

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 27-4

研究テーマ

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

研究代表者：	新潟大学教授	佐伯	竜彦
共同研究者：	新潟大学教授	阿部	和久
	新潟大学教授	紅露	一寛
	新潟大学准教授	斎藤	豪
	新潟大学准教授	大竹	雄
	新潟大学技術職員	山下	将一
	琉球大学准教授	富山	潤
	デンカ株式会社主席研究員	宮口	克一

令和元年7月

新道路技術会議

目 次

研究概要（様式 3 を挿入）	1
第 1 章 はじめに	3
第 2 章 新設構造物のための塩害環境評価手法の構築.....	5
2. 1 手法の概要	5
2. 2 気象・海象と地形条件を考慮した飛来塩分推定手法（レベル 1）	6
2. 3 構造物各部位毎の表面塩化物イオン濃度推定方法（レベル 2）	10
第 3 章 既設構造物のための塩害環境評価手法の構築.....	16
3. 1 手法の概要	16
3. 2 実測による表面塩化物イオン濃度評価（レベル 3）	17
3. 3 逆解析による表面塩化物イオン濃度推定方法（レベル 4 およびレベル 5）	19
第 4 章 塩害環境評価マニュアル	31
4. 1 マニュアルの構成.....	31
4. 2 薄板モルタルを用いた飛来塩分計測マニュアル.....	31
4. 3 飛来塩分量解析マニュアル	34
4. 4 構造物各部位における表面塩分濃度設定マニュアル.....	35
4. 5 コンクリート構造物中の塩分浸透予測マニュアル	36
4. 6 塩害環境評価手法の適用範囲と留意点，精度	37
第 5 章 まとめ.....	38

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（平成 27 年度採択）
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.27-4	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	新潟大学 教授 佐伯 竜彦

飛来塩分環境下にあるコンクリート橋の全表面における塩分浸透境界条件を定量的に把握し、コンクリートへの塩分浸透を 3 次元的に把握する実用的なシステムを構築し、さらにその成果を利用して、構造物の維持管理手法の提案を行う研究開発。

1. 研究の背景・目的（研究開始当初の背景・動機・目標等）

今後の構造物の管理実務においては、個々の構造物の状況に即した画一的でない対処を行うための設計体系の構築が求められると考えられることから、構造物個々の設置環境、荷重環境、施工品質、経過年に応じた適切な対応策の設定、対策の範囲の合理的な設定等の具体的な設計法の開発が求められている。このような手法の開発により、事後保全型の維持管理から予防保全型の維持管理へ真に脱却することができる。これを実現するためには、計測・モニタリングによる(1)コンクリート内部の現状把握と塩害や中性化等の(2)外力環境条件の同定、それに基づく(3)将来予測の 3 つの要素技術の開発とそれらを有機的に結合させた実用的な設計支援ツールが求められる。

本研究は、上記の問題意識に基づいて、塩害劣化を対象としてコンクリート構造物の設計支援ツールの開発と実用化を目指すものである。また、その最大の特徴は、コンクリート表面に貼り付ける「薄板モルタル」による非破壊モニタリング技術の有効活用と数値解析技術の融合にある。

2. 研究内容（研究の方法・項目等）

- ・飛来塩分の付着・浸透過程の現地観測：新潟県内 68 橋、沖縄県内 10 橋において暴露試験を、その内 10 橋（新潟県 9 橋、沖縄 1 橋）で複数部位における暴露試験を実施した。
- ・薄板供試体の製造・貼付け・回収方法の改善：型枠、両面テープの改良などにより、効率化を図った。
- ・飛来塩分輸送過程（順解析）プログラムの開発：流体解析にランダムウォーク法を組み合わせた解析手法の構築した。
- ・飛来塩分同定解析（逆解析）プログラムの開発：最小二乗法を用いた逆解析手法を開発した。
- ・コンクリート内部の物質移動プログラムの開発：3次元塩分浸透解析手法を構築した。
- ・塩害環境評価手法のマニュアル整備：暴露試験の実施から飛来塩分輸送・付着解析までのマニュアルを作成した。

3. 研究成果（図表・写真等を活用し分かりやすく記述）

（1）新設構造物を対象とした塩害環境評価手法

- ①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。
- ②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。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、予防保全を行う手法を提案した。
- ②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する手法を構築した。

4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- 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)

5. 今後の展望 (研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

新設構造物を対象とした塩害環境評価では、これまで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社会実装・普及を目指す。橋梁管理者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による塩害環境評価を行い、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。

6. 道路政策の質の向上への寄与 (研究成果の実務への反映見込み等)

- ・国土交通省の調査で薄板モルタル供試体が用いられている。
- ・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)

以上のように、本研究の関係者以外でも薄板モルタル供試体は、塩害環境評価に活用されており、研究成果が実務に活用される素地は大きい。また、本研究の実務への展開として、橋梁管理者および建設コンサルタントとの協働が計画されている。

7. ホームページ等 (関連ウェブサイト等)

<http://www.eng.niigata-u.ac.jp/~doboku/project/index.html>

第1章 はじめに

高度経済成長期に集中整備された社会インフラの一斉老朽化が社会問題になっている。本格的な少子高齢時代が到来する中、予算制約の中で既設構造物の要求性能を確保しつつ延命化させることが極めて重要となる。現在、各種インフラ施設の見視点検とデータの蓄積とともに見視点検情報を活用した大量インフラ施設群の合理的なスクリーニング技術の研究が国土交通省や地方自治体、土木学会の委員会等で活発に行われている。

このような背景の中、今後の既設構造物の管理実務においては、個々の構造物の状況に即した画一的でない対処を行うための設計体系の構築が求められると考えられる。すなわち、スクリーニングにより抽出された施設個々の設置環境、荷重環境、施工品質、経過年に応じた適切な対応策の設定、対策の範囲の合理的な設定等の具体的な設計法の開発である。これにより、事後保全型の維持管理から予防保全型の維持管理へ真に脱却することができると考えている。これを実現するためには、計測・モニタリングによる(1)コンクリート内部の現状把握と塩害や中性化等の(2)外力環境条件の同定、それに基づく(3)将来予測の3つの要素技術の開発とそれらを有機的に結合させた実用的な設計支援ツールが求められる。

本研究は、上記の問題意識に基づいて、塩害劣化を対象として既設コンクリート構造物の設計支援ツールの開発とそのパッケージ化による実用化を目指すものである。また、その最大の特徴は、コンクリート表面に貼り付ける「薄板モルタル」による非破壊モニタリング技

術の有効活用と数値解析技術の融合にある。

以上の背景の下、本研究では下記の要素技術の開発を行った。

- (1) 薄板供試体とデータ同化手法を用いて、飛来塩分の構造物表面への付着量を推定する手法
- (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

さらに、各要素技術を統合して、塩害環境評価手法を構築した。研究の経緯は、下記の通りである。平成27年度はFS研究として、研究目的達成の可能性について検討を行った。その結果、本研究で目的とする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。

平成28年度は本格研究の初年度として、FS研究の成果を踏まえ、塩分浸透予測技術を構成する各要素技術の高度化を行った。具体的には、風向と橋軸方向が斜交する場合や複雑な形状（PC T桁橋など）の橋梁において高精度の飛来塩分解析を行うことを目的として、順解析および逆解析手法の改良を行った。また、暴露した薄板モルタル供試体からコンクリートの内部環境（含水状態など）を評価するモデルを完成

させ、環境作用を受ける橋梁の塩分浸透モデルを高精度化した。さらに、モデルの構築や検証のための現地暴露試験を引き続き行った。さらに、薄板モルタル供試体の効率的な製造方法の検討も行った。

平成29・30年度は、これまでの成果を整理・

統合し、新設構造物のための塩害環境評価手法と既設構造物のための塩害環境評価手法および塩分浸透予測手法を完成させ、妥当性と精度について検討した。また、一連の手法のマニュアルを作成し、評価・予測手法の適用や結果の解釈にあたっての留意点も記述した。

第2章 新設構造物のための塩害環境評価手法の構築

2.1 手法の概要

本研究で検討した塩害環境評価のための要素技術は幾つかあり、労力・費用と要求される精度によって組合せを使い分けることが合理的である。以下に評価手法のレベルとそれらの活用方法について概説する。

(1) 評価手法のレベル

本研究で扱う評価手法のレベルとその内容は下記の通りであり、レベルの数字が大きくなるほど高度な手法であることを意味する。

- レベル1：構造物の立地条件から構造物の表面塩化物イオン濃度を推定する。
- レベル2：最小限の薄板モルタル計測結果を利用し、事前解析の結果を類型化した情報を活用する。
- レベル3：事前解析の類型化情報を活用し、重要位置に薄板供試体を貼付ける。
- レベル4：事前解析の類型化情報を活用し、重要位置に薄板供試体を貼付ける。暴露試験結果を用いて逆解析を行う。
- レベル5：事前に順解析で重要箇所を確認して薄板供試体を貼付け、測定結果により逆解析を行う。

上記のうち、レベル3～5は既設構造物のための手法であるため、3章において詳しく説明する。

(2) 手法活用のシナリオ

新設構造物を対象とした評価手法では、設計時での利用を想定している、即ち、構造物が存

在しない時点の検討であることから、薄板供試体の測定結果がない場合の検討となる。このため、不確定要因が多く、当然、既設構造物の場合と比較して精度は高くない。

レベル1は、当該構造物の立地条件を考慮して、構造物の表面塩化物イオン濃度を設定する手法である。これは、土木学会コンクリート標準示方書の方法と同様である。ただし、示方書では、海岸からの距離によって表面塩化物イオン濃度を設定することとなっているが、本研究で検討した手法は、構造物周囲の環境条件の影響を取り入れた「補正距離」を用いることにより、高精度化を図ったものである。詳細は、2.2に示す。

本研究では、流体解析とランダムウォーク法を組み合わせた塩分輸送・付着解析の手法を構築したが、これらの解析を、全ての橋梁に対して、対象橋梁の条件（橋梁の形状、地形条件、気象条件）を考慮して行うのは費用・労力の面から現実的でない。このため、レベル2では、予め幾つかの上部構造の形式・風況を設定して付着塩分量の解析を行っておき、その結果を類型化して、基準位置（本研究の場合は、橋梁スパン中央の海側地覆側面）に対する相対的な付着塩分量を部位によって設定する方法をとることとした。表面塩化物イオン濃度の絶対値を知りたい場合には、基準位置の表面塩化物イオン濃度（薄板モルタル供試体への塩分浸透量から計算）と基準位置との相対的な塩分量の比を利用して求めることができ、レベル1で得られる値を基準位置の表面塩化物イオン濃度と見なすことが可能である。

なお、推定精度を向上させたい場合は、構造

物の建設予定周辺のアメダスデータを取得し、その地点の風向・風速を考慮する方法を採ることも可能である。

2.2 気象・海象と地形条件を考慮した飛来塩分推定手法（レベル1）

(1) 実験概要

暴露試験は、原則として塩害環境下にある橋梁に薄板モルタル供試体を貼りつけて行った、また一部では、暴露試験場に供試体を設置した。

a) 暴露地点

①北海道

暴露試験を行った地点は、図 2.2.1 に示す日本海側の2カ所（1橋梁，1暴露試験場）である。

②新潟県本州側沿岸

暴露試験を行った地点は、図 2.2.2 に示す68カ所（全て橋梁）である。

③新潟県佐渡沿岸

暴露試験を行った地点は、図 2.2.3 に示す13カ所（全て橋梁）である。

④石川県

暴露試験を行った地点は、図 2.2.4 に示す2カ所（1橋梁，1暴露試験場）である。

⑤和歌山県

暴露試験を行った地点は、図 2.2.5 に示す1カ所（橋梁）である。

⑥沖縄県

沖縄本島と宮古島において、図 2.2.6 に示す15カ所（10橋梁，5暴露試験場）において暴露試験を行った。



図 2.2.2 試験を行った地点（新潟県本州側沿岸）

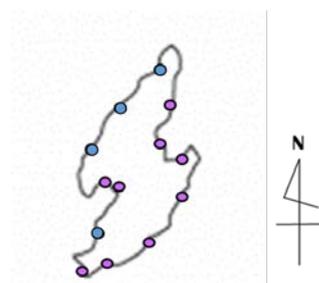


図 2.2.3 試験を行った地点（新潟県佐渡）

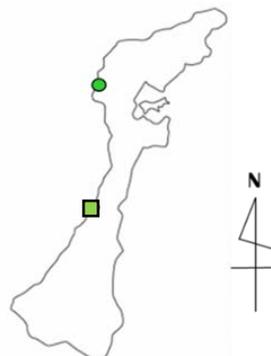


図 2.2.4 試験を行った地点（石川県）

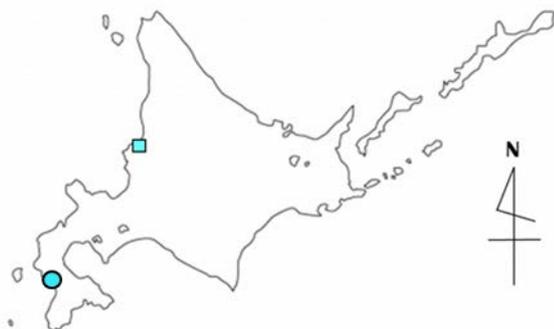


図 2.2.1 試験を行った地点（北海道）



図 2.2.5 試験を行った地点（和歌山県）

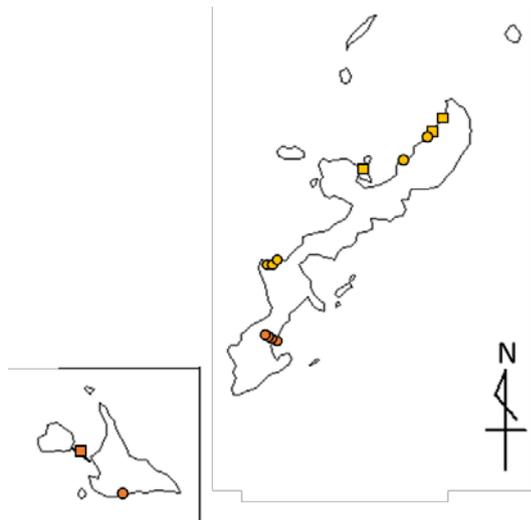


図 2.2.6 試験を行った地点（沖縄県）

b) 供試体と設置方法

本研究では、供試体間のばらつきの影響をできるだけ排除するために、薄板モルタル供試体として、市販品であるデンカ（株）製の「クロルサーチ」を用いた。供試体の寸法は4×4×0.5cmであり、水セメント比は60%である。4×4cmの一面を除いた他の面をアルミテープでシールし、塩分浸透を一面からとした。

供試体は基本的には橋梁スパン中央の海側地覆側面に2枚貼り付けた。設置状況の一例を、写真1に示す。なお前述した通り、地点によっては暴露試験場に設置したものもある。図2.2.1～2.2.6中の●は橋梁、■は暴露試験場を表している。

暴露期間は地域によって若干違いがあるが、おおむね平成28年11月下旬～平成29年4月上旬の約120日間である。暴露期間を冬期としたのは、新潟県等の日本海側沿岸では、年間の飛来塩分量の大部分が冬期に供給されることが確かめられているためである。



写真 2.2.1 供試体設置の様子（橋梁地覆側面）

c) 供試体中の塩化物イオン分析方法およびコンクリートの表面塩化物イオン濃度への換算方法

所定の暴露期間終了後、回収した供試体のアルミテープを剥がしてから、全てを粉砕して分析試料とした。これは、供試体が薄いことから、近似的に供試体中の塩化物イオン濃度分布を無視できると考えていることによる。供試体中の全塩化物イオン量は、JIS A 1154「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により測定した。

薄板供試体は形状と設置方法から、構造物のコンクリートの表面を模擬していると考えられることができる。しかし、用いた供試体とコンクリートとは、材料・配合が異なるため、式(2.2.1)を用いて、薄板供試体への塩分浸透量をコンクリート（普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比50%のコンクリート）の表面塩化物イオン濃度 C_0 に換算した。

$$C_0 \approx \frac{1+R_c}{1+R_m} C_m = \frac{1+R_c}{1+R_m} \cdot \frac{M_m}{l} \quad (2.2.1)$$

ここに、 C_0 ：コンクリートの見掛けの表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_m ：薄板モルタル供試体の表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)

R_c ：コンクリートの塩化物イオン固定化率

R_m ：薄板モルタル供試体の塩化物イオン固定化率

d) 海岸条件の取得方法

本研究では、供試体に供給される飛来塩分量に影響を及ぼす要因として、周辺地形、気象および海象を考慮した。

周辺地形として着目したのは、①離岸距離、②高さ、③海岸地形環境(海岸状況、施設状況)である。離岸距離については、Google Earthの空中写真を用いて、供試体から汀線までの最短距離を求めた。ただし、沖縄県などのリーフ海岸では、潮汐の影響で汀線の位置が大きく変化するため、潮位条件に応じて補正が必要な場合があると考えられる。しかし本研究では、補正方法についての検討は行っていないことから、google earthから得られる距離をそのまま用いたが、結果として他の地域と比較をする上で不都合は生じなかった。

供試体の設置高さは、Google Earthを用いて、橋桁の橋台位置での標高を測定して求めた。

海岸地形環境として、図2.2.7のような海岸状況(砂浜・岩礁・リーフ・その他)と施設状況(消波ブロック、離岸堤、人工リーフ、防波堤)について、目視で分類して整理を行った。

気象条件の評価には、国土交通省気象庁アメダス観測結果を用いた。最多風向の1日間隔のデータを取得して整理を行った。観測点は供試体の設置場所の近くであり、周辺に風況に影響する障害物などが少ない観測点をできる限り選定することとした。なお、飛来塩分量に影響する気象条件としては、風速も重要な要因であるが²⁾³⁾、後述する波エネルギーにその影響が含まれていることから、二重の評価とならないよう、風速については直接考慮しなかった。波浪条件(波高)の評価には、気象庁の沿岸波浪数値予報モデルGPV-CWMの予測値を用いた。GPV-CWMは東経120°~150°、北緯20°~50°の領域において、エネルギー平衡方程式を約5km四方の格子で解いており、1日4回72時間先までの1時間間隔の波浪物理場の予測値を公開している。本研究では、海岸工学分野で一般的に利用されている有義波高(1/3最大波)を波高として整理することとした。ここで、GPV-MSMの有義波高は風速とうねりの合成値となっている。供試体の暴露期間において、GPV-CWMの有義波高の平均値を算出して、海洋飛沫の発生に影響する波エネルギーを求めた。ここで、暴露期間における波エネルギーの積算値が塩化物イオンの濃度に寄与すると考えたため、各暴露期間における有義波高の平均値を用いてエネルギーを求めることで、各観測地点における波浪の影響を比較することができると考えた。有義波高の数値計算の格子点は、波浪が算定されている供試体の設置位置に最も近い格子を選定することとした。

