

論文 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

野島 昭二*1・渡邊 晋也*2・藤原 貴央*3・谷倉 泉*4

要旨: 透気係数の活用を検討する目的で、養生条件が異なるコンクリート2配合を用いて透気係数と中性化、および塩害の抵抗性について検討を行った。また、実構造物を想定した型枠の脱型時期と透気係数の関係、ならびに透気係数の測定位置の違いが測定結果におよぼす影響について検討を行った。その結果、透気係数の値が大きいと中性化速度、および塩化物イオン浸透量は大きくなるが、透気係数の値と中性化速度係数および塩化物イオン浸透量の相関性は小さいことが判明した。また、測定時期については、コンクリート配合などにより異なり、測定箇所によっても透気係数は10倍程度の違いがあることが判明した。

キーワード: 透気係数, Torrent 法, 促進中性化, 塩化物イオン浸透量, 試験実施方法

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は、材料、配合、施工および養生などの要因により耐久性能が大きく異なることが知られている。例えば、品質の良い材料で適切なコンクリート配合であるのにも関わらず、施工時に締固めが不十分だったり、養生が適切に行われなかったコンクリートでは、耐久性能は適切な施工が行われたものより低下することが知られている。このような問題はコンクリート特有の問題であり、構造物を管理するうえで問題になる要因である。

そこで、近年では施工後のコンクリートの状態を確認し、予防保全として、表面被覆材や含浸材などを施工したり、もしくは将来的な劣化を予測しLCCに反映させたりする取組みが実施されている。

コンクリートの品質を確認する方法としては、従来はコアを採取し圧縮強度などを確認していたが、コンクリート強度だけでは、耐久性を評価することが困難なことから、コンクリートの物質移動抵抗性を評価する方法も採用され始めている。物質移動抵抗性の測定方法には、いろいろな手法が提案されている。その中でも、構造物管理者としては、構造物を破壊しない方法で測定できる非破壊試験法を採用することが多い。物質移動抵抗性の非破壊試験法については、透気試験法¹⁾や透水試験法²⁾などが代表的な試験方法である。その他にも散水試験³⁾や流水試験⁴⁾などが提案されている。

本研究では、物質移動抵抗性の中で代表的に用いられている透気試験法について検討を行った。本研究で用いた透気試験法はダブルチャンバー方式のTorrent法である。Torrent法は、施工現場で簡易に測定することが可能

なことから、コンクリート表層部の品質を評価するには適している方法である。しかしながら、測定するコンクリートの材齢やコンクリート面積に対する測定数などについていまだに明確な解が得られていない。また、透気試験で得られた透気係数をどのように活用できるのかも未知なことが多いのが現状^{5)~8)}である。そこで、筆者らは構造物管理者の観点から透気係数の活用方法と透気試験の測定方法について検討を行った。

本論文は、大別して以下の2項目について検討した結果を取りまとめたものである。すなわち、1. 鉄筋の腐食に影響をおよぼす中性化、および塩害の抵抗性と透気係数の関係を比較し、透気係数の活用法について検討したうえで、2. 測定材齢による透気係数の変動や測定箇所による違いを検討している。

2. 実験概要

本実験では、透気係数と劣化因子の浸入抵抗性の関係に着目した実験と、透気係数の測定時期、および測定位置の違いによる測定結果のばらつきに着目した実験を実施した。

2.1 透気係数と各種劣化因子の浸透量との関係

Torrent法で得られた透気係数の活用法について検討することを目的とした。検討した外的因子は二酸化炭素と塩化物イオンである。

(1) 使用したコンクリート

本試験では、一般的に使用されているコンクリート配合を用いた。コンクリートの配合を表-1に示す。呼び強度24と40の2種類とし、スランブ8cm、空気量4.5%の普通ポルトランドセメントを用いたものである。

*1 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 (正会員)

*2 (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 研究員 博士(工学) (正会員)

*3 エフティーエス株式会社 第二営業部 (正会員)

*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 (正会員)

