

論文 自動補強システムを有するコンクリート 3D プリンタに適した層間補強方法に関する基礎的研究

小林 紀行*1・浅川 智哉*2・西條 圭祐*3・西脇 智哉*4

要旨: 建設用 3D プリンタによる積層体には、通常の鉄筋補強を用いることができず、特に力学的な弱点となる層間を補強できる方法が求められている。ここでは、補強材を層間へ垂直に挿入する方法について、補強材の配置計画の検討を行った。3DCP 実機で積層した試験体に加え、積層体を模擬的に再現した試験体を作製し、せん断試験、曲げ試験と X 線 CT 観察を行い、補強材の長さや配置について検討を行った。その結果、せん断強度の向上には長い補強材が、曲げ強度と靱性の向上には試験体の中央部に配筋した方が有効であることが確認された。

キーワード: 建設用 3D プリンタ、自動施工、層間補強、自動挿入機構、補強材

1. はじめに

国内の建設業は、少子高齢化に伴う就労人口や熟練工の減少が問題となっている。また、建設業は他産業に比べ、労働生産性が低いという課題がある¹⁾。主要産業分野では、建設業の労働生産性は、宿泊・飲食サービス業に次いで低く、労働生産性の向上は喫緊の課題である。国土交通省では、「ICT の全面的な活用」等の施策を建設現場に導入し、建設生産システム全体の生産性向上を図る「i-Construction」を推進している²⁾。このような状況で、3D プリンティング技術が、建設分野で利用され始めている。現在、国内外で建設用 3D プリンタ（以下、3DCP）の開発が進んでおり、主に海外では大型構造物の作製の事例も多くある。国内では、2018 年に日本コンクリート工学会が「3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会」を発足させ、国内の開発状況の検討を行っているほか、日本建築学会、土木学会にも研究委員会が発足されて活発な議論が行われている。しかしながら、現状では国内の開発状況は海外に遅れを取っていると言わざるを得ない。

3DCP には、デザインの自由度の向上、環境配慮、コスト削減、時間短縮、省人化などの多くの利点がある³⁾。一方で、層間にコールドジョイント状の不連続層が発生し、構造的な弱点となる。また、通常の鉄筋補強を適用することが困難であるため、様々な補強方法についての検討が行われている。層間を補強するための方法として、3D プリンティングによる積層体を埋設型枠として用いて、従来通りの鉄筋コンクリート⁴⁾や補強材補強コンクリート⁵⁾を打ち込むといった事例がある。しかし、これらの手法は現場での配筋や打込み作業が発生し、3DCP

の利点である省人化を十分に生かすことができない。そこで筆者らの研究グループは、積層されたモルタルに田植えのように補強材を挿入することで層間を補強する方法を提案した⁶⁾。これまで、適切に補強材を挿入できた場合に力学特性の改善を確認した一方で、手作業による補強材の挿入では、挿入時に空隙を積層体内部に巻き込んでしまうことや、補強材の施工精度が一定ではないなどの課題があった⁷⁾。これを受けて、図-1 に示す挿入機構を開発し、一定の精度での挿入や空隙の抑制に成功した⁸⁾。また、補強材の適切な配置計画を検討するため、FEM 解析により、補強材の配置の基礎検討として補強材の径による比較を行った⁹⁾。一方で、補強材の長さ、配置などのパラメータについての検討は十分ではない。

これらの背景から、本研究では 3DCP による積層を模擬的に再現した打込み試験体（以下、模擬試験体）と 3DCP 実機試験により作製した積層体から切り出した試験体（以下、実機試験体）を作製し、せん断試験、曲げ試験と X 線 CT 観察を実施する。得られた試験結果について考察を行うことで、自動補強システムに適した補強材の配置計画の検討を行う。

2. 実験概要

ここでは、異なる補強材配置の試験体を作製し、せん断試験と曲げ試験を行った。試験体作製に当たっては、以下に示す 2 種類の手順で実施した。第一に、模擬試験体として 3DCP による積層を再現した試験体を作製した。第二に、模擬試験体のせん断試験・曲げ試験の結果を踏まえ、実機試験体として 3DCP 実機により作製した積層

