

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（2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	タイプII
		[副領域]		
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
	1,029万円	1,101万円	1,534万円	3,664万円
※H28は精算額、H29は受託額、H30は計画額を記入。端数切捨。				
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、これまでに得られた研究成果や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。)

(1) 新設構造物のための塩害環境評価手法の開発

i) 海岸条件を考慮した表面塩分濃度設定法の検討

新潟県沿岸の68の橋梁(図1参照)の海側地覆側面に薄板モルタル供試体を暴露し、海岸条件が飛来塩分量、ひいては、構造物の表面塩分濃度に及ぼす影響について検討した。測定結果をコンクリートの表面濃度に換算し、海岸からの距離との関係で整理した結果を図2(a)に示す。図中には、土木学会コンクリート標準示方書の値も併せて示した。図より、本研究の結果は示方書の値と同様に海岸からの距離が大きくなるに従って表面濃度が小さくなるという傾向は同じであるが、示方書の推定値より明らかに表面濃度が大きくなる地点が多数見られた。また、表面濃度は海岸からの距離のみで評価することができなかった。そこで、構造物の標高、卓越風向と橋梁のなす角度、波のエネルギーを考慮し、海岸線からの距離を補正した結果を図2(b)示す。図より、補正した海岸から距離により表面濃度を一律に評価できることが明らかとなった。なお、今回の試験の範囲では海岸のタイプ(砂浜、岩礁)や消波ブロックの有無は影響が見られなかった。他地域での適用性も含めて、今後の検討が必要である。

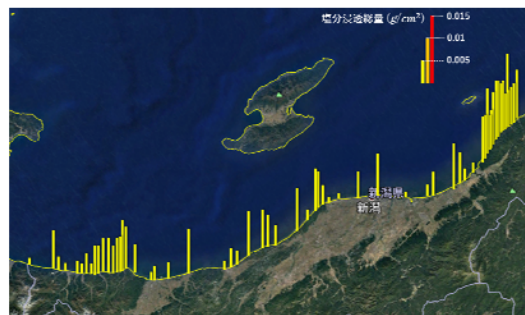


図1 供試体設置橋梁と塩分浸透量

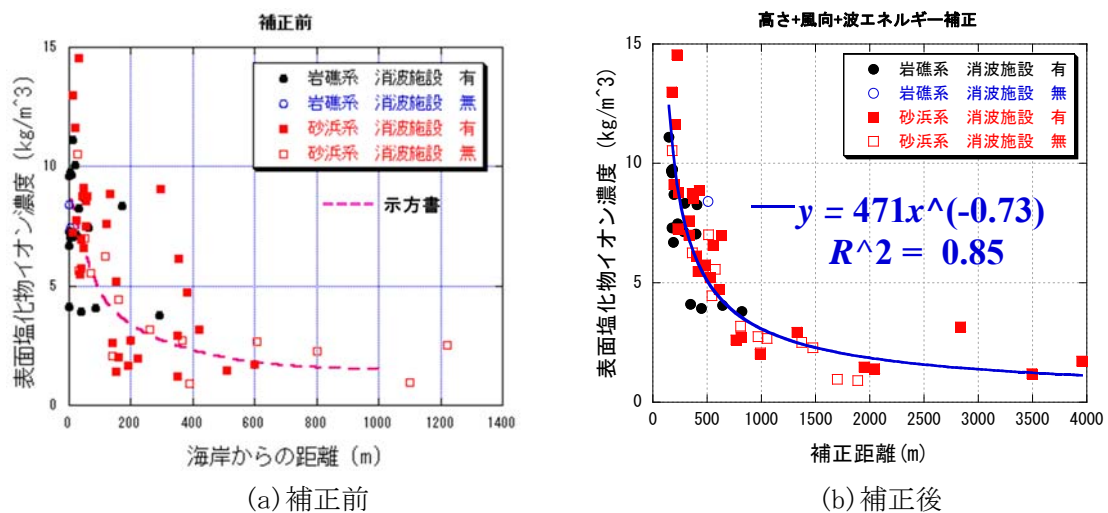


図2 海岸からの距離と表面塩分濃度の関係

沖縄県では、薄板モルタル供試体による塩害環境調査を図3に示す4暴露試験場および10橋梁で実施した。表1に暴露試験箇所および期間を示す。暴露試験場においては暴露試験体の架台に設置し、橋梁においては橋中央部の海側地覆に設置した。ただし、伊良部大橋暴露試験場においては、4方向測定捕集可能な土研飛来塩分捕集器（以下、土研式）が設置されているため、土研式捕集口の横に薄板モルタル供試体を設置した。図4に設置例を示す。暴露期間の風況の整理として、伊是名気象観測所、糸数気象観測所、宮古島気象観測所の観測結果を整理した（図5）。

図6に暴露試験結果として、薄板モルタル供試体に浸透した塩化物イオン濃度の日平均を示す。この結果より、暴露位置の違いにより外来塩分としての供給量が異なることがわかり、塩害環境の定量評価が可能であると考えられる。定量評価に関する詳細な検討は今後行う。

