

各種コンクリート配合に対する表層品質試験評価に関する一考察

A STUDY ON EVALUATION OF SURFACE QUALITY TEST FOR VARIOUS CONCRETE MIXPROPORTIONS

澤村 淳美*1, 大橋 英紀*2, 土師 康一*3, 田中 徹*2
 Atsumi SAWAMURA, Hideki OHASHI, Kouichi HAZE and Tooru TANAKA

As a method of confirming the quality of the surface layer at the site of civil engineering work, use cases of surface air permeability test and surface water absorption test are increasing. However, with regard to these test methods for evaluating hardened concrete, it is not sufficiently clarified about the compounding conditions of fresh concrete and the influence of the test conditions on the evaluation result. In this paper, we confirmed the influence of blending condition and test condition on test results using specimens formulated and adjusted by indoor test. As a result of the test, the influence of the strength development of the structure and the water content on the surface on the test result is dominant, and it is important to evaluate the surface quality by using both tests taking the characteristics of the test method into account I found out.

Keywords : Surface air permeability test, Surface water absorption test, Coefficient of air permeability, Water absorption speed
 表層透気試験, 表面吸水試験, 透気係数, 吸水速度

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質確保の取組みの一環として、施工段階における品質確保に向けた様々な取組みが試行されている¹⁾。なかでも、コンクリート構造物の長期耐久性を左右するかぶりコンクリートの品質を確認し評価することは重要であり、種々の試験方法が提案、実用化されている。このような流れの中、コンクリート構造物の表層品質を評価する方法として、硬化コンクリートの非破壊試験手法である表層透気試験や表面吸水試験の採用事例が増加している²⁾。しかし、コンクリートの配合条件や試験条件に起因する試験結果の差や、試験方法の違いによる評価の差については十分に明らかになっていない。

そこで、本稿では、施工現場で表層品質を評価する際のひとつの指標として、上記 2 種類の非破壊試験について、室内試験により配合調整した供試体を対象に実施し、その結果を基に配合条件や試験条件が試験結果に及ぼす影響について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 試験配合および使用材料

表-1 に使用材料、表-2 に試験配合を示す。本試験では、シリーズ I としてコンクリートの結合材種別による比較を行い、シリーズ II として配合条件による比較を行った。

表-2 に示すように、シリーズ I では、セメント 4 種類に加え、普通ポルトランドセメントに膨張材

20kg/m³を置換した配合と、普通ポルトランドセメントの 70%を高炉スラグ微粉末で置換した配合の合計 6 種類の配合 (No.1~6) を比較した。配合条件として、水セメント比を一定 (W/C=50% (単位水量: 170kg/m³, 単位結合材量: 340kg/m³)) とし、フレッシュ性状として、スランブを 15±2.5cm, 空気量を 4.5±0.5%で調整した。なお、No.1 配合については、透水型枠シートの有無についても比較した。

また、シリーズ II では、普通ポルトランドセメント配合 (No.1) を基本に、空気量 (2%, 7%), 単位水量 (W=150kg/m³, 190kg/m³), 水セメント比 (W/C=40%, 60%) の各パラメータを増減させ、化学混和剤の使用量によりフレッシュ性状を調整した 6 種類の配合 (No.7-1~9-2) の供試体を作製した。

表-1 使用材料

種類	記号	産地、物性等
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
	M	中庸熱ポルトランドセメント (密度 3.21g/cm ³)
	H	早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm ³)
	BB	高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm ³)
混和材	EX	膨張材 (密度 3.16g/cm ³)
	BF	高炉スラグ微粉末 (密度 2.89g/cm ³)
水	W	上水道水
細骨材	S	掛川産陸砂 (表乾密度 2.57g/cm ³)
粗骨材	G	青梅産碎石 (表乾密度 2.65g/cm ³)
混和剤	Ad	AE減水剤標準形
	SP	高性能AE減水剤標準形

*1 戸田建設土木工事技術部

*2 戸田建設技術開発センター 修士 (工学)

*3 戸田建設土木工事技術部 修士 (工学)

Civil Engineering Dept., TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Civil Engineering Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

