

コンクリート構造物の外観変状の予測手法

—鋼材腐食と外観変状の予測・外観変状による予測の修正—

丸屋 剛・小山 哲^{*1}・武田 均・新藤竹文

Keywords : concrete, prediction, revision of prediction, reinforcement bars, corrosion, surface condition

コンクリート, 予測, 修正, 鋼材, 腐食, 外観変状

1. はじめに

コンクリート標準示方書維持管理編では、コンクリート構造物を適切に維持管理するために劣化予測に基づく計画的維持管理が重要であるとされており、外観点検結果や詳細調査結果を有効に利用して劣化予測の精度を向上させることが求められている。ここで用いられる劣化予測の対象は、塩化物イオンの移動や中性化深さの進行であり、コンクリート中の鋼材の腐食を間接的に評価するものである。また、示方書施工編では予測すべき鋼材の腐食に関する限界状態を腐食発生状態としており、ひび割れの発生を限界状態とする予測においては用いることはできない。したがって、鋼材の腐食因子のみならず鋼材の腐食進行を直接的に予測できる手法の開発が必要となる。腐食進行とは、鋼材の腐食による断面の欠損量から残存断面積の経時変化で表すこと、あるいは、鋼材の腐食グレードの進行というかたちで整理することである。構造物の耐荷性能を精度よく算定するためには残存断面積をもとめることが合理的であるが、現状ではその手法が確立されていないこと、仮に手法があったとしても実構造物では計算のインプットにあたる環境条件の評価方法や配合条件のばらつき、施工条件の影響など予測を行う上の情報としては不明確なことが多く、実構造物において予測することは現実的ではないのが現状である。そこで、本論文では鋼材の腐食に関しては、まず腐食グレードの経時変化を予測することとした¹⁾。

実構造物の点検では構造物の外観変状を観察記録することが基本であり、劣化の評価、対策の要否の判定、さらには数量の算出に用いられる。また、構造物中の鋼材の腐食グレードとコンクリート表面の変状には相関関係があると考えられることから、つまり、鋼材の腐食が激しければ外観上の変状も浮きやはく離に至り、そうでなければ外観変状は観察されない場合が多いことから、これらの関係を定式化することにより腐食グレードから外

観変状を推測すること、あるいは、外観変状から鋼材の腐食グレードを推定することが可能になる。ただし、劣化予測は点検調査データを用いて修正することが重要であるが、詳細調査結果から塩化物イオンの拡散係数などを算出し、その値を用いて予測を行う方法はあるものの、外観変状を予測の修正に用いる方法は確立されていない。

本論文は以上のような背景のもとに、鋼材の腐食グレードと外観変状の関係を定量化すること、かぶり、中性化深さ、鋼材位置における塩化物イオン濃度などの点検・調査結果に基づいて鉄筋腐食グレードと外観変状の状態の予測を行うこと、および外観変状の状態から予測を修正する方法を確立することを目的として、外観点検結果や詳細調査の結果の評価に確率・統計の方法論を取り入れた手法を検討した内容の概要をまとめたものである。予測結果は、点検調査対象として一般的である鋼材の腐食グレードの確率分布および外観変状の面積率であることが本手法の大きな特長であり、対策の対象面積やその費用算出の指標となるものである。

2. 予測に関する基本的考え方

2.1 鋼材の腐食グレードおよび外観変状の予測

図-1 は、点検調査結果を有効活用するための劣化予測の考え方を示したものである。中性化の進行や塩化物イオンによる鋼材の腐食を予測する場合、コンクリート標準示方書では中性化の進行や塩化物イオンの拡散浸透を予測し、中性化深さ(残り)あるいは鋼材位置(かぶり)における塩化物イオン濃度で鋼材の腐食発生時期を予測する方法が述べられている²⁾。一方、構造物を点検する場合、常に詳細調査等を行って中性化の進行や塩化物イオンの拡散浸透を計算する際の中性化速度係数、あるいは塩化物イオンの拡散係数や表面塩化物イオン濃度など、予測に必要なパラメータを算出できるとは限らないため、

