

非破壊検査によるコンクリート橋の 塩害点検について

森野 由愛

近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 技術課 (〒573-0094 枚方市南中振3丁目2-3)

コンクリート橋を劣化させる主要要因である塩害を受けやすい構造物を早期発見し、予防保全的な補修を行うことを目的に、国土交通省は、塩化物イオン濃度の調査を、原則10年に1度行っている。従来の調査法は、コア抜きやドリル削孔等により試料を採取して調査する必要がある、構造物を傷つけてしまう。本稿では、非破壊で測定できる装置として提案されているRANS- μ を用いた塩害点検の結果を示す。従来の調査方法と比較し、塩害点検における非破壊技術の活用の有用性を、橋梁長寿命化、点検効率化、維持管理費削減、省人化の観点で評価し、今後の展望を述べる。

キーワード 塩害、コンクリート橋、非破壊計測技術、点検支援技術、予防保全

1. 背景と検討の目的

我が国は、海に囲まれ長い海岸線を有しており、絶えず海からの潮風に含まれる塩分に加え、冬季に散布される凍結防止剤や融雪剤は、多量の塩分を含み道路橋の健全性に及ぼす大きな影響が報告されている。一方で、塩害の進行は目に見えにくいため、多くは劣化が顕在化した後の対処となっているものの、いわゆる国土強靱化に資する観点で、より高度な橋梁点検の実施は重要な課題である。2024年7月の橋梁定期点検要領の改定では、塩害は「特定事象」に位置づけられ、取り組み強化の方向にある。¹⁾

鉄筋腐食による橋梁劣化の最大要因は塩害とされる。^{2、3)} 鋼橋は別として、鉄筋には空気や外気に触れない上層のコンクリート被りがあり直接状態を目視できない。そのため、国土交通省は、塩害を受けやすい構造物を早期発見し、予防保全的な補修を行うことを目的に、原則10年に1度、塩化物イオン濃度を調査する特定点検を行っている。(以下、塩害点検という。) 塩化物イオン濃度の測定は、従来よりコンクリート層をコア抜きやドリル削孔で試料を採取して行っているが、構造を傷つけ痛めてしまう。特に橋梁の健全性において重要箇所である上部工に直接コアやドリルの穴を開けることは避けたい。そのためには壊さないで内部、特に鉄筋周辺の深さの塩化物イオン濃度がわかれば上記の本質的な問題は解決する。非破壊検査がもたらす恩恵は計り知れないと考える。

また、直轄国道の点検の一部項目においては、2022年度より点検支援技術の活用原則化を行っている。橋梁の点検における原則化している項目に「コンクリート構造の鋼材位置のコンクリート中に含まれる塩化物イオン量計測、又はかぶりコンクリート内の塩化物イオン量の深さ方向の把握」がある。

これらの背景により、私は、理化学研究所が開発した中性子を用いた非破壊塩分検査装置「RANS- μ 」が塩害点検に有効ではないかと考えた。昨年来、インフラ構造物の点検に関する点検支援技術性能カタログ⁴⁾に掲載されているコンクリート構造物に内在する塩化物イオン濃度を非破壊で測定できる唯一の装置である。

本稿は、2024年度に「RANS- μ 」を用いて実施した塩害点検の計測データに関する考察を行い、塩害点検における非破壊計測の有用性について述べる。

2. 非破壊塩分計測技術 RANS- μ

(1) 測定原理

「RANS- μ 」の塩化物イオン濃度の深さ分布の測定原理について、図-1を用いて紹介する。図-1にコンクリート橋を対象として、その内部の塩化物イオン濃度を測定するために設置した「RANS- μ 」の設置方法を示している。この図は上部工の下面から内部に向かって塩化物イオン濃度

