

論文 コンクリート中の水分量が表層透気試験の透気係数および測定深さにおよぼす影響

渡邊 晋也*1・野島 昭二*2・藤原 貴央*3・谷倉 泉*4

要旨：本論文は、コンクリート構造物の水分量が表層透気試験の測定値および測定深さに及ぼす影響について検討を行った。かねてより水分量が透気係数に与える影響については検討されており、水分計や Wenner 法などで補正をすることが検討されてきた。しかしながら、水分量と表層透気試験の測定影響深さについては、検討がなされていない。そこで、本研究では、質量含水率を変化させたモルタルとコンクリート試験体を用いて、表層透気試験を行った。その結果、透気係数に影響を及ぼす質量含水率は対象物により異なるが概ね 4.0～5.5% であり、表層透気試験の測定影響深さは概ね 50mm 以内であることが判明した。

キーワード：透気試験, 水分量, 簡易透気試験, 透気係数, 測定影響深さ

1. はじめに

わが国では、かねてよりコンクリート構造物の耐久性について多くの議論がなされ、材料の開発や施工方法の改善など工学的に発展してきているのが現状である。しかしながら、コンクリートは打込みや養生などが不十分な場合、設計している性能が発揮できず早期劣化などの問題が生じているという問題もあるのが周知の事実である。

近年、これらの問題を解決するために、外部からの劣化因子を浸入させづらくするために、コンクリート表層部を緻密化し、物質移動抵抗性を向上させる試みがなされている。特に実構造物では、施工時の打込み方や、締固め方法、養生などで物質移動抵抗性が大きく左右されることから、耐久性を考慮した丁寧な施工が行われているのが現状である。しかしながら、丁寧な施工が行われているが、実際に出来上がったコンクリートの状態がどの様になっているのか不明であるため評価する必要があると考えられる。現状では、実構造物の耐久性を評価するには、コンクリート表面の物質移動抵抗性を用いることが良いと考えられている。

実際の構造物で物質移動抵抗性を評価するには、破壊試験ではなく非破壊試験が有効とされる。現在、コンクリート表層部の評価をする非破壊試験方法として、簡易透気試験法などの表層透気試験法¹⁾や SWAT 法などの表面吸水試験法²⁾などが一般的になってきた。

しかしながら、これらの試験法は「絶対値」が求められるものではなく、測定したときのコンクリートの状況を示す値が得られるものである。特に、物質移動抵抗性はコンクリートの空隙量などに影響を受けることが指摘

されている³⁾。したがって、この空隙が「水」により充填されているならば、測定値は非常に良い値を示すことになる。この問題は、多くの研究者からも指摘されており検討課題となっている^{4), 5), 6), 7), 8), 9)}。筆者らも実構造物で簡易透気試験法を用いてコンクリート表層部の品質を調査したときに、「水分」の問題に直面した。その問題とは、同じ測定場所で同じ日に測定をしたが、日陰の時と日向の時で透気係数が約 10 倍違う結果となった。この時、同時に測定した水分率の結果を見ても、顕著な違いがみられず、測定データとしてはどちらが適切な値なのかわからない結果となった。この問題は、測定するタイミングで求められる透気係数の結果が異なるということである。この原因としては、コンクリート中の微量な「水分」に透気試験の結果が影響を及ぼされていることが推定できる。

そこで、本研究では表層透気試験法がコンクリート中の「水分」にどの程度影響を受けるのかを明確にする目的で検討を行った。本論文は、コンクリート中の質量含水率が表層透気試験法の測定結果ならびに測定影響深さについて検討を行った結果について取りまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 試験方法

本研究では、同一試験体で質量含水率を変化させ、表層透気試験による測定結果ならびに測定影響深さについて検討を行った。深さの影響を検討するには、試験体の厚みを変えて、表層透気試験測定面と反対側の真空圧を測定する方法で検討を行っている。使用した装置や試験

*1 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 中日本高速道路株式会社 名古屋支社 四日市工事事務所 菰野工事区 工事長 (正会員)

*3 エフティーエス株式会社 第二営業部

*4 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 部長 工修 (正会員)

