

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.41 NO.4 December 2002

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)
第 41 卷 第 4 号 (Vol. 41, No. 4), 2002年12月 (December 2002)

目 次 (CONTENTS)

1. RC 棧橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発
..... 小牟禮 建一・濱田 秀則・横田 弘・山路 徹 3
(Development of A Model on Deterioration Progress for RC Deck of Open Type Wharf
..... Kenichi KOMURE, Hidenori HAMADA, Hiroshi YOKOTA, Toru YAMAJI)

2. ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性
ーメガフロート情報基地機能実証実験報告ー
..... 飯島 一博・白石 悟・佐藤 平和 39
(Motion Characteristics of Floating Structure Moored by Hybrid Type Fender -A Report on Information Backup Center
by Megafloat-
..... Kazuhiro IJIMA, Satoru SHIRAIISHI, Hirakazu SATOH)

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)
第 41 卷 第 4 号 (Vol. 41, No. 4), 2002年12月 (December 2002)

目 次 (CONTENTS)

1. RC 棧橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発
..... 小牟禮 建一・濱田 秀則・横田 弘・山路 徹 3
(Development of A Model on Deterioration Progress for RC Deck of Open Type Wharf
..... Kenichi KOMURE, Hidenori HAMADA, Hiroshi YOKOTA, Toru YAMAJI)

2. ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性
ーメガフロート情報基地機能実証実験報告ー
..... 飯島 一博・白石 悟・佐藤 平和 39
(Motion Characteristics of Floating Structure Moored by Hybrid Type Fender -A Report on Information Backup Center
by Megafloat-
..... Kazuhiro IJIMA, Satoru SHIRAIISHI, Hirakazu SATOH)

RC 棧橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発

小牟禮 建一*・濱田 秀則**・横田 弘***・山路 徹****

要 旨

近年、鉄筋コンクリート構造物の塩害による早期劣化が重大な問題となっている。塩害による劣化は、鉄筋コンクリートの耐荷性を担う鉄筋を腐食させ、構造物の著しい性能低下を引き起こす危険性がある。

港湾構造物においてもそれは例外ではなく、特に直接海洋上に設置され、常時海水飛沫に曝された、非常に厳しい塩害環境にある棧橋上部工の被害は甚大であると考えられる。これらの棧橋を永く安全に使用するためにあたっては、現在の劣化の実態を把握し、それに応じた適切な維持管理を行っていくことが重要である。

本文は、平成9年度から平成13年度にかけて行った、全国から抽出した25の棧橋上部工の劣化実態調査の結果をまとめたものである。また、これらの調査結果を基に、棧橋上部工の維持管理を行う上で必要となる劣化進行モデルを作成したので、その内容について報告する。

キーワード：棧橋上部コンクリート工、塩害、劣化実態調査、劣化進行モデル、劣化予測

* 地盤・構造部 材料研究室 受託研修生 (平成13年度～14年度、ショーボンド建設株式会社 事業本部技術部)

** 地盤・構造部 材料研究室 室長

*** 地盤・構造部 構造強度研究室 室長

**** 地盤・構造部 材料研究室

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
TEL: 0468-44-5061 FAX: 0468-44-0255 e-mail: hamada@pari.go.jp

Development of A Model on Deterioration Progress for RC Deck of Open Type Wharf

Kenichi KOMURE *
Hidenori HAMADA **
Hiroshi YOKOTA ***
Toru YAMAJI****

Synopsis

Recently, it is pointed out that RC structures are deteriorated by chloride attack. Deterioration by chloride attack causes the corrosion of reinforcing bars and ultimately reduces load-bearing capacity of structures. Especially, the RC superstructure of wharves are located right above the sea level and it is thought that they are also prone to the damage by chloride included in seawater splash. Therefore, in order to use those wharf structures for long time in good condition, it is rather important to grasp the actual deterioration condition and to carry out the suitable maintenance works based upon the prediction of deterioration.

In this study, the result of field investigation of 25 wharves picked up from all over Japan, which is performed from 1997 to 2001, is summarized. Moreover, a model to represent a deterioration progress of wharves contributing to a rational maintenance strategy is proposed based on the result of field investigation.

Key Words : RC superstructure of wharves, chloride attack, field investigation, model of deterioration progress, prediction of deterioration

* Trainee of Materials Laboratory, Geotechnical and Structural Engineering Division
(Temporarily Transferred from Sho-Bond Corporation)
** Chief of Materials Laboratory, Geotechnical and Structural Engineering Division
*** Chief of Structural Mechanics Laboratory, Geotechnical and Structural Engineering Division
**** Research Engineer of Materials Laboratory, Geotechnical and Structural Engineering Division
1-1,3-Chome , Nagase , Yokosuka , 239-0826 JAPAN
Phone : +81-468-44-5061 Fax : +81-468-44-0255 e-mail : hamada@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. 序論	7
2. 鉄筋腐食のメカニズムと構造物の各種条件	7
2.1 鉄筋腐食メカニズム	7
2.2 栈橋上部工における塩害の構造的・環境的条件	8
3. 栈橋上部工の劣化実態調査概要	8
3.1 調査対象港	8
3.2 調査の方法	8
3.3 コンクリート標準示方書との劣化度の相関	10
4. 栈橋上部工の劣化実態調査結果	11
4.1 調査結果の傾向	11
4.2 確率的な観点による調査結果のまとめ	12
5. 栈橋上部工の劣化進行モデルの作成	16
5.1 マルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルの考え方	16
5.2 各劣化度の期間に関する検討	16
5.3 劣化進行モデルの導入	17
5.4 劣化進行モデルの性質	18
5.5 劣化進行モデルの種類	19
5.6 劣化進行モデルの適用	20
6. 栈橋上部工の劣化予測および劣化推定	24
6.1 劣化予測手法の提案	24
6.2 劣化推定手法の提案	25
7. 栈橋上部工の長期維持管理手法の提案	29
7.1 栈橋上部工の寿命	29
7.2 補修を考慮した維持管理計画の必要性	30
7.3 劣化進行モデルを使用した維持管理手法の提案	31
8. 結語	33
謝辞	33
参考文献	34
付録 A 劣化現象の事例	35

1. 序論

わが国の港湾構造物のストックは既に膨大であり、国際貿易の大部分を担う、重要かつ不可欠なものとなった。このような港湾構造物の社会的役割を考慮すれば、これらを永く安全に維持していくことは、わが国の産業、経済の発展に対して、極めて重要である。

港湾における主な構造物は、防波堤と係留施設である。そのような構造物の中で、特に棧橋式係船岸は、図-1に示すように1960年以降、すなわち高度経済成長期後期以降に集中的に建設されたものが非常に多い。したがって、それらはおおよそ40年以下の供用期間を経過しているが、通常は耐用年数を50年として設計されていることから、これらの構造物はまもなく一斉に耐用年数を迎え始めることとなる。

さらに、近年、鉄筋コンクリート構造物に対し、塩害による早期劣化が指摘されている。塩害は、海水飛沫や融雪剤などに含まれる塩化物イオンが原因となり、鉄筋コンクリート中の鉄筋を腐食させる劣化現象である。港湾コンクリート構造物は常に海洋からの海水飛沫にさらされており、陸上の構造物と比べ塩害による劣化を生じやすい。とりわけ、棧橋式係船岸の鉄筋コンクリート製上部工（以後、「棧橋上部工」と呼ぶ）は海水面直上に設置されているため、海水飛沫を直接受ける非常に過酷な塩害環境にある。そのため、港湾コンクリート構造物の劣化のうち、塩害は棧橋上部工に集中して発生しており¹⁾、極めて重要な問題となっている。

これまで、一般的な環境下において、コンクリート中の鉄筋が安定な状態にあることから、港湾コンクリート構造物の寿命に関して、基本的には半永久的な寿命を持つもの、との認識も少なくなかった。しかし、特に棧橋上部工に関して、上述のように耐用年数が迫っていることや、塩害による早期劣化の問題などを考慮すると、早急な対応が必要であることは論を待たない。これらの棧橋を永く安全に使用するにあたっては、劣化の程度を十分把握し、将来的な劣化を見越した上で、適切な維持管理を行っていくことが重要である。このような棧橋上部工の劣化調査や維持管理に関しては、これまでにも幾つかの資料が示されている^{1,2,3)}。しかし、棧橋上部工の劣化程度の定量的評価や、将来的な劣化予測を行う手法に関しての報告はほとんどなく、この分野における知見は必ずしも十分ではない。

こうした背景の中、今回の報告では、現状における棧橋上部工劣化の実態を把握する目的で、全国から地域性を考慮して抽出した港における劣化実態調査の結果を示

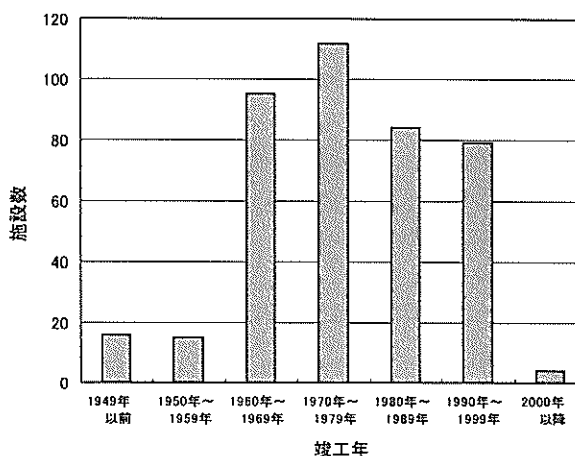


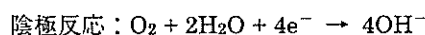
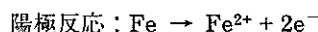
図-1 棧橋式係船岸整備の推移
(405サンプルでの調査結果)

す。また、この調査結果から得られた棧橋上部工の劣化傾向に基づき、棧橋上部工の劣化過程を表す劣化進行モデルを作成した。この劣化進行モデルについて説明すると共に、劣化進行モデルを用いた維持管理の手法について考察する。

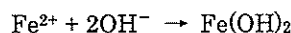
2. 鉄筋腐食のメカニズムと構造物の各種条件

2.1 鉄筋腐食メカニズム

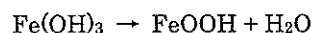
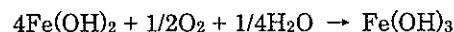
まずここで、塩害による鉄筋腐食のメカニズムを整理する。鉄の腐食は一般的に以下のような電気化学式で表される。



このように、電子を放出する反応と電子を消費する反応が同時に進行するのが腐食反応であり、以下のようにまとめられる。



ここからさらに、



のような反応が生じる場合もあり、これらの化学反応によって生成した、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ や $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 FeOOH などが総括して「錆」と呼ばれるものである。

しかし、通常アルカリ環境下にある鉄は、表面に不動態皮膜を形成し、容易に陽極反応を起こさない。コンクリートは強アルカリ性 (pH12.5程度) であり、したがって、コンクリート中の鉄筋は強アルカリ環境下にあるため、腐食を起こしにくい。ところが塩害の場合、塩化物イオンの働きによって、アルカリ環境下においても不動

態皮膜が破壊され、陽極反応を進行させる。その結果、健全なコンクリート中であっても鉄筋の腐食が起こる。

以上から解るように、塩害による鉄筋の腐食に関わる主な因子は、水、酸素ならびに塩化物イオンの3つである。鉄筋コンクリート構造物において、これらの劣化因子が鉄筋を腐食させる場合、以下のようなメカニズムを形成する。

- ①コンクリート表面から浸透した塩化物イオンがコンクリート中を移動し、鉄筋表面に到達する。
- ①'コンクリート表面から浸透した水、酸素がコンクリート中を移動し、鉄筋表面に到達する。
- ②鉄筋位置での塩化物イオンが限界量を超え、鉄筋の周りを覆っている不動態皮膜を破壊する。
- ③鉄がイオンの状態で溶出する。
- ④イオン化した鉄と水、ならびに酸素が化学反応を起こし、錆を形成する。

さらに、腐食が進行すると、

- ⑤錆がコンクリート内部で膨張する。
- ⑥錆の膨張圧により、コンクリート表面に錆汁が染み出したり、かぶりコンクリートにひび割れを生じたりする。
- ⑦さらに錆が増加すると、かぶりコンクリートが押し出され、はく離・はく落を起こす。

というように、塩害による劣化現象が顕在化するようになる。

したがって、鉄筋の腐食に関わる要因としては、

- a.コンクリート表面での塩化物イオン量
- b.コンクリート中での塩化物イオン移動速度を表す塩化物イオン拡散係数
- c.コンクリート中での酸素移動速度を表す酸素拡散係数
- d.鉄筋位置での塩化物イオン濃度、酸素濃度、含水率

などである。棧橋上部工において、これらの要因は、主に構造物の構造的・環境的条件によって、その程度が変化するものと思われる。

2.2 棧橋上部工における塩害の構造的・環境的条件

前述のような鉄筋腐食に影響する構造的な条件としては、以下のようなものが挙げられる。

- a.部材の海水面からの距離(部材の高さ)・・・部材表面の塩化物イオン濃度やコンクリートの含水率などに影響する。
- b.コンクリートの密実性・・・塩化物イオンや酸素の拡散係数に影響する。

c.かぶり・・・鉄筋位置での塩化物イオン濃度、酸素濃度、含水率等に影響する。

一方、鉄筋腐食に影響する環境的な条件としては、

- d.湿度、降水量・・・含水率、ならびに酸素拡散係数に影響する。
- e.海水中の塩化物イオン濃度、風速、波の高さ・・・コンクリート表面に付着する塩化物イオン濃度や含水率に影響する。
- f.気温・・・含水率、また全ての化学反応速度に影響する。

が挙げられる。

したがって、棧橋上部工においては、これらの構造的・環境的条件によって、鉄筋腐食の程度や速度が決定されるものと考えられることができる。

3. 棧橋上部工の劣化実態調査概要

3.1 調査対象港

これまでに建造された既存棧橋上部工の塩害による劣化の実態を把握するため、全国から地域性を考慮して、図-2に示す14港25施設を抽出し、外観目視調査を行った。なお、調査対象とした施設は、竣工後の経過年数が10~48年のものである。

3.2 調査の方法

調査は原則として、既往の港湾構造物維持補修マニュアル³⁾にしたがって行った。その概略を以下に簡潔に説明する。

(1)調査の内容

調査は主に小型ボートなどを用いて、干潮時に棧橋上部工の下面に進入し、部材の表面に露顕している劣化現象を目視にて調べた。また、コンクリートかぶりの浮き、はく離等が確認される時は、可能な限り点検ハンマーなどを用いて、打音検査を行った。参考までに代表的な棧橋施設の標準断面図を図-3に、棧橋上部工の平面図を図-4に示す。

調査の対象は鉄筋コンクリート製のはり、床版、およびハンチ部分である。また、これらの部材は、図-5に示すように1部材ごとに劣化度を判定した。

(2)劣化度判定方法

各部材ごとに与えた劣化度は、主に鉄筋の腐食、コンクリート表面のひび割れ、かぶりコンクリートのはく離・はく落といった3種類の劣化現象を対象に、表-1にしたがった判定を行った。表-1は、文献3)に示された劣化度判定基準であり、構造物の外観に現れる劣化現象を

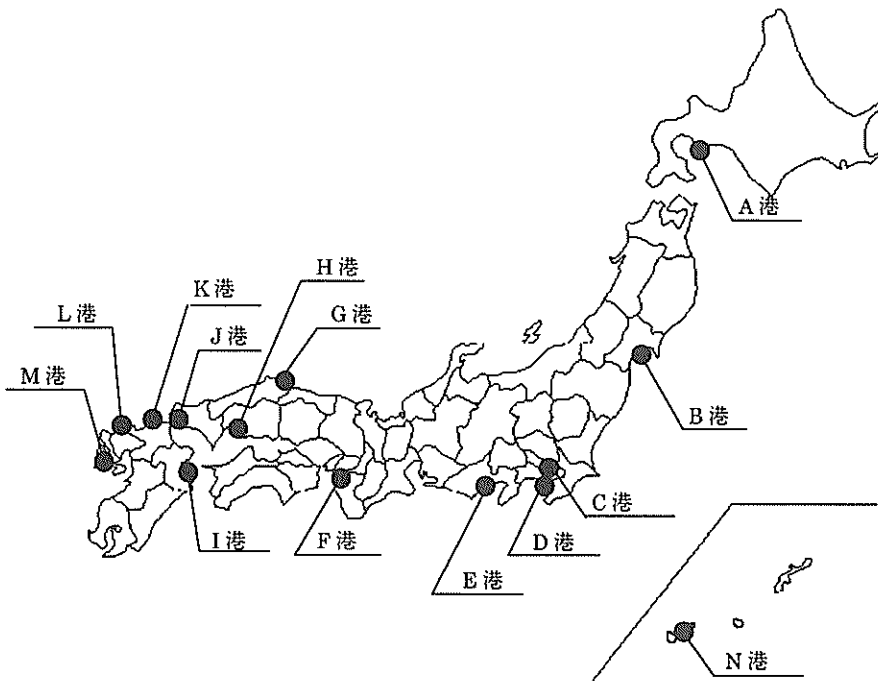


図-2 調査対象港

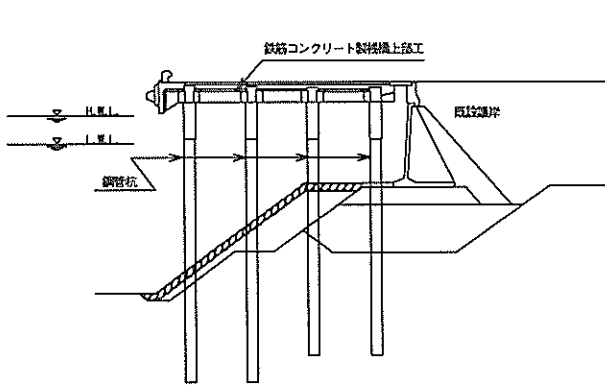


図-3 一般的な栈橋の断面図例

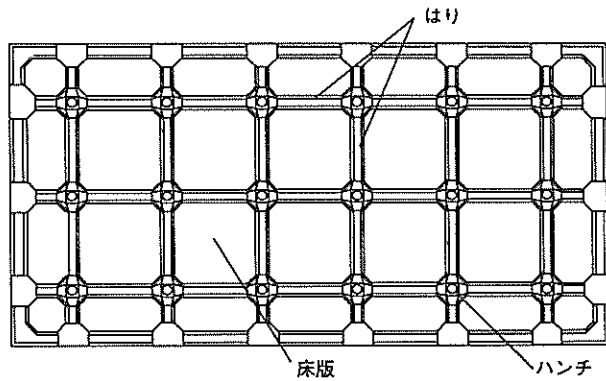


図-4 一般的な栈橋上部工の平面図例

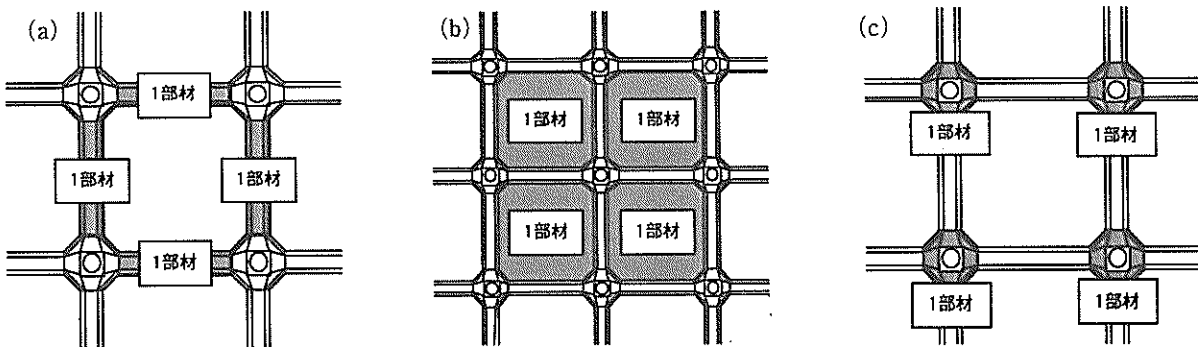


図-5 栈橋の分割例 (a)はり, (b)床版, (c)ハンチ部

劣化度 0～Vの6段階に分類している。各劣化度は、全く劣化現象が見られないものを劣化度0とし、劣化度の値が大きいほど、劣化が進行していることを表している。

そして、かぶりのはく落や鉄筋断面の減少などが起こり、構造物の耐荷性への影響が懸念されるほどの著しい劣化を劣化度Vとし、劣化の最終段階としている。

ところで、表-1 は錆汁、ひび割れの量などに関して、判定に若干経験を要する定性的表現が用いられる部分があるため、これらを定量的に表し、判定が容易となるように修正したものを表-2 に示す。ここに示した表-1、表-2 は、基本的に同一の劣化に対しては同一の劣化度となるものである。

