

論文 モルタル円盤供試体による青森県沿岸部の飛来塩分調査

上原子 晶久^{*1}・皆川 浩^{*2}・久田 真^{*3}・鈴木 基行^{*3}

要旨: 青森県の沿岸部 21 箇所にモルタル円盤供試体を利用した簡素な装置を設置して、その設置場所における飛来塩分量を計測する方法を提案した。その測定値を解析した結果、飛来塩分量は風などの巨視的な環境条件のみならず、消波ブロックの有無や橋長(川幅)などの微視的な条件の影響を受けることがわかった。さらに、測定結果を利用して、青森県沿岸部における塩害危険度マップを提案した。

キーワード: モルタル円盤, 簡易計測装置, 飛来塩分, 塩分浸透

1. はじめに

沿岸部に立地する鉄筋コンクリート構造物は、内部の鉄筋が腐食する塩害により著しい損傷を受けることが周知となっている。著者らの調査結果^{1)~3)}によれば、海洋から多量の飛来塩分が到来する橋梁においては、供用開始から約 32 年で著しい塩害劣化により上部工が架け替えになっている事例もある。その調査結果以外にも、多数の塩害劣化事例が報告されており、その対策を講じるための研究事例も多数公表されている。前田ら⁴⁾の研究では、構造物の表面に付着する塩化物イオン濃度は、地域ごとに差があることが明らかにされている。一方、佐伯ら⁵⁾は、新潟県内沿岸における飛来塩分特性とコンクリートへの塩化物イオン浸透性状を明らかにしている。この研究では、同一県内の沿岸でも飛来塩分特性に場所ごとの多寡があることが示されている。

以上をまとめると飛来塩分の特性は、日本列島という巨視的な環境のみならず、ある限定された地域の微視的環境にも大きく影響を受けるということになる。そのような背景を踏まえて、本研究では、青森県の沿岸部にモルタル円盤を 2 ヶ年暴露して浸透した塩化物イオン量を計測した。その結果を整理して青森県沿岸における飛来塩分、ならびに塩分浸透特性を明らかにする。

2. 塩分浸透量の計測方法

2.1 測定場所

本研究でモルタル円盤を暴露することにより飛来塩分特性と塩分浸透量を計測した地点は、青森県沿岸部に架かる 21 橋梁である。その詳細を表-1 に示す。それらの位置を示した地図を図-1 に示す。本調査では、沿岸部の環境が類似していると想定される設置箇所ごとにグルーピングを行い、合計 7 グループを設定した。表-1 に示した通り、各グループ 3 箇所の計測箇所を有している。本計測では、沿岸部を満遍なく網羅するのではなく、橋

表-1 計測場所の詳細

番号	所在地	各回収回までの暴露期間(日)				離岸距離(m)
		(1)	(2)	(3)	(4)	
1-1	大間町	195	399	566	813	65
1-2	むつ市	195	392	566	813	237
1-3	むつ市	195	392	566	813	129
2-1	むつ市	196	399	567	813	40
2-2	むつ市	196	399	567	813	392
2-3	東通村	196	399	567	813	65
3-1	むつ市	196	393	567	814	1320
3-2	横浜町	196	393	567	814	217
3-3	野辺地町	196	393	567	814	149
4-1	六ヶ所村	197	401	568	815	514
4-2	六ヶ所村	197	401	568	815	1307
4-3	八戸市	199	395	570	817	471
5-1	平内町	198	396	569	816	417
5-2	青森市	198	396	569	816	340
5-3	青森市	198	396	569	816	83
6-1	外ヶ浜町	191	388	562	803	3
6-2	今別町	191	388	562	803	64
6-3	五所川原市	191	-	-	-	-
7-1	鱒ヶ沢町	197	371	612	-	28
7-2	深浦町	193	390	564	805	104
7-3	深浦町	193	390	564	805	88
平均暴露期間		195	394	569	812	
平均暴露期間		6.4	13	18.7	26.7	

