

港湾構造物における取組

横田 弘*

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、生活や産業などの経済社会活動の命運を担うインフラである。そこには、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の施設・構造物がある。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。

コンクリート構造物のメンテナンスの観点から見れば、港湾構造物⇒海洋環境⇒塩害は、誰にも真っ先に浮かんでくる構図である。港湾構造物は、このような厳しい海洋環境下において、要求される性能を長期間にわたり発揮し続けなければならない。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、構造物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、日常点検などのメンテナンスが十分に行えない状況にある。

このような状況下で、港湾構造物の機能を必要な期間良好な状態に保持するためには、発生する変状を効率的に見つけ、それを合理的に評価し、効果的な対策を施すという、一連のメンテナンスが不可欠であることはいうまでもない。加えて、機能が陳腐化した構造物の更新を適切に図ることも必要である。本稿では、このような観点に立って、港湾コンクリート構造物のメンテナンスに関する取組みについて紹介する。なお、本稿では、構造物に生じる不具合を総称して「変状」と称し、この内とくに環境作用により材料に生じる変状を「劣化」と称する。また、「維持」を変状の進行防止や機能維持のための工事、「修繕」を当初機能へと回復させるための補修・補強工事、「更新」を既設構造物を撤去して新たに高機能の構造物を建設する工事と定義する。

2. 港湾構造物の変状連鎖

港湾構造物は、構造が比較的複雑で、構成部材が相互に

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、変状の発生機構がきわめて複雑になっている。そのため、効率的なメンテナンスを行うには、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、変状の結果生じる影響、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とるのが効率的である¹⁾。変状連鎖の一例として、栈橋における主要な変状連鎖を図-1に示す。栈橋は、係留施設の代表的な構造様式であり、わが国では、一般的に複数の鋼管杭をコンクリート上部工で結合した構造物である。同図において、ローマ数字 I～VI を付した箱が変状の原因となる荷重等の作用を示している。材料の劣化に起因する変状以外は、おのおの変状が相互に絡み合って進行する状況が理解できる。このように、構造物の構成要素の変状が独立して進行していく変状と、互いに関連性をもち、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できる。

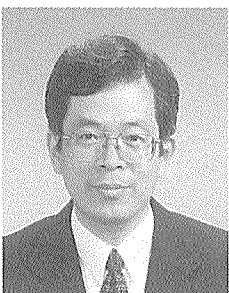
メンテナンスに際しては、このような変状の性質や発生の傾向を十分に理解して、標準的な点検指標、点検頻度、点検箇所などを定めることが必要である。栈橋では、図-1に示した二重枠で示す変状をきちんと捕捉することで、重大な変状に達する以前に、比較的軽微に対処可能な段階の変状で留めることができると考えられる。また、エプロンを含むコンクリート上部工においては、ひび割れの発生が重要な変状である。ひび割れの発生原因はさまざまであるが、作用の種類に応じて発生形態をある程度予測することも可能であり、主要な点検の対象とすべきである。

3. メンテナンスの現状

3.1 メンテナンスの方法

ここでは、栈橋のコンクリート上部工のメンテナンスについて紹介する。港湾のコンクリート構造物では、海水の物理的・化学的作用を受けて経年的に材料劣化が進行し、変状の顕在化に至る。すなわち、外部環境からコンクリート中に侵入する塩化物イオンによりコンクリート内部の鋼材が腐食し、それによりコンクリートのひび割れ、剥離、剥落が生じる、いわゆる塩害による劣化・変状が発生しやすい。とくに、写真-1に示すように、栈橋のコンクリート上部工は、設置環境が厳しいことに加えて塩害を受けやすい構造様式であるため、劣化事例がきわめて多いのが現状である。

