

2. 港湾におけるアセットマネジメントの構築

2.1 港湾施設の劣化状態

港湾施設の劣化状態については、目視による調査により様々な状況がある程度把握することができる。図 2-1～2-5 に港湾施設の劣化状態の事例を示す。

ここで示したように、陸上から容易に目視で劣化状態を把握できる一方で、特別な調査により初めて劣化状態を把握できる場合がある。特に、本研究で主な対象とする栈橋式係船岸施設は、後者に該当する。図 2-6 に栈橋式係船岸施設の概要を示す。大きくは床版と梁を主体とする上部工と、鋼管杭を主体とする下部工に区分される。

上部工の上面は、図 2-1 で示すように陸上からの調査で劣化状態を把握することができる。しかしながら、上部工の下面は陸上からの調査が困難であることから、一般的には図 2-7 に示すように潮位の状況を踏まえた上で、小型船舶に乗船するか、点検用の足場を設けて調査を実施する。図 2-7 でも梁のかぶりが剥落し、鉄筋が露出している状況を把握でき、図 2-8 でも床版と梁の劣化状況を示している。

下部工の鋼管杭は、大半は海中にあるために図 2-7 のように船上からでも調査を実施することができない。このため、ダイバーによる潜水調査が必要になる。この潜水調査により図 2-9 右に示すように腐食の著しい進展により、完全に切断されている状況を確認することもできる。

矢板式係船岸施設についても栈橋の下部工と同様に潜水調査が必要であるが、干満帯付近を目視で調査することで主要な点検を実施することが可能である。その結果、例えば図 2-10 に示すようにHWL～MLWLの間が著しく劣化している状況を確認することができる。



図 2-1 エプロンの沈下・ひび割れ



図 2-2 護岸胸壁の損傷



図 2-3 防舷材の損傷



図 2-4 護岸の移動



図 2-5 防波堤の沈下

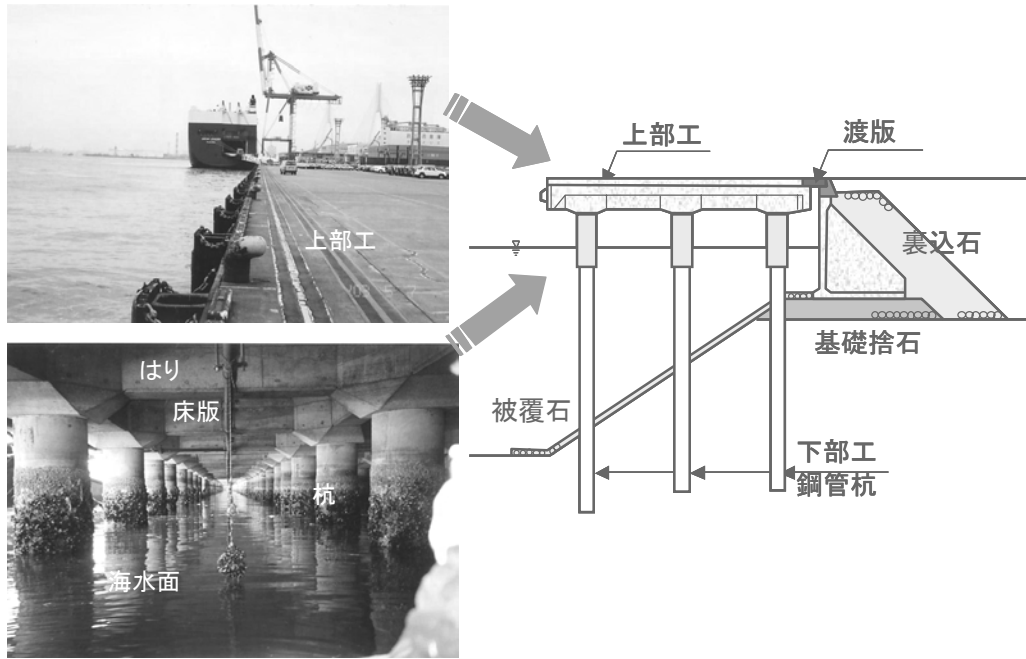


図 2-6 栈橋式係留施設の概要

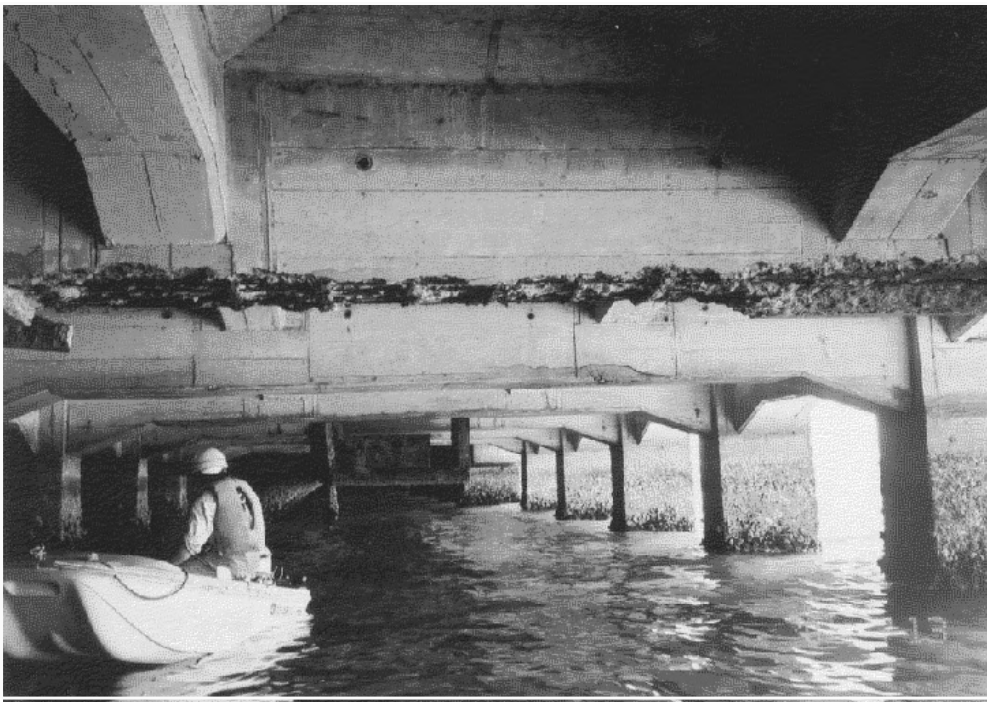


図 2-7 栈橋上部工下面の調査状況



図 2-8① 上部工 床版下面の劣化状況



図 2-8② 上部工 梁下面の劣化状況

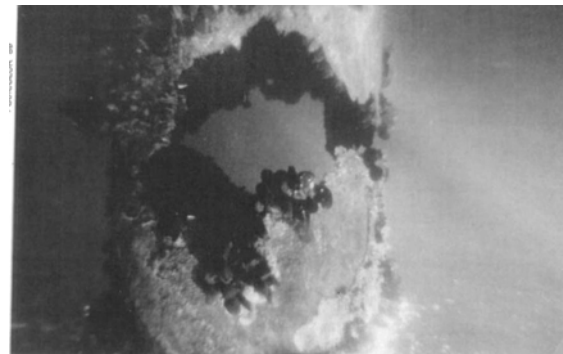


図 2-9 下部工 鋼管杭の劣化状況

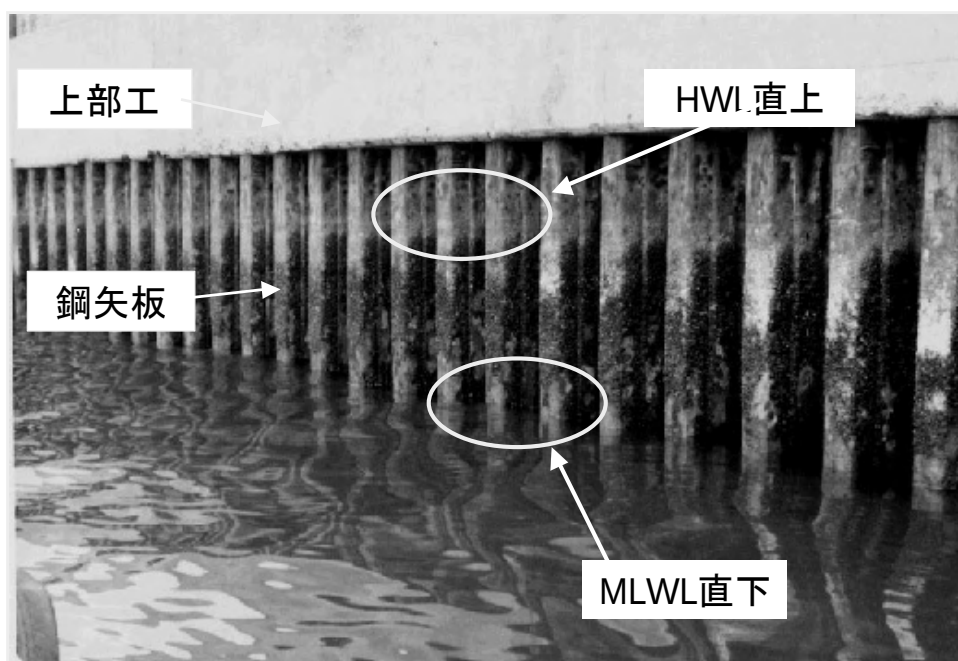


図 2-10 矢板式係船岸施設の劣化状況

2.2 港湾におけるアセットマネジメントの現況⁸⁾⁹⁾

港湾におけるアセットマネジメントは、現在、港湾空港技術研究所を中心に構造物に着目したマネジメントとしての港湾LCM（ライフサイクルマネジメント）として推進されている。

(1) 港湾LCMの概念

港湾LCMの概念は、図2-11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「劣化度」により区分する。一次点検は、点検実施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。

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）の劣化度を評価する。劣化度は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2-12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、今後の劣化度（機能・性能）の経時変化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する場合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、適用可能な劣化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。要求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改善が得られる方法を選択する場合がある。

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、工事大規模になる。そのため、劣化や変状の進行を事前に予測し、最適なタイミングで最適な対策工をとる、いわゆる予防保全的維持管理を行うことが理想であり、結果的にライフサイクルコストも低減することになる。

