論文　塩害環境下にある RC 部材の各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測に与える影響に関する感度分析

木下　真一[*1]・内田　慎哉[*2]・鎌田　敏郎[*3]・田中　伸幸[*4]

要旨：本研究では，まず，塩害環境下にある RC 部材を対象として，著者らの曲げ耐力予測手法を活用し，塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の各期間を算出した。続いて，期間ごとに，RC 部材の各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測に与える影響についての感度分析を行った。最後に，潜伏期および進展期における維持管理上の重要な調査項目を把握する方法についての検討を行った。その結果，本研究の範囲内では，潜伏期の初期では塩化物イオン濃度やその分布の調査，その後の潜伏期および進展期では，鉄筋の腐食速度の調査を併せて行うことが特に重要であることが明らかとなった。

キーワード：維持管理，調査，RC 部材，塩害，劣化予測，感度分析，潜伏期，進展期

1. はじめに

著者らは，これまでに，塩害環境下にある RC 部材を対象に，塩害の劣化進行過程を，確率過程を含む数値モデルとして取り扱い，RC 部材の設置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，部材の曲げ耐力を予測する方法についての検討を行ってきた [1)]。その結果，この方法で予測した部材撤去時の曲げ耐力は，撤去後に載荷試験により把握した実際の曲げ耐力と比較的良い一致を示すことがわかった。そこで著者らは，この予測手法に基づいて，部材撤去時の曲げ耐力を精度よく推定するための劣化因子を把握するための感度分析を行った。その結果，かぶりコンクリートの塩化物イオン濃度やその分布あるいは鉄筋腐食速度を適確に調査することが重要であることを明らかにした。しかしながら，本来，塩害で劣化したコンクリート構造物の劣化進行を考えた場合，劣化過程（潜伏期や進展期など）ごとに構造物の性能に与える影響因子が異なるため，劣化過程ごとに調査項目を適切に選定する必要がある。

そこで，本研究では，まず，塩害環境下にある RC 部材を対象（2 章参照）として，著者らの曲げ耐力予測手法（3 章で概説）を活用し，塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の各期間を算出（4.1 参照）した。続いて，期間ごとに，RC 部材の各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測に与える影響についての感度分析を行った（4.2 および 4.3 参照）。最後に，潜伏期および進展期における維持管理上の重要な調査項目を把握する方法についての検討を行った（5 章参照）。

表－1　RC スラブの部材設計諸元

スラブ厚さ(mm)		350
引張側主鉄筋	径(mm)	13
	かぶり(mm)	63.5
コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)		32.6
コンクリートの弾性係数(kN/mm^2)		28
水セメント比(%)		47.5

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，桟橋上部工の RC スラブである。H.W.L.から部材下面までの距離：d は 0.19m である。港湾の施設の技術上の基準・同解説 [2)]および既往の研究 [3)]にしたがって，表面の塩化物イオン濃度：C_0 (kg/m^3)を次式により推定した。

$$C_0 = -6.0d + 15.1 \tag{1}$$

したがって，C_0 は式(1)より 14.0kg/m^3 となる。

表－1 に部材諸元を示す。表中の部材寸法，引張側主鉄筋およびコンクリートの圧縮強度は，桟橋調査結果の値を採用した [4)]。水セメント比は同調査結果 [4)]および既往の研究 [5)]に基づいて 47.5%と仮定した。コンクリートの弾性係数は，コンクリート標準示方書【設計編】に基づき圧縮強度に対応する値とした。

3. RC 部材の曲げ耐力の予測手法の概要

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, RC スラブの部材諸元（**表－1**）および**表－2**[1)]に示す各劣化因子を統計量（3.2 参照）として取り扱うことにより，RC スラブの曲げ耐力を予測した。詳細な手順は 3.3 以降に示す。

*1 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　(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 大阪大学　工学部地球総合工学科　(学生会員)

表－2　各劣化因子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)	C_0	正規			14.0	5.05			
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)	f'_c	正規			32.6	1.25	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					

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－2**[1)]に示す。表中の鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度：C_{lim} (kg/m^3)は，既往の文献[6)]に基づき 1.2～2.5kg/m^3 の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[4),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および標準偏差を求めた。これらが対数正規分布に従うと仮定して，X_1 の平均値および標準偏差を算出した。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，平均値および標準偏差をそれぞれ求めた。これらの値から対数正規分布の平均値および標準偏差をそれぞれ推定した。

