

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

清水建設 技術研究所 正会員 ○小倉大季, 正会員 阿部寛之, 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を期待して、建設スケールの3D プリンティング技術の研究開発が近年進められている。これらの技術のうち主流となっているのは、フレッシュ状態のセメント系材料を押し出して積層することで、立体形状を作製する技術（材料押し出し方式）である。押し出し方式に使用するセメント系材料は、従来のコンクリートよりもフレッシュ性状の精緻な制御が必要であり、プリンティングに適した材料を検討するための実験的評価手法がいくつか提案されている¹⁾。しかし、試験室スケールから実大スケールへ移行する場合や、温湿度が変動しやすい現場での施工に移行する場合などにおいては、実験だけで最適な材料を選定するには限界があるため、材料のフレッシュ性状、造形物の形状およびプリント速度などが積層性に与える影響を検討できるツールが有効であると考えられる。

そこで本論では、セメント系材料の積層性評価を目的として、数値解析を用いた基礎的検討を行った。具体的には、平行板粘度計による実験を再現できるようにキャリブレーションした材料パラメータを用いて、積層シミュレーションを実行し、積層性を評価した。そして、数値解析で積層性が高いと判断されたフレッシュ性状と同程度の性状のセメント系材料を開発し、これを積層実験に供することで、解析の妥当性を確認した。

2. 積層シミュレーション

形状保持性が高いセメント系材料のフレッシュ状態の挙動を表現するために、本研究では離散要素法 (Discrete Element Method, 以下 DEM) を使用した。DEM は、解析の対象を自由に運動できる粒子で表現し、粒子間の接触・滑動を考慮して、各時刻におけるそれぞれの粒子の運動を逐次追跡して解析する手法である。本研究で使用した粒子径は 6 mm, 粒子密度は 2170 kg/m^3 である。DEM の接触力モデルにはフォークトモデルを採用し、バネモデルはバネ定数 1500 N/m の線形モデル、反発係数は 0.7 を用いた。相互作用力モデルには、液架橋力モデル²⁾を使用した。このモデルに用いる接触角、表面張力係数および無次元体積は、後述する方法で決定した。なお、実際のセメント系材料は、時間が経過するにつれフレッシュ性状が変化するが、本検討では材料パラメータの時間依存性は考慮してい

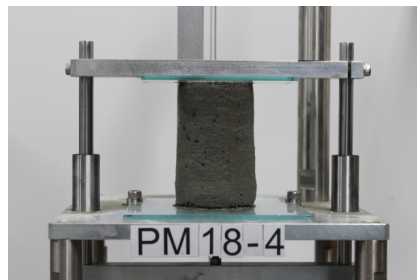


図-1 平行板粘度計を用いた試験の状況

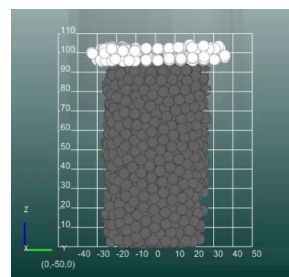


図-2 平行板粘度計を模擬した解析

ない。

解析に使用する材料パラメータをキャリブレーションするために、ここでは平行板粘度計による試験を対象に再現解析を行った。平行板粘度計による試験は、3D プリンティングに用いる材料の積層性を評価するために、筆者らが提案した試験方法である³⁾。図-1に示すように、フレッシュ状態のセメント系材料を平行板で挟み込み、荷重を段階的に作用させる試験である。事前に行った実験の結果を基に、ここでは $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ に成型したセメント系材料に 12.7 N の荷重を作用させたときに着目し、この変形量が $2.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ になるような材料パラメータに設定した。図-2は再現解析の状況である。セメント系材料（グレーの粒子）の上部に所定の重り（白色の粒子）を載せ、载荷前後の変形量を測定した。キャリブレーションの結果、相互作用力モデルにおける接触角および無次元体積はそれぞれ 10° , 5 に設定した。表面張力係数については、 8 N/m および 6 N/m としたときに変形量がそれぞれ 2.7 mm , 4.8 mm という結果が得られたので、これらのパラメータをそれぞれ Case 1, Case 2 とした。

次に、この決定したパラメータを使用して、積層シミュレーションを実行した。解析では、開口幅 $40 \times 20 \text{ mm}$ のノズルからセメント系材料である粒子を連続的に吐出しなが

