

論文 タンピング試験を用いたコンクリートのワーカビリティに及ぼす細骨材粗粒率の影響評価

榊原 誠樹*1・宇治 公隆*2・上野 敦*3・大野 健太郎*4

要旨: 本研究では、同一スランブが得られる、単位セメント量や細骨材の粗粒率が異なる配合のコンクリートにタンピング試験を行い、ワーカビリティに対するセメント量や細骨材細粒分の影響を検討・評価した。その結果、粗粒率の相異によってワーカビリティは異なり、単位セメント量の減少による流動性の低下を、0.3mm以下の砂粒子を増加させることで補うことができることを明らかにした。これより、土木学会の指針で提示している単位セメント量と打込みスランブの照査図だけでなく、使用する細骨材の細粒分量も考慮することが適当であることを示した。

キーワード: ワーカビリティ, 粗粒率, 流動性, 材料分離抵抗性

1. はじめに

コンクリートのワーカビリティは、流動性や材料分離抵抗性など、様々な要因が複雑に関連して定まる性質で、従来からスランブ試験によって評価されてきた。しかし、この試験は降伏値を評価しているものであり、厳密には材料分離抵抗性を評価しているとは言えない。ワーカビリティは、その複雑さゆえ、未だ適切に評価する試験方法は整備されるに至っていない。そこで、土木学会では、単位セメント量と打込みのスランブを指標とした照査図から、適切なワーカビリティを有する配合のコンクリートであるか否かを判断することを提案している¹⁾。

近年、コンクリート材料を取り巻く状況は変化しており、資源の有効利用や環境負荷抑制の観点から、コンクリート用材料として、産業副産物が使用されるなど、コンクリート材料は多様化している。また、高性能 AE 減水剤など、様々な種類や性能の化学混和剤が開発され、スランブの調整も可能なものとなっている。このため、同一のスランブ、単位セメント量を示すコンクリートであっても、セメントや骨材の特性、粒度分布、混和材料など、様々な配合や材料構成が可能となり、要求された条件を満たせば、施工に用いることができると単純に判断するのは適当でないとと言える。

一方、ワーカビリティを簡易的に評価する試験方法は数多く提案されており¹⁾、なかでもタンピング試験²⁾は、特別な試験器具を用いることなく、現場でも簡易にコンクリートのワーカビリティを定量的に評価できる方法として有効である。

本研究では、同一スランブが得られる、単位セメント

量や細骨材の粗粒率が異なる配合のコンクリートにタンピング試験を適用し、ワーカビリティに対する細骨材の粗粒率や細粒分の影響を検討・評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験で使用した材料は、表-1 に示すとおりであり、一般的に用いられるコンクリート材料を想定した。また細骨材には、神奈川県相模原産砂岩砕砂（細骨材粗目：S1）、陸砂（細骨材細目：S2）を使用した。細骨材の粒度分布を図-1 に示す。

図-2 は、ワーカビリティに関する単位セメント量と打込みスランブを指標とした照査図³⁾を示している。対象部材はスラブであり、締固め作業高さは 0.5m 未満である。ワーカビリティは、構造、施工条件において欠陥を発生することなく密実にコンクリートを打ち込むことのできる性能を示しており、図の色の濃い領域ほど、

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	品質
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	粗目	S1 砕砂, 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.62%, 粗粒率 2.92
	細目	S2 陸砂, 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 2.89%, 粗粒率 1.58
粗骨材	G	砂岩砕石, 表乾密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 1.15%, 粗粒率 6.51
混和剤	AE 減水剤	A1 リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
	AE 助剤	A2 アルキルエーテル系

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻教授 (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻准教授 (正会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻助教 (正会員)

適切な流動性、材料分離抵抗性のバランスを有する配合を示している。上部破線はスランブに応じた流動性を確保するために必要となる単位セメント量の上限値の目安、下部破線はスランブに応じた材料分離抵抗性を確保するために必要となる単位セメント量の下限値の目安を示している。

