

論文 コンクリート構造物の表層品質を対象とした各種試験の比較

森 優太*1・山中 翔太*2・半井 健一郎*3・西尾 壮平*4

要旨：近年、新設コンクリート構造物の高耐久化が強く求められている。本研究では、コンクリート構造物の耐久性を左右する表層品質に着目し、その評価を対象とした表層透気試験、散水試験、コア供試体を用いた吸水試験の特徴を分析することとした。室内試験の結果、各試験において、コンクリートの養生期間の違いや測定高さの違いを抽出でき、散水試験と表層透気試験の結果の相関、表層透気試験とコア供試体を用いた吸水試験の結果の相関はいずれも高いものとなった。また、吸水試験について複数の手法による比較分析を行い、吸水試験前の乾燥の程度や養生条件が結果に与える影響の検討を行った。

キーワード：表層品質、耐久性、吸水試験、散水試験、表層透気試験

1. はじめに

近年、新設コンクリート構造物の高耐久化が、ますます強く求められている。耐久的なコンクリート構造物を構築するためには、表層部のコンクリートが緻密で高い物質移動抵抗性を有することが求められるが、その達成には、水セメント比に代表されるコンクリートの配合のみならず、養生をはじめとする施工の要因が大きいことが指摘されている。そこで、従来のプロセス検査のみならず、硬化後のコンクリート構造物の表層品質を直接的に評価するための研究が精力的に進められている¹⁾²⁾。これまでに数多くの手法が提案され、表層透気試験（トレント法）³⁾のようにスイス標準規格 SIA 262/1:2013 に採用された手法もあるが、それぞれに長所と短所があり、いずれも実務での本格的な活用には至っていない。各試験方法の今後の改良も期待されるが、同時に、それぞれの試験の特徴を明らかにし、複数の試験手法の組み合わせによって手法ごとの短所を補い合い、合理的かつ効率的な表層品質評価を行うためのシステムを構築することも考えられる。

表層品質の詳細な非破壊試験手法としては、前述の表層透気試験³⁾のほか、表面吸水試験⁴⁾などが提案され、実構造物においても測定事例が増えつつある。しかしながら、測定結果が含水率の影響を受けるほか、高額な測定装置が必要であったり、測定に電源や時間が必要であったりと、簡便な手法ではない。これに対して、流水試験⁵⁾や散水試験⁶⁾⁷⁾のような簡易な手法が開発されている。この簡易試験は、単独の試験としての利用のほか、詳細試験の前の概略評価としても活用が期待される。一方で、非破壊試験においては含水率の影響を排除することが困難であり、含水率を制御した評価のためにはコア

を採取し、その物質移動抵抗性を測定する必要があると考えられる。

そこで本研究では、表層透気試験（トレント法）に対し、新たに開発された簡易法である散水試験および含水率の制御が可能であるコア供試体を用いた吸水試験について、測定結果を比較分析することによって、各手法の特徴を明らかにすることとした。ここで、コンクリートの吸水試験については国内において確立された手法はないため、ASTM C 1585-13、RILEM 暫定基準の方法および BS1881-122 の比較分析を行い、試験手法の検討を行った。さらに、ASTM C 1585-13 により、コア供試体を詳細に分析した。

2. 吸水試験手法の検討

2.1 使用材料、配合、養生条件

表-1 に本研究で使用したコンクリートの配合表を示す。また、表-2 に使用材料を示す。セメントには高炉セメント B 種を使用した。養生条件は 3 水準を設定し、各吸水試験が養生条件の違いをどの程度捉えることができるかを比較した。

養生は、コンクリート打込み後に封緘とし、材齢 1 日、7 日、または 28 日に脱型後、いずれも室内にて気中暴露とした。材齢 90 日程度で吸水試験前の切断や乾燥を行った後、それぞれの吸水試験を開始した。試験方法によって乾燥期間が異なるため、試験開始材齢は統一されていないが、その差は小さく、水和反応も十分に進行していると考えられ、試験開始材齢の影響は小さいと判断した。

2.2 各吸水試験方法

各吸水試験の吸水方法の模式図を図-1 に示す。吸水試験は様々な方法が提案されているが、すでに規格化さ

*1 広島大学 工学部社会基盤環境工学科 (学生会員)

