

# 論文 モルタルの静置, 振動下におけるレオロジー特性に関する基礎的研究

齋藤 拓弥\*1・藤倉 裕介\*2・橋本 紳一郎\*3・伊達 重之\*4

**要旨:** 本研究では, 同一の材料で単位水量を変化させた場合, 混和剤によりフローの大きさを変化させた場合, 異なる配合や材料を使用して練った場合など, 各種配合条件におけるフレッシュモルタルの静置及び振動下におけるレオロジー特性について検討した。その結果, モルタルに振動をかけることによりビンガム流体の特性値である塑性粘度の上昇および降伏応力の減少が確認された。フローが大きいモルタルほど振動をかけた時の塑性粘度の上昇量と降伏応力の減少量が小さくなり, 同一のフローであっても異なる材料や配合である場合は振動によってそれぞれ異なる挙動が示された。

**キーワード:** モルタル, 振動, 塑性粘度, 降伏応力, モルタルフロー, ビンガム流体

## 1. はじめに

これまで, 構造物に要求される強度や耐久性, 耐震性能などを十分に満足させるために, 特定の構造物には設計の段階における鉄筋量の増加, 高強度コンクリートや高流動コンクリートの使用, 高品質な二次製品の活用など様々な工夫が行われてきた。しかしこれらのケースでは必要とされる材料費の増加, 鉄筋の高密度配筋から求められるコンクリートの高い施工性能への要求, それにかかるコストなどの問題があり, いまだ全ての構造物の施工に適用されてはいない。

現在でも, 高品質な土木構造物を構築するためには施工が可能な範囲で単位水量を落とした比較的固練りのコンクリートを用いることが一般的であり, 施工性能と材料分離抵抗性の観点から, スランプ 8cm から 12cm 程度のコンクリートが指定され, それらをバイブレーターによって振動締めをしながら施工を進めていくケースが多い。使用されるコンクリートの基本的な施工性能を試験するための方法は上記で述べたスランプ試験が一般的であるが, 現在では混和剤を取り巻く環境が充実し, 異なる材料, 異なる配合で練り混ぜたコンクリートでも指定のスランプ値を出すことが比較的容易となってきた。材料や配合が異なればそれぞれ異なる施工性能を示すことが予想されるが, コンクリートのワーカビリティの判断基準をスランプ値のみに依るものとした場合, 上記のコンクリートのワーカビリティはすべて等しいということになる。また, バイブレーターを使用した加振環境下では, 更に異なる挙動を示すことが報告されている<sup>1), 2)</sup>。

コンクリートの実質的な施工性能を調べる有効な方法としてボックス充填試験や, それに棒バイブレーター

を組み合わせた方法<sup>3)</sup>も存在するが, これは間隙通過性を見るための方法にとどまってしまう。一方でコンクリートをビンガムモデルとみなし, 回転粘度計や球引上げ粘度計などを用いてコンクリートやモルタルの塑性粘度と降伏値を直接測定する試験方法や報告<sup>3)</sup>も数多いが, これらは試験装置や測定条件が複雑であり, 特にコンクリートを用いた測定では精度に不確実性が残り, 加えて加振の状況下が想定されていない場合が多い<sup>3)</sup>。

本研究では, 羽根沈入式粘度計とテーブルバイブレーターを用いて, 静置時と加振時のモルタルのレオロジー特性値である塑性粘度と降伏応力値を測定し, 各レオロジー特性に対する振動の影響と各種配合条件との関係を評価する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験で使用した材料は, セメントに普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>, 以下, N), 高炉セメント B 種 (密度: 3.04g/cm<sup>3</sup>, 以下, BB), 低熱ポルトランドセメント (密度: 3.22g/cm<sup>3</sup>, 以下, L), 早強ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm<sup>3</sup>, 以下, H), 細骨材は千葉県君津産山砂 (表乾密度: 2.61g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.17%, 以下, y), 東京都青梅産砕砂 (表乾密度: 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.35%, 以下, s) を使用した。混和剤には, ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

