

報告 塩害環境下にある 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

田中 伸幸*1・内田 慎哉*2・鎌田 敏郎*3・関 翔太*4

要旨：本研究では、著者らが提案している塩害環境下にある RC 部材の曲げ耐力の劣化予測手法の有効性を検証するため、環境条件および部材諸元の異なる複数の栈橋に対して本手法を適用し、推定した曲げ耐力と栈橋から切り出した RC 部材を対象に載荷により把握した実際の曲げ耐力との比較を行った。その結果、本手法により導出した劣化曲線から推定した曲げ耐力は、実際の曲げ耐力と比較的良好一致を示した。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。

キーワード：栈橋, RC 部材, 塩害, 飛沫帯, 曲げ耐力, 劣化予測, 劣化曲線, 確率過程, モンテカルロ法

1. はじめに

著者らは、塩害環境下にある RC 部材を対象として、塩害による RC 部材の劣化進行過程を確率過程を含む数値モデルとして取り扱い、RC 部材が設置されている環境条件および部材設計諸元からモンテカルロシミュレーション (MCM) により、部材の曲げ耐力の劣化曲線の導出を行ってきた¹⁾。導出した劣化曲線から部材撤去時の曲げ耐力を推定し、これと撤去後の部材の曲げ耐力を載荷試験により把握した結果²⁾とを比較すると、両者は比較的良好一致を示すことがわかった。しかしながら、対象とした部材の数が少なかったため、本手法の有効性については十分な検討が行われていないのが現状である。

そこで、本研究では、既往の研究¹⁾で対象とした部材とは異なる環境条件および部材諸元の RC 部材 2 体を対象として、著者らが提案している曲げ耐力の劣化予測手法により劣化曲線を導出し、これと載荷によって把握した実際の曲げ耐力²⁾とを比較することで、本手法の有効性についての検討を再度行った。

2. 対象とした RC 部材の概要

本研究で対象とした RC 部材は、A 港および B 港にある栈橋上部工の RC スラブである。これら栈橋の建設時期、撤去時期、供用年数を表-1 にそれぞれ示す。対象とした RC スラブはいずれも飛沫帯に位置しており、H.W.L.から部材下面までの距離： d は、表-1 に示すとおりである。港湾の施設の技術上の基準・同解説³⁾および既往の研究⁴⁾によれば、栈橋のコンクリート上部工における表面の塩化物イオン濃度： C_0 (kg/m³) は、H.W.L.と部材下面までの距離が 0～2.0m 程度の場合、次式から

表-1 栈橋の概要

	A 港	B 港
建設時期	1964～1966 年	～1965 年
撤去時期	2004 年	2004 年
供用年数	38～40 年	39 年
H.W.L.から部材下面までの距離： d (m)	0.14	0.9
表面塩化物イオン濃度： C_0 (kg/m ³)	14.3	9.70

推定できるとしている。

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

算出した C_0 を表-1 にそれぞれ示す。

表-2 に RC スラブの部材諸元を対象部材ごとにそれぞれ示す。スラブ厚さ、引張側主鉄筋 (上・下段)、コンクリートの圧縮強度： f'_c (N/mm²) および弾性係数： $E_c \times 10^3$ (N/mm²) は、栈橋調査結果の値を採用した²⁾。水セメント比は同調査結果²⁾および既往の研究⁵⁾に基づいて算出した。

3. 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出方法

3.1 導出手順の概要

2 章で推定した表面塩化物イオン濃度 (表-1) および RC スラブの部材諸元 (表-2) から、曲げ耐力の劣化曲線を導出した。具体的には、まず、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食ひび割れ発生前後の腐食速度などのパラツキを考慮するために、これらを確率変数として取り扱い、既往の研究および実構造物での調査結果から確率変数の確率分布および統計量を設定した (3.2 参照)。

*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (学生会員)

*2 佐賀大学大学院 工学系研究科都市工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*4 佐賀大学 理工学部都市工学科

