

論文 目視調査結果に基づいた栈橋 RC 上部工の劣化予測手法に関する検討

谷口 修*1・田村 保*2・佐野 清史*3・濱田 秀則*4

要旨：栈橋 RC 上部工を適切に維持管理するには、現時点の劣化状態の把握もさることながら以後の劣化進行を予測することが重要となる。本研究は、その劣化手法として、目視調査結果をもとに現在の栈橋の劣化部材の割合を正確に表した上で将来の劣化予測が出来る確率論的手法を提案した。既往の栈橋調査事例によってモデルを検証し、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：栈橋, 塩害, 劣化予測, 確率論, 目視調査

1. はじめに

港湾施設は、我が国の物流を担い重要な社会資本であり、その社会的役割は重大であるが、海洋環境下に置かれているためコンクリート構造物は塩害による早期劣化の事例が数多く見られる。特に栈橋上部工は海面直上に設置されることから劣化の進行が他の海洋コンクリート構造物に比べ早い傾向にある。そのため、建設後 30 年以上経過した高度成長期に数多く建設された栈橋は、塩害による劣化が進行し、損傷が現れているものが数多く存在する。

劣化した栈橋を適切に維持管理していくためには、定期的な点検を行い、重大な損傷が発見された場合には速やかに対処することが重要である。しかしながら栈橋の点検は、通常小型船舶を必要とすることなど施設管理者が容易に実施できないなどの制約があり、劣化が進行した段階で初めて劣化による損傷が発見される場合が多い。そのため現時点での劣化状態を適切に評価するとともに今後の劣化進行状況を評価することが栈橋の維持管理を行う上で重要となる。

そこで本研究では、コア採取等の詳細劣化調査を実施する前段階の簡易な劣化予測手法として、現時点での目視調査結果のみから今後の栈橋上部工全体の劣化を予測する方法を提案する。

2. 栈橋 RC 上部工の確率論に基づく劣化予測手法

2.1 既往モデルの概要

これまで栈橋上部工の確率論的劣化予測手法として表—1 に示すモデルが提案されている。これら 2 つのモデルは、目視点検結果から栈橋の部材毎の劣化度を港湾施設の維持管理マニュアル¹⁾などで示されている劣化度 0～5 の 6 段階に分類し、各部材の劣化進行がマルコフ連鎖で表現できるとする劣化予測モデルである。マルコフ連鎖は、ある状態のものが遷移率で次の状態に移行する概念であり、栈橋上部工の劣化もこの考えで推移するものと考えられる。

表—2 に劣化期間と劣化分類の関係の一例を示す。これらの手法は、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。

モデル (1) は、各劣化度で一定とした遷移率を用いており、複数栈橋の遷移率の対比を容易に行うことができることから、複数の栈橋の劣化予測や劣化速度を評価する上で有効なモデルである。

モデル (2) は、あらかじめ塩化物イオン拡

*1 五洋建設 (株) 技術研究所 主任 工修 (正会員)

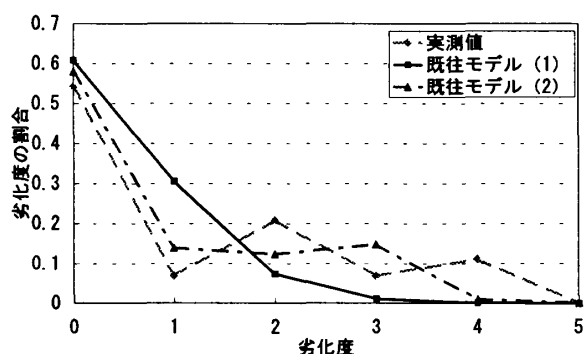
*2 五洋建設 (株) 土木本部土木設計部 部長 M. S.

