実態調査に基づく 係留施設の機能低下評価手法の提案

加藤 絵万¹・川端 雄一郎²・岩波 光保³

^{1, 2, 3}正会員 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究チーム (〒239-0836 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail 1: katoh-e@pari.go.jp

E-mail 2: kawabata-y@pari.go.jp

E-mail 3: iwanami@pari.go.jp

本研究では、係留施設の利便性および利用上の安全性が失われることを、係留施設の機能低下と位置付け、エブロンや附帯設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響を定量的に評価する手法を構築することを目的とした。検討にあたって、港湾施設管理者および利用者を対象とした実態調査により、エブロンや附帯設備等の変状と施設の機能低下の関連について現状を把握した。調査結果の統計分析により、各設備等の変状が係留施設の機能低下に及ぼす影響の程度、および各設備等の劣化度と機能低下の関係を評価し、最終的に、係留施設の機能低下を定量的に評価する手法を構築した。

Key Words : *berthing facility, decline in functional performance, deterioration and deformation, deterioration grade*

1. まえがき

港湾の施設は、他の社会基盤施設と比較すると、一般的に厳しい自然環境下に置かれていることから、材料の劣化に起因する部材の損傷等の変状により、供用期間中に施設の性能の低下が生じることが多い。今後、限られた投資の中で、港湾の施設を所要の期間にわたって機能させるためには、施設が有すべき性能が要求水準を満たすように、適切に維持管理が実施されなければならない。

港湾の施設の計画的かつ適切な維持管理を推進するため、平成19年4月に港湾の施設の技術上の基準を定める省令が施行された。これによれば、技術基準対象施設については施設の設計時（既存の施設の場合には、今後最初に実施する点検時）に維持管理計画書等を作成し、それに基づく維持行為を実施することが求められている。維持管理計画の策定にあたっては、対象とする施設全体および全構成部材の維持管理についての基本的な考え方をまとめた上で、維持管理に関する行為の一連の手順について定めておかねばならない。これに連動して、施設の維持管理計画書等の作成や維持管理業務についての技術的支援を目的として、平成19年10月に港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き¹⁾が、同じく平成19年10月に港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾が刊行された。

港湾の施設のうち、特に係留施設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、構造物に作用する外的要因が多種多様であるため、変状の発生・進展現象が複雑である。施設の機能を、その供用期間中、確実に維持するためには、発生する可能性のある全ての変状を点検診断することが理想であるが、手間や費用の観点から現実的ではない。このため、施設の性能および機能に及ぼす影響が大きい変状を点検診断の対象として、効率的な維持管理を行うことが求められており、維持管理技術マニュアルでは、変状の原因、変状の発生、変状の結果生ずる影響、性能および機能の低下へと変状が進行していく過程を、変状連鎖図として整理している²⁾。

図-1に横棧橋の変状連鎖を示す。棧橋本体に発生する代表的な変状は、下部工（鋼管杭）および上部工の劣化である。上部工は、鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリートといったコンクリート部材で構築されるが、上部工が曝される環境条件はコンクリート部材にとって極めて過酷であり、他の陸上構造物と比較してその劣化速度は極めて速い。また、上部工を支える鋼管杭の腐食による劣化は、直ちに他の構成部材の損傷に繋がるものであり、ひいては構造物全体の安定性の低下に繋がるものである。したがって、棧橋の維持管理にあたっては、環境条件が上部工および下部工の劣化の発生・進展に及ぼす影響を十分に考慮することが必要であり、維持管理計画書作成の手引き¹⁾においても、構造安定性

図-1 横桟橋の変状連鎖²⁾

図-2 鋼矢板式係船岸の変状連鎖²⁾

の低下に主眼を置いた維持管理計画の策定事例が記されている。

図-2に鋼矢板式係船岸の変状連鎖図を示す。鋼矢板式係船岸に発生する代表的な変状は、鋼矢板の腐食であり、その発生・進展現象は、その他の構成部材の変状の発生・進展現象とは独立して進行する。したがって、鋼矢板の腐食のみに着目すれば、施設全体の安定性の低下を明確に把握できるとされている。ただし、鋼矢板の腐食のみが「安定性の低下」に結びつくものであり、他の構成部材に発生する変状とその連鎖はすべて「機能の低下」に繋がるものとなっている。これは、図-1に示した上部工および下部工を除いた桟橋の構成部材についても同様である。

一方、図-3に示すケーソン式係船岸では、全ての変状が「機能の低下」へと繋がっており、構造物の「安定性

の低下」には繋がっていない。つまり、ケーソン式係船岸では、構成部材の変状の進行により、構造物としての安定性を失う可能性は非常に低いということである。

前述の港湾施設の維持管理の関連資料^{1),2)}は、現状では、構成材料の劣化・変状による構造性能(耐荷性、変形性等)の低下により引き起こされる施設の「安定性の低下」に主眼を置いて構成されている。また、施設の構造安定性の低下に対する対策工法とその実施時期の組合せにより可能な限りライフサイクルコストを低減させるための方策については、これまでも多数の検討がなされている^{例えば3)}。しかし、特に、ケーソン式係船岸では、その供用期間中、ケーソン本体の構造性能を確保するための補修・補強等に係るコストを考慮して、施設全体のライフサイクルコストの最小化を目指すような維持管理を実施することの意義は小さい。この場合、施設の利用

図3 ケーソン式係船岸の変状連鎖²⁾

上の障害の排除，すなわち「機能の低下」の抑制に主眼を置いた維持管理を実施することが適切と考えられる。

施設の「機能の低下」の抑制に主眼を置いた維持管理は，材料の劣化に対して効率的かつ効果的に維持管理を行う必要がある栈橋，および鋼矢板式係船岸に対しても同様に必要とされる．なぜなら，特に，係留施設の利用者にとっては，施設に利用上の障害が生じること，すなわち，利便性および利用上の安全性が失われることが問題であり，それは施設の構造形式にはよらないためである．係留施設の設置者および管理者は，施設の予定供用期間中，係留施設の利便性が失われることのないよう，また，あわせて施設の利用上の安全性が失われることのないよう，施設を構成する部材の全てについて，適切な維持管理を行わなければならないのである．

実際，係留施設の維持管理実務では，施設の利便性や利用上の安全性の低下に対応するための比較的小規模な維持行為の方が，施設の構造安定性の低下に対応するための大規模な維持行為よりも実施の頻度は高い．施設の供用期間中に複数回，施設の利用状況によっては毎年のように小規模な維持行為が必要となる場合もある．ライフサイクルコストを可能な限り低減するためには，構造安定性の低下のみでなく，施設の利便性や利用上の安全性の確保の観点からの維持管理も戦略的に行うことが必要である．

ここで，港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾によれば，防舷材，係船柱などの船舶の接岸や，エプロンなど荷役に必要な設備については，係留施設の利用の観点から，日常点検に加えて適切な定期点検診断を行う必要がある．また，車止め，安全柵やはしご等の附帯設備に

ついては，その損傷を放置した場合，人命にも関わる重大な事故や災害につながる恐れがある．このため，上記の設備と同様に日常点検および定期点検診断を行う必要がある．このような観点から，エプロンや附帯設備等の変状は，係留施設の利便性や荷役作業等の利用上の安全性に及ぼす影響は大きいといえる．しかし，それらの設備等の変状の発生が施設の利便性や利用上の安全性に及ぼす影響がどの程度であるか，施設を管理あるいは利用する人間の感覚に基づいて定量的に評価した例はない．現行の維持管理の枠組みでは，あくまでそれらの設備等に発生する変状の程度を点検診断し，劣化度として評価しているに過ぎない．

