論文 海岸部コンクリート構造物の塩化物イオンの表面濃度と拡散係数

青山 實伸*1・松田 哲夫*2・鳥居 和之*3

要旨:海岸部のコンクリート構造物では,構造物の位置や標高により表面における塩化物イオン濃度が大きく異なる。表面塩化物イオン濃度は,構造物部位の塩害環境の程度を示すものであるが,塩化物イオンの見掛けの拡散係数は,コンクリート標準示方書に示されるように W/C により一定でなく,同一配合では表面における塩化物イオン濃度が大きくなるほど見掛けの拡散係数も大きくなる。本論文は,実構造物での測定およびそれらの分析結果より上記の仮説を実証したものである。

キーワード:海岸構造物,塩害,表面塩化物イオン濃度,見掛けの拡散係数,劣化予測。

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害環境の程度を示す表面塩化物イオン濃度およびコンクリート内部への塩化物イオンの浸透し易さを示す拡散係数は,コンクリート構造物の耐久性照査や維持管理を実施する上で重要となる指標である。

今回,日本海の海岸部の厳しい塩害環境下の実構造物で,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,多数の塩化物イオン濃度の分布を測定した。その結果,表面塩化物イオン濃度は海岸部での構造物の位置や標高により大きく異なり,拡散係数は同一のW/Cの配合でも相違していた。表面塩化物イオン濃度は構造物の位置で、拡散係数はW/Cから一律に示されているコンクリート標準示方書の規定1)とは異なることを明らかにした。本論文は,海岸部の実構造物より得られたコンクリートの表面塩化物イオン濃度と拡散係数の分布状

況について示すものである。

2. 構造物の概要

2.1 構造物の概要と塩害環境

対象とした構造物は、橋長約3.4 km、計画標高 16~36 mのコンクリート橋である(表 - 1 参照)。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「海中部」という)に位置する。

現地の波浪状況は,波高1m以上の出現率が47%,波高2m以上が8.9%、波高3m以上が1.5%である。特に,冬期(12~3月)の波浪は,季節風の影響を受け,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。海中部の橋脚は砕波帯に位置し,橋脚表面は波しぶきにより湿潤状態または乾湿繰返し状態にある。また,標高の高い位置や砂浜部の橋脚には多くの飛来塩分が付着する。海岸付

		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/mm²(普通ポルトランドセメント)
上部工	砂浜部	PC 連続中空床版 (スパン 30 m)	35 N/mm²(早強ポルトランドセメント)
ㅗ마ㅗ	海山郊	DC 連結5-か符炉 (フパン, 60 m)	40 N/mm²/目2台ま。まときいと、セインと)

表 - 1 構造型式の概要とコンクリートの種別

^{*1 ㈱}クエストエンジニア 土木調査設計部長 (正会員)

^{*2} 日本道路公団 北陸支社 金沢技術事務所長

^{*3} 金沢大学 工学部 土木建設工学科 教授 (正会員)

表 - 2 コンクリートの配合

f 'ck	W/C	G_{max}	細骨材率	単位重量(kg/m³)				
(N/mm^2)	(%)	(mm)	(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
24	54.7	25	45	164	300	825	1031	0.75
35	45.7	25	40	160	350	726	1107	0.875
40	40.8	25	37	163	400	647	1116	1.000

近より 40 m 標高 10 mでの飛来塩分の測定結 は,年間約 250 g/m²であった。

2.2 コンクリートの配合

構造型式別のコンクリートの種別を表 - 1 に , コンクリート種別毎の配合を表 - 2 に示す。

コンクリートは,コンクリートポンプ車により打設し,締め固めは棒状バイブレータにより施工している。

3.調査の概要

3.1 塩分の測定方法

橋脚では、建設後12~13年後に実施した予防保全の事前調査時の測定結果を用いた。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、20~40、40~60、60~80、80~100 mm毎に採取した。上部工では、建設後12~13年後に実施したモニタリング時の測定結果を用いた。試料採取は、主にコアを採取(径55 mm、長さ100 mm)し、深さ10、20、30、50、70 mm毎に10 mm幅でスライスし粉砕した。塩化物イオン濃度は、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化物イオン濃度を測定した。

中性化深さは,コア採取時に測定したが,いずれも数 mm 程度であった。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行現象³⁾を示すものはなかった。

3.2 分析手法

(1) 表面塩化物イオン濃度および拡散係数の算定

表面塩化物イオン濃度および拡散係数の算定値は,最小2乗法の定理により塩化物イオン濃

度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 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²⁾。

$$C=Co(1-erf \frac{X}{2 \overline{DcT}})$$
 (1)

