

コンクリート構造物の環境劣化予測に適用した サイバー空間シミュレータの開発

櫻井 真希・中村 文則

1. はじめに

近年、数値解析技術とパソコンの性能の進歩とともに、コンクリート構造物の劣化過程に関する予測解析技術も高度化されている。既往研究では、コンクリート内部の劣化促進物質(主に水分と塩分)の移動過程に関する予測モデルの研究が盛んに行われ、予測精度が向上している。さらに、その表面境界条件となる外部環境作用からコンクリート内部への劣化促進物質の移動過程を統合した予測モデルの開発が行われている。例えば、Wattanapornprom¹⁾らは、構造物外部の塩害環境作用とコンクリート内部の物質移動の予測モデルを統合したマルチスケールモデルを提案している。花岡²⁾は、コンクリート外部・内部の物質移動過程の予測モデルをそれぞれパッケージ化したソフトウェアとして、コンクリート構造物の長期性能照査支援ソフトウェア LECCA の活用例を報告している。

しかしながら、実構造物の3次元的な形状に応じた外部環境作用とそれに応じたコンクリート内部の物質移動過程を統合して予測した研究事例はほとんどないのが現状である。構造物を含めた実空間を3次元で正確に再現し、それを利用して構造物外部の自然環境作用とコンクリート内部の物質移動過程を予測できれば、将来的に、コンクリート構造物の維持管理の高度化につながる技術となる。

本研究では、急速に発達している3次元デジタル空間を利用して、実構造物を再現した空間において塩害環境作用からコンクリート内部の物質移動過程を統合して予測できるサイバー空間シミュレータの構築を行った。さらに、構築したシステムを利用して、自然環境作用を変化させた数値実験を実施し、コンクリート内部の物質質量の変化について考察を行った。

2. サイバー空間シミュレータの構築

2.1 システムの概要と機能

サイバー空間シミュレータは、空間情報工学分野で利用される3次元形状計測技術とデジタル空間(仮想空間)技術に、既往研究で開発された数値シミュレーションの予測技術を統合したものである。

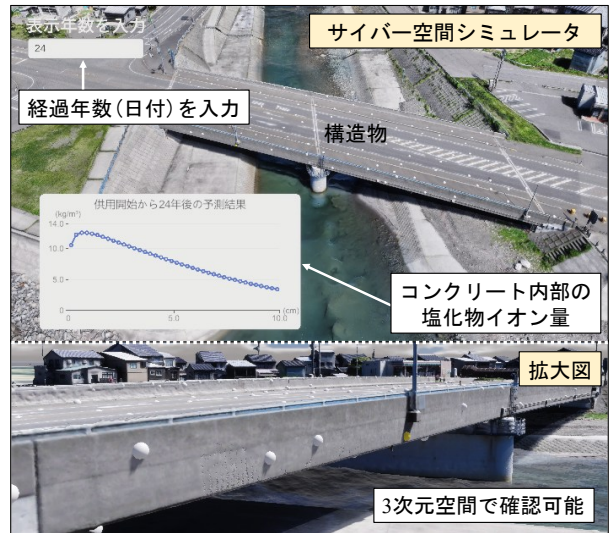


図-1 サイバー空間シミュレータ

これらの技術を統合して利用することにより、3次元デジタル空間内に実空間の構造物を再現するとともに、その中で自然環境作用からコンクリート内部の劣化促進物質(主に水分と塩分)を予測できるようにしたものである。

構築したサイバー空間シミュレータで、コンクリート構造物を含めた実空間を再現した事例を図-1に示す。図に示すように、本システムを利用することで、実空間を正確に再現したデジタル空間を構築し、構造物を確認することが可能である。さらに、コンクリート内部の劣化促進物質の分布なども取得できるようになっている。

2.2 サイバー空間シミュレータの全体構成

サイバー空間シミュレータの全体構成を図-2に示す。本システムは、図のように2つの機能で構成されている。1つ目は、デジタル空間を利用した実空間の再現とそれを可視化・操作する機能である。この機能は、測量やCAD図面などの実空間で得られたデータを使用して、デジタル空間内に実構造物を再現し、3次元的に確認できるようにしたものである。

2つ目は、デジタル空間内に再現した仮想的な実構造物に作用する自然環境とコンクリート内部の物質移動過程を予測する機能である。この機能は、既往研究で確立されている数値シミュレーションを利用し、デジタル空間内で、自然環境作用に応じたコンクリート内部の水分や塩分量(塩化物イオン

