

論文 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

齋藤 拓弥*1・大八木 雅人*2 藤倉 裕介*3・伊達 重之*4

要旨: コンクリートの施工は振動締固め機を使用して実施することが多く、フレッシュコンクリートの施工性能を評価するためには振動下におけるレオロジー特性と充填性能を評価することが重要である。本研究では振動下におけるコンクリートやモルタルの充填性や分離抵抗性といった施工性能を統一的に評価するとともに、最適な締固め手法を確立することを目的とし、その基礎的な検討としてモルタルの静置下および周波数の異なる振動下でのレオロジー特性を調べた。また、周波数の異なる振動下において加振ボックス充填試験を行い、周波数と充填性能の関係について検討を行った。その結果、最適な締固め方法の確立にはモルタルのレオロジー特性に適した振動周波数を評価することが重要であることを確認した。

キーワード: モルタル, レオロジー, 振動締固め, 塑性粘度, 降伏値, 加振ボックス充填試験

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, 施工者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。

土木学会では, 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提案されている¹⁾。

しかし, 同一のスランプを有するコンクリートであってもパイブレータによる加振時の挙動, 鉄筋間の間隙通過性や型枠内の充填性能が異なることも近年指摘されている²⁾。また, 高密度な配筋条件の構造物では, 振動締固めの方法によって表層コンクリートの品質に影響を及ぼし³⁾, 現場ではコンクリートの充填不良やジャンカなどの不具合を生じるケースもある。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によって施工性能を評価できないことも多く, 実際の施工の状況である振動締固め機を使用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, 流動性や材料分離抵抗性といった施工性能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や様々な種類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が十分に検討されているとはいえない。

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る。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⁷⁾。しかし, 静置下のレオロジー特性に関する報告は多くあるが, 振動下におけるレオロジー特性を調べた研究は少ない。

以上の背景から, 本研究では振動下におけるコンクリートやモルタルの施工性能を統一的に評価できる手法を確立することを目的とし, モルタルの静置下および周波数の異なる振動下のレオロジー特性や充填性能を調べ, 最適な締固め方法について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料及びモルタルの配合

使用材料を表-1に示し, モルタルの配合条件を表-2

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
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)フジタ技術センター土木研究部 博士(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 配合表

配合名	W/C (%)	S/C	単位量(kg)				Ad (C×%)	フロー(mm)	
			W	C	S1	S2		0 打	15 打
50N279S1	50	2.55	279	558	1426	0	0.5	117	237
50N279S2					0	1421		105	139
50N279mix					713	710		104	174
40N279mix	40	1.88	698	655	653	105		168	
60N279mix	60	3.23	465	752	749	105		165	
50N264mix	50	2.82	264	528	745	742		108	143
50N294mix		2.31	294	588	681	679		113	212

に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比(W/C)を 40%, 50%, 60%, 単位水量を 264kg/m³, 279 kg/m³, 294 kg/m³ の 3 水準とし、細骨材として砕砂と山砂を使用した。本検討では、スルホン酸系の AE 減水剤を使用し、混和剤の添加量の違いがセメントペーストに与える影響を一定とするため、混和剤の添加量はセメント量の 0.5% を添加した。モルタルのフローは JIS R 5201 に従って測定したフロー値 (0 打および 15 打フロー値) とした。また、モルタル 1 配合に対して、設定した、静置を含む 4 段階の周波数で後述する各試験を順番に行う。試験進行に伴う経時による物性の変化が試験結果に大きな影響を与えないものであることを確かめるため、本試験では周波数が変更される際にモルタルのフローも測定した。

2.2 試験方法

(1) 静置および振動下のレオロジー測定

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⁸⁾。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⁸⁾。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⁹⁾も提案されている。

本研究では静置および振動下のモルタルの塑性粘度と降伏値の測定は水セメントの比の大小に関係なく適用が可能で測定の操作が簡便な羽根沈入型の測定装置¹⁰⁾を使用した。本試験は図-1 に示すように 3 枚の羽根を有する治具を容器内のモルタルに自重で沈入させて粘度および降伏値を求めるものである。羽根は薄い金属板でできており移動方向から見た投影面積が小さいため、ペーストやモルタルの付着の影響を極力抑えることができ、円筒回転式粘度計にみられるせん断履歴の影響をほとんど受けない方法である。

