

2015 年度（第 51 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 15-B-4

港湾・海岸構造物の維持管理の 高度化に向けて

北海道大学 教授

横田 弘

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015 年 8 月

港湾・海岸構造物の維持管理の高度化に向けて

Toward Advancement of Maintenance for Port, Harbor, and Coastal Facilities

横 田 弘

Hiroshi YOKOTA

1. はじめに

社会基盤施設を有効活用し、長寿命化させることが近年非常に重要になってきている。これは、社会基盤施設を構成する構造物の高齢化と経年劣化の進行による事故や災害の発生への懸念、および維持費や更新費の低減要請などに起因する。長寿命化を図るためには、維持管理の時代に対応した意識の変化と制度や技術の確立が必要であり、それに基づいた維持管理の着実な遂行が求められている。

港湾構造物（以下、「港湾の施設」も「港湾構造物」と記す）は、海上物流の要として日々の生活や経済活動を支える重要な役割を担う港湾の最も礎となるインフラである。また、海岸構造物（以下、「海岸保全施設」も「海岸構造物」と記す）は、背後地を高潮や津波等から防護し、同様に住民の安全・安心とともに国土の保全や経済活動を支えるインフラである。これらはいずれも供用期間中に求められる役割や機能を果たしていくことが求められる。そのためには、新設の構造物では性能保持と耐久性に裏付けられた供用設計の実施が求められ、既存の構造物では、当初設計での考え方を踏襲しつつ戦略的かつ計画的な維持管理の実施が求められる。

この目的のために筆者らは港湾・海岸構造物のライフサイクルマネジメントのシステム構築のための検討を進めている。このシステムでは、構造物の計画、設計から撤去、更新までの各段階での作業の連携を確実にするとともに、維持管理において、点検・診断、予測、評価、判定、対策の各技術の高精度化と高信頼性を目指すものである。ライフサイクルマネジメントを適切に実施することで、構造物の機能や性能の確保とともに、ライフサイクルコストの縮減、構造物の資産価値の向上等が実現できる。

本稿では、ライフサイクルマネジメントの視点から、港湾・海岸構造物の維持管理の高度化に向けた実務的な調査・研究の事例について示す。まず、構造物の維持管理上の特徴と現状を述べ（2章）。次に、ライフサイクルマネジメントの枠組みについて概説する（3章）。紙面の関係から、ライフサイクルマネジメントを構成する要素のうち、点検・診断における選択と集中（4章）、性能評価における確率的考察（5章）および予測モデルとその影響（6章）について示す。最後に、要求性能レベルの向上（7章）への対応についても言及する。

2. 構造物の維持管理上の特徴

2.1 港湾構造物

港湾構造物の維持管理は、港湾法に規定される「港湾の施設の技術上の基準」¹⁾に基づいて行われている。現行の基準は、2007年4月に改訂・施行されており、そこでは性能規定化の思想が導入されたとともに維持管理に関する事項も充実された。これは、港湾構造物に求められる性能を明確に規定し、それを設計供用期間中に要求水準以上に保つことを、当初設計および供用中の維持管理の両者で実現しようとするものである。つまり、将来の維持管理に配慮した当初設計を実施し、その考えに基本的に基づいた維持管理を実施することになる。そのために、構造物の設置者は計画的な点検や想定される補修方法等を規定した維持管理計画を策定し、管理者はそれに基づいて維持管理の行為を進めていくことになる。さらに、ライフサイクルコスト

の縮減等を意図して予防保全計画²⁾を策定する。この予防保全計画は、構造物単位で策定している維持管理計画の内容を踏まえつつ、港湾単位で俯瞰的な視点に立った老朽化対策の検討が可能とするものである。構造物の重要性、変状の状況や利用状況等を総合的に勘案したうえで、個々の構造物をどのように維持管理・更新していくかなどの対応方針を定め、変状への対策を講じる構造物の優先順位等を設定する。

2013年6月に港湾法の一部改正が行われ、「技術基準対象施設の維持は、定期的に点検を行うことその他の国土交通大臣が定める方法により行わなければならない」という規定が導入された。合わせて、「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」および「技術基準対象施設の維持に関し必要な事項を定める告示」の改正も行われ、点検・診断の方法等が規定された。これを具現化し、港湾構造物の点検・診断の頻度および方法等の考え方をより詳細に示すガイドライン³⁾が2014年7月に新たに制定され、現在に至っている。

2.2 海岸構造物

海岸構造物に対しても、2014年6月に改正された海岸法において、海岸管理者の海岸構造物に関する維持・修繕の責務が明確された。また、予防保全の観点から維持・修繕に関する技術的基準を主務省令で定めることになった。海岸構造物も同様に、予防保全の導入などにより適切かつ効率的に維持管理を行うことで、構造物の長寿命化を図り、ライフサイクルコストの縮減に取り組む必要がある。そのためには、維持管理行為を義務づけるだけでなく、具体的な運用方法を定めた技術的基準の整備や取り組みを推進することが求められ、その一つとして、2014年3月に「海岸保全施設維持管理マニュアル～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～」⁴⁾が制定された。このマニュアルは、以下の項目についてその標準的な手法を提示するものである。

- ・点検の選択と集中および重点点検箇所の抽出
- ・防護機能の確保に重要な視点の明確化
- ・引継ぎを考慮した点検結果等の記録、保存
- ・巡視（パトロール）と定期点検による点検システムの構築
- ・予防保全に資する健全度評価の基準見直し
- ・長寿命化計画の定義づけと策定の単位
- ・劣化予測結果にもとづく修繕時期の検討
- ・ライフサイクルコストの縮減および点検・修繕等の費用の平準化

また、このマニュアルでは、予防保全の考え方を導入して適切な維持管理を行うことで長寿命化を目指すとしている。長寿命化を図ることにより、防護機能を確保できること、大規模な対策等を実施する必要性が小さくなること、長期的にみるとライフサイクルコストが少なく済むことなどの効果を期待している。

3. ライフサイクルマネジメント

港湾構造物や海岸構造物において戦略的な維持管理を行うにあたっては、構造物に変状が生じることを前提とし、「事後保全」から「予防保全」へとその思想を転換することが必要である。また、予防保全は、長寿命化を可能とする重要なキーワードでもある。港湾構造物や海岸構造物は、海中や地中に埋没している部分が多いことなどから、陸上の構造物と比較して維持管理上の困難が伴うことが多い。また、構造物が環境条件の厳しい沿岸域に位置しており、外力の作用のみならず材料劣化やそれによる性能低下が生じやすい。そのため、構造物の建設時にその重要性（代替性）や維持管理の難易度に応じて所要の耐久性を付与するとともに、予防保全に立脚した計画的な維持管理を行うことで、構造物が保有すべき機能や性能を保持しなければならない。

ライフサイクルマネジメントとは、計画・設計段階から供用段階を経て撤去・更新段階に至るまでの構造物の総合的な管理を効果的に実施するための技術の体系である。単一の構造物を対象とすることもあれば、複数の構造物群を対象とすることも可能である。港湾や海岸の構造物に限らず、どのような社会基盤施設で

あってもそれぞれに何らかの機能が期待され、その機能が所定の期間保持されることが求められる。例えば、防波堤は外洋の高波から港を守り、港内に静穏な海域を提供することがその機能であり、岸壁は所定の船舶が平易に着岸でき、円滑に貨物の積み出し、積み込みができることがその基本的な機能である。この機能が失われることは、その構造物にもはや存在価値がなく、言い換えれば寿命を迎えることを意味する。前述のように、この寿命をできるだけ長くすることが、地域や国家の経済発展や社会生活の保証に貢献することとなる。構造物の機能あるいはそれに基づく性能を設計供用期間中に要求水準以上に保つことは、当初設計および供用中の維持管理の両者の連携で実現すべきである。つまり、構造物の機能や性能の時間的な低下を予測し、それに対応するために必要となる将来の維持管理の方法を考慮した設計を行い、構造物の機能・性能確保の道筋（シナリオ）を設定することが求められる。一方、維持管理では、設計で考えられた構造物の性能レベルに応じた維持管理を実施するとともに、設計で予測した性能低下の状況を補正しつつ最適な維持行為を行うことになる。このように、維持管理の中で定期的な診断行為によりシナリオを検証し、必要に応じてシナリオを見直し、修正することが必要となる。これらの一連の作業の流れがライフサイクルマネジメント（LCM）である^{5,6)}。