体の概要については次項に記載する。

2.2 表層透気試験機の概要

市販されているダブルチャンバー方式の表層透気試験機を用いた。

2.3 影響深さ測定装置の概要

表層透気試験の影響深さを測定するために、図－1 に示す装置を作製した。対象となる試験体を鋼製治具（□160mm×160mm）で固定したのち、底面にφ75mm×12mmの空間を設けて、その空間の真空圧を測定した。測定値は、表層透気試験時の最大真空圧になった値を用いて評価している。この試験装置でモルタルやコンクリート試験体がない場合では、表層透気試験機を用いて真空にした場合、真空に達するまで20秒程度であった。

2.4 試験体概要

本研究では、モルタル試験体とコンクリート試験体の2種類について検討を行った。なお、コンクリート試験体は、2配合としている。詳細を以下に示す。

(1) モルタル試験体

モルタル試験体の配合はセメント：細骨材＝1：3とし、水セメント比を50%とした。また、材齢は室内にて3年間経過したものを用いている。試験体寸法は、100mm×100mm×400mmの直方体から厚さ10mm、30mm、50mmに切断して試験体とした。測定面は切断面とし、側面はアルミテープを用いて密閉している。試験体数は、各条件3個とし、試験結果にはその平均値を用いている。

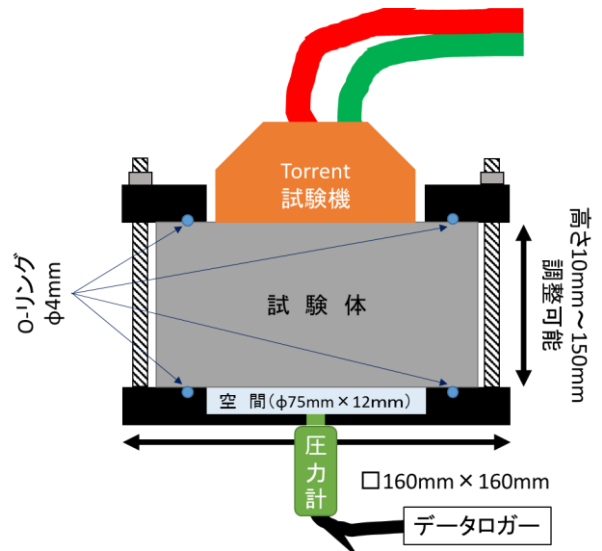
(2) コンクリート試験体

コンクリート試験体の配合を表－1に示す。水セメント比の違いによる影響を確認した。材齢は室内にて1年間経過したものを用いている。試験体寸法は、直径100mm×高さ200mmの円柱体から厚さ10mm、20mm、30mm、50mm、75mmおよび100mmとした。モルタル試験体と同様に測定面を切断面とし、側面はアルミテープを用いて密閉している。試験体のバラツキを考慮して各条件5個とし、試験結果にはその平均値を用いている。

試験体の外観を写真－1に示す。

2.5 試験項目

本試験で実施した試験項目を表－2に示す。モルタル試験体の水分率は、水分計を用いて測定した。水分計は、現場で使用可能な市販されている電気抵抗式と静電容量式を用いた。両水分計の特徴として、静電容量式水分計はASTM規格に準拠したものであり測定深さは20mm（カタログ値）である。一方、電気抵抗式水分計は、電極間距離が15mmであることから、測定深さは極表層部を測定しているものである。表層透気試験は簡易透気試験法、真空圧は2.3で記載した試験装置を用いて行っている。

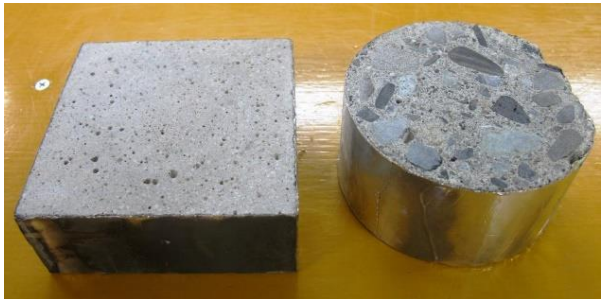


図－1 影響深さ測定装置の概要

表－1 コンクリートの配合

呼び強度	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
		セメント	水	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤
27	49.5	315	156	504	336	1013	2.21
40	44.3	361	160	469	314	1024	2.53

セメント：普通ポルトランドセメント、細骨材①：川砂、細骨材②：山砂、粗骨材：川砂利



1) モルタル試験体 2) コンクリート試験体

写真－1 本試験で使用了試験体の外観

表－2 試験項目および方法

試験体	項目	方法
モルタル	水分率	・電気抵抗式 ・静電容量式
	質量基準質量含水率	JIS A 1476 「建築材料の含水率測定方法」
	真空圧	-
	透気係数	簡易透気試験法
コンクリート	質量基準質量含水率	JIS A 1476 「建築材料の含水率測定方法」
	真空圧	-
	透気係数	簡易透気試験法

