

論文 建設用コンクリート 3D プリンタに適用可能な自動補強材挿入機構の開発及び評価

浅川 智哉*1・江川 諒*2・西條 圭祐*3・西脇 智哉*4

要旨: 近年, 建設用コンクリート 3D プリンタ (3DCP) の開発が国内外で活発に行われている。3DCP は施工の自動化といった利点を持つが, 補強鉄筋の導入が困難などの課題も存在する。そこで, 著者らは補強材を積層間に挿入する補強方法を提案した。本研究では, 3DCP に設置可能な補強材の自動挿入機構を開発し, この機構を用いて, 補強材挿入を積層と並行した一連の自動作業として積層体を作製した。積層体から試験体を作製し, X 線 CT 観察, 曲げ試験を行った。その結果, 補強材を有する積層体を得ることに成功し, X 線 CT 測定からは補強材の傾斜角度の抑制を, 曲げ試験からは靱性と曲げ特性の向上を確認した。

キーワード: 建設用コンクリート 3D プリンタ, 建設ロボット, 自動挿入機構, 層間補強, 補強材, 積層構造

1. はじめに

近年, 国内外で建設用コンクリート 3D プリンタ (以下, 3DCP) の開発が行われている。3DCP による施工には造形自由度の高さ, 環境配慮といった多数の利点が存在する。その中でも, 特筆すべき利点として施工の自動化が挙げられる。施工作業の自動化, 24 時間施工が可能であることは, 昨今の課題となっている労働者数の減少などの解決策となりうる¹⁾。一方で, 課題も多く残されており, その一つに 3DCP に適した補強方法の開発が挙げられる²⁾。3DCP では, ノズルが空間を 3 次元的に移動しながら材料を吐出して積層物を造形するため, 従来のような鉄筋補強が難しい。また, 3DCP で造形した積層物の層間にはコールドジョイント状の不連続層が生じてしまい, 弱点となってしまうことが確認されている³⁾。この課題を解決する為に様々な補強方法が提案・開発されている^{2),4),5),6)}。例えば, 山本ら⁴⁾は 3DCP で埋設型枠を作製し, 従来のように鉄筋を埋設型枠内に配置することで補強を行っている。坂上ら⁵⁾は 3DCP により型枠を作製し, 内部に超高強度繊維補強モルタルを打ち込む複合構造を提案した。これらの方法は補強効果を担保する一方で, 型枠や部材の組立などの現場作業を必要とする。また, Bos ら⁶⁾は印刷中にケーブルを連行することによる補強を行った。この方法は補強材導入を自動化した点に優位性が見られるが, 積層と平行方向の補強に限られるため効果は限定的である。以上のように, 3DCP の利点である自動化と, 十分な補強効果の 2 点を両立する補強方法は確立されておらず, 課題となっている。

そのため, 著者らは層間を貫く方向に補強材を挿入する方法を提案している⁷⁾。この方法では, 造形した積層

体表面から補強材を挿入することで補強を行う。適切な挿入により力学特性の改善が見られた一方で, 挿入に伴う巻き込み空隙の発生と, この空隙による力学特性の低下や, 不安定な挿入精度が課題として確認された。このことを受けて, 著者らにより挿入方法の改善が行われ, 補強材を押し込む形式の挿入機構を開発した⁸⁾。この挿入機構ではリニアブッシュを用いた直動機構により, 補強材を高精度に垂直挿入することが可能となった。また, 複数 (2 本) の補強材を同時に挿入することが可能である。3DCP による積層プロセスの途中で, この挿入機構を用いて補強材を挿入して得た試験体について, X 線 CT による内部の観察, 曲げ試験を実施した。その結果, より適切な補強材挿入が可能となり, 巻き込み空隙の大幅な抑制や, 力学特性の改善を確認した。すなわち, 挿入機構の導入により挿入方法の改善が見られた。しかし, 補強材の装填や押し込み, 挿入機構の位置合わせなど作業の一部は人の手で行う必要があり, 自動化に向けてはこの点を解決する必要がある。

