

論文 水セメント比および細骨材率が振動条件下におけるコンクリートの充填性に及ぼす影響

中村 敏之*1・橋本 紳一郎*2・佐伯 啓介*3・北野 潤一*4

要旨: コンクリートを型枠内に確実に充填させるためには振動条件下におけるコンクリートが有する充填に関する性能を把握しておく必要があるが、スランブ試験で振動条件に対する充填性を評価することは難しい。そこで、振動を付与した試験方法を用いて、水セメント比、細骨材率を変化させた同一スランブ、同一材料のコンクリートの間隙通過性、材料分離抵抗性、変形性を定量的な指標で評価した。その結果、同一スランブにおいても、細骨材率が増加することで充填性が向上し、水セメント比が小さいコンクリートほどその効果が大きいことがわかり、また、評価に用いた試験方法が十分に適用可能であることがわかった。

キーワード: 振動締固め、間隙通過性、材料分離抵抗性、スランブフロー

1. はじめに

コンクリート工事における初期欠陥などの不具合のリスクを低減させるためには、使用するコンクリートが対象の打込み箇所に対して、適切な充填性を有する必要がある。適切な性能を有したコンクリートを使用しないと、たとえ初期欠陥が生じなくても、例えば、材料分離したコンクリートがかぶり部に充填されれば、硬化後の耐久性が低下する可能性がある。フレッシュコンクリートのコンシステンシーの評価で一般に用いられる試験はスランブ試験であるが、コンクリート標準示方書施工編¹⁾の施工標準では、標準的な施工方法として実際の型枠への打込みには棒状パイププレートによる締固めによるとしており、その振動条件に対しては、スランブ試験では定量的に評価することは難しい。振動条件下における充填性に関わるフレッシュコンクリートの性能として、間隙通過性、材料分離抵抗性、変形性(変形のしやすさ)などが挙げられる。これらの性能は、骨材の種類や粒度・粒径、化学混和剤の種類などの使用材料や細骨材率、水セメント比や単位セメント量などの配合条件によって左右される。そのため、同一スランブのコンクリートであっても、振動条件に対する間隙通過性、材料分離抵抗性、変形性などの性能は同一とは限らない。したがって、これらの性能を定量的に、かつ簡易な方法で実施できる試験の評価指標が確立されることが望まれた。

このような背景から、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²⁾³⁾」(以下、341委員会報告書)では、振動条件下における同一スランブを有するコンクリートの間隙通過性や材料分離抵抗性、変形性を定量的な指標を

もって評価する2つの試験方法が提案された。本稿では、これらの試験方法を活用し、水セメント比や細骨材率などの配合条件が、同一スランブにおけるコンクリートの充填性に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を示す。すべての配合で共通とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は砕砂、粗骨材は砕石を使用した。混和剤はリグニンスルホン酸系AE減水剤を使用した。

2.2 配合水準

表-2に配合とスランブおよび空気量の測定結果を示す。水セメント比は55, 47.5, 40%の3水準とし、細骨材率は38, 43, 48, 53%の4水準とし、合計12水準の配合とした。AE減水剤の添加率はセメント質量に対し

表-1 使用材料

水	上水道水	密度 (g/cm ³)	1.00
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 (g/cm ³)	3.16
		比表面積 (cm ² /g)	3350
細骨材	砕砂 (茨城県桜川産硬質砂岩)	表乾密度 (g/cm ³)	2.63
		吸水率 (%)	0.84
		実積率 (%)	55.5
		粗粒率	2.85
		微粒分量 (%)	2.3
粗骨材	砕石 (茨城県桜川産硬質砂岩)	最大寸法 (mm)	20
		表乾密度 (g/cm ³)	2.66
		吸水率 (%)	0.41
		実積率 (%)	61.2
		粗粒率	6.76
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸系	

*1 オリエンタル白石(株) 技術研究所(正会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助教 博士(工学) (正会員)

