

可塑性グラウトの材料特性評価方法に関する基礎研究

田中 麻穂^{*1}・安井 利彰^{*2}

The Basic Study on the Evaluation Method of Material Characteristics of the Plastic Grout

Maho TANAKA, Toshiaki YASUI

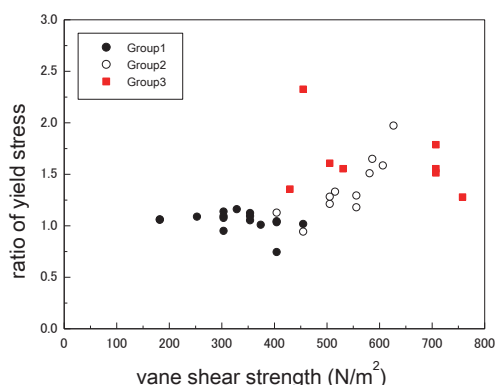


図-1 降伏応力比－ベーンせん断強度関係

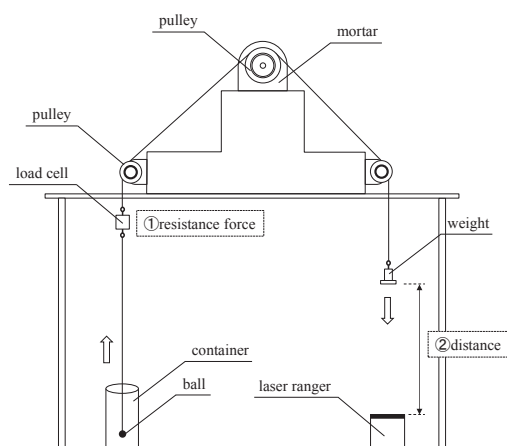


図-2 球引き上げ試験概要図

研究の目的

近年、陥没対策を目的とした空洞充填工事が増加している。空洞が広大に広がる場合には可塑性グラウトによって端部隔壁を構築し、空洞内の必要な箇所だけを限定的に充填する。可塑性グラウトは、自立性のあるセメント系材料で加圧することで流動する。このような材料の取扱いにおいてはレオロジー特性の評価が重要であるが、レオロジー特性を評価することは容易ではなく評価方法も確立されていないため、隔壁構築材として可塑性グラウトが使用される場合には、打設試験を何度も実施して配合を決定する作業を行っている。そこで、本研究では、数値解析により生産性の向上を図るために、可塑性グラウトのレオロジー特性を評価する方法の構築を目的としている。

技術の説明

本研究では、スランプ試験、音叉型振動式粘度計を用いた粘度測定及び球引き上げ試験を実施することによりレオロジー特性の評価を試みた。その際、異なる配合の可塑性グラウト及びセメントの水和反応による硬化の影響を受けた場合についての検討を実施した。

主な結論

- 可塑性グラウトの降伏値の評価において、スランプ試験結果の適用性を確認した。また、材料の状態に応じてビンガムモデルを適用するのが妥当であるかを判断する場合に、ハンドベーン試験よりベーンせん断強度が450 (N/m²) 以上の場合はビンガムモデルの適用が妥当ではない可能性があるということが示された。
- 可塑性グラウトの挙動を表現するのに用いる解析プログラムは、可塑性グラウトの性状変化に追従するため解析途中でのモデルの変更が可能のように検討する必要がある。
- ベーンせん断強度 450 (N/m²) 以下の範囲においては、塑性粘度の値が大きく変化しない可能性があると考えられる。
- レオロジー定数である降伏値及び塑性粘度を定量的に評価することができた。ただし、球引き上げ試験から得られる降伏値は過大評価、塑性粘度は過小評価されている可能性があると考えられる。

