

論文 塩害環境下の鉄筋コンクリートに対するばらつきを考慮に入れた劣化予測

川島 仁^{*1}・網野 貴彦^{*2}・加藤 絵万^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨: 筆者らは、鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化を予測する上で主たる要因である、表面塩化物イオン濃度、塩化物イオンの拡散係数および鉄筋のかぶりのばらつきに着目し、モンテカルロ法を用いてそれらのばらつきを考慮に入れた予測手法を検討した。本文では、環境条件や使用条件が異なる複数の構造物に対して行った劣化調査の結果を用いて予測の結果と実際の劣化状態の比較を行い、予測手法の精度や課題について検討を行った。その結果、本予測手法はある程度の精度が確認され、さらに精度を高めるには、構造物全体にわたる各種調査データの採取が重要であることがわかった。

キーワード: 劣化予測, ばらつき, 表面塩化物イオン濃度, 拡散係数, かぶり, 塩害

1. はじめに

近年、構造物のライフサイクルを通じたマネジメント手法の確立が重要となってきた。構造物の経年変化を考慮したマネジメントにおいては、精度の高い劣化進行予測が重要である。

しかし、実構造物での劣化進行は多様であり、これまで行われてきた確定論的な劣化予測では、劣化現象のばらつきを精度よく表現することが難しかった。

これを解決するために、外観より得られる劣化状態が次の劣化状態に進行する割合を想定した、マルコフ連鎖を用いた劣化進行予測手法が検討されてきた¹⁾。

一方、塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化進行の過程は、これまでの数多くの研究成果により、明らかにされてきた。そこで、筆者らは、これまで確立されてきた塩害の劣化進行過程の各要因に「ばらつき」を考慮して、劣化予測を行う手法を検討してきた²⁾。ここでは、環境条件や使用条件が異なる複数の構造物に対して行った劣化調査の結果を用いて予測の結果と実際の劣化状態の比較を行い、予測手法の精

度や課題について検討を行った。

2. 不確定性を考慮した劣化予測手法の概要

劣化予測は、これまでの研究成果²⁾に基づき以下の手順で行った。

潜伏期ではフィックの拡散方程式³⁾を用いて鋼材位置の塩化物イオン濃度を求め、この値が腐食発生限界値を超えるまでの期間を予測した。進展期は、鋼材の腐食速度を鋼材位置の塩化物イオン濃度の関数でモデル化し⁴⁾、鋼材表面の腐食量がひび割れ発生限界値を超えるまでの期間を予測した。加速期以降における鋼材の腐食量は、腐食により発生したひび割れ幅などとの相関より予測した⁵⁾。

なお、劣化進行の不確定性を考慮に入れるために、先の予測手法に用いられる各パラメータに対して、調査結果から得られた平均値と標準偏差を元にばらつきを考慮した。潜伏期から進展期、加速期以降に進むにつれて劣化予測の精度は、現状の技術の範囲では低下せざるを得ないため、計算上細かく整理して予測しても基本的な部分での誤差により、優位性が無いと考

*1 東亜建設工業(株) シビルリニューアル事業室(正会員)

*2 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術室(正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 LCM研究センター 工博(正会員)

*4 (独) 港湾空港技術研究所 LCM研究センター長 工博(正会員)

られる。そこで、各劣化進行過程においてばらつきが発生方法を変化させた。なお、ばらつきが発生させるにあたり、拡散係数等の各パラメータが0以下の値となる場合があるが、これらについては値を0と設定して予測を行った。

2.1 潜伏期の予測

潜伏期の予測は、式(1)を用い、各パラメータは調査結果より得られたデータを統計処理し、平均値と標準偏差を算出し、表-1 に示すように各パラメータはそれぞれ独立で正規乱数を1000個発生させて、標準偏差に乗じることでパラメータのばらつきを考慮した。

$$C(d,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(d,t)$ ：かぶり d (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 ：表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 C_i ：初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3) を表す。

なお、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、環境条件などによって大きく異なり、 1.2kg/m^3 ³⁾、 1.88kg/m^3 ⁶⁾、 2.5kg/m^3 ⁷⁾など、必ずしも合意の得られた数値となっていない。したがって、腐食発生限界塩化物イオン濃度についてもばらつきを想定する必要があると考えられる。しかし、上記の限界値は、維持管理の中である程度安全側の数値として採用されていると考えられる。そこで、本論文で行うばらつきを考慮した劣化予測においては、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、 2.5kg/m^3 とした。ただし、限界値の違いが予測結果に与える影響については、今後検討していく予定である。