したがって、港湾LCMは港湾アセットマネジメントにおいて主に時間軸の観点から体系化されたプロセスといえる。

(2) 港湾LCMにおける点検・診断

点検・診断は、構造物の現況を知る上で不可欠の作業であり、港湾LCMにおいても入力データの重要な項目である。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ある。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・診断を行うには、維持補修の実施判断に適切な項目の選定が必要である。

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項目を対象として維持補修を実施することが効率的である¹⁰⁾。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・診断では、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で留めることができると考えられる。

これらを踏まえて、前述のように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材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点検・診断表（案）を表2-1に示す。

一次点検は、目視調査等を主体に構造物の部材毎に点検・診断するものであり、同表に示すように、点検結果をa～dの劣化度で判定する。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、定量的な指標で劣化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劣化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、1～2年に1回程度実施することが必要であると考えられる。

二次点検は、潜水土・機器等を活用して目視困難な部材の劣化の進行等を詳細に点検・診断するものである。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変化が生じ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、表2-2に示すような二次点検の項目および点検方法が考えられる。

(3) 港湾LCMにおける総合評価

点検・診断から得られた部材毎の評価結果（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．部材毎の評価結果から施設や構造物全体の性能評価をいかに行うかについては，現在検討が進められている．

2003年度より実施された国有港湾施設の点検・診断においては，主に以下に示す定性的な判断基準が用いられている．

- 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．

ここでの総合評価結果について，栈橋を事例に施設が建設されてからの年数と劣化度との関係を整理すると，図2-13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，主に上部工の変状を対象として判定している．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についても同様の傾向がみられる．

この原因として，担当者による判断誤差なども含まれるが，最大の要因は施設ごとに変状の進行速度が大きく異なるためである．

(4) 港湾LCMにおける劣化度の進行予測

施設や構造物に生じる変状の進行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測し，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適用するには未だ説明すべき課題が多い．一方，鋼構造では，腐食速度が劣化度の進行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2-14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，ここでは簡素化のため，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により表現する．

図2-15は，マルコフ連鎖という確率論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¹¹⁾．これは，ある施設における変状は，A，B，C，Dの独立する劣化度のいずれかに存在し，1年経過すると遷移確率（ P_x ）で劣化度が1ランク進行し，残りの施設は確率（ $1-P_x$ ）で同じ劣化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劣化度間の遷移確率が等しいかどうかによる．ただし，劣化度によっては定性的な判断によっているものがあるものの，現時点では各劣化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重要である．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逆算する．その結果を図2-16に示す．同図は再現性が非常に高かった鋼矢板岸壁と再現性が中程度の栈橋の結果である．また，ここでは個別の施設ではなく，国有港湾施設の点検・診断を実施した施設全体を対象としてマルコフ連鎖モデルの適用を実施していることから，わが国での各施設の特徴を把握することができる．

図2-16での「実際」は，点検・診断の結果から得られた劣化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と劣化度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 $P_A=0.036$ ，栈橋では $P_B=0.047$ となる．両施設の遷移確率の大小関係は，栈橋が鋼矢板岸壁より変状の進行が速いというこれまでの一般的な認識と一致している．

ここでのマルコフ連鎖モデルにより得られた変状の分布は，実際の点検・診断結果から得た分布を近似させることで得られたものである．したがって，この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．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．

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，劣化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梁の暴露試験体での劣化度と耐力との試験結果¹²⁾を図2-17に示す．おおむねの傾向として，栈橋の上部工では，劣化度がBからA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明らかになった．

(5) 港湾 L C Mにおける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計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、港湾施設の建設では、ライフサイクルコストについて十分に検討されていなかった。これは、そもそも構造物の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。

しかしながら、効率的な港湾整備のためには、初期建設費のみではなく、供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、既に供用されている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、本研究ではこの意味で用いる）を算出し、最適な維持管理戦略を検討することが、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%程度の維持補修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の分布が予測されると、将来AあるいはBの劣化度と判定されて、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2-3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まれている¹³⁾。すなわち、問題が生じてから対応する事後保全に比較して、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効果が明らかになっている。

さらに、栈橋上部工の梁を対象として、(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いる。対策を行うことにより、劣化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。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している¹⁴⁾。

ここで、断面修復では、塩化物イオン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、劣化度の回復を可能とし、さらに、遷移確率を50%に低減できると仮定している。電気防食では、各劣化度のいずれの変状にも適用でき、断面修復と同様に劣化度の回復を可能とし、さらに、遷移確率を10%に低減でき

ると過程している。部分的更新では、対策を行った全ての部材は健全な状態に戻るものの、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している。

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2-18に示す。この算定結果で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、安い順に部分的更新、断面修復、電気防食となるが、供用開始から50年目までのL C Cでは、安い順に電気防食、断面修復、部分的更新となり、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梁では、劣化速度を効果的に抑制する工法が有効である結果となっている。

この結果から、変状の進行速度を示す遷移確率や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が明らかになる。

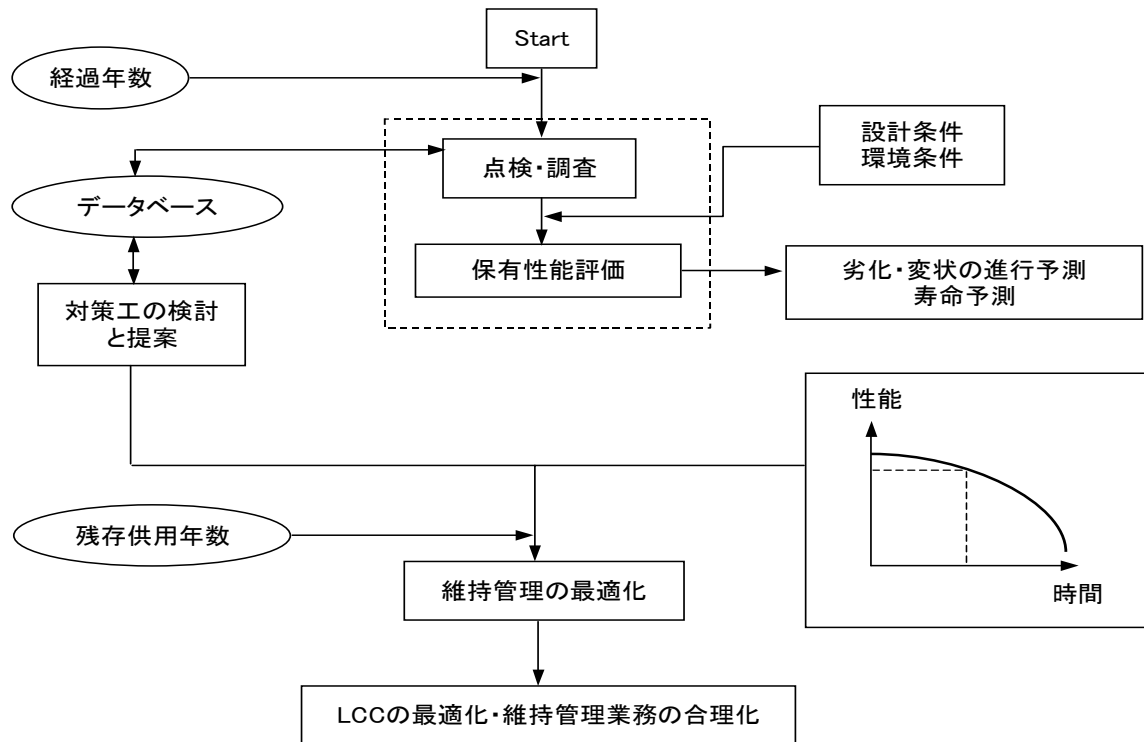


図 2-11 港湾 LCM の概念

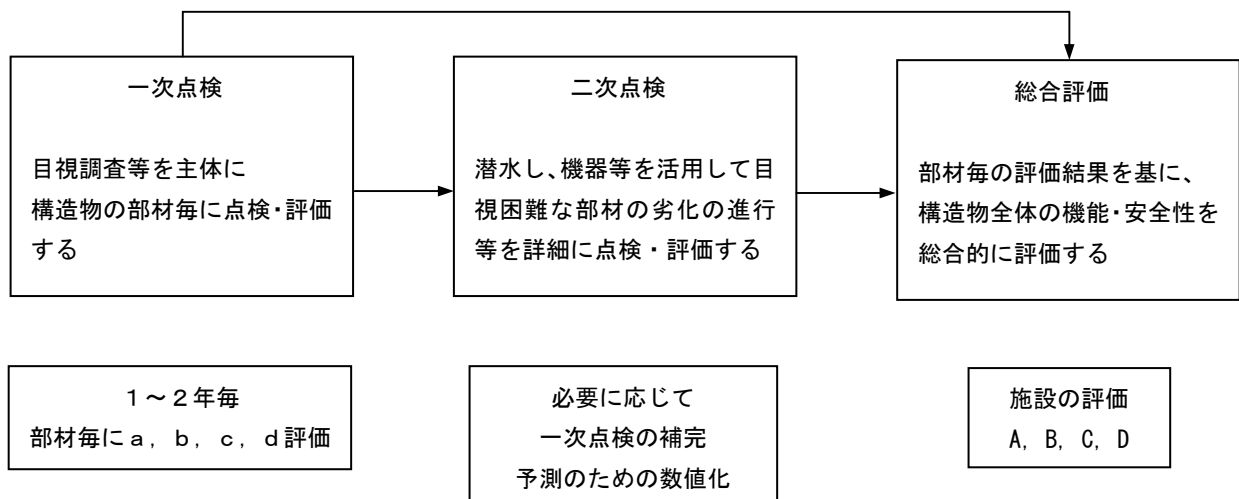


図 2-12 総合評価に至るフロー

表 2-1 栈橋の一次点検・診断表（案）

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		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： a ☐ 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	☐ MSLW 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 2-2 栈橋上部工の二次点検項目および点検方法(案)