LCMの枠組みのうち、維持管理の段階に絞って示した流れは、図-1に示すとおりである。LCMは、構造物の現況を統一的な基準に基づいて判断する「定期的な点検・診断」、点検・診断等に基づく構造物あるいは部材の「保有性能評価と将来予測」、および将来の利用計画、残存供用期間、ライフサイクルコスト等を制約条件として評価し、必要に応じて実施する「対策法の提示」を中心に構成されている。

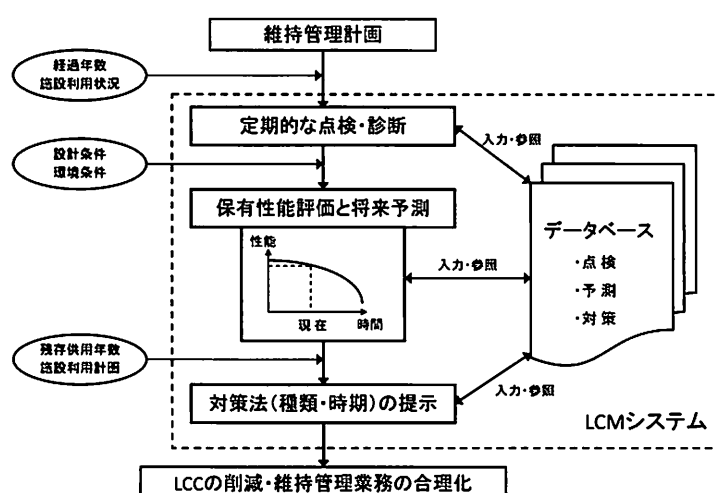


図-1 ライフサイクルマネジメントに基づく維持管理の流れ

点検・診断は、構造物の現況を知るうえで不可欠の作業で、LCMにおける評価や対策検討のための重要な行為である。港湾構造物や海岸構造物では、2段階のレベルおよび2段階のタイミングによる点検・診断を実施することを基本としている。常にすべての変状を詳細に調べていくのではなく、点検・診断の対象にめりはりをつけて、費用や労力の合理化を図るためである。次は、構造物の供用中の保有性能を的確に評価し、これに基づいて今後の性能低下の進行を予測（従前の予測結果を修正）する。その結果、コストが最適に、あるいは限られた予算内で最大の効用が得られるような性能確保のシナリオ（維持管理計画）が立案されることが期待できる。また、これらの結果をデータベースに登録し、以降の作業に活用できるようにする。データが多く蓄積されるにつれ、評価や予測の精度が向上することになる。性能確保のシナリオが立案できれば、それに基づいて所定のタイミングと方法で対策を実施する。ここで、性能維持のシナリオは、当初に将来の維持管理の方法の基本を定めたものであるが、実際の劣化・変状が当初の予想どおり進行しないことが一般的である。これに対して、シナリオを定期的な行為で検証し、必要に応じてより適切なものへと見直す

ことがLCMにおいては必要となる。具体的には、構造物（構造物）の供用中の保有性能を的確に診断し、これに基づいて今後の性能低下の進行を予測（従前の予測結果を修正）するとともに、必要に応じてコストが最適に、あるいは限られた予算内で最大の効用が得られるように維持管理を行うことである。この流れたLCMの枠組みそのものであると言える。なお、現時点ではコスト（いわゆる経済性）を指標としてシナリオの評価が行われることが一般的である。本来、構造物のサステナビリティの観点⁷⁾から考えると、経済性のみならず社会性や環境性の観点からの指標も考慮される必要がある。特に我が国では人口減少等に伴い構造物の役割や期待が当初のものと異なってくることも考えられる。また、沿岸域や海岸線周辺では環境への配慮が必要となる場合も多く、環境コストを低減し、環境便益を上げていくことも必要になる。そのようなものも統合した評価指標の構築についても検討を進めている

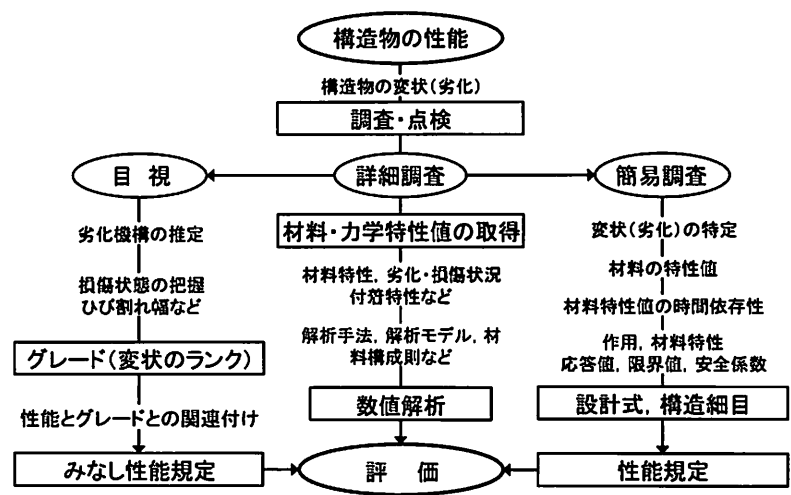


図-2 性能評価のレベルに応じた点検・調査⁸⁾

4. 点検・診断における選択と集中

この章では、海岸構造物を事例として、点検・診断の高度化に向けた実務的な検討の状況を紹介する。海岸構造物の変状は、一般に荒天時や地震時等に大きく進行する。また、地形的に変状が進行しやすい箇所があるなど、点検においては選択と集中が必要かつ有効である。

海岸構造物の要求性能には、安全性、使用性、復旧性等が考えられる。その性能の指標として最もわかりやすく、かつ直接的なものの一つに天端高さがある。ある高さを確保していると、それ以上潮位や波浪が乗り越えない。また、地震、台風時に構造物が安定して存在し、破壊しないということ（安全性）も容易に理解される要求性能である。安全性や安定性の評価を行おうとすると、設計手法を用いる計算、数値シミュレーションの実施等が必要である。しかし、天端高さというのは非常にわかりやすい指標となり、簡単に計測するだけで構造物の性能・機能が評価できることになる。

このように、維持管理において診断し評価すべきは、構造物の外観ではなく（もちろん外観の美しさが求められる構造物ではこれを無視してはいけない）、構造物の保有する機能あるいは性能である。つまり、維持管理における点検や調査では、種々のテクニックを駆使して各種のデータを取得するが、最終的に評価すべきものは機能あるいは性能である。図-2は、点検・調査で得られるデータの質および量によって適用できる機能・性能評価の手法を示している。目視による点検では、得られる結果は「変状のランク」あるいは「劣化度」といった、いわゆるグレードである。もし、このグレードと性能が関連づけられると、目視の結果だけでも、ある程度構造物の性能を評価できるようになる。あくまでも「みなし的な性能評価」であり、目視のデータだけで、精度の高い評価を行うには限界がある。一方、実際には非常に難しいが、労力と費用をかけて質・量ともに満足できるデータが取得されれば、数値解析による方法や設計で用いられる照査式、いわ

ゆるマクロ式を用いて構造物の定量的かつ高精度な性能評価を行うことが可能である。したがって、必要な診断項目や評価項目を事前に検討し、どのようなデータをどの程度の質で、どのくらいの量必要とするのかを事前に考えることが求められる。