*1 本店 技術研究所

*2 本店 技術研究所 生産性革新技術研究室

可塑性グラウトの材料特性評価方法に関する基礎研究

田 中 麻 穂*¹ 安 井 利 彰*²

要 旨

可塑性グラウトは、自立性のあるセメント系材料で加圧することで流動するという性質を有する。材料特性の評価方法は確立されておらず、その挙動を数値解析で表現することは容易ではないが、施工計画段階での生産性向上を目指して数値解析の早期実用化を望む声が高まっている。本研究では、数値解析の実用化に向けて可塑性グラウトの材料特性評価方法を構築することを目的とし、スランプ試験や球引上げ試験により材料特性の評価を試みた。その結果、スランプ試験結果から降伏値、粘度計から塑性粘度、球引上げ試験から降伏値および塑性粘度を評価することが可能であることを確認した。また、これらの試験による評価方法が適用できるのは可塑性グラウトがレオロジー流体と評価できる場合のみであり、ハンドベーン試験より得られるベーンせん断強度を指標としてレオロジー流体であるかを評価できる可能性があるということが示された。

キーワード 可塑性グラウト／空洞充填／レオロジー

目 次

- | | |
|----------------|----------------|
| 1. はじめに | 4. 粘度計測定による検討 |
| 2. 可塑性グラウトの構成式 | 5. 球引上げ試験による検討 |
| 3. スランプ試験による検討 | 6. まとめ |

THE BASIC STUDY ON THE EVALUATION METHOD OF MATERIAL CHARACTERISTICS OF THE PLASTIC GROUT

Maho TANAKA

Toshiaki YASUI

Synopsis:

The plastic grout is a self-organized and cementitious material, and flows by adding additional pressure. It is difficult to express the behavior of the plastic grout by the numerical analysis because evaluation methods of material characteristics aren't established. In the execution scheme, there is a growing need for the practical application of numerous analyses for the productivity increase. In this study, it was tried to evaluate material characteristics by the slump test, viscometers and ball pulling up test. In conclusion, it was confirmed to be able to evaluate the yield stress by slump tests, the plastic viscosity by viscometers and the both material characteristics by ball pulling up test. Only when the plastic grout is able to consider the rheological fluid, these tests are able to apply. And it was confirmed that there is the potential to be able to judge by the vane shear stress available from hand vane tests.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 技術研究所 生産性革新技術研究室

1. はじめに

日本全国には、放置された鉱山廃坑や地下施設、鍾乳洞等の空洞が至る所に存在している。近年、危機管理需要の増加に伴い、道路等の陥没事故要因の1つであるこれら空洞の充填工事も増加している。全体を充填することが困難な廃坑等の広大な空洞では、事前に空洞内に隔壁を構築し、充填材が逸走しないように制御した上で必要箇所のみに限定的に充填する限定充填工法¹⁾が実施されている。この限定充填工法では、空洞内での隔壁の構築は安全性や施工性等の観点から、一般的に地上からボーリング孔を利用して構築されることが多く、その隔壁材料として用いられるのが可塑性グラウト²⁾である。可塑性グラウトは、自立性のあるセメント系材料で、加圧することで流動するため多用途に使用できる便利な材料である。その反面、構築される隔壁は可塑性グラウト材料特性や施工方法等に大きく依存するため、施工管理や出来形管理等が非常に困難である。また、その設計や評価方法も確立されていないため、配合等の決定に際して多数の打設試験を実施しなければならない現状にある。そこで本研究では、可塑性グラウトにより構築される隔壁の設計や評価手法の確立を目的として、可塑性グラウトをビンガム流体でモデル化し、そのレオロジー特性についてスランプ試験や音叉型振動式粘度計、球引上げ試験等を実施することでその評価を試みた。

2. 可塑性グラウトの構成式

可塑性グラウトは、加圧することで流動化する材料であるため、その変形や物性はレオロジーとしての評価が必要である。レオロジーとは、「物質の流動と変形を取り扱う科学」、「その物質の物性をモデル化し、評価する学問」と定義され³⁾、物質を表すモデルやその材料特性、挙動の予測・評価等が含まれる。可塑性グラウトのレオロジー特性について検討した例は少ないが、その挙動はセメント系材料であることから、フレッシュコンクリートと同様にビンガム流体でモデル化できる⁴⁾⁵⁾とされる。ビンガム流体のせん断応力～せん断ひずみ速度の関係は式[1]で示される。

$$\tau = \tau_f + \dot{\gamma} \eta_p \quad [1]$$

τ : せん断応力 (N/m²) , $\dot{\gamma}$: せん断ひずみ速度 (1/s) , τ_f : 流動化し始める際の降伏値 (N/m²) , η_p : 塑性粘度 (Pa・s) . 本研究では、可塑性グラウトを式[1]に示したビンガム流体と仮定し、そのレオロジー特性の評価を行った。

