

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属	役職
	佐伯竜彦（さえきたつひこ）		新潟大学	教授
②研究 テーマ	名称	薄板モルタルとデータ同化手法を利用したコンクリート橋の3次元塩分浸透予測手法の開発		
	政策 領域	[主領域] 領域8	公募	タイプII
		[副領域]	タイプ	
③研究経費（単位：万円）	平成28年度	平成29年度	平成30年度	総合計
※H28は受託額，H29以降は計画額を記入，端数切捨。	1,029万円	1,742万円	1,534万円	4,305万円
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名，所属・役職を記入。なお，記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏名	所属・役職			
阿部和久	新潟大学・教授			
富山 潤	琉球大学・准教授			
宮口克一	デンカ（株）・主席研究員			
⑤研究の目的・目標	（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）			
<p>本研究は，飛来塩分環境下にあるコンクリート橋への塩分浸透状況を3次元的に把握するシステムを構築することを目的とする。このために，以下の要素技術を開発し，それを組み合わせる。</p> <p>(1)薄板供試体とデータ同化手法を用いて，飛来塩分量解析の境界条件を同定する手法</p> <p>(2)(1)を利用し，橋梁全表面における飛来塩分付着量，即ち，コンクリート中への塩分浸透解析の境界条件となる表面塩分濃度を求める手法</p> <p>(3)環境条件の影響を考慮した不飽和コンクリートへの塩分浸透予測手法</p> <p>(4)薄板供試体の効率的な製造・貼付け・回収方法</p>				

## ⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでの研究目標の達成状況とその根拠(データ等)を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。また、研究の目的・目標からみた研究計画、実施方法、体制の妥当性についても記入。)

### (1) 飛来塩分解析の効率化・高精度化

i) 3次元流体解析と飛来塩分濃度に関する移流拡散解析の効率化・高精度化

a) ソフトウェア開発による効率化

解析モデル作成や解析の条件設定、解析結果の確認を容易に行えるよう、可視化機能を有するソフトウェアの開発を進めている(図1)。今年度は、移流拡散解析のためのソフトウェアの開発を重点的に進めた。今後は、可視化機能の充実、WindowsをOSとするパソコン上で動作することを重視し、飛来塩分解析を簡易かつ迅速に実行できるよう、開発を進めていく。また、コンクリート橋の設計・維持管理に関わる実務担当者が本開発ソフトウェアを容易に使用するために、専用の計算パソコンシステムを構築し、実務者と協議しながら、ソフトの要求性能を上げていく予定である。

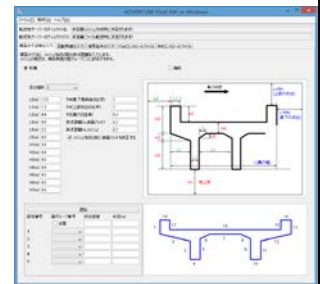


図1  
解析条件設定ソフトの  
データ入力画面

b) 流体解析および移流拡散解析の3次元化による付着塩分量推定の高精度化

風向の違いによる橋梁周辺の風況および塩分粒子の移流拡散をシミュレーションするために、3次元の解析を実施した。これにより、風向が異なる場合の風況をシミュレートでき、この結果を利用して、飛来する塩分粒子の付着状況を風向ごとに把握することが可能となった。また、付着量の大小を評価する機能を開発中のソフトウェアに組み込み、見た目だけでなく定量的に塩分の付着量の大小を評価することが可能となった。なお、図4、5に示すように、桁の側面・底面、手前・奥など、部位ごとに細かく塩分粒子の付着状況を把握することが可能である。今年度の研究目標としていた解析フローの構築・高精度化を達成できたと判断する。

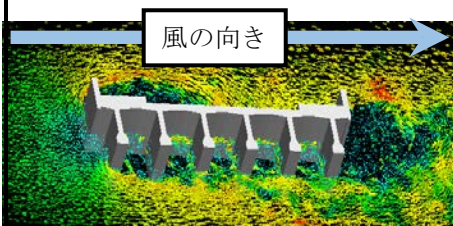


図2 流体解析結果  
(暖色が濃いほど風速が大きい)

