

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。このダンベル型供試体は、一軸引張試験機の把持装置の寸法、形状に合致するよう両端の掴み部がダンベル型に拡幅された専用の型枠を用いて作製されるが、型枠はダンベル型に金属を削り出した精密な加工が施されており、現状において容易に入手できるものではない。さらに、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）や樹脂材料での一軸引張試験は、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。

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が確立できれば、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。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ため、樹脂材料の評価をすることも可能である。

本研究では、棒状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の適用範囲を広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

小型棒状試験片をダンベル型供試体に後成形して行う引張試験方法を適用して、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：樹脂試験片の試験

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。さらに、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。

シリーズ 3 では、樹脂で薄板状の試験片を作製し、成形材に HPFRCC を用いてダンベル型に後成形する方法で、樹脂材料の引張性能を確認した。

表-1 棒状試験片の断面形状の詳細

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

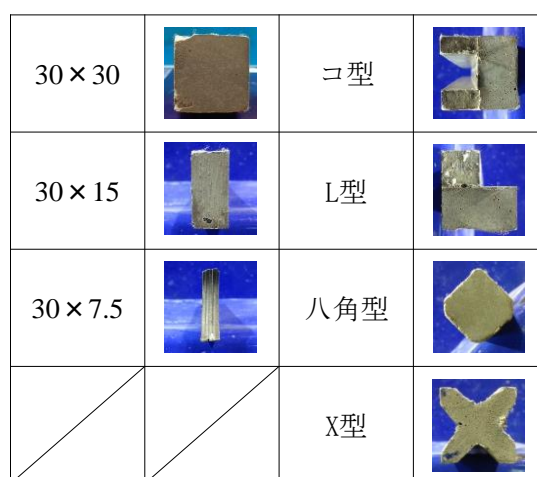


図-1 棒状供試体の断面形状

2.2 材料特性と配合

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。配合を表-2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、 $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$ の鋼繊維を2vol%混入した。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繊維とUFC用鋼繊維の寸法と物性を表-3に示す。

シリーズ3の実験で、樹脂の試験片を作製するにあたって光硬化型FRPシートを用いた。光硬化型FRPシートとは、マット状のガラス繊維（チョップドストランドマット）に光硬化性のあるエポキシアクリレート樹脂を含浸させたものである。光硬化型FRPシートの基本物性を表-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-2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。

表-3 鋼繊維と試作繊維A~Cの物性値

	密度 g/cm ³	線径 μm	強度 GPa	伸度 %	弾性率 GPa	長さ mm	備考
鋼繊維	7.85	200	2.7	-	200	15	
A	0.97	64	1.7	4.5	48	15	
B	0.97	187	2.6	3.7	86	15	
C	0.97	187	2.6	3.7	86	25	
D	0.97	129	2.6	3.3	99	15	テープ状

表-4 光硬化型FRPシートの一般的物性

繊維目付量	600 g/m ²
厚さ	1.6 mm
引張強度	80 N/mm ² 以上
引張弾性係数	6.0×10 ³ N/mm ² 以上

2.3 供試体成形と一軸引張試験

シリーズ1で用いたHPFRCC棒状試験片の外寸法は、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、ダンベル型供試体に加工した。

シリーズ3で用いた樹脂薄板試験片の寸法は、幅30mm、高さ1.6mm、長さ300mmとし、太陽光により光硬化型FRP試験片に紫外線を与え、紫外線計測機（UVチェッカー）により、各試験片の紫外線積算光量が1500mJ/cm²以上であることを確認することで、硬化完了とした。引張強度が高い材料であるため、成形材との付着が足りず引き抜けてしまうことも考えられるため、試験片の両端を折り返してアンカー加工した試験片も作製した。

一軸引張試験は、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、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。