以上のことから，本研究では，係留施設の利便性が失われること，および利用上の安全性が失われることを，「係留施設の機能低下」と位置付け，エプロンや附帯設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響を定量的に評価する手法を構築することを目的とした．図1～3に示した各構造形式における変状連鎖図を参考として，変状が生じた場合，船舶の接岸および係留に及ぼす影響が懸念されるものとして，岸壁法線，防舷材，係船柱を検討の対象とした．また，変状が生じた場合，荷役作業の安全に及ぼす影響が懸念されるものとして，エプロンおよび車止めを検討の対象とした．

検討にあたり，まず，上記の各部位・部材および設備（以下，設備等と称する）の変状と施設の機能低下の関連について現状を把握するため，港湾施設管理者（以下，管理者）および利用者を対象として，アンケートによる実態調査を行った．そして，調査結果から，係留施設の機能低下の定量評価手法の構築に向けて解決すべき課題

表-1 調査項目

施設の基本情報
(1) 管理者あるいは利用者, (2) 施設概要: 構造形式・供用年数等, (3) 利用形態: 積荷種類, (4) 利用頻度: 船舶の着岸回数等, (5) 荷役機械種類
設備等の変状に関する影響度調査
0. 下記の設備等のうち, 変状(損傷・欠損・破損など)を発見する機会が多いものはどれか。(複数回答可)
1. 下記の設備等に変状が発生したり損傷した場合, 施設の利用に支障をきたすと考えられるものはどれか。(重要と思われる順に3つ選択)
2. 下記の設備等に変状が発生したり破損しても, 施設の利用に支障をきたすことはないと考えられるものはどれか。(影響が小さいと思われる順に3つ選択)
(選択肢) 1. 岸壁法線の出入り, 2. エプロンの沈下, 3. エプロン(舗装)のひび割れ, 4. エプロンおよび背後地の段差, 5. 防舷材本体, 6. 防舷材取付け金具, 7. 係船柱, 8. 車止め
設備等の変状の状態に関する認識調査
係留施設の利用に支障が出始めるときの下記の設備等の変状の状態について問う。
(それぞれの設備等について1つの状態を選択)
1. 岸壁法線の出入りについて
2. エプロンおよび背後地について
2-1 エプロンの沈下
2-2 エプロン(コンクリート舗装およびアスファルト舗装)のひび割れ
2-3 エプロンおよび背後地の段差
3. 防舷材について
3-1 防舷材本体
3-2 防舷材取付け金具
4. 係船柱について
5. 車止めについて
(理由)※設備等の種類に応じて選択肢を設定
(例) 利用者の不安, 美観, 荷役作業の安全確保, 車両走行の安全確保, 船舶の接岸の安全確保, その他(記入)

を抽出した。そして、アンケートによる実態調査の結果を客観的に評価するために統計的手法を導入し、各設備等の変状に係留施設の機能低下に及ぼす影響の程度、および港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾における各設備等の劣化度と機能低下の関係を定量的に評価した。以上の結果をもとに、係留施設の機能低下を定量的に評価する手法を構築した。

2. 係留施設の機能低下に関する実態調査

(1) 実態調査の概要と回答とりまとめの方針

a) 実態調査の概要

実態調査は、平成22年10月～12月に国内の重要港湾および地方港湾を対象として実施し、係留施設の利用に支障が出始めるときの岸壁法線、エプロン、係船柱、防舷材、車止めの変状の状態、およびその理由に関して当該施設の管理者および利用者、それぞれの立場から回答してもらうこととした。このとき、供用10年以上が経過した同一施設に対して両者から回答を得ることとし、管理者により所管の施設から回答対象とする施設、および施設を利用し利用上の安全確保に注意を払っている利用者を回答者として選定してもらうこととした。

実態調査の項目を表-1に示す。調査にあたって、まず、施設の構造形式や供用年数、また利用形態等の施設の基

表-2 劣化度判定の基本的な考え方²⁾

劣化度	部位・部材の状態
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	部材の性能低下はないが、変状が発生している状態
d	変状が認められない状態

表-3 劣化度判定基準と選択肢の対応(エプロンの沈下)

劣化度	判定基準 (重力式の場合)	選択肢
a	車輛の通行や歩行に重大な支障がある	エプロンに陥没している箇所がある エプロンに50mm以上の沈下(段差)がある
b	エプロンに3cm以上の沈下(段差)がある	エプロンに30～50mm程度の沈下(段差)がある
c	エプロンに3cm未満の沈下(段差)がある	エプロンに10～30mm程度の沈下(段差)がある エプロンに10mm以下の沈下(段差)がある
d	変状なし	—

表-4 劣化度判定基準と選択肢の対応(防舷材本体)

劣化度	判定基準	選択肢
a	本体(ゴム): 欠落, 永久変形がある	本体(ゴム)がない 本体(ゴム)が50%以上欠損している 本体(ゴム)が変形している
b	—	本体(ゴム)が30%以上欠損している
c	本体(ゴム): 欠損, 亀裂, チッピングがある	本体(ゴム)が10%以上欠損している 本体(ゴム)に亀裂が生じている 本体(ゴム)にチッピングがある
d	変状なし	—

本情報を把握した。調査の内容は、大きく分けて、設備等の変状に関する影響度調査と、設備等の変状の状態に関する認識調査の二つである。

「設備等の変状に関する影響度調査」では、設備等の変状に係留施設全体の機能低下に及ぼす影響を把握するため、変状を発見する機会が多い設備等、施設の利用に影響を及ぼすと考えられる設備等、影響を及ぼすことはないと考えられる設備等について調査を行った。

「設備等の変状の状態に関する認識調査」では、係留施設の利用に支障が出始めるときの、それぞれの設備等の変状の状態について調査した。変状の状態に関する回答は原則として選択方式とし、選択肢は港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾の一般定期点検診断様式における各項目の劣化度(a, b, c, d)に配慮して設定した。

表-2に劣化度と劣化度判定の基本的な考え方を示す。なお、同マニュアルでは、附帯設備の劣化度判定基準は劣化度a, c, dについて示されており、劣化度bについては示されていない。しかし、本調査では、劣化度aと劣化度cの判定基準の中間となる変状の状態を選択肢に含め、これを劣化度bの状態に対する回答として取り扱うこととした。同マニュアルにおける劣化度判定基準と、本調査における選択肢の例として、表-3にエプロンの沈下について、表-4に防舷材本体について示す。

エプロンの沈下についての劣化度判定基準は、係留施

設の構造形式により記述が異なる。しかし、劣化度は、係留施設の構造形式によらず統一的な判断基準に基づいて部材の性能低下の程度として表されていることから、認識調査の各項目における選択肢は、構造形式を意識せずに回答できるよう配慮しながら、それぞれの劣化度に対応するよう設定した。

防舷材については、防舷材種類に応じた劣化度の判定と機能低下度の判定方法がガイドライン⁴⁾に示されており、ガイドラインにおける劣化度判定の基本的な考え方は表-2と同様である。本調査では、選択肢の設定にあたって、機能低下度の判定基準として示された防舷材本体の欠損割合(%)を参考にした。

