

左官による建設用 3D プリンタ造形物の性能向上

Performance Improvement of 3D Printed structures by Plastering Work

立命館大学 准教授 福山智子

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究計画

近年, 実大スケールの建設用 3D プリンティングの研究開発が精力的に進められている¹⁾。建設用 3D プリンタでは主にモルタルをフィラメントとしており, モルタル押出積層方式²⁾が施工法として主流となっている。

しかし, 押出積層方式では積層間の付着とその耐久性が課題となっており, 検討が必要であると考えられる。また, 3D プリンタを用いた実環境下での施工は, 想定外の打重ね時間³⁾の発生や温湿度環境の影響が考えられる。

本研究では, 積層間の耐久性に対する打重ね時間や温湿度環境の影響を検討するため, 層ごとのひずみに着目した曲げ試験や層間の一体性に関する乾燥収縮試験, 透水・透気試験を行った。

2. 研究手法の概略

3D プリンタでの試験体作製は, 市販のプレミックス 3DP 用モルタルを用い, 表 1 の環境 (鎌倉市内) で表 2 の内容に基づき実施した。

層間の打重ね時間の影響を調べるため打重ね時間 0 (連続打設), 30, 60 分の 3 水準とし, 環境条件 (標準期・夏期・冬期) も検討項目とした。実験は強度・変形特性 (図 1: 曲げ試験, 図 2: 自己収縮試験, 図 3: 乾燥収縮試験) と耐久性 (図 4: 透水・透気試験) に関して行った。

表 1 養生環境 (鎌倉市) と材料内平均温度

	6 月 (標準期)	8 月 (夏期)	10 月 (標準期)	12 月 (冬期)
養生環境温湿度	29.0°C, 33%RH	27.3°C, 77%RH	13.2°C, 63%RH	6.7°C, 53.5%RH
試験体内温度	29.0°C	26.7°C	23.1°C	7.8°C

表 2 3D プリンタ押出しモルタルで造形する試験体

試験項目	試験体形状	打重ね位置	養生	試験材齢	対象とする期
積層曲げ	40x40x160 mm (4 層, 2 列)	2 層と 3 層の間	屋外	28	6, 8, 10, 12 月
自己収縮	φ 100x200 mm	—		1	
乾燥収縮	300x120x300 mm (30 層, 4 列)	15 層と 16 層の間		1~56	
透水・透気				56	

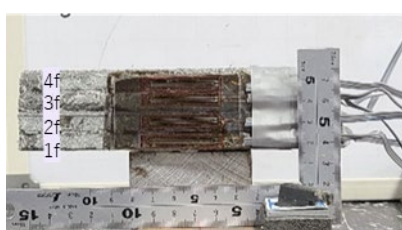


図 1 曲げ試験体



図 2 自己収縮測定

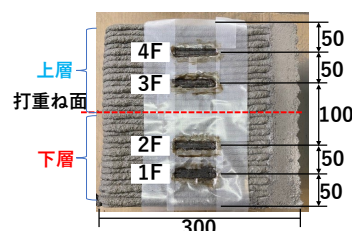


図 3 乾燥収縮試験体

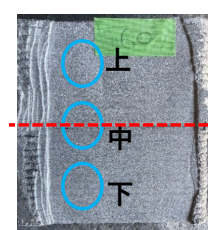


図 4 透水透気試験体

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 結果と考察

3.1 強度・変形特性

(1) 使用材料 (3DP 用モルタル) の強度特性

表 3 に標準養生試験体 (以下, 標準養生), 表 4 には各期に作製・気中養生した試験体の強度特性を示す。圧縮強度 ($\phi 50 \times 100 \text{mm}$) は 6, 8, 10, 12 月の順となり, 標準養生は 10 月と同程度であった。曲げ強度 ($40 \times 40 \times 160 \text{mm}$) は各期同程度で, 標準養生は気中水中共に各期より高くなった。

(2) 3D プリント積層梁の曲げ試験

3D プリントによりフィラメントを 4 層積層した梁の層間の付着状態を調べるため, 支点間距離 100mm で 3 点曲げ試験を行った。引張側の層を 1f とし, 各層 1 枚ずつひずみゲージを貼付した (図 1)。

