

論文 繊維配向性が超高強度高靱性繊維補強セメント複合材料の引張性能に与える影響

鈴木 慶汰^{*1}・Sukmin Kwon^{*2}・西脇 智哉^{*3}・武田 三弘^{*4}

要旨: 超高強度高靱性繊維補強セメント複合材料 (UHP-FRCC) の補強繊維の形状, 分散, 配向性は力学性能に影響を及ぼす。本研究では繊維配向性に焦点を当て, 打込み方法と試験体寸法が異なる UHP-FRCC 試験体について, X線透過撮影を用いた画像分析による配向性の評価と, 直接引張試験による引張力学性能の評価を行った。その結果, 試験体寸法・打込み方法と配向性を示す配向係数には相関がある事が確認された。また配向係数と引張力学性能 (引張強度, 引張強度時のひずみ) の間には相関があり, 引張応力方向への繊維の配向性が高いほど, 引張力学性能が向上することが明らかとなった。

キーワード: UHP-FRCC, 試験体寸法, 打込み方法, 繊維配向性, 配向係数, 一軸引張試験

1. はじめに

超高強度繊維補強セメント複合材料 (Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下 UHP-FRCC) は, 圧縮強度が150N/mm²以上, 引張強度が5N/mm²以上の力学的性能を持つ繊維補強セメント複合材料である¹⁾。Kwonらは引張力学性能を向上させる手法としてひび割れ幅のレベルに応じた適切な形状・サイズの繊維によって, ミクロレベルからマクロレベルまでのひび割れを効率的に補強する手法を提案し, 力学性能の向上を確認した²⁾。

一方で, FRCCに用いられる補強繊維は異形状であるため, 補強鋼繊維の配向性がその力学的性能に影響を与えることが知られている³⁾。小林らによって, 試験体の断面寸法が配向係数に影響を与え, 打込み方法の違いによって曲げ性能が異なる事が確認されている⁴⁾。繊維の配向性の調節が可能な打込み手法を確立する事によって, 同一の部材断面寸法に対して, 応力負担方向の力学性能を高めた部材の作製が可能となる。

本研究では, Kwonらが開発したUHP-FRCC²⁾を基に, 打込み方法と試験体寸法が繊維の配向特性に与える影響を調べることを目的とする。まず, 繊維の配向性を調べるために, X線透過撮影で得られた画像を二値化する事でUHP-FRCC中の繊維を可視化し, 配向係数の分析によって繊維配向性の定量化を行った。また, 最後にこれらの結果に基づいて, 打込み方法と試験体寸法に影響される繊維配向性の引張性能への影響を明らかにするため, 配向係数と引張力学性能を比較し, 双方の関係について検討を行った。

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
結合材	B	シリカフェームセメント (低熱セメント 82%, シリカフェーム 18%, 比表面積 6150cm ² /g, 密度 3.01g/cm ³)
珪砂	S	珪砂 6号 (最大粒径 0.12mm, 表乾密度 2.61g/cm ³)
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物 (密度 1.05g/cm ³)
消泡剤	D	ポリエーテル系 (密度 1.05g/cm ³)
ワラストナイト	Wo	密度 2.9g/cm ² , 繊維長 50~2000μm, アスペクト比 3~20

2. 試験体概要

2.1 使用材料および調合

本研究で用いた使用材料を表-1に示す。結合材は低熱セメントとシリカフェームをプレミックスしたシリカフェームセメントを用いた。細骨材には粒径 0.12mm 以下の珪砂, 混和剤には高性能減水剤と消泡剤を混入した。また, 繊維状の鉱物であるワラストナイトをミクロレベルのひび割れを架橋する目的で混入した。マトリックスの調合表を表-2に示す。メゾ鋼繊維及びマクロ鋼繊維の混入率は, Kwonら²⁾によって最適化された調合 (メゾ鋼繊維 1%とマクロ鋼繊維 1.5%) を参考にした。鋼繊維の物性値を表-3に示す。

