塩害に対する予防保全を目的とした既設ＰＣ橋の簡易的な塩分量調査手法の一提案

株式会社ワイ・テック（八千代エンジニヤリング株式会社から出向）　○佐藤　純弥
国立研究開発法人　土木研究所　吉田　英二

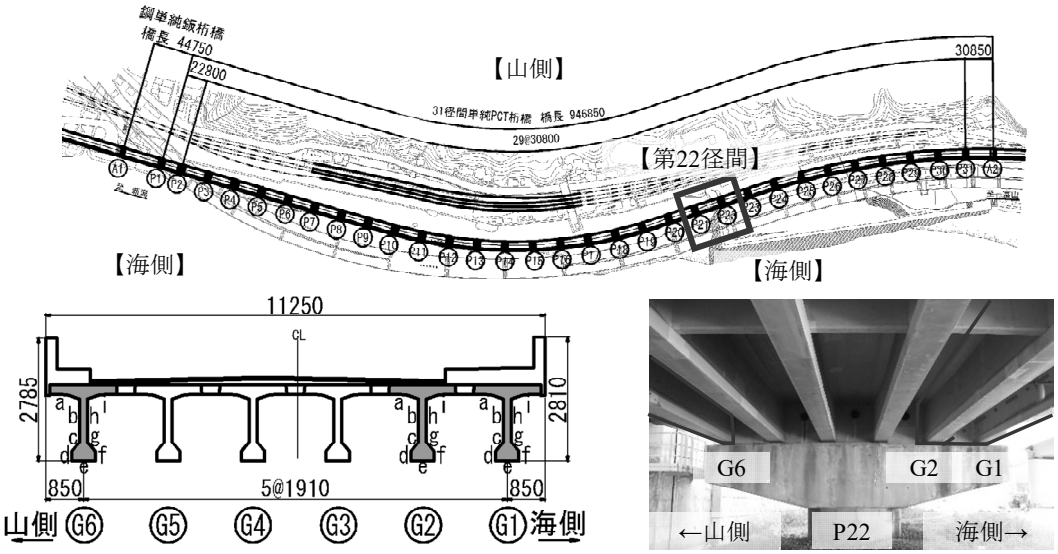
１．はじめに

コンクリート橋において、塩害は最も深刻な劣化要因の一つである。塩害は劣化の進行が著しく早く、外観に変状が現れた時点において、コンクリート内部では鋼材の腐食が進んでおり、劣化した箇所を除去しても内在する塩分を完全に除去するのは困難であり、橋として既に重篤な状態にあるものと判断される。

近年、コンクリート橋のなかでも、プレストレストコンクリート橋（以下、PC 橋）の塩害による劣化が顕在化してきており、既に膨大な数の PC 橋が供用されているなか、将来的に劣化が進行する前に予防保全的な維持管理を行うことは極めて重要である。

これまでの塩害の対策としては、1984 年に「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説 [1]」が暫定指針として初めて示され、設計・材料の選定及び施工の各方面にわたって十分な配慮がなされている。1984 年以降においても 2002 年に道路橋示方書が改定され、最小かぶりの見直しが行われるなど、塩害による被害の実態を踏まえ、適宜基準の見直しが行われてきた。また、2004 年にはコンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）[2]（以下、特定点検）が定められ、コンクリート橋への塩分の浸入状況を定期的に点検するとしている。しかし、1984 年以前に建設された橋梁については、現行基準で建設された橋梁に比べかぶりがうすく、劣化の進行程度が極端に早い傾向にある。そのため、特定点検に基づき、定期的なコア採取による塩分量の検査を行うことが予防保全的な維持管理を行ううえで特に重要である。このように、特定点検により塩分量の定量的な結果の入手が可能であるが、採取位置によって塩分量が大きく異なる場合がある。また、環境条件や構造形式などによっても付着塩分量が異なること [3]が知られているため、検出された塩分が必ずしも橋の代表値とは限らない。