3. スランプ試験による検討

3.1 スランプ試験による降伏値の評価方法

一般的に、レオロジー特性を評価する方法としてコンシステンシー試験が挙げられる。コンシステンシーとは

変形あるいは流動に対する抵抗性の程度を表すものの総称であり、フレッシュコンクリートではスランプ試験によって評価される。村田ら⁶⁾は、フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定し、スランプ試験における変形量と降伏値の関係を提案している。図-1に示したスランプ試験において、スランプコーンの任意高さ z の水平断面に作用する最大せん断応力 τ_z は式[2]で表される。

$$\tau_z = \frac{1}{2} \frac{W_z}{\pi z^2} w \frac{(H+z)^3 - H^3}{6(H+z)^2} \quad [2]$$

W_z : 任意高さ z における供試体重量 (m) , r_z : 任意高さ z における供試体半径 (m) , w : 単位体積重量 (kg/m³) , H : スランプコーンの全高 (m) , S_L : スランプ値 (m) . スランプ試験では、図-1に示すように試験後の供試体が不変領域と変形領域に分けられると考える。不変領域は、降伏値よりも自重によるせん断応力の方が小さい領域であり、不変領域の下端では降伏値とせん断応力が釣り合うと考える。不変領域の高さを h_0 とすると、不変領域下端の降伏値 τ_{fa} は式[2]より以下のように求められる。

$$\tau_{fa} = w \frac{(H+h_0)^3 - H^3}{6(H+h_0)^2} \quad [3]$$

一方、変形領域の高さを h_1 とし、変形領域では体積変化が無く変形領域の上端で降伏値とせん断応力が釣り合うと考えれば、変形領域の高さ h_1 は式[2]より次のように求められる。

$$h_1 = \int_{h_0}^H \frac{r_z^2}{r_{z1}^2} dz = \int_{h_0}^H \frac{\tau_{fb}}{\tau_z} dz = \frac{2\tau_f}{w} \ln \frac{7H^3}{(H+h_0)^3 - H^3} \quad [4]$$

τ_{fb} は変形領域上端の降伏値であり、式[4]より以下のように表される。

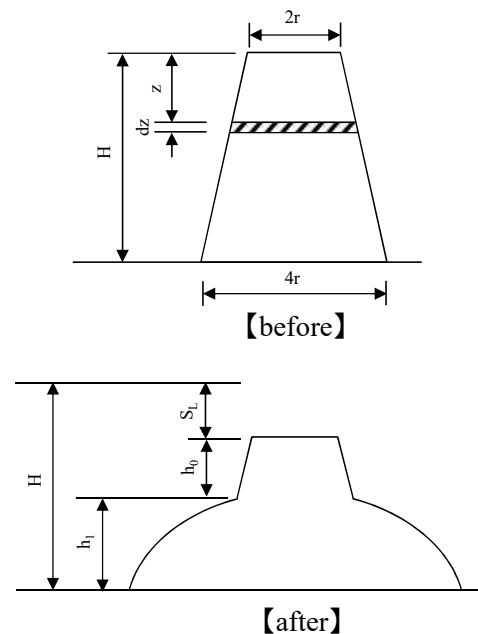


図-1 スランプ試験

$$\tau_{fb} = \frac{wh_1}{2} \frac{1}{\ln \frac{7H^3}{(H+h_0)^3 - H^3}} \quad [5]$$

