

論文 厳しい塩害環境下のコンクリート橋の塩分浸透性と耐久性能評価

青山 實伸^{*1}・丸山 大三^{*2}

要旨：日本海沿岸の厳しい塩害環境下の海岸橋で、建設後約 12 年～19 年経過時の予防保全実施時に測定した浸透塩分量データを用い、配合毎の塩分浸透性を分析した。その結果、見かけの拡散係数の分布は対数正規分布を示し、その平均値は水セメント比 (W/C) が小さくなるほど減少しコンクリート標準示方書の値より小さくなっていた。塩分浸透性の分析結果を用いて耐久性能を評価した結果、100 年の長期耐久性能確保には、橋脚では W/C = 0.52 の高炉セメントの配合で かぶり 150mm とし、海上部の橋桁では W/C = 0.41 の配合で かぶり 100mm、または かぶり 70mm で約 15 年後に塗装をする方法で、概ね可能であると推察された。

キーワード：塩害，表面塩化物イオン濃度，拡散係数，耐久性能

1. はじめに

日本海沿岸の厳しい塩害環境下の海岸に「道路橋の塩害対策指針(案)」(日本道路協会 1984.2)を基本に 1985～1987 年に海岸橋が建設された。海岸橋は海上部および砂浜部を通過する延長約 3.4km の路面高 16～36 m のコンクリート橋で、かぶり増(橋脚 100mm, 橋桁 70mm)や表面積の小さい桁形状にする等の塩害対策を行った¹⁾。その主な構造型式とコンクリート配合を表-1 に示す。

塩分浸透性を示すコンクリートの表面塩化物イオン濃度や拡散係数の特性値は、耐久性能照査や維持管理上の重要な指標となる。コンクリート標準示方書の特性値²⁾を用いる場合、厳しい塩害環境では、経済的なコンクリートかぶりによる長期耐久性能の確保が難しいと評価される。しかし、実際の構造物の複数の配合で、塩分浸透性を分析し耐久性能の評価を加えた事例は少ない。

今回、海岸橋の建設後約 12 年～19 年経過時の予防保全実施時に測定した多数の浸透塩分量データを用い、配合毎の塩分浸透性を分析した。さらに、分析結果を用いて海岸橋のコンクリートの塩害に対する耐久性能を評価し、100 年の長期耐久性能を確保する方法を検討した。

本論文は、海岸橋より得られたコンクリートの塩分浸透性を示すとともに、その結果より塩害に対する耐久性能の評価を行うものである。

2. 塩分浸透性

2.1 分析方法

(1) 浸透塩分量測定

浸透塩分量の測定は、橋脚で建設後 12～13 年後、橋桁で 18～19 年後に塩害環境の厳しい区間で実施した予防保全の事前調査時に行った。測定位置は、橋脚では側面の高さ方向の上・中・下

表 - 1 海岸橋の主な構造型式とコンクリート配合

構造型式の概要		セメント種別	F _{ck} N/mm ²	W/C %	G _{max} mm	単位重量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE 混和剤
橋脚	柱橋脚: (小判型 18～35m高)	普通	24	55	25	164	300	825	1031	0.75
	直接基礎: フーチング	高炉 B 種	24	52	40	157	300	794	1065	0.75
橋桁	砂浜部: PC 連続中空床版(30m) 護岸部: PC 連続箱桁(スパン 52m)	早強	35	46	25	160	350	726	1107	0.875
	海上部: PC 連続箱桁(スパン 60m)	早強	40	41	25	163	400	647	1116	1.000

*1 (株)クエストエンジニア 土木調査設計部長 博士(工学) (正会員)

*2 東日本高速道路(株) 新潟支社 保全グループ サブリーダー

段とし、橋桁では各橋脚前面（支点から離れ2m）と支間60mスパンのほぼ3等分点、または支間30mの中央点の各断面を、各部位の代表箇所として選定した。横断面の測定位置（図-6参照）は、主桁側面・桁底面を基本に、張出部は表面部の塩化物イオン濃度（以下「塩分量」）を確認し塩分浸透の多い場合に実施した。

