

論文

[1156] コンクリート中への塩化物の浸透と海洋環境条件

佐々木 慎一 *1 ・ 堺 孝司 *2

1. まえがき

海岸付近に建設される鉄筋コンクリート構造物では、飛来する塩分（塩化物イオン）による劣化・損傷、いわゆる塩害への対策が非常に重要である。北海道においても、日本海沿岸や太平洋岸に架設された橋梁や覆道で塩害による被害が確認されている。

塩害は海塩粒子がコンクリート表面に付着し、それらが内部に浸透し、鉄筋の不動態被膜を破壊して腐食を生じさせることに起因するが、その過程は未だに不明な点も多い。

鉄筋コンクリート構造物の合理的な塩害対策を確立するためには、いろいろな塩害環境下において飛来塩分がコンクリート中にどのように浸透・蓄積していくかを明らかにすることが必要となる。そこで、本研究では、先ず実構造物がおかれている塩害環境を把握するために、現在一般的に用いられている2種類の塩分捕集方法を用いて飛来塩分の捕集を行い、地形や海岸線からの距離の影響と両捕集方法の相関について検討した。また、コンクリート供試体の暴露試験により表面に付着する塩化物量と内部に浸透する塩化物イオン量の測定を行い、飛来塩分量との関係について検討した。さらに、暴露供試体と同一環境にある実構造物の浸透塩化物イオン量を測定し比較を試みた。

2. 研究の概要

2.1 飛来塩分量の測定

JIS Z 2381で規格されているガーゼ法は飛来塩分の捕集能力が低く、実態を過小評価する恐れがあるとして建設省土木研究所によって金属板に衝突した海塩粒子を捕集する方法（土研法）が提案されているが、それぞれの方法の有効性はそれらが用いられる環境によって異なってくると思われる。そこで、ガーゼ法と土研法のいろいろな環境における捕集能力を比較検討するため、両方法による捕集を行った。捕集した塩分は吸光光度法によって定量した。

2.2 暴露供試体

暴露試験用コンクリート供試体は、1か月ごとに交換する短期用と10年間暴露を行って塩化物イオンの蓄積を調査する長期用の2種類作成した。ここで述べる長期用供試体に関する結果は、暴露試験3年経過後のデータを用いている。供試体諸元を表-1に示す。短期用の供試体は一辺が10cmの立方体で、NP50を除く各配合について型枠面の違いによる影響を調べるため底面部分を暴露するものと側面部分を暴露するものを作成した。長期用の供試体は一辺が20cmの立方体で

表-1 暴露供試体諸元

記号	使用セメント種類	配合条件			細骨材率 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)			
		水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)			水	セメント	細骨材	粗骨材
NP40	普通セメント	40	8±2.5	6±1.0	43	25	144	360	818	1036
NP50	"	50	"	"	"	"	140	280	853	1080
BB45	高炉セメントB種	45	"	"	"	"	144	320	829	1051
BB50	"	50	"	"	"	"	140	280	849	1076

*1 北海道開発局開発土木研究所 材料研究室 研究員、(正会員)

*2 北海道開発局開発土木研究所 材料研究室 室長、工博 (正会員)

ある。いずれの供試体も暴露対象面以外はエポキシ樹脂によって被覆した。浸透塩化物イオン量は、直径26mmのコンクリートドリルで供試体の表面から深さ方向に1cmきざみで採取した試料を用いて、溶出させた塩化物イオンを吸光光度法で定量した。ここでは、試料を100℃の水中で1時間強制攪拌した場合に得られた塩化物イオンを全塩化物イオン、20℃の水中で30分間振とう攪拌した場合を可溶性塩化物イオンとする。

2.3 試験調査箇所

飛来塩分量は、海岸線からの距離、海面からの高さ、海岸の状況（砂浜、岩礁等）、障害物の有無、風向・風速その他の気象状況など多くの因子に影響される。これらの要因を考慮して決定した飛来塩分の測定箇所および供試体の暴露箇所は図-1に示す各橋梁位置である。各々の箇所の特徴を表-2にまとめた。各橋梁からは暴露供試体と同様の方法でコンクリート試料を採取した。なお、石狩河口橋については供試体の暴露試験は行っていない。