*3 東洋建設 (株) 技術本部 美浦研究所 副所長 工博 (正会員)

*4 (独) 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)

表—1 既往確率モデル

	既往モデル(1) ²⁾	既往モデル(2) ³⁾
モデル	$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{bmatrix}^Y \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ Y: 建設後の経過年数 x: 遷移率(このモデルでは遷移率を一定とする) P₀~P₅: 予測する劣化度の割合	$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 1-x_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 1-x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & 1-x_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_4 & 1 \end{bmatrix}^{Y'} \begin{bmatrix} P_0' \\ P_1' \\ P_2' \\ P_3' \\ P_4' \\ P_5' \end{bmatrix}$ Y': 調査時点からの経過年数, x₀~x₄: 遷移率 P₀'~P₅': 調査時の劣化度分布
モデルの特徴	遷移率は, 各劣化度で一定としたモデル	遷移率は, 各劣化度でそれぞれ異なったものであるとしたモデル。塩化物イオン濃度による予測方法と確率モデルによる予測方法を融合したモデル。
遷移率の算定方法	遷移率は, 調査時点の劣化度分布に適合するように最小自乗法等で選定する。	遷移率の算定は以下の方法で行う。 1) 劣化度0~5の期間を予測する。 (設計データや観測データを用いて塩化物イオン拡散, 鉄筋腐食速度の予測方法を用いて予測) 2) 各劣化期間の比率を算定(比率を重みとする) 3) 調査した栈橋の劣化度の分布に対して, 既往モデル(1)と同様に遷移率を算定し, 算定した遷移率に劣化度毎に重みを付加する。
留意点	劣化度の割合にばらつきが存在する場合には, モデルで表現できない場合がある。	理論的な劣化期間と目視調査の劣化期間の整合性について問題がある。予測にあたっては, 対象構造物のかぶり, 鉄筋径, 表面塩化物イオン濃度, 拡散係数が必要



図—1 既往モデルの比較

(実測値は太平洋側に位置し, 建設から24年が経過した栈橋床版の劣化度分布)

散や鉄筋腐食速度の予測を行い, 劣化度 0~劣化度 5 の期間を設定し, その劣化期間に従うように遷移率を設定するものである。したがってモデル (1) よりも詳細な入力パラメータを必要とし, 個々の栈橋の劣化予測を行う上で有効なモデルである。しかしながらこれら 2 つのモ

デルは, 図—1 に示すように現時点での劣化分布を正確に反映できない場合がある。なお, 図—1 は, 調査実測値の劣化分布とそれに従うように算出したモデル (1), モデル (2) のそれぞれの劣化度分布である。

本研究では, 劣化度分布を正確に表し, 今後の劣化予測を目視調査結果のみから実施することが可能な簡易手法を提案する。

2.2 提案モデル

提案するモデルを式(1)に示す。

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 1-x_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 1-x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & 1-x_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_4 & 1 \end{bmatrix}^{Y'} \begin{bmatrix} P_0' \\ P_1' \\ P_2' \\ P_3' \\ P_4' \\ P_5' \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで Y : 調査時からの経過年数, $P_0' \sim P_5'$: 調査時点の栈橋全体の劣化度の割合, $P_0 \sim P_5$: Y 年経過後の栈橋全体の劣化度の割合,

$x_0 \sim x_4$: 各劣化度における遷移率を示す。

この劣化進行モデルは、ある劣化度の部材がある遷移率 $x_0 \sim x_4$ で次の劣化度に移行し、移行しない残りの部材は、確率 $(1-x_0) \sim (1-x_4)$ で現在の状態に留まることを示している。また、今後の劣化進行もこれまでと同様の遷移率で劣化が進行するものと仮定している。

