

論文 骨材の粒度構成がコンクリートの充填性に及ぼす影響

大野 拓也*1・三谷裕二*1・兵頭彦次*2・谷村充*3

要旨: 細骨材率, 細・粗骨材の粒度分布, 石灰石微粉末の使用有無を変化させた同一スランプのコンクリートに対して加振ボックス充填試験を実施し, 各種要因がコンクリートの充填性(間隙通過性・材料分離抵抗性)に及ぼす影響を検討した。その結果, 細骨材率が 35~55%程度の範囲において, 細骨材率が大きいほど充填性が高い傾向になること, 骨材の粒度分布が充填性に及ぼす影響は, 細骨材が粗骨材より卓越すること, 石灰石微粉末を使用すると充填性が高くなるが, 充填性を最適にするための使用量は石灰石微粉末の比表面積によって異なること, が明らかとなった。

キーワード: 充填性, 加振ボックス充填試験, 細骨材率, 粒度分布, 石灰石微粉末

1. はじめに

近年, 耐震強化による鋼材量の増加や部材の形状複雑化・大型化などに伴って, コンクリート構造物の施工難易度が増大する中, 構造物の初期欠陥を抑制し, 品質を確保するために, ワークビリティの良いコンクリートへの要求が高まっている。

コンクリート標準示方書[施工編]¹⁾では, ワークビリティの一つに充填性を挙げ, この充填性を流動性と材料分離抵抗性の相互のバランスによって得られる性能とし, スランプと単位粉体量を照査するための指標としている。一方, 産業副産物の利用促進や化学混和剤の発展などコンクリート材料の多様化に伴い, スランプが同一であっても, 材料・配(調)合によってコンクリートの充填性は異なり, とりわけ骨材の品質や物性と密接に関係することが知られている^{2), 3)}。

また最近では, スランプのみで評価することが難しい間隙通過性や振動締固め性などを比較的簡易に評価するための試験方法^{4), 5)}についても検討・提案されている。

本検討では, 土木学会が提案した加振ボックス充填試験⁵⁾を用いて, 細骨材率, 骨材の粒度分布, 石灰石微粉末の使用がコンクリートの充填性に及ぼす影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 実験水準

表-1 に実施した実験シリーズの概要を示す。すべてのシリーズでスランプ 8cm と 15cm のコンクリートを対象とした。変化させたパラメータは, 細骨材率(シリーズ 1), 細骨材および粗骨材の粒度分布(シリーズ 2), 石灰石微粉末の比表面積および使用量(シリーズ 3)とした。シリーズ 1 については, 細骨材率を 35~60% まで変化させた。

表-1 実験シリーズの概要

シリーズ	変化させたパラメータ
1	細骨材率
2	細骨材および粗骨材の粒度分布
3	石灰石微粉末の比表面積および使用量

シリーズ 2 については, 粒度分布の異なる 2 種類の細骨材および粗骨材の混合割合を変化させた。シリーズ 3 は, 比表面積の異なる 2 種類のコンクリート用石灰石微粉末を細骨材の一部に置き換えて 50kg/m³ および 100kg/m³ 使用した。

2.2 使用材料

使用材料を表-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント, 混和材には比表面積の異なる 2 種類の石灰石微粉末(LP1, LP2)を用いた。石灰石微粉末の粒度分布を図-1 に示す。粒度分布の測定には, レーザ回折式粒度分布測定装置を用いた。使用した石灰石微粉末は, 2 種類とも日本コンクリート工学会「石灰石微粉末研究委員会報告書」に示される「コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案)」⁶⁾を満足する市販品である。細骨材には山砂(S1)および硬質砂岩砕砂(S2), 粗骨材には碎石 2013(G1)と 1305(G2)を使用した。

2.3 配(調)合条件

配(調)合条件は, すべてのシリーズで水セメント比 55%とし, スランプは 8±1.5cm および 15±1.5cm とした。また, AE 減水剤標準形(Ad1)の使用量は一定(C×%)とし, 空気量が 4.5±1.0%となるように AE 剤の添加量を調整した。

2.4 試験項目および方法

表-3 に試験項目および方法を示す。いずれの試験も 20℃-80% R.H.の室内でコンクリートの練混ぜ直後に実

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第 2 研究部 TBC チーム 工修 (正会員)
*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第 2 研究部 インフラ保全技術チーム (正会員)
*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第 2 研究部 CS チーム 博士(工学)(正会員)

