論文　表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握

家辺　麻里子[*1]・秋山　仁志[*2]・蔵重　勲[*3]・岸　利治[*4]

要旨：硬化コンクリートの耐久性能検査指標として提案されている表層透気試験の適用性を検討するため，柱ごとに脱型材齢やその後の養生条件を変化させた中規模柱 RC 試験体を作製し表層透気試験を行った。同一試験体内の多数の箇所に対して測定を行い，表層透気係数の面的な分布やばらつきを確認した。多数の測定値の平均をとることにより，表層透気係数の値が配合，養生条件の違いに起因するコンクリート表層品質の差異を検出することを確認した。

キーワード：耐久性，表層品質，表層透気試験，養生条件，ばらつき

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において，鉄筋を腐食させる原因となる有害因子はかぶりコンクリートを通して外部より侵入するため，かぶり厚やかぶりコンクリートの品質が鉄筋コンクリートの耐久性能に影響する。一方，コンクリートは現場で個別生産され，その品質は設計だけでなく打込み・締固め・養生等に左右されることから，これらの妥当性を施工後に定量的に検査する必要性が議論されている[1)]。施工後の耐久性能検査指標の一つに，表層部かぶりコンクリートの物質移動抵抗性を非破壊で定量的に評価する手法として表層透気試験が提案され，研究されている。本検討では，表層透気試験として Torrent 法[2)]を採用し，柱ごとに脱型材齢や養生条件を変化させて作製した中規模柱試験体に対し適用性の評価を試みた。

Torrent 法はコンクリート表層の透気性を評価する手法のうち表面法に属する。コンクリート表面に減圧したチャンバーを設置し，その内部の気圧変化から透気係数を算出するものであるが，**図－1** のように内部チャンバーと外部チャンバーを有することがこの手法の特徴である。透気係数は内部チャンバー内の圧力変化から算出されるが，内部チャンバーと外部チャンバー内の圧力を等しくコントロールすることにより外部から内部チャンバーへの空気の流入が妨げられる。これにより，コンクリートのごく表層の粗な組織の影響を受けにくいとされている。

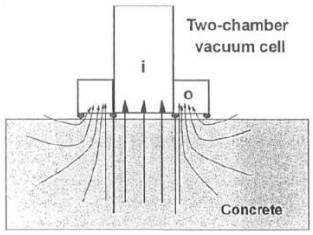
2. 実験概要

2.1 中規模柱試験体

図－2 に示す中規模柱試験体を作製した。図の右手前側（東側）10 本を冬季施工（2010 年 3 月 4 日打設），左奥側（西側）10 本を夏季施工（同 8 月 5 日打設）とした。配合，養生の異なる 20 本の柱試験体の上部をスラブで覆っており，試験体に雨が直接かからないようになっている。ただし，夏季施工分はスラブ下面に常設の水切りがあるのに対して，冬季施工分のスラブには常設の水切りはなく，当初だけ粘着テープにより仮設の水切り処置を講じていたが，打設半年後に仮設の水切りを撤去した。柱試験体の高さは 2350mm, 断面は 300mm×400mm の矩形である。

2.2 コンクリートの配合および養生条件

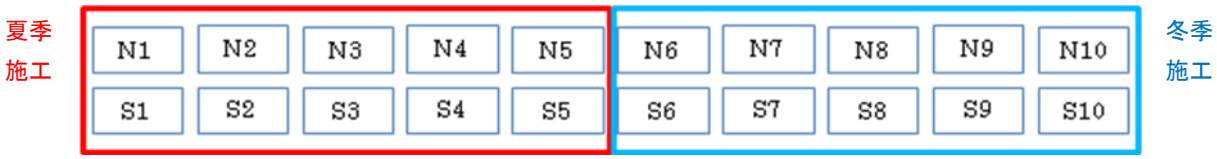
柱の配置および試験体名を**図－3** に示す。本検討では冬季に施工した 10 本の試験体を測定対象とした。これ



図－1　Torrent 法[3)]

図－2　中規模柱試験体

*1 東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻修士課程　(正会員)
*2 東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻博士課程　修士(工学)　(正会員)
*3(財)電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 主任研究員 博士(工学)（正会員）
*4 東京大学　生産技術研究所　教授　博士(工学)　(正会員)