(2) 海岸条件がコンクリートの表面塩化物イオン濃度に及ぼす影響

a) 離岸距離が表面塩化物イオン濃度に及ぼす影響

図2.2.8に、離岸距離とコンクリートの表面塩化物イオン濃度の関係を示す。表面塩化物イオン濃度は、(1)c)に示した方法により、コンクリートの値に換算してある。図より、全体の傾向としては離岸距離が大きくなるほど表面塩化物イオン濃度は小さくなる傾向はあるが、ばらつきは大きく、離岸距離のみで表面塩化物イオン濃度を評価することは難しいと言える。地域別にみると、佐渡と沖縄県においては、東海岸と西海岸で全く異なる傾向があり、同程度の離岸距離でも西海岸の表面塩化物イオン濃度が大きかった。また、和歌山県のデータは1点のみであるが、離岸距離が小さいにもかかわらず、表面塩化物イオン濃度が小さかった。図

中

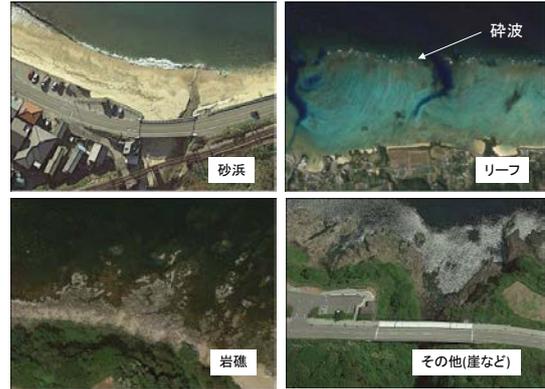


図 2.2.7 海岸状況(砂浜・岩礁・リーフ・その他)の分類

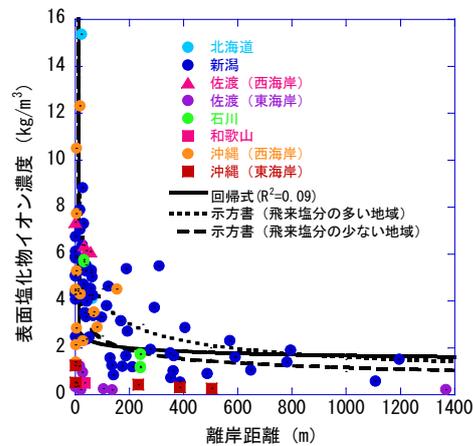


図 2.2.8 離岸距離と表面塩化物イオン濃度の関係

には、コンクリート標準示方書に示されている海岸からの距離と表面塩化物イオン濃度の関係と試験全体のデータの回帰曲線を示している。大部分のデータは、「飛来塩分が多い地域」を対象とした示方書の値より小さく、安全側の評価としては妥当なものと思われる。しかし、実測値を大幅に上回る地点も多い。

なお、回帰式は離岸距離の累乗の関数であり、全データの決定係数が0.09、データが最も多い新潟県本州側のみデータの決定係数が0.31であった。新潟県のデータの決定係数の値が大きいのは、同一地域の地形条件や気象・海象が他と比べて類似しているためと考えられる。

(2) 補正距離による表面塩化物イオン濃度の評価

離岸距離には、その他の海岸条件の影響が含まれていないため、それらの影響を考慮した「補正距離」による表面塩化物イオン濃度の評価を試みた。具体的には、以下のように補正距離を求めた。

a) 標高による補正

2007年度制定コンクリート標準示方書【設計編】⁸⁾では、高さ1mが汀線からの距離25mに相当すると考えて C_0 を求めてよいとされており、これに従って離岸距離を補正した。

$$x' = x_0 + 25 \cdot z \quad (2.2.4)$$

ここに、 x' : 標高補正距離(m)

x_0 : 離岸距離(m)

z : 標高(m)

b) 風向による補正

アメダスより取得した暴露期間の最多風向と汀線直角方向との角度差により、図2.2.9に示す通り式(4)を用い補正した。

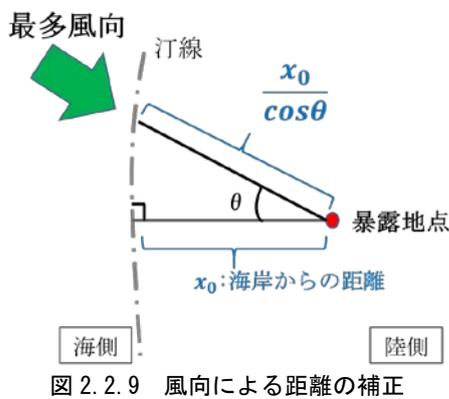


図 2.2.9 風向による距離の補正

$$x'' = x' \cdot \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.2.5)$$

ここに、 x'' : 風向補正後の距離(m)

x' : 標高補正距離(m)

θ : 最多風向と汀線直角方向との角度差

c) 波エネルギーによる補正

沿岸域における波エネルギーは、式(2.2.6)により示される。

$$E = \frac{\rho g}{8} H^2 \quad (2.2.6)$$

ここに、 E : 波エネルギー(N・m/m²)

H : 波高(m)

g : 重力加速度(m/s²)

ρ : 海水の密度(1030 kg/m³)

上式を用いて、各暴露地点の波エネルギーを算出した。その後、式(2.2.7)、(2.2.8)により距離の補正をした。具体的には、波高1mにおける波エネルギーを基準として、各地点の波エネルギーの比を取った。波エネルギーが小さければ、砕波による飛来塩分量が少なくなると考えられ、補正後の距離が長くなると考えた。

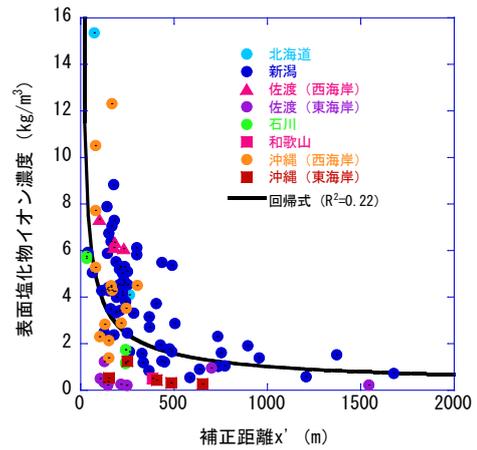


図 2.2.10 標高補正の結果

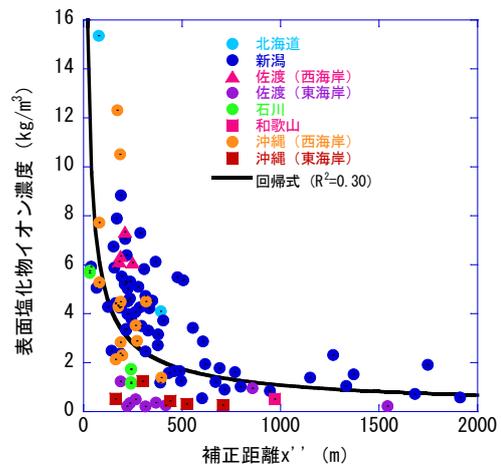


図 2.2.11 標高および風向補正の結果

$$x''' = \frac{x''}{\alpha} \quad (2.2.7)$$

ここに、 x''' : 波エネルギー補正後の距離(m)

x'' : 標高・風向補正後の距離(m)

α : 波エネルギーの比

$$\alpha = \frac{E}{E_1} \quad (2.2.8)$$

ここに、 E : 当該地点の波エネルギー(N・m/m²)

E_1 : 波高1mにおける波エネルギー

(N・m/m²)

d) 補正距離と表面塩化物イオン濃度の関係

図2.2.10および図2.2.11に、標高による補正および標高と風向による補正を行った結果を示す。

標高による補正を行った場合、データ全体の決定係数は0.22となった。また、標高に加えて風向の補正を行った場合の決定係数は、データ全体で0.30となった。高さの影響を考慮することで回帰式の精度は向上し、風向の補正を加えることでさらに精度向上が見られた。特に、

和歌山県のデータは、補正によってデータ全体の回帰式に近づく傾向があり、標高・風向の補正が有効である。

しかし、沖縄・佐渡の表面塩化物イオン濃度の低い地点では、補正を行ってもほとんど変化が無く、標高と風向の補正距離のみで他の地点と同一の評価は難しい。佐渡のような四方が海で囲まれた島では、同様の離岸距離に設置されている構造物でも、設置されている沿岸の位置(島の北側や南側など)によって表面塩化物イオン濃度は大きく異なる。例えば、冬季に北西方向からの風や波が卓越する佐渡では、図 2.2.12 に示されるように、島の北西側で波高が高くその反対側の南東側では急激に小さくなる。これによって、同じ離岸距離でも表面塩化物イオン濃度が大きく異なっていることが考えられる。沖縄についても、表面塩化物イオン濃度の低い4地点は東海岸のものであり、冬季の卓越風は陸側からになることから、佐渡の場合と同様の理由が考えられる。この影響を考慮するために、本研究では波エネルギーを用いた。式(2.2.6) および (2.2.7) によって補正

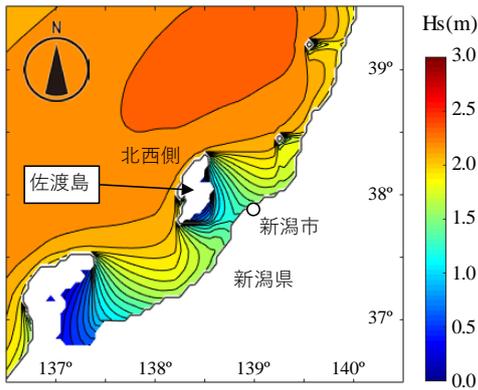


図 2.2.12 暴露期間全体の平均波高(佐渡)

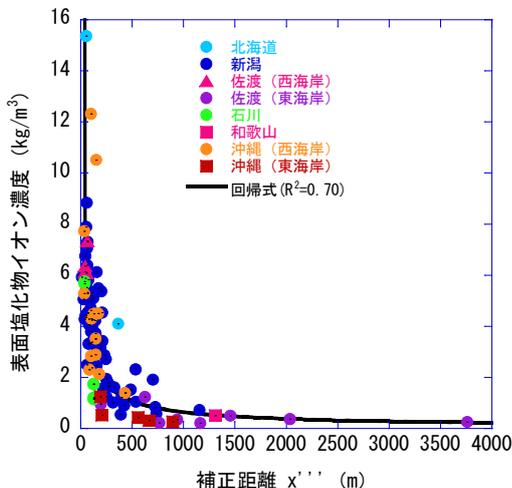


図 2.2.13 標高、風向および波高補正の結果

した距離と表面塩化物イオン濃度の関係を図 2.2.13 に示す。図より、全体的に相関が良くなり、回帰式の推定精度が大きく向上していることがわかる。特に、同一距離でも東側と西側で大きく飛来塩分量が異なっていた佐渡と沖縄についても、波エネルギーを考慮することによって、卓越する風向に対して島陰になる東側の地点の補正距離が大きくなり、推定精度が向上した。離岸距離のみでは評価できない要因(標高・風向・波エネルギー)を考慮した補正距離によって一律な評価が可能となった。

全ての補正を行った後の最終的な回帰式は下記の通りであり、全データの決定係数は 0.70 となった。

$$C_0 = 109(x''')^{-0.74} \quad (2.2.9)$$

ここに、 C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
 x''' : 標高・風向・波エネルギーの影響を考慮した補正距離(m)

2.3 構造物各部位毎の表面塩化物イオン濃度推定方法(レベル2)

(1) 付着塩分量の解析方法

a) 風の流体解析

風の流体解析の主目的は、次に実施する粒子の移流拡散解析に必要な風速場(風速ベクトル)を得ることである。流体解析にはオープンソース有限要素解析ソフトウェアの Adventure_Fluid を使用した。

風の流れを解析する領域は図 2.3.1 のように設定した。橋から解析領域の境界面までの距離は、風速の変化をシミュレーションできるように十分な長さを確保しておくことが必要であり、これは既往の研究や事前解析の結果を参考にして決定した。ただし、解析領域における橋の地面からの高さは、実橋の架設されている高さと同程度に設定した。図 2.3.1 で解析領域の有限要素分割も示した。要素には四面体要素を用いた。橋桁近傍など、風況の変化が大きいと予想される部分は密に分割した。粗い部分は要素 1 辺の長さが約 0.8m、密な部分は要素 1 辺の長さが約 0.15m である。

流体は気温 20°C 下での空気と想定し、物性値は密度 $\rho = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、粘性係数 $\mu = 1.822 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ と設定した。

図 2.3.4 に示す解析領域に存在する全ての面(風の流入・流出面を除く)に境界条件を設定

した。橋桁の表面には、面上で流体の滑りが生じないノンスリップ条件を設定し、その他の面（解析領域の上下面・側面）では、流体の滑りが生じるスリップ条件を設定した。橋桁表面に設定したノンスリップ条件は、流体の粘性を考慮したもので、橋桁表面の風速をゼロとする条件である。橋桁表面の近傍では、ゼロから変化していく風速を計算できるように、細かな有限要素分割をしておく必要がある。本研究では、上述の通り、密な部分の要素1辺の長さが約0.15mとなるように要素分割したが、これは、要素分割の細かさを変えた複数の事前解析の結果を比較し設定した。なお、解析領域の上面と側面は、空中に位置しているものとし、下面は地面を想定している。

図2.2.4の風の流入・流出面には、面に直交する方向に風が進むように風速を設定した。風速の大きさは、下記の手順で設定した。

- ① 1年間のアメダスデータのうち、「最多風向」が対象橋梁の海側の風向いずれかに該当する日のみ、「平均風速」のデータを抽出した。「最多風向」が海側風向に該当しない日のアメダスデータは抽出せず利用しない。
- ② ①で抽出した「平均風速」のデータを0~2 m/s, 2~4 m/s, 4~6 m/s, …, と2 m/sごとの区間で数え、区間ごとの風速に対する発生頻度を調べた。

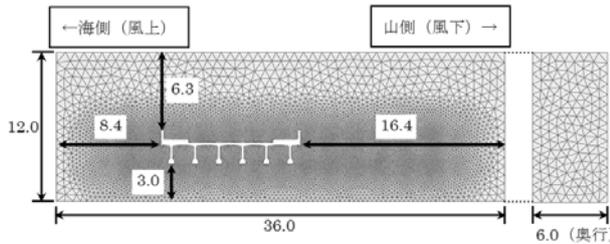


図 2.3.3 解析領域の有限要素分割

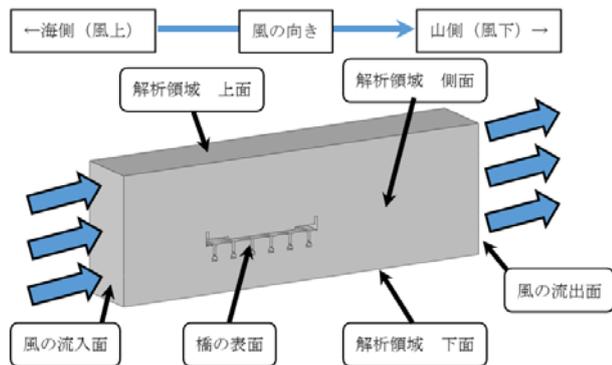


図 2.3.4 境界条件を設定した面

上記で得られた区間ごとの風速に対する発生頻度を風向分合計して解析領域へ流入・流出させる風速として、1, 3, 5, 7 m/s の4ケースを設定することとした（これらは頻度を数えた区間の中間の値）。

風向により異なると予想される風況をシミュレートするために、解析領域内の橋の部分に傾斜させた解析モデルを作成した。解析モデルを図2.3.5に示す。(a)~(d)は橋を上空から見た図である。(a)に示すベースモデルと、ベースモデルの橋桁の部分の時計回りに22.5°, 45°, 67.5°だけ傾斜させたモデル((b)~(d))で流体解析を実施した。次項で示すが、流体解析の結果は、橋の表面に付着する粒子数に反映される。ここで仮に、ベースモデルの橋桁の部分に反時計回りに22.5°, 45°, 67.5°だけ傾斜させた解析モデルも用意して流体解析を行う場合、図(b)~(d)の解析モデルとの相違は橋桁部分の傾斜の方向だけであり、その他の解析条件は同一である。次項で解析結果として付着粒子数を求めるが、この付着粒子数において、橋桁部分の傾斜が時計回りであるか反時計回りであるかによる差異は現れず、橋桁部分の傾斜が時計回りの場合の解析結果を反時計回りの場合にも共用できる。

図2.3.6に風が橋軸直交方向に吹く場合（ベースモデル）の、流入出の風速5 m/sでの風速ベクトル図を示す。図中で風速ベクトルを表す線に白黒の濃淡をつけているが、黒色が濃いほど、また、線が長いほど風速は大きい。図示した風速ベクトルデータは、流入面から流入した風が、時間の経過とともに進み、流出面に到達した時点のデータである。図で見られる特徴として、橋の下部、最も海側の桁の下フランジ左下角部が風の剥離の起点となり、剥離後に風速が大きくなっている。また、橋の下部と解析領域下面（地面）の間が狭いため、剥離した風には逃げ場（風速が徐々に緩和される領域）がなく、当該域では風速低下が認められない。

b) ランダムウォーク法による塩分粒子の輸送解析

ランダムウォーク法（以降、RW法と略記）による塩分粒子の輸送解析では、飛来塩分を粒子で表し、前述した風の流体解析で得られた風速場データに従い粒子を輸送させる。ここで、粒子に自身の速度に応じた拡散性状を持たせるために、粒子拡散手法の一種であるRW法を適用している。本研究では文献2)で示されている解析手法に従い作成された解析プログラムを利用した。

