

材料押出方式の3Dプリンティングで造形した積層体の積層界面の一体性評価

清水建設（株） 正会員 ○阿部 寛之，小倉 大季，山本 伸也，菊地 竜

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加速的に進められているが，3Dプリンティングで造形した積層体の物質移動抵抗性などの耐久性を定量的に評価した事例は少ない。そこで，本研究では，材料押出方式で積層造形した積層体の耐久性と積層界面の一体性を評価することを試みた。評価方法には，積層表面を含んだ積層体に対する表面吸水試験，積層体からコア抜きした供試体（以下，プリント供試体）に対する塩水浸せき試験ならびに促進中性化試験を用いた。なお，積層体に関する呼称は図-1に示す位置を指す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および練混ぜ方法

プリント材料には，水粉体比を0.24，砂粉体比を0.80，繊維混入率を0.75 vol.%とした繊維補強モルタル¹⁾を用いた。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。繊維には，長さ6 mmのポリエチレン繊維を用いた。練混ぜには，容量120 Lの2軸強制練ミキサを使用し，練混ぜ時間は材料投入後から6分間とした。

2.2 フレッシュ性状および硬化物性

材料練上り直後の空気量は5.8%，フロー試験（JIS R 5201）から得られるフロー値は125 mmであった。プリント供試体と型枠に打ち込んで作製した供試体の材齢28日の圧縮強度はそれぞれ109 MPa，107 MPaであった。

2.3 積層体の作製方法

3Dプリンタによる積層造形は，ノズルの移動速度を100 mm/秒，プリント幅を70 mmに設定し，1層積層するごとに鉛直方向に7 mm上昇させ（積層ピッチ7 mm），積層終了まで自動運転プログラムで制御した（写真-1）。積層後は，ビニルシートで覆い，水分が逸散しない状態で実験室に1日間静置した。その後，恒温恒湿室（温度20℃，湿度60%RH）に移動し，材齢1日から7日間封かん養生した後，試験に供するまで恒温恒湿室で気中静置させた。

2.4 評価方法

評価方法の一覧を表-1に示す。SWAT法の表面吸水試験では，積層体の透水性を材齢406日時点の表面吸水速度により評価した。積層表面を10 mm切断して平らに整形した面と積層表面を含む面を比較した。塩水浸せき試験では，JSCE-G572-2018に準拠し，プリント供試体（供試体数：3体）の積層界面からの塩化物イオンの拡散を調べた。材齢15週から濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に浸せきさせ，浸せき期間は12か月時点までとした。その後，塩化物イオンの拡散係数の評価では，プリント供試体を浸せき面から深さ40 mm，横幅80 mm，厚さ10 mmに整形し，浸せき面から浸入した塩化物イオンをEPMAにより測定した。なお，拡散係数の算出には，積層表面に凹凸があるため，比較的平らな積層表面を3箇所選び，平均値で整理した。促進中性化試験では，JIS A 1153に準拠

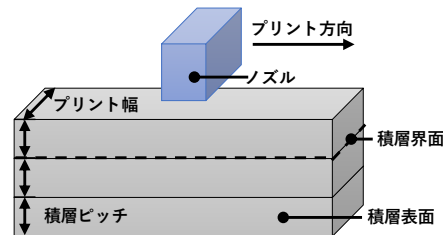


図-1 積層体に関する呼称

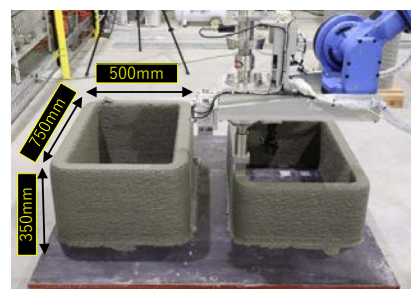


写真-1 3Dプリンタによる積層状況

表-1 評価方法の一覧

評価方法	評価項目	関連規準
表面吸水試験	表面吸水速度	SWAT法
塩水浸せき試験	塩化物イオンの拡散係数	JSCE-G572-2018 JSCE-G574-2013
促進中性化試験	中性化深さ	JIS A 1152 JIS A 1153

キーワード 3Dプリンティング，繊維補強モルタル，積層界面，表面吸水試験，促進中性化試験，EPMA

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL 03-3820-5504

し、プリント供試体（供試体数：3 体）の積層界面からの中性化の進行を調べた。中性化深さによる評価では、材齢 15 週から促進試験を開始し、促進期間 12 か月時点で測定した。

