

論文 外部環境条件の時系列変化を考慮した実構造物の塩分浸透量に関する研究

中村 文則*1・下村 匠*2・原田 健二*3・大原 涼平*4

要旨: 表面塩分量に直接影響を及ぼす外部環境条件として到達塩分量と降雨による洗い流し効果を考え、それらの時系列変化と実構造物中の塩分浸透量の関係について現地調査結果と数値解析を用いて検討を行った。その結果、実構造物における塩分浸透量は、到達塩分量と降雨による洗い流しの時系列変化の影響を受けていることが確認できた。さらに、外部環境条件として到達塩分量と降雨による洗い流し効果を考慮した拡散方程式モデルの計算結果から、外部環境条件の時系列変化とコンクリート中の塩分浸透量の関係について説明できることが示された。

キーワード: 塩害、塩分浸透量、到達塩分量、外部環境、拡散方程式

1. はじめに

コンクリート中の塩分浸透量を正確に把握することは、鉄筋コンクリート構造物を維持管理する上で重要である。実構造物では、その表面のコアを採取し、その塩分浸透量から見かけの拡散係数と表面塩分量を算定し、コンクリート標準示方書¹⁾に記載されている Fick の拡散方程式を用いて、塩分浸透量を予測する方法が一般的に行われている。ただし、この方法では、コアを採取した部分では塩分浸透量は正確に予測できるが、構造物各部位の塩分量を対象とした場合に、多くのコアを採取しなければならないといった問題がある。長期にわたって構造物を維持管理する上で、採取するコアはできる限り少なくすることが理想であり、構造物を傷つけることなく構造物中の塩分浸透量を予測する方法の確立が重要である。

既往研究において、ソーンウィーラ²⁾はコンクリート中の塩化物イオンの収支モデルについて報告している。佐伯³⁾は、薄板供試体の塩分浸透量から構造物の塩分浸透量を推定する方法について報告している。藁毛⁴⁾はコンクリート構造物への塩分の付着から境界面を通じてその内部へ浸透する塩分量を算出する塩化物イオン流動モデルについて報告を行っている。また、コンクリート標準示方書¹⁾でも、見かけの拡散係数と表面塩分量を、水セメント比と海岸からの距離によって定める方法が示されている。これらの研究により、ある一定の限られた条件であれば、コンクリート中の塩分浸透量を予測できることが報告されている。

しかしながら、コンクリート中の塩分浸透量を汎用的かつ高精度で予測するためには、到達塩分量および降水量、湿度、温度、日射等の外部環境条件の時系列的な変

化を考慮できるモデルが必要となる。例えば、山田⁵⁾は構造物の表面塩分量に直接影響を及ぼす到達塩分量(構造物表面に到達する飛来塩分量)が、数時間から日単位で大きく変化していることを報告している。既往研究では、コンクリート中の塩分浸透量とその外部環境の時系列変化の関係を詳細に研究した例は少なく、構造物の表面塩分量に影響を及ぼす到達塩分量と降水量を数時間単位で考慮し、その値とコンクリート中の塩分浸透量の関係について研究した例はない。

本研究では、表面塩分量に直接影響を及ぼす外部環境条件として到達塩分量と降雨による洗い流し効果を考え、それらの時系列変化と実構造物中の塩分浸透量の関係について現地調査結果と数値解析を用いて検討を行った。

2. 現地調査におけるコンクリート中の塩分浸透量

2.1 対象とした構造物

対象とした構造物は、新潟県上越地方に位置する名立大橋およびその近傍に位置する暴露試験場に設置されている大型供試体の架台である。橋桁および暴露試験場に設置されている架台を図-1に示す。この橋梁は2001年11月に供用が開始されており、構造形式は表-1のようになっている。この橋梁では、著者ら⁶⁾の既往研究により、橋桁に到達する飛来塩分量の数値シミュレーションが実施されており、2002~2006年までの5年間の計算結果が報告されている。

