

建設用 3D プリンター向け 2 液型セメント系積層材の 押出性、積層性および強度発現性

伊勢島 佳・石田剛朗

当社が建設用3Dプリンター向けに開発した主材と硬化開始材から構成される2液型セメント系積層材について、押出性、積層性および強度発現性を評価した。押出性については、主材スラリーおよび硬化開始材スラリーの練混ぜ直後の15打フローは約200mmであり、その後5日間が経過しても変動は±10mmの範囲にあり、良好なスラリーの安定性が確認できた。積層性については、積層速度が水平方向150mm/秒、垂直方向120mm/分で半径100mm、高さ400mmの筒型積層体を作製可能であり、その所要時間は約2分30秒であった。強度発現性については、積層体から採取したコアおよび切出試験体と、ノズルから吐出された積層材を型枠に流し込んで成型した基準試験体との比較において、コアおよび切出試験体の圧縮強度、割裂引張強度および曲げ強度は基準試験体と顕著な差異は認められず、積層体の層間の一体性や付着強度に問題がないことを確認した。

開発品は、主材と硬化開始材とをノズル内に設置したインラインミキサーで混合するため、ノズルより前の配管系での材料硬化を抑制できる。そのため、配管系が閉塞し難く、施工中断時や終了時の洗浄が容易になるといった作業性の改善が可能となるものである。

キーワード：建設用 3D プリンター、材料押出方式、積層材、インラインミキサー

1 緒言

人手不足への懸念や生産性向上ニーズが高まる中、コンクリート施工の省力化や省人化等に向けて、建設用 3D プリンターの活用が検討されている。3D プリンティング技術の導入が建設業にもたらすと期待される主な効果を以下に示す⁽¹⁾。

- ・型枠が不要なことからデザインの自由度が向上
- ・最適化設計による軽量化や材料の使用量削減
- ・機械化による生産性向上や工期短縮
- ・型枠等の廃棄物や使用材料の削減
- ・多品種少量生産におけるコスト削減
- ・省力化・省人化、安全性の向上

このように、3D プリンティングには多くの利点があると考えられており、国内外で研究開発が進められている。

3D プリンティングの方式には、材料を押出しながらノズルの位置や移動速度を正確にデジタル制御し、一層ずつ積層を繰り返して造形する材料押

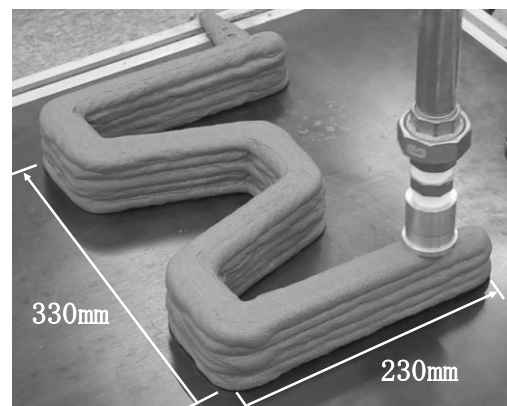


図1 開発品による積層の様子

出方式、ロボットアーム等の先端に吹付システムを搭載した吹付方式、薄層状にセメント系材料を敷き詰め上部から水もしくは結合剤を噴射（注入）し選択的に固化させる、あるいは、薄層状に砂等の骨材を敷き詰めセメントペーストを注入する、粉末床結合方式等がある⁽¹⁾。国内では、材料押出方式と吹付方式の採用が多い。

開発品による積層の様子を図1に示す。建設用

3D プリンター向けに開発した 2 液型セメント系積層モルタルは、長期間スラリー状態を保持可能な材料押出方式用の積層材である。

材料押出方式の 3D プリンター用積層材は、一般の建材と同様に、硬化後の強度（圧縮、引張、曲げ、層間付着等）や耐久性（収縮、ひび割れ、凍結融解抵抗性等）について要求性能を満たす必要がある。特に 3D プリンター用積層材の場合、ポンプからホース等の管路を経てノズル先から吐出されるまでの押出性（ポンプ圧送性、流動性）と、吐出後、硬化するまでの積層体に必要な積層性（自立安定性、形状保持性）が重視され、これらの両立が不可欠である（図 2）。

