

# 論文 屋外暴露した 3D プリンティング積層体の力学特性および耐久性の評価

阿部 寛之\*1・小倉 大季\*2・山本 伸也\*3・菊地 竜\*4

**要旨：**材料押出方式の 3D プリンティングで作製した繊維補強セメント硬化体の耐久性の評価を目的として、実案件に適用した柱型枠と同一の条件で積層体を作製し、3 年間の屋外暴露試験を行った。この積層体から切り出した供試体を力学試験に供した結果、割裂ひび割れ発生強度は材齢 13 週の結果と比べて 24~31 %高い値を示し、プリント層間の界面にひび割れが発生する条件の供試体でも 5.76~5.98 MPa のひび割れ発生強度が得られた。また、表面吸水試験と中性化深さ測定から、積層界面に脆弱層がないことを示唆する結果が得られた。

**キーワード：**3D プリンティング, 繊維補強モルタル, 屋外暴露, 圧縮強度, 割裂引張強度, 透水性, 中性化

## 1. はじめに

建設スケールの 3D プリンティングに関連する研究開発が世界中で進められており<sup>1)</sup>, 実案件に適用される事例が国内でも増えてきている。3D プリンティングにはいくつかの方式があるが、主流になっているのはノズルからフレッシュな状態のセメント系材料を押し出して積層を繰り返す方法(材料押出方式)である。本技術は、自由な曲面を有する部材を作製できるだけでなく、型枠工なしで埋設型枠の作製やコンクリート構造物の施工への展開なども見込まれ、工期短縮や省人化などの可能性が期待できると考えられている。

筆者らは、これまでに材料押出方式の 3D プリンティングに適した繊維補強モルタルを開発し、そのフレッシュ性状や力学特性、ならびに各プリント層間の界面(以下、積層界面と呼ぶ)の一体性について検討してきた<sup>2)3)</sup>。この 3D プリンティング技術は、写真-1 のペDESTリアンデッキを支える柱の型枠に適用され、意匠の自由度が向上すること、従来の型枠工が不要で工期短縮が図れることなど、本技術の有効性が確認された<sup>4)</sup>。このような型枠としての適用事例は、近年国内でも数多く報告されている<sup>5)</sup>。

しかしながら、3D プリンティングで作製した積層体の耐久性を評価した事例は依然として少ないのが実情である。一般的に、材料押出方式の 3D プリンティングでは、硬化後の積層体の品質を向上させるために、次の層をプリントするまでに要する時間が短いほど積層界面の付着が良好になると考えられている。積層界面の一体性が不十分になると、脆弱部や空隙などが生じて耐久性が低下することが懸念される。この積層界面の力学特性

に関して評価した事例はいくつかあるが<sup>6)</sup>, 室内に保管した条件で評価した結果に留まっており、実際の環境に曝された条件の積層体を評価した事例は少ない<sup>6)</sup>。また、屋外暴露試験により積層体の耐久性を評価した事例も少なく<sup>7)</sup>, 1 年を超える暴露条件で評価した事例はほとんどない。

そこで本論では、3D プリンティングで作製した積層体の耐久性の評価を目的として、写真-1 の柱型枠と同一の条件で作製した試験体を 3 年間の屋外暴露試験に供した。屋外暴露が積層体の力学特性に与える影響を調べるために、積層体からコア抜きした供試体に対して圧縮強度試験、割裂引張強度試験を行った。また、物質移動抵抗性などの耐久性に与える影響を調べるために、表面吸水試験、中性化深さ測定を行った。



写真-1 豊洲 Michi の駅での適用

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料および練混ぜ方法

本検討で使用した繊維補強モルタルは、水粉体比(W/P)

\*1 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター (正会員)

\*2 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 修士(工学) (正会員)

\*4 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター

を 0.24, 砂粉体比 (S/P) を 0.80, 繊維混入率を 0.75 vol.% とした配 (調) 合である。粉体には、普通ポルトランドセメント、シリカフェーム、フライアッシュ、石灰石微粉末を用いた。砂には、最大粒径 0.85 mm のものを用いた。混和剤には、高性能減水剤 (ポリカルボン酸系) を用いた。繊維には、長さ 6 mm のポリエチレン繊維 (直径 12  $\mu$ m) を用いた。練混ぜには、容量 120 L の 2 軸強制練りミキサを使用し、練混ぜ時間は材料投入後から 6 分間とした。材料の練上り直後の空気量は 4.9%, フロー試験 (JIS R 5201) から得られるフロー値は 132 mm であった。

