

# 論文 モルタルのフレッシュ性状に及ぼす高炉スラグ細骨材置換率の影響

竹久 大貴\*1・高橋 直希\*2・橋本 紳一郎\*3・伊達 重之\*4

**要旨:** 高炉スラグ細骨材と天然砂の混合割合の拡大と施工性能の改善を目的とし、モルタル試料にて静置時と加振時における挙動を、塑性粘度、充填性、ブリーディングの観点から確認した。その結果から、本実験の範囲内では、羽根沈入式粘度測定試験によって得られる加振塑性粘度から、塑性粘度が変化する混合割合を検討することで、適切な細骨材の混合割合の推定が可能であった。さらに、細骨材の混合割合を変化させた試料に対し、間隙水圧を測定し、振動停止後の間隙水圧の消失の傾向から、フレッシュ性状の評価が行える可能性を示した。

**キーワード:** 高炉スラグ細骨材, 混合割合, 振動, 塑性粘度, 充填性, ブリーディング, 間隙水圧

## 1. はじめに

近年、産業副産物である高炉スラグ細骨材(以下, BFS)が注目されている。BFSを使用したコンクリートの硬化後の耐凍害性や耐塩害性に関する報告は数多くあるが、フレッシュ性状や流動性、施工性能などのワーカビリティに着目した報告は少ない<sup>1)</sup>。

BFSは、一般の細骨材と粒子形状が異なり細骨材として全量使用すると、骨材の分離やブリーディングの増大、スランプの著しい低下など良好なフレッシュ性状が得られず、施工性が低下することが課題として挙げられる<sup>2)</sup>。レディーミクストコンクリート工場では粒度調整や塩化物含有量の低減のため、天然砂に20~60%程度の混合割合で使用されている<sup>3)</sup>。

一般に、フレッシュコンクリートの流動性はスランプ試験によって評価されている<sup>2)</sup>。しかし、同一のスランプ値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<sup>3)</sup>。また、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<sup>4)</sup>。このように、スランプ試験だけでは施工性能を適切に評価できない場合も多い。そのため、構造物の適切な施工や品質向上のためには、振動環境下のような実施工を模擬した状況におけるフレッシュコンクリートの流動性や材料分離抵抗性などの挙動を評価することが重要である。

現在までに、スランプ試験では評価できないフレッシュコンクリートの性能評価を行う試験方法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<sup>3)</sup>。

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<sup>5)</sup>。しかしながら、これらの試験は実際の施工条件との関連性や任意の配合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検討されているものの未だ不十分である<sup>6)</sup>。

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<sup>7)</sup>。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、これらのレオロジー特性は特に重要な物性である<sup>8)</sup>。しかし、静置下のレオロジー特性に関する報告は数多く存在するものの、振動下におけるレオロジー特性に関する研究は数少ない<sup>9),10)</sup>。

表-1 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	高炉スラグ細骨材(BFS) (広島県福山産, 表乾密度:2.74g/cm <sup>3</sup> )
	陸砂(NS) (大井川水系産, 表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	AE減水剤(リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩と ポリカルボン酸系化合物)
	AE助剤(樹脂塩酸)
	消泡剤(ノニオン系界面活性剤)

\*1 東海大学大学院 工学研究科 建築土木工学専攻 (学生会員)

\*2 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 修士(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(工学) (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-2 モルタルの配合

配合名	W/C (%)	S/C	BFS 混合割合 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤の添加率 (C×%)		MSL (mm)	15 打 フロー (mm)
					W	C	BFS	NS	AE 助剤	消泡剤		
50-BFS100	50	3	100	6.5±1.5	262	523	1570	0	0.00	0.65	17	133
50-BFS75			75		259	519	1167	389	0.00	0.50	30	157
50-BFS50			50		257	514	771	771	0.00	0.40	46	155
50-BFS25			25		255	510	382	1147	0.00	0.15	76	176
50-BFS0			0		253	505	0	1516	0.00	0.00	97	188
60-BFS100	60	3	100	6.5±1.5	298	497	1492	0	0.00	0.40	95	241
60-BFS75			75		296	493	1109	370	0.00	0.15	114	256
60-BFS50			50		293	489	733	733	0.00	0.00	129	289
60-BFS25			25		291	485	364	1091	0.20	0.00	130	280
60-BFS0			0		289	481	0	1443	0.35	0.00	-	281

