論文　モルタルの静置，振動下のレオロジー特性が充填性能に与える影響

藤倉　裕介[*1]・齋藤　拓弥[*2]・橋本　紳一郎[*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性状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できる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振動下のレオロジー特性を調べるとともに，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。その結果，振動下の塑性粘度と充填性能に良好な関係を有することが分かり，施工性能を評価するためには振動下のレオロジー特性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，振動締め固め，塑性粘度，降伏値，ボックス充填試験

1. はじめに

公共工事をはじめ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バ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，土木構造物においては高密度な配筋条件の構造物も増加しており，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多々ある。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)]。スランプ試験はワーカビリティの一面である変形性を示す試験ではあるが，現場では振動締固め機を使用した施工が一般的であることを考えれば，振動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できる手法を構築することが重要である。

このように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)]。しかしながら，これらの方法は簡便にフレッシュコンクリートの品質を評価できる試験方法として有効ではあるが，実際の施工条件との関連や任意の配合のコンクリートへの適用性について課題を有する。また，振動下におけるコンクリートの充填性能に関するメカニズムや統一的な評価方法が十分に確立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は非ニュートン流体であるビンガム流体に分類され，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)]。しかしながら，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，その基礎的な検討としてモルタルの静置下および振動下のレオロジー特性を調べるとともに，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**に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(N)，高炉セメント B 種(BB)，早強ポルトランドセメント(H)，低熱ポルトランドセメント(L)を使用し，水セメント比(W/C)を 50%，単位水量を 264kg/m^3, 279 kg/m^3, 294 kg/m^3 の 3 水準とし，細骨材として山砂を使用した。普通ポルトランドセメント(N)を使用したケースでは W/C=40%の

*1　（株）フジタ技術センター土木研究部　博士(工)　(正会員)
*2　東海大学　工学部土木工学科　(学生会員)
*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)　(正会員)

表－1　使用材料

材料	記号	種類，産地	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	－
	BB	高炉セメント	3.04	－
	H	早強ポルトランドセメント	3.14	－
	L	低熱ポルトランドセメント	3.22	－
細骨材	S1	山砂（千葉県君津産）	2.61	2.17
	S2	砕砂（東京都青梅産）	2.60	2.35
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤	－	－

表－2　モルタルの配合条件

セメントの種類	W/C	W(kg/m^3)	細骨材	Ad
N，BB，H，L	50	264	山砂 (S1)	C×0～2.0(%)
		279		
		294		
N	40	264		
		279		
		294		
	50	264	砕砂 (S2)	
		279		
		294		

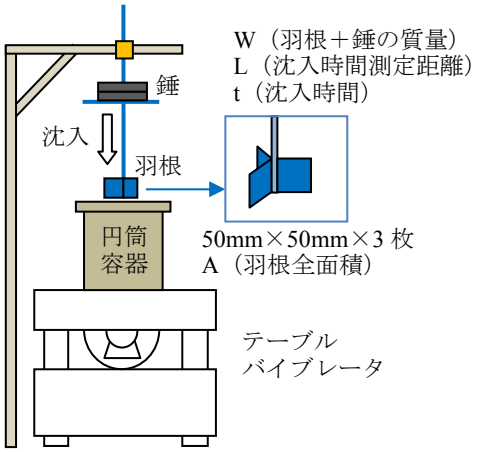
ケース，W/C=50%で砕砂を使用したケースについても実施した。本検討では，近似式を用いてフロー値が 180 mm（コンクリートのスランプがおおよそ 12cm に相当）の場合の各特性について着目するものとした。近似式を得るため**表－2** に示す各配合においてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤によりフローを調整し，フローが 150mm～250 mm の範囲で，異なる 3 種類のフローのモルタルを作製して次項に示す各試験を行った。モルタルのフローは JIS R 5201 に従って測定したフロー値（15 打フロー値）とした。