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

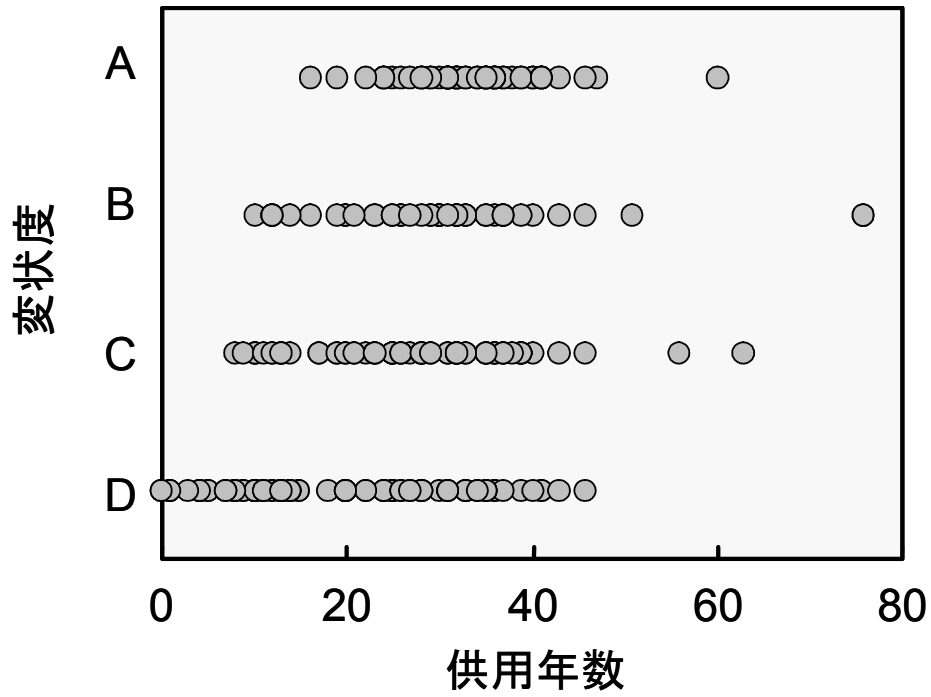


図 2-13 栈橋の劣化度の分布状況

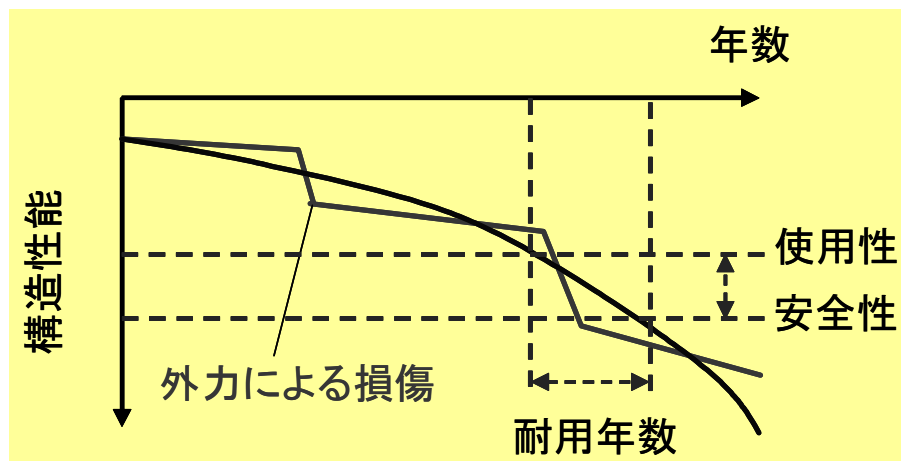


図 2-14 供用後の構造物の性能低下

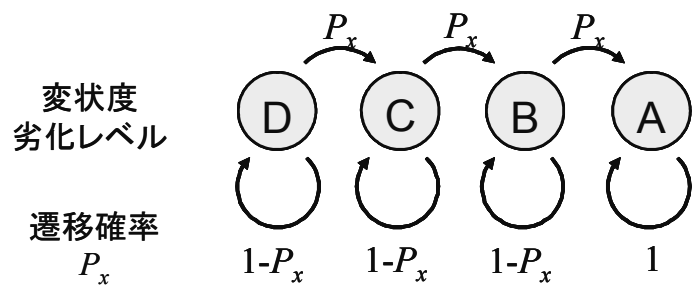


図 2-15 マルコフ連鎖モデル¹¹⁾

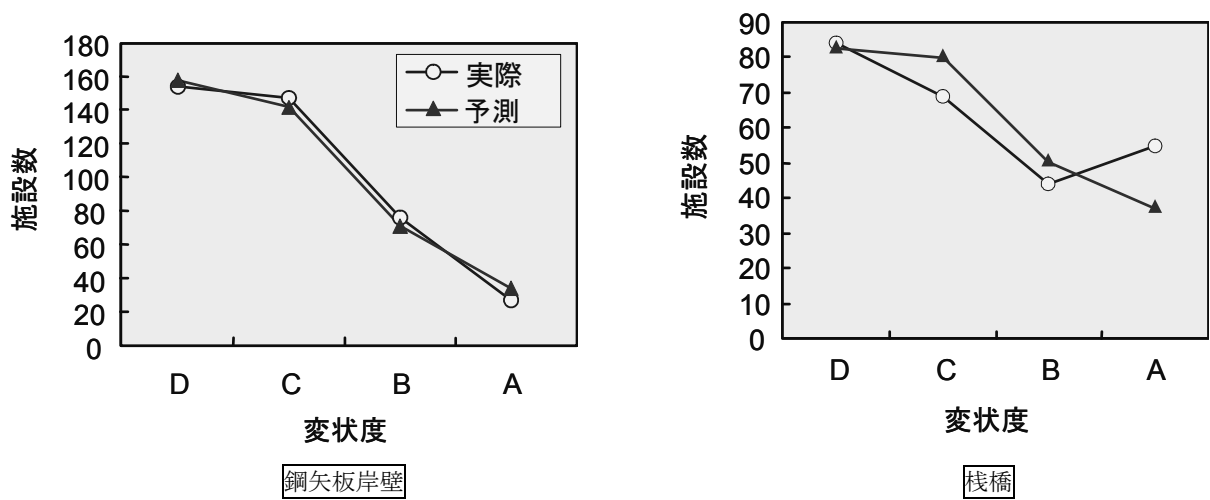


図 2-16 マルコフ連鎖モデルによる劣化度の再現性¹¹⁾

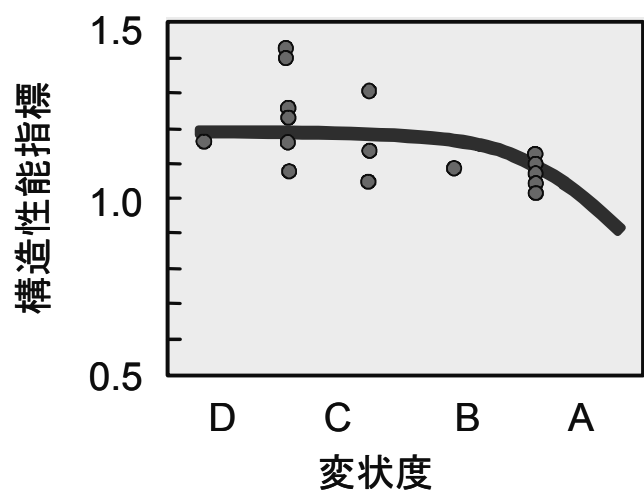


図 2-17 栈橋上部工 梁 での構造性能と劣化度との関係¹²⁾

表 2-3 予防保全によるコスト削減効果試算の仮定¹³⁾

- 1) 劣化度B判定：優先度の高いものから5年ごとに30%を補修。
- 2) 劣化度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，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，平均的な構造物の補修費用と更新費用を設定する。

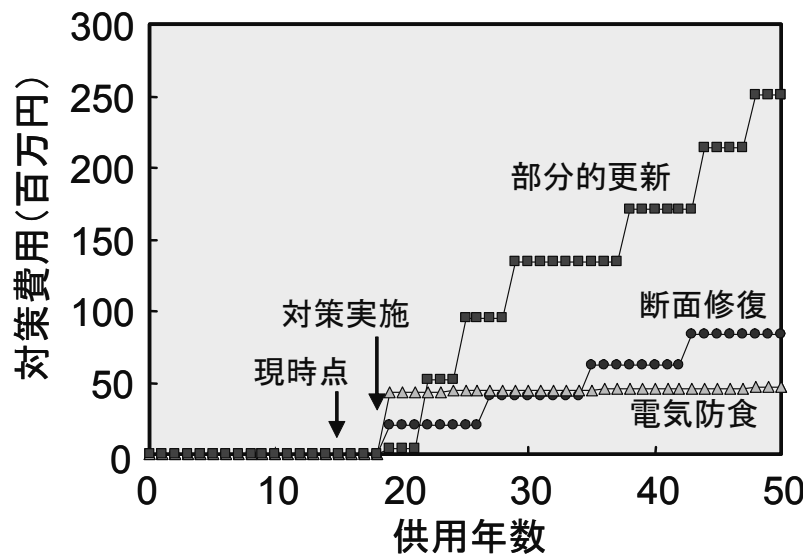


図 2-18 栈橋上部工 梁 の対策費用効果¹⁴⁾

2.3 港湾におけるアセットマネジメント構築に向けての 課題と対応方策

(1) 港湾の特性に対応したアセットマネジメントの構築

港湾施設は、他の社会資本の施設とは異なる次のような特徴を有する。

① 多種多様な施設の存在

道路等に代表される他の社会資本と異なり、港湾においては水域施設、外郭施設、係留施設、臨港交通施設等の様々な施設があり、また、その一つとして例えば係留施設では、栈橋式係船岸、重力式係船岸、矢板式係船岸等とさらに細分化される。これらは各々に個別の特性を有しており、アセットマネジメントの適用の考え方も大きく異なる。

② 点検・診断の困難性

道路等に代表される社会資本の大半は陸上に存在していることから、点検・診断の基本である「目視」を容易に実施することができる。しかしながら、港湾施設の大半は海中に存在しており、接近することはもちろん「目視」を実施することさえ容易ではない。

この「多種多様な施設の存在」および「点検・診断の困難性」等から他の社会資本に同様のアセットマネジメントを港湾において構築することはできない。さらに、港湾施設として一括したアセットマネジメントの構築も困難である。

したがって、現場の状況と現場からの要請に応じて主要な施設ごとにアセットマネジメントを順次構築し、最終的にこれを一体化することが必要である。

(2) アセットマネジメントに対応した技術基準等の整備⁹⁾

港湾の施設の技術に関する基準¹⁵⁾（以下 技術基準）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 structures¹⁶⁾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」として、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、2001年3月には、行政で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、2003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：2003年度から2007

