

論文 材料分離がコンクリートの表層透気性に及ぼす影響

早川 健司*1・加藤 佳孝*2

要旨: コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、かぶりコンクリートの品質、特に物質移動抵抗性が重要となる。構造体かぶりコンクリートの品質は、施工に伴うブリーディング等の材料分離の影響を少なからず受けると考えられる。本研究では、コンクリートの表層透気性に及ぼす粗骨材の分離、およびブリーディングの影響について検討した。その結果、同一水セメント比のコンクリートにおいてもブリーディング性状が異なると表層透気係数は変化し、所要の表層透気性を確保するためには水セメント比とブリーディング性状を考慮する必要があることを示した。

キーワード: かぶりコンクリート, 材料分離, ブリーディング, 表層透気性

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は、主に劣化因子の物質移動抵抗性に依存するため、かぶりコンクリートの品質が特に重要となる。コンクリートの物質移動抵抗性は主に水セメント比に支配されるが、同じ水セメント比のコンクリートを使用した場合であっても、打込みや締固め等の影響により、構造体かぶりコンクリートの品質は材料が供試体レベルで有する品質と異なることが知られている。土木学会コンクリート標準示方書では両者の差を、部分安全係数を用いて評価する手法が示されているが、使用材料の違いや部材位置での安全係数の使い分けについては必ずしも明確になっていないのが現状と考えられる。両者の品質が異なる原因としては、締固めの程度、所定の配合からの材料分離、養生等が考えられるが、構造物の所要の耐久性を確保するためにはこれらがかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

構造体かぶりコンクリートの品質変動要因である材料分離には、打込み、振動締固め時における鉄筋間の通過や粗骨材の沈降による粗骨材の分離、また打設後のブリーディングが考えられる。一般的なスランブを有するコンクリートを対象とし、構造体かぶりコンクリートの品質変動、特に耐久性について検討した既往研究は比較的少ないが、鉄筋間の通過による粗骨材分離が凍結融解抵抗性に与える影響の検討¹⁾や、統計的手法により部材内で発生する材料の不均一性を評価した結果が報告されている²⁾。筆者らも、物質移動抵抗性の一つである表層透気性に着目し、構造体かぶりコンクリートの表層透気性に及ぼす配筋や締固めの影響に関する検討を行い、ブリーディングの影響等を示している³⁾。このように、かぶりコンクリートの耐久性指標に及ぼす材料分離の

影響を指摘している研究はあるものの、コンクリートのブリーディング性状と耐久性指標との関係を定量的に示した研究⁴⁾は少ないのが現状である。

そこで、本研究ではコンクリートのブリーディング、また粗骨材とモルタルの分離が表層透気性に及ぼす影響を検討することを目的とし、小型供試体レベルの室内実験で検討した結果を述べるものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に実験に用いたコンクリートの使用材料および配合を示す。シリーズIは粗骨材とモルタルの分離、シリーズIIはブリーディング性状の相違の検討を目的としたものである。

シリーズIの配合は、水セメント比を0.45, 0.55, 0.65の3水準とし、基準配合の目標スランブを12cmとした。各水セメント比における基準配合(表中の網掛け)の単位粗骨材容積 $g(m^3/m^3)$ は0.37程度であり、材料分離を想定したコンクリートの配合は、モルタルの質、すなわち空気量を含む粗骨材以外の構成材料比を一定として、既往の研究を参考として粗骨材量を0.27および0.45に変化させた。すなわち、鉄筋間の通過による配合変化を検討した既往の研究⁵⁾によれば、鉄筋あきが20~35mmの場合、単位粗骨材容積は-0.03~-0.12程度小さくなること、振動締固めによる鉛直方向の配合変化を調べた既往研究⁶⁾では、標準的な締固めで-0.05~+0.04、過剰締固めで-0.16~+0.12程度変化することが示されている。これらを参考とし、標準的な配筋条件および締固めにおける材料分離より若干大きいと考えられる条件とした。なお、比較として、基準配合から粗骨材を除いたモルタルについても試験を行った。