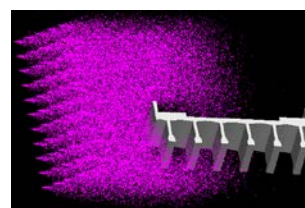


図63 塩分粒子の移流拡散解析  
(紫色の粒が塩分粒子を表す)

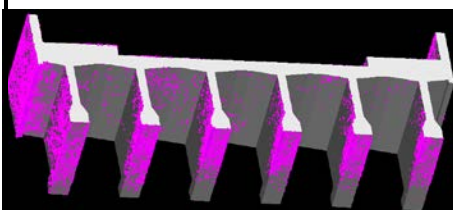


図4 橋の各部位における粒子付着状況

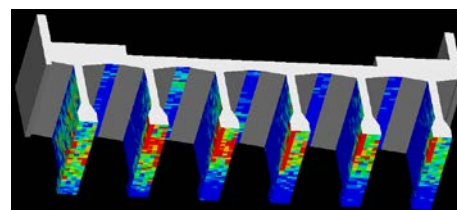


図5 橋の各部位における付着粒子数の大小  
(暖色が濃いほど付着粒子数が大きい)

## ii) 逆解析システムの高精度化

逆解析では、移流拡散解析で得られた付着粒子数と、既設橋で測定された実測値を利用して、飛来塩分濃度を定めるパラメータ  $\alpha$  と、 $\alpha$  を用いて推定される推定付着塩分量を算出する。今年度は、風向を考慮したことで、風向ごとにパラメータ  $\alpha$  を設定することが可能となった。 $\alpha$  を用いて推定された付着塩分量について、図6 に推定値と実測値の比較を、図7 に風向を考慮した場合としない場合の比較を示す。風向を考慮した逆解析を実施することで、実測のピーク値と同等の値を推定できるという性能を確認できた。

今後、逆解析に使用する実測値を、測定位置や数値の大小により選定・削減し、推定値の変化の傾向を把握し、薄板モルタル貼付位置の検討のためのデータを収集する。

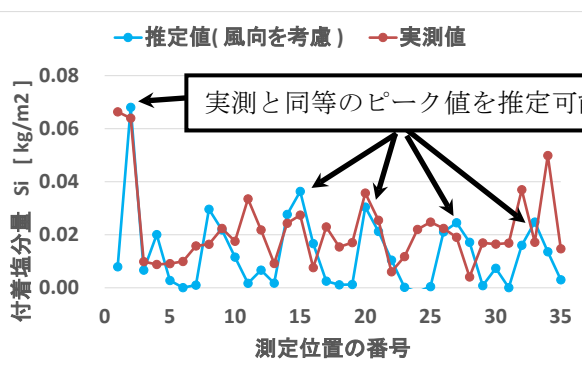


図6 逆解析結果 付着塩分量 推定値  
実測値との比較

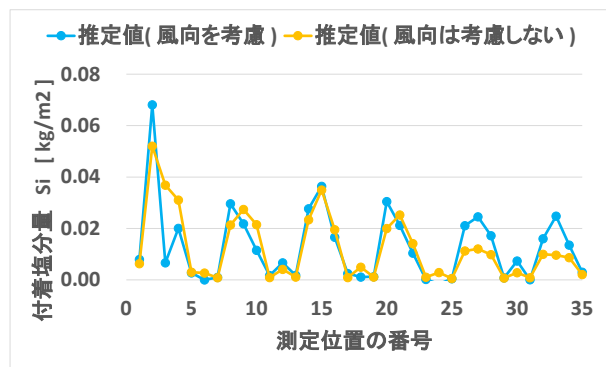


図7 逆解析結果 付着塩分量 推定値  
風向を考慮した場合としない場合の比較

## iii) 今後の展開

本研究の成果を、新設橋の設計の際に活用するために、橋の構造形式や形状・寸法を変化させた場合のシミュレーションデータを収集する。例えば、桁高一定として、桁間隔を変化させた場合の付着塩分量のデータを収集し、新規に設計する橋の形状や寸法と照らし合わせて、年間の付着塩分量をデータベースから推定できるようにする。これにより、流体解析や移流拡散解析などのシミュレーション解析が実施できない場合にも、本研究の成果が適用可能となる。