一般に、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



* Hiroshi YOKOTA

独立行政法人 港湾空港技術研究所
構造強度研究室長

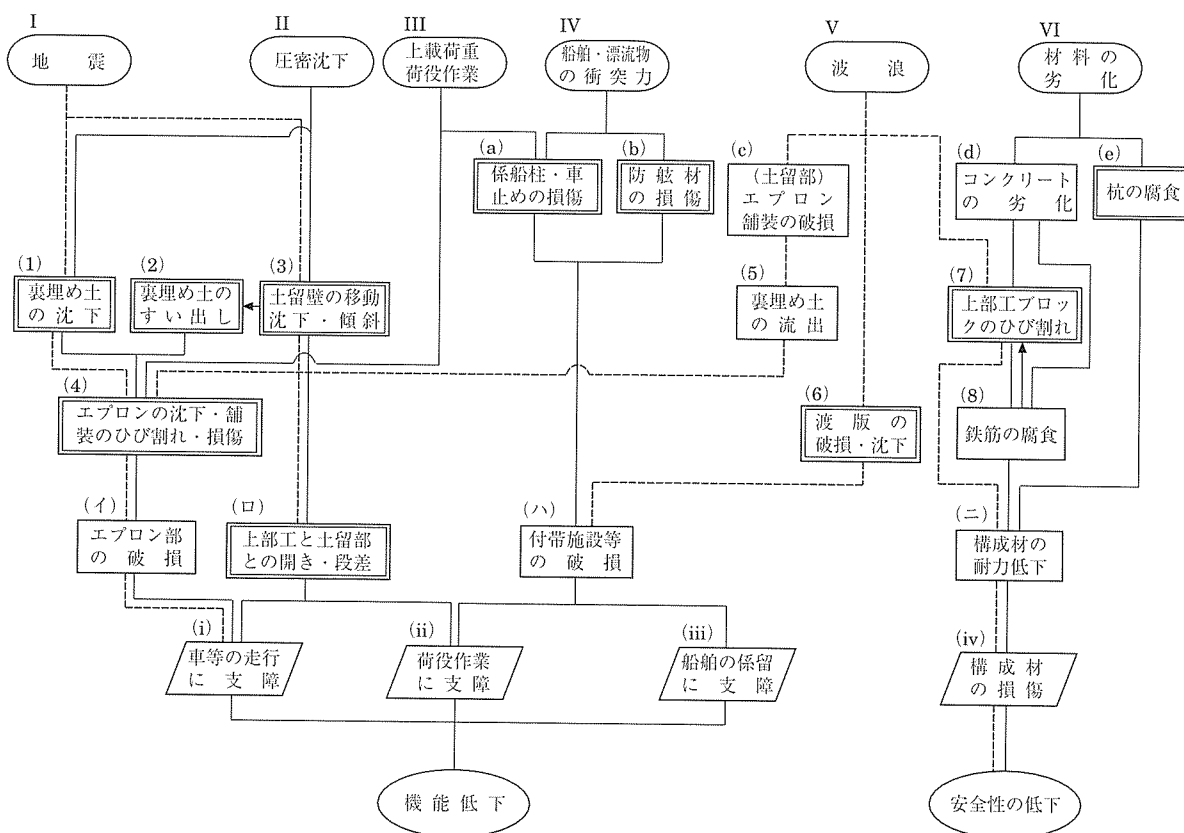


図-1 栈橋の主要な変状連鎖

て、所定の機能を保持するためには、適切な点検・調査を通して劣化をできるだけ早期に発見し、劣化の種類と程度に応じた適切な対策を施す必要がある。栈橋のコンクリート上部工に対する一般的なメンテナンスの手順を図-2に示す。まず、計画的に行う定期点検において、主として目視により劣化の有無や状況を把握し、劣化度を判定する。構造物の点検は、本来日常業務の一環として実施することが望ましいが、栈橋の場合は、船舶接岸時の波浪、干満による上部工と海面との間の距離の変動、あるいは季節風や台風による波浪などの影響により、日常点検を常時行える環境にあるとはいえない。したがって、点検の主体は計画的に行う定期点検によらざるをえない。定期点検の間隔は、供用初期は3~4年、供用10年程度を経過すると2年程度