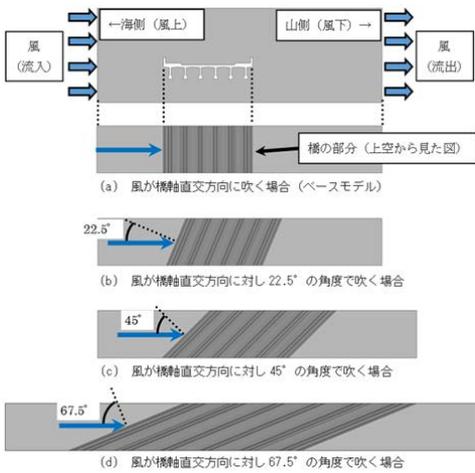


図2.3.5 風向を考慮した解析モデル（視点：上空）

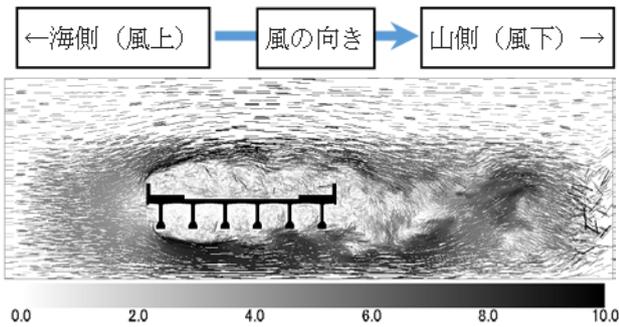


図 2.3.6 流体解析結果 流入出の風速：5 m/s(風が橋軸直交方向に吹く場合)

解析領域における粒子の発生位置を図2.3.7に示す。粒子は、風の流入面および上下面・側面から1mの間隔をあけて発生させた。また、発生させる粒子同士の間隔も1mとし、1ステップに $5 \times 11 = 55$ 個の粒子を供給した。ここで、1ステップとは、粒子の輸送解析の総計算ステップ数のうちの1ステップのことであり、供給する粒子の総数は、 $55 \times$ （総計算ステップ数）となる。この粒子の発生条件は実施したすべての解析で共通とした（流体解析における流入出の風速、風向によらず、毎ステップつねに55個の粒子を発生させた）。なお、粒子の発生位置の間隔を過剰に広くすると、供給する粒子の総数および橋に付着する粒子数が少なくなり、風速や風向の変化に伴う付着粒子数の変化を確認することができない可能性がある。一方で、発生位置間隔を狭くすると、付着粒子数の変化を確認することには支障は無いが、計算や解析結果データ処理に要する時間が膨大となることや、使用するソフトウェアやハードウェアが円滑に動作しない可能性がある。そこで、発生させる粒子数が過少あるいは過多とならないよう、発生位置間隔の広狭を変えた複数ケースの事前解析結果をもとに、風速や風向の変化に伴う付着粒子数の変化を比較的明らかに

確認できることから、上記のとおり粒子の発生位置間隔を1mと設定した。

粒子は、輸送され橋の表面に到達することで付着したものと判定される。また、粒子の質量や体積については考慮せず、それぞれゼロとしている。粒子の輸送のために使用した風速場データは、流入面から流入した風が、橋を挟んだ向かい側の流出面に到達した時点のデータとした。

図2.3.8および2.3.9に風が橋軸直交方向に吹く場合および橋軸直交方向に対する風向の角度 67.5° の場合の粒子（黒い点）の付着状況を示す（流入出の風速は1m/s）。両図とも橋桁下面を表示している。両図に共通して見られる特徴として、海側の桁側面と桁下フランジ底面への粒子付着が多い。また、図2.3.9では、風下側の桁下フランジ底面に対する粒子付着に明らかな偏りがある。この粒子付着の偏りには、桁下フランジ底面付近を流れる風の風速の橋軸に沿った不均一性が影響している。

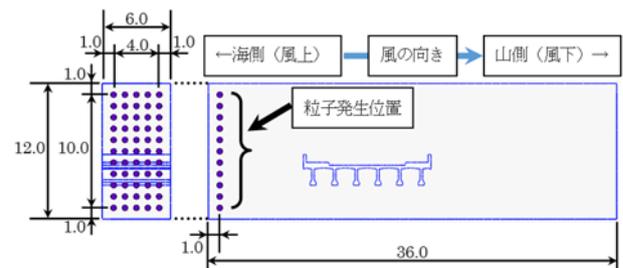


図 2.3.7 輸送解析における粒子の発生位置

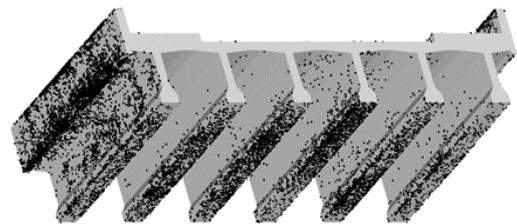


図2.3.8 粒子の付着状況 流入出の風速：1 m/s(風が橋軸直交方向に吹く場合)

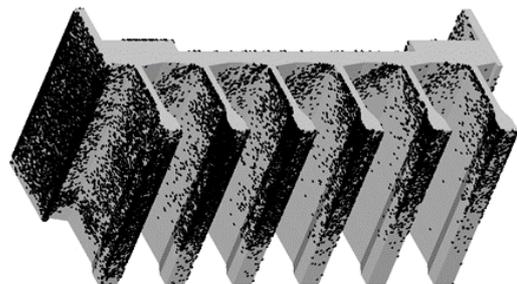


図2.3.9 粒子の付着状況 流入出の風速：1 m/s(橋軸直交方向に対する風向角度： 67.5°)

(2) 手法の概要

橋梁上部構造の形状を仮定し、風況（風向・風速）を種々設定してシミュレーションを行い、各部位における付着塩分量の相対値（海側地覆側面の塩分量を1.0とした値）を求めた。結果の一部を表2.3.1～2.3.4に示す。

風向・風速が変化すれば、当然、各部位における付着塩分量は変化するが、簡便性を考慮し、安全側となるよう、形状別に図2.3.1～2.3.3のように類型化した。図中の数値は、基準位置（海側地覆側面）の塩分量に対する比である。

図2.3.1は、床版橋・溝橋等を対象としている。海側側面に当たった風が剥離して底面の離れた部分や裏面に飛来塩分を輸送する傾向があることから、海側側面と底面の塩分量の比率を同じとした。



図2.3.1 部位毎の相対的な付着塩分量（床版橋・溝橋の場合）

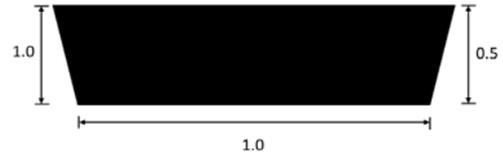


図2.3.2 部位毎の相対的な付着塩分量（箱桁橋の場合）

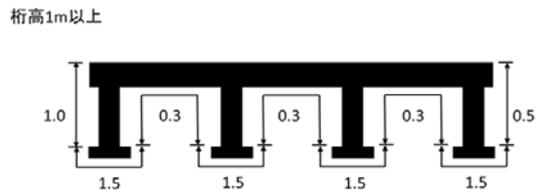
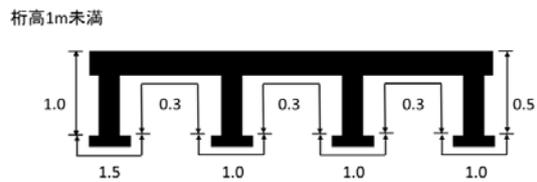


図2.3.3 部位毎の相対的な付着塩分量（T桁橋の場合）

表 2.3.3 風速 10m/s, 風向：橋軸直交方向の場合基準面 1 に対する各部位の塩分付着量の比

断面形状	ケース番号			
	1	2	3	4
矩形	b: 0.5m 12	b: 1m 12	b: 1.5m 12	b: 2m 12
台形	$\phi: 10^\circ$ 12	$\phi: 30^\circ$ 12	$\phi: 10^\circ$ 12	$\phi: 30^\circ$ 12
T桁	b: 2m n: 3本 17	b: 1.5m n: 4本 23	b: 1m n: 6本 35	b: 0.75m n: 8本 47

表 2.3.4 風速 10m/s, 風向：橋軸直交方向から 45° 傾いた方向基準面 1 に対する各部位の塩分付着量の比

断面形状	ケース番号			
	1	2	3	4
矩形	b: 0.5m 12	b: 1m 12	b: 1.5m 12	b: 2m 12
台形	$\phi: 10^\circ$ 12	$\phi: 30^\circ$ 12	$\phi: 10^\circ$ 12	$\phi: 30^\circ$ 12
T桁	b: 2m n: 3本 17	b: 1.5m n: 4本 23	b: 1m n: 6本 35	b: 0.75m n: 8本 47

図2.3.2は、箱桁の場合である。箱桁では、底面の付着塩分量が海側から山側へ向かうに従って少なくなっていくが、安全側の設定として底面全体で相対値を1.0とした。結果として床版橋の場合と同じとなった。

図2.3.3は、T桁橋の場合であり、桁高1mを境にして2つ分けた。T桁の場合の一般的傾向として、フランジ側面・底面の塩分量が多くなり、桁間は少ない。桁高は、フランジ側面および下面の塩分量に影響する。すなわち、桁高が高い場合は海側フランジ側面から風が剥離し回り込むことによって、山側の桁のフランジにも多くの塩分が到達する。なお、桁の本数は図では4本としているが、本数が変わってもこの図を適用するものとする。桁高が1m以上では、フランジ部分の塩分量は位置に寄らず同じであり、桁高1m未満の場合は、海側から2本目以降のフランジ部の塩分量を全て同じとする。

図2.3.4～2.3.6に、図2.3.1～2.3.3に示した部位毎の付着塩分量の相対比の設定値とその根拠データとなった表2.3.1～2.3.4の値（解析値）

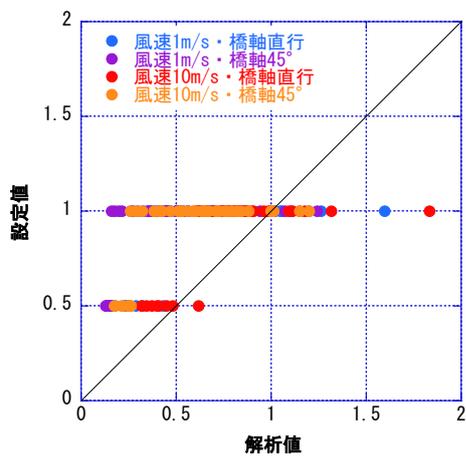


図2.3.4 解析値と設定値（床版橋・溝橋）

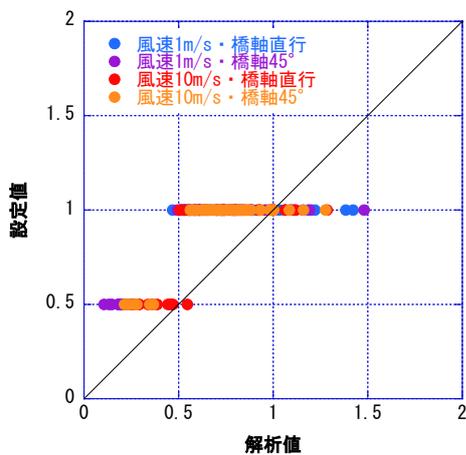
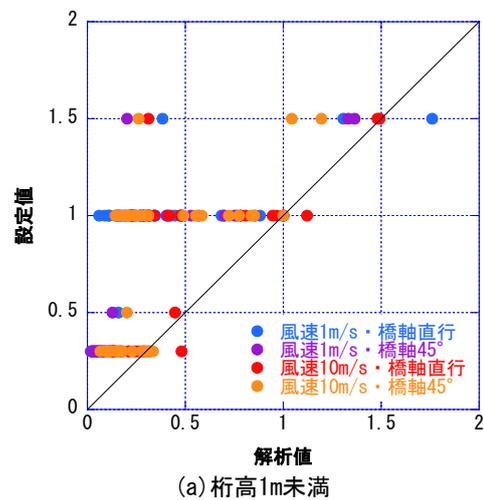


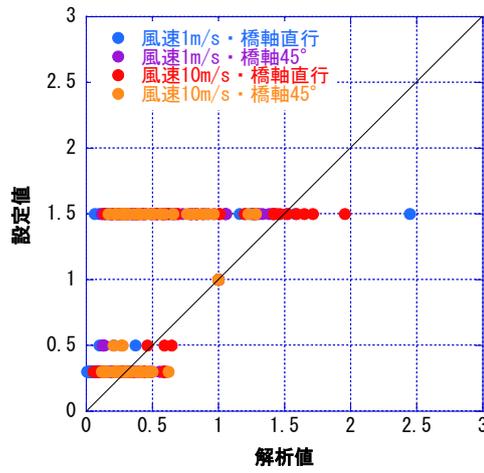
図2.3.5 解析値と設定値の関係（箱桁橋）

の関係を示す。解析は、風向と風速を一定としてそれぞれのケースについて計算しているが、実際には風向・風速は時々刻々変化しており、薄板供試体あるいは構造物の付着塩分量は、個々の風向・風速における付着塩分量の累積である。あらゆるケースを想定してシミュレーションを行うことは現実的ではないことから、飛来塩分の輸送量が多い風速の大きい風の結果を重視し、解析値の90%程度が設定値以下となるよう値を定めた。

床版橋・溝橋および箱桁では、相対値0.5においてはほぼ全ての解析値が設定値を下回っている。設定値1.0においては、いくつかの解析値が設定値を上回り危険側となっているが、設定値を上回っているのは風速1mの解析値が大部分を占めている。風速が小さい方が飛沫の発生量が少ないことから、相対比は大きくても塩分量の絶対値は小さい。したがって、劣化に及ぼす影響は大きくないと判断できる。



(a) 桁高1m未満



(b) 桁高1m以上

図2.3.6 解析値と設定値の関係（T桁橋）

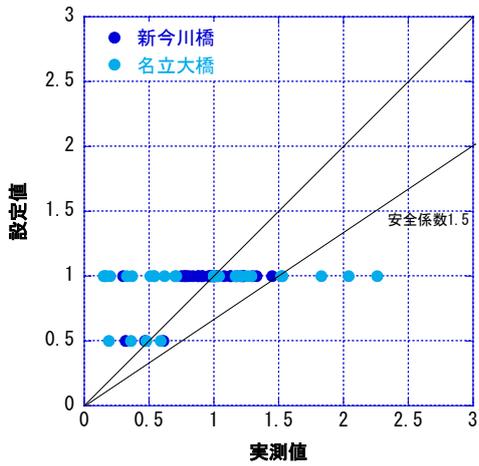
T桁橋では桁高で2つに分けたが、それぞれ解析値の約90%が設定値を下回るよう設定値を定めた。

これまで、上部構造の形式によって異なる表面塩化物イオン濃度を設定する方法は無かったが、図2.3.1～2.3.3を参考とすることで、より合理的な耐久性設計が可能となる。

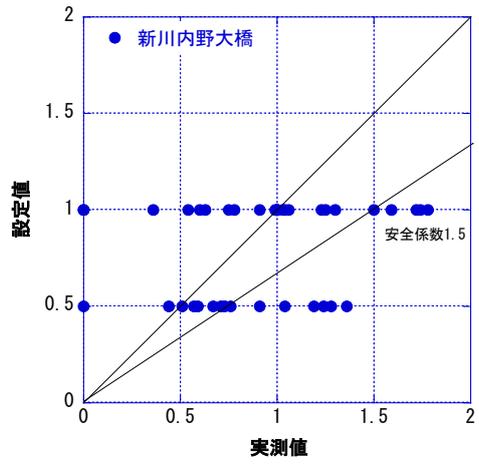
(3) 評価手法の検証と安全係数の設定

ここでは、前節で示した構造物部位毎の表面塩化物イオン濃度推定方法の妥当性を確認するために、実測データとの比較を行い評価する。また、それらの結果を用いて推定手法の安全係数を設定する。

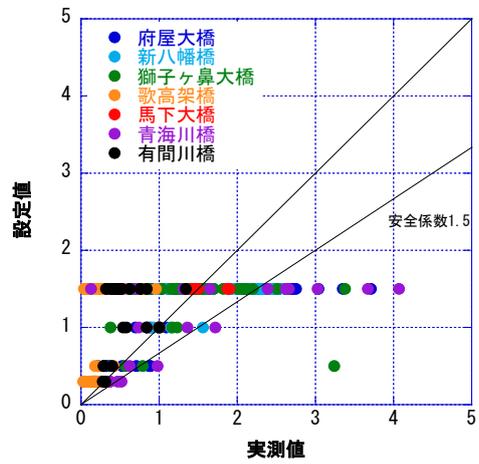
図2.3.7に、類型化した情報から定めた設定値と実測値（実橋に設置した薄板モルタル供試体の塩分浸透量の比）の比較結果を示す。設定値より実測値が小さくなるケースは、全体の60%程度である。図中には、安全係数を1.5とした場合の直線を示してあるが、この場合は、殆どの実測値が設定以下となり、安全係数は1.5でよいと考えられる。



(a) 床版橋・溝橋



(b) 箱桁橋



(c) T桁橋

図 2.3.7 設定値と実測値の比較

第3章 既設構造物のための塩害環境評価手法の構築

3.1 手法の概要

(1) 評価手法のレベル

既設構造物を対象とした評価手法のレベルを再掲する。なお、2章で示したように、レベル1および2は、新設構造物を対象とした手法である。

- レベル3：事前解析の類型化情報を活用し、重要位置に薄板供試体を貼付ける。
- レベル4：事前解析の類型化情報を活用し、重要位置に薄板供試体を貼付ける。暴露試験結果を用いて逆解析を行う。
- レベル5：事前に順解析で重要箇所を確認して薄板供試体を貼付け、測定結果により逆解析を行う。

(2) 手法活用のシナリオ

新設構造物を対象とした評価手法との違いは、構造物が現存するため、測定が行える点にある。対象橋梁での測定値を用いた逆解析を行うことで、精度を高めることが可能となる（レベル4、5）。また、本研究の手法は薄板モルタル供試体を用いることが前提であり、暴露期間は冬期4カ月～1年程度を想定しているが、構造物におけるコア調査などを行えば、さらなる精度の向上も期待できる。

なお、レベル3では、解析を行わないこととしているが、薄板供試体の測定結果から、測定部位における塩害環境を定量的に評価できるため、環境条件の厳しい部位を特定して表面被覆を行うなどの対策を採れば、少ない費用で効果的な予防保全となると考えられる。

薄板供試体への塩分浸透量を用いた逆解析

では、薄板供試体の位置によって精度が異なる。これは、平成27年度のFS研究で検討した通りであるが、既設構造物の塩害環境評価手法ではまず、薄板供試体の貼付け位置を決める必要がある。27年度の検討では、付着塩分量が多い位置（ピーク位置）あるいは、多い位置と少ない位置（ピークとバレーの位置）を選定すると逆解析の精度が高くなることが確認されている。