ここに,C:深さ X(mm),建設後の経過時間 T(s) 後の塩化物イオン濃度(kg/m³)

Co:表面塩化物イオン濃度(kg/m³)

Dc:塩化物イオンの見掛けの拡酸係数

erf:誤差関数 (cm²/s)

この際,表面塩化物イオン濃度(Co)は構造物の置かれた塩害環境の程度を,見掛けの拡散係数(以下「拡散係数」(Dc)という)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。

(2) 解析方法

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(浮き等の損傷発生個所)を除いたものである。分析データ数は、コンクリート種別毎に 24 N/mm²で 306個,35 N/mm²で 74個,40 N/mm²で 51個である。24 および 35 N/mm²のデータのうち 188個は、約 30 cm 程度離れた 3 個所の測定値(ドリル法)より各々の Co と Dc を算定し,それらの平均値を 1 個の分析値として取り扱った。

塩害環境の厳しさを示す Co 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・上部工での部位面の方向,上部工での桁下面・側面・張り出し部等)によって異なる。本分析では,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,橋脚位置により海中部,汀線部,汀線からの距離 5~20,20~50,50~100 mの区分を基本とした。また,標高では,5~10,10~15,15~20,20~25,25~30 mに区分した。標高5 m未満では,橋脚に磨耗層(ゴム圧着鋼鈑)が設置されており,塩化物イオンの浸透が少ないとして測定の対象外とした。また,代表的な海中部橋脚1基に関しても標高別の分析を実施した。拡散係数 Dc では,コンクリートの強度種別毎の分布状況と Co との関係を分析した。

4 . Co および Dc の算定値の変動

24 および 35 N/mm²のデータのうち 188 個は ,約 300 mm 程度離れた 3 個所の塩化物イオンの測定結果から算定した Co ,Dc 値の平均値を用いている。これを用いて ,表面塩化物イオン濃度と拡散係数の算定値の変動係数を比較した。

図 - 1 は ,Co 値の変動係数の分布状況を示す。 変動係数の平均は 23 %で ,最大で 50 %を越え ている。図 - 2 は , Dc 値の変動係数の分布状況 を示す。変動係数の平均は 3 0%で 最大で 60 % を越えており ,塩化物イオン濃度 Co の変動係数 より大きくなっている。

これらの結果は、構造物の同一部位で、かつ同一環境と考えられる個所でも塩化物イオンの浸透状況が異なり、算定した Co 値および Dc 値にバラツキを有す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化物イオンの浸透性状の違いに起因すると推察する。

5. 塩分の分析結果と考察

5.1 表面塩化物イオン濃度

(1) 橋梁全体

実構造物での表面塩化物イオン濃度 Co の全 データの位置別・標高別の分布状況を図 - 3 に 示す。位置区分では,20~100 mをまとめて示 した。また,図-4には,橋脚(24 N/mm²)の 位置別・標高別に区分した平均 Co 値の分布を 示す。

構造物の設置位置では、海中部で Co 値が最も大きく、汀線部、5~20、20~50、50~100 mと汀線から離れるほど値が小さくなる。一方、標高では標高が高くなるほど Co 値は小さくなり、塩害環境が緩やかになることを示している。砕波帯で頻繁に波しぶきを受ける海中部や汀線部の標高 15 m程度までは、Co 値が 10 kg/m³以上になることが多く、塩害環境が非常に厳しいこ

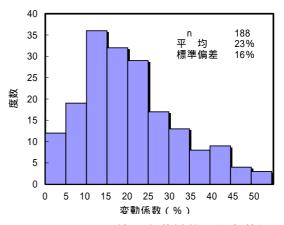


図 - 1 Co 値の変動係数の分布状況

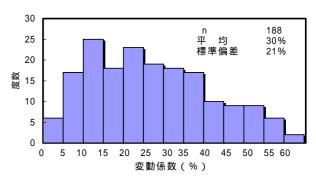


図 - 2 Dc値の変動係数の分布状況

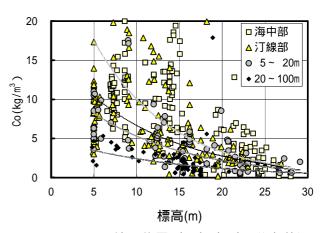


図 - 3 Co 値の位置別・標高別の分布状況

とを示している。しかし,海中部でも標高が20 mを越えるとCo値が約7kg/m³未満となり,塩 害環境が緩やかになっている。また,汀線から20 m以上離れるとCo値が約5kg/m³未満となり,低い標高でも塩害環境が顕著に緩和されている。