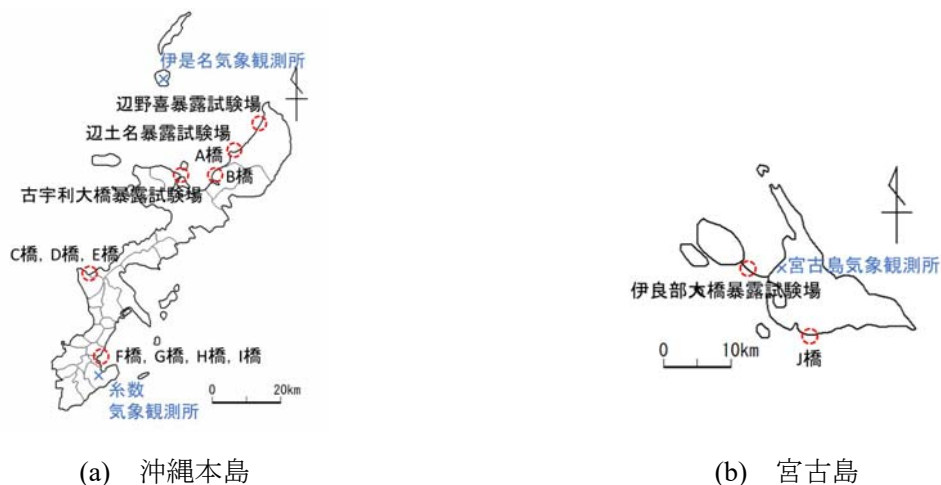
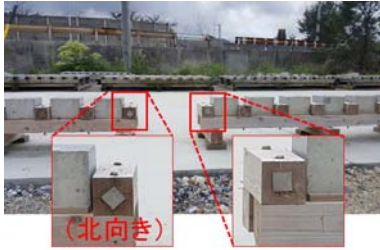


図3 暴露試験場と気象観測所の位置

表1 暴露箇所および暴露期間

場所種別	市町村	暴露箇所（暴露面方向）	暴露時期および期間
暴露試験場	国頭村	辺野喜暴露試験場（西）	2016年12月2日～2017年4月6日 (125日)
		辺土名暴露試験場（北）	
		古宇利大橋暴露試験場（東）	
	宮古島市	伊良部大橋暴露試験場 （東，西，南，北）	2016年12月6日～2017年4月6日 (121日)
橋梁	国頭村	A橋（北）	2016年12月2日～2017年4月6日 (125日)
	大宜味村	B橋（北西）	
	読谷村	C橋（北）	2016年12月3日～2017年4月6日 (124日)
	恩納村	D橋（北北西），E橋（北西）	
	西原町	F橋，G橋，H橋，I橋（南東）	2016年12月3日～2017年4月5日 (123日)
	宮古島市	J橋（南南西）	2017年1月6日～2017年4月6日 (90日)



