

1. はじめに

本研究では、既往の研究¹⁾を参考に、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変数から、モンテカルロ法（以降、MCM）により曲げ耐力と供用年数の関係（劣化曲線）を導出した。さらに、導出した劣化曲線から供用年数33年から36年での曲げ耐力を推定し、載荷試験により得られた曲げ耐力の実測値²⁾との比較を行った。

2. 飛沫帯にあるRCスラブの概要

表-1にRCスラブの部材諸元を示す。設置環境条件として、栈橋上部工の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、H.W.L.から部材下面までの鉛直距離: d は 0.19mであるため、 C_0 は式(1)より $14.0\text{kg}/\text{m}^3$ 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

導出手順としては、まず、「鉄筋腐食開始および腐食ひび割れ発生時刻」を、MCMを用いて推定した。続いて、これらの結果を用いて、「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「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係」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 鉄筋腐食発生の判定その開始時刻の算出

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、鉄筋腐食発生と判定した¹⁾。判定式: $g_1 = 0$ として t について解くと、腐食開始時刻: t_{cor} (年)が算出できる。図-1にその結果を示す。

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

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

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

塩化物イオンの見かけの拡散係数は、次式から求めた。

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

3.3 腐食ひび割れの発生の判定とその発生時刻の算出

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、腐食ひび割れ発生と判定した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。

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

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

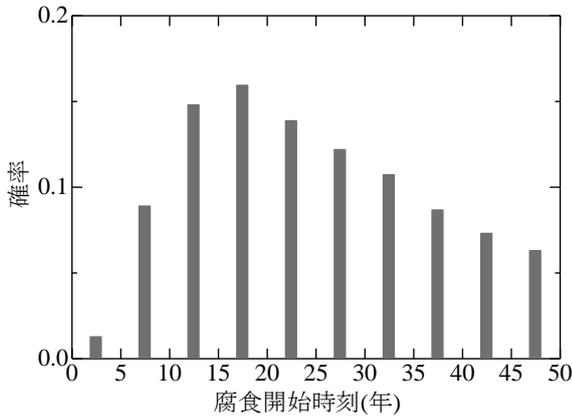


図-1 供用年数ごとの鉄筋腐食発生確率

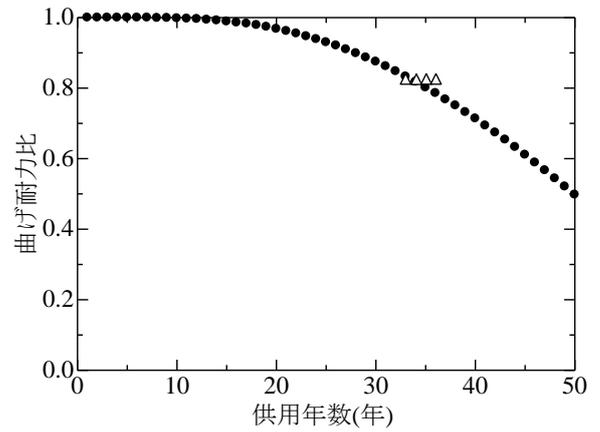


図-3 曲げ耐力の劣化曲線

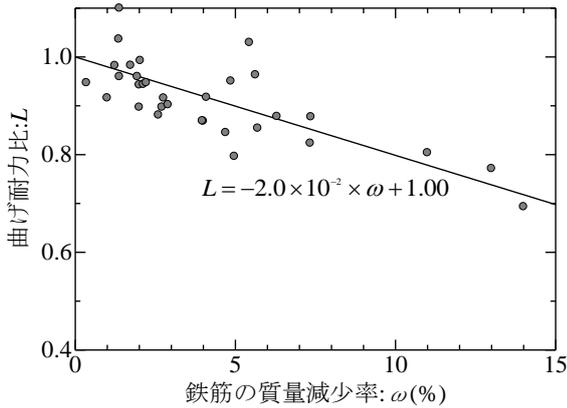


図-2 曲げ耐力と鉄筋の質量減少率の関係

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

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

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

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

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(mg/cm²/年)], ρ_s :鉄筋の密度 [7.85(mg/mm³)], 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(mm)], $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$: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

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。

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

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

ここで、 V_a :腐食ひび割れ発生後の腐食速度である。試行回数 10,000 回の MCM により生成した t_{cor} , t_{cr} および標本観測値を用いて、式(7), (10)および(11)から 1 年ごとに腐食量をそれぞれ求め、鉄筋の腐食量の平均値を求め、質量減少率に換算した。

3.5 曲げ耐力の劣化曲線

3.4 で求めた「鉄筋の質量減少率の平均値と供用年数との関係」と、図-2 に示す「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率の関係」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

供用年数が 33 年から 36 年時に切り出した RC スラブに対して行われた荷重試験の結果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荷重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

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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