

塩害を受ける RC 構造物の分極抵抗測定値に基づく鉄筋腐食進行予測法の提案

四国総合研究所 正会員 ○横田 優 四国総合研究所 正会員 松田耕作
香川大学 正会員 松島 学 四電技術コンサルタント 非会員 中村俊夫

1. はじめに

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物を適切に維持管理していくためには、現状の腐食劣化過程を把握するとともに、将来の鉄筋腐食の進行予測を行う必要がある¹⁾。一方、分極抵抗法はコンクリート中にある鉄筋の腐食速度の評価が可能とされている。本報文は、分極抵抗法により測定された鉄筋の腐食速度をもとに、測定時点での腐食量を推定するとともに、将来の鉄筋腐食の進行予測を行う方法を提案するものである。

2. 鉄筋腐食速度評価方法

(1) 鉄筋の腐食速度

塩害を受けるコンクリート構造物中にある鉄筋の腐食速度評価方法については、森永の式²⁾、柘田らの式³⁾、鳥取の式⁴⁾、松村らの式⁵⁾、筆者らの式^{6,7)}が提案されている。いずれもコンクリートの配合や鉄筋位置での塩化物イオン(Cl⁻)濃度、かぶり等を変化させた供試体の促進試験や暴露試験の結果に基づいた実験式である。それぞれの提案式によって評価される鉄筋の腐食速度は異なるが、コンクリートの配合、かぶり位置での Cl⁻濃度の影響を受けることは各提案式に共通する事項であり、温度依存性があることも認識されている。

(2) 筆者らの腐食速度提案式

筆者らの提案している腐食速度推定式を以下に示す。曝露実験の結果⁶⁾をもとに、現場で計測できるコンクリート温度、Cl⁻濃度、コンクリートの品質の3つの項目から腐食速度を推定する式となっている。

$$R(T, C, D) = C_D(D) \cdot R(T, C) \quad (1)$$

ここで、R(T,C,D)：鉄筋の腐食速度 (mg/cm²/年)、C_D(D)：コンクリートの品質による影響関数、R(T,C)：温度とかぶり位置での Cl⁻濃度による影響関数であり、次式で表される。

$$R(T, C) = 0.27 R_0(T, C)^{1.38} \quad (2-1)$$

$$R_0(T, C) = R_0 \cdot C_T(T) \cdot C_C(C) \quad (2-2)$$

ここで、R₀：基準となる腐食速度(=21.33mg/cm²/年)、C_T(T)：コンクリート温度による影響関数、C_C(C)：かぶり位置での Cl⁻濃度による影響関数である。

各項目の影響関数を式(3)～(5)に示す。

・温度による影響関数(アレニウス式)

$$C_T(T) = \exp\{-2.593 \times (1000 \times 1/K) + 8.695\} \quad (3)$$

ここで、K：絶対温度(=T+273.15)、T：摂氏温度(°C)

・塩化物イオン濃度による影響関数

$$C_C(C) = 1.93 \sqrt{1 - \frac{(C - 12.0)^2}{(12.0 - C_{cr})^2}} \quad (4)$$

ここで、C：かぶり位置での Cl⁻濃度(kg/m³)、C_{cr}：腐食発生限界 Cl⁻濃度(kg/m³)

・コンクリートの品質による影響関数

コンクリートの品質を代表する W/C の影響を式(5)のように見かけの拡散係数 D₅ で考慮しており、その見掛けの拡散係数については、時間の経過とともに小さくなるとした式(6)の時間依存モデルを採用した。

$$C_D(D) = 0.1129 \times 10^8 \times D_5 \quad (5)$$

$$D_5 = \left(\frac{t}{5}\right)^m \times D_c(t) \quad (6)$$

ここで、D₅：コンクリートの品質を評価する基準年 5 年での見かけの拡散係数(cm²/sec)、D_c(t)：経過年数 t 年時点で採取したコアの Cl⁻濃度分布から求めた見かけの拡散係数(cm²/sec)、m：係数(=0.54)

