

2017年度（第53回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 17-B-2

港湾構造物の戦略的な維持管理の  
実現に向けて

港湾空港技術研究所 構造研究グループ長

加藤絵万

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2017年8月

# 港湾構造物の戦略的な維持管理の実現に向けて

## Toward Strategic Maintenance for Port and Harbor Facilities

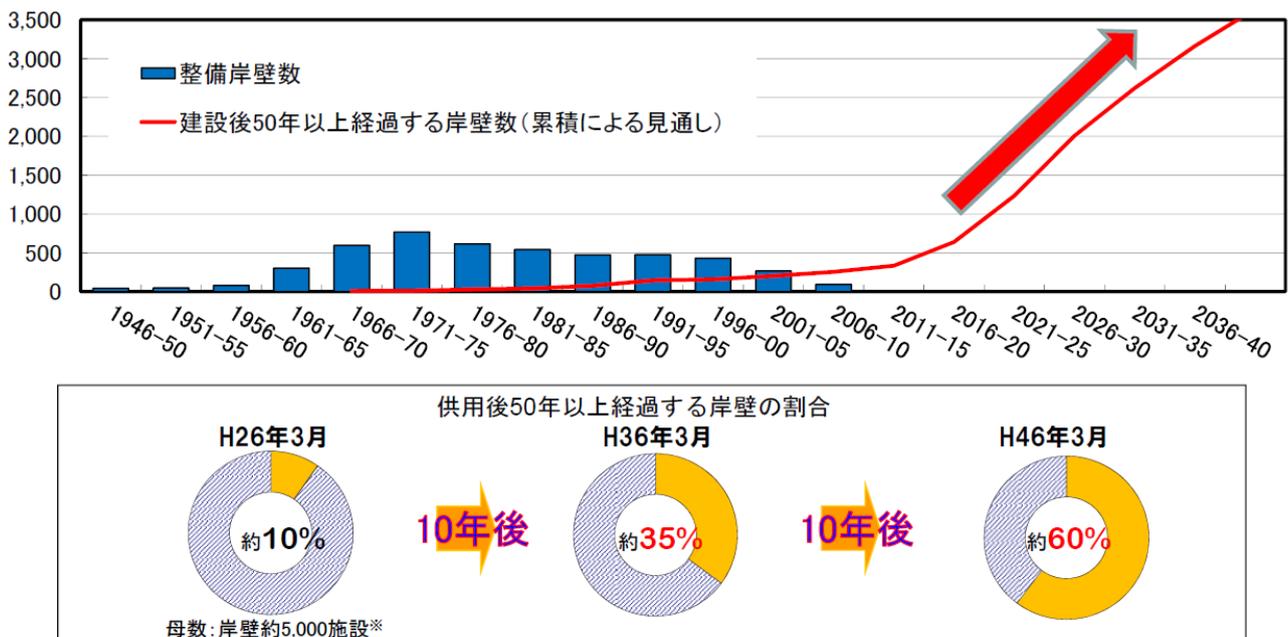
加藤 絵万

Emma KATO

### 1. はじめに

長期間にわたって社会に貢献することが期待される社会インフラは、通常、その供用期間中に、様々な外的要因によって構成要素に劣化や損傷などの変状が生じる。社会インフラに求められる機能を所定の期間にわたって安定的に確保するためには、これらの変状に適切に対応すること、または変状の発生を未然に防ぐ対応を講じることが求められる。この対応のための行為が維持管理であり、土木学会では「構造物の供用期間において、構造物の性能を要求された水準以上に保持するための全ての行為」と定義されている。

港湾の施設は、諸外国および国内との物流・人流ネットワークを担う重要なインフラである。基幹的な物流ネットワークのための機能を持つ主要な港湾の施設は、国自らが整備することが多い。しかし、その施設は国有の施設でありながら、維持管理については地方自治体等の港湾管理者が大部分を担う仕組みとなっている。港湾の施設は1960～1980年代に整備されたものが大多数を占めており、係留施設では今後20年間で約60%もの施設が建設後50年以上を経過することが予測されている(図-1)<sup>1)</sup>。インフラ整備に充当する予算がますます厳しくなるいま、港湾管理者がその大部分を担う港湾の施設の維持管理を戦略的に進めていくことが強く求められている。



※国際戦略港湾、国際拠点港湾、重要港湾、地方港湾の公共岸壁数(水深4.5m以深):国土交通省港湾局調べ

図-1 各年度に整備した係留施設数と供用後50年を経過する施設の推移<sup>1)</sup>

港湾の施設の戦略的な維持管理の実現に向けて、著者らは港湾構造物のライフサイクルコスト（LCC）を縮減し効率的な構造物管理の実現を達成するための一連の手法、すなわちライフサイクルマネジメント（LCM）のシステム構築のための検討を進めている。LCM システムは、構造物の計画、設計、施工、維持管理、撤去・更新の各段階での作業の連携を確実にするとともに、維持管理段階における点検診断、予測、評価、対策の各要素技術の高度化を目指すものである（図-2）<sup>2)</sup>。LCM の枠組みのうち、特に維持管理段階では、港湾構造物の供用期間中に生じるであろう劣化や損傷等の様々な状態について、構造物の点検診断結果を基に評価・予測し、これに計画的に対処していくためのシナリオを作成するとともに、シナリオを適宜適切に見直して維持行為を進めていくことが求められる（図-3）<sup>3)</sup>。

本稿では、まず、港湾の施設の維持管理に関連する制度や指針類の整備の経緯について概説する（2章）。次に、港湾構造物の戦略的な維持管理の根幹を担う点検診断の基本と課題について述べる（3章）。最後に、港湾構造物の戦略的な維持管理の実現に向けた設計における維持への配慮の方法と具体例を示す（4章）。

