

論文 薄板モルタル供試体による沖縄県の塩害環境の定量的評価検討

富山 潤*1・風間 洋*2・比嘉正也*3・砂川恒雄*4

要旨: 薄板モルタル供試体による沖縄県の塩害環境の定量評価に関する検討を行った。調査個所は、環境の異なる4つの暴露試験場および10橋梁である。結果は、薄板モルタル供試体の貼り付け方法の違いによる表面塩化物イオン濃度の差異、暴露試験場の塩害環境、西海岸と東海岸の塩害環境、海岸からの距離による塩害環境、および薄板モルタル供試体と土研式飛来塩分捕集器の関係について整理した。その結果、薄板モルタル供試体の貼り付け方法に有意な差はなく、環境作用の違いについて定量的に評価可能な結果を得ることができた。また、薄板モルタル供試体と土研式飛来塩分捕集器の結果には良い相関があることが確認できた。

キーワード: 塩害環境, 薄板モルタル供試体, 共通暴露試験, 表面塩化物イオン濃度

1. はじめに

塩害環境下のコンクリート構造物に対して適切な耐久性設計と維持管理を行うためには、塩害環境の定量評価が重要であり、既往の研究¹⁾もいくつかあるが、部材・部位毎の浸透塩分環境については、不十分でありデータの蓄積も少ないのが現状である。即ち、個別の構造物や構造物の部位毎の環境の違いを対象とした環境評価について調査・研究を行うことが必要である。

このような背景のなか、周辺地形の影響を考慮し、構造物(主に橋梁)各部位における表面塩化物イオン濃度(kg/m³)以下、C₀と称す)を定量的に評価し、設定するための基礎データを得ることを目的に土木学会「コンクリート委員会 348 塩害環境の定量評価に関する研究小委員会」では、薄板モルタル供試体を用いた共通暴露試験を冬季(2016年12月~2017年3月程度)限定とし、北海道、金沢、富山、新潟、和歌山、大阪、沖縄の各地で実施した。本論文は、沖縄県で実施した結果をまとめたものの一部である。一方で、沖縄県では、コンクリート構造物の耐久性向上を目的として、様々な環境で暴露試験^{2,3,4)}を行っている。そこで本研究では、暴露試験場とコンクリート橋梁を対象に塩害環境調査を行った。暴露試験場の結果は、薄板モルタル供試体と長期暴露試験体のC₀を比較し、薄板モルタル供試体の結果の妥当性を検証した。また、橋梁の調査については、建設位置や環境の違いによる塩害環境の定量評価の可能性を検討した。

2. 暴露試験概要

2.1 薄板モルタル供試体⁵⁾

(1) 特徴

薄板モルタル供試体を用いた塩害環境調査は、設置に特殊な機材や技術が必要なく容易に設置・回収できるの

が特徴である。本研究で用いた薄板モルタル供試体は、市販のもので、寸法は4.0cm×4.0cm×0.5cmで水セメント比(W/C)=60%である(写真-1)。

薄板モルタル供試体の主な特徴として、以下のことが挙げられ、これらを用いた研究も増えている^{6,7)}。

a)複数地点の比較のための塩害環境調査が容易

b)構造物の部材・部位毎の塩害環境の比較が容易

以上のことから、薄板モルタル供試体を用いた塩害環境調査は、構造物の適切な耐久性設計と維持管理を行うために必要なデータを継続的に蓄積することが容易であるといえる。

(2) 塩分量分析方法

薄板モルタル供試体回収後の塩分量分析は、供試体を乾燥させ、粉碎処理をして粉末試料とし、JCI-SC5に基づき電位差滴定法(自動滴定装置GT-2001型)によりモルタル中に含まれる塩化物イオン濃度を分析する。