*1 東北大学 工学部建築社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程後期 日本学術振興会特別研究員 修士(工学) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東北学院大学 工学部環境建設工学科 教授 博士(工学) (正会員)

2.2 練り混ぜおよび養生

練混ぜには 10L オムニミキサーを使用し、シリカフェームセメント、骨材及びワラストナイトを 1 分間空練り後、水と混和剤を入れ 4 分間練り混ぜた。その後メゾ繊維を混入し 1 分 30 秒、更にマクロ繊維を混入して 2 分 30 秒練り混ぜた。

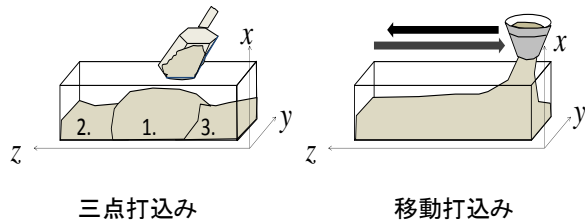


図-1 打込み方法

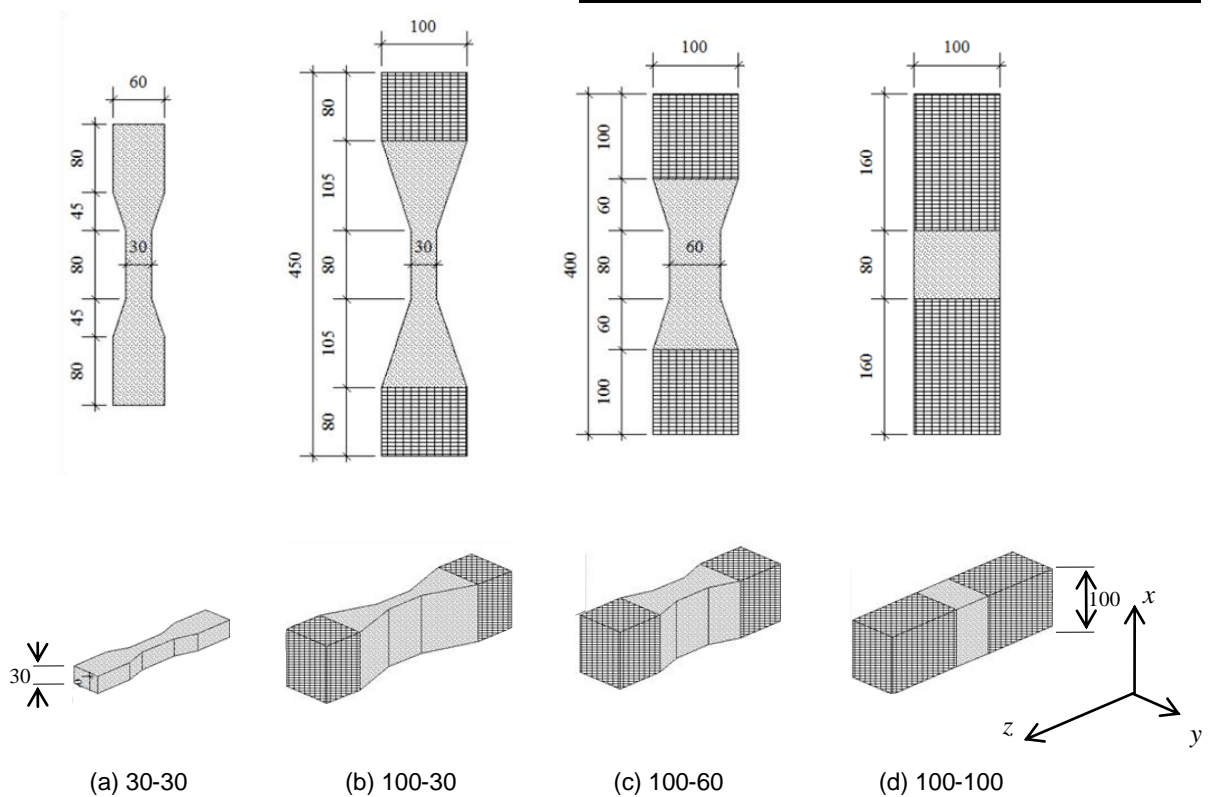


図-2 試験体寸法

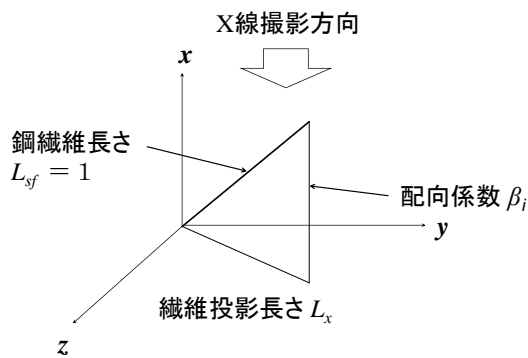


図-3 配向係数 β_i と繊維投影長さ

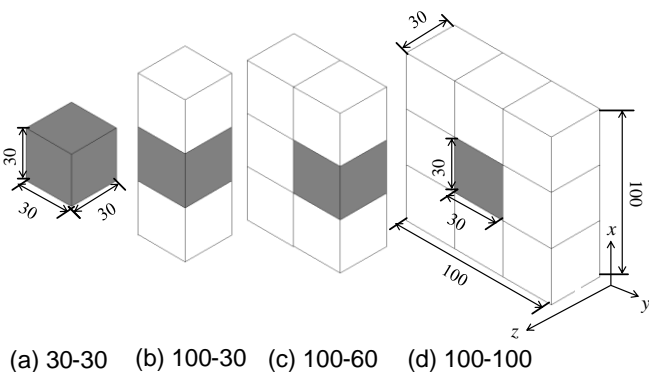


図-4 評価試験片

表-2 調合表

B	S/B (Wt.%)	Wo/B (Wt.%)	W'/B (Wt.%)	SP/B (Wt.%)	D/B (Wt.%)
SFC	35	13	14.6	1.4	0.02

脚注 SFC : シリカフェームセメント, W' : 水

表-3 繊維の物性

繊維名称	密度	長さ	直径	引張強度	アスペクト比
	g/cm ³	mm	mm	MPa	
メゾ繊維	7.85	6	0.16	2000	37.5
