

予防保全型の維持管理による港湾施設のライフ サイクルコスト削減効果に関する解析事例

PARAMETRIC STUDY ON EFFECT OF PREVENTIVE MAINTENANCE
ON LIFE-CYCLE COST OF PORT FACILITIES

岩崎 和弘¹・浅井 正²・宮地 陽輔²・森橋 真³・玉石 宗生³・岩波 光保⁴
Kazuhiro IWASAKI・Tadashi ASAI・Yousuke MIYACHI・Makoto MORIHASHI・
Muneo TAMAISHI・Mitsuyasu IWANAMI

¹正会員 (財)港湾空港建設技術サービスセンター (〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-3-1)

²正会員 工修 (財)港湾空港建設技術サービスセンター (〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-3-1)

³国土交通省中部地方整備局港湾空港部港湾計画課 (〒455-8545 名古屋市港区築地町2番地)

⁴正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Many of port facilities in Japan were constructed in 1960s, so most of them will be renewed or repaired in 10-20 years. To carry out these renewals and repairs with budgetary limit, reduction of life-cycle cost and/or extension of life for each of these facilities shall be required. Therefore the preventive approach is to be put into the manner of maintenance for port facilities.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport updated the ordinance on the technical standards for port and harbour facilities in Japan in 2007. The updated ordinance requires that owners of port facilities shall establish a maintenance plan for each of them, and manage it adaptively according to the plan.

This report shows the analytical procedure of life-cycle cost for port facilities. Parametric study of this analytical method is carried out to provide the effect of preventive maintenance on life cycle cost for each part of each facility. Based on the result of this parametric study, the effect on whole life-cycle cost for port facilities is also discussed.

Key Words : *Port facility, asset management, preventive maintenance, life-cycle cost, extension of life, technical standards of port and harbour facilities, parametric study*

1. はじめに

2005年12月に交通政策審議会で「安全で経済的な港湾施設の整備・維持管理システムのあり方について」¹⁾が答申され、維持更新コストの抑制や既存社会資本の有効活用、構造物の安全性の確保と言った観点から港湾施設の適切な維持管理が重要とされた。2007年3月の「港湾の施設の技術上の基準」²⁾の改正では、技術基準対象施設は供用期間にわたって要求性能を満足するよう維持管理計画等にもとづき適切に維持されるものとされた。これらの背景から、予防保全の概念を導入した計画的な維持管理手法を確立することを目的として実施した調査研究の成果を報告するものである。

ここで、計画的な維持管理を行うためには、様々な維持補修シナリオに対して定量的な評価を行う指標が必要である。本研究では、その指標の1つとしてライフサイクルコスト(LCC)を取り上げ、LCCの評価を行う上での配慮事項を抽出するとともに、

大型の栈橋形式の港湾構造物の事例を対象にLCCの感度解析を行い、予防保全型の維持管理の導入による効果について考察する。

2. LCCの解析方法

(1) マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法

LCCの解析にあたり、構造物を構成する各部材に区分して、そのそれぞれについてLCCを検討し、その線形和で構造物全体のLCCを評価できると仮定して、検討を行うこととした。部材の区分は「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き」³⁾に示す考え方に沿って行っている。この時、構造的にあまり重要でないその他部材や附帯設備を含めてすべての部材に対して予防保全型の維持管理を行うことは合理的ではないため、各部材毎に維持管理の方針を設定することが望ましい。

各部材・部位の劣化度は、d～aの4段階で劣化の進行を判定している。それぞれの部材・部位の劣化度判定結果の分類は表-1に示すとおりである。

表-1 部材・部位の劣化度判定結果の分類

劣化度	部材・部位の状態
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	施設の性能低下はないが、変状が発生している状態
d	変状が認められない状態

各部材・部位のLCCの検討で、劣化の進行状況を予測する手法は、マルコフ連鎖モデルによる手法を用いることとした。マルコフ連鎖モデルの考え方は、劣化の進行の各段階の遷移確率を P_x とすると図-1に示すように表すことができる。