表－2 RC スラブの部材諸元

		A 港	B 港
スラブ厚さ(mm)		270	300
上段鉄筋	径(mm)	13	13
	本数(本)	4	3
	有効高さ(mm)	92	140
	かぶり(mm)	171.5	153.5
	降伏強度(N/mm ²)	386	358
	弾性係数(kN/mm ²)	192	218
下段鉄筋	径(mm)	13	13
	本数(本)	8	6
	有効高さ(mm)	200	250
	かぶり(mm)	63.5	43.5
	降伏強度(N/mm ²)	386	358
	弾性係数(kN/mm ²)	192	218
コンクリートの圧縮強度: f'_c (N/mm ²)		32.3	39.1
コンクリートの弾性係数: $E_c \times 10^3$ (N/mm ²)		23.7	29.5
水セメント比(%)		49.8	44.4

その後、「鉄筋の腐食開始時刻 (3.3 参照)」および「腐食ひび割れ発生時刻 (3.4 参照)」を、MCM を用いて推定した。これらの推定結果を用いて、供用年数ごとに、同じく MCM により鉄筋の質量減少率の平均値を求め、「鉄筋の質量減少率の経時変化 (3.5 参照)」を算出した。さらに、既往の研究成果に基づき、「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係 (3.6 参照)」を整理した。最後に、「鉄筋の質量減少率の経時変化」と「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 (3.7 参照)」を導出した。これらの詳細を次節以降にそれぞれ示す。

3.2 確率変数の確率分布および統計量の設定方法

本研究で設定した確率変数、その確率分布および統計量を表－3¹⁾に示す。表に示す対数正規分布および正規分布は、以降に示す既往の文献や実構造物でのデータの分布状況から判断して確率分布を決定した。なお、それ以外の確率分布は、データ数が少なく、分布を決定するための根拠が乏しいため、一様分布と仮定した。各確率変数の確率分布の決定方法は以下に示すとおりである。すなわち、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度: C_{lm} (kg/m³) は、既往の文献⁶⁾に基づき 1.2～2.5kg/m³と設定し、一様分布と仮定した。鉄筋位置での塩化物イオン濃度: X_1 および塩化物イオンの見かけの拡散係数: X_2 は、飛沫帯にある実構造物での調査結果^{2),7),8)}を参考に決定した。すなわち、まず、調査結果を Fick の拡散方程式の解で回帰することにより、表面塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数をそれぞれ算出した。続いて、算出したそれぞ

れの値から任意の位置での塩化物イオン濃度を Fick の拡散方程式の解により推定した。調査結果を推定値で除したそれぞれの無次元量から平均値 (表中の 1.1) および標準偏差 (表中の 0.47) を求めた。これらが対数正規分布に従うと仮定して、 X_1 の平均値 (表中の 0.011) および標準偏差 (表中の 0.41) を算出した。一方、 X_2 は、Fick の拡散方程式の解で回帰することにより算定した見かけの拡散係数を、次式で推定した見かけの拡散係数で除し、平均値: 0.34 および標準偏差: 0.24 をそれぞれ求めた。これらの値から対数正規分布の平均値: -1.3 および標準偏差: 0.64 を推定した。

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

ここで、 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)、 W/C : 水セメント比 (表－2 参照) である。 C_0 については、飛沫帯にある実構造物での調査結果⁴⁾に基づき、確率分布を正規分布、H.W.L.から RC 部材下面までの鉛直距離が 0.0～0.5m のケースで標準偏差: 5.05kg/m³、鉛直距離が 0.5～1.0m で標準偏差: 5.41kg/m³を採用した。平均値は式(1)より求めた値 (表－1) をそれぞれ使用した。かぶりの施工誤差: c_{error} (mm)については、川村ら⁹⁾によって実測された鉄道高架橋の「中間スラブ下面」,「張出スラブ下面」および「スラブ桁主梁下面」における 5,318 点でのかぶりの調査結果から正規分布として設定し、平均値および標準偏差を新たに算出した。腐食ひび割れ発生時の腐食量: X_3 は、既往の研究¹⁰⁾に基づいて、対数正規分布の平均値: -0.052, 標準偏差: 0.32 と設定した。 f'_c (N/mm²)は、徳富が実施した試験体 100 体での結果¹¹⁾から変動係数: 0.0382 の正規分布とした。平均値は栈橋調査結果 (表－2 参照)²⁾を採用した。標準偏差は表－3 に示す。腐食ひび割れ発生前の腐食速度: V_b (mg/cm²/年) および腐食ひび割れ発生後の腐食速度: V_a (mg/cm²/年) は、飛沫帯で暴露した供試体での実験結果^{12),13)}および腐食促進試験による実験結果¹⁴⁾を、式(3)および(4)にそれぞれ代入して求めた。

