

論文 供試体寸法や成形方法が一軸引張試験における UHPFRC の引張特性に与える影響調査

藤野 由隆*1・玉滝 浩司*2・青木 峻二*3・富井 孝喜*4

要旨：床版上面増厚工法用の補修材として適用されている超高性能繊維補強コンクリートは、繊維の多量添加により高い引張特性を有する。本論文では、超速硬型 UHPFRC について一軸引張試験の供試体寸法および成形方法が繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみに与える影響を調査した。その結果、供試体高さが小さいと繊維架橋強度や繊維架橋強度時のひずみが大きくなる傾向を示した。また、エックス線 CT スキャンによる画像解析の結果、供試体高さが小さいと引張応力が作用する方向に配向する繊維の割合が多くなることが確認でき、繊維の配向が繊維架橋強度や繊維架橋強度時のひずみに影響を与えていることがわかった。

キーワード：一軸引張試験, UHPFRC, 繊維架橋強度, 繊維架橋強度時のひずみ, 繊維の配向

1. はじめに

高度経済成長期に急速に整備された鉄道や道路等のインフラは、長期供用や気象変動の厳しい使用環境によって、著しい劣化や変状が進行している。その中で道路橋では、インフラの機能維持・回復のため床版取替工事による大規模更新や床版上面増厚工法による大規模修繕が行われている。床版上面増厚工法では、超速硬型の鋼繊維補強コンクリート（Steel Fiber Reinforced Concrete：以下、SFRC）などが使用されるが、既設床版との一体化不足によって、浮き・剥離、土砂化などの再劣化が報告されている。これらの対策として、近年、高強度かつ緻密な超高性能繊維補強コンクリート（Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete：以下、UHPFRC）が床版上面増厚工法用の補修材として適用されている。UHPFRC を床版上面増厚に適用する場合、その補強効果の確認や補強厚さを設定するため、引張特性の把握が重要となる。高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針（案）¹⁾（以下、VFC 指針）では、一軸引張応力の作用下でひび割れ発生強度に到達した後にひび割れ幅の増加とともに応力が低下する「ひずみ軟化型 VFC」と、ひび割れ発生強度に到達した後にひび割れの本数と幅の増加とともに応力が増加し、応力が最大値に達した後に低下する「ひずみ硬化型 VFC」に分類されている。鋼繊維を含有する UHPFRC や VFC の引張特性（ひび割れ発生強度、繊維架橋強度など）は、一軸引張試験で求めることができるが、これまでに供試体寸法や成形方法が繊維の配向や試験結果に与える影響について報告されている例は少ない。そのため、本検討では、超速硬型 UHPFRC²⁾の一軸引張試験における供試体寸法および成

形方法が繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみに与える影響を供試体内の繊維の配向を含めて調査した。なお、本論文では VFC 指針にならって、ひび割れ発生後に繊維の架橋効果が生じた後の最大引張応力度を「繊維架橋強度」と称することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

超速硬型 UHPFRC の使用材料を表-1 に、標準配合を表-2 に示す。検討した超速硬型 UHPFRC は、「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）」³⁾に準拠した材料をベースとし、早期強度発現性を実現させるために急硬材を 140kg/m³ 添加した配合とした。また、可使用時間の調整のために遅延剤を使用した。なお、モルタルフローは高性能減水剤によって調整した。

表-1 使用材料

種類	記号	備考
練混ぜ水	W	上水道水
プレミックス材	P	高強度用プレミックス粉体
細骨材	S	珪砂
混和剤	SP	高性能減水剤
急硬材	HA	粉体系
補強用鋼繊維	SF	φ 0.16×13mm
遅延剤	CR	粉体系

表-2 標準配合

W/(P+HA) (%)	単位量(kg/m ³)					添加量(kg)	
	W※1	P	HA	S	SP※2	CR	SF
15.8	210	1187	140	837	適宜	5.4	157

