

論文 表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する一考察

温品 達也*1・坂田 昇*2・渡邊 賢三*3・柳井 修司*4

要旨: コンクリートの物質透過性を非破壊試験によって評価する手法として, Torrent 法に代表される表層透気試験が期待されている。しかし, 劣化因子がコンクリートの表面側から内部へ移動するのに対し, Torrent 法は内部から表面側へ空気を吸入し試験するため, ごく表層部分のコンクリートが脆弱である場合, その評価が脆弱部に大きく影響される可能性が考えられる。これを検証するために, 表層部が脆弱な配合で構成された要素供試体および水セメント比や表面の締め固めを要因とした大型供試体を Torrent 法によって評価した。その結果, コンクリート表面の透気性や含水率が表層品質の評価に大きく影響を与えることを確認した。

キーワード: 表層品質, 透気係数, Torrent 法, 水セメント比, 中性化深さ, 表面含水率

1. はじめに

コンクリート構造物は中性化や塩害などによって, 鉄筋が腐食してひび割れが生じ耐久性を損なう。中性化や塩害は, 主として外部から侵入する劣化因子によって発生する。すなわち, 劣化因子を内部に容易に浸透させない物質透過性の小さい表層を有するコンクリートが耐久性に優れていると言っても過言ではない。

コンクリート構造物の特性を直接評価する方法としては, コア供試体の圧縮強度試験などが代表的である。しかし既往の研究¹⁾によると, 強度は耐久性を支配する物質透過性と相関のある絶対的な指標でないことが示唆されている。また, コア試験などの破壊試験は実構造物の検査には適さないため, 非破壊でコンクリート表層部の物質透過性を評価する手法の確立が望まれている。

物質透過性を非破壊で評価する手法の 1 つとして, Torrent 法によるコンクリートの表層透気試験がある。Torrent 法はコンクリートの物質透過性の違いを透気係数によって評価することができ, 中性化速度係数などの耐久性に関する特性値と相関があることが報告されている^{2, 3)}。これらの報告から分かるように, Torrent 法は実構造物の耐久性を原位置で合理的に評価することが可能な技術として期待されている。

しかし, 実際の現象は, 劣化因子がコンクリート表面側から内部へゆるやかに移動するのに対し, Torrent 法による表層透気試験は, 内部から表面側へ強制的に空気を吸入して物質透過性を評価するものである。したがって, ごく表層部が脆弱なコンクリートを Torrent 法によって評価した場合, 図-1 に示すように表層部から空気が回り込み実際よりも過大な透気係数を算出する可能性が考

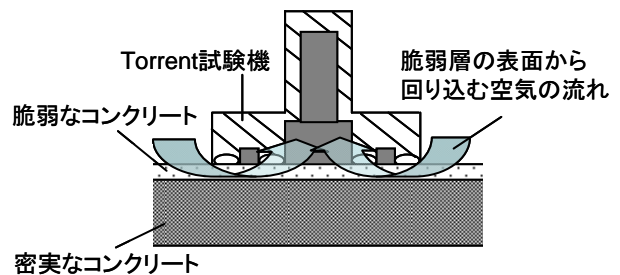


図-1 Torrent 法の課題イメージ

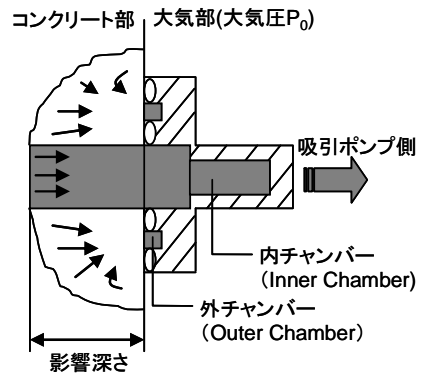


図-2 ダブルチャンバー方式概要

えられる。Torrent 法による表層透気試験は, ダブルチャンバー方式(図-2)を採用しており, 2室のチャンバーから空気を吸入することで, Inner Chamber には周囲からの空気の流入はないとされているが, Torrent 法に関する既往の研究においては, 微細ひび割れや表面気泡が多く表層部が比較的脆弱なコンクリート面を評価した場合, 実際の物質透過性よりも大きい結果となる可能性があることが報告されている^{4, 5)}。

