

論文 塩害環境下に設置された PC 桁の損傷・内部劣化促進物質量の調査と外部環境予測

中村 文則*1・小川 晴希*2・山口 貴幸*3・下村 匠*4

要旨：本研究では、塩害環境下に設置された PC 桁の一部を摘出し、損傷状況、コンクリート内部の塩化物イオン量の調査を実施した。さらに、外部環境作用として橋桁近傍を輸送する飛来塩分量を予測解析し、それらの関係について考察を行った。その結果、各主桁の損傷状況は、海側面と下面(海側)で局所的に生じており、第 2 径間では内部の塩化物イオン量の分布と一致した傾向であることが示された。調査を実施した橋桁の第 2 径間と第 3 径間を比較した結果から、外部の飛来塩分の作用は両者で同様の傾向が見られたが、内部の塩化物イオン量は違いがあることが明らかになった。

キーワード：塩害、外部環境、飛来塩分、浸透塩化物イオン、橋桁損傷

1. はじめに

コンクリート橋梁の塩害劣化過程を正確に予測するためには、橋桁の損傷状況(ひび割れや内部鉄筋腐食量)、コンクリート内部の劣化促進物質量(主に水分や塩分)とそれらの要因となる外部環境作用のそれぞれの値を把握し、それらの関係性を定量化しておくことが重要である。

既往研究において、著者ら¹⁾は、橋桁周辺の地形および橋桁形状の違いを考慮して、飛来塩分の輸送過程を予測できるモデルを構築している。Wattanapornpromら²⁾は、大気中の飛来塩分量とコンクリート内部に浸透する塩化物イオン量を統合して予測できるモデルを構築している。佐伯ら³⁾は橋桁表面の飛来塩分量の現地調査を実施し、橋桁各部位の飛来塩分量を報告している。田中ら⁴⁾は、コンクリート主桁の表面腐食ひび割れの分布と内部鉄筋腐食状況の調査結果を報告している。これらの結果より、限定された条件であれば、実橋梁の飛来塩分の作用や損傷状況、内部塩化物イオン量をそれぞれ把握できるようになっている。

しかしながら、同一の橋梁を対象に、外部環境作用、内部の塩化物イオン量、損傷状況(ひび割れ、浮き・剥離、内部鋼材腐食)を総合的に把握した事例はほとんどないのが現状である。個々の橋梁において、これらの結果を蓄積していくことは、橋梁全体の塩害劣化過程の解明やその劣化予測解析の精度の向上につながる。

本研究では、塩害環境下に設置された PC 桁の一部を摘出し、損傷状況、コンクリート内部の塩化物イオン量の調査を実施した。さらに、外部環境作用として橋桁近傍を輸送する飛来塩分量を予測解析し、それらの関係について考察を行った。

2. 対象とした橋梁

対象とした橋は、図-1 の新潟県糸魚川市に位置するコンクリート橋梁である。この橋梁は 1970 年に供用が開始(竣工昭和 47 年)、約 50 年間供用後、2021 年に解体されたものである。構造形式は、橋長 110.0m、支間長 26.75m、幅員 9.0m、4 径間単純ポストテンション方式 PCT 桁橋である。橋桁下面の標高は 8.5m であり、地表面からの橋桁下面までの高さは 6~7m 程度である。供用期間中の主な工事履歴は、1986 年と 1996 年に表面保護塗装(全径間)、1994 年に外ケーブル補強(全径間)、2008 年に表面保護塗装(局部)が実施されている。

橋桁は、海岸の汀線から 50m 程度の位置に設置されており、高波浪時には海域の波が橋桁下部まで浸入することが確認されている。この地域は、冬季に西から北西方向の季節風が卓越することで、波浪条件が厳しく、海域から発生した飛来塩分の作用を受ける環境である。また、冬季には橋梁路面に凍結防止剤(NaCl)が散布されている。



図-1 対象とした橋梁

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤系准教授 博(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻 学(工)

*3 長岡技術科学大学 技術支援センター 修(工) (正会員)

*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤系教授 博(工) (正会員)

