

NPV を用いた係留施設の補修優先度決定手法に関する研究

Repair Prioritization based on the NPV for Mooring Facilities

北海道大学大学院工学院 ○学生員 谷 拓歩 (Takuho Tani)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 横田 弘 (Hiroshi Yokota)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 橋本 勝文 (Katsufumi Hashimoto)

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。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。また、建設業界では人手不足が深刻な問題となっている。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、財政あるいは人材の観点から困難になっていくと推測される。

これらの状況の下、社会基盤施設の性能や機能を所定の期間維持しながら、できる限り補修・更新に必要な費用を低減するためには、効率的かつ効果的な長期の維持管理戦略が必要となる。これに関して、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に補修・更新するための財源および時間を充当することが適切でない場合があり、補修優先度を従来とは異なる客観的な指標を用いて適切に決定することが望まれる。つまり、施設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。しかしながら、港湾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。島国である我が国において港湾施設は非常に重要な役割を果たしている。2013年のデータによると、我が国の貿易量に占める海上貿易の割合は金額ベースで76.7%、重量ベースでは99.7%となっている¹⁾。さらに港湾施設、特に係留施設は、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。例えば、栈橋上部工（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ことから、適切な補修優先度の決定プロセスは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、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、劣化速度を表す遷移率の分布および補修シナリオ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とする）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

2.1 対象モデル港

Y港の5つの係留施設（W1～W5）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。表-1にY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いるのに対して、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。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。

2.2 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。

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

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^2 を用いた。 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

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 | — |

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 劣化進行予測に用いる遷移率分布

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²⁾およびそれを元に新たに作成した遷移率分布を用いた。これは、Y港の5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。既往の研究で用いている遷移率データ²⁾は、全国の56の栈橋を調査した結果に基づくものであり、その遷移率分布は対数正規分布に近似できるとされている。

本論文では、まず56の栈橋を経過年数別に分類し、それぞれの遷移率分布を作成した。これにより、劣化進行予測を行う際、経過年数ごとに遷移率分布を変えてシミュレーションを行うことが可能となる。例えば、今後50年間の劣化進行予測を行う場合、最初の10年間(1~10年目まで)は1~10年経過の遷移率分布を適用し、次の10年間(11~20年目まで)は11~20年経過の遷移率分布を用いる。経過年数別の遷移率分布、分布の平均値および分布パラメータ μ と σ を図-1に示す。分布の適合検定には1標本K. S. 検定を用いた。検定の結果、いずれの分布も有意水準20%で対数正規分布に適合する結果となった。同図より、経過年数が短いほど遷移率分布の平均値が大きい傾向があることがわかる。これは、経過年数の長い施設は既に供用中止となり調査の対象とはならないため、遷移率が小さいまま長期間供用されている施設のデータが多いためと考えられる。また、遷移率分布の平均値の増減とパラメータ μ の増減の傾向が類似していることがわかる。そこで、パラメータ σ は変化させず、 μ のみを変化させて遷移率分布を作成した(図-2)。なお、パラメータ σ の値は、既往の研究²⁾で得られた56栈橋全体の遷移率分布の値($\sigma=0.638$)である。ここで、遷移率 P_x は0以上1以下の値であるが、現実的には0.5を超えるものは稀である。したがって、本論文では既往の研究で得られた遷移率分布のパラメータ $\mu=-2.582$ から、遷移率分布の平均値が0.5を初めて超える $\mu=-0.8$ までを検討の対象とした。これにより、適切な遷移率分布を用いることで劣化速度の上昇リスクを考慮したシミュレーションが可能となる。

2.4 1回あたりの補修費用の算出方法と結果

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-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補修適用 DP を示す。各補修工法の適用範囲は既往の研究³⁾を基に設定した。

予防保全型補修(P)では補修対象面積の70%に表面被覆を行うとした。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_x は補修前の1/2の値になるとした。