本研究では、BFSの混合割合の拡大と施工性能の向上を目的とし、モルタル試料にて静置時と加振時における挙動を、塑性粘度、充填性、ブリーディングの観点から確認した。その結果から、BFSと天然砂を使用した際の適切な混合割合を決定するため、羽根沈入式粘度測定試験の適用性について検討を行った。さらに、既往の研究<sup>1)</sup>において報告されている、ブリーディングと間隙水圧の関連について、異なる観点から検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびモルタルの配合

使用材料を表-1に、モルタルの配合を表-2に示す。BFSと陸砂の混合割合は質量比とした。AE減水剤は標準添加量であるC×1.0%とし、助剤を用いて空気量が6.5±1.5%になるように調整した。また、今回使用したBFSと陸砂の粒度分布を図-1に、混合割合別の細骨材の物理的性質を表-3に示す。

### 2.2 試験項目及び試験方法

#### (1) フレッシュ性状試験

空気量試験 (JIS A 1128)、モルタルフロー試験 (JIS R 5201) およびミニスランプ試験 (JIS A 1171) を行った。

#### (2) 羽根沈入式粘度測定試験

羽根沈入式粘度測定試験装置<sup>1)</sup>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

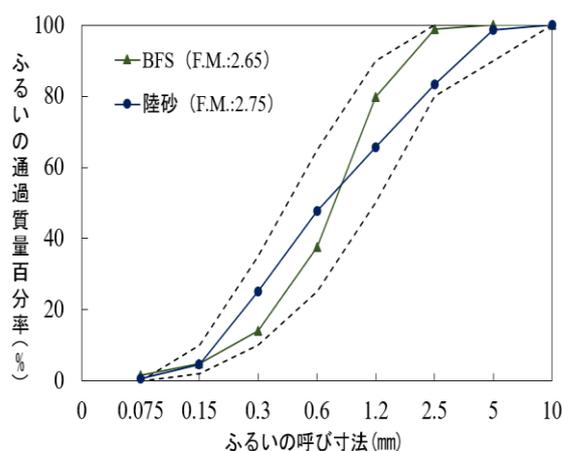


図-1 細骨材の粒度分布

表-3 細骨材の物理的性質

BFS 混合割合 (%)	吸水率 (%)	実積率 (%)
100	0.96	58.3
75	1.77	60.5
50	2.06	62.9
25	2.15	65.7
0	2.65	66.6

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  $\eta'$  を

求める。そして、塑性粘度が既知の流体（塑性粘度が10~300Pa・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<sup>7)</sup>を参照し、テーブルバイブレータ（40Hz、振幅1mm）を稼働させた。

### (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。流動障害についてはR2を模擬し、D6を25mm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た。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に到達した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の移動時間から速度を算出し、これを間隙通過速度  $V_{\text{pass}}$ (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150mm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、試料を詰める際に振動を付与していない場合（以下、静置）と振動を付与した場合（以下、加振）の2通りで実施した。容量2Lのモルタルブリーディング容器を用いることとし、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、静置の場合は突き棒で各層15回突いた後、加振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、モルタル加振ボックス充填試験と同じ40Hzとした。ブリーディング水の採取時間は開始から60分経過までは10分毎とし、60分経過以降は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) 間隙水圧試験