の深さ分布を測定する配置とされる。計測の基本概念を以下に記述する。カリフォルニウム (Cf) 線源から打ち込まれた中性子がコンクリート内部に存在する塩素のうち質量 35 の ^{35}Cl と中性子捕獲反応を起こし、そこで放出される ^{35}Cl 由来のエネルギーの異なる数本のガンマ線を Cf 線源の横に置かれた高エネルギー分解能の Ge (ゲルマニウム半導体) 検出器で検出する。Ge 検出器の周囲に配置する BGO 検出器は、Ge 検出器のバックグラウンドを削減する機器である。以下に、「RANS- μ 」の特徴を箇条書きに整理した。

- 放射性同位体 ^{252}Cf を中性子源として、中性子をコンクリートに照射し、発生するガンマ線 (中性子誘導即発ガンマ線) を利用した元素分析装置。
- ガンマ線は、高いエネルギー分解能を持つ Ge 検出器により測定し塩素由来であることを同定してコンクリート中の塩化物イオン濃度を深さ方向 3 分割で推定、図-1 では表面から 9cm の深さの鉄筋を想定。①、②、③は表面から 3cm 厚さの層ごとの塩分の変化を導出することを表している。
- 物質中の透過力が高い中性子で塩素と核反応を起こし、その際に放出する 3 本のガンマ線を利用しコンクリート中の塩分を完全に非破壊で計測。(原理: 使用する 3 本のガンマ線が異なるエネルギーを持ち、コンクリート中の減衰率の差から深さ分布を導出する。検出器系は、あらかじめ深さごとに既知の濃度で一定の大きさの供試体を用いて各エネルギーの検出効率を校正しておき、各エネルギーガンマ線の検出感度係数を求める。)
- 非破壊であるので、同一箇所を何度でも測定でき、補修箇所の経時変化をいつでも測定できる。
- カリフォルニウム (Cf) 線源 (^{252}Cf という自発核分裂する放射性同位元素の中性子源) は表示付き認証機器として届け出され、RANS- μ の小型化の重要な要件。強度が最大で 3.7MGq と小さいため放射線取扱に関する資格は不要でポータブル性を高めている。
- 安全な使用を確保するために、「RANS- μ 計測士」の資格認定を受けた者が取り扱う。⁷

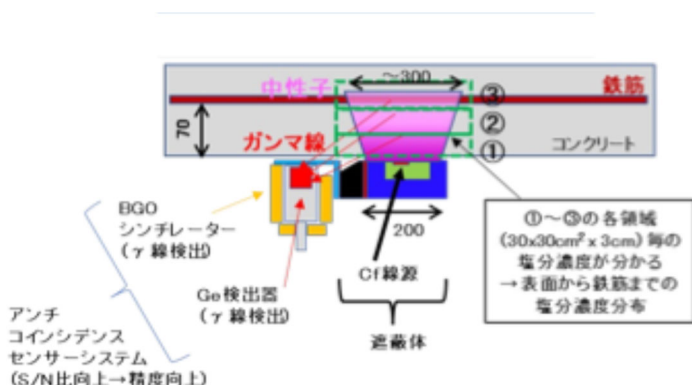


図-1 「RANS- μ 」の非破壊計測の仕組み^{3、5)}

(2) 計測器構成

図-2は対象コンクリート面に接触する部分の

「RANS- μ 」の配置がわかる写真である。上部工での計測においては、軽量で操作性が良い計測器が望ましい。「RANS- μ 」の主要機器は、Ge検出器、中性子源を埋め込んだ線源集合体ユニット、一体化筐体、設置架台などで構成され、要素毎の重量を約10kg程度とし、現場で容易に組み上げられる設計方針で作られている。