(2) 試験体寸法および養生条件

試験体寸法は、15cm×15cm×53cmの直方体（以降、小型試験体と称す）とした。養生条件は、表-2に示す5条件とした。材齢1日目までは室温23℃の恒温室に湿潤養生した後、各養生条件で材齢28日まで養生を行った。その後、小型試験体を中央で切断し、14日間室温23℃、湿度60%RHの恒温恒湿室で養生を行った。14日間同じ条件で養生した理由として、コンクリートの含水率がすべての小型試験体で同等となるようにするためである。本試験では、含水率を高周波水分計により計測を行っており、含水率が5±1%程度であることを確認している。

(3) 透気係数の測定概要

透気係数の測定は、材齢28日まで各養生条件で養生を行った後、恒温恒湿室で14日間養生を行った後測定を行った。小型試験体の材齢は42日である。測定位置は、切断した小型試験体15cm×15cm×26cmの打設側面を用いて各面2か所の合計4か所で測定を行った。測定箇所を中心は小型試験体の高さ方向の中心となるようにして測定を実施している。

(4) 促進試験概要

試験体の中性化、および塩害の抵抗性を評価するため、促進試験を実施した。促進試験方法は、中性化はJIS A 1153に準拠し、塩害はJIS A 1171の塩化物イオン浸透深さ試験に準拠した。ただし、浸漬した塩化ナトリウム水溶液は3%ではなく10%とした。促進期間は両試験とも18週間とした。

促進期間終了後、試験体を割裂し、中性化深さはJIS A 1152に準拠したフェノールフタレイン溶液、塩化物イオン浸透深さは0.1N硝酸銀水溶液を噴霧し、変色した深さをノギスにより測定した。

2.2 実構造物を模擬した試験体による測定実施材齢や測定箇所が透気係数に与える影響

透気係数はコンクリート中の含水率に影響を受けることが指摘されていることから、基本的には材齢28日に実施することが望ましいとされている。しかしながら、施工現場においては、材齢28日も待ってられない状況が多々ある。透気試験の実施時期における透気係数の違いについて検討を行った。また、測定箇所の影響がどの程度あるのかを明確にするために、同一断面において測定場所を変えた場合の透気係数の影響を把握する目的で検討を行った。

(1) 使用したコンクリート

本試験で用いたコンクリートの配合を表-3に示す。呼び強度15, 24および40の3種類とし、スランブ8cm、空気量4.5%の普通ポルトランドセメントを用いたものである。

表-1 コンクリート配合（Iシリーズ）

呼び強度	スランブ	Gmax	W/C	s/A	W	C	S1	S2	G	Ad
SL	cm	mm	%		kg/m ³					
24	8	25	54.5	47	155	285	527	351	1000	2.85
40	8	25	38.5	40.9	167	434	420	280	1024	4.34

備考
 C: 普通ポルトランドセメント 3.16g/cm³, S1: 富士川中流域産川砂 2.64g/cm³
 S2: 富士宮星山産山砂 2.62g/cm³, G: 富士川中流域産川砂利 2.66g/cm³
 Ad: AE減水剤標準形(I種) or AE減水剤遅延型(I種)

表-2 脱型日および養生条件

記号	脱型日(材齢)	養生方法
標準	1	標準(水中)
屋外	1	屋外(降雨の影響あり)
乾燥	1	恒温恒湿室(20℃、60%)
封緘	1	封緘して恒温室(20℃)
封緘(型枠)	28	封緘して恒温室(20℃)

表-3 コンクリート配合（IIシリーズ）

呼び強度	スランブ	Gmax	W/C	s/A	W	C	S1	S2	G	Ad
SL	cm	mm	%		kg/m ³					
15	8	25	69.8	51.3	155	223	590	394	944	2.23
24	8	25	54.5	47	155	285	527	351	1000	2.85
40	8	25	38.5	40.9	167	434	420	280	1024	4.34

備考
 C: 普通ポルトランドセメント 3.16g/cm³, S1: 富士川中流域産川砂 2.64g/cm³
 S2: 富士宮星山産山砂 2.62g/cm³, G: 富士川中流域産川砂利 2.66g/cm³
 Ad: AE減水剤標準形(I種) or AE減水剤遅延型(I種)

