

港湾施設のライフサイクルマネジメントに関する研究

港湾空港技術研究所	構造強度研究室	横田 弘
港湾局	建設課	宮崎正治
港湾局	環境・技術課	西園勝秀

要 旨

安定的な経済発展を目指す我が国において、港湾施設を適切に維持管理していくことは重要な課題となっている。本研究により、厳しい海洋環境下にあり、劣化や変状の発生・進行が生じやすいこれら構造物の性能評価を適切に行うことができる。また、最も効果的な維持補修の工法や実施時期を提案することができる。結果として港湾構造物の維持管理業務の合理化が図られ、ライフサイクルコストの低減が可能となる。

1. はじめに

港湾は、四方を海洋に囲まれるわが国にとって、安全・安心な生活や円滑な経済社会活動の命運を担っている。港湾は、防波堤等の外郭施設、岸壁等の係留施設、航路・泊地等の水域施設等で構成され、これらがそれぞれにその機能を十分に発揮し、かつ個別の機能が相互に効率的に結びつくことで、港湾自体もまたその使命を十分に果たすことができる。

これら港湾施設のストックは、1998年度に約27.5兆円(1995年価格換算)に達している。中でも、1960年代の高度経済成長期に建設された施設の多くは、建設されてから既に40年余が経過し、これらに対する維持管理費用が今後急増していくことは確実である。過去に実施された港湾施設の維持管理費用(維持、補修、更新に要した費用)から、将来必要な維持管理費用の推計を試みた結果¹⁾によると、今後港湾事業費の伸びが期待できないと仮定すれば、2020年における維持管理費用は全事業費の30%にも達する。この金額は決して小さなものではなく、全国的視野に立って、できる限り小さい負担で計画的かつ戦略的な維持管理を実施していくことの必要性を示唆するものである。

このように、既存施設の有効活用、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ための技術として、ライフサイクルマネジメント(LCM)がある。港湾LCMは現状では十分に確立されたものではなく、研究的アプローチと行政的アプローチの両面から、協調してその実現を模索している段階である。本稿では、現在検討中の港湾施設LCMについて概要を述べる。

2. ライフサイクルマネジメントの概念

港湾LCMの概念は、図-1に示すとおりである。目視を主体とする一次点検により、施設、構造物、あるいは構造物を構成する構造要素の状態を「変状度」により区分する。一次点検は、港湾管理者等の点検の複雑化を避けるために、目視を主としており、主観的な判断になりがちである。そのため、目視により判断された変状度と耐力等の構造性能との関係づけを行い、できるだけ客観的な判断となるようにしておく必要がある。これについ

ては現在，研究的に取り組んでいるところである²⁾．一次点検，あるいはそれが十分でない場合に実施する二次点検の結果から，施設全体（係留施設1バース，防波堤の1単位等）の変状度を評価する．その全体的変状度に基づいて対策を検討することとなるが，同時に，今後の変状度の低下の程度を予測する必要がある．その予測結果に基づいて，当該施設が必要な性能を維持してゆくのに最も合理的な対策工法およびその実施時期を提案する．

対策工は，適用可能な対策工データベースから，適用可能な変状度に応じて複数案を提案し，それらに必要なライフサイクルコストを算定する．ライフサイクルコストによって港湾管理者が適当な工法を選定する．その際，必要性能に応じてライフサイクルコストを最小にする解を求める場合と，予算制約下で性能の最大化を解とする場合がある．

港湾構造物に限らず，一般の構造物では，過度の劣化や変状が生じてから対策を講じているのは，コストもかかる上に，工事も大規模になる．そのため，劣化・変状の進行を事前に予測し，最適なタイミングで最適の対策工をとる，いわゆる予防保全的維持管理を行うことが理想である．その結果，ライフサイクルコストも低減することになる．港湾LCMは，まさにこの思想に立脚して構築される一連のシステムと言い換えることができる．

