

港湾施設の維持管理における LCM(ライフサイクルマネジメント)の考慮 ～棧橋の点検結果による対応策の試行的検討～

AN ATTEMPT TO MAINTAIN THE HARBOR FACILITIES BASED ON LIFE CYCLE MANAGEMENT TECHNIQUE

宮島正悟¹・浅見靖伸²・東方真次³・澤田隆志⁴
Shogo MIYAJIMA, Yasunobu ASAMI, Shinji TOHO and Takashi SAWADA

¹正会員 工修 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所
(〒457-0833 名古屋市南区東又兵ヱ町1-57-3)

²国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所
(〒457-0833 名古屋市南区東又兵ヱ町1-57-3)

³国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾事務所 (〒455-8545 名古屋市港区築地町2)

⁴国土交通省 中部地方整備局 港湾事業課 (〒455-8545 名古屋市港区築地町2)

This paper attempts to incorporate life cycle management technique in the process to maintain the harbor facilities. Since deterioration will force the pace in many harbor facilities, it is necessary to implement optimal maintenance strategy. Taking steel pipe piles of pile-supported wharves for example, some of the piles need repair because of their severe circumstances against corrosion. It is important to minimize the expected cost during the extended lifespan of the structure to select an appropriate repair method. In this paper we predict the degree of corrosion on steel piles from the result of site inspection and estimate the expected cost to repair the predicted deteriorated area on the piles.

Key Words : *life cycle management, harbor facilities, pile-supported wharf, steel pipe pile, maintenance, corrosion, deterioration, repair method*

1. はじめに

我が国の港湾では、他の社会資本と同様に1960年代の高度経済成長期の港湾取扱貨物の著しい伸びに対応するために大量の施設が整備された。既に建設後40年以上を経た構造物も多く、今後老朽化した構造物が急速に増加することが予想されている。貿易貨物の物流拠点として地域経済を支え産業の国際競争力を確保する重要な役割を果たす我が国の港湾にとって、安定的で安全な港湾施設の機能を確保していくことが社会の要請に応えていくための使命である。社会資本に係る財政制約の厳しさが増す中、使命を果たしていくためには、急激に進行する港湾施設の老朽化に対応して適切に維持管理を行い、既存施設をより効率的に活用していくことが重要となる。

国土交通省港湾局が2005年5月に作成した「港湾の技術開発にかかる行動計画」¹⁾においても、重点的に取り組むべき技術開発の一つとして、社会基盤の整備・維持管理の効率化やコスト削減を目的とし

て港湾におけるアセットマネジメントの推進が掲げられている。港湾におけるアセットマネジメントはまだその緒に着いたばかりであり、施設の所要の機能を確保しつつ、建設から維持管理・補修に至る全体費用であるライフサイクルコスト（以下「LCC」）の最小化や、港湾施設の有効活用および適切な補修等の対処による構造物の延命化を実現するライフサイクルマネジメント（以下「LCM」）の確立に向けたアプローチが、研究的・行政的の両側面から協調して進められている。研究的側面からのアプローチとしては、港湾施設に関するLCM（以下「港湾LCM」）の概念を取り入れた性能照査や維持管理戦略等の研究が進められており、その現状については横田^{2),3)}が報告している。行政的側面からのアプローチとしては、技術基準⁴⁾やマニュアル⁵⁾等に基づいて国有港湾施設の点検診断を行い、必要な対策が進められている。性能設計の考え方を導入した技術基準の全面的な改訂や、港湾LCMに基づく維持管理の実施を目的としたマニュアルの改訂も進めら

れているところである³⁾。

本稿では、港湾LCMの概要とともに、LCMを考慮した維持補修方策についての試行的検討として、栈橋下部工の鋼管杭の局部腐食に関する点検結果に基づく検討事例について報告する。

