

建設用 3D プリント積層材料におけるレオロジー特性に関する基礎的研究

ライフサイクル工学分野
市川優希

建設用 3D プリント レオロジー特性 チキソトロピー
積層造形 省コスト

1. はじめに

国内の建設業における就業者数は減少傾向にあり、工事現場では作業員が足りない状況も発生している¹⁾。そのような状況下において、建設用3Dプリンタ（以下3DCP）が注目されている。3DCPには、省人化、工期短縮、環境配慮など多くの利点がある²⁾。しかし、現状では積層材料に関する明確な基準がなく、その適性の評価や判断は難しい。市販の工具等を用いて3DCPを小型で再現した卓上3DCPによる小規模な積層体の造形、試験体を作製する提案³⁾があり、プレミックス材料の積層体の造形および試験体の作製に成功した。その一方で3DCPを保有し、積層材料の開発が可能な企業はその詳細な調合を公にしておらず、プレミックス材料等の購入の際には企業が提示する価格を受け入れるしかない。

これらの背景から、既に広く普及している材料を用いて積層材料に適するレオロジー特性を持つ材料の調合検討を行う。また、その材料の性能評価するため、フロー試験、圧縮試験、に加え、卓上3DCP³⁾で作製した試験体から独自の評価を試みる。

2. 3DCP積層材料に求められる性質

積層材料には良好な「押出性」と「自立性」が求められる²⁾。特殊な粘度特性を示す物質の流動を扱う分野であるレオロジー⁴⁾において、これらの相反する性質としてチキソトロピー性がある。チキソトロピー性とは、せん断力が加わり続けると粘度が低下し、せん断力が消失すると粘度が増大す

る性質である⁵⁾。しかし、チキソトロピー性の評価方法は確立されていないが、フロー試験による積層材料の適正評価⁶⁾や、動的降伏応力、静的降伏応力の関係から評価する方法もあるが、本研究では独自の評価も加えている。

このチキソトロピー性の付与方法として、粉体の増粘剤や、微細繊維の水分散水溶液の添加を検討した。

3. 実験概要

3.1 使用材料と調合

普通ポルトランドセメント(C)、珪砂6号(S6)に加え、チキソトロピー性を付与する会合型増粘剤(T)、微細繊維のマイクロファイブシルセロース(MFC)、高性能減水剤(SP)を混和材料として用いた。積層材料の調合を表1に示す。

3.2 フレッシュ性状、力学性能

フレッシュ性状評価としてフロー試験(JIS R 5201)を行った。また、圧縮試験(JIS A 1108)を行った。材齢は7日、28日とした。既往の研究³⁾より圧縮強度は積層体から切り抜いたものと打込み試験体で大きな差異は見られないことが確認されている。

3.3 積層体の作製

オムニミキサーを使用して材料を練り混ぜたのち、卓上3DCPを用いて1層あたり幅35 mm、長さ200 mm、高さ12 mmを目標に10層分の積層を行う。積層は材料の練り混ぜ後5分から15分の間に行う。ドリルの回転速度を計測し100~120 rpmを保つようにして練り混ぜ後10分、20分、30分経過時点の電圧を計測する。電圧は25 Vを最大とし、それ以上のものは押出不可能とした。

積層体硬化後、積層体を4等分し、異なる3つの断面から下記の式(1)を用いて算術平均粗さRa(JIS B 0601)をそれぞれ求め、その平均から積層幅の安定性を比較した。

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

ここで、Ra: 算術平均粗さ (mm)、l: 基準長さ (mm)、f(x): 粗さ曲線 (積層幅と積層幅平均の差) である。

Raは積層体の最下面からの高さ50 mm~100 mmの部分から算出した。また、断面から最下層の幅の平均を測定し、試験体ごとに比較した。

4. 実験結果と考察

図1にM5TSPの積層体、図2にその断面を示す。

表 1

シリーズ	wt. %							
	C	S6	W	MFC	T	SP		
C-20	100	200	50					
C-15	100	150	50					
T	100	150	50		0.3			
M5T				0.005	0.3			
M15T				0.015	0.3			
M50T				0.05	0.3			
TSP						0.3	1	
M5TSP					40	0.005	0.3	1
M15TSP						0.015	0.3	1
M50TSP						0.05	0.3	1



