

建設用 3D プリンタの吐出口における押出成形速度の材料分離への影響

北海道大学大学院
北海道大学大学院
北海道大学

学生会員
正会員
非会員

○吉原 伶
橋本 勝文
○本田 佳己

中瀬 皓太
杉山 隆文
本田 佳己

1. はじめに

フレッシュコンクリートの型枠への流込み時には、鉄筋や型枠に接する界面付近に粗骨材が配置されにくいことで、材料分離を伴う不均質性を生むことが、X 線 CT を用いた画像解析により明らかとされている¹⁾。このような不均質性は、建設用 3D プリンティング（以下、3DP）技術においても大きな問題となることが予想される。3DP は省人化や経済性の向上が期待されている一方で、積層プロセスにより硬化体の力学的性能に生じる異方性や、層間の付着強度の脆弱性が報告されている²⁾。しかしながら、3DP によるセメント系材料の積層物における強度や破壊形式に対する研究は緒に就いたばかりである。特に、印刷時には一定の流動性を有する材料が圧力を受けて流速を持つため、吐出口において骨材の不均質な分布が生じる可能性があるが、吐出時の材料分離に関する知見はほとんどない。本研究では、X 線 CT 法による画像解析手法を用いて、3DP 装置の吐出口において発生する積層材料の材料分離について、骨材の分布性状に関する評価を行った。

2. 実験概要

3DP フィラメント材料をモルタルとし、セメントには普通ポルトランドセメント、骨材は 5 号珪砂、混和剤は高性能 AE 減水剤を用いた。珪砂はセメントペーストよりも密度差等に起因して、CT 画像で骨材を分離抽出しやすいため、珪砂を骨材として用いた。モルタルの配合は水セメント比 0.22、砂セメント比 0.5 とし、高性能 AE 減水剤はセメントの質量に

表-1 供試体一覧

記号	ピストン移動速度 (mm/sec)	造形スペース移動速度 (mm/sec)
M02noz	0.2	1.8
M04noz	0.4	3.5
M08noz	0.8	7.1
Mcyl	円柱供試体	

対して 3% 添加した。表-1 に示すように内径 50mm のピストンの押出し速度と造形スペースの移動速度を制御しながら、簡易的な 3DP 装置（図-1）を用いて内径 16mm の吐出口からモルタルを押し出した。その後、ノズルの先端から 5mm~15mm の部分を切り出し、図-2 に示す厚さ 10mm の供試体とした。また、速度の影響を受けない自己充填によるノズル内部の骨材分布を再現するために直径 16mm、高さ 14mm の円柱供試体を作製した。

3. 画像解析手法

マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて、供試体を撮影した。ガウシアンフィルタ処理を行った後、CT 画像の二値化処理を行った。画像内で結合して抽出された骨材領域を分離するために、ADI による画像解析を導入して骨材コアを抽出した³⁾。ここでは、画像処理ソフト ImageJ を用いて、各骨材コアの重心座標と体積を取得し、骨材コアの形状を球形と仮定した場合の直径に相当した場合の直径に相当する長さを粒径とした。

断面中心からの距離（以下、r）が 1mm ずつ異なる円環状の 8 つの領域を設定して粒度分布を比較し

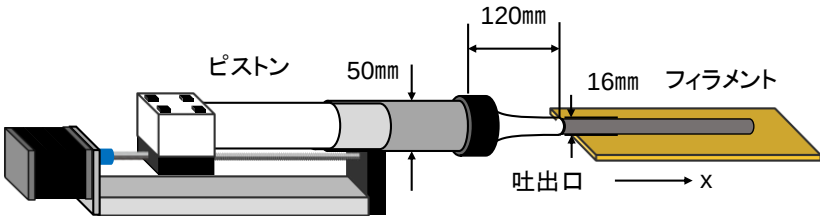


図-1 3D プリンタ

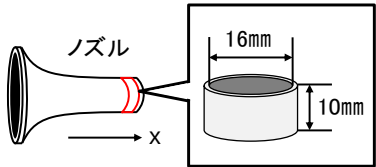


図-2 ノズル供試体

キーワード 3D プリンタ, 材料分離, X 線 CT 法, 押出成形速度, 吐出口

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学工学部 A4-53 室 TEL 011-706-6180