(1)~(4)は暴露期間の略称である

(1)2009年3月-2009年10月, (2)2009年3月-2010年4月
(3)2009年3月-2010年10月, (4)2009年3月-2011年6月

梁の立地する場所で飛来塩分の計測を行った。そのため、グループ1の北端(1-1)と南端(1-2)との間、およびグループ6の南端(6-3)とグループ7の北端(7-1)の間では計測を行っていない。表-1に記載した離岸距離については、現地では緯軽度を実測して、それを基に地理院地図⁶⁾の距

*1 弘前大学大学院 理工学研究科准教授 工博 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 工博 (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

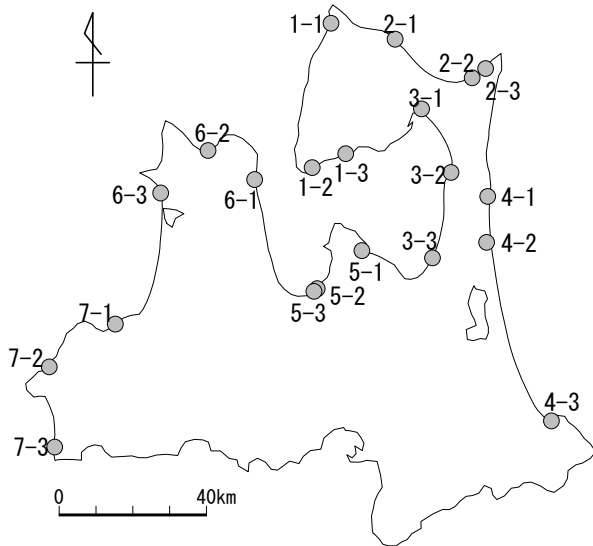


図-1 計測位置図

離計測機能を利用して推定した。

2.2 計測装置

図-2 に計測装置を示す。計測装置は塩化ビニル板に取り付けられたステンレス製のレール部と8枚のモルタル円盤で構成されている。本研究では、モルタル円盤に関しては佐伯らの研究⁷⁾を参考に制作した。モルタル円盤は、図-3 のような寸法が厚さ11mm、直径85mmの市販のスチロール製シャーレにモルタルを打設したものである。モルタルは、セメントの物理試験方法(JIS R5201「10.4 供試体の作り方」)に従って作成した。すなわち、モルタルの配合を重量比でセメント1、標準砂3、水セメント比0.5とした。モルタルミキサーにより練り混ぜ、テーブルバイブレータで75秒間締固めを行った。その後、約1時間経過後、表面にコテ仕上げを施した。その際、図-3 に示したように、余盛りしたモルタルを切削することによりブリーディングの影響を極力小さくするように配慮した。摂氏20度で約1ヶ月の水中養生後、図-2 に示した装置を橋梁下部工などの側面に設置して、1計測地点当り8枚のモルタル円盤を計測装置のレール部に挿入した。実際の設置状況を図-4 に示す。

2.3 計測期間と塩分量の測定方法

表-1 に示したように、2009年3月から2011年6月までの約27ヶ月に渡って約6ヶ月ごとに2枚づつモルタル円盤を回収した。本稿では、便宜上、各暴露期間を(1)~(4)に区分した。なお、計測地点6-3については、2010年4月から始まった橋梁補修工事により装置を撤去した。また、計測地点7-1については、2011年6月以降で計測装置が何らかの原因で破損していた。これら両地点については、それ以降の飛来塩分計測を断念した。回収したモルタル円盤における塩分浸透量は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」によ

