

外部塩害を受ける鉄筋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
備四国総合研究所	正会員	横田 優
備四国総合研究所	正会員	中川 裕之

1. 塩害劣化モデル

実構造物に生じる不確実性を考慮した劣化予測モデルの構築を行い、海岸部の実構造物を対象に予測モデルを適用した。塩害による劣化の進行過程は、潜伏期、進展期、加速期の三つの期間にモデル化した。確率論的手法に基づいて、腐食発生限界塩化物イオン濃度、かぶり、拡散係数は平均値と標準偏差から乱数を発生させ不確実性を再現した。

(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。

$$C^*(X^*, t) = C_0 + W \left[2 \sqrt{\frac{t}{\pi D^*}} \exp \left(-\frac{X^{*2}}{4 D^* t} \right) - \frac{X^*}{D^*} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X^*}{2 \sqrt{D^* t}} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 $C^*(X^*, t)$: コンクリート表面から深さ X^* (cm)、経過時間 t (sec) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 W : 付着塩分量 ($\text{kg/cm}^2/\text{sec}$)、 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}^* に達したときとした。ここで、*印は確率変数を意味する。

(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定義した。

$$R^*(T, C^*, D^*) = R^*(T, C^*) \cdot C_{cr}^*(D^*) \quad (2)$$

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影響関数であり、 $R_0^*(T, C^*) <$

$10 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ の時、 $R^*(T, C^*) = 2 \cdot R_0^*(T, C^*)$ 、 $R_0^*(T, C^*) \geq 10 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ 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 の影響関数であり、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の影響関数 $C_D^*(D^*)$ 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 (year)、 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。

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

ここに、 X^* :かぶり(mm)、 ϕ :鉄筋径(mm)である。

(3) 加速期以降

晴天時などひび割れ部に水分が供給されない場合の腐食速度は進展期と同じ値を用いた。ただし、満潮時や荒天時に海水と接するような部位は、進展期で求めた腐食速度の 3.7 倍とした。これらを年間の降雨日数の割合と腐食速度の積を用いることで再現した。

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返し起こ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。計算に用いた条件、対象構造物の材料特性を表 1 に示す。

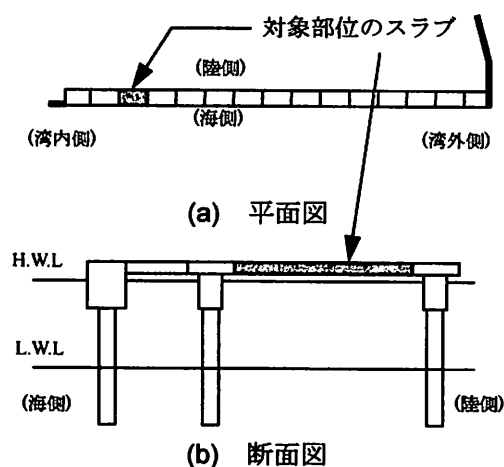


図 1 対象構造物

(2) 予測結果

本劣化予測モデルにより計算された鉄筋に腐食量と経過年数の関係を図 2 に示す。同図に、対象構造物から求められた鉄筋の腐食量の平均値とその値から土標準偏差の値も示す。さらに、対象構造物から得られた実測値を○印で示す。実測値は、平均値±標準偏差の範囲内に 80%が入り、十分な推定精度を有していることがわかる。鉄筋

の腐食量の予測値と実測値の分布を図 3 に示す。予測値の平均値は、5.0%であり、実測値の 4.4%より若干大きい値を示すが、両分布とも 0~20%の範囲にばらつき、分布形状も対数正規分布近似が当てはまるなどよく似ている。このように、実測値と予測値は、各因子の不確実性を考慮することでよりよい予測が可能であると考えられる。

表 1 予測計算に用いた値

拡散係数 $D^*(\text{cm}^2/\text{sec})$	平均	0.1608×10^{-7}
	標準偏差	0.6432×10^{-8}
かぶり $X^*(\text{cm})$	平均	4.4
	標準偏差	1.0
腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{cr}^*(\text{kg}/\text{m}^3)$	平均	3.1
	標準偏差	1.3
初期含有塩分量 $C^*(\%)$		0.038
付着塩分量 $W((\text{wt}\%/\text{cm}^2)/\text{s})$		0.2083×10^{-8}
年平均気温 $T(^{\circ}\text{C})$		16.2
鉄筋径 $\phi(\text{mm})$		13.0
1 年間の雨の日の比率 R_D		0.305
供用年数 $T(\text{年})$		30

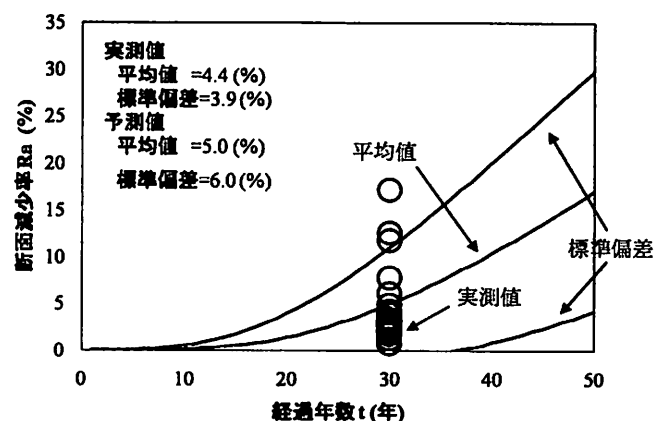


図 2 劣化予測と実測値

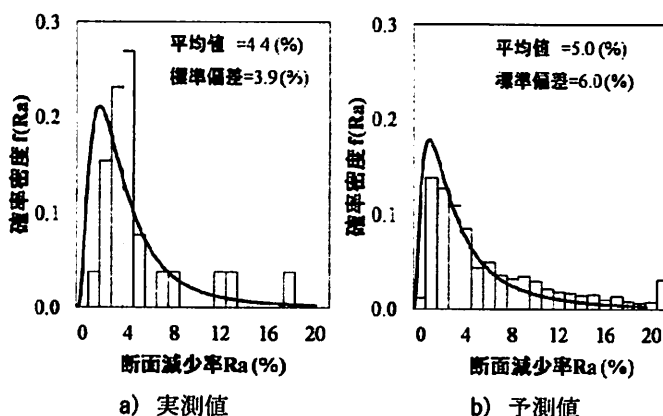


図 3 断面減少率の分布比較 (t=30 年)