

論文 建設 3D プリンティング用モルタルへのチクソトロピー性の付与とその評価

前田 周磨*1・寺西 浩司*2・長谷川 周平*3・吉牟田 千晴*4

概要：材料押し出し方式の 3D プリンティングのための材料に要求される押し出し性と積層性を両立させるためには、セメント系材料に高いチクソトロピー性を付与することが一つの手段となり得る。このことから、本研究では、まず、セメント系材料のチクソトロピー性の評価方法について検討し、静的降伏応力が得られる回転粘度計試験の試験条件を明らかにした。次に、このことを踏まえたうえで、モルタルのチクソトロピー性を向上させる方法について検討した。その結果、ダイユータンガムやポリオレフィン繊維を一定量以上添加・混入することで、チクソトロピー性を効果的に付与することが可能であるとの知見を得た。

キーワード：3D プリンター、レオロジー、回転粘度計、静的降伏応力、チクソトロピック剤、微細繊維

1. はじめに

近年、建設 3D プリンティング技術の研究開発が世界各国で進められており、海外では、この技術で建設された住宅が販売されるまでに至っている¹⁾。それに対し、我が国では、建築基準法や関連する法令が 3D プリンティングを想定した規定になっていないこともあり、建築物への適用はほとんど進んでいないのが現状である。一方で、少子高齢化や職人の減少による労働力の低下が問題となるであろう我が国の建設分野において、3D プリンティングによる建設現場の省人化は、労働力不足の一つの解決策になり得るものと考えられる。また、建設 3D プリンティングのメリットとしては、そのほかにも、工期短縮、建設コスト削減、デザインの柔軟性向上などが挙げられる。

現在、建設 3D プリンティング技術の中で主流となっている方式は、フレッシュ状態のセメント系材料を押し出して積層していくことで構造物を造形する材料押し出し方式である。しかし、この方式に適用するセメント系材料においては、①輸送管内をノズルまで圧送する段階で閉塞せずに押し出すことが可能な「押し出し性」、②ノズルから吐出された段階で自重や上層積層時の圧力によって形状が変化しない「積層性（ビルダビリティ）」²⁾、の相反する 2 つの性能が両立しなければならない²⁾。そして、このような性能を満足させるための手段の一つとしては、せん断応力が加わり続けると粘度が低下し、せん断応力が消失すると粘度が増大するというチクソトロピー性をプリンティング材料に付与することが考えられる。

これらの背景から、本研究では、モルタルに効果的にチクソトロピー性を付与する方法として、混和材料の添

加、微細繊維の混入、細骨材粒度の調整の 3 種類の可能性を検討した（実験 2）。ただし、これらの検討にあたっては、建設 3D プリンティングに適した形でセメント系材料のチクソトロピー性を評価する必要があり、そのような方法は十分に確立されているとは言えない。

チクソトロピー性の評価に関して、Qian ら³⁾は、モルタルがチクソトロピー性を有する場合、流動曲線（せん断応力-せん断速度関係）の極小せん断速度領域に、図-1 に示すような、せん断応力が上昇に転ずる負の勾配が発現すると報告している。また、その切片を静的降伏応力と定義し、チクソトロピー性の評価に用いている。しかし、回転粘度計を用いた既報⁴⁾の実験では、これらを確認するには至らなかった。そこで、本研究では、実験 2 に先立ち、タイプの異なるスピンドルを用い、セメント系材料を対象として改めてこのことに関する検討を行った（実験 1）。

