

建設用 3D プリンタの吐出口における材料分離

Segregation of Cement-based Material for Construction in 3D Printing Nozzle

北海道大学工学部環境社会工学科

北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻

北海道大学大学院工学研究院土木工学部門

北海道大学大学院工学研究院土木工学部門

北海道大学工学系技術センター技術部

○学生員 吉原侖 (Rei Yoshihara)

学生員 中瀬皓太 (Kota Nakase)

正員 橋本勝文 (Katsufumi Hashimoto)

正員 杉山隆文 (Takafumi Sugiyama)

非会員 本田佳己 (Yoshiki Honda)

1. はじめに

コンクリートは構造設計の際には均質な材料として扱われることが多いが、実際には骨材の分布に不均質性が生じることが知られている。例えば、コンクリートの流込み時に、鉄筋あるいは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の発生が、X線CTを用いた画像解析により明らかとされている¹⁾。

近年、建設用3Dプリンティング（以下、3DP）装置の開発が進められており、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には異方性があることや、層間の付着強度が従来の流込みにより充填した場合の引張強度より小さくなる積層面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、印刷時の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、積層材料の吐出口において3DP装置内で発生する材料分離について、骨材の分布性状に関する評価を行った。

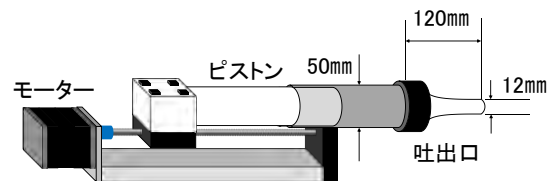


図-1 3Dプリンタ概要

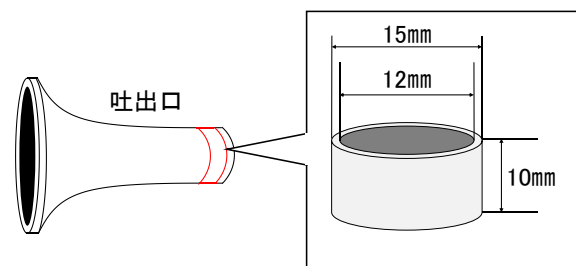


図-2 供試体概要

2. 実験概要

2.1 供試体概要

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が小さく一定であり、CT画像で骨材を抽出しやすいため、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対して3%添加した。

図-1に示した簡易的な3DP装置を製作し、直径50mmのピストンの押し出し速度を0.1mm/secに制御しながら、内径12mmの吐出口からモルタルを押し出した。なお、吐出口の先端部を10mm切り出して、図-2に示すような円柱状の供試体とした。

2.2 X線CT装置

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。撮影条件は管電圧100kV、管電流200μA、解像度5.33μm/pix、画像サイズ2864pix×2864pix、撮影枚数1949枚、撮影時間4080秒とした。

3. 画像解析手法

3.1 二値化処理

X線CT撮影による連続断面画像を画像処理負荷低減のために、2864×2864pixで構成される1949枚の画像から1432×1432pixで構成される975枚の画像にデータ低減し、ノイズの少ない連続した700枚を解析対象とした。ガウシアンフィルタ処理を行った後、二値化処理を行った。

3.2 骨材コアの抽出

上記の二値化処理を行った画像に対して、結合して抽出された骨材領域を分離するために、ADI¹⁾による画像解析を導入して骨材コアを抽出した。

3.3 骨材コアの空間座標の取得

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た。このとき、骨材コアの形状を球形と仮定した場合の直径に相当する長さを粒径とした。