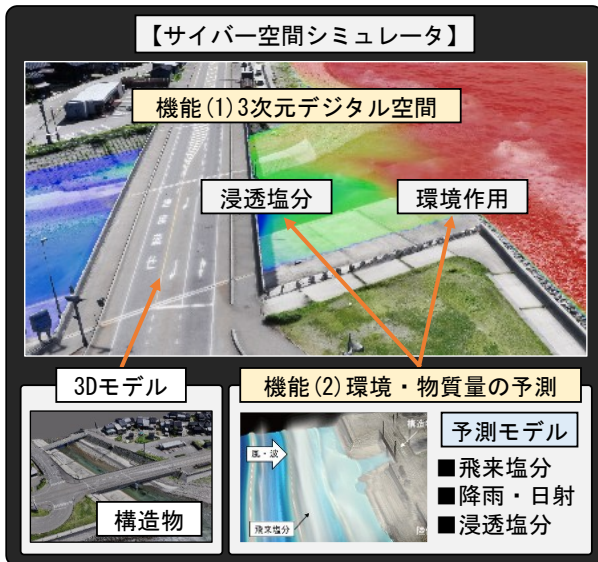


図-2 サイバー空間シミュレータの全体

量)を予測できるようにしたものである。各機能の構築方法について、以下に説明する。

2.3 デジタル空間を利用した実空間の再現機能

3次元デジタル空間の構築は、増田らの既往研究³⁾を参考にソフトUnityを使用して行った。このソフトは、プログラム言語C#のコードを実装することで、機能を追加・拡張できるようになっている。

コンクリート構造物の塩害劣化予測に適用できるようにするために、コンクリート橋梁の3次元構造物モデルの実装と操作・表示などの機能の追加を行った。コンクリート橋梁モデルの実装は、周辺地形を含めた構造物形状データを構築し、デジタル空間内に入力する方法で実施した。追加した機能は、以下の機能1)~4)である。

- 1) キーボード・マウスによる視点の移動・回転
- 2) 時系列な予測のための日時の入力機能
- 3) 自然環境作用の計算結果の可視化機能
- 4) コンクリート内部の塩化物イオン量のグラフ表示

これらの機能は、デジタル空間内での移動や日時に応じた自然環境作用とコンクリート内部の塩化物イオン量を確認できるようにするためのものである。

2.4 環境作用とコンクリート内部の物質量の予測機能

(1) 対象とした自然環境作用の項目

沿岸部に設置されたコンクリート構造物は、海城から発生した飛来塩分が構造物表面に到達し、その後、降雨・結露などの水分が作用することによって洗い流される。そのような作用が繰り返されることにより、コンクリート内部に塩分が浸透・蓄

積される。そのため、以下の自然環境作用1)~3)を対象とした。

- 1) 波浪・風況を含めた飛来塩分の発生・輸送・到達
- 2) 構造物に作用する降雨粒子の到達
- 3) 日射作用とその日射エネルギーによるコンクリート表面・内部の熱伝導現象

自然環境作用1)~3)は、既往研究で開発された予測モデルを利用して予測を行った。予測解析では、事前にすべての予測計算を実施し、その計算結果をシステム内に保存する方法とした。

自然環境作用1)の波浪・風況および大気中の飛来塩分の予測は、中村らの既往研究⁴⁾で開発された数値シミュレーションを利用した。このモデルは、海域の波浪と風に応じた飛来塩分の発生から輸送過程を3次元空間で予測できるものである。大気中から構造物表面への飛来塩分の到達量の予測は、大気中の塩分量と構造物の表面に到達する塩分量が、線形的な関係であると仮定して予測を行った。コンクリート表面に到達する塩分量は、構造物の格子の1格子外側にある大気空間格子の平均塩分量の値を既往研究⁴⁾を参考に1/20にして計算した。

自然環境作用2)の降雨作用は、大気中の風によって影響を受ける現象であることから、大気中の風の場と降雨粒子の移動・到達過程を連携した予測モデルによる計算を行った。風の場の解析は、非圧縮性流体を仮定した3次元N-S方程式モデルである。降雨粒子の予測は、中村らの既往研究⁵⁾を参考に、降雨を球体の粒子として仮定し、その球体に作用する風の抵抗と慣性力、粒子自体の自重による落下速度のつり合いから計算を行った。降雨粒子の構造物表面への到達は、構造物壁面の各面を20分割し、降雨粒子が到達した面を判定した。今回の解析では、分割した壁面に1粒子でも降雨が到達した場合に、その壁面全体に降雨が作用したと判定した。そのため、壁面に作用する降雨量の算定は行っていない。

