

論文 コンクリートの締固め性能の向上に関する基礎的研究

竹久 大貴*1・井手 一雄*2・橋本 紳一郎*3・伊達 重之*4

要旨：モルタルにおける細骨材の粒度分布の違いが加振下での塑性粘度および充填性に与える影響について検討した。また、これらとブリーディング量、水を含んだ細骨材を加振した際の液状化が発生するまでの時間との関係性についても検討した。その結果、細骨材の形状や表面性状に大差がなければ、細骨材の種類がモルタル加振時の塑性粘度に与える影響は少なく、粒度分布がモルタルの充填性に与える影響は少ない。各粒度分布における加振時の塑性粘度が大きいモルタルはブリーディング量が少ない。また、ブリーディングは水を含んだ細骨材を加振した際の液状化が発生するまでの時間と密接な関係にあることを示した。

キーワード：モルタル，粒度分布，振動，塑性粘度，充填性，ブリーディング，液状化現象

1. はじめに

コンクリート構造物の高品質化，長寿命化への要求が高まっている。コンクリート構造物の品質向上のためには、使用材料であるフレッシュコンクリートの施工性能を評価することが重要である。

施工性能はフレッシュコンクリートの流動性と材料分離抵抗性から決定される指標とし、流動性はスランプによる評価、材料分離抵抗性は配合上の粉体量により照査できるシステムが土木学会から提案されている¹⁾。

その一方、同一のスランプを有するコンクリートであっても、内部振動機による加振時の挙動や、鉄筋間の間隙通過性、型枠内の充填性能などが異なることも近年指摘されている²⁾。また、高密度な配筋の構造物では、振動締固めの方法によっては充填不良や豆板などの不具合を生じるケースや、表層コンクリートの品質に影響及ぼすことも報告されている³⁾。更に、コンクリート構造物の品質と密接に関連する指標の一つであるブリーディングについても、静置条件下と振動履歴を受けたものでは全く性状が異なることも報告されている⁴⁾。このように、スランプや配合上の粉体量だけでは施工性能を適切に評価できない場合も多い。適切な施工や品質向上のためには、実際の施工の状況に近似した振動環境下におけるフレッシュコンクリートの変形性や、流動性、材料分離抵抗性などを評価することが重要である。

スランプでは評価できないフレッシュコンクリートの性能を評価する試験としてタンピング試験や加振ボックス充填試験が提案されている²⁾。また、振動下のフレッシュコンクリートの締固め性能を検討した事例も報告されている⁵⁾⁶⁾。しかし、これらの方法は実際の施工条件との関連性や任意のコンクリートへの適用性について課

題がある。また、振動下におけるコンクリートの充填性能のメカニズムや、振動締固め方法の最適化等については十分に検討されているとはいえない⁷⁾。

一方、フレッシュコンクリートの流動性を支配する基本的な物性として、塑性粘度や降伏値といったレオロジー特性が挙げられている⁸⁾。フレッシュコンクリートやモルタルの流動性を評価するための数値解析においては、これらのレオロジー特性の評価は非常に重要である⁹⁾。しかし、静置下のレオロジー特性に関する報告は数多くあるが、振動下におけるレオロジー特性に関する研究は少ない¹⁰⁾¹¹⁾。

そこで本研究では、振動下におけるコンクリートの締固め性能の向上を目的とし、モルタルにおける細骨材の粒度分布の違いが加振下での塑性粘度および充填性に与える影響について検討した。また、これらとブリーディング量、水を含んだ細骨材を加振した際の液状化が発生するまでの時間との関係性についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびモルタルの配合条件

使用材料を表-1に示し、モルタルの配合条件を表-2に示す。また、細骨材の粒度を図-1に示し、細骨材の物理的性質を表-3に示す。ポリカルボン酸の高性能 AE 減水剤を用いて、モルタルの 15 打フローが配合ごとに 150mm から 230mm の範囲内で 3 種類の流動性(例えば、160mm, 180mm, 200mm)となるように調整した。

2.2 試験項目及び試験方法

(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 R 5201 に準拠して行った。

*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 博(工) (正会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助教 博(工) (正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科教授 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	砕砂 (茨城県桜川産)	2.61
	陸砂 (大井川水系産)	2.58
混和剤	高性能 AE 減水剤	-

