

厳しい塩分環境下におけるコンクリート構造物 の塩分浸透性に関する実証的研究

青山實伸¹・鳥居和之²・松田哲夫³

¹正会員 金沢大学大学院自然科学研究科地球環境科学専攻 (〒920-8667 金沢市小立野二丁目40番20号)

E-mail:maoyama@questeg.co.jp

²正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野二丁目40番20号)

E-mail:torii@t.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 工修 日本道路公団 金沢技術事務所 (〒920-0365 金沢市神野町170番)

E-mail:tetsuo.matsuda@jhnet.go.jp

本研究では、日本海沿岸の厳しい塩分環境下の高架橋において塩害環境を示す飛来塩分量調査を実施するとともに、建設後約10年が経過した時点で橋脚より多数の試料を採取し、高架橋の部位毎の塩分浸透性を比較検討した。その結果、高架橋への飛来塩分量は波エネルギーの計算値との間に相関性があり、コンクリートの表面塩化物イオン濃度は構造物の部位毎の塩害環境により決定できることを示した。また、コンクリートの塩化物イオンの拡散係数はコンクリートの水セメント比により一定の値になるのではなく、表面塩化物イオン濃度とともに変化することを明らかにした。さらに、海岸部の塩害環境の計算結果に基づく高架橋への塩分浸透性の予測法を提案した。

Key Words : *severe saline environment, sea of Japan, surface chloride content, diffusion coefficient for chloride ions, rapid chloride permeability test (ASTM C1202)*

1. はじめに

海岸部に位置するコンクリート構造物では、波しぶきや飛来塩分による塩化物イオンが、コンクリート中を移動・拡散し腐食因子となって鉄筋を腐食させ、鉄筋コンクリート部材の耐久性を低下させる事例が報告されている^{1),2)}。海岸部のコンクリート構造物の維持管理や耐久性照査を行う際には、塩害環境やその厳しさの程度を示す表面塩化物イオン濃度 (Co 略記) およびコンクリート内部への塩分の浸透し易さを示す塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (Dc 略記) を算定する必要がある^{3),4)}。

従来、塩害環境を示す飛来塩分量に関する研究では、海岸からの距離、標高、風速、風向などを勘案して、年間飛来塩分量を推定する方法が提案されている^{5),6)}。一方、本研究では、海岸部の塩害環境の変動を短い時間間隔で、かつ長期間にわたり正確に捉えるために、海岸部の波高と周期から計算した波エネルギーと飛来塩分量の測定値

の関係を検討した⁷⁾。その結果、両者の間に良好な相関性があることを見だし、構造物の長期間にわたる塩害環境の変動を正確にシミュレートすることが可能になった。

海岸部のコンクリート構造物での塩分浸透性 (Co や Dc の算定) に関する研究では、海岸部の曝露試験体の追跡調査や港湾施設の塩害調査など、多くの報告事例がある^{8),9)}。武若ら¹⁰⁾は、既往の文献を整理して、Dc をセメント種別 (普通ポルトランドセメント、高炉セメントなど) や水セメント比から推定する方法を提案している。しかし、塩害環境が季節的に大きく変動する日本海沿岸において、実構造物での塩分浸透性を長期にわたり測定した事例は少なく、上記のように一律に決定できるのは不明である。本研究では、日本海沿岸に位置する高架橋を対象にして、建設後約10年を経過した段階での予防保全やモニタリングのために実施した塩化物イオン濃度の分布状況より、高架橋各部位毎のコンクリートの Co

と D_c を測定した。その結果、塩害環境を示す C_o は海岸線からの距離や標高により大きく異なるとともに、 D_c の算定値は同一の水セメント比の配合でも測定場所毎に大きく相違した。この結果は、水セメント比から D_c を一律に推定されるとする、土木学会・コンクリート標準示方書 [施工編]¹⁾ の規定とは相違するものになった。一方、コンクリート中への塩分浸透予測では、塩化物イオンの固定化を勘案した濃度勾配による拡散モデル、表面部の塩分を含む水の移動を勘案したモデルなどが提案されている^{11), 12)}。本研究では、塩化物イオン濃度の推定に波エネルギーの実測値に基づく塩害環境の長期的かつ季節的な変動を反映させ、塩化物イオンの固定化を勘案した、差分法による推定モデルを提案している。

コンクリートの塩分浸透性を迅速に評価するための一手法として、ASTM C1202 を改良した電気泳動法による D_c の評価が普及してきている^{13), 14)}。本研究では、対象とした高架橋の橋脚およびフーチングからコアを採取し、電気泳動による方法で塩化物イオンの拡散係数を測定し、実構造物で得られた結果との相関性を検討した。高炉セメントを用いたコンクリートは、塩化物イオンの浸透抑制効果が大きいとされているが¹⁵⁾、海中に位置する高炉セメントを用いたフーチングでも長期にわたり優れた塩化物イオン浸透抑制効果を発揮していることを実証した。

本研究は、日本海沿岸の厳しい塩害環境下に位置する高架橋を対象として、塩害環境を示す飛来塩分量調査を実施するとともに、建設後約 10 年を経過した時点で高架橋より多数の試料を採取し、高架橋の部毎の塩分浸透性を比較検討したものである。

2. 調査対象構造物の概要

(1) 高架橋の構造型式およびコンクリートの配合

調査対象構造物は、背後に山が迫る狭隘な海岸部に 1985～87 年にかけて建設された、橋長約 3.4 km、計画標高 16～36 m の高架橋である¹⁶⁾。建設時には橋梁延長の約 2/3 が砂浜部に、約 1/3 が汀線より海側（以下「海上部」と呼ぶ）に位置していた。現在では、砂浜部の約 1/2 の区間は、海岸侵食が進行し橋脚位置が汀線部になっている。高架橋の構造型式の概要およびコンクリート種別を表-1 に、コンクリート種別毎の配合を表-2 に示す。高架橋の橋脚は設計基準強度 24 N/mm²（普通ポルトランドセメント、OPC 略記）を、フーチングでは 24 N/mm²（高炉セメント B 種、BFSC 略記）を使用している。上部工は早強ポルトランドセメントを使用し、設計基準強度は PC 中空床版で 35 N/mm²、PC 箱桁で 40 N/mm² としている。

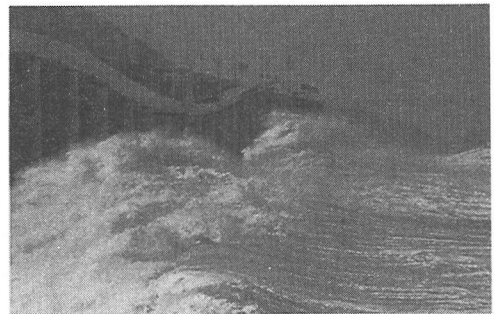


写真-1 高架橋の波浪状況

表-1 構造型式の概要およびコンクリートの種別

構造型式の概要			コンクリートの種別	
下部工	柱橋脚	RC 柱（小判形：高さ 18.5～35 m）	24 N/mm ² （普通ポルトランドセメント）	
	基礎工	直接基礎（フーチング）	24 N/mm ² （高炉セメント B 種）	
上部工	砂浜部	PC 連続中空床版（スパン 30 m）	35 N/mm ² （早強ポルトランドセメント）	
	海中部	PC 連続ラーメン箱桁（スパン 60 m）	40 N/mm ² （早強ポルトランドセメント）	

表-2 コンクリートの配合

f'_{ck} (N/mm ²)	セメント種別	W/C (%)	G_{max} (mm)	細骨材率 (%)	単位重量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
24	普通ポルトランドセメント	55	25	45	164	300	825	1031	0.75
24	高炉セメント B 種	52	40	43	157	300	794	1065	0.75
35	早強ポルトランドセメント	46	25	40	160	350	726	1107	0.875
40	早強ポルトランドセメント	41	25	37	163	400	647	1116	1.000