以上のことから, コンクリートのごく表層の透気性が大きく, その背面は透気性の小さい密実なコンクリート

*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修 (正会員)
 *2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ グループ長 博士(工学) (正会員)
 *3 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 (正会員)
 *4 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 工修 (正会員)

表-1 要素供試体配合

配合名	骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
密実配合	20	47.5	153	322	851	1026	3.86
脆弱配合	5	73.0	300	429	1337	—	—

*C：普通ポルトランドセメント，S：砕砂+山砂，G：砕石，SP：ポリカルボン酸系

である場合、コンクリート全体としてはある程度の耐久性を有しても、Torrent 法によって評価した場合は耐久的でないと評価・判定される可能性も否めない。特に既設構造物では、環境条件によって乾燥や溶脱の影響を受けて表面部が劣化することから⁶⁾、新設構造物と比較して物質透過性の評価は難しいと考えられる。

本論文では、ごく表層部のみが脆弱なモルタルで構成された要素供試体や水セメント比および表面部の締固めを要因とした大型供試体を作製し、これらを Torrent 法によって評価・検討した結果について報告する。また、透気係数による評価は含水率の影響を受けることから⁷⁾、大型供試体において、経時的なコンクリートの含水率と透気性に関する検討も実施した。

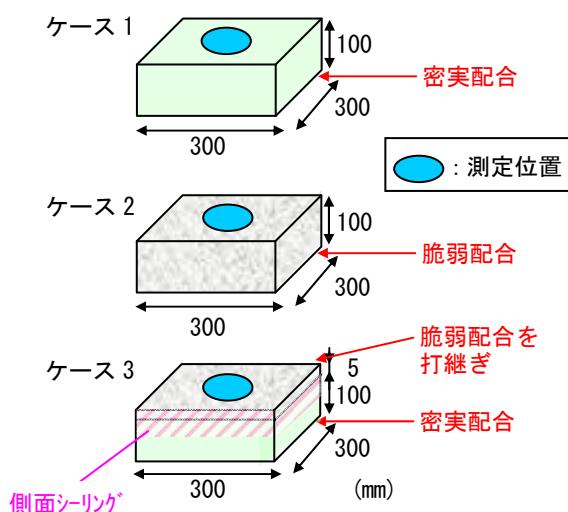


図-3 要素供試体概要

2. 要素供試体による検討

2.1 実験概要

「内部のコンクリートが健全であっても、表面部が脆弱で透気性が高い場合、そのコンクリート全体としての透気性の評価が表面部の透気性に支配される」という仮定を実験的に検証した。実験では、表-1 に示す密実配合および脆弱配合を用いて、図-3 に示す3 ケースの要素供試体を作製し、それぞれの透気係数を Torrent 法によって測定した。透気係数の評価には Torrent 法に準拠した表層透気試験機(写真-1)を使用して3 回測定した結果の平均値を用いた。また、表層透気試験の直前に測定面の含水率を高周波容量式(20MHz・測定誤差0.5%)の水分計によって測定した。

まず、ケース1の密実なコンクリート供試体(300×300×100mm)を作製し、打込み面をシールして材齢28日まで封緘養生を実施した。材齢28日において脱枠し、20℃、60%R.H.の室内に存置した。その後、材齢118日に打込み面を対象として表層透気試験を実施し、密実配合の透気係数を確認した。ケース1の表層透気試験実施後、ただちにケース2の脆弱なモルタル供試体(300×300×100mm)の作製およびケース3の密実配合に脆弱配合を打ち継いだ供試体(300×300×100mm)の作製を行った。ケース3の供試体は写真-2に示すように、ケース1の供試体上に5mmの厚さで脆弱配合を打ち継げるよう型枠を設置して作製した。脆弱配合はブリーディングが多量



