

建設用 3D プリンタの施工性を考慮したモルタルのフレッシュ性状評価に関する検討

千葉工業大学 学生会員 ○青田 和輝
千葉工業大学 学生会員 大野 優希
千葉工業大学 石井 希

千葉工業大学 正会員 橋本 紳一郎
(株)Polyuse 正会員 鎌田 太陽

1. はじめに

建設業界は労働者人口の不足や生産性向上の観点から、建設用 3D プリンタの実用化が期待されている。建設用 3D プリンタ用モルタルには、通常の現場施工とは異なり、圧送性や充填性（流動性）に加えて形状安定性や自立性などの積層性が求められる。

材料押出方式の建設用 3D プリンタの製造では、押出性（圧送性）と積層性の両方の性状の確保が重要となる。圧送性を重視した流動性の高いモルタルの配合では積層が困難となり、積層性を確保のためモルタルの流動性が低い配合や高粘性の配合を使用した場合は、ノズル先端の移動に併せて常に変形するフレキシブルホースによって圧送が不安定または閉塞が生じる場合もある。これらに対して建設用 3D プリンタの製造と配合、配合の評価手法に関しては様々な検討が報告されているが、配合を簡易的に評価する手法の検討は少ない。

本検討では、圧送性と積層性の両方を満足する配合を検討すると共に、実際の建設用 3D プリンタにて試験体を作成・評価し、フレッシュモルタル性状試験と実施工の関係及び配合の簡易評価手法について検討した。

2. 実験概要

2.1 モルタルの材料および配合、試験方法

本検討で使用した材料を表-1、モルタルの配合条件を表-2 に示す。配合は、単位粉体量 (P) と単位水量 (W) を変化させた計 5 配合で検討した。混和剤には主に高性能減水剤 (SP) を固定量で使用し、単位水量 (W) の違いにより各配合のフレッシュ性状の違いを評価した。モルタルの製造は、ホバート型ミキサを使用し、水と混和剤以外の材料を容器に全て投入して 30 秒間練混ぜ、水と混和剤を入れて 60 秒間の練混ぜを行った。

フレッシュ性状試験として、モルタルフロー試験 (JIS R 5201)、ミンスランプ試験 (JIS A 1171)、空気量試験 (JIS A 1171) に加え、既往の研究²⁾を参考にベーンせん断試験を行った。強度試験として、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、割裂引張強度試験 (JIS A 1113) を行った。

2.2 実機試験

実機による検証では、φ200mm の円筒試験体を製造した。円筒状にモルタルを積層し、管内圧力と限界積層数を計測することで、圧送性・積層性の評価を行った。ここに、限界積層数は吐出されたモルタルの層を目視評価し、積層が崩れた時点の層数と定義する。管内圧力

表-1 使用材料

種類	記号	物性等
練混ぜ水	W	上水道水、密度：1.0g/cm ³
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度：3.16g/cm ³
細骨材	S	珪砂 4 号、密度：2.63g/cm ³
混和材	SF	シリカフューム、密度：2.63g/cm ³ 、比表面積：2 000 000cm ² /g
	BS	高炉スラグ微粉末、密度：2.91g/cm ³ 、比表面積：8 000cm ² /g
	CSA	膨張剤、密度：3.05g/cm ³
混和剤	U	尿素、密度：1.335g/cm ³
	T	収縮低減剤、アルキレンオキシド系
	SP	高性能減水剤、ポリカルボン系
繊維	F	ポリアミド系繊維、繊維長：10mm、密度：1.14g/cm ³

表-2 モルタルの配合条件

配合 No.	W/P (%)	目標フロー (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)	
				W	P
1	23.5	115±20	4.5±1.0	323	1053
2	25.1			346	
3	26.8			369	
4	28.5			392	
5	30.1			415	

表-3 モルタル試験結果

配合 No.		1	2	3	4	5
ミンスランプ (cm)		3.0	5.5	7.0	10.0	11.0
フロー (mm)	0 打	102.0	105.0	116.0	122.5	132.5
	15 打	119.5	127.5	145.5	151.5	163.5
	変化率	1.17	1.21	1.25	1.24	1.23
空気量 (%)		4.7	4.1	4.3	3.8	4.7
ベーン最大せん断応力 (kPa)		9.40	4.23	3.39	1.79	1.08
圧縮強度 (N/mm ²)		41.5	40.7	39.6	38.6	36.1
引張強度 (N/mm ²)		4.15	4.08	3.28	3.18	3.13

は材料押出方式の建設用 3D プリンタの機器根元圧力を計測した。なお、実機による検証では、No.2～4 の 3 配合で検討した。

3. 実験結果および考察

モルタル試験の結果を表-3 に示す。本検討は、水粉

キーワード 建設用 3D プリンタ、フレッシュ性状、圧送性、積層性、ベーンせん断試験
連絡先 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1 千葉工業大学 TEL047-478-0445

