

論文 棧橋 RC 上部工の劣化進行予測手法に関する考察

谷口 修*1・田村 保*2・佐野 清史*3・濱田秀則*4

要旨： 棧橋 RC 上部工を適切に維持管理するには、劣化状態の把握もさることながら以後の劣化進行を的確に予測することが重要となる。そこで本研究は、塩化物イオン浸透の予測モデルを用いた方法と確率論的手法を融合した劣化進行予測手法の妥当性について検討した。劣化度分布が評価できる既往調査事例によって検証した結果、妥当性と今後の確立に向けた方針が抽出できた。

キーワード： 棧橋, 塩害, 確率論, 劣化予測, 塩化物イオン浸透予測

1. はじめに

公共投資の大幅な伸びが期待できない現況においては、既存の社会資本ストックの適切な維持・管理を行うことにより供用期間を通した施設の良好な機能維持を図るとともに、維持管理費の低減を図ることが重要課題となっている。

我が国の物流を支える港湾施設は重要な社会資本の一つであるが海洋環境下に置かれているため、コンクリート構造物の塩害による早期劣化の事例が数多く見られ、維持・管理費用および機能維持・向上のための補修費用の増大につながっている。塩害劣化を受けた構造物の維持・管理および補修を効果的に行うためには、腐食環境を適切に評価した上で、構造物の保有する耐久性を適切に評価して、補修時期・補修工法を選定する必要がある。構造物の耐久性の評価では、適切な点検実施を行うとともに、構造物の置かれた劣化環境下でのコンクリート構造物の合理的で精度の高い劣化予測手法に基づいた耐久性能設計を行うことが重要である。

コンクリート標準示方書¹⁾では、塩化物イオンの拡散と鋼材腐食の進行に基づいた劣化予測手法を示し、塩化物イオンの拡散の予測および鋼材腐食の進行の予測をそれぞれ示している。これらの手法では、腐食ひび割れ発生までは表

面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数および鉄筋の腐食速度等をパラメータとして適切に与えることで、対象施設の平均的な劣化を予測することができる。しかしながら、実際の施設では構造物の各部材の置かれた劣化環境が違ったり構造物の性能が必ずしも一様でないことなどから、劣化が進んだ部材と劣化進行の遅い部材が混在する状況にあるのが一般的であるが、このような実際の施設の劣化進行状況を上述の手法で適切に再現することは困難である。

参考文献 2) では棧橋を対象とした研究の中で、梁・床版を小領域に分割した各施設毎の劣化進行がマルコフ連鎖モデルで表現できるとした劣化予測モデルを提案している。このモデルによれば、各施設の劣化進行は遷移確率で表される確率的現象で表現されており、小領域に分割された梁・床版部材の劣化度に関する目視調査結果から遷移確率を評価することで、将来の梁・床版部材の劣化予測を行うことができる。ただし、参考文献 2) の手法では、遷移確率は構造物の諸元や現状の劣化度の違いに関わらず一定とされたモデルとなっているが、このことは構造物の劣化度が時間的に平均的に進行することを仮定したことになる。実際の構造物では、かぶり厚などの構造物条件の違いや現状の劣化度の

*1 五洋建設株式会社 技術研究所 工修 (正会員)

*2 五洋建設株式会社 土木本部土木設計部 部長 M. S.

*3 東洋建設株式会社 総合技術研究所 美浦研究所 副所長 工博 (正会員)

*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤構造部 材料研究室 室長 工博 (正会員)

違いなどにより，劣化進行が時間的に平均に進むことを想定することはできない。

本研究は，参考文献 2)の劣化予測手法において，かぶり厚などの構造物条件の違いにより劣化進行速度が異なることを，各劣化度毎に異なる遷移確率を与えることで考慮できるものとする新しい確率的な劣化予測モデルを提案するものである。本提案手法によれば，同一施設における劣化度分布をより正確に再現した劣化予測モデルを構築できるため，塩害劣化を受ける構造物の維持・管理戦略立案に向けた有用な情報を提供することができる。