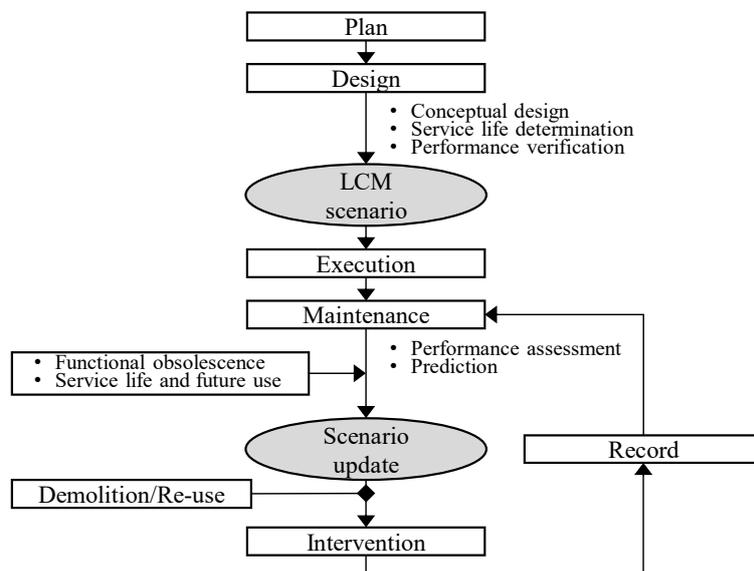


図-2 ライフサイクルマネジメントシステム<sup>2)</sup>

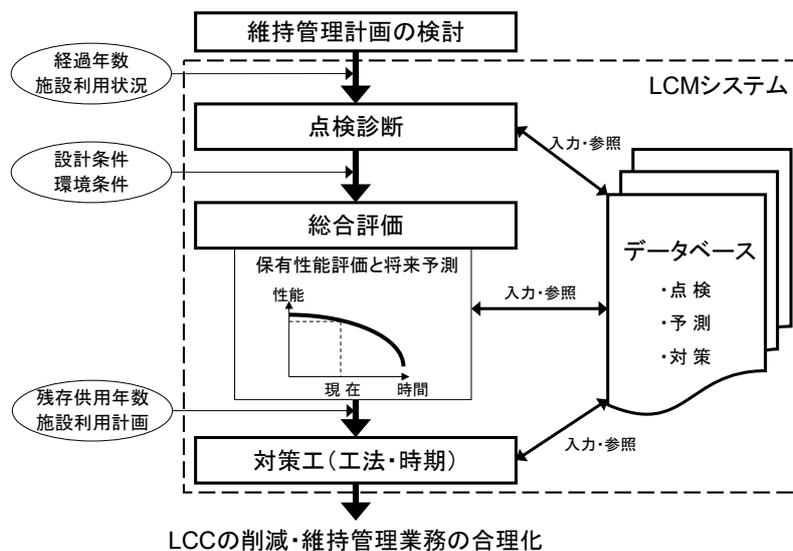


図-3 ライフサイクルマネジメントに基づく維持管理の流れ<sup>3)</sup>

## 2. 港湾の施設の維持管理に関連する制度や指針類の整備の経緯

港湾の施設では、他の社会インフラに先駆けて維持管理に関連する制度や指針類が整備されてきた。表-1に、2007年から現在に至るまでの港湾の施設の維持管理に関連する主な制度や指針類の整備の経緯について、年表形式で示す。

表-1 港湾の施設の維持管理に関連する制度や指針類の動向

時 期	港湾の施設の維持管理に関連する話題
2007年3月	港湾の施設の技術上の基準を定める省令 改正 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
2007年7月	『港湾の施設の技術上の基準・同解説』 <sup>4)</sup>
2007年10月	『港湾の施設の維持管理技術マニュアル』 <sup>3)</sup> 『港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き』 <sup>5)</sup>
2008年11月～ (2011年3月)	海洋・港湾構造物維持管理士資格制度の創設 (東日本大震災)
2012年2月 (2012年12月)	社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視 [結果に基づく勧告] <sup>6)</sup> (笹子トンネル天井板崩落事故)
2013年1月 2013年3月 2013年10月 2013年11月 2014年5月 ...	社会資本の老朽化対策会議の設置 社会資本の維持管理・更新について当面講ずべき措置 <sup>7)</sup> インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議の設置 インフラ長寿命化基本計画 <sup>8)</sup> 国土交通省インフラ長寿命化計画 [行動計画] <sup>9)</sup> ...
2013年3月～7月	港湾施設の集重点検
2013年6月	港湾法 改正
2013年11月	港湾の施設の技術上の基準を定める省令 改正
2014年3月	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 改正
2014年6月	『港湾の施設の技術上の基準・同解説』 <sup>4)</sup> の部分改訂
2014年7月	『港湾の施設の点検診断ガイドライン』 <sup>10)</sup> 『特定技術基準対象施設に関する報告の徴収及び立入検査等のガイドライン』 <sup>11)</sup> 『港湾荷役機械の点検診断ガイドライン』 <sup>12)</sup>
2015年1月	公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者資格の登録制度
2015年4月	『港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン』 <sup>13)</sup>
2016年3月	『港湾荷役機械の維持管理計画策定ガイドライン』 <sup>14)</sup>

2007年3月、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、「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」(以下、基準省令)が改正された。これにより、技術基準対象施設については、新規施設に対しては設計時、既存施設の場合には今後最初の実施する点検時に個別施設毎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規定された。これは、港湾の施設の設計体系が性能規定型に移行したことに伴い、特に新規施設について、施設の計画・設計・施工の時点から供用開始後の維持管理の合理化・省力化に配慮して施設が保有すべき当初の性能レベルを付与すること、また供用期間中は性能レベルに応じた維持管理を確実に実行することを目的としている。

また、上記の省令では、維持管理の一般的な実施手順として、当該施設を取り巻く自然状況、利用状況、構造特性等を勘案しながら当該施設の点検診断を定期的に行い、その結果に基づき総合評価を適切に行った上で、必要に応じて維持補修等の対策を行うことが規定された。

省令の改正を補足する形で、「技術基準対象施設の維持管理に関し必要な事項を定める告示」(以下、維持告示)が新たに制定され、維持管理計画は当該施設の設置者が定めることが標準とされた。これは、性能レベルに応じた維持管理には、施設の設置者が主体的な役割を果たすべきであるという考えに基づいたものである。国有港湾施設の場合、施設の設置者と管理者が異なることが多い。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、どのように施工されたのかを把握しておかなければ、施設に要求される性能の確保を目的とした維持管理は実現できない。したがって、施設の管理委託の際には、当初設計で付与した性能レベルと、それを保持するために必要な維持管理計画が、施設の設置者から管理者に確実に引き継がれることが重要である。

また、維持告示では、維持管理計画の策定と実施にあたって、必要に応じて、専門技術者が関与することが規定された。これにあわせて、2008年度から海洋・港湾構造物維持管理講習会等の研修・講習会が開催されたり、海洋・港湾構造物維持管理士資格制度が創設されるなど、港湾施設の維持管理に関する専門技術者の育成と確保が推進されてきた。

以上のように、港湾の施設の維持管理に係る包括的な法体系が確立されしばらくが経過した2012年2月、「社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視〔調査結果に基づく勧告〕」が発表された。これは、港湾施設等の維持管理および更新等の実施状況等を調査した結果を取りまとめ、必要な改善措置を示したものである。これより、調査対象とした港湾管理者（18団体）のうち7割において、施設の定期点検が実施されていないことが示された。定期点検を実施していない理由として、「これまで定期点検診断を実施する規定等がなく、実施しないことによる支障等も無かったため」や、「職員には知識や技術がないため専門業者等へ委託することとなるが、委託に係る予算措置が困難であるため」などが挙げられた。