図－3　柱の配置

らは**表－1** に示す配合で作製し，S10 のみ 20kg/m^3 の現地加水を行った。フレッシュ性状は**表－2** の通りであり，**表－3** に示す養生を行った。普通ポルトランドセメントを用い，呼び強度 24 で標準養生を行った N9 を基準試験体とし，試験結果の対比を行うこととした。基準試験体と同配合，脱型後 21 日間ラップを巻いて養生をした N8 は養生期間延長効果，散水を行った N10 は水分供給効果，1 日で脱型した S8 は養生不足の影響を対比の観点とした。標準養生で南側に位置する S9 は南北方角の影響を確認することを目的とし，現地加水を行った S10 は生コン不良を想定したものである。N7 および S7 は高炉セメントを使用し，標準養生と 1 日脱型の比較を行った。N6 および S6 は呼び強度 60 の高強度コンクリートで，同様に標準養生と 1 日脱型で養生条件の比較を行った。

2.3 気象条件

本検討の測定対象とした冬季施工分の柱打設は 2010 年 3 月 4 日に実施した。現地にて測定した打込み時の気温は 7℃～10℃，湿度は 30～60%であった。1 ヶ月前の 2 月 4 日の同じ時刻に気温が 0℃～4℃であったことを考慮すると，本施工日は比較的気温が高くなった時期に行ったものであると言える。また，気象庁の観測（千葉）によると，打設直後の 3 月 4 日夕方から 5 日早朝，6 日日中と 7 日終日に降雨があり，湿度が 80%を超える日が続いた。本施工は夏季施工と対比した冬季施工という位置づけであったが，以上のように比較的温暖な気象条件と打設直後から続いた降雨による高い湿度の影響が重なり，養生条件の相違によるコンクリート表層品質の違いがそれほど顕著にはならない可能性がある。

2.4 測定方法

測定は材齢約 10 ヶ月で実施した。測定値の精度を高めるとともに，測定値の面ごとのばらつき，測定点の高さによるばらつきを議論するため，標準養生の N9 は南北面に対して縦 2 列，11 段の 22 点，東西面対して縦 1 列 11 段の 11 点，合計 66 点の測定を行った。その他の試験体は省力化を図るため全ての面に対して各 8 段(セパレータ間を 2 段ずつ)，合計 32 点の測定点を設定し，トレント法による表層透気係数 kT の測定を行った。

表－1　コンクリートの配合

試験体名	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
				W	C	S	G	混和剤
N8~10, S8~10	N	58.0	45.2	168	290	826	1019	2.90
N7, S7	BB	57.5	44.9	167	291	818	1019	2.91
N6, S6	N	32.0	47.4	170	532	768	866	8.78

表－2　コンクリートのフレッシュ性状

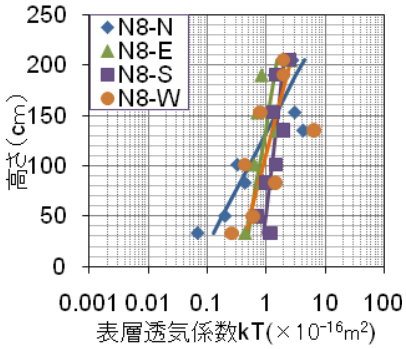
試験体名	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量(%)	練上温度 (℃)
N8～10，S8,S9	13.0	4.7	11.2
S10	22.0	5.8	－
N7，S7	14.5	5.1	11.2
N6，S6	スランプフロー60×59	4.5	13.6

表－3　養生条件

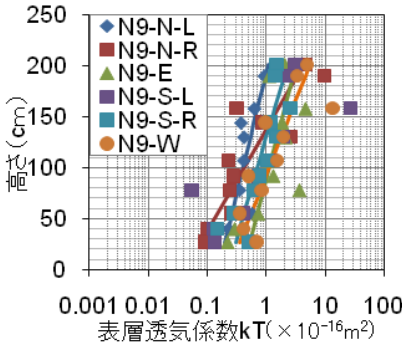
試験体名	加水の有無	養生方法	養生良否
N8	なし	型枠 7 日→ラップ 21 日	優
N9（基準），N6，N7		型枠 7 日	標準養生
N10		型枠 1 日→散水 27 日	極優
S8，S6，S7		型枠 1 日	極劣
S9		型枠 7 日	標準養生
S10	あり	型枠 7 日	標準養生

