

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

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27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	総合計
※端数切り捨て。 ※該当する研究期間のみご記入 下さい。	800万円	1,029万円	1,101万円	1,368万円	4,298万円
④研究者氏名	（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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（※平成31年3月31日現在）				
阿部和久	新潟大学・教授				
紅露一寛	新潟大学・教授				
斎藤 豪	新潟大学・准教授				
大竹 雄	新潟大学・准教授				
山下将一	新潟大学・技術職員				
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・目標を簡潔に記入下さい。）				
<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・目的の達成状況

本研究では⑤の目的を達成するため、新設構造物と既設構造物に分けて塩害環境評価および塩分浸透予測手法を構築した。新設構造物を対象とした手法では、まず、気象・海象条件を考慮した、従来手法より精度の良いコンクリート表面塩化物イオン濃度推定式を求めた。次に、飛来塩分輸送解析（順解析）の結果を類型化して、上部構造の形式別に表面塩化物イオン濃度の設定値を定めた。既設構造物を対象とした手法では、薄板供試体への塩分浸透量データを用いる逆解析手法を構築し、橋梁各部位における表面塩化物イオン濃度を推定可能であることを確かめた。また、供用開始直後に薄板供試体により部位ごとの塩害環境評価を行い、効果的な予防保全につながる現実的な方法を提案した。推定精度やユーザーインターフェースについては改善の余地があるものの、おおむね当初の目的を達成した。

佐伯は、研究代表者として研究の総括、塩害環境評価手法の構築、評価手法の検証を担当した。阿部・紅露・山下は、解析手法の構築を行った。富山・斎藤は、塩害環境評価手法の構築、評価手法の検証を担当した。大竹は、手法導入の利点をLCCの観点から評価した。宮口は、薄板供試体の製造・貼付け・回収方法の改善を担当した。

<外注>本プロジェクトで提案した橋梁上部構造の3次元モデルを対象とした塩害シミュレーション手法を実装した解析システムの効率化のための改良を（株）インサイトへ、周辺地形と対象橋梁の3D測量と点群データの作成は、（株）ナカノアイシステムおよび（株）オカベメンテに外注した。

## ⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

<FS採択時>

限られた測定結果からの塩害環境の同定の可能性や、推定精度について明らかとされたい。→特徴あるデータを用いることによって、少数の観測点で精度の良い推定ができることを明らかにした。

<H27評価>

1. 開発手法を橋梁の管理や新設橋の設計等の実務においてどのように活用するのかを明確にし、研究を実施されたい。→新設構造物向けと既設構造物向けに分けて手法を検討した。また、手法の活用シナリオを示した。

2. 実橋梁では、水分の滞留やコンクリート表面のひび割れ等も生じており、これらの影響も考慮すれば、さらに有用性が高まると思われる。→薄板供試体中の炭酸カルシウム生成量から部位ごとの水分供給条件とそれが塩分浸透に及ぼす影響を評価する手法を開発した。本研究は環境作用を評価する研究であるため、ひび割れの影響については考慮できていない。

<H28評価>

1. 実用化に向けて、風速、桁構造、塩分環境の地域特性、凍結防止剤の影響などを含め、パラメータ解析などにより標準化を検討する必要がある。→新設構造物を対象とした手法において、パラメトリックスタディの結果を類型化して、上部構造の形状別に部位ごとの表面塩化物イオン濃度の設定値を計算した。凍結防止剤については、劣化の進展によって漏水経路が変化する等のため、対

応できていない。

2. 降雨による塩分流出の影響も考慮する必要がある。→薄板供試体の炭酸カルシウム量から暴露期間中の平均含水率、さらには降雨による水の作用時間を推定し、塩分流出量を推定する手法を提案した。ただし、実構造物におけるデータで検証を行う必要がある。

3. 詳細で精度の高い塩分浸透予測法を使うメリットについて実務者にわかりやすくまとめられることを期待する。→LCCの比較を行った。

4. 道路管理者のニーズを踏まえた活用方法を検討していただきたい。→建設コンサルタントにヒヤリングを行い、活用シナリオに反映した。

<H29評価>

1. 海岸の状況、土地利用の状況、台風等の低気圧の影響、桁構造と位置などの因子は影響が大きいと考えられることから、この観点を踏まえた整理を行っていただきたい。→海岸状況および土地利用状況に関して検討したが、本研究の範囲では明確な傾向が得られなかった。台風時の飛来塩分量について検討し、沖縄ではその影響が無視できないことを確認した。桁構造の影響については、新設構造物を対象に解析結果を類型化した表面塩化物イオン濃度設定値を提案した。

