

# 論文 コンクリートの表層品質試験結果に対する試験方式などの影響

葛山 育海\*1・寺西 浩司\*2

**要旨:** 近年, RC 構造物の表層品質を透気試験や吸水試験などの非破壊試験で評価する動きが広まってきた。しかし, 試験方式や透過物質の違いがこの種の試験の結果に及ぼす影響は必ずしも明確になっていない。そこで, 本研究では, 様々なタイプの吸水・透気試験を, 水セメント比や初期養生期間を変化させたコンクリートに対して同時に実施し, それらの結果を比較することにより, 試験方法の違いが試験結果に及ぼす影響を検討した。その結果, 吸水試験の結果は, 試験方式や加圧の有無の影響を受けること, また, 吸水試験と透気試験の結果の関係は, 水セメント比ごとに異なることなどがわかった。

**キーワード:** 表層品質, 吸水試験, 透気試験, トレント法, 水セメント比, 養生期間

## 1. はじめに

コンクリート表層からの劣化因子の侵入により生じる中性化や塩害などの劣化は, 鉄筋腐食の誘発要因となるため, RC 構造物の寿命に直結する劣化であるといえる。また, この種の劣化に対しては, かぶりコンクリートの物質移動抵抗性が大きな影響を及ぼすが, コンクリート表層の品質は, 強度だけではなく, 型枠の存置期間や初期養生の方法・期間, 建設後の環境などによっても左右される。このような認識から, 近年では, コンクリート構造物の表層品質を, 透気試験や吸水試験などの非破壊試験により直接的に評価する動きが広がっている。

これらの表層品質試験に関しては, トレント法<sup>1)</sup>や SWAT<sup>2)</sup>をはじめとした様々な透気・吸水試験方法がすでに開発されており, 普及しつつある。また, 筆者らも, これまでに, 吸水させた化粧用コットンパフもしくは PVA スポンジ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というような, 湿布式吸水試験<sup>3)</sup>や スポンジ式吸水試験<sup>4)</sup>などの簡便な試験方法を提案してきた。しかし, これらのそれぞれの試験がコンクリート表層のどのような性質を評価しているのかは必ずしも十分には解明されていない。すなわち, コンクリート中を透過する物質が空気であるか水であるかの違いや試験方式の違いなどが試験結果に及ぼす影響は明らかにされていない。

そこで, 本研究では, 水セメント比や初期養生期間を変化させたコンクリートに対して, トレント試験, および本研究で新たに考案した方法を含む 4 種類の吸水試験を同時に実施し, 試験方法の違いが試験結果に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因とその水準

表-1 に, 実験要因とその水準を示す。本実験では, コンクリート組織の緻密度を変化させるために水セメント比を 35, 50 および 65% の 3 種類とした。また, 供試体の初期水中養生期間を 1, 3 および 6 日の 3 水準に, その後の気中養生期間を 1~91 日の範囲で 7 水準に変化させた。

### 2.2 供試体

表-2 および 3 に, 供試体コンクリートの使用材料お

表-1 実験要因とその水準

要因	水準
水セメント比 (%)	35, 50, 65
水中養生期間 (日)	1, 3, 6
気中養生期間 (日)	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91

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 <sup>3</sup> )
細骨材	S	揖斐川産川砂 (表乾密度 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.62%, 粗粒率 2.61)
粗骨材	G	春日井産砕石 2005 (表乾密度 2.68 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.40%, 実積率 58.6%)
AE 減水剤 (高機能タイプ)	A1	有機酸系誘導体および芳香族高分子化合物
高性能 AE 減水剤	A2	ポリカルボン酸コポリマー

表-3 コンクリートの調査および試験結果

水セメント比 (%)	スランブ量 (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )				混和剤 (g/m <sup>3</sup> )		試験値		
				W	C	S	G	A1	A2	スランブ量 (cm)	空気量 (%)	91 日圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
35	60*	4.5	49.3	185	167	262	340	—	3330	59*	4.5	89.3
50	18	4.5	45.2	185	117	312	340	1480	—	20	6.0	41.9
65	18	4.5	52.6	185	90	339	340	2240	—	20	5.9	30.6

