

飛沫帯に位置する RC 部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその妥当性の検証

大阪大学大学院 学生会員 ○木下 真一 正会員 内田 慎哉 正会員 鎌田 敏郎

1. はじめに

本研究では、既往の研究¹⁾に基づき、飛沫帯にある RC スラブを対象として、部材諸元および部材の設置環境条件と、既往の研究や実構造物の調査結果に基づき設定した確率分布およびその統計量から、モンテカルロ法（以降、MCM）により供用年数と曲げ耐力との関係（劣化曲線）を解析的に導出した。さらに、対象とした部材において載荷試験を行い曲げ耐力を実測した既往の研究成果²⁾を用いて、導出した劣化曲線の妥当性についての検証も併せて行った。

2. 飛沫帯にある RC スラブの概要

栈橋にある RC スラブの部材諸元を表-1 に示す。設置環境条件として、スラブ下面のコンクリート表面の塩化物イオン濃度: C_0 (kg/m^3) を次式³⁾により推定した。

$$C_0 = -6.0d + 15.1 \quad (1)$$

ここで、 d : H.W.L. から部材下面までの鉛直距離[0.19(m)]である。式(1)より、 C_0 は $14.0\text{kg}/\text{m}^3$ となる。

3. 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出方法

3.1 劣化曲線の導出手順の概要

導出手順は、まず、「鉄筋腐食発生時刻および腐食ひび割れ発生時刻」を、試行回数 10,000 回の MCM により推定した。続いて、これらの結果を用いて、供用年数ごとに鉄筋の腐食量を算出し、「鉄筋の質量減少率の平均値の経時変化」を求めた。最後に、「鉄筋の質量減少率の平均値の経時変化」と、既往の研究成果を整理し得られた「鉄筋の質量減少率と曲げ耐力比との関係」から、「曲げ耐力に関する劣化曲線」を導出した。本研究で使用した確率変数の確率分布および統計量を表-2 に示す。

3.2 鉄筋腐食発生時刻と腐食発生時刻の算出

任意の供用年数: t (年)における鉄筋位置での塩化物イオン濃度: C (kg/m^3) が、腐食発生限界塩化物イオン濃度: C_{lim} [$1.85(\text{kg}/\text{m}^3)$] を超えた場合に、式(2)を用いて鉄筋腐食発生を判定した¹⁾。式(2)の判定式: $g_1 = 0$ として t について解くと、腐食開始時刻: t_{corr} (年) が算出できる。

表-1 RC スラブの部材諸元

鉄筋径: ϕ (mm)	13
かぶり: c (mm)	63.5
コンクリートの圧縮強度: f'_c (N/mm^2)	32.6
コンクリートの弾性係数: E_c (kN/mm^2)	28
水セメント比: W/C (%)	47.5

$$g_1 = x_1 C_{\text{lim}} - C(c, C_0, D, t) \quad (2)$$

$$C = x_2 \left[x_3 C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \frac{0.1(c + x_4)}{2\sqrt{x_5 D t}} \right\} \right] \quad (3)$$

$$t_{\text{corr}} = \frac{1}{4x_5 D} \left\{ \frac{0.1(c + x_4)}{\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{x_1 C_{\text{lim}}}{x_2 x_3 C_0} \right)} \right\}^2 \quad (4)$$

なお、塩化物イオンの見かけの拡散係数は次式から求めた。

$$\log_{10} D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (5)$$

図-1 に鉄筋腐食発生確率のヒストグラムを示す。

3.3 腐食ひび割れの発生の判定とひび割れ発生時刻の算出

t (年)における鉄筋の腐食量: Q (mg/cm^2) が、腐食ひび割れ発生時の腐食量: W_c (mg/cm^2) を超えた場合に、式(6)を用いて腐食ひび割れ発生を判定した¹⁾。判定式: $g_2 = 0$ として t について解くと、腐食ひび割れ発生時刻: t_{cr} (年) が算出できる。

$$g_2 = x_6 \eta W_c - Q(V_b, t_{\text{corr}}, t) \quad (6)$$

$$Q(V_b, t_{\text{corr}}, t) = x_8 V_b (t - t_{\text{corr}}) \quad (7)$$

$$t_{cr} = t_{\text{corr}} + \frac{x_6 \eta W_c}{x_8 V_b} \quad (8)$$

$$W_c = \frac{100\rho_s}{\pi(\gamma - 1)} \left[\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \left\{ 2(c + x_4) + \phi \right\}^2 + \phi^2}{E_c (c + x_4 + \phi)} \right. \\ \left. (x_7 f'_c)^{\frac{2}{3}} + \alpha_1 \beta_1 \frac{c + x_4 + \phi}{5(c + x_4) + 3\phi} w_{cr} \right] \quad (9)$$

ここで、 η : 腐食ひび割れ発生時の腐食量に関する補正係数[3.68]、 V_b : 腐食ひび割れ発生前の腐食速度[$12.1(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年})$]、 ρ_s : 鉄筋の密度[$7.85(\text{mg}/\text{mm}^3)$]、 γ : 腐食生成物の体積膨張率[3.0]、 w_{cr} : 腐食ひび割れ発生時のひび割れ幅[$0.1(\text{mm})$]、