表-2 モルタルの配合条件

細骨材	粒度分布	W/C (%)	S/C	混和剤 (C×%)
砕砂	細目	50	2.80	0~2.3
	中目			
	粗目			
陸砂	細目	50	2.80	0~2.5
	中目			
	粗目			

表-3 細骨材の物理的性質

細骨材	粒度分布	F.M.	比表面積 (cm ² /cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)
砕砂	細目	2.00	215.4	1.35	63.1
	中目	2.67	153.6	1.35	63.3
	粗目	3.43	90.9	1.35	62.8
陸砂	細目	2.00	215.4	1.95	62.8
	中目	2.67	153.6	1.70	65.8
	粗目	3.43	90.9	1.20	64.7

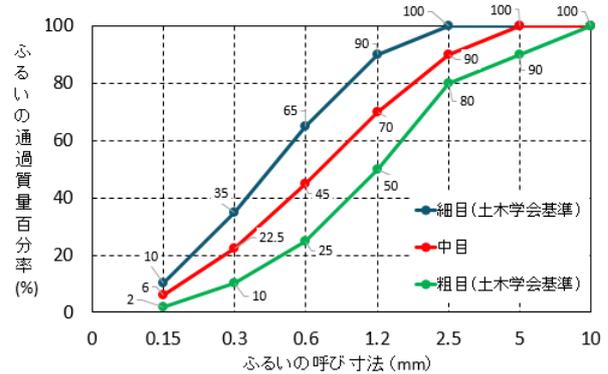


図-1 細骨材の粒度分布

(2) 羽根沈入式粘度測定試験

羽根沈入試験装置¹²⁾は、図-2に示すように、モルタル試料を詰めた円筒容器をセメント強さ試験に用いられるテーブルバイブレータに固定し、3枚の羽根を有する器具をモルタル試料に自重で沈入させて、みかけの塑性粘度を測定するものである。容器に詰めた試料に対し、沈入羽根の質量を段階的に変えていき沈入時間を測定し、図-3に示すように、せん断ひずみ速度 $v (=L/T)$ とせん断応力 $\tau (=W/A)$ の変化の関係より、塑性粘度 η' と降伏値 τ_y を求める。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からモルタルの塑性粘度を算出する。なお、本試験では沈入時に作用する浮力及びせん断面積が一定となるように羽根が完全に埋まった状態から沈入させ、測定を開始した。加振時の測定では既往の研究⁷⁾を参照し、テーブルバイブレータを 40Hz で稼働させた。

(3) モルタル加振ボックス充填試験

モルタルの振動下の充填性能を調べる目的で、テーブルバイブレータ上でのボックス充填試験を実施した。ボックス充填試験装置の概要を、図-4に示す。試験装置には、高流動コンクリートの充填試験 (JSCE-F 511) で使用するボックス型容器の $1/2$ サイズのものを用いた。ボックス充填試験装置の側面にはテーブルバイブレータ上で試験装置が移動しないように固定板を取り付けた。流動障

