

実構造物を対象とした特殊シートを用いた長期水分逸散抑制養生の効果に関する一考察

A Study Based on Site Structures of the Effect of Application of Long-Term Curing Using Water-Repellent Sheets

仲 森 稔 晃¹⁾ 渡 邊 賢 三 藤 岡 彩 永 佳 柿 本 啓 太 郎
 芦 澤 良 一 吉 田 祐 麻 中 谷 俊 晴 坂 井 吾 郎

要 約

高撥水性シートを用いた長期間の湿潤養生を7つの実構造物に適用し、非破壊試験によって物質透過性が向上していることを確認した。さらに、その品質向上効果について、セメント種類、単位水量および水セメント比などの配合条件を変えて分析を加えた。その結果、コンクリートの水セメント比と表面吸水速度の比例関係を確認するとともに、長期の湿潤養生により表面吸水速度を低減できること、また、水セメント比が大きい場合に低減効果が高いことを明らかにした。これは、水セメント比が大きい場合に生じ易くなる自由水の逸散をシート養生により抑制することで水和反応が継続してコンクリート表面が緻密化し、結果として、表面吸水速度を低減できるためと考えられた。

目 次

- I. はじめに
- II. シート養生の現場適用
- III. シート養生の効果に関する分析
- IV. おわりに

I. はじめに

東日本大震災の復興工事が進められていることや、社会基盤の大規模更新時代の到来に向けて、新たに構築するコンクリート構造物の耐久性向上が求められている。耐久性を向上させる手法として、配合、材料あるいはかぶりの変更などが考えられるが、施工段階においてこれらの変更は採用されにくい。例えば、水セメント比の低減は、コンクリート表面の緻密化に極めて有効であるものの、部材断面の大きい構造物では温度ひび割れの発生確率が增大してしまう場合がある。セメント種類の変更は、発注者の理解が得られても地域やプラントの地理的・設備的な条件によって、現実的には変更できない場合が多い。そのため、配合、材料などによらず、施工の工夫によってコンクリート構造物の品質を向上させることが望ましい。そこで、筆者らはコンクリートの持つポテンシャルを最大限に引き出し品質を向上させる方法として、Fig.1に示すように予め型枠内面に高撥水性のシートを貼付する湿潤養生方法（以下、シート養生と称する）を考案し、現場に適用した。このシート養生は、型枠を取り外した後においても、シートがコンクリート表面に存置されるため、コンクリートの表面を一度も乾燥させることなく、完全な水分逸散抑制を実現するものである。このシート養生について、これまでの検討により、長期間の水分逸散抑制養生によって、塩害抵抗性や中性化抵抗性が向上することやシートの高い撥水性によってブ

リーディングと表面気泡が減少することを明らかにしている²⁾。

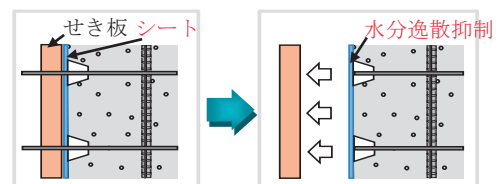
本論文では、実構造物に適用したシート養生がコンクリートの物質透過性に与える影響を定量的に把握することを目的として、複数の現場におけるデータを分析、評価した結果について報告する。

II. シート養生の現場適用

1. 分析の目的

養生がコンクリート構造物の性能に与える影響を定量的に評価することは比較的難しい。高品質な材料と比較するような試験とは異なり、例えば、養生方法の効果の差異を塩水浸漬試験で比較しようとすると、塩水で養生されてしまい正確に評価ができない場合がある。また、型枠界面のブリーディングや脱型直後の強風や日射などは、実構造物では日常的に生じる現象であるが、室内試験では再現が難しく、これらの影響を適切に評価できない。