レベル3・4と5の違いは、薄板供試体貼付け位置の選定方法の違いである。

レベル3・4では、上部構造の形式から事前解析による類型化情報の中で類似した形状を選択し、塩分量が多くなると推定されている箇所（箇所）に薄板供試体を貼りつける。レベル5では、対象構造物の風況（場合によっては地形）を考慮し、流体解析とランダムウォーク解析を行って、付着塩分量を事前に求め、重要な箇所（逆解析の精度が高くなる箇所）を選定して薄板供試体を貼る。何れの方法でも、基準点として海側地覆側面は供試体を貼るのが望ましい。

レベル4・5では逆解析結果を利用して、再度、順解析を行うことにより、構造物の全表面における表面塩化物イオン濃度を推定することが可能となる。この結果から、レベル3では供試体を貼り付けた箇所（箇所）でしか塩害環境を評価できないのに対して、構造物全体から劣化しやすい箇所を特定し、点検の重点箇所の絞り込みを行うことで維持管理を効率化する、予防保全を行うことで耐久性を向上させる、等の対応をとることが可能となる。さらに、推定された表面塩化物イオン濃度を境界条件として、塩分浸透解析を行うことにより、部位毎の飛来塩分環境の違いを考慮した3次元的な塩分濃度分布を求めることも可能となる。断面修復工法では、塩分が侵入した箇所を取り残すとマクロセ

ル腐食が発生し、早期に塩害が再発することがあるが、本手法で3次元的な塩分濃度分布を把握しておくことによって、過不足のない補修範囲を設定することができる。

3. 2 実測による表面塩化物イオン濃度評価 (レベル3)

レベル3を供用開始直後の構造物に適用することが、費用・労力の面からも効果の面からも推奨できる方法である。以下に実構造物での薄板供試体による調査事例を示す¹⁾。

a) 対象橋梁

対象橋梁は、河口部に位置する可動堰を管理する昭和46年に竣工した7径間プレテンションPC T桁橋であり、新潟市日本海側に位置する。図3.2.1に、位置図を示す。また、図3.2.2に、橋梁側面図および平面図を示す。

b) 供試体暴露試験 (シリーズI)

薄板モルタル供試体として、クロルサーチを用いた。供試体の寸法は4cm×4cm×0.5cmであり、4cm×4cmの面を除いた5面をアルミテープでシールし、塩分の浸透を一面からのみとした。

薄板モルタル供試体の暴露試験は、図3.2.2に示した橋梁の各径間中央部の地覆側面において行った。季節別の飛来塩分量の把握のため、1回の暴露期間はおよそ3ヶ月とし、2015年2月24日～2016年4月26日まで供試体を入れ替えて4回の試験を行った。

所定の暴露期間の後、回収した薄板モルタル供試体内部の全塩化物イオン量を、JCI-SC4に基づき電位差滴定法により測定した。

c) 供試体暴露試験 (シリーズII)

薄板モルタル供試体は、シリーズIと同様のものを用いた。

薄板モルタル供試体の暴露試験は、図3.2.3に示した第4径間主桁の下フランジ側面および下面で行った。暴露試験は、2015年2月24日～2015年11月12日で行った。供試体に浸透した塩化物イオン量は、シリーズIと同様の方法で測定した。

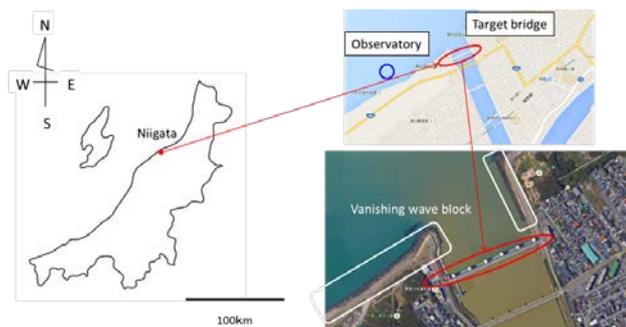


図3.2.1 対象橋梁の位置

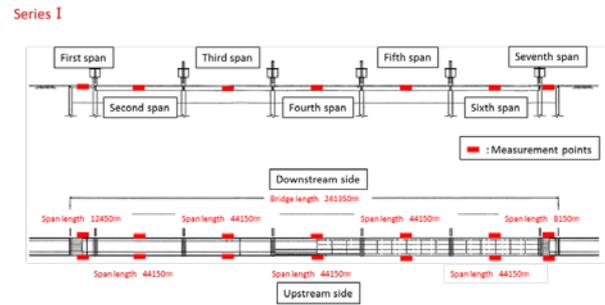


図3.2.2 橋梁側面図および平面図とシリーズIの薄板供試体設置位置

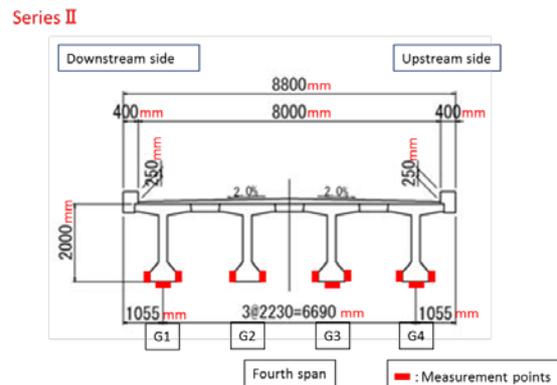


図3.2.3 シリーズIIの薄板供試体設置位置

d) 径間毎の塩害環境 (シリーズI)

地覆側面の暴露試験結果の一例を図3.2.4に示す。暴露期間は、2015年10月～2016年1月である。図より、第7径間の供試体に多くの塩分が浸透する結果となった。これは、他の時期においても同様であった。

図3.2.5に、暴露期間における風速10m/s以上の風の観測回数と風向を示す。図より、西からの風が卓越していることがわかる。風向から考えると、飛来塩分を運ぶ風の流れは、図3.2.1に示されるように左岸側に突き出した地形により遮断されると考えられる。しかし、第7径間では、風の流れが周辺の地形に遮られることなく、飛来塩分が到達する。さらに、第7径間では、消波ブロックにより、砕波しなかった波が図3.2.6に示す下流側に存在する護岸によって絞られ、しぶきとなって直接かかるため、極めて塩分浸透量が多い結果になったと考えられる。

表3.2.1に、対象橋梁の竣工から平成26年までの主な補修履歴を示す。第7径間では、竣工からおおよそ10年後の昭和58年には、PC鋼線の破断が生じている。このことから、厳しい塩害環境の中でも、特に第7径間が一番厳しいこ

とがわかる。この傾向は、図 3.2.4 に示される暴露試験による結果と一致している。

以上の検討より、構造物に到達する飛来塩分量は、周辺の地形と風向に大きくに影響を受けることが本研究において確認することができた。また、薄板供試体を実構造物の地覆側面に短期間暴露することで、構造物の劣化環境の相対的な厳しさを把握できることが確認できた。

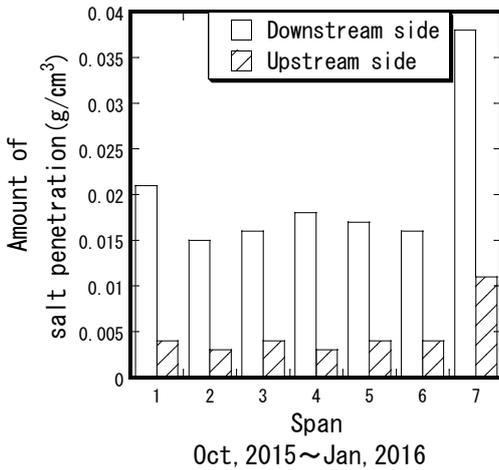


図3.2.4 地覆における塩分浸透量

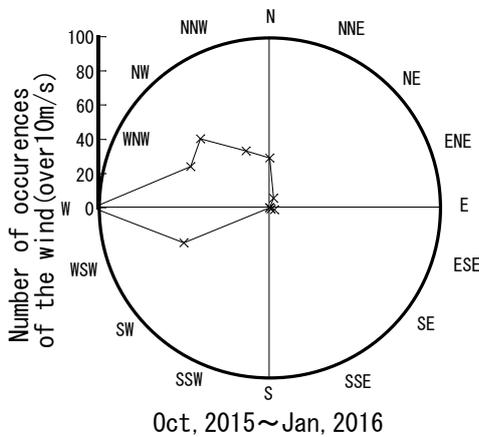


図3.2.5 風向図



図 3.2.6 第 7 径間付近の護岸

表3.2.1 補修履歴

Span	First span	Second span	Third span	Fourth span	Fifth span	Sixth span	Seventh span
Span 48	Asbestosis						
Span 58	Rise joint, cracking, peeling (beam)						Breaking of PC steel wire
Span 59	Cracking (chamber)	Crack (beam), but no damage to the steel					Breaking of PC steel wire
Span 49	Cross-section repair, surface coating	Cross-section repair, surface coating				Cross-section repair, surface coating	Cross-section repair, surface coating
Span 61		Cross-section repair, surface coating	Cross-section repair, surface coating	Bridge collapse prevention device repair	Cross-section repair, surface coating	Bridge collapse prevention device repair	
Span 62		Cross-section repair, surface coating		Bridge collapse prevention device repair	Cross-section repair, surface coating	Bridge collapse prevention device repair	
Span 5	Fire line	Rise joint, cracking (beam)					
Span 6	Rise joint (floorboards)	Crack (on lower flange side), shear corner (on the fourth span - the sixth span)					
Span 7	Waterproof work			Waterproof work, cross-section repair			
Span 8	Waterproof work, cross-section repair, surface coating			Involved design (floorboard beam)			
Span 9				Waterproof work, reinforcement work			
Span 20	Water leakage, fire line						
Span 21	Rise joint, cracking (beam), damage of concrete waterproofing						
Span 22	Fire cut						
Span 23	Partial loss, breaking of steel						
Span 24	Softening of PC cable						
Span 25	Cracking, peeling (beam)						
Span 26	Cracking repair			Cracking repair		Cracking repair	

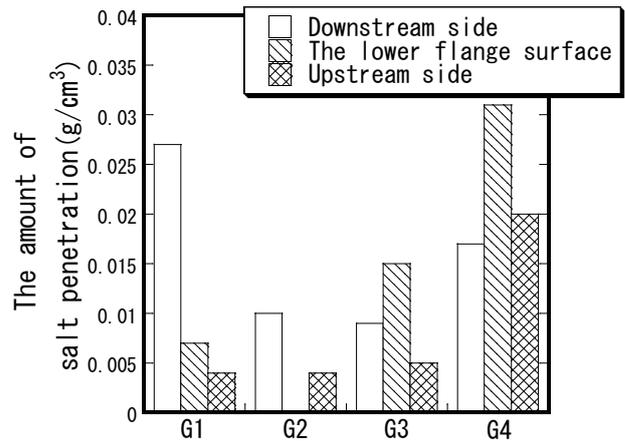


図 3.2.7 第 4 径間桁フランジにおける塩分浸透量

e) 桁の部位毎の塩害環境 (シリーズ II)

シリーズ I よりさらに詳細な検討を行うために、桁に暴露試験を行った結果を図 3.2.7 に示す。

第 4 径間は、図 3.2.4 を見ると地覆における塩分量はそれほど多くない。一方で、桁フランジ部では、第 7 径間の地覆と同程度の塩分量となっており、非常に厳しい塩害環境である事がわかる。当該の桁は、外ケーブル補強が行われており (表 3.2.1 参照)、実際に劣化が進行していた。この部位では、地覆での測定結果のみでは、厳しい塩害環境を見逃す可能性があったことがわかる。

飛来塩分は日本海からの季節風によって運ばれ、構造物に到達するため、下流側である G1 桁の側面に暴露した供試体への塩分浸透量が多く、上流側である G4 桁に暴露した供試体への塩分浸透量は少ないことが予測されたが、G4 桁のフランジ下面に暴露した供試体への塩分浸透量が最も多く、次いで、G1 桁の下流側側面に暴露した供試体への塩分浸透量が多いという結果となった。

図 3.2.8 に、上部構造周りの風速ベクトル図

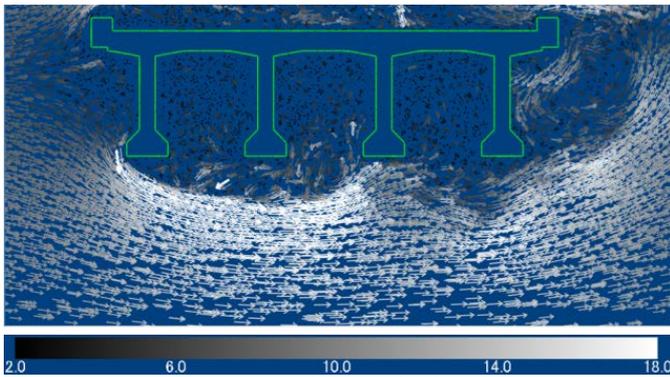


図 3.2.8 風速場の解析結果

を示す。図では、風向を矢印の向きで、風速を矢印の長さで確認できる。図より、桁の下部に着目すると、下流側の桁側面 (G1 桁) 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、下方に弧を描くように吹き抜ける。すなわち、上流側の桁側面 (G1 桁) で剥離した風が、到達しやすい部位は、上流側の桁 (G3, G4 桁) のフランジ下面であり、相対的に薄板モルタルへの塩分の付着量は、下流側の桁側面 (G1 桁)、さらに橋の上流側の桁 (G3, G4 桁) のフランジ下面への付着量が多くなると考えられる。図 3.2.7 の暴露試験結果は、この傾向が捉えられている。したがって、桁部分の塩害環境は、薄板モルタルの暴露試験により評価でき、その定性的な傾向は、風速場の解析によって把握できることが確認された。この例では、供用後 45 年で調査を行ったが、薄板供試体の塩分浸透量から塩分供給量の多い部位が特定でき、さらに、それらの部位で実際に劣化生じていることが確認できた。このことは、薄板供試体を用いた暴露試験によって、劣化部を特定できることを示しており、できるだけ早期に、理想的には供用開始直後に測定を行えば、事前に劣化部位を特定でき、予防保全を行うことが可能となる。建設中の足場などがある時に薄板供試体を貼っておくと、費用の節約にもなる。設計の段階で塩害環境を推定・評価し、その結果を耐久性設計に取り入れることは非常に重要であるが、構造物の建設による地形の改変、消波施設 (消波ブロックなど) の設置の影響を事前に全て把握することは難しいと思われる。供用開始直後の塩害環境測定が推奨される。本手法の普及のために、供用開始直後の暴露試験を設計者あるいは施工者との契約に含めることも効果的であると思われる。

3.3 レベル 4 およびレベル 5

構造物部位毎の付着塩分量の大小評価について、レベル 4 では、事前に実施済みの複数の順

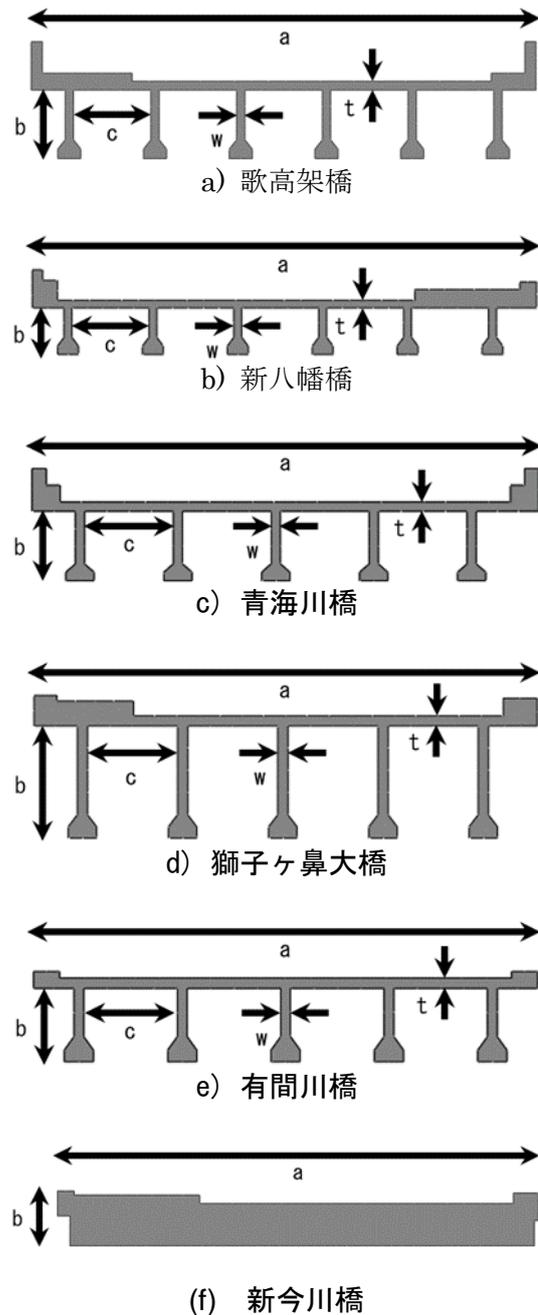


図 3.3.1 推定対象の橋 T 桁橋 断面形状
(a: 幅, b: 桁高, c: 桁間間隔, w: 桁幅, t: 厚さ)

解析結果を整理した類型化情報を参照する。そのため、調査対象の構造物の断面形状、寸法などが、類型化情報で想定している構造物の断面形状、寸法などと、必ずしも一致するわけではない。ただし、順解析 (風の流体解析および塩分粒子の輸送解析) に要する手間を省くことができるという長所がある。なお、類型化情報を充実させることは、本研究における今後の展開の一つである。一方、レベル 5 では、調査対象の構造物の断面形状、寸法などの情報をもとに順解析を行い、部位毎の付着塩分量の大小を精

度よく評価することを目的としている。なお、逆解析は、レベル4、レベル5の両水準で実施されるが、両水準で異なるのは、用いる実測データの位置と数であり、実施する解析はまったく同じである。

(1) 推定対象の形状、寸法

レベル4、5ともに、推定対象の形状、寸法情報を用いて解析モデルを作成し、順解析（風の流体解析および塩分粒子の輸送解析）を行い、その後、順解析の結果を用いて、逆解析を行う。本資料では、図3.3.1に示す5橋を対象とする。図1で、a：（橋の断面の）幅、b：桁高、c：桁間隔、w：（ウェブ部の）桁幅、t：（床版の）厚さ、であり、対象5橋のこれらの値について、表3.3.1に記載した。