そこで, 本研究では開発した挿入機構の自動化に向けた検討を行った。挿入機構を 3DCP ヘッド部に設置し, 実際に 3DCP で積層を行いながら自動で補強材を挿入した。作製した積層体から試験体を切り出して, X 線 CT・曲げ試験の実施によって, 自動挿入機構により適切に補強材が挿入可能であること, 挿入した補強材による補強効果を確認した。

2. 自動挿入機構

既存のガントリー型 3DCP のヘッド部分に, 図-1 に示すように補強材挿入機構を後付けで設置した。3DCP

*1 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学 工学部機械知能航空工学科 (会員外)

*3 前田建設工業 (株) ICI 総合センター 修士 (工学) (正会員)

*4 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

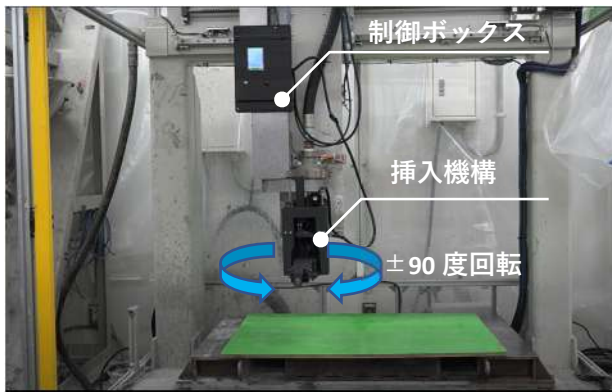


図-1 3DCP に設置した自動挿入機構

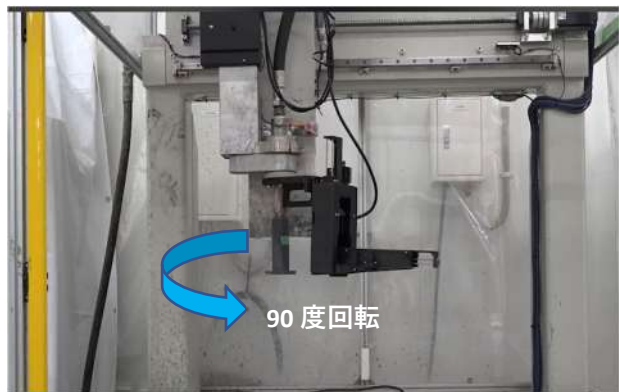


図-2 手先回転時の挿入機構

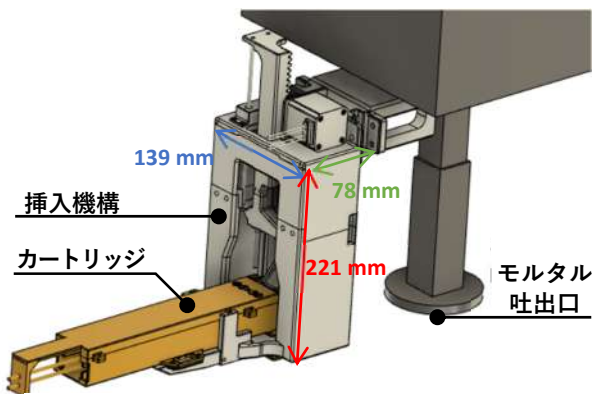


図-3 挿入機構 CAD 図

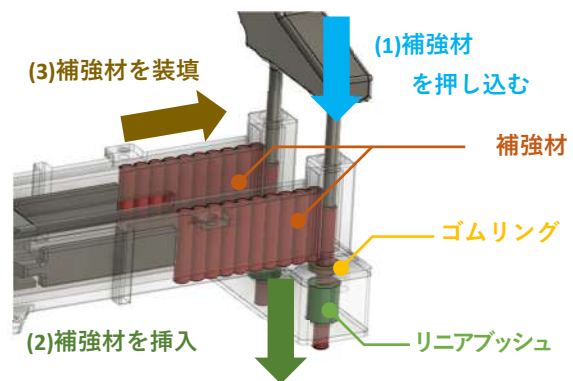


図-4 補強材挿入プロセス

のヘッド部に装着することで、モルタル積層用の並行/回転移動のアクチュエータを利用して任意の位置に自動挿入機構を移動させることができる。図-2 は、図-1 の状態から挿入機構部分が 90 度回転した状態である。