遷移率は、調査時の劣化度の割合と調査時点の経過年数から構成される以下の連立方程式を用いて算出する。

$$P_0' = (S_0)^Y \quad (2)$$

$$P_1' = x_0 \sum_{k=1}^Y (S_0)^{Y-k} (S_1)^{k-1} \quad (3)$$

$$P_2' = x_0 x_1 S_0^{Y-3} \times (S_0 + S_1 + S_2) + x_0 x_1 \sum_{j=1}^{Y-3} \left(S_0^{j-1} \sum_{k=1}^{Y-j} S_1^{Y-i-k} S_2^{k-1} \right) \quad (4)$$

$$P_3' = x_0 x_1 x_2 S_0^{Y-4} \times (S_0 + S_1 + S_2 + S_3) + x_0 x_1 x_2 \times \sum_{j=1}^{Y-4} \left\{ S_0^{j-1} \times \left[S_1^{Y-j-3} (S_1 + S_2 + S_3) + \sum_{i=j+1}^{Y-3} \left(\sum_{k=1}^{Y-i} S_2^{Y-i-k} S_3^{k-1} \times S_1^{i-(j+1)} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

$$P_4' = x_0 x_1 x_2 x_3 S_0^{Y-5} \times (S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4) + x_0 x_1 x_2 x_3 \times \sum_{j=1}^{Y-5} \left\{ S_0^{j-1} \times \left[S_1^{Y-j-4} (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) + \sum_{m=j+1}^{Y-4} S_1^{m-j-1} \left\{ S_2^{Y-m-3} (S_2 + S_3 + S_4) + \sum_{i=m+1}^{Y-3} \left(\sum_{k=1}^{Y-i} S_3^{Y-i-k} S_4^{k-1} \times S_2^{i-(m+1)} \right) \right\} \right] \right\} \quad (6)$$

ここで, $S_0 = 1 - x_0$, $S_1 = 1 - x_1$, $S_2 = 1 - x_2$, $S_3 = 1 - x_3$, $S_4 = 1 - x_4$

式 (1) ~ (6) を用いることで現時点の調査結果を正確に表した劣化度分布の表現が可能になる。

3. 提案モデルの検討

3.1 既往調査事例を用いた検証

(1) 調査栈橋の概要

全国各地の建設後 10 年から 47 年経過した全 44 件の栈橋の目視調査結果を用いて検討を行った。このうち H. W. L (朔望平均満潮面), 設計

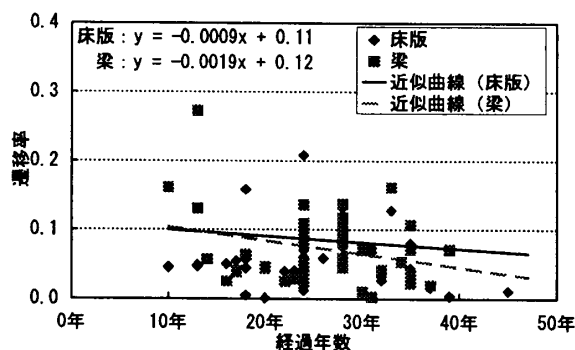
表—2 劣化度の分類

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で潜伏期に相当する。
劣化度1	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2	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であり、進展期の後期に相当する。
劣化度3	加速期	かぶり部分に腐食ひび割れが発生しており、加速期の前期に相当する。
劣化度4	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。
劣化度5	劣化期	鉄筋の断面欠損が顕著になる段階であり、劣化期に相当する。

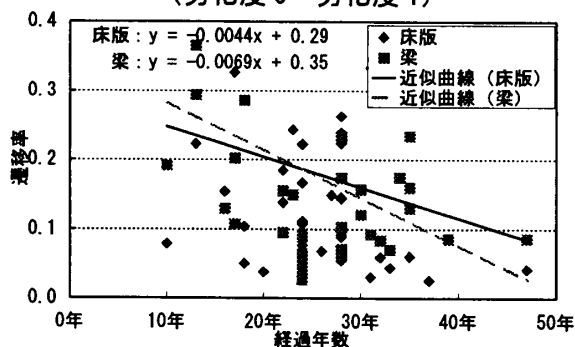
かぶりのデータが得られているものは、16 の栈橋である。なお、かぶりデータは実際のかぶりの値で検討することが有効であると考えられる。しかしながら、ここでは設計かぶりのみしか得られなかったことから、設計かぶりをを用いて検討した。