することを推奨している¹⁾。

劣化度の判定は、前述のように、目視によって捕捉された外観上の変状に基づいて行う。その際、表-1に示すように、鉄筋の腐食に関連する変状、ひび割れ、かぶりコンクリートの剥離・剥落の3項目に対して、それぞれ5段階の劣化度で区分する。そのうち、もっとも進んだ段階を部

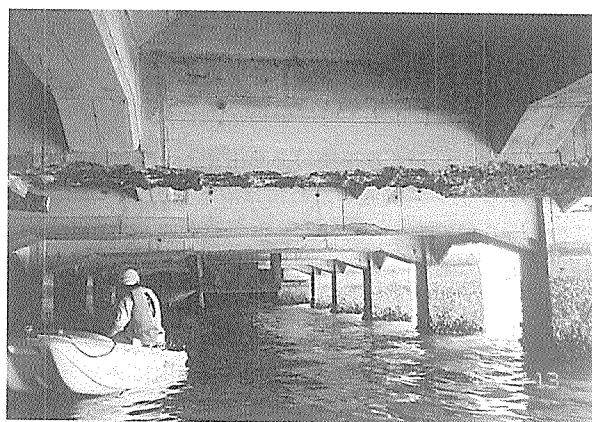


写真-1 栈橋上部工の劣化状況

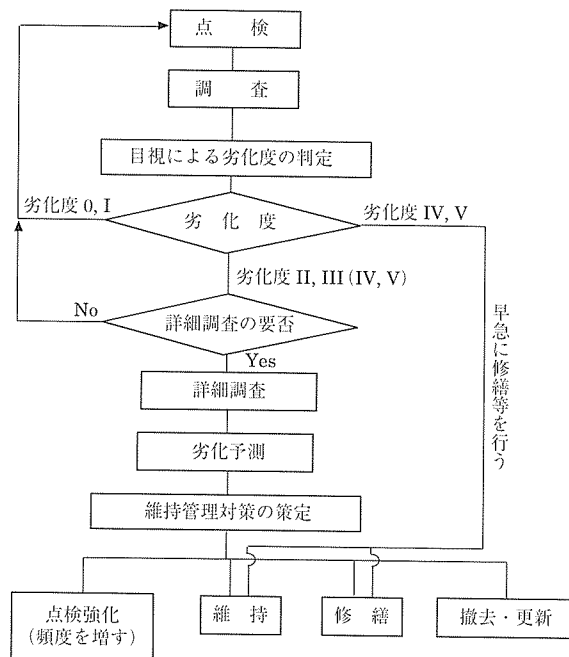


図-2 点検から対策までのメンテナンスの流れ

表 - 1 劣化度判定の標準

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れがみられる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し	ひび割れ幅数mm以上のひび割れ多し	(かぶりコンクリートの状況で判断)
かぶりコンクリートの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい

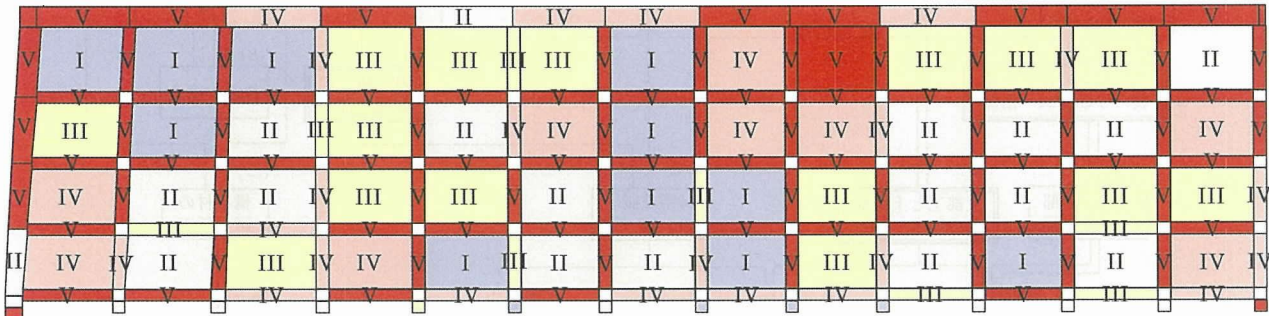


図 - 3 劣化度評価の事例

材の劣化度とする。劣化度判定は、梁、スラブなどの各部材ごとの劣化度を基に、最終的には栈橋の1ブロックを単位として総合評価する。部材ごとの劣化度判定結果の事例を図-3に示す。

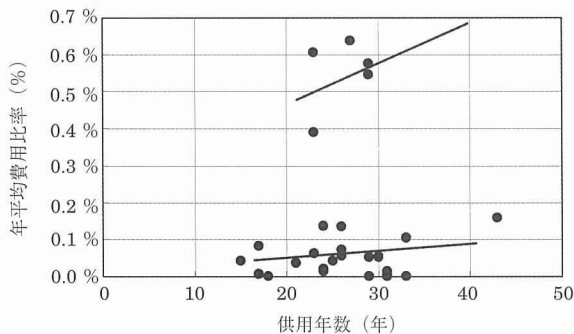
詳細調査は、定期点検により劣化が発見された場合にその劣化の程度を詳細に調べるために実施する。その際、当該構造物の将来的な劣化進行を予測し、適切な対策を策定する。

判定された劣化度がIVまたはVの場合は、必要に応じて

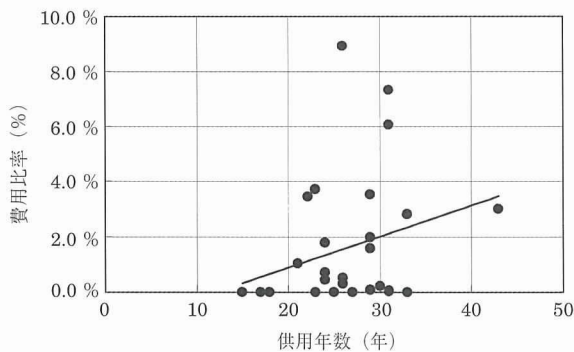
詳細調査を行ったのち、ただちに修繕等の対策を実施する。劣化度の判定が0またはIの場合は、定期点検を継続する。一方、両者の中間である劣化度IIもしくはIIIの場合は、詳細調査の要否を判定することとなる。

3.2 劣化に対する対策工

維持・修繕および更新が発生するまでの経過年数と費用との関係について、栈橋を含む係留施設での調査結果²⁾の一例を図-4に示す。同図では、年間維持・修繕費の初期建設費に対する比率および更新費の初期建設費に対する比率を示している。いずれの費用も、デフレータを用いて施設建設当時の価値に換算している。施設建設後の供用年数が35年以上経過した施設そのものは、絶対数が少ないため明確に示されていないが、維持・修繕費は供用開始からほぼ15年が経過した時期から発生し、経過年数につれて比率が高くなる傾向が見られる。修繕の内容としては、防舷材などの付帯設備の取替えが主であり、構造体に直接施されるような事例は少なかった。維持・修繕費の初期建設費に対する比率は、供用開始からの経過年数により多少変化するものの、計画的に高頻度で実施している港湾で約0.5%、そうでない港湾で約0.1%、更新費で約3%となっている。



(b) 更新



(a) 維持・修繕

図 - 4 メンテナンス費用の発生状況

4. メンテナンス技術に関する取組

栈橋のコンクリート上部工を対象とした上述のメンテナンス手法は、いわゆる事後対策を主体としており、理想とするメンテナンス実施のためには限界がある。たとえば、このような戦略をとった場合、対象構造物があとの位で使用不能になるかといった定量的な問題に解を与えることはできない。このため、構造物の今後の供用計画、残存供用年数などを加味したライフサイクルモデルに基づいて劣化・変状の進展を精度良く予測し、合理的にメンテナンスを行うための技術の確立が求められる。ここでは、この目的のために現在取り組んでいる事例を紹介する。