$$V_b = W_c / (t_{tra.} - t_{corr.}) \quad (3)$$

$$V_a = (W - W_c) / (t - t_{tra.}) \quad (4)$$

ここに、 W_c : 腐食ひび割れ発生時の腐食量(mg/cm²)、 $t_{tra.}$: 腐食ひび割れの発生時刻(年)、 $t_{corr.}$: 鉄筋の腐食開始時刻(年)、 W : $t_{tra.}$ 以降の任意の供用年数 t (年)における腐食量(mg/cm²)である。ただし、 W_c が不明なものについては、Qi らが提案している腐食ひび割れ幅から鉄筋の腐食量を推定する式¹⁵⁾により求めた。腐食ひび割れ発生時のひび割れ幅: w_{cr} は 0.1mm¹⁶⁾と仮定した。その結果、 V_b は 2.3～21.9mg/cm²/年、 V_a は 21.9～64.9mg/cm²/年を得た。ただし、 V_a の上限値は、露出の鋼材・管材などの実用上の限界腐食速度: 78.7mg/cm²/年¹⁷⁾に変更した。なお、

表-3 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	下限値	上限値	平均値	標準偏差	変動係数	対数正規分布	
								平均値	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	1.2	2.5					
鉄筋位置での塩化物イオン濃度	X_1	対数正規			1.1	0.47		0.011	0.41
表面塩化物イオン濃度(kg/m ³): A 港	C_0	正規			14.3	5.05			
表面塩化物イオン濃度(kg/m ³): B 港	C_0	正規			9.70	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		-1.3	0.64
腐食ひび割れ発生時の腐食量	X_3	対数正規			1.0	0.33	0.33	-0.052	0.32
コンクリートの圧縮強度(N/mm ²): A 港	f'_c	正規			32.3	1.23	0.0382		
コンクリートの圧縮強度(N/mm ²): B 港	f'_c	正規			39.1	1.49	0.0382		
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	2.3	21.9					
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	21.9	78.7					

V_b および V_a は一様分布と仮定した。

3.3 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)における鉄筋位置の塩化物イオン濃度: C (kg/m³)が, C_{lim} [=1.2~2.5(kg/m³)]を超えた場合に, 鉄筋腐食と判定した ($g_1 < 0$ で鉄筋腐食発生)。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。以下に判定式¹⁾および t_{corr} 算出式¹⁾をそれぞれ示す。

$$g_1 = C_{lim} - C(c, C_0, D, t) \quad (5)$$

$$C = x_1 \left[C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{0.1(c + C_{error})}{2\sqrt{x_2 D t}} \right\} \right] \quad (6)$$

$$t_{corr} = \frac{1}{4x_2 D} \left\{ \frac{0.1(c + c_{error})}{\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{lim}}{x_1 C_0} \right)} \right\}^2 \quad (7)$$

ここで, c : かぶり (表-2 参照) である。 D は, 対象 RC スラブが普通ポルトランドセメントで表-2 に示す W/C で製作されたとして, 式(2)によりそれぞれ求めた。式(5)~(7)の確率変数: $C_{lim}, x_1, C_0, C_{error}, x_2$ は, MCM により表-3 に示す確率分布および統計量に従って 10,000 回発生させ, t_{corr} を 10,000 回算出した。

3.4 腐食ひび割れ発生の判定とひび割れ発生時刻の算出

任意の供用年数: t (年)における鉄筋の腐食量:

Q (mg/cm²)¹⁾が, W_c (mg/cm²)¹⁵⁾を超えた場合に, 腐食ひび割れ発生と判定した ($g_2 < 0$ で腐食ひび割れ発生)。判定式: $g_2 = 0$ として t について解くと, t_{cra} (年)が算出できる。以下に判定式¹⁾および t_{cra} 算出式¹⁾をそれぞれ示す。

$$g_2 = x_3 \eta W_c - Q(V_b, t_{corr}, t) \quad (8)$$

$$Q(V_b, t_{corr}, t) = V_b (t - t_{corr}) \quad (9)$$

$$t_{cra} = t_{corr} + \frac{x_3 \eta W_c}{V_b} \quad (10)$$

$$W_c = \frac{100\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \left[\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \left[\{2(c + C_{error}) + \varphi\}^2 + \varphi^2 \right]}{E_c (c + C_{error} + \varphi)} (f'_c)^{\frac{2}{3}} + \alpha_1 \beta_1 \frac{c + C_{error} + \varphi}{5(c + C_{error}) + 3\varphi} w_{cr} \right] \quad (11)$$

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[=3.68¹⁰⁾], 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], φ : 鉄筋径[=13(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。この補正係数は, 以下の式¹⁵⁾により求めることができる。

$$\alpha_0 = (-0.0005\varphi + 0.028)(c + c_{error}) + (-0.0292\varphi + 1.27) \quad (12)$$

$$\beta_0 = -0.0055f'_c + 1.07 \quad (13)$$

$$\alpha_1 = (0.0007\rho - 0.04)(c + c_{error}) + (0.0663\rho + 5.92) \quad (14)$$

$$\beta_1 = -0.0016f'_c + 1.04 \quad (15)$$

式(8)～(15)の確率変数： x_3, V_b, f'_c は、表-3に示す確率分布および統計量に従って試行回数 10,000 回の MCM によりそれぞれ発生させ、 $t_{cra.}$ を 10,000 回算出した。

3.5 鉄筋の質量減少率の経時変化の算出

3.3 および 3.4 で求めた 10,000 個の $t_{corr.}$ (年)と $t_{cra.}$ (年)のペアを用いて、供用年数 0 から 50 年までの鉄筋の質量減少率の平均値の経時変化を算出する方法について説明する。鉄筋の質量減少率を算出するためには、供用年数 1 年ごとに鉄筋の腐食量を求める必要がある。腐食量を求める具体的な手順としては、以下の 3 ケースを想定し、それぞれのケースごとに腐食量を算出した。すなわち、腐食量を算出する供用年数： t の時点において、腐食ひび割れが既に発生している場合(ケース I: $t_{corr.} < t_{cra.} < t$)、鉄筋は腐食しているものの腐食ひび割れが発生していない場合(ケース II: $t_{corr.} < t < t_{cra.}$)および鉄筋が腐食していない場合(ケース III: $t < t_{corr.} < t_{cra.}$)である(図-1 参照)。ケース I における腐食量の算出式を式(16)に、ケース III でのそれを式(17)に示す。なお、ケース II については、式(9)と同じである。

$$Q(V_b, V_a, t_{corr.}, t_{cra.}, t) = V_b(t_{cra.} - t_{corr.}) + V_a(t - t_{cra.}) \quad (16)$$

$$Q = 0 \quad (17)$$

式(16)の確率変数： V_a は、表-3に示す確率分布および統計量に基づき 10,000 回の MCM によりそれぞれ発生させた。腐食量を求めようとする供用年数： t と 3.3 および 3.4 で求めた 10,000 個の $t_{corr.}$ (年)と $t_{cra.}$ (年)のペアとを比較し、上記のケース I～III のどのケースに分類されるかを決定した。その後、ケースごとに式(9)、(16)および(17)を適宜使い分け、供用年数 1 年ごとに 10,000 個の腐食量を求めた。最後に、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： $\omega_{ave.}$ を算出した。

$$\omega_{ave.} = \frac{1}{10000} \left[100 \sum_{i=1}^{10000} \left\{ \frac{Q_i}{(\rho \rho_s / 4)} \times 100 \right\} \right] \quad (18)$$

