

論文 棧橋上部工を対象とした補修優先度決定手法に関する検討

谷 拓歩^{*1}・横田 弘^{*2}・古谷 宏一^{*1}・北里 新一郎^{*3}

要旨: 大量のコンクリート構造物が設計供用期間を迎えつつある中、少ない予算でいかに効率的かつ効果的に維持管理をしていくかが大きな課題となっている。本論文では、複数の棧橋のコンクリート上部工を対象としてモンテカルロシミュレーションによりリサンプリングされた遷移率を用いて劣化予測を行い、様々な条件下で50年間の補修費用および便益から純現在価値を算出した。その結果、年間予算が大きくなるに従い各施設の補修優先度に関わらず純現在価値は増加し、そのばらつきは減少した。また、同予算の場合には便益の大きい施設の補修優先度を高く設定することにより、施設群の純現在価値を増加させることができた。

キーワード: 棧橋上部工, 純現在価値 (NPV), 補修優先度, 劣化予測

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していくことが、社会経済の持続可能な発展において、非常に重要である。これに対し、公共事業関係費は年々削減の一途をたどっている¹⁾。したがって、これらの膨大な施設を短期間で全て補修・更新を行うことは、財政の観点から非常に困難であると推測される。

これらの状況を鑑みると、社会基盤施設の性能や機能を所定の期間中維持し、できる限り補修・更新に必要な費用を低減するために、施設の利用実態を考慮した効率的かつ効果的な維持管理戦略が必要となる。従来の維持管理では施設の劣化状況のみで補修優先度を決定する方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、施設の劣化状況と利用実態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。

社会基盤施設において広く用いられている材料はコンクリートであり、コンクリート構造物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²⁾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、内田ら³⁾は新幹線の高架橋を対象として、表層コンクリート品質を指標に補修優先度を決定する補修優先度決定手法を提案している。しかしながら、港湾コンクリート構造物を対象とした補修優先度に関する研究は希少である。港湾構造物は、他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⁴⁾。例えば、棧橋上部工(梁と床版)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。

以上の背景に基づき、本論文では棧橋のコンクリート上部工を対象とする効率的な維持管理手法の構築に関する検討を行った。予算および補修の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考察を行った。

2. 概要

2.1 対象施設

Y港の5つの施設(W1~W5)を対象として補修優先度の決定方法に関する検討を行った。Y港は国際拠点港湾として重要な役割を担っている。表-1に各施設の主要なデータを示す。なお、表中の初期DPは予定供用期間の初年度における各施設のDPである。

2.2 劣化進行予測

まず、マルコフ連鎖モデルを用いて劣化進行予測を行った。式(1)により表現される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。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)~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。なお、既往の研究⁵⁾において、各劣化度間の遷移率 P_x をすべて等し

*1 北海道大学大学院 工学院 (学生会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院 博士(工学) (正会員)

*3 一般財団法人 港湾空港総合技術センター

いと考えることに大きな誤りはないとされているので、各劣化度間の遷移率 P_x はすべて等しいと仮定した。

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

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⁶⁾。 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。

2.3 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⁷⁾を用いる。これは、Y港の5つの施設は比較的新しく、適切な遷移率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。これより、遷移率分布に従う遷移率をリサンプリングし、各施設の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のばらつきを持つ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。

2.4 補修費用の算出方法

コンクリート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、事後保全型および大規模補修型の3種類とした。表-2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（P工法）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⁸⁾で、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ている。さらに、予防保全型補修を行う際の DP の推奨値として $1.7 \leq DP < 2.0$ としているので、本論文においてもこの値を用いる。また、予定供用期間中に表面被覆を初め

