

# 報告 塩害を受ける栈橋上部工のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測に基づく LCC 算定に関する考察

小牟禮 建一<sup>\*1</sup>・濱田 秀則<sup>\*2</sup>・横田 弘<sup>\*3</sup>・山路 徹<sup>\*4</sup>

**要旨**：本文では、マルコフ連鎖モデルを使用した劣化進行モデルを実栈橋に適用し、過去の調査結果から推定された劣化度の将来予測値と経年後の実際の劣化度を比較した。さらに、補修等を行った場合の将来予測の手法を提案し、ライフサイクルコスト（LCC）のうち、維持・補修費用の算出を試みた。その結果、過去の調査結果に基づく劣化予測結果は、経年後の劣化度分布と良く整合し、また対策方法として断面修復、電気防食、施設更新の3者を考慮し、いくつかの仮定に基づく検討の結果、対策工法ごとに異なる LCC 算定結果を得た。

**キーワード**：栈橋上部工、塩害、マルコフ連鎖、劣化進行モデル、劣化予測、補修、LCC

## 1. はじめに

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、経済の発展にとって極めて重要な課題である。

ところが近年、港湾構造物、特に栈橋の塩害による機能低下が深刻化している<sup>1)</sup>。このような構造物を安全に維持するためには、構造物の現在の状態を把握した上で、適切な維持管理を行っていく必要がある。しかし、このことは膨大な維持管理費用が発生することも同時に意味し、いかに経済的かつ効果的に構造物を維持するかという命題に対し、ライフサイクルコスト（以下、LCC と称する）最小化の考えに基づいた維持管理手法の確立が急務である。

著者らはこれまでに、栈橋の鉄筋コンクリート上部工（以下、栈橋上部工と称す）の塩害による劣化に対し、マルコフ連鎖モデルを用いた劣化進行モデルを提案してきた<sup>2),3)</sup>。本文では、このモデルを実構造物に適用し、過去の調査結

果から推定された劣化度の将来予測値と経年後の実際の劣化度を比較した。さらに補修等を行った場合の将来予測の手法を提案し、維持・補修にかかるライフサイクルコストの算出を試みたので、その結果について報告する。

## 2. マルコフ連鎖を用いた栈橋上部工の劣化進行モデルの概要

マルコフ連鎖を用いた栈橋上部工の劣化進行モデルについて、以下に簡単に説明する。

これまでに行った栈橋上部工の劣化実態調査の結果から、全ての対象施設で塩害による被害が確認された。その劣化状況を、既往のマニュアル<sup>4)</sup>に準じた表-1に示す判定基準<sup>2),3)</sup>で部材ごとに評価し、横軸に劣化度、縦軸に全部材数のうちその劣化度が占める部材数の割合をとって確率的に表現したものを図-1に示す。同図より、栈橋上部工の劣化度は、ある劣化度にピークを持ち、ばらついた分布を示す。そこで、劣化進行モデルとしてこのようなばらつきを考慮するために、マルコフ連鎖の考えを適用した。

栈橋上部工の劣化度推移をマルコフ連鎖で表

\*1 ショーボンド建設（株）営業本部（正会員）

\*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 材料研究室長（正会員）

\*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室長（正会員）

\*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 材料研究室主任研究官（正会員）

表－１ 栈橋上部工の劣化度判定表

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	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	
鉄筋の腐食	なし	○コンクリート表面に小さなしみ状の点錆がある	○錆汁の流れ跡がある ○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)	○断面減少が多い(鉄筋形状が維持されていない)
腐食ひび割れ	なし	ひび割れの発生	腐食ひび割れの発生			
腐食ひび割れ	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	○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	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		
はく離・はく落	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	○1区画面積の4割を超えるはく離・はく落が見られる

現すると図－2のようになる。すなわち、現時点からある一定期間が過ぎると、ある劣化度の部材は、ある遷移率  $x$  で次の劣化度に移行し、移行しない残り  $(1-x)$  は同じ劣化度に留まる。これが全ての劣化度で同時に起こり、最終的には劣化度 V に収束する、というものである。