表-2 使用材料

材料	記号	種類/銘柄	備考
水	W	上水道水	—
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3330cm ² /g
混和材	LP1	石灰石微粉末(200 メッシュ)	密度:2.71g/cm ³ , 比表面積:5320cm ² /g
	LP2	石灰石微粉末(325 メッシュ)	密度:2.71g/cm ³ , 比表面積:7440cm ² /g
細骨材	S1	山砂	密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:2.75%, 粗粒率:2.18
	S2	硬質砂岩砕砂	密度:2.62g/cm ³ , 吸水率:1.14%, 粗粒率:3.01
粗骨材	G1	硬質砂岩碎石 2013	密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.50%, 粗粒率:7.00
	G2	硬質砂岩碎石 1305	密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.74%, 粗粒率:6.22
混和剤	Ad1	AE 減水剤標準形(Ⅰ種)	リグニンスルホン酸系
	Ad2	AE 減水剤高機能タイプ	リグニンスルホン酸系とポリカルボン酸テール系の複合体
	AE	AE 剤	アルキルエーテル系

施した。加振ボックス充填試験の概要を図-2 に示す。試験は、スランブ 5～21cmのコンクリートを対象とした土木学会「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(341 委員会)第 2 期委員会報告書」⁵⁾で提案されている方法に準じた。A室とB室の間に設置する流動障害は、同試験方法に従って障害R2(D13×3 本)を用い、棒状パイププレートは直径 28mm, 周波数 230Hzのものとした。試験手順は、練上り直後のフレッシュコンクリートをA室の上部から 3 層に分けて投入し、1 層ごとに装置を左右に 3 回揺らし、最後に上面を均した後、パイププレートを挿入した。挿入深さはパイププレート先端が底面から 100mmとなる位置とした。その後、仕切りゲートを引き上げ、パイププレートの加振を開始した。フレッシュコンクリートがA室からB室に流動し、B室の充填高さが 190mmから 300mmになるまでの到達時間を測定した。間隙通過性の評価指標は、190mmから 300mmまでに要した時間を区間長で除した間隙通過速度(mm/s)とした。また、300mm到達後、A室下部およびB室上部から 2 リットル程度コンクリートを採取し、JIS A 1112 に準拠して洗い分析試験を実施した。試料中の粗骨材量を測定し、配(調)合量との比からA室下部とB室上部の粗骨材量変化率を式(1)および式(2)より求め、両者を平均したものを平均粗骨材量変化率(式(3))とし、材料分離抵抗性の評価指標とした。

$$\delta_A = \frac{G_A}{G_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\delta_B = \frac{G_B}{G_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\delta_{ave.} = \frac{|\delta_A - \delta_B|}{2} \quad (3)$$

δ_A, δ_B : A室およびB室の粗骨材量変化率(%)

$\delta_{ave.}$: 平均粗骨材量変化率(%)

G_A, G_B : A室およびB室から採取した試料の単位粗骨材量(kg/m³)

G_0 : 配合における単位粗骨材量(kg/m³)

表-3 試験項目および方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
加振ボックス充填試験	JSCE341 委員会

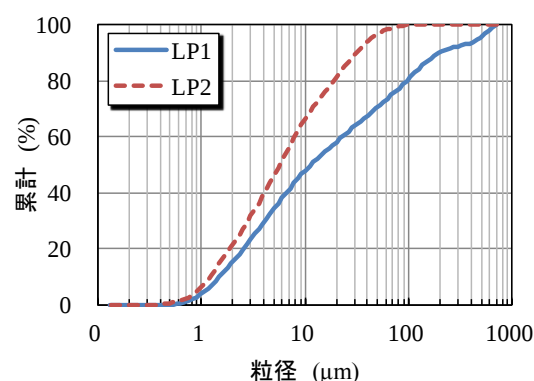


図-1 石灰石微粉末の粒度分布

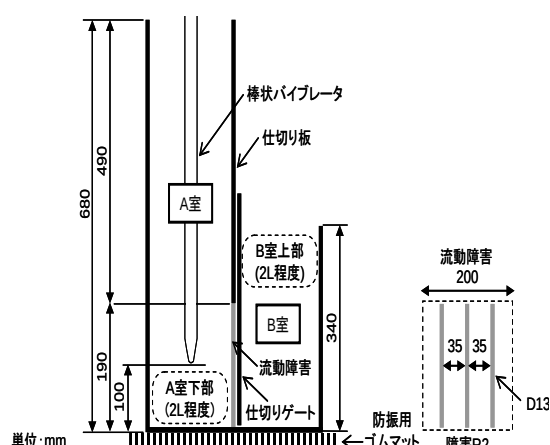


図-2 加振ボックス充填試験の概要

3. 実験結果および考察

3.1 細骨材率の影響(シリーズ 1)