マクロ繊維	7.85	30	0.38	3000	78.9

試験体の養生方法は、打込み後 1 日間養生室（湿度 95%RH, 温度 20°C）にて湿潤養生を行った後、脱型を行い、蒸気養生を行った。蒸気養生の条件は、温度上昇速度を 15°C/h として 90°C まで上昇させ、最高温度 90°C で 24 時間保持とした。その後は自然放冷によって室温まで低下後、養生室にて 4 日間湿潤養生を行った。

2.3 打込み方法

本研究では、図-1 に示すように型枠中で繊維がよりランダムな向きに（繊維の配向性が減少）させる打込み方法として、モルタルを三箇所に分けて打込む方法（以下、三点打込み）と、繊維がより長軸方向の向きに（繊維の配向性が増加）させるように、注ぎ口を往復させながらモルタルを流し込む打込み方法（以下、移動打込み）を用いた。三点打込みは図中の 1→2→3 の順にモルタルを流し込んでいき、1 の過程で試験区間となる中央部分に十分な量のモルタルを投入し、2、3 の過程でその半分程度の量のモルタルを型枠の端を補う様な形で繰り返し投入した。型枠内がモルタルで満たされるまで打込みを行った後、ハンマーにて振動を与えて締めを行った。

2.4 試験体寸法・形状

試験体寸法として、図-2 に示すように 4 種類の断面寸法の異なる試験体形状を本実験では設定し、実験を行った。試験体形状は断面寸法の大きい 100×100×400mm の角柱試験体から、最も小さい厚さ 30mm のダンベル試験体の間で分類を行っている。図-2(a)~(c)に示すように、図-2(d)以外の試験体は中央でくびれている形状を取っており、くびれている部分を各種実験の評価を行う試験区間とする。試験体名称を試験体寸法と打込み方法によって、表-4 に示すように定義した。

