

論文 WS モルタルのフレッシュ性状とタンピング試験が加振環境下のフレッシュコンクリートの充填性能に与える基礎的研究

大八木 雅人*1・竹久 大貴*2・井手 一雄*3・伊達 重之*4

要旨：本研究では異なるスランブを持つ3通りの配合で練ったコンクリートに加えて、それぞれの配合の細骨材率を変化させた配合で練混ぜた。コンクリートに対して変形性能と充填性能を評価するためにタンピング試験と加振ボックス充填試験を行った。また、ウェットスクリーニングによって採取したモルタルの加振時のレオロジー一定数、加振ボックス充填試験を測定する事で流動性に関連する各測定項目同士の関連付けを実験的に試みた。その結果、モルタルの加振時の塑性粘度の変化に伴い、コンクリートの加振時の充填性能が変化し、モルタルの塑性粘度とコンクリートのタンピング試験がコンクリートの充填性能に関連していることがわかった。

キーワード：タンピング, 充填性能, フレッシュモルタル, レオロジー, 振動, 塑性粘度, スクリーニング

1. はじめに

現代において構造物を建設する際に、コンクリートは主かつ必要不可欠な材料の一つである。過去の多くのコンクリートに関する研究により、基本的なコンクリートの強度や耐久性の向上に寄与する目覚ましい研究成果が多数報告されている。また、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの環境に考慮した混和材料や、高性能 AE 減水剤や硬化促進剤などの化学混和剤に関する研究も日々進歩しており、それらを取り巻く環境も大きく発展してきた。近年では技術の発展に伴い、建設される構造物は以前と比べてはるかに高耐久になり、仕様が大きく変化している。また、高品質なプレキャストコンクリート製品などが使われるようになったことも技術の進歩といえる。

しかし、構造物の高耐久化、高耐震化が進むにつれ、高密度配筋になり、コンクリートの打込みにより、高度な技術力が要求されるようになった。高流動コンクリートや中流動コンクリートといった非常に充填性能が高い特殊なコンクリートが使われるようになった。しかし、特殊なコンクリートが必要な場合を除いて、土木構造物に使用されるコンクリートは依然として主にスランブ値が 10cm 前後の比較的硬練りのコンクリートを使用することが多い。普通コンクリートを使用し、打込みを行う場合、パイプレータを用いて振動締固めを適切に行う事が高品質な構造物を造るうえで必要不可欠である^{1) 2)}。適切ではない振動締固めを行うことにより、振動不足であれば、未充填が生じてしまい、過剰な加振によっては材料分離を生じる場合がある。それ以外にも、あばたや豆板などの現象が起これば構造物の品質を下げってしまう。また、混和剤の技術レベルが大きく進歩したことにより、

異なる材料や配合においても、要求されるスランブを満足することが容易になっており、パイプレータによる振動締固めの方法についても目安となる基準などはあっても、構成する材料や配合が様々に異なるコンクリートに対して細かな条件に応じた最適な施工方法が明確化されているとは言えないのが現状である。

材料や配合が異なれば、静置状態において同一スランブを示したとしても、振動締固め時の挙動や流動性などは異なることが報告されているが³⁾、現段階においては加振環境下でのフレッシュコンクリートの挙動が、何に起因するものなのかを的確にとらえられているとは言い難く、異なる材料や配合を統一的に評価できる手法の確立が必要である。

本研究は、加振環境下でのフレッシュコンクリートの挙動の評価方法の確立の一助として、加振環境下におけ

表－1 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
セメント	N	普通 ポルトランドセメント	3.16	—
細骨材	S1	砕砂	2.62	2.46
	S2	山砂	2.61	2.18
粗骨材	G1	碎石	2.63	0.87
	G2	碎石	2.65	2.45
混和剤	Ad	AE 減水剤	—	—

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科 (学生会員)

*3 株式会社フジタ 技術センター土木研究部 博(工) (正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科 教授 博士(工) (正会員)