その後、2012年12月に笹子トンネル天井板落下事故が発生した。これにより、人命に関わるような事故の防止と構造物の安全性確保、予防保全的な維持管理の実現のためには、社会インフラの定期的な点検を確実に行うことが第一歩であることが再認識され、全社会インフラの維持管理に関する制度の整備が一気に加速された。

まず、2013年3月、社会資本の老朽化対策会議において「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」が示され、今後3か年にわたって老朽化対策に取り組むこととなった。これに対応した動きとして、点検の規定の整備を目的とした2013年6月の港湾法の改正があげられる。これにより、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うことが規定された。

これを受けて、2013年11月に基準省令が、2014年3月に維持告示が改正され、技術基準対象施設の点検診断に関する事項が定められた。基準省令では、維持管理計画等に点検に関する事項を含むことや、施設の維持にあたって定期および臨時の点検を適切に行うこと等が規定された。維持告示では、これまで法令等では明記されていなかった点検診断の頻度について、「定期的な点検診断は5年（施設の損壊に伴い、人名、財産または社会経済活動に重大な影響を及ぼす恐れのあるものについては3年）以内毎に行うこと」と規定された。

これらの法令で規定された点検診断に関する事項の技術的なサポート、特に、施設の管理者が実行できる点検診断の方法、項目、頻度等の考え方を示すことを目的として、2014年7月に『港湾の施設の点検診断ガイドライン』が国土交通省港湾局より公表された。このガイドラインでは、施設の種類や構造形式毎に点検診断の項目や劣化度判定基準、点検診断にあたっての留意点等が示されており、ガイドラインの活用によって、一定レベル以上の点検診断が統一的な基準に基づいて実施されることが期待されている。

ここで、2011年の東日本大震災では、被災地域の港湾において、護岸の損壊によって船舶の入出港に支障を来す事例があった。このため、今後、想定される首都直下地震や南海トラフ巨大地震等の非常災害時において船舶の交通を確保することを目的として、港湾管理者が民有港湾施設の維持管理状況等に関して立入検査を実施し、必要に応じて勧告や命令を行うことができる制度が、2013年6月の港湾法の一部を改正する法律により創設された。報告の徴収や立入検査等を実施する場合の手続きと考え方については、2014年7月に公表された『特定技術基準対象施設に関する報告の徴収及び立入検査等のガイドライン』にとりまとめられている。

2014年6月には、『港湾の施設の技術上の基準・同解説』の一部が改訂され、設計における維持への配慮

に関する記載が充実された。港湾の施設を構成する部位・部材について、性能レベルに応じた維持管理が確実に実行できるよう適切な配慮がなされる必要があることがあらためて示されるとともに、コンクリート構造部材の耐久性を向上させる方策や、消波ブロック被覆堤ケーソン側壁や栈橋上部工における維持への配慮の方法が示された。

2015年4月には、施設機能の安全的な確保とLCCの縮減を目的とした維持管理計画の策定の推進と内容の充実を図ることを目的として、『港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン』が国土交通省港湾局より公表された。ガイドラインでは、維持管理計画への点検の規定の反映方法や港湾の各種施設の維持管理計画書の事例が示されたほか、港湾単位のスストックマネジメントを戦略的に行うための「予防保全計画」の役割と意義が示された。予防保全計画とは、施設毎に作成する維持管理計画を基に、港湾ごとに各施設の維持管理・更新に関する優先度を定め、費用の平準化を図ることを旨とした中期的な計画である。維持管理計画と予防保全計画の関係は表-2に示すとおりである。

ここで、2015年1月、社会資本ストックの維持管理・更新を適切に実施するために、民間団体等が運営する資格を「国土交通省登録資格」として登録し、国や地方公共団体の業務に活用する制度が導入された。これは、2014年6月に改正された「公共工事の品質確保の促進に関する法律（品確法）」において、公共工事に関する調査及び設計の品質確保の観点から、資格等の評価のあり方等について検討を加え、その結果に基づいて必要な措置を講ずることが規定されたことによる。港湾の施設については、前述の海洋・港湾構造物維持管理士資格制度のほか、海洋・港湾構造物設計士資格制度などが登録され、維持管理計画の策定とその実施に関与する専門技術者として、国や地方自治体等の維持管理業務での活用が進められている。

表-2 維持管理計画と予防保全計画<sup>13)</sup>

計画名	維持管理計画	予防保全計画
計画単位	個別施設単位 	港湾単位 
目的	施設毎の適切な維持管理（点検，維持工事等）等に資する。	港湾単位での計画的な老朽化対策の実施に資する。
計画期間	予定供用期間	5カ年
主な内容	施設の維持管理についての基本的な考え方，当該施設の計画的かつ適切な点検診断，実施時期，補修の内容，時期等を策定。	各施設の老朽化状況，利用状況等を総合的に勘案し，施設の重要度に応じた老朽化対策の対応方針，優先順位を策定。

### 3. 港湾構造物の点検診断の基本と課題

点検診断は、港湾構造物の戦略的な維持管理の根幹を担うものである。点検診断を定期的かつ適切に実施することは、構造物に発生する変状の早期発見に繋がるものであり、点検診断結果に基づいて然るべき時期に適切な対策を施すことが構造物の長期の安全な供用に繋がる。このため、個々の構造物のLCCの最小化や、地区単位での構造物群のLCCの最適化を目指すには、定期的な点検診断の実施が必要不可欠である。

ここで、港湾構造物は、構造が比較的複雑で、鋼・コンクリート・地盤等からなる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波浪・船舶・地震など多種多様であるため、劣化や変状の発生・進展が複雑である。予定される供用期間中、構造物に求められる機能を確実に維持するためには、部材や構造物全体に発生する可能性があるすべての変状を対象に点検診断することが理想であるが、労力や費用の観点から現実的ではない場合が多い。このため、構造物の性能低下に及ぼす影響が大きい部材や構造

物全体の変状を対象として効率的に点検診断を行うことが求められている。点検診断の対象とする変状を選定するにあたっては、構造物の「変状連鎖」の機構を理解することが重要である。

