

水工学シリーズ 10-B-7

港湾施設の健全度・劣化に関するデータと維持管理

北海道大学大学院工学研究院 教授

横田 弘

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2010年8月

港湾施設の健全度・劣化に関するデータと維持管理

Maintenance of Existing Port and Harbor 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技術の確立が必要である。

港湾施設の維持管理は、港湾の施設の技術上の基準¹⁾(以下、技術基準という)に基づいて行われている。2007年4月に改訂・施行された技術基準では、性能規定化の思想が導入され、同時に、維持管理に関する事項も充実された。これは、港湾の施設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するものである。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に基づいた維持管理を実施することになる。

このような維持管理を行うにあたって、施設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。後述するように、長寿命化を可能とする重要なキーワードは、「予防保全」である。港湾施設は、海中や地中に埋没している部分が多いことなどから、陸上の施設と比較して維持管理上の困難が伴うことが多い。また、施設が環境条件の厳しい沿岸域に位置しており、材料劣化やそれによる性能低下が生じやすい。そのため、施設の建設時にその重要度(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、施設あるいは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。

本稿では、港湾施設における維持管理の考え方や流れを説明し、健全度や劣化に関するデータの取得、取得されたデータの解釈と評価に基づくマネジメント(ライフサイクルマネジメント)の考え方と方法について紹介する。

2. 性能維持のシナリオ

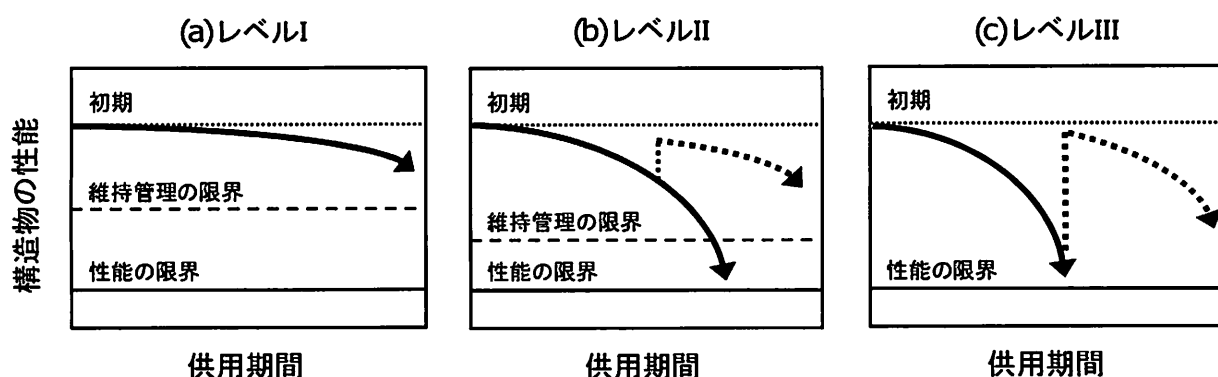
予防保全に基づく維持管理を実施するには、施設の供用中の性能維持のシナリオを定めることが有効である。このシナリオをあらかじめ定めたものが維持管理計画である。港湾施設では、この維持管理計画を管理者ではなく、当該施設の設置者が定めることを標準としている。それは、将来の維持管理に配慮しつつ施設が保有すべき当初の性能レベルを設定し、それに応じた維持管理を行うことが戦略的な維持管理の実現には不可欠であるためである。最初にどういう性能を施設に付与するかということは、将来それをどのように維持していくかということを切り離して考えるわけにはいかない。非常に耐久性の高い材料が使用された施設や補修等による供用停止が許されない施設等ではそれらを前提とした維持の方法がある一方で、初期建設費の低減にのみ重きをおいて建設された施設施設では、将来の維持に要する費用の負担や破壊リスク²⁾について気を配るべきである。

また、港湾施設は、施設の設置者と管理者が異なることが多いことも忘れてはならない。施設の管理者は、そもそもその施設がどのような考え方で設計されたのかを知っていなければ、適切な維持管理はできない。

また、当初設計において考えた種々の仮定や性能確保の枠組みを、施設の管理者に的確に引き継ぐ必要がある。設計者から維持管理者へ引き渡すメッセージが維持管理計画であると言える。なお、維持管理計画等を含むべき基本的内容については、「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（平成 19 年国土交通省告示第 364 号）」に示されているほか、実際の作成に際しては、「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き」³⁾などを参考にする。

3. 維持管理レベル

維持管理に関する基本的な考え方は、当該施設が置かれる諸条件、設計供用期間、構造特性、材料特性、点検診断及び維持工事等の難易度、当該施設の重要度（代替性）等を勘案し、一般には、図－1 に示す 3 つの維持管理レベルの中から選定する。施設の設置者や設計者は、このレベルである性能低下の状況を想定して施設の設計や今後の維持管理計画を考えることになる。このうち、レベル I および II が広い意味での予防保全に基づく基本方針である。



図－1 設定する維持管理レベル

維持管理レベル I は、高い水準の耐久性を付与することにより、変状の発生を防止し、設計供用期間中に施設（構造物）の性能が要求性能を下回ることのないようにするものである。所要の耐久性を確保できる構造形式や材料、工法を用いるとともに、供用期間中に的確な点検診断を行うことが求められる。

