

論文 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

佐伯 竜彦^{*1}・堀岡 祐介^{*2}

要旨：本研究は、塩害環境の定量的把握のための基礎的検討として、新潟県沿岸の塩害環境の特性、さらに環境条件とコンクリート中への塩分浸透との関係を明らかにすることを目的として、新潟県内の沿岸部で飛来塩分量の測定、モルタルおよびコンクリート供試体の暴露試験を行った。その結果、各地点の飛来塩分量は、個別の条件の影響を強く受けること、飛来塩分量とコンクリート内部への塩分浸透量には相関があることが明らかとなった。さらに、短期間の暴露試験によって比較的長期間の塩分浸透量を予測できるが可能性があることが確認された。

キーワード：塩害環境, 飛来塩分, 塩分浸透

1. はじめに

海洋環境下の構造物の合理的な耐久性設計・維持管理のためには、塩害環境、即ち劣化外力を適切に評価することが不可欠である。

土木学会 コンクリート標準示方書では¹⁾、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査において、環境条件をコンクリート表面における塩化物イオン濃度で与えることとしている。表面濃度は、海岸からの距離に応じて設定することとなっているが、実際のコンクリート構造物への塩分の供給量は気象条件や周辺地形等の様々な影響を受けると考えられる。しかし、これらの影響は定量的には必ずしも明らかになっておらず、照査手法にも取り入れられていない。

そこで本研究では、塩害環境の定量的把握を最終目的とした研究の第一歩として、対象地域を新潟県沿岸と限定し、その飛来塩分状況を明らかにすること、および飛来塩分量とコンクリートへの塩分浸透量の関係について検討することを目的とした。

2. 実験概要

本研究では、新潟県沿岸の各地点において飛来塩分量を測定するとともに、同一地点にモル

タル供試体およびコンクリート供試体を暴露し、内部に浸透した塩化物イオン量を測定した。

2.1 調査地点

本研究では、図-1に示す15ヶ所を調査地点とした。飛来塩分量測定は全15地点で行い、モルタル供試体およびコンクリート供試体の暴露試験は、それぞれ13地点および4地点で行った。各地点の概要を表-1に示す。No.2とNo.3, No.6~8, No.12とNo.13はそれぞれ同一河川の橋梁での測定地点であり、海岸線からの距離の影響を検討できる。なお、表中の海岸線からの距離は、調査地点から海岸線までの最短距離である。

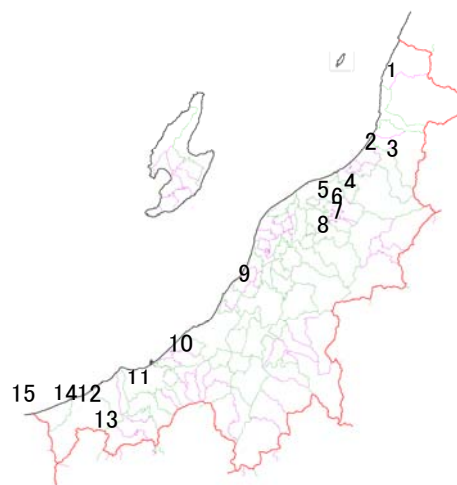


図-1 調査地点

*1 新潟大学 工学部建設学科助教授 博(工) (正会員)

*2 新潟大学 工学部建設学科

表－1 調査地点の概要

調査地点	海岸線からの距離 (m)	設置標高 (m)		方位
		捕集器	供試体	
1	0	10	6※	N
2	150	4	11	WNW
3	1400	9	7	WNW
4	300	5	3	NM
5	3000	7	-	NNW
6	300	7	5	NNW
7	3400	10	6	NNW
8	4500	7	5	N
9	900	25	-	WNW
10	200	50	45	WNW
11	20	10	10※	NNW
12	450	7	5	NNW
13	1000	15	12	NNW
14(上)	0	30	36※	NNW
14(下)			10※	
15	100	11	10※	NNW

