

複数の係留施設の維持管理における 最適な補修優先度と年間予算に関する検討

谷 拓歩¹・横田 弘²・橋本 勝文³・古谷 宏一⁴・北里 新一郎⁵

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:tanitakuho@eng.hokudai.ac.jp

²フェロー 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:yokota@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:hashimoto.k@eng.hokudai.ac.jp

⁴非会員 東京都建設局西多摩建設所奥多摩出張所 (〒198-0212 東京都西多摩郡奥多摩氷川951-4)

E-mail:Kohichi_Furuya@member.metro.tokyo.jp

⁵正会員 港湾空港総合技術センター (〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-3-1)

E-mail:kitazato@scopenet.or.jp

老朽化が進む大量の社会基盤施設を予算制約の下、適切に維持していくことが重要な課題となっている。そのため、補修・更新を行う施設の優先順位決定手法の確立が望まれている。そこで、本論文では2つのモデル港湾施設内の複数の係留施設を対象として劣化予測を行い、予定供用期間中の補修費用と便益から純現在価値 (NPV) を算出することで各施設の補修優先度評価を行うとともに、各港湾施設間における補修優先度の差異を考察した。さらに、年間予算を複数通り設定したうえでシミュレーションを行い、年間予算が各施設の補修優先度に及ぼす影響を検討した。

その結果、便益の大きい施設の補修優先度を高く設定した場合にNPVが最大となることがわかった。また、各港湾施設内における各施設の補修費用の合計が最適な年間予算に影響を及ぼすという結論を得た。

Key Words : maintenance strategy, mooring facilities, prioritization, NPV, budgetary restriction

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に大量の社会基盤施設が整備されてきた¹⁾。そのため、これらの膨大な社会基盤施設のストックを適切に維持管理していくことが、社会経済の持続可能な発展に対して、非常に重要な課題となっている。しかしながら、公共事業関係費は年々削減の一途をたどっている¹⁾。また、建設業界では人手不足が深刻な問題となっている²⁾。したがって、これらの膨大な施設を短期間ですべて補修・更新するのは、財政・人手の観点から困難であると推測される。

これらの状況から、社会基盤施設の性能や機能を所定の期間維持し、できる限り補修・更新に必要な費用を低減するために、効率的かつ効果的な長期の維持管理戦略が必要となる。従来の維持管理においては施設の劣化状況のみで補修優先度を決定する手法が一般的であった。しかしながら、補修・更新に利用できる予算が少ない現状では、期待される便益の小さい施設を補修・更新する

ことが適切でない場合があり、補修優先度を客観的な手法を用いて適切に決定することが望まれる。つまり、施設の便益等の利用状況と劣化状況の両方を考慮した補修優先度決定手法の確立が求められている。

社会基盤施設の補修優先度決定手法に関する研究はこれまでも数多く行われている。例えば、石田ら³⁾は橋梁を対象として、補修・補強優先順位を決定する手法について検討を行っている。また、杉浦ら⁴⁾は、舗装、橋梁、危険斜面を対象として、リスク評価を行う際にそれらを同等に扱うことで、より効率的にネットワーク全体の安全性を確保する総合維持管理手法を提案している。

しかしながら、港湾施設、特に係留施設を対象とした補修優先度に関する研究は希少である。係留施設は、ほかの社会基盤施設と比べ、極めて過酷な環境に置かれているため、種々の劣化現象が顕在化している⁵⁾。例えば、栈橋上部工 (梁と床板) では、海水中に含まれる塩化物イオンの浸透および鋼材の腐食に伴う塩害による劣化が顕著であることから、適切な補修優先度の決定はより

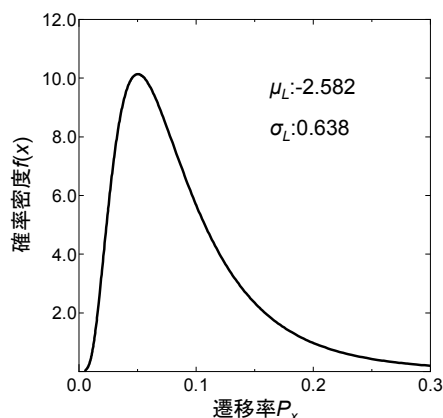


図-1 我が国の栈橋式係留施設の遷移率分布の近似¹⁰⁾

複雑となることが想定され、補修・補強優先順位を考慮した維持管理手法の構築は大変重要になる。

以上の背景に基づき、本論文では複数の係留施設を対象とする、経済性に対して効率的な維持管理手法の構築に関する検討を行った。年間予算および各施設の補修優先度等の様々な設定条件の下、モンテカルロシミュレーションを行い、予定供用期間（50年）中の全施設の純現在価値（以下、NPVという）を算出した。これより、各諸条件がNPVに与える影響を評価し、NPVを最大化させる効率的な維持管理手法の構築に関する検討を行った。

2. 検討方法の概要

(1) 劣化進行予測

本論文では、マルコフ連鎖モデルを用いて劣化進行予測を行った。マルコフ連鎖モデルは、「状態」と「推移」という2つの概念を用いて、ある事象が1つの「状態」から、「遷移率 P_x 」で次の「状態」へと移行する様子を確率論的に捉える統計手法である。マルコフ連鎖モデルは式(1)により表現される。本論文では、係留施設を構成する部材の劣化状態がd（変状が認められない状態）、c（部材の性能低下はないが、変状が発生している状態）、b（部材の性能が低下している状態）およびa（性能が著しく低下している状態）の4段階であると仮定し、式(1)を用いて任意の年における劣化度部材比を求めた。ここで、劣化度部材数ではなく劣化度部材比としたのは、既往の研究⁹⁾において、同一の構造物の中に劣化度の小さい部材と大きい部材を同時に含むものも少なくなく、劣化度の平均値を用いた場合には、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り、また、劣化度の最大値を用いた場合には、構造物全体について過大な劣化度を与えることとなるとされている⁹⁾ためである。さらに、劣化度の平均値や最大値を用いた