2. チクソトロピー性の評価方法の検討（実験 1）

2.1 実験概要

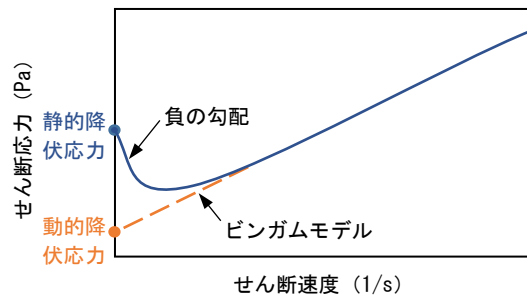


図-1 負の勾配および静的降伏応力

*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)竹中工務店 設計部

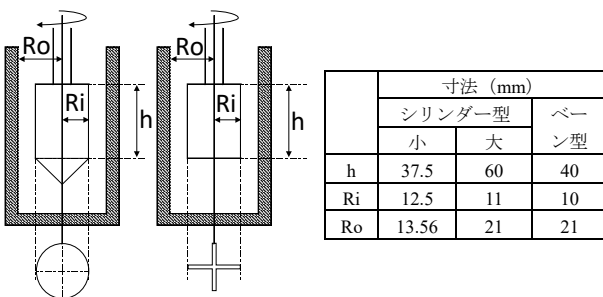
*4 トヨタ T&S 建設(株) PC 事業部

表-1 実験要因と水準

実験要因	水準
ダイユータンガム (DG) 添加率 (C×%)	0, 0.06, 0.12
高性能減水剤 (SP) 添加率 (C×%)	0, 0.2

表-2 使用材料

材料	仕様
水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3320cm ² /g)
混和材	ダイユータンガム (汎用品, 80メッシュパス)
高性能減水剤	ポリカルボン酸化合物
消泡剤	非イオン系界面活性剤
凝結遅延剤	ポリヒドロキシカルボン酸複合体



(a) シリンダー型 (b) ベーン型

図-2 スピンドルおよび測定カップ

(1) セメントペースト試料

実験1では、まず、セメントペーストを試料とし、回転粘度計試験の試験条件を変化させて、測定される流動曲線に負の勾配および動的降伏応力が出現するか否かを検討した。

表-1 に実験要因とその水準を示し、表-2 に使用材料を示す。本実験では、チクソトロピー性の付与を目的として、筆者らの過去の実験³⁾でその効果が高いことが確認されたダイユータンガム (DG, 微生物発酵多糖類の一種) を用いた。また、その添加率を3水準に変化させた。さらに、高性能減水剤 (SP) の添加の有無を要因とした。セメントペースト試料の水セメント比は50%とし、試料に対して、消泡剤を C×0.001%, 凝結遅延剤を C×0.3% 添加した。

なお、練混ぜにあたっては、DG に起因するダマの発生を抑制するために、事前に DG と半分の水を調理用ミキサーで60秒間攪拌した。その後、モルタルミキサーにセメント、残り半分の水および混和剤を投入し、DG を攪拌した水を加えながら低速で60秒間、高速で計90秒間練り混ぜた。

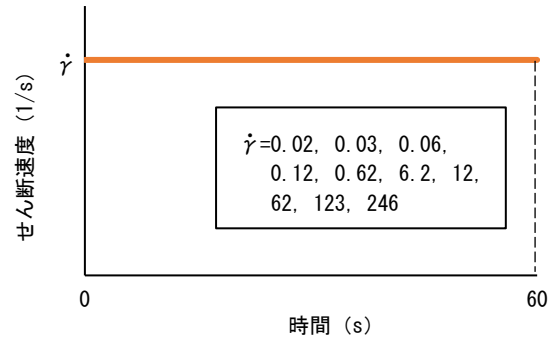


図-3 応力緩和曲線測定プログラム (緩和 P)

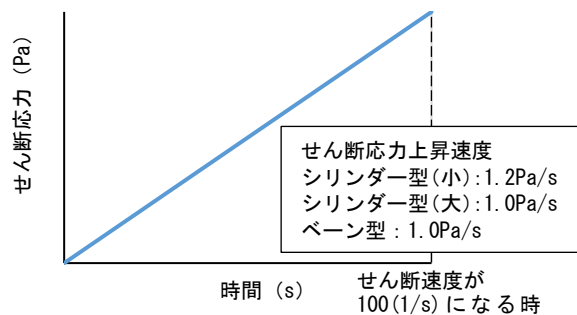


図-4 応力制御プログラム (応力 P)

(2) 試験方法

(a) 試験項目および試験手順

フロー試験および回転粘度計によるレオロジー特性の測定を行った。フロー試験は JIS R 5201 に準拠した。ただし、試験はスランプ板上で行い、打撃なしの値を測定した。また、回転粘度計による測定では、5分以上 20°C で保温し、直前に1分間手練りした試料を試験に供した。

