

3D プリンティングで作製した繊維補強セメント複合材料の力学特性

清水建設 技術研究所 正会員 ○小倉 大季, 阿部 寛之, 田中 博一

1. はじめに

近年、海外を中心に建設スケールの3D プリンティング技術の研究開発が進められている¹⁾。これらの技術のうち、最も検討が進んでいるのは、フレッシュ状態のセメント系材料を押し出して積層することで、立体形状を作製する技術(材料押し出し方式)である。本技術は、自由な形状の部材を作製できるだけでなく、コンクリート構造物の自動化・省人化施工への展開も見込まれ、様々な可能性が期待できると考えられているが、その実現には、施工プロセス上、鉄筋の配筋が難しいという課題を解決する必要がある。

この課題に対して、筆者らは鉄筋代替となる補強法として繊維補強セメント複合材料を用いる方法を提案し、プリント材料に適した配合の開発に取り組んでいる。本論では開発した材料で作製した供試体の力学特性を紹介する。

2. 実験概要

本研究で使用した繊維補強セメント複合材料は、水結合材比を0.22、砂結合材比を0.5、繊維混入率1.5vol%とした配合である。結合材には、普通ポルトランドセメント、シリカフューム、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した。細骨材には、最大粒径1.0mmの砂を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。繊維には、長さ6mm、直径12 μ mのポリエチレン繊維を用いた。材料の練混ぜには容量50Lの二軸強制練りミキサを使用し、練混ぜ時間は材料投入後から6分間とした。

作製した供試体の一覧を表-1に示す。本研究ではプリントおよび型枠に打込む方法で供試体を作製した。前者の方法では、図-1のようにノズルから連続してセメント系材料を押し出せる装置を用いて、幅600mm、奥行き60mm、高さ250mmの壁形状の造形物を作製した。ノズルの移動速度は30mm/秒として、1層ごとのプリント終了後にノズルを鉛直方向に8mm上昇させ、次の層に移行するように制御した。プリント完了後は、表面の成形や振動台による締固めなどは行わずに、そのままの状態で養生に移行した。型枠に打込む方法では、2種類の円柱とダンベル型の供試体(以下、打込み供試体)を作製した。全ての供試体は、水分が逸散しない状態で1日静置した後、恒温恒湿室(温度20 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C、湿度60 $\pm$ 5%RH)に移動させ、材齢26日まで養生を行った。養生方法は、プリント造形物の場合は気中養生、打込み供試体の場合は封緘養生とした。

表-1 供試体の一覧

作製方法	形状 [寸法 (mm)]	数	用途
プリント	円柱 [ϕ 50 $\times$ 100] ^{*1}	14	圧縮試験
	ダンベル [330 $\times$ 30 $\times$ 13] ^{*1}	3	一軸引張試験
打込み	円柱 [ϕ 50 $\times$ 100]	3	圧縮試験
	円柱 [ϕ 100 $\times$ 200]	3	割裂引張試験
	ダンベル [330 $\times$ 30 $\times$ 13]	3	一軸引張試験

^{*1} プリンティングで作製した造形物から、コア抜きおよび切り出した



図-1 3D プリンティングの状況



図-2 壁形状の造形物とコア抜き位置

プリントした壁形状の造形物は、材齢26日に恒温恒湿室から取り出し、図-2の位置からコアを抜いた。このコア供試体は高さ210mm程度であり、これを半分に切断することで、 ϕ 50 $\times$ 100mmの円柱供試体に成形した。また、試験区間の寸法が幅30mm、奥行き13mmであるダンベル型供試体²⁾も、プリント造形物から切り出して作製した。これらの成形後、材齢28日に力学試験に供した。

力学試験としては、圧縮試験、割裂引張試験ならびに一軸引張試験を行った。一軸引張試験は、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針²⁾に準拠して行った。試験区間は供試体中央の80mmとして、区間内変位を計測するためにパイ型変位計を供試体両側に配置した。载荷速度は、0.5mm/分の一定とした。

キーワード: 繊維補強セメント複合材料, 3D プリンティング, 付加製造技術, ひずみ硬化型セメント複合材料
連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6415

