

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ひずみ硬化挙動

清水建設 技術研究所
Technische Universität Dresden

正会員 ○小倉 大季
Venkatesh N. Nerella, Viktor Mechtcherine

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（付加製造）技術の研究開発が進められている¹⁾。建設スケールの3Dプリンティング技術は，たとえば，層ごとにセメント系材料を積層して部材を施工する技術（材料押し出し方式）がある。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・省人化施工など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。しかし，3Dプリンティングによる施工プロセスにおいては，鉄筋を配筋することが難しく，従来の鉄筋補強の代替となる補強法が求められていた。そこで筆者らは，その解決策として，プリント材料にひずみ硬化型セメント複合材料（SHCC: Strain Hardening Cementitious Composites）を用いる方法を提案し，プリント材料に適したSHCCを開発した。本論では，開発したSHCCで作製した試験体の一軸引張試験の結果を紹介する。

2. 実験概要

(1) 配合と使用材料

本研究で開発したSHCCは，水結合材比を0.22，砂結合材比を0.3，繊維混入率1.5vol%とした配合である。結合材の内訳は，質量比75%のセメント，15%のシリカフェーム，10%のフライアッシュである。セメントには，CEM II/A-M (S-LL) 52.5Rを用いた。シリカフェームは，固形分50%（ブレン値：15～35 m²/g）のスラリーの形態で添加した。細骨材には，最大粒径1.0 mmの砂を用いた。混和剤は，高性能減水剤（ポリカルボン酸系）を結合材質量に対して2.0%混入した。繊維には，長さ6 mmの高強度ポリエチレン繊維（直径：0.012 mm，密度：0.97 g/cm³）を用いた。

(2) 試験体の作製

本研究では，フレッシュ状態のセメント系材料をノズルから押し出すことができる3Dプリンタ²⁾を用いて，**図-1**に示す壁形状の試験体（長さ1000 mm，幅30 mm，高さ100 mm）を作製した。材料の積層は，1層のプリントが終了して1分後に，次の層のプリントを開始するように行った。プリント速度は50 mm/sec

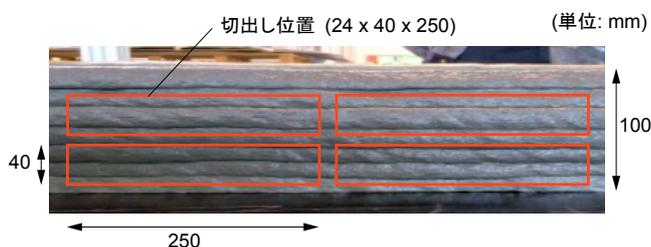


図-1 プリンティングで作製した壁試験体からの切出し位置

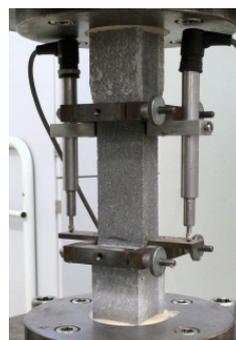


図-2 一軸引張試験の荷重装置

として，材料を7層プリントした。プリントの完了後は，表面の整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を行った。また，同様の配合を用いて，型枠に打込む方法でも試験体を作製した。作製した試験体は，長さ250 mm，幅24 mm（試験区間内），奥行き40 mmのダンベル型の試験体である。

すべての試験体は，水分が逸散しない状態で実験室に1日間静置した後，水中にて7日間養生した。その後，試験体を恒温室（温度20℃，湿度65%RH）に移動させ，材齢27～28日に荷重試験を行った。

(3) 一軸引張試験

一軸引張試験には，プリントで作製した壁試験体から**図-1**のとおり切り出した試験体（以下，プリント試験体），ならびに打込みで作製したダンベル型試験体（以下，打込み試験体）を4体ずつ供した。**図-2**に，荷重装置を示す。両端固定の境界条件で試験を行うために，試験体の両端部に20 mmの鋼製リングを接着し，このリングを試験機にボルトで固定した。試験区間は，試験体中央の100 mmとして，区間内の変位を計測するために変位計を試験体両側に配置した。荷重は，試験速度0.05 mm/secの変位制御で行った。



