

# 建設 3D プリンティング材料の品質評価に関する実験的検討

張 文博\*<sup>1</sup>・村田 哲\*<sup>2</sup>・木ノ村 幸士\*<sup>1</sup>

Keywords : 3D printing, fresh property, vane shear strength, pumpability, mortar flow

3D プリンティング, フレッシュ性状, ベーンせん断強さ, ポンプ圧送性, モルタルフロー

## 1. はじめに

建設 3D プリンティング (以下, 3DP) 技術は, 型枠不要で遠隔操作が可能であり, さらに複雑な曲面にも簡易に対応でき, 建設業において生産性向上やコストの削減などが期待できる。近年, 特に材料押し積層方式の 3DP 技術に関する事例がしばしば報告されている<sup>1),2)</sup>。

このような技術では, 従来技術より優れた箇所があるものの, 材料への要求性能が高くなるのが実状である。既往文献<sup>2)</sup>によると, 当該材料は以下 4 つの要求性能を兼ね備える必要がある。即ち, (a) 良好なポンプ圧送性; (b) 定常的な押し出しに必要な流動保持性; (c) 自立安定性; (d) 形状保持性である。ここで, (c) 自立安定性について, 本研究ではノズルから排出された材料 (以下, 「フィラメント」と記す) が自重により変形しないことと定義する。(d) 形状保持性とは, 既存フィラメントの上に積層してもその形状を維持できることである。

3DP 技術では, 積層中に十分な締固めができないため, フィラメントの緻密性あるいは隣り合うフィラメント間の接着は材料によって異なると考えられる。そのため, 施工プロセスにおける材料のフレッシュ性状の制御は, 構造体の力学特性および耐久性などを保つために肝要である。

これまで筆者らは, 上記の要求性能に適したセメント系材料を開発してきた<sup>3)</sup>。本稿では, 現場施工における材料品質の簡易評価指標の提案を目的に, 各種評価試験法の有効性を検証した。まず, 積層材料の流動保持性, 積層後の自立安定性と形状保持性を評価する目的で, 材料の存置状態を変化させ, モルタルフロー, 凝結時間, およびベーンせん断強さの各試験を実施した。次に, ポンプ圧送性を評価することを目的で, ポンプ圧送試験を実施した。施工中において吐出の待機やトラブル発生などによりポンプ圧送が一時停止する場合, 高チキソトロピー性<sup>注1)</sup>の材料が配管中に停滞することで急速にこわばり, 圧送再開ないし圧送効率に支障をきたす可能性があるため, 上記を踏まえたポンプ圧送試験を実施した。圧送試験中には材料特性の変化を把握するためベーンせん断試験を合わせて実施した。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料および配合

使用した配合を表-1 に示す。施工現場での積層を想定し, 10, 20 および 30℃の環境温度に適用する 3 パターンの配合を選定した。使用した結合材 (P) は, 初期の反応性を高めた速硬性を有するセメントであり, 密度 3.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3,970 cm<sup>2</sup>/g である。細骨材には,

表-1 3D プリンティング材料の配合  
Table 1 Mix proportions for 3D printing materials

| 適用温度 | W/P (%) | S1/P (%) | S2/P (%) | V/P (%) | 外割添加量(P×%) |      |      | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |    |
|------|---------|----------|----------|---------|------------|------|------|-------------------------|-----|-----|-----|----|
|      |         |          |          |         | SP         | De   | Re   | W                       | P   | S1  | S2  | V  |
| 10℃  | 37      | 120      | 60       | 5       | 0.20       | 0.20 | 0.65 | 264                     | 713 | 856 | 428 | 36 |
| 20℃  | 37      | 120      | 60       | 5       | 0.20       | 0.20 | 0.90 | 264                     | 713 | 856 | 428 | 36 |
| 30℃  | 37      | 120      | 50       | 5       | 0.20       | 0.20 | 1.20 | 271                     | 732 | 879 | 366 | 37 |

\* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

\* 2 横浜支店 土木工事作業所

砕砂 (S1) および微粉末 (S2) を併用している。砕砂 (S1) の密度は  $2.71\text{g/cm}^3$ 、最大粒形は  $2\text{mm}$ 、粗粒率は  $2.86$  である。微粉末 (S2) は、密度  $2.71\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $8160\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $45\mu$  残分  $4.0\%$  のものを使用した。混和剤には水溶性の分離低減剤 (V) (密度  $1.32\text{g/cm}^3$ )、ポリカルボン酸系高性能減水剤 (SP)、消泡剤 (De) およびオキシカルボン酸系の凝結遅延剤 (Re) を用いた。また、 $20^\circ\text{C}$  配合をベースにして凝結遅延剤 (Re) や微粉末 (S2) の使用量を微修正することで  $10^\circ\text{C}$  と  $30^\circ\text{C}$  の配合を作成した。

## 2.2 試験内容および試験方法

表-1 に示す 3 配合を用い、それぞれ  $10$ 、 $20$ 、 $30^\circ\text{C}$  の恒温恒湿室 ( $70\%RH$ ) にてモルタルフロー、ベーンせん断、凝結時間試験を行った。また、ポンプ圧送試験は  $20^\circ\text{C}70\%RH$  の環境下のみで実施した。材料の練混ぜには JIS R 5201 に規定されるミキサを用い、上記粉体を低速 15 秒空練りし、注水後に低速 2 分練り混ぜ、かき落としの後、低速で更に 2 分練り混ぜた。

### 2.2.1 モルタルフローと凝結時間試験

モルタルフロー試験は JIS R 5201 に準拠し、フローコーンを取り去った直後に測定したフロー値を 0 打、15 秒間に 15 回の落下運動を与えた後に測定したフロー値を 15 打フローとした。後述するベーンせん断試験のケース (a) に併せて 30 分間隔で両フロー値を測定した。フロー試験を練混ぜ直後以外に行う際は、測定直前にホバートミキサで低速 20 秒の練返しを行い、再攪拌した試料を試験に供した。なお、凝結時間の測定は、JIS A 1147 に準拠して各温度環境下で実施した。

### 2.2.2 ベーンせん断試験

実際の積層では、材料が徐々に消費されていくため、練り上がりから 1 時間程度材料が静置されるケースも想定される。そこで、材料の静置時間をパラメータにして図-1 に示す条件でベーンせん断試験を実施した。試料の攪拌時期が異なる 4 パターンの試験を実施した。

(a) 30 分ごとに再攪拌；(b) 再攪拌せず静置を継続；(c)、(d) 30 分または 60 分まで静置し、それから再攪拌したケースである。ここでの時刻はすべて注水してからの経過時間である。また、試験は地盤工学会基準 JGS 1411-012 に規定されている「原位置ベーンせん断試験方法」<sup>4)</sup>を参照し、せん断強さの最大容量が  $16.2\text{kPa}$  を有する押し込み式ベーンせん断試験機を使用した。安定した結果を得るために、挿入後のベーン先端の深さは、試料表面からベーン直径の 4 倍とし、ベーンの回転速度は毎秒  $15^\circ$  と統一した。ベーンせん断強さは、試料内における異なる箇所にてブレードを押し