4.1 対策に関わるコスト評価

港湾構造物の計画・設計において、構造物のライフサイクルを考慮するといった考え方は、一般的に行われていない。これまで、物理的あるいは機能的に問題となった構造物は、他の目的に転用したり、これに隣接して高規格の構造物を新設したりする方法がとられてきた。しかし、経済・社会が成熟化したわが国における港湾構造物の将来を考えると、適切にメンテナンスを行うことで、既設の構造物を長期間にわたって活用していくことがますます重要になってくると考えられる。そのためには、構造物の建設から最終的な廃棄までのライフサイクルを対象とした機能変化シミュレーション手法やコスト計算、維持・修繕・更新に対する費用便益評価手法などの確立が急務である。たとえば、メンテナンスに関する前述のコスト発生から考えれば、仮に25年経過した港湾構造物では、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。一方、更新を行った場合は初期建設費の1~3倍程度の費用を必要とした事例も見られる。一般には、更新は制約された設計・施工条件下で行われることが多く、同規格のものを新規に建設するよりも費用は高くなる傾向にある。

一方、港湾構造物は、これまでの整備の結果かなりのストックとして保有され、1998年度には約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造された構造物の多くは、建設されてからすでに40年を経過し、今後老朽化する構造物の数が加速度的に増加していくと予想される。これら構造物のメンテナンスにおいて必要な費用が今後急増していくことは確実であり、できる限り小さい負担で計画的に構造物のメンテナンスをしていく必要がある。

過去に行われた係留施設のメンテナンスにおける修繕および更新に要した費用から、将来必要なメンテナンス費用の推計を試みる。具体的な予測手法は文献3)によるが、メンテナンス費用の発生履歴から、供用年数に応じた年平均メンテナンス費用に換算し、それに基づいてわが国の係留施設全体の費用を求めた。その結果、今後港湾事業費の伸びがなく、総事業費が前年と同額であると仮定すれば、図-5に示すとおり、2020年には修繕・更新費用は全事業費の50%にも達するとの予測結果が得られている。したがって、全国的視野に立ったメンテナンス戦略の立案が必要

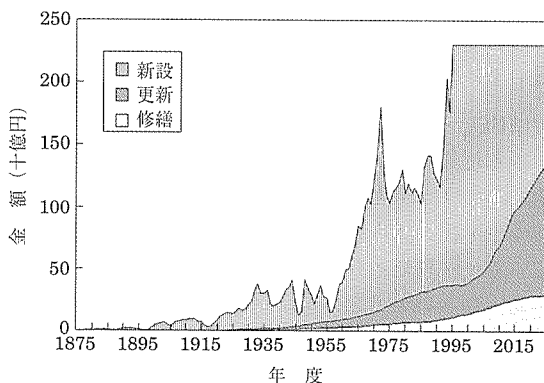


図-5 メンテナンス費用の将来動向推計

になる。

4.2 マネジメントシステム

港湾構造物の維持管理マネジメントシステムは、構造物あるいは構造部材の劣化の現況データを入力することにより、その構造物や構造部材に起こっている耐力低下の現況を適切に評価するとともに、今後の劣化および耐力低下の進展を予測するツールである。そして、その構造部材が必要な耐力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。現在試行版のシステムが完成した段階である⁴⁾。本システムが有する機能は次のとおりである。

- 1)情報の格納・整理
- 2)構造物の現況（劣化）評価
- 3)構造物の劣化予測
- 4)対策工の候補選定
- 5)ライフサイクルコスト評価による最適対策工の提案