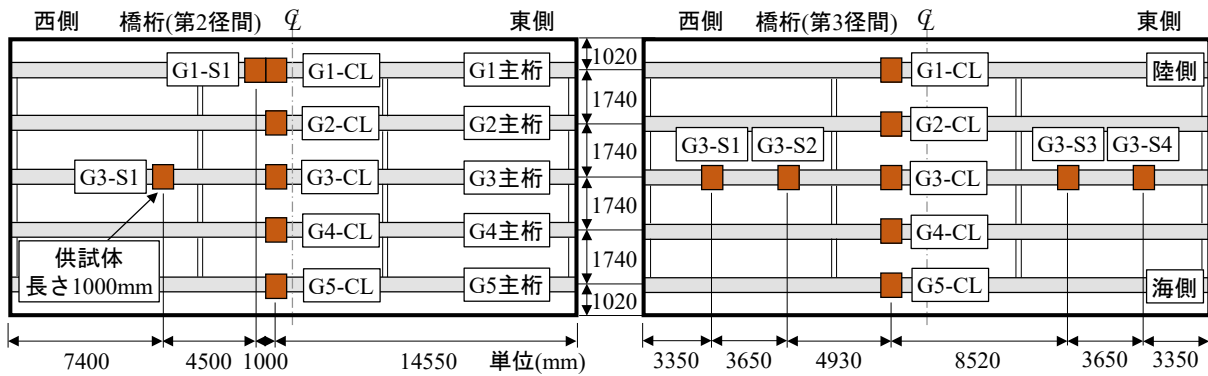


図-2 供試体の摘出位置 (左図：第2径間、右図：第3径間)

3. 橋桁損傷状況および内部塩化物イオン量の調査

3.1 調査箇所および調査方法

(1) 調査箇所および供試体

調査箇所は、橋梁の中央部の第2径間および第3径間の主桁の一部である。第2径間と第3径間における供試体の摘出位置を図-2に示す。供試体は、主桁をワイヤーソーで切断し、プレストレスがない状態になったものを長岡技術科学大学の大型実験棟に運搬した。橋桁から摘出した供試体は、第2径間で7体、第3径間で9体の合計16体である。図-3は、第2径間の中央部から摘出した供試体G3-CLである。供試体の主桁のフランジ部は、幅が500mm、高さが410mm、長さ(橋軸方向)1000mmである。フランジ部の内部鋼材は、図-4のようにPC鋼材と鋼製シースのセットが9本、帯鉄筋が3~4本、補助鉄筋が8本配置されている。シーソ内部のPC鋼材は12本であり、シーソ内部に直線状に配置されている。

(2) 調査項目および調査方法

調査項目は、外観の損傷状況(ひび割れ、浮き、剥離)、コンクリート内部の浸透塩化物イオン量である。ひび割れは、定規により直接測定を実施した。各位置のひび割れ幅は、クラックスケールを利用して、ひび割れの幅の直接測定を行った。表面のコンクリートの浮きは、打音ハンマーを利用して、その範囲を測定した。剥離は、デジタルカメラで写真を撮影し、画像から剥離の範囲を測定した。これらの調査は、フランジ部の海側の側面(海側面)、下向面(下面)、陸側の側面(陸側面)でそれぞれ実施し、その結果を各面ごとに整理した。

コンクリート内部に浸透している塩化物イオン量は、ドリルを用いてコンクリートを削孔し、採取した試料(コンクリート粉)の塩化物イオン量の測定を行った。使用したドリルの刃は直径13mmであり、隣接する3点を削孔した。試料の採取範囲は、表面から140mmの範囲であり、深さ方向に20mm間隔で計7試料を採取した。8箇所の調査点では、表面のみ10mm間隔で計8試料を採取した。調査箇所は、図-4の各供試体のフランジ部の海