### 2.2 モルタルの配合

本実験で使用したモルタルの配合一覧を表-1 に示す。モルタルの種類は, セメントの影響を比較するために4種類のセメントそれぞれで水セメント比を 50% に統一して単位水量 264kg/m<sup>3</sup>, 279 kg/m<sup>3</sup>, 294 kg/m<sup>3</sup> の 3 水準を設

\*1 東海大学 工学部土木工学科 (学生会員)

\*2 株式会社フジタ 技術センター土木研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博士 (工) (正会員)

\*4 東海大学 工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 配合一覧

| W/C (%) | S/C  | セメントの種類 | 単位水量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 砂の種類 | 高性能 AE 減水剤 (C×%) | フロー (mm)      |
|---------|------|---------|---------------------------|------|------------------|---------------|
| 50      | 2.81 | N       | 264                       | 山砂   | 1.0, 1.5, 2.0    | 152, 173, 178 |
|         | 2.54 |         | 279                       |      | 0.5, 1.0, 1.5    | 172, 183, 193 |
|         | 2.31 |         | 294                       |      | 0.0, 0.5, 1.0    | 164, 207, 254 |
| 50      | 2.78 | BB      | 264                       | 山砂   | 1.0, 1.5, 2.0    | 170, 165, 188 |
|         | 2.51 |         | 279                       |      | 0.5, 1.0, 1.5    | 165, 169, 197 |
|         | 2.28 |         | 294                       |      | 0.0, 0.5, 1.0    | 150, 177, 201 |
| 50      | 2.83 | L       | 264                       | 山砂   | 1.0, 1.5, 2.0    | 182, 176, 195 |
|         | 2.56 |         | 279                       |      | 0.5, 1.0, 1.5    | 194, 199, 226 |
|         | 2.32 |         | 294                       |      | 0.0, 0.5, 1.0    | 186, 200, 240 |
| 50      | 2.81 | H       | 264                       | 山砂   | 1.0, 1.5, 2.0    | 154, 198, 203 |
|         | 2.54 |         | 279                       |      | 0.5, 1.0, 1.5    | 170, 201, 216 |
|         | 2.30 |         | 294                       |      | 0.0, 0.5, 1.0    | 147, 190, 251 |
| 40      | 2.08 | N       | 264                       | 山砂   | 1.0, 1.5, 2.0    | 168, 190, 174 |
|         | 1.87 |         | 279                       |      | 0.5, 1.0, 1.5    | 162, 219, 216 |
|         | 1.68 |         | 294                       |      | 0.0, 0.5, 1.0    | 156, 198, 250 |
| 50      | 2.80 | N       | 264                       | 砕砂   | 0.0, 0.5, 1.0    | 152, 197, 245 |
|         | 2.53 |         | 279                       |      | 0.15, 0.5, 0.75  | 191, 247, 269 |
|         | 2.30 |         | 294                       |      | 0.0, 0.25, 0.5   | 204, 239, 262 |

定した。また、各単位水量内の配合で異なるフローを出すために混和剤の添加量を3水準設定した。

Nセメントの配合においては、上記と同じ要領で水セメント比を40%に変更したもの、また砂に砕砂を使用した配合も行い、同様に混和剤の添加量を3水準設定した。

### 2.3 試験方法

#### (1) フレッシュ性状試験

モルタルのフレッシュ性状試験では、モルタルフロー試験を JIS-R5201 にしたがって測定した。実際のフローを表-1 に示す。

#### (2) 羽根沈入式粘度測定試験

本試験器は、図-1 に示すような3枚の羽根を有する器具をモルタルに自重で沈入させて、みかけの塑性粘度  $\eta'$  を測定するものである。実験結果の例を図-2 に示す。また、試料について数種類の沈入羽根の重量  $W_f$  (以下、記号については図-1 を参照) を用いて試験を行うことにより、せん断速度  $v_t(=L/T)$  とせん断応力  $\tau (=W_f/A)$  の関係が得られる。せん断速度をモルタルのせん断領域の幅  $h$  で割った値がせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  となる。図-2 に示すようにモルタルをビンガム流体と考え、せん断速度とせん断応力  $\tau$  の関係からみかけの塑性粘度  $\mu'$  と降伏値を求めた。そして、塑性粘度が既知の流体(塑性粘度が  $10\sim 300\text{Pa}\cdot\text{s}$  のシリコンオイル)を用いた実験により求めたみかけの塑性粘度と塑性粘度の関係<sup>4)</sup>から、モルタルの塑性粘度を算出した。

