

# 報告 棧橋 RC 上部工における劣化進行モデルを用いた LCC 算定の一例

中川 将秀\*1・末岡 英二\*2・内藤 英晴\*3・濱田 秀則\*4

**要旨：**本報告は、塩害により劣化した棧橋 RC 上部工の実構造物に対して外観目視調査を行い、確率論的予測手法のマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルを適用して調査で得られた劣化度分布から将来の劣化度分布を予測し、補修時期や補修方法の各種シナリオを設定して LCC 算定を行って比較し、最適な補修シナリオを導き出す一つの考え方を示したものである。

**キーワード：**棧橋 RC 上部工、目視調査、劣化度分布、劣化進行モデル、塩害、LCC

## 1. はじめに

棧橋 RC 上部工は、厳しい塩害環境下にあるため早期劣化の被害が多く報告されているが、棧橋を長期に渡って使用して行くためには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、定期的な点検と詳細調査を基に、将来の劣化進行を精度よく予測するとともに、維持・保全のための補修等を適切に実施することが重要である。しかし、棧橋 RC 上部工は、海面付近に設置されているため、波浪や潮の干満の影響を受けて詳細調査を行うことが非常に困難である。そこで、比較的容易に行える外観目視調査の結果から将来の劣化進行を予測し、その結果から適切な補修時期等を導き出すことが可能となれば棧橋 RC 上部工の維持管理が極めて容易になるものと考えられる。

本報告は、塩害により劣化した棧橋 RC 上部工の実構造物を例に、その外観目視調査の結果から、これまで検討してきた確率論的予測手法のマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデル<sup>1), 2), 3)</sup>を適用して得られた劣化度分布から将来の劣化度分布を予測し、補修時期や補修方法の各種シナリオを設定して LCC 算定を行い、比較検討することで最適な補修シナリオを導き出す一つの考え方を示したものである。

表-1 対象棧橋の概要

経過年数	35年
場所	中国地方
H.W.L.から部材下端までの高さ	(床版) 3.15m (梁) 2.75m
補修の有無	梁7部材が補修済み

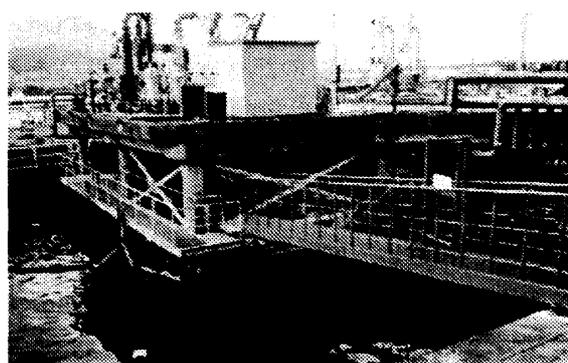


写真-1 対象棧橋の全景写真

## 2. 対象棧橋の概要

対象棧橋の概要を表-1に示し、全景写真を写真-1に示す。この棧橋は、中国地方にある昭和43年に建設された荷役棧橋であり、大型タンカーが接舷することから、H.W.L.から上部工部材下端までの高さが高いという特徴がある。なお、経過年数35年で行った外観目視調査時には既に陸岸側の梁7部材が断面修復および表面塗装されており、補修が施されていた。

\*1 東洋建設(株) 技術本部 美浦研究所 構造研究室 工修 (正会員)

\*2 東洋建設(株) 技術本部 美浦研究所 材料研究室 室長 工修 (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)

3. 外観目視調査からLCC算定までの手順

外観目視調査（1次判定）による劣化予測からLCC算定までの手順を図-1に示す。

3.1 外観目視調査

外観目視調査は、栈橋下面の床版および梁部材毎に目視や打音調査を行い、栈橋下面全域の劣化損傷状況をスケッチ図や写真に記録する。スケッチの例を図-2に示し、劣化状況の例を写真-2に示す。

3.2 劣化度判定

劣化度の判定は、床版および梁部材毎に外観目視調査で得られたスケッチ図や写真から参考文献<sup>1), 3)</sup>で提案した判定基準を適用して、鉄筋腐食、ひび割れ、剥離・剥落についてそれぞれ個別に劣化度0～劣化度Vまでの6段階で行い、この中で最も大きい劣化度を部材の劣化度とする。例えば、図-2のスケッチの梁ではひび割れが卓越しており、この部材は劣化度IIである。劣化度0は潜伏期、劣化度I～IIは進展期、劣化度III～IVは加速期、劣化度Vは劣化期を示す。

