論文　振動締固めによる材料分離およびブリーディングが硬化コンクリートの表層透気性に与える影響

西村　和朗 *1・加藤　佳孝 *2

要旨：本研究では，施工時のフレッシュコンクリートの材料分離を洗い分析試験およびブリーディング試験によって評価し，これらの結果と表面透気試験の結果を比較することで，材料分離の程度と硬化コンクリートの品質の関係について実験的に検討した。その結果，配合によって程度は異なるが，振動締固めに伴い骨材が沈降することで，上層と底面の総骨材の体積割合の差は 10%以上となった。また，沈降する骨材の多くは粗骨材であり，いずれの配合でも上層と底面の細骨材率の差は 7%以上となった。さらに，表層透気係数と，粗骨材の変動およびブリーディング率には明確な関係が確認されなかった。

キーワード：材料分離，振動締固め，ブリーディング，表層透気係数

1. はじめに

同一配合で打設されたコンクリート構造物であっても，部材位置によって劣化進行のばらつきが大きく，場合によっては設計で想定した劣化の進行を上回る場合があることが報告されている [1]。この一つの要因として，施工時の材料分離に伴い硬化コンクリートの品質が変動することが考えられる。硬化コンクリートの品質変動をもたらす材料分離には，締固めによる材料分離や，鉄筋障害による材料分離，ブリーディング等が考えられる。締固めによる材料分離は，一般的に振動によってモルタルと粗骨材間の付着力が低下することで粗骨材が沈下するとされており [2]，沈下の程度はモルタルと粗骨材間の付着力であるモルタルの粘性によって変化するとされている [3]。また，ブリーディングは材料の密度が異なることによって各材料の沈降速度に差が生じ，材料分離する現象とされている [4]。この様に，材料分離の現象に関する議論はなされているものの，最終的に重要となる硬化コンクリートの品質変動との関係を定量的に検討した例は極めて少ないのが現状である。

本研究では，振動締固めによる材料分離およびブリーディングを定量的に把握し，これらの材料分離の程度と硬化コンクリートの品質の一つである表層透気性の関係を把握することを目的とする。

2. 材料分離の程度の把握

2.1 材料・配合

セメントには普通ポルトランドセメント（以降 C と称する：密度 3.15g/cm^3，比表面積 3410cm^2/g），細骨材には山梨県富士川産川砂（以降 S と称する：表乾密度 2.62g/cm^3，絶乾密度 2.58g/cm^3，F.M.2.73），粗骨材には埼玉県秩父産砕石（以降 G と称する：表乾密度 2.71g/cm^3，絶乾密度 2.70g/cm^3，F.M.6.74），化学混和剤にはアルキルエーテル系 AE 剤およびリグニンスルホン酸系 AE 減水剤を用いた。本研究で用いた配合を**表－1** に示す。なお，スランプ試験は JIS A 1101 に，空気量試験は JIS A 1128 に準拠した。配合計算で設定した空気量は全ての配合で 4.5%とした。本研究では，水セメント比（以降 W/C と称する）を 45～60%で 3 水準，細骨材率（以降 s/a と称する）を 40～50%で 3 水準，単位水量を 155～175kg/m^{3}で 3 水準の範囲で変化させた。配合の違いが材料分離に与える影響を明確にするため，化学混和剤の添加率は一定とした。なお，化学混和剤の添加率は製造元の推奨値を参考に決定した。

2.2 試験概要

(1) 洗い分析試験

洗い分析試験は，既往の研究 [5]を参考に実施した。試験に使用した供試体と採取箇所を**図－1** に示す。1 層打のコンクリートの材料分離を想定し，コンクリート標準示方書[施工編]（以降示方書と称する）に記載されている打込み高さ 400～500mm 以下を参考に，高さ 400mm までコンクリートを型枠（断面 150×150mm）に打込み，棒状バイブレータで中央部を 15 秒間締め固めた。また，締固め時間は，示方書に記載されている締固め時間 5～15 秒を参考に，最も分離しやすいと予想される 15 秒とした。なお，型枠の断面が小さいと振動が型枠から反射することでコンクリートに影響を与えると考えられるが，本研究では型枠の断面や締固め条件は同一であるため反射波の影響も同様であると考えた。ブリーディングの影響を排除するため，締固め終了直後，高さ方向に 8 等分した箇所から試料を採取し，試料の体積を算出した。なお，各箇所の試料は，型枠内のコンクリートが流動しない程度に型枠を傾けた後，型枠 1 側面を開放し，上部か

