

# 建設用コンクリート 3D プリンタ積層体に適用可能な補強方法

## Reinforcement method applicable to 3D concrete printed laminates

浅川 智哉

Tomoya ASAKAWA

Concrete laminates printed by 3D concrete printing system has problems, e.g., decreased mechanical properties due to the interlayer gap and the impossibility of adapting conventional reinforcement methods. In this study, the practical application of the automatic reinforcement method without directional restrictions was proposed. Printable FRCC mix proportions and automated the reinforcement method by inserting reinforcement bars were investigated and evaluated by mechanical tests and X-ray CT observations. Mechanical tests were conducted on specimens fabricated using the integrated two methods to evaluate the effectiveness. As the result, it was confirmed that the 3DCP laminate can be reinforced in both directions.

**Keywords:** 3D concrete printer, Interlayer reinforcement, Automatic insertion device, Fiber reinforced cementitious composite

建設用コンクリート 3D プリンタ, 層間補強, 自動挿入機構, 繊維補強セメント系複合材料

### 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）の開発が活発に行われている。造形自由度の高さなど多くの可能性を期待される中で、特筆すべき利点として施工の自動化が挙げられる。自動化による施工の効率化は、労働者数減少の解決策や近年建設業界で進むデジタル化に沿う技術として注目されている<sup>1)</sup>。一方で、3DCP 特有の課題として、3DCP に適した補強方法が確立していない点が挙げられる<sup>2)</sup>。吐出と積層による造形方法では、鉄筋の事前配置が難しく、また、積層体内部にはコールドジョイント状の不連続層が発生して力学特性が低下する<sup>3)</sup>。そのため、3DCP に適応可能な補強の提案が必要とされている。国内では 3DCP で印刷した型枠に鉄筋を配置する事例<sup>4)</sup>といった埋設型枠としての事例が主に確認されている。これらは十分な補強効果が見られる一方で、鉄筋の配置やコンクリートの打設などの作業に人の手が必要であり、3DCP の利点である自動化を十分に活用できていないと言いがたい。

そこで、3DCP 積層体に対する自動補強可能な手法の提案のため、著者らは以下の二つの方法の検討を行ってきた。一つ目の方法は、圧送性と積層性を持つ高強度な繊維補強セメント系複合材料（以下、FRCC）による補強である。既往の結果<sup>5)</sup>から積層可能であり、概ね超高強度・高靱性 FRCC に近い性能を持つ調合が得られた。一方で、FRCC で補強可能な方向に制限があり、この課題は FRCC 材料ではない新たな対策が必要である<sup>6)</sup>。また、文献 5 で得られた FRCC 調合は、他の 3DCP に使用される調合<sup>6)</sup>と比較して過大なシリカフェーム使用量などによるコスト増など、実用化に向けては様々な観点から改良が必要である。そこで、FRCC が持つ補強方向の制限への対策として、二つ目の方法として補強材を挿入する事による補強の検討が行われている。この方法は積層過程の途中で積層

体表面から補強材を挿入する事で層間補強を行う。一部作業を手動で行う補強材挿入機構を開発し、積層実績があるモルタルで造形した積層体に補強材挿入を行った。その結果、一つ目の方法では補強が困難であった方向について力学性能の改善が確認された。一方で、補強材挿入を自動化した場合の結果については確認されていない<sup>7)</sup>。

本研究では、改善点が存在する積層可能な FRCC 調合について、シリカフェーム使用量などの調合条件が、補強効果やコストを含めた材料特性に与える影響を考察する。また、補強材挿入による補強方法に対して、一連の作業の自動化と、これによる補強効果への影響評価を行う。これら二つの手法を用いて積層体を作製し、力学試験や X 線 CT 観察を行う。FRCC と補強材挿入を統合した補強が、異方性なく補強可能である事を確認する。

### 2. 実験概要

既往の検討の結果、FRCC を積層材料に用いることで積層体を補強可能であることを確認した<sup>5)</sup>。一方で、FRCC 調合の更なる改良の可能性や、有効な補強方向の制限といった課題を確認した。そこで、①適切な調合の検討を行うとともに、②補強材挿入による補強とその自動化を目指す。①について、特にシリカフェーム使用量に注目し、補強効果やコストなどの材料特性に与える影響を総合的に検討する。②について、補強材を自動挿入可能な機構を開発し、積層実績のある材料を用いた積層体・梁部材に対して使用することで、FRCC で補強が困難であった方向への補強効果、自動挿入機構について検討を行う。そして、これら 2 つの補強を統合することで、それぞれの課題を補い、異方性なく補強可能であることを確認する。また、②で開発した自動挿入機構を FRCC に適用した場合に生じる課題や効果についても確認を行う。今回は紙面の都合から、実施した試験の中で曲げ試験結果のみ扱う。

