

調 査 報 告

現地調査による歴代既存コンクリート構造物の表層品質相互比較

——表面透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価——

Quantitative Comparison on Surface Quality of Historic Concrete Structures by Field Investigation

——Quality Evaluation on Cover Concrete of Existing Structures by Air Permeability Test——

岸 利 治*・秋 山 仁 志**・井 上 翔**・吉 田 亮**

Toshiharu KISHI, Hitoshi AKIYAMA, Sho INOUE and Ryo YOSHIDA

1. は じ め に

良質な鉄筋コンクリート (RC) が高いメンテナンスフリー性能を実現できることは複数の貴重な実例が証明するところであるが、一方、高度経済成長期に建造された構造物を中心に、比較的早期に劣化・変状を呈した構造物も少なくない。現行の品質管理システムは、構造物の設計段階でコンクリートのかぶり (厚さ) と水セメント比の妥当性を事前に照査し、仕様確認とプロセス検査を実施することで、完成後の構造物の品質を担保する方法を採っている。しかし、完成後の耐久性品質の定量的な評価は技術的な問題から実際には行われておらず、コンクリートの品質を左右する打込み・締固めや養生の妥当性が事後に直接検証されることはない。個別現場生産の宿命上、耐久性の確保は施工のプロセス管理に拠るところが大きいが、施工後の確認なしに確認を得ることはできない。適切な施工が行われることによって十分な耐久性が発現することを期待しつつも、コンクリートの硬化後達成品質を圧縮強度とひび割れ以外では定量的に検証しない現状では、耐久性の良否は構造物の行く末によって結果論的に検証されるのみである。

これまでに膨張コンクリート、自己充てんコンクリート、高強度・高耐久コンクリートなど、コンクリートの高耐久化・高信頼化を図る幾多の技術開発がなされてきた。これらの技術は、維持管理費用の抑制によってライフサイクルコストの縮減に寄与することが大いに期待されるが、現状では耐久性向上のメリットを対費用効果の議論の中に定量的に盛り込むことができておらず、目に見える初期コストの増大を嫌って新技術の採用が敬遠されてきた経緯がある。現行の品質管理制度は、耐久性の過不足を見抜けない危険があるばかりか、真に必要とされる技術の重要性を見誤る可能性さえ内包している。このように、立地環境条件に応じた耐久性能の過不足が竣工時に明らかにされていないことの弊害は少なくない。

施工後既に 50 年以上が経過し、今日において耐久コンクリートの範を示す歴史的 RC 構造物の多くは、現在の標

準的な施工方法とは少なからず異なる方法によって造られた。施工の効率性とコンクリート達成品質のトレードオフが生じている可能性は否定できないと思われる。相当に合理化された施工システムの恩恵を享受しつつ、標準技術と施工努力のみによって、十分に耐久的な構造物が標準的に実現できると少なくとも制度上は暗黙のうちに想定しているところに問題があると思われる。

このような背景と問題意識の下、要求性能に対する耐久性能の過不足を施工後の達成品質に基づいて検証する技術とシステムの調査・研究・整備を目的とした小委員会 (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)) を、土木学会コンクリート委員会の第三種委員会として設立し、第一期目として 2008 年 4 月までの約 2 年半にわたり活動を行ってきた。具体的には、非破壊・微破壊・サンプリング検査等による硬化コンクリートとかぶりの品質同定、初期ひび割れの影響判定、環境条件と検査結果を踏まえた簡易判定、同定品質に基づく劣化予測を組み合わせた詳細判定、およびこれらを統合した鉄筋コンクリートの施工後品質／耐久性能検証システムの構築に向けた調査研究を行うことが委員会の目的である。

委員会では、現行の耐久性照査や品質管理方法の妥当性を検討する第一歩として、既存コンクリート構造物の品質の実態解明とその変遷を検証することを目的とした全国調査を昨年度 (2007 年度) 約 1 年間かけて行った。昨年 4 月には、後の国鉄総裁の仁杉巖博士が、当時国鉄大阪工事事務所次長として建設の陣頭指揮を執った滋賀県の信楽高原鉄道第一大戸川橋梁の現地調査を実施し、その優れた耐久性能を定量的に確認している。第一大戸川橋梁のような「優良な資産」であれば維持管理費負担は相当に節減される。建設時には初期コストにばかり注意を奪われがちであるが、財政基盤が必ずしも強固とはいえない全国のローカル路線にとって、第一大戸川橋梁のようなメンテナンスフリーの構造物こそが「資産」の理想形といえよう。建設が完了した竣工時点で最終的に構造物が所定の性能を有することを検証できれば、耐久性照査設計の実効性を担保することのみならず、使用材料や施工方法選択の自由度を高める性能規定型発注の趣旨を活かすことになると考えている。