*1 東京理科大学　理工学研究科土木工学専攻　（学生会員）
*2 東京理科大学　理工学部土木工学科　教授　博（工）　（正会員）

表－1　配合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				単位量(C×%)		スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	AE 剤	AE 減水剤		
1	45	45	165	367	794	1004	0.003	0.25	10.5	4.5
2	50	40	165	330	718	1114	0.003	0.25	17.5	3.8
3	50	45	155	310	830	1046	0.003	0.25	7.5	3.8
4	50	45	165	330	808	1021	0.003	0.25	14.0	4.2
5	50	45	175	350	792	997	0.003	0.25	14.5	6.1
6	50	50	165	330	898	928	0.003	0.25	18.0	3.2
7	60	45	165	275	828	1047	0.003	0.25	14.5	3.2

ら 50mm ごとに採取した。体積は，断面積（ϕ100mm）の定まった容器に採取した試料を打込み，気泡が浮上しなくなるまで棒状バイブレータで締め固めた後の試料の高さを測定することで算出した。各箇所の 0.15mm ふるいの上でペースト分を水で洗い流した。0.15mm ふるい上に残った骨材を 105℃の乾燥炉で 24 時間以上静置し，これを絶乾状態と判断し，5mm ふるいを用いて細骨材と粗骨材にふるい分け，式(1)～(2)によって各採取箇所のコンクリート中の材料の構成比を算出した。さらに，ふるいを用いて細骨材を 5～1mm，1～0.6mm，0.6mm 以下に分類し，各径の分離の程度を確認した。なお，骨材試験から 0.15mm 以下の細骨材は 4%であったため，ペーストとともに洗い流した細骨材量を 4%と仮定した。

$$V_P = 1 - (V_S + V_G) \tag{1}$$

$$V_S = \frac{M_S / \rho_S}{V_C}, V_G = \frac{M_G / \rho_G}{V_C} \tag{2}$$

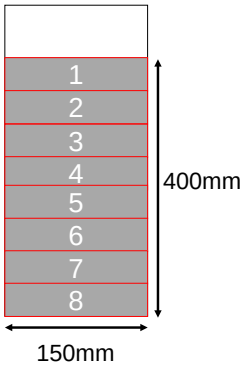
ここに，V はそれぞれ採取した試料の各材料の体積割合，M は採取した試料の各材料の絶乾質量(kg)，ρは絶乾密度 (g/cm³)とした。なお，添え字の P，S，G，C はそれぞれ採取した試料中のペースト，細骨材，粗骨材，コンクリートを意味している。