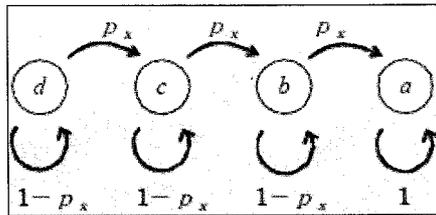


図-1 マルコフ連鎖モデルの考え方

この時、たとえば、 i 年後の判定基準cの部位の比率を $P_c(i)$ とすると、 $(i+1)$ 年後の比率 $P_c(i+1)$ は式(1)で表すことができる。

$$P_c(i+1) = P_x \times P_d(i) + (1 - P_x) \times P_c(i) \quad (1)$$

(2) 各部材の劣化の判定指標

マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法により、部材毎に i 年後の判定基準 d～a のそれぞれの割合 $P_d(i) \sim P_a(i)$ が算出される。ここで、 i 年後の各判定基準の割合から部材の劣化をマクロ的に判定する指標として、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」⁴⁾を参考に総合判定 D～A を表-2 のように定義した。あわせて評価結果の分類を表-3 に示す。

判定基準のしきい値は、一般的な栈橋式構造物の上部工の点検診断データを用いて設定している。実際には、判定基準は部材により異なるものと考えられるが、今回はこの判定基準ですべての部材を代表させると仮定して解析を行った。

また、高橋ら⁵⁾は、 i 年後の部材の劣化をマクロ的に評価する指標として、構造性能指標 $I(i)$ を式(2)のように定義している。

$$I(i) = 100 \times P_d(i) + 99 \times P_c(i) + 90 \times P_b(i) + 80 \times P_a'(i) \quad (2)$$

ここで、d～a の 4 段階での a 判定の下に aa 段階を設定した時の a, aa 段階の判定基準の割合をそれぞれ $P_a'(i)$, $P_{aa}(i)$ と定義している。 $P_d(i) \sim P_a'(i)$ の前の係数は、d～a'の部材の性能の残存割合を概念的に評点として表している。なお aa 段階の評点は0としている。構造性能指標を用いた場合の総合判定のしきい値は、表-2 のとおりである。

表-2 部材の劣化の判定指標

総合判定	判定基準	構造性能指標
A	$P_a(i) > 20\%$	$I(i) \leq 60$
B	$P_a(i) + P_b(i) > 50\%$	$I(i) \leq 80$
C	$P_a(i) + P_b(i) + P_c(i) > 60\%$	$I(i) \leq 95$
D	上記以外	上記以外

表-3 総合判定結果の分類

総合判定	施設の状態
A	施設の性能が低下している状態
B	放置した場合、施設の性能が低下するおそれがある状態
C	施設の性能にかわる異常は認められないが、継続して観察する必要があると判断される状態
D	異常が見られず、十分な性能を保持している状態

(3) 各部材の LCC の解析条件

各部材の LCC を解析するにあたり、予防保全的な対策を行う場合および事後保全的な対策を行う場合のそれぞれについて検討を行うこととした。それぞれの場合の解析の前提条件は以下のように定義した。

(Case-1：予防保全型の対策を行う場合)

- ・総合判定がCになった時点で補修工事を実施
- ・補修工事の範囲：判定基準 a および b の部材
- ・補修工法：大規模補修（判定基準 a の部材）
小規模補修（判定基準 b の部材）
- ・補修後の部材の性能：すべて判定基準 d に回復

(Case-2：事後保全型の対策を行う場合)

- ・総合判定が B または A になった時点で補修工事を実施
- ・補修工事の範囲：判定基準 a および b の部材
- ・補修工法：大規模補修（判定基準 a の部材）
小規模補修（判定基準 b の部材）
- ・補修後の部材の性能：すべて判定基準 d に回復

解析にあたり、社会的割引率は「港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル」⁶⁾を参考に 4%と仮定し、標準的な設計供用期間 50 年間にわたり前提条件を満足するように維持管理を行うものとして LCC を算定した。なお、構造物の点検診断調査および記録の

