

論文 モルタルを用いた場合の表面吸水試験による品質評価に関する研究

白川 敏夫*1・花井 伸明*1・内田 和弘*2

要旨: 本研究は、種々の環境下で一定質量となるまで乾燥させたモルタル供試体を用い、新たに提案した表面吸水試験装置により吸水試験を行った。これらの結果より、供試体内の含水率分布が一定条件での吸水量と時間の関係について検討を行った。また、表面吸水試験と同一の条件の供試体を用い、気体拡散試験を行い、気体拡散係数を求め、吸水試験結果と気体拡散係数の関係についても検討した。以上のことより、非破壊試験である表面吸水試験による吸水機構や表層部の耐久性に大きく係わる気体透過性の評価の可能性について検討した。

キーワード: 吸水試験, かぶりコンクリート, 気体拡散, 非破壊試験, 耐久性

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化は、外部環境から、コンクリート中への有害物質の進入により進行するケースが多い。例えば、コンクリートの中酸化は、大気中の炭酸ガスがコンクリート中へ拡散し、コンクリート中のセメント水和物と反応することにより進行する。これらのことより、筆者の一人はこれまでコンクリートの気体拡散性状について、種々明らかにしてきた¹⁾。

これら有害物質の進入は、コンクリート表層部より進入することから、表層部コンクリートの緻密性の評価は、重要なこととなる。

近年、非破壊や微破壊の試験により、実構造物の表層部のコンクリートの気体や水の物質移動抵抗性を測定し、コンクリートの耐久性を評価しようとする研究が種々行われている^{2),3),4),5)}。

筆者らは、非破壊試験である表面吸水試験により表層部コンクリートの緻密性を測定し、コンクリートの耐久性を評価する方法について検討を行っている⁶⁾。

以上のようなことを背景に、本研究では、3種類の配(調)合で、種々の環境下で一定質量となるまで乾燥させたモルタル供試体を用い、新たに提案した表面吸水試験装置により吸水試験を行った。これらの結果より、供試体内の含水率分布が一定条件での吸水量と時間の

関係について検討を行った。また、表面吸水試験と同一の条件の供試体を用い、気体拡散試験を行い、気体拡散係数を求め、吸水試験結果と気体拡散係数の関係についても検討した。

これらのことより、非破壊試験である表面吸水試験による吸水機構や表層部の耐久性に大きく係わる気体透過性の評価の可能性について明らかにすることを本研究の目的に実験検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の配(調)合

配(調)合は、より均質で、かつ供試体厚さをなるべく小さくするため、モルタルとした。

表-1に配(調)合を示す。表に示すように、水セメント比 45%, 55%, 65%の3種類のモルタルを使用した。表-1には、フロー値、および標準水中養生した4週圧縮強度も併せて示す。

2.2 供試体の作製

吸水試験用供試体は、練り混ぜ後、直径 200mm×厚さ 10mm、拡散試験用供試体は直径 100mm×厚さ 10mm の型枠に打設した。各供試体ともに、厚さを 10mm とした理由は、各乾燥環境下で供試体内の含水率が一定となるまでの期間を短くするとともに、吸水試験において、吸水深さが供試体厚さを超えないことを考慮したためである。

供試体は、翌日脱型を行い、材齢 7 日まで標準水中(温度 20℃)養生を行った。その後、温度 40℃の真空乾燥、温度 20℃相対湿度 60%、および温度 20℃相対湿度 80%の3つ乾燥条件の異なる環境下(W/C45%, 55%の調合では、温度 20℃, 相対湿度 45%も追加)で一定質量となるまで乾燥した。次に、乾燥した試験体を用いて、吸水試験、および拡散試験を行った。なお、供試体は各条件 3 個用

表-1 モルタルの配(調)合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)			フロー値 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)
	C	W	S		
45	739	332	1128	201	53.6
55	580	319	1294	206	38.7
65	478	310	1400	213	28.8

*1) C:セメント, W:水, S:細骨材を示す。

*1 九州産業大学 工学部住居・インテリア設計学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 九州産業大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