2.2 現地調査データの収集項目および調査内容

現地調査データの収集項目は、コア試験体の塩分浸透量、土研式捕集箱による到達塩分量、風速、風向、降水量、波浪である。調査地点の配置を図-2に示す。

*1 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 修(工) (学生会員)

*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 学(工) (学生会員)

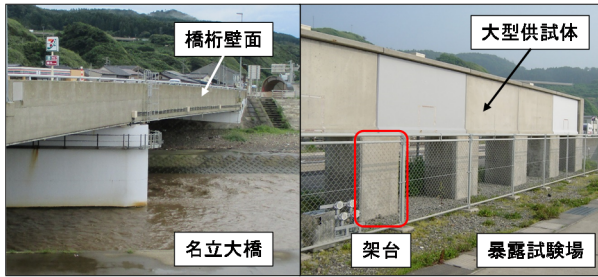


図-1 名立大橋橋桁および暴露試験場

表-1 名立大橋の構造形式

項目	内容
橋長	75.30m
供用開始	2001年11月
上部工構造形式	PC単純ポストテンション バイプレ方式中空床板橋
下部工構造形式	逆T式橋台、壁式橋脚
桁高	1.50m
幅員	21.0m

コンクリート中の塩分浸透量は、図-3のようなコアを構造物から採取し、それらを1cm間隔で切断および粉砕し、その中に含まれる全塩分量について測定を行った。コア試験体の採取位置を図-4に示す。コア試験体は、橋桁壁面の4箇所、暴露試験場所の架台部分の3箇所から採取した。名立大橋の橋桁壁面では、2002年に撥水加工が実施されており、橋桁壁面から採取した4つのコアは表面が撥水加工されたものである。暴露試験場に設置されている架台は撥水加工がされていないものである。コアを採取した壁面の方向は橋桁が306°、架台が295°に垂直な方向である。コア試験体の採取日は2013年10月25日である。

構造物表面の到達塩分量は、土研式捕集箱を用いて、1ヵ月単位の塩分量を採取した結果を整理した。土研式捕集箱は、橋桁海側および暴露試験場の2箇所に設置されている。測定が実施された期間は、2002～2006年の5年間である。

気象条件となる風速および風向、降水量は、橋梁と暴露試験場の中間地点に設置してある気象ステーションおよび気象庁大湊観測点の測定結果を用いた。収集したデータの期間は、2001年11月～2013年10月であり、これらのデータを2時間間隔で整理した。

波浪データは、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)の直江津港観測点のデータを用いた。整理したデータ項目は、有義波高、有義周期、波向である。これらのデータは、著者らの研究結果より直江津港観測点の位置と名立大橋の沖海域の位置でほぼ一致することが明らかにされている。収集した測定結果の期間は2001～2013年であり、測定時間間隔は2時間である。