キーワード: 付加製造技術, 3D プリンティング, コンクリートプリンティング, 離散要素法, 積層性

連絡先: 〒 135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 090-2730-5396

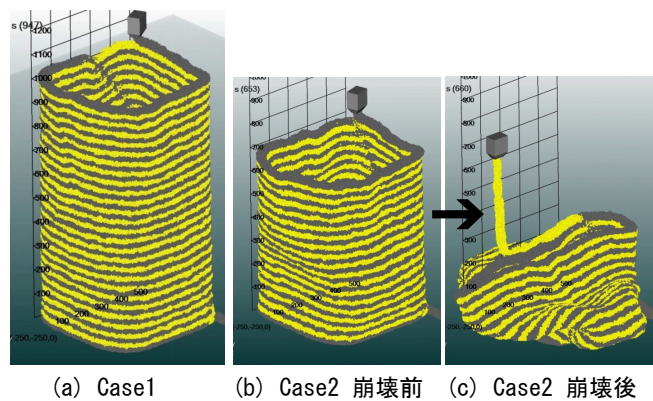


図-3 積層シミュレーションの結果

表-1 セメント系材料のフレッシュ性状

	平行板粘度計の変形量 (mm)	フロー値 (mm)
配合 1	2.94	124
配合 2	6.02	130

ら、ノズルを 500×500 mm の矩形を描くように移動させた。1 層のプリントが完了後にノズルを高さ方向に 20 mm 移動させて、次の層のプリントに移行した。このようにして角筒形状の造形物を作製した。

図-3 に、解析結果を示す。平行板粘度計の変形量が 2.7 mm であった Case 1 の場合、高さ 1000 mm に至っても解析を継続することができたが、変形量が 4.8 mm であった Case 2 の場合、高さ 700 mm の積層時に造形物が崩壊する挙動を示した。なお、吐出する粒子の色を各層ごとに変更したのは、層間の状況を判別しやすくするためである。

3. 積層実験

積層シミュレーションの結果を受け、平行板粘度計の変形量が 2.7 mm 程度になるようなセメント系材料を開発して、積層実験に供した。開発したセメント系材料（配合 1）は水結合材比を 0.24 とした配合であり、結合材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、石灰石微粉末を使用し、ポリエチレン繊維を 0.75vol% 混入した。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。また、比較用の配合として、解析の Case 2 における平行板粘度計の結果に近くなるように混和剤量を調整した配合（配合 2）も作製した。実際の積層開始時の平行板粘度計による変形量とフロー値を表-1 に示す。

積層実験は、マニピュレータを使用することで、ノズルの先端を制御して、所定の位置にセメント系材料を押し出すことで実施した。ノズルの開口幅は 40×10 mm、ノズル

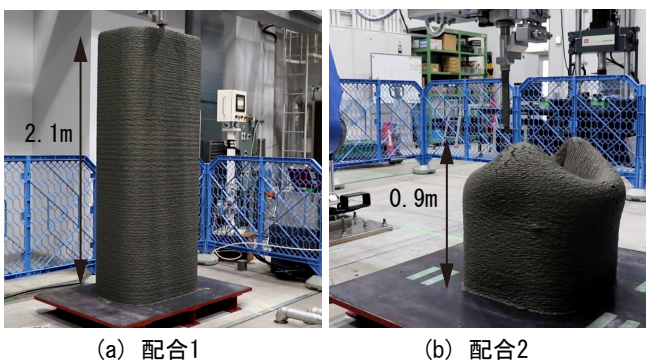


図-4 セメント系材料の積層状況

の移動速度は 75 mm/秒として、ノズルから連続してセメント系材料を押し出した。作製した造形物は、幅 740 mm、奥行 540 mm の角筒形状である。

図-4 に、積層の状況を示す。開発した配合（配合 1）では、2.1 m まで積層しても造形物が崩壊することはなく、高い積層性が確認された。比較用の配合（配合 2）では、ノズルが 0.9 m 程度の高さに至ったときに造形物が崩壊する挙動を示した。上層からの荷重によりセメント系材料が変形したことが要因であると考えられる。このセメント系材料が崩壊する挙動は、解析で確認された傾向（図-3(c)）と類似であった。このように配合 1 と配合 2 の結果がそれぞれ解析の Case 1 と Case 2 の結果と同様の傾向であったことから、DEM による解析が積層性を評価できるツールとして有効である可能性が確認された。

4. おわりに

材料押し出し式 3D プリンティングに用いるセメント系材料の積層性を評価するために DEM による解析および平行板粘度計を用いた試験を行った結果、プリンティングに適した材料を選定できる可能性が確認された。今後は、解析にフレッシュ性状の時間依存性を考慮した材料モデルを導入することで、プリントする材料の可使時間、最適なプリント速度・吐出量などを検討していく予定である。

謝辞： 本研究は、平成 30 年度土木学会吉田研究奨励賞を授与された研究課題である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 小倉大季: 建設スケールの 3D プリンティング技術に関する海外の研究動向, コンクリート工学, Vol. 56, No. 2, pp. 174-180, 2018.

2) Willett, Christopher D., Adams, Michael J., Johnson, Simon A., Seville, Jonathan P. K.: Capillary bridges between two spherical bodies, Langmuir, Vol. 16, pp.9396-9405, 2000.

3) 阿部寛之, 小倉大季, 田中博一: 3D プリンティング技術に用いる繊維補強セメント複合材料の積層性評価, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, pp.102-103, 2019.