図 5 は各層の応力-ひずみ絶対値関係を例示したものである。打重ね時間 0 分 (図 5(a)) では 1f と 4f, 2f と 3f のひずみがほぼ一致したが, 打重ね時間を設けたもの (図 5(b)) は一致しない傾向にあった。これは打重ね時間を設けたものは, 打重ね面での付着が弱くなったためと考えられる。図 6 は 2f-3f 間のひずみ差の絶対値を比較したものである。8 月は 10 月と 12 月に比べてひずみ差自体が大きく, また打重ね時間とひずみ差の相関が明確なことから, 養生温度の影響が考えられる。

表 3 標準養生 (20°C, 28 日) 試験体の強度特性 [N/mm²]

圧縮気中 (60%RH)	圧縮水中	曲げ気中 (60%RH)	曲げ水中
37.5	37.7	2.3	2.6

表 4 各期の力学特性 [N/mm²]

	6 月 (標準期)	8 月 (夏期)	10 月 (標準期)	12 月 (冬期)
圧縮強度	64.1	55.1	40.2	30.5
曲げ強度	1.4	1.6	1.8	1.9

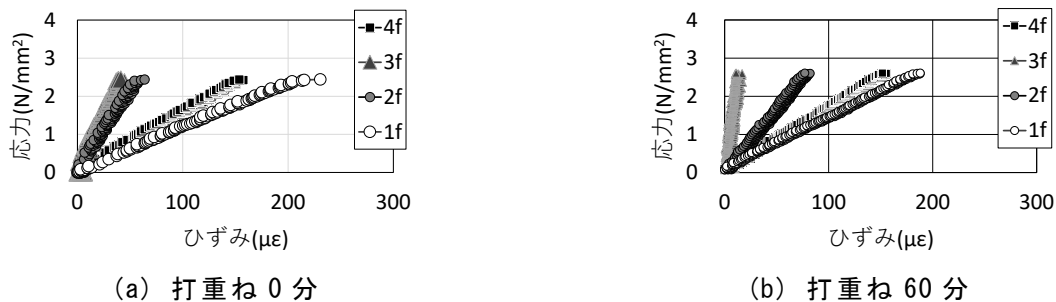


図 5 積層梁曲げひずみ (8 月)

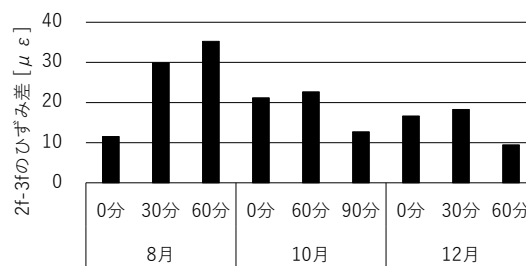


図 6 曲げひずみの層間差

(3) 自己収縮試験

埋込みゲージ（図 2）により，3DP 用モルタルの自己収縮ひずみを測定した。図 7 はひずみの時系列変化を例示したものである。各期の打設後 24 時間時点の平均収縮ひずみは 6 月（ -177μ ），8 月（ゲージ断線によりデータログ失敗），10 月（ -304μ ），12 月（ -368μ ）であった。

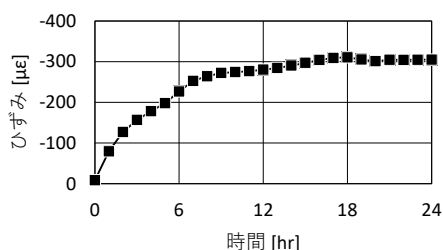


図 7 自己収縮ひずみ時系列（10 月）

(4) 乾燥収縮試験

図 3 のような試験体に対し，打重ね面を境にした下層（1F，2F）と上層（3F，4F）にゲージを貼付し，打設 1 日後から屋外に暴露してひずみを計測した。

図 8 は 8 月に作製した打重ね時間 30 分のひずみを例示したもので，別試験体で測定したモルタル温度も併記した。測定開始直後から 3F は他層とひずみが異なっており，試験体温度上昇（15 時間以降）に伴い全層のひずみが異なる膨張／収縮挙動を示した。本試験は打重ねが層間付着に及ぼす影響の検討を目的としており，ひずみ傾向の不一致から層間の付着が切れた可能性が示唆された。ただし，層間の相互拘束や，先打ち層の乾燥による後打ち層のドライアウト現象も各層の膨張／収縮要因として考えられ，本報の範囲ではそれら要因を分離できなかった。