本来は、設計供用期間中に変状を発生させない維持管理レベル I を選択することが望ましいが、合理性や経済性等の観点、あるいは一般に 50 年以上という技術の信頼性の観点から多くの場合は難しい。そのため、これより少し初期性能のレベルを落とした維持管理レベル II と III を選択できる余地も残している。維持管理レベル II は、供用中に施設の性能が低下することを許容するものの、予防保全的観点から維持管理上の限界を高いレベルに設定し、劣化が軽微な段階で小規模な対策を繰り返すことにより対処するものである。また、維持管理レベル III は、事後保全型であり、施設の性能が要求性能を下回る直前（あるいは少し超えた時点）で対策を行い、性能の回復を図るものである。事後保全を基にした維持管理であるため、対策実施の時期を誤って、施設の性能が要求性能を大きく下回ることのないようにしなければならない。通常は構造体本体に設定するレベルとしては推奨できない。

後述するように、同一の材料・施工法で建造された施設であっても、部材に生じる劣化や変状には非常に大きなばらつきが生じ、空間的な多様性を示す。そのため、例えば初期設計におけるコンクリートの塩害に対する耐久性の照査に際しては、このばらつきに対応するために予測式中にかなりの余裕を含ませている。したがって、設計照査上 NG となっても、幸運な場合には性能低下に至るような劣化が生じない（顕在化しない）ことや、生じたとしても建設後かなりの時間が経過した時点となる可能性がある。したがって、設計時点では材料劣化による性能低下をある程度許容し、対策が比較的容易に行えることを前提として、劣化が

顕在化した初期の時点で対策を実施することを設計時点であらかじめ考慮しておく方策も有効となることが多い（維持管理レベル II）。

一般的に維持管理レベル I では、初期のコストは高いものの、供用中に補修等の対策を行う維持管理レベル II や III の場合と比べてライフサイクルコスト（LCC）が低減できる可能性が高い⁴⁾。いずれの維持管理レベルを設定したにしても、維持管理の過程で当初設定した劣化予測の精度を確認するとともに、実態に合った予測に修正し、性能維持のシナリオ（維持管理計画）を修正していくことが肝要となる。したがって、性能維持のシナリオの設定は非常に重要である。栈橋の上下部工を対象とするコンピュータプログラム（図-2）が整備⁵⁾されているように、今後、維持管理計画の作成を支援するツールも多く整備されていくものと考えられる。