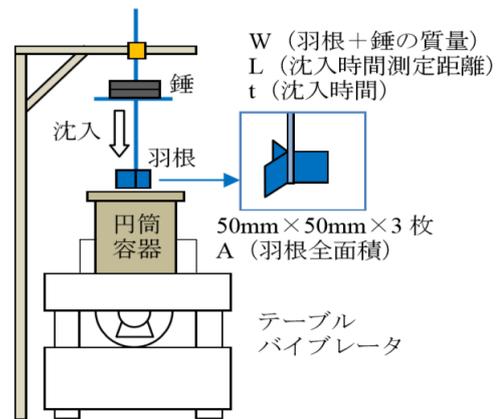


図-2 羽根沈入試験装置の概要

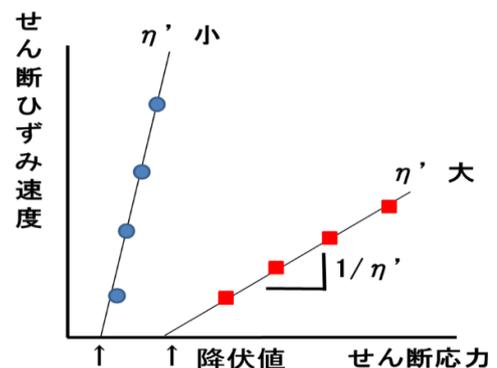


図-3 塑性粘度と降伏値の算定方法

害については R2 を模擬し、D6 を 25mm×4 の等間隔になるように 3 本設置した。

試験の手順を、以下に示す。まず、ボックス充填試験装置をテーブルバイブレータ上に設置した後、A 室に 3 層に分けて突き棒を用いてモルタルを詰め、A 室上面を均し、1 分間静置した後、仕切りゲートを引き上げ、同時にテーブルバイブレータの加振を開始した。振動数は羽根沈入式粘度測定試験と同じ 40Hz とした。加振開始から B 室の充填高さ 95mm および 150mm に到達することを目視により確認し、その際の経過時間を計測した。充填高さ 95mm から 150mm の移動時間から移動速度を算出し、これを間隙通過速度 V_{pass} (mm/s) とした。また、B 室の充填高さ 150mm まで到達した際の時間を完全充填時間とした。

(4) ブリーディング試験

ブリーディング量の測定は、振動を付与していない場合（以下、振動無し）と振動を付与した場合（以下、振動有り）の 2 通りで実施した。試験には、陸砂を使用し、容量 2L のモルタルブリーディング容器を用いた。試験は、温度 20℃、湿度 60% の一定の環境下で行った。モルタル試料を 2 層に分けて詰め、振動無しの場合は突き棒で各層 15 回突いた後、振動有りの場合はテーブルバイブレータで各層 15 秒間振動を付与した後に表面を均しブリーディング水の採取を開始した。振動数は羽根沈入式粘度測定試験と同じ 40Hz とした。ブリーディング水の採取時間は 0 分～60 分までは 10 分毎とし、60 分以降は 30 分毎とした。2 回連続で採取量が 0ml となった時点で試験を終了した。

(5) 間隙水圧の測定

ここでは、水を含んだ細骨材（陸砂）の間隙水圧を測定することで、加振時に液状化するまでの時間を調べた。

間隙水圧試験装置の概要を図-5 に、試験中の写真を写真-1 に示す。試験には陸砂を使用した。円筒容器をテーブルバイブレータに固定し、円筒容器中心の底から 200mm の位置（以下、上）、125mm の位置（以下、中央）、50mm の位置（以下、下）の 3 ヲ所に間隙水圧計を取り付けた。砂を 2 層に分けて詰め、テーブルバイブレータを 40Hz で稼働させ、各層 15 秒間振動を付与して締め固めた。締め固め高さは、円筒容器の底から 250mm とした。その後、締め固められた細骨材に一定量の水を入れ、間隙水圧を 0 点に合わせた後、テーブルバイブレータを稼働させ、間隙水圧を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 細骨材の種類および粒度分布と加振塑性粘度の関係

図-6 および図-7 に、砕砂と陸砂の 15 打フローと加振時の塑性粘度の関係を示す。細骨材の種類や吸水率、形

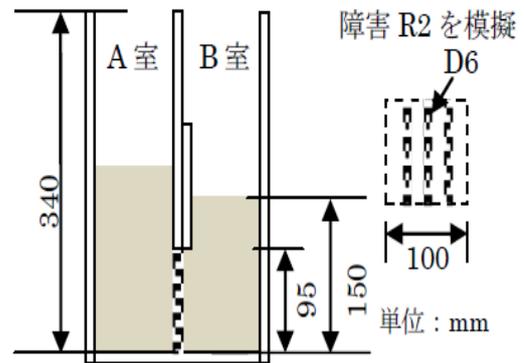


図-4 モルタル加振ボックス充填試験装置の概要

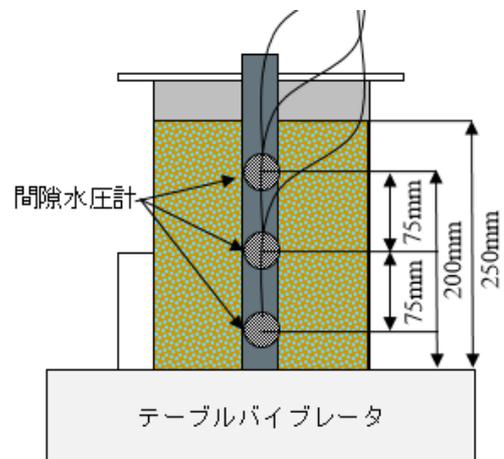


図-5 間隙水圧試験装置の概要



写真-1 間隙水圧の測定の様子

状などが異なると施工性に影響を及ぼすことが報告されている¹³⁾。しかし、図-6 および図-7 に示すように、細骨材の種類や吸水率が異なっても、同一の粒度分布における加振時の塑性粘度に与える影響は少ない傾向にある。そこで、写真-2 に示すように、砕砂と陸砂の 1.2mm、0.6mm、0.15mm 以下の粒度を顕微鏡で観察したところ、