以上のように、 τ_{fa} は不変領域から算出した降伏値、 τ_{fb} は変形領域から算出した降伏値であり、可塑性グラウトがビンガム流体でモデル化できる場合は τ_{fa} と τ_{fb} は等しくなる。

しかしながら、可塑性グラウトは時間経過に伴いセメントの水和反応により硬化する材料であり、流体から固体へとその物性が変化していくため、不変領域 h_0 及び変形領域 h_1 は徐々に変化すると考えられる。

この時、可塑性グラウトがビンガム流体の材料特性から徐々に乖離すると考えると、降伏値 τ_{fa} と τ_{fb} は等しくならない。そこで、可塑性グラウトに対してスランプ試験を実施し、そのレオロジー特性の評価を試みるとともに、降伏値 τ_{fa} と τ_{fb} の関係からビンガム流体を用いたモデル化の妥当性について検討した。

3.2 試験条件及び結果

スランプ試験の条件を表-1 及び表-2 に示す。試験には、2 配合の可塑性グラウトを用いた。TYPE2 には急硬剤を添加することで TYPE1 より硬度が高くなる配合とした。試験結果は、配合と製造後の経過時間によって 3Group に分割した。Group1 は、TYPE1 の配合で、製造後 2 時間未満のもの、Group2 は TYPE1 の配合で製造後 2 時間以上経過したもの、Group3 は TYPE2 の配合の結果である。TYPE2 の配合では急速に硬化が進むため、全試料において製造後 1 時間以内に試験を実施した。スランプコーンの形状は、上面の直径が 5cm、下面の直径が 10cm、高さが 15cm である。スランプコーンの内側には剥離剤を塗布し摩擦の影響は無いものとして検討を行った。

スランプ試験後の状態を図-2 に示す。Group1 では降伏値が小さいため S_L が大きく h_0 が小さいが、Group2 では S_L が小さく h_0 が大きくなっている。製造後 2 時間以上経過すると、硬化に伴う降伏値の増大によって不変領域 h_0 が拡大する傾向が見られた。Group3 では Group2 と同傾向の形状となる場合が多かった。ここで、スランプ試験より得られた τ_{fa} と τ_{fb} の関係を図-3 に示す。図-3 中の実線は $\tau_{fa} = \tau_{fb}$ の基準線であり、降伏値が比較的小さい Group1 は基準線上にあるものが多く、製造から 2 時間程度経過すると Group2 では降伏値が大きくなるにつれて基準線から逸脱してくることがわかる。また、Group3 では、基準線から逸脱している場合が多くなっている。TYPE2 の配合では、急硬剤の添加によるゲル化の影響により、せん断強度が増加していると考えられる。

そこで、ベーンせん断強度を指標として配合および時間経過に伴う材料特性の変化を評価する。ベーンせん断強度とスランプ試験結果及び式[3]から計算した降伏値 τ_{fa} との関係を図-4 に示す。なお、ベーンせん断強度はハン

ドベーン試験により求めた。スランプ試験を実施した後の試料を、なるべく外力を与えないように容量が 1 リットルの容器に戻し、ハンドベーン試験器を試料の天端から 10cm 程度挿入して試験を実施した。図-4 より、降伏値 τ_{fa} とベーンせん断強度との間には相関関係があると考えられる。また、ベーンせん断強度と降伏値の比 τ_{fa}/τ_{fb} の関係を図-5 に示す。図-5 より、ベーンせん断強度が 450N/m² 以下の比較的小さい場合には、 τ_{fa}/τ_{fb} は 1 に近い値となっているが、ベーンせん断強度が 450N/m² 以上になると τ_{fa}/τ_{fb} が 1 から乖離していく。つまり、配合および硬化の影響によりせん断強度が大きい可塑性グラウ

表-1 配合表（仕上がり 1.0m³あたり）

配合	高炉セメント	水	混和剤	可塑性材料	急硬剤
単位	kg	kg	kg	kg	kg
TYPE1	500	323	10	45.0	482.0
TYPE2	500	323	10	44.1	472.9