## 2.1 調合検討 (実験 1)

シリカフェームの使用量が補強効果やコスト面に与える影響を確認することで、より適切な調合を模索する。ここでは、コンプレッジャー試験によるフレッシュ性状と、圧縮試験による硬化後の性能を評価した。これらの結果と併せて、原材料単価からコストを算出して総合的な評価を行う。

### 2.1.1 使用材料と調合

材料には、結合材 (B) として早強ポルトランドセメント (C) とシリカフェーム (S)、また、一部調合では低熱ポルトランドセメントと S が 9 : 1 でプレミックスされたシリカフェームセメント (SC) を使用した。細骨材に珪砂 6 号 (S6) とワラストナイト (Wo) を用いた。混和剤に高性能減水剤 (SSP)、また、繊維長 6 mm のポリエチレン繊維 (PE) を使用した。PE は外割で添加した。

調合を表 1 に示す。調合は既往の検討<sup>5)</sup>を参考に決定した。水結合材比 (W/B) は固定して、B 内部の C と S の割合を実験パラメータとした。シリーズ名の末尾の値はその調合の SSP の割合を示す。

### 2.1.2 各試験の概要

コンプレッジャー試験により計測されるフレッシュモルタルのせん断降伏応力から、モルタルの印刷適正を評価できる<sup>5)</sup>。硬化前の試料に対し、図 1 に示す約 590 g、先端角度 30° のコーンを自由落下させ、貫入深さ [mm] と、先端角度  $\theta$  [°] から、式(1)より降伏応力  $\tau_0$  を求める。この計算結果から、表 2 の範囲<sup>5)</sup>で判定を行った。

$$\tau_0 = \frac{m \times g \times (\cos\theta)^2}{\pi h^2 \tan\theta} \quad (1)$$

圧縮試験は JIS A 1108 に基づいて実施した。試験は材齢 7 日で行い、一部試験体は材齢 28 日についても実施した。

コストの評価は各材料の単価から 1 m<sup>3</sup> あたりの価格を求め、基準とした調合 (C82S18-1.7) との比較により評価した。

## 2.2 補強材挿入による補強の自動化 (実験 2)

補強材挿入による補強について、補強材を自動挿入可能な機構を開発し、試験体作製を行った。作製した試験体に対して X 線 CT 観察と曲げ試験を行い、自動挿入機構の評価を行った。開発した自動挿入機構を用いて梁部材を造形し、曲げ試験を実施した。

### 2.2.1 自動挿入機構・試験体作製

開発した補強材自動挿入機構を図 2 に示す。本機構は、3DCP ヘッド部分に後付け設置した。モルタル積層用のアクチュエータを利

用して補強材の挿入位置へ移動が可能である。直動機構により補強材を押込み (図 3(a))、リニアブッシュとゴムリングにより補強材を垂直に保持しつつ挿入する (図 3(b))。ばねにより次の補強材が装填され、補強材の連続挿入が可能である (図 3(c))。

自動挿入機構を用いて作製した試験体 1~3 を図 4 に示す。積層には積層実績のあるプレミックスモルタル (以下、基準調合)<sup>5)</sup>、補強材は円柱状鋼材 (S45C、直径 5 mm、長さ 30 mm) を用いた。図 4 の試験体に対し X 線 CT 観察を実施した。撮影データは汎用画像処理ソフトにより再構成し、傾斜角度と空隙体積を測定した。その後、JIS R 5201 に基づき、3 点曲げ試験を実施した。

### 2.2.2 大型部材の造形

自動挿入機構を用いて、図 5 に示す梁部材を作製した。積層材料、補強材は 2.2.1 と同じ材料を用いた。梁部材は H 型断面の形状、高さ 900 mm の寸法で積層した。補強材は両端 75 mm を除いた挿入範囲内で断面積当たりの補強材量が一定となるように、図 5 のように 1 層当たり 5 本、5 層で計 40 本補強材を挿入した。補強材を挿入した梁部材 (以下、補強有り)、補強材を挿入していない無補強梁部材 (以下、補強なし) について三等分点 4 点曲げ試験を実施した。