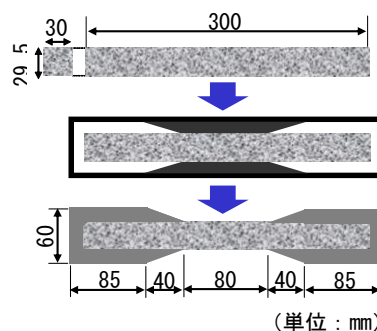


図-2 供試体の形状寸法ならびに作製順序

表-2 HPFRCCの配合

使用箇所	W/P (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	Powder		S	SP	MC	PE
				C	LP				
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

3. 実験結果および考察

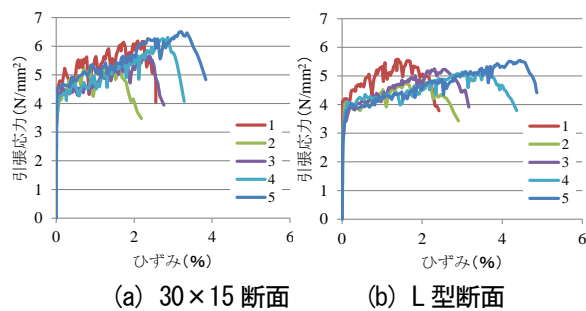
3.1 シリーズ1：各種断面形状のHPFRCC試験片の試験

各種の断面形状をしたHPFRCC棒状試験片の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。引張強度と引張終局ひずみは、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。

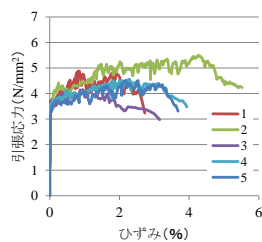
試験片の断面とその周長との比A/Bの値が小さいと、試験片の表面が広くなり、より多くの繊維が表面で配向して引張性能が高くなることが予想されたが、図-4に示すように、A/Bと引張性能との間には、ほとんど相関が認められなかった。このように、本研究で取り上げた寸法の範囲では、どのような断面形状でも、成形材にHPFRCCを用いてダンベル型に後成形することで安定して一軸引張試験が行えることを確認できた。

表-5 断面形状が異なる供試体の引張試験結果

断面形状	引張強度 (N/mm ²)	終局ひずみ (%)	A/B (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

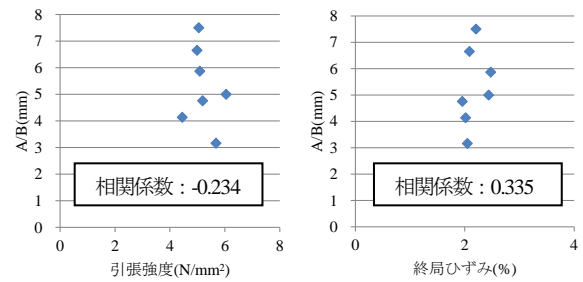


(a) 30×15断面 (b) L型断面



(c) X型断面

図-3 各種断面の供試体の引張応力ひずみ曲線



(a) 引張強度とA/Bの関係 (b) 終局ひずみとA/Bの関係
図-4 引張強度および終局ひずみとA/Bの関係

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16.0N/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はなかった。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。

また、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~D)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。試作繊維を用いた場合、鋼繊維を用いたUFCよりも圧縮強度が小さくなった。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、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~Dの中では、繊維C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。

表-6 試作繊維を用いた供試体の強度試験結果

供試体	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
鋼繊維	211	16.0
A	155	12.2
B	155	13.2
C	166	12.8
D	133	10.8