3. 繊維配向性の検討

3.1 分析方法・手法

繊維補強コンクリート中の繊維の配向性を定量的に表す手法として、小林らによってX線画像分析による配向係数の同定が行われている³⁾。図-3に示すように、配向係数は直方体試験片のうちある面への繊維投影長さ（面積）から算出され、投影方向に対しての配向状態として定義し、配向係数が大きい程、繊維配向が投影方向と平行に近いことを表している。本研究では、それぞれのサイズの試験体の試験区間から、図-4に示すように 30×30×30mm の立方体の試験片を切り出し、馬場らの方法⁵⁾に従って、x-y-z の三方向に直交する立方体の面について、X線画像の撮影を行い、さらに画像の二値化を行い鋼繊維の配向係数 β_i を求めた。手順を以下に示す。

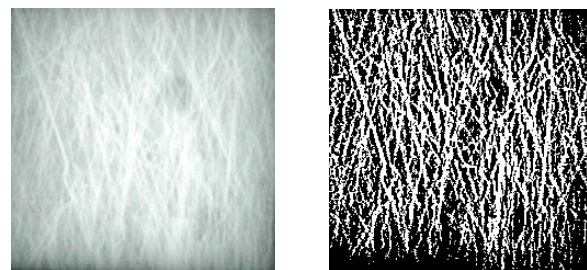
- (1)試験区間から、30mm角の試験片を切り出す。
- (2)サンプルは二つずつ用意し、一試験片につき三面方向から表-5の仕様に従ってX線透過撮影を行い、図-5(a)に示されるようなX線画像を得る。フィルムをデジタル

表-4 試験体名称

series	試験体断面寸法			
	(a)	(b)	(c)	(d)
三点打込み (Homogeneous)	H30-30	H100-30	H100-60	H100-100
移動打込み (Deflection)	D30-30	D100-30	D100-60	D100-100

表-5 X線透過撮影仕様

X線発生装置	管電圧	100kV
	管電流	2mA
	焦点時間	900mm
	撮影時間	70sec
	焦点寸法	0.8×0.8mm
フィルム		工業用X線 #50
増感紙		鉛箔増感紙



(a) X線画像

(b) 二値化画像

図-5 二値化画像処理

カメラで撮影した画像について、山王らが示す手法⁶⁾に従って二値化処理を行う（使用ソフト：imageJ 画像サイズ：400×400pixel, ピクセルサイズ：0.075mm/pixel）。二値化処理は、画像中に占める白色の濃淡の差分ヒストグラムを取り、白黒に分けるべき濃度レベルを決定して行われ、最終的に図-5(b)に示すように二値化処理された画像を得る。今回は、すべての試験体中の繊維量が一定であるため、ヒストグラムで累積値が50%になる中央値を閾値として設定し、比較を行った。このことから、本検討で得られる試験体間の配向係数 β_i に関する定性的な傾向は、上記のアルゴリズムの影響を排除できると考えている。

(3)二値化処理された画像から鋼繊維の面積率 S_f （繊維面積/撮影方向試験片断面積）を求める。

(4)調査・試験片寸法・繊維の面積率から、配向係数 β_i を馬場らが示す手法⁵⁾によって求め、打込み方法・試験体寸法ごとの繊維配向性を評価する。

試験体中の評価部分である 30×30×30mm 中にある鋼繊維容積 V_{sf} (mm³) は、鋼繊維が一様に分布しているものと想定して、鋼繊維の混入率 λ (vol.%) と計測した試験体の三辺の長さ l_x, l_y, l_z (mm) から、式 (1) によって求めた。

$$V'_{sf} = \lambda \times (l_x \cdot l_y \cdot l_z) \quad (1)$$

全ての鋼繊維がX線照射方向に対して直交する平面と平行に存在した場合の面積率を S_{sf} とおく。評価試験片容積中の鋼繊維換算本数を N' (本) とすると、式 (2)、式 (3) から S_{sf} が求められる。鋼繊維断面円の直径 (mm) を ϕ_{sf} 、繊維単体の長さを L_{sf} 、評価断面積 (mm^2) を A_i とすると、