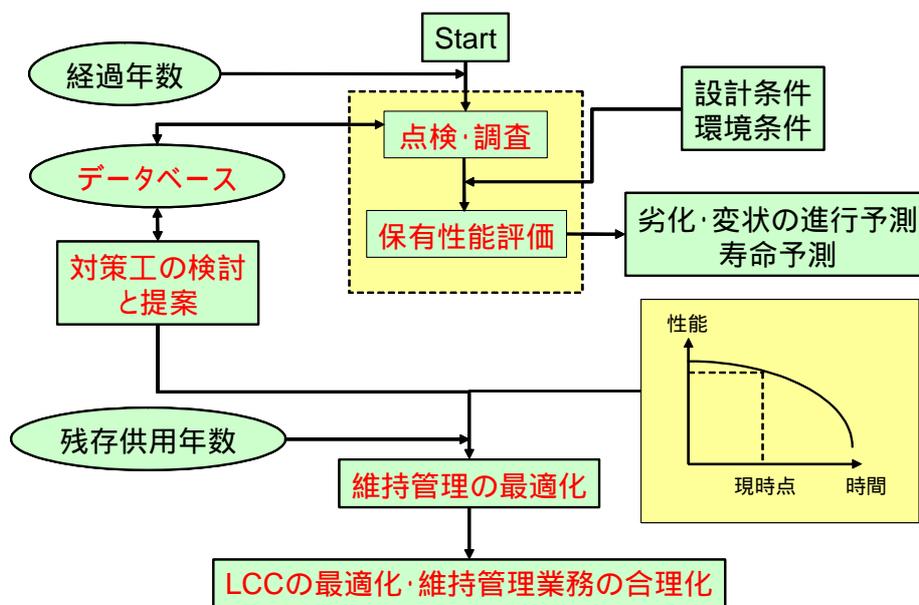


図-1 港湾LCMの概念

3. 点検・調査

点検・調査は構造物の現況を知る上で不可欠の作業で，港湾LCMにおいても諸データの入力となるべく重要な項目である．港湾施設は，常時海水の作用を受ける塩害環境下に位置し，構成材料にとってたいへん過酷な状況に置かれている．加えて，施設の大部分が海水中に没していることや，防波堤などでは作業を妨げる規模の波浪が常時作用することなどにより，日常点検などが十分に行えない状態になる．また，港湾施設はそれを構成する構造物や構造要素が複雑かつ相互に関連し合っているうえに，作用する外的要因が多種多様であり，変状の発生機構が極めて複雑になっている．そのため，効率的な点検・調査を

行うには、重要度の高い主要な変状をその対象として選定することが必要である。すなわち、原因による変状の発生、変状の結果生ずる影響、そして機能の低下へとさらに変状が進行していく過程を変状連鎖として捉え、変状連鎖上における主要な変状に絞ってメンテナンスを行う手法を採るのが効率的である³⁾。つまり、変状が独立して進行していく変状と、互いに関連性を持ち、一つの構成要素の変状が次々と他の要素へと波及していく変状とに大別し、これらの性質を踏まえた点検を行うこととなる。

点検・調査では、このような変状の性質や発生の傾向を十分に理解して、標準的な点検指標、点検頻度、点検箇所などを定めることとなる。構造形式毎に重要な変状を確実に捕捉することで、重大な変状に達する以前に、比較的軽微に対処可能な段階の変状で留めることができると考えられる。

これらを踏まえて、点検を定期的に行う目視による一次点検とより詳細な二次点検に大別し、それぞれ着目すべき点検部位とその項目を整理して提供している。栈橋の一次点検における判定基準(抜粋)を表-1に示す。一次点検は、目視調査等を主体に構造物の部位毎に点検・評価するものであり、同表に示すように、点検結果をa～dの変状度で判定する。aは重度の変状、dは変状のない場合である。同表に示す上部工コンクリートのひび割れのように、定量的な指標で変状度を判断できる項目がある一方、鋼管杭の損傷のように定性的な基準で変状度を判断せざるを得ないものもある。一次点検は、変状の経時変化を把握するために、定期的に行う必要があるが、現在のところ1～2年に1回程度実施することとしている。