※1 SP を含む質量

※2 目標フローに応じて適宜調整

*1 UBE三菱セメント（株） 研究所 コンクリート研究室 （正会員）

*2 UBE三菱セメント（株） 研究所 コンクリート研究室 工博

*3 （株）大林組 生産技術本部 リニューアル技術部 課長 工修 （正会員）

*4 （株）大林組 生産技術本部 リニューアル技術部 部長 （正会員）

2.2 練混ぜ方法

超速硬型 UHPFRC の練混ぜは、二軸強制練りミキサ（容量：55L）を用いて、20℃の室内にて行った。練混ぜ量は 30L とした。細骨材およびプレミックス材を投入して 30 秒間空練りを行い、水と混和剤を投入して 3 分間、遅延剤を投入して 2 分間練り混ぜた。さらに、補強用鋼繊維の投入完了後に 1 分間、急硬材を投入して 1.5 分間の練混ぜを行ってから試料を排出した。

2.3 目標性能

超速硬型 UHPFRC の目標性能を表-3 に示す。モルタルフローは、道路勾配や施工性を考慮して、150～280mm を目標とした。また、一軸引張試験における繊維架橋強度時のひずみの目標値は、国内における明確な基準値がないため、スイスの UHPFRC 規格⁴⁾を参考にして定めた。

2.4 引張特性を検討するための水準

一軸引張試験による引張特性への影響を調査するため、供試体寸法および成型方法を変えて試験を実施した。試験水準を表-4 に示す。検討する項目は、目標フロー（180, 220mm）、鋼繊維添加率（1.5, 2.0, 2.5vol.%）、打込み方法（流込み、積層）、供試体高さ（100, 50, 30mm）の 4 項目とした。打込み方法は、片側から 1 層で連続的に流込む方法（図-1）を標準とし、比較として、バケツを用いて流し込みながら両端部まで数回往復して積層させて打込む方法も検討した。床版上面増厚への適用では、打込み厚さが 50mm 以下となる場合が多いことや、スイスの UHPFRC 規格では供試体高さが 30mm（図-2）であることを考慮し、供試体高さ 30, 50, 100mm について試験を実施した。

2.5 フレッシュ性状および硬化物性の試験方法

フレッシュ性状は表-3 に示す項目について実施した。圧縮強度は JIS A 1108、静弾性係数は JIS A 1149 に準拠し、φ100×200mm の供試体を用いて測定した。一軸引張試験は、VFC 指針に例示されているドッグボーン型供試体によって実施した。ドッグボーン型の供試体を成形する型枠は、JIS A 1132 に準拠した曲げ強度試験用の型枠（100×100×400mm）に専用のスペーサーを入れ、両端部 60mm の断面 100×100mm に対して、中間部 100mm の断面が 100×40mm となるように調整した（図-3）。一軸引張試験は、図-4 および写真-1 に示すように、専用の把持装置と固定用プレートを用いて実施した。試験区間（標点間）は中央 100mm とし、1 水準あたりの試験本数は 5 本とした。ひび割れ発生強度は、打込み面と型枠面の両方にひずみゲージを貼り付けてひずみを測定し、ひずみが急激に変化した時点の荷重から算出した。

2.6 エックス線 CT スキャンの試験方法

一軸引張試験による引張特性へ及ぼす繊維の配向の影響を調査するため、一軸引張試験後の供試体を用いて、

表-3 目標性能

項目	試験規格	目標値
モルタルフロー(mm)	JIS R 5201（落下なし）	150～280
空気量(%)	JIS A 1128	4.0 以下
練上がり温度(℃)	JIS A 1156	10.0 以上
圧縮強度(N/mm ²)	JIS A 1108	120 以上
ひび割れ発生強度(N/mm ²)	一軸引張試験 ¹⁾	6.0 以上
繊維架橋強度(N/mm ²)	一軸引張試験 ¹⁾	9.0 以上
繊維架橋強度時のひずみ(μ)	一軸引張試験 ¹⁾	1500 以上

表-4 試験水準

試験 No.	目標フロー(mm)	鋼繊維添加率(vol.%)	打込み方法	供試体高さ(mm)
1	180	2.0	流込み	100
2	220	1.5	流込み	100
3(基準)	220	2.0	流込み	100
4	220	2.0	積層	100
5	220	2.5	流込み	100
6	220	2.0	流込み	50
7	220	2.0	流込み	30