意した。

2.3 吸水試験方法

本研究で用いた吸水試験装置の概要を図-1に示す。本試験装置は、基本的に壁面の測定を対象とし、本実験の円盤状の供試体（直径200mm×厚さ10mm）は、垂直に立て実験を行った。

図-1に示すように、吸水試験装置は、三つのチャンバーからなり、外側のチャンバーからチャンバー1、チャンバー2、チャンバー3（最も内側のチャンバー）と呼ぶことにする。

チャンバー1は、吸引ポンプによりチャンバー内を負圧にすることにより、構造物への取り付けを行えるようにした。また、チャンバー3は、取り付けしたコンクリート構造物に吸水試験が行えるようにした。なお、吸水量測定のため、メモリを付した長さ300mmの吸水パイプを取り付けた。また、チャンバー2は、チャンバー1が吸引ポンプにより負圧となり、チャンバー3の吸水試験への影響を除くために作製した。

装置の外側の直径は184mmとし、コンクリートへ吸水させるチャンバー3の直径は80mmとした。また、チャンバー3は、吸水試験時に気泡が残らないように若干勾配を付けた。各チャンバーの間、またチャンバー1と外側とは約9から10mmの間隔とし、そこに溝を設けパッキンを挿入した。軟質のパッキンを用いることにより、多少のコンクリート表面の不陸にも対応できるようにした。なお、吸水状況を目視で確認できるように、材質は透明樹脂を使用した。

吸水試験は、まずチャンバー1を負圧にすることにより供試体に取り付け、次にチャンバー2に給水タンクより給水し、最後にチャンバー3にチャンバー2と同様に、給水タンクをより給水するとともに、吸水パイプへ給水した。なお、吸水パイプの長さは、図-1に示すように、300mmとし、吸水パイプへの吸水は、250mm程度とした。

吸水試験は、吸水パイプの水位を1分間隔に20分まで0.5mm間隔で読み取り、単位面積あたりの吸水量（mm³/mm²）を求めた。吸水試験後に、吸水深さを測定するため、供試体を割裂し、写真撮影した。

2.4 気体拡散試験方法

気体拡散試験は、酸素と窒素ガスの相互拡散によるセメント硬化体中への酸素ガスの拡散係数を求める方法として、日本コンクリート工学協会の「酸素の拡散係数試験方法(案)⁷⁾」に準じて行った。気体拡散係数(D_{N-O})は、筆者の既往の研究⁸⁾と同様に、以下の式により求めた。

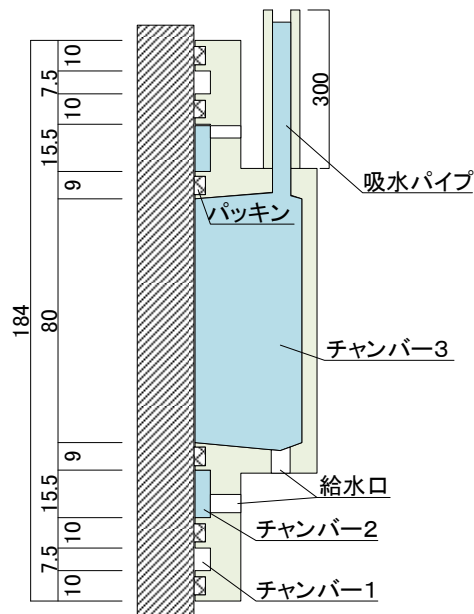


図-1 吸水試験装置の概要

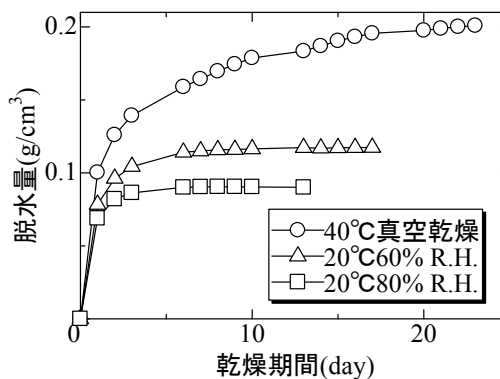


図-2 脱水量の経時変化 (W/C65%)

$$D_{N-O} = \frac{R_N \cdot (C_N - C_b) \cdot (L + \delta_N + \delta_O)}{\left\{ 1 - \frac{R_N}{R_O} \cdot \left(\frac{M_O}{M_N} \right)^{1/2} \right\} (C_N - C_b) - C_N} \cdot A_c \quad (1)$$