2.2 進展期の予測

進展期の予測は、かぶり 2.5cm の鉄筋の腐食進行速度の計測結果⁴⁾より、進展期における鋼材の腐食速度として式(2)および(3)によって表現した。

$$i = 0.025 \times C(d,t)^{1.5} \quad (2)$$

$$W_{spe} = i / (2F) \times [\text{Fe}(\text{OH})_3]^- \times t_{corr} \quad (3)$$

ここに、 i ：腐食電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 $C(d,t)$ ：

表-1 式(1)中の各パラメータのばらつき

表面塩化物イオン濃度	$C_0 = C_{0ave} + \sigma_{C0} \times dz(C_0)$
見かけの拡散係数	$\log_e D = \log_e [D_{ave} + \sigma_D \times dz(D)]$
初期塩化物イオン濃度	$C_i = C_{iave} + \sigma_{Ci} \times dz(C_i)$
かぶり	$d = d_{ave} + \sigma_d \times dz(d)$

ここに、

- C_{0ave} ：表面塩化物イオン濃度の平均値 (kg/m^3)
- σ_{C0} ：表面塩化物イオン濃度の標準偏差 (kg/m^3)
- D_{ave} ：見かけの拡散係数の平均値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)
- σ_D ：見かけの拡散係数の標準偏差 ($\text{cm}^2/\text{年}$)
- C_i ：初期塩化物イオン濃度の平均値 (kg/m^3)
- σ_{Ci} ：初期塩化物イオン濃度の標準偏差 (kg/m^3)
- d ：かぶりの平均値 (mm)
- σ_d ：かぶりの標準偏差 (mm)
- $dz(C_0)$, $dz(D)$, $dz(C_i)$, $dz(d)$ ：各パラメータの正規乱数

かぶり d (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 W ：腐食量 (g/cm^2)、 F ：ファラデー定数 (=96500C/mol)、 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ ：水酸化鉄(III)の分子量 (=106.9g/mol)、 t_{corr} ：腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回った時点からの経過年数を表す。

ただし、実際の土木構造物の多くは、かぶりが 7cm を超えるため、上記の供試体の結果から算出した腐食速度とは大きく異なるものと推測される。たとえば、松村らの研究⁸⁾と比較すると、若干大きい計算結果を与えている。かぶりの影響は、森永らの研究⁹⁾による、「中性化の腐食速度はかぶりの2乗に逆比例する式」や、友澤らの研究¹⁰⁾によると、かぶり 60mm を境に鉄筋の腐食速度を比較すると、「かぶりによる影響は認められるものの、その違いがそれほど小さくなくなった」ことを考慮に入れ、上記の式(3)にかぶりの影響を考慮して式(4)に示す係数を乗じた。

$$W = k \times W_{(spe)} \quad (4)$$

$$k = 1.0 \quad 3 \times D \geq d \quad (5)$$

$$k = 3 \times D/d \quad 3 \times D < d \quad (6)$$

ここに、 W ：実際の構造物の腐食速度、 k ：かぶりが腐食速度に及ぼす係数、 D ：鉄筋径(cm)、 d ：かぶり(cm)を表す。

なお、進展期における腐食速度のばらつきは、上記式(4)によって得られた値を平均値とし、変

動係数が 1.0 の正規分布と想定した。計算に当たっては、平均値、平均値±2σ、平均値±3σ の 5 種類の値とその発生確率を用いて腐食量を計算した。

なお、腐食ひび割れ発生時の腐食量は、かぶりと鉄筋径の影響が大きいことを考慮に入れて式(7)¹¹⁾により求めた。

$$W_{cr} = \frac{0.02d}{3D} \quad (7)$$

ここに、 W_{cr} ：腐食ひび割れを発生させる鉄筋の腐食量(g/cm²)、 d ：かぶり(cm)、 D ：鉄筋径(cm)を表す。なお、かぶりと鉄筋径のばらつきが結果に影響を及ぼすと考えられるが、ここではデータが少ないことからばらつきを考慮していないため、ばらつきによる予測結果への影響については、今後の検討課題である。