* 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門

** 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻

著者らは、この委員会で実施した構造物全国調査に主要メンバーとして参画した。本報は、主として担当した表面透気試験の調査結果の一部を報告するものである¹⁾。

2. 調査方法

昨年度は、約1年間をかけて全国7箇所、8個の構造物の調査を行った(図1、図2および表1参照)。調査では、実構造物に対する現地非破壊試験と採取コアの分析を行っており、前者として、表面透気試験、表面吸水試験、テストハンマー試験、および弾性波試験を実施している。著者らは、表面透気試験をすべての構造物に対して実施した。採取コアについては精密な分析に時間を要するため、分析が完全に終了していないものもある。

表面透気試験は、表層コンクリートの耐久性能(物質透過抵抗性)を透気性に基づいて評価するものである²⁻⁸⁾。表層コンクリートは内部の鋼材を腐食から保護するバリアとしての重要な役割を担っている一方で、養生などの施工が不適切であるとその影響を深刻に受けることから、実構造物の耐久性を推し量る上で最も留意すべき部位にあたる。

表面透気試験には図3に示す試験機を使用した。表面透気試験機は、チャンバー、真空ポンプ、制御盤、測定器で構成される。試験機は、チャンバーからコンクリートに一

定時間負圧を与えた後、圧力が回復するまでの経時変化を測定することで透気係数を算出する。チャンバーが二重構造となっているのが特徴であり、横方向からの空気を取り込みの影響を外側のチャンバーで除外することで、内側のチャンバーが深さ方向のみの透気性を測定できる仕組み

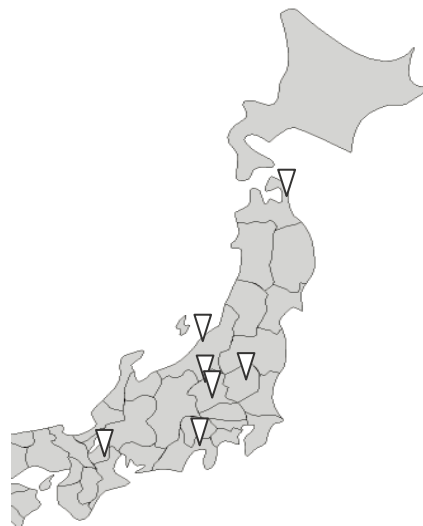


図1 現地調査箇所

表1 調査対象構造物の諸元

| 番号 | 名称 | 所在地 | 経年 | 概要 | 主な調査箇所 |
|----|--------------------|---------|------|--------------------------------------|-------------|
| 1 | PC 桁 A | 滋賀県大津市 | 53 年 | 丁寧な施工により長期健全な品質を保っている コンクリートとして調査 | ウェブ フランジ |
| 2 | PC 桁 B | 静岡県富士市 | 36 年 | 特に厳しい環境で塩害を受けた PC 桁 | ウェブ |
| 3 | PC 桁 C | 静岡県富士市 | 10 年 | 近年の PC 桁を代表するもの | ウェブ |
| 4 | RC ボックス カルバート A | 栃木県矢板市 | 3 週間 | 施工直後の高炉セメントコンクリート | 壁面 |
| 4 | 〃 | 〃 | 3 ヶ月 | 〃 | 〃 |
| 5 | RC ボックス カルバート B | 群馬県高崎市 | 3 週間 | 施工直後の高炉セメントコンクリート | 壁面 |
| 6 | RC 高欄壁 | 群馬県魚沼市 | 28 年 | 一般的な強度のコンクリート | 壁面 |
| 7 | RC 橋脚 | 群馬県草津市 | 28 年 | 一般的な強度のコンクリート | 壁面 |
| 8 | RC 擁壁 | 青森県六ヶ所村 | 1 年 | 最新の知見や技術を生かし、 材料設計、施工されたコンクリート | 壁面 |