2.6 試験条件

モルタルおよびコンクリート試験体を切断した後、水中に1週間浸漬させた。測定は、浸漬から取り出した直後に各測定を行った。その後、室温23度、湿度50%の恒温恒湿室に静置乾燥させた。乾燥後の試験は、モルタル試験体で乾燥期間が6時間、1日、3日、7日、14日、28日および56日、コンクリート試験体で乾燥期間が3日、7日、14日および28日で行った。なお、乾燥面は簡易透気試験の測定面のみとするように、測定面の反対面はラップで乾燥しないように養生をしている。

3. 試験結果および考察

本章では、モルタル試験体とコンクリート試験体別に得られた結果を記載する。

3.1 モルタル試験体

(1) 水分量と質量基準質量含水率

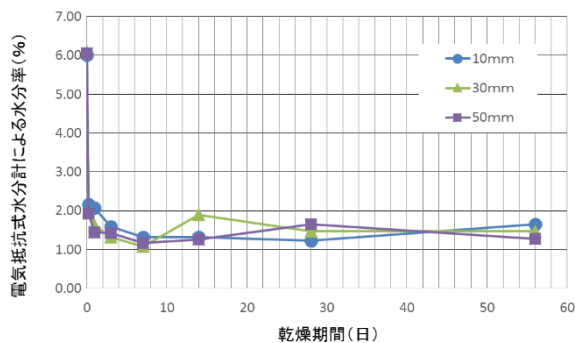


図-2 電気抵抗式水分計の測定結果

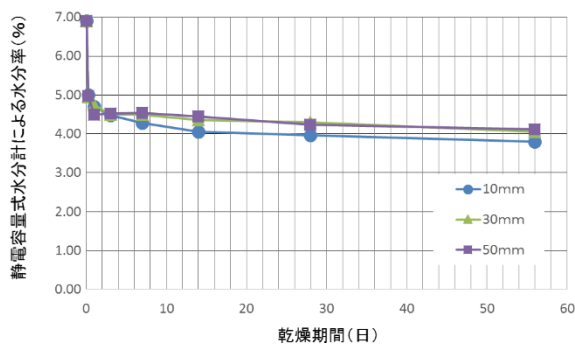


図-3 静電容量式水分計の測定結果

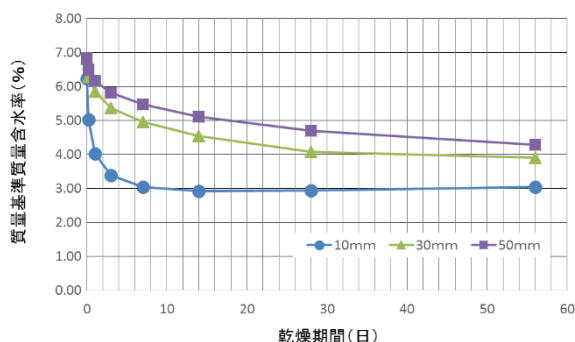


図-4 各種試験体厚の質量含水率

モルタル試験体の水分率の結果を図-2、図-3に示し、質量基準質量含水率の結果を図-4に示す。電気抵抗式水分計を用いた場合、浸漬後すぐには約6%と測定したが、乾燥期間6時間で約2%となった。試験体の厚みによる違いは見られない結果となった。一方で静電容量式水分計では、浸漬後すぐには約7%であった。その後4~5%で推移する結果となった。静電容量式でも、試験体の厚みによる違いがみられなかった。また、測定方法の違いで大きく水分率が異なることが判明した。

質量基準質量含水率では、水分計の結果とは異なり、試験体厚みで質量含水率が異なることが確認された。試験体が薄くなることで、乾燥が早くなることが判明した。この結果は、一般的に想像しやすい結果である。各種水分計で測定された水分率と質量含水率の関係を図-5に示す。上述しているように、本試験で使用した電気抵抗式水分計は電極間距離が15mmであることから極表層の