2. 栈橋 RC 上部工の現状の劣化予測手法とその問題点

2. 1 コンクリート標準示方書の劣化予測モデル

コンクリート標準示方書¹⁾では鉄筋位置において発錆限界に至るまでの期間を予測する方法として鉄筋位置における塩化物イオン濃度から求めるものとしており，塩化物イオンの拡散予測にあたってはフィックの第 2 法則として知られる拡散方程式をコンクリート表面の塩化物イオン濃度を一定として解いた次式が用いられている。

$$C(z,t) = C_o \left(1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここで $C(z,t)$: 深さ $z(\text{cm})$ ，時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)，

C_o : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)，

D : 塩化物イオンのみかけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)，

erf : 誤差関数

式(1)では，入力パラメータとして表面塩化物イオン濃度，みかけの拡散係数を与えることで，構造物内の塩化物イオン濃度分布が求まるが，同一の施設であっても各部材毎に環境条件が異なることやコンクリート品質にばらつきが存在することなどのために，実際の構造物の塩化物イオン濃度分布は均一ではない。そのため，塩化物イオン濃度分布の予測精度を向上させるた

めには，各部材毎に入力パラメータと現状の塩化物イオン濃度分布の精度良い値が必要となる。通常これらの測定には多額の費用がかかるため，各施設の限られた箇所での調査結果から施設全体の平均的な劣化進行を判断せざるを得ない。

一方，劣化進行が進んだ段階では鉄筋腐食量の進行予測が重要となるが，鉄筋の腐食は様々な環境要因に左右されることからコンクリート標準示方書¹⁾では加速期，劣化期の各期間の具体的な予測方法については必ずしも明確にされていない。

2. 2 確率論的予測方法

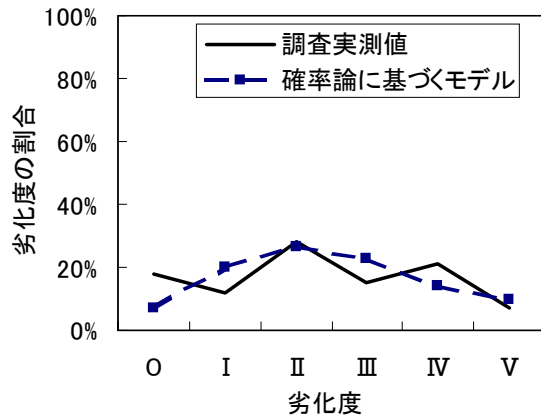
参考文献 2)では，目視点検結果から栈橋の部材毎の劣化度を表—1 に示す劣化度 0～V の 6 段階に分類し，各部材の劣化進行が式(2)で表現されるマルコフ連鎖モデルで表現できるとする劣化予測モデルを提案している。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

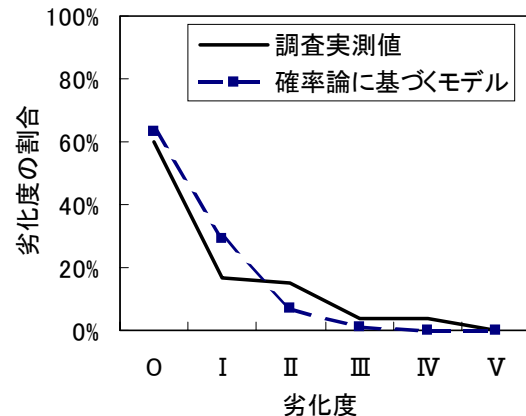
ここで 0～V は表—1 に示される劣化度に分類される部材数の割合を示すものであり劣化度分布を表すものである。 t は経過年数を示す。

x は遷移確率を示しており，ある劣化度の部材が単位経過年数（ここでは 1 年）で次の劣化度に移行する確率を示し，同じ劣化度に留まる確率が $(1-x)$ であることを示すものである。