場合には、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とされている⁹⁾ため、本論文においては劣化度部材比を用いて劣化進行予測を行った。本論文で対象としている栈橋は、栈橋法線方向の梁、栈橋直行方向の梁、および床板の3形態の部材から構成されており、梁どおし、床板どおしで大きな寸法諸元の変化や発生断面力の変化が大きい。そのため、部材の質量や断面力等による寄与度が同等であると仮定し、部材比のみで表現できるものとした。既に、塩害を受ける栈橋上部工に対してマルコフ連鎖モデルを用いて劣化予測を行った研究⁷⁾が行われており、劣化度分布の将来予測は経年後に行った調査結果と比較的に良く一致する結果となっているため、マルコフ連鎖モデルを用いることは妥当であると考えられる。なお、既往の研究⁹⁾に基づいて、各劣化度間の遷移率 P_x はすべて等しいと仮定した。

$$\begin{pmatrix} d \\ c \\ b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-P_x & 0 & 0 & 0 \\ P_x & 1-P_x & 0 & 0 \\ 0 & P_x & 1-P_x & 0 \\ 0 & 0 & P_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $d \sim a$ ：各劣化度に該当する部材の全部材数に対する比、 P_x ：遷移率、 t ：経過年数である。

また、係留施設の劣化進行の程度を表す代表的指標として、式(2)で表されるDPを用いた⁹⁾。DPは、劣化度部材比に、各劣化度に対する重みを乗じたものを合計して算出され、値が大きいほど劣化が進行していることを表す。本論文では、各劣化度に対する重みについて、 a を4点、 b を3点、 c を2点、 d を1点と仮定した。

$$DP = 4 \times a + 3 \times b + 2 \times c + 1 \times d \quad (2)$$

ここで、DP：施設の代表的劣化指標（1.0～4.0）である。

(2) 遷移率の設定

マルコフ連鎖モデルの適用に際しては、既往の研究の遷移率データ¹⁰⁾を用いた。これは、Y港の5施設およびT港の3施設は比較的新しく、適切な遷移率データが得られなかったためである。ここで用いた遷移率は、全国の56の栈橋を調査した結果に基づくものであり、その分布は対数正規分布に近似できるとしている。図-1に遷移率分布と分布パラメータを示す。既に貝戸ら¹¹⁾は、橋梁において目視点検データからベイズ推定を用いて統計的劣化予測を行う検討を行っている。本論文では、遷移率分布に従う遷移率を施設の数だけリサンプリングし、得られた遷移率を各施設に与え、劣化進行予測を行った。つまり、この遷移率を用いることにより、我が国の平均的

な劣化速度を持つ栈橋構造の係留施設群モデルでシミュレーションを行うことが可能であると考えた¹²⁾。

(3) 対象モデル港

Y港の5つの係留施設（W1～W5）およびT港の3つの係留施設（A～C）を対象として補修優先度決定手法に関する検討を行った。Y港およびT港はいずれも国際拠点港湾に指定されており、我が国の物流において重要な役割を果たしている。これより、Y港およびT港の2港は、効率的な維持管理手法の構築に関する検討の対象として妥当であると考えられる。表-1および表-2にY港およびT港の各係留施設の主要なデータを示す。Y港の5つの施設の中で最も古い施設は1976年に供用開始されたW3であり、最も新しい施設は2005年に供用開始されたW5である。各施設の劣化進行状況は、目視点検の結果によると、W1およびW2では比較的劣化が進行しており、供用開始年が最も古いW3では他の施設と比較して劣化が進行していない。T港の3つの施設は、いずれも1997～2001年の間に供用開始されており、Y港の5つの施設と比較して、劣化は進行していない。なお、表中の調査時の経過年数は、供用開始されてから劣化度調査が行われるまでの経過年数である。また、表中の初期DPは、シミュレーションを行う際の初年度のDPである。

(4) 補修費用の算出方法

施設の劣化の進行程度に応じて適用できる補修工法が異なると考え、補修を行う際のDPに応じて補修工法を設定した。補修工法は、予防保全型（P）工法、事後保全型（C1, C2, C3, C4）工法および大規模補修型（R）工法の6種類とした。表-3に各補修工法の表面積に対する補修対象面積の比率および適用範囲DPを示す。

予防保全型補修では、補修対象面積すべてに表面被覆を行うとした。これは、鉄筋腐食を防ぐために行われる工法であるため、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する前に行うとした。既往の研究¹³⁾より、鉄筋コンクリートの腐食状況とDPを対応させた場合、 $1.5 \leq DP \leq 2.0$ においてコンクリートにひび割れが発生するとした。さらに、予防保全型補修を行う際のDPの推奨値として $1.7 \leq DP < 2.0$ とされている¹³⁾ため、本論文においてもこの値を用いた。また、予定供用期間中に表面被覆を初めて行う場合には、その後の劣化速度が低減されることを考慮し、遷移率 P_d は補修前の1/2の値になるとした¹⁴⁾。

事後保全型補修（C1～C4）では、小断面修復、大断面修復および表面被覆を行うとした。ここでは、はつり深さによって小断面修復と大断面修復に細分した。事後保全型補修の適用範囲DPは $2.0 \leq DP < 3.5$ であるが、実際には劣化度d～aの様々な部材が存在する。そのため、小

表-1 Y港の各係留施設の主なデータ

	W1	W2	W3	W4	W5
竣工年	1988	1981	1976	1994	2005
構造形式	栈橋	栈橋	栈橋	栈橋	栈橋
水深（m）	14	12	12	12	14
延長（m）	280	240	240	300	330
部材数（梁&床版）	966	732	626	1010	—
調査時の経過年数	17	24	28	16	—
劣化度部材比	d	0.64	0.67	0.70	0.88
	c	0.34	0.28	0.30	0.04
	b	0.01	0.05	0.00	0.00
	a	0.00	0.00	0.00	0.08
初期DP	1.63	1.52	1.48	1.09	1.11

表-2 T港の各係留施設の主なデータ

	A	B	C
竣工年	1997	1999	2001
構造形式	栈橋	栈橋	栈橋
水深（m）	10	10	10
延長（m）	230	200	186
部材数（梁&床版）	1450	1251	1190
調査時の経過年数	11	9	7
劣化度部材比	d	0.97	0.99
	c	0.03	0.01
	b	0.00	0.00
	a	0.00	0.00
初期DP	1.04	1.02	1.04