$$N' = \frac{V'_{sf}}{\pi \cdot \phi_{sf}^2 \cdot L_{sf} / 4} \quad (2)$$

$$S_{sf} = \frac{N' \cdot \phi_{sf} \cdot L_{sf}}{A_i} \times 100 \quad (3)$$

二値化画像より得られた S_i より、式 (4) に示す様に繊維投影面積比 α_i を求める事ができる。ここで、繊維投影面積比は単繊維の繊維投影長さ L_i (mm) と同値であるため、($\alpha_i=L_i$) とした。

$$\alpha_i = \frac{S_i}{S_{sf}} \quad (4)$$

式 (5) より、実測長の誤差を各軸の実測投影長さ比に応じて配分する事で補正する。式 (6) に補正後の式を示す。補正値を s_i とし、補正後の繊維投影長さを \bar{L}_i (mm) とすると、

$$s_i = \frac{(1 - \alpha_x^2 - \alpha_y^2 - \alpha_z^2) \cdot \alpha_i}{\alpha_x + \alpha_y + \alpha_z} \quad (5)$$

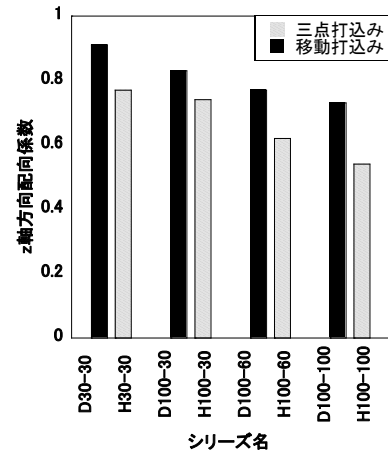
$$\bar{L}_i = \sqrt{\alpha_i^2 + s_i} \quad (6)$$

式 (7) を用いて配向係数 β_i を導出できる。

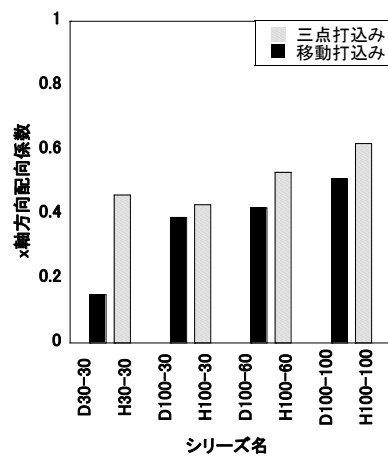
$$\beta_i = \sqrt{1 - L_i^2} \quad (7)$$

3.2 分析結果

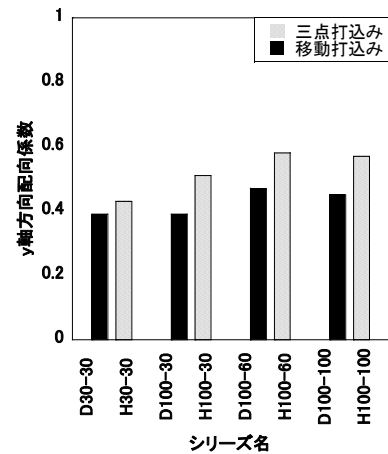
軸方向ごとの配向係数の結果を図-6(a)~(c)に示す。図-6(a)(b)(c)それぞれを比較すると、どのシリーズにおいてもz軸方向の配向係数が高い傾向を示し、他の二方向の配向係数が低い事が分かる。引張応力下で引張性能に影響を与える繊維の配向方向は、応力方向 (z軸方向) への配向である。応力方向に配向している繊維は、マトリックスから繊維が引き抜ける時の摩擦抵抗力やスナッピング効果を発揮する⁷⁾。一方で、応力方向に対して繊維が垂直方向 (x, y軸方向) に配向している場合、脆性破壊を起こしてしまい、繊維の補強効果はほとんど認められない³⁾。従って、本研究ではz軸方向の配向係数を評価する。図-6(a)に示すように、打込み方法の違いを比較すると、全シリーズにおいて移動打込みシリーズよりも、三点打込みの方がz軸方向の配向係数が大きいことが明らかになった。すなわち、移動打込みによって鋼繊維がz軸方向に配向することが確認できた。また、試験体寸法