*1 (株) 篠塚研究所

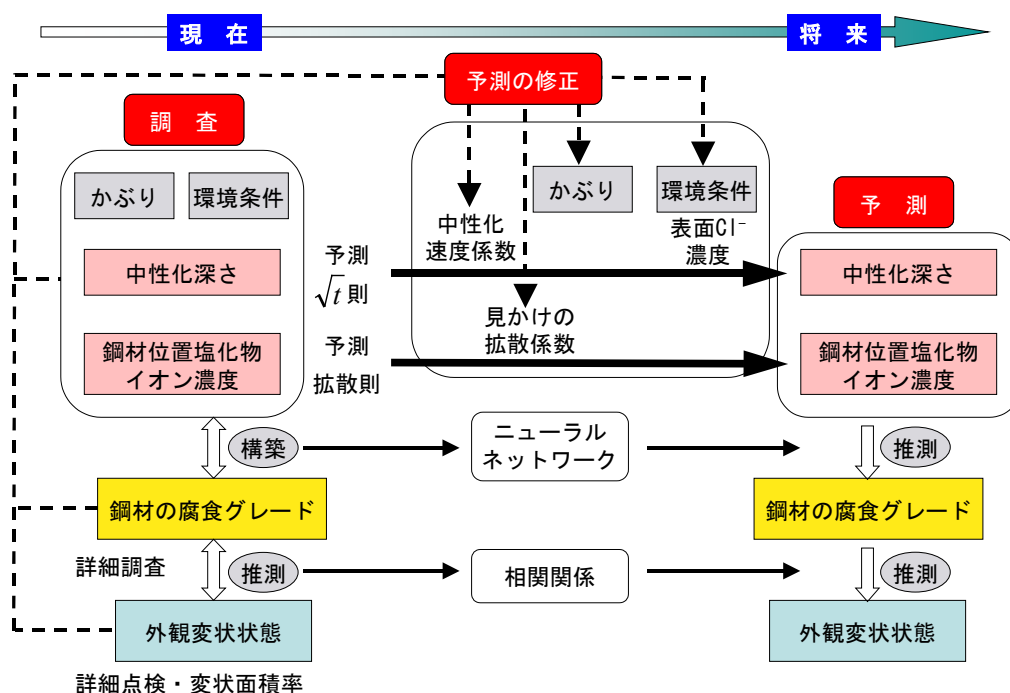


図-1 予測と修正に関する基本的考え方
Concept of prediction and revision on durability of concrete structures

鋼材の腐食グレードや浮きやはく離、ひび割れなどの外観の変状を位置や範囲の大きさなどとして記録することが現実的である。

コンクリート構造物中の鋼材の腐食速度は、酸素や塩化物イオンの供給およびpHなどによって影響を受け、それらは環境条件やコンクリートの品質によって異なる。既往の研究によれば³⁾、鋼材の腐食グレードとかぶりの大きさ、鋼材に対する酸素の供給量の指標となる中性化深さ、鋼材位置における塩化物イオン濃度および鋼材位置における塩化物イオン濃度には相関関係があることから、橋梁の詳細調査データを用いてこの関係をニューラルネットワークにより定式化した。さらに、詳細調査を行った付近の外観調査データと鋼材の腐食グレードとの相関関係を統計的手法により定式化した。

したがって、中性化深さの予測値と鋼材位置における塩化物イオン濃度の予測値、かぶりと構造物のおかれている環境条件から将来の鋼材の腐食グレードおよび外観変状を予測することができる。

2.2 予測の修正

構造物の維持管理において、現時点で得られた調査結果から将来の鋼材の腐食グレードや外観変状を予測する場合、予測結果を予測対象時期の点検調査結果により修正し、さらに先の将来予測を行わなければならない。一般には、中性化深さや塩化物イオン濃度の分布から中性化速度係数や塩化物イオンの見掛けの拡散係数などを算

出し、その値を用いて中性化深さや鋼材位置の塩化物イオン濃度を予測する¹⁾。

しかし、中性化深さや塩化物イオンの濃度分布を測定せずに、外観変状の面積率により予測を修正することも可能である。これは、点検によって得られた外観変状の面積率と、鋼材の腐食グレードの確率分布との関係をあらかじめ定量化しておき、点検から得られる外観変状の面積率を鋼材腐食グレードの確率分布になるように換算し、この確率分布になるように中性化速度係数や塩化物イオンの拡散係数を推定することによる。

3. 鋼材の腐食グレードと外観変状の相関関係

3.1 相関のモデル化に関する考え方

外観変状と表-1に示す鋼材の腐食グレードとの相関関係を求めるためには、それらの調査結果が必要となるが、ここでは調査結果を仮定して検討した。鋼材の腐食グレードと外観変状の双方向への変換ができる確率手法に関する検討を行った。鋼材の腐食グレードと変状の状態との関係は、2次元の確率変数と確率分布の概念を用いて表現することができる。ここで、確率変数 X の値 x は鉄筋腐食グレードを表し、確率変数 Y の値 y は変状の状態を表すものとし、鋼材の腐食グレードは(I, II, III, IV)の4分類、外観変状は(変状なし, 変状あり)の2分類とした。

鋼材の腐食グレードの分布を表す周辺確率関数は式

表-1 鋼材の腐食グレード

Grades of corrosion of reinforcement bars

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている

表-2 外観変状の2分類整理(度数表)

Frequency on condition of concrete surface

鋼材の腐食 グレード	外観変状件数		
	変状なし	変状あり	合計
I	40	5	45
II	35	20	55
III	15	30	45
IV	5	50	55
変状別集計	95	105	200

表-3 鋼材の腐食グレード(相対度数表)