細骨材率(s/a)を変化させたコンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状を表-4 に示す。試し練りによって基

表-4 コンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状(シリーズ1)

目標スランブ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
		W	C	S	G					
8	35.0	158	287	647	1216	0.25		8.5	3.5	22.0
	40.0	161	293	736	1113			8.5	4.5	21.6
	45.0	165	300	819	1012			8.0	4.5	22.0
	50.0	172	313	893	906			8.0	4.5	21.6
	55.0	178	324	971	803			8.0	4.6	22.0
	60.0	189	344	1034	694			8.5	5.0	22.0
15	36.0	171	311	647	1163		0.6	14.0	3.7	22.2
	41.0	171	311	736	1071		0.8	15.5	3.8	22.4
	46.0	171	311	825	981		1.0	15.5	4.8	22.0
	51.0	171	311	914	890		1.4	15.5	5.1	23.0
	56.0	180	327	982	784		1.4	16.0	4.1	22.8

準となる配(調)合を設定した後、スランブ 8cm では s/a が-10～+15%まで、スランブ 15cm では、-10～+10%まで 5%間隔で変化させた。細骨材は、山砂と砕砂を容積比率 50:50 で混合し、粗骨材は、砕石 2013 と 1305 を容積比率 50:50 で混合して用いた。

s/a の増減に伴うスランブの変化は、スランブ 8cm では単位水量で調整し、スランブ 15cm では AE 減水剤高機能タイプの使用量で調整した。ただし、スランブ 15cm の s/a=56%の配(調)合については、混和剤のみで調整することが困難であったため、単位水量も併せて増加させた。

単位水量は、s/aが 35～60%に対し、158～189kg/m³となった。s/aに対する単位水量の変化割合は、1%あたり約 1.2kg/m³であり、示方書に示される補正值⁷⁾(s/a=1%あたり W=1.5kg/m³)より若干小さい結果であった。

図-3 に加振ボックス充填試験の間隙通過速度および平均粗骨材量変化率を示す。スランブ 8cm, 15cmともに、総じてs/aが大きくなるほど間隙通過速度は速くなる傾向が認められ、同一の試験方法を用いて検討された既往研究^{5), 8)}と同様の結果であった。これは、s/aが大きくなることで粗骨材量が減少し、鉄筋障害への接触が低下することやモルタル分の増加によってコンクリートの一体性が高まることの一つの要因と考えられる。間隙通過速度は、スランブ 8cmの場合、s/aが 35～50%の範囲で緩やかに速くなっているのに対し、s/aが 55%になると50%に対して3.5倍になった。しかし、s/aが 55～60%の範囲では、間隙通過速度はほとんど変わらない結果であった。一方、スランブ 15cmの場合、s/aが 46%より大きくなるとそれ以下と比べて急激に速くなる傾向であり、スランブ 8cmより小さい s/aで間隙通過速度の増加勾配が大きくなった。

平均粗骨材量変化率は、間隙通過速度の増加にともなって減少する傾向を示し、s/a が 1%大きくなると平均粗骨材量変化率が約 1.5%小さくなる結果であった。また、間隙通過速度がある一定速度以上になると、平均粗骨材量変化率はほとんど変わらない傾向が認められた。

加振ボックス充填試験と実施工を再現した模擬型枠

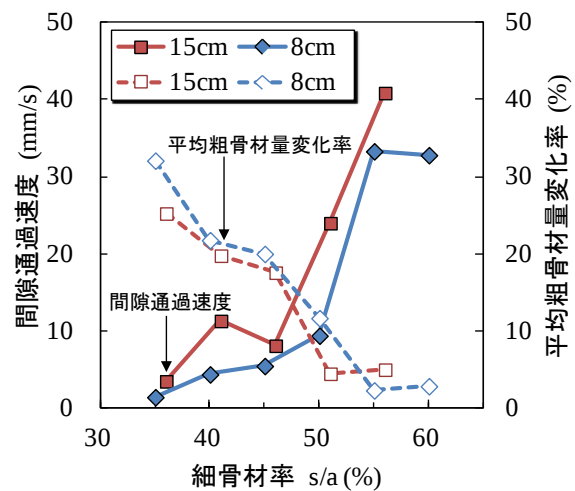


図-3 加振ボックス充填試験結果(s/a)