なお、本試験では沈入時に作用する浮力およびせん断面積が一定となるように羽根がモルタルに完全に埋まった状態から沈入させ、測定を開始した。加振時の測定に

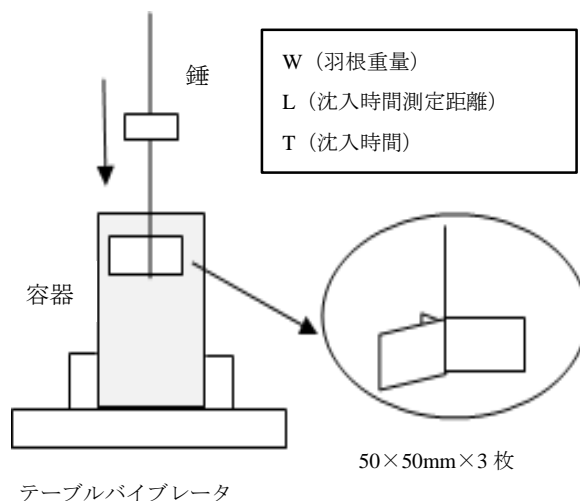


図-1 羽根沈入試験装置の概要

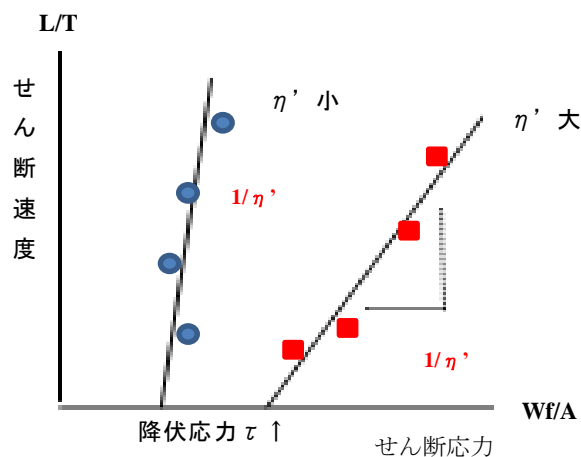


図-2 試験結果例



写真-1 試験状況



写真-2 加速度の測定状況

においては、本試験器を据え付けたテーブルバイブレータ（加速度： $42.0\text{m/s}^2$ 、周波数： $70\text{Hz}$ ）を稼働させた状況で測定を行った。実際の試験を行っている様子を写真-1に、テーブルバイブレータの加速度と速度を測定している様子を写真-2に示す。振動締固めによる試料の物性変化を極力避けるために、羽根を沈入させる時以外は加振を行わず、加振時間の合計も可能な限り短くした。なお、沈入羽根と容器はそれぞれ独立しておりテーブルバイブレータの振動の影響は少ないがモルタルの振動が羽根に与える影響が考えられる。本試験では羽根が鉛直かつ等速で沈入することを確認して試験を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 羽根沈入式粘度測定試験

実際に測定した結果の一部を図-3に示す。凡例の名前はモルタルの配合を示し、例えば 50N264y1.5（静置）では、水セメント比 50%、セメントの種類 N、単位水量  $264\text{kg/m}^3$ 、砂の種類 y、混和剤添加量 ( $C \times 1.5\%$ )、測定を行った試料の状態（静置）を表している。図-3に示した試料はいずれも 15 打フローの値が  $185 \pm 15$  (mm) のものである。試験機の説明で述べたように、錘の重量を変えて試料 1 つあたり平均して 4 から 5 段階の重量で静置状態、加振状態それぞれにおいて測定を行い、それらの測定点を近似直線で表している。図中の実線で表した静置状態における測定に比べて、点線で示した加振状態の測定では横軸の切片である降伏応力が減少し、線の傾きが小さくなり、塑性粘度が上昇していることがわかる。ま