なお、これらの表を用いて調査を行った結果、1 部材に複数種類の劣化現象が見られ、それぞれの劣化現象ごとに異なる判定が与えられる場合、それらのうち最も劣化度の大きなものを採用することとした。

3.3 コンクリート標準示方書との劣化度の相関

平成 13 年 1 月にコンクリート標準示方書[維持管理編]⁴⁾が発刊されている。本示方書は、コンクリート構造物の劣化と維持管理に関する、我が国で最初の示方書で

ある。

同示方書によると、塩害による構造物の劣化期間は、

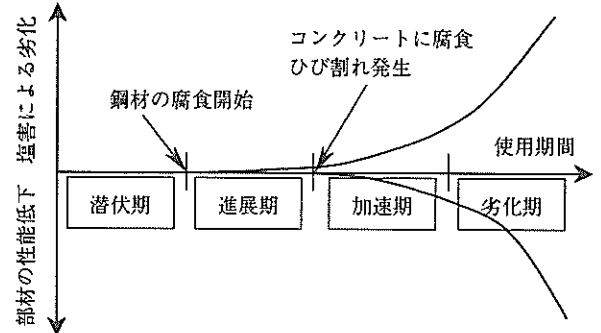


図-6 コンクリート標準示方書[維持管理編]における塩害による劣化進行過程

表-1 劣化度判定表

劣化度 部材項目	0	I	II	III	IV	V	
床版	鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆が見られる。	一部に錆汁が見られる。	錆汁多し。鉄筋腐食が広範囲に見られる。	浮き錆多し。鉄筋表面の大部分あるいは全周にわたる腐食が広範囲に認められる。	浮き錆著しい。鉄筋断面の有意な減少が全域にわたっている。
	ひび割れ	なし	一部にひび割れあるいは帯状または線状のゲル吐出物が2.3箇所見られる。	ひび割れあるいは帯状または線状のゲル吐出物が数箇所見られる。	ひび割れ多し。割目状あるいは錆汁をとともうひび割れを含む。	割目状のひび割れなどが全域にわたり多数見られる。	
	はく離・はく落	なし	なし	一部に浮きが見られる。	一部にはく離が見られる。	浮き・はく離多し。(1区画面積の4割程度以下)	全域にわたる浮き・はく離(1区画面積の4割程度以上)
はり	鉄筋の腐食	なし	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ
	ひび割れ	なし	小さなひび割れ(ひび割れ幅 1mm 以下程度)が2.3箇所見られる。	ひび割れやや多し。軸方向に直角なひび割れのみ。	ひび割れ多し。軸方向につながったひび割れ(ひび割れ幅 3mm 以上程度)を含む。	軸方向につながったひび割れが全域にわたり多数	
	はく離・はく落	なし	なし	一部に浮きが見られる。	浮き多し。	浮き多し。はく離・はく落が数箇所見られる。(1区画面積の4割程度以下)	はく離・はく落多数。(1区画面積の4割程度以上)
ハンチ部	鉄筋の腐食	なし	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ
	ひび割れ	なし	一部にひび割れが見られる。	ひび割れ幅 2mm 程度以下のひび割れが数箇所見られる。	ひび割れ幅 2mm 程度以下のひび割れが全体に広がっている。	ひび割れ幅 2mm 程度以上のものも発生あるいは鉛直方向のひび割れが見られる。	
	はく離・はく落	なし	なし	部分的に浮きが見られる。	一部にはく離が見られる。	はく離・はく落多し。(1区画面積の4割程度以下)	全域にわたり多数はく離。(1区画面積の4割程度以上)

表-2 修正した劣化度判定表

劣化度 項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	状況	なし	コンクリート表面の点錆	錆汁の発生		鉄筋断面の減少
	具体例	なし		○錆汁の流れた跡がある ○一部に錆汁がある	○錆汁が塊になっている ○錆汁が多い	○断面減少が少ない(鉄筋形状を維持している) ○断面減少が大きい(鉄筋形状が維持されていない)
腐食ひび割れ	状況	なし	ひび割れの発生	腐食ひび割れの発生		
	具体例	なし	○1方向のひび割れ(床版) ○軸直角方向のひび割れ(梁)	○ひび割れ幅 0.3mm 以上 ○2方向の腐食ひび割れ(床版) ○軸方向の腐食ひび割れ(梁)	○ひび割れ幅 1mm 以上 ○ひび割れから錆汁が出ている	○ひび割れ幅 3mm 以上
はく離・はく落	状況	なし		(浮きの発生) 小さな鉄筋露出	かぶりコンクリートのはく離、もしくははく落の発生 鉄筋の露出	
	具体例	なし		○はく離を伴わない浮きが生じている ○かぶりの小さな鉄筋が1、2箇所露出している	○浮きが複数箇所見られる ○鉄筋1本に対する小さなはく離・はく落がある ○かぶりの小さな鉄筋が多く露出している	○はく離・はく落が多い(1区画面積の1割以上) ○複数の鉄筋にまたがるはく離・はく落が見られる

図-6 に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4つの段階に分類される。ここで、各劣化過程は、

潜伏期・・・鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が、腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの期間

進展期・・・鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間

加速期・・・腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間

劣化期・・・腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間

と定義されている。つまり、同示方書においては、塩害による劣化を、塩化物イオンがコンクリートに進入する過程から評価しており、コンクリートの表面に劣化現象が露顕するのは、加速期以降ということになる。

一方、本報告における調査では、表-1 に示されたように、コンクリート表面に顕在化した劣化現象を、外観目視によって0～Vの6段階に分けている。すなわち、コンクリート標準示方書[維持管理編]における加速期以降に重点を置いた評価となっており、この両者の比較が必要である。

そこで、これらの異なる資料における各々の位置付けを確認するため、これらの相関を表-3 に整理した。

表-3 より、コンクリート標準示方書[維持管理編]における潜伏期～進展期が、本調査で使用した維持管理マニュアルにおける劣化度0、加速期が劣化度Ⅰ～Ⅲ、劣化期が劣化度Ⅳ～Ⅴにほぼ該当するものと考えられる。

4. 栈橋上部工の劣化実態調査結果

4.1 調査結果の傾向

栈橋上部工の劣化実態調査を行った結果について述べる。

調査の結果、対象施設のほとんど全てにおいて、塩害による劣化現象が確認された。ここで言う劣化現象とは、表-2 に示した鉄筋腐食に伴う点錆、錆汁、鉄筋の断面減少、かぶりコンクリートのひび割れ、はく離・はく落などを指している。

その調査結果の一例を図-7 に示す。これらの図では、前述の劣化現象に対して、表-2 によって各部材ごとに与えられた劣化度を、各部材ごとに表-4 に示す色で分類し、表現している。また、本調査において各劣化度の判定を

表-3 コンクリート標準示方書[維持管理編] (上段) と港湾構造物の維持管理マニュアル (抄：下段) の比較

状態	潜伏期	進展期	加速期		劣化期		
			前期	後期			
外観上の変状	外観上の変状が見られない		腐食ひび割れ発生	腐食ひび割れ多数発生			
			錆汁		ひび割れ幅大		
			部分的なはく離・剥落		はく離・剥落 変位・たわみが大きい		
塩分の状況	腐食発生限界塩化物イオン濃度以下	腐食発生限界塩化物イオン濃度以上					
腐食量	—	腐食開始	—	腐食量増大			
劣化度	0		I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆が見られる	一部に錆汁が見られる	錆汁多し	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れが見られる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し(ひび割れ幅数mm以上のひび割れ含む)	ひび割れ多し(ひび割れ幅数mm以上のひび割れ含む)	ひび割れ幅数mm以上のひび割れ多数	ひび割れ多数
かぶりコンクリートのはく離・はく落	なし	なし	一部に浮きが見られる	一部にはく離・はく落が見られる	一部にはく離・はく落が見られる	はく離・はく落多し	はく離・剥落が著しい

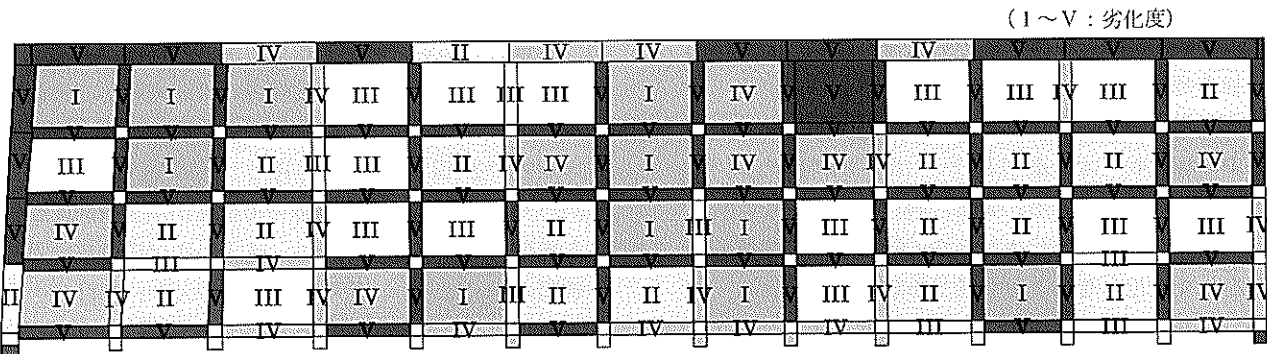


図-7 栈橋の劣化実態調査結果の一例

受けた、劣化現象の事例を図-A.1～A.5に示した。

調査の結果、得られた知見を以下に列記する。

(1) 各港間での劣化進行程度の相異

今回、調査の対象とした施設は、建設後10～48年を経過しているが、そのうち約70%は30数年が経過したものである。したがって、これらは経過年数が概ね同一であると考えられる。しかし、経過年数が同一であるにもかかわらず、調査結果から得られた劣化現象は、各施設ごとに程度が異なっており、あまり劣化が進行していない施設から、場合によってはかぶりコンクリートがほとんどはく落し、各所で鉄筋の破断が確認されるほどの極度の鉄筋腐食を起こしているものまで様々であった。

この原因としては、施設ごとの劣化速度が異なること、つまり、2.2で示したような構造的・環境的条件の違いによってこのような劣化進行程度の差異が生じたことが挙げられる。今回の調査対象港は、図-2に示したように全国から抽出したものであるため、各港ごとに気温などの環境的条件は異なり、また施設によって部材の海水面からの距離などの構造的条件も異なるものと考えられる。なお、このような施設ごとの劣化度に対する構造的・環境的条件の影響に関しては、6.において詳述する。

(2) 同一施設間での部材ごとの劣化進行程度の相異

図-7から判るように、同一の施設内においても、劣化の進行が速い部材と遅い部材が混在しており、劣化度判定によって得られた劣化度は、部材ごとに大きくばらついていた。

通常、陸上の構造物では、同一構造物中であっても、塩分を含んだ海風を受けやすい部材や、降雨の影響を受けやすい部材が存在するため、部材の位置によって劣化を起こしやすい箇所とそうでない箇所の差が生じ、部材ごとの劣化度が大きく異なることがある。しかし、今回の調査の結果、一部の栈橋を除いて、劣化度のばらつきに関して部材位置による影響は見られなかった。

このような劣化度のばらつきの原因として、やはり劣化速度、つまり構造的・環境的条件の違いを考えると、一般的な栈橋施設は、海水面とほぼ平行に位置した平面状の構造物であり、波浪の影響を受けやすい部材とそうでない部材の違いは若干あるものの、基本的には気温や海水中の塩化物イオン濃度といった環境的条件の違いは小さいものと考えられる。また、同一施設の中でコンクリートの設計配合を変化させたり、同じ種類の部材で設計かぶりを変化させることも稀であると推測される。つまり、同一施設では環境的条件、設計上の構造的条件は同程度であると考えて良い。

表-4 調査結果における劣化度の表し方

劣化度	劣化度を表す色	
0	白色	
I	水色	
II	黄緑色	
III	黄色	
IV	桃色	
V	赤色	

したがって、同一施設における、部材ごとの劣化進行程度に差異を生じる原因として、構造的条件の中で、特に部材ごとに生じているかぶり厚さのばらつきや、豆板、コールドジョイントなどの初期欠陥の有無など、施工精度のばらつきによるものが大きいと考えられる。

4.2 確率論的な観点による調査結果のまとめ

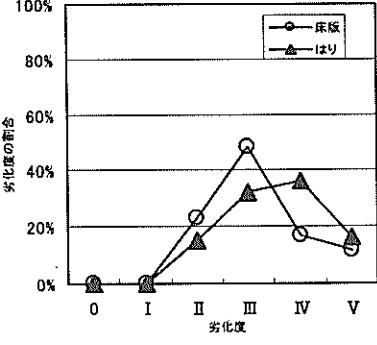
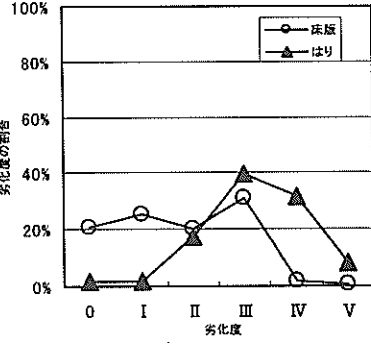
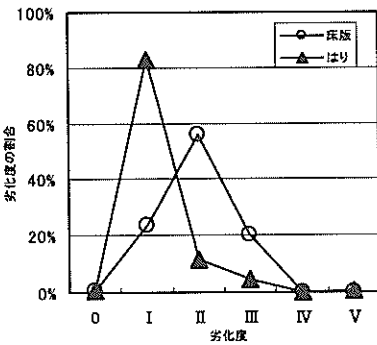
上述のように、調査で得られた劣化度は、同一施設の中でもばらつくが、このようなばらついた劣化を表現する場合、一般的には劣化度の算術平均や最大値、劣化度の範囲などを用いて構造物全体の劣化状況を表す場合が多い。しかし今回の調査の結果、同一の構造物の中に劣化度0と劣化度Vを同時に含むものも少なくなく、平均値を用いて表した場合、劣化度が大きく、安全性に懸念がある部材を見落とす危険がある。また、劣化度の最大値を用いて表した場合は、構造物全体について過大な劣化度を与えることとなり、劣化度の範囲を用いて表した場合は、構造物ごとの劣化状況の差を判断しにくくする。さらには、今回のような調査結果に基づき、劣化対策を行う場合、平均値や最大値を用いた表現では、対策の程度や対策を要する部材の数量を判断する根拠とはなりにくい。

そこで、劣化度とその劣化度を与えられた部材の、全部材に対する割合でそれぞれの施設を表現することとし、その結果を表-5にまとめた。また、表-5の結果を図示したものを図-8に示す。なお、図-8では、構造物の性能上の意味合いが小さいハンチ部については、検討から除外している。

これらの図から、調査結果にはある傾向が見られる。具体的には、得られた劣化度分布は、概ねある劣化度にピークを持ち、ばらついた分布を示している。一般的に構造物の劣化は、時間の経過とともに進行する⁴⁾。したがって、図-8に示した栈橋の劣化度が示す傾向についても同様に考えることができ、現状の劣化度分布に対し、時間の経過とともに徐々に劣化度の大きい部材が占める割合が高くなり、ピークが劣化度の大きい方向へ移行していくものと考えられる。

表-5 各港の劣化度分布

構造物	竣工年	項目	床版						梁						ハンチ						
			0	I	II	III	IV	V	0	I	II	III	IV	V	0	I	II	III	IV	V	
A港	A-a岸壁	S43	部材数	2	64	150	54	0	0	3	462	63	26	0	4						
		割合	1%	24%	56%	20%	0%	0%	1%	83%	11%	5%	0%	1%							
B港	B-a栈橋	S40	部材数	33	40	32	49	3	1	7	6	64	150	119	31	0	1	41	42	19	0
		割合	21%	25%	20%	31%	2%	1%	2%	2%	17%	40%	32%	8%	0%	1%	40%	41%	18%	0%	
B港	B-b栈橋	S45	部材数	0	0	31	66	23	16	0	0	52	110	125	56	0	0	39	56	16	1
		割合	0%	0%	23%	49%	17%	12%	0%	0%	15%	32%	36%	16%	0%	0%	35%	50%	14%	1%	
C港	C-a岸壁	S43	部材数	116	52	6	41	2	0	9	271	137	63	13	0						
		割合	53%	24%	3%	19%	1%	0%	2%	55%	28%	13%	3%	0%							
D港	D-a栈橋	S41	部材数	3	0	24	29	0	0	37	11	84	6	0	0	2	0	19	15	0	0
		割合	5%	0%	43%	52%	0%	0%	27%	8%	61%	4%	0%	0%	6%	0%	53%	42%	0%	0%	
	D-a繫船岸	S41	部材数	0	0	21	59	0	0	8	0	25	20	32	23	0	0	7	11	0	0
		割合	0%	0%	26%	74%	0%	0%	7%	0%	23%	19%	30%	21%	0%	0%	39%	61%	0%	0%	
D-b栈橋	S41	部材数	42	0	74	147	1	0	101	44	454	48	3	0	11	0	114	43	0	0	
	割合	18%	0%	28%	56%	0%	0%	16%	7%	70%	7%	0%	0%	7%	0%	68%	26%	0%	0%		
D-c栈橋	S40	部材数	68	0	81	11	0	0	175	36	150	25	2	0	26	0	53	20	0	0	
	割合	43%	0%	51%	7%	0%	0%	45%	9%	39%	6%	1%	0%	26%	0%	54%	20%	0%	0%		
E港	E-a岸壁	S42	部材数	13	4	44	2	2	0	175	16	2	1	1	0						
		割合	20%	6%	68%	3%	3%	0%	90%	8%	1%	1%	1%	0%							
F港	F-a栈橋	S30	部材数	39	0	19	6	0	0												
		割合	61%	0%	30%	9%	0%	0%													
	F-b栈橋	S38	部材数	10	5	3	0	0	0	10	11	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
		割合	56%	28%	17%	0%	0%	0%	48%	52%	0%	0%	0%	0%	0%	###	0%	0%	0%	0%	
F-c栈橋	S44	部材数	4	1	3	13	7	7	0	10	10	10	17	13	0	0	5	9	7	3	
	割合	11%	3%	9%	37%	20%	20%	0%	0%	20%	20%	34%	26%	0%	0%	21%	38%	29%	13%		
F-d栈橋	S44	部材数	27	0	2	0	0	0	33	0	3	0	0	0	16	0	3	1	0	0	
	割合	93%	0%	7%	0%	0%	0%	92%	0%	8%	0%	0%	0%	80%	0%	15%	5%	0%	0%		
G港	G-a岸壁	S42	部材数	4	117	84	90	30	26	2	117	217	318	85	9						
		割合	1%	33%	24%	26%	9%	7%	0%	16%	29%	43%	11%	1%							
H港	H-a岸壁	S44	部材数	0	118	126	35	14	1	0	39	169	0	475	21						
		割合	0%	40%	43%	12%	5%	0%	0%	8%	24%	0%	67%	3%							
I港	I-a岸壁	S45	部材数	270	2	130	47	17	14	224	69	357	164	137	185						
		割合	56%	0%	27%	10%	4%	3%	20%	6%	31%	14%	12%	16%							
J港	J-a岸壁	S52	部材数	0	0	21	74	29	10	0	0	141	156	44	1	0	0	82	31	0	0
		割合	0%	0%	16%	55%	22%	7%	0%	0%	41%	48%	13%	0%	0%	0%	73%	27%	0%	0%	
J港	J-b岸壁	S52	部材数	0	2	83	46	8	3	0	11	270	66	34	2	0	1	121	9	0	1
		割合	0%	1%	58%	32%	6%	2%	0%	3%	70%	17%	9%	1%	0%	1%	92%	7%	0%	1%	
K港	K-a岸壁	S41	部材数	0	0	24	44	38	2	16	13	59	154	46	0						
		割合	0%	0%	22%	41%	35%	2%	6%	5%	20%	53%	16%	0%							
L港	L-a岸壁	S52	部材数	181	41	6	14	0	14	439	98	4	8	0	0						
		割合	71%	16%	2%	5%	0%	5%	80%	18%	1%	1%	0%	0%							
M港	M-a栈橋	S28	部材数	5	2	16	28	46	14	13	11	8	11	30	60	6	5	14	9	3	0
		割合	5%	2%	14%	25%	41%	13%	10%	8%	6%	8%	23%	45%	16%	14%	38%	24%	8%	0%	
M港	M-b栈橋	S28	部材数	0	21	34	37	29	27	0	6	15	19	55	280	0	8	20	48	78	36
		割合	0%	14%	23%	25%	20%	18%	0%	2%	4%	5%	15%	75%	0%	4%	11%	25%	41%	19%	
N港	N-a栈橋	S63	部材数	29	3	16	6	0	0	2	5	65	48	9	0	0	0	4	40	1	0
		割合	54%	6%	30%	11%	0%	0%	2%	4%	50%	37%	7%	0%	0%	0%	9%	89%	2%	0%	
	N-b栈橋	S63	部材数	23	6	9	6	0	0	16	12	44	24	3	0	8	1	5	13	0	0
割合		52%	14%	20%	14%	0%	0%	16%	12%	44%	24%	3%	0%	30%	4%	19%	48%	0%	0%		
N港	N-c栈橋	H3	部材数	27	11	4	1	0	0	17	28	43	2	9	0	7	6	8	6	0	0
		割合	63%	26%	9%	2%	0%	0%	17%	28%	43%	2%	9%	0%	26%	22%	30%	22%	0%	0%	