結果の一例として、A 港における算出した鉄筋の質量減少率の平均値と供用年数との関係を図-2に示す。

3.6 曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係

RC はり供試体を対象に、電食試験以外の方法で鉄筋の腐食促進試験を行ない、その後、曲げ載荷試験を行なって得られた最大荷重とその供試体での鉄筋の質量減少率との関係を既往の研究^{18),19),20),21),22)}を参考にしてみとめたものを図-3に示す。また、回帰式を以下に示す。

$$L = -2.01 \times 10^{-2} \times m + 1.00 \quad (19)$$

ここで、 L ：曲げ耐力比、 m ：鉄筋の質量減少率(%)である。

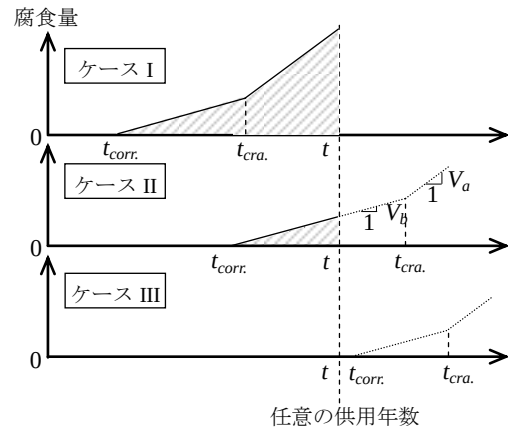


図-1 任意の供用年数における鉄筋の質量減少の算出方法の概念図

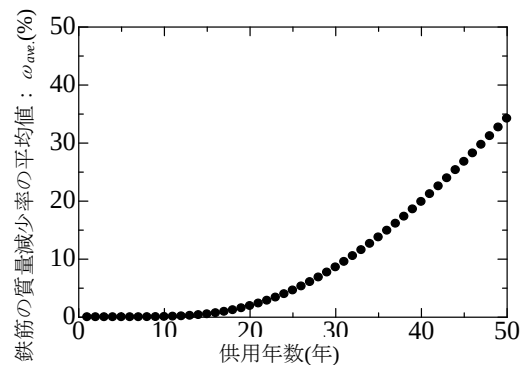


図-2 鉄筋の質量減少率の平均値の経時変化

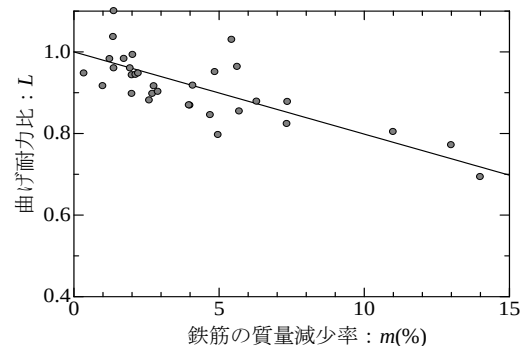


図-3 曲げ耐力と鉄筋の質量減少率との関係

3.7 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出

図-2において供用年数 1 年ごとに質量減少率の平均値を判読し、これらの値を図-3から算出した回帰式(19)にそれぞれ代入して、曲げ耐力比を求めた。この計算を供用年数 50 年となるまで繰り返し、供用年数と曲げ耐力の関係を算出した。A 港および B 港の RC スラブの劣化曲線を図-4 および図-5 (図中の●) にそれぞれ示す。

4. 導出した劣化曲線の検証

導出した劣化曲線の妥当性を検証するため、各港の栈橋から撤去した RC スラブをはり状に切りだした RC 部材に対して 3 点曲げ載荷試験を行った既往の研究成果²⁾と比較することとした。載荷試験の結果、A 港の RC は