*1 東急建設(株) 土木技術部 工修 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料および配合

シリーズ	記号	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	g (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)					AE	SP/VIS
						W	C	S1	S2	G		
I: 粗骨材量 変化 (網掛け: 基準配合)	45-S	0.45	5.2	55.9	0.27	197	438	882		705	1.09	
	45-N		4.5	44.5	0.37	170	378	761		968	0.94	
	45-L		3.9	36.6	0.45	149	331	665		1175	0.83	
	55-S	0.55	5.2	57.8	0.27	197	357	949		705	0.89	
	55-N		4.5	46.5	0.37	170	309	821		963	0.77	
	55-L		3.9	38.3	0.45	148	270	716		1175	0.67	
	65-S	0.65	5.2	59.2	0.27	195	300	1002		705	0.75	
	65-N		4.5	48.5	0.36	170	262	875		948	0.65	
65-L	3.9		39.6	0.45	147	226	756		1175	0.57		
II: ブリーディング 変化	55-0	0.55	4.5	46.5	0.37	170	309	821		963		3.09/0.3
	55-1		4.5	48.3	0.37	155	282	882		963	0.71	
	55-2		4.5	46.5	0.37	170	309	821		963	0.77	
	55-3		4.5	44.6	0.37	185	336	761		963	0.84	
	55-4		4.5	48.5	0.35	175	318		847	917	0.84	

※55-N と 55-2 は同一配合

セメント (C) : 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)

細骨材 (S1) : 静岡県掛川産陸砂 (表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.84%)

細骨材 (S2) : 島根県仁多郡産加工砂 (表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.01%)

粗骨材 (G) : 東京都八王子産硬質砂岩砕石 2005 (表乾密度 2.62g/cm³)

AE 減水剤 (AE) : リグニンスルホン酸系 AE 減水剤標準型

高性能 AE 減水剤 (SP) : ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤, 増粘剤 (VIS) : セルロース系

シリーズIIの配合は、単位水量を 155, 170, 185kg/m³ とし、スランブを 8~18cm 程度に変化させた 3 種類 (記号 55-1, 55-2, 55-3), および増粘剤を混入してノンブリーディングとしたもの (55-0), 細骨材の種類を変化させてブリーディング性状を変化 (55-4) させた計 5 種類である。

2.2 供試体の作製方法

コンクリートの練混ぜには強制パン型ミキサを用い、細骨材、セメント、水を投入後 90 秒間練混ぜ、その後粗骨材を投入して 60 秒練り混ぜる方法とした。表層透気試験用の供試体寸法は一辺 150mm の立方体とした。供試体の作製方法は突き棒による方法とし、コンクリートはすべて 20℃の室内にて打設した。そして、材齢 5 日まで封堪養生を行った後脱型し、試験材齢まで 20℃, 60%RH の室内に静置した。

2.3 試験項目

フレッシュコンクリートの試験は、スランブ、空気量、温度、および JIS A 1123 に準拠したブリーディング試験である。硬化コンクリートの試験は Torrent 法⁷⁾による表層透気試験、および圧縮強度試験 (JIS A 1108) である。表層透気試験は、図-1 に示すようにチャンバ内の圧力を真空ポンプにより減圧し、減圧を停止した後の復圧過程の測定結果より、表層透気係数 KT は式(1)によって算出される。表層透気試験は供試体側面を対象とし、材齢 28 および 91 日で実施した。

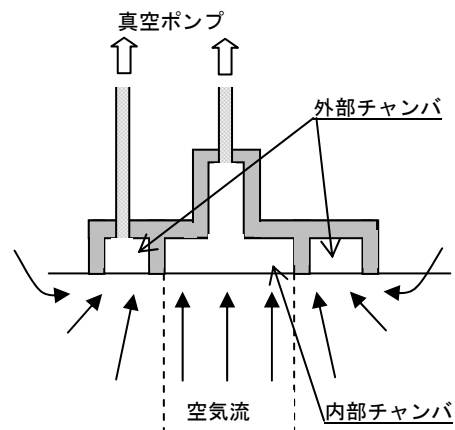


図-1 表層透気試験 (Torrent 法⁷⁾) の概要

$$KT = \left(\frac{V_C}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\epsilon Pa} \left[\frac{\ln \left(\frac{Pa + \Delta P}{Pa - \Delta P} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (1)$$

KT : Torrent 法による表層透気係数 (m²)

V_C : 内部チャンバの容積 (m³)

A : 内部チャンバの面積 (m²)

μ : 空気の粘性係数 (Ns/m²) (2.0×10⁻⁵)

ε : コンクリートの空隙率の想定値 (m³/m³) (通常 0.15)

Pa : 大気圧 (N/m²)

ΔP : 試験終了時までの復圧量 (N/m²)