(2) ブリーディング試験

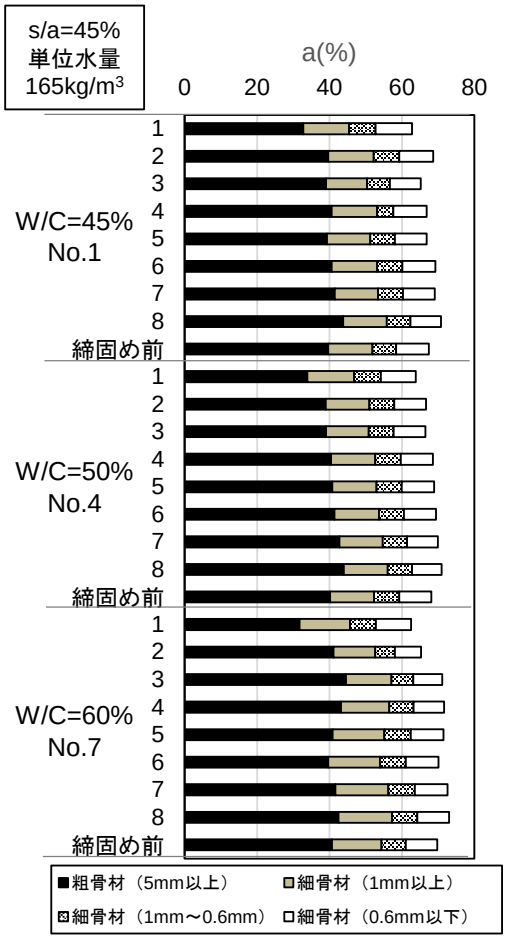
ブリーディング試験は JIS A 1123 を参考にした。ϕ200×200mm の容器にコンクリートを打込み，振動締固めの影響を考慮するため，棒状バイブレータで中央部を 15 秒締め固めた。締固め後 60 分までは 10 分間隔で取水し，それ以降は 30 分間隔で取水した。最終のブリーディング率は式(3)によって算出した。また，60 分までのブリーディング率の傾きからブリーディング速度を算出した。

$$B_r = \frac{V \times \rho_w}{W_s} \times 100, \quad W_s = \frac{W}{C'} \times S' \times 1000 \tag{3}$$

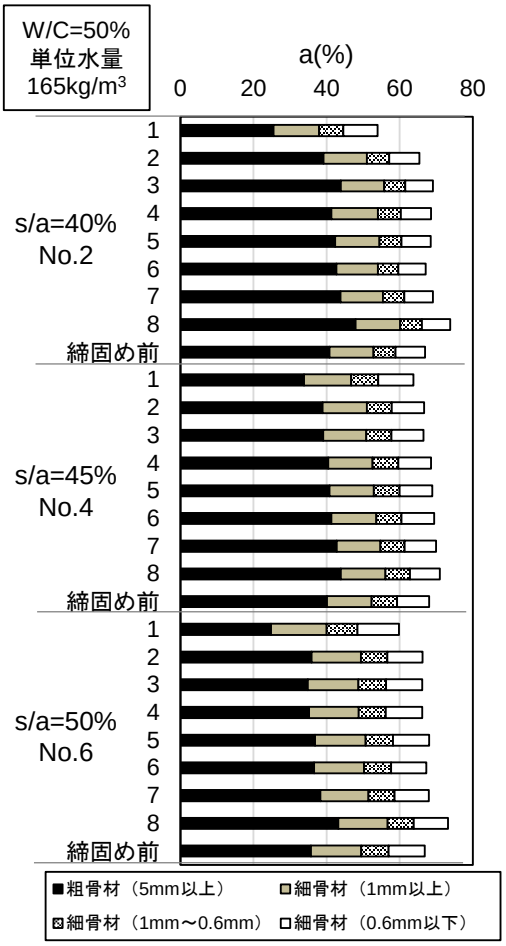
ここに，B_r：ブリーディング率(%)，V：累計したブリーディングによる水の容積(cm³)，ρ_w:水の密度(g/cm³)，