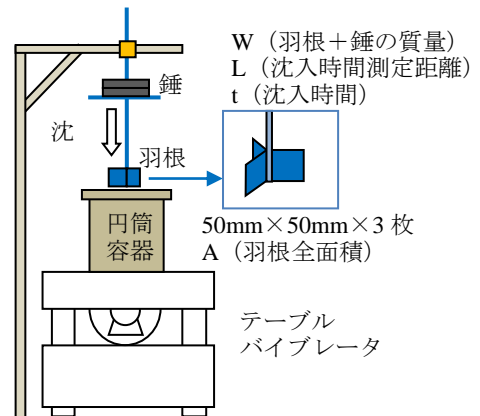


図-1 羽根沈入試験装置の概要

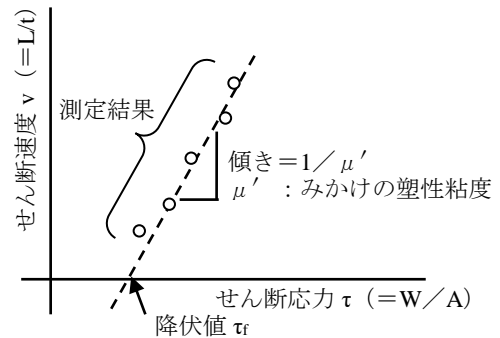


図-2 塑性粘度と降伏値の算定方法

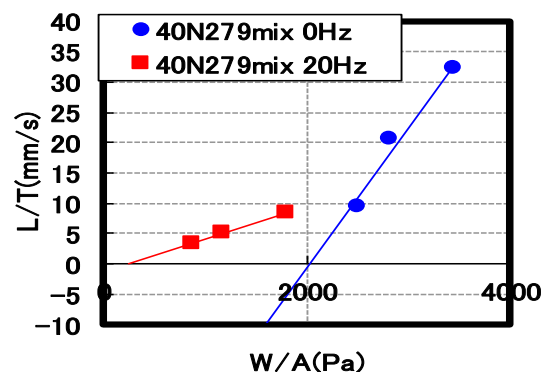


図-3 塑性粘度と降伏値の算定方法

試験の方法としては、容器に試料を詰め羽根の上部に設置した錘の質量を段階的に変えて沈入速度を測定した。せん断面積が一定となるように3枚の羽根が試料に完全に埋まった状態から沈入させ、羽根が容器の底に到着する寸前まで（沈入時間測定距離 $L=180\text{mm}$ ）の沈入時間を測定した。本試験ではせん断時のすべり面が試験結果に影響を及ぼさないように、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。そして、**図-2**に示すせん断速度 v （=沈入時間測定距離(L)/沈入時間(t)）とせん断応力 τ （=羽と錘の質量(W)/羽の全面積(A)）の関係からみかけの塑性粘度 μ' と降伏値を求め、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¹⁰から、モルタルの塑性粘度を算出した。モルタルとシリコンオイルでは内部構造の均一さなどが異なる点があるが、今回はモルタル内部の細骨材同士の加振による内部摩擦の影響などを含めた見かけの塑性粘度から校正を行った。**図-3** は実際の配合でレオロジー曲線を求めた測定結果の例である。加振時の測定においても、同一の試験方法を行うという観点から、静置時と同様にビンガムモデルに当てはめて塑性粘度と降伏値の測定を行った。

レオロジー測定の試験はセメントの物理試験(JIS R 5201)に規定されるテーブルバイブレータ上に容器を固定して行い、振動を全く与えない状況で実施した静置および 20Hz 、 40Hz 、 60Hz と振動周波数が異なる場合の振動下にてそれぞれ実験を行った。

(2) 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、前項で示すテーブルバイブレータ上で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。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形容器の1/2サイズのものを用いた。**写真-1**に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状況を示す。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 $\phi 6\text{mm}$ の鉄筋を3本、均等間隔に設置した。

試験は以下の手順で実施した。ボックス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分おいた後に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。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 $V_{\text{pass}}(\text{mm/s})$ とした。また、B室の充填高さ