## 2.3 補強方法を統合した場合の補強効果 (実験 3)

積層方向と直交する方向に载荷した場合 (以下、A 方向) に補強効果がある FRCC と、積層方向と平行な方向に载荷した場合 (以下、B 方向) に補強効果がある補強材挿入による補強を統合した試験体を作製する。力学試験、X 線 CT 観察の結果から統合した場合の効果について確認する。

### 2.3.1 作製した試験体

作製した試験体を図 6 に示す。既往の検討で提案された FRCC 調合<sup>9)</sup>による積層体に対し、自動挿入機構 (図 2) を用いて円柱状補強材を挿入した。補強材の表面は、直径または軸方向にやすり掛けをした試験体 (以下、それぞれヨコ、タテ)、加工を行わない試験体 (以下、無加工) を作製した。図 6 に示す曲げ試験体 (B 方向試験体②) では、ねじ式 (SUSXM7、全長 90 mm、ねじ部 60 mm) の補強材を使用した。ねじ式の補強材は、一部を手作業が必要な別機構を用いて挿入し、モータ制御挿入の試験体 (以下、ねじ (直動)) と、補強材の自重で挿入する試験体 (以下、ねじ (自重)) の二つを準備した。また、A・B 方向それぞれに無補強の試験体 (以下、補強なし) と、打込み試験体 (以下、打込み) を作製した。

表 1 調合表

シリーズ名	C	S	SC	S6	Wo	W	SSP	PE	圧縮試験材齢
C82S18	-1.7 <sup>1)</sup>	82	18						7d, 28d
C90S10	-1.7	90	10			18.5	1.7		7d
C98S2	-1.7	98	2						7d, 28d
C90S10	-2.0					18.2	2.0		7d, 28d
	-2.1	90	10			18.1	2.1		7d, 28d
	-2.2					18.0	2.2		7d
	-1.0					19.2	1.0		7d, 28d
SC	-1.35			100		18.85	1.35		7d, 28d
	-1.7					18.5	1.7		7d

\*1 参考文献 5 で提案された調合

表 2 降伏応力範囲 (単位: kPa)<sup>5)</sup>

判定	10 分	20 分
A	$4.6 < \sigma < 6.9$	$7.3 < \sigma < 11.0$
B	$3.2 < \sigma < 4.6$	$5.1 < \sigma < 7.3$
C	$3.2 < \sigma$	$5.1 < \sigma$
D	$\sigma > 6.9$	$\sigma > 11.0$

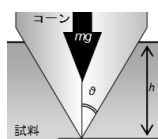


図 1 コンプレッジャー試験

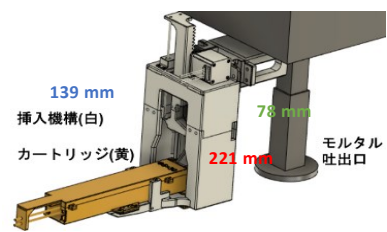


図 2 挿入機構 CAD 図

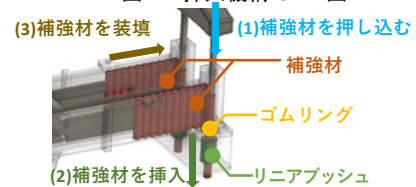


図 3 挿入プロセス

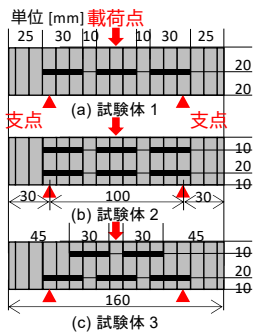


図4 試験体 (実験2)

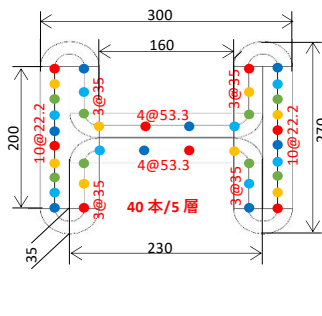


図5 梁部材断面図

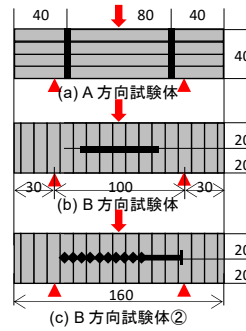


図6 曲げ試験体 (実験3)