体比（単位水量）のみを配合要因としており、硬化後の圧縮強度は 35～40N/mm² 程度、引張強度は 2.9～4.0N/mm² 程度の範囲にあった。フレッシュ性状に関しては、フローの変化率は各配合によって大きな違いはみられず、空気量は同程度であった。ミニスランプ及びフローの値は水粉体比とともに大きくなり、ベーン最大せん断応力もこれに比例する傾向となった。これらの結果とフレッシュ性状を目視判定し、配合 No.1 は圧送性が悪く、閉塞危険性もあると判断し、配合 No.5 は圧送可能であるが、明らかに積層性が悪いと判断し、実機試験は配合 No.2 から No.4 で実施することとした。

実機試験の結果を表-4 に示す。圧送性に関して、各配合で管内圧力は 1.5～3.0MPa であり、圧送圧自体の乱れもなく、目視でもノズル先端から吐出されるモルタルの状態は安定していた。積層性に関して、各配合で限界積層数は 9～59 層と大きく異なり、配合 No.4 は目視による積層状態の確認で各層の出来形状態から判断して、積層性の困難な配合であると判断した。以上から、対象とする構造物とその積層する速度にもよるが、本検討範囲では管内圧力は 3.0MPa 程度までであれば、圧送性と積層性を十分に確保できると考えられる。

コンクリートのスランプ試験と同様に、ワーカビリティの変形性の一評価であるミニスランプとフローだけでは、圧送性や積層性などの製造・施工性を評価するのは困難である。そこで、ベーン最大せん断応力を主として、実機試験の結果を評価した。図-1 にベーン最大せん断応力と管内圧力の関係、図-2 にベーン最大せん断応力と限界積層数の関係、ベーンせん断試験による圧送性と積層性の評価を表-5 に示す。ベーン最大せん断応力と管内圧力及び限界積層数には、高い相関があることが分かる。限界積層数に関しては、配合 No.2 と No.3 で積層数の違いが大きいため、今後も詳細な検討は必要であるが、圧送性と積層性の可否を判断する 1 つの評価手法としてベーン最大せん断応力は有効であると考えられる。また、ベーン最大せん断応力の閾値として、本検討範囲ではあるが、3.0～4.0KPa 程度であれば、良好な圧送性と積層性を確保できることが示唆された。

4. まとめ

建設用 3D プリントで製造に関する検討について、機器根元の管内圧力が 3.0MPa 程度までが有効であり、それら良好な圧送性と積層性を確保できる配合の評価として、ベーン最大せん断応力の値が 3.0～4.0KPa 程度を本検討範囲での閾値として設定した。

参考文献

1) 日本コンクリート工学会編：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

2) 重本憂大：こわばり低減剤を用いたフレッシュモルタル及びコンクリートの諸性状に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演会，vol.77，V-119，2022

表-4 実機試験結果

配合 No.	2	3	4
管内圧力 (MPa)	3.0	2.0	1.5
圧送性	悪 ← → 良		
限界積層数 (層)	59	23	9
積層性	良 ← → 悪		
様子			

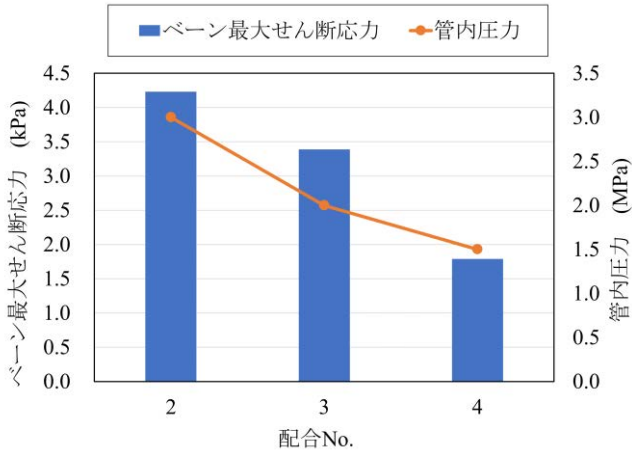


図-1 ベーン最大せん断応力と管内圧力の関係

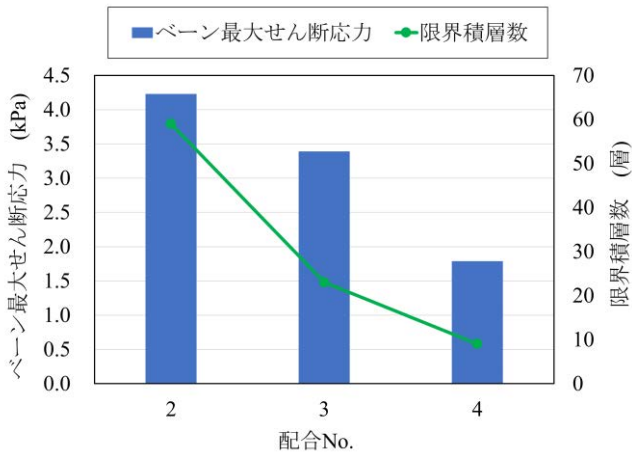


図-2 ベーン最大せん断応力と限界積層数の関係

表-5 ベーンせん断試験による評価

配合 No.	2	3	4
ベーン最大せん断応力 (kPa)	4.23	3.39	1.79
圧送性	悪 ←		→ 良
積層性	良 ←		→ 悪