(a) 辺土名暴露試験場（国頭村）

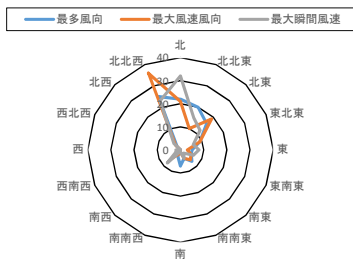


(b) C橋（読谷村）

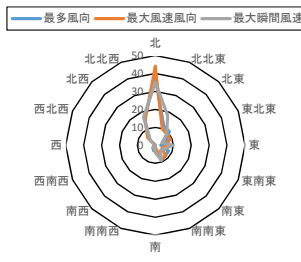


(c) 伊良部大橋暴露試験場（宮古島）

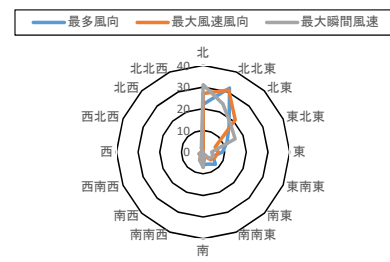
図4 薄板モルタル供試体設置例



(a) 伊是名気象観測所



(b) 糸数気象観測所



(c) 宮古島気象観測所

図5 卓越風向

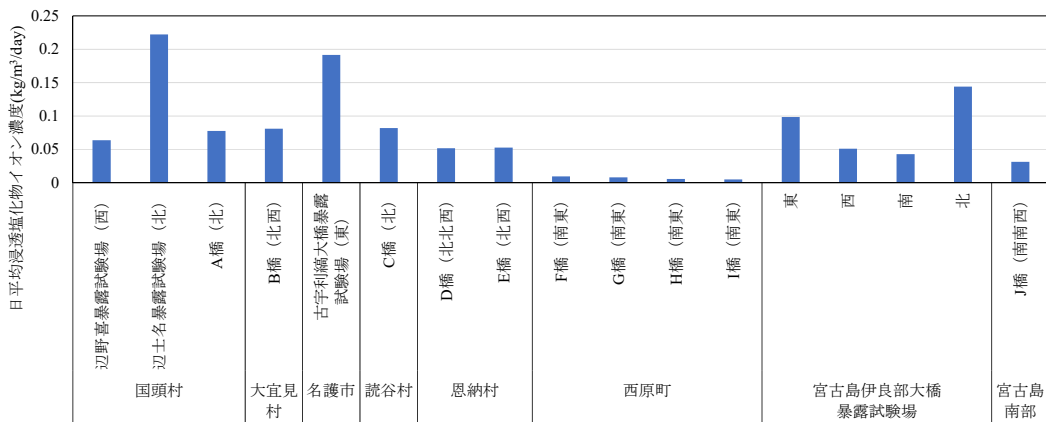
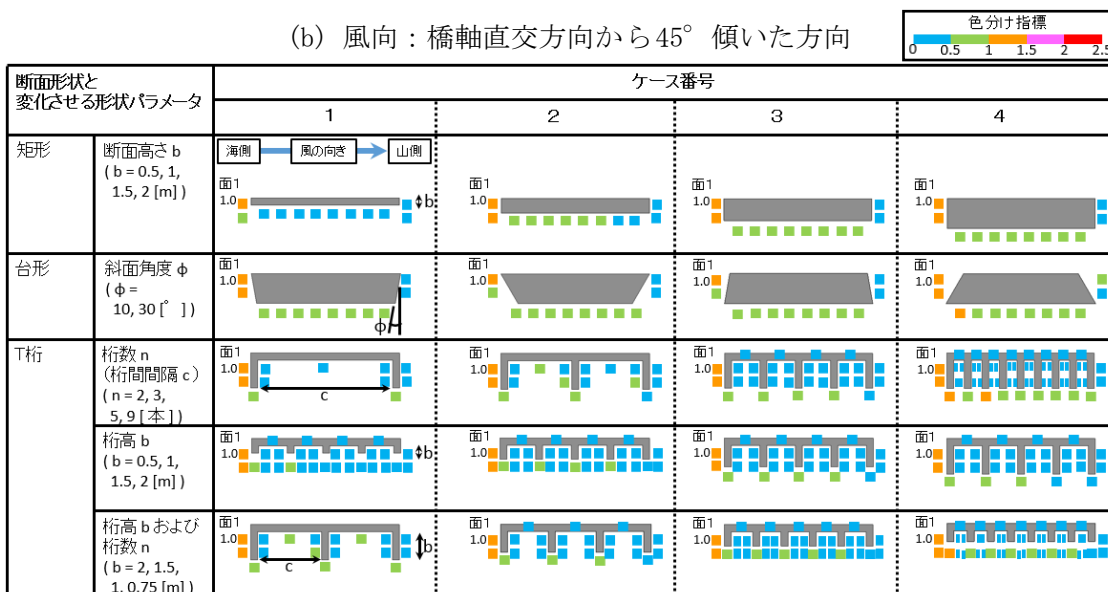
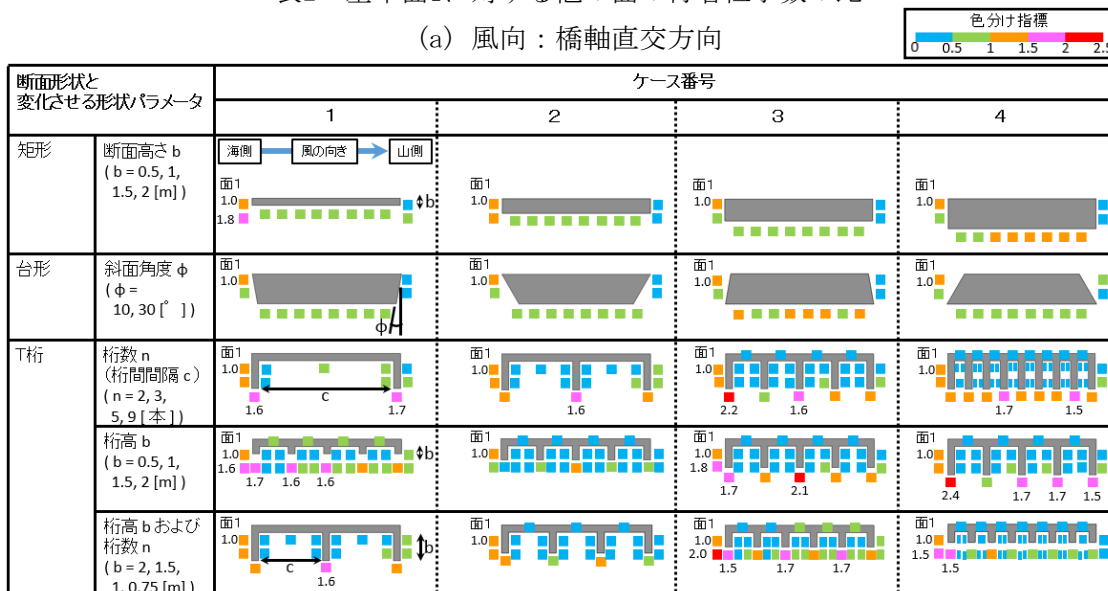


図6 暴露試験全体比較（括弧内は暴露面方向）

ii) 構造物形状別の表面濃度設定法の検討

28年度に開発した順解析手法（流体解析+RW法による付着塩分量解析）を用いてシミュレーションを行い、橋梁上部構造の形状（+風況）の影響を評価した。結果をまとめた一例を表2に示す。

表2 基準面1に対する他の面の付着粒子数の比



上表は、橋の断面形状と、形状を定めるパラメータ（断面高さ（または桁高） b 、斜面角度 ϕ 、桁数 n ）を変化させることにより、基準とする面1に対する他の面の付着粒子数がどの程度変化するか、単位面積・単位時間あたりの付着粒子数の比で表したものである。また、付着粒子を、海より飛来し付着する塩分と見なしている。面1は表中の通り、風上（海側）に存在する面を想定している。断面の幅は矩形および台形で10 m、T桁で10.5 mとしている。

なお表2では、流体解析において、風速 $V=10$ [m/s]、風向：橋軸直交方向、および橋軸直交方向から 45° 傾いた方向の場合の結果を示している。橋軸方向と風向の関係について図7に示す。

表2(a)より、風向が橋軸直交方向である場合、特にT桁で、桁の底面に付着する粒子が多いケースが目立つ。一方、表2(b)より、風向が橋軸直交方向から 45° 傾いた方向となると、桁の底面への粒子の付着は少なくなる。ここで、表1のようになる理由を示す一例として、矩形断面、断面高さ b が2 m のケースについて、面1に対する他の面の付着粒子数の比をグラフで図8に示す。図より風向が橋軸直交方向から 45° 、 67.5° と傾くと、風下側の面（特に番号5~10の面）で付着粒子数が少なくなることが分かる。これは、風が橋軸直交方向寄りに吹く場合、図9(a)で示すように、風上側の橋の側面角部で風の剥離が起こり、剥離した風が風速を増し、弧を描くようにして吹き、風下側の面まで粒子を運ぶが、風が橋軸直交方向からある一定の角度以上離れて吹く場合、図9(b)で示すように風の剥離の程度が小さくなり、風速の増加および発生する弧も目立たず、風下側の面へ粒子を運ぶ風の働きが弱まるためと考えられる。