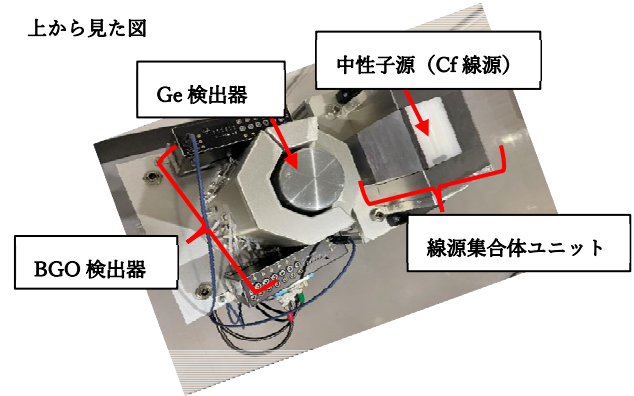


図-2 「RANS- μ 」の主要機器構成

(3) データの不確実性と検出限界

塩素由来のガンマ線エネルギーに対応したピークの計数率が塩素濃度に対応している。塩素含有量が少ないとガンマ線計数が小さくなる。限られた時間内で有意なピークを同定するために長時間測定が望ましいが、現状では1時間で打ち切っており、バックグラウンドと比較して計数率がない状態で、コンクリート表面から第1層では 0.6 kg/m^3 、第2、第3層で 1 kg/m^3 をそれぞれの上限として検出限界としている。「RANS- μ 」の検出器感度の向上が今後の技術開発で進展すると不確実性は小さくなるであろう。

(4) 従来法

従来の塩化物イオン濃度を測定する方法として、内部分布にはコア抜き滴定法、ドリルを用いた微破壊化学分析、コンクリート表面に対してはX線やレーザーによる技術がある。塩害の実態の把握に必要な鉄筋位置の深さ(被り)までの表面データをもとに塩化物イオンの拡散を仮定して計算シミュレーション手法を用いたハイブリッドの試みは精力的に開発されている。⁹⁾

3. RANS- μ を用いた塩害点検の実施

(1) 対象橋梁

2024年度の塩害点検において、福井河川国道事務所管内の国道8号、27号において12橋、兵庫国道事務所管内の国道28号において2橋、紀南河川国道事務所管内の国道42号において3橋の合計17橋で実施した。実施した橋梁を表-1に示す。それぞれの橋梁構造、供用開始年とおおよその海岸からの距離を示す。福井河川国道事務所

管内において実施した国道 8 号の橋梁は、若狭湾沿岸に沿う海岸から数百 m の位置にある。敷設年は 1960 年前半で供用から 60 年程度経過している。青井橋は国道 27 号にあり、従来法の塩分測定も実施しているため「RANS- μ 」での計測データと比較し、考察を行った。

兵庫国道事務所管内において実施した橋梁は、明石市及び淡路市にある国道 28 号の 2 橋で、海岸から極めて近くに位置する。

紀南河川国道事務所管内において実施した橋梁は、串本町から新宮市にかけての国道 42 号の 3 橋で、海岸より数百 m の位置にある。

図-3 に福井河川国道事務所管内、兵庫国道事務所管内及び和歌山河川国道事務所管内のそれぞれの橋の位置を示す。

表-1 「RANS- μ 」による塩化物イオン濃度を測定した橋梁一覧

福井河川国道事務所管内 12 橋

路線	橋梁名	構造	計測部位	供用開始年	海岸からの距離 (m)
8	飛谷橋	PC 中空床版	主桁下面 (海側)	1962	800
8	元比田 1 号橋	PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1963	550
8	元比田 3 号橋 (下)	PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1963	250
8	大川橋	PCT 桁	主桁下面 (海側)	1962	400
8	竹鼻川橋 (上)	単純 RCT 桁	主桁下面 (海側)	1963	500
8	竹鼻川橋 (下)	単純 RCT 桁	主桁下面 (海側)	1962	500
8	杉津橋	単純 PC プレテン床版	主桁下面 (海側)	1963	300
8	阿曾 1 号橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1963	200
8	江良 1 号橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1962	50
8	江良 2 号橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1961	50
8	赤崎橋	単純 PC 中実床版	橋台側面 (海側)	1961	70
27	青井橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1961	500

兵庫国道事務所管内 2 橋

路線	橋梁名	構造	計測部位	供用開始年	海岸からの距離 (m)
28	中崎橋	単純 PC プレテン床版	主桁下面 (海側)	1964	0
28	灘川橋	PC ボステン I 桁	主桁下面 (海側)	1997	71