(b) スピンドルおよび測定カップ

図-2 に、回転粘度計のスピンドルおよび測定カップの仕様を示す。本実験では、既報⁴⁾の実験で用いたシリンダー型 (ギャップ小) のほかに、シリンダー型 (ギャップ大) およびベーン型のスピンドルも使用した。

(c) 測定プログラム

図-3 および 4 に、回転粘度計の測定プログラムを示す。応力緩和曲線測定プログラム (緩和 P) では、極小せん断速度領域を含む 10 種類の一定せん断速度を与え、応答のせん断応力をそれぞれ測定した。また、応力制御プログラム (応力 P) では、せん断応力を一定速度で増加させていき、応答のせん断速度を測定した。

2.2 実験結果とその考察

(1) フロー値

図-5 に、フロー値と DG 添加率の関係を示す。フロー値は、DG 添加率が高いほど小さくなった。

(2) 緩和 P の測定結果

図-6 に、緩和 P においてベーン型スピンドルを使用した場合のせん断応力の測定結果の例を示す。DG を添加していないケース (DG0%・SP0%) では、0.62 (1/s)

以下の極小せん断速度領域のせん断応力は小さく、それぞれの時間曲線の変動も小さかった。それに対し、DGを添加したケース (DG0.12%・SP0%) では、0.62 (1/s) 以下の極小せん断速度領域において、せん断応力の時間曲線は、せん断速度の増加とともに、経時により増大する曲線からピークを有する曲線に遷移していった。また、

ピークの生じる時期はせん断速度が大きいほど早くなった。

(3) 流動曲線

図-7に、緩和Pおよび応力Pで得られた流動曲線を示す (SP0%のケース)。ここで、先述のQianらの実験³⁾では、モルタル試料に一定せん断速度を与えた場合に60