したがって、構造物全体から塩分量の代表箇所を早期に見つけ、予防保全対策につなげるためには、スクリーニング的な手法の提案が必要と考え



ハッチ部分：対象桁（G1、G2、G6）、a～i：近赤外分光法を用いた測定面の番号

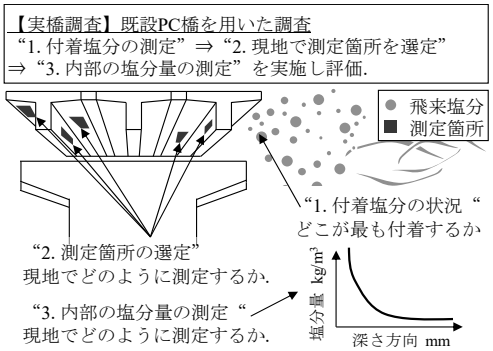
図－1　対象橋梁概要

表－1　中性化深さ

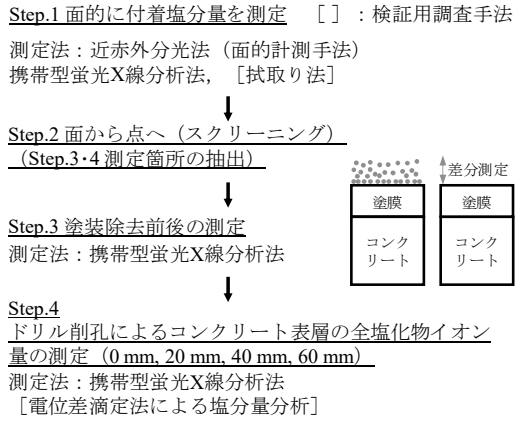
単位：mm

	施工年	第4径間 G5桁	第8径間 G2桁	第8径間 G5桁
表面被覆前	2007年（橋齢32年）	13.8	11.4	10.2
表面被覆後	2020年（橋齢45年）	11.0	15.5	12.0
差分	13年	-2.8	4.1	1.8

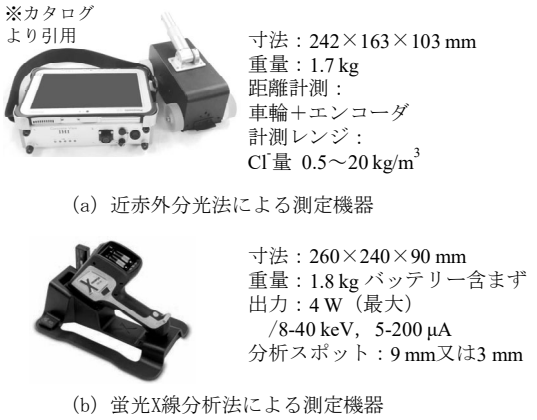
文献6)の表－2より中性化深さのみ抜粋し再整理した。



図－2　調査方針



図－3　調査手順



(a) 近赤外分光法による測定機器

(b) 蛍光X線分析法による測定機器

図－4　調査機器

られる。特に構造物の損傷を最低限にするため、近年では非破壊・微破壊検査手法を用いた劣化予測手法の研究が進んでいる[例えば 4)]。しかし、それらの調査手法について、実橋を対象に付着塩分量およびコンクリート内部の塩分量の状態を一連で評価した事例は極めて少ない。

そこで、本研究では塩害地域に位置した橋梁を対象として、現地で簡易的に測定が可能な非破壊・微破壊塩分量調査手法を用いた調査手法の一提案を行うことを目的に、塩害により劣化した既設 PC 橋の T 桁を対象とした非破壊・微破壊調査を実施した。

2．対象橋梁

図－1 に本調査の対象橋梁概要を示す。本橋は対策区分 S 地域[5)]の日本海沿岸に位置する。橋梁形式は鋼単純鈑桁橋、PC31 径間単純 T 桁橋である。本研究では、第 22 径間を対象として、塩分の付着状況の違いを確認した。なお、現在、本橋は通行止めになっており、新橋に架け替えられている。