自動挿入機構を設置するにあたり、以下の条件をクリアする必要があった。本実験で使用した 3DCP のプリンタヘッド部に設置可能な重量は約 10 kg 以下である。また、自動挿入機構を設置できる範囲として 3DCP の吐出口の中心から水平方向に半径 600 mm 以内の大きさに収める必要があった。加えて、直線や R 形状の積層に対して補強材を挿入する為に±90 度の回転が出来る様に設置する必要がある一方で、この固定に使用できるのは突出口部分にある円盤状部品(直径 100 mm)のみであった。

そこで、これらの条件を満たす自動挿入機構として図-3 に示す自動挿入機構を製作した。この自動挿入機構は、3DCP とは独立したコントローラを持っており、3DCP のコントローラと連携して複数の補強材を連続して挿入することができる。挿入機構が補強材の挿入位置に到着したこと、挿入機構が補強材を挿入していること、挿入が完了し次の場所に移動可能であること、カートリッジ部に補強材が無くなり交換が必要なことなどの情報を 3DCP と制御コンピュータ間で通信することによって、連続した挿入を実現する。

補強材には円柱形の市販の鉄鋼 (S45C) を利用した。

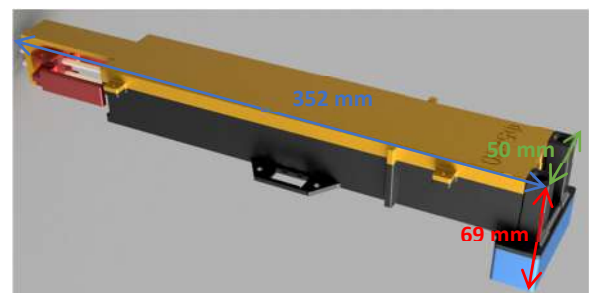


図-5 カートリッジ CAD 図-1

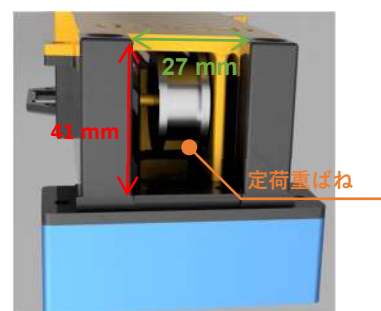


図-6 カートリッジ CAD 図-2

この補強材を、ラック・ピニオン方式(ラックギア部に取り付けられた棒をピニオンギアにより垂直可動させ、カートリッジ内部の補強材を押し出す方式)を用いた直動機構でモルタルに垂直に挿入する。図-4 に補強材を挿入する機構と、挿入の流れを示す。直動機構で補強材を押し込む(図-4 (1))と補強材がリニアブッシュとゴ

ムリングで保持され、さらに押し込むことでモルタルに垂直に挿入される(図-4(2))。補強材の挿入が終わり、直動機構を上げると、図-6に示すカートリッジ後部の定荷重バネにより次の補強材が挿入機構内に装填され(図-4(3))、次の挿入が可能となる。この様に1つのアクチュエータで複数の補強材を繰り返し挿入することで機構の簡素化を実現した。従来のピストン・クランク機構を利用した挿入方法⁹⁾に比べて、補強材の長さを容易に変更できること、挿入時の力や速度を一定に制御することを可能とした。本実験で利用した挿入機構は、長さ25~60mmの補強材を挿入することができる。