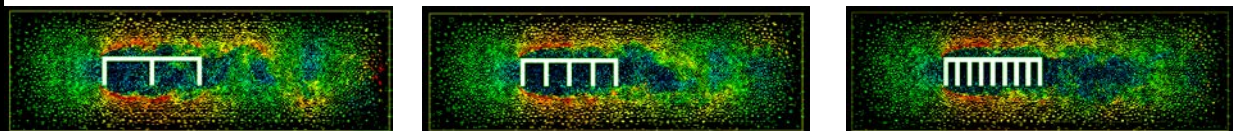


図8 特定の部位のみ形状・寸法を変化させた場合の風況の変化(流体解析結果)

## (2) 飛来塩分の付着・浸透過程のモデル化及び現地観測

### ① 飛来塩分付着・浸透過程のモデル化

コンクリート中への塩分浸透量は、飛来塩分量とともにコンクリートの内部環境、即ち、含水率の影響を受ける。従来は試験中の含水状態の変化の履歴を考慮できず、供試体回収時の含水率によって暴露中の含水率を代表させていた。今年度は、薄板供試体中の炭酸カルシウム生成量を測定することによって、二酸化炭素拡散係数を逆算し、さらにそこから暴露試験中の平均的な含水率を逆算し、それを「等価含水率」と定義した。下図は、10年以上暴露されたコンクリート供試体中への塩分浸透量を、同位置に数カ月暴露した薄板供試体の回収時の含水率と等価含水率を用いて推定した例である。図より、等価含水率を用いた推定の方が精度がよく、暴露試験中の含水率の変動履歴を逐次把握しなくても、等価含水率で適切な評価が行えることが明らかとなった。このことは、薄板供試体の含水状態から構造物中のコンクリートの含水状態を評価できることを示している。

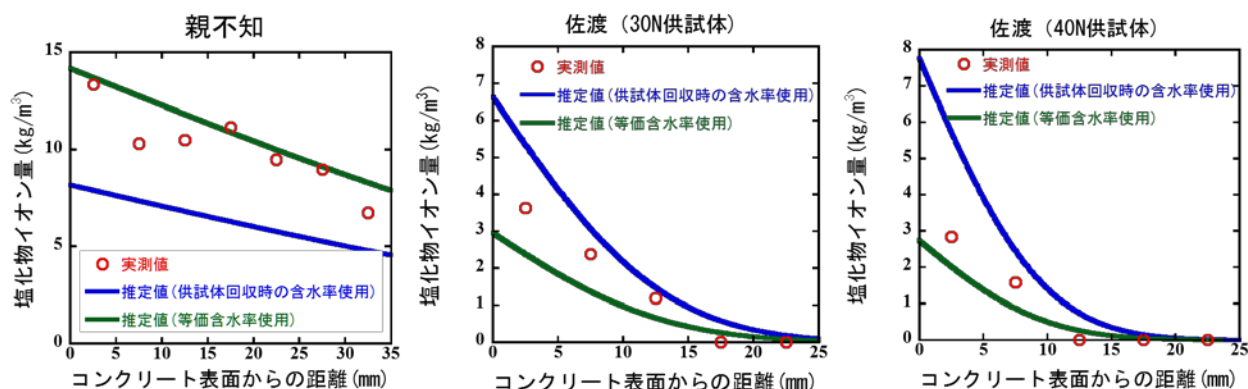


図9 薄板供試体によるコンクリートへの塩分浸透量の推定結果

なお昨年度の検討により、同一環境に置かれた薄板モルタル供試体の含水率とコンクリート表層部の含水率には高い相関があることが、種々の気象条件を入力データとしたシミュレーションにより確認されている（図10参照）。以上のことから、薄板供試体の含水率を求めことで、ある程度の精度で構造物中のコンクリートの含水率を、さらには、含水率の影響を受けた塩分拡散係数を推定できることになる。