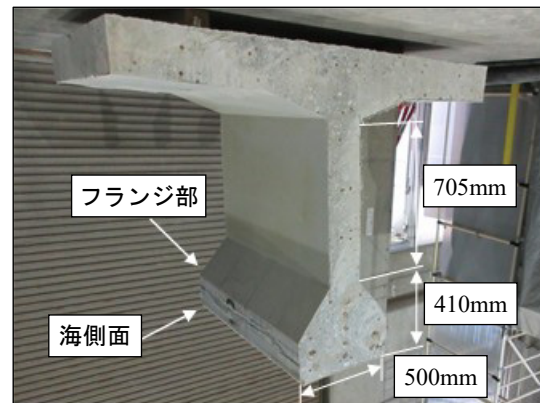


図-3 摘出した供試体(G3-CL)の状況

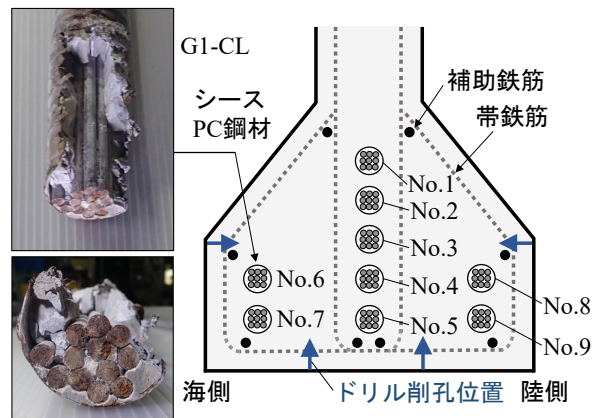


図-4 供試体の断面図とドリル削孔位置

側面と陸側面、フランジの下面の海側と陸側の計4箇所である。

採取した試料は、電量滴定塩分計SALMATE(100-H)を用いた電量滴定法で含有している塩化物イオン量を測定した。分析方法は、試料10gに溶出助剤2gを加え、90℃の蒸留水50mlを投入し、攪拌後に53時間静置した。その後、溶液0.2mlを酸試薬に投入し、塩化物イオン量の測定を行った。測定した試料数は、供試体16体×4箇所×7試料(その中の8箇所が深さ方向に8試料)の合計456個である。