図-5、図-6に本実験で用いたカートリッジのCADの外観図を示す。本研究では、長さ30mm、直径5mmの円柱形の補強材を100本(50本×2列)保持するカートリッジを複数製作した。カートリッジごとと交換することで、数百本の補強材を連続挿入できる。また、挿入機構と補強材保持部を分離し、カートリッジ化することで、様々な径や長さの補強材の入ったカートリッジを用意することが可能となる。また、交換もワンタッチで行う方法を開発した。これにより、カートリッジ内の補強材がなくなった場合にも、素早く新しいカートリッジに交換して、大型部材の造形も可能と考えられる。

3. 実験計画

3.1 実験概要

本研究では、3DCPに適用可能な自動挿入機構の評価を目的として、積層直後の積層体に補強材を挿入する自動挿入実験を行った。このようにして得られた積層体が硬化した後、既定の寸法で試験体を切り出した。X線CTにより試験体内部を観察するとともに、曲げ試験により力学特性を確認した。

3.2 使用材料

積層材料には3DCPに適した性状が確認されているブレミックスモルタルを使用した。補強材には円柱状の市販鋼材(S45C、 $\phi=5\text{mm}$ 、 $L=30\text{mm}$)を用いた。

3.3 試験体作製

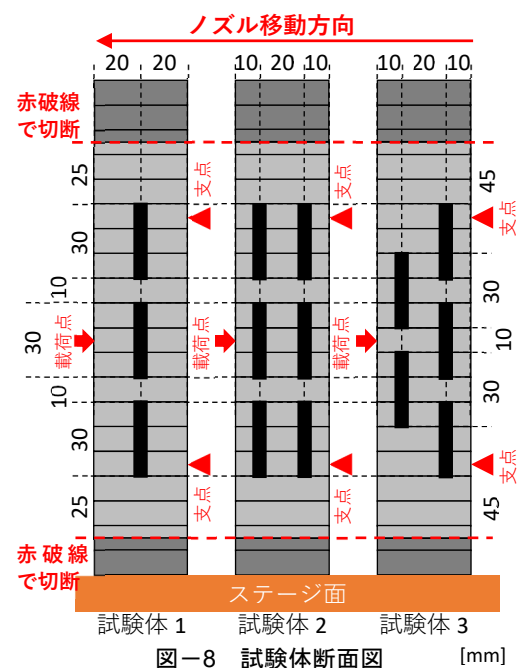
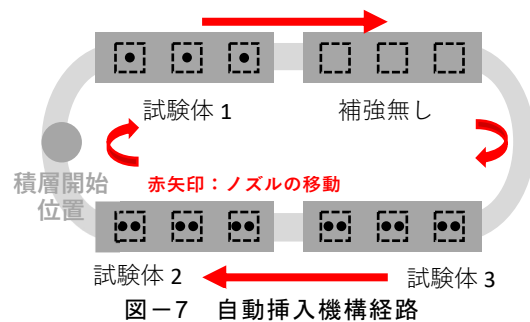
3DCPにより所定の高さ(200mm)までモルタルを積層した。1層当たり10mm、積層幅を60mmとした。所定の高さに積層している途中に、自動挿入機構により補強材を予め設定した図-7の位置で、図-8のように自動挿入した。その後、積層を再開し、所定の高さに到達後、同様に補強材を挿入することを繰り返した。積層体が十分に硬化した後、図-8のように積層体から幅40mm×高さ40mm×長さ160mmの試験体を、積層方向が載荷方向と平行になるように上面から25mm、下面から15mm、両幅を10mmずつ切り出して作製した。

3.4 試験概要

(1) 補強材自動挿入実験

自動挿入機構による補強材の挿入精度を確認することを目的として、補強材自動挿入実験を行った。

積層直後の積層体表面に自動挿入機構を用いて補強材を挿入した。3DCPで曲げ試験体作製のために図-7のような打ち込み経路を設定した。なお、積層方向は図-7のように定めた。打ち込みは試験体1と試験体2については積層高さが70mm、110mm、150mmに到達後、図-7の箇所に打ち込んだ。試験体3は、図-8に示すように補強材が高さ方向に対して、交互に配置されるように挿入して作製した。図-8左列においてはモルタルを70mm、110mm、150mmの高さまで積層したのちに補強材を挿入し、右列においてはモルタルを90mm、130mmの高さまで積層したのちに補強材を挿入した。今回は3DCPに設置した自動挿入機構を用いて、途中停止することなく終了できること、所定の位置に1本や2本と調整しながら打ち込めること、挿入深さの調整が可能であることを確認した。