最も簡便で容易な点検方法は、目視である。しかし、誰でも確実にできるというわけではなく、経験を積み、研修や訓練を受けるということが必要である。知識を持ち経験を積みれば、簡便で、他者に委託することなく実施できるので、多大な点検費用も必要としない。ところが、人が目で見て判断するので、多少の主観が入るのはやむを得ず、誤差が含まれてくることもある。また、全ての部位を見ることは難しい。このような制約はあるものの、現時点で、あるいは当面の将来においても、実行可能な唯一の点検の枠組みは、目視点検であると考えている。

海岸構造物は、延長も長く、点検すべき箇所もたくさんあるので、まともに全延長、全箇所を細かく点検するのは大変である。そこで、前述のマニュアル制定に際しては、どれだけ簡略化できるかということを検討してきた。例えば、海岸構造物は平面的に一樣ではなく、前浜の状況とか、背後の状況とかが異なっている。何度か点検を実施してデータが蓄積されると、変状が生じやすい箇所が特定できる可能性が高くなるので、地形的に変状の生じやすいところを重点的に点検の対象とし、省力化につなげることができる。また、ここ数年、護岸や堤防の胸壁の劣化調査をしてきた結果を元に、ひび割れ調査の簡略化を可能とする提案も行ってきている^{9, 10)}。このような構造物では、ひび割れが変状を表す指標として重要であるため、部材にひび割れがどの程度発生しているのかを調べ、それを発生確率によって表現した例を紹介する。図-3によると、護岸の胸壁に全くひび割れが発生していないという確率は27%、1本あるいは2本以上ひび割れが入っている確率は73%である。次に、それらのひび割れの幅についての2つの海岸での測定結果を一例として図-4に示す。このようなデータを多数収集することで、ひび割れ幅の頻度に対する確率分布形状を特定することが可能となる。

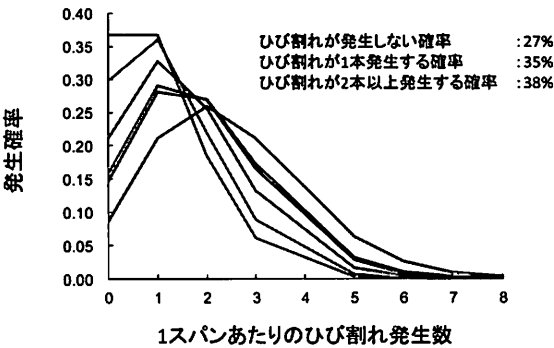


図-3 胸壁1スパンでのひび割れ発生確率

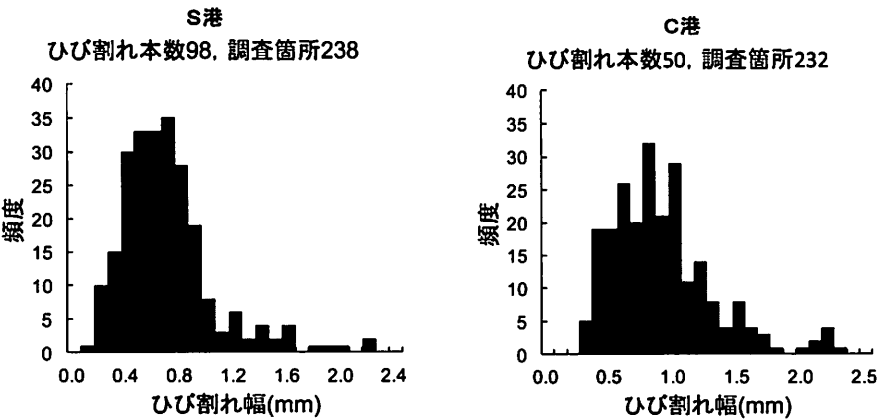


図-4 ひび割れ幅の頻度分布

これらの調査結果を元に、全てのひび割れの幅を測定しなくても、構造物全体の最大ひび割れ幅を精度よく推定するには、どれぐらいの量のデータがあればいいのかを、数値計算的に検討する。図-5に示すように、3種類の極値分布を仮定して検討したところ、実測値と予測値の差が概ね10%以内ぐらいの精度にあることを目標とすると、サンプリング率（測定スパンの全スパンに対する比）は15%とか20%程度であることが分かる。地形的な状況に応じて変状の起きやすいところがあることを既述したが、比較的一様な状況の中にあるたくさんのスパンから20%ぐらいのスパンを抽出してひび割れ幅のデータを取り、極値分布を適用することで、構造物の全スパンに入っているひび割れ幅の最大値がある程度の誤差で推定できる可能性がある。今後よりデータの蓄積を図り、精度の向上を検討したいと考えている。

もし、ひび割れの位置や幅から、構造物の保有する性能が限界値に対してどれぐらいの余裕があるのかがわかると、補修時期の設定や構造物の寿命そのもののある程度予測することができる。ひび割れの発生が構造物の性能に与える影響を知るには、ひび割れがどれぐらいの深さまで進展しているかということも調べる必要がある。ただ、ひび割れの深さは目視では分からず、非破壊試験等を行う必要がある。図-6は、ひび割れの深さとひび割れ幅との関係を示すものである。ひび割れ幅に部材の寸法を考慮することで、容易に計測できるひび割れの幅から、ひび割れ幅を推定することがある程度の精度で行える。そうすることで、ひび割れの状況をモデル化し、安全性等の構造物の性能の現状レベルおよび将来ラベルを定量的に検討することが可能となる。これらに基づいた変状度ランクの規定について、現在パラメータ解析を行っているところであり、別途その成果を公表したい（講習会ではその一部を発表する予定である）。

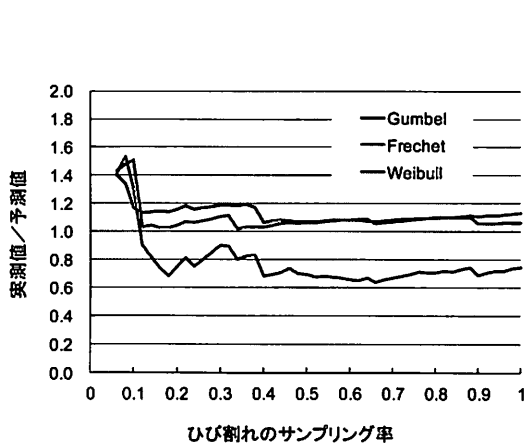


図-5 サンプリング率と予測精度

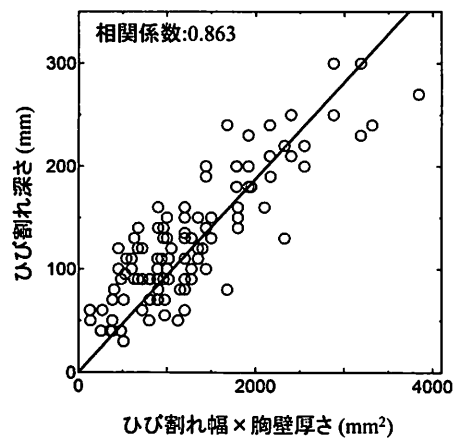


図-6 ひび割れ深さを推定する指標

5. 性能評価における確率的考察

既述のとおり、構造物の性能評価の観点から言えば、本来診断し、評価するものは表面上の損傷の程度ではなく、構造物や部材等有している性能である。言い換えれば、耐力や変形性能、安定性、使用性等の構造物に求められている性能の評価が不可欠である。したがって、「損傷劣化の診断」から構造物あるいは構造物の「保有性能の診断」へと点検・診断の内容を転換していかなければならない。この章では栈橋の上部工を事例として、性能評価の高度化について紹介する。

点検診断ガイドライン³⁾では、点検・診断から得られた部位・部材ごとの劣化度の判定結果(表-1)を基に、構造物全体の性能を総合的に評価し、表-2に示すように、その結果を性能低下度として評価している。部位・部材ごとの劣化度の判定結果からどのように構造物全体の性能低下度を評価するかについては、その手法が十分に確立されていない。そこで、簡便的に、部位・部材の変状が構造物全体の性能、特に安全性へ与える影響の程度をI類からIII類までの3段階に分類し、類別ごとに劣化度がaと診断された部材の割合等によって評価する手法をとっている。