*3 オリエンタル白石(株) 東京支店施工・技術部 工修

*4 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻

表-2 配合

配合No.	配 合								フレッシュ性状		
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤 添加率	単位量 (kg/m ³)					スランブ	空気量	練上がり 温度
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
				W	C	S	G	A			
%	%	C×mass%	kg	kg	kg	kg	kg	cm	%	℃	
SW-55-38	55.0	38.0	0.6	153	278	714	1177	1.67	7.0	3.7	20.0
SW-55-43		43.0		157	285	801	1073	1.71	7.0	4.3	20.0
SW-55-48		48.0		163	296	881	966	1.78	7.0	5.0	20.0
SW-55-53		53.0		165	300	969	869	1.80	7.5	5.4	20.0
SW-47-38	47.5	38.0	0.6	155	326	696	1149	1.96	7.0	4.0	19.0
SW-47-43		43.0		159	335	780	1046	2.01	7.5	4.5	19.0
SW-47-48		48.0		165	347	859	941	2.08	7.0	4.9	19.5
SW-47-53		53.0		169	356	939	842	2.13	7.5	5.4	19.0
SW-40-38	40.0	38.0	0.6	160	400	668	1102	2.40	7.0	3.8	19.5
SW-40-43		43.0		164	410	748	1003	2.46	7.0	4.1	19.5
SW-40-48		48.0		167	418	828	907	2.51	8.0	4.1	20.0
SW-40-53		53.0		170	425	907	813	2.55	7.5	4.4	20.0

0.6%を共通として、スランブが 8±1cm, となるように単位水量を調整した。試験は温度 20℃, 相対湿度 60%の室内で行った。コンクリートの練混ぜは 100L 強制練りミキサを使用し、各配合で 60L 練り混ぜた。スランブは JIS A 1101 に、空気量は JIS A 1128 に準じて測定した。

2.3 試験方法

(1) 間隙通過性, 材料分離抵抗性の評価試験

間隙通過性および材料分離抵抗性は、341 委員会報告書において提案される加振ボックス充填試験に準じた方法で評価した。図-1 に試験装置を示す。試験容器は「JSCE-F511 高流動コンクリートの充填試験方法(案)」で使用されるボックス形容器を用い、障害 R2 (D13×3 本, あき 35mm) を用いた。バイブレータは振動体の呼び径 28mm, 振動数 240Hz の手持形振動機を使用した。ボックス型容器は防振性のあるゴムマットに静置し、試料を容器の A 室に 3 層に分けて詰めた。試料を詰める際には各層を詰める度に仕切り板の面板方向へ容器を 3 回揺らして、試料の上面が水平になるようにした。試料を上面まで詰めた後、上面を軽く均し、A 室中央にバイブレータの先端と容器底面との間隔が 100mm となる位置までバイブレータを挿入した。バイブレータが動かないように位置を保持しながら、仕切りゲートを引き上げ、バイブレータを始動し、試料が A 室から障害 R2 を通過し、B 室正面における高さ 190mm および 300mm に到達した時間をストップウォッチで 0.01 秒単位まで測定した。300mm まで到達した後にバイブレータを停止し、B 室の上面から 2L の試料を採取し、JIS A 1112 に準じて洗い分析により単位粗骨材量を求めた。間隙通過性の評価指標を式(1)に、材料分離抵抗性の評価指標を式(2)に示す。間隙通過性の指標は、B 室の高さで 190mm~300mm の一定距離 (=110mm) を、試料が障