本実験で使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。単位セメント量や細骨材の粗粒率の影響を検討するため、水セメント比および細骨材率は各配合で一定とした。また、単位セメント量は照査図の(b)に示す $C=300\text{kg/m}^3$ を基準として、 20kg/m^3 減少させた(a) $C=280\text{kg/m}^3$ 、 18kg/m^3 増加させた(c) $C=318\text{kg/m}^3$ の3水準とした。また、それぞれの単位セメント量のケースで細骨材の粗目、細目の混合割合を調整して使用し、粗粒率を4水準に変化させた。粗粒率は、セメント量での比較を行うため、それぞれ最大の値を設定し、0.2 ずつ変化させている。粗粒率を変化させた細骨材の粒度分布の例を図-1 に示す。目標スランブは 8.0cm、目標空気量は 4.5%とし、計 12 配合で検討を行った。なお、スランブは基本的に AE 減水剤の使用量によって調整することとした。

2.2 試験方法

(1) フレッシュ性状試験

コンクリートのフレッシュ性状試験では、スランブ試験を JIS A 1101 に従い、空気量試験を JIS A 1128 に従って行った。また、コンクリート温度も併せて測定した。スランブは $8.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ を満たしていることを確認し、タンピング試験を行った。スランブ、空気量およびコンクリート温度の測定結果を表-2 に示

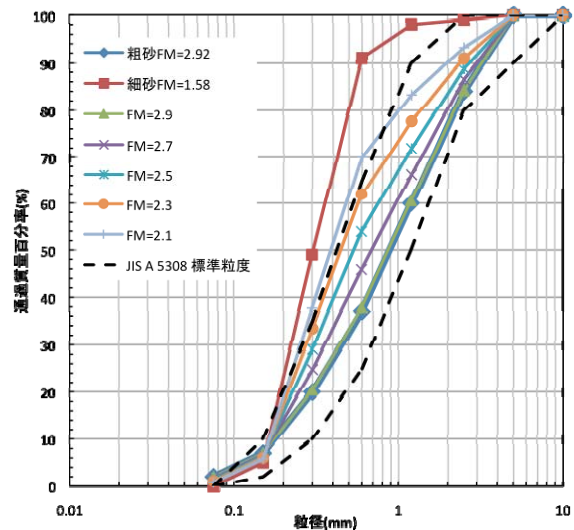


図-1 細骨材の粒度分布

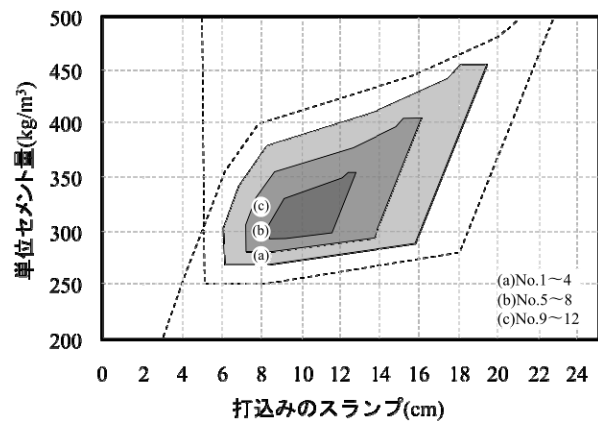


図-2 ワークビリティーに関する単位セメント量と打込みスランブの照査図 (対象部材: スラブ, 締固め作業高さ 0.5m 未満)

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

No.	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	粗粒率 F.M.	単位量 (kg/m ³)							スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
				水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	混和剤				
						S1	S2		A1	A2			
1	55	43.5	2.7	154	280	680	134	1059	C×1.0	C×0.25	5.5	4.3	17.5
2			2.5			559	255		C×0.9	C×0.25	6.0	4.4	17.0
3			2.3			437	377		C×0.7	C×0.25	6.0	6.0	18.0
4			2.1			316	498		C×0.9	C×0.15	6.0	5.5	18.0
5	55	43.5	2.8	165	300	723	71	1033	C×0.35	C×0.225	7.5	3.9	15.0
6			2.6			604	190		C×0.35	C×0.225	7.5	4.0	15.0
7			2.4			486	308		C×0.35	C×0.225	7.5	4.6	16.0
8			2.2			367	427		C×0.4	C×0.225	7.0	5.1	15.0
9	55	43.5	2.9	175	318	765	12	1010	C×0.2	C×0.225	8.5	4.0	18.0
10			2.7			649	127		C×0.2	C×0.225	9.0	4.1	18.0
11			2.5			533	243		C×0.2	C×0.225	9.0	4.5	18.0
12			2.3			417	359		C×0.2	C×0.225	8.0	5.0	18.0

