

コンクリート構造物の劣化診断

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

1. はじめに

近年、海岸線近くに立地するコンクリート構造物において、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やはく離が生じる塩害が顕在化している。

コンクリート構造物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、補修・補強対策工は進展期以前の早期に実施することが効率的な維持管理に繋がる。

そこで本論文では、塩害の影響地域に立地するコンクリート構造物の飛来塩分による塩害を対象とし、塩害の影響状況、塩化物イオンのコンクリート中への浸透状況等の塩害による損傷度の診断を行い、RC床版の健全性を評価した。試験体には、疲労損傷や塩害を受け、補修・補強を施しながら47年間供用された実橋RC床版を用いた。

2. 塩害のメカニズム

塩害とは、コンクリート中に侵入した塩化物イオンが鋼材に作用して不動態皮膜を破壊し、酸素と水の供給によって腐食した鋼材の膨張圧によってひび割れが発生することをいう。図-1に塩害による劣化過程¹⁾を示す。コンクリート中に塩化物イオンが侵入する要因としては、材料への混入、海岸部における飛来塩分に加え、近年では凍結防止剤の散布による混入が顕在化している。本論文では、海岸部における飛来塩分を対象としている。

また、飛来塩分による塩害の変状グレード²⁾を表-1に示す。

3. 塩化物イオン濃度の浸透予測

3.1 フィックの拡散方程式

コンクリート中への塩化物イオン濃度の浸透予測には、一般にフィックの拡散方程式(フィックの第2法則)が用いられている。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。ここで、塩化物イオンの拡散方程式を式(1)に示す。

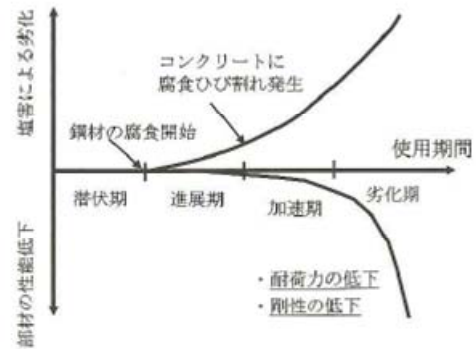


図-1 塩害による劣化過程¹⁾

表-1 飛来塩分による塩害の変状グレード²⁾

健全度	変状グレード	劣化の状態	
潜伏期	I	・外観上の変状が見られない ・塩化物イオン濃度発生限界値以下	
進展期	II	・乾燥収縮以外の微細なひび割れが見られる ・塩化物イオン濃度発生限界値以上	
加速期	III	・鉄筋に沿ったひび割れ発生 ・局部的なはく離剥落が小範囲で見られる	
	IV	・鉄筋に沿ったひび割れ発生 ・部分的なはく離剥落が見られる	
劣化期	V	・腐食ひび割れが多数発生 ・ひび割れ幅が大きい、錆汁が見られる ・はく離・はく落が見られる、変位・たわみが大きい	

Deterioration diagnosis of a concrete structure

by

Makiko TAKANO and Tadashi ABE

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \left\{ C_o \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C_i \right\} \quad (1)$$

ただし、

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (1.1)$$

$$C_o = 1.2 C_{air}^{0.6} \quad (1.2)$$

ここに $C(x, t)$: 深さ x (cm), t : 供用年数における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_o : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)¹⁾, C_{air} : 飛来塩分量 ($= C_1 \cdot d \cdot 0.6$ ($\text{mg}/\text{dm}/\text{day}$))³⁾, C_1 : 1km 換算飛来塩分量 ($= 0.935 \text{mg}/\text{dm}/\text{day}$), d : 離岸距離, γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数 ($= 1.0$), erf : 誤差関数, x : コンクリート表面からの距離 (cm), D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), W/C : 水セメント比, t : 時間 (年), C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 ($= 0.3 \text{kg}/\text{m}^3$)

3.2 表面における塩化物イオン濃度

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における表面からの深さと塩化物イオン濃度の一例を示す。当該構造物は、供用後約40年経過しており、常時飛来塩分を被る厳しい塩害環境下にある。汀線部の代表5径間の表面からの深さと塩化物イオン濃度の関係を図-2に示す。5径間ともに表面の塩化物イオン濃度値は大きく、表面から80mmを超えた付近で初期含有塩化物イオン濃度程度に収束している。また、表面から鉄筋かぶり位置付近までの塩化物イオン濃度はばらつく傾向にあり、4径間は理論値を大幅に上回っている。

よって、理論値を算出する際には、表面における塩化物イオン濃度を汀線からの距離の変数として理論値を算出する必要があると考える。ここで、海岸からの距離による表面の塩化物イオン濃度¹⁾を表-2に示す。

4. 対象橋梁の概要

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である。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

