ISSN 2186-5647

塩害を受けたコンクリート構造物の診断方法

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京㈱　○高野真希子
日大生産工　　阿部　忠

１．はじめに

近年，海岸線近くに建設されたコンクリート構造物，とくに道路橋RC床版では，塩分が浸透して内部鉄筋が腐食することでコンクリートにひび割れの発生やはく離・剥落が生じる塩害が顕在化している．塩害による損傷例を図-1に示す．

道路橋RC床版の塩害に対する耐久性の確保には，塩害状況の把握，塩化物イオンのコンクリート中への浸透性を適切に把握する必要がある．また，効率的な維持管理を実施するためには，海岸線に建設されたコンクリート橋の塩害状況を適切に診断・劣化予測を行うとともに，塩化物イオンに対する実態に即した健全度の評価が重要な課題となっている．

そこで本論文では，塩化物イオン濃度の推定予測式において，支配的な影響をもつ1因子であるコンクリート表面の塩化物イオン濃度に着目し，実態に即した評価法の提案を行う．対象橋梁は，旧銚子大橋のRC床版とし，EPMA試験とフィックの拡散方程式との整合性を検証し，実測に近似する塩化物イオン濃度の推定，劣化予測方法を検討する．

(1)RC床版下面の剥離

(2)PC主桁の剥離

図-1　塩害による損傷例

２．塩化物イオン濃度の浸透予測

2.1　フィックの拡散方程式[1)]

コンクリート中の塩化物イオン濃度の浸透予測には，一般的にフィックの拡散方程式が用いられている（式(1)）．これは，コンクリート中の塩化物イオン含有量が鉄筋腐食発生限界濃度1.2kg/m^3 に達した時点で，加速期へ移行するものと仮定している[1)]．

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_o \left(1 - erf\left(\frac{0.1 \cdot C_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}}\right)\right) + C_i \qquad (1)$$

ただし，$\mathrm{Log}_{10} D_{dp} = 3.0(W/C) - 1.8$　　(1.1)

ここに，C_d：鋼材位置における塩化物イオン濃度(kg/m^3)，γ_{cl}：鋼材位置における塩化物イオン濃度のバラつきを考慮した安全係数(=1.3)，C_o：コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m^3)，c_d：耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値(mm)，D_d：塩化物イオンに対する拡散係数（式(1.1)），t：供用年数における塩化物イオン濃度(kg/m^3)，Ci：初期含有塩化物イオン濃度（= 0.3kg/m^3），W/C：水セメント比

2.2　コンクリート表面における塩化物イオン濃度

劣化予測式における支配的な因子として，拡散係数，飛来塩分量，コンクリート表面の塩化物イオン濃度が挙げられる．本論文では，コンクリート表面の塩化物イオン濃度に着目した検討を行う．コンクリート標準示方書では，コンクリート表面の塩化物イオン濃度は，海岸からの距離の変数として示されている[1)]．ここで，コンクリート標準示方書に示される海岸線からの距離と表面の塩化物イオン濃度の近似値を図-2に示す．図-2より，離岸距離が1,500mを

Method for diagnosis concrete structure suffering salt damage
by
Makiko TAKANO and Tadashi ABE

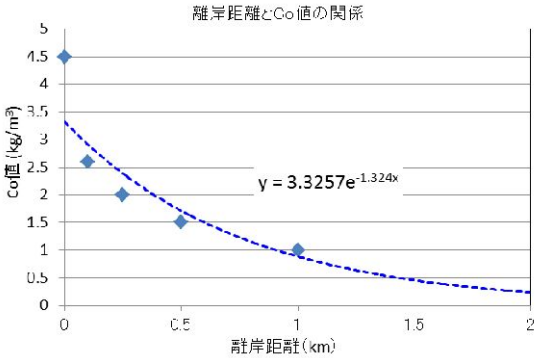

図-2　離岸距離と表面の塩化物ｲｵﾝ濃度[1)]

超えると塩害の影響をほとんど受けない立地条件であることがわかる．

2.3　理論塩化物イオン濃度と経年予測

フィックの拡散方程式は式(1)で示され，鋼材位置における塩化物イオン濃度を算出するためには，表面の塩化物イオン濃度（海岸線からの距離の変数），かぶり深さ，水セメント比，拡散係数等の各値を代入する必要がある．この各値にコンクリート標準示方書で規定されている標準的な値を使用した場合の塩化物イオン濃度分布と経年予測（これを理論値とする）を図-3，図-4に示す．なお，供用年数は，実測値との比較検討を行うため47年と設定した．