す。セメント量の少ない No.1~4 の配合では、スランブが 5.5~6.0cm となっており、他の配合より小さいスランブであるが、タンピングにより衝撃を与えて変形させることから、以降ではスランブの差が大きくは影響しないものとして検討を行った。

(2) タンピング試験

タンピング試験では、既往の研究²⁾に従い、スランブ試験終了後、スランブ板の四隅に質量約 1.2kg の木製の棒を 500mm の高さから落下させてコンクリートに衝撃を与え、その変形を観察した。図-3 にタンピング試験の模式図を示す。スランブコーン引き上げ時と、スランブフローが 250, 300, 350, 400, 450mm となったときの、タンピング回数、スランブ、試料上部に円形が保持されているかを測定した。なお、床による影響を取り除き、タンピングによる振動をスランブ板に一樣に伝達させるため、スランブ板の下に砂を約 10mm の厚さで敷いて試験を行った。

流動のしやすさを所定のエネルギーを与えた時の流動変形の程度と考えると、所定のスランブフローとするためのタンピング回数で流動性を評価できる。また、コンクリートの材料分離を粗骨材とモルタルの分離と考えると、材料分離抵抗性はコンクリートの塑性粘度に影響を受ける。単位セメント量 280~320kg/m³ 程度の範囲では、塑性粘度の大きなコンクリートの場合、衝撃を与えた際に、試料上部は粘性の影響が卓越して変形せず、試料上部の円形は保持される。これより、試料上部円形の保持性により、材料分離抵抗性を評価できる²⁾。

また、タンピング過程でのコンクリートは、配合条件や粘性の程度によって、変形時の性状が異なる。試料の性状や変形形態にもとづき、目視によってコンクリートの変形を表-3 に示す 3 パターンに分類し、材料分離抵抗性を評価した。写真-1 は良好な材料分離抵抗性を示すコンクリートの例を示している。粘性が高く、ある程度スランブフローの広がりを持たせたときでも、一体となって変形している。写真-2 は、試料側面にわれが生じており、崩壊に分類されるコンクリートの例を示している。スランブフローの広がりを持たせたとき、見かけの体積を確保するために割れを生じたり、形状維持が困難となって崩壊が生じる。なお、今回の検討では分離に分類されるコンクリートは存在しなかった。

3. 結果および考察

3.1 粗粒率が流動性に及ぼす影響

タンピング試験による測定結果を表-4 に示す。表中の○は所定のスランブフロー時の試料上面が円形を保持していることを示し、×は円形を保持していないことを示す。また、タンピング試験における各スランブフロー

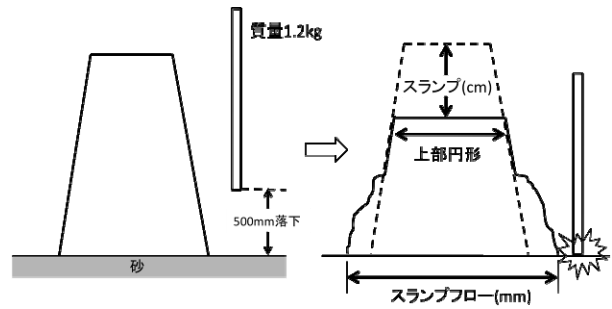
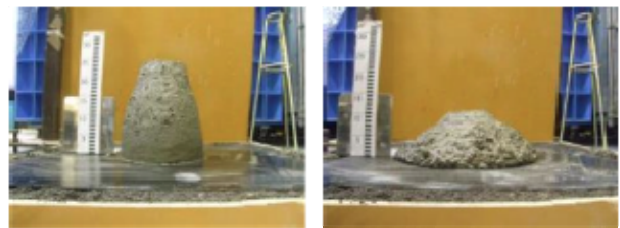