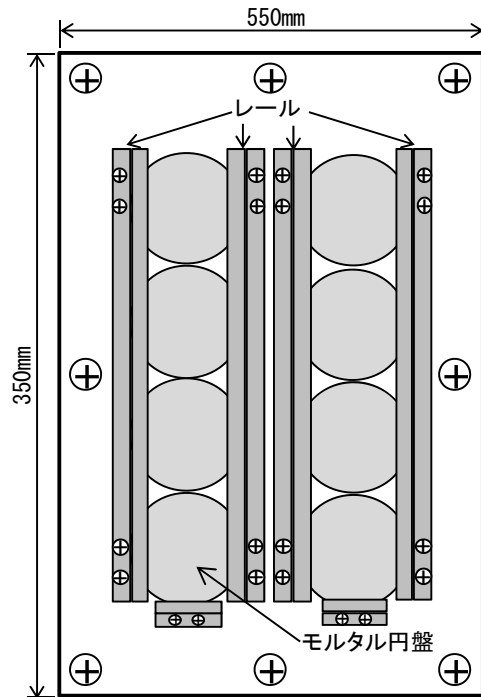


図-2 計測装置

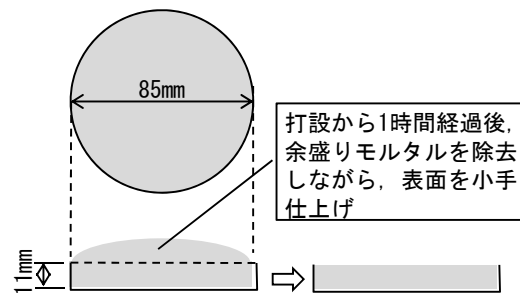


図-3 モルタル円盤の作製方法



図-4 計測装置の設置例

り全塩分を測定した。全塩分での測定では、シャーレの縁とモルタル円盤との境界から浸透する塩分の影響を排除する必要がある。そこで、モルタル円盤の中心約45×45mmの矩形範囲で全塩分量を測定した。

表-2 塩分量の測定結果

番号	塩分浸透量($\times 10^{-3}$ g/cm ²)				日平均塩分浸透量($\times 10^{-6}$ g/cm ² /日)				平均
	(1)	(2)	(3)	(4)	(a)	(b)	(c)	(d)	
	(1)	(2)-(1)	(3)-(2)	(4)-(3)	(1)	(2)-(1)	(3)-(2)	(4)-(3)	
1-1	0.10	0.74	1.45	2.13	0.50	3.14	4.26	2.73	2.66
1-2	0.15	0.31	0.35	0.59	0.79	0.80	0.21	0.99	0.70
1-3	0.27	0.24	0.81	0.85	1.36	0.00	3.29	0.15	1.20
2-1	0.33	0.32	0.71	1.39	1.66	0.00	2.31	2.74	1.68
2-2	0.46	0.94	1.26	1.80	2.37	2.35	1.89	2.18	2.20
2-3	0.29	0.28	1.11	1.55	1.46	0.00	4.98	1.78	2.06
3-1	0.77	1.57	2.79	3.28	3.92	4.08	7.00	1.97	4.24
3-2	0.12	0.43	1.19	1.58	0.60	1.56	4.40	1.58	2.03
3-3	0.43	1.15	1.54	2.46	2.17	3.66	2.27	3.71	2.95
4-1	0.14	0.24	0.32	0.61	0.71	0.51	0.46	1.18	0.71
4-2	0.33	0.46	1.64	1.60	1.65	0.65	7.07	0.00	2.34
4-3	0.16	0.21	0.30	0.69	0.78	0.28	0.53	1.56	0.79
5-1	0.15	0.18	0.29	0.48	0.77	0.14	0.64	0.75	0.57
5-2	0.12	0.21	0.40	0.90	0.59	0.47	1.11	2.00	1.04
5-3	0.16	0.24	0.72	1.12	0.79	0.41	2.80	1.62	1.41
6-1	0.35	0.38	0.81	1.23	1.84	0.14	2.48	1.76	1.55
6-2	0.19	0.41	1.44	0.90	0.99	1.12	5.94	0.00	2.01
6-3	0.38	-	-	-	2.00	-	-	-	2.00
7-1	0.91	2.61	3.02	-	4.64	9.78	1.70	-	5.37
7-2	0.27	1.04	1.48	2.89	1.40	3.90	2.56	5.83	3.42
7-3	0.55	0.16	1.66	2.89	2.83	0.00	8.63	5.10	4.14