自然環境作用3)の構造物に作用する日射作用の計算は、太陽と構造物の位置から、太陽に対する方向を算出し、その後、遮蔽物による影の形成範囲の計算を行った。日射、気温によるコンクリート表面と内部の温度変化の解析は、増田らの既往研究³⁾を参考に、1次元非定常熱伝導方程式で行った。

2) コンクリート内部の物質移動の予測モデル

自然環境作用に応じたコンクリート内部における水分および塩化物イオンの移動過程は、Hienらの既往研究⁶⁾で報告されている予測モデルを利用



図-3 構築した3次元構造物モデル

した。計算では、構造物表面に多数の点(246点)を配置、表面に対して法線方向の1次元空間で予測解析を行った。予測モデルの表面境界条件となる表面塩分量と降雨作用による水分量の供給は、事前にシステム内に保存しておいた計算結果を入力する方法とした。降雨作用については、降雨が作用したと判定された場合に、コンクリート表面が飽和状態になると仮定して計算を行った。コンクリート内部の温度は、熱伝導方程式による内部温度の計算結果を各計算格子に設定した。

3. サイバー空間シミュレータの実構造物への適用

3.1 対象とした実構造物

対象とした実構造物は、日本海沿岸部の新潟県に設置されている名立大橋である。この構造物は、汀線から50m程度の位置に設置されており、冬季に飛来塩分の作用を受ける特徴がある。橋桁の寸法は橋長75.3m、桁幅21.9mである。構造物の供用開始は2001年11月である。

3.2 周辺地形を含めた実構造物3次元モデルの構築

3次元デジタル空間に配置するための実構造物の3次元モデルは、フォトグラメトリーによる方法で構築を行った。使用したソフトは、3Dモデルの構築で幅広く利用されているAgisoft Metashapeを利用した。具体的には、UAVによって現地の画像を取得し、画像からソフトを利用して点群データを生成し、それをメッシュ化して3次元形状モデルを構築する方法である。構築したモデルは、3Dファイル形式(FBX形式)で保存した。

3次元構造物モデルを構築するための画像は、構造物を中心に410m×270m程度の範囲において、UAV(DJI製Mavic3 pro)を飛行させ、2361枚の画像(有効解像度20MP)を撮影した。取得した画像の中

表-1 熱伝導解析用の計算設定パラメータ

項目	記号	単位	設定値
日射量	太陽係数	J_0	W/m^2 1367
温度解析 (熱伝達)	コンクリートの密度	ρ	kg/m^3 2400
	コンクリートの比熱	c	$J/(kg \cdot ^\circ C)$ 1050
	コンクリートの熱伝導率	k	$J/(m \cdot ^\circ C \cdot s)$ 2.6
	計算格子間隔	dx	m 0.002
	計算時間間隔	dt	s 1.8

表-2 コンクリート内部の物質移動の計算条件

項目	単位	設定値
水セメント比	—	37.4
初期細孔湿度	%	95
養生期間	day	28
計算深さ	mm	400
計算格子間隔	mm	2.5
計算時間間隔	hour	1

で、不鮮明な画像などを除外し、最終的に2303枚の画像を使用した。構築した3次元構造物モデルを図-3に示す。

3.3 自然環境作用とコンクリート内部の計算条件

(1) 大気中の飛来塩分と到達塩分量の予測計算

飛来塩分の予測は、中村の既往研究⁴⁾で実施された風と波浪条件を変化させた990ケースの大気中の飛来塩分の計算結果を使用した。さらに、この結果から、橋桁表面の到達塩分量の算定を行った。これらの結果を、風況と波浪条件別に整理し、サイバー空間シミュレータ内に保存し、使用できるようにした。