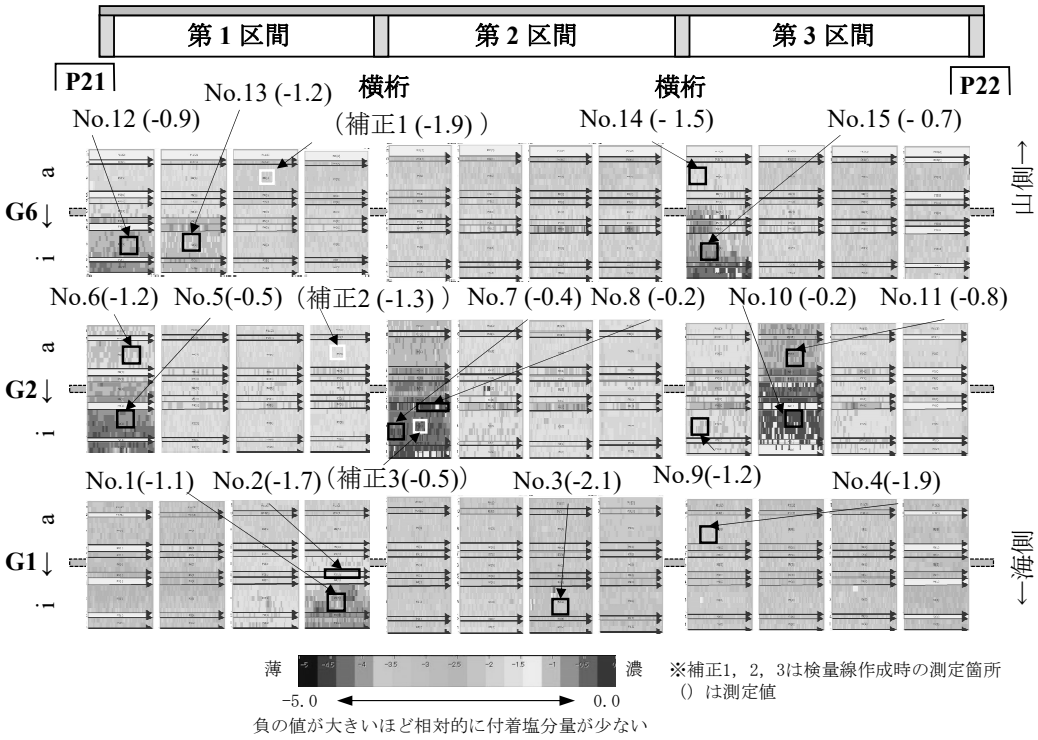
第 22 径間のうち、対象桁は海側に位置する G1 桁、内桁の G2 桁および山側に位置する G6 桁とした。なお、本橋は 1975 年に竣工された後、第 22 径間は 1994 年に全面塗装された。

塩分量調査以外では、杉江ら[6)]によって、第 4 径間および第 8 径間において塗装前後の中性化深さの測定が行われている。この結果を表－1 に示す。表－1 によれば、塗装前後において中性化深さの差は平均的に 2 mm 程度とほとんど変化がみられない。この結果から、同じ環境条件に位置する本調査の対象径間についても同様に中性化が進行していない可能性がある。

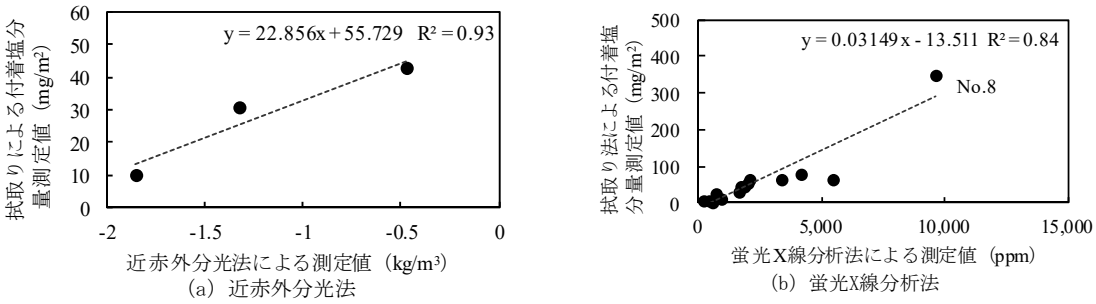
3．調査方針および調査手順

3.1 調査方針

図－2 に調査方針を示す。実務上は、桁全体のどの箇所に塩分が付着しているのか判断した上で、非破壊・微破壊手法などを用いて調査すべき箇所を決める必要がある。本調査では、そのような実務に即した調査手順の計画を立て、その調査手法の適用範囲を確認した。