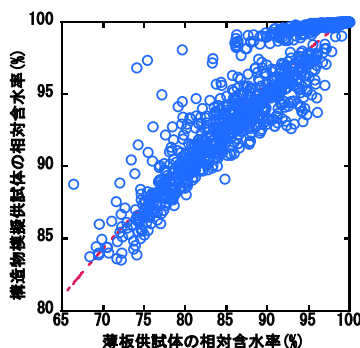


図10 薄板モルタル供試体の含水率とコンクリート表層部（0～1cm）の含水率の関係

ある期間にコンクリートに浸透する塩分量 $M_t$ は、下記の式で表すことができる。ここで、拡散係数は等価含水率から推定し、塩分浸透量も薄板供試体中への塩分浸透量から推定が可能である。したがって、表面塩分濃度 $C_0$ を逆算することが可能である。これにより、コンクリート中の塩分濃度分布を式(2)により計算することが可能となる。図9の表面濃度は、このようにして求めたものであり、実際の表面濃度さらには濃度分布を比較的精度良く再現できていることがわかる。

$$M_t = 2C_0 \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \quad (1)$$

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2)$$

## ②現地観測

a) 構造物部位ごとの詳細な塩害環境評価と解析の検証データ取得を目的として、橋梁各部位に薄板供試体を貼付けた(新潟県: 3橋, 沖縄県: 1橋)。回収は、平成29年3月中旬の予定である。対象橋梁の一例を下図に示す。

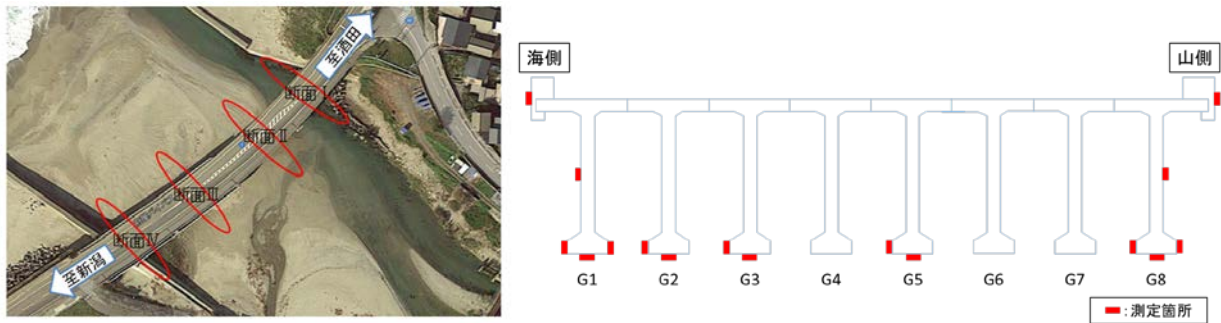


図11 府屋大橋(新潟県村上市)における供試体貼付け位置

b) 周辺地形、特に海岸条件(砂浜・岩礁、消波ブロックの有無、植生の有無、防波堤の有無)が飛来塩分量に及ぼす影響を評価することを目的とし、図12に示すように新潟県内の74橋のスパン中央の海側地覆側面に薄板供試体を設置した。また、土木学会348委員会とも連携して、同様の暴露試験を日本各地で行っており、これらのデータも利用することが可能である。供試体は平成29年3月に回収し、海岸条件を考慮したコンクリートの表面塩分濃度( $C_0$ )設定のための基礎データとする。着目する海岸条件の分類例を、図13に示す