表-2 検討グループ

Group	配合	経過時間
Group1	TYPE1	2 時間未満
Group2	TYPE1	2 時間以上
Group3	TYPE2	1 時間未満

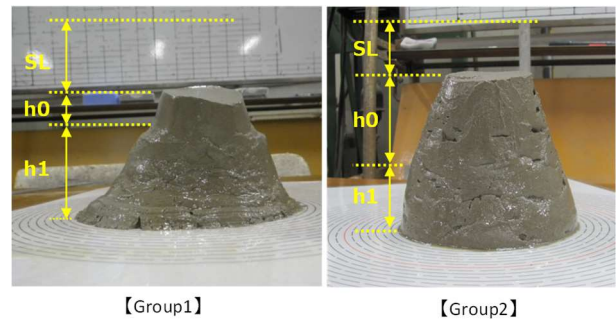


図-2 スランプ試験後の状態

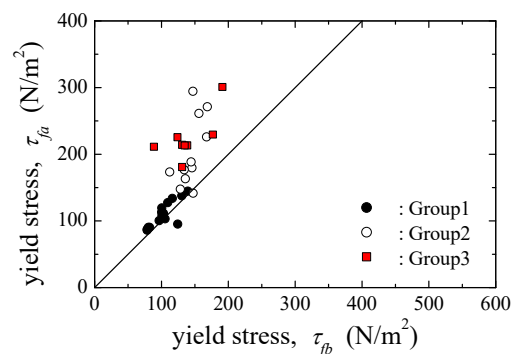


図-3 $\tau_{fa} - \tau_{fb}$ 関係

トはビンガムモデルとして取り扱うのが難しい可能性があるということを示唆している．そこで本研究では，ハンドベーン試験によって求めたベーンせん断強度が 450N/m^2 以下という条件の下でビンガム流体として振る舞うと評価した．このように，フレッシュ状態ではその流動及び変形特性がビンガムモデルに従うと考えられる材料であっても，硬化に伴い材料の性状が変化することによってビンガムモデルから逸脱する可能性がある．また，フレッシュ状態であっても，ゲル化の作用が強い場合にも同様のことがいえるため，ビンガム流体として扱うことが難しいという可能性があることがわかった．以上より，可塑性グラウトは通常の使用条件下において性状変化が起こりうる材料であると評価できるため，その挙動を数値解析で表現するためには解析途中でのモデルの変更が必要になる可能性もある．なお，スランプ試験では塑性粘度の影響は小さいとして降伏値のみを評価しているが，この降伏値から材料がビンガム流体であるかの判断をできる可能性があることを確認した．

4. 粘度計測定による検討

4.1 試験条件

スランプ試験では塑性粘度の影響は小さいとして降伏値のみを評価しているため，可塑性グラウトの変形を示す塑性粘度を定量的に評価することはできない．塑性粘度は，粘度計を用いて計測するのが一般的であり，回転粘度計や B 型粘度計，コーンプレート型粘度計等，多くの種類がある．しかしながら，これらの粘度計はその計測対象が低粘度であり，回転時に材料が計測部から乖離してしまう等，可塑性グラウトに対して評価可能であるとは言い難い．そこで本研究では，音叉型振動式粘度計⁷⁾を用いて塑性粘度の測定を試みた．ここでは配合 TYPE1 の材料に対して，製造 15～45 分程度 (CASE1)，60～90 分程度 (CASE2)，120～150 分程度 (CASE3) 経過後に測定を行った．また，それぞれの時間において 3 試料ずつ試験を実施している．

4.2 試験結果

試験結果を図-6 及び表-3 に示す．図-6 は，塑性粘度の経時変化を示しており，材料の硬化とともに塑性粘度も増加する傾向があると考えられる．ただし，CASE3 では，3 点のうち 1 点が他の測定値から大きく外れているため，残りの 2 点の平均値を CASE3 の塑性粘度とした．表-3 に示されるようにベーンせん断強度がおよそ $450\text{ (N/m}^2)$ 以下の CASE1 と CASE2 を比較すると，塑性粘度は 30 分で約 1.1 倍の値となっている．それに対し，CASE3 は CASE1 の約 1.3 倍の値を示す．以上のことから，ビンガム流体としての取扱いが妥当であるとしたベーンせん断強度 $450\text{ (N/m}^2)$ 以下の範囲においては，塑性粘度の値が大きく変化しない可能性があると考えられる．ただし，