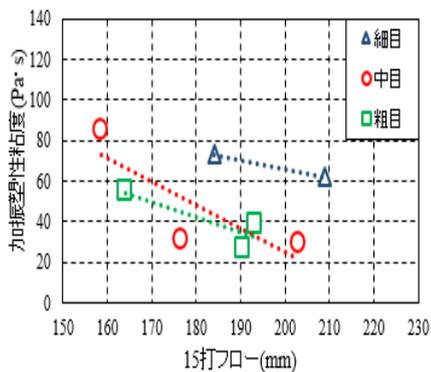


図-6 15 打フローと加振塑性粘度の関係（砕砂）

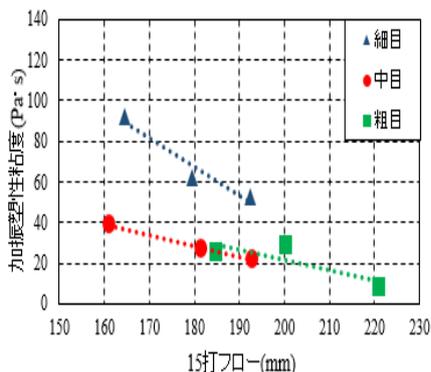


図-7 15 打フローと加振塑性粘度の関係（陸砂）

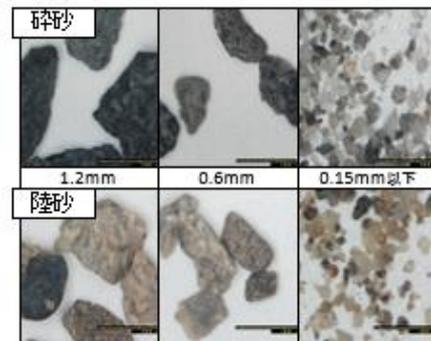


写真-2 砕砂と陸砂の粒度別写真

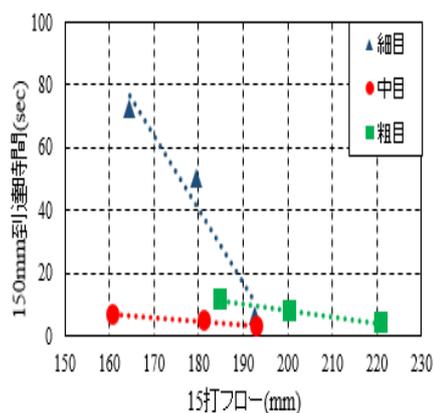


図-8 15 打フローと150mm 到達時間の関係（陸砂）

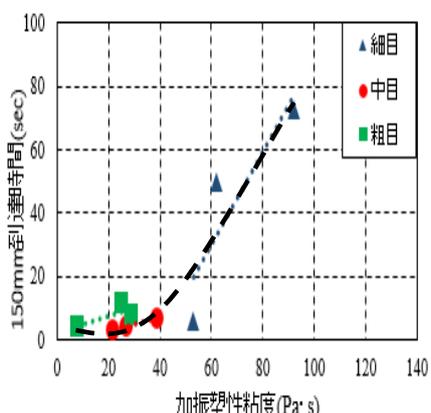


図-9 加振塑性粘度と150mm 到達時間の関係（陸砂）

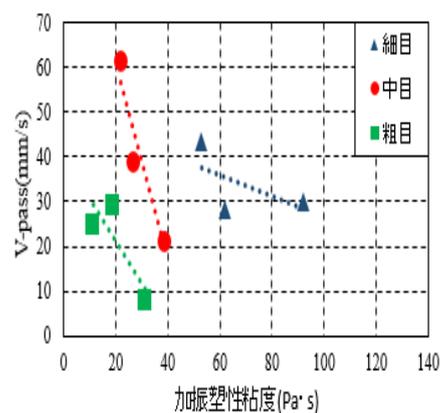


図-10 加振塑性粘度とV-pass の関係（陸砂）

細骨材の種類や粒度が異なっても、形状や表面性状には違いがほとんど見られなかった。砕砂の実積率（1.2mm:55.7%、0.6mm:54.9%、0.15mm 以下:55.6%）と陸砂の実積率（1.2mm:57.2%、0.6mm:56.5%、0.15mm 以下:56.9%）からも大きな違いは確認されなかった。つまり、形状や表面性状が似通っていれば、加振時の塑性粘度に与える影響は少ないと言える。形状や表面性状が異なる細骨材を用いれば結果が異なることも考えられるため、これらの点については今後検討する予定である。

3.2 加振塑性粘度と充填性

図-8 に、15 打フローと 150mm 到達時間の関係を示す。いずれの粒度分布でも、15 打フローが大きくなるほど、150mm 到達時間が速くなるのがわかる。

図-9 に、加振時の塑性粘度と 150mm 到達時間の関係を示す。図-10 には、加振時の塑性粘度と V-pass の関係を示す。図-9 から、粒度分布ごとに見れば、加振時の塑性粘度が大きくなれば 150mm 到達時間が遅くなる。また、粒度分布に関わらず加振時の塑性粘度が大きくなれば 150mm 到達時間が遅くなる関係にある。細目は比表

面積が大きく、練混ぜ水を多く拘束するため塑性粘度が大きくなり 150mm 到達時間が遅くなる。すなわち、充填性が低下すると考察する。

図-10 から、粒度分布ごとには加振時の塑性粘度が大きくなれば V-pass は小さくなる傾向にあるが、全体を通して見た場合には、150mm 到達時間のような相関性はない。

3.3 ブリーディング量および終了時間

図-11 および図-12 に、それぞれ振動無しおよび振動有りのブリーディング試験の結果を示す。振動の有無に関わらず、ブリーディング量は粗目、中目、細目の順に早い時間から量が多く、また最終量も多い。中目、粗目は、15 打フロー180mm では振動有りの方が振動無しよりもブリーディング量が多い傾向である。15 打フロー200mm では、振動無しの方が振動有りよりもブリーディング量が多くなる傾向である。