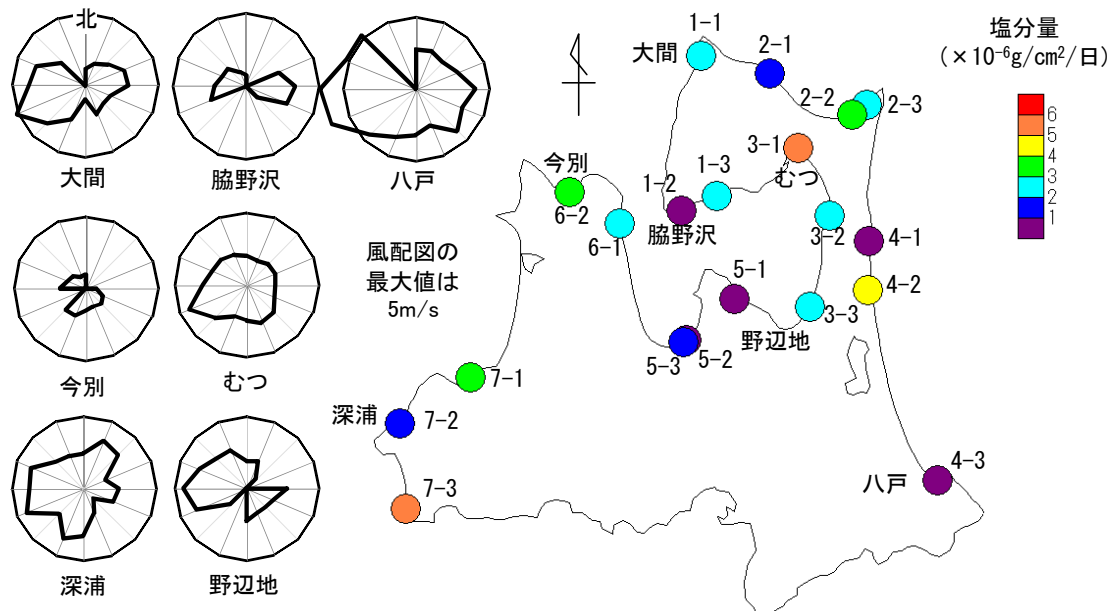


図-5 表-2の(a)列と(c)列を相加平均した日平均塩分浸透量と当該期間の風配図

3. 塩分浸透量の測定結果と考察

3.1 塩分量の測定結果

全塩分量を測定した結果の一覧を表-2に示す。この表では、暴露期間内に浸透した全ての塩分量を塩分浸透量(g/cm²)として表している。これについては、JIS A 1154で測定した全塩分量をモルタル円盤の厚さ11mmを乗じ

て求めた。一方、暴露期間ごとに塩分浸透量の差分を暴露日数で除したものを日平均塩分浸透量(g/cm²/日)として表に示した。具体例を示すと、1-1の暴露期間(2)における日平均塩分浸透量は、 $(0.74-0.10) \times 10^{-6} / (399-195) = 3.14$ g/cm²/日となる。平均塩分浸透量の差分が負の値となる場合には塩分量をゼロと仮定した。塩分量の日平均