塩分量分析用の試料は、主にドリル法（直径20mm）により近傍3点から深さ0～20、20～40、40～60、60～80mm毎に採取した。塩分量は、JCI-SC4の試験方法により、2N-HNO₃での溶解による電位差滴定法により全塩分量を測定した。

中性化深さは数mm程度であり、表面付近の塩分量の測定値には炭酸化に伴う塩化物イオンの濃縮現象を示すものはなかった。

(2) 表面塩化物イオン濃度(Co値)および見かけの拡散係数(Dc値)の算定

表面塩化物イオン濃度(以下「Co値」)および見かけの拡散係数(以下「Dc値」)の算定は、最小2乗法の定理により塩分量測定値の深さ方向の分布値と、式(1)に示すフィックの拡散方程式での算定値との差の2乗和が最小になるCoとDcを繰り返し計算により算定した。

$$C = Co(1 - \text{erf}(X / \sqrt{Dc \cdot T})) \quad (1)$$

ここに、C:深さX(mm)、建設後の経過時間T(s)後の塩分量(kg/m³)、Co:Co値(kg/m³)

Dc:Dc値(cm²/s)、erf:誤差関数

コンクリート中の塩分量の分布形状は、Co値とDc値により表すことができる。Co値は構造物の置かれた塩害環境の程度を、Dc値は塩化物イオンのコンクリート中への浸透のし易さを示している。

(3) 解析方法

分析の対象としたデータは、Co値0.8kg/m³未満および塩分量の深さ方向の分布形状が特異なものを除いた

ものである。分析データ数は、コンクリート配合毎に橋脚(W/C=0.55)で319個、フーチング2箇所、橋桁(W/C=0.46)で184個、橋桁(W/C=0.41)で295個である。

塩分浸透性は、構造物の置かれた海岸の位置や高さや構造部位によって異なる。本分析では、塩分浸透性をマクロ的に把握するために、配合毎の海岸の位置（海上部・汀線部・砂浜部に区分）と海面からの高さに着目した。橋桁では、海岸の位置の他に横断面や支間方向の違いに着目して分析した。

2.2 分析結果および考察

(1) 橋梁全体

1) Co値

橋脚の全データおよび橋桁側面のデータでの位置別・高さ別のCo値の分布状況を図-1に示す。橋脚のCo値は、海上部で最も大きく、汀線部、砂浜部と海から陸に向かうほど小さくなり、高さが高くなるほど小さくなっている。砕波帯で頻りに波しぶきを受ける海上部や汀線部の高さ15m程度までは、Co値が10kg/m³以上になることが多く、塩害環境が非常に厳しいことを示している。しかし、海上部では高さが20mを越えるとCo値が約7kg/m³未満、砂浜部ではCo値の多くが約5kg/m³未満となり、塩害環境が緩和されている。