なお，一部の試験体の 4F の膨張ひずみが 600μ ととびぬけて大きい場合があり，これは，試験体屋外暴露による日射の影響と考えられる。

図 9 は 2F と 3F とのひずみ差の絶対値を打設後 28 日間分平均したものである。打ち重ね時間の影響は明確にはならなかったが，各期を比較すると 10 月が最もひずみ差が大きい結果となった。

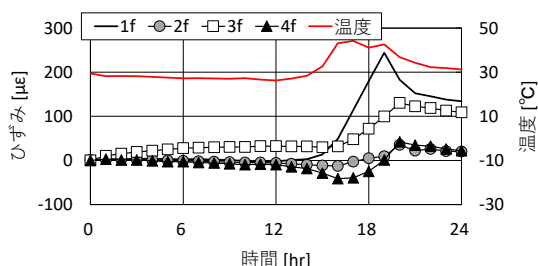


図 8 乾燥収縮ひずみ時系列（8 月）

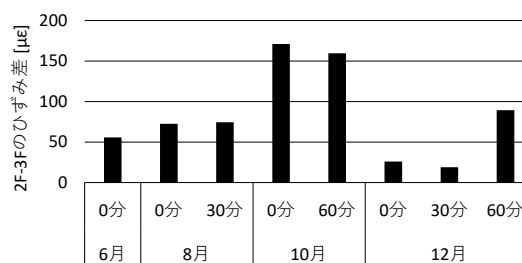


図 9 乾燥収縮ひずみの層間差

3.2 耐久性に関する検討

乾燥収縮ひずみ測定後の試験体に対し，表面の凹凸がなくなるまで一面を研磨した。その後，図 4 のように測定面を上・下部（＝連続打設部，打重ね時間 0 分），中部（＝打重ね部）と定義し，透水試験と透気試験を行った。

(1) 透水試験

研磨した試験体にφ75mmの漏斗を固定して透水量を測定した。図10は実験開始90分後の透水量を示したものである。連続打設部に比べて打重ね部の透水量が大きく、また8月よりも10月の透水量が大きい結果となった。

(2) 透気試験

透水試験後の試験体表面（図4）にφ40mmのシリンジをパテで固定し、微差圧計に接続してシリンジ内部の圧力を計測し、初期値からの変化量を計算した。変化量の大小は透気量の大小と相関する。

図11は実験開始300秒後の内部圧力の変化量を示したものである。連続打設部に比べて打重ね部の透気量がおおむね大きく、特に8月30分と10月60分の打重ね部での内部圧力変化は顕著であった。

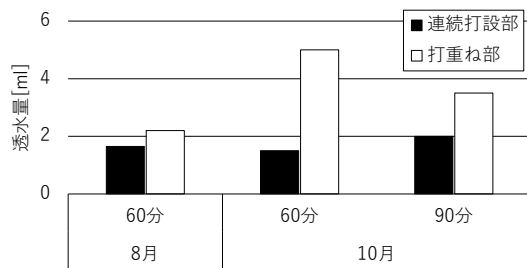


図10 透水量の比較（90分時点）

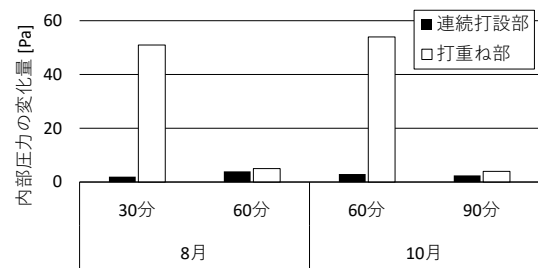


図11 内部圧力の比較（300秒時点）

4. まとめ

本研究の検討から、積層式3Dプリンタで作製した試験体の層間の耐久性について、打重ね時間が長くなると悪影響が生じる可能性が明らかになった。

参考文献

- 1) 小倉大季他：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，43(1)，2021
- 2) 阿部寛之他：3Dプリンティングで作製した繊維補強モルタル試験体の物質移動抵抗性，コンクリート工学年次論文集，43(1)，2021
- 3) 岡沢智他：打重ね部の一体評価～許容打重ね時間間隔の管理について～，コンクリート工学，39(5)，2001

（発表論文）

- ・植松蓮，鎌田太陽，金侖美，山田悠二，福山智子：建設用3Dプリンタ積層体の層間付着に打重ね時間と養生条件が及ぼす影響，日本建築学会年次大会梗概集，2023.9
- ・本研究の成果の一部で特許申請準備中のため，記載していない事項がある。