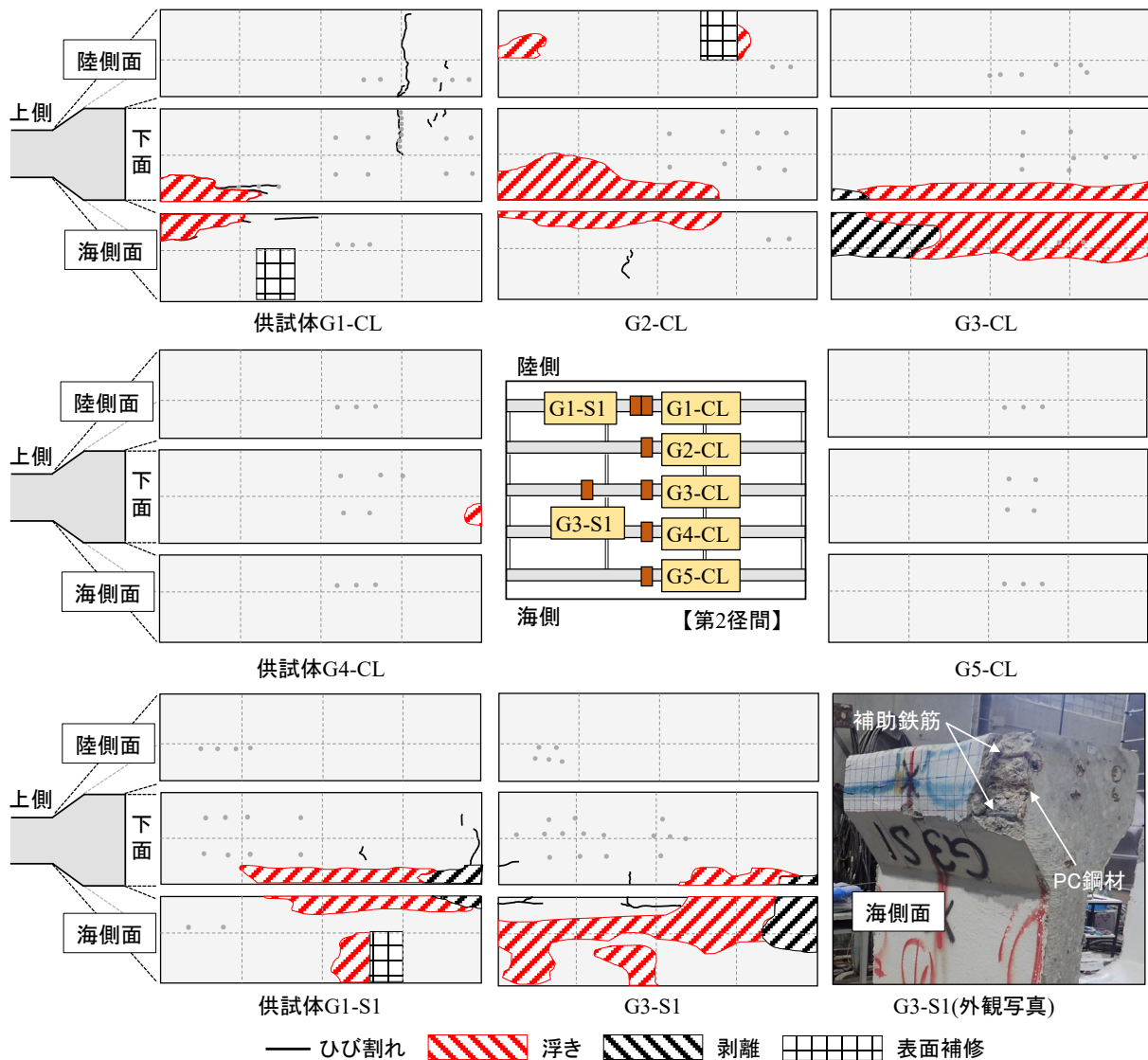


図-5 供試体の損傷状況の調査結果(第2径間)

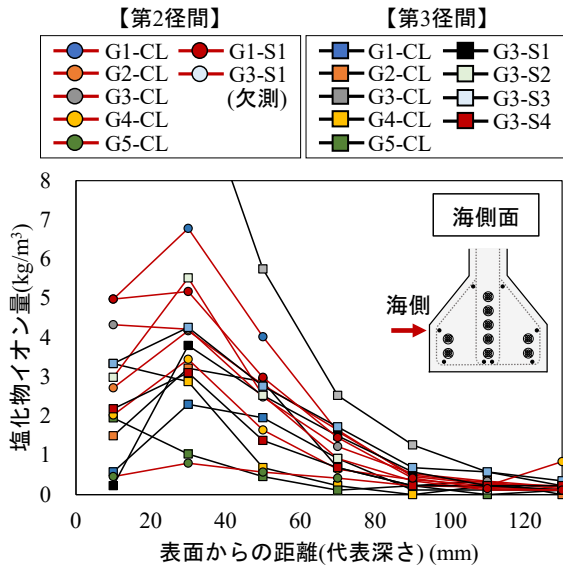
3.2 供試体の損傷状況

第2径間から抽出した各供試体の損傷状況を整理した結果を図-5に示す。図の上段は、最も陸側に位置するG1主桁から中央部のG3主桁から抽出した供試体の陸側面・下面・海側面の結果である。図に示すように、海側面と下面の海側では、コンクリート表面の浮きおよび剥離している範囲が広く、局所的に損傷状況が激しい傾向となっている。陸側面では、損傷が海側面と比較して少ない傾向が見られる。また、コンクリート表面部全体の損傷状況は、第3径間より第2径間のほうが激しい状況であった。

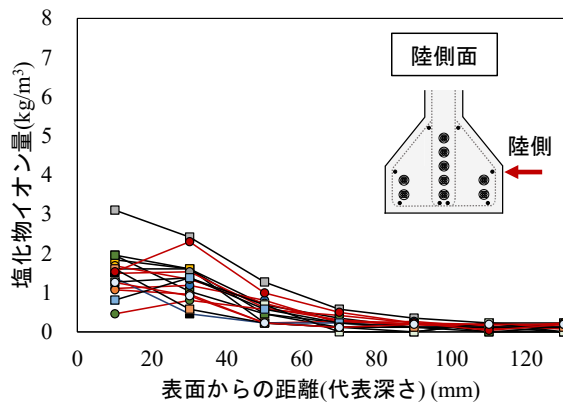
図の中段は、第2径間の海側の主桁から抽出した供試体G4-CLとG5-CLの結果である。図より、海側から抽出した供試体では、コンクリートの表面のひび割れおよび浮き、剥離などの損傷はほとんど見られなかった。第3径間から抽出した供試体においても、最も海側のG5主桁の供試体(第3径間G5-CL)は損傷がほとんどなく、第

