

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有効性の検証

佐賀大学 学生会員 関 翔太 正会員 内田慎哉 大阪大学 正会員 鎌田敏郎 非会員 田中伸幸

1. はじめに

本研究では、著者らが提案している飛沫帯にある RC 部材の劣化予測手法¹⁾を、環境条件および部材諸元の異なる A 港と B 港の栈橋²⁾に対して適用し、塩害劣化した RC 部材の曲げ耐力を推定する手法としての有効性を検証した。

2. 対象とした RC 部材の概要

栈橋にある各 RC 部材の部材諸元を表-1 に示す。対象としている RC 部材下面のコンクリート表面における塩化物イオン濃度は既往の文献³⁾から式(1)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距離(m)である。

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

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 回のモンテカルロ法 (以降、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」を算出した。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。

表-1 各 RC 部材の部材諸元

	A 港	B 港
供用年数(年)	38~40	39
水セメント比: W/C (%)	49.8	44.4
かぶり: c (mm)	63.5	43.5
鉄筋径: ϕ (mm)	13	13
コンクリートの弾性係数: $E_c \times 10^3$ (N/mm ²)	23.7	29.5
コンクリートの圧縮強度: f'_c (N/mm ²)	32.3	39.1
H.W.L.と部材下面の距離: d (m)	0.14	0.9

3.2 鉄筋腐食発生の判定と腐食開始時刻の算出

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/m³)が、腐食発生限界塩化物イオン濃度: C_{lim} (kg/m³)を超えた場合に、鉄筋が腐食発生したと判定した¹⁾。判定式: $g_1 = 0$ として t について解くと、 $t_{corr.}$ (年)が算出できる。なお、塩化物イオンの見かけの拡散係数は式(5)から求めた。

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

$$C = x_1 \left[C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{0.1(c + c_{error})}{2\sqrt{x_2 D t}} \right\} \right] \quad (3)$$

$$t_{corr.} = \frac{1}{4x_2 D} \left\{ \frac{0.1(c + c_{error})}{\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{lim}}{x_1 C_0} \right)} \right\}^2 \quad (4)$$

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

3.3 腐食ひび割れ発生の判定と発生時刻の算出

任意の供用年数 t (年)における鉄筋の腐食量: Q (mg/cm²)が、腐食ひび割れ発生時の腐食量: W_c (mg/cm²)を超えた場合に、腐食ひび割れが発生したと判定した¹⁾。判定式: $g_2 = 0$ として t について解くと、 $t_{cr.}$ (年)が算出できる。

$$g_2 = x_3 \eta W_c - Q(V_b, t_{corr.}, t) \quad (6)$$

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

$$t_{cr.} = t_{corr.} + \frac{x_3 \eta W_c}{V_b} \quad (8)$$

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

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], 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

表-2 各パラメータのバラつき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(kg/m ³)	C_{lim}	一様	1.85	-	0.375
鉄筋位置での塩化物イオン濃度	X_1	対数正規	1.1	-	0.47
表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)	A 港	正規	14.3	0.353	5.05
	B 港		9.70	0.558	5.41
かぶりの施工誤差(mm)	c_{error}	正規	-0.16	-	7.8
塩化物イオンの見かけの拡散係数	X_2	対数正規	0.34	-	0.24
腐食ひび割れ発生時の腐食量	X_3	対数正規	1.00	0.330	0.330
コンクリートの圧縮強度(N/mm ²)	A 港	正規	32.3	0.0382	1.23
	B 港		39.1		1.49
腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度(mg/cm ² /年)	V_b	一様	12.1	0.47	5.7
腐食ひび割れ発生後の鉄筋の腐食速度(mg/cm ² /年)	V_a	一様	50.3	0.33	16.4

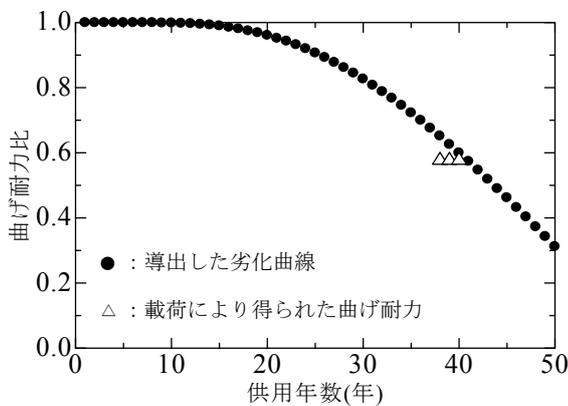


図-1 A港のRC部材の劣化曲線

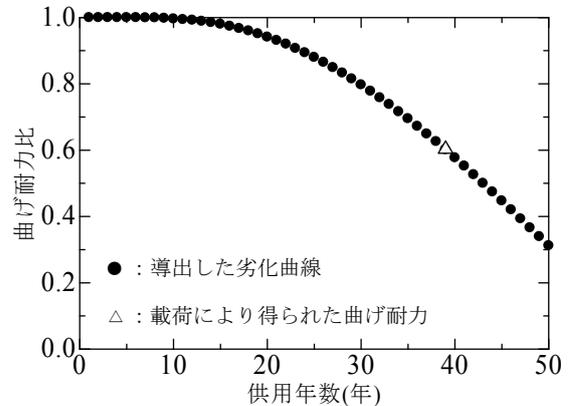


図-2 B港のRC部材の劣化曲線

場合(式(9))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。続いて、式(12)から供用年数ごとに鉄筋の質量減少率の平均値： ω_{ave} をそれぞれ算出した。

$$Q(V_b, V_a, t_{corr.}, t_{tra.}, t) = V_b(t_{tra.} - t_{corr.}) + V_a(t - t_{tra.}) \quad (10)$$

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

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

3.5 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、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、各RC部材について、それぞれの劣化曲線(図-1および2中の●)を導出した。

4. 導出した劣化曲線の検証

切り出した各RC部材に対して行われた曲げ載荷試験の結果²⁾から得られた曲げ耐力比(図-1および2中

の△)と、導出した劣化曲線から推定した曲げ耐力比(図-1および2中の●)は、概ね一致した。

5. まとめ

本研究では、AおよびB港にあるRC部材を対象に、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曲げ載荷試験により得られた実際の曲げ耐力は、比較的良い一致を示した。

参考文献

- 1) 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 飛沫帯にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.887-892, 2011
- 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