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

ここで，D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm^2/年)，W/C ：水セメント比（**表－1** 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[3)]に基づき，確率分布を正規分布，標準偏差：5.05kg/m^3 とした。平均値は式(1)より求めた値を使用した。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かぶりの調査結果から正規分布，平均値および標準偏差を算出した。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 とした。f'_c (N/mm^2)は，徳富の実験結果[11)]から変動係数：0.0382 の正規分布とした。平均値は桟橋調査結果[4)]を採用した。腐食ひび割れ発生前の腐食速度：V_b (mg/cm^2/年)および腐食ひび割れ発生後の腐食速度：V_a (mg/cm^2/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。

$$V_b = W_c / \left(t_{cra.} - t_{corr.}\right) \qquad (3)$$

$$V_a = \left(W - W_c\right) / \left(t - t_{cra.}\right) \qquad (4)$$

ここに，W_c ：腐食ひび割れ発生時の腐食量(mg/cm^2)，$t_{cra.}$ ：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 ：$t_{cra.}$ 以降の任意の供用年数 t (年)における腐食量(mg/cm^2)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 0.1mm[16)]と仮定し，V_b は 2.3～21.9mg/cm^2/年，V_a は 21.9～64.9mg/cm^2/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/cm^2/年[17)]に変更した。なお，V_b および V_a は一様分布と仮定した。

3.3 鉄筋の腐食開始の判定とその発生時刻の算出

任意の供用年数：t (年)における鉄筋位置の塩化物イオン濃度：C (kg/m^3)が，C_{lim} [=1.2～2.5(kg/m^3)]を超えた場合に，鉄筋腐食と判定した。以下に判定式[1)]および鉄筋の腐食開始時刻：$t_{corr.}$ (年)の算出式[1)]をそれぞれ示す。

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

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

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

ここで，c ：かぶり（**表－1** 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－1** 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－2**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^2)[1]が，W_c (mg/cm^2)[15]を超えた場合に，腐食ひび割れ発生と判定した。以下に判定式[1]および腐食ひび割れ発生時刻：$t_{cra.}$(年)の算出式[1]をそれぞれ示す。

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

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

$$t_{cra.} = t_{corr.} + \frac{x_3 \eta W_c}{V_b} \tag{10}$$

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

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[=3.68[10]]，ρ_s：鉄筋の密度[=7.85(mg/mm^3)]，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[15]である。式(8)～(11)の確率変数：x_3, V_b, f_c'は，**表－2**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。

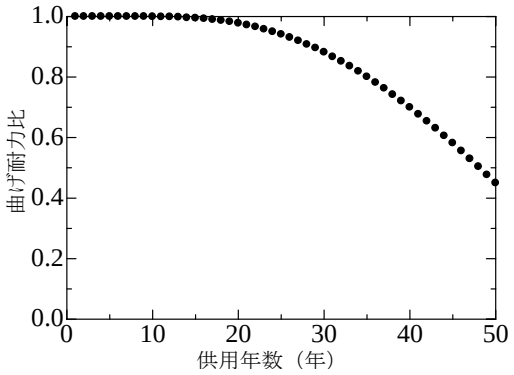
3.5 鉄筋の質量減少率の経時変化の算出

鉄筋の質量減少率を算出するためには，3.1で算出した10,000個の$t_{corr.}$(年)と$t_{cra.}$(年)のペアを用いて，供用年数1年ごとに鉄筋の腐食量を求める必要があり，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。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。ケースIIは，式(9)と同じである。

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

$$Q = 0 \tag{17}$$

式(16)の確率変数：V_aは，**表－2**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のケースに分類し，式(9)，(16)および(17)を適宜使い分け，供用年数1年毎に10,000個の腐食量を求めた。最後に，供用年数1年毎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。



図－1　RCスラブの曲げ耐力に関する劣化曲線

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

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)]を参考に整理した。回帰式を以下に示す。

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

ここで，L：曲げ耐力比，m：鉄筋の質量減少率(%)である。

3.7 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出

式(18)により算出した供用年数1年毎の鉄筋の質量減少率の平均値を回帰式(19)にそれぞれ代入し，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。RCスラブの劣化曲線を**図－1**に示す。