表-2 力学試験の結果一覧

	圧縮試験			割裂引張試験	一軸引張試験		
	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	ひび割れ発生強度 (MPa)	ひび割れ発生強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	終局ひずみ (%)
プリント供試体	105 (0.036)	33.7 (0.020)	0.22 (0.043)	—	4.43 (0.131)	5.84 (0.133)	0.79 (0.210)
打込み供試体	123 (0.027)	36.0 (0.014)	0.23 (0.030)	4.80 (0.124)	3.88 (0.232)	5.58 (0.192)	0.61 (0.520)

* () 内の値は変動係数である



図-3 プリント造形物からコア抜きした供試体の外観

3. 実験結果

力学試験から得られた結果の一覧を表-2に示す。プリント供試体は、打込み供試体と比べて圧縮強度とヤング係数が小さい傾向にあったが、それ以外の力学特性については概ね同様の値を示した。圧縮強度とヤング係数が小さくなった理由は、養生方法の違いが一つの要因であると考えられる。また、変動係数は、打込み供試体に対してプリント供試体が際立って大きくなるようなことはなかった。

プリント供試体の変動係数が大きくならなかった理由の一つとして、積層間の界面などに欠陥が認められなかったことが挙げられる。図-3は、プリント造形物からコア抜きした供試体の外観である。外観からは、層間の不連続面が目視できないだけでなく、目立った空隙やひび割れなども観察されなかった。層間の一体性については、プリント造形物から供試体をコア抜きするときに層間で割れなかったことから、脆弱ではないと判断できる。

図-4に、プリント供試体（円柱供試体）計14体から得られた圧縮試験の結果をヒストグラムで示した。ここでは、プリント造形物の上部から採取した供試体と下部から採取した供試体に分けて示した。圧縮強度、ヤング係数の平均値および変動係数は、上部と下部で同程度であり、採取位置による差異はほとんどみられなかった。

図-5に、プリント供試体の一軸引張試験から得られた引張応力-ひずみ関係を示す。ひずみは、パイ型変位計で計測した変位の平均値を区間長で除した値である。供試体ごとのばらつきが大きいものの、いずれの供試体も初期ひび割れ発生後にひずみ硬化挙動を呈した。ひび割れは試験

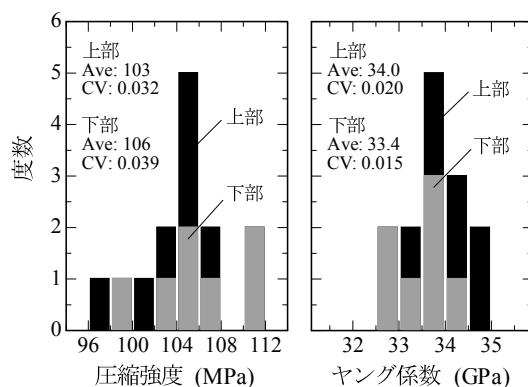


図-4 プリント供試体の圧縮試験結果のヒストグラム

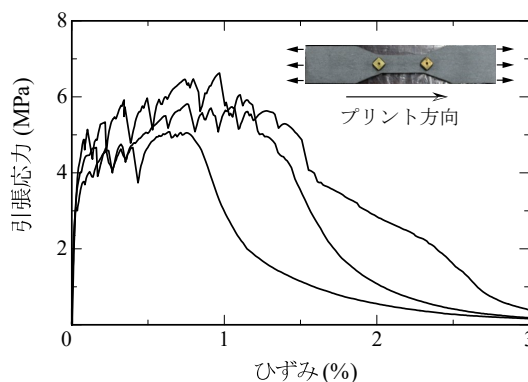


図-5 プリント供試体の引張応力-ひずみ関係

区間の全域に分散して発生したことが観察され、プリント供試体と打込み供試体に顕著な差異は認められなかった。

4. おわりに

本研究では、3Dプリンティングで作製した繊維補強セメント複合材料の力学特性を評価するために、プリント造形物から切り出した供試体と型枠に打ち込んで作製した供試体を用いて力学試験を行い、その結果を考察した。今後は、切出し方向を変えて供試体を採取するなど、プリントした造形物の異方性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 小倉大季: 建設スケールの3Dプリンティング技術に関する海外の研究動向, コンクリート工学, Vol. 56, No. 2, pp. 174-180, 2018.
- 2) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー 127, 2007.