表-1 各施設のデータ

	W1	W2	W3	W4	W5	
施工年	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	

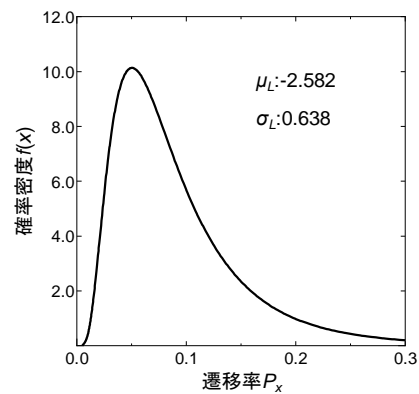


図-1 我が国の栈橋式係留施設の遷移率分布の近似

表-2 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80%) + 表面被覆 (100%)	$2.0 \leq DP < 2.3$
C2	断面修復 (小60%・大20%) + 表面被覆 (100%)	$2.3 \leq DP < 2.6$
C3	断面修復 (小20%・大60%) + 表面被覆 (100%)	$2.6 \leq DP < 3.0$
C4	断面修復 (大80%) + 表面被覆 (100%)	$3.0 \leq DP < 3.5$
R	撤去・新設	$3.5 \leq DP \leq 4.0$

で行う場合は、その後の劣化速度が低減されることを考慮し、遷移率 P_x は補修前の1/2の値になるとした⁹⁾。

事後保全型補修（C1～C4工法）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 $d \sim a$ の様々な部材が存在する。そのため、小断面修復と大断面修復を組み合わせる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。なお、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。

大規模補修（R工法）では、対象上部工をすべて撤去・新設するとした。

次に、各補修工法の単価を既往の研究⁹⁾を基に設定する。表-3に各補修工法の単価を示す。また、各施設の上部工の表面積とコンクリートの体積を表-4に示す。本論文では、補修単価に各施設の上部工の表面積（大規模補修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。

2.5 便益の算出方法

港湾投資の評価に関する既定の手順¹⁰⁾に従って各施設の便益を推定した。なお、定量的に把握できる便益のうち、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貨物量から、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つに分類される。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。

3. NPVを用いた補修優先度決定手法

3.1 NPVの算出方法

式(3)に示すように各年の便益から補修費用を引いたものを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、 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。

予定供用期間である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。そのため、1つの施設にのみ補修費用が集中し、施設群の維持管理手法としては適当ではない。したがって、施工の長期化を避けるために、他の施設と

表-3 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	

表-4 各施設の補修対象部位（梁と床版）の表面積とコンクリート体積

	W1	W2	W3	W4	W5
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

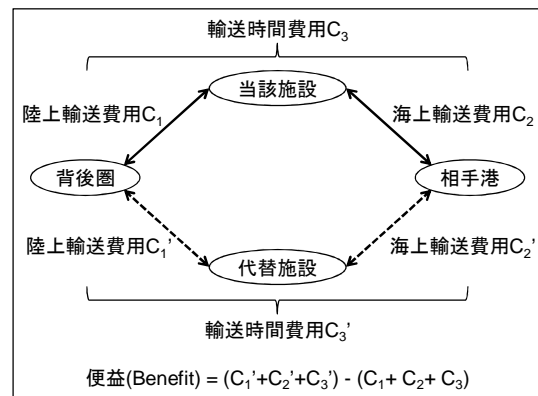


図-2 便益の計算方法の概要

比較して補修費用が小さい予防保全型補修を適用した。しかしながら、複数の施設の補修時期年が重なった場合には、優先度の高い施設を先に補修することとした。なお、 $DP \geq 3.0$ 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）¹¹⁾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。

3.2 年間予算の上限設定

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¹²⁾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5施設を対象としているので年平均の補修費用も約半分になると考え、1億円を年間予算として設定することとしたが、年間予算の大小が各施設の補修優先度によるNPVに与える影響を検討するため、年間予算を0.5億円から4億円まで、0.5億円刻みで8通りの値を設定した。

3.3 補修優先度シナリオの設定

各施設の補修優先度シナリオに関して、5つの施設で考えられる補修順序の全ての組み合わせは $5! (=120)$ 通りである。この全ての補修優先度シナリオについて NPV を計算した。