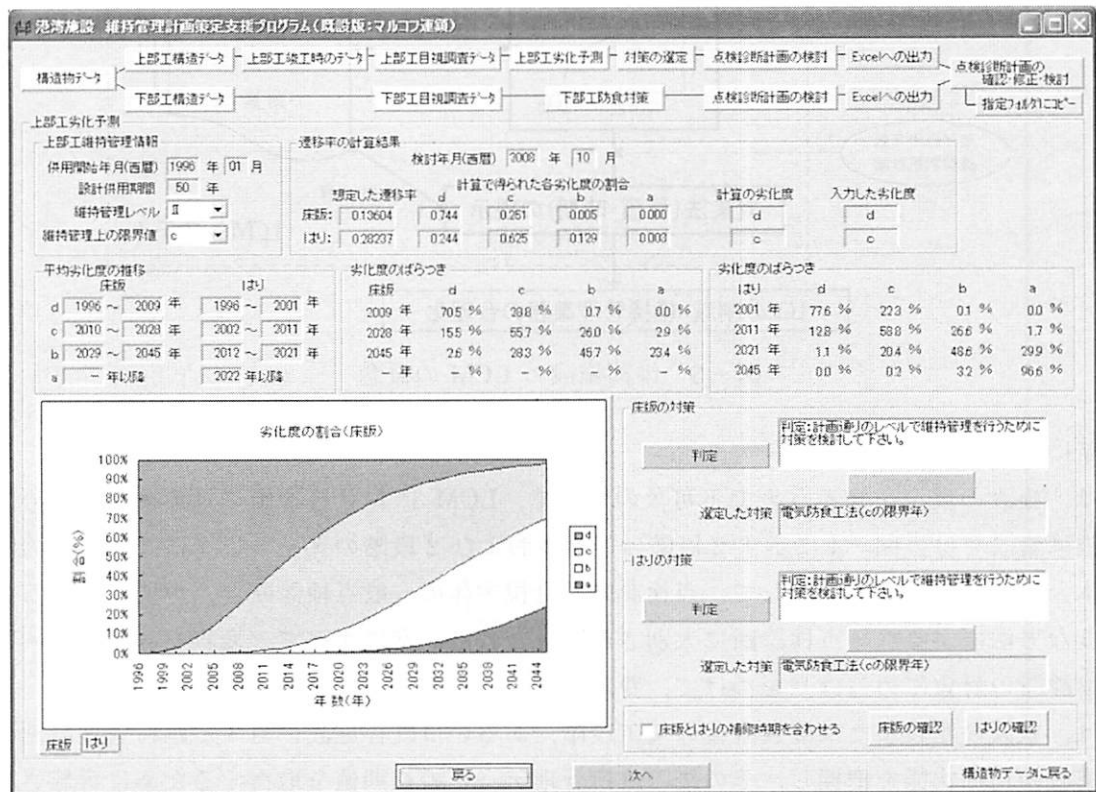
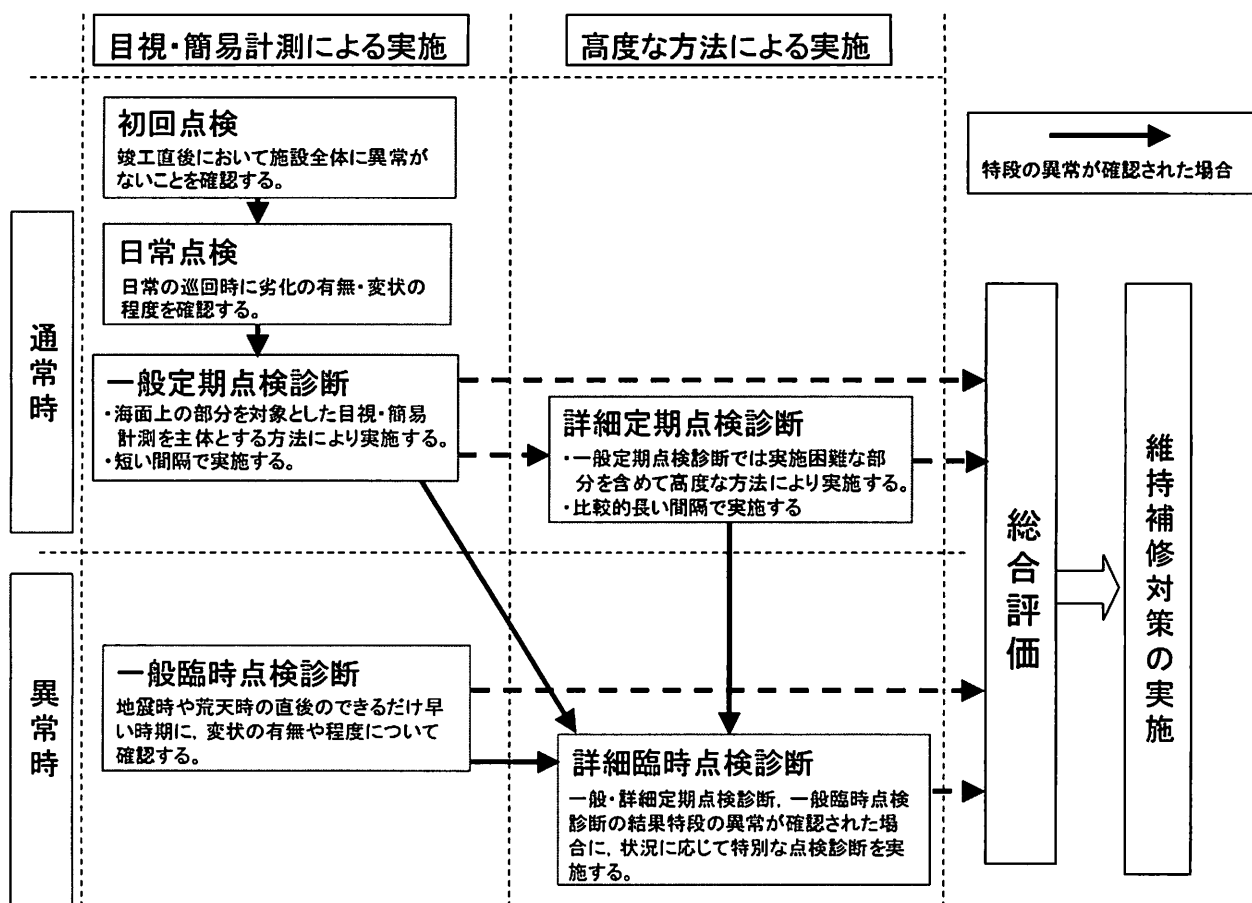


図-2 栈橋の維持管理計画策定支援プログラム（出力画面の事例）

4. 維持管理の基本

性能維持のシナリオ（維持管理計画）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、維持管理計画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維持管理の実務においては必要となる。具体的には、施設（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。これらの一連の作業の流れをライフサイクルマネジメント（LCM）と称している。LCM の概念を図-3 に示す。LCM は性能確保のシナリオの作成とその検証・修正を行う一連の行為であると言える。