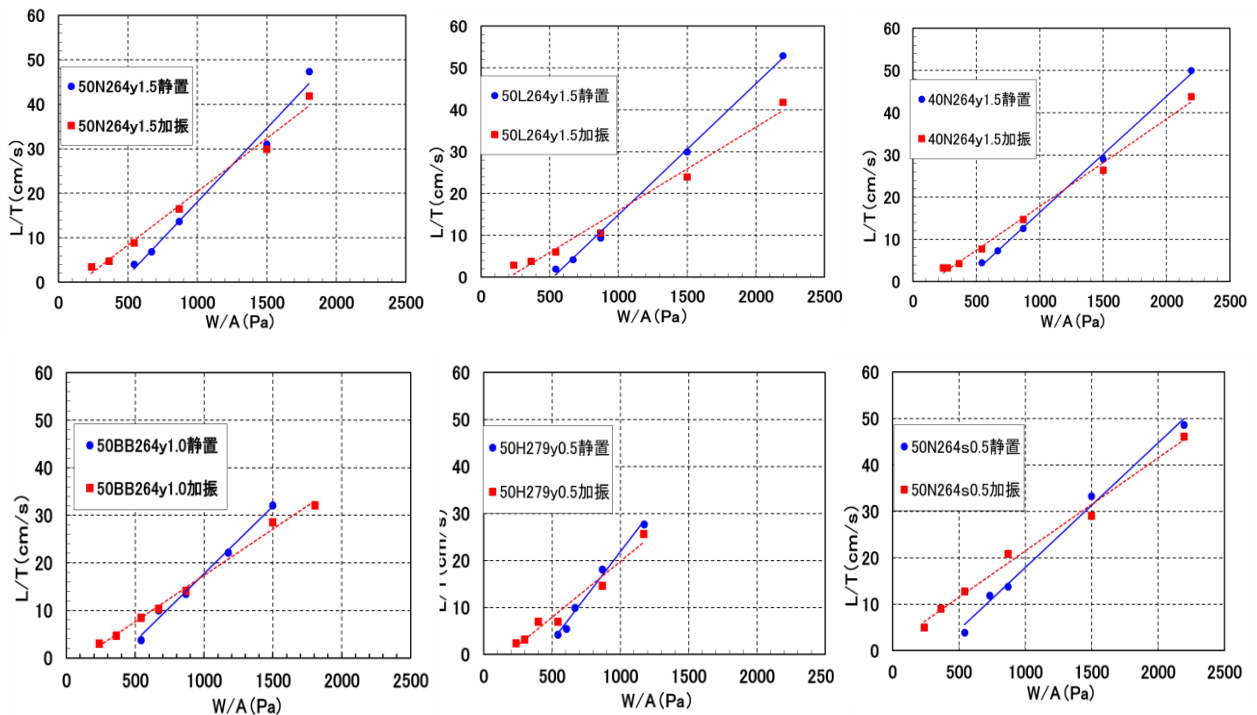
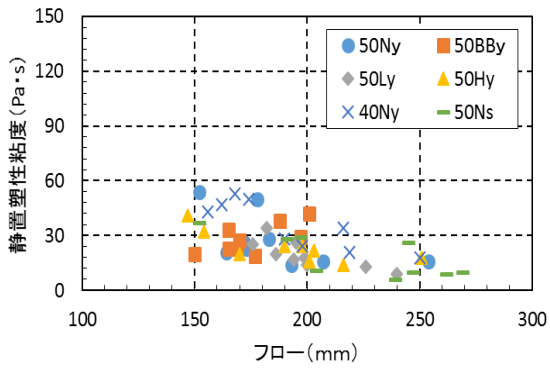
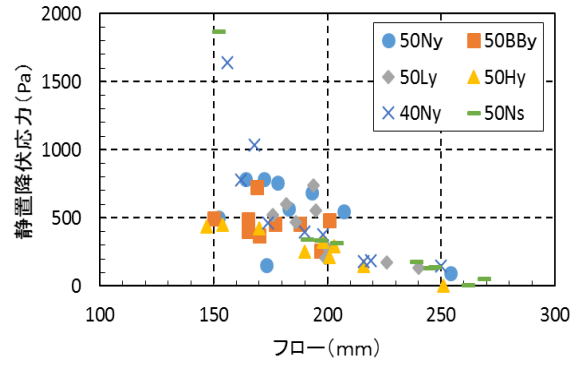