T : 試験終了時間

T₀ : 試験開始時間 (=60s)

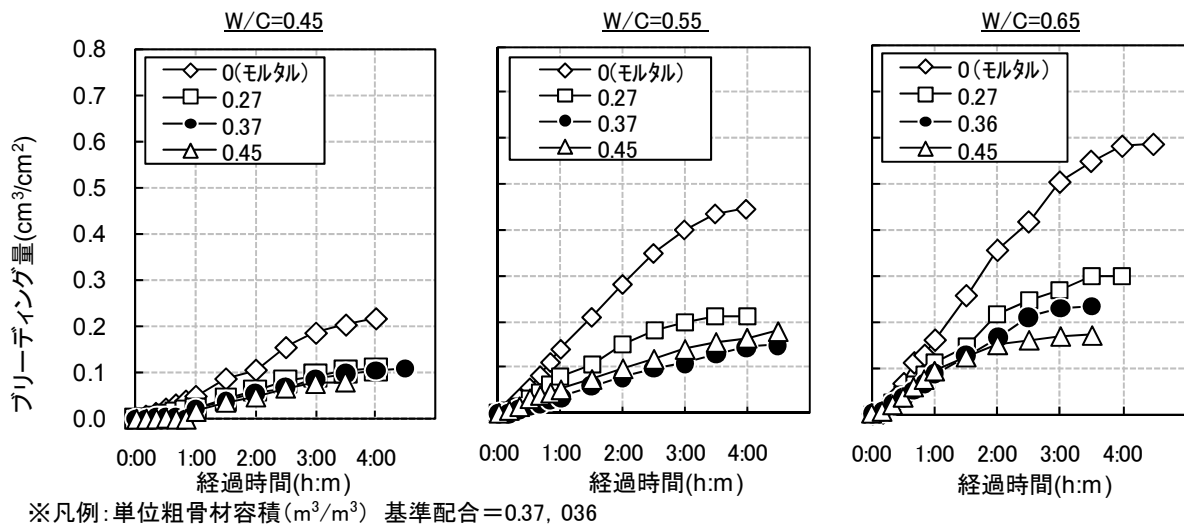


図-2 経過時間とブリーディング量の関係(シリーズI:粗骨材量変化)

表-2 フレッシュ試験結果

	記号	スランプ cm	空気 量 %	ブリーディング	
				量 cm³/cm²	率 %
I	45-S	18.0	5.5	0.11	2.2
	45-N	11.0	4.8	0.10	2.4
	45-L	3.0	3.8	0.08	2.2
	55-S	22.5	4.4	0.21	4.3
	55-N	11.0	4.7	0.15	3.1
	55-L	7.0	3.3	0.18	4.8
	65-S	20.0	5.8	0.30	5.5
	65-N	11.0	5.3	0.23	5.9
	65-L	3.0	3.4	0.17	4.1
II	55-0	19.0	3.1	0.00	0.0
	55-1	12.5	5.0	0.11	2.7
	55-2	19.0	5.1	0.12	2.7
	55-3	7.5	5.4	0.15	3.6
	55-4	10.5	5.8	0.40	8.7

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ試験結果

表-2にフレッシュ試験結果, 図-2に粗骨材量を変化させたときのブリーディング量の経時変化を水セメント比毎に示す。

粗骨材量を変化させたシリーズIにおいて, 基準配合のスランプはすべて11.0cmであるのに対し, 粗骨材量を増加させた配合のスランプ3~7cm, 減少させた配合では18~22.5cmとなり, 当然のことであるが単位水量の変化によってスランプは変化している。ブリーディング性状は図-2に示すようであって, 水セメント比の増加に伴ってブリーディング量は大きくなる傾向にあり, これはセメント量の低下に伴う保水量の低下によるものと考えられる。基準配合から単位粗骨材量を変化させた場合, 単位粗骨材量が小さい, すなわちモルタル量が増加すると, ブリーディング量は概ね大きくなった。ただし, 水