表-3 補修工法とその適用範囲 DP

	補修工法	適用範囲DP
P	表面被覆（100%）	$1.7 \leq DP < 2.0$
C1	断面修復（小10%）+表面被覆（100%）	$2.0 \leq DP < 2.3$
C2	断面修復（小20%・大10%）+表面被覆（100%）	$2.3 \leq DP < 2.6$
C3	断面修復（小10%・大20%）+表面被覆（100%）	$2.6 \leq DP < 3.0$
C4	断面修復（大50%）+表面被覆（100%）	$3.0 \leq DP < 3.5$
R	撤去・新設	$3.5 \leq DP \leq 4.0$

表-4 各補修工法の単価

補修工法		単位	単価（円）	
			床版	梁
予防保全型	表面被覆	m ²	15,000	
	仮設費		9,000	
事後保全型	表面被覆		13,500	
	仮設費		9,000	
	断面修復（小）		75,000	
	断面修復（大）		115,000	
大規模補修	撤去・新設	m ³	300,000	

断面修復と大断面修復を組み合わせることで補修を行うことが必要である。さらに、補修を行う面積も変化すると考えられる。したがって、事後保全型補修を小断面修復および大断面修復の補修対象面積の割合により、C1, C2,

C3およびC4工法の4通りの補修工法を設定した。DPの適用範囲については、C1～C3は $2.0 \leq DP < 3.0$ の間ではほぼ3分割する値とし、C4については施設の全部材がb判定（部材の性能が低下している状態）の場合のDPの値より大きい範囲、すなわち $3.0 \leq DP < 3.5$ の範囲とした。ここで、 $DP=3.0$ という値は部材の性能および施設の機能が著しく低下している状態と考えられる。そのため、C4では大断面修復を行う面積を50%とし、C1～C3の補修対象面積よりも大きく設定した。なお、C1～C4において、表面被覆は補修を行う施設のすべての面積を対象として行うとした。ここで、補修対象面積の割合については、既往の研究¹⁵⁾を参考にした。当然ながら、実際には断面修復以外の工法や補修対象面積の違いなどにより様々な補修工法が考えられるが、本論文では事後保全型補修工法をC1～C4の4通りに限定してシミュレーションを行った。

大規模補修では、対象施設のコンクリート部材をすべて撤去し、新設するとした。

次に、各補修工法の単価を既往の研究⁸⁾を基に設定した。表-4に各補修工法の単価を示す。また、Y港およびT港の各施設のコンクリート表面積および体積を表-5および表-6に示す。本論文では、補修単価に各施設のコンクリートの表面積（大規模補修（事後保全型）の場合はコンクリートの体積）を乗じて1回あたりの補修費用として算出した。

(5) 便益の算出方法

港湾投資の評価に関する既定の手順¹⁶⁾に従って各施設の便益を推定した。便益には輸送費用削減による便益、輸送の信頼性の向上による便益、港内の安全性向上による便益、周辺の既存ターミナルの混雑緩和など様々ある。このうち、定量的に把握できる便益として、輸送費用削減便益が考えられる。また、信頼性の向上や安全性の向上による便益はいずれの施設においても同一であると考えられるため、本論文では施設間で最も差がつくと予測される輸送費用削減便益のみを検討の対象とした。

輸送費用削減便益の算出方法の概要を図-2に示す。まず、各施設の取扱い貨物の種類と量から、便益計算の前提条件となる背後圏、対象航路および代替港等を設定した。次に、背後圏および対象航路別の貨物量割合を算出した。

ここで、輸送費用削減便益は、当該施設を利用する場合の貨物の輸送費用と、代替施設を利用する場合の貨物の輸送費用の差である。輸送費用は、陸上輸送費用、海上輸送費用および輸送時間費用の3つの和である。陸上輸送費用（ C_1 および C_1' ）は、貨物を国内港湾から背後圏（あるいは、背後圏から国内港湾）に輸送する際に要する費用である。また、海上輸送費用（ C_2 および C_2' ）は、国内港湾から貿易相手港（あるいは、貿易相手港か

表-5 Y港のコンクリート表面積、体積および比

	W1	W2	W3	W4	W5
表面積(m ²)	6,912	7,364	8,021	8,664	17,568
体積(m ³)	2,482	2,731	2,149	3,748	12,730
表面積/体積	2.8	2.7	3.7	2.3	1.4

表-6 T港のコンクリート表面積、体積および比

	A	B	C
表面積(m ²)	10,690	9,621	11,337
体積(m ³)	2,931	2,638	2,973
表面積/体積	3.6	3.6	3.8

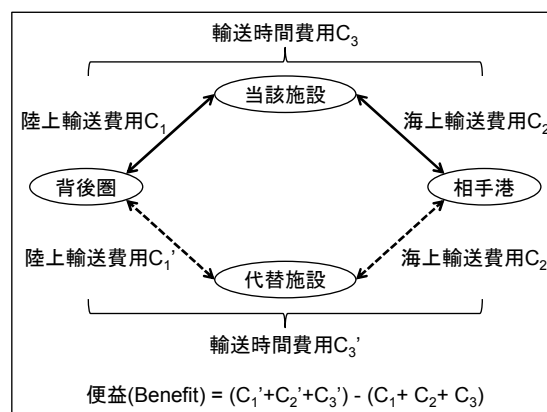


図-2 便益算出方法の概要

ら国内港湾）に輸送する際に要する費用である。輸送時間費用（ C_3 および C_3' ）は、陸上輸送、海上輸送および港湾での積卸しにかかる時間の総和に、取扱い貨物の種類による時間費用原単位を乗じた値である。

(6) NPVの算出方法

a) 概要

式(3)に示すように、各年の便益から補修費用を差し引いたものを予定供用期間（現在から50年間）にわたって足し合わせることでNPVを算出した。

$$NPV = \sum_{n=1}^{50} \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} \quad (3)$$

