

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

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

コンクリート構造物の省人化施工や複雑形状を有する部材を造形できる可能性などが期待されて，建設スケールの 3D プリンティングの研究開発が近年進められているが，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，材料押出方式の 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を評価することを試みた．具体的には，著者らが開発した繊維補強モルタル¹⁾を用いて断面が 500×750 mm の角筒形状の積層体を作製し，計 4 カ所に対して表層透気試験および表面吸水試験を行い，表層透気係数，表面透水速度を評価した．



写真-1 3D プリンタによる積層状況

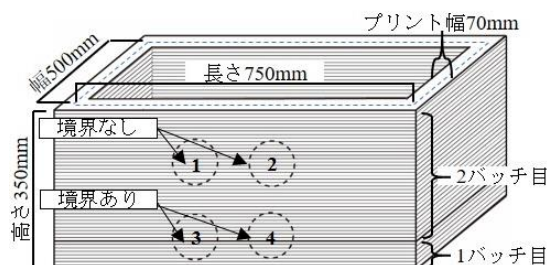


図-1 測定位置

2. 実験概要

2. 1 配合およびフレッシュ性状

本研究では，水粉体比を 0.24，砂粉体比 0.80，繊維混入率を 0.75 vol.% の配合を使用した．粉体には，普通ポルトランドセメント，シリカフューム，フライアッシュ，石灰石微粉末を用いた．砂は最大粒径 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 軸強制練ミキサを用いた．練混ぜ時間は材料投入後から 6 分間とした．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．

2. 2 試験体の作製方法

3D プリンタによる積層状況を写真-1 に示す．積層造形は，ノズルの移動速度を 100 mm/秒，プリント幅（積層幅）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，次の層に移行するように自動運転プログラムで制御した．

積層造形した試験体（以下，プリント試験体）の形状は，幅 500 mm，長さ 750 mm，高さ 350 mm の角筒形状とした．また，比較用に同一配合を用いて，練上り直後に型枠に打込む方法でも試験体（以下，打込み試験体）を採取した．プリント試験体および打込み試験体を作製した後は，水分が逸散しない状態で実験室に 1 日間静置し，恒温恒湿室（温度 20 °C，湿度 60 %RH）に移動させ，材齢 1 日から封かん養生を開始した．圧縮強度を調べるために，積層方向に対して垂直に $\phi 50 \times 100$ mm のコア試験体を 5 体採取し，打込み試験体についても $\phi 50 \times 100$ mm の円柱試験体を 3 体作製した．それら試験体の材齢 28 日の圧縮強度は，それぞれ 109 MPa，107 MPa であった．

2. 3 透気性および透水性の評価方法

プリント試験体の透気性および透水性は，材齢 91 日において，表層透気試験および表面吸水試験を用いて評価した．測定位置を図-1 に示す．モルタルの製造バッチが変わる境界位置の影響を検討するため，測定点 1 および 2 は同一バッチ（以下，境界なし）とし，測定点 3 および 4 は，1 バッチ目と 2 バッチ目が変わる位置（以下，境界あり）とした．測定面はプリント試験体を材齢 1 日から 7 日間封かん養生した後，材齢 13 日に湿式ダイヤモンド

キーワード 3D プリンティング，積層造形，繊維補強モルタル，表層透気試験，表面吸水試験

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

表－1 表層透気試験および表面吸水試験の結果一覧

測定位置	測定点	含水率 [%]	表層透気試験			表面吸水試験		
			表層透気係数 $kT [10^{-16} \text{ m}^2]$	平均値	品質 グレード	表面吸水速度 $P_{600} [\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}]$	平均値	品質 グレード
境界なし	1	3.6	0.040	0.040	良	0.00	0.00	良
	2	3.4	0.040			0.00		
境界あり	3	3.4	0.052	0.053	良	0.00	0.00	良
	4	3.5	0.054			0.00		

ドクターを用いて、表層から 10 mm 程度を切り出して整形した。整形後は再び恒温恒湿室に移動し、試験するまで気中で静置した。

表層透気試験は、ダブルチャンバーを用いたトレント法による試験とし、表層透気係数 $kT [10^{-16} \text{ m}^2]$ で品質グレードを求め、測定点 1 と 2、および 3 と 4 の平均値で評価した。表面吸水試験は、SWAT 法を用いて、注水完了から 600 秒時点での吸水速度 $P_{600} [\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}]$ で品質グレードを求め、測定点 1 と 2、および 3 と 4 の平均値で評価した。表層透気試験および表面吸水試験は同一位置を 4 か所で行った。

3. 実験結果

表層透気試験と表面吸水試験の状況を写真－2 に、材齢 91 日の試験結果を表－1 に示す。表層透気試験では、境界なしが $0.040 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 、境界ありが $0.053 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。すべての測定位置が「良 ($0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$)」の評価となり、プリント試験体の透気性が小さいことが確認できた。表面吸水試験では、境界なしが $0.00 \text{ ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 、境界ありは $0.00 \text{ ml}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。すべての測定位置が「良 ($0.25 \text{ ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下)」の評価となり、プリント試験体の透水性が小さいことが確認できた。なお、試験開始前の含水率の平均値は 3.5 % であった。

以上の結果から、プリント試験体は材料の製造バッチが変わる境界位置を含む 4 か所の測定位置のいずれでも、透気性および透水性が小さく、測定位置における物質移動抵抗性のばらつきが小さいことが明らかになった。この結果は、本研究で作製したプリント試験体が緻密で、品質のばらつきが小さかったことを示唆する。

写真－3 は、プリント試験体の表層を切断した面（表層透気試験と表面吸水試験の計測面）である。各プリント層の界面（積層面）は、写真の水平方向に 7 mm おきに存在しているが、それぞれの積層面は目視では確認できなかった。また、特徴的な気泡や空隙も少なく、ひび割れも認められなかった。セメント系材料の 3D プリンティングでは、積層面にコールドジョイントなどが発生することが懸念されたが、本研究で作製した積層体には明確なコールドジョイントは認めらず、目視観察からも品質のばらつきが小さいことが確認された。

4. おわりに

本研究では、3D プリンティングで造形した繊維補強モルタル積層体に対して、表層透気試験と表面吸水試験を行って、透気性および透水性を評価した。その結果、材料の製造バッチが切り替わった境界位置を含む 4 か所の測定位置のいずれでも、表層透気係数が「良 ($0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$)」、表面吸水速度が「良 ($0.25 \text{ ml}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下)」の評価となり、積層体の物質移動抵抗性が高く、そのばらつきが小さいことが明らかになった。

参考文献

- 1) 小倉大季ほか：3D プリンティングに用いるセメント系材料の積層性評価手法に関する検討，土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会，V-102，2020。



写真－2 試験状況

(左：表層透気試験，右：表面吸水試験)



写真－3 プリント試験体の表層を切断した面