

特集

今後の技術基準改訂に
向けた方向性
～新たな行政ニーズと
技術基準～



性能設計と維持管理

末岡 英二 北澤 壮介 吉田 倫夫 海洋・港湾構造物維持管理士会

港湾施設の維持管理は、ライフサイクルマネジメントの枠組みに基づいて計画的かつ合理的に実施することが必要とされている¹⁾。そのため、維持管理においては、計画と設計で想定した性能確保の考え方をシナリオとして、それを修正しながら供用期間にわたって構造物の性能確保を行うため、性能設計に基づく必要がある。本稿では、海洋・港湾構造物維持管理士会の活動を紹介するとともに、維持管理の変遷と性能設計、鋼構造物や鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関わる性能設計およびこれらの課題について紹介する。

1. 海洋・港湾構造物維持管理士会の活動

海洋・港湾構造物維持管理士資格制度は、海域環境下にある構造物の維持管理を行うため、点検診断、維持管理の計画および施工についての高い知識と技術を有する技術者の確保、育成を目指して2008年度に創設された。2014年度には、国土交通省の登録民間資格として、港湾分野の維持管理の計画策定、設計および点検・診断について、海岸分野の点検・診断について登録されており、有資格者は約470名である。また、国土交通省策定の「港湾の施設の点検診断ガイドライン」において、専門技術者として当該資格が記載されている。

海洋・港湾構造物維持管理士会 (MEMPHIS会) は、会員の海洋構造物および港湾構造物の維持管理に係る技術の研鑽・普

及・向上を図るとともに、当該業務に関わる技術者の資質の向上により社会に貢献することを目的として、2012年に設立された。本会会員は、当該資格の有無による正会員と準会員からなり、2020年現在で約700名であり、建設会社、調査・設計コンサルタント、防食専門家、国・地方自治体・港湾管理者などに所属する者で構成されている。本会の活動は、役員、技術委員、顧問、事務局が中心となって実施しており、賛助会員である43の企業・団体にご協力頂いている。

当会の活動は、毎年定期的に講演会・見学会を実施しており、これまで全国の港湾に関係する都市14か所において18回実施した。今年度は第19回の講演会をオンデマンド方式で配信し、200名を超える皆様に視聴して頂いた。講演会では、港湾の現状、計画および維持管理に関わるもの、最新の維持管理に関わる施工事例や技術、あるいは鉄道、道路など異分野の維持管理に関わるものも講演頂いている。講演会と見学会の様子を写真1、2に示す。

また、当会では、国土技術政策総合研究所や各地方整備局で実施している港湾施設の維持管理研修の講師として御協力させて頂いており、2016年～2020年の5年間で30の港で実施した。現場実習では「港湾の施設の点検診断ガイドライン」に沿った近接目視を中心として、鋼材の電気防食の電位計測も実施しており、各班に分かれて点検調査や劣化度判定を行っている。



写真1 維持管理講習会の様子(札幌)



写真2 見学会の様子(松山)



図1 維持管理講演会・見学会実施場所



図2 維持管理研修実施場所

講演会と維持管理研修の実施場所を図1、2に示す。維持管理士の資格者を増やしていくことも本会の目的であり、択一試験問題の解答例の作成や、賛助会員に限定した記述式問題に対する勉強会も実施している。

さらに、当会は沿岸技術研究センター、港湾空港技術研究所との連携、協力協定を締結し、お互いの連携、協力を図っている。その成果の一例として、維持管理関連のマニュアル作成への協力、「係留施設の変状連鎖と点検診断に関する一考察」と題する港空研資料の共同執筆、海外での国際セミナーへの参加なども実施しており、今後とも皆様と協力して、維持管理士の維持管理に関わる技術の研鑽に貢献していく所存である。

2. 維持管理の変遷と性能設計

港湾の施設はその主要部分が海中や干満帯、飛沫帯にあり、大水深、軟弱地盤という厳しい自然条件下にある施設も多く、高波、高潮、地震動などの強大な作用により変状が一気に発生するほか、鋼材の腐食やコンクリートの塩害劣化などの材料劣化、海底地盤の洗掘・堆積、施設の沈下や背後地盤の吸出しなどの経年的な変状が生じる。