(2) 風向、風速、風が吹く時間

ここでは、推定手法の手順の説明を主目的とし、説明の便宜をはかるため、風向を橋軸直交方向のみに限定する。また、海側（塩分発生源）を風上とする風向を設定する。風速は、1、3、5、7m/sの4ケースを設定する。風が吹く時間は、推定対象の最寄りのアメダス観測所で観測されたアメダスデータを利用して設定する。アメダスデータより、設定した風速ごとに、風が吹く日数データを抽出する。データを抽出する期間は、表面塩化物イオン濃度の実測データとの比較を行うため、実測データの取得期間（薄板モルタル供試体の暴露期間）に対応させる。対象5橋について、風速ごとの風が吹く日数のデータを整理したものを表3.3.2に示す。なお、

に分解したとき、いずれか一方向が橋軸直交方向となるデータについても抽出している。この場合、もとのデータを分解したぶん、風速が弱まるよう換算し抽出している。

(3) 評価部位

以降で、逆解析による表面塩化物イオン濃度の推定結果と、実測データとの比較を示す。比較のために設定する評価部位について図2に示す。評価部位の番号は、設定した各部位に風上（海側）から風下（山側）へ向けて、断面形状の縁に沿って1、2、3、…と順に番号を付けた。なお図2では、評価部位が多いため、番号の記載を省略している部位がある。なお、提案手法では、設定する全ての評価部位において表面塩化物イオン濃度が推定されるが、実測ではデータが存在しない部位がある。この場合でも、

評価部位の番号は図2に示すと通りの番号を用いる。

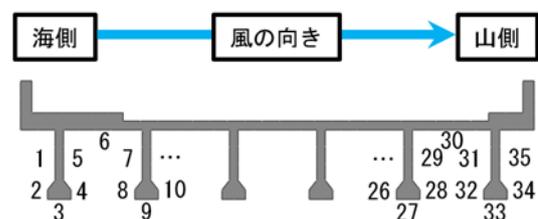
表3.3.1 推定対象の橋 T桁橋 主な寸法の値
（寸法の単位は m（メートル））

	幅 a	桁高 b	桁間隔 c	桁幅 w	厚さ t	桁の本数 n [本]
歌高架橋	11.25	1.52	1.72	0.19	0.2	6
新八幡橋	12	1.11	1.83	0.19	0.18	6
青海川橋	9	1.24	1.58	0.16	0.16	5
獅子ヶ鼻大橋	8.85	1.97	1.58	0.18	0.18	5
有間川橋	7.8	1.14	1.45	0.15	0.16	5
新今川橋	11.5	1.32	—	—	—	—

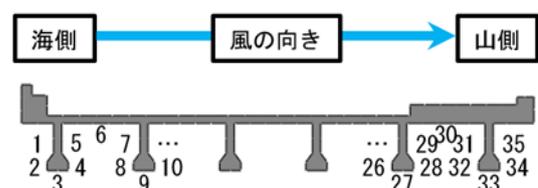
表3.3.2 推定対象の橋 風速頻度データ

	アメダス観測所	風向 ※)	風速頻度データ (風速ごとの風が吹く日数 [日])			
			1 m/s	3 m/s	5 m/s	7 m/s
歌高架橋	糸魚川	北西	28	21	3	1
新八幡橋	鼠ヶ関	北西	21	40	28	10
青海川橋	糸魚川	北北西	6	13	8	0
獅子ヶ鼻大橋	寺泊	西北西	2	27	31	12
有間川橋	大潟	北北東	8	7	0	0
新今川橋	鼠ヶ関	北西	35	45	37	11

※) ここで、「風向」は、橋軸直交方向かつ、海側を風上とする風向のことである。



a) 歌高架橋



b) 新八幡橋

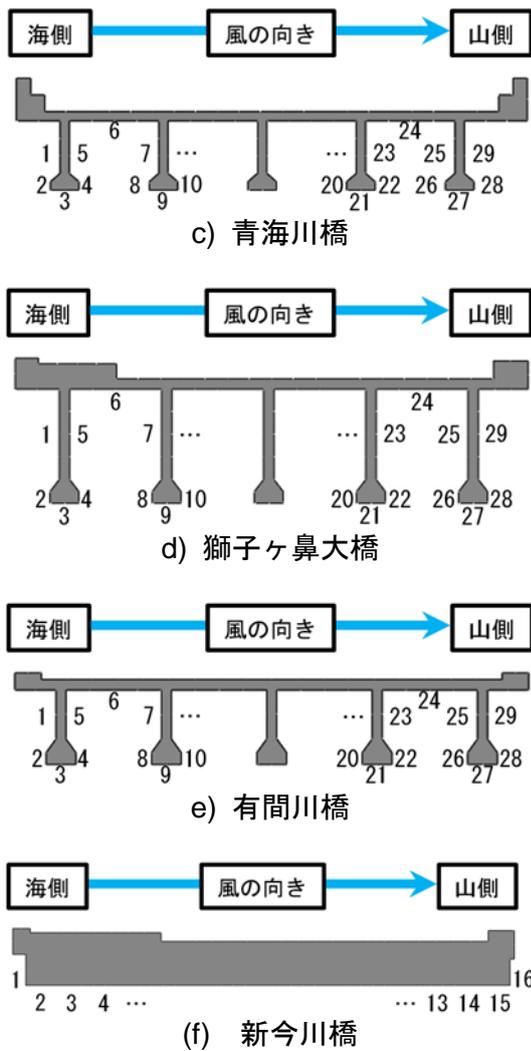


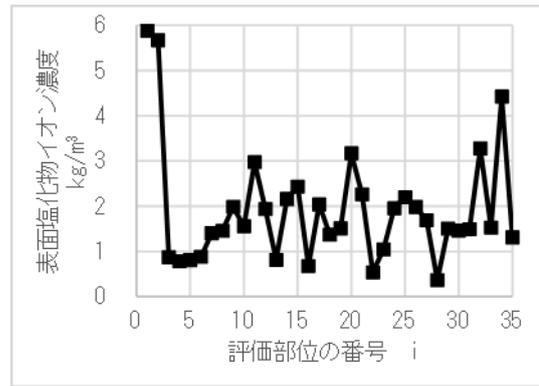
図3.3.2 推定対象の橋 評価部位

(4) 実測データ

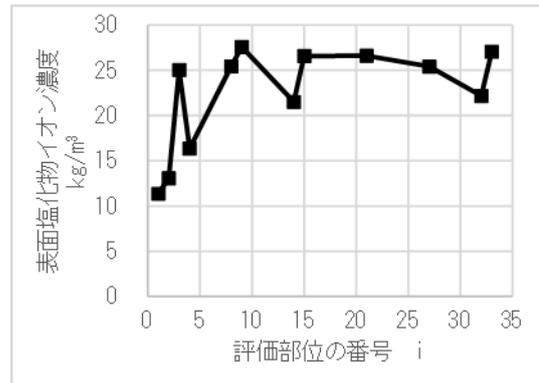
推定対象の5橋に対し、薄板モルタル供試体を貼り付け、暴露し得られた実測データ（表面塩化物イオン濃度データ）を図3.3.3に示す。薄板モルタル供試体の貼り付け期間は、前掲の表2中、「データ抽出期間」に示す通りである。貼り付け部位は、前掲の図3.3.2の評価部位と同じである。ただし、薄板モルタル供試体の貼り付けが省かれ、実測データが存在しない部位もある。

(5) 逆解析

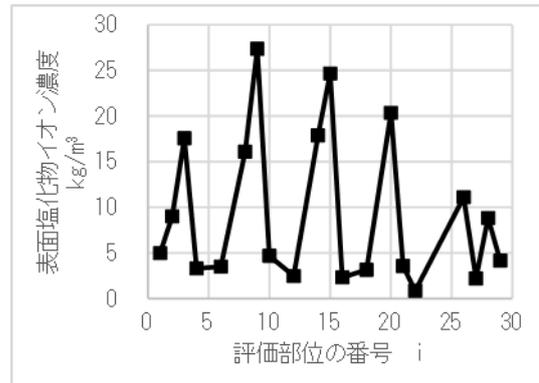
レベル4、5の両水準ともに、実測データに対する逆解析を実施する。ここでの逆解析とは、順解析（風の流体解析および塩分粒子の輸送解析）の結果を実測データに近づける換算パラメータ（データ同化パラメータ）を求めることである。このデータ同化パラメータを α とすると、風向を橋軸直交方向のみに限定する場合、 α は次式により求まる。



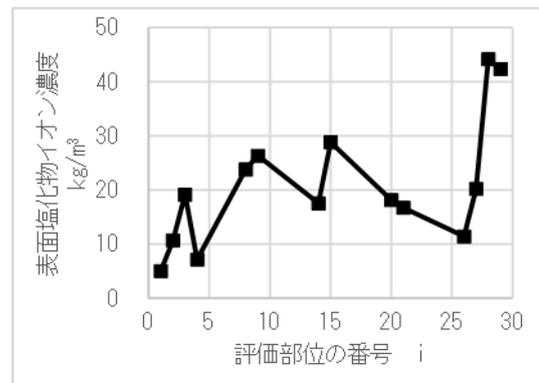
a) 歌高架橋



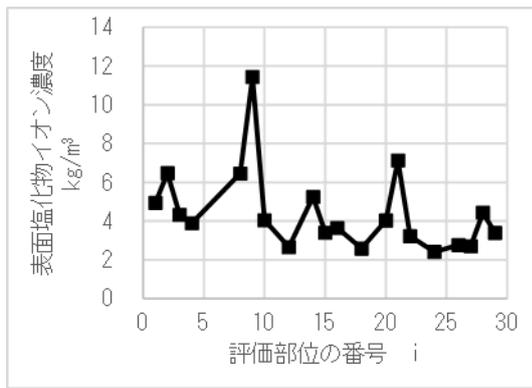
b) 新八幡橋



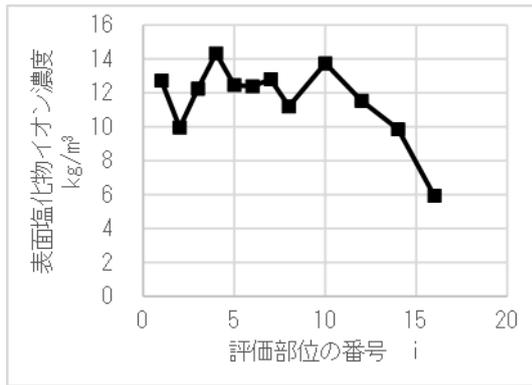
c) 青海川橋



d) 獅子ヶ鼻大橋



e) 有間川橋



f) 新今川橋

図3.3.3 推定対象の橋 実測データ（表面塩化物イオン濃度データ）

$$\alpha = \left(\frac{\sum_i \left(\bar{S}_i \cdot \left(\sum_j (a_{ij} \cdot t_j \cdot V_j^2) \right) \right) \right)}{\left(\sum_i \left(\sum_j (a_{ij} \cdot t_j \cdot V_j^2) \right)^2 \right)} \right) \quad (3.3.1)$$

ここで、 i : 評価部位の識別番号、 l (エル) : 評価部位の総数、 j : 風速ケース識別番号、 m : 風速ケース総数、 \bar{S}_i [kg/m³] : 評価部位番号 i における実測データ (表面塩化物イオン濃度)、 a_{ij} [個/(m²・s)] : 順解析により求まる単位面積・単位時間あたりの付着粒子数 (なお、部位 i 、風速ケース j における付着粒子数)、 t_j [s] : 風速 V_j で風が吹く時間、 V_j [m/s] : 風速ケース番号 j における風速である。

パラメータ α は、推定値 S_i と実測データ \bar{S}_i の誤差二乗和を最小にする値として求まる。求まったパラメータ α を次式(3.3.2)に代入し、評価部位 i あるいは任意部位における表面塩化物イオン濃度の推定値 S_i を求めることができる (任意部位における推定値 S を求める場合は、その部位に対応する面積・時間あたりの付着粒子数 a_j を式(2)で用いる)。

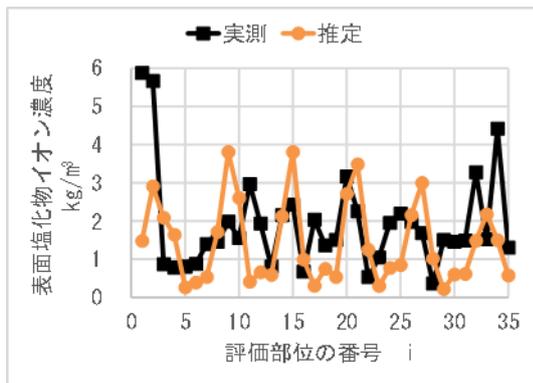
$$S_i = \sum_j^m (\alpha \cdot a_{ij} \cdot t_j \cdot V_j^2) \quad (3.3.2)$$

式(3.3.1)でパラメータ α を求めるにあたり、風速 V_j および風が吹く時間 t_j には前掲した表 3.3.2 に示したデータを代入すればよい。単位面積・単位時間あたりの付着粒子数 a_{ij} には、順解析により直に a_{ij} を求め、式(3.3.1)に代入する。

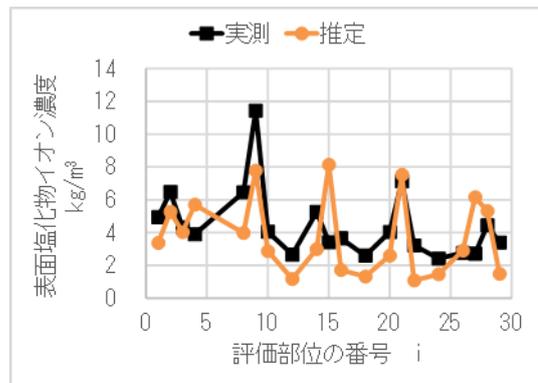
(6) 表面塩化物イオン濃度の推定

前述の逆解析を実施し、設定した評価部位における表面塩化物イオン濃度を推定する。推定された表面塩化物イオン濃度について図4に示す。図3.3.4では、実測データも合わせて示す。また、逆解析により求めたデータ同化パラメータ α について表 3.3.3 に示す。

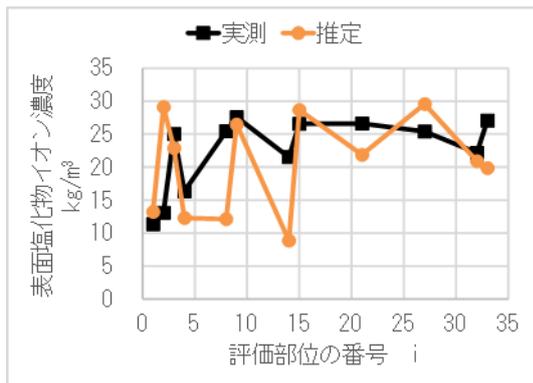
逆解析は、最小二乗法を適用するものであり、推定値全体で見ると、実測データに近い値が得られる。しかし、図3.3.4を見ると、実測と異なる推定値が現れている部位もある。特に、実測では大きな値を示しているのに、推定では比較的小さい値にとどまっている部位が少なくない。これは、まず、順解析 (風の流体解析および塩分粒子の輸送解析) の結果である単位面積・単位時間あたりの付着粒子数 a_{ij} が、精度よく求められていない可能性がある。また、前述の逆解析で、設定するすべての評価部位において、推定値と実測データの誤差二乗和を最小にすべく、データ同化パラメータ α を求めており、少ない (1~4 部位程度) が値の大きい実測データより、値は目立たないが、数が多い実測データに近づくよう、データ同化パラメータ α が求まることも、理由の一つであろう。さらに、現時点では、順解析において、塩分を表す粒子は、構造物の表面に到達すると、必ず付着するものとして扱っているが、現実には、構造物の表面に到達しても、反射する風に乗って、別の部位へ向かうような挙動も生じると考えられる。粒子の反射のため、実測では、山側 (風下側) を向く桁の側面や、桁間の天井面でも、表面塩化物イオン濃度が大きくなっている可能性がある。最後に、順解析では、ある一瞬の風速場データ (風速ベクトルデータ) に従い、塩分を表す粒子を移動させているが、風速場は時時刻刻に変化するため、この時時刻刻に変化する風速場データを用いて塩分粒子を移動させる方法を確立することも必要であろう。



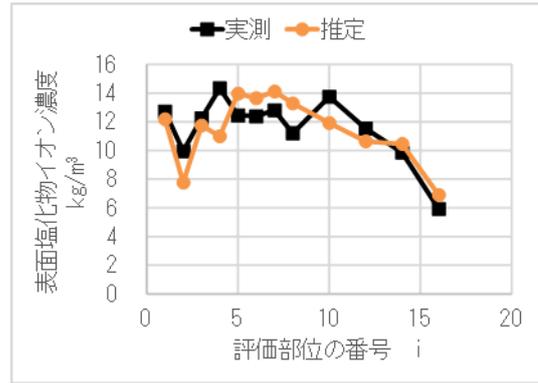
a) 歌高架橋



e) 有間川橋

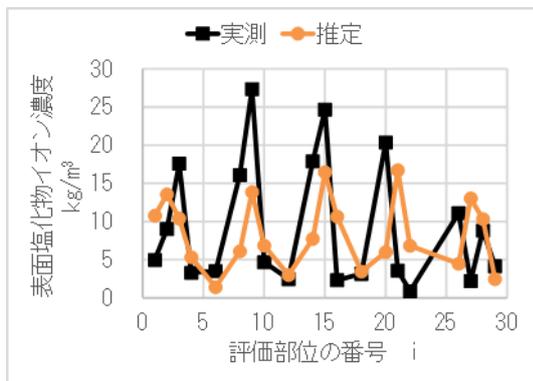


b) 新八幡橋

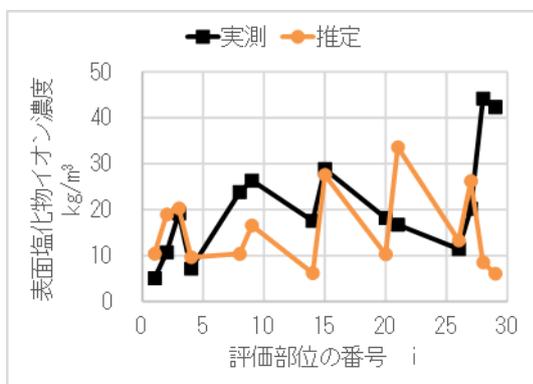


f) 新今川橋

図 3.3.4 推定された表面塩化物イオン濃度



c) 青海川橋



d) 獅子ヶ鼻大橋

表 3.3.3 逆解析により求めたデータ同化パラメータ α

	データ同化パラメータ α
歌高架橋	5.02×10^{-9}
新八幡橋	7.42×10^{-9}
青海川橋	2.42×10^{-8}
獅子ヶ鼻大橋	5.70×10^{-9}
有間川橋	7.29×10^{-8}
新今川橋	2.80×10^{-9}