写真-1 Torrent 法に準拠した表層透気試験機

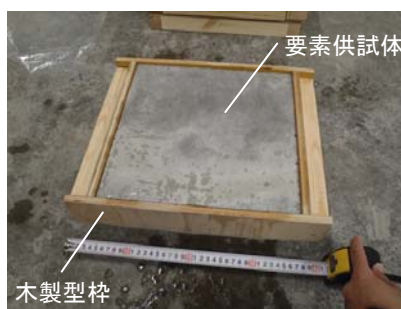


写真-2 ケース3型枠設置状況

に発生したため、型枠上端より10mmほど余盛りし、打込み完了5時間後に金ゴテを用いて表面仕上げを実施した。表面仕上げ後は、打込み面に特別な養生をせずに20℃、60%R.H.の室内に存置し、材齢7日で側枠を脱型して同室内に存置した。脆弱配合打設から158日後にケース2および3の表層透気試験を実施した。なお、ケー

ス3は表層透気試験中に打継ぎ部から空気が流入しないように、上面から7mmまでの側面をシリコン樹脂によってシールした(写真-3)。

2.2 実験結果

透気係数は表-2に示すTorrentらによって提案された基準⁷⁾に従い、5つのランクに分類し評価することとした。表-3に要素供試体各ケースの打込み面の表層透気試験および表面含水率試験の結果を示す。これより、密実配合で構成されたケース1の供試体は透気係数が $0.003 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と小さく、その透気係数は「優」と評価された。また、脆弱配合で構成されたケース2の供試体は透気係数が $3.70 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と大きく、その透気係数は「劣」と評価された。密実配合上面に脆弱配合を5mm厚で打ち継いだケース3の供試体は、透気係数が $2,950 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と極めて大きい結果となった。これは、ケース2の供試体は脆弱なモルタル1層で構成されるのに対し、ケース3の供試体は脆弱層から5mmの深さに密実層があるため、表面部からの空気流過が卓越し、空気の流入経路が短くなったためと考えられる。また、ケース2および3の脆弱配合部打込み面は、乾燥に起因したとみられるいくつかの微細ひび割れが確認された。さらに、透気係数は含水率に大きく影響を受けると報告されており⁷⁾、ケース1と2を比較した場合、含水率は同等で、含水率の影響なくそれぞれの透気係数を評価しているものと考えられる。一方、ケース3の表面含水率は1.5%とケース1および2と比べ小さくなっている。含水率が小さいために透気係数が大きくなった可能性も考えられ、含水率や脆弱部の微細構造の違いもケース3の透気係数の増大に寄与しているものと考えられる。

以上より、要素供試体をTorrent法による表層透気試験で評価すると、密実なコンクリートと脆弱なモルタルの物質透過性の違いを判定できるものの、密実配合に脆弱配合を打ち継いだ供試体の透気性は適切に評価できない場合が確認された。既設コンクリートの表層部は、乾燥による微細な表面ひび割れの発生や溶出による空隙構造のポーラス化などが生じる可能性が考えられ、このようなコンクリートをTorrent法で評価した場合、過大な透気係数を検出し、実際の物質透過性とは異なる結果を得る可能性が考えられる。

3. 要素供試体の深さ方向における透気係数

3.1 実験概要

上述した検討によって、Torrent法による表面透気試験は、表面5mmに脆弱な配合が存在した場合、その影響を大きく受けることを確認した。既往の研究から、コンクリートの表面数mm部を除去した場合、透気係数が小さくなる現象が報告されているため⁴⁾、ここでは、ケー

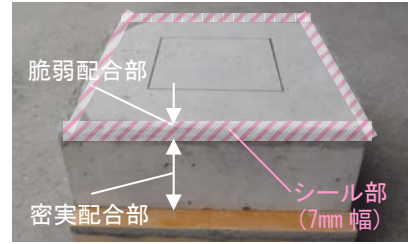


写真-3 ケース3 供試体状況

表-2 Torrent法による透気係数の評価基準

	優	良	一般	劣	極劣
透気係数 (10^{-16}m^2)	0.001 ~ 0.01	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 1.0	1.0 ~ 10	10 ~ 100

表-3 各ケース供試体の透気係数と表面含水率

ケース	透気係数 (10^{-16}m^2)	透気係数 ランク	表面 含水率 (%)	密実配合作製 から試験まで の経過日数
1	0.003	優	3.5	118
2	3.70	劣	4.0	276
3	2950	極劣以上	1.5	276