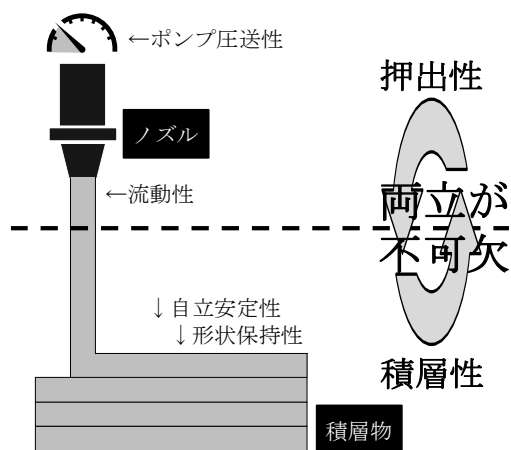


図 2 積層材の要求性能（フレッシュ性状）

2 2 液型積層材・システムの概要

2.1 2 液型積層材の概要

2 液型積層材は、主材と硬化開始材から構成される。主材はセメント系結合材と細骨材等のプレミックス材であり、硬化開始材は硬化促進剤と細骨材等のプレミックス材である。いずれも 1 袋 20kg の荷姿としている。

主材には、セメント系結合材の水和反応を一時的に停止させる遅延剤を配合している。一方、硬化開始材には、単独で水和・硬化する材料は配合していない。よって、主材および硬化開始材は、水を加えて練り混ぜたスラリー（モルタル）状態で、5 日間程度硬化せず流動性を保ち、主材と硬化開始材を混合すると直ちに硬化が開始する。

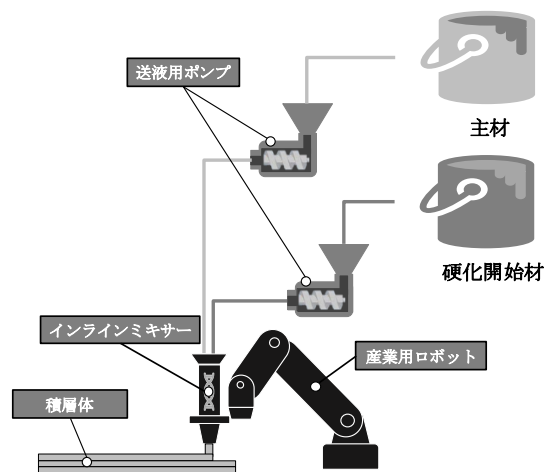


図 3 2 液型積層システムのイメージ

2.2 2 液型積層システムの概要

2 液型積層システムのイメージを図 3 に示す。主材および硬化開始材に水を加えてモルタルミキサーで練り混ぜ、主材スラリーおよび硬化開始材スラリーを得る。標準配合は、主材 3 袋に対して水量 13.2L、硬化開始材 1 袋に対して水量 6.2L であり、練上がり後のスラリー量は主材スラリーが約 40L、硬化開始材スラリーが約 17L となる。

2 種類のスラリーはそれぞれポンプで圧送され、ロボットアーム先端に取り付けたノズル内に設置されたインラインミキサー（図 4）で混合され、吐出、積層される。送液用ポンプには無脈動定量ポンプを使用し、主材スラリーおよび硬化開始材スラリーは容積比 2.4 : 1.0 で送液する。

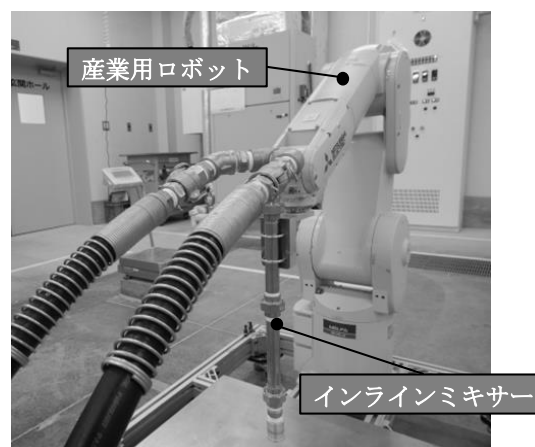


図 4 産業用ロボットとインラインミキサー

3 評価項目および試験方法

本報告では、2 液型積層材について、以下の項目に関して評価した。

3.1 押出性

主材および硬化開始材に標準量の水を加えてモルタルミキサーで3分間練り混ぜ、主材スラリーおよび硬化開始材スラリーを作製し、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」におけるフロー試験方法に従って、15打フローを求め、押出性の指標とした。

3.2 積層性

3.1と同じ方法で主材スラリーおよび硬化開始材スラリーを作製し、積層幅 30mm、1層あたりの積層高さ 10mm の条件で正八角形の筒体 (高さ 400mm、半径 100mm) を造形し、積層性を評価した。

3.3 強度発現性

3.1と同じ方法で主材スラリーおよび硬化開始材スラリーを作製し、積層幅 30mm、1層あたりの積層高さ 10mm の条件で 15層積層し直方体に成形した。温度 20°C、湿度 50%の恒温恒湿室にて6日間気中養生を行った後、コア抜きによってφ50×100mmの円柱試験体を、切り出しによって40×40×160mmの角柱試験体を採取した。