ここで、NPV：純現在価値、 n ：経過年数、 B_n ： n 年時の便益、 C_n ： n 年時の補修費用、 r ：社会的割引率である。

予定供用期間50年間のNPVを計算する際には、全施設において予防保全型の維持管理（ $DP=1.7$ で補修）を行うことを前提とした。これは、事後保全型補修や大規模補

修を行う場合、補修費用が大きくなることによる補修の施工期間が長期になることが予測されることによる。すなわち事後保全型補修や大規模補修を行う場合、1つの施設にのみ補修費用が集中し、複数の施設の維持管理手法としてこれらを前提とすることは適当ではないと考えられる。したがって、施工の長期化を避けるために、他の工法と比較して補修費用が小さい予防保全型補修を適用することを前提とした。しかしながら、複数の施設の補修時期が重なった場合には、優先度の高い施設を補修することとした上で、 $DP \geq 2.0$ となる場合に事後保全型補修や大規模補修を適用した。なお、上記において、補修を行うことができずに劣化が進行し、 $DP \geq 3.0$ となった施設は供用停止となり、便益が発生しないものと仮定した。また、社会的割引率は公共事業の費用便益分析に関する技術指針（共通編）¹⁷⁾において、全事業において当面4%を適用するとされているので、本論文においても社会的割引率を4%と設定した。

b) 年間予算の設定

検討に際しては、補修に用いることができる年間の予算に上限値を設定した。既往の研究¹⁸⁾において、係留施設12施設を対象として30年間の補修コストを算出した場合、年間の平均費用は約2.2億円という結果になっている。本論文では検討対象施設数が5施設および3施設であること、および年間予算の大小がNPVに与える影響を検討するため、0.1億円から4.0億円まで、0.1億円刻みで40通りの値を設定した。ここで、Y港（5施設）およびT港（3施設）において年間予算0.1億円という値は既往の研究¹⁹⁾と比較しても小さい値であるが、今後の社会経済の状況の変化（港湾分野および他分野における老朽化施設の増大、公共事業費の削減など）を考慮して設定した。

c) 補修シナリオの設定

Y港およびT港の補修シナリオに関して、5つの施設で考えられる補修順序の組み合わせは5! (=120) 通り、3つの施設では3! (=6) 通りである。このすべての補修シナリオについてNPVを計算した。

d) 補修期間中の便益の設定

補修期間中の便益の損失割合（通常時の何%が減少するか）は、補修工法によって異なると仮定した。便益の損失割合は港内の他の施設の空き具合などによって変動すると考えられるが、港湾管理者等へのヒアリングに基づき、P工法では0%、C1工法では30%、C2工法では50%、C3工法では70%、C4およびR工法では100%と設定した。

e) モンテカルロシミュレーションによるNPV計算

上記の設定条件の下、モンテカルロシミュレーションにより図-1に示した遷移率の分布からリサンプリングして各施設に与え、現在（2014年）から50年間の全施設のNPVを計算する作業を10,000回繰り返し、その平均値を各補修シナリオのNPVとして算出した。ここで、図-3お

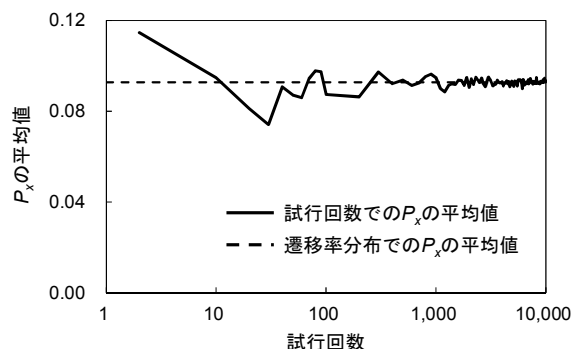


図-3 遷移率 P_x の平均値の収束状況

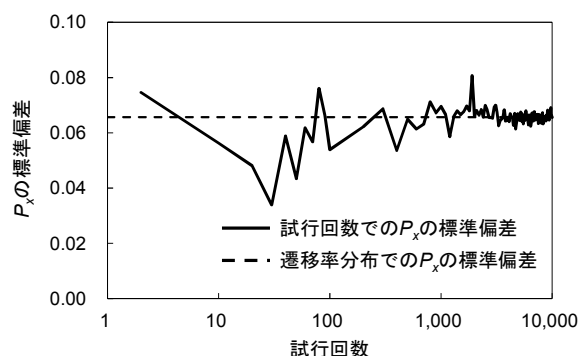


図-4 遷移率 P_x の標準偏差の収束状況

および図-4に、モンテカルロシミュレーション試行回数の増加に伴う遷移率 P_x の平均値および標準偏差の収束状況を示す。同図より、いずれのパラメータも試行回数10,000回では、図-1に示した遷移率分布の平均と標準偏差の値に収束していることがわかる。

また、予定供用期間50年の各施設の劣化予測を行う際の初年度のDP（以下、初期DPという）は、各施設の点検データから得られた劣化度部材比を基に算出した。

以上より、Y港では120通り、T港では6通りの補修順序の組み合わせの中で、NPVが最も大きくなる補修順序の組み合わせを各港において各施設の維持管理を行う上で最も効率的な補修シナリオとした。また、年間予算の違いが各施設の補修優先度に与える影響を考察した。

3. 計算結果

(1) 各工法における1回あたりの補修費用

表-7に、Y港およびT港の各施設における各補修工法ごとの1回あたりの補修費用を示す。補修単価は各港各施設で同じであるため、コンクリート表面積（大規模補修の場合はコンクリート体積）の大小によって補修費用が変化する。同表より、Y港（W1～W5）とT港（A～

C) を比べると、W5を除いたすべての施設において、Y港よりもT港の方が各補修工法で1回あたりの補修費用が大きくなっている。Y港のW5は全施設の中でコンクリート表面積および体積が最も大きいため、各工法における1回あたりの補修費用も最大である。また、表-5より、W5は表面積/体積の値が他の施設と比較して小さいことがわかる。これより、実際には躯体の形状が補修費用に影響を及ぼす可能性も考えられるが、本論文においては、補修費用はコンクリート表面積（大規模補修の場合は体積）によって決まるとしている。