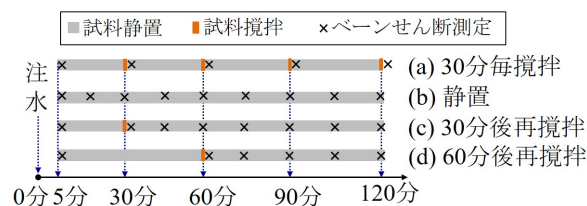


図-1 ベーンせん断試験計測条件

Fig.1 Measurement contents of vane shear test

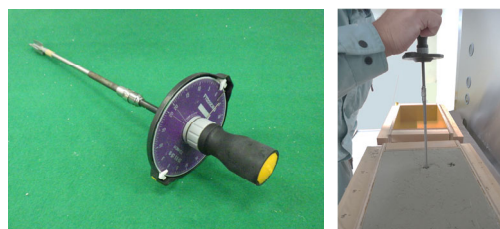


写真-1 ベーンせん断試験機とその計測風景

Photo.1 Vane shear testing device and the measurement scenery

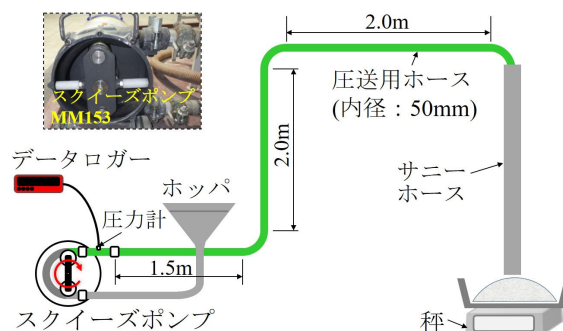


図-2 ポンプ圧送試験の概要

Fig.2 Outline of the device in the pumpability test

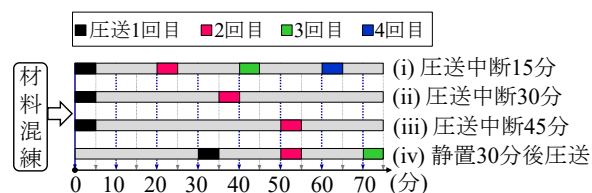


図-3 ポンプ圧送試験計測条件

Fig.3 Measurement contents of pumpability test

込んで回転させた際の 3 回の回転抵抗の平均値より算出した (写真-1)。

### 2.2.3 ポンプ圧送試験

ポンプ圧送試験の概要を図-2 に示す。既往の研究で用いた建設用 3DP システム<sup>3)</sup>のポンプ圧送部分を参考に、水平と垂直方向の圧送距離をそれぞれ  $3.5\text{m}$  と  $2.0\text{m}$  にし、直角カーブを三箇所設けた。ポンプは最大理論吐出量  $13\text{L}/\text{min}$  のスクイズ方式であり、その吐出口近傍に圧力計を装着して吐出圧力を計測した。ホースは内径  $50\text{mm}$ 、許容圧力  $1.5\text{MPa}$  のものであった。また、ポンプの圧送量を確認するため、サニーホースの

筒先にて排出した試料を受け取って秤によってその累積質量の経時変化を記録した。

試験内容は実施工の状況を考慮して図-3 に示す 4 ケースとした。ケース (i) ~ (iii) では試料が練り上がってからすぐに圧送を開始し、圧送途中にポンプをそれぞれ 15 分, 30 分, および 45 分間一旦停止した。また、ケース (i) では併せて 4 回圧送を行った。ケース (iv) では、試料が練り上がってから予め 30 分間静置した後圧送し、その後ポンプの停止時間をすべて 15 分間として圧送を繰り返した。各段階での圧送は吐出圧力が安定してから 5 分間である。また、ポンプ圧送時の材料のフレッシュ性状を把握するため、別途静置した試料を用いてベーンせん断試験を同時に実施した。なお、ポンプの始動圧力および圧送効率を比較するため、すべての試験ケースにおいてポンプ吐出量の設定が 8 L/min と一定にした。

### 3. 試験結果

#### 3.1 モルタルフローと凝結時間試験の結果

モルタルフロー試験の結果を図-4 に示す。既往の検討において、これらの配合では、0 打フローが 115±15mm, 15 打フローが 170±20mm の範囲である場合、良好な 3D プリンティング施工ができることを確認している<sup>3)</sup>。図-4 より、10℃と 30℃配合のフロー値は、経時 120 分以内では許容値範囲内に入っており、特に 30℃配合の結果はほぼ許容範囲の中心値近傍に分布している。これに対して、20℃配合は経時 90 分間で許容範囲を満足していたが、120 分では 0 打と 15 打フロー値が急激に増加して許容上限値を大幅に超えた。この原因については、10℃と 20℃配合の違いは、凝結遅延剤の量のみであるが(表-1)、後述する図-5 に示すように、20℃配合の凝結始発時間は 10℃配合の半分程度となっており、20℃配合の凝結遅延剤の量がやや不足していたためであると考えている。なお、この影響で、後述する 20℃試料の 120 分でのベーンせん断試験は実施できなかった。

各配合における貫入抵抗値の経時変化の測定結果を図-5 に示し、始発と終結時間を表-2 にまとめている。始発時間について、10℃配合は 4 時間程度、20℃と 30℃配合は 2 時間程度であった。始発から終結までの時間間隔は、20℃配合は 40 分程度、10℃と 30℃配合は 60 分程度であった。このように、始発から終結までの時間間隔が短いことは、積層後の形状保持に繋がると考えられる。