ここで、補修済みの梁7部材については健全であると判定し、劣化度0と仮定した。

床版および梁部材毎の劣化度判定結果について図-3および図-4に示す。建設後35年経過した栈橋としては全体的に劣化度が大きい部材は少なかったものの、床版および梁ともに着船側と返し波の飛沫を受ける陸岸側は劣化度の若干大きい部材があった。

3.3 劣化予測

劣化予測は、マルコフ連鎖を用いた栈橋全部材数に対する劣化度の分布割合を経過年数と遷移確率で表現する劣化進行モデル<sup>1)</sup>から将来の劣化度分布割合を算出する方法があるが、本報告では、より精度の高い劣化予測を行うため、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濃度拡散式や鉄筋腐食断面減少率の推定を基に各劣化度の期間比率を推定し、各劣化度の期間に対応した重みを遷移確率に与えた劣化進行モデル<sup>3)</sup>から将来の劣化度分布割合を算出する方法を適用した。

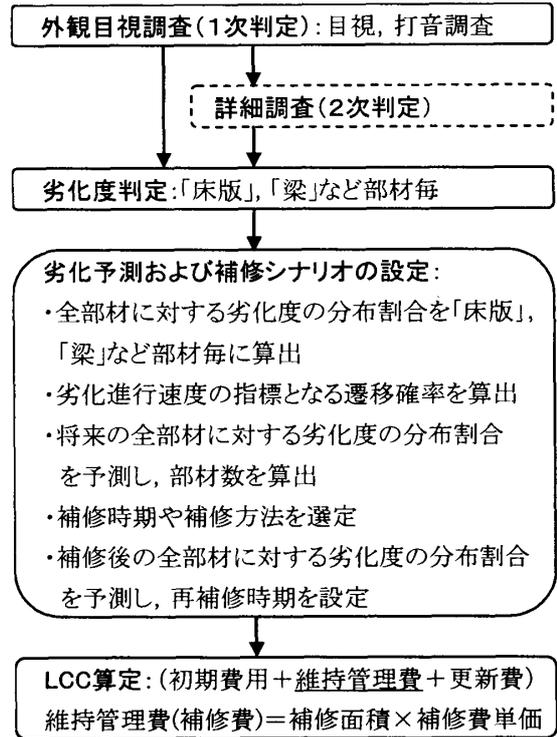


図-1 LCC算定までの手順

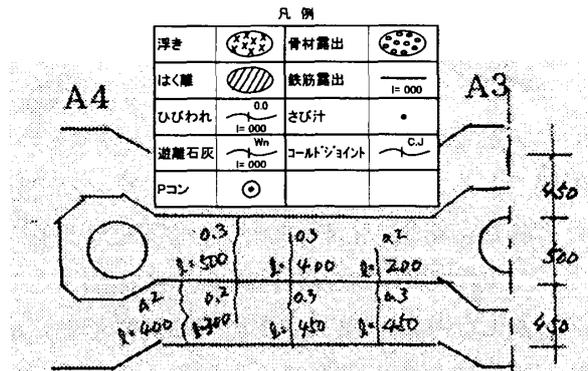


図-2 スケッチの例



写真-2 劣化状況の例

3.4 補修シナリオの設定

補修シナリオは様々あるが、補修時期や補修方法および対象部材に着目して補修シナリオを

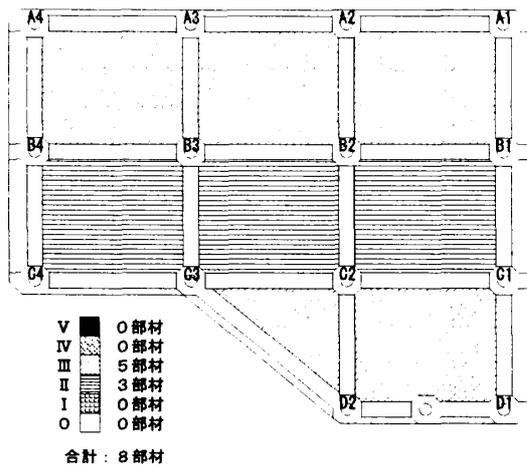


図-3 床版の劣化度判定結果

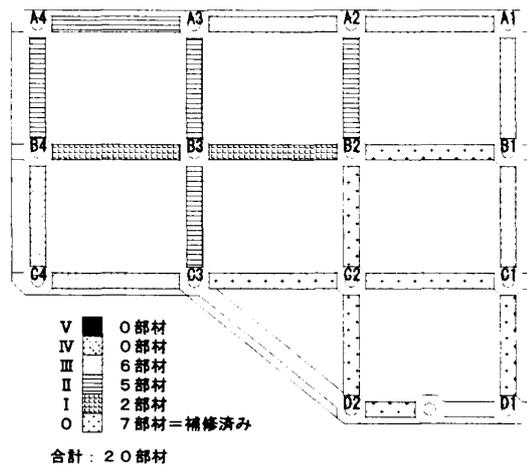


図-4 梁の劣化度判定結果

表-2 補修シナリオの概要

補修シナリオ	補修・再補修時期	補修方法	対象部材
シナリオ1	なし	無補修	—
シナリオ2			梁7部材（補修済）
シナリオ3	劣化度Vが20%を超え、 寿命と予想される時点	断面修復	劣化度II以上の部材
シナリオ4			劣化度III以上の部材
シナリオ5			劣化度II以上の部材
シナリオ6			劣化度III以上の部材
シナリオ7	調査翌年と耐用年数毎	断面修復+表面塗装	全部材
シナリオ8		断面修復+電気防食	

注) 断面修復は表面塗装を施す場合と電気防食を施す場合とで仕様が異なる。詳細は表-3に示す。

表-2のように設定した。

シナリオ1~2は、今後、補修を行わない場合を考えており、現状では補修済みであった梁7部材が補修されていなかった場合をシナリオ1、現状のまま放置する場合をシナリオ2と想定した。シナリオ3~6は、補修方法を断面修復とし、補修時期と補修対象部材を比較検討した。シナリオ3・4は寿命まで補修を行わない事後保全的な考えであり、シナリオ5・6は劣化が激しくない時点で補修を行う予防保全的な考えを意識している。シナリオ7・8は、補修後の劣化を完全に防止する考えである。