ここに、D_{N-O}：有効拡散係数(mm²/sec)、C_N：定常状態における窒素ガス中の酸素濃度、C_b：窒素ガスボンベ中の酸素濃度、R_N、R_O：窒素および酸素のガス流量(mm³/sec)、M_N、M_O：窒素および酸素の分子量、L：試験片の厚さ(mm)、A_c：試験片の断面積(mm²)、δ_N、δ_O：窒素ガス側および酸素ガス側の境界膜の厚さで、本装置および本実験条件では、それぞれ、2.1mmとした。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体の乾燥

水セメント比65%のモルタルを例に、脱水量の経時変

化を図-2 に示す。図に示すように、材齢の経過に伴い、脱水量が増加し、温度 20℃、湿度 60%R.H.、80% R.H. では、1 週間程度でほぼ一定となった。また、温度 40℃ の真空乾燥では、3 週間程度でほぼ一定となった。この脱水量がほぼ一定となった後、吸水試験および気体拡散試験を実施した。

3.2 吸水量と吸水時間の検討

吸水試験後の一例を写真-1 に示す。吸水試験により、チャンバー 2 と 3 の部分が水に濡れている。また、その境界部分には、パッキンにより仕切られ、チャンバー 3 が、独立した領域となって吸水している。しかし、一部の供試体で、チャンバー 2 と 3 の境界部分も水に濡れ、境界が不明確な場合も観察された。

酒井ら⁹⁾は、コンクリートへ浸入する液状水の挙動とコンクリートの細孔構造の関係について検討している。それによると、コンクリートの空隙中の液状水の浸入についての駆動力を毛細管張力とし、Washburn の式が適用できるとし、吸水量が時間の平方根に比例するとしている。

古賀ら¹⁰⁾は、ASTM C 1585 の方法に準じてコンクリートから採取したコア供試体の側面をシールし、6 時間の浸漬試験を実施している。その結果、浸漬した一方向の表面吸水試験において、吸水量が時間の平方根に比例するとしている。さらに、吸水試験結果とコンクリートの種々の物性との関係を検討している。

本実験の吸水試験中の吸水パイプの水位差から求めた単位面積あたりの吸水量 (mm^3/mm^2) と吸水時間の関係を図-3 に水セメント比 55% を例に示す。

図に示すように、いずれの条件においても、吸水時間の増加とともに、吸水速度は、徐々に低下する傾向となった。そこで、上記の研究と同様に、式(2)に近似した結果も併せて、図-3 に実線で示す。

$$V = S\sqrt{t} + V_0 \quad (2)$$

ここに、 V : 吸水量(mm^3/mm^2)、 S : 吸水係数($\text{mm}/\text{sec}^{0.5}$)、 t : 吸水時間(sec)、 V_0 : 初期吸水量(mm^3/mm^2)

図に示すように、いずれの実験結果も式(2)で非常に良く近似でき、すべて実験で相関係数が 0.99 以上の結果となった。

上記既往の研究と同様に、実験結果を式(2)で近似できることは、本試験装置での吸水は、一方向流れが支配要因となっていると考えられる。この理由として、当然吸水は 3 次元流れとなるとともに、チャンバー 1 の負圧の影響も考えられるが、チャンバー 3 の直径と吸水深さの関係、チャンバー 3 と 2 の間隔などが相互に影響していると考えているが、詳細については、今後の課題である。

