

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	LCM 研究センター	横田 弘
国土技術政策総合研究所	港湾計画研究室	高橋宏直
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。ライフサイクルマネジメントに基づく維持管理の実施により、厳しい海洋環境下において、劣化や変状の発生・進行が生じやすいこれら港湾施設の性能評価を適切に行うことができる。また、性能低下の進行予測に基づいて、最も効果的な補修等の対策方法やその実施時期を選定することができる。その結果として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。一般に港湾では、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基幹施設が設置される。これらの施設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行った最新の結果¹⁾によると、港湾事業費の伸び率を最近の傾向に合わせて毎年 -2%（2%減）と仮定すれば、2030年度には維持補修費および更新費の合計が2003年度の約4倍に達するとされている。言い換えれば、2030年度のこれら費用の合計は、港湾事業費の約8割を占めるまでに達しようとしている。これは、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。

本研究は2年間の予定で実施されている。この内、昨年度の研究発表論文においては、中間成果の報告として、

- ・港湾LCMによる維持管理の実務とそのあり方
- ・港湾施設の点検診断結果の解析
- ・材料の劣化と構造性能の関係

- ・確率的アプローチによる劣化・変状の進行予測

の課題を中心に報告した。本稿では、これらの研究をさらに進め、

- ・「港湾の施設の技術上の基準・同解説」への港湾LCMの導入
- ・港湾施設の維持管理技術マニュアル改訂への取り組み
- ・港湾施設の性能低下曲線の提示と寿命予測

について報告し、2年間の研究で得られた港湾LCMの実務への適用を目的とした成果について取りまとめる。

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²⁾を行い、できるだけ客観的な判断となるように努めている。

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。変状度はA, B, C, Dの4段階で、施設の機能・性能を総合的に評価するものである。その流れを図-2に示す。総合評価の結果に基づいて必要な対策を検討することとなる。その際に、今後の変状度（機能・性能）の低下の程度を予測することが港湾LCMの特徴の一つである。

性能低下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いくのに最も合理的な対策工およびその実施時期を提案する。対策工は、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。必要性能に応じてライフサイクルコストを最小にする方法を選択する場合と、予算制約下で最大の性能が得られる方法を選択する場合がある。

