

建設用 3D プリンタに適用可能な層間補強システムの開発に関する基礎研究

ライフサイクル工学分野
浅川智哉

建設用 3D プリンタ 繊維補強 積層構法 挿入機構 コールドジョイント FEM 解析

1. 研究の目的と背景

近年、3Dプリンティング技術の研究は盛んにおこなわれており、様々な産業分野で活用されている。建設分野では、セメント系材料を使用する建設用コンクリート3Dプリンタ（以下、3DCP）として、研究が行われている。3DCPには様々な造形方式が存在し、主にノズルからセメント系材料を吐出する事で積層する材料押出方式が広く用いられている。本研究でも、この方式の3DCPを対象とする。

3DCPがもたらす利点として、型枠が不要になる点が挙げられる。また、ノズルのデジタル制御による材料の適切な配置によって、造形の自由度向上や材料の軽減なども可能となる。加えて、施工を機械化によって、省力化・省人化といった施工効率の向上を可能とする²⁾。

一方で、3DCPには実用化に当たって多くの課題が存在する。3DCPではその造形方法から、層間にコールドジョイントのような不連続層が生じ、造形物の強度低下の原因となる³⁾。そのため、3DCPに適した補強方法が必要であり²⁾、様々な取り組みが行われている⁴⁾。既往研究の一つに、金属繊維を挿入して層間補強を行う取り組みがある⁵⁾。ここでは、金属繊維が適切に挿入された場合には層間補強の効果が得られた。その一方で、金属繊維の挿入方法に伴う挿入精度に課題が見られ、安定した補強効果を得ることは困難であった。

そこで本研究では、金属繊維の挿入方法の改善し、適切な精度での挿入を実現するとともに、適切な配置計画を提案するための基礎検討を目的とする。挿入機構を開発してこれを適用して試験体を作製する。得られた試験体に対してX線CT撮影と曲げ試験を行い、挿入繊維の施工精度と補強効果を確認する。また、FEM解析を行い、配置計画を検討するため基礎検討を行う。

2. 実験概要

2.1. 挿入機構

本研究で開発した挿入機構を図1に示す。この機構を作製するにあたり、金属繊維を垂直に押し込む直動機構を採用した。直動機構とリニアブッシュを用いることで、金属繊維を垂直に挿入することができる。また、複数本の金属繊維を装填することが可能で、挿入後の再装填で連続した挿入が可能となる。開発した挿入機構を固定治具に設置し、高さを調整した後、棒を押し込むことで金属繊維を挿入できる。

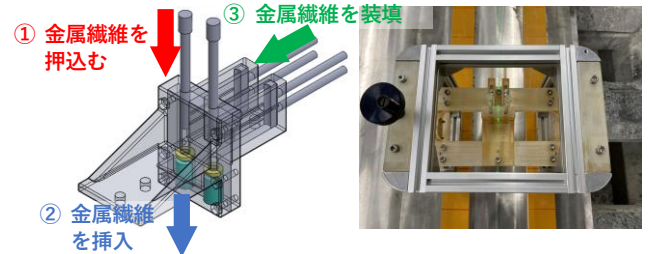


図1 挿入機構

2.2. 試験体作製

材料には3DCPに適した性状が確認されているプレミックスされたモルタル（無収縮特殊ポリマー系断面修復モルタル材）を使用した。目標フロー値は 110 ± 10 mm（0打）、 140 ± 10 mm（15打）であり、水添加率を14.5%とした⁶⁾。また、補強材には円柱状の市販金属繊維（S45C、 $\phi=5$ mm、 $L=30$ mm）を使用した。なお、一部の金属繊維は先端形状を尖らせた物を挿入した。

3DCPによって所定の高さまで積層した後、積層プロセスを一時停止して、挿入機構を用いて金属繊維を挿入した。その後、積層を再開し積層体を得た。十分に積層体が固まった後、積層体から $D40$ mm \times H40 mm \times L160 mmの試験体を切り出した（図2）。なお、切り出す際は積層方向が載荷方向と平行になるように注意した。