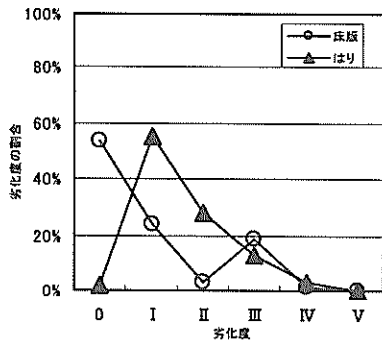


(a) A港-a岸壁の劣化度分布

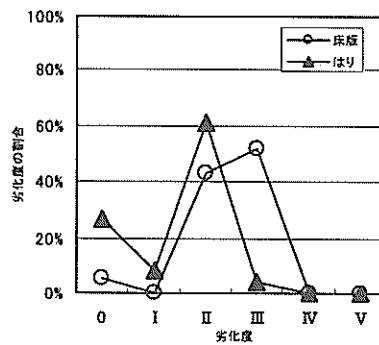
(b) B港-a栈橋の劣化度分布

(c) B港-b栈橋の劣化度分布

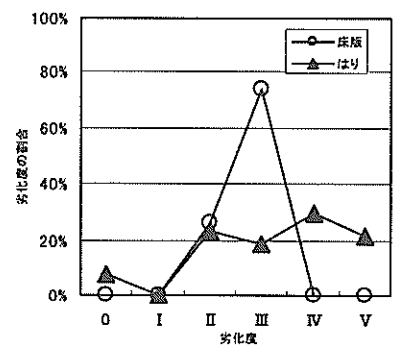
図-8 劣化実態調査から得た施設ごとの劣化度分布



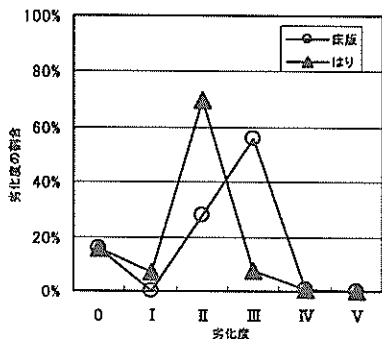
(d) C 港-a 岸壁の劣化度分布



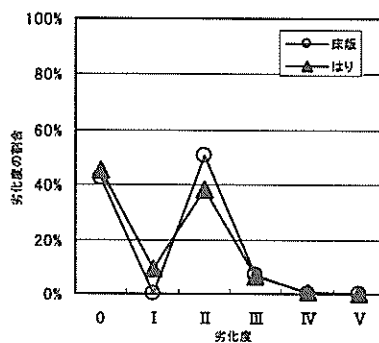
(e) D 港-a 栈橋の劣化度分布



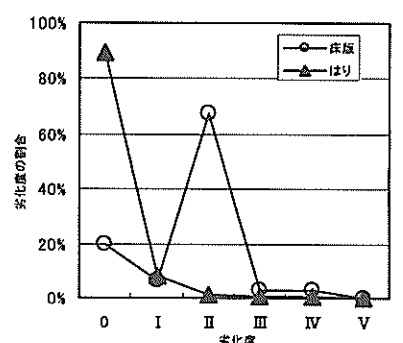
(f) D 港-a 繫船岸の劣化度分布



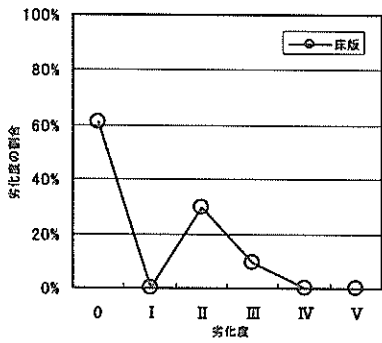
(g) D 港-b 栈橋の劣化度分布



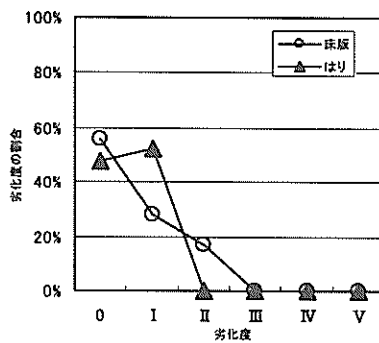
(h) D 港-c 栈橋の劣化度分布



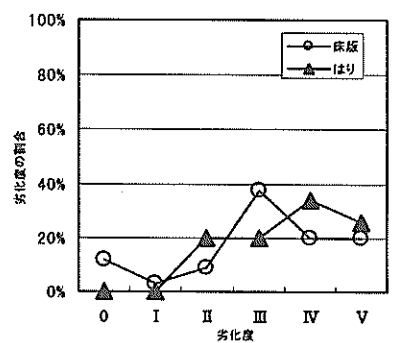
(i) E 港-a 岸壁の劣化度分布



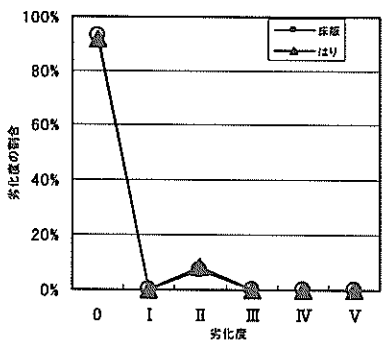
(j) F 港-a 栈橋の劣化度分布



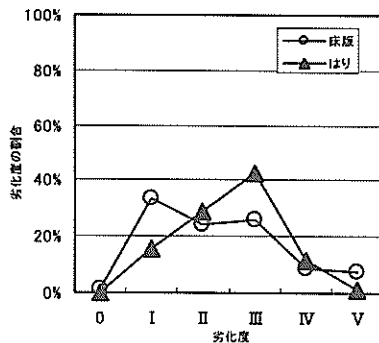
(k) F 港-b 栈橋の劣化度分布



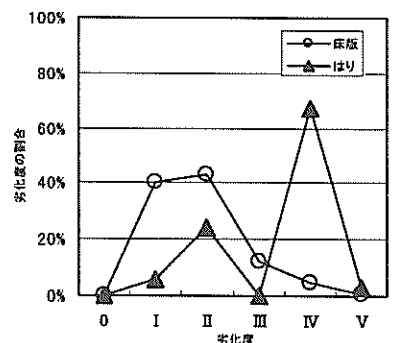
(l) F 港-c 栈橋の劣化度分布



(m) F 港-d 栈橋の劣化度分布

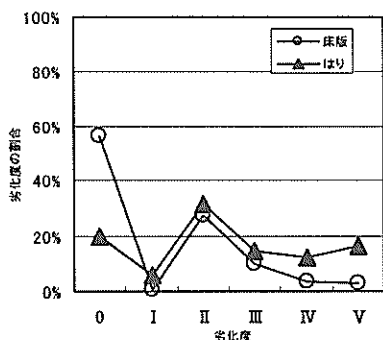


(n) G 港-a 岸壁の劣化度分布

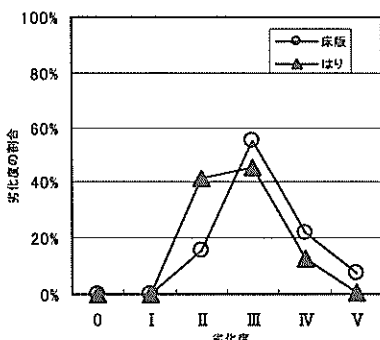


(o) H 港-a 岸壁の劣化度分布

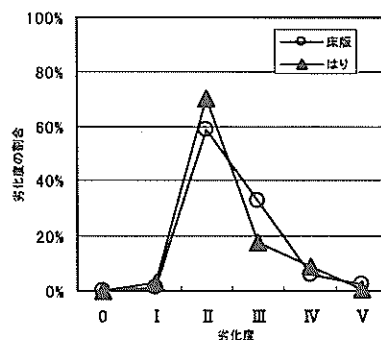
図-8 劣化実態調査から得た施設ごとの劣化度分布



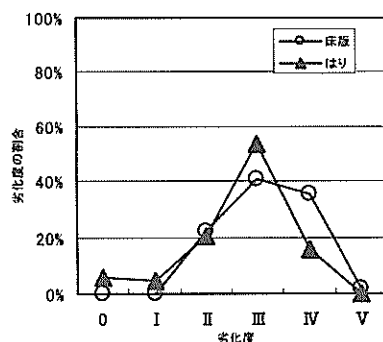
(p) I 港-a 岸壁の劣化度分布



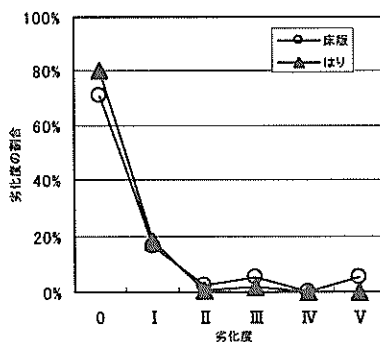
(q) J 港-a 岸壁の劣化度分布



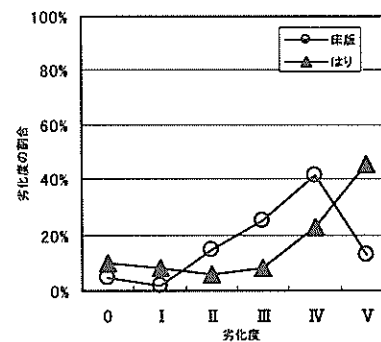
(r) J 港-b 岸壁の劣化度分布



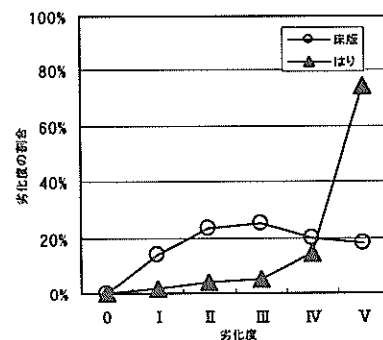
(s) K 港-a 岸壁の劣化度分布



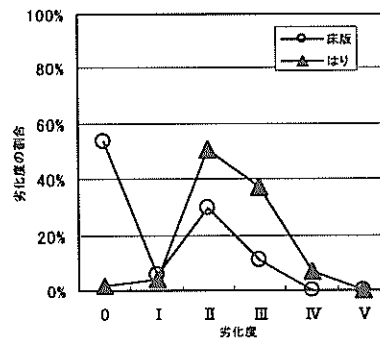
(t) L 港-a 岸壁の劣化度分布



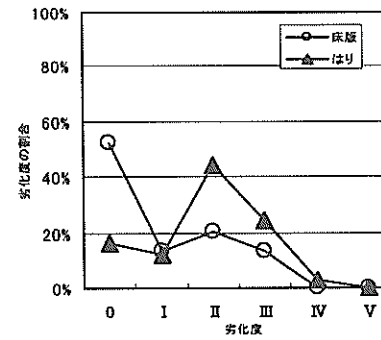
(u) M 港-a 岸壁の劣化度分布



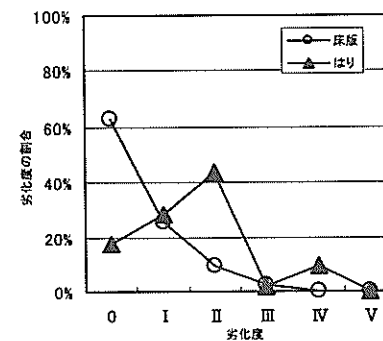
(v) M 港-a 栈橋の劣化度分布



(w) N 港-a 栈橋の劣化度分布



(x) N 港-b 栈橋の劣化度分布



(y) N 港-c 栈橋の劣化度分布

図-8 劣化実態調査から得た施設ごとの劣化度分布

5. 栈橋上部工の劣化進行モデルの作成

5.1 マルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルの考え方

ここまで、栈橋上部工が塩害によって劣化することを説明し、調査によってその劣化傾向や劣化程度を調べた。これらの劣化現象の時間軸に沿った推移を把握することを目的とし、栈橋上部工の劣化実態調査の結果を基に、塩害による栈橋上部工の劣化進行モデルの作成を行った。

一般に、劣化進行モデルの作成を考える場合、劣化の基本的なメカニズムに着目し、劣化要因と構造物の性能低下を結びつけて考えることが多いといえる。しかし、実際には劣化要因は多数存在し、それぞれが劣化に与える影響が明確でないばかりか、劣化要因そのものも全て明らかになっていないと言いき難い。また劣化現象が構造物の性能低下に影響する程度も、現段階では不明確である。したがって、これらを用いて劣化進行モデルを作成しようとする場合、非常に煩雑かつ多くの仮定を必要とする。そこで、今回の劣化進行モデルでは、4.2で説明した、実際の劣化現象に見られる傾向に着目し、これを数学的に表現する手法を採用した。

栈橋上部工の劣化実態調査では、確率的に表現した場合、ある劣化度にピークを持ち、全体的に劣化度がばらつくという傾向が見られた。そこで、このように劣化度がばらつき、徐々に劣化が進行する過程を表すモデルとして、マルコフ連鎖⁵⁾の考えを適用した。

マルコフ連鎖とは、「状態」と「推移」という2つの概念を用い、物事がある「状態」から、ある「推移確率」で「次の状態」へと移行する様子を確率的に捉えるものであり、OR（オペレーションズリサーチ）などで使用されることがある統計手法の一つである。ここで、マルコフ連鎖を用いて、栈橋上部工の劣化度の推移を図-9のように表現した。すなわち、

- ①現時点から、ある一定期間が過ぎると、
- ②ある状態（劣化度）の部材は、ある推移確率 x で次の状態に移行し、
- ③移行しない残り $(1-x)$ は同じ状態に留まる。

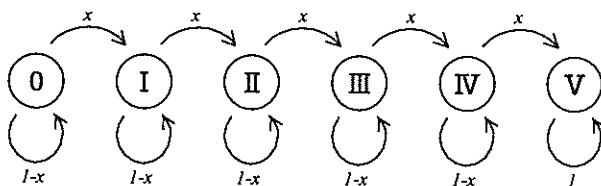


図-9 栈橋劣化のマルコフ連鎖推移図

④これが全ての状態で同時に起こる。

⑤劣化度Vは、劣化の最終状態であり、劣化はこれ以上には進まず、全てが劣化度Vに留まる。

この一連の流れを1ステップとし、一定期間が経過するごとにこのステップが繰り返されることで劣化度が徐々に進行していき、やがて全ての部材の劣化度がVに収束していくものである。

5.2 各劣化度の期間に関する検討

ここで、一般的なマルコフ連鎖では、各状態に対する推移確率は個々に異なるが、図-9では単一の x という一定値を採用した。この点については、以下のような理由による。

まず、劣化現象の中で表-2に示すひび割れの幅に注目した。表-2のひび割れ幅は、これまでの調査を行った経験から、表-1を参考に、比較的妥当と思われる最小ひび割れ幅を採用したものである。また、劣化実態調査において、目視で観察できるひび割れ幅の最小限界値として、劣化度Iについて0.1mm以上とし、さらに、広い範囲で完全にかぶりがはく離している状態をとって、劣化度Vについて10mm以上を想定した。以上による各劣化度とひび割れ幅の関係を表-6にまとめた。

これに関し、木村らによると、鉄筋腐食によって発生するひび割れ幅は、鉄筋腐食量と関連があることが報告されている⁶⁾。同報告では、ひび割れ幅 δ を図-10を参考に、以下の式(1)で表している。

$$\delta = \frac{2u[\cos\beta + a \cdot (\cos\alpha + \cos\beta)]}{[h + u \cdot (\sin\alpha - \sin\beta)]} \quad (1)$$

ここで、 u : 腐食膨張変位(cm)、 a : かぶり(cm)、 h : ひび割れ長さ(cm)、 α : ひび割れが水平軸となす角度($^\circ$)、

表-6 劣化度に対応するひび割れ幅

劣化度	I	II	III	IV	V
ひび割れ幅	0.1mm~	0.3mm~	1.0mm~	3.0mm~	10.0mm~

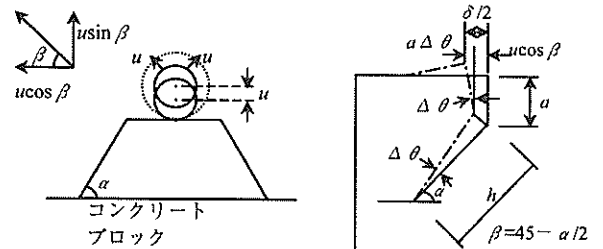


図-10 文献6のひび割れモデル (腐食変位と変形の関係)

$\beta : 45 - \alpha/2$, ただし, $u = u - u_0$ であり, u_0 : ひび割れ発生時の変位(cm), である.