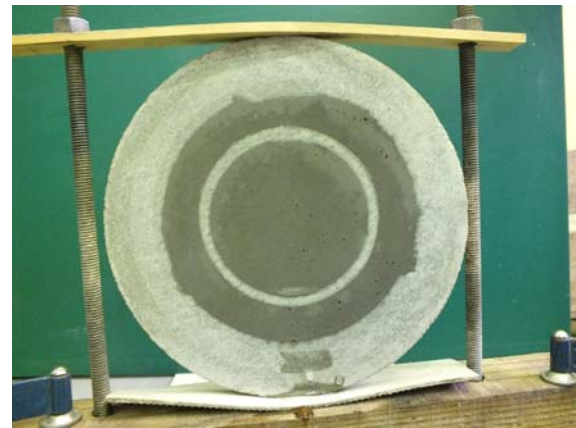
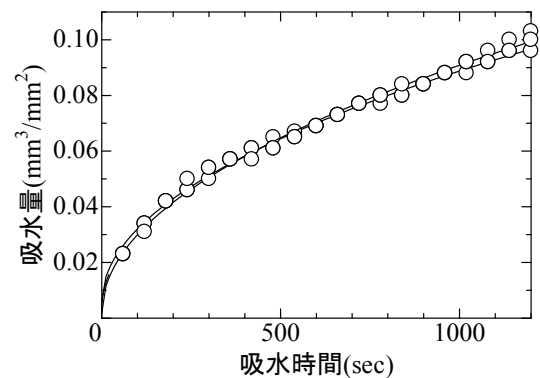
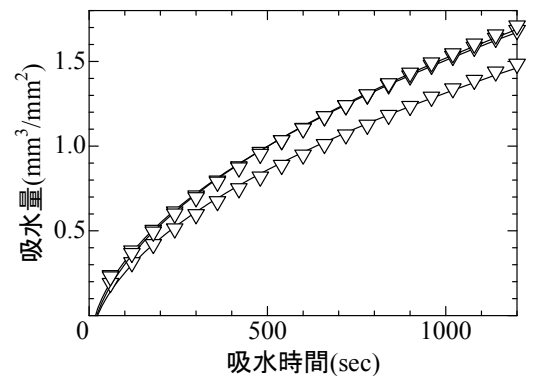


写真-1 吸水試験後



(a) 相対湿度 80%



(b) 絶乾状態

図-3 吸水量と吸水時間の関係
(水セメント比 55%)

また、吸水量が時間の平方根に比例することより、本実験装置で行った表面吸水試験は、古賀ら¹⁰⁾が行った、コンクリートの側面をシールし、水に浸漬する表面吸水試験と同様な結果が得られると考えられる。このことは、本試験装置により、実構造物の耐久性に関わる諸物性を非破壊で検査できる可能性を示唆するものと考えられる。