保管等に必要費用はすべての場合で共通であると仮定して、感度解析では補修工事の費用のみを用いて、LCCへの影響を検討している。

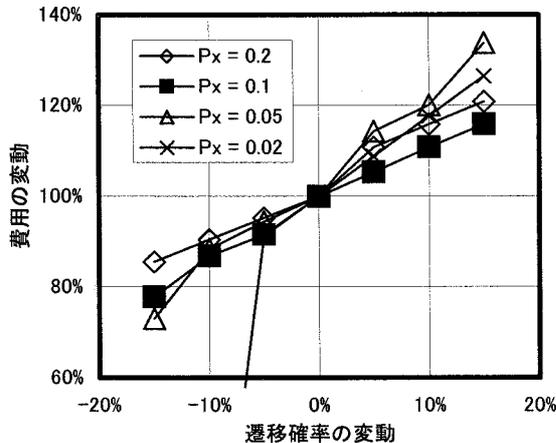
3. 各部材の補修費用に対する感度分析

各部材の劣化予測に用いるパラメーターがLCCの削減に与える影響を考察するため、感度分析を行った。

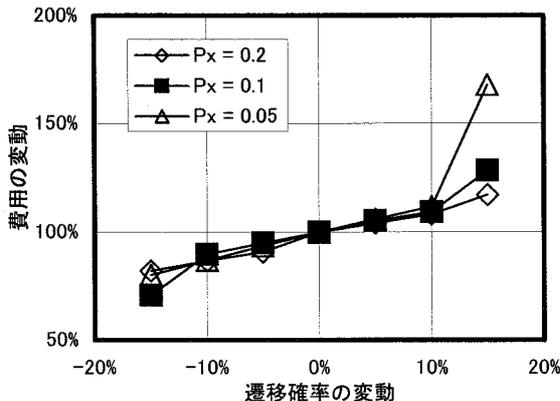
感度分析では、遷移確率 $P_x = 0.02, 0.05, 0.1, 0.2$ のそれぞれの場合について検討を行った。なお、小牟禮ら⁷⁾がRC 栈橋上部工の劣化進行の現地調査結果から計算した遷移率（途中で補修を加えたものを除く）の範囲は、床版で $P_x = 0.018 \sim 0.143$ 、はりで $P_x = 0.07 \sim 0.207$ である。ただし、 $P_x \leq 0.01$ の場合は、解析を行ったところ、一般的な供用期間50年の間に補修工事が1回も必要ないと判定されることから今回の検討対象から除外した。

(1) 遷移確率の変動によるLCCへの影響について

図-2は、 P_x を $-15\% \sim +15\%$ の範囲で変動させた場合の補修工事の費用の増加率を示したものである。なお、小牟禮ら⁷⁾は、現地調査結果から計算した遷移率と推定式から計算した値との誤差は $\pm 4\%$ 程度であることを示している。



(1) Case-1：予防保全型の対策を行う場合



(2) Case-2：事後保全型の対策を行う場合

図-2 遷移確率の変動によるLCCへの影響

Case-1の場合、 P_x が $-5\% \sim +5\%$ の範囲で変動した場合に費用は $-10\% \sim +15\%$ の範囲で増減し、 P_x の変動が $-10\% \sim +10\%$ の場合の費用の変動は $-15\% \sim +20\%$ 、 P_x の変動が $-15\% \sim +15\%$ の場合の費用の変動は $-25\% \sim +35\%$ である。 P_x の変動幅に対して費用はほぼ比例的に増加しているように見えるが、実際には一定期間毎に補修工事の回数が増加するため、その度毎にステップ関数的に増加する。たとえば、 $P_x = 0.02$ の場合で -10% 以下の値が急激に減少しているのは、設計供用期間内に補修工事の回数が0になったためである。

遷移確率が小さい場合 ($P_x = 0.02$ および 0.05) に、大きい場合 ($P_x = 0.1$ および 0.2) と比べてL費用の変動の幅が大きくなっているが、明確な傾向は見られない。これは、遷移確率が小さな場合ほど設計供用期間内に必要な補修工事の回数が少なくなるので、工事回数の増減や各回の工事が前後の年度にずれることによる影響を相対的に受けやすいためと考えられる。

Case-2の場合、 P_x が $-5\% \sim +5\%$ の範囲で変動した場合に費用は $-10\% \sim +5\%$ の範囲で増減し、 P_x の変動が $-10\% \sim +10\%$ の場合の費用の変動は $-15\% \sim +10\%$ 、 P_x の変動が $-15\% \sim +15\%$ の場合の費用の変動は $-30\% \sim +70\%$ である。ただし、 P_x の変動幅が $+15\%$ の場合にLCCが急激に増加しているのは、その値を境に補修工事の回数が増加しているためである。また、Case-2でも遷移確率の大小による費用の変動幅の差についても同様な傾向がみられるものの、明確な傾向は見られない。