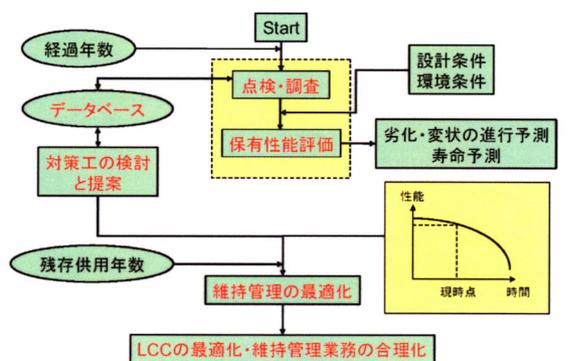
2. 港湾施設の維持管理

まず、港湾LCMの概要と、その取り組みとして行われている点検診断の状況を紹介する。

(1) 港湾LCMの概念

我が国の港湾施設のストックは1998年度時点で約27.5兆円に達していると報告されている。過去に実施された係留施設の維持管理費用（維持補修および更新に要する費用）を基に将来必要な維持管理費用を推計した最新の結果⁶⁾によれば、港湾事業費の伸び率を最近の傾向に従って毎年2%減と仮定すると、2030年度には維持管理費用が港湾事業費の約8割に達すると推算されている。極力費用を抑え、計画的かつ戦略的に維持管理を実施していくことが不可欠であり、港湾LCMの実現が求められる。

横田²⁾による港湾LCMの概念図を図-1に示す。点検・調査は2段階に分けられる。構造物や構造要素の状態を変状度ごとに区分するための目視主体の点検（一次点検）、あるいはそれを受けて潜水士等によって行う詳細な点検（二次点検）の結果から、施設全体の変状度をバース等の単位ごとに評価し、将来の変状度の推移予測から、当該施設が必要な性能を維持していくのに最も合理的な対策工法およびその実施時期を設定していくことになる。



(横田²⁾による)

図-1 港湾LCMの概念

(2) 港湾施設の特徴と点検・調査の重要性

港湾施設の維持管理上の特徴としては、構造物の大半が海中や地中にあり日常的な維持管理が容易に行える環境にはないことに加え、多くの構造要素があり劣化・変状の進展が複雑に関係しあっていることが挙げられる。また、港湾法第54条の規定に基づいて、国が建設した国有港湾施設であっても、地方公共団体等の港湾管理者に施設の管理を委託してお

り、施設の建設・管理に複数の機関が携わることも大きな特徴である。

構造物の点検・調査は、構造物の現況を知る上で不可欠の作業であり、港湾LCMにおいても出発点となる重要な項目である。点検・調査を効率的に行うには、重要度の高い変状を対象として選定することが必要である。構造形式ごとに重要な変状を確実に捕捉することで、比較的軽微な段階の変状で留めることもできると考えられる。

港湾構造物に限らず、構造物では過度の劣化や変状が生じてから対策を講じると費用や工事規模が大きくなる。現状では、国有港湾施設の点検診断は構造物の損傷発見に重きを置いており、維持・補修対策は損傷が発生してから行う事後保全である場合が多い。構造物に劣化や変状が顕在化する前から、適切な対策を講じる予防保全を行うことが理想であり、それによって港湾施設を安全な状態に保てるだけでなく、LCCの縮減も期待できる。

3. 栈橋下部工の調査事例と腐食原因の推定

ここでは、栈橋下部工の鋼管杭における腐食量調査の結果と、対象施設に見られた局部腐食の原因の推定について紹介する。

(1) 対象施設と腐食対策

本稿では、港湾構造物の中でも特に維持補修の検討の必要性が高い鋼構造物である栈橋を検討対象としている。図-2に対象施設の標準断面図を示す。

対象施設は、連続2バースの直杭式横栈橋であり、

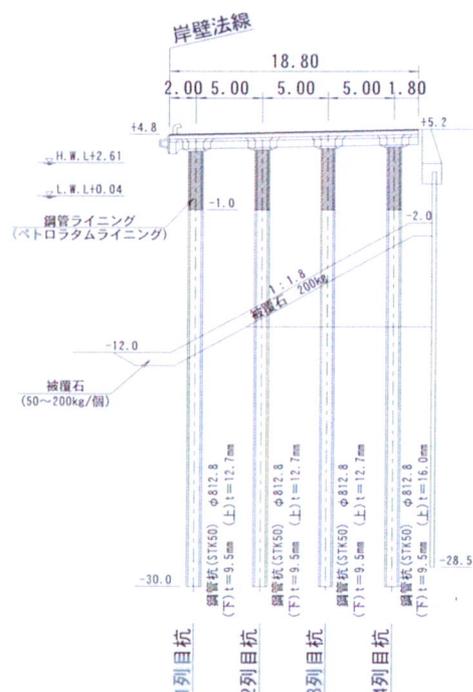


図-2 対象施設の標準断面図

水深-12m, 2バースの総延長約500mで, 建設後30年程度経過した施設である. 鋼管杭の腐食対策としては, 設計当時では標準であった腐食速度を考慮に入れた鋼材肉厚とする設計(腐食しろの考慮)による対策が取られていた. 供用後20年経過時点で実施した鋼管杭の腐食量調査において腐食穴が発見されたことから, 調査後, ペトロラタムライニング工法による補修が行われた.