\*スランブフロー (cm)

\*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻大学院生 (正会員)

\*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

よび調査を示す。また、表-4に試験項目、供試体寸法・個数、測定箇所および測定回数を示す。供試体は、試験項目ごとに表中に示す4種類のを、水セメント比と水中養生期間の組合せごとに用意し、気中養生期間ごとの測定は同一の供試体に対して行った。その際、同一供試体の同一箇所に対して繰り返し測定を行うことの影響に関しては特に考慮しなかった（表層品質試験結果同士の比較にあたってこの点に関する条件は概ね同一であると見なした）。また、供試体の側面のうち、型枠（メタルフォーム）に接していた面を各種試験の試験面とした。

図-1に実験日程を示す。供試体は打込みの翌日に脱型し、その後、水中養生期間の水準に従って標準養生を行った。そして、供試体を恒温恒湿室内（温度20℃、湿度60%RH）に存置して気中養生し、図-1中に示した材齢において各種表層品質評価試験を行った。

### 3. 表層品質評価試験の概要

本実験では、表-4中に示した4種類の吸水試験および1種類の透気試験（トレント試験）を実施した。これらの中の面吸水試験は試験片を対象とした実験室レベルの試験方法であり、それ以外は構造物での原位置試験を想定した試験方法であるが、本研究では、これらの区別に拘らず、なるべく広範なメカニズムの試験方法を選定した。

また、表層品質試験の測定値に対して含水率が極めて大きな影響を与えることは周知の事実であり<sup>4)</sup>、本実験で別途測定した結果によると、試験体の表面含水率は、気中養生3日まで6~7%程度であり、その後4%前後に収束した。したがって、本実験の各種表層品質試験結果はこの影響を包含したものとなるが、各気中養生期間で

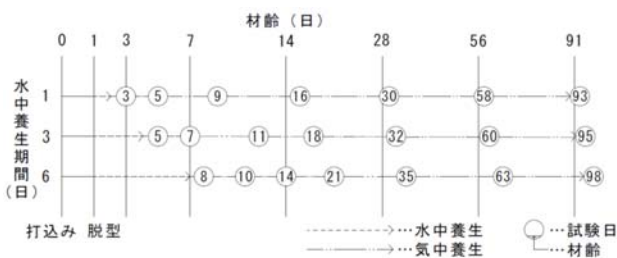


図-1 実験日程

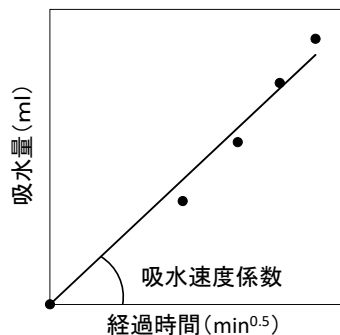


図-3 吸水試験結果の評価方法

の試験結果同士の比較にあたっては、含水率の条件は概ね同一と考えられるので、本研究ではこの点について特に配慮はしなかった。

### 3.1 吸水試験

#### (1) 湿布式・スポンジ式吸水試験

図-2に、湿布式・スポンジ式吸水試験<sup>3), 4)</sup>の概要を示す。湿布式吸水試験では、化粧用コットンパフ（50×60mm）に水と合わせて5gになるように吸水させ、それを試験面に張り付けた後に乾燥防止用シートで覆う。そして、15分ごとに60分まで、コットンパフの質量減少量（すなわち、吸水量）を測定する。スポンジ式吸水試験は、湿布式吸水試験よりもさらに試験のハンドリングを高めるために、保水材をコットンパフからPVAスポンジ（40×40mm）に変更したものであり、保水材への吸水量をスポンジと合わせて10gとしているほかの手順は湿布式吸水試験と同じである。これらの試験では、吸水量と経過時間の平方根の間に直線関係が見られるため、図-3に示すように、測定結果を直線回帰して得られる傾きを吸水速度係数として表層品質の評価に用いる。