2径間と同様の傾向であった。図の下段は、第2径間の供試体G1-S1およびG3-S1の結果である。図に示すように、表面の浮きと剥離は、海側面とその下面に分布しており、フランジ部が局所的に損傷していることがわかる。

右下の図は、供試体G3-S1の海側面の写真である。画像から、海側面に配置されているPC鋼材・シースと補助鉄筋が腐食しており、この鋼材の腐食膨張によりコンクリートが剥離していることがわかる。コンクリート表面の損傷部を対象に、内部鋼材の腐食状況を確認した結果では、ひび割れ、浮きおよび剥離が生じている範囲で、内部の補助鉄筋または帯鉄筋が腐食している状況が確認された。補助鉄筋以外では、シースとその内部のPC鋼材に腐食状況が見られた。今回の調査では、PC鋼材はグラウンドが充填されていない場合に腐食が激しく、表面の損傷状況と明確な関係は確認できなかった。内部鋼材の腐食量は、後日、調査を実施し、表面損傷状況との関係を整理する予定である。



(a) 海側面

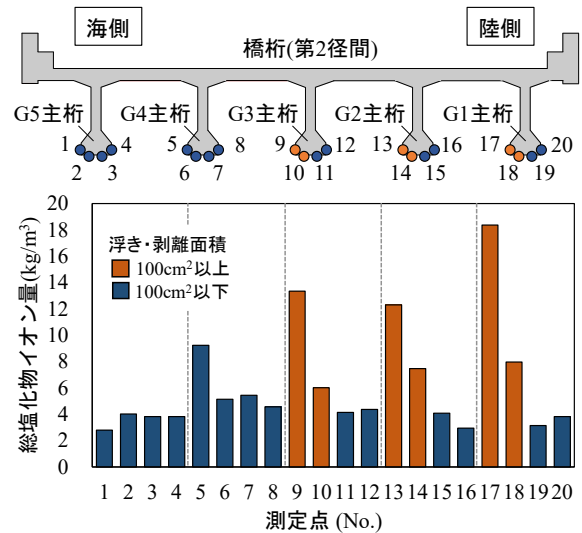


(b) 陸側面

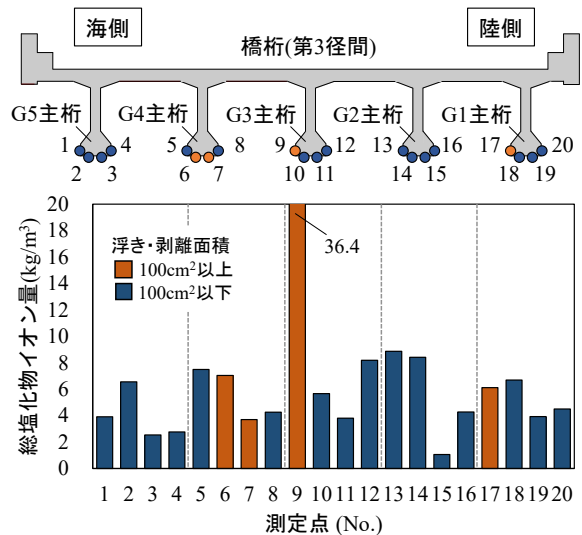
図-6 塩化物イオン量の測定結果

3.3 内部の塩化物イオン量の測定結果

図-6は、第2径間と第3径間の各供試体のコンクリート部に浸透した塩化物イオン量の測定結果である。図の赤線は第2径間、黒線は第3径間の結果である。測定結果は、海域からの飛来塩分のほかに、凍結防止剤による塩化物イオンの供給の影響を含めた結果である。図(a)の供試体の海側面では、塩化物イオン量は、表面から20~40mm(代表深さ30mm)の位置で最大となっており、最も表面(代表深さ10mm)では低下する傾向となっている。塩化物イオン量の測定と並行で実施した中性化試験の結果では、中性化深さは5~13mm程度であった。これより、表面付近の塩化物イオン量の低下は、中性化が関係している可能性がある。第3径間の供試体G3-CL(第3径間)の塩化物イオンは著しく大きくなっており、代表深さ10mmの位置で14.8kg/m³、代表深さ30mmの位置で11.2kg/m³であった。これは、供試体G3-CLは損傷が激しく、試料の採取位置がひび割れに近い位置となったためである。