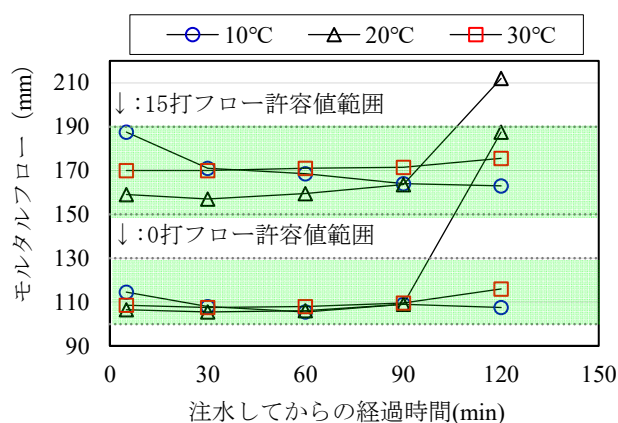


図-4 モルタルフロー経時変化  
Fig.4 Test results of mortar flow

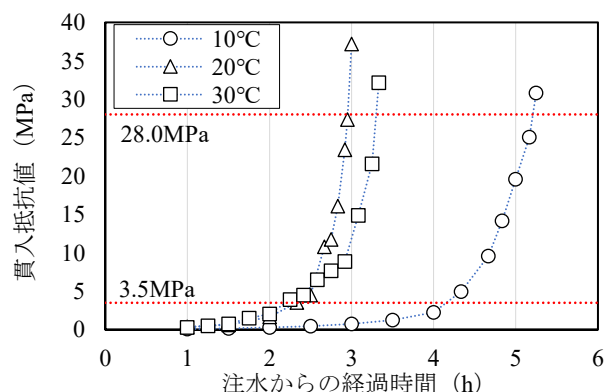


図-5 凝結時間試験結果  
Fig.5 Test results of setting time

表-2 凝結時間の試験結果  
Table 2 Test results of setting time

| 項目   | 10℃配合 | 20℃配合 | 30℃配合 |
|------|-------|-------|-------|
| 始発時間 | 4:09  | 2:20  | 2:12  |
| 終結時間 | 5:13  | 2:57  | 3:17  |

#### 3.2 ベーンせん断強さ試験結果

各試料のベーンせん断強さ試験結果を図-6 に示す。図中にて「×」との標記は、その測定時点での結果を示しているが、その次の計測でベーンせん断試験機の測定限界である 16.2kPa を超えたことを意味する。同図より、30 分ごと攪拌して計測したケース (a) では、いずれの温度においても値がほとんど変化しなかったのに対して、静置状態で測定したケース (b) では、時間の経過に伴い顕著に増加する傾向が認められた。これをチキソトロピー性といい、3D プリンティングに求められる材料の特徴である。