#### (2) 加圧式吸水試験

本研究では、加圧式吸水試験を新たに考案して試行した。図-4にその概要を示す。本試験では、まず、注入座金を接着剤で試験面に張り付ける。次に、水5mlを入れたシリンジと注入座金をホースを介して接続し、輪ゴムにより加圧した状態で吸水を開始する。そして、試験開始から0、15、30、45および60分後にシリンジの目盛りを読み取り、吸水量を測定する。

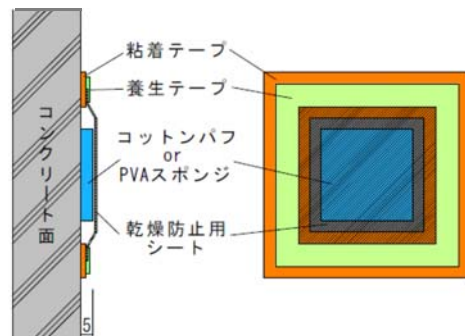


図-2 湿布式およびスポンジ式吸水試験の概要

表-4 試験項目と供試体

区分	試験項目	供試体寸法 (mm)	供試体個数* (個)	測定箇所 / 供試体 (箇所)	測定回数 / 測定箇所 (回)
吸水試験	湿布式 <sup>3)</sup>	100×100×400	1	3	1
	スポンジ式 <sup>4)</sup>				
	加圧式	100×100×100	1	1	1
	面吸水 (ASTM C 1585)	88×88×50	2	1	1
透気試験	トレント試験 <sup>1)</sup>	150×150×150	1	1	3

\*水セメント比、水中養生期間の組合せに対する個数

### (3) 面吸水試験

図-5 に、面吸水試験の概要を示す。本試験は、供試体形状を円柱形から試験面の面積が同一となるような角柱形に変更した以外は、ASTM C 1585 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes) に準拠したものである。試験にあたっては、供試体の質量を測定した後に、図中に示したように、深さ2mmまで供試体を水中に浸漬させ、30分経過後に質量増加量(すなわち、吸水量)を測定する。

### 3.2 透気試験(トレント試験)

トレント試験では、まず、コンクリート表面に装着したダブルチャンバー内を真空ポンプにより真空引きしたうえで、内側チャンバーを真空ポンプから切り離す。その後、内側チャンバー内と同一になるように外側チャンバー内の圧力を制御すると、内側チャンバー直下のコンクリート内部に栓流の空気の流れが形成される。本試験では、この仮定に基づいて、内側チャンバー内の復圧過程の圧力変化を調べることで、透気係数を算出する<sup>1)</sup>。

## 4. 実験結果

### 4.1 加圧式吸水試験の結果

図-6 に、本研究で考案した加圧式吸水試験で得られた吸水量の経時変化の一例を示す(W/C50%, 気中養生

期間1, 3および7日)。本試験においても、湿布式・スポンジ式吸水試験と同様に、吸水量と経過時間の平方根の間に直線関係が得られた。そこで、加圧式吸水試験の場合も、3.1(1)に示したように最小二乗法により吸水速度係数を算出し、以下の考察に用いた。

### 4.2 各種吸水試験の結果

図-7~10に、湿布式吸水試験、スポンジ式吸水試験、加圧式吸水試験および面吸水試験における、吸水速度係数と気中養生期間の関係を示す。ここで、本研究は吸水試験結果同士の比較を目的としたものであるため、吸水速度係数は、各試験の試験面積で除した値(以下、単位吸水速度係数という)で表示することとした。

これらの図によると、水セメント比が大きいほど、また、水中養生期間が短いほど、どの試験の単位吸水速度係数も大きくなる傾向となっている。これは、コンクリート表層の組織がポーラスであったことが原因と考えられる。また、いずれの吸水試験の場合も、水中養生期間が1日と短いケースにおいて、水セメント比にかかわらず、気中養生の開始直後に単位吸水速度係数が一旦小さくなってから再び大きくなっている。これは、極若材齢においてセメントの水和反応によりコンクリート組織が緻密化され、その後乾燥の影響を受けて多孔質化に転じたことが吸水速度係数の結果に反映されたものと考えられる。

