

## 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（FS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	タイプII
		[副領域]		
③研究経費（単位：万円） ※受託金額を記入。	平成27年度 777万円			
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。） 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。 (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 (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 (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 (4)薄板供試体の効率的な製造・貼付け・回収方法				

## ⑥FS研究の結果

本年度のFS研究において行った各検討項目の内容と結果を以下に示す。研究の実現可能性を示すため、特に飛来塩分付着量の推定に関する順解析・逆解析手法の検討に重点を置いた。

### (1) 流体解析

本年度は基礎的検討を目的とし、橋梁周囲の風の解析領域を橋軸方向(奥行き) 2m の準二次元場として設定した。その下で、流体解析コード” ADVENTURE\_Fluid ” を使用して、風況の解析を実施した。

風速 5 m における解析結果(流速ベクトル図)を図-1に示す。暖色が濃いほど、風速が大きい。橋梁下面に着目すると、特徴として風上である海側の桁端部(左端)が風の剥離の起点となり、剥離後は、風速が大きくなる。また、剥離した風は、弧を描くように吹き、橋の中央寄りの位置まで到達する。なお、この特徴は風速を変えても同様に認められた。

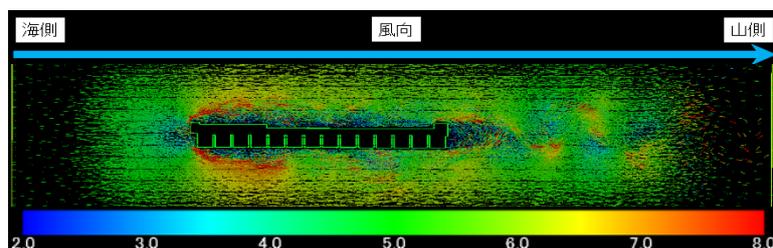


図-1 解析結果(風速 5 m の場合の流速ベクトル図)

### (2) 付着塩分量の計算

流体解析とランダムウォーク法の解析結果より得られた風速1, 3, 5 m 毎の橋梁下面各箇所における付着粒子数(付着モード分布)を求めた。これに1年間の気象データから得た風速毎の総時間と、塩分濃度パラメータとを掛け合わせ、風速について総和をとり橋梁各箇所の付着塩分量を求めた。

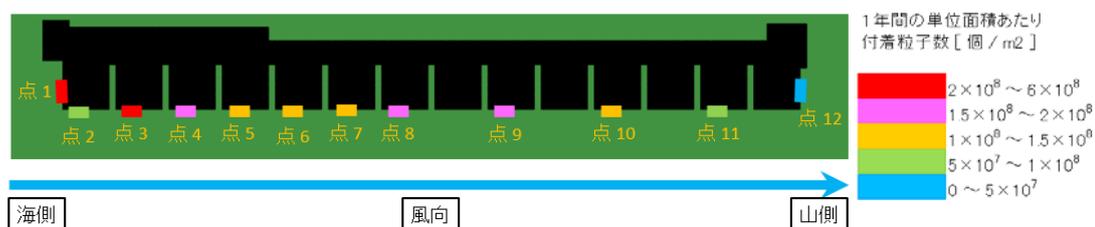


図-2 橋の着目箇所における1年間の単位面積あたり付着粒子数

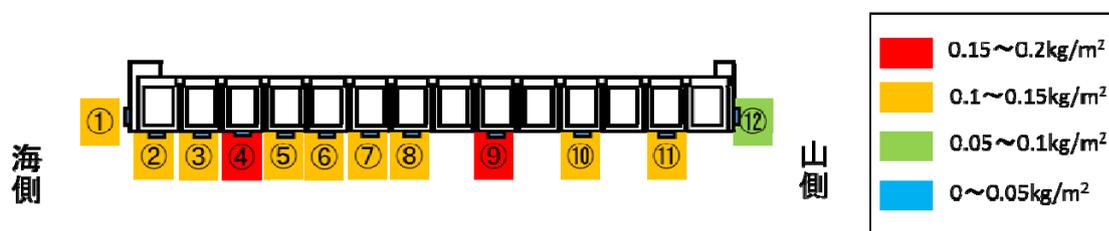


図-3 実際の橋に設置した薄板供試体への塩分浸透量

図-2は、橋梁下面の着目箇所における、1年間の単位面積あたり付着粒子数を、色分けして示したものである。暖色が濃いほど付着粒子数が多い。海側の桁の側面や底面で、付着粒子数が多い。また、橋の中央付近でも付着粒子数が多い。これは、流体解析で述べたように、海側の桁端部で剥離した風が、橋の中央寄りの位置まで到達することにより、粒子もこの位置まで運ばれ、付着するためである。