3.4 補修期間中の便益の設定

補修期間中の便益の損失割合（通常時の便益の何%が減少するか）は、補修工法によって異なると仮定した。便益の発生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% とした。

3.5 モンテカルロシミュレーションによる NPV 計算

上記の設定条件のもと、モンテカルロシミュレーションにより、遷移率をリサンプリングして各施設に与え、現在（2013年）から50年間の全施設の NPV を計算する作業を 1,000 回繰り返して、各補修優先度シナリオでの NPV の平均値を算出した。ここで、予定供用期間 50 年の各施設の劣化予測を行う際には、初年度の DP は各施設の点検データから得られた劣化度部材割合を基に算出した初期 DP の値（表-1）とした。

以上より、120 通りの補修順番の組み合わせの中で、NPV が最も大きくなる補修順番の組み合わせを各施設の維持管理を行う上で最も効率的な補修優先度シナリオとした。また、年間予算の上限を変化させて同様の計算を行い、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。

4. 補修費用の計算結果

表-5 に各施設の補修費用の計算結果を示す。補修単価は各施設で同等であるので、上部工の面積（大規

表-5 補修費用の計算結果（億円）

	W1	W2	W3	W4	W5
P	1.7	1.8	1.9	2.1	4.2
C1	5.7	6.1	6.6	7.1	14.5
C2	6.3	6.7	7.3	7.8	15.9
C3	7.4	7.8	8.5	9.2	18.7
C4	7.9	8.4	9.2	9.9	20.1
R	7.4	8.2	6.4	11.2	38.2

表-6 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

模補修の場合は体積)によって補修費用が変化する。つまり、表-4 と表-5 を比較すると、上部工のコンクリート表面積（大規模補修の場合は体積）が大きい施設ほど、1 回あたりの補修費用が大きい。特に W5 は、他の施設と比べて上部工の表面積や体積が大きいので、補修費用も5つの中で最も大きくなった。

また、W4 および W5 では R 工法の補修費用が最も大きくなった。しかしながら、W1~W3 は R 工法よりも C4 工法の補修費用の方が大きくなっている。これは、R 工法は上部工の表面積の大きさによって補修費用が決まるが、C4 工法は上部工の体積によって補修費用が決まるためであると考えられる。

5. 便益の計算結果

各施設の取扱い貨物の種類、過去5年間の貨物量の平均および便益の計算結果を表-6 に示す。同表より、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、便益については、最も大きいのは W1、最も小さいのは W2 である。しかしながら、W3、W4 および W5 を見ると、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つの施設の中で最も小さいことがわかる。これは、完成自動車はトレーラーを用いて輸送するが、その場合のトレーラー1台あたりの輸送費用と、コンテナ1個あたりの輸送費用を比較した場合、トレーラー1台あたりの輸送費用の方が小さいためである。例えば、輸送距離 100km までの場合、20ft コンテナ1個は 64,410 円、トレーラー1台は 45,400 円である。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 の背後圏を他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かったことも便益が小さくなった一因として考えられる。

6. 予算上限額が NPV の平均とばらつきに与える影響

図-3 に、各年間予算において 120 通りの補修優先度シナリオで算出した NPV の平均および変動係数を示す。さらに、120 通りの補修優先度シナリオを、どの施設の補修優先度が最も高いかによって5つのグループに分類した。例えば、W1 の優先度が最も高いシナリオを 1 グループ、W5 の優先度が最も高いシナリオを 5 グループとし、それらのグループ内の NPV の平均値を算出した。その結果も合わせて図-3 に示す。この図より、年間予算が大きくなるに従って平均 NPV

が大きくなっていることがわかる。年間予算が 0.5 億円の場合の平均 NPV は 2,446 億円、4 億円の場合の平均 NPV は 2,855 億円であり、その差は 409 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ので供用停止による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を行うことができるため予定供用期間 50 年中の総補修費用が小さくなったことが推察される。

