

論文 栈橋 RC 上部工における劣化の実態と評価方法に関する考察

中川 将秀*1・中村 亮太*2・内藤 英晴*3・濱田 秀則*4

要旨：塩害等の劣化環境に曝露された栈橋 RC 上部工を適切に維持管理するためには、現状の劣化の実態を把握し、的確な劣化進行予測を行うことが重要である。本報は、主に追跡調査を行った栈橋 RC 上部工の劣化調査事例をもとに、各栈橋の床版および梁部材毎に劣化度を考案した判定基準により判定し、その劣化度分布をマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルに適用して、劣化速度の指標として遷移確率を整理し、栈橋の経過年数、設計かぶり厚さおよび H.W.L.からの高さが遷移確率に及ぼす影響などについて検討したものである。

キーワード：栈橋 RC 上部工、目視調査、劣化度判定、劣化進行モデル、劣化予測、塩害

1. はじめに

栈橋は、港湾荷役を司る上でも重要な構造物であり、その機能が麻痺した時の損失や、費用の効果的投資を考えると、維持管理を計画的に行っていくことが必要である。そのためには、現時点の劣化状況を適切に評価するとともに、今後の劣化進行を精度よく予測した上で、所要の機能を所用期間保持するための最適な維持管理計画を立案することが重要である。

本報は、栈橋 RC 上部工において、5 年程度の間隔において複数回実施した目視による外観の追跡調査結果をもとに、劣化進行モデルを適用して、劣化の実態を整理するとともに、その適用性について検討したものである。また、その過程において、劣化進行モデルの精度向上のため、劣化度判定基準について検討し、劣化度判定基準の試案を考案した。

2. 調査栈橋の概要

調査栈橋の概要を表 1 に示す。31 件の栈橋の目視による劣化調査資料を収集し、後述するスケッチから 6 段階の劣化度判定が可能なもので、主に劣化の進行状況が把握できる 2～3 回の

表 1 調査栈橋の概要

調査栈橋数	31 栈橋
経過年数	14～39 年
場所（都道府県）	千葉県・神奈川県 愛知県・大阪府 徳島県・香川県 広島県・佐賀県
H.W.L.から部材下端 までの高さ	(床版) 1.94～3.24m (梁) 1.19～2.30m
設計かぶり	(床版) 5～10cm (梁) 5～15cm
複数回調査栈橋数	17 栈橋

複数回調査を行っている 17 栈橋の床版および梁部材を評価対象とした。これらの栈橋は、大型タンカー等が接舷することもあり、H.W.L.からの高さが高いという特徴がある。

3. 評価方法

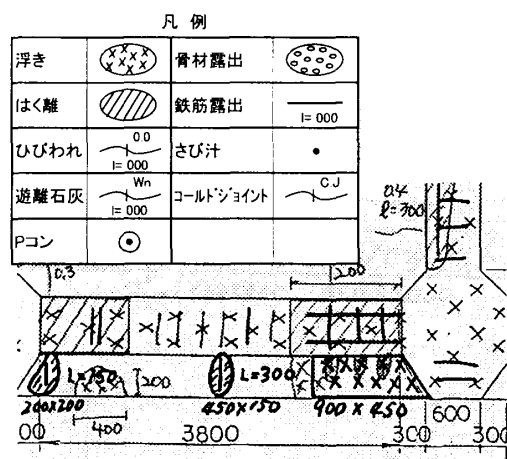
まず、目視による劣化調査資料から各栈橋の床版や梁部材毎に劣化度の判定を行った。そして、その劣化度分布から参考文献¹⁾に示されている劣化進行モデルを適用し、劣化速度の指標となる遷移確率を算出して、遷移確率と栈橋の経過年数、H.W.L.からの高さおよび設計かぶりとの関係を調べた。

*1 東洋建設(株) 総合技術研究所 美浦研究所 構造研究室 工修 (正会員)