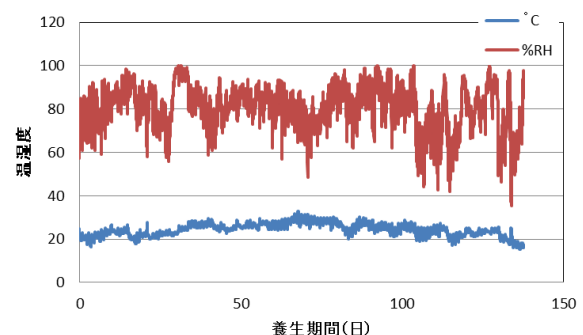


図-1 養生時の温度および湿度

(2) 試験体寸法および養生条件

試験体寸法は、横180cm×高さ90cm×幅30cmとした（以降、大型試験体と称す）。コンクリートは室内で打設し、材齢5日まで湿潤養生を行った後、材齢7日で脱型した。その後、室内で91日間静置した。静置時の室内温度および湿度を図-1に示す。温度は平均24.4℃（最高

32.9℃, 最低 15.2℃), 湿度は平均 81%RH(最高 99%RH, 最低 36%RH)であった。

(3) 透気係数の測定時期と測定位置

透気係数の測定時期は, 脱枠後 1 日 (材齢 8 日), 6 日 (材齢 14 日), 20 日 (材齢 28 日) および 91 日 (材齢 99 日) の 4 回測定を行った。また, 材齢 99 日以降に雨水の影響を受ける屋外に暴露し, 適宜透気係数を測定している。測定位置は毎回同じ個所で実施している。

測定箇所の違いによる影響について検討する目的で, 図-2 に示すように, 横 180cm×高さ 90cm の面を横に 3 分割, 縦に 2 分割の 6 分割し測定を行った。したがって, 1 試験体で両面合わせて 12 箇所透気係数を測定している。以降, 表裏を区別するために表面を A 面, 裏面を B 面と表記する。測定位置はなるべく分割区分の中心になるようにし, 表面気泡などは避けて測定を行った。

3. 実験結果

本研究で得られた結果を項目ごとに記載する。

3.1 透気係数と各種劣化因子の浸透量との関係

(1) 透気係数

小型試験体の透気係数を図-3 に示す。呼び強度 24 と 40 を比較すると, 全ての養生環境で呼び強度 40 の方が透気係数は小さな値を示した。養生条件で比較すると, 最も透気係数を小さくできたのは標準養生であった。また, 透気係数が小さくなった順として, 標準養生<封緘(型枠)<封緘<屋外<乾燥となった。この順番にはコンクリート強度による違いは見受けられない。したがって, 養生が適切に実施されていれば, 透気係数は小さくなるということが得られた。以上のことから, 同一のコンクリートを用いた場合, 養生の状態を透気係数により相対的に評価することは可能であることが考えられる。

(2) 透気係数と中性化係数の関係

小型試験体の中性化速度係数を図-4 に示す。透気係数と同様に中性化速度係数が最も小さくなったのは標準養生であった。コンクリート強度の大小で中性化速度係数に大きく異なる結果が得られた。また, 中性化速度係数の小さくなった養生条件と透気係数の小さくなった養生条件の順番は, 同一の結果が得られた。

図-5 に透気係数と中性化速度係数の関係を示す。呼び強度 24 のコンクリートでは, 両者に相関がある ($R^2=0.79$) が, 呼び強度 40 になると両者には相関がなかった ($R^2=0.37$)。また, 透気係数が $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ とほぼ同等である数値について, 呼び強度 24 と 40 を比較すると, 呼び強度 24 では透気係数が $1.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ で中性化速度係数は $6.39 \text{mm}/\sqrt{\text{週}}$, 呼び強度 40 では透気係数が $0.97 \times 10^{-16} \text{m}^2$ で中性化速度係数は $0.38 \text{mm}/\sqrt{\text{週}}$ となる。同程度の透気係数で比較した場合, 中性化速度係数に 16 倍程度

