

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.48 No.2 June 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 2 号 (Vol.48, No.2), 2009年6月 (June 2009)

目 次 (CONTENTS)

棧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加藤 絵万・岩波 光保・横田 弘3 (Development of Life Cycle Management System for Open-type WharfEma KATO・Mitsuyasu IWANAMI・Hiroshi YOKOTA)
潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の底質輸送と干潟の地形変化に関する 3次元数値モデルの開発と現地適用鶴崎 賢一・栗山 善昭37 (Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field.Ken-ichi UZAKI・Yoshiaki KURIYAMA)
関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動に関するアイソタックモデルによる評価渡部要一・田中政典・佐々真志・森川嘉之63 (Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International AirportYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiyuki MORIKAWA)
分割型圧密試験によって評価した関西国際空港海底粘土の圧密挙動に見られる層厚の影響渡部要一・田中政典・佐々真志・江村 剛83 (Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay ClaysYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Tsuyoshi EMURA)
東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に関する一考察渡部要一・田中政典・佐々真志・野口孝俊・宮田正史 ...103 (A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Takatoshi NOGUCHI・Masafumi MIYATA)
信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案渡部要一・田中政典・佐々真志・菊池喜昭 ...123 (New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based DesignYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiaki KIKUCHI)
沿岸域に用いた気泡混合処理土の長期安定性確認調査渡部要一・田中政典・佐々真志 ...145 (10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal AreasYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA)
海上大気中における各種防食塗装による鋼材の防食効果と塗膜の健全性評価手法審良 善和・岩波 光保・山路 徹 ...161 (Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layersYoshikazu AKIRA・Mitsuyasu IWANAMI・Toru YAMAJI)
任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案平山 克也・宮里 一郎 ...199 (Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary SpectrumKatsuya HIRAYAMA・Ichiro MIYAZATO)

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

加藤 絵万*・岩波 光保**・横田 弘***

要 旨

著者らはこれまで、ライフサイクルマネジメント（LCM）の概念に基づく港湾施設の維持管理を提案している。これまで、点検診断、総合評価、対策の方法、それらに関するデータベースなど、個々の要素技術については、それらに関する研究・調査から有益な知見が蓄積されており、また、LCMの一連の流れについては、港湾の施設の維持管理技術マニュアルなど、維持管理に関する技術資料への掲載を通して普及を図っている。しかし、システム概念やシステム中の個々の要素技術は確立されているものの、これまで、LCMシステムとして個々の要素技術を結びつけ体系的にとりまとめたものはない。

そこで、本研究では、栈橋を対象として、これまでLCMシステムの要素技術として蓄積された知見を体系的に取りまとめるとともに、個々の要素技術を結びつけるための手法を構築した。具体的には、点検診断に基づいた保有性能評価と将来予測手法、対策工および実施時期の選定手法、また、構造物の維持管理レベルに応じた性能低下度の限界値の設定などである。さらに、LCMシステムの具現化と普及を目的として、栈橋の維持管理計画の策定を支援するためのプログラムを開発した。

本研究は、これまで維持管理の基本概念として捉えられていたLCMを、実際の港湾施設の維持管理へ具体論として適用することを目指したものであり、本研究の成果は、港湾施設の合理的かつ効果的な維持管理の一層の推進に寄与することが期待できる。

キーワード：栈橋、ライフサイクルマネジメント、維持管理計画、性能評価、劣化予測、対策

* LCM研究センター主任研究官

** 地盤・構造部構造研究領域構造・材料研究チームリーダー

*** 研究主監兼LCM研究センター長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5089 Fax：046-844-0255 e-mail:katohe@pari.go.jp

Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf

Ema KATO*

Mitsuyasu IWANAMI**

Hiroshi YOKOTA***

Synopsis

The authors have proposed a strategic maintenance method of port facilities based on the life-cycle management (LCM) concept. The overall concept of the LCM and its individual philosophies and perspectives have been distributed through publishing the manuals on maintenance technology for port facilities, etc. The individual components and methodologies in the LCM system, regarding inspection, assessment, prediction, and planning of interventions and their timings, have been established by the authors' previous research. However, those individual components have not been systematically united as a life cycle management system. In this report, the LCM system for an open-type wharf with steel piles was developed by uniting the individual components, such as performance assessment based on the inspection, performance prediction based on the inspection, and planning interventions based on inspection and prediction. Moreover, the definition of the limit of deterioration grade based on the designed maintenance level and an idea for deriving a representative deterioration grade in a structure were expressly proposed. In addition, the computer-based program to formulate a maintenance plan for an open-type wharf based on the LCM system was developed to distribute the concept of LCM system. The authors expect that rational and effective maintenance would be realized by results of this research and subsequently the life-cycle cost reduction and performance maximization can be attained.

Key Words: Open-type wharf, life-cycle management, maintenance plan, performance assessment, performance prediction, intervention

* Senior Researcher, Life Cycle Management Research Center for Coastal Infrastructures

** Head of Structural Mechanics and Materials Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Executive Researcher and Director of Life Cycle Management Research Center for Coastal Infrastructures
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5089 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:katoh-e@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. 研究の背景と目的	7
2. LCMに基づく港湾施設の維持管理の流れ	8
3. 栈橋のLCMシステムの構築	9
3.1 検討項目	9
3.2 維持管理レベルと維持管理上の性能限界の検討	9
4. 点検診断に基づいた保有性能評価	11
4.1 点検診断種別と保有性能の評価レベルについて	11
4.2 上部工の点検診断に基づいた保有性能評価	11
4.3 下部工の点検診断に基づいた保有性能評価	12
4.4 部材の保有性能の代表値に関する検討	13
5. 点検診断に基づいた保有性能の将来予測	14
5.1 上部工の点検診断に基づいた保有性能の将来予測	14
5.2 下部工の点検診断に基づいた保有性能の将来予測	16
6. 対策工と対策の実施時期の選定	17
6.1 対策工と対策の実施時期の選定の原則	17
6.2 上部工の補修工法と補修実施時期の選定	17
6.3 下部工の補修工法と補修実施時期の選定	19
7. 維持管理計画策定支援プログラムの開発	19
7.1 維持管理計画の策定	19
7.2 維持管理計画策定支援プログラムの目的	21
7.3 プログラムの構成	21
8. まとめおよび今後の課題	22
謝 辞	22
参考文献	22
付 録	24

