

論文

実構造物コア深部を用いた新たなコンクリート劣化判定手法の提案

井上 優作^{*1}, 宮脇 正嗣^{*2}, 伊代田 岳史^{*3}

Proposal of a New Method for Determining Concrete Deterioration Using Cores from Inside Concrete Structures

Yusaku INOUE^{*1}, Masashi MIYAWAKI^{*2} and Takeshi IYODA^{*3}

要旨：表層からの劣化が認められたコンクリート構造物の調査のひとつにコア採取による調査がある。しかし施工不良や凍害等による内部コンクリートの劣化の存在も予想され、表層に加え内部の情報が必要なケースもある。本研究では実構造物コアを用いた表層の中性化深さ測定に加え、深部の促進中性化試験および著者が考案した真空吸水試験を組み合わせた劣化判定手法を提案した。この手法を用いることで材料や施工不良による影響、凍害や ASR などのコンクリート内部の劣化を把握し、表層の調査だけでは不明な内部の状態を反映した劣化判定が可能であることを示した。

キーワード：劣化判定, コア分析, 内部コンクリート, 促進中性化試験, 真空吸水試験

1. はじめに

日本の土木構造物の多くが高度経済成長期に建設されており、供用後 60 年が経過する構造物の割合が加速度的に増加している。そのため老朽化した構造物の状態を詳細に把握するための調査が重要となっており、表層からの劣化が認められたコンクリート構造物ではコア採取による中性化深さ測定や含有塩分量測定等が行われている。しかし施工不良等による内部コンクリートの欠陥が存在し、現在も施工時の欠陥を持っていることが予想される。内部の初期欠陥、材料欠陥が存在すると、酸素や二酸化炭素などの気体で侵入する劣化因子や、水、塩化物イオンなどの液体、もしくはイオンで侵入してくる劣化因子の侵入速度が設計時に想定した速度に対して遥かに速くなることが考えられる。そこで維持管理における調査の際に劣化潜伏期のコンクリート内部の物質移動特性を把握しておくことで、構造物の劣化の進行を予測し、事前に対策が検討できると考えた。

本研究では更新に伴い撤去される樋門からコアを採取し、総合的な劣化判定手法を検討した。コア全体を用いた圧縮強度試験、劣化の進行度や環境の厳しさを確認するためにコア表層部を用いた中性化深さ測定、コンクリート内部が有する物質移動特性や内部に及ぶ劣化状況を確認するためにコア深部を用いた真空吸水試験と促進中性化試験を行った。

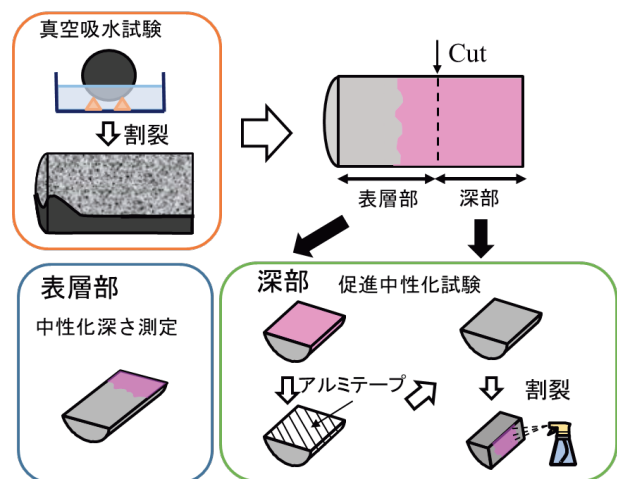


図-1 新劣化判定手法

2. 新劣化判定手法の概要

2.1 コア採取と試験概要

提案する新劣化判定手法を図-1 に示す。コアはコンクリート構造物表面から円柱供試体を採取して利用する。まず、構造物の調査で一般的な圧縮強度試験とコア側面部を用いて、フェノールフタレイン法によりおおまかな中性化深さの測定を行う。そして新劣化判定手法として、コンクリート表層から深さ方向の水分浸透抵抗性を連続的に把握するため、筆者らが考案した手法¹⁾と同様の手順で真空吸水試験を実施する。吸水深さを測定した後、事前に把握し

