

大阪大学工学部 学生員○田中 伸幸 佐賀大学大学院工学系研究科 正会員 内田 慎哉  
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 鎌田 敏郎 佐賀大学理工学部 学生員 関 翔太

1. はじめに

本研究では、まず、部材諸元および部材の設置環境条件が異なるA港およびB港の栈橋上部工のRCスラブを対象に、著者らが提案している「塩害を受けるRC部材の曲げ耐力の予測手法<sup>1)</sup>」を適用し、曲げ耐力に関する劣化曲線の導出をそれぞれ行った。続いて、導出した劣化曲線から推定した曲げ耐力と、載荷試験により得られた曲げ耐力<sup>2)</sup>との比較を行い、手法の有効性を評価した。

2. 対象としたRCスラブの概要

表-1に対象とした各港の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<sup>3</sup>)を次式<sup>3)</sup>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の概要

導出手順は、まず、「鉄筋腐食開始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、「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。

表-1 各RCスラブの概要

	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: $\phi$ (mm)	13	13
コンクリートの弾性係数: $E_c \times 10^3$ (N/mm <sup>2</sup> )	23.7	29.5
コンクリートの圧縮強度: $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	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<sup>3</sup>)が、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度:  $C_{lim}$  を超えた場合に、鉄筋腐食発生と判定した<sup>1)</sup>。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。

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

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

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

また、塩化物イオンの見かけの拡散係数:  $D$  (cm<sup>2</sup>/年)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 腐食ひび割れ発生の判定とその発生時刻の算出

任意の供用年数:  $t$  (年)における鉄筋の腐食量:  $Q$  (mg/cm<sup>2</sup>)が、腐食ひび割れ発生時の腐食量:  $W_c$  (mg/cm<sup>2</sup>)を超えた場合に、腐食ひび割れ発生と判定した<sup>1)</sup>。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:  $t_{cra.}$  (年)が算出できる。

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

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

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

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

ここで、 $\eta$  : 腐食ひび割れ発生時の腐食量に関する補正係数[=3.68],  $\rho_s$  : 鉄筋の密度[=7.85(mg/mm<sup>3</sup>)],  $\gamma$  : 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)],  $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$  : かぶり, 鉄筋径およびコンクリートの圧縮強度に関する補正係数である。

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(kg/m <sup>3</sup> )		$C_{lim}$	1.85	-	0.375	
鉄筋位置での塩化物イオン濃度		$X_1$	1.1	-	0.47	
表面塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	A 港	$C_0$	正規	14.3	0.353	5.05
	B 港					
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 <sup>2</sup> )	A 港	$f'_c$	正規	32.3	0.0382	1.23
	B 港					
腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度(mg/cm <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup> /年)		$V_a$	一様	50.3	0.33	16.4

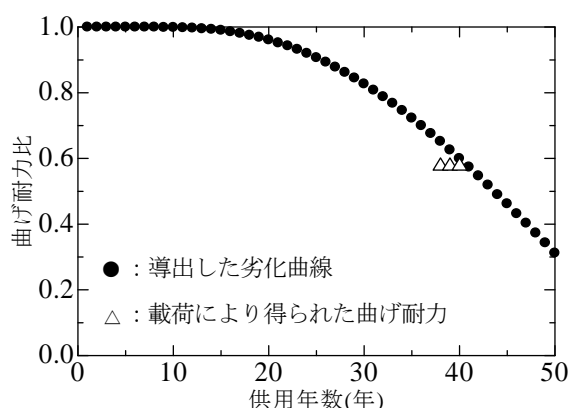


図-1 A 港の RC スラブの劣化曲線

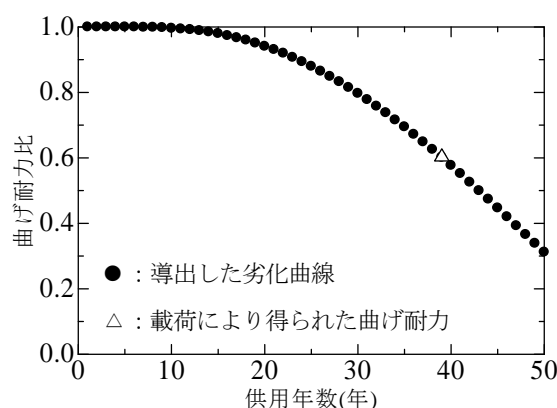


図-2 B 港の RC スラブの劣化曲線

### 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  $t_{corr.}$ ,  $t_{cra.}$  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。

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

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

続いて、供用年数 1 年ごとに以下の式から鉄筋の質量減少率の平均値:  $\omega_{ave.}$  をそれぞれ算出した。

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

### 3. 5 曲げ耐力に関する劣化曲線

3. 4 で求めた「鉄筋の質量減少率の平均値と供用年数との関係」と、既往の研究の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、各 RC 部材について、それぞれの劣化曲線 (図-1 および図-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 スラブに対して行われた载荷試験の

結果<sup>2)</sup>から得られた曲げ耐力比 (図-1 および図-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 および図-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载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。したがって、本研究の範囲内では、塩害劣化した部材の曲げ耐力を予測する手法としての有効性を概ね把握することができた。

### 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) 加藤藤万, 岩波光保, 山路 徹, 横田 弘: 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 (下巻), p.488, 2008.7