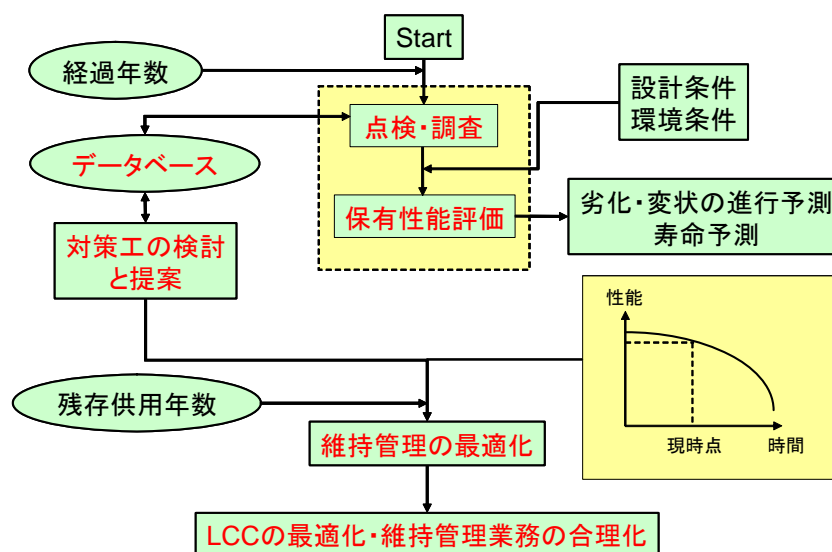


図-1 港湾LCMの概念

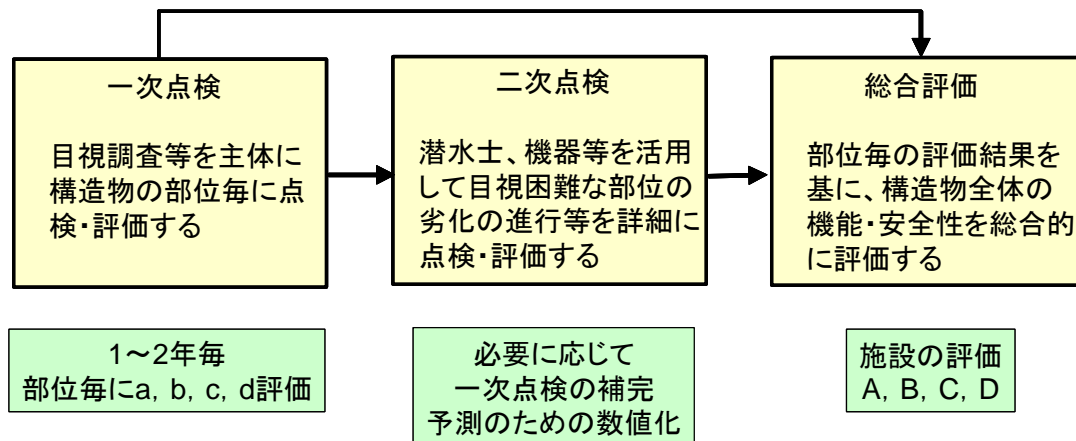


図-2 総合評価に至る流れ

港湾施設に限らず、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、工事也大規模になる。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³⁾。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。

3. 港湾LCMに立脚した技術基準の整備

港湾の施設の技術に関する基準（以下「技術基準」という）⁴⁾は、港湾施設に求められる基本的な要件を規定した「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」（昭和49年運輸省令第30号）およびその細部を規定した「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」（平成11年運輸省告示第30号）（以下「告示」という）からなり、港湾の施設を建設し、改良し、または維持する際の基準として運用している。

国際的には、ISO2394 General principles on reliability of structures⁵⁾を始めとする国際標準において、設計の自由度を向上させる観点から、構造物に求められる性能のみを規定し、性能を満足させるための設計法は自由とする、いわゆる性能規定化の動きが進んでいる。こうした国際的な動きに合わせ、平成13年3月には、行政の各分野の全ての基準類を原則として性能規定化することを明記した「規制改革推進3か年計画」が閣議決定された。さらに、平成15年3月には、「国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム」（目標期間：平成15年度から平成19年度までの5年間）において、「土木・建築にかかる設計の基本」（国土交通省）に沿った基準類の改定の一貫として、「港湾の施設の技術上の基準」の性能規定化の方向性が示されたことから、当該技術基準の性能規定化を図る必要が生じた。

これらを踏まえ、施設に求められる性能の明確化、コストの一層の縮減、新たな技術的知見の反映、その他の行政ニーズへの対応を図ることを目的に、平成18年度からの運用開始を目途として、技術基準の改訂を進めている。その際、当然のことながら、新規施設の整備のみならず、既存施設の有効活用や施設の的確な維持管理の実施について、新たな知見の導入が図られることとなる。その一つが、港湾を資産としてとらえ、施設の損傷・劣

化等を将来にわたり把握し、適切かつ効率的な更新・改良を行うマネジメントの導入を推進するとともに、ライフサイクルコストを考慮した設計法の導入である。

港湾の施設の維持に関して、新たに告示で定めるべき事項、およびその解説として、以下のような案を検討している。

【告示】（港湾の施設の維持）

第〇〇条 港湾の施設は、自然状況並びに当該施設の利用状況及び構造特性等を勘案し、設計供用期間中のいずれの時点においても常に当該施設の要求性能を満足するように、適切に維持されなければならない。

2 港湾の施設の維持に当たっては、当該施設で使用する材料の劣化対策を適切に行われなければならない。

【解説】

(1) 港湾の施設の維持とは、作用による物理的変状及び材料の経年劣化による施設の損傷劣化を効率的に見つけ、それを合理的に評価し、補修・補強等の効果的な対策を施す一連のシステムのことであり、適切な基準及び計画に基づいて行われることが望ましい。