表-1 劣化度の判定基準

部材の劣化度	劣化度の判定基準
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	変状はあるが、部材の性能の低下がほとんど認められない状態
d	変状が認められない状態

表-2 性能低下度の評価基準

性能低下度	性能低下度の評価基準
A	施設の性能が相当低下している状態
B	施設の性能が低下している状態
C	変状はあるが、施設の性能低下がほとんど認められない状態
D	変状は認められず、施設の性能が十分に保持されている状態

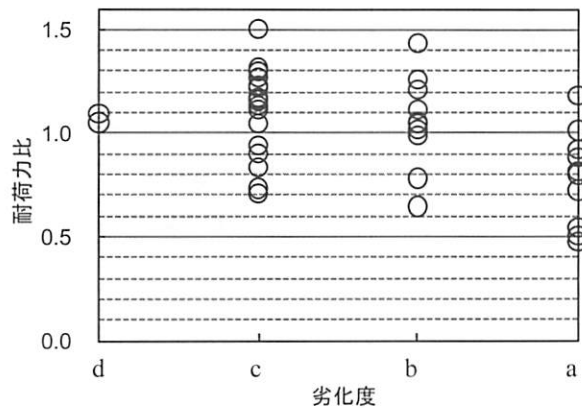


図-7 栈橋上部工コンクリート部材の耐荷力比と劣化度との関係

このような方法では簡便であるものの、主観的な判断になってしまう可能性もあり、より高度な方法が求められる。栈橋上部工のコンクリート部材を対象に整理した、目視による劣化度の判定結果と部材の性能（ここでは耐荷力に着目）との関係を図-7に示す¹¹⁾。これは、実際の港湾で30～40年供用された複数の栈橋の上部工から床版を切り出して行った載荷試験の結果である。また、耐荷力比は、劣化が生じていないとしては理論により求めた計算曲げ耐力に対する最大荷重の試験結果の比である。計算曲げ耐力の算出では、コンクリートおよび鉄筋の物性値は一定として取り扱っている。結果は非常にばらついているが、劣化度c～aと判定された部材において耐荷力比が1.0以下となるものが存在しており、変状が認められるRC部材の耐荷性は、初期値を下回る可能性があるといえる。詳細に見ると、同一の施設から採取した部材で劣化度判定結果と耐荷力比の大小関係が逆転した例が、特に劣化度bおよびcの部材間で多数見られている。これは、コンクリート部材の耐荷性が、軸方向鉄筋の腐食発生箇所とその程度、鉄筋径および本数に影響され、これは腐食発生箇所や鉄筋の節の残存による試験体内での応力伝達メカニズムの違いによるものであるとされている。劣化度は個々の部材に対して部材表面の状況から判定されるが、変状の発生位置については十分には考慮されない。さらに、劣化度の判定基準には、部材内のひび割れ発生面積は考慮されるが、ひび割れ幅や深さ等、部材内の鉄筋の腐食による断面減少程度に大きく影響する事項は含まれていない。このため、劣化度と耐荷力比の関係は一樣ではなく、劣化度ごとに広範な耐荷力比を示す結果となったものである。また、鉄筋の腐食により生じるかぶりの浮きは劣化度には反映されないことがある。このような要因で劣化度と構造物の性能との間には大きなばらつきも生じる。しかし、おおむね劣化度がbに達すると部材の耐荷力が設計値を下回

り、 a に達すると何らかの対策が必要な状況になる傾向が読み取れる。ただし、載荷試験では、支持条件や作用曲げモーメントが実際の部材の条件とは異なるものであるので、実際の構造物の耐荷性と結びつけるにはさらなる検討が必要である。

前述のように、鉄筋の腐食量や腐食箇所に関する詳しいデータを得ることができれば、性能評価の精度は向上する。腐食性状を精緻にモデル化し、数値解析を行うことで性能評価を行うことが考えられるが、現実的には難しい。上記のような部材の劣化度判定結果と耐荷性の関係に関するばらつきを効率よく取り扱うためにも、耐荷力比のばらつきを確率論的に取り扱い、目視による劣化度判定結果から部材の耐荷力を推定する手法を検討する。

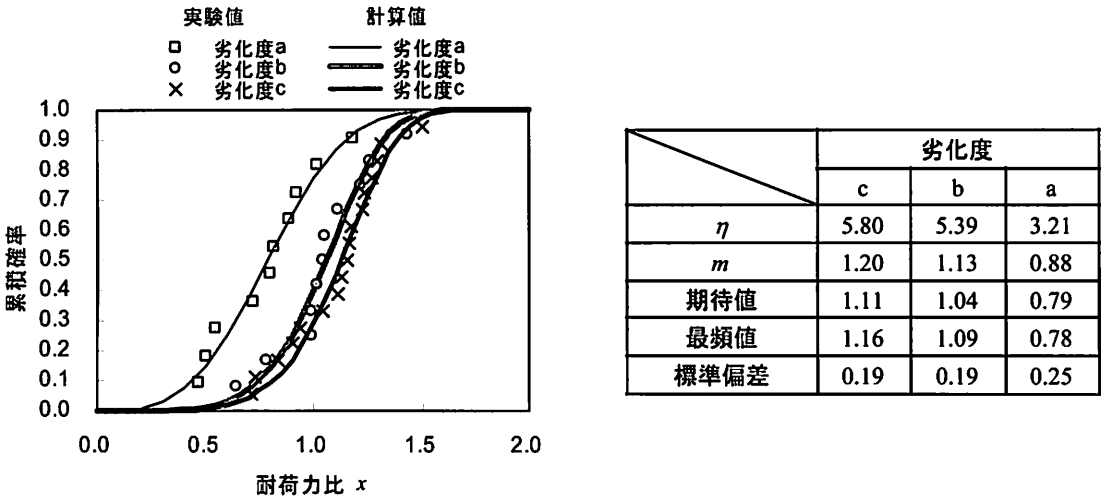


図-8 劣化度ごとの耐荷力比の累積確率と極値統計パラメータ¹¹⁾

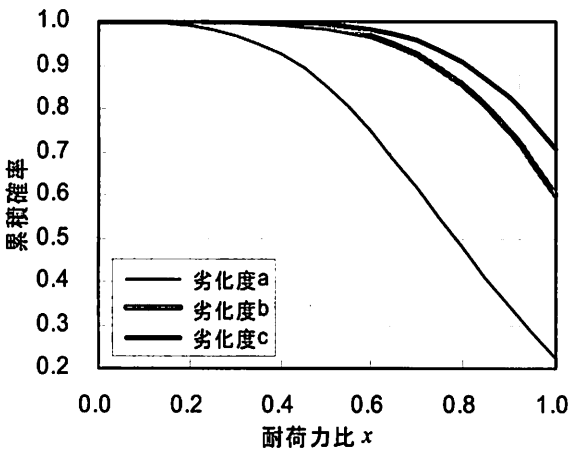


図-9 部材の耐荷力比が x 以上となる確率¹¹⁾

図-8に、劣化度 a , b , c の部材の耐荷力比のWeibull分布での累積確率の実験値と計算値、劣化度ごとのパラメータと代表値、標準偏差を示す。ここで、 η はWeibull分布の尺度パラメータ、 m は形状パラメータである。耐荷力比の期待値および最頻値は、劣化度の進行に伴い減少する傾向を示し、劣化度 a では、耐荷力比の標準偏差が劣化度 c および b と比較して大きく、期待値および最頻値は1.0を下回る結果となった。ここで、図-8で示した累積確率は耐荷力比の最小値が x 以下となる確率を示している。例えば、いずれの劣化度においても $x=1.5$ の場合、累積確率はおよそ1.0を示すことから、ある劣化度のRC部材の耐荷力比の最小値はほぼ100%の確率で1.5以下となるといえる。しかし、この表現は、構造物の効率的かつ効果的な維持管理の実施を目的