表-1 栈橋の一次点検診断表(一部抜粋)

点検項目		点検方法	判定基準
上部工	コンクリートのひび割れ(下面)	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数・長さ と幅	a スラブ: 網目状のひび割れが部材表面の50%以上見られる かぶりのはく落がある 鉄筋が破断している はり: 軸方向の幅3mm以上のひび割れが見られる かぶりのはく落がある ハンチ: 蜘蛛の巣状または鉛直方向の幅2mm以上のひび割れが見られる かぶりのはく落がある
			b スラブ:網目状のひび割れが部材表面の50%未満で見られる はり:軸方向の幅3mm未満のひび割れがある ハンチ:幅2mm未満のひび割れが全体的に広がっている
			c スラブ:一方方向のひび割れもしくは帯状または線状のゲル吐出物が見られる はり:軸と直角な方向のひび割れのみが見られる ハンチ:幅2mm未満のひび割れが部分的に見られる
			d 変状なし
鋼管杭	鋼材の腐食, 亀裂, 損傷	目視 ・穴あきの有無 ・水面上の鋼材の腐食 ・表面の傷の有無	a 腐食による開孔や変形, 損傷が見られる
			b MSWL付近～LWL付近, あるいは全体的に赤橙色の発錆が著しい
			c 部分的に黒または赤褐色の発錆が見られる
			d 付着物は見られるが, 発錆, 開孔, 損傷は見られない

表-2 栈橋上部工の二次点検項目

点検項目	点検方法
コンクリート強度	コアサンプリング，反発度法
コンクリートのひび割れ深さ	超音波法等
かぶり厚さ	電磁波法，はつり試験等
鉄筋の腐食状況	自然電位測定，分極抵抗測定等
コンクリートの分析	塩化物イオン含有量測定，中性化深さ測定等

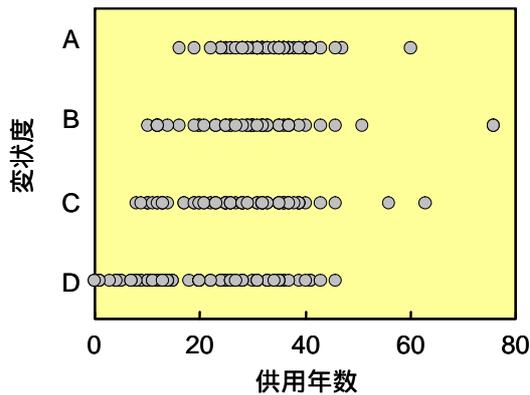


図-2 栈橋の変状度分布

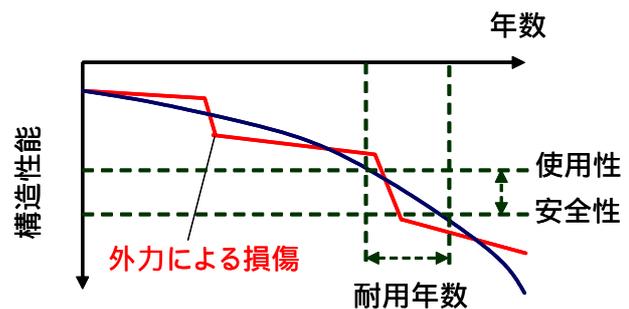


図-3 供用による構造性能の低下

二次点検は、潜水士、機器等を活用して目視困難な部位の劣化の進行等を詳細に点検・評価するものである。一次点検と比較してより客観的かつ数値指標で構造物や構造要素の状態が把握できる。例えば、栈橋のコンクリート上部工は、特に塩害を受けやすい構造様式であるため、劣化事例が極めて多い。コンクリート構造物において、コンクリート中の鋼材に腐食が生じると劣化が急速に進行する。したがって、所定の機能を保持するためには、二次点検により表面に現れる段階以前で劣化を発見し、劣化の程度に応じた適切な対策を施す必要がある。そのために、表-2 に示すような二次点検の項目を与えている。