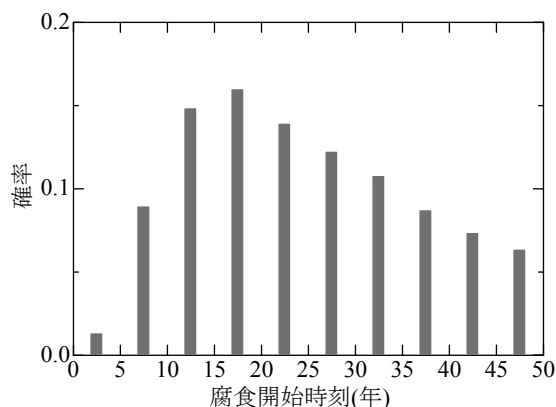


図-1 供用年数ごとの鉄筋腐食発生確率

キーワード 塩害、飛沫帯、RC スラブ、曲げ耐力、劣化予測、モンテカルロ法

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 TEL06-6879-7618

表-2 各パラメータのバラツキを表す確率変数の確率分布および統計量

確率変数		確率分布	平均値	変動係数	標準偏差
鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度	X_1	一様	1.0	0.20	0.20
鉄筋位置での塩化物イオン濃度	X_2	対数正規	1.1	—	0.47
表面塩化物イオン濃度	X_3	正規	1.00	0.363	0.363
かぶりの施工誤差(mm)	X_4	正規	-0.16	—	7.8
塩化物イオンの見かけの拡散係数	X_5	対数正規	0.34	—	0.24
腐食ひび割れ発生時の腐食量	X_6	対数正規	1.00	0.330	0.330
コンクリートの圧縮強度	X_7	正規	1.00	0.0382	0.0382
腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度	X_8	一様	1.0	0.47	0.47
腐食ひび割れ発生後の鉄筋の腐食速度	X_9	一様	1.0	0.33	0.33

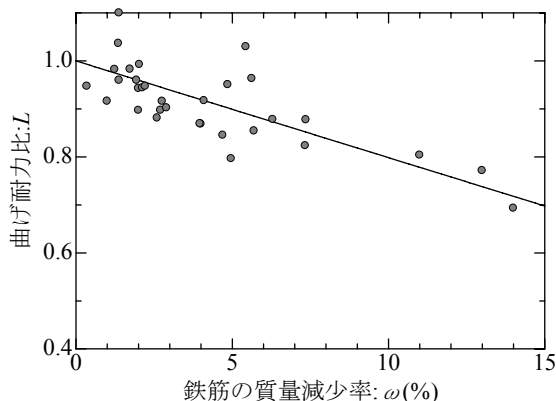


図-2 鉄筋の質量減少率と曲げ耐力との関係

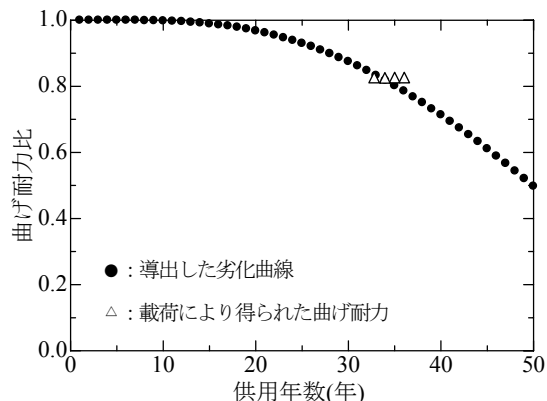


図-3 曲げ耐力に関する劣化曲線

$\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$: 補正係数である。

3.4 鉄筋の質量減少率の平均値の算出とその経時変化

MCMにより生成した t_{corr} 、 t_{cr} および標本観測値を用いて、腐食ひび割れが既に発生している場合(式(10))、鉄筋は腐食しているが腐食ひび割れは発生していない場合(式(7))および鉄筋が腐食していない場合(式(11))のケースごとに腐食量をそれぞれ算出した。

$$Q(V_b, V_a, t_{co}, t_{cr}, t) = x_8 V_b (t_{cr} - t_{corr}) + x_9 V_a (t - t_{cr}) \quad (10)$$

$$Q = 0 \quad (11)$$

ここで、 V_a : 腐食ひび割れ発生後の腐食速度である。続いて、以下の式を用いて、供用年数ごとに鉄筋の質量減少率の平均値をそれぞれ算出した。

$$\omega_{ave.} = \frac{1}{10000} \sum_{i=1}^{10000} \left\{ \frac{Q_i}{(\phi \rho / 4) \times 100} \right\} \quad (12)$$

3.5 鉄筋の質量減少率と曲げ耐力比との関係

RCはり供試体を対象とした既往の研究を参考に、電食試験以外の方法で鉄筋の腐食促進試験を行い、曲げ載荷試験を行って得られた曲げ耐力比(鉄筋腐食後の供試体で得られた最大荷重を鉄筋が腐食していない供試体の最大荷重で除した値を曲げ耐力比と定義)とその供試体での鉄筋の質量減少率との関係を整理した結果を図-2に示す。

3.6 曲げ耐力に関する劣化曲線

3.4で求めた「供用年数と鉄筋の質量減少率の平均値との関係」と、3.5に示す「鉄筋の質量減少率と曲げ耐力比

との関係(図-2参照)」から、劣化曲線(図-3中の●)を導出した。

4. 導出した劣化曲線の検証

切り出したRCスラブ(供用年数は33年から36年)に対して行われた載荷試験の結果²⁾、曲げ耐力比は0.818となった(図-3中の△)。導出した劣化曲線から推定した供用年数が33年から36年経過した際の曲げ耐力比は、実際の曲げ耐力比と概ね一致した。

5. まとめ

本研究では、飛沫帯にあるRCスラブを対象に、曲げ耐力に関する劣化曲線を導出した。劣化曲線から推定した曲げ耐力と載荷により得られた実測の曲げ耐力を比較した結果、本研究の範囲内では、曲げ耐力の推定値と実測値は比較的良い一致を示した。

参考文献

- 例えば、内田慎哉ら：塩害環境下にあるRC部材の曲げ耐力の予測手法に関する基礎研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第10巻、pp.207-214, 2010
- 加藤絵万ら：建設後30年以上経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能、港湾空港技術研究所資料、No.1140, 2006
- 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、p.488, 2008.7