セメント比=0.55では, 粗骨材量を基準より増加させた場合にブリーディング量および率が大きくなっている。シリーズIでは, 各水セメント比におけるモルタルの材料構成比率は同一であるから, 各モルタルにおけるセメントおよび細骨材の保水量は一定と考えられる。よって, 粗骨材量の変化に伴うブリーディング性状の違いは, モルタルもしくはセメントペーストへの作用圧力が粗骨材量によって異なることや, 上昇したブリーディング水が粗骨材下面に留まることにより, 上面まで達する水量が変化したことによるものと考えられる。いずれにしても, 打込みや鉄筋間通過, また過剰締固めによって, 粗骨材とモルタルが分離した場合, ブリーディング性状は基準配合と比較して変化し, 粗骨材量が大きくなる場合よりは減少する場合にブリーディングは大きくなりやすいものと考えられる。

また, ブリーディング性状の影響の検討を目的としたシリーズIIのブリーディング量は0~0.4cm³/cm², ブリーディング率は0~8.7%であり, 使用材料が同一である55-1, 55-2, 55-3では単位水量が大きいほどブリーディング量が大きくなる傾向にある。

3.2 圧縮強度および表層透気試験の結果

(1) シリーズI

図-3にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。基準配合のセメント水比と圧縮強度には, 当然のことながら強い相関関係がある。粗骨材量を変化させた場合の圧縮強度は, 基準配合との差が2N/mm²程度であって概ね同等の値を示している。このように, 粗骨材量の変化による圧縮強度への影響は比較的小さい結果であった。

図-4に表層透気試験結果を水セメント比との関係で示す。水セメント比が小さく, セメント硬化体の組織が緻密になると, 表層透気係数KTは低下する傾向が確

認できる。水セメント比 0.2 の変化に対して、材齢 28 日の KT は $0.25 \sim 2.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、材齢 91 日では $0.7 \sim 7.6 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の範囲にあり、両者とも 1 オーダ程度の範囲にある。ここで、材齢に伴って KT が増加しているのは乾燥による含水率の低下の影響と考えられる。

単位粗骨材量が KT に及ぼす影響をみると、同一 W/C において、粗骨材量が変化すると KT は変化していることが示されている。例えば、含水率の影響が小さいと考えられる材齢 91 日の水セメント比=0.55 において、粗骨材量を変化させ場合の KT は基準配合より 3 倍程度大きく、水セメント比=0.65 では、モルタルと基準コンクリートの差が小さく、粗骨材量が基準より多い場合に KT が小さくなる傾向にあった。このように、単位粗骨材容積と KT の関係は、水セメント比によって異なる傾向となったが、水セメント比が一定の場合において粗骨材量が変化すると、圧縮強度よりも表層透気性に対してその影響が大きい。

図-5 は表層透気係数 KT を空隙率 ϵ によって修正した場合の水セメント比と修正 KT の関係を示したものである。すなわち、表層透気係数 KT の算出において式(1)に示した空隙率 ϵ を試験時においては正確に把握することができないため、 ϵ は通常 $0.15 \text{m}^3/\text{m}^3$ として算出される。実際の空隙率は粗骨材量が少ない配合ほど大きくなるから、基準配合の空隙率を $0.15 \text{m}^3/\text{m}^3$ とし、モルタル量の増減に比例した空隙率を仮定して KT の修正を試みた。この場合の修正係数は、モルタルの場合 0.63、単位粗骨材容積が 0.27 および 0.45 m^3/m^3 の場合、それぞれ 0.86, 1.14 であり、KT の測定結果に修正係数を乗じて修正 KT を求めたものである。修正前後の関係を比較すると、特にモルタルの修正 KT は基準配合のそれと近い値になっている。一方、コンクリートの修正 KT は、基準配合に対する修正係数が 0.86 もしくは 1.14 程度と比較的小さいこともあり、修正 KT は基準配合に概ね近づく傾向にあるが完全には一致していない。このように、KT が変化する一要因としては、粗骨材量の増減による空隙率の変化による見かけ上の変化が挙げられるが、これを考慮して修正した KT においても粗骨材量の変化によって KT は変化しているものと判断される。このことは、粗骨材の増減によるブリーディング性状の変化や粗骨材下面の空隙等が表層透気係数に影響していることを示唆しているものとする。

図-6 は、ブリーディング量および率と修正 KT の関係を示したものである。コンクリートについては水セメント比に関わらず、ブリーディング量が大きくなると修正 KT は大きくなる傾向にある。ただし、コンクリートと比較して、モルタルのブリーディング量は大きい、ブリーディング量の増加に伴う修正 KT の増加はコンク