4. 総合評価

点検・診断から得られた部位毎の評価結果（a～d）を基に、施設や構造物全体の機能・安全性を総合的に評価する。この結果はA～Dのランクで区分する。部位毎の評価結果からどのように施設や構造物全体の性能評価を行うかについては現在検討中であり、未だ定まった基準はできていない。平成15年度より実施中の国有港湾施設の点検・診断結果が蓄積された段階で評価手法を提示する予定である。したがって、現状では、A：性能上問題があり、緊急の対策が必要，B：計画的な対策が必要，C：軽微な劣化・変状が見られ，継続して観察が必要，D：劣化・変状が認められない，というような技術者の官能評価によっている。

栈橋を事例に施設が建設されてからの年数と変状度との関係を整理すると，図-2 に示す

ようになる。これは我が国における252栈橋の評価結果を表したもので、主に上部工の変状に基づいて判定している。必ずしも時間の経過に伴って施設の変状が進行する訳ではないことが分かる。このような傾向は他の施設、他の変状についても同様である。この原因として、もちろん担当者による誤差なども含まれるが、最も大きな要因は施設ごとに変状の進行速度が異なることによる。しかし、個々の施設について変状の進行程度を規定するよりも、このような傾向をばらつきとみなし、確率的に評価を行った方が妥当である。この考え方について以下で述べる。

5．変状の進行予測

施設や構造物に生じる変状の進展を予測することは港湾LCMにおいて重要な項目となるが、同時に非常に困難な課題でもある。コンクリート構造物の塩害劣化に対しては、Fickの拡散則に基づいて鉄筋位置での塩化物イオンの蓄積量を予想し、これがある量を超えると鉄筋に腐食が生じるという考え方がある。この方法はコンクリート構造物では一般的に用いられているものの、鉄筋腐食発生時の塩化物イオン量の設定、外部から供給される塩化物イオン量（表面塩化物イオン量）の設定、コンクリートの塩化物浸入・拡散への抵抗性（拡散係数）の設定などに不明な点が多く、既存構造物の変状予測には未だ解明すべき課題が多い。一方、鋼構造では、腐食速度が性能予測のために用いられているが、集中腐食への対応が難しいなどの点が課題である。

構造物の性能低下の進行は、概念的に図-3のように表すことができる。つまり、初期欠陥の値を初期値として、変状や劣化が時間と共に進行する。また、台風や地震等の大きな荷重作用により損傷が短時間で進行する。そのため、このような荷重作用時の点検（異常時点検）も重要となる。ただし、本稿では、簡素化のため、初期欠陥および荷重作用による損傷の進行は無視し、経時的な変状に関する進行速度と時間とで表現する。

図-4は、マルコフ連鎖という確率論的な考えを用いて変状の進行を再現するモデルの概念を示すものである⁴⁾。これは、ある施設における変状は、A、B、C、Dの独立する変状度のいずれかに存在し、1年経過すると遷移確率 P_x で変状度が1ランク進行し、残りの施設は確率 $1-P_x$ で同じ変状度に留まるというものである。この仮定が成立するかどうかは、各変状度間の遷移確率が等しいかどうかによる。しかしながら、変状度によっては定性的な判断によっているものもあり、現時点では各変状度間の遷移確率をすべて等しいと考えることに大きな誤りはないと判断している。