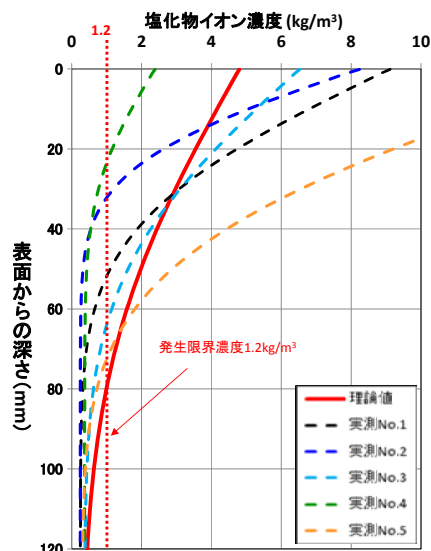


図-2 表面からの深さと塩化物イオン濃度の関係

表-2 海岸からの距離による表面の塩化物イオン濃度¹⁾

表面の塩化物イオン濃度	海岸からの距離(km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
C_o	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

表-3 旧銚子大橋の補修・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

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-3に示す。

5. 塩化物浸透量調査

5.1 ドリル法による資料採取

ドリル法による塩化物含有量試験用試料の採取は、中性化試験の削孔穴を利用して行う。

試料採取には、φ20mmのドリルを使用し、未中性化領域表面から0～20mm, 20～40mm, 40～60mm, 60～80mm, 80mm～100mmの5深度において採取（1試料あたり約50g以上：4孔以上必要）する。

削孔穴それぞれより採取した試料を表面からの深度ごとに混合し、その部位の代表試料とし、塩化物含有試験⁴⁾を実施する。図-2に示す深さ方向の塩化物イオン濃度はこの方法による結果である。

5.2 コア採取による調査

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、EPMA⁵⁾）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⁶⁾。

採取箇所は、1982～1985年にSFRC上面増厚補強後24年間供用された床版（コアNo.1）および1982～1985年にSFRC上面増厚補強、2007年に部分的に打換えされた床版（コアNo.2）の2箇所とした。

6. 調査結果

6.1 EPMA 診断結果

旧銚子大橋のRC床版のEPMA診断による塩化物イオン濃度の結果を図-3、図-4に示す。図-3よりコアNo.1は、上面から5mmの塩化物イオン濃度は 6.2kg/m^3 であり、SFRC表層部での塩化物イオン濃度は高い。また、上面から20mm付近では 0.32kg/m^3 、上面から70mmの増厚界面付近では 1.0kg/m^3 程度であり、上面からの塩分の浸透は比較的少ない。一方、上面から100mmのRC床版部の圧縮鉄筋付近では 1.3kg/m^3 、上面から190mmの引張鉄筋付近では 3.6kg/m^3 が検出され、既存RC床版部の塩化物イオン濃度はいずれも鋼材腐食発錆限界濃度の 1.2kg/m^3 を超えている。次に、図-4よりコアNo.2は、上面から0～40mmのSFRC増厚層においては塩化物イオン濃度が高い。また、上面から80mmの増厚界面付近では 2.4kg/m^3 であり、鋼材腐食発錆限界濃度を超えている。しかし、上面から100mmの圧縮鉄筋付近では 0.7kg/m^3 、上面から190mmの引張鉄筋付近では発錆限界程度である。以上、EPMAによる塩化物イオン濃度分析結果から、旧銚子大橋は汀線部から平均距離1,500m離れているにも関わらず、RC床版部においては全体的に塩化物イオン濃度が高い傾向を示した。

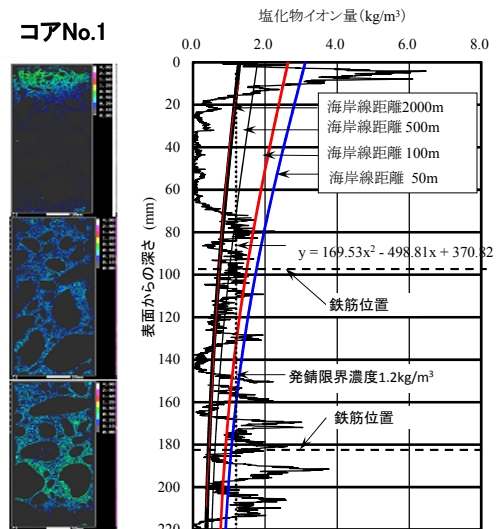


図-3 EPMA 診断による塩化物イオン濃度（コアNo.1）

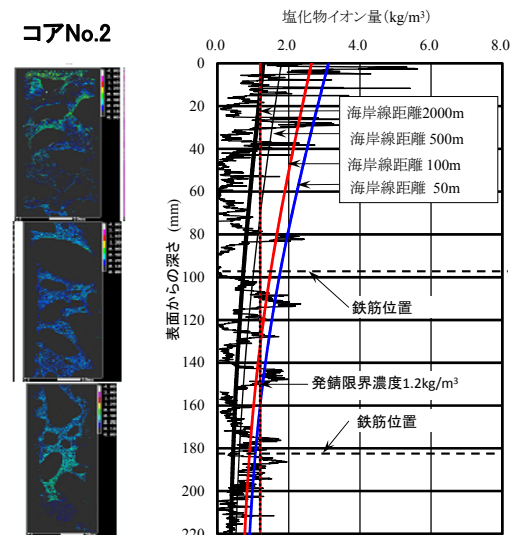


図-4 EPMA 診断による塩化物イオン濃度（コアNo.2）

6.2 汀線からの距離と塩化物イオン濃度

3.2項に示したとおり、表面における塩化物イオン濃度はばらつく傾向にあり、また、表面の塩化物イオン濃度は海岸からの距離によって異なることとされている。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, 100m, 500mを変数とした理論塩化物イオン濃度を算出し、図-3、図-4に併記した。