橋桁側面のCo値は、砂浜部では小さく塩害環境が緩やかであるが、海上部や汀線部では位置

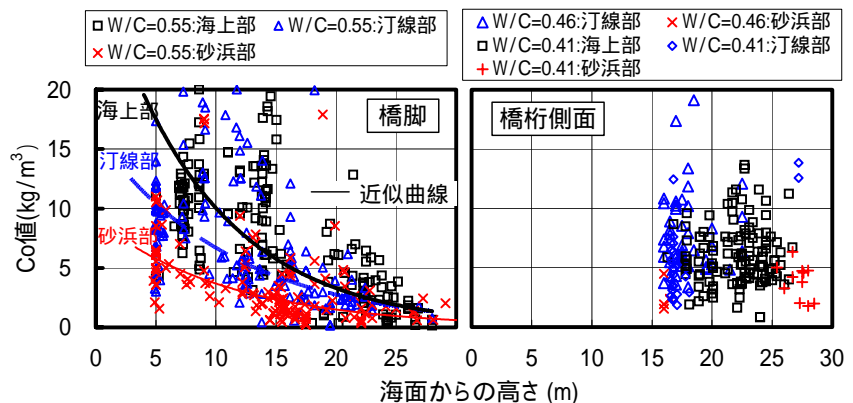


図-1 橋脚および橋桁側面の位置別・高さ別のCo値の分布状況

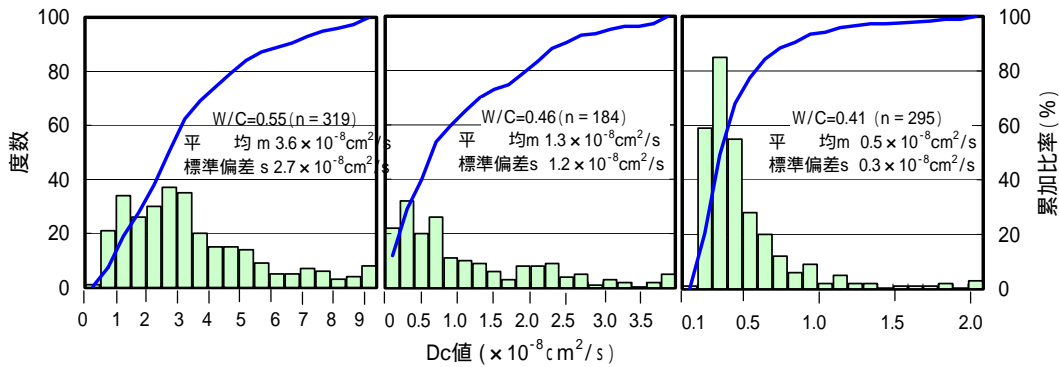


図 - 2 配合毎の Dc 値の分布状況と累加比率曲線

や高さによる違いがなく 3~13kg/m³ の分布が多く、同じ高さの塩害環境は橋脚より厳しくなっている。この要因は、橋桁側面では張出部を有するため雨水に曝されにくく、橋脚側面に比べコンクリート表面に付着した塩分の洗い流しの影響が小さいためであると推察される。

2) Dc 値

配合毎の Dc 値の分布状況と累加比率曲線を図 - 2 に示す。Dc 値の分布形状は、概ね対数正規分布を示し、平均値は W/C が小さくなるほど減少し、W/C = 0.55 で 3.6×10^{-8} 、W/C = 0.46 で 1.3×10^{-8} 、W/C = 0.41 で $0.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ である。標準偏差は W/C が小さいほど大きく減少し、小さい W/C では Dc 値のばらつきが小さくなる。

フーチングの 15 年経過時のコンクリート（高炉セメント B 種）中の塩分量を図 - 3 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、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、Dc 値は平均 $0.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ と小さい値になっている。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³⁾

海岸橋の配合毎の Dc 値の平均値をコンクリート標準示方書²⁾（以下「示方書」）と比較し、図 - 4 に示す。海岸橋の Dc 値は、示方書の値より小さくなっている。標準偏差を勘案した場合には、図中 (m+s) で示すように、W/C が小さくなるほど、示方書の値との差は大きくなっている。W/C が小さい場合、ばらつきを考慮しても示方書の値は、海岸橋に比べ大きい過ぎると考える。