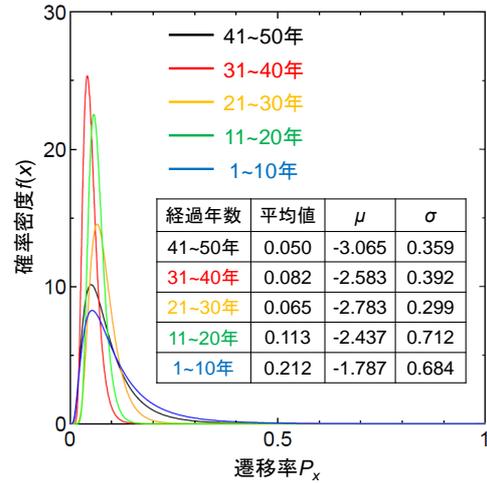


図-1 経過年数別の遷移率分布

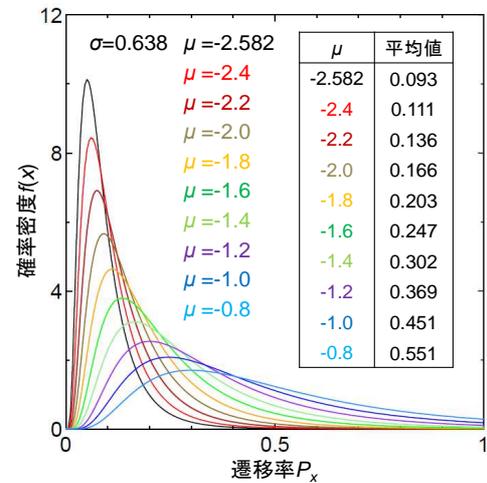


図-2 μ のみを変化させて作成した遷移率分布

表-2 補修工法とその補修適用 DP

| 補修工法 | 補修適用 DP |
|--|------------------------|
| P (予防保全型) 表面被覆 (70%) | $1.7 \leq DP < 2.0$ |
| C1 (事後保全型) 断面修復 (小70%) + 表面被覆 (70%) | $2.0 \leq DP < 2.3$ |
| C2 (事後保全型) 断面修復 (小45.5%・大24.5%) + 表面被覆 (70%) | $2.3 \leq DP < 2.6$ |
| C3 (事後保全型) 断面修復 (小10.5%・大59.5%) + 表面被覆 (70%) | $2.6 \leq DP < 3.0$ |
| C4 (事後保全型) 断面修復 (大70%) + 表面被覆 (70%) | $3.0 \leq DP < 3.5$ |
| R (大規模補修型) 撤去・新設 | $3.5 \leq DP \leq 4.0$ |

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。

大規模補修(R)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⁴⁾を基に設定した。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。

表-3にY港の各施設の1回あたりの補修費用の算出結果を示す。同表より、全施設のなかでW5の補修費用が最も大きい結果となった。

2.5 便益の算出方法と結果

港湾投資の評価に関する既定の手順⁹⁾に従って各施設の便益を推定した。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。

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。

表-4にY港の各施設の1年あたりの便益の算出結果を示す。同表より、全施設のなかでW1およびW5の便益が大きいことがわかった。

2.6 NPVおよびDP_{ave}の算出方法

(1) 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により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（本論文では4%）である。

また、各施設の1年ごとのDPの値を予定供用期間にわたって足し合わせ、予定供用期間から補修期間を差し引いた年数で割った値をDP_{ave}として式(4)のように算出した。

$$DP_{ave} = \left(\sum_{n=1}^{50-x} DP(n) \right) / (50-x) \quad (4)$$

ここで、DP_{ave}：平均DP、DP(n)：n年経過時のDP、x：補修期間である。

予定供用期間50年間のNPVおよびDP_{ave}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り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。しかしながら、複数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補修することとした上で、DP≥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≥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。

(2) 諸条件の設定

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する必要がある。本論文では0.1億円から8.0億円まで、0.1億円刻みで80通りの値を設定した。また、Y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)

表-3 各施設の1回あたりの補修費用（億円）

| 施設 | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 |
|----|-----|-----|-----|------|------|
| P | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 3.5 |
| C1 | 6.0 | 6.4 | 6.9 | 7.5 | 15.2 |
| C2 | 6.9 | 7.3 | 8.0 | 8.6 | 17.5 |
| C3 | 8.2 | 8.7 | 9.5 | 10.2 | 20.7 |
| C4 | 8.5 | 9.1 | 9.9 | 10.7 | 21.7 |
| R | 7.4 | 8.2 | 6.4 | 11.2 | 38.2 |

表-4 各施設の1年あたりの便益（億円）

| 施設 | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 |
|----|------|-----|-----|------|------|
| 便益 | 57.4 | 1.8 | 7.5 | 28.2 | 41.2 |

通りである。このすべての補修シナリオについてNPVおよびDP_{ave}を計算した。さらに、補修期間中の便益の損失割合は、補修工法によって異なると仮定した。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。

(3) モンテカルロシミュレーションによる計算

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各分布から遷移率を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およびDP_{ave}を計算する作業を5,000回繰り返し、その平均値を各補修シナリオのNPVおよびDP_{ave}として算出した。また、全シナリオの平均値を平均NPVおよび平均DPとした。

3. NPVに基づく最適な補修優先度

パラメータμのみを変化させて作成した遷移率分布10通り（図-2）を用いたシミュレーションの結果、全800通りのシミュレーション（遷移率分布10通り×年間予算80通り）のうち、NPVが最大となる補修シナリオで最も高い補修優先度にある施設の出現割合は、W5：79%、W1：20%、W4：1%、W2およびW3：0%となった。W5およびW1は全施設のなかで便益が大きい施設であることから、便益の大きい施設の補修優先度を高く設定することで全施設のNPVを最大化することができる場合が多いといえる。しかしながら、W5はW1よりも便益が小さいにもかかわらず、出現割合は最大である。これは、W5の方がW1よりも1回あたりの補修費用が大きいと考えられる。つまり、補修期間を短縮するために、W5に対する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ことがわかる。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、W5の補修優先度が最も高いシナリオにおいてNPVが最大になり、W5の出現割合が最大になったと推察される。