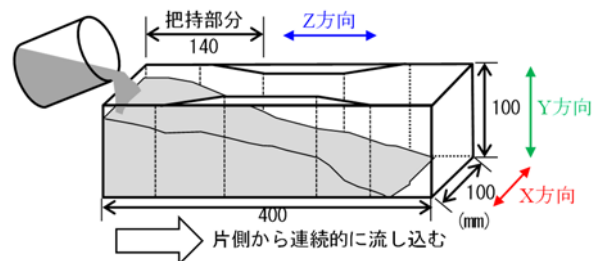


図-1 打込み方法（流込み）¹⁾を参考に作成

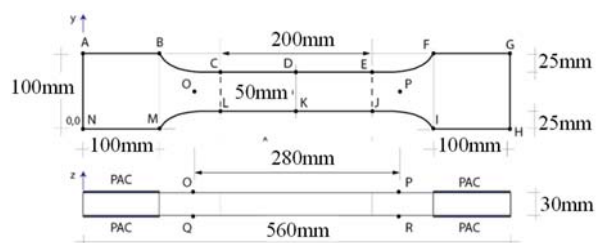


図-2 スイスの UHPFRC モデル規格の供試体⁴⁾を参考に作成

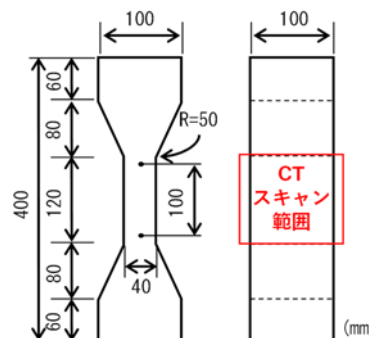


図-3 一軸引張試験の供試体形状¹⁾を参考に作成

図-3に示す標点間のエックス線CTスキャンを実施した。繊維配向性には供試体高さが影響していると考えられたため、供試体高さおよび繊維架橋強度時のひずみが異なる各2本（No.3-1, No.3-2, No.6-3, No.6-5, No.7-1, No.7-2）を試験体として選定した。また、エックス線CTスキャンを実施した後、解析ソフトウェアにより、繊維体積率、繊維の配向テンソルおよび投影角度のヒストグラムを調べた。なお、配向テンソルは、3次元空間の座標系に対して、繊維がどの方向にどの程度配向しているかを表す確率分布である。エックス線CTスキャンは、大型エックス線CT装置（マイクロフォーカス管、管電圧：280kV、管電流：140μA、ビュー数：2400枚）を用いて行った。また、スキャンした画像をもとに、解析ソフトウェア（ボリウムグラフィックス社）により欠陥解析および空間配向解析を実施した。なお、供試体高さ位置の繊維の配向を調べるため、打込面から底面までを供試体高さ100mmおよび50mmの場合は5等分、供試体高さ30mmの場合は3等分の層で区切り、各層の繊維体積率と配向テンソルを調べた。解析条件のパラメータは、解析区間（標点間）の繊維体積率が概ね2.0vol.%となるように設定して、同一条件において各層の解析を行った。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状、圧縮強度および静弾性係数

フレッシュ性状、圧縮強度および静弾性係数の測定結果を表-5および図-5に示す。No.1のモルタルフローは、目標フロー180mmに対して191mmであったが、No.2～7のモルタルフローは目標フロー220mmに対して216～272mmであった。繊維を除くマトリクスの流動性を一定としたため、鋼繊維添加率が少ないNo.2はフローが大きくなった。ただし、繊維の沈降等は認められず、検討項目で比較する水準毎のフロー差は小さいため、一軸引張試験への影響は小さいと考えられる。空気量はいずれも4%以下で目標性能を満足した。圧縮強度は151～167N/mm²と若干ばらつきはあるものの、目標値120N/mm²を満足していた。静弾性係数は45.8～50.1kN/mm²であり、各水準で明確な傾向は認めなかったが、No.5の鋼繊維添加率が大きい場合に最も大きな値を示した。