Case-2の方が、Case-1と比べてLCCの変動の幅が大きくなっているのは、事後保全型の方が設計供用期間内に必要な補修工事の回数が多いためと考えられる。

これらの解析結果より、施設全体のLCCの検討にあたって、遷移確率の影響を考慮するためには、各部材毎に設定された遷移確率とその精度に応じて、補修費用の変動を考慮して適切に割増率を設定する必要があると考える。

(2) 大規模補修と小規模補修の工事費の差によるLCCへの影響について

図-3は、大規模補修の場合の工事費用が、小規模補修の場合と比べて基本単位あたりの工事単価で1倍、2倍、5倍および10倍と増加する場合の費用の変動を示したものである。

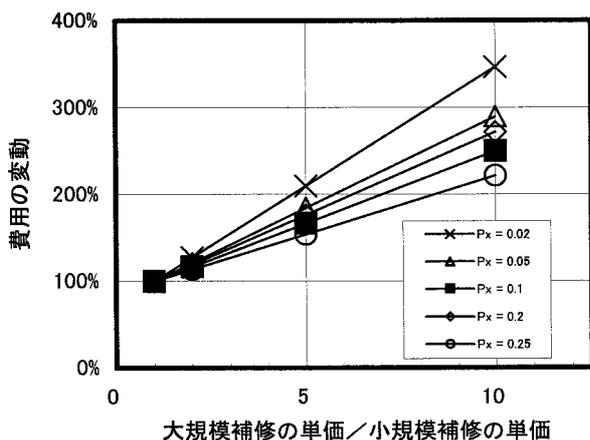
Case-1の場合、大規模補修と小規模補修の場合の工事単価の比が大きくなるにつれてほぼ比例的にLCCが増加している。これは今回の解析では、小規模補修の工事費用を用いて正規化しているため、大規模補修の工事単価が大きくなった分が単純に増加していると考えられる。

ただし、工事単価の比が10倍の場合でも費用の変動が $220\% \sim 350\%$ となっているのは小規模補修費用の影響を受けているからと考える。たとえば、工

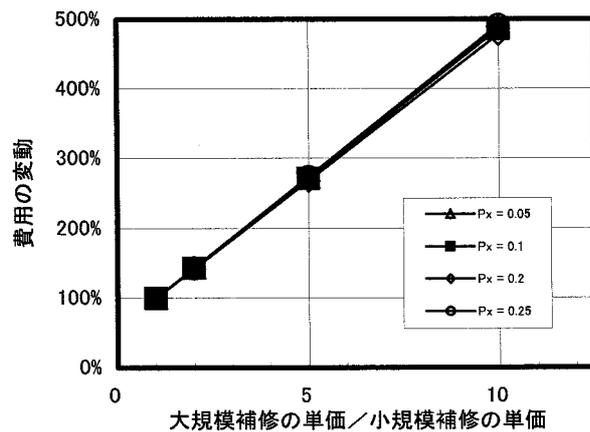
工事単価の比が 10 倍の場合で比較すると、 $P_x = 0.02$ の場合に費用が 350%程度まで増加するに対して、 $P_x = 0.2$ の場合には 270%程度と補修費用の変動幅が小さくなる。これは、遷移確率が大きいほど劣化の進行が速いため、小規模補修の回数が多くなり、小規模補修の工事費用の割合が大きくなるためである。

Case-2 の場合も、工事単価の比が大きくなるにつれてほぼ比例的に LCC が増加している。しかし、工事単価の比が 10 倍の場合で比較すると、 $P_x = 0.02$ および $P_x = 0.2$ の場合とも 500%程度であり、遷移確率による補修費用の変動幅は同程度となる。