以下、流動保持性と自立安定性や速硬性の評価の観点から分析を行う。

##### 3.2.1 流動保持性

図-6 に示す各温度での (a) 30 分ごと攪拌した結果に着目すると、20℃の経時 120 分を計測できなかった以

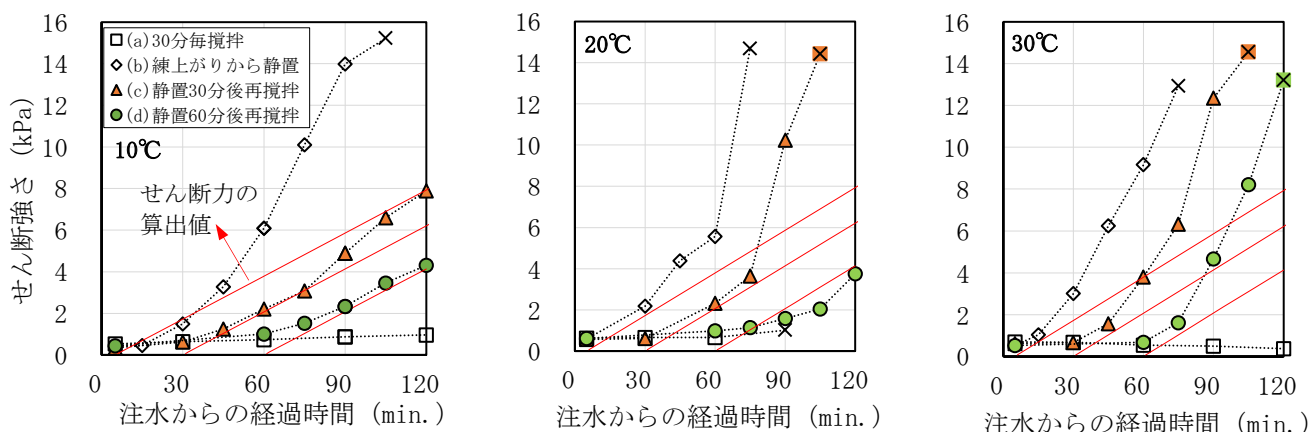


図-6 各試料のベーンせん断強さの計測値およびせん断力の算出値

Fig.6 Measured and calculated results of vane shear strength

外、いずれの試料においてもベーンせん断強さは 1.0kPa 以内であり、比較的小さい範囲内に収まっていることがみられる。このように、同時に実施したモルタルフロー試験(図-4)と同様、攪拌したベーンせん断強さ試験は各試料の流動保持性評価に使えると考えられる。

また、温度ごとに練り上がり直後の測定値を各指標の基準にして、モルタルフローおよびベーンせん断強さの経時測定値の比を算出し、図-7 にプロットした。同図には、0 打フロー値比  $R_{f(0)}$  あるいは 15 打フロー値比  $R_{f(15)}$  とベーンせん断強さ比  $R_v$  直線回帰した式を示している。回帰式は、以下に示す通りである。

$$R_{f(0)} = -0.09R_v + 108.67, R^2 = 0.73 \quad (1)$$

$$R_{f(15)} = -0.15R_v + 113.39, R^2 = 0.87 \quad (2)$$

今回の試験から得られたデータ数が少ないものの、今回の検討範囲では、特に 15 打フロー値比  $R_{f(15)}$  と一定な相関性が認められた。このことは、より簡便なベーンせん断強さ試験によって積層材料の流動保持性を評価できる可能性が示唆された。

### 3.2.2 自立安定性

積層中にノズルから排出した直後の試料では、自重によらず所定の寸法を保持する必要がある。この点について図-6 のケース (a), (c), (d) で攪拌した直後の状態に着目し、以下に考察する。30 分ごとに攪拌したケース (a) は、10°C と 20°C では、練り上がりの 0.5kPa 程度から段々大きくなり、最終的に 1.0kPa 付近に収束した。これに対して 30°C では 0.7kPa から 0.4kPa 程度に減少した。また、30 分と 60 分静置後に再攪拌したケース (c), (d) では、攪拌直後のベーンせん断強さは、いずれの温度でも 0.6 kPa ~ 1.0kPa の範囲であった。

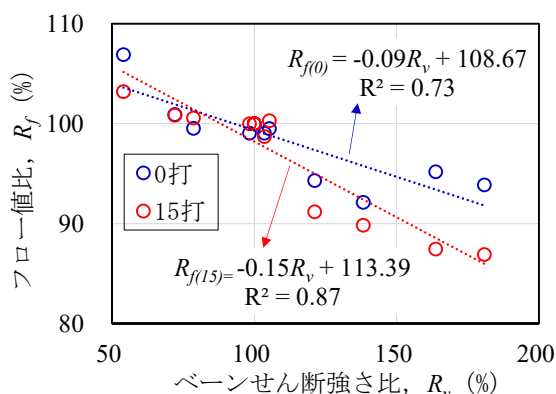


図-7 ベーンせん断強さ比とフロー値比の関係

Fig.7 Relationship between vane shear strength and flow ratio

既報の PC 構造体の実証プロジェクト<sup>5)</sup>において、著者らは主に 30°C 配合を用いた積層製作を実施した。その際、オーバーハングを含めた積層パーツを問題なく所定の寸法に積層できた。また、10°C、20°C 配合は、30°C 配合から微調整したもので、材料のベーンせん断強さが上記 0.4kPa ~ 1.0kPa の範囲内にある場合、押し出された直後の自立安定性は確保できると考えられる。既往研究において Le ら<sup>6)</sup>は、ノズルより押し出される、かつフィラメントに割れ目が発生しないベーンせん断強さの範囲が 0.3 kPa ~ 0.9kPa であることが報告されているが、これは本研究の結果と概ね一致している。