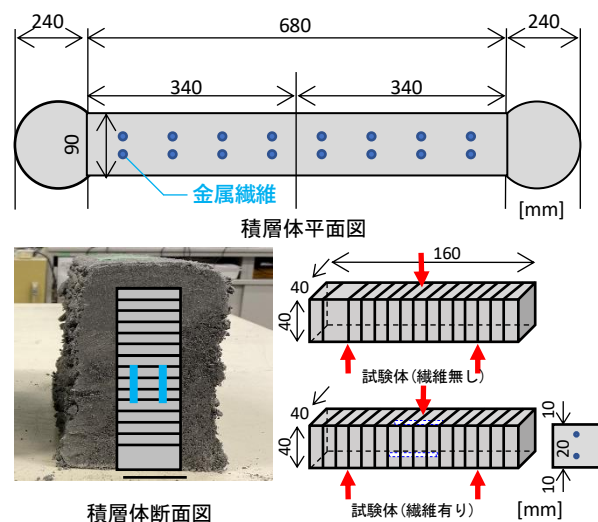


図2 積層体と試験体

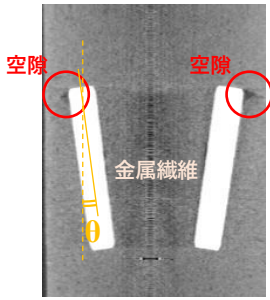


図3 X線CT

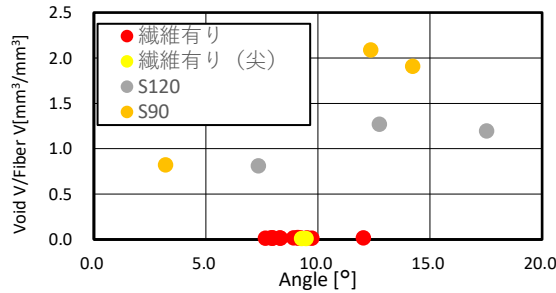


図4 空隙体積と角度

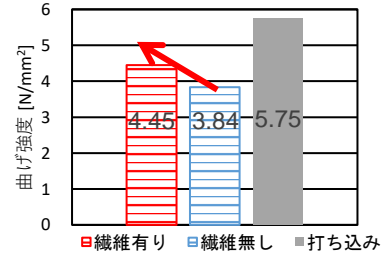


図5 曲げ強度

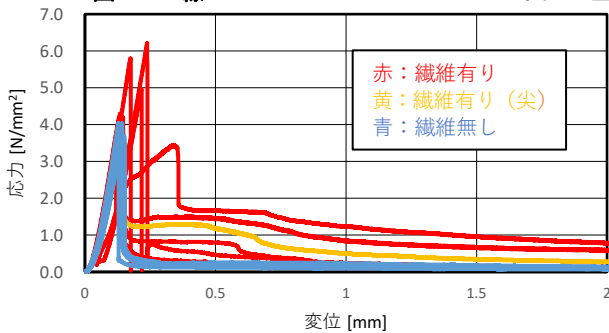


図6 応力-変位曲線

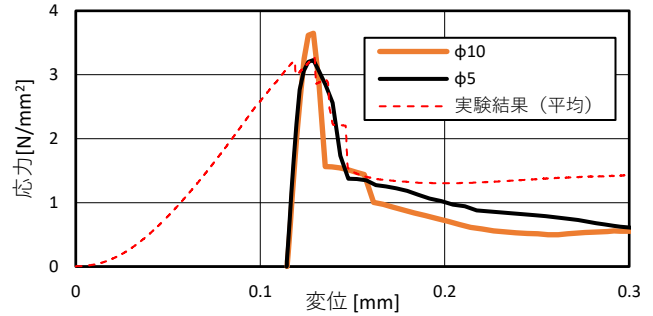


図7 応力-変位曲線 (径比較)

2.3. 実験概要

2.3.1. X線CT

繊維が挿入された試験体について、マイクロX線CT (コムスキャンテクノ ScanXmate D160TS11) により試験体内部を撮影した。撮影条件は、電圧156kV、電流38 μ Aとした。撮影データはImageJ及びVolumeViewer2.0により観察した。

2.3.2. 曲げ試験

作製した試験体について、曲げ試験 (JIS R 5201) を行い、力学特性を確認した。なお、試験体は積層体から切り出した繊維が挿入されている試験体 (以下、繊維有り)、積層体から切り出した金属繊維が挿入されていない試験体 (以下、繊維無し)、打ち込み試験体 (以下、打ち込み) を用意した。

2.4. 解析概要

解析ソフトはAbaqus 6.14を使用した。繊維有り・繊維無し試験体の曲げ試験結果を基準として、Abaqus内で繊維無しモデル、繊維有りモデルを再現した。基準とするモデルでの精度を確認後、金属繊維の直径についてパラメトリックスタディを行う。

4. 結果と考察

4.1. X線CT

X線CTによる撮影画像を図3に示す。金属繊維は垂直から7~10°程度の傾斜をもって挿入されており、巻き込み空隙は挿入上部に見られる。得られた画像から求めた傾斜角度と金属繊維体積当たりの空隙量の関係を図4に示す。なお、S120とS90は文献7の結果である。図4より、挿入機構の使用により挿入時の傾斜角度は概ね一定であり、また、挿入時の巻き込み空隙量の大幅な抑制が可能であることを確認した。

4.2. 曲げ試験

曲げ試験より求めた曲げ強度を図5に、応力-変位曲線を図6に示す。図5より、金属繊維の適切な挿入は曲げ強度の向上

に寄与する事が確認された。また、図6から、金属繊維によってひび割れ後の靱性の向上が確認された。なお、一部の試験体では複数ひび割れも確認された。

4.3. 解析結果

金属繊維の直径について、パラメトリックスタディを行った結果を実験結果の抜粋とともに図7に示す。金属繊維の直径を大きくなることで曲げ強度の向上が確認された。この基礎検討をもとに、金属繊維の強度・配置などをパラメータに解析を行うことで補強方法の検討が可能となった。

5. まとめ

挿入機構を用いた金属繊維の導入実験、試験体を用いた曲げ強度試験、FEM解析を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 開発した挿入機構を用いることにより、金属繊維の挿入方法の改善が確認された。一定の精度での挿入、空隙の抑制といった改善が見られた。
- 2) 適切に挿入された金属繊維は、層間補強に対して曲げ強度や靱性の向上といった形で効果を発揮する。
- 3) 配置計画を検討する為に基準とするモデルの作製を行い、基礎的なパラメトリックスタディを行った。

[参考文献]

- 1) 特許庁：平成25年度特許出願技術動向調査報告書 (概要) 3Dプリンター, 平成25年3月
- 2) 石田哲也, 木ノ村幸士, コンクリート工学, **58**(1), 45-51, 2020
- 3) Wangler, T. *et al.*, Cement and Concrete Research, **123**, 105780, 2019, DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105780.
- 4) Viktor M. *et al.*, Cement and Concrete Composites, **119**, 103964, 2021, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103964.
- 5) 宮田賢優ら, コンクリート工学年次論文集, **42**(1), 1888-1893, 2020.
- 6) 梶田秀幸ら, 日本建築学会大会学術講演, A-1, pp.1273-1274, 2019
- 7) T.Nishiwaki *et al.*, ACI Materials Journal, **118**(6), 331-340, 2021, DOI: 10.14539/51733133