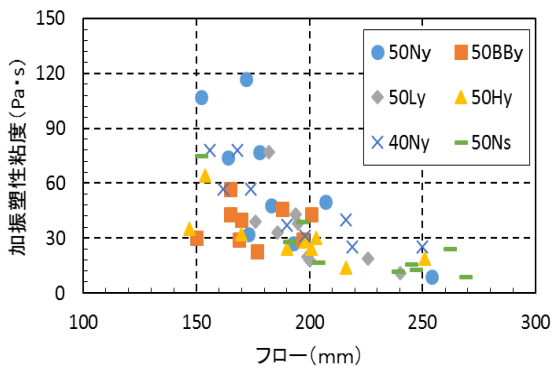
図-3 実際の試験結果の例



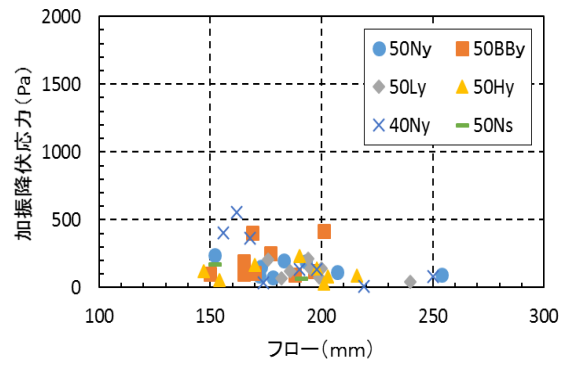
図—4 モルタルのフローと静置塑性粘度の関係



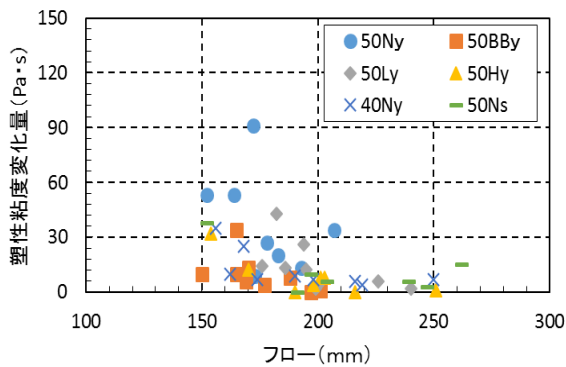
図—7 モルタルのフローと静置降伏応力の関係



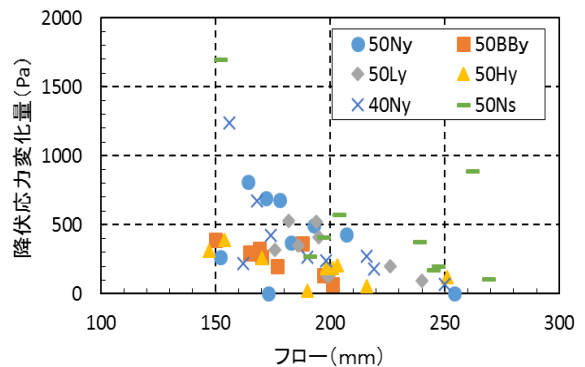
図—5 モルタルのフローと加振塑性粘度の関係



図—8 モルタルのフローと加振降伏応力の関係



図—6 モルタルのフローと塑性粘度変化量の関係

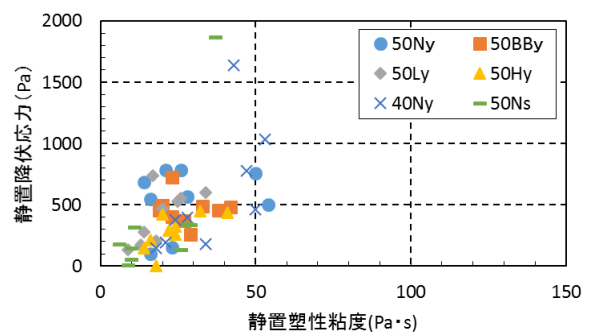


図—9 モルタルのフローと降伏応力変化量の関係