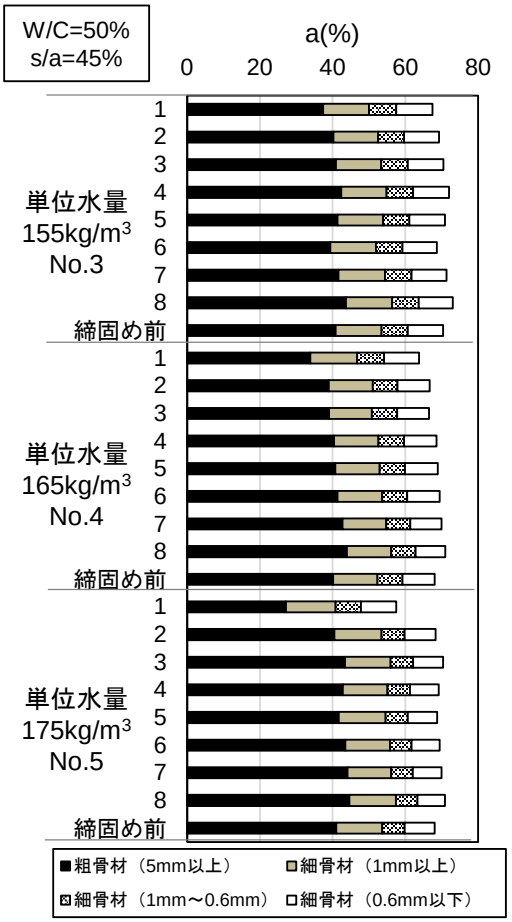
図－1　供試体の採取箇所



図－2　締固めに伴う総骨材量の変化（W/C）



図－3　締固めに伴う総骨材量の変化（s/a）



図－4　締固めに伴う総骨材量の変化（単位水量）

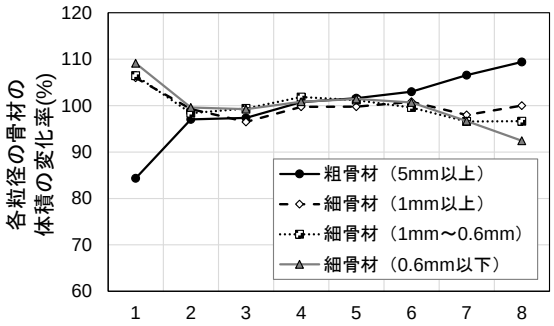
W_s：試料中の水の質量(g)，C’：コンクリートの単位容積重量(kg/m^3)，S’：試料の質量(kg)である。

2.3. 試験結果

(1) 洗い分析試験

締固め後の各層の総骨材の体積割合（以降 a と称する）を図－2～4 に示す。なお，図－2 は W/C，図－3 は s/a，図－4 は単位水量の影響を示している。配合に関わらず，上部と比較して，下部の a が多くなった。これは，振動締固めに伴いセメントペーストと骨材が分離したことが考えられる。配合によって程度は異なるが，いずれの配合でも a の最大と最小の差は 10%以上の差が確認された。また，各粒径の骨材の分離の程度を確認するため，締固め後の 1 層あたりの各粒径の骨材の体積の変化率の一例（No.4）を図－5 に示す。分離した骨材の多くは粗骨材であることが確認された。なお，全ての配合で同様な傾向が確認されている。

締固め後の各層の s/a を図－6～8 に示す。なお，図－6 は W/C，図－7 は s/a，図－8 は単位水量の影響を示している。いずれの配合でも，下部と比較して，上部の s/a は大きくなった。配合によって程度は異なるが，いずれの配合でも s/a の最大と最小の差は 7%以上の差が確認された。既往の研究[6]より，s/a の変動が約 4%以内では，