ここで、コンクリート構造物に求められる養生とは、セメント種類、配合、環境条件などによって方法や期間などが異なるものと考えられる。しかしながら、現状のコンクリート標準示方書では、セメント種類と外気温に対して標準的な湿潤養生期間が示されているのみである。これらを解決するためには、まず、セメント種類や配



コンクリート打込み せき板取外し時(脱型時)

Fig.1 シート養生の概念図
(Method of Sheet Curing)

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード: 養生, 表層品質, 耐久性, 透気係数





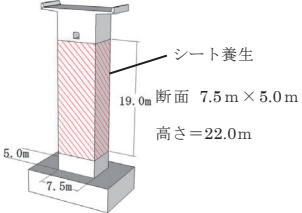
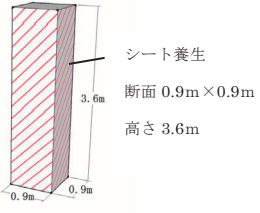
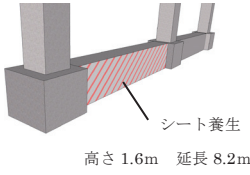




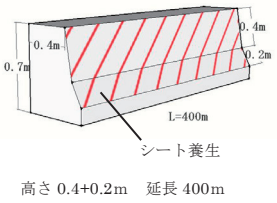
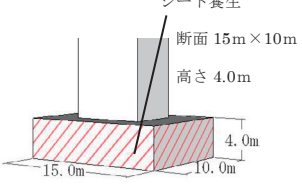
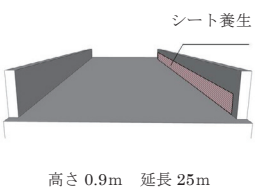
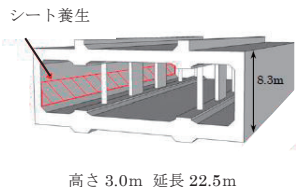
Keywords: curing, surface layer quality, durability, permeability coefficient, water absorption rate

Table 1 適用現場の配合と試験項目
(Mix Proportions and Measurement Item of Site)

No.	工種	部位	セメント種類	スランブ (cm)	水セメント	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				測定項目		
							水	セメント	細骨材	粗骨材	透気係数	吸水速度	表面含水率
A ¹⁾	橋梁	橋脚	普通	8.0	42.5	37.3	165	388	650	1120	○	○	○
B ³⁾	鉄道	柱	普通	12.0	50.0	45.2	170	340	810	976	○	○	○
C ⁴⁾	鉄道	地中梁	普通	12.0	53.0	44.3	166	313	786	1037	○	○	○
D ⁵⁾	橋梁	壁高欄	高炉 B 種 ^{※1}	12.0	44.0	40.1	154	350	727	1112	○	○	○
E ⁶⁾	橋梁	フーチング	高炉 B 種	8.0	50.5	41.6	156	309	757	1091	○	○	○
F ⁷⁾	ボックスカルバート	堅壁	高炉 B 種 ^{※2}	8.0	54.4	44.7	161	296	809	1037	○	—	○
G ⁸⁾	ボックスカルバート	側壁	低熱	15.0	54.0	44.8	164	303	812	1040	○	○	○

※1 膨張材を内割り 20 kg で使用し、便宜上セメントと標記、※2 低発熱・収縮抑制型高炉セメント

Table 2 現場への適用状況
(Application Status of Site)

	橋梁全景 A, D, E	A 橋梁一橋脚	B 鉄道一柱	C 鉄道一地中梁
適用状況				
適用寸法				
	D 橋梁一壁高欄	E 橋梁一フーチング	F ボックスカルバート一堅壁	G ボックスカルバート一側壁
適用状況				
適用寸法				