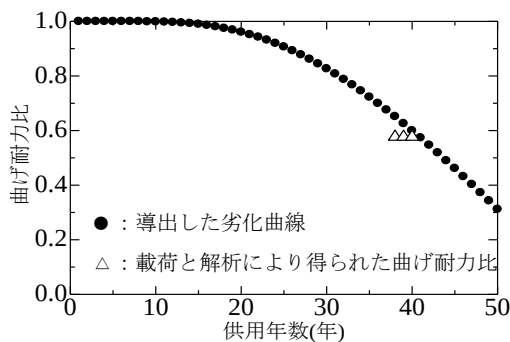


図-4 A 港の RC スラブの劣化曲線

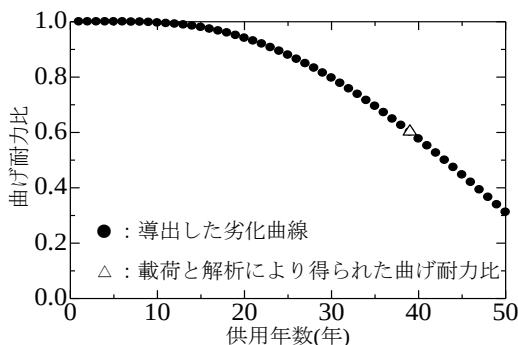


図-5 B 港の RC スラブの劣化曲線

り部材の最大荷重は 745kN, 一方, B 港のそれは 196kN であった。ここで, 建設当時の健全な状態での RC はり部材の設計曲げ耐力を推定するため, 有限要素法による解析を行った。B 港のはり部材 (幅 798mm×高さ 300mm×長さ 2000mm) における解析モデルの概要を図-6 に示す。コンクリートの要素寸法は, 高さ 10mm, 長さ 10mm とした。コンクリートの材料モデルについては, 図-7 に示す応力-ひずみ関係を適用した。圧縮応力下においては圧縮強度: f'_c に達するまで放物線とし, その後は終局ひずみ: ϵ'_{cu} となるまで線形で軟化するように設定した。 ϵ'_{cu} の値は, 圧縮破壊エネルギー: G_{fc} (N/mm) を考慮して決定した。以下に圧縮破壊エネルギーの算出式を示す。

$$G_{fc} = 8.8(f'_c)^{1/2} \quad (20)$$

これに対して, 引張応力下では引張強度: f_t に達するまで線形とし, その後は引張破壊エネルギー: G_{ft} [=150(N/mm)²³] で定義される終局ひずみ: ϵ_u に達するまで指数曲線で軟化するようにした。解析で使用したコンクリートの物性値を表-2 に示す。いずれの部材についても, コンクリートの引張強度およびポアソン比に関する対象栈橋での調査結果²⁾がないため, それぞれ 3.26N/mm² および 0.20 と仮定した。

一方, 鉄筋は離散鉄筋モデルとした。鉄筋の材料モデルには, 図-8 に示すトリリニア型である。図中の E_s は弾性係数, E'_s [=0.01 E_s ²⁴] は硬化後の剛性, f_y は降伏強度, f_u は引張強度, ϵ_y は降伏強度時のひずみ, ϵ_{sh} [=0.01²⁴] は硬化開始時のひずみ, ϵ_u [=0.2²⁴] は破断時

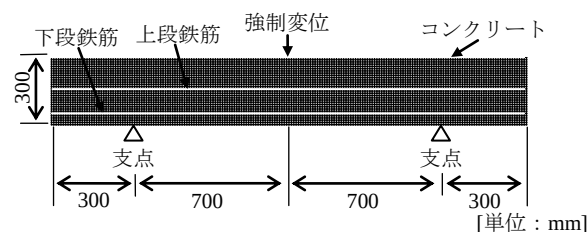


図-6 解析モデル (B 港のはり部材)