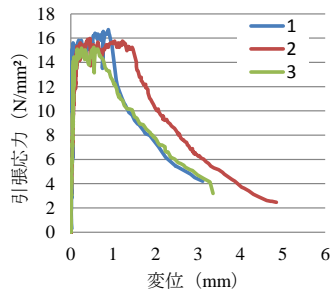


図-5 UFCの引張試験結果

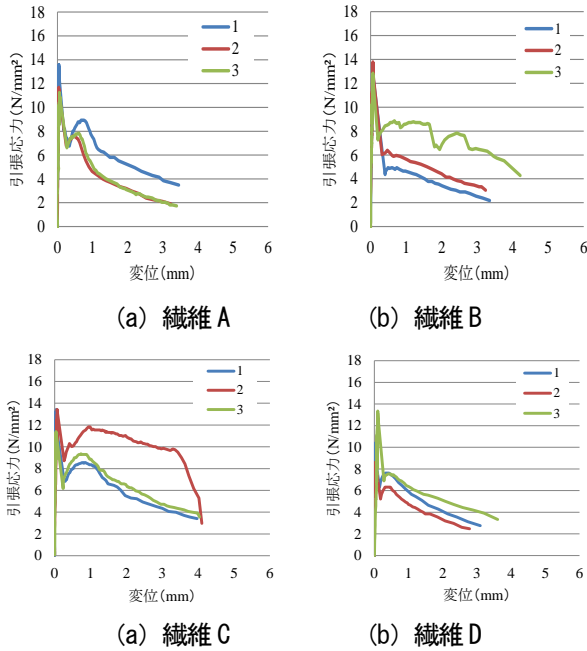


図-6 試作繊維を用いた供試体の引張試験結果

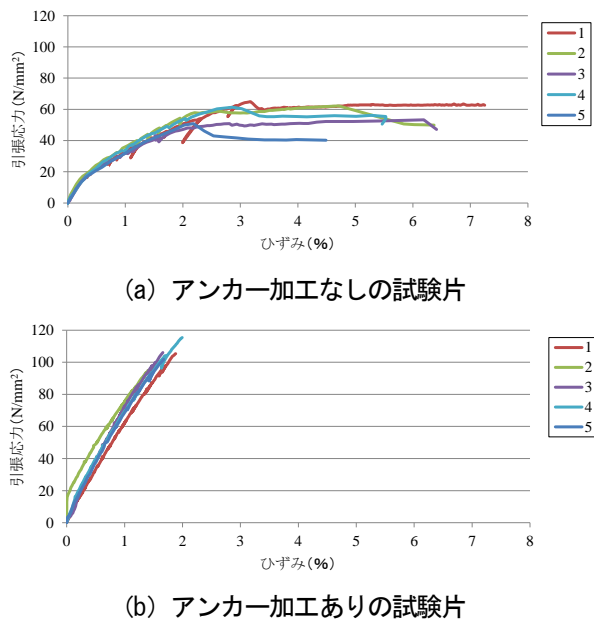


図-7 光硬化型FRPシートの引張応力-ひずみ曲線

3.3 シリーズ3：樹脂試験片の試験

光硬化型 FRP シートで作製した薄板試験片を 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。引張試験結果を表-7に示し、引張応力-ひずみ曲線を図-7に示す。図-7から分かるように、アンカー加工なしの試験片では、引張応力がおよそ 60N/mm^2 に達したところで樹脂と成形材との付着が切れて試験片が引き抜けてきてしまった。薄板試験片の両端にアンカー加工を施した供試体では、試験片が引き抜けることなく引張試験を行うことができた。

表-7 から、光硬化型 FRP シートの引張強度は 104.7N/mm^2 、終局ひずみが 1.72%、引張弾性係数は $7.8 \times 10^3\text{N/mm}^2$ であった。物性表(表-4)と照らし合わせると、樹脂で作製した薄板試験片を HPFRCC を用いてダンベル型に加工する方法で、引張特性を評価できることを確認した。

表-7 光硬化型FRPシートの引張試験結果

付着が切れた時の引張応力(N/mm ²)	58.5
引張応力(N/mm ²)	104.7
終局ひずみ(%)	1.72
引張弾性係数(N/mm ²)	7.8×10^3

4. まとめ

- (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。
- (4) 光硬化型 FRP シートのような樹脂材料の一軸引張試験を、薄板状の試験片を HPFRCC を用いてダンベル型に後成形する方法で行うことができた。試験片の引張強度が高く成形材から引き抜けてしまう場合も、試験片にアンカー加工をすることで引張試験を行うことができた。