(2) X線 CT 観察による補強材埋設状況の確認

補強材を埋設した試験体内部を X 線 CT により観察した。撮影条件は、電圧 150 kV、電流 38 μ A とした。撮影データは汎用画像処理ソフトにより再構成を行い、空隙体積と傾斜角度を計測した。傾斜角度はノズルの移動方向の角度、移動方向と直交方向の角度を計測した。

(3) 曲げ試験

図-8 のように、補強材を挿入した 3 種類の試験体（試験体 1、試験体 2、試験体 3）、補強材を挿入していない試験体（補強無し）を積層体から切り出した。作製した試験体に対して 3 点曲げ試験（JIS R 5201）を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 挿入実験結果

挿入実験の結果、図-7 に示した設定位置に補強材が挿入可能であることを確認した。また、積層開始から終了まで、カートリッジ交換時以外は停止することなく挿入が可能であった。今後、より大きい部材を積層する場合を想定すると、カートリッジの大型化や交換方法の自動化・簡素化などを検討する必要があると考えられる。図-9 は、積層終了後の写真である。図中に見える補強材は、打込み深さを 10 mm になるように調整して積層体表面から補強材の頭が出る状態に設定したものである。これを埋設補強材位置の目印として用いた。図-9 に示す積層体表面から出ている補強材の長さを測定したところ、挿入長さが事前に設定した 10 mm であることが確認された。また、片側の補強材のみ挿入し、他方を積層体外部に落とすことで 1 本挿入することも可能となった。今後、挿入機構の改善により補強材を落とすことなく本

数の調整ができるよう改良を行う予定である。

以上のことから、自動挿入機構により補強材の挿入ができること、設定位置に任意の本数を挿入できること、挿入深さを任意に設定できることを確認できた。



図-9 挿入実験結果

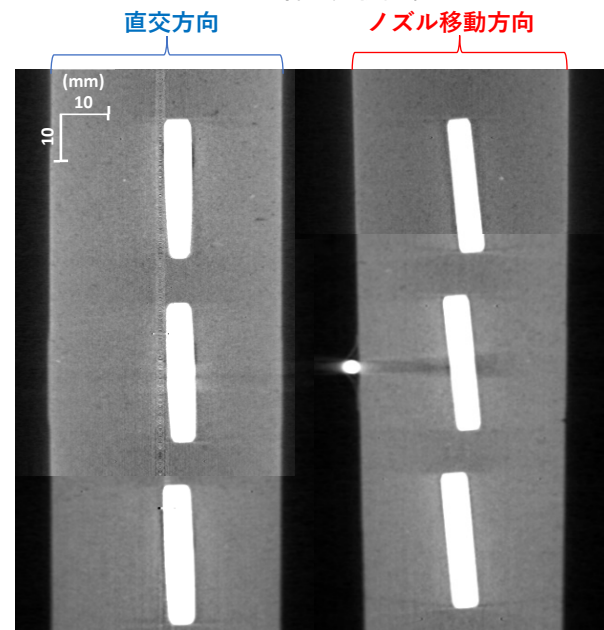


図-10 X線 CT (試験体 No.1)