また、同図の NPV の変動係数に着目すると、年間予算が大きくなるに従って変動係数が小さくなっていることがわかる。これによると、年間予算が少ない場合には、施設の補修優先度の設定により、NPV が大きくばらつくことを示している。この傾向は年間予算が 0.5 億円、1 億円および 1.5 億円の場合に顕著であり、変動係数がそれぞれ 0.044、0.027、0.022 となっている。理由としては、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、劣化が進行し $DP \geq 3.0$ となって長期間供用中止となり便益の発生がなくなる。また、各施設によって便益の大きさが大きく異なるため、施設の補修優先度の設定の違いによって NPV に大きな差異が発生したと推察される。

一方で、年間予算が大きい場合には補修期間が短くなるので、長期間便益が発生しないという状況は少なくなる。ゆえに、施設の補修優先度の設定の差異による NPV の値のばらつきは小さくなったと考えられる。年間予算が 2 億円から 4 億円では、すべての場合において変動係数は 0.015 以下となり、年間予算が 1.5 億円以下の場合と比べて非常に小さい結果となった。

ここで図-3 より、120 通りの補修優先度シナリオを 5 グループに分類した場合の傾向に着目すると、年間予算が 1.5 億円以下の場合には最大 NPV と最小 NPV の差が 100 億円以上あるが、年間予算が 2 億円以上の場合には、最大 NPV と最小 NPV の差が 50 億円以下となっている。すなわち、年間予算が少ない場合にはグループ間のばらつきが大きく、年間予算が増えるに従ってグループ間のばらつきは小さくなることがわかる。

以上より、本論文が対象とした 5 つの施設においては、年間予算が大きい場合にはいずれの補修優先度シナリオを選択しても NPV には大きな差は出ない。しかしながら、年間予算が少ない場合には補修優先度シナリオによって NPV が大きくばらつくため、適切な補修優先度シナリオを選択する必要がある。さらに NPV のばらつきは、年間予算が 1.5 億円以下の場合とそれより大きい場合とで、その大きさが著しく異なる結果となった。