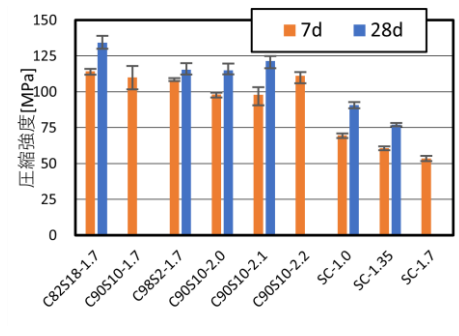


図7 圧縮強度

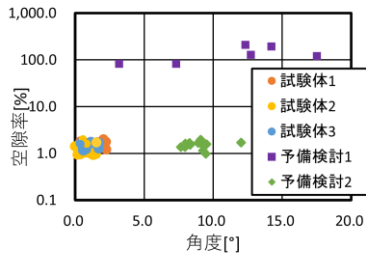


図8 空隙率と傾斜角度 (実験2)<sup>7)</sup>

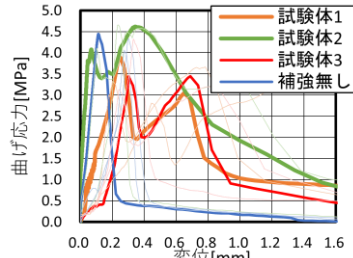


図9 曲げ応力 - 変位グラフ (実験2)

表3 コンプランジャー試験結果とコスト計算結果

調査名	コンプランジャー試験				試算コスト [万円/m <sup>3</sup> ]	
	10分		20分			
	σ[kN]	判定	σ[kN]	判定		
C82S18	-1.7	5.8	A	8.9	A	21.09
C90S10	-1.7	9.0	D	30.0	D	18.06
C98S2	-1.7	25.7	D	105.0	D	14.93
C90S10	-2.0	4.6	A	12.1	D	18.43
	-2.1	4.3	B	10.2	A	18.55
	-2.2	3.6	B	6.9	B	18.67
SC	-1.0	7.2	D	11.1	D	17.31
	-1.35	2.7	C	4.1	C	17.74
	-1.7	1.5	C	1.8	C	18.17

### 2.3.2 各試験の概要

B方向の補強材が挿入された試験体に対して、X線CT観察を行い、空隙体積と傾斜角度を得た。ねじ式の補強材を挿入した試験体については、機構の性質上、傾斜角度は参考値として扱う。曲げ試験はJIS R 5201に準じて、材齢14日で実施した。

## 3. 実験結果

### 3.1 調査検討 (実験1) 結果

コンプランジャー試験の結果を表3に示す。基準としたC82S18-1.7と比較して、S使用量を抑えることで降伏応力の値が高くなる事が確認された。Sを用いた調査については、SSPの割合を2.1とした場合に良好な降伏応力が見られた。SCシリーズについて、SC-1.7はC82S18-1.7と比較して降伏応力が著しく小さい。SCに用いられている低熱セメントによる影響が大きく、SSPを調整することで今後SC調査においても良好な結果が得られることが見込まれる。図7に示すように、圧縮強度はC82S18、C90S10、C98S2それぞれの調査でいずれも同程度であった。SCを用いた調査では、材齢7日の場合にC82S18-1.7の半分程度、材齢28日の場合は約7割程度の結果が得られた。また、1m<sup>3</sup>あたりのコストを計算した結果を表3に示す。2024年時点ではCは17円/kg、Sは300円/kgであり、S使用量を抑え、Cに置換することで基準としたC82S18-1.7と比較して約12%~29%削減出来ることを確認した。

同等程度の力学性状を示した事やコストの削減結果から、本研究の範囲内ではC90S10-2.1を改善した調査であることを確認した。

### 3.2 補強材挿入の自動化に関する実験 (実験2) 結果

#### 3.2.1 試験体作製・実験結果

X線CTの測定結果から求めた、補強材傾斜角度と空隙率の関係を図8に示す。ここで、空隙率は挿入時に巻き込む空隙体積を補強材の体積で除して求めた割合の値であり、図8の縦軸は対数表示とした。図中の、「予備検討1」は手作業で補強材を挿入した場合<sup>8)</sup>、「予備検討2」は一部作業を手動で行う自動挿入機構のプロトタイプ

の機構を用いた場合の結果である<sup>7)</sup>。図8より、自動挿入機構を用いることで、傾斜角度と空隙率は、予備検討1と比較してそれぞれ8%と1%程度、予備検討2と比較して10%と90%程度まで低減できることを確認した。