## 2.2 積層体のプリント方法

3D プリンティングの状況を写真-2 に示す。作製した積層体の形状は、高さが 1.4 m, 断面は下端から上端に向かって捻れながら、直径 2.2 m から 2.6 m に拡幅していく 3 次元曲面を有する形状である。ノズルの移動速度は 100 mm/秒, プリント幅は 70 mm に設定した。1 層プリントするごとに鉛直方向に 7 mm 上昇させ、積層終了まで自動運転プログラムで制御した。プリント時の室内環境は、温度 22 $\pm$ 2  $^{\circ}$ C, 湿度 65 %RH であった。

## 2.3 屋外暴露試験の方法

積層後から屋外暴露 3 年時点までの流れを図-1 に示す。積層後は、実験室内でそのまま動かさずに、養生に移行した。積層体の周囲をビニルシートで覆い、水分が逸散しない状態で保管し、初期養生を行った。その後、材齢 1 日に初期養生を解き、積層体をラップフィルムで覆い、封かん養生を開始した。材齢 2 日から封かん養生にしたままの状態、積層体を屋根や壁に囲まれていない屋外へ移動させた。屋外暴露試験は、材齢 1 か月時点で封かん養生を解き、直射日光や降雨を受ける環境で開始した。暴露場所は、写真-1 の実案件に適用した柱型枠と同様の東京都江東区とした。図-2 は、積層体を製造した 2020 年 11 月から 3 年間の平均気温と降水量のデータである。

## 2.4 試験項目

### (1) 力学特性の評価

実施した試験項目を表-1 に示す。力学試験には、積層体を切り出して作製した供試体を用いて、圧縮強度試験、割裂引張強度試験を実施した。荷重方法は JIS A 1107, JIS A 1113 に準拠した。力学試験に用いる供試体は、図-3 (左) に示す位置から切り出した。コアの採取位置は、上部が高さ 1430 mm (最上層) から 1000 mm まで、中部が高さ 770 mm から 400 mm まで、下部が 200 mm から 0 mm (最下層) までとした。また、積層体からのコア抜きは、方向を変えて数本採取した。

作製した供試体の一覧を表-2 に示す。圧縮強度試験用の供試体には、ヤング係数を取得するために、ひずみ

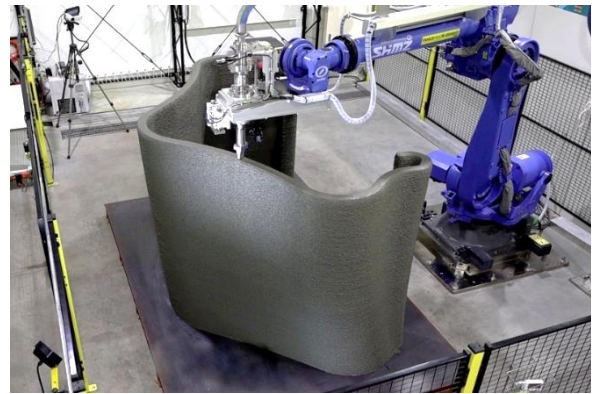


写真-2 3D プリンティングの状況

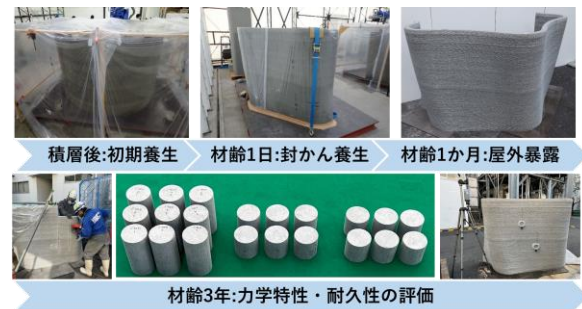


図-1 積層後から屋外暴露 3 年までの流れ

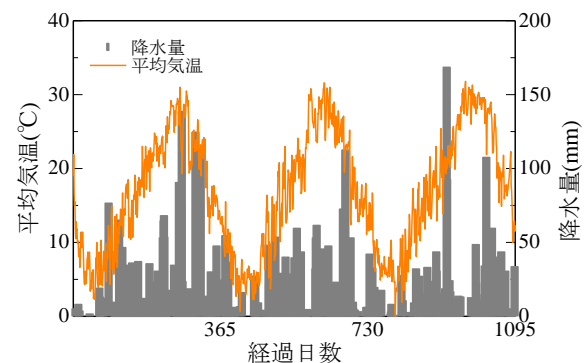


図-2 屋外暴露中の気温と降水量 (気象庁:東京)