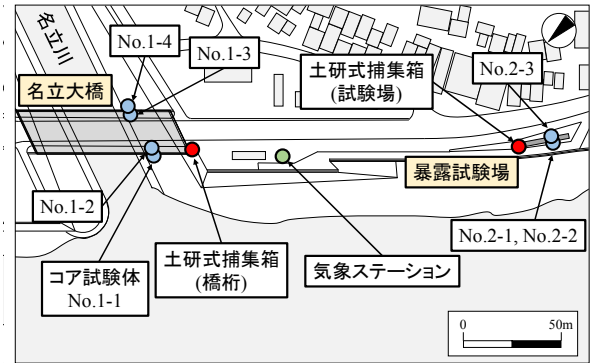


図-2 現地調査地点の配置

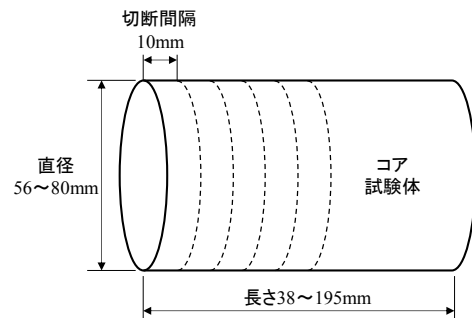


図-3 採取したコア試験体

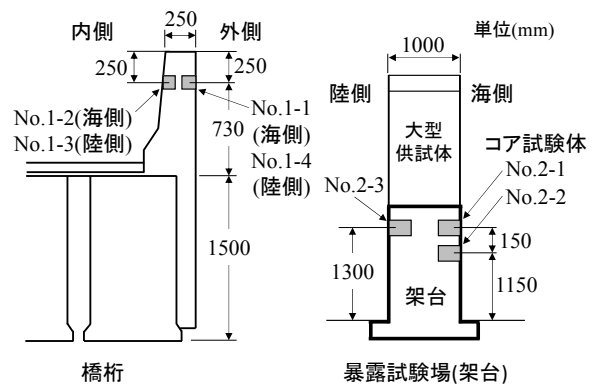


図-4 コア試験体の採取位置

2.2 実構造物の外部環境条件の整理

構造物の表面塩分量に直接影響を与える外部環境条件として、到達塩分量および降水量の時系列データの整理を行った。

これらのデータは、橋梁の供用開始からコア試験体の採取までの2001年11月～2013年10月の12年間の期間が必要となる。しかしながら、現地調査では、到達塩分量の調査期間が不足しているとともに、1ヵ月単位の調査結果しか得られていないのが現状である。そのため、既往研究⁹⁾の飛来塩分算定図を用いて、風および風向、波高の調査結果から2時間間隔の12年間の橋桁壁面における到達塩分量を算定した。

降水量は到達塩分量の算定結果に合わせて、気象庁の1時間当たりの降水量を2時間間隔で12年間整理した。

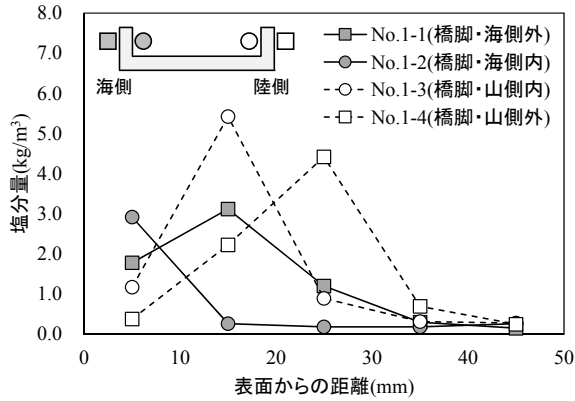


図-5 塩分浸透量の調査結果(橋桁 No. 1-1~1-4)

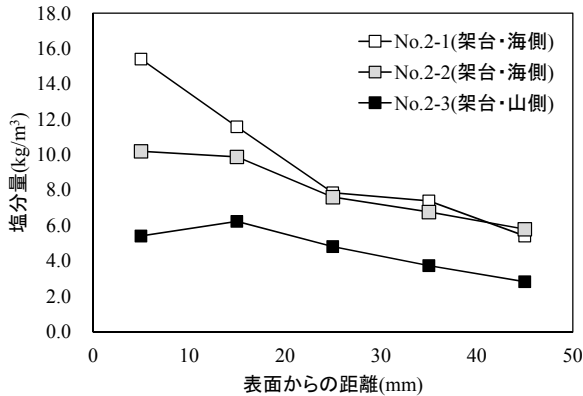


図-6 塩分浸透量の調査結果(架台 No. 2-1~2-3)

2.3 現地調査における塩分浸透量と外部環境条件

橋梁壁面から採取したコア試験体の塩分浸透量の調査結果を図-5 示す。図に示すように、コンクリート中の浸透塩分量は最大値が 2.9~5.4kg/m³ 程度となっており、海側壁面の外側 No.1-2 では、最も表層に近い 0~10mm の範囲で試験体中の塩分量が最大値となっている。それ以外の試験体では、表面から 10~30mm の範囲で塩分量が最大となっており、最も表面に近い 0~10mm の範囲では塩分浸透量が小さい傾向が見られた。