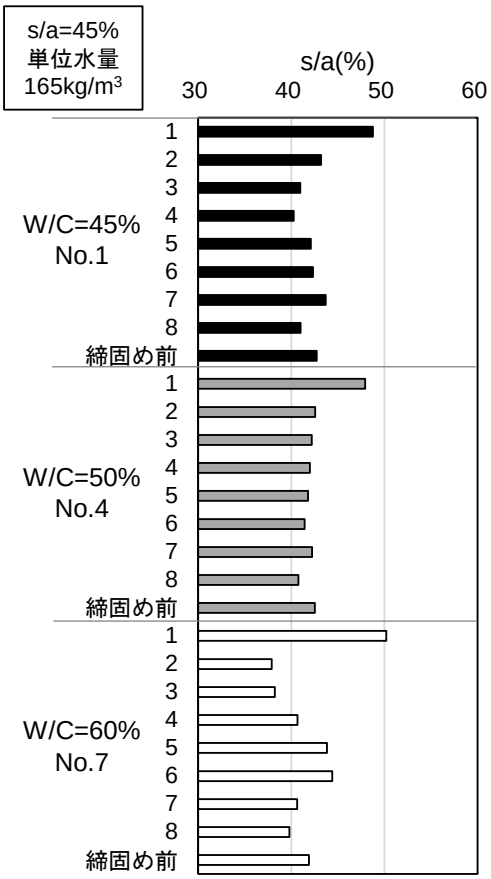


図－5　各粒径の骨材の体積の変化率（No.4）

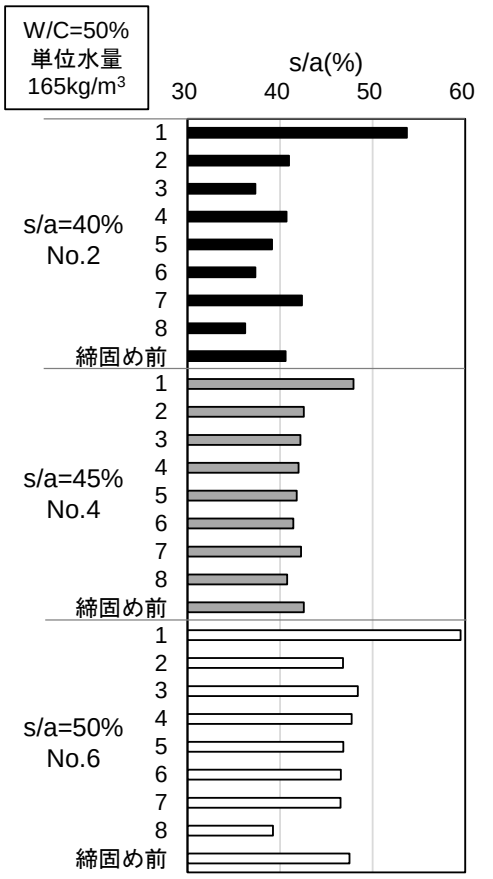
硬化コンクリートの物質移動抵抗性の変化は小さいことが報告されていることから，細骨材率の変化が硬化コンクリートの品質に影響を与える可能性が考えられる。

また，配合 No.2，5，6，7 では，採取箇所 1 と 8 の s/a の差が著しく大きくなった。既往の研究[7]より，s/a の低い配合 No.2 や単位水量が高い配合 No.5，W/C の高い配合 No.7 ではモルタルの粘性は低くなることが予想される。このため，粗骨材が分離しやすく s/a の変動も大きくなったことが考えられる。

細骨材と粗骨材の分離が異なる原因として，細骨材と粗骨材では粒径や密度が違うことで，沈降速度が大きく異なることが考えられる。そこで，Gibbs ら[8]によって提



図－6　締固めに伴う s/a の変化（W/C）



図－7　締固めに伴う s/a の変化（s/a）

案された式(5)からペースト中の骨材の沈降速度を算出した。なお，ペーストの動粘性係数は，既往の研究 [9]の W/C=50%の塑性粘度を密度で除した値を用いた。

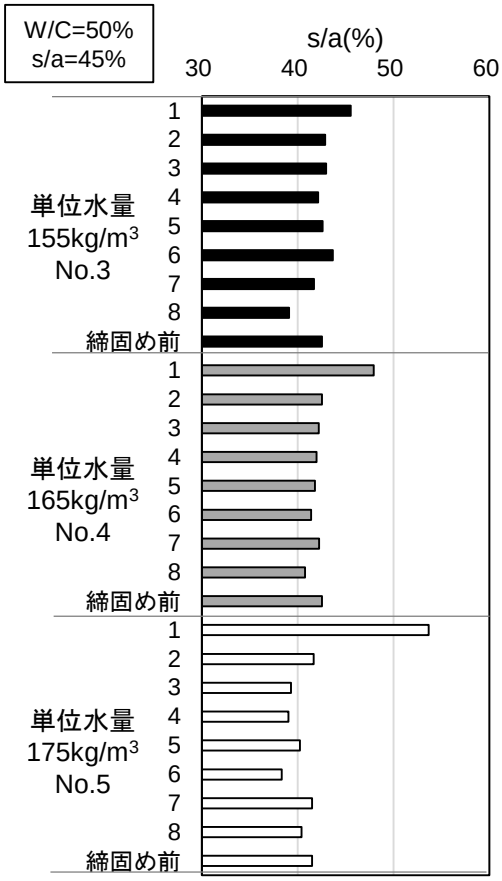
$$V = \frac{-3\nu + \sqrt{9\nu^2 + gr^2 P_f (P_s - P_f)(0.015476 + 0.19841r)}}{P_f (0.011607 + 0.14881r)} \quad (5)$$