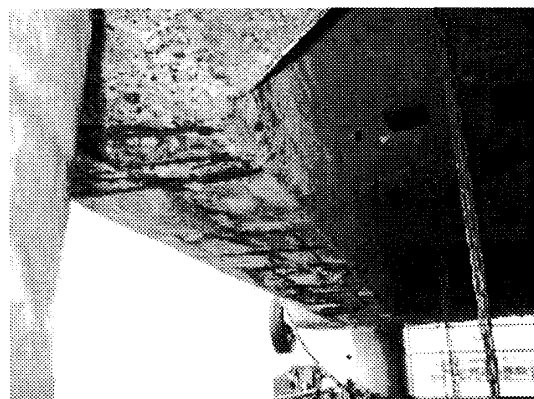
*2 東洋建設(株) 総合技術研究所 美浦研究所 材料研究室 (正会員)

*3 五洋建設(株) 土木本部 土木部 リニューアルチーム 部長 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)



図－１ スケッチの一例



写真－１ 劣化状況写真の一例

表－２ 判定基準（試案）

劣化度部材項目		0	I	II	III	IV	V
表面錆		なし	コンクリート表面に点錆が見られる 鉄筋腐食発生時点	一部に錆汁が見られる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
露出鉄筋		なし	なし	露出した鉄筋が1~3箇所程度見られる	露出した鉄筋が数箇所見られる	露出した鉄筋の腐食および断面減少が見られる	露出した鉄筋の腐食が著しく、断面が5%以上減少している
ひび割れ	床版	なし	1方向にひび割れが見られる	1方向にひび割れが多く見られる	2方向に幅0.05mm以上のひび割れが見られる	2方向に幅1mm以上のひび割れが広い範囲に見られる	鉄筋の体積減少率が5%を超過した時点 —
	梁	なし	軸直角方向にひび割れが見られる	軸直角方向にひび割れが多く見られる	軸方向に幅0.05mm以上のひび割れが見られる	軸方向に幅1mm以上のひび割れが見られる	
遊離石灰		なし	部分的な遊離石灰の溶出が1~3箇所程度見られる	遊離石灰の溶出が数箇所見られる	遊離石灰の溶出が広い範囲に見られる	腐食ひび割れが発生する時点	—
浮き・剥離・剥落		なし	なし	小規模な浮き、剥離・剥落が見られる(20%未満)	20~50%未満の浮き、剥離・剥落が見られる	50~70%未満の浮き、剥離・剥落が見られる	70%以上の浮き、剥離・剥落が見られる

潜伏期

進展期

加速期

潜伏期

進展期

加速期

3.1 劣化調査資料

収集した劣化調査資料は、栈橋全体にわたって床版および梁の各部材毎に写真－１や図－１に示すスケッチの例のように記録されており、スケッチには、目視調査によるひび割れ、遊離石灰、浮きや剥離・剥落、錆汁、鉄筋露出状況などが表記されている。

3.2 劣化度判定

劣化度判定は、スケッチから6段階で行った。劣化度判定には既往の判定基準²⁾があるが、この判定基準では定性的な表現が多いため、判定者によって劣化度に差を生じる恐れがある。今後、劣化進行モデルを適用して、より精度の高

い劣化予測をするためには、判定者が劣化度を判定しやすく、その判定結果のばらつきがより小さくなる判定基準が必要であることから、既往の判定基準²⁾や参考文献^{1) 3)}の判定基準を参考にして、新たに表－２に示す判定基準（試案）を考案した。

判定基準（試案）は、劣化度0を潜伏期、I～IIを進展期、III～IVを加速期、Vを劣化期に区分しており、各項目の特徴を以下に述べる。

(1) 鉄筋腐食がまだ進行しない潜伏期は劣化度0とし、鉄筋腐食が進行しているが腐食ひび割れが発生していない進展期は劣化度I～II、腐食ひび割れが発生する加速期は劣化度III～

IV、鉄筋の断面欠損が顕著な劣化期は劣化度 V に区分した。

(2) ひび割れの判定は、幅 0.05mm 以上を腐食による初期ひび割れ幅⁵⁾として加速期初期の劣化度を III とした。また、ひび割れ幅 1mm 以上で劣化度 IV とし、既往の判定基準²⁾より厳しくしている。これは、目視によるひび割れ幅の調査では、鉄筋腐食を過小評価する可能性があるためである。

(3) 浮き、剥離・剥落の判定は、参考文献³⁾の判定基準を採用した。

(4) 露出鉄筋や遊離石灰の項目を新たに設け、露出鉄筋は体積減少率が 5% を超過した時点⁶⁾で耐荷力の低下が著しいものと考え、劣化期として劣化度を V とした。遊離石灰は構造上特に重要な問題にならないと判断して劣化度 I ～ III に限定した。