### 3.5 LCC算定

一般的に言われているLCCの内訳は、初期費用、維持管理費、更新費であるが、近年、残存価値、便益等を含める考え方も報告されている。

本報告のLCC算定では、残存価値は参考文献<sup>4)</sup>によると建物や設備等とは異なり、供用期間

終了後に次の経済活動に供することができない栈橋等の施設は売却できないことや、公共施設の便益は社会的価値や損失の仮定が難しいことから、維持管理費にあたる補修費の算出のみに留め、最も経済的な補修シナリオを導き出すことを目的とした。ただし、物価上昇率については考慮していない。

補修費の算出にあたって、補修必要面積は参考文献<sup>5)</sup>では総面積の70%としているが、本手法では補修が必要ない部材の割合を把握できるため100%として各補修方法の内訳を劣化度に応じて表-3のように設定した。また、補修費単価はヒアリングや施工事例に基づいて表-4のように設定した<sup>5)</sup>。

## 4. 劣化予測結果とLCC評価

### 4.1 劣化予測結果

今後、補修を行わない場合の床版の劣化予測

表-3 補修面積の設定

対 象		劣化度 0	劣化度 I	劣化度 II	劣化度 III	劣化度 IV	劣化度 V
断面修復	総面積	—	—	100%	100%	100%	100%
大断面修復	断面修復面積	—	—	20%	50%	70%	90%
小断面修復		—	—	80%	50%	30%	10%
表面塗装	総面積	100%	100%	100%	100%	100%	100%
ひび割れ注入	表面塗装面積	0.05m <sup>2</sup>	0.1m <sup>2</sup>	—	—	—	—
電気防食	総面積	100%	100%	100%	100%	100%	100%
大断面修復	電気防食面積	—	—	5%	15%	20%	20%
小断面修復		—	—	0.5%	1.5%	5%	15%
ひび割れ注入		—	0.1m <sup>2</sup>	0.15m <sup>2</sup>	0.2m <sup>2</sup>	0.25m <sup>2</sup>	0.3m <sup>2</sup>

注) 断面修復は大断面修復(はつり深さ 10cm 程度)と小断面修復(はつり深さ 5cm 程度)とに分けられる。

表-4 補修費単価

	大断面修復 (m <sup>2</sup> 当り)	小断面修復 (m <sup>2</sup> 当り)	表面塗装 (m <sup>2</sup> 当り)	ひび割れ注入 (m 当り)	電気防食 (m <sup>2</sup> 当り)
補修費 (千円)	150	97	17.5	10	120
再補修費 (千円)	—	—	19.5	—	18

