

3D Printing に適したセメント系材料の自立安定性に関する検討

大成建設(株) 技術センター
大成建設(株) 技術センター
太平洋セメント(株) 中央研究所

正会員
フェロー会員
正会員

○木ノ村 幸士 村田 哲
坂本 淳
小川 洋二

前堀 伸平

宮本 昌周

1. はじめに

押出し積層方式の3D Printing用のセメント系材料は、速硬性、流動保持性、圧送性、自立安定性の4つの性能を併せ持つことが望ましい。本報では、3D Printingに適した配合検討を通じて設定したモルタル配合²⁾を対象に、強度および凝結試験の結果を示すとともに、開発した小型3Dプリンタシステム³⁾を用いて行った、一度に連続的に積み上げることのできる限界高さを確認する試験方法とその結果について報告する。

2. 積層材料

(1) 配合

対象とした配合を表-1に示す。いずれの配合も結合材Bおよび細骨材Sの種類は同一である。一方、NシリーズとFでは異なる種類の混和剤Adを使用し、タイプ別に前者を標準型、後者を速硬型として区別する。

(2) 強度および凝結試験結果

強度試験として、圧縮強度試験(JSCE-G 505)、割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。各試験体は、モールド内で突き固めて製作したもの(JSCE-F 506)である。材齢1日まで20℃封緘養生した後脱型し、以後、所定の試験材齢まで20℃70%R.H.の環境に曝露した。各強度試験は配合N1についてのみ実施した。試験結果を表-2に示す。圧縮強度は、材齢28日強度(約65N/mm²)に対し、材齢3日でその約70%、材齢7日で約90%まで達しており、強度発現が早いのが特徴である。同様に、割裂引張強度の発現も早く、各材齢での割裂引張強度は、圧縮強度に対し1/14~1/16程度であった。

また、凝結試験(JIS A 1147)を、配合N1およびFについて行った。試験結果を表-3に示す。凝結の始発から終結までの時間は、配合N1で40分、Fで15分であった。凝結始発時間および始発から終結までの時間は、結合材や混和剤の種類および混合量の変更により調整可能であるが、例えばW/C=25%のOPCペーストの凝結始発から終結までの時間が60分程度であること

⁴⁾と比較すると、表-3の配合はW/Bが高いにも関わらずその時間が短い。このように、本配合は凝結始発後、急激に硬化する速硬性を有するため、図-1のように短い時間間隔で次ロット施工時の上載荷重に耐えられる。

3. 自立安定性に関する検討

(1) 小型3Dプリンタシステムの概要

システムの概要を図-2に示す。操作制御は専用ソフトウェアを備えたPCを介して行う。ホップ内に投入されたモルタルはスクイズポンプによりノズルまで圧送される。ノズルは、材料を押し出しながら層状の3次元データに基づいて平面上に軌跡を描き、最大250

表-1 モルタルの配合(質量比)

配合	W/B	S/B	Ad/B	タイプ
N1	0.370	1.50	0.062	標準型
N2	0.375	1.50	0.062	
N3	0.380	1.50	0.062	
F	0.365	1.50	0.058	速硬型

表-2 強度試験結果(配合N1)

(N/mm ²)	材齢(日)				
	1	3	7	14	28
圧縮	35.5	46.0	57.0	55.7	64.6
割裂引張	2.5	3.3	4.1	4.0	4.1

表-3 凝結試験結果

配合	始発(分)	終結(分)
N1	120	160
F	60	75

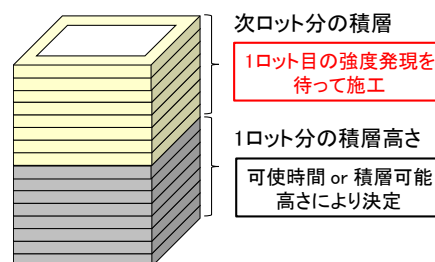


図-1 速硬性と施工サイクルの短縮

キーワード 3D Printing, 圧縮強度, 凝結時間, 積層可能高さ, 自立安定性

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 TEL 045-814-7228

×250×500 (mm) の対象物を製作できる。特殊ノズルの効果によりポンプの脈動影響は解消され、ノズルからの吐出量は定常で、またノズル口から材料を垂らすことなく、不連続区間を移動することが可能である。

(2) 積層試験方法

ここでは、連続積層により一度に積み上げることのできる高さを「積層可能高さ」と定義して、当該高さを以下の手順により確認した。表-1 の 4 配合を対象とし、20℃70%R.H.の恒温恒湿室にて試験を行った。