構造物の劣化予測については、コンクリート標準示方書等で採用されている Fick の拡散法則に基づく塩化物イオン量の算定および鉄筋の腐食速度算定式を用いている。これらを基に、表-1で示した目視による劣化度判定との関係を現地調査や室内実験から定義している。その結果は、図-6に示すとおりである。劣化度ⅠとⅡの区別が定量的な劣化指標の観点から明確ではないが、劣化度Ⅱまでは塩化物イオン量によって劣化度の予測を行う。鉄筋位置での塩化物イオン量が2.0 kg/m³に達した時点で腐食ひび割れが発生し、以降は鉄筋の腐食速度で劣化の程度を評価する。これらの仮定と実際の劣化進展状況との比較により、劣化予測のパラメータである表面塩化物イオン量とみかけの拡散係数の設定方法を提案している。

4.3 マルコフモデルによる変状進展予測

変状の進行を予測するもう一つのアプローチとして、実際の構造物のこれまでの変状の進行状況から、将来の変状の進行を予測する手法について紹介する⁵⁾。ここでは、構造物に生じる変状を表-2に示すA~Dの4段階の変状程

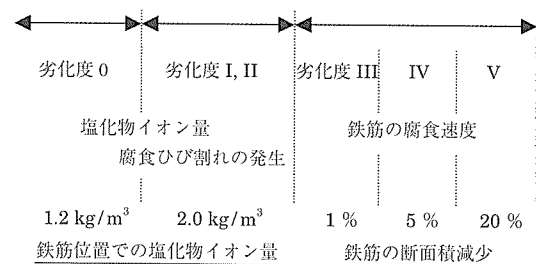


図-6 マネジメントシステムにおける劣化度進展予測

表-2 目視による変状程度の判定表

判定	内容
A	性能上問題があり、緊急に対策の必要がある
B	計画的な修繕を実施する必要がある
C	計画的な修繕は必要ないが、継続して観測する必要がある
D	異常がみられない

度で評価している。この中で、AあるいはBと判定された施設は、修繕や更新などのなんらかの対策を要する施設である。これらは、コンクリート構造物に限らずすべての構造物についての対策の有無を判断根拠としており、表-1に示した5段階の劣化度とは異なっている。コンクリート構造物では、おおむねAが劣化度VかIVに、Bが劣化度のIIIに、Cが劣化度IIかIに、Dが0に相当していると考えてよい。

供用年数と変状程度との関係の調査結果を図-7に示す。同図は防波堤上部工の沈下に対する例であるが、必ずしも時間の経過と変状程度が比例関係にないことが分かる。この傾向は他の構造物や変状についても同様である。このもっとも大きな原因は、施設ごとに劣化の進展速度が異なることである。したがって、個々の施設について劣化の進展速度を与えるよりも、上記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。

そこで、図-8に示すような、マルコフ連鎖という確率的な考えを用いてみる。この考えは、ある劣化程度を示す施設は、1年経過すると遷移確率 x で劣化が次の段階に進行し、残りの施設は確率 $1-x$ で同じ段階に留まるとい