表-2 試験調査箇所の特徴

調査箇所	所在地	海岸からの距離 (m)	海面からの高さ (m)	海岸の形状
大森大橋	神恵内村大森	海上	10	岩礁
竜神橋	浜益村瀧屋	20	50	〃
古平橋	古平町浜町	50	3	砂浜
旧大平橋	島牧村豊浜	20	3	砂浜
新大平橋	〃	60	3	〃
節婦橋	新冠町節婦	5	2	岩場
咲梅橋	えりも町咲梅	10	2	小石
石狩河口橋	石狩町矢白場	1200		



図-1 試験調査箇所

3. 結果および考察

3.1 飛来塩分量と捕集方法

各測定点におけるガーゼ法と土研法による1か月間の飛来塩分捕集量を図-2に示す。海面から約50mの高さにある竜神橋、海岸線から1.2km内陸にある石狩河口橋では、飛来する海塩粒子が小さいと考えられるためガーゼ法の捕集量が土研法をほとんどの月で上回っている。これに対して、大森大橋、咲梅橋、節婦橋など海岸線に位置している箇所では、海水

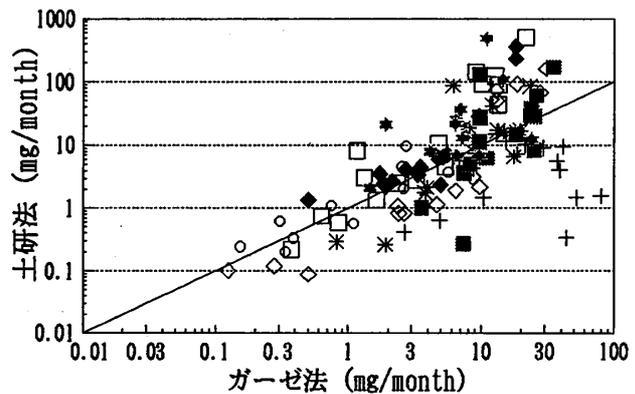


図-2 ガーゼ法と土研法の飛来塩分捕集量

の飛沫などを受けるため土研法がガーゼ法を上回っている。以上の結果から、ガーゼ法は捕集用ガーゼが百葉箱内に取り付けられているため、飛沫などの粒径の大きな海塩粒子は捕集できないが、海岸線から離れた地点や比較的弱い風によって飛来する微細な粒子は捕集していると考えられる。これに対して、土研法では海岸線近くを浮遊する粒径の大きな海塩粒子、波しぶきなどの飛沫も捕集することができるが、微細な粒子は捕集板に付着しにくいという構造上の問題がある。

3.2 飛来塩分量の特徴

図-3は大森大橋における1カ月間の飛来塩分捕集量と、最寄りのアメダス観測地、神恵内における海風の風速階級別の積算時間を示したものである。なお、海風とは、全16方位のアメダスの風向データの中で海岸線に直角な方位を中心とした7方位から吹く風と定義した。捕集器は海面から10m程の高さに位置する国道沿いに設置しており、付近の地形は海面から0.5m程の浸食棚が背後の崖下から橋梁の真下まで広がり、そこから急激に水深が6~10mに変化する岩礁で、海岸線に設置した消波ブロックによって発生した碎波がしばしば橋梁上まで達することがある厳しい環境である。風速5m/s以上の海風が多い秋から冬にかけては飛来塩分量が特に多い。5~8月は5m/s以上の風がほとんど吹かないため量が少なく、ガーゼ法と土研法を比較しても、この期間はガーゼ法の捕集量と土研法の捕集量にはほとんど差がない。10~12月は土研法の捕集量が著しく大きくなっているが、この時期は強い海からの季節風によって付近では海塩粒子が霧状に浮遊している。