また、エプロン(舗装)のひび割れについては、コンクリートおよびアスファルト舗装を区別して調査を行うこととした。

b) 調査数量と回答のとりまとめの方針

実態調査の回答を得た管理者数は54団体(91港湾、132施設)、利用者数は85団体(102施設)である。利用者の業種は、陸運・海運業、倉庫・運輸関連、製造業、埠頭管理会社等であった。施設の構造形式の内訳を図-4に示す。回答は重力式係船岸が半数以上、鋼矢板式係船岸が4分の1程度となった。ここで、本調査の目的は、設備等の変状と係留施設の機能低下に関連づけることである。このためには、構造形式別に回答を分析することは必要でないと判断し、以降では全ての施設に関する回答を総合して考察する。

また、同一の管理者および利用者から複数の施設に対する回答を得たが、施設の設置目的および構造形式毎に維持管理に対する基本的な考え方が異なる場合があるため、回答のとりまとめにあたっては、回答数を施設数としてカウントし、同一の管理者および利用者からの回答の重複については考慮しないこととした。

本来、施設の規模、利用形態、利用頻度、荷役機械の状況により、各施設の経済的あるいは社会的重要度が異なるため、施設の維持管理に対する基本的な考え方は異なるものとなる。しかし、ここでは、それらの詳細を区別せず、全ての施設に対して、設備等の維持管理に関する調査結果を統合して考察することとした。

(2) 設備等の変状に関する影響度調査の結果

a) 変状を発見する頻度が高い設備等について

図-5に変状を発見する頻度が高い設備等についての調査結果を示す。本設問は、実際に頻繁に変状が発生する設備等を把握するため、また、管理者と利用者間の施設の維持管理に対する着眼点の違いを把握するために設定した。

回答は設備等計8項目から複数を選択可能としたため、図中の縦軸は管理者および利用者の総回答数に対する、

図-4 構造形式毎の回答数

図-5 変状を発見する頻度が高い設備等

【管理者】

【利用者】

図-6 設備等の変状が施設の利用に及ぼす影響

表-5 順位毎の回答数

区分	管理者		利用者	
	影響がある	影響がない	影響がある	影響がない
1 番目	134	116	105	96
2 番目	122	115	97	82
3 番目	121	110	101	74
回答数	132 (施設)		102 (施設)	

それぞれの設備等の回答割合として示した。有意水準を0.05として χ^2 検定を行った結果、管理者および利用者の

全体的な回答の傾向に統計学的には差はないと判定された。しかし、管理者は防舷材本体の変状、利用者はエプロンの沈下に対する回答が最も多い。両者の管理あるいは利用に関する本来的な立場の違いを踏まえると、管理者は施設の維持管理費用に、利用者は施設の利便性と利用上の安全性の確保に意識が高いことが要因となっているものと推察される。

b) 設備等の変状が施設の利用に及ぼす影響について

図-6に設備等の変状に係留施設の利用に及ぼす影響に関する調査結果を示す。調査は、施設の利用に支障をきたすと考えられる設備等と、施設の利用に支障をきたすことはないと考えられる設備等、それぞれを計8項目から順に3つ選択することで行った。

ここで、表-5にそれぞれの順位についての回答数を示す。管理者および利用者ともに、それぞれの順位に対する回答数は異なり、特に、最も影響がある設備等に対する回答数は、調査の対象とした施設数を上回っている。これは、影響があると考えられる設備等を複数選択し、選択したもののすべてが最も影響がある(1番目)とした回答者がわずかではあるが存在したためである。本来であればこれらの回答の有効性について検討すべきと考えられるが、ここでは、簡便のため、図-6にそれぞれの順位についての回答を総計して示すこととした。同図は、横棒が右側に長いほど影響があり、左側に長いほど影響がないと考えられていることを示す。

回答数の合計では、管理者および利用者ともに、防舷材本体の変状とエプロンの沈下が施設の利用に及ぼす影響が大きいと考えていることが分かる。しかし、順位別でみると、管理者は岸壁法線の出入りを、利用者はエプロンの沈下を最も影響が大きいとする回答が多かった。ここで、設定した選択肢のうち、岸壁法線の出入りについては、施設の本体工(構造的な主要部材と位置付けられる¹⁾)に関する項目であり、変状は施設の利用状況に依り難い場合が多い。また、変状が生じ補修が必要であると判断された場合、エプロンや附帯設備と比較して、その費用は多大なものとなり、施設の供用停止等の措置が必要となることも考えられる。このため、施設の安全な利用を担保するための維持管理を、特に、補修に係る費用削減の観点から効率的に行うことを重視しているため、岸壁法線の出入りに対する管理者の回答数が最も多くなったことが考えられる。一方、利用者は、施設の利便性や車輛走行等の利用上の安全性の確保の観点から、エプロンの沈下に対する回答数が最も多くなったことが考えられる。

変状が発生したとしても、施設の利用に支障をきたすことはないと考えられる設備等については、回答数の合計および順位別において、管理者および利用者ともに車止めが最も多く、次いでエプロン(舗装)のひび割れの

表-6 施設の利用に支障が出始めるときの設備等の劣化度

区 分 項 目\劣化度	管理者			利用者		
	a	b	c	a	b	c
岸壁法線の出入り	20	48	32	21	41	38
エプロンの沈下・陥没	30	36	35	25	25	51
コンクリートのひび割れ	42	46	11	37	43	19
アスファルトのひび割れ	69	22	9	41	33	26
エプロンと背後地の段差	3	27	70	9	13	78
防舷材本体	28	31	41	27	25	48
防舷材取付金具	75	21	4	68	24	8
係船柱	15	41	44	19	34	48
車止め	38	39	22	33	30	37

項目毎の回答数に対する割合(%、小数点以下四捨五入)として表示

図-7 舗装のひび割れ状態のイメージ

順に回答が多かった。図-5に示したように、これらの設備等については変状を発見する頻度が両者共に高いと回答されている。このことから、車止めの変状とエプロンのひび割れについては、日常的に変状の発生が認識されているが、施設の利用の観点からはその変状によって利用に支障をきたすことは少ないという、施設利用の実状を表していることが考えられる。

(3) 設備等の変状の状態に関する認識調査の結果

係留施設の利用に支障が出始めるときの、設備等5種、計9項目についての管理者および利用者の設備等の変状の状態に関する認識調査の回答を、変状の状態に応じて港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾に示される劣化度(a, b, c)として整理した結果を表-6に示す。表中の網掛け部は各項目で最大の回答割合となった劣化度を示している。

各項目に設定した選択肢は、劣化度として順序付けて表すことができる。このことから、各項目について、管理者および利用者のそれぞれの選択肢に対する回答数を対象として、有意水準を0.05としたMann-WhitneyのU検定

を行った。その結果、アスファルト舗装のひび割れ以外の項目については、管理者および利用者の回答の傾向に統計学的には差はないと判定された。アスファルト舗装のひび割れについての回答割合は、管理者および利用者で劣化度 a が最も大きくなったが、管理者の7割が劣化度 a を選択しているのに対して、利用者は劣化度 a, b, c とともにほぼ同程度の回答割合となっている。本調査では、コンクリートおよびアスファルト舗装のひび割れに関する設問については、ひび割れ度およびひび割れ率について回答者が理解し易いよう、ひび割れ状態のイメージを図-7のように示した。アスファルトのひび割れについてのみ、管理者および利用者で傾向に差があると判定された理由は、アスファルトのひび割れに対する両者の点検頻度の違いや技術的な認識の差が要因となったことが考えられる。