(2) 橋桁表面への降雨粒子の到達判定の予測計算

降雨粒子の移動過程の計算は、風向が16方位、風速が2001年1月～2025年6月の風速を風向16方位別に抽出し、各方位の風速分布を累積頻度0-30%、30-60%、60-100%の3区分に分類して代表化した。降水量は、過去の降雨強度の観測結果を整理し、出現率から0.5～2.0mm(77.9%)と2.5mm以上(22.1%)の2区分で代表化した。計算ケースは、降雨量が2ケース、風向が16ケース、風速が3ケース、無風時を含めた合計98ケースである。計算に設定した降雨粒子数は50万個であり、計算領域の上空に配置した。

(3) 日射作用とコンクリート内部の熱伝導予測計算

日射作用に応じたコンクリート表面と内部の熱伝達量の計算に設定したパラメータを表-1に整理した。

(4) コンクリート内部の塩化物イオンの予測計算

コンクリート内部の水分・塩化物イオン量の計算は、自然環境作用の計算結果を表面境界条件と

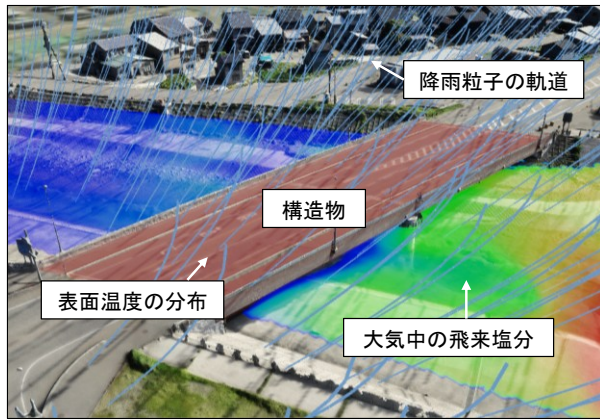


図-4 自然環境作用の予測結果

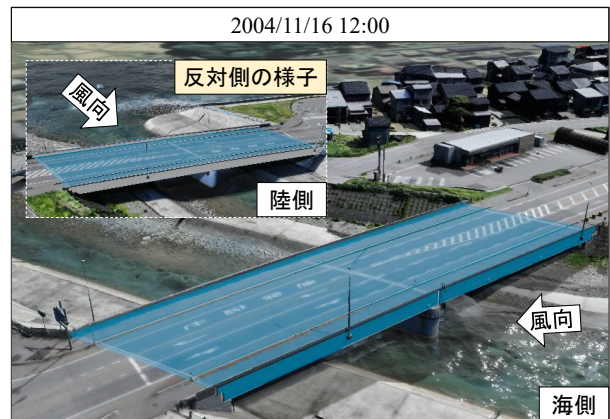


図-6 降雨粒子の到達面の判定結果

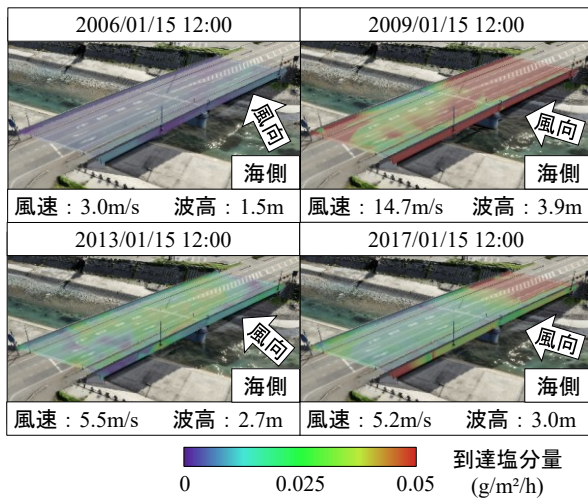


図-5 到達(表面)塩分量の予測結果

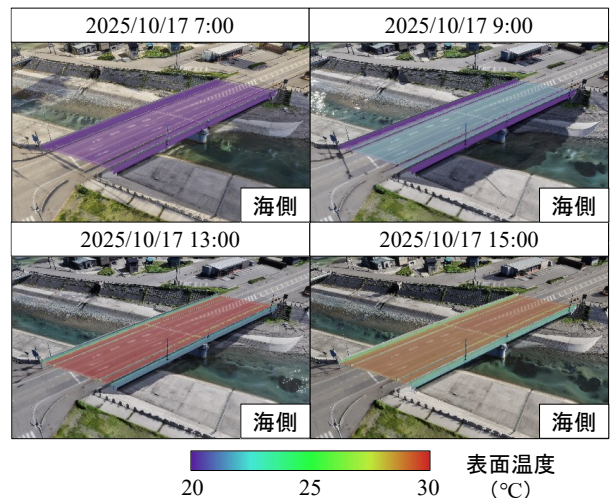


図-7 日射による表面温度の計算結果

して入力する方法で行った。計算に設定したパラメータを表-2に示す。

3.4 サイバー空間シミュレータの予測期間と保存データ

サイバー空間シミュレータの予測期間は、構造物の供用が開始された2001年11月～2025年10月31日の期間である。時間間隔は1時間間隔とした。この期間の日時に応じた実空間の気象・波浪条件のデータから、自然環境作用の予測を行うため、これらのデータの観測結果の取得とシステム内への保存を行った。

気象条件のデータは、気象庁が公開しているアメダスの観測結果を利用した。観測点は大潟観測点である。取得したデータは、風向・風速、降水量、気温、日照時間、湿度である。波浪条件のデータは、国土交通省港湾局が公開しているNOWPHASのデータを利用し、有義波高のデータを取得した。観測点は直江津港観測点である。

3.5 サイバー空間シミュレータによる環境作用の予測結果

図-4は、サイバー空間シミュレータで予測した