3. 測定結果

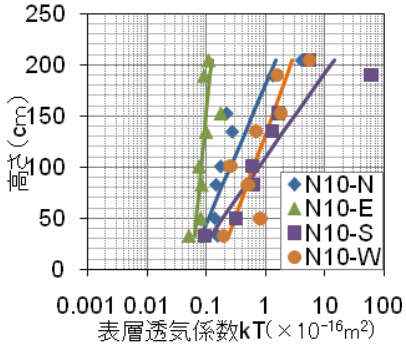
3.1 各試験体内でのばらつき



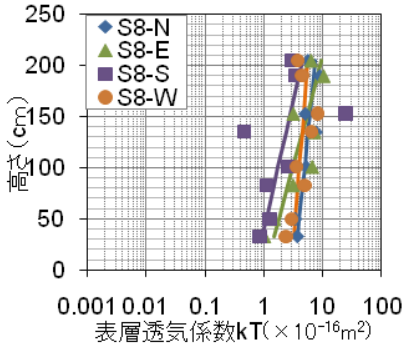
図－4　各点での表層透気係数 kT 測定値（N8）



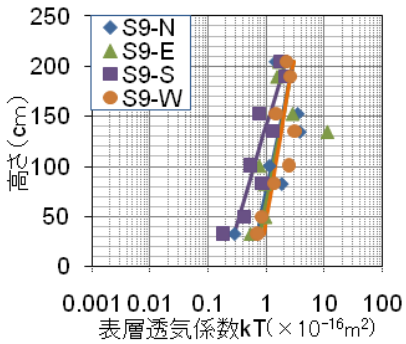
図－5　各点での表層透気係数 kT 測定値（N9）



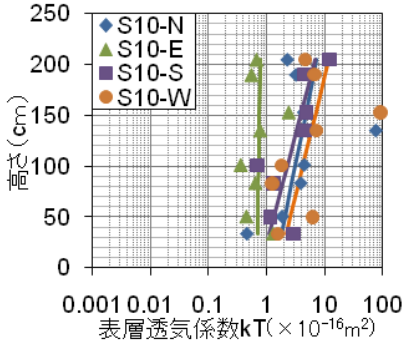
図－6　各点での表層透気係数 kT 測定値（N10）



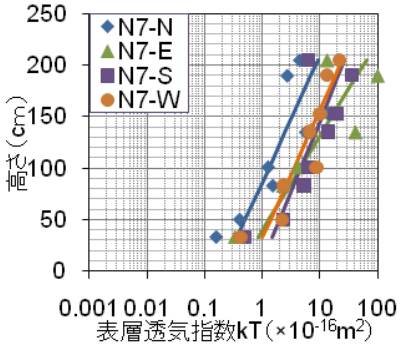
図－7　各点での表層透気係数 kT 測定値（S8）



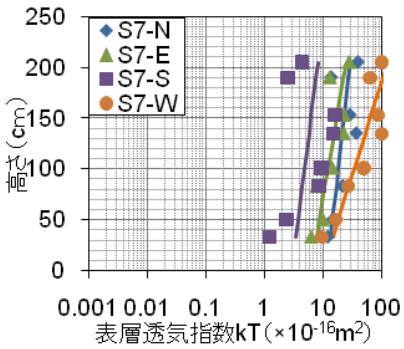
図－8　各点での表層透気係数 kT 測定値（S9）



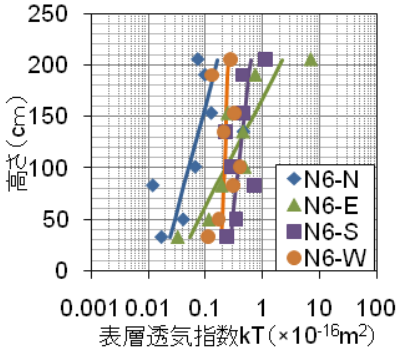
図－9　各点での表層透気係数 kT 測定値（S10）



図－10　各点での表層透気係数 kT 測定値（N7）



図－11　各点での表層透気係数 kT 測定値（S7）



図－12　各点での表層透気係数 kT 測定値（N6）

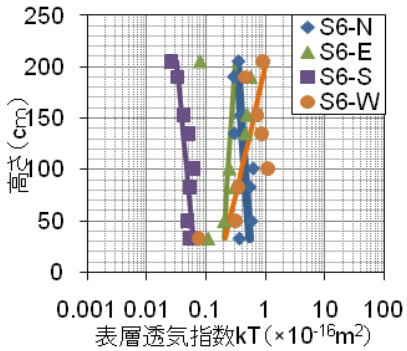


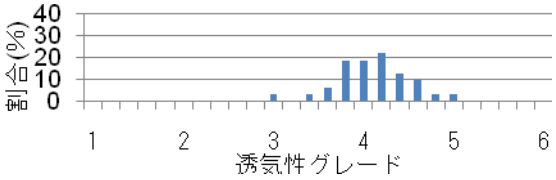
図 13　各点での表層透気係数 kT 測定値（S6）