また, 図-11 を参考に, u について,

$$u = t_2 - t_1 \tag{2}$$

としている. ここで, t_1 : 腐食によって失われる鉄筋厚さ(cm), t_2 : 腐食による錆びの厚さ(cm), であり, その各々は以下の式(3), (4)で表される.

$$t_1 = \frac{\phi}{2} \pm \frac{\sqrt{\phi^2 - \frac{2.51W_{ca} \cdot \phi}{\rho_s}}}{2} \tag{3}$$

$$t_2 = -\left(\frac{\phi}{2} - t_1\right) \pm \sqrt{\left(\frac{\phi}{2} - t_1\right)^2 + \frac{4W_{ca}\phi}{\rho}} \tag{4}$$

ここで, ϕ : 鉄筋径(cm), W_{ca} : 単位表面積あたりの腐食量(g/cm²), ρ_s : 鉄の密度 7.85(g/cm³), ρ : 錆の密度(g/cm³), である.

以上から, 文献 6) に準じて, 一般的なはりを想定したかぶり 7cm, 鉄筋径 29mm の場合について, ひび割れ幅 δ と鉄筋の腐食量 W_{ca} の関係を整理し, 表-7 にまとめた.

次いで, 鉄筋の腐食量と, その腐食量に達するまでの時間の関係について記された, 文献 4) における加速期以降の例を参考に, 各劣化度の期間を求めた. 文献 4) では, 鉄筋の体積減少率と時間の関係を, 以下の式(5)で表している.

$$V_{reduction} = \frac{4ac}{\phi\gamma_{Fe}} e^{\frac{\alpha}{a}t} \tag{5}$$

ここで, $V_{reduction}$: 体積減少率, ϕ : 鉄筋径(mm), γ_{Fe} : 鉄筋の単位体積重量(mg/mm³), a : 構造条件で決定する係数(mg/mm³), α : 環境条件で決定する係数(mg/mm³/year), t : 期間(年), である.

以上の文献 4), 6) から得た式(1)~(5)を用いて, 表-6

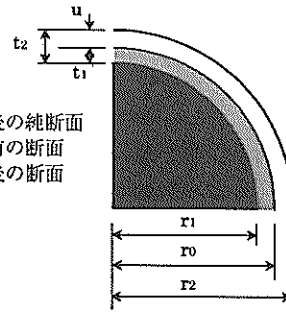


図-11 文献 6 における腐食前後の鉄筋断面

に示した各劣化度のひび割れ幅に対応する期間を求めた結果を, 表-7 に併記した.

表-7 より, 各劣化度の期間は, おおよそ劣化度 I : II : III : IV = 1 : 1 : 1 : 1 となることが判る. また, 劣化度 0 は腐食によるひび割れが生じる前であり, 鉄筋腐食のシステムが他と異なる上, 鉄筋腐食が開始するまでの期間を含むため, ここでは同列に評価できない. そこで, 劣化度 0 が仮に他と同じ期間を有するものと仮定すると, 劣化度 0 から劣化度 IV までは同一の期間で表される

また, 栈橋上部工の劣化の場合, 推移確率は劣化速度と関連している. 前述のように, 栈橋上部工の劣化速度は, 環境的要因, 構造的要因によって決定され, これらの条件は同一構造物ではほぼ同程度と考えられる. したがって, 栈橋上部工の劣化度推移に関する推移確率は, 個々の構造物ごとに固有の値とみなし, さらに上記のように, 各劣化度の期間が同一と考えると, 各々の劣化度から次の劣化度へと推移するときの推移確率はすべて一定値 x とすることができる. このとき, 個々に異なる一般的なマルコフ連鎖の推移確率と区別するため, 栈橋上部工の劣化に関する, 一定値となる推移確率を「遷移率」と称することとした.

なお, 表-7 は, 文献 4) および 6) の計算中における, 鉄筋径, かぶり厚さ, ひび割れの長さ, 構造係数, 環境係数, 初期ひび割れ幅などについて, 複数の仮定的な数値を用いた上での試算例である. ただし, これらの数値を変更しても, 各劣化度の期間(年)は変化するものの, 期間の割合はほとんど変化しない.

5.3 劣化進行モデルの導入

ここでは, 栈橋上部工の劣化に関して, 図-9 で示したマルコフ連鎖の考え方にしたが, 徐々に劣化度が進行するものと考え, 同図の流れを数学的に表せる劣化進行モデルを導入する.

まず, 図-9 のマルコフ連鎖推移図に示した劣化進行過程は, 以下の式(6)で表すことができる.

表-7 ひび割れ幅から求めた各劣化度の期間例

劣化度	ひび割れ幅 δ (mm)	腐食量 W_{ca} (mg/cm ²)	体積減少率 $V_{reduction}$ (%)	期間 (年)
I	0.1	0.012646	0.1397	7.51
	0.3	0.038085	0.4206	
II	1	0.128690	1.4214	8.29
III	3	0.401669	4.4364	7.74
IV	10	1.552743	17.1497	9.13

$$\begin{matrix} & 0 & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} \\ \begin{matrix} 0 \\ \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

この式は、マルコフ連鎖の考えに基づき、ある時点からある単位期間が経過した時の劣化度の推移を表すものである。一方、建設直後の栈橋上部工では、構造物に生じた豆板や乾燥ひび割れ、コールドジョイントなどの初期欠陥を無視すると、すべての部材が劣化度 0 であると考えることができ、このときの劣化度の分布は以下の式(7)で表すことができる。

$$\begin{matrix} 0 \\ \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)で表された建設直後の栈橋上部工に対し、単位期間が t 回分経過した後の劣化度分布は、図-9 で表したマルコフ連鎖の流れを t 回分繰り返す、すなわち、式(6)を t 回かけたものとなり、式(8)で表すことができる。

$$\begin{matrix} 0 \\ \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{matrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

この式(8)で表されるものが、今回提案する劣化進行モデルとなる。なお、本報告では、単位時間を 1 年とし、式(8)の t には栈橋上部工が建設されてからの使用年数を用いることとした。

5.4 劣化進行モデルの性質

式(8)で表される劣化進行モデルについて、遷移率 x を

0.1 とし、時間 t を変化させた場合の劣化度分布の変化を図-12 に示す。同様に、仮に t に固定値 10 を代入し、遷移率 x を変化させた場合に得られる劣化度分布の変化を図-13 に示した。

これらの図から、式(8)の劣化進行モデルによって計算された結果は、ある劣化度にピークを持ちながら、ばらついた劣化度分布を示すことが判る。また、図-12 が示すように、時間 t が増加するにしたがって劣化度のピークは劣化度の大きいほうへとシフトし、同様に図-13 からは遷移率 x が増加するほど、劣化度のピークは劣化度の大きいほうへとシフトすることが判る。

ここで、図-8 に示した調査結果のうち、床版における代表的な劣化度分布を抜き出して図-14 に示した。これらの図と図-12 および図-13 の比較から、図-14 の N 港-c 栈橋の結果は図-12 における $t=2$ の場合、もしくは図-13 における $x=0.01$ の場合とよく類似している。また A 港-a 岸壁の結果は図-12 における $t=20$ もしくは $t=40$ の場合、図-13 における $x=0.20$ の場合と類似しており、同様に M 港-b 栈橋の結果は図-12 の $t=60$ の場合、もしくは図-13

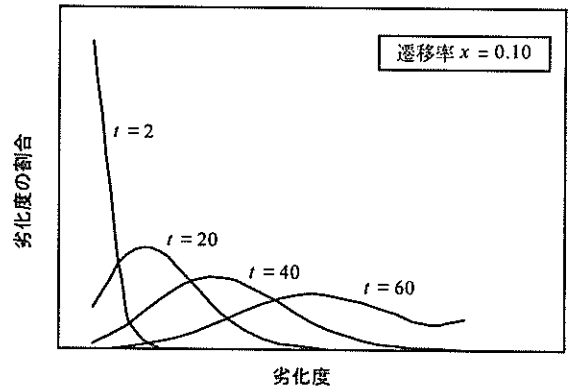


図-12 t を変化させたときの劣化進行モデルの挙動

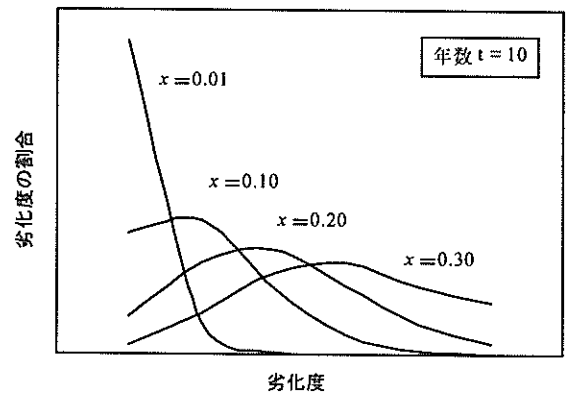


図-13 x を変化させたときの劣化進行モデルの挙動

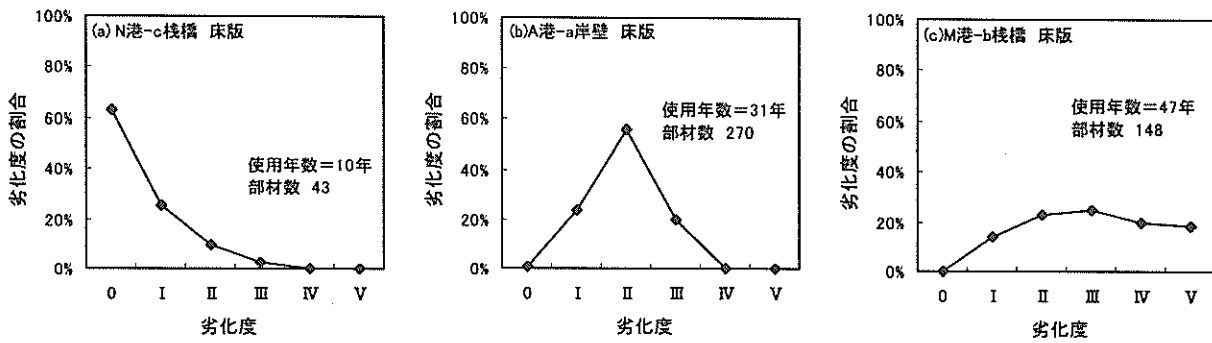


図-14 栈橋調査結果の一例

の $x=0.30$ の場合と類似していることが判る。

このように、本劣化進行モデルは、遷移率 x と時間 t の組み合わせによって得られる劣化度分布が異なり、ある劣化度にピークを持って、ばらついた劣化度分布を示すという、実際の劣化実態調査で得られた調査結果の傾向を模擬できるものである。

5.5 劣化進行モデルの種類

本劣化進行モデルは、5.2 で示したように、劣化度 0～IV の期間を全て同じとし、遷移率 x を一定としている。この点について、式(6)はマルコフ連鎖における1つの「状態」に対し、劣化度1つを割り当てている。しかし、以下の式(9)に示すように、たとえば状態2つに対して1つの劣化度を割り当てた場合でも、劣化度の期間が全て同じという条件は満足する。

	0	I	II	III	IV	V
0	$1-x$ 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
I	x $1-x$	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
II	0 0	x $1-x$	0 0	0 0	0 0	0 0
III	0 0	0 0	x $1-x$	0 0	0 0	0 0
IV	0 0	0 0	0 0	x $1-x$	0 0	0 0
V	0 0	0 0	0 0	0 0	x $1-x$	0 0

(9)

同様に考えれば、劣化度1つに相当する状態の数を増やしていくことで、この劣化進行モデルは無数に存在する。今回の検討では、状態と劣化度の比率が1:1, 2:1, 3:1のもの3種類を作成し、それぞれ1モデル, 2モデル, 3モデルと呼ぶこととした。

この3種類のモデルは若干挙動が異なり、およそ以下

のような違いがある。

- ① マルコフ連鎖の性質上、同等の劣化状態を表現しようとする場合の遷移率の大きさは、1モデル:2モデル:3モデル=1:2:3となる。詳細は割愛するが、このことはマルコフ連鎖の理論により証明される。
- ② ①の性質を利用して各モデルにおける遷移率を調整した場合、図-15に示すように、各モデルが示すピークが位置する劣化度は同じとなるが、ピークの鋭さ、ばらつきの程度が変化する。このとき、1モデルよりも2モデル, 2モデルより3モデルのほうが、よりばらつきが少なく、ピークが鋭くなる性質を持つ。すなわち、これらのモデルを使い分けることで、劣化度分布におけるばらつきの程度を変化させることができる。

ここで、前述のように、同一施設での劣化度のばらつきは、構造的条件の中で、特に施工のばらつきによるものと考えられる。したがって、1モデル, 2モデル, 3モデルの3種類を設定し、この3つのモデルを使い分ける

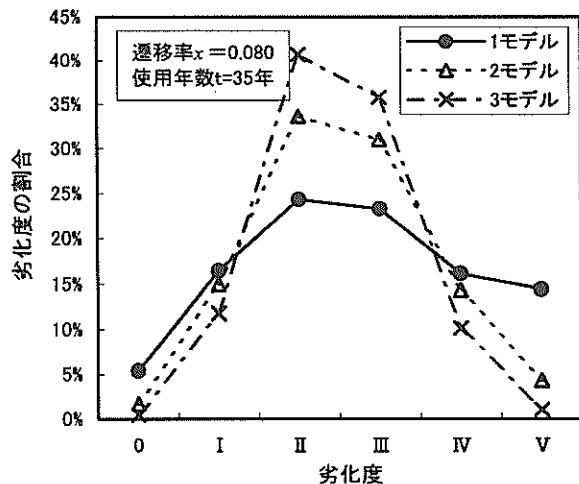


図-15 モデルの違いが劣化度分布に与える影響

ことで、各施設ごとに異なると思われる施工の精度を反映させることができるものとする。

5.6 劣化進行モデルの適用

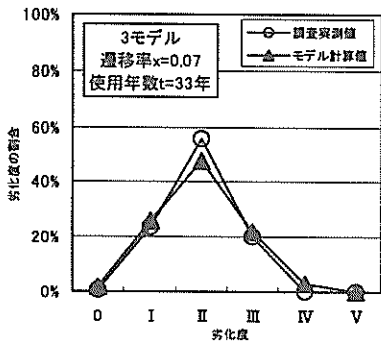
ここでは、劣化実態調査の結果に作成した3種類の劣化進行モデルを適用し、劣化進行モデルが調査結果に対してどの程度の再現性を持っているかについて説明する。モデルの適用にあたっては、以下の手順で行った。

- ① 栈橋上部工の建設から調査を行ったときまでの期間、すなわち栈橋上部工の使用年数が分かっており、モデルの t に使用年数を代入した。
- ② 次に、3種類のモデルのうち、いずれか1つを用いて、実際の調査結果から得られた劣化度分布とモデルを計算することによる劣化度分布が最も近くなるよう、遷移率 x を計算した。
- ③ 上記のようにして得られた遷移率を、モデルの種類によって、2モデルの場合は1/2、3モデルの場合は1/3とし、1モデルの遷移率に換算した。

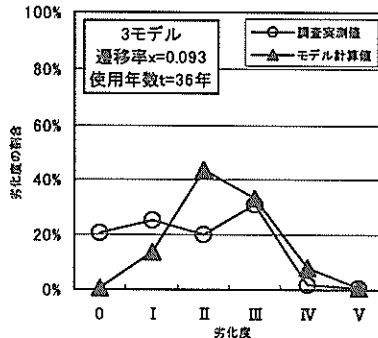
このようにして得た、実際の調査結果と最もよく合うモデル計算値を以下の図-16 および図-17 に示す。なお、

同図には、調査実測値とモデル計算値が最も良く合うときのモデルの種類、遷移率、ならびにモデルに代入した栈橋施設の使用年数 t も併記している。

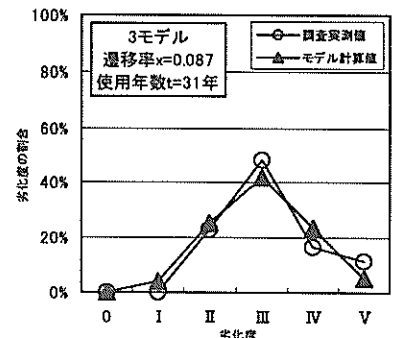
栈橋上部工の調査には小型ボートを用いることが多く、波浪や潮の干満により調査対象部材との距離が変化する。さらに、栈橋下面は日射がなく、照明を使用した調査となることも多いため、劣化度判定、特に劣化度0~IIの判定の精度が常に高いとはいえない。この点を考慮すれば、構造物ごとに異なるある遷移率を与えたとき、モデルの計算値は調査実測値を比較的良好に近似しているものと思われる。



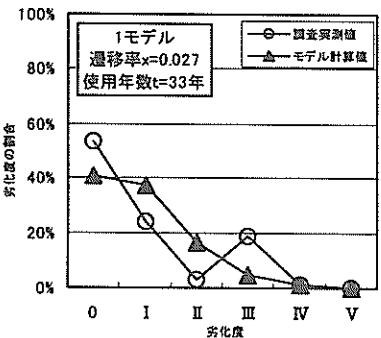
(a) A 港-a 岸壁の劣化度分布



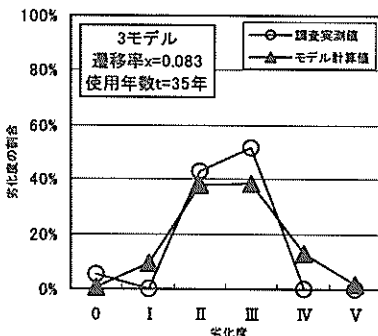
(b) B 港-a 栈橋の劣化度分布



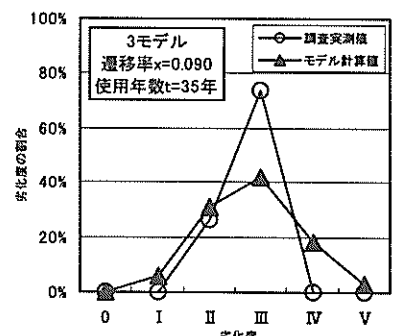
(c) B 港-b 栈橋の劣化度分布



(d) C 港-a 岸壁の劣化度分布

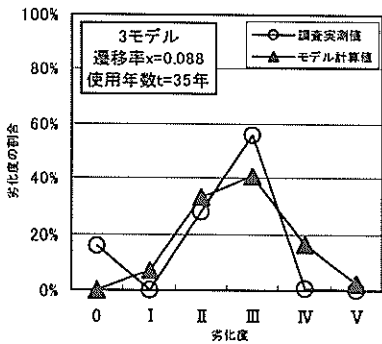


(e) D 港-a 栈橋の劣化度分布

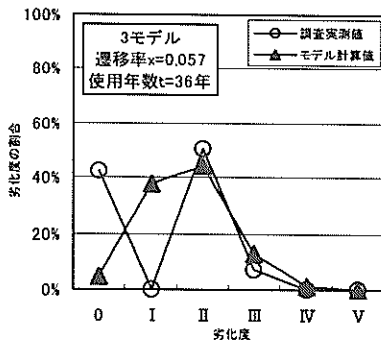


(f) D 港-a 係船岸の劣化度分布

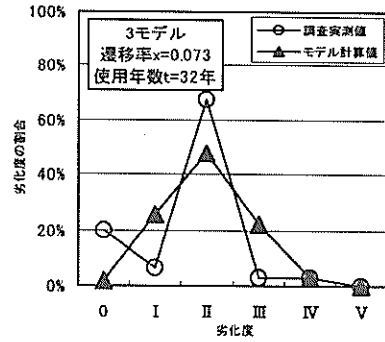
図-16 劣化実態調査の結果と劣化進行モデルの計算値 (床版)