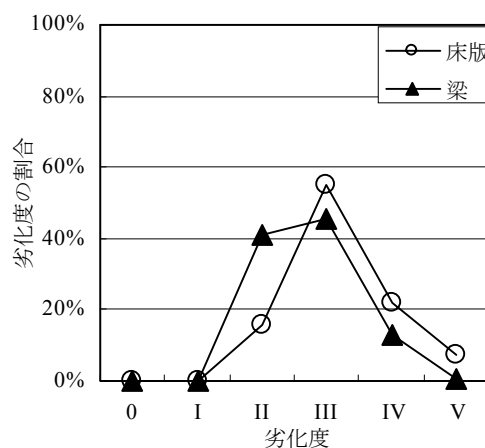
本モデルではこの一連の流れを 1 ステップとし、一定期間が経過するごとにこのステップが繰り返され、劣化度が徐々に進行していく。

この劣化過程は以下の式(1)で表される。

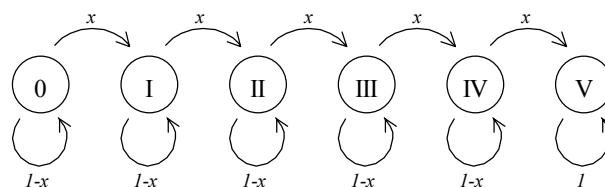
$$\begin{pmatrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}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

ここで、 $x$  は遷移率、 $t$  は施設の使用年数 (年) である。この式(1)がマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルの基本式である。また、遷移率はある種の劣化速度指標であり、経時的に変化しない施設ごとに固有の一定値と考えて良い<sup>2),3)</sup>。

この式(1)で表される劣化進行モデルに関し、調査結果から得られる劣化度分布と、施設の使用年数  $t$  を代入した式(1)のモデル計算値が最も良く適合するように遷移率  $x$  を定め、さらにその遷移率を用いて年数  $t$  を将来に設定すること



図－1 栈橋上部工の代表的な劣化度分布



図－2 栈橋劣化のマルコフ連鎖推移図

で劣化予測が可能となると考えられる。これは、本モデルでは、劣化速度指標となる遷移率を、施設ごとに固有な一定値としたことによる。

### 3. 実構造物に対する劣化予測と LCC の算出

#### 3.1 対象構造物

今回の検討では、実構造物に対し、前述のマルコフ連鎖モデルを使用し、実際の劣化度とモデルによる予測値との比較、およびそれに基づく LCC の試算を目的としている。ここで LCC

とは、一般に構造物のライフサイクル中における、初期コストと維持管理費用の総和を表す。本来、施設の構築の時点から LCC 最小化を目指すことが望ましいが、既設構造物においては初期コストが既に発生しており、維持・補修にかかる費用を最小化せざるを得ない。したがって、本稿ではそのような維持・補修によって発生する費用を検討することとし、以後 LCC と称する際にはこの維持・補修費用を指すものとする。

検討の対象とした A 栈橋の情報を表-2に示す。同表より、対象施設は H.W.L.とはり部材の底面が同じ高さであるため海水飛沫を受けやすく、さらに年間の平均気温が 24℃を超える高温であり、塩害に対しては非常に厳しい環境下にあると考えられる。そのため、同施設は、十分なかぶりが確保され、現在まででおよそ 15 年しか経過していないにもかかわらず、はり部材を中心に比較的著しい劣化が起こっている。

同施設では、2000 年、2003 年に外観目視を主体とした劣化実態調査を実施しており、また 2002 年には一部の部材で実験的に補修を行っている。補修の概要について以下に記す。

- 1) 劣化度 II, III, IV のはり各 1 部材に断面修復を行った。いずれもかぶり 100mm に対し 150mm をはつり、鉄筋に防錆材を塗布した後、無収縮モルタルで修復した。
- 2) 劣化度 III, IV のはり各 1 部材に電気防食を行った。劣化度 III のものはかぶり 100mm に対して 150mm をはつり、チタン製リボンメッシュ