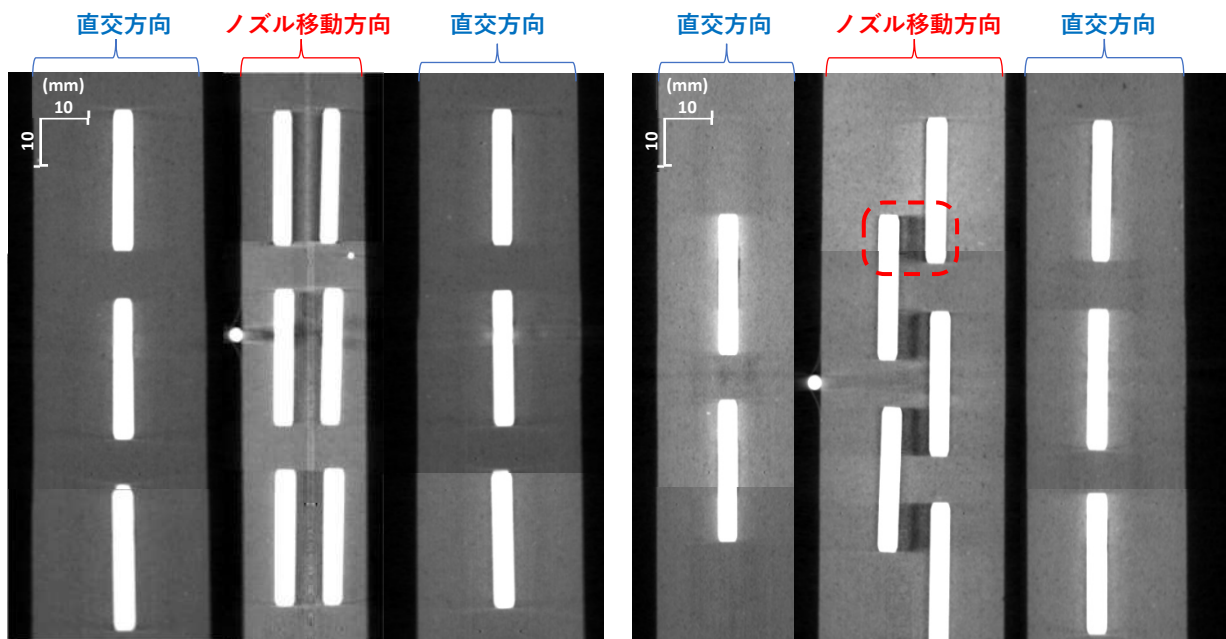


図-11 X線 CT (試験体 No.2)

図-12 X線 CT (試験体 No.3)

4.2 X線 CT 結果

X線 CTによる撮影画像を図-10、図-11、図-12に示す。図-10、図-11、図-12はノズル移動方向、ノズルの移動方向と直交する方向の断面を示している。また、図-11、図-12は補強材を2列挿入している事から、左右にそれぞれの補強材の直交方向の画像を示している。なお、図-12中の赤枠部分などに見られる影は計測上避けられないアーチファクトであり、空隙ではない。各試験体の巻込み空隙体積を挿入した補強材の体積で除して求めた百分率（以下、空隙率）、傾斜角度の平均値や標準偏差を表-1に示す。また、縦軸に空隙率、横軸をノズルと直交方向の傾斜角度としたグラフを図-13に示す。ここで、図-14と表-1の「予備検討1」は挿入機構を用いない手作業により補強材を挿入した場合の結果である。「予備検討2」は、本研究の自動挿入機構のプロトタイプとして作製した手動型の挿入機構を用いた、補強材の位置決め・挿入・装填作業を手作業で実施した場合

の結果である⁸⁾。また、図-14の縦軸は対数表示とした。

図-10、図-11、図-12より、補強材は試験体に対して概ね垂直に挿入されていることを確認した。傾斜が生じた原因として、硬化前のモルタルがノズル移動方向と直交方向に広がる事が挙げられる。また、表-1と図-13より、傾斜角度は約0°~2°の範囲で生じていること、空隙率は約1~2%の範囲となっていることを確認した。自動挿入機構により、本数によらず、概ね一定の角度と空隙率で挿入が可能になった事を確認した。

