

3D プリンティングに用いる繊維補強セメント複合材料の積層性評価

清水建設(株) 正会員 ○阿部 寛之, 小倉 大季, 田中 博一

1. はじめに

近年, 海外を中心に建設スケールの 3D プリンティング技術の研究開発が進められている。これらの技術のうち, 最も検討が進んでいるのは, 層ごとにセメント系材料を積層して部材を施工する技術(材料押出し方式)である。本技術は, 自由な形状の部材を作製できるだけでなく, コンクリート構造物の自動化施工への展開も見込まれ, 様々な可能性が期待できると考えられているが, その実現には, 施工プロセス上, 鉄筋の配筋が難しいという課題を解決する必要がある。

そこで筆者らは, 鉄筋の代替となる補強法の一つとして繊維補強セメント複合材料を用いる方法を提案し, プリント材料に適した配合の開発に取り組んでいる。本論では, 開発した配合の積層性や形状保持性を評価するために行ったフロー試験, レオロジー試験ならびにプリント試験の結果を紹介する。

2. 試験概要

2. 1 配合および使用材料

本研究で使用したモルタルの配合を表-1に示す。配合は水結合材比(W/B)を 0.22 として, 繊維混入率を 2.0, 1.5, 1.0vol% の 3 水準とした。結合材 B 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, 石灰石微粉末を用いた。細骨材 S には最大粒径 1mm の珪砂を用いた。混和剤には高性能減水剤(ポリカルボン酸系)と消泡剤を使用した。繊維には, 長さ 6mm, 直径 12 μ m のポリエチレン繊維を用いた。練混ぜには容量 50L の二軸強制練りミキサーを使用し, 材料を投入して 6 分間練り混ぜて排出した。

2. 2 試験項目

本研究の試験項目を表-2に示す。フロー試験は, 練上がりから 5, 60 分後に, JIS に準拠した方法で行った。

レオロジー試験は, 図-1 に示す平行板粘度計を用いて行った。この粘度計は, リニアブッシュによって載荷板が上下に摩擦なく移動できる機構になっている。載荷板などの自重は定滑車を介したカウンターウェイトで相殺し, 試料に負荷する荷重は別途重り載せることで調整した。試料は, 内径 50mm, 高さ 50mm の型枠にモルタルを詰め後, 直ちに型枠を引き抜くことで作製し, 試験の開始まで所定の時間, 気中で静置した。静置時間 t は, 1, 15, 30, 60, 90 分と変動させた。重りは 1 分毎に 300g ずつ追加していき, 合計で 3kg を載せた時点で試験を終了した。試料の変形量(鉛直変位)は, レーザー変位計で計測した。なお, 最終的に試料に作用させた荷重 3kg は, この試料を高さ 700mm 程度まで積層したときに, 最下面に発生する自重に相当する。

プリント試験は, 図-2 のようにノズルからモルタルを連続的に押し出して, 幅 600mm, 奥行き 60mm の壁状に材料積層する方法で行った。ノズルの移動速度は 30mm/秒(1 層のプリント時間: 約 45 秒)で一定として, 1 層のプリントが終了後に, ノズルを鉛直方向に 8mm 上昇させ, 次の層に移行するように自動制御した。プリント開始は, 実際の現場での施工を想定して, 材料の練上がりから 60 分後とした。なお, 40 層をプリントするために要す

表-1 モルタルの配合

配合	W/B	S/B	繊維混入率(vol%)
A	0.22	0.4	2.0
B		0.5	1.5
C		0.5	1.0

表-2 試験項目

試験項目	試験方法	備考
フロー試験	JIS R 5201 に準拠	練上がりから 5, 60 分後に測定
レオロジー試験	平行板粘度計を使用	試料の成形後から試験開始までの静置時間 t : 1, 15, 30, 60, 90 分
プリント試験	図-2 参照	プリント速度: 30mm/sec 試験終了: 積層物が崩壊した時点

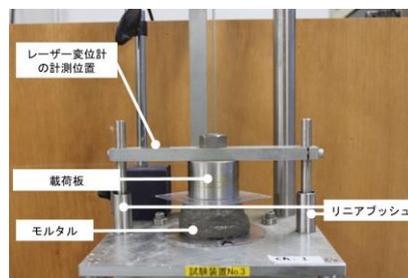


図-1 平行板粘度計



図-2 プリント装置

キーワード: 繊維補強セメント複合材料, 3D プリンティング, 付加製造, コンクリートプリンティング

連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL03-3820-5924

る時間は約 30 分であり、1 層目と 40 層目の材料では空中での静置時間に 30 分近くの差が生じることになる。レオロジー試験で静置時間 t を変動させたのはこのためである。