同様な傾向は、実際の橋梁での薄板供試体を用いた測定結果（図-3）でも得られており、流体解析とランダムウォーク法を組み合わせた手法によって、飛来塩分環境下にある橋梁各部における塩分付着量を定性的に評価可能であることが確かめられた。

### (3) 風速毎の塩分濃度の推定

風速に対する塩分濃度を二次関数近似して、測定結果と解析結果との誤差ノルムを最小にする係数(未知パラメータ)を求める手法を構成した。順解析より得た結果を正解に設定し、それに適用することで推定法の妥当性を確認した。また、測定誤差(ノイズ)に対する安定性を検証した。

表-1 は、風速 5 m の場合で、測定誤差を含む模擬的な測定データに対して、推定される塩分濃度と正解に対する誤差を示したものである。測定データにノイズを含まない場合（検証ケース 0 番）は、正解を推定でき、測定データに誤差が含まれる場合でも、正解に対し大差ない塩分濃度を推定できた。

表-1 推定される塩分濃度と、正解に対する差分（風速 5 m の場合）

検証ケース番号	模擬測定データの特徴		推定塩分濃度	正解塩分濃度	正解に対する推定値の差分(絶対値) $ \Delta $
	平均値	標準偏差			
0 (測定誤差なし)	0.0112	0.00697	25.0	25.0	0.00
1 (測定誤差あり)	0.0113	0.00787	26.1		1.13
2 (同上)	0.0109	0.00672	24.1		0.898
3 (同上)	0.0104	0.00670	23.2		1.80

### (4) 観測点数の検討

12個の測点で得られた実測値（図-3）を対象に、本推定手法の適用を試みた。推定対象となる測定点の位置と総数をそれぞれ変化させて、それらが推定結果に及ぼす影響について検討した。

図-4.A), B) に、測定点の位置と総数が異なる2ケース（ケースA, ケースB）について、推定した付着塩分量を示す。ケースAでは全測定データで推定し、ケースBでは実測値のピークとバレーとなる測点データ（6点、図-2の点1, 2, 4, 8, 9, 12）のみを用い推定している。図-4.C) 中の横軸の未知パラメータ $\alpha$ は、用いる測定データにより定まる。 $\alpha$ の変化に対応し推定値と実測値の差が変化し、ある $\alpha$ の値で誤差ノルムは最小になる。ケースBのように、測定点の位置と総数とを適切に設定することで、より良好な推定値を得ることができることが明らかとなった。