表-2 コンクリート配合

配合名 (コンクリート)	配合名 (WS モルタル)	目標 スランブ (cm)	水セメント比(%)	s/a (%)	S/C	目標 空気量 (%)	単位量(kg/m³)						Ad C×(%)
							W	C	S1	S2	G1	G2	
8-40.5	8-2.48	8 (±2)	56.6	40.5	2.48	4.0 (±1.5)	168	297	590	146	542	546	1.80
8-45.5	8-2.76			45.5	2.76				658	162	487	495	1.30
8-50.5	8-3.09			50.5	3.09				734	183	451	454	1.05
12-41.7	12-2.46	12 (±2)		41.7	2.46		172	304	600	149	529	533	1.90
12-46.7	12-2.75			46.7	2.75				671	165	479	487	1.30
12-51.7	12-3.06			51.7	3.06				744	185	437	440	1.30
18-44.6	18-2.38	18 (±2)		44.6	2.38		185	327	624	154	487	490	1.00
18-49.6	18-2.64			49.6	2.64				692	170	440	447	1.05
18-54.6	18-2.91			54.6	2.91				762	191	400	403	1.00

るフレッシュコンクリートの充填性能、衝撃による変形性やウェットスクリーニングモルタル（以下、WS モルタルとする）の加振環境下でのレオロジー定数、砂セメント比と充填性能との関連性について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本実験にて使用したコンクリートの材料を表-1 に、練り混ぜたコンクリートの配合を表-2 に、フレッシュ性状試験の結果を表-3 示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には砕砂と山砂の混合砂、粗骨材には2種類の混合砕石、混和剤にはスルホン酸系のAE減水剤を使用した。配合についてはスランブ8cm 細骨材率45.5%、スランブ12cm 細骨材率46.7%、スランブ18cm 細骨材率49.6%を基準に、それぞれの細骨材率を5%増加させた場合と、減少させた場合について検討を行った。配合名はコンクリートでは、スランブ値と細骨材率を表しており、例えば12-46.7の場合、スランブが12cmで細骨材率が46.7%の配合を表している。WS モルタルではスランブ値と砂セメント比を表しており、12-2.75の場合、スランブが12cmで砂セメント比が2.75の配合であることを示している。今回は、目標スランブを各スランブ事に±2cm、目標空気量を4%±1.5%、細骨材率を40.5～54.6%の範囲で実験を行った。

2.2 試験方法

コンクリートの練混ぜは、最大容量55Lの強制二軸練りミキサーを使用し、練り混ぜ時間は150秒とした。また、コンクリートとウェットスクリーニングしたWSモルタルを使用し、以下の試験を行った。

表-3 フレッシュ性状試験結果

配合表	コンクリート		WSモルタル	
	SL (cm)	AIR (%)	0打 フロー (mm)	15打 フロー (mm)
8-40.5	8.5	3	108	199
8-45.5	7.5	3.5	106	192
8-50.5	6.0	4.5	107	177
12-41.7	12.5	3.7	113	230
12-46.7	11	2.6	108	210
12-51.7	12	4.7	107	185
18-44.6	17.5	3.5	121	248
18-49.6	18.5	2.8	121	245
18-54.6	16.5	4.8	108	198

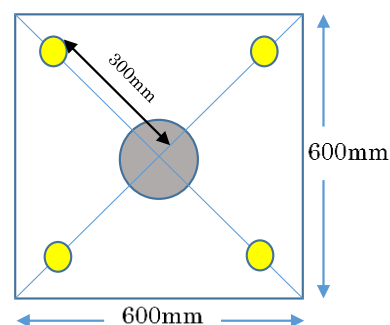


図-1 タンピング試験装置の概要

(1) フレッシュ性状試験およびタンピング試験

コンクリートを練り混ぜた直後にスランブ試験(JIS A 1101)および空気量試験(JIS A 1128)にしたがってそれぞれ測定を行った。また、WSモルタルに対してはJIS R 5201にしたがってモルタルフロー試験を行い0打と15打におけるフロー値を測定した。

タンピング試験⁴⁾は、配合の異なる同一スランブのコ

ンクリートにおける流動性や材料分離抵抗性を調べる目的で実施した。

試験の手順を以下に示す。地面から跳ね返る衝撃を抑えるために、乾かした砂を 1cm 程度に敷いた上にスランブ板を置き、そのうえでスランブ試験を行った。スランブ試験の終了後、続けてスランブ板の中心から各隅角部に 300mm 移動した地点（図-1 の黄点）に質量 1.2kg の木製棒を 50cm の高さから落下させ、スランブ板の四隅を時計回りに打撃した。打撃回数は 8, 16, 24, 32, 40 回の 8 回区切りで行い、8 回打撃するごとにコンクリートのスランブ値とスランブフロー値を測定した。