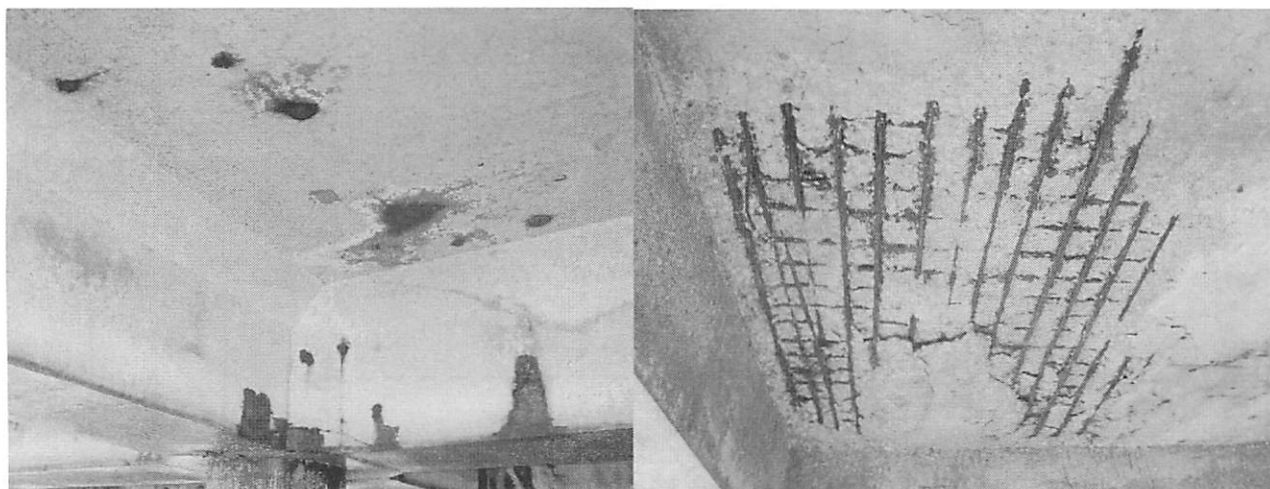
港湾施設で適用している LCM は、施設の現況を統一的な基準に基づいて判断する「定期的な点検・診断」、点検・診断等に基づく構造物あるいは部材の「保有性能評価と将来予測」、および将来の利用計画、残存供用期間、ライフサイクルコスト等を制約条件として評価し、必要に応じて実施する「対策法の提示」を中心に構成されている。用中の保有性能を的確に評価し、これに基づいて今後の性能低下の進行を予測（従前の予



図－4 点検診断の種類と位置付け

表－1 栈橋上部工下面の劣化度判定基準

点検項目	点検方法	判定基準
コンクリートの劣化、損傷	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数、長さ と幅 ・かぶりの剥落状況 ・さび汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	スラブ: ☐ 網目状のひび割れが部材表面の50%以上ある ☐ かぶりの剥落がある a ☐ さび汁が広範囲に発生している はり・ハンチ: ☐ 幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある ☐ かぶりの剥落がある ☐ さび汁が広範囲に発生している
		スラブ: ☐ 網目状のひび割れが部材表面の50%未満である ☐ さび汁が部分的に発生している b はり・ハンチ: ☐ 幅3mm未満の鉄筋軸方向のひび割れがある ☐ さび汁が部分的に発生している
		スラブ ☐ 一方向のひび割れもしくは帯状または線状のゲル析出物がある ☐ さび汁が点状に発生している c はり・ハンチ: ☐ 軸と直角な方向のひび割れのみがある ☐ さび汁が点状に発生している
		d ☐ 変状なし



図－5 栈橋上部工（床版裏面）の劣化状況（左：劣化度 c，右：劣化度 a）

詳細点検診断は、比較的長い間隔で実施する定期点検診断的な潜水士による水中での目視の他、非破壊試験装置を用いることや、局部的に破壊させて部材の状況を調べるといった高度な方法を用いて、より詳細に評価のためのデータを得ようとするものである。詳細定期点検診断の主な目的は、一般定期点検診断によって変状が発見された場合で、必要に応じてその発生原因や程度、施設の性能低下に及ぼす影響程度を把握すること、ならびに、一般定期点検診断では見ることのできない海中部などの状態を把握することである。栈橋上部工に対する詳細定期点検診断の実施頻度については、一般に、新規供用（管理委託）して5年以内に1回目を、その10年後に2回目を、供用20年後に3回目を行い、これ以降は施設の利用状況や変状の発生・進展状況などを踏まえつつ、概ね5年間隔で実施することを推奨している。

詳細定期点検診断では、点検項目の性格によって、判定基準を定めるものと、定めないものとに分けられる。潜水士による潜水調査を行う場合は、点検の方法は主に目視となるため、点検者によって点検結果にばらつきが極力生じないように判定基準を設ける。この際の判定基準は、当該点検項目に対する一般定期点検診断に対する判定基準と同一とする。一方、測定などを伴う詳細点検診断の場合、判定基準を定める必要はなく、その測定値自体を詳細に分析・検討することで、変状の原因を推定したり、その程度を定めたりできるだけでなく、当該点検項目に対する一般定期点検診断結果の見直しに活用できる。さらに、これらのデータが蓄積されれば、当該点検項目の判定基準の見直しや作成に反映することができる。

一般臨時点検診断は、地震時や船舶衝突時などの偶発作用状態の直後のできるだけ早い段階で、目視調査または簡易計測を主体として変状の有無や程度の把握のために行う。さらに、定期点検診断または一般臨時点検診断の結果、特段の異常が確認された場合、あるいは想定外の異常が確認された場合に実施される。

6. 状態評価から性能評価へ

施設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」から施設あるいは構造物の「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。