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻 修士課程

*2 元芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻 修士課程

*3 芝浦工業大学 工学部 先進国際課程（兼務 土木工学科）教授

た中性化深さを用いてコアを表層部（中性化フロントから奥に 30mm まで）と深部（健全部）に切断する。表層部は従来の手法通り割裂面での中性化深さを測定し、コア深部はコンクリート内部が有する中性化抵抗性を把握するために促進中性化試験を行う。これらの試験より外部からの劣化因子の浸透状況に加え、内部における液体の浸透しやすさや気体の拡散のしやすさを把握し、物質移動特性を評価する。

2.2 試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は採取したコアを用いて JIS A 1108²⁾ に準拠して実施する。

(2) 中性化深さ測定

コア側面部では割裂する前にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、おおまかな中性化深さを測定した。

割裂面では、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」に準拠して中性化深さを測定した。割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、色の変化が安定してからノギスを用いて中性化深さを測定（10mm～15mm 間隔に 5 カ所以上測定）した。

(3) 真空吸水試験

既往研究¹⁾と同様にまず 5 日間 40℃の乾燥炉にて乾燥させた。乾燥後、試験体側面からの水の侵入を防ぐため、円柱の底面と表層面、側面の一部に幅 5 cm のアルミテープでシールした。次にバットに円柱供試体が 26mm 浸漬するように水を張り、デシケータに設置後、デシケータ内を真空ポンプで 1 時間吸引（-0.1MPa）した後、2 時間真空を保持し試験を行った。その後、供試体を割裂し、水の吸い上げられた高さを浸漬面の長手方向に 10mm 間隔で測定した。

(4) 促進中性化試験

コア深部を用いて促進中性化試験を実施した。中性化の促進条件は JIS A 1153（2012）に基づき、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5.0%とした。供試体はアルミテープでシールし一面開放とし、所定の促進期間（1, 4, 8 週）において割裂し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した後、変色境界までの距離を 1 面当たり 6 点測定し、その平均を中性化深さとした。中性化深さから中性化速度係数を算出した。本研究では以下に示す魚本高田式³⁾を用いて、コア深部の促進中性化試験から得られた中性化速度係数（mm/√週）を二酸化炭素濃度 0.04%の実環境での中性化速度係数（mm/√年）に換算した。

$$A = X / (2.804 - 0.847 \log C) \sqrt{C * t} \quad (1)$$

ただし、A：中性化速度係数(mm/√年)、X：促進中性化深さ(mm)、C：炭酸ガス濃度(%), t：促進期間(週)