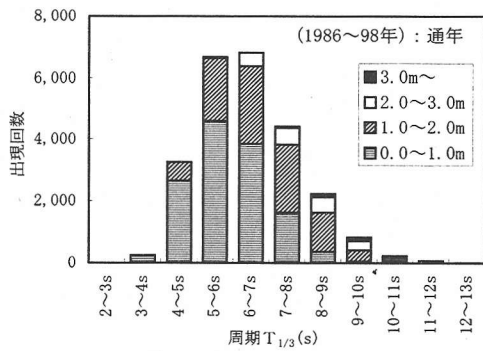


図-1 高架橋地点の波浪出現状況

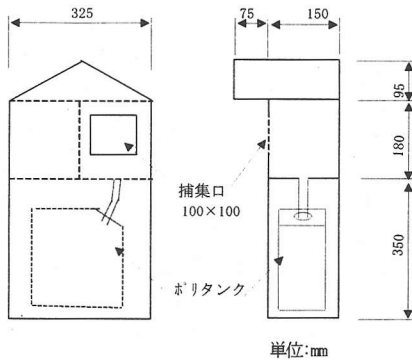


図-3 飛来塩分量の捕集装置

(2) 高架橋地点の波高頻度

日本海沿岸部に位置する高架橋地点の波浪出現状況(1983~98年)を図-1に示す。この結果、波高1m以上の出現率が37%、波高2m以上が8.9%、波高3m以上が1.5%であることが判明した。とくに、冬期(12~3月)の波浪は、季節風の影響を強く受けるので、写真-1に示すような大きい波高をもつ波浪の出現率が多く、冬期間だけで、波高2m以上で通年の69%、波高3m以上で通年の88%が出現する。

3. 塩害環境の観測結果

(1) 飛来塩分量の測定

塩害環境を表わす指標である飛来塩分量の調査結果を分析した。観測は、高架橋の中間部の図-2に示す地点A, B, Cで実施した。AおよびB地点では地表面上1.2mの位置で、C地点では上部工壁高欄の位置で測定を行った。図中には汀線からの距離(m)と標高(m)を示してある。測定は、図-3に示す100×100mmの捕集口を設けたアクリル樹脂製の捕集装置を用い、捕集口内に附着し

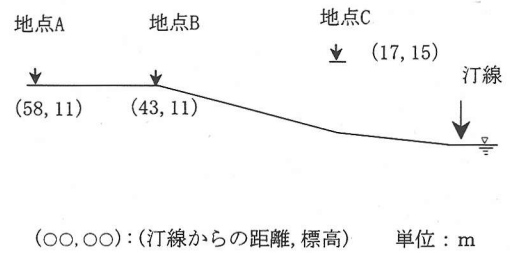


図-2 飛来塩分量の測定位置

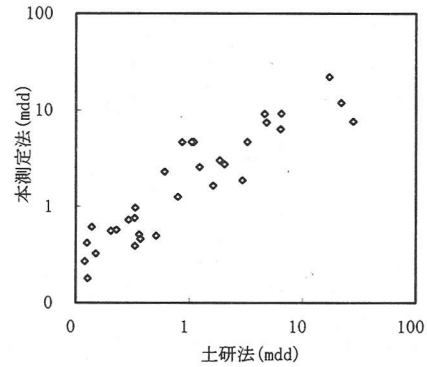


図-4 土研法による測定値との関係

た飛来塩分を水により洗い流しポリタンク内に誘導して採取する方法によった。測定値は、100×100mmの捕集面積(dm²)で測定した飛来塩分(NaCl)を日平均飛来塩分量(mdd = mg/dm²/day)で算定して示した。本方式による測定値と土研法⁵⁾による測定値との間には、図-4に示すような相関性が認められた。飛来塩分量の観測は1年3ヶ月間実施し、おおむね1ヶ月間隔(23~49日間)で飛来塩分量を測定した。各地点での測定結果を図-5に示す。飛来塩分量は、夏期に少なく、冬期が卓越して多く、各地点間の測定値に図-6に示すような相関関係があった。これは、飛来塩分量は構造物の標高と海岸からの距離に関係しており、各地点間の塩害環境には比例関係があることを示している。

(2) 波エネルギーの算定と飛来塩分量

塩害環境の変動を短い時間間隔で把握することは、塩化物イオン浸透予測の精度向上において重要な要因となる¹²⁾。しかし、現在の飛来塩分量の測定方法では、短い時間間隔で長期間測定するには精度および費用において限界がある。そのため、海岸部の塩害環境の変動を再現するために、高い精度で測定されている波高観測結果から算定できる波エネルギーと飛来塩分量との関係を検討した。

波エネルギーは、有義波高を用いて式(1)により示され

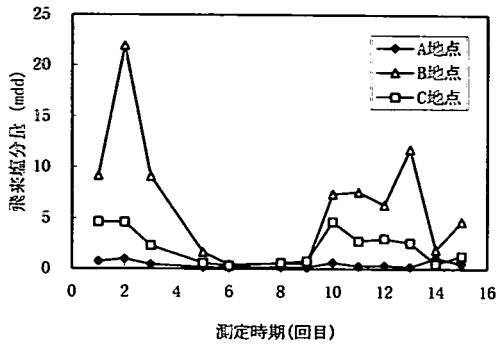


図-5 各地点での飛来塩分量の測定結果

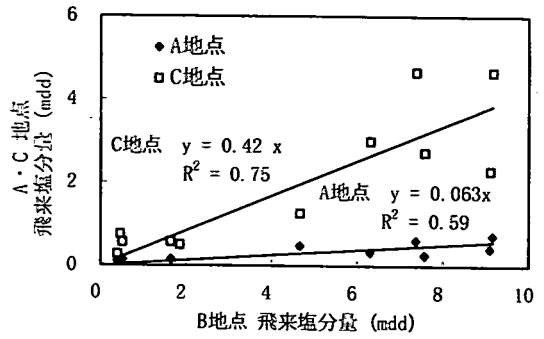


図-6 各地点間の飛来塩分量測定値の関係

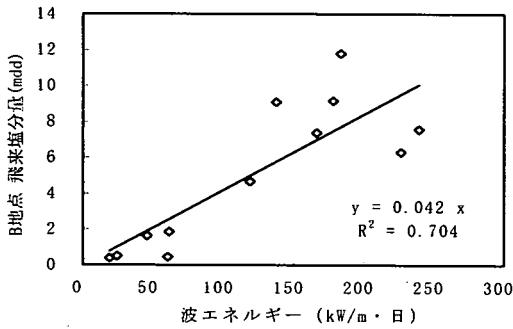


図-7 飛来塩分量測定値と波エネルギーの関係

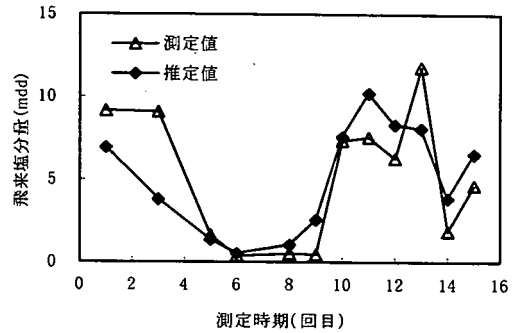


図-8 飛来塩分量の測定値と推定値の関係

る¹⁷⁾。

$$W_0 = 0.5H_{1/3}^2 T \quad (1)$$

ただし、 W_0 : 波エネルギー (kW/m)

$H_{1/3}$: 有義波高 (m)

T : 有義波周期 (s)