(2) 港湾の施設は、自然状況、施設の利用状況、施設の構造特性、維持管理上の重要度（難易度）に応じて、維持管理上の適切な基準に基づいて維持されることが望ましい。なお、維持管理上の基準については、当該施設の建設、改良又は維持主体が、当該施設の置かれる状況を踏まえて、個々の施設の事情に照らして適切に定める必要がある。具体的には、以下のような手順が想定される。

①港湾の施設の建設又は改良主体が、表-1を参考に、当該施設の性能照査の段階において当該施設の維持管理上の重要度を定めた上で、その維持管理レベルを反映した性能照査を行う。

表-1 港湾の施設の維持管理上の重要度（難易度）

重要度の分類	維持管理性能	
	損傷劣化に対する考え方	対策の必要性
維持管理レベル A	損傷劣化をさせない	対策を必要としない
維持管理レベル B	損傷劣化を予防保全する	頻繁な対策を計画する
維持管理レベル C	損傷劣化を事後保全する	数回の対策を計画する
維持管理レベル D	損傷劣化を許容する	劣化が生じても対策を行わない

②港湾の施設は、その設計供用期間中は要求性能を常に満足しなければならないことから、港湾の施設の維持主体が、定期的な点検によって常に施設の現状を把握し、維持管理上の重要度に応じた維持管理性能を満足するように適切な対策を行う。

(以下省略)

ここで新たに導入する維持管理レベルの設定は、港湾 LCM の導入を前提として実現されるものである。維持管理は、港湾施設に要求される性能を、構造物の保有する性能が下回ることはないように、供用期間において継続して実施すべきものである。その際に、建設時点あるいは初期点検（維持管理）時点において適切な維持管理レベルを設定し、設計と維持管理の両輪により、供用期間中の性能・機能の保持を確固たるものとする。例えば、維持管理レベル A は、設計供用期間において損傷劣化を許容しないもので、点検診断ができない施設、構造物あるいは構造物部材、損傷劣化が顕在化してもそれに対する補修等の対策が取れない施設、構造物あるいは構造物部材などの場合に設定されることになる。このような性能を設計の際に付与することに加え、維持管理においては、頻繁なモニタリング等により、損傷劣化が生じないことを定期的に確認することを要求する。また、維持管理レベル B は、軽微な劣化損傷を許容するもので、この段階で適切な補修等の対策を行うことで、性能の保持を図るものである。供用期間中に複数回の対策工の実施が予定されることから、対策が行いやすいような構造上の工夫が必要である。

4. 維持管理技術マニュアルの整備

前述の技術基準の考え方および港湾 LCM の考え方を実務において的確に導入するには、マニュアル類の整備が不可欠となる。そこで、技術基準【解説】（案）で記述される予定の「適切な基準及び計画」を立案するための参考資料として、「港湾構造物の維持管理技術マニュアル（仮称）」（以下「技術マニュアル」という）の整備を合わせて実施している。これは、現行の「港湾構造物の維持・補修マニュアル⁶⁾」を港湾 LCM の考え方に従って改訂する⁷⁾ものである。

技術マニュアルに基づいた維持管理の流れを図-3 に示す。これは、図-1 で示した港湾 LCM の流れを実務的に書き換えたものとなっている。黄色で着色した部分が新たに加わった作業項目となる。

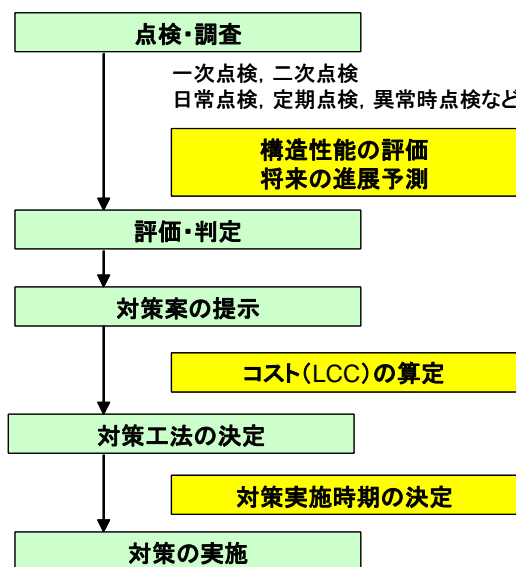


図-3 技術マニュアルに従った維持管理の流れ

4.1 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。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。