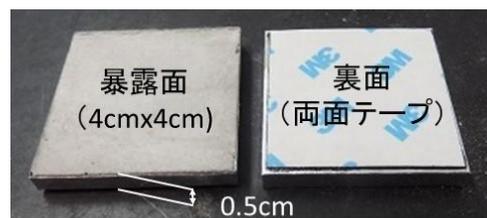


写真-1 薄板モルタル供試体(4cm×4cm×0.5cm)の例

2.2 暴露位置および暴露期間

(1) 暴露位置

薄板モルタル供試体の暴露試験は、沖縄本島3か所、宮古島1箇所の合計4暴露試験場と、沖縄本島9橋梁、宮古島1橋梁の合計10橋梁で実施している。詳細を表-1に示し、位置図の概略を図-1に示す。海岸からの距離

*1 琉球大学 工学部工学科 社会基盤デザインコース 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 アール・アンド・エー 代表 (正会員)

*3 一般財団法人沖縄県建設技術センター 試験研究部試験研究班 主任技師 (正会員)

*4 琉球大学 工学部技術部 技術職員 (正会員)

は、辺野喜暴露試験場(約 30m), 西原町 (G~I 橋) を除く, 薄板モルタル供試体のほとんどの暴露箇所では, ほぼ 0m である。西原町 (G~I 橋) の海岸からの距離については後述する。

表-1 暴露試験箇所

場所種別	市町村	暴露箇所 (暴露面方向)
暴露試験場	国頭村	辺野喜暴露試験場 (西)
		辺土名暴露試験場 (北)
	名護市	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)
橋梁	国頭村	A 橋 (北)
	大宜味村	B 橋 (北西)
	読谷村	C 橋 (北)
	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)
	宮古島市	J 橋 (南南西)

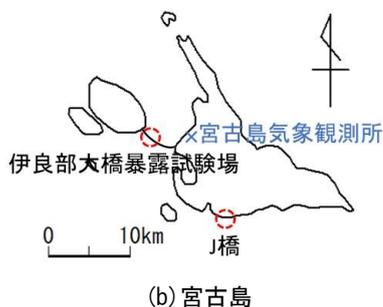


図-1 暴露試験実施位置図および気象観測所

(2) 貼り付け方法 (設置方法)

今回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-2 に示す四角形 (□) とひし形 (◇) の 2 通りとした。これは雨がかりがある場合, 構造物に付着した雨水が流水

となり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つけ方の違いによる差異を検討するためである (図-2 参照)。また, 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-3 に設置例を示す。なお, 各暴露箇所に設置した薄板モルタル試験体の数は, 四角形 (□), ひし形 (◇) 各々 1 個ずつ計 2 個である。

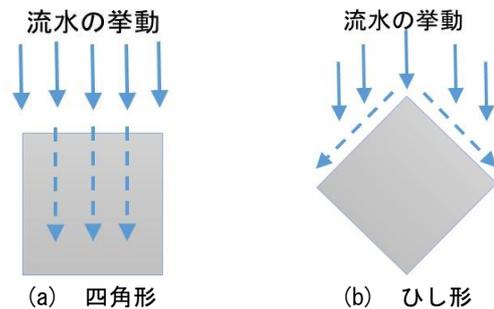
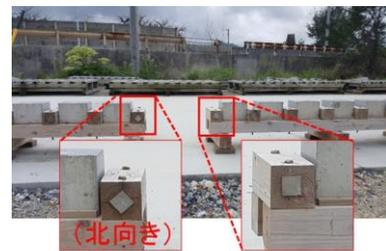


図-2 貼り付け方法と想定される流水の挙動



(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-伊良部島)

図-3 薄板モルタル供試体設置例

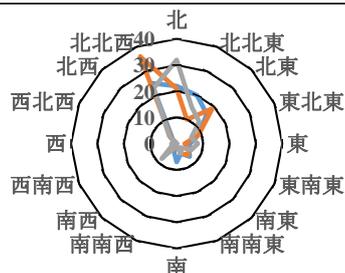
(3) 暴露期間およびその期間の風況

暴露期間は、冬季の約4ヵ月とした(J橋については約3ヵ月)。表-2に具体的な時期および期間を示す。また、暴露期間中の風況として、最寄りの気象観測所の風向および風速を整理した。沖縄本島北部(西海岸)については、伊是名気象観測所、本島中部(東海岸)については、糸数気象観測所、宮古島については、宮古島気象観測所の観測記録を用いた(図-1)。図-4~6にそれぞれの観測所の記録を整理した風向別割合(平均, 最大, 最大瞬間風速)および風速(平均, 最大, 最大瞬間風速)を示す。この結果より、いずれの暴露箇所においても、期間内の風況は、北よりの風が多く、平均風速も5m/s程度あることがわかる。