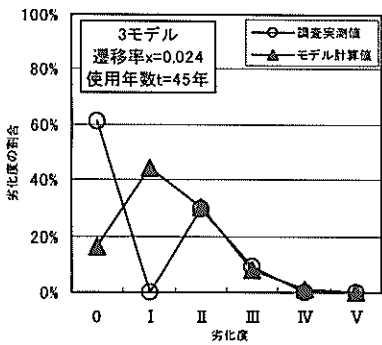
(g)D 港-b 栈橋の劣化度分布



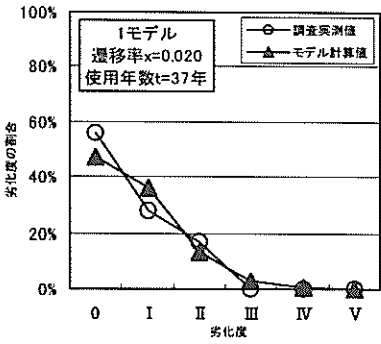
(h)D 港-c 栈橋の劣化度分布



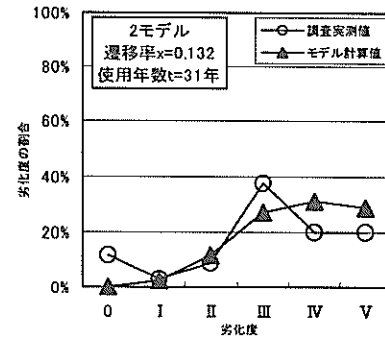
(i)E 港-a 岸壁の劣化度分布



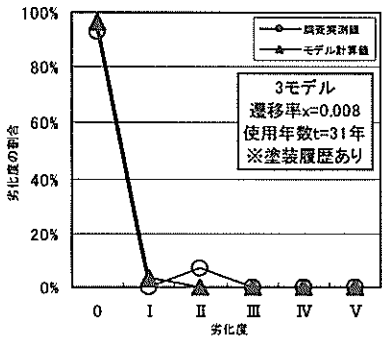
(j)F 港-a 栈橋の劣化度分布



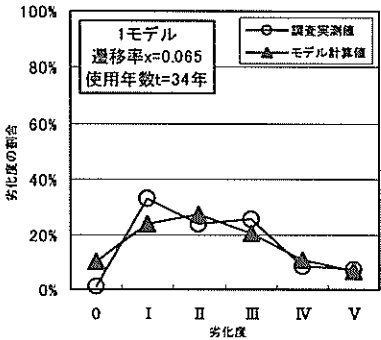
(k)F 港-b 栈橋の劣化度分布



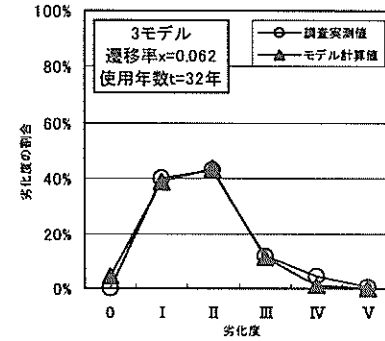
(l)F 港-c 栈橋の劣化度分布



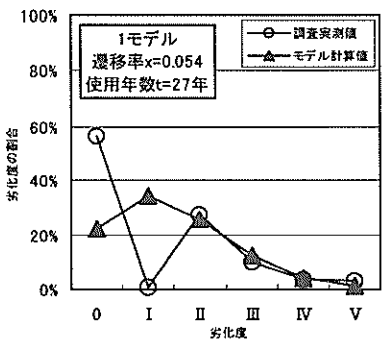
(m)F 港-d 栈橋の劣化度分布



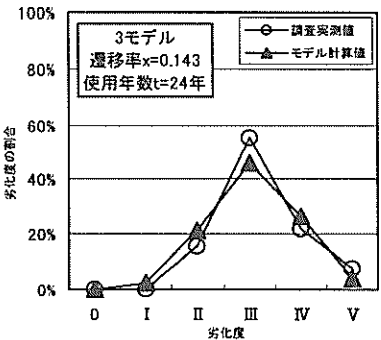
(n)G 港-a 岸壁の劣化度分布



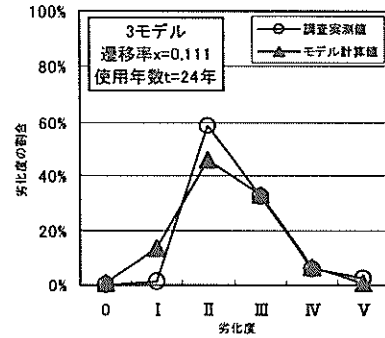
(o)H 港-a 岸壁の劣化度分布



(p)I 港-a 岸壁の劣化度分布

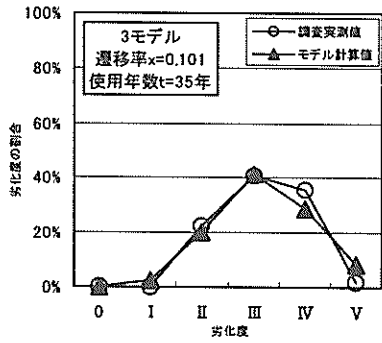


(q)J 港-a 岸壁の劣化度分布

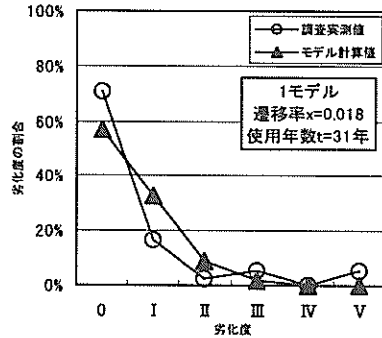


(r)J 港-b 岸壁の劣化度分布

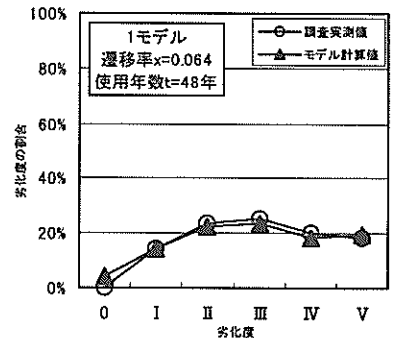
図-16 劣化実態調査の結果と劣化進行モデルの計算値 (床版)



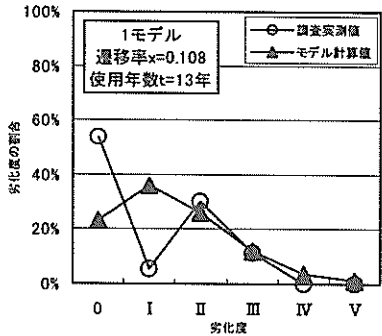
(s) K 港-a 岸壁の劣化度分布



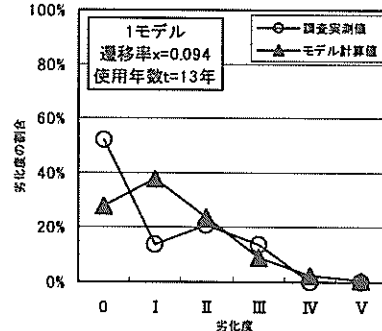
(t) L 港-a 岸壁の劣化度分布



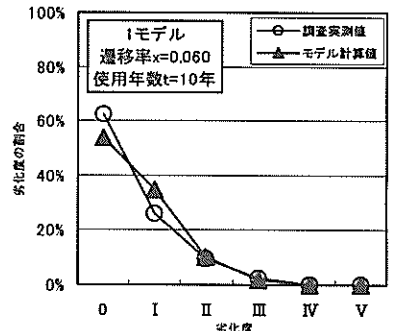
(u) M 港-b 栈橋の劣化度分布



(v) N 港-a 栈橋の劣化度分布

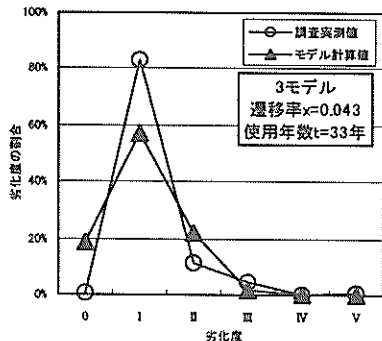


(w) N 港-b 栈橋の劣化度分布

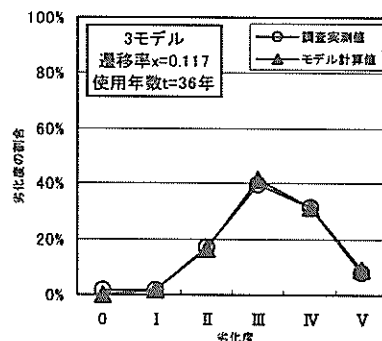


(x) N 港-c 栈橋の劣化度分布

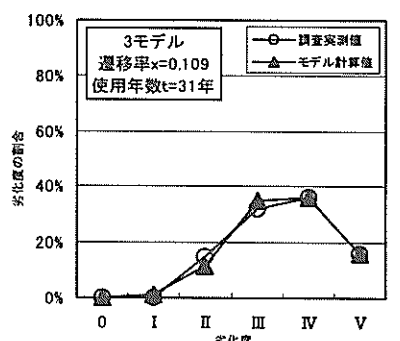
図-16 劣化実態調査の結果と劣化進行モデルの計算値 (床版)



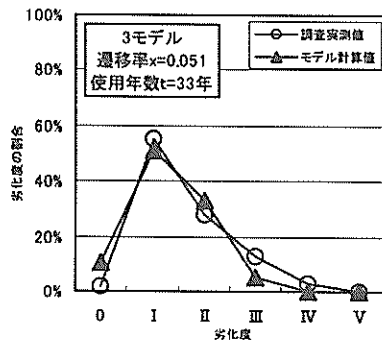
(a) A 港-a 岸壁の劣化度分布



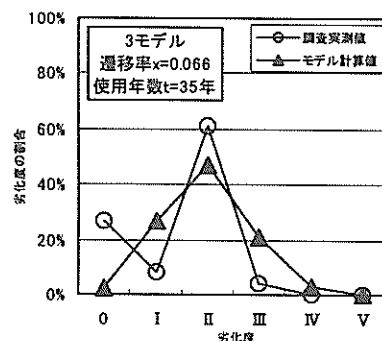
(b) B 港-a 栈橋の劣化度分布



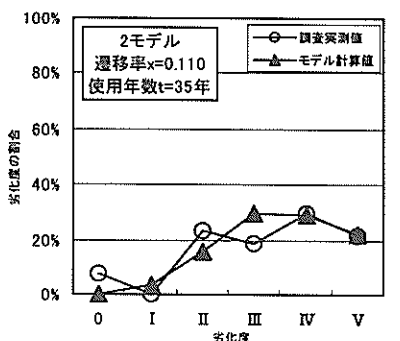
(c) B 港-b 栈橋の劣化度分布



(d) C 港-a 岸壁の劣化度分布

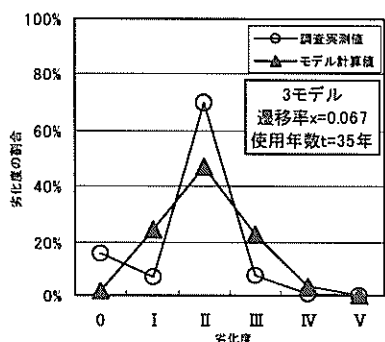


(e) D 港-a 栈橋の劣化度分布

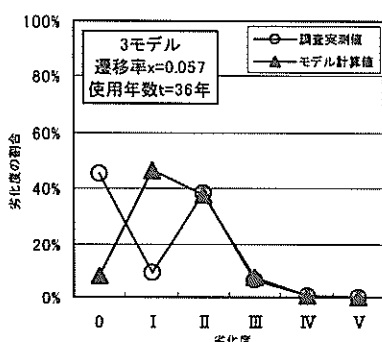


(f) D 港-a 繫船岸の劣化度分布

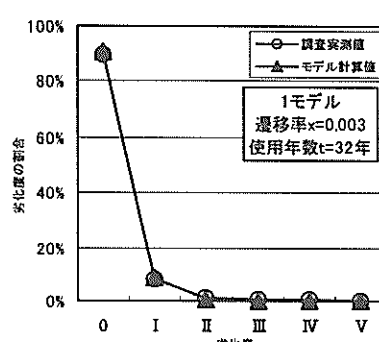
図-17 劣化実態調査の結果と劣化進行モデルの計算値 (はり)



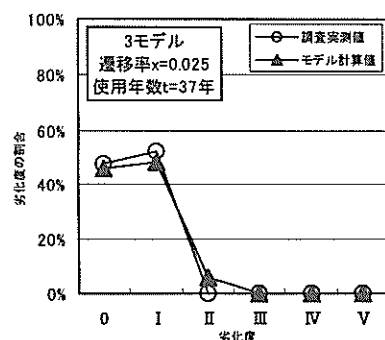
(g)D 港-b 栈橋の劣化度分布



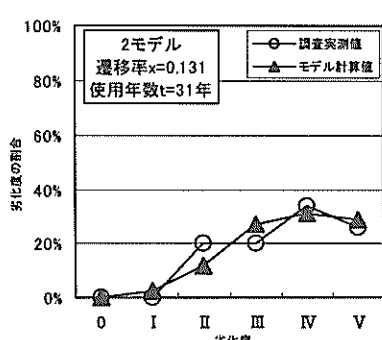
(h)D 港-c 栈橋の劣化度分布



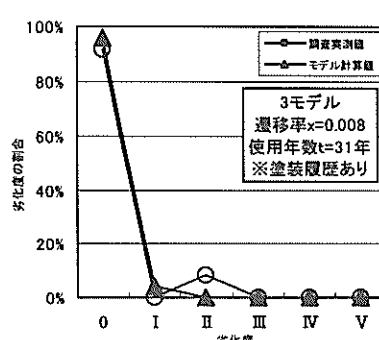
(i)E 港-a 岸壁の劣化度分布



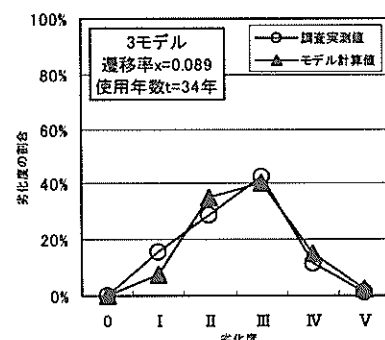
(j)F 港-b 栈橋の劣化度分布



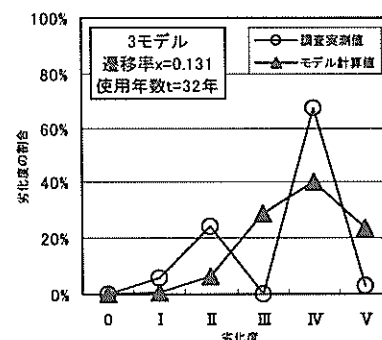
(k)F 港-c 栈橋の劣化度分布



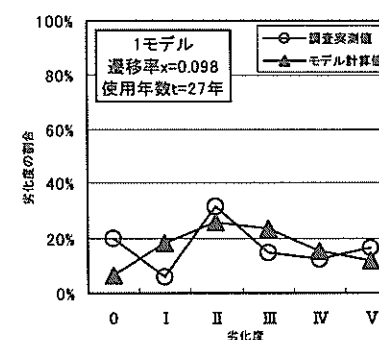
(l)F 港-d 栈橋の劣化度分布



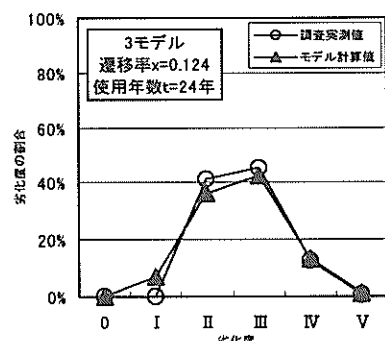
(m)G 港-a 栈橋の劣化度分布



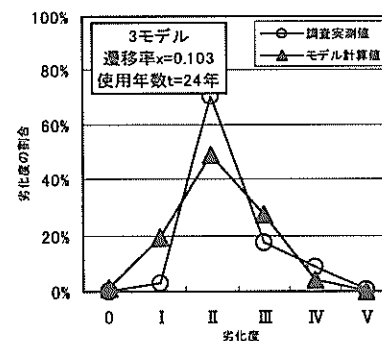
(n)H 港-a 岸壁の劣化度分布



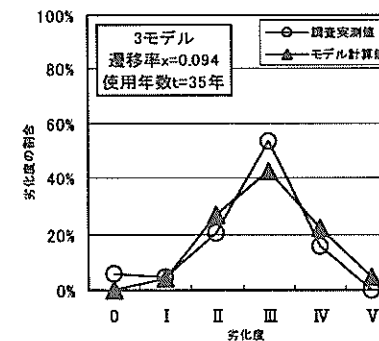
(o)I 港-a 岸壁の劣化度分布



(p)J 港-a 岸壁の劣化度分布



(q)J 港-b 岸壁の劣化度分布



(r)K 港-a 岸壁の劣化度分布

図-17 劣化実態調査の結果と劣化進行モデルの計算値 (はり)

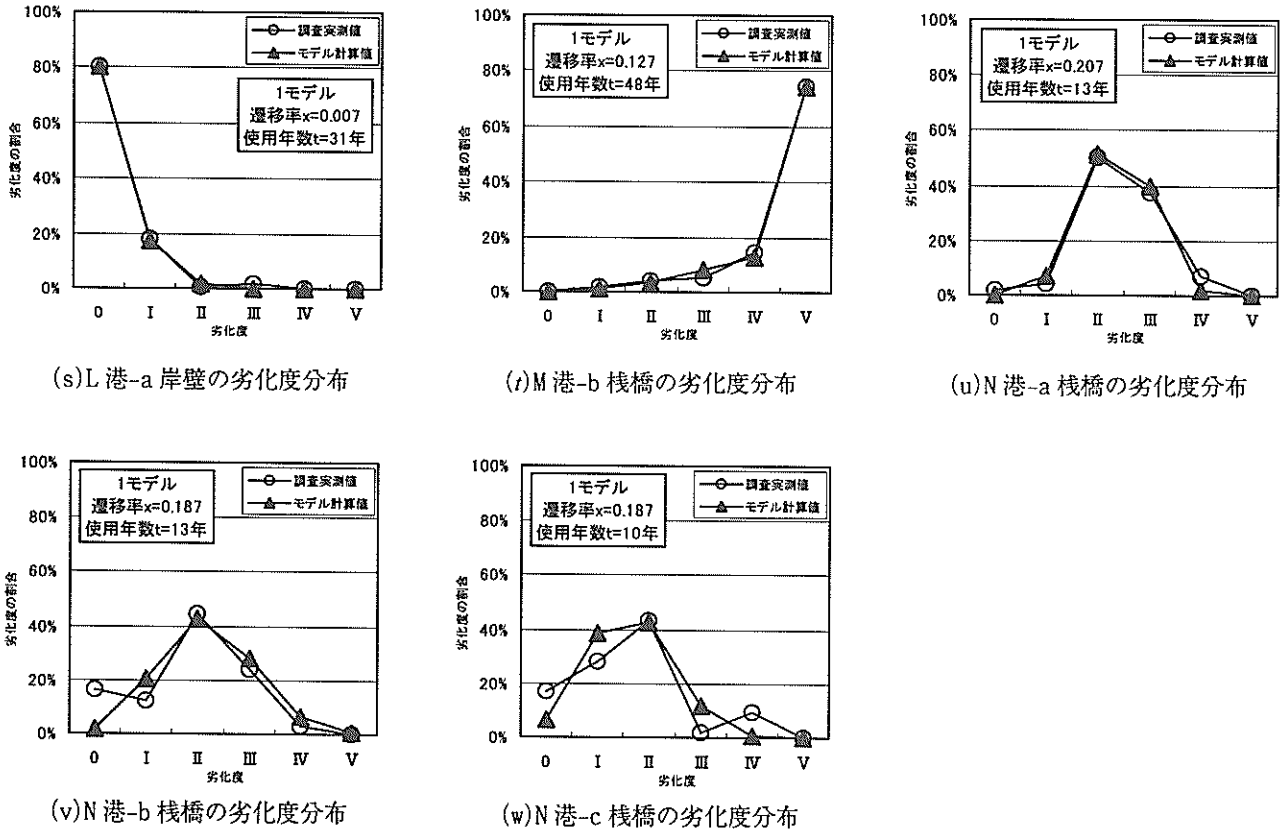


図-17 劣化実態調査の結果と劣化進行モデルの計算値 (はり)