Frequency on corrosion of reinforcement bars

鋼材の腐食 グレード	外観変状		
	変状なし	変状あり	合計
I	0.200	0.025	0.225
II	0.175	0.100	0.275
III	0.075	0.150	0.225
IV	0.025	0.250	0.275
変状別集計	0.475	0.525	1.000

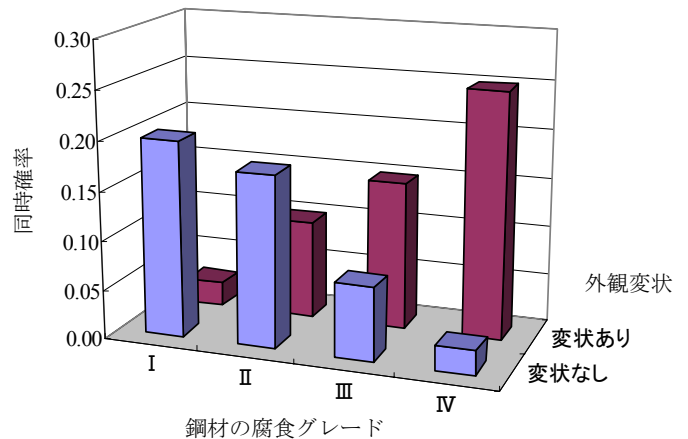
図-2 外観変状と鋼材の腐食グレードの同時確率分布
Joint distribution of probability on condition of concrete surface and corrosion

表-4 鋼材の腐食グレードに対する外観変状の条件付き確率

Conditional probability of surface condition to corrosion

鋼材の腐食 グレード	外観変状		
	変状なし	変状あり	合計
I	0.889	0.111	1.000
II	0.636	0.364	1.000
III	0.333	0.667	1.000
IV	0.091	0.909	1.000
変状別集計	1.949	2.051	4.000

(1) で与えられる。

$$p_X(x) = \sum_{y_j} p_{X,Y}(x, y_j) \quad (1)$$

ここに、 y_j : 外観変状 (変状あり, 変状なし) である。

また、外観変状の分布を表す周辺確率関数は式(2)で与えられる。

$$p_Y(y) = \sum_{x_i} p_{X,Y}(x_i, y) \quad (2)$$

ここに、 x_i : 腐食グレード (I, II, III, IV) である。

これらをまとめると図-2のように表すことができる。

次に、 $Y = y$ となる確率が X の値に依存して決まる場合、すなわち他の事象への従属性がある場合には、条件付確率を用いて式(3)のように、 $X = x$ となる確率が Y の値に依存する場合には式(4)のように表すことができる。

$$P_{Y|X}(y|x) \equiv P(Y = y | X = x) = \frac{p_{X,Y}(x, y)}{p_X(x)} \quad (3)$$

$$P_{X|Y}(x|y) \equiv P(X = x | Y = y) = \frac{p_{X,Y}(x, y)}{p_Y(y)} \quad (4)$$

3.2 腐食グレードから外観変状への変換

表-1 に示す鋼材の腐食グレードと外観変状について、はく離、浮きおよび鉄筋露出を<変状あり>に、健全とひび割れを<変状なし>とした結果を表-2 に示す。ここで、ひび割れを<変状なし>に分類した理由は、調査で観察されるひび割れに、腐食によるひび割れではない曲げひび割れがカウントされている可能性があること、浮きの周辺にあるひび割れは浮きでカウントしていることから、浮きにかかわるひび割れは<変状あり>でカウントしていること、である。

鋼材の腐食グレードの分布を表す周辺確率関数は、式(1)より以下の式(5)から式(8)のように求められる。これらから、表-2 を相対度数表として整理した結果を表-3 に示す。

$$I : p_X(I) = 0.200 + 0.025 = 0.225 \quad (5)$$

$$II : p_X(II) = 0.175 + 0.100 = 0.275 \quad (6)$$

$$III : p_X(III) = 0.075 + 0.150 = 0.225 \quad (7)$$

$$IV : p_X(IV) = 0.025 + 0.250 = 0.275 \quad (8)$$

ここで、式(3)より、例えば鋼材の腐食グレードがIであるときに、外観変状が<変状なし>、<変状あり>にな

表-5 外観変状の状態確率
Probability of surface condition to corrosion

鋼材の腐食		外観変状		
グレード	確率値P	状態	条件付確率 $P_{Y X}$	変状状態確率 $P \times P_{Y X}$
I	a	変状なし	0.889	0.889a
		変状あり	0.111	0.111a
II	b	変状なし	0.636	0.636b
		変状あり	0.364	0.364b
III	c	変状なし	0.333	0.333c
		変状あり	0.667	0.667c
IV	d	変状なし	0.091	0.091d
		変状あり	0.909	0.909d