4. 各種劣化因子の変動が劣化予測結果に与える影響

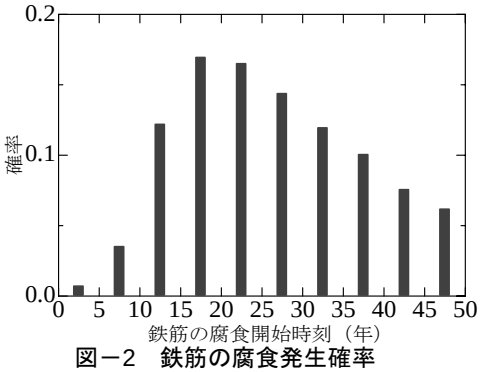
4.1 塩害劣化進行過程の潜伏期および進展期の算出方法

3.3に示す方法により，鉄筋腐食開始時刻を求めた。すなわち，10,000個の$t_{corr.}$に対し，供用年数5年毎にカウントし，さらに総数10,000個で除すことにより，腐食発生する確率を算出した（**図－2**参照）。この平均値を鉄筋腐食開始時刻（供用年数26年）とした。したがって，潜伏期は，供用年数0～26年となる。

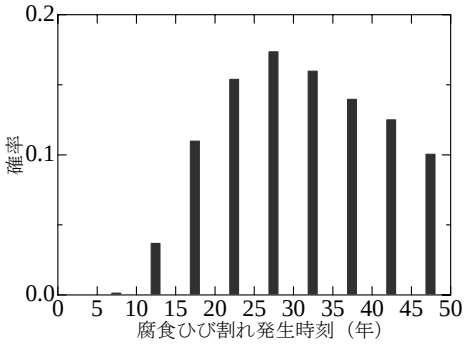
続いて，3.4に示す方法から腐食ひび割れ発生時刻を算出した。具体的には，10,000個の$t_{cra.}$に対し，供用年数5年毎にカウントし，さらに総数10,000個で除すことにより，腐食ひび割れが発生する確率を求めた（**図－3**参照）。この平均値を腐食ひび割れ発生時刻（供用年数31年）とした。潜伏期は，供用年数26～31年となる。

4.2 感度分析の方法

例えば，**表－2**に示す鉄筋位置での塩化物イオン濃度：X_1の変動が曲げ耐力に与える影響を把握する場合は，以下の手順により計算を行った。すなわち，X_1の累積分布関数を算出し，確率40%および60%に相当する標本観