港湾鋼構造物は, 常時海水に接し潮位や飛沫を受ける苛酷な腐食環境条件下にあるため, 腐食に対して適切な対策が求められる. 現在の設計では, 鋼材の防食法として電気防食工法および塗覆装工法が用いられている⁴⁾. 対象施設の設計時に用いられていた腐食しろの考慮による腐食対策は, 腐食環境条件によっては集中腐食等の著しい腐食が生じる恐れがあるため, 現在の設計では仮設構造物を除いて用いられない.

(2) 腐食傾向の抽出

対象施設で供用後20年が経過した時点で実施した鋼管杭の腐食量調査において, 2バース全体で13本の鋼管杭において-0.2m~-0.7mの範囲に腐食穴の発生が確認された. 参考として, 他の調査において得られた腐食穴の状況を図-3に示す. なお, 当該写真は腐食穴周辺の貝殻等を掻き落として撮影している.

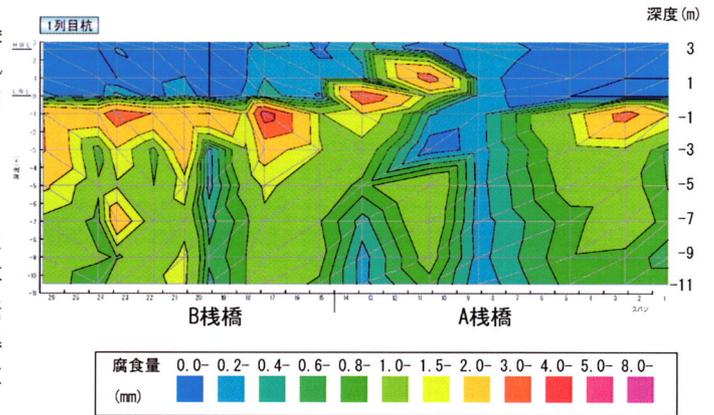
岸壁全体の腐食傾向をより詳細に把握し, 鋼管杭の腐食原因の抽出につなげるため, 供用後20年の時点で調査された腐食量を用いて腐食量コンターを作成した(図-4). なお, 各鋼管杭の腐食量は深度による違いがあるだけでなく, 各深度においても杭周上で腐食が一様ではないため, コンター図の作成には各深度における杭周上90度ごとの4ヶ所で測定した腐食量の平均値(平均腐食量)を用いている. 1列目(最も海側)の杭について深度方向で示した図-4(a)より, -1.0m付近の腐食量が大きく, 深い部分では腐食量が小さい傾向が見られる. この腐食傾向は文献⁷⁾に示された鋼材の腐食速度分布とも一致するものである. また, -1.0mの水深で平面方向の傾向を示した図-4(b)より, 腐食量が大きい範囲は海側の杭に偏っていることが分かる. ちなみに, 鋼管杭の初期肉厚は12.7mmであることから, 腐食穴が発生した位置の腐食速度は, 少なくとも0.64mm/年以上であったことが算定できる. この腐食速度は, 一般に言われる海中の腐食速度の標準値(0.1~0.2mm/年)⁴⁾の3倍を超える値となっている.

(3) 環境条件および利用条件による腐食原因の検討

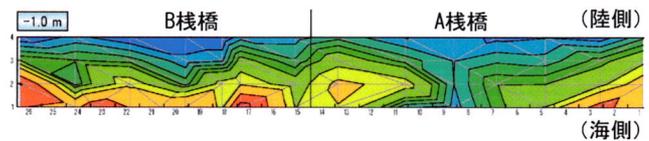
このような鋼材の腐食原因としては, まず環境条件が考えられる. 海洋環境の中で, 鋼材の腐食に影響を与える因子としては, ①溶解成分, ②溶存酸素, ③流速, ④温度, ⑤pH等が挙げられる⁷⁾. これらの個別因子と腐食との関係は, 単独ではある程度定量化されているものの, 多因子が同時に作用した場合には相乗効果や相殺効果が働き, 材料特性と環境特



図-3 鋼管杭の腐食穴の例



(a) 深度方向の分布(1列目)



(b) 水平方向の分布(深度-1.0m)

図-4 腐食量コンター

性の相互作用も加わって, 極めて複雑な関係となる. 対象施設周辺で得られている既往調査結果(塩分濃度, 溶存酸素量, 水温等)に基づいて, 上記の腐食状況と環境条件との関連付けを試みたが, これまでのところ有意な関連性は見出せていない.