図2 調査対象構造物の外観



図3 表面透気試験機

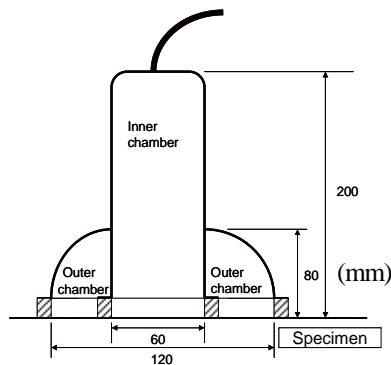
図4 ダブルチャンバー断面図²⁾

表2 品質のグレーディング基準

| | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|--------------|-----------|----------|------------|
| 透気係数 $KT(\times 10^{-16} m^2)$ | 0.001 ~0.01 | 0.01~ 0.1 | 0.1~ 1 | 1~ 10 | 10~ 100 |
| 透気性 グレード | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 透気性評価 | 優 | 良 | 一般 | 劣 | 極劣 |

になっている(図4). 式(1)および(2)に, 透気係数および影響深さの算定式²⁾を示す.

$$k = 4 \left(\frac{V_c (dP_1/dt)}{A(P_a^2 - P_1^2)} \right)^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_0^t \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに,

k : 透気係数 (m²)
 μ : 空気の粘性係数 (Nsm⁻²)
 V_c : 測定空気量 (m³)
 ε : コンクリートの空隙率 (m³m⁻³)
 A : チャンバー断面積 (m²)
 P_1 : 内側チャンバー内の圧力 (Nm⁻²)
 P_a : 大気圧 (Nm⁻²)

$$L(t) = \left\{ \frac{k P_a}{\varepsilon \mu} \int_0^t \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_a} \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, L : 測定面から大気圧状態であるところまでの

長さ(m)

また, 表2に示すように, 試験から得られる透気係数を基に, 表層の透気性グレードを5段階で評価する.

3. 調 査 結 果

これまでの報告や経験から, 測定値はばらつくため複数回の測定が必要であること⁴⁾, 微小クラックやあばたなどの存在の影響を受けるので, 局所的な欠陥の影響による異常値を排除した上で, 複数回の測定値の対数平均(相乗平均)をとることが良いこと⁸⁾などが分かっている. そこで, 調査では各構造物でおよそ10箇所測定し, 異常値が出た場合はそれが局所欠陥によるものであることを確認した上で排除した. 表3に各対照構造物での測定値(透気係数)の対数平均を示す.

その透気係数と構造形式から推定される強度を比較すると, その間には必ずしも相関があるとはいえない. 例えば, 「PC桁A」, 「PC桁B」および「PC桁C」を比較すると, すべて設計基準強度が40N/mm²以上であるにもかかわらず, 透気係数が順に, $0.005 \times 10^{-16} m^2$, $0.050 \times 10^{-16} m^2$, $0.173 \times 10^{-16} m^2$ と異なる値を示した. 透気性グレードとしても, 「優」, 「良」, 「普通」と異なる評価になっている. この結果は, 圧縮強度のみで実構造物の耐久性を評価することの限界を示唆している. 既往の文献⁹⁾では養生の方法による空隙の連続性の相違が述べられているが, 「PC桁A」の場合は1週間の散水養生および湿布養生がされており, 一般的な施工が行われたと推察される「PC桁C」と比較して, 表層部の空隙構造が緻密であり, 水和初期において表層部の乾燥が防がれたことによって, その後の水和の進行も良好であったものと考えられる¹⁾.

「RCボックスカルバートA」は材齢3週間, 材齢3ヶ月と時期を変え, 材齢の相違が透気性に及ぼす影響を検討した. 実験室内の検証実験⁵⁾では, 透気係数は材齢14~28日目までは変動するが, それ以降はおおむね平衡状態になることが確認されている. 一方で, 本調査での透気係数は材齢3週間で $0.582 \times 10^{-16} m^2$, 材齢3ヶ月で $1.782 \times$

表3 表層コンクリートの透気性

| 名称 | 経年 | 透気係数 ($\times 10^{-16} m^2$) | 透気性 グレード |
|------------------|-----|-----------------------------------|-------------|
| PC桁A | 53年 | 0.005 | 優 |
| PC桁B | 36年 | 0.050 | 良 |
| PC桁C | 10年 | 0.173 | 普通 |
| RCボックス カルバートA | 3週間 | 0.582 | 普通 |
| 〃 | 3ヶ月 | 1.782 | 劣 |
| RCボックス カルバートB | 3週間 | 0.156 | 普通 |
| RC高欄壁 | 28年 | 1.502 | 劣 |
| RC橋脚 | 28年 | 12.704 | 極劣 |
| RC擁壁 | 1年 | 0.001 | 優 |