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動向に対応して、「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、2007年度からの施行を目途として、技術基準の改訂が進められている。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、アセット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維持管理レベルの設定である。

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り、具体的には以下の3レベルの導入が予定されている。

【維持管理レベルA】 高い水準の損傷劣化対策を行うことにより、設計供用期間に要求性能が満たされなくなる状態に至らない範囲に損傷劣化を留める。

【維持管理レベルB】 損傷劣化が軽微な段階で、繰り返し対策を行うことにより、設計供用期間に要求性能が満たされなくなる状態に至らないように性能低下を予防する。

【維持管理レベルC】 要求性能が満たされる範囲内である程度の損傷劣化を許容し、設計供用期間に1～2回程度の対策を行うことにより、損傷劣化に事後的に対処する。

また、この技術基準の改訂にあわせて「港湾構造物の維持・補修マニュアル」¹⁰⁾の全面改訂も進められている。

(3) 港湾LCMの構成要素の高度化

時間軸の観点からのプロセスは、港湾LCMとして体系化が進展しているものの、さらに以下の要素に関しての高度化が必要である。

① 判定基準の設定に対する考え方の明確化

先に示したように、港湾LCMでは一次点検、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）の劣化度をA、B、C、Dの4段階で評価することとしている。

この4段階評価は、定性的な判断基準として次のように整理されていた。

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。

さらに、部材毎の評価結果から施設や構造物全体の総合

評価を行う手法が検討されている．しかしながら，この手法では多種多様な施設を統一的な判断基準として考えた場合には十分ではない．

このため，岩波・横田は，栈橋上部工を事例にA判定の基準として「安全しろ＝0」を提案（参考-1）している．この考え方は，栈橋上部工を構成する梁の暴露試験体および実栈橋から切り出した供試体の劣化度に応じた載荷試験結果に基づいている．

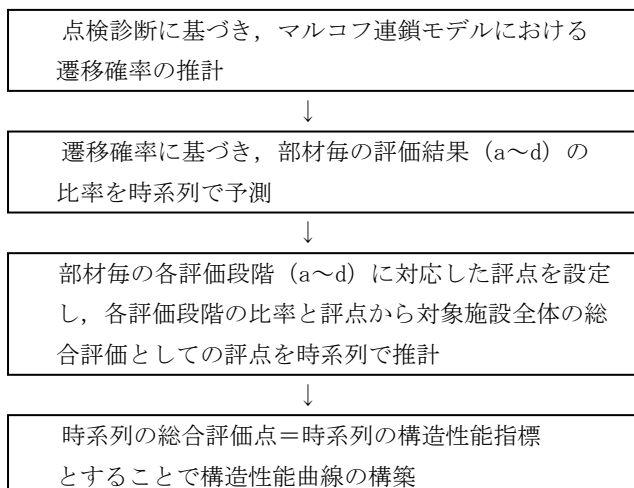
したがって，この考え方をさらに整理するとともに，栈橋上部工以外に対しての展開の妥当性が確認し，港湾施設全体に対する統一的な判断基準の設定等により考え方の明確化が必要である．

ただし，この場合にはこの判断基準に基づいた点検診断の実施要綱を見直すことも必要となる．

②構造性能曲線の構築の推進¹⁷⁾

アセットマネジメントの有効性を示す代表的な図の一例として，図 2-19 がある．縦軸に構造性能（健全度），横軸に経過時間として構造物の性能が低減する曲線（構造性能曲線）を示している．ここでは，使用限界に達してから対策を講じる場合にはコストもかかる上に，工事も大規模になるのに対して，劣化・変状の進行を事前に予測し，予防保全的維持管理を行う場合には，結果的にライフサイクルコストが低減することを示している．道路，橋梁等の様々な分野において，これと同様のイメージが示されているものの，文字通り「イメージ」であり，この構造性能曲線を定量的に示している分野はほとんど無く，「定式化が困難である」と明言している分野さえある．しかしながら，アセットマネジメントの必要性・有効性に対する説明責任の点から，構造性能曲線の定式化は非常に重要である．

このため，A判定の基準を「安全しろ＝0」とすることを前提として，本研究では以下の手法を提案する．なお，この手法の詳細は 2.4 に示す．



ここで，前述した「安全しろ＝0」の考え方にに基づき，総合評価「A」判定の評点が（60）になるように，事前に部材毎の各評価結果（a～d）に評点を設定しておくことで，総合評価の評点を構造性能指標として意味付けすることが可能になる．具体的には，栈橋上部工では【d=100，c=99，b=95，a=80】が考えられる．なお，実際の構造性能曲線の構築においては，評価段階として部材毎の各評価段階として【aa=0】を追加設定することが必要である．

この構造性能曲線を施設ごとに設定することで，その施設の残寿命年数（A判定に達するまでの年数）を推計することが可能となる．例えば，図 2-20 で現時点までの経過年数が同じ 20 年の 2 つ施設を示している．ここで，「施設①」は経過年数 20 年時点での点検・診断の結果により遷移確率=0.1，「施設②」は遷移確率=0.05 と推計された状況を示している．当然に遷移確率の高い（同時点であれば a 判定の部材の比率が高い）「施設①」の方が，構造性能指標が低くなる．図 2-20 で示したように，上記で提案された構造性能曲線を描くことにより現時点（経過年数 20 年）から構造性能指標が 60（総合評価「A」を意味する）になるまでの残寿命年数を推計することができる．

したがって，今後はさらに，「安全しろ＝0」の考え方を精査するとともにこの考え方にに基づき，他の港湾施設に対しても統一的な判断基準の下での構造性能曲線の構築を推進することが必要である．

(4)空間軸の観点からのプロセス構築

本研究では，港湾におけるアセットマネジメントを以下のように定義した．

国民の共有財産である港湾資本を，国民の利益向上のために，時間軸および空間軸の観点から，機能を維持し，資産価値を向上させて，効果的かつ効率的に運用することを目的として体系化されたプロセス

ここで，時間軸の観点からのプロセスは，2.1 で示したように港湾 LCM として体系化が進展している．これに対して，空間軸の観点からのプロセスは部分的に検討されているものの，港湾 LCM と比較すれば全く不十分である．

このため，空間軸の観点からのプロセスを早急に構築することが必要である．

表 2-4 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

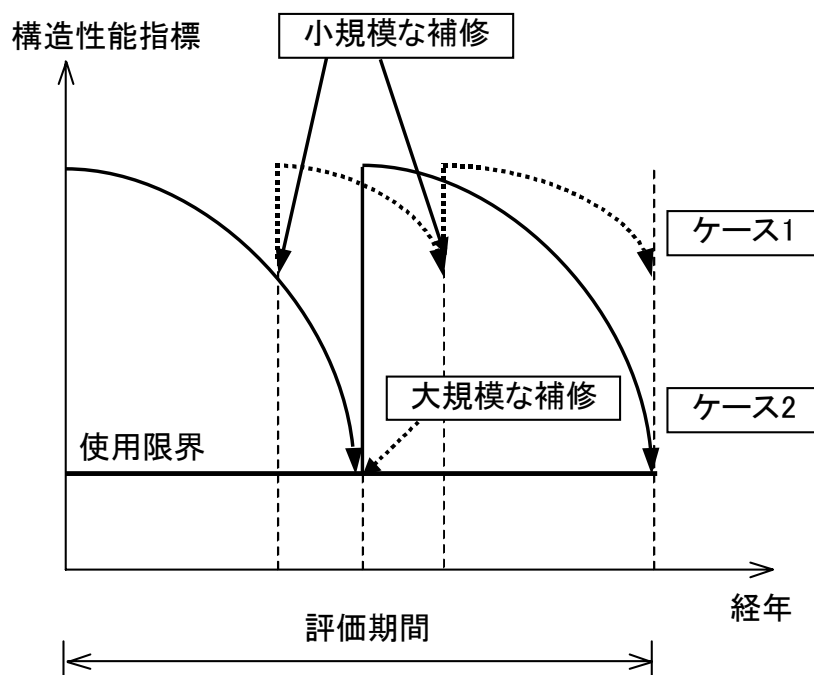


図 2-19 構造性能曲線のイメージ

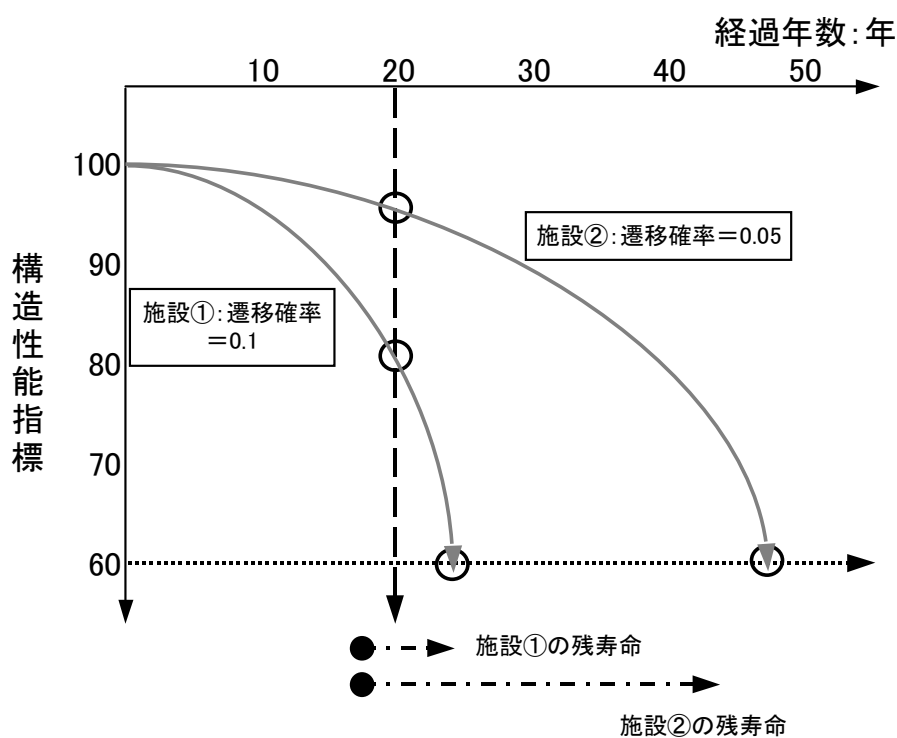
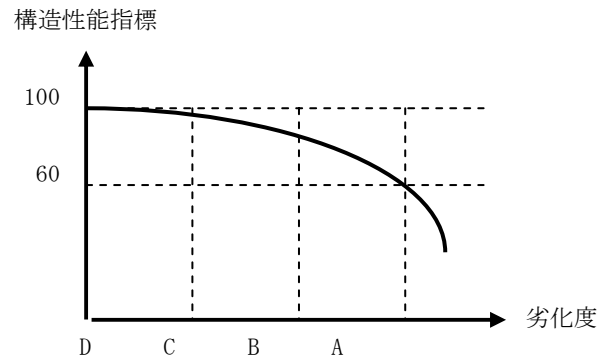


