

報告 塩害環境下にある RC 部材の塩害劣化進行過程の予測手法に関する基礎研究

田中 伸幸*1・内田 慎哉*2・鎌田 敏郎*3・寺地 悠紀*4

要旨: 著者らは、塩害環境下にある RC 部材を対象として、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により、部材の曲げ耐力に関する劣化曲線を予測する手法についての検討を行ってきた。本研究では、この予測手法を活用し、鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻を算出し、この結果に基づき各劣化過程の期間（潜伏期、進展期、加速期および劣化期）をそれぞれ推定するとともに、供用年数に対する各劣化期間の推移を求める方法を提案した。

キーワード: RC 部材, 塩害, 飛沫帯, 劣化予測, 劣化進行過程, 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、部材の曲げ耐力に関する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、塩害劣化した RC 部材の曲げ耐力は、環境条件や部材諸元のみにより決定されるものではなく、対象部材に対して荷重がどの位置にどのように作用したかにむしろ依存するものである。したがって、コンクリート構造物の合理的な維持管理を目指す上では、土木学会 コンクリート標準示方書 [維持管理編]³⁾に示されている塩害劣化進行過程における各劣化過程（潜伏期、進展期、加速期および劣化期）の予測が重要と考えられる。

そこで本研究では、環境条件および部材諸元の異なる塩害環境下にある RC 部材 3 体を対象 (2 章参照) として、著者らが提案している曲げ耐力の劣化予測手法を活用して鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻およ

び加速期終了時刻を算出 (3 章で概説) し、この結果に基づき各劣化過程の期間（潜伏期、進展期、加速期および劣化期）をそれぞれ推定 (4.1 参照) するとともに、供用年数に対する各劣化期間の推移を求める方法 (4.2 参照) についての検討を行った。

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、B 港および C 港にある栈橋上部工の RC スラブ²⁾である。これらの栈橋の建設時期、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 (m)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⁴⁾および既往の研究⁵⁾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、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)

表-1 栈橋の概要

	A 港	B 港	C 港
建設時期	1964~1966 年	~1965 年	1968~1971 年
撤去時期	2004 年	2004 年	2004 年
供用年数	38~40 年	39 年	33~36 年
H.W.L.から部材下面までの距離： d (m)	0.14	0.9	0.19
表面塩化物イオン濃度： C_0 (kg/m ³)	14.3	9.70	14.0

*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 佐賀大学大学院 工学系研究科都市工学専攻

表-2 RCスラブの部材諸元

		A 港	B 港	C 港
スラブ厚さ(mm)		270	300	350
引張側主鉄筋	径(mm)	13	13	13
	かぶり(mm)	63.5	43.5	63.5
コンクリートの圧縮強度： f'_c (N/mm ²)		32.3	39.1	32.6
コンクリートの弾性係数： $E_c \times 10^3$ (N/mm ²)		23.7	29.5	28.0
水セメント比(%)		49.8	44.4	47.5

は、栈橋調査結果の値²⁾を採用した。水セメント比は、同調査結果により得られたコンクリートの圧縮強度²⁾および既往の研究により得られたコンクリートの圧縮強度と水セメント比の関係⁶⁾に基づいて算出した。なお、各港のRCスラブの撤去時点での曲げ耐力比は、A港で0.577、B港で0.616、C港で0.818である。また、A港およびB港のRCスラブは、撤去時点で腐食ひび割れが確認されたことから、構造物の外観上のグレードは加速期以降であることがわかった。

3. 鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻の算出方法

3.1 算出手順の概要

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、鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻を算出した。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)。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。なお、MCMは、乱数を用いたシミュレーションを繰り返し行うことにより近似解を求める計算手法である。これらの推定結果を用いて、「加速期終了時刻(3.5参照)」を算出した。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および統計量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