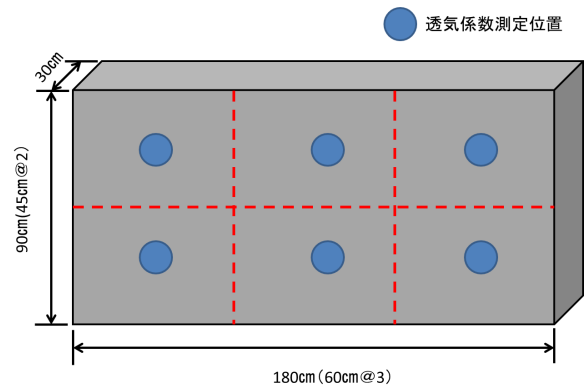


図-2 コンクリート試験体寸法および測定位置

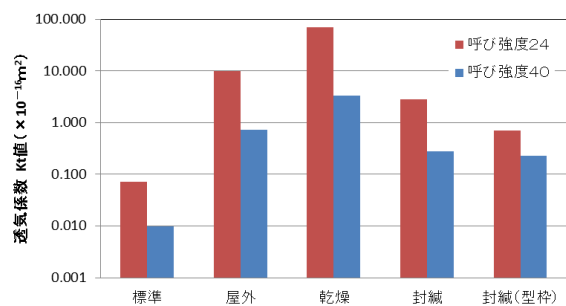


図-3 各養生の透気係数

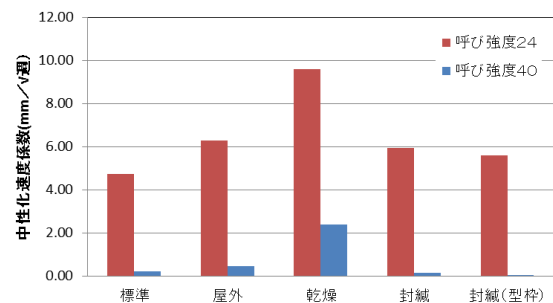


図-4 各養生の中性化速度係数

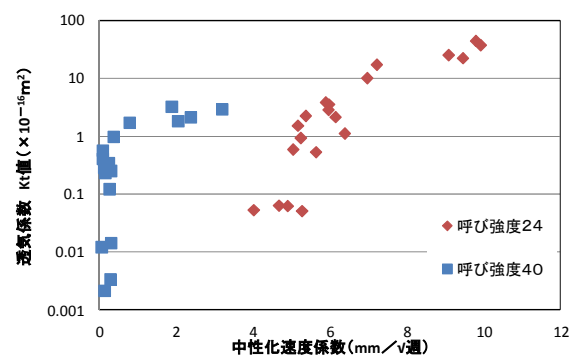


図-5 透気係数と中性化速度係数の関係

違いがあることが確認できた。測定した時の表面水分率は同じ程度であり、測定条件も異なることから、透気係数だけでは、中性化速度係数を評価することが難しいことが判明した。中性化はコンクリート中のカルシウム量の影響を受けることから、単位セメント量などの別の要因を検討しなくてはならないと考えられる。

(3) 透気係数と塩化物イオン浸透深さの関係

小型試験体の塩化物イオン浸透深さを図-6に示す。透気係数と中性化速度係数と同様に、標準養生を行った試験体が最も浸透していないのが確認できた。コンクリート強度の違いは大きく、強度が大きいことで、塩化物イオン浸透深さが50~70%抑制することが判明した。また、塩化物イオン浸透深さは、透気係数や中性化速度係数と同一の養生条件順に浸透深さが大きくなる結果が得られた。

図-7に透気係数と塩化物イオン浸透深さの関係を示す。この図からもわかるように、両者の相関は小さいことが言える。中性化速度係数との違いとして、コンクリート強度の影響は小さいことがわかる。

以上のことから本検討項目の結果として、透気係数のみでは、コンクリート構造物の主要劣化要因である塩害や中性化を推測することは困難であることが言える。ただし、中性化については、コンクリート中のカルシウム量などの要因を再検討することで、コンクリート表層の透気係数から中性化による劣化を推定することが可能であることが考えられる。

3.2 実構造物を模擬した試験体による測定実施材齢や測定箇所が透気係数に与える影響

(1) 脱型後91日までの透気係数の変化

呼び強度15、24および40における透気係数の変化を図-8に示す。試験体は室内で静置していることから、試験体は、徐々に乾燥していることが考えられる。測定の結果、材齢が経過することで透気係数が大きくなる傾向を示した。特に水セメント比が大きい呼び強度15の大型試験体が顕著に透気係数は大きくなった。