*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (学生会員)

*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)

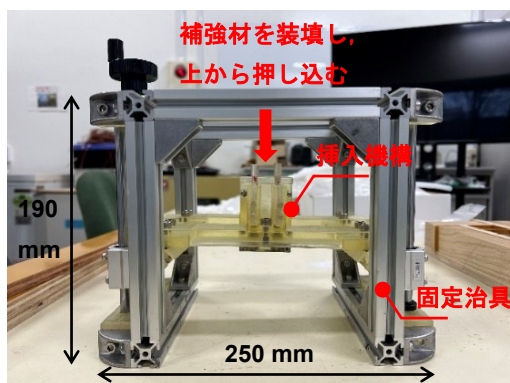


図-1 挿入機構

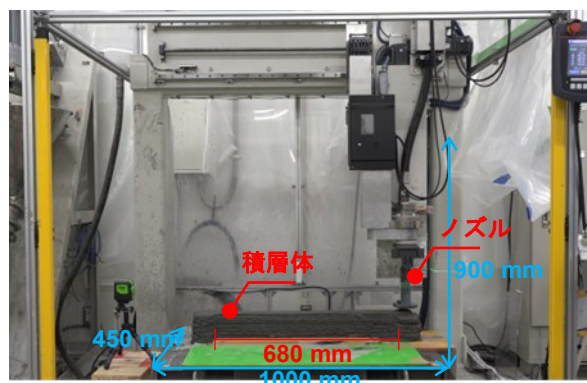


図-2 ガントリー型 3DCP



図-3 模擬試験体の型枠

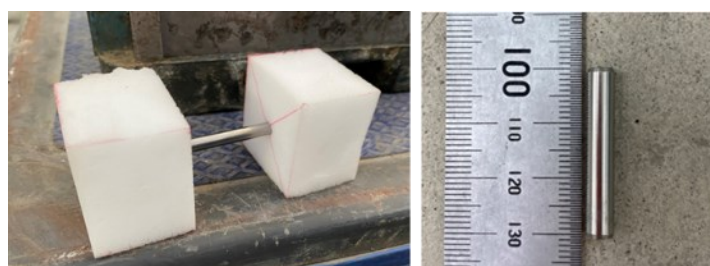


図-4 メラミンスポンジによる補強材（30 mm）の固定

体から切り出した試験体を作製した。実機試験体については、せん断試験に加えて X 線 CT 観察を実施した。各々の実験方法の詳細については、後述する。

2.1 使用した 3DCP

図-2 に、本研究で使用したガントリー型 3DCP を示す。練り混ぜたモルタルがポンプから吐出ノズルに供給されるとともに、吐出ノズルが上下左右方向に、土台となる盤面が前後方向に移動することで三次元的に積層体をプリントすることができる。

2.2 使用材料

積層材料には基準モルタルとして、実大部材や実験室レベルのいずれでも積層実績のあるブレックス材料を使用した⁶⁾。目標フロー値は $110 \pm 10 \text{ mm}$ (0 打), $140 \pm 10 \text{ mm}$ (15 打) であり、水添加率を 14.75% とした。補強材として、市販の円柱状鋼補強材 (S45C, $\phi=5 \text{ mm}$, $L=30 \text{ mm}$, 60 mm) を使用した。

2.3 模擬試験体の作製

補強材の配置、長さ、本数を実験パラメータとして、模擬試験体を作製した。模擬試験体は、3DCP 実機による積層に先立って、少量の材料で簡易に作製が可能であることから採用したもので、積層の際に生じる不連続面を模擬的に再現している。型枠には、図-3 に示したモルタル供試体用三連型枠を使用した。型枠中の所定の位置に補強材を固定するため、図-4 に示すメラミンスポンジを使用した。図-5 に試験体の作製手順を示す。ス