2.2 試験方法

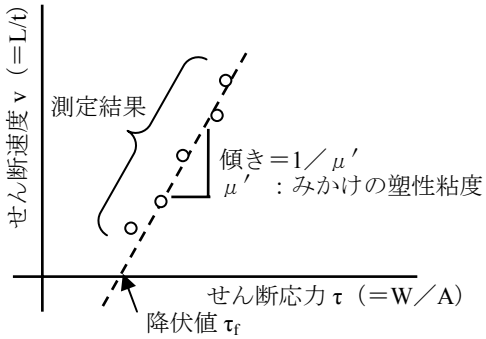
(1) 静置および振動下のレオロジー測定

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。

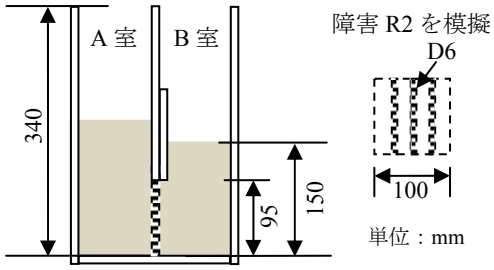
本研究では静置および振動下のモルタルの塑性粘度と降伏値の測定は水セメントの比の大小に関係なく適用が可能で測定の操作が簡便な羽根沈入型の測定装置 [10] を使用した。本試験は**図－1** に示すように 3 枚の羽根を有する治具を容器内のモルタルに自重で沈入させて粘度および降伏値を求めるものである。羽根は薄い金属板で



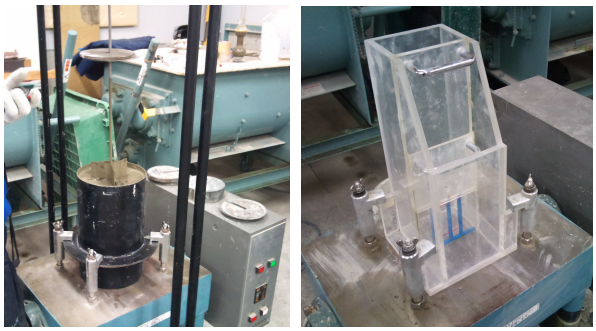
図－1　羽根沈入試験装置の概要



図－2　塑性粘度と降伏値の算定方法



図－3　ボックス充填試験装置



写真－1　試験装置の設置状況

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。

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＝180mm）の沈入時間を測定した。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 10～300Pa・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 [10]から，モルタルの塑性粘度を算出した。

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振動下（振動周波数：約 70Hz）にて行った。

(2) ボックス充填試験

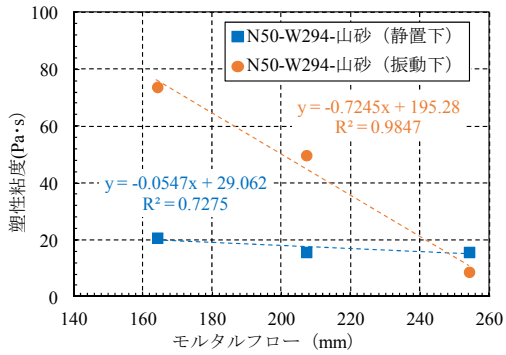
モルタルの振動下の充填性能を調べる目的で，前項で示すテーブルバイブレータ上でボックス充填試験を実施した。ボックス充填試験装置の概要を**図－3** に示す。この試験装置は高流動コンクリートの充填試験(JSCE-F 511)で使用するボックス型容器の 1/2 サイズのものを用いた。**写真－1** にボックス充填試験装置をテーブルバイブレータ上に設置した状況を示す。ボックス充填試験装置の側面にはテーブルバイブレータ上で試験装置が移動しないように固定板を取り付けた。流動障害については R2 を模擬しφ6mm の鉄筋を 3 本, 均等間隔に設置した。

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_{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。