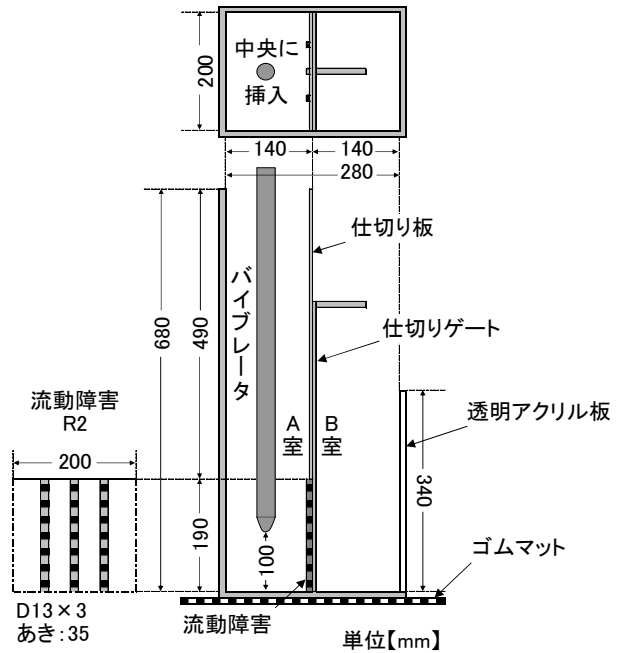


図-1 加振ボックス充填試験装置

$$V_{pass} = \frac{110}{t_{300} - t_{190}} \quad (1)$$

ここに、 V_{pass} : 間隙通過速度 (mm/s)

t_{300} : 300mm 到達時間 (s)

t_{190} : 190mm 到達時間 (s)

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

ここに、 δ_B : 粗骨材量変化率 (%)

G_B : B 室の単位粗骨材量 (kg/m³)

G_0 : 配合における単位粗骨材量 (kg/m³)

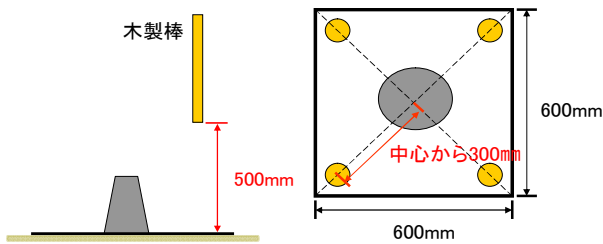


図-2 タンピング試験方法

$$K_{sf} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i S_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n S_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3)$$

ここに、 K_{sf} : 単位スランブフロー変化量 (mm/回)
 n : スランブフローを測定した回数 (回)
 x_i : i 回目の測定時におけるタンピング回数 (回)
 S_i : i 回目の測定時におけるスランブフロー (mm)

害 R2 の通過に要した時間 (s) で除した間隙通過速度 (mm/s) とした。材料分離抵抗性の指標は、300mm 到達後の B 室上面の試料、つまり、障害 R2 を通過して最も先端に到達した試料の単位粗骨材量 (kg/m³) を配合における単位粗骨材量 (kg/m³) で除した粗骨材量変化率 (%) とした。なお、粗骨材量変化率は値が 100% に近いほど B 室の単位粗骨材量が配合における単位粗骨材量に対して変化していないことを示している。

(2) 変形性の評価試験

変形性は、341 委員会報告書において提案されるタンピング試験に準じた方法で評価した。図-2 に試験方法を示す。試験はスランブ試験終了後の試料を用いて行った。スランブ試験における平板は、試験前に厚さ 2cm で敷き詰めた表乾状態の細骨材の上に水平に設置した。スランブを測定後、JIS A 1101 に準じてスランブフローを測定した。スランブおよびスランブフローを測定後、質量 1.2kg の木製棒を 500mm の高さから、平板の中心から頂点方向に 300mm 離れた四隅に右回りで順次、落下させ、打撃による振動を与えた。平板を 8 回 (2 周) 叩くごとにスランブフローを測定し、これを 32 回 (8 周) まで行い、そのときの試料の状態を目視で観察した。変形性の評価指標を式(3)に示す。 n は打撃前を含むスランブフローを測定した回数とした。単位スランブフロー変化量 K_{sf} (mm/回) は、打撃 1 回に対するスランブフローの増加量 (mm) を表し、変形性の指標とした。また、打撃後の試料の状態で、崩れや割れ、スランブコーン上端の円形の痕跡の有無などから、材料分離抵抗性に関する定性的評価を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 間隙通過性