図-6 は、暴露試験場に設置されている供試体の架台から採取したコア試験体の塩分浸透量の調査結果である。試験体 No.2-1 および No.2-2 はほぼ同様の位置でコアを採取しており、No.2-2 はひび割れ発生部分でコアを採取したものである。図に示すように、各試験体の塩分量の最大値は 6.3~15.4kg/m³ であり、橋桁壁面の測点 No.1-1~1-4 の 4 箇所の結果と比較して塩分量が大きくなっている。これは、橋桁と暴露試験場の位置で外部環境に大きく差がないと仮定すれば、橋桁壁面の撥水加工の有無による影響であると考えられる。

図-7 は、橋桁と暴露試験場の位置で土研式捕集箱により到達塩分量を調査した結果である。図に示すように、2 つの調査箇所での到達塩分量に大きな差はなく、年間の変動傾向も同様である。また、この 2 箇所は、距離が 170m

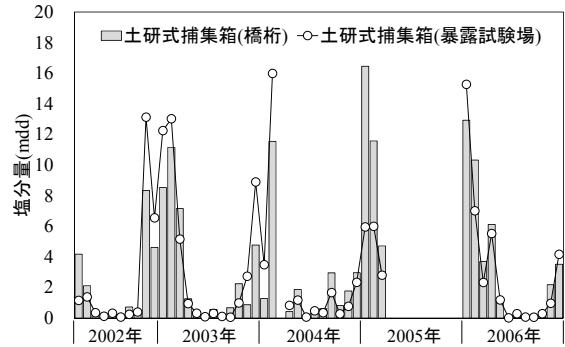


図-7 土研式捕集箱による到達塩分量の調査結果

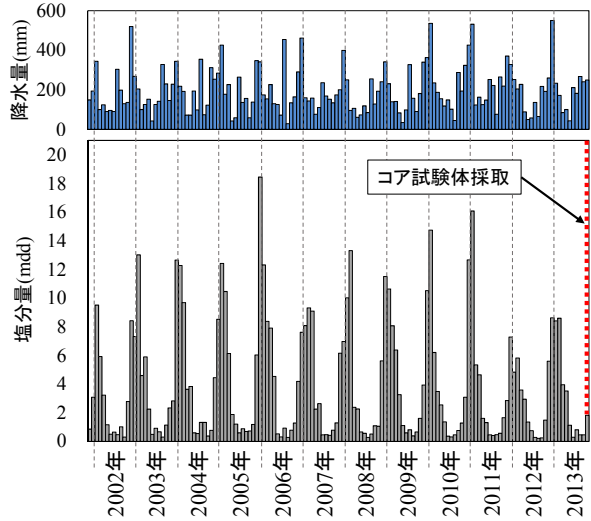


図-8 到達塩分量と降水量の時系列分布

程度しか離れていないため、降雨による表面の洗い流しの効果もほぼ同様と考えられる。これらより、コア試験体の採取を行った 2 箇所での到達塩分量や降水量などの外部環境に大きく差はなく、試験体の塩分浸透量の差は撥水加工の有無が関係しているといえる。

また、図-6 の測点 No.2-2 および 2-3 では、表面から 0~10mm の距離の塩分浸透量が比較的小さい傾向にある。このような傾向は、表層部の中性化により発生することがあるため、コア供試体の中性化試験を同時に実施した。その結果、中性化は表層の 2mm 程度であり、塩分浸透量に大きく影響を与えている傾向は見られなかった。そのため、降雨による表面塩分量の洗い流し効果が、表層部の浸透塩分量に大きく影響している可能性がある。

図-8 は、名立大橋の供用が開始された 2001 年 11 月~2013 年 10 月までの各月の到達塩分量、降水量を整理したものである。図の塩分量の値は、橋桁に設置された土研式捕集箱の位置での 2 時間間隔の到達塩分量の算定結果を 1 ヶ月単位に換算したものである。図に示すように、コア試験体の採取日が 2013 年 10 月 25 日であったことから、試験体を採取する前の数か月間で到達塩分量が少ない状態が続いていたことがわかる。また、降水量