路線	橋梁名	構造	計測部位	供用開始年	海岸からの距離 (m)
42	新長野川橋	PC ボステン I 桁	主桁下面 (海側)	1980	200
42	二川橋	PC ボステン I 桁	主桁下面 (海側)	1966	150
42	里野橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1960	100

和歌山河川国道事務所管内 3 橋



福井河川国道事務所管内



兵庫国道事務所管内



紀南河川国道事務所管内

図-3 「RANS- μ 」を用いて塩化物イオン濃度を計測した橋梁位置

(2) 計測実施状況

図-4に「江良2号橋」における計測状況を示す。橋梁上部工下面の計測で下から組み上げ設置した「RANS- μ 」の状態である。川に水があっても水位が20cm程度であれば通常の架台に固定し昇降機を使って床版桁下に検出面を接触できる。測定器が直接水に濡れなければ問題はないが、細心の注意が必要である。



図-4 「江良2号橋」における計測状況

4. 測定結果と考察

(1) 塩分由来のガンマ線スペクトル

図-5に今回実施した橋梁のうち「大川橋」で顕著な塩化物イオン濃度が観測された。観測結果から出力したガンマ線スペクトルを示す。どのコンクリートでも標準的に配合されているカルシウム由来のガンマ線ピークのすぐ左に塩素由来のガンマ線ピークが現れる。測定中に両者のピーク高さ比較から、直感的にどの程度の塩分が含有されているかの目安が得られる。他に1165keVと6111keVのピークにも着目し、塩化物イオン濃度の導出に用いる。

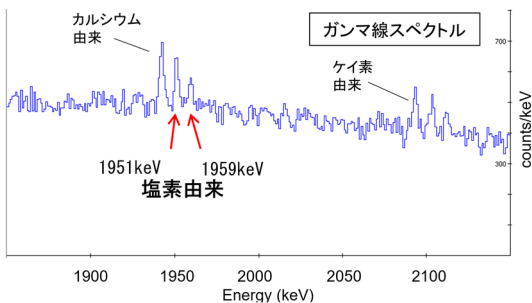


図-5 ガンマ線スペクトル（大川橋）

(2) 塩分濃度分布測定結果

図-6に福井河川国道事務所管内の12橋で「RANS- μ 」で計測した塩化物イオン濃度の測定結果を示す。12橋の測定データのうち、1橋（大川橋）から顕著な塩化物イオン濃度が検出された。表面からの深さ0-30mm（第1層）で $9.9 \pm 0.7 \text{ kg/m}^3$ 、30-60mm（第2

層）で $4.1 \pm 1.1 \text{ kg/m}^3$ 、60-90mm（第3層）で $1.2 \pm 1.8 \text{ kg/m}^3$ が計測された。各層において、鉄筋の腐食発生限界である 1.2 kg/m^3 を超える塩化物イオン濃度が観測された。本橋梁では、2024年度の定期点検でコンクリートの剥落、鉄筋露出が確認されていることから、高い塩化物イオン濃度が予想された。実際、第1層、第2層で高い塩化物イオン濃度が観測された。第3層においても、 1.2 kg/m^3 を超える値が観測された。今回計測した主桁は海側であるが、さらに海側に歩道橋が架橋されており、雨により表面に付着した塩分が流されることが少ないため、高い塩化物イオン濃度が観測されたと考えられる。かぶり代表値の19mmにおいて、塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 を超えているため、鋼材の腐食状況を調査するなど塩害による劣化の程度を明らかにし、補修方法等について検討が必要と思われる。