図-2 は、経過年数 24 年の栈橋の梁を対象に、判定者 2 名 (A: 年齢 29 才, 専門分野コンクリート, 塩害に関する経験年数 2 年, B: コンクリート劣化診断エキスパートシステム⁴⁾で判定) による劣化度の割合を既往の判定基準²⁾と判定基準 (試案) を適用した結果例である。このように、判定基準 (試案) を適用することにより、判定者の違いによる劣化度のばらつきを小さくできるといえる。以上のことから、劣化度判定は、判定基準 (試案) を適用した。

3.3 劣化進行モデル

適用する劣化進行モデルは、既往の文献¹⁾で報告されている図-3 のマルコフ連鎖を用いた式(1)に示すものである。このモデルは、実際の栈橋の劣化度分布を経過年数 t と遷移確率 x で表わすものである。遷移確率は、劣化速度と比例の関係があり、遷移確率が大きいほど劣化速度が速い。また、劣化度間の遷移確率は、同一環境の栈橋であれば一定と考えたモデルである。

3.4 遷移確率の算出

遷移確率は、各栈橋の床版あるいは梁毎に調査資料から劣化度判定した劣化度分布 (以下、調査実測値の劣化度分布と記す) と劣化進行モ

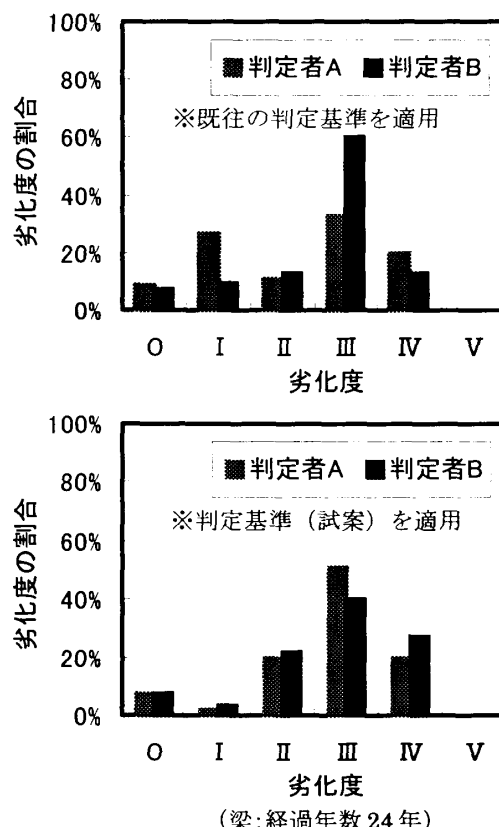


図-2 判定者の違いによる劣化度のばらつき

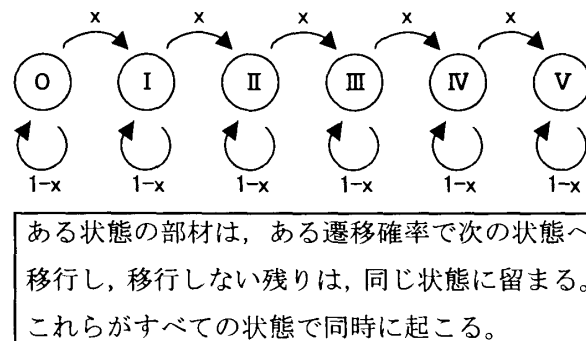


図-3 マルコフ連鎖推移図

$$\begin{pmatrix} O \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

デルに経過年数および任意の遷移確率を代入して表現した劣化度分布 (以下、劣化進行モデルによる劣化度分布と記す) の偏差平方和が最小になる値を算出し、それぞれの遷移確率とした。