表-6 鋼材の腐食グレードと外観変状の換算表
Conversion table of corrosion grades to surface condition

鋼材の腐食グレードの確率分布		外観変状		合計
		変状なし	変状あり	
I	a	0.889a	0.111a	a
II	b	0.636b	0.364b	b
III	c	0.333c	0.667c	c
IV	d	0.091d	0.909d	d
合計		0.889a+0.636b+0.333c+0.091d	0.111a+0.364b+0.667c+0.909d	1.0

表-7 外観変状に対する鋼材の腐食グレードの条件付き確率
Conditional probability of corrosion to surface condition

鋼材の腐食グレード	外観変状		
	変状なし	変状あり	合計
I	0.421	0.048	0.469
II	0.368	0.190	0.559
III	0.158	0.286	0.444
IV	0.053	0.476	0.529
変状別集計	1.000	1.000	2.000

表-8 鋼材腐食の状態確率
Probability of reinforcement corrosion

外観変状		鋼材の腐食		
変状状態	確率値P	グレード	条件付確率 $P_{X Y}$	変状状態確率 $P \times P_{X Y}$
変状なし	m	I	0.421	0.421m
		II	0.368	0.368m
		III	0.158	0.158m
		IV	0.053	0.053m
変状あり	n	I	0.048	0.048n
		II	0.190	0.190n
		III	0.286	0.286n
		IV	0.476	0.476n

表-9 外観変状と鋼材の腐食グレードの換算表
Conversion table of surface condition to corrosion grades

外観変状		鋼材の腐食グレード				合計
		I	II	III	IV	
変状なし	m	0.421m	0.368m	0.158m	0.053m	m
変状あり	n	0.048n	0.190n	0.286n	0.476n	n
合計		0.421m+0.048n	0.368m+0.190n	0.158m+0.286n	0.053m+0.476n	1.0

る条件付き確率は式(9)および式(10)のようにして求めることができる。同様に、鋼材の腐食グレードがⅡ、Ⅲ、Ⅳのときの条件付き確率をまとめた結果を表-4に示す。

$$P_{Y|X}(\text{変状なし}|I) = \frac{P_{X,Y}(I, \text{変状なし})}{P_X(I)} = \frac{0.200}{0.225} = 0.889 \quad (9)$$

$$P_{Y|X}(\text{変状あり}|I) = \frac{P_{X,Y}(I, \text{変状あり})}{P_X(I)} = \frac{0.025}{0.225} = 0.111 \quad (10)$$

鋼材の腐食グレードが確率分布で与えられた場合、すなわち、腐食グレードⅠの確率が a、Ⅱの確率が b、Ⅲの確率が c、Ⅳの確率が d で、 $a+b+c+d=1$ であるとき、表-4 の値を用いることによって、外観変状の〈変状なし〉、〈変状あり〉は表-5 に示すようにして求めることができる。表-6 は、これを鋼材の腐食グレードと外観変状の換算表として表したものであり、鋼材の腐食グレードの確率分布が与えられれば外観変状の〈変状なし〉、〈変

状あり〉の確率分布を求めることができる。

3.3 外観変状から腐食グレードへの変換

表-3 および式(4)より、外観変状が〈変状なし〉、〈変状あり〉それぞれで、鋼材の腐食グレードがⅠ、Ⅱ、ⅢおよびⅣになる条件付き確率を求めると表-7 のようになる。

外観変状が確率分布で与えられた場合、すなわち、〈変状なし〉の確率が m、〈変状あり〉の確率が n で、 $m+n=1$ であるとき、表-7 の値を用いることによって、鋼材の腐食グレードⅠ、Ⅱ、ⅢおよびⅣは表-8 に示すようにして求めることができる。これを鋼材の腐食グレードと外観変状の換算表として表すと表-9 のようになり、鋼材の腐食グレードの確率分布が与えられれば外観変状の〈変状なし〉、〈変状あり〉の確率分布を求めることができる。なお、外観変状の確率分布は外観変状の面積率として考えることができる。

