表層透気試験（トレント法）の実務展開

半井健一郎^{*1}・Roberto J. TORRENT^{*2}

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性能（performance over time）を、コンクリートの硬化後に実構造物において直接的に評価しようとする手法の開発が精力的に進められている。耐久性能は、かぶりコンクリートの厚さと品質に大きく支配される。かぶり（厚さ）に関しては、電磁波レーダー法や電磁誘導法による非破壊検査がすでに実施されている。一方、その品質に関しては、強度（硬度）やひび割れの検査が中心で、耐久性能を左右する物質移動抵抗性などの評価はほとんど行われてこなかった。しかし近年、構造物表層のコンクリートにおける物質移動抵抗性を非破壊で測定する表層透気試験¹⁾や表面吸水試験²⁾などの手法が開発され、実務での活用が始まりつつある。

これまでに筆者（半井）らは、スイスの取組み³⁾や土木学会の委員会活動^{4),5)}の紹介を本誌にて行ってきた。さらに本稿では、スイスのその後の動向に加え、実務における表層透気試験（トレント法）の具体的な活用事例について紹介する。

なお、本稿は、コンクリート構造物の「表層品質」に着目したものである。ここで「表層」とは、養生や環境の影響を受けて品質が変動し得る領域であり、その範囲はコンクリートの配（調）合などによって変化する。また、表層の「品質」には、強度や化学抵抗性なども含まれるが、本稿では物質移動抵抗性のみを対象とする。この表層品質が、かぶりコンクリートの品質を左右し、さらには構造物の耐久性能の支配要因のひとつになっていると考えている。

2. スイス標準規格における表層透気試験

コンクリート構造物に関するスイス標準規格 SIA 262 は、2003 年に制定され、耐久性能の直接的な検査を求めている。耐久性能の観点からは、特にかぶりコンクリートの品質が重要であるとし、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性を、実構造物（あるいは実構造物から採取し

たコア）において、表層透気試験などの方法によって検査しなければならないとしている。あわせて、実構造物における表層透気試験（トレント法）に関しての標準規格（SIA 262/1-付属書 E）も整備された。さらに、実際に試験を行うために必要となる、具体的な試験実施や適合性評価の方法については、2009 年にスイス連邦道路局（ASTRA）より指針 AGB 2007/007 が発行された^{6),7)}。

2013 年 1 月の SIA 262：2013 の改訂に続いて 8 月に改訂された SIA 262/1：2013 では、ASTRA の指針の内容が全面的に反映され、表層透気試験（トレント法）の詳細が、環境区分に応じた透気係数の特性値とともに追記された。透気係数の設定は 3 段階で、①設定なし、② $2.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ （厳しい中性化環境や穏やかな塩害環境など）、③ $0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ （厳しい塩害環境など）である。これらを含めて内容のほとんどは指針のままであるので、指針そのもの⁶⁾や筆者らの既報^{3),7)}をご参照いただきたいが、コンクリートの含水状態の測定方法に、若干の修正が加えられた。すなわち、Wenner 法（四端子法）での電気抵抗の測定を削除し、ASTM F 2659 に示されたインピーダンス法による測定のみを示すこととした。これは、Wenner 法は、セメント種類などの影響をより強く受けるために実務への適用が難しいと判断したためである。以上の具体的な評価方法の記述を含む今回の改訂によって、スイスにおいて表層透気試験が本格的に活用されていくことが期待されている。

3. 地下鉄建設工事における透気性評価

以前の SIA 262/1：2003 を用いたものであるが、表層透気試験による透気性評価を実務において活用した事例として、ブエノスアイレス地下鉄の新線建設工事におけるコンクリートの表層品質の評価と改善について、主に文献 8) をもとに紹介する。

3.1 工事の概要

アルゼンチンの首都にあるブエノスアイレス地下鉄のうち、市内を南北に結ぶ H 線は、2001 年に着工し、2007 年に開業した路線である。約 8 km のトンネルと 8 つの駅から構成され、地下水位以下に建設された。駅部およびいくつかのトンネル部分では、100 年以上の耐久性能を保証し、水密性の高いコンクリートを用いることが要

*1 なからい・けんいちろう／広島大学大学院 准教授（正会員）

*2 ロベルト J. トレント／Consultant, Materials Advanced Services Ltd.