4. 年間予算の増加に伴う平均NPVおよび平均DPの変化

図-3に年間予算の増加に伴う平均NPVおよび平均DPの変化を示す。同図より、いずれの遷移率分布においても、年間予算の増加に伴い平均NPVが増加してい

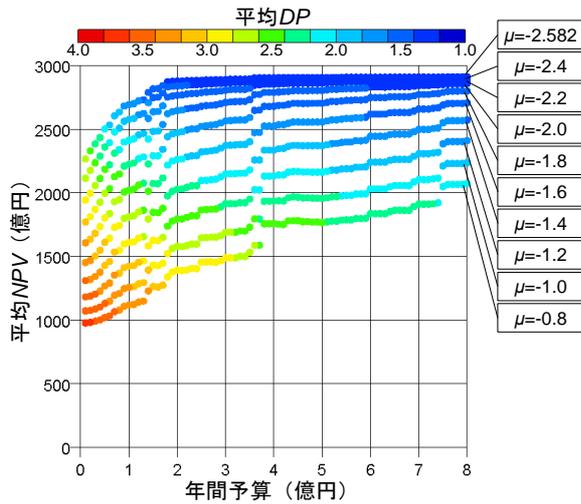


図-3 年間予算の増加に伴う平均 NPV および平均 DP の変化

くことがわかる。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 年間での総補修費用の増加を抑えることができたためと考えられる。また、 μ の値が大きい遷移率分布では、年間予算がある値を超えると平均 NPV の増加が頭打ちになると同時に補修費用が一定になることが確認された。これより、 μ の値が大きい遷移率分布では劣化速度が小さい傾向があるため、ある年間予算以降では補修を行うべき時期に補修を行うことができ、年間予算を増やしても補修に使われることはない、年間予算の増額は必要ないと考えられる。

さらに、いずれの年間予算においても μ の値が増加するに従って平均 NPV が減少していることがわかる。 μ の値が増加することによって各施設の遷移率が大きくなる確率が上昇して劣化の速度が大きくなる傾向がある。このため、施設の補修にかかる費用が増加することおよび補修期間中の便益の損失額が大きくなったことで平均 NPV が減少したと考えられる。

次に、平均 DP の変化に着目すると、年間予算が増加するに従って平均 DP が減少していくことがわかる。これは、年間予算が増加すると、補修すべき施設 ($DP \geq 1.7$ となっている施設) に対して補修を行うことができ、補修後にその施設の DP が 1.0 になるためである。また、同図より、 μ の値が大きい場合には、同じ年間予算でも平均 DP が大きいことがわかる。これは、 μ の値が大きい場合には劣化の進行が速い場合が多く、DP の増加も速くなるためである。また、それによって補修が長期化し、補修優先度の低い施設は補修されずに DP が増加し続けていくことも一因と考えられる。

以上より、遷移率分布、つまり施設群の劣化速度および施設群が維持すべき平均 DP を設定し、平均 NPV の増加が少なくなるときの年間予算を知ることができれば、各港における最適な年間予算を決定することができる。

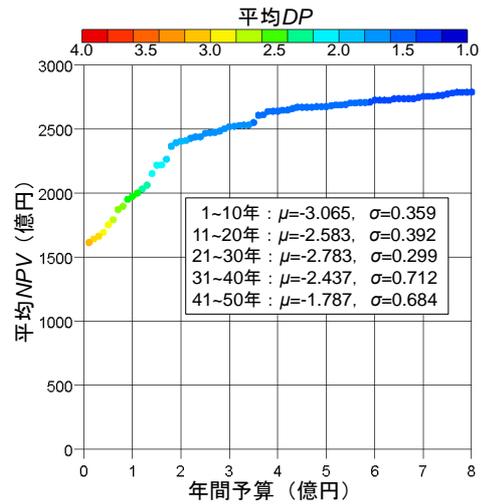


図-4 経過年数別に異なる遷移率分布を用いた場合

5. 経過年数別の遷移率分布によるシミュレーション

図-4 に、経過年数別に異なる遷移率分布を用いた場合のシミュレーション結果を示す。図-3 および図-4 より、図-4 の結果は図-3 の $\mu=-1.8$ の場合のシミュレーションとほぼ同じ結果であることがわかる。これより、遷移率の経過年数を考慮したシミュレーションを行いたい場合には、 $\mu=-1.8$ の遷移率分布を汎用的に用いてシミュレーションを行えばよいことがわかる。

6. まとめ

本論文で得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 便益の大きい施設、もしくは 1 回あたりの補修費用が大きい施設の補修優先度を高くすることで、施設群全体の NPV を最大化できる。
- 2) 年間予算の増加に伴う平均 NPV および平均 DP の変化から、各港における最適な年間予算を決定することができる。
- 3) 経過年数別に異なる遷移率分布を用いるシミュレーション結果は、 $\mu=-1.8$ の遷移率分布を用いたシミュレーション結果とほぼ同じである。

参考文献

- 1) (一社) 日本船主協会：海運統計要覧 2013
- 2) 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.
- 3) 古玉悟，田辺俊郎，横田弘，浜田秀則，岩波光保，日比智也：棧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.
- 4) 加藤絵万，岩波光保，横田弘：棧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.
- 5) 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.