合ごとに養生の効果について把握することが必要となる。

以上のことをふまえ、本章では、実構造物に適用した養生方法の効果について評価することを目的として、コンクリートの物質透過性に関するデータの分析を試みた。

2. 適用現場

シート養生の適用現場の一覧を Table 1 および Table 2 に示す。各種条件の異なる、橋梁（フーチング、橋脚、壁高欄）、鉄道（ラ

メン高架橋の柱、地中梁）、ボックスカルバート（堅壁、壁）など7つの部材に適用した。セメント種類は4種類であり、普通ポルトランドセメント（以下、Nと称する）、高炉セメントB種（以下、BBと称する）、低発熱・収縮抑制型高炉セメント、低熱ポルトランドセメント（以下、Lと称する）が用いられている。なお、BBに膨張材を使用したケースおよび低発熱・収縮抑制型高炉セメントを含めて「BB」と表記した。コンクリートは、水セメント比（以下、W/C）

42.5~54.4%, スランプ 8~15cm の土木の一般的なコンクリートであり, 打込みは土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に準じて施工された。

3. 養生日数および測定材齢

各現場における養生方法, 養生日数および計測材齢を Table 3 に示す。土木構造物の湿潤養生方法の一つであるせき板存置(以下, 図中ではせき板)と, シート養生を比較した。せき板存置の期間には条件によって異なり 5~21 日であった。これに対し, シート養生は, せき板存置の期間を含んで, 91 日を標準として 18~290 日とした。なお, 上述の養生終了後から, 計測材齢まで外気に曝した。

4. 評価試験

試験の項目を Table 4 に示す。Torrent 法⁹⁾による表層透気試験および SWAT 法¹⁰⁾による表面吸水速度試験を実施した。また, 測定時のコンクリートの表面含水率を高周波容量式水分計により測定した。測定数は, Torrent 法では 1 箇所あたり 3 点, SWAT 法では 1 箇所あたり 2 点測定した。表面含水率は 1 箇所あたり 9 点測定した。

5. 物質透過性の試験結果

Fig.2 に 7 つの部材における表面含水率と透気係数の関係を示す。縦軸の透気係数には「優」~「劣」の評価ランクを 4 段階¹¹⁾で併記した。透気係数の全データの平均値は, せき板存置で $0.091 \times 10^{-16} \text{m}^2$, シート養生で $0.067 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となり, 表面含水率の平均値は, せき板存置で 5.2%, シート養生で 6.0% だった。シート養生の方が全体的に表面含水率が高く, 透気係数が小さい傾向となったのは, シート養生によってコンクリート構造物表面のセメントの水和が継続して進行し, 空隙径分布が小径側にシフトすることで, 気中暴露期間においても水分が逸散しにくくなったためと考えられる。

Fig.3 に 7 つの部材における表面含水率と表面吸水速度の関係を示す。縦軸の表面吸水速度には「良」「一般」の評価ランクを 2 段階¹⁰⁾で併記した。ここで, 表面吸水速度の全データの平均値は, せき板存置で $0.154 \text{ml/m}^2/\text{s}$, シート養生で $0.101 \text{ml/m}^2/\text{s}$ となった。Fig.2 に示した透気係数と同様に, シート養生の方が全体的に表面含水率が高く, 表面吸水速度も小さい傾向となっており, この傾向がシート養生の効果と考えられる。Fig.2, Fig.3 の結果をセメント種類, 単位水量, 水セメント比などの項目で分析した結果について次章で述べる。

Table 3 養生・計測材齢

(Material Age of Curing and Measurement)

No.	養生方法		材齢 (日)				
	養生種別	養生日数	せき板取外し	シート撤去	気中暴露	計測 ^{※2}	
						A	B
A	シート	123 日	14	123	123~131	131	131
	シート	187 日	10	187	187~194	194	194
B	せき板	12 日	12	-	12~91 12~419	419	91
	シート	12 日	12	12	12~91 12~419	419	91
	シート	28 日	12	28	28~91 28~419	419	91
	シート	91 日	12	91	91~91 91~419	419	91
C	せき板	5 日	5	-	5~32	32	32
	シート	28 日	5	28	28~32	32	32
D ^{※1}	せき板①	5 日	5	-	5~231	231	231
	シート①	91 日	5	91	91~231	231	231
	せき板②	5 日	5	-	5~223	223	223
	シート②	91 日	5	91	91~223	223	223
	せき板③	5 日	5	-	5~185	185	185
	シート③	91 日	5	91	91~185	185	185
E	せき板	7 日	7	-	7~32	32	32
	シート	28 日	7	28	28~32	32	32
F	せき板	18 日	18	-	18~24	24	24
	シート	18 日	18	18	18~24	24	24
G	せき板	21 日	21	-	21~168	168	168
	シート	84 日	7	84	84~168	168	168