間隙水圧試験装置の概要を図-5に示す。ここでは、各細骨材に対し、振動を付与した際の間隙水圧の変動につ

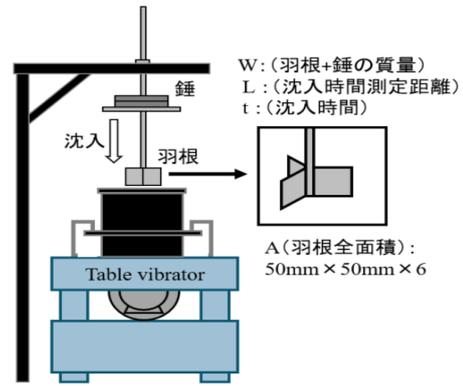


図-2 羽根沈入試験装置の概要

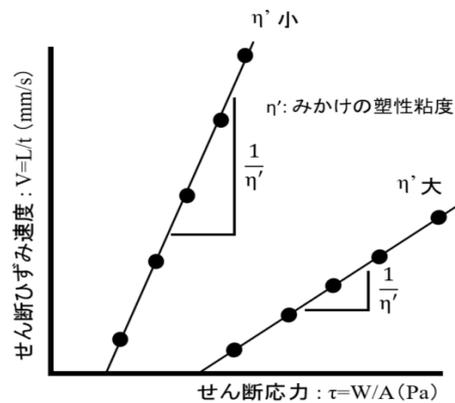


図-3 塑性粘度の算定方法

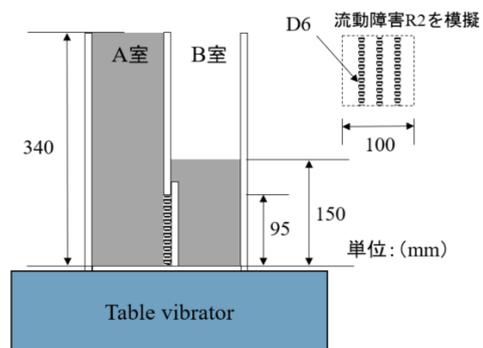


図-4 モルタル加振ボックス充填試験装置の概要

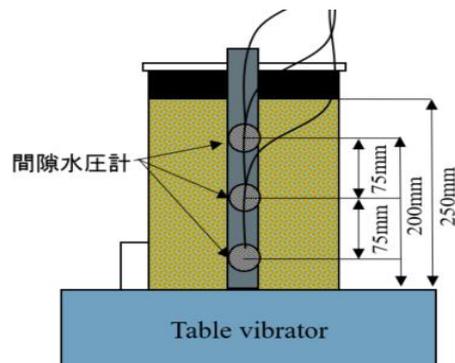


図-5 間隙水圧試験装置の概要

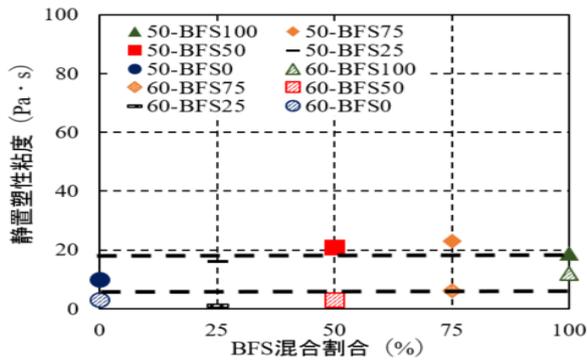


図-6 静置塑性粘度 (W/C=50%, 60%)

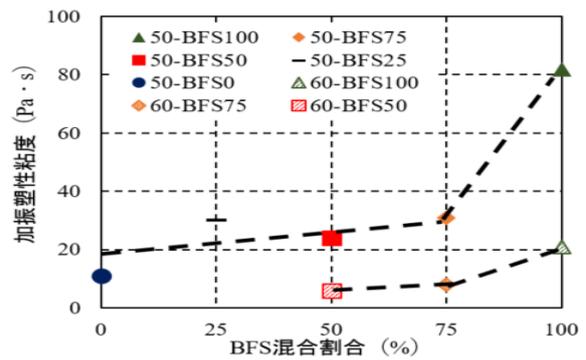


図-7 加振塑性粘度 (W/C=50%, 60%)