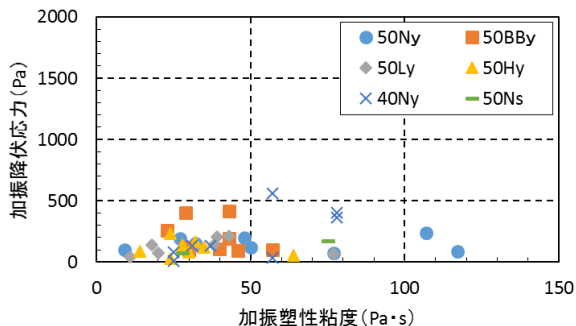
た、これらの線はおよそ 1000 から 2000Pa の付近で交差している。

### 3.2 静置，加振時のモルタルのレオロジー特性

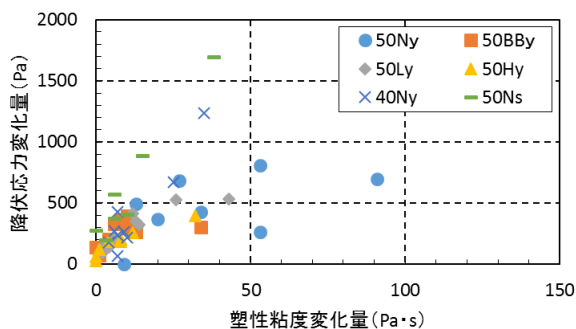
モルタルのフローとレオロジー特性の関係，静置および加振時のレオロジー特性の変化について示す。図—4 にはフローと静置塑性粘度の関係を示し，図—5 にはフローと加振時塑性粘度の関係を示す。モルタルのフローが 150mm から 180mm 程度の比較的固練りのモルタルではフローが 200mm を超える柔らかいモルタルと比べて静置時および加振時の塑性粘度が大きいことが分かる。図—6 はフローと塑性粘度の静置時から加振時で