この式によると、かぶり 7cm に設置された D16mm の鉄筋の場合には、ひび割れ発生時の腐食量は 29mg/cm² となり、既往の文献¹²⁾で示された数値 (10 mg/cm²) より大きい。

2.3 加速期以降の予測

加速期以降の予測は、腐食ひび割れ発生後の鉄筋の断面減少率を式(8)にて計算した⁵⁾。

$$V_{reduction} = \frac{4ac}{\phi\gamma_{Fe}} e^{\frac{\alpha}{a}t} \quad (8)$$

ここに、 $V_{reduction}$ ：断面減少率 (%)、 γ_{Fe} ：鉄筋の単位体積重量 (=7.85mg/mm³)、 a ：腐食量とひび割れ幅を関連づける係数 (=1.5mg/mm²と仮定)、 c ：腐食による初期のひび割れ幅 (=0.05mmと仮定)、 ϕ ：鉄筋径 (=16mm)、 α ：腐食速度とひび割れ幅を関連付ける係数 (=0.22mg/mm³/年と仮定)、 t ：腐食ひび割れ発生後からの年数を表す。

劣化が進行するとばらつきは拡大してくるため、予測精度も低下する。そこで、ここでは、上記式(8)によって得られた断面減少率を平均値とし、変動係数を 1.0 とした正規分布を仮定した。計算に当たっては、平均値、平均値±2.5σ の 3 種類の値とその発生確率を用いて腐食量を計算した。

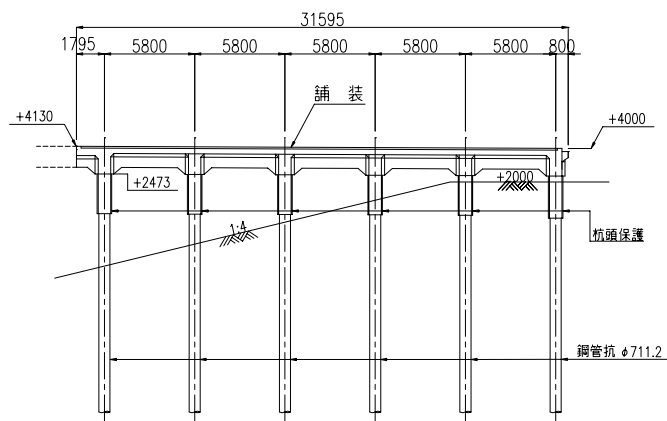


図-1 棧橋 A の構造概要

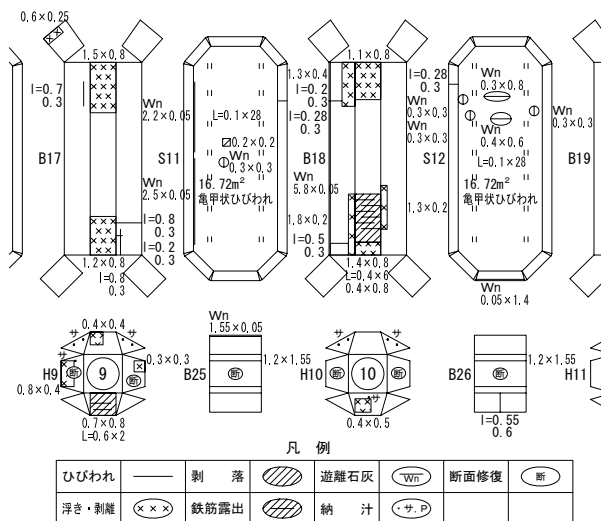


図-2 目視調査の結果一例

3. 検討対象とした棧橋の劣化概要

2 章の予測手法の精度を確認するために供用後の経過年数、環境条件ならびに使用条件の異なる 2 種類の棧橋を検討対象とした。

3.1 棧橋 A の目視調査結果と劣化予測

対象棧橋 A は、建設後 25 年が経過したものである。棧橋 A の構造概要を図-1 に、目視調査結果の一例を図-2 に示す。この調査では、海水面からの距離が違うことから床版と梁を区別し、部材の損傷程度によって棧橋断面方向に 5 グループ¹²⁾に分けて全体の調査を行った。また、本予測手法では劣化が生じた面積割合が計算されるので、実際の劣化面積の算出は、図-2 に示した損傷図面から、浮き、剥離、鉄筋露出を生じた面積を腐食ひび割れ発生時以上に腐食が進行しているとして考え、その中で特に剥離や鉄筋露出が生じている部位は鉄筋の断面減少率が