図-3 に間隙通過速度と細骨材率の関係を示す。いずれの水セメント比においても、細骨材率の増加にともない間隙通過速度は大きくなった。また、同じ細骨材率では、水セメント比が小さいほうが間隙通過速度は大きくなった。土木学会「コンクリートの施工性能にもとづく配合設計・施工指針 (案)⁴⁾」(以下、施工性能指針) では、間隙通過性を確保するために、水セメント比、スランブ、最大粗骨材寸法に応じた細骨材率の最小値の目安を設定している。同一のスランブ、最大粗骨材寸法においては、水セメント比が大きいほど細骨材率の最小値を大きく設定しており、換言すれば、細骨材率を大きく、水セメント比を小さくすることで、間隙通過性が向上することとなる。したがって、本試験方法で得られた図-3 に示す間隙通過性の指標はこれを定量的に表していると言える。施工性能指針では、同様にスランブ、最大粗骨材寸法に応じた粗骨材かさ容積の最大値の目安を設定している。図-4 に本試験方法で得られた間隙通過速度と粗骨材かさ容積の関係を示す。相関係数が 0.8 以上と高い値を示しており、本試験の試験方法で得られた間隙通過速度は間隙通過性の評価として十分に妥当な指標であると言える。また、施工性能指針におけるスランブ 8cm、粗骨材

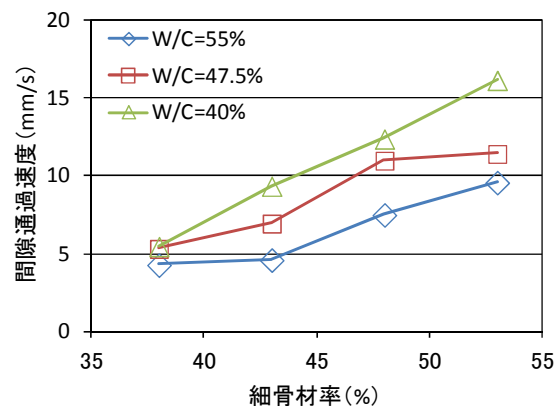


図-3 間隙通過速度と細骨材率の関係

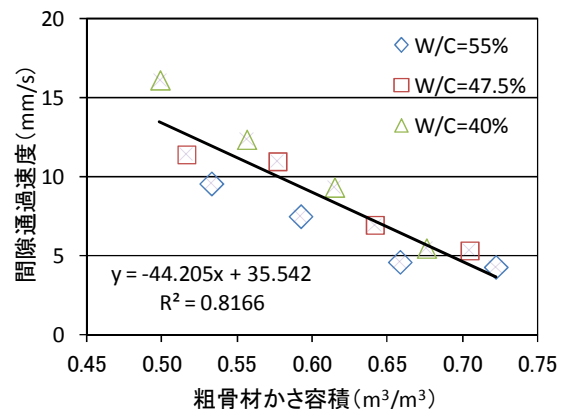


図-4 間隙通過速度と粗骨材かさ容積の関係

最大寸法 20mm における粗骨材かさ容積の最大値は $0.70\text{m}^3/\text{m}^3$ であることから、それに相当する間隙通過速度を図-4 に示す一次相関式から算出すると 4.6mm/s となり、本試験の範囲では、間隙通過速度の最小値を示していることになる。341 委員会報告書では、実構造を模擬した試験体との比較から決定した間隙通過速度のしきい値を 5mm/s としており、本試験で得られた最小値とほぼ近い値となっている。

3.3 材料分離抵抗性

図-5 に粗骨材量変化率と細骨材率の関係を示す。水セメント比 47.5%および 40%では、細骨材率の増加にともない粗骨材量変化率は大きくなった。水セメント比 55%では、細骨材率 38%から 43%に増加させると粗骨材量変化率は小さくなったが、細骨材率 43%より増加させると粗骨材量変化率は大きくなった。同じ細骨材率では、水セメントが小さいほうが粗骨材変化量は大きくなった。