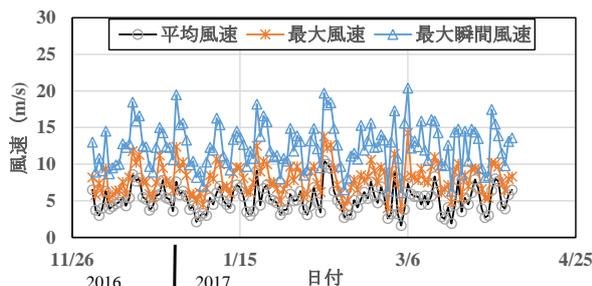
表-2 暴露時期および期間

暴露箇所	暴露時期および期間
辺野喜暴露試験場	2016年12月2日~2017年4月6日(125日)
辺土名暴露試験場	
古宇利大橋暴露試験場	
伊良部大橋暴露試験場	2016年12月6日~2017年4月6日(121日)
A橋	2016年12月2日~2017年4月6日(125日)
B橋	
C橋	
D橋, E橋	2016年12月3日~2017年4月6日(124日)
F橋, G橋, H橋, I橋	2016年12月3日~2017年4月5日(123日)
J橋	2017年1月6日~2017年4月6日(90日)

— 最多風向 — 最大風速風向 — 最大瞬間風速



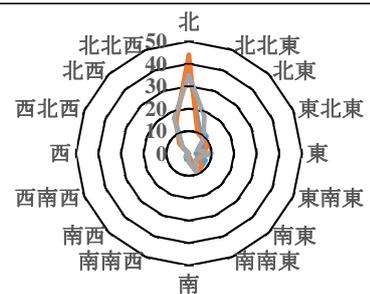
(a) 風向別割合



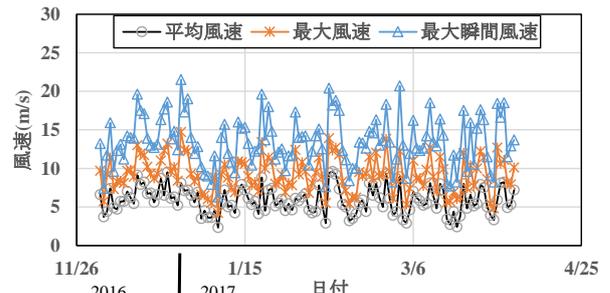
(b) 風速

図-4 伊是名気象観測所

— 最多風向 — 最大風速風向 — 最大瞬間風速



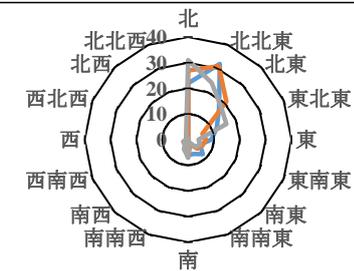
(a) 風向別割合



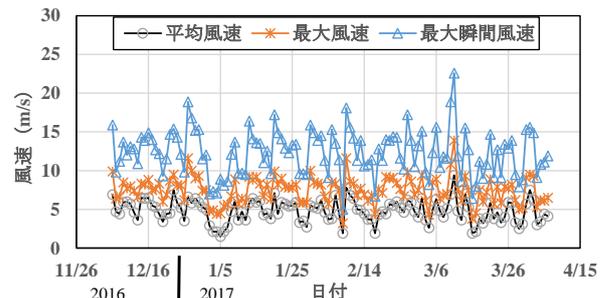
(b) 風速

図-5 糸数気象観測所

— 最多風向 — 最大風速風向 — 最大瞬間風速



(a) 風向別割合



(b) 風速

図-6 宮古島気象観測所

3. 調査結果および考察

本論文では、佐伯らの方法⁵⁾により薄板モルタル供試体から得られた浸透塩化物イオン濃度(kg/m³)をコンクリートの見掛けのC₀(kg/m³)に変換し整理した。なお、拡散係数の推定値を算定するためのコンクリートおよび薄板モルタル供試体の固定化率は文献⁵⁾を参考にそれぞれ

