

東電設計	正会員	中川貴之
東電設計	正会員	松島 学
東京電力	正会員	堤 知明
東京都立大学	正会員	大賀宏行

1. はじめに

実構造物の塩害劣化は地域的影響が大きく、劣化現象も大きくばらつく場合が多い。このため、室内試験から得られた研究成果から劣化現象を説明するのは困難な場合が多い。本研究は、実構造物の劣化調査に基づき、確率論的手法を用いてデータのばらつきを考慮した鉄筋の腐食速度の推定を行ったものである。

2. 劣化調査

調査対象は、東京湾内に位置する護岸の一部のスラブ構造物である。供用年数は35年である。構造物の設置場所は過酷な塩害環境下であり、当該調査面は、ひびわれ、浮きが目視で明瞭に認められるほど劣化が進んでいた。対象とした構造物に使用されている鉄筋径は、 $\phi 13$ であった。本調査結果では、ひびわれ幅は0.2~1.4mm程度の範囲であり、保守管理規定に記載されている基準値を超えるひびわれ幅も含まれている。また、かぶり厚は4~6cmであり、現在のコンクリート標準示方書に規定されている海岸構造物のかぶり厚さから比較すると小さめの値となっている。測定した鉄筋径を元に単位長さ当たりの表面積と重量減少量の関係から算出した鉄筋腐食量は40~110mg/cm²であった。

3. 鉄筋断面減少率の推定

塩害劣化は、コンクリート表面からの塩化物イオン浸透による鉄筋腐食までの潜伏期、その後の鉄筋腐食膨張によるひびわれ発生までの進展期に分けられる。本研究では、潜伏期の挙動は、式(1)に示すFickの拡散式に従い、この式で求められた鉄筋近傍の塩化物イオン量 $C(X_t, t)$ が限界塩化物イオン量 C_{cr} を超えると鉄筋の腐食が開始すると仮定した。

$$C(X_t, t) = C_0 \left(1.0 - \operatorname{erf} \left(\frac{X_t}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

ここで、 t : 経過時間(sec)、 X_t : 鉄筋かぶり(cm)、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m³)、 D_c : 見掛けの拡散係数(cm²/sec)である。しかしながら、Fickの拡散式の中の各係数は、経過時間 t 、鉄筋かぶり X_t を除くとばらつきを有する値であり、鉄筋腐食も現象は複雑で実構造物における腐食速度は大きなばらつきを持っている。ここでは、鉄筋かぶり X_t および表面塩化物イオン量 C_0 を特性値として与え、 D_c と発錆限界塩化物イオン量 C_{cr} は確率変量として与えた。また、鉄筋の腐食速度も調査データに基づいた確率変量として与えた。

本研究における見掛けの拡散係数および発錆限界塩化物イオン量の統計処理結果を表-1に示す。これらの値を用いると、腐食開始までの経過時間 t_{cr} は式(2)で求められる。

$$t_{cr} = t \quad \text{このとき} \quad C(X_t, t) = C_{cr} \quad (2)$$

鉄筋断面減少率を式(3)のように定義し、図-1に鉄筋断面減少率の分布を示す。

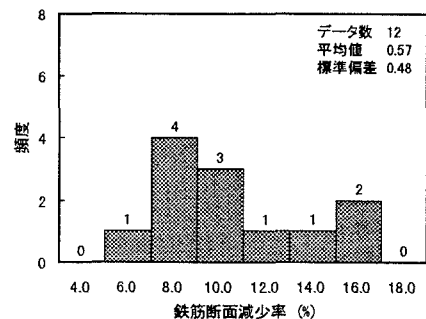


図-1 鉄筋断面減少率の分布

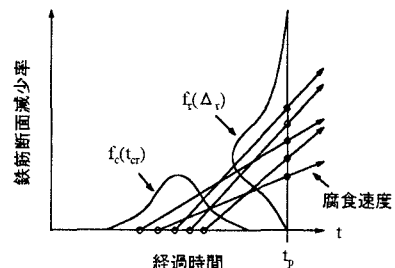


図-2 構造物の経過時間と鉄筋断面減少率の関係

キーワード：塩害劣化、鉄筋腐食、確率論

〒110 東京都台東区東上野 3-3-3 TEL: 03-5818-7605 FAX: 03-5818-7608

表-1 確率変量のばらつき

項目	値	備考
拡散係数 D_e	$\text{LN}(1.73 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}, 1.59 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec})$	東京湾内の海岸構造物の調査[1]
発錆限界塩化物イオン量 C_{cr}	$\text{R}(1.1 \text{kg/m}^3, 0.0115 \text{kg/m}^3)$	室内試験[2]