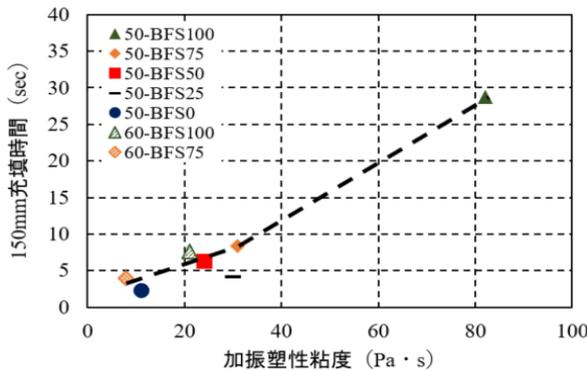


図-8 加振塑性粘度と 150mm 充填時間

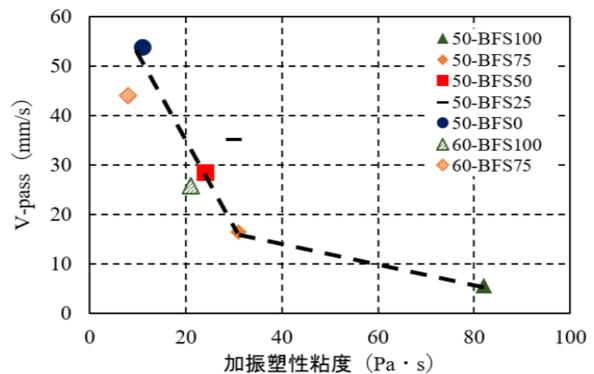


図-9 加振塑性粘度と V-pass

いて着目することとした。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。

まず、細骨材を 2 層に分けて詰め、テーブルバイブレータを加振ブリーディング試験と同じ 40Hz で稼働させ、各層 15 秒間振動を付与して締固めた。締固め後の高さは、円筒容器の底から 250mm とした。その後、締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で 15 秒間振動させ、間隙水圧を測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実験結果

##### (1) BFS 混合割合と塑性粘度

図-6 および図-7 に、W/C=50%, 60% のモルタルにおける BFS の混合割合と静置塑性粘度および加振塑性粘度の関係を示す。図中に示す、例えば 50-BFS50 は、W/C が 50% で細骨材全量に対する BFS の混合割合が 50% である。図-6 および図-7 から、BFS0% (陸砂 100%) の場合は静置時に比べ加振塑性粘度の上昇量は僅かだが、BFS100% の配合の場合には、静置時に比べ加振時のモルタルの塑性粘度が非常に大きくなった。また、混合割合を変化させた際の静置塑性粘度に変化はほとんどないも

の、加振塑性粘度においては、ある混合割合において急激に塑性粘度が変化していることが確認された。W/C=60% の場合においても、W/C=50% と同様の傾向にあることが確認された。

##### (2) 加振塑性粘度と充填性

図-8 および図-9 に、細骨材の混合割合を変えた際の加振塑性粘度と 150mm 充填時間の関係および V-pass の関係を示す。天然砂を用いた既往の研究<sup>1)</sup>では、加振塑性粘度が小さいほど 150mm 充填時間が短くなること、および V-pass が速くなることが報告されている。図-8 および図-9 より、BFS と陸砂の混合砂においても、加振塑性粘度が小さいほど 150mm 充填時間が短く、V-pass が速くなることが確認された。塑性粘度が急激に大きくなることで、150mm 充填時間が長くなること、および V-pass が遅くなる傾向が確認できる。

##### (3) BFS 混合割合とブリーディング量

図-10 および図-11 に、W/C=50% の静置および加振後のブリーディング試験の結果を示す。本実験の範囲では、50-BFS100 は、最終的なブリーディング量が静置時に比べて加振時では 30% 程度増加した。一方、50-BFS75, 50, 25, 0 においては、加振によるブリーディング量に変化はなく、加振の影響がほぼ無いことが確認できる。なお、W/C=60% においても、同様の傾向であった。

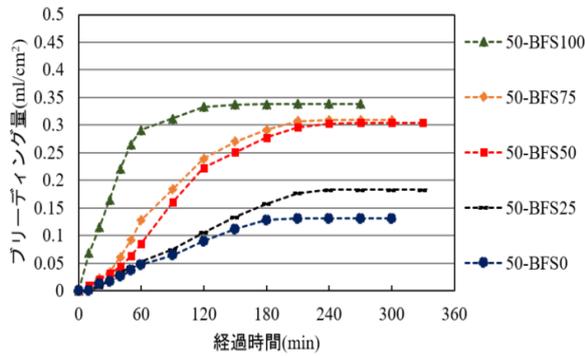


図-10 静置ブリーディング量 (W/C=50%)