### 3.2.3 形状保持性

地盤材料試験分野では、短期安定問題に対して軟弱な粘性土地盤の非排水せん断強度の推定値として一軸圧縮強さの 1/2 を利用している<sup>4)</sup>。ここで、既存フィラメントの上に積層したフィラメントの自重を一軸圧縮荷重と考えると、それによって既存フィラメントに作用するせん断力  $\tau_G$  を式 (3) のように表すことができる。

$$\tau_G = \frac{1}{2} K \cdot \rho g h \cdot v t \quad (3)$$

ここに、 $\rho$ は材料の密度 (2200kg/m<sup>3</sup>)、 $g$  は重力加速度、(9.8m/s<sup>2</sup>)、 $h$ は1層の高さ (m)、 $v$ は1層あたりの積層スピード (層/min.)、 $t$ は積層時間 (min.)を示す。なお、 $K$ は施工係数とし、著者らが既往<sup>7)</sup>に行った実際積層高さや理論積層高さの関係によると、実際積層高さは理論高さより大きく、少なくとも1.57倍であった。そこで、その逆数として $K$ の値を0.64と仮定した。

また、積層スピード $v$ を1層/min.と仮定し、練上がり直後、経時30分あるいは60分で再攪拌して積層開始した場合を想定し、各ケースについて、時間経過に伴う発生するせん断力の増加を式(3)によって算出し、図-6にて赤い実線で示している。

図-6より、(b) 静置、(c) 静置30分後攪拌および (d) 静置60分後攪拌の各ケースにおいて、静置時間に伴いベーンせん断強さは高くなっており、ベーンせん断強さの増加率は環境温度が高くなるほど高くなることが見られる。また、再攪拌時間が遅くなると、その増加率が低くなる傾向がみられたが、これについては、傾向の再現性やメカニズムを含め、今後明らかにする必要がある。一方で、このようなベーンせん断強さの増加に対し、積層への繰り返しによって上層荷重も増加するため、発生するせん断力も大きくなる。両者の大小関係は図-6の赤い線によって比較することができる。例えば、せん断強さが赤線で示すせん断応力より大きい場合は、試料が形状保持できることを意味する。今回は、軟弱粘性土の一軸圧縮と仮定して上層荷重に起因したせん断力を算出したが、一軸圧縮強度は側面拘束がないことを前提としている。しかし、実積層においてフィラメントが連続しており、特に経時によって材料がこわばっていくので、側面拘束が無視できない。また、式(3)において $K$ の値を定数として扱ったが、今回のような高チキソトロピー性材料の場合、その値は経過時間、いわゆる積層スピードと密接な関係があると推察される。今後、これらのことを明らかにするため、更なるデータの蓄積が必要である。

### 3.3 ポンプ圧送性試験結果

#### 3.3.1 吐出圧力に関する考察

圧送中にポンプの停止および再開を繰り返した場合の吐出圧力を図-8に示す。ケース(i)15分間中断させる場合の結果に着目すると、1回目の圧送において、試料が筒先から安定的に出されるまでは、吐出圧力のピ