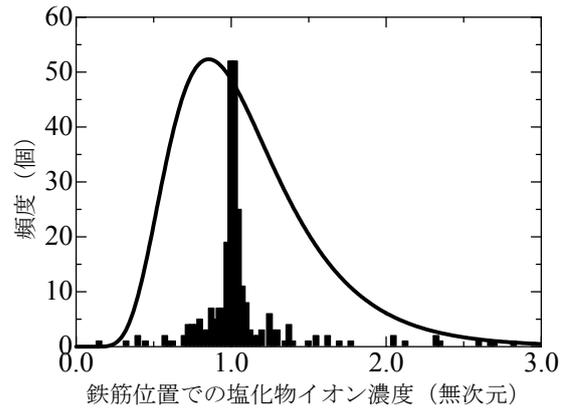


図-1 鉄筋位置での塩化物イオン濃度のヒストグラム

濃度： C_{lim} (kg/m³)は、既往の文献⁷⁾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),8),9)}を参考に決定した。すなわち、まず、調査結果より得られたかぶり位置での塩化物イオン濃度を 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。これら鉄筋位置での塩化物イオン濃度は、常に正の値(非負)を取るため対数正規分布に従うと仮定した。前述の平均値および標準偏差を対数変換して、 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。ヒストグラムを図-1に示す。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出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。塩化物イオンの見かけの拡散係数は、鉄筋位置での塩化物イオン濃度と同様に非負の値となるため、対数正規分布で近似することとした。したがって、対数正規分布における平均値および標準偏差は、-1.3および0.64となる。ヒスト

グラムを図-2に示す。

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

ここで、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 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⁵⁾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： $5.05\text{kg}/\text{m}^3$ 、鉛直距離が0.5~1.0mで標準偏差： $5.41\text{kg}/\text{m}^3$ 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¹⁰⁾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¹¹⁾に基づい

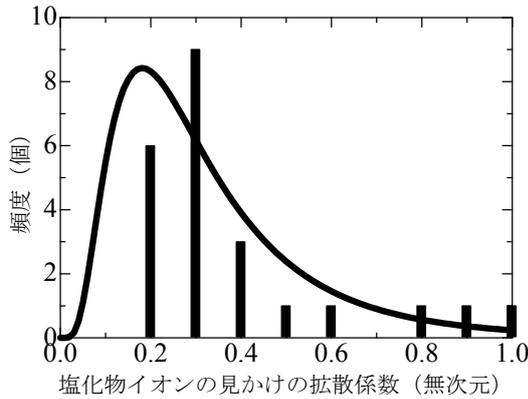


図-2 塩化物イオンの見かけの拡散係数のヒストグラム

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/mm^2)は、徳富が実施した試験体100体での結果¹²⁾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 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)は、飛沫帯で暴露した供試体での実験結果^{13),14)}および腐食促進試験による実験結果¹⁵⁾を、式(3)に代入して求めた。

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

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)である。ただし、 W_c が不明なものについては、 Q_i 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¹⁶⁾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 ¹⁷⁾と仮定した。その結果、 V_b は $2.3 \sim 21.9\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ を得た。なお、 V_b 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)における鉄筋位置での塩化物イオン濃度： C (kg/m^3)が、 C_{lim} [$=1.2 \sim 2.5(\text{kg}/\text{m}^3)$]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。

$$g_1 = C_{lim} - C(c, C_0, D, t) \quad (4)$$

$$C = x_1 \left[C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \frac{0.1(c + c_{error})}{2\sqrt{x_2 D t}} \right\} \right] \quad (5)$$

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		
	B港				9.70	5.41		
	C港				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)	A港	f'_c	正規		32.3	1.23	0.0382	
	B港				39.1	1.49		
	C港				32.6	1.25		
腐食ひび割れ発生前の 鉄筋の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)	V_b	一様	2.3	21.9				

$$t_{corr.} = \frac{1}{4x_2D} \left\{ \frac{0.1(c+c_{error})}{\operatorname{erf}^{-1}\left(1-\frac{C_{lim}}{x_1C_0}\right)} \right\}^2 \quad (6)$$

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(4)~(6)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)¹⁶⁾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。

$$g_2 = x_3\eta W_c - Q(V_b, t_{corr.}, t) \quad (7)$$

$$Q(V_b, t_{corr.}, t) = V_b(t - t_{corr.}) \quad (8)$$

$$t_{cra.} = t_{corr.} + \frac{x_3\eta W_c}{V_b} \quad (9)$$

$$W_c = \frac{100\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \left[\alpha_0\beta_0 \frac{0.22\left[\{2(c+c_{error})+\varphi\}^2 + \varphi^2\right]}{E_c(c+c_{error}+\varphi)} (f'_c)^{\frac{2}{3}} + \alpha_1\beta_1 \frac{c+c_{error}+\varphi}{5(c+c_{error})+3\varphi} W_{cr} \right] \quad (10)$$