※1 打込みは 3 回に分けて実施した

※2 A 表層透気試験, B 表面吸水速度試験

Table 4 試験項目

(Measurement Method)

試験項目	測定方法	摘要
透気係数	Torrent 法	3 点/箇所
表面吸水速度	SWAT 法	2 点/箇所
表面含水率	高周波容量式 (20MHz)	9 点/箇所

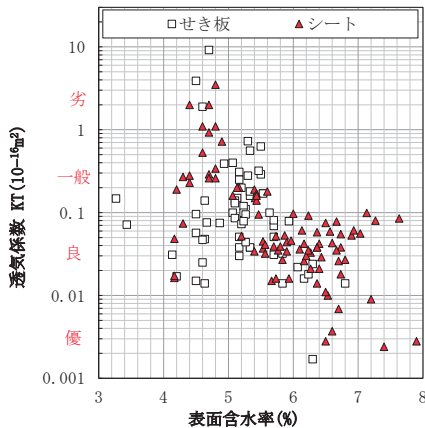


Fig.2 表面含水率と透気係数 (7 現場)

(Surface Moisture Content and Permeability Coefficient)

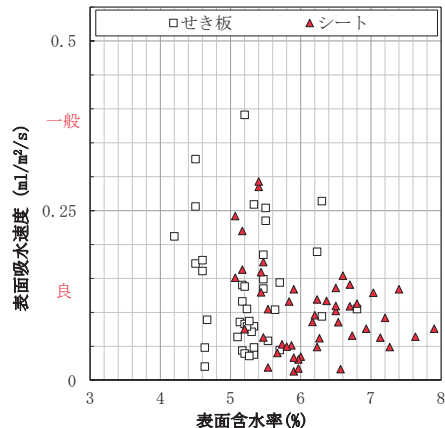


Fig.3 表面含水率と表面吸水速度 (7 現場)

(Surface Moisture Content and Water Absorption Rate)

Ⅲ. シート養生の効果に関する分析

1. セメント種類による比較

(1) 透気係数の比較

Fig.4 にセメント種類による透気係数の比較を示す。3 種類のセメント種類において透気係数の値はせき板存置に比べ、シート養生の方が小さくなり、その傾向は特に BB,L で顕著になった。これは、BB はスラグの反応に入念な湿潤養生が必要であること、L は水和反応に時間を要することなどから、シート養生による長期間の水分逸散抑制養生の効果が明確に表れたためと考えられる。

(2) 表面吸水速度の比較

Fig.5 にセメント種類による表面吸水速度の比較を示す。透気係数と同様に表面吸水速度の値はせき板存置に比べシート養生の方が小さくなった。その傾向は特に L で顕著となり、この理由は透気係数のケースと同様と考えられる。

(3) 標準偏差の傾向

Table 5 に透気係数および表面吸水速度の測定結果と標準偏差を示す。透気係数および表面吸水速度の標準偏差は全てのケースでせき板存置に比べシート養生の方が小さくなった。これは、自然環境下に曝された実構造物ではせき板取外し後の風雨や日射などによって部位、位置ごとに品質がばらついたことに対し、シート養生は均一な湿潤養生が継続されることによって品質の均質化が生じたものと考えられる。