自然環境作用の予測結果である。図は、日射作用と橋桁表面温度、大気中の飛来塩分量と降雨粒子の作用状況を表示したものである。図の橋桁周辺で色が変化している部分が、大気中の飛来塩分量の分布であり、配色が緑色から赤色になっている塩分量が大きい方が海側である。橋桁表面が赤色になっているが、これは橋桁の表面温度を示したものである。橋桁周辺の水色の線状のものは、降雨粒子が移動した軌跡であり、橋桁に作用する降雨を確認することができる。

図-5は、橋桁表面の到達塩分量を予測した結果である。図は、2006年、2009年、2013年、2017年の1月15日12:00の結果である。図に示すように、各年で、橋桁表面の到達塩分量に差があることがわかる。2009年の予測結果では、他の日と比較して到達塩分量が全体的に大きい傾向が見られる。また、2009年と2017年の結果では、2009年の到達塩分量が全体的に大きくなっているが、これは風速が大きいためである。

図-6は、降雨粒子の到達した橋桁壁面を示した結果である。図の青色の部分が、橋桁の表面に降雨

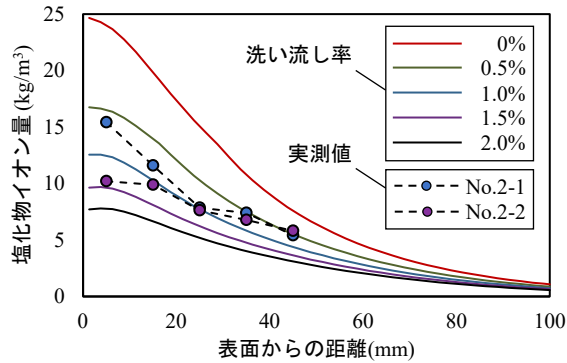


図-8 降雨作用による洗い流し率

粒子が作用したと判定された範囲である。図の白色の破線で囲まれた部分は陸側の様子を示している。図より、降雨の作用範囲が橋桁の海側の壁面と陸側の壁面で異なっている。これは、橋桁周辺の風の作用が関係しており、2004年11月16日12時時点での風が海側からとなっているためである。

図-7は、日射による橋桁の表面温度の分布を示したものである。図の2025年10月17日7:00の結果では、日射作用をほとんど受けていないため、橋桁の表面温度が全体的に低い状況である。その後の13:00、15:00の結果では、日射作用によって徐々にコンクリート表面に熱エネルギーが供給され、全体的に温度が高くなっていることが確認できる。13:00以前の結果では、海側壁面は日射の影響を受けていないため、橋桁上面と比較して表面温度が低い一方で、15:00の結果では、海側壁面が日射の影響を受けるため、他の時間帯と比較して表面温度が高くなっていることが確認された。

これらの結果から、橋桁周辺の自然環境作用を時空間的に3次元デジタル空間で可視化することが可能であり、サイバー空間シミュレータを利用して、コンクリート構造物に作用する自然環境を確認および評価できることが明らかになった。

3.6 環境作用に応じたコンクリート内部の物質量の予測

(1) 降雨による表面塩分量の洗い流し効果の検討

図-8は、自然環境作用に応じたコンクリート内部の塩化物イオン量の計算結果を示したものである。図の洗い流し率は、降雨作用によるコンクリート表層部の塩化物イオン量の1時間当たりの減少

