

論文 製造時の温度環境が 3D プリント造形物の力学特性と耐久性に与える影響

阿部 寛之*1・小倉 大季*2・山本 伸也*3・菊地 竜*4

要旨：製造時の温度環境を 5, 20, 35℃と変動させて材料押出方式の 3D プリンティングを行い、作製した高さ 1.5m の造形物を屋外暴露試験に供し、材齢 26 週に力学特性、物質移動抵抗性、細孔径分布を調べた。水分浸透試験の結果、浸せき期間 48 時間後の水分浸透深さは 0 mm となり、フィラメント同士の界面（層間）からの浸透は認められなかった。また、温度環境の条件によらず、SWAT 法から得られた表面吸水速度は 0.02 ml/m²/s 以下であり、積層時間間隔 10 分の層間を含む評価位置でも同等の結果が得られた。造形物からコア抜きした供試体の圧縮強度は 112 MPa 以上であり、製造時の温度が高いほど強度は低くなる傾向が認められた。

キーワード：3D プリンティング、繊維補強モルタル、温度環境、力学特性、水密性、中性化、細孔径

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、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。

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プリント材料を開発し、そのフレッシュ性状や力学特性、ならびにセメント系フィラメント同士の界面（以下、層間と呼ぶ）の耐久性について検討し、高い力学特性と水密性を確認した^{2),3)}。

この 3D プリンティング技術は、外気温 35℃を超える時間帯のオンサイトプリントにおいて造形範囲 20 m を超える壁状柱の埋設型枠、ならびに冬季の低温環境下のニアサイトプリントにおいてシェル構造の屋根板の構築に採用されている⁴⁾。このように同一の 3D プリンティング技術であっても、適用対象、適用スケール、プリント場所が様々である。オンサイトプリントやニアサイトプリントのように外気温などが日変動する条件では製造時の温度環境の影響によりプリント造形物の品質に変化が生じる可能性があること、プリント造形物が大規模になる条件ではノズルが次の層に移行するまでに要する時間（以下、積層時間間隔と呼ぶ）が長くなり、層間に脆弱部や空隙などが生じて一体性が低下することが懸念されるため、設計で考慮すべき項目などは異なることが考えられる。しかし、製造時の温度環境を要因とした 3D プリント造形物の力学特性および物質移動抵

抗性などの耐久性に及ぼす影響を評価した事例は少ない。

そこで本論では、製造時の温度環境が 3D プリント造形物の力学特性と耐久性に与える影響を評価するため、室温 5, 20, 35℃の環境可変室において 3D プリンティングを行い、作製した造形物を屋外暴露試験に供した。屋外暴露試験に供した後、コアを抜いて材齢 26 週時点で圧縮強度、割裂引張強度などの力学特性、ならびに表面吸水試験、水分浸透試験、中性化深さ測定から水密性や物質移動抵抗性を評価した。また、細孔径分布測定から製造時の温度環境が細孔構造に与える影響を調べた。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および練混ぜ方法

本検討で使用したプリント材料は、水粉体比 (W/P) を 0.24、砂粉体比 (S/P) を 0.80、繊維混入率を 0.75 vol.% とした繊維補強モルタルである。粉体には、普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm³）、シリカフェーム（密度 2.28 g/cm³）、フライアッシュ（密度 2.34 g/cm³）、石灰石微粉末（密度 2.71 g/cm³）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 μm）を用いた。練混ぜには、容量 120 L の 2 軸強制練りミキサーを使用し、練混ぜ時間は材料投入後から 6 分間とした。環境温度 5, 20, 35℃の試験室における材料の練上り直後の空気量はそれぞれ 5.8, 4.0, 3.1%，フロー試験 (JIS R 5201) から得られるフロー値はそれぞれ 137, 130, 137 mm であった。

*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

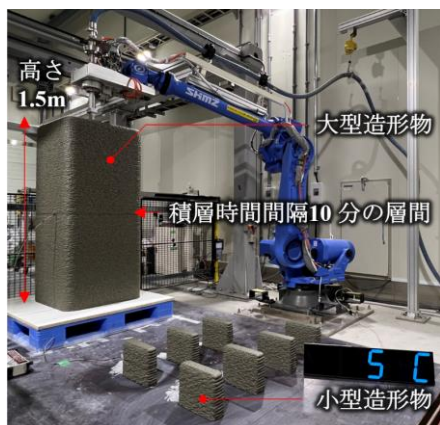


写真-1 3D プリンティングの状況



写真-2 屋外暴露試験の状況

表-1 評価試験の一覧

試験項目	方法
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
表面吸水試験	SWAT 法
中性化深さ測定	JIS A 1152 に準拠
水分浸透試験	JSCE-G 582-2018 に準拠
細孔径分布測定	水銀圧入法