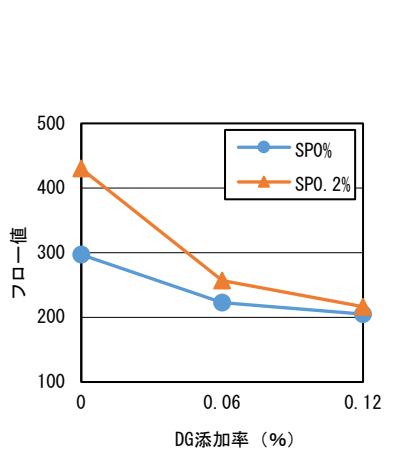


図-5 フロー値と DG 添加率の関係

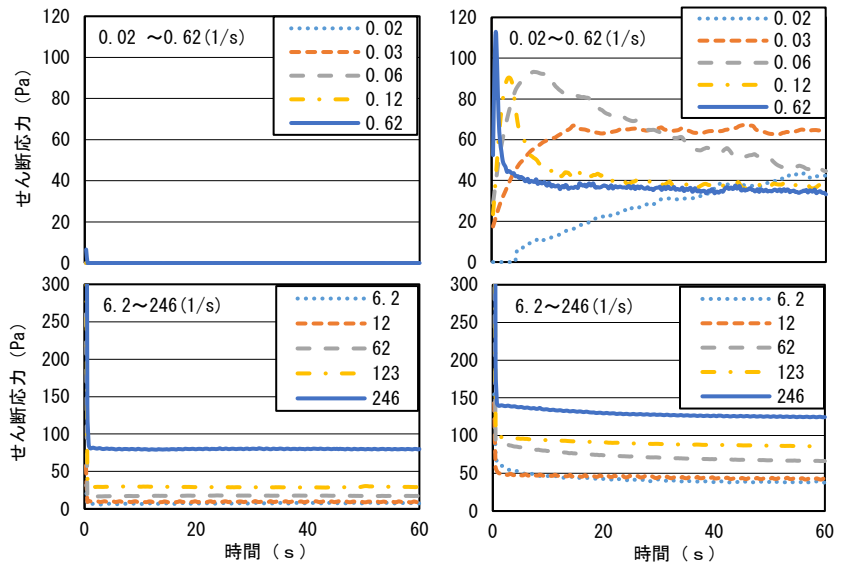


図-6 緩和Pによるせん断応力の測定結果

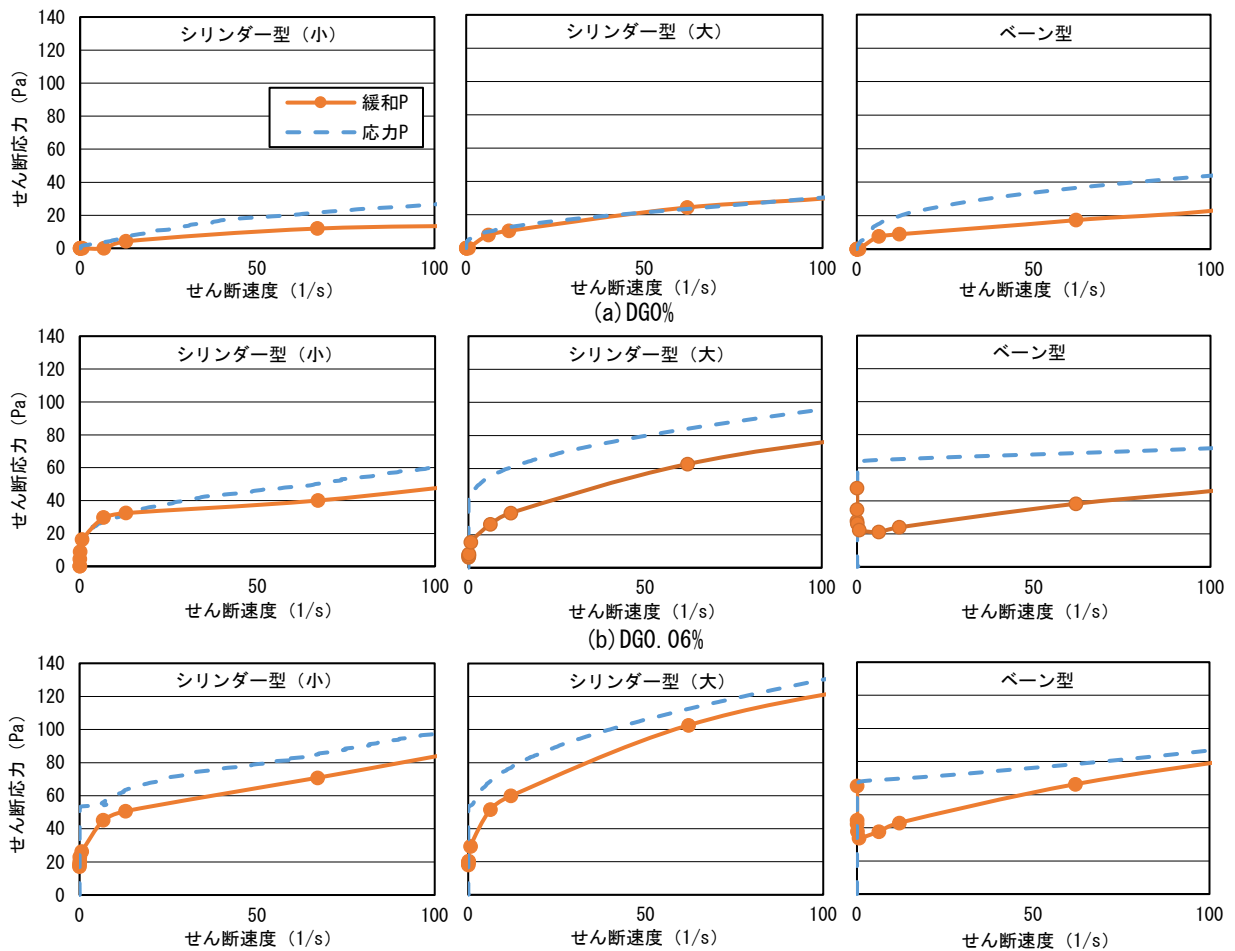


図-7 流動曲線 (SP0%)