各材齢における透気係数を材齢28日で除し、百分率にした結果を図-9示す。脱型後1日(材齢8日)で測定した透気係数は、材齢28日と比較して30%未満となり、物質移動抵抗性が大きいと判断された。また、呼び強度が低いと顕著に透気係数が小さくなった。透気係数が小さくなる理由として、コンクリートの含水率が影響を及ぼしていることが考えられる。材齢14日で約65%程度、材齢21日で約80%になった。このことから、材齢28日以前の測定では透気係数が小さく評価されることが判明した。一方で、材齢99日まで静置した場合、材齢28日と比べ、呼び強度15では15倍、呼び強度24と40では2倍になった。乾燥が進むにつれて、透気係数が大きく

なる結果となった。一般的にこのような環境は、雨水などの水が掛からない場所、例えばボックスカルバートや箱桁内部で生じることが考えられる。

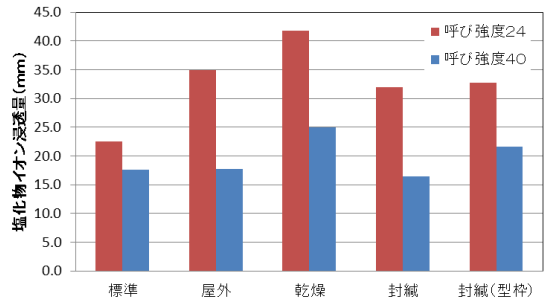


図-6 各養生の塩化物イオン浸透量

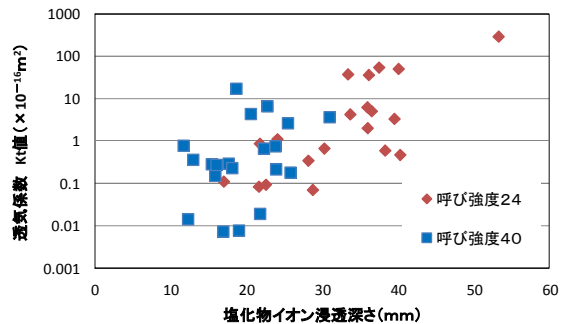


図-7 透気係数と塩化物イオン浸透深さの関係

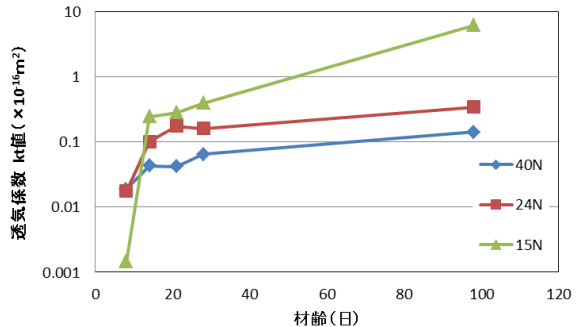