2.2 造形物のプリント方法

3D プリンティングの状況を写真-1 に示す。3D プリンティングは環境可変室で行い、製造時の温度環境は室温 5, 20, 35°C、湿度 60%Rh に設定した。セメント系フィラメント 1 列の幅は 64 mm とし、1 層の積層厚は 7 mm とした。ノズル移動速度は 100 mm/s に設定し、積層終了まで自動運転プログラムで制御した。大型造形物の形状は高さ 1.5 m、幅 0.6 m、奥行 0.6 m の角筒形状とし、各層の積層時間間隔は 23 秒である。この大型造形物を製造する際、高さ 0.75 m の層でセメント系フィラメントの吐出を一時停止し、10 分後にプリントを再開することで積層時間間隔 10 分の層間を形成した。この高さ 0.75 m の層間には熱電対を埋設し、製造時から屋外暴露試験中に大型造形物が受ける内部温度を測定した。図-1(左) は製造時から材齢 7 日まで室内養生した際の内部温度履歴である。また、同様の自動運転プログラムで高さ 0.2 m、幅 0.2 m の平板形状とした小型造形物を作製した。比較用に直径 50 mm、高さ 100 mm の型枠に打ち込んで作製した供試体（以下、打込み供試体と呼ぶ）も採取した。

2.3 積層後から評価試験までの流れ

実施した評価試験の一覧を表-1 に、大型造形物の積層後から評価試験までの流れを図-2 に示す。積層後から大型造形物ならびに小型造形物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、実験室内でそのまま動かさずに初期養生を実施した。材齢 1 日にラップフィルムで封かん養生した後から材齢 7 日まで製造時の温度環境としたまま室内養生した。その後、大型造

