

外部塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の劣化予測手法の開発

香川大学大学院	学生会員	○中元 浩富
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 裕介

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、鉄筋腐食や発生したひび割れ、剥離・剥落により構造物の性能が低下する現象である。最適な維持管理を行い既存構造物の長寿命化を図るために塩害劣化予測は必須である。著者らは、今までに、塩害による劣化の進行過程を、潜伏期、進展期、加速期の三つの期間にモデル化し、予測を行っている。この予測モデルの再構築を行うことで、予測精度を向上させるとともに確率論的なアプローチを使い、実構造物に生じる不確実性も再現している。

2. 拡散係数の時間依存性モデル

既往の実験により拡散係数は時間の経過とともに指数的に小さくなることがわかっている。特に供用開始から 10 年経過時点の範囲で指数的に小さくなる。本研究では、基準年を 5 年として拡散係数を式(1)により求めた。

$$D_c(t) = \left(\frac{t_{cr}}{t} \right)^m \cdot D_5 \quad (1)$$

ここで、 t_{cr} :基準となる年数、 D_5 :経過年数 5 年での拡散係数、 t :経過年数、 m :指数関数の係数で、既往の実験から 0.54 とした。

3. 限界塩化物イオン濃度のコンクリートの品質依存性モデル

今まで、腐食発生限界塩化物イオン濃度は室内試験結果を用い、配合等に関係なく一律としていた。鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{cr} は、コンクリート中に浸透した塩化物イオンがセメント中和物へ固形化される程度により決まると考えられ、配合に依存する。既往の実験結果から拡散係数 D_c と水セメント比 W/C の関係を式(2)で、水セメント比と限界塩化物イオン濃度 C_{cr} の関係を式(3)で構築した。

$$W/C = 0.5 \cdot \left(\frac{D_c}{1.0 \times 10^{-8}} \right)^{0.15} \quad (2)$$

$$C_{cr} = 3.7 \cdot (1.0 - 9.87(W/C - 0.45)^2) \quad (3)$$

ここで、 W/C :水セメント比、 D_c :拡散係数(cm^2/sec)、 C_{cr} :腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m^3)とした。

4. 鉄筋の腐食速度モデル

鉄筋の腐食速度は、コンクリート内部の温度、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度、コンクリートの品質に依存するとし、以降の腐食速度式を提案している。

(1) 温度と塩化物イオンによる影響

既往の実験結果よりコンクリート温度と腐食速度および塩化物イオン濃度と腐食速度の関係を求めた。コンクリート温度と塩化物イオン濃度を考慮した腐食速度を算定式(4)のように定義した。

$$R_0(T, C) = R_0 \cdot C_T(T) \cdot C_c(C) \quad (4)$$

ここで、 R_0 :基準となる腐食速度($=21.33\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)、 $C_T(T)$:温度の影響関数、 $C_c(C)$:塩化物イオン濃度の影響関数である。 $C_T(T)$ 、 $C_c(C)$ は式(5)、(6)より求められる。

$$C_T(T) = \exp\{-2.593 \cdot (1000 \cdot 1/K) + 8.695\} \quad (5)$$

$$C_c(C) = 1.93 \sqrt{1 - \frac{(C - 12.0)^2}{(12.0 - C_{cr})^2}} \quad (6)$$

ここで、 K :温度($=T+273.15$)、 C :塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_{cr} :限界塩化物イオン濃度(kg/m^3)である。結局、予測誤差を考慮し、鉄筋の腐食速度は式(7)のように求められる。

$$R(T, C) = 0.27 \cdot R_0(T, C)^{1.38} \quad (7)$$

(2) コンクリートの品質による影響

コンクリートの品質による腐食速度への影響

を塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数で補正する方法を検討した。温度と塩化物イオンの影響を考慮した腐食速度 $R(T,C)$ にコンクリートの品質の影響 $C_D(D)$ を考慮した腐食速度を式(8)とした。
 $R(T,C,D) = R_0 \cdot C_T(T) \cdot C_c(C) \cdot C_D(D)$ (8)
 コンクリートの品質の影響 $C_D(D)$ は式(9)より求められる。

$$C_D(D) = 0.1129 \cdot D_5 \tag{9}$$

$$D_5 = \left(D_t \cdot \frac{0.419}{t^{-0.54}} \right) \tag{10}$$

ここで、 t :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 年時点での塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm^2/sec)である。

(3) ひび割れ発生後の腐食速度

既往の実験のひび割れ発生後に測定した分極抵抗から求めた腐食速度は塩化物イオン濃度と温度から推定した腐食速度より 3.9 倍程大きいことから、腐食ひび割れ発生後の加速期の腐食速度は、進展期の腐食速度の 3.9 倍とした。

5. 再構築した予測モデルの検証

(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、劣化予測モデル検証を行った。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。計算に用いた条件、対象構造物の材料特性を表 1 に示す。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。

(2) 検証結果

本劣化予測モデルにより計算された鉄筋の断面減少率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断面減少率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、予測値の平均値±標準偏差の範囲内に 80%が存在し、十分な推定精度を有していることがわかる。

本研究では、拡散係数の時間依存モデル、腐食発生限界塩化物イオン濃度のコンクリートの品質依存モデル、鉄筋の腐食速度モデルを構築することができた。実構造物を用いて劣化予測モデルの検証を行った結果、鉄筋の腐食状態を精度よく再現することができた。

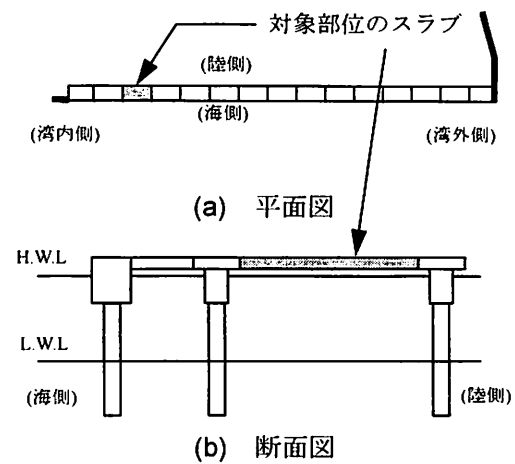


図 1 対象構造物

表 1 予測計算に用いた値

確定値	鉄筋径	D13
	初期含有塩分量	0.3800×10^{-1} (%)
	付着塩分量	0.2083×10^{-8}
	年平均気温	16.2 (°C)
確率因子	雨の日の割合	30.5 (%)
	拡散係数	平均 0.1608×10^{-7} (cm^2/sec)
		標準偏差 0.6432×10^{-8} (cm^2/sec)
	かぶり	平均 4.4(cm)
		標準偏差 1.0(cm)

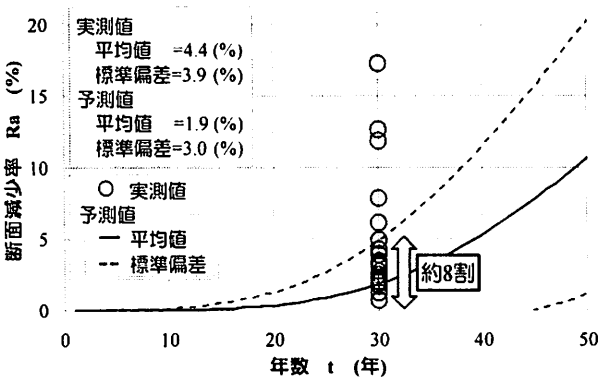


図 2 断面減少率の予測値と実測値