これは事後保全では、劣化が一定以上進行してから補修工事を行うため、全体の費用に占める大規模補修の影響が大きいためと考える。



(1) Case-1：予防保全型の対策を行う場合



(2) Case-2：事後保全型の対策を行う場合

図-3 大規模補修と小規模補修の工事費の差による LCC への影響

(3) 予防保全型の対策の実施による LCC の削減効果について

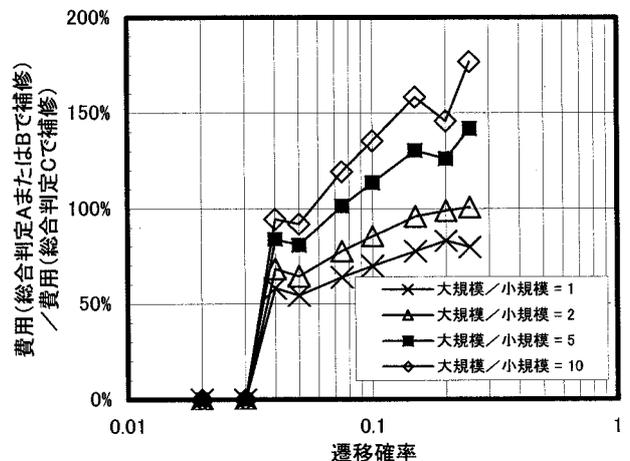
図-4 は、Case-1：予防保全型の対策（総合判定 C で補修）を実施した場合に対する Case-2：事後保全型の対策（総合判定 B または A）を実施した場合の補修費用の比を示したものである。図-4 (1) は遷移確率による影響について整理したものであり、

(2) は大規模補修の場合の工事単価が増加することによる影響について整理したものである。図の補修費用の比が 100%より大きな範囲で、予防保全型の対策を実施した場合に削減効果があると期待される。

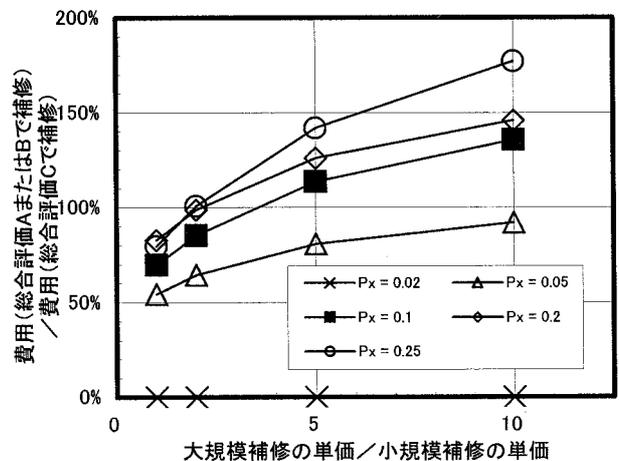
図より、遷移確率が高い場合に、予防保全型の対策による LCC の削減効果が高くなると考えられる。図の(1)で途中補修費用の比が小さくなっているところがあるが、これが Case-1 の場合で補修工事の回数が 1 回増加することによる影響である。なお、今回の解析では、事後保全型の対策を実施した場合、 $P_x \leq 0.03$ の範囲では設計供用期間の間に補修工事が不要になるため、補修費用の比が 0 になっている。

また、大規模補修の工事単価が大きい場合に、予防保全型の対策の実施による LCC の削減効果が高いと考えられる。

これらより、遷移確率が大きく比較的補修工事の回数が増える場合で、比較的大規模補修と小規模補修の工事単価の比が大きい場合に、予防保全型の維持管理を行うことによる LCC の削減効果が得られると考える。



(1) 遷移確率による LCC への影響



(2) 大規模補修と小規模補修の工事費の差による LCC への影響

図-4 予防保全型の対策の実施による LCC の変動

(4) 総合判定 A~D と構造性能指標の関係について

ここでは今回使用した総合判定と構造性能指標を用いた場合の判定指標とで比較を行い、それぞれの特徴について整理する。図-5 は、劣化予測の結果から、第 1 回目に総合判定 A~D になる時期について、それぞれ（構造性能指標を用いて判定した場合の補修時期）－（今回使用した総合判定を用いて判定した補修時期）を遷移確率毎に示したものである。

全体的に今回使用した総合判定で指標が変わる時期の方が、構造性能指標を用いた場合の時期より早い傾向がある。両者の差は、総合判定 C で 1~5 年、B で 2~10 年、A で 5~20 年の範囲にあり、遷移確率が大きくなるほど小さくなる傾向にある。