EPMA診断とフィックの拡散方程式(1)の塩化物イオン濃度を比較すると、コアNo.1では、海岸汀線部から橋梁位置までの距離を500mとした場合は、圧縮鉄筋位置での塩化物イオン濃度は鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 を下回

っている。それに対して、EPMA診断では部分的に鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 を上回る。とくに下面側60mmの領域で大幅に上回り、その付近の鉄筋で発錆が確認された。

次に、コアNo.2では、海岸汀線部から橋梁位置までの距離を500mとした場合は、圧縮鉄筋位置での塩化物イオン濃度は鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 を下回っている。EPMA診断においては、圧縮鉄筋位置前後で部分的に鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 を上回る傾向となる。

コアNo.1, No.2ともにEPMA診断による平均値とフィックの拡散方程式(1)による圧縮鉄筋付近の塩化物イオン濃度が近似する距離は100mとなった。

よって、EPMA診断とフィックの拡散方程式(1)による塩化物イオン濃度の算出結果には差異が生じる結果となる。

6.3 塩化物イオン濃度の経年予測

旧銚子大橋RC床版を対象とし、式(1)に示す拡散方程式の解を用いた回帰分析によりコンクリート表面の塩化物イオン濃度(C_0)および塩化物イオンの見かけの拡散係数(D)を算定し、想定する耐用年数時点の塩化物イオンの浸透予測を行った。ここで、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、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。また、耐用年数は、供用開始から100年後までの塩化物イオン濃度の経年予測を行った。供用開始から100年後までの塩化物イオン濃度の経年予測を図-5に示す。

図-5より、海岸汀線部から距離500mを超えると塩化物イオン濃度の浸透量が急激に多くなる。海岸汀線部から橋梁までの距離を50mと仮定した場合は18.1年、100mとした場合は27年、500mとした場合は90年で鉄筋腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 を越えると推定される。旧銚子大橋は、供用後47年が経過しており、この時点での圧縮鉄筋位置での塩化物イオン濃度は約 1.5kg/m^3 となり、海岸汀線部から距離100mでの塩化物イオン濃度が近似している。

7. まとめ

海岸汀線部から平均1,500mに立地する旧銚子大橋のRC床版を試験体とし、塩害による劣化状況を調査した結果、以下の結果が得られた。(1) EPMA診断により得られた塩化物イオン濃度とフィックの拡散方程式より得られる理論値とは差異が生じる。また、圧縮鉄筋付近の塩化物イオン濃度が近似する距離は、海岸汀線部から100mである。

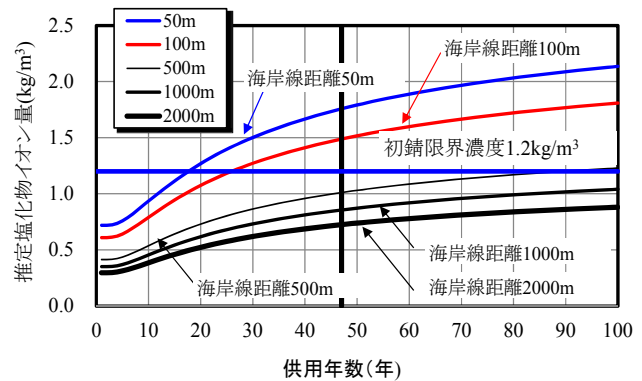


図-5 塩化物イオン濃度の経年予測

(2) 塩化物イオン濃度の経年予測は、海岸汀線部から距離500mを超えると塩化物イオン濃度の浸透量が急激に多くなる。供用後47年が経過した旧銚子大橋の圧縮鉄筋位置での塩化物イオン濃度は、海岸汀線部から距離100mで近似している。

以上の結果より、塩害における劣化判断は、対象構造物の部位、設置環境、重要性によっても異なることから、実測による結果を参考に定めるべきである。また、実構造物における塩化物イオンの浸透は、浸せき時間、構造体の形状、浸透方向、コンクリートの材料特性などの多くの条件が影響を及ぼすことから、拡散方程式の理論式により塩化物イオンの浸透予測を行う手法では、求めた塩化物イオン浸透予測結果の適応条件は限定的なものにならざるを得ない。本検討においても、劣化診断による塩化物イオン濃度と理論式による劣化予測では差異が生じていることから、橋梁建設地域の塩害に対する環境条件やコンクリート材料自体の品質や劣化を考慮した特性を適切に調査し反映する必要があると考える。

「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 (2007)
- 2) NEXCO 中日本 保全点検要領 (構造物編) 補足資料 (2014)
- 3) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料 第711号 (平成24年)
- 4) 硬化コンクリート中の全塩化物イオン濃度の迅速推定法 中日本高速道路(株) (2009)
- 5) 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
- 6) 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)