施工性能指針では、材料分離抵抗性を確保するために、打込み対象の構造条件に応じた打込みのスランプに対する単位セメント量の下限および上限を設定した照査図で確認することとしている。図-6 に施工性能指針に示される照査図と本試験の配合における単位セメント量を示す。なお、図-6 の照査図は仮定として、打込み対象が柱部材で、有効換算鋼材量 $700\text{kg}/\text{m}^3$ 未満、締固め作業高

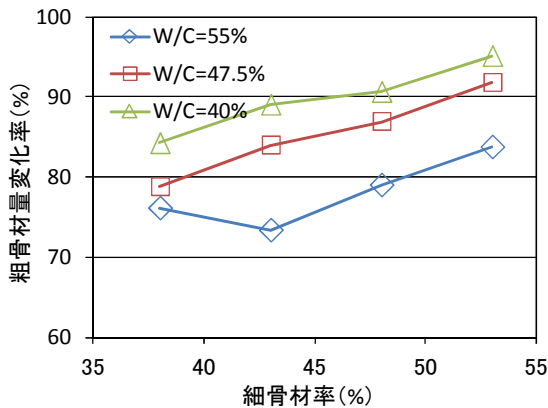


図-5 粗骨材量変化率と細骨材率の関係

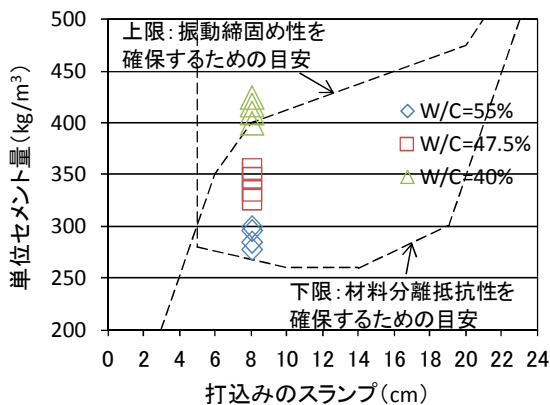


図-6 打込みのスランプと単位セメント量の関係

さ 3m 未満、鋼材の最小あき 50mm 以上のものを用いている。照査図の下限は材料分離抵抗性に対し、上限は振動締固め性に対し、その性能を確保する目安となっている。つまり、単位セメント量が下限値より大きくなるほど材料分離抵抗性が大きくなる。したがって、水セメント比が小さい配合は単位セメント量が大きくなり、かつ、表-1 に示す配合では細骨材率が増加することにもない、単位セメント量も増加しているので、本試験で得られた図-5 に示す材料分離抵抗性の指標はこれを定量的に表していると考えられる。

3.4 変形性

図-7 に細骨材率と単位スランプフロー変化量の関係を示す。いずれの水セメント比においても、細骨材率の増加にともない単位スランプフロー変化量は大きくなった。しかしながら、同じ細骨材率では、細骨材率が小さい場合には水セメントが小さいほうが単位スランプフロー変化量は大きい、細骨材率が大きい場合には水セメント比が大きいほうが単位スランプフロー変化量は大きくなっている。図-8 に各細骨材率ごとの単位セメント量と単位スランプフロー変化量の関係を示す。細骨材率が小さい 38%の配合は単位セメント量の増加にともない、単位スランプフロー変化量は大きくなるが、細骨材率の大きい 53%の配合は単位セメント量の増加にともない、