2. 表面含水率に基づいたセメント種類の評価

(1) セメント種類による透気係数の評価

透気係数は、コンクリートの空隙構造や表面含水率によって大きな影響を受けるとされる。そこで、Fig.2 に示した表面含水率と透気係数のデータをセメント種類ごとに表示した結果を Fig.6 に示す。N では、せき板とシート養生の違いとして、表面含水率 4%程度の低いケースにおいてもシート養生にのみ透気係数が 1 以下の結果が見られた。つまり、一般的に表面含水率が低いほど透気係数が大きくなるが、シート養生をしたケースでは、表面含水率が低くても、透気係数が小さい場合があり、これがシート養生による緻密化によるものと考えられる。BB では、せき板とシート養生の違いとして、シート養生の方が全体的に表面含水率が高く、透気係数が小さい傾向が確認できる。これは、シート養生による緻密化によってコンクリート中の自由水が逸散しにくくなったためと推察した。L では、せき板とシート養生の違いとして、表面含水率はほぼ同程度でシート養生の方が透気係数が小さいことが確認できる。表面含水率が等しいことから、この差異は、空隙構造に起因するものと考えられる。

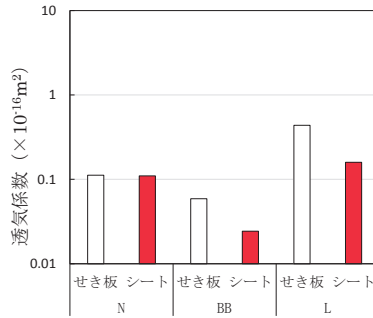


Fig.4 セメント種類と透気係数の比較
(Type of Cement and Permeability Coefficient)

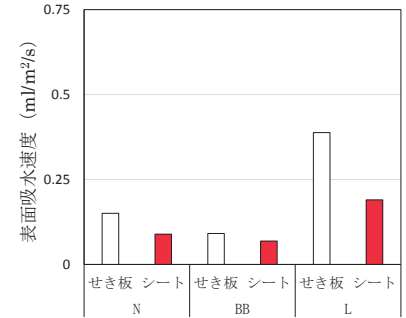


Fig.5 セメント種類と表面吸水速度の比較
(Type of Cement and Water Absorption Rate)

Table 5 測定結果と標準偏差
(Result of Measurement and Standard Deviation)

ケース	項目	平均値		標準偏差		測定数 n	
		透気係数 (10 ⁻¹⁶ m ²)	表面吸水速度 (ml/m ² /s)	透気係数	表面吸水速度	透気係数	表面吸水速度
N	せき板	0.112	0.150	2.642	0.043	12	3
	シート	0.110	0.089	0.696	0.042	40	13
BB	せき板	0.059	0.091	0.065	0.076	43	30
	シート	0.024	0.069	0.026	0.038	42	29
L	せき板	0.437	0.388	0.155	0.285	8	8
	シート	0.159	0.190	0.031	0.077	9	8

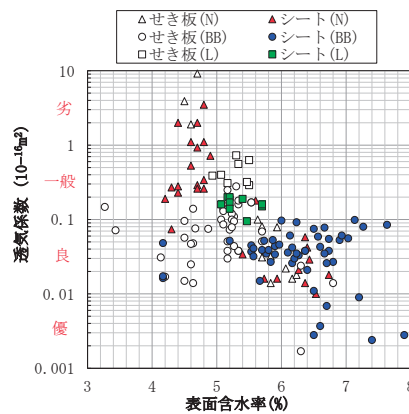


Fig.6 表面含水率と透気係数
(Surface Moisture Content and Permeability Coefficient)