秒後までにはせん断応力が平衡状態に達していた。また、流動曲線は、平衡時のせん断応力を用いて描かれていた。そこで、本研究においても、緩和 P の流動曲線は、各せん断速度の測定結果における 60 秒時の測定値を用いて作成した。図 (b) および (c) の右図に示したような、緩和 P の流動曲線における極小せん断速度領域の負の勾配は、DG を添加した試料に対してベーン型スピンドルを使用した場合にのみ発現した。また、図 (b) および (c) の右図に着目すると、応力 P の流動曲線の立ち上がり部分のせん断応力は、緩和 P の流動曲線の y 切片のせん断応力とほぼ一致している。なお、シリンダー型スピンドルを使用した場合や、DG を添加していないケースでは、緩和 P の流動曲線に負の勾配は発現しなかった。

(4) 降伏応力

Qian ら³⁾の報告と同様に、ベーン型スピンドルを使用した場合、緩和 P の流動曲線の y 切片のせん断応力、および応力 P の流動曲線におけるせん断速度の立ち上がり部分のせん断応力をそれぞれ静的降伏応力と見なし、その値を算定した。また、ベーン型スピンドルを使用して測定した緩和 P の流動曲線の極小せん断速度領域 (0.62 (1/s) 以下) を除いた直線部分を既報⁴⁾と同様に Regularized Bingham モデルにフィッティングさせて、動的降伏応力を求めた。

図-8 に、緩和 P による静的降伏応力と動的降伏応力の関係を示す。DG を添加したケースでは、動的降伏応力に比べて静的降伏応力が大きくなった。この差は凝集の有無に起因して生じるものであり、差が大きいほどチクソトロピー性が高いものと考えられる。

図-9 に、応力 P と緩和 P の静的降伏応力の関係を示す。両プログラムで得られた静的降伏応力はおよそ一致しており、緩和 P、応力 P のいずれによってもほぼ同じ値の静的降伏応力が得られるものと考えられる。

3. モルタルのチクソトロピー性を向上させる方法の検討 (実験 2)

3.1 実験概要

(1) 各シリーズの実験の要因と水準

建設 3D プリンティングのためのセメント系材料としては一般にモルタルが使用されている。そこで、実験 2 では、モルタルを試料とし、チクソトロピー性を効果的に向上させる方法の検討を目的として、下記の実験 2a, 2b および 2c の 3 つのシリーズの実験を行った。表-3 に実験要因とその水準を示す。

(a) DG 添加率の影響の検討 (実験 2a)

チクソトロピー性を付与するために、実験 1 と同様に、混和材としてダイユータンガム (DG) を使用し、その添加率を 4 水準に変化させた。

(b) 微細繊維の種類および混入率の影響の検討 (実験 2b)

表-4 および写真-1 に、使用した微細繊維の仕様および形状を示す。本実験では、多分岐形状を有するポリオレフィン微細繊維 (PO) 3 種類とガラス繊維のミルドファイバー (GL) 1 種類を使用した。また、これらの微細繊維の混入率を 3 または 4 水準に変化させた。

(c) 細骨材粒度の影響の検討 (実験 2c)

図-10 に細骨材の粒度分布を示す。連続粒度の C2 は、揖斐川産川砂 (表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 1.60%, 粗粒率 2.81) の 2mm ふるいを通過したものとした。また、S のシリーズは、C2 を単一粒度にさらに分級したものとした。

(2) モルタル試料

セメントおよび DG は実験 1 と同一のものを用いた。また、実験 2a および 2b では、細骨材として C2 を使用した。表-5 にモルタル試料の調合を示す。この調合に

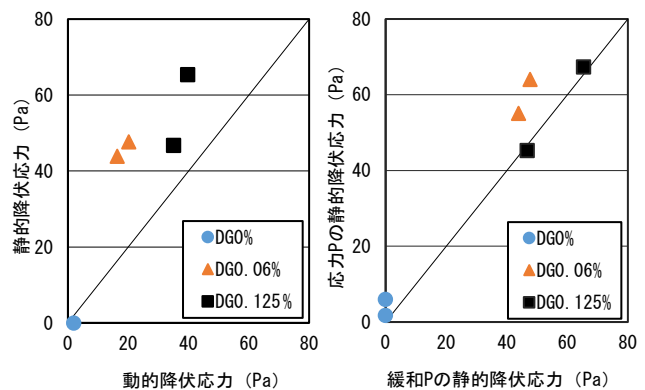


図-8 緩和 P による静的降伏応力と動的降伏応力の関係

図-9 応力 P と緩和 P の静的降伏応力の関係

表-3 実験要因と水準

実験	要因	水準
2a	DG 添加率 (C×%)	0, 0.015, 0.03, 0.06
2b	微細繊維種類	PO-1, PO-6, PO-7, GL
	繊維混入率 (Vol%)	0, 0.5, 1.0, 2.0 (GL のみ)
2c	細骨材粒度	C2, S2, S1.2, S0.6, S0.3, S0.15