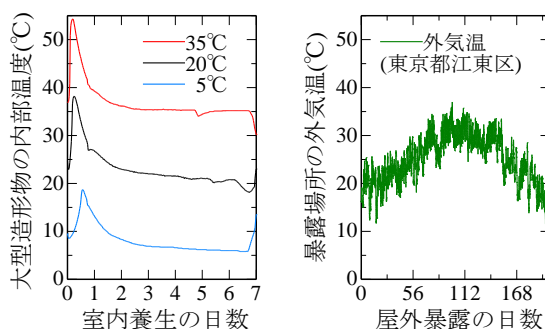


図-1 内部温度履歴（左）と外気温（右）

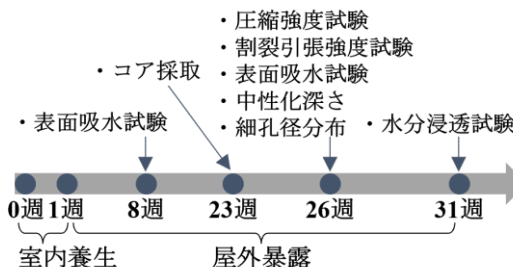


図-2 大型造形物の評価試験までの流れ

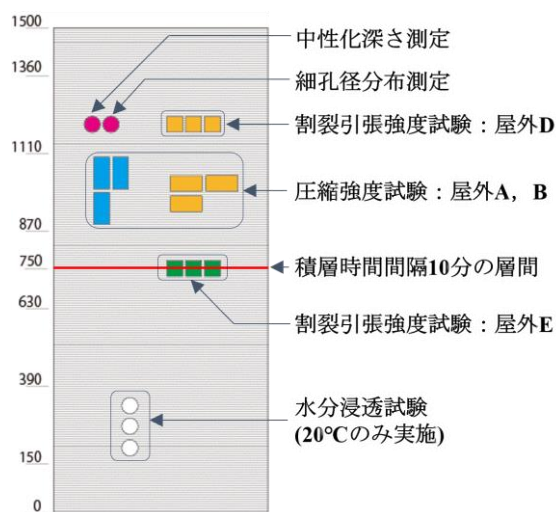


図-3 大型造形物からのコア採取位置

表-2 作製した供試体の一覧

試験項目	保管方法	作製方法	コアの採取方向	層間と載荷方向の関係	名称
圧縮強度	室内封かん	打込み供試体	—	—	室内 mold
		小型造形物	鉛直	A	室内 A
	屋外暴露	打込み供試体	—	—	屋外 mold
		大型造形物	鉛直	A	屋外 A
			平行	B	屋外 B
割裂引張強度	室内封かん	打込み供試体	—	—	室内 mold
		小型造形物	平行	C	室内 C
				D	室内 D
	屋外暴露	打込み供試体	—	—	屋外 mold
		大型造形物	平行	D	屋外 D
				E	屋外 E

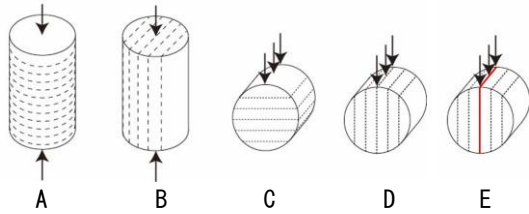


図-4 供試体の載荷方向
(破線：層間, 赤線：積層時間間隔 10 分の層間)

形物は材齢 7 日に封かん養生を終え、屋外の直射日光や降雨を受ける環境に移動させ、屋外暴露試験を開始した（以下、屋外暴露と呼ぶ）。暴露場所は写真-2 の東京都江東区とした。図-1(右)は屋外暴露を開始した 2024 年 4 月から 6 か月間の外気温データである。小型造形物は材齢 7 日から恒温恒湿室（室温 20 °C、湿度 60 %RH）に保管場所を移動し、試験に供するまで封かん養生を継続した（以下、室内封かんと呼ぶ）。比較用の打込み供試体は屋外暴露と室内封かんのそれぞれに保管した。

造形物からのコア抜きは、小型造形物が材齢 3 週、大型造形物が材齢 23 週に実施した。大型造形物については、図-3 に示す位置から力学特性と耐久性の評価に用いるコアを採取した。コアの採取方向は、印刷方向に対して鉛直方向からと平行方向から数本採取した。コア抜きした供試体の層間には顕著な残存空隙は認められなかった。

2.4 試験項目

(1) 力学特性の評価

力学試験には、造形物からコア抜き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。載荷方法は JIS A 1107, JIS A 1113 に準拠した。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。圧縮強度試験用は直径 50 mm、高さ 100 mm に、割裂引張強度試験用は直径 50 mm、高さ 50 mm

に整形した。整形後は、屋外ヤードならびに恒温恒湿室にそれぞれ試験に供するまで保管した。

作製した供試体の一覧を表-2 に示す。表-2 の層間と載荷方向の関係の記号は、図-4 と対応している。図中の破線は層間の方向を、赤線は積層時間間隔 10 分とした層間を表している。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、平行方向にコア抜きした供試体は、層間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、層間が位置するように、あらかじめ目印をつけて作製した。

(2) 耐久性の評価

表面吸水試験は、大型造形物に対して、SWAT 法により 10 分時点の表面吸水速度を測定した。試験箇所は写真-3 に示す A, B, C, D の 4 点である。C, D は積層時間間隔 10 分の層間を含む試験箇所である。SWAT 法は、一般的に、平滑な面に対して行う試験であるが、造形物の表層の凹凸を含む面に吸水カップを貼り付けることで、造形物の表層からの水の浸入の影響を評価した。なお、最上層の平滑な上面で、高周波容量式ならびに電気抵抗式の水分計を用いて、大型造形物の試験前の水分率が同等であることを確認した。

中性化深さ測定は、大型造形物から平行方向にコア抜きした供試体を用い、層間からの中性化の進行を調べた。材齢 26 週の時点で層間に対して垂直に割裂した後、フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さをノギスで測定した。

水分浸透試験は、JSCE-G 582-2018 に準拠した。製作時の温度環境 20 °C の大型造形物から平行方向にコア抜きした供試体を用いた。材齢 27 週から 40 °C の環境で 4 週間の乾燥を与え、質量変化が 0.1 % 以下になったこと確認した後、供試体側面をアルミ粘着テープで覆い、水温 20 °C の水に暴露面を浸せきした。浸せき期間 48 時間の時点で、直ちに層間に対して垂直に割裂した後、割裂面