(2) 遷移率と建設後の経過年数の関係

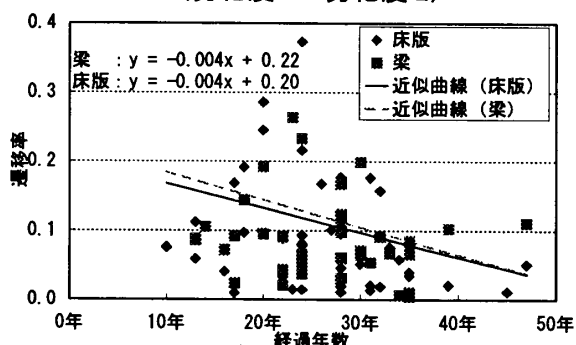
図—2～図—6 は、建設年数と各劣化度の遷移率の関係を示したものである。各劣化度において床版と梁の近似直線はほぼ同様の傾向を示していることがわかる。これらの図では、建設当初から年数が経過するに従って遷移率が小さくなる傾向が見られた。建設から 20 年未満の比較的新しい栈橋に対する全体の劣化調査は、一般的に何らかの劣化が発見された場合に調査が行われており、健全である場合には、劣化調査が実施されない場合が多い。そのため、図—2～図—6 の近似直線は、初期欠陥等を有している構造物ほど劣化の進行速度が早く、それ以外の構造物は劣化の進行が遅いことを示しているものと考えられる。そのためこれらの図で算出した近似直線から遷移率を算定し劣化予測を行うことは、現在健全である構造物に対して危険側に予測されることが考えられる。



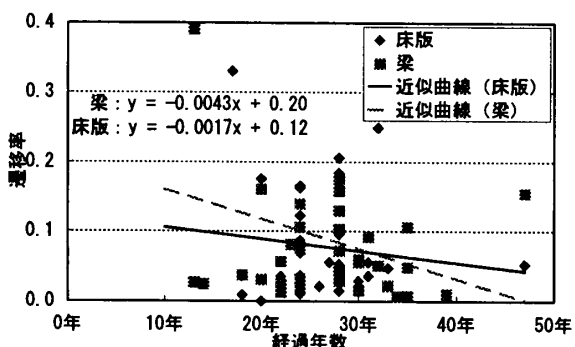
図—2 経過年数と移行率
(劣化度 0→劣化度 1)



図—3 経過年数と移行率
(劣化度 1→劣化度 2)



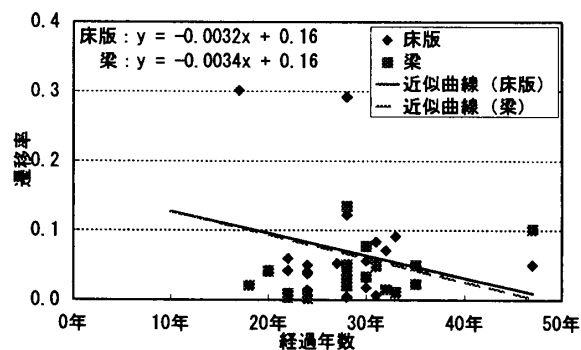
図—4 経過年数と移行率
(劣化度 2→劣化度 3)



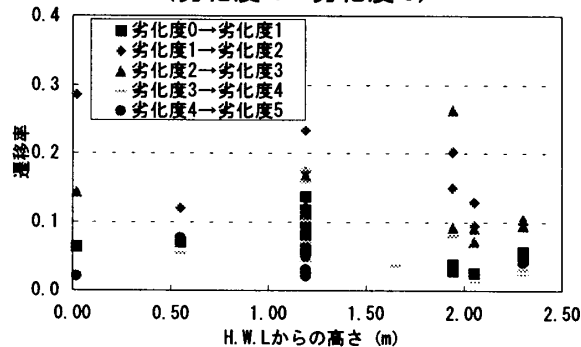
図—5 経過年数と移行率
(劣化度 3→劣化度 4)