3.2 一軸引張試験における引張特性

一軸引張試験におけるひび割れ発生強度、繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみの測定結果を表-6および図-6に示す。また、各試験水準における繊維架橋強度時のひずみの最大値、最小値、平均値、標準偏差および変動係数を表-7に示す。

目標フローの異なるNo.1（180mm）とNo.3（220mm）を比較した場合、ひび割れ発生強度、繊維架橋強度およ

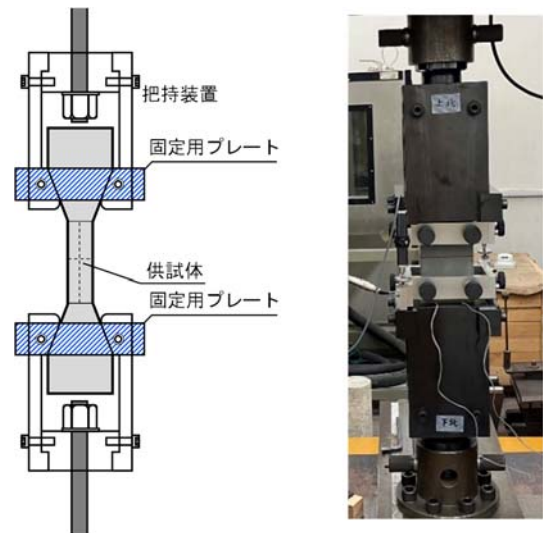


図-4 専用試験装置 写真-1 一軸引張試験状況

表-5 フレッシュ性状の測定結果

試験 No.	目標フロー (mm)	鋼繊維添加率 (vol.%)	打込み方法	供試体高さ (mm)	実測フロー (mm)	空気量 (%)
1	180	2.0	流込み	100	191	2.5
2	220	1.5	流込み	100	272	3.0
3	220	2.0	流込み	100	236	3.5
4	220	2.0	積層	100	256	2.7
5	220	2.5	流込み	100	224	1.9
6	220	2.0	流込み	50	234	—
7	220	2.0	流込み	30	244	—

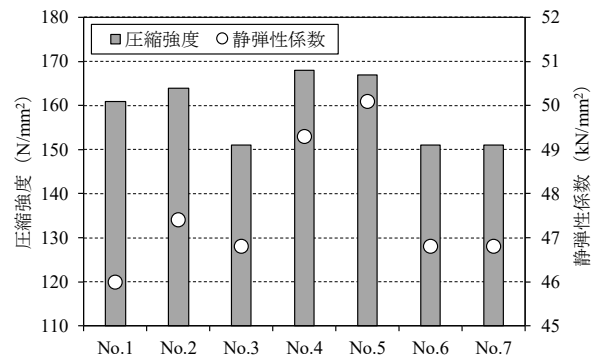


図-5 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

び繊維架橋強度時のひずみは、フローの小さいNo.1の方がいずれも大きな値を示した。既往の報告⁵⁾では、フローが小さい場合に型枠壁面付近で繊維が流動方向に配向しやすいことが報告されており、本実験でもフローの小さいNo.1の方が引張応力の作用する方向に配向する繊維が多くなり、No.3よりも高い引張特性を示したと推察される。一方で、変動係数はいずれも40%以上であり、供試体間のばらつきは大きい結果であった。

鋼繊維添加率の異なるNo.2（1.5vol.%）、No.3（2.0vol.%）およびNo.5（2.5vol.%）を比較した場合、鋼繊維添加率

が大きいほど、ひび割れ発生強度、繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみが大きくなる傾向が認められ、供試体成形時のフローが異なるものの、妥当な結果が得られていると判断した。また、鋼繊維添加率が大きいほど、繊維架橋強度時のひずみの変動係数が小さくなる傾向であった。これは、鋼繊維添加率が多いことで、標点間の断面に存在する鋼繊維が多くなり、繊維架橋強度時のひずみが比較的安定したものと推察される。