B 地点での飛来塩分量測定値と飛来塩分量測定期間の波エネルギーの和 (Σ (日々の波エネルギー)) の関係を図-7 に示す。波エネルギーの算定には、海岸に沿って北東に約 10 km 離れた港での波高観測データを用いた。図-7 に示すように、飛来塩分量と波エネルギーの間には良好な相関性が認められた。なお、高架橋位置では 1986~89 年の波高データがあり、波エネルギーの算定に用いた港での波高データとの間に相関があった。

この結果より、海岸部の高架橋の塩害環境を波高観測データより任意の時間間隔で長期間にわたり再現することが可能になった。また、標高、海岸からの距離が異なる地点での塩害環境は、地点間の飛来塩分量におおむね比例することから、式(2)で示すことができる。

$$A = k \cdot 0.5H_{1/3}^2 T \quad (2)$$

ただし、 A : 飛来塩分量 (mdd)

k : 部材の位置 (標高や汀線からの距離) で決まる変換定数

B 地点の変換定数 $k = 1.4$ として波エネルギーから推定した飛来塩分量と飛来塩分量の測定値との関係を図-8 に示す。図-8 より、式(2)による推定結果は測定値を再現していると判断された。変換定数 k は、A 地点で $k = 0.07$ 、C 地点で $k = 0.4$ となる。10 年間の波エネルギーを、波高観測データの日平均波高と日平均周期から算定した日単位の波エネルギーより 10 日間平均値を求めて図-9 に示す。

4. 高架橋への塩分浸透性 (Co 値および Dc 値の算定)

(1) 塩分浸透性の分析

a) 塩分の測定方法

橋脚では建設後約 10 年目に実施した予防保全のため

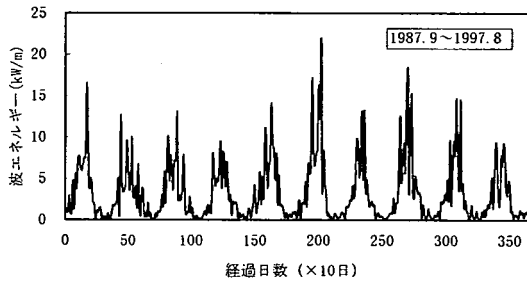


図-9 10年間の波エネルギーの再現

erf : 誤差関数

分析の対象としたデータは、塩化物イオン濃度の深さ方向の分布形状が特異なもの（ひび割れ、浮きなどの損傷発生箇所）を除いたものである。コンクリート種別毎のコア試料数は、橋脚（24 N/mm²）で30個、中空床版（35 N/mm²）で74個、箱桁（40 N/mm²）で51個である。一方、ドリル法の試料数は188個であり、橋脚（24 N/mm²）を対象として、300 mm程度離れた3地点の測定値よりそれぞれのC₀値およびD_c値を求め、その平均値を算定値として取り扱った。

の事前調査時の塩分測定結果を主に用いた。塩化物イオン分析用の試料は、主にドリル法（直径20 mm）により近傍3点から深さ0~20 mm, 20~40 mm, 40~60 mm, 60~80 mm および90~110 mmにて採取したものをを用いた。上部工では、建設後12~13年後に実施したモニタリングのための塩分測定結果を用いた。塩化物イオン分析用の試料は、コア（直径55 mm, 長さ100 mm）を深さ10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm および70 mmで10 mm厚にスライスしたものをを用いた。塩化物イオン濃度は、JCI-SC4の試験方法（規定の硝酸での溶解）に従い電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を測定した。なお、海上部の橋脚では、建設後2年, 5年, 8年目に塩分浸透分布を測定し経年変化をモニタリングした。塩化物イオン分析は、コア（直径100 mm, 長さ150 mm）を深さ10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm および100 mmで10 mm厚にスライスし、全塩化物イオン濃度および可溶性塩化物イオン濃度を測定した。

中性化深さは試料採取時に同時に測定したが、最大でも数mm程度であったので、表面付近の塩化物イオン濃度の測定値には炭酸化に伴う塩化物イオンの移動¹⁸⁾による影響は少ないものと判断した。

b) C₀値およびD_c値の分析手法

C₀値およびD_c値は、塩化物イオン濃度測定値の深さ方向の分布と式(3)に示すフィックの拡散方程式での算定値の差の2乗和が最小になるように、C₀値およびD_c値を繰り返し計算することにより算定した¹⁹⁾。なお、初期塩分量は、モニタリング時のコア深部の塩分量が0.1 kg/m³未満であったため、C₀値およびD_c値の算定には勘案しなかった。

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{X}{2\sqrt{D_c T}} \right) \quad (3)$$

ただし、C : 深さX (cm), 建設後の経過時T (s) 後の全塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C₀ : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)

D_c : 見掛けの拡散係数 (cm²/s)

塩害環境の厳しさを示すC₀値は、構造物の置かれた位置や標高や構造部位（例えば、橋脚、上部工での部材の方向、上部工での桁下面、側面、張り出し部など）によって異なるものとなる。塩分浸透性の分析では、塩害環境をマクロ的に把握するために、構造物の位置と標高に着目した。すなわち、位置では、橋脚位置により海上部、汀線部、汀線からの距離5~20 m, 20~50 m, 50~100 mに区分した。また、標高では、4~10 m, 10~15 m, 15~20 m, 20~25 m, 25~30 mに区分した。標高4 m未満では、橋脚に磨耗防止層（ゴム圧着鋼板）が設置されており、塩化物イオンの浸透が少ないと判断して測定の対象から外した。また、代表的な海上部橋脚1基についても標高別の塩分浸透性の分析を実施した。塩分の浸透し易さを示すC₀値では、コンクリート強度およびセメント種別毎の分布状況C₀値との関係に着目した。

(2) 塩分浸透性の分析結果

a) C₀値とD_c値の分布状況

高架橋のC₀値と標高の関係を図-10に示す。構造物の位置区分では汀線からの距離20~100 mをまとめて示している。また、橋脚（24 N/mm²）の位置および標高毎の平均C₀値の分布状況を図-11に示す。

構造物の設置位置では、海上部でのC₀値が最も大きく汀線部では5~20 m, 20~50 m, 50~100 mと汀線から離れるほどC₀値が小さくなった。また、構造物の標高では、標高が高くなるほどC₀値は小さくなった。これらの図より、砕波帯で頻繁に波しぶきを受ける海上部や汀線部の標高15m程度までの部位は、C₀値が10 kg/m³以上になり、非常に厳しい塩害環境に曝されていることがわかる。しかし、海上部でも標高が20 mを越えるとC₀値が7 kg/m³以下となった。同様に、汀線から20 m以上離れるとC₀値が5 kg/m³以下となり、標高が低い場合でも塩害環境が大きく軽減された。