### 4.3 透気試験の結果

図-11に、トレント試験で得られた透気係数と気中養生期間の関係を示す(水セメント比50%, 水中養生期間

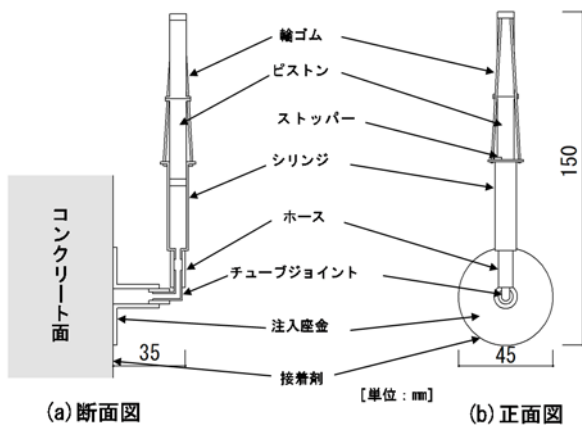


図-4 加圧式吸水試験の概要

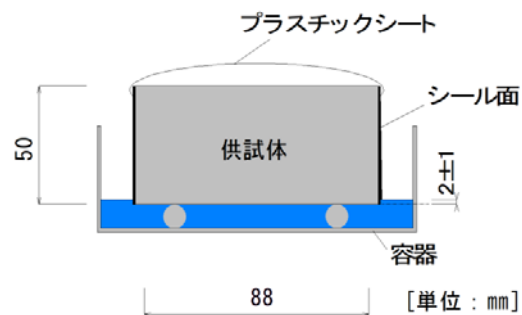


図-5 面吸水試験の概要

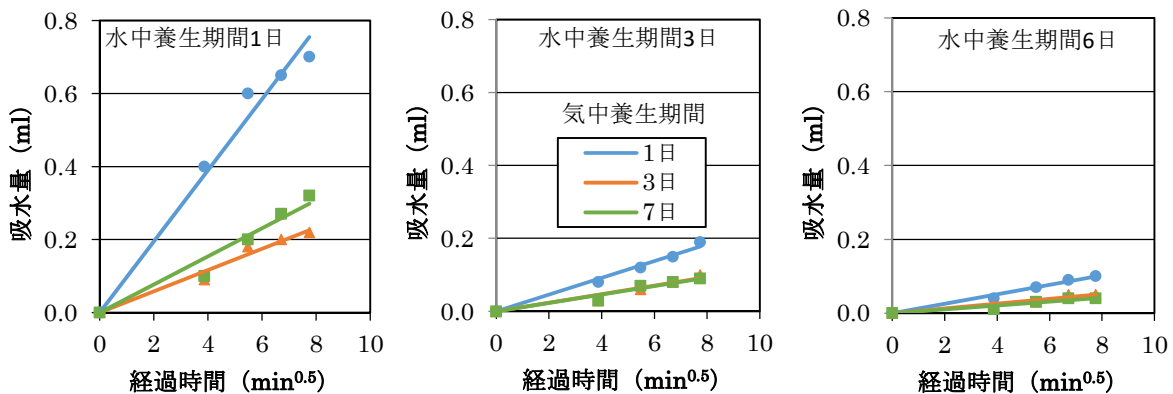


図-6 加圧式吸水試験の吸水量の経時変化(W/C50%)