各項目について、最大の回答割合となった劣化度に着目すると、特に、エプロンと背後地の段差については、7割以上の管理者および利用者が劣化度 c の状態で、施設の利用に支障が出始めると回答している。防舷材本体と係船柱についても同様に、4割以上が劣化度 c で支障が生じるとの回答であった。つまり、係留施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からみた設備等の変状の限界状態は、港湾の施設の維持管理技術マニュアルに示される劣化度 a (部材の性能が著しく低下している) や劣化度 b (部材の性能が低下している) として表される状態ではなく、設備等の種類によって異なることが分かる。

また、同マニュアル²⁾に示される点検項目では、エプロンの沈下・陥没、エプロンと背後地の段差の劣化度判定基準はひとつの枠内に記載されており、両者を総合してひとつの劣化度を判定するようになっている。しかし、表-6より、施設の利便性および安全性の確保の観点からみた両者の限界状態は異なることが考えられる。つまり、設備等の変状の限界状態は、設備等のどの箇所に着目して点検を行うか、また使用材料により異なるといえる。このため、エプロンの沈下・陥没と、エプロンと背後地の段差については、それぞれ個別の項目として評価する必要があることが考えられる。これは、コンクリートおよびアスファルトのひび割れ、防舷材本体と防舷材取付金具についても同様である。これらの項目については、今後、同マニュアル²⁾に示される点検項目および判定基準の改訂を検討する必要があると考えられる。

(4) 実態調査のまとめ

設備等の変状の程度と係留施設の機能低下を関連付けることを目的として行った実態調査の結果をまとめると、以下のとおりである。

1) 管理者および利用者ともに、防舷材本体の変状とエ

プロンの沈下が施設の利用に及ぼす影響が大きいと認識している。

- 2) 管理者は、利用者と比較して、岸壁法線の出入りが施設の利用に及ぼす影響が大きいと認識している。これは、施設の安全な利用を担保するための維持管理を、特に、補修に係る費用削減の観点から効率的に行うことを重視しているためと考えられる。
- 3) 利用者は、管理者と比較して、エプロンの沈下が施設の利用に及ぼす影響が大きいと認識している。これは、施設の利便性や利用上の安全性の確保を重視しているためと考えられる。
- 4) 車止めの変状とエプロン(舗装)のひび割れは、日常的に変状の発生が確認されているが、施設の利用の観点からは、それらの変状が支障をきたすことは少ないと認識されている。
- 5) 施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からみた、設備等の変状の限界状態に対する管理者および利用者の認識には明確な差は見られなかった。
- 6) 施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からみた設備等の変状の限界状態を表す劣化度は、設備等の種類によって異なる。
- 7) 施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からみた設備等の変状の限界状態は、設備等のどの箇所に着目するか、また使用材料により異なる場合がある。

3. 係留施設の機能低下評価手法の構築に向けて解決すべき課題

(1) 設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響度

港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾では、各部位・部材の点検項目について、施設の安全性に及ぼす影響の観点から表-7に示す3種類の点検項目分類が設定されている。なお、ここでいう安全性は、施設全体の構造上の安全性および安定性を対象としたものである。

表-8に本調査で対象とした設備等の点検項目の分類を示す。通常、点検診断により得られた各部位・部材の劣化度から施設全体の性能低下度を評価する際には、附帯設備(防舷材、係船柱、車止め)は点検項目分類として同一レベルとして考えられている。これは、附帯設備は施設の安全性に影響を及ぼすことはないためである。しかし、2.(2)より、施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からは、設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響は、設備等の種類により異なることが分かった。このため、施設の機能低下を定量的に評価するためには、それぞれの設備等の変状が施設全体の機能低下に及ぼす影響の程度(影響度)を評価する必要がある。

表-7 施設の安全性に及ぼす影響に基づく点検項目の分類²⁾

分類	施設の性能に及ぼす影響
I類	劣化度 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	劣化度 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-8 設備等の点検項目の分類²⁾

項 目	点検項目の分類
岸壁法線の出入り	I類
エプロン沈下・陥没	I類
エプロンと背後地の段差	I類
エプロン（舗装）のひび割れ	II類
防舷材本体	III類
防舷材取付金具	III類
係船柱	III類
車止め	III類

各設備等の影響度の設定にあたっては、実態調査により得られた管理者および利用者それぞれの観点を踏まえる必要があるとともに、対象とする施設の規模、利用形態等の状況により異なる各施設の経済的あるいは社会的重要度を踏まえることが重要であると考えられる。

以上のことから、後述する4.では、各設備等の変状が係留施設の機能低下に及ぼす影響の程度を定量的に評価する手法について検討する。

(2) 設備等の劣化度と機能低下の関係

実態調査の結果、係留施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からみたそれぞれの設備等の変状の限界状態は、港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾に示される劣化度 a（部材の性能が著しく低下している）や劣化度 b（部材の性能が低下している）の状態には限らないことが分かった。特に、エプロンと背後地の段差については、7割以上の管理者および利用者が劣化度 c（部材の性能低下はないが、変状が発生している）の状態、施設の利用に支障が出始めるとの回答であった。これは、現行の劣化度判定基準が、部位・部材の安全性や耐久性などを含む総合的な知見に基づいて体系化されたものであることによる。設備等の点検診断結果（劣化度 a, b, c, d）に基づいて係留施設の機能低下を評価するためには、設備等のそれぞれについて、劣化度と劣化・変状の発生による設備等の機能低下の程度を定量的に評価する必要がある。さらに、機能低下の程度の評価にあたっては、設備等の種類のみでなく、設備等のどの箇所に着目するか、また、使用材料によって個別に評価する必要がある。

後述する5.では、港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾における各設備等の劣化度と機能低下の関係を定量的に評価する手法について検討する。

4. 設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響度の評価

(1) 「重み係数」の評価に関する既往の研究

各種構造物はそれぞれ複数の部位・部材により構成されている。特に、対策実施の優先順位を決定することを目的として、各種部位・部材の劣化・変状が構造物全体の健全度に及ぼす影響を定量的に評価する手法について、これまでいくつかの検討がなされている。

例えば、橋梁を対象とした既往の研究⁵⁾では、「総合健全度」を評価する際に用いる各種部位・部材の「重み係数」について検討している。実橋の点検結果に基づいて、エキスパート10名が計480橋の「総合健全度」を評価し、それに数量化理論II類を適用することで、「総合健全度」を評価する際の主桁や床版等の各部材の重視度を尺度化している。

また、長崎県港湾施設（鋼構造物）維持管理ガイドライン⁶⁾においては、「施設健全度」の算出のため、点検診断の項目毎に、「部位・部材の性能」、「変状（連鎖）の特性」、「施設の要求性能への影響度」等を考慮した「重み係数」を設定している。この「重み係数」は、港湾構造物・鋼構造物の専門家等18名へのアンケート調査結果を、AHPの一対比較に適用して、どちらがどの程度重要かを評価して設定されたものである。

上記の「重み係数」算出の事例は、どちらも施設全体としての「健全性」を評価するために、各部材の変状の影響度を尺度化した例である。本研究ではこれらに習い、管理者および利用者から得た実態調査の結果を統計的に分析することにより、各設備等の変状が係留施設の機能低下に及ぼす影響の程度を定量的に評価することとした。