図 2-20 構造性能曲線の設定に基づく残寿命の推計

栈橋上部工における総合評価「A」の考え方について

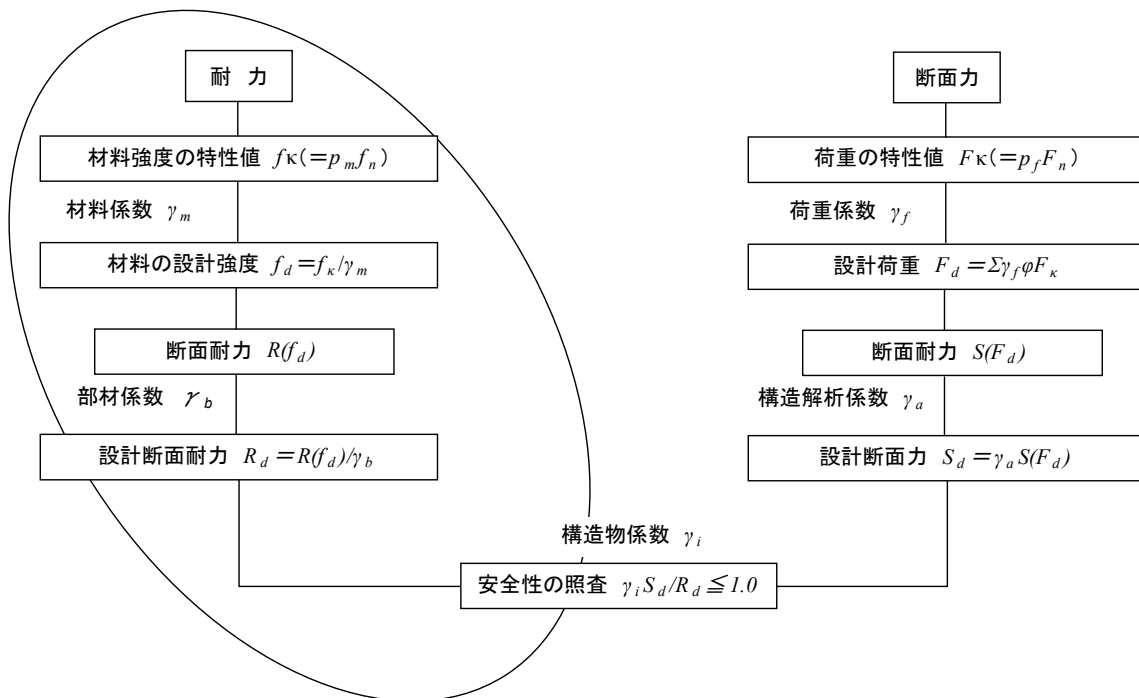
1. 劣化度と構造性能指標の関係

ある施設の劣化状態が総合評価に基づく劣化度「A」まで進行すると、構造性能指標は建設当初の100から、60まで低下するとして検討を進めている。その根拠について、栈橋上部工を対象として以下に整理する。栈橋上部工の場合、構造性能指標として、鉄筋コンクリート梁の部材耐力（部材の断面破壊に対する限界断面力）を考えることにする。



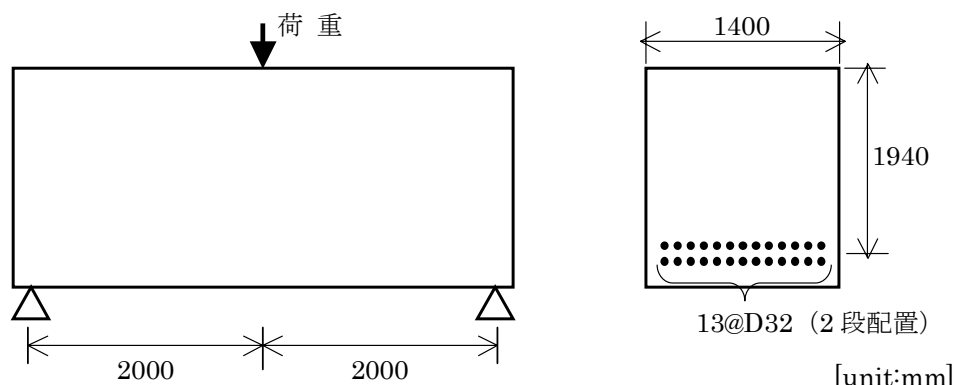
2. 限界状態設計法（部材の断面破壊に対して）の考え方

断面破壊に対する安全性が確保できなくなる設計上の限界は、 $\gamma_i \cdot S_d / R_d = 1.0$ のときである。よって、設計上では断面破壊を生じさせる設計断面力（≡ 荷重）は $S_d = R_d / \gamma_i$ となる。



3. 試算

下図に示す鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力を算定する。この諸元は、土木学会コンクリートライブラリーNo.116「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]」に掲載されている栈橋上部工梁の諸元を参考に定めたものである。



＜使用材料＞ コンクリート 圧縮強度の特性値＝24 N/mm²
鉄 筋 引張降伏強度の特性値＝345 N/mm²

① 部分係数として、以下の標準的な値を用いた場合

材料係数 $\gamma_m = 1.3$ (コンクリート)、1.0 (鋼材)

部材係数 $\gamma_b = 1.1$

構造物係数 $\gamma_i = 1.2$

$$S_d = R_d / \gamma_i = R (f_d) / \gamma_b / \gamma_i = R (f_k / \gamma_m) / \gamma_b / \gamma_i = 9595 \text{ (kN)}$$

これより、上図の鉄筋コンクリート梁は 9595kN の曲げ荷重が作用すると、設計上は断面破壊を生じて終局限界状態に至ると言える。

しかしながら、実際には上図の鉄筋コンクリート梁は、この値 (9595kN) よりも大きい断面力に耐えることができる。これは、コンクリートや鉄筋の実強度は設計強度よりも大きいこと、この値 (9595kN) は部分係数で処理されていることによる。そこで、この鉄筋コンクリート梁が実際に断面破壊する際の断面力を算定してみる。

② 材料の設計強度に実強度を用いた場合

コンクリートの圧縮強度＝35 N/mm² (実績値として代表的な値)

鉄筋の降伏点＝388 N/mm² (実績値として代表的な値)

部分係数はすべて 1.0 とする。

実際の曲げ耐力＝14772 (kN)

	設計上 (①)	実際 (②)
断面破壊を生じさせる断面力	9595 kN	14772 kN
①を 100 とした比	100	154
②を 100 とした比	65	100

以上より、ある荷重 (or 断面力) に対して設計された鉄筋コンクリート梁は、設計上は 100 という構造性能を有していることになるが、実際には、154 という、より高い構造性能を有している。この差 (154－100＝54) が、設計上で見込まれている「安全しろ」(厳密な意味では、安全率ではないので、あえて「安全しろ」と呼ぶ) となる。

逆に言えば、建設当初に 100 という構造性能を有していた鉄筋コンクリート梁が、劣化の進行によって構造性能が 65 まで低下したとすると、設計時点で見込んでいた「安全しろ」がなくなってしまうと考えることができる。すなわち、この状態で、設計上の断面破壊を生じさせる断面力 (≒ 荷重) が作用すると、断面破壊してしまうことになる。

ただし、ここで想定している荷重は栈橋上部工の上載荷重などであり、地震荷重に対しては別途検討が必要である。また、実際には作用 (荷重) 側にも部分係数がかかっていることから、「安全しろ」がなくなった状態ですぐに断面破壊が生じるわけではないことも付記しておく。

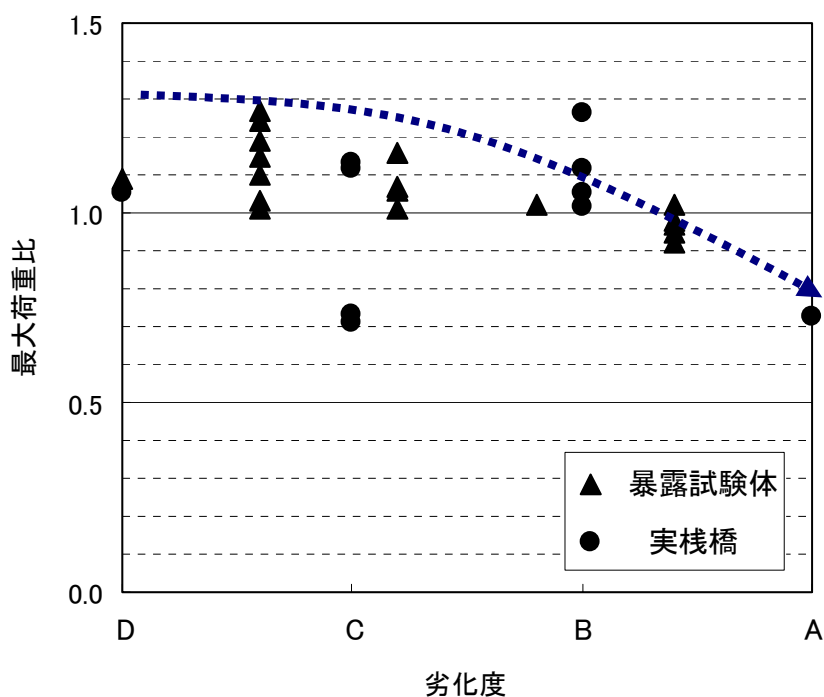
したがって、栈橋上部工の構造性能指標が建設時点 を 100 とし、60 (上の計算では 65) まで低下した状態は、ある意味で設計上の限界点と考えることができるため、この状態を劣化度「A」と定義した。