(a) z軸方向

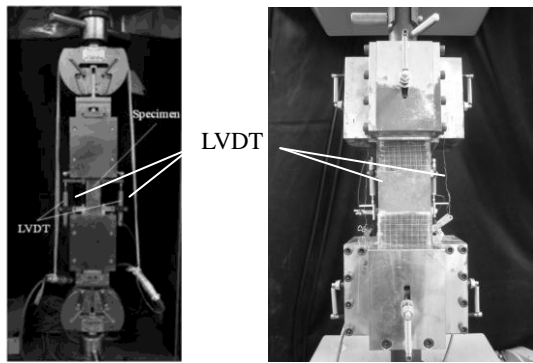


(b) x軸方向



(c) y軸方向

の違いについて比較を行うと、打込み方法に関係なく、断面寸法が小さい試験体ほど (100-100, 100-60, 100-30, 30-30の順に) z軸方向の配向係数が大きくなった。これは、断面寸法が小さい程打込みの際にモルタルが型枠短軸方向への流動を制限され、同時に繊維長の長いマクロ繊維の配向方向の自由度が制限されてしまうためであると考えられる。



(a)ダンベル型試験体用治具 (b)大型断面用引張試験治具

図-7 一軸引張試験治具

4. 引張性能の検討

4.1 実験概要

本実験では、図-2(a)に示す厚さ30mmのダンベル型試験体については、図-7(a)に示す治具を用い、最大容量30kNの一軸引張試験装置を用いて実験を行った。荷重が十分に伝達するために、試験体面の内、ダンベル形状をしている面を厚さ10mmの鉄板で挟みこみ、ボルトで締め付けた。試験体の両端部の支持条件は固定とした。載荷時の変位は、試験体の材軸と平行になる様に、高感度変位計を二箇所に対称に設置して計測を行った。検長区間は80mmとして0.5mm/minの速度で載荷した。

図-2(b)(c)(d)の試験体については、図-7(b)に示す治具を用いて、最大容量1000kNの万能試験機で試験を行う試験体を設置する利便性のため⁸⁾、片側二方向自由、片側固定とし、載荷時の変位は試験体の材軸と平行になる様

に、高感度変位計を二箇所に対称に設置して計測を行った。検長区間は80mm、0.3mm/minの速度で載荷を行った。試験体には、検長区間以外の範囲にガラス繊維シートを巻きつけて接着する事によって補強し、チャックの締め付け応力による局所的な破壊を予防するとともに、引張応力による変形領域を試験体中央部に明確化した。

4.2 引張性能評価指標

本研究では、引張性能の評価に引張強度（以下 σ_{ts} ）と引張強度時のひずみ（以下 ϵ_{ts} ）を用いた。それぞれ図-8に示すように定義する。UHP-FRCC はひずみ硬化により初期ひび割れ応力（以下 σ_{fcs} ）を超え、 σ_{ts} まで応力が増大する。

4.3 実験結果および考察

引張応力とひずみの関係を図-9(a)~(f)に示す。引張強度は図中の黒点で表されている。その結果全てのシリーズにおいてひずみ硬化現象が確認された。また、図-9(a)と(b)、図-9(c)~(f)の比較により、断面寸法が小さい試験体ほど（100-100、100-60、100-30、30-30の順に） σ_{ts} が大きくなり、更に ϵ_{ts} が増大する傾向が示された。すなわち試験体寸法で比較を行うと、寸法が小さいほど引張強度が高く引張強度時のひずみが増大する事が確認された。また、図-9(a)(b)と(c)(d)を比較すると、移動打ち込み（D30-30、D100-30）の方が三点打ち込み（H30-30、H100-30）よりも高い σ_{ts} と ϵ_{ts} を示した。すなわち、三点打ち込みより移動打ち込みの場合において高い引張強度とひずみが得られた。これらの結果から、打ち込み方法や試験体寸法の違いが UHP-FRCC の引張性能に影響を与える