(a) 第2径間(G1~G5主桁)



(b) 第3径間(G1~G5主桁)

図-7 損傷面積と総塩化物イオン量

図(b)の陸側面では、塩化物イオン量は、代表深さ10mmまたは30mmで最も大きくなる傾向があり、海側面と比較して全体的に小さい値となっている。また、供試体の下面の測定結果は、陸側面と同様の傾向が見られた。

以上の測定結果は、表面保護塗装の影響を受けて変化していると考えられるが、今回の測定だけでは、その有無の影響を定量的に示すことができなかった。そのため、今後、詳細な検討を追加で実施していく予定である。

3.4 損傷面積と内部塩化物イオン量の関係

図-7は、各測点の塩化物イオン量の総量を整理した結果である。総量は、表面から140mmまでの各深さの塩化物イオン量を足し合わせて算出した。棒グラフの橙色は、コンクリート表面の浮きおよび剥離の面積が100cm²以上の箇所である。図(a)の第2径間では、主桁の各側面の総塩化物イオン量は、測定点No.1を除外すれば、海側面で大きくなっている傾向があり、その他の側面では大

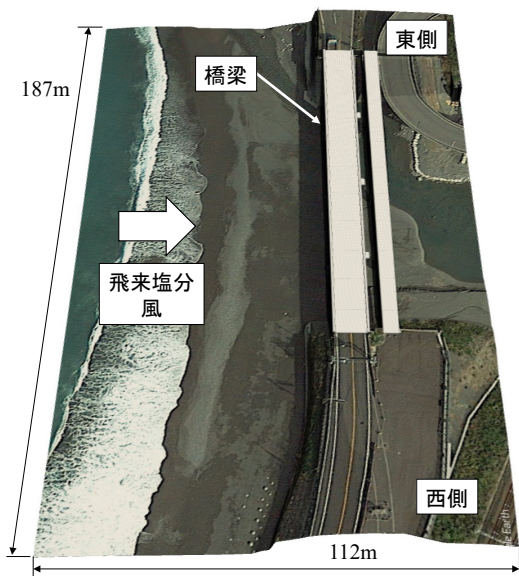


図-8 計算領域および計算地形

きな差がない結果である。損傷面積と塩化物イオン量では、損傷面積が大きい海側面(No.9, 13, 17)と下面(海側)(No.10, 14, 18)で、塩化物イオン量が大きくなっている傾向があり、両者の変動が一致している。図(b)の第3径間では、測点 No.9 以外の総塩化物イオン量は、著しく大きくなっている部分はなく、第2径間とは傾向が一致していないことがわかる。また、総塩化物イオン量と損傷面積についても明確な関係が示されていないといえる。

これらの結果より、第2径間と第3径間では、内部の総塩化物イオン量の分布に違いがあることがわかった。その要因として、2つの影響が考えられる。一つ目は、佐伯ら³⁾の既往研究の結果でも報告されているように、橋桁の各位置での飛来塩分の作用量の違いによる影響である。もう一つは、コンクリート表面の損傷部から侵入した塩化物イオンによる影響である。コンクリート表面のひび割れなどの損傷が激しい第2径間では、損傷部から侵入した塩化物イオンにより、内部の塩化物イオン量の分布が変化した可能性がある。以上の要因を明らかにするために、橋桁の外部環境作用の予測解析を実施した。

4. 橋桁周辺の外部環境作用(飛来塩分)の予測

4.1 外部環境作用の予測モデルおよび計算条件

外部環境作用の予測は、著者ら⁴⁾の既往研究を参考に、風と飛来塩分を予測できる3次元モデルを構築して実施した。このモデルは、3次元非圧縮 N-S 方程式および3次元移流拡散方程式を用いて、風と大気中の飛来塩分濃度の分布を算定するものである。方程式の解法は差分法であり、N-S 方程式の圧力項を HSMAC 法で計算した。