同一地点における構造物の高さ方向でのC₀の低減効果は式(4)のように近似できる。

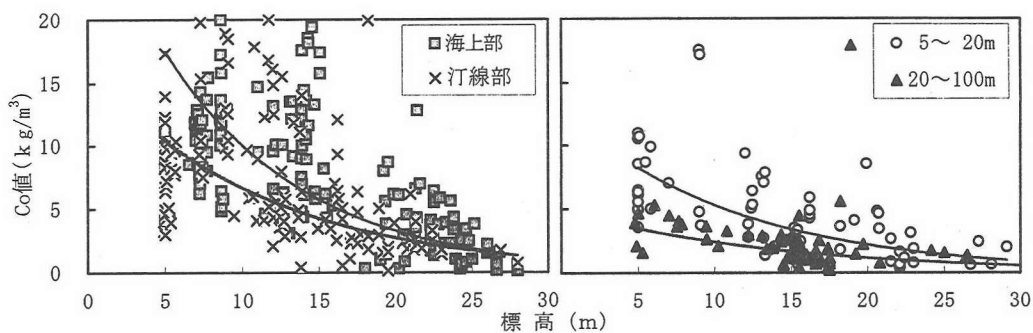


図-10 高架橋のCo値と位置および標高の関係

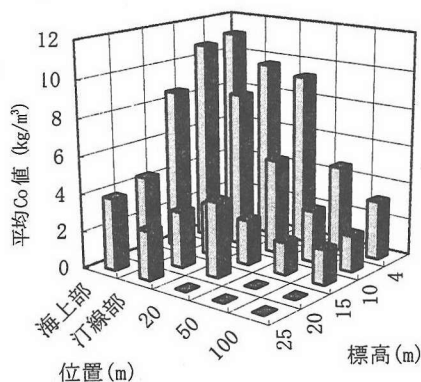


図-11 平均Co値の位置および標高毎の分布状況

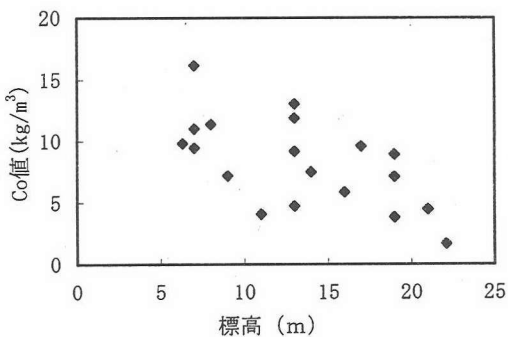


図-12 海上部の橋脚のCo値と標高の関係

$$Co_z = Co_5 \cdot \exp(\alpha \cdot Z) \quad (4)$$

ただし、Z：高さの変化(標高-5)(m)

Co_z ：標高 Z mでのCo値(kg/m³)

Co_5 ：標高 5 mでのCo値(kg/m³)

α ：定数

標高 5 mの Co_5 値および定数 α を表-3に示す。

海上部に位置する橋脚のCo値と標高の関係を図-12に示す。海中部の橋脚は、波浪の衝突により波しぶきが20 m程度まで打ちあがる非常に厳しい塩分環境下にあった。このため、Co値は標高15 m程度まで10 kg/m³を越えており、波しぶきの影響を直接に受ける標高20 mまでの測定値はすべて大きな値となった。

コンクリート種別毎(水セメント比)のDc値の分布状況を図-13に示す。Dc値は水セメント比(W/C)が小さくなるとともに大きく減少しており、それらの平均値はW/C=0.55で $3.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($0.38 \sim 11.6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)、W/C=0.46で $1.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($0.33 \sim 4.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)、W/C=0.41で $0.7 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($0.14 \sim 5.7 \times 10^{-8}$

表-3 標高5 mの Co_5 値および定数

位置	Co_5 (kg/m³)	α
海上部	17.5	-0.11
汀線部	10.4	-0.089
0~20m	8.2	-0.088
20~100m	3.5	-0.073

cm^2/s) になった。

橋脚(24 N/mm²)の位置および標高毎の平均Dc値の分布状況を図-14に示す。Dc値は海上部および汀線部で大きくなり、汀線から離れるほど、また標高が高くなるほど減少した。このように、Dc値は同一の配合(同一の水セメント比)でも一定の値にならず、Co値に類似した分布を示した。

b) Co値とDc値との関係

コンクリート種別毎のCo値とDc値との関係を図-15に示す。橋脚(W/C=0.55)の場合では、測定試料数が多いためにDc値は大きく変動しているが、Co値が増加するとともにDc値が増加する傾向がある。また、上部工の場合は、測定試料数が少ないこともあり、Co値とDc値の間に明確な関係が認められなかった。

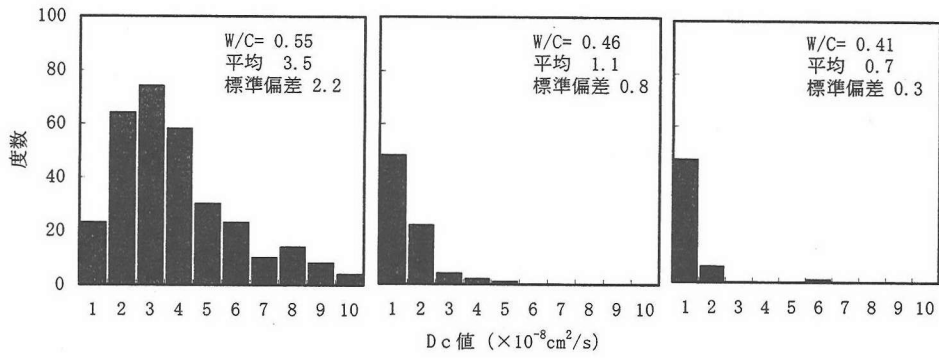


図-13 Dc 値のコンクリート種別毎の分布状況

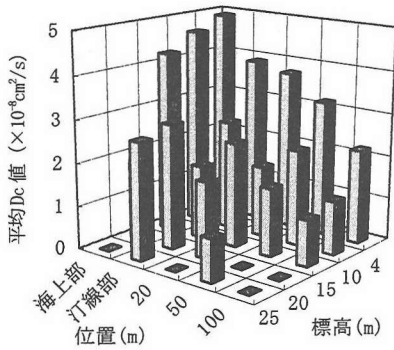


図-14 平均 Dc 値の位置および標高毎の分布状況

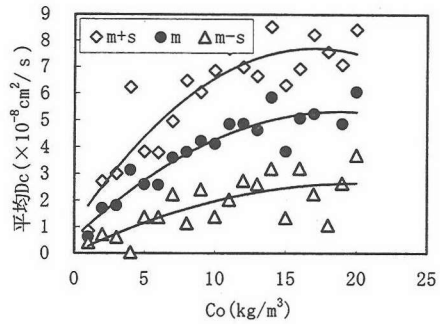


図-16 橋脚の Co 値と Dc 値の関係

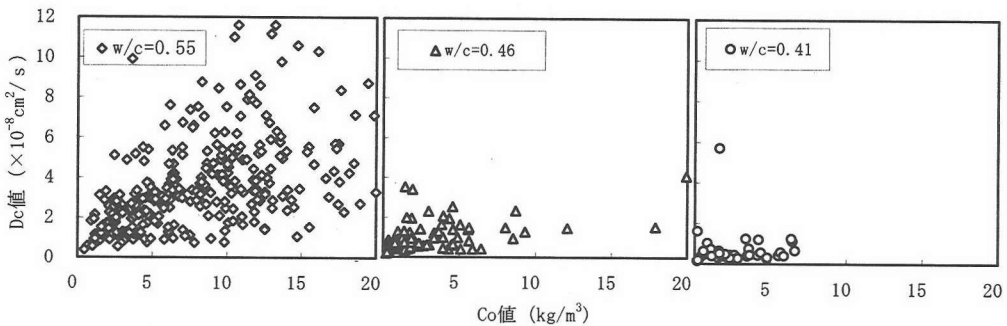


図-15 コンクリート種別毎の Co 値と Dc 値との関係

橋脚 (24 N/mm²) の Dc の分布状況を Co 値の 1 kg/m³ 毎の階層に区分して各階層毎での平均値 (m) および標準偏差 (s) を求めると図-16 のようになる。図-16 より、Co 値の階層単位での Dc 値の変動係数は約 50 % となった。同一の部位および環境条件での Dc 値の変動係数の平均 (図-19 参照) は 30 % であるが、これより変動係数が大きくなる理由は部位の方向、汀線の変動などによる環境条件の変化によるものと推察された。