表-2 栈橋 A の実際の劣化面積割合

部位	外観上健全な面積割合 (%)	外観上の変状が見られた面積割合(%)	
		浮き	剥落
床版	99.7	0.2	0.1
梁	93.8	5.6	0.6
実際の損傷と本予測手法との位置付け	腐食ひび割れ発生前	腐食ひび割れ発生～鉄筋断面減少率 10%未満	鉄筋断面減少率 10%～

10%以上進行しているものとして、全体の目視調査の結果を表-2 に示すように整理した。床版は比較的劣化が少ないが、梁には、6%以上の割合で浮き・剥離が確認された。これは床版に比べ梁のほうが海水面近くに位置することによる影響であることが考えられる。

調査結果から整理したパラメータを表-3 に示す。このパラメータを用いて予測した結果のうち、一例として栈橋 A 梁の進展期における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の予測結果を図-3 に示す。この予測結果から鉄筋位置の塩化物イオン濃度の発生確率は、経過年数によらず指数分布と合うことが確認できる。異なる塩害環境下については今後検討を続ける予定である。

床版と梁に分けた栈橋全体の劣化予測結果を図-4 に示す。この図では、劣化状況の分類を、「劣化しない割合(潜伏期)：鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界値を超えない」、「腐食進行中(進展期)：コンクリート中で鉄筋腐食が進行しているが、まだ劣化は現れていない」、「腐食ひび割れ進行中：部材に鉄筋に沿った腐食ひび割れが発生し、内部の鉄筋が急速に腐食している状態」、「危険～限界の範囲：鉄筋の断面減少率が5%以上10%未満の状態、外観上危険な状態」、「限界を超えた割合：鉄筋の断面減少率が10%以上になり、構造的に危険な状況」の5段階とした。

栈橋 A の床版では、調査結果(表-2)と劣化予測結果(図-4)を比較すると、調査結果では「外観上劣化がない割合は99.7%」であったが、予測では「劣化しない割合(潜伏期)：84%」と「腐食進行中(進展期)：10%」を合わせて94%

表-3 本検討に用いた各パラメータの設定値

部 位	栈橋 A		栈橋 B		
	床版	梁	床版	梁	
表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)	平均値	4.19	5.59	5.56	13.9
	標準偏差	5.82	5.41	0.615	2.80
見かけの拡散係数 D (cm ² /年)	平均値	0.444		1.58	
	標準偏差	2.54		1.97	
かぶり d (mm)	平均 d_{ave}	62.5	90.0	76.8	119.7
	標準偏差 σ_d	10.5	14.9	12.1	21.6
ひび割れ発生限界腐食量 W_{cr} (mg/m ²)	26.0	22.8	31.8	45.6	
かぶりが腐食速度に及ぼす係数 k	0.8	0.9	0.6	0.4	