	浸透 (No.1-1)	浸透 (No.2-1)	浸透 (No.2-2)	到達 (算定値)
総塩分量(kg/m ²)	0.065	0.666	0.592	1.686
(浸透)/(到達)	0.039	0.395	0.351	—

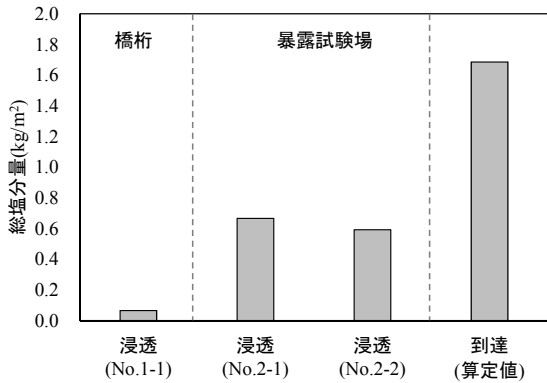


図-9 浸透と表面到達する総塩分量の比較

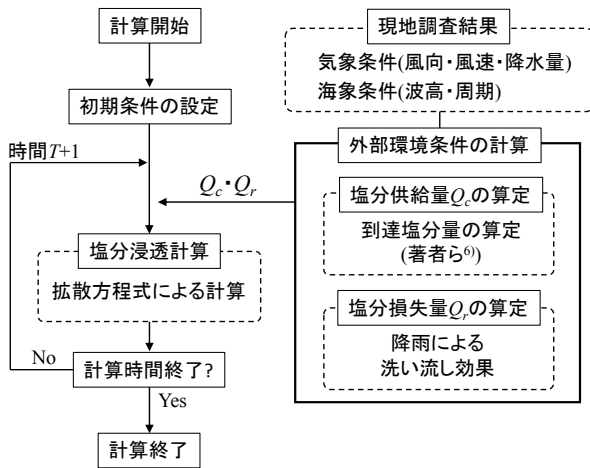


図-10 計算全体の流れ

も大きくなっている。これらより、図-6 に示す試験体の表面では、到達塩分による供給量が減少し、さらに降雨による洗い流しの効果を受けることで、構造物の表面塩分量および表面近傍の塩分浸透量が損失したといえる。

降雨による洗い流しの効果を確認するために、コア試験体に含まれる総塩分量と単位時間あたりの到達塩分量を時間で積分した総塩分量の比較を行った。図-9 は、測点 No.1-1, No.2-1, No.2-2 および到達塩分量を単位断面積当たりの量に換算し、それらの総塩分量を比較したものである。図に示すように、コア試験体中の総塩分量は、表面に到達した総塩分量と比較して減少している。これは、表面に到達した塩分が降雨によって洗い流されたことにより減少したと考えられる。

これらの結果から、コンクリート中に浸透している塩分は、その表面から一定の塩分量で浸透しているのではなく、時系列的な変動の影響を受けながら表面から浸透していることがわかる。そのため、現地を再現した数値解析を行い、コンクリート中の塩分浸透量と外部環境の時系列変化の関係について検討を行った。

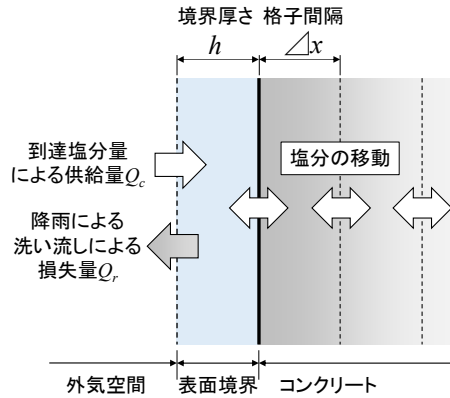


図-11 表面境界部分のモデル化

3. 外部環境の時系列変化を考慮した塩分浸透計算

3.1 計算モデル

(1) 計算モデルの概要と計算全体の流れ

計算モデルは、1 次元拡散方程式モデルであり、到達塩分量および降水量を時系列で考慮して計算するものである。計算全体の流れを図-10 に示す。本計算モデルでは、事前に気象・海象条件から 2 時間間隔のコンクリート表面の到達塩分量および降雨による洗い流し量を算定しておき、それらを計算に時系列で入力した。