この仮定に基づく予測に際しては、適切な遷移確率の設定が必要となる。そこで、既往の点検診断結果を最も精度良く再現できるような遷移確率を求める。その結果を図-5に示す。同図は再現性が非常に高かった鋼矢板岸壁と適合度が中程度の栈橋の結果である。ここで、「実際」は、点検の結果得られた変状度の分布を表している。また、「予測」は、マルコフ連鎖モデルに各施設の供用年数を入力して得られた解析結果である。両者が最もよく合致する遷移確率は、鋼矢板岸壁では $P_x=0.036$ 、栈橋では $P_x=0.047$ となる。両施設の遷移確率の大小関係は、栈橋の方が鋼矢板岸壁より変状の進行が速いというこれまでの感覚に一致している。

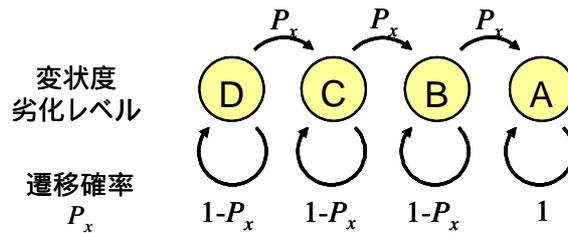


図-4 マルコフ連鎖モデル

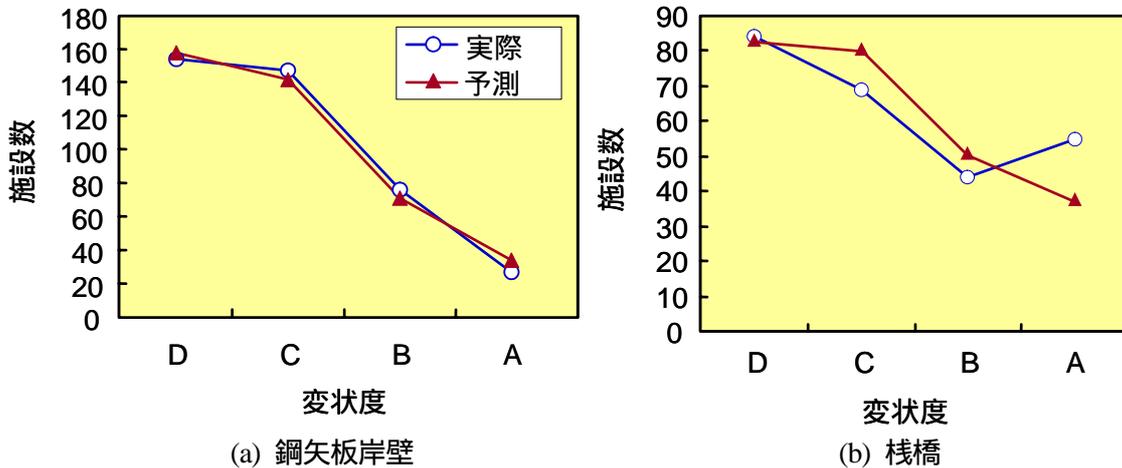


図-5 マルコフ連鎖モデルによる変状度の再現性

マルコフ連鎖モデルにより得られた変状の分布は、実際の調査結果から得た分布を近似し、遷移確率は各施設の変状進行速度の全国的なレベルでの平均値を示すものである。実際には施設や構造物の置かれた環境条件や用いられた建設材料の品質条件等によって遷移確率は異なる。今後、いろいろな条件下でデータの蓄積がなされればより精度良く個別の施設の変状進行を予測することが可能となるが、現時点ではそこまでのレベルの解析には至っていない。言い換えれば、これまでの検討では、我が国における全国平均としての港湾施設の変状度の進行の傾向をつかむことができるというものである。

この結果に基づいて、構造性能の低下曲線を求める。そのためには、変状度と数値的な構造性能とを結びつける必要がある。栈橋上部工を構成するはりの暴露試験体での変状度と耐力との試験結果⁵⁾を図-6に示す。縦軸は、設計時の設計耐力と実験値との比である。変状度がAの場合には、鉄筋の断面積が10%程度低減するといった大きな変状を示したため、載荷実験を行うことが困難であった。そのため、やや精度的に問題があるものの、おおむねの傾向として、栈橋の上部工では、変状度がBの後半以降になると耐力の低下、すなわち構造性能の低下が顕著になることがわかった。