計算領域は、図-8のような沿岸方向 187m、岸沖方向 112m、高さ 20m の空間である。図の上側が東側、下側が

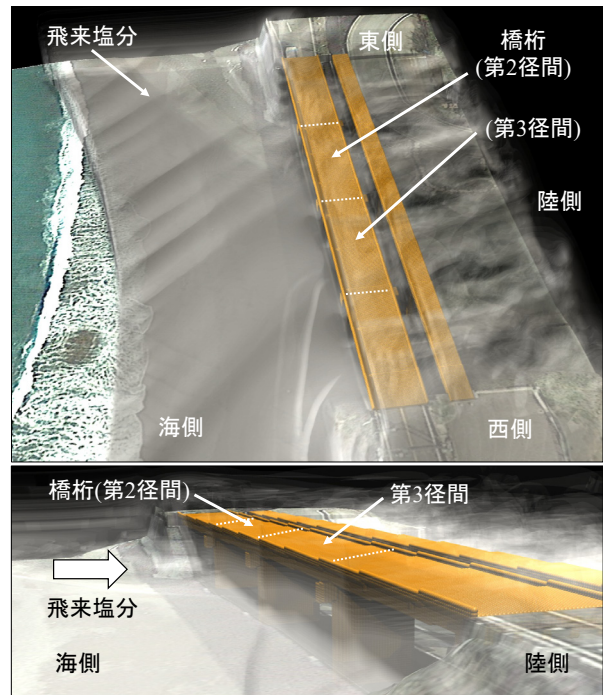


図-9 大気中の飛来塩分の分布(風向: 西北西)

西側となるように橋桁を配置した。計算地形と橋梁形状は、3次元測量成果、国土地理院 5m メッシュ電子データ、海図、空中写真、図面を参考に構築した。今回の解析では、橋桁の表面保護塗装の影響が小さいと考えられることから表面保護塗装を考慮しない条件とした。

計算条件は、水平方向の計算格子間隔が 0.25m、鉛直方向が 0.20m である。境界に設定した風の風向は、海域からの風となる西、西北西、北西、北北西、北、北北東方向の6方向をそれぞれ個別に設定した。各風向の風速は、過去10年間の冬季(12月～翌年3月)の観測結果(気象庁アメダス)から、それぞれの風向に応じた平均風速 5.4～8.3m/s を設定した。飛来塩分の沈降速度は 0.315m/s であり、汀線からの距離に応じて沈降速度を減少させるモデルを利用した。沈降速度の減少係数は単位距離(m)あたり 0.012 とした。飛来塩分の発生は、汀線位置で鉛直方向に指数分布となるように設定した。鉛直方向の飛来塩分の減少率は、単位高さ(m)あたり 0.293 とした。これらのパラメータは著者ら⁴⁾と仲座ら⁵⁾を参考に設定した。

4.2 外部環境作用の予測結果および考察

図-9は、大気中の飛来塩分の輸送量の空間分布を示した計算結果である。図の分布は、風向西北西の条件の結果である。図に示すように、海域の汀線付近で設定した飛来塩分が陸側方向に輸送されていることがわかる。この地域では、冬季に西および西北西の風向が最も卓越することから、橋桁に対して斜め方向に飛来塩分が作用する結果となっている。また、下図に示すように、橋桁周辺では飛来塩分が低い位置に集中しており、飛来塩分の大部分が橋桁の下部を通過している結果となった。