2. データの精度とリスク管理の関係性について検討していただきたい。→提案した塩分浸透推定手法の精度について検討し、具体的な安全係数を提案した。

3. 精密に予測することについて、ニーズとのマッチングに留意し、実構造物に適用した場合の実務上のメリットを明確にしていきたい。→新設構造物向けと既設構造物向けに分けて手法を検討し、ニーズに対応した適用方法を示した。

4. 本技術の適用の範囲と精度を明らかにした使用条件の設定や結果の解釈の留意事項についてとりまとめていただきたい。→提案した塩分浸透推定手法の精度について検討し、具体的な安全係数を提案した。

### ③研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

#### (1) 新設構造物を対象とした塩害環境評価手法

新設構造物を対象とした塩害環境評価手法の構成は下記の通りである。

##### ① 海岸条件(気象・海象)の影響を考慮したコンクリートの表面塩化物イオン濃度推定手法

標高、風向、波エネルギーを考慮することによって離岸距離を補正した「補正距離」により、従来より精度の高いコンクリートの表面塩化物イオン濃度推定式を求めた(図1)。

$$C_0 = 109(x''')^{-0.74}$$

##### ② 橋梁上部構造各部位における表面塩化物イオン濃度推定手法

流体解析とランダムウォーク法を組み合わせた解析手法を用い、種々の風況でシミュレーションを行い、各部位の飛来塩分付着量を求めた。その結果を類型化し、部位による相対的な表面塩化物イオン濃度の設定値を提案した(図2)。各部位の表面塩化物イオン濃度の絶対値は、[①の推定式の値(海側地覆側面の値に対応)×部位ごとの相対値]で求めることができる。

#### (2) 既設構造物を対象とした塩害環境評価手法

① 供用直後の構造物の各部位に薄板供試体を貼り付け、塩化物イオン供給量の多い部位を早期に発見し、予防保全を行う。ただしこの場合は、供試体を貼り付けた位置のみの評価となる。

##### ② 逆解析を利用した手法

構造物に貼り付けた薄板モルタル供試体への塩分浸透量を利用して逆解析を行い、再度順解を行うことで各部位の表面塩化物イオン濃度の推定を行った。結果の一例を図3に示す。

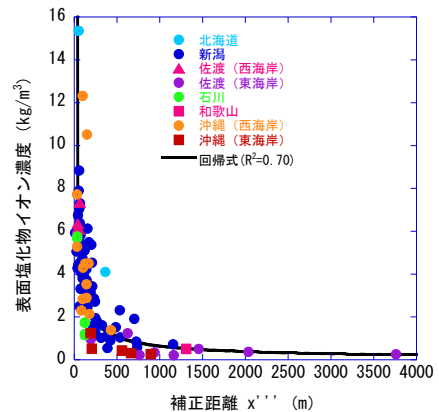


図1 補正距離と表面塩化物イオン濃度の関係

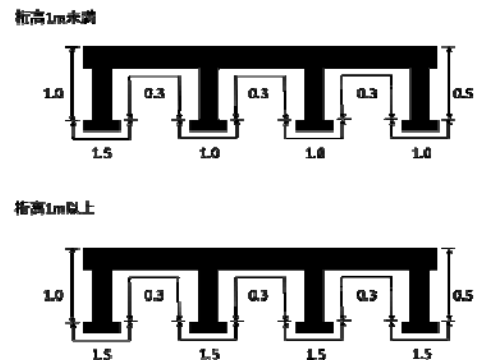
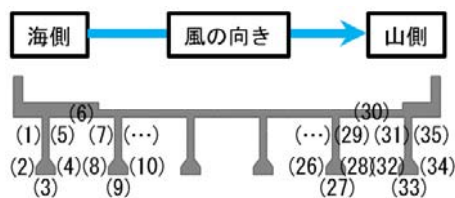
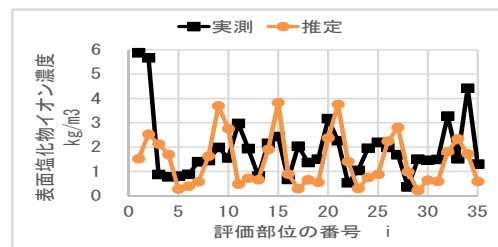