注) $\text{LN}(,)$: 対数正規分布の平均値、標準偏差を示す。 $\text{R}(,)$: 矩形分布の平均値、標準偏差を示す。

$$\Delta_r = \frac{A_n - A_r}{A_n} \quad (3)$$

ここで、 A_n : 鉄筋の公称断面積(cm^2)、 A_r : 腐食した鉄筋の残存断面積(cm^2)である。

図-1 から、鉄筋断面減少率は対数正規分布を示し、その平均値、標準偏差は式(4)で表される。

$$\Delta_r = \text{LN}(0.096, 0.037) \quad (4)$$

式(4)と式(2)から求められた t_{cr} の関係から、鉄筋の腐食速度 Δ_s は式(5)を用いて計算することができる。ここでは、見掛けの拡散係数 D_e を確率分布として与えているため、発錆限界塩化物イオン量に達する時間 t_{cr} も確率分布で与えられる。図-2 に示すように t_{cr} の分布と現状の鉄筋断面減少率の分布から、鉄筋腐食速度は $f_c(t_{cr})$ と $f_c(\Delta_r)$ の2つの確率分布の任意の点を通る直線の勾配で求められる。 t_{cr} の確率分布および現時点での鉄筋断面減少率の確率分布に対し、それぞれ 10000 個の乱数を発生させて鉄筋腐食速度を求めた。得られた腐食速度も確率変量として取り扱われる。また、これらの直線を延長することにより、竣工 t 年後の鉄筋断面減少率も確率分布で与えられる。

$$\Delta_s = \frac{\Delta_r}{t_0 - t_{cr}} \quad (5)$$

得られた腐食速度を用いて、本調査構造物の竣工後 50 年後の断面減少量を推定した。対象構造物は現在 35 年経過しており、15 年後の断面減少率を推定することになる。表面塩化物イオン量は、対象構造物は常時飛沫を被り、湿気がこもりやすい条件下であることを考慮して、既往東京湾表面塩化物イオン量の調査から 20.0kg/m^3 に設定した。

図-3 に推定された現状の鉄筋腐食速度の分布を示す。腐食速度は概ね $0.3 \sim 1.0\%/yr$ の範囲にある。東京湾内の腐食速度の統計的結果は、 $0.35\%/yr$ であり[1]、鉄筋腐食は現象が複雑で、その速度も非常にばらつくことを考慮すると、今回の調査結果は、ほぼ同程度の値と言え、本検討結果が妥当であることを示していると言える。図-4 に竣工 50 年後の鉄筋断面減少率を示す。鉄筋断面減少率は 21% 程度となり、現状の約 10% からさらに 10% 程度増加する。

5. まとめ

東京湾内に位置する海洋構造物の劣化調査データを本研究で提案した手法に適用した。その結果、塩化物イオンの拡散係数、発錆限界塩化物イオン量および現時点での鉄筋断面減少率を確率変数として与え、鉄筋の腐食速度の分布を推定したところ、 $0.3\%/yr \sim 1.0\%/yr$ 程度となり、既往調査統計的結果である $0.33\%/yr$ と概ね一致した。さらに、その腐食速度の分布を用いて、竣工後 50 年時点における鉄筋の断面減少率の分布が推定できた。

参考文献

- [1] 堤知明、白井伸一、安田登、松島学：塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価、土木学会論文集、No.544(V-32), pp33~41, 1996 年 8 月
- [2] 岸谷孝一、西澤研昭他編：コンクリートの耐久性シリーズ：塩害 (I)、技報堂出版

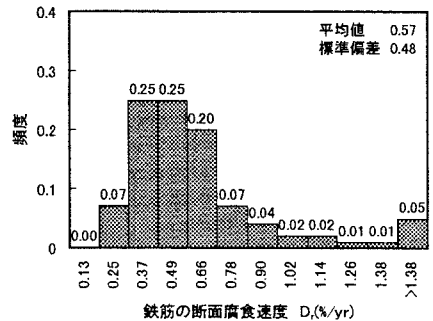


図-3 現状の鉄筋の腐食速度の分布

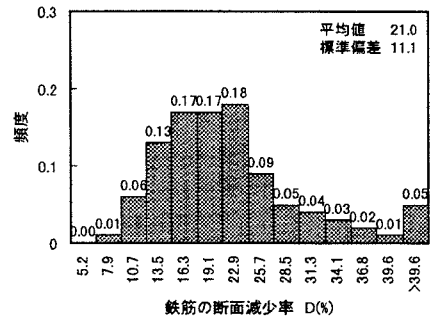


図-4 竣工 50 年後の鉄筋断面減少率の分布