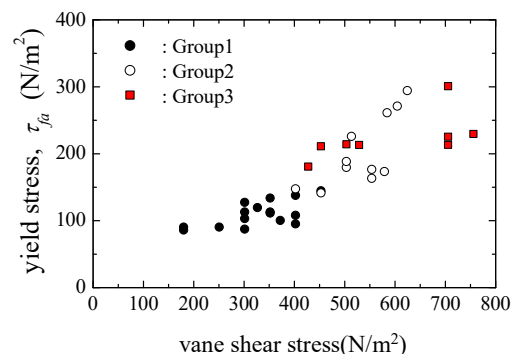


図-4 降伏値 τ_{fa} - ベーンせん断強度の関係

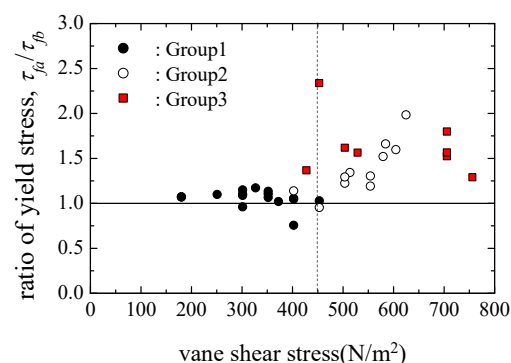


図-5 τ_{fa} / τ_{fb} - ベーンせん断強度の関係

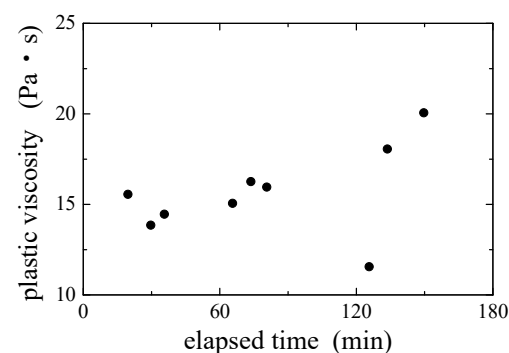


図-6 塑性粘度の経時変化

表-3 ベーンせん断強度

CASE	経過時間 (min)	塑性粘度 (Pa · s)	ベーンせん断強度 (N/m²)
CASE1	15～45	14.6	404.2
CASE2	60～90	15.7	454.7
CASE3	120～150	18.9	545.7

本試験の結果だけでは音叉型振動式粘度計は塑性粘度の評価に関して適用性があるとは断言できず、今後の検討が必要であると考えられる。

5. 球引上げ試験による検討

5.1 球引上げ試験の概要

小門ら⁸⁾は代表的なレオロジー試験の一つである球引上げ試験を実施することによって、高流動モルタルのレオロジー特性を評価している。球引き上げ試験とは、図-7に示す装置を用いて試料中に埋め込んだ直径 30mm の球を一定の速度で引上げて球に作用する抵抗力を測定し、引上げ速度を変化させて同様の試験を実施することにより引上げ速度と抵抗力の関係からレオロジー定数を求めるものである。それぞれの引き上げ速度と引き上げ抵抗力の関係から、Ansley⁹⁾の式を用いて降伏値 τ_f 及び塑性粘度 η_p を求めることができる試験である。Ansley の式を式[6]に示す。

$$F = 3\pi\eta_p vD + \frac{7}{8}\pi^2 D^2 \tau_f \quad [6]$$

F : 球の引き上げ抵抗力 (N) , v : 球の引き上げ速度 (m/s) , D : 球の直径 (m) . 球引上げ試験では、レオロジーモデルのパラメータである降伏値と塑性粘度を同時に評価することができる。