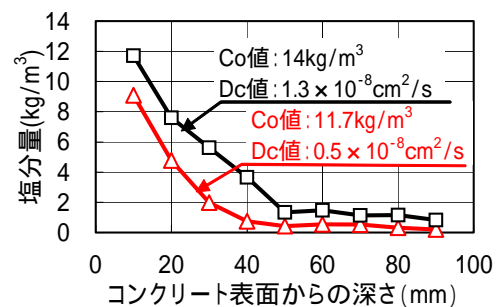


図-3 フーチングの 15 年経過時の塩分量

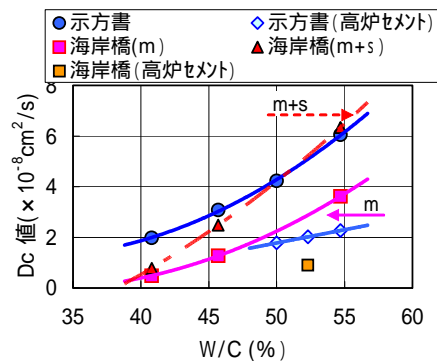


図-4 Dc 値の海岸橋とコンクリート標準示方書との比較

3) Dc 値と Co 値との関係

コンクリート配合毎の Dc 値と Co 値との関係を図 - 5(左)に示す。Co 値を 1 kg/m³ 毎の階層に区分して階層毎の平均 Dc 値をプロットし Dc 値と Co 値に関係の近似式を求め図 - 5(右)に示す。ばらつきを有するが、Dc 値は Co 値が大きくなるとともに増える傾向を示し、増加傾向は W/C が大きいほど大きくなっている。なお、W/C = 0.41 では、変化が小さくなっている。Dc 値の増加傾向が W/C が大きいほど大きくなる要因は、塩分の固定化率が一定でないことや、W/C や Co 値が大きくなるほどコンクリート中の相対含水率が

高くなり、塩分が浸透し易くなることによると推察する³⁾。

(2) 橋桁の Co・Dc 値

橋桁横断面の海上部箱桁および汀線部中空床版での平均 Co・Dc 値、浸透塩分量の多い護岸部箱桁 (W/C=0.46) 断面での Co・Dc 値を図 - 6 に示す。横断面の Co 値は、桁側面が桁底面より大きく塩害環境として厳しい傾向にある。箱桁の張出部の Co 値は小さく、塩害環境は緩やかになっている。壁高欄の Co 値は、桁側面に比べて大きく減少しており、橋脚と同様にコンクリート表面に付着した塩分の雨水による洗い流し作用を受けることに起因すると推察される。Dc 値では、鉛直面が水平面より小さい傾向にある。

海上部箱桁で隅角部より各々500mm 離れた桁側面と桁底面との Dc 値の関係を図 - 7 に示す。ばらつきを有するが、桁側面の Dc 値は桁底面の Dc 値の約 80% である。鉄筋軸に対する水平方向打設部材は鉛直方向打設部材より透水係数が大きくなるのと同様に⁴⁾、水平部材である桁底面は鉛直部材である桁側面より Dc 値が大きくなり、塩分が浸透し易くなっていると推察される。

海上部箱桁の支間方向位置と桁側面・底面の平均 Co 値との関係を図 - 8 に示す。富山橋脚側の側面の Co 値は、新潟橋脚側や支間中央部の Co 値に比べ大きい傾向を示している。富山橋脚側の側面の部材は、橋脚面が現地での波向の主方向に面しているため海上部の橋脚に衝突した波しぶきの影響を受けやすいためである考える。

3. 耐久性能評価

3.1 Co・Dc 値と塩分浸透量の関係

Co・Dc 値の塩分浸透に及ぼす影響を定量的に示すために、Co・Dc 値と 20 年間に着目した鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度²⁾(以下「腐食塩分量」)とされている 1.2kg/m³の塩分量に到達する深さとの関係を(1)式により算定し、図 - 9 に示す。腐食塩分量到達深さは、Co 値が一定の場合、Dc 値により大きく異なる。図 - 9 より、