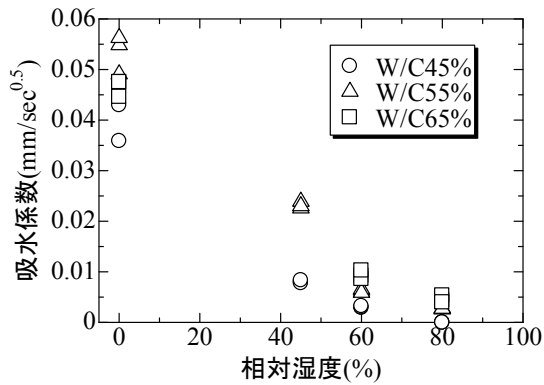


図-4 吸水係数と相対湿度の関係

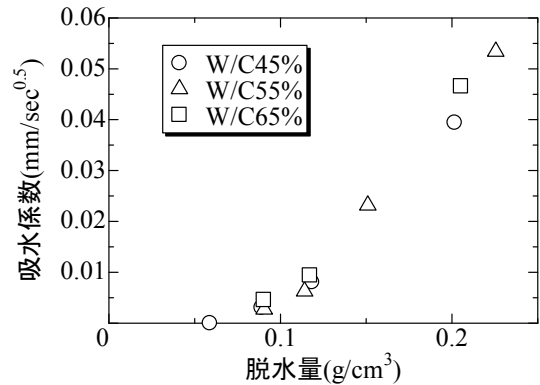


図-6 吸水係数と脱水量の関係

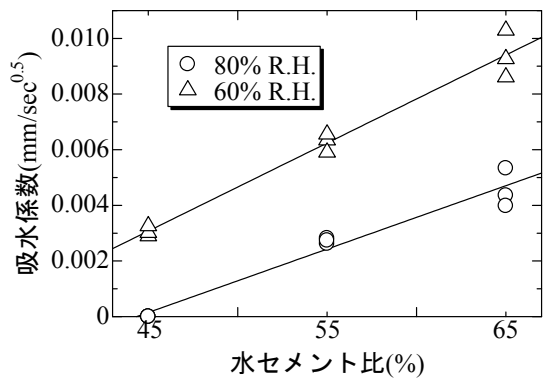


図-5 吸水係数と水セメント比の関係

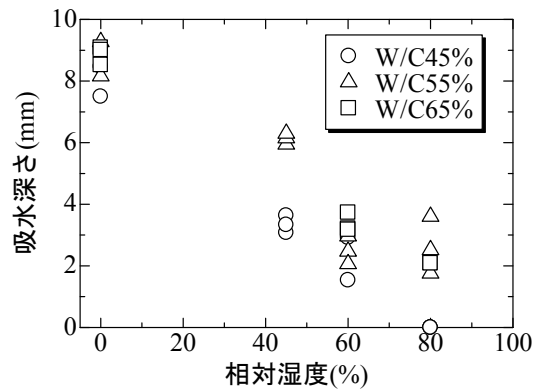


図-7 吸水深さと相対湿度の関係

さらに、吸水係数で実験結果を評価すれば、実験のばらつき要因の一つである吸水試験開始時間までの吸水量 (V_0) の影響を除去できることとなる。しかし、本実験では、供試体内の含水率分布がほぼ一定の条件下で実験を行っているのに対し、実構造物では、一般に水分分布が一定ではなく、その場合の吸水係数の評価については、今後の課題である。

3.3 吸水係数とその影響要因

以上のことより、実験結果を式(2)で近似して得た、吸水係数と種々の物性の関係を検討した。

図-4 に水セメント別に、相対湿度と吸水係数の関係を示す。なお、温度 40°C の真空乾燥条件については、相対湿度 0% として示した。

図に示すように、吸水係数への相対湿度の影響は大きく、相対湿度の低下に伴い、吸水係数は増加した。

図-5 に相対湿度 60% および 80% における、吸水係数と水セメントの関係を示す。図に示すように、吸水係数は水セメント比にほぼ比例する関係となった。図中に両者の関係を一次式に最小二乗近似した結果を示すが、相関係数は、0.98 程度とかなり高い相関を示した。

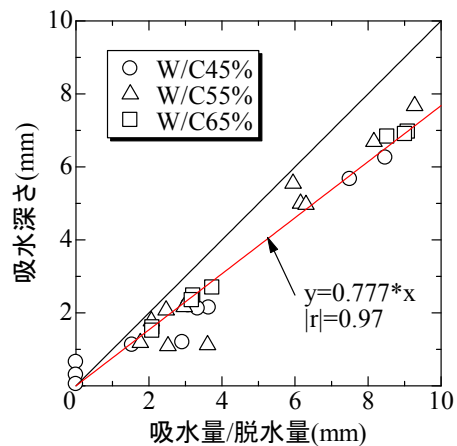


図-8 吸水深さと吸水量/脱水量の関係

図-6 に表乾状態から質量が一定となるまで乾燥した単位体積あたりの脱水量と吸水係数の関係を示す。図に示すように、吸水係数は本実験の範囲では、配(調)合に関わらず、脱水量が増加すると指数関数的に大きくなる結果となった。

両者の関係は、相対湿度の低下に伴い脱水量が増加し、その空隙部分に、吸水試験により再度水が浸透すると考えられ、モルタルの細孔構造と関係し、複雑な様相を呈すると考えられる。

