

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

大成建設(株) 技術センター

正会員

○村田 哲

木ノ村 幸士

大成建設(株) 技術センター

フェロー会員

坂本 淳

太平洋セメント(株) 中央研究所

正会員

前堀 伸平

宮本 昌周

小川 洋二

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。本報は、この施工システムの現場適用を視野に、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を目的として実験的に検討したものである。まず、前段として4つの要求性能を兼ね備える配合を検討し、各種フレッシュ性状試験²⁾および本システムを用いた積層試験³⁾を実施した。本報では両結果を整理することで流動保持性および自立安定性の品質管理手法の提案を試みた。

2. 簡易品質管理手法の提案

2.1 流動保持性

材料の流動保持性は、積層中のノズルからの材料抽出を定常に保つために必要な要求性能である。本報では、攪拌/静置状態に着目して各種フレッシュ性状を整理し、流動保持性の品質管理を試みた。フレッシュ性状試験の概要および結果は前報²⁾にて述べたとおりである。なお、攪拌状態は経時変化の測定直前に練返しを行ったものを示し、静置状態は前回測定時から気中にて静置し続けたものを示す。ただし、静置状態のゴム硬度測定用試料は練り上がり直後に成形し、一度測定に用いた試料は再使用しないものとした。

15 打モルタルフロー（以下、モルタルフロー）（図-1）は、配合Fにおいて注水20分まで、配合N1～N3において注水90分まで一定である。この時間範囲において、攪拌状態のゴム硬度（図-2）、および攪拌状態のベーンせん断強さ（図-3）も一定である。3つのフレッシュ性状はいずれも攪拌状態であり、これらに相関関係があることから、流動保持性は攪拌状態のフレッシュ性状によって確認できる可能性がある。したがって、実施工の材料受入れ時における流動保持性の確認では、より簡便に測定可能な攪拌状態のゴム硬度およびベーンせん断強さによって代替できる可能性がある。

2.2 自立安定性

（1）モルタルフローおよび塑性粘度による確認

ここでは、既往の研究で実施したモルタルフローによる確認¹⁾に加え、各種フレッシュ性状試験²⁾に基づき、塑性粘度および降伏値を用いた確認を試みた。いずれのパラメータとも、経時20分の値を用いた。図-4(a)より、同一材料を用いてW/Bのみ異なる配合N1, N2およびN3では、モルタルフローが大きいほど積層可能高さが低下した。しかし、配合Fはモルタルフローが比較的大きいが、積層可能高さは配合N1の2倍以上であり、強度発現特性が異なるとモルタルフローによる積層可能高さの整理が困難であることが分かる。この傾向は、図-4(b)～(c)より、塑性粘度および降伏値と積層可能高さの関係でも同様であった。結合材種類の異なる既往の研究¹⁾でも、モルタルフロー180mm程度の材料の積層可能高さが200mmを超えており、結合材種類が異なるとモルタルフローによる積層可能高さの整理

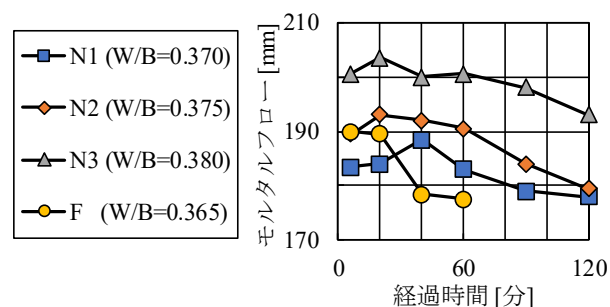


図-1 モルタルフロー

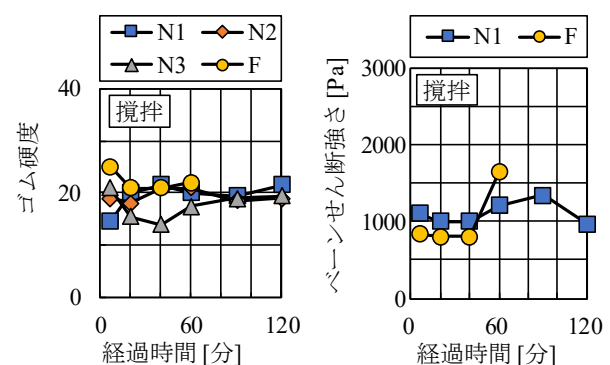


図-2 ゴム硬度(攪拌) 図-3 ベーンせん断強さ(攪拌)