表-2 A 栈橋に関する情報

項目		内容	
諸元	形式	栈橋形式	
	建設年度	1988年	
構造的 条件	H.W.L.と部材間の距離	床版	0.75m
		はり	0.00m
	かぶり実測値	10cm	
	W/C	0.59	
環境的 条件	年間平均気温	24.6℃	
	年間平均風速	4.6m/s	
	年間降水量	2065mm	
	平均湿度	75%	

を設置後、無収縮モルタルで修復した。劣化度 IV のものは、かぶり 100mm に対して 110mm 程度をはつり、チタンメッシュ陽極を取りつけた FRP パネルを設置後、パネル内に無収縮モルタルを充填した。なお、電気防食での通電電流密度は約 25mA/m<sup>2</sup>である。

### 3.2 劣化予測の適用性に関する検討

まず、対象栈橋の劣化実態調査結果を用い、前述の劣化進行モデルによる劣化予測の適用性について評価する。評価は以下の手順で行った。

- 1) 2000 年の劣化実態調査結果から、床版、はりの劣化度分布を調べ、その結果と劣化進行モデル計算値が最も良く一致する遷移率を求めた。
- 2) さらに劣化進行モデルに将来の年数を代入することで、3 年後の将来(2003 年時)における劣化度分布を予測した。
- 3) 2003 年の調査結果から得た劣化度分布と、2)による劣化予測結果を比較した。

その結果を図-3に示す。また、同図には、前述 1)のはじめに行った調査結果、2)の将来予

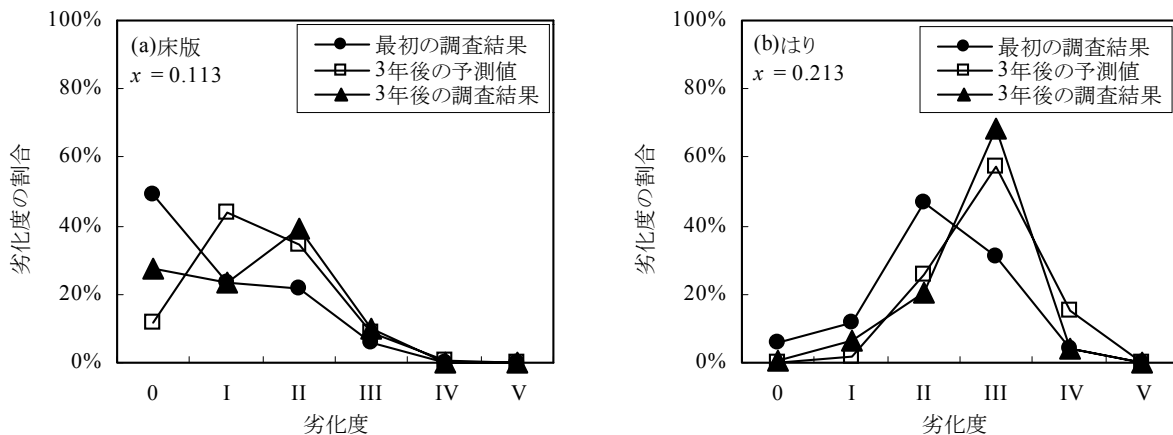


図-3 対象栈橋の調査結果と劣化予測値の比較

測, 3)の3年後に行った調査結果を併せて表記した。同図より, 対象栈橋の遷移率は, 床版で0.113, はりで0.213であり, 特にはりでの遷移率の値は, 劣化の進行が非常に速いことを示す<sup>5)</sup>。

また, 図-3の結果より, 2)の劣化予測値, 3)の調査結果は, 詳細は異なるものの劣化度分布のピーク, 分布の傾向がおおよそ一致しているものと考えられる。したがって, わずか3年という短い間隔での調査結果の比較ではあるが, マルコフ連鎖モデルによる劣化予測がある程度の精度で行われていることがわかる。

### 3.3 劣化予測に基づくLCC算出の試み

#### (1) 対策効果に関する検討

前述の手法によって劣化度の将来予測を行った結果, 構造物の設計供用年数まで安全性を確保できない場合, 何らかの対策を行う必要がある。対策の効果として以下の2点が考えられる。