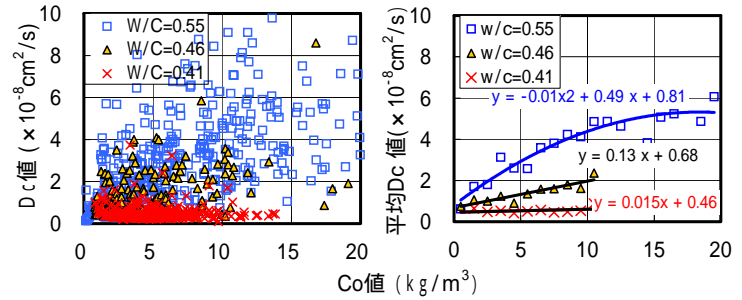


図 - 5 Dc 値と Co 値との関係

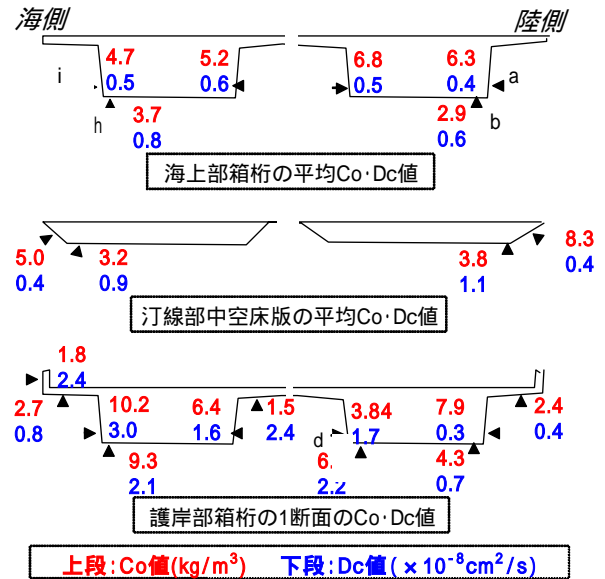


図 - 6 横断面の Co・Dc 値の分布状況

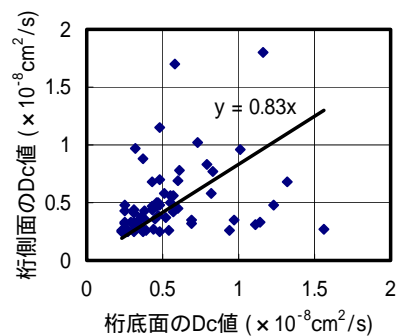


図 - 7 桁側面と桁底面との Dc 値の関係

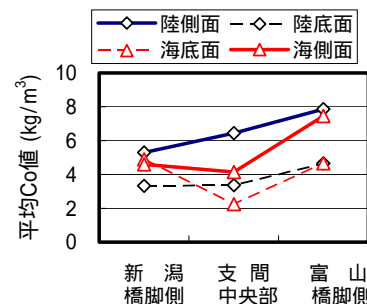


図 - 8 支間方向位置と Co 値との関係

例えば、 Co 値 9kg/m^3 の塩害環境で $W/C=0.55$ の平均 Dc 値では、図中の矢印線で示すように 20 年後の腐食塩分量到達深さは約 100mm となる。

3.2 耐久性能の検討

(1) 海岸橋コンクリートの耐久性能評価

海岸橋で算定した $Co \cdot Dc$ 値の全データを用い、(1)式により、浸透塩分量を予測した。予測は、 $W/C=0.55$ をかぶり 150mm で 50 年後、 $W/C=0.41$ をかぶり 70mm と 100mm で 100 年後について実施した。予測した塩分量の分布と累加比率曲線を図 - 10 に示す。図中には、腐食塩分量 1.2kg/m^3 未満の比率を示す。 $W/C=0.55$ かぶり 150mm の 50 年後の予測塩分量は、 $0 \sim 7\text{kg/m}^3$ と大きくばらつき、 1.2kg/m^3 未満の比率は 58% となる。 $W/C=0.41$ かぶり 70mm の 100 年後の予測塩分量は、概ね $0.1 \sim 4\text{kg/m}^3$ に分布し、 1.2kg/m^3 未満の比率は 72% となる。 $W/C=0.41$ かぶり 100mm では、100 年後の予測塩分量の分布幅は $0 \sim 2\text{kg/m}^3$ と小さくなり、 1.2kg/m^3 未満の比率は 97% となる。

腐食塩分量 1.2kg/m^3 に到達する時期を塩害に対するコンクリート部材の耐久性能の目安になると考えれば、橋脚の $W/C=0.55$ では、 150mm のかぶりを確保しても 50 年後に 42% の部位で耐久性能を確保できなくなる。海上部の橋桁の $W/C=0.41$ では、かぶり 100mm にすれば概ね 100 年の長期耐久性能を確保できる。しかし、道路橋示方書によると、橋桁の最大かぶりは 70mm が望ましいとしており⁴⁾、かぶり 70mm では 28% の部位で耐久性能が確保できないと評価される。