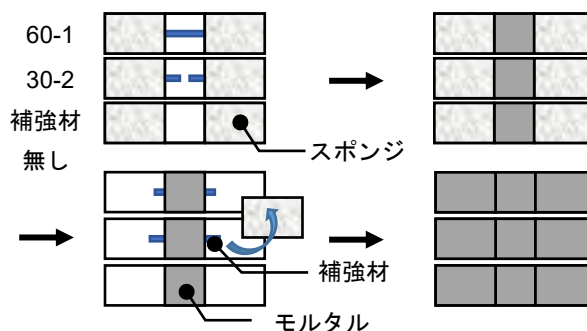


図-5 模擬試験体作製手順

ポンジを仕切りとして型枠を分割し、約 15 分の時間差を設定してモルタルを打込み、3DCP による不連続層を再現した。このようにして作製した試験体について、形状や補強材配置などの概要を図-6 に示す。ここで、再現した不連続層は、それぞれの図中の黒実線で示す位置に設けた。せん断試験では、図-6(a)に示すように、埋設する補強材の長さをパラメータとして、60 mm の補強材を中央部に 1 本挿入した試験体 (60-1 (模擬)), および、30 mm の補強材を補強材間距離が 10 mm となるように 2 本挿入した試験体 (30-2 (模擬)), 補強材を挿入していない試験体 (補強材無し (模擬)) の 3 水準の模擬試験体と、不連続層を作らず一度で打込みを行った試験体 (打込み) を作製した。曲げ試験では、図-6(b)に示すように、補強材の配置をパラメータとして、2 種類の配置案 (以下、曲げ 1 (模擬), 曲げ 2 (模擬)) と曲げ補強材無