図-8 透気係数の変化

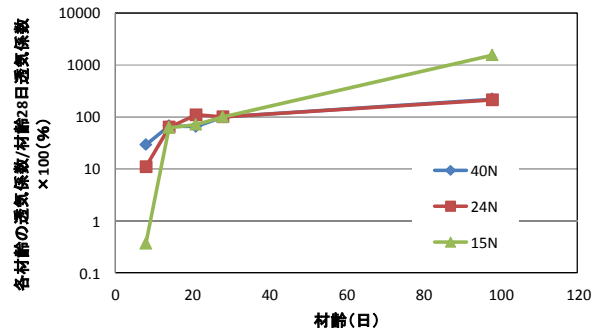


図-9 各材齢における透気係数(材齢28日)の比較

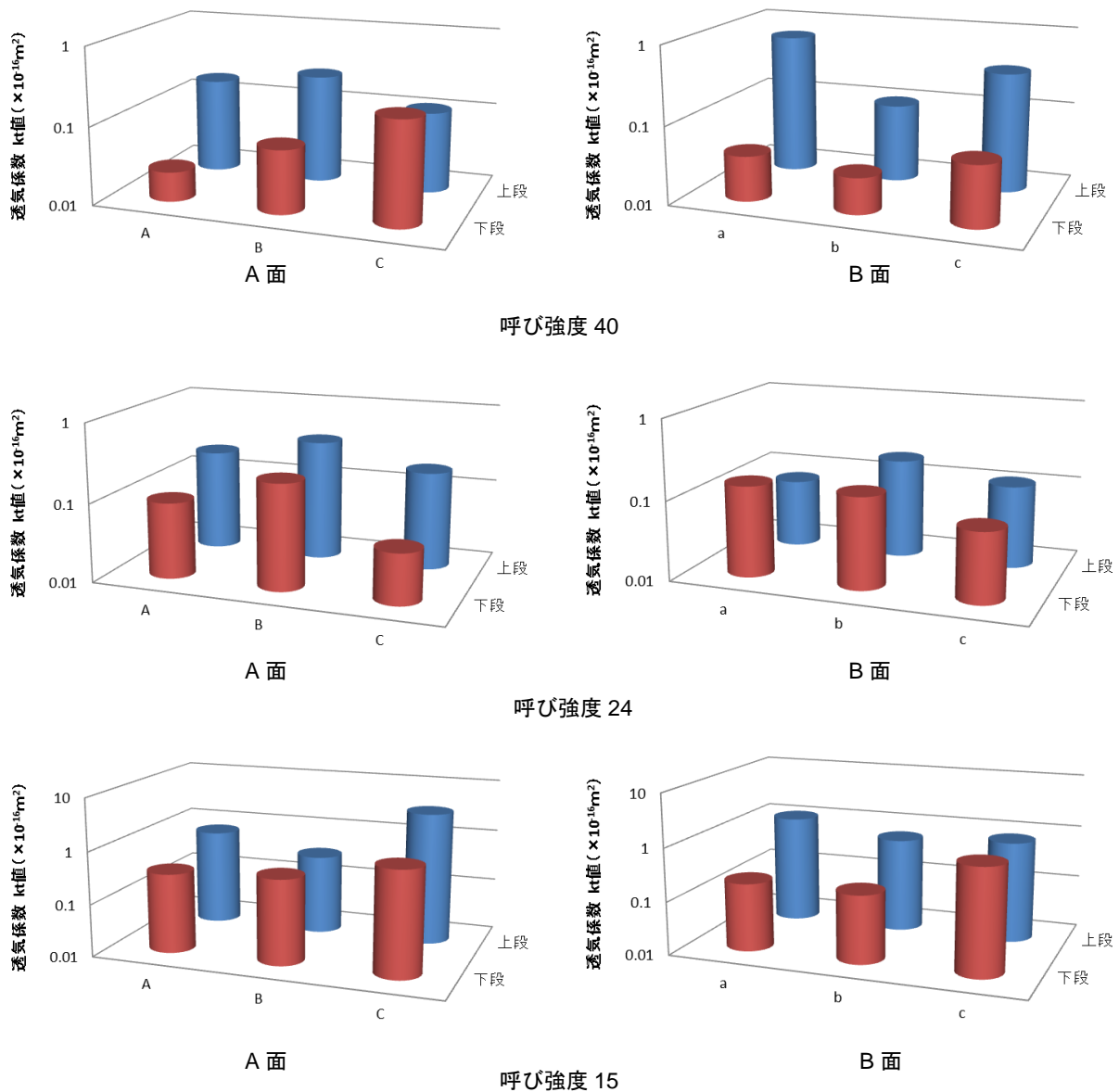


図-11 透気係数の測定位置による測定結果

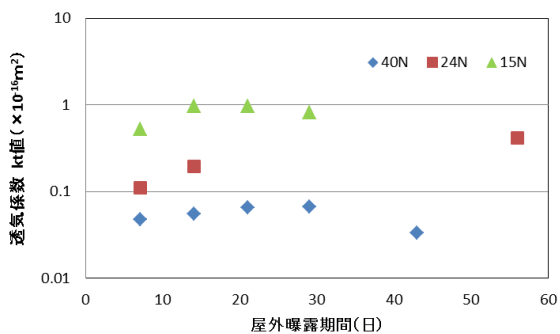


図-10 屋外養生時の透気係数の変化

(2) 屋外暴露時の透気係数の変化

屋外に静置した大型試験体における透気係数の変化を図-10に示す。透気係数の平均値として呼び強度 15 で

は $0.8 \times 10^{-16} m^2$, 24 では $0.2 \times 10^{-16} m^2$, 40 では $0.05 \times 10^{-16} m^2$ となった。材齢 28 日の透気係数と比較すると、呼び強度 15 では 2 倍, 24 では 1.5 倍, 40 では 0.8 倍となった。このことから水セメント比が大きなコンクリートほど、測定材齢を遅くするか、補正係数を用いなければならないことが判明した。