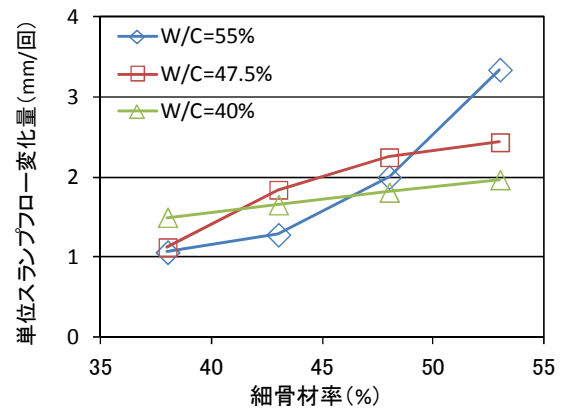


図-7 単位スランプフロー変化量と細骨材率

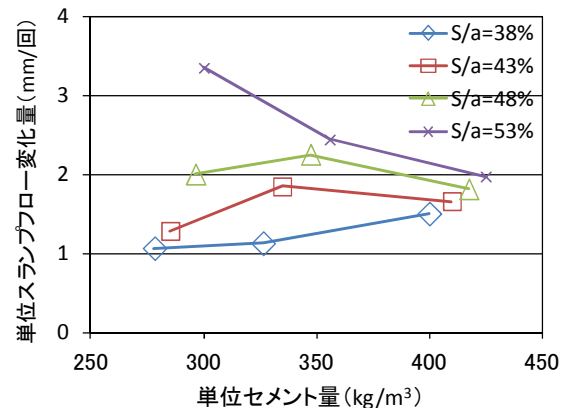


図-8 単位スランプフロー変化量と単位セメント量

単位スランプフローは小さくなっている。一方で、細骨材率43%の配合と48%の配合は、単位セメント量が小さい場合と大きい場合に単位スランプフロー変化量は小さくなっている。図-6に示すような施工性能指針における単位セメント量の照査図は、打込みのスランプと単位セメント量の上限と下限を設定し、その範囲で中心に近いほうが、材料分離抵抗性と振動締め固め性が良好となっている。したがって、単位スランプフロー変化量は、照査図の単位セメント量の影響に細骨材率の影響を加えた指標となっていると考えられる。すなわち、単位スランプフロー変化量は、単に変形性といった評価ではなく、材料分離抵抗性と振動締め固め性の相互における最適値となる指標を検出している可能性があると考えられる。

3.5 試料の状態の評価

写真-1~3に平板を32回打撃した後の試料の状態を示す。打撃前の試料では、水セメント比が大きい配合ほど、細骨材率が小さい配合ほど、粗々しい状態であることは確認できたが、打撃することによって、それがより顕著となる傾向が見られた。一方、水セメント比が小さく、細骨材率が大きな配合ほど、打撃後においてもスランプコーン上縁の円形の痕跡がより濃く残り、粘性が高い傾向が見られた。加振ボックス充填試験で得られた指標と比較すると、間隙通過速度や粗骨材量変化率が小さ

い配合は粗々しくなり、大きい配合は粘性が高い傾向になると考えられる。このことから、打撃過程の試料の状態を観察することで、間隙通過性や材料分離抵抗性を簡易に推定できる一つの手法となり得ると考えられる。

3.6 水セメント比および細骨材率の違いによる配合特性

以上のように、水セメント比や細骨材率の違いによって各配合の特性は異なる。本実験の範囲では、水セメント比55%の配合で単位セメント量が少ない場合では、比較的に間隙通過性や材料分離抵抗性が劣る傾向にあるが、細骨材率を増加することで改善できるため、それによって充填性を向上させることができる。一方、水セメント比47.5%および40%の配合で単位セメント量が大きくなるほど、間隙通過速度や粗骨材量変化率が大きくなり、細骨材率38%や43%の場合でも、水セメント比55%における細骨材率53%と同等の指標値を得ることができる。つまり、単位セメント量が大きい配合ほど細骨材率を低減しても十分な充填性が得られると推測される。一般に、単位セメント量の多い配合は温度ひび割れや収縮量などが懸念されるため、品質に対してはできるだけ単位セメント量を低減することが望ましい。したがって、充填が可能な範囲を定量的に把握し、それに準じて細骨材率を低減することで単位セメント量の低減となり、品質が向上し、また、経済的な配合設計が可能となる。