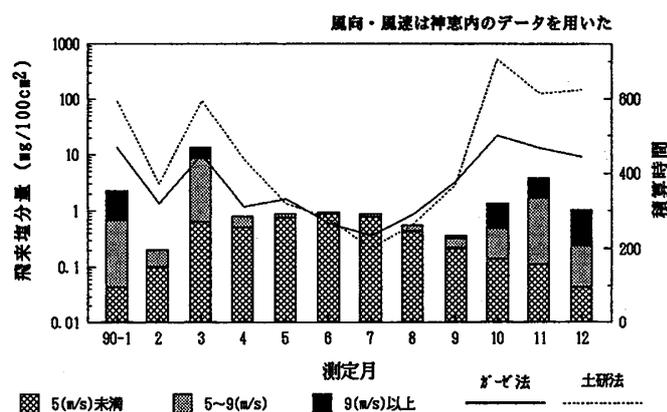


図-3 大森大橋の飛来塩分量と海風の積算時間

節婦橋のある海岸線には消波ブロックが設置されており、海塩粒子が発生しやすい環境である。静内における風向・風速データと飛来塩分量の比較を試みたが相関はあまりみられなかった。この付近一帯は、冬期間には日高山脈から太平洋に向かって風が吹くため海風の積算時間は少なくなっている。しかし、主桁位置に設置されている土研法捕集器には夏期、冬期に関わらず多量の塩分が捕集されており、海岸線に極端に近く海面からの高さが僅かしかないこの橋梁の場合、風向・風速に関係なく塩分が捕集される環境にあることを示している。

節婦橋のある海岸線には消波ブロックが設置されており、海塩粒子が発生しやすい環境である。静内における風向・風速データと飛来塩分量の比較を試みたが相関はあまりみられなかった。この付近一帯は、冬期間には日高山脈から太平洋に向かって風が吹くため海風の積算時間は少なくなっている。しかし、主桁位置に設置されている土研法捕集器には夏期、冬期に関わらず多量の塩分が捕集されており、海岸線に極端に近く海面からの高さが僅かしかないこの橋梁の場合、風向・風速に関係なく塩分が捕集される環境にあることを示している。

旧大平橋と新大平橋の飛来塩分量を比較した結果では、内陸にある新橋の飛来塩分量は旧橋に比べて少なく、40mという距離であるがその影響が認められた。

3.3 コンクリートの塩化物イオン量

3.3.1 短期暴露供試体

各地点とも暴露面の違いによる付着塩分量の違いはみられなかった。しかし、浸透塩化物イオン量については僅かではあるが型枠底面の方が側面に比べて少なかった。

塩化物イオンの浸透に対する水セメント比とセメント種類の影響はほとんど現れず、NP40で塩化物イオンの浸透量が若干少ない傾向がみられた程度である。

付着塩分量と飛来塩分量については、両者は定性的には同じ傾向を示すが、定量的にはほとんどの場合付着量の方が少ない。これは、降水などによって供試体表面が洗い流されるなどの点を考慮すると当然のことと思われる。しかし、大森大橋で得られたデータによると付着塩分量がガーゼ法で捕集した塩分量を上回っていた。このことは、ガーゼ法で捕集した塩分量が実構造物の表面に付着する塩分量より少ない可能性があることを示している。

今回調査を行った大森大橋をはじめとする日本海沿岸の橋梁では、冬期間だけで多量の塩分がコンクリート中に浸透していることが確認された。また、表面から1cmの間というごく表面につい

てではあるが、1カ月間という短期間で可溶性塩化物イオンにして1.0~1.5kg/m³もの量が浸透していた。

3.3.2 長期暴露供試体

図-4に日本海側の大森大橋、太平洋側の節婦橋、咲梅橋の3カ所における供試体中への浸透塩化物イオン量の分布を示す。いずれの配合においても3年間の暴露期間で表面付近に2kg/m³を