経過年数 30 年の栈橋の梁部材について、遷移

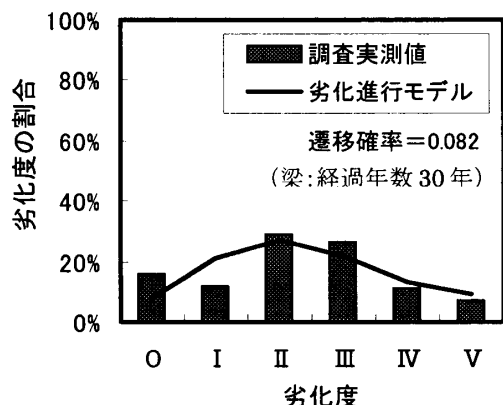


図-4 遷移確率の算出例

確率を算出した例を図-4に示す。図に示すようにある遷移確率を与えることによって得られた劣化進行モデルによる劣化度分布は、調査実測値の劣化度分布とほぼ一致することがわかる。

4 評価結果と考察

4.1 遷移確率と経過年数の関係

遷移確率と建設後からの経過年数との関係を図-5に示し、追跡調査した栈橋の遷移確率変化量を図-6に示す。図中の直線は、追跡調査した同じ栈橋を表している。遷移確率は0～0.2の範囲に分布しており、このことから経過年数が同一であっても、調査実測値の劣化度分布が様々あることがわかる。また、追跡調査結果によると経過年数24年程度までは遷移確率が一定となるものが多いが、24年以降の調査では、やや大きくなる傾向がみられた。遷移確率の変化量は、-0.04～0.09の範囲にばらついており、各調査毎に遷移確率が異なった。

そこで、遷移確率の変化量の大きさが劣化予測へ与える影響具合を調べるため、調査初回における遷移確率を用いて、追跡調査の劣化度分布を予測することで検証を行った。劣化予測モデルの検証結果の一例を図-7に示す。図の上段は、経過年数20年の栈橋の床版における調査実測値と良く合う遷移確率0.044の劣化進行モデルから算出した劣化度の分布である。図の下段は、この栈橋の6年後の調査実測値と遷移確率0.044の劣化進行モデルを用いて6年後の劣