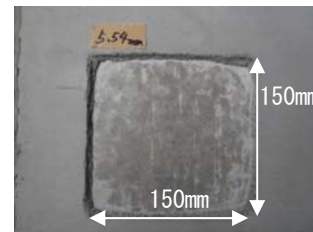


写真-4 研磨面状況

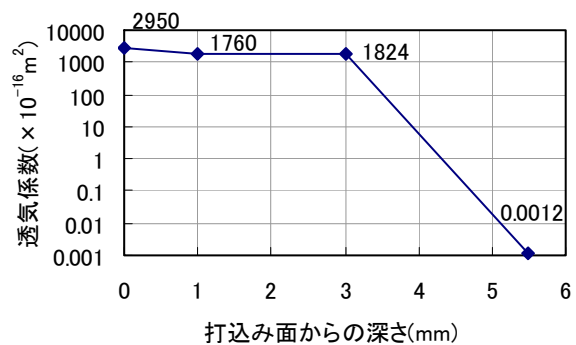


図-4 ケース3 供試体の深さ方向における透気係数

ス3 供試体の脆弱配合部をどの程度除去すれば、透気性を適切に評価可能か検討した。

深さ方向の透気係数は、写真-4のようにケース3の上面中心から150×150mmの部分を手動グラインダによって研磨し、表面から0・1.0・3.0・5.5mmの深さで表層透気試験を実施した。測定は、脆弱配合を打ち継いでから158日後に実施した。

3.2 実験結果

図-4にケース3の脆弱配合部表面から深さ方向の透気係数を示す。表面部においては透気係数が $1,000 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 「極劣」よりも大きくなり、その傾向は打込み表面から3mmの深度まで確認され、ごく表層部の透気性のみ検出している結果となった。深さ5.5mmまで研磨すると、全面が下層の密実配合のコンクリート面となり、その透気係数は「優」と評価され、脆弱配合を全て除去すれば密実配合の透気性を評価できる結果となった。よって、ダブルチャンバー方式のTorrent法であってもチャンバー周囲の脆弱なモルタル面から空気の流入現象が発生し、表層部のみの透気性を評価したものと考えられる。

以上より、Torrent法による透気試験は、コンクリート全体としては耐久性が高い場合でも、ごく表面が脆弱な場合においてそのコンクリートの耐久性は低いと評価する可能性が示唆された。このような場合、現状のTorrent法では脆弱部を研磨するなどにて除去すれば、密実部が適切に評価できることが本検討によって確認された。

本検討では著しく脆弱な配合および密実な配合の2層供試体みの検討であるため限られた条件で得られた結果である。表面部と内部の密実性にどの程度の差異が生じた場合に、Torrent法による評価が困難となるかについては検討していない。また、表層透気試験におけるコンクリート表面からの空気の流入現象は、氏家らの研究でも報告されており⁸⁾、氏家らは試験箇所周囲表面をシールする「シール法による表層透気試験」によって流入現象を解消する試み⁹⁾を実施している。Torrent法による表層透気試験もチャンバー周囲を樹脂やシートなどシールすることによって、チャンバー周囲からの空気の流入現象を抑制し、より適切な評価が可能と考えられる。これらを併せて今後の検討課題としたい。

4. 大型供試体による検討

4.1 実験概要

(1) 供試体概要

要素供試体による検討においては、コンクリート表面の脆弱部の存在がTorrent法による評価に大きな影響を与えることを確認した。Torrent法による評価は、実構造

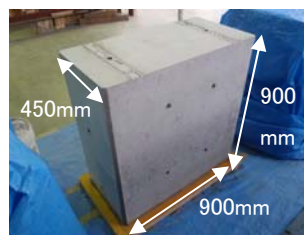


写真-5 大型供試体の外観(無筋)

表-5 検討要因一覧

W/C (%)	スランブ (cm)	養生条件	内部振動機	型枠振動機	たたき(木槌)
60	8	7日脱型	24秒	150秒	120打*
44	15			—	60打*