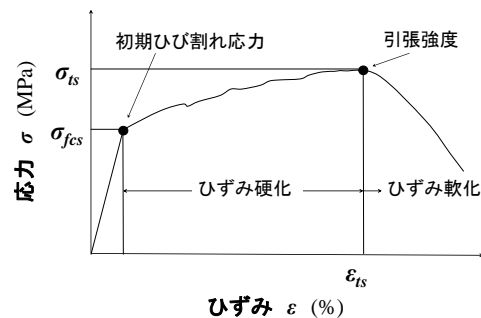
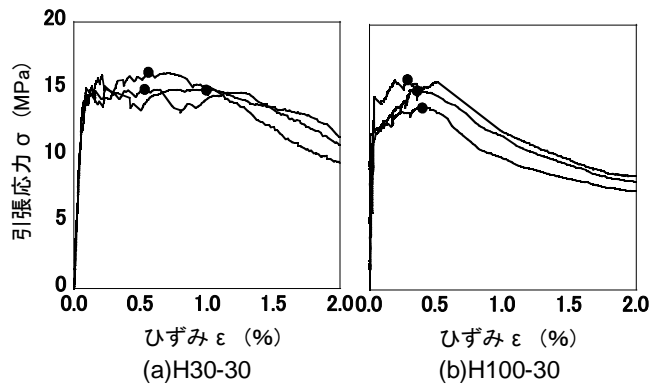