表-4 使用した微細繊維

記号	種類	仕様
PO-1	ポリオレフィン繊維	平均繊維長 0.1mm 以下, 繊維径 10 μ m, 密度 0.96g/cm ³
PO-6		平均繊維長 0.6mm, 繊維径 10 μ m, 密度 0.96g/cm ³
PO-7		平均繊維長 0.7mm, 繊維径 10 μ m, 密度 0.96g/cm ³
GL	ガラス繊維	平均繊維長数十～数百 μ m, 繊維径約 10 μ m, 密度 2.8g/cm ³

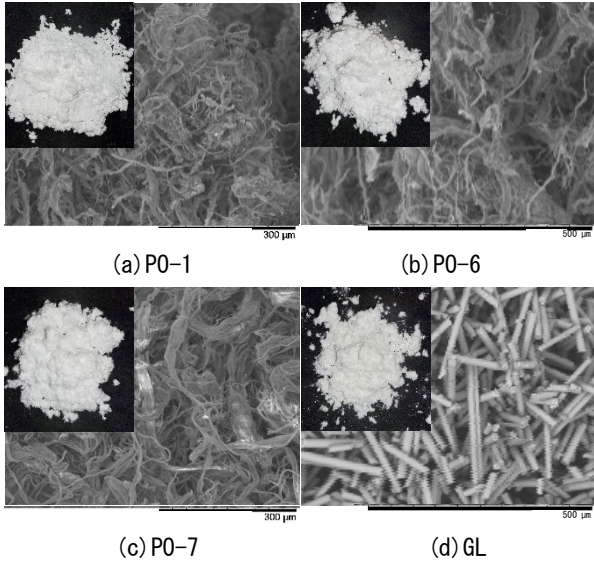


写真-1 微細繊維の形状

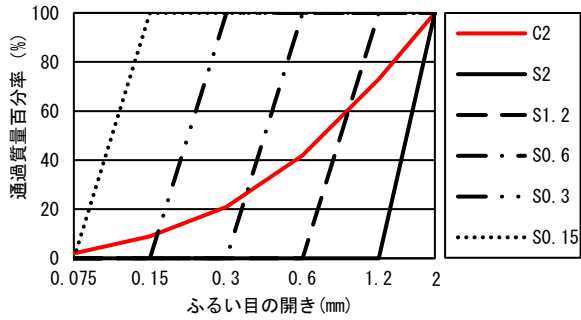


図-10 細骨材の粒度分布

対し、実験 2a では DG をセメントに置換し、実験 2b では微細繊維を外割で混入した。

なお、練混ぜにあたって、実験 2a では、実験 1 と同様にセメントペーストを練り混ぜたうえで、さらに細骨材を投入しながら低速で 30 秒間、高速で 60 秒間練り混ぜた。一方、実験 2b および 2c では、モルタルミキサにセメントおよび細骨材を投入して低速で 30 秒間練り混ぜた後に、水および混和剤を投入して低速で 30 秒間、高速で 60 秒間練り混ぜた。そして、実験 2b の場合は、その後さらに微細繊維を投入して低速で 30 秒間、高速で 60 秒間練り混ぜた。

(3) 試験方法

実験 1 と同様に、フロー試験（打撃なし）および回転粘度計による測定を行った。表-6 に、回転粘度計の測定プログラムおよび使用スピンドルを示す。実験 2 では、実験 1 の中から採用したプログラムのほかに、チクソトロピー性の標準的な方法での評価を目的として、ヒステリシスループ測定プログラム (H.L.P) を実施した。測定にあたって、応力緩和曲線測定プログラム (緩和 P) および応力制御プログラム (応力 P) は実験 1 と同様とし、これらのプログラムではベーン型スピンドルを使用した。