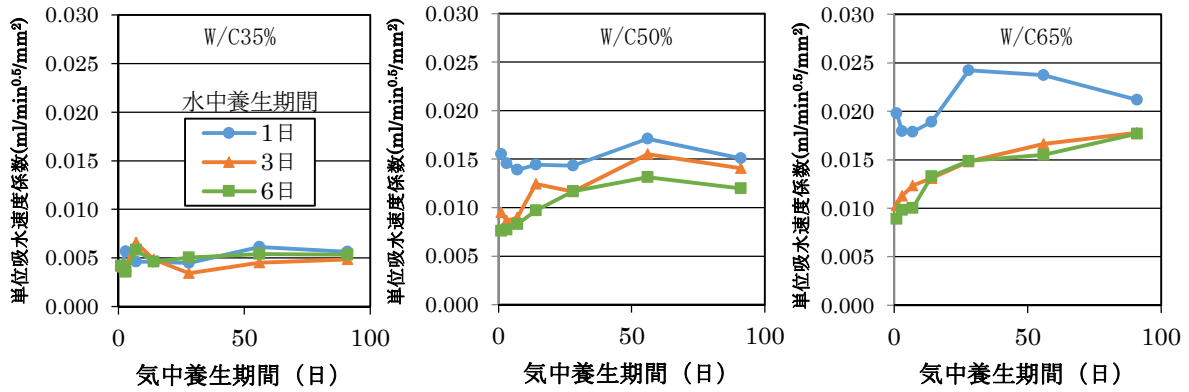


図-7 単位吸水速度係数と気中養生期間の関係（湿布式吸水試験）

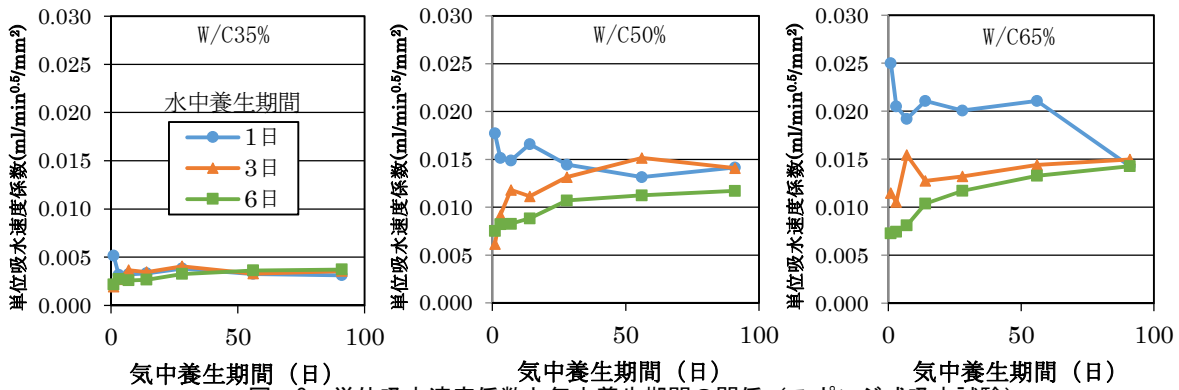


図-8 単位吸水速度係数と気中養生期間の関係（スポンジ式吸水試験）

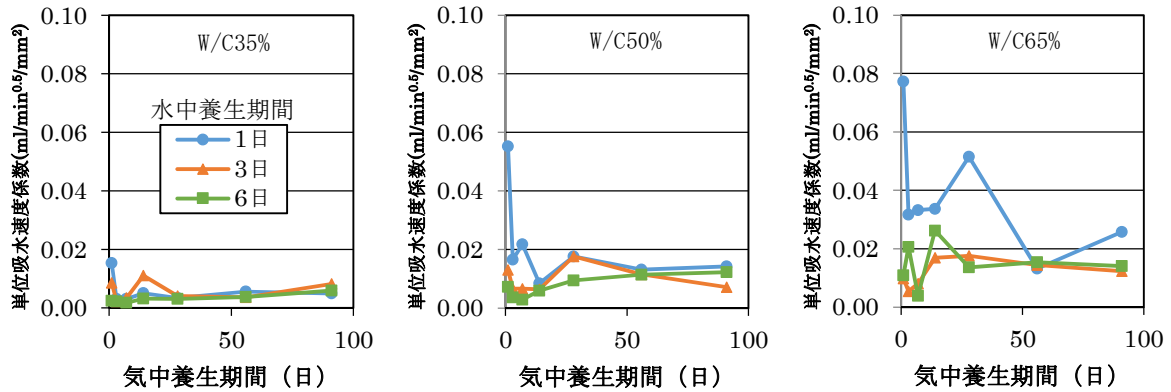


図-9 単位吸水速度係数と気中養生期間の関係（加圧式吸水試験）

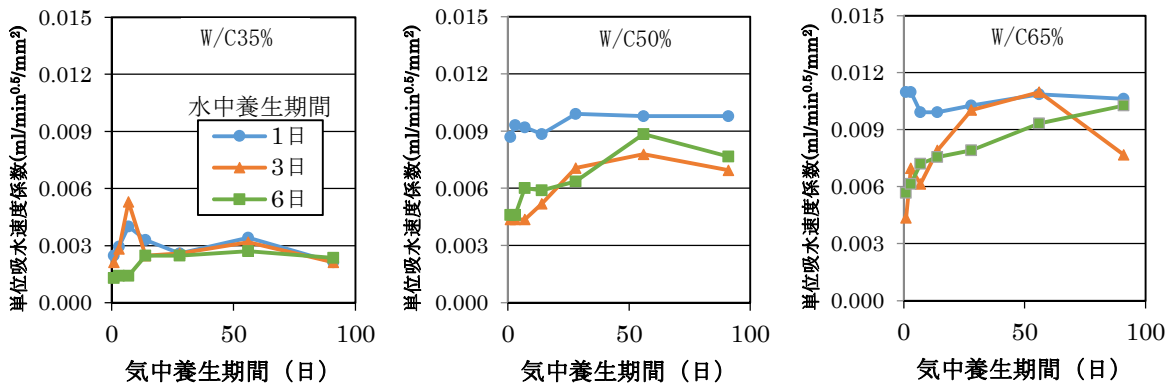


図-10 単位吸水速度係数と気中養生期間の関係（面吸水試験）