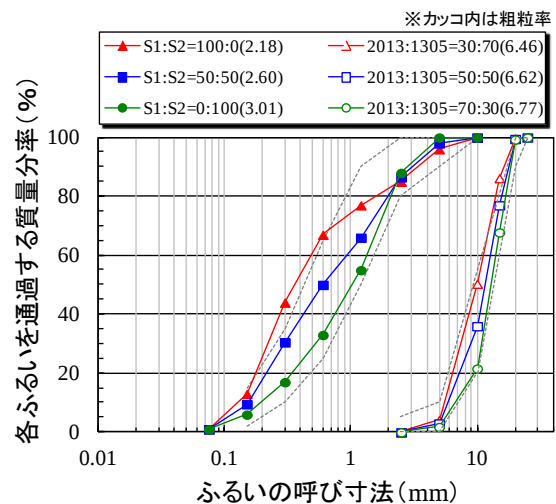


図-4 細骨材と粗骨材の粒度分布

を用いた充填試験の関係性を検討した既往の研究⁵⁾では、水セメント比 55%, スランブ 8cmの場合、使用材料によらず、十分な充填性を確保するためには、平均粗骨材量変化率が15～20%以下となることが望ましいと示されている。本配(調)合のスランブ 8cmにおいて、平均粗骨材量変化率 20%に対応させると、実施工での充填性を確保

表-5 コンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状(シリーズ2)

No.	目標スランプ (cm)	S1:S2	G1:G2*	単位量(kg/m ³)				Ad1 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
				W	C	S	G				
1	8	50:50	30:70 (61.9)	161	293	831	1013	0.25	6.5	4.2	21.7
2		100:0	50:50 (61.8)	161	293	828	1013		7.0	5.0	21.4
3		50:50		161	293	831	1013		8.5	4.8	22.0
4		0:100		164	298	821	1013		6.5	4.5	21.1
5	15	50:50	70:30 (61.9)	161	293	831	1013		8.0	4.5	21.3
6		50:50	30:70 (61.9)	170	309	826	981		13.0	4.9	21.4
7		100:0	50:50 (61.8)	170	309	823	981		14.0	4.2	22.0
8		50:50		170	309	826	981		16.0	5.0	21.4
9		0:100		170	309	829	981		13.5	5.6	20.7
10		50:50	70:30 (61.9)	170	309	826	981		14.5	4.5	21.7

*カッコ内は混合した粗骨材の実積率(%)

するためには、少なくともs/a は 46%程度以上が望ましいと推察される。

3.2 細骨材と粗骨材の粒度分布の影響(シリーズ2)

表-5 に検討したコンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状を示す。また、使用した骨材の粒度分布を図-4に示す。細骨材の粒度分布を変化させたケース(No.2, 3, 4, 7, 8, 9)では、山砂(S1)と砕砂(S2)を単独あるいは容積比率 50:50 で混合して使用し、このとき粗骨材には、碎石 2013(G1)と 1305(G2)を容積比率 50:50 で混合して用いた。粗骨材の粒度分布を変化させたケース(No.1, 3, 5, 6, 8, 10)では、碎石 2013 と 1305 を容積比率 30:70, 50:50, 70:30 で混合して使用し、このとき細骨材は、山砂と砕砂を容積比率で 50:50 混合して用いた。なお、粗骨材の混合割合を変化させたことによる実積率の変化はほとんどなかった。

図-5 に細骨材の粒度分布を変化させた加振ボックス充填試験結果を示す。スランプ 8cm, 15cm とともに、粗粒率が小さいほど間隙通過速度が速くなる傾向が認められた。スランプ 15cm では、山砂 100%(粗粒率:2.18)の場合、混合砂(粗粒率:2.60)と砕砂 100%(粗粒率:3.01)間の傾向に比べて、顕著に速くなる傾向を示した。平均粗骨材量変化率はスランプ 8cm, 15cm とともに、粗粒率が小さいほど総じて小さくなる傾向を示し、間隙通過速度の上昇に概ね対応する結果であった。本試験で検討した細骨材の粒度分布(図-4)は、粒径 1.2mm 以下の細粒分の量に違いがあり、その細粒分量が充填性に大きく影響したものと考えられる。

