

# 塩害を受けた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) 正会員 ○高野 真希子  
日大生産工 正会員 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。

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、塩害影響地域に建設されたコンクリート橋の適切な塩害状況診断・劣化予測を行うとともに、実態に即した健全度の評価を行うこと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から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、塩害影響地域に建設された旧銚子大橋の 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、適切な塩化物イオン濃度の推定、劣化予測方法を検討する。

## 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

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  $1.2\text{kg/m}^3$  に達した時点で、加速期へ移行するものと仮定している<sup>1)</sup>。

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

$$\text{ただし、} \quad \text{Log}_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (1.1)$$

ここに、 $C_d$ ：鋼材位置における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $\gamma_{cl}$ ：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 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $c_d$ ：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 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_i$ ：初期含有塩化物イオン濃度 (=  $0.3\text{kg/m}^3$ )、 $W/C$ ：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

表-1 離岸距離と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	1.5	2
表面の塩化物イオン濃度	4.50	2.50	2.00	1.50	1.00	0.46	0.24

イオン濃度に着目した検討を行う。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<sup>1)</sup>。ここで、海岸線からの距離に応じた表面の塩化物イオン濃度を表-1に示す。

### 2.3 維持管理における問題点

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。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表-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影響を受けている。このような原因から理論式と実測値の評価・予測に相違が生じていると考えられる。

### 3. 調査対象橋梁の概要

飛来塩分による塩害橋梁の一例として、疲労損傷や塩害を受け、補修・補強をしながら47年間供用された旧銚子大橋の RC 床版を用いた。旧銚子大橋の立地は、銚子川の河口から1.5~2.0kmである。床版下面には表面被覆による塩害対策が施されている。また、RC 床版の上面には耐荷力性能および疲労性能の向上を目的とした SFRC 上面増厚補強 (70mm~80mm) が施されている。

### 4. 塩化物浸透量調査

#### 4.1 EPMA 診断

本研究では、コアを採取 ( $\phi 45 \times 230\text{mm}$ ) し、電子線マイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer: 以下、EPMA<sup>2), 3)</sup>) の面分析による塩化物浸透量調査を行った。

#### 4.2 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分布を図-1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  $1.9\text{kg/m}^3$ 、最大量は  $5.0\text{kg/m}^3$  を超える。圧縮鉄筋位置では  $2.32\text{kg/m}^3$ 、引張鉄筋位置では  $1.0\text{kg/m}^3$  である。下面側の塩化物イ

キーワード：道路橋 RC 床版、塩害、飛来塩分、フィックの拡散方程式、劣化予測

連絡先 〒160-0023 新宿区西新宿 1-23-7 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) TEL 03-5339-1721 FAX 03-5339-1729

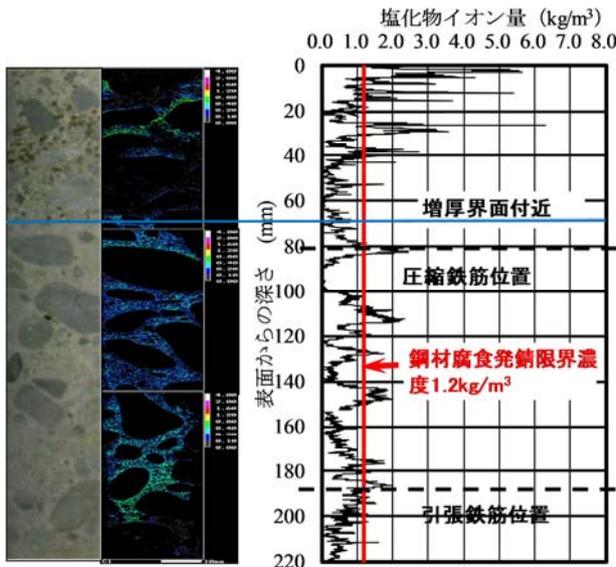


図-1 EPMA 診断による塩化物イオン濃度

オン濃度が比較的低い理由は、下面に施された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られる。

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 1.5~2.0km の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過しており、RC 床版部の塩化物イオン濃度は高い傾向を示した。

4.3 汀線からの距離と塩化物イオン濃度

表-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 1.5~2.0km に対する表面濃度は 0.46 kg/m³ である。一方、実測の表面濃度は平均で 2.2 kg/m³ (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、表面の実測塩化物イオン濃度を基準として理論式の補正を行った。また、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、図-2 に示した。

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、旧銚子大橋は離岸距離 1.5~2.0km 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結果となった。

4.4 塩化物イオン濃度の経年予測

式(1)に示す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。塩化物イオン濃度の経年予測を図-3 に示す。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

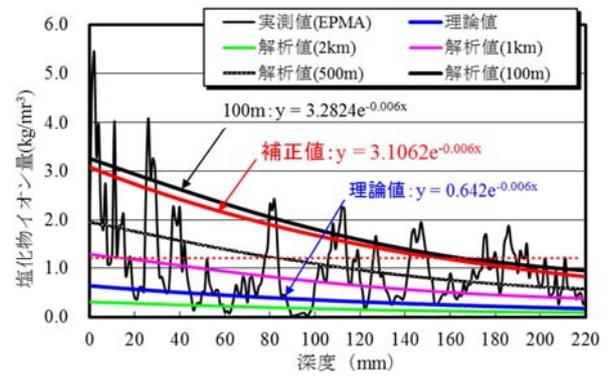


図-2 理論塩化物イオン濃度

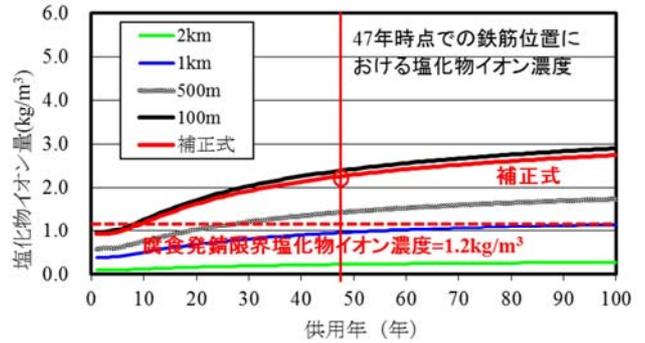


図-3 塩化物イオン濃度の経年予測

える。現時点測定年(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/m³ と推定され、補正式の 2.25kg/m³ と近似する。また、実測値 2.32 kg/m³ 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ており、経年予測にも大きな影響を与えている。よって、橋梁点検においてコア採取による EPMA 試験、或いは粉体採取による現状の塩化物イオン濃度を評価し、調査結果により理論式の補正を行った塩化物イオン濃度を算出することで実測に沿った経年予測が可能となるものと考えられる。

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。本対象橋梁では、表面の濃度に着目したが、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、RC 床版の維持管理においては、定期点検による塩害調査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)