(3) H.W.L と移行率の関係

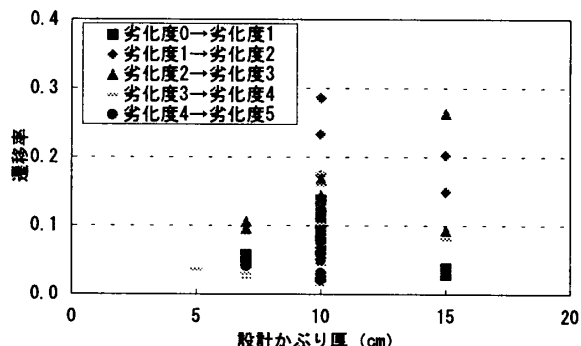
図—7 は、調査した栈橋の梁について H.W.L と移行率の関係を示したものである。この図から



図—6 経過年数と移行率
(劣化度 4→劣化度 5)



図—7 移行率と H.W.L の関係 (梁)



図—8 移行率と設計かぶり厚の関係

H.W.L と移行率の関係を求めることはできなかった。移行確率がばらついた理由として施工・品質条件、環境条件等様々な要因が影響しているものと考えられる。

(4) かぶりと移行率の関係

図—8 は、梁についてかぶりと移行率の関係を示したものである。同一のかぶりに対する移行率のばらつきが大きく、その関係を見いだすことは出来なかった。

3.2 劣化予測の検証

提案したモデルの検証は、1 回目の目視劣化調査結果を用いて既往の劣化進行モデル (1) および提案した劣化予測モデルで劣化予測を行い、追跡調査後の実測値と比較することで劣化予測

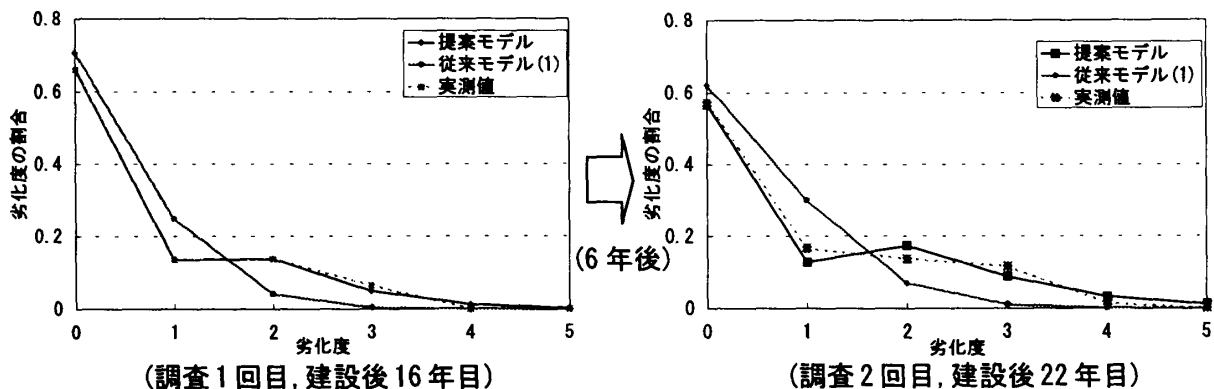


図-9 モデルの検証 栈橋A(梁)