(7) 塩分浸透解析

①解析条件

塩分浸透の解析例として、歌高架橋、有間川橋を対象として解析を行う。境界条件として各橋の表面に与える塩化物イオン濃度の分布状況を図 3.3.5 に示す。図 3.3.5 では、細分された矩形面ごとに塩化物イオン濃度が設定されている。

各細分面における塩化物イオン濃度 S [kg/m^3] は式(1)により求める。式(1)において、 j : 風速ケース識別番号, m : 風速ケース総数, a_j [$\text{個}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] : 各細分面において、順解析により求まる単位面積・単位時間あたりの付着粒子数 (また、風速ケース j における付着粒子数), t_j [s] : 風速 V_j で風が吹く時間, V_j [m/s] : 風速ケース番号 j における風速, α :

逆解析により求まるデータ同化パラメータである。歌高架橋，有間川橋のデータ同化パラメータ α について表 3.3.3 に示す。

$$S = \sum_j^m (\alpha \cdot a_j \cdot t_j \cdot V_j^2) \quad (3.3.3)$$

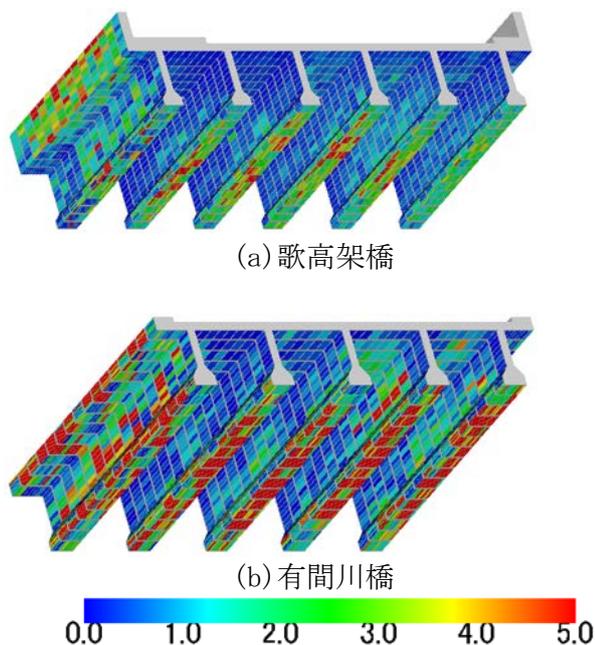


図 3.3.5 塩分浸透解析で与える表面塩化物イオン濃度
(単位 : kg/m³)
(図中手前に見える灰色の断面部分は塩化物イオン濃度を与えない部分)

塩分浸透解析は，オープンソース有限要素解析ソフトウェア Adventure Thermal の熱伝導解析機能を利用して実施した。拡散係数が 0.5[cm²/年]となるよう物性値を設定し，100 年間にわたる塩分浸透を想定し，図 3.3.5 で示した表面塩化物イオン濃度の境界条件を与えシミュレーションを実施した。なお，シミュレーション開始時の解析モデル内部における塩化物イオン濃度はゼロと設定した。

②解析結果

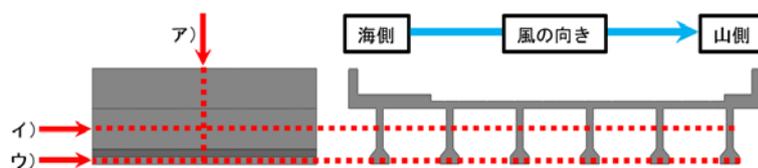
解析結果として，歌高架橋，有間川橋の 20，40，60 年経過後の塩分浸透状況を，図 3.3.6～3.3.11 に示す。塩分浸透状況として，ア) 解析モデルの奥行（橋軸方向）6 m を二等分する断面，イ) ウェブ高さを二等分する断面，ウ) 桁底フランジ厚さを二等分する断面における塩分浸透コンター図を示す。これらの図では，浸透した塩化物イオン濃度が大きいほど暖色で

表示される。

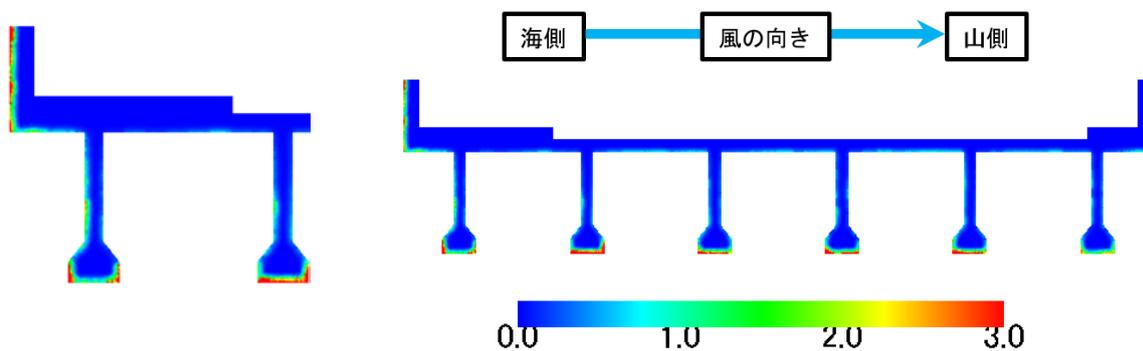
特徴として，両橋とも，桁の底面と，桁底フランジの側面で塩化物イオン濃度が高く，他の部位より塩分浸透が進行していることが分かる（図 3.3.6，3.3.8，3.3.9，3.3.11）。また，桁底フランジ側面は，海側（風上）を向く面と，山側（風下）を向く面があるが，山側向きの面でも海側向きの面に匹敵する塩分が供給されており（図 3.3.8，3.3.11），桁底フランジでは，海側，山側，底面の三面からはさみうちで塩分が浸透し，進行の度合いが大きい。また，やはり桁底フランジについて，海側から何番目の桁であるか（海側に近いかどうか）によっても塩分浸透の度合いが変化している。歌高架橋では，図 3.3.8 より，海側から 2，3 番目の桁で塩分浸透が大きく，有間川橋でも，図 3.3.11 より，海側から 2，3 番目の桁で塩分浸透が大きいようである。

桁のウェブ部では，部位が狭いため，特徴を確認しづらいが，海側から 1 番目の桁で，海側（風上）を向く面で塩分浸透が大きいようである（図 3.3.6，3.3.7，3.3.9，3.3.10）。山側（風下）を向く面では，塩分浸透は小さい。

i) 歌高架橋

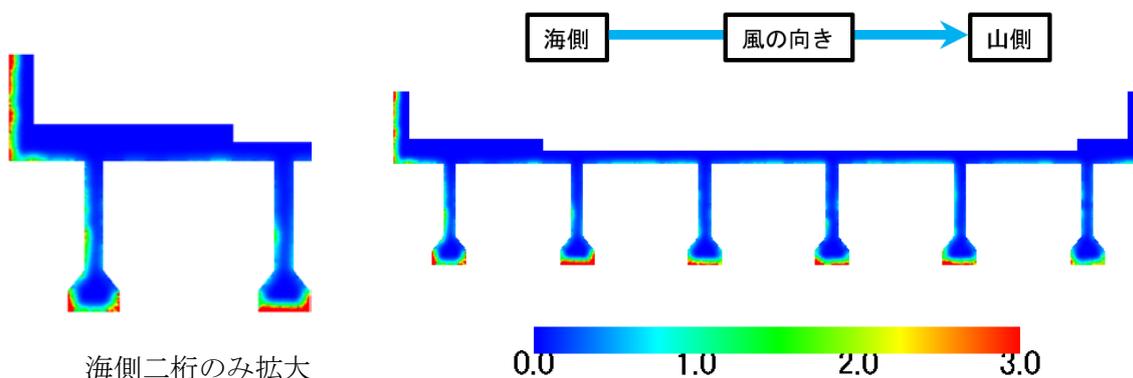


a) 塩分浸透状況を確認する断面ア) ~ウ)



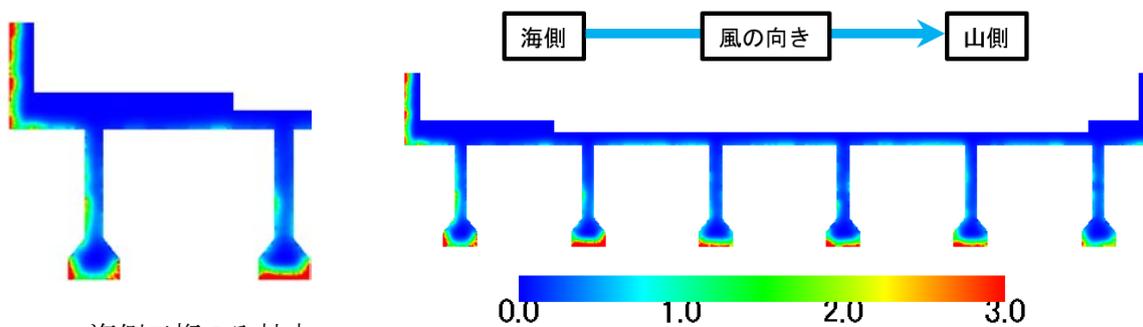
海側二桁のみ拡大

b) 20年経過後



海側二桁のみ拡大

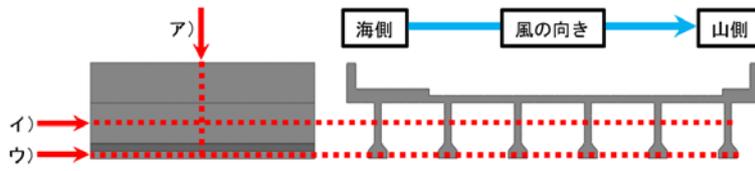
c) 40年経過後



海側二桁のみ拡大

d) 60年経過後

図 3.3.6 歌高架橋 断面ア) における塩分浸透状況
25



a) 塩分浸透状況を確認する断面ア) ~ウ)

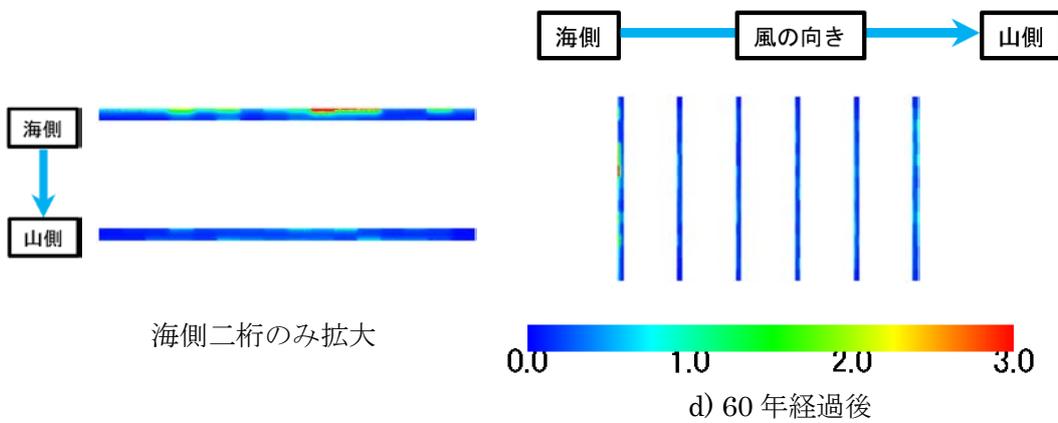
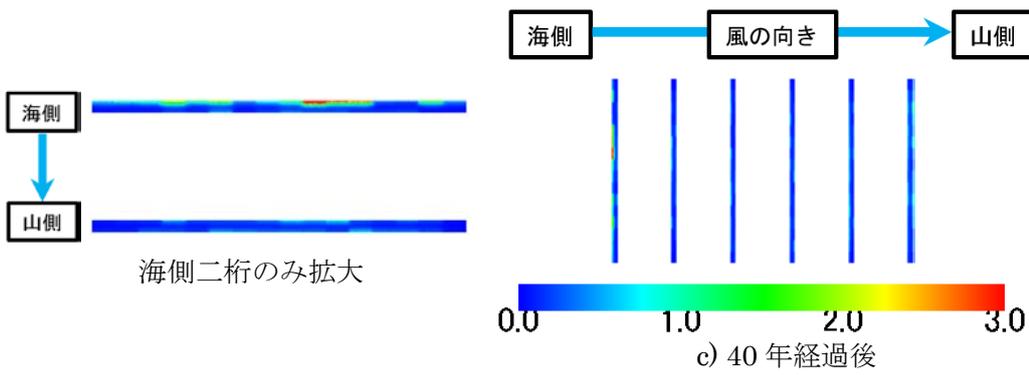
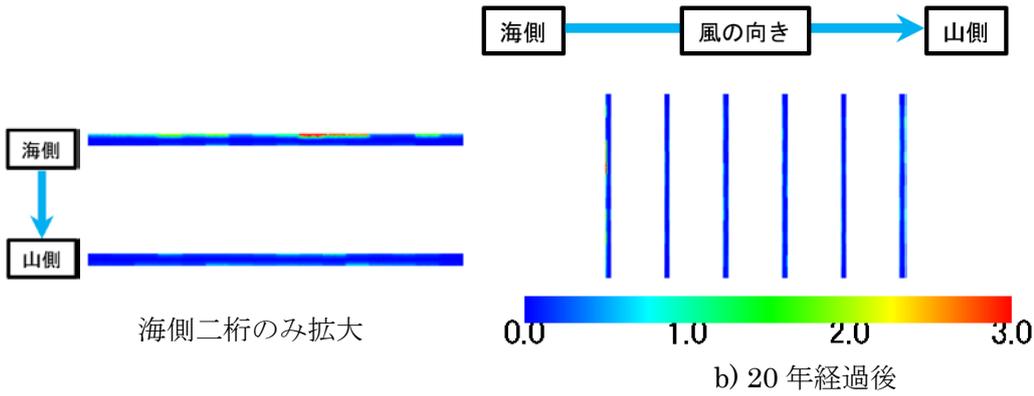
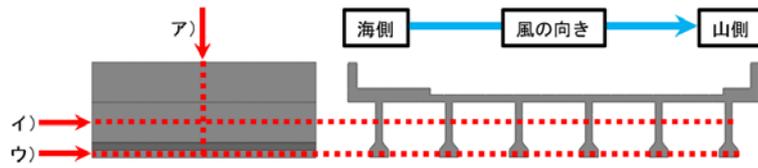


図 3.3.7 歌高架橋 断面イ) における塩分浸透状況



a) 塩分浸透状況を確認する断面ア) ~ウ)

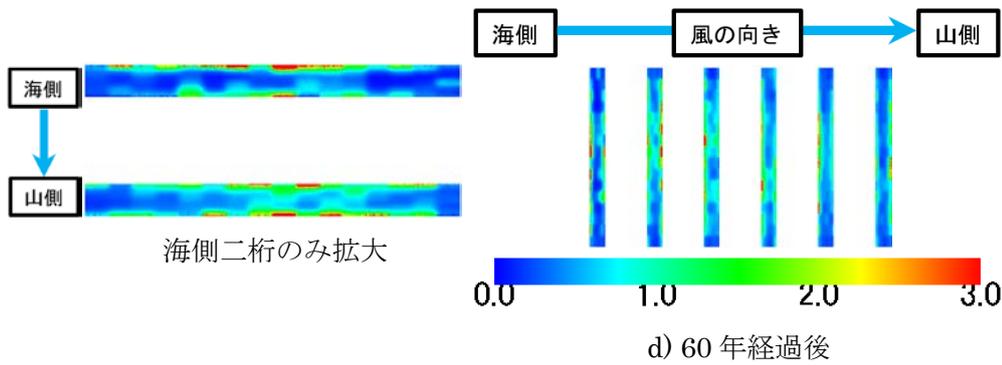
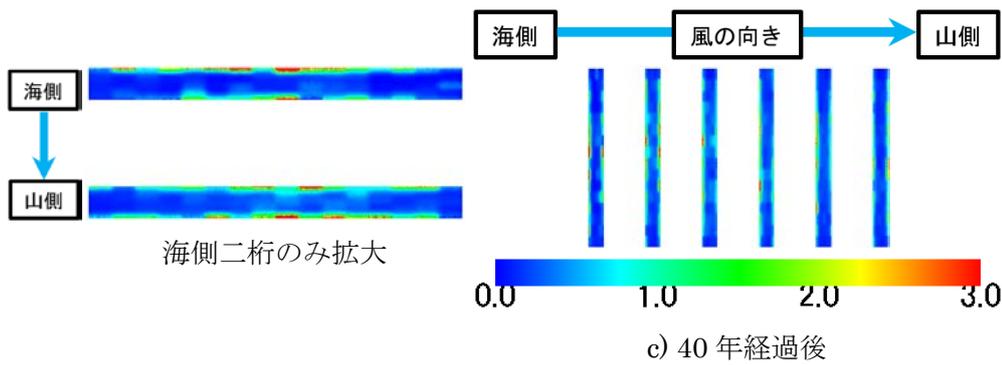
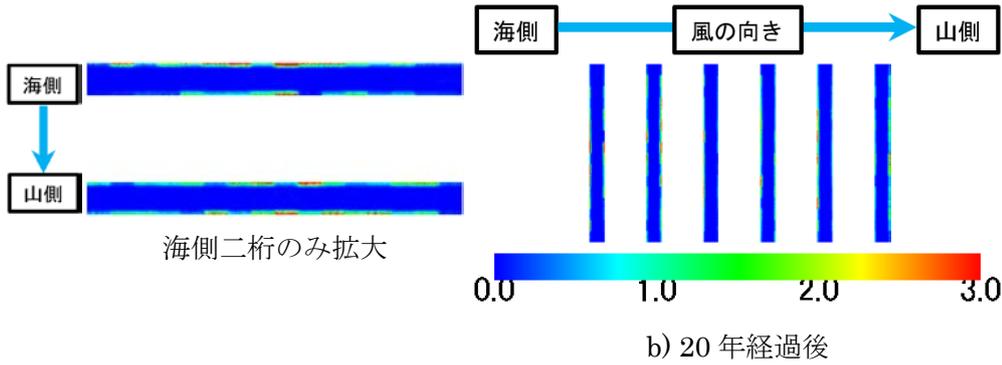