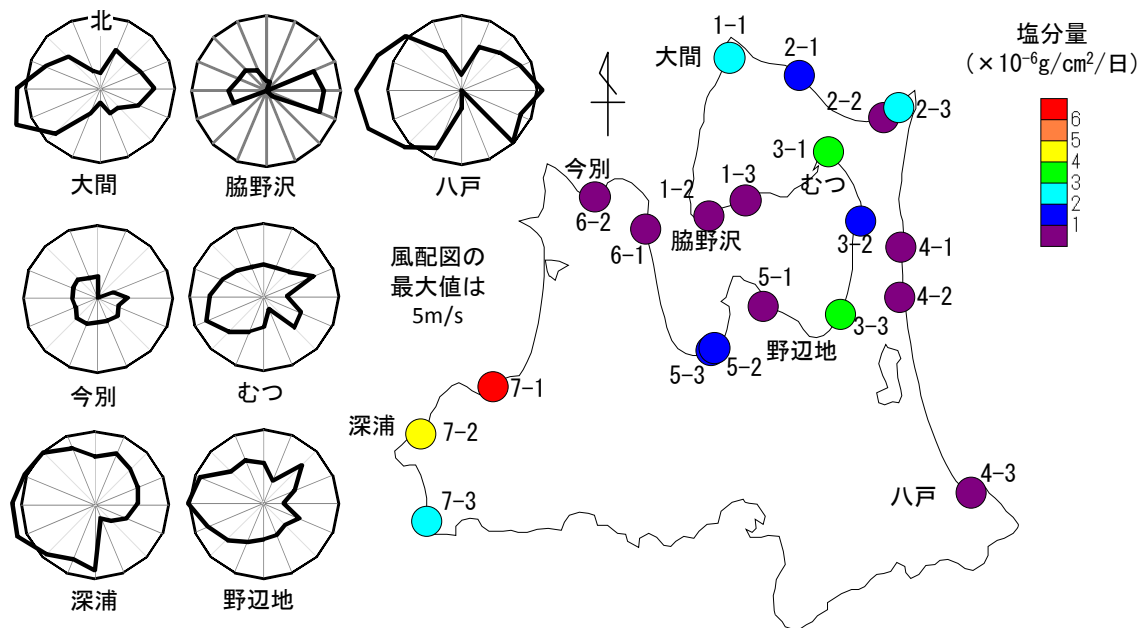


図-6 表-2の(b)列と(d)列を相加平均した日平均塩分浸透量と当該期間の風配図

塩分浸透量の測定結果を用いて青森県沿岸部における塩分浸透特性について考察を試みる。なお、6-3については、1回の測定結果しか得られていないため、以降の検討から除外した。

3.2 風速・風向による塩分浸透特性

まず、風速や風向に代表される巨視的な環境条件が塩分浸透特性に与える影響について考察を試みる。図-5は表-2の(a)列と(c)列を、図-6は表-2の(b)列と(d)列をそれぞれ相加平均した日平均塩分浸透量を地図上に表したものである。すなわち、図-5では春夏が、対して図-6では秋冬が主な計測期間となる。これらの図化には、汎用の地理情報分析支援プログラム⁸⁾を使用した。図-5、図-6において、塩分量の大小はカラーコンターによって表している。参考のため、図には計測地点の近隣で観測している気象データ⁹⁾を利用して作成した風配図を併記した。日最多風向を16方位に分け、各方位ごとの日平均風速の平均値を風配図上にプロットした。なお、表-2において、同一測定地点の(a)列と(c)列、並びに(b)列と(d)列をそれぞれ比較すると、塩分浸透量に年間の変動が大きい場合が見られる。本来ならば、そのような変動を適切に評価しながら、塩分浸透量の平均値を示すことが妥当である。しかしながら、本論文の範囲で、そのような評価を行うことは困難である。そこで、図-5と図-6では、塩分浸透量の年間変動を緩和させることを目的にして、(a)列と(c)列、並びに(b)列と(d)列の相加平均値を用いた。塩分浸透量の変動に関する評価については、今後の研究で適切な手法を提案したい。