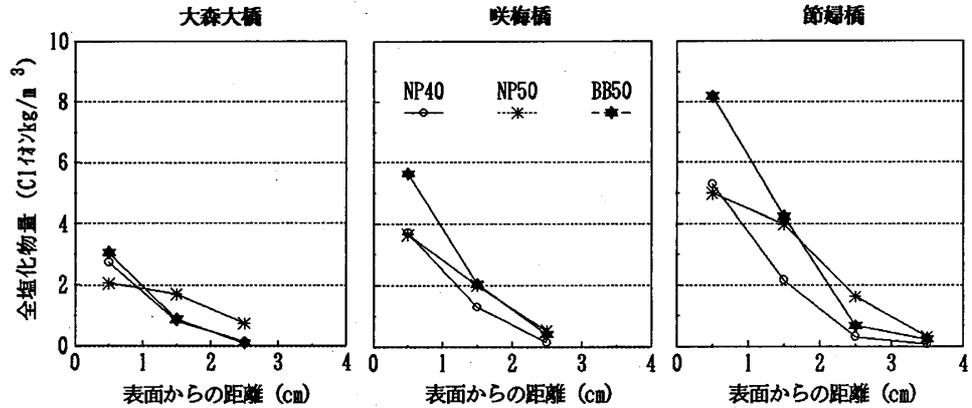


図-4 供試体の塩化物イオン量の分布

越える塩化物イオンが浸透していた。咲梅橋と節婦橋では供試体に海水がかかっていたとみられ、大森大橋における供試体に比べて大きな値を示した。NP40の場合とNP50の場合では、表面部ではほぼ同量の塩化物イオンを含有しているが、1~2cmの深さでNP40が少なくなっており内部への拡散が抑えられている。BB50の場合は表面付近の塩化物イオン量が多くなる傾向にある。これは、スラグセメントの場合、表面部では乾燥により組織が緻密化していないことに起因する。これに対して、内部ではスラグのポゾラン反応により組織が緻密化したため塩化物イオンの拡散が抑えられ、結果として塩化物イオンの濃度勾配が大きくなったと思われる。NP50の場合はBB50との比較でわかるように、表面付近の塩化物イオン量は少ないが、内部での量はやや多くなっており緩やかな濃度勾配

$$C_{(x,t)} = W \left[\sqrt{\frac{t}{\pi D}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x}{2D} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right) \right] \quad (1)$$

$C_{(x,t)}$: t 時間後におけるコンクリート表面から x の深さでの塩化物量

D : 拡散係数, erf : 誤差関数, W : 付着塩分量 (= const)

になっている。このことから高炉セメントを用いたコンクリートの遮塩効果の高さが認められる。また、これらの測定値を拡散方程式(1)に当てはめて見かけの拡散係数を計算した結果を表-3に示す。NP40とBB50は同程度の値となっているものの、NP50では実際に最も内部まで塩化物イオンが浸透している節婦橋での値よりも、大森大橋での値が大きくなっている。これらの結果は、式(1)によって算出される拡散係数がコンクリートの品質と飛来塩分量に大きく影響されることを示している。

表-3 暴露供試体の拡散係数

暴露箇所	配合	飛来塩分量 (mdd)	D: 拡散係数 ($\times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{sec}$)	W: 付着塩分量 (mdd)
大森大橋	NP40		1.14	0.79
	NP50	2.58	7.54	1.18
	BB50		1.06	0.87
咲梅橋	NP40		1.41	1.18
	NP50	1.79	2.78	1.45
	BB50	* 87.87	1.54	1.84
節婦橋	NP40		1.39	2.79
	NP50	2.28	4.75	2.42
	BB50	* 73.93	2.11	2.85