4. 載荷実験での検証

3. で設定した劣化度「A」の構造性能指標を 60 としたことを下記の写真で示す載荷実験により検証した。具体的には，暴露試験体および実際の栈橋の床版を現場で切断して実験室に搬入した試験体を用いた載荷実験を実施した。その結果，下図に示すようにD判定の部材耐力に対してA判定の部材耐力は 60%程度であることが確認された。検証の詳細は，下記文献を参照にされたい。



実験室での載荷実験の状況



- 横田弘・秋山哲治・濱田秀則・三上晃・福手勤：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, pp. 169-222
- 加藤絵万・岩波光保・山路徹・横田弘：建設後 30 年以上を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. 9

2.4 構造性能曲線の構築手法

(1) 遷移確率の推計法

遷移確率を用いたマルコフ連鎖モデルにより港湾施設の劣化進行状況を予測する手法は、著者らが中心に構築し、その成果を文献 18)に取りまとめている。ここでは、文献 18)をもとに栈橋式係留施設の上部工を対象として遷移確率の推計法を整理する。

劣化度の判定段階について、劣化の進展状況に応じて 0～Ⅴ段階の全体としての 6 段階に区分していた。文献 10)に基づき、ここでは劣化度Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ段階の状況を図 2-21 に示す。このような劣化度に対する 6 段階の定義をもとに、上部工の下面を対象に床版・梁の部材ごとの判定を 2.1 の図 2-7 で示したように船上から目視等により実施する。その結果の一例を図 2-22 に示す。

この判定結果から、全部材を対象にして各劣化度の段階に対する比率が算定される。各劣化度の判定段階の比率と施設の経過年数と合わせた事例の幾つかを図 2-23 に示す。例えば、図 2-23 での中央の図では 31 年経過した状態において劣化度Ⅱの比率が 60%程度に達している。この分布形状とマルコフ連鎖モデルによる解析結果との統合を図る。マルコフ連鎖の結果例として図 2-24 を示す。図 2-24 左では遷移確率 0.10 の場合に $t=2\sim 60$ 年に変化させた場合、右側では $t=10$ 年の場合に遷移確率を 0.01～0.30 に変化させた状況を示している。例えば、図 2-23 で見られるように時間経過と共にピークが 0 段階からⅤ段階に変遷する状況と図 2-24 の左図とは全く同様の傾向が確認することができる。

これらの成果をもとに個別の施設ごとに、施設の経過年数で最も適合する遷移確率を繰返し計算により求める。図 2-25 では、図 2-23 で示した結果に最も適合した遷移確率の解析結果を示している。ここでは、図 2-23 での結果を実測として示し、推計した遷移確率に基づいた解析結果を予測として示している。

したがって、個別の施設の部材単位での劣化度を判定し、その判定段階ごとの比率と経過年数から遷移確率を推計することができる。

なお、この 6 段階での判定段階は、その後に実務的および行政的な判断のもとに部材単位での劣化度の判定結果は d～a の 4 段階として整理された。ただし、マルコフ連鎖モデルの考え方は図 2-26 に示すとおり基本的に同じである。さらに、図 2-27 では遷移確率が 0.10 の場合における部材単位での 4 段階の劣化度判定結果比率の経過年数に応じた変遷を示している。また、本研究では 6 段階で確認されたマルコフ連鎖モデルの適用性は、4 段階においても同様であるとしている。

(2) 構造性能曲線の構築

遷移確率を得ることができれば、マルコフ連鎖モデルにより、部材毎の評価結果 (d～a) の比率を時系列で推計することができる。

一方で、2.3 で整理したように「安全しろ＝0」の考え方にに基づき、総合評価「A」判定の評点が (60) になるように、事前に部材毎の各評価結果 (d～a) に評点を設定しておくことで、総合評価の評点を構造性能指標として意味付けすることが可能になる。具体的には、栈橋上部工では【d=100, c=99, b=95, a=80】を用いた。この部材毎の評点の設定は、これまでの経験、知見に基づくとともに、総合評価「A」判定の時点での評点が (60) となり、さらにその時点までに描かれる構造性能曲線の連続性等の妥当性が確保されるように設定している。

ただし、この設定【d=100, c=99, b=95, a=80】に基づく解析結果では最終的に劣化度 a 段階に集約することから総合評価の評点は a 段階の (80) となり、劣化度「A」判定の総合評価としての評点は (60) にはならない。このため、実用的な構造性能曲線を構築するために、d～a の 4 段階での a 段階の下に更に aa 段階を設定し、その評点を【aa=0】とする。すなわち、a 段階に達した部材が次の劣化度の aa 段階に達した場合には、部材耐力を期待できない状況であると判断して【aa=0】を設定する。

ここで示した考え方に基づき、遷移確率が 0.05～0.20 における構造性能指標の算定結果を表 2-5①～④に示す。遷移確率が 0.1 の表 2-5②を対象として説明を加える。まず、年次が 0 では当然に d 判定が 100%となっている。次に、年数が 1 では遷移確率を 0.1 としていることから年次が 0 での d 判定の 100%のうち 10%が c 判定となり、90%が d 判定として残留している。同様に、年次の進展とともに $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow aa$ への段階的に変遷の状況を同表左半分の列で示している。これに対して、右半分の列では部材単位での各評点【d=100, c=99, b=95, a=80, aa=0】に比率を乗じた値、さらにその合計値としての構造性能指標値を示している。

したがって、遷移確率の推計結果に基づき、ここで示した手法により構造性能曲線を構築することが可能となる。図 2-28 では、この考え方に基づいて遷移確率を 0.025～0.20 とした場合の構造性能曲線を示している。

また、総合評価としての劣化度「A」判定の評点を (60) とすることに合わせて、総合評価の劣化度「B」、「C」、「D」判定の評点は、それぞれの劣化度部材に対する耐力試験結果 (p.34) および今回のモデル設定の結果から次のように設定している。

総合評価結果劣化度の評点 (構造性能指標値)

【D=100 C=95 B=80 A=60】

この構造性能曲線の構築手法は，これまで実施されてきた実験結果や分析結果等の知見から，マクロ的な視点からの検討および個別施設としての栈橋式係留施設の上部工への適用性は高いと考えられるものの，栈橋式係留施設の下部工（鋼管杭）あるいは矢板式係留施設等の他の個別施設への適用については十分に検討することが必要である．

ただし，本研究での 3. 以降では主にマクロ的な視点からの検討であることから，栈橋式係留施設の上部工以外への施設に対しても適用可能としている．

なお，遷移確率の推計に際しては，先に示した図 2-22 ように部材ごとの詳細な点検・診断を実施し，図 2-25 に示す手法で，実測データに最も近似するような遷移確率を繰り返し計算によりもとめることが望ましい．

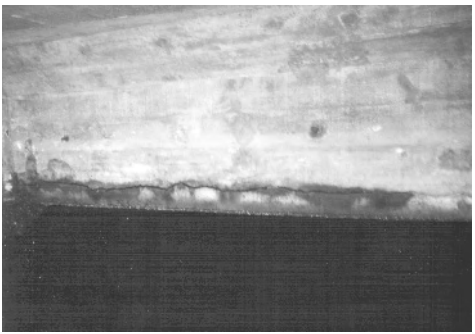
しかしながら，現実的に実施される点検・診断では，より簡易な点検・診断により総合評価の判定が実施されており，図 2-25 に示す手法を適用することは困難な状況となる．この場合には，総合評価の各判定に達するまでの経過年数に対応した劣化速度は遷移確率に近似できるという考え方¹⁸⁾を適用することが考えられる．具体的には，総合評価の評点を【D=0，C=1，B=2，A=3】として，これを各判定に達した年数で除した値が劣化速度となり，これを遷移確率の近似値として適用することになる．例えば，建設後 10 年で総合評価B判定となった場合には $2/10=0.2$ が，建設後 30 年で総合評価A判定となった場合には $3/30=0.1$ が劣化速度となり，これを遷移確率の近似値とする．