ここに，V : 粒子の沈降速度(cm/s)，ν : ペーストの動粘性係数(＝0.33cm^2/s)，g : 重力加速度(cm/s^2)，r : 粒子の直径(cm)，P_f : ペーストの密度 (＝1.83g/cm^3)，P_s : 粒子の密度(細骨材の場合は 2.62，粗骨材の場合は 2.72g/cm^3)である。

配合 No.3～5 を想定したペースト中での各径の骨材の沈降速度を**表－2** に示す。なお，表中の粒径はふるいを通過した網目と留まった網目の中間の大きさを，含有率は配合上の総骨材あたりの各径の骨材の質量含有率を意味している。また，沈降速度に用いた粒子の直径は，表中の粒径を使用した．コンクリート中に多く含有されている 0.45～3.1mm の粒径の細骨材の沈降速度は 1.03～12.3cm/s に対し，7.5～12.5mm の粗骨材では 46.5～64.1cm/s と約 3～64 倍大きくなることが確認された。細骨材と比較して粗骨材の沈降速度は大きいため，締固めに伴う粗骨材の分離が顕著になったと考えられる。

(2) ブリーディング試験

配合がブリーディング率に与える影響を**図－9** に，ブ



図－8　締固めに伴う s/a の変化（単位水量）

表－2　各粒径の沈降速度

	細骨材			粗骨材	
粒径 (mm)	0.45	0.9	3.1	7.5	12.5
各径の含有率 (%)	9.9	12.2	12.6	16.5	25.9
沈降速度 (cm/s)	1.03	3.85	12.3	46.5	64.1

粒径 0.45mm は 0.3～0.6mm, 0.9mm は 0.6～1.2mm, 3.1mm は 1.2～5.0mm, 7.5 mm は 5.0～10mm, 12.5mm は 10～15mm を意味している。

リーディング速度に与える影響を**図－10** に示す。Powers[10]は，ブリーディング速度とブリーディング率には関係性があることを報告している。本研究の結果からも，ブリーディング速度とブリーディング率の大小関係は概ね一致した。また，W/C の増加や s/a の低下，単位水量の増加に伴い，ブリーディング率およびブリーディング速度は増加することが確認された。ブリーディングは，コンクリート中の自由水量に影響されることが報告されており [11]，配合の変化に伴い自由水量が変化したことで，ブリーディングに影響を与えたと考えられる。

3. 表層透気性のばらつきの把握

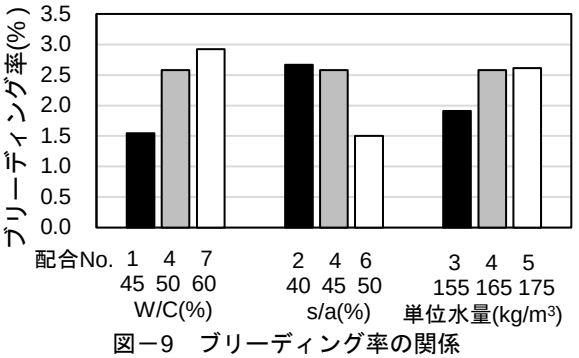
3.1 試験概要

洗い分析試験と同様の手順で, 150×150×400mm の供試体を作製し，硬化後にダブルチャンバー法を用いた表面透気試験（内径 50mm，外径 100mm）によって品質を評価した。なお，材料・配合は **2.1 材料・配合**と同様である。養生は, 翌日脱型後, 材齢 28 日まで水中養生（20℃）した。また，表面透気試験はコンクリート中の含水率の影響を受ける [12]ため，養生後，高周波容量式のコンクリート・モルタル水分計の計測結果が 4.5%程度となるまで乾燥させた。測定高さは底面から 50，150，250，350mm（試験機のセルの中心位置）の 4 箇所とした。なお，測定結果は 4 側面の試験結果を相乗平均した値とした。