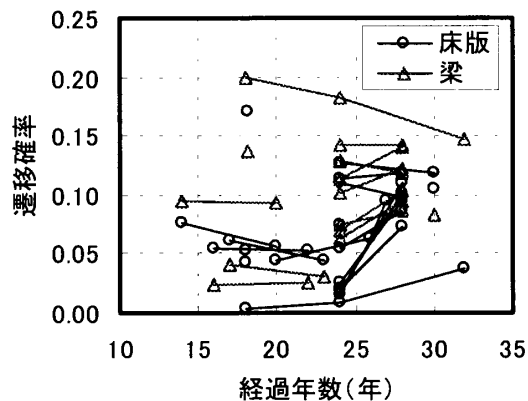


図-5 遷移確率と建設後の経過年数の関係

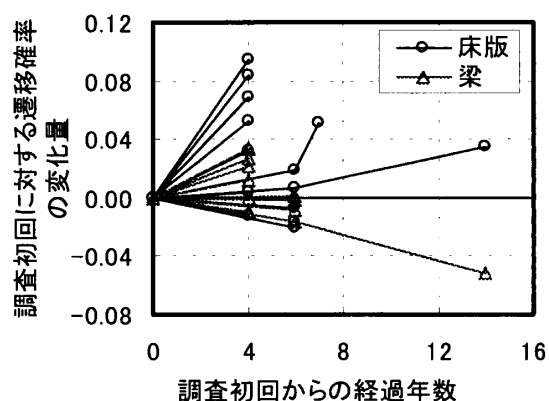


図-6 追跡調査した栈橋の遷移確率変化量

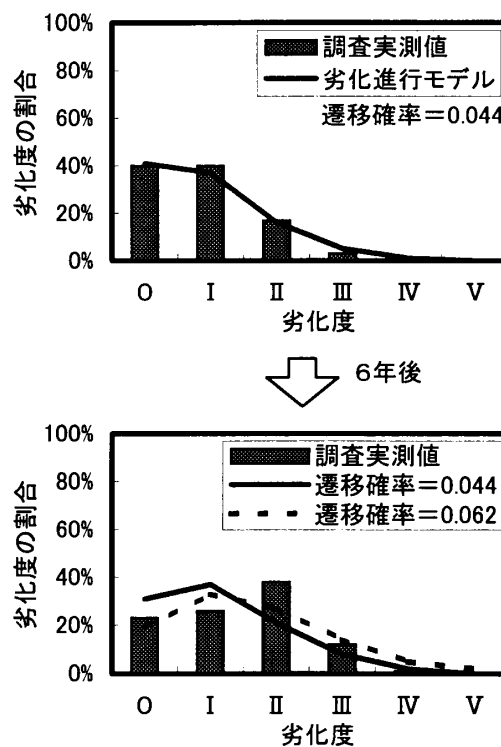


図-7 劣化予測モデルの検証

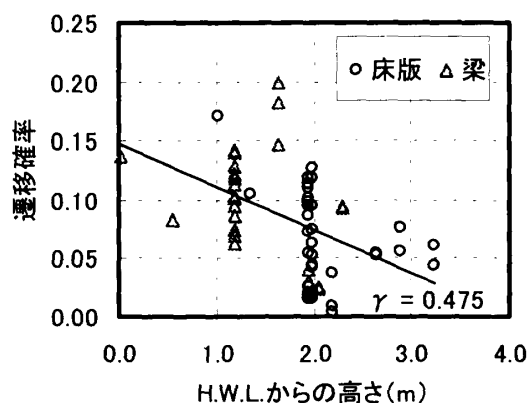


図-8 遷移確率と H.W.L.からの高さの関係

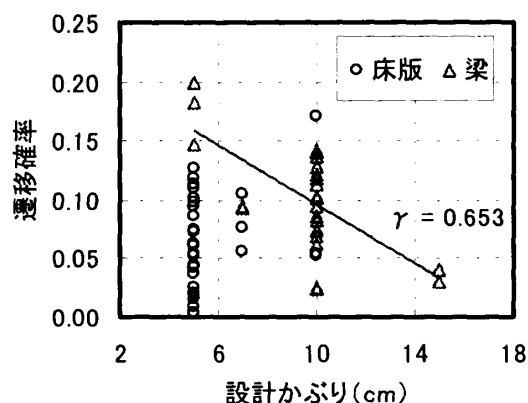


図-10 遷移確率と設計かぶりの関係

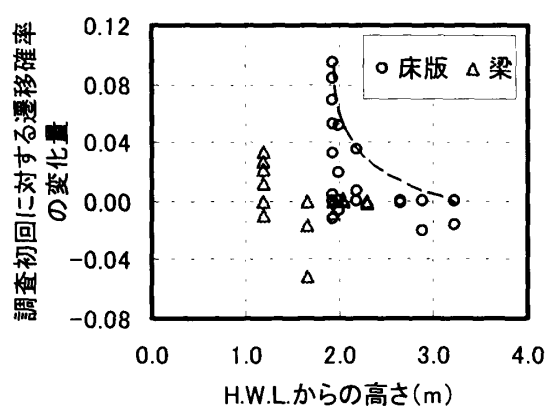


図-9 遷移確率の変化量と H.W.L.からの高さの関係

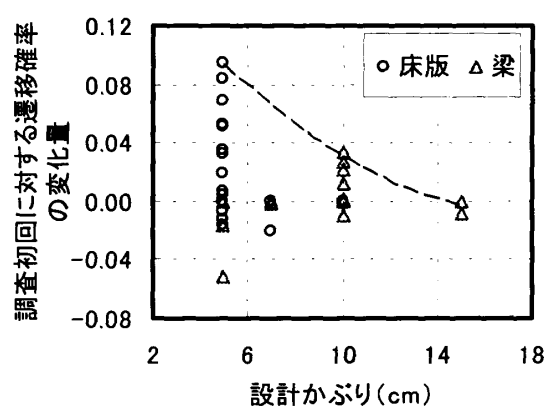


図-11 遷移確率の変化量と設計かぶりの関係

化度分布を予測した結果である。点線は、6年後の調査実測値と良く合う遷移確率 0.062 の劣化進行モデルから算出した劣化度の分布である。図のように遷移確率の変化量が 0.02 程度以内であれば、調査実測値の劣化度分布の傾向を比較的良好に表現できていると考えられる。しかし、今回の調査結果において、図-6 に示した遷移確率の変化量が 0.02 を超える栈橋が 4 割程度あり、同一環境の栈橋であれば劣化度間の遷移確率が一定と考えた劣化進行モデルを用いた劣化予測結果は、危険側に判断される場合があり、問題があるといえる。