一方，表面の塩化物イオン濃度は図-2に示すとおり，海岸線からの距離の変数となっている．この離岸距離に対する表面の塩化物イオン濃度を用いて算出した塩化物イオン濃度分布の理論値は，図-3に示すとおり離岸距離が1kmを超えると理論上塩化物イオン濃度分布は，最小化鉄筋かぶり位置においても発錆限界塩化物イオン濃度を超ない．また，理論値を用いた経年予測は，図-4に示すとおり理論上は供用100年時点においても発錆限界塩化物イオン濃度の範囲内に収束することから，理論上は塩害の影響をほとんど受けない結果を示す．

3．塩害による損傷事例

コンクリート標準示方書では，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，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．ここで，海岸汀線部に立地するコンクリート構造物の損傷事例として，旧銚子大橋の事例を示す．

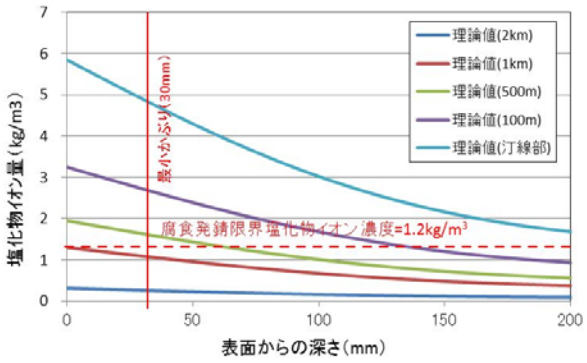

図-3　塩化物イオン濃度分布（理論値）

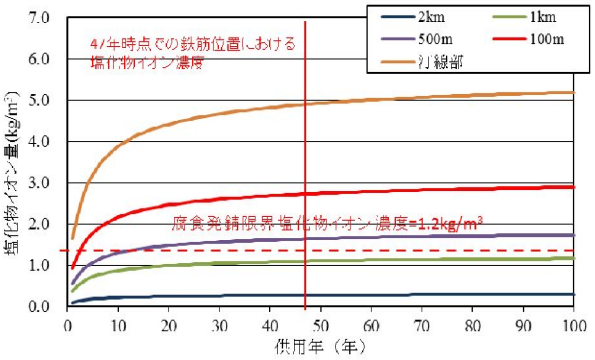

図-4　経年予測（理論値）

表-1　旧銚子大橋RC 床版の補修・補強歴

補修年度	種別	内　　容	経　緯
1962年(昭和37年)	供用開始		
1982年(昭和57年)～1985年(昭和60年)	床版補修	床版上面増厚(SFRC)	ひび割れ損傷
1987年(昭和62年)～1991年(平成3年)	床版補修	床版下面にポリマーセメントランニング	塩害対策
1995年(平成7年)～1998年(平成10年)	床版補修	床版下面にアクリル系ランニング	塩害対策（機能低下）
		床版一部打換	ひび割れ対策
2001年(平成13年)～2005年(平成17年)	路面補修	コンクリート路面の目地に止水対策	止水対策
2007年(平成19年)	路面補修	コンクリート路面の部分的な打換	舗装の亀裂および止水対策

3.1　旧銚子大橋の概要

飛来塩分による塩害橋梁の一例として，47年間供用された実橋RC 床版を用いた．旧銚子大橋の立地は，銚子川の河口から2,000m，対岸は1,000m （平均1,500m）である．離岸距離からの判断では，塩害の影響を受けない立地条件となるはずである．しかし，塩害対策として1987～1991 年にかけて床版下面にポリマーセメントライニング，1995 年にはアクリル系ライニングが施されている．また，供用開始から20 年後の1982 ～ 1985 年に耐荷力性能および疲労性能の向上を目的として，RC床版の上面に70mm ～ 80mm のSFRC 上面増厚補強が施され，一部は再劣化により2007年に部分的に打換