残りの11橋の測定データのうち、阿曾1号橋、赤崎橋、江良2号橋では、第1層において 1.0 kg/m^3 近傍と濃度は低いものの塩化物イオン濃度が観測された。それ以外は、1時間計測における検出限界以下となった。塩化物イオン濃度が観測された3橋のうち、阿曾1号橋及び赤崎橋は、前回の塩害点検において今回「RANS- μ 」での測定した箇所の近傍で測定しているため、測定結果の比較を行った。阿曾1号橋は、2014年に電位差滴定法で測定しており、各層における最大の測定値が 0.81 kg/m^3 （0~10mm）、 0.66 kg/m^3 （30~40mm）、 0.48 kg/m^3 （60~70mm）であったのに対し、今回の「RANS- μ 」での測定結果は第1層で 1.6 kg/m^3 、第2、3層で検出限界以下であった。赤崎橋は、2013年に電位差滴定法で測定しており、各層における最大の測定値が 0.97 kg/m^3 （0~10mm）、 0.39 kg/m^3 （30~40mm）、 0.3 kg/m^3 （60~70mm）であったのに対し、今回の「RANS- μ 」での測定結果は第1層で 1.4 kg/m^3 、第2、3層で検出限界以下であった。両橋とも、第2、3層での測定結果は、前回の塩害点検以降の塩化物イオンの進入を考慮しても、「RANS- μ 」との測定結果は整合のある結果であると考えられる。第1層での測定結果からは、前回の塩害点検以降、塩化物イオンの進入が進んでいるということが分かる。また、かぶり代表値における塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 以上となっているため、詳細調査による検討が必要ではないかと考える。

今回の計測計測箇所は橋梁毎に1箇所であるため、海岸からの距離、供用年数による相関データを分析することが難しい。地道な計測を一步一步確実に進めることの重要性を示している。

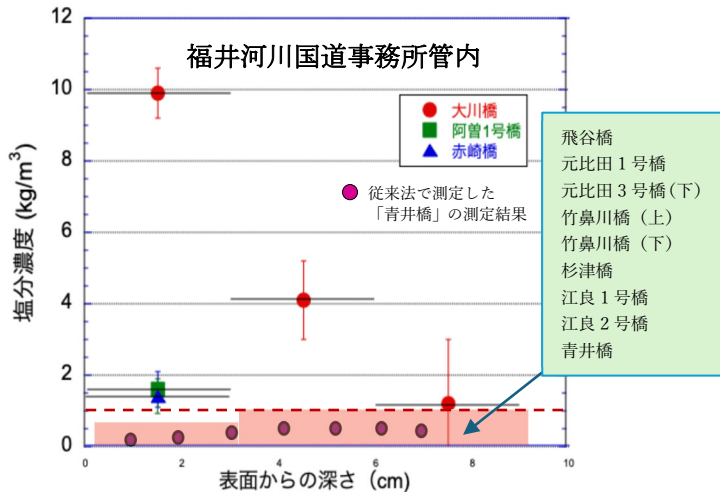


図-6 福井河川国道事務所管内で計測した塩化物イオン濃度測定結果

兵庫国道事務所管内で計測した2橋は、ともに検出限界以下であった。過去の塩害点検データがないため、直接比較できないが、直近の定期点検では、塩害による損傷は確認されていない。

図-7に紀南河川国道事務所管内の3橋で「RANS- μ 」で計測した塩化物イオン濃度の測定結果を示す。

二河橋での「RANS- μ 」の測定結果は、検出限界以下であった。前回の塩害点検（2014年）におけるドリル削孔による電位差滴定法結果を図-7に併せて示す。電位差滴定法の結果は、今回の「RANS- μ 」での測定箇所と最も近い位置の測定結果をプロットした。電位差滴定法の測定値とおおよそ合っており、前回の塩害点検以降の塩化物イオンの進入を考慮しても、「RANS- μ 」との測定結果は整合のある結果であると考えられる。

新長野橋での塩化物イオン濃度の測定結果を従来法（ドリル法）と比較する。図-7の「RANS- μ 」は上部工の表面から第1層では2.2kg/m³、第2層では1.7kg/m³、第3層では検出限界以下であった。前回の塩害点検（2013年）におけるA1橋台でのドリル削孔による電位差滴定法の計測結果は、0.37kg/m³以下と極めて低い。10年での変化量というよりも、地形的に上部工に潮風が付着しやすい場合も想定されるため、下部工と上部工という測定箇所による違いであると考えられる。