図—10 静置状態での塑性粘度と降伏応力の関係



図—11 加振状態での塑性粘度と降伏応力の関係

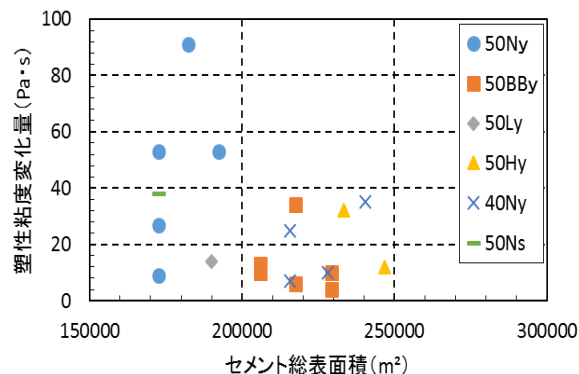


図—12 塑性粘度と降伏応力の変化量の関係

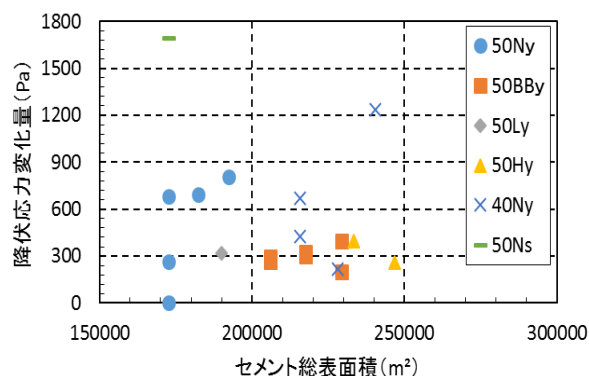
の変化量を示す。150mm から 180mm 程度の比較的固練りのモルタルでは変化量が多いことが分かる。

次に、図—7 はフローと静置降伏応力の関係を示し、図—8 はフローと加振時降伏応力の関係を示す。また、図—9 はフローと降伏応力の加振前後での変化量の関係を示す。塑性粘度と同様にフローが小さいモルタルほど静置時および加振時の降伏応力は大きくなることが分かる。図—9 に示すようにフローが小さいモルタルほど降伏応力の変化量が大きくなる傾向となった。このことよりモルタルのフローの大きさと、モルタルのレオロジー特性である塑性粘度と降伏応力には、フローが小さいほど振動をかけた時の変化量が大きくなる傾向があると考えられる。

図—10 は静置時における塑性粘度と降伏応力の関係を示し、図—11 は加振時における塑性粘度と降伏応力の関係を示す。図—10 より、静置時の塑性粘度が大きいほど降伏応力も大きくなる傾向がある。また、図—10 および図—11 より、モルタルに振動をかけることにより、降伏応力は減少し、塑性粘度が上昇する傾向がみられた。また、図—12 は静置と加振前後における塑性粘度の変化量と降伏応力の変化量の関係を示す。図—12 より、全体的には振動により塑性粘度の変化が大きいものほど、降伏応力の変化も大きくなる傾向がある。また、山砂の配合 (50Ny) と砕砂の配合 (50Ns) を比べると、塑性粘度と降伏応力の変化量はそれぞれ異なった傾向を示した。



図—13 セメント総表面積と塑性粘度変化量の関係

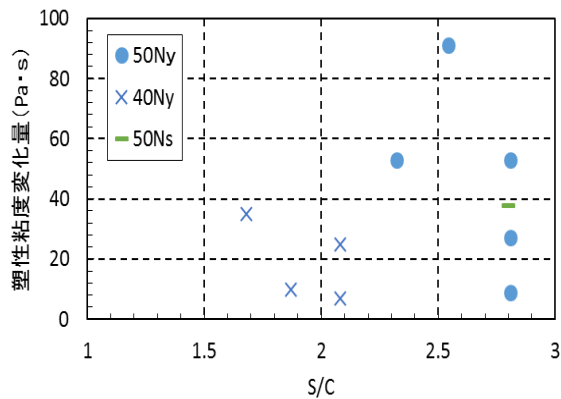


図—14 セメント総表面積と降伏応力変化量の関係

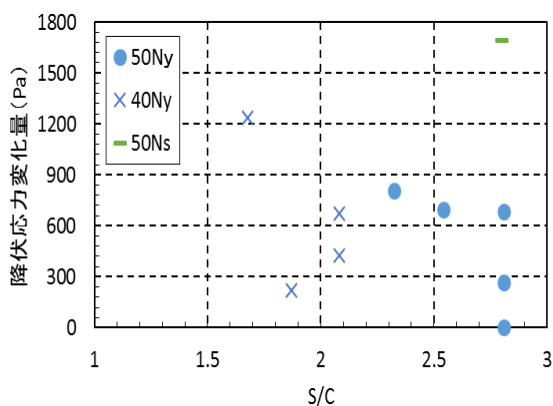
すなわち、山砂と比べて砕砂のほうが加振により降伏値が大きく変化することがわかる。