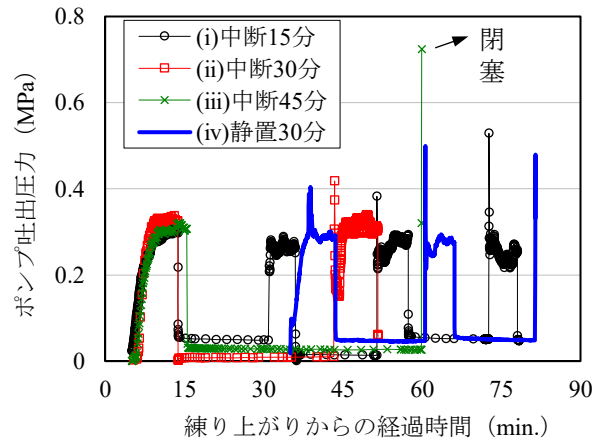


図-8 ポンプ吐出圧力ピーク値の経時変化  
Fig.8 Peak value of discharge pressure over time

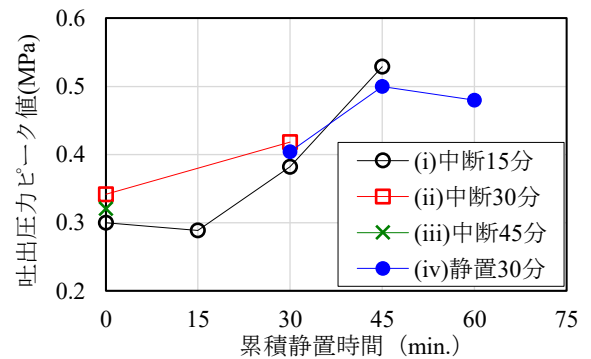


図-9 各圧送段階でのポンプ起動時の最大圧力  
Fig.9 Maximum value at restart at each pumping step

ーク値が時間とともに増大し、最終的に0.3MPa程度の定常的な圧力を維持した。また、試料を圧送用ホース中に15分静置させて2回目圧送を行ったところ、吐出圧力が1回目より若干低くなったが、大差はなかった。さらに、同じ手順で3回目と4回目の圧送を実施したところ、ポンプ再開直後の吐出圧力のピーク値が停止回数増加に伴い明らかに増大する傾向がみられた。しかし、いずれも圧力が圧送段階の最大値に達したあとすぐに0.3MPa程度まで減少し、それ以降維持し続けた。ケース(ii)中断30分、(iii)中断45分および(iv)練り上がり後30分間静置させた場合においても、定常的な圧送段階での吐出圧力のピーク値がケース(i)と同様に0.3MPa付近に維持されていた。このことより、安定的なポンプ圧送に必要な圧力が0.3MPaであることが示された。なお、ケース(iii)45分間圧送中断させて再開した場合、ポンプの能力不足によって閉塞が生じ、圧送継続ができなかった。

図-8に示すそれぞれの圧送中の吐出圧力のピーク値を検出し、試料の累積静置時間との関係を図-9にまとめている。試料の累積静置時間は、ホッパーに投入す

る前の静置時間とホース中の静置時間の合計時間としたが、前回圧送がある場合、圧送中に試料を乱された5分間を除いて計算した。図-9において、練り上がり直後の計測された圧力の最大値は0.3~0.35MPaであった。また、ケース(i)、(ii)、および(iv)を比較すると、それまでに圧送する・しないに関わらず、累積静置時間30分では、吐出圧力の最大値は約0.4MPaであることが見受けられる。それ以降においてもこの傾向が続いており、累積静置時間が長くなると、ポンプ再開に必要な最大圧力が0.5MPa程度となった。これらのことにより、圧送に必要なポンプの吐出圧力は、試料の累積静置時間に及ぼされる影響が大きいと推察される。

### 3.3.2 圧送効率に関する考察

一例としてケース(iv)の1回目と2回目圧送における試料の累積圧送量を図-10に示す。同図より、圧送中断前の1回目圧送で得られた質量増加率は、圧送再開後の2回目より明らかに大きい傾向がみられる。また、各試験段階で得られた圧送量は圧送時間に伴いほぼ線形であることから、線形回帰によって各ケースについて各段階の圧送効率を求め、横軸を圧送回数として図-11に整理した。図-10に示すケース(iv)以外でも、1回目の圧送において圧送効率が最も高かったが、圧送を一旦中断させて再開した場合、圧送効率が明らかに低下した。また、3回目の圧送で圧送効率がさらに低下する傾向が認められた。また、ケース(iv)では、圧送効率が他のケースより下回っている。

今回、実験上のトラブルでケース(i)の1回目と4回目のデータが取得できなかったが、このことは、材料性質の経時変化に関連すると考えたため、静置し続けた試料のベーンせん断強さと圧送効率の関係を整理し、図-12に示している。データ数が少ないものの、圧送効率は静置状態のベーンせん断強さの増加に伴い減少する傾向が認められる。

## 4. まとめ

本研究の範囲内において得た知見を以下にまとめる。

- (1) ベーンせん断試験は、既往研究で提案されたモルタルフロー試験と同様、繰り返した積層材料の経時保持性評価に適用できる。
- (2) 材料のベーンせん断強さが0.4kPa~1.0kPa程度である場合、積層時ノズルから押出された直後の自立安定性が窺える。
- (3) 積層中にフィラメントの自重によって発生したせ