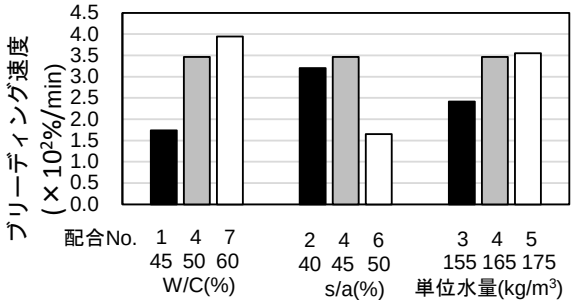
3.2 試験結果

表面透気試験結果を**図－11～13** に示す。なお，**図－11** は W/C，**図－12** は s/a，**図－13** は単位水量の影響を示している。配合 No.4 を除き，高さ 50～250mm では表層透気係数（以降 kT と称する）の変化は小さいが，高さ 350mm の kT は最も大きくなる傾向が確認された。これは，s/a の増加に伴い空隙率が増加すること [5]や，浮上したブリーディング水によって上部の W/C が増加したことによって物質移動抵抗性が低下したと考えられる。

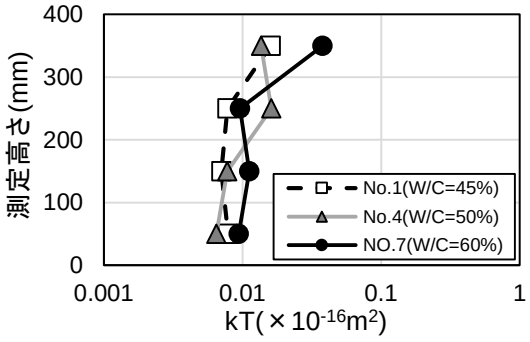
締固め時に生じる粗骨材の沈下量，およびブリーディングによる水の浮上量が大きくなることで，硬化コンクリートの表層透気性のばらつきも大きくなることが予想