・腐食発生限界塩化物イオン濃度：C_{cr}

まず式(7)より拡散係数 D₅ から水セメント比(W/C)を推定し、この W/C を用いて、次式(8-1)または(8-2)より腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{cr} を求める。

$$W/C = 0.5 \times (D_5 / 10^{-8})^{0.15} \quad (7)$$

(W/C が 0.45 以上の時)

$$C_{cr} = 3.7 \times (1.0 - 9.87 \times (W/C - 0.45)^2) - 0.801 \quad (8-1)$$

(W/C が 0.45 未満の時)

$$C_{cr} = 3.7 - 0.801 \approx 2.90 \quad (8-2)$$

・腐食によるひび割れ発生限界腐食量：M_{cr}

$$M_{cr} = 44.22 \times (c/\phi)^{0.7206} \quad (9)$$

ここで、c：かぶり(mm)、φ：鉄筋径(mm)

3. 分極抵抗測定値に基づく鉄筋腐食進行予測法の提案

前掲のように鉄筋の腐食速度はコンクリートの配合、かぶり位置での Cl⁻濃度および温度の影響を受ける。

しかし、調査対象構造物を特定した場合、コンクリートの品質は一定で、鉄筋径やかぶりは既知となる。また、温度は日変動や季節変動繰り返しながら1年間を通じて周期的に変動しており、毎年年平均気温はほぼ一定である。したがって、鉄筋の年平均腐食速度は、かぶり位置での Cl⁻濃度の影響のみを受けて変化するものと考えられる。

