

## ベーンせん断試験による建設用3Dプリンティング材料のチキソトロピー性評価

大成建設(株) 技術センター<sup>\*1</sup> 正会員 ○田中 俊成<sup>\*1</sup> 張 文博<sup>\*1</sup>  
横浜支店<sup>\*2</sup> 村田 哲<sup>\*2</sup> 木ノ村 幸士<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

建設用3Dプリンティングモルタル(以下3DP用モルタル)は、積層までの待機時間やマシントラブルの発生時に静置される状況が発生しうる。静置された材料はチキソトロピー性により流動性を失うが、適当な時期に攪拌が与えられれば、流動性を回復し、通常通り積層可能となる。建設用3Dプリンティングの普及を見据えると、材料の流動性の変化を簡便に評価・把握する技術が必要になる。本論文では、現場でも簡便に実施可能なベーンせん断試験により、3DP用モルタルのチキソトロピー性の発現と流動性の回復を定量的に評価することを試みた。

## 2. 試験概要

## (1) 使用材料と試験環境

表-1に3DP用モルタルの配合表を示す。使用材料の諸元と練混ぜ手順は筆者らの過去の論文<sup>1)</sup>に準ずる。練混ぜおよび試験は温度が10°Cあるいは30°C、湿度が70%RHの恒温恒湿室内で行った。配合は適用温度に応じて、Reの量やS2/Pを微修正している。

## (2) フロー試験とベーンせん断試験の対応比較

ベーンせん断試験で3DP用モルタルの流動性を適切に評価できるか確認するために、既往研究<sup>(例えば1)</sup>で流動性評価に用いられているフロー試験と比較した。3DP用モルタルの練り上がり直後および、注水から30, 60, 90, 120分後に与えた攪拌の直後に両試験を実施した。試験は10°C, 30°C環境下でそれぞれ行った。なお、ベーンせん断試験は地盤工学会基準JGS1411-2012に規定されている「原位置ベーンせん断試験」に準拠して行った(2.(3)も同様である)。フロー試験はJIS R 5201に準拠し、0打フローと15打フローを測定した。

図-1にフロー試験とベーンせん断試験の結果を示す。材料の流動性が高いほどフロー値は大きく、ベーンせん断強さは小さくなる指標である。10°C環境下(ア)では時間が経つにつれフロー値は減少、せん断強さは増加し、ともに流動性の低下を示す結果となった。逆に30°C環境下(イ)ではフロー値は増加、せん断強さは減少し、ともに流動性の増加を示す結果となった。10°C環境下と30°C環境下での流動性の変化傾向の違いは、凝結遅延剤量の違いに起因すると考えられる。この検討において、ベーンせん断試験とフロー試験で捉えられた材料の流動性変化に矛盾はなく、ベーンせん断試験により流動性の「変化」を評価することは妥当であると判断し、以後の検討を行った。なお、せん断強さとフロー値が、条件によらず1対1で対応するのは、今後比較データ数を蓄積し検討していく。

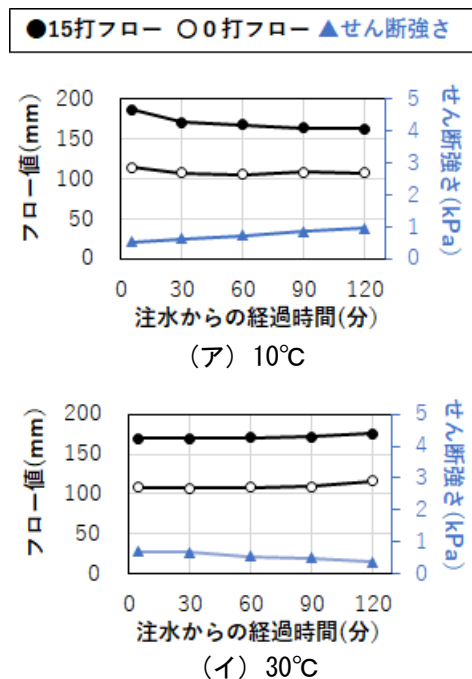


図-1 フロー試験とベーンせん断試験の比較

表-1 配合表

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°C	37	120	60	5	0.20	0.20	0.65	264	713	856	428	36
30°C	37	120	50	5	0.20	0.20	1.20	271	732	879	366	37

W: 水道水, P: 結合剤, S1, S2: 細骨材(砕砂, 微粉末), V: 分離低減剤, SP: 高性能減水剤, De: 消泡剤, Re: 凝結遅延剤

キーワード 3Dプリンティング, ベーンせん断試験, 流動性, チキソトロピー性

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 070-1078-5737

### (3) ベーンせん断試験によるチキソトロピー性発現と流動性回復の評価

図-2に示すように、材料の静置時間や攪拌時期をパラメータにした試験ケースを設定し、ベーンせん断試験を実施した。(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、直後に一度再攪拌したケースである。静置後の再攪拌はホバートミキサで低速にて20秒練返した。試験は10、30°C環境下でそれぞれ実施した。