10^{-16}m^2 と両者におよそ3倍の差異が見られ、透気性グレードも一段階評価が下がっている。このように材齢28日を過ぎて透気性が高くなった要因としては、まず材料面から考察すると、水セメント比が50%以上であり乾燥の影響を比較的大きく受けること、また高炉セメントコンクリートは普通セメントコンクリートに比べて乾燥収縮が大きいことなどが要因として考えられる。養生期間が冬季の低温でかつ厳しい乾燥条件であったので、水和の進行も遅く、ペースト部の空隙構造がより粗大となり乾燥が促進されやすかったことも要因として考えられる。

「RCボックスカルバートB」の透気係数は $0.156 \times 10^{-16}\text{m}^2$ であったが、「RCボックスカルバートA」と同様に、養生が冬季であったこと、および、測定時の材齢が3週間であったことから、材齢3週間以降、透気性が増加していた可能性があるとして類推される。

一般的なRC構造物と思われる「RC高欄壁」の透気係数は $1.502 \times 10^{-16}\text{m}^2$ で、透気性グレードは「劣」であった。

一般的な強度を持つと推測される「RC橋脚」の透気係数は $12.704 \times 10^{-16}\text{m}^2$ で、透気性グレードは「極劣」であった。

「RC擁壁」は、近年の最新の知見や技術を生かして、一般的な擁壁よりも高い耐久性をもつように設計された特別な構造物である。具体的には低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、膨張材を使用し、水結合材比を45%としている。この「RC擁壁」の透気係数は $0.001 \times 10^{-16}\text{m}^2$ で、透気性グレードは「優」であった。

4. まとめと今後の展望

実構造物の品質同定を目的として、表面透気試験による実構造物の表層コンクリートの透気性を評価した。透気性の傾向は、構造形式から推定される強度のそれとは必ずしも一致しなかった。この結果は、強度だけでは実構造物の耐久性の評価は十分でなく、透気性などの耐久性を直接支配する特性の評価も必要であることを示唆している。

著者らが参画する委員会の活動は第一コーナーを曲がったばかりであり、今後の活動では、かぶりの厚さと品質を踏まえた耐久性能検証システムの確立と竣工検査体系・品質保証システムの提案に向けた検討を本格化させたいと考

えている。この委員会の活動が一助となり、コンクリート構造物の耐久性確保に向けた技術的な取り組みが実施に活かされる制度づくりを目指している。

謝 辞

本調査は、土木学会335委員会の活動の一環として行ったものであり、委員会メンバー各位に感謝致します。また、対象構造物における調査の許可をいただいた所有者、管理者等の関係各位に篤く御礼申し上げます。なお、著者らの実施した調査研究活動は、東京大学生産技術研究所特別研究経費による助成を受けて実施致しました。

(2008年7月31日受理)

参 考 文 献

- 1) 土木学会：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、No. 80, 2007. 4.
- 2) 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*, Vol. 25, pp. 358-365, 1992.
- 3) R.J.TORRENT:「カバークリート」の透気性係数の迅速な決定方法、土木工学における非破壊試験国際会議シンポジウム（NDT-CE）, pp. 26-28, 1995.
- 4) 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, 財団法人 高速道路技術センター, 2004. 11.
- 5) 小野聖久, 上東 泰, 紫桃孝一郎, 原島 実：コンクリートの密実性評価に関する研究, 土木学会第57回年次学術講演会, V-522, pp. 1043-1044, 2002. 9.
- 6) 小野聖久, 上東 泰：非破壊試験による密実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察, 土木学会第60回年次学術講演会, V-259, pp. 517-518, 土木学会, 2005. 9.
- 7) 原島実ほか：コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会報告書（コンクリート橋非破壊検査編）, pp. 197-201, pp. 273-288, 東京大学生産技術研究所, (財)生産技術研究奨励会, 2005. 3.
- 8) Quoc H. D. PHAN, T. Kishi: Measurement of air permeation property of cover concrete, the Proceedings of the JSCE Annual Meeting, Vol. 61, V-551, 2006.
- 9) 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, セメント・コンクリート論文集, No. 60, pp. 227-234, 2007. 2.