「変状連鎖」とは、構造物の変状の原因、変状の発生、変状がもたらす影響、そして構造物の性能低下へと変状が進行していく過程をいう<sup>15)</sup>。例として、図-4に鋼矢板式係船岸の主要な変状連鎖を示す。変状連鎖は、構造物を構成する部材間の関連性という観点から次のように区別することができる。ひとつは、部材で発生した変状が独立して進行していくものであり、図-4中の鋼材の劣化やコンクリートの劣化に起因する連鎖に代表される。この変状は、部材そのものの特性のみに影響を与えるもので、その発生・進行過程は比較的単純である。もうひとつは、異なる部材で発生した変状同士が互いに影響し合いながら、次々と他の部材の変状へと波及していくもので、図-4中の地震や圧密沈下に起因する連鎖が該当する。この場合、変状の発生・進行過程は、部材のみならず構造物全体の特性に影響を受けることとなり、構造物全体の性能低下を招くような規模の大きな変状の発生に繋がる傾向がある。

点検診断の対象とする変状の選定にあたっては、変状と性能低下の因果関係、点検作業の難易などの観点から検討する必要があるほか、変状が発見された場合に補修・補強等の対策が効果的かつ効率的に行えるかという観点も必要である。しかし、港湾構造物では、大部分の構造要素が地中あるいは海水中などアクセスが困難な場所に位置する。また、陸上構造物と比較すると、港湾構造物に適用可能な点検機器・装置も少ない。このため、例えば鋼矢板式係船岸の場合、現状では、図-4に太線で示した変状のみが点検診断の対象になり得る。

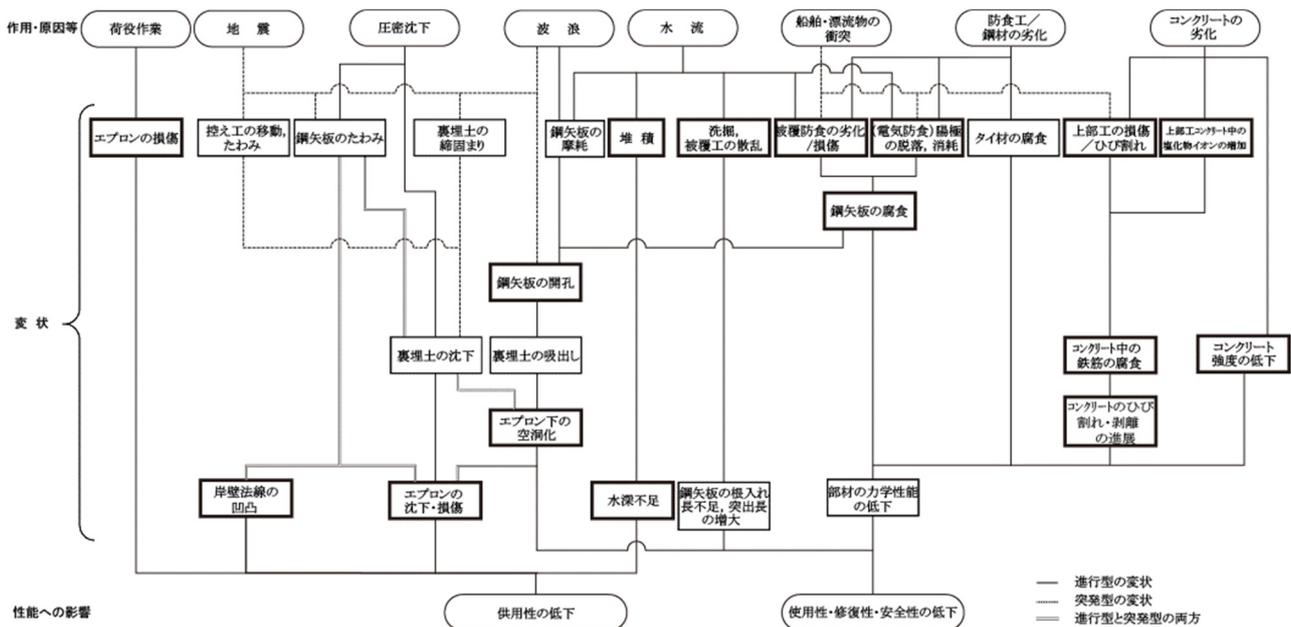


図-4 鋼矢板式係船岸の主要な変状連鎖<sup>15)</sup>

点検診断の対象とすることが不可能な変状については、現状では、その発生・進行を食い止めるための適切な事前対策を講じる以外に対応方法はない。また、点検診断の対象とすることが可能な変状であっても、実際に点検診断を実施するにあたっては、天候や潮汐、波浪、施設の利用状況や周辺の漁業活動等により、作業時間や適用可能な点検診断技術が制約されることが多い。このため、性能評価や対策選定のために必要なデータ（点検診断結果）の質・量を確保することや、補修・補強等の対策の実施が難しい場合もある。したがって、施設の計画・設計・施工の時点から供用開始後の維持管理の合理化・省力化に配慮して施設が保有すべき当初の性能レベルを付与すること、また、供用期間中は性能レベルに応じた維持管理が確実に実行

できるよう適切な配慮がなされることが必要である。港湾構造物への性能レベルの付与とそれに応じた維持管理については、2007年の基準省令の改正および維持告示の規定により広く周知されたが、2013年以降の維持管理に関する制度整備等により、その重要性はますます高まってきているといえる。

#### 4. 港湾構造物の設計における維持への配慮

##### 4.1 維持管理レベル

3章で述べた性能レベルの付与について、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>4)</sup>では、3段階の「維持管理レベル」を基本的な考え方として導入している。表-3に、維持管理レベルの定義を示す。

表-3 維持管理計画と予防保全計画<sup>4)</sup>

分類	損傷劣化に対する考え方	概念図
維持管理レベルⅠ (事前対策型)	高い水準の損傷劣化対策をあらかじめ行うことにより、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。	<p>初期値 維持管理上の限界値 要求性能上の限界値 経過年数 供用期間</p>
維持管理レベルⅡ (予防保全型)	損傷劣化が軽微な段階で、比較的小規模な対策を繰り返し行うことにより、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の低下を予防する。	<p>初期値 維持管理上の限界値 要求性能上の限界値 経過年数 供用期間</p>
維持管理レベルⅢ (事後保全型)	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回程度の大規模な対策を行うことにより、損傷劣化に事後的に対処する。	<p>初期値 要求性能上の限界値 = 維持管理の限界値 経過年数 供用期間</p>