里野橋についても、新長野橋と同様ことが言える結果であった。ただし、いずれも、かぶり代表値において、1.2kg/m³以上の計測結果であるため、多数検体での測定や詳細調査による検討が必要ではないかと考える。今回の「RANS- μ 」での測定結果は、早期の塩害発見に警鐘を鳴らす効果があったと考える。

今回の試みでは計測箇所がそれぞれ1箇所であったため海岸からの距離や、供用年数により暴露期間など分かりやすい関連データを分析することが困難である。今後塩害点検データを地道に蓄積してゆくことが大事である。

また、現在のコンクリート橋の塩害に関する塩害点検

要領では、まず下部工において調査を行い、その結果塩化物イオン濃度が高い場合（1.0kg/m³以上）に、上部工を調査する2段階の調査手順となっており、効率的とは言えない。非破壊装置で最初から上部工の最も重要な箇所や、そのほか複数箇所において非破壊で計測することが望ましい。必要な橋梁の対応と並行して限られた予算で予防保全に切り替えていく上で、効率的な点検方法の確立が必要不可欠である。

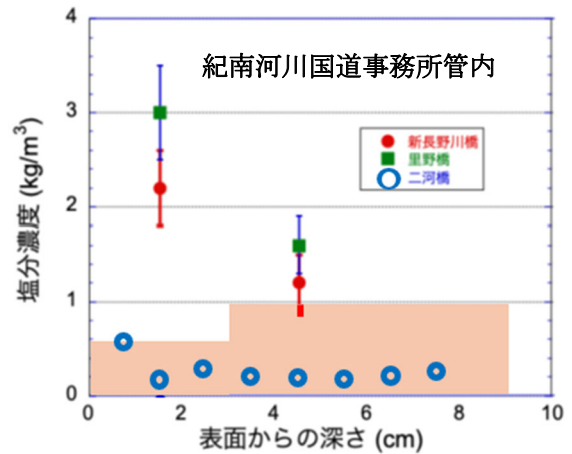


図-7 紀南河川国道事務所管内で計測した塩化物イオン濃度測定結果

(3) 塩素以外の元素について

「RANS- μ 」の計測では、塩素以外のコンクリート成分の元素（水素、カルシウム、ケイ素）の割合を同時に観測することができる。先に示した図-5では塩素以外にカルシウム、ケイ素に由来するガンマ線が示されている。

竹鼻橋（上）、大川橋で、他橋梁の主桁に比べ、水素とカルシウムのピーク量が1/2～1/3程度少ない結果が得られた。特に、竹鼻橋（上）は、竹鼻橋（下）が他橋梁と同程度であったのに対し、供用開始が異なる上下線で異なる結果が得られた。一方、ケイ素の量は、竹鼻橋（下）も、竹鼻橋（上）と同程度であった。さらに重要な知見として、竹鼻橋上下線、大川橋は鉄のピーク量は、他の橋梁よりも多く、かぶりコンクリートが薄いことを示唆している。

水素は水分、カルシウムはセメント、ケイ素は粗骨材に主に関係する元素であるが計測箇所での差が顕著に現れている。塩素以外の元素に関しても、重要な関連情報となるため「RANS- μ 」を用いる場合は、同時にデータを集約することが望ましい。

(4) 従来法との比較

「RANS- μ 」の塩化物イオン濃度の測定結果の妥当性検証は、従来法としてこれまで採用されてきたコア抜き試料から求めた塩化物イオン濃度との比較が有効と考えた。2024年度の対象橋梁のうち、青井橋においては、ドリル削孔による電位差滴定法でも測定したことから、データを直接プロットして比較を試みた。「RANS- μ 」の測定データ

