

コンクリート構造物の塩害劣化予測モデル

香川大学工学部 学生会員 ○松崎 康晴
 香川大学工学部 正会員 松島 学
 (株)四国総合研究所 正会員 横田 優
 (株)四国総合研究所 正会員 中川 裕之

1. はじめに

コンクリート構造物が塩害によって劣化することはよく知られている。最適な維持管理対策を行い、コンクリート構造物の性能を維持するためには、劣化予測が非常に重要な役割を担っている。

2. 塩害劣化モデル

塩害による劣化の進行過程は、鉄筋の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れ発生までの進展期、腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増大する加速期、鋼材の大幅な断面減少などにより耐荷力等の性能が大幅に低下する劣化期という四つの期間に区分される。本研究では各劣化期間を次に示すよう劣化期を除いた三つの期間にモデル化した。

(1) 潜伏期

潜伏期は塩化物イオンの拡散と初期含有塩化物イオン濃度が期間を決定する。外部から一定の塩化物イオン量が連続して浸透すると仮定し、式(1)を Fick の拡散方程式より求めた。

$$C(X,t) = C + W \cdot \left[2 \sqrt{\frac{t}{\pi D}} \cdot \exp\left(-\frac{X^2}{4Dt}\right) - \frac{X}{D} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}}\right) \right\} \right] \quad (1)$$

ここに、 $C(X,t)$:コンクリート表面から深さ $X(\text{cm})$ 、経過時間 $t(\text{sec})$ における塩化物イオン濃度 (kg/m^3) 、 C :初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3) 、 W :付着塩分量 $(\text{kg}/\text{cm}^2/\text{sec})$ 、 D :塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/sec) 、 erf :誤差関数である。潜伏期の終了時は、かぶり位置での塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{cr} に達したときであり、本研究では室内試験の結果を参考に $C_{cr}=2.5\text{kg}/\text{m}^3$ と設定した。

(2) 進展期

進展期は、現場で計測できる項目から鉄筋の腐食速度 $R(T,C,D)$ を推定する非線形回帰式を用いた。

$$R(T,C,D) = R(T,C) \cdot C_D(D) \quad (2)$$

ここで、 $R(T,C)$:温度とかぶり位置での塩化物イオン濃度の関数であり、 $R_0(T,C) < 10\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ の時、 $R(T,C) = 2 \cdot R_0(T,C)$ 、 $R_0(T,C) \geq 10\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ の時、 $R(T,C) = R_0(T,C) + 9.6$ である。ここで、 $R_0(T,C) = 22.6 \cdot C_T(T) \cdot C_C(C)$ である。 $C_T(T)$ 、 $C_C(C)$ は、外気温 T 、かぶり位置での塩化物イオン濃度 C の影響を考慮する式であり、式(3)、(4)で求められる。

$$C_T(T) = \frac{1}{1 + e^{-0.21T + 4.35}} + 0.28 \quad (3)$$

$$C_C(C) = 1.6 \cdot \sqrt{1 - \frac{(C - 11.2)^2}{(11.2 - C_{cr})^2}} \quad (4)$$

ここに、 T :外気温 $(^\circ\text{C})$ 、 C :かぶり位置での塩化物イオン濃度 (kg/m^3) である。 C が C_{cr} に達したとき鉄筋は腐食開始とし、 $C \leq C_{cr}$ の時 $C_C(C) = 0$ とした。コンクリートの品質 $C_D(D)$ は、見かけの拡散係数を指標として評価する。 $C_D(D)$ は、既往の飛沫帯での研究成果を参考に経過年数 t 年で得られた見かけの拡散係数 D_t を経過年数5年時点での拡散係数に換算した値 D_5 を用いて、式(5)、(6)で求められる。

$$C_D(D) = 0.127 \times 10^8 \times D_5 - 0.128 \quad (5)$$

$$D_5 = D_t \left(\frac{0.419}{t^{-0.54}} \right) \quad (6)$$

ここに、 t :調査時点での経過年数(年)、 D_t :経過年数 t 年時点での塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/sec) 、 D_5 :経過年数5年時点での見かけの拡散係数換算値 (cm^2/sec) である。進展期の終了時は、

腐食ひび割れ発生時であり，その時の限界腐食量 M_{cr} はかぶりと鉄筋径の関数とし，式(7)で求められる。

$$M_{cr} = 44.2(C_d/\phi)^{0.721} \quad (7)$$

ここに， C_d :かぶり(mm)， ϕ :鉄筋径(mm)である。

(3) 加速期以降

加速期は，腐食ひび割れ発生し，割れ目から鋼材の腐食を促進する塩化物イオンや酸素の侵入が増加するため腐食速度が増大する。加速期の腐食速度は常に進展期で求めた腐食速度の 3.7 倍とした。