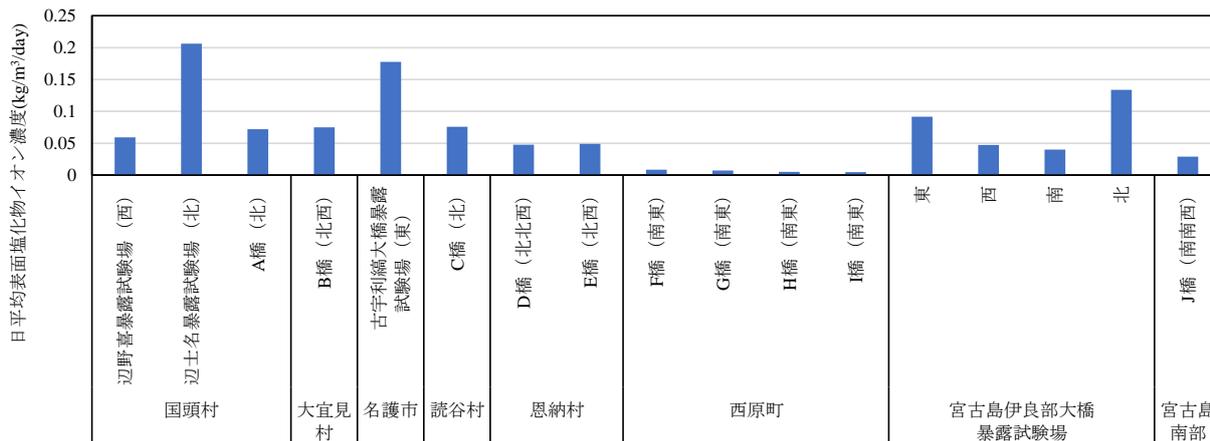


図-8 共通暴露試験全体比較 (括弧内は暴露面方向)

1.6, 1.8 を採用した。

以降には、貼り付け方法 (設置方法)、全体比較、長期暴露試験体との比較、西海岸と東海岸、海岸からの距離、薄板モルタル供試体と土研式の関係の整理を示す。

3.1 貼り付け方法 (設置方法)

図-7 に、四角形 (□) とひし形 (◇) に貼り付けた結果の比較を示す。この図より、今回の測定範囲内では、当初想定された流水の影響はそれほどないことがわかる。このため、以降に示す結果は、四角形 (□) およびひし形 (◇) の2つの平均値とした。

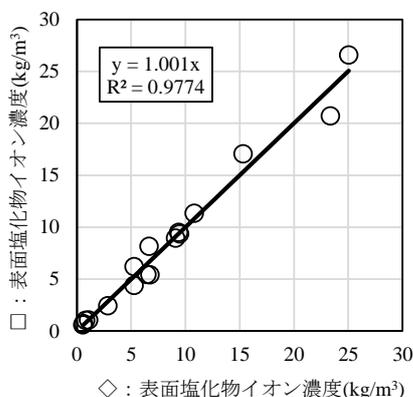


図-7 薄板モルタル供試体の貼り付け方法の比較

3.2 全体比較

図-8 に結果全体の比較を示す。なお、暴露期間がわずかに異なるため、図-8 では、 C_0 を暴露期間で除した日平均 C_0 ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{day}$) で整理した。

道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説⁸⁾によると、沖縄県は一律に塩害環境地域区分 A とされるが、この結果より、場所により塩害環境が大きく異なることがわかる。この違いについて、これ以降において考察を行う。