(2) 設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響度

本研究ではThurstonの一対比較法⁷⁾を用いて、設備等計8項目が係留施設の利用に及ぼす影響度の尺度化を試みた。Thurstonの一対比較法は、複数の対象から二つを取り出して比較した結果（01型の測定値）を集計して比率を求め、比率を尺度値に変換する際に標準正規分布の累積関数の逆関数を用いる手法である。

$$Y = \Phi^{-1}(p) \quad (1)$$

ここに、 p ：比率、 Y ：比率に対応する不変尺度値、 Φ ：累積正規分布関数である。

本研究では、変状が生じた場合、施設の利用に支障をきたすと考えられる設備等と、施設の利用に支障をきたすことはないと考えられる設備等を、それぞれ順に3つ選択する調査を行った（図-6）。これより、8項目のうち上位、下位ともに1から3位まで、計6項目に対する順位付けを行うことができる。順位が付けられていない他

2項目については、その2項目間では比較できないが、上位、下位の1～3位までと比較することは可能である。また、表-5に示したとおり、管理者および利用者ともに、選択した設備等のすべてが最も影響がある(1位)とした回答が存在したが、各設備等で比較が可能な組合せについては、可能な範囲で順位付けを行った。以上の考え方に基いて実施した8項目間の比較について、表-9に管理者および利用者それぞれの結果を比率で示す。

施設の利用に支障をきたす設備等の尺度値は、各回答比率について式(1)の変換を行い、それぞれの設備等の行平均を求めることで、全体の平均値が0.0となる場合の尺度値として算出できる⁷⁾。図-8に設備等計8項目の尺度値を図化した。尺度値が大きいほど、その項目の変状が施設の利用に及ぼす影響が大きいことを示し、項目間の尺度値の差(距離)は影響の度合いの差を示している。これによれば、管理者の場合は項目5. 防舷材本体、利用者の場合は項目2. エプロンの沈下についての尺度値が最も大きく、次点は両項目が入れ替わっている。そして、それらの尺度値の差は、管理者の場合の方が大きくなっている。つまり、施設の利用に及ぼす影響が最も大きい項目の変状に対して、利用者よりも管理者の方がその重視の度合いが大きいことを示している。また、管理者、利用者の場合ともに項目8. 車止めが最も影響が小さいとの結果となったが、2番目に影響が小さい項目3. エプロン(舗装)のひび割れとの尺度値の差は利用者の場合の方が大きい。これより、利用者は車止めの変状に対して、他の項目と比較して施設の利用に及ぼす影響は著しく低いと判断しているといえる。両方で尺度値に最も差が大きかったのは、項目1. 岸壁法線の出入り、最も差が小さかったのは、項目8. 車止めであった。項目1. 岸壁法線の出入りについては、前述のとおり、施設の本体工(主要部材)に関する項目であり、変状は施設の利用状況に依り難い。このため、施設の安全な利用を担保する立場にある管理者と、施設を日常的に利用する立場にある利用者として、設備等の変状に対する重視の度合いに差が生じたものと考えられる。

本研究では、それぞれの設備等の変状が施設全体の機能低下に及ぼす影響度を百分率で表現することを目的として、設備等8項目が施設の利用に及ぼす影響度を、各項目の尺度値を次式により多項ロジットのシェアに変換することにより算出した⁸⁾。

$$p_i = \exp Y_i / (\exp Y_1 + \exp Y_2 + \dots + \exp Y_8) \quad (2)$$

ここに、 p_i : 施設の利用に及ぼす影響度、 Y_i : 尺度値である。

以上により算出された係留施設全体の機能低下に及ぼす設備等計8項目の影響度を、表-10に示す。ここでは、管理者および利用者それぞれの場合についての結果と

表-9 比較結果の比率

		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
管理者	1.		0.45	0.73	0.58	0.35	0.70	0.54	0.78
	2.	0.55		0.95	0.77	0.38	0.79	0.64	0.87
	3.	0.28	0.05		0.19	0.06	0.39	0.22	0.57
	4.	0.42	0.23	0.81		0.25	0.70	0.45	0.79
	5.	0.65	0.62	0.94	0.75		0.97	0.72	0.97
	6.	0.30	0.21	0.61	0.30	0.03		0.25	0.67
	7.	0.46	0.36	0.78	0.55	0.28	0.75		0.90
	8.	0.22	0.13	0.43	0.21	0.03	0.33	0.10	
利用者	1.		0.19	0.55	0.30	0.16	0.56	0.25	0.73
	2.	0.81		0.91	0.76	0.58	0.84	0.56	0.94
	3.	0.45	0.09		0.25	0.18	0.44	0.28	0.63
	4.	0.70	0.24	0.75		0.41	0.68	0.46	0.86
	5.	0.84	0.42	0.82	0.59		0.90	0.58	0.90
	6.	0.44	0.16	0.56	0.32	0.10		0.26	0.78
	7.	0.75	0.44	0.72	0.54	0.42	0.74		0.93
	8.	0.27	0.06	0.38	0.14	0.10	0.22	0.07	

【項目】1.岸壁法線の出入り、2.エプロンの沈下・陥没、3.エプロン(舗装)のひび割れ、4.エプロンおよび背後地の段差、5.防舷材本体、6.防舷材取付金具、7.係船柱、8.車止め

図-8 各項目の尺度値

表-10 各設備等の影響度

	項目	全て	計画水深		荷役機械 あり
			-10m未満	-10m以深	
管理者	回答数	131	72	59	69
	1.	0.13	0.13	0.13	0.12
	2.	0.19	0.18	0.21	0.19
	3.	0.05	0.03	0.06	0.04
	4.	0.11	0.11	0.10	0.11
	5.	0.29	0.30	0.29	0.30
	6.	0.06	0.06	0.05	0.06
	7.	0.13	0.15	0.11	0.13
	8.	0.04	0.03	0.05	0.05
利用者	項目	全て	計画水深		荷役機械 あり
	回答数	101	-10m未満	-10m以深	
	1.	0.08	0.09	0.07	0.07
	2.	0.24	0.23	0.24	0.25
	3.	0.06	0.06	0.07	0.07
	4.	0.14	0.14	0.13	0.14
	5.	0.21	0.22	0.20	0.19
	6.	0.07	0.08	0.06	0.06
	7.	0.16	0.14	0.20	0.17
	8.	0.04	0.04	0.03	0.04

もに、施設の規模による影響度の違いを比較することを目的として、施設の計画水深-10m未満と-10m以深における影響度の算出結果を示す。表中の回答数は、分析に用いたデータの総数である。また、表中の網掛け部は、影響度の算出にダミーデータを用いたものを示す。本研究で適用した一対比較法では、回答比率が1.0対0.0となる組合せについては、尺度値を算出できない。例えば、計画水深-10m以深の管理者の回答では、項目5. 防舷材本体

と項目6. 防舷材取り付け金具の比較において、項目5. を重視する回答比率は1.0であったため、項目5. および項目6. の尺度化は、理論上、不可となる。このため、便宜的に、項目5. に対する回答比率を0.99、項目6. に対する回答比率を0.01と設定して、両項目の影響度を算出した。

また、表-10には、陸上にガントリークレーンやフォークリフト等の荷役機械を有する施設における影響度の算出結果を示した。これは施設の荷役機械の有無による影響度の違いを比較することを目的としたものであるが、荷役機械の保有に対する回答が不明確であるものが多数存在したことから、陸上の荷役機械を有することが明確である施設についてのみ影響度を算出した。これによれば、各設備等の変状が係留施設の機能低下に及ぼす影響度は、管理者の場合および利用者の場合で異なり、これは図-8で示したとおりである。しかし、両者ともに、各設備等の影響度を示す数値に微小な差はあるものの、各設備等の影響度の大小関係は計画水深によらず、ほぼ同様であった。また、荷役機械を有する施設についても、全てを統合した影響度の算出結果と大きな差はなかった。