以上のように、追跡調査した栈橋の遷移確率が必ずしも一定とならない理由として、塩化物の影響が大きいことが考えられ、以下に遷移確率へ及ぼす H.W.L.からの高さや設計かぶりとの関係について検討した。

4.2 遷移確率と H.W.L.からの高さの関係

遷移確率と H.W.L.からの高さの関係を図-8 に示す。遷移確率は、床版、梁ともにばらつきが大きいですが、H.W.L.からの高さが低くなるほど大きくなる傾向が認められた。調査初回に対する遷移確率の変化量と H.W.L.からの高さとの関係を図-9 に示す。図中の点線は、各高さにおける変化量の最大値を結んでいる。遷移確率の変化量は、H.W.L.からの高さが低い栈橋ほど大きくなる傾向が認められた。

すなわち、H.W.L.からの高さが低くなると飛来塩分が多く、コンクリート中への塩分浸透量が多くなり、塩害による劣化が促進されて、遷移確率が大きくなるものと思われる。

4.3 遷移確率と設計かぶりの関係

遷移確率と設計かぶりの関係を図-10 に示す。床版について、遷移確率と設計かぶりの関

係は明らかではなかったが、梁について、遷移確率は設計かぶりが小さいほど大きくなる傾向が認められた。調査初回に対する遷移確率の変化量と設計かぶりの関係を図-11に示す。図中の点線は、各設計かぶりにおける変化量の最大値を結んでいる。遷移確率の変化量は、設計かぶりが小さい栈橋ほど大きくなる傾向が認められた。

ここでも、コンクリート中への塩分浸透量が遷移確率（劣化速度）に影響したものと推測される。ただし、床版についてはH.W.L.からの高さが高い位置にあるものが多く、飛来塩分量が少なかったのではないかと推測される。

なお、4.2、4.3の遷移確率がばらついた理由として、実際には、波浪条件やコンクリートの品質・施工、および使用頻度等の様々な条件が影響しているものと考えられる。

5. 劣化予測のあり方

現在の劣化進行モデルでは、同一環境の栈橋であれば、劣化度が上位の段階に進行するのに要する期間はいずれの段階でも同じと考え、劣化度間の遷移確率を一定としている。一方、考案した判定基準（試案）では、劣化度が上位の段階に進行するのに要する期間を明確にしているものとは言い難い。つまり、潜伏期より進展期・加速期、劣化期へ進行していく遷移確率は、変化させる必要があると考えられる。このことは、4.1で述べたことと一致している。

また、遷移確率が変化する要因として、塩化物イオンの浸透量があげられ、コンクリート標準示方書[維持管理編]に示されている塩化物イオンの拡散の予測や鋼材腐食の進行予測を考慮するなど、劣化進行モデルを改良することによって、劣化度分布をより精度よく予測することが可能になると思われる。

なお、劣化進行モデルは、目視調査結果の劣化度分布からの遷移確率で、以後の劣化予測を劣化度分布で表すことができるため、維持管理を立案するにあたって有益であると思われる。

6. まとめ

本報の範囲で得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 劣化度判定に定量的な表現を多くとり入れ、容易に判定しやすい判定基準（試案）を考案した。
- (2) 劣化度間の遷移確率が同一環境の栈橋であれば一定と考えて、既往の劣化進行モデル¹⁾を用いて劣化予測を行った場合、危険側の評価となる場合が認められた。
- (3) 栈橋の劣化状況を劣化進行モデル¹⁾の遷移確率で整理した結果、設計かぶりが小さいほど、あるいはH.W.L.から栈橋下面までの高さが低いほど、遷移確率が大きくなる傾向が認められた。

今後、調査資料数、特に追跡調査結果が得られる資料を収集し、データを蓄積し、劣化進行モデルにさらなる改良を加えていく。

参考文献

- 1) 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
- 2) 港湾構造物の維持・補修マニュアル，（財）沿岸開発技術研究センター，1999.6
- 3) 大井埠頭栈橋劣化調査・補修マニュアル（案），（財）東京港埠頭公社，1994
- 4) 大音宗昭，佐野清史，渡辺英市，森悦栄：海洋コンクリートの劣化診断・補修設計エキスパートシステム，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.767-770，1993
- 5) 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
- 6) 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，（社）日本コンクリート工学協会，1998