(3) 測定箇所が透気係数に及ぼす影響

各大型試験体の上段と下段について透気係数を測定した結果を図-11に示す。全ての大型試験体で上段の方が下段に比べて透気係数は大きくなる結果が得られた。また、同一の高さにおいても、横方向で透気係数の標準偏差が最大 $1.6 \times 10^{-16} m^2$, 最小 $0.02 \times 10^{-16} m^2$, 平均 $0.29 \times 10^{-16} m^2$ 程度異なることが確認できた。このことは、締固め具合の違いなどが影響を及ぼしているものと考えられ

る。透気係数の最大値と最小値の差は大きくて 10 倍違う結果が得られた。スイスにおける透気係数の推奨値で 0.5 と $2.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の 2 段階となっており、このことを考えると、測定値が 10 倍違うと測定値の信頼性は問題となる。したがって、測定値の信頼性を上げるために、測定数を多くする必要があると考えられる。

以上のことから、本検討項目で得られた結果は、透気係数を測定する時期については、対象コンクリート構造物の水セメント比により異なる結果となった。含水率を測定することで補正をすることが可能と考えられるが、現状でコンクリート内部まで適切に含水率を測定する方法が少ないことから、含水率を測定する方法の検討を別途行わなければならないと考えられる。また、測定箇所による影響について、ブリーディングの影響や締固め程度が異なると透気係数の値が変わることが判明した。今回の大型試験体（寸法：横 180cm×高さ 90cm）においても、測定箇所の違いにより透気係数に 10 倍の違いが得られたことから、測定頻度を上げて計測を行わなければコンクリート構造物の代表値として活用することは困難であると考えられる。

4. 結論

透気係数を用いた養生条件が異なるコンクリートの品質評価および透気係数の測定時期や測定箇所が測定結果に与える影響について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) コンクリートの養生条件を変えた小型試験体について透気係数を測定した結果、透気係数の大きい順と中性化速度係数や塩化物イオン浸透深さの大きい順が同じになった。
- (2) 透気係数と中性化速度係数の結果、呼び強度 24 のコンクリート配合では透気係数を用いることで、中性化速度係数を推定することが可能であることが確認できたが、呼び強度 40 のコンクリート配合では透気係数から中性化速度係数を推定することが難しいと考えられる。
- (3) 透気係数と塩化物イオン浸透深さの結果、透気係数と塩化物イオン浸透深さには相関関係が確認できなかった。
- (4) 透気係数の測定時期による測定結果に与える影響を検討した結果、水セメント比により結果が異なることが確認された。
- (5) 雨水の影響を受ける屋外に静置した場合、透気係数の変動は小さくなった。材齢 28 日の透気係数と比較して、水セメント比が大きいものは 2 倍程度の違いが確認された。

- (6) 測定箇所が透気係数に及ぼす影響について検討した結果、ブリーディングの影響や締固めの違いによる影響などにより測定値に 10 倍程度の違いが確認された。

以上のことから、透気係数を用いてコンクリートの品質を測定するには、単純に透気係数だけの値を用いることは困難であると考えられる。したがって、配合などの観点からも再度検討する必要がある。また、測定時期についても、コンクリート配合によって違いがあることから、再度検討する必要がある。

コンクリートの評価を行うことは、今後の課題であることから、今後もしろいろな視点から評価をしていきたいと考えている。

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) 西尾莊平, 上田洋, 岸利治 : コンクリート表面における散水時の明度変化の飽和度による表層品質の簡易検査, *土木学会第 68 回年次学術講演会第 V 部門講演概要集*, Vol.V, pp.743-744, 2013
- 4) 家辺麻里子, 秋山仁志, 岸利治 : 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
- 5) 蔵重勲, 廣永道彦 : コンクリートの中性化抵抗性と表層透気係数の関連分析に基づいた品質検査判定基準の提案, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.718-723, 2012
- 6) 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
- 7) 金武漢, 権寧, 朴宣圭, 姜錫杓 : モルタル及びコンクリートの中性化に影響を及ぼす透気係数に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.22, No.1, pp.193-198, 2000
- 8) 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.22, No.1, pp.1849-1854, 2013