※モルタル供試体とコンクリート供試体を設置

また、塩分捕集器供試体の方位は設置位置から海岸線までの最短距離の方向と一致させた。

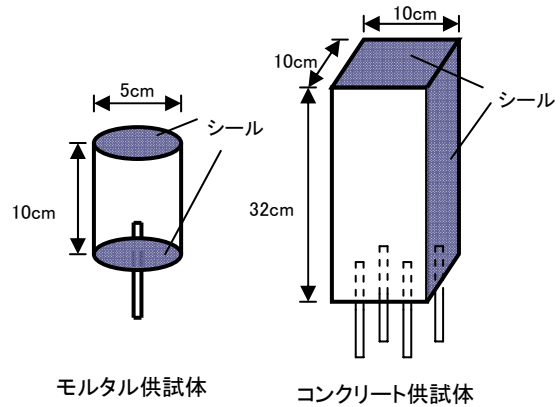
飛来塩分量とコンクリートへの浸透量の関係を検討するため、塩分捕集器と供試体は極力同位置あるいは近接した位置に設置した。ただし、No.1 と No.14（下）は設置地点の都合上、両者が同一環境とは見なせず、供試体が直接波しぶきを受ける飛沫帯への設置となった。

2.2 飛来塩分量測定

飛来塩分量は、土研式塩分捕集器を用いて測定した。測定期間は、1992年10月～1994年12月であり、1ヶ月毎に測定を行った。

2.3 供試体暴露試験

モルタル供試体は、早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比50%とした。コンクリート供試体では、早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比40%とした。スランプは12cm、空気量は4%である。



図－2 供試体概要



図－3 供試体設置状況

供試体の形状を図－2に示す。モルタル供試体はφ5×10cmの円柱、コンクリート供試体は10×10×32cmの角柱である。

供試体は材齢7日まで標準養生を行った後、暴露開始まで実験室内で気中養生した。暴露開始時の材齢は、モルタルで50日～62日、コンクリートで24日～38日であった。気中養生中に図に示すように、暴露面以外をエポキシ樹脂でシールした。

供試体設置状況は図－3の通りであり、直接降雨の影響を受けないように屋根を設けた。

モルタル供試体の暴露期間は、2, 6, 10, 14, 18, 24ヶ月間であり、コンクリート供試体は13年間である。

所定の暴露期間の後回収した供試体内部の全塩化物イオン量を、JCI-SC4に準じて測定した。

モルタル供試体の場合は供試体に侵入した総量を、コンクリート供試体の場合は表面から1 cm 毎にドリル粉末を採取して濃度分布を測定した。

3. 結果と考察

3.1 新潟県沿岸の飛来塩分環境^{2) 3)}

図-4に、地点別の1年間の総飛来塩分量を示す。図より、同一県内であっても地点によって飛来塩分量が相当異なっている。

図-5は、海岸からの距離と飛来塩分量との関係である。コンクリート標準示方書¹⁾では、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査において必要となるコンクリート表面における塩化物イオン濃度の設定に海岸からの距離を用い、高さについては、高さ1 m が汀線からの距離 25m に相当すると考えてよいとしている。このことから塩分捕集器の設置高さの影響も海岸からの距離に換算して、補正した海岸からの距離を用いた。図より、海岸からの距離が増加するに従って飛来塩分量は減少する傾向にあるものの、個々の地点の飛来塩分量を海岸からの距離のみで把握することは難しいと言える。示方書では、海岸からの距離で推定するのはコンクリート表面の塩化物イオン濃度であり、飛来塩分量と必ずしも同一に扱えるとは限らない。表-1に示した通り塩分捕集器の方位が全て同じではないため、ここで検討している距離の影響はあくまでも目安である。しかし図中のデータの大きなばらつきから判断して、塩害環境の定量的な把握は海岸からの距離だけでは難しく、例えば周辺地形等の他の要因も考慮する必要があると考えられる。

図-6は、月別の飛来塩分量の測定例である。図より、飛来塩分は冬期に多く、夏期に少ないことが確認できる。この傾向は、全調査地点で同一であった。これは、飛来塩分が主として冬期の日本海側からの季節風によって発生・輸送されていることを示すものである。図中には、風速10m/s以上の風の頻度も併せて示してあるが、飛