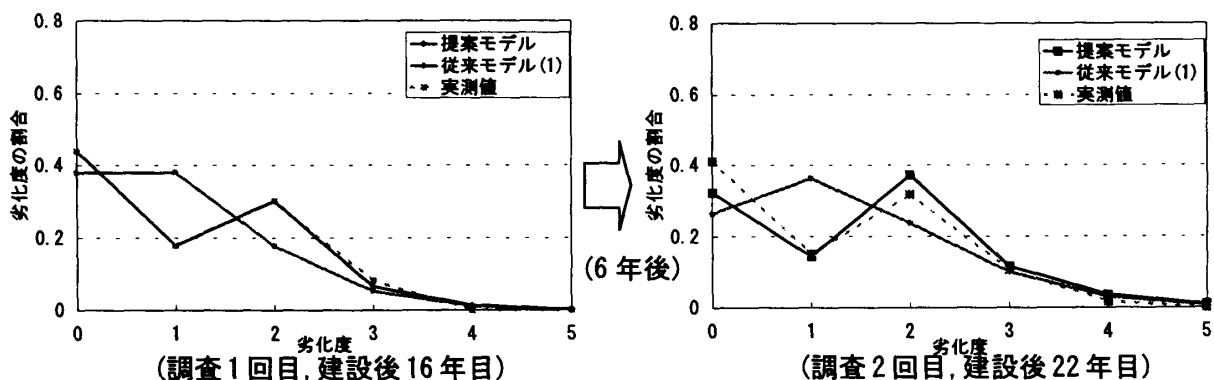


図-10 モデルの検証 栈橋A(床版)

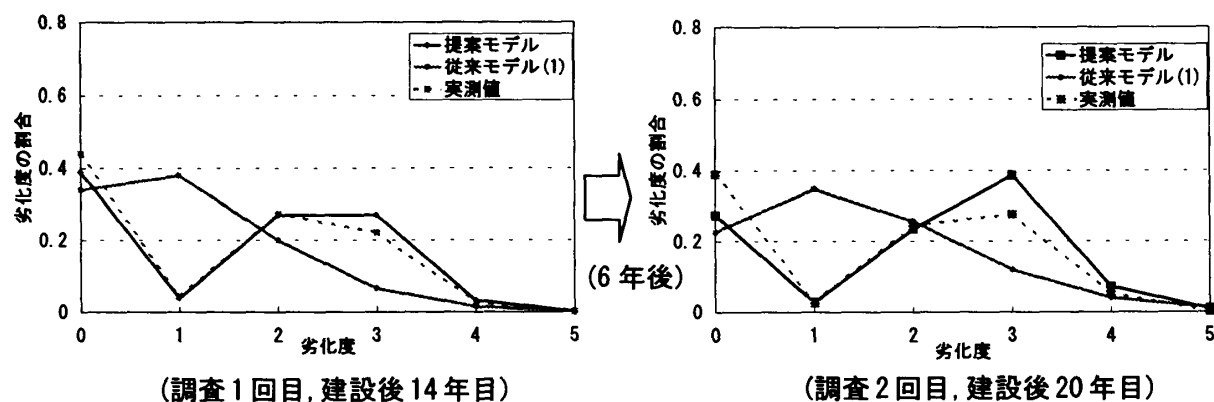


図-11 モデルの検証 栈橋B(梁)

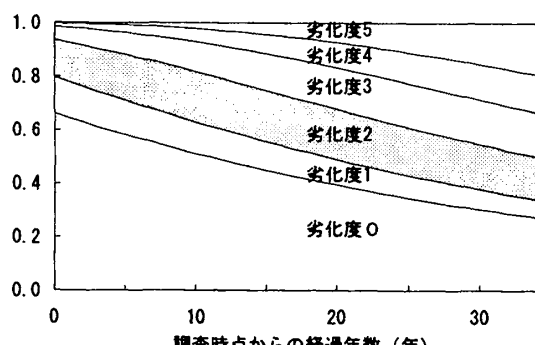
モデルを検証した。

劣化予測モデルの検証で対象とした栈橋Aは、建設後16年目と22年目、栈橋Bは建設後14年目と20年目の2回にわたって目視劣化調査が行われたものであり、いずれの栈橋も東京湾に位置するものである。