また、T港のCを除くすべての施設において、P工法（予防保全型補修）からR工法（大規模補修）にかけて、1回あたりの補修費用は大きくなっていることから、施設の劣化が著しいほど1回あたりの補修費用は大きくなると言える。しかしながら、T港のCではR工法（大規模補修）よりもC4工法（事後保全型補修）の方が1回あたりの補修費用が大きいことがわかる。これは、予防保全型補修（P工法）および事後保全型補修（C1～C4工法）ではコンクリート表面積に単位表面積当たりの単価を乗じて補修費用を算出するが、大規模補修（R工法）ではコンクリート体積に単位体積当たりの単価を乗じて算出するためである。ただし、表-4に示した補修単価は種々の条件によって変動する⁹⁾とされており、各施設の躯体の寸法や形状によって多少変化する可能性も考えられる。

(2) 各施設の1年あたりの便益

表-8および表-9に、Y港およびT港の各施設の取扱い貨物の種類、過去5年間（平成19～23年）の貨物量の平均および便益の計算結果を示す。

表-8より、Y港において取扱い貨物量が最も多いのはW1、最も少ないのはW2であり、便益についてもW1が最大でW2が最少となっている。しかしながら、W3、W4およびW5に着目すると、W3はW4およびW5よりも取扱い貨物量が多いにもかかわらず、便益はこの3施設の中で最小である。これは、W3で取扱っている完成自動車と、W4およびW5で取扱っているコンテナとで輸送費用単価が異なるためであると考えられる。例えば、輸送距離100kmまでの場合、20ftコンテナ1個の輸送費用は64,410円である。完成自動車はトレーラーを用いて輸送するが、トレーラー1台の輸送費用は100kmまでの場合で45,400円である。よってW3の貨物では輸送費用自体が小さいため、当該施設が利用できずに代替施設を利用する際の輸送費用の差が小さくなり、結果として便益が小さくなったと考えられる。また、W3の背後圏をほかの施設と比べ近くに確保できたことで、代替施設を利用する場合の係留施設から背後圏までの陸上輸送費用が小さくなったことや、海上輸送費用および輸送時間費用の差が小さくなったことも、便益が小さくなった一因として

表-7 各施設の補修費用の計算結果（億円）

		Y港					T港		
		W1	W2	W3	W4	W5	A	B	C
工法	P	1.7	1.8	1.9	2.1	4.2	2.6	2.3	2.7
	C1	2.1	2.2	2.4	2.6	5.3	3.2	2.9	3.4
	C2	3.4	3.6	3.9	4.2	8.6	5.2	4.7	5.6
	C3	3.7	3.9	4.3	4.6	9.3	5.7	5.1	6.0
	C4	5.5	5.9	6.4	6.9	14.1	8.6	7.7	9.1
	R	7.4	8.2	6.4	11.2	38.2	8.8	7.9	8.9

表-8 Y港の各施設の貨物に関するデータと便益の計算結果

	W1	W2	W3	W4	W5
取扱い貨物	石炭	コイル	完成自動車	コンテナ	コンテナ
H19～H23の取扱い貨物量の平均(千トン)	2,774	175	1,329	1,230	1,274
便益（億円/年）	57.4	1.8	7.5	28.2	41.2

表-9 T港の各施設の貨物に関するデータと便益の計算結果

	A	B	C
取扱い貨物	金属機械工業品	軽工業品	雑工業品
H19～H23の取扱い貨物量の平均(千トン)	50	258	108
便益（億円/年）	0.4	2.4	1.2

考えられる。

表-9より、T港において取扱い貨物量が最も多いのはB、最も少ないのはAであり、貨物量が多い施設ほど便益が大きいことがわかる。これは、T港の場合は各施設における貨物の輸送方法をすべてトラックとし、さらに背後圏も3施設ですべて同じと設定したため、輸送費用単価や輸送距離に差が出ず、便益が貨物量のみに依存したからであると考えられる。

4. 予算がNPVの平均とばらつきに与える影響

(1) 予算がNPVに及ぼす影響

図-5に、各年間予算において120通り（Y港の場合）および6通り（T港の場合）の補修シナリオで算出したNPVの平均値（平均NPV）を示す。同図より、両港において年間予算が増加するほど平均NPVは大きくなることがわかる。年間予算が0.1億円の場合、Y港においては平均NPVが2,278億円でありT港においては平均NPVが72億円である。年間予算が4.0億円の場合、Y港においては平均NPVが2,907億円であり、T港においては平均NPVが76億円である。よって年間予算が最大（4.0億円）の場合と最小（0.1億円）の場合の差は、Y港において629億円、T

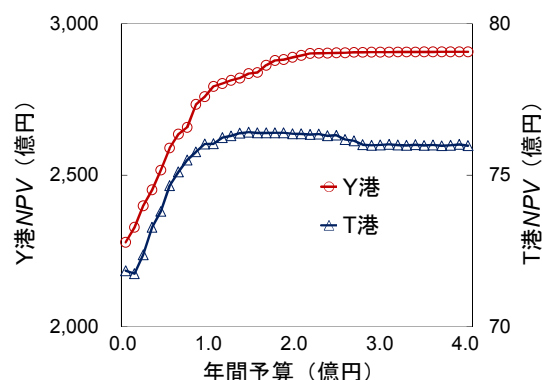


図-5 Y港およびT港での各年間予算における平均NPV

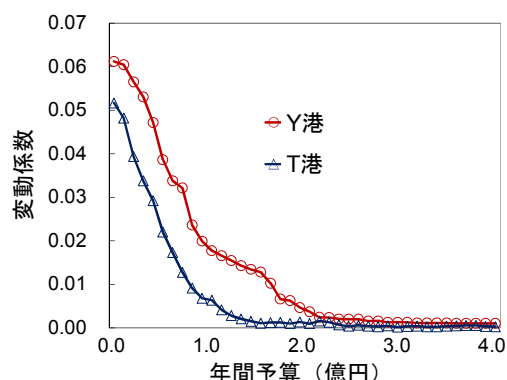


図-6 Y港およびT港での各年間予算におけるNPVの変動係数

港において4億円である。これは、年間予算が大きいほど施設全体の補修に要する期間が短くなるため、供用停止に伴う便益の損失が減少したこと、および多くの施設において予防保全型の維持管理（ $DP=1.7$ で補修）を行うことができるため予定供用期間50年間の総補修費用が減少したことによると考えられる。