(2) 海中部橋脚

海中部の Co 値分布の一例として,海中部橋脚 1基の表面塩化物イオン濃度 Co と標高の関係を図-5に示す。 海中部橋脚では,波浪の衝突により波しぶきが最高で 20 m程度まで打ちあがる厳しい環境下に位置する。このため,Co 値は標高 15 m程度までは 10 kg/m³を越えており,波しぶきの影響を受けると想定された標高 20 mまでは大きな値となっている。しかし,標高 20 mを越えると Co 値は 5 kg/m³程度未満となり塩害環境が大きく緩和される。

5.2 見掛けの拡散係数

(1) 橋梁全体

1) 拡散係数の分布状況

コンクリート種別毎の拡散係数 Dc の分布状況を図 - 6 に示す。Dc 値は W/C が小さくなるとともに減少し,W/C = 0.55 で平均 3.5×10^{-8} cm²/s,W/C = 0.46 で平均 1.1×10^{-8} cm²/s,W/C = 0.41 で平均 0.7×10^{-8} cm²/s になった。W/C = 0.55 では, $1 \sim 10 \times 10^{-8}$ cm²/s と広い範囲に分布し,W/C = 0.41 は, $1 \sim 5 \times 10^{-8}$ cm²/s の範囲に分布していた。

橋脚(24 N/mm²)での位置別・標高別に区分

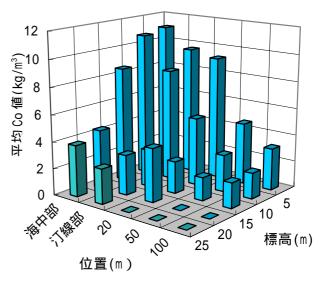


図 - 4 位置別・標高別の平均 Co 値(24 N/mm²)

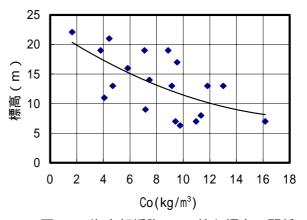


図 - 5 海中部橋脚の Co 値と標高の関係

した拡散係数の平均 Dc 値の分布状況を図 - 7に示す。平均 Dc 値の分布状況は,平均 Co 値の分布状況(図 - 4)の傾向と同様に海中部・汀線部で大きく,汀線から離れるほど小さくなり,汀線

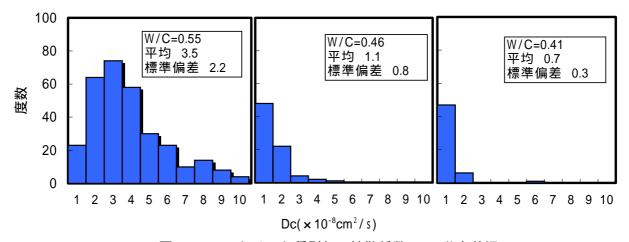


図 - 6 コンクリート種別毎の拡散係数 Dc の分布状況

から離れるほど小さくなり,標高が高くなるほど減少する傾向を示している。このように Dc 値は,同一配合(同一W/C)で一定でなく,Co 値の値と密接な関係があった。

2) 拡散係数と表面塩化物イオン濃度の関係 コンクリート種別毎の拡散係数と表面塩化物 イオン濃度の関係を図 - 8 に示す。W/C = 0.55 の拡散係数 Dc の分布は変動があるが、表面塩化 物イオン濃度 Co が大きくなるとともに拡散係 数 Dc も大きくなる傾向を示した。また,W/C = 0.46 の拡散係数 Dc においても,表面塩化物イオン濃度の分布範囲が小さく変動が小さいが, W/C = 0.55 と同様な傾向にあった。

橋脚(W/C=0.55)の拡散係数の分布状況を,表面塩化物イオン濃度 Co を 1 kg/m³毎の階層に区分して各階層毎の拡散係数の平均値(m)・標準偏差値(s)を算定すると図-9のようになる。Coの階層単位での拡散係数値の変動係数は,約50%程度となった。同一の部位・同一の環境条件であった拡散係数の変動係数(図-2参照)は平均30%であったが,これより変動係数が大きくなる理由は,部位の位置(部位の方向等)の違いや環境条件の変化によるものと推察する。

コンクリート種別毎に表面塩化物イオン濃度 Co を 1 kg/m³毎の階層に区分して,各階層毎に 算定した平均 Dc 値との関係を図 - 10 に示す。 図中では,コンクリート種別毎の Co と平均 Dc 値には相関が認められる。相関曲線の関係式を求めると式(2)~(4)のようになる。