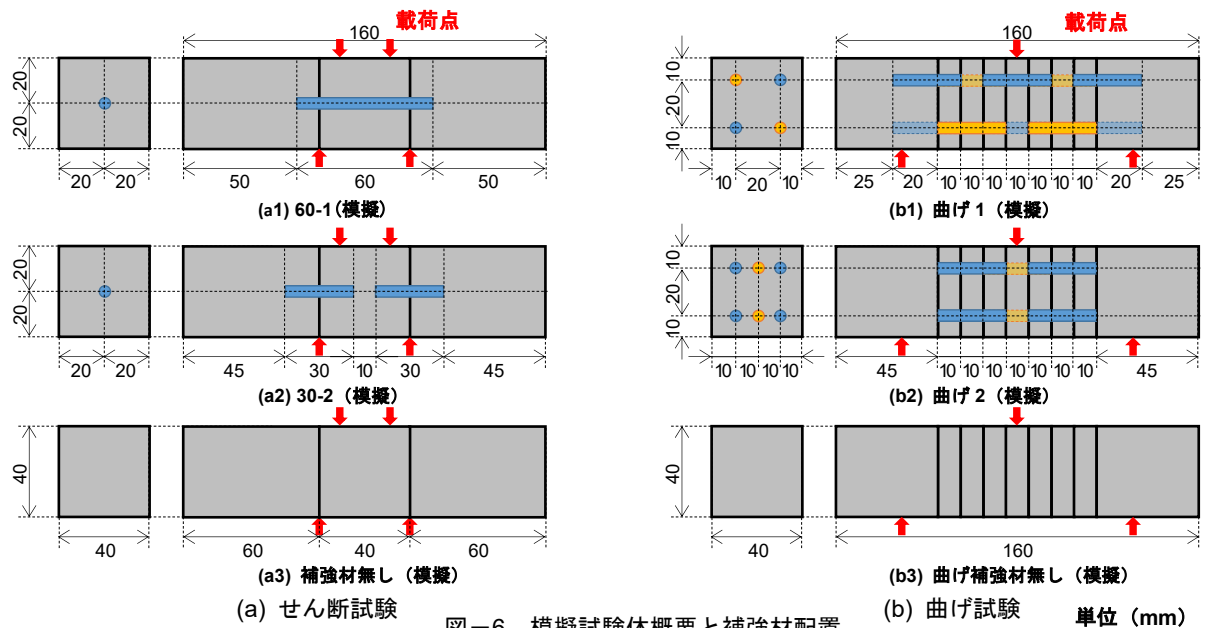


図-6 模擬試験体概要と補強材配置

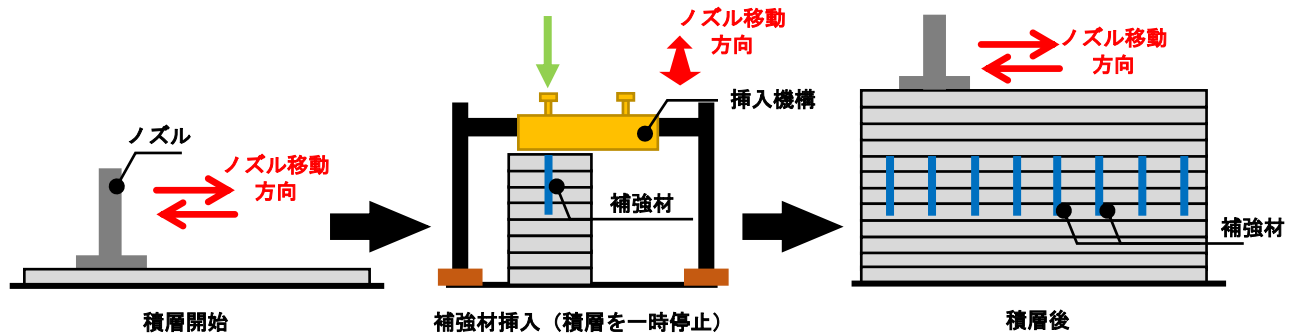


図-7 積層体製作手順

し (模擬) の試験体を作製した。なお、使用した補強材の長さはすべて 30 mm であり、図中の補強材の青と橙の色分けは配置を明確化するためだけのものではない。試験体は 24 時間の気中養生を経て脱型した後、気中養生 (20 °C) を施し、材齢 14 日で力学試験を行った。

2.4 実機試験体の作製

本実験では、模擬試験体の実験結果の妥当性を確認するために、3DCP 実機による積層体から試験体を作製し、せん断試験および X 線 CT 観察を実施した。図-7 に積層体製作手順を示す。ガントリー型 3DCP によって、モルタル積層体を作製し、図-1 に示す挿入機構を用いて、補強材を垂直に挿入した。挿入機構は同時に 2 本の挿入が可能であるが、実験の都合上 1 本ずつ挿入した。1 層あたりの積層高さは 8 mm、積層幅は 70 mm で積層を行った。60-1 (実機) の場合、高さ 110 mm まで積層後、積層を一時停止し、60 mm の補強材を挿入した。30-2 (実機) の場合、高さ 76 mm まで積層後、積層を一時停止し、下方の補強材 (30 mm) を挿入した。挿入完了後、積層を再開し、116 mm まで積層、再度一時停止し、上方の補強材 (30 mm) を挿入した。挿入完了後、積層を再開し、高

さ 200 mm まで積層した。補強材無し (実機) は、積層を一度も止めず高さ 200 mm まで積層した。作製した積層体をコンクリートカッターで 40 mm×40 mm×160 mm の寸法に切断し、せん断試験用試験体を作製した。