この結果から、当初の構造性能に比較して、変状度Dでは100%、変状度Cでは99%、変状度Bでは95%、および変状度Aでは80%に低減すると仮定する。また、変状度Aに到達してから5年後に0%となり、完全に構造性能が失われるものとする。

上述の仮定から得られる構造性能低下曲線の一例を図-7に示す。同図では使用限界 (SLS) を80%低下時点、終局限界 (ULS) を60%低下時点としている。鋼矢板岸壁および

栈橋では、それぞれ55年程度あるいは40年程度で使用限界に、80年程度あるいは60年程度で終局限界に達すると推定される。これは、鋼矢板岸壁あるいは栈橋の平均的な劣化・変状の進行を表すものであり、個別の施設では、これより速く、あるいは遅く劣化・変状が進行する。このばらつきを個別の施設でどのように評価するためには、今後のデータの蓄積が必要である。

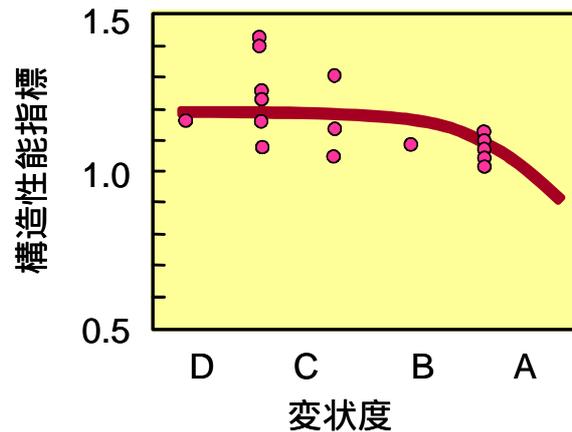


図-6 栈橋上部工はりでの構造性能と変状度との関係

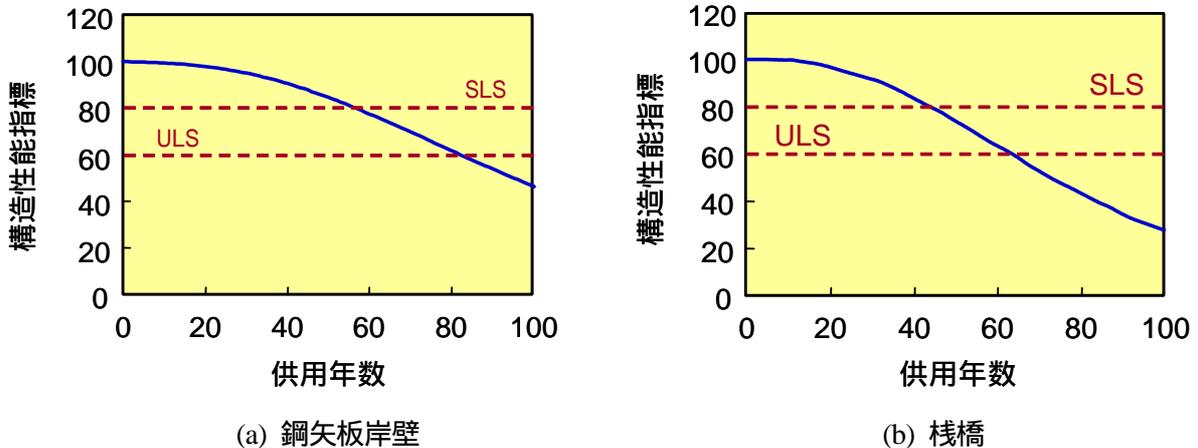


図-7 構造性能低下曲線

5. データベース

データベースは対策工を効果的に選定するために必要となる。特に、これまでに港湾構造物に適用された補修や補強のための工法について、初期コスト、設計供用年数、適用範囲等の情報を収集し整理している。これらの情報を多数収集することがデータベースの良否に関わっているので、現在港湾局環境・技術課主催のライフサイクル評価に基づく施設整備・補修技術WGの活動の一環として事例の収集に努めている。また、合わせて国有港