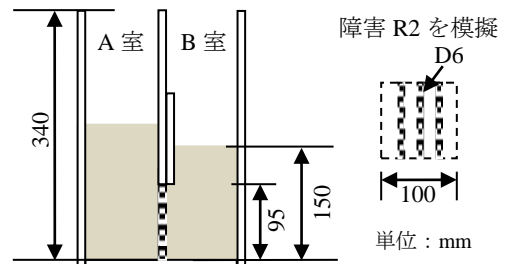


図-4 ボックス充填試験装置

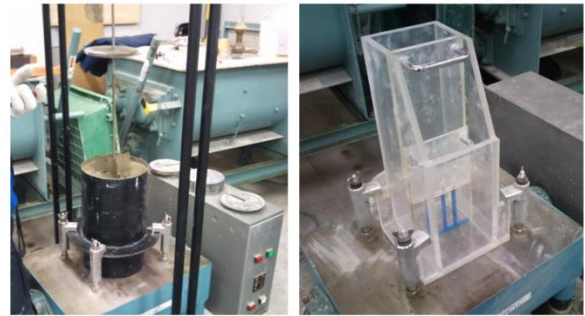


写真-1 試験装置の設置状況

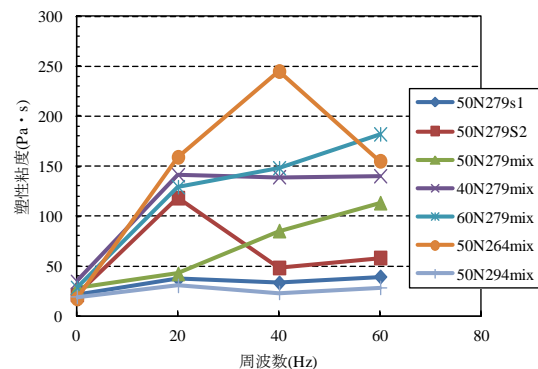


図-5 周波数と塑性粘度の関係

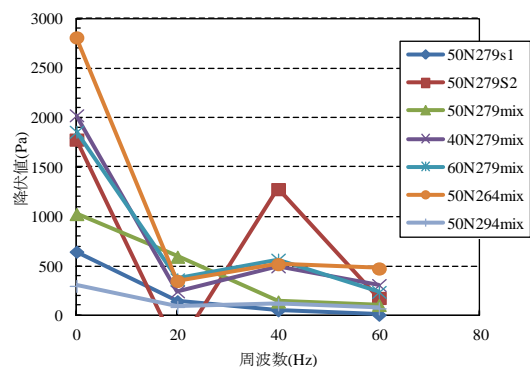


図-6 周波数と降伏値の関係

150mm まで到達した際の時間を完全充填時間とした。

3. 試験結果および考察

3.1 試験結果

図-5 に振動の周波数と加振時の塑性粘度の関係を示す。周波数が0Hzのプロットは振動をかけていない静置状態での測定を意味している。既往の研究では、モルタルに振動を与えるとレオロジー定数が増加し、静置時と比べて塑性粘度が増加することが報告されているが¹¹⁾、本実験においてもその傾向は全ての配合で得られていることがわかる。周波数が高くなるに伴い塑性粘度が増加するものと考えられるが、多くの配合ではそのような傾向は必ずしも見られないことがわかる。その後40Hz、60Hzと周波数を増加させた際の挙動は一定ではなく、塑性粘度が上昇したものや一定のもの、減少したものがあり共通の傾向は見られなかった。今回の実験では静置状態での塑性粘度と比較して振動を与えることで塑性粘度が上昇する傾向がみられた。振動をかけると流動を開始するモルタルの特性を考えると、周波数が異なる場合のレオロジー特性は配合条件によって異なっており、特に骨材の影響が大きいものと予測されるが、そのメカニズムは現段階では明らかになっておらず、今後の検討課題となる。

図-6 は振動の周波数と降伏値の関係を示す。静置時ではいずれも大きな降伏値を示すが、振動下では、降伏値を大きく減少させることがわかる。さらに周波数の増加により降伏値がさらに減少する事は無く、20Hzの振動下で降伏値は最低値を示し、周波数の増加によるさらなる降伏値の低下は見られなかった。