そこで, 環境条件以外の原因として, 対象施設の利用条件についての整理を試みた. 最近5年程度の当該施設の利用状況を調べたところ, 特定種の貨物を運搬する専用船の離着岸が頻繁に行われており, 施設の利用形態が特定規模・形状の船舶に限られている. 図-4において右側から「A栈橋」, 「B栈橋」とすると, A栈橋に比べてB栈橋の方が利用頻度が高く, 約2.5倍の違いがある. また, 各栈橋で離着岸頻度の高い船舶の規模は, A栈橋では120m級, B栈橋では180m級であった. この利用形態が供用以降変わらずに維持されているとは言えないものの, 前述の通り, 腐食傾向は明らかにB栈橋において顕著であったことから, 腐食傾向と船舶の離着岸との関連

性が強いことが推察できる。

腐食量コンターと船舶の着船位置の関係を重ねて図-5に示す。船舶位置図には、バウスラスト（船首水線下に付いている横方向への推力機）および船尾のスクリューの位置も記した。図より、船舶の位置と腐食量の大きい箇所がある程度一致しており、特にスクリューやバウスラスト付近の腐食が進行している傾向が見られる。

本稿で対象とした施設については、腐食原因を検証するに十分な現地状況や研究成果が得られていないが、①船舶のスクリューやバウスラストの影響により酸素供給量が増えて錆の発生が促進され、②離岸時の噴流によって生じる流体の衝突により鋼材表面に付着している錆が剥離し、③さらに鋼材に錆が生じる、というサイクルを繰り返して局部腐食が進行したと推定することができる。以上のことから、鋼管杭の腐食傾向が船舶の離接岸に影響を受ける可能性が高いことが示唆される。

現時点で得ている他の施設の点検診断においては、ここで対象とした施設ほど顕著な腐食傾向は確認されていない。本施設では、利用形態が特定形状の船舶に偏ったことによって非常に特徴的な傾向が現れたものと考えられるが、他の施設においても、長期間にわたって特定の状況が継続するような場合には局部腐食が進行する可能性があるため、今後実施する点検診断においては、施設の利用状況にも着目する必要があると考えられる。

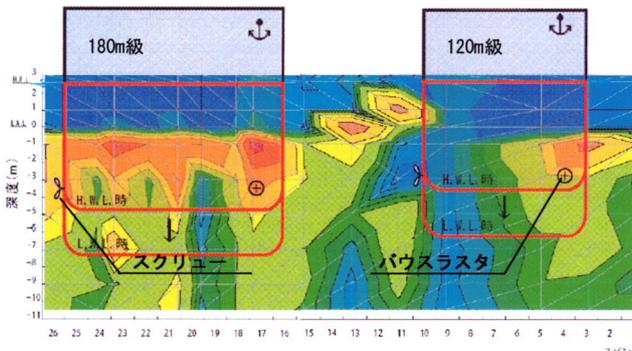


図-5 腐食量コンターと船舶位置との照合

4. 劣化予測と対策工法の検討

ここでは、LCMを考慮した港湾施設の維持管理の試行例として、前章に示した腐食傾向に対する将来の劣化予測を行い、対策工法に対する維持管理费用を算出して比較検討を行った事例を紹介する。

(1) 劣化予測

構造物の劣化予測は、効果的な対策工法の選定やLCCの最小化、さらには維持管理の合理化・最適化につながるため、維持管理計画の中でも重要な位置付けとなる。実施した劣化予測においては、まず鋼管杭の腐食の進行を予測し、次に腐食量に応じた耐