6. 棧橋上部工の劣化予測および劣化推定

6.1 劣化予測手法の提案

(1) 遷移率と劣化速度に関する考察

5.6において、遷移率 x は、実際の調査結果に最も近くなるよう、各棧橋施設ごとに任意に設定した。しかし、図-9に示したマルコフ連鎖推移図から解るように、遷移率はある単位時間内における、劣化度の増加に対する確率であると言える。言い換えると、遷移率はある種の劣化速度と関係を持つ値である。

そこで、図-18に遷移率と劣化速度の関係を示す。ここでは、縦軸に調査結果から得た劣化度分布と、劣化進行モデルから算出された劣化度分布が最も良く一致するよう設定した遷移率、横軸に対象棧橋施設における部材劣化度の算術平均値を棧橋上部工の使用年数で除した値をプロットしている。このとき横軸は、劣化度を時間で除した値であり、劣化速度と同じ次元を持つ、劣化速度平均値であるといえる。

図-18から解るように、遷移率は劣化速度とほぼ直線的な相関を示している。つまり、遷移率は劣化速度と置き換えることも可能な、劣化速度の指標であると考え

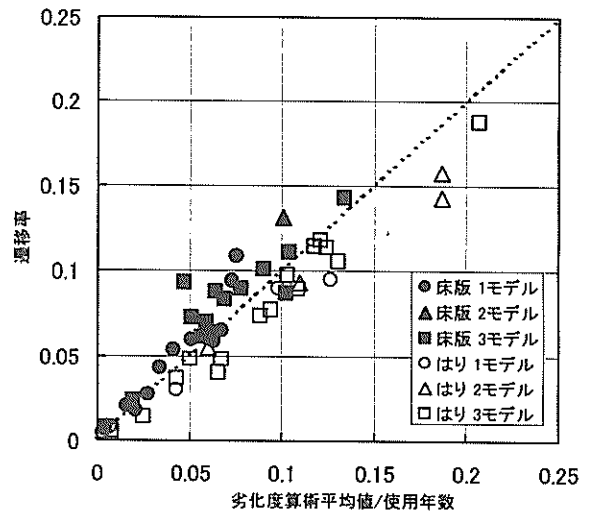


図-18 遷移率と劣化速度との関係

られる。ただし、ここで言う劣化速度とは、一般的に用いられる、鉄筋腐食量などと直接的に関係のある定量的な劣化速度とは異なり、今回の調査で用いた6段階の劣化度判定に対する劣化速度であることに注意する必要がある。

(2)劣化予測の試み

一般的に、劣化速度を特定できれば劣化程度の将来予測が可能となる。ここで、今回作成した劣化進行モデルにおける遷移率は、各施設ごとに与えられる固有の値であり、5.2で示したように、各劣化度の期間を等しくしたことにより、遷移率は時間軸に左右されない一定値とすることができる。したがって、今回の劣化進行モデルは、ある施設における遷移率が決定すれば、時間 t を将来に設定することで、将来的な劣化予測ができる可能性がある。

そこで、この考えにしたがって、現在の劣化状況から10年後の劣化度分布を予測した例を図-19に示す。同図は2施設の床版もしくははりについての予測である。(a)N港-c栈橋の場合、現時点で60%以上を占める劣化度0の部材が20%程度となり、ほとんどの部材が塩害による劣化現象を露呈する結果となる。また(b)B港-a栈橋の場合、現時点で10%未満である劣化度Vの部材が、10年後には50%程度まで増加する。

このようにして、本劣化進行モデルを劣化予測モデルとして使用できる可能性があることが示唆された。ただし、劣化予測モデルとしての妥当性についての評価を行うことは現時点では不可能である。したがって、現段階で予測される劣化度分布に対して将来的に再度調査を実施し、それらの整合性を検証していく必要がある。

6.2 劣化推定手法の提案

本劣化進行モデルでは、マルコフ連鎖の考えに基づき、遷移率 x と時間 t から、劣化度の分布を決定する。このとき、時間 t は栈橋上部工の使用年数であり、目的に応じて

任意の値を取ることができる。一方、遷移率は施設ごとに固有の値であり、遷移率を的確に決定することが重要なポイントとなる。

ここまでにおいて、栈橋上部工の劣化実態調査とモデルの計算値が最もよく整合するように遷移率を決定した。しかし、遷移率をある種の劣化速度と考えれば、劣化速度は環境的条件、および構造的条件との関数で表される⁷⁾。そこで、遷移率をこれらの各種条件を用いて表す試みを行った。なお、この試みに対し、必要なデータが揃わない施設もあり(後述表-6)、それらは本検討から除外している。

(1)遷移率に影響する各種条件

2.2に示したように、遷移率に影響を与える構造的条件として、主に以下の3点が考えられる。

- ① 部材の海水面からの距離(部材の高さ)
- ② コンクリートの密実性
- ③ かぶり

ここで、②、③に関して、今回劣化実態調査を行った栈橋のほとんどが、建設から数十年を経過しており、設計に関する資料が失われていることが多かった。そこで、過去に行われた劣化実態概略調査¹⁾におけるこれらの集計結果を図-20および図-21に示した。

まず、図-20を見ると、設計かぶりは5~10cmの範囲にある。そのうち最も採用率が高いのはかぶり8cmであり、 $8 \pm 1\text{cm}$ とすると全体の約60%がこの中に含まれる。

同様に、図-21に関して、設計水セメント比の採用率が最も高いのは、水セメント比が0.5の場合である。かぶりの場合と同様に 0.5 ± 0.02 の比率を見てみると、

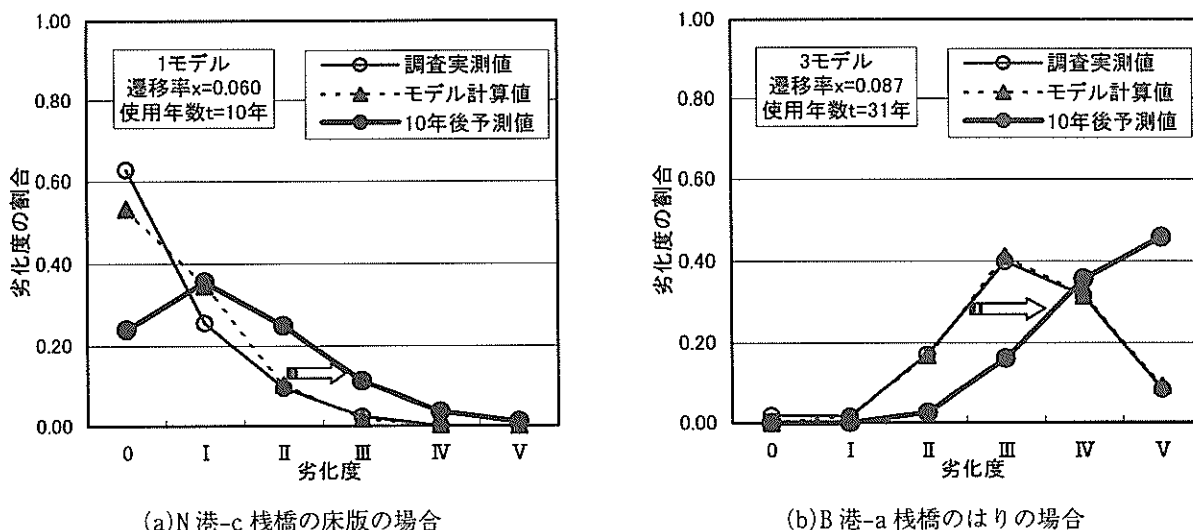


図-19 10年後の劣化予測を行った例

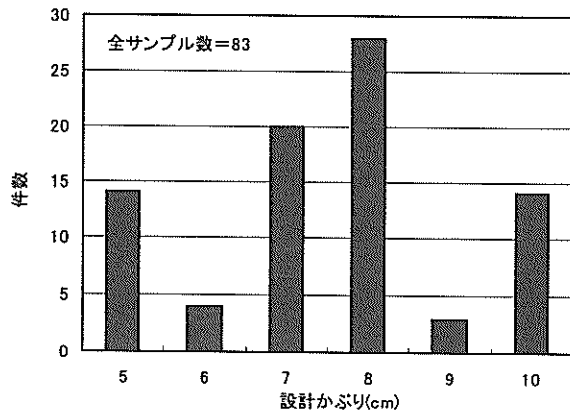


図-20 設計かぶりの集計結果

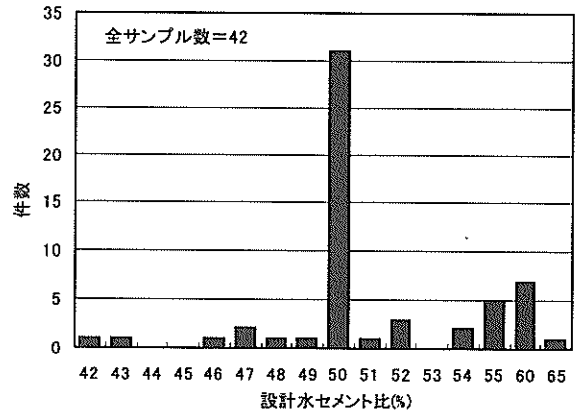


図-21 設計水セメント比の集計結果

全体の約 65%がこの範囲に含まれることになる。

本来、コンクリートの密実性、かぶりなどの違いが塩害による劣化に与える影響は、決して無視できるものではないと思われるが、資料が現存しないこと、60%を超える施設でこれらがほぼ同程度の値となることを考慮して、これらをすべて一様のもものと見なし、今回の検討には加えないこととした。したがって、本検討に対して使用する構造的条件は、①部材の海水面からの距離のみとした。

一方、遷移率に影響を与える環境条件としては、2.2 に示したように、以下の6項目が考えられる。

- ① 湿度
- ② 降水量
- ③ 海水中の塩化物イオン濃度
- ④ 風速

⑤ 波の高さ

⑥ 気温

これらの情報のほとんどは、気象庁において入手できる情報であり、全ての対象港について、最も近い地点における 1996~2000 年までの 5 年間の情報を収集し、平均したものを検討に用いた。ただし、海水中の塩化物イオン含有量に関しては、文献 8)における各港で採取した海水に含まれる塩化物イオン含有量のデータを用い、データが不足している港では、新たに海水サンプルを採取し、塩化物イオン濃度を調べることでデータとした。以上によって得た、各種条件の収集結果を表-6 に示す。

なお、今回調査対象とした棧橋施設の中には、調査データの精度が若干低いもの、詳細な構造的条件が得られなかったもの、棧橋施設の使用年数を示す資料が失われているものなどがあり、これらについては検討から除外

表-6 各施設ごとの構造的条件および環境的条件

施設名称	建設年度	使用年数(年)	部材下面と海面との距離		年間平均風速(m/s)	塩化物イオン濃度(ppm)	年間平均気温(°C)	年間平均湿度(%)	年間降水量(mm)	最大有義波(H/T:m/s)	平均有義波(H/T:m/s)	
			床版(m)	はり(m)								
A港	A-a岸壁	S43	33	1.50	0.70	2.94	17700	7.66	75.40	1305.1	0.37	0.11
B港	B-a棧橋	S40	36	0.93	0.03	3.30	17225	11.72	71.47	1239.8	0.25	0.10
	B-b棧橋	S45	31	0.93	0.03	3.30	17225	11.72	71.47	1239.8	0.25	0.10
C港	C-a岸壁	S43	33	1.52	0.57	3.60	15825	16.20	68.20	1568.4	0.41	0.19
D港	D-a棧橋	S41	35	1.40	0.65	3.60	15454	16.26	68.20	1568.4	0.26	0.11
	D-a繫船岸	S41	35	1.50	0.25	3.60	15454	16.26	68.20	1568.4	0.26	0.11
	D-b棧橋	S41	35	1.55	0.70	3.60	15454	16.26	68.20	1568.4	0.26	0.11
	D-c棧橋	S40	36	1.55	0.75	3.60	15454	16.26	68.20	1568.4	0.26	0.11
E港	E-a岸壁	S42	32									
F港	F-a棧橋	S30	45									
	F-b棧橋	S38	37									
	F-c棧橋	S44	31									
	F-d棧橋	S44	31									
G港	G-a岸壁	S42	34	1.16	0.56	2.14	11476	15.20	74.60	1965.4	0.23	0.07
H港	H-a岸壁	S44	32	0.71	0.04	3.80	14870	16.70	68.40	1544.4	0.32	0.14
I港	I-a岸壁	S45	27									
J港	J-a岸壁	S52	24	0.32	-	3.14	17846	17.08	69.20	1773.9	0.32	0.14
	J-b岸壁	S52	24	0.32	-	3.14	17846	17.08	69.20	1773.9	0.32	0.14
K港	K-a岸壁	S41	35	0.85	0.10	2.74	14261	17.32	68.40	1695.7	0.40	0.18
L港	L-a岸壁	S52	31									
M港	M-a棧橋											
	M-b棧橋	S28	48	0.90	0.25	2.30	14360	17.14	69.80	2012.3	0.38	0.11
	M-c棧橋	S63	13	0.75	0.00	4.58	19625	24.62	75.00	2065.3	0.18	0.06
N港	N-a棧橋	S63	13	0.75	0.00	4.58	19625	24.62	75.00	2065.3	0.18	0.06
	N-b棧橋	S63	13	0.75	0.00	4.58	19625	24.62	75.00	2065.3	0.18	0.06
	N-c棧橋	H3	10	0.75	0.00	4.58	19625	24.62	75.00	2065.3	0.18	0.06

することとした。

(2) 遷移率推定式の導入

まず、各種条件と遷移率との相関を調べた。このとき、各々最も妥当と思われる近似方法を選択し、その近似方法に対して得られた相関係数を表-7 に示す。同表より判るように、床版、はりの双方において、遷移率に与える影響が最も大きかったのは、部材と海水面との距離であった。なお、このとき部材と海水面との距離とは、H.W.L. から床版、もしくははりの底面までの平均距離を採用している。

そこで、部材-海水面間距離と遷移率との関係を、図-22 に示す。特に床版に対して、相関係数は決して大きいとは言えないが、図-22 から、遷移率を部材-海水面の距離を用いて、以下の式(10)および(11)で近似した。

$$x' = 0.14e^{-0.6H} \quad (\text{床版}) \quad (10)$$

$$x' = 0.14e^{-1.3H} \quad (\text{はり}) \quad (11)$$

ここで、 x' は部材-海水面の距離から求めた遷移率、 H は部材と海水面との距離(m)を表している。このとき近似方法として対数近似を選択した理由は、部材と海水面の距離が非常に大きくなった場合、塩害の影響は非常に小さくなるのが予想され、遷移率は 0 に近づくと考えられるが、決して負の値にはならないという境界条件を考慮したためである。

さらに、他の環境条件が遷移率に与える影響について、遷移率 x を式(10)および式(11)から得られる x' で除した値 x/x' と、各条件との相関を調べた。このとき得られた相関係数を表-8 に示す。表-8 から、床版に対する相関係数はいずれも非常に小さく、各種の環境条件が x/x' に影響を与えているとは考えにくい。したがって、床版の遷移率は環境条件の影響が小さく、これらの影響を考慮しないこととした。一方、はりに対する相関係数も決して大きいものではないが、年間降水量、年間平均気温が若干の相関を示している。そこで、はりの遷移率に関しては年間降水量、年間平均気温の影響を含めることとした。

ここで、年間平均気温と年間降水量との関係を図-23 に示す。同図から判るように、今回取得したデータの範囲では、年間平均気温と年間降水量の間には、ある程度の正の相関が見られる。しかし、年間降水量に関しては比較的各年ごとのばらつきが大きいものと考えられ、したがって、より安定性のある年間平均気温を用いて代表することとした。

年間平均気温が x/x' に与える影響を図-24 に示す。図-24 より、気温が x/x' に与える影響として以下の式(12)

表-7 各種条件と遷移率との相関係数

項目	相関係数		近似方法
	床版	はり	
部材と海面との距離	0.3165	0.7953	対数近似
年間平均風速	0.0023	0.1994	直線近似
塩化物イオン濃度	0.1247	0.3219	直線近似
年間平均気温	0.0233	0.5806	直線近似
年間平均湿度	0.0048	0.0985	直線近似
年間降水量	0.0108	0.3955	直線近似
最大有義波	0.0003	0.2852	直線近似
平均有義波	0.0075	0.2193	直線近似

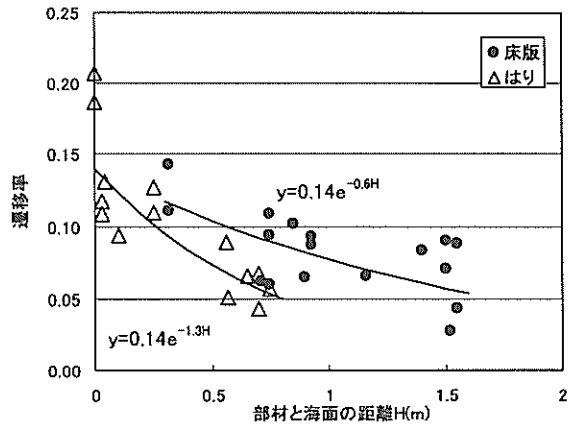


図-22 遷移率と部材-海水面の距離との関係

表-8 各種条件と x/x' の相関係数

項目	相関係数		近似方法
	床版	はり	
年間平均風速	0.0005	0.1141	直線近似
塩化物イオン濃度	0.0014	0.0445	直線近似
年間平均気温	0.0034	0.5316	直線近似
年間平均湿度	0.0068	0.2079	直線近似
年間降水量	0.0576	0.6773	直線近似
最大有義波	0.0000	0.2671	直線近似
平均有義波	0.0047	0.4360	直線近似

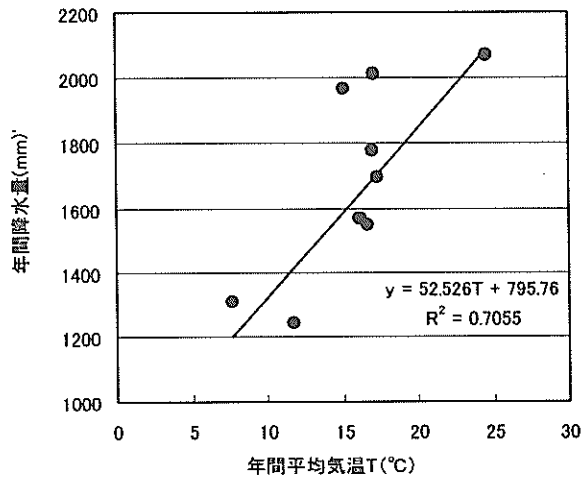


図-23 気温と降水量の関係

で近似した。

$$x/x' = 0.04T + 0.4 \quad (12)$$

ここで、 T は年間平均気温(°C)である。したがって、式(10),(11),(12)より、遷移率推定式として以下の式(13)および式(14)が得られる。

$$x = 0.14e^{-0.6H} \quad (\text{床版}) \quad (13)$$

$$x = 0.14(0.04T + 0.4)e^{-1.3H} \quad (\text{はり}) \quad (14)$$

つまり、栈橋上部工の遷移率は栈橋上部工と海水面との距離が小さいほど、また気温が高いほど大きくなり、劣化の進行を速める、という結果となる。

(3)遷移率推定式の整合性

上記のようにして作成した式(13)および式(14)について、調査結果から得られた遷移率との整合性を調べた。図-25 にその結果を示す。同図より、推定式から計算された遷移率と、調査結果から得た遷移率は、ほぼ良く整合しているものと思われる。このことより、遷移率推定式を用いて、遷移率を算出できる可能性が示された。