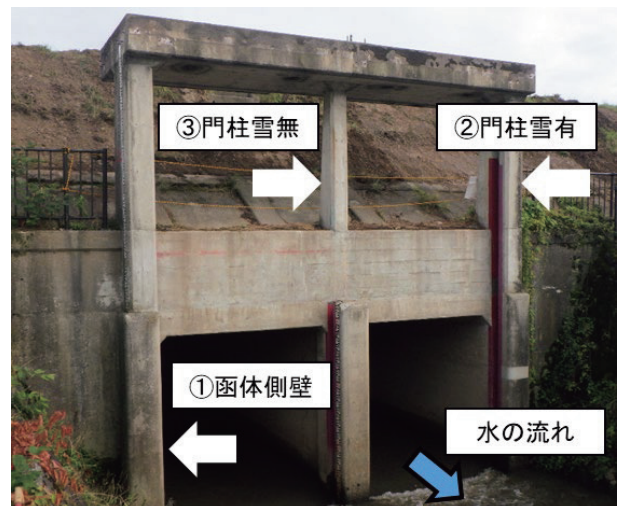


図-2 構造物の概要とコア採取位置

3. 対象構造物およびコア採取位置

対象構造物は山形県の最上川流域に建設された樋門であり、コア採取時の供用年数は 62 年である。樋門函体の寸法は幅 2.9m、高さ 2.9m、延長 20.97m である。冬季は積雪が非常に多い寒冷地であり凍害の危険性がある地域であるが、凍結防止剤は散布されていなかった。また目視調査時に外傷は見られなかったものの、構造物の概要とコア採取位置を図-2 に示す。本検討では φ75×220mm のコアを採取した。コアは、①函体の内壁（以下、函体側壁とする）、②門柱雪掛かりが有る箇所（以下、門柱雪有とする）、③門柱雪掛かりが無い箇所（以下、門柱雪無とする）の 3 か所から採取した。函体側壁は、高い湿度で保たれた環境にあった。門柱雪有は積雪があり、融雪水による水分供給がある。一方で門柱雪無は屋根があり積雪が無く、水の供給は少ない環境であった。

4. 試験結果

4.1 圧縮強度と中性化深さ

図-3 に各部材毎のコアの圧縮強度試験の結果を示す。採取したコアの両端部をそれぞれ 35mm ずつ切断して、φ75×150mm の円柱供試体を作製した。門柱雪無では門柱雪有の 4 割程度の圧縮強度であり、部材毎に異なる圧縮強度であることが分かった。図-4 に表層の中性化深さを示す。函体側壁と門柱雪有の中性化深さが小さい。中性化の進行が抑制された理由は函体側壁では構造物表面の砂のような付着物と流水による高い湿度であったこと、門柱雪有では冬季は積雪によって大気が遮断された状態であったことが考えられる。ここで圧縮強度を比較すると、中性化深さと異なり門柱雪有の強度が最も高いという結果であった。しかし環境の情報だけでは圧縮強度に差がみられた原因は判断できない。

4.2 真空吸水試験

図-5 に各部材毎のコアの真空吸水試験の結果を示す。中性化部を白抜きで表現している。各部材ごとにコア深部において吸水高さが大きく異なることから、コンクリートの内部の水分浸透抵抗性が異なることがわかる。函体側壁や門柱雪有は門柱雪無と比較してコンクリート内部の吸水高さが小さく、中性化部の吸水高さが大きくなっていた。函体側壁は水掛かりがある上、高湿度環境にあった。門柱雪有は冬季には積雪や融雪水による一定の水分供給のある環境であった。すなわち函体側壁と門柱雪有は冬季には気温、湿度が一定の条件下にあると考えられる。しかし表層においては中性化が進んだことで吸水高さが大きくなったと考えられる。

一方で、門柱雪無においてコンクリートの内部では吸水高さが大きいものの、中性化部の吸水高さが小さくなっていた。門柱雪無は冬季には気温の差が大きい環境であったことから、コンクリート内部の水分あるいは吹き込んできた雨や雪により供給された水分によって凍害が発生し、内部から微細ひび割れが発生したことで、内部の吸水高さが大きくなったと考えられる。一方、中性化部は既往の研究⁴⁾より、ひび割れ近傍に存在する気泡がカルシウムを主成分とする析出物で閉塞していると推定される。

4.3 促進中性化

図-6 に各部材毎のコア深部を用いた促進中性化試験の促進期間と中性化深さの関係を示す。門柱雪無では中性化の進行が早かったため、促進期間 1,4,5 週の結果を示す。函体側壁、門柱雪有においてはほとんど同じ中性化深さとなったが、門柱雪無は著しく中性化深さが大きくなった。外部環境からの影響が他と比較して大きいため、内部まで劣化が進行していると考えられる。

表-1 に実構造物の中性化深さの結果から得られた中性化速度係数、および促進中性化試験で得られた中性化速度係数を魚本高田式を用いて実環境での中性化速度係数に換算した結果を示す。部材間の中性化速度係数の大きさは実環境、促進環境ともに同じ傾向がみられたが、実環境の中性化速度に対して促進環境から換算した中性化速度係数は大きな値となった。これはそれぞれの環境要因が大きく影響していると考えられ、促進環境は常に RH60%と中性化が進行しやすい湿度を保ち続けていたことにより中性化速度係数が大きくなったと考えられる。一方で、実環境はすでに中性化していることや、水掛かり、表層における砂の付着などによって中性化速度が遅くなっていることが考えられる。