コンクリート種別毎 (水セメント比) の Dc の分布状

況を W/C=0.55 と同様に Co 値 1 kg/m³ 毎の階層に区分して各階層毎の平均値を算定し、Co 値と Dc 値との関係を求めて図-17 に示す。図中には、水セメント比毎の Co 値と Dc 値との相関曲線を示しており、それらの関係式は式(5)~式(7)のようになる。

[W/C=0.55 (24 N/mm²) の場合]

$$Dc = -0.013Co^2 + 0.50Co + 0.56 \quad (5)$$

[W/C=0.46 (35 N/mm²) の場合]

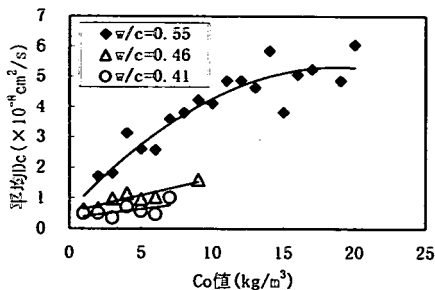


図-17 水セメント比毎のCo値とDc値の関係

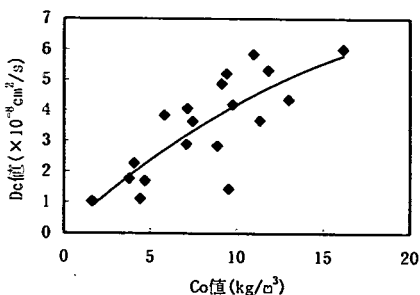


図-18 海上部の橋脚のCo値とDc値の関係

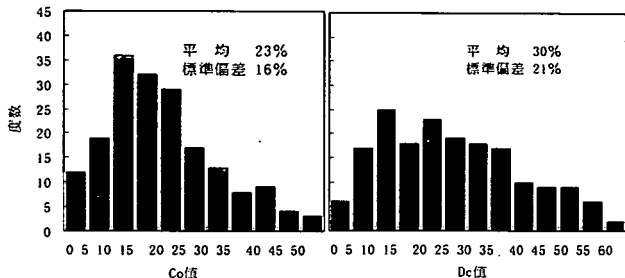


図-19 Co値およびDc値の変動係数の分布状況

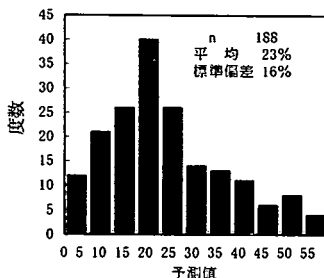


図-20 予測値の変動係数の分布状況

$$Dc = 0.11Co + 0.52 \quad (6)$$

[W/C=0.41 (40 N/mm²) の場合]

$$Dc = 0.006Co + 0.34 \quad (7)$$

同様に、海上部に位置する橋脚のCo値とDc値との関係を図-18に示す。海上部の橋脚でもCo値が増加するとともにDc値が増加しており、式(5)に類似した関係式(8)が得られる。

[海上部の橋脚 (24 N/mm²) の場合]

$$Dc = -0.01Co^2 + 0.51Co + 0.06 \quad (8)$$

(3) Co値およびDc値の変動

a) Co値およびDc値の変動

24 N/mm²のデータ(188個)は、同一部材・同一環境と考えられる300mm程度離れた3地点の塩化物イオンの測定結果(ドリル法)から算定したCo値およびDc値の平均値を用いている。これらの測定値からCo値およびDc値の算定値の変動係数を求めた。Co値およびDc値の変動係数の分布状況を図-19に示す。Co値の変動係数の平均は23%で、最大値は50%を越えている。それに対して、Dc値の変動係数の平均は30%で、最大値は60%を越えている。両者を比較すると、Dc値の変動係数はCo値のものより大きくなっている。これらの結果は、同一部位、かつ同一環境の構造物でも塩分浸透性が異なっており、CoおよびDcの算定値には一定の変動を

持っていることを示すものである。これは、かぶりコンクリートの品質が均一でないことによる表面部における塩分の浸透性状の違いや塩分測定に起因すると推察された。

b) 予測値の変動

構造物への塩化物イオンの浸透予測である式(3)に同一部材・同一環境と考えられる3地点の塩化物イオン濃度の測定結果から算定したそれぞれのCo値およびDc値を代入し、50年後のコンクリート表面から深さ70mm位置での塩分浸透を予測し、予測値の変動係数を求めた。塩分浸透予測値の変動係数の分布状況を図-20に示す。塩分浸透の予測値の変動係数は平均23%で、最大値は50%を越えている。塩分浸透予測値の変動係数の分布状況はCo値の分布状況とほぼ同じであることから判断して、塩分浸透の予測では表面塩化物イオン濃度の変動の影響を大きく受けていることがわかる。すなわち、実構造物の塩化物イオン濃度分布から算定したDc値を用いて式(3)により塩分浸透予測を行う場合には、Dc値の変動が予測値に影響することがないことを示している。なお、予測年数の違いやコンクリート表面からの深さの違いが塩分浸透の予測値の変動係数に及ぼす影響はほとんど認められなかった。

(4) 橋脚およびフーチングの塩分浸透性

海上部の橋脚(海面側側面の標高6~7m付近)にて塩分濃度の経年変化を調べた。その結果を図-21に示す。

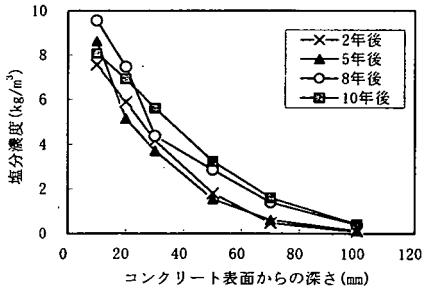


図-21 海上部の橋脚での塩分濃度の経年変化

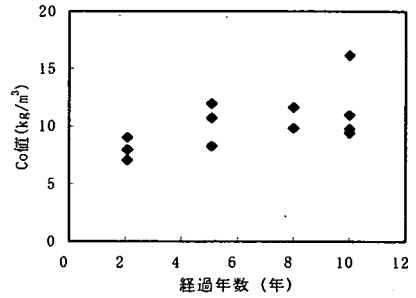


図-22 海上部の橋脚でのCo値の経年変化

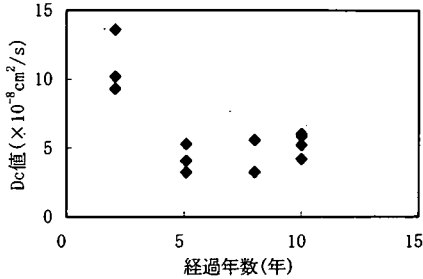


図-23 海上部の橋脚でのDc値の経年変化

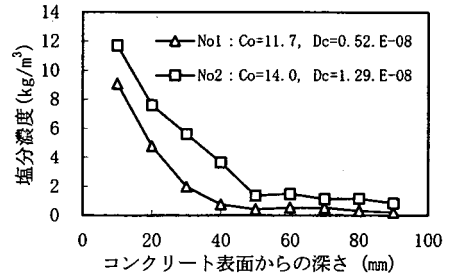


図-24 フーチングの15年経過時の塩分濃度

曝露期間の増加にともないコンクリート中に塩化物イオンが浸透・蓄積しているのが認められる。Co値およびDc値の経年変化を図-22と図-23に示す。これらの結果より、海上部の橋脚のCo値は曝露期間の経過とともに漸増しており、Dc値は曝露2年から5年にかけて大きく低下し、その後はほぼ一定になるのがわかる。

フーチングのコンクリート(高炉セメントB種)の15年経過時の塩分濃度を図-24に示す。フーチングは常時海面下にあり砂礫に埋設されていた。高炉セメントを使用したコンクリートでは表面部の塩分濃度は比較的大きくなるが、内部への塩分浸透が長期にわたって効果的に抑制されており、50mmをこえる部分には塩分がほとんど浸透していなかった。この結果は、厳しい塩分環境下でも高炉セメントB種は優れた塩分浸透の抑制効果を発揮することを実証している。