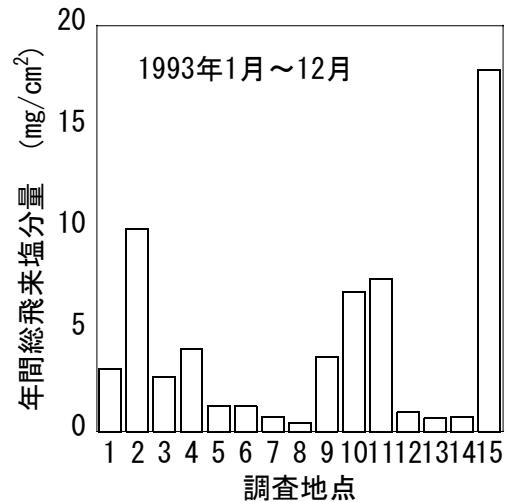


図-4 地点別飛来塩分量

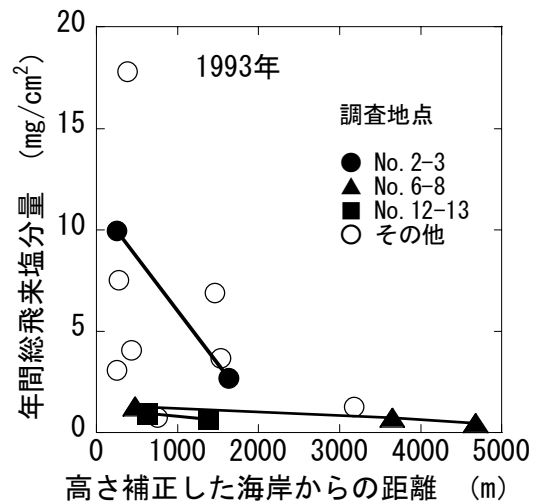


図-5 海岸からの距離と飛来塩分量

来塩分量は、10m/s以上の風の頻度と同じ傾向を示しており、飛来塩分を輸送するのは一定以上の速度の風であることがわかる。風速10m/s以上の風との相関は、他の観測結果でも確認されている⁴⁾。

図-7は、1993年と1994年の年間総飛来塩分量の比較である。飛来塩分量は月毎に変化するが、年単位の变化はそれほど大きくないことがわかる。長期的な気象等の変化傾向の影響(例えば、温暖化など)については今後検討する必要があるが、本研究で対象とした新潟県沿岸では、将来の塩分浸透予測を行う上で飛来塩分の年毎の変化は考慮しなくてよいものと仮定した。

3.2 飛来塩分量とコンクリート中への塩分浸透

図-8は、13年間暴露を行ったコンクリート供試体中の塩化物イオン濃度分布を示したものである。図中の線は、濃度分布をFickの拡散方程式の解である式(1)で回帰した結果である。表-2に回帰の結果得られた見かけの拡散係数Dと表面濃度C₀を示す。

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (1)$$

図より、飛来塩分量と同様に、コンクリート中への塩分浸透量も暴露地点によって異なっており、環境条件の影響が相当大きいことが確認できる。また、表中の拡散係数も大きく異なっている。暴露したコンクリート供試体は、地点によらず同一材料・同一配合のコンクリートであることから、同一の空隙構造を持つと考えられる。ただし、環境条件が暴露地点によって異なることから、含水状態等のコンクリートの内部環境が異なり、これが拡散係数の値に影響していることも考えられる。さらに、見かけの拡散係数は、表面濃度と同時に回帰によって得られたものであるため、本来無関係であるはずの塩分供給条件の影響を含んでいるため、真の拡散係数とは必ずしも一致しない。

図-9は、暴露開始からの累積飛来塩分量と暴露期間中にモルタル供試体中に侵入した全塩化物イオン量との関係である。塩化物イオン量は、モルタル中の総量を供試体暴露面の面積(シール面を除いた)で割った値とした。これは、モルタル中の塩分が全て表面を介して内部に浸透したものであり、本研究では供試体表面に飛来塩分として供給された量のうちどの程度が内部に浸透するかに着目しているためである。

図より、累積飛来塩分量が増加するほど供試体内部への塩分浸透量も増加しており、両者は直線関係にある。このことは、コンクリート表面に到達した飛来塩分が常に一定の割合で内部に浸透していることを示すものと考えられる。こ

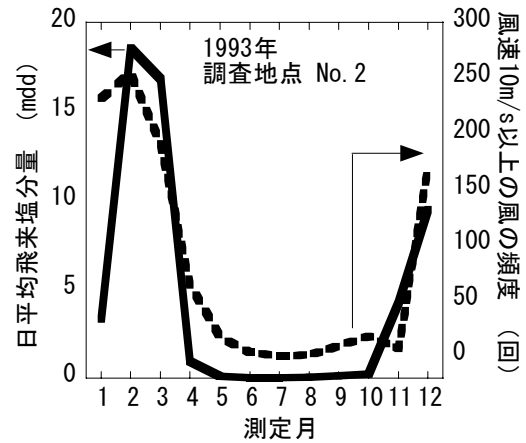


図-6 月別飛来塩分量 (No.2 地点)