3日のケースは、測定の際に不都合があったため結果なし。透気係数の測定結果は、W/C35%の場合に、水中養生期間1および3日より6日の方が大きくなった。しかし、そのほかは吸水速度係数とほぼ同様な傾向であった。

## 5. 考察

### 5.1 吸水試験の試験方式などの影響

#### (1) 吸水方式および吸水方向の影響

図-12に、面吸水試験と湿布式吸水試験の単位吸水速度係数の関係を示す。同図より、両者の相関は高く、湿

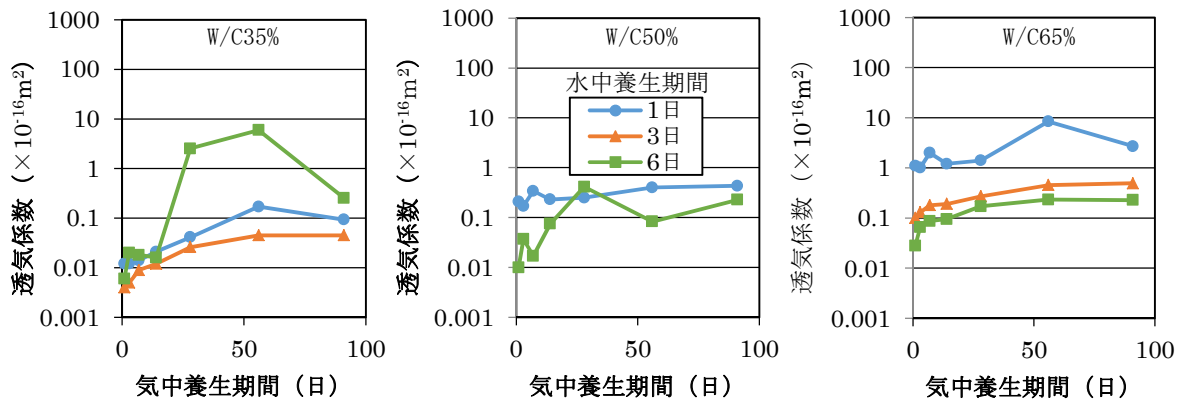


図-11 透気係数と気中養生期間の関係

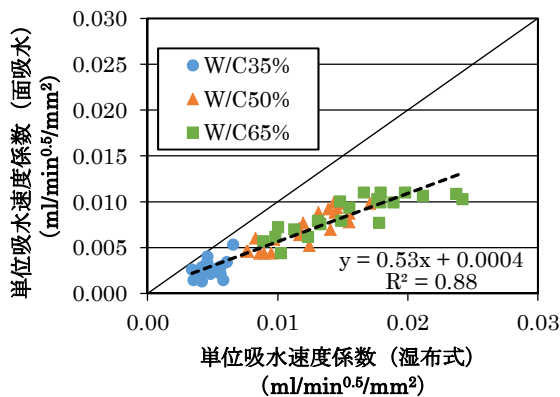


図-12 単位吸水速度係数同士の関係 (面吸水試験と湿布式吸水試験)