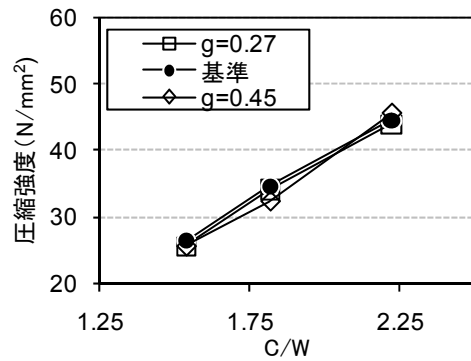


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係(シリーズ I)

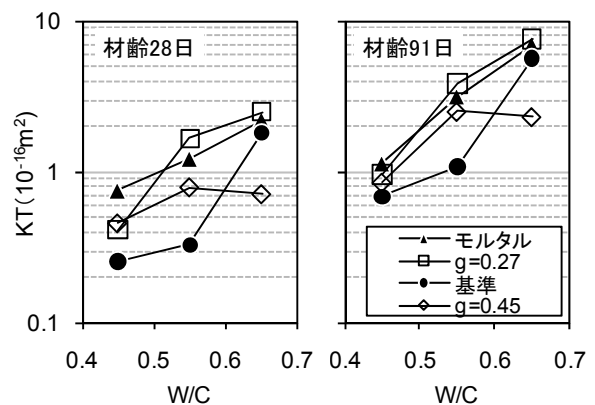


図-4 水セメント比と KT の関係 (シリーズ I)

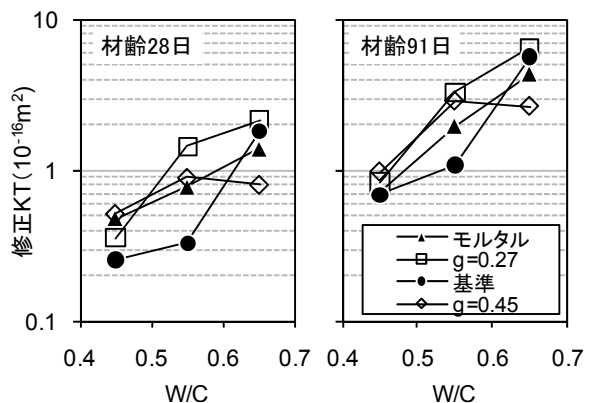


図-5 水セメント比と修正 KT の関係(シリーズ I)

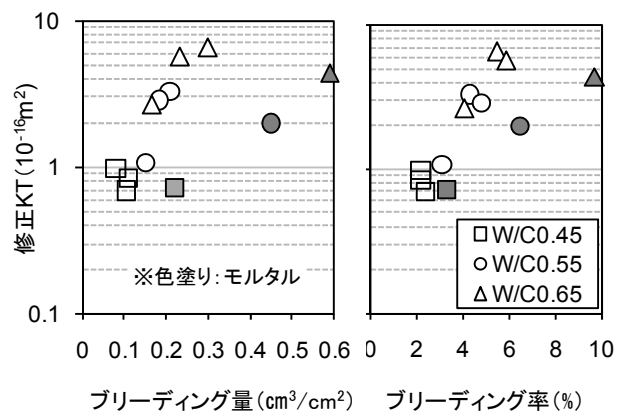


図-6 ブリーディング量 Bq, 率 Br と修正 KT の関係 (シリーズ I : 材齢 91 日)

リートより小さい。ブリーディング率は容器内の試料の水量に対するブリーディング水の割合であって、コンクリート中におけるモルタルの増減を考慮した値であることから、モルタルを含む試験結果全体のブリーディング率と修正 KT の関係 ($\log KT = 0.12 \times Br - 16.24$, $R^2 = 0.55$) は、ブリーディング量との関係 ($\log KT = 1.27 \times Bq - 16.00$, $R^2 = 0.29$) より相関が高くなっている。しかし、ブリーディング量の場合と同様に、モルタルの場合にはブリーディング率に対する表層透気係数増加の割合がコンクリートより小さく、表層透気係数に対しては粗骨材下面の空隙等が影響していると考えられる。

このように、鉄筋の間隙通過等によって基準配合から粗骨材が分離した場合、モルタル量の増加、ならびにブリーディング性状の変化等によって、表層透気性が変化することが示された。