湾施設の維持管理データベースとして施設の現況として変状度等の経時変化を蓄積できるシステムを開発し、運用中である。

6. 劣化予測とライフサイクルコスト評価

構造物のライフサイクルは、構造物が計画・建設されてからその役割を終えて撤去されるまでの過程と定義され、この間に生じた費用、あるいは生じると予想される費用の総和がライフサイクルコストと言われるものである。これまで、港湾施設の建設において、ライフサイクルコストが十分に考えられてきたわけではない。これは、そもそも構造物の設計供用期間が明示されていないことや、供用中の機能変化を考慮する手段がなかったことなどがその理由であると思われる。しかし、効率的な港湾整備のためには、初期建設費のみではなく、使用中に係る費用や解体撤去に係る費用を評価することが重要である。同時に、当然ではあるが、新規に建設される施設だけでなく、既に建設され使用されている既存施設の運用管理段階でのライフサイクルコスト（狭義のライフサイクルコストであり、ここではこの意味で用いる）を検討し、最適な維持管理戦略を検討することも、ライフサイクルコストを低減するために重要である。これまでの事例分析⁶⁾によれば、供用開始後25年程度経過した係留施設では、初期建設費に対し約13%程度のメンテナンス費用が必要であると試算できる。

4.で述べたような手法で、港湾施設の将来的な変状程度の分布が予測されると、将来AあるいはBの変状度と判定されて、対策を必要とする施設数およびそれに要する費用が推定できる。一例として、表-3に示す計算の仮定を設定して、以後30年間に予想される対策費用を算出すると、施設の種類によっても若干異なるが、すべての施設を更新する場合に比べて、計画的な維持補修で対応する場合、防波堤では約40%、岸壁では20～60%程度のコスト低減が見込める計算となる⁷⁾。すなわち、問題が起こってから生じる事後保全に比べて、変状の軽微な段階から計画的に実施する予防保全を行うことの影響が顕著に現れている。

表-3 予防保全によるコスト縮減効果試算の仮定

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1) 変状度B判定：優先度の高いものから5年ごとに30%を補修。2) 変状度A判定：優先度の高いものから毎年30%を補修。3) 更新：A判定後5年を経過すると、補修では対応できず、更新を要する。4) 対策済み施設：補修や更新を行った施設は、変状度がD判定に戻る。5) 対策費用：過去の実績等を参考に、平均的な構造物の補修費用と更新費用を設定する。 |
|---|

4.で示したマルコフ連鎖モデルを利用して対策法の検討を行ってみる。対策を行うことにより、変状度が小さくなる効果あるいは変状の進行速度、すなわち遷移確率が低減する効果が期待できる。栈橋のコンクリート上部工のはりを対象として、断面修復、電気防食、部分更新のそれぞれの対策を行った場合のライフサイクルコストを比較する⁸⁾。ここで、

断面修復は変状度C以上を対象とし，塩分を多く含むコンクリートを除去し，鉄筋に発生した錆をある程度除去することによって，変状度を1ランク戻すことができると考える．また，遷移確率を50%に低減する効果があると仮定する．電気防食は，変状度D～Aのいずれの変状にも適用でき，断面修復と同様に変状度を回復させる．また，効果的に作用した場合，遷移確率を10%に低減できるとする．部分的更新は劣化度B以上を対象とし，対策を行った全ての部材が変状度Dに戻るものの，特に耐腐食性の高い鉄筋や防錆材などを使用しない限り，遷移確率は変化しないとする．