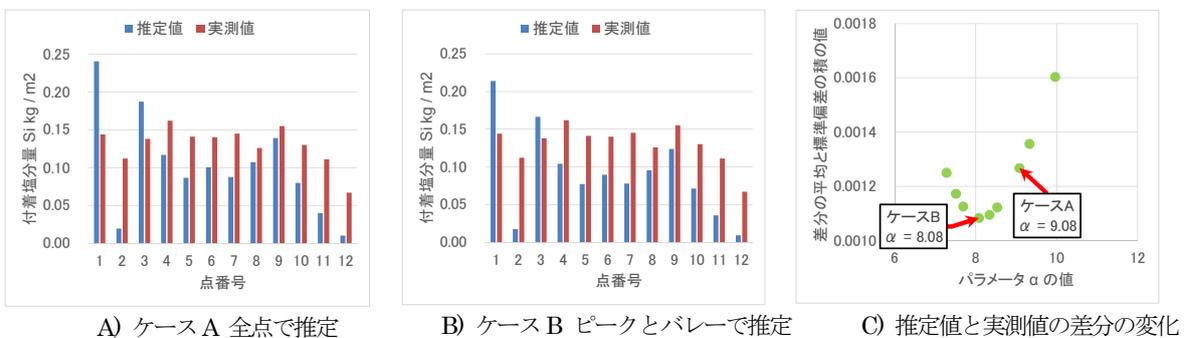


図-4 測定点の位置・総数の変化が推定値に及ぼす影響

### (5) コンクリート内部の塩分浸透モデルの開発

陸上のコンクリート構造物は気象条件の影響を受け、内部の含水状態が部位によって異なり、さらに経時変化する。コンクリートの含水状態は、塩分の浸透と内部の移動に影響を及ぼす。この影響を塩分浸透モデルに反映させるため、薄板供試体の暴露試験結果から供試体貼付け位置のコンクリートの含水状態を推定する手法を検討した。図-5は、推定手法のフローである。薄板供試体中の暴露試験中におけるCaCO<sub>3</sub>生成量を測定し、コンクリートの含水率とCO<sub>2</sub>拡散係数の関係式を用いて、暴露期間中の平均含水率を逆算する。求めた平均含水率を用いて、コンクリートの含水率と塩分拡散係数の関係式から不飽和コンクリート中の塩分拡散係数を算出する。

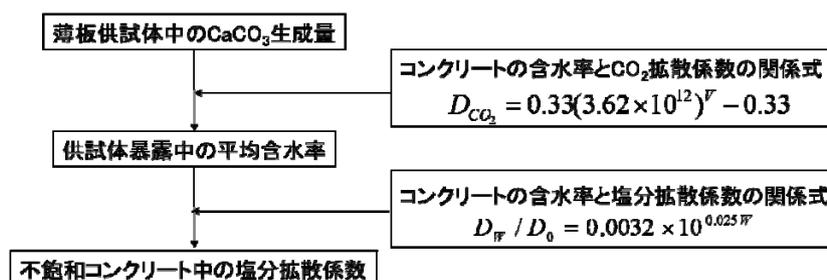


図-5 不飽和コンクリートの塩分拡散係数の推定フロー

図-6は、種々の気象条件を入力データとし、同じ気象作用を受ける薄板供試体と構造物を模擬したコンクリートの含水状態をシミュレートした結果である。両者には高い相関が見られる。以上のことから、薄板供試体中のCaCO<sub>3</sub>生成量から含水率を求め、さらに構造物表層部の含水状態を評価できることが明らかとなった。これにより、気象作用による部位毎の含水率の違いに起因する部位毎の塩分浸透性状の違いを浸透予測に反映する実用的なモデルが構築された。

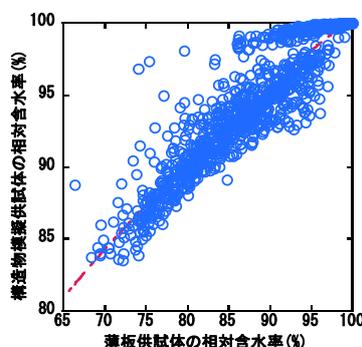


図-6 薄板モルタル供試体の含水率とコンクリート表層部（0～1cm）の含水率の関係

### (6) 飛来塩分の現地観測

沖縄県北部の西海岸に建設された3径間ポストテンションPCT桁橋において、薄板モルタル供試体による付着塩分調査を実施中である。供試体設置日は2015年11月27日で、回収は2月26日の予定である。本観測結果とランダムウォーク法の結果を比較検討し、解析の高精度化を図る予定である。

### (7) 薄板モルタル供試体の製造方法の改善

薄板モルタル供試体の型枠について、横型と縦型でどちらが効率的な製造が行えるか、収率の検討を行った。横型の型枠の収率は50%以下であったのに対して、縦型の収率は80%以上と大きく向上した。

## ⑦本格研究の見通し

⑥に示した通り、今年度のFS研究により、本研究で目的とする薄板モルタルとデータ同化手法を利用した塩分浸透予測システムの構築が十分可能であることが確認できた。特に、本研究の柱の一つである逆解析の有効性が確認され、塩分付着量の推定精度は順解析（流体解析とランダムウォーク法）の精度に大きく依存することが明らかとなった。そのため、次年度以降の本格研究では、個々のモデルの精度を向上させ、実用的な精度を有する塩分浸透推定システムを完成させる。具体的には下記の検討を行う。