W/C=0.55 (24 N/mm²)の場合

$$Dc=0.013Co^2+0.50Co+0.56$$
 (2)

W/C=0.46 (35 N/mm²)の場合

$$Dc=0.11Co+0.52$$
 (3)

W/C=0.41 (40 N/mm²) の場合

(2)海中部橋脚

海中部橋脚の拡散係数 Dc と表面塩化物イオン濃度 Co の関係を図 - 11 に示す。海中部橋脚の Dc の分布は,図 - 10 で示される W/C=0.55 で

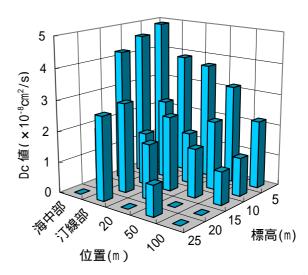


図 - 7 位置別・標高別の平均 Dc 値(24 N/mm²)

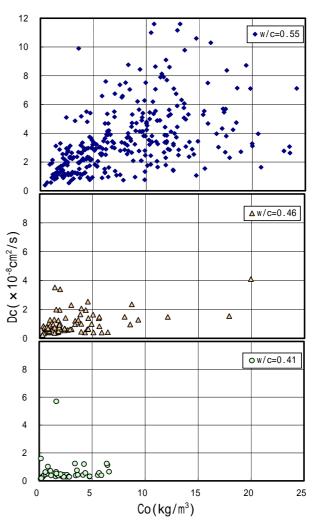


図 - 8 コンクリート種別毎の Dc 値と Co 値 の関係

のDcとCoの相関曲線とほぼ同じ傾向を示した。 海中部橋脚の Co 値は波しぶきの影響を受ける 標高 20 m程度までが大きく 標高 20 mを越え ると小さくなっていた。Dc 値は Co 値の変化に対応して変化することが解る。

6. 結論

厳しい塩害環境下の実構造物での塩分の測定 および分析結果から得られた表面塩化物イオン 濃度 Co と見掛けの拡散係数 Dc に関する分布状 況をまとめると,次のようになった。

- (1) 同一部位・同一環境と考えられる個所での測定値から算定した Co 値および Dc 値の変動係数は各々24 %および 30 %であり,Dc 値の変動係数が Co 値よりも大きくなった。
- (2) Co値は、海中部や汀線部の標高 15 mまでは 10 kg/m³以上になり、塩害環境が非常に厳しかった。一方、海中部で標高 20 mを越える場合には約 7 kg/m³未満、汀線から 20 m以上離れる場合には約 5 kg/m³未満と小さくなり、塩害環境が大きく緩和された。
- (3) コンクリート種別毎の Dc 値の平均は, W/C=0.55で3.5×10⁻⁸ cm²/s, W/C=0.46で1.1×10⁻⁸ cm²/s W/C=0.41で0.7×10⁻⁸ cm²/sとなり, W/C が小さくなるとともにDc が大きく低減された。
- (4) Dc 値は,コンクリート標準示方書に示されるようにW/Cにより一定ではなく,同一配合でも Co 値が大きくなるとともに Dc 値も大きくなった。コンクリートの設計基準強度毎の Dc 値と Co 値の関係式を本文中に示した。
- (5) 海中部に位置する橋脚では、波しぶきの 影響を受ける標高 20 mまでは Co 値が大き くなったが、標高がそれ以上になると Co 値が小さくなった。同様に、Dc 値は Co 値 とともに相違した。

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], pp.24-28,80,2002.3

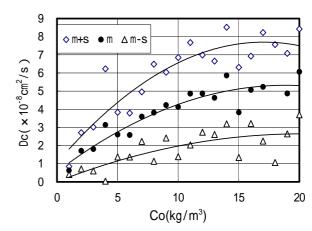


図 - 9 Dc の分布と Co との関係(W/C=0.55)

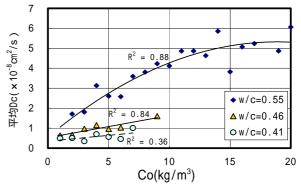


図 - 10 W/C 毎の平均 Dc と Co の関係

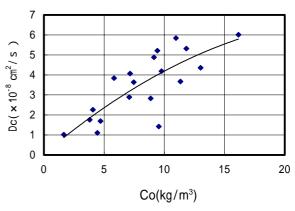


図 - 11 海中部橋脚の Dc 値と Co 値 の関係

- 2)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 No.520/ -28,pp.269-272,1995.8