が拡散・浸透するとして算定される。塩分浸透予測に関する研究では、佐伯ら^{12), 20)}による乾湿繰り返しによる表層部の水分移動や塩分固定化の影響を考慮した拡散予測モデル、丸屋ら^{11), 21)}による塩化物の表層部濃縮と乾湿繰り返しによる移動をモデル化した拡散予測モデルがある。また、表面塗装後の塩分濃度の変化を差分法により推測する方法も守分ら²²⁾により研究されている。

本研究では、可溶性塩化物イオンの濃度差による拡散と塩化物イオンの固定化を勘案する拡散式¹²⁾式(9)を用いて、境界条件として塩害環境の変動を考慮した拡散予測を行った。

$$\frac{\partial C'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D' \frac{\partial C'}{\partial x} \right] - \frac{\partial S}{\partial t} \quad (9)$$

ただし、C' : 可溶性塩化物イオン濃度(kg/m³)

D' : 可溶性塩化物イオンの拡散係数
(cm²/s)

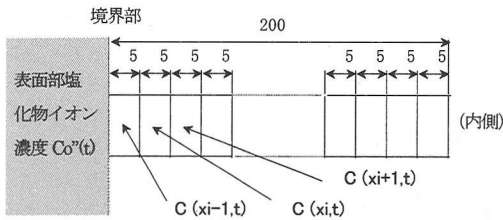
S : 固定化塩分量(kg/m³)

5. 塩害環境の変動をとまなう塩分浸透予測

(1) 塩分浸透予測のモデル化

通常、コンクリート中への塩分浸透予測では、対称構造物の塩分濃度分布から算定したCo値およびDc値から推定する方法が採用されている。この際、Dc値には環境条件やコンクリート内部の状態の影響が含まれており、コンクリート中の塩分濃度の差を駆動力として塩分

式(9)は1次元差分法では図-25のようにモデル化される。表面境界部の塩化物イオン濃度は、塩害環境の変動を鋭敏に反映させるために、式(2)で算定される飛来塩分量の変化に対応して式(10)のように変化するものとした。



$$C(x_i, t + \Delta t) = D' \times \frac{A}{(\Delta x)^2} \times \Delta t + C(x_i, t)$$

ここに、 $A = C(x_{i-1}, t) - 2 \times C(x_i, t) + C(x_{i+1}, t)$

$$C(x_i, t) = C(x_i, t) - S(x_i, t)$$

$$S(x_i, t) = C(x_i, t) \times (1 - C(x_i, t-1) / C(x_i, t-1))$$

図-25 1次元差分法によるモデル化

$$Co''(t) = K \cdot 0.5H_{1/3}^2 T \quad (10)$$

ただし、 $Co''(t)$: 境界部の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

K : 部材の位置 (標高や汀線からの距離) で決まる変換定数

変換定数 K は、構造物の位置や部位での塩害環境の厳しさの程度を表す。

(2) 塩分浸透の予測

a) 予測方法

塩害環境の変動は、図-8 に示す 10日間平均の波エネルギーの再現で、年間エネルギーが平均的になる 1年間 (1987.9~88.8) の変動パターンを予測期間 (年数) 繰り返すことで再現させた。1年間 (1987.9~88.8) の波エネルギーの変動状況を図-26に示す。境界部では外部とコンクリート表面部の塩化物イオンの濃度差により拡散することとし、外部の塩化物イオン濃度が表面部の濃度より小さい場合は、外部に拡散するものとし、その場合の拡散係数は既往の研究²³⁾を参考にして D' 値の 1/6 程度とした。

高架橋での全塩分量 (C) と可溶性塩分量 (C') の測定結果 (図-27参照) より、可溶性塩分量は式(11)で示されるものとした。

$$C' = 0.40 \times C^{1.16} \quad (11)$$

可溶性塩分量の測定は、高架橋でのコアによる全塩分量の測定時に JCI-SC4に従って測定したものである。両者の関係は既往の研究結果²⁴⁾と同様な分布であるが、塩

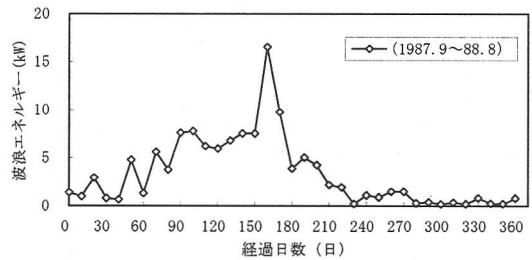


図-26 波エネルギーの変化状況

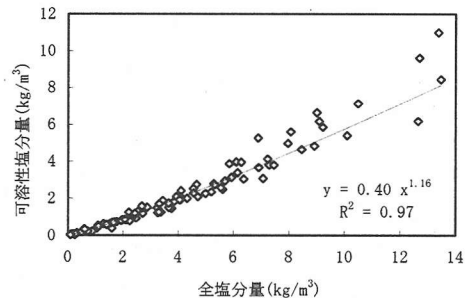


図-27 全塩分量と可溶性塩分量の測定結果

分の固定化率は一定でなく、可溶性塩分量は全塩分量の増加とともに増加する傾向にあった。

b) モデル化による予測結果

モデル化による予測と実構造物での結果を比較するために、可溶性塩分の拡散係数 (D') および塩害環境の程度を示す変換定数 (K) を任意に変化させ、所定期間経過後の塩分濃度分布を予測した。10年経過後の予測値より Co 値および Dc 値を算定し、高架橋での実際の Dc 値の平均と合致する値を求めた。その結果、 D' 値は、 $W/C = 0.55$ および $W/C = 0.46$ ではそれぞれ $6.5 \times 10^{-8} cm/s$ および $2.1 \times 10^{-8} cm^2/s$ となった。塩害環境を変動させて10年経過後の塩分濃度分布を予測した結果を図-28に示す。 Co および Dc の算定では高架橋と同じ深さでの濃度予測値を用いている。図-28に示すように、モデル化による予測結果でも、 Dc 値は Co 値が増加するとともに増加しており、4. (2) で述べた高架橋での測定値と同じ傾向になった。この結果は、塩分の固定化率が一定でなく、全塩分量と可溶性塩分量が比例関係にないことによるものである。可溶性塩分量の拡散係数 (D') を一定とした場合、測定値と比べて Co 値が大きくなると Dc 値は小さくなった。可溶性塩分量の拡散係数は、コンクリート中の相対含水率の増加とともに大きくなり²⁵⁾、コンクリート表層部で乾湿による塩化物イオンの濃縮と移動が生じるとされている¹¹⁾。実構造物では、 Co 値が大きい環境ほど波しぶきによる相対含水率の増加や塩化物イオンの濃縮移動による影響が大きくなるものと考えら