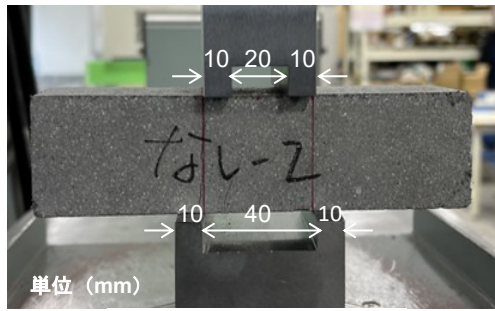
2.5 各試験の概要

(1) せん断試験

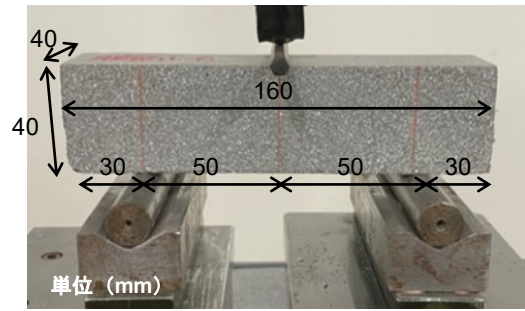
試験体は、幅 40 mm、高さ 40 mm、長さ 160 mm の直方体形状で、図-6(a1)~(a3)に示すような 60-1、30-2、補強材無しの試験体および打込み試験体を作製した。積層模擬試験では各 3 本、3DCP 実機試験では各 8 本ずつ作製した。試験方法は図-8(a)に示すように、「直接二面せん断試験」⁸⁾を参考に、載荷幅を変更して実施した。試験機は油圧式万能試験機 (YU-1000SIV、東京衝機試験機社製、最大容量：1000 kN) を使用し、載荷速度は 0.5 N/s で試験を行った。最大荷重を求め、せん断強度 σ を、式(1)により求めた。

$$\sigma = \frac{P}{2A} \quad (1)$$

ここに、 P ：せん断荷重[N]、 A ：断面積[mm²]である。



(a) せん断試験方法



(b) 曲げ試験方法

図-8 力学試験方法

(2) 曲げ試験

図-6(b1)~(b3)に示すように、試験体は以下、曲げ 1 (模擬)、曲げ 2 (模擬)、曲げ補強材無し (模擬) をそれぞれ 3 本ずつ作製した。試験方法は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」を参考に、幅 40 mm、高さ 40 mm、長さ 160 mm の試験体を、図-8(b)に示すように、3 点曲げ試験を行った。試験機は電気機械式万能材料試験機 (59R5567, インストロンジャパン社製, 最大容量: 30 kN) を使用し、支点間距離は 100 mm、載荷速度は 0.4 mm/min で試験を行った。最大荷重を求め、曲げ強度 σ_b を、式(2)により求めた。

$$\sigma_b = \frac{M}{I} \times \frac{h}{2} = \frac{wl/4}{bh^3/12} \times \frac{h}{2} = 0.234w \quad (2)$$

ここに、 M : 曲げモーメント[N・mm], I : 断面二次モーメント[mm⁴], h : 試験体高さ[mm], b : 試験体幅[mm], l : 支点間距離[mm], w : 曲げ荷重[N]である。

(3) X 線 CT 観察

せん断試験用に作製した実機試験体について、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 150 kV、電流 103 μ A とした。撮影データは画像処理ソフトウェアで画像処理し、補強材の傾斜角度と空隙体積を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 せん断試験

せん断試験の結果について図-9 に示す。模擬試験体の応力-変位曲線を図-9(a), せん断強度を図-9(b), 実機試験体の応力-変位曲線を図-9(c), せん断強度を図-9(d)に示す。図-9(a),(c)では太線が各試験体の代表的な結果の 1 つを示しており、図-9(b)(d)のエラーバーは標準偏差である。図-9(b)に示すように、補強材を適切な位置に挿入することで、補強材無しに比べせん断強度が向上することを確認した。載荷後の試験体を観察すると、補強材無しは二面あるせん断面のどちらかの面に脆性的なせん断破壊が生じた。一方で、補強材を挿入した試験体は脆性的なせん断破壊と、載荷箇所以外に微細な