以上より、本研究の範囲では、各設備等の影響度は、管理者および利用者それぞれの立場で異なるが、対象とする施設の規模および荷役機械の状況は、各設備の影響度に大きく影響しないことが考えられた。

5. 各設備等の劣化度と機能低下の関係の評価

(1) 「劣化度」の評点化に関する既往の研究

構造物の劣化度の評点化については、これまで多数の事例がある。実際、劣化度を判定することは、劣化・変状の状態を格付けすることにはほかならないため、劣化度を近似的に間隔尺度（距離の等価性が保証されている）とみなして、0, 1, 2, …の様に等間隔の評点を与える事例は多数存在する。例えば、橋梁の資産的価値の算出を目的とした既往の研究⁹⁾においては、部材の損傷度 II, III, IV, OKについて、損傷による資産的価値の低下率を0.75, 0.50, 0.25, 0の評点を与えている。

等間隔でない評点の設定例としては、例えば、前出の長崎県港湾施設（鋼構造物）維持管理ガイドライン⁶⁾がある。ここでは、点検診断の項目毎に判定した d, c, b, a の診断結果に対して、それぞれ100, 70, 40, 0の評点を与えて、「施設健全度」を算出している。また、既往の研究⁹⁾では、部材の構造性能の経時変化を評価するにあたって、劣化度 d, c, b, a および劣化度 a の下位に劣化度 aa を設けた5段階の劣化度に対して、工学的判断に基づいて、100, 99, 95, 80, 0の評点を与えている。一方、著者らは、劣化度から確率論的に鉄筋コンクリート部材の耐荷性を評価する手法を提案した¹¹⁾。ここでは、

例えば、劣化度 d における耐荷力を1.0とした場合、それぞれの劣化度で部材数の95%が示す耐荷力は、劣化度 c で0.72, 劣化度 b で0.65, 劣化度 a で0.35と推定されている。これらは、部材の耐荷性の観点から定めた評点と捉えることができる。

以上の事例は、施設全体としての健全性評価を目的としたものである。本研究では、管理者および利用者から得た実態調査の結果を統計的に分析することにより、各設備等の劣化度と設備等の利便性や利用上の安全確保に関する機能低下の関係について評点化を試みた。

(2) 各設備等の劣化度と機能低下の関係

表-6に示した施設の利用に支障が出始めるときの設備等の劣化度の回答割合は、回答者各人の各設備等の劣化状態に関する認識を総合的に表した結果でしかない。つまり、仮に、施設の利用に支障が出始める状態の機能低下を評点0.0（機能低下が著しい）として表した場合、ある設備等について劣化度 c で施設の利用に支障が出始めるとした回答者は、劣化度 c の状態で評点0.0と表すことになる。しかし、ここでは、劣化度毎の回答割合の累積を、ある劣化度において設備等の機能低下が生じた割合と捉えて、設備等の機能低下を評点化することとした。

評点化にあたっては、4. で述べた Thurston の一対比較法を用いた。まず、それぞれの設備等の劣化度毎の回答割合を表-11に当てはめて回答比率を計算し、比率を尺度値に変換した。その後、それぞれの劣化度における尺度値の行平均を求め、項目数 $i = 3$ とした場合の式(2)により、各劣化度の多項ロジットのシェアを算出した。

本研究では、変状が見られない場合の劣化度 d に対応する機能低下について評点を1.0（機能低下は生じていない）、劣化度 a に対応する評点を0.0（機能低下が著しい）と設定することとした。ここで、港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾では、例えば、車止めは「性能上支障となる損傷、変形がある」状態が劣化度 a と判定される。この状態の機能低下の評点を0.0とすることの妥当性については、今後の検討が必要であるが、ここでは簡便のため全ての設備等について劣化度 a に対応する評点を0.0と設定した。

劣化度 c および劣化度 b に対応する評点は、以下のよう

に算出した。

$$\begin{aligned} & \text{劣化度 c に対応する機能低下 (評点)} \\ & = 1.0 - \text{劣化度 c のロジットシェア} \end{aligned}$$

劣化度 b に対応する機能低下 (評点)

$$= 1.0 - (\text{劣化度 c} + \text{劣化度 b のロジットシェア})$$

図-9に、各設備等の劣化度と機能低下の評点の関係を示す。岸壁法線の出入りと防舷材本体の変状については、管理者および利用者ともに、外観から目視により判定される劣化度と機能低下の評点の関係がほぼ等分割で対応

した。これは、変状の発生程度と設備等の機能低下の程度が1対1で対応していることを示している。上に凸となる関係を示したエプロン（舗装）のひび割れや防舷材取付金具については、外観から目視により判定される変状の発生程度以上に、機能低下は生じていないと判断される。一方、下に凸となる関係を示したエプロンと背後地の段差については、一旦、変状が発生した場合、その変状の程度が軽微であっても、設備等の機能低下に及ぼす影響は大きいといえる。

2.(3)で述べたとおり、アスファルト舗装のひび割れについては、管理者と利用者の回答の傾向に差があると検定された。アスファルト舗装のひび割れについては、利用者では劣化度と機能低下の評点がほぼ1対1で対応しているのに対して、管理者では外観から目視により判定される変状の発生程度以上には機能低下は生じていないと評価された。これについては、前述のとおり、両者の点検頻度の違いや技術的な認識の差が要因となったことが考えられるが、利用者の方が比較的、ひび割れの発生に対して敏感に反応していることも考えられる。

各設備等の劣化度と評点の関係に、対象とした係留施設の規模が影響しているか確認するため、管理者および利用者の回答を計画水深-10m未満と-10m以深に区別し、それぞれの選択肢に対する回答を対象として、有意水準を0.05としたMann-WhitneyのU検定を行った。管理者および利用者の回答の検定結果と有効回答数を表-12に示す。これによれば、いずれの項目についても、計画水深毎の有効回答者数に大きな差はないが、管理者の場合は計4項目について、利用者の場合は1項目についてのみ、施設の計画水深で回答の傾向に差があるとの結果となった。

図-10に計画水深で回答の傾向に差があるとされた各設備等の劣化度と機能低下の評点の関係を示す。管理者の場合、回答の傾向に差があるとされたすべての設備等について、計画水深-10m未満の施設よりも-10m以深の施設の方が、外観から判断される劣化度に対する評点は小さい。これは、利用者の場合も同様であり、エプロンの沈下について、劣化度と評点の関係は計画水深-10m以深の方が厳しい判定となっている。

以上のことから、係留施設の規模によって、施設の利用に支障が開始するときの設備等の劣化度は異なり、施設の規模が大きくなるほど、劣化度に対する設備等の機能低下の評点は小さくなることが考えられた。

6. 係留施設の機能低下評価手法の構築

本章では、4.において検討した各設備等の変状が係留施設の機能低下に及ぼす影響度、および5.において検討した各設備等の劣化度と機能低下の関係（評点）を用い

表-11 一対比較法による計算過程（回答比率の算出）

	劣化度 a	劣化度 b	劣化度 c
劣化度 a		劣化度 a の回答割合	劣化度 a の回答割合
劣化度 b	劣化度 b の回答割合		劣化度 b の回答割合
劣化度 c	劣化度 c の回答割合	劣化度 c の回答割合