現状では、点検診断から得られた部位毎の劣化度の診断結果（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し、表－2に示すように、その結果を大文字のA～Dにより表現している。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健全度の評価を行うかについては、その手法が十分に確立されていない。そこで、簡便的に、変状や劣化の性能への寄与度をI類からIII類までの3段階に分類（表－3）し、表－4に示すように、分類毎に劣化度がaと診断された部材の割合によって一律に評価している。

表－2 評価結果の分類

評 価	施設の状態
A	施設の性能が低下している状態
B	放置した場合に、施設の性能が低下する恐れがある状態
C	施設の性能にかかわる変状は認められないが、継続して観察する必要がある状態
D	異状は認められず、十分な性能を保持している状態

表－3 施設の安全性に及ぼす影響に基づく点検項目の分類

点検項目の分類	施設の性能に及ぼす影響
I 類	a が 1 個から数個あると、施設の安全性に影響を及ぼす。
II 類	a が数多くあると、施設の安全性に影響を及ぼす。
III 類	施設の安全性に直接的には影響を及ぼさない。

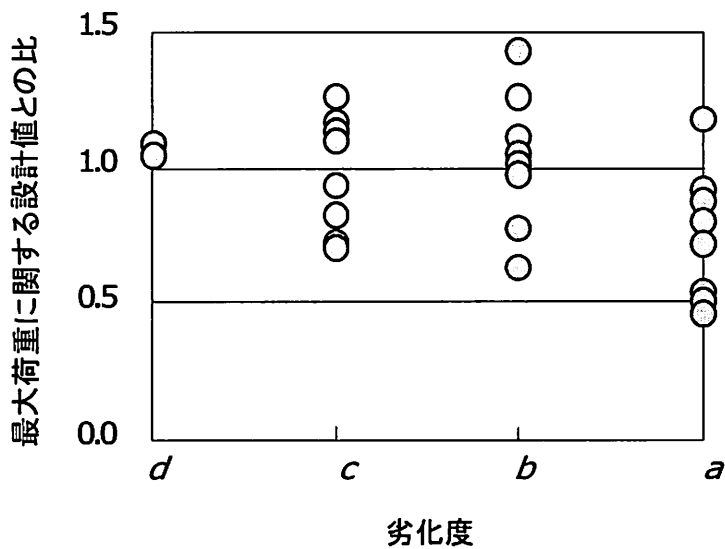
表－4 評価結果の導出方法

スキーム	点検項目	評価結果			
		A	B	C	D
【1】	I 類	「a が 1 個から数個の項目」があり、既に施設の性能が低下している。	「a または b が 1 個から数個の項目」があり、そのまま放置すると施設の性能が低下する恐れがある。	A, B, D 以外	すべて d のもの
【2】	II 類	「a が多数を占めている項目」、「a+b がほとんどを占めている項目」があり、既に施設の性能が低下している。	「a が数個ある項目」、「a+b が多数を占めている項目」があり、そのまま放置すると施設の性能が低下する恐れがある。	A, B, D 以外	すべて d のもの
【3】	III 類	－		D 以外	すべて d のもの

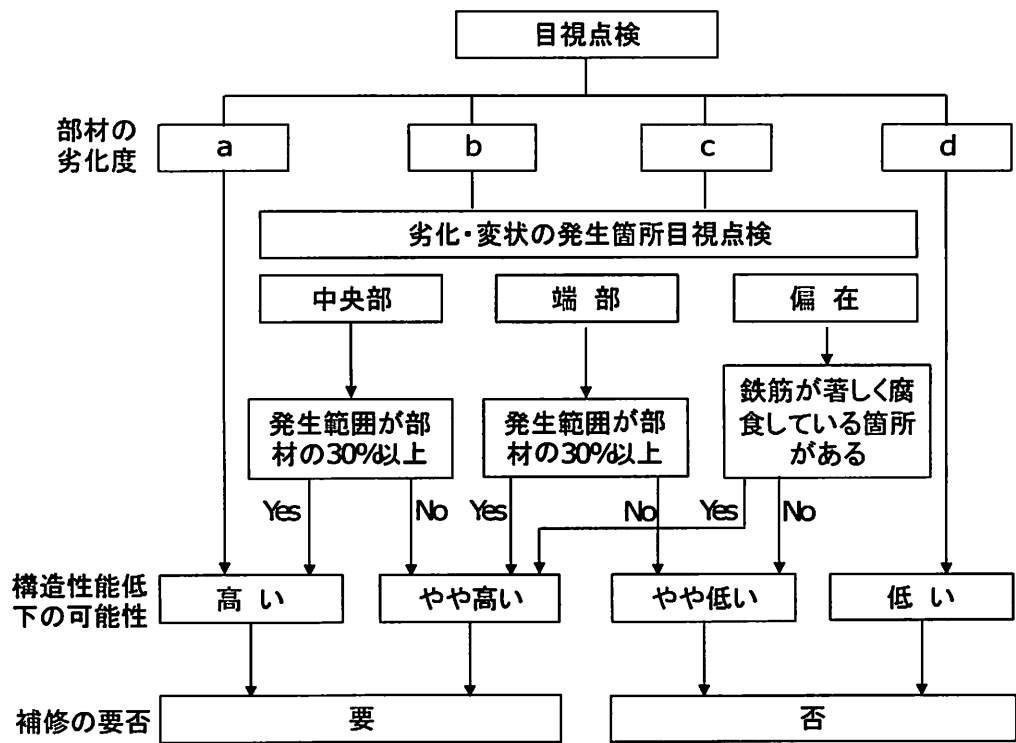
一方、構造物の形式を絞れば、より合理的な性能評価の方法が構築されつつある。その一例として、栈橋上部工のコンクリート部材を対象に整理した、目視による劣化度の判定結果と構造性能（耐荷力）との関係を図－6 に示す⁷⁾。これは、20 数年の実環境暴露を行った鉄筋コンクリートはり試験体および供用 30 年超の複数の栈橋からスラブを切り出して行った載荷試験の結果である。結果は非常にばらついているが、おおむね劣化度が b に達すると、部材の耐荷力が設計値を下回り、a に達すると何らかの対策が必要な状況になる傾向が読み取れる。このばらつきの主要な原因は、部材のどの部分に顕著な劣化が生じているかが目視に