*2 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 (学生会員)

*3 広島大学 大学院工学研究院 社会環境空間部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 副主任研究員 修士 (工学) (正会員)

表-1 配合表

配合名	W/C	目標値		s/a	単位量 (kg/m ³)			
		スランブ	空気量		水(W)	セメント(BB)	細骨材(S)	粗骨材(G)
		(cm)	(%)	(%)				
50BBC	0.50	8±2	4.5±1.5	44.6	170	340	774	977

表-2 使用材料

使用材料	種類	記号	物理特性
セメント	高炉セメントB種	BB	密度:3.04g/cm ³ , 比表面積: 3760cm ² /g
細骨材	石英斑岩砕砂(広島県東広島市黒瀬町産)	S	表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率1.56%
粗骨材	石英斑岩砕石(広島県東広島市黒瀬町産)	G	表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率0.59%

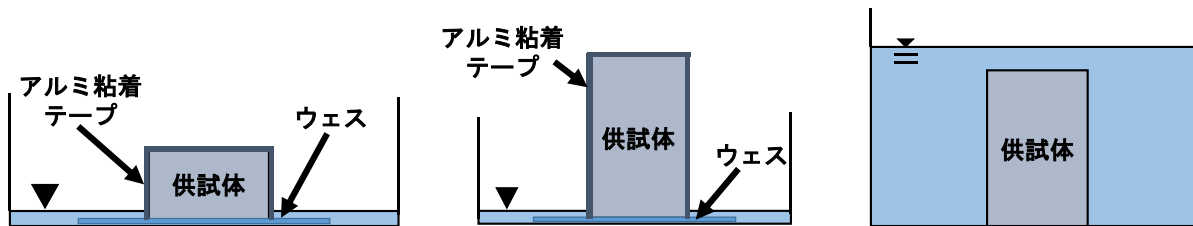


図-1 各吸水試験方法の模式図(左: ASTM C 1585-13, 中央: RILEM 暫定基準, 右: BS1881-122)

れている試験を主に選定した。いずれの試験においても、打込み時の供試体は、直径 100mm×高さ 200mm の円柱とした。

(1) ASTM C 1585-13

ASTM C 1585-13 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes) による試験 (以下, ASTM 規格) を行った。材齢 90 日程度で供試体をコンクリートカッターによって切断し、直径 100mm×高さ 50mm の円柱供試体を作製した。本試験では、最下部の円柱供試体を用いることとし、3 日間、温度 50°C, RH80% の環境下におき、その後、円柱供試体を密封容器の中に入れ、15 日間 20°C の環境下においた。この前処理により、吸水試験時のコアの内部相対湿度が 50% 程度で平衡となり、実構造物における下限値とほぼ一致する含水状態を得られるとされている⁸⁾。なお、ASTM 規格では乾燥前に飽水処理を行うこととされているが、今回は行わずに養生の影響を比較することとした。

吸水面以外にアルミ粘着テープを貼ることで空気中との水分のやり取りがないようにしたうえで、1 次元的な吸水挙動を測定することとした。また、吸水面から水が十分に吸収されるようにウェスを敷いた。計測時間は吸水開始後、5, 10, 20, 30 分, 1, 2, 3, 4, 5, 6 時間, 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 日とし、6 時間までの供試体質量の経時変化を初期吸水速度係数とし、そこから、9 日までの供試体質量の経時変化を 2 次吸水速度係数とした。

さらに、試験中のコンクリートへの水の供給が吸水挙動へ与える影響を明らかにするために、同じ供試体を繰り返し用い、合計 3 回の吸水試験を独自に行った。

(2) RILEM 暫定基準の方法

RILEM 暫定基準の方法 (RILEM CPC11.2: Absorption of water by Capillarity, 1989) を参考とした試験 (RILEM 基準) を実施し、ASTM 規格との前乾燥条件や供試体寸法の比較を行った。直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体をそのまま使用し、吸水開始前に 14 日間、温度 40±5°C の環境下で乾燥させた。また、本来の RILEM 暫定基準ではシールをせずに吸水試験を行うことになっているが、ここでは比較分析のため、ASTM 規格と同様に吸水面以外にアルミ粘着テープを貼って試験を行った。吸水開始後、3, 6, 24, 48 時間で供試体質量の経時変化を測定し、吸水速度係数 (g/h^{1/2}) を求めた。