維持管理レベルの設定にあたっては、当該施設の設置目的、供用期間及び要求性能を踏まえて、自然環境条件や利用条件といった当該施設を取り巻く諸条件、施設の構造形式やこれを構成する部材の構造特性等、使用材料の種類や品質等から、当該施設の有する性能の経時変化を予測して設定する。つまり、維持管理レベルは本来、施設全体に対して設定されるものであるが、施設全体の性能の経時変化を予測することが難しい場合やすべての部材や附属設備等に対して同一の維持管理レベルを設定することが合理的でない場合がほとんどである。したがって、当該施設を構成する部材の保有性能の経時変化に関する検討を実施し、この結果に加えて、点検診断及び維持工事等の難易度、当該施設の重要度等についても勘案しながら、当該施設全体としての維持管理のシナリオを描きつつ、施設を構成する部材ごとに適切な維持管理レベルを設定する。維持管理レベルの設定の例として、表-4に、重力式防波堤および直杭式横棧橋を構成する部材に設定する維持管理レベルの目安を示す。

著者らは、供用開始後の維持管理に関する課題が多い構造物を対象として、設定された維持管理レベルを全うするための具体的な配慮の方法について検討を進めている。ここでは、重力式防波堤のケーソンと、栈橋の上部工を対象とした設計時における維持への配慮について述べる。

表-4 維持管理レベルの設定の目安 (文献16)を基に作成)

施設	部材名	維持管理レベル	維持管理レベル設定の考え方
重力式防波堤	ケーソン	I	一般に、ケーソンは鉄筋の腐食の進展が軽微であることから、供用期間中に維持管理上の限界に達しないと想定
	上部工 消波工 海底地盤	III	構造的に重要な部材であるものの、劣化予測、予防保全的な対策が困難あるいは不経済
直杭式横栈橋	上部工	I	供用期間中に維持管理上の限界に達しないことを確認している部材、事前対策が施されている部材(例、耐腐食性の高い鋼材を用いたRC等)
		II	供用期間中に維持管理上の限界に達すると予測される場合、予防保全的な対策を計画する
	下部工(鋼管杭の被覆防食)	II	耐用年数が供用期間より短い被覆防食
	下部工(鋼管杭の電気防食)	I	耐用年数が供用期間より長い電気防食
		II	供用期間中に陽極の交換が必要な電気防食
	下部工(鋼管杭)	I	供用期間中に維持管理上の限界に達しないことを確認している鋼管杭
	上部工(土留護岸) エプロン 海底地盤 渡版	III	構造的に重要な部材であるものの、劣化予測、予防保全的な対策が困難あるいは不経済
附帯設備	III	劣化予測、予防保全的な対策が困難あるいは不経済	

#### 4.2 維持管理を考慮した防波堤ケーソン側壁の耐衝撃設計に関する検討

消波ブロック被覆堤は、ケーソン堤体前面に消波ブロックを配置した防波堤構造の一種である。消波ブロック被覆堤では、消波ブロックがケーソン側壁に繰り返し衝突し、局所的な損傷が進行して穴あきに至る場合がある。消波ブロックの衝突によるケーソン側壁の穴あき被災は、中詰材の流出による堤体重量の減少を招くため、結果として、ケーソンの滑動や転倒に対する安定性の低下から、防波堤に求められる機能の喪失に繋がるものである(図-5)<sup>17)</sup>。

ケーソン側壁の損傷に対する点検診断方法としては、一般に、潜水士による目視調査や、図-6に示すように水中カメラを用いた目視調査が実施される<sup>18)</sup>。しかし、消波ブロックの存在により、ケーソン側壁を全面にわたって調査することは不可能である。このため、損傷が進展し、穴が相当大きくなった段階で発見されるケースが多い。

ケーソン側壁の穴あきが発見された場合、中詰材の充填と側壁の復旧を目的とした補修が実施される。主な補修方法としては、消波ブロックの撤去後に側壁の破壊箇所を型枠で塞ぎ、上部コンクリートに削孔した穴から隔壁に水中コンクリートを打設する方法や、上部工および蓋コンクリートを撤去した後に、隔壁内部から型枠を設置し、港外側の隔壁に水中コンクリートを打設する方法等がある<sup>19)</sup>。しかし、これらの実施には、消波ブロックの広範な撤去・復旧が必要となるため多額の工費を必要としたり、外洋側に面していることから気象・海象等の影響により実施期間が限られる等の困難を伴う。このため、穴あき被災の可能性のあるケーソン側壁については、あらかじめ予防保全的な対策を講じることが有効と考えられる。