ただし，この手法に基づく遷移確率の推計精度は低いことから，マクロ的な視点からの検討以外への適用には十分に注意することが必要である．

劣化度Ⅲ
錆汁を伴うひび割れ



劣化度Ⅳ
幅 3 mm を超えるひび割れ



劣化度Ⅴ
かぶりコンクリートの広範囲の剥落



図 2-21 劣化度Ⅲ～Ⅴの状況

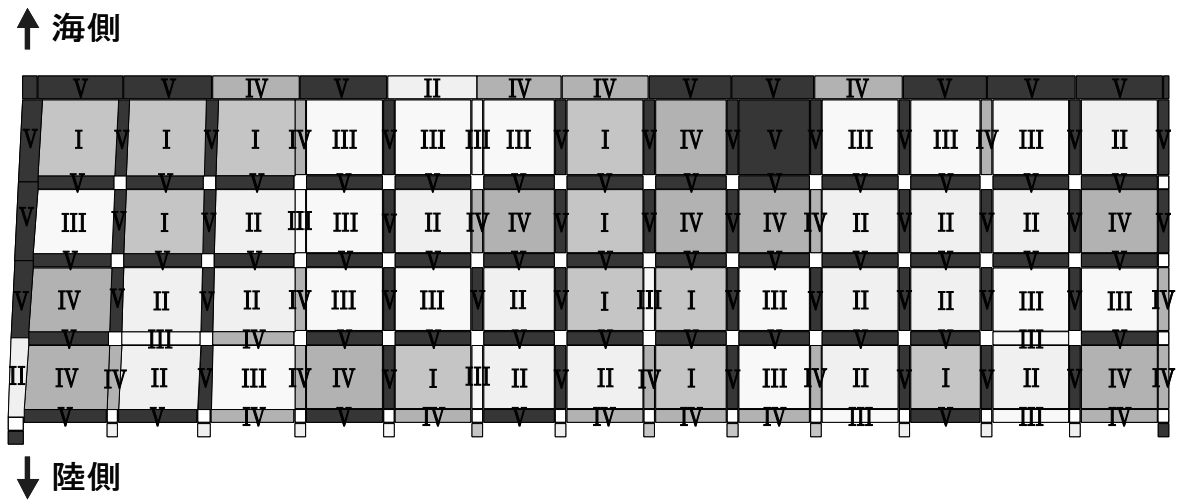


図 2-22 栈橋 上部工下面の劣化度判定結果の一例

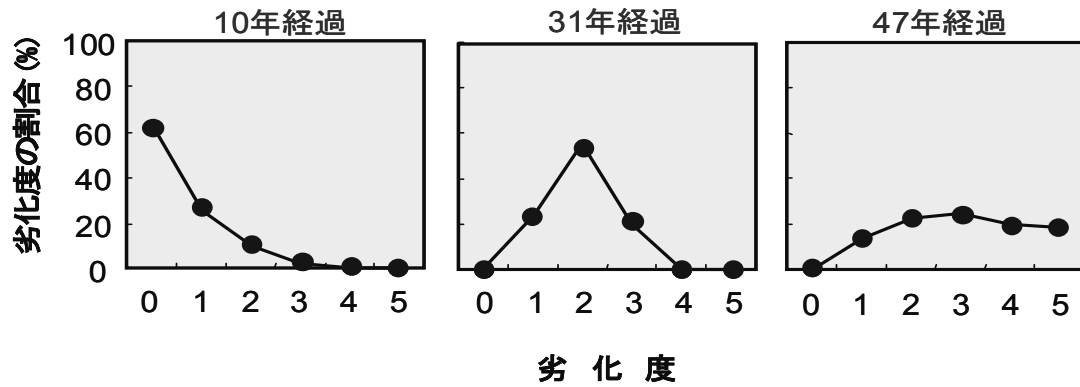


図 2-23 栈橋の劣化判定による各段階の比率

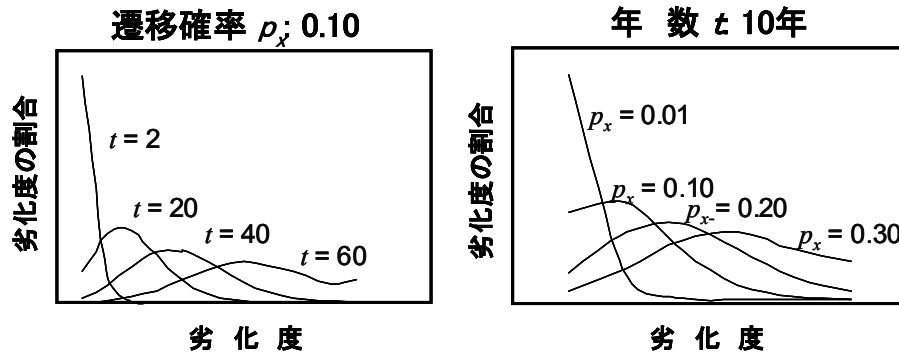


図 2-24 マルコフ連鎖モデルによる解析結果例

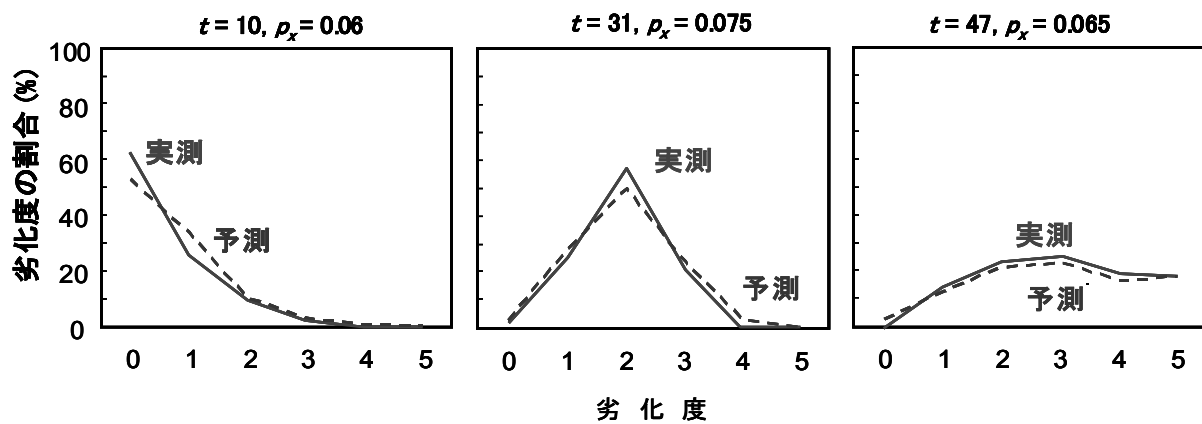


図 2-25 劣化実態調査結果とマルコフ連鎖モデル解析結果との比較

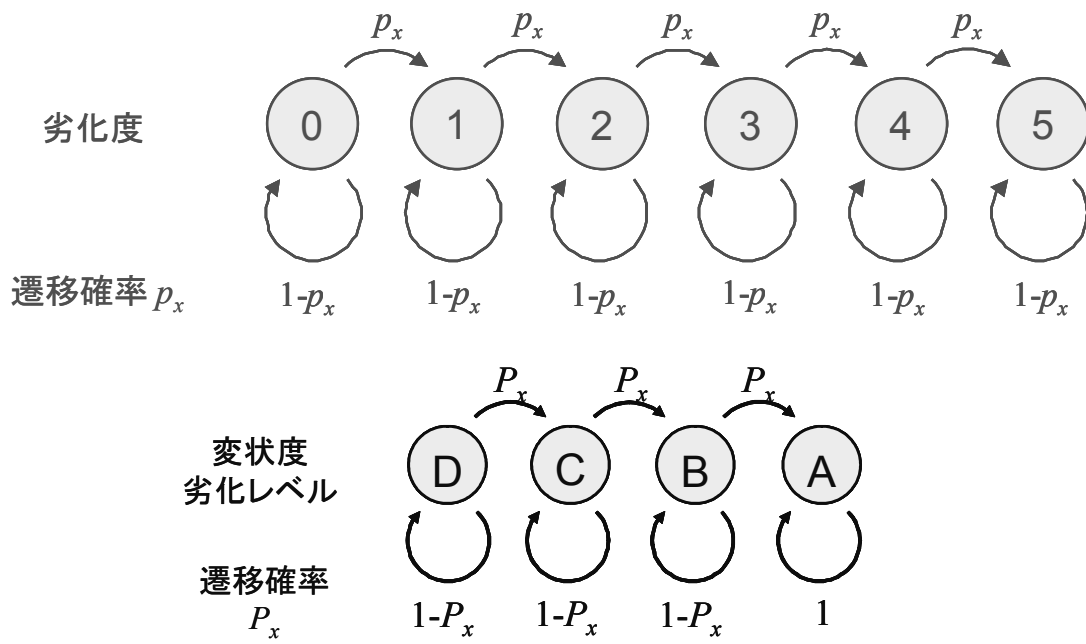


図 2-26 劣化度 6段階と4段階とのマルコフ連鎖モデルの比較

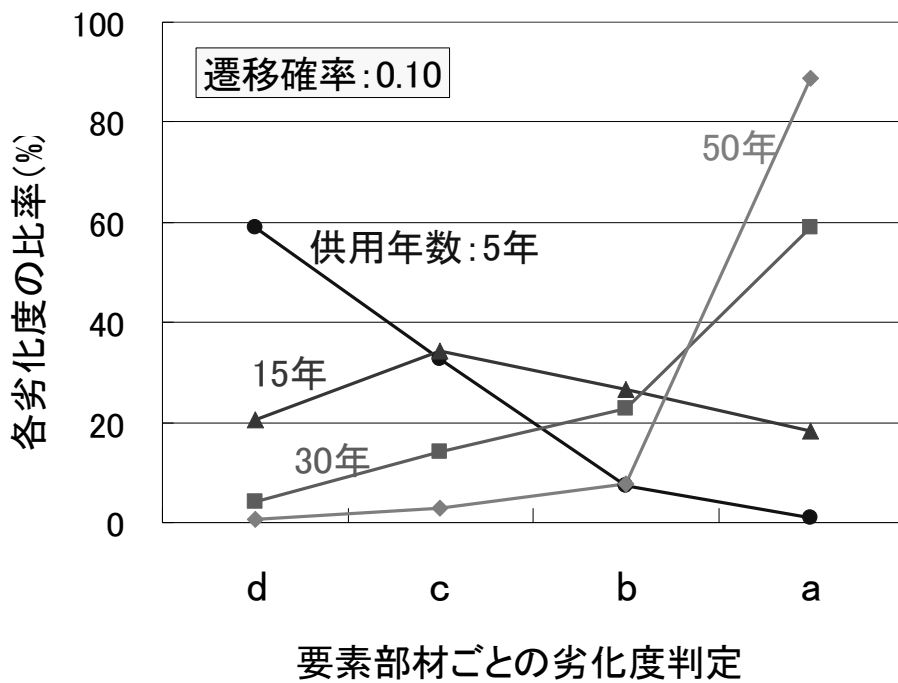


図 2-27 部材別劣化度判定 4 段階 遷移確率: 0.10 での推計結果

表 2-5① 遷移確率=0.05 構造性能指標の算定結果

遷移確率= 0.05

年数	部材単位での判定比率					部材単位での評点					構造性能指標
						d	c	b	a	aa	
	d	c	b	a	aa	100	99	95	80	0	
0	100%	0%	0%	0%	0%	100.00	0.00	0.00	0.00	0	100.0
1	95%	5%	0%	0%	0%	95.00	4.95	0.00	0.00	0	100.0
2	90%	10%	0%	0%	0%	90.25	9.41	0.24	0.00	0	99.9
3	86%	14%	1%	0%	0%	85.74	13.40	0.68	0.01	0	99.8
4	81%	17%	1%	0%	0%	81.45	16.98	1.29	0.04	0	99.8
5	77%	20%	2%	0%	0%	77.38	20.16	2.04	0.09	0	99.7
6	74%	23%	3%	0%	0%	73.51	22.98	2.90	0.17	0	99.6
7	70%	26%	4%	0%	0%	69.83	25.47	3.86	0.29	0	99.4
8	66%	28%	5%	1%	0%	66.34	27.65	4.89	0.43	0	99.3
9	63%	30%	6%	1%	0%	63.02	29.56	5.97	0.62	0	99.2
10	60%	32%	7%	1%	0%	59.87	31.20	7.09	0.84	0	99.0
11	57%	33%	9%	1%	0%	56.88	32.60	8.23	1.09	0	98.8
12	54%	34%	10%	2%	0%	54.04	33.79	9.39	1.39	0	98.6
13	51%	35%	11%	2%	0%	51.33	34.77	10.54	1.78	0	98.4
14	49%	36%	12%	3%	0%	48.77	35.57	11.68	2.14	0	98.2
15	46%	37%	13%	3%	1%	46.33	36.21	12.80	2.52	0	97.9
16	44%	37%	15%	4%	1%	44.01	36.69	13.90	2.93	0	97.5
17	42%	37%	16%	4%	1%	41.81	37.04	14.96	3.37	0	97.2
18	40%	38%	17%	5%	1%	39.72	37.25	15.99	3.83	0	96.8
19	38%	38%	18%	5%	1%	37.74	37.36	16.98	4.32	0	96.4
20	36%	38%	19%	6%	2%	35.85	37.36	17.92	4.81	0	95.9