一方で、両港において年間予算がある値を超えると平均NPVの増加が止まることがわかる。Y港においては2.3億円以上、T港においては1.2億円以上の年間予算では、年間予算の0.1億円の増加に伴う平均NPVの増加は最大でもY港で0.96億円、T港で0.21億円である。この値は、Y港において年間予算が0.5億円から0.6億円に増加するのに伴う平均NPVの増加分72.96億円およびT港において年間予算が0.3億円から0.4億円に増加するのに伴う平均NPVの増加分0.91億円と比べ、著しく小さいといえる。さらに、T港では年間予算が2.5億円前後の場合において、年間予算が増加するにもかかわらず、平均NPVが減少していることがわかる。これは、補修費用の増加分の方が便益の増加分よりも大きかったためと考えられる。つまり、年間予算が増加することにより $DP \geq 1.7$ となる施設に対して補修を行うことができるが、その期間は便益の発生が低減されることおよび $DP < 3.0$ の施設は供用中止にはならず便益が発生することから、補修を行うことによって平均NPVが減少したと考えられる。以上のことから、Y港においては2.3億円、T港においては1.2億円がNPVの増加率に対する最適な年間予算であるといえる。

(2) 予算が変動係数に及ぼす影響

図-6に、各年間予算において120通り（Y港の場合）および6通り（T港の場合）の補修シナリオで算出したNPVの変動係数を示す。同図より、両港において年間予算が大きくなるにしたがって変動係数が小さくなっていることがわかる。これは、年間予算が小さい場合には、施設

表-10 各港において各年間予算でNPVが最大となる補修シナリオ

年間予算（億円）	NPVが最大となるシナリオ	
	Y港	T港
0.1	W1→W5→W2→W3→W4	B→C→A
0.2	W1→W5→W4→W2→W3	B→C→A
0.3	W1→W5→W4→W3→W2	B→C→A
0.4	W1→W5→W4→W3→W2	B→C→A
0.5	W1→W5→W4→W3→W2	B→C→A
0.6	W1→W5→W4→W3→W2	B→C→A
0.7	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
0.8	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
0.9	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
1.0	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
1.1	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
1.2	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
1.3	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
1.4	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
1.5	W5→W1→W4→W3→W2	C→B→A
1.6	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
1.7	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
1.8	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
1.9	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
2.0	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
2.1	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
2.2	W5→W4→W1→W3→W2	B→C→A
2.3	W5→W4→W3→W1→W2	B→C→A
2.4	W5→W4→W1→W3→W2	C→B→A
2.5	W5→W4→W1→W3→W2	C→B→A
2.6	W5→W4→W3→W1→W2	B→C→A
2.7	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
2.8	W5→W4→W1→W3→W2	C→B→A
2.9	W5→W4→W1→W2→W3	A→C→B
3.0	W5→W4→W1→W3→W2	C→A→B
3.1	W5→W4→W1→W3→W2	C→B→A
3.2	W5→W4→W1→W3→W2	C→A→B
3.3	W5→W4→W1→W3→W2	A→B→C
3.4	W5→W1→W4→W3→W2	B→C→A
3.5	W5→W4→W3→W1→W2	A→B→C
3.6	W5→W4→W3→W1→W2	B→C→A
3.7	W5→W4→W1→W2→W3	C→B→A
3.8	W5→W4→W3→W1→W2	B→C→A
3.9	W5→W4→W3→W1→W2	C→B→A
4.0	W5→W4→W3→W1→W2	C→B→A

の補修優先度の設定によってNPVが大きくばらつくことを示している。この理由として、年間予算が少ない場合には補修が長期化することが多いため、優先度の低い施設は補修することができない。そのため、当該施設において劣化が進行して $DP \geq 3.0$ となり、供用停止に伴う便益の減少を生じる。これに関して、各施設によって便益の大きさに差があるため、各施設の補修優先度の設定の違いによって予定供用期間50年間のNPVに大きな差異が出たと考えられる。

また、両港において変動係数が小さくなり横這いに推移しはじめる際の年間予算は、(1)で述べた各港の最適な年間予算（Y港では2.3億円、T港では1.2億円）とほぼ一致していることがわかる。つまり、最適な年間予算以上の場合には、いずれの補修シナリオを選択しても全施設の予定供用期間50年でのNPVには大差がないといえる。

5. NPVが最大となる補修シナリオ

表-10に、各港での各年間予算においてNPVが最大となる補修シナリオを示す。例えば、Y港において年間予算が0.1億円の場合には、W1の補修優先度が最も高く、次いでW5、W2、W3、W4となるシナリオにおいてNPVが最大となった。ここで、Y港とT港はそれぞれ独立してシミュレーションを行っており、各港湾間の補修優先度ではなく、港湾内の施設間の補修シナリオについて検討した。また、図-7および図-8には、Y港およびT港において、表-10に示す各年間予算の場合にNPVが最大となるシナリオのなかで、各補修優先度（Y港ならば1～5、T港ならば1～3）に対する各施設の割合を示す。

Y港において、年間予算が0.1億円から0.6億円までの場合にNPVが最大となるのは、W1の補修優先度が最も高いシナリオである。表-8より、W1は便益が最も大きい施設であることがわかっている。特に、年間予算が0.3億円から0.6億円においてNPVが最大となるのは、便益の大きい施設から順に補修優先度が高いシナリオである。

しかしながら、年間予算が0.7億円以上の場合にNPVが最大となるのはすべて、W5の補修優先度が最も高いシナリオである。W5はY港の中で2番目に便益が大きい施設である（表-8参照）。便益が最も大きいW1以外にW5の補修優先度が高い場合にNPVが最大となった理由として、各施設の1回あたりの補修費用が関係していると考えられる。これに関して、表-7より、W5はW1と比べ、すべての補修工法において1回あたりの補修費用が大きいことがわかる。よって、補修期間を短縮するためにW5の各補修工法の中で最も補修費用の小さいP工法を行う場合においてNPVが最大になる結果となったと考えられる。ここで、W5においてP工法を行うためには、W5の補修優先度を高く設定する必要がある。したがって、