力の指標値として安全性の限界を超える確率を算出し、さらに鋼管杭の中で安全性の限界を超える面積を算出して、劣化の程度を評価した。

a) 腐食量予測

腐食量予測においては、調査されている全測点に対して、供用20年後の調査で得られた各測点の腐食速度に予測年数を乗じて将来の腐食量を予測した。ただし、供用20年後の調査でペトロラタムライニングが施工された箇所については、その後腐食は進行しないものとしている。

なお、ここでは過去の腐食傾向が将来にわたって継続されることを前提としているが、実際には、様々な状況の変化により腐食傾向の変化が生じる可能性も否定できない。例えば、施設の利用状況や周辺の環境条件の変化や腐食対策の実施による材料特性と環境特性の相互作用の変化を考慮すること等が挙げられる。しかし、現状ではこれらについては確立された劣化予測での考慮方法がないため、今後の研究の進展に期待するところである。

b) 超過確率の算出

腐食量に応じた耐力の指標値として、安全性の限界を超える確率（以下「超過確率」）を算出した。前章で述べた通り、全体的に腐食量が深度に相関する傾向が見られることから、深度別の整理を行うこととし、腐食量予測値の深度別の頻度分布を確率分布関数でモデル化して経年変化を調べた。なお、各予測年の深度別の腐食量予測結果をあてはめる確率分布関数としては、適合性の高かったワイブル分布を用いることとした。

耐力指標値について、古玉ら⁸⁾は腐食による耐力の低下を応力比（発生応力の降伏応力に対する比）で整理した。杭の断面が均一に腐食すると仮定し、腐食の進行に従って応力比が上昇し、断面減少率が45%になった時点で応力比が0.9になり安全性の限界値に達する、というものである。本劣化予測においてもこの指標値を用いて安全性の限界を判断し、超過確率を求めることとした。

図-6に超過確率の算出の一例を示す。この例では、供用約50年後に深度-1.0mでの超過確率は18.2%となっており、対象とする鋼管杭のうち深度-1.0mで

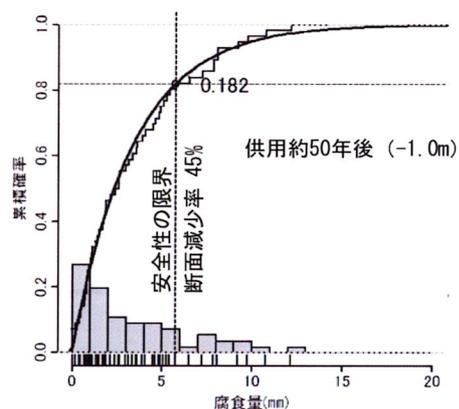


図-6 超過確率の算出例

代表される杭の表面積が100m²の場合、18.2m²の面積が安全性の限界を超えることを意味している。

c) 劣化面積の算出

劣化面積は、超過確率に対象とする面積を乗じて算出する。図-7に劣化面積の経年変化を示す。図には深度-1.0m~-10.5mの6深度での値を示しているが、深度-1.0mの劣化面積が最も急速に増加しており、浅い箇所ほど劣化の進行が速く進んでいる。前述の腐食量調査と同様の傾向が確認できる。

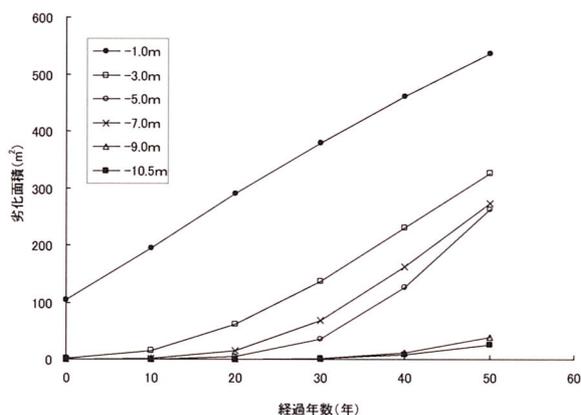


図-7 劣化面積の経年変化

(2) 対象とする対策工法

局部腐食に対する対策工法としては、塗覆装工法や電気防食工法等腐食を防ぐ防食工法と、耐力が低下した鋼材に強度を付加する補強工法に大別することができる。ここでは、防食工法として水中施工型の有機ライニングによる塗覆装工法ならびに流電陽極方式による電気防食工法を、補強工法として鋼板溶接工法または鉄筋コンクリート被覆（以下「RC被覆」）工法を対象とすることとした。