なお、現在の RILEM の吸水試験法である、TC116-PCD においては、直径 150mm×高さ 50mm の円柱試験体を 50°C にて前乾燥させたのちに密封保管し、吸水面以外をシールする、ASTM 規格と類似の手法となっている。

(3) BS1881-122

BS1881-122 (Method for determination of water absorption) による吸水試験 (以下, BS 規格) を行った。直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体をそのまま使用し、吸水試験開始前に温度 105±5°C の環境下で 72 時間乾燥させた。その後、供試体全体が水に浸かるように水位を供試体上部から数 cm に設定し、供試体全面からの吸水を行った。吸水開始後、10, 30, 60, 120 分で供試体

質量の経時変化を測定し、吸水速度係数 ($\text{g}/\text{min}^{1/2}$) を求めた。

2.3. 吸水試験結果

(1) 前乾燥条件の比較

各吸水試験の前に実施した乾燥処理後の供試体の単位体積質量を表-3に示す。ASTM規格とBS規格ではほぼ同程度の単位体積質量になったが、RILEM基準ではやや大きな値となった。平均的には、RILEM基準では試験体の乾燥が進んでいないことになるが、供試体寸法が大きく乾燥期間も短いため、供試体内での含水状態に分布が生じている可能性もある。

(2) 吸水速度係数の比較

各吸水試験の吸水量と時間の平方根の経時変化を図-2~図-4に示す。測定は、RILEM基準では「分」、BS規格では「時間」を単位として行ったが、相互比較を容易にするためにASTM規格の「秒」で統一して図示した。それぞれの測定について近似直線を与え、得られた吸水速度係数を表-4にまとめて示した。図-2~図-4に示したように、いずれにおいても高い決定係数を得た。なお、ASTM規格においては、初期吸水速度係数と2次吸水速度係数が得られるが、1日脱型の2次吸水では質量増加量が少なく飽水状態にあるといえ、2次吸水速度係数での比較は困難であるといえる。そのため、初期吸水速度係数のみを表-4における比較の対象とした。

いずれの試験においても、封緘養生期間が長いものほど吸水速度係数が小さくなり、封緘養生期間が長くなることによって表層品質としての物質移動抵抗性が向上するという、養生条件の違いを評価できた。ただし、ASTM規格における2次吸水速度係数については、3水準の養生条件の違いを明確には評価はできなかった。脱型1日の場合には特に小さな2次吸水速度係数が得られ、これは養生が不十分で物質移動抵抗性が低いために早期に厚さ50mmの最深部までの吸水が完了したためと考えられたが、脱型7日と28日の違いは明確ではなかった。

ASTM規格とRILEM基準を比較した場合、吸水前の乾燥の方法や供試体の高さが異なるが、得られた吸水速度係数を比較すると、28日脱型ではほぼ同一の値が得られた。一方で、1日脱型や7日脱型では、ASTM規格に対して、RILEM基準では0.8倍程度のやや小さな値が得られた。養生の影響がASTM規格でより顕著に表れ、それは前乾燥条件の違いによると推察された。BS規格では、供試体全面からの3次元的な吸水方法であるため、吸水量が多く、数値そのものを他の2つの試験法と直接的に比較することは難しいが、養生条件の違いによる吸水速度係数の変化は相対的に小さくなっていった。

表-3 乾燥処理後の供試体の単位体積質量
(単位: $\times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$)

	1日脱型	7日脱型	28日脱型	平均
ASTM規格	2.21	2.20	2.22	2.21
RILEM基準	2.24	2.27	2.29	2.27
BS規格	2.19	2.21	2.21	2.20