表-1 試験項目の一覧

試験項目	備考
圧縮強度試験	JIS A 1107 に準拠
割裂引張強度試験	JIS A 1113 に準拠
表面観察	目視による観察
水分率測定	高周波容量式および電気抵抗式の水水分計
表面吸水試験	SWAT 法の表面吸水速度
中性化深さ測定	JIS A 1152 に準拠

ゲージを貼り付けた。割裂引張強度試験は、一般的には脆性的な破壊を生じる材料の引張強度を求める試験であるが、本研究で使用した材料は、繊維補強により脆性



図-3 コア採取位置（左）と表面吸水試験の試験箇所（右）

表-2 作製した供試体の一覧

試験項目	形状[mm]	供試体名	採取位置	コア抜き方向	積層面に対する載荷方向	供試体数
圧縮強度	φ 50×100	C-50V	上部	鉛直	垂直	3
			下部	鉛直	垂直	3
		C-50H	中部	水平	平行	3
割裂引張強度	φ 50×50	S-50V	上部	鉛直	—	3
			下部	鉛直	—	3
		S-50H	上部	水平	平行	3
			下部	水平	平行	3

的な破壊が生じにくいため、ひずみゲージで計測されるひずみの変化からひび割れ発生を検知した。

図-4 に、供試体の載荷方向の関係を整理した。図中の破線は、積層面の方向を表している。プリント層の厚さは 7 mm であるため、いずれの供試体もプリント層が 6 層以上含まれていることになる。なお、水平方向にコア抜きした供試体は、積層界面とひび割れが発生する方向が一致した状態で試験するために、供試体断面の中心に、積層界面が位置するように、あらかじめ目印をつけて作製した。

## (2) 耐久性の評価

耐久性の評価のために、SWAT 法の表面吸水試験で透水性を、積層体から採取したコアを用いて中性化深さを測定した。表面吸水試験を行う前には、表面観察を目視で行い、積層体の全体の変状を調べた。また、高周波容量式と電気抵抗式の水分計を用いて、水分率測定を行った。高周波容量式は表面から 40 mm 程度の深さまでの平均的な水分率を、電気抵抗式は表層の水分率を各々評価できる水分計である。なお、積層表面に、凹凸があるため、水分率測定のみ最上層の平滑な上面を対象とした。

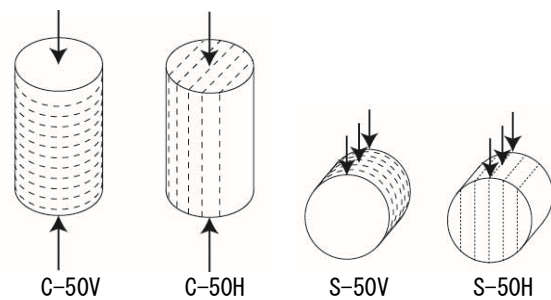


図-4 供試体の載荷方向（破線：積層界面の方向）

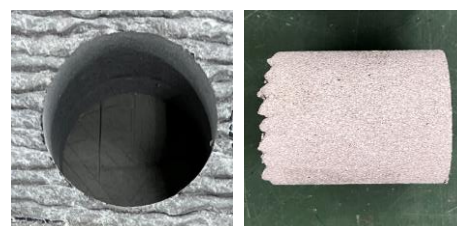


写真-3 中性化深さ測定用の供試体

表面吸水試験は、SWAT 法により 10 分時点の表面吸水速度を測定した。試験箇所は、図-3（右）示すように、

表-3 圧縮強度試験の結果一覧

	採取位置	圧縮強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]
C-50V	上部	129 (0.683)	35.6 (0.265)
	下部	129 (0.733)	36.2 (0.345)
C-50H	中部	125 (1.11)	39.2 (0.525)

\* ( ) : 変動係数[%]