図－2　鉄筋の腐食発生確率



図－3　腐食ひび割れ発生確率

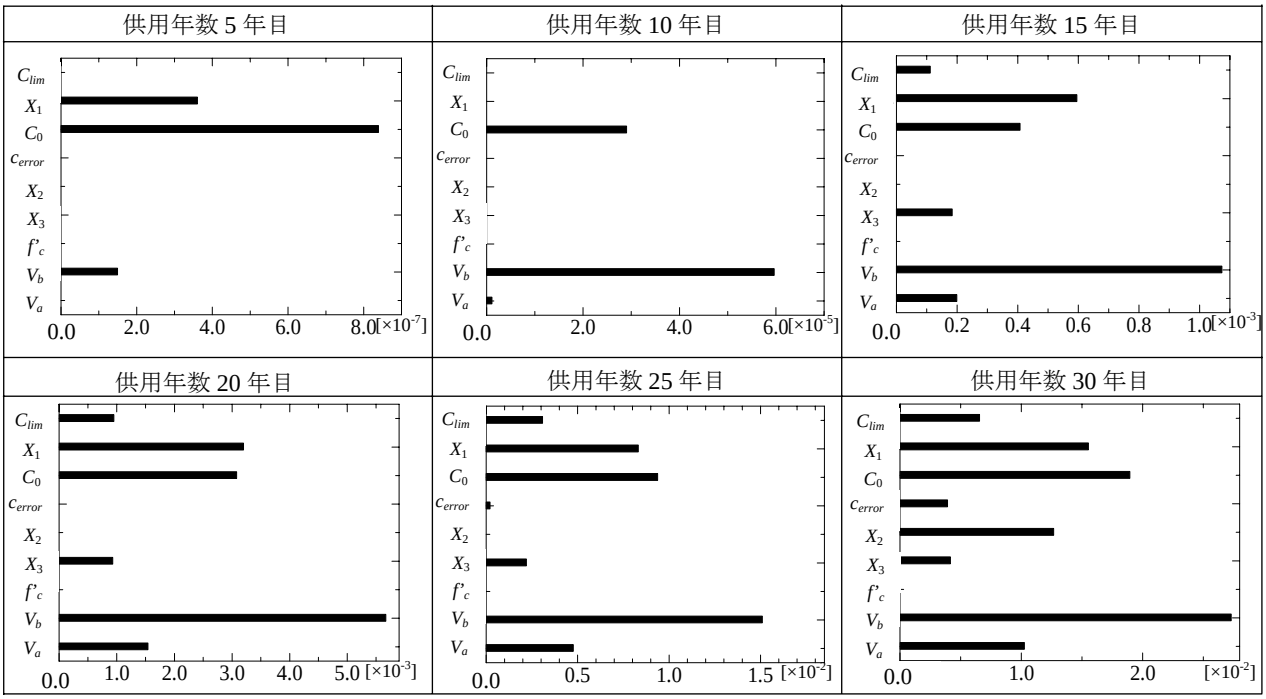
表－3　感度分析における各標本観測値と感度分析の結果

項目	標本観測値		感度分析の結果：曲げ耐力比								
			供用年数 5 年目			供用年数 10 年目			供用年数 15 年目		
	$x_{40\%}$	$x_{60\%}$	最小値	基準値	最大値	最小値	基準値	最大値	最小値	基準値	最大値
C_{lim}	1.7	2.0	1.000		1.000	1.000		1.000	0.995		0.996
X_1	0.91	1.1	1.000		1.000	1.000		1.000	0.994		0.997
C_0	12.7	15.2	1.000		1.000	1.000		1.000	0.994		0.997
c_{error}	-2.1	1.8	1.000		1.000	1.000		1.000	0.996		0.998
X_2	0.24	0.33	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.997	0.995	1.000
X_3	0.88	1.0	1.000		1.000	1.000		1.000	0.995		0.995
f'_c	32.3	32.9	1.000		1.000	1.000		1.000	0.995		0.995
V_b	10.1	14.1	1.000		1.000	1.000		1.000	0.994		0.996
V_a	44.6	56.0	1.000		1.000	1.000		1.000	0.995		0.995
項目	標本観測値		供用年数 20 年目			供用年数 25 年目			供用年数 30 年目		
	$x_{40\%}$	$x_{60\%}$	最小値	基準値	最大値	最小値	基準値	最大値	最小値	基準値	最大値
C_{lim}	1.7	2.0	0.977		0.982	0.938		0.951	0.875		0.898
X_1	0.91	1.1	0.975		0.983	0.933		0.953	0.866		0.901
C_0	12.7	15.2	0.975		0.983	0.932		0.951	0.863		0.895
c_{error}	-2.1	1.8	0.979		0.987	0.941		0.960	0.878		0.910
X_2	0.24	0.33	0.983	0.978	0.997	0.943	0.941	0.985	0.869	0.882	0.955
X_3	0.88	1.0	0.977		0.979	0.939		0.944	0.878		0.886
f'_c	32.3	32.9	0.978		0.978	0.941		0.941	0.882		0.882
V_b	10.1	14.1	0.972		0.981	0.926		0.944	0.855		0.881
V_a	44.6	56.0	0.976		0.979	0.936		0.946	0.872		0.894

測値を，便宜上それぞれ求める。本研究では，確率 40%および60%に相当する標本観測値をそれぞれ $x_{40\%}$ および $x_{60\%}$ と表記する。その結果，$x_{40\%}$ は 0.91 を，$x_{60\%}$ については 1.12 をそれぞれ得る。次に，確率変数 X_1 の標本観測値である $x_{40\%}$ の値：0.91 を確定値とし，その他の $C_{\lim}, C_0, c_{error}, x_2, x_3, f'_c, V_b$ および V_a を確率変数として取り扱い，設定した供用年数における曲げ耐力比を算出する。この計算の結果を，用いた標本観測値と併せて**表－3** に示す。同様に，標本観測値 $x_{60\%}$ の値：1.12 を確定値として上記の計算により曲げ耐力比を求める。以上の手順にしたがって，確率変数 $C_{\lim}, C_0, c_{error}, x_2, x_3, f'_c, V_b$ および V_a における標本観測値 $x_{40\%}$ および $x_{60\%}$ （**表－2** 参照）をそれぞれ求め，各曲げ耐力比をそれぞれ算出した。なお，感度分析は，実際の橋梁などで行われている定期点検を意識して，5 年刻みで行っている。