3.4 吸水深さとその影響要因

実験概要で記述したように、20分間の吸水試験後、供試体を割裂し、吸水深さを求めた。

図-7に吸水深さと相対湿度の関係を示す。実験結果は、ばらつきがあるものの、各調合ともに相対湿度の低下に伴い、吸水深さも大きくなっている。また、最も乾燥している温度40℃の真空乾燥状態で9mm前後の値となった。

吸水深さは、供試体の乾燥に伴い脱水した空隙部分に吸水試験による吸水した水が浸入することにより推定できると考えられる。そこで、図-8に吸水深さと吸水量を脱水量で除した値との関係を示す。

脱水した部分すべてに吸水したと仮定すると両者の関係は、1対1の関係となり、図中の黒の実線となる。実験結果を最小二乗近似した結果を赤の実線で示すが、係数は、0.78の値となった。すなわち、乾燥に伴い脱水した水の78%程度が、吸水により脱水した空隙部分を埋め、22%は、空隙の状態に残存している。これは、モルタル中の吸水した先端部分と表面部分では、吸水量に差が異なるなども当然考えられる。

3.5 気体拡散係数と相対湿度および水セメント比

気体拡散係数と相対湿度の関係を図-9に示す。筆者は、既にセメントペーストの場合の気体拡散係数と相対湿度の関係を明らかにしている⁸⁾。すなわち、相対湿度45%から100%の間においては、相対湿度の低下に伴い気体拡散係数は、指数関数的に増加し、相対湿度12%から45%の間においては、ほぼ一定値を示し、相対湿度12%以下においては、相対湿度の低下に伴い再び大きくなる傾向となった。

本研究のモルタルを用いた場合は、相対湿度0%から45%において実験していないものの、既往の研究で示した傾向とほぼ同様な結果となっていると考えられる。

図-10に相対湿度60%および80%における気体拡散係数と水セメント比の関係を示す。気体拡散係数と水セメント比の関係は、筆者の既往の研究⁸⁾においてほぼ比例関係となった。図中には、両者の関係を一次式に最小二乗近似した結果を実線で示す。本研究結果も既往の研究と同様に、同一湿度において比例関係が成り立つことが明らかとなった。