### 3.3 レオロジー変化量に及ぼす使用材料の影響

次に、使用材料や配合の違いが静置時および加振時のレオロジー特性の変化量に及ぼす影響について、特にフローが 150~180mm で変化量の大きい結果について考察する。図—13 はモルタルに使用したセメントの総表面積と加振による塑性粘度の変化量の関係を示す。セメントの種類ごとに加振による影響が異なり、特に比表面積の小さい普通ポルトランドセメントを使用した配合では他のセメントを使用した場合よりも塑性粘度の変化量が大きくなる傾向を示すことがわかる。図—14 はセメントの総表面積と加振による降伏応力の変化量の関係を示す。普通ポルトランドセメントを使用したモルタルは加振による降伏応力の変化量が大きくなる傾向があるが、同じ種類のセメントを使用したモルタル同士を比較すると、セメントの総表面積が大きいほど加振による降伏応力の変化が大きい傾向となったこのことから、同程度のフローを有するモルタルであっても使用するセメントの特性により、振動に対して異なる挙動を示すことが分かる。すなわち、普通ポルトランドセメントでは加振



図—15 砂セメント比と塑性粘度変化量の関係



図—16 砂セメント比と降伏応力変化量の関係

により塑性粘度の上昇量が大きい一方で、降伏応力の低下の程度も大きい傾向にあることが示されている。施工性能を考える上では塑性粘度と降伏応力のどちらが支配的であるかについては検討の余地があるが、セメントの総表面積が小さい場合には振動の前後でのレオロジー特性が大きく異なることを十分に把握することが重要である。

図—15は普通ポルトランドセメントを使用した配合において砂セメント比(S/C)と塑性粘度の加振前後の変化量の関係を示す。砂セメント比が大きいモルタルほど加振による塑性粘度の変化量が大きい傾向にあることが分かる。同様に図—16は砂セメント比と降伏応力の加振前後の変化量の関係を示す。塑性粘度と同じように、砂セメント比の大きいモルタルのほうが加振による降伏応力の変化が大きいことがわかる。以上のことから同程度のフローを有したモルタルであっても各材料の単位量や砂とセメントの比率によってモルタルは振動に対して

異なる挙動を示すことが分かる。特に単位粉量が少なくS/Cが大きな配合では振動によりレオロジー特性が大きく異なるため、施工性能に与える影響も大きくなるといえる。

#### 4. まとめ

モルタルの静置下および加振下におけるレオロジー特性である塑性粘度や降伏応力について調べ、加振有無によるレオロジー特性の変化の配合要因について考察した。その結果以下のことがわかった。

- (1) 加振下のモルタルのレオロジー特性は変化する。すなわち、本実験の範囲では静置下と比較して加振下の塑性粘度は上昇し降伏応力は低下する傾向にある。そのメカニズムについては検討中であり、今後の課題である。
- (2) 加振による塑性粘度と降伏応力の変化の程度はモルタルを構成する材料や配合により異なる。すなわち、フローが小さいモルタルほど加振によるレオロジー特性の変化が大きい傾向がある。また、水セメント比が大きいほど降伏応力が大きくなる傾向がある。
- (3) 塑性粘度の変化が大きいものほど、降伏応力の変化も大きくなる傾向がある。また、山砂と比べて砕砂のほうが加振により降伏値が大きく変化する。
- (4) 加振による塑性粘度と降伏応力の変化の程度は、セメントの総表面積が小さいほど大きく、S/Cが大きいほど大きくなる傾向にあることが分かった。すなわち、セメント量が少ない配合ほど加振下のモルタルのレオロジー特性は大きく変化するため、施工性能に与える影響も大きくなるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 102, コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会第二期委員会報告書, 2013.11
- 2) 伊達重之ほか：モルタルの振動下のフレッシュ性状に及ぼす分割練混ぜの効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1091-1096, 2006.7
- 3) 村田二郎ほか：フレッシュコンクリートの物性値測定法に関する共通試験結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.8, pp.20-29, 1988.8
- 4) 室賀陽一郎ほか：モルタルの粘性評価試験装置の開発, 土木学会年次学術講演概要集, vol.55, 部門 5, V-406, 2000