よる劣化度判定に考慮されていないことによる。また、はく離といった目視だけでは十分に捉えられない劣化も考慮されていないことも理由の一つである。鉄筋の腐食量や腐食箇所に関する詳しいデータがあれば、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。

そこで、非破壊試験結果から推測した鉄筋腐食量と腐食場所の情報で簡易的にコンクリート部材の性能評価を行う手法についても検討を進めている。そのフローを図－7に示す。鉄筋の腐食判定と腐食の発生箇所・範囲の判定により構造性能低下の判定を行うが、鉄筋が露出している場合は、直接鉄筋径を測定し、そうでない場合は、分極抵抗法などにより鉄筋の腐食程度を判定する。このフローでは目視点検の結果のみを用いるが、非破壊調査等により精緻な劣化の状況が把握できれば、より精緻な部材の性能評価の実現に近づくことになる。



図－6 劣化度と構造性能（耐荷力）との関係

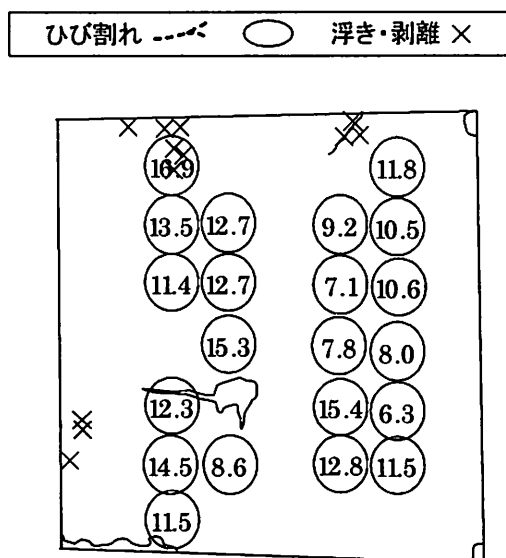


図－7 栈橋 RC 上部工の簡易性能診断フロー

7. 劣化進行の将来予測

LCM の実現のためには、劣化・変状および性能低下の将来予測が必要となる。腐食が問題となる鋼部材では、当該地点の腐食速度を点検診断の結果から求め、これを予測に用いる。コンクリート部材の塩害の進行に対しては、Fick の拡散則に基づいて鉄筋位置での塩化物イオン濃度を予測し、これが限界値を超えると鉄筋に腐食が生じるという考え方⁸⁾が用いられている。この方法で劣化の進行を予測することが可能であるが、維持管理の実施上は、予測に用いる計算パラメータの設定が難しいという問題がある。言い換えれば、表面塩化物イオン濃度、拡散係数、限界塩化物イオン濃度はかなりのばらつきを示す。その一例として、コンクリートに供給される塩化物イオン量の指標となる表面塩化物イオン濃度のばらつきを示したのが、図－8である。これは約 30 年程度供用されていた栈橋のスラブの一部（約 1.5m 四方）から直径 100mm のコア試験体を多数採取し、それから得られた表面塩化物イオン濃度を表したものである⁹⁾。同じ部材であっても、隣接するコアで大きな違いが見られる箇所もあり、どの値を表面塩化物イオン濃度の代表値とするのかは見解が分かれるところである。また、同様に、みかけの拡散係数のばらつきを示したのが図－9 である。図－8と同様の条件で得たコア試験体から求めたもので、図中の一つの○が 1 本のコアから得られる値である。図中の四角の枠は、平均値から標準偏差の範囲を示しているが、表面塩化物イオン濃度と同様に大きなばらつきを示す。同じ材料を使用し、同じ施工法で建設され、同じ期間ほぼ同じ環境条件に置かれたものであっても、劣化現象はこのような大きなばらつきを示す。また、実際にコアを抜いて塩化物イオン量を調べようとする場合、1 本のコアでは採取する箇所によって予測結果が大きく異なる危険性が示唆される。