打込み方法の異なる No.3 (流込み) と No.4 (積層) を比較した場合、ひび割れ発生強度および繊維架橋強度に大きな差はないものの、No.4の方が繊維架橋強度時のひずみがやや小さい結果となった。打込み方法を積層とした場合、鋼繊維が引張応力の作用する軸方向に最も多く配向され、繊維架橋強度や繊維架橋強度時のひずみが大きく、またばらつきも小さくなると考えて実施したが、異なる結果であった。これは、片側から流し込んだ場合は型枠近傍の繊維の配向が2次元的となり、流動方向(引張応力の作用する軸方向)に繊維が配向したため、流込みと積層で明確な差が生じなかったと推察される。

鋼繊維添加率が同じで、供試体高さが異なる No.3 (100mm)、No.6 (50mm)、No.7 (30mm) を比較した場合、供試体高さを 50mm 以下とすることで、繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみが大きくなった。また、変動係数は、No.3 (100mm) の 40%に対して、No.6 (50mm) が 17%と小さくなり、No.7 (30mm) は 39%で同等の値であった。本実験で実施した一軸引張試験における繊維架橋強度時のひずみの測定結果は、非常にばらつきが大きく、評価方法やばらつきの低減対策は今後の課題である。

3.3 配向テンソルおよび繊維体積率

エックス線 CT スキャンによる解析画像の例を図-7 および図-8 に、解析結果一覧を表-8 に示す。また、配向テンソルと繊維架橋強度時のひずみの関係を図-9 に、繊維体積率の分布を図-10 に示す。配向テンソルの ZZ は供試体底面の長手方向に対して繊維が水平方向 (引張が作用する方向に平行)、YY および XX はそれぞれ繊維が鉛直および直角方向を向いている割合を示している。全区間における配向テンソル ZZ と繊維架橋強度時のひずみを比較すると、供試体高さ 100mm および 50mm では、配向テンソル ZZ が大きいほど、繊維架橋強度時のひずみが大きくなる傾向を示した。供試体高さ 30mm では、全区間の配向テンソル ZZ が同じ供試体 (試験 No.7-1、試験 No.7-4) の場合でも繊維架橋強度時のひずみに差が生じたが、ひずみが低い方の供試体 (試験 No.7-4) でも目標とする 1500 μ 以上であった。なお、供試体高さを 50mm 以下とした場合に、変動係数が最も小さく、高い繊維架橋強度時のひずみが得られた。また、供試体高さが小さいほど、各層の配向テンソル ZZ は大きく、それ

表-6 結果一覧

試験 No.	No.	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)		繊維架橋強度 (N/mm ²)		繊維架橋強度時のひずみ(μ)	
		各値	平均値	各値	平均値	各値	平均値
1	1	11.9	12.2	16.1	14.9	4248	2737
	2	11.7		13.6		948	
	3	11.9		14.7		2797	
	4	13.3		14.5		1098	
	5	12.2		15.7		4596	
2	1	10.7	10.8	12.7	12.1	1348	988
	2	10.5		12.0		445	
	3	10.7		11.6		400	
	4	10.7		12.0		850	
	5	11.4		12.4		1898	
3	1	11.6	11.0	13.3	13.8	690	1825
	2	10.1		14.0		2744	
	3	11.0		13.6		1850	
	4	11.1		13.6		1947	
	5	11.3		14.3		1895	
4	1	12.7	12.3	13.6	13.8	1747	1176
	2	12.1		14.1		891	
	3	11.4		12.4		645	
	4	12.4		14.8		1098	
	5	13.1		14.1		1500	
5	1	11.5	12.5	15.1	16.3	3147	3146
	2	12.6		16.9		4592	
	3	13.5		17.1		4348	
	4	11.8		15.6		2046	
	5	13.0		15.4		1596	
6	1	11.5	12.0	16.0	16.0	4750	4148
	2	10.9		15.7		4545	
	3	13.0		15.0		3549	
	4	11.9		15.4		3200	
	5	12.5		16.2		4698	
7	1	9.9	12.4	15.5	16.2	2043	3037
	2	13.0		16.0		3947	
	3	12.8		16.1		3399	
	4	12.5		15.2		4250	
	5	13.7		15.8		1548	