図－4～図－13 のグラフに各試験体の表層透気係数の高さ方向の分布を示す。同一試験体内では圧密やブリーディングの影響により下部ほど密に，上部ほど粗になると考えられるが，このことを反映し上部ほど表層透気係数の値が大きくなるような傾きを持つ近似直線が得られた。東の端に位置する N10 および S10 の東面は高さによる表層透気係数の差がほとんどなく，他の面と異なった傾向を持つ。これは後述する雨掛かりの影響によるものと考えられる。また，1 日で脱型を行った養生不足の試験体(S8, S7，S6)は同配合で標準養生を行った試験体(N9，N7，N6)と比べて高さによる表層透気係数の差が小さく，全体的に表層透気係数が大きい値をとっていることが読み取れる。養生条件の違いが比較的高さが低い点での表層透気係数に影響していることがこれらのグラフより読み取れる。

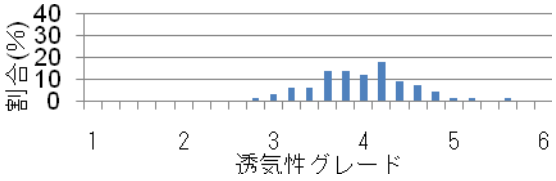
次に表層透気係数 kT の比較をしやすくするため，式(1)で計算される表層透気性グレードを導入する。透気性グレードの値が 1 に近づくほど透気係数は小さく，6 に近づくほど大きくなる。

$$(\text{透気性グレード}) = \log_{10}(kT) + 20 \qquad (1)$$

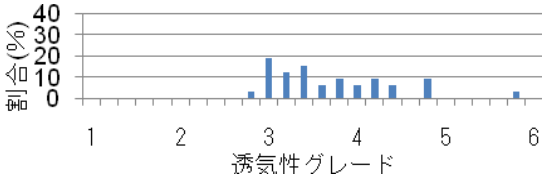
試験体内での測定点ごとの表層透気性グレードの分布を**図－14～図－23** に示す。各点の測定値(表層透気係数 kT)から計算された表層透気性グレードの値を 0.2 刻みの度数分布で表したものである。まず，全体として各試験体とも 1 グレードから 2 グレードの広範囲に測定値が存在し，中にはピークからグレードが 1 以上離れた値も存在する。基準試験体 N9 ではグレードの値が 4.0~4.2 程度の値をピークに 3 から 5 までの範囲に広く分布している。養生を追加した N8 では N9 と比べて分布の範囲やピーク位置に大きな違いは見られなかった。散水養生を行った N10 も，分布の範囲は大きく変化しないが，ピー