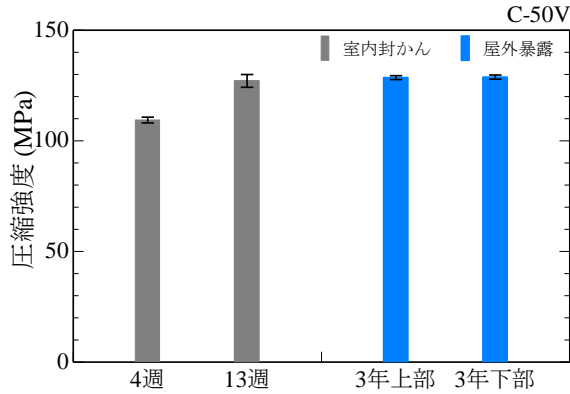


図-5 圧縮強度の平均値と標準偏差



写真-4 採取した供試体  
(左から : C-50V 上部, C-50V 下部, C-50H)

高さ 1150 mm, 1000 mm, 550 mm ならびに 500 mm の 4 箇所とした。SWAT 法は、一般的に、平滑な面に対して行う試験であるが、積層表面の凹凸を含む面と積層界面からの水の浸入の影響を評価するために、積層表面に吸水カップを貼り付けて試験を行った。

中性化深さ測定は、積層界面からの中性化の進行を調べるために、積層体から水平方向にコアを採取した(写真-3)。この供試体を積層面に対して垂直な方向に載荷して割裂面を作製した後、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。測定方法は JIS A 1152 に準拠した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度試験

屋外暴露 3 年時点の圧縮強度試験から得られた結果の

表-4 割裂引張強度試験の結果一覧

	採取位置	割裂ひび割れ発生強度 [MPa]
S-50V	上部	7.43 (2.64)
	下部	7.04 (0.548)
S-50H	上部	5.76 (1.30)
	下部	5.98 (4.44)

\* ( ) : 変動係数[%]

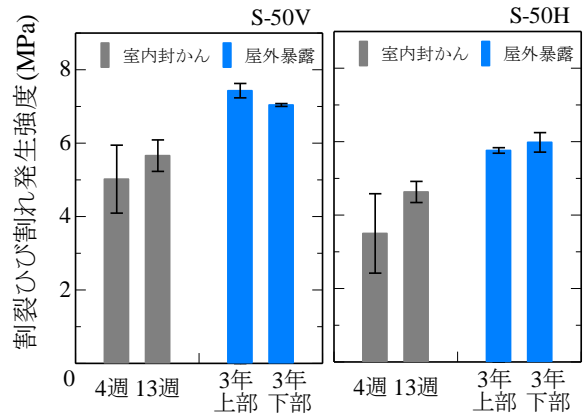


図-6 割裂ひび割れ発生強度の平均値と標準偏差

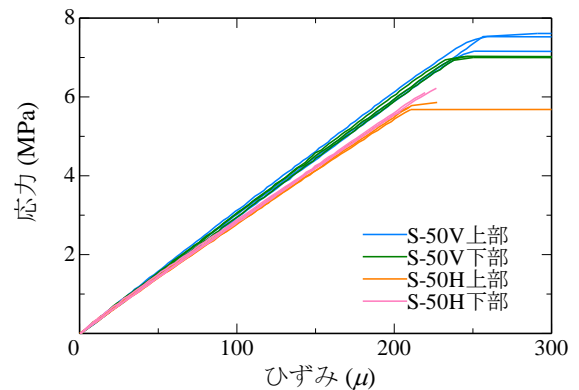


図-7 引張応力とひずみの関係

一覧を表-3 に、圧縮強度の平均値と標準偏差を整理した結果を図-5 に示す。各値は、供試体 3 体から得られた平均値であり、括弧内は変動係数ある。

コアの採取位置の影響に着目すると、C-50V の上部と下部は、同等の圧縮強度、ヤング係数を示した。鉛直方向にコア抜きした供試体 C-50V には、コアの採取位置の影響は認められなかった。コア抜き方向に着目すると、水平方向にコア抜きした供試体 C-50H と鉛直方向にコア抜きした供試体 C-50V を比較すると、おおむね同等であった。