(2) 耐久性能確保に関する検討

かぶり各々 $70, 100, 150\text{mm}$ の深さに 100 年後の腐食塩分量 1.2kg/m^3 に到達する $Co \cdot Dc$ 値の組合

せを (1) 式より求め、それを境界線として図 - 11 に示す。図 - 11 には、建設後 20 年間の塩分供給を許容させ、20 年後に塗装を施し塩分供給を遮断した場合の 100 年後に腐食塩分量 1.2kg/m^3 に到達する $Co \cdot Dc$ 値の境界線も示している。この境界線は、塗装実施以降に新たな塩分供給が遮断され、内部に浸透した塩分はフィックの拡散方程式によって再拡散するとして求めている。図 - 11 より、 Co 値が約 5kg/m^3 を超えるような塩害環境で 100 年後に腐食塩分量に到達させないためには、小さい Dc 値と大きいかぶりが必要であることが解る。また、当初かぶ

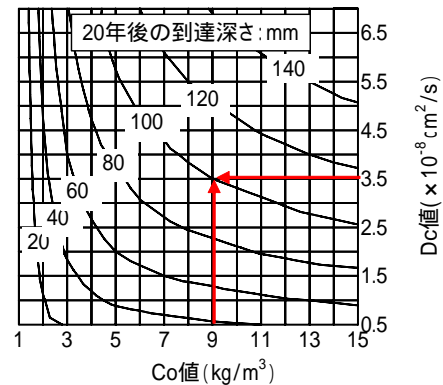


図 - 9 $Co \cdot Dc$ 値と腐食塩分量到達深さとの関係

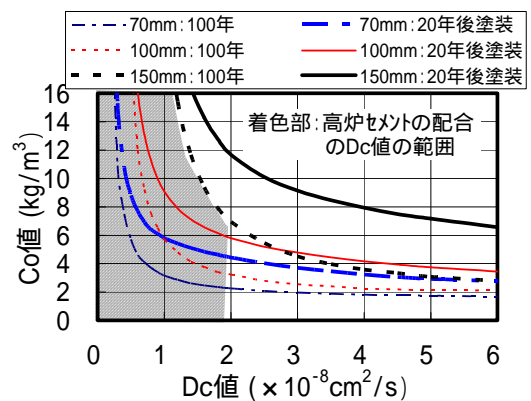


図-11 $Co \cdot Dc$ 値と耐久性およびかぶりとの関係

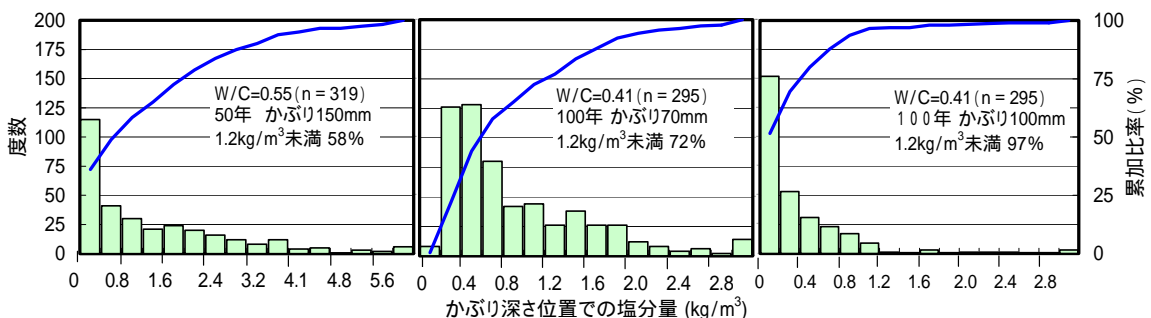


図 - 10 海岸橋で算定した $Co \cdot Dc$ 値を用いて予測した塩分量の分布と累加比率曲線

り部分の塩分供給を許容し、例えば 20 年後に塗装により塩分供給を遮断することで、同一かぶりに対応可能な塩害環境を拡大できることが示される。海岸橋の橋脚では、高炉セメントの配合を使用すれば、図 - 2 で Dc 値の平均値の 2 倍の累加比率は 90% を超えることから、Dc 値の分布を測定平均値の 2 倍の着色範囲と想定すると、かぶり 150mm 確保により塩害に対する 100 年の長期耐久性能を概ね確保できると推察される。