5.2 実験条件

本試験で使用した可塑性グラウト材の配合は急硬剤を添加しない TYPE1 の配合である。試験モールドには、直径 150mm、高さ 300mm のコンクリート供試体整形型枠を使用した。また、装置の引上げ回転数は 250, 1000, 1500, 2000rpm とした。球引上げ試験を実施するタイミングは、TYPE1 において製造直後及び 1 時間経過後とした。また、ハンドベーン試験も実施した。

5.3 実験結果

式[6]の両辺を $7\pi^2 D^2 / 8$ で除すと、ビンガムモデルの構成則である式[1]と同じ形状になる。ここで、両式を比較することによって、引上げ速度からひずみ速度、引上げ抵抗力からせん断応力を算出し、図-8 にプロットした。それぞれの試験時刻におけるせん断応力～ひずみ速度の関係において近似線を引き、切片を降伏値、傾きを塑性粘度と仮定すると表-4 のような結果が得られた。この結果を見ると、製造直後の塑性粘度の値に対して 1 時間経過後には約 2 倍の値を示している。

また、スランプ試験と球引き上げ試験によって得られた降伏値とベーンせん断強度の関係を図-9 に示す。球引上げ試験によって得られた降伏値は、スランプ試験によって得られた降伏値よりも大きく、2 倍程度の値となっている。これは、球引き上げ試験の降伏値算出方法に要因があると考えられる。球引き上げ試験では、既述のような方法で降伏値を推定するが、球の引き上げ速度が速くなるにつれて試料が球からスリップしてしまい、引上げ

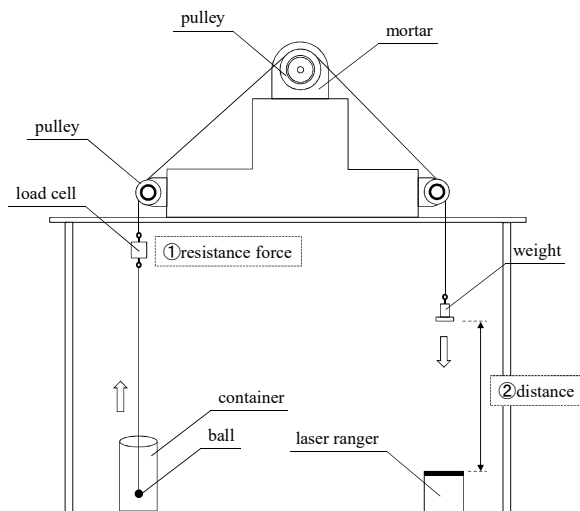


図-7 球引上げ試験装置

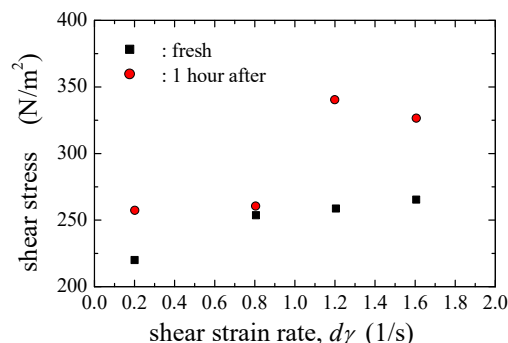


図-8 セン断応力 - セン断ひずみ速度の関係

表-4 ベーンせん断抵抗値の経時変化

	単位	製造直後	1 時間経過
ベーン			
せん断強度	N/m ²	332.5	347.5
塑性粘度	Pa・s	31.8	60.6
降伏値	N/m ²	218.2	237.5