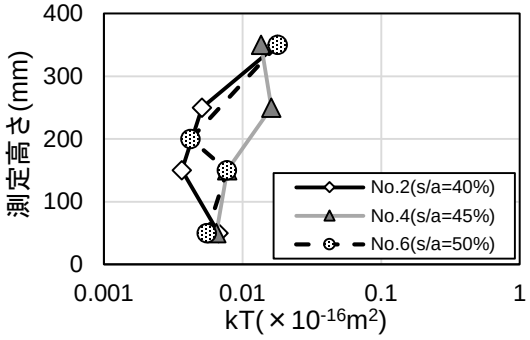
図－9　ブリーディング率の関係



図－10　ブリーディング速度の関係

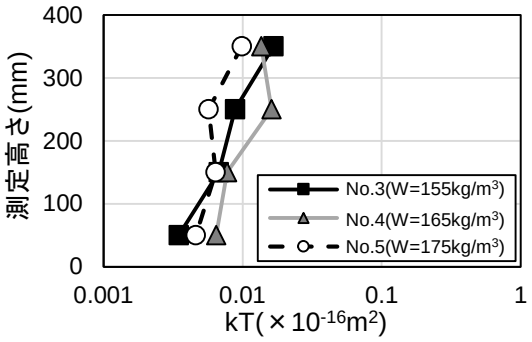


図－11　測定高さと kT の関係（W/C）

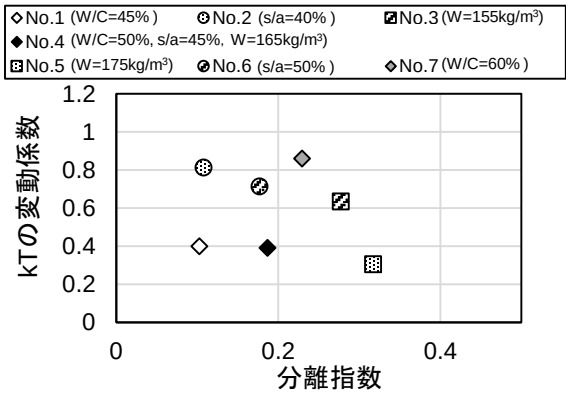


図－12　測定高さと kT の関係（s/a）

される。そこで，本研究では粗骨材の沈下の影響を粗骨材の変動係数で考慮し，これとブリーディング率を掛けた値を材料分離の程度を表す指標（以降分離指数と称する）とした。kT の変動係数と分離指数の関係を**図－14** に示す。なお，洗い分析試験結果を用いて高さ方向に 4 等分した場合の各箇所の単位粗骨材量を算出した。kT の変動係数と分離指数には明確な関係性が確認されない結果



図－13　測定高さと kT の関係（単位水量）



図－14　kT の変動係数と分離指数の関係

となった。このことから，kT の変動は，洗い分析試験によって把握できる粗骨材量の変動や，ブリーディング試験によって把握できる水の浮上以外の分離現象も影響している可能性が考えられる。

4.まとめ

本研究の範囲で得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) いずれの配合でも，振動締固めに伴い骨材が沈降し，上層と底面の総骨材の体積割合の差は10%以上となった。

(2) 細骨材と比較して，ペースト中の粗骨材の沈降速度は著しく大きいため，振動締固めによって分離する骨材の多くは粗骨材であることが確認された。

(3) 配合によって程度は異なるが，いずれの配合でも細骨材率の最大と最小の差は 7%以上の差が確認された。

(4) 表層透気係数と，粗骨材の変動およびブリーディング率には明確な関係が確認されなかった。

謝辞

本研究の一部は，SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の「港湾構造物のライフサイクルマネジメトの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発」の一環として実施したものである。この場を借りて深く感謝致します。

参考文献

1) 酒井秀昭：中性化による橋梁上部工コンクリート部材の耐久性について，プレストレスコンクリート工学会, 第 21 回シンポジウム論文集, pp.81-84, 2012.10

2) 麓隆行：振動下でのモルタルの流動性とその試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.19-24，2007

3) 寺西浩司，谷川恭雄，森博嗣，寺田謙一：フレッシュコンクリートの振動下における粗骨材沈下挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17，No.1，pp.563-568，1995

4) 李柱国：静置状態におけるフレッシュコンクリートのブリーディングモデルに関する理論的研究，日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 679 号, pp.1357-1366，2012.9

5) 尾上幸造，亀澤靖，松下博通：鉄筋間隙通過によるコンクリートの配合変化, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1，pp119－128，2006.2

6) 田篭滉貴，伊代田岳史：ブリーディングによる空隙構造の違いが物質透過制に及ぼす影響，アップグレード論文報告集，第 16 巻 pp.189-194，2016.10

7) 呉承寧，今井昌文，手塚正道：フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料及び配合の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.379-384，1997

8) Ronald J. Gibbs，Martin D. Matthews，David A. Link：The relationship between sphere size and settling velocity, Journal of Sedimentary Research，41，pp.7-18，1971

9) 橋本永手，西村和朗，江口康平，加藤佳孝：フロー試験の物理的解釈に基づくセメントペーストの粘性評価手法，土木学会第 71 回年次学術講演会，pp.645-646，2016

10) Powers,T.C.：The Bleeding of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete，American Concrete Institute Journal，Vol.35，No.6，pp.465-479，1939

11) 桜井邦昭，丸山久一，近松竜一：セメントの凝集や細骨材による拘束水量を考慮したブリーディングの予測モデル，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.3，pp.295-308，2013

12) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp385-398，2012