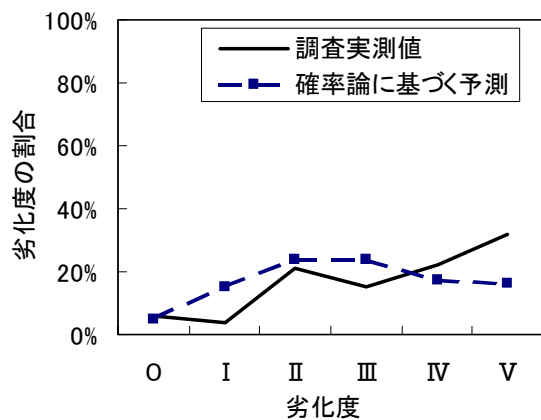
式(2)の劣化予測モデルでは，目視点検結果から得られた各部材毎の劣化度の分布から遷移確率を求めることで，将来の栈橋の劣化予測を行うことができる。遷移確率は目視点検結果から得られる劣化度分布と式(2)から計算される劣化度分布の偏差 2 乗和が最小となる遷移確率で与えられる。この手法は，現時点での目視点検結果による劣化状態から，各部材の劣化度を経過年数によって確率的に予測することが可能



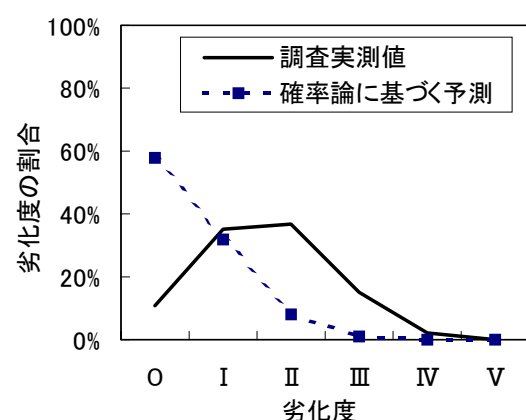
図—1 燃料施設 B 栈橋床版
(建設後 24 年時での調査)



図—3 燃料施設 F 栈橋床版
(建設後 24 年時での調査)



図—2 燃料施設 B 栈橋床版
(建設後 28 年時での調査)



図—4 燃料施設 F 栈橋床版
(建設後 28 年時での調査)

なモデルであり、構造物全体の劣化度分布の予測が可能である。構造物の置かれた環境条件や構造諸元などの劣化要因は、遷移確率で包括的に表現されている。このモデルの適用性について参考文献 2) では、国内の栈橋における調査事例から検討しており、調査を行った栈橋の現状の劣化度を適切な精度で再現できることを示している。ただし、同一栈橋で複数回調査を行った事例での検証を行っていないため、劣化予測モデルとしての適用性についての検証がなされていないとされている。

ここでは、同一の栈橋において異なった経過年数での目視点検による劣化度調査が実施された事例により、上記のモデルの適用性について検証する。検証対象としたのは中部地方太平洋側に位置する民間施設の栈橋 B と栈橋 F であり、建設後 24 年目と 28 年目に目視点検による劣化度調査が実施されている。両施設の建設後 24

表—1 劣化度の分類

劣化度の分類	示方書の分類	状態
劣化度 0	潜伏期	鉄筋腐食がまだ始まっていない段階
劣化度 I	進展期	鉄筋の腐食が進行している段階で進展期の前期～中期に相当する。
劣化度 II	進展期	コンクリート表面に劣化が顕在化しているが、まだ腐食ひび割れは発生していない段階
劣化度 III	加速期	かぶり部分に腐食ひび割れが発生した段階で加速期の前期に相当する段階
劣化度 IV	加速期	かぶり部分に腐食ひび割れが発生しており、加速期の後期に相当する段階
劣化度 V	劣化期	鉄筋の断面欠損が顕著になる段階

年目の調査結果から両栈橋毎に遷移確率を計算し、この遷移確率を用いて式(2)から得られる劣

化度分布と調査結果を比較したものが図-1、図-3である。この結果から、遷移確率という単一のパラメータを用いた劣化予測モデルで調査時点での劣化度分布を再現できることが確認できた。一方、建設後24年目の調査結果から得られた遷移確率を用いてその4年経過後の劣化度の予測を行った結果と実際の調査結果を比較したものが、図-2、図-4である。施設Bと施設Fで4年後の劣化度進行に明確な違いがあり、目視点検結果の精度に若干議論の余地もあるが、予測結果と調査結果の適合性は劣り、特に施設Fのような急激な劣化進行が進んだ事例を再現することは困難である。