求された。しかしながら、工事を進めるにつれて、実際に作用している水圧が計画よりも大きかったことが判明し、コンクリートの水密性が十分にあるかどうかについての検討が必要となった。そこで、既設構造物および供試体の双方の物質透過性を測定可能な表層透気試験（トレント法）を用いた検討を行うこととなった。測定は、SIA 262/1：2003 に従って行われた。

なお、水密性は、表層透気試験によって測定される透気性よりも、透水試験や吸水試験による透水性と直接的な関係を有していると考えられる。一方、透気性と透水性の両者には相関があり、特に表層透気試験（トレント法）は実構造物での試験手法がすでに確立していたことなどから、本工事では表層透気試験による透気性評価が用いられた。後述するように、室内試験では、吸水深さとの関係についても検討された。

3.2 現場における表層透気試験（第1段階）

既設の6つのコンクリート部材（梁、排水溝、スラブの各2部材）について、合計130点以上の表層透気係数の計測が行われた。コンクリートはいずれも比較的乾燥した状態にあり、当時の評価ダイアグラムで提案されていた水分の影響の補正は必要なかった（現在は測定時の含水率の下限値を設定することで透気係数の補正は行っていない）。測定では、測定面が平滑ではない場合には表面を研磨するとともに、付着したモルタル、レイトンス、養生剤などは取り除き、目視で確認されたひび割れ箇所は避けられた。測定時のコンクリートの材齢は、1か月以上であった。

測定結果の概要を表-1に示す。マーカーで示す幾何平均に加え、線によって標準偏差の幅を示している。ほとんどが5段階評価の中で透気性の大きなクラス（High～Very High）となり、以後の工事では物質移動抵抗性の低いコンクリートに改善するため、配合の再検討が行われ、コンクリートの打込み作業が45日間にわたって中断した。

新旧コンクリートの配合を表-2に示す。新配合では水セメント比が小さくなっているが、空気量が増加したため、両者の材齢28日強度や弾性係数は同等であったと報告されている。

3.3 室内試験による検討

新配合コンクリートの性能検証のため、アルゼンチン

セメント協会（ICPA）にて表層透気試験、アルゼンチン国立産業技術研究所（INTI）にて吸水試験が行われた。透気試験では、直径150 mm、高さ300 mmの円柱供試体を7日間の湿潤養生後、高さを100 mmに切断して、50℃の電気炉で恒量まで乾燥させたものを用いた。吸水試験はIRAM 1 554/83に従い、直径150 mm、高さ300 mmの円柱供試体を28日間の湿潤養生後、切断せずに透気試験と同様の乾燥を行った。

透気係数および吸水深さの測定結果の平均値は、それぞれ $0.198 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ と47 mmで、透気クラスはModerate（並）、吸水深さは要求された50 mm未満となることが確認された。

3.4 現場における表層透気試験（第2段階）

新配合コンクリートの実際の現場での性能検証のため、Venezuela 駅のスラブの一部が試験施工され、表層透気試験が実施された。7日以上養生を行った後に測定された透気係数の幾何平均は $0.386 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。透気性評価は5段階の中位のModerate（並）であったが、以下の理由によって、透気係数の目標値を $0.20 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ として、以後の工事を再開することが承認された（ただし、2点目に関しては、水分の逸散により透気係数は増加することになるため、総合的な判断が必要となると、筆者らは考えている）。