曲げ試験の結果を図9に示す。図中の太線は代表的な試験結果として表示した。図9より、この曲げ試験では補強材挿入による曲げ強度の向上は限定的であった。試験体断面積に対する補強材断面積の割合が高い事が原因として考えられる。一方で、最大曲げ応力後の挙動から補強材挿入によりひび割れ後の靱性が向上している事を確認した。以上の結果より、FRCCによる補強で課題となっていたB方向に対して、補強材挿入により補強可能である事が確認された。

#### 3.2.2 梁部材の造形・曲げ試験結果

自動挿入機構を用いて造形した梁部材を図10、曲げ試験より得られた荷重と変位の関係を図11に示す。図11より得られた曲げモーメントを断面係数で除す事で求めた引張強度として、補強有りは1.32 MPa、補強なしは1.05 MPaが得られた。図11と引張強度から、補強材挿入により靱性と引張強度の向上が可能である事を確認した。補強材が互い違いに挿入されることで、載荷時に段階的に荷重を負担する事が要因の一つと考えられる。

### 3.3 補強方法を統合した場合の試験 (実験3) 結果

#### 3.3.1 X線CT結果

2つの補強方法を統合して作製したB方向試験体に対して、X線CT観察を行った結果を図12に示す。赤い凡例は図8の試験体1から3の結果である。積層材料をFRCCに変更した事で、傾斜角度や空隙率の値やばらつきが共に大きくなった。傾斜角度は、FRCCに変更した事で挿入時の抵抗が大きくなり、積層体表面と一致するまで挿入出来ていなかった事で、若干飛び出していた補強材が次層のモルタルで倒れてしまったと考えられる。また、基準調査と比較してFRCCは繊維混入量や粘性が大きいため、内部を押し広げる形で補強材が挿入される。これにより、挿入後補強材周辺にモルタルが

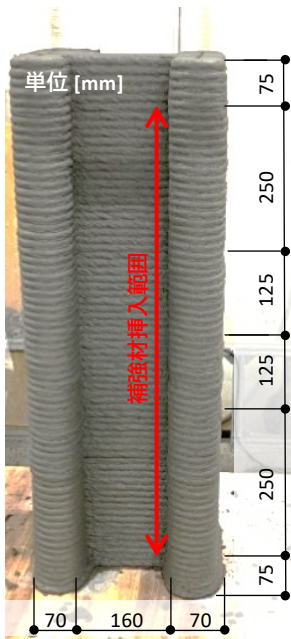


図 10 作製した梁部材

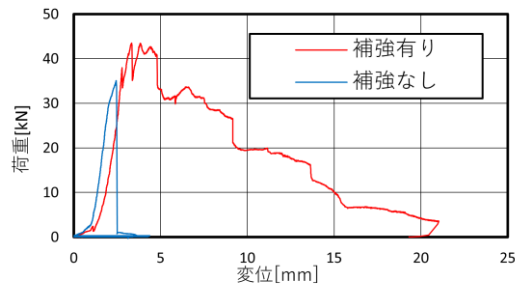


図 11 荷重 - 変位グラフ (梁部材)

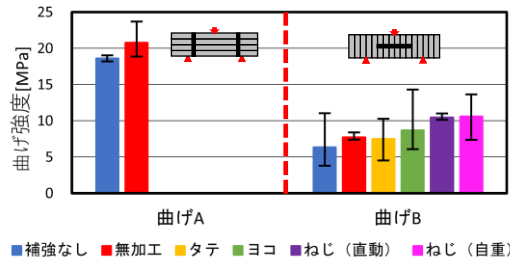


図 13 曲げ強度 (実験 3)

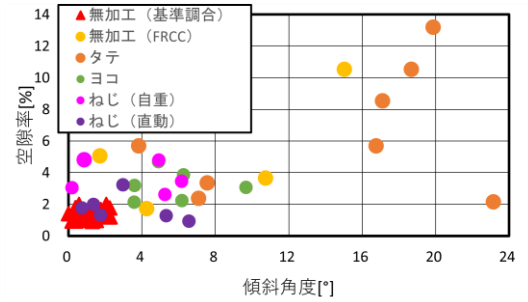


図 12 傾斜角度と空隙率 (実験 3)