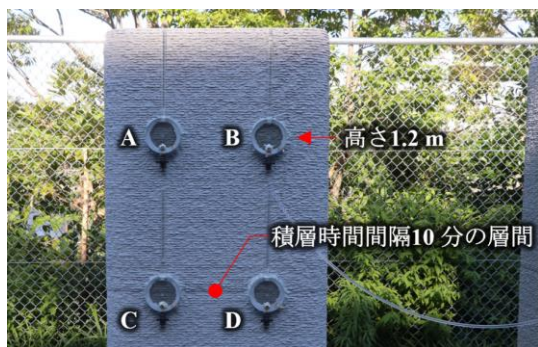


写真-3 表面吸水試験の試験箇所



写真-4 細孔径分布測定用の供試体

に現像剤を噴霧して発色する部分を目視にて判定し、水分浸透深さをノギスで測定した。

細孔径分布測定には、大型造形物から平行方向にコア抜きした供試体の積層痕（暴露面）が見える面を 0 mm とし、深さ 0~10 mm と 30~40 mm の位置でスライスした分析試料を用いた（写真-4）。また、比較用の打込み供試体は、型枠底面を 0 mm とし、同様にスライスした分析試料を用いた。測定には 5 mm 角程度に粉砕し、材齢 26 週時点でアセトン浸漬および D-dry 乾燥により水和停止させた。なお、本検討では合成繊維を含む試料を分析に用いた。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験から得られた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る。

小型造形物の室内 A に着目すると、材齢 4 週の製造時の温度環境 5, 20, 35 °C のケースはそれぞれ 123, 123, 119 MPa であり、温度環境の影響は小さかった。また、同一材齢である室内 mold と比較して 1~6 % 大きい値を示した。圧縮強度試験からは、小型造形物から採取した供試体と打込み供試体の試験結果が概ね同等であることが確認された。

大型造形物に着目すると、鉛直方向にコア抜きした屋外 A と平行方向にコア抜きした屋外 B は各温度の圧縮

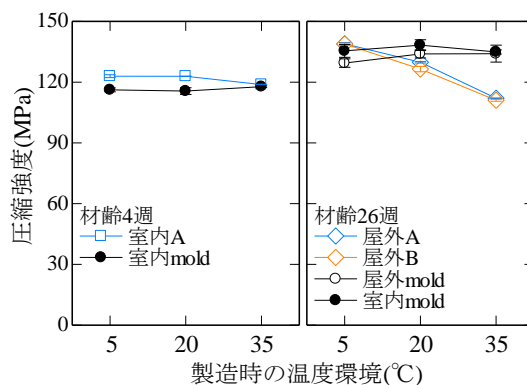


図-5 圧縮強度の平均値と標準偏差

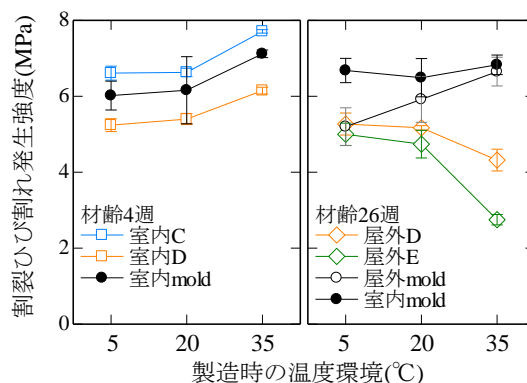


図-6 割裂ひび割れ発生強度の平均値と標準偏差

強度が概ね一致しており、コア抜きした方向の影響は認められなかった。また、小型造形物とは異なり、大型造形物には製造時の温度環境の影響が認められた。材齢 26 週の屋外 A の 5, 20, 35 °C はそれぞれ 139, 130, 112 MPa の圧縮強度が得られ、製造時の温度環境が高いほど圧縮強度が小さくなる傾向を示した。同一材齢の屋外 mold よりも 5 °C が 7 % 大きく、20 °C が 3 % 小さく、35 °C が 16 % 小さい値であった。

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（材齢 4 週の室内 A は供試体 2 体）から得られた平均値である。

小型造形物の室内 D に着目すると、材齢 4 週の 5, 20, 35 °C はそれぞれ 5.24, 5.40, 6.15 MPa のひび割れ発生強度が得られ、室内 C の 79~81 % であった。これは層間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。同一材齢の室内 mold と比較して、各温度において室内 C のほうが 8~10 % 大きい値を示した。

