報告 小型棒状試験片を後成形したダンベル型供試体による各種断面形状の HPFRCC と UFC の引張性能の評価

田中 僚*1・佐藤あゆみ*2・浅野 幸男*3・六郷 恵哲*4

要旨:小型の棒状試験片を複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)を用いて後成形して ダンベル型供試体を作製し一軸引張試験を行う方法により,断面形状が異なる HPFRCC や超高強度繊維補強 コンクリート(UFC)の一軸引張性能を確認した。本研究の範囲では,HPFRCCで作製した棒状試験片の断 面形状を変えても一軸引張試験結果に有意な差は認められなかった。高温養生が必要な UFC でも,小さな棒 状試験片でよいため市販の電気ポットで高温養生を行え,簡易に一軸引張試験を行うことができた。試作繊 維の量が少ない場合にも,繊維補強コンクリートとしての引張性能を評価するのにこの方法は適していた。 キーワード:HPFRCC,UFC,一軸引張試験,ダンベル型供試体

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下, HPFRCC)のような高い引張性能を有する材料では,一 軸引張試験により引張性能を評価することが望まれる。 一軸引張試験には、ダンベル型の特殊な供試体が用いら れる場合が多い。超高強度繊維補強コンクリート(以下, UFC)や樹脂材料の一軸引張試験は、材料の収縮や成形 の難しさからダンベル型供試体の作製が難しく、さほど 行われていない。

著者ら¹⁾は、HPFRCC棒状試験片を後成形してダンベ ル型供試体を作製し一軸引張試験を行う簡易な試験方法 を提案している。収縮が大きな材料でも、棒状試験片で あれば材料が収縮時に型枠に拘束されない。高温養生が 必要な材料でも、試験片が小型であれば、入手が容易な 電気ポットで高温養生が可能である。さらに、試験片の 体積が小さく少量の試料で引張試験を行えるため、試作 段階で試料が少ない材料を評価する場合にも、この試験 方法は有効である。薄板状の試験片でも、ダンベル型供 試体に後成形して一軸引張試験を行うことができる。

本研究では、棒状試験片をダンベル型供試体に加工 (後成形)して行う一軸引張試験方法の適用範囲を拡げ ることを目的としている。様々な断面の形状が HPFRCC の引張性能に及ぼす影響について、この試験方法により 検討した。また、UFC の引張性能についても、小型の UFC 棒状試験片を作製し電気ポットで高温養生を行い、 ダンベル型供試体に後成形して一軸引張試験を行い、評 価した。さらに、少量の試作繊維を用いた繊維補強モル タルの引張性能に繊維が及ぼす影響についても、この試 験方法により評価した。

2. 実験概要

2.1 実験の内容

小型棒状試験片に対して両端のつかみ部を後から打 設したダンベル型供試体を作製し、下記の3シリーズの 一軸引張試験を行った。

- ・シリーズ1:各種断面形状のHPFRCC試験片の試験
- ・シリーズ2: UFC 試験片の試験
- ・シリーズ3:試作繊維補強モルタル試験片の試験

供試体中の短繊維は型枠面付近では表面(型枠面と仕上げ面)に沿うように配向²⁾しているため,表面が多くなる断面形状ほど引張軸方向に沿って繊維が配向し,引張性能が高くなることが予想される。そこで,シリーズ1では,断面形状が異なる HPFRCC 棒状試験片を作製し,一軸引張試験を行った。作製した試験片の断面形状の詳細を表-1に,断面形状を図-1に,棒状試験片と後成形したダンベル型供試体の例を写真-1に示す。

シリーズ2では、硬化時の収縮が大きいためにダンベ ル型供試体を用いた引張試験が一般に難しいとされてい る UFC の引張性能を、本研究の方法で確認した。

断面形状	A:断面積(mm ²)	B:周長(mm)	A/B(mm)
30×30	900	120	7.50
30×15	450	90	5.00
30×7.5	240	76	3.16
コ型	704	148	4.76
L型	704	120	5.87
八角型	612	92	6.65
X型	612	148	4.14