同様の試験を行った過去の報告では、コンクリートのスランブフロー値が 350mm を超えた時点で終了としているものもあるが、今回は実験的に全ての配合で 40 回の打撃を終了するまで継続して測定を行った。

(2) コンクリート加振ボックス充填試験

コンクリートの振動下の充填性能を調べる目的で、棒パイブレータを使用し、ボックス充填試験⁵⁾を実施した。ゲートの障害鉄筋には D13 の鉄筋を鉛直方向に 3 本配置した R2 の障害を使用した⁶⁾。ボックス充填試験装置の概要を図-2 に、示す。

試験の手順を以下に示す。まず、ボックス試験装置を防振ゴムマットの上に設置した後、A 室に 3 層に分けて突き棒を用いてコンクリートを詰めた。A 室上面を均し 1 分おいた後に仕切りゲートを引き上げ、同時に棒パイブレータの加振を開始した。加振開始から B 室の充填高さ 190mm および 300mm 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 190mm から 300mm 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 300mm まで到達した際の時間を完全充填時間とした。

(3) WS 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、テーブルパ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-3 に、示す。この試験装置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 サイズのものをを用いた。ボックス充填試験装置の側面にはテーブルパイブレータ上で試験装置が移動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 $\phi 6mm$ の鉄筋を 3 本、均等間隔に設置した。

試験の手順を以下に示す。まず、ボックス試験装置をテーブルパ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 分おいた後に仕切りゲートを引き上げ、同時にテーブルパイブレータの加振を開始した。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

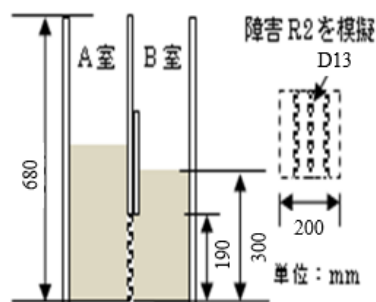


図-2 コンクリート加振ボックス充填試験装置の概要

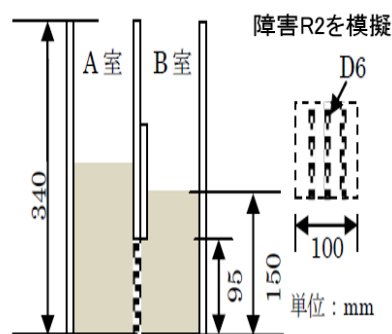


図-3 モルタル加振ボックス充填試験装置の概要

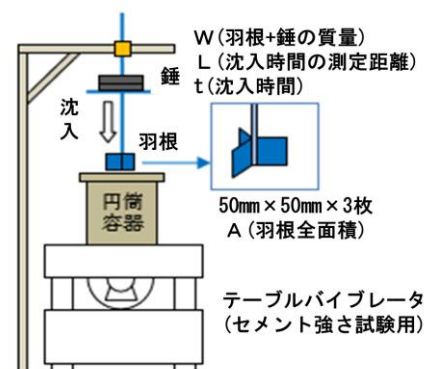


図-4 羽根沈入式粘度計試験装置の概要

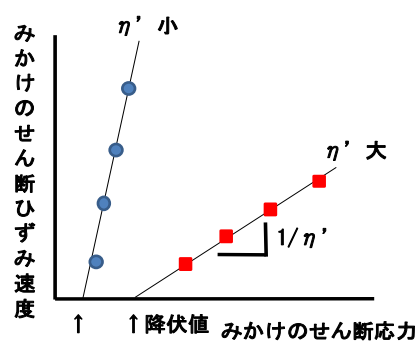


図-5 降伏値と塑性粘度の算定方法

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 $V_{\text{pass}}(\text{mm/s})$ 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、加振時の測定ではテーブルバイブレータを 40Hz¹⁰⁾ で稼働させて試験を行った。