図-5、図-6をそれぞれ比較すると以下のことが言える。まず、一般に日本海沿岸では冬期の強い北西季節風

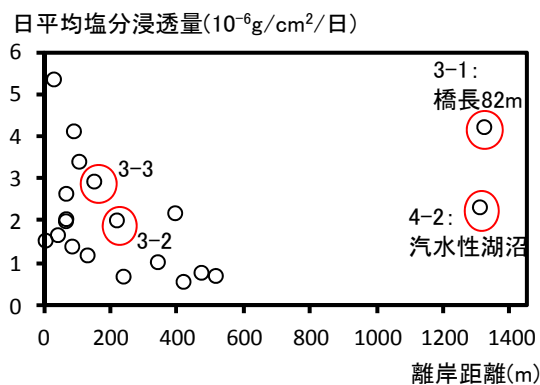


図-7 日平均塩分浸透量と離岸距離との関係

により多量の塩分が到来することが知られている。それを考慮すると、日本海沿岸に設置した7-1, 7-2, 7-3では、7-1と7-2でそのような傾向が伺える。しかし、7-3ではそれらの計測地点とは逆に、秋冬よりも春夏に比較的多くの塩分浸透が認められる。他の沿岸部では、総じて風上が海上にあり、なおかつ風速が比較的大きい場合に塩分量が大きくなっている傾向にある。その傾向は、3-1, 3-3で認められる。しかしながら、例えば7-1, 7-2, 7-3や3-1, 3-2のように比較的近隣に位置する場合でもモルタル円盤に浸透した塩分量に差がある。従って風向や風速だけでは、浸透する塩分量の大小を説明しきれないものと思われる。

3.3 微視的環境条件による塩分浸透特性

飛来塩分に与える影響要因として考えられるのは、風や離岸距離の影響が大きいことは、これまでの調査研究例えば¹⁰⁾で明らかである。図-7は、本研究における日平均塩分浸透量と離岸距離との関係である。この図を見る

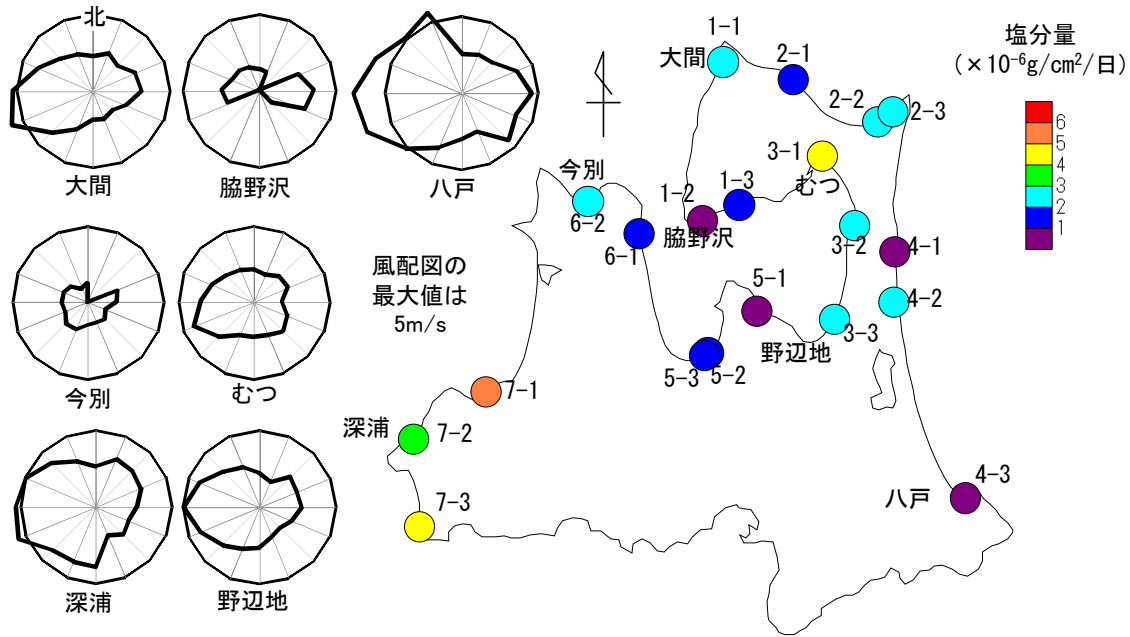


図-8 青森県沿岸における日平均塩分浸透量の分布(塩害危険度マップ)