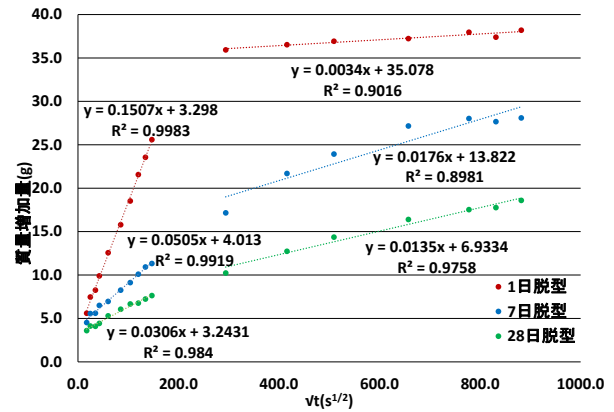


図-2 ASTM C 1585-13による吸水試験結果

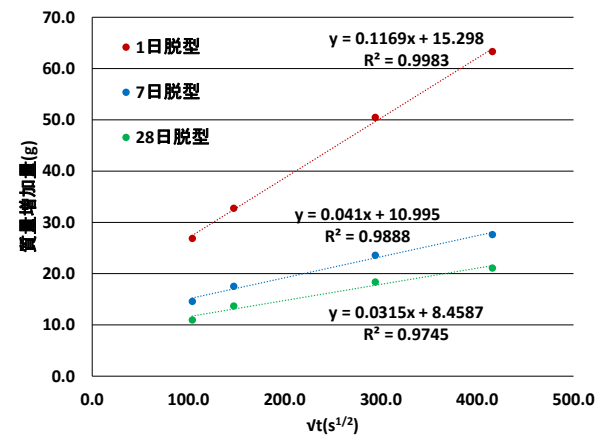


図-3 RILEM CPC11.2による吸水試験結果

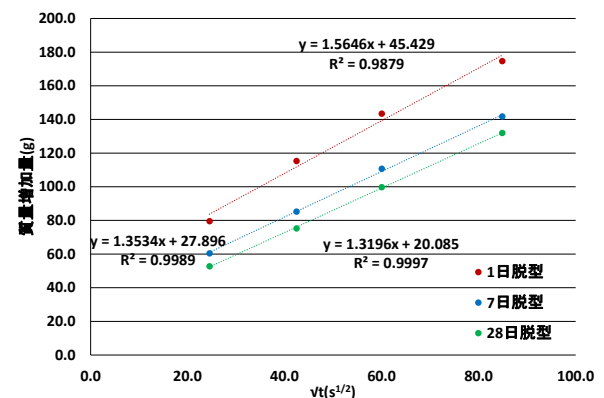


図-4 BS1881-122による吸水試験結果

(3) ASTM 規格を用いた繰返し吸水試験

前項(2)で示した ASTM 規格による吸水試験を 1 回目とし、その後に同じ供試体を繰返し用いて 2 回目と 3 回目の吸水試験を行った。計 3 回の繰返し吸水試験結果として、吸水試験前後での供試体の単位体積質量の変化を図-5、初期吸水速度係数の変化を図-6 に示す。いずれも 3 体の供試体の平均値を示した。

まず、28 日脱型と養生を十分に行った供試体については、吸水試験回数に拘わらず、試験前後の質量および吸水速度係数にほとんど変化がなかった。すなわち、材齢 28 日までの封緘養生を行うことによって、その後の水の供給による物性の変化がほとんどないこととともに、ASTM 規格による吸水試験の再現性が確認された。

一方、1 日および 7 日脱型の供試体については、吸水試験の繰返しによって、試験開始前の質量が増加するとともに、吸水速度係数が小さくなる傾向がみられた。これは、養生期間が不十分であったため、吸水試験によって供試体に水が供給されることによりセメントの水和反応が追加的に生じ、コンクリートの組織が緻密になったためと推察できる。ただし、吸水試験による水の供給を繰返すことによる変化の程度は、1 日脱型と 7 日脱型では大きく異なった。7 日脱型の供試体については、2 回目の吸水試験で 28 日脱型の供試体に近い吸水速度係数まで減少したが、1 日脱型の供試体については 3 回目の吸水試験でも 28 日脱型の 3 倍程度の吸水速度係数であり、吸水速度係数の減少に限界があることが示された。これは、材齢初期の養生が十分ではなかった場合には、その後のコンクリートへの水の供給により物質移動抵抗性（今回は吸水速度係数）が改善するものの、脱型 1 日のように極端に養生が不足した場合には、その後の水分供給によっても十分な改善効果が得られないことが意味する結果と言える。