として行われる部材の保有性能評価の指標とするには、概念として不適當である。そこで、縦軸を部材の耐荷力比が x 以上となる確率として変換したものを図-9に示す。なお、ここでは、耐荷力比 x の上限を1.0として表している。これによれば、例えば、耐荷力比 x が1.0、つまり劣化の発生以前と同程度の耐荷力を示す可能性は、劣化度cの部材では約70%、劣化度bの部材では約60%、劣化度aの部材では約20%となる。また、それぞれの劣化度で部材数の95%が示す耐荷力比は、劣化度cの部材では0.72、劣化度bの部材では0.65、劣化度aの部材では0.35と推定できる。また、劣化度aにおける耐荷力比の最小データは0.47である。劣化度aは最も劣化が進行した状態であり、データが増えれば部材の耐荷力比の最小値は0.0に近づくことが予想される。今後、さらなるデータの蓄積とともに、劣化度判定時に劣化発生 of 局所化等の要因を可能な限り考慮することにより、特に、劣化度c および劣化度 b における部材の耐荷力比の推定精度が向上することが期待できる。

6. 予測モデルとその影響

6.1 概要

合理的かつ効果的な維持管理の実現のためには、予測が不可欠である。予測というと寿命予測、つまり、構造物があと何年使用できるかということに短絡的に結び付けられることが多い。このような寿命予測ももちろん重要であるが、寿命の定義が明確でない以上、構造物の状態が時間とともにどのように変化し、それによって性能がどのように低下していくかを予測することが目的となる。このような予測を行うことができれば、いつどのような補修をすればよいか、いつ更新する必要があるかということも自ずとわかってくる。それに応じて、構造物にどう向き合っていくかをより具体的に考えられるようになる。また、将来の予測だけでなく、過去の履歴を予測することも重要である。構造物の維持管理においては、初期値が明確でないことが多い。そのため、現時点から過去を予測し、どのような経路をたどって構造物が現在の状態になったのかを知るということも必要となることが多い。

維持管理における予測の目標を達成するには、予測の精度をできるだけ向上させる必要がある。設計時の耐久設計の際に行う予測においては、多くの仮定を積み重ねて構造物の設計供用期間において重大な補修等の対策が必要とならないことを照査する、あるいは、そのようにならないための事前の対策を検討することが行われる。一方、既設構造物においては、点検時点での構造物の状態を入力値として、あるモデルを用いて将来あるいは過去を予測することになる。しかし、様々な要因により、構造物の部位・部材において劣化の状態等が大きく異なることが一般的¹²⁾であり、予測において、この大きなばらつきをどのように取り扱うか、また、予測のための入力パラメータをどのように設定すればよいのかを決めることが必要である。また、劣化機構に基づく理論的なモデルが構築されていることは稀で、どのようなモデルを用いるかも難しい。これらが、維持管理において予測を行うことの難しさにつながっている。この章では、港湾構造物や海岸構造物で最も代表的な劣化の事象である、鋼材の腐食と鉄筋コンクリートの塩害を取り上げて、その予測モデルの考え方を紹介し、その影響について考察する¹³⁾。

6.2 鋼材の腐食

鋼材の腐食は電気化学的に説明でき、鋼材すなわち鉄(Fe)が酸素と水に接触することで鉄イオン(Fe^{2+} 等)に変化する現象である。鋼材の腐食速度が鋼材の劣化進行を説明するパラメータとなる。既に、長年の実構造物でのモニタリングあるいは研究レベルでの暴露試験を経て、標準的な腐食速度が規定されるに至っている¹⁴⁾。その規定では、海洋環境として、海上大気中、飛沫帯、干満帯、海水中、海底土中部、背面土中部ごとに標準的な腐食速度が確定的な値として与えられている。この値を用いることで、経年的な腐食による鋼部材の肉厚減量を計算でき、その肉厚減量に応じた断面諸元を入力値として、部材あるいは構造物の性能の低下が予測できることになる。

しかし、鋼材の腐食が電気化学的な現象であるということは、ミクロ的あるいはマクロ的な電位差によって腐食電流密度が影響を受け、場所ごとに腐食速度が変動することになる。それには、局所的な腐食条件の

相違，たとえば鋼の化学成分の差，部材の表面テクスチャの差，海水温度の差，溶存酸素濃度の差，溶解成分の差等が影響する．棧橋の鋼管杭で26年間実測された腐食速度の分布を図-10に示す．同図に示すように，腐食速度は杭の軸方向で変動するのはもちろんのこと，円周方向でのばらつきも見て取れる．では，このような場合，どの値を用いて予測を行えばよいのであろうか．図-11に腐食速度として平均値，最大値，最小値を用いた場合の棧橋鋼管杭の曲げ耐力の計算結果の経年変化を示す．用いる腐食速度すなわち劣化曲線の相違によって，得られる部材性能の予測結果は異なることになる．確定的に予測を行うには，何らかの方針に基づいて適切な腐食速度を用いる必要がある一方で，このようなばらつきを確率的に表現することで予測を行うことも可能である．例えば，腐食速度のばらつきを確率分布として与え，構造物の破壊確率の経時変化を示すことで性能を評価することも可能である．また，鋼材の被覆防食に関しても，材料の劣化の問題があり，防食効果が永続するわけではない．近年被覆防食材の耐久性に関する調査研究が進められ，劣化進行に関する知見が得られつつある．しかし，予測モデルとして確立するまでには至っていない状況であり，今後の成果が期待される．

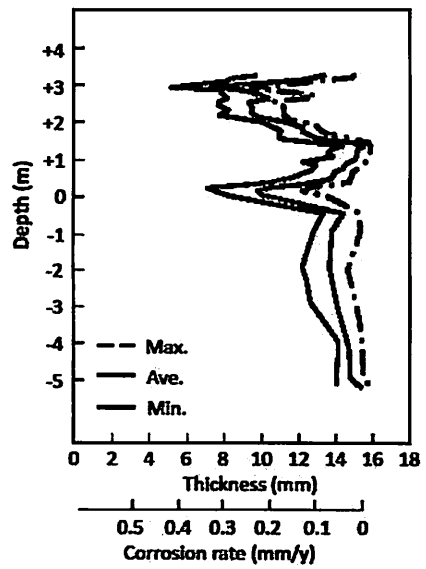


図-10 棧橋の鋼管杭で実測された腐食速度の分布
(港湾空港技術研究所より提供)

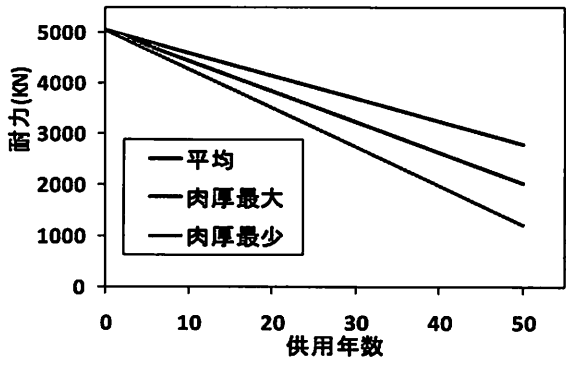


図-11 棧橋鋼管杭の曲げ耐力の経年変化の計算値

6.3 鉄筋コンクリートの塩害

コンクリート部材の塩害は，海水から供給される塩化物イオンによって鉄筋の不動態皮膜が破壊されることで生じ，コンクリートのひび割れ，かぶりコンクリートの剥離・剥落，鉄筋の破断等の過程をたどる．鉄筋の腐食の観点からは，前述の鋼材の腐食と同じ機構となる．この塩害の進行過程を模式的に図-12に示す．この図では，模式的にそれぞれの塩害過程が等間隔で描かれているが，現実はそのようなことは全くない．