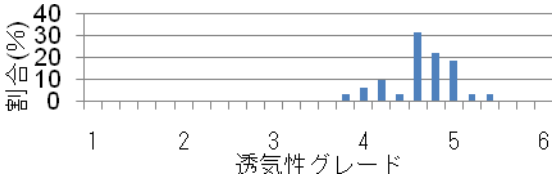
図－14　透気性グレードの分布（N8）



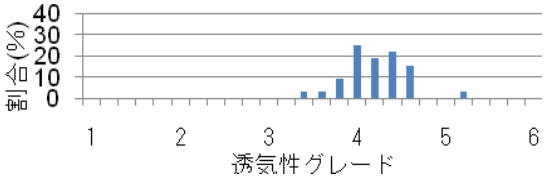
図－15　透気性グレードの分布（N9）



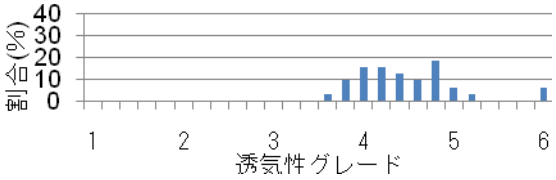
図－16　透気性グレードの分布(N10)



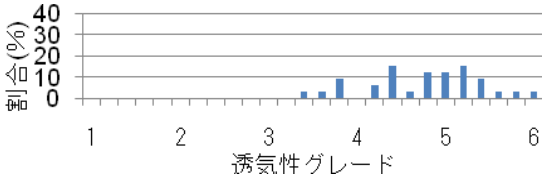
図－17　透気性グレードの分布（S8）



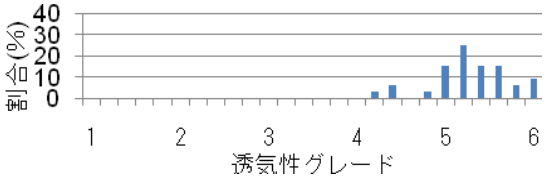
図－18　透気性グレードの分布（S9）



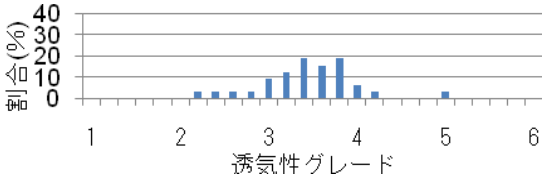
図－19　透気性グレードの分布（S10）



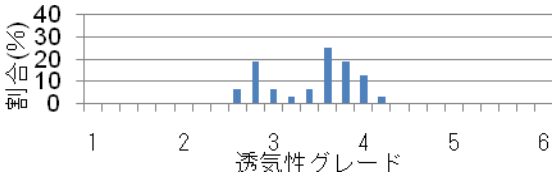
図－20　透気性グレードの分布（N7）



図－21　透気性グレードの分布（S7）



図－22　透気性グレードの分布（N6）



図－23　透気性グレードの分布（S6）

クの位置が 3 前後となり明確に透気係数が良い傾向になっている。一方養生不足の S8 は，分布が全体的に値が大きい方に移動するのではなく，**図－7** で確認されたように高さ方向のばらつきが小さくなり，比較的大きい値に測定値が集中していることがわかる。現地加水を行った S10 は後述する平均値では S8 と近い値であったが，透気性グレードが大きい範囲でピークなく分布しており，加水の影響により主に高さ方向の品質のばらつきが大きくなっていると推察される。高炉セメントを用いた N7, S7 および高強度コンクリートの N6, S6 についても，1 日で脱型した試験体の測定値は比較的小さい値が少なく，大きい値に集中していることがわかる。

3.2 各試験体の傾向

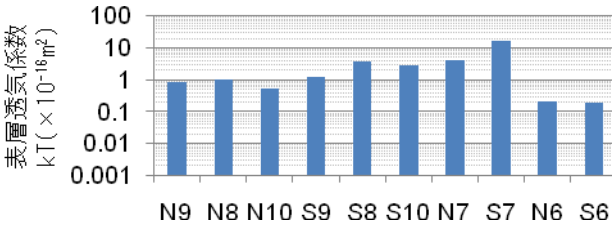
次に各試験体における 32 点ないし 66 点で測定した表層透気係数 kT の平均値を**図－24** に示す。ただし，平均値の算出にあたり以下のことに注意した。前項で述べた通り，測定値には同一試験体の他の測定点と比較して極端に小さい値や大きい値が一部含まれている。これらの測定値は試験体全体の傾向を示すものではなく目に見えないひび割れ等の局所的な性質を表すものである可能性が高く，試験体の傾向を確認するためには排除する必要があると考えられる [4)]。したがって本論文では以下の方針によって極端な値の影響を排除することとした。この処理によって，それぞれ 0～10%の極端に大きい値，小さい値を削除した。また，後述する雨掛かりの影響を排除するため，N10 および S10 は東面を除いた 3 面の測定値を使用した。