3. かぶりを考慮した確率論に基づく予測

3.1 提案する予測モデルの概要

(1) 劣化度の期間の推定

提案するモデルは、かぶりの大小の影響が劣化期間の長さおよび遷移確率に影響を及ぼすものと考え、式(1)で示した塩化物イオン濃度予測の示方書の考えを取り入れ、塩化物イオン濃度により劣化度0～Vの6段階に分類される各期間の比率 $T_0, T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}, T_V$ をあらかじめ予測し、劣化度の期間を考慮した遷移確率を設定し今後の予測を行うものである。

劣化度の各期間を予測するために式(1)を用いて塩化物イオン濃度分布の予測を行い、鉄筋位置で塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 に達した段階で鉄筋に腐食が発生するものとし、潜伏期と進展期を判断する。また、塩化物イオン濃度が鉄筋位置で 2.0kg/m^3 に達した段階でコンクリートに腐食ひび割れが発生する⁴⁾ものとし、進展期と加速期を判断する。示方書の分類と劣化度の関係を表-1に示す。

腐食ひび割れが発生した後の鉄筋の体積減少率 V は、次式⁵⁾を用いて算出し、鉄筋の体積減少率が20%を超過した時点で劣化度Vと仮定した⁴⁾。

$$V = 4ac / (\phi\gamma) \times \exp(\alpha t / a) \quad (3)$$

ここに γ :鉄筋の単位体積質量 (mg/cm^3)

a :腐食量とひび割れ幅を関係付ける係数 (1500mg/cm^3 と仮定⁴⁾) c :腐食による初期のひび割れ幅 (0.005cm と仮定⁴⁾) ϕ :鉄筋径(cm), t :時間(year)

α :腐食速度とひび割れ幅の関係付け係数 ($220\text{mg/cm}^3/\text{y}$ と仮定⁴⁾)

式(1)、(3)から劣化度の各期間を求め、劣化度の期間を推定し、各劣化度の期間の比率 $T_0, T_I, T_{II}, T_{III}, T_{IV}$ を算出した。なお、進展期、加速期については劣化度がさらに2分類されているが、その期間について劣化期間は同じであるとして等分した。ここでは各劣化期間のうち進展期が最も短い期間となり、進展期は劣化度IおよびIIに区分されることから、最も短い劣化度の期間となる劣化度I、劣化度IIの期間の比率をそれぞれ1と設定した。

(2) 劣化期間を考慮した遷移確率

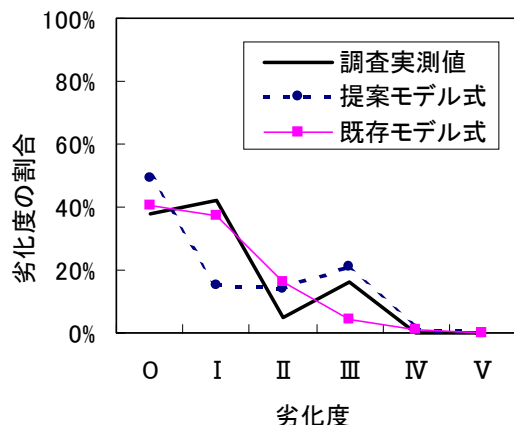
期間が短い劣化度ほど次の劣化段階に移行しやすいものと考え、各劣化度の期間の比率 $T_0 \sim T_{IV}$ に対して表-2のように遷移確率($x_0 \sim x_{IV}$)を設定する。ここで α は進展期の遷移確率であり、調査実測値の劣化度分布と遷移確率($x_0 \sim x_{IV}$)から算出した劣化度分布との偏差2乗和が最小となる α を求めた。