また、予備検討1・2の結果と比較したものを図-14および表-1に示す。表-1より、今回の自動挿入機構全体の平均値と予備検討の値と比較して、傾斜角度を予備検討2の約10%、予備検討1の約8%まで抑制出来ることを確認した。また、空隙率は予備検討2の約90%、予備検討1の約1%程度まで抑制出来ることを確認した。今後、挿入方法や補強材の形状を検討することで、空隙率や精度を改善することが可能であると考えられる。

表-1 空隙率と傾斜角度の平均値と標準偏差

シリーズ	平均値		標準偏差	
	角度[°]	空隙率[%]	角度[°]	空隙率[%]
試験体1	1.29	1.57	0.75	0.29
試験体2	0.84	1.25	0.45	0.31
試験体3	0.89	1.46	0.41	0.21
自動挿入機構	0.96	1.39		
予備検討1 ⁷⁾	11.2	134.9	4.69	49.3
予備検討2 ⁸⁾	8.97	1.56	1.01	0.24

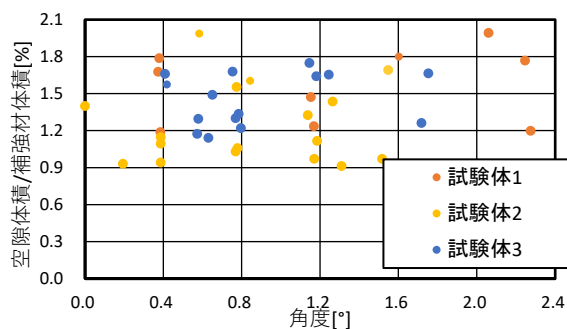


図-13 空隙率と傾斜角度

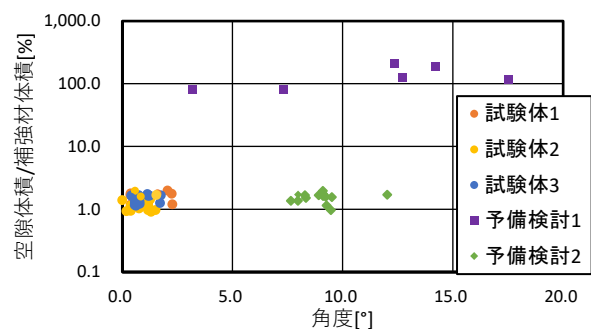


図-14 空隙率と傾斜角度（比較）

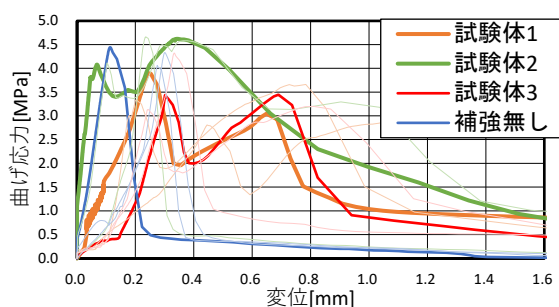


図-15 応力-変位曲線

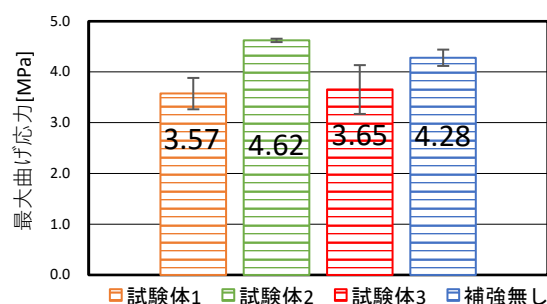


図-16 曲げ応力

以上より、自動挿入機構により概ね垂直での補強材の挿入と、空隙率の抑制が可能であることを確認した。

4.3 曲げ試験結果

曲げ試験により得た応力と変位の関係を図-15に、最大曲げ応力の平均値を図-16に示す。図-15では、試験体毎に挙動が微妙に異なり、平均値のグラフにそれぞれの性質を反映することが困難であったため、各試験体につき1つのグラフを太線表示している。