積層試験では、写真-1 に示す中空矩形断面柱を製作した。積層開始を注水 20 分後に統一し、積層体下部が写真のように自重により崩壊したら試験終了とした。ノズル移動速度は 50mm/s、層厚は 5mm、層幅は 10mm である。積層可能高さは、崩壊する一層前の層の設計高さとし、例えば、28 層目の積層中に崩壊した場合の積層可能高さは、27 層×5mm = 135mm とみなした。

(3) 積層可能高さ

表-4 に積層可能高さの試験結果を示す。同表より、N シリーズでは、W/B が小さいほど、積層可能高さが大きいことが確認できる。一方、N シリーズと F を比較すると、F の積層可能高さは N1～N3 の 2 倍以上となった。前報²⁾において、静置時のゴム硬度やベーンせん断強さの発現勾配は、F の方が明らかに大きいことが示していることから、積層可能高さはこれらの強度発現特性に依存する可能性が示唆される。次報³⁾では、積層可能高さを簡易に評価する方法について、前報²⁾および本報の結果を踏まえ、詳細な検討を行う。

4. まとめ

本報にて、3D Printing に適したモルタル配合は、材齢経過に伴う強度発現が早いこと、また、凝結始発後の速硬性に優れ、施工サイクルの短縮が期待できることが示された。また、積層したモルタルの自立安定性に関する検討として、小型 3D プリンタシステムを用いた積層試験を行い、積層可能高さを確認した。その結果、前報の結果²⁾と合わせ、積層可能高さは静置時の強度発現特性に依存する可能性が示唆された。

自立安定性に関する検討は、現段階ではトータルの積層可能高さに対する概略的な検討に留まっているが、今後は積層中の鉛直・水平変位を計測し、自重崩壊に至るプロセスとメカニズムを明らかにしたい。また、自立安定性は積層体の幾何学形状にも依存すると考えられることから、その検討にも着手する必要がある。

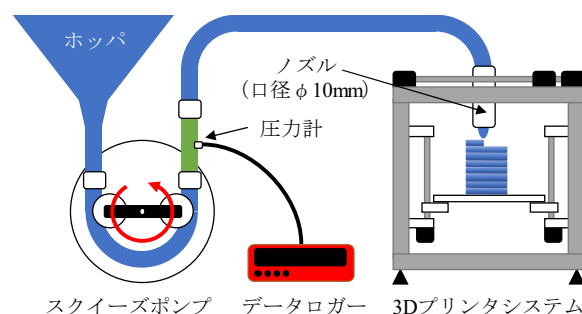


図-2 小型 3D プリンタシステムの概要

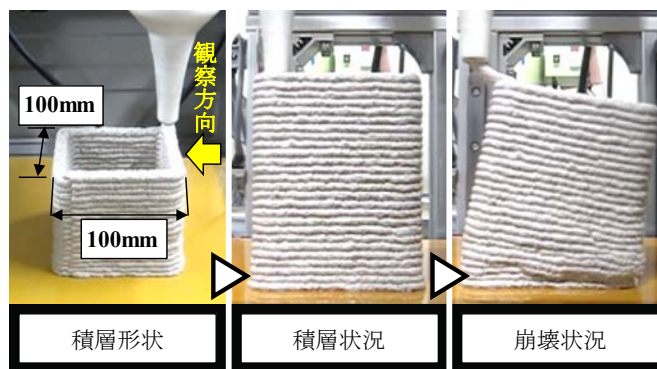


写真-1 積層体の積層・崩壊状況

表-4 積層可能高さ

配合	N1	N2	N3	F
W/B (%)	37.0	37.5	38.0	36.5
積層可能高さ (mm)	175	140	135	400

参考文献

- 1) 村田哲ら：高チキソ性材料のフレッシュ性状および硬化物性に関する基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1929-1934，2018。
- 2) 宮本昌周ら：3D Printing に適したセメント系材料の基礎物性，第 74 回土木学会年次学術講演会講演概要集，2019。(投稿中)
- 3) 村田哲ら：3D プリンタ技術を応用した新たなコンクリート施工法の開発と展望，大成建設技術センター報，第 51 号，pp.23-1~23-6，2018。
- 4) 魚本健人，大下健二：高性能減水剤によるコンクリートの凝結遅延に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第 5 巻，第 1 号，pp.119-129，1994。
- 5) 村田哲ら：3D Printing に適したセメント系材料の簡易品質管理手法の提案，第 74 回土木学会年次学術講演会講演概要集，2019。(投稿中)