と、既往の研究^{例えは 10)}のように離岸距離と塩分浸透量にある程度の相関が見られる。しかし、塩分浸透量の大きさを離岸距離だけで説明しきれないデータが見られる。従って、離岸距離などの要因以外に塩分浸透量を計測する周囲のミクロな環境条件もまた、看過することはできないと著者らは考えている。具体的には、岩礁や消波ブロックによる飛沫の発生¹¹⁾、橋長、すなわち川幅の大小による飛来塩分の多寡¹⁾、あるいは周囲の遮蔽物の影響¹²⁾などが考えられる。ここでは、風向や風速の条件がほぼ同等の条件と考えられる、3-1(離岸距離 1320m)、3-2(同 217m)、3-3(同 149m)について微視的条件の比較を試みたい。表-2 における全暴露期間の日平均塩分浸透量は、それぞれ 3-1 が $4.24 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2/\text{日}$ 、3-2 が $2.03 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2/\text{日}$ 、3-3 が $2.95 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2/\text{日}$ となっている。ここで、離岸距離が最も大きい 3-1 において多量の塩分が浸透しているのは、装置を設置した橋梁の橋長が約 82m となっており、しかも大きく海に開けた河口部に架設されていることが影響していると推定している。文献¹⁾では、橋長、すなわち川幅が 100m を超えると離岸距離が大きくなっても比較的少量の飛来塩分が到来する可能性を指摘している。3-1 については、そのような影響が反映されているものと考えている。一方、3-2 と 3-3 では離岸距離が数百メートルにも関わらず、比較的少量の塩分が浸透している。現地を確認したところ、3-2、3-3 では河口部に消波ブロックが設置されており、その影響により比較的多くの飛来塩分が到来していると思われる。図-5 に示したように、4-2(離岸距離 1307m)では秋冬よりも春夏で比較的少量の塩分浸透が認められる。これについては、季

節による卓越風向が影響して、春夏で比較的多くの塩分が浸透しているものと予想される。さらに、4-2 は汽水性湖沼¹³⁾の入り江に架っていることから、淡水よりも多量の塩分を含んだ水が橋梁直下を流れていることも原因と思われる。

以上より、3 方を海洋に囲まれた青森県の飛来塩分特性は、巨視的には季節風の影響を受けることが明らかとなった。しかし、風の影響のみならず、計測地点の微視的な環境条件の影響を受けることが改めて明らかとなった。

3.4 塩害危険度マップの作成

表-2 に示した日平均塩分浸透量の 4 回に渡る測定結果の平均値を用いて青森県沿岸における日平均塩分浸透量の分布を塩害危険度マップとして図-8 のように作成した。日平均塩分浸透量の平均値は、全測定期間の測定結果を反映させること、および図-5 と図-6 と同様のデータ処理を実施することを目的に、表-2 における(a)から(d)の相加平均とした。このような図は、以下のような活用策があると考えている。まず、新設構造物を設計する際に、既存の示方書やマニュアル類の補間資料として利用することが挙げられる。例えば、土木学会コンクリート標準示方書¹⁴⁾では、大まかな塩害区分が示されている。しかし、3-1~3-3 などのように塩害区分が明確でない区域では、表-2 や図-8 に従って塩害に対する耐久性照査を行うことが可能になる。次に、既存構造物の維持管理に活用することが考えられる。具体的には、図-8 の 7-1 では、著しい塩害が起こることが予測される。実例^{2),3)}として、この地域に架設された PC 上部工が著し

い塩害により比較的早期に架け替えが余儀なくされている。このような事例を踏まえると、橋梁群の維持管理を行う場合には、図-8のような危険度マップを活用して構造物長寿命化の優先度を策定することが望ましいと言える。