次にバイブレータの周波数とモルタルの加振ボックス充填試験における150mm到達時の充填時間の関係を図-7に示す。周波数の増加により加振ボックス試験の充填時間が減少していることがわかる。既往の研究では、モルタルの加振ボックス充填試験の充填時間と加振時の塑性粘度には良い相関があることが述べられている¹¹⁾。図-5では各周波数におけるモルタルの塑性粘度に一定の傾向はみられず、配合ごとに最大の粘度を示す周波数が異なっていたが、図-7では周波数が高いほど充填時間が短くなることが示されており、モルタルの充填性能が加振時の塑性粘度のみに依らないものと考えられる。すなわち、周波数が異なる場合の振動下において円筒容器のレオロジー特性とボックス容器への充填挙動の関連性について詳細な検討が必要と考えられる。

図-8はモルタルの15打フローと塑性粘度の関係を示す。これらは既往の研究結果¹¹⁾と同様にモルタル全体の傾向としてフローが小さいほど加振時の塑性粘度が大きくなっていることがわかる。15打のフロー値が小さい固練りのモルタルは、細骨材の粒子間の隙間が狭く振動をかけた際の細骨材粒子間の摩擦が大きく上昇するために

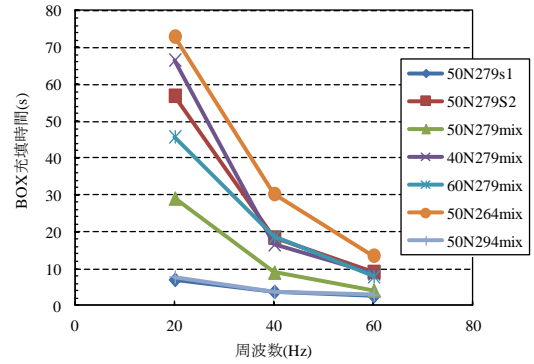


図-7 周波数とBOX 充填時間の関係

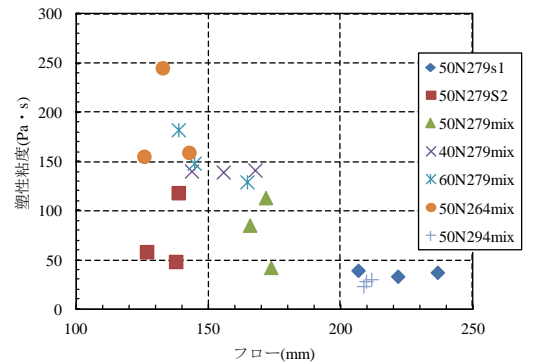


図-8 フローと塑性粘度の関係

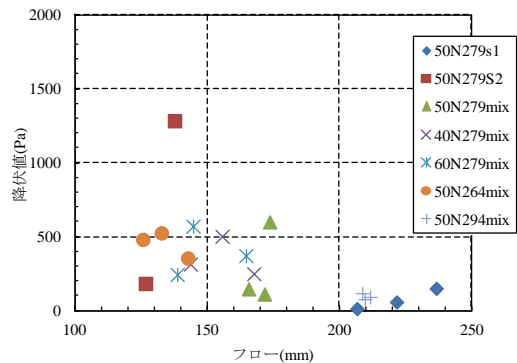


図-9 フローと降伏値の関係

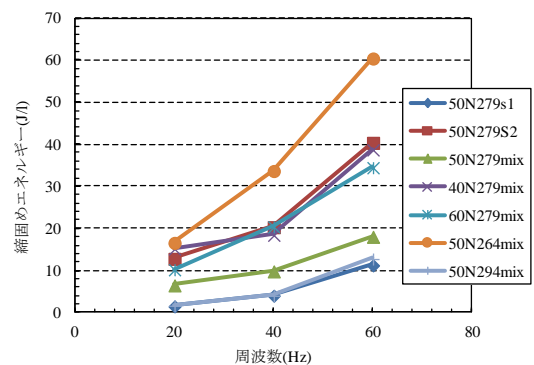


図-10 周波数と締固めエネルギーの関係

このような傾向を示すと考えられる。

図-9はモルタルの15打フローと降伏値の関係を示している。フローと塑性粘度の関係と同様に、フローの大きい軟練りのモルタルほど加振時の降伏値も小さくなる傾向が見て取れる。逆に、フローが小さい固練りのモルタルであっても、振動をかけた際に塑性粘度が小さい物、降伏値が小さいモルタルもあり、こういった要因がこれらの固練りのモルタルのレオロジー特性に影響を与えているのかを十分に検討することが、今後必要と考えられる。