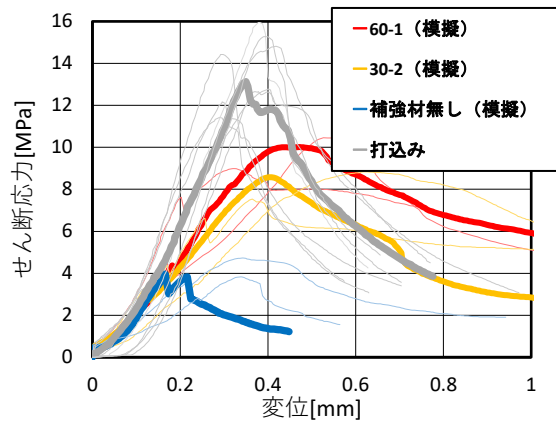
曲げひび割れが見られた。また、30mm の補強材を直列に 2 本挿入した試験体よりも 60mm の補強材を 1 本挿入した試験体の方が、高い補強効果が得られた。模擬試験体と実機試験体は、せん断強度の絶対値に差異は見られるものの同様の傾向を示した。模擬試験体と実機試験体では、作製過程において、補強材挿入時の空気の巻き込みや層間の付着など様々な相違が存在するが、ひび割れは界面に沿って発生しているため、界面がより支配的な影響を与えると考えられる。これらの結果から、3DCP による積層を模擬的に再現した試験体を用いて補強材配置の検討を行うことの妥当性が確認できた。

3.2 曲げ試験

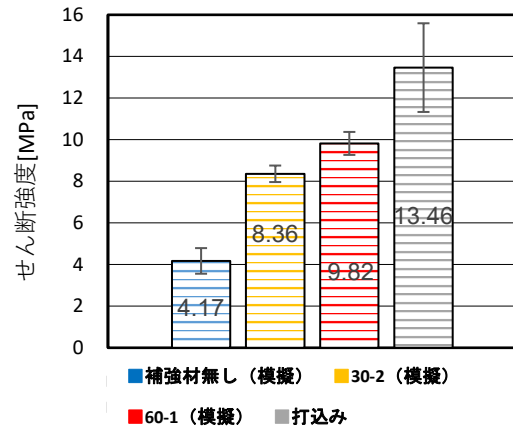
曲げ試験の結果を図-10 に示す。応力-変位曲線を図-10(a), 曲げ強度を図-10(b)に示す。図-10(a)では太線が各試験体の代表的な結果の 1 つを示しており、図-10(b)のエラーバーは標準偏差である。補強材無しはひび割れが生じた瞬間に不連続層で破断したが、補強材有りは補強材により急激な破断は起こらなかった。補強材を挿入することにより曲げ強度と靱性が向上することが確認できた。曲げ 1 (模擬) と曲げ 2 (模擬) では、降伏点に大きな違いは確認されなかったが、降伏後の靱性的挙動には違いが見られ、曲げ 2 (模擬) の方が曲げ 1 (模擬) よりも靱性が高かった。曲げ 2 (模擬) は試験体中央に集中して補強材が位置しており、変形時に試験体下側に生じる引張応力を負担する補強材の本数が多い。そのため、降伏後の靱性が大きく向上したと考えられる。曲げ 1 (模擬) と曲げ 2 (模擬) の実機試験体については今後実施する予定である。

3.3 X 線 CT 観察

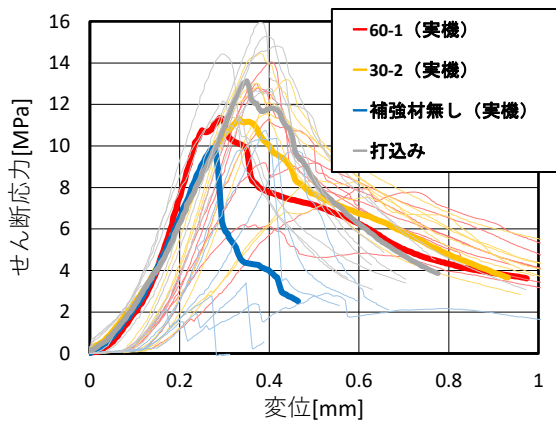
X 線 CT で撮影した画像を図-11(a),(b)に示す。縦軸に補強材の単位体積当たりの巻き込み空隙体積(空隙率)を、横軸に傾斜角度としたグラフを図-12 に示す。図-11 に示すように、60-1 (実機) では鉛直から 0.93°, 30-2 (実機) は上側の補強材では 4.72°, 下側の補強材では 8.18°の角度で、積層方向に対して直交方向にそれぞれ傾斜していた。一方で、積層方向に対しては大きな傾斜は