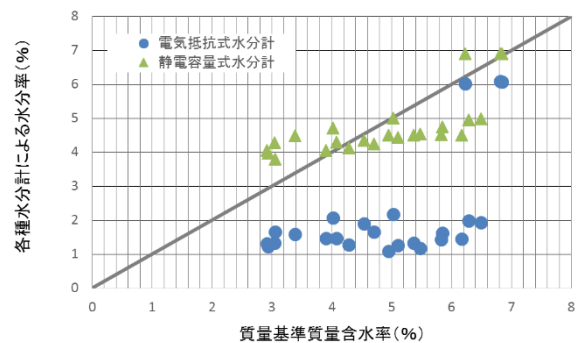


図-5 水分率と質量含水率の関係

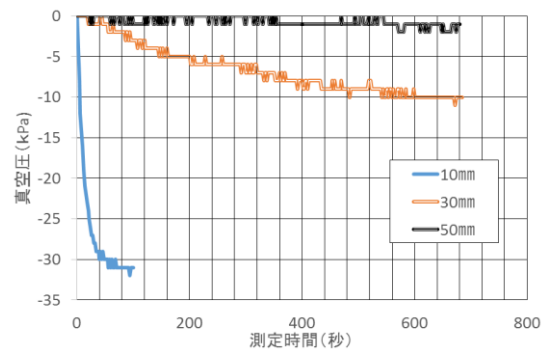


図-6 試験体厚さにおける真空圧の経時変化

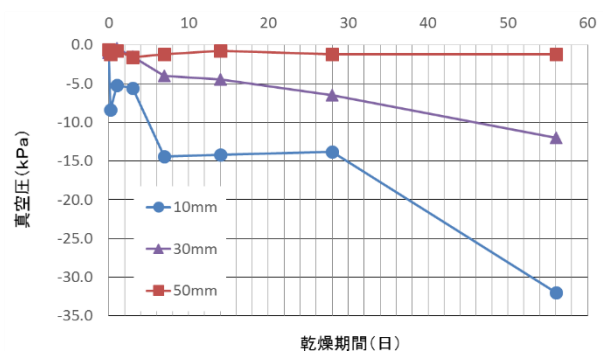


図-7 真空圧の測定結果

水分量を測定していると考えられる。したがって、試験体全体で測定している質量含水率との相関は無い結果となった。一方で、本試験で使用した静電容量式水分計は、測定深さが 20mm（カタログ値）である。このことから、質量含水率との相関は小さいものの、電気抵抗式水分計よりは相関があったと考えられる。したがって、極表層の水分量を測定するのではなく、なるべく深い場所までの水分量が測定できる水分計を用いることが望ましいと考えられる。

(2) 真空圧

真空圧の生データを図-6 に示す。このデータは乾燥期間 56 日に得られた結果である。試験体が薄いと真空圧は急激に高まり、一方で試験体が厚いと真空圧に変動がない結果となっている。したがって、真空圧が高くなれば、簡易透気試験の影響を受けている深さであることがいえる。真空圧の経時変化を図-7 に示す。浸漬から

取り出した直後に測定をした結果、試験体厚が 10mm でも真空圧が高くなかった。その後、徐々に真空圧が高くなる傾向を示した。試験体厚が 30mm の場合、乾燥期間 7 日目より真空圧が高くなる傾向が得られた。この結果は、モルタル中の水分が影響を及ぼしているものと推測できる。試験体厚が 50mm の場合、乾燥期間 56 日でも、初期の値と差異がなかった。このことから、本試験で用いたモルタルの場合、簡易透気試験の影響深さは 50mm 以内であることが推測できる。

(3) 透気係数

簡易透気試験より得られた透気係数の結果を図-8 に示す。水分量が多い乾燥初期の場合、透気係数が著しく小さな値を示す結果となった。その後、乾燥が進むにつれて透気係数が大きくなる結果が得られた。なお、試験体厚が 10mm の値で著しく大きくなった理由は、真空圧を測定していることが原因として考えられる。試験体厚