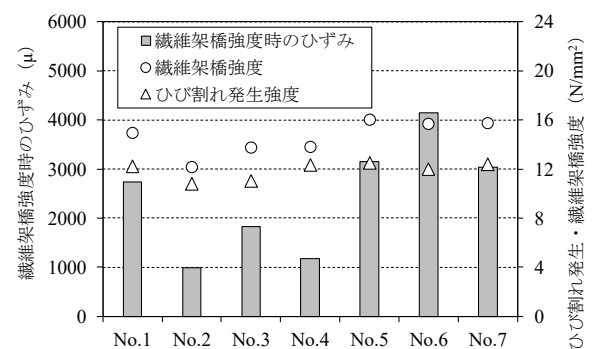


図-6 各測定値の平均値

表-7 繊維架橋強度時のひずみの各測定値

試験 No.	繊維架橋強度時のひずみ				
	最大値 (μ)	最小値 (μ)	平均値 (μ)	標準偏差 (μ)	変動係数 (%)
1	4248	948	2737	1705	62
2	1898	400	988	636	64
3	2744	690	1825	734	40
4	1747	645	1176	447	38
5	4592	1596	3146	1337	42
6	4750	3200	4148	721	17
7	4250	1548	3037	1187	39

ぞれの差も小さい傾向が認められた。

空間解析における繊維体積率は、配合設計値 2.0vol.% に対して、No.3 で 0.97～3.56vol.%, 0.98～3.27vol.%, No.6 で 1.64～2.49vol.%, 1.52～2.63vol.%と各層での差が大きかったが、No.7 では 1.91～2.08vol.%, 1.91～2.13vol.%と差が小さかった。また、いずれの場合も中央層の繊維体積率が最も小さく、打込み面である上層が最も大きくなった。なお、フレッシュモルタルの状態、鋼繊維の沈下等が認められていない材料を型枠の片側から一様に流し込んだ場合、上・下層の繊維体積率が大きく、中層の繊維体積率が小さくなる現象が生じることは考えにくく、今後さらに詳細な検討が必要と考える。

3.4 投影角度のヒストグラム

解析データから得られた投影角度のヒストグラムによって、各層における投影角度の差を比較した。供試体高さごとの各層のヒストグラムを図-11に示す。図-11に示す配色は、ZY断面における繊維の配向の角度の分布を示している。図-8に示すZY断面上では、Y方向は0度または180度、Z方向は90度である。薄水色は約90度、黄緑色は50～80度程度、青色は100～130度程度、赤色は0度または180度程度を示している。また、縦軸は投影角度のカウント数、横軸は投影角度を表しており、

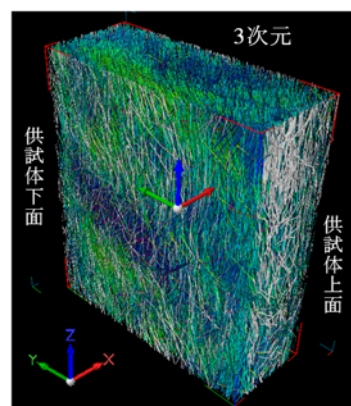


図-7 解析画像の例 (No. 3-1, 解析部全体, 3次元)

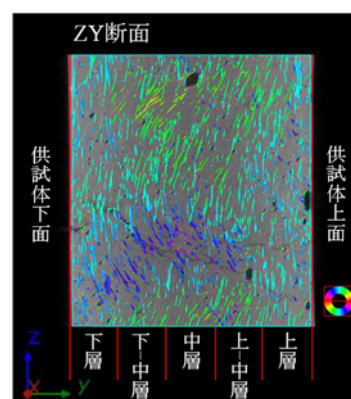


図-8 解析画像の例 (No. 3-1, X軸中央のZY断面)