図-3 タンピング試験模式図

表-3 目視による評価の分類

性状	説明
良好	十分な材料分離抵抗性を有し、タンピングの際、われや崩壊を示さず、一体となって変形する。
崩壊	材料分離抵抗性が不十分であり、タンピング過程でわれが見られたり骨材がはがれ落ちる。
分離	材料分離抵抗性が不十分であり、衝撃を与えると、モルタルやペーストのみが流動する。



スランブコーン引上げ時 フロー350mm 時
写真-1 良好に分類されるコンクリート



スランブコーン引上げ時 フロー350mm 時
写真-2 崩壊に分類されるコンクリート

時のタンピング回数を図-4 に示す。単位セメント量の少ない C=280kg/m³ の配合では、タンピング回数が多くなっている。これは、セメント量が少なく、粗骨材同士がかみ合い、流動性が小さくなったことが考えられる。また、それぞれの配合ケースで、粗粒率が変化するのに伴い、タンピング回数も変化しており、流動性が相異している。粗粒率が小さくなるに従って、タンピング回数は減少しており、またその傾向は単位セメント量の少ない C=280kg/m³ の配合で顕著に確認できる。すなわち、細骨材の粗粒率を小さくすることで、流動性が変化した。

表-4 タンピング試験結果

No.	単位セメント量 C(kg/m ³)	粗粒率 F.M.	スランプフロー	初期	250mm	300mm	350mm	400mm	450mm	目視による評価
1	280	2.7	タンピング回数	0	30	56	82	108	145	崩壊
			スランプ(cm)	5.5	10.5	13.5	16	18.5	22	
			円形保持	○	○	○	○	×	×	
2		2.5	タンピング回数	0	25	54	83	109	141	良好
			スランプ(cm)	6	10.5	14.5	17.5	20	23	
			円形保持	○	○	○	○	×	×	
3		2.3	タンピング回数	0	18	42	66	87	113	良好
			スランプ(cm)	6	10.5	14.5	17	19.5	21.5	
			円形保持	○	○	○	○	○	○	
4		2.1	タンピング回数	0	14	37	66	92	113	良好
			スランプ(cm)	6	9.5	13	17.5	20.5	22.5	
			円形保持	○	○	○	○	○	○	
5	300	2.8	タンピング回数	0	16	32	50	62	78	良好
			スランプ(cm)	7.5	13	17	20.5	22	24	
			円形保持	○	○	×	×	×	×	
6		2.6	タンピング回数	0	12	25	43	57	75	良好
			スランプ(cm)	7.5	13	16.5	19	22.5	24.5	
			円形保持	○	○	○	○	×	×	
7		2.4	タンピング回数	0	13	27	43	53	68	良好
			スランプ(cm)	7.5	13.5	18	21.5	22	24	
			円形保持	○	○	○	×	×	×	
8		2.2	タンピング回数	0	12	25	42	54	69	良好
			スランプ(cm)	7	11	15	18	20	22	
			円形保持	○	○	○	○	○	○	
9	318	2.9	タンピング回数	0	14	27	48	64	80	良好
			スランプ(cm)	8.5	14	17	20	22.5	23.5	
			円形保持	○	○	×	×	×	×	
10		2.7	タンピング回数	0	13	29	43	58	76	良好
			スランプ(cm)	9	13.5	18	20.5	22.5	24	
			円形保持	○	○	○	×	×	×	
11		2.5	タンピング回数	0	9	20	37	52	65	良好
			スランプ(cm)	9	13.5	17	20	23	24.5	
			円形保持	○	○	○	×	×	×	
12		2.3	タンピング回数	0	7	24	38	52	66	良好
			スランプ(cm)	8	11.5	16.5	19	21	22.5	
			円形保持	○	○	○	○	○	○	