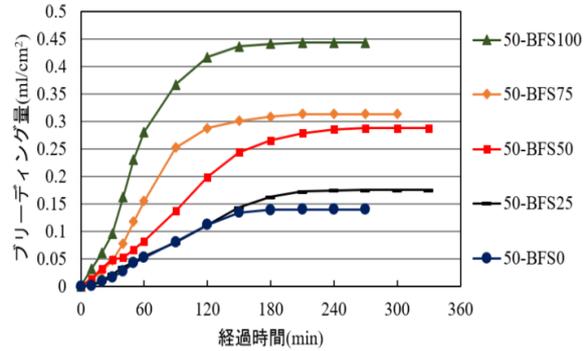


図-11 加振ブリーディング量 (W/C=50%)

#### (4) 間隙水圧

筆者らは、水を含んだ細骨材に振動を付与した際の液状化現象が発生するまでの時間と、早い段階のブリーディングは密接な関係にあることを報告している<sup>11)</sup>。ここで扱う「液状化」とは、間隙水圧が上昇して有効応力が減少する結果、せん断強さを失う現象のことである。以下に液状化の発生から終了までの過程を示す<sup>13)</sup>。まず、ゆるく堆積した砂に対して、地震動などによる繰り返し載荷が作用することで土粒子が水の中で浮遊した状態となる。その後、砂の沈積が始まり、液状化前より密な状態となり、地表面が沈下していく。砂の沈降速度を一定とすれば、沈降距離の短い下部から砂の再配列が完了し、上部ほど液状化状態は長く続いていくことになる。そして、最終的には上部の粒子同士も接触し、液状化が終了する。既往の実験<sup>11)</sup>では、間隙水圧の上昇、すなわち液状化現象が発生するまでの時間に注目していたが、振動停止後の細骨材の再配列にともなう間隙水圧の変化については着目していなかった。また、細骨材の粒度分布を変えて測定を行っていたものの、BFS との混合砂の場合の間隙水圧の変化については検討を行っていなかった。

そこで本実験では、BFS のみ、陸砂のみおよび混合砂として BFS を 75% 混合した試料をそれぞれ用意し、振動停止後の間隙水圧の変化に着目することとした。図-12 および図-13 に、BFS のみおよび陸砂のみの場合の振動時間と間隙水圧の関係を示す。図-14 には、混合砂として BFS を 75% 混合した際の振動時間と間隙水圧の関係を示す。図-12 に示す BFS のみの間隙水圧試験の結果より、振動を停止した直後に間隙水圧が急激に消失していることが確認できる。これは、振動停止後の砂の再配列に要する時間が短く、水と細骨材の分離が生じやすいことを示しているものと考えられる。一方、図-13 に示す陸砂のみの間隙水圧は、振動を停止した後の消失が緩やかであることが確認できる。さらに図-14 に示すよ

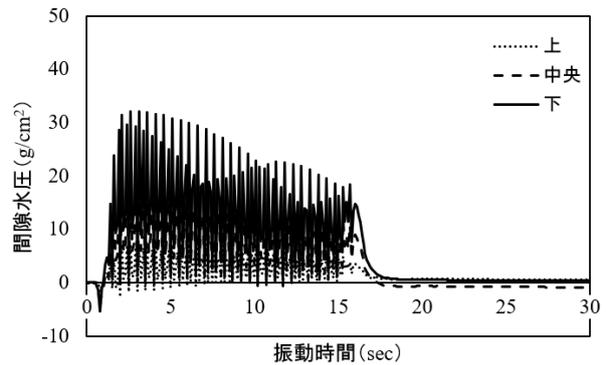


図-12 振動時間と間隙水圧 (BFS のみ)