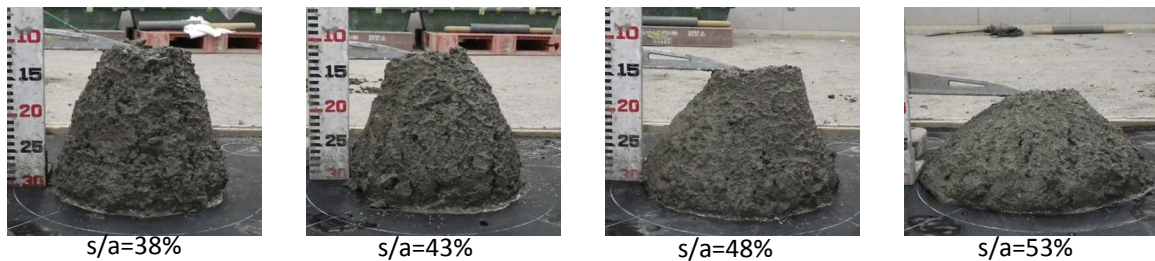


写真-1 32回打撃後のスランプ形状 (水セメント比 55%)

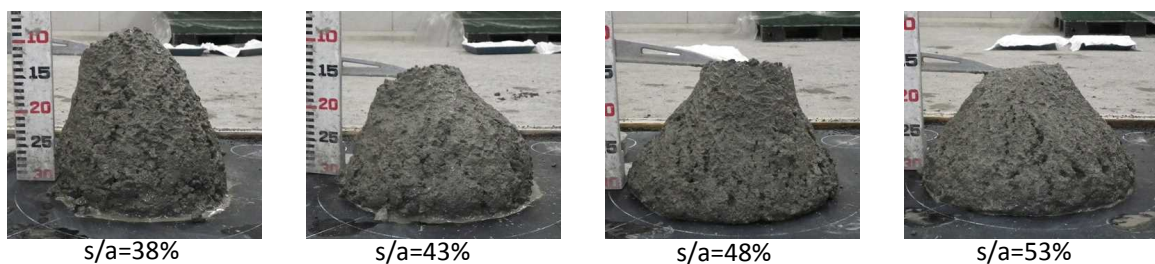


写真-2 32回打撃後のスランプ形状 (水セメント比 47.5%)

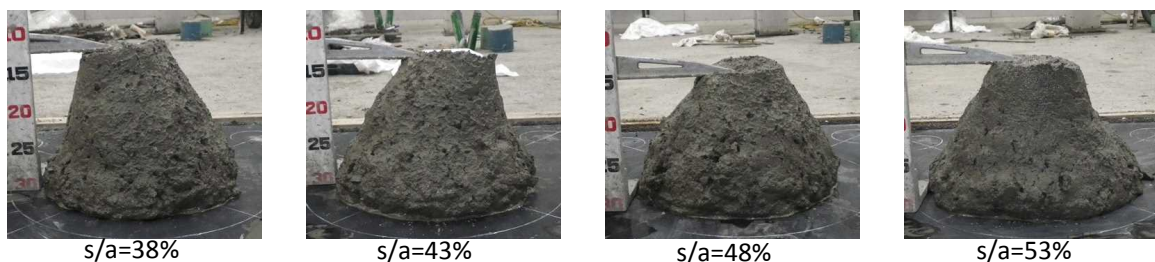


写真-3 32回打撃後のスランプ形状 (水セメント比 40%)