図-6 に粗骨材の粒度分布を変化させた加振ボックス充填試験結果を示す。間隙通過速度は、碎石 2013 の割合が 70%から 50%に減少すると、わずかに遅くなる結果であったが、総じて見ると、いずれのスランプでもほとんど変わらない結果であり、間隙通過速度の変化割合も細骨材の粒度分布の影響に比べて、鈍感な傾向であった。

以上から、細骨材の粗粒率の変化に伴う間隙通過速度・平均粗骨材量変化率の変化量は、粗骨材の粗粒率が

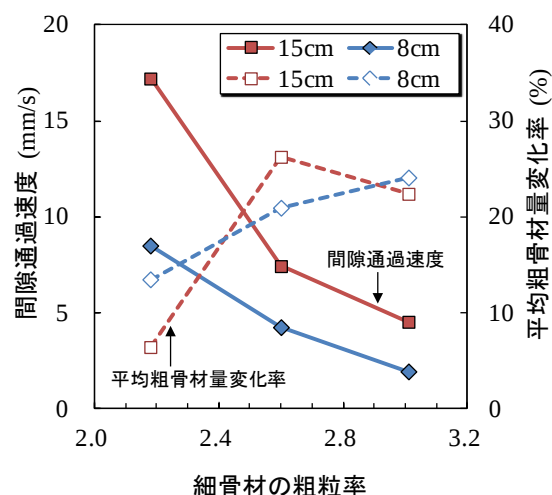


図-5 加振ボックス充填試験結果(細骨材)

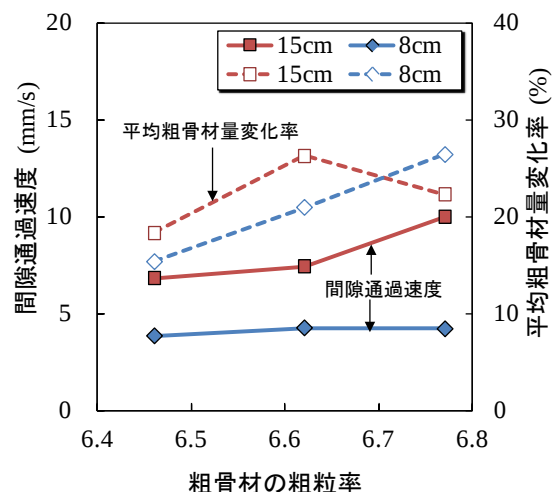


図-6 加振ボックス充填試験結果(粗骨材)

変化した場合より明確に大きくなっており、骨材の粒度分布がコンクリートの充填性に及ぼす影響は、細骨材が粗骨材より卓越すると考えられる。

3.3 石灰石微粉末の影響(シリーズ3)

表-6 に検討したコンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状を示す。石灰石微粉末を使用しない基準配(調)

表-6 コンクリートの配(調)合およびフレッシュ性状(シリーズ3)

目標スランブ (cm)	細骨材* 粗粒率	単位量 (kg/m ³)						Ad1 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
		W	C	LP1	LP2	S	G				
8	2.60	159	289	0	0	839	1013	0.25	8.0	4.5	22.2
	2.56	159	289	50	0	791	1013		8.0	5.1	21.4
	2.46	159	289	100	0	742	1013		8.0	4.0	21.9
	2.51	159	289	0	50	791	1013		8.0	4.0	21.6
	2.35	159	289	0	100	742	1013		8.0	3.9	21.6
15	2.60	168	305	0	0	834	981		16.5	5.0	21.3
	2.56	168	305	50	0	785	981		15.0	4.3	21.0
	2.46	168	305	100	0	737	981		16.5	5.0	21.1
	2.51	168	305	0	50	785	981		16.5	5.0	21.4
	2.35	168	305	0	100	737	981		16.0	5.3	21.4

*細骨材=LP1+LP2+S

合を決定した後、石灰石微粉末LP1(比表面積:5320cm²/g)およびLP2(比表面積:7440cm²/g)をそれぞれ 50kg/m³および 100kg/m³細骨材の一部に置き換えて使用した。細骨材は、山砂と砕砂を容積比率 50:50 で混合し、粗骨材は、碎石 2013 と 1305 を容積比率 50:50 で混合して用いた。表-6 にはLP1 およびLP2 を含んだ細骨材の粗粒率を併記しているが、粗粒率は石灰石微粉末の使用量が多いほど小さく、同一の使用量の場合には、比表面積が大きいLP2を用いた場合の方が小さくなった。