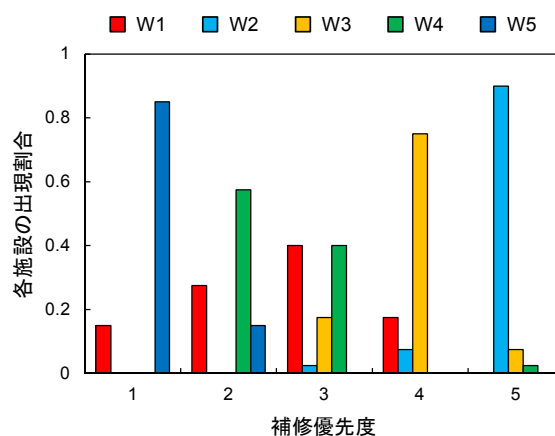


図-7 全年間予算シナリオにおいて各補修優先度における各施設の割合（Y港）

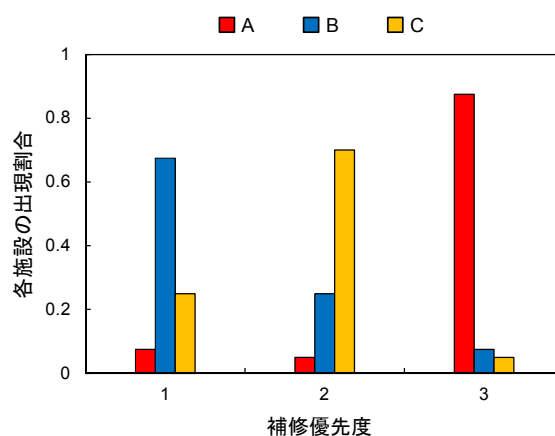


図-8 全年間予算シナリオにおいて各補修優先度における各施設の割合（T港）

年間予算が0.7億円以降の場合には、W5の補修優先度が最も高いシナリオにおいてNPVが最大になったと推察される。

ここで同表より、年間予算が0.2億円、2.9億円および3.7億円の場合にはW3よりもW2のほうが補修優先度が高い結果となることがわかる。W2について、補修費用はW3と大差なく、1年あたりの便益は1/4以下である。それにもかかわらずW2の補修優先度がW3よりも高い結果となった理由を以下に述べる。年間予算が0.2億円の場合には、予算が少なくすべての施設を補修することができない。すなわち補修優先度が1～2、もしくは1～3の施設しか補修することができない場合が多く、補修優先度が下位の施設についてはNPVの大小に影響を及ぼさない。年間予算が2.9億円および3.7億円の場合には、すべての施設に対して予防保全的な補修を行うことができる場合が多いため、複数の施設で補修時期年が重なり、補修が後回しになる施設が発生しても、比較的劣化の進行して

いない時期に補修を行うことが可能となる。そのため、1回あたりの補修費用の増加や補修期間中の便益の損失を抑えることが出来るので、各施設の補修優先度は施設全体の NPI に影響を及ぼしにくいと考えられる。

また図-7より、各年間予算を通して、補修優先度が1～3となる施設はW1, W4およびW5が多いことがわかる。これらの施設はY港の中で便益が比較的大きい施設である。また、補修優先度が4および5となる施設はW2およびW3が多く、これらの施設はY港の中で比較的便益の小さい施設である。これより、いずれの年間予算においても便益の大きい施設の補修優先度を高く設定することで予定供用期間中の全施設の NPI が最大になる可能性が高いといえる。

T港において、年間予算が0.1億円から1.4億円において NPI が最大となるのは、B→C→Aの順に補修優先度を高く設定したシナリオである。ここで、表-9より、B→C→Aという順番は便益が大きい順であることがわかっていいる。ただし、年間予算が1.5億円以上の場合に NPI が最大になる補修シナリオの中には、A, B, Cそれぞれの施設の補修優先度が最も高くなる場合がある。これは、T港はY港と比べ、各施設間において便益や各補修工法での1回あたりの補修費用の差が小さいため全体の NPI にも大きな差が出ず、補修シナリオ間の差異が小さくなったと考えられる。また、Y港と同様、すべての施設に対して予防保全的な補修を行うことによって1回あたりの補修費用や補修期間中の便益の損失を抑えることで、各施設の補修優先度が全施設の NPI に及ぼす影響が弱まったことも一因として考えられる。

また図-8より、各年間予算を通して、補修優先度が1, 2および3となる施設は、それぞれB, CおよびAが多い。これはT港の中で便益の大きい順番であり、Y港と同様便益の大きい施設の補修優先度を高く設定することで予定供用期間中の全施設の NPI が最大になる可能性が高いことがわかる。

6. 補修費用が最適な年間予算額に及ぼす影響

上記で述べたとおり、各港湾施設において最適な年間予算、すなわち年間予算の増加に対して平均 NPI の増加が止まるときの年間予算に差異が生じた。そこで、各港における各施設の1回あたりの補修費用が最適な年間予算額に及ぼす影響を検討した。

Y港では2.3億円、T港では1.2億円の年間予算で平均 NPI の増加が止まる理由として、平均補修費用の増加分と平均便益の増加分が等しい場合と、平均補修費用の増加が止まることにより平均便益の増加も止まり、結果的に平均 NPI の増加が止まる場合の2通りが考えられる。平均補修費用は、平均 NPI と同様に、10,000回の繰り返

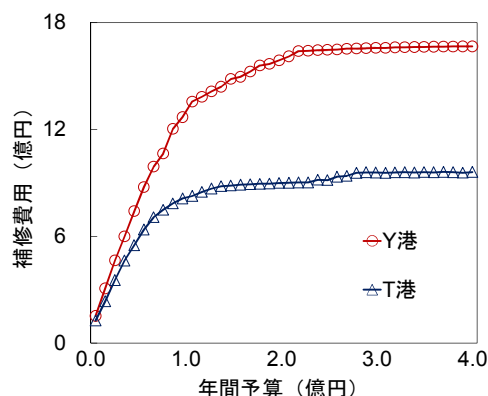


図-9 Y港およびT港における各年間予算での平均補修費用

し計算から算出された平均値である。ここで、図-9に、Y港およびT港の各年間予算における平均補修費用を示す。同図より、今回のシミュレーションにおいて、年間予算の増加にもかかわらず平均 NPI の増加が止まった原因は、平均補修費用の増加が止まったためであるといえる。平均補修費用の増加が止まるということは、既に補修を行うべき時期に補修を行うことができているということを意味する。つまり、補修時期年が重なる施設が少なく、年間予算の増加に伴う補修期間の短縮によって新たに補修を行うべき施設は少ない。