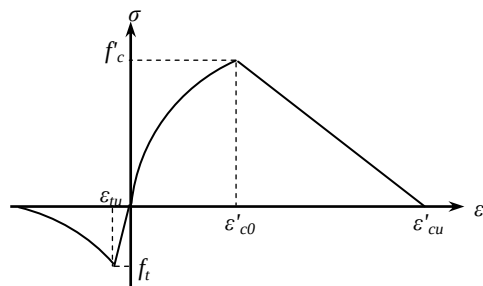


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

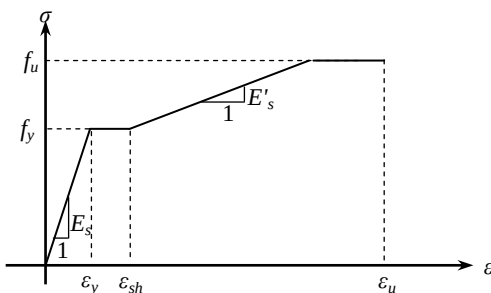


図-8 鉄筋の応力-ひずみ関係

のひずみである。表-2 に鉄筋の物性値を示す。

以上の条件で解析を行った結果, A 港の RC はり部材の最大荷重 1291kN, B 港のそれは 318.2kN となった。これより, RC はり部材の曲げ耐力比は, 実験によって測定した最大荷重を解析で求めた最大荷重で除し, A 港で 0.577, B 港で 0.616 となる (図-4 および図-5 中の△)。一方, 本手法により導出した劣化曲線から推定した曲げ耐力比は, A 港で 0.600, B 港で 0.602 であった (図-4 および図-5 中の●)。以上のことから, 導出した劣化曲線から推定した撤去時の曲げ耐力比は, 実際の曲げ耐力比と概ね良い対応関係を示すことが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では, 著者らが提案している塩害環境下にある RC 部材の曲げ耐力の劣化予測手法の有効性を検証するため, 環境条件および部材諸元の異なる複数の栈橋に対して本手法を適用し, 推定した曲げ耐力と栈橋から切り出した RC 部材を対象に荷重により把握した実際の曲げ耐力との比較を行った。その結果, 本手法により導出した劣化曲線から推定した撤去時の曲げ耐力は, 荷重により確認した実際の曲げ耐力と比較的良好一致を示すことがわかった。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。

謝辞

本研究において対象とした A 港および B 港の RC スラブの建設時期、撤去時期および供用場所については、港湾空港技術研究所の岩波光保氏ならびに加藤絵万氏にご教示頂いた。ここに記して謝意を表する。

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, 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
- 4) 山路 徹, 横田 弘, 中野松二, 濱田秀則: 実構造物調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾 RC 構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.335-347, 2008.5
- 5) 大即信明, 下沢 治: 港湾工事におけるコンクリートの品質調査報告, 港湾技研資料, No.429, 1982
- 6) 建設省東北地方建設局酒田工事事務所: 温海地区塩害橋対策技術報告書, p.6, 1998.3
- 7) 建設省土木研究所: 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査 (III) - 調査結果およびデータ集 -, 土木研究所資料, 第 2687 号, 1988
- 8) 川村 力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 鳥取誠一, 長谷川雅志, 東川孝治: 鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.193-204, 2005.2
- 9) 川村 力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 佐藤 勉, 長谷川雅志: 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.253-266, 2004.8
- 10) 例えば, 吉田郁政, 秋山充良, 鈴木修一, 山上雅人: Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.758-775, 2009.8
- 11) 徳富久二: コンクリートの引張・圧縮強度分布について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.127-128, 1994
- 12) 松村卓郎, 西内達雄: 沖縄における 13 年間の暴露実験による鉄筋コンクリートの塩害劣化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.795-800, 2008
- 13) 松村卓郎, 金津 努, 西村達雄: 7 年間海岸に暴露した鉄筋コンクリート試験体への交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食検査手法の適用, 材料, Vol.51, No.5, pp.581-586, 2002.5
- 14) 梶田佳寛ほか: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 435 号, pp.19-27, 1992.5
- 15) Qi, L., 関 博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2
- 16) 中川裕之, 田中大博, 横田 優, 松島 学: 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.2
- 17) 永山 勝: コンクリート構造物における鉄筋腐食の非破壊モニタリングに関する研究, 名古屋大学学位論文, pp.84-89, 1999
- 18) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤 勉: 鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006.8
- 19) 山住克巳, 宮本征夫, 佐藤 勉: 鉄筋を腐食させた RC はりの劣化状態と耐力について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.557-562, 1990
- 20) 松田耕作, 横田 優, 萩山和樹, 松島 学: 塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.807-812, 2008
- 21) 倉知星人, 佐藤孝史, 小林孝一, 六郷恵哲: 塩害による鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.819-824, 2008
- 22) 小林孝一: 塩害劣化した RC はり部材の曲げ耐荷性能に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 6 巻, pp.231-236, 2006
- 23) 井上寛規, 檜貝 勇, 中村 光: RC 部材におけるせん断補強鉄筋の効果: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.463-468, 1999
- 24) 斉藤成彦, 高橋良輔, 檜貝 勇: 鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.601-611, 2008.11