このため、旧港湾技術研究所では設立直後の1960年代から

鋼材腐食やコンクリートの材料劣化に関する研究に着手され、港湾空港技術研究所となった現在に至るまで50年以上にわたって継続的に取り組まれている。1970～80年代には将来、施設の維持管理が大きな課題になることを見通して、港湾施設や海岸保全施設を対象として変状連鎖、変状点検手法、対策などの研究が進められたほか、港湾鋼構造物の膨大な全国調査により腐食プロフィールや集中腐食のメカニズムなどが明らかにされた。

1973年の港湾法の改正を受けて、1974年7月に「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」（以下、技術基準省令という）が制定された。この技術基準省令は全16条からなっており、外郭施設や係留施設に関しては、“十分に機能を発揮すること、安全かつ円滑に利用できること、波力、土圧、地震力などの外力に対して安全な構造であること”などが規定されているが、施設の維持管理に関する規定はとくに設けられていない。当時は維持管理を考慮した設計という概念が一般的にはなっておらず、鋼構造物は耐用年数を50年と考えて腐食しろや電気防食の設計を行ってはいいたが、コンクリート構造物は基本的にはメンテナンスフリーと考えられていた。

技術基準省令を本文とし解説を記述した「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（以下、基準・同解説という）が1979年に刊行されているが、1989年の改訂において総論に“港湾の施設の維持管理”の章が初めて設けられ、“点検、評価、対策などの総合的な維持管理”、“定期点検、異常時点検”、“一次点検、二次点検”、“維持管理情報の保管”といった現在の維持管理につながる記述がみられる。しかしながら、設計時における維持管理への配慮という視点は明確ではなかった。

その後、1999年4月に技術基準省令が一部改正され、「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」（以下、技術基準告示という）が初めて定められた。この技術基準告示では、外郭施設や係留施設などについて、“当該施設の構造の特性などを勘案して必要な機能が発揮できるように、適切な基準に基づいて維持管理を行うことを原則とする。”とされ、初めて法的拘束力をもって「維持管理」が位置づけられた。2007年3月の技術基準省令の全面的な改正によって港湾の施設の設計に性能設計の考え方が導入され、それに伴って施設の要求性能や設計供用期間という概念も導入された。要求性能とは施設に必要なとされる性能のことであり、設計供用期間とは施設の設計に当たって、当該施設の要求性能を満足し続けるものとして適切に設定される期間であり、通常は50年とされる場合が多い。技術基準省令には維持管理の原則が表1に示すとおり規定され、供用期間にわたって要求性能を満足するよう、維持管理計画などに基づいて性能が維持されなければならない、とされている。

る。その詳細は「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」(2007年)に示され、具体的には、基準・同解説(2018年版)に記載されているように、設計段階において部材ごとに維持管理レベル(表2参照)を定めるとともに、維持管理レベルが合理的に実現できるように設計がなされ、維持管理レベルに対応した点検診断や維持補修工事などを円滑に実施できるように設計時から配慮がなされていること、これらを記載した維持管理計画書(案)を設計段階で作成することなどが必要となった。

性能設計の導入により、施設の設計に当たって、要求性能の1つである構造的な応答に関する性能(使用性、修復性、安全性)を満足し続けることを確認するために、高耐久性材料・部材の導入検討や、供用期間中の材料劣化や維持補修などを考慮した性能照査が不可欠になったと言える。また、施設共通の要求性能として維持管理性、すなわち点検診断の容易性や劣化損傷に対して技術的・経済的に妥当な補修・補強などを施すことにより所要の性能を継続的に確保できる性能が求められている。