* 海水を捕集した際の値を含めた場合

3.3.3 実構造物のコンクリート

図-5は大森大橋と咲梅橋の主桁の腹部から採取したコンクリートの塩化物イオン分布である。架設後10年の大森大橋と20年の咲梅橋で海側主桁表面における塩化物イオン量はほぼ同じ値を示している。しかし、3~5cmの位置では咲梅橋が1.5~3倍の量となっており、経過年数が塩化物イオンの拡散に影響していることがわかる。また、大森大橋では表面から2cmまでの濃度勾配がやや緩やかになっているが、これは暴露供試体NP50の場合と同様に、表面での塩化物イオン量の増加より内部へ拡散する量が多くなっていることによるといえる。山側主桁の塩化物イオン量に関しては、咲梅橋と比較して大森大橋の含有量が非常に多くなっており、大森大橋が厳しい塩害環境におかれていることを示している。

図-6に旧大平橋の主桁、および節婦橋の海側主桁と橋台、図-7に竜神橋の橋脚、および石狩河口橋の橋脚から採取したコンクリートの塩化物イオンの分布を示す。旧大平橋の主桁、節婦橋の主桁および橋台、竜神橋の橋脚のコンクリートにおける塩化物イオン量の分布が、表面部で少なく内部にピークが存在し、暴露供試体とは異なった形状を示している。この傾向は炭酸化したコンクリートにみられる現象で、コンクリートの炭酸化に伴い固定されていた塩化物イオンが遊離して非炭酸化部分に移動し、その部分に再び固定されることで非炭酸化部分との境界より内部に塩化物イオン含有量のピークが生じ、結果的にこのような分布を示すとされている [1]。特に節婦橋は1951年、旧