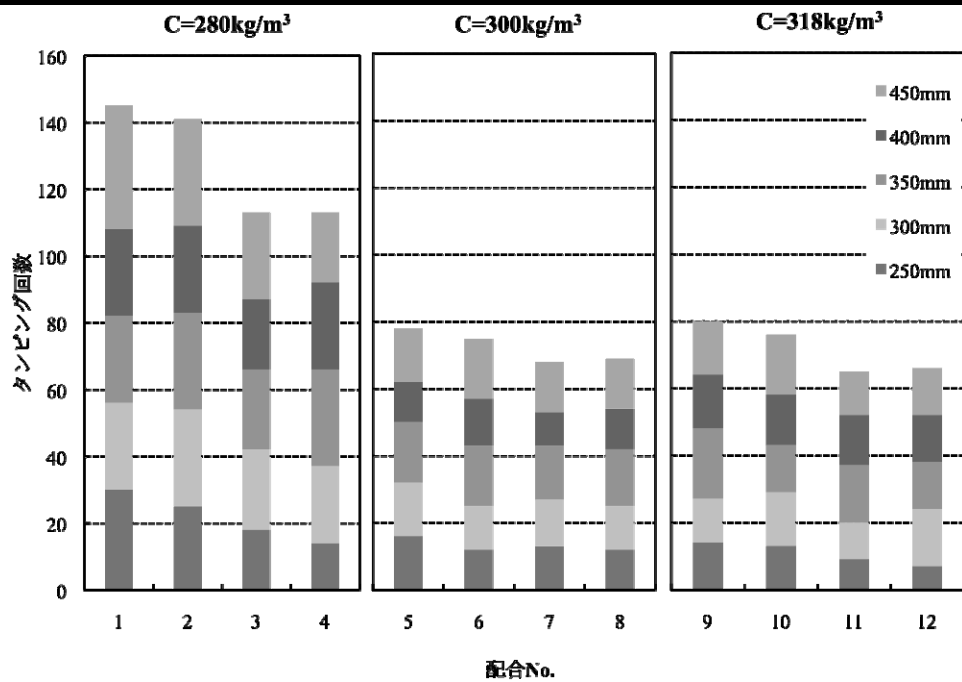


図-4 各スランプフロー時のタンピング回数

このような結果となった要因として、粗粒率を小さくし、細骨材の細粒分が増加したことで、粗骨材の噛み合わせを緩和したことが起因すると推察される。また、単位セ

メント量が少ない配合では、粗骨材の噛み合わせが強く、細粒分の変化の影響が大きくなったと考えられる。これらのことから、同一セメント量で、同一スランプを示す

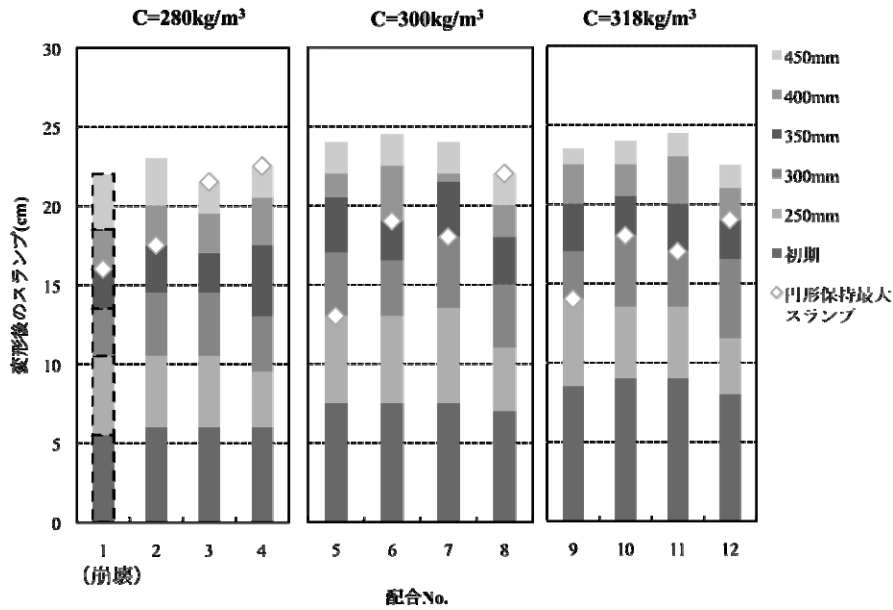


図-5 タンピングによるスランブの進行と円形保持

コンクリートでも、粗粒率の変化による細骨材細粒分の増減は、コンクリートの流動性に影響し、タンピング試験ではそれを詳細に評価することができるといえる。

3.2 粗粒率が材料分離抵抗性に及ぼす影響

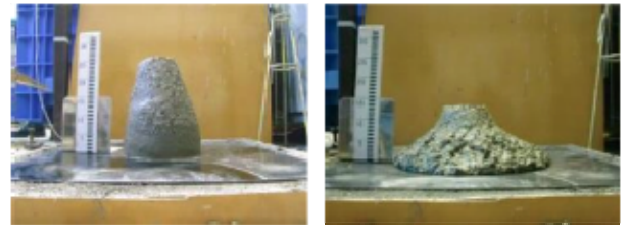
各配合のタンピング過程でのスランブの進行状態を図-5 に示す。各配合で試料上部の円形を保持する最大のスランブが相異していることがわかる。各ケースにおいて粗粒率を小さくすると、円形を保持する最大のスランブが大きくなる傾向が見られた。これは、細骨材の細粒分が増加することで、コンクリートの粘性が増加し、材料分離抵抗性を向上させたと考えられる。写真-3 に配合 No.1 (C=280kg/m³, 粗粒率 2.7), 写真-4 に配合 No.3 (C=280kg/m³, 粗粒率 2.3) のコンクリートの变形状況を示す。単位セメント量の少ない C=280kg/m³ の配合では、粗骨材の噛み合わせが強くなり、試料上部は变形せず、試料下部のみが变形することとなる。このため、セメント量の多い配合と比較して、上部円形保持性は高い傾向となった。しかし、目視による評価で配合 No.1 は、タンピング過程で試料側面にわれが確認され、この配合ケースでは、単位セメント量が少なく、粗骨材を取り巻くペースト分が不足するため、材料分離抵抗性が不十分と考えられる。