・極端に大きい値または小さい値も含め，各試験体の全測定値の平均値をとる。

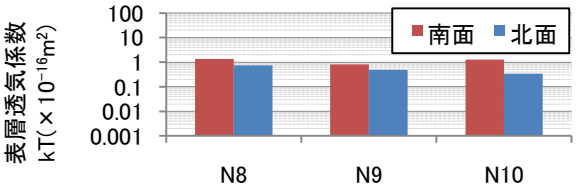
・平均値から標準偏差の 2 倍以上大きい，または小さい値を削除する。

・残った測定値で改めて平均値をとり，これを各試験体の測定値の平均値とする。

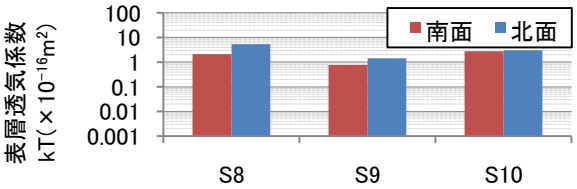
以上の方針で求めた表層透気係数の平均値から，N9 を基準に散水養生を行った N10 ではわずかではあるが表層透気係数が小さくなっていることが確認できる。N10 はコンクリート打設後 1 日で脱型し養生マットを巻きつけた上で，上方からシャワーで水を流して養生を行っている。このことから，若材齢においてコンクリート表面が洗い流され，表層のコンクリートが十分に緻密化しなかったことにより，測定値がそれほど良くならなかった可能性もある。養生を追加した N8 は表層透気係数が N9 とほとんどかわらず，平均値で養生追加の影響は確認できなかった。一方，養生不足である S8 と現地加水を行った S10 では値が大きくなっており，N9 での値との差も比較的大きい。多数の測定点の平均値をとることにより，養生不足や加水の影響は検出することができた。6 試験体における表層透気係数の最大値(S8：養生不足)と最小値(N10：散水養生)の差が 1 オーダー以下とあまり大きくないことは，先に述べた施工時の比較的温暖で湿度の高い気象条件が影響している可能性がある。基準供試体と同じ標準養生で，南側に位置した S9 では N9 とほとんど変わらないもののやや大きい値が得られ，脱型後に日射の影響で乾燥が促進されたことによりコンクリート表層が粗になった可能性がある。ただし，N9 と S9 の表層透気係数の差は大きくなく，N9 と S8 および S10 の表層透気係数の差は方位の違いよりも養生条件の違いによるところが大きいと考えられる。高炉セメントを用いた試験体は標準養生を行った N7 も表層透気係数が S8 や S10 と同程度であるが，1 日で脱型した S7 はさらに大きく，普通ポルトランドセメントを用いたものと同様の養生条件の影響を確認できた。高強度コンクリートの試験体はともに表層透気係数が小さく，平均値では養生条件の影響は確認できなかった。前項で述べたように，各試験体の測定値は 1 オーダー以上の範囲に分布するため，少数の測定点では全体としての傾向と測定値が逆転する可能性がある。多数の測定点の平均をとることによって養生条件等の違いによるコンクリート表層品質の違いを検出することができると考えられるが，何点の測定で信頼性の高い値を得ることができるのかと



図－24　試験体ごとの表層透気係数 kT の平均値



図－ 25　南北面の表層透気係数の比較(北側の柱)



図－ 26　南北面の表層透気係数の比較(南側の柱)