予測の観点から見ると，鉄筋に腐食が発生する時期の予測，腐食ひび割れが発生する時期の予測，その後の鉄筋腐食に伴う劣化進行の予測が必要である．新設構造物の耐久設計では，設計供用期間中に鉄筋に腐食が生じないようにすることを一般的に照査するが，実際は設計での仮定どおりに進むことは稀で，場合によっては塩害の進行が予測を超えて進み，ひび割れ発生や腐食による鉄筋断面の減少等も予測する必要がある．これらの予測に対しては，数値解析上のモデル化が検討されており，このうち，鉄筋腐食発生時期の予測では，Fickの拡散則に基づいて鉄筋周囲の塩化物イオンの蓄積を予測し，ある値（腐食発生限界塩化物イオン濃度）に達した際に腐食が生じると考える方法が一般に用いられている¹⁴⁾．その際に必要となるのは，コンクリートの表面塩化物イオン濃度，コンクリートの見かけの拡散係数，かぶり，時間である．この法則

では、外部環境からの塩化物イオン供給量をコンクリート表面の塩化物イオン濃度で代表させ、コンクリート中の塩化物イオン濃度の移動のし易さをコンクリートの見掛けの拡散係数で代表させている。したがって、環境条件、コンクリートに用いるセメントの種類や水セメント比によって、劣化の進行程度が異なることが表現できる。

しかし、前述の腐食速度と同様、同一の部材であっても詳細調査で得られる表面塩化物イオン濃度やコンクリート拡散係数は大きくばらつく。つまり、どのようにこれらの計算パラメータの代表値を求めるかが難しい。直径10cmのコアを単一の部材から多数抜いた場合、これらの値には大きなばらつきが認められ、その結果、鉄筋位置における塩化物イオン量の推定結果も図-13に示すように分布する¹⁶⁾。このうちどの値を用いて鉄筋腐食時期を予測するのかは困難な問題であり、ばらつきの定量化が望まれている。

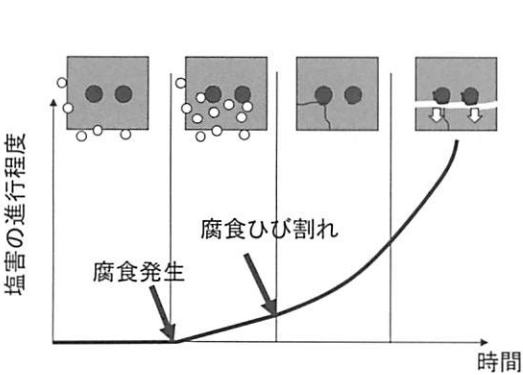


図-12 コンクリートの塩害の進行過程の模式図

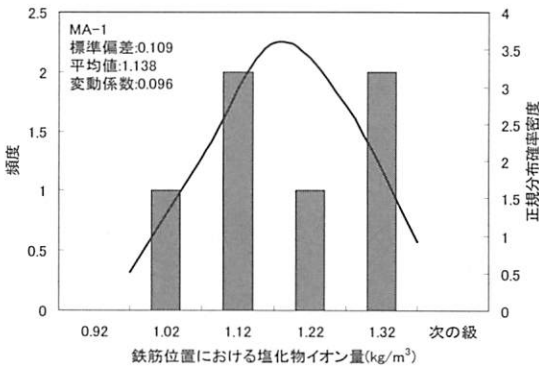


図-13 鉄筋位置における塩化物イオン量の度数分布

6.4 確率的アプローチによる予測

鋼材の腐食や塩害以外の劣化のように劣化の進行を予測するためのモデルが確立されている場合も含めて、この劣化度の経年的な推移を確率的に捉えて、将来の劣化度の進行を予測することも考えられる。特に、部位ごと部材ごとに劣化の進行程度が異なるため、構造物全体から見れば、劣化度にばらつきが生じ、同一の劣化度を有する部材の存在割合が構造物ごとに異なる。このような状態に対しては確率モデルの適用が効果的であり、港湾構造物ではマルコフ連鎖モデルが用いられることが多い。このモデルは、図-14に示すように、「状態」と「推移」という2つの概念を用いて、ある事象が「状態」から、ある「遷移率」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。また、過去の状態は将来の状態に依存しない。遷移率が定量化できれば、任意の年における部材ごとの劣化度割合を求めることができる。遷移率は、ある所定の期間（港湾・海岸構造物では1年間とすることが多い）における劣化速度とほぼ等価であり、遷移率が大きければ劣化速度が速いということになる。

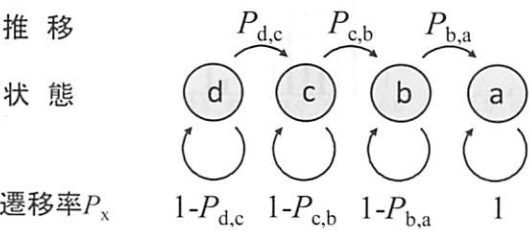


図-14 マルコフ連鎖モデルによる劣化進行の予測

港湾構造物は多種多様な多くの部材より構成されているが、それぞれの部材の劣化過程を表現することは難しいとされている。港湾構造物の維持管理戦略を決定する際には、部材ごとの劣化過程を予測するよりも、構造物全体における統計的な劣化予測を行うことのほうが重要であることが多く、マルコフ連鎖モデルの有用性がある。

港湾構造物の内、係留構造物の代表構造である重力式岸壁、矢板式岸壁、栈橋について、点検・診断によって得られた劣化度調査に基づく分析結果を紹介する¹⁷⁾。図-15は、国内の335の係留施設の遷移率の分布を示すものである。これは、構造形式ごとの劣化度分布より二乗誤差和が最も小さくなる遷移率を推定した結果である。同図より、遷移率の分布は、構造形式に依存せず、概ね同じ分布系であり、対数正規分布を示していることが分かる。また、構造形式ごとの遷移率の平均値は、重力式で0.081、栈橋式で0.094、矢板式で0.080となった。ただし、この計算では遷移率はすべての劣化度で一定値であると考えている。栈橋の場合に劣化速度が速く、重力式および矢板式岸壁の場合では概ね劣化速度は一致している。しかし、劣化速度つまり遷移率は種々の要因によってばらつくため、この遷移率からの変動によって実際の劣化速度が異なることの影響を調べる必要があり、以降でそれを示す。

港湾構造物では部位・部材の劣化度から構造物全体の代表劣化度を評価することは既に述べたとおりであるが、同じ代表劣化度において、その劣化度の初期の状態と劣化が最も進行している後期の状態があり、これがばらつきの要因となる。離散的なアルファベットによる代表劣化度では細かな検討が難しいので、ここでは、構造物全体の劣化の進行状態を数値により連続的に表現するものとして、劣化度ポイント(DP)を定義する。DPは、式(1)に示すように、 $X_a=4.0$ 、 $X_b=3.0$ 、 $X_c=2.0$ 、 $X_d=1.0$ と重みづけすることで求める。重みづけの数値は今後詳細な検討が必要であるが、ここでは、遷移率を一定としていることから劣化度が線形的に与えられているものと考えて、これらの値を用いる。

$$DP = X_a a + X_b b + X_c c + X_d d$$

(1)

ここで、 a 、 b 、 c 、 d はそれぞれ劣化度が a 、 b 、 c 、 d と診断された部材数の全部材数に対する比である。したがって、DPの最大値は4.0、最小値は1.0である。また、全ての部材が b の状態では $DP=3.0$ となる。

対数正規分布に従う乱数を10,000個発生させ、マルコフ連鎖モデルにより劣化予測を行い、予防保全の限界の一例として、DPが2.5および3.0に達するまでの年数を算出し、これを予防保全のための補修の実施時期と考える。なお、式(1)において、DPは構造物全体の劣化の進行状態を定量的に表すものであり、構造物性能の限界値を示すものではない。