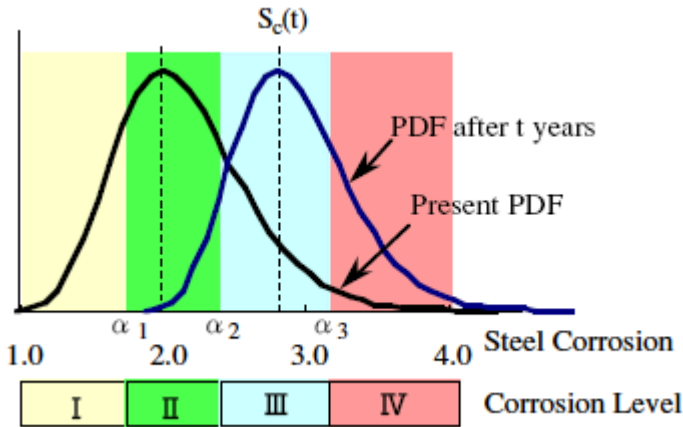


図-3 鋼材の腐食グレードの確率分布
Distribution of probability on corrosion

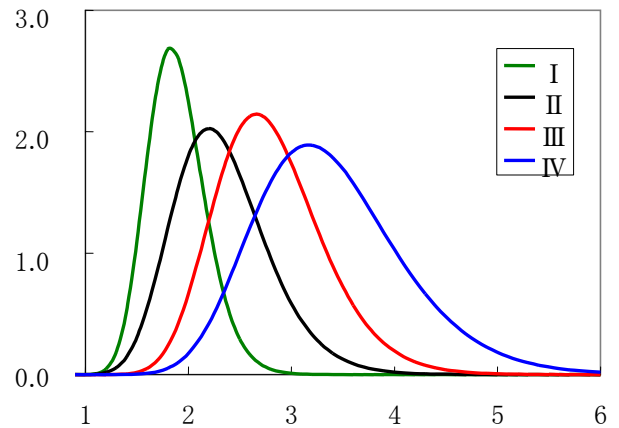


図-4 鋼材の腐食グレードの統計量の分布
Distribution Statistical quantity on corrosion

4. 鋼材の腐食グレード・腐食状態確率の予測

4.1 鋼材腐食グレードの予測

鋼材腐食グレード（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）のそれぞれの状態にある可能性を腐食状態確率として定量的に表現した。腐食状態確率は，図-3 に示すように鉄筋腐食グレードを確率変数とした確率分布（対数正規分布）を仮定し，その面積比率すなわち4つの排反事象の確率として得られると考える．時間の推移とともに確率分布は図の右方向へ移動し，同時に腐食状態もⅠからⅡ，ⅡからⅢ，ⅢからⅣへと推移し，その可能性は確率によって示すことができる．ここで，図中 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ は腐食状態の閾値であり，分布のばらつきを含めて点検調査データから求めることができる．

鋼材の腐食グレードの予測は，ニューラルネットワークを用いて構成した鋼材の腐食因子と腐食グレードの関係のネットワークを用い，腐食因子の予測値から腐食グレードの予測値を算出した³⁾．これらは，式(11)のように表すことができる．なお，ここで用いたニューラルネットワークは，8個の入力層，中間層および腐食グレードの出力層からなる3階層のネットワークを用いている．

$$S_c(t) = NW(d, C_t(t), C_d(t), T_{ave}, RH, Rain) \quad (11)$$

ここに， $S_c(t)$ ：鋼材の腐食グレード， t ：供用期間(年)， NW ：ニューラルネットワークモデル， d ：鉄筋かぶり(mm)， $C_t(t)$ ：鋼材位置塩化物イオン濃度(kg/m^3)， $C_d(t)$ ：中性化深さ(mm)， T_{ave} ：年平均気温($^{\circ}\text{C}$)， RH ：年平均相対湿度(%)， $Rain$ ：年間降水量(mm)，である．式(11)中の鋼材位置における塩化物イオン濃度と中性化深さは既往の予測式により算出することができ²⁾，その他

表-10 鋼材の腐食グレードに関する統計量
Statistical quantity on corrosion

鋼材腐食 グレード	μ	σ	n	λ	ζ
Ⅰ	1.85	0.28	29	1.83	0.148
Ⅱ	2.25	0.46	119	2.20	0.197
Ⅲ	2.70	0.49	61	2.66	0.186
Ⅳ	3.23	0.63	43	3.17	0.211

も設計値や点検調査結果より設定することができる．

ここで，ニューラルネットワークの構築に用いた，劣化要因の全ての値が記載されている252個のデータの，それぞれの腐食状態Ⅰ～Ⅳに関する統計量を表-10に，密度関数を図-4に示す．

ここに， μ ：平均値， σ ：標準偏差， n ：サンプル数， λ ： $\ln X$ の平均値， ζ ： $\ln X$ の標準偏差，である．鋼材の腐食グレードの閾値の設定は，表-10の統計量の値を用いて，1変量による判別でばらつきの異なる式(12)により算定した．

$$\text{閾値Ⅰ－Ⅱ} : \text{Exp}\{(\lambda_1\zeta_2 + \lambda_2\zeta_1)/(\zeta_1 + \zeta_2)\} = 2.0$$

$$\text{閾値Ⅱ－Ⅲ} : \text{Exp}\{(\lambda_2\zeta_3 + \lambda_3\zeta_2)/(\zeta_2 + \zeta_3)\} = 2.47$$

$$\text{閾値Ⅲ－Ⅳ} : \text{Exp}\{(\lambda_3\zeta_4 + \lambda_4\zeta_3)/(\zeta_3 + \zeta_4)\} = 2.93$$

(12)