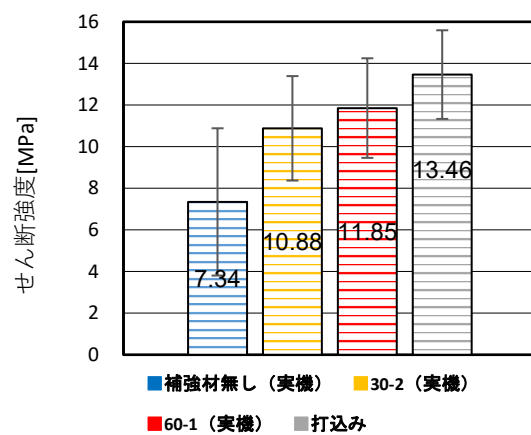
(a) 応力-変位曲線：模擬試験体



(b) せん断強度：模擬試験体

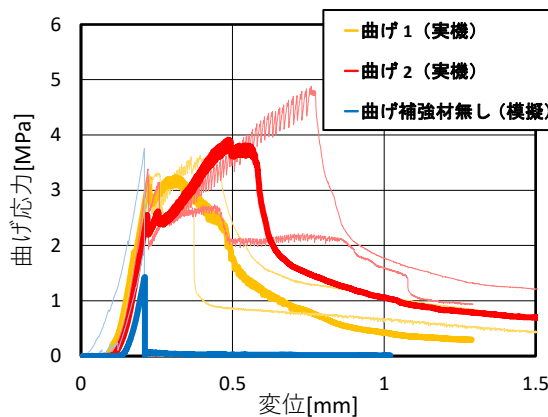


(c) 応力-変位曲線：実機試験体

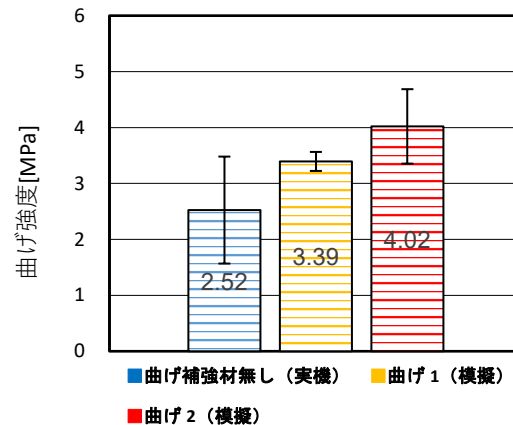


(d) せん断強度：実機試験体

図-9 せん断試験結果



(a) 応力-変位曲線：模擬試験体



(b) 曲げ強度：模擬試験体

図-10 曲げ試験結果

見られなかった。また、30-2 (実機) は上側の補強材と比較して下側の補強材の傾斜角度が大きかった。これは、下側の補強材の上に積層されたモルタルが、上側の補強材の挿入時に補強材とともに押されることで圧力が発生したためと考えられる。図-12 より、60-1 (実機) は、30-2 (実機) に比べ、空隙率および傾斜角度が小さかった。また、傾斜角度と空隙率には正の相関が確認された。積層方向と垂直に傾斜が発生したのは、補強材が積層面