このようなばらつきを極値統計理論によって処理し、寿命予測を行った結果を図－10 に示す¹⁰⁾。これは、同図の左図に示すデータの内、表面塩化物イオン濃度の低い 6 個のデータを用いて、二重指数分布により予測を行った結果である。その結果、この部材の腐食開始は遅くとも建設後 20 年以内であった可能性が高いと判断できる。また、MVALUE 法で求めた標準偏差から、本栈橋床版は供用開始から 10 年程度で鉄筋腐食が生じていた可能性がある。この例では、真の分布から標準偏差は 11 年程度となり、推定精度はよくない。精度を向上させるためには、測定区画数上げるか、測定区画の面積を大きくする必要がある。この事例での採取コアは直径 75mm であることから、標準偏差を最頻値の 1/2 に以下に抑えるためにはサンプリング数 7 本が、さらに 1/3 に抑えるには 13 本が必要となる。しかし、実際には、1 部材から採取できるコア数はせいぜい 1～2 本である。したがって、寿命精度を上げるためには、コア直径を可能な限り小さくしてサンプリング面積を極力小さくし、サンプル数を大きくしていかなければならない。



図－8 栈橋上部工床版での表面塩化物イオン濃度のばらつき（単位：kg/m³）

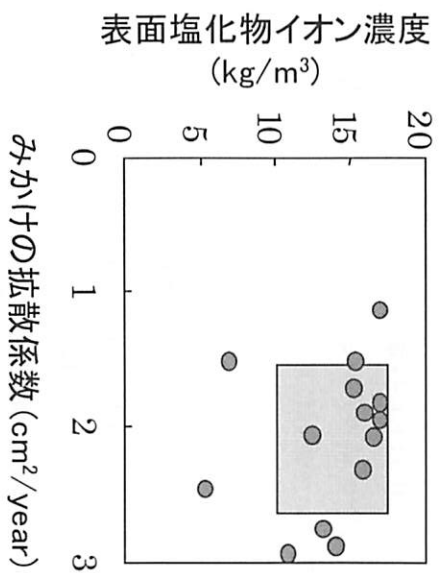


図-9 栈橋上部工床版での表面塩化物イオン濃度のばらつき

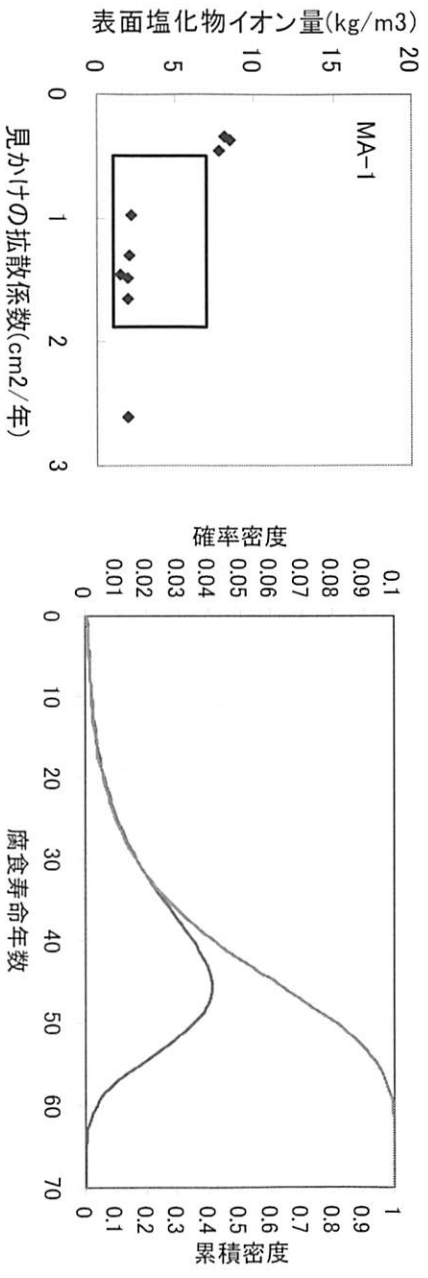


図-10 コアサンプリングによる腐食寿命予測の結果

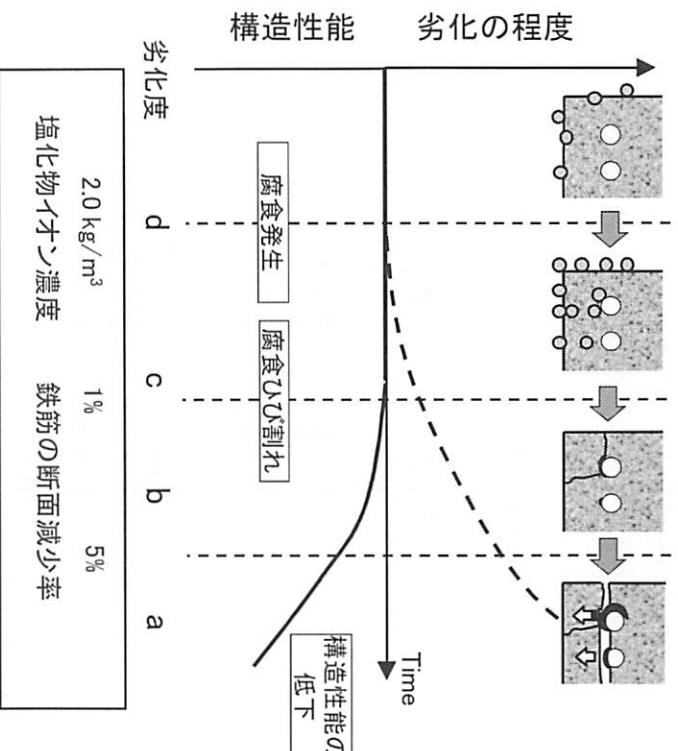


図-11 劣化度と物理的指標との関係

また、目視による劣化度と実際の物理的現象や数値指標との対応がとれれば、種々のモデルを用いて、目視による劣化度判定の結果とリンクさせて、劣化度の進行の将来予測をすることも可能である。栈橋上部工のコンクリート部材では、これまでの調査研究の成果に基づき、図-11に示すような各劣化度の閾値を考えている⁵⁾。これらについても、今後の高精度化が必要な項目である。

一方、このようなばらつきを表現するために、部材単位ではなく、あるまとまった部材のグループで確率的な劣化進行の評価を行う方法がある。この一つがマルコフ連鎖モデル¹¹⁾である。このモデルを用いた予測に際しては、適切な遷移確率の設定が必要となる。実際には、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。結果の一例を図-12に示す。これは、ある港湾における部材毎の劣化度の分布を示したもので、この実際の分布に適合するように繰返し計算を行って、遷移確率を求める。遷移確率が求まると、それを用いて将来の分布を予測できる。同図の結果によると、15年後には劣化度 a と判定される部材数が現在の 3 倍程度に増加することがわかる。したがって、今後 15 年間に計画的な対策の実施や予算確保が求められることになり、このような目的のためにも本方法は有用であると言える。

マルコフ連鎖モデルの適用に際しては、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ため、同じような条件下にあるできるだけ多くの構造物や部材の劣化度に関するデータを蓄積していかなければならない。今後、いろいろな条件下でデータの蓄積が実現すれば、より精度よく個別の構造物の変状進行を予測することが可能になると期待している。

また、マルコフ連鎖モデルを用いて、構造物の性能低下を指標とした寿命予測を行うことも可能である。その他にも補修費用の概略推定なども行うことができ、その適用範囲は広いと考えている。