ただし、推定式の誤差は±0.04 程度であり、遷移率を安全側に評価するならば、計算結果に0.04 程度の数値を加える必要がある。

(4)劣化推定の検討例

前述の遷移率推定式(7)および式(8)から遷移率を計算し、得られた遷移率と栈橋上部工の使用年数を、式(3)で代表される劣化進行モデルに代入することにより、栈橋上部工の劣化状況を推定することができることになる。すなわち、遷移率推定式と劣化進行モデルの組み合わせにより、劣化推定モデルとして使用できる可能性がある。

そこで、以下に示す栈橋において、調査に先立って上記手順にて劣化度分布を推定し、劣化実態調査を行うことでその検証を行った。

対象としたのは北陸圏にあるO港のa栈橋である。表-9に同港の諸元を示す。また、表-9には、これらの諸元を用いて、式(13)および式(14)から計算した遷移率も併記してある。

O港-a栈橋の調査の結果、部分的にかぶりが小さい箇所があり、かぶりのはく離や鉄筋露出などの著しい劣化現象も確認されたが、全体としてはさほど著しい劣化状態ではなかった。その調査結果ならびに遷移率推定式と劣化進行モデルを用いて推定された劣化度分布を図-26に示す。

同図より、遷移率推定式を用いて推定した劣化度分布と、実際の調査結果から得た劣化度分布は、詳細は異なるものの比較的良く一致している。

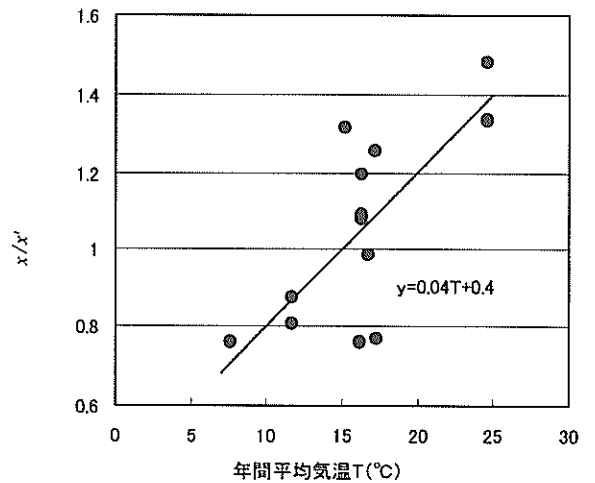


図-24 気温と x/x' の関係

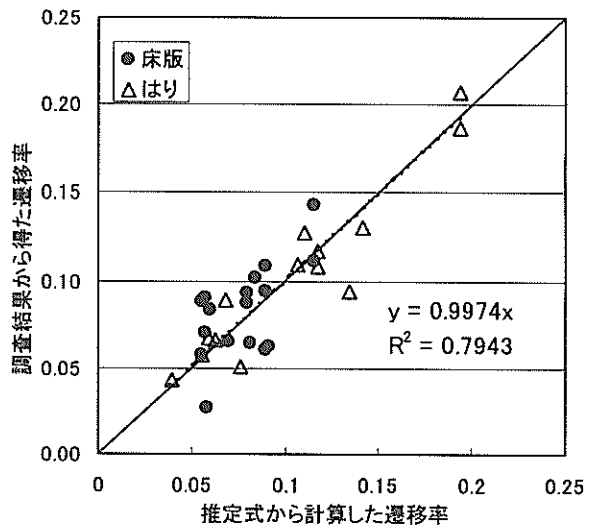


図-25 遷移率推定式の整合性

表-9 O港-a栈橋の諸元

項目	諸元	
建設年度	S44年	
使用年数	32年	
部材と海面の距離	床版	1.45m
	はり	0.85m
年間平均気温	14.4°C	
計算された遷移率	床版	0.059
	はり	0.045

るものの比較的良く一致している。また、推定式より計算された遷移率と、調査結果の最適モデルから得た遷移率は、はりでは約30%のずれが生じていたものの、床版では完全に一致し、ほぼ実用のレベルで劣化推定が行われる可能性があることが示された。

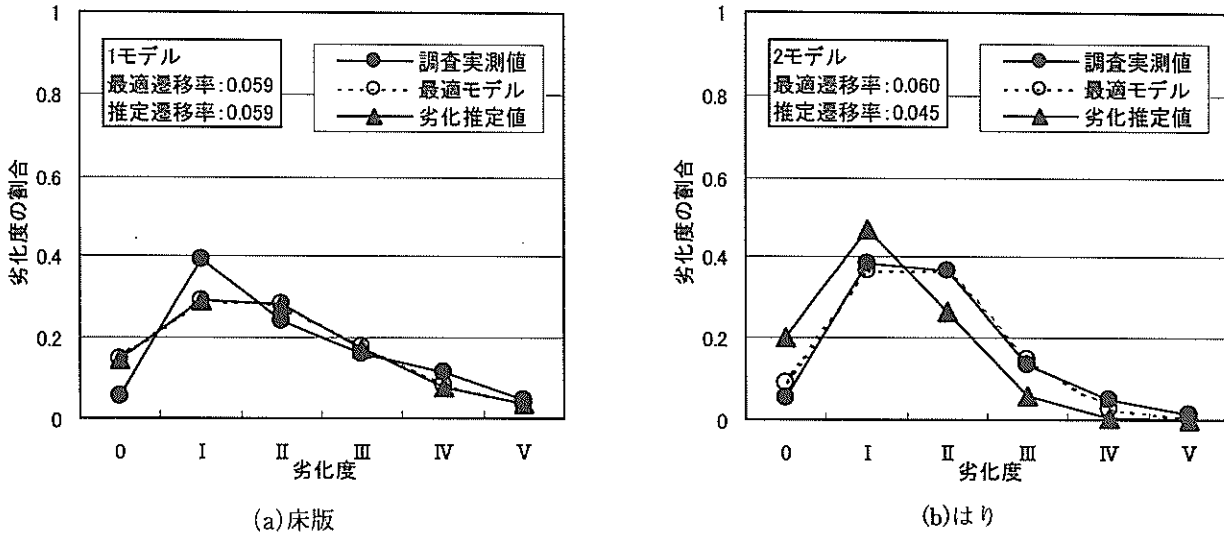


図-26 0港-a 栈橋の劣化推定結果

7. 栈橋上部工の長期維持管理手法の提案

7.1 栈橋上部工の寿命

4.において、栈橋上部工が塩害によって劣化していることを述べた。これらの栈橋を永く安全に使用するためにあたっては、劣化の程度を十分把握し、将来的な劣化を見越した上で、適切な維持管理を行っていくことが重要である。ここでは、今回作成した劣化進行モデルを使用し、栈橋上部工の維持管理を行う手法について考察する。

まず、栈橋上部工の寿命、つまり、塩害によってどの程度の劣化が生じた場合に構造物が寿命を迎えるか、という点について考える。現時点では、この栈橋上部工の寿命に関する論議は十分になされていない。この点に関し、文献 4)では、同資料中の塩害区分「加速期（後期）」以降において、耐荷力・じん性の低下が記述されている。これは、表-3 より劣化度 II に相当する部分であるが、あくまで定性的な評価であり、明確な数値的根拠に基づくものではない。一方、岩波らの報告 9)によると、電食によって強制的に鉄筋を腐食させたはりでは、鉄筋の断面欠損が 5%を超えると耐荷性が低下するとされており、塩害による被害が構造物の耐荷性に影響を与え、寿命を低下させることが明らかとなっている。このとき、鉄筋断面欠損 5%という数値は、非常に著しい鉄筋腐食を指しており、一般的なはりにおける鉄筋 D22~D29、かぶり 7cm という条件下で、文献 6)にしたがって計算すると、ひび割れ幅 3.2~4.2mm 程度に相当し、劣化度 IV 以降を意味していることになる。さらに、横田らの報告 10)では、塩害を受ける海洋環境下に暴露したはり試験体は、劣化度が進行するにつれて耐荷性が低下する傾向を示している

ものの、劣化度 IV までは終局荷重が設計荷重を下回らなかったことが記されている。

これらは一見相異なる結論を示しているように思われるが、電食と実環境による腐食部分の相異や発生する錆の量の相異などがその原因と考えられる。したがって、実際の栈橋施設の劣化現象に関しては、文献 10)の内容が最も近いものと考え、同文献を参考に、栈橋施設の耐荷性の限界を以下のように仮定した。

- ① 耐荷性能に関しては、劣化度 IV までは設計値を下回らないものとする。
- ② 劣化度 V は鉄筋破断などの重篤な劣化も含んでおり、劣化度 V で耐荷性が低下するとした。ただし、施設は本来安全率を考慮して設計されており、劣化度 V が生じた時点で、即座に施設の破壊が生じることはない。
- ③ ②を考慮し、劣化度 V の占める割合が全部材数の 1%を超えると、施設の安全性に注意を要するものとした。
- ④ 劣化度 V が全部材数の 20%を超えると、施設の安全性に問題があり、構造物の寿命であるとした。

ここで、6.1 で示した劣化予測の手法を用いて、今回劣化実態調査を行った栈橋施設に対し、劣化度 V が 1%を超え、安全性に注意を要する時期、および劣化度 V が 20%を超え、安全性に問題が生じる時期を計算した例を図-27 に示す。同図(a)より、床版で 100%、はりで約 88%の施設が 50 年の耐用年数までに安全性に注意を要し、同図(b)より、床版で 50%、はりで 67%の施設が 50 年未満で安全性に問題を生じ、耐用年数以前に寿命を迎える結果となっている。このことは、栈橋施設が塩害による劣化が

原因で、早期の寿命を迎える可能性があることを明らかにしている。

7.2 補修を考慮した維持管理計画の必要性

わが国の港湾施設は、対外輸出入物資の99%以上を取り扱う、極めて重要なものであり、港湾施設の機能を維持・向上させるだけでなく、絶対数の維持も重要な課題となる。したがって、栈橋施設の耐用年数や劣化による寿命の短縮の問題は、今後何らかの対策を要する施設が急増すること、さらにはその対策費用が急増することを意味する。

一方で、近年、公共事業費の縮減が求められており、このような対策を行う際、単に対策を施すだけではなく、その経済性の評価も不可欠となる。なお、ここで言う経済性とは、短期的なものではなく、構造物の存続中に発生するすべての建設・維持・運営費用のトータルコスト、すなわち、構造物の建設から耐用年数を迎えるまでに発生する、長期的なライフサイクルコストを指している。

ここで、物理的な耐用年数を迎える栈橋施設に対し、現在採りうる対策方法をまとめると、およそ以下の3つに分類される。

- ① 供用停止…施設の供用を停止する。
- ② 更新……施設を撤去し、新たに建設する。
- ③ 補修・補強…補修を行うことにより、施設を延命する。

このうち、供用停止や更新といった手段は、構造物のライフサイクルの終焉を意味しているが、補修や補強は機能の回復や向上を図ることで、構造物の耐用年数を延ばすことを意味している。したがって、補修や補強によって、構造物の物理的な耐用年数を引き上げることが可

能である。

また、公共事業費の縮減が叫ばれる中、経済性を重要視するならば、可能な限り積極的に維持管理を行った上で、そのまま維持を続けるより更新を行ったほうが経済的である、と判断されるまでの年限を耐用年数として考慮することが妥当であろう。その際、構造物を撤去・更新した方が良いのか、構造物に補修を行う方が良いのか、さらにはそのときの補修手段はどうすれば良いのか、という判断は、基本的にはそれらの対策方法の持つ効果と、対策費用の兼ね合いによって決定されるべきであると思われる。たとえば、

① 目標とする時期まで構造物を維持したい場合

目標とする時期まで構造物を維持できる性能を有する対策方法のうち、費用が最小となるものを採用する。

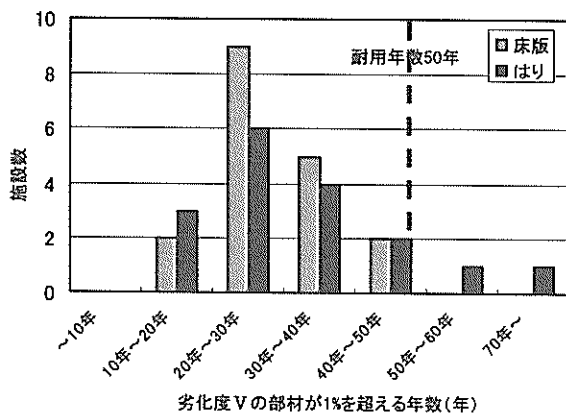
② 可能な限り構造物を維持したい場合

構造物の機能維持に関して最低限の性能を持つ対策方法に対し、対策方法の持つ効果と費用を比較し、費用対効果が最大となるものを採用する。

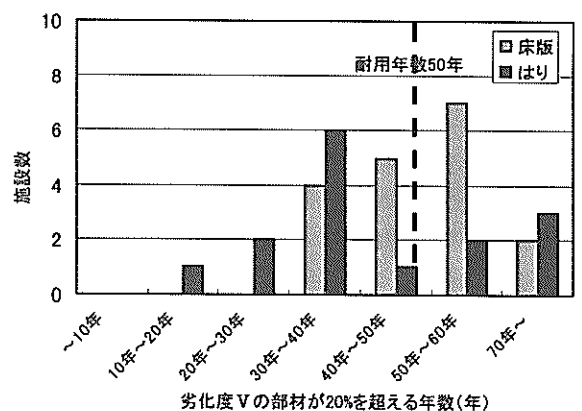
というように、経済性と効果を考慮し、目的に応じた維持管理計画が必要となる。

しかし、現在、このような維持管理計画を立案する手法はほとんどなく、既存栈橋施設をスムーズに供用していくために、安全性、経済性の両観点から見た長期維持管理手法を確立することが現時点の課題であるといえる。

これに対し、今回作成した劣化進行モデルは、構造物の劣化を時系列に対して表現できるものであり、このような維持管理手法確立のための一手段となりうる。そこで、以下に劣化進行モデルを使用した維持管理手法を提案する。



(a)劣化度Vが1%を越える時期



(b)劣化度Vが20%を越える時期

図-27 栈橋施設の安全性

7.3 劣化進行モデルを使用した維持管理手法の提案

維持管理手法を考える場合、物理的な性能が限界値を下回らないことが必要最低限の条件である。すなわち、7.1 に示した栈橋上部工の寿命に従うならば、目標とされる年限まで、時系列上のあらゆる点において劣化度 V が 20% を上回ってはならない。まず、この点について検討を行う。

(1) 新設施設、更新施設のライフサイクル

新設の施設や更新を行った施設では、基本的にここまでに紹介した劣化進行モデルをそのまま使用することができる。しかし、このような新設・更新施設に関しては、以下に示すような方法で劣化速度、すなわち遷移率を低減させることが可能である。

- ① 鋼材にステンレス鉄筋やエポキシ塗装鉄筋など、腐食に対して高耐久性の材料を用いる。
- ② コンクリートにスラグセメントや防錆材を使用するなど、塩害に対して耐性の高い材料を用いる。
- ③ 電気防食など、鉄筋の腐食防止手法を適用する。
- ④ 建設時に被覆、塗装などの方法で、コンクリート中への塩化物イオンの進入を防ぐ。

このような方法を行った場合、塩害による鉄筋腐食の速度を低減することが可能であり、式(8)の遷移率 x を相応に低減させることで、任意の時点における劣化度分布を推測することができる。

(2) 補修・補強を行う場合のライフサイクル

今回作成した劣化進行モデルは、マルコフ連鎖の考え方に基づいており、構造物の劣化度、ならびに遷移率が重要な要素である。ところで、補修・補強を行う場合、その効果として以下の 2 点が考えられる。

- ① 補修・補強を行うことによる、構造物性能の回復、向上効果。言いかえると、補修によって見かけ上の劣化度を小さくする効果。
- ② 補修を行うことによる劣化速度、すなわち遷移率の低減効果。

この 2 点はマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルの要素として過不足ない。したがって、これらの具体的数値を取得できれば、補修・補強を行った後の劣化度分布を推定することができる。

表-10 補修効果を表す一覧表の例

名称	対策後の劣化度・遷移率						遷移率
	0	I	II	III	IV	V	
ひび割れ補修+表面被覆工法	0	I	I	-	-	-	x_1
断面修復工法+表面被覆工法	-	I	I	II	II	III	x_2

現在、栈橋上部工における補修は事後対策が主となっている。これは、栈橋上部工の調査や補修を行うことが橋梁などと比較すると困難であることが原因の一つとして考えられる。ここで、事後対策の際に留意すべき点として、補修を行う時点での構造物の状態によって、補修の効果が異なることが挙げられる。例えば、表面被覆によってコンクリートへの塩分の進入を遮断する場合、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達していない段階であれば大きな効果が見込める。しかし、鉄筋位置の塩化物イオン濃度がこれを超える場合、鉄筋の腐食は既に始まっており、補修効果は小さくなると考えられる。

また、補修を行うことにより、鋼材腐食の原因となる塩化物イオンや酸素の供給・浸透・拡散が変化し、遷移率が変化することも考えられる。

以上を考慮した上で、補修の効果、つまり補修対策を行うことによる劣化度および遷移率の変化を表した例を表-10 に示す。同表は、以下のような想定を行っていることを意味する。例えば、劣化した部材にひび割れ補修を行った後、表面被覆を行う工法は、劣化度 0~II の部材に対して行われる工法であり、補修を行うことによって劣化度 0~I の部材の性能は変化しないが、劣化度 II のものを劣化度 I 同等の性能に回復させる効果があり、また、劣化度 0~II の部材に施工した場合、この範囲における遷移率を x_1 に低減させる効果を持つ。断面修復工法と表面被覆工法を行う場合の例も同様に考える。

なお、表-10 の内容は、本来実験等で定量的に評価されるべきものであるが、現段階でこのような評価がなされた例が存在しないことから、表中の内容は仮の値を想定している。

ここで、ある施設について、劣化度 I~II の部材にひび割れ補修+表面被覆を行い、劣化度 III 以上の部材に断面修復工法+表面被覆工法を行うものとする、ひび割れ補修+表面被覆を行った後の劣化度分布は、補修前に劣化度 I および劣化度 II であった部材が、新たに劣化度 I となるため、以下の式(15)で表される。

$$\begin{matrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{matrix} \begin{pmatrix} 0 \\ I_{PR} + II_{PR} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{15}$$

ここで、 I_{PR} ：補修前の劣化度 I の割合、 II_{PR} ：補修前の劣化度 II の割合である。また、この補修方法を施し

たとき、劣化進行を表す式は式(6)における劣化度 0~II に対する遷移率が x_1 に変化し、以下の式(16)で表される。

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & I & II & III & IV & V \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 1-x_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (16)$$

したがって、ひび割れ補修+表面被覆を行った後、 t 年が経過した部材の劣化度分布は、

$$\begin{pmatrix} 0' \\ I' \\ II' \\ III' \\ IV' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & 1-x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 1-x_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ I_{PR}+II_{PR} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