3.3 暴露試験場の塩害環境

共通暴露試験を行った4つの暴露試験場のうち、辺土

名、古宇利大橋、伊良部大橋暴露試験場は沖縄県および関係組織が管理しており、様々な目的の暴露試験体^{2,3,4)}が設置されている。ここでは、4暴露試験場の薄板モルタル試験体の結果に加え、沖縄県関係管理の3暴露試験場の暴露試験体の C_0 を示し、短期間の薄板モルタル供試体の結果の妥当性についても検証した。なお、辺土名暴露場は11年 (2001年~2012年、ただし、2009年までは別暴露場に設置)²⁾、古宇利大橋暴露場は11年 (2002年~2013年)³⁾、伊良部大橋暴露場は5年 (2008年~2013年)⁴⁾の調査結果である。比較には、普通コンクリート仕様 (設計基準強度 $36\text{N}/\text{mm}^2$) の暴露試験体から採取したコンクリートコアを2cm毎にスライスした各層の塩化物イオン濃度を回帰分析し、得られた C_0 を用いた。また、暴露試験体は上下面が暴露面となっているが、比較は薄板モルタル供試体同様に雨がかりのある上面のみとした。

図-9 に辺野喜を含む4暴露試験場の航空写真 (海岸の種類、海岸からの距離 (辺野喜暴露試験場のみ) および暴露方向) を示す。図-10 に結果を示す。図-10 から4暴露試験場の塩害環境が大きく異なることがわかる。これは、海岸の種類、暴露面方向、標高、風向・風速などがそれぞれ異なることが原因としてあげられ、今後詳細な検討を行う。また、薄板モルタル供試体と3箇所の暴露試験体の結果との比較では、辺土名暴露試験場以外の2つの暴露試験場の両者の結果は、概ね同様な値を示している。この2暴露試験場では、薄板モルタル供試体と暴露試験体が比較的近い位置にあるのに対して、辺土名暴露試験場では、薄板モルタル供試体が海岸からほぼ0m、暴露試験体は海岸から8mほど離れていることが両者の大きな差異の原因であると考えられる。

辺土名暴露試験を除く2暴露試験場の結果から、薄板モルタル供試体は短期間の設置であっても長期暴露試験体の近傍に設置することで、長期暴露試験体の C_0 を評価できる可能性が示された。

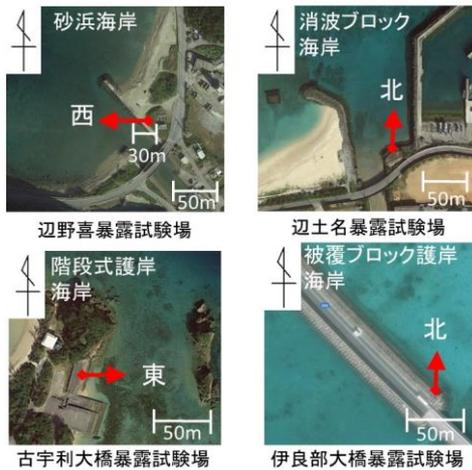


図-9 暴露場の航空写真 (Google map)

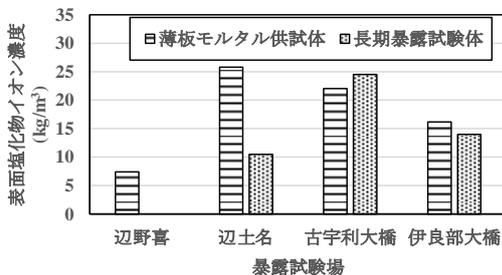


図-10 暴露試験場と塩害環境

3.4 個々の橋梁の塩害環境

比較に用いた橋梁は、海岸線に架橋された橋梁とし、西海岸に位置する5橋 (A~E橋) と東海岸に位置する1橋 (F橋) である。図-11に結果を示す。図-4~図-6からもわかるように冬季の沖縄の卓越風は北よりの風で、風速も強い傾向を示していることから、東海岸の橋梁に比べ、西海岸の橋梁の日平均C₀が多いのがわかる。また、建物や植生などの遮蔽物がない、あるいは少ない西海岸のA~C橋は、同程度の日平均C₀である。一方、遮蔽物のあるD、E橋も同程度の日平均C₀を示している。これらの結果から、薄板モルタル供試体の測定結果を用いた個々の橋梁の塩害環境の定量評価から、維持管理の優先順位付けが可能と考える。