それぞれの指標の定義から、総合判定では判定基準 c, b および a の重みがほぼ等しいのに対して、構造性能指標では aa の重み(-100)が他 (c : -1, b : -5, a : -20) とくらべて大きい。また、判定基準 c の割合は P_x にほぼ比例して増加するとともに、b は P_x^2 にほぼ比例し、aa は P_x^4 にほぼ比例する。このため、遷移確率が小さい場合には、c, b の増加の割合に比して、aa の増加の割合が小さくなるため、差が大きくなると思われる。

ただし、今回の 4 段階のマルコフ連鎖モデルでは、定義上 $i=0\sim4$ 年までは $P_{aa}(i)=0$ となる。このため、補修時期が比較的早くなるような場合については、その影響についても考慮して、必要に応じて段階数および期間の分割数を大きくするなどの工夫が必要になると考えられる。

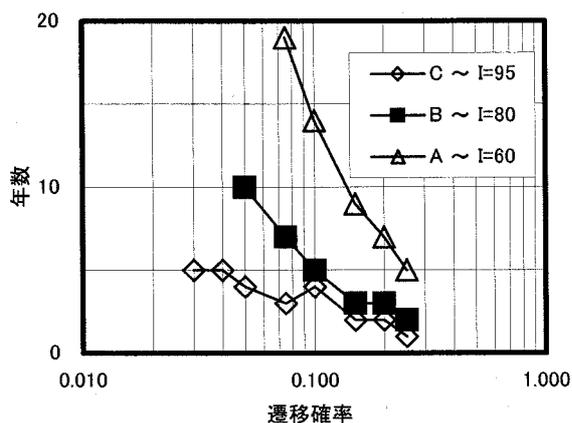


図-5 総合判定 A~D と構造性能指標の関係

これは、実際の現象では、遷移率の大きな場合では致命的な変状の発生により構造物の補修の必要な時期が決定されるが、遷移確率の小さな場合ではその前に全体に微少な変状が発生することにより補修の必要な時期が決定される傾向にあることを示していると考えられる。この結果から、実際の判定指標の設定においては、構造部材の劣化の遷移確率と維持管理上問題となる変状の状態をよく考慮して、それぞれの判定基準の重み付けとしいき値を検討すべきであると示唆される。

4. 施設全体の LCC 削減効果に対する考察

(1) 主要部材とその他の部材の区分

今回は、栈橋形式の港湾施設について削減効果に対する考察を行う。この時の「主要部材」は、一般的に上部工の床版、下部工の鋼管杭およびエプロン部の土留護岸が対象となる。その他の部材については、構造的に二次的に重要な部材を「その他部材」とし、それ以外を「附帯設備」とする。

このうち、その他部材および附帯設備は常に事後保全型の維持管理を行うことを基本とするので、LCC 削減効果に関する考察では、主要部材を対象とする。

(2) 主要部材の主な維持補修工法について各

主要部材を構成する鋼材およびコンクリート部材の劣化度に応じた維持補修工法について主なものを整理して、その概算工費とともに表-4、表-5 に示す。なお、概算工費は高橋ら⁵⁾、古玉ら⁸⁾が用いている工事単価をもとに整理している。

表-4 鋼材（下部工等）の維持補修工法

劣化度	補修工法	概算工費
c~a	ペトロラタム ライニング工法	65,000 (円/m ²)
c~a	有機ライニング工法 水中硬化型樹脂	55,000 (円/m ²)
c~a	無機ライニング工法 モルタルライニング	75,000 (円/m ²)
b~a	電気防食 (流電陽極型)	4,500 (円/m ²)
b~a	鉄筋コンクリート補強 (モルタル補強)	120,000 (円/m ²)

表-5 コンクリート部材（上部工等）の維持補修工法

劣化度	補修工法	概算工費
d~c	表面塗装工法	17,500 (円/m ²)
d~c	ひび割れ注入 工法	10,000 (円/m)
c~a	断面修復工法	150,000 (円/m ²) 97,000 (円/m ²)
c~a	電気防食工法 (外部電源 タイプ)	初期コスト 120,000 (円/m ²) 更新コスト 18,000 (円/m ²) 管理費 600 (円/m ² /年)
C	脱塩工法	80,000 (円/m ²)
b~a	FRP接着工法	炭素繊維 52,000 (円/m ²) アラミド繊維 39,000 (円/m ²)
A	改修 (打ち換え)	個別に設定