3.2 締固めエネルギーに関する考察

コンクリート打設の際、バイブレータを用いた振動締固めを行うにあたってコンクリートの各種条件に適した振動締固め完了時間を振動締固めエネルギーという指標で評価した例が報告されている⁹⁾。本実験においても、モルタルの加振ボックス充填試験の150mm充填時間を振動締固め完了時間と仮定して、各周波数における振動締固め完了エネルギー E_t (J/l)⁷⁾を式(1)により算定した。

$$E_t = \frac{\rho_0 \alpha_{\max}^2 t}{4\pi f} \quad (1)$$

ここで、 ρ_0 (kg/l) は試料の単位容積質量、 α_{\max} (m/s²) は加速度、 t (s)は時間、 f (Hz) は周波数である。

図-10はボックス充填試験時の周波数と、それぞれの周波数とボックス充填試験の結果に対応した $t=150$ mmの時の締固めエネルギーの関係を示している。周波数が高くなるにつれて締固めエネルギーが大きくなること、また、各周波数において、配合ごとの締固めエネルギーの相対的な大きさに極端な変化は無かった。フレッシュコンクリートの振動締固めにおいて、各周波数において締固めエネルギーが小さいほどより効率的にフレッシュコンクリートを型枠内に充填させることができるものと考えられる。図-7では振動の周波数が高いほど充填時間が短くなるが、図-10で示されている通り、締固めエネルギーは大きくなる事が示されている。すなわち、最も締固めの効率が良い最適な振動の周波数があるものと考えられる。本研究で使用したテーブルバイブレータは周波数の増加とともに加速度も増加することが分かっており、高い周波数の振動下においては、上昇した加速度の影響により締固めエネルギーも大きくなることから、過剰な締固めによる材料分離などの影響もあるものと考えられ、本実験においても加振時の測定においては、60Hzの振動を加えた際に若干の材料分離が測定終了後に確認された配合もあり、材料分離への影響も考慮した最適な締固め方法の確立が重要であると考えられる。