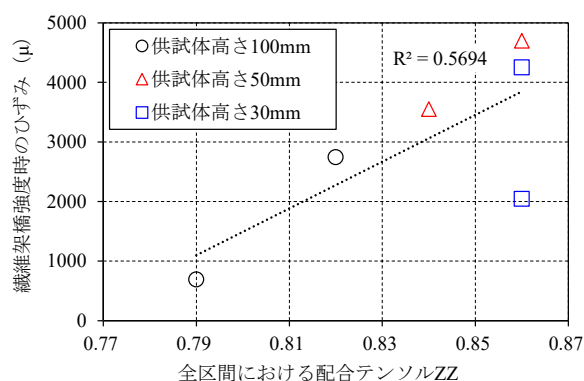


図-9 配向テンソルと繊維架橋強度時のひずみの関係

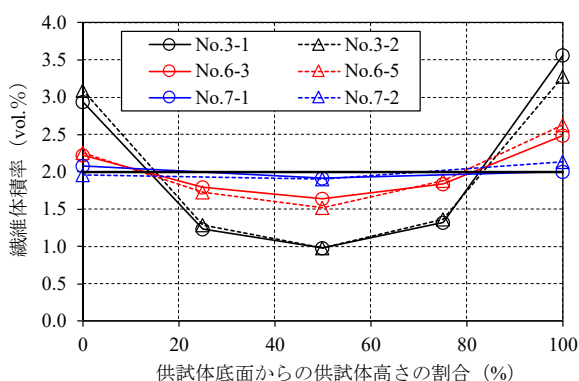


図-10 繊維体積率の分布

表-8 解析結果一覧

試験 No.	No.	解析 位置	配向テンソル			繊維体積率 (vol.%)
			ZZ	YY	XX	
3	1	全区間	0.79	0.12	0.09	2.00
		上層	0.82	0.10	0.07	3.56
		上-中層	0.78	0.14	0.08	1.32
		中層	0.76	0.14	0.09	0.97
		下-中層	0.75	0.15	0.10	1.23
	2	下層	0.78	0.12	0.10	2.93
		全区間	0.82	0.10	0.08	2.00
		上層	0.86	0.08	0.07	3.27
		上-中層	0.82	0.10	0.08	1.36
		中層	0.77	0.14	0.08	0.98
6	3	下-中層	0.77	0.15	0.08	1.29
		下層	0.83	0.09	0.08	3.09
	5	全区間	0.84	0.08	0.08	2.00
		上層	0.81	0.13	0.06	2.49
		上-中層	0.84	0.08	0.08	1.84
7	1	中層	0.84	0.10	0.06	1.64
		下-中層	0.84	0.10	0.06	1.79
		下層	0.87	0.08	0.06	2.22
	4	全区間	0.86	0.08	0.07	2.00
		上層	0.85	0.11	0.05	2.63
		上-中層	0.87	0.07	0.07	1.88
		中層	0.84	0.09	0.07	1.52
		下-中層	0.86	0.08	0.06	1.72
		下層	0.87	0.07	0.06	2.26
7	1	全区間	0.86	0.08	0.06	2.00
		上層	0.85	0.09	0.06	2.00
		中層	0.85	0.10	0.05	1.91
		下層	0.88	0.08	0.04	2.08
	4	全区間	0.86	0.08	0.07	2.00
		上層	0.84	0.09	0.07	2.13
		中層	0.86	0.09	0.05	1.91
		下層	0.87	0.08	0.05	1.96