図－5　近赤外分光法測定値（補正前）

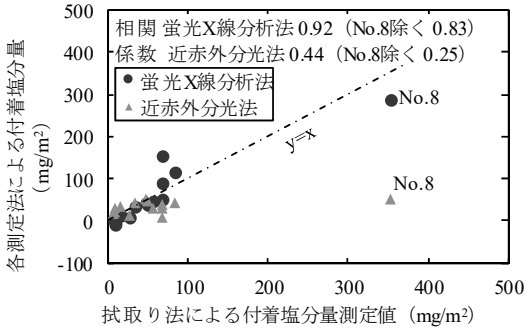


図－6　検量線

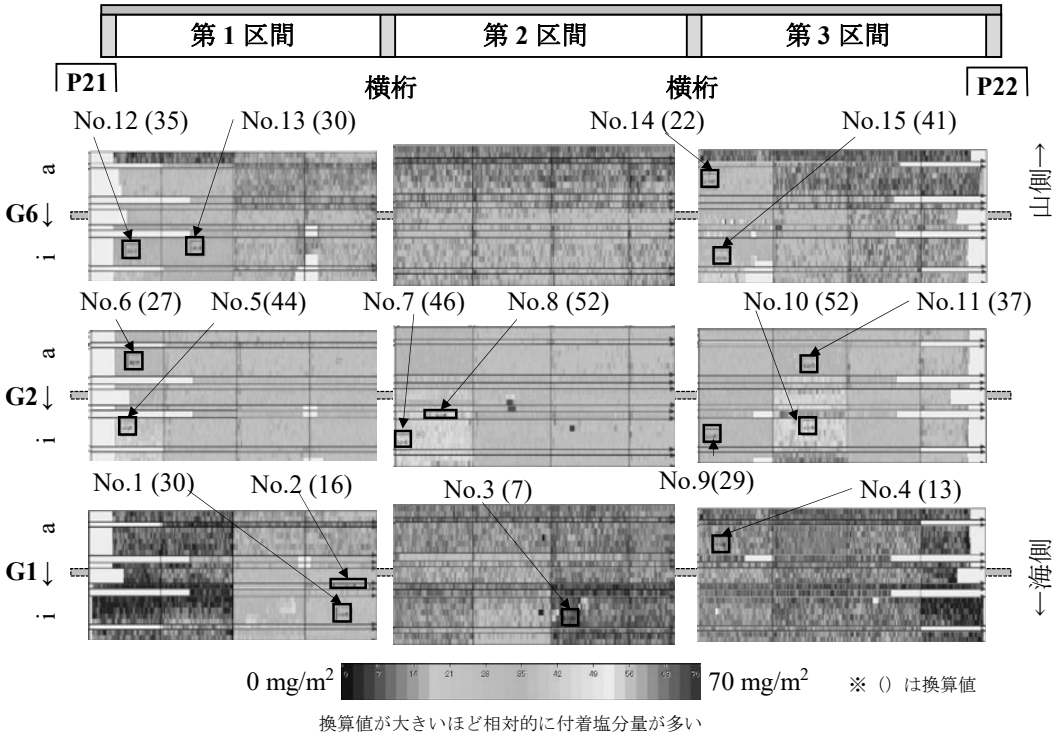
3.2 簡易的な非破壊塩分量調査手順

図－3 に本調査で実施した非破壊塩分調査手順を示す。本調査で用いた近赤外分光法[7]および携帯型蛍光 X 線分析法[8]は、付着塩分量を現地で確認できる。この特徴を生かし、図－3 に示すように、Step.1 では、近赤外分光法を用いて面的に付着塩分量を測定する。Step.2 では、付着塩分量が比較的多い箇所を現地で抽出する。Step.3 では、塗装除去前後の全塩化物イオン量を蛍光 X 線分析法により測定する。Step.4 では、深さ方向の全塩化物イオン量を蛍光 X 線分析法により測定する。