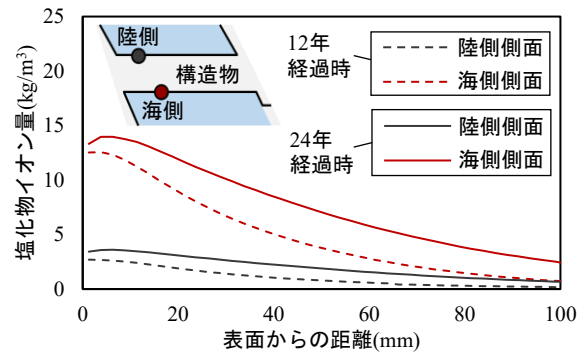


図-9 海側と陸側の塩化物イオン量の計算結果

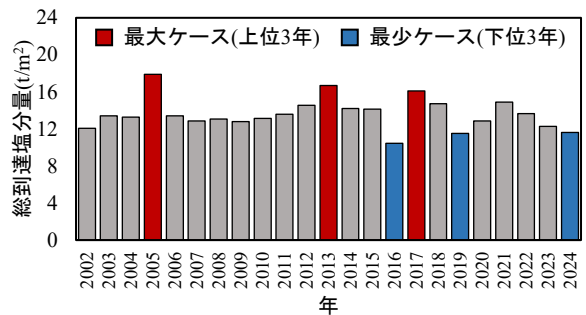


図-10 各年の飛来塩分の作用量の合計値

率である。図の丸印は、上図の構造物近傍に位置する暴露試験場から採取したコンクリート供試体の塩化物イオン量の分析結果である。供試体は、橋梁と同時期に製作されたコンクリートから採取したものであり、暴露期間は約12年間である。

図に示すように、計算は、降雨による洗い流し率0.5~1.5%を設定した条件で、コンクリート供試体の結果とほぼ一致している傾向があることがわかる。この結果から、降雨による洗い流し率は1.0%を設定することにした。

(2) コンクリート内部の塩化物イオン量の予測結果

図-9は海側と陸側の塩化物イオン量の分布を整理した結果である。図中の点線は12年経過時、実線は24年経過時の結果を示している。図から、コンクリート内部の塩化物イオン量は、海側側面のほうが陸側と比較して大きくなっていることが確認できる。これは、橋桁表面に作用する塩化物イオン量が、24年間を通して海側側面のほうが大きいためである。また、24年経過時の塩化物イオン量は、表面から5mm程度の範囲で、12年経過時の値と近い結果となっている。これは、コンクリート表面の飛来塩分の供給と降雨作用の洗い流しなどによる塩分の損失により、表層部の塩化物イオン量が平衡状態になったためであると考えられる。

4. 自然環境作用の変化を想定した数値実験

4.1 自然環境作用の設定条件

構築したサイバー空間シミュレータを利用して、橋桁に作用する自然環境作用の変化を想定した予測計算を実施し、コンクリート内部の浸透塩分量の検討を行った。自然環境作用の変化は、橋桁表面に作用する飛来塩分が大きい条件と少ない条件の2ケースを想定した。各予測ケースの風・波浪条件の設定は、図-10のように橋桁全体に到達する塩分量を各年で整理し、上位と下位の3年分を抽出し、それを繰り返し24年間作用させる方法である。

飛来塩分が大きいケース(最大塩分ケース)では、橋桁に作用する到達塩分量が大きかった2005年、2013年、2017年の3年間とした。飛来塩分が少ない条件(最少塩分ケース)では、2016年、2019年、2024年とした。これらの3年間の気象・波浪条件を1時間間隔で、8回繰り返すことで24年を予測した。また、各年は前年11月1日から10月31日までを1年間として扱った。

4.2 コンクリート内部の塩化物イオン量の予測結果

図-11は各ケースにおけるコンクリート内部の塩化物イオン量を予測した計算結果である。図に示す通り、コンクリート内部の浸透塩化物イオン量は、飛来塩分の作用が最大ケースと最少ケースで大きく差があり、表面から50mm位置で最大ケースのほうが1.4倍程度大きい値となっている。実環境ケースでは、表面から20mm程度までの表面に近い範囲で最少ケースに、表面から60mmより深い位置で最大ケースに近い値を示している。これは、自然環境作用に応じた表面塩化物イオン量の時間的な変動が関係していると考えられる。