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[=3.68¹¹⁾]、 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¹⁶⁾により求めることができる。

$$\alpha_0 = (-0.0005\varphi + 0.028)(c+c_{error}) + (-0.0292\varphi + 1.27) \quad (11)$$

$$\beta_0 = -0.0055f'_c + 1.07 \quad (12)$$

$$\alpha_1 = (0.0007\varphi - 0.04)(c+c_{error}) + (0.0663\varphi + 5.92) \quad (13)$$

$$\beta_1 = -0.0016f'_c + 1.04 \quad (14)$$

式(7)~(14)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 加速期終了時刻の算出

既往の研究¹⁸⁾によると、加速期の期間（加速期開始時刻から加速期終了時刻まで）は潜伏期の 0.5 倍になるとされている。これより、加速期が終了する時刻： $t_{de.}$ (年)は以下の式により求めることができる。

$$t_{de.} = t_{cra.} + 0.5t_{corr.} \quad (15)$$

4. 塩害劣化進行過程の予測

4.1 塩害劣化進行過程における各劣化過程の期間の算出

3.3, 3.4 および 3.5 で求めた $t_{corr.}$ (年)、 $t_{cra.}$ (年)および $t_{de.}$ (年)を用いて、塩害劣化進行過程における各劣化過程の期間を算出する方法について説明する。本研究では、各劣化過程の期間を以下に示す方法でそれぞれ算出した。

(1) 潜伏期

潜伏期は、鋼材表面における塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの期間と定義³⁾されている。そのため、任意の供用年数： t (年)において以下の式を満たす場合を潜伏期とした。

$$t < t_{corr.} < t_{cra.} < t_{de.} \quad (16)$$

(2) 進展期

進展期は、鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間と定義³⁾されているため、任意の供用年数： t (年)において以下の式を満たす場合を進展期とした。

$$t_{corr.} < t < t_{cra.} < t_{de.} \quad (17)$$

(3) 加速期

加速期は、腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間と定義³⁾されている。一方、前述の既往の研究¹⁸⁾によれば、加速期の期間は潜伏期の 0.5 倍となる。そこで、本研究では、加速期終了時刻を $t_{de.}$ (年)とし、以下の式を満足する場合を加速期とした。

$$t_{corr.} < t_{cra.} < t < t_{de.} \quad (18)$$

(4) 劣化期

劣化期は、腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著となる期間と定義³⁾されている。上記(3)に示す加速期終了時刻を $t_{de.}$ (年)参考に、次式を満たす場合を劣化期とすることとした。

$$t_{corr.} < t_{cra.} < t_{de.} < t \quad (19)$$

4.2 供用年数に対する各劣化期間の推移

供用年数 0 から 50 年までの塩害劣化進行過程における各劣化期間の推移を割合（比率）として求める方法について概説する。例えば、1 回のシミュレーションの結果として、鉄筋腐食開始時刻：10 年、腐食ひび割れ発生時刻：20 年および加速期終了時刻：25 年が得られたと考える。この場合、潜伏期は供用年数 1 年から 10 年までとなり、進展期は供用年数 10 年から 20 年、加速期は供用年数 20 年から 25 年および劣化期は供用年数 25 年以降となる。本研究では 10,000 回の MCM を行っており、供用年数 1 年ごとに MCM の結果がそれぞれの劣化期間に該当するかをカウントし、これを MCM の総数 10,000 回で除すことにより、供用年数 1 年ごとの各劣化期間の割合を算出した。A 港、B 港および C 港での結果を図-3、図-4 および図-5 に示す。各港の撤去時点における各劣化期間の割合は、供用年数 39 年の A 港で、潜伏期：24.0%、進展期：14.1%、加速期：22.7%、劣化期：39.2%