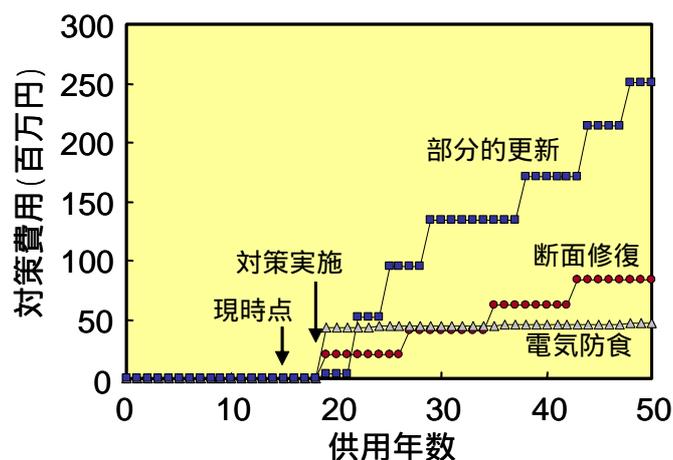


図-8 栈橋上部工はりの対策費用比較

このようにして得られたライフサイクルコストの算定結果を図-8に示す．ライフサイクルコストは工法ごとに大きな差が見られる．対策のための初期コストは，部分的更新，断面修復，電気防食の順で安価であるが，50年目までの最終的なコストでは，電気防食，断面修復，部分的更新の順であり，その費用は電気防食を基準に，断面修復が1.7倍，部分的更新が5倍強となっている．また，対策を行う回数を見てみると，電気防食1回に対し，断面修復4回，部分的更新7回となっており，非常に劣化速度の速いはりでは，劣化速度を効果的に抑える工法が有効である結果となっている．この結果から，変状の速度を示す遷移確率，今後の供用年数によって最小のライフサイクルコストを与える対策工法が異なることを示唆している．また，設計供用年数の長短によって，最小となるライフサイクルコストを与える工法が異なることも示している．このような解析を行うことによって，効果的な対策が実現できることの可能性が示される．

7. まとめ

我が国全体で港湾構造物の維持管理に対する負担を軽減し，費用の最適化や平準化を図る必要があることはいうまでもない．現在検討している港湾LCMの適用によりライフサイクルコストが低減できる可能性が示された．また，あくまで試算ではあるが，早い段階に

おける対策で、港湾構造物においてライフサイクルコストを低減できる可能性が定量的に示されている。これを受けて、わが国全体で港湾構造物のメンテナンスに対する負担を軽減し、費用の最適化や平準化を図る方策を提示することが、研究においても港湾行政においても今まさに求められている。特に、研究的には、供用中の港湾施設、構造物の点検・診断手法、特に、劣化・変状を非破壊的に検出・モニタリングできる実用的な技術およびこれらの高精度な数値化技術等の確立、将来の劣化・変状の進行や寿命の予測モデルの高精度化、ライフサイクルコスト算出手法の際の各対策工法の時期別コストの検討や各種補修工法の性能評価など、LCMを構築するための個別技術に関する課題があげられる。これらについては行政部局のご協力を得ながら港湾空港技術研究所において研究を進めている。今後のご支援とご協力をお願いする。

参考文献

- 1) 高橋宏直，横田 弘：港湾施設の維持補修費の推計モデル構築および将来動向の推計，土木学会論文集，No.679/VI-51，pp.135～140，2001.6．
- 2) 加藤絵万他：繰返し荷重を受けるRCはりの構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1079，2004.6．
- 3) 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，沿岸開発技術研究センター，1999.6．
- 4) 小牟禮建一他：RC栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，コンクリート工学論文集，Vol.15, No.1，pp.13～22，2004.1．
- 5) 横田 弘他：海洋環境（酒田港20年）に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響，港湾技術研究所報告，Vol.38, No.2，1999.6．
- 7) 横田 弘，小牟禮建一：計画的な維持修繕によるライフサイクルコストの低減，港湾，Vol.79, No.8，pp.14～17，2002.8．
- 8) 小牟禮建一，浜田秀則，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，pp.2061～2066，2004.7．