4. まとめと今後の課題

本論文の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) モルタル円盤を利用した簡素な装置を設置して、その設置場所における飛来塩分特性や塩分浸透量を計測する方法を提案した。
- 2) 以上の装置を青森県沿岸部の21箇所に設置して、塩分浸透量を計測した結果を利用して青森県における塩害危険度マップを作成した。そのマップより、青森県における飛来塩分特性は風などの巨視的な環境条件のみならず、消波ブロックの有無や橋長(川幅)などの微視的な条件を受けることがわかった。

富山¹⁵⁾の研究では、同一の橋梁上部工でも主桁の位置ごとに表面に付着する塩分量が異なることが実測されている。そのような観測事実を考慮すると、モルタル円盤を利用した耐久設計では、同じ橋梁でも部材ごとに、さらに同一の部材でも複数点で塩分浸透を計測する必要がある。モルタル円盤による塩分計測により構造物への塩分浸透予測の精度を向上させるためには、そのような検討が不可欠と考えられる。今後は、塩分浸透予測の精度向上を目指して計測事例を増やしていきたい。

謝辞: 本研究は、青森県と財)大阪地域計画研究所 ブリッジマネジメント研究会との共同研究により行われた。モルタル円盤設置のためのフィールド提供では、川村 宏行氏(青森県三八地域県民局)の多大なご協力を賜った。データ整理と一部の考察は、夏坂 亮太氏、鍛冶 傑氏、葛西 祥也氏(元 弘前大学理工学部 地球環境学科)の卒業論文として実施された。ここに記して各位に深甚なる謝意を表す

参考文献

- 1) 藤田弘昭・上原子晶久・津村浩三・石澤 徹：青森県日本海沿岸における RC 橋梁の塩害に関する調査，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.330-340，2006.
- 2) 鈴木基行・岩城一郎・上原子晶久・内藤英樹・久田真・鶴田浩章・佐々木暢智・千葉陽子：著しい塩害

を受けた PC 橋の静的載荷試験，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.231-244，2010.

- 3) 岩城一郎・上原子晶久・子田康弘・内藤英樹・皆川浩・鈴木基行：著しい塩害を受けた道路橋 PC 桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.413-432，2010.
- 4) 前田 聡・竹若耕司・山口明伸：塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.109-120，2004.
- 5) 佐伯竜彦・堀岡佑介：新潟県沿岸の飛来塩分環境とコンクリートへの塩分浸透性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.923-928，2006.
- 6) 国土地理院ホームページ：地理院地図，<http://maps.gsi.go.jp/>
- 7) 佐伯竜彦・竹田光明・佐々木謙二，嶋 毅：飛来塩分環境の定量評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.66，No.1，pp.1-20，2010.
- 8) 谷 謙二：フリーGIS ソフト MANDARA パーフェクトマスター，古今書院，2011.
- 9) 気象庁ホームページ：過去の気象データ検索，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 10) 建設省土木研究所：飛来塩分量全国調査(I)，土木研究所資料，No.2203，1985.
- 11) 宇多高明・小俣 篤・小西正純：海岸からの飛来塩分量の計算モデル，海岸工学論文集，第 39 巻，第 2 号，pp. 1051-1055，1992.
- 12) 大即信明・檜野紀元・片脇清士・小林明夫・宮川豊章：塩害(I)，技報堂出版，1993.
- 13) 植田真司・川端一史・久松俊一・稲葉次郎・細田昌広・横山瑞江・近藤邦男：浅い汽水湖尾駁沼における塩分躍層の構造特性，陸水学会誌，第 63 巻，pp.125-134，2002.
- 14) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2012 年制定，2013.
- 15) 富山 潤・佐藤 智・清水文雄・神田恭幸・砂川勇二：塩害環境下に置かれたコンクリート橋主桁における付着塩分量調査(その1)，材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342 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.98，pp.331-338，2012.