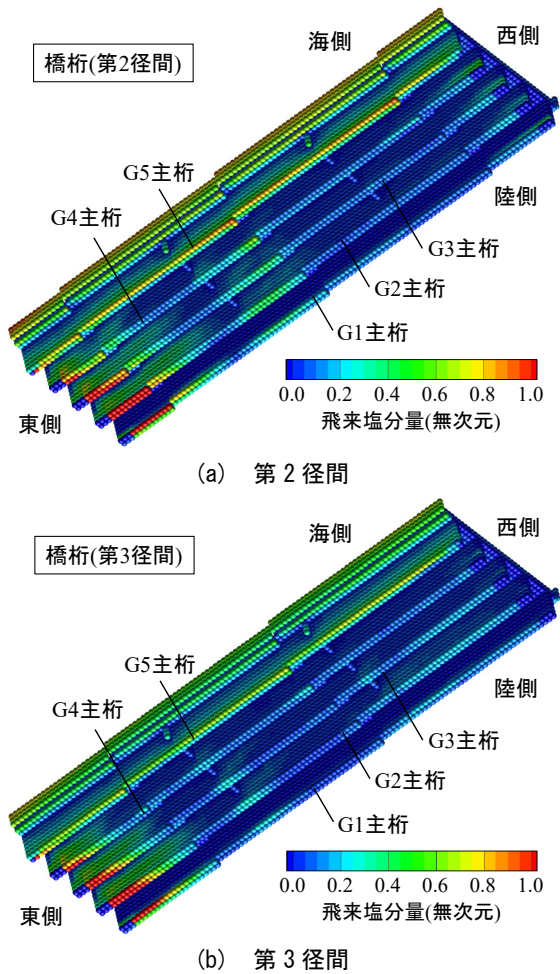


図-10 橋桁周辺の飛来塩分の作用量の分布

図-10は、橋桁の第2径間近傍の飛来塩分の輸送量を整理した結果である。図の塩分量は、橋桁の壁面近傍(隣接する格子)を輸送する飛来塩分量を可視化した結果であり、風向6方向の結果を重ね合わせるとともに、最大値近傍を1.0とした無次元量である。図に示すように、橋桁に作用する飛来塩分量は、第3径間より第2径間のほうが若干大きい傾向がある。飛来塩分の空間的な分布は、橋桁の東側端部で局所的に大きくなっており、第2径間と第3径間で同様の傾向となっている。これは、風が橋桁に対して斜めの方向から作用することで、飛来塩分が橋桁の東側に局所的に集中しているためである。

また、最も海側のG5主桁では、東側端部を除けば、飛来塩分量の予測結果が大きくなっている。実際の橋桁の測定結果では、桁中央部(G5-CL)の内部の塩化物イオン量は少ない傾向があり、桁中央部の予測結果と測定結果が一致していないといえる。これは、最も外側の桁では桁表面に降雨が作用し、その影響でコンクリート表面の飛来塩分量が減少しているためであると考えられる。

これらの結果から、橋桁に作用する飛来塩分量とその空間的な分布は、第2径間と第3径間で大きな違いはないことがわかる。そのため、内部の塩化物イオン量の結

果で示された第2径間と第3径間の分布の違いは、コンクリート表面の損傷部から侵入した塩化物イオンが要因となっている可能性が高いといえる。

5. 結論

実橋梁の損傷状況と内部劣化促進物質量の調査結果から、各主桁の損傷状況は、海側面と下面(海側)で局所的に生じており、第2径間では内部の塩化物イオン量の分布と一致した傾向であることが示された。調査を実施した橋桁の第2径間と第3径間を比較した結果から、外部の飛来塩分の作用は両者で同様の傾向が見られたが、内部の塩化物イオン量は違いがあることが明らかになった。

今後は、表面保護舗装および凍結防止剤、降雨の影響を含めた予測解析を実施していくことを予定している。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費(基盤研究B)「外部環境適用型の実構造物の新規劣化予測技術の開発と総合的検証データの構築」(研究代表者:中村文則, 課題番号:22H01563), (挑戦的研究(萌芽))(研究代表者:中村文則, 課題番号:20K21054), 大日本コンサルタント(株)との共同研究「塩害PC橋の外観と腐食・耐荷性能の調査研究」の一部として行ったものである。国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所より、撤去した橋桁の一部を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村文則, 下村 匠, 大原涼平, 細山田得三: 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評価への適用, 土木学会論文集 E2, Vol.75, No.2, pp.60-79, 2019.4
- 2) Wattanapornprom, R. and Ishida, T.: Comprehensive numerical system for predicting airborne chloride generation and its ingress in concrete under actual environmental conditions, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.18-35, 2018.
- 3) 佐伯竜彦, 能勢陽祐, 菊地道生: 薄板モルタル供試体を用いたマイクロ塩害環境評価手法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.803-808, 2011.
- 4) 田中泰司, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.466-482, 2010.11
- 5) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄: 飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.1036-1040, 1993.