一方、分極抵抗法により測定される鉄筋の腐食速度は、調査対象構造物のコンクリートの品質ならびに測

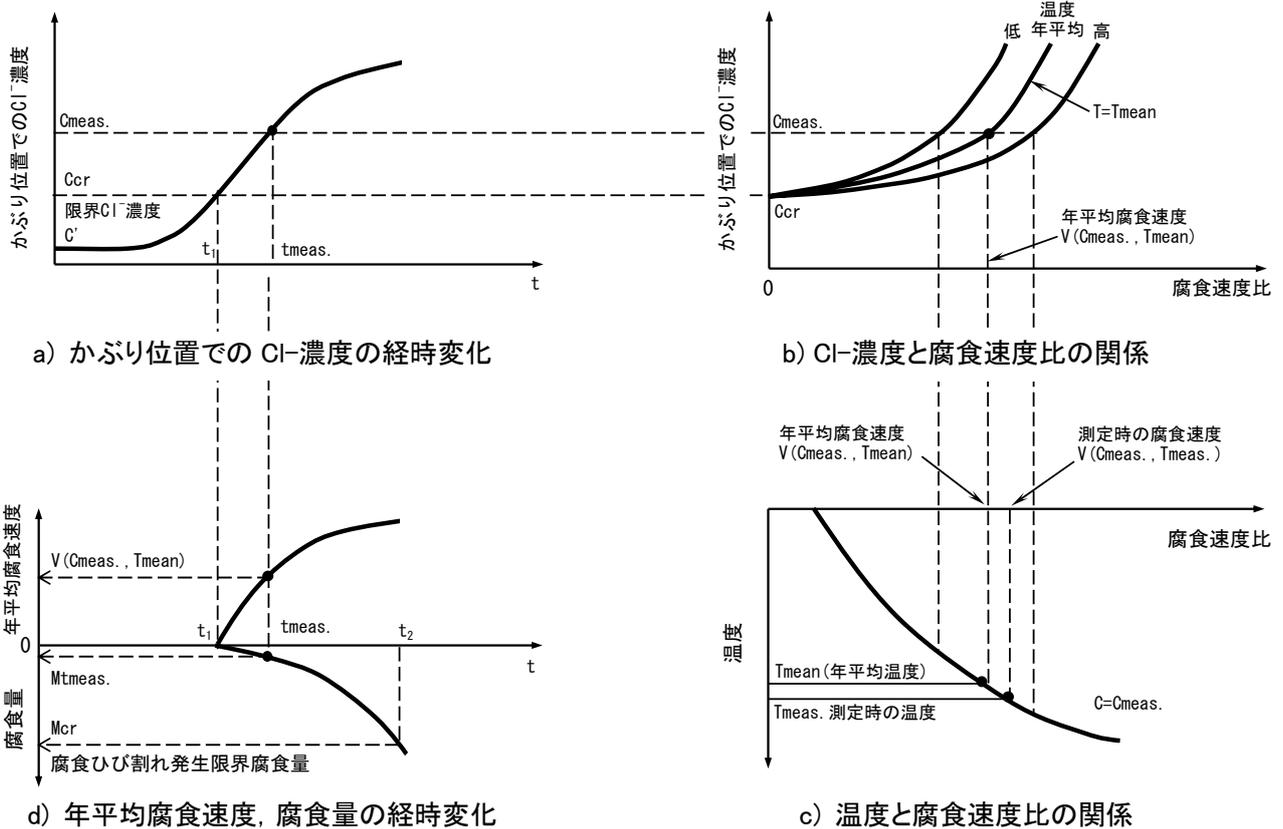


図1 分極抵抗法により得られた腐食速度から年平均腐食速度ならびに腐食量の経時変化を求める方法

定日におけるかぶり位置での Cl 濃度や温度の影響を反映した結果と判断される。

したがって、分極抵抗法により得られた腐食速度測定値をもとに、次のような手順で、測定時ならびに将来の腐食量を予測する方法を考案した。

まず、分極抵抗法により得られた腐食速度測定値を測定日の温度と年平均温度から、式(3)の温度による影響関数式【図 1c)】を用いて温度補正し、測定年での平均腐食速度を求める。

次に、腐食開始後の年平均腐食速度は鉄筋かぶり位置での Cl 濃度に依存する。かぶり位置での Cl 濃度の経時変化は、外部から一定の Cl 量 W が連続して浸透すると仮定した時の Fick の拡散方程式の解である式 (10) を用いて計算する。

$$C(x,t) = W \cdot \left[2\sqrt{\frac{t}{\pi D_c}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D_c t}\right) - \frac{x}{D_c} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right) \right\} \right] + C' \quad (10)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：深さ x (cm)、経過時間 t (sec)における Cl 濃度(wt%)、 C' ：初期混入 Cl 濃度(wt%)、 D_c ：Cl の見かけの拡散係数(cm^2/sec)、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ ：誤差関数、 W ：表面に付着した飛来塩分のうちコンクリート内部へ浸透する量〔付着塩分量〕($\text{wt}\%/\text{cm}^2/\text{sec}$)である。 D_c 、 W および C' は、採取したコアの Cl 濃度分布データを式 (10) の拡散方程式の解に回帰分析して求めた値を採用する。なお、拡散係数 D_c については前掲の式(6)の時間依存モデルを考慮する。

分極抵抗測定時の年平均腐食速度および式 (6) と式 (10) より計算されるかぶり位置での Cl 濃度【図 1a)】

を基準に、式(4)の Cl 濃度による影響関数式【図 1b)】を用いて腐食速度の経時変化を求める。腐食量は年平均腐食速度の時間積分値として求める【図 1d)】。

4. おわりに

今後は、実構造物を対象に本予測手法の妥当性を検証するとともに、腐食ひび割れが発生するまでの期間(進展期における残存期間)の予測の可能性についても併せて検討する予定である。

【参考文献】

- 1)土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，土木学会，pp.185，2001.1.
- 2)森永：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学学位論文，1986.11
- 3)梶田ほか：塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集 12-1，pp.569-574，1990
- 4)鳥取：鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測，京都大学学位論文，2002.2
- 5)松村ほか：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.303-314，1999.11
- 6)横田ほか：曝露試験結果に基づいた外部塩害を受けるコンクリート構造物の鉄筋腐食進行予測法の提案，コンクリート構造物の補修・補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第6巻，pp.67-74，2006.10
- 7)松田ほか：塩害劣化を受ける構造物の劣化モードを推定する確率論的手法の構築，JCOSSAR2011 論文集，pp.440-445，2011.10