図 - 10(中)と同様に W/C = 0.41 かぶり 70mm の場合に、建設後の塗装時期を 10 年、15 年、20 年と変化させて 100 年後の塩分量を予測し、その累加比率曲線と腐食塩分量 1.2kg/m³ 未満の比率を求め図 - 12 に示す。塗装による塩分供給を遮断することにより、腐食塩分量に到達する部位の比率を少なくすることができ、その比率は塗装実施時期により異なる。塗装の実施時期を 15 年後とすれば腐食塩分量を超える部位は 6% であり、海上部の箱桁の塩害環境で 100 年の長期耐久性能を概ね確保できると推察される。

道路橋示方書によると海上部の厳しい塩害環境下では、かぶりを 70mm とし塗装等を併用する設計を規定している⁵⁾。塗替コストを勘案した場合、海岸橋での事例のように、より小さい W/C の配合を適用し、当初かぶり部分への塩分供給を許容させて、モニタリングにより塗装実施時期を決定する手法が LCC 上有効であると考えられる。

4. まとめ

日本海沿岸の厳しい塩害環境下の海岸橋での塩分浸透性の分析および塩害に対する耐久性能の評価より得られた結果を次に示す。

- (1) 橋脚の Co 値は、海上部や汀線部の高さ 15 m までは塩害環境が非常に厳しいが、高さ 20m を超える場合や砂浜部では塩害環境が大きく緩和されていた。橋桁側面の Co 値は、同じ高さの橋脚より大きく、雨水による付着塩分の洗い流し作用の影響を受けにくいと推察された。
- (2) Dc 値の分布形状は対数正規分布を示し、その

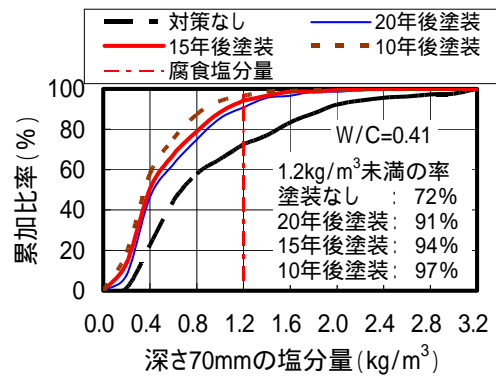


図-12 100 年後の塩分量の累加比率曲線

平均値は W/C が小さくなるほど減少し、コンクリート標準示方書の値より小さくなっていった。

- (3) Dc 値は、Co 値が大きくなるとともに増える傾向を示し、増加傾向は W/C が大きいほど大きくなっていった。W/C = 0.41 では変化が小さかった。
- (4) 橋桁の横断面の塩分浸透性では、Co 値は桁側面が桁底面より大きい傾向にあり、Dc 値は桁側面が桁底面より小さい傾向にあった。
- (5) 海岸橋の厳しい塩害環境で 100 年の長期耐久性能確保には、橋脚では W/C = 0.52 の高炉セメントの配合で かぶり 150mm とし、海上部の橋桁では W/C = 0.41 の配合で かぶり 100mm または かぶり 70mm で約 15 年後に塗装する方法により、概ね可能であると推察された。

参考文献

- 1) 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．
- 2) 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．
- 3) 青山實伸，鳥居和之，松田哲夫：厳しい塩害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，土木学会論文集，No.746/ -61，pp.251-264，2003.11
- 4) 森本康熙ほか：コンクリート内部の存在する鉄筋とコンクリート海面における統一的透水係数の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp. 593-598，2003.7
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 [コンクリート橋編]，pp.171-175，2002.3.