3.4 ブリーディング量と加振塑性粘度

図-13 に、振動有りブリーディング量と加振時の塑性粘度の関係を示す。粒度分布ごとにまとまる傾向にある

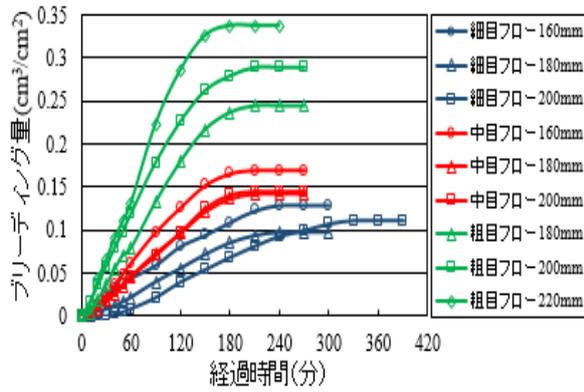


図-11 振動無しブリーディング量（陸砂）

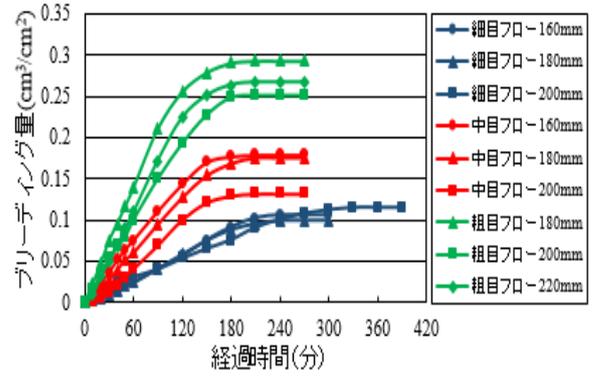


図-12 振動有りブリーディング量（陸砂）

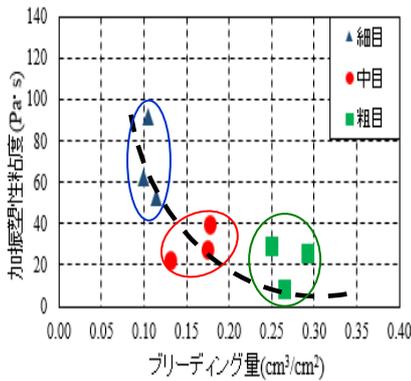


図-13 振動有りブリーディング量と加振塑性粘度の関係（陸砂）

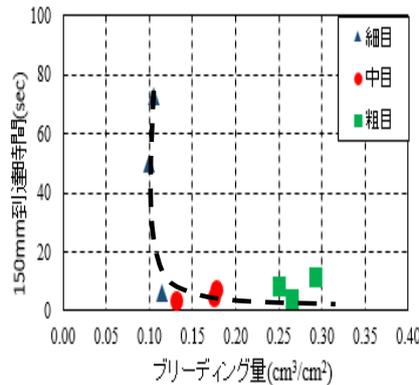


図-14 振動有りブリーディング量と150mm到達時間の関係（陸砂）

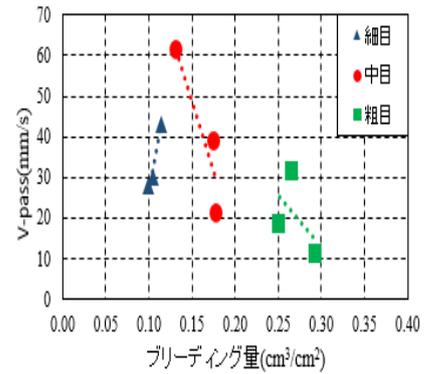


図-15 振動有りブリーディング量とV-passの関係（陸砂）

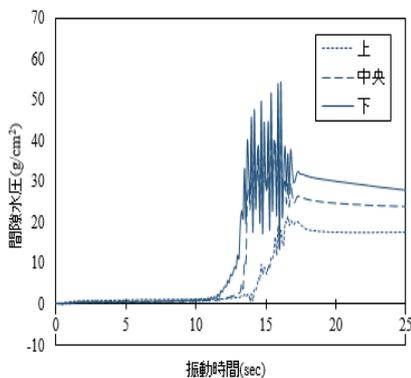


図-16 振動時間と間隙水圧の関係（陸砂-細目）

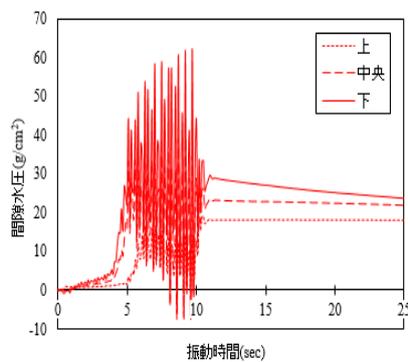