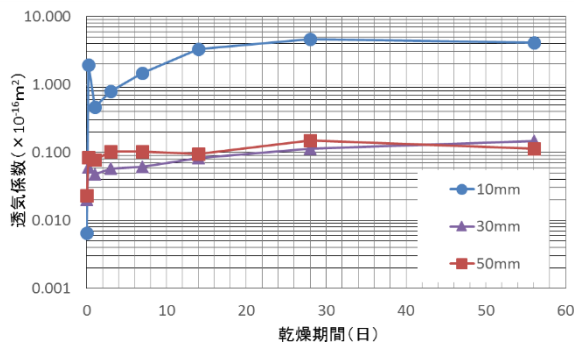


図-8 表層透気試験の測定結果

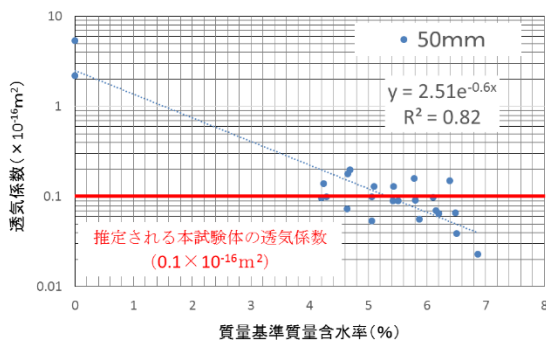


図-9 透気係数と質量含水率の関係

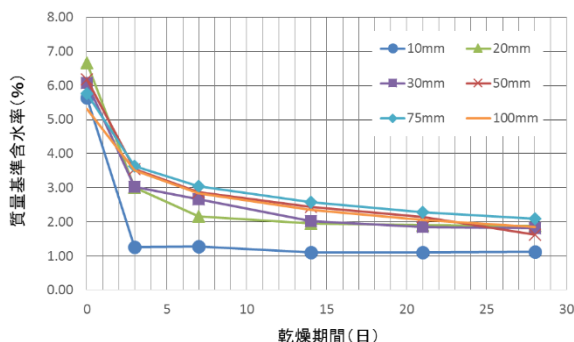


図-10 各種試験体厚の質量含水率 (27N)

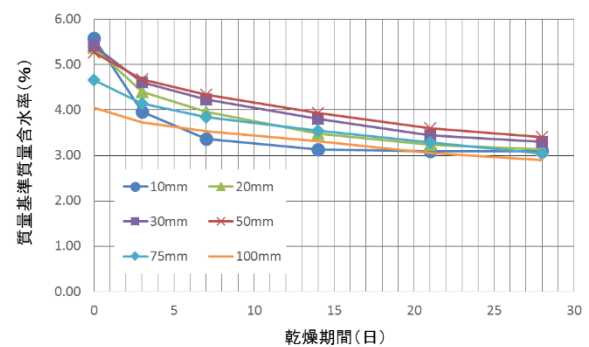


図-11 各種試験体厚の質量含水率 (40N)

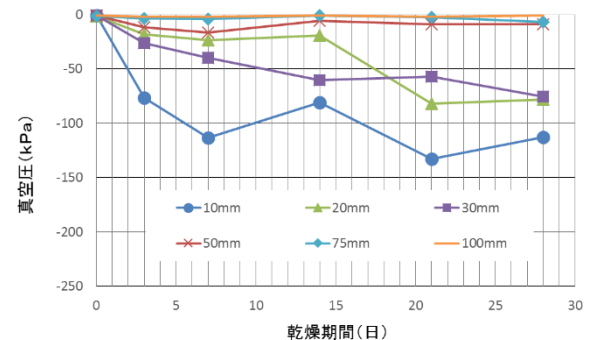


図-12 真空圧の測定結果 (27N)

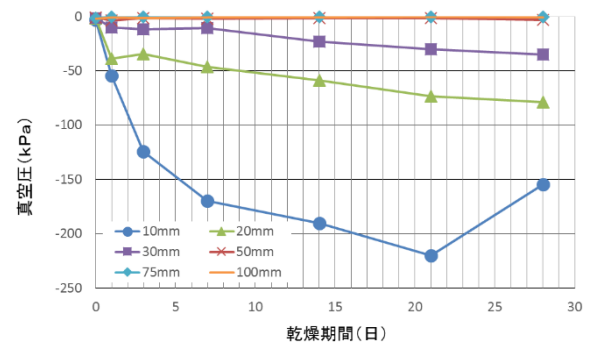


図-13 真空圧の測定結果 (40N)

が 30mm の場合でも真空圧に変動があるため、適切な透気係数の測定ができていないと考えられる。このことから、本試験で用いたモルタルの透気係数は試験体厚が 50mm で測定した結果であると推定される。本試験で用いたモルタルの透気係数は、 $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と考えられる。試験体厚が 50mm の透気係数と質量基準質量含水率の関係を図-9 に示す。図中には、絶乾状態で測定したときの透気係数も付記している。その結果、含水率が約 5.5% より大きいと透気係数が $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ より小さな値になる傾向となった。したがって、本試験で用いたモルタル試験体では、含水率が約 5.5% 以下で表層透気試験をしないと危険側の評価になる恐れがある。