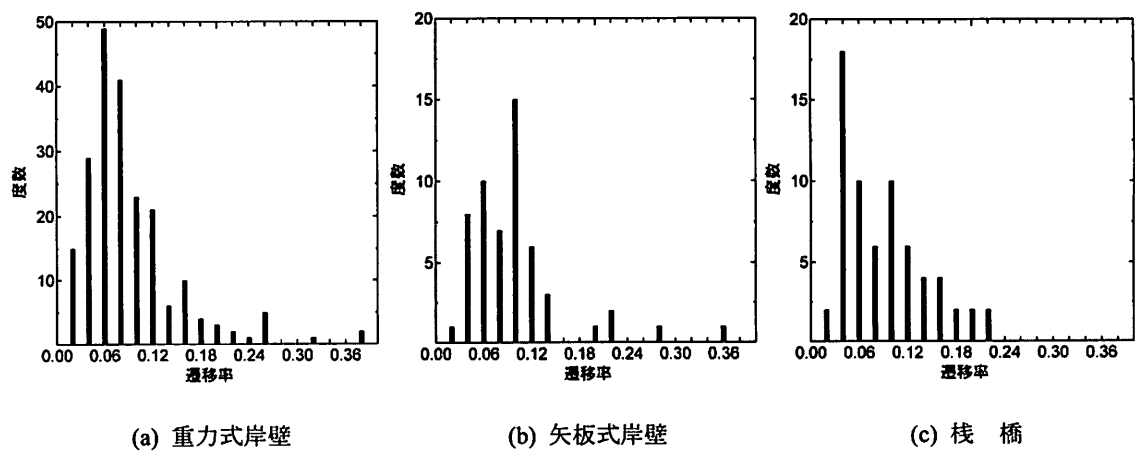


図-15 係留構造物の遷移率の分布

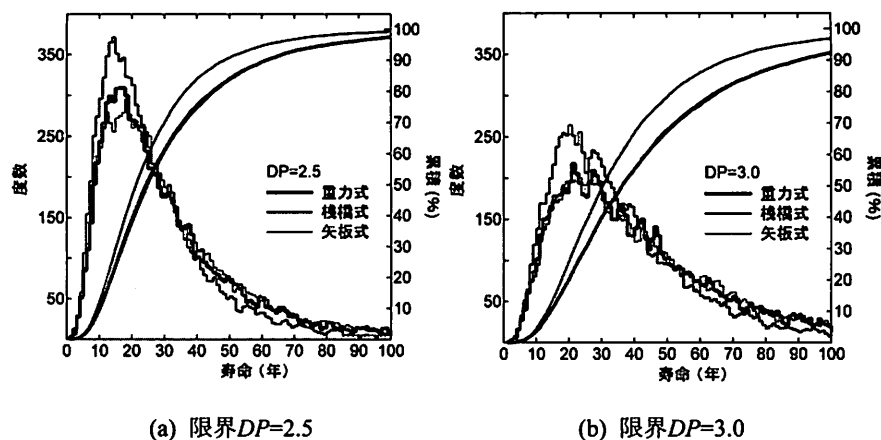


図-16 限界DPごとの補修実施時期（寿命と表記している）の予測結果の分布

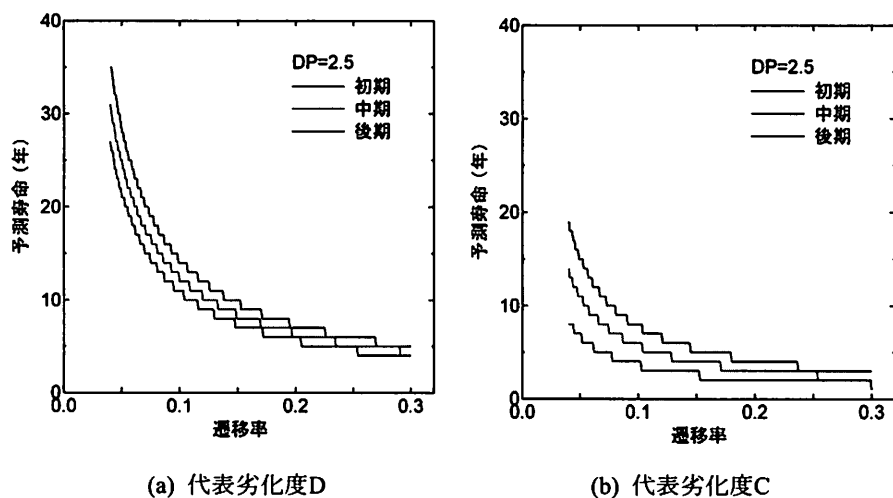


図-17 代表劣化度ごとの補修実施時期（寿命と表記している）の予測結果の分布

図-16にDPが2.5あるいは3.0に達した場合に補修が必要と仮定した場合の補修実施時期の予測結果の分布を示す。同図より、分布系状は左側（対策推奨年が短い側）に偏っている。DP=2.5の場合のみを考察すると、補修実施時期の最頻値（発生確率の最も高い値）は、重力式で18年、橋樑式で15年、矢板式で19年である。補修実施時期の中央値（累積確率が50%の値）は、重力式で25年、橋樑式で22年、矢板式で26年である。さらに、補修実施時期が50年以内、つまり設計供用年数以内に1度は補修が必要と想定される構造物数は重力式および矢板式では80%以上、橋樑式では90%以上である。したがって、DP=2.5で補修が必要となるという条件下では、設計供用年数を50年とした場合、多くの構造物で一度補修が必要となると推定される。

遷移率の対数正規分布のパラメータから、累積確率が75%、50%、25%における遷移率を算出し、遷移率が高いケース（75%）、中間のケース（50%）のケースおよび遷移率が小さいケース（25%）における補修実施時期を予測し、遷移率の影響を定量化する。補修を必要とする限界DPを2.5とした場合には、補修対策実施時期は13年から40年の間でばらつく。重力式および矢板式の場合、遷移率が高いケースと最頻値では、予測結果の差が9年となり、橋樑式の場合には同様に7年となる。我が国の係留施設の実態から得られた遷移率の大きさに応じて、補修対策時期の結果はこの程度変動することがわかる。

同じ代表劣化度が与えられる場合でも、劣化進行程度（ $X_a \sim X_d$ の割合）はその構造物によって異なる。そこで、劣化進行程度が寿命推定予測の結果に与える影響を定量化する。代表劣化度がDおよびCで、DPを2.5とした場合の補修対策時期の予測結果を図-17に示す。図-17(a)で遷移率が0.040の場合、劣化度分布が初期と後期の場合の予測結果の差は8年であるが、遷移率が0.100の場合3年である。遷移率が0.2を超えた時点で、予測結果の誤差は1年程度となり、両者は概ね一致する。また、代表劣化度がCでは、遷移率が0.040の場合、

劣化度分布が初期と後期の場合の予測結果の差は11年となり、代表劣化度がDの場合に比べ誤差が大きくなる。これらより、遷移率が小さい場合において、劣化進行程度が補修実施時期の予測結果に与える影響が大きく、遷移率が増加するに従い予測結果の誤差が低減する。したがって、予測を行う構造物の劣化曲線つまり劣化速度（マルコフ連鎖モデルでの遷移率）に応じて、予測結果の扱いを慎重に行わなければならないと言える。

7. 要求レベルの向上への対応

港湾構造物や海岸構造物のもう一つの特徴は、供用中に要求性能が変わってくる可能性が高いことがあげられる。供用中の設計潮位や設計波高・津波高の見直等がこれに該当する。つまり、劣化や変状が見られなくても要求性能のレベルが上昇し、結果的に性能や機能不足に陥ることが想定される。