なお、配合 No.2~4 では、細骨材の細粒分量が増加したことで粘性が増し、崩壊を起こさずフロー450mm まで变形した。このように、セメント量が少ない配合では、粗粒率を小さくし、細粒分量を増加させることによってコンクリートの材料分離抵抗性を確保することができる。また、写真-5 に配合 No.7 (C=300kg/m³, 粗粒率 2.4) のコンクリートの变形状況を示す。セメント量の多い C=300kg/m³, C=318kg/m³ の配合では、セメン



スランブコーン引上げ時

フロー350mm 時

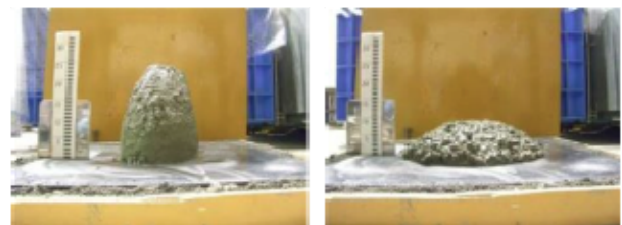
写真-3 No. 1 の变形状況



スランブコーン引上げ時

フロー350mm 時

写真-4 No. 3 の变形状況



スランブコーン引上げ時

フロー350mm 時

写真-5 No. 7 の变形状況

ト量の少ない配合と異なり、スランブフローの広がりとともに、試料が一体的に変形する。このような変形を生じる場合、粗骨材を取り巻くペーストが十分確保されているため、タンピング過程で、コンクリートが試料側面

のわれや崩壊を示さず変形していることがわかる。これらのことから、同一セメント量で、同一スランブを示すコンクリートでも、粗粒率の変化による細骨材の細粒分の増減は、コンクリートの材料分離抵抗性に影響することが明らかとなった。

3.3 細骨材の細粒分とセメント量の関係

スランブフロー450mm 時のタンピング回数を図-6 に示す。以下では、単位セメント量が現在一般に用いられている 300kg/m³ 以上で検討する。C=300kg/m³ と、C=318kg/m³ のケースのフロー450mm 時のタンピング回数を比較すると、この2ケースでは、単位セメント量に18kg/m³の差があるのに対し、No.5とNo.9のように、タンピング回数が同程度の値となっていることがわかる。ここで、細骨材の粗粒率を変化させることによる細粒分の増減に着目して、以下で検討する。なお、ここでは、0.3mm以下の粒径の細骨材を細粒分とみなしている。