- 1) 今回の新配合コンクリートの値は、旧配合コンクリートを用いて得られた値（表-1のE6）と比較しては十分に小さい。
- 2) 今回は材齢7日という若材齢時の測定であったが、十分な養生によってさらなる細孔構造の緻密化と透気係数の低下が期待できる。

表-2 コンクリートの配合

	単位量 (kg/m ³)	
	旧配合	新配合
水	145	135
セメント (EN CEM II/A-S)	320	350
細骨材 (川砂, 0～3 mm)	420	400
細骨材 (川砂, 3～6 mm)	420	410
粗骨材 (碎石, 6～20 mm)	1 030	1 030
防水剤	3.20	3.50
AE 剤	0.20	0.21
高性能減水剤	2.60	3.50

表-1 地下鉄建設工事における表層透気係数の測定結果（第1段階）

測定箇所	測定数 N	透気係数の幾何平均 GM ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	標準偏差 ($\ln(10^{-16} \text{ m}^2)$)	透気性評価 (5段階評価)
E 1 梁 (Venezuela 駅, 上部)	25	4.37	1.59	High (劣)
E 2 梁 (Venezuela 駅, 下部)	25	0.41	1.89	Moderate (並)
E 3 排水溝 (Venezuela 駅, 上部)	13	1.26	1.67	High (劣)
E 4 排水溝 (Venezuela 駅, 下部)	14	0.079	1.80	Low (良)
E 5 スラブ (Humberto 1 駅)	27	11.5	2.12	Very High (極劣)
E 6 スラブ (Venezuela 駅)	6	1.68	2.73	High (劣)

表-3 地下鉄建設工事における表層透気係数の測定結果（第2段階）

	測定箇所	測定数 N	透気係数の幾何平均 GM ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	標準偏差 ($\ln(10^{-16} \text{ m}^2)$)	透気性評価 (5段階評価)
N 1	スラブ (Venezuela 駅)	27	0.076	0.94	Low (良)
N 2	トンネル覆工 (Humberto 1 駅付近)	17	0.057	1.04	Low (良)

図-1 地下鉄建設において計測された表層透気係数

写真-1 生コンクリート工場での品質管理への立会

3) 炉乾燥した供試体の室内試験の透気係数は一般には通常の乾燥状態のコンクリートよりも大きくなる。新配合コンクリートを用いたスラブとトンネル覆工について、材齢1か月半の時点で表層透気試験が実施された。結果を表-3に示す。また、配合修正前後の透気係数の変化を図-1に示す。透気係数の目標とした $0.20 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ を上回ったのはスラブの4点のみで、平均値が小さく透気クラスがLow（低）となったことだけでなく、標準偏差が小さい均質なコンクリートになったという結果が得られた。

なお、品質向上は、前述のコンクリートの配合の見直しのほか、品質管理の強化によって実現された。生コンクリート会社によってコンクリートの製造と運搬における品質管理の内容が見直されるとともに、施工者の責任技術者が工場に常駐して品質管理状況を監視した（写真-1）。養生の方法自体は変更されていないが、適切な実施が徹

写真-2 検査対象のセグメント

底された。具体的には、スラブは湿潤砂によって7日以上以上の湿潤養生が行われ、脱型後の覆工については水溶性の養生剤が散布された。

4. プレキャストセグメントの透気性評価

次に、マイアミ港トンネルの建設工事におけるコンクリートセグメントの品質評価および中性化進行予測に表層透気試験を活用した事例について、文献9)をもとに紹介する。

4.1 工事の概要

アメリカのマイアミ港トンネル（POMT）はマイアミ港（POM）と高速道路を直接結ぶために計画されたもので、フロリダ交通局（FDOT）から、設計・施工・資金調達・運営・維持管理のすべてを一括とした官民パートナーシップPPPとして、民間会社に発注された。全長3.8 km 工事のうちの要所は1.1 km のワトソン島とダッジ島を結ぶ直径13 m のトンネルで、シールド工法によって施工された。用いられたプレキャストのコンクリートセグメントの代表的な寸法は、長さ4.8 m、幅1.7 m、厚さ0.6 mであった（写真-2）。