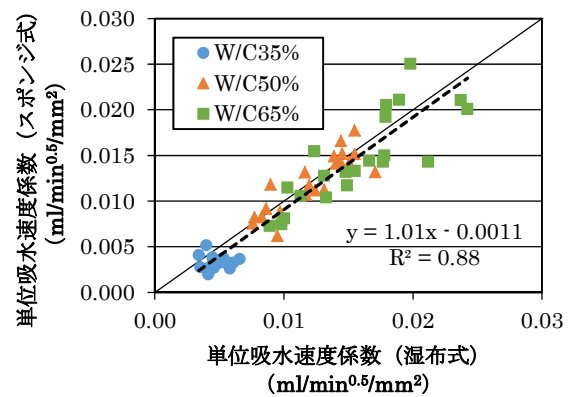


図-13 単位吸水速度係数同士の関係 (スポンジ式吸水試験と湿布式吸水試験)

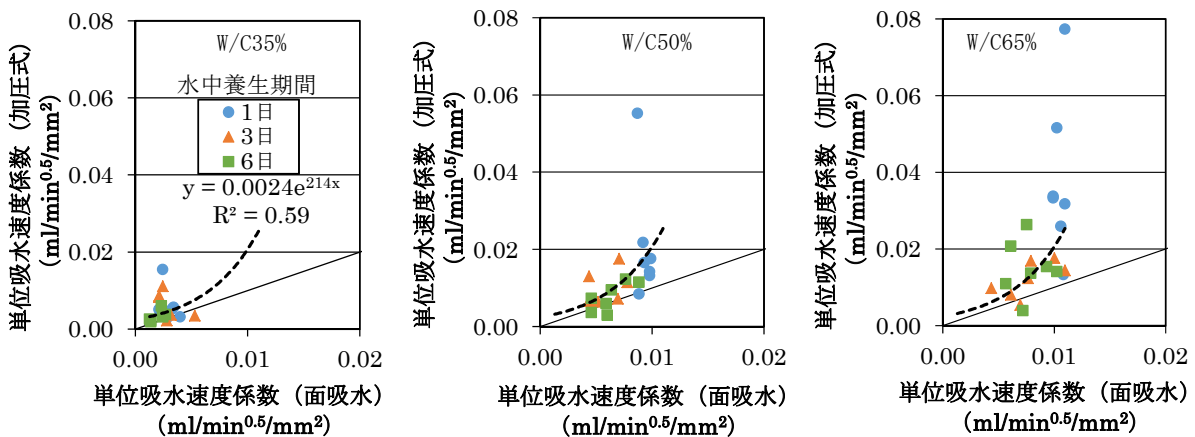


図-14 単位吸水速度係数同士の関係 (加圧式吸水試験と面吸水試験)

布式吸水試験の方が面吸水試験よりも単位吸水速度係数が大きくなっていることがわかる。なお、ここで取り上げた2つの試験方法は、吸水方式(直接的な吸水、または保水材を介した吸水)と吸水方向(下面からの吸水、または垂直面からの吸水)の2つの点が異なっている。したがって、保水材を介して吸水させたか、あるいは垂直面から吸水させたかのいずれかの影響により吸水量が増大したものと考えられる。ただし、本実験の範囲では、これらのどちらが影響しているかを特定できず、この点については今後さらに検討を要する。

### (2) 保水材の種類の影響

図-13に、スポンジ式吸水試験と湿布式吸水試験の単

位吸水速度係数の関係を示す。同図からわかるように、相関率は0.88であり、両者の相関は高い。また、回帰直線の傾きはほぼ1となっており、湿布式吸水試験で使用する繊維質の保水材とスポンジ式吸水試験で使用する連続した空隙組織を有する保水材では、コンクリートに吸水させる性能に違いがないと言える。

### (3) 加圧の有無の影響

図-14に、加圧式吸水試験と面吸水試験の単位吸水速度係数の関係を示す。ここで、各水セメント比の図中に示した回帰曲線は、すべての水セメント比の測定データに対するものである。面吸水試験と加圧式吸水試験は、いずれも直接的に試験面に吸水させるタイプの試験であ