3.6 気体拡散係数と吸水係数

以上で求めた吸水係数と気体拡散係数の関係について検討した。

図-11にその結果を示す。図中のそれぞれの記号は、

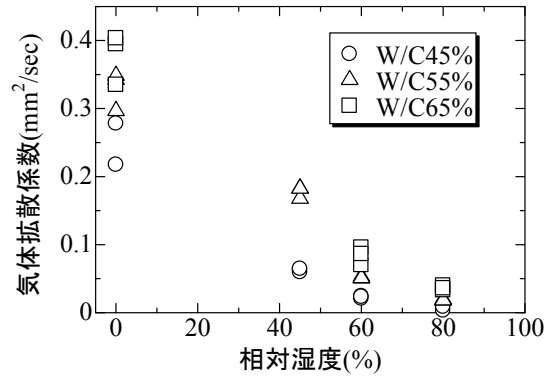


図-9 気体拡散係数と相対湿度の関係

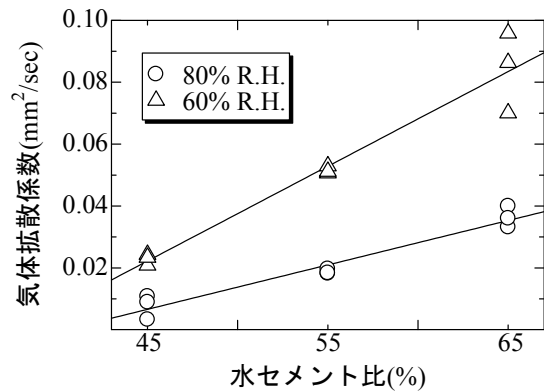


図-10 気体拡散係数と水セメント比の関係

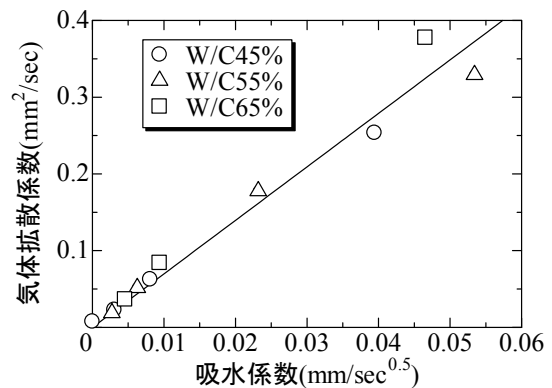


図-11 吸水係数と気体拡散係数の関係

それぞれの配(調)合の各乾燥環境下で実施した表面吸水試験および気体拡散試験の3個の実験データの平均値である。実線は、全データを用いて、原点を通る一次式に近似した結果である。その結果を式(3)に示す。なお、相関係数は、0.98と非常に高い相関性を示した。

$$D_{N-O} = 6.97 \times S \quad (3)$$

吸水係数と気体拡散係数の関係の関係が、式(3)で非常に高い相関性を示したことは、本提案の表面吸水試験により、非破壊で実構造物の表層部分（かぶりコンクリート）の気体拡散係数を推定できる可能性を示したこととなる。延いては、気体拡散係数の関数となるコンクリートの中性化の進行予測も可能となると考えられる。

4. 結論

新たに提案した非破壊の表面吸水試験装置により吸水試験を行うとともに、吸水試験と同一の条件の供試体で、気体拡散試験を行った。これらの結果より、表面吸水試験による吸水機構や表層部の耐久性に大きく係わる気体透過性の非破壊による評価の可能性について明らかにすることを目的に実験検討した。

これらの結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 新たに提案した表面吸水試験装置により吸水試験を行った。その結果、既往のコンクリートの側面をシールし、水に浸漬する表面吸水試験と同様に、吸水量が時間の平方根に比例した。そこで、この比例係数を吸水係数として定義した。
- 2) 吸水係数は、本研究の範囲内では、配(調)合に関わらず脱水量が増加するとともに指数関数的に大きくなった。また、同一相対湿度では、水セメント比に比例した。
- 3) 20分間の吸水試験後、供試体を割裂し、吸水深さを求めた。その結果、各調合ともに相対湿度の低下に伴い、吸水深さも大きくなった。本実験の範囲内では、最も乾燥している温度 40°C の真空乾燥状態で 9mm 前後の値となった。
- 4) 気体拡散係数も吸水係数と同様に、相対湿度の低下に伴い増加した。また、水セメント比とは、筆者の既往の研究と同様に、比例関係となった。
- 5) 吸水係数と気体拡散係数の関係は、原点を通る一次式で近似でき、このことは、表面吸水試験により、非破壊で実構造物の表層部分（かぶりコンクリート）の気体拡散係数を推定できる可能性を示したこととなる。延いては、コンクリートの中性化の進行予測

も可能となると考えられる。

参考文献

- 1) 白川敏夫，島添洋治，九谷和秀：モルタルを用いた場合の気体拡散性状への炭酸化の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.636，pp.193-199，2009.2
- 2) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇：簡易な試験による構造体コンクリートの品質評価の試み，セメント・コンクリート，No.559，pp.20-28，Sept. 1993
- 3) 今本啓一，山崎順二，下澤和幸，永山勝，二村誠二：かぶりコンクリートの透気性に基づくRC構造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究—各種試験方法における透気性の指標値と中性化深さの関連—，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.638，pp.593-599，2009.4
- 4) Torrent, R. J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structure, No. 150, pp.358-365, July 1992
- 5) 林和彦，細川暁：表面吸水試験によるコンクリート実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
- 6) 白川敏夫，花井伸明：吸水試験方法による表層部コンクリート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.35，No.1，pp.1729-1734，2013
- 7) 酸素の拡散係数試験方法（案），耐久性診断研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，1989
- 8) 白川敏夫他：セメントペースト硬化体中の乾燥の程度と気体拡散係数の関係，日本建築学会構造系論文集，No.524，pp.7-12，1999.10
- 9) 酒井雄也，岸利治，中村兆治：微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.730-735，2012
- 10) 古賀裕久他：表面吸水試験を用いたコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.739-744，2013