図12 設置橋梁



図13 海岸条件の分類

### (3) 構造物中のコンクリートの不均一性の把握

構造物中のコンクリートの不均一性の基礎データを取得するために、薄板供試体の貼付けを行った構造物（栈橋）からコアを採取した。調査位置およびコア採取位置を図14、15に示す。今後、採取したコアで酸素拡散係数を測定し、実験室で作製した供試体の測定値のばらつきと比較し、施工の影響を明らかにする。さらに、打込み順序とコンクリートの品質について考察する予定である。



図14 調査対象位置

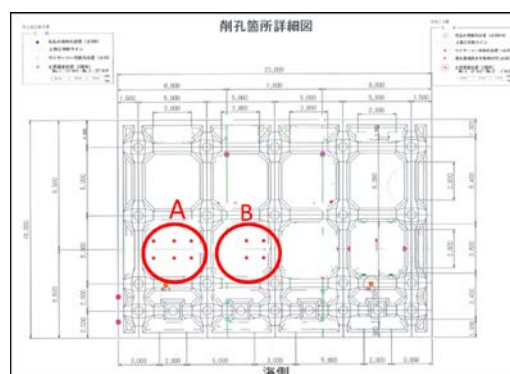


図15 コア採取位置

### (4) 薄板供試体の回収方法の改善

薄板供試体の構造物への貼付けは、供試体と同じ大きさの両面テープ（40×40mm）によって行っているが、接着力が強すぎて回収時に供試体が破損する場合があった。そこで、両面テープの大きさを30×30mm程度まで小さくすることで、回収時の破損を回避できることを見出した。

### (5) 実務における活用可能性検討

実橋のLCC試算に基づいて、本技術が実用化され、塩害環境が同定することができた場合の効果（コストメリット）を検討した。対象橋梁は、塩害による劣化が進行し、補修・補強が実施されている新潟大堰（昭和46年竣工，橋長242.7m，全幅員8.8m，プレストレス単純T桁橋）とした。現在，設計実務では，国土交通省土木研究所「ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同報告」に従って，維持管理計画が立案される場合が多い（以後，ミニマムメンテと呼称）。これに対して，堤ら（2005），秋山ら（2006）に示されているコンクリートの見かけの拡散係数のバラツキとコンクリート表面の塩化物イオン濃度のバラツキを考慮したフィックの拡散方程式の解から合理的な補修頻度を割出し（LCC期待値 $\pm 1\sigma$ ）を算出し，両者を比較した。また，参考として，新潟大堰の補修補強実績の費用も併記している。

Case1をみるとミニマムメンテは，安全側の配慮がなされていることが分かる。上記の橋梁規模の場合には，観測をして塩害環境を同定することにより，3~4億円程度のコスト縮減が期待される。これに対して，Case2厳しい塩害環境であると同定された場合（ここでは， $Co=9\text{kg/m}^3$ と仮定した）には，ミニマムメンテよりも短い頻度で予防的に補修し，補修費用をさらに2億円程度計上することを要求することが分かる。ここで計算したLCC期待値が新潟大堰の実績と同等であることを考えても，妥当な計算結果であると考えられる。塩害環境を同定することにより，合理的な補修頻度を設定することは，メリハリのある維持管理，投資計画を進める上で有効に機能することが試算された。