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。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。また、定期的な点検を厳守させ、事後処理的な対処でなく健康診断的な役割を持たせる方針を明確にする。

4.2 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。部材・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研究を進めているところであり、今後、より具体的な判断基準を提示したいと考えている。

4.3 対策の実施

対策法の検討を行う場合、対策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を考慮して、将来の施設の機能・性能の低下を予測して工法の選定を行う。その際、今後の供用年数とともに、その期間のライフサイクルコストを見積もる方法が有効になりうる。例えば、ライフサイクルコストを判断材料とすることで、供用年数の長短によって、選択される対策工法が異なってくることになる。ただ、ライフサイクルコストは多くの仮定の下で得られた指標であり、現時点ではこの結果をそのまま鵜呑みにするのは危険である場合がある。実際には、諸事情を考慮してどの方策・シナリオを選択することが必要となる。一般的には、早めの対策がライフサイクルコストを下げることにつながるので、対策や点検を容易にするための工夫や点検・対策が行いにくい構造物は、設計の段階から高耐久なものにしておくなどの対応が望まれる。

5. 港湾施設の構造性能曲線

5.1 性能低下予測とマルコフモデル

構造物の性能低下の進行は、概念的に図-4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ことがある。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、経時的な変状に関して取り扱う。

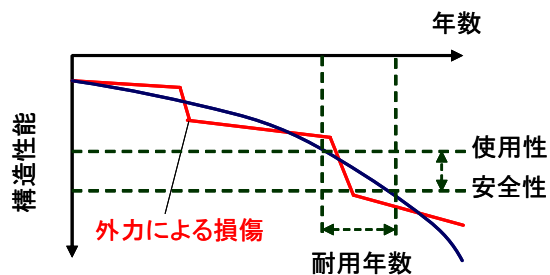


図-4 供用による構造性能の低下

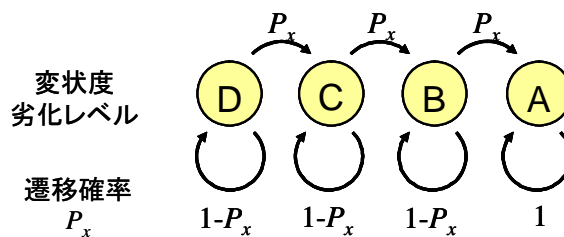


図-5 マルコフ連鎖モデル

本研究では、図-5に示すマルコフモデルという確率論的な考えを用いて変状の進行を再現する方法⁸⁾を港湾施設の劣化・変状予測へ適用することを検討してきた。このモデルは、ある施設における変状は、A, B, C, Dの独立する変状度（部材単位では、a, b, c, d）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。

5.2 栈橋の性能低下予測への適用

栈橋上部工のはりおよび床版といった主要構造部材の劣化度判定結果に基づいて、構造全体としての構造性能指標の低下を予測する。この目的のため、部材の変状度（a, b等）とそれぞれに対応した構造性能の関係を与えて、要素部材全体の平均値を主要部材における構造性能の値とする方法を検討した。具体的には、栈橋上部工のはりの変状度と耐力との試験結果から、構造性能指標を $d=100$, $c=99$, $b=95$, $a=80$ と設定する⁸⁾。これを基に、これらの構造性能指標の値の意味づけを明確にし、構造性能曲線の構築を試みる。

一昨年度から、全国的規模で国有港湾施設の点検・診断が実施され、主要部材ごとに変状度A, B, C, Dによる健全度評価の結果が得られている。例えば、栈橋の上部工については、252施設に関して総合評価結果のデータが、図-6に示すように、建設後の経過年数とともに得られている。しかしながら、ここでは要素部材に関する個別の劣化度判定結果は整理されていないために、遷移確率を具体的に算定することができない。