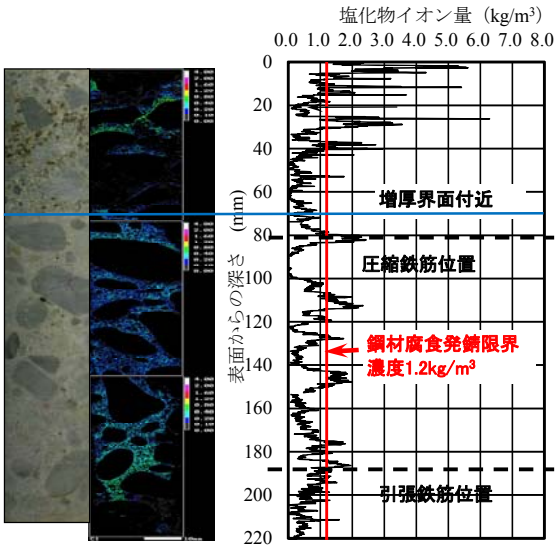

図-5　EPMA 診断による塩化物イオン濃度

図-6　内部鉄筋の腐食状態

えされている．ここで，旧銚子大橋のRC 床版に関する補修・補強歴を表-1に示す．

3.2　調査概要

本研究ではコアを採取し，採取したコンクリートコアをスライスして，表面から塩化物イオン濃度分布を連続的に測定する方法を用いた．採取コア径は，φ45×230mmの小径コアとし，塩化物イオンは，電子線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro Analyzer：以下，EPMA[2)]）の面分析により濃度プロファイルを求め，それから見かけの拡散係数を算出して塩化物イオンの浸入速度予測を行った[3)]．また，コンクリートをはつり取り，内部鉄筋の腐食状態を確認した．

3.3　EPMA 診断結果および内部鉄筋の腐食状態

旧銚子大橋のRC 床版のEPMA診断による塩化物イオン濃度分布の結果の一例を図-5に示す．塩化物イオン濃度は，表面から40mm範囲で高く，平均で1.9 kg/m^3，最大量は5.0 kg/m^{3}を超える．圧縮鉄筋位置では2.25kg/m^3，引張鉄筋位置では1.0 kg/m^{3}である．引張側の鉄筋位置での塩化物イオン濃度が比較的低い理由は，下面の表面被覆による塩害対策により塩分の浸透が抑制されているためであると考える．

以上のEPMA診断による塩化物浸透量調査結果より，旧銚子大橋は汀線部から1,500～2,000mの理論上は塩害影響範囲外である立地条件にも関わらず，深度に対して約４割以上の範囲で腐食発錆限界塩化物イオン濃度を超えており，RC床版部の塩化物イオン濃度は高い傾向を示した．

また，旧銚子大橋では丸鋼が用いられていたが，塩化物イオン濃度が発錆限界程度(1.2kg/m^3)を超えた付近の丸鋼全体に発錆がみられた．ここで，図-6に鉄筋の腐食状況を示す．

3.4　維持管理における問題点

このような塩害による損傷事例から，実測値と理論値にはかい離が生じていることが確認できた．理論式と実測値の評価・予測に相違が生じる理由として，以下の事項が考えられる．

①フィックの拡散方程式は，コンクリート表面の塩化物イオン濃度は常時一定量，付着塩分がコンクリート内部に浸透していく過程の評価は塩化物イオン濃度の拡散のみである．

②一方，塩害の実測データは橋梁の設置環境や構造形式，飛来塩分量，コンクリートの品質，施工状態等の種々の要因によりバラつきが多く見られる．例えば，影響因子の1つであるコンクリート表面の塩化物イオン濃度は図-1に示すように，海岸からの距離の変数として示されており，理論的にはその一定量が内部拡散すると想定されているが，実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ている．

このように，理論値と実測値にかい離がある場合には経年予測にも大きな影響を受け，理論値によって劣化予測を行った場合には，維持管理対策が過小となるといった懸念が生じる．

４．理論値と実測値の比較

塩化物イオン濃度の理論値と実測値を旧銚子大橋の解析結果を用いて比較検討した．

4.1　汀線からの距離と塩化物イオン濃度

図-1に示すとおり，表面における塩化物イオン濃度は海岸からの距離の変数として示されており，旧銚子大橋の場合，離岸距離1,500～2,000mに対する理論上の表面濃度は0.46 kg/m^{3}である．一方，実測の表面濃度は平均で2.2 kg/m^3（ばらつきを考慮した76%信頼限界値）である．このように理論値と実構造物への塩分の供給量には差異が生じる．

そこで，理論値（式(1)）とEPMA 診断の結果を検証することを目的に，海岸汀線部から橋梁位置までの距離50m～2,000mを変数とした理論塩化物イオン濃度を算出し，理論値と実測値の比較を図-7に示した．また，表面の塩化物イオン濃度の理論値と実測値から算出した補正係数を用いて理論値の補正を行った．その結果，表面の塩化物イオン濃度に着目した補正理論値は，離岸距離100mに近似した．