図-9 各設備等の劣化度と評点の関係

表-12 検定結果

	検定	管理者		検定	利用者	
		有効回答数	有効回答数		有効回答数	有効回答数
		-10m未満	-10m以深		-10m未満	-10m以深
1.	N	63	45	OK	33	34
2.	N	63	52	N	44	44
3-1	OK	59	46	OK	32	33
3-2	OK	35	29	OK	20	26
4.	OK	51	51	OK	35	32
5.	N	65	56	OK	37	45
6.	N	62	57	OK	34	46
7.	OK	64	56	OK	35	44
8.	OK	64	54	OK	38	46

【項目】1.岸壁法線の出入り、2.エプロンの沈下・陥没、3-1.コンクリート舗装のひび割れ、3-2.アスファルト舗装のひび割れ、4.エプロンおよび背後地の段差、5.防舷材本体、6.防舷材取付金具、7.係船柱、8.車止め

【検定】OK：傾向に差はない、N傾向に差がある

図-10 各設備等の劣化度と評点の関係（計画水深の違い）

て、係留施設の機能低下を定量的に評価する手法について提案する。

本研究で提案する機能低下評価手法は、基本として、港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾における一般点検診断の各設備等の劣化度を用いる。これは、あえて施設の機能低下に主眼を置いた点検診断を実施するのではなく、施設の部位・部材の構造上の安全性および安定性に着目した点検診断結果を利用して、効率的に機能低下評価を行うことを目的としたためである。

ここで、栈橋のライフサイクルマネジメント手法の構築を目指した著者らの既往の研究³⁾では、表-7に示した点検項目のⅠ類およびⅡ類に対して、劣化度の代表値を算出する方法を提案している。これは、各部位・部材の劣化・変状の進行は、実際には、個々で広範にばらつくものであるが、効率的な栈橋の維持管理を実施する観点から、評価単位毎に各部材の劣化度の代表値を求め、代表値を基準として最適対策実施時期と補修工法を選定するためである。

本研究で対象とした各設備等の劣化・変状についても、栈橋の各部材と同様、個々で広範にばらつくことが考えられる。しかし、効率的な維持管理を実施する観点、特に、通常、施設の機能低下を評価する際には、各設備等の個々の状態ではなく設備等の種類毎に統合的な判定を行うことが考えられる。このことから、本研究で提案する機能低下評価手法では、1評価単位毎、具体的には点検診断結果に基づいて行われる評価の標準的な実施単位である1バース毎に各設備の劣化度の代表値を求め、これらを統合することによって、対象とする施設の機能低下を定量的に評価することとした。

防舷材、係船柱、車止めが属する点検項目Ⅲ類の設備等の劣化度の代表値については、点検項目Ⅰ類およびⅡ類の部材の劣化度の代表値の導出方法と同様に、これまで収集した国有港湾施設の点検診断結果の分析、および工学的判断に基づいて、下記のとおり導出することとした。なお、港湾の施設の維持管理技術マニュアルには、点検項目Ⅲ類に位置付けられる設備等に劣化度bの判定基準は設けられていない²⁾。しかし、劣化度の代表値にはa, b, c, dの4段階の状態が考えられるとして、ここでは劣化度の代表値bの導出方法を定めた。

以下に、Ⅰ～Ⅲ類の点検項目に対する劣化度の代表値の算出手法を示す。なお、現段階では全ての点検項目分類における劣化度の代表値の導出方法の妥当性について、今後の点検診断データの蓄積による検証が必要である。

■Ⅰ類の点検項目に対する劣化度の代表値³⁾

劣化度a：劣化度aの部材の割合 $\geq 10\%$

劣化度b：劣化度a + 劣化度bの部材の割合 $\geq 10\%$

劣化度c：劣化度dの部材の割合 $< 90\%$,

かつ劣化度a + 劣化度bの部材の割合 $< 10\%$

劣化度d：劣化度dの部材の割合 $\geq 90\%$

■Ⅱ類の点検項目に対する劣化度の代表値³⁾

※維持管理上の限界値を劣化度bに至る以前とする場合

劣化度a：劣化度aの部材の割合 $\geq 30\%$

劣化度b：劣化度a + 劣化度bの部材の割合 $\geq 30\%$

劣化度c：劣化度dの部材の割合 $< 70\%$,

かつ劣化度a + 劣化度bの部材の割合 $< 30\%$

劣化度d：劣化度dの部材の割合 $\geq 70\%$

■Ⅲ類の点検項目に対する劣化度の代表値

※原則として、劣化度aから劣化度dの順に評価を行い、劣化が進行している方の劣化度(判定)を代表値として求める。

劣化度a：劣化度aの部材の割合 $\geq 50\%$

劣化度b：0% $<$ 劣化度aの部材の割合 $< 50\%$,

かつ劣化度c + 劣化度dの部材の割合 $< 50\%$

劣化度c：0% $<$ 劣化度cの部材の割合,

かつ劣化度c + 劣化度dの部材の割合 $\geq 50\%$

劣化度d：劣化度dの部材の割合 $\geq 50\%$

図-11に本研究で提案する係留施設の機能低下評価のフローを示す。各設備等の劣化度の代表値は、5.(2)に示した劣化度と機能低下の関係を用いて、評点化して表すことができる。また、各設備等の劣化・変状が係留施設全体としての機能低下に及ぼす影響はそれぞれ異なるが、これについては、4.(2)により各設備等の影響度として考慮できる。このことから、係留施設の機能低下の程度(係留施設の機能低下の評点、とする)は、各設備等の評点に各設備の影響度を乗じ、それらを総計することによって定量的に評価することが可能となる。

本研究で提案する係留施設の機能低下評価では、各設備等の劣化度を基本データとして用いることから、各設備等の劣化の進行を予測することにより、将来の施設の機能低下を予測することが可能となる。しかし、各設備等の劣化・変状については、それらの仕様や施設の使用状況等により大きく異なるため、明確な予測手法は存在しない。このため、現状では、点検診断により得られた劣化度を入力値として、式(3)に示すマルコフ連鎖モデルにより劣化の進行を確率的に取り扱いながら将来予測を行う手法が有効であると考えられる²⁾。

$$\begin{pmatrix} d \\ c \\ b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p_x & 0 & 0 & 0 \\ p_x & 1-p_x & 0 & 0 \\ 0 & p_x & 1-p_x & 0 \\ 0 & 0 & p_x & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここに、 p_x ：遷移率、 t ：経過年数である。なお、遷移率 p_x は劣化速度を表す指標であり、検討期間中、一定値とみなして計算を行った。

係留施設の将来の機能低下評価の例として、表-13に示す各設備等の影響度、劣化度毎の評点、および各設備

図-11 係留施設の機能低下評価フロー

表-13 各設備等の影響度および劣化度の評点と遷移率

項目	影響度	劣化度の評点				遷移率*
		d	c	b	a	
1.	0.13	1.00	0.68	0.21	0.00	0.016
2.	0.19	1.00	0.65	0.30	0.00	0.038
3-1	0.11	1.00	0.88	0.42	0.00	
4.	0.05	1.00	0.34	0.05	0.00	
5.	0.29	1.00	0.59	0.28	0.00	0.068
6.	0.06	1.00	0.94	0.71	0.00	
7.	0.13	1.00	0.57	0.16	0.00	0.042
8.	0.04	1.00	0.77	0.38	0.00	0.060