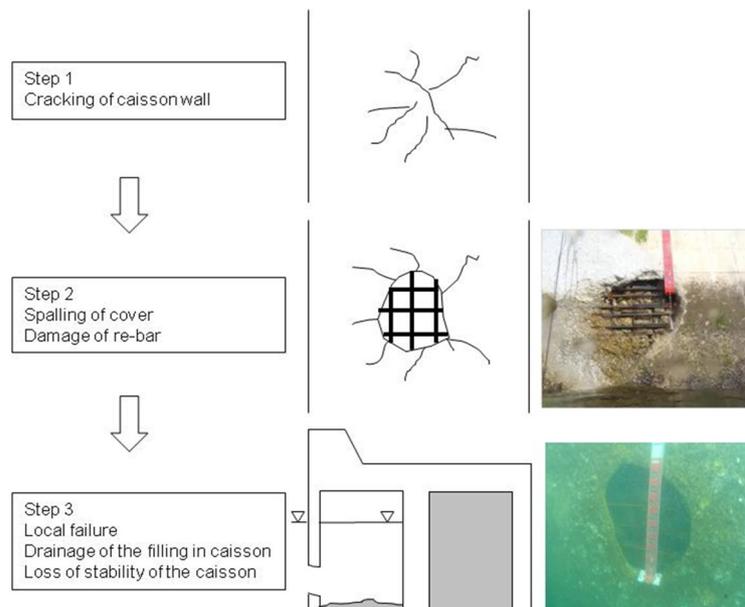


図-5 ケーソン側壁の損傷による消波ブロック被覆堤の性能低下の過程<sup>17)</sup>

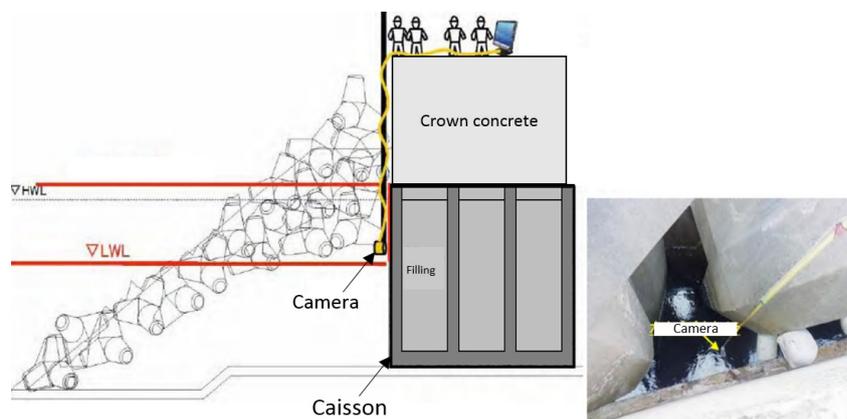


図-6 ケーソン側壁の損傷による消波ブロック被覆堤の性能低下の過程<sup>18)</sup>

以上のことから、文献 20)では、穴あき被災の可能性のある消波ブロック被覆堤ケーソン側壁について、維持管理レベル I を実現するため、ケーソン側壁の耐衝撃設計・照査方法を提案している。これまでの穴あき被災事例において、鉄筋コンクリート版の押抜きせん断破壊と類似した破壊形態が見られていることから、繰り返し衝撃荷重に対するケーソン側壁の押し抜きせん断破壊に対する抵抗性を確保することで、局所的な損傷に対する安全性を照査することとしている。ケーソン側壁の耐衝撃性を向上させるための対策としては、短繊維補強コンクリートの使用、引張鉄筋比の増加、側壁の版厚の増加などが挙げられる。

一方で、ケーソン側壁の耐衝撃性を向上させるための予防対策の可否を判断するためには、LCC 縮減の観点から検討することが肝要である。しかし、予防対策の有効性は、防波堤全体における穴あき被災の発生確率に影響される。このため、ケーソン新設時における予防対策の可否の判断に資するため、予防対策が LCC の観点から有利となる条件を検討した<sup>21)</sup>。

図-7 に結果の一例を示す。ここでは、ケース 1) 側壁への短繊維補強コンクリートの使用、2) 側壁の鉄筋比の増加、3) 側壁の版厚の増加を予防対策として設定し、穴あき被災後の補修工法と 1 函あたりの補修費用として表-5 を設定している。図-7 中の横軸の発生率 ( $P_i$ ) は、防波堤の全函数に対する穴あき発生函数の割合を表している。縦軸に示す全対策費用は、防波堤全函 ( $n$ ) に対して予防対策を講じた場合の費用を、期待補修費用は、穴あき被災が発生したケーソン ( $n \times P_i$ ) に対する補修費用を表している。つまり、全対策費用

／期待補修費用が 1.0 を下回る場合、予防対策が LCC の観点から有利となる。例えば、**図-7** では、予防対策ケース 2) 鉄筋比の増加は、補修ケース A、B に対しては発生率が 10～12 % 以上の場合に予防対策が有利であるといえる。また、補修ケース C では、発生率 1.3～5 % 以上でいずれの予防対策も有利となった。つまり、ケーソン 100 函で構成される防波堤を想定すると、5 函以上に穴あき被災の危険性が予測される場合においては、予防対策を講じることが LCC の観点から有利であるといえる。予防対策費用や補修費用は、検討の対象とする防波堤の諸元や穴あき被災の発生規模等で変化するが、以上のような手法により、LCC 縮減の観点から防波堤ケーソン側壁の穴あき被災に対する予防対策の優位性を示すことができる。

消波ブロック被覆堤ケーソン側壁の耐衝撃設計については、これまで、穴あき被災率が 6.4% であった防波堤ケーソンに適用された実績がある<sup>17)</sup>。この事例では、D19-200mm ピッチから D38-100mm ピッチに鉄筋比を増加させることで、ケーソン側壁の耐衝撃性を向上させた。当該防波堤については、現時点では穴あき被災は報告されていないが、耐衝撃設計の有効性について今後も引き続き検証を行う予定である。

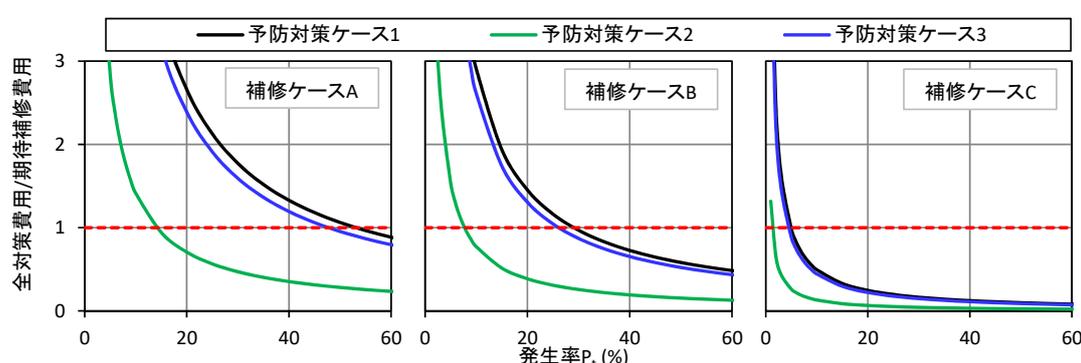


図-7 防波堤ケーソンにおける局部破壊の発生率と全対策費用/期待補修費用の関係<sup>21)</sup>

表-5 各補修シナリオの補修費用<sup>21)</sup>

補修ケース		防波堤 I (万円/函)
ケース A	消波ブロック撤去後、隔室に中詰コンクリート充填	1,084
ケース B	上部コンクリート撤去後、隔室に中詰コンクリート充填	1,316
ケース C	中詰材を除去して再度据付後、隔室に中詰コンクリート充填	9,608

#### 4.3 維持管理を考慮した栈橋上部工の設計に関する検討

栈橋は、係留施設の構造形式の一種であり、主にコンクリート製のはりや鋼管杭の杭頭を連結し、その間をコンクリート製の床版で繋いだ構造が基本となっている。栈橋上部工は、海水面から非常に近い位置にあるため、コンクリート製のはりや床版では塩害が生じやすく、他の港湾コンクリート構造物と比較して、その劣化の進行が極めて速い。塩害によるコンクリート部材の安全性の低下により施設の供用制限にまで至った事例は、これまで数多く存在している。

栈橋上部工の点検診断方法としては、一般に、ボート上からの目視調査が行われる(写真-1)。上部工下面部のクリアランスが確保されない場合や、部材が海水に浸漬している場合は、潜水士が目視調査を行う。また、コンクリート部材の塩害を対象とした調査・診断手法は種々確立されているが、栈橋上部工にこれらを適用する場合、上部工下面への足場の設置が必要である。いずれの調査を実施する場合も、潮汐や波浪、施設の利用状況等の影響を受けるため、十分な作業時間や良好な作業環境を確保することは難しい。

栈橋上部工の補修では、一般に、はりや床版などそれぞれの部材の劣化の進行程度に応じて、表面被覆工法、断面修復工法、電気防食工法などが適用される。しかし、点検診断と同様、施工のための十分な作業時間等を確保することは難しく、補修効果の持続性は、施工時のコンクリートの含水状態や施工後の潮汐によ