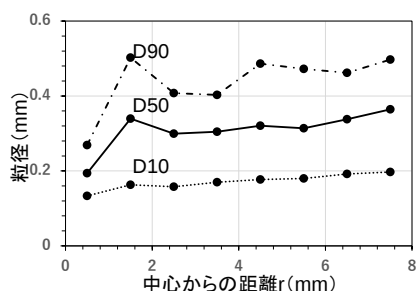


図-3 M02noz における骨材分布

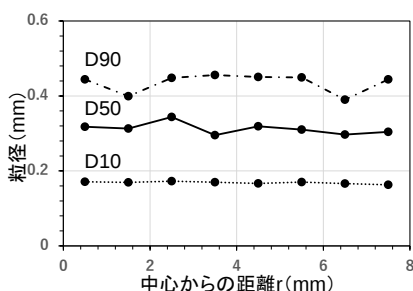


図-4 M04noz における骨材分布

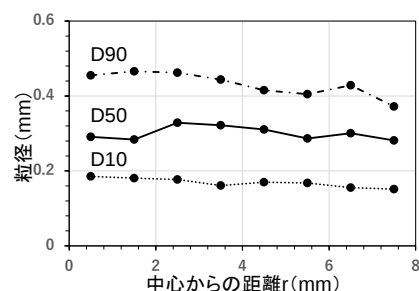


図-5 M08noz における骨材分布

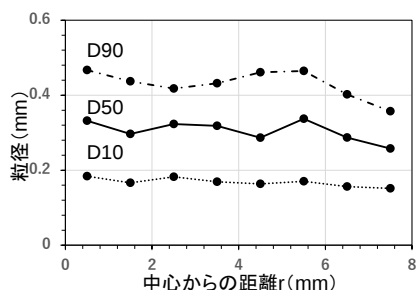


図-6 Mcyl における骨材分布

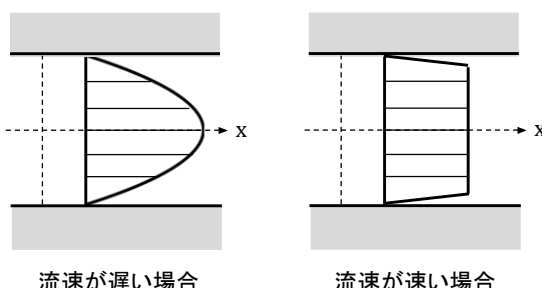


図-7 ノズル内の流速分布のイメージ

た．得られた粒度分布の評価指標には，粒度分布の10%粒径（以下，D10），50%粒径（以下，D50），90%粒径（以下，D90）を用いた．なお，D10は各粒度分布の中の小さな粒径の変化，D50は各粒度分布全体の粒径の変化，D90は各粒度分布の中の大きな粒径の変化を示す．

4. 画像解析結果

M02noz, M04noz, M08noz における，D10, D50, D90 と r の関係をそれぞれ図-3, 図-4, 図-5 に示す．これより，M02noz は中心付近に大きな骨材が少ない傾向があるが，M04noz, M08noz は中心からの距離による粒径の変化は見られない．

管壁との界面の影響のみを受けると考えられる Mcyl においては，図-6 に示すように，中心に近いほど粒径が大きい骨材が分布している．このことから，ノズル内部をモルタルが圧力を受けながら押し出される過程で，速度が遅いほど大きな骨材が外側に移動していると推察できる．

コンクリートの圧送技術においては，コンクリートが管内流動する際に，栓流（管内断面で流速分布が一様な流れ）の状態になることが知られている³⁾．また，管壁とコンクリートの抵抗が圧力の増加により減少することが報告されている⁴⁾．ここで，図-7 にノズル内に生じる材料押し出し時の流速分布のイメージ図を示す．3DP のノズル内部においても，材料の押し出成形速度が速い場合には，壁面への圧力が増加

することでノズルとの界面に潤滑層が生じて摩擦力が減少し，栓流に近くなることで材料分離が小さくなったと考えられる．一方で，押し出成形速度が遅い場合には，ノズルとの界面における摩擦力の影響を受け，中心からの距離によって流速に差が生じ，管路をモルタルが圧力を受けながら押し出される過程で大きな骨材が流速の遅い外側に移動したと考えられる．

5. 結論

3D プリンティングによる積層材料内での骨材分布の不均質性に関して，ノズル吐出口において生じる骨材の分布性状と押し出成形速度の関係を把握することができた．

参考文献

- 1) 中瀬皓太ほか：コンクリート内部の粗骨材分布に関する X 線 CT 画像の三次元画像解析手法の構築，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 22 巻，pp.243-248，2022．
- 2) 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委員会」報告書，pp.90-101，2021．
- 3) 田沢栄一：ポンプ圧送技術の現状と問題点，回収水研究委員会報告書，Vol. 21, No.11, pp.13-22，1983．
- 4) 田畑和男ほか：コンクリートのポンプ輸送における摩擦抵抗，セメント・コンクリート，1956．