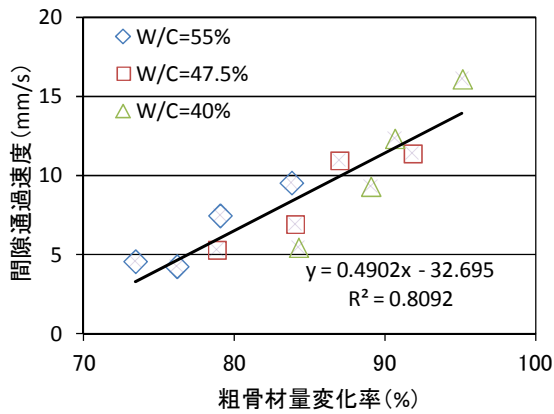


図-9 間隙通過性と粗骨材量変化率の関係

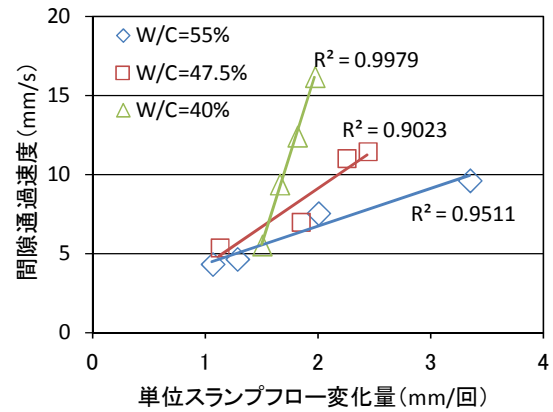


図-10 間隙通過性と単位スランプフロー変化量の関係

4. 試験方法の適用性

4.1 間隙通過速度と粗骨材量変化率の関係

図-9 に間隙通過速度と粗骨材量変化率の関係を示す。本試験の範囲では、試験によって得られた間隙通過速度と粗骨材量変化率の関係には高い相関があり、間隙通過性が良好なほど、材料分離抵抗性も良好となる。

4.2 間隙通過速度、粗骨材量変化率と単位スランプフロー変化量の関係

図-10 に間隙通過速度と単位スランプフロー変化量の間隔を、図-11 に粗骨材量変化率と単位スランプフロー変化量の間隔を示す。本試験の範囲では、試験によって得られた間隙通過速度あるいは粗骨材量変化率と単位スランプフロー変化量の間隔には、水セメント比ごとでは高い相関がある。また、水セメント比が小さい配合ほど傾きが大きくなっており、間隙通過性あるいは材料分離抵抗性と変形性との関係には、単位セメント量に関わる振動締め固め性の程度が加味されていると考えられる。

4.3 試験方法の適用の可能性

加振ボックス充填試験は直接的に間隙通過性と材料分離抵抗性を評価でき、また、タンピング試験で得られる指標もこれらと関連した評価ができるため、2つの試験を試し練り時などに行うことで、振動条件を加味した配合設計ができる可能性があると考えられる。

5 まとめ

水セメント比、細骨材率を変化させた同一スランブ、同一材料のコンクリートの振動条件下の充填性を実験的に評価した結果、以下の知見が得られた

- (1) 加振ボックス充填試験の間隙通過速度と粗骨材量変化率は、それぞれ間隙通過性、材料分離抵抗性の指標となり得る。
- (2) 同一スランブ・同一材料において、細骨材率の増加や水セメント比の低減によって、間隙通過性や材料分離抵抗性が向上する。
- (3) タンピング試験の単位スランブフロー変化量は、変

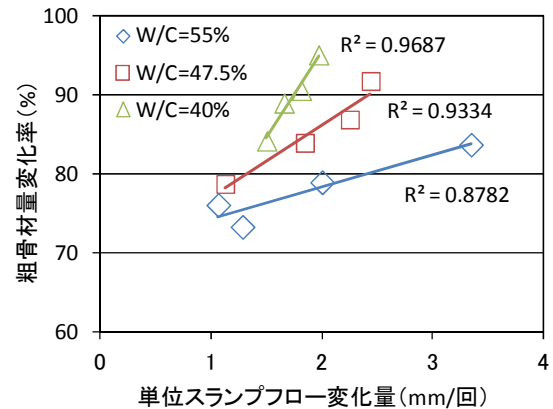


図-11 粗骨材量変化率と単位スランプフローの関係

形性だけでなく、材料分離抵抗性と振動締め固め性の相互における最適値を検出している可能性がある。

- (4) タンピング試験後のスランブの崩れや形状から、簡易的に間隙通過性や材料分離抵抗性を推測することは可能である。
- (5) 細骨材率の低減による充填性の向上は、水セメント比が小さいコンクリートほど効果が大きく、それにとともなう単位セメント量の低減から、品質や経済性が向上する可能性がある。
- (6) 同一水セメント比では、加振ボックス充填試験とタンピング試験で得られる指標は関連している。

参考文献

- 1) (社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2013.3
- 2) (社)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，2011.5
- 3) (社)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，2013.11
- 4) (社)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)，2007.3