写真-1 栈橋上部工の点検診断

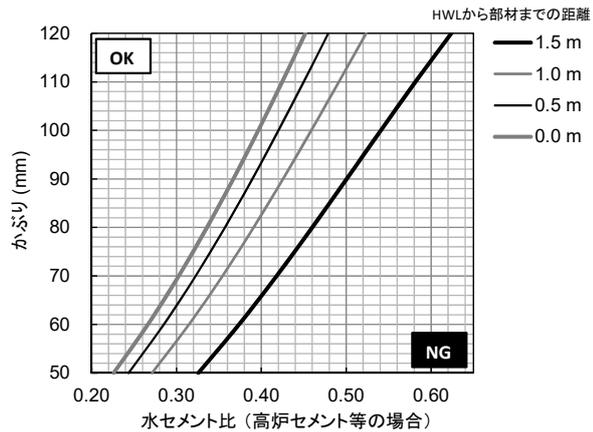


図-8 水セメント比と最小かぶりの関係 (RC 部材) 22)

る乾湿の繰返しによって影響を受けることに注意しなければならない。

以上のように、栈橋上部工は港湾コンクリート構造物のなかでも最も維持管理上の課題が多いとされる部材であり、設計・施工時点から供用開始後の点検診断や補修等対策の実施の合理化・省力化に配慮することが強く望まれている。

上部工のコンクリート部材の設計においては、断面破壊や疲労破壊などの安全性、ひび割れ幅やたわみなどを指標とした使用性などに対する照査だけではなく、塩害の発生・進行による部材の性能の経時変化に対する抵抗性についても適切に確認する必要がある。本来であれば、塩害による劣化や損傷等の変状に伴う部材の性能の経時変化を直接的に評価し、要求性能の照査に反映すべきであるが、現状の技術レベルでは難しい。このため、性能低下を生じさせる変状の発生を抑えることで、間接的に性能の経時変化を照査することとしている。具体的には、維持管理レベルⅠを設定する場合は、設計供用期間中にコンクリート中の鋼材に腐食が生じないことを確認する。維持管理レベルⅡを設定する場合は、設計供用期間中にコンクリート中の鋼材にいつの時点で腐食が発生するかを確認し、それを踏まえた対策を実施することを設計時点から計画しておくことで、設計供用期間中の部材の性能を満足させる。

コンクリート中の鋼材の腐食の発生時期は、Fickの拡散則に基づいたコンクリート中の塩化物イオンの侵入予測により行われる<sup>4)</sup>。予測のパラメータは、コンクリートに用いるセメント種類、水セメント比、H.W.L.から栈橋上部工部材の下端までの距離、かぶりなどである。図-8に、文献4)に基づいて計算された設計供用期間50年中に塩化物イオンの侵入による鋼材腐食の発生を許容しないための水セメント比と最小かぶりの関係を、H.W.L.から部材(鉄筋コンクリート製と想定)下端までの距離が0.0m、0.5m、1.0m、1.5mの場合について示す<sup>22)</sup>。水セメント比とかぶりの関係が、H.W.L.から部材下端までの距離によるラインの右下に位置する場合は「NG」、すなわち設計供用期間中に鋼材の腐食が発生すると判定される。例えば、部材からH.W.L.までの距離が1.0mについて見ると、水セメント比を48%と設定する場合、かぶりが70mmでは「NG」と判定されるが、110mmでは「OK」、すなわち設計供用期間中に鋼材の腐食は生じないと判定される。

ここで、文献4)においては、特に厳しい腐食性環境にある鉄筋コンクリート部材のかぶりは、一般に70mm以上に設定するとの記載がある。ただし、100mmを超えるかぶりを採用する場合には、コンクリートのひび割れ幅の制御に留意する必要があるため、栈橋上部工に適用されるかぶりの限界値は100mm程度が妥当であるとされている<sup>22)</sup>。また、H.W.L.から部材下端までの距離を当初の想定よりも大きくすれば、同じ水セメント比を選定した場合でもかぶりを小さく設定することは可能である。しかし、栈橋上部工の位置(高さ)は、背後の土留め護岸の位置(高さ)により決定されることが多いため、これを変更することは難しい。

このように、部材諸元や施工の観点からかぶりや水セメント比の選択によって設計供用期間中に鉄筋腐食が発生しないようにすることができない場合、維持管理レベルⅠを実現するためには、鋼材自体を高耐久化

する、あるいはコンクリート中への塩化物イオンの侵入を抑制するなどの事前対策を検討する。もしくは、維持管理レベルをⅡとして、供用期間中に断面修復工法や電気防食工法等による適切な補修を実施することを計画する。どのような対策を取るかについては、LCC や施工性、対策の実施が施設の利用に与える影響、また、栈橋下部工（鋼管杭）の維持管理シナリオなどを総合的に考慮して決定する必要がある。

図-9 に、表-6 に示す維持管理シナリオを設定した栈橋上部工の LCC の算定例を示す。エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用による鋼材自体の高耐久化や、埋設型枠の使用によりコンクリート中への塩化物イオンの侵入の抑制を図ったケースは、設計供用期間中に対策を実施するケースと比較して初期建設費は高くなるものの、LCC は小さくなった。栈橋上部工の設置環境を踏まえれば、補修等の対策工事には足場の設置が必要であり、狭隘かつ多湿な空間において十分な効果が得られるよう補修等の作業を実施することは極めて難しい。図-9 は仮想の栈橋上部工についての計算結果ではあるが、対策に要する費用や対策の確実性の観点から、近年では、栈橋上部工の維持管理レベルをレベルⅠと設定して、エポキシ樹脂塗装鉄筋による事前対策を採用するケースが増加している。

なお、文献 24)では、維持に配慮した栈橋上部工の構造形式として、床版部分をプレキャスト化することで、供用中の床版の取り外しおよび交換ができるリプレイサブル栈橋上部工が提案されている（図-10）。このメリットとして、設計・施工段階ではプレキャスト化による部材品質の確保と工期の短縮が、維持管理段階では点検診断の際に床版を取り外すことで床版だけでなくはりの点検診断が容易になること、また部材交換が容易であることから、変状が生じた場合に対策に要する期間が短縮できることなどが挙げられる。リプレイサブル栈橋上部工は、2016 年に港湾技術パイロット事業として採択され、現在、実証試験のための準備が進められているところである<sup>25)</sup>。