(2) シリーズ II

図-7 に、シリーズ II の圧縮強度および表層透気試験の結果をコンクリートのブリーディング量との関係で示す。圧縮強度は $31.6 \sim 37.8 \text{ N/mm}^2$ の範囲にあり、ノンブリーディングの圧縮強度が大きく、ブリーディング量のある配合間ではその差が 3 N/mm^2 程度であった。表層透気係数 KT はブリーディング量が大きくなるにしたがって大きくなる傾向が認められ、この関係はシリーズ I と同様である。

3.3 表層透気性に及ぼすブリーディングの影響に関する考察

コンクリート中の余剰水の動きを考えると、マクロ的に見れば上面へ達したブリーディングの分だけ、供試体内の平均的な水セメント比は減少する。ただし、ブリーディング量が大きい配合ほど表層透気係数 KT が大きくなる事実は、内部に留まるブリーディング水等が影響していることを示唆している。コンクリート中のブリーディング水の挙動は非常に複雑であるが、上面まで達する水であるブリーディング量と KT には相関が認められることから、ブリーディング量が大きいほど内部に留まる水量が多い、また移動経路となった水みちが表層透気性へ影響しているものと考えられる。このように、ブリーディングの影響により、同一水セメント比のコンクリートにおいても表層透気性は異なる。

以下では、シリーズ I と II の結果を合わせ、水セメント比およびブリーディングが表層透気性に及ぼす影響を検討する。

図-8 に、ブリーディング率を用いて修正した供試体の平均的な水セメント比と材齢 91 日における $\log KT$ の関係を示す。図に示すように、修正水セメント比は最大で 0.05 程度低下しているが、修正水セメント比が同等でも、 $\log KT$ が異なることが分かる。ここで、表層透気試

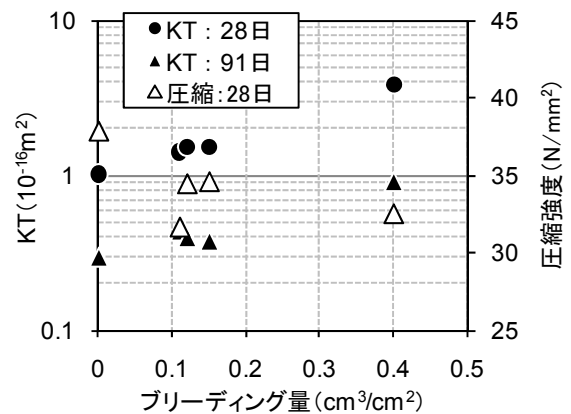


図-7 ブリーディング量と KT の関係 (シリーズ II)

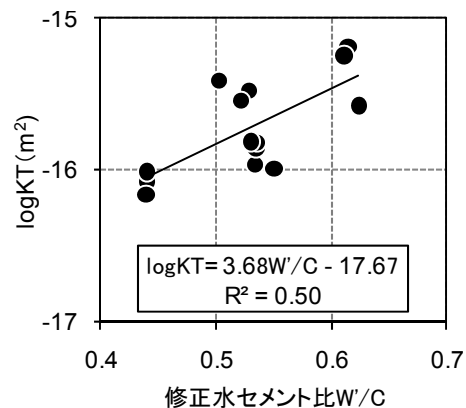


図-8 修正水セメント比と $\log KT$ の関係

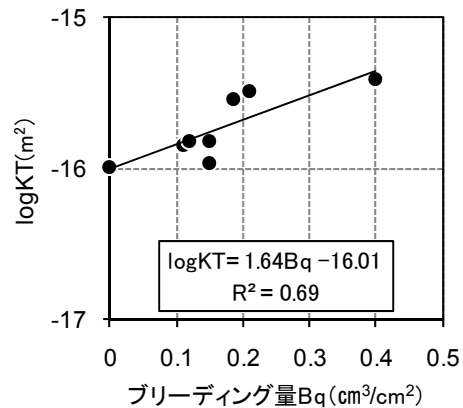


図-9 ブリーディング量と $\log KT$ の関係

験に用いた供試体とブリーディング試験の容器の長さおよび径は異なるため、寸法の小さい表層透気試験用の供試体のブリーディング量はブリーディング試験におけるそれより小さく⁸⁾、実際の水セメント比の平均的な変化は図-8 より小さいと想定される。