図－3 に示す検証用調査は、近赤外分光法および蛍光 X 線の測定値を評価することを目的としている。拭取り法は、「鋼道路橋防食便覧」に示す方法[9]に準じた。塩分量調査は、JIS A 1154 に準じ塩分量を測定した。調査で用いた非破壊・微破壊調査機器を図－4 に示す。図－3 に示す付着塩分量の測定において、図－4(a)のコンクリート表面全体を測定可能な近赤外分光法による測定機器を用いた。また、表面および内部の塩分量の測



図－7　付着塩分量測定値の相関関係



図－8　近赤外分光法分析値（補正後）

定においては、図－4(b)の蛍光 X 線分析法による測定機器を用いた。なお、調査は約 2 週間かけて実施した。

4．調査結果

4.1 付着塩分量の調査結果

近赤外分光法の測定結果を図－5 に示す。図－5 より、内桁の G2 桁の横桁付近、上フランジ、ウェブおよび下フランジテーパー部の付着塩分量が多い傾向にあった。この調査結果をもとに付着塩分量が多かった G2 桁から 7 箇所、G1 および G6 桁から 4 箇所の計 15 箇所を抽出した（図－5 の黒枠)。図－6 に検量線、図－7 に近赤外線分光分析および蛍光X線分析法測定値に対して検量線を用いて換算した付着塩分量と拭取り法による分析値の関係を示す。

図－6(a)の近赤外分光法出力値は、塗装がない試験体を基準にした検量線による出力値である。このように近赤外分光の検量線が塗装上の塩分を想定していないため、条件に合わせた検量線を別途作成する必要があった。図－6(a)の検量線を用いて補正した値が図－7 に示す付着塩分量である。補正に用いた測定箇所は、近赤外線分光法の出力値が濃い、中程度、薄い状況を示す 3 点とした（図－5 中白枠補正 1、2、3)。また、図－6(b)の蛍光 X 線分析法出力値は、試料に含まれる全元素の中に占める塩素の割合を出力した値（ppm）（以下、測定値）の拭取り前後の差を示している。この測定値の差に対して拭取り法により補正した値が図－7 の付着塩分量である。なお、図－5 中に示す No.6 の蛍光 X 線の測定値は拭取り前より拭取り後の値が大きくなったため異常値として除外した。図－7 の負の付着塩分量は、実用上ゼロとするなどの対応も考えられるが、本検討では調査結果の傾向分析として位置付け、特別な処理を行わないこととした。

図－7 より、拭取り法の分析値に対し蛍光 X 線の分析値は正の相関関係にあり、分析値が概ね一致する傾向にある。ただし、他の測定箇所に比べて明らかに大きい No.8 の分析値を除外した場合には、相関係数が低下する傾向がみられた。

図－8 に、図－6(a)の検量線を用いて補正した近赤外分光法による分析値を示す。本調査の結果、蛍光 X 線分析法の分析値は図－7 に示すように、拭取り法による測定値と一致する傾向にある。そのため、蛍光X線分析法による分析値を正として、現地で補正を実施し図－8 の結果を得られる可能性がある。ただし、図－7 に示すように拭取り法

の測定値と近赤外分光法の分析値の相関関係は低い。図－8 のような現地で補正した分析値の精度向上や図－7 に示す相関関係の精度を確認するためには、今後更なるデータの蓄積と精査が必要となる。

4.2 塗装に含まれる塩分量の調査結果

コンクリート表層の塩分量調査においては拭取り後、塗装除去前後の塩分量を調査した。この差分は、塗装に含まれる塩分量を示している。その結果、塗装に含まれる塩分は 587～3,994 ppm であった。よって、付着塩分量の測定にあたっては、拭き取り前後の測定を行い、塗装に含まれる塩分を除去する必要がある。

4.3 コンクリート表層塩分量の調査結果

各測定深さでの電位差滴定法による塩分量測定値と蛍光Ｘ線分析法による分析値の関係を図－9 に示す。蛍光Ｘ線分析法の分析値は、式(1)に準じて算出した。

分析値(kg/m^3)=測定値(ppm)×γ　　(1)