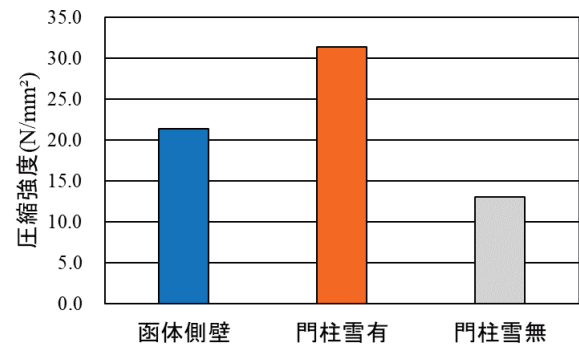


図-3 圧縮強度試験

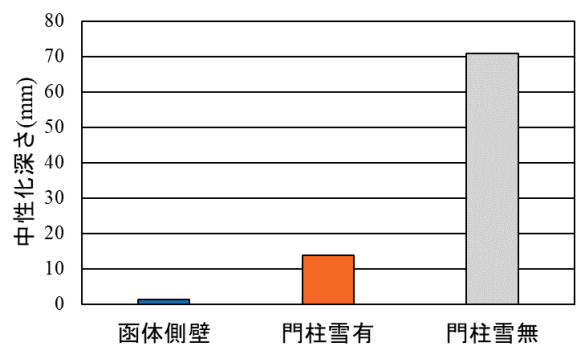


図-4 表層の中性化深さ

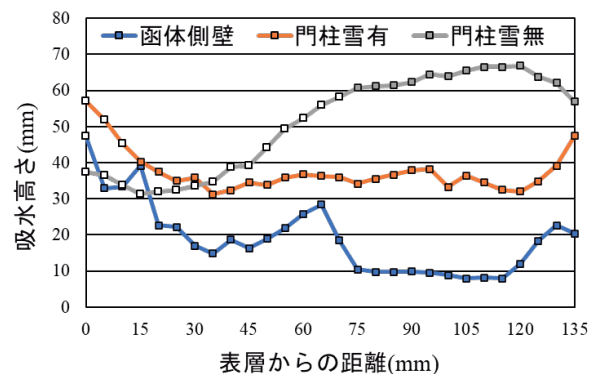


図-5 吸水高さ

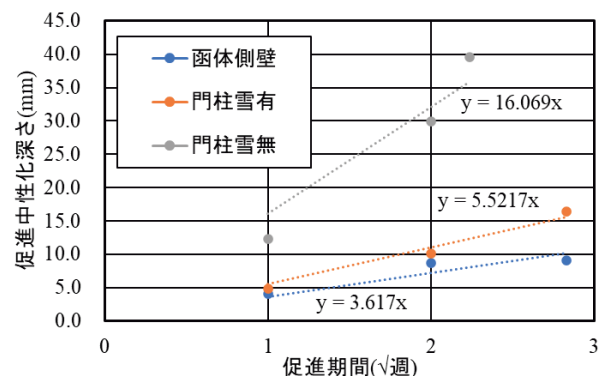


図-6 促進中性化深さ

表-1 実環境と促進環境の中性化速度係数

部材	中性化速度係数(mm/年)	
	実環境	促進環境(換算)
函体側壁	0.20	2.58
門柱雪有	2.04	4.70
門柱雪無	10.47	11.80

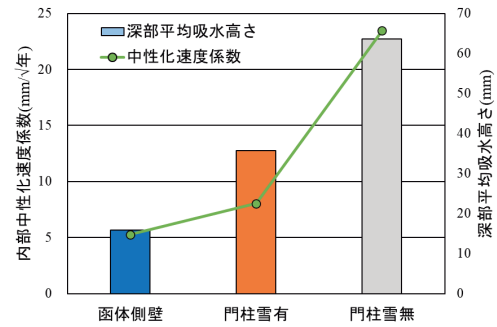


図-7 吸水高さと内部中性化速度係数

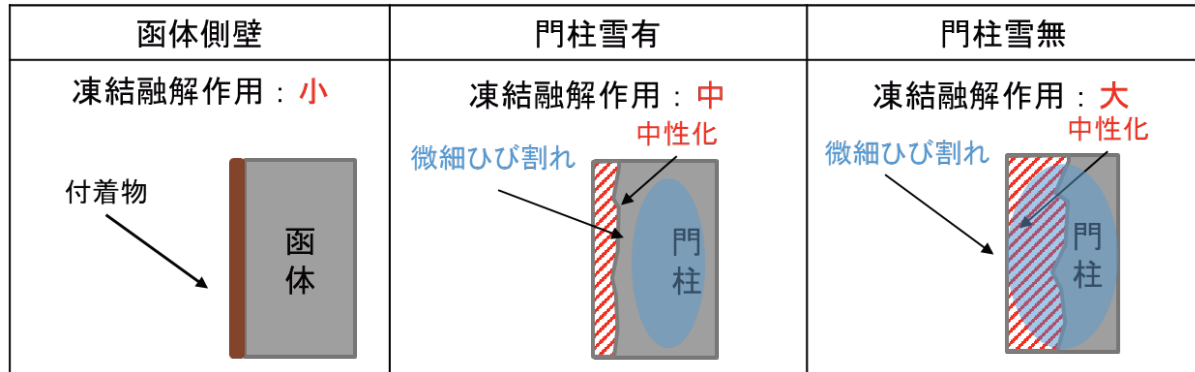


図-8 劣化の進行イメージ

4.4 真空吸水試験と促進中性化

図-7 に各部材毎のコアの深部平均真空吸水高さと推定された中性化速度係数を示す。深部平均真空吸水高さと同様に推定された中性化速度係数は函体側壁、門柱雪有、門柱雪無の順に小さいことが確認できた。外部からの劣化に影響を及ぼす浸透因子が液体か気体かに依存せず、門柱雪無において著しく低い物質移動抵抗性が確認された。

5. 新劣化判定手法の適用に関する考察

図-8 にコアそれぞれの環境要因における劣化の進行イメージを示す。同一の施工者であり、同一のコンクリートが用いられたと考えられ、ここまで内部の水分浸透抵抗性および中性化抵抗性のような物質移動抵抗性に差が生じた原因は環境の違いであると考えられる。