るが、これらの図から、加圧することにより吸水量が多くなるのがわかる。また、いずれの水セメント比の場合も、面吸水試験の結果には水中養生期間が短期間（1日間）であることの影響が明確な形で反映されているのに対し、加圧式吸水試験の結果にはそのような傾向は見られない。湯浅ら<sup>5)</sup>は、水中養生期間が短いほど、コンクリートの乾燥面に近い部分の空隙が大きな径に偏ることを報告している。このことを踏まえると、一つの仮説として、面吸水試験では、水中養生期間1日のケースにおいて、このような大きな径の空隙に吸水されたため、単位吸水速度係数が顕著に増大したのに対し、加圧式吸水試験では、加圧により小さな空隙にまでさらに吸水されたため、水中養生期間の影響が曖昧になったものと考えることができる。

## 5.2 透気試験と吸水試験の結果の特性の違い

図-15に、湿布式吸水試験の単位吸水速度係数と透気係数の関係を示す。同図によると、両者の関係は、水セメント比50および65%のグループと35%のグループに層別される。湯浅らの研究<sup>5)</sup>によると、水セメント比35%のコンクリートの表層部分には半径 $10^2 \text{ \AA}$ 前後の細かい空隙が多く存在する。また、宇野らの研究<sup>6)</sup>によると、その径の空隙に対する空気と水の透過速度を表す係数は、それぞれ $8.5 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 、 $7.0 \times 10^4 \text{ cm/s}$ であり、空気の方が水よりも2桁大きい。これらより、水セメント比35%のコンクリート中の空隙内では、空気に比べて水は圧倒的に移動しにくいいため、水セメント比50および65%のケースとは異なり、透気係数のみが大きくなるものと考えられる。すなわち、透気試験と吸水試験の違いにはコンクリート中の空隙の大きさが影響を及ぼすと言える。

## 6. まとめ

本研究では、透気試験（トレント試験）および4種類の吸水試験の結果を比較することで、表層品質評価試験の方法の違いが試験結果に及ぼす影響を検討した。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

(1) 垂直面から保水材を介して吸水させるタイプの吸水試験と、下面から直接的に吸水させる吸水試験では、前者の吸水試験の方がコンクリートの吸水量は多い。ただし、このことに対して吸水方式と吸水方向のどちらが影響しているのかは本研究の範囲では特定できておらず、今後の課題である。

(2) 吸水試験では、繊維質の保水材と連続した空隙組織

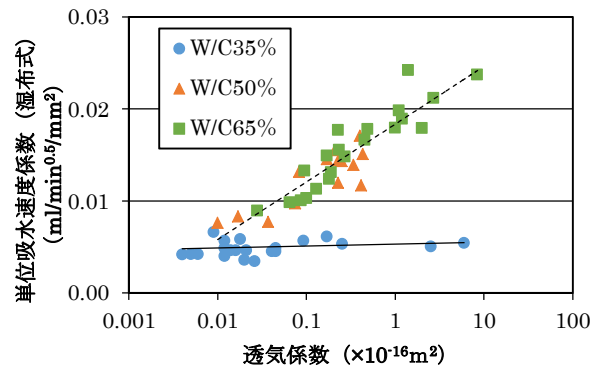


図-15 湿布式吸水試験の単位吸水速度係数と透気係数の関係

を有する保水材では、コンクリートに吸水させる性能に違いはない。

(3) 吸水試験では、加圧するよりも加圧しない場合の方が、水中養生期間の影響を明確に捉えることができる。

(4) 吸水試験と透気試験（トレント試験）の結果の関係は、コンクリートの水セメント比ごとに異なった傾向となる。

## 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, 1992.7
- 2) 井川倫宏, 玉岡優児, 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基準に関する基礎的研究, *コンクリート工学論文集*, No.29, pp.101-109, 2018.9
- 3) 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
- 4) 寺西浩司, 葛山育海: 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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.41, No.1, pp.1751-1756, 2019.7
- 5) 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
- 6) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, *土木学会論文集*, No.469, pp.25-34, 1993.6