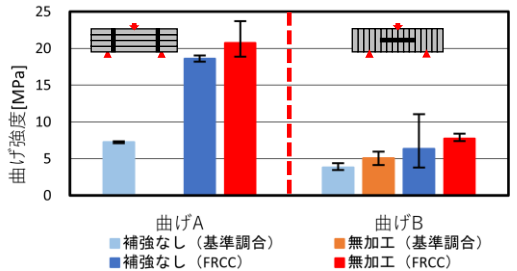


図 14 曲げ強度比較 ※曲げA補強なし (基準調合) のみ 28d、その他は全て 14d

充填されにくくなり、空隙率が向上したと考えられる。ねじ式補強材については従来の押込み式よりも良好な結果が得られた。ねじ込みながら補強材を挿入する事で押込み式よりも抵抗を抑え、繊維を巻き込みながら挿入できる事が原因として考えられる。

### 3.3.2 力学試験結果

曲げ試験の結果を図 13 に示す。図 13 より、A 方向に载荷した場合、補強材の有無によらず同等程度の強度を示した事から、統合した場合でも FRCC により A 方向を補強可能である事を確認した。B 方向に载荷した場合、補強なしに対して円柱状補強材は 36.9%、ねじ式補強材は 67.0% 強度が向上した。表面性状に注目した場合、ヨコ、タテ、無加工の順に結果が優れている。やすり掛けの実施により、表面積が増えた事で付着面が増え、補強効果の差が生じたと考えられる。形状の差に注目した場合、ねじ式が優れた結果を示した。ねじ式補強材は空隙率を抑えて挿入されたため、安定して効果を発揮したと考えられる。一方で、今回は実験の都合上、補強材間で長さを統一できていないため、ねじ式補強材が円柱状補強材よりも長尺である事が結果に寄与している可能性を考慮する必要がある。

図 14 に、基準調合と FRCC に対して補強材を挿入した試験体の曲げ試験強度を示す。図 14 の左側範囲から FRCC により A 方向の補強が可能であり、右側範囲の基準調合結果から補強材挿入により B 方向の補強が可能であることが確認できる。左右の FRCC 結果から、2 つの補強を統合する事で異方性なく積層体を補強可能であることを確認した。今後、補強材挿入形式、形状や配置などの検討を重ねる事で、効果を向上させることが出来ると考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、3DCP 積層体に適応可能な二つの補強方法とその統合について検討し力学性能を評価した。得られた知見を以下に示す。

1) FRCC 調合について、材料価格から S 利用量を抑え C に置換する事で、コストを約 12%~29% 程度削減可能。コストを抑え、同等程度の力学性能を示す調合として C90S102.1 を得た。

- 2) 3DCP に後付け可能な補強材自動挿入機構を開発した。自動挿入機構により、積層体にほぼ垂直に、巻き込み空隙を限りなく抑えた補強材の自動挿入が可能となった。
- 3) 自動挿入機構を用いる事で、積層から補強材挿入までの一連の作業の自動化、大型部材の作製が可能となった。補強材配置の工夫等を行う事で無補強体と比較して靱性や引張強度などの力学性能の改善が可能。
- 4) 2 つの補強補応報を統合した場合、補強材の挿入形式や形状によって補強効果が向上する。挿入形式や形状の検討により、空隙率を抑えた形で補強材挿入を行える可能性を確認した。
- 5) 2 つの補強方法を統合した場合、A 方向は補強材の有無に影響なく FRCC により補強が可能であり、B 方向は補強材挿入によって強度の向上が可能。
- 6) 2 つの補強方法を統合する事で、補強なしと比較して異方性なく優れた力学性能を持つ積層体を自動で得る事が可能となった。

## 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, **59**(2), 173-180, 2021.2
- 2) Mechtcherine, V. et al.: Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework, Cement and Concrete Composites, **119**, 103964, 2021.5
- 3) Timothy, W. et al.: Digital Concrete: A Review, Cement and Concrete Research, **123**, 105780, 2019.9
- 4) 中島忠大ら: 建設用 3D プリンタによる大型構造物の現地製造, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), A-1, 1317-1318, 2023.9
- 5) 宮田賢優, 浅川智哉, 宮澤友基, 西脇智哉: 建設用コンクリート 3D プリンタに適用可能な高強度繊維補強セメント系複合材料の開発と評価, コンクリート工学年次論文集, **44**(1), 1558-1563, 2022.7
- 6) Nodehi, M., et al.: Effect of supplementary cementitious materials on properties of 3D printed conventional and alkali-activated concrete: A review, Automation in Construction, Vol. 138, 2022
- 7) 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, 411-416, 2022.6
- 8) Nishiwaki, T. et al.: Reinforcing Interlayers of Three-Dimensional-Printed Mortar Using Metal Fiber Insertion, ACI Materials Journal, **118**(6), 331-340, 2021.11