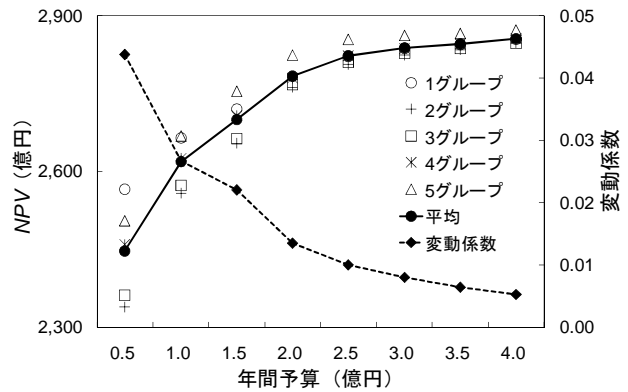


図-3 各予算における全体およびグループ毎の NPV の平均と変動係数

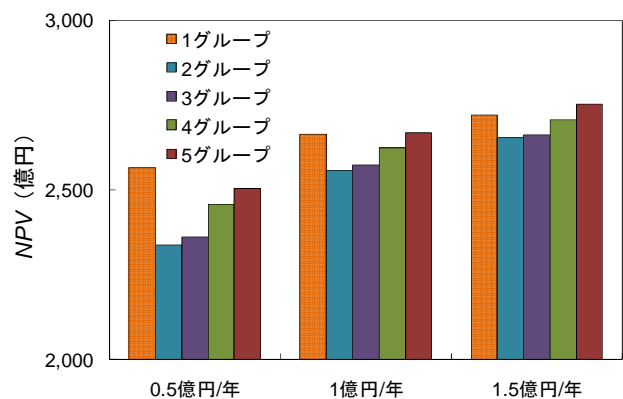


図-4 年間予算が 0.5、1 および 1.5 億円におけるグループごとの各施設の NPV

7. 各予算内での最適な補修優先度決定手法

図-4 に、年間予算が 0.5、1 および 1.5 億円の場合のグループごとの NPV を示す。同図より、年間予算が 0.5 億円の場合には 1 グループの NPV の平均が最も大きいことがわかる。また、図には年間予算が 1.5 億円の場合までの結果のみ示しているが、年間予算が 1 億円以上の場合にはすべての年間予算において 5 グループの NPV の平均が最も大きくなる結果となった。しかしながら、年間予算が 1 億円の場合の NPV は W1 が 2,665 億円、W5 が 2,669 億円であり、1.5 億円の場合は W1 が 2,721 億円、W5 が 2,754 億円なので、その差は小さい。ここで、1 グループは W1 の優先度が最も高い補修優先度シナリオ 24 通りで、5 グループは W5 の優先度が最も高い補修優先度シナリオ 24 通りである。表-6 より、W1 は最も便益が大きく、W5 は 2 番目に便益が大きい。よって、便益の大きい 2 施設の補修優先度を高くすることで、いずれの年間予算においても NPV を最大化することができる結果となった。また、最も便益が小さいのは W2 であるが、W2 の補修優先度が最も高い 2 グループはいずれの年間予算においても NPV が最も小さい結果となった。これは、P 工法や C1 工法など比較的劣化が進んでいない段階で補修を

表-7 0.5 億円/年における NPVの変動係数

グループ	1	2	3	4	5	全体
変動係数	0.017	0.022	0.027	0.033	0.030	0.044

行う場合には、補修期間中の便益の損失割合が小さいためであると考えられる。特に、P 工法では補修期間中も便益は平常時と同様に発生するとした。すなわち、補修優先度の高い施設は予定供用期間（50 年）にわたって予防保全的な維持管理を行うことができるので、概ねすべての期間でその施設の便益は発生し続ける。そのため、便益の大きい施設の優先度を高くすることで、施設全体の 50 年間の NPV が大きくなるものと考えられる。

また表-7 に、年間予算が 0.5 億円の場合の各グループおよび全体の変動係数を示す。グループ間で最も変動係数が大きいのは 4 グループでありその値は 0.033 であるが、この値は全体としての変動係数 0.044 よりも小さい。すなわち、全シナリオの中から最適な補修優先度シナリオを選択するよりも、5 つにグループ分けしたものを対象として最適な補修優先度シナリオを検討することで最も重視すべき施設を決定することができ、効率の良い維持管理が可能となる。

以上より、便益の大きい施設の優先度を高く設定することで、全体としての NPV は大きくなるが、年間予算が少ない場合には補修優先度シナリオの違いによって NPV に大きく差が出る場合がある。そのため、年間予算が少ない場合には、綿密な計画の下、適切な補修優先度シナリオを決定する必要がある。

7. まとめ

本論文では、年間予算の制約条件および120通りの補修優先度シナリオの下、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 を用いて各補修優先度シナリオにおける50年間の全施設のNPVを算出し、効率的な維持管理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) 年間予算が1.5億円より小さい場合には補修優先度シナリオ間のNPVのばらつきが大きいので、各施設の補修優先度を吟味する必要がある。
- 2) 複数の施設群の維持管理を行う場合には、最も補修優先度の大きい施設に対して予防保全的な維持管理を行うべきである。
- 3) 便益の大きい施設から順に補修優先度を高く設定することで、いずれの年間予算においても施設群のNPVが大きくなる傾向が見られる。

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、北海道大学の橋本勝文助教からは論文のとりまとめについて、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) 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.
- 3) 内田雅人，松尾賢，岸利治：鉄筋コンクリート構造物の効率的な維持管理手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，2012.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.