図-12は、コンクリート表層部の塩化物イオン量の予測結果を示した時系列分布である。図の黒色の線は実環境ケースであり、2001年11月1日から2025年10月31日までの実空間の風・波浪条件を用いて計算を行ったものである。図に示すように、実環境ケースは、経過年数が6年程度までは最大ケースと同程度の値であり、年数が21~24年までの期間では最少ケースに近い値を示している。この結果から、経過年数が短い段階で、コンクリート内部に塩化物イオンが大量に浸透し、その影響で表層から60~100mmの深い範囲で、実環境ケースの塩化物イオン量が大きくなったといえる。

以上より、構築した空間管理情報システムは、自然環境作用の変化を想定した環境条件の設定と、コンクリート内部の塩分浸透過程の予測に適用可

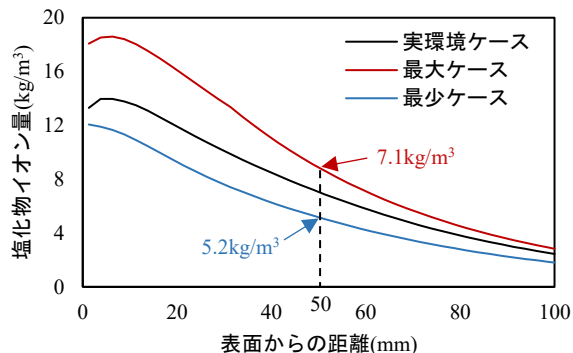


図-11 内部の塩化物イオン量の数値実験結果

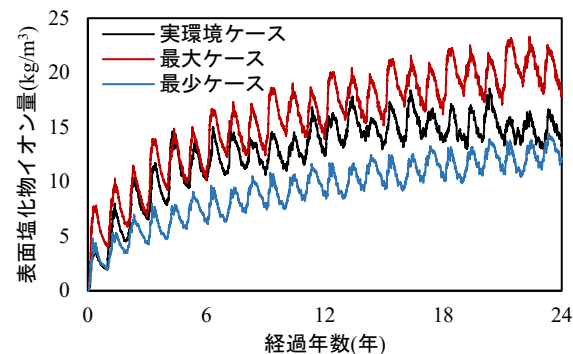


図-12 表面塩化物イオン量の時系列分布

能であることが示された。

5. 結論

本研究では、塩害劣化予測のためのサイバー空間シミュレータの構築を行った。その結果、構築したサイバー空間シミュレータを利用することで、自然環境作用とコンクリート内部の予測モデルを統合して使用することが可能であることが明らかになった。さらに、3次元デジタル空間内で、自然環境作用に応じたコンクリート内部の塩化物イオン量の時系列的な変化を確認でき、自然環境作用の変化を想定した数値実験が実施できることが示された。

今後は、構築したシステムを沿岸部に設置された複数のコンクリート構造物への適用を予定している。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費(基盤研究B)「鋼コンクリート複合構造物の補修補強後の性能の経時変化予測システムの開発」(研究代表者: 下村匠, 課題番号: 23H01490), 一般財団法人日本建設情報センター研究助成「社会基盤構造物の環境作用デジタルツインの構築」(研究代表者: 中村文則)で実施したものである。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 花岡大伸, 小池賢太郎, 富山 潤, 山口明伸: コンクリート構造物の長期性能照査支援ソフトウェア LECCA による長期性能評価と維持管理への活用例, *コンクリート工学*, 62 巻, 5 号, pp.383-388, 2024.
- 3) 増田 健, 中村文則, 山口貴幸, 下村 匠: 3次元仮想空間技術を利用した構造物の維持管理システムの提案とその検証, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.43, No.2, pp.907-912, 2021.7
- 4) 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
- 5) 中村文則, 山科裕海, 井向日向, 山口貴幸, 下村 匠: 構造物外部から表面部における降雨・飛来塩分の移動過程の予測解析とその検証, *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*, 第 21 巻, pp.7-12, 2021.10
- 6) N.T.Hien, R.Ohara and T.Shiomomura: Influence of Interfacial Void Around Reinforcement Due to Bleeding on Chloride Ingress and Its Interaction with Flexural Crack, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.39, No.1, pp.781-786, 2017.7