図2 部位毎の相対的な付着塩分量 (T桁橋の場合)



(a) 評価部位



(b) 推定値

図3 逆解析結果の一例

### ⑧研究成果（つづき）

#### （3）塩分浸透予測

（1）または（2）で示した手法によって得られた、構造物各部位における表面塩化物イオン濃度を用いて3次元塩分浸透解析を行う。解析結果の一例を示す。図4は表面塩化物イオン濃度の分布、図5は海側の桁2本の内部への塩分浸透状況である。

#### （4）道路管理実務における活用方法の検討

本研究で検討した手法の活用シナリオを、図7に示す。

補修履歴が分かっている実橋梁を対象として上記の4ケースについてライフサイクルコストを計算した。

①Case1：事後保全ケース（新潟大堰の補修実績の積み上げ）

②Case2：ミニマムメンテナンス橋梁ケース：『断面修復』による対応

③Case3-1：提案手法①：事前に塩害環境を把握してメンテナンス計画を立案。『表面被覆』による対応（全面補修）

④Case3-2：提案手法②：事前に塩害環境を把握して合理的なメンテナンス計画を立案。『表面被覆』による対応（部分補修；飛来塩分が集中している部分のみを想定）

下図に示されるように、劣化箇所を把握して補修箇所を限定することにより、対象橋梁程度の規模の橋では、100年で3億円程度のコストメリットがあることが予想される。

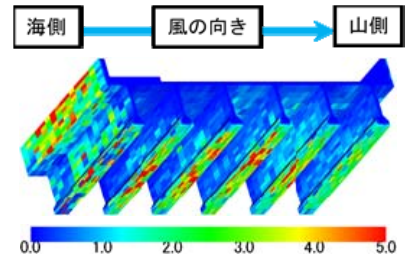


図4 表面塩化物イオン濃度分布の計算例

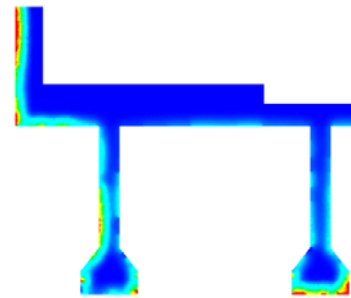


図5 塩分浸透の計算例

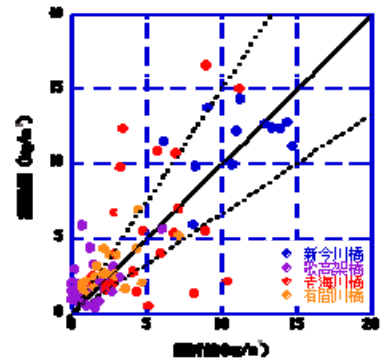


図6 実構造物における表面塩化物イオン濃度の実測値と解析値の比較

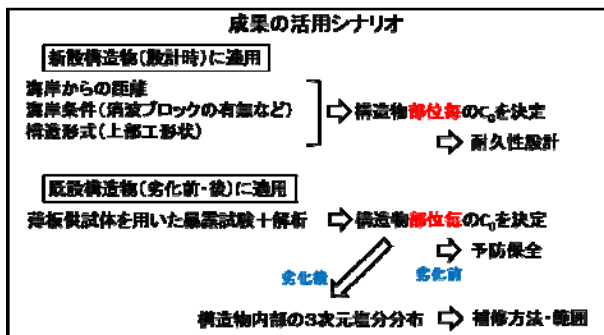


図7 成果活用のシナリオ

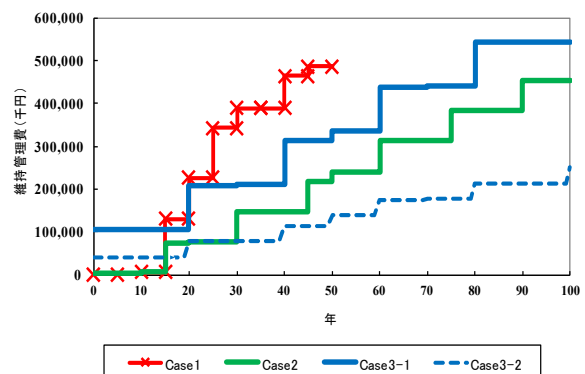


図8 LCC 試算例

## ⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限りません。)

- 1) 山下将一, 富山 潤, 阿部和久, 佐伯竜彦, 紅露一寛: 数値シミュレーションと逆解析によるコンクリート橋の付着塩分量推定, 土木学会第72回年次学術講演会, V-434, pp. 867-868, 2017.9
- 2) 山下将一, 富山 潤, 阿部和久, 佐伯竜彦, 紅露一寛: 風向を考慮した3次元数値解析によるコンクリート橋の付着塩分量推定, 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, Vol. 17, pp. 609-614, 2017.10
- 3) 秋山広太郎, 佐伯竜彦, 鈴木志朗: 海岸条件を考慮した飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会第73回年次学術講演会, V-048, 2018.8
- 4) 佐伯竜彦ほか: 飛来塩分環境下にあるコンクリートの表面塩化物イオン濃度評価式の検討, 土木学会論文集E2 (投稿中)

## ⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

### Web

新潟大学工学部社会基盤工学プログラムHPの研究プロジェクトで紹介  