(2) 支配方程式およびモデル化

本計算モデルで用いた 1 次元拡散方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 c は塩分量(濃度)(kg/m³)、 D_c は拡散係数(m²/s)、 t は時間(s)、 x は x 軸方向の距離(m)である。

計算の境界条件となるコンクリートの表面塩分量は、図-11 に示すような仮定の表面境界を設定し、その境界での塩分量の収支を算定して求めた。実際の計算では、表面塩分量(濃度) c_0 は、外部から構造物表面への塩分の到達による塩分供給量 Q_c (kg/m³/s)と降雨によって洗い流される塩分損失量 Q_r (kg/m³/s)、コンクリート内部での塩分移動量の収支で算定している。

コンクリート表面の塩分供給量 Q_c は、飛来してきた塩分が表面にすべて到達すると仮定して、式(2)のようにモデル化した。

$$Q_c = \frac{q}{h} \quad (2)$$

ここで、 q は到達塩分量(kg/m²/s)であり、この量は土研式捕集箱で採取される塩分量と同様のものである。 h は表面境界の厚さ(m)であり、計算格子間隔と同様の 1mm と

表-2 計算条件

項目	単位	計算設定条件
計算領域	NX	m
計算格子間隔	DX	m
計算時間間隔	DT	sec
計算時間	TIM	year
拡散係数	D_c	m^2/s
損失係数 (降雨による洗い流し効果)	α	1/s
		2.0×10^{-6} (測点No.2-1再現)
		2.4×10^{-6} (測点No.2-2再現)

した。

降雨により洗い流される塩分損失量 Q_r は、降水量の調査結果で降水量が 1.0mm/h 以上の場合に、仮定の表面境界の塩分量 c_0 が降雨による洗い流しで減少するとして、式(3)のようにモデル化した。

$$Q_r = c_0 \cdot \alpha \quad (3)$$

ここで、 α は係数(1/s)であり、降雨による単位時間当たりの表面塩分量の損失率である。

3.2 計算条件

名立大橋の橋桁海側壁面の塩分浸透量の再現計算を行った。再現期間は、橋梁の供用が開始された 2001 年 11 月からコア試験体が採取された 2013 年 10 月 25 までの 12 年間である。計算条件を整理したものを表-2 に示す。構造物の表面境界に設定する塩分供給量 Q_c は、現地調査部分で算定した橋桁位置の 2 時間間隔の到達塩分量を計算に与えた。降雨による洗い流し効果の係数 α は、図-9 に示した到達塩分量とコア試験体に含まれる総塩分量の差が降雨による塩分の損失量 Q_r の総量と等しくなると考え、その量が現地調査と一致するように設定した。ただし、この係数 α は降水量および壁面への降雨の当たり方、コンクリートの水分含水状態などによって変化する値であり、今後、その値を定量化していきたいと考えている。コンクリート中の塩分の拡散係数は、コア試験体の測点 No.2-1 と No.2-2 の表面から 20~50mm 範囲の塩分浸透量の調査結果から求めた。

計算結果と比較する塩分浸透量の調査結果は、橋桁壁面位置のものを用いるべきであるが、その測点では撥水加工の影響で塩分浸透量が減少している。そのため、外部環境条件が橋桁位置とほぼ同様であった暴露試験場の測点 No.2-1 および No.2-2 の結果を用いることとした。