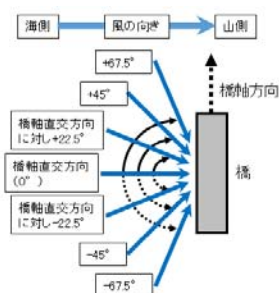


図7 橋軸方向と風向の関係

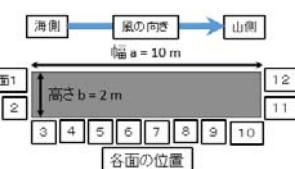
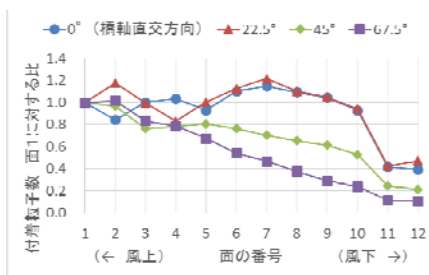
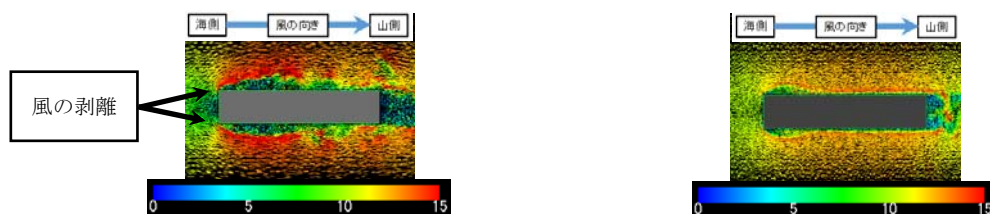


図8 矩形断面における風向ごとの付着粒子数



(a) 風向：橋軸直交方向に対し 22.5°

(b) 風向：橋軸直交方向に対し 67.5°

図9 風向による風速ベクトル分布の違い

表2の表面塩分濃度比の基準（塩分濃度1.0）は海側地覆側面であり、この位置の表面濃度はi)の検討により海岸条件から求めることができる。したがって、現地での測定を行わなくても構造物各部位における表面濃度を設定することが可能である。あるいは、竣工直後に薄板供試体で測定（1年間）を行うことにより、精度の高い推定が可能となる。さらには、事前解析を行うことで重要箇所（塩分量が多くなる部位と少なくなる部位）を推定し、そこに薄板供試体を貼り付けることによって得られたデータから精度の高い逆解析が可能となり、ひいては、構造物全体の表面塩分濃度を推定することが可能となる。

(2) 既設構造物のための塩害環境評価および塩分浸透予測手法の開発

i) 飛来塩分供給量算定システムの開発

本研究では、これまで、数値解析により得られた付着粒子数データから、付着塩分量を推定するためのデータ同化パラメータ α を逆解析により求めてきた。この際、薄板供試体で実測された塩分浸透量データを利用するが、橋の部位によりこの実測値の大小が異なる。また、数値解析結果も部位による大小の異なりがある。図10は、実測値と解析結果（付着粒子数）を比較したグラフであるが、同じ評価箇所でも両データにおける大小の現れ方は異なるように見える。しかし、図11に示すように、評価箇所を向きや位置によりグループ分けし、グループに含まれる評価箇所どうしで実測値と解析結果を比較して見ると、図12のようになり、数値のオーダーや単位は異なるが、評価箇所ごとの値の大小の現れ方は似ていることが分かる。このことは、他のグループでもほぼ同様に確認できる。

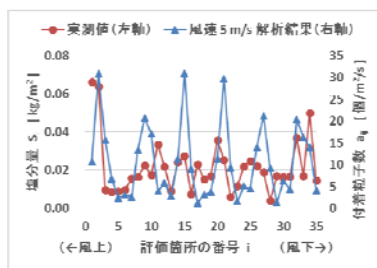


図10 実測値と解析結果の比較

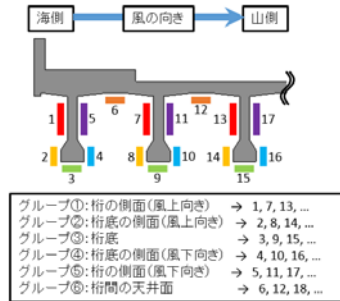


図11 評価箇所のグループ分け

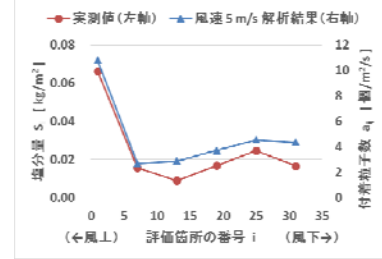
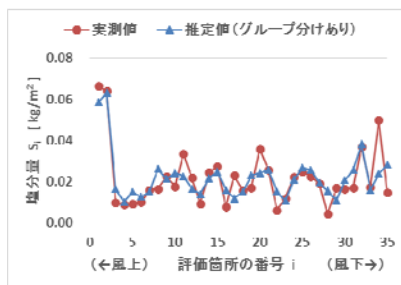