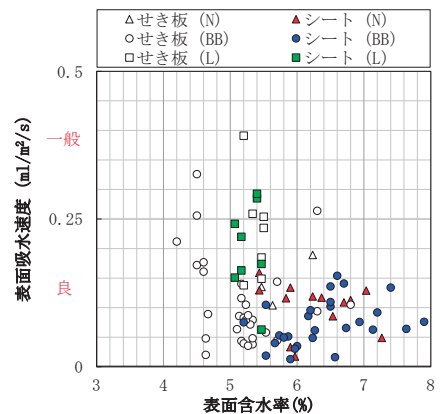


Fig.7 表面含水率と表面吸水速度
(Surface Moisture Content and Surface Water Absorption Rate)

以上より、透気係数が小さくなる理由として、空隙構造が同じで含水率が高い場合、空隙が緻密で含水率も高い場合、空隙が緻密で含水率は等しい場合、などが想定された。なお、現状ではこの違いがセメント種類によるものとは言えない。

(2) セメント種類による表面吸水速度の評価

Fig.3 に示した表面吸水速度のデータをセメント種類ごとに表示した結果を Fig.7 に示す。N および BB においては、シート養生の効果によって表面含水率が高く、そして表面吸水速度も小さい傾向が確認された。L では、表面含水率が 5%程度と比較的小さい場合で比較してもせき板存置に比べシート養生の結果が小さい傾向が得られた。

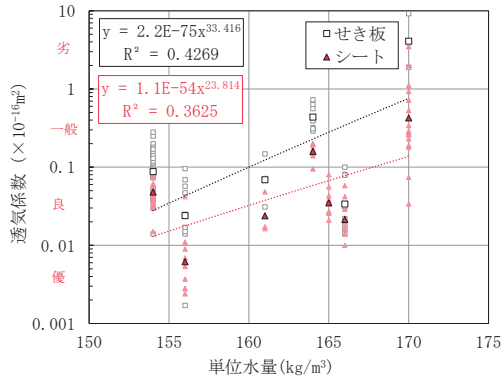


Fig.8 単位水量と透気係数の関係

(Unit Water Volume and Air Permeability Coefficient)

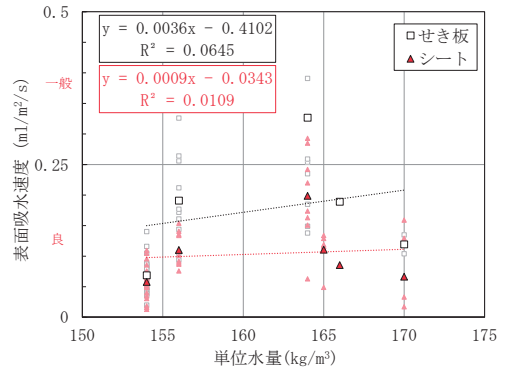


Fig.9 単位水量と表面吸水速度の関係

(Unit Water Volume and Surface Water Absorption Rate)

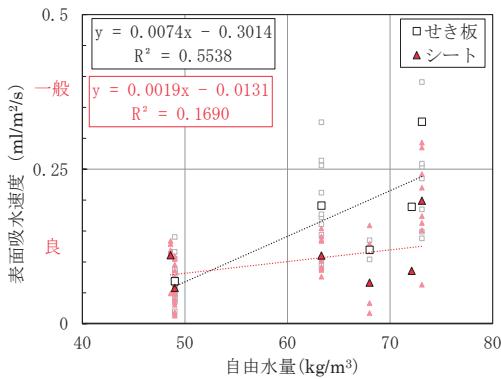


Fig.10 自由水量と表面吸水速度の関係

(Free Water Volume and Surface Water Absorption Rate)

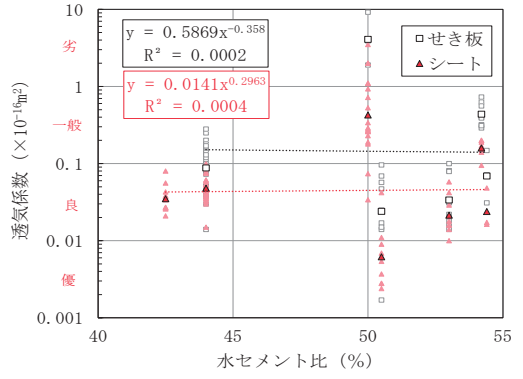


Fig.11 透気係数と水セメント比

(Air Permeability Coefficient and Water Cement Ratio)