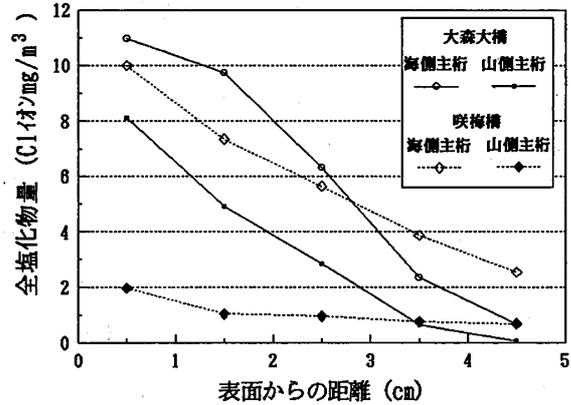


図-5 大森大橋、咲梅橋の塩化物イオンの分布

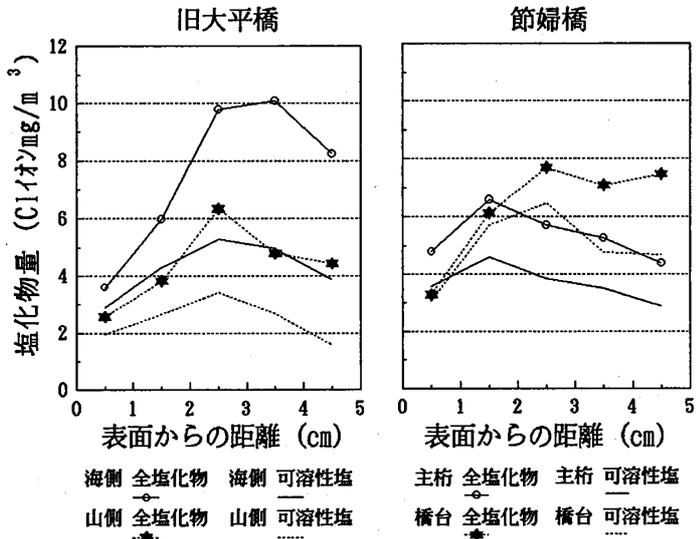


図-6 旧大平橋、節婦橋の塩化物イオンの分布

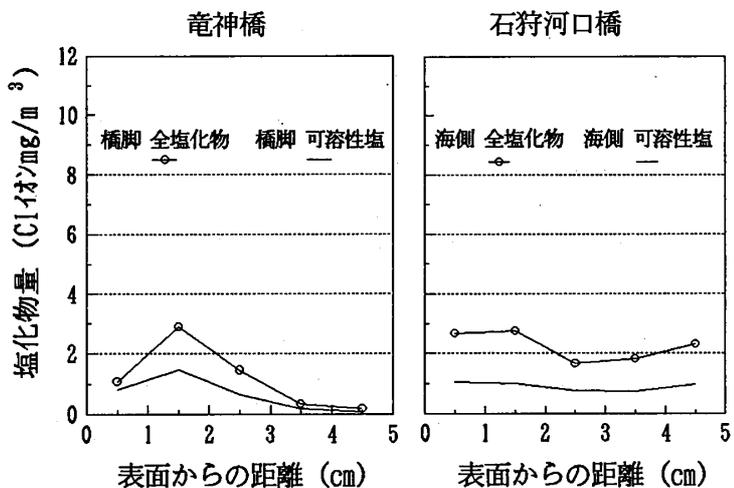


図-7 竜神橋、石狩河口橋の塩化物イオンの分布

大平橋は1960年に架設されたRC橋で相当な年数が経過していることから、炭酸化による劣化が進んでいることが十分考えられる。実際、異なった分布を示したものについて全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を比較すると、旧大平橋の主桁と節婦橋の橋台においては、表面から3cmまでは全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の差、すなわち固定されている塩化物イオン量が内部に比べて少なくなっていた。また、竜神橋の橋脚部では表面から1cmまでの部分で旧大平橋の主桁、節婦橋の橋台と同様の分布傾向がみられた。竜神橋は1987年に架設された比較的新しい構造物であること、橋脚のコンクリートの水セメント比が50%であること、コンクリート表面への降雨の影響がないことからこの現象についての原因は特定できない。今後さらに検討が必要である。一方、節婦橋の主桁は、深さ1cmまでの塩化物イオン量が内部と比較して少なくなっているが、全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の差は比例関係で推移しており、前述した他の部位におけるケースとは異なっている。なお、この部分では1985年にコンクリート表面へエポキシ樹脂塗装が施されたため塩化物イオンが表面から供給されなくなっている。

石狩河口橋は海岸線から直線距離で約1200m、河口からは約5.2km内陸に位置し、1976年に架設された。この位置での日平均飛来塩分量は、1990年の1年間のデータによるとガーゼ法で1.04(mdd)、土研法で0.16(mdd)となり、捕集方法の違いがあるが、旧大平橋の土研法での捕集量0.89(mdd)を上回る結果が得られており、海岸まで遮蔽物のないような開けた地形では、かなり内陸まで海塩粒子が飛来してくることがわかった。このような環境下にある石狩河口橋の橋脚部の塩化物イオン分布は、表面から5cmまでほとんど濃度勾配がない一定の値を示しているが、この原因については不明である。

4. まとめ

- (1) 飛来塩分の捕集において、ガーゼ法は海岸線から離れた地点や比較的弱い風によって飛来する微細な海塩粒子の捕集については土研法より優れているが、海岸線近くで発生する波しぶきなど、百葉箱内に入ってこない大きな粒子は捕集できない。そのため、塩分の飛来量を過小に評価する恐れがある。これとは反対に土研法では、微細な粒子は捕集できない欠点がある。
- (2) 飛来する海塩粒子の量および粒径と風向・風速の間には相関がみられた。しかし、その地点での飛来塩分量は地形条件、海岸の形状など多くの因子による影響を受けるため、風向・風速との定量的な相関を得るには至らなかった。
- (3) 暴露供試体の塩化物イオン量の分布から求めた見かけの拡散係数は、コンクリートの配合および飛来塩分量の影響を大きく受けている。
- (4) 実構造物のコンクリートでは、暴露供試体とは異なり、表面での塩化物イオン含有量が少なく、内部に含有量のピークが存在する場合がみられた。
- (5) 石狩河口橋のように内陸部にある場合でも、海岸からの地形等の条件により土研法では捕集できない微細な海塩粒子が多量に飛来することが明らかになった。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断、森北出版、pp.142-146、1991.7