図-8 UHP-FRCC の引張応力 - ひずみ関係

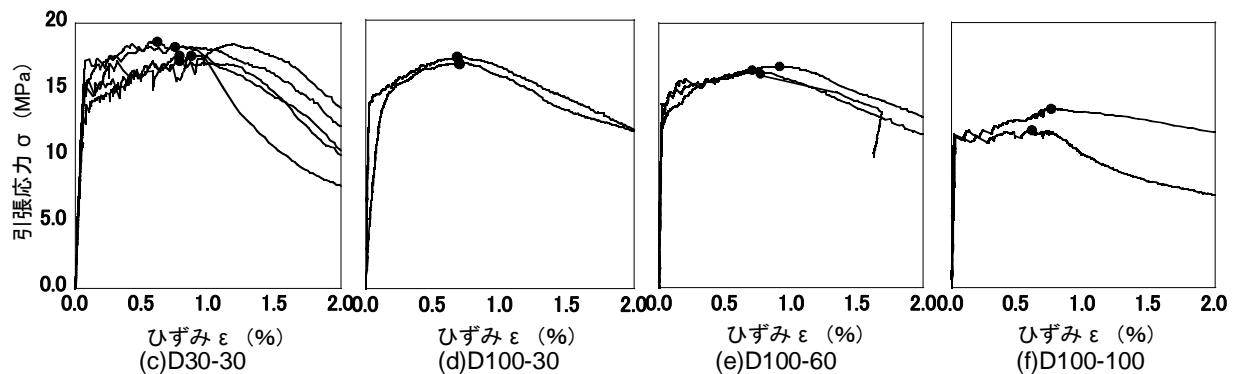


図-9 応力 - ひずみ曲線

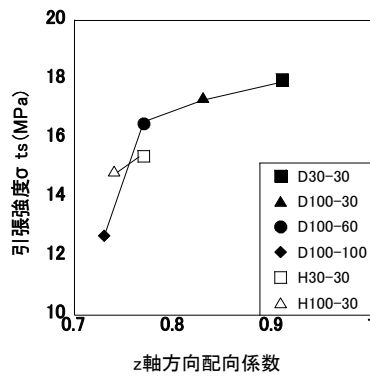


図-10 z軸配向係数と引張強度の比較

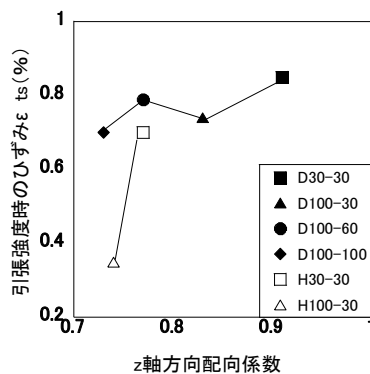


図-11 z軸配向係数と引張強度時のひずみの比較

事が確認された。図-9(d)に示すサンプルのうち、かなり高いひずみ値で最大強度を発揮するものがあつた。これは試験不備によるものと考えられるため除外し、図-10, 11には加味していない。

図-10に σ_{ts} を縦軸としたz軸方向配向係数 β_z との関係を示した。ここに示す引張強度は試験結果の平均値である。図-10より、配向係数 β_z が大きいほど σ_{ts} が大きい事が確認できる。図-11には ϵ_{ts} を縦軸とした配向係数 β との関係を示した。また、引張強度時のひずみは試験結果の平均値である。図-11から、配向係数 β_z が大きいほど ϵ_{ts} が高い傾向にある事が確認できた。このような引張性能の向上は、引張応力方向への繊維の配向性が高いほど、より多くの鋼繊維が検長区間に発生したひび割れを架橋するため繊維の架橋性能が向上し、初期ひび割れ発生後においてひずみ硬化現象が起こったためであると考えられる。以上から、配向係数と引張性能値を比較する事で、打込み方法や試験体寸法によって変動する配向係数と引張性能の相関が明らかとなり、繊維配向性がUHP-FRCCの引張性能に影響を与える事が確認された。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) X線透過写真の二値化を用いて、UHP-FRCCの配向係数 β_z を求める事が出来た。

- (2) UHP-FRCCの打込み時に、移動打込みを行い、尚且つ試験体断面寸法が小さい程、試験体長軸方向の繊維の配向係数の値が大きくなった。
- (3) 一軸引張試験により、移動打込みを行い、尚且つ試験体断面寸法が小さい程、引張性能(引張強度・引張強度時のひずみ)は上昇することがわかつた。
- (4) 配向係数との比較から、引張応力方向への繊維の配向性が高いほど、優れた引張性能を発揮する事が明らかとなった。今後は三点打込みによる大断面寸法の条件についても一軸引張試験を行い、引張性能と配向係数との関係を比較する必要がある。

謝辞

本研究は、「日本学術振興会特別研究員奨励費(26・7167)」の助成及び公益財団法人大林財団の研究助成金「超長寿命コンクリート構造物を実現する高強度・高靱性セメント複合材料の開発と適用」による成果である。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施行指針(案), 土木学会, pp.1, 2004
- 2) Kwon S., Nishiwaki T., Kikuta T., Mihashi H.: Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Cement-Based Composites, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Framcos-8, Toledo, Spain Mar. 2013
- 3) 小林一輔: 繊維補強コンクリート特性と応用一, オーム社, 1981.6
- 4) 小林一輔, 睦好宏史: 繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形, 土木学会論文報告集, 299号, pp.101-112, 1980.7
- 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
- 6) 山王博之, 小林一輔, 富田強: 鋼繊維コンクリートの引張強度に及ぼす繊維の分散と配向の影響, 生産研究, Vol.28, No.9, pp.13-16, 1976.9
- 7) 吉田理紗, 菊田貴恒, 西脇智哉, 三橋博三: 鋼繊維と合成繊維を混入した繊維補強セメント複合材料の引張性能に及ぼす鋼繊維形状の影響, コンクリート工学年次論文集 vol.34, No.1, pp.262-267, 2012.7
- 8) 菊田貴恒, 三橋博三, 秋田宏: ひずみ硬化セメント複合材料の一軸引張試験用治具の開発に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.81-90, 2012.5