に対して完全に埋没されていなかったため、補強材の飛び出している部分が、ノズルから吐出されたモルタルに横から押し付けられたことが原因だと考えられる。

4. まとめ

本研究では、3DCP による積層を模擬的に再現した試験体と 3DCP 実機試験により作製した積層体から切り出

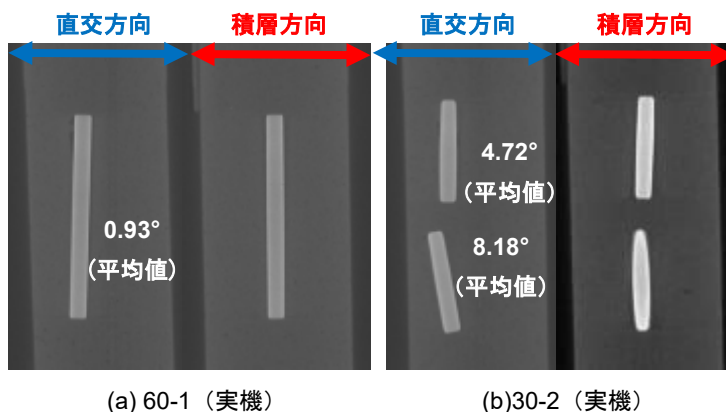


図-11 X線CT画像

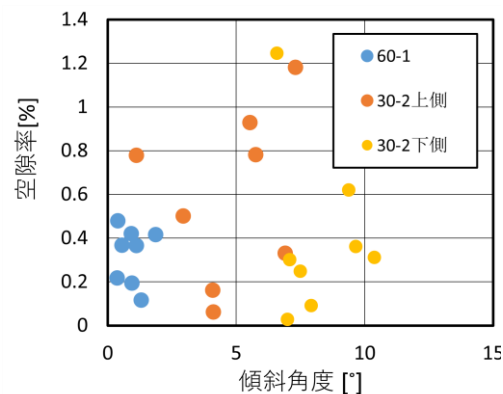


図-12 傾斜角度と空隙率との関係

した試験体について、力学試験とX線CT観察を実施することで、補強材の配置計画に関する検討を行った。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 模擬試験体と実機試験体は、せん断強度の絶対値に差異は見られるものの同様の傾向を示した。このことから、3DCPによる積層を模擬的に再現した試験体を用いて補強材配置の検討を行うことができると考えられる。
- (2) 補強材を適切な位置に挿入することで、補強材無しに比べせん断強度が向上した。また、30mmの補強材を直列に2本挿入した試験体よりも60mmの補強材を1本挿入した試験体の方が、補強効果が高いことを確認した。
- (3) 補強材を挿入することにより、曲げ強度と靱性が向上することを確認した。試験体中央部に補強材を集中的に配置し、中央部に位置する補強材の本数が多い方がより高い靱性を得ることができた。
- (4) X線CT観察により、挿入した補強材の傾きの方向が、3DCPの積層方向に対して垂直方向に発生していることを確認した。また、30mmの補強材よりも60mmの補強材を挿入する方が、補強材の傾斜角度が小さく、空隙率も小さいことを確認した。

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。この場を借りて深く御礼申し上げます。

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, コンクリート工学年次論文集, vol.59, pp.173-180, 2021
- 2) 国土交通省: i-Construction: <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (閲覧日: 2022年12月26日)

- 3) 石田哲也, 木ノ村幸士, 石関嘉一: 3Dプリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.17-26, 2021
- 4) 小倉大季, 山本伸也, 阿部寛之: 3Dプリンティングによる自由曲面型枠の製造とその実用化日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.791-792, 2021.9
- 5) 金子智弥, 坂上肇, 中村允哉: セメント系材料を用いた建設用3Dプリンタの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.39, No.1, pp.318-312, 2021.5
- 6) Nishiwaki, T. et al.: Reinforcing Interlayers of Three-Dimensional-Printed Mortar Using Metal Fiber Insertion. ACI Materials Journal, Vol. 118, No. 6, pp. 331-340, 2021
- 7) 宮田賢優, 西脇智哉, 古江翔子: 建設用コンクリート3Dプリンターによる積層構造体の層間補強に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1888-1893, 2020
- 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, pp. 411-416, 2022
- 9) 浅川智哉, 西脇智哉, 宮田賢優: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.913-914, 2022.9
- 10) 魚本健人, 峰松敏和: コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.4, pp.107-112, 1981.4