4.2 鋼材の腐食状態確率の予測

鋼材の腐食グレードⅠ～Ⅳの確率 $P(E_1) \sim P(E_4)$ は，それぞれの腐食状態の閾値 α_1 ， α_2 ， α_3 および確率変数である鋼材の腐食グレードの平均値 μ ならびに対数標準偏差 ζ を用いて式(13)で表すことができる．ここでは，鋼材の腐食グレードを対数正規分布と仮定したが，ニューラルネットワークモデルのインプット条件を確率分布として考えることもできる．

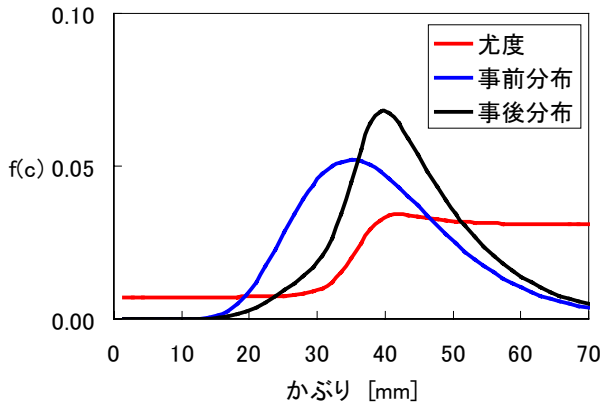


図-5 事前分布，尤度関数および事後分布の例
Distribution of probability on corrosion

$$\begin{aligned} P(E_1) &= \Phi\left(\frac{\ln \alpha_1 - \ln \mu}{\zeta}\right) \\ P(E_2) &= \Phi\left(\frac{\ln \alpha_2 - \ln \mu}{\zeta}\right) - \Phi\left(\frac{\ln \alpha_1 - \ln \mu}{\zeta}\right) \\ P(E_3) &= \Phi\left(\frac{\ln \alpha_3 - \ln \mu}{\zeta}\right) - \Phi\left(\frac{\ln \alpha_2 - \ln \mu}{\zeta}\right) \\ P(E_4) &= 1 - \Phi\left(\frac{\ln \alpha_3 - \ln \mu}{\zeta}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

ここに， Φ は標準正規確率分布関数，である。

5. 予測の修正方法

鋼材の腐食状態の予測値と点検結果の腐食状態が整合するように，予測式のパラメータを変更する方法として，最小二乗法などによる回帰分析方法や，ベイズ確率の方法がある。

ベイズ確率の方法は，利用できる情報量が限られており主観的判断を要する工学問題において有意義な方法である。それぞれの劣化要因に関する母数の推定は，設計図書や公的機関などで提供される情報を活用するか，または専門技術者が直感または経験的に持っている知識に基づいて，その母数を取り得る値について設定する。更に，点検や実験結果などから得られる付加的な情報が加わることにより，式(14)のベイズの定理を用いて母数を更新することができる。

$$f''(\theta) = \kappa L(E_i | \theta) f'(\theta) \quad (14)$$

ここに， $f''(\theta)$: 事後分布， $f'(\theta)$: 事前分布， κ : 正規化係数， $L(E_i | \theta)$: 尤度関数，である。

事前分布は，対数正規分布であると仮定すると式(15)のように表せる。

表-11 予測のための設定条件
Parameters for prediction

項 目	設定値
建設年度	1975 年
気温	20℃
降水量	1500mm/年
湿度	70%
初期含有塩分量	0 kg/m ³
かぶり	50mm
表面塩化物イオン濃度	4.5kg/m ³
塩化物イオンの拡散係数	1.5468 cm ² /年
中性化速度係数	1.110 mm/√年

$$f'(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta\theta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\theta - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (15)$$

ここに， $\zeta = \sqrt{\text{var}(\ln\theta)}$ ， $\lambda = E(\ln\theta)$ である。

尤度関数は，かぶり値が θ になる時に点検データの腐食状態（I～IV）が E_i （ $i=1\sim 4$ ）となる条件付き確率で，式(16)に示すような関数で表す。

$$L(E_i | \theta) = \prod_{i=1}^4 P(E_i | \theta)^{q_i} \quad (16)$$

ここに， q_i は E_i （ $i=1\sim 4$ ）の生起確率を表す。

例えば，かぶりは設計かぶり 35mm を平均値とする対数正規分布とした場合の，事前分布，尤度関数および事後分布の例を図-5 に示す。

6. 実構造物の予測と修正のケーススタディー

6.1 設計値を用いた予測

設計値を用いる予測は，構造物の計画・設計段階，あるいは，既設の構造物で点検調査を行っていない場合に行う予測に相当する。この場合には，既存の資料または各種機関で作成された基準書などから劣化要因のパラメータ値を設定する必要がある。塩害・中性化の劣化要因のパラメータ値は，書類等により設定を行う。