3.2 コンクリート試験体

(1) 質量基準質量含水率

水セメント比 49.5% (以下、27N と称す) の質量含水率を図-10、水セメント比 44.3% (以下、40N と称す) の質量含水率の結果を図-11 に示す。モルタル試験体とは異なり、質量含水率の低下は緩やかであることがいえる。また、呼び強度の違いとして、27N の方が、乾燥が早いことが判明した。

(2) 真空圧

27N の真空圧を図-12、40N の真空圧を図-13 に示す。両試験体とも、浸漬から取り出した直後に測定した場合では真空圧が高くならなかった。その後、乾燥期間が長くなることで、真空圧が高くなる傾向が確認された。両コンクリート試験体では、厚さ 30mm まで真空圧に変動が確認され、厚さ 50mm では真空圧の変動がないことから、簡易透気試験の影響深さは 50mm 以内であることが推測できる。この結果はモルタル試験体とほぼ同じ結果となったが、真空圧はコンクリート試験体の方が高くなる結果であった。

(3) 透気係数

27N の簡易透気試験結果を図-14、40N の簡易透気試験結果を図-15 に示す。両試験体ともに試験体の厚さが 30mm 以内では透気係数が大きくなっている。これは、モルタル試験体の結果で記述したように、真空圧を測定しているからであり、透気係数の値も 30mm 以内で、大きくなっていることから真空圧の測定が影響していると推測できる。ただし、真空圧の測定結果では、試験体の厚さ 30mm においても真空圧が上昇していることから、簡易透気試験の測定結果には影響が小さかったものと推測できる。本試験で用いたコンクリートの透気係数は試験体厚さが 50mm 以上の結果より 27N で $50 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、40N で $0.2 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度と推定できる。

透気係数と質量基準質量含水率の関係を図-16、図-17 に示す。図中には、絶乾状態で測定したときの透気係数も付記している。本研究で用いた試験体では、27N で、

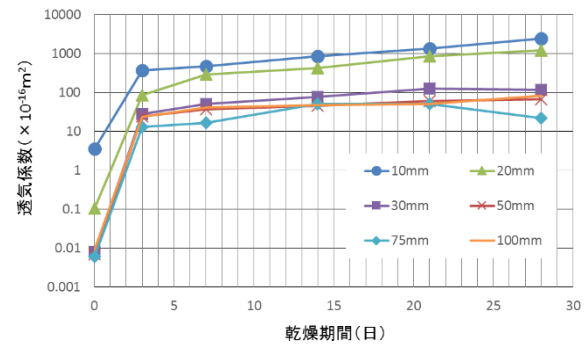


図-14 表層透気試験の測定結果 (27N)

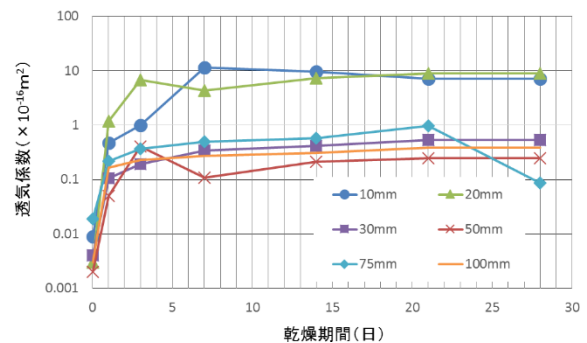


図-15 表層透気試験の測定結果 (40N)

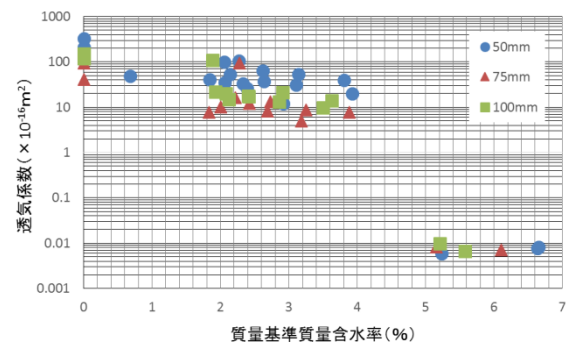


図-16 透気係数と質量含水率の関係 (27N)