図-17 振動時間と間隙水圧の関係（陸砂-中目）

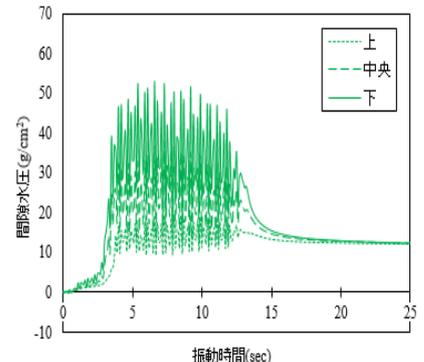


図-18 振動時間と間隙水圧の関係（陸砂-粗目）

ものの、全体を見れば、ブリーディング量が多くなるほど、細目、中目、粗目の順に、加振時の塑性粘度が小さくなる傾向が確認された。振動無しの場合でも、同様の結果であった。塑性粘度が大きい細目は、比表面積が大きく自由水を拘束しやすいため、ブリーディング量が少なくと考察する。これらより、各粒度分布における加振時の塑性粘度が大きいモルタルはブリーディング量が少ない傾向にあることがわかった。

3.5 ブリーディング量と充填性

図-14に、振動有りブリーディング量と150mm到達時

間の関係を示す。ブリーディング量が最も少ない細目は、150mmに到達するまでに最も時間を要した。図-14からは、粒度分布に関わらず、ブリーディング量が $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度より多くなると150mm到達時間は速くなる傾向があり、全体を通してひとつの相関性が見られる。なお、振動無しの場合でも、同様の結果であった。