図-7 に基準配(調)合およびLP1 を使用した結果を示す。間隙通過速度は、スランブ 8cm, 15cmともに石灰石微粉末を 50kg/m³使用してもほとんど変わらない傾向であったが、100kg/m³使用すると、スランブ 15cmの場合は、0～50kg/m³と比べて著しく速くなる傾向を示し、基準配(調)合に対して約 3 倍速くなった。平均粗骨材量変化率は、間隙通過速度の上昇と対応して小さくなる傾向を示し、スランブ 15cmでは石灰石微粉末を 100kg/m³使用すると基準配(調)合の半分程度となった。

図-8 に基準配(調)合およびLP2 を使用した結果を示す。比表面積が大きいLP2 はLP1 と傾向が異なった。間隙通過速度は、スランブ 8cm, 15cmともに 50kg/m³使用した場合に約 2 倍速くなり、それに対応して平均粗骨材量変化率は小さくなった。しかし、100kg/m³使用すると、間隙通過速度は基準配(調)合よりは速いものの、50kg/m³使用した場合より遅くなった。

以上より、LP1 およびLP2 を使用すると、石灰石微粉末を使用しないものに比べ、間隙通過速度は速く、平均粗骨材量変化率は小さくなる傾向であった。

一方、石灰石微粉末の種類で比較すると、比表面積が大きいLP2 はLP1 より少ない使用量で充填性に影響を及ぼすことが確認された。そこで、図-1 の粒度分布において、LP1 とLP2 の差が明確な 0.075mm以下の粒径(以下、微粉分)に着目し、その量と間隙通過速度の影響について検討した。図-9 に石灰石微粉末の微粉分量と間隙通過速度の関係を示す。微粉分量は図-1 の粒度分布から算出した。いずれのスランブにおいても、ある微粉分量で間

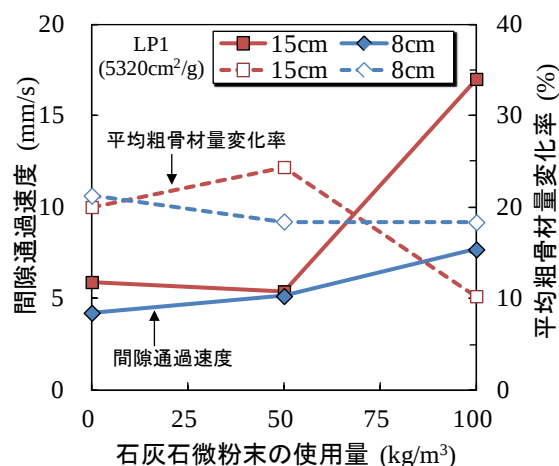


図-7 加振ボックス充填試験結果(LP1)

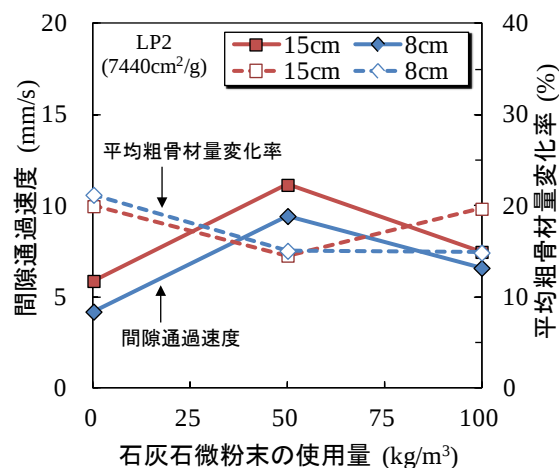


図-8 加振ボックス充填試験結果(LP2)

隙通過速度のピークを示す結果となっており、スランブによってピーク時の微粉分量は異なった。これより、間隙通過速度が最も速くなる微粉分量は、用いる石灰石微粉末の比表面積の大きさによって異なる可能性がある。本試験で検討した配(調)合において、微粉分量を考慮した間隙通過速度がピークを示す石灰石微粉末の使用量を評価すると、スランブ 8cmの場合、LP1 では、75kg/m³程度、LP2 では 50kg/m³程度と推察される。また、スラ