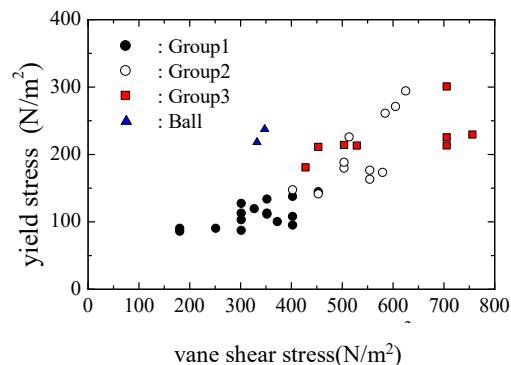


図-9 降伏値 - ベーンせん断強度の関係

抵抗力を過小評価している可能性がある。つまり、球引き上げ試験結果から切片として得られる降伏値は、実際の降伏値より過大評価されている可能性が考えられるため、スランプ試験によって得られた降伏値に近づくと予想される。どちらの試験においても降伏値の定量的な評価は可能であると考えられるが、スランプ試験で得られる降伏値の方が、真値に近い可能性があると考えられる。また、同様の理由で、塑性粘度は大きくなる可能性がある。

6. まとめ

本研究では、スランプ試験、粘度計による粘度測定及び球引き上げ試験を実施することによって、可塑性グラウトのレオロジー特性についての評価を試みた。得られた結果を以下に示す。

- 1) スランプ試験結果から可塑性グラウトの降伏値を評価することができると考えられる。また、材料の状態に応じてビンガムモデルを適用するのが妥当であるかを判断する場合に、ハンドベーン試験よりベーンせん断強度が 450N/m^2 以上の場合はビンガムモデルを適用するのが妥当ではない可能性があるということが示された。つまり、可塑性グラウトの挙動を表現するのに用いる解析プログラムは、可塑性グラウトの性状変化に追従するため解析途中でのモデルの変更が可能なように検討する必要がある。
- 2) 音叉型振動式粘度計によって塑性粘度の測定を行った。ベーンせん断強度 450N/m^2 以下の範囲においては、塑性粘度の値が大きく変化しない可能性があると考えられる。ただし、本試験の結果だけでは音叉型振動式粘度計は塑性粘度の評価に関して適用性があるとは断言できないため、今後の検討が必要であると考えられる。
- 3) 球引き上げ試験により可塑性グラウトのレオロジー特性の評価を試みた。レオロジー定数である降伏値及び塑性粘度を定量的に評価することができた。ただし、球引き上げ試験から得られる降伏値は過大評価、塑性粘度は過小評価されている可能性があると考え

られる。

参考文献

- 1) 安井利彰, 清水英樹, 伏屋学, 赤松祐介 : 空洞充填工法の開発－廃坑充填工における端部隔壁の施工－, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.515-516, 2011.
- 2) 清水英樹, 小熊登, 安井利彰, 伏屋学 : 空洞充填工における範囲限定隔壁材料の開発および実施工での検証, 建設技術発表会論文集, pp.264-271, 2011.
- 3) 谷川泰雄 : フレッシュコンクリートの流動特性とその予測, 株式会社セメントジャーナル社, 118pp., 2004.
- 4) 石井裕康, 檜垣貫司, 伊藤一教, 木村政俊, 小山文男 : セメント系可塑状グラウト材料の充填挙動に対する数値流体解析の適用, 土木学会論文集 F Vol.66 No.1, pp.170-180, 2010.
- 5) 田中麻穂, 安井利彰, 平田昌史, 清水英樹 : 可塑性グラウトのレオロジーモデルに関する検討, 第 51 回地盤工学研究発表会発表講演集投稿中.
- 6) 村田二郎 : フレッシュコンクリートの挙動に関する研究, 土木学会論文集第 378 号, Vol.6, pp.21-33, 1987.
- 7) 棚木隆, 柿崎正義, 枝広英俊, 大島秀明 : 音叉型振動式粘度計による高流動セメントペースト・モルタルのレオロジー特性 (材料・施工), 研究報告書構造系, pp.157-160, 1993.
- 8) 小門武, 細田尚, 宮川豊章, 藤井學 : スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究, 土木学会論文集 No.578/V-37, pp.19-29, 1997.
- 9) Ralph W. Ansley and Terence N. Smith : Motion of Spherical Particles in a Bingham plastic, *AIChE Journal*, Vol.13/No.6, pp.1193-1196, 1967.