キーワード 3D Printing, 品質管理, 自立安定性, 流動保持性, ゴム硬度, ベーンせん断強さ

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

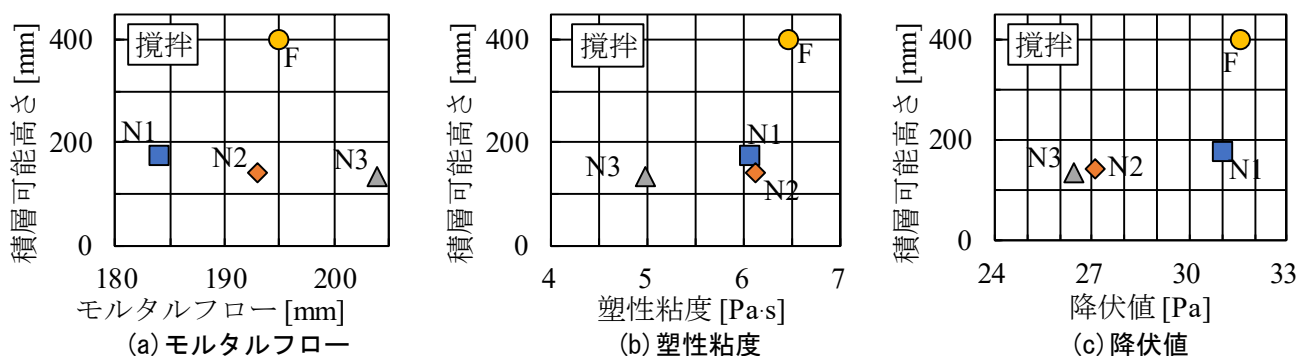
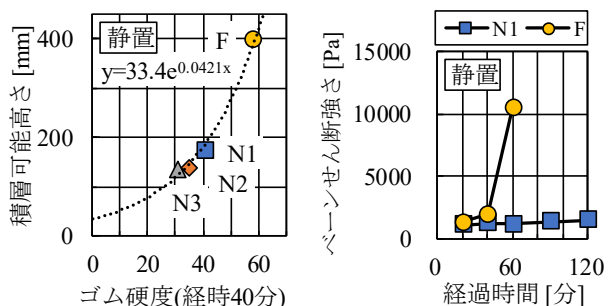


図-4 各項目と積層可能高さの関係（経時 20 分）



が困難であることが分かる。すなわち、攪拌状態のフレッシュ性状では積層可能高さを予測することが困難であることが推察される。

(2) 静置状態のゴム硬度による確認

静置状態のゴム硬度を用いて自立安定性の確認を試みた。最も積層高さが高い配合 F は、注水 20 分後に積層開始し、約 20 分間で積層完了していることから、検討には経時 40 分の静置状態のゴム硬度の値を用いた。図-5 より、静置状態のゴム硬度と積層可能高さには相関関係があることが分かる。グラフ上には、参考までに、指数関数の近似曲線を示した。しかし、今後結合材種類や強度発現特性の異なる配合において、同様の相関関係が成立するかに関しては検討する余地があり、更なるデータの蓄積が必要である。

(3) 静置状態のベーンセン断強さによる確認

積層試験³⁾において、積層体の崩壊は自重によって下部が降伏して崩壊に至ったことから、一軸方向の圧縮破壊によって崩壊したと仮定して理論積層可能高さの算出を試みる。図-6 に静置状態のベーンセン断強さを再掲する²⁾。確認にはゴム硬度と同様に経時 40 分後のベーンセン断強さ τ_b を用いることとした。ベーンセン断強さ τ_b は軟弱な粘土地盤の非排水せん断強度に相当するため、ベーンセン断強さ τ_b から理論積層可能高さ h' を式(1)によって算出する。なお、材料の密度 ρ は 2200 kg/m³、重力加速度 g は 9.81 m/s²を用いた。

表-1 理論積層可能高さとの関係

配合	N1	F
静置ベーンセン断強さ(経時 40 分) τ_b (Pa)	1204	1973
理論積層可能高さ h' (mm)	112	183
積層可能高さ h (mm)	175	400
h/h'	1.57	2.19

表-2 簡易な品質管理手法（案）

要求性能	品質管理手法（案）
流動保持性	攪拌状態のモルタルフロー、ゴム硬度およびベーンセン断強さにより管理できる可能性がある。
自立安定性	静置状態のゴム硬度およびベーンセン断強さによって管理できる可能性がある。

$$h' = \frac{2\tau_b}{\rho \cdot g} \quad (1)$$

得られた理論積層可能高さ h' と実測した積層可能高さ h との関係を表-1 に示す。積層可能高さの理論値に対する実測値の比を示す h/h' は配合 N1 で 1.57、配合 F で 2.19 であった。図-6 より、配合 F は静置状態のベーンセン断強さ τ_b が急激に増大する傾向があるため、積層可能高さ h' の予測は難しいことが推察される。

3. まとめ

本報では、これまで実施してきた検討²⁻³⁾を通じて、流動保持性および自立安定性について実験的に検討し、現場施工時に簡易に品質管理可能な試験方法（表-2）を提案した。今後、更にデータを蓄積し、妥当性について検証する。

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) 木ノ村幸士ら：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，第 74 回土木学会年次学術講演会講演概要集，2019。（投稿中）