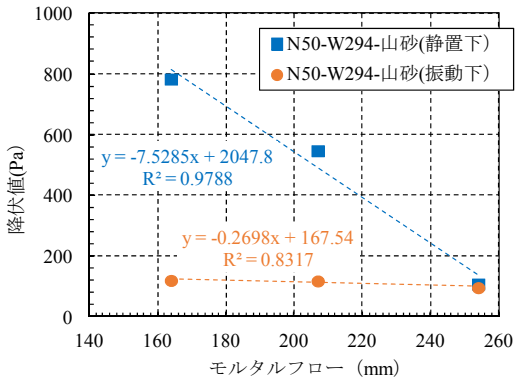
3. 試験結果および考察

3.1 レオロジー特性と充填性能の関係

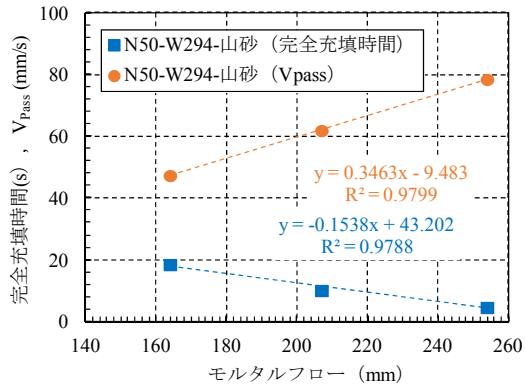
静置下および振動下における塑性粘度や降伏値といったレオロジー特性がボックス充填試験における充填性能に与える影響について示す。本研究では各配合において混和剤量を調整して 3 種類のフローを作製し各試験を実施している。本検討では，同一のモルタルフローにおける結果に着目することとし，以下の**図－4～図－6** に示すようにモルタルフローと各試験結果の関係から近似式を



図－4　モルタルフローと塑性粘度の関係



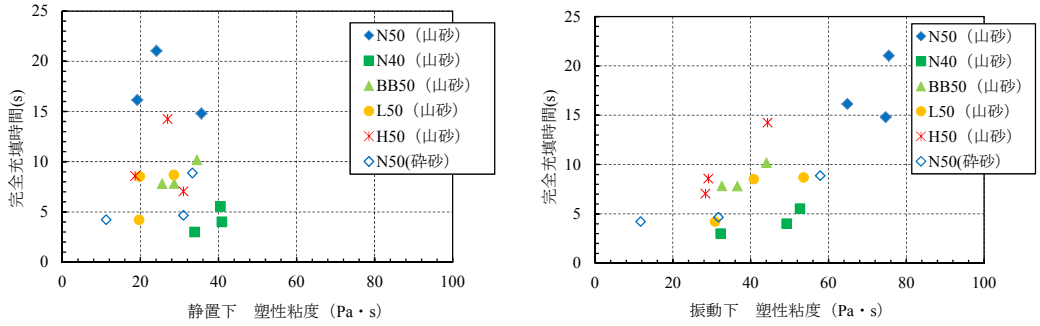
図－5　モルタルフローと降伏値の関係



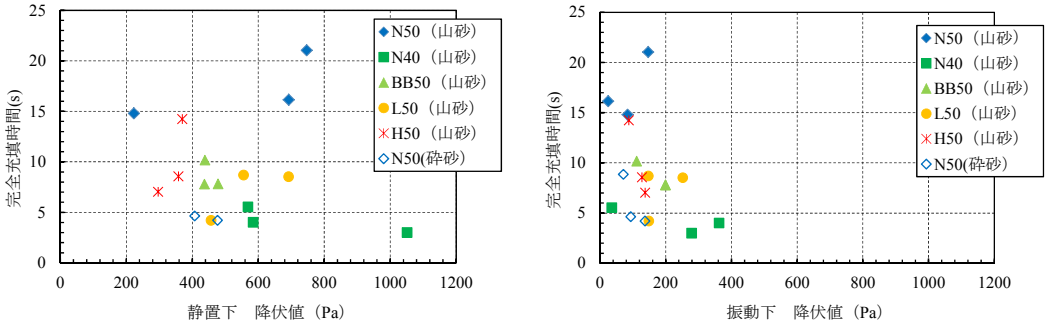
図－6　モルタルフローと充填時間，V_{Pass} の関係

求めた。本検討ではこの近似式を用いてモルタルフローが 180 mm に相当（コンクリートのスランプがおおよそ 12cm に相当）する場合の各試験結果に着目して報告する。