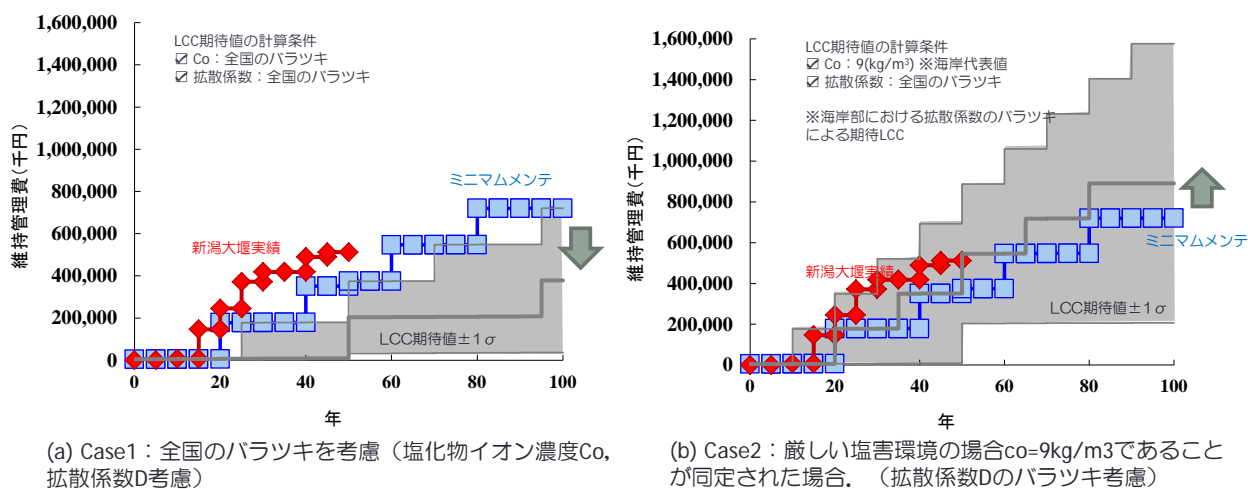


図16 LCC計算結果

#### <研究計画・実施方法・体制の妥当性>

本研究は、現地計測と数値解析の組合せでミクロな劣化外力を定量評価しようとするものである。解析手法の構築では、飛来塩分輸送モデルについて順解析の高度化と逆解析手法の高度化を行っている。また並行して、構造物表面への飛来塩分量到達量が把握された場合のコンクリート中への塩分浸透を予測するモデルを開発している。これらの解析モデルについては、基本的な部分は完成しており、進捗状況は順調である。また、現地計測については、モデルの構築と検証のための暴露試験を行っている。来年度は、上部工形状の影響に着目した暴露試験を行う予定である。さらに最終年度は、開発した手法を構造物管理者、現場技術者が容易に使用できるよう、解析ソフトのパッケージ化とマニュアルの整備を行う予定である。以上のことから、研究計画・実施方法は妥当であると言える。

上述のように、本研究は現場計測技術と数値計算技術を統合して検討を進めるものであり、コンクリート工学と計算力学の専門家が協力する体制が不可欠である。本研究のメンバーは、コンクリート工学：佐伯、斎藤、計算力学：阿部、紅露、山下、コンクリート工学と計算力学双方に精通している富山、さらに、設計論と観測データの統計処理を専門とする大竹が参画し、目的を達成するための理想的な体制がとられている。また、適宜、構造物管理者の協力を得て、暴露試験等を実施している。

#### ⑦特記事項

(研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の見通しや進捗についての自己評価も記入。)

本研究の根幹技術である薄板供試体による塩害環境評価は、様々な研究者により活用されており<sup>1)</sup>、一般的な環境評価技術となりつつある。さらに橋梁だけでなく、港湾構造物や海岸付近の法面吹付けコンクリート<sup>2)</sup>等にも適用されている。このため、本研究終了後に開発した技術が普及しやすい環境が整っていると言える。また、公益社団法人発明協会・平成27年度関東地方発明表彰発明奨励賞を受賞した<sup>3)</sup>。

1) 例えば、佐々木巖ほか：飛来塩分/付着塩分/浸透塩分の比較評価 - 駿河海岸での調査から - , コンクリート工学年次論文集, Vol. 38 , No. 1, pp. 861-866, 2016.

2) 窪塚大輔ほか：沿岸部におけるのり面構造物の塩化物量調査(報告), 土木学会第71回年次学術講演会公演概要集第5部, pp. 777-778, 2016.

3) [http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/chihatsu/H27/jusho\\_kanto/index.html](http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/chihatsu/H27/jusho_kanto/index.html)

#### <研究については見通しや進捗についての自己評価>

基本的な検討は終了しており、今後は実務に適用するための検討を行う予定である。研究は概ね順調に進んでいると評価できる。