図-3 プリンティングの状況

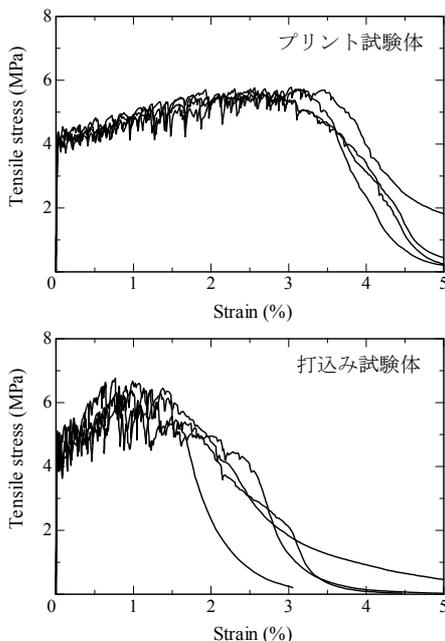


図-4 引張応力-ひずみ関係

3. 実験結果

図-3に、SHCCの積層状況を示す。材料は、ポンプで閉塞することなく、連続してノズルから押し出された。プリントされた材料は、材料分離することなく、表面に欠陥などは認められなかった。試験体の形状は、7層のプリントを行った後も、下層が大きく変形することなく保持された。養生後に、試験体の表面観察を行ったところ、ひび割れは認められなかった。

図-4に、一軸引張試験から得られた応力-ひずみ関係を示す。ひずみは、変位の平均値を区間長で除した値である。いずれの試験体も初期ひび割れ発生後にひずみ硬化挙動を呈した。表-1には、ひび割れ発生強度、引張強度ならびに終局ひずみ（引張応力-ひずみ関係において応力が大幅に低下したときのひずみ）を示す。括弧内は、4体の試験体から得られた値の変動係数である。プリント試験体の終局ひずみは、打込み試験体よりも大きく、変動係数は小さいことがわかる。なお、打込みで作製した角柱試験体(100×100×100 mm)の圧縮強度は、104 MPaであった。

表-1 一軸引張試験の結果

	ひび割れ発生強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	終局ひずみ (%)
プリント試験体	4.25 (0.03)	5.66 (0.02)	3.21 (0.05)
打込み試験体	4.63 (0.09)	6.32 (0.04)	1.67 (0.16)

* (): 変動係数

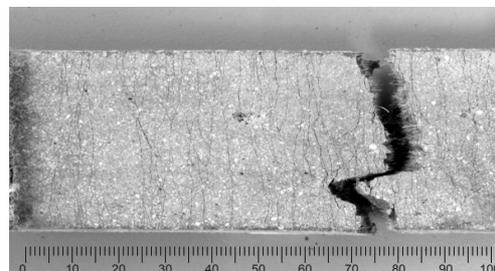


図-5 プリント試験体の引張载荷後のひび割れ状況

図-5は、プリント試験体のひび割れ状況である。試験区間の全域に、微細なひび割れが分散したことが確認された。破断面を観察すると、打込み試験体よりもプリント試験体のほうが空隙が少ない傾向が認められた。これは、ポンプで材料を押し出す過程で、締固めの効果が働いたことが要因であると推察される。また、プリント試験体において、ひび割れを直交する方向（押し出し方向と一致）に配向した繊維が多い傾向が定性的に認められた。以上のことから、プリント試験体の終局ひずみが大きくなった要因として、(1) 試験体中の空隙が減少したこと、(2) 繊維の配向が整ったことが考えられるが、詳細は今後の分析が必要となる。

4. まとめ

本研究では、3Dプリンタから連続的に押し出すことができ、高さ100 mmの試験体を積層造形で作製できるSHCCを開発した。プリントしたSHCCは、引張応力下で複数微細ひび割れ特性とひずみ硬化特性を呈し、打込み試験体よりも終局ひずみが大きくなる傾向が認められた。積層間の力学特性を明らかにするためには、さらなる研究が必要であるが、本研究で示した結果は、鉄筋を配筋することが難しいプリント部材の引張性能を向上させるために役立つと考えられる。

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) Nerella, V. N., Krause, M., Näther, M. and Mechtcherine, V.: Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CON-Print3D), 25th Conference on Rheology of Building Materials, pp. 236-246, 2016.