図12 グループ①に含まれる評価箇所どうしの実測値と解析結果で比較

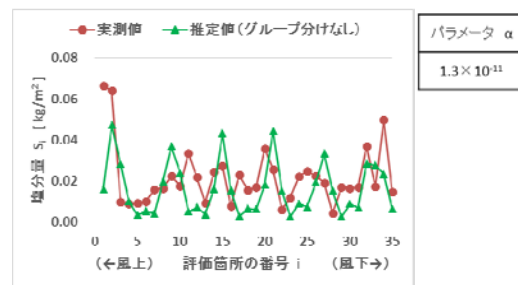
そこで、従来、全ての評価箇所に対し一括して実施していた逆解析を、図11のようなグループごとに実施し、グループごとにパラメータ α を求めた。パラメータ α を用いて算出した付着塩分量の推定値を実測値と比較したグラフを図13に示す。図13(a), (b)の比較より、値の程度やピークの現れ方から、評価箇所をグループ分けするほうが精度の良い推定をできることが分かる。単純な方法ではあるが、評価箇所をグループ分けして扱うことが、逆解析モデルの高度化のために重要である。

なお、ここでは、風向は考慮しない場合の結果を示したが、開発した飛来塩分供給量算定システムでは、風向を考慮する場合も評価可能である。



(a) 評価箇所をグループ分けした場合

グループ	パラメータ α
①	4.7×10^{-11}
②	1.7×10^{-11}
③	7.3×10^{-12}
④	1.3×10^{-11}
⑤	5.6×10^{-11}
⑥	2.9×10^{-11}



(b) 評価箇所をグループ分けしない場合

パラメータ α
1.3×10^{-11}

図13 付着塩分量 実測値と推定値の比較

これまでに開発した飛来塩分供給量算定システムを構成する各工程と、各工程におけるデータの取り扱いについて図14に示す。第2工程で薄板供試体への塩分浸透量データ(実測値)を利用することにより、解析結果である付着粒子数を、実橋で生じ得る付着塩分量に換算する。この換算の過程で逆解析により得られるデータ同化パラメータ α を用い、第3工程で、橋全体の表面塩分濃度を算定する。なお、第3工程では、第2工程と同様に、第1工程で得られた付着粒子数データも用いる。

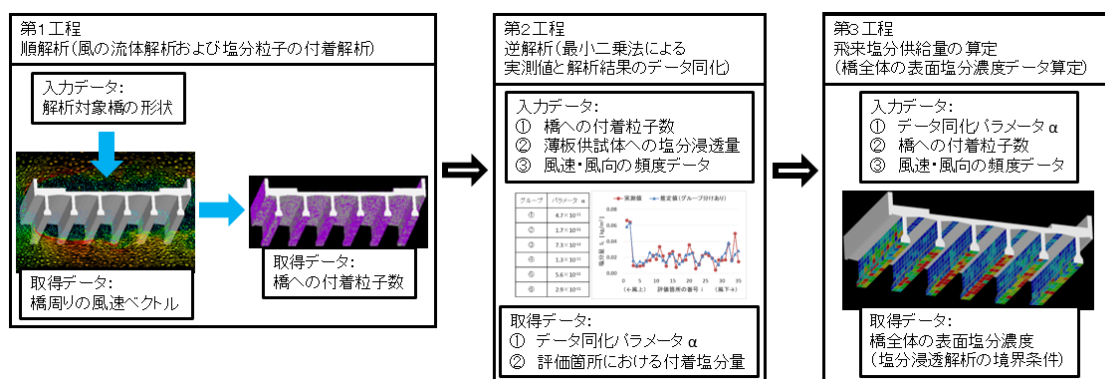


図14 飛来塩分供給量算定システムを構成する各工程と取り扱うデータ

次に、現在開発中の3次元非定常塩分拡散解析プログラムの概要を示す。進捗としては、入力データである3次元有限要素モデルの作成(図15)、ディレクレ境界条件として、固定表面塩化物イオン濃度を境界条件(図16)とした塩分拡散解析が可能(図17)となっている。今後は、境界条件として、ノイマン境界条件(Flux)の実装を行い、最終的には、ランダムウォーク法で得られた結果を直接境界条件とした塩分拡散解析が行えるモデルを構築する。なお、今回解析に用いたモデルや値は解析確認用に適当なものを用いた。

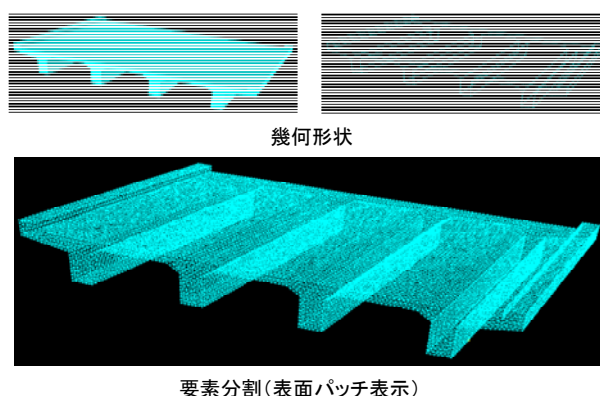
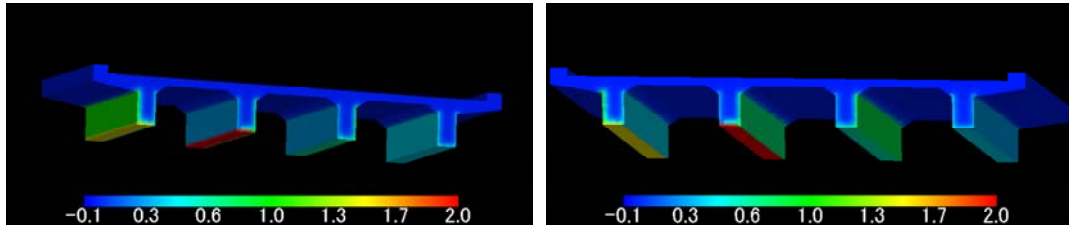