よって，離岸距離1,500～2,000mに立地するが，実際には離岸距離100m地点と同等な塩化物イオンの供給を受ける環境にあり，理論値によって劣化予測を行った場合には，過小評価となる懸念が生じることとなる．

4.2　塩化物イオン濃度の経年予測

式(1)に示す塩化物イオン濃度の拡散方程式を用いた回帰分析により離岸距離50m～2,000mを変数とした表面の塩化物イオン濃度(Co) および見かけの拡散係数(D) を算定し，供用開始から100年後の塩化物イオンの浸透予測を行った．ここで，塩化物イオン濃度の経年予測を図-6に示す．

実測値によって理論値の補正を行った補正式と離岸距離100mの経年予測は近似しており，供用から20年以下で発錆限界塩化物イオン濃度を超える．測定年（供用後47年時点）における鉄筋位置の塩化物イオン濃度は，離岸距離100mで2.38 kg/m^{3}と推定され，補正式の2.25kg/m^{3}と近似する．また，実測値の2.32 kg/m^{3}とも近似する結果となった．

以上より，理論による塩化物イオン濃度と実橋のイオン濃度には差異が生じ，経年予測にも大きな影響を与える．よって，近年では5年ごとに義務化された定期点検によって，コア採取によるEPMA試験，あるいは粉体採取により現状の塩化物イオン濃度を把握・評価することが重要であると考える．その取得データを利用した理論式の補正を行うことにより，塩化物イオン濃度の経年予測を図る必要があると考える．

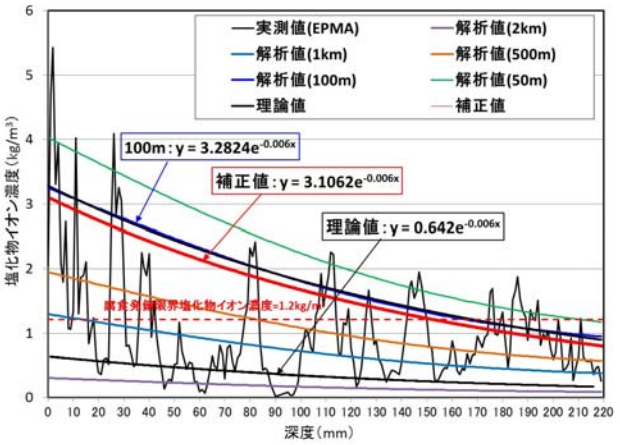

図-7　理論値と実測値の比較
（塩化物イオン濃度分布）

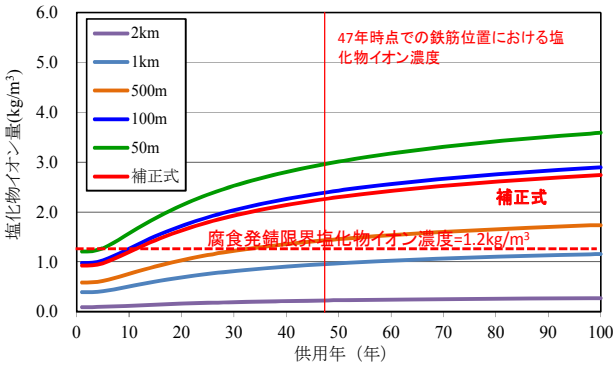

図-8　塩化物イオン濃度の経年予測

５．まとめ

理論値と実測の塩化物イオン濃度には相違が生じていることを確認した．本対象橋梁では，表面の塩化物イオン濃度に着目したが，補正理論値は離岸距離100mに近似した．多くの橋梁において塩化物イオン濃度が予想以上に高い傾向から，様々な条件下におかれた橋梁の塩害状況を適切に判定・予測し，実態に近い評価法の検討を行う必要がある．そのためには，定期点検が重要であり，実橋の収集・蓄積データを活用して理論式の補正を行うことにより，実態に沿った経年予測が可能であることを示した．

[参考文献]
1)土木学会 コンクリート標準示方書　維持管理編(2013)
2)土木学会：コンクリート標準示方書（規準編），土木学会規準および関連規準，EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方(案)，(2007) pp. 297-307
3)橋梁塩害対策検討委員会：塩害橋梁維持管理マニュアル(案)(2008)