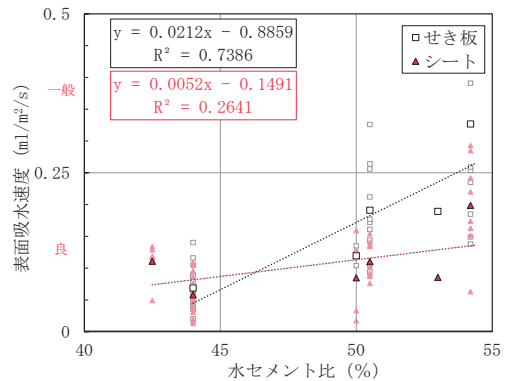


Fig.12 表面吸水速度と水セメント比

(Surface Water Absorption Rate and Water Cement Ratio)

3. 単位水量による分析

(1) 単位水量による透気係数の分析

透気係数のデータを単位水量で整理した結果を Fig.8 に示す。図示するように、透気係数と単位水量に比較的高い相関があり、同じ単位水量に対して、せき板存置に比べシート養生の方が透気係数が小さくなる傾向を示した。

表面吸水速度のデータを単位水量で整理した結果を Fig.9 に示す。図示するように、単位水量と表面吸水速度に明確な相関は確認できなかった。そこで、式 (1) に示すように、セメントの水和に必要な水量をセメント重量の30%と設定し、それ以外の水を自由水と仮定し、自由水量と表面吸水速度の関係を求めた。その結果を Fig.10 に示す。

$$W_f = W - C \times 0.3 \quad \dots (1)$$

ここで、 W_f : 自由水量(kg/m³)、 W : 単位水量(kg/m³)、 C : 単位セメント量(kg/m³)。

Fig.10 に示すように、せき板存置の場合、表面吸水速度と自由水量に比較的高い相関が確認された一方で、シート養生の場合は、表面吸水速度が小さかつほぼ一定値となった。ここで、養生方法の種類に限らず、養生後の気中暴露によってコンクリート表面近傍の自由水が逸散し、この逸散量が多いほど表面吸水速度が大きくなると考えられる。せき板存置に比べ、シート養生の表面吸水速度が小

さくなったのは、養生の効果によって空隙構造の緻密化や複雑化が生じ、同じ自由水量を有していても逸散しにくい構造になっていたためと推察される。

4. 水セメント比による分析

(1) 水セメント比による透気係数の分析

透気係数のデータを水セメント比で整理した結果を Fig.11 に示す。図示するように透気係数と水セメント比に明確な相関は見られないものの、同じ水セメント比では、せき板存置に比べシート養生の方が透気係数が小さくなった。

(2) 水セメント比による表面吸水速度の分析

表面吸水速度のデータを水セメント比で整理した結果を Fig.12

に示す。図示するように、せき板存置のケースでは水セメント比が大きいかほど表面吸水速度も比例して大きくなった。これに対し、シート養生のケースでは水セメント比が大きくなっても表面吸水速度は、ほぼ同等で近似線の傾きは著しく小さくなった。これは、シート養生により表面を緻密化させることで、水セメント比を小さくすると同等の効果が得られ、特に水セメント比が大きい場合にその効果が大きくなることを明らかにした。

IV. おわりに

本検討では、実現場を対象として養生方法の差異が物質透過性に与える影響についてセメント種類、単位水量、水セメント比など各種要因から分析した。その結果から得られた知見を下記にまとめる。

(1) セメント種類と透気係数および表面吸水速度の評価

- ① せき板存置に比べシート養生の標準偏差が小さくなった。これは、せき板存置のケースはせき板取外し後に外気や雨水などに曝されて品質がばらついたことに対し、シート養生は均質な湿潤養生を継続したためと考えられた。
- ② 高炉セメントB種、低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートのように長期養生が必要なセメントにおいてシート養生の効果が顕著となる可能性が示唆された。