- 1) 構造物性能の回復・向上, つまり対策により見かけ上の劣化度が小さくなる効果。
- 2) 対策を行うことによる劣化速度, すなわち遷移率の低減効果。

今回の劣化進行モデルは, 劣化度と遷移率, 使用年数の3つで構成されているため, これらの効果の具体的数値を取得できれば, 対策後の劣化度分布を推定することができる。

このうち, 性能の回復・向上の効果については, 行う対策の種類によってある程度推定できる。例えば部分的更新を行った場合, 新規建造と同様に考えて部材の劣化度を全く損傷のない劣化度0まで回復でき, 鉄筋の断面減少が少ない時点で断面修復を行えば, 劣化度をI~II程度まで回復できる, という具合である。

一方の劣化速度の低減効果については, 工法ごとにある程度固有であると考えられるが, 現段階でそれを評価した事例はない。そこで, A栈橋における補修箇所, 鉄筋腐食速度評価法である分極抵抗を測定し, 劣化速度を推定した。なお, 分極抵抗の測定はガード電流を使用した交流インピーダンス法<sup>6)</sup>を採用し, 補修前および補修後半年経過した時点で行った。測定箇所は1

表-3 補修による鉄筋腐食速度変化の計測

工法	元の劣化度	分極抵抗値 (kΩ・cm <sup>2</sup> )		腐食電流密度 (μA/cm <sup>2</sup> )		腐食電流密度の比較(補修前/補修後)
		補修前	補修後	補修前	補修後	
断面修復	II	91.7	237.0	0.284	0.110	0.387
	III	180.3	1251.9	0.144	0.021	0.144
	IV	135.7	360.6	0.192	0.072	0.376
電気防食	III	42.6	487.9	0.611	0.053	0.087
	IV	261.7	10655.7	0.099	0.002	0.025

表-4 各対策工法の効果一覧

工法	元の状態	元の状態						遷移率
		0	I	II	III	IV	V	
対策後の変化	断面修復	-	-	I	II	II	II	50%に低減
	電気防食	0	0	I	II	II	II	10%に低減
	部分的更新	-	-	-	0	0	0	変化なし

部材あたり1箇所, 補修の前後とも同一の箇所とし, また電気防食の部材では, 通電遮断後約1日経過した時点で測定した。その結果を表-3にまとめた。同表より, 断面修復を行った場合は鉄筋腐食速度と直線的な関係がある腐食電流密度が対策前の40%以下, 電気防食を行った場合は補修前の10%以下となっており, これらの工法の採用によって鉄筋腐食速度が低減されていることがわかる。そこで, 断面修復を行った場合には遷移率を50%に低減する効果があり, 電気防食を行った場合には同じく遷移率を10%に低減する効果があるものと仮定した。

今回, A栈橋のLCCを計算するにあたり, 対策方法として断面修復, 電気防食, 部分的更新の3つを選定し, 検討を行う。

まず, 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-4に示す。その際, 以下の仮定を設けた。

1) 断面修復は劣化度II以上を対象とする。断面修復では塩分を多く含むコンクリートを除去, 発生した錆をある程度除去することによって, 劣化度IIを劣化度Iに, 劣化度III以上を劣化度II同等に戻す。また, 遷移率を50%に低減する。

2) 電気防食は, 劣化度0~Vまでを対象とし, 断面修復と同様, 劣化度0~Iを劣化度0へ, 劣化度IIを劣化度Iへ, 劣化度III以上を劣化度IIへ戻す。また, 電気防食が効果的に作用した場

合、遷移率を10%に低減できる。

3) 部分的更新は劣化度 III 以上を対象とし、新規建造と同様、対策を行った全ての部材が劣化度 0 に戻るが、特に耐腐食性の高い鉄筋や防錆材などを使用しない限り、遷移率は変化しない。