表-2 試験配合

	No.	配合名	W/C(B)	s/a	Air	単位量(kg/m ³)									
			(%)	(%)	(%)	W	N	M	H	BB	EX	BF	S	G	
シリーズⅠ 結合材	1	N	50.0	47.0	4.5	170	340	-	-	-	-	-	-	818	951
	2	M	50.0	47.2	4.5	170	-	340	-	-	-	-	-	823	951
	3	H	50.0	46.9	4.5	170	-	-	340	-	-	-	-	816	951
	4	BB	50.0	46.7	4.5	170	-	-	-	340	-	-	-	807	951
	5	N+EX	50.0	47.0	4.5	170	320	-	-	-	20	-	-	818	951
	6	N+BF	50.0	46.4	4.5	170	102	-	-	-	-	238	-	800	951
シリーズⅡ 配合条件	7-1	Air:2.0	50.0	48.9	2.0	170	340	-	-	-	-	-	-	882	951
	7-2	Air:7.0	50.0	45.0	7.0	170	340	-	-	-	-	-	-	754	951
	8-1	W:150	44.1	48.5	4.5	150	340	-	-	-	-	-	-	870	951
	8-2	W:190	55.9	45.4	4.5	190	340	-	-	-	-	-	-	767	951
	9-1	W/C:40	40.0	44.8	4.5	170	425	-	-	-	-	-	-	749	951
	9-2	W/C:60	60.0	48.4	4.5	170	283	-	-	-	-	-	-	864	951

2.2 試験方法

本試験では、20℃室内において、配合別に試験供試体（□15cm×15cm×53cm）を3本採取（写真-1）し、試験材齢において表層品質試験を実施した。養生条件としては、実施工条件を踏まえて、環境温度20℃、相対湿度60%の試験室内において、材齢2日で型枠を脱型し、その後、材齢7日まで湿封養生を行った後、試験材齢まで試験室内に置いて気中養生を行った。表層品質試験については、材齢28日、56日および91日において、表層透気試験（トレント法）³⁾、並びに表面吸水試験（SWAT）⁴⁾を行い、透気係数と吸水速度を測定した。なお、脱型直後（材齢2日）の試験体の一面に表面含浸材（シラン系含浸材⁵⁾）を塗布（塗布量：150g/m²）（写真-2）し、含浸材の効果についても同時に確認した。



写真-1 試験供試体

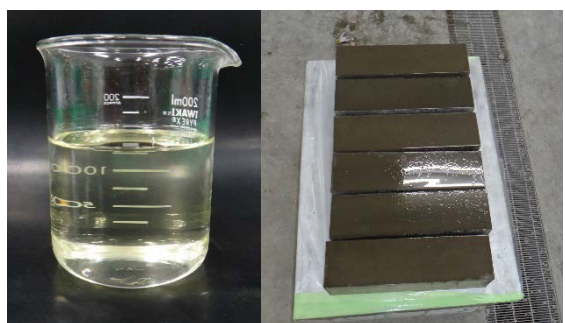


写真-2 表面含浸材塗布状況

2.3 使用機器

(1) 表層透気試験（トレント法）

表層透気試験（トレント法）は、真空ポンプの吸引によってダブルチャンバー内部を真空状態にし、その後吸引を停止し、チャンバー内の圧力が一定量回復するまでの時間から一次元方向の表層コンクリートの透気性を評価する手法である。図-1に示すように、測定チャンバーは二重構造になっており、外部のチャンバーにより周辺の影響を排除する仕組みである。表層透気試験の測定状況を写真-3に示す。また、表-3に示すように、試験結果で得られる表層透気係数 kT （ $\times 10^{-16}m^2$ ）は、値が小さいほど表層が緻密で硬化コンクリートの品質が良好であることを意味している。