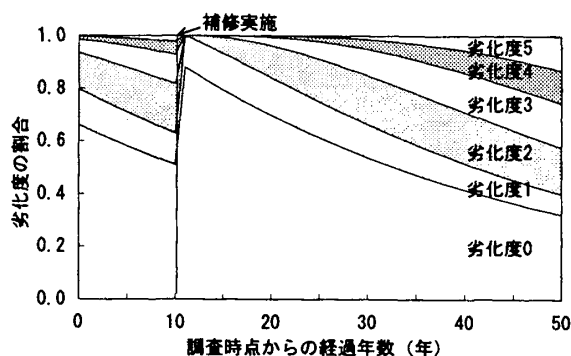
検証結果を図-9～図-11に示す。提案した劣化モデルは、調査1回目の劣化度分布を正確に表した上で劣化予測を行っていることがわかる。また、提案モデルは、モデル(1)で表現できなかった劣化度分布の凹凸も表現できること

がわかる。図-12は栈橋Aの梁の調査時点での遷移率を用いて今後の劣化推移を予測したものである。このような劣化曲線とすることで容易に構造物全体の劣化推移を把握することができる。

なお、ここでは簡易モデルとしての対比を行うために前述のモデル(1)との比較のみを行った。また、調査実測値において劣化度の割合が0である箇所については、式(2)～式(6)で遷移率を算定することができないため、その箇所の遷移率については、劣化度が前段階の遷移率を用い



図一12 梁の劣化予測曲線



図一13 梁の補修後の劣化予測曲線

て計算を行った。

4. 補修後の再劣化に関する検討例

確率論的劣化予測手法は、目視調査結果の劣化度分布から得られた遷移率によって将来の劣化度分布を予測することが可能である。そのため、施設全体の劣化評価を行うことができ、栈橋の維持管理計画を立案する上で有効なものとなる。この有効性を生かすために、ここでは提案モデルを用いて劣化した栈橋の補修後の再劣化に関して計算した例を図一13に示す。

図一13は、調査時点から10年後に補修を実施し、補修後の劣化速度は補修前と同様に推移していくと仮定した。また、劣化度が2以上の部材は、すべて補修し、補修後の部材は劣化度0になることとした。このような劣化曲線を用いることで港湾施設管理者が劣化予測の推移を容易に理解することができる。

5. まとめおよび今後の課題

本研究で得られた主な結果と残された課題は、以下のとおりである。

(1) 本研究は、目視調査結果のみから簡易に栈橋上部工の劣化予測が可能な手法を提案した。

提案した手法は、現時点の劣化調査結果を正確に表し、栈橋全体の劣化予測が実施できるものである。複数回の調査事例を基に劣化予測に関する検証を行い、有効性を確認した。

なお、本研究で提案したモデルはあくまで簡易手法であり、塩害劣化を受けた構造物の詳細調査は、コアを採取し、コンクリート内部の塩化物イオン濃度を測定することは、勿論重要であると考えられる。

(2) 提案したモデルは、遷移率が経時的に変化しないという仮定をもとにしたものである。しかしながら実際の現象では、鉄筋腐食発生までは比較的劣化の進行が遅く、鉄筋腐食発生後は急速に劣化が進行することと思われる。そのため、栈橋全体が健全であるものに対して本モデルを適用することは問題があるものと考えられる。そのため、建設時からの遷移率の推移については、検討する必要がある。

(3) 補修後の劣化予測手法として現在と同等の進行速度で劣化が進むと仮定した場合の劣化予測曲線を作成した。このような劣化予測曲線を作成することで栈橋全体の劣化の推移が容易に理解することができる。

なお、補修後の劣化速度については、再劣化事例の調査等、データの収集が必要となる。

参考文献

- 1) 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，1999年6月
- 2) 小牟禮建一，濱田秀則，横田弘，山路徹：RC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) 佐野清史，中川将秀，谷口修，濱田秀則：栈橋RC上部工を対象とした劣化進行予測手法に関する研究，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，Vol.3，2003.10