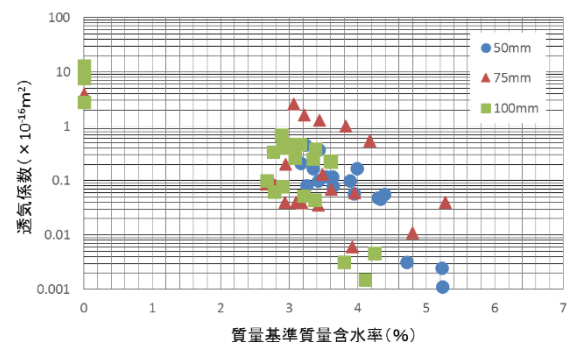


図-17 透気係数と質量含水率の関係 (40N)

含水率が約 5.0%以上になると、透気係数が高くなり、危険側の評価になることが判明した。一方で、40N ではバラつきが大きいものの、含水率が約 4.0~4.5%以上で透気係数が高くなり、危険側の評価になることが推測できる。モルタル試験体の結果では、含水率が 5.5%以上、コンクリート試験体では、27N が 5.0%以上、40N が 4.0~4.5%以上の含水率があると、簡易透気試験結果に影響が及ぼされるということが本研究で判明した。

4. 表層透気試験の測定方法の検討

コンクリート表層部の評価を実施するうえで、表層透気試験などは有効であることは前述したとおりであるが、測定対象のモルタルやコンクリートの含水率が高いと得られる透気係数は小さくなり、危険側の評価になる。しかしながら、モルタルやコンクリートの含水率を正確に測定することは本研究の結果よりも明らかで、水分計などを用いて透気係数を補正し、推定することは難しいと考えられる。そこで、何らかの手法を用いて、モルタルやコンクリートの含水率を調整することで、透気係数などの評価をより適切に使用することが望ましいと考えられる。今後、含水率の調整方法については、検討を進める必要があると考えられる。

5. 結論

本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) 市販されている水分計とモルタルの質量基準含水率を比較した結果、本研究で使用した電気抵抗式水分計は極表層の評価をしており、質量含水率との相関は得られなかった。一方で静電容量式では、深さ 20mm まで測定できることから、相関は低いもののある程度の推定は可能であると考えられる。しかしながら、水分計の測定値を用いて表層透気試験の補正をすることは困難であると考ええる。
- (2) 簡易透気試験の測定影響深さを検討する目的で、測定面の反対面で真空圧を測定した結果、モルタルおよびコンクリートともに影響深さは 50mm 以内であることが判明した。
- (3) 質量含水率が透気係数に及ぼす影響について検討した結果、約 4.0~5.5%で透気係数の変化点があることが推定された。したがって、モルタルやコンクリート中の質量含水率が約 4.0~5.5%以上で測定を行った場合、透気係数は危険側の評価となることが推測される。また、表層透気試験に影響する質量含水率は、コンクリート強度などで異なることが考えられるため、今後詳細な検討を行うことが望ましい。
- (4) 表層透気試験の測定方法の検討については、水分計などの含水率を補正する方法では、適切な評価は困

難であることから、測定対象物の含水率などを調整できる手法について検討することが必要であると考えられる。

以上が本研究で得られた知見であり、表層透気試験方法の問題点である含水率について明確にすることができたと考えられる。今後は、結論でも記載したように、測定方法の確立に向けて検討を行っていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) R.J.Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992
- 2) 林和彦, 細田暁 : コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1769-1774, 2011
- 3) 田中章夫, 今本啓一, 下澤和幸, 山崎順二 : ダブルチャンバー法を用いた既設鉄筋コンクリート造建築物の中性化予測に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1691-1696, 2011
- 4) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1755-1780, 2010
- 5) 林亮太, 樋原弘貴, 添田政司, 松本涼 : 透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法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.745-750, 2013
- 6) 野中英, 湯浅昇, 佐藤孝一 : 各種養生を施したコンクリートの簡易表層透気試験による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.1849-1854, 2013
- 7) 野島昭二, 渡邊晋也, 藤原貴央, 谷倉泉 : 透気係数を用いたコンクリートの品質評価と測定条件に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2134-2139, 2014
- 8) 半井健一郎, R.J.Torrent : 表層透気試験(トレント法)の実務展開, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.595-600, 2014
- 9) 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