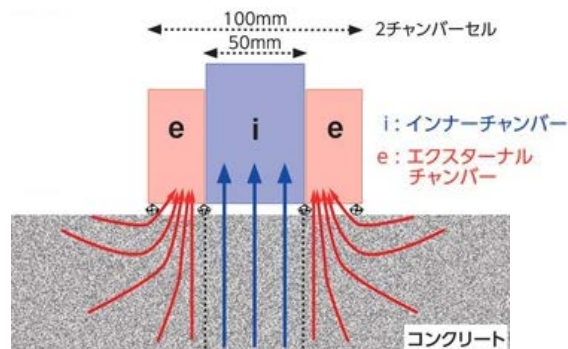


図-1 測定チャンバーの仕組み



写真-3 表層透気試験 測定状況

表-3 表層透気試験の計測結果に基づく品質（評価）の
グレーディング

表層透気係数	優	良	一般	劣	極劣
$kT(\times 10^{-16}m^2)$	0.001~ 0.01	0.01~ 0.1	0.1~1	1~10	10~100

(2) 表面吸水試験 (SWAT)

表面吸水試験 (SWAT) は、写真-4 に示される吸水カップをコンクリート表面に密着させ、吸水カップに水頭 30cm 分の水を満たした直後からシリンダー内の水位の変化を 10 分間連続的に読み取ることで、10 分間に変化する水頭差からコンクリート表層部の吸水速度(P_{600})を算出し評価する方法である。対象コンクリートの表層に空隙が多い場合は吸水量が多くなり、緻密であると吸水量は少なくなる。Levite が提案しているしきい値⁶⁾を表-4 に示す。

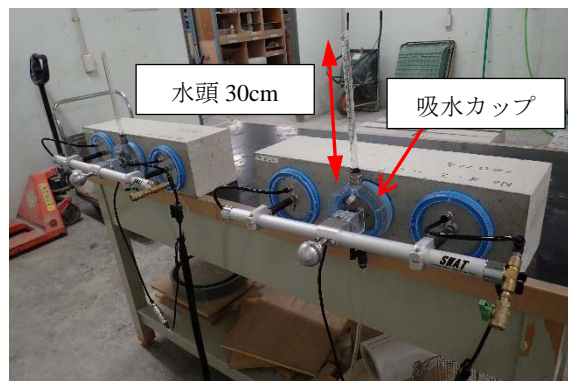


写真-4 表面吸水試験 測定状況

表-4 SWAT の計測結果に基づく品質（評価）の
グレーディング

注水完了から600秒時点での 吸水速度	良	一般	劣
$\rho_{600}(ml/m^2/s)$	0.25 以下	0.25を超えて 0.5以下	0.5を超える もの

(3) 含水率

表層透気試験、表面吸水試験共に試験結果はコンクリートの含水率に影響を受けることが知られている⁷⁾。コンクリート構造物の品質確保の手引き (案) (国土交通省、東北地方整備局)²⁾ では、含水計 (Tramex, Concrete Encounter CMEX II) で計測したコンクリート表面の含水率が 5.5%以下 (スイス規格:SIA262)であることを確認したうえで計測することとされている。また、試験時期としては材齢 28 日程度以降で行うことを基準としている。

3. 試験結果

本試験の試験結果の一覧を表-5 に示す。表層透気試験、表面吸水試験共に含水依存性があるため、材齢の経過に伴う乾燥の影響を受け試験結果が大きくなる。その中で以下の項目について考察を行った。

3.1 シリーズ I (結合材)

コンクリートの結合材種別による材齢 28 日、56 日、91 日における表層透気試験と表面吸水試験の計測結果を図-2、図-3 に、また、圧縮強度試験の結果を図-4 に示す。

結合材の種類の違いによる強度発現の差については、両試験とも定性的に捕らえることができた。

一般的に長期にわたり強度が漸増する中庸熟ポルトランドセメントや高炉セメント配合を緻密化させるためには、普通ポルトランドセメント配合と比較して、長い養生期間が必要とされている。材齢 7 日までの湿封養生では水和に必要な水分が足りず、乾燥の影響も相まって細孔組織が粗な状況であると考え⁸⁾⁹⁾。このため、基準配合である No.1 (N) と比べて No.2 (M) と No.4 (BB) は水分逸散量が多くなり、透気係数および表面吸水速度の結果が大きくなったと考える。

また、膨張材を添加した No.5 (EX) の供試体は、実構造物とは異なり鉄筋の拘束を受けない自由膨張であり、また、前述した中庸熟ポルトランドセメントや高炉セメント配合と同様に本試験の養生では水和