また、積層した試験体と比較を行う基準試験体については、ノズルから吐出された積層材をφ50×100mmの円柱型枠および40×40×160mmの角柱型枠に2層に分けて流し込み、各層を10回突き固めて成型した。

各試験体は、所定の材齢まで温度 20°C、湿度 50%の恒温恒湿室にて気中養生を行った後、試験に供した。

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って圧縮強度を、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に従って割裂引張強度を、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」における曲げ強さ試験方法に従って曲げ強度を測定した (試験体数 3)。試験体のコア抜き、切り出しおよび载荷の方向を図5に示す。

4 試験結果

4.1 押出性

主材スラリーおよび硬化開始材スラリーの 15打フローの経時変化を図6に示す。

練混ぜ直後の主材スラリーおよび硬化開始材スラリーの 15打フローは約 200mm であった。事前

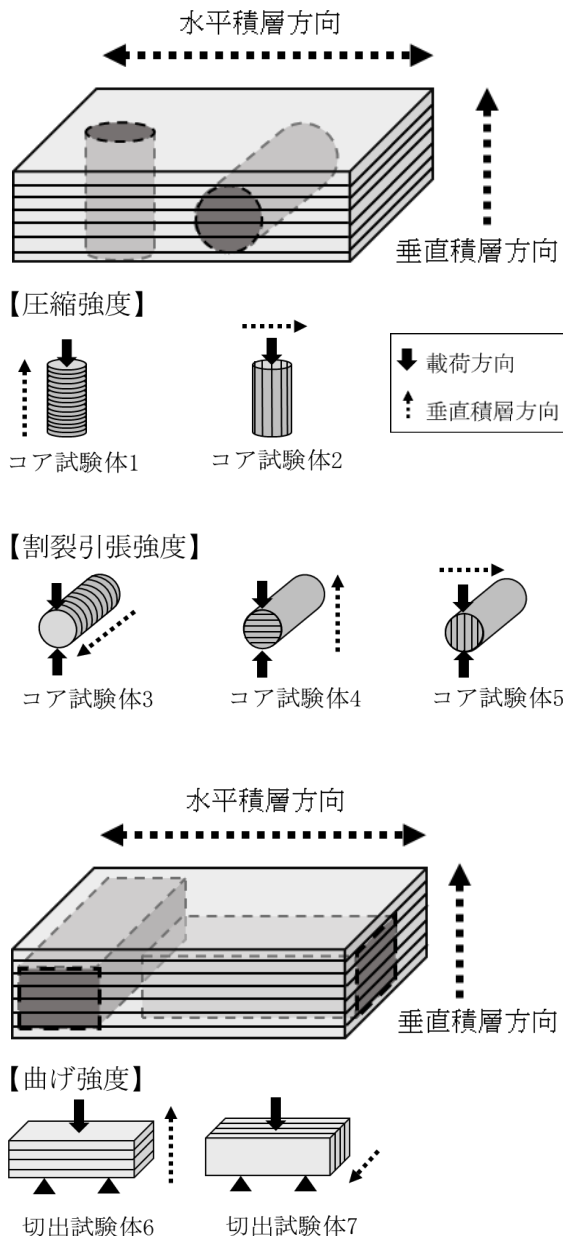


図5 コア抜き、切り出しおよび载荷の方向

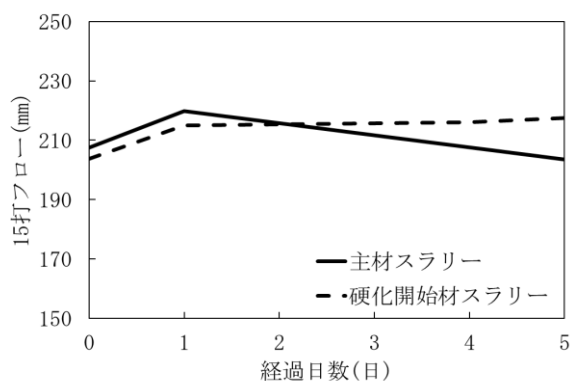


図6 15打フローの経時変化

の検討により、15打フローが200±20mm程度であればポンプへの負荷が小さく安定して圧送できることを確認しており、押出性は良好な結果であった。また、その後時間が経過しても15打フローの変動は±10mm程度であり、流動性が高く圧送可能な状態を5日間程度保持可能であることを確認した。

この特徴により、二つのスラリーが混ざっていない、インラインミキサーより前の配管内ではスラリーが硬化しないため、製造工程上やトラブル時等における中断や、施工終了時の装置内の洗浄が容易になると考えられる。

4.2 積層性

造形した積層体の外観を図7に示す。水平方向の移動速度150mm/秒、垂直方向の移動速度120mm/分で正八角形の筒体(高さ400mm、半径100mm)を積層することができた。これに要した時間は約2分30秒であった。