3. 各種表層品質評価手法の相互比較

3.1 供試体の作製と試験の概要

表層透気試験（トレント法）³⁾、散水試験⁶⁾、および吸水試験（ASTM C 1585-13）の 3 手法による表層品質評価の相互比較を行うため、700mm×700mm×200mm の壁状供試体を作製した。配合および養生条件は、前章 2. にて用いた円柱供試体と同一とした。材齢 1 日、7 日、28 日の脱型後に室内で気中暴露した後、材齢 120 日程度で、表層透気試験、散水試験、採取コアによる吸水試験（ASTM C 1585-13）を順次行った。ブリーディングによって供試体の高さ方向に品質が変動する可能性を考慮し、上段と下段の 2 水準の高さで各測定を行った。なお、散水試験や表層透気試験はコンクリートの含水率の影響を

受けるため、電気インピーダンス法によって表面水率を測定した。

各種試験の相関分析についての研究はすでに多くあるが、本検討では、室内試験としては比較的大きな供試体を用いたこと、後述するように複数の測定点の結果を平均したものを考察に用いたこと、新たに開発された散水試験を含めた比較分析を行ったことに特徴がある。

表-4 吸水速度係数の比較（単位:g/s^{1/2}）

	1日脱型	7日脱型	28日脱型
ASTM規格(初期)	0.151	0.051	0.031
RILEM基準	0.117	0.041	0.032
BS規格	1.565	1.353	1.320

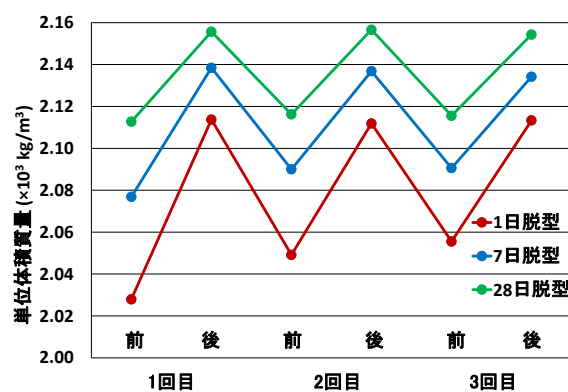


図-5 供試体の単位体積質量の変化

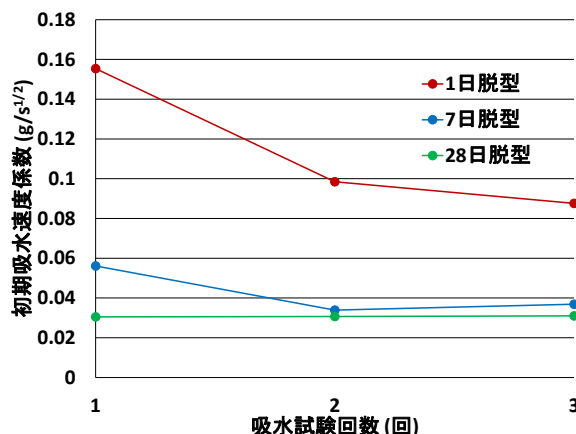


図-6 初期吸水速度係数の変化

3.2 各種試験方法

(1) 表層透気試験³⁾

表層透気試験（トレント法）により透気係数を測定した。ダブルチャンバーからなるカップを測定箇所に取り付けて減圧し、圧力差から算出される表層透気係数で表層品質を評価した。壁状供試体の上段と下段で 5 箇所ずつの測定を行い、それぞれで対数平均値を求めた。

表-5 各種試験結果

		表面含水率(%)	散水回数(回)	表層透気係数($\times 10^{-16}m^2$)	吸水速度係数($g/s^{1/2}$)
上段	1日脱型	3.5	15.3	3.8	0.071
	7日脱型	4.1	7.5	2.9	0.067
	28日脱型	4.2	7.8	0.91	0.047
下段	1日脱型	3.8	4.3	0.88	0.084
	7日脱型	4.4	1.5	0.34	0.055
	28日脱型	4.4	2.0	0.13	0.038