* 型枠リブ一本あたりの打数

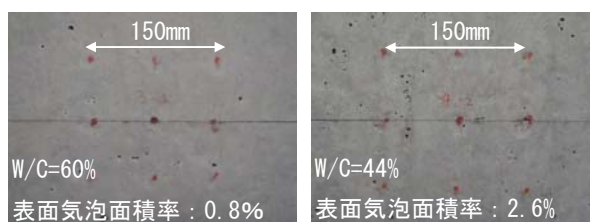


写真-6 大型供試体表面状況

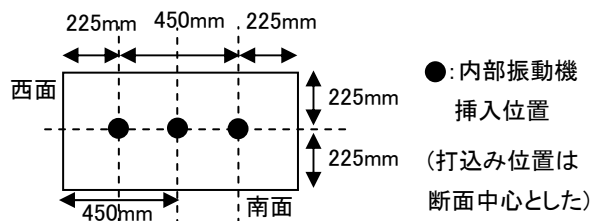


図-5 大型供試体の締固め位置(平面図)

物の耐久性を適切に評価することを最終的な目的としており、締固めなどの施工条件が十分に管理された実構造物や大型供試体においては適切な評価が可能あることが報告されている^{10,11)}。先に検討した要素供試体におけるTorrent法による評価を鑑み、写真-5に示す大型供試体において、水セメント比や表面の締固め方法の要因としてTorrent法で評価した場合の判定結果を検討した。大型供試体の概要を以下に示す。

表-4に示すように、W/C=60%および44%と異なる2種類のコンクリートの大型供試体をそれぞれ作製した。

表-4 コンクリートの配合

JIS 標記	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD	混和剤 SP
24-8-20N	20	8	60.1	45.9	4.5	167	278	584	1020	3.48	—
40-15-20N	20	15	44.4	43.8	4.5	165	372	535	1017	—	3.53

*C：普通ポルトランドセメント，S：砕砂+山砂，G：碎石，AD：リグニンスルホン酸系，SP：ポリカルボン酸系

強度レベルや水セメント比を勘案して、W/C=60%においてはスランプを8cm、W/C=44%は15cmとした。表-5に示すように、W/C=60%では型枠振動機および木槌によるたたきを実施して表面を締固め、W/C=44%では木槌によるたたきのみ実施した。各供試体の表面は写真-6に示すようになり、型枠振動機を用いた W/C=60%の供試体は表面気泡面積率が0.8%と少なく表面仕上がりのよいものとなった。一方、表面をたたきのみで締固めて作製した W/C=40%の供試体は、表面気泡面積率が2.6%であり W/C=60%の供試体よりも大きくなった。内部の締固めは、φ40mmの内部振動機を用いて図-5に示す位置で実施し、供試体高さ半分の位置で10分の打重ね間隔を設けて供試体を作製した。打設7日後にそれぞれの供試体を脱枠し、脱型後の供試体は雨がかりのない屋外にて、900×900mm面を南北に向けて設置し暴露した。

(2) 測定方法

900×900mm南北面の写真-7に示す6箇所の位置において、表層透気試験および表面含水率試験を実施しその平均値を用いた。透気係数はTorrent法に準拠した表層透気試験機によって測定した。表面含水率は前述の水分計によって測定した。中性化深さは、材齢133日において位置②の近傍からφ50mmのコアを2体採取し測定した。測定項目と測定材齢を表-6に示す。

4.2 実験結果

図-6に大型供試体作製時に採取したφ100×200mmの圧縮強度試験結果を示す。養生は、封緘養生したまま大型供試体と同じ場所で行った。W/C=44%の圧縮強度はW/C=60%よりも各材齢において10N/mm²以上高い結果となっており、水セメント比による違いが認められた。

図-7に各供試体の南面における透気係数の測定結果を材齢ごとに示す。各材齢において、透気係数に水セメント比の影響が認められず、材齢33および133日における透気係数は「一般」と評価された。これは、表面部の締固めが影響しているためと考えられ、W/C=60%は型枠振動機によって表面が十分締め固められたことにより透気性が小さくなり、W/C=44%は表面の締固めが足りず表面気泡が多くなったため透気性が大きくなり、水セメント比の影響が小さくなったものと考えられる。