と従来法での測定データを図-6に示す。測定箇所は、「RANS- μ 」と従来法ともに床版下面の同一箇所で測定した。「RANS- μ 」での測定結果は、第1～3層のどの層においても検出限界以下であった。また、従来法での測定結果については、「RANS- μ 」での測定時でいうところの第1層における最大の塩化物イオン濃度は0.39kg/m³、また第2層における最大の塩化物イオン濃度は0.46kg/m³、第3層における塩化物イオン濃度は0.37kg/m³であった。「RANS- μ 」との測定結果と矛盾がない結果であることが確認できた。

「RANS- μ 」での測定は、非破壊で行うことから、試料採取箇所から劣化が生じる可能性がないことや、多数検体での測定を行うことができ、橋梁全体の塩害評価を行うことが可能なことから、従来法に比べ、塩害による劣化を早期に発見し、予防保全的な補修が可能と考える。これらは、長期的に考えると橋梁の長寿命化や維持管理費の削減に繋がると期待できる。

(5)省人化

厳しい財政状況や、技術者の不足といった制約の中で、インフラの効率的な維持管理を実施するために、新技術を活用における「省人化」は重要な視点である。ここで①省人化率（作業開始から測定結果判明までの人工と、②生産性向上率（作業開始から測定結果判明までの時間）を総合的に評価し非破壊計測技術「RANS- μ 」と従来法（コア抜き、ドリル削孔）を比較した。一定の仮定をおいているが、現場作業は同程度、従来法では採取試料の化学分析手順を有することを考えると、大きな省人化効果、生産性向上が見込まれることが期待できる。

5. まとめ

本論文では、コンクリート構造物に内在する塩化物イオン濃度を非破壊で計測できる技術「RANS- μ 」を取り上げた。2024年度の近畿地方整備局における塩害点検対象の内の17橋の計測結果およびその結果について考察した。鉄筋の腐食発生限界である1.2kg/m³以下の判定が可能な測定感度を有しており、塩害点検の目的である塩害による劣化を受けやすい構造物を発見し、予防保全的な補修を行うために必要な計測結果が得られることが分かった。また、最大の利点である非破壊での計測に加え、今後、橋梁の長寿命化、点検の効率化、省人化等の観点でも期待ができる技術である。近畿地方整備局にとどまらず、全国に非破壊計測の価値が広がり、点検に革新をもたらすことを期待する。

謝辞:本論文作成にあたり、(株)ランズビュー様には、計測サービス等の実施にご協力賜りこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 橋梁定期点検要領（2024年7月 国土交通省 道路局）
- 2) 朝倉 啓仁他、「コンクリート橋の塩害損傷である錆汁と食ひび割れの発現順序に関する一考察」土木学会第71年次学術講演会（2016年9月）
- 3) 古賀裕久他、「塩害を受けるコンクリート橋の維持管理手法に関する検討」土木技術資料48-11（2006）
- 4) 点検支援技術性能カタログ：一技術番号：BR020032-V0124
- 5) 若林泰生，吉村雄一，水田真紀，大竹淑恵，池田裕二郎：
“小型中性子源および即発 γ ガンマ線分析を用いたコンクリート構造物内塩分濃度分布の屋外利用非破壊診断技術の開発”，日本材料学会 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集，Vol.18，pp.635-640，（2018）.
- 6) 塩害特定点検要領「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」（2015年3月 道路局国道・防災課）
- 7) 若林泰生：RANS- μ RI 中性子源を利用したコンクリート構造物の塩害に対する非破壊検査装置の開発”，日本コンクリート工学会「中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するシンポジウム」論文集，pp.202-209，（2021）.
- 8) 点検支援技術性能カタログ：一技術番号：BR020032-V0124
一国土交通省点検支援性能カタログ非破壊検査技術（橋梁）BR020032-V0225 非破壊塩分検査装置「RANS- μ 」
- 9) T-RANS ホームページ、計測士認定制度，
URL <https://t-rans.or.jp>
- 10) 中村文則、下村匠、大原涼平、細山田徳三、「飛来塩分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長期的な塩害環境作用の評価への適用」、土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）、Vol. 75、No. 2、60-79、2019.