注) 表面塗装の耐用年数は 15 年, 電気防食の耐用年数は 20 年とし, 耐用年数時に再補修を実施する。

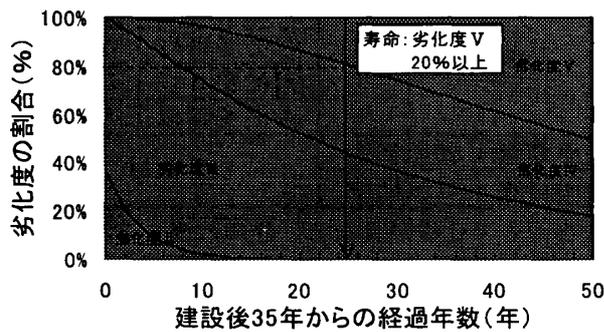


図-5 床版の劣化予測結果

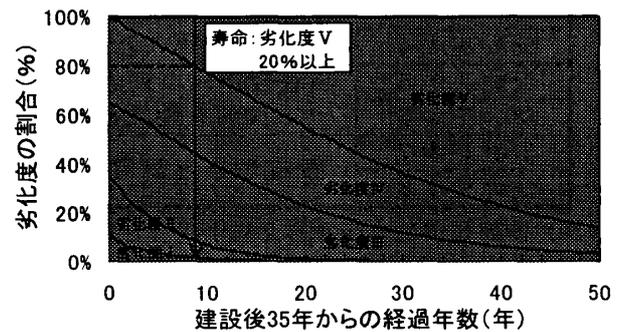


図-6 梁の劣化予測結果 (シナリオ 1)

結果を図-5に示す。図のように劣化進行モデルを適用して床版全数に対する劣化度の分布割合を予測することにより, 経過年数に伴って劣化度 V が増加していく様子がよく分かる。ここで, 栈橋の寿命は, 耐荷力の低下が懸念される劣化度 V の割合が床版全数の 20% を越える時点と仮定すると, 床版は 25 年後 (建設後 60 年) に寿命を迎えると予想される。

今後, 補修を行わない場合の梁部材について, シナリオ 1 の劣化予測結果を図-6に, シナリオ 2 の劣化予測結果を図-7に示す。梁部材はシナリオ 1 では 9 年後 (建設後 44 年) に寿命を迎え, シナリオ 2 では 20 年後 (建設後 55 年) に寿命を迎えると予想できる。このことから, 梁 7 部材に補修を施したことにより梁部材は 11

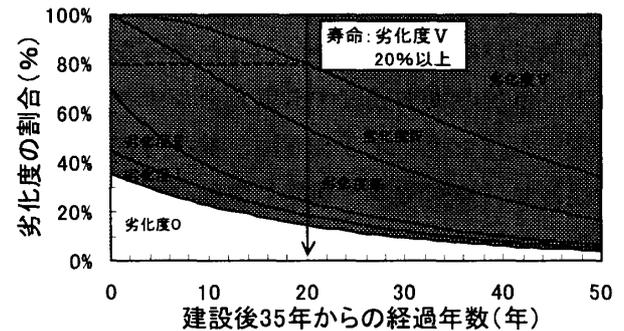


図-7 梁の劣化予測結果 (シナリオ 2)

年の延命効果が期待できると考えられる。

また, シナリオ 1・2 では床版の寿命である建設後 60 年まで栈橋施設を供用するためには, 再度, 梁部材を補修する必要があることが分かる。シナリオ 3~8 の劣化予測結果を図-8~図-12に示す。寿命と予想される時点で補修を

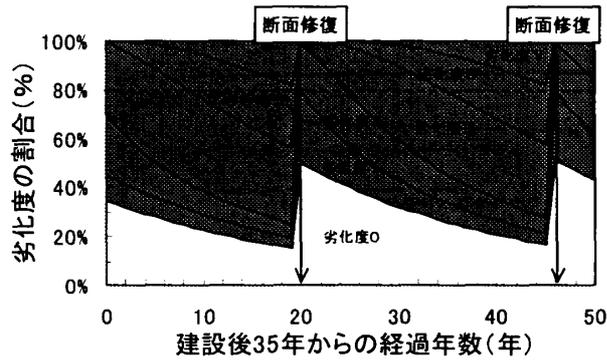


図-8 梁の劣化予測結果 (シナリオ 3)