図-8に中性化深さの測定結果を示す。W/C=60%の中性化深さはW/C=44%の1.6倍であった。同条件において2007年制定コンクリート標準示方書「設計編」にもとづいて中性化深さを計算すると、W/C=60%はW/C=44%の4.6倍と推定され、中性化深さの実測値は示方書推定値と比較し、水セメント比による差異は小さくなった。これより、中性化深さにおいても表面の締固めの要因が影響し、水セメント比の影響が小さくなったことが確認された。

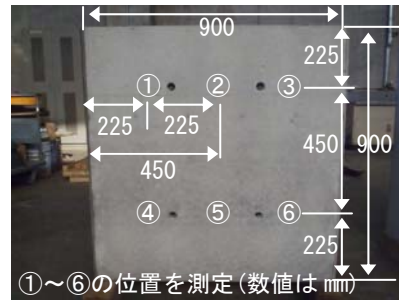


写真-7 測定箇所

表-6 測定項目と測定材齢

測定項目	測定材齢(日) / (脱枠後の材齢)			
	9 / (2)	14 / (7)	33 / (26)	133 / (126)
透気係数	○	○	○	○
表面含水率	○	○	○	○
中性化深さ	—	—	—	○

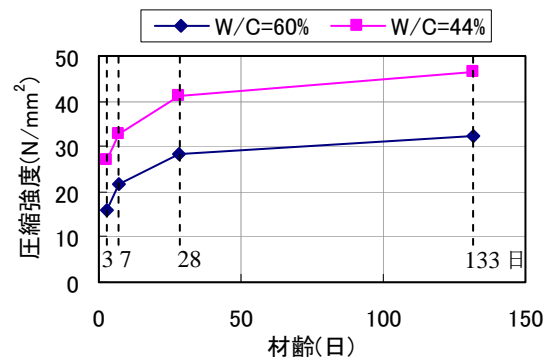


図-6 現封養生した供試体の強度試験結果

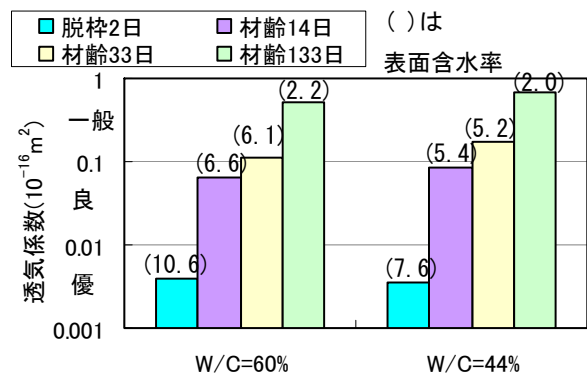


図-7 大型供試体の透気係数の経時変化(南面)

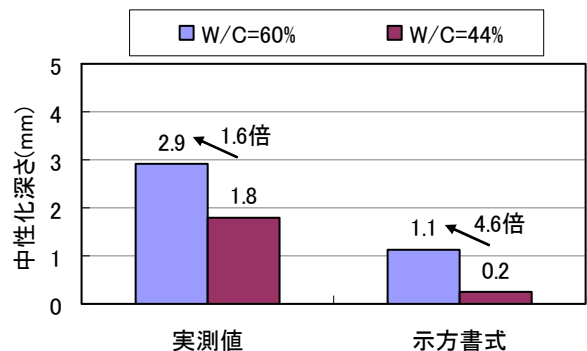


図-8 小径コアの中性化深さ(材齢133日)

以上の結果より、圧縮供試体から得られる圧縮強度は水セメント比の影響があるものの、コンクリート表層部の物質透過性は表面の締固めの影響を受け、相対的に水セメント比の影響が小さくなり得ることが示唆された。すなわち、締固めによるかぶり部の施工条件は、水セメント比の要因と同様にコンクリート表層部の物質透過性に大きく影響を与え、これらの要因を Torrent 法によって評価できることを確認した。