表-6 上部工の維持管理シナリオ<sup>23)</sup>

Case	維持管理レベル	初期建設時	設計供用期間中
1	Ⅰ	エポキシ樹脂塗装鉄筋	—
2		埋設型枠＋普通鉄筋	—
4-①	Ⅱ	普通鉄筋	断面修復＋表面塗装
4-②		普通鉄筋	断面修復＋電気防食
5		普通鉄筋	打換え

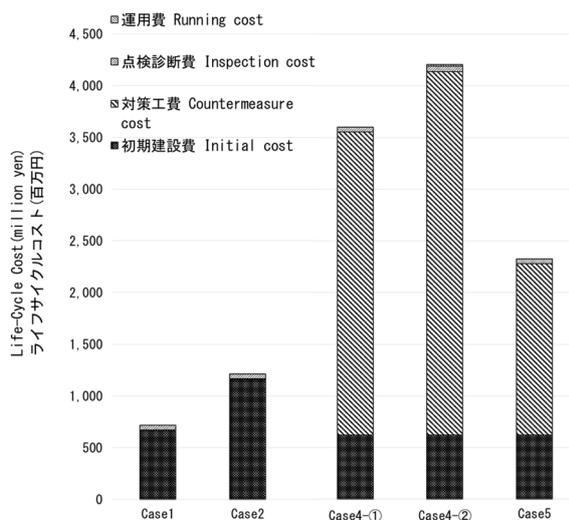


図-9 上部工の LCC 算定例<sup>23)</sup>

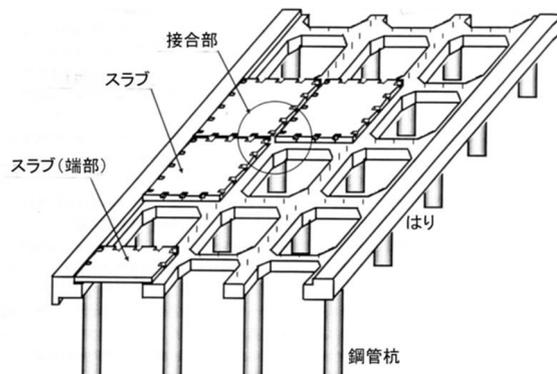


図-10 リプレイサブル栈橋上部工のイメージ<sup>25)</sup>

## 5. おわりに

本稿では、港湾構造物の戦略的な維持管理の実現に向けた制度整備等の経緯と課題、および設計における維持管理への配慮の必要性について概説した。

2章で述べたとおり、近年、維持管理関連の種々のガイドライン・指針類が充実されたが、維持管理の現場からは、ガイドライン・指針類は理想的なことしか記述されておらず、そのとおりの維持管理を実行することは難しいとの意見を聴くことが多い。しかし、これは当たり前である。ガイドライン・指針類は、国内の広範な地域の港湾構造物を想定して作成されたものであり、構造物に備わった性能を要求水準以上に保持していくための維持管理計画の策定や点検診断、対策等に関する技術の標準を示しているに過ぎない。実際に構造物を維持管理するためには、構造物の利用計画や立地条件、使用材料、施工条件、これまでの管理の状況等を踏まえて、それぞれの構造物についてオーダーメイドで維持管理計画が策定され、それが着実に実行される必要がある。そして、その実行にコストや労力がかからなければ尚のことよい。このためにも、今後、建造される構造物については、構造物の計画、設計、施工、維持管理の各段階での作業の連携を確実にすることが必要である。

我が国の物流や産業の発展や災害対応に不可欠な港湾構造物の安全な利用を確保するためにも、港湾構造物の設計と維持管理の連携強化に向けた一連の技術開発に取り組み、港湾構造物の LCM の推進を図っていききたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：港湾施設の維持管理の現状と課題，<https://www.mlit.go.jp/common/001069314.pdf>, 2015.
- 2) Yokota, H., “Practical Application of Life-Cycle Management System for Shore Protection Facilities”, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, No.1, pp.34-43, 2017.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 総務省：[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000144897.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000144897.pdf), 2012.
- 7) 国土交通省：<http://www.mlit.go.jp/common/000991905.pdf>, 2013.
- 8) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：<http://www.mlit.go.jp/common/001040309.pdf>, 2013.
- 9) 国土交通省：<http://www.mlit.go.jp/common/001040664.pdf>, 2014.
- 10) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001037855.pdf>, 2014.
- 11) 国土交通省港湾局：特定技術基準対象施設に関する報告の徴収及び立入検査等のガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001047968.pdf>, 2014.
- 12) 国土交通省港湾局：港湾荷役機械の点検診断ガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001049081.pdf>, 2014.
- 13) 国土交通省港湾局：港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001087609.pdf>, 2015.
- 14) 国土交通省港湾局：港湾荷役機械の維持管理計画策定ガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001123532.pdf>, 2016.

- 15) 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保, 横田弘, 山路徹, 藤井敦, 内藤英晴, 北澤壮介, 井上博士, 柏原裕彦, 末岡英二, 吉田倫夫, 山本修司, 中野則夫, 稲田勉: 係留施設の変状連鎖と点検診断に関する一考察, 港湾空港技術研究所資料, No.1328, 2016.
- 16) 文献 13), p.40
- 17) コンクリート構造物の補修・補強編集委員会: 消波ブロックの衝突による防波堤ケーソンの変状および対策事例, コンクリート構造物の補修・補強ー実例で見る思想と実践ー, 産業技術サービスセンター, pp.676-680, 2016.
- 18) Kato, E., Kawabata, Y. and Yokota, H.: *Life-Cycle Management of Port and Harbor Structures in Japan*, Proceedings of The 2nd ACF Symposium, Chiang Mai, Thailand, November 23-25, 2017. (印刷中)
- 19) 国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所: 防波堤ケーソンの損傷対策に関する技術マニュアル(案)ー消波ブロック衝突による側壁損傷対策ー, 2007.
- 20) 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: 維持管理を考慮した防波堤ケーソン側壁の耐衝撃設計に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No. 1279, 2013.
- 21) 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: 維持管理を考慮した防波堤ケーソン前壁の耐衝撃設計に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, I\_552-I\_557, 2014.
- 22) 岩波光保, 加藤絵万, 川端雄一郎: 維持管理を考慮した栈橋の設計手法の提案, 港湾空港技術研究所資料, No.1268, 2013.
- 23) 野上周嗣, 加藤絵万, 川端雄一郎, 佐藤徹: 栈橋上部工の維持管理シナリオに関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No. 1296, 2014.
- 24) 岩波光保, 加藤絵万, 横田弘: リプレイサブル栈橋上部工の構造性能評価に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.48, No.1, pp.1-53, 2009.
- 25) 国土交通省港湾局: <https://www.mlit.go.jp/common/001151971.pdf>, 2016.