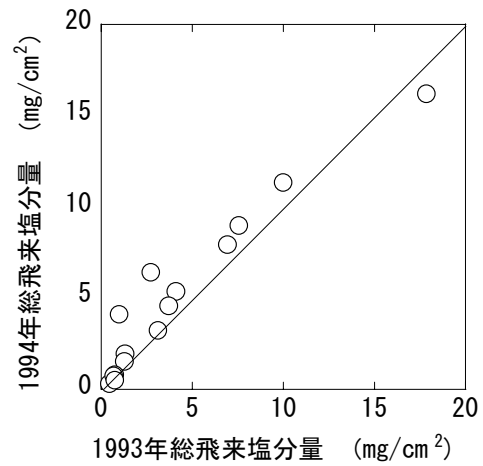


図-7 年間総飛来塩分量の比較

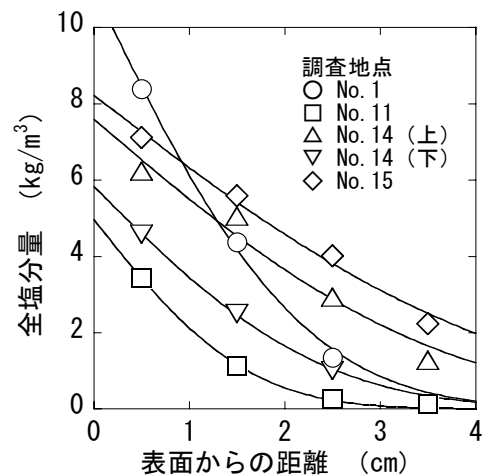


図-8 コンクリート中の塩化物イオン分布

のように両者の関係が直線的になるのは既往の研究でも確認されている⁵⁾。ただし、塩分浸透量

が飛来塩分量に比例して際限なく増加するとは考えにくいため、長期的には浸透割合が減少していくものと予想される⁶⁾。

No.1, No.14 は他の地点に比べて、直線の傾きが大きく、供給された飛来塩分量よりも多量の塩分が浸透している。飛来塩分の測定方法によって捕集できる海水滴・海塩粒子の大きさが異なることから⁷⁾、塩分捕集器と供試体が同位置に設置されたとしても、本研究で用いた塩分捕集器が供試体表面に到達する量と同じ飛来塩分を捕らえているとは限らない。しかし、その他の地域とは明らかに大きな違いがあり、塩分捕集器と供試体の設置環境が異なっていたことが原因と考えられる。

図-10 は、コンクリート供試体の場合の累積飛来塩分量と塩分浸透量の関係である。累積飛来塩分量は、暴露地点の1993年と1994年の年間総飛来塩分量の平均値を1年間の飛来塩分量と仮定し、13年間の累積供給量とするために1年間の値を13倍して算出した。また、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布は、図-8に示されるように式(1)で表せることから、式(1)を積分してコンクリート中への浸透量を求めた。

図-9と比較すると、累積飛来塩分量および浸透塩分量の絶対値はモルタル供試体と異なるものの、調査地点間の大小関係は類似している。モルタル供試体およびコンクリート供試体は同一地点に暴露され、同じ環境条件下におかれたことから当然とも言えるが、モルタル供試体を比較的短期間の暴露することによって環境条件の相対的比較が可能であることは、塩害環境の把握のために有益である。

表-3に、累積飛来塩分量に対する供試体内部への浸透量の比を示す。モルタル供試体では塩分浸透量を経時的に測定しているため、図-9のデータを調査地点別に直線回帰して傾きを求めた。内部に浸透した塩分量の割合はコンクリート供試体よりモルタル供試体の方が高く、即ち塩分が浸透しやすい結果となっている。塩分捕集器と供試体の設置環境が異なると考えら

表-2 コンクリート供試体の見かけの拡散係数と表面濃度

調査地点	見かけの拡散係数 (cm^2/year)	表面濃度 (kg/m^3)
No. 1	0.112	10.9
No. 11	0.061	4.96
No. 14 (上)	0.134	5.53
No. 14 (下)	0.311	7.59
No. 15	0.448	8.22

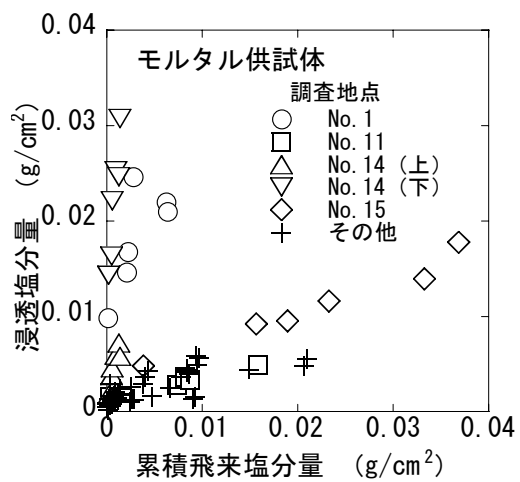


図-9 累積飛来塩分量と浸透塩分量の関係 (モルタル供試体)