(2) 単位水量および水セメント比と表面吸水速度の評価

- ① 単位水量と表面吸水速度は相関が見られなかったものの、配合から推定した自由水量との相関を評価したところ、せき板存置は相関が高く、シート養生は相関が小さくなった。これは、せき板存置は養生後の気中暴露によってコンクリート表面近傍の自由水が逸散するため、自由水量が多いほど表面吸水速度が大きくなったためと考えられる。一方で、シート養生は、長期養生による、表層の緻密化によってせき板存置と同等の自由水量であっても、表面吸水速度が小さくなった。
- ② せき板存置のケースでは水セメント比が大きいかほど表面吸水速度も比例して大きくなった。これに対し、シート養生のケースでは水セメント比が大きくなっても、表面吸水速度はほぼ同等で近似線の傾きは小さくなった。これは、シート養生により表面を緻密化させることで、表面吸水速度を低減し、

水セメント比が増加するほどその効果が高いことを示している。

参考文献

- 1) 例えば、柿本ら; 橋脚における熱可塑性樹脂シートを用いた長期間の水分逸散防止養生, 土木学会第 71 回年次学術講演概要集,2016,pp.345-346.
- 2) 石田ら;熱可塑性樹脂シート養生によるコンクリートの表面改質, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集,2014,pp.117-118.
- 3) 芦澤ら;柱部材を事例とした長期間にわたる水分逸散抑制養生の効果, 土木学会第 72 回年次学術講演概要集, 2017,pp.1115-1116.
- 4) 中谷ら;熱可塑性樹脂シートによる水分逸散抑制養生の合理化に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演概要集, 2017,pp.1117-1118.
- 5) 仲森ら;橋梁壁高欄における熱可塑性樹脂シートを用いた長期湿潤養生の効果, 土木学会第 72 回年次学術講演概要集, 2017,pp.1123-1124.
- 6) 村田ら;熱可塑性樹脂シートを用いた養生による橋梁フーチングの品質向上, 土木学会第 70 回年次学術講演概要集, 2015,pp.575-576.
- 7) 渡邊ら;熱可塑性樹脂シートによる表面品質向上手法の実構造物への適用, 土木学会第 69 回年次学術講演概要集, 2014,pp.135-136.
- 8) 柿本ら;ボックスカルバート側壁における長期間の水分逸散抑制養生, 土木学会第 72 回年次学術講演概要集, 2017,pp.1119-11120.
- 9) R.J.TORRENT ; A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*,vol.25,1992, pp.358-365.
- 10) 林和彦, 細田暁;コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, *コンクリート工学年次論文集*,Vol.33,No.1, 2011.
- 11) Torrent, R., & Frenzer, G. ; A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete. In *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*,1995,pp.985-992.

A Study Based on Site Structures of the Effect of Application of Long-Term Curing Using Water-Repellent Sheets

Toshiaki Nakamori, Kenzo Watanabe, Saeka Fujioka, Keitaro Kakimoto, Ryoichi Ashizawa, Yuma Yoshida, Toshiharu Nakatani and Goro Sakai

The authors subjected seven actual structures to long-term curing using water-repellent sheets and then confirmed using a nondestructive test that the substance permeability was improved. They also analyzed the effect on quality improvement of varying the conditions under which the concrete was blended, including cement type, unit water volume, and water-cement ratio. As a result, they confirmed the proportional relationship between the water-cement ratio of the concrete and the surface water absorption rate under long-term curing and that the suppressing effect is strong when the water-cement ratio is large. This is because the hydration reaction continues owing to reduced dissipation of free water due to sheet curing, making the concrete surface become dense, and as a result it is thought that the surface water absorption rate can be reduced.