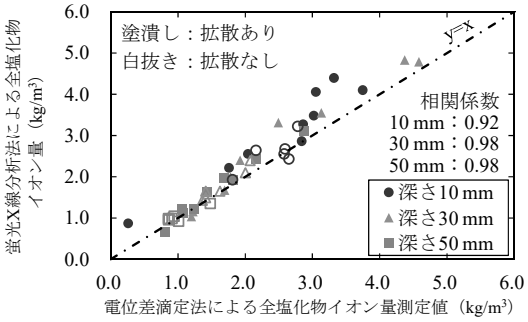
γ：コンクリートの単位体積重量(＝2,350 kg/m^3)

いずれの深さにおいても電位差滴定法による塩分量分析結果に対し蛍光Ｘ線の分析値が正の相関にあり、概ね一致する傾向であった。なお、図中に示す拡散ありとは、塗装除去後の表面塩分量に比べて内部の塩分量が大きい状態を指す。

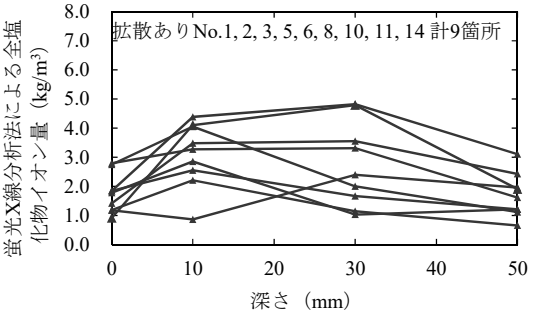
図－10 に蛍光 X 線分析法により測定したコンクリート表層の全塩化物イオン量分布を示す。拡散ありを示す箇所は 15 箇所中 9 箇所で確認された。本橋は竣工後 19 年経過したときに塗装による補修を受けていること、および他径間の中性化試験の結果、中性化の進展はほとんどないことから、中性化による塩分濃縮の影響は小さいと推察される。そのため 9 箇所における表層付近の塩分濃度の低下は、塗装によって塩化物イオンの供給がなくなり、既に浸透した塩分の濃度勾配によって生じた内部への拡散が要因と考えられる。なお、拡散の有無と図－5 および図－8 に示す付着塩分量の大きい測定箇所の関係は確認できなかった。

4.4 付着塩分量とコンクリート表層塩分量の関係

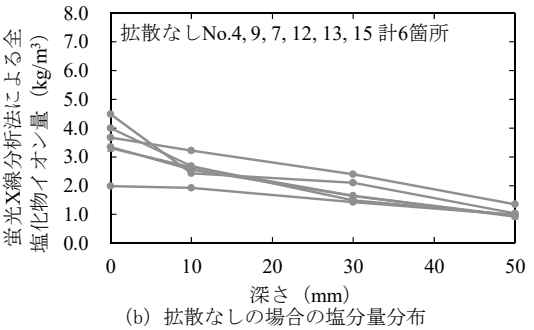
塗装除去前の付着塩分量とコンクリート表層（深さ 0 mm を含む）の塩分量の最大値の関係を図－11 に整理した。なお、塗装除去前の付着塩分量は、図－6 に示す蛍光Ｘ線分析法の付着塩分量である。図－11 によれば、塗装除去前の付着塩分量と深さ方向の最大全塩化物イオン量は内部への拡散の有無によらず正の相関にある。そのため、