【項目】1. 岸壁法線の出入り, 2. エプロンの沈下・陥没, 3-1 コンクリート舗装のひび割れ, 4. エプロンおよび背後地の段差, 5. 防舷材本体, 6. 防舷材取付け金具, 7. 係船柱, 8. 車止め

*遷移率の算出に用いたデータ数=1: 1,380 データ, 2~4: 1,089 データ, 5,6: 1,035 データ, 7: 1,049 データ, 8: 1,011 データ

等の遷移率を用いて算出した機能低下の評点の推移を図-12に示す。各設備等の影響度および劣化度毎の評点は、表-10および図-9に示した港湾施設管理者の場合の算定値である。また、各設備等の遷移率は、平成14～15年に国有港湾施設を対象として行われた点検診断結果のうち、劣化度 c, b, a と判定された結果の平均的な遷移率を用いた。なお、当時の点検診断項目では、エプロンの沈下、エプロン（舗装）のひび割れとエプロンおよび背後地の段差、および防舷材本体と防舷材取付け金具については区別されていないため、これらについては同じ遷移率を用いて劣化進行予測を行った。図-12では、例えば、供用10および11年における機能低下の評点は、それぞれの前年と比較して10以上低下している。供用10年での低下の要因は、2. エプロンの沈下と4. エプロンと背後地の段差の代表的な劣化度がd から c に移行したことである。それぞれの設備等の影響度は大きくないが、合計すると0.30 となること（表-10参照）、また、特に、4. エプロンと背後地の段差の評点については、変状の程度が軽微であっても、その変状が防舷材本体の機能低下に及ぼす影響は大きいと設定されたことによる（図-9参照）。同様に、供用11年については、5. 防舷材本体の劣化の進行によるものであり、影響度が他の設備等と比較して最も大きいこと（0.29）が影響している。

ここで、図-12における機能低下予測結果は、係留施

図-12 係留施設の機能低下評価の例

設において一般的に行われる防舷材本体のローテーションや、エプロンの部分打替え等については考慮されていない。このため、上記の極小規模な維持管理が実施されている施設においては、機能低下の進行は図-12よりも緩やかなものとなることが考えられる。また、機能低下の評点の下限値については、施設の重要度や利用形態等が大きく影響するため、現段階では言及できない。しかし、本研究で提案する手法により、係留施設における各設備等の劣化・変状予測に加えて、それらを考慮した施設の機能低下評価を実施できる可能性を示すことができた。本研究で提案する係留施設の機能低下評価手法の妥当性については、係留施設の点検診断データおよび利便性や安全確保の観点からみた機能低下評価データの蓄積や、港湾施設管理者および利用者へのヒアリング等により、今後、検証していかなければならない。

7. まとめ

本研究により得られた成果は以下のとおりである。

- 1) アンケートによる実態調査の結果、係留施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からは、設備等の変状が施設の機能低下に及ぼす影響は、設備等の種類により異なることが明らかとなった。また、係留施設の利便性および利用上の安全性の確保の観点からみたそれぞれの設備等の変状の限界状態は、設備等の種類により異なることが明らかとなった。
- 2) 係留施設の機能低下を定量的に評価するためには、それぞれの設備等の変状が施設全体の機能低下に及ぼす影響の程度、および設備等の劣化度と機能低下の関係を明確にする必要がある。
- 3) 実態調査結果の統計分析により、設備等の変状が係留施設全体の機能低下に及ぼす影響度、および設備等の劣化度と機能低下の関係を定量的に評価した。
- 4) 設備等の変状が係留施設全体の機能低下に及ぼす影

響度は、管理者および利用者それぞれの立場で異なるが、対象とする施設の規模および荷役機械の状況は大きく影響しないことが考えられた。

- 5) 係留施設の規模によって、施設の利用に支障が始めるときの設備等の劣化度は異なり、施設の規模が大きいほど、劣化度に対する設備等の機能低下の評価は小さくなることが考えられた。
- 6) マルコフ連鎖モデルによる設備等の劣化予測を用いた係留施設の機能低下の将来予測手法を提案した。

8. あとがき

本研究では、これまでその必要性は認識されつつも、具体的な考え方が示されることはなかった、係留施設の利便性や利用上の安全性の確保の観点からの維持管理について検討した。本研究で用いた設備等の影響度や設備等の機能低下の定量化手法、および設備等の劣化予測手法は既存の理論に基づいたものである。本研究では、それらを繋ぎ合わせて、ヒューリスティックに係留施設の機能低下を評価する手法を提案した。機能低下評価手法の妥当性については、今後、設備等の点検診断データ、および利便性や安全性の確保の観点からみた機能低下評価データの蓄積や、管理者および利用者へのヒアリング等により検証していかなければならない。しかし、本研究における係留施設の維持管理に対する先駆的な取り組みは、ライフサイクルマネジメントの概念に基づく港湾施設の戦略的な維持管理の実現に貢献するものと期待している。

参考文献

- 1) 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（増補改訂版），港湾空港建設技術サービスセンター，2008。
- 2) 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，沿岸技術ライブラリーNo.26，沿岸技術研究センター，2007。
- 3) 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，Vol.48, No.2, pp.3-35, 2009。
- 4) 沿岸技術研究センター：ゴム防舷材の維持管理ガイドライン，沿岸技術ライブラリーNo.38，沿岸技術研究センター，2010。
- 5) 大島俊之，三上修一，山崎智之，丹波郁恵：供用健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析，土木学会論文集，No.675/1-55, pp.201-217, 2001。
- 6) 長崎県土木部港湾課：長崎県港湾施設（鋼構造物）維持管理ガイドライン，
http://www.doboku.pref.nagasaki.jp/~kouwan/2010_03/business02/ijikanri/guidelines_steel.pdf, 2010。
- 7) 君山由良：一対比較法のモデル，統計解説書シリーズC-05，データ分析研究所，2010。
- 8) 君山由良：心理測定の基礎と調査での応用，統計解説書シリーズC-04，データ分析研究所，2009。
- 9) 大島俊之，三上修一，丹波郁恵，佐々木聡，池田憲二：橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析，土木学会論文集，No.703/1-59, pp.53-65, 2002。
- 10) 高橋宏直，横田弘，岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究—構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例—，国土技術政策総合研究所研究報告，No.29, 2006。
- 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（材料・コンクリート構造），Vol.67, No.1, pp.150-159, 2011。

(2012.3.2 受付)

DEVELOPMENT OF EVALUATION METHOD FOR FUNCTIONAL PERFORMANCE OF BERTHING FACILITIES

Ema KATO, Yuichiro KAWABATA and Mitsuyasu IWANAMI

Non-structural components of berthing facility such as yard apron and ancillaries are important equipment for ensuring safe and smooth operation in the facility. They often suffer deterioration and deformation under severe environmental and usage conditions, however, quantitative evaluation method of decline in their functional performance has not been developed to date. The decline in functional performance of ancillaries would consequently become one of main causes of decrease in safety and serviceability of the facility. This paper reports the results of the factual investigation on the decline in functional performance of berthing facilities with focusing on deterioration and/or deformation observed in face-line of wharf, yard apron and ancillaries, such as bollard and fender. The problems for developing quantitative evaluation method of functional performance from the viewpoint of safe and smooth operation in the facility were made clear from the investigated results. Applying the sensory evaluation technique, the influence degree on functional performance and the relationship between deterioration grades of each member and functional performance were evaluated statistically. Finally, an evaluation method of functional performance was developed for achieving the strategic maintenance of berthing facility.