図-11はモルタルのフローと振動締固めエネルギーの関係を示す。モルタルのフローが大きいほど必要な締固めエネルギーが小さくなる傾向がある。図-8と図

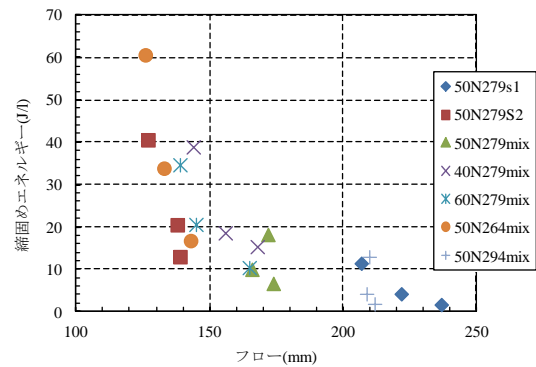


図-11 フローと締固めエネルギーの関係

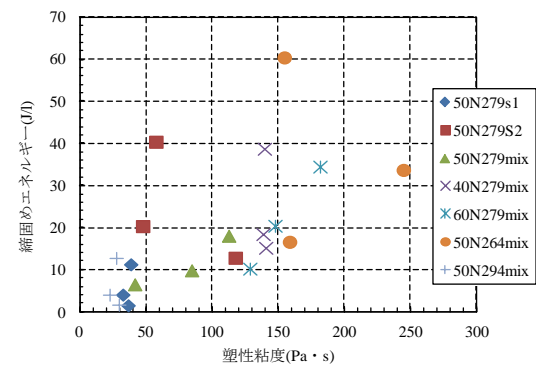


図-12 塑性粘度と締固めエネルギーの関係

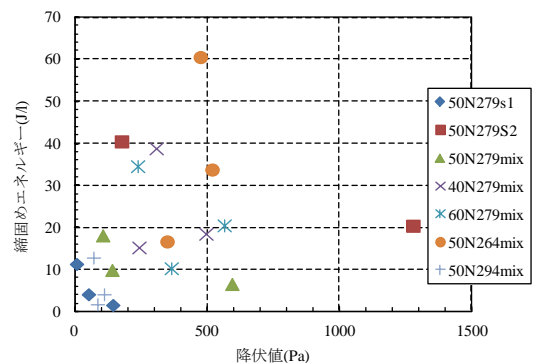


図-13 降伏値と締固めエネルギーの関係

図-11を比べると、フローと塑性粘度の関係と、フローと振動締固めエネルギーの関係はともに強い相関関係があることがわかる。図-12は塑性粘度と締固めエネルギーの関係を示す。50N279S2および50N279mixの配合を除き、同配合のモルタルにおいては異なる周波数下で得られた塑性粘度とそれに対応する加振ボックス充填試験の結果から得られた締固めエネルギーの間には、塑性粘度が上昇すると締固めエネルギーも増加する傾向にある。

前述の配合がこれに習わなかった理由としては粒子の細かい山砂を用いたこと、単位水量が少なかったことで粘度が大きくなりすぎたこと、また、降伏値などの別の要因が影響を与えたのではないかと推測される。これにより振動下の塑性粘度から間接的にモルタルの締固めエネルギーを推定することが可能であると考えられる。

図-13 はモルタルの振動下の降伏値と締固めエネルギーの関係を示す。こちらは図-12 に示す塑性粘度と締固めエネルギーの関係ほど強い相関が求められなかった。したがって、本実験においては振動締固めエネルギーにより強く影響を及ぼすパラメータはモルタルの加振時の降伏値より塑性粘度の方がより強く影響を及ぼすのではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究では振動下におけるコンクリートやモルタルの充填性や分離抵抗性といった施工性能を統一的に評価できる手法を確立することおよび、振動締固めに際しての最適な周波数の選択と加振時のモルタルの挙動の評価を目的に、その基礎的な検討としてモルタルの静置下および異なる周波数での振動下のレオロジー特性を調べるとともに、同じく異なる周波数での振動下における充填性能との関係について検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。異なる周波数の振動下でのモルタルのレオロジー特性について、既往の研究において振動下のモルタルは静置時に比べて塑性粘度が上昇し、降伏値が減少する傾向を見せるが、その傾向は本実験においても同様であった。メカニズムについては今後の検討課題とする。新たに得られた知見として以下の物がある。

- (1) 振動周波数の大小とモルタルのレオロジーの関係は周波数が増えるごとに塑性粘度の上昇量と降伏値の減少量が増大するのではなく、一定の周波数の振動を境にレオロジー定数の変化はおおよそ頭打ちになることがわかった。
- (2) 異なる周波数の振動下において既往の研究結果と同様に、フローの増加に伴って、塑性粘度と降伏値が小さい値となることがわかった。
- (3) 振動締固めエネルギーとモルタルのレオロジーなどの各種要因について検討を行った。その結果、特に締固めエネルギーと塑性粘度の間に良い相関があることがわかった。今後は材料や配合の異なるモルタルに関しても同様の検討を重ねて他の要因との関連性の評価も重ねていくことが重要であると考えられる。
- (4) 振動の周波数が大きいほど充填時間が短くなるが、締固めエネルギーは大きくなる結果が得られた。高い周波数の振動下においては、締固めエネルギーも

大きくなることから、過剰な締固めによる材料分離なども起こる可能性があり、材料分離などにも考慮した、最適な締固め方法の確立が重要である。

- (5) 振動下の塑性粘度が大きいほど、締固めエネルギーも大きくなることがわかった。これにより、振動下のモルタルの塑性粘度より、締固めエネルギーを推定できる可能性があることがわかった。

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) 梁俊，丸屋剛，坂本淳，宇治公隆：締固め完了エネルギーによる同一スランプコンクリートの施工性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1393-1398，2009
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-406，2000.9
- 11) 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