6.1.1 塩化物イオンの浸透および鋼材の腐食の予測

塩化物イオンの浸透および鋼材腐食の予測のために設定した表面塩化物イオン濃度，初期含有塩化物イオン濃度，かぶり，中性化速度係数，環境条件を表-11 に示す。

表面塩化物イオン濃度は 4.5kg/m³，初期含有塩化物イオン濃度は 0kg/m³，塩化物イオンの見掛けの拡散係数は，コンクリートの水セメント比を 52%と仮定し，コンクリート標準示方書施工編⁴⁾の式から算出した。中性

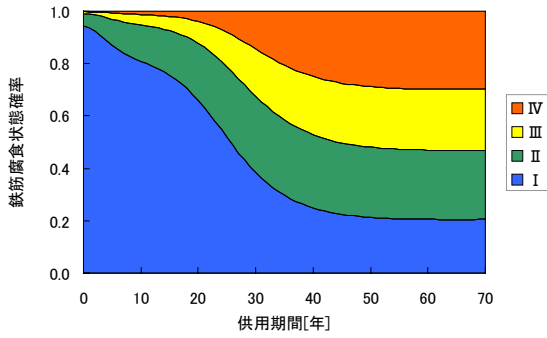


図-6 鋼材腐食グレードの確率分布の経時変化
Time dependence of probability on corrosion

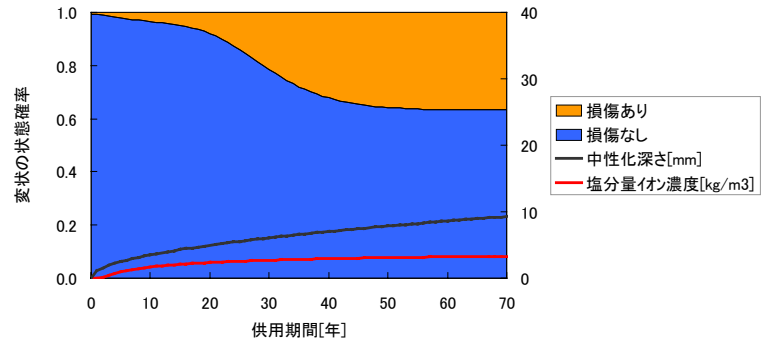


図-7 外観変状状態の確率分布の経時変化
Time dependence of probability on surface condition

表-12 修正のパラメータと修正結果
Parameters for prediction

	設定値による予測結果		調査結果(25 年後)	修正後の値	
	かぶり (mm)	変状面積率 (変状なし, 変状あり)	変状面積率 (変状なし, 変状あり)	かぶり (mm)	変状面積率 (変状なし, 変状あり)
Case 1	50	(0.86, 0.14)	(0.8, 0.2)	46	(0.72, 0.28)
Case 2			(0.4, 0.6)	43	(0.64, 0.36)

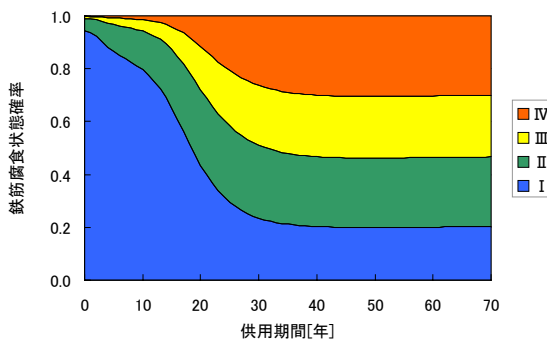


図-8 修正後の鋼材腐食グレードの確率分布の経時変化(Case 1)
Time dependence of probability on corrosion after revision (Case 1)

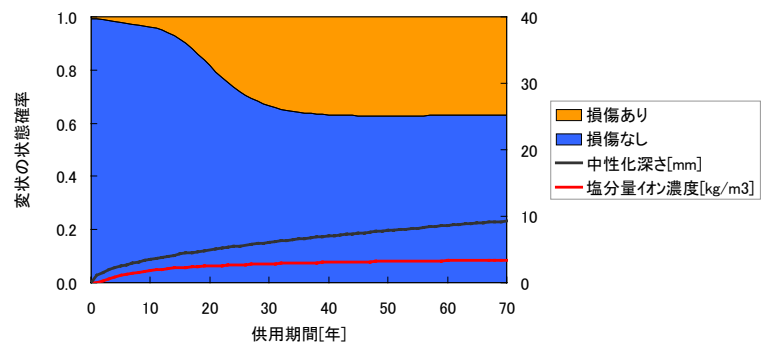


図-10 修正後の外観変状状態の確率分布の経時変化(Case 1)
Time dependence of probability on corrosion after revision (Case 1)