表1 技術基準省令における維持に関する規定の概要

第四条	供用期間にわたって要求性能を満足、維持管理計画等に基づき、適切に維持
2	自然状況、利用状況その他の諸条件、構造特性、材料特性等を勘案
3	定期及び臨時の点検及び診断、維持に係る総合的な評価、維持工事等の実施
4	維持に必要な事項の記録及び保存
5	利用の安全のための運用方法の明確化、危険防止対策

表2 維持管理レベル²⁾

分類	損傷劣化に対する考え方
維持管理レベルⅠ	高い水準の損傷劣化対策を行うことにより、供用期間中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Ⅱ	損傷劣化が軽微な段階で、供用期間中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。
維持管理レベルⅢ	要求性能が満たされる範囲内で、損傷劣化に起因する性能低下をある程度許容し、供用期間中に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。

3. 鋼構造物の腐食対策における性能設計

港湾の施設を構成する鋼部材、具体的には鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板などの鋼材は、高い強度、安定した品質、優れた施工性など特長を有する。一方で、鋼材は腐食するという性質がある

ため、鋼部材の性能を十分に発揮させるためには、腐食対策としての防食が必要となる。

(1) 鋼構造物の性能照査

基準・同解説では、“鋼構造物の性能照査にあたっては、性能の経時変化に対する検討において、設計供用期間中に構造部材の性能の低下が生じないことを基本とする。一般に、技術基準対象施設に用いられる鋼材は、厳しい腐食環境条件下に設置されるため、電気防食工法、被覆防食工法、またはその他の防食工法によって適切に防食を行う。このため、鋼部材の経時変化に対する検討は、鋼材の防食設計について行うことを基本とする”とされている。

(2) 鋼材の防食設計

鋼材の防食対策は、平均干潮面(M.L.W.L.)以下の部分にあつては電気防食工法、朔望平均干潮面(L.W.L.)以下1mより上の部分においては被覆防食工法によることを標準とする(図3参照)。この方法は、実績が多く、信頼性も確認されている。M.L.W.L.~L.W.L.-1mの間は、集中腐食が最も発生しやすい部位であるため、被覆防食と電気防食を併用し、集中腐食を防止できるように配慮されている。

電気防食は流電陽極方式と外部電源方式に分類できるが、港湾鋼構造物に対しては維持管理が容易であることから、一般にアルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式が適用される。

被覆防食は塗装、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、金属被覆に分類されるが、港湾鋼構造物が新設か既設か、干満帯か海中部かといった防食対象部位の相違、腐食環境条件、施

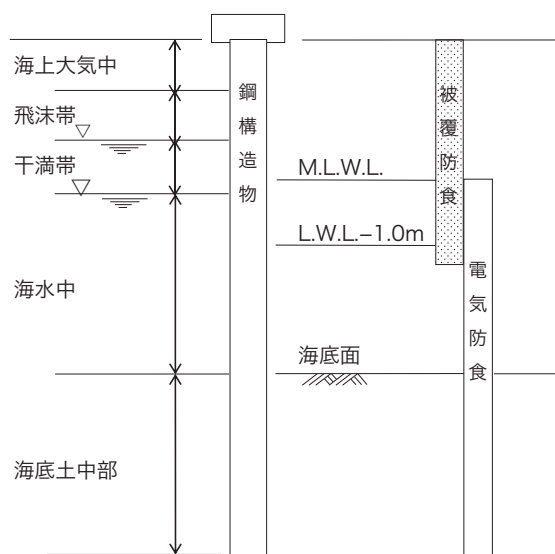


図3 港湾鋼構造物の腐食環境と適用防食法³⁾



工条件、耐用年数などに対して、各防食工法の特性を考慮し、信頼性の高い工法を選定する必要がある。

(3) 防食工の維持管理

防食工の防食性能を設計耐用年数の間発揮させるためには、供用期間中の防食工の維持管理が不可欠である。適切な頻度および必要な時点で防食工に関する点検診断を行い、その防食性能を評価するとともに、必要に応じて防食工の補修を行う必要がある。電気防食の場合、電位測定によって防食状態にあることを確認するとともに、陽極の消耗量調査によって残存耐用年数を算出し、陽極の取替・追加など、適切な時期に適切な対応を行うことも可能である。被覆防食の場合、目視調査を主体として、傷やはがれなどの変状が確認された場合には、詳細調査や補修など適切に対応する必要がある。