7. まとめ

本論文では、2つのモデル港湾において年間予算の制約条件および想定し得る全補修シナリオの下、モンテカルロシミュレーションを行いリサンプリングされた遷移率 P_x を用いて各施設の劣化進行予測を行い、各補修シナリオにおける予定供用期間中の全施設の NPI を算出し、各施設の補修優先度決定手法の構築に関する検討を行った。その結果、以下の結論を得ることができた。

- 1) Y港では2.3億円、T港では1.2億円より大きい年間予算において、年間予算の増加に伴う NPI の増加はみられない。
- 2) Y港およびT港において、 NPI が最大となる補修シナリオは、便益の大きい施設の補修優先度を高く設定した補修シナリオである。
- 3) 各施設の補修期間を短縮することによって全施設の補修費用の増加が止まる際の年間予算が、各港における最適な年間予算となる。

本論文では補修優先度を決定する指標として NPI を用いたが、今後の課題として、防災機能等の平常時の便益として考慮されていない指標を考慮すること、施設の劣化状況に対するばらつきや予測結果の精度に起因するリ

スクなどを指標として取り入れることが必要であると考えられる。また、遷移率分布を用いたモンテカルロシミュレーションと同様に、補修費用や便益をモンテカルロシミュレーションによって各施設に与え、様々な補修工法や便益の発生状況を表現することで、より実際の港湾に近い形でシミュレーションを行うことが可能になると考えられる。

謝辞：モデル港湾の点検データおよび便益検討データは国土交通省の港湾事務所より提供をいただきました。港湾事務所の関係各位に対してここにお礼申し上げます。また、前独立行政法人港湾空港技術研究所の高橋宏直氏から便益の計算手法について、一般財団法人港湾空港総合技術センターの宮井真一郎氏、兵頭武志氏から計算結果のとりまとめについて、それぞれ貴重なご助言をいただきましたことに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，2012.
- 2) 国土交通省：国土交通白書，2013.
- 3) 石田純一，森岡弘道，河村圭，宮本文穂：橋梁通常点検結果を用いた劣化予測式の作成と橋梁補修優先順位の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，2008.
- 4) 杉浦聡志，金森吉信，高木朗義，倉内文孝，森本博昭：リスク評価に基づいた道路施設の総合維持管理手法の開発，土木学会論文集 F4，Vol.67，No.4，I_103-I_112，2011.
- 5) 岩波光保，加藤絵万，川端雄一郎：維持管理を考慮した栈橋の設計手法の提案，港湾空港技術研究所資料，No.1268，2013.
- 6) 小牟禮健一，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，Vol.41，No.4，2002.
- 7) 小室禮健一，濱田秀則，横田弘，山路徹：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，2004.
- 8) 加藤絵万，岩波光保，横田弘：栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究，港湾空港技術研究所報告，Vol.48，No.2，2009.
- 9) 佐藤互，横田弘，橋本勝文，古谷宏一，加藤博敏：マルコフモデルにより劣化進行予測を行った係留施設のライフサイクルコスト分析，土木学会論文集 F4，Vol.67，No.4，pp.I_181-I_190，2011.
- 10) 古谷宏一，横田弘，橋本勝文，花田祥一：マルコフ連鎖モデルを用いた係留施設の劣化進行予測の信頼性評価，土木学会論文集 F4，Vol.67，No.4，pp.I_159-I_168，2011.
- 11) 貝戸清之，小林潔司：マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，336-355，2007.
- 12) 青木一也：確率的劣化予測手法を用いた最適補修戦略に関する研究，京都大学工学研究科博士論文，2006.
- 13) 佐藤互：塩害を受ける鉄筋コンクリート部材の維持管理上の変状限界に関する考察，北海道大学大学院修士論文，2012.
- 14) 山路徹，小牟禮健一，濱田秀則：塩害環境下に 15 年間暴露されたコンクリートの耐久性および表面被覆材による塩害防止効果，港湾空港技術研究所報告，Vol. 43，No. 2，2004.
- 15) 古玉悟，田辺俊郎，横田弘，浜田秀則，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，港湾空港技術研究所資料，No.1001，2001.
- 16) 港湾事業評価手法に関する研究委員会：港湾投資の評価に関する報告書 2011【第 2 版】，一般財団法人みなと総合研究財団，2012.
- 17) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編），2009.
- 18) 岩波光保，加藤絵万，川端雄一郎：港湾施設のアセットマネジメントの試行例，海洋開発論文集，第 26 巻，土木学会，2010.

(2014. 5. 19 受付)

Prioritization and Annual Budget for Efficient Maintenance of Mooring Facilities

Takuho TANI, Hiroshi YOKOTA, Katsufumi HASHIMOTO, Kohichi FURUYA and Shinichiro KITAZATO

It is essential to establish lifecycle management strategies under budgetary restriction in order to ensure performance of existing structures. This study discusses the prioritization procedure of repair based on the net present value (*NPV*). Two ports, having 5 and 3 mooring facilities, are focused in this study as a model case and their prioritization procedure and annual budget are evaluated. Deterioration progress of mooring facilities was predicted by using the Markov-chain model to calculate repair costs. After the repair costs were calculated, benefits of each facility were estimated. In this study, to consider the influence of budgetary restriction, annual budgets were set at 40 patterns. The *NPV* of each facility in the planned service life (50 years) was calculated from the repair costs and the benefits.

As the results, the *NPV* became maximum when the facility having large benefit is given priority to repair and the most suitable annual budgets of each port are the annual budgets when the repair costs are optimized.