(4) WS モルタルの静置・加振時のレオロジー試験

モルタルの塑性粘度の測定については、円筒回転式、漏斗式や球引上げ式などの方法が知られている。漏斗タイプでは降伏値が比較的大きなモルタルには適用できない場合があり、円筒回転式では試料との界面のすべりが影響するため測定が困難であることが指摘されている⁷⁾。また球引上げ式では球体にモルタルが付着し見かけの直径が大きくなるといった問題点がある⁷⁾。以上の問題点を解決するため、応力制御型のリングせん断試験装置を用いたレオロジー測定法⁸⁾も提案されている。

本研究では静置および振動試験では羽根沈入試験装置は、図-4 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-5 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 を求めた。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⁹⁾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。加振時の測定ではテーブルバイブレータを 40Hz で稼働させて試験を行った。

3. フレッシュコンクリートと WS モルタルの試験結果

3.1 WS モルタルのフレッシュ性状試験と充填性

(1) WS モルタルの 15 打フロー

図-6 に、砂セメント比と WS モルタル 15 打フローの関係を示す。砂セメント比が大きくなるほど 15 打フローが小さくなる結果になった。15 打フローの範囲は、スランプ 8cm では、177~199mm、スランプ 12cm では、185~230mm、スランプ 18cm では 198~248mm であった。

(2) WS モルタルの充填性能

図-7 に、WS モルタル 15 打フローと WS モルタル 150mm 充填時間の関係を示す。同一スランプごとにみれば、15 打フローが大きいくほど、150mm 充填時間が短く

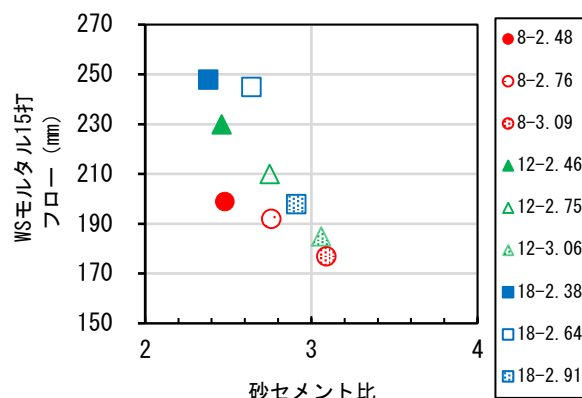


図-6 砂セメント比と WS モルタル 15 打フローの関係

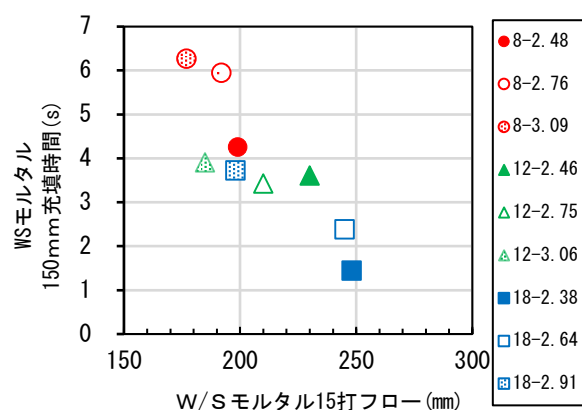


図-7 WS モルタル 15 打フローと WS モルタル 150mm 充填時間の関係

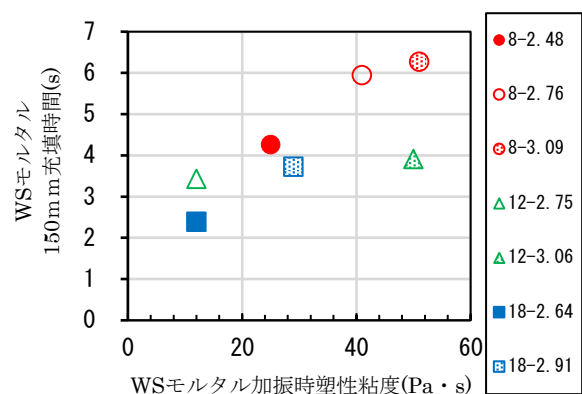


図-8 WS モルタル加振時塑性粘度と WS モルタル 150mm 充填時間の関係

なる結果になった。

図-8 に、WS モルタル加振時塑性粘度と WS モルタル 150mm 充填時間の関係を示す。同一スランプごとにみれば、砂セメント比が大きいくことにより、WS モルタルの加振時塑性粘度が上昇する結果となった。また、スランプの大きさに関わらず、砂セメント比が大きいくほ