スランブ 15cmの場合、LP1 では 100kg/m^3 程度、LP2 では 75kg/m^3 程度であると考えられる。

4. 間隙通過速度と平均粗骨材量変化率の関係性評価

図-10にシリーズ1～3までの間隙通過速度と平均粗骨材量変化率との関係を示す。細骨材率、骨材の粒度分布、石灰石微粉末の有無や種類によらず、間隙通過速度が速くなるほど平均粗骨材量変化率は小さくなっており、既往の研究⁵⁾と同様の傾向であった。図中には、スランブごとに両者の関係をべき乗関数で回帰した式を併記しているが、間隙通過速度が同一の場合には、スランブ 15cmの平均粗骨材量変化率がスランブ 8cmより大きい傾向が認められた。

5. まとめ

本研究では、加振ボックス充填試験を用いて、細骨材率、細・粗骨材の粒度分布、石灰石微粉末の使用がコンクリートの充填性に及ぼす影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) スランブ 8cm, 15cm とともに、細骨材率が 35～55% 程度の範囲において、細骨材率が大きくなるほど間隙通過速度は速くなる傾向を示した。
- (2) 細骨材の粒度分布の変化に伴う間隙通過速度および平均粗骨材量変化率の変化量は、粗骨材の粒度分布が変化した場合より明確に大きかった。
- (3) 石灰石微粉末を細骨材の一部として使用した場合、石灰石微粉末を使用しないものと比較して、間隙通過性および材料分離抵抗性が向上した。
- (4) 石灰石微粉末を用いてコンクリートの充填性を高める上での最適な使用量は、石灰石微粉末の比表面積によって異なり、比表面積が大きいほど、少ない傾向が認められた。
- (5) 細骨材率、骨材の粒度分布、石灰石微粉末の使用有無によらず、間隙通過速度と平均粗骨材量変化率には相関があり、間隙通過速度が速いほど平均粗骨材量変化率が小さく、材料分離抵抗性が向上する傾向があった。

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]，pp.32-54，2013.3
- 2) 土木学会：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)，pp.1-4，2007.3

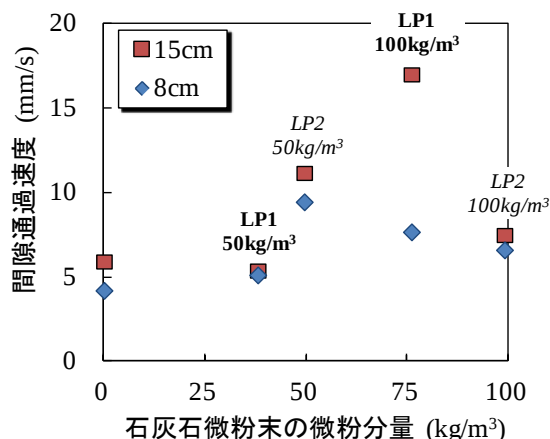


図-9 微粉量と間隙通過速度の関係

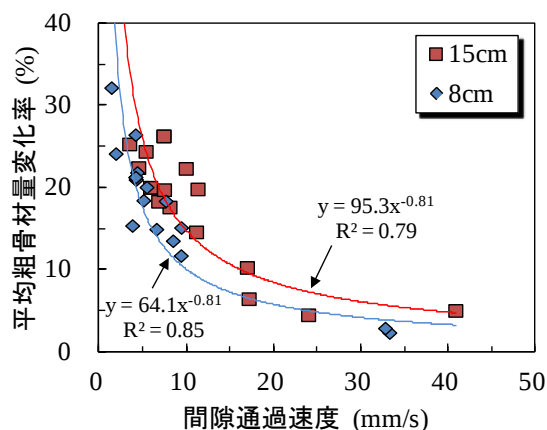


図-10 間隙通過速度と平均粗骨材量変化率の関係

- 3) 近松竜一，入矢桂史郎，十河茂幸：骨材の粒度構成がフレッシュコンクリートの変形特性に及ぼす影響，骨材の品質と有効活用に関するシンポジウム論文集，pp.51-56，2005.12
- 4) 土木学会：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(341 委員会)委員会報告書，pp.I-69-81，2011.5
- 5) 土木学会：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(341 委員会)第2期委員会報告書，p.II-58-87，2013.11
- 6) 日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末研究委員会報告書，pp.39-44，1998.5
- 7) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.63-88，2013.3
- 8) 齋藤憲寿，加賀谷誠：細骨材率を増加したコンクリートの間隙通過試験による締固め性能評価，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，シンポジウム論文集，pp.II-23-28，2011.5