図-9 に W/C=60 および 44% の南・北面の透気係数と表面含水率の材齢ごとの関係を示す。これより、表面含水率と透気係数はおおむね相関関係にあることが分かる。時間とともに水和が進み、硬化体組織は密になるはずであるが、透気係数が「乾燥」あるいは「含水率」の影響を強く受けていると考えられ、透気係数の絶対値を用いて物質透過性の評価を行う場合は、これらの要因を考慮する必要がある。また、図より表面含水率が 7% 以上になると透気係数が一律に小さい値となっており、本検討の条件において Torrent 法による表層透気試験は、表面含水率が 6% 未満で実施することが望ましいと考えられる。

5. 結論

本検討によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 密実なコンクリートの表面に厚さ 5mm の脆弱なモルタルを打ち継いだ 2 層供試体を Torrent 法で評価した場合、その透気性は脆弱配合の影響を顕著に受け、背面の密実配合の透気性は評価できなかった。
- (2) 経年劣化や施工の要因で表面部が脆弱なコンクリートの物質透過性を Torrent 法によって評価する場合、表面部を研磨して測定すれば、より精度の高い結果が得られる可能性が示唆された。
- (3) コンクリート表面部の締固め度合いによって、W/C が異なるコンクリートでも同等の物質透過性になり得ることが Torrent 法によって認められた。中性化深さ試験から得られる物質透過性も同様の傾向を示した。
- (4) Torrent 法による評価はコンクリートの含水率の影響を受けるため、実構造物は経時的に乾燥し透気係数の絶対値が上昇する現象を本実験においても確認することができた。

参考文献

- 1) 岡崎慎一郎, 八木翼, 岸利治, 矢島哲司: 養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, *Cement Science and Concrete Technology*, No.60, pp.227-234, 2006
- 2) 吉田亮, 高松俊介, 秋山仁志, 岸利治: 水セメント比および単位水量がコンクリート表層の透気性に

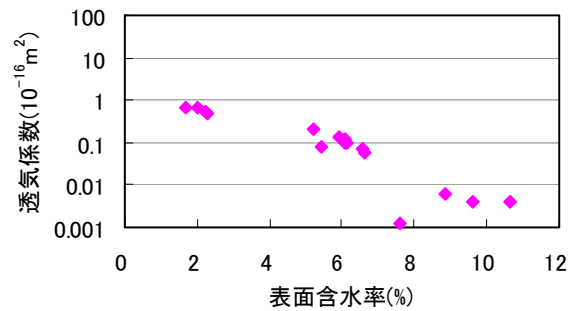


図-9 大型供試体の含水率と透気係数(南および北面)

与える影響の養生依存性に関する一考察, 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書, No.80, pp.379-382, 2008

- 3) 蔵重勲, 廣永道彦: 脱枠材齢や暴露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.32, No.1, pp.623-628, 2010
- 4) 細田暁, 林和彦, 下田智也, 吉田早智子: コンクリート表層のマイクロクラックが表面の吸水性と透気性に及ぼす影響, *Cement Science and Concrete Technology*, No.63, pp.196-203, 2009
- 5) 岸利治, 秋山仁志, 井上翔, 原島実: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム公演概要集, *コンクリート技術シリーズ* No.80, pp.30-36, 2008
- 6) 鳥居和之, 川村満紀, 上田信二: 80 数年経過したコンクリートの劣化性状, *Cement Science and Concrete Technology*, No.48, pp.518-523, 1994
- 7) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Material and Structures*, 25, pp.358-365, 1992
- 8) 氏家勲, 土屋崇, 岡崎慎一郎: 実構造物でのコンクリートの透気係数の測定方法に関する検討, *セメントコンクリート論文集*, No.62, pp.197-203, 2008
- 9) 氏家勲, 岡崎慎一郎, 中村翼: コンクリート構造物における現場透気試験方法の改善に関する検討, *セメントコンクリート論文集*, No.63, pp.189-194, 2009
- 10) 小野聖久, 上東泰, 紫桃孝一郎: コンクリートの密実性検査手法に関する研究, *日本道路公団試験研究所報告*, Vol.41, pp.101-110, 2004
- 11) 白根勇二, 船橋政司, 松尾健二: 施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.32, No.1, pp.1313-1318, 2010