図15 3次元有限要素モデル

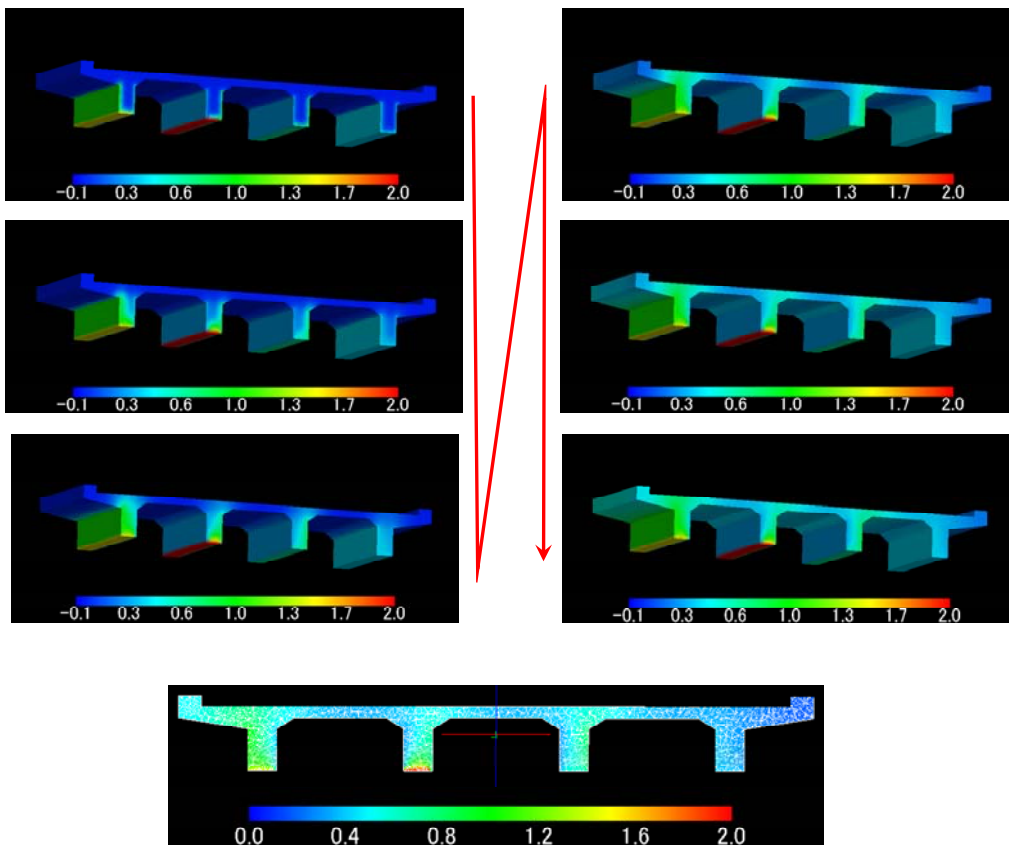
海 → 陸



面ごとに異なる塩化物イオン濃度を与えた

図16 境界条件

海 → 陸



断面内の塩分拡散分布

図17 解析結果

ii) 構造物内部の含水状態と降雨による塩分流出の影響を考慮した塩分浸透予測モデルの開発

コンクリート中に浸透した塩分が降雨によって洗い流される場合、コンクリート内部の初期塩分量を C_i 、コンクリート表面の塩分濃度を C' 、塩分拡散係数を D とすると、流出量 M_t と時間 t の関係は以下のようなになる。

$$M_t = 2(C_i - C') \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

上式の t は水が作用していた時間である。既往の研究によれば、1mm以上の降雨が作用すればコンクリート中の塩分が流出すると考えられている。

予め塩分を浸透させた薄板供試体を降雨を受ける環境下に暴露し、水作用時間と塩分流出量を測定した結果を図18に示す。供試体は雨掛りの程度の異なる箇所に暴露したが、塩分流出量は水作用時間の平方根に比例することが確認できる。このことから、水作用時間を把握することができれば、降雨による塩分流出量が推定できることになる。しかし、実構造物では、各部位によって雨掛りの程度が異なり、降雨時間と水作用時間が一致するとは限らない。また、実構造物で長期にわたって各部位の水作用時間を把握することは困難である。そこで本研究では、昨年度検討した「等価含水率」を用いて水作用時間を推定する手法を検討した。等価含水率は、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たものであり、長期間屋外暴露されたコンクリート中の含水率の変動の影響を考慮した塩分浸透予測が可能であることが確かめられている。図19に、等価含水率と水作用時間の関係を示す。図中の●、■、◆、×は大学構内で行った暴露試験結果であり、▲は実橋梁の各部位に約3か月間暴露した結果である。また、暴露試験期間が限られることから、乾湿繰り返し現象を数値シミュレーションで再現し両者の関係を求めた結果を実線で示してある。等価含水率と水作用時間の関係は暴露期間によって異なるが、水作用時間が長くなるほど等価含水率が大きくなることがわかる。また、シミュレーション結果と大学内での暴露試験結果は比較的良好に一致しており、等価含水率から水作用時間を推定でき、さらには、浸透した塩分の流出量を求めることが基本的には可能であると考えられる。しかし、実構造物での結果を見ると、ばらつきも大きく、さらに検討が必要であることから、来年度の課題としたい。