構造物の予定供用期間は150年とされ、設計耐用期間はコンクリートセグメントの鉄筋の腐食によって決定した。セグメントの外側は海水による塩害環境、内側は中性化環境であり、Life-365¹⁰⁾、DuraCrete/DARTS^{11), 12)}、Sagües 予測モデル¹³⁾の3手法での耐久設計が行われ、外側からの塩害が最も厳しい環境条件であった。

地場の材料を用いたうえで物質透過性の低いコンクリートを用いることがFDOTの仕様書に記載された。ポルトランドセメント（タイプII）188 kg/m³、高炉セメント236 kg/m³、フライアッシュ（クラスF）47 kg/m³

の混合セメント，水セメント比を 0.32 とするコンクリートを用い，かぶりを 76 mm とすることが承認された。

4.2 セグメントの製造と問題の発生

セグメントは，工場内にて打込みと養生が行われた。8 分間の振動締固めの後，打込み面となるセグメント外側は手作業で表面仕上げを行い，養生剤が噴霧された。打込み後 18 時間以上で脱型され，上下反転させて内側面が上になるようにして，屋外にて保管された。

型枠と接していた側面および内面の養生期間を少なくとも 72 時間まで延長するために，脱型後に養生剤が散布されること（あるいは脱型を 72 時間後とするか湿潤養生を行うこと）が，工事の仕様書で要求されていた。しかしながら，最初に製造していた 623 個のセグメントについては，養生剤の散布などが実施されていなかった。

仕様書に合致しないセグメントは不良品となるが，大量の破棄は環境負荷および財政負担を著しく増大させることになる。また，過去の知見や DuraCrete/DARTS の養生の効果を考慮した計算からは，150 年後の中性化深さが，脱型 18 時間で 35 mm，72 時間で 24 mm となり，養生省略の影響はそれほど大きくない結果となった。そこで，より詳細な検討として，表層透気試験（トレント法）による非破壊検査によって炭酸化抵抗性の評価を行うこととなった。

4.3 表層透気試験

18 時間および 72 時間の養生を行ったセグメント各 5 個の内面について，表層透気試験を実施した。養生期間が 72 時間となったものは，打込みが金曜日であったために脱型が翌週の月曜日となり，たまたま養生期間が延長されていたものである。いずれにおいても，試験時の材齢は約 4 か月で，測定の前 2 日からは防水シートで覆って雨水の影響を受けないようにした。

測定は ASTRA の指針に従い，各セグメントにおいて少なくとも 6 か所の透気係数 kT を，2 日間かけて測定した（写真-3）。64 点で測定したコンクリート表層の含水率は 4.5～5.9% で，基準値の 5.5% を超えた点は 2 点のみであり，その影響は無視できるとした。また，赤外

写真-3 表層透気試験の実施状況

線放射温度計で測定した表面温度は 20～48℃ であった。

測定された透気係数の頻度分布を図-2 に，対数軸で示した幾何平均と標準偏差を図-3 に示す。養生期間を 18 時間から 72 時間とすることで，統計上は透気係数が小さくなることが示された。しかし，透気クラスとしてはいずれも同じ Low（低）と評価されたため，差異の工学的な意味について以下で論じることとした。