(4) 既設鋼構造物の改良

既設鋼構造物の性能照査は、主に目視調査と鋼材の肉厚測定を実施することで、現状で施設の要求性能を満足していることを確認するとともに、鋼材の腐食速度を用いて残存耐用年数を予測することができる。施設として今後も利用し続ける場合、あらたに設計供用期間（例えば50年）を設定し、供用期間にわたって施設の要求性能を満足することを照査する必要がある。この場合、防食性能確保の観点では、被覆防食の補修や電気防食の大規模な交換を行うことが想定される。なお、当初の設計が腐食しるによる場合には、既設鋼構造物に被覆防食や電気防食（陽極）を新たに施工することにより延命化が可能となる。

4. 鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化に対する性能設計

港湾の鉄筋コンクリート構造物は厳しい海洋環境に晒されるため、その劣化原因の多くは、写真3に示すような塩害に起因する。そのため、耐久性に関して性能設計を行う場合、塩害に対する性能照査が非常に重要となる。ここでは、塩化物イオン濃度による鉄筋腐食の照査、コンクリートのひび割れ幅の照査および既往の知見による鉄筋腐食により劣化した部材の耐力の3つについて紹介する。

(1) 塩化物イオン濃度による鉄筋腐食の照査

港湾の鉄筋コンクリート構造物における塩化物イオンによる鉄筋腐食の照査は、鉄筋腐食の主要因となる塩化物イオン濃度が、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回らないようにコンクリートの品質などを定める簡便な手法が採用されている。



写真3 港湾構造物の塩害劣化の例

塩化物イオン濃度の将来予測は、Fickの拡散方程式の解を用いて行うが、その際、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} 、表面塩化物イオン濃度 C_0 、コンクリートの拡散係数 D_k の設定が重要となる。 C_{lim} は、15年間模擬環境に暴露した干満帯試験体の調査結果から 2.0kg/m^3 に設定されている⁴⁾。 C_0 は、全国の栈橋上部工におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布データから、海水面(H.W.L.)からコンクリート表面までの距離 X との関係を調べ、近似直線式で設定されている⁵⁾。また、 D_k も、海洋暴露試験を実施した供試体や、実構造物から得られたコンクリートの見かけの拡散係数から設定されている⁶⁾。これらの係数や式は、2017年制定土木学会・コンクリート標準示方書〔設計編〕とは異なっており、いずれも海洋環境に特化したものとなっている。土木学会コンクリート標準示方書と港湾の基準・同解説での比較を表3に示す。なお、本照査結果により、供用期間中に性能低下が予測される場合には、対象部材の維持管理レベルも考慮して、水セメント比低下によるコンクリートの緻密化、高耐久補強材の使用などの対策を検討する必要がある。

表3 コンクリート標準示方書と港湾基準の比較

	コンクリート標準示方書	港湾基準・同解説
腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim}	セメント種類、W/Cによって設定	2.0 (kg/m ³)
表面塩化物イオン濃度 C_0	地域や飛沫帯と海岸からの距離で設定	$C_0 = -6.0X + 15.1$ (kg/m ³) X : H.W.L.からの距離(m)
拡散係数 D_k	セメント種類、W/Cによって設定	セメント種類、W/Cによって設定(港湾基準の独自式)

(2) コンクリートのひび割れ幅の照査

鉄筋コンクリート部材の使用性照査のうち、鉄筋腐食に関わる要因としてひび割れ幅の照査が規定されている。照査におい

表4 各種補強材を用いた場合のひび割れ幅の限界値

鉄筋の種類	環境区分	ひび割れ幅の限界値
異形鉄筋・普通鉄筋	特に厳しい腐食性環境	0.0035 c
	腐食性環境	0.004 c
	一般の環境	0.005 c
PC鋼材		0.004 c
エポキシ樹脂塗装鉄筋	/	無塗装鉄筋を用いた場合より10%割り増し
SUS-304-SD		0.5mm
SUS-316-SD		0.5mm
SUS-410-SD		0.005 c あるいは 0.5mmのいずれか小さい値