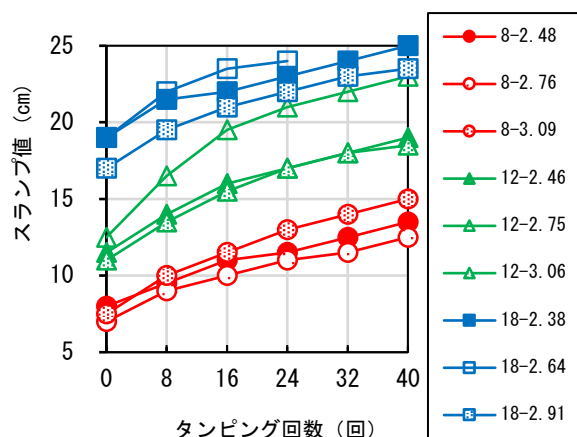


図-9 タンピング回数とスランプ値の関係

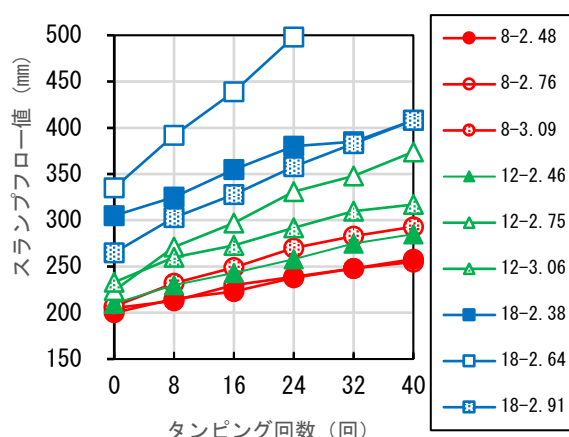


図-10 タンピング回数とスランプフローの関係

表-4 1 衝撃ごとのスランプ値の平均変化量と
スランプフローの平均変化量

配合名	1衝撃ごとのスランプ値の平均変化量(cm)	1衝撃ごとのスランプフローの平均変化量(cm)
8-40.5	0.13	1.44
8-45.5	0.12	1.30
8-50.5	0.18	2.16
12-41.7	0.18	1.88
12-46.7	0.25	3.63
12-51.7	0.18	2.10
18-44.6	0.13	2.57
18-49.6	0.21	5.56
18-54.6	0.16	3.52

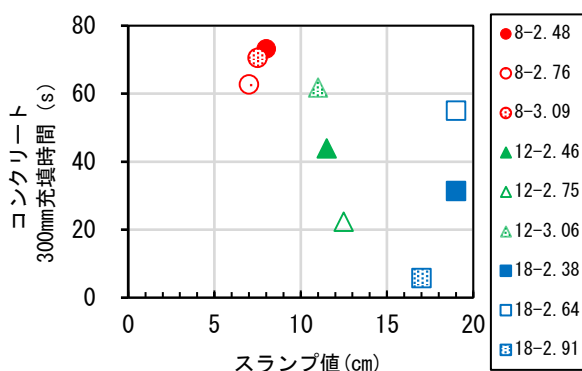


図-11 スランプ値と
コンクリート 300mm 充填時間の関係

ど 150mm 充填時間が長くなる。同様に、加振時塑性粘度が上昇すると、150mm 充填時間が長くなる結果となった。なお、12-41.7 と 18-44.6 の配合については、テーブルバイブレータにより振動をかけた際にペーストが飛散したため、加振時の塑性粘度が測定できなかった。

以上より、砂セメント比が小さく、加振時の塑性粘度が低く、15 打フローが大きい配合が、充填性の良い配合となった。

3.2 コンクリートの変形と充填性

(1) タンピング試験の変化量

図-9 に、タンピング回数とスランプ値の関係、図-10 に、タンピング回数とスランプフローの関係を示す。また、表-4 に 1 衝撃ごとのスランプ値の平均変化量とスランプフローの平均変化量を示す。8-40.5、8-45.5、8-50.5 ではタンピング試験によるスランプ値、スランプフローに大きな変化はなかった。12-46.7 は同一スランプである 12-41.7、12-51.7 と比べると、タンピング試験によるスラ