図1 積層体

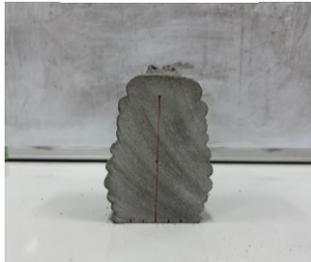


図2 積層体断面

表 2

シリーズ	フロー値 [mm]	
	0 打	15 打
C-20	100	152
C-15	115	256
T	104	161
M5T	105	170
M15T	102	162
M50T	101	151
TSP	113	176
M5TSP	109	177
M15TSP	104	157
M50TSP	105	149

表 3

シリーズ	電圧 [V]			自立性評価	
	10 分	20 分	30 分	Ra [mm]	最下層幅 [mm]
C-20					
C-15	12	12	14		
T	15	17	18	6.58	70.67
M5T	12	14	18	5.00	74.67
M15T	19	20	21	10.30	76.33
M50T	18	20	21	7.78	66.67
TSP	12	13	14	10.39	72.33
M5TSP	16	18	18	6.13	68.00
M15TSP	18	18	19	8.54	88.67
M50TSP	16	18	19	9.08	63.33

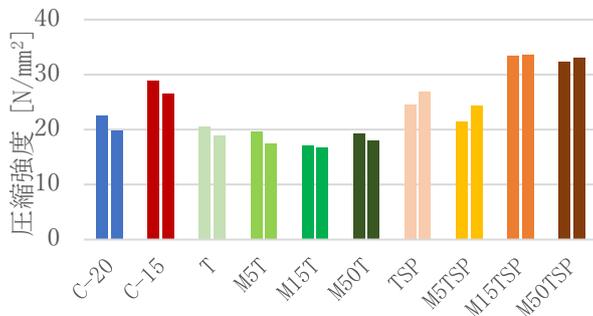


図3 圧縮強度

4.1 フロー試験

フロー試験結果を表2に示す。既往の研究⁷⁾より0打フローが115±15 mm、15打フローが170±20 mmの範囲である場合、良好な積層ができることが確認されており、C-15以外のフロー値はおおむねその範囲にあることが確認できた。

4.2 押出性、自立性

押出性を評価するための電圧、自立性を評価するための算術平均粗さを表3に示す。C-20以外の積層体に関しては本実験の最高電圧である25 V以下の電圧での押出が可能であった。C-20に関しては25 Vで押出せなかった。

電圧が小さいほど押出性が良いと判断すると、30分経過時点での電圧が14 VであるC-15、TSPが押出性の良い調合であると言える。その一方で、自立性評価ではC-15が積層後に転倒してしまい、自立性がないと判断した。フロー値も既往の研究⁷⁾の範囲外であり、妥当な判断であると言える。また、TSPに関しては算術平均粗さが最大であり、他の積層体より自立性が高いとは言えないと判断した。

上記以外の調合では押出の電圧に大きな差はみられなかった。また、算術平均粗さと最下層の幅に強い関係はみられなかった。

4.3 圧縮試験結果

圧縮試験結果を図3示す。各調合左のグラフが材齢7日、右のグラフが材齢28日の圧縮強度である。押出性、自立性を評価できたもののうち高性能減水剤を用いた調合では標準耐久設計基準強度を満たしており、中でもMFCを0.015%以上混和したものの強度が高いことが確認された。

普通モルタルに増粘剤を添加すると圧縮強度が下がるが、微細繊維の混和によって圧縮強度の向上がみられた。このことから増粘剤添加が圧縮強度の低下を引き起こすと考えられる。

5. まとめ

広く普及する材料に混和材料を用いて積層材料に適したレオロジー特性を持つ材料の調合検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 普通モルタルに混和材料を用いることで積層材料に適するレオロジー特性の付与が可能であった。
- 2) 圧縮試験においてもコンクリートの標準耐久設計基準強度である24 N/mm²を満たす調合が得られた。

[参考文献]

- 1) 建設3Dプリンティング技術の現状と今後の可能性：
<https://www.shimz.co.jp/company/ir/pdf/240327.pdf> (閲覧日：2025年1月12日)
- 2) 石田哲也ら, コンクリート工学, Vol.58, No.1, pp.45-51, 2020
- 3) 田崎悠斗ら, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, [1] pp.2077-2082, 2024
- 4) 鈴木洋ら, J.Jpn.Soc.Colour Mater., 84 [2] pp.47-51, 2011
- 5) 前田周磨ら, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1630-1635, 2023
- 6) 三浦大樹ら, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, pp.197-202, 2020
- 7) 前堀伸平ら, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1373-1378, 2021