### (2) 維持・補修による LCC の算出方法

ここで、ある施設について、劣化度 IV~V の部材に断面修復を行う場合、対策箇所の部材劣化度は劣化度 II に戻るため、式(2)で表される。また、ここには示さないが、対策を行わない劣化度 0~III までの部材劣化度は変化しない。

$$\begin{matrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{matrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ IV_{PR} + V_{PR} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $IV_{PR}$  は対策前の劣化度 IV の割合、 $V_{PR}$  は対策前の劣化度 V の割合である。したがって、対策箇所での対策後  $t'$  年後の劣化度分布は式(3)で表される。

$$\begin{pmatrix} 0' \\ I' \\ II' \\ III' \\ IV' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x' & 1-x' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x' & 1-x' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x' & 1-x' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x' & 1-x' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x' & 1 \end{pmatrix}^{t'} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ IV_{PR} + V_{PR} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $x'$  は対策後の遷移率、 $t'$  は対策後の年数である。電気防食や更新についても同様にして考え、対策後の劣化度分布を推定できる。なお、対策費用は、対策を行う部材数に 1 部材あたりの平均対策費用を乗じて計算する。

### (3) A 栈橋の LCC

LCC の算出にはいくつかの仮定を必要とする。今回の検討に用いた仮定を表-5 にまとめた。ここで、維持管理における重要な要素として、構造物がどの程度の劣化となった時点で施設が危険であると判断するかがある。この点に関する明確な基準や研究成果等は、現段階では少ないが、過去の事例では、劣化が原因で施設の更

表-5 LCC の算出に用いた仮定

項目	単位	断面修復	電気防食	部分的更新
対策費用	円/m <sup>2</sup>	¥100,000	¥120,000	¥400,000
管理費用	円/m <sup>2</sup> ・年	—	¥300	—
対策の実施対象劣化度	—	IV~V	III~IV	V
工法の耐用年数	年	20	40	—
その他	最初の対策は使用年数18年目 2度目以降は劣化度Vが20%を超えるか、工法の耐用年数に達したら実施 費用は部材数×1部材あたり平均費用			

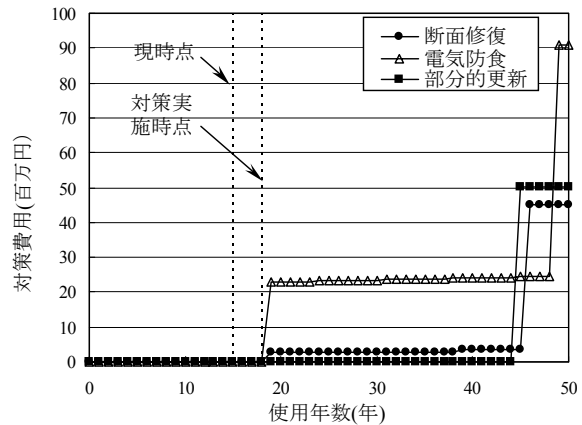


図-4 床版の維持補修にかかる LCC 算出例

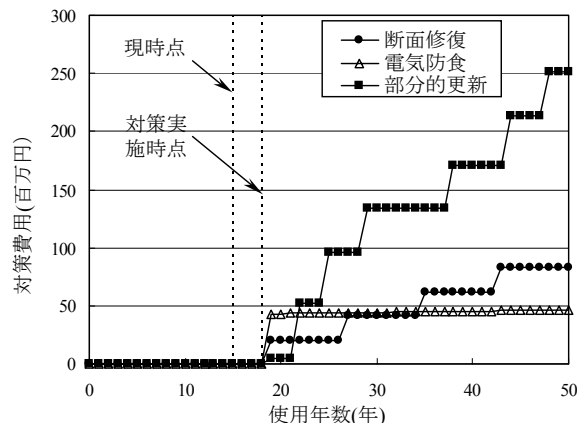


図-5 はりの維持補修にかかる LCC 算出例

新や補修が行われた施設ではおおよそ劣化度 V が 20%を超えており、また劣化実態調査の経験上、劣化度 V が 20%程度を超えると危険性を感じる。そこで、本研究では、仮に劣化度 V が 20%を超えた時点を経営者の安全性の限界とした。