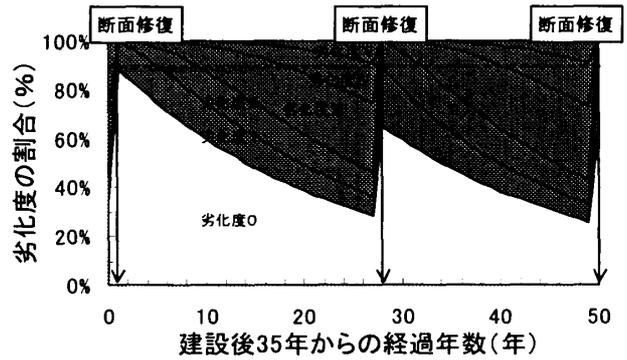


図-10 梁の劣化予測結果 (シナリオ 5)

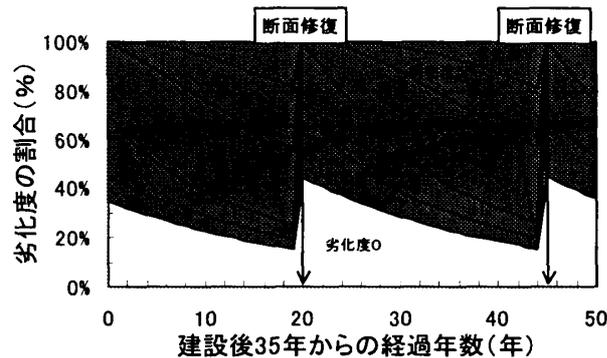


図-9 梁の劣化予測結果 (シナリオ 4)

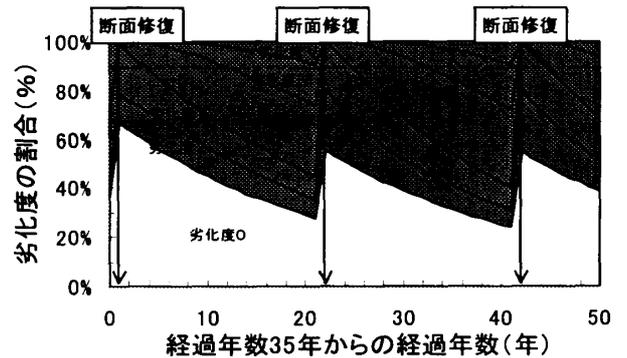


図-11 梁の劣化予測結果 (シナリオ 6)

行うシナリオ3とシナリオ4にはあまり違いがない。劣化度Vが10%を越える時点で補修を行う場合、シナリオ6はシナリオ5より約6年再補修の期間が早くなる。シナリオ7・8は補修後に劣化度Iとなっているが、これは、断面修復ではすでに浸透していた塩化物イオンを除去しきれないと考え、全ての部材が劣化度0に回復するのではなく、大きな劣化度の部材は劣化度I～IIに回復するものと仮定したためである。

#### 4.2 LCC評価

梁部材に限定してシナリオ3を基準にした補修費比率と経過年数との関係を図-13に示す。ここで、栈橋の劣化程度を分かりやすく見られるように梁全数に対する劣化度Vの割合と経過年数との関係も併記した。

当然ながら、断面修復の補修費は補修する部材が少ない方が小さくなるが、補修時期によって経済的な補修シナリオは入れ替わって行く。床版の寿命と予想される25年後(建設後60年)ではシナリオ5が最も経済的な補修シナリオであるが、50年後(建設後85年)にはどのシナ

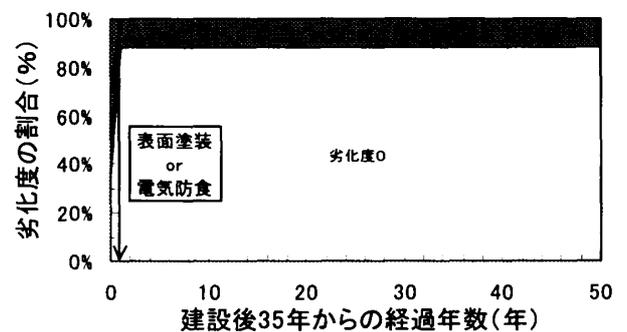


図-12 梁の劣化予測結果 (シナリオ 7・8)

リオもほぼ同程度となる。

シナリオ7・8は、初回の補修費は大きく、再補修費は小さいものの、劣化を進行させないように定期的に管理する必要がある。しかし、50年後(建設後85年)にはシナリオ7が最も経済的な補修シナリオとなる。ただし、25年後(建設後60年)には床版が寿命を迎えるため、その後は床版の補修シナリオも含めて検討する必要がある。