表 2-5② 遷移確率=0.10 構造性能指標の算定結果

遷移確率= 0.10

年数	部材単位での判定比率					部材単位での評点					構造性能指標
						d	c	b	a	aa	
	d	c	b	a	aa	100	99	95	80	0	
0	100%	0%	0%	0%	0%	100.00	0.00	0.00	0.00	0	100.0
1	90%	10%	0%	0%	0%	90.00	9.90	0.00	0.00	0	99.9
2	81%	18%	1%	0%	0%	81.00	17.82	0.95	0.00	0	99.8
3	73%	24%	3%	0%	0%	72.90	24.06	2.57	0.08	0	99.6
4	66%	29%	5%	0%	0%	65.61	28.87	4.62	0.29	0	99.4
5	59%	33%	7%	1%	0%	59.05	32.48	6.93	0.65	0	99.1
6	53%	35%	10%	1%	0%	53.14	35.08	9.35	1.17	0	98.7
7	48%	37%	12%	2%	0%	47.83	36.83	11.78	1.84	0	98.3
8	43%	38%	15%	3%	1%	43.05	37.88	14.14	2.65	0	97.7
9	39%	39%	17%	4%	1%	38.74	38.35	16.36	3.57	0	97.0
10	35%	39%	19%	6%	1%	34.87	38.35	18.40	4.59	0	96.2
11	31%	38%	21%	7%	2%	31.38	37.97	20.24	5.68	0	95.3
12	28%	38%	23%	9%	3%	28.24	37.28	21.86	6.82	0	94.2
13	25%	37%	24%	11%	3%	25.42	36.35	23.25	8.66	0	93.7
14	23%	36%	26%	12%	4%	22.88	35.23	24.42	9.75	0	92.3
15	21%	34%	27%	14%	6%	20.59	33.97	25.36	10.83	0	90.7
16	19%	33%	27%	15%	7%	18.53	32.61	26.08	11.88	0	89.1
17	17%	32%	28%	16%	9%	16.68	31.19	26.60	12.89	0	87.4
18	15%	30%	28%	17%	10%	15.01	29.72	26.93	13.84	0	85.5
19	14%	29%	29%	18%	12%	13.51	28.23	27.09	14.73	0	83.6
20	12%	27%	29%	19%	14%	12.16	26.75	27.09	15.54	0	81.5

表 2-5③ 遷移確率=0.15 構造性能指標の算定結果

遷移確率= 0.15

年数	部材単位での判定比率					部材単位での評点					構造性能指標
						d	c	b	a	aa	
	d	c	b	a	aa	100	99	95	80	0	
0	100%	0%	0%	0%	0%	100.00	0.00	0.00	0.00	0	100.0
1	85%	15%	0%	0%	0%	85.00	14.85	0.00	0.00	0	99.9
2	72%	26%	2%	0%	0%	72.25	25.25	2.14	0.00	0	99.6
3	61%	33%	6%	0%	0%	61.41	32.19	5.45	0.27	0	99.3
4	52%	37%	10%	1%	0%	52.20	36.48	9.27	0.92	0	98.9
5	44%	39%	14%	2%	0%	44.37	38.76	13.13	1.95	0	98.2
6	38%	40%	18%	4%	1%	37.71	39.53	16.74	3.32	0	97.3
7	32%	40%	21%	6%	1%	32.06	39.20	19.92	4.93	0	96.1
8	27%	38%	24%	8%	2%	27.25	38.08	22.57	6.71	0	94.6
9	23%	37%	26%	11%	3%	23.16	36.42	24.67	8.55	0	92.8
10	20%	35%	28%	13%	5%	19.69	34.40	26.21	10.39	0	90.7
11	17%	32%	29%	15%	7%	16.73	32.16	27.23	12.14	0	88.3
12	14%	30%	29%	17%	9%	14.22	29.82	27.77	13.76	0	85.6
13	12%	28%	29%	22%	12%	12.09	27.46	27.90	17.27	0	84.7
14	10%	25%	29%	23%	15%	10.28	25.14	27.67	18.20	0	81.3
15	9%	23%	29%	24%	18%	8.74	22.89	27.14	18.97	0	77.7
16	7%	21%	28%	24%	22%	7.43	20.76	26.36	19.55	0	74.1
17	6%	19%	27%	25%	26%	6.31	18.74	25.39	19.95	0	70.4
18	5%	17%	26%	25%	29%	5.36	16.87	24.28	20.16	0	66.7
19	5%	15%	24%	25%	33%	4.56	15.14	23.07	20.20	0	63.0
20	4%	14%	23%	25%	37%	3.88	13.54	21.79	20.09	0	59.3

表 2-5④ 遷移確率=0.20 構造性能指標の算定結果

遷移確率= 0.20

年数	部材単位での判定比率					部材単位での評点					構造性能指標
						d	c	b	a	aa	
	d	c	b	a	aa	100	99	95	80	0	
0	100%	0%	0%	0%	0%	100.00	0.00	0.00	0.00	0	100.0
1	80%	20%	0%	0%	0%	80.00	19.80	0.00	0.00	0	99.8
2	64%	32%	4%	0%	0%	64.00	31.68	3.80	0.00	0	99.5
3	51%	38%	10%	1%	0%	51.20	38.02	9.12	0.64	0	99.0
4	41%	41%	15%	3%	0%	40.96	40.55	14.59	2.05	0	98.2
5	33%	41%	20%	5%	1%	32.77	40.55	19.46	4.10	0	96.9
6	26%	39%	25%	8%	2%	26.21	38.93	23.35	6.55	0	95.0
7	21%	37%	28%	11%	3%	20.97	36.33	26.15	9.18	0	92.6
8	17%	34%	29%	15%	6%	16.78	33.22	27.89	11.74	0	89.6
9	13%	30%	30%	18%	9%	13.42	29.90	28.69	14.09	0	86.1
10	11%	27%	30%	20%	12%	10.74	26.58	28.69	16.11	0	82.1
11	9%	24%	30%	22%	16%	8.59	23.39	28.05	17.72	0	77.7
12	7%	21%	28%	24%	21%	6.87	20.41	26.93	18.90	0	73.1
13	5%	18%	27%	29%	25%	5.50	17.69	25.46	23.43	0	72.1
14	4%	15%	25%	29%	31%	4.40	15.24	23.76	23.03	0	66.4
15	4%	13%	23%	28%	37%	3.52	13.06	21.94	22.43	0	60.9
16	3%	11%	21%	27%	42%	2.81	11.15	20.06	21.64	0	55.7
17	2%	10%	19%	26%	48%	2.25	9.47	18.18	20.69	0	50.6
18	2%	8%	17%	25%	53%	1.80	8.03	16.36	19.61	0	45.8
19	1%	7%	15%	23%	58%	1.44	6.78	14.63	18.45	0	41.3
20	1%	6%	14%	22%	63%	1.15	5.71	13.01	17.22	0	37.1

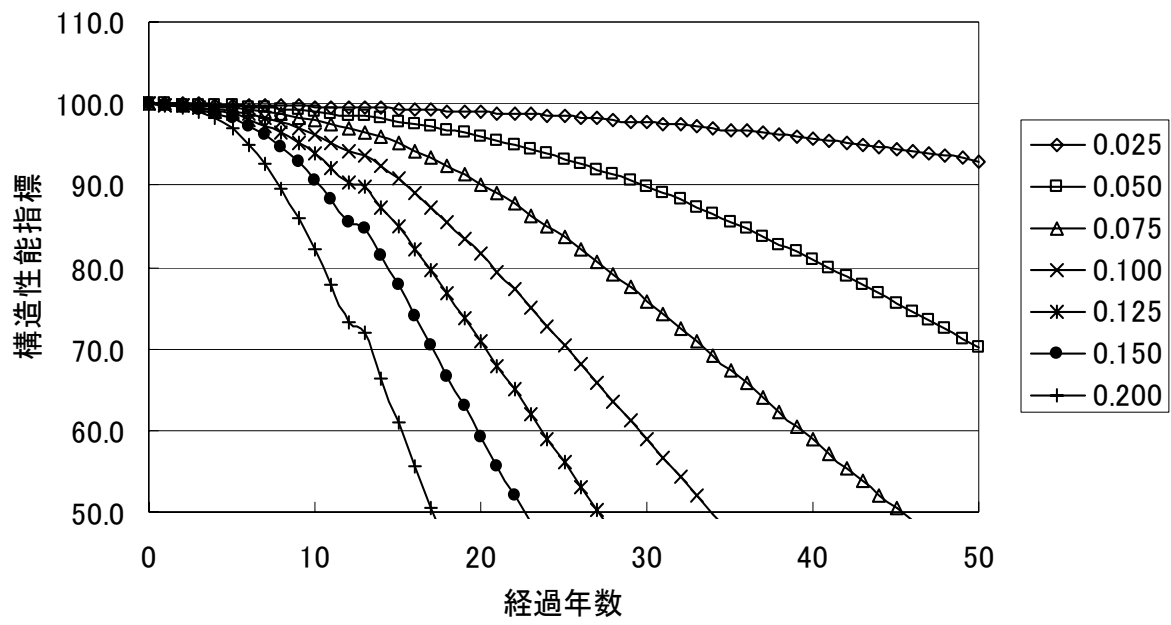


図 2-28 構造性能曲線（遷移確率 0.025～0.20）