繊維は一樣に同心円状に配向する。また、幅の小さい梁状の試験体の片側から打ち込むと、繊維はコンクリートの流動方向と平行に斜め上方に配向し、幅の広い梁状の試験体の片側から打ち込むと、繊維が斜め上方に配向し、幅方向の中央側に傾く傾向があることを明らかにした。

9.4 UFC の力学特性と繊維の配向の定量的な関係

第 7 章「標準曲げ試験体における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討」では、繊維の分散・配向とコンクリートの曲げ特性の関係を定量的に評価した。切欠き深さの異なる曲げ供試体の 3 点曲げ試験を行い、J 積分法により断面高さごとの引張軟化曲線を推定した。試験後、画像解析により破断面の繊維の配向を評価し、断面高さごとの引張強度と繊維本数および配向角度の定量的な関係について検討した。その結果、型枠底面に近いほど、最大引張応力が高くなり、断面高さごとに最大引張応力の変化の割合は有効繊維数の変化の割合とほぼ一致した。

第 8 章「パネル部材における繊維の配向と曲げ特性の定量的な関係に関する検討」では、繊維の配向が UFC の曲げ強度に及ぼす影響を検討するために、φ1200×50mm 円形パネルの中心に UFC を打込み、硬化後にパネルの半径方向に対して 0°、30°、60°および 90°の方向に曲げ供試体を切出し、曲げ載荷試験と破断面の画像解析を行った。その結果、パネルから切出した供試体のひび割れ発生後の最大曲げ応力は、切出した角度により変化し、半径方向に対して 0°と 90°で切出した場合では、1:10 程度の差が生じることが確認できた。また、破断面の画像解析の結果から、繊維の配向角度の変化にともなう曲げ強度の変化の割合は、配向角度の変化にともなう破断面における有効繊維本数の変化の割合とほぼ一致することを明らかにした。

9.5 今後の展望

9.5.1 設計・施工における繊維の配向の考慮

現行の土木学会の UFC 指針（案）では材料係数 $\gamma_c=1.3$ とすることで繊維の配向について直接的には考慮していないが、今後は繊維の配向が部材の強度への影響を把握しつつ、さらに合理的な設計方法を提案すべきと考えられる。また、材料特性を求めるための供試体の作製方法の統一、さらには、供試体から得られる材料特性を部材中での特性の関係を明確にする必要がある。

現行の土木学会の UFC 指針（案）では UFC の施工について、いくつかの留意点を挙げられてあり、打ち重ね部が合流部では、つき棒などをを用いコンクリートの繊維をかき乱す必要があるとされている。しかし、現状では乱しの方法と繊維の配向の関係は明確にされておらず、今後更なる研究が必要である。

9.5.2 繊維の配向の評価技術

第 3 章において配向の評価技術に関する既往の研究を挙げた。これらのほとんどは実験室で作製した供試体を対象としたものであり、実際の UFC 構造物の繊維の配向を評価する研究例はほとんどない、したがって、今後、実際の UFC 構造物中の繊維の配向を評価する技術を開発す

る必要がある。

9.5.3 繊維の配向の予測

本論文で提案した可視化モデルコンクリートは定性的には繊維の配向を予測できるが、定量的な評価は難しい。そのため、今後は、定量的に繊維の配向を予測するための数値シミュレーション技術の開発が望まれる。

9.5.4 繊維の配向と力学特性

第8章では、繊維の配向性が異なる供試体を用い、繊維の配向が供試体の曲げ強度への影響を検討したが、各シリーズの供試体において繊維の配向角度が異なると繊維の本数も異なり、繊維の配向のみの曲げ強度への影響の検討はまだ不十分である。今後、繊維の本数と配向の影響を分離して評価する必要がある。

9.5.6 繊維の配向の制御

UFC の打込み時に繊維の配向性を制御する方法としては、いくつか考えられる。例えば、打込み後に、つき棒などを用い、マトリクスを再び局所的に流動させ、繊維を再配向できると考えられる。しかし、現状では突き棒の操作方法とコンクリート中の繊維の配向の関係は不明であり、今後、解明する必要がある。その際、本論文で提案した可視化モデルコンクリートは現象を容易に直接確認できることから、有効であると考えられる。

9.6 まとめ

本研究では、主に部材中の局所的な繊維の配向に着目して研究を行ったが、局所的な繊維の配向が部材全体の挙動に及ぼす影響については必ずしも明確ではない。また、繊維の配向は、常に構造物の性能低下に結び付くわけではなく、制御さえできれば積極的に配向させることで、性能向上に寄与する可能性も考えられる。したがって、繊維の配向の問題は今後も研究開発が強く望まれる課題である。