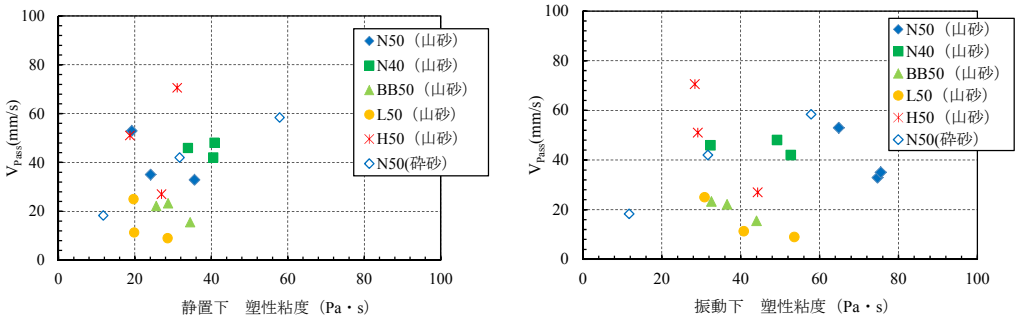
図－4 には静置下および振動下のモルタルフローと塑性粘度の関係の一例を示し，**図－5** にはモルタルフローと降伏値の関係の一例を示す。図中の凡例は，例えば普通ポルトランドセメント(N)を使用し，W/C=50%，単位水量 W が 294kg/m^3，細骨材として山砂を使用した配合において静置下で実施した試験結果を N50-W294-山砂（静置下）として示している。**図－4** や**図－5** に示すように同一の配合の範囲では，モルタルフローの増加に伴って塑性粘度や降伏値は小さくなる傾向にあり，その関係は線形に分布し相関係数も高いことが分かる。また，振動下における塑性粘度は静置時に比べて大きくなるが，



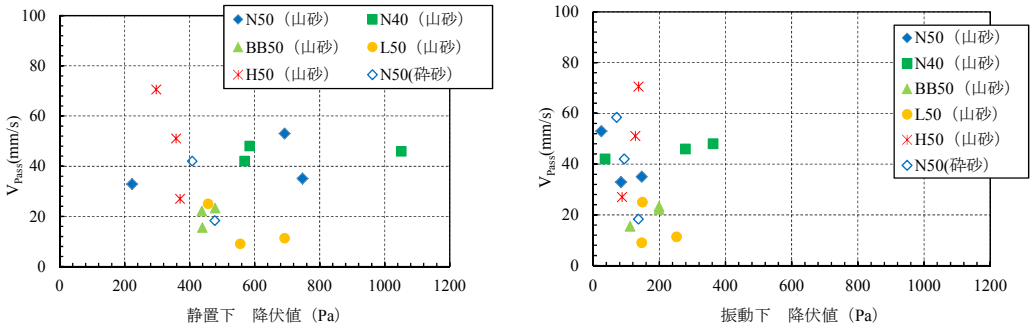
図－7　静置下，振動下の塑性粘度と完全充填時間の関係（フロー180mm）



図－8　静置下，振動下の降伏値と完全充填時間の関係（フロー180mm）



図－9　静置下，振動下の塑性粘度と V_{Pass} の関係（フロー180mm）



図－10　静置下，振動下の降伏値と V_{Pass} の関係（フロー180mm）

モルタルフローが 250 mm を超える範囲では逆に小さくなる傾向がみられる。降伏値については振動下では大きく減少することが分かる。

図－6 にはモルタルフローとボックス充填試験結果との関係を示す。モルタルフローの増加に伴って完全充填時間は小さくなり，間隙通過速度である V_{Pass} は大きくなることが分かる。また，モルタルフローとボックス充填試験結果との関係は線形に分布することが分かる。

次に，以上のようにして求めたモルタルフロー180mm に相当するレオロジー特性とボックス充填性能との関係について示す。**図－7** にはフロー180mm における静置下および振動下の塑性粘度と完全充填時間の関係を，W/C や使用材料であるセメントや細骨材の種類ごとに示し，**図－8** には降伏値と完全充填時間の関係を同様に示す。

図中の凡例は，例えば普通ポルトランドセメント(N)を使用し，W/C=50%，山砂を使用したケースを N50 （山砂）として示している。**図－7** より，静置下における塑性粘度とボックス充填試験における完全充填時間の関係では明確な傾向が得られていないが，振動下の結果では塑性粘度が大きいほど完全充填時間が大きくなる傾向が全体の分布として得られていることが分かる。これは材料条件ごとにみても同様の傾向を有している。振動下の塑性粘度と充填時間は相関が高く振動下の塑性粘度を評価することでモルタルやコンクリートの充填性能を評価できるものと考えられる。**図－8** では静置下の降伏値が大きいほど完全充填時間が大きくなる傾向が得られているが配合ごとの違いが大きい。振動下の降伏値では降伏値の範囲が小さく，配合ごとに分布の傾向が異なっている。