有機ライニングはパテ状のライニング材を手で鋼管杭に圧着して施工するもので、水中施工も可能である。電気防食には流電陽極方式と外部電源方式があるが、ここでは鋼管杭に陽極を設置する流電陽極方式を対象としている。鋼板溶接工法は腐食鋼管杭に補強鋼板を溶接して鋼管杭を補強する工法、RC被覆工法はスタッドあるいは主鉄筋を鋼管杭に溶接してコンクリートで覆う工法である。

(3) 維持管理シナリオの策定

劣化の進行が予測される場合には、残存耐用期間を十分考慮して維持管理シナリオを策定する必要がある。シナリオ策定にあたって、構造物の機能をあるレベル以上に維持するための代表的な3種類の考え方が挙げられる。

第1の考え方は、耐用年数に達するまで補修をせずに供用するもので、残存耐用期間が短いような場合はこのような考え方も成立する。第2の考え方は、耐用年数に達するまで複数回の補修を繰り返して供用を継続するというものである。この場合1回の補

修は比較的簡易なものであり、低コストであることが要求される。第3の考え方は、1回の補修を行うことにより残存耐用期間にわたって供用を継続するというものである。この場合、補修効果が長期間継続することが要求され、1回のコストは高くなる⁵⁾。

これらの考え方にに基づき、基本的な維持管理シナリオとして以下のとおり設定した。鋼板溶接を行う場合、溶接部の劣化を考えるとそのままでは腐食対策として不十分と判断されるため、有機ライニングによる塗覆を組み合わせている。

- ・対策Ⅰ 鋼板溶接+有機ライニング
- ・対策Ⅱ 鋼板溶接+有機ライニング+流電陽極
- ・対策Ⅲ RC被覆+流電陽極

(4) 維持管理費用の試算

維持管理に要する費用は、経年的に算定された劣化面積に単位面積あたりの補修費用を乗じることににより求められる。表-1に維持管理費用の算定条件を示す。対策時期については、供用後約30年の現時点から対策を開始することを想定し、費用を求めている。なお、費用算定においては施設の損傷によるリスクや便益の効果は考慮していない。

維持管理費用の算定結果を図-8に示す。図では、対策開始時期（供用後約30年）を原点として、経過年数に対する維持管理費用を示している。残存供用期間を20年（すなわち供用開始後50年まで）程度と

表-1 維持管理費用の算定条件

シナリオ	対策Ⅰ：鋼板溶接+有機ライニング 対策Ⅱ：鋼板溶接+有機ライニング+流電陽極 対策Ⅲ：RC被覆+流電陽極
対策間隔	対策Ⅰ：10年間隔 対策Ⅱ、Ⅲ：20年間隔
対策箇所	補強：断面減少率45%を超過した劣化箇所 塗覆装：鋼板溶接箇所 電気防食：全鋼管杭
その他費用	対策Ⅰ：対策前に肉厚測定調査 対策Ⅱ、Ⅲ：電位測定（1回/2年）

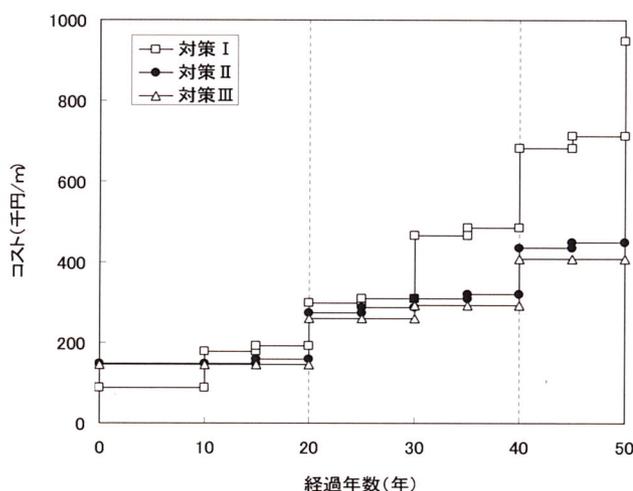


図-8 維持管理費用の算定結果

想定した場合には、対策Ⅰ～Ⅲの維持管理費用は同程度となる。残存供用期間40年（供用開始後70年まで）程度の場合には、対策ⅡおよびⅢは同程度を維持しているが、電気防食を施さない対策Ⅰの費用は急増して対策ⅡおよびⅢの約1.6倍となる。