(2) 散水試験⁶⁾

手動のスプレーを用い、60秒間隔で同一箇所にて一定量の水を噴霧し、水が流下するまでに要した散水回数で表層品質を評価した。コンクリートの組織が緻密なもののほど、表面からの水の吸水量は少なく、少ない散水回数で水が流下する試験である。

壁状供試体の上段と下段で4箇所ずつ散水を行い、それぞれの平均散水回数を求めた。なお、表層透気試験を実施後に行い、散水による表面含水率の上昇が表層透気試験に影響を与えないようにした。

(3) コア供試体を用いた吸水試験

表層透気試験および散水試験を実施した後、湿式でコンクリートコアを採取し、前章で検討を行った、ASTM C 1585-13を参考とした吸水試験を実施した。コンクリートコアは、直径100mmの標準コアを採取した。壁状試験体の上部と下部のそれぞれから、各3体を採取した。表面から50mmの長さに切断し、飽水処理をせずに前乾燥を行ったのち、吸水試験を行って初期吸水速度係数を算定した。

3.3. 各種表層品質評価手法の試験結果

各種表層品質評価手法の試験結果と表面含水率を表-5に示す。スイス標準規格 SIA 262/1:2013では、表層透気試験を実施する際には、表面含水率が5.5%以下であることが条件になっているが、今回の供試体の最大値は4.4%であり、いずれも十分に乾燥した状態であった。なお、脱型材齢が若いほど含水率は低く、組織が緻密ではないために乾燥が進んだためと考えられる。また、いずれの供試体においても下段に比べて上段の含水率がやや低い傾向を示し、養生と同様に、上段は下段と比較して相対的に密実ではなく、乾燥が進行した可能性が考えられた。

(1) 表層透気試験の結果

脱型材齢が若く養生期間が短くなるほど表層透気係数が大きくなり、養生条件の差を適切に検出した。また、上段と下段の測定値を比較すると、いずれの供試体でも上段の透気係数が多くなり、ブリーディングによって上段の物質透過抵抗性が低下したものと評価された。なお、

養生と測定高さの違いに関しては、上段と下段のそれぞれで同程度の透気係数の増加傾向を示した。

(2) 散水試験の結果

1日脱型のように養生期間が短い場合には散水回数が多くなり、養生の影響が検出された。一方で、今回の試験では、7日脱型と28日脱型の散水回数には違いがみられなかった。また、上段と下段の違いに関しては、上段の散水回数が多く、下段では数回で流下する結果となった。なお、養生と測定高さの違いについては、測定高さの違いの方が散水回数に与える影響が大きい傾向を示した。

(3) コア供試体を用いた吸水試験の結果

養生期間が短いほど初期吸水速度係数が大きくなり、コア供試体においても養生の影響が検出された。一方で、壁状供試体の上部と下部における初期吸水速度係数の違いは明確ではなく、採取高さの影響は確認できなかった。このことから、ブリーディングの影響が試験結果に及ぼす影響が小さい試験であるといえる。

(4) 散水回数と表層透気係数の関係性

散水試験で得られた散水回数と表層透気試験で得られた表層透気係数の関係を図-7に示す。表層透気係数が大きくなるほど散水回数が増える傾向を示した。近似曲線の決定係数は0.93と高く、両者の相関は高い。すなわち、本研究の限られたデータ数ではあるが、簡易法である散水試験の有効性をあらためて確認することができた。