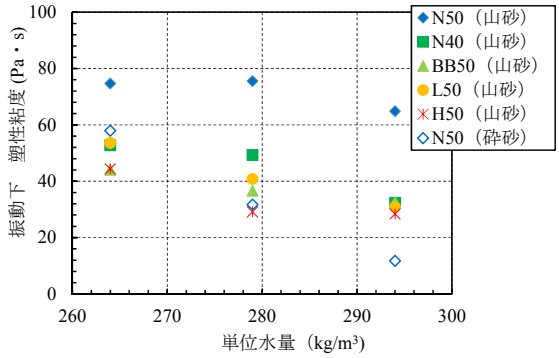
図－9，**図－10** は静置下，振動下における塑性粘度および降伏値と間隙通過速度である V_{Pass} との関係を示す。静置下および振動下において塑性粘度が大きいほど V_{Pass} は小さくなる傾向が得られている結果もみられるが，配合条件ごとの違いが大きく，特に砕砂を使用した N50(砕砂)の配合では逆の傾向が得られている。**図－10** に示す降伏値と V_{Pass} との関係では降伏値が大きいほど V_{Pass} が小さくなる傾向にあり振動下ではその傾向を示すケースが多いことが分かる。しかしながら，N40（山砂）の場合では異なった傾向を示している。V_{Pass} については材料条件の影響が大きく表れているものと考えられる。また，塑性粘度と降伏値のそれぞれと充填性能の関係だけでなく，振動前後のレオロジー性質の変化程度や降伏値の大小と塑性粘度の大小との関連について詳細に検討する必要がある。

3.2 振動下のレオロジー特性についての考察

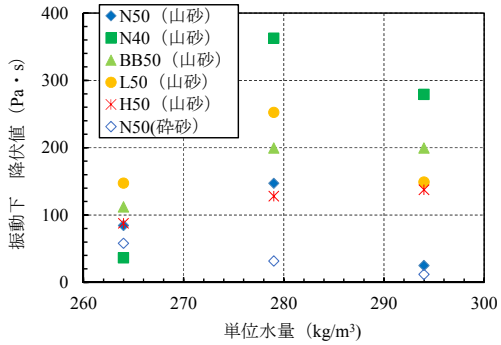
前項では振動下の塑性粘度と充填時間は相関が高い結果が得られることを報告した。そこで，本項では振動下における塑性粘度および降伏値に影響を及ぼす材料的要因について考察を加える。なお，前項と同様にフローが 180mm に相当する塑性粘度と降伏値に着目する。

図－11, **図－12** は単位水量と振動下の塑性粘度および降伏値の関係をそれぞれ示す。両図とも使用材料による違いが明確に表れており，単位水量が小さいほど塑性粘度は大きくなり，降伏値は単位水量が 279 kg/m^3 において最大値を示す傾向にある。

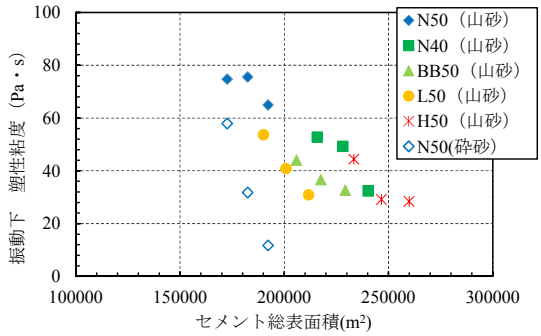
図－13, **図－14** はセメントの違いとしてセメント総表面積（m^2）（＝各セメントのブレーン比表面積(cm^2/g)×セメント量(kg)，単位を m^2 に換算）と振動下の塑性粘度および降伏値の関係をそれぞれ示す。セメント総表面積が大きくなるほど振動下の塑性粘度は小さくなり，山砂のケースと砕砂のケースで分布の傾向が異なることが示されていることが分かる。また，振動下の降伏値についてはセメント総表面積が大きいほど大きい値を示す傾向にある。