### (1) 流体解析

本年度の検討では、期間も限られていることから、橋梁周りの風速場を準二次元モデルとして設定した。しかしその結果より、付着塩分量の分布特性を適切に捉え得る箇所に測定点を設定することで、推定精度を維持しつつ桁横断方向の測点数を5～6点程度まで低減可能であることがわかった。ただし、実際の橋梁においては、必ずしも橋軸直角方向に風が吹くとは限らず、風向と橋軸とが斜交する場合についても検討する必要がある。また、風の流れと塩分の移流・拡散解析とを三次元モデルで実施するのは実用化の面で現実的でない。そのため、桁高や間隔・本数など橋梁の幾何学的特性をパラメータとするデータベースやニューラル・ネットワークなどによる簡易な評価手法の構築を行う。

### (2) ランダムウォーク法

ランダムウォーク法による構造物への付着塩分量の評価の精度向上は、構造物周辺の風況解析や粒子のランダム性を決定するパラメータ、さらには付着判定の方法の修正により可能である。次年度以降は、ランダムウォーク法の風速場のケーススタディーや粒子の拡散性状を決める係数のパラメトリックスタディーを行い、調査結果との比較より解析手法の高精度化を図る。さらに、粒子の構造物への付着モデルの検討も行う。

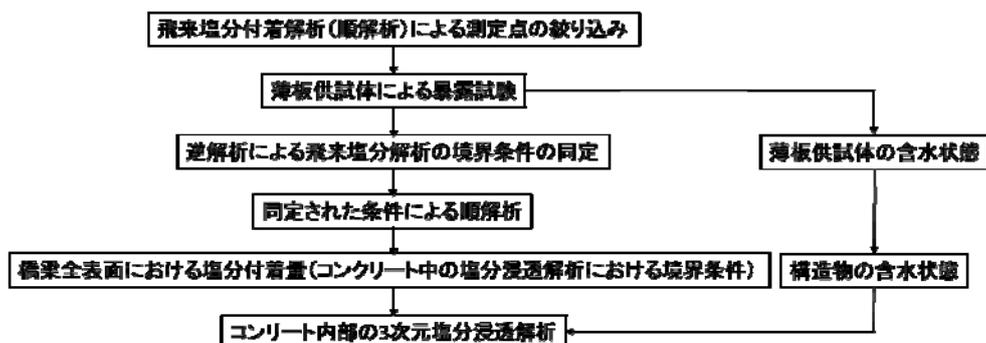
### (3) 塩分浸透解析

飛来塩分環境下にある橋梁の各部位に薄板モルタル供試体を設置し、暴露期間終了後に回収して塩分浸透量と炭酸カルシウム生成量を測定する。暴露試験の結果から、構造物のコンクリートの内部環境（主に含水率）を評価するモデルの精度向上および付着塩分量と浸透塩分量の関係を含水率を考慮した定式化を行う。

付着塩分量予測値から塩分浸透解析の境界条件を求め、コンクリート中の含水状態、降雨による洗い流しの影響を考慮可能な塩分浸透モデルを構築する。さらに、コンクリートの含水状態を考慮した酸素拡散モデルを組み合わせて、鋼材腐食解析手法を開発する。

### (4) 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

(1)～(3)のモデルを統合し、下記のフローで示される塩分浸透予測手法を完成させる。また、ソフトウェアをパッケージ化して、マニュアルの整備を行う。



#### (5) 供試体製造、設置・回収方法の改善

薄板モルタル供試体の収率は現状 80%程度であり、20%近くが不良品となっている。収率を 90%以上に向上させることを目標とし、離型性の良い型枠（表面のテフロンコート等）、離型剤（シリコーンオイル等）の導入や製造方法（振動による脱泡など）の改善を検討する。さらに、設置と回収方法の効率化にも取り組む。

FS研究および研究分担者らのこれまでの実績から、上記(1)～(5)の実現は十分可能である。

#### ⑧特記事項

今年度のFS研究により、本研究の目的を達成することが十分可能であることが示された。今後の課題は精度の向上であり、これは今後 3 年間の検討で十分達成可能であると考えられる。

また、本研究の特徴の一つである「薄板供試体」は、塩害環境調査手法として普及しつつあり（橋梁、港湾施設（栈橋等）、法面吹付けコンクリート、建築構造物などに適用）、本研究の結果を直ちに応用することができる。