表-1 棒状試験片の断面形状の詳細

岐阜大学	工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)
熊本大学	自然科学研究科環境共生工学専攻助教 博士(工学) (正会員)
岐阜大学	社会資本アセットマネジメントセンター 博士(工学) (正会員)
岐阜大学	工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)
	岐阜大学 熊本大学 岐阜大学 岐阜大学



図-1 棒状供試体の断面形状



写真-1 作製した供試体(左:X型断面,右:L型断面)

表-2 使用材料

材料	仕様,物性
	繊維径 12µm, 繊維長 12mm,
高強度ポリエチレン繊維	ŧ 密度 0.97g/cm ³ ,
(PE) 引張強度 2.6GPa,
	弹性係数 88GPa
	繊維径 200µm, 繊維長 15mm,
名图《社》《任	密度 7.85g/cm ³ ,
亚叫和埃尔王	引張強度 2.7GPa,
	弹性係数 200GPa
	JIS R 5210
セメント (C) 早強ポルトランドセメント,
	密度 3.13g/cm ³
	、密度 2.71g/cm ³ ,
石灰石柄 (LF	/ 比表面積 3.05cm ² /g
細骨材 (S) 7 号珪砂, 密度 2.63g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SF) ポリカルボン酸エーテル系
增粘剤 (MC) 水溶性メチルセルロース系

表-4 鋼繊維と試作繊維 A~C の物性値

	密度	線径	強度	伸度	弾性率	長さ	借去
	(g/cm^3)	(µm)	(GPa)	(%)	(GPa)	(mm)	加巧
鋼繊維	7.85	200	2.7	-	200	15	
A	0.97	187	2.6	3.7	86	15	
В	0.97	187	2.6	3.7	86	25	
С	0.97	129	2.6	3.3	99	15	テープ状

表-3 HPFRCC の配合

	W/D	NUC	単位量(kg/m ³)						
使用箇所	W/P (%)	w/C (%)	W	Powder		c	CD	MC	DE
				С	LP	3	SP	IVIC	ΓĽ
棒状試験片	30.0	42.8	380	887	380	351	19.0	1.0	12.1
成形材	30.0	30.0	380	1267	0	401	19.0	1.0	12.1

シリーズ3では、UFC に用いられる鋼繊維に代えて高 強度 PE 繊維を使用することの可能性について検討する ため、試作した少量の PE 繊維を用いて繊維補強モルタ ルを作製し、引張性能を確認した。

2.2 材料と配合

シリーズ1の実験で用いた HPFRCC では,高強度ポリ エチレン(以下, PE) 繊維を体積比で1.25%混入し,セ メントの一部(質量比で30%)を石灰石粉で置換した。 セメントには早強セメントを用いた。使用材料を表-2 に,配合を表-3に示す。

シリーズ2のUFCには、プレミックスタイプの材料 を使用し、φ0.2×15mmの鋼繊維を2vol%混入した。シ リーズ3の試作繊維を使用した繊維補強モルタルには、 UFC 用プレミックスタイプの材料に試作 PE 繊維を 1.75vol%混入した。試作 PE 繊維には、断面形状が円形の一般的な繊維 A、B と、断面形状が長方形で平たい繊維 C (テープ状)を用いた。試作 PE 繊維と UFC 用鋼繊維の寸法と物性を表-4 に示す。

棒状試験片を一軸引張試験機の把持装置に適したダ ンベル型に成形するために、棒状試験片の両端の掴み部 に後から打設する材料(以下,成形材)には、PE 繊維混 入量1.25vol%,石灰石粉置換率0%のHPFRCCを用いた。 セメントには早強セメントを用いた。配合を表-3 に示 す。