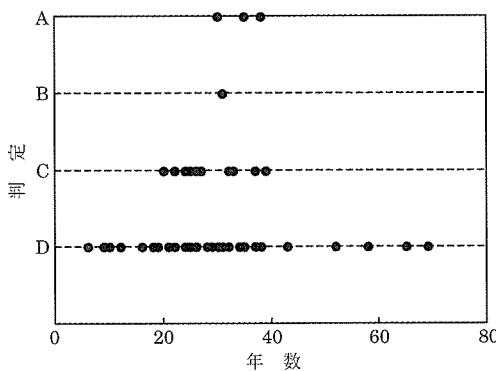


図-7 供用期間と劣化程度の関係

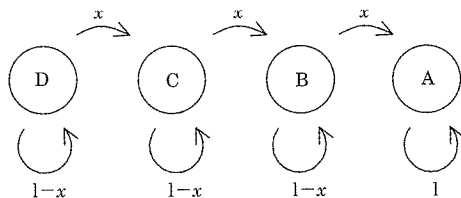


図-8 マルコフ連鎖モデル

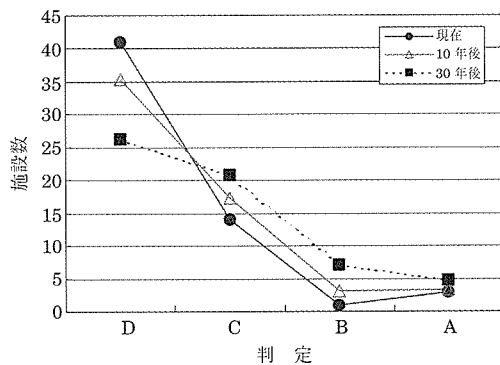


図-9 劣化程度の将来進展予測

ものである。この考えに従い、実測の劣化程度をもっともよく推定できる遷移確率を設定することで、劣化の進展が表現できることになる。つまり、マルコフ連鎖モデルで推定した劣化の進行程度の分布は、実際の調査結果から得た分布を近似し、各施設の劣化進行速度の平均値と、施設の使用年数で劣化程度の分布を表すものである。この劣化程度の進展にかかわる遷移確率を用いて、施設の将来の劣化程度の分布が推測される。その結果を図-9に示す。対策を行わない場合には、同図に示すような劣化の進展が予想されることになる。

上述のように、施設の将来的な劣化程度の分布が予測されると、将来AあるいはBの劣化程度と判定されて、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、計算の仮定を以下のように設定した場合の計算結果を示す。

- 1) B判定・・・優先度の高いものから5年ごとに30%を修繕。
- 2) A判定・・・優先度の高いものから毎年30%を修繕。
- 3) 更新・・・A判定後、施設が5年を経過すると、修繕では対応できず、更新を要する。
- 4) 対策済み施設・・・修繕や更新を行った施設は、劣化度がD判定に戻る。
- 5) 対策費用・・・過去の実績等を参考に、平均的な構造物の修繕費用、更新費用を設定する。

このような条件で以後30年間に予想される対策費用を算出した例を表-3に示す。表-3より、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(C_2)に比べて、計画的な修繕で対応する場合(C_1)、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。

今回の計算は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。

表-3 ライフサイクルコスト低減率の試算例

施設の 種類	施設の 形式	対策費用 (100万円)		ライフサイクルコスト 低減率 $(C_2-C_1)/C_2$
		修繕 (C_1)	更新 (C_2)	
防波堤	傾斜式	51 754	90 732	43.0 %
	混成式	143 325	227 169	36.9 %
岸壁	矢板式	179 438	453 454	60.4 %
	栈橋式	128 732	166 425	22.6 %

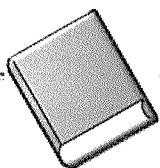
5. おわりに

戦略的なメンテナンス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ことを受けて、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今まさに求められている。本稿で紹介した取組みに関しては、より高精度かつ確実なメンテナンス指標の定量化に向けて港湾空港技術研究所において研究を進めている。本稿が読者の皆様方に有益となることを期待し、今後のご支援とご協力をお願いする。

参考文献

- 1) 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
- 2) 松舘 知，横田 弘：係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意思決定支援システムの構築に関する基礎的研究，港湾技術研究所報告，Vol.38，No.2，1999.6
- 3) 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-51，2001.6
- 4) Yokota, H. et al.: Development of Maintenance Management System for Existing Port Structures, Proceedings of the 30th PIANC-AIPCN Congress, Sydney, Sept 2002 (CD-ROM)
- 5) 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.14～18，2002.8

【2002年11月13日受付】



● 刊行物案内

- PC斜張橋・エクストラードズド橋設計施工規準(案)
- PC吊床版橋設計施工規準(案)
- PC橋の耐久性向上マニュアル

(平成12年11月)

頒布価格：3点セット 会員特価 6 000 円〈非会員価格 7 200 円〉(送料はいづれも 600 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会