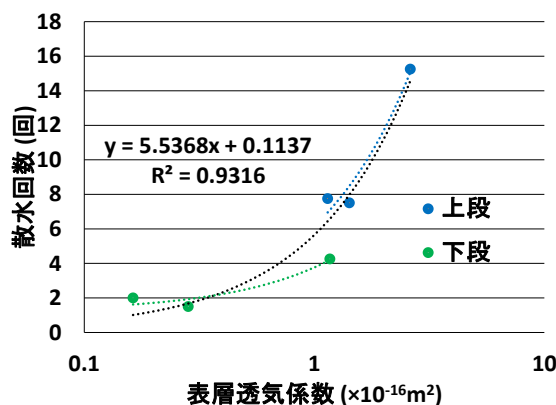


図-7 散水回数と表層透気係数の関係

(5) 吸水速度係数と表層透気係数の関係

コア供試体を用いた吸水試験から得られた初期吸水速度係数と表層透気係数の関係を図-8に示す。全体としては表層透気係数が大きくなるほど吸水速度係数が大きくなる傾向を示したが、決定係数は0.36と高くなく、データのばらつきが大きかった。一方で、前述のように上下の測定高さの影響が表層透気試験と吸水試験では異なっていたことから、測定高さごとの相関性も検討した。その結果、上段および下段のそれぞれにおいては比較的高い相関性を示すことが確認された。すなわち、表層透気試験と吸水試験では測定手法が異なり、表層透気試験の方がブリーディングの影響を受けた測定高さの影響を顕著に受けたと言える。表層透気試験（トレント法）ではダブルチャンバー法によってスキンの巻き込み空気の影響を低減しているものの、完全ではなく、ごく表層の脆弱層の影響を強く受けたものと考えられる。

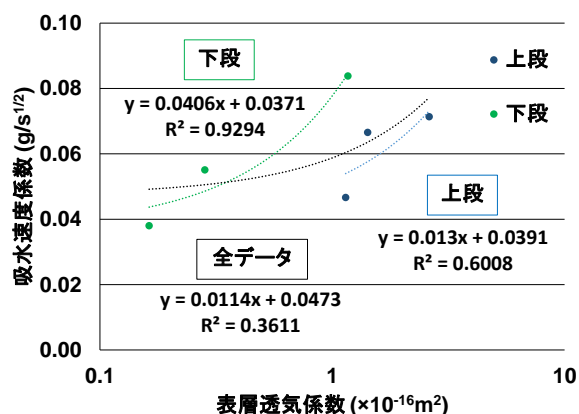


図-8 表層透気係数と吸水速度係数の関係

6. まとめ

本研究では、養生条件を変化させたコンクリートの表層品質に着目し、表層透気試験(トレント法)、散水試験、コア供試体を用いた吸水試験による測定を行い、各試験手法の特徴を分析した。その結果、以下の知見を得た。

- (1)海外で規格化された吸水試験として、ASTM C 1585-13, RILEM CPC11.2, BS1881-122 の3手法を用い、円柱供試体の吸水速度係数を測定し、いずれの試験においても養生条件の違いによるコンクリートの吸水性能の差を評価できることを確認した。また、養生の違いは、ASTM規格の手法によって特に顕著に表れることが示された。
- (2)壁状試験体において、散水試験と表層透気試験、およびコア供試体を用いた吸水試験を行い、いずれの試験においても養生条件の影響を検出できることを確認した。一方で、測定高さの影響は試験によって大きく

異なることが明らかになった。ブリーディングの影響によってごく表層部の物質透過性が変動し、その影響が散水試験や表層透気試験では強く測定値に反映されていると考えられた。

また、今後の課題として、特に ASTM C 1585-13 を参考とした吸水試験については、初期吸水速度係数のみで評価するのではなく、吸水量や2次吸水速度係数での評価も検討する予定である。

謝辞

本研究は、国土交通省の「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」による研究助成を受けて実施したものです。また、研究の実施にあたっては、岸利治教授（東京大学生産技術研究所）や上田洋博士（鉄道総合技術研究所）、舌間孝一郎准教授（前橋工科大学）のご助力をいただきました。ここに記し、謝意を示します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 97，2012
- 2) 半井健一郎ほか：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム，コンクリート工学，Vol.51，No.2，pp.153-158，2013.
- 3) Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, V.25, No.6, pp.358-365, 1992.7
- 4) 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.
- 5) 家田真理子ほか：水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.670-675，2012.
- 6) 西尾壮平ほか：コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価，Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.303-310, 2012.
- 7) Nishio, S. et al.: A simple on-site non-destructive evaluation method for the cover concrete quality by spraying small amounts of water onto the concrete surface, International Association for Life-Cycle Civil Engineering, pp.245, 2014.
- 8) Bentz, D.P. et al.: Service life prediction based on sorptivity for highway concrete exposed to sulfate attack and freeze-thaw conditions, FHWA-RD-01-162, 2001.