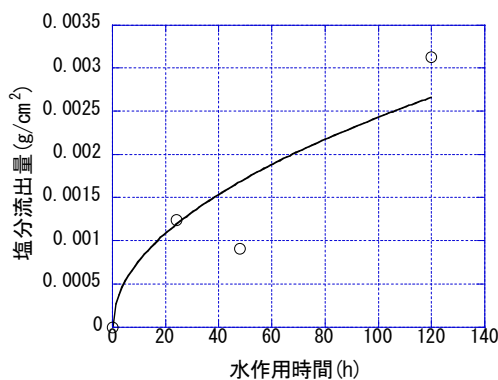


図18 水作用時間と塩分流出量の関係

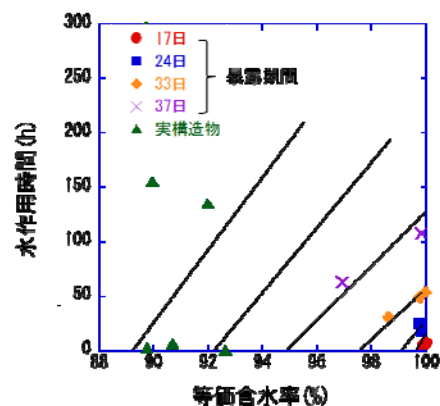


図19 等価含水率と水作用時間の関係

(1) i) の検討で使用した薄板モルタル供試体は、暴露面が4cm×4cmの正方形をしており、貼り付け方法は、図20に示す四角形(□)とひし形(◇)の2通りとした。これは凍結防止剤を含む流水がある場合、薄板モルタル供試体に影響を与えることが想定されることから貼り付け方の違いによる差異を検討するためである(図20参照)。図21に、薄板モルタル供試体の貼り付け方法による違いを示す。この結果より、沖縄県の結果では、□と◇の違いは確認できなかった。一方、新潟県の結果では、□が◇より5%ほど浸透塩分量が大きくなった。沖縄県では、凍結防止剤の散布が行われないことから、両者が同じ浸透塩分量になったのに対して、新潟県における暴露試験では、凍結防止剤の散布によって5%程度の浸透量が増加したものと考えられる。このことから、薄板供試体の貼り付け方によって凍結防止剤の影響を評価できる可能性があるものと考えられる。

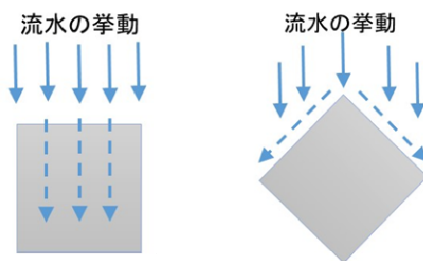
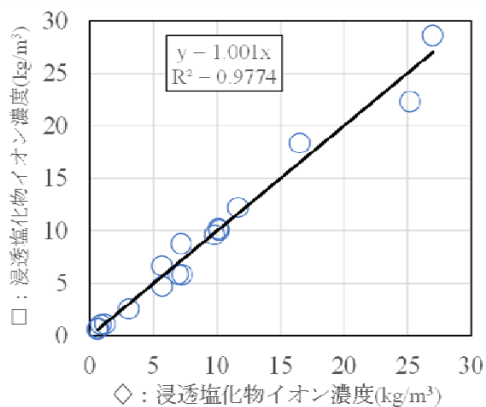
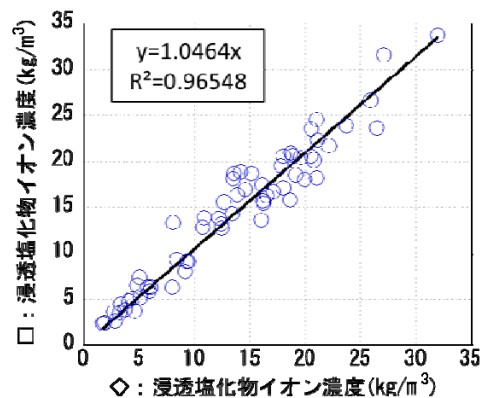


図20 薄板供試体の貼り付け方法と流水の挙動



(a) 沖縄県



(b) 新潟県

図21 薄板供試体の貼り付け方法と浸透塩分量の関係

(3) コンクリート構造物内部の塩分算定量マニュアル素案の作成

コンクリート構造物内部の塩分算定量マニュアルは、「薄板供試体を用いた飛来塩分計測マニュアル」、「構造物各部位における表面塩分濃度設定マニュアル」、「飛来塩分量解析マニュアル」、「コンクリート（構造物）中の塩分浸透予測マニュアル」から構成される。ここではスペースの都合上、目次のみを示す。なお、要求精度と測定・解析のレベルの関係については、来年度に検討する予定である。

マニュアル目次（案）

<薄板モルタルを用いた飛来塩分計測マニュアル>

1. 暴露期間
2. 供試体設置位置
3. 貼付・回収
4. 浸透塩分量分析

<構造物各部位における表面塩分濃度設定マニュアル>

1. 薄板供試体の測定値を用いる方法
 - 1.1 薄板供試体からコンクリート構造物の表面濃度への換算
 - 1.2 供試体を設置していない箇所の表面濃度推定
2. 数値計算による方法
3. 降雨による洗い流しの影響の考慮

<飛来塩分量解析マニュアル>

1. 順解析
 - 1.1 計算条件の設定
 - 1.2 風況の考慮
2. 逆解析

<コンクリート（構造物）中の塩分浸透予測マニュアル>

1. 拡散係数の設定
2. 計算条件の設定

(4) コンクリート構造物内部の塩分算定量マニュアル素案の妥当性検証

マニュアル素案の妥当性を検証するために、薄板供試体の暴露試験を行った。新潟県内で供試体を設置した橋梁は、図22に示す国道8号線における5橋（T桁橋：3，床版橋：2）である。T桁橋では主桁本数と桁高に着目し，床版橋では床版厚さに着目して対象橋梁を選定した。図23は，薄板供試体設置位置の一例である。