上述のような各劣化度の期間を考慮した劣化予測モデルは式(4)に示すとおりとなる。

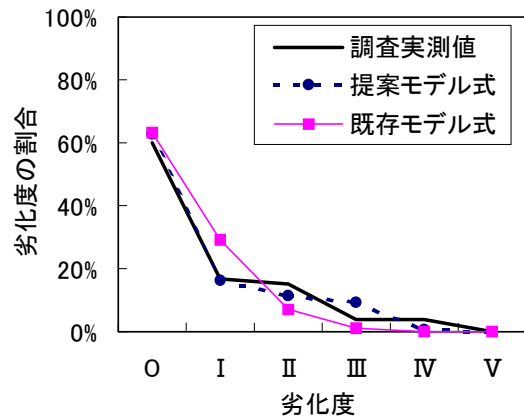
$$\begin{bmatrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & 1-x_I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_I & 1-x_{II} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{II} & 1-x_{III} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{III} & 1-x_{IV} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{IV} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

表-2 遷移率の設定

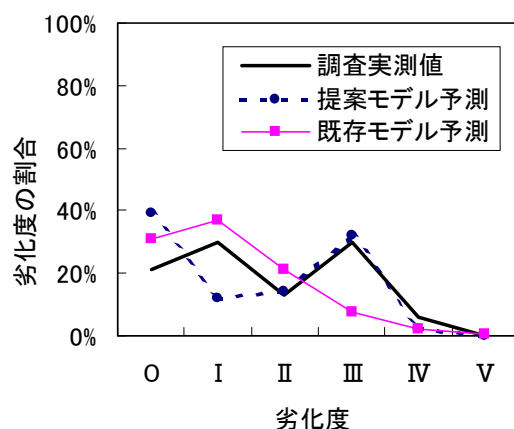
劣化度	0	I	II	III	IV	V
劣化期間の比率	T_0	$T_I=1$	$T_{II}=1$	T_{III}	T_{IV}	
遷移率	$x_0 = \alpha/T_0$	$x_I = \alpha/T_I$	$x_{II} = \alpha/T_{II}$	$x_{III} = \alpha/T_{III}$	$x_{IV} = \alpha/T_{IV}$	



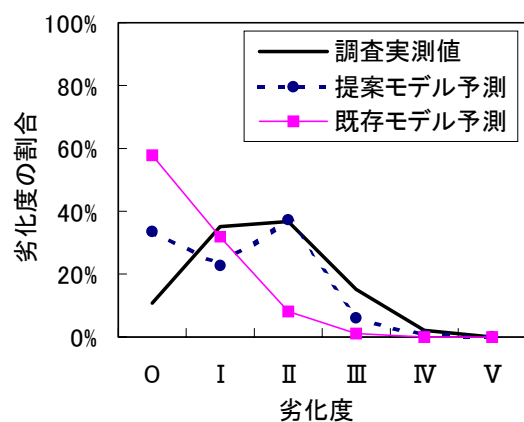
図—5 入出荷施設 D 栈橋, 床版
(建設後 20 年時)



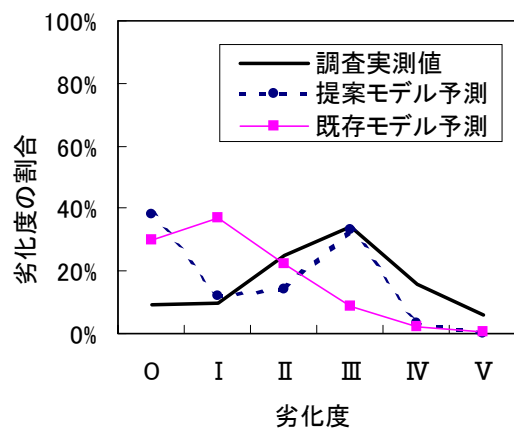
図—8 燃料施設 F 栈橋床版
(建設後 24 年時)



図—6 入出荷施設 D 栈橋, 床版
(建設後 26 年時)



図—9 燃料施設 F 栈橋床版
(建設後 28 年時)



図—7 入出荷施設 D 栈橋, 床版
(建設後 27 年時)

表—4 劣化期間の割合

示方書の分類	潜伏期		進展期		加速期		劣化期
劣化度	0	I	II	III	IV	V	
かぶり5cm	4年間	2年間		30年間			
各期間の比率:T	4	1	1	15	15		
かぶり10cm	17年間	7年間		30年間			
各期間の比率:T	5	1	1	4.29	4.29		