図-5 には、同一配合である既報<sup>2)</sup> の材料押出方式の 3D プリンティングで作製したプリント供試体 C-50V の材齢 4 週の結果 (n=5) と、同様の方法で作製した材齢 13

週の結果 (n=3) も併記した。いずれも材齢 4 週と材齢 13 週に各々試験に供するまで、封かん養生を行い、恒温恒湿室 (室温 20 °C, 湿度 60 % RH) に保管した供試体である (以下、室内封かんと呼ぶ)。屋外暴露した C-50V は、室内封かん C-50V の材齢 13 週の結果に対して、同等の結果を示した。

写真-4 は、コア抜きした供試体の外観であるが、いずれの供試体も粗大な空隙やひび割れは観察されず、屋外暴露後においても、積層界面は目視で判別できないほど一体化していた。

### 3.2 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験から得られた結果一覧を表-4 に、割裂ひび割れ発生強度の平均値と標準偏差を整理した結果を図-6 に示す。各値は、供試体 3 体から得られた平均値であり、括弧内は変動係数ある。

圧縮強度試験とは異なり、コア抜き方向の影響が表れた。水平方向にコア抜きした S-50H は、鉛直方向にコア抜きした S-50V よりも、割裂ひび割れ発生強度が 15~23 % 小さい傾向であった。S-50H は、弱面である積層界面の方向とひび割れが発生する方向が一致したためと考えられる。

図-6 には、同一配合である既報<sup>2)</sup>の室内封かん S-50V と S-50H の材齢 4 週の結果 (n=5) と、材齢 13 週の結果 (n=3) も併記した。圧縮強度試験とは異なり、材齢の影響が表れた。室内封かんの材齢 13 週の結果に対して、屋外暴露した供試体を比較すると、S-50V が 24~31 % 増加し、S-50H が 24~29 % 増加する傾向を示した。屋外暴露試験中に、降雨や湿度により定期的に水分供給を受けるため、未水和セメントや混和材の反応が進み、材齢 13 週の時点よりも積層界面の空隙構造が緻密になった可能性が考えられる。なお、図-7 のように、すべての供試体の割裂引張応力-ひずみ関係を重ねて示したところ、初期剛性のばらつきが小さいことが確認された。

### 3.3 表面観察

屋外暴露した積層体の外観を写真-5 に示す。積層表面においても、劣化要因を誘発するようなひび割れが発生していないこと、積層界面に変状が起きていないこと、不均一な色むらがないことが確認された。

### 3.4 表面吸水試験

表面吸水試験の結果一覧を表-5 に、表面吸水試験の状況を写真-5 に示す。高周波容量式および電気抵抗式による水分率測定では、表面吸水試験を行う直前の状態がいずれも同等であることを確認した。

4 箇所の位置における表面吸水速度は、0.00~0.02 ml/m<sup>2</sup>/s となり、SWAT 法の品質グレードの「良 (0.25 ml/m<sup>2</sup>/s 以下)」の評価が得られた。また、本検討からは測定位置や高さ方向の影響は認められなかった。

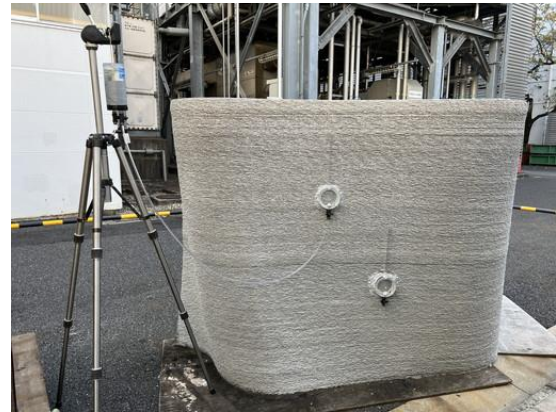


写真-5 屋外暴露した積層体の表面吸水試験状況

表-5 表面吸水試験の結果一覧

No.	高周波容量式 [%]	電気抵抗式 [%]	表面吸水速度 [ml/m <sup>2</sup> /s]
1	3.5	1.7	0.02
2	3.5	2.1	0.02
3	3.7	1.8	0.00
4	3.1	1.3	0.01