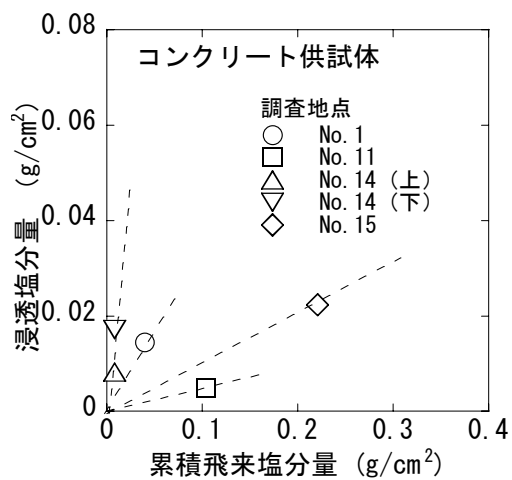


図-10 累積飛来塩分量と浸透塩分量の関係 (コンクリート供試体)

れる No.1 および No.14 を除くと、モルタルでは約 20～35%程度、コンクリートでは約 5～10%程度である。モルタル供試体とコンクリート供試体の違いは配合（水セメント比，粗骨材の有無など）と供試体形状・シールの状況であり，複数の要因が関係している。前者は主として空隙組織ひいては拡散係数に関係し，後者は境界条件に相当するものである。今後これらの影響を定量的に評価できれば，表面に到達した塩分が内部に浸透する割合を定量的に把握できると考えられる。表には，モルタルとコンクリートの比（A/B）も示してあるが，この値は調査地点が異なってもおおよそ4前後とほぼ同じ値となっている。したがって，モルタル供試体で1～2年程度の暴露試験を行うことにより，少なくとも10年程度のコンクリートへの塩分浸透量を推定できる可能性があり，塩害環境の定量的な評価に有効であると思われる。

4. まとめ

本研究では，塩害環境の定量的把握のための基礎的段階として，対象地域を新潟県沿岸に限定して飛来塩分の測定および同位置でのモルタル・コンクリート供試体の暴露試験を行った。

その結果，飛来塩分として供給された量の一定の割合がコンクリート内へ浸透していること，モルタル供試体を比較的短期間暴露することで長期的なコンクリートへの塩分浸透量を推定できる可能性があることが明らかとなった。

謝 辞

本研究は，土木学会新潟会「コンクリートの塩害およびその対策に関する調査研究」および日本学術振興会科学研究費「日本海沿岸の過酷環境下における社会基盤コンクリート構造物の維持管理対策」（研究代表者：丸山久一 長岡技術科学大学理事，課題番号：16360225）の一環として行ったものである。暴露試験では，関係各機関のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

表－3 累積飛来塩分量に対する
浸透塩分量の比

調査地点	モルタル 供試体 (A)	コンクリート 供試体 (B)	A/B
No. 1	1.57	0.36	4.4
No. 11	0.21	0.048	4.4
No. 14 (上)	3.78	0.97	3.9
No. 14 (下)	12.1	2.03	5.9
No. 15	0.36	0.10	3.6
その他	0.24	—	—

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2002
- 2) 宝島由治，加藤恭浩，米山紘一：新潟県沿岸における塩害環境に関する研究，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.448-449，1994.9
- 3) 加藤恭浩，宝島由治，佐伯竜彦：新潟県沿岸部における塩害環境の定量的把握，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.294-295，1995.9
- 4) 谷口秀明，渡辺博志，河野広隆，藤田 学：塩害暴露試験による高強度コンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.825-830，2004.
- 5) 金谷光秀，榊田佳寛，西山直洋：海岸に暴露したコンクリート供試体への塩化物イオン浸透性状，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.684-689，1997.
- 6) 谷川 伸，山田義智，大城 武：塩害環境下におけるコンクリート中の塩分蓄積に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18，No.1，pp939-944，1996.
- 7) 例えば，佐々木慎一，堺 孝司：コンクリート中への塩化物の浸透と海洋環境条件，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp941-946，1994.