表-5 試験結果一覧

	No.	配合名	強度 (N/mm ²)			含水率 (%)			$kT (\times 10^{-16}m^2)$			$\rho_{600} (ml/m^2/s)$		
			28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日
結合材	1	N	47.9	49.9	54.6	5.4	5.0	4.7	0.046	0.064	0.220	0.050	0.223	0.210
	2	M	40.7	47.4	53.1	5.4	4.6	4.5	0.089	0.160	0.430	0.068	0.239	0.354
	3	H	52.3	52.5	53.8	5.6	5.0	4.8	0.044	0.055	0.150	0.084	0.116	0.234
	4	BB	41.1	49.7	58.0	5.6	4.7	4.4	0.062	0.200	0.350	0.091	0.270	0.334
	5	N+EX	44.3	47.7	51.9	5.4	4.9	4.6	0.034	0.100	0.163	0.071	0.163	0.208
	6	N+BF	34.8	40.8	44.8	5.4	4.2	3.8	0.017	0.038	0.183	0.161	0.287	0.343
配合条件	7-1	Air:2.0	55.9	57.8	62.8	5.4	4.8	4.8	0.058	0.078	0.167	0.076	0.199	0.295
	7-2	Air:7.0	37.9	41.1	44.6	5.1	4.6	4.6	0.051	0.147	0.297	0.160	0.170	0.284
	8-1	W:150	57.0	61.1	65.9	5.4	4.7	4.8	0.021	0.053	0.107	0.038	0.159	0.192
	8-2	W:190	35.5	38.3	42.5	5.6	4.8	4.6	0.025	0.078	0.200	0.085	0.182	0.306
	9-1	W/C:40	62.3	64.1	69.7	5.4	4.8	5.0	0.041	0.067	0.143	0.034	0.186	0.218
	9-2	W/C:60	35.6	37.5	40.7	5.2	4.5	4.5	0.080	0.129	0.463	0.102	0.263	0.399
透水型枠	1'	N				4.8	4.4	4.4	0.017	0.073	0.200	0.035	0.139	0.105

反応に必要な水分が足りないことも相まって、拘束による細孔組織の緻密化が起きず粗大化したと考えられ、今回の試験方法では、膨張材の効果について明確な試験結果は得られなかった。

さらに、結合材として高炉スラグ微粉末を用いた配合では、十分に湿潤養生を行うことでセメントペーストの細孔容積が減少し密実になり、スラグ置換率が大きいほど水密性が高くなるとされている。しかし、本試験の養生条件では、水和に必要な水分が不足していたため、ごく表層部の組織構造がポラスであったと想定される。そのため、乾燥が進みやすく、高炉スラグ微粉末を70%置換したNo.6 (BF)の表層透気試験においては、No.1 (N) に比べて透気係数の増加率が大きくなったと考えられる。また、表面吸水試験においては、ごく表層部の乾燥の影響を受け、No.6 (BF) の吸水速度はNo.1 (N) と比べて大きな値になったと推測される。

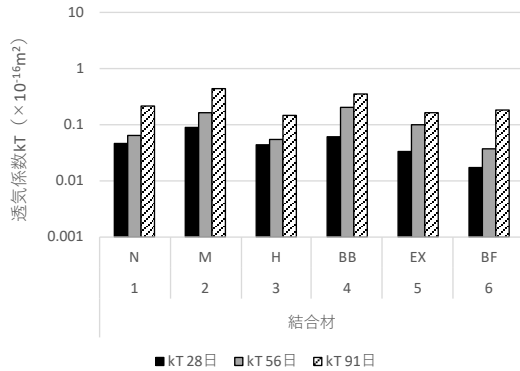


図-2 表層透気試験結果 (結合材種別)

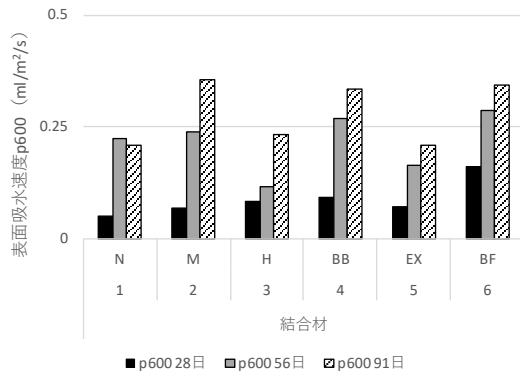


図-3 表面吸水試験結果 (結合材種別)

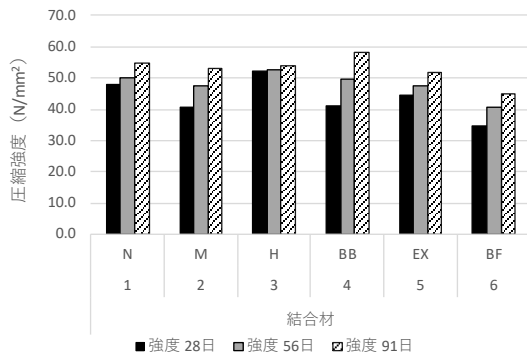


図-4 圧縮強度試験結果

3.2 シリーズII (配合条件)

(1) 空気量

空気量の違いによる表層透気試験と表面吸水試験の結果を図-5に示す。

図より、空気量による影響は、表層透気試験に比べて表面吸水試験の結果にばらつきが認められたが、一般的なフレッシュコンクリートの空気量の変動範囲(2.0~7.0%)【No.1, No.7-1, No.7-2】に明確な傾向は認められなかった。しかし、測定原理を考えると、硬化コンクリートにおけるエントレインドエアのような微細な気泡は表層透気試験に比べて表面吸水試験に大きな影響を及ぼすと考える。これにより、施工時のバイブレーター等による締固めの影響や、コンクリート表層の美観についても定性的に評価できる可能性があるため、今後の検討課題としたい。

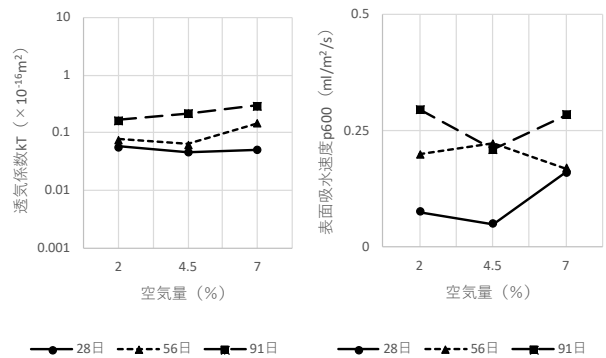


図-5 表層透気試験と表面吸水試験結果 (空気量)

(2) 単位水量・水セメント比

単位水量と水セメント比の違いによる各表層品質試験の結果を図-6, 図-7に示す。各試験とも硬化コンクリートの強度に大きな影響を及ぼす単位水量や水セメント比に関しては、既往の文献¹⁰⁾に示すようにW/Cが小さく、強度が大きい配合が透気係数、吸水速度とも小さな結果となり、定性的な傾向が確認できた。

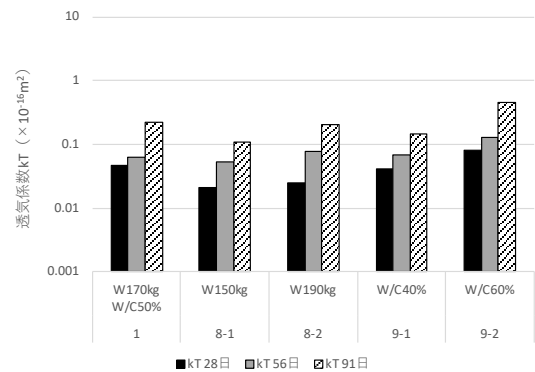


図-6 表層透気試験結果 (単位水量・水セメント比)

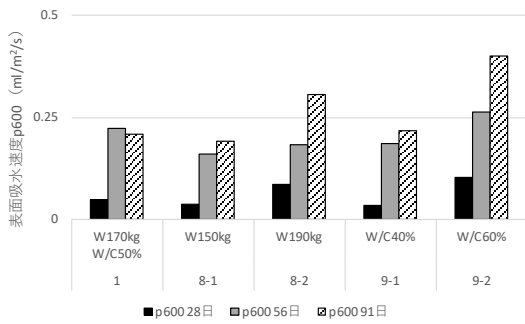


図-7 表面吸水試験結果 (単位水量・水セメント比)

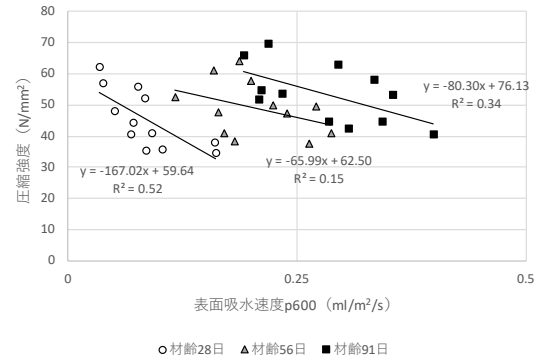


図-9 圧縮強度と吸水速度の関係

3.3 圧縮強度と各表層品質試験の関係

本検討に使用する圧縮強度の値は、標準水中養生の結果を使用しているため、所定の材齢より気中養生を行って評価した表層透気試験や表面吸水試験との養生条件や測定領域が異なるが、施工現場で表層品質を評価する際のひとつの指標とするため、これらの試験結果を比較し検討することとした。

表-7 圧縮強度と吸水速度の相関関係

	相関係数	相関関係
材齢28日	-0.7	相関がある
材齢56日	-0.4	相関がある
材齢91日	-0.6	相関がある

(1) 圧縮強度と表層透気試験

各材齢における圧縮強度と透気係数の関係を図-8に、相関係数を表-6に示す。圧縮強度と透気係数の関係は、材齢により相関関係に差が見られ、また、材齢の経過に伴い相関係数が大きくなり、材齢91日では相関関係が認められた。これは、強度発現の遅い配合の強度の安定や、供試体表面の含水率が安定したことにより、表層透気試験の結果が安定したからであると考える。

3.4 透気係数と吸水速度の関係

同一箇所測定した表層透気試験と表面吸水試験結果の関係を図-10に、透気係数と吸水速度の相関係数を表-8に示す。これらより、材齢の経過に伴い相関関係が認められることがわかった。また、材齢91日では、相関係数が+0.8となり比較的強い正の相関が認められた。既往の研究¹¹⁾においても、普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を変化させた配合に対して、材齢1ヶ月から3ヶ月と比べ、3ヶ月から6ヶ月の間では試験結果の差が小さいとされる結果が報告されている。また、今回の試験では、各試験の評価のグレーディングも概ね一致していた。

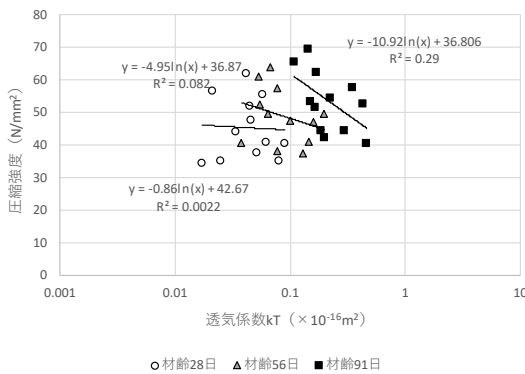


図-8 圧縮強度と透気係数の関係

表-6 圧縮強度と透気係数の相関関係

	相関係数	相関関係
材齢28日	-0.05	ほとんど相関がない
材齢56日	-0.3	やや相関がある
材齢91日	-0.5	相関がある

(2) 圧縮強度と表面吸水試験

各材齢における圧縮強度と吸水速度の関係を図-9に、相関係数を表-7に示す。圧縮強度と吸水速度の関係は、今回試験を実施した材齢28日、56日および91日の相関関係はほぼ一定であり、材齢28日以降であれば相関関係が認められることがわかった。

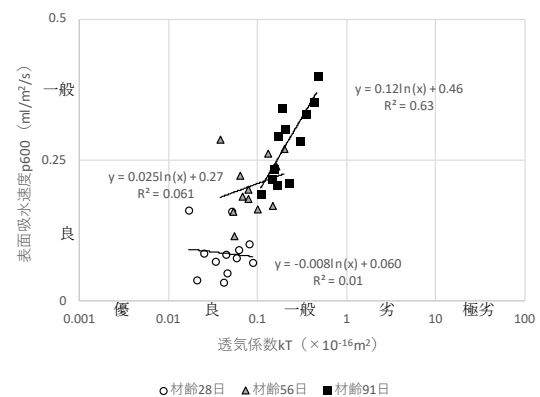


図-10 透気係数と吸水速度の関係

表-8 透気係数と吸水速度の相関関係

	相関係数	相関関係
材齢28日	-0.1	ほとんど相関がない
材齢56日	+0.3	やや相関がある
材齢91日	+0.8	かなり相関がある

3.5 表面含浸材の効果

表面含浸材を塗布した供試体（材齢 91 日）の含水率を図-11 に、表層透気試験による表面含浸材の効果を図-12、表面吸水試験による効果を図-13 に示す。

今回使用したシラン系表面含浸材の特徴として、含浸したコンクリート表層部を疎水性に改質し、その疎水層により、水が移動媒体となる劣化因子の浸入を抑制する効果を有している。この効果により、表面含浸材の塗布により含浸した表層部の疎水が進んだことで、塗布していない供試体と比べて塗布した供試体の表面の含水率が低くなる結果が得られた（図-11）。

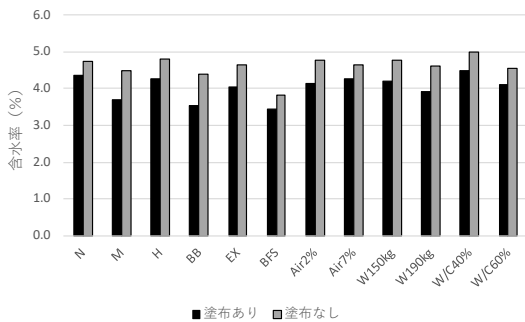


図-11 表面含浸材と含水率の関係

一般的に含水率が高いと表層品質試験の結果が小さくなる傾向にある⁷⁾。しかし、各試験の結果、表面含浸材を塗布することで、含水率が低い供試体の方が良好な結果となった。このことは、各試験において表面含浸材の効果を評価できることが示唆される（図-12、図-13）。

表層透気試験と表面吸水試験の結果を比較すると、表面吸水試験の方が表面含浸材の有無を顕著に捉えた結果となった。これは、表層透気試験は含浸層を超えて内部まで計測したのに対し、表面吸水試験は含浸層に対する水の吸水挙動を計測したため、評価方法の差からこのような結果になったと考えられる。これらのことから、表面含浸材の効果を捉えるには、表面吸水試験のほうがより適していると考ええる。

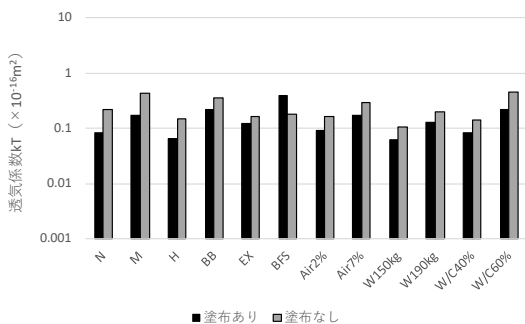


図-12 表面含浸材の効果（表層透気試験）

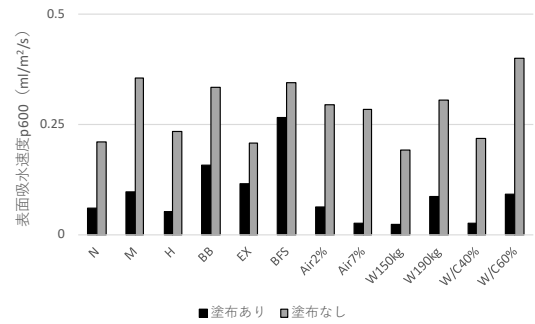


図-13 表面含浸材の効果（表面吸水試験）

3.6 透水型枠シートの効果

基準配合である No.1 (N) 配合に対して一般的に表層の緻密化に効果が高いとされる透水型枠シートの有無を比較した試験結果を図-14 に示す。

結果より、シートの有無については、表層透気試験より表面吸水試験のほうが明確に差を捉えることができた。これは、表面含浸材と同様に測定原理の差により、表面吸水試験がよりコンクリート表面に近い領域を評価しているためと考える。

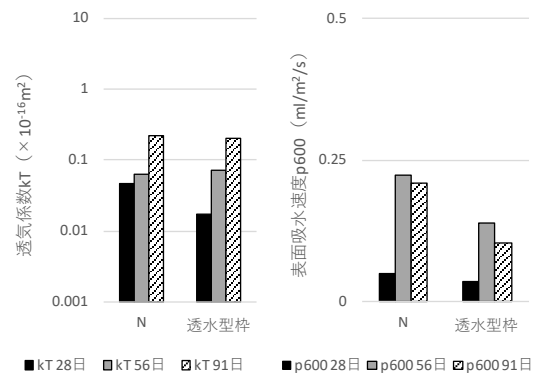


図-14 透水型枠シートの効果

4. まとめ

本研究では、現場での使用実績が多い表層品質試験である、表層透気試験ならびに表面吸水試験について、配合調整した硬化コンクリートを使用し、配合条件や試験条件が試験結果に及ぼす影響について検討した。本研究により、得られた知見を以下に示す。

- (1) 結合材の種類を変えた供試体に対する試験（シリーズ I）の結果より、両試験とも結合材の種類による水和反応の特徴を定性的に捉えることができた。
- (2) 今回の試験の養生（材齢 7 日まで湿封養生）では、結合材によっては水和に必要な水分が足りないことが推測でき、水分の供給が表層品質に影響を及ぼすことが示唆された。
- (3) 標準水中養生を行った圧縮強度試験と今回の試験の養生条件で計測した表層品質試験について、表層透気係数は材齢 91 日で相関関係が認められ、表面吸水試験では材齢 28 日以降は相関関係が認められた。

- (4) 今回の試験条件では、表層透気試験と表面吸水試験の関係については、配合条件に関わらず材齢の経過に伴い相関関係が認められ、材齢 91 日では比較的強い正の相関が認められた。
- (5) 表面吸水試験は、表層透気試験よりも、コンクリート表面により近い領域を評価するため、表面含水剤や透水型枠シートなど、コンクリート表層に使用する材料の効果を捉えるのに適していると考ええる。

以上の結果を踏まえ、施工現場においてコンクリート構造物の表層品質を評価するにあたり、表層透気試験と表面吸水試験の異なる計測原理や特徴を踏まえ、併用して評価することが、より有効であると考ええる。

参考文献

- 1) 熱血ドボ研 2030, 新設コンクリート革命, 日経 BP 社, pp.48-107, pp130-171, 2017.3.20
- 2) 国土交通省東北地方整備局, コンクリート構造物の品質確保の手引き(案), 2015
- 3) Torrent, R., A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, vol.25, pp.358-365, July 1992.
- 4) 林和彦・細田明, 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.69, No.1, 2013
- 5) 土木学会, コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針(案), pp.147-148, 2017.4.26
- 6) Concrete Society Working Party: Permeability Testing of Site Concrete - A Review of Methods and Experience, *Concrete Society Technical Report*, No.31, pp.1-95, 1987
- 7) 蔵重勲・廣永道彦, 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案, *Cement Science and Concrete Technology*, No.65, 2011
- 8) 笠井芳夫, 極く早期脱型するコンクリートの強度に関する研究(その1), 日本建築学会論文報告集, No.179, pp.17-23, 1971
- 9) 笠井芳夫, 極く早期脱型するコンクリートの強度に関する研究(その2), 日本建築学会論文報告集, No.180, pp.7-12, 1971
- 10) 田中章夫・今本啓一・唐沢智之・山崎順二, 鉄筋コンクリート造建築物の表層透気性を評価する上での 2, 3 の課題に関する検討
- 11) 野中英・湯浅昇, ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 700 号, pp.689-696, 2014