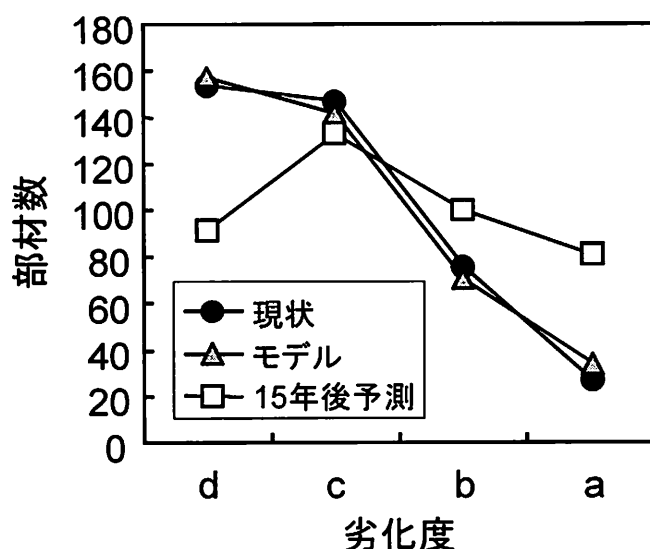


図-12 マルコフ連鎖モデルによる劣化進行の予測

8. おわりに

本稿で紹介した港湾構造物の維持管理の方法については本格的にその運用が開始され3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。なお、ここでは紙面の都合で、点検診断と性能評価・予測の部分を中心に述べたが、補修等の対策の検討については、別稿¹²⁾を参照いただきたい。

今後は統一したルールに基づいてできるだけ多くのデータを蓄積することが、より精度の高い予測を可能にするとともに、維持管理のさらなる効率化や合理化に結び付く。そのためには、施設の管理者、点検者、

あるいは技術者だけではなく、一般市民をも維持管理の部分的な作業に巻き込み、国民全体で社会基盤施設を維持していく枠組みの構築も必要であると考えている¹³⁾。

引用文献

- 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) 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，No.1114，2005.
- 3) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き，港湾空港建設技術サービスセンター，2007.および増補改訂版，2008.
- 4) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例〔栈橋上部工編〕，コンクリートライブラリー，No.116，2005.
- 5) 加藤絵万，岩波光保，横田弘：栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究，港湾空港技術研究所報告，第48巻，第2号，pp.3-35，2009.
- 6) 港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術研究センター，2007.
- 7) Yokota, H. Kato, E. and Iwanami, M.: Simplified assessment on structural performance of deteriorated concrete members, Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-7, Jeju, pp.874-879, 23-28 May 2010.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.
- 9) 加藤絵万，岩波光保，山路徹，横田弘：建設後30年以上経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，No.1140，2006.
- 10) 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，Vol.62，2010（印刷中）.
- 11) 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.4，2002.
- 12) 横田弘：港湾構造物の劣化・損傷と維持管理，土木施工，Vol.48，No.11，2007.
- 13) 土木学会：コンクリート構造物のインフラマネジメント検討小委員会報告書，コンクリート技術シリーズ79，2008