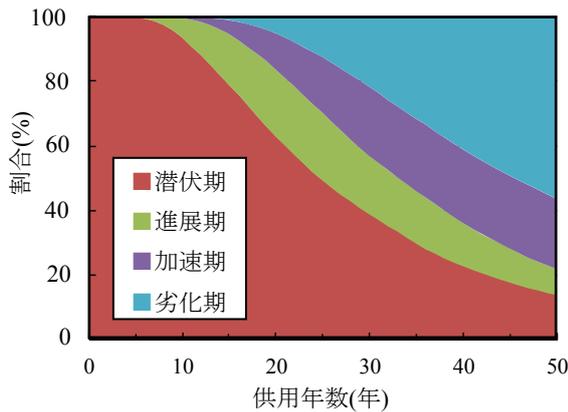


図-3 A港の劣化期間の推移

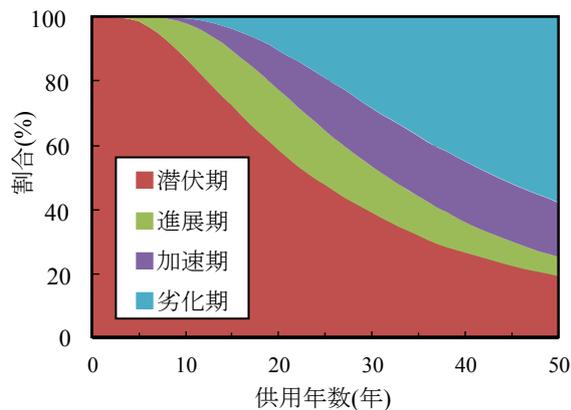


図-4 B港の劣化期間の推移

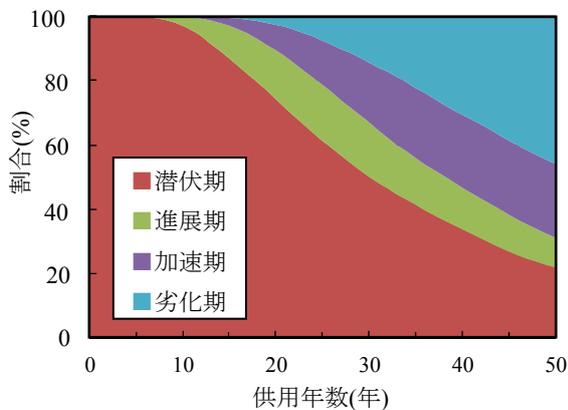


図-5 C港の劣化期間の推移

となり、B港（供用年数39年）では、潜伏期：27.6%、進展期：10.1%、加速期：19.1%、劣化期：43.2%であった。また、C港（供用年数34年）においては、潜伏期：43.1%、進展期：15.1%、加速期：21.5%、劣化期：20.3%を得た。

ここで、各港における劣化進行程度を比較することを目的に、供用年数50年における各期間の割合を算出した。その結果を図-6に示す。表-1および表-2に示すとおり、各港での環境条件および部材諸元は異なっているものの、図-6に示す各期間の割合においては各港であまり差が生じていないことがわかる。これは、潜伏期、進

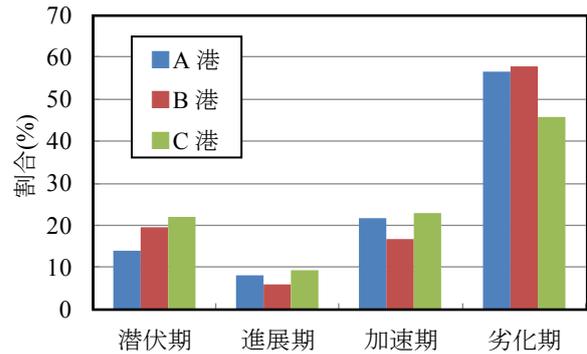


図-6 供用年数50年における各港の劣化期間の割合

展期、加速期および劣化期の各劣化過程を支配する要因について、表-3に示す確率変数をそれぞれ独立した事象として捉えていることに原因があると考えられる。すなわち、本研究では、独立した事象の確率分布にしたがってMCMを行っているため、例えば、MCMにより算出した表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数が大きいにも関わらず、腐食速度は小さい値を使用して劣化過程を推定している場合も含まれることになる。その結果、初期条件である環境条件および部材諸元の違いが劣化過程の推定結果に反映されにくくなっていると考えられる。今後は、表-3に示す確率変数同士の相関について検討し、MCMの問題点を改善する予定である。

5. まとめ

本研究では、塩害環境下にあるRC部材を対象として、著者らが提案している曲げ耐力の劣化予測手法を活用して鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻を算出し、この結果に基づき各劣化過程の期間（潜伏期、進展期、加速期および劣化期）をそれぞれ推定するとともに、供用年数に対する各劣化期間の推移を求める方法を提案した。今後は、4.2で述べたMCMの問題点を改善した上で、本手法の実構造物への有効性について検討する予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究(B) 23760405）の援助を受けて行なったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、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) 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2007
 - 4) 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
 - 5) 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
 - 6) 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
 - 7) 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
 - 8) 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
 - 9) 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
 - 10) 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
 - 11) 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
 - 12) 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
 - 13) 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
 - 14) 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
 - 15) 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
 - 16) 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
 - 17) 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
 - 18) 高橋 順, 江本久雄, 宮本文穂: コンクリートコア試験に基づく橋梁健全度評価システムの検証法に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1399-1404, 2012