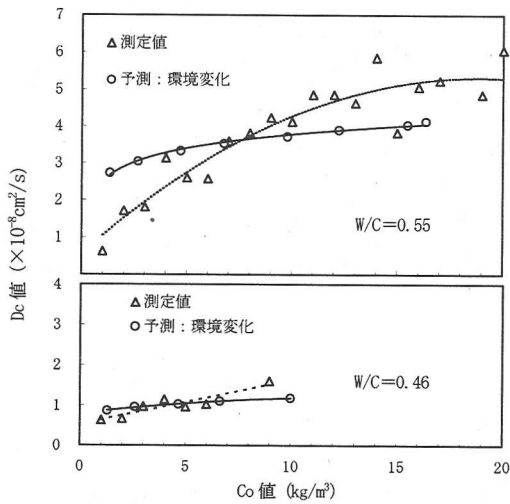


図-28 塩害環境を変動させた10年経過後の塩分濃度の予測結果

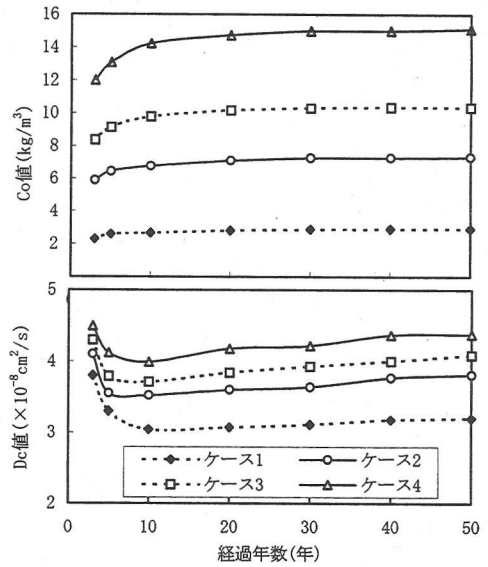


図-29 Co値とDc値の経年変化の予測結果

れた。

W/C=0.55にて塩害環境の程度を変化させ、 C_o 値および D_c 値の経年変化を予測した結果を図-29に示す。 C_o 値は曝露期間とともに漸増し、それに対して D_c 値は曝露初期に大きく低下する傾向にあった。これは実構造物での測定結果(図-22および図-23参照)と良く一致していた。

塩分浸透予測モデルは、固定化を勘案した可溶性塩化物イオンによる濃度拡散や塩害環境の変動を反映させたことで、実構造物での塩分浸透現象に近い予測を可能にしたと推察する。更に、実構造物でのコンクリート中の相対含水率の変化や、コンクリート表層部の乾湿や中性化の影響を考慮できれば、より精度の高い塩分浸透の予測が可能になると考える。

6. 電気泳動法による塩分浸透性の評価

(1) 電気泳動法による測定方法

高架橋から採取したコアを用いて電気泳動法による促進試験により塩化物イオンの拡散係数を求め、高架橋での測定結果と比較した。コア(直径100mm)は、建設後約16年経過した高架橋(橋脚およびフーチング)より採取した。塩化物イオンが浸透していない深さから50mmの長さで切出し、蒸留水中に90日間浸漬した後、20℃の恒温室内にて電気泳動法による促進試験を実施した。

促進試験は、図-30に示すように改良型の拡散セル(容量:785ml、陰極側:所定濃度のNaCl溶液、陽極側:飽和Ca(OH)₂溶液)間の試験体に0.3V/mmの直流電圧を

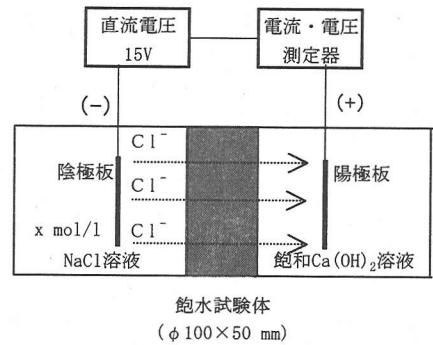


図-30 電気泳動法による促進試験の概要

付加し、陽極側セル溶液の塩化物イオン濃度の経時変化を測定した。試験体の種類および測定結果を表-4に示す。高架橋で得られた C_o 値を参考にして陰極側のNaCl溶液の濃度を種々に変化させた。

塩化物イオンの拡散係数は、Nernst-Planckの式が適用できる直線部の傾き(塩化物イオンの移動度(J_{cl}))より、塩化物イオンの移動が直流電圧の電位勾配に比例し、測定期間内の濃度勾配による移動は無視できるとの仮定に基づいて、式(12)より塩化物イオンの拡散係数 D_{cl} を算定した¹³⁾。

$$D_{cl} = \frac{RT}{|Z_{cl}| \cdot F \cdot C_{cl} \cdot \Delta V} \cdot J_{cl} \quad (12)$$

表-4 試験体の種類および測定結果

種類	試験条件		測定結果	
	種別 (W/C)	Cl ⁻ 濃度 (mol/l)	経過日数 (日)	拡散係数 D_{cl} ($\times 10^{-6}$ cm ² /s)
1	OPC (0.55)	0.48	2	3.6
2	OPC (0.55)	0.36	2	4.2
3	OPC (0.55)	0.18	2	7.1
4	OPC (0.55)	0.088	2	9.8
5	BFSC (0.52)	0.36	23	0.3

ただし、 D_{cl} : 拡散係数 (電気泳動法) (cm²/s)

R : 気体定数 (J/(mol · K))

T : 絶対温度 (K)

$|Z_{cl}|$: 塩化物イオンの電荷

F : ファラデー定数 (C/mol)

C_{cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度 (mol/l)

ΔV : 電位勾配 (V/cm)

J_{cl} : 塩化物イオンの移動度 (mol/cm² · s)

(2) 電気泳動法による測定結果

電気泳動法による陽極側の塩化物イオン濃度変化の測定結果を図-31に示す。OPC (0.55) では試験開始から2日経過後から塩化物イオンが透過しており、その後陽極側の塩化物イオンは一定の割合で増していた。陰極側の塩化物イオン濃度の影響に関して、塩化物イオン濃度が大きいほど透過後の塩化物イオンの増加勾配が大きくなった。一方、BFSC (0.52) では、23日目で塩化物イオンが透過しており、その後の塩化物イオンの増加勾配は OPC と比べてかなり小さくなった。この結果は実構造物の塩分浸透の結果とも一致していた。

電気泳動法により求めた拡散係数 (D_{cl}) と陰極側の塩化物イオン濃度の関係を図-32に示す。OPC (0.55) では、陰極側の塩化物イオンが大きくなるほど D_{cl} 値が減少していた。この結果は、電気泳動試験では陰極側の塩化物イオン濃度が小さいほど、飽和状態にある試験体中の塩化物イオンの移動が容易になることを示唆している。しかし、実構造物で得られた C_0 値と D_c 値の関係とは相違するものとなった。塩害環境を塩分の飽和状態と設定した予測結果では、海水中の環境である C_0 値⁽²⁰⁾を 14 kg/m³とした時の D_c 値は 4.1×10^{-8} cm²/s であり、図-32から推定される D_{cl} 値と良く一致していた。このことよ

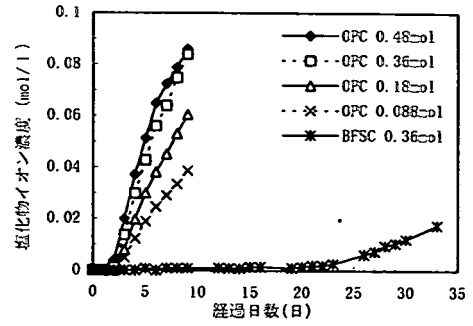


図-31 陽極側の塩化物イオン濃度の変化

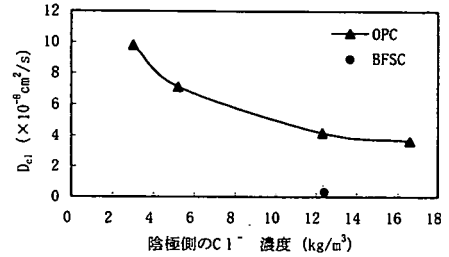


図-32 D_{cl} 値と陰極側の塩化物イオン濃度との関係

り、電気泳動法により海水で飽和した環境条件下でのコンクリートの塩化物イオンの拡散係数を推定できるものと考えられた。一方、BFSC (0.52) では、OPC に比べて D_{cl} 値が 1/10 程度に低減されており、高炉スラグ微粉末の水和反応過程で緻密な内部組織が形成されることにより優れた塩分浸透の抑制効果が得られることが確認された。