図-13および図-14より、細骨材の粒度分布が中目に近いもので、加振時の塑性粘度が $50\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度以下であり、ブリーディング量が $0.1\sim 0.2\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の場合、充填性が良好である傾向にあったが、メカニズムの解明に

については今後の課題とする。

図-15には、振動有りブリーディング量と V-pass の関係を示す。ブリーディング量が少ないほど、粒度分布ごとに見れば V-pass が速くなる傾向があるが、全体を通して見た場合には、150mm 到達時間のような相関性はない。

3.6 ブリーディング量と液状化現象

図-16～図-18 に、振動時間と間隙水圧の関係を示す。本実験では、振動の付与を開始してから液状化現象が発生するまでの時間に着目した。

細目は、12 秒～14 秒程度で間隙水圧が上昇し始め、液状化の発生が確認できる。中目は、振動開始後 5 秒程度で液状化の発生が確認できる。粗目は、振動開始後 2 秒～3 秒程度で液状化の発生が確認できる。

ここで、細目は、比表面積が大きく、細骨材に拘束される水、いわゆる拘束水が多くなることで、液状化するまでに多くの時間が掛かったと考える。一方、粗目は、比表面積が小さいため、拘束水が少なくなり、自由水が多くなる。そのため、液状化が発生するまでの時間が早くなったものとする。

以上のことから、水を含んだ細骨材を加振した際の液状化が発生するまでの時間は、各粒度分布における、早い段階でのブリーディング量の差に大きく影響していることがわかった。

4. まとめ

モルタルにおける細骨材の種類と粒度分布の違いが加振下での塑性粘度、充填性に与える影響ならびにブリーディング量と液状化現象との関係性について実験した結果、本実験の範囲では以下のことがわかった。

- (1) 細骨材の種類の違いが加振時の塑性粘度に与える影響が少なかったのは、今回使用した砕砂と陸砂が似通った粒形や表面性状をしていたためであると考えた。
- (2) 各粒度分布における加振時の塑性粘度が大きいモルタルはブリーディング量が少ない傾向にある。
- (3) 細骨材の粒度分布が中目に近いもので、加振時の塑性粘度が $50\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度以下であり、ブリーディング量が $0.1\sim 0.2\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の場合、充填性が良好であった。
- (4) ブリーディング量と 150mm 到達時間の関係から、粒度分布に関わらず、ブリーディング量が $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度より多くなると 150mm 到達時間が速くなった。
- (5) ブリーディングは、水を含んだ細骨材を加振した際の液状化現象が発生するまでの時間と密接な関係にあることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2012
- 2) 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
- 3) 早川健司，加藤佳孝：振動締めによるかぶりコンクリートの充填挙動と品質変動に関する実験的究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1325-1330，2010.7
- 4) 伊達重之，伊藤祐二，長谷川聖史，辻幸和：モルタルの振動下のフレッシュ性状に及ぼす分割練混の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1091-1096，2006.7
- 5) 西川隆之，橋本親典，山地功二，水口裕之：加振装置を用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.397-401，2000.7
- 6) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締め固め性試験法に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62 No.2，pp.416-427，2006.6
- 7) 齋藤拓弥，大八木雅人，藤倉裕介，伊達重之：周波数の異なる振動下におけるモルタルのレオロジー特性と充填性能に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1353-1358，2016
- 8) 藤倉裕介：コンクリートの静置，振動下のレオロジー特性が充填性能に与える影響に関する基礎的研究，フジタ技術研究報告第 51 号，pp.21-26，2015
- 9) 森博嗣，谷川恭雄：振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動解析法，日本建築学会構造系論文報告集，第 388 号，pp.18-26，1988.6
- 10) 齋藤拓弥，藤倉裕介，橋本紳一郎，伊達重之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1099-1104，2015
- 11) Takuya Saito, Yusuke Fujikura, Shin-ichiro Hashimoto and Shigeyuki Date : "Study on the Rheological Properties of Fresh Mortar under Vibration" , International Journal of Structural and Civil Engineering Research Vol.4, No.3, pp.291-295, August 2015
- 12) 室賀陽一郎，伊達重之，大須賀哲夫：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-406，2000.9
- 13) 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016 年度版]