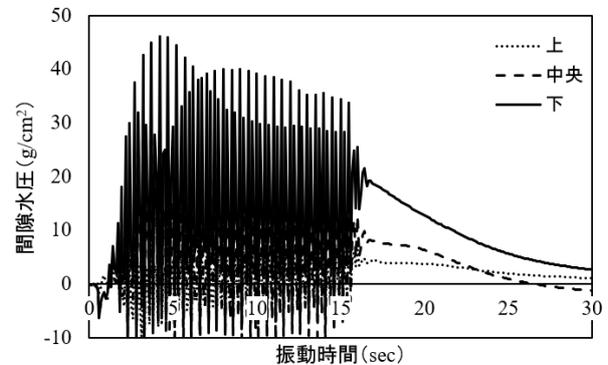


図-13 振動時間と間隙水圧 (陸砂のみ)

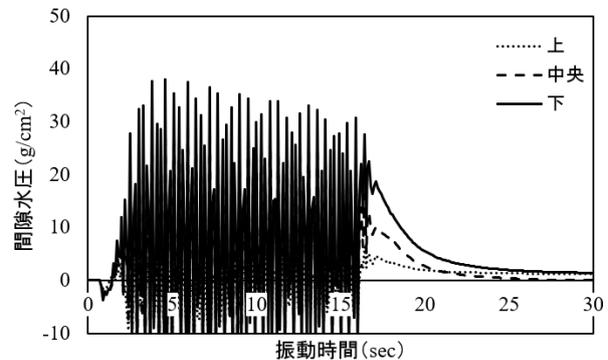


図-14 振動時間と間隙水圧 (BFS75%)

うに、混合砂として BFS を 75%混合した際には、振動停止後の間隙水圧の変化は比較的緩やかであり、BFS のみを使用した場合に比べ、水と細骨材の分離が生じにくくなっているものと考えられる。

### 3.2 考察

これらの結果から、BFS を使用する際の適切な混合割合を決定するための評価方法について検討する。

実験結果から、BFS の混合割合が増加することで、加振塑性粘度が緩やかに上昇し、ある割合以上で急激に大きくなっている。塑性粘度が大きくなると充填性が悪くなることから、BFS の混合割合を変えて羽根沈入式粘度測定試験を行い、塑性粘度が変化する混合割合を検討することで適切な混合割合を決定可能であると考えられる。

ブリーディング試験の結果から、細骨材に BFS のみを使用した際には、静置時と加振時のブリーディング量が異なっているが、ある割合の天然砂を混合することで静置時と加振時のブリーディング量に差が生じなくなっている。この結果は、加振塑性粘度が急激に大きくなる混合割合と同様であり、羽根沈入式粘度測定試験によって得られる加振塑性粘度から、加振の影響が無くなる適切な混合割合を推定することが可能となり得る。

また、間隙水圧試験を実施することで、細骨材の混合割合によって、振動停止後の間隙水圧の消失傾向が異なることが確認できることがわかった。その結果から、加振による材料分離、すなわちブリーディング性状を間隙水圧の消失のしやすさから評価できる可能性があることが示された。

本実験では水と細骨材のみでの間隙水圧の検討であったため、今後はモルタル試料での検討を試みる必要があると考えられる。

## 4. まとめ

BFS の混合割合の拡大を検討するために、混合割合を変化させた配合において、羽根沈入式粘度測定試験、モルタル加振ボックス試験およびブリーディング試験を実施した。また、既往の研究<sup>11)</sup>にて報告されている、ブリーディングと間隙水圧について再度検討を行った。以下に、本実験の範囲内で得られた知見を示す。

- (1) 羽根沈入式粘度測定試験によって得られる加振塑性粘度から、塑性粘度が変化する混合割合を検討することで、適切な細骨材の混合割合を推定が可能であった。
- (2) 細骨材の混合割合を変化させた試料に対し、間隙水圧試験を実施し、振動停止後の間隙水圧の消失の傾向から、フレッシュ性状の評価が行える可能性を示した。

## 参考文献

- 1) 浦野真次, 田中博一, 藤井隆史, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1267-1272, 2017
- 2) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, 2012
- 3) 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
- 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) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 竹久大貴, 井手一雄, 橋本紳一郎, 伊達重之: コンクリートの締固め性能の向上に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1273-1278, 2017
- 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) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化(第二版), 技報堂出版, 1991