3. 実験結果

3. 1 表面吸水試験

材齢 406 日時点の試験状況を写真-2 に示す。積層表面を切断した平面の表面吸水速度は $0.00 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ であった。SWAT 法の品質グレードの「良 ($0.25 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ 以下)」に該当し、材齢 28 日および 91 日の試験結果^{1, 2)}と同等であることが確認された。また、積層表面を含む面においても表面吸水速度は $0.00 \text{ ml/m}^2/\text{s}$ であった。この結果から、積層表面も透水性が小さいことが明らかとなった。

3. 2 塩水浸せき試験

塩水浸せき期間 12 か月時点の分析画像を写真-3 に示す。写真の黄色枠は、拡散係数の算出に用いた範囲である。写真の黄矢印の位置は、7 mm ピッチで存在する積層界面に該当する。この黄矢印の位置から局所的に塩化物イオンが浸入するような挙動は観察できず、積層界面に沿った塩化物イオンの拡散は確認できなかった。この結果は、積層界面に顕著な隙間や空隙が少なく、界面の一体性が良好であることを示唆する。また、塩化物イオンの浸入深さは 5 ~ 6 mm 程度であった。見掛けの拡散係数は、それぞれ $0.0406 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、 $0.0444 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、 $0.0367 \text{ cm}^2/\text{年}$ であった。この結果は、コンクリート標準示方書[設計編]³⁾の見掛けの拡散係数の推定値（普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート）と比較すると、見掛けの拡散係数は、1/2 程度に相当する。

3. 3 促進中性化試験

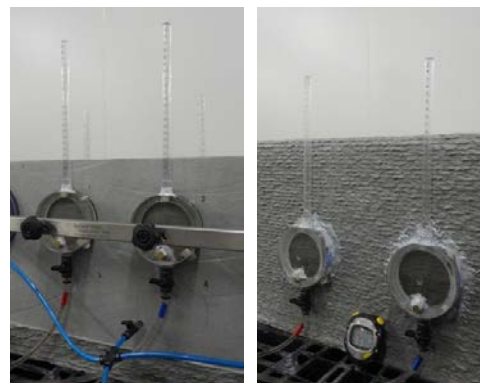
促進期間 12 か月時点の中性化状況を写真-4 に示す。プリント供試体の中性化深さは、いずれも 0 mm であった。また、積層界面における中性化の進行は認められなかった。

4. おわりに

本研究では、3D プリンティングで造形した積層体の耐久性と積層表面を含む積層界面の一体性を物質移動抵抗性の観点で評価した。その結果、表面吸水試験の品質グレードは「良」であり、積層表面を含めた積層体の透水性が小さいことが認められた。また、塩水浸せき試験と促進中性化試験はそれぞれ 12 か月行い、EPMA 法の分析と中性化深さ測定では、積層界面からの局所的な塩化物イオンの拡散と中性化の進行は認められなかった。本条件で 3D プリンティングした積層体は、積層界面の一体性が良好であることを示唆するデータが得られた。

参考文献

- 1) 阿部寛之, 小倉大季, 山本伸也, 菊地竜: 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, Vol.43, No.1, pp.1403-1408, 2021.
- 2) 阿部寛之, 小倉大季, 山本伸也, 菊地竜: 3D プリンティングで造形した積層体の透気性および透水性評価, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, V-134, 2021.
- 3) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 2017.



a) 切断した平面 b) 積層表面

写真-2 表面吸水試験の試験状況

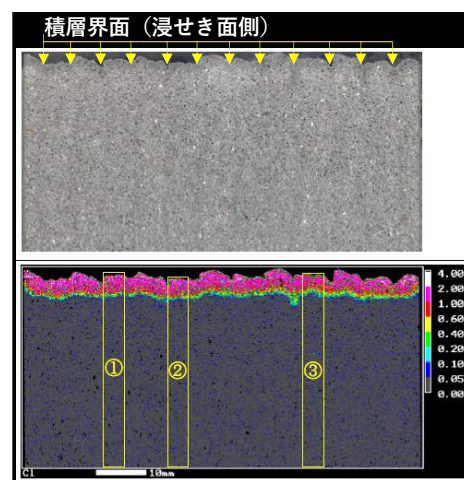


写真-3 EPMAによる塩化物イオンの分析



写真-4 中性化状況