3 種類の HPFRCC と UFC の練混ぜには、オムニミキ サー(容量 30 リットル)を用いた。

2.3 供試体の成形と一軸引張試験方法

シリーズ1で用いた HPFRCC 棒状試験片の外寸法は,



(早12:100) 図-2 供試体の形状寸法ならびに作製順序



写真-2 一軸引張試験装置

幅 29.5mm,高さ 30mm,長さ 300mmとし,表-1に示 すような断面形状とした。図-2 に手順を図示するよう に、材齢7日でダンベル型の型枠に棒状試験片をセット して掴み部に成形材 HPFRCC を充填し、ダンベル型供試 体に加工した。成形材を充填する直前に、成形材と接す る試験片の界面を水洗しながらワイヤーブラシで清掃し 打継ぎ面の処理を行った。養生室(室温 20℃,相対湿度 80%)で、供試体を湿布で包んで湿空養生した。材齢14 日で、一軸引張試験を行った。

シリーズ2,3 で用いた UFC 棒状試験片ならびに試作 繊維補強モルタル棒状試験片の寸法は,幅 15mm,高さ 30mm,長さ230mmとし,市販の電気ポットの90℃の湯 の中で2日間高温養生を行った。養生後,シリーズ1と 同様にダンベル型の型枠に棒状試験片をセットして掴み 部に成形材 HPFRCC を充填して,ダンベル型供試体に加 工した。

ー軸引張試験に用いた装置を写真-2 に示す。ダンベ ル型供試体の下部を固定支持,上部を回転支持とした。 検長区間(80mm)の変位は供試体の両側に取り付けた 2 つの変位計(容量 25mm)で,荷重はロードセル(容量 10KN)で検出した。引張力は,手回しジャッキで与えた。

2.4 圧縮強度試験

各シリーズでは,圧縮供試体(φ50×100mm)を作製 し,棒状試験片と同様の養生を行い,一軸引張試験時と 同じ材齢で圧縮強度試験も行った。

表-5 断面形状が異なる供試体の引張試験結果

素明長年	引張強度	終局ひずみ	A/B
剧面形扒	(N/mm^2)	(%)	(mm)
30×30	5.05	2.21	7.50
30×15	6.05	2.44	5.00
30×7.5	5.68	2.05	3.16
コ型	5.19	1.96	4.76
L型	5.09	2.48	5.87
八角型	4.99	2.09	6.65
X型	4.45	2.02	4.14

実験結果および考察

3.1 シリーズ1:各種断面形状の HPFRCC 試験片の試験 各種の断面形状をした HPFRCC 棒状試験片をダンベル 型供試体に後成形して一軸引張試験を行った結果を表-5 に示すとともに,代表的なものとして 30×15 断面,L 型断面,X型断面について引張応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。図-3 (a)の断面形状が単純な 30×15 断面で は曲線の形状のばらつきは小さく,図-3 (b),(c)の形 状がより複雑で薄い部分を持つL型やX型では,曲線の ばらつきが大きくなる傾向にあった。引張強度と引張終 局ひずみ(引張強度点のひずみ)は,引張終局ひずみが 最大の供試体と最小の供試体の2本を除外した残り3本 の平均により求めた。棒状試験片の断面積が一定ではな いため,試験片の断面積Aをその断面の周長Bで除した 値(A/B)を,引張性能の評価のために用いた。引張強 度および終局ひずみとA/Bとの関係を図-4に示す。

試験片の断面とその周長との比 A/B の値が小さいと, 試験片の表面(型枠面と仕上げ面)が広くなり,より多 くの繊維が表面で配向して引張性能が高くなることが予 想されたが,図-4 に示すように,A/B と引張性能(引 張強度と引張終局ひずみ)との間には,ほとんど相関が 認められなかった。相関が認められなかった原因として, 表面の広さに関係なく,どの断面においても繊維の配向 状況が同様になっていた可能性も考えられ,供試体内部 の繊維の配向状態について,今後検討する必要がある。 本研究で取り上げた寸法の範囲では,どのような断面形 状であっても,成形材に HPFRCC を用いてダンベル型に 後成形することで安定して一軸引張試験が行えることを 確認できた。

3.2 シリーズ2: UFC 試験片の試験

UFC で作製した棒状試験片を HPFRCC を成形材に用 いてダンベル型に後成形して一軸引張試験を行った。一 軸引張試験で得られた引張応力-変位曲線を図-5 に示 す。なお UFC の圧縮強度は 211N/mm²,引張強度は 16.0 N/mm²であった。引張終局ひずみは 0.78%であった。