図-15、図-16より、補強材の挿入により一部の試験体で曲げ応力の向上、全ての試験体でひび割れ後の靱性の向上が確認された。応力の向上が限定的であった理由として、補強材の形状や配置が考えられる。ここで用いた補強材は、既往の研究(予備検討2)⁸⁾において挿入可能であることを確認されている形状の補強材を採用している。補強材が短いこと、補強材の表面が平滑であったことによって補強材が抜けやすくなっていたと考えられる。これらに加えて、補強材によって部材断面が減少していることで曲げ応力の向上が限定的になってしまったと考えられる。補強材の長尺化、補強材表面の異型化などの変更を検討することにより付着が向上することで、補強効果の改善が可能と予想される。このように、補強材について、形状や寸法を修正することで、付着強度や補強効果を向上させることができると考えられる。また、今回の試験体では、載荷点である試験体中央における補強材の本数差から、試験体1・3では同じような強度となり、試験体2では曲げ応力が他よりも向上したと考えられる。このように、断面に対する比率や配置についても十分に検討を行うことで補強効果を向上、安定させることが可能と考えられる。

以上より、補強材の挿入により靱性の向上が確認された。今後、補強材の配置や断面に対する比率、形状などを検討することで、より高性能な補強が可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、自動挿入機構を3DCPに設置し、補強材を自動挿入し、積層体を作製した。作製した積層体得た試験体に対してX線CTによる観察、曲げ試験を行った。本研究の試験範囲で確認したことは以下の通り。

- 1) 自動挿入機構を開発し、3DCPに設置した。その結果、3DCPによる自動積層の中で、自動挿入機構を用いて積層体を得ることが可能となった。
- 2) 自動挿入機構により、補強材を設定した位置に任意の挿入本数や挿入深さで挿入することが可能となった。
- 3) X線CTにより内部を観察した結果、自動挿入機構で挿入した場合の空隙率は約1~2%、傾斜角度

は約0~2°となった。

- 4) 手動挿入機構と比較して、自動挿入機構によって挿入することで補強材の傾斜角度を大幅に抑制できることを確認した。また、角度のばらつきを抑えて、連続挿入が可能であることを確認した。
- 5) 曲げ試験の結果、ひび割れ後の靱性、一部の配置で曲げ応力が向上した。今後、比率や配置、補強材の形状を検討することで十分な補強が可能と考えられる。

謝辞

本研究は国土交通省の建設技術研究開発助成制度JPJ000094の助成を受けたものです。また、自動挿入機構の開発・設置に当たり(株)前田製作所の多大なる助力を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 丸屋剛, 石田哲也: 3Dプリンティングの技術開発の現状と展望, コンクリート工学., vol. 59, No. 2, p. 173-180, 2021.
- 2) Mechtcherine, V. et al.: Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework. , Cement and Concrete Composites, Vol.119, 2021
- 3) Wangler, T. et al.: Digital Concrete: A Review, Cement and Concrete Research. , vol. 123, March, 2019
- 4) 山本伸也, 小倉大季, 阿部寛之, 菊地竜: 建設用3Dプリンティング技術の開発とその実用化, コンクリート工学, vol. 59, No. 8, p. 655-660, 2021
- 5) 坂上肇ほか: 建設用3Dプリンターにより製造したシェル型ベンチの設計と施工, 大林組技術研究所報, No. 84, p. 1-6, 2020
- 6) Bos, F. P. et al.: Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete, Materials, vol. 10, No. 11, 2017
- 7) Nishiwaki, T et al.: Reinforcing Interlayers of Three-Dimensional-Printed Mortar Using Metal Fiber Insertion, ACI Materials Journal, vol. 118, No. 6, p. 331-340, 2021
- 8) Asakawa, T et al.: Fundamental Study on Automated Interlayer Reinforcing System with Metal Fiber Insertion for 3D Concrete Printer, Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, vol. 1, p. 411-416, 2022
- 9) 横山慈ほか: 建築に利用可能なコンクリート3Dプリンタの開発ー積層モルタルの剪断強度を補強する繊維挿入機構の開発ー, 建設ロボットシンポジウム, p. 2-6, 2022