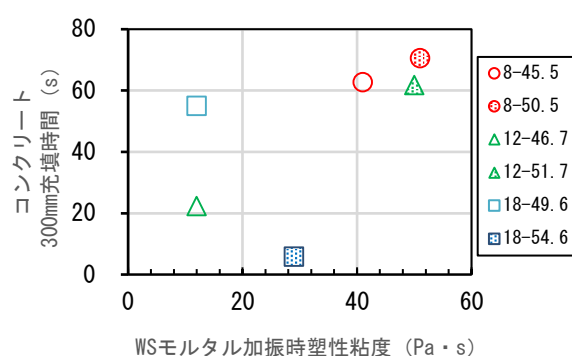


図-12 WS モルタル加振時塑性粘度と
コンクリート 300mm 充填時間の関係

ンプ値、スランプフローが大きく変化した。18-54.6 も同一スランプ 18-44.6 と比べると、タンピング試験によるスランプ値、スランプフローが大きく変化した。表-4 に示されている 18-49.6 は、フローの先端に、粗骨材が行き渡らず、中央に粗骨材が留まる状態であった。

(2) コンクリートの充填性

図-11 に、スランプ値とコンクリート 300mm 充填時間の関係を示す。12-46.7 は、12-51.7 の比べ、細骨材率が小さく、粗骨材量が多いにも関わらず、300mm 充填時間は短い結果になった。図-10 のタンピング試験の結果を見ると、12-46.7 は 12-51.7 比べ、スランプフローの変化量が大きく衝撃に対して変形しやすいことから、充填時間が早くなったものとする。18-54.6 も同様に、スランプフローの変化が大きく、充填時間が短くなったものとする。表-4、18-49.6 は、フローの先端まで粗骨材が行き渡らず、中央に粗骨材が留まる状態であり、コンクリートが分離傾向であったため、充填時間が長くなったと考察する。

図-12 に、WS モルタル加振時塑性粘度とコンクリート 300mm 充填時間の関係を示す。WS モルタルの加振時の塑性粘度が上昇するほど、コンクリート加振ボックス 300mm 充填時間が長くなる結果になった。18-49.6 はタンピング試験より分離傾向にあり、コンクリート加振ボックス充填試験を行うと、充填時間が長い。

一般的に、間隙通過性は細骨材率が大きく、粗骨材量が少ないものほど良好な関係を示すが、ボックス充填性は WS モルタルの加振時の塑性粘度の影響を受け、必ずしも細骨材率が大きく、粗骨材量が少ない場合でも、充填性が良好な関係になるとは限らない結果となった。

4. まとめ

3 水準の同一のスランプを有する細骨材率を変化させたコンクリートと、それらをウェットスクリーニングした、モルタルに対して、衝撃や振動を与えた際の変形性能や充填性能を評価した結果以下のことが明らかになった。

- (1) ウェットスクリーニングモルタルの加振時塑性粘度が低いものほど、フレッシュコンクリートの充填性能が良い、傾向がみられた。
- (2) ウェットスクリーニングモルタルの砂セメント比は小さく、加振時の塑性粘度は低く、15 打フローが大きい配合が、充填性の良い配合となった。
- (3) 材料分離していない状態で 1 衝撃ごとのスランプフローの平均変化量が大きいと、フレッシュコンクリートの充填性能が良い傾向にあった。

参考文献

- 1) ACI Committee 309 : Behavior of Fresh Concrete During Vibration, Jour. of ACI vol. 78, No.1-2, pp.36-53, Jan.-Feb. 1981
- 2) 早川健司, 加藤佳孝: 振動締固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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1325-1330, 2010.7
- 3) 橋本紳一郎ほか: 各種配合条件におけるフレッシュコンクリートの定量的な振動性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー145, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針, 資料 79-84, 2016.6
- 5) 土木学会: コンクリートライブラリー145, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針, 試験 1-4, 2016.6
- 6) 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
- 7) 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, Vol.26, No.8, pp.20-29, 1988.8
- 8) 李柱国, 李潔勇, 飯高稔: フレッシュコンクリートの応力制御型レオロジー試験法の開発, Vol.33, No.1, pp.1211-1216, 2011.7
- 9) 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
- 10) 齋藤拓弥ほか: 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