4.3 感度分析の結果および考察

表－3 に，各種確率変数の標本観測値および算出した曲げ耐力比のすべての計算結果を示す。なお，表中の基準値とは，3.7 で求めた劣化曲線における該当供用年数の曲げ耐力比のことである。ここで，**表－3** において，劣化因子の変動により曲げ耐力比が基準値を下回る場合に着目する。すなわち，予測結果に悪影響を及ぼすと考えられる因子に着目するため，**表－3** の曲げ耐力比の基準値 1.000 と曲げ耐力比の最小値との差を**図－4** に示す。ただし，最小値が基準値より大きい場合は 0 とした。



図－4　各供用年数における曲げ耐力比の基準値 1.000 と最小値

(1)潜伏期：供用年数 0～26 年

図－4 より，5 年目では，C_0 の変動が曲げ耐力比に与える影響が大きいことがわかる。10 年目では，C_0 に加えて，V_b：腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度の影響も大きくなっていることが確認できる。さらに，15, 20 および 25 年目では，X_1：鉄筋位置での塩化物イオン濃度の影響度も高くなってきている。また，供用年数の増加に伴って，V_a：腐食ひび割れ発生後の腐食速度の影響も徐々に大きくなる傾向を示している。

(2)進展期：供用年数 26～31 年

図－4 の供用年数 30 年目の結果に着目すると，曲げ耐力比の最小値と基準値との差が特に大きいものとしては，V_b：腐食ひび割れ発生前の腐食速度，C_0：表面塩化物イオン濃度，X_1：鉄筋位置での塩化物イオン濃度である。また，25 年目と比較すると，X_2：塩化物イオンの見かけの拡散係数の影響が急激に大きくなっていることも同時に確認できる。

5. 塩害環境下にある RC 部材の劣化過程に対応した重要な調査項目の抽出方法

本節では，前述の流れを踏まえ「塩害環境下にある新設 RC 部材の維持管理における劣化過程に対応した重要な調査項目の抽出方法」について整理する。まず，劣化予測手法により腐食開始時刻および腐食ひび割れ時刻を算出する。具体的には，飛沫帯にある RC 部材の部材設計諸元に関する情報を入手するとともに，表面塩化物イオン濃度を式(1)により算出する。そして，次に，本論文に示した方法に基づき，鉄筋の腐食開始時刻および腐食ひび割れ開始時刻を算出する。これにより，対象 RC 部材の潜伏期および進展期の期間を定義することが可能となる。その後，鉄筋の腐食開始時刻および腐食ひび割れ発生時刻の標本観測値の個のペアを用いて，曲げ耐力に関する劣化曲線を導出する。これが，感度分析における曲げ耐力比の基準値となる。最終段階として，まず，感度分析を実施する供用年数を決定する。本研究では，暫定的に供用年数 5 年間隔で設定したが，任意の間隔で設定することが可能である。続いて，感度分析を実施し，曲げ耐力の基準値を下回る確率変数（劣化因子）を抽出する。その確率変数に対応するものを，日常点検あるいは定期点検において重点的に調査を行う。

ここで，本研究で対象とした「桟橋上部工の RC スラブ」を例に，劣化過程に対応した重要な調査項目の抽出結果について概説する。4.3 (1)での検討の結果，潜伏期：供用年数 0～26 年の期間においては，例えば，供用直後から 5 年程度であれば，かぶりコンクリートの塩化物イオン濃度が重要な調査項目となる。供用年数の経過にともって，鉄筋の腐食速度の調査も重要になってくる。この場合は，分極抵抗法などの非破壊検査の適用が有効であると考えられる。次に，4.3 (2)での検討の結果，進展期：供用年数 26～31 年の期間では，塩化物イオン濃度の調査および腐食速度の調査を重点的に行う必要ある。腐食速度の調査にあたっては，潜伏期の後半時期と同様，分極抵抗法などの非破壊試験の適用が特に有効であると考えられる。

6 まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 塩害環境下にある RC 部材を対象に，著者らが提案している曲げ耐力の予測手法を応用して，塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の期間を求める方法論を提示した。

(2) 上記(1)により算出した潜伏期および進展期において，RC 部材の各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測に与える影響についての感度分析を行い，期間ごとに，曲げ耐力に与える劣化因子の抽出を実施した。その結果，潜伏期の初期の段階ではコンクリートかぶり部分の塩化物イオン濃度やその分布の調査が，潜伏期の後期から進展期では，これらの調査項目に加えて鉄筋の腐食速度の調査も重要であることを明らかにした。

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) 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

3) 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

4) 加藤絵万，岩波光保，山路　徹，横田　弘：建設後 30 年以上経過した桟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

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　力ほか：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　力ほか：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) 桝田佳寛ほか：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