7. 結論

日本海の厳しい塩害環境下の高架橋を対象にして、構造物の塩害環境と塩分浸透性との関係を詳細に検討した。また、塩害環境を変動させた塩分浸透予測モデルにより構造物への塩分浸透性を検証するとともに、電気泳動法による塩化物イオンの拡散係数と高架橋での測定値との関係を検討した。

本研究で得られた主要な結果をまとめると次のようである。

- (1) 塩害環境を示す飛来塩分量は、標高と海岸からの距離により決定でき、各地点間の測定値には比例関係があった。また、海岸部の構造物の飛来塩分量と波エネルギーの算定値との間には一定の関係があり、波浪観測データより長期間の塩害環境を予測できた。

- (2) 高架橋で測定された C_0 値は海上部や海岸部の標高 15 m までは 10 kg/m^3 以上になり非常に厳しい塩害環境になった。しかし、海上部でも標高 20 m を超える場合や汀線から 20 m 以上離れる場合には塩害環境が大きく緩和された。
- (3) 高架橋で測定された D_c 値は構造物の水セメント比が小さいものほど大きく低減されていた。また、 D_c 値は同一の水セメント比でも一定にはならず、 C_0 値が増加するとともに D_c 値も増加する傾向を示した。
- (4) 同一の部位および環境である箇所での測定値から算定した C_0 値および D_c 値の変動係数の平均値はそれぞれ 24 % および 30 % であり、 D_c 値の変動係数は値のものよりも大きくなった。また、 C_0 値および D_c 値により求めた塩分浸透の予測値の変動係数は C_0 値の変動係数とほぼ同じになった。
- (5) フーチング部に使用した高炉セメント B 種は厳しい塩分環境下でも長期にわたり優れた塩分浸透の抑制効果を発揮した。このことは電気泳動法による促進試験においても確認された。
- (6) 塩害環境変動と塩分固定化を勘案した差分法による塩分浸透予測モデルを提案し、塩分濃度分布より算定される D_c 値は C_0 値の大きさにより変化することを証明した。また、塩分浸透予測により求めた C_0 値および D_c 値の経時変化は実構造物での測定結果と一致していた。
- (7) 実構造物から採取したコアを使用しての、電気泳動法による塩化物イオンの拡散係数の測定では、陰極側の塩化物イオン濃度の増加とともに塩化物イオンの拡散係数の算定値が減少した。また、電気泳動試験による塩化物イオンの拡散係数は海水中の環境条件での D_c 値とほぼ一致していた。
- 3) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, pp. 99-102, 2001.
- 4) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp. 24-28, 80, 2002.
- 5) 西川和廣, 田中良樹：飛来塩分量の特性, 土木技術資料, Vol. 36-8, pp. 54-59, 1994.
- 6) 加藤泰浩, 宝島由次, 佐伯竜彦：新潟県沿岸における塩害環境の定量的把握, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, V-147, pp. 294-295, 1995.
- 7) 大即信明, 長滝重義, 福手勤, 中下兼次：港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 466/V-19, pp. 31-41, 1993.
- 8) 例えば, 金谷光秀, 榊田佳寛, 阿部道彦, 西山直洋：海岸に曝露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 18, No. 1, pp. 747-752, 1996.
- 9) 例えば, 堤智明, 白井伸一, 安田登, 松島学：塩害劣化に関する実データに基づく定量的評価, 土木学会論文集, No. 544/V-32, pp. 33-41, 1996.
- 10) 前田聡, 若武耕司, 山口明伸, 好本健一：コンクリート中への塩化物浸透過程に関する既往調査の整理と分析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 795-800, 2002.
- 11) 丸屋剛, Somnuk, T., 松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化, 土木学会論文集, No. 585/V-38, pp. 79-95, 1998.
- 12) 佐伯竜彦, 植木聡, 嶋毅：塩害と中性化の複合による塩化物イオンの浸透予測モデルの構築, 土木学会論文集, No. 697/V-54, pp. 131-142, 2002.
- 13) 笹谷輝彦, 鳥居和之, 佐藤健一, 川村満紀：海洋環境化におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究, 土木学会論文集, No. 571/V-36, pp. 91-104, 1997.
- 14) 大即信明, 久田真, 大谷隆之, 丸山俊夫：電気泳動実験によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数の推計, 土木学会論文集, No. 592/V-39, pp. 97-105, 1998.
- 15) 杉山隆文, Som, V., 辻幸和, 大城武：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の適用, 土木学会論文集, No. 711/V-56, pp. 191-203, 2002.
- 16) 青山實伸：道路橋の塩害対策, コンクリート工学, Vol. 25, No. 11, pp. 74-79, 1987.
- 17) 田端竹千徳, 柳生忠彦, 福田功：日本沿岸における波のエネルギー, 港湾技術資料, No. 364, pp. 1-20, 1980.
- 18) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp. 1-14, 1991.
- 19) 松島学, 松井邦夫, 関弘, 堤知明：Fickの拡散方程式の係数の同定, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 269-272, 1995.
- 20) 佐伯竜彦, 嶋毅, 長滝重義：等価拡散係数を用いたコンクリートの塩分浸透予測, コンクリート工学年次論文集,

謝辞：本研究は、日本道路公団が永年にわたり実施してきた日本海沿岸の高架橋でのモニタリングや予防保全で得られた調査データを使用したものである。調査資料の使用を許可いただきました日本道路公団北陸支社並びに試験にご協力をいただいた(株)クエストエンジニアの各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 西川和廣, 柏原壮助, 見波潔, 山本幹雄：幕坪陸橋の塩害による損傷と対策 -①過去の損傷および補修-, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 11, pp. 28-32, 1993.
- 2) Aoyama, M., Nomura, M., Sakamoto, K. and Torii, K. : Countermeasures against Chloride-induced Corrosion of Steel Bars in Coastal Concrete Bridge in a Sever Saline Environment, Proc. of the first fib Congress 2002, pp. 49-56, 2002.

Vol. 20, No. 2, pp. 859-864, 1998.

- 21) 丸屋 剛, 松岡康訓: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 422/V-16, pp. 81-90, 1992.
- 22) 守分敏郎, 長滝重義, 大即信明, 三浦成夫: 既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工の適用性, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 111-122, 1995.
- 23) 榎田佳寛, 天沼邦一, 吉崎芳郎, 御所窪邦夫: コンクリートの乾湿に伴う塩化物の移動について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 14, No. 1, pp. 787-792, 1992.
- 24) 関根信哉, 増田隆, 吉岡博幸: 硬化コンクリート中の全塩分と可溶性塩分の関係, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, V-292, pp. 638-639, 1984.
- 25) 佐伯竜彦, 二木央: 不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 18, No. 1, pp. 963-968, 1996.
- 26) 武田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋曝露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 595-600, 1991.

(2003. 4. 3 受付)

A STUDY ON THE CHLORIDE ION PENETRABILITY INTO CONCRETE IN CONCRETE STRUCTURES IN A SEVERE SALINE ENVIRONMENT

Minobu AOYAMA, Kazuyuki TORII and Tetsuo MATSUDA

In this study, both the amount of airborne chlorine and the chloride ingress into concrete were measured for the bridge on the coast in the Sea of Japan. From the results, it has been found that the amount of airborne chlorine has a good correlation with the calculated energy value of waves at the bridge, and that the surface chloride content (C_o) indicating the degree of saline environment can be determined based on both the distance from the seashore and the height of structure. Also, it is clarified that the diffusion coefficient for chloride ions (D_c) is not a constant value for the concrete with the same water to cement ratio, which varies depending on the value of C_o . Furthermore, the method estimating the chloride ingress into concrete in the bridge was proposed.