これらの仮定を基に、式(1)、式(3)で代表される劣化進行モデルを用いて算出を試みた、A 栈橋における供用 50 年を目標とした LCC を試算した結果を図-4 および図-5 に示す。

まず床版の結果について、図-4 よりいずれの工法を行った場合でも、50 年目までに 1~2 回

の対策を必要とする。これは、主に対策を行っていない部材の劣化が進行し、劣化度 V が 20% を超えるためである。その結果、初期対策費用で比較すると部分的更新、断面修復、電気防食の順に費用が低く、50 年目までを対象にすると断面修復、部分的更新、電気防食、という順に最終的な LCC が低く抑えられる結果となった。

一方、はりの結果は、図-5 から判るように工法ごとに大きな差が見られる。まず、初期対策費用では、床版の場合と同様の順序となったが、50 年目までの最終的な LCC では、電気防食、断面修復、部分的更新の順であり、その費用は電気防食を基準に、断面修復が 1.7 倍、部分的更新が 5 倍強となっている。ここで対策を行う回数を見てみると、電気防食 1 回に対し、断面修復 4 回、部分的更新 7 回となっており、非常に劣化速度の速いはりでは、劣化速度を効果的に抑える工法が有効である結果となっている。

この床版とはりの検討結果は、劣化速度である遷移率、目的とする使用年数によって LCC が大きく変化することを示唆している。

また、図-6 は、はりにおける電気防食の実施劣化度を变化させた結果である。同図より、初期コストでは劣化度 IV~V を対象とした場合の方が有利となるが、50 年目では劣化度 III~V を対象としたほうが有利な結果となった。したがって、LCC を算出する際には対策の実施対象とする劣化度も検討に加える必要がある。

#### 4. まとめ

本稿では、塩害を受けた実栈橋 RC 上部工に対し、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測結果と実際の調査結果の比較を行い、さらにその結果に基づき、対象栈橋における LCC 算定の試みを行った。その結果、以下の知見を得た。

1) 過去の調査結果を用いてマルコフ連鎖モデルで算出した劣化度の将来予測値は、経年後に行った調査結果と比較的良く一致した。

2) マルコフ連鎖モデルの将来予測に基づいて実構造物の LCC 算定を試みた結果、劣化速度で

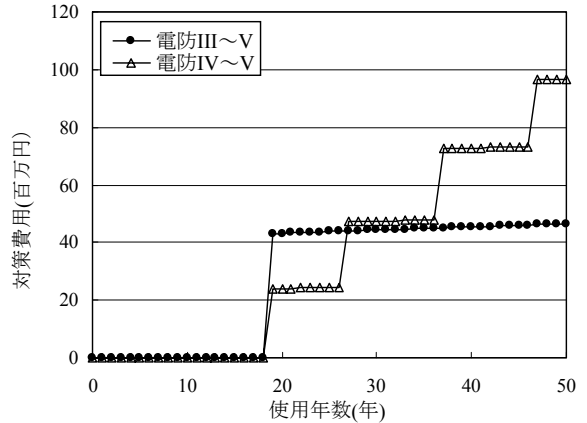


図-6 対策の実施対象劣化度の違いによる LCC の違いを表す電気防食での例

ある遷移率、目的とする使用年数によって LCC が大きく変化する可能性があり、劣化速度の速い施設では、劣化速度を抑える工法が有効である結果となった。

3) 同一工法でも、対策の実施対象とする劣化度によって LCC が変化することが判った。

#### 参考文献

- 1)大即信明, 原茂雅光, 濱田秀則: 栈橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告, 港湾技術研究所資料, No.627, 1988.9
- 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)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, コンクリート工学論文集, 第 15 巻, 第 1 号, pp.13-22, 2004.1
- 4)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, pp.89-103, 1999.6
- 5)濱田秀則, 小牟禮建一: 港湾施設における維持管理—主に栈橋について—, 基礎工, 総合土木研究所, vol.31, No.6, 2003.6
- 6)横田優: 交流インピーダンス法に基づくコンクリート中の鉄筋腐食評価に関する研究, 徳島大学大学院学位論文, 1995.3