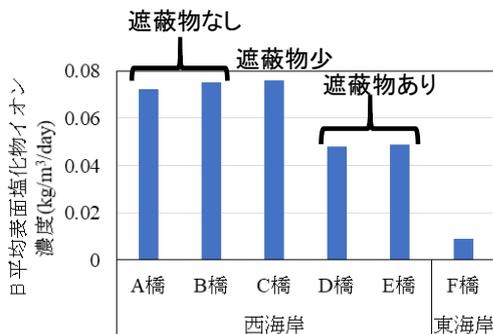


図-11 西海岸と東海岸の比較

3.5 海岸からの距離

一般的に飛来塩分量は、海岸から離れるに従い、少なくなる、いわゆる距離減衰効果があり、指数関数で概ね表現できることが知られている⁹⁾。ここでは、図-12に示す感潮河川上に建設された4橋梁の位置について、得られたC₀の比較を行った。なお、この位置は埋立地であり、もともと海の干満の影響を直接受ける領域である。

図-13に海岸からの距離とC₀の関係を示す。図-13に示す通り、本調査結果は、海岸からの距離に関してC₀は減衰している。しかし、その関係は、一般的な指数関数近似ではなく、直線近似で表現されることが示された。その理由については、感潮河川上に建設された橋梁においては、海岸からの距離が離れた位置においても、海水の潮位変化があり、また、強風時には碎波の影響があるためだと考えられる。この結果からも薄板モルタル供試体の測定結果を用いた個々の橋梁の塩害環境の定量評価により、維持管理の優先順位付けが可能と考える。



図-12 橋梁の位置図

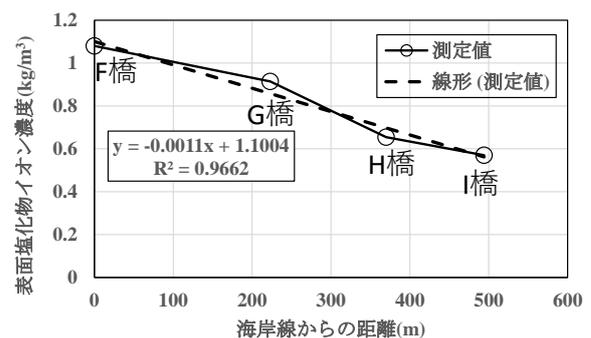


図-13 海岸からの距離と表面塩化物イオン濃度

3.6 薄板モルタル供試体と土研式との結果比較

薄板モルタル供試体と土研式飛来塩分捕集の結果については、既往の研究^{例えば10, 11)}においても比較検討が行われている。ここでは、伊良部大橋暴露試験場に設置した4方向測定可能な土研式飛来塩分捕集器とその捕集口の横に貼り付けた薄板モルタル供試体 (図-3(c)参照) の結果を比較した。

土研式における2016年12月6日～2017年4月6日(121日)の飛来塩分量(Cl⁻/mdd)を求め、薄板モルタル供試体の塩分量も mdd に単位変換を行い、両者を比較した。その結果を図-14 に示す。この結果より、既往の研究と同様、薄板モルタル供試体と土研式には良い相関があることが確認できた。しかし、これらの4 データのみの比較であるため、今後もデータを蓄積し、両者の比較を行っていく予定である。