大型造形物の屋外 D に着目すると、材齢 26 週の 5, 20, 35 °C はそれぞれ 5.27, 5.17, 4.32 MPa のひび割れ発生強度が得られ、圧縮強度試験と同様の傾向を示した。



写真-5 中性化深さの測定結果
(左:5℃, 中央:20℃, 右:35℃)

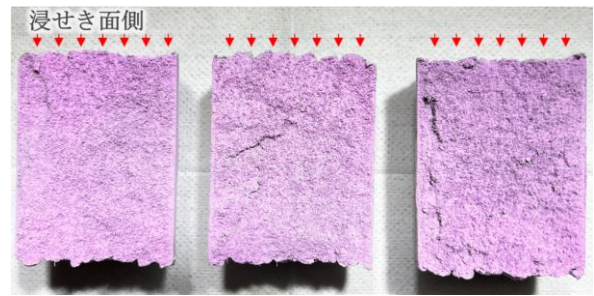


写真-6 浸漬期間48時間後の水分浸透深さ
(製造時の温度環境20℃)

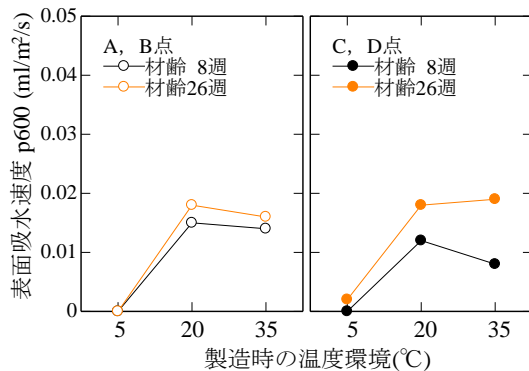


図-7 製造時の温度環境と表面吸水速度の関係

積層時間間隔 10 分の層間を含む位置から採取した屋外 E に着目すると、5℃ならびに20℃の場合、ひび割れ発生強度は4.7 MPa以上が得られた。屋外 D の92～95%であり、積層時間間隔の影響はほとんど認められなかった。一方、35℃の場合、積層時間間隔の影響が認められ、ひび割れ発生強度が2.75 MPaとなり、屋外 D の64%であった。35℃環境では、セメント系フィラメントの表面の乾燥が促進され、層間の付着特性が低下した可能性が推察される。

3.3 表面吸水試験

製造時の温度環境と表面吸水速度の関係を図-7に示す。各値は、2点の試験箇所から得られた平均値である。材齢8、26週時点の表面吸水速度は、0.00～0.02 ml/m²/sとなり、SWAT法の品質グレードの「良(0.25 ml/m²/s以下)」の評価が得られた。本検討から積層時間間隔10分の層間を含む測定位置においても同等の傾向が認められた。特に、製造時の温度環境5℃のケースが最も小さい値を示した。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⁹⁾よりも10倍程度小さい値である。

3.4 中性化深さ測定

コア抜きした供試体の中性化深さの測定状況を写真-5に示す。写真の上部が暴露面、矢印の位置が層間である。材齢1年時点の中性化深さは0 mmであり、製造

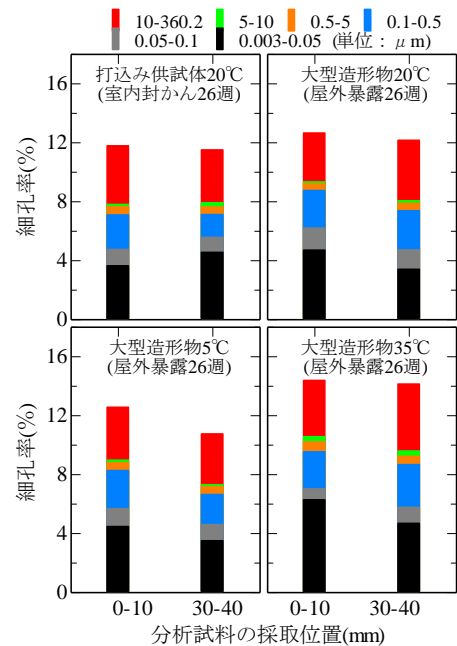


図-8 細孔径分布の測定結果

時の温度環境5、20、35℃の測定結果が同等であることが確認できた。いずれも割裂面の全体が鮮明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、層間からの中性化の進行は認められなかった。なお、3Dプリント造形物の層間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⁶⁾されている。本検討では、その挙動は認められず、層間に脆弱層がないことを示唆するデータが得られた。