4.4 寿命予測

前述の DuraCrete/DARTS による検討のほか，実測された表層透気係数 kT を用いた寿命予測として，2 種類の方法で中性化進行予測を行った。

まず，次式で示される Parrot の提案式^{14), 15)} を用いて中性化深さを計算した。

$$d = A \frac{kT^g t^n}{c^f} \quad (1)$$

ここで， d ：中性化深さ（mm）， kT ：透気係数（ $\times 10^{-16} \text{ m}^2$ ）， t ：材齢（年）， c ：CaO 含有量（ kg/m^3 ）， n ：中性化進行に係わる係数， A ， g ， f ：定数（=64, 0.4, 0.5）である。このうち，係数 n は次式によって相対湿度 r （%）の係数として次式によって与えられ，相対湿度 55% における 0.52 が最大値となる。

$$n = 0.02536 + 0.01785r - 0.0001623r^2 \quad (2)$$

今回の計算では，透気係数 kT には実測された表層透気係数，係数 n を 0.52（相対湿度 r を 55%），CaO 含有量 c を $225 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。その結果，150 年後の中性

図-2 セグメントにおける表層透気試験結果の頻度分布

図-3 セグメントにおいて計測された表層透気係数

表-4 セグメントの表層透気係数と150年後の中性化深さの予測値

養生期間	実測された透気係数 kT の幾何平均 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	150年後の中性化深さの予測値 (mm)		
		解析評価	実測された透気係数 kT に基づく評価	
		DuraCrete/DARTS	Parrott 式	既存構造物データ
72 時間	0.027	24	14	38
18 時間	0.057	35	19	48

図-4 既存構造物から得られた透気係数と中性化速度係数の関係

化深さは、72 時間養生では 14 mm、18 時間養生では 19 mm となった。

次に、スイスおよび日本で得られた既設構造物の調査結果^{16)~20)}に基づき中性化深さの予測を行った。日本の結果は、今本らの計測によるものである。すなわち、図-4 に示す表層透気係数と中性化速度係数の関係から、ばらつきを考慮した安全側の評価として、データの上限値を結ぶ次式を与えた。

$$CR = 2.2 \log_{10}(kT) + 6.6 \quad (3)$$

ここで、 CR ：中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$)、 kT ：透気係数 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$) である。実測された表層透気係数を用いて中性化速度係数を求めて計算される 150 年後の中性化深さは、72 時間養生では 38 mm、18 時間養生では 48 mm となった。

DuraCrete/DARTS および表層透気係数 kT を用いた、計 3 手法による中性化進行予測結果を表-4 にまとめて示す。いずれの予測値もかぶりの 75 mm 未満となり、十分な耐久性能を有していることが確認された。この結果、18 時間養生で製造済みのセグメントについても出荷が許可された。なお、今回の結果は養生期間の短縮の検討を可能とするものであったが、以後は当初の養生計画によってセグメントの製造が行われた。

5. おわりに

近年、コンクリート構造物において、所要の耐久性能や表層品質を確保することの重要性が強調されている。たとえば、東北地方の復興コンクリートにおいても、様々な角度から品質確保のための方策が検討されている²¹⁾。

本稿で紹介した 2 つの事例は、不具合が発生した後の品質評価への表層透気試験（トレント法）の活用に関するものであったが、スイス標準規格にあるように新設構

造物の設計段階からの活用も可能である。また、ここでは直接的には紹介をしなかったが、表層透気試験（トレント法）以外の非破壊試験手法の開発も国内外で進められている⁴⁾。不具合事例における分析のための特殊な試験に留まることなく、新設構造物における表層品質の検証手法として、各種非破壊試験手法が実務で活用されていくことが期待される。

加えて今後は、表層透気試験の測定結果を活用した性能照査型の耐久設計への展開も期待される。筆者（トレント）は、表層透気係数と中性化速度係数あるいは塩化物イオンの拡散係数との相関を求め、かぶり（厚さ）とともに、コンクリートの構造物の耐用年数に関する照査手法の提案を行っている²²⁾。あわせてご参照いただければ幸いです。