主材スラリーおよび硬化開始材スラリーは、ロボットアーム先端に取り付けたノズル内のインラインミキサーで混合されると、直ちに硬化を開始する。なお、積層材の凝結始発には60~90分を要するが、積層性に必要とされる硬さに関しては、混合後速やかに発現できるよう、材料設計を行っている。この特徴により、良好な積層性(自立安定性、形状保持性)を発揮できることを確認した。

4.3 強度発現性

積層体からコア抜き、又は切り出して採取した試験体(コア試験体、切出試験体)、および型枠に2層に分けて流し込み成型した基準試験体の圧縮強度、割裂引張強度および曲げ強度を測定した。表1に試験結果(試験体3体の平均値)を示す。

試験体数が少ないこともあり、試験結果にはばらつきも含まれるものと考えられるが、コアおよび切出試験体の強度は基準試験体と比較して顕著な差は認められなかった。

前述のとおり、積層材の凝結始発には60~90分を要し、積層性に必要な硬さは混合後速やかに発現する。ただし、吐出・積層された時点の積層材はある程度軟らかいため、既に積層された層との一体性は高くなるものと考えられる。また、本報告における積層条件が、ノズル内径20mmに対し積層幅30mmと、積層材を押し潰すような条件

であったことも、層間の一体性を高め、コアおよび切出試験体の強度を高めた要因の一つと考えられる。

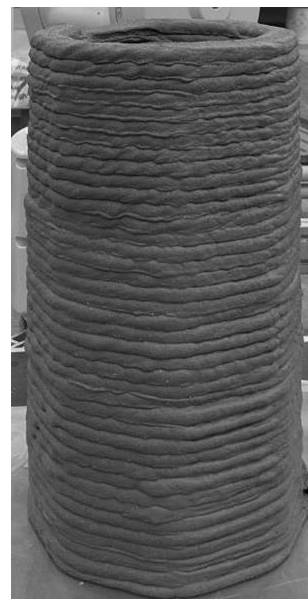


図7 積層体：
正八角形の筒体(高さ400mm、半径100mm)

表1 圧縮強度、割裂引張強度および曲げ強度
(コアおよび切出試験体と基準試験体の比較)

試験体寸法： φ50×100mm		強度(N/mm ²)	
		7日	28日
圧縮強度	基準	36.4	49.4
	コア試験体1	34.2	54.4
	コア試験体2	36.4	52.4
割裂引張強度	基準	1.8	2.2
	コア試験体3	2.4	3.0
	コア試験体4	2.1	2.9
	コア試験体5	1.4	3.3

試験体寸法： 40×40×160mm		強度(N/mm ²)	
		7日	28日
曲げ強度	基準	2.8	4.9
	切出試験体6	3.6	3.5
	切出試験体7	4.3	5.1

5 結言

開発した建設用3Dプリンター向け2液型積層材について、押出性、積層性および強度発現性を評価した。その結果を以下に示す。

(1) 主材スラリーおよび硬化開始材スラリーの練

混ぜ直後の 15 打フローは約 200mm であり、その後 5 日間が経過しても 15 打フローの変動は±10mm 程度であった。主材スラリーおよび硬化開始材スラリーは、水と練混ぜ後も単独では硬化せず、押出性（ポンプ圧送性、流動性）が良好な状態を 5 日間程度保つことができた。

二つのスラリーが混ざっていない、インラインミキサーより前の配管内ではスラリーが硬化しないため、製造工程上やトラブル時等における中断や、施工終了時の装置内の洗浄が容易になると考えられる。

- (2) 主材スラリーおよび硬化開始材スラリーは、ロボットアーム先端のノズル内に配置したインラインミキサーで混合されると直ちに硬化を開始し、良好な積層性（自立安定性、形状保持性）を発揮して短時間での施工（積層）が可能であった。

正八角形の筒体（高さ 400mm、半径 100mm）を、水平方向の積層速度 150mm/秒、垂直方向の積層速度 120mm/分で積層することが可能で、所要時間は約 2 分 30 秒であった。

- (3) 積層体からコア抜き、又は切り出して採取した試験体と、ノズルから吐出された積層材を型枠に流し込んで成型した基準試験体を比較した。コアおよび切出試験体の圧縮強度、割裂引張強度および曲げ強度は、基準試験体と顕著な差は認められなかった。本報告における積層条件では、2 液型積層材・システムによる積層体の層間の一体性や付着強度に問題は無いことを確認した。

参考文献

- (1) 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」、(2021)

伊勢島 佳・いせじま けい
研究所 コンクリート研究室
建材製品グループ 研究員

石田剛朗・いしだ たけお
研究所 コンクリート研究室
建材製品グループ グループリーダー