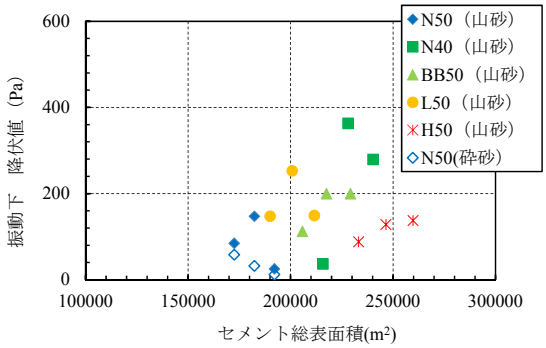
図－11　単位水量と振動下の塑性粘度の関係



図－12　単位水量と振動下の降伏値の関係

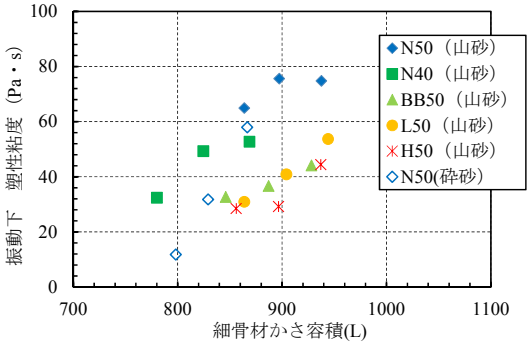


図－13　セメント総表面積と振動下の塑性粘度の関係

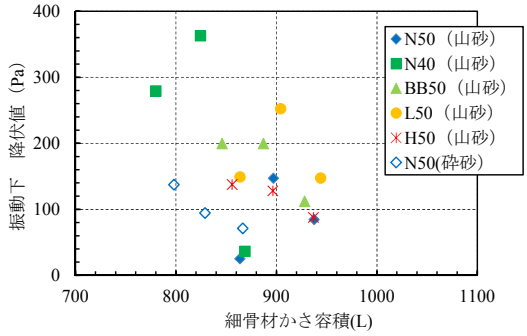


図－14　セメント総表面積と振動下の降伏値の関係

図－15，**図－16** は細骨材のかさ容積（L）（＝細骨材量(kg)/細骨材の密度(g/ cm^2)×実績率(%)，山砂の実績率を 60.59(%)，砕砂の実積率を 65.56(%)として算定）と振



図－15　細骨材かさ容積と振動下の塑性粘度の関係



図－16　細骨材かさ容積と振動下の降伏値の関係

動下の塑性粘度および降伏値の関係をそれぞれ示す。細骨材かさ容積が大きいほど振動下の塑性粘度が大きくなることが分かる。また，材料条件ごとに非常に良い線形的な相関を示している。一方，振動下の降伏値はかさ容積が大ききなるほど小さくなる傾向にある。

以上のように各材料要因と振動下のレオロジー特性とは良い相関があり，今後試験データを積み重ねることでモルタルの振動下のレオロジー定数を評価可能な手法を構築できるものと考えられる。本試験の範囲での結果ではあるが，特に振動下の塑性粘度については単位水量，セメント総表面積および細骨材かさ容積と非常に良い相関関係が得られており，これらの材料的要因の影響度やそれぞれの連関を分析することにより任意の材料におけるモルタルの振動下のレオロジー定数を評価できるものと考える。

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を目的とし，その基礎的な検討してモルタルの静置下および振動下のレオロジー特性を調べるとともに，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。

(1) モルタルの静置下および振動下のレオロジー特性とボックス充填性能の関係において，特に振動下の塑性粘度と充填時間は相関が高い結果が得られた。モルタルやコンクリートの充填性能を把握する上で，振動下の塑性粘度を評価することが重要である。

(2) 振動下における塑性粘度と降伏値のそれぞれの値と充填性能の関係だけでなく，振動前後のレオロジー性質の変化程度や降伏値の大小と塑性粘度の大小との関連について詳細に検討する必要がある。

(3) 振動下における塑性粘度および降伏値に影響を及ぼす材料的要因について検討した。その結果，特に振動下の塑性粘度については単位水量，セメント総表面積および細骨材かさ容積と非常に良い相関関係が得られることが分かった。

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研究，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

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) 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

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