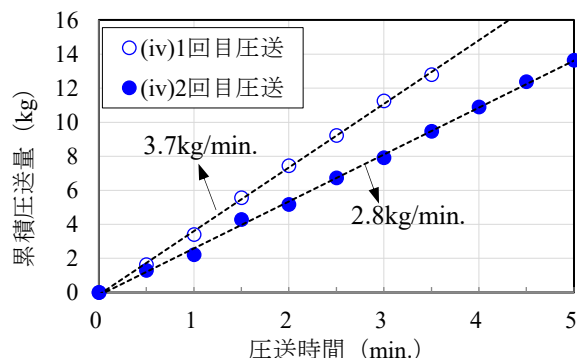


図-10 累積圧送量の経時変化の一例

Fig.10 An example of cumulative pumping mass over time

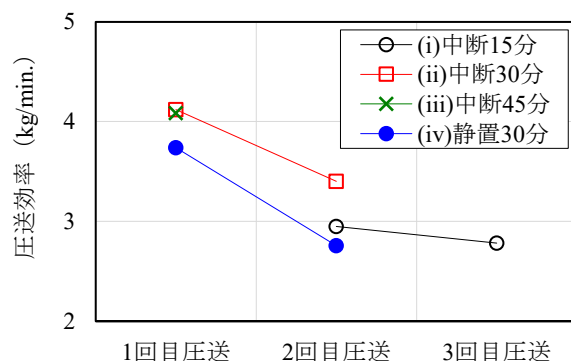


図-11 各圧送段階での圧送効率

Fig.11 Pumping efficiency at each pumping stage

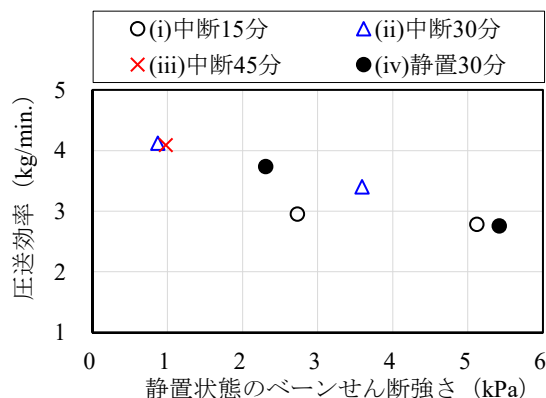


図-12 圧送効率とベーンせん断強さの関係

Fig.12 Pumping efficiency vs stationary vane shear strength

ん断力と材料のせん断抵抗を比較することで、積層高さを予測できる可能性がある。

(4) 定常的なポンプ圧送を維持するのに必要となる吐出圧力は0.3MPa程度である。また、ポンプ圧送を一時中断して再開した場合、最大吐出圧力は累積静置時間に及ぼされる影響が大きいと考えられる。

(5) 圧送効率は、材料性質の経時変化と共に低下する傾向がある。また、静置状態の材料のベーンせん断試

験は、ポンプ圧送効率の評価に適用できる可能性があると考えられる。

今後、評価対象の範囲を拡大し、得られた結果の汎用性について検証するつもりである。特に、形状保持性（積層高さ）評価に用いた計算方法の適用範囲と係数の推定、およびベーンせん断試験とポンプ圧送性の関連性について考察する予定である。

#### 謝辞

本稿の執筆にあたり、太平洋セメント株式会社より材料を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 注

注 1) チキソトロピー性とは、一定の力をかけ続けることで粘度が下がるが、下がった粘度がある一定時間放置すると元に戻る性質である。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：「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，pp.118-146, 2021.
- 2) R.A. Buswell, W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Cement and Concrete Research, No.112, pp.37-49, 2018.
- 3) 前堀伸平, 黒澤真一, 小川洋二, 張文博: 3D プリンティングに適した短繊維補強モルタルの配合および押出性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1373-1378, 2021.
- 4) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会: 地盤調査の方法と解説—二分冊の1—, pp.404-419, 2013.
- 5) 村田哲, 張文博, 木ノ村幸士, 畑明仁: 3D プリンティングで製作した積層体の硬化物性と収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1852-1857, 2020.7
- 6) T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, et al.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Materials and Structures, vol.45, No.8, pp.1221-1232, 2012.
- 7) 村田哲, 木ノ村幸士, 前堀伸平, 宮本昌周: 3D プリンティングに適したセメント系材料の簡易な品質確認方法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.2027-2032, 2019.