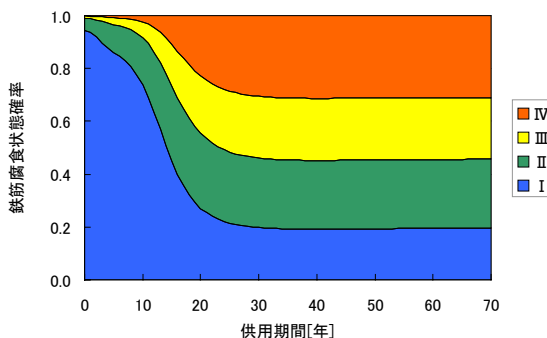


図-9 修正後の鋼材腐食グレードの確率分布の経時変化(Case 2)
Time dependence of probability on corrosion after revision (Case 2)

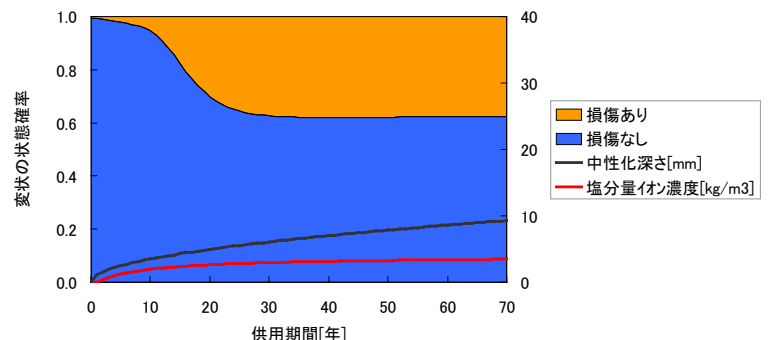


図-11 修正後の外観変状状態の確率分布の経時変化(Case 2)
Time dependence of probability on corrosion after revision (Case 2)

化速度係数も、塩化物イオンと同様に設定した水セメント比から示方書の式を用いて算定した表-11 に示す条件とニューラルネットワークによる式(11)を用い、建設年

から 70 年間の劣化予測を行った鋼材の腐食グレードを図-6 に示す。これから、時間の経過とともに変状が進行していることがわかる。

6.1.2 外観変状の予測

鋼材の腐食グレードと外観変状の相関モデルより、**図-6**を外観変状に変換した結果を**図-7**に示す。

6.2 外観調査結果による予測の修正

6.2.1 修正の条件

外観調査結果から、変状面積をブロック単位に集計して変状面積率を計算する。ここで、ブロックとは栈橋上部工の梁で囲まれた部分をそれぞれ1つの領域のことである。竣工後25年目の調査で得られた変状面積率を**表-12**に示す2ケース仮定し、それぞれの変状面積率を式(16)の q_i に代入して、ベイズ確率の方法を適用した。ここで、修正する確率変数として、かぶりを選定し、最適に修正した場合の劣化予測を行った。

6.2.2 修正の結果

更新する劣化要因をかぶりとして、ベイズ確率の方法を適用した後の更新結果を**表-12**にまとめた。**図-8**および**図-9**には、更新後の鋼材の腐食グレードの確率分布を、**図-10**および**図-11**には、外観変状の状態確率を示す。ここでは、かぶりを修正の対象としたが、中性化速度係数あるいは表面塩化物イオン濃度を対象として、ベイズ確率の考え方をを用いることもできる。また、パラメータの更新をベイズ確率を用いる方法ではなく、予測に用いるパラメータを回帰分析により求めることや、技術者の判断によることで対応できる。

7. 結 論

本研究は、実構造物の点検結果を有効に活用することによる劣化予測手法とその修正方法を検討したものであり、検討に用いたデータはすべて実構造物の詳細点検・調査から得たことが研究の手法上の特長である。以下、

本研究により明らかになった結論を述べる。

- (1) コンクリート中の鋼材の腐食グレードと外観変状の状態との間には相関関係があり、この関係は確率を用いて定量的に表すことができる。
- (2) 鋼材の腐食グレードを予測し、腐食グレードと外観変状の状態との相関モデルを用いることにより、外観変状の予測を行うことができる。
- (3) 外観変状の点検結果を、変状あり、変状なしの面積率に定量化することにより、腐食グレードと外観変状の状態との相関モデルを用いて、鋼材の腐食グレードの確率分布に変換することができる。
- (4) 点検から得られた鋼材の腐食グレードの確率分布に整合するように、ベイズ確率の方法や回帰分析手法を用いて、中性化速度係数、かぶり、表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見掛けの拡散係数を定めることにより、予測の修正を外観変状の点検結果を用いて行うことができる。

参考文献

- 1) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書，維持管理編，2001.1.
- 2) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書，施工編，2002.3.
- 3) 武田均，丸屋剛：ニューラルネットワークを用いたコンクリート構造物中の鉄筋の腐食進行予測，コンクリート工学論文集，Vol.9, No.1, pp.133-142, 1998.1
- 4) 鶴澤哲史，武田 均，泉 博允，小山 哲，中村孝明：リスクを考慮したコンクリート構造物のLCC評価手法，大成建設技術センター報，第34号，2001.