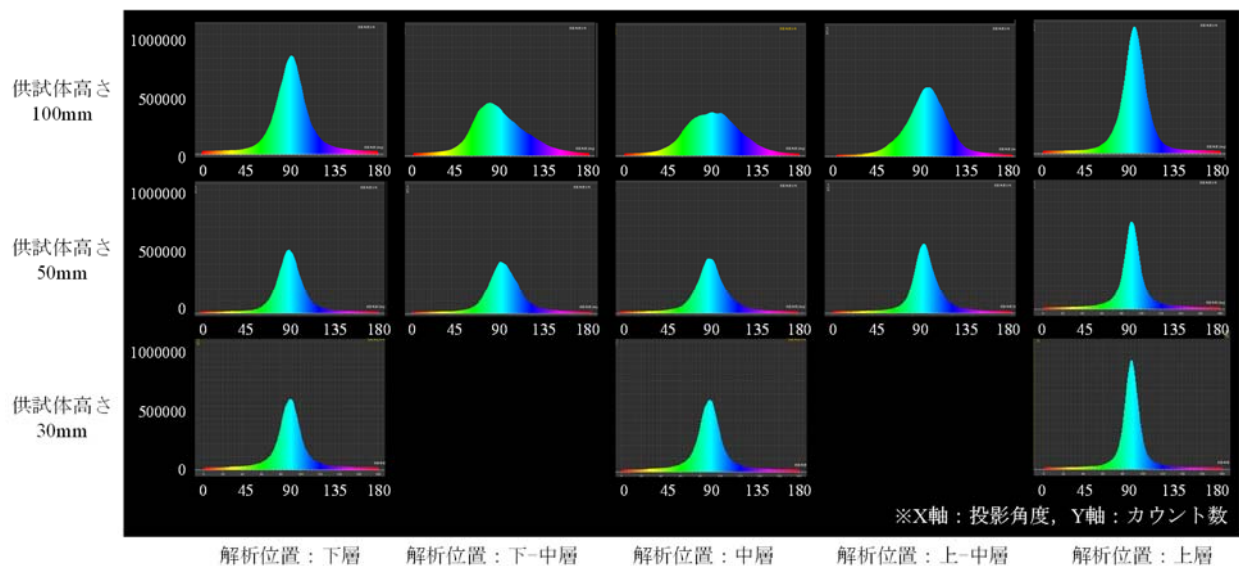


図-11 エックス線 CT スキャンによる投影角度のヒストグラム

それぞれ 0～1000000 カウント、0～180 度の範囲で表している。なお、本検討では、投影角度のカウント数のピークおよび分布を供試体間で相対的に比較した。供試体高さ 100mm の場合、打込み面である上層と型枠底面である下層において、90 度 (Z 方向) に近い角度を示す薄水色のカウント数が多くなっている。しかし、上-中層、中層、下-中層では、投影角度 50～80 度程度や 100～130 度を表す黄緑色や青色が多くなっており、黄緑色がカウントのピークとなっている層 (供試体高さ 100mm、下-中層) もある。すなわち、中層付近では、繊維の配向が引張応力の作用する方向に対して配向していないものが多いことを示している。供試体高さが 50mm および 30mm の場合には、すべての層において、投影角度 90 度程度を表す薄水色がカウントのピークを示していることから、引張応力が作用する方向に対して平行に繊維が配向しているものが多いと読み取れる。これは、繊維の長さに対して部材の断面寸法が小さい場合、型枠近傍の繊維の配向が 2 次元的となりやすいことなどが影響していると考えられるが、本検討の解析のみでは明確な要因は判断できなかった。

4. まとめ

一軸引張試験における供試体寸法および成形方法が繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみに与える影響を調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 各試験値にばらつきはあるものの、フローが小さいほど繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみが大きくなる傾向であった。
- (2) 鋼繊維添加率がひび割れ発生強度に与える影響は小さかった。一方、鋼繊維添加率が繊維架橋強度および繊維架橋強度時のひずみに与える影響は大き

く、鋼繊維添加率を大きくするとそれぞれの試験値が大きくなった。

- (3) 供試体高さを 100mm より小さくした場合、繊維架橋強度と繊維架橋強度時のひずみが大きくなる傾向を示した。
- (4) 供試体高さが小さいほど、配向テンソル ZZ は大きくなる傾向を示した。
- (5) 投影角度のヒストグラムにより繊維の配向を比較した結果、供試体高さが 100mm の場合は、供試体中層付近で繊維の配向が引張応力の作用する方向に対して平行に向いていないものが多い傾向を示した。
- (6) 供試体高さ 50mm および 30mm の場合、各層における投影角度は 90 度付近がピークとなっており、引張応力が作用する方向に対して平行に繊維が配向しているものが多いことがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針 (案)，2024.9
- 2) 富井孝喜，青木峻二，玉滝浩司，藤野由隆：床版上面増厚工法用超速硬型高性能繊維補強コンクリートの配合設定，土木学会，第 77 回年次学術講演会，V-233，2022.9
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，2004
- 4) Swiss Standard SIA 2052 : UHPFRC Materials, Design and Application, 2016
- 5) 石河義希，河村有紀，周波，内田裕市：繊維補強コンクリート中の繊維の配向に及ぼす流動性の影響，土木学会，第 71 回年次学術講演会，V-110，2016.9