3. 試験結果

フロー試験の結果と空気量を表-3 に示す。繊維混入率が大きい配合ほど、フロー値および空気量は小さくなる傾向が認められた。また、練上がりから 60 分後の値は、5 分後よりも若干小さくなった。

配合 A と B の平行板粘度計の結果を図-3、図-4 に示す。両配合ともに、試験前の静置時間 t が長いほど変形量が小さくなる傾向が認められた。これは、試料の表面が乾燥して、こわばりが形成されたことが影響していると推察できる。配合による差異は、静置時間が短い場合に顕著に認められ、配合 B のほうが配合 A よりも変形量が大きい。一方、静置時間が 30 分より長い場合は、配合の違いに伴う差異が小さくなった。

プリント試験の状況を図-5 に示す。配合 A は高さ 368mm (46 層) まで、配合 B は高さ 312mm (39 層) まで積層できたが、その後、形状を保持することができず、崩壊に至った。この崩壊挙動は、上層からの自重によって積層後の材料が変形していき、造形物の重心がずれたことに起因すると推察された。より高く積層できた配合は、フロー値と平行板粘度計で計測された変形量が小さかったことから、積層可能高さをこれらの試験の結果から推測できる可能性があるといえる。なお、他の配合と比べてフロー値が大きかった配合 C については、形状保持性が低く、材料を適切に積層することができなかった。

4. おわりに

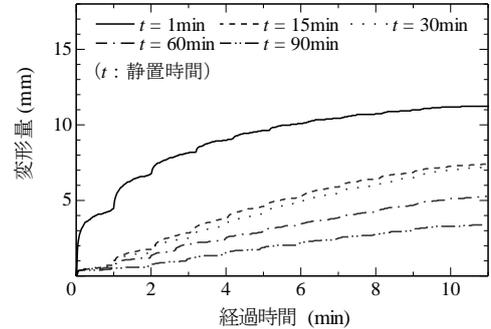
本研究では、フロー試験、平行板粘度計を使用したレオロジー試験ならびにプリント試験から、3D プリンティングに用いる繊維補強セメント複合材料の積層性や形状保持性を評価した。その結果、繊維混入率の最も大きい 2.0vol% の配合は形状保持性が良好であり、368mm の高さまで積層できることが確認された。今後は、フロー試験や平行板粘度計の結果と積層可能高さの関係をより詳細に検討し、積層可能高さを向上できる材料を検討する予定である。

参考文献

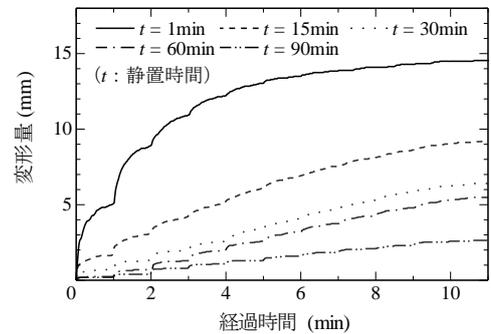
- 1) 小倉大季：建設スケールの 3D プリンティング技術に関する海外の研究動向，コンクリート工学，Vol.56, No.2, pp.174-180, 2018.

表-3 フロー値と空気量

配合	練上がりから 5 分後		練上がりから 60 分後	
	フロー値 (mm)	空気量 (%)	フロー値 (mm)	空気量 (%)
A	135	2.4	129	2.0
B	140	2.9	139	2.5
C	165	6.0	164	4.9

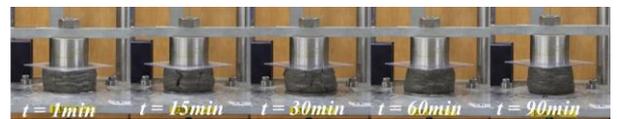


(a) 配合 A

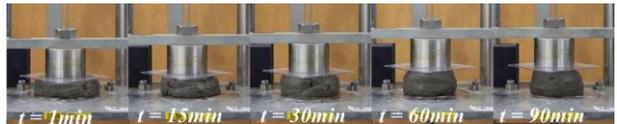


(b) 配合 B

図-3 平行板粘度計で計測した変形量



(a) 配合 A



(b) 配合 B

図-4 静置時間 t と試験後の変形形状の関係



(a) 配合A:46層

(b) 配合A:47層



(c) 配合B:39層

(d) 配合B:40層

図-5 プリント試験状況