図22 暴露試験実施橋梁（新潟県）

表3 T桁橋の諸元

橋梁名	主桁本数	主桁高さ (m)
有間川橋	5	1.3
弁天大橋	11	1.15
青海川橋	5	1.4

表4 床版橋の諸元

橋梁名	床版厚さ (cm)
藤崎3号溝橋	35
能生大橋	150

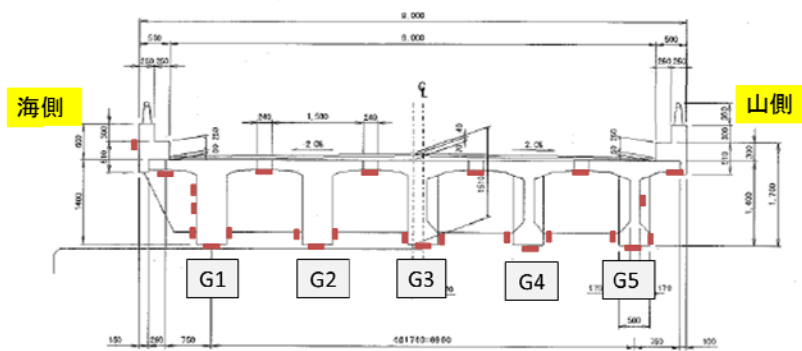


図23 薄板供試体位置箇所の例（青海川橋）

沖縄県では，塩分量算定マニュアル素案の妥当性検証のため，（1）で示した暴露試験を継続して実施している。計測は，毎月実施している。また，暴露試験場においては，土研式飛来塩分回収器を伊良部大橋暴露試験場以外の3暴露試験場にも設置し，薄板モルタル供試体と合わせて計測を継続している。

(5) 道路管理実務における活用方法の検討

昨年度と同様に、補修履歴が分かっている実橋梁（新潟大堰管理橋；橋長 242.7m, 幅員 8.8m）を対象として上記の 4Case 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合理的な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）

表 5 試算シナリオ

シナリオ	計測	補修 間隔	補修 面積	対策方法
Case1	なし	-	-	事後補修対応 (新潟大堰における補修実績)
Case2	なし	15年	20% 部分補修	ミニマムメンテ橋の考え方 桁床版-『断面補修』
Case3-1	事前 設置	20年	100% 全面補修	桁床版-『表面被覆』
Case3-2	事前 設置	20年	20% 部分補修	桁床版-『表面被覆』

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。

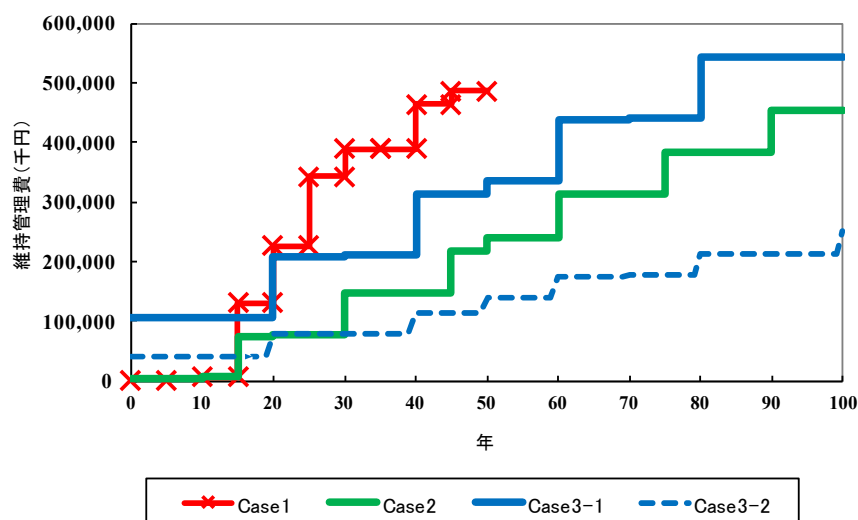


図 24 LCC の試算結果

⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

- 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

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

- (1) 海岸条件を考慮した表面塩分濃度の推定方法：他地域の結果（土木学会・塩害環境の定量評価に関する研究小委員会共通試験結果やその他のデータ）と比較検討し，必要な修正を行う。最終的には示方書類への取り込みを目指す。
- (2) 薄板供試体の規準化を図る。
- (3) 新設構造物への適用が最も効果的と考えられるため，構造物管理者の協力を仰ぎ，新設橋梁への試験的な適用を図る。
- (4) 構造物管理者および研究者の協力を仰ぎ，気象観測結果や構造物各部での薄板モルタル供試体による飛来塩分量測定結果，当該システムによる劣化評価結果等を継続的に収集し当該評価システムの性能向上を図る体制（PDCA サイクル）を構築する。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、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、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度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、一般的な環境評価技術となりつつある。土木学会・コンクリート委員会 塩害環境の定量評価に関する研究小委員会で実施の共通試験では、薄板供試体の市販品である「クロルサーチ」が用いられている。また、2018年改訂の土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕でも塩害環境評価手法の一つとして紹介される予定である。

<研究については見通しや進捗についての自己評価>

研究の主要部分についてはほぼ終了しているが、降雨による塩分洗い流しの影響の取り込みについての検討が若干遅れている。このため最終年度は、降雨による洗い流しモデルの検討を引き続き行う。また、塩分浸透予測システムを構成する各モデルの改良のための暴露試験供試体および実構造物調査、既往の研究結果との比較検討を行う。さらに実用化に向けて、解析ソフトの自動化・ユーザーインターフェースの整備、マニュアル類の整備を進める予定である。

研究は概ね順調に進んでいると評価できる。