図 3.3.8 歌高架橋 (断面ウ) における塩分浸透状況

ii) 有間川橋

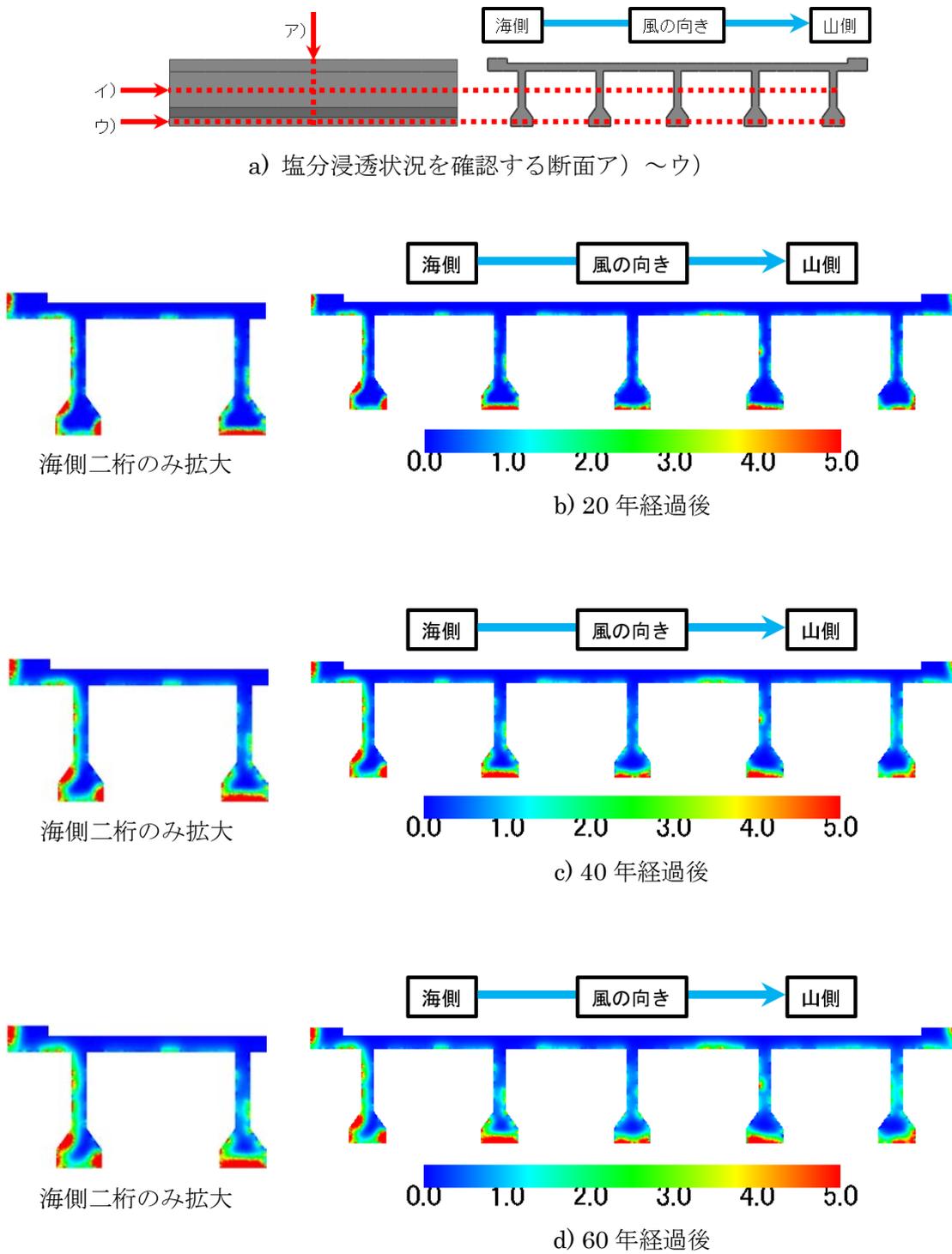


図 3.3.9 有間川橋 断面ア) における塩分浸透状況

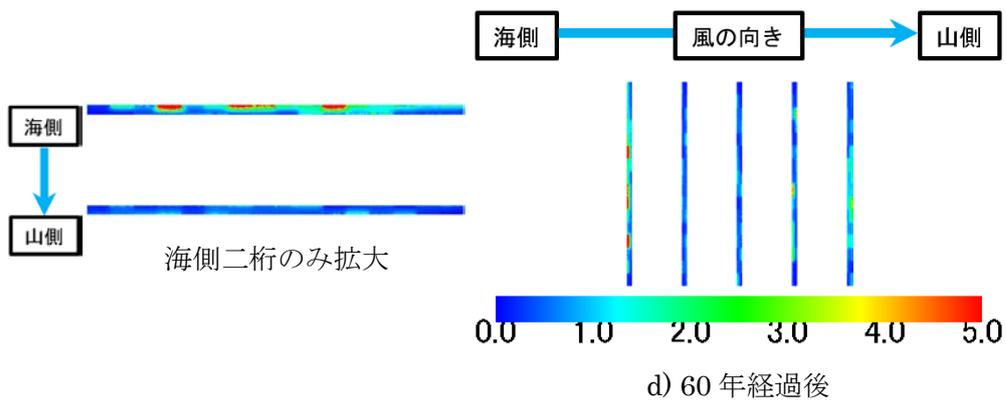
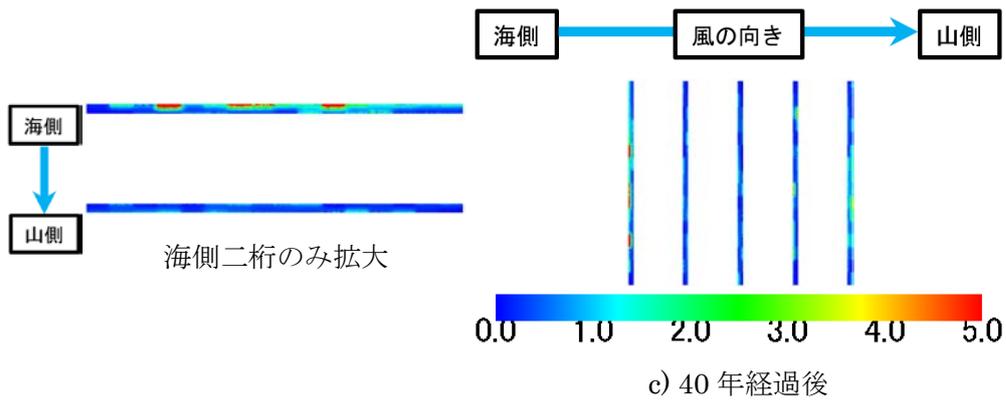
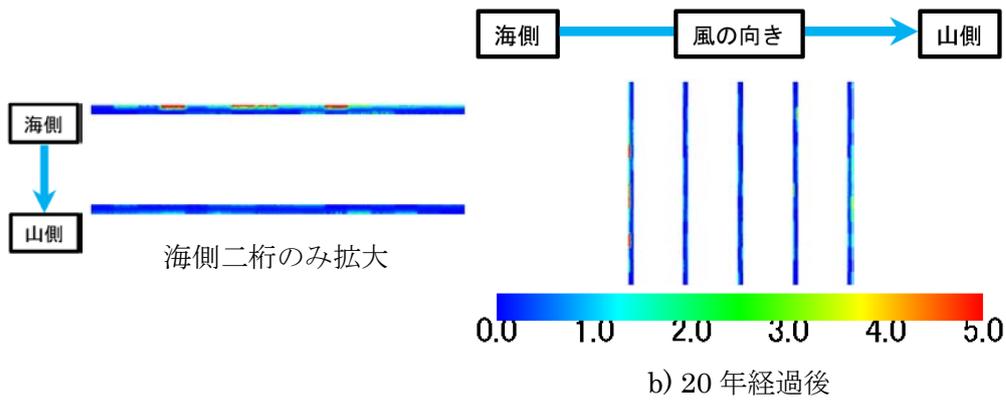
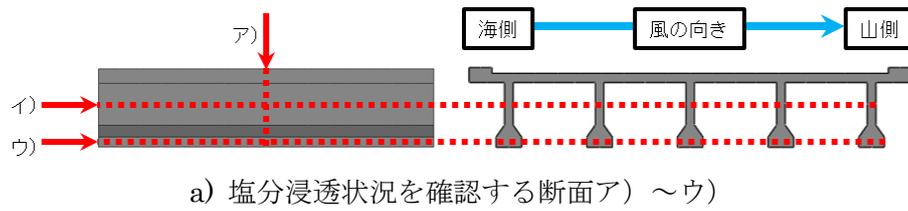
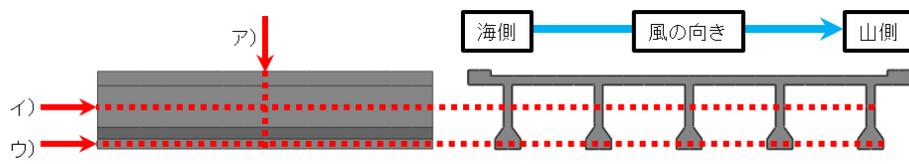
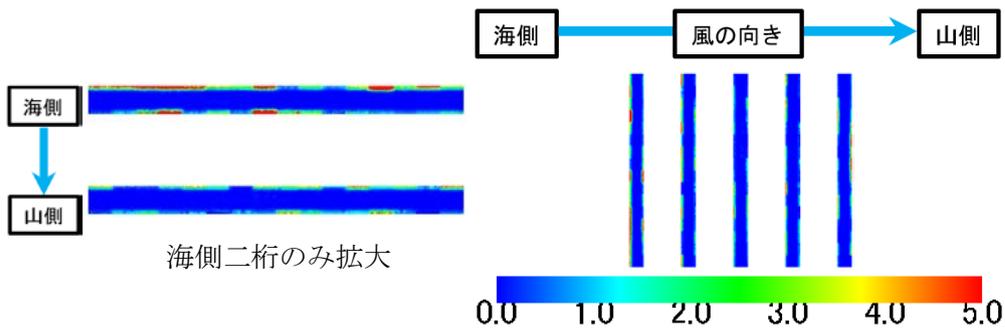


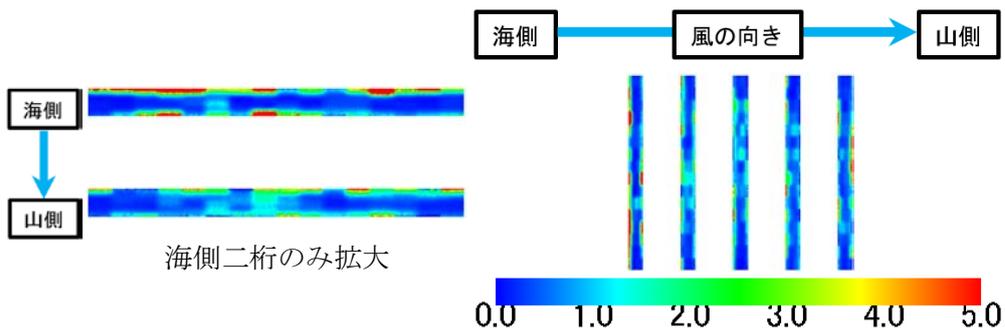
図 3.3.10 有間川橋 断面イ)における塩分浸透状況



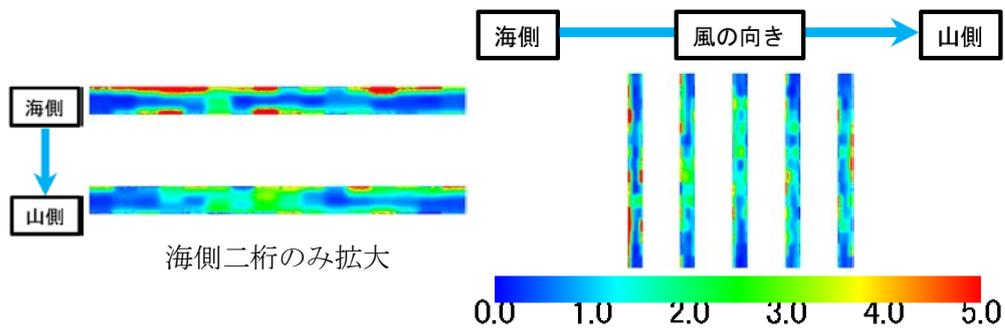
a) 塩分浸透状況を確認する断面ア) ~ウ)



b) 20年経過後



c) 40年経過後



d) 60年経過後

図 3.3.11 有間川橋 断面ウ) における塩分浸透状況

第4章 塩害評価環境マニュアル

4.1 マニュアルの構成

コンクリート構造物内部の塩分量を算定するためには、現地計測から解析までいくつかの過程を経る必要がある。そこで、各過程におけるマニュアルを作成した。塩害評価環境マニュアルは、「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。マニュアルの構成・目次は、下記の通りである。

なお、図番号・式番号等は、それぞれの手マニュアルで独立とした。

＜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

＜飛来塩分量解析マニュアル＞

1. 順解析
2. 逆解析
3. 飛来塩分供給量の算定

＜構造物各部位における表面塩分濃度設定マニュアル＞

＜コンクリート（構造物）中の塩分浸透予測マニュアル＞

1. メッシュ分割の設定
2. 時間刻みの設定
3. 対象構造物の寸法データの用意
4. 解析用データの作成
5. 解析実行、結果処理

4.2 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

薄板供試体の暴露期間は、地域の気象条件や目的によって定める。

飛来塩分量は、風速 10m/s 以上の海風の頻度と高い相関があるため、対象構造物近くのアメダス観測所の風向・風速データから決定するとよい。東北地方日本海側や北陸地方では、11月～3月に暴露試験を行えば、ほぼ1年間の飛来塩分量を測定することができる。一方、台風の影響のある沖縄では、8月から暴露試験を行う必要がある。

2. 供試体設置位置

本節では薄板供試体の設置位置について示す。まず、橋の縦断方向および横断方向について、基本とする設置位置を示す。

次に、橋の横断方向について、飛来塩分供給量算定システムによるシミュレーション結果を根拠とした設置位置の案を示す（シミュレーションの詳細については、「飛来塩分量解析マニュアル」を参照）。

なお、橋の断面形として、図 2.1 に示す矩形（床版橋）、台形（箱桁）、T桁の3タイプを想定している。



a) 矩形

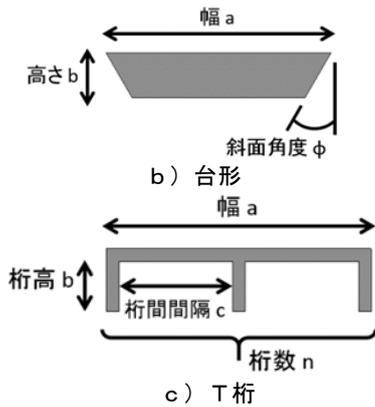


図 2.1 想定している橋の断面形

2. 2 橋の縦断方向における設置位置

橋の縦断方向における薄板供試体の設置位置は、図 2.2 に示すように、橋台および橋脚で挟まれる区間の中央付近とする。

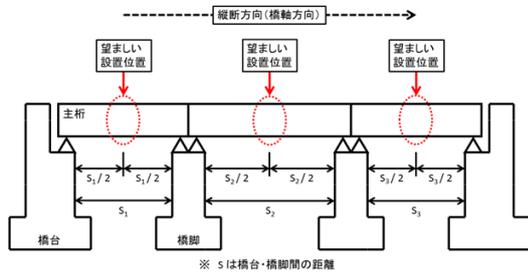


図 2.2 縦断方向における薄板供試体の設置位置

2. 3 橋の横断方向における設置位置

2. 3. 1 基本とする設置位置

本項で、橋の横断方向における薄板供試体の設置位置について示す。なお、設置位置は、図 2.3 で示すように、橋の側面および底面を対象とし、路面は対象としない。



図 2.3 横断方向における薄板供試体の設置対象面

1) 矩形断面

図 2.4 で示すように、側面 2 か所×2、底面 8 か所を基本の設置位置とする。側面には断面高さ b の $1/2$ を大体の目安とし供試体どうし間隔をあけて設置する。端部からは b の $1/4$ を大体の目安とし間隔をあけて設置する。底面には断面幅 a の $1/8$ を大体の目安とし供試体どうし間隔をあけて設置する。端部からは a の $1/16$ を大体の目安とし間隔をあけて設置する。

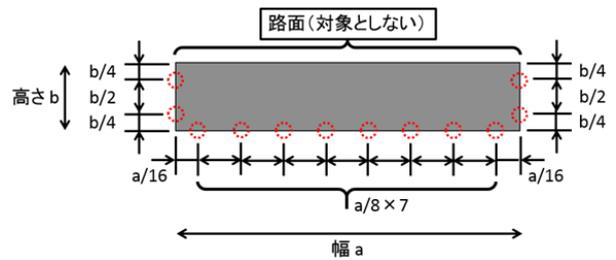


図 2.4 矩形断面において基本とする設置位置 (丸印の位置)

2) 台形断面

図 2.5 で示すように、側面 2 か所×2、底面 8 か所を基本の設置位置とする。側面には断面高さ b の $1/2$ を大体の目安とし供試体どうし間隔をあけて設置する。端部からは b の $1/4$ を大体の目安とし間隔をあけて設置する。

底面には台形の短辺幅 a' の $1/8$ を大体の目安とし供試体どうし間隔をあけて設置する。端部からは a' の $1/16$ を大体の目安とし間隔をあけて設置する。

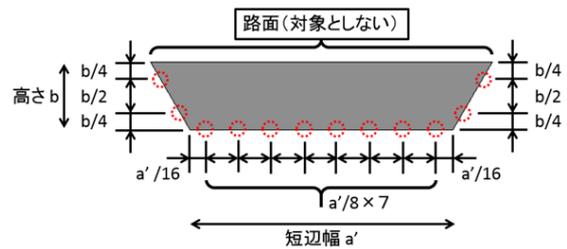


図 2.5 台形断面において基本とする設置位置 (丸印の位置)

3) T 桁断面

図 2.6 で示すように、桁の側面 2 か所×2×桁数 n 、桁の底面 n か所、桁間の天井面

$(n-1)$ 箇所を基本の設置位置とする。桁の側面には桁高 b の $1/2$ を大体の目安とし供試体どうし間隔をあけて設置する。端部からは b の $1/4$ を大体の目安とし間隔をあけて設置する。桁の両側面に 2 か所ずつ設置する。桁の底面には桁幅の $1/2$ を大体の目安とし端部から間隔をあけて設置する。桁間の天井面には桁間間隔 c の $1/2$ を大体の目安とし端部から間隔をあけて設置する。