3.3 計算結果および考察

(1) コンクリート中の塩分浸透量の計算結果

図-12 および 13 は、現地調査でコア採取を行った 2013 年 10 月 25 日の塩分浸透量の分布を表したものである。

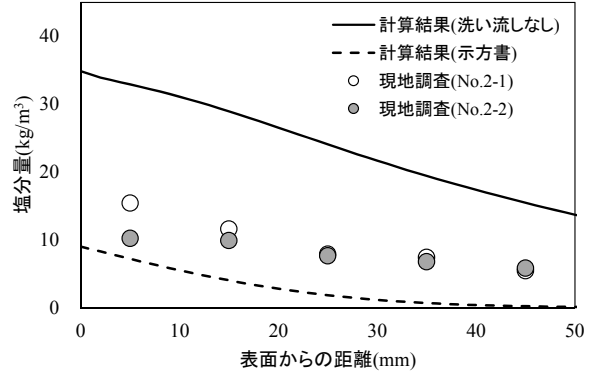


図-12 塩分浸透量の計算結果(洗い流しなし)

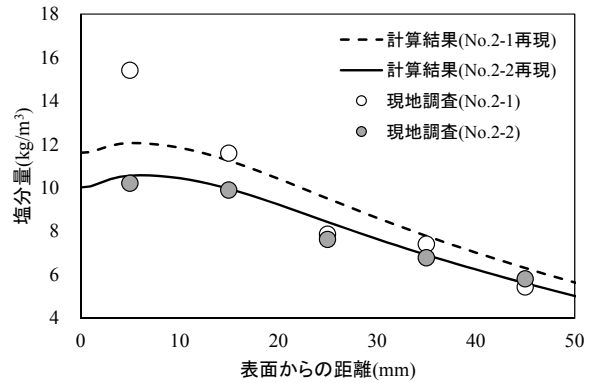


図-13 塩分浸透量の計算結果(洗い流し考慮)

図-12 は、降雨による洗い流しがないと仮定して、構造物表面の到達塩分量がすべてコンクリート中に浸透した場合のケースである。図の実線は本計算モデルで計算した結果であり、破線はコンクリート標準示方書¹⁾に示す方法で計算した結果である。示方書の方法での計算条件は、表面塩分量 c_0 が 9.0 kg/m^3 、見かけの拡散係数が橋桁のコンクリートの配合 $W/C=33.6\%$ であることから $0.16 \text{ cm}^2/\text{年}$ とした。ただし、配合 W/C は暴露試験場の架台の値が不明であったことから、橋桁と同様と仮定した。

図に示すように、塩分浸透量は、表面からの距離に対して一様に減少する傾向がある。塩分量はコンクリート表面で最大値となっているが、表面付近の塩分量の急激な増加は見られてない。これは、2013 年 10 月 25 日の数か月前から表面に供給される到達塩分量が少ない状態が続くためである。破線で示す示方書の方法では、調査結果に対して塩分浸透量が過小となる傾向が見られた。

図-13 は降雨による洗い流し効果を考慮したケースの計算結果である。図の破線は測点 No.2-1 を再現したものあり、実線は No.2-2 を再現したものである。図に示すように、塩分浸透量は、洗い流し効果を考慮しないケースと比較して大きく減少している。計算結果は洗い流しの効果を追加することで、測点 2-1 では塩分浸透量分布の傾向が若干ずれているが、測点 No.2-2 の結果では十分に再現できている。

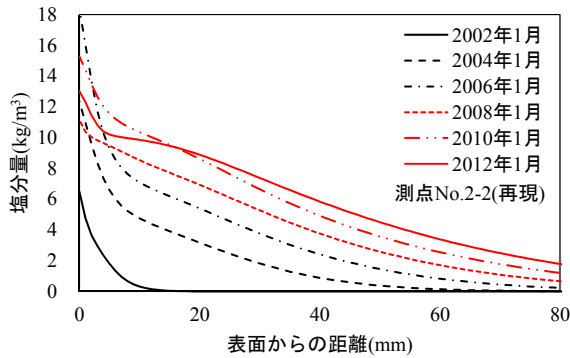


図-14 塩分浸透量の時系列変化(2年間隔)