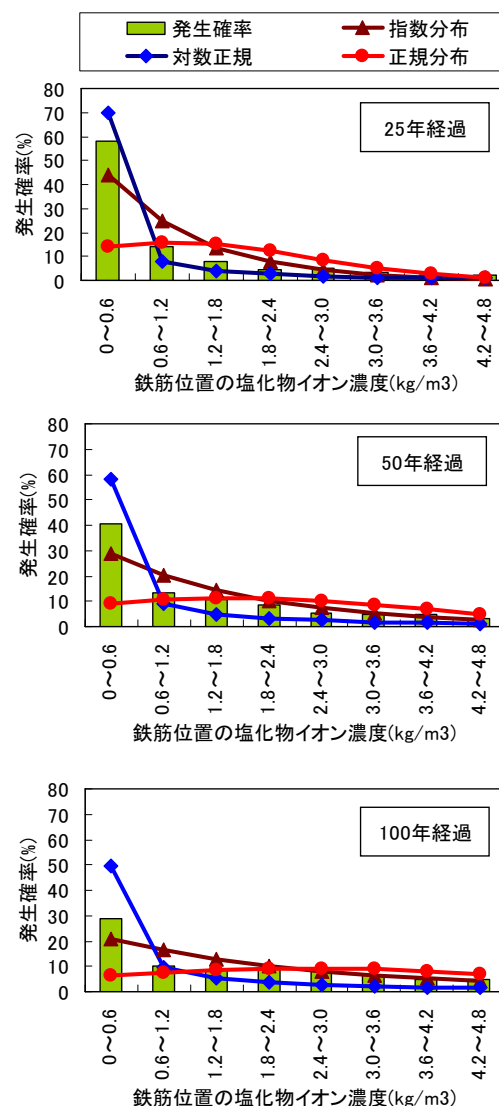


図-3 栈橋 A 梁の塩化物イオン濃度の予測

表-4 栈橋 B の実際の劣化面積割合

部位	外観上健全な面積割合 (%)	外観上の変状が見られた面積割合 (%)	
		浮き	剥落
床版	90.0	10.0	0.0
梁	95.0	5.0	0.0
実際の損傷と本予測手法との位置付け	腐食ひび割れ発生前	腐食ひび割れ発生～鉄筋断面減少率 10%未満	鉄筋断面減少率 10%～

となった。予測計算のほうが劣化の進行が速く計算されているが、両者の違いは少なく、おおよそ予測できていると判断できる。一方、梁においては、予測では「劣化しない割合：88%」と「腐食進行中：6%」を合わせて 94%となった。調査結果では、94% (表-2) であり、両者はよく一致している。

3.2 栈橋 B の目視調査結果と劣化予測

栈橋Bは、建設後約8年経過しており、栈橋Aとは異なる地域に建設されたものである。栈橋Aと比較してかぶりは2cm程度大きいものの梁の表面塩化物イオン濃度は約2.5倍、見かけの拡散係数は約3.5倍の値を示しており、厳しい環境条件であるといえる (表-3)。栈橋B全体の劣化予測結果を図-5に示す。この結果から、かぶりは大きくても表面塩化物イオン濃度や見かけの拡散係数が大きい場合は、年数が経過するとともに急激に「劣化しない割合(潜伏期)」が減少し、劣化の進行が早いという予測結果が確認できた。また、栈橋Bは本栈橋の外観目視調査結果によると、陸側の床版に浮きが確認されており、その劣化の割合は全床版に対して10%程度であった (表-4)。予測結果 (図-5) では、建設後8年程度では大部分の部材には外観上劣化が顕在化していないと計算される。したがって、床版においては、実際の劣化進行のほうが予測より速く、違いが生じた。これは劣化した部分のデータを採取してなかったために、局所的な劣化進行を表現できていなかったことが原因としてあげられ、全体の状況を表現するためには、調査データが不足していたと考えられる。よって、提案する予測手法の精度の向上のためには、部