図－9　コンクリート内部の測定値の相関関係

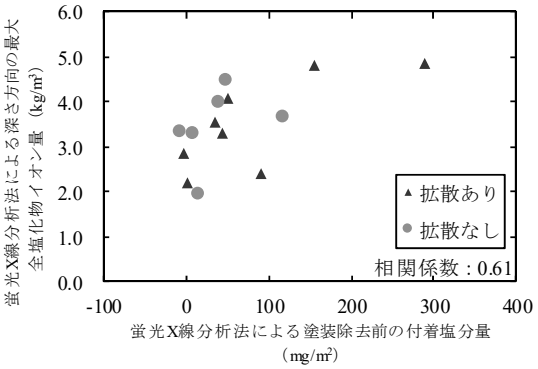


(a) 拡散ありの場合の塩分量分布

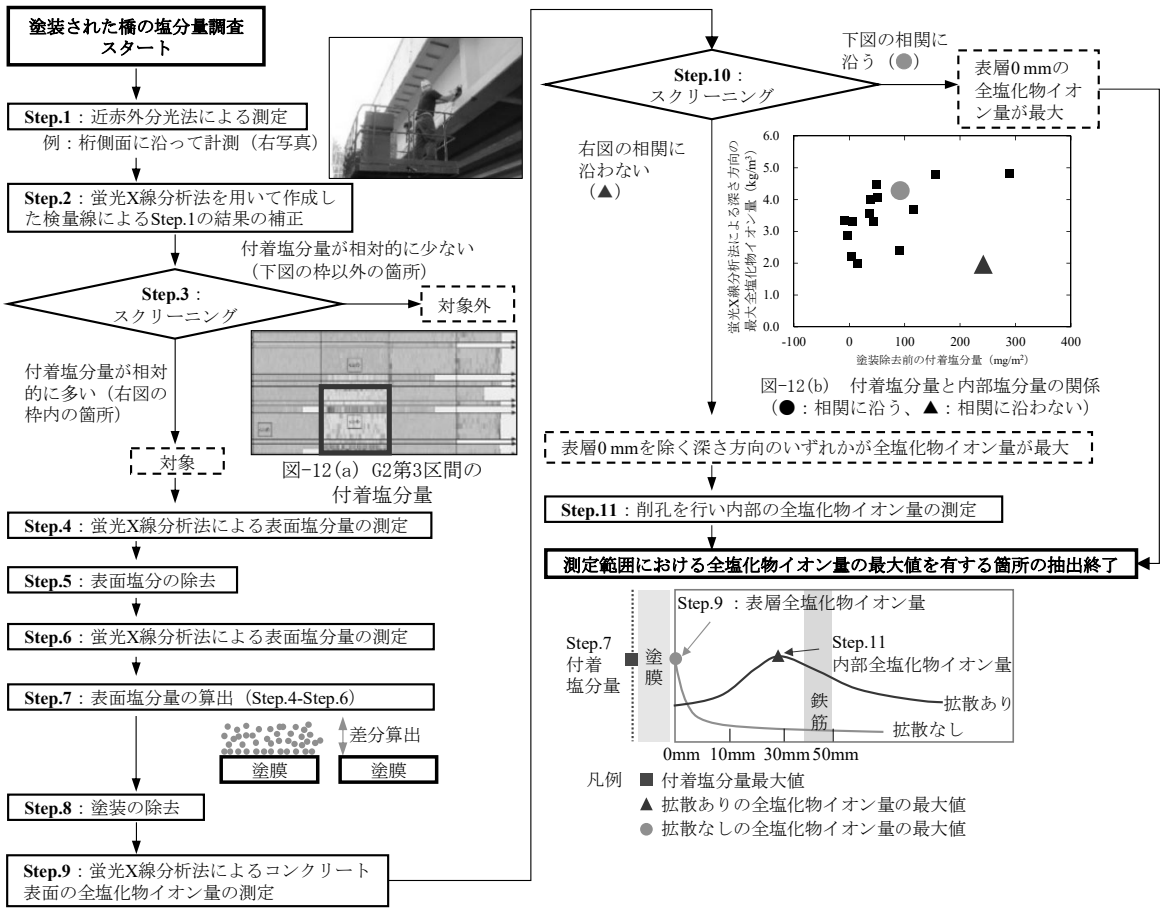


(b) 拡散なしの場合の塩分量分布

図－10　コンクリート表層の塩分量分布



図－11　付着塩分量と内部塩分量の関係



図－12　塗装された橋梁の塩分量調査箇所のスクリーニング手法（案）

付着塩分量から表層の塩分量が高い箇所を推定できる可能性がある。ただし、付着塩分量が小さい場合、比較的ばらつきが大きく、内部の全塩化物イオン量の最大値が大きい場合もある。