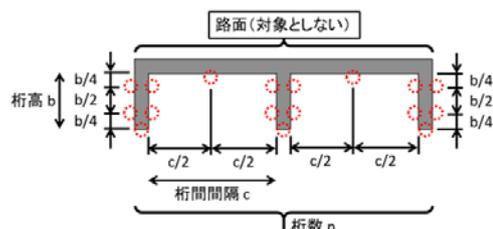


図 2.6 T 桁断面において基本とする設置位置 (丸印の位置)

なお、供試体は1箇所について2枚を原則とする。貼付けの向きは、□と◇とする。

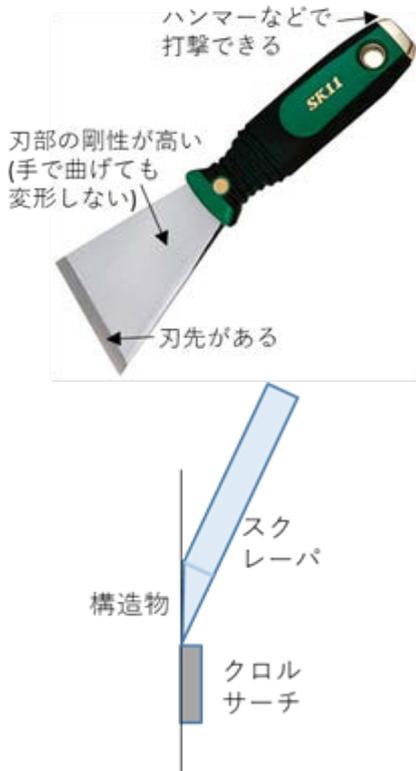
3. 貼付け・回収

(1) 貼付け

設置前に構造物の表面から汚れを取り除く。推奨の手順は、①ワイヤブラシでのケレン ②エタノールかアセトンでの清拭 ③十分な乾燥 である。

(2) 回収

- ・ 貼り付けた薄板供試体が強力に接着されていて、剥がすのが難しい場合がある。その時は、以下の方法を試してみると良い。
 - スクレーパーなどの工具を用いて、接着テープの部分にゆっくりとせん断力を掛けて剥がす。推奨するスクレーパーを右図に示す。
 - スクレーパーの刃先は、薄板供試体に対して右図のようにあてる。
 - 以上で上手くいかない場合は、ドライヤーなどで温めて再度、上記の方法をためす。
 - スクレーパーの柄の部分ハンマーなどで打撃して剥がし取る。



- ・ 回収時に割れてしまった薄板供試体については、出来る限り全量を回収するものとする。

- ・ 回収時に薄板供試体が落下しても確実に回収できるようにする。そのため、回収時はタモ網、虫取り網を活用することが望ましい。
- ・ 回収した薄板供試体は、乾燥したガーゼで表面に付着した塩分を取り除いた後に、チャック付きポリ袋などに確実に収納する。チャック付きポリ袋には、あらかじめ設置場所(構造物名)を油性マジックなどで書いておくと良い。
- ・ 回収時は、薄板供試体が乾燥していることが望ましい。降雨の直後は、避けた方が良い。

4. 浸透塩分量分析

回収した薄板供試体は、裏面の接着テープを剥がしてから全量を粉碎して JIS A 1154 硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法により全塩化物イオン量を測定する。

また、電量滴定式塩分計を用いる方法、蛍光 X 線法によって全塩化物イオン量の測定を行ってもよい。蛍光 X 線による場合は、適切な方法によって検量線を作成するものとする。

4. 3 飛来塩分量解析マニュアル

本節では、順解析および逆解析による飛来塩分量解析の手順について示す。なお、本節で説明する「解析」とは、コンピュータ上でソフトウェアを使用して実施するシミュレーションと、その実施前、後に行う各種作業を含めて指している。

1. 順解析

i) 風の流体解析

① 対象構造物の寸法データの用意

新設構造物であれば仮想の形状を想定し、寸法に分かる数値データを用意する。既設構造物であれば設計図面などから寸法を読み取り、数値データ化する。

② 解析用入力データの作成

シミュレーションする領域や形状、物性値、風速・風向などの解析条件をすべて反映した解析用入力データを作成する。本研究で開発中のソフトウェアでは、この一連のデータ作成作業を、GUI（グラフィカルユーザーインターフェース）を介してコンピュータ上で行うことが可能である。

③ 解析実行、結果処理

ソフトウェアによりコンピュータ上で解析が実行される。解析結果として得られる風速場データは、次工程の塩分粒子の付着解析で利用するため、コンピュータ上に次工程用の作業領域を用意しておき、この領域内に保存する。

ii) 塩分粒子の付着解析

塩分粒子の付着解析での主な解析条件は、粒子の発生条件であり、これを記載したデータファイルを、作業領域内に置いておく。必要なファイルを用意したら、作業領域内で解析実行ファイルを起動させる。ソフトウェアによりコンピュータ上で解析が実行される。解析結果として得られる橋へ付着した粒子の座標データは、次工程の逆解析で利用するため、コンピュータ上に次工程用の作業領域を用意しておき、この領域内に保存する。なお、この時点で、本報告書の2章で示したように、ある基準面の表面塩分濃度が分かる関係式などが得られていれば、その関係式により得られる表面塩分濃度と、ここで得られた付着粒子の座標データを併用して、橋梁各部位の表面塩分濃度を求めることが可能である（新設構造物を対象とする場合）。

2. 逆解析

逆解析は、最小二乗法を利用して、前工程で得られた橋への付着粒子数データを、実橋で生

じ得る飛来塩分量に換算するためのデータ同化パラメータを求める工程である。薄板供試体で測定された塩分量データが必要であり、既設構造物を対象とした解析である。また、アメダスデータなどを利用し、1年間あたりの風速・風向の頻度データを用意する必要がある。薄板供試体による実測データと、前工程で得られた橋への付着粒子数データをデータファイルに記載し用意し、コンピュータ上の作業領域に保存する。作業領域内で解析実行ファイルを起動させる。ソフトウェアによりコンピュータ上で解析が実行される。解析結果としてデータ同化パラメータおよび設定した部位ごとの飛来塩分量データが得られる。ここでの飛来塩分量データと薄板供試体による実測データの比較により、データ同化パラメータによる同化の程度を確認することができる。データ同化パラメータは、次工程で、橋の全表面に対する飛来塩分供給量を求めるために利用する。

3. 飛来塩分供給量の算定

本工程では、特殊な解析は実施しない。ここまでに得られた①橋への付着粒子数データ、②1年間あたりの風速・風向の頻度データ、③データ同化パラメータが記載されたデータファイルを用意し、コンピュータ上の作業領域に保存する。作業領域内で解析実行ファイルを起動させる。ソフトウェアによりコンピュータ上で計算が実行される。解析結果として橋の全表面に対する飛来塩分供給量データが得られる。この飛来塩分供給量データを、さらに塩分浸透解析の境界条件として利用し、橋梁内部へ浸透する塩分の濃度を求めるシミュレーションを実施することも可能である。

4. 4 構造物各部位における表面塩分濃度設定マニュアル

ここでは、薄板供試体への塩分浸透量からコンクリート表面塩分濃度への換算方法を示す。

本研究の飛来塩分量解析では付着粒子数が得られ、逆解析によって付着粒子数を薄板供試体への塩分浸透量に変換するパラメータが求められる。次に薄板供試体への塩分浸透量を、構造物のコンクリートの表面濃度に換算する必要がある。

既往の研究により、薄板供試体への塩分浸透量から構造物コンクリートの表面塩化物イオン濃度を推定することができる。

供試体は薄板状であるので、冬期1シーズンで供試体内に浸透した塩分量は、奥行きのあるコンクリートの表層部分の塩分量、即ち、表面塩化物イオン濃度 C_0 の近似値と見なせる。ここで薄板供試体およびコンクリートの塩分浸透量 M_m および M_c が得られていると、コンクリートの見掛けの表面塩化物イオン濃度は、式(1)を用いて薄板供試体の平均塩化物イオン濃度 C_m で近似できる。

$$C_0 \approx \frac{1+R_c}{1+R_m} C_m = \frac{1+R_c}{1+R_m} \cdot \frac{M_m}{l} \quad (1)$$

ここに、 C_0 ：コンクリートの見掛けの表面塩化物イオン濃度

R_c ：コンクリートの固定化率

R_m ：薄板供試体の固定化率

上式を用いるには、薄板供試体およびコンクリートの塩化物イオン固定化率（＝単位結合材量当たりの固定化率×結合材量比）が必要になる。これらの値は実験によって直接求めることが望ましいが、それが困難な場合には、配合表に記載されるセメント（結合材）の種類および単位セメント量（単位結合材量）から計算するものとする。配合表が無い場合は、設計基準強度から標準的な配合を想定して単位セメント量（単位結合材量）を設定する。なお、結合材量当たりの固定化率は、実測あるいは信頼できる資料によるのがよいが、普通ポルトランドセメントで1.6、高炉セメントB種で2.3としてもよい。

薄板供試体への塩分浸透量 M_m からコンクリートへの塩分浸透量 M_c を求めるには、以下の方法によるものとする。

供試体単位暴露面積当たりの拡散物質の浸透量は次の式で与えられる¹⁴⁾。

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left\{-\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2}\right\} \quad (2)$$

ここに、 l ：供試体厚さ（cm）

M_t ：時刻 t における浸透量
(g/cm²-mortar)

M_∞ ： $t \rightarrow \infty$ における浸透量
(g/cm²-mortar)

異なる2配合間の塩分浸透量を比較するには、配合ごとに上式を適用しその比をとればよい。

式(2)により塩分浸透量の比を計算するには、見掛けの拡散係数比と M_∞ の比が必要である。

構造物のコンクリートの見掛けの拡散係数は、構造物からコアを採取するか、同一材料・配合の供試体を作製して、土木学会規準 JSCE-G572

浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）によって求めるのが望ましい。

それが困難な場合には、コンクリート標準示方書に示される以下の式により、水セメント比から計算してもよい。

(a) 普通ポルトランドセメントの場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8$$

(b) 低熱ポルトランドセメントの場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.5(W/C) - 1.8$$

(c) 高炉セメントB種相当の場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.2(W/C) - 2.4$$

(d) フライアッシュセメントB種相当の場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.9$$

ここに、 D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数
(cm²/年)

W/C ：水セメント比 (0.30 ≤ W/C ≤ 0.55)

異なる2配合A, B間の M_∞ の比 ($M_{\infty B} / M_{\infty A}$) は、次式(3)で近似することができる。

$$\frac{M_{\infty B}}{M_{\infty A}} = \frac{1+R_B}{1+R_A} \quad (3)$$

上式より、異なる2配合間の $t \rightarrow \infty$ における塩分浸透量比は、固定率 R により評価可能となる。

なお、薄板供試体としてデンカ製「クロルサーチ」を用いた場合は、見掛けの拡散係数は9.4

(cm²/年)、単位セメント量は580kg/m³、固定化率は、1.8としてよい。

4. 5 コンクリート構造物中の塩分浸透予測 マニュアル

本節では、コンクリート構造物中への塩分浸透予測シミュレーションを実施する際の手順について示す。なお、塩分浸透予測シミュレーションの理論については、本報告書の3. 3節を参照されたい。なお、本節で説明する「解析」とは、コンピュータ上でソフトウェアを使用して実施するシミュレーションと、その実施前、後に行う各種作業を含めて指している。

1. メッシュ分割の設定

解析領域のメッシュ生成は、3次元領域を生成した後に、ADVENTURE プロジェクト (adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/) の TetMesh を用いて生成する。メッシュ生成については、塩化物イオン濃度がコンクリート表面から鉄筋位置まで(かぶり)をどの程度の時間で濃度拡散するかを精度よく計算する必要があることから、かぶり内のメッシュサイズを細かく設定する必要がある。例えば、かぶり 5 cm であれば、メッシュ分割はその 1/10 程度が推奨される。なお、TetMesh を用いてメッシュ生成の具体的な方法については、TetMesh のマニュアルを参照されたい。

2. 時間刻みの設定

非定常解析を行う際に、時間方向の離散化方法は解析精度に大きくかわる。しかし、高精度な離散化方法においても、時間刻みを大幅に大きく設定することは精度悪化につながる。したがって、精度良く非定常解析を行うために時間刻みの設定は非常に重要である。

精度良く非定常解析を行うための時間刻みの目安は、メッシュサイズに依存することが知られており、塩化物イオン濃度がいくつものメッシュを超えて濃度拡散しないことが重要である。つまり、塩化物イオン濃度の拡散が1回の計算で1メッシュサイズを超えないように設定する。例えば、最小メッシュサイズが「1」だとすると、時間刻みは、「1/10」などと設定することにある。

ただし、時間刻みが小さくなりすぎる場合は、計算時間が長くなることや、場合によって解が発散する場合もあるため、問題に応じて上記を目安にその都度設定することになる。

3. 対象構造物の寸法データの用意

新設構造物であれば仮想の形状を想定し、寸法の分かる数値データを用意する。既設構造物であれば設計図面などから寸法を読み取り、数値データ化する。

4. 解析用入力データの作成

シミュレーションする領域や形状、物性値などの解析条件をすべて反映した解析用入力データを作成する。また、本節で述べる塩分浸透予測シミュレーションの前工程として、飛来塩分供給量算定システムによる解析(順解析および逆解析)を実施し、橋の全表面における飛来塩分供給量データを用意し、解析用入力データに反映させる。

解析用入力データに必要な主なデータを挙げると、以下の通りである。

- a) 対象構造物の寸法データ
- b) 塩分浸透解析に関わる物性値データ(拡散係数など)
- c) 橋の全表面における飛来塩分量データ

5. 解析実行、結果処理

ソフトウェアによりコンピュータ上で解析が実行される。解析結果として得られる構造物内部の塩分濃度データを色分け表示やグラフ表示し確認する。

4. 6 塩害環境評価手法の適用範囲と留意点、精度

本研究で検討した手法は、要求される精度と費用・労力（あるいは入手できる情報）によって下記に示すレベルに分けることができる。

レベル1：構造物の立地条件から構造物の表面塩化物イオン濃度を推定する。

レベル2：最小限の薄板モルタル計測結果を利用し、事前解析の結果を類型化した情報を活用する。

レベル3：事前解析の類型化情報を活用し、重要位置に薄板供試体を貼付ける。

レベル4：事前解析の類型化情報を活用し、重要位置に薄板供試体を貼付ける。暴露試験結果を用いて逆解析を行う。

レベル5：事前に順解析で重要箇所を確認して薄板供試体を貼付け、測定結果により逆解析を行う。

新設構造物では、レベル1あるいはレベル2を選択する。

レベル1は、ある地点の塩害環境をコンクリートの表面塩化物イオン濃度として求める手法であり標高、風向および波エネルギーを用いて離岸距離を補正する方法である。風向データの入手元であるアメダス観測地点、波エネルギーの入手元であるナウファス観測地点から離れた場所の場合、精度が低下する場合があるので注意が必要である。また、離岸堤などの消波施設は、海水飛沫を発生させるため飛来塩分量を増加させる影響と構造物から十分離れた場所で碎波させれば飛来塩分量を低減させる効果がある。具体的な影響は消波施設と構造物の距離、風向・風速、海岸地形などの影響を受けることから、本研究では定量的な評価に至らなかった。構造物周辺に消波施設がある場合で、高精度な評価を行いたい場合は、薄板供試体などで実測することが望ましい。

レベル2は、構造物部位毎の付着塩分量（あるいは表面塩化物イオン濃度）の相対値を求める手法であり、いくつかの風況（風向・風速）を設定した解析の結果を総合して類型化した結果を用いる。類型化の際には、橋軸直角方向の風が吹いた場合の結果を重視していることから、最多風向が橋軸に平行に近い場合は精度が低下する。また、直接波しぶきを受ける構造物の場合も精度が低くなる。それ以外の場合は、

図 2.3.1～2.3.3 を参照して塩分量の相対値を求めることができる。この場合の安全係数は 1.5 程度とするのがよい。

既設構造物では、レベル3～5の中から手法を選択する。

レベル4・5は逆解析を行う手法である。精度に影響するのは、薄板供試体の測定値であり、供試体数が極端に少ない場合（一断面で3個程度以下）や供試体位置が偏っている場合は注意が必要である。このため、4.2に示される供試体位置を参考に設置することが望ましい。また、新設の場合と同様、直接波しぶきを受けるような場合や漏水で凍結防止剤を含む漏水などが影響する場合は精度が低下する可能性がある。橋脚付近や桁が地表面に近く、風の流れが複雑になる領域も解析精度が低下するので注意が必要である。

第5章 まとめ

本研究は、従来着目されてこなかった構造物の部位毎の塩害環境を評価するため、研究代表者らが考案した「薄板モルタル供試体」を用い、さらに数値解析を組み合わせることで種々の環境条件や構造物の条件に対応できる塩害環境評価手法の構築を行った。用いた手法は、実測と数値解析のそれぞれの長所を活用しながら欠点を相互補完するものであり、従来の手法より高精度で合理的に局所的な劣化環境を評価・予測することが可能となった。

また、対象を新設構造物と既設構造物に分け、それぞれについて手法のレベルと活用のシナリオを設定することで実務への適用性に配慮した。

塩害による劣化では、一度腐食が生じると、完全な補修は難しく、補修後の再発事例も多い。補修を繰り返した塩害橋の LCC 評価では、建設費の2倍以上の費用を要したものも少なくない。このため、塩害環境下では、予防保全を行うことが最も効果的であると言える。しかし、現状の目視主体の点検では、事後保全にならざるを得ない。

そこで、薄板モルタル供試体を活用した以下のような施策が必要であると考えます。

供用開始直後に、構造物各部位において測定を行う。これによって、事前に劣化部位を特定でき、局所環境条件に応じた適切な（過不足のない）予防保全（表面被覆工法や表面含浸工法など）を行うことが可能となる。設計の段階で塩害環境を推定・評価し、その結果を耐久性設計に取り入れることは非常に重要であるが、構造物の建設による地形の改変、消波施設（消波ブロックなど）の設置の影響等を事前に全て把握することは難しいと思われ、供用開始直後の塩害環境測定が推奨される。本手法の普及のた

めに、供用開始直後の暴露試験を設計者あるいは施工者との契約に含めることも検討の価値があると考えられる。

既設構造物では、近接目視時に全コンクリート橋梁に薄板モルタル供試体の設置を行うことが望ましい。必ずしも詳細な解析を行う必要はなく、定量的な塩害環境の把握こそが重要であり、環境条件に合わせて今後の対策を含む維持管理計画を検討する、データを蓄積して設計にフィードバックするなどの対応が可能となる。