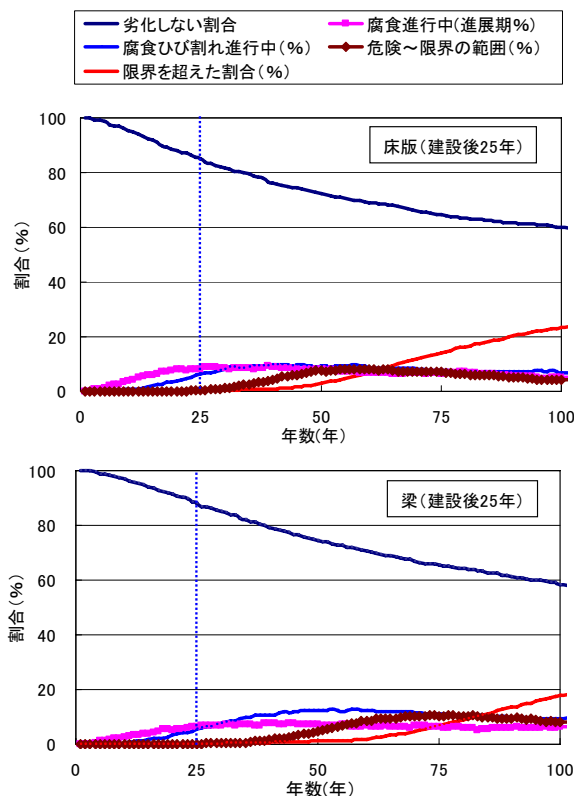


図-4 栈橋 A の劣化推移予測

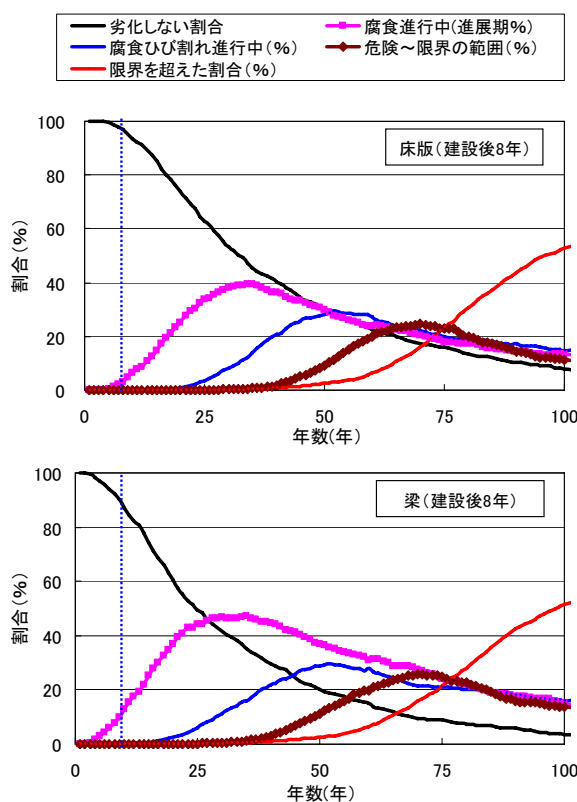


図-5 栈橋 B の劣化推移予測

材全般にわたる目視や塩化物イオン濃度，鉄筋腐食量，かぶりなどの調査の実施が必要である。

4. 本予測手法の精度に関する一考察

3章で述べたとおり，劣化予測では構造物全体を評価することが必要であり，予測精度の向上には，調査データの質が重要な役割を担う。本予測手法では，予測結果と実際の劣化状況の相違が，調査データに起因するものか，解析上の誤差なのかが明確でないことが課題である。これまでの調査では，約100m程度の栈橋に対し，梁，床版それぞれ少なくとも3個のコアを採取したが，更なるデータの蓄積が必要である。さらに，今回仮定した腐食発生限界塩化物イオン濃度等の値においてもばらつきを考慮して検討する必要がある。こうして予測精度を向上することにより，マルコフ連鎖モデルの遷移確率を適切に求めることも可能になると考えられる。

5. まとめ

塩害劣化が生じた2つの栈橋の調査データを用いて，各種要因の不確定性を考慮した劣化予測を行った結果と比較した結果，明らかになったことを以下に示す。

- (1) 部材を梁と床版に分けたことにより栈橋全体としてある程度の精度の予測結果が得られた。
- (2) 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の発生確率は，経過年数によらず指数分布と合うことが確認できた。
- (3) かぶりが大きい場合でも，表面塩化物イオン濃度や見かけの拡散係数が大きい場合は，劣化の進行が早いという傾向を示す予測結果が得られた。
- (4) 部分的な劣化に対応するためには，予測に使う調査データに配慮する必要がある，かつ，健全部も劣化部もバランスよく構造物全体にわたる各種調査の実施が重要である。

参考文献

- 1) 小牟禮建一ほか：塩害を受ける栈橋上部工のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測に基づくLCC算定に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.2061～2066，2004.7
- 2) 網野貴彦ほか：塩害劣化を受けた実栈橋の劣化推移と各種要因の不確定性を考慮した劣化予測との比較検討，日本材料学会・コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，pp.253-258，2005.10
- 3) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.24-25，2002.3
- 4) 守分敦郎：鉄筋コンクリート栈橋上部工の塩害に対する耐久性評価と維持管理に関する研究，東京工業大学学位論文，1996.3
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，pp.11，1998.10
- 6) (財)東京港埠頭公社：土木施設維持管理マニュアル，pp.77-79，2004.6
- 7) (財)土木研究センター：コンクリートの耐久性向上技術の開発，pp.67，1989.5
- 8) 松村卓郎ほか：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法，土木学会論文集，No634/V45，pp304-314，1999.11
- 9) 森永 繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学学位論文，1986
- 10) 友澤史紀ほか：鉄筋コンクリート増建築物の塩害実態調査ーコンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす塩化物量の影響，建築研究報告 No.118,1988
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書，pp.106，1992.10
- 12) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 57，コンクリート標準示方書〔維持管理編〕に準拠した維持管理マニュアル（その1）および関連資料，2003.11