謝 辞 本原稿の執筆にあたり、Frank Jacobs 博士よりスイス標準規格に関する最新情報、Guillermo Di Pace 教授よりブエノスアイレス地下鉄の建設工事に関する詳細情報や写真の提供を頂いた。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) Torrent, R. J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, V.25, No.6, pp.358-365, 1992. 7
- 2) 林 和彦・細田 暁：表面吸水試験によるコンクリート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
- 3) 半井健一郎・蔵重 勲・岸 利治：かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査～スイスにおける指針案～，コンクリート工学，Vol.49, No.3, pp.3~6, 2011
- 4) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 97, 2012
- 5) 半井健一郎・蔵重 勲・岸 利治：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム，コンクリート工学，Vol.51, No.2, pp.153~158, 2013
- 6) AGB 2007/007: ASTRA Research Project "Recommendations for the quality control of concrete with air permeability measurements". (<http://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?page=Texte&projectid=24243>.)
- 7) Torrent, R.: English Translation of "Recommendations for Quality Control of Concrete with Air-Permeability Measurements" (Swiss Federal Department of Transportation, December 2009), 2010. 9
- 8) Torrent, R. J., Armaghani, J. and Taibi, Y.: Evaluation of Port of Miami Tunnel Segments, Concrete International, Vol.35, pp.39-46, 2013. 3
- 9) Di Pace, G. and Calo, D.: Assessment of Concrete Permeability in Tunnels, International RILEM Conference on Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures (SACoMATIS 2008), Italy, 2008. 9
- 10) Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program

- for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Life 365 Consortium II, 2012
- 11) The European Union-Brite EuRam III, General Guidelines for Durability Design and Redesign. DuraCrete : Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, contract : BRPR-CT95-0132, project : BE95-1347, document : BE95-1347/R9, 2000
 - 12) E. C.—Fifth Framework Programme, Competitive and Sustainable Growth Programme (GROWTH 2000) : DARTS, Durable and reliable Tunnel Structures—Integrated design examples, contract : RD GIRD-CT-2000-00467, project : G1RD-25633, 2000
 - 13) Sagües, A. A. : Modeling the Effects of Corrosion on the Lifetime of Extended Reinforced Concrete Structures, Corrosion, V.59, No.10, pp.854-866, 2003
 - 14) Andrade, C., Bakker, R., Harrison, T., Massazza, F., Reinhardt, H., Parrott, L., Plumat, M., Somerville, G. and Tuuti, K. : Design for avoiding damage due to carbonation-induced corrosion, CEN TC104/TG1/WG1/Panel 1, Paper N62, 1992
 - 15) Parrott, L. : Design for avoiding damage due to carbonation-induced corrosion, ACI SP-145, pp.283-298, 1994
 - 16) Torrent, R. und Frenzer, G. : Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Ueberdeckungsbetons auf der Baustelle -Teil II (Methods for Measuring and Assessing the Characteristics of Concrete Cover on Site - Part II), Bundesamt für Strassen (Federal Office for Roads), VSS Report No.516, Bern, Suisse, 1995
 - 17) Jacobs F. : Beton zerstörungsfrei untersuchen, der Bauingenieur, n.3, pp.24-27, 2008
 - 18) Teruzzi, T. : Estimating the service-life of concrete structures subjected to carbonation on the basis of the air permeability of the concrete cover, EUROINFRA 2009, Helsinki, October 14-15, 2009
 - 19) Imamoto, K., Tanaka, A. and Kanematsu, M. : Non-destructive assessment of concrete durability of the National Museum of Western Art in Japan, Paper 180, Microdurability 2012, Amsterdam, 11-13 April, 2012
 - 20) Imamoto, K. and Tanaka, A. : Evaluation of carbonation progress of existing concrete structures based on air permeability of concrete cover—a case study in Japan, ICCRRR 2012, Cape Town, South Africa, 2-5 September 2012
 - 21) 日経コンストラクション : 「強度 = 耐久性」ではない—被災地で始まった長持ちするインフラづくり, 2013年8月26日号, pp.64~69
 - 22) Torrent, R. J. : Service life prediction: Theorecrete, labcrete and realcrete approaches, The Third International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (SCMT 3), Japan, 2013
-