4.5 スクリーニング手法の提案

調査結果を踏まえ、スクリーニング的な調査手順を図－12 に整理した。まず、Step.1 では、近赤外分光法により、測定範囲の桁の付着塩分量を測定する。Step.2 では、測定した付着塩分量を図－6(a)の検量線により補正した結果を出力する。Step.3 では、その出力値より付着塩分量が相対的に多い箇所を抽出する。ここで、図－12 に示すように、桁全面での付着塩分量調査において、塗装除去前の蛍光 X 分析法による付着塩分量が相対的に大きい箇所は、全塩化物イオン量の最大値を有している可能性がある。図－12(a)中の黒枠箇所がそれに該当する。

Step.4 では、Step.3 の抽出箇所に対して蛍光 X 線分析法を用いて付着塩分量を測定する。このとき、Step.5 に示すように、塩分の拭取り前後で測定する必要がある。Step.6 では、拭取り後、蛍光 X 線分析法を用いて測定する。その差分が Step.7 に示す付着塩分量となる。

本橋のように主桁に塗装が施工されている場合には、4.2 に示すように、塗装に塩分が含まれていることに注意が必要である。塗装がされている場合、Step.8 で塗装を除去する。Step.9 では、塗装除去後に蛍光 X 線分析法を用いて表層 0 mm の全塩化物イオン量を測定する。

Step.10 では、Step.9 で求めたコンクリート表層 0 mm における全塩化物イオン量と Step.7 で求めた付着塩分量を比較し、図－12(b)に示す塗装除去前の付着塩分量と全塩化物イオン量の相関の有無を確認する。このとき相関が無い（たとえば、図－12(b)中の▲が該当）ときは、内部への拡散の影響を考慮する必要がある。この場合は、Step.11 に示すようにドリル削孔等により深さ方向の全塩化物イオン量の分布の状況を確認する。

５．まとめ

本調査で得られた結果を以下に示す。

（1） 現地で簡易的に測定が可能な非破壊・微破壊塩分量調査手法の一手順を示した。

（2）塗装が施されていた場合、塗装に塩分が含まれているため、塗装除去前後で塩分量を測定する必要があることを確認した。

（3） 近赤外分光法により、構造物全体の付着塩分量を大略的に把握したうえで、付着塩分量の多い箇所に蛍光 X 線分析法を用いれば、測定範囲において全塩化物イオン量が最大となる箇所を現地でスクリーニングが可能となり、予防保全対策を行うべき範囲を合理的に選定できる可能性がある。

（4） 塗装後にコンクリート表面よりも深い位置において塩分量が最大値となる可能性があるため、内部への拡散を考慮して微破壊手法を用いた深さ方向の塩分量調査が必要である。なお、データにばらつきがある点、および本橋のみで得られた限定的な範囲における結果である点を踏まえ、今後データの蓄積と精査が必要となる。

謝辞

本研究で行った調査は、筆者が土木研究所の交流研究員として、国土交通省北陸地方整備局橋梁塩害研究会における調査研究活動の一環として実施されたものである。ご協力いただいた関係各位、貴重な意見をいただいた委員各位に謝意を表す。

参考文献

1)（社）日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説、1984.

2）国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）、2004.

3）小窪幸恵、岡村甫：海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量の算定モデル、土木学会論文集 B、Vol.65、No.4、pp.259-268、2009.10.

4）荒川遥、向俊成、渡邊有寿、渡邊賢三：コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定を目的としたハンディ型蛍光 X 線分析装置の実用化検討、第 33 回構造物の診断と補修に関する技術・研究発表会論文集、2021.10、pp.1-7.

5）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ編コンクリート橋・コンクリート部材編、pp.183-187、2017.11.

6）杉江匡紀、小瀬戸弘樹、山本将、塚崎翔太：表面処理工法施工後の塩化物イオン濃度分布に関する調査、プレストレストコンクリート工学会第 30 回シンポジウム論文集、2021.10、pp.139-142.

7）戸田勝哉、中村善彦、倉田孝男：分光分析法を用いたコンクリート劣化診断システムの開発、IHI 技報、Vol.52、No.1、pp.53-58、2012.

8）櫻庭浩樹、古賀裕久：携帯型蛍光 X 線分析装置を用いた硬化コンクリート表面の塩分量測定の検討、アップグレード論文報告集、1127、2019.

9）日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、pp.II-158-II-160、2014.3.