吸水試験や内部の促進中性化試験はコンクリートの物性を表現しており、凍害の危険性がある地域であることや空隙率が雪無、雪有の順に大きかったことから部材によって凍結融解作用による微細ひび割れがコンクリート内部で発生していたと判定した。そのため、コア深部において劣化が進行していたのだと考えられる。よって、従来手法の目視点検や圧縮強度試験、中性化深さなどでは判定できない内部コンクリートの劣化を把握できたといえる。実構造物のコア深部を用いた分析を行うことで材料、施工不良による影響や凍害、ASR といった

内部劣化などを反映した構造物の劣化判定が可能であると考えられる。

6. まとめ

今回提案した新劣化判定手法では従来の手法において中性化深さ測定を行うコアでさらに真空吸水試験とコア深部の促進中性化試験を行った。圧縮強度試験用のコアが別に用意できれば、これまでとコアの本数は変わらず試験を行うことができる。これらを用いて今後は実構造物における内部の物質移動抵抗性と劣化のデータを蓄積することで、より正確な劣化判定が実現できるのではないかと考えられる。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 井ノ口公寛: 簡易な真空吸水試験を用いた中性化進行予測手法の提案, コンクリート工学論文集, 第 34 巻, pp.748-753, 2012
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書【標準編】, 2018
- 3) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.119-128, 1992
- 4) 緒方英彦, 兵頭正浩, 石神暁郎, 新大軌: EPMA 分析に基づく積雪寒冷地で長期供用された開水路のコンクリートの変質に関する一考察, コンクリート工学論文集, 第 30 巻, pp.53-63, 2019