3.5 水分浸透試験

コア抜きした供試体の水分浸透深さの測定状況を写真-6に示す。写真の上部が浸せき面側、矢印の位置が層間である。浸せき開始から48時間後の水分浸透深さは0 mmであった。層間からの局所的な浸入がなく、供試体3体の結果のばらつきも小さかった。

3.6 細孔径分布

細孔直径毎に区分して算定した細孔率を図-8に示す。試験体の作製方法に着目すると、打込み供試体20℃の場合、分析試料の採取位置0～10 mm（型枠底面）と30～40 mm（供試体の中心位置）における細孔率が概ね同

等であった。一方、大型造形物 20 °Cは、分析試料の採取位置 0~10 mm (暴露面)において細孔直径 0.003~0.05 μm の細孔率が増加していた。また、5, 35 °Cも同様の傾向を示していた。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、細孔構造が緻密化した可能性が推察される。

製造時の温度環境に着目すると、大型造形物 35 °Cの条件は、分析試料の採取位置 0~10 mm と 30~40 mm とともに、細孔率が最も大きかった。特に、細孔直径 0.1 μm 以上の空隙の増加が確認された。製造時の温度環境によって細孔構造が粗大化した可能性が示唆される。既往の報告⁷⁾では、強度に寄与する細孔直径は 0.05 μm 以上の空隙であると報告されている。本研究では、前述のとおり製造時の温度環境が高いほど圧縮強度は小さくなる傾向が確認されたが、この要因として、細孔直径が 0.1 μm 以上の空隙が増加したことが影響している可能性が考えられる。

4. おわりに

本論では、製造時の温度環境が 3D プリント造形物の力学特性と耐久性に与える影響を評価するために、環境可変室 5, 20, 35°Cにおいて 3D プリンティングを行い、作製した造形物を屋外暴露試験に供した。この造形物からコア抜きした供試体を用いて、材齢 26 週時点の力学特性と物質移動抵抗性などの耐久性の評価試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 大型造形物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、製造時の温度環境が 20 °Cのケースでは圧縮強度 130 MPa が得られ、型枠に打ち込んで作製した供試体と同等であった。また、5 °Cは 7 %大きく、35 °Cは 16 %ほど小さい値を示した。平行方向にコア抜きした供試体も同様の傾向であった。
- (2) 積層時間間隔 10 分の層間を含む位置から採取した供試体に対して、層間にひび割れが発生するように载荷したところ、製造時の温度環境 5°Cならびに 20 °Cの供試体から 4.7 MPa 以上のひび割れ発生強度が得られた。一方、35 °Cの供試体は 2.75 MPa であり、製造時の温度環境の影響が認められた。
- (3) 表面吸水試験の結果は、0.02 ml/m²/s 以下であった。また、積層時間間隔 10 分を含む評価位置でも同様の表面吸水速度が得られた。

- (4) コア抜きした供試体を用いた中性化深さ測定および水分浸透試験からは、層間からの中性化の進行と水の浸入は認められず、ひび割れなどの変状も生じていないことが確認された。
- (5) 大型造形物からコア抜きした供試体の細孔径分布測定から、製造時の温度環境が 35 °C条件の細孔率が最も大きかった。特に、細孔直径 0.1 μm 以上の空隙の増加が認められた。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187 (研究推進法人：土木研究所) によって実施されました。

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, 山本伸也, 菊地竜 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.2005-2010, 2024.
- 4) 小倉大季, 田中初太郎, 中島忠大, 山本伸也 : 3D プリンティング技術の建築構造部材への適用, コンクリート工学, Vol.62, No.6, pp.527-533, 2024.
- 5) 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.
- 6) Jean De'M M alan, Algurnon Steve van Rooyen, Gideon P.A.G.van Zijl : Chloride Induced Corrosion and Carbonation in 3D Printed Concrete, Infrastructures, 2022.
- 7) 橋田浩 : 細孔空隙構造からのコンクリートの各種特性の形成機構に関する検討, 清水建設研究報告, 第 63 号, 1996.