3. 既存構造物との比較

(1) 調査対象構造物

対象構造物は，高度成長期に建設され，30年間供用されたRC栈橋上部工の床版を対象とし，劣化予測を行った。栈橋のように乾燥と湿潤が繰り返される場所では多く塩化物イオンが供給されるため，非常に厳しい塩害環境にあるといえる。対象構造物を図1に示す。図中には，計算の対象とした部位の位置も示す。計算に用いた対象構造物の材料特性を表1に示す。コンクリートの品質は， $t=5$ 年時の拡散係数 $4.23 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ を用いた。

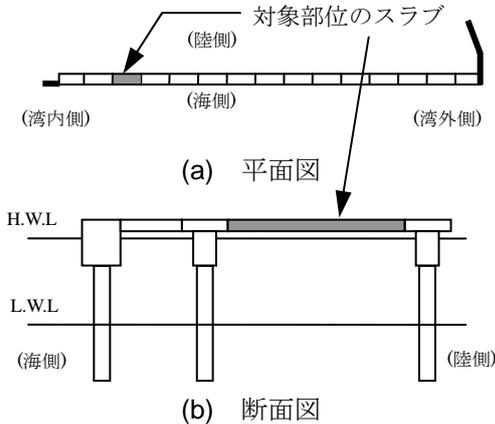


図1 対象構造物

(2) 予測結果

本劣化予測モデルにより計算された鉄筋の腐食量と実測値の関係を図2に，腐食速度の比較を図3に示す。計算で，腐食が開始するのは，供用開始から15年後であり，腐食ひび割れが発生するのは，供用開始から27年後である。予測モデルで推定された腐食速度は，分極抵抗から求めら

れた値よりかなり大きな値をとる。予測モデルで，30年後では加速期に構造物は進展しており，腐食速度が急激に大きくなったことに起因していると考えた。対象構造物は，ひび割れが発生し，錆汁なども見られ，加速期に属すると判断できるが，鉄筋の腐食量は考えていたよりも小さかった。そのために，若干計算値よりも実測値が小さくなったと考えられる。

表1 予測計算に用いた情報

栈橋(供用年数)		C(30)
鉄筋径		D13
かぶり(cm)	平均	4.4
鉄筋腐食量実測値 断面減少率 (%)	最大	17.2
	最小	3.2
	平均	4.3
見かけの拡散係数 $D_t (\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec})$		1.61
付着塩分量 $W (\times 10^{-9} \text{wt}\%/\text{cm}^2 \text{sec})$		2.08
初期含有塩化物イオン濃度		3.8
外気温($^{\circ}\text{C}$)		16.2

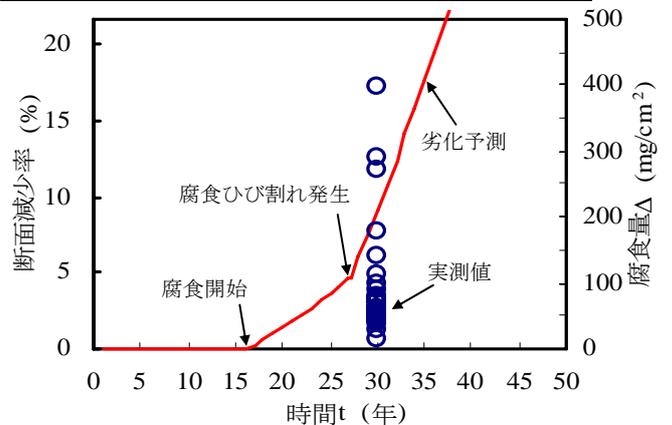


図2 劣化予測の結果

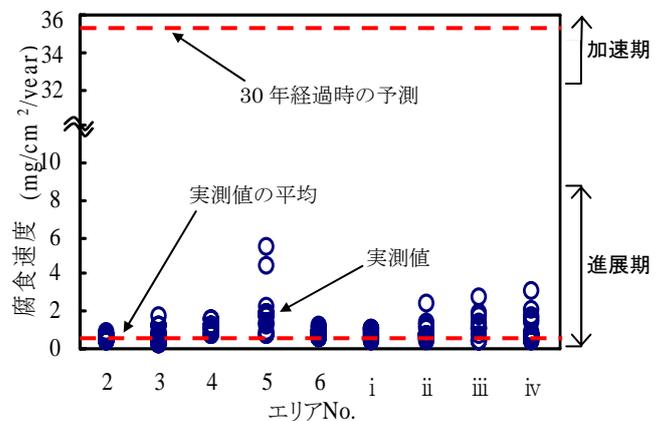


図3 腐食速度の比較