(<http://www.eng.niigata-u.ac.jp/~doboku/project/index.html>)

## ⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

新設構造物を対象とした塩害環境評価では、これまでの手法より精度の良い表面塩化物イオン濃度推定式を提案した。また、解析結果を類型化した橋梁部位毎の表面塩化物イオン濃度の設定値を提案した。今後は、これらの成果の設計基準等への取入れを目指していく。また、短期的には、実際に薄板モルタル供試体による測定で塩害環境の厳しい部位に予防保全を適用する手法の普及・社会実装を目指す。北陸地方整備局、新潟県、新潟市に働きかけをしており、検証フィールド（実橋）の提供を受ける予定である。

既設構造物を対象とした塩害環境評価では、薄板モルタル供試体の測定値を利用した逆解析によりパラメータを同定し、順解析により構造物全体の表面塩化物イオン濃度推定、さらには塩分浸透解析を行う手法を開発した。本手法を利用して、建設コンサルタント（エヌシーイー（株））との共同研究を予定しており、新潟県発注の橋梁点検業務に薄板供試体を用い、数値解析で供試体設置位置以外の部分を補完することによって、点検の効率化と高度化に取り組む予定である。

課題としては、基礎的な検討しかできなかった降雨による塩化物イオンの洗い流しの影響の評価や構造物中のコンクリートの品質を考慮した塩分浸透予測手法の構築などがあり、今後、取り組む予定である。

## ⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

- ・国土交通省の調査で薄板モルタル供試体がいわれている（歌高架橋、能生大橋など）。
- ・2018年制定土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】において、薄板供試体による局所環境評価方法が下記のように記述された。  
「構造物の部位ごとの環境条件を評価する方法としては、現地に小型供試体を暴露する方法、解析的手法による方法なども提案されている。」
- ・研究だけでなく、実構造物の塩害環境調査に広く用いられている。（例えば、土木学会：塩害環境の定量評価に関する研究小委員会委員会報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ，No. 121参照）

### ⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

	自己評価	理由
研究目的の達成度	概ね達成	目的とした手法の主要な部分は開発できた。しかし、ユーザーインターフェースには検討の余地がある。
研究成果	概ね達成	実務に適用可能な成果が得られた。
今後の展望	普及が期待できる	一部、解決すべき課題もあるが、簡便で実用的な維持管理ツールとして普及が期待できる。
道路政策の質の向上への寄与	今後の貢献が期待できる	具体的な成果はこれからであるが、定性的な維持管理から定量的な維持管理への「質の転換」の契機となる研究と言える。塩害環境評価の一手法として、広く普及し始めている。
研究費の投資効果	十分にあった	研究成果や今後の道路政策の質向上への貢献を考えると、投資効果は十分にあったと言える。