表—5 調査実測値との偏差 2 乗和の比較
(入出荷 D 栈橋, 床版)

	20年目	26年目	27年目
提案モデル	0.0957	0.0669	0.0807
既往のモデル ²⁾	0.0290	0.0727	0.2026

表—3 入力値

表面塩化物イオン濃度	13.0 (kg/m ³)
見かけの拡散係数	1.86 × 10 ⁻⁸ (cm ² /sec)
鉄筋径	1.6 (cm)

表—6 調査実測値との偏差 2 乗和の比較
(入出荷 F 栈橋, 床版)

	24年目	28年目
提案モデル	0.006	0.073
既往のモデル ²⁾	0.024	0.326

3. 2 提案モデルの検証

かぶり厚さの違いによる劣化度の進行の違いを調べるために、かぶりが 5cm, 10cm の場合について式(1), 式(3)を用いて各劣化度の期間を算出した。使用したパラメータを表—3 に示す。各劣化期間の長さ及び比率を表—4 に示す。かぶり厚さの大小によって各劣化度の期間の比率に違いが生じることがわかる。複数回の目視による劣化調査が行われた栈橋 D, F の調査事例をもとに、本提案モデルの検証を行った。栈橋 D は中部地方太平洋側の栈橋であり、建設後 20 年, 26 年, 27 年目に目視による劣化調査が実施されている。栈橋 F は前述のものと同じものである。

初回の点検結果から遷移確率を求め、得られた遷移確率から初回の劣化度の再現計算および各点検年の劣化予測計算を行い、それぞれの対応する目視点検調査結果による劣化度分布と比較した。初回点検結果から遷移確率を算定する方法は前述の通りであるが、かぶりについては設計時のかぶり厚さを用いた。

図—5, 図—6, 図—7 は、栈橋 D の床版について結果を、図—8, 図—9 は栈橋 F の床版についての結果を示したものである。栈橋 D は、20 年目から 6 年間で劣化度 II, III の割合が増える形で劣化が進行した事例であり、栈橋 F は 4 年間で劣化が比較的急速に進行した事例であるが、このような栈橋での劣化事例に対して提案モデルは調査結果を比較的精度良く再現していることがわかる。表—5, 6 は実測値と予測値の偏差自乗和の値を示したものであるが、比較のため示した参考文献 2) のモデルによる結果と比べて、本提案モデルによる値が小さくなっており、このことから提案モデルの予測精度が向上していることがわかる。

4. まとめと今後の課題

- (1) かぶりを考慮するために劣化度の期間をあらかじめ計算し、劣化期間毎に設定した遷移確率を用いた確率モデルを提案した。複数回

の調査を実施した栈橋の劣化調査結果を用い、提案したモデルの検証を行い、有効性が確認できた。提案したモデルは比較的かぶり厚が小さい床版部では、劣化の進行が急速に進む場合が多いことから適用が可能であり、またかぶり厚を明確に考慮したモデルであると言える。

- (2) 本研究では、補修を一度も行っていない栈橋を対象として提案モデルの検証を行った。実際には補修後の再劣化が問題となる場合も少なくないことからこれらの事例を対象とする必要もあるが、補修工法の相違によって補修後の遷移確率に違いが生じるものと考えられるため今後実測データの収集が必要となる。
- (3) 確率モデルを使用することで構造物全体の劣化予測分布の予測が可能となることから劣化度と補修工法を関係付け、前述した再劣化の遷移確率を考慮することでライフサイクルコストの計算が可能になる。そのためには既存の補修事例から劣化度と補修工法とを関連づけることが必要となる。

参考文献

- 1) 2001 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 土木学会
- 2) 小牟禮建一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: R C 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, 第 41 巻, 第 4 号, 2002. 12
- 3) 港湾構造物の維持補修マニュアル, (財) 沿岸開発技術センター, 平成 11 年 6 月
- 4) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料, No. 1001, 2001. 3
- 5) 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委員会報告書, 1998. 10