そこで、以下の2つの仮定を置くことで、劣化速度を算定することを試みる。この劣化速度は、要素部材を同一のレベル区分数とした場合の遷移確率の近似値と同等のものであることが分かっている⁹⁾。

- ① 点検・診断時点において各劣化度のレベルに達している。
- ② 劣化速度を算定するために必要な、要素部材ごとの $a(=3)$, $b(=2)$, $c(=1)$, $d(=0)$ による劣化度判定結果の算術平均値は、総合評価結果 $A(=3)$, $B(=2)$, $C(=1)$, $D(=0)$ に置換できる。
- ③ 劣化速度は、総合評価結果の値を経過年数で除することで得られる。

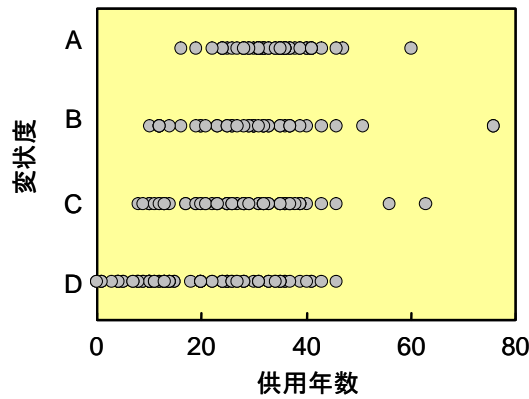


図-6 栈橋の変状度分布

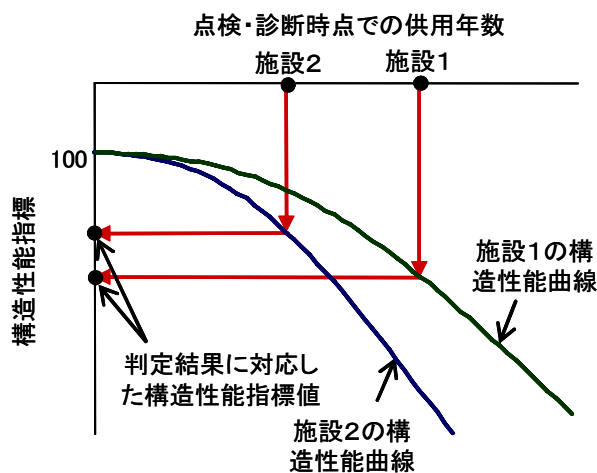


図-7 構造性能指標の意味づけ

これにより、栈橋の上部工の252施設について、D判定とされた84施設を除いた168施設に関して近似的な遷移確率を求める。次に、C判定（69施設）、B判定（44施設）、A判定（55施設）ごとに施設を区分し、各区分された施設について上記で整理した構造性能曲線を作成し、図-7で示すように点検・診断した時点での構造性能指標の値を整理する。その結果、各判定に対応する構造性能指標は概ね次の値となることが確認される。

C判定=95

B判定=80

A判定=60

ここで、各判定の定義からA判定の時期を終局限界とすることで、構造性能指標値の特性を明確にした各主要部材の構造性能曲線の構築が可能となる。

栈橋を対象とした場合には、施設の機能・性能を大きく制約する主要部材としてコンクリートの上部工、鋼管杭の下部工がある。鋼管杭の下部工においても同様の総合判定結果が得られており、コンクリートの上部工と同様の処理をすることで遷移確率を求めることができる。D判定の施設を除いた平均値を代表的な遷移確率とすると、上部工の遷移確率

は0.0706, 下部工の遷移確率は0.0665となった. そこで, 大きな値となった上部工の遷移確率を用いて栈橋全体としての構造性能曲線を求める. その結果を図-8に示す. 25%値, 平均値, 75%値での構造性能曲線を示しているが, 25%および75%とは, 標準偏差を基にして得られた信頼度分布に応じた構造性能曲線であり, 全体の下位25%あるいは75%の施設が示す構造性能曲線を表している.