図-1の粒度分布図から、今回使用した細骨材では、粗粒率を変化させることで、粒径0.3mm以下の砂粒子が顕著に増減している。一例としてNo.5とNo.9を比較する。粗粒率2.8である配合No.5の0.3mm以下の砂粒子量が182kg/m³であるのに対し、粗粒率2.9であるNo.9の0.3mm以下の砂粒子量は159kg/m³となっている。つまり、0.3mm以下の砂粒子量は23kg/m³の差がある。一方で、単位セメント量は18kg/m³の差がある。これより、0.3mm以下の砂粒子と単位セメント量は流動性に同程度の影響を与えると考えた。図-7には、C=300kg/m³、C=318kg/m³の2ケースにおける、0.3mm以下の砂粒子量と単位セメント量を足しあわせた量と、フロー450mm時のタンピング回数を示す。同程度の細粒分量では、どの配合でもタンピング回数が同程度の値となっている。これらより、岡村らの研究成果⁴⁾とも対応し、セメント量の減少による流動性の低下を、粗粒率を小さくし0.3mm以下の砂粒子を増加させることで補うことができることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、同一スランブが得られる、単位セメント量や細骨材粗粒率が異なる配合のコンクリートにタンピング試験を行い、ワーカビリティに対するセメントや細骨材の細粒分の影響を検討・評価した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 同一スランブを示すコンクリートであっても、粗粒率によってワーカビリティは相異し、タンピング試験によりその影響を詳細に把握することが出来る。また、単位セメント量と打込みスランブの照査図だけでなく、使用する細骨材の粗粒率や細粒分も考慮

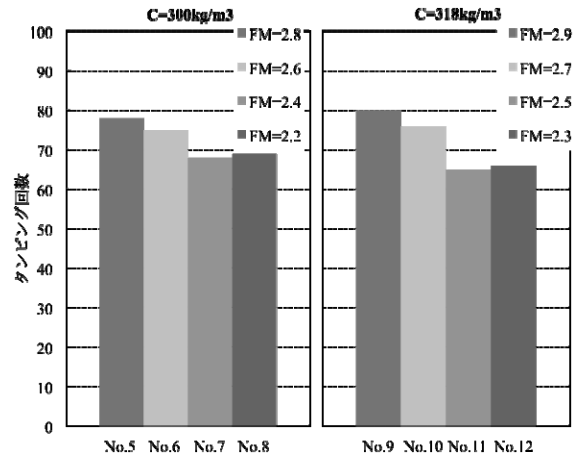


図-6 フロー450mm 時のタンピング回数

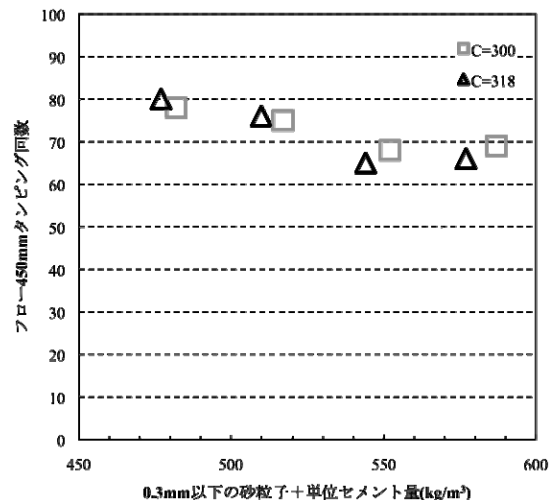


図-7 微粒分量とフロー450mm 時のタンピング回数

することが適当である。

- (2) 単位セメント量の減少による流動性の低下を粗粒率の調整による細粒分量の増加で補うことができる。

参考文献

- 1) 浦野真次, 栗田守朗, 江渡正満: 高密度配筋部におけるコンクリートの充てん性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.31-36, 2008.6
- 2) 石井佑大, 宇治公隆, 上野敦: タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.37-42, 2008
- 3) 土木学会編: コンクリートライブラリー126, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), 2007.3
- 4) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993