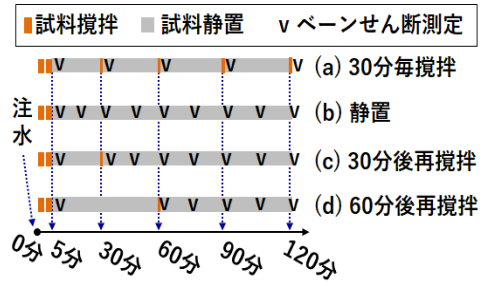


図-2 各試験の実施時期

### 3. 結果と考察

筆者らは、過去のプロジェクトにおいて、せん断強さが 0.4~1.0 kPa の 3DP 用モルタルで少なくとも高さ 44 cm までは安定的に積層可能なことを確認している<sup>1)</sup>。本論文では上記の範囲を、良好に積層可能なせん断強さの適正範囲として扱う。図-3に各ケースのせん断強さの変化を示す。10°C環境下(ア)、30°C環境下(イ)ともに、練り上がり直後(5分)時点では、(a)~(d)のすべてのケースでせん断強さが 0.4~0.7 kPa であり、せん断強さは適正範囲内にあった。ケース(b)、(c)、(d)ではそれぞれ最後に攪拌を与えられた5分(=練り上がり直後)、30分、60分を起点にせん断強さが単調増加した。30分ごとに攪拌を与えた試料(a)では、試験終了の120分まで練り上がり直後と同程度のせん断強さを維持していた。また、ケース(b)、(c)、(d)のせん断強さの上昇は10°C環境下よりも、30°C環境下の方が顕著であった。ケース(a)、(c)、(d)で攪拌を与えた直後は流動性を回復することから、このせん断強さの増加は凝結ではなくチキソトロピー性によるものである。チキソトロピー性は結合材粒子の凝集・分散挙動に起因するため、温度が高いほどその発現が顕著となったものと考えられる。図-3の両図中に矢印で示しているが、30分または60分静置された試料(b)のせん断強さはチキソトロピー性の発現により適正範囲を大きく超えるが、その直後に攪拌を与えるとせん断強さは0.6~1.0 kPaと適正範囲に戻り((c)、(d)、練り上がり直後と同程度の良好な流動性を回復可能であった。また、ケース(b)、(c)、(d)という順で再攪拌までの静置時間が長くなっているが、再攪拌後にせん断強さの増加が加速するというような傾向も見られていない。よって今回使用した材料については、積層を中断した場合でも、材料に60分以内に攪拌を与えれば、良好な流動性を回復でき、通常どおり積層が再開可能と見込まれる。3DPによる積層性の確認までは行えていないが、別報<sup>2)</sup>では静置を与えた材料のポンプ圧送性(3DP用モルタルの要求性能の一つ)を確認している。例えば30分の静置時間を与えた材料でも、圧送再開の瞬間には高い圧力が必要となるが、ひとたび材料が圧送され始めると通常通り、連続的に圧送可能なことを確認している。

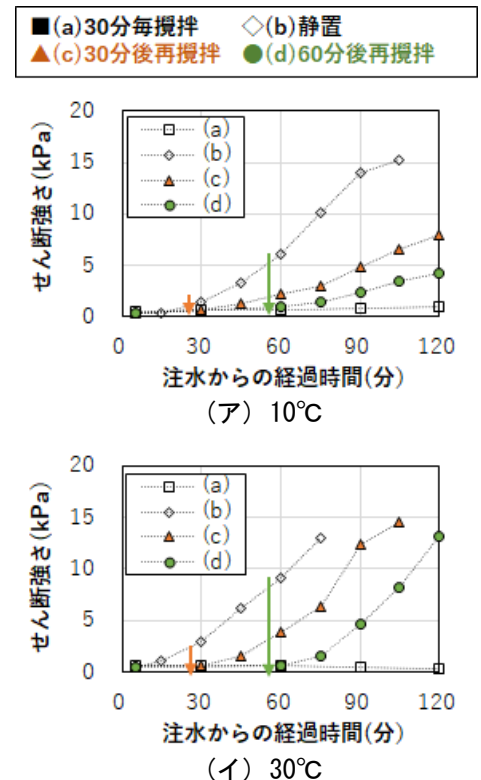


図-3 各ケースのせん断強さの変化

### 4. まとめ

現場で簡便に実施可能なベーンせん断試験により、3DP用モルタルの流動性の変化を評価可能である。今回使用した3DP用モルタルでは60分の静置を経験し流動性を失った状態でも、攪拌を与えることで練り上がり直後と同程度の流動性を回復可能なことを確認した。

### 参考文献

- 1) 村田哲ら：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。
- 2) 張文博ら：建設3Dプリンティング材料のポンプ圧送性に関する実験的検討，第77回土木学会年次学術講演会講演概要集，2022。（投稿中）