UFC で小型の棒状試験片を作製することで、収縮の際 に拘束されることがなく、供試体にひび割れが発生する こともなかった。成形材として用いた HPFRCC の圧縮強 度は 70N/mm²程度であったが、間詰め部分が破壊するこ となく一軸引張試験を行うことができた。また、図-5 をみてもわかるように UFC においても 0.8%程度の引張 終局ひずみと複数のごく微細なひび割れを確認すること ができた。





図-3 各種断面の供試体の引張応力ひずみ曲線

3.3 シリーズ3:試作繊維補強モルタル試験片の試験

UFC 用のプレミックスタイプの材料に、鋼繊維に代え て試作 PE 繊維(A~C)を混入した繊維補強モルタルで 棒状試験片を作製し、ダンベル型供試体に後成形して一 軸引張試験を行った。圧縮試験ならびに引張試験結果を 表-6に示し,引張応力-変位曲線を図-6に示す。表-6 には参考のため繊維を混入していない供試体の結果を 示す。表-6から分かるように、圧縮強度と引張強度は 繊維なしのものと比べ, 鋼繊維を混入すると大きくなり, PE 繊維 A~C を混入すると小さくなった。図-5 では, 鋼繊維を用いた UFC では初期ひび割れ発生後, 疑似ひず み硬化特性が見られるが,図-6に示す試作PE繊維を用 いた繊維補強モルタルでは、いずれの繊維を用いた場合 も初期ひび割れ強度が最大引張強度となり、ひび割れは 1本しか観察されなかった。いずれの試作繊維でも、初 期ひび割れが発生した後,初期ひび割れ位置で繊維がじ わじわと引き抜けた。

今回用いた試作繊維ではひずみ硬化特性を得ることが できなかったが、繊維 A~C の中では、繊維 B を用いた モルタルで、ひび割れ発生後の最大引張応力が最も大き くなった。繊維の表面を加工したり、繊維をさらに長く して繊維とマトリクスとの付着を改善することや、マト リクス中に少量の中空粒子を混入して圧縮強度をさほど 低下させることなく初期ひび割れ強度を小さくすること により、PE 繊維を混入した高強度マトリクスにおいても ひずみ硬化特性を得られるように検討したい。

4. おわりに

棒状試験片を HPFRCC を用いてダンベル型供試体に 後成形して一軸引張試験を行う方法により,断面形状が 異なる HPFRCC やダンベル型供試体の作製が難しい UFC の一軸引張性能を確認した。下記の知見が得られた。

- (1) X型やL型を含む種々の断面形状をした HPFRCC 棒 状試験片をダンベル型供試体に後成形して一軸引 張試験を行うことができた。本研究で検討した寸法 の範囲では、HPFRCC で作製した棒状試験片の断面 形状を変えても、引張性能(引張強度や引張終局ひ ずみ)に有意な差は認められなかった。
- (2) UFC の一軸引張試験を、棒状試験片を HPFRCC を 用いてダンベル型供試体に後成形する方法で行う ことができた。棒状試験片の長さを市販の電気ポッ トに入る大きさにすることで、UFC の高温養生を簡 易に行うことができた。UFC の一軸引張試験におい て、0.8%程度の引張終局ひずみと複数のごく微細な ひび割れを確認できた。
- (3) 試験片をダンベル型供試体に後成形して行う一軸 引張試験方法は、量が少ない試作段階の繊維で補強

したモルタルの引張性能を評価するのに適していた。

表-6 試作繊維を用いた供試体の強度試験結果

- 1			
	使用繊維	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
	繊維なし	202	13.3
	鋼繊維	211	16.0
	А	155	13.2
	В	166	12.8
	С	133	10.8



参考文献

- 田中僚,高田浩夫,浅野幸男,六郷恵哲:棒状試験 片を後成形したダンベル型供試体による HPFRCC の一軸引張試験方法の検討, コンクリート工学年 次論文集, Vol.34, No.1, pp232-237, 2012
- 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, pp268-273, 2012