このように、LCC評価を行う際には供用年数を何年に設定するかによって、最適な補修シナリオは異なり、管理者の判断が重要となる。

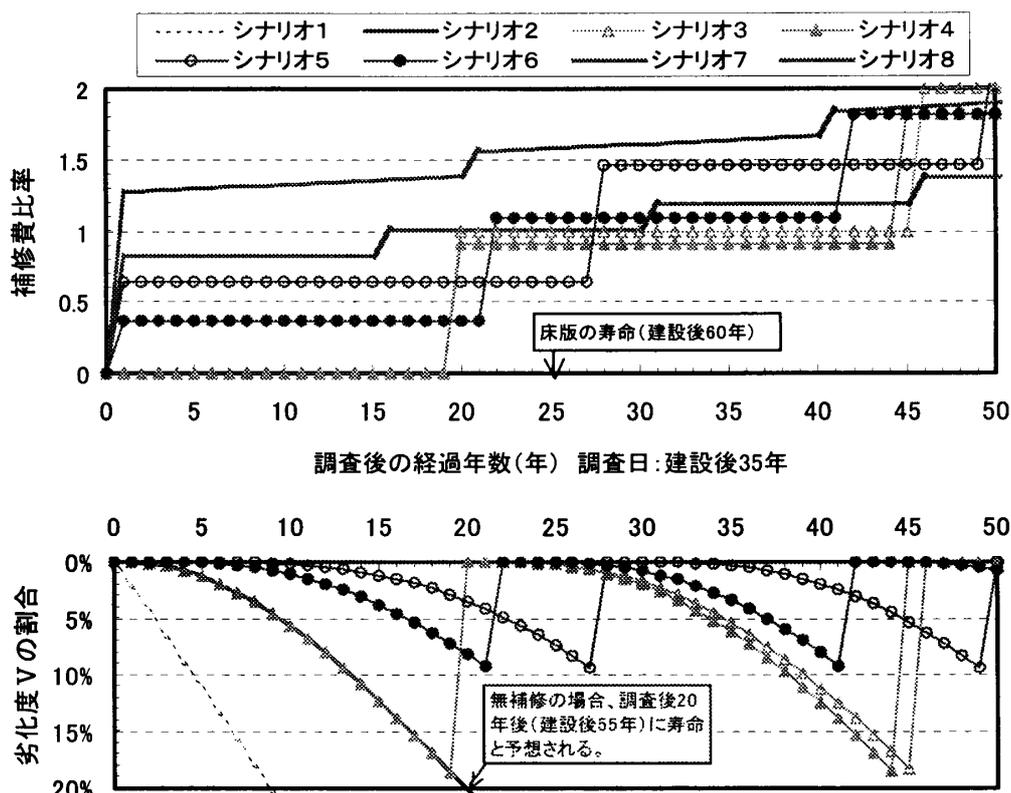


図-13 梁の補修費比率および劣化度Vの割合と経過年数との関係

なお、脱塩工法やエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた特殊工法についても基礎資料を得ることによって同様な評価ができるので、更に多くの補修シナリオ設定のもとでの判断が可能となる。

## 5. まとめ

本報告では、これまで検討してきた確率論的予測手法のマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルを用いて、外観目視調査の結果から将来の劣化進行を予測して、補修時期や補修方法および対象部材に着目したLCCを算出する手順を示した。この手法を活用することによって、栈橋RC上部工の維持管理計画が極めて容易に行えるものと考えられる。

今後、さらに多くの調査事例を収集してデータを蓄積し、本手法の妥当性を検証していく。また、補修費の算出のみに留まらず、初期費用、維持管理費、更新費、便益等を含めて検討していく。さらに、長期的な供用を考える場合には、物価上昇率や社会的割引率を用いた現在価値への換算も検討して行きたい。

## 参考文献

- 1) 中川将秀, 中村亮太, 内藤秀晴, 濱田秀則: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1811-1816, 2003
- 2) 谷口修, 田村保, 佐野清史, 濱田秀則: 栈橋 RC 上部工の劣化進行予測手法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1817-1822, 2003
- 3) 中川将秀, 佐野清史, 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, アップグレード論文報告集, 第3巻, pp.363-370, 2003
- 4) 港湾施設の評価に関するガイドライン, 港湾投資の社会経済効果に関する調査委員会, 1999
- 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