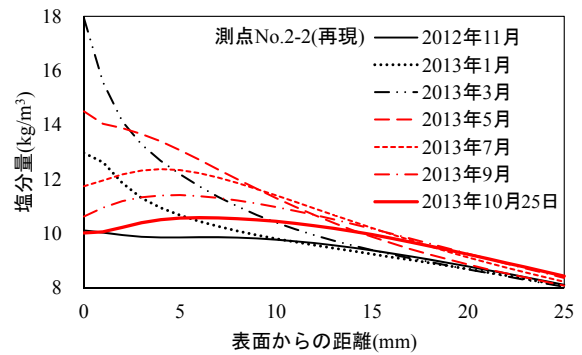


図-15 塩分浸透量の時系列変化(2ヵ月間隔)

(2) 塩分浸透量の時系列変化

図-14は、コンクリート中の塩分浸透量の再現計算結果を2年間隔で示したものである。図に示すように、塩分浸透量の全体的な分布は、経過年数が長いほど大きい値を示す傾向が見られる。また、2008年1月以降では、表面付近の塩分量は2006年1月より減少する傾向がある。これは、2005年の間に到達塩分量がこの12年間で最大となっており、その影響で2006年1月の表面付近の塩分量が大きくなっているためである。

図-15は、コア試験体を採取する直前の1年間におけるコンクリート中の塩分浸透量を再現計算した結果である。図より、冬季の1月および3月で、表面付近の塩分量が増加しており、その後は10月25日まで減少する傾向が続いている。これは、コンクリート表面の到達塩分量と降雨による洗い流し効果の時間的な変動による影響であり、塩分浸透量が到達塩分量の変動と同様の傾向を示していることがわかる。この結果から、測点No.2-2および2-3の現地調査で見られた表面付近の塩分浸透量の減少を説明することができる。

ただし、今回の解析では、塩分浸透量に影響を及ぼす項目として、降雨による洗い流し効果のみを検討したものである。実際では、コンクリート内部の品質差、中性化、水分の移動等が総合的に影響する現象であるため、今後、それらを含めた解析およびその検証が必要である。

5. 結論

実構造物における外部環境条件の時系列変化が塩分浸透量に与える影響について検討を行った。その結果、実構造物における塩分浸透量は、到達塩分量と降雨による洗い流しの時系列的な影響を受けて変化していることが確認できた。さらに、外部環境条件として到達塩分量と降雨による洗い流し効果を考慮した計算モデルの計算結果から、外部環境条件の時系列変化とコンクリート中の塩分浸透量の関係について説明できることが示された。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費「コンクリート構造物の高精度な長期供用性予測に資する環境作用評価システムの開発」(研究代表者：下村 匠，課題番号：25289131)及び「塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の表面到達塩分の予測システムの開発」(研究代表者：中村文則，課題番号：26870810)の一環として行ったものである。また、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所から現地調査の貴重なデータの提供を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp.172-173，2013
- 2) ソーンウィーン，山田義智，大城 武，長嶺健吾：コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.801-806，2004.7
- 3) 佐伯竜彦，竹田光明，佐々木謙二，嶋 毅：飛来塩分環境の定量評価に関する研究，土木学会論文集E，Vol.66，No.1，pp.1-20，2010.1
- 4) 養毛宏明，石田哲也，石川智行：飛来塩分作用下におけるコンクリート表面での塩化物イオン流束モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.886-891，2014.7
- 5) 山田文則，細山田得三，下村 匠：海岸に隣接した構造物周辺の飛来塩分の発生・輸送過程とその長期的な予測計算，海岸工学論文集，第54巻，pp.1216-1220，2007.11
- 6) 中村文則，下村 匠，生田麻実，細山田得三：数値シミュレーションを援用した構造物各部位の到達塩分量の予測手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.775-780，2015.7