となる。同様に考えると、断面修復工法+表面被覆工法を行う劣化度 III~V の部材に対しては式(18)、全く補修を行わない劣化度 0 の部材に対しては式(19)で t 年後の劣化度分布が表される。

$$\begin{pmatrix} 0'' \\ I'' \\ II'' \\ III'' \\ IV'' \\ V'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_2 & 1-x_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 1-x_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & 1-x_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ III_{PR}+IV_{PR} \\ V_{PR} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} 0''' \\ I''' \\ II''' \\ III''' \\ IV''' \\ V''' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0_{PR} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

ここで、 III_{PR} ：補修前の劣化度 III の割合、 IV_{PR} ：補修前の劣化度 IV の割合、 V_{PR} ：補修前の劣化度 V の割合、 0_{PR} ：補修前の劣化度 0 の割合、である。

最終的に得られる、各種補修工法を行った施設の t 年後の劣化度分布は、以下の式(20)で表される。

$$\begin{matrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{matrix} \begin{pmatrix} 0'+0''+0''' \\ I'+I''+I''' \\ II'+II''+II''' \\ III'+III''+III''' \\ IV'+IV''+IV''' \\ V'+V''+V''' \end{pmatrix} \quad (20)$$

ここで、補修を行った場合の劣化度分布について、図-14に示したM港-b 棧橋の床版について検討してみる。補修の条件は表-10に示した通りで、補修を行うことによる遷移率を、仮に $x_1=0.04$, $x_2=0.03$ とした。以上によって、現時点での劣化度分布、補修を全く行わない場合における30年後の推定劣化度分布、現在において補修を行った場合における30年後の推定劣化度分布を合わせて図-28に示す。同図より、何ら補修を行わず放置した場合、30年後には劣化度 V の部材が50%を超えるのに対し、上記の補修方法で補修を行った場合、劣化度 V の割合は10%程度に抑制できることが示唆される。

このような方法を用いることで、補修を行った施設に対するライフサイクルを算出することができるものと思われる。ただし、先にも述べたが、現在補修・補強を行うことによる構造物性能の回復・向上効果、遷移率の低減効果については定量的な数値が得られていない。したがって、さまざまな補修・補強工法について、表-10に示した補修・補強効果を表すデータベースの充実が今後の焦点となろう。

(3) ライフサイクルコストの算出方法

今後、構造物の維持管理を行っていくに際し、構造物の性能だけでなく、経済性も考慮し、ライフサイクルコストの最小化を目指すことが望まれている。

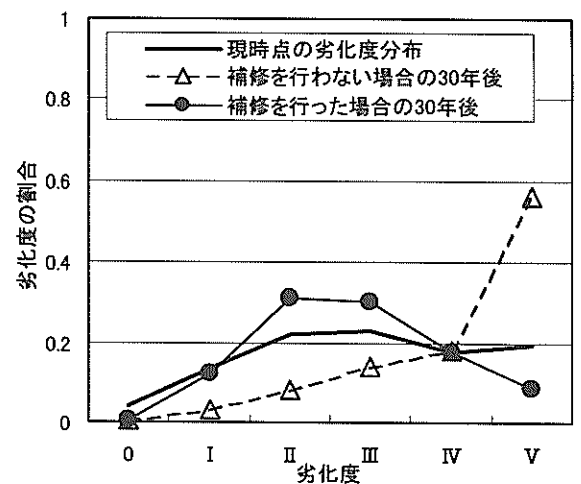


図-28 補修を行った場合の劣化度分布

これに対し、今回作成した劣化進行モデルは、新設・更新、補修・補強によって対策を行った場合の将来の劣化度分布を推測できる可能性がある。さらに対策の経済性を考慮するのであれば、7.2において述べた、目標とする時期まで構造物を維持する場合には、目標年次において、劣化度Vが20%以下という閾値を超えないような方法を列挙した上で、対策にかかる費用が最も小さくなるものを採用すれば良い。また、可能な限り構造物を維持する場合は多少複雑となるが、一例として、いかなる時系列軸上においても劣化度Vが20%を超えない方法のうち、構造物の性能回復・向上効果と遷移率低減効果を用いて対策方法ごとの効果を定量化し、費用/効果を最小化できる方法を採用することが挙げられる。現時点において表-10に示すような対策工法の効果を定量化できるものがないため、この点を考察することはできないが、補修によるライフサイクルを考慮する場合、対策工法の効果を定量化することは必ず必要であり、今後の課題としたい。

以上のような手法で、劣化進行モデルを用いてライフサイクルコストを考慮した栈橋施設の長期維持管理が可能となるものと思われる。

8. 結語

本研究では、栈橋上部工の劣化実態調査を行い、その調査結果を基に、塩害を受ける栈橋上部工の劣化進行モデルを作成した。その結果、以下の知見を得た。

1) 劣化実態調査の結果、ほぼ全ての栈橋で錆汁や腐食ひび割れ、かぶりコンクリートのはく離・はく落といった、塩害による劣化現象が確認された。

2) 劣化実態調査において、各部材ごとに与えた劣化度は、同一施設の中でも大きくばらついていた。各施設ごとに確率的な分析を行った結果、ある劣化度にピークを持ち、ばらついた分布を示すことが明らかとなった。

3) 劣化実態調査の結果を基に、マルコフ連鎖の考えを用いた確率論的な劣化進行モデルを作成した。同モデルは、劣化度分布が示す劣化度のばらつきを表現でき、栈橋上部工の使用年数と、施設ごとに固有の遷移率を与えた場合、劣化進行モデルは実際の調査結果から得られた劣化度分布を良く近似した。

4) 遷移率は劣化速度と直線的な相関を示し、ある種の劣化速度指標であることが明らかとなった。また、遷移率は時間の変化に左右されない一定値であることから、遷移率を固定し、劣化進行モデルの時間を将来に設定することで、劣化予測モデルとして使用できる可能性が示

された。

5) 遷移率が劣化速度指標であることから、遷移率を構造的要因、環境的要因で表す試みを行ったところ、部材の底面からH.W.L.までの距離、ならびに年間平均気温が、遷移率に大きく影響を与えていることが解った。これらの要因を用いて遷移率を表す推定式を作成した結果、遷移率推定式から算出される遷移率と調査結果から得られた遷移率は良く整合し、遷移率推定式と劣化進行モデルを組み合わせて使うことで、未調査栈橋に対する劣化推定モデルとして使用できる可能性が示された。

6) 5)で示した方法によって、ある栈橋上部工に対して劣化推定を行った後、劣化実態調査によって検証を行ったところ、推定された劣化度分布と調査結果から得られた劣化度分布は比較的良く一致し、今回作成した劣化進行モデルが、劣化推定モデルとして使用できる可能性を裏付けた。

7) 耐荷性の低下が懸念される劣化度Vが20%を超えた場合を対象施設の寿命と捉えると、劣化予測の結果から、多くの施設が一般的な耐用年数50年に達する前に早期寿命を迎えることが示された。

8) 今回提案した劣化進行モデルは、施設の更新や補修・補強といった対策を行った場合にも適用でき、対策後経年時の劣化推定やライフサイクルコスト算出に関して有用であると思われる。これによって、栈橋施設の長期維持管理手法の一つとして利用できることが期待される。

(2002年9月2日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、各港湾管理者の方々に、劣化実態調査、海水サンプルの提供などに関するご協力をいただきました。

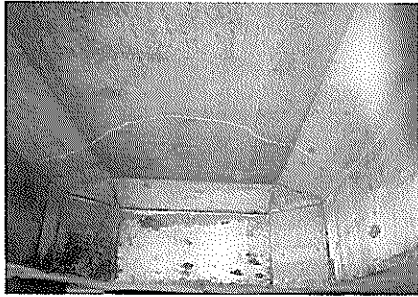
また、化工建設株式会社 原清氏、大久保謙治氏には、劣化実態調査の際の目視観察による劣化度判定に関して、豊富な経験に基づいた多くのご助言をいただきました。

これらの方々に対し、末尾ではありますが、ここに記して感謝の意を表します。

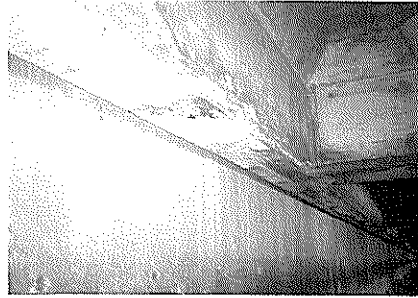
参考文献

- 1)大即信明,原茂雅光,濱田秀則:棧橋コンクリート上部
工劣化実態概略調査報告,港湾技術研究所報告,No
617,1988年
- 2)大即信明,原茂雅光,濱田秀則:棧橋コンクリート上部
工劣化実態詳細調査報告,港湾技術研究所報告,No
627,1988年
- 3)運輸省港湾技術研究所編著: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
年,pp.89-103.
- 4)土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編],2001
年,pp.97-112.
- 5)森村英典,高橋幸雄:マルコフ解析,日科技連,OR ライ
ブラリー18,1989年
- 6)木村哲士,丸山久一,濱田宏:RC部材における鉄筋腐食
の定量的評価方法に関する研究,コンクリート工学年
次論文集,Vol.18,No1,1996年 pp.771-776.
- 7)コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員
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,コンクリート工学協会,1998年,pp.1-13.
- 8)濱田秀則:RC 港湾構造物の塩害に係わる環境要因の
定量的評価に関する研究,港湾技術研究所報告,第 38
巻,第 2 号,1999年,pp.299-393.
- 9)岩波光保,横田弘,秋元孝:内部鉄筋が腐食した RC は
りの力学性能評価のための非破壊調査手法の適用性,
港湾技研資料,No978,2000年
- 10)横田弘,秋山哲治,濱田秀則,三上晃,福手勤:海洋環境
(酒田港 20 年)に暴露したコンクリートはりの材料劣
化がはりの力学性能に及ぼす影響,港湾技術研究所報告,
第 38 巻,第 2 号,1999年,pp.169-197.
- 11)松渕知,横田弘:係留施設のライフサイクルコスト発生
と維持管理意思決定支援システムの構築に関する基礎
的研究,港湾技術研究所報告,第 38 巻,第 2 号,1999
年,pp.423-473.

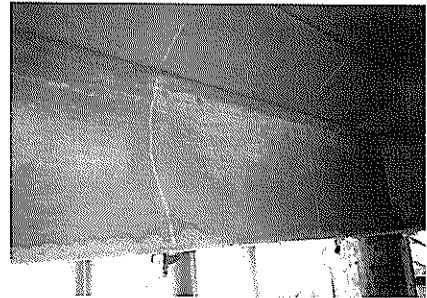
付録 A 劣化現象の事例



(a) 一方向のひび割れ
(ひび割れ幅 0.2mm, 床版)

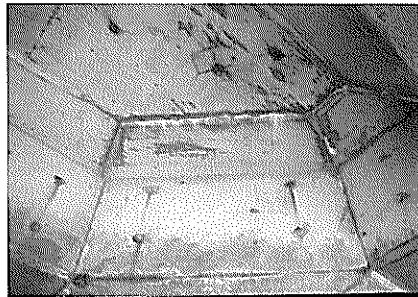


(b) コンクリート表面の
しみ状の点蝕(はり)

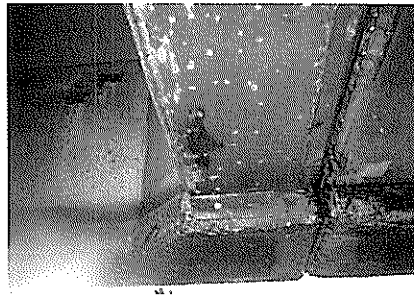


(c) 軸直角方向のひび割れ(はり)

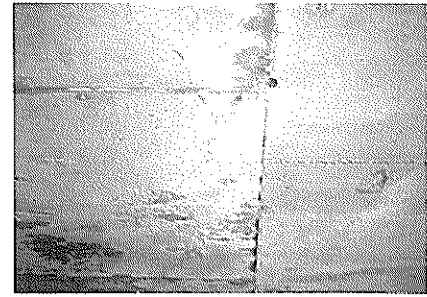
図-A.1 劣化度 I の劣化事例



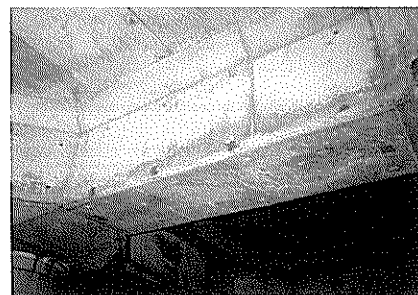
(a) 錆汁の流れた形跡(床版)



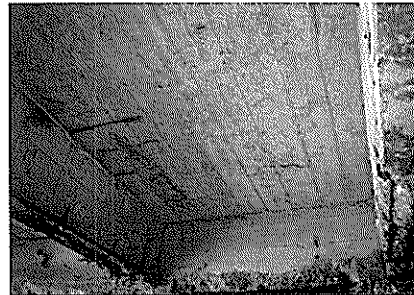
(b) 一部に錆汁がある(はり)



(c) 二方向の腐食ひび割れ(床版)



(d) 軸方向の腐食ひび割れ
(はり, ひび割れ幅 0.5mm)

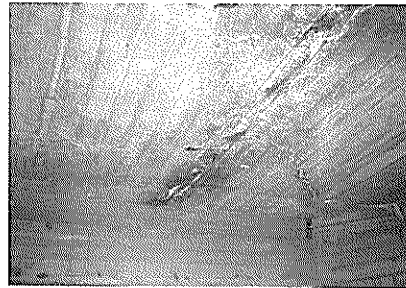


(e) かぶりの小さな鉄筋の露出
(床版)

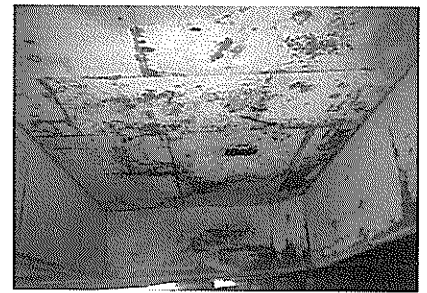
図-A.2 劣化度 II の劣化事例



(a) 錆汁が多い(床版)



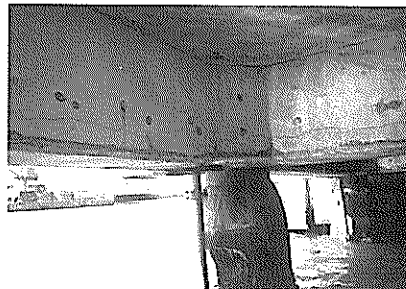
(b) ひび割れから錆汁が出ている
(床版, ひび割れ幅 0.5mm)



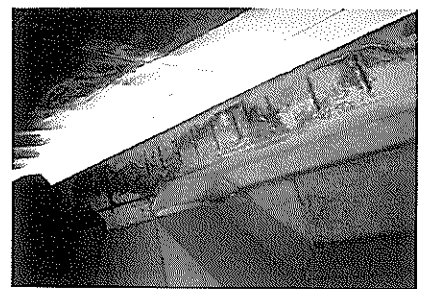
(c) 鉄筋 1 本に対する小さな
はく落(床版)



(d) 錆汁が固まりになっている
(はり)

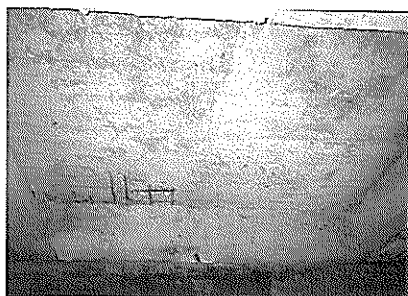


(e) 軸方向の腐食ひび割れ
(はり, ひび割れ幅 1mm)



(f) かぶりの小さな鉄筋が多く
露出(はり)

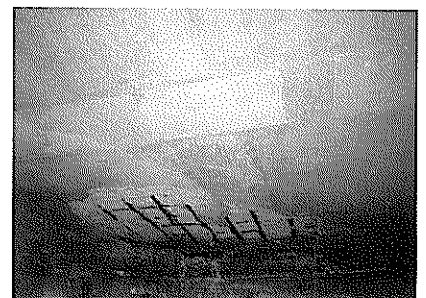
図-A.3 劣化度Ⅲの劣化事例



(a) 複数の鉄筋にまたがるはく離
(床版, はく離約 10%)



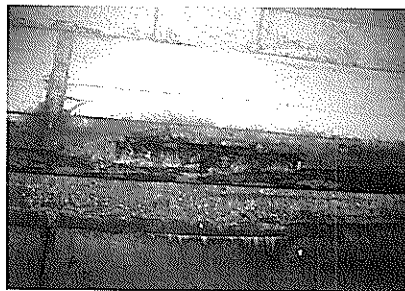
(b) 鉄筋断面減少が少ない
(床版, はく落約 20%)



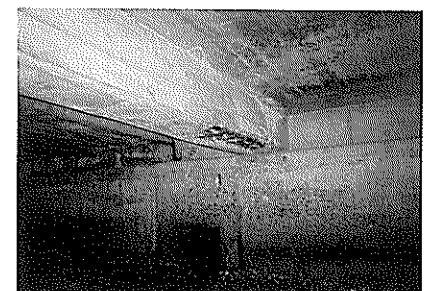
(c) 鉄筋断面減少が少ない
(床版, はく落約 20%)



(d) 軸方向の腐食ひび割れ
(はり, ひび割れ幅約 5mm)

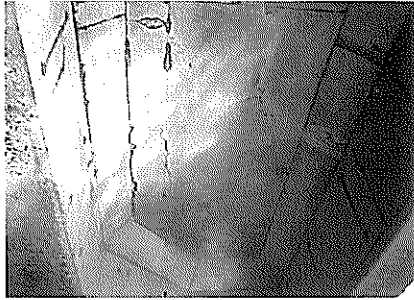


(e) はく離・はく落が多い
(はり, はく落約 30%)



(f) 鉄筋断面減少が少ない
(はり, はく落約 10%)

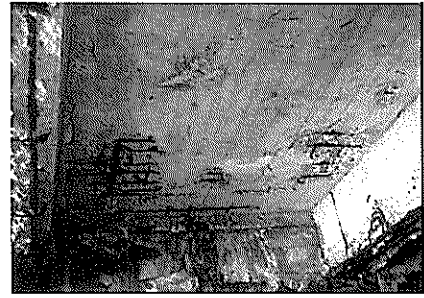
図-A.4 劣化度Ⅳの劣化事例



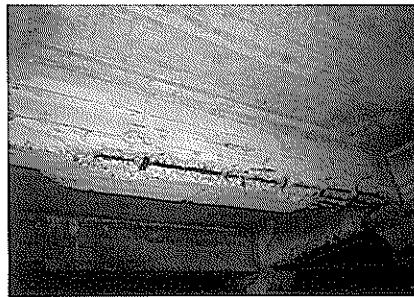
(a) はく離・はく落が多い
(床版, はく離約 70%)



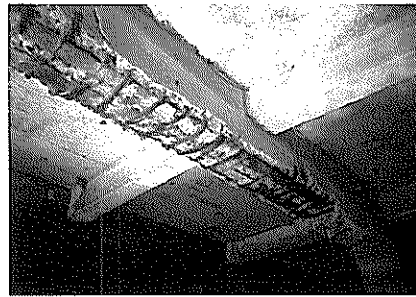
(b) はく離・はく落が多い
(床版, はく落約 90%)



(c) 鉄筋断面減少が多い(床版, はく落約 20%, 鉄筋破断あり)



(d) はく離・はく落が多い
(はり, はく落約 50%)



(e) はく離・はく落が多い
(はり, はく落 100%)



(f) 鉄筋断面減少が多い
(はり, はく落 40%)

図-A.5 劣化度Vの劣化事例