図-9 は、シリーズ I (水セメント比=0.55) とシリーズ II のブリーディング量と $\log KT$ の関係を合わせて示したものである。ブリーディング量が大きくなると $\log KT$ が大きくなり、シリーズ I, II によらず全体として概ね同様な関係が認められる。ブリーディング量に比例して

logKT が変化するとすれば、回帰式で示すようにブリーディング量 $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の変化に対して logKT は 0.164m^2 程度変化することになる。ブリーディング性状に及ぼす配合や使用材料の影響は高水セメント比ほど大きくなると考えられるが、KT に及ぼすブリーディングの影響が各水セメント比で同等とすれば、この係数を用いてブリーディング量がない場合の修正水セメント比と logKT (m^2) の関係から式 (2) が得られる。

$$\log\text{KT}=2.83\text{W}'/\text{C}+1.64\text{Bq}-17.49 \quad (2)$$

ここに、 W'/C : 修正水セメント比

$$\text{W}'=\text{W} (1-\text{Br}\times 0.01)$$

Br : ブリーディング率 (%)

Bq : ブリーディング量 (cm^3/cm^2)

図-10は、式(2)によって得られる logKT の予測値と logKT の実測値の関係を示したものである。水セメント比が大きくなると、ブリーディングが大きくなる傾向にあると考えられることから、式(2)の係数で表層透気係数に及ぼす両者の影響程度を評価することは一概にできないが、図に示す関係は両者を考慮することで合理的に表層透気係数を評価できる可能性を示唆しているものとする。

このように、小型供試体レベルにおいてもコンクリートのブリーディング性状の違いが表層透気性に影響することが定量的に示された。部材寸法の大きい構造体かぶりコンクリートの表層透気性に対してはコンクリートのブリーディングの影響が小型供試体より大きくなり、またブリーディング性状はコンクリート温度等によっても異なる。このため、構造体かぶりコンクリートにおいて所要の表層透気性を確保するためには、水セメント比に加え、使用するコンクリートのブリーディング性状を考慮することが有効と考えられる。

4. まとめ

本研究では、粗骨材の分離およびブリーディングが表層透気性に及ぼす影響を検討することを目的とし、小型供試体レベルの実験による検討を行った。本研究の範囲で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 粗骨材の材料分離により、コンクリート中のモルタル量が増加すると、ブリーディングは大きくなる傾向にあり、この傾向は高水セメント比のコンクリートで顕著である。
- (2) 粗骨材が分離した場合の表層透気係数は、分離したコンクリートのブリーディング量と相関関係にある。
- (3) 同一水セメント比のコンクリートにおいても、

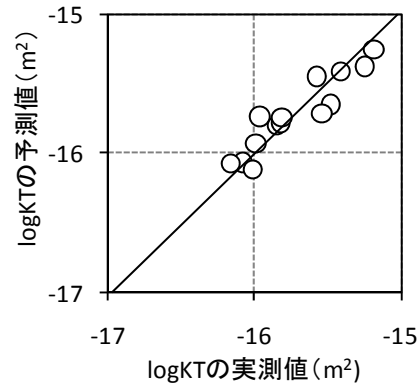


図-10 logKT の実測値と予測値の関係

ブリーディング性状の相違によって、表層透気係数は変化する。すなわち、表層透気係数はノンブリーディングの配合で最も小さくなり、ブリーディング量の増加に伴って大きくなる。また、ブリーディングの影響は圧縮強度より表層透気性に対して顕著である。

参考文献

- 1) 小沼 寛享, 大野 誠彦, 城門 義嗣, 加賀谷 誠 : 普通コンクリートの締固め性能とかぶり部の凍結融解抵抗性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.891~896, 2007
- 2) 石田哲也, 加藤智治, 二宮宗, 前川宏一 : 鉄筋コンクリート部材に発生する材料不均一性の定量評価, 土木学会論文集, No.669 /V-50, 187-201, 2001.2
- 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
- 4) 松崎晋一郎, 吉田亮, 岸利治 : 単位水量と水セメント比がコンクリート表層の透気性に及ぼす影響とその養生依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.757-762, 2009
- 5) 尾上幸造, 亀澤靖, 松下博通 : 鉄筋間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, pp.119-128, 2006.2
- 6) 加賀谷誠, 徳田弘, 川上洵, 熊谷雅毅 : コンクリートの材料分離に及ぼす細骨材率の影響, コンクリート工学年次論文集, pp.225-228, Vol.3, 1981
- 7) R.J. Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site. Materials and Structures, vol.25, No.6, pp.358-365, 1992
- 8) 吉田彌七 : 新しいコンクリートの沈下に関する数理論的考察, 土木学会論文集第 14 号, pp.6-13, 1952.9