謝辞

本論文は、筆者が岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程生産開発システム工学専攻に在籍中とりまとめたものであります。

指導教員の岐阜大学総合情報メディアセンター 内田裕市教授には、研究計画から実験方法や論文のとりまとめに至るまでご指導を頂き、また国内外での論文発表の機会を与えて頂いたことに心より感謝を申し上げます。

また、岐阜大学工学部社会基盤工学科 小林孝一教授ならびに国枝 稔教授には、本研究の要所においてご指導、ご意見を頂きました。深く感謝を申し上げます。

岐阜大学工学部長・社会基盤工学科 六郷恵哲教授、岐阜大学アセットマネジメントセンター 浅野幸男客員教授、ならびに群馬大学 小澤満津雄准教授には、実験の実施において多大の支援を頂きました。深く感謝を申し上げます。

また、実験の実施に際しては、筆者が所属した複合構造研究室の Ha Duy Nhi 君、平岩修人君を初めとする研究室の皆様にも多大なるご支援を頂きました。心より感謝を申し上げます。

最後に、常に支えてくれた家族に心より感謝します。

発表論文

1. 博士論文に含まれる論文

- (1) 周波, Ha Duy Nhi, 稲熊唯史, 内田裕市: PVA 繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの特性と繊維の配向の影響, 繊維補強セメント系複合材の新しい利用法に関するシンポジウム, pp.303-310, 日本コンクリート工学会, 2012
- (2) 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供試体中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集第 34 巻, 1 号, pp.268-273, 2012
- (2) B. Zhou and Y. Uchida: Fiber Orientation in Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete and its Visualization, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2013
- (3) 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, 286-291, 2014.
- (3) B. Zhou and Y. Uchida: Relationship between fiber orientation and flexural strength in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete panels, proceeding of 10th International Symposium on Innovation & Utilization of High-Performance Concrete(HPC-2014), Beijing, 2014.
- (3) B. Zhou and Y. Uchida: Relationship between fiber orientation and flexural strength in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete panels (投稿準備中)
- (4) B. Zhou and Y. Uchida: Evaluation of fiber orientation in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete using visualization model concrete (投稿準備中)

2. 博士論文に含まれない論文

- (1) 周波, 平岩修人, 小澤満津雄, 内田裕市: 廃瓦細骨材による超高強度繊維補強コンクリートの自己収縮低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 301-306, 2013.
- (2) M.Ozawa, Z. Bo, Y. Uchida, H. Morimoto: Preventive Effects of Fibers on Spalling of UFC at High Temperatures, Journal of Structural Fire Engineering,2014 (Acceptance)
- (3) M.Ozawa, Z. Bo, J. Kawaguchi and Y. Uchida: Preventive effect on spalling of UFC using jute fiber at high temperature, Concrete Spalling due to Fire Exposure: Proceedings of the 3rd International Workshop, Paris, France, September 25-27, 2013, P. Pimienta and F. Meftah (Eds.), MATEC Web of Conferences, Vol. 6 (2013), 02006-p.1~p.7
- (4) M.Ozawa, B.Zhou, Y. Uchida, H. Morimoto: Preventive Effects of Different Types of Fibers on UFC Spalling at High Temperatures, Proceedings of 7th International Conference on Structures in Fire, M. Fontana, A. Frangi, M. Knobloch (Eds.), 747-755, Zurich(Switzerland),
- (5) Nguyen Khanh Thy, 周波, 大森慎也, 内田裕市: アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 233-238, 2011.
- (6) Davaajav Munkhtsara, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市: 天然繊維を適用した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 1330-1335, 2014.
- (7) 川口潤, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制と加熱後の残存強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 1153-1158, 2013.

3. そのほかの発表

- (1) 周波, 永井祐, 内田裕市: 廃瓦を用いた超高強度繊維補強コンクリートの自己収縮特性, 土木学会平成 26 年度全国大会第 69 回年次学術会講演概要集, CD-ROM
- (2) 平岩修人, 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリートの繊維の配向に関する研究, 土木学会平成 26 年度全国大会第 69 回年次学術会講演概要集, CD-ROM
- (3) 周波, Nguyen Khanh Thy, Ha Duy Nhi, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリートの自己収縮特性に関する研究, 土木学会平成 25 年度全国大会第 68 回年次学術会講演概要集, CD-ROM
- (4) 内田裕市, 周波, 平岩修人, Ha Duy Nhi: 超高強度繊維補強コンクリートの引張特性と繊維の分散・配向の関係に関する検討, 土木学会平成 25 年度全国大会第 68 回年次学術会講演概要集, CD-ROM
- (5) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市: PVA 繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの特性, 土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM