

論文 異なるタイプの吸水試験および透気試験によるコンクリートの表層品質の評価

寺西 浩司*1・葛山 育海*2

要旨: 本研究では、まず、コンクリートの表面含水率が吸水試験の結果に及ぼす影響を検討し、表面含水率1%当たりの試験結果の補正値を求めた。次に、水セメント比や水中養生期間などを変化させたコンクリートに対して、本研究で新たに考案したスポンジ式吸水試験、面吸水試験および透気試験（トレント試験）を同時に実施した。そして、これらの試験は、いずれも、水セメント比の低下や水中養生期間の増加に伴うコンクリートの表層品質の向上を定量的に評価できること、面吸水試験およびトレント試験は、スポンジ式吸水試験に比べて、水中養生期間の影響をより端的に評価することなどを明らかにした。

キーワード: スポンジ式吸水試験, トレント試験, 含水率, 養生期間, 材齢, 物質移動性

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化という時代の要請を受けて、コンクリートの中酸化抵抗性や塩害抵抗性を診断する機会が増えている。また、このことを受けて、炭酸ガスや飛来塩分などの浸透に対するコンクリート表層部の抵抗性を、透気試験や吸水試験により評価しようとする動きが広がっている。

透気試験は、一般に、空気を吸引してコンクリート内部を負圧にし、その復圧の速度を測定するものであり、一方の吸水試験は、コンクリートが吸水する速度を測定するものである。これらは、いずれも非破壊試験もしくは微破壊試験であり、コアを採取するなどの破壊試験に比べて手軽に実施できる点で現場調査に適しているといえる。また、現在、現場調査のための透気試験としてはトレント法¹⁾が最も標準的な試験となっており、現場調査のための吸水試験としては、細田らにより考案されたSWAT²⁾などが採用される機会が多いようである。しかし、これらのほかにも、様々に工夫された透気試験、吸水試験方法が多数の研究者により提案されている³⁾。

筆者らも、これまでに、極めて安価で手間のかからない試験方法として、吸水させた化粧用コットンパフを測定面に張り付けて、コンクリートが吸水する量を測定する湿布式吸水試験を提案し⁴⁾、実構造物の調査に試用してきた⁵⁾。本研究では、よりハンドリングのよい試験方法の開発を目指して、湿布式吸水試験の保水材をコットンパフからPVAスポンジに変更したスポンジ式吸水試験を新たに考案し、その有効性などを検討した。

透気試験や吸水試験では、コンクリートの含水率が測定結果に大きな影響を及ぼすことが広く知られている⁶⁾。

そこで、本研究では、まず、コンクリートの表面含水率が吸水試験の結果に及ぼす影響を検討した（実験1）。次に、水セメント比や水中養生期間などを変化させたコンクリートに対してスポンジ式吸水試験、試験片を用いて行うタイプの吸水試験およびトレント試験を同時に実施し、それらの結果を比較して、表層品質の評価試験としての妥当性・有用性を検討した（実験2）。

2. 吸水試験結果に対する含水率の影響の検討（実験1）

2.1 実験概要

(1) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。実験1では、コンクリート供試体の水セメント比(W/C)を35, 50および65%の3水準に変化させた。また、W/C50%のケースでは、空気量を4.5および0%の2水準とした。そして、それら

表-1 実験ケース

記号	W/C (%)	空気量 (%)	強制乾燥期間	供試体 A	供試体 B
C35A4.5-0d	35	4.5	0日	○	○
C35A4.5-1d			1日	○	○
C35A4.5-6d			6日	○	○
C50A4.5-0d	50		0日	○	○
C50A4.5-2h			2時間		○
C50A4.5-3h			3時間		○
C50A4.5-4h			4時間		○
C50A4.5-5h			5時間		○
C50A4.5-1d			1日	○	○
C50A4.5-6d	0		6日	○	○
C50A0-2h			2時間		○
C50A0-3h			3時間		○
C50A0-4h		4時間		○	
C50A0-5h		5時間		○	
C65A4.5-0d	65	4.5	0日	○	○
C65A4.5-1d			1日	○	○
C65A4.5-6d			6日	○	○

*1 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

表-3 コンクリートの調査および試験結果

調合	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	絶対容積 (l/m ³)					混和剤 (C×%)		試験値		
					W	C	S1	S2	G	A1	A2	スランブ (cm)	空気量 (%)	28日圧縮強度 (N/mm ²)
C35A4.5	35	60*	4.5	49.2	180	163	241	60	311	3.0	-	58*	3.0	64.9
C50A4.5	50	18	4.5	47.9	183	116	251	63	342	-	1.0	19.5	3.4	41.7
C50A0			0		192	121	263	66	358			-	-	0.6
C65A4.5	65	18	4.5	51.5	176	86	286	71	336	-	1.0	19.5	3.5	21.9

*スランブフロー (cm)

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	S1	豊田産山砂 (表乾密度 2.55g/cm ³ , 吸水率 1.64%, 粗粒率 2.80)
	S2	瀬戸産砕砂 (表乾密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 1.22%, 粗粒率 2.75)
粗骨材	G	瀬戸産砕石 2005 (表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 0.57%, 実積率 59.0%)
高性能 AE 減水剤	A1	ポリカルボン酸エーテル系
AE 減水剤	A2	有機酸系誘導体芳香族高分子化合物
AE 剤	A3	アルキルエーテル系
消泡剤	A4	ポリエーテル系

表-4 試験項目

供試体	面吸水試験	スポンジ式吸水試験	表面含水率試験
供試体 A	○		○
供試体 B		○	○

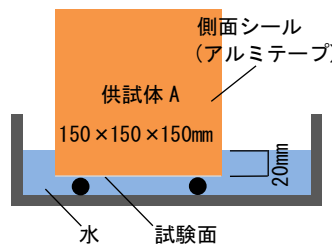


図-1 面吸水試験

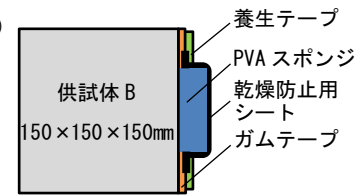


図-2 スポンジ式吸水試験

を表中に示した期間強制乾燥し、供試体の含水率を変化させて吸水試験を行った。

(2) コンクリート

表-2 および表-3 に、コンクリートの使用材料および調合を示す。W/C50%の場合はレディーミクストコンクリートとし、W/C35%および 65%の場合は実験室でコンクリートを練り混ぜた。ただし、混和剤以外の材料は全ての水セメント比で共通とした。また、W/C50%における空気量 0%のコンクリートは、空気量 4.5%のレディーミクストコンクリートに消泡剤を後添加して製造した。

(3) 打込みおよび養生方法

供試体の作製にあたっては、離型剤を塗布したコンクリートパネルを型枠の側板に使用してコンクリートを打ち込んだ。

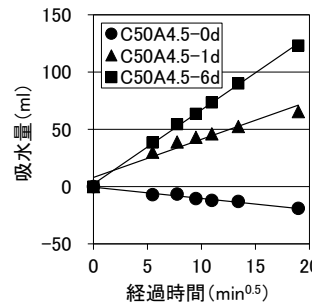
また、本実験では、材齢 28 日に吸水試験を行った。供試体は、コンクリートの打込み翌日に型枠を脱型し、その後標準養生し、さらに試験前に所定時間 105°C で強制乾燥した後に試験に供した。

(4) 試験項目および試験方法

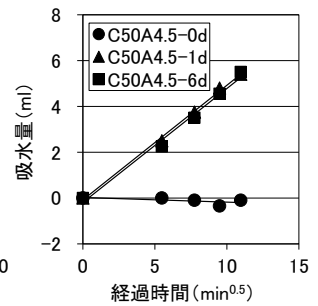
本実験では、ケースごとに A, B の 2 種類の供試体をそれぞれ 2 個ずつ作製した。表-4 に、これらの供試体に対する試験項目を示し、以下に各試験の概要を示す。なお、各試験の結果は、2 個の供試体に対する試験結果の平均値で表示することとした。

①面吸水試験

アルミテープで側面をシールした供試体 A (1 辺



(a) 面吸水試験



(b) スポンジ式吸水試験

図-3 吸水試験の結果

150mm の立方体) を、図-1 に示すように、試験面を下にして深さ 20mm まで水中に浸漬した (試験面は、打込み時の側面とし、ワイヤーブラシでケレンした)。そして、試験開始から 360 分後まで、定期的 (120 分までは 30 分ごと、それ以降は 60 分ごと) に供試体の質量増加量 (すなわち、コンクリートの吸水量) を測定した。

②スポンジ式吸水試験

図-2 に、スポンジ式吸水試験の概要を示す。PVA スポンジ (40×40×5mm, 質量約 1.5g) に、スポンジを含めて 10g になるように吸水させて、供試体 B (1 辺 150mm の立方体) のコンクリート表面 (打込み時の側面) に張り付け、その上面を乾燥防止用のシートで覆った。そして、試験開始から 120 分後まで、30 分ごとに PVA スポンジを取り外してその質量減少量 (すなわち、コンクリートの吸水量) を測定した。

③表面含水率試験

吸水試験の開始前に、高周波容量式含水率計により供

試体 A および B の試験面の表面含水率を測定した。また、供試体 A では、面吸水試験に際して、毎回の質量増加量測定時にも、試験面を布で拭いた後に表面含水率を測定した。

2.2 実験結果とその考察

(1) 吸水試験の結果

図-3 に、吸水試験の結果の一例を示す。面吸水試験、スポンジ式吸水試験のいずれの試験方法の場合も、湿布式吸水試験の場合⁴⁾と同様に、吸水量の測定値と経過時間の平方根の間に直線関係が得られた。そこで、本実験では、次式中の吸水速度係数 D を最小二乗法により求め、その値を測定結果の代表値とした。

$$Q = D \cdot t^n \quad (1)$$

ここに、 Q : 吸水量 (ml), D : 吸水速度係数 (ml/minⁿ), t : 経過時間 (min), $n=0.5$ 。

なお、2 個の供試体の吸水速度係数の標準偏差は、平均的に、面吸水試験では 1.06ml/min^{0.5}, スポンジ式吸水試験では 0.034ml/min^{0.5} であった。また、図-3(a)によると、面吸水試験の強制乾燥期間 0 日のケースでは、吸水量が負の値になっており、試験中に水分が徐々に放出されている。これは、このケースでは、飽水状態の供試体を試験に供したため、試験を行っても吸水しない一方で、試験中に供試体上面から水分が逸散したことが原因であると推察される。

図-4 に、面吸水試験に伴う表面含水率の変化の一例を示す。強制乾燥期間が長く、試験開始前の含水率が低いケースでは、面吸水試験の開始後すぐに表面含水率が急激に増加した。ただし、それ以降、表面含水率はほとんど変化せず、試験終了時 (360 分後) に至っても、表面含水率には、強制乾燥期間による差がある程度残ったままであった。

(2) 表面含水率

図-5 に、表面含水率と強制乾燥期間の関係を示す (供試体 B の吸水試験開始前の測定値)。表面含水率は、強制乾燥により徐々に減少し、その減少度合いは水セメント比が高いほど大きかった。

(3) 吸水速度係数と表面含水率の関係

図-6 に、吸水速度係数と表面含水率の関係を示す。同図から、面吸水試験、スポンジ式吸水試験のいずれの場合も、両者の間に水セメント比ごとに高い相関が見られ、吸水速度係数の測定値は、表面含水率の増大とともに直線的に減少することがわかる。

表-5 に、図-6 中の回帰直線から求めた表面含水率 1% の増加に対する吸水速度係数の変化量を示す。本実験の条件下であれば、コンクリートの表面含水率 1% の増加に対して、吸水速度係数を、面吸水試験では

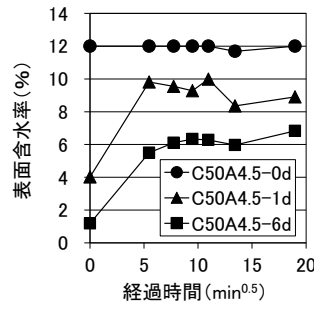


図-4 面吸水試験に伴う表面含水率の変化

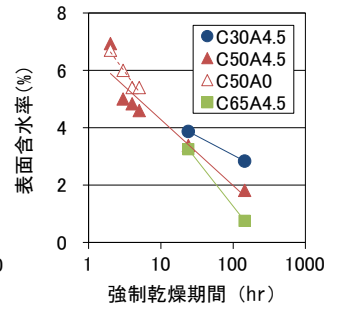
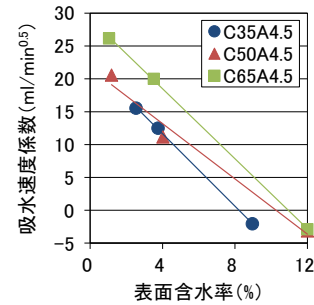
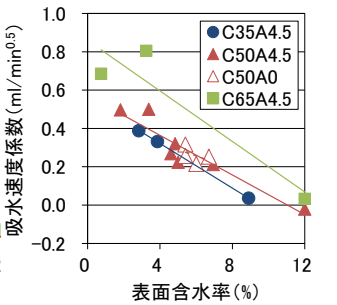


図-5 表面含水率と強制乾燥期間の関係



(a) 面吸水試験



(b) スポンジ式吸水試験

図-6 吸水速度係数と表面含水率の関係

表-5 吸水速度係数の補正值

試験方法	表面含水率 1% の増加に対する吸水速度係数の変化量 (ml/min ^{0.5})			
	W/C35%	W/C50%	W/C65%	平均値
面吸水試験	-0.82	-0.66	-0.84	-0.77
スポンジ式吸水試験	-0.058	-0.054	-0.066	-0.059

表-6 実験ケース

記号	W/C (%)	空気量 (%)	水中養生期間 (日)	供試体 C	供試体 D
C35A4.5-0	35	4.5	0	△	
C35A4.5-1			1	△	
C35A4.5-6			6	○	○
C50A4.5-0	50	4.5	0	○	○
C50A4.5-1			1	○	○
C50A4.5-6			6	○	○
C50A0-0	50	0	0	○	○
C50A0-1			1	○	○
C50A0-6			6	○	○
C65A4.5-0	65	4.5	0	△	
C65A4.5-1			1	△	
C65A4.5-6			6	○	○

* ○: 材齢 28, 56, 84 日に試験, △: 材齢 28 日のみに試験

0.77ml/min^{0.5}, スポンジ式吸水試験では 0.059ml/min^{0.5} 程度補正すれば、測定結果から含水率の影響を排除できるものと考えられる。

3. 各種表層品質試験による表層品質の評価 (実験 2)

3.1 実験概要

(1) 実験ケース

表-6 に実験ケースを示す。実験 2 では、コンクリー

トの水セメント比 (W/C) および空気量を実験 1 と同様に变化させた。また、供試体の水中養生期間を 0, 1 および 6 日に变化させた。

(2) コンクリートおよび養生方法

実験 1 と同一バッチのコンクリートを用いて供試体を作製した。作製した供試体は、コンクリートの打込み翌日に型枠を脱型した後、表-6 中に示した期間標準養生 (水中養生) した。そして、さらに材齢 28, 56 または 84 日まで恒温恒湿室内 (温度 20℃, 相対湿度 60%) で気中養生し、試験に供した。

(3) 試験項目および試験方法

本実験では、各ケースの試験材齢ごとに供試体 C を、また、ケースごとに供試体 D (いずれも 1 辺 150mm の立方体) をそれぞれ 2 個ずつ作製した (各試験の結果は、2 個の供試体に対する試験結果の平均値で表示した)。表-7 に、これらの供試体に対する試験項目を示す。実験 2 では、実験 1 で実施した試験に加えて透気試験も行った。

① 吸水試験および表面含水率試験

供試体 C に対して実験 1 と同様に面吸水試験を行った。ただし、実験 2 では、シール剤にエポキシ樹脂を用い、供試体の側面のほかに上面もシールした。また、供試体 D に対して実験 1 と同様にスポンジ式吸水試験を行った。これらのほかに、表面含水率試験も実験 1 と同様の手順で行った。

② 透気試験

吸水試験を行う前に、供試体 C および D に対してトレント法による透気試験を行い、透気係数を測定した。

3.2 実験結果とその考察

(1) 面吸水試験の結果

図-7 に、面吸水試験の結果の一例を示す。本実験では、実験 1 の場合とは異なり、吸水量の測定値と経過時間の平方根の間に直線性は見られなかった。これは、供試体 C には、試験面以外に解放面を設けていなかったため、小池ら⁷⁾が報告しているように、供試体中の空気が拘束され、吸水されにくくなったためと推察される。そこで、試行錯誤的な検討を行ったところ、図-7 に示したように、吸水量と経過時間の 0.3 乗との間に直線性が得られた。このことから、実験 2 では、式 (1) における次数 n を 0.3 とし、面吸水試験の吸水速度係数 D を求めた。ただし、今後面吸水試験を行う場合には、実構造物のコンクリート部材に一般的に空気の開放面が存在することを考慮すると、実験 1 に示した方法による方がより適当であろうと考えられる。

図-8 に、面吸水試験に伴う表面含水率の変化の一例を示す。試験材齢 (気中養生期間) が長くなるほど、表面含水率の増加は緩やかになった。

表-7 試験項目

供試体	面吸水試験	スポンジ式吸水試験	透気試験	表面含水率試験
供試体 C	○		○	○
供試体 D		○	○	○

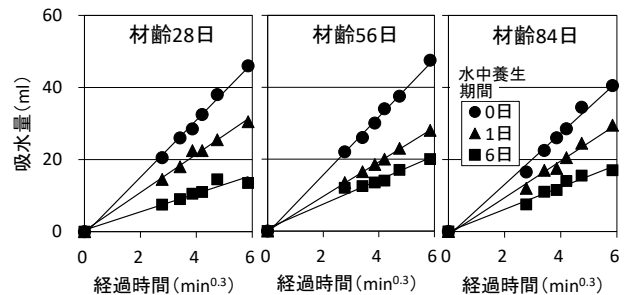


図-7 面吸水試験の結果 (C50A4.5)

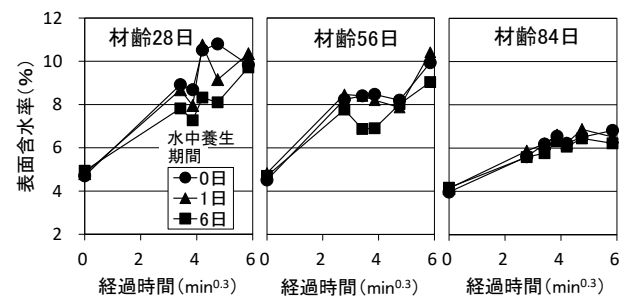


図-8 面吸水試験に伴う表面含水率の変化 (C50A4.5)

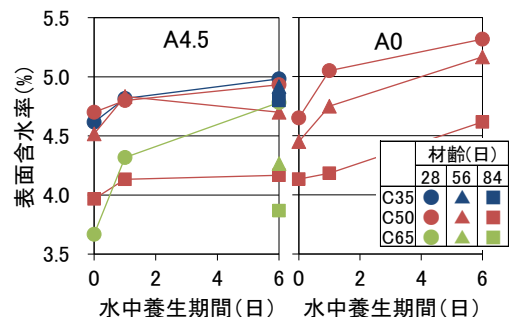


図-9 表面含水率と水中養生期間の関係

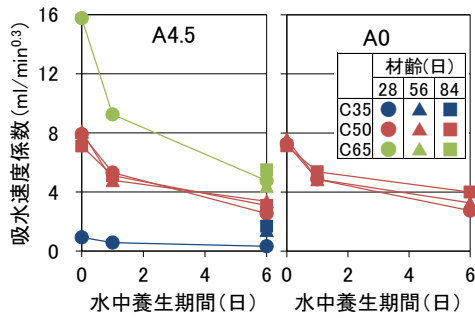
(2) 表面含水率

図-9 に、表面含水率と水中養生期間の関係を示す (供試体 C の吸水試験開始前の測定値)。空気量 4.5% の場合、表面含水率はいずれも 4~5% 程度であったが、W/C65% のケースでは、水中養生期間が 0 日の場合にやや小さな値となった。また、2 個の供試体の表面含水率の標準偏差は、平均的に 0.14% であった。

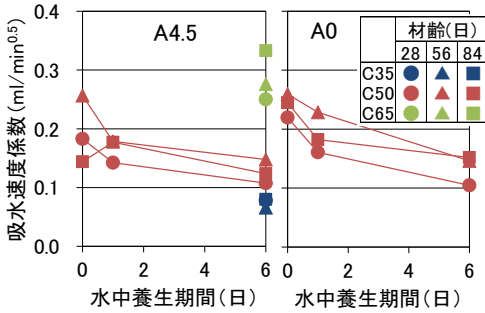
本実験では、以上のように、実験を通じて、表面含水率のばらつきが全体として小さかったため、表-5 に示した吸水速度係数の補正は行わないこととした。

(3) 吸水速度係数・透気係数と水中養生期間の関係

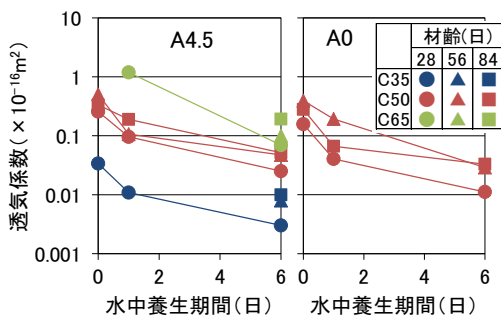
図-10 および図-11 に、吸水速度係数と水中養生期間の関係を示す。面吸水試験の結果に着目すると、吸水速度係数は、水セメント比が低くてコンクリート組織が



図一10 吸水速度係数と水中養生期間の関係 (面吸水試験)



図一11 吸水速度係数と水中養生期間の関係 (スポンジ式吸水試験)



図一12 透気係数と水中養生期間の関係

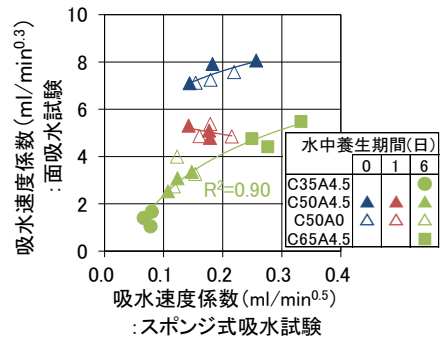
緻密なほど、また、水中養生期間が長くてコンクリートの表層品質が向上するほど小さくなっている。一方で、W/C50%の結果からわかるように、試験材齢(気中養生期間)による吸水速度係数の差は見られなかった。

スポンジ式吸水試験の場合も、ばらつきがやや大きいものの、吸水速度係数は、水中養生期間の増加に伴ってコンクリートの表層品質が向上する状況を捉えている。なお、いずれの方式の吸水試験の場合も、空気量による吸水速度係数の違いは見られなかった。したがって、AE剤によって連行される独立した微細な空気泡は、コンクリート中の物質移動性にほとんど影響を与えないものと考えられる。

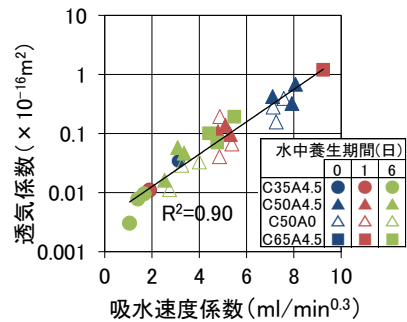
図一12に、透気係数と水中養生期間の関係を示す(供試体Cに対する測定値)。透気係数も、吸水速度係数と類似した傾向の結果となった。

(4) 各試験の結果の関係

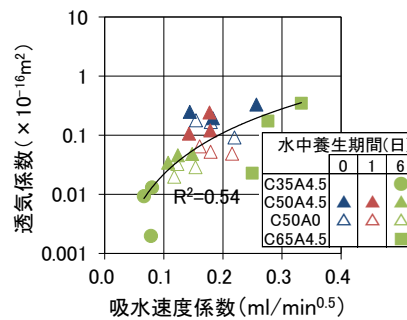
図一13に、面吸水試験とスポンジ式吸水試験による吸



図一13 面吸水試験とスポンジ式吸水試験の吸水速度係数の関係



図一14 透気係数と面吸水試験の吸水速度係数の関係



図一15 透気係数とスポンジ式吸水試験の吸水速度係数の関係

水速度係数の関係を示す。両者の関係は、水中養生期間ごとに異なった関係線で表されており、面吸水試験の場合には、水中養生期間が短いと、吸水速度係数がスポンジ式吸水試験に比べてより大きく測定されている。このことに関しては、乾燥開始材齢が早いほどコンクリート表層に長期にわたり大きな細孔が残存することが湯浅ら⁸⁾により報告されている。したがって、面吸水試験とスポンジ式吸水試験で、仮に、吸水されるコンクリートの細孔径の範囲が異なると考えると、面吸水試験の方がスポンジ式吸水試験に比べて大きな径の細孔まで吸水されていることになる。

図一14および図一15に、透気係数と面吸水試験およびスポンジ式吸水試験による吸水速度係数の関係を示す。面吸水試験による吸水速度係数には、透気係数との間に高い相関が見られ、その対数との関係は、水セメント比や水中養生期間などにかかわらず、一つの直線で表される。また、スポンジ式吸水試験による吸水速度係数にも、

透気係数との間に相関が見られた。ただし、この両者の関係には、それほど明確ではないものの、図-13と同様な傾向が認められた。

4. まとめ

本研究では、まず、コンクリートの表面含水率が面吸水試験およびスポンジ式吸水試験の結果に及ぼす影響を検討した。次に、水セメント比や水中養生期間などを変化させたコンクリートに対して面吸水試験、スポンジ式吸水試験および透気試験（トレント試験）を同時に実施し、それらの結果を比較して、表層品質の評価試験としての妥当性・有用性を検討した。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

(1) コンクリートの表面含水率 1%の増加に対して、吸水速度係数を、面吸水試験では $0.77\text{ml}/\text{min}^{0.5}$ 、スポンジ式吸水試験では $0.059\text{ml}/\text{min}^{0.5}$ 程度補正すれば、測定結果から含水率の影響を排除できる。

(2) 面吸水試験、スポンジ式吸水試験およびトレント試験は、いずれも、水セメント比の低下や水中養生期間の増加に伴うコンクリートの表層品質の向上を定量的に評価することができる。

(3) 面吸水試験およびトレント試験は、スポンジ式吸水試験に比べて、水中養生期間の影響をより端的に評価する。

参考文献

1) Torrent, R.: A Two-chamber Vacuum Cell for Measuring the Coefficient of Permeability to Air of the Concrete

Cover on Site, Materials & Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, Jul. 1992

- 2) 林和彦, 細田暁: 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方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.
- 3) 日本コンクリート工学会中部支部: 高度成長期に建造された構造物の耐震・耐久性評価方法の標準化に向けた調査研究委員会報告書, pp.3-9-3-18, 2017.3
- 4) 山下健悟, 寺西浩司, 佐藤晴香: 吸水試験によるコンクリートの物質移動性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1247-1248, 2016.8
- 5) 寺西浩司, 瀬古繁喜, 今本啓一, 野口貴文, 兼松学, 佐藤晴香, 丹羽大地: 築 50 年を経過した RC 打放し建築物におけるコンクリートの物性調査 (その 4. 吸水試験の結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1307-1308, 2016.8
- 6) 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, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.225-232, 2011.
- 7) 小池賢太郎, 山口明伸, 中田拓磨, 武若耕司: モルタルの含水状態と水分移動が塩分浸透特性に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, V, pp.259-260, 2012.9
- 8) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率, 細孔構造の不均質性, 日本建築学会構造系論文集, No.509, pp.9-16, 1998.7