一例として海面上昇を考えると、IPCCの検討結果¹⁸⁾によると、RCP8.5シナリオでは45～82cmの範囲になる可能性が高いことが予測されている。海面上昇だけでなく、地球温暖化が進むと台風の強度も上がり、中心気圧で7hPaぐらい下がってくると言われている。このような状況を考えながら、供用中の構造物の性能や機能の維持を検討する必要がある。影響は大きいので、当面はソフト的な対策とハード的な対策をうまく組み合わせて、海岸施設の長寿命化を検討する必要がある。そのソフト的対策とハード的対策の組合せの中で、海岸保全施設に必要な機能あるいは性能を、今一度明確にすることが求められている。

このようなことから、今後の港湾構造物や海岸構造物の補修、更新等に当たっては、近い将来生じると想定されている地球温暖化に伴う海面上昇等を考慮し、長期的視点に立った計画的な取組みが求められる。既に変状の進行した構造物の対策が必要であるが、少子高齢化等により社会資本整備に係る投資余力が低下するなか、地域の特性を考慮した上で、潮位変化の長期的な動向の把握、災害リスクの評価、設計外力の設定等を検討し、構造物の嵩上げやその他の減災対策等についてハード対策およびソフト対策を含めて検討を行うことになる¹⁹⁾。

これらも含めた海岸構造物のマネジメントのあり方について、土木学会海洋開発委員会で議論したことがある²⁰⁾。その際にとりまとめたマネジメントの将来像を図-18に示す。

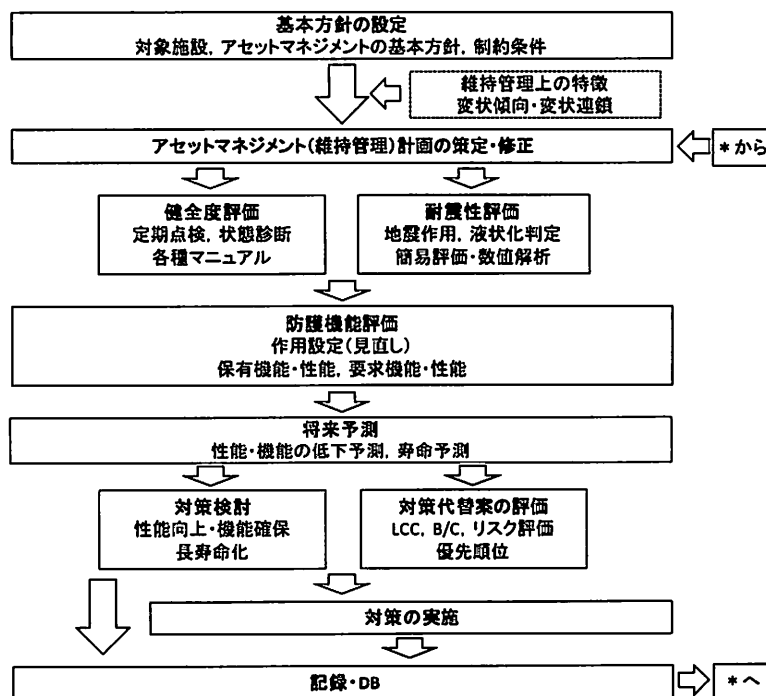


図-18 海岸構造物のマネジメントの将来像

この将来像は、LCMの枠組みをより具現化したものであり、優先順位の設定も含めて広域の海岸構造物の確実な性能・機能の維持を図るものとなっている。

8. おわりに

本稿で紹介した港湾構造物や海岸構造物の維持管理は本格的にその運用が開始されてまだ1～2年が経過したところである。今後さらに問題点などが改善され、より合理的かつ効率的な維持管理が実現するとともに、優れた構造物がより長く活用されることを期待している。港湾構造物と海岸構造物が非常に重要な施設であることは、疑うことはない。しかし、構造物の老朽化が進行し、変状の進んだ多くの施設が存在する状況で、維持管理を効率化し、評価基準を見直し、できるだけ客観的に説明責任が果たせるようにすることが必要である。これらに対して、いろいろな関係機関が分担をして技術開発に取り組むとともに、国や海岸管理者が導入する政策や制度と技術のバランスの確保、技術者の育成、可能ならば一般市民の方々からもご協力を得られるような施設の管理が必要となっていると考えている。

計画的な維持管理を実現するためには、点検・診断の高度化、予測の高精度化、対策の効率化が必要であることは疑いのないことである。維持管理の現場においても予測を十分に行って対策等の方針を検討することが望ましいが、最大の問題は、予測に必要な高精度かつ信頼性の高いモデルが存在しないことである。このようなことからマルコフ連鎖モデルを用いて確率的に劣化の予測を行うことが一般に行われている。マルコフ連鎖モデルは簡単な手法であり、また、港湾構造物への適用性について概ね確認されている。しかし、劣化が顕在化し、変状が進んだ部材が存在しないと遷移率が求まらず、計算ができない。つまり、劣化の顕在化を予測することを目的とするなら、別のモデルを用いる必要がある。これについても現在取り組みを行っているところである。また、多くの劣化度のデータが蓄積されればされるほど、より精度の高い予測の実現につながることから、定期的な点検・診断を継続して行い、データを蓄積することが求められる。

維持管理に関する技術は日進月歩である。今後より精度の高い点検・診断、予測、評価、より効果的な対策等に関する技術が確立するものと思われる。これらを適宜適切に活用してLCMの推進を図るための研究も進めていきたいと考えている。維持管理分野以外の技術者や研究者、維持管理の現場の技術者等からも多くのご意見やご要望をお聞かせいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007.
- 2) 山口貴弘，大澤修一：港湾・海岸保全施設の老朽化対策の推進，港湾，91(4)，10-11，2014.
- 3) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン，2014.
- 4) 農林水産省農村振興局防災課，農林水産省水産庁防災漁村課，国土交通省水管理・国土保全局海岸室，国土交通省港湾局海岸・防災課：海岸保全施設維持管理マニュアル～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～，2014.
- 5) Yokota, H and Hashimoto, K. Life-cycle management of concrete structures, International Journal of Structural Engineering, 4(1/2), 138-145, 2013.
- 6) 横田弘：海岸保全施設のライフサイクルマネジメント，波となぎさ，191，2-3，2013.
- 7) ISO/TS 21929-2: 2015, Sustainability in building construction -- Sustainability indicators -- Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works, 2015.
- 8) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー139，2013.
- 9) 古谷宏一，横田弘，橋本勝文：無筋コンクリート海岸構造物のひび割れ幅に基づく新しい劣化度判定基準の提案，土木学会論文集，B3，68(2)，I_360-I_365，2012.
- 10) 古谷宏一，横田弘，橋本勝文，加藤絵万，小松周平：無筋コンクリート海岸保全施設の現地調査結果の

- 統計解析に基づく検討, 土木学会論文集, B3, 69(2), I_251-I_256, 2013.
- 11) 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保, 横田弘: 港湾RC構造物の確率論に基づく保有性能評価の試行, 土木学会論文集, E2, 67(1), 150-159, 2011.
 - 12) 古谷宏一, 横田弘, 橋本勝文, 加藤絵万: コア採取による塩分浸透性状の評価および腐食開始時期の予測に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 34(1), 814-819, 2012.
 - 13) 横田弘: 港湾構造物における劣化曲線と予測, 防錆管理, 59(6), 9-17, 2015.
 - 14) 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル, 沿岸技術ライブラリー, 35, 沿岸技術研究センター, 2009.
 - 15) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2012.
 - 16) 横田弘, 古谷宏一: 鉄筋腐食発生時期の予測に関する信頼性, 生産研究, 62(4), 55-58, 2010.
 - 17) 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, 67(4), I_159-I_168, 2011.
 - 18) Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC: Climate change 2013, The physical science basis, Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
 - 19) 海岸における地球温暖化適応戦略検討委員会: 海外保全施設の更新等に合わせた地球温暖化適応策検討マニュアル(案), 2011.
 - 20) 土木学会: 沿岸防災施設のアセットマネジメントに関する現状と展望, 2012