このようにして、目標とする残存供用期間に応じた、安全性を確保するために必要な維持管理費が算定される。ただし、ここに示した維持管理費用はいくつもの仮定の下に得られたもので、現実に必要な費用とは異なることに注意が必要である。

5. 今後の課題

以上、港湾施設の維持管理においてLCMを試行的に考慮した検討事例を紹介した。こうした検討により、一施設の維持管理費用の最小化が図られるだけでなく、複数施設に対して実施することにより、予算の制約の中で適切な優先順位の下で補修を行い港湾機能を維持していく戦略的な維持管理も可能になると考えられる。

しかしながら、現状では港湾LCMは発展途上の技術であり、点検手法、予測手法、対策手法等、さらに種々の研究や技術開発が不可欠である。以下に、主な課題を挙げる。

(1) リスクおよび便益の分析・評価

維持管理を戦略的に行うにあたって、複数の補修対象施設の中から優先順位を決定する際の材料として様々な要因が挙げられる。例えば、補修による耐用年数の延長によって提供される便益等（正の要因）、あるいは補修期間中の施設の使用停止または制限による経済的損失等（負の要因）に対して、総合的な評価を行って優先順位を決定する必要がある。評価にあたっては、正の要因の最大化と負の要因の最小化を図る戦略を組むことになり、この考え方は冒頭に触れたアセットマネジメントに通じる。

しかし、評価に必要なとされる重要な要因であっても、現状では評価手法が確立されていないものも多い。例えば、港湾施設が経済活動を支える役割を果たす中で想定されるリスクや便益として、自然災害による施設損壊のリスクやそれに伴う経済活動への打撃等のリスク、逆に自然災害時に港湾施設が救援物資搬出入等の防災目的で活用される場合の便益、あるいは年々変化するニーズの中で港湾施設の維持管理によって提供し得る便益等、様々な要因の評価が未確立である。これらのリスクおよび便益の分析・評価に対する今後の検討の進展が望まれる。

(2) 施設全体の健全性評価

本稿では栈橋下部工の鋼管杭に絞って検討を行ったが、栈橋構造物の健全性を評価するにあたって上部工の劣化予測や補修対策の検討も不可欠である。上部工と下部工を含めた劣化の進行あるいは補修対

策の実施が施設全体の健全性に及ぼす影響等の評価手法について、研究や技術開発が急がれる。

(3) 劣化予測の高精度化

維持管理費用の最小化を含め、LCMの最適化には得られた点検結果から将来の状況を予測する精度の向上が重要である。劣化速度の経年変化や補修後の劣化進行の考え方等、本稿においては考慮できなかった事項も多く、これらについて予測手法を確立していくとともに点検結果等によってその検証を進め、劣化予測の高精度化を図ることが求められる。

(4) 点検診断の簡易性と信頼性の向上

鋼管杭の腐食調査の場合、肉厚調査を主体として現状では潜水土による調査が行われているが、作業効率が悪くコストもかかる。鋼管杭以外についても栈橋上部工の下面等、点検診断が容易でない箇所も多い。事後保全ではなく予防保全を基本とした維持補修によってLCCの縮減を図るためにも、より簡易で信頼性の高い点検手法の技術開発が必要である。

6. おわりに

今後、港湾施設の老朽化が急速に進んでいく中で、制度の整備や様々な技術開発をさらに進めつつ、関係機関が適切な計画と役割分担の下に施設の維持管理を効率的に進めていくことが求められる。本稿がその一助となれば幸いです。

謝辞：本検討を進めるにあたって、東洋大学 福手勤教授をはじめとする方々に貴重な意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：港湾の技術開発にかかる行動計画～安全で活力ある持続可能な社会の実現を目指して～、2005。
- 2) 横田 弘：港湾施設のマネジメント、コンクリート工学、Vol. 42, No. 5, pp. 29-32, 2004。
- 3) 横田 弘：港湾施設の維持管理技術マニュアルの改訂動向、コンクリート工学、Vol. 43, No. 6, pp. 3-9, 2005。
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、1999。
- 5) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル、(財)沿岸開発技術研究センター、1999。
- 6) 高橋宏直、後藤文子、横田 弘：港湾施設の維持補修・更新費の将来推計（2005）、国土技術政策総合研究所資料、No. 257, 2005。
- 7) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版）、1997。
- 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。