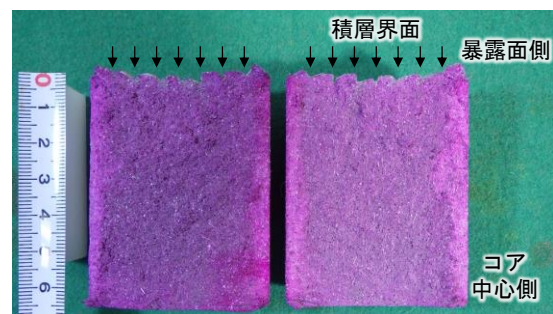


写真-6 中性化深さの測定状況

この結果より、3 年間の屋外暴露下であっても透水性が低下することがないことが確認された。なお、ここで得られた表面吸水速度は、水セメント比が 40 % のコンクリートを型枠存置期間 28 日とした場合の材齢 91 日における表面吸水速度<sup>8)</sup>よりも 10 倍程度小さい値である。

### 3.5 中性化深さ測定

コア抜きした供試体の中性化状況を写真-6 に示す。写真-6 の上が暴露面側、下がコアの中心側、矢印の位置が積層界面である。材齢 3 年時点の中性化深さは、0 mm であった。割裂面の全体が鮮やかな赤紫色を示しており、フェノールフタレイン溶液の噴霧による呈色反応では、積層界面からの中性化の進行は認められなかった。なお、3D プリンティングで作製した供試体の積層界面にコールドジョイントなどがある場合、そこから中性化が進行することを報告<sup>9)</sup>されている。本検討では、その挙動は認められず、積層界面に脆弱層がないことを示唆するデータが得られた。

#### 4. おわりに

本論では、3D プリンティングで作製した繊維補強セメント硬化体の耐久性を評価するために、実案件に適用した柱型枠と同一の条件で積層体を作製し、3年間の屋外暴露試験に供した。この積層体に対して力学特性と物質移動抵抗性などの耐久性の評価試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 積層体から鉛直方向にコア抜きして作製した供試体を圧縮強度試験に供したところ、採取位置が上部、下部ともに圧縮強度 129 MPa が得られた。また、水平方向にコア抜きした供試体は、鉛直方向と同等であった。室内に保管した材齢 13 週の供試体に対して、圧縮強度がいずれも同等であり、作製した積層体に大きな欠陥がなく、強度特性を維持していることを示唆するデータが得られた。
- (2) 割裂ひび割れ発生強度は、室内に保管した材齢 13 週の供試体に対して、鉛直方向ならびに水平方向にコア抜きして作製した供試体は、いずれも 24~31% 高い値を示した。積層界面にひび割れが発生するように载荷した供試体においても、5.76~5.98 MPa のひび割れ発生強度が得られた。
- (3) 物質移動抵抗性の観点で耐久性を評価したところ、積層表面における表面吸水試験の結果は、0.02 ml /m<sup>2</sup>/s 以下であった。測定位置や高さ方向の影響は認められず、結果のばらつきも小さかった。コア抜きした供試体を用いた中性化深さ測定からは、積層界面から中性化の進行は認められず、ひび割れなどの変状も生じていないことが確認された。3年間の屋外環境下であっても透水性や物質移動抵抗性が低下していないことが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) R.A.Buswell, W.R.Leal de Silva, S.Z.Jones et al. : 3D Printing using concrete extrusion:A roadmap for research, Cement and Concrete Reserch 112, pp. 37-49, 2018.
- 2) 小倉大季, 阿部寛之, 山本伸也, 菊地竜: 3D プリンティング技術で積層造形した繊維補強セメント複合材料の力学特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1379-1384, 2021.
- 3) 阿部寛之, 小倉大季, 菊地竜, 山本伸也: 3D プリンティング技術で積層造形した繊維補強モルタルの積層界面の一体性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1552-1557, 2022.
- 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, pp.655-660, 2021.
- 5) 日本コンクリート工学会: 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報告書, 2021.
- 6) 伊藤慎也ほか: 3D プリンターにより製造された部材の強度特性について, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, V-131, 2021.
- 7) 張文博, 臼井達哉, 田中俊成, 木ノ村幸士: 3D プリンティングで製作した短繊維補強モルタル積層体の耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1612-1617, 2023.
- 8) 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.
- 9) Jean De'M Malan, Algnurnon Steve van Rooyen, Gideon P.A.G.van Zijl : Chloride Induced Corrosion and Carbonation in 3D Printed Concrete, Infrastructures, 2022.