表-5 調査

水セメント比 (%)	砂セメント比	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (L/m ³)		凝結遅延剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
			セメント	細骨材		
50	1.5	387	245	368	0.3	0.001

表-6 測定プログラムおよび使用スピンドル

測定プログラム	スピンドル
ヒステリシスループ測定プログラム (H.L.P)	シリンダー型 (ギャップ大)
応力緩和曲線測定プログラム (緩和 P)	ベーン型
応力制御プログラム (応力 P)	ベーン型

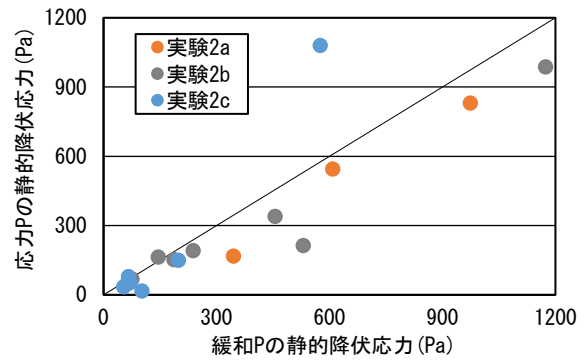


図-11 応力 P と緩和 P の静的降伏応力の関係

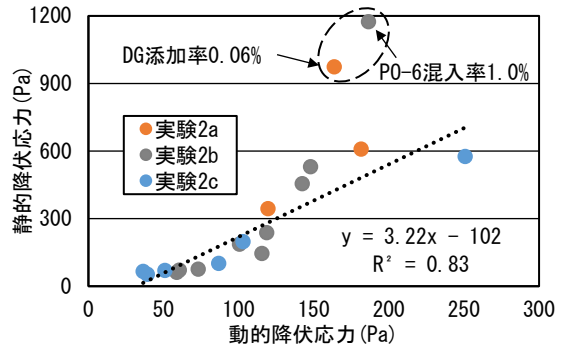


図-12 緩和 P における静的降伏応力と動的降伏応力の関係

また、H.L.P では、シリンダー型 (ギャップ大) スピンドルを使用した。そして、最大せん断速度を 100 (1/s) としたうえで、1 秒間当たり 6.67 (1/s) の割合でせん断速度を上昇・下降させ、ヒステリシスループを測定し、その面積 (ヒステリシスループ面積、以下、H.L.面積という) を求めた。

3.2 実験結果とその考察

(1) 各測定プログラムで得られた降伏応力同士の関係

実験 1 と同様の方法で、緩和 P から静的および動的降伏応力を、また、応力 P から静的降伏応力を算定した。図-11 に、応力 P と緩和 P で得られた静的降伏応力の関係を示す。セメントペーストを試料とした実験 1 の結果と同様に、モルタルを試料とした場合も、緩和 P と応力 P による静的降伏応力は概ね同じ値を示した。

図-12に、緩和Pによる静的降伏応力と動的降伏応力の関係を示す。同図からわかるように、全体としては、両者の間に高い相関が見られ、静的降伏応力は、動的降伏応力の増加とともに直線的に増加している。ただし、中には、丸で囲んだプロットのように、全体的な関係を逸脱しているケースも見られた。これらは、静的降伏応力と動的降伏応力の差(以下、単に降伏応力の差という)がより大きくなっており、チクソトロピー性が効果的に付与されたケースであるといえる。

(2) チクソトロピー性を効果的に付与する方法の検討

図-13に、フロー値、H.L.面積、降伏応力の差および塑性粘度に対する各種要因の影響を示す。チクソトロピー性の評価指標である H.L.面積および降伏応力の差は、指標ごとにやや傾向が異なるものの、DG 添加率が 0.06% のケース、PO-6 の混入率 1.0% のケース、細骨材粒度が S0.15 のケースで特に大きくなった。ただし、S0.15 のケースは、塑性粘度が顕著に大きくなっており、建設 3D プリンティングでは押出し性が低下するものと考えられる。したがって、上記のこれ以外のケースが建設 3D プリンティングに適した材料になり得るものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、まず、セメント系材料のチクソトロピー性の評価方法について検討した。次に、その結果を踏まえたうえで、建設 3D プリンティングのためのモルタルにチクソトロピー性を効果的に付与する方法について検討した。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