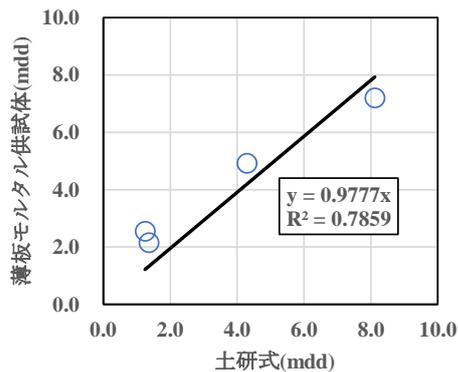


図-14 薄板モルタル供試体と土研式の関係

4. まとめ

薄板モルタル供試体による沖縄県の塩害環境の定量評価に関する検討を行った。得られた知見を示す。

- (1) 構造物表面の流水の影響を考慮し、薄板モルタル供試体を四角形(□)とひし形(◇)の2通りの方法で貼り付けた。その結果、両方法のC₀に優位な差は認められなかった。
- (2) 薄板モルタル供試体の全体的な比較から、各地域で塩害環境が大きく異なることが示された。
- (3) 4 暴露試験場の塩害環境の違いが示され、また、3 暴露試験場における薄板モルタル供試体と暴露試験体の比較から、薄板モルタル供試体を暴露試験体の近くに設置することで、短期間設置でも長期暴露試験体のC₀を評価できる可能性が示された。
- (4) 西海岸および東海岸に架橋された5 橋梁の比較した薄板モルタル供試体の測定結果から、個々の橋梁の塩害環境を定量評価でき、橋梁の維持管理優先度を決定できる可能性が示された。
- (5) 海岸から500m 以内の感潮河川上に建設された4 橋梁の薄板モルタル供試体分析の結果、C₀は海岸からの距離の関数とした1 次式で近似された。
- (6) 薄板モルタル供試体と土研式飛来塩分捕集器の結果は、捕集メカニズムが異なるが、良い相関を示した。

今後は、詳細な検討を進め、C₀に対する海岸の種類、海岸からの距離、標高(高さ)、雨がかりなどの影響を検討する。

謝辞: 本研究は、土木学会 348 委員会の共通暴露試験の一環で実施し、暴露試験場を管理する沖縄県、橋梁を管理する国頭村、大宜味村、沖縄県中部土木事務所、内閣府沖縄総合事務局南部国道事務所、読谷村、西原町に協力を頂いた。また、本研究は平成 29 年度国総研「道路政策の質の向上に関する技術研究開発(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)代表:佐伯竜彦 新潟大学教授」の支援を受けた。4 年生の八神孝佑君、福村英太郎君は研究に対する補助をして頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会:土木学会塩害環境の定量評価に関する研究小委員会(348 委員会)報告書,コンクリート技術シリーズ,2015.
- 2) 風間洋,富山潤,砂川勇二,比嘉正也,小旗俊介:沖縄県の海岸線に11年間暴露したフライアッシュコンクリートの耐久性に関する研究,土木学会論文集 E2, No.3, pp.251-270, 2017
- 3) 風間洋,富山潤,下地健,小旗俊介:コンクリート表面の含有塩分量 C₀ 調査方法の提案,土木学会第70 回年次大会学術講演会, V, pp.139-140, 2015
- 4) 沖縄県土木建築部道路管理課:沖縄県道路構造物耐久性調査業務委託(H25)報告書,2014.2
- 5) 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, 2010.1
- 6) 上原子晶久,皆川浩,久田真,鈴木基行: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,コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.757-762, 2015.6
- 7) 吉次優祐,富山潤,松田愛子,佐伯竜彦:薄板モルタル供試体を用いた PCT 桁橋上部工における塩害環境調査,コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.727-732, 2017.6
- 8) 社団法人日本道路協会:道路橋塩害対策指針(案)・同解説,1984.2
- 9) 岸谷孝一,西澤紀昭,他:コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(I),技報堂出版,1986.5
- 10) 細井雄介,Rungrawee Wattanapornprom,石田哲也,高橋佑弥:2つの手法を用いた27か月間の現地飛来塩分測定と測定結果に基づく飛来塩分発生・輸送モデルの検証,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, No.1, 733-738, 2017.6
- 11) 崎原康平,石川嘉崇,石川学,山田義智,富山潤:火力発電所における塩害環境評価に関する基礎的研究,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文集, Vol.17, pp.593-598, 2017.10