ては、曲げひび割れ幅の設計応答値を算定して、その値がひび割れ幅の限界値以下であることを確認する。使用時のひび割れ幅の限界値は表4に示すように、かぶりc (mm) をパラメータとして設定されている。また、塩害対策として使用されるエポキシ樹脂塗装鉄筋およびステンレス鉄筋を用いる場合の限界値も設定されている。

(3) 鉄筋腐食により劣化した部材の耐力

鉄筋腐食が生じた部材の耐力を、構造物の劣化度の指標を用いて評価することができれば、構造物の健全度を照査する上で、非常に有用となる。しかし、構造物の劣化は、コンクリートのひび割れ、鉄筋とコンクリートの付着力減少、鉄筋断面の欠損など多岐にわたっており、単純な評価は難しい。また、鉄筋コンクリート部材の健全度は、一般的に近接目視による劣化度ランクとして示され、耐力について定量的な照査を行うことは難しい。これまで、加藤ら^{7)、8)、9)}は、30年以上経過した栈橋上部工から切り出したRC部材、各港湾の栈橋上部工や渡橋床版から採取した40体のRC部材および電食により局所的腐食を生じさせた試験体を用いて、劣化度と耐力比の関係、鉄筋断面減少率と耐力の関係などの検討を実施している。その結果、劣化度と耐力比の関係にはばらつきが見られるが、少なくとも劣化したRC部材の構造性能は低下すること、鉄筋の腐食程度とその発生箇所に着目して評価する必要があることが示されている。

5. 今後に向けて

性能設計の導入は、初期建設費の低減を重視した従来の設計からの大きな転換であり、供用期間中の点検診断や維持補修工事などを含めたライフサイクルコストの低減につながる新材料や新工法など（たとえば高耐久性の材料・部材の採用、部材のプレキャスト化など）の導入促進につなげていくことが期待される。

また、点検診断の容易性の観点からは、栈橋上部工下の点検

足場やケーソン中詰材の点検孔の設置など、当初設計における維持管理への配慮も重要である。さらに、被覆防食工の劣化状況、コンクリート中の塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食状況などについて各種センサーを用いて自動でモニタリングできる技術の確立が望まれる。

今後は、従来の施設の維持管理に加えて、既存施設の供用期間の延長や用途の変更、地球温暖化などによる作用外力の強化や施設の耐震化などに伴う設計条件の見直しが必要となる事例が増大していくものと想定される。これらの改良設計においては、あらたに設定した設計供用期間にわたって性能を満足することを照査する必要があるが、新設の施設の設計とは異なり、既存部材の劣化状況が部材ごとに様々であり、劣化が急速に進展する可能性もあるなど、多くの課題がある。このような課題に対して、維持管理計画を充実させるなど設計・施工・維持管理を通じた対応策の検討が必要と考えられる。

〈参考文献〉

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル（改定版），p.7，平成30年7月
- 2) 公益社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），P.74，平成30年5月
- 3) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版），p.53，平成21年11月
- 4) 山路徹，他：海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメントの種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.577～582，2001
- 5) 山路徹，他：港湾コンクリート構造物および塩害環境の定量的評価手法に関する検討，港湾空港技術研究所報告，Vol.44，No.3，pp.39～75，2005
- 6) 与那嶺一秀，他：長期海洋暴露試験および実構造物調査に基づくコンクリートの塩化物イオン拡散性状に関する性状に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1339，2018
- 7) 加藤絵万，他：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
- 8) 加藤絵万，他：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.1，150～159，2011
- 9) 加藤絵万，他：局所的に生じた鉄筋腐食がRCはりの構造性能に及ぼす影響，港湾空港技術研究所報告，Vol.47，No.1，pp.57～82，2008