(1) 回転粘度計による測定において、チクソトロピー性を有するセメント系材料(セメントペーストまたはモルタル)を試料とし、ベーン型スピンドルを使用し、応力緩和曲線測定プログラムにより測定を行った場合に、その流動曲線の極小せん断速度領域に負の勾配が発現する。一方、シリンダー型スピンドルを使用した場合やチクソトロピー性を有しないセメント系材料を試料とした場合は流動曲線に負の勾配は生じない。

(2) 応力緩和曲線測定プログラムの流動曲線における負の勾配の y 切片を基に算定した静的降伏応力と、応力制御プログラムの流動曲線におけるせん断速度の立ち上がり部分のせん断応力を基に算定した静的降伏応力の値はおよそ一致する。

(3) ダイユータンガムや繊維長 0.6mm のポリオレフィン微細繊維を一定量以上添加・混入することで、モルタルにチクソトロピー性を効果的に付与することができる。すなわち、建設 3D プリンティングにおいて押出し性を低下させずに、積層性を高めることが可能と考えられる。

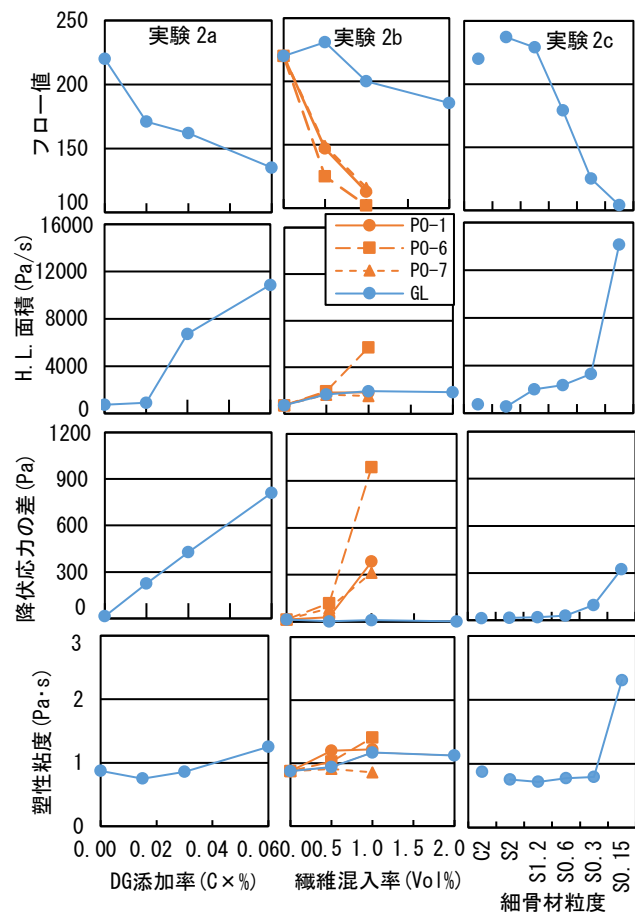


図-13 各種要因がフロー値、H.L.面積、降伏応力の差および塑性粘度に及ぼす影響

参考文献

- 1) Hamidreza, S.G., Corkerb, J. and Fana, M.: Additive Manufacturing Technology and Its Implementation in Construction as an Eco-Innovative Solution, Automation in Construction, Vol.93, pp.1-11, Sep.2018
- 2) Tarhan, Y. and Sahin, R.: Developments of 3D Concrete Printing Process, International Civil Engineering and Architecture Concrete, pp.2394-2404, Apr.2019
- 3) Qian, Y. and Kawashima, S.: Distinguishing Dynamic and Static Yield Stress of Fresh Cement Mortars through Thixotropy, Cement and Concrete Composites, Vol.86, pp.288-296, Feb.2018
- 4) 寺西浩司, 藤田健太郎: 建設 3D プリンティングに用いるセメント系材料のチクソトロピー性の評価方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1540-1545, 2022.7
- 5) 水戸友哉, 寺西浩司: 種々の混和材を添加したセメントペーストのチクソトロピー性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.67-68, 2020