いうことについては，更に統計的な議論の余地がある。

3.3　面ごとのばらつき

同一試験体内の各面の表層透気係数 kT を比較すると(**図－ 25**，**図－ 26**)，北側の試験体は 3 体とも北面の方で表層透気係数が小さくなる傾向が見られたが，南側の試験体では反対に南面の方が小さい値をとる。柱試験体上部はスラブで覆われており，直接雨があたることはないが，空気中に霧状の水滴が浮遊し，コンクリート表面に付着すると考えられる。北側の試験体北面および南側の試験体南面は高架橋模型の外側面にあたり，こうした霧状の水滴による水分供給が比較的多いことが，表層透気係数が小さくなる原因であると予想される。南側試験体の南面は日射の影響による水分逸散のため表層透気係数が大きくなると予想されたが，本検討では面ごとの日射の影響は確認されなかった。3 月の施工(冬季施工)であり，比較的気温が低かったため，日射の影響がそれほど大きくならなかったと考えられる。

また，模型の東端に位置する N10，S10 の東面はともに降雨時に雨がかかる構造になっている(**図－27**)。測定前 1 週間降雨がない状況で，**図－28** に示したように，N10，S10 ともに東面の表層透気係数は他の面と比べて明らかに小さくなっている。雨掛かりによってコンクリート表面に水分が供給されることによる自然の養生効果が，表層透気係数に表れていることが確認できた。さらに，**図－6** および**図－9** で示したように表層透気係数の高さ方向分布の近似直線を描いたときの傾きが，N10 東面で 0.0016(他の面は 0.06~0.12)，S10 東面で 0.0003(他の面は 0.004 前後)と同一試験体内の他面と比べて 1 オーダー以上小さい。雨掛かりのない面ではブリーディング等材料の影響で表層透気係数が大きくなる試験体上部が，十分な水分の供給により下部と同程度の表層透気係数を保持していると考えられる。

4. まとめ

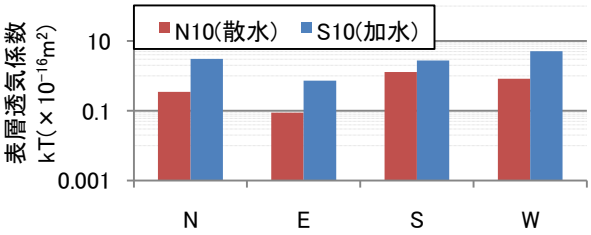
・表層透気係数の値は，同一試験体内でも測定点により 1 オーダーから 2 オーダーの範囲で分布し，養生によってその分布の仕方に違いがあることを確認した。

・中規模高架橋模型の柱試験体を対象とした表層透気試験で多数のデータを取得することにより，養生の違いによるコンクリート表層品質の差異をある程度検出した。

・養生条件の違いによる表層透気係数の差が顕著には表れていない。冬季施工としては比較的温暖な気象条件下で施工を行ったことや施工直後に降雨が続き湿度が高かったことが影響している可能性がある。

・面によって表層透気係数の傾向が異なることが確認された。この結果には降雨の影響が大きいと考えられる。

図－27　試験体 S10 の東面



図－28　雨掛かりのある試験体の面ごとの表層透気係数の比較（N10, S10）

・実務レベルでの適用を視野に入れた際，何点の測定値の平均をとれば信頼性の高い値を得ることができるかということについて，更なる統計的な検討の余地がある。

謝辞

模擬 RC 柱の製作におきまして，東日本旅客鉄道（株）松田芳範氏，小林薫氏，住友大阪セメント（株）小田部裕一氏，小出貴夫氏 他の関係各位の御協力を頂きました。ここに記しまして深甚の謝意を表します。また，本論文は，（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構「平成 21 年度運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施した研究の成果であることを付記致します。

参考文献

1) 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書，コンクリート技術シリーズ 80，土木学会，2008

2) 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, Voi.25, No.6, pp.358－365, 1992.

3) R.J. Torrent, G. Frenzer, A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, Proceedings of the International Symposium Non－Destructive Testing in Civil Engineering(NDT－CE), pp.985－992, 1995.

4) Phan Huu Duy PUOC, Toshiharu KISHI, Experimental Study on Transport Property of Cover Concrete, The Tenth East Asia－Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Aug. 2006.