(3) 予防保全型の維持管理による LCC 削減効果について

3. の感度分析の傾向を、各部材について当てはめてみる。

主要部材のうち鋼製の部材は、劣化の進行が速く遷移確率が比較的高いと考えられる。このため、事後対策型の対策を実施した場合には設計供用期間内に大規模補修が数回必要となると考えられる。このため、予防保全型の対策として防食工の維持管理を行うことにより、鋼管杭本体の更新を抑えることができるため、LCC の削減効果が大きいと考えられることと定性的に一致する。

鋼材の維持補修工法は防食工の種類により異なるので、設計時に供用期間や現地の自然状況、補修工事の困難性等を考慮して、LCC が最小になるように適切な工法を選定することが重要である。また、鉄筋コンクリート補強は、下部工が腐食等の変状により所要の性能を満足しない恐れがある場合等に、下部工を補強する対策工であり、本来は補強が必要になる以前に対策を行うことが望ましい。また、鉄筋コンクリート補強を、電気防食工（陽極の交換）の補修とで概算工費を比べた場合、25 倍程度の違いがある。このため、LCC の観点から考えても、鉄筋コンクリート補強により維持管理を行うことは不経済であると考えられる。

これに対して、コンクリート構造の部材のように遷移確率が比較的低い場合には、設計供用期間内に大規模な補修が必要となる可能性が小さい。このため、事前対策型の対策を実施することにより、設計供用期間内は予防保全型の対策を実施しないことによっても、LCC の削減効果が小さいと考えられることと定性的に傾向が一致する。ただし、予防保全型の対策を実施することにより、設計供用期間内に大規模な補修が必要なくなるような結果が得られる場合などでは、LCC の削減効果は大きいと考えられる。

5. 結論

本研究の主要な結論は以下のとおりである。今後はよりよい維持管理手法の確立に向けて、本研究で明らかになった課題の解決のために、さらに検討を進めて参りたい。

- ① 港湾施設を構成する部材について、劣化予測に用いるパラメータの変動によるLCCの削減に与える影響を感度解析を行って考察した。劣化予測に用いる遷移確率の変動によるLCCの変動が無視できない場合がある。このため、必要に応じてLCCの算定にはその誤差を見込む必要があるとともに、今後、現地調査等にもとづいて、自然条件等に応じて適切に遷移確率を設定でき

る手法を確立することが重要である。

- ② 感度解析の結果、遷移確率が大きく比較的補修工事の回数が多くなる場合で、比較的大規模工事補修と小規模補修の工事単価の比が大きい場合に、予防保全型の維持管理を行うことによるLCCの削減効果が得られる傾向にあることがわかった。
- ③ 主要部材を構成する鋼材とコンクリート部材のそれぞれについて、その劣化の度合いに応じて、維持補修工法およびその単価を整理した。そして、感度解析の結果にもとづいて、予防保全型の維持管理によるLCC削減効果について考察した。LCC削減効果を定量的に評価するためには、さらに事例を蓄積することにより、各部材のパラメータを適切に設定する手法を確立することが重要である。

なお、今回の解析では、劣化度がすべてdの状態に回復すると仮定している。このため、今後現地試験結果等にもとづいて、性能の回復状況等を検証していくことが望まれる。

謝辞：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引きの編集にあたり、行政経験者、学識経験者及び港湾関係の調査設計・施工に関する有識者からご意見をいただき、本論文にその検討の成果を一部反映させた。検討の間、熱心なご意見をいただきました関係者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省交通政策審議会：安全で経済的な港湾施設の整備・維持管理システムのあり方について 答申，2005。
- 2) 国土交通省港湾局監修：改訂新版 港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，2007。
- 3) 国土技術政策総合研究所・（独）港湾空港技術研究所編集：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き，（財）港湾空港建設技術サービスセンター，2007。
- 4) （独）港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，（財）沿岸技術研究センター，2007。
- 5) 高橋宏直・横田 弘・岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究—構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例—，国土技術政策総合研究所報告，No.29，2006。
- 6) 国土交通省港湾局：港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル，2004。
- 7) 小牟禮建一・浜田秀則・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，No.41，Vol.4，2002。
- 8) 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。