3.4 不均質性の評価

積層フィラメント（積層体を構成するために吐出された材料の断面）中心からの距離が0~1, 1~2, 2~3, 3~4,

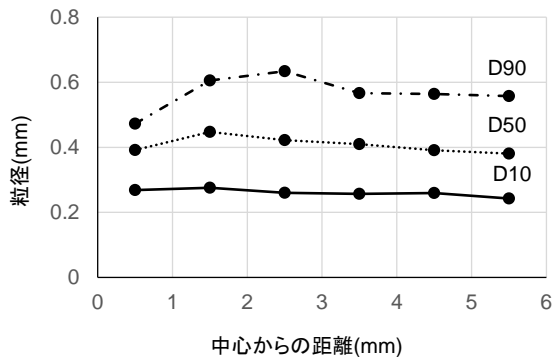


図-3 D10, D50, D90 と中心からの距離の関係

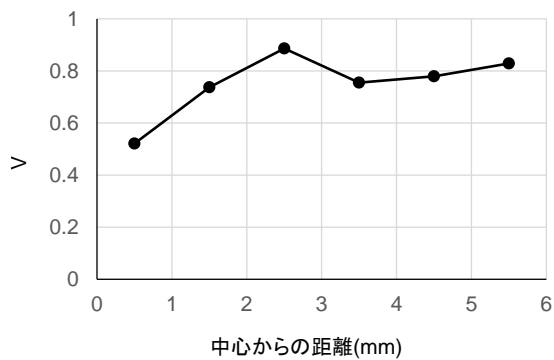


図-4 V と中心からの距離の関係

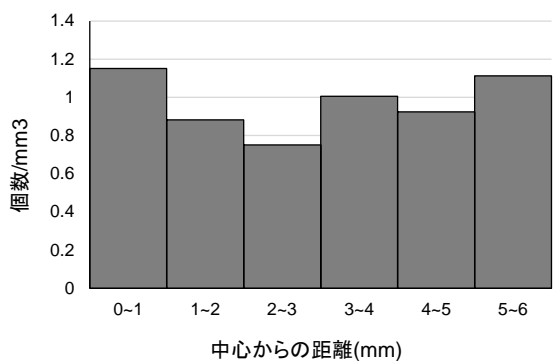


図-5 N と中心からの距離の関係

4~5, 5~6mm となる円環状の6つの領域を設定し、それぞれの粒度分布を比較した。比較のための評価指標として、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。ここで, D10 は各粒度分布の中における小さな粒径の変化, 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。加えて, ばらつきを示す指標として, D90 から D10 を減じて D50 で除した値(以下, V)を用いた。また, 領域ごとに粒径0.1mm以下の骨材の体積当たりの個数(以下, N)を計算した。

4. 画像解析結果

図-3にD10, D50およびD90と中心からの距離の関係を示す。D10は中心からの距離に伴い変化しないが, D50あるいはD90は中心からの距離が1~3mmの部分で

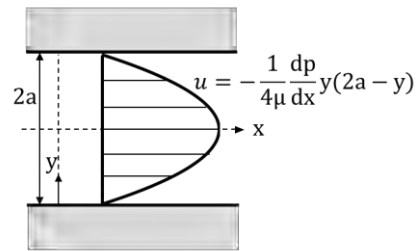


図-6 管路における層流の流速分布

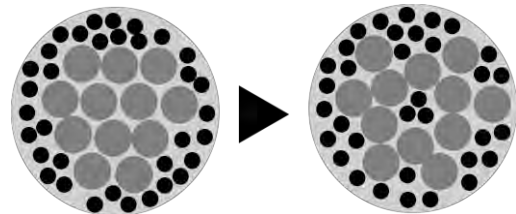


図-7 管路における骨材の移動のイメージ

大きいことが分かった。図-4にVと中心からの距離の関係を示す。ばらつきを示す指標Vも中心からの距離が1~3mmの部分で大きな値を示している。図-5にNと中心からの距離の関係を示す。粒径0.1mm以下の骨材は中心付近および3DP装置の吐出口に接する界面付近に多いことが分かった。

以上の結果から, 吐出口におけるフィラメント中心には大きな骨材が少なく, 中心から1~3mmの領域は大きな骨材が多いことが分かる。一方で, ノズル壁面における界面の影響を考慮すれば, 中心に近いほど粒径が大きい骨材が分布すると考えられる。しかしながら, 上記のように, 3DPによる吐出口においては, 中心から離れた領域に粒径が大きくなる領域が存在することがわかった。ここで, ノズルのような管路における層流の流速分布は, 図-6のように管路の中心部分の流速が大きい。したがって, 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, 図-7に示すように大きな骨材が流速の遅い外側に移動すると考えられる。

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, 材料が押し出されることでノズル吐出口において生じる骨材の分布性状と材料分離の挙動を把握することができた。

参考文献

- 1) 中瀬皓太, 富樫佑介, 橋本勝文, 杉山隆文, 齊藤亮介: 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.