5.3 構造性能曲線からの主要施設の寿命に関する分析

施設の寿命を定義することは容易でないが, 設計計算に含まれる安全率から考えて, 本研究では終局限界に達した時点(変状度A判定の時点)を寿命と考える. これにより, 構造性能指標において終局限界である60に達した年数を構造性能曲線から算定することができる. この結果, 上部工により規定される栈橋では, 平均値の0.0706の遷移確率における寿命は42年と算定される. なお, 25%値の場合には32年, 75%値の場合には64年と算定される. この結果は, わが国の平均的な栈橋の寿命を示しているもので, これまでに得られている同施設の劣化進行の実態と感覚的に大きく外れてはいない. よって, このような手法により施設の寿命を推定することに大きな誤りはないと判断している. 実際の維持管理上は, 個別の施設の点検および評価により, 本研究で得られた標準的な構造性能曲線を修正し, 今後の維持管理戦略を個別に検討することとなる.

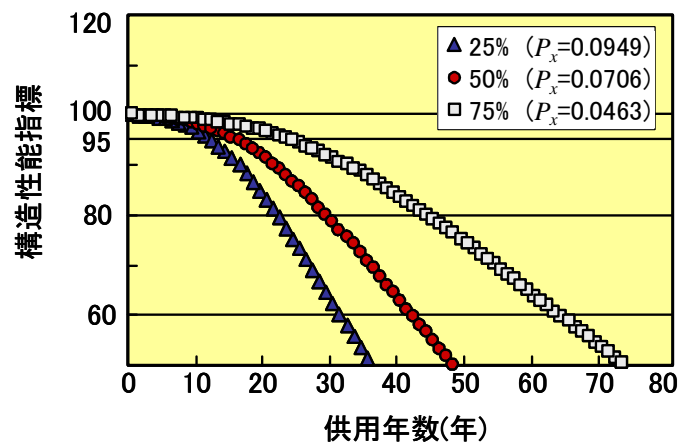


図-8 栈橋の構造性能曲線

6. 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, この目的を達成する維持管理業務が可能になるものと考えている. 適切な維持管理を行うために, 港湾LCMを具現化した標準的な手法をとりまとめたマニュアルは有効であるが, 維持管理の実際は現場ごと相当異なるため, 汎用的かつ標準的な手法をできるだけ具体的に書き込

んでいく必要がある。そのためには、研究的課題として、供用中の港湾施設や構造物の点検・診断手法の高度化、保有性能の高精度な数値化技術、将来の劣化・変状の進行や寿命の予測モデルの高精度化、対策工法の時期別コストの検討や性能評価などが上げられる。また、維持管理施策として、維持管理制度（法律や予算）の充実、ライフサイクルコスト評価による事業実施の推進などを進めていく必要がある。また、本研究では栈橋の構造性能曲線の構築を行った、他の主要施設に関しても分析を進める予定である。

港湾LCMはまだ発展途上にある技術であり、今後も積極的な取り組みが必要であることはいままでもない。そのために関係各位のご協力とご指導をお願いする次第である。

最後に、点検・診断実施に際して、港湾局建設課のご協力をいただきましたことに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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, 2005.9.
- 2) 例えば, 横沢 篤, 加藤絵万, 横田 弘, 下村 匠: 供用40年が経過したRC栈橋上部工の劣化と構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1591~1596, 2005.6.
- 3) 例えば, 横田 弘, 山内 浩, 加藤絵万, 岩波光保: 既設栈橋のライフサイクルシナリオに関する検討, 港湾空港技術研究所資料, 2005.12発刊予定 (印刷中)
- 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, 1999.4.
- 5) International Standardization Organization: ISO2394 - General principles on reliability of structures, June 1998.
- 6) 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.
- 7) 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, 2005.6.
- 8) Yokota, H and Komure, K: Estimation of Structural Deterioration Process by Markov Chain and Costs for Rehabilitation, Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures, American Society of Civil Engineers, 2003.
- 9) 小牟禮建一, 浜田秀則, 横田 弘, 山路 徹: RC栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, Vol.41, No.4, pp.3~37, 2002.12.