1. 研究の背景および目的

港湾施設は、他の社会基盤施設と比較して、一般的に厳しい自然環境下に置かれることから、材料の劣化、部材の損傷等の変状により、供用期間中に性能の低下が生じることが多い。従来の維持管理では、変状が顕在化し性能低下が顕著となった後に補修や更新等の対策を講じる、いわゆる事後保全の対処が一般的であった。また、これまでは港湾施設に要求される機能向上のスピードが変状に伴う性能低下のスピードを上回っていたために、変状が顕在化する以前に、機能向上のために施設の更新が行われていることが多く、変状への対策が戦略的に行われていなかった。しかし、今後、限られた投資の中で、港湾施設を所要の期間にわたって供用し有効に活用していくためには、施設が有すべき機能や性能が要求水準を満たすよう、適切に維持管理が実施されなければならない。

港湾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になった。維持管理計画は、対象とする施設全体および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くものである。つまり、港湾施設の性能の確保を当初設計と供用中の維持管理の両輪で達成することになる。これを受けて、施設の維持管理計画書の作成や維持管理業務の技術的支援を目的として、港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き¹⁾²⁾や港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾が刊行されている。このような港湾施設の維持管理に関する施策や技術の普及は、合理的かつ効果的な維持管理をより推進していくものと考えられる。

近年、土木構造物の建設・点検・維持管理・更新を含めて、その費用や便益を総合的に評価する方法論として、社会基盤構造物のアセットマネジメント（AM）という概念が注目されるようになってきた⁴⁾。社会基盤構造物のAMは、一般に、図-1⁵⁾に示すように点検・対策、構造物（資産）マネジメント、資産会計マネジメントの3項目により構成され、構造物を資産として捉えた社会経済的な観点からの検討がなされる。AMは、橋梁および道路等の分野において徐々に導入が検討されており、青森県における予算平準化重視型や山口県における住民重視型などに代表されるよう、管理者毎にそれぞれ目的に

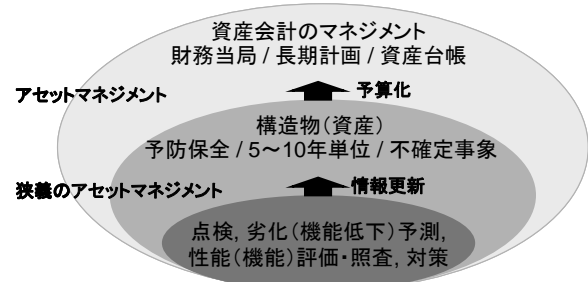


図-1 社会基盤構造物のAMの基本概念

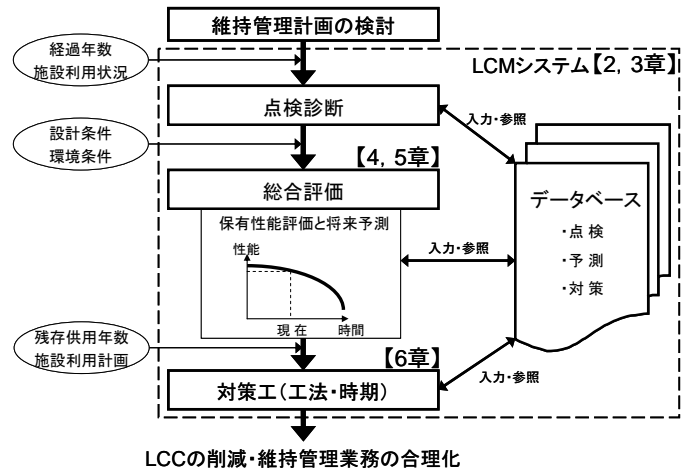


図-2 LCM の概念に基づく維持管理の流れ

応じた取組みがなされている⁴⁾。しかし、ライフサイクルコスト以外の指標による投資判断や意志決定の事例は種々考えられているものの、現状では多くないようである。なお、ここでいうライフサイクルコストは、(a) 計画・設計・施工に関する初期費用、光熱費や補修・補強・更新に伴う維持管理費用、供用後の処理費用に加え、(b) 期せずして発生する事故や災害による損失なども考慮される。(a) は支出がほぼ確実な費用であり、(b) は確率的事象による損失、いわゆるリスクを金銭に換算したものである⁴⁾。

著者らは、港湾施設の上記 (a) に関するライフサイクルコストを最適化することで、効率的な維持管理を達成するための手法、すなわち、ライフサイクルマネジメント（LCM）の概念に基づく維持管理を提案している（図-2）^{3),6)}。LCMは、港湾施設・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を予測し、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ための一手法と定義できる。著者らは、これまで、維持管理の技術資料^{1)~3)}への掲載などを通して港湾施設のLCMの一連の流れと考え方について普及を図って

きた。また、点検診断、総合評価、対策の方法、それらに関するデータベースなど、LCMの個々の要素技術については、数々の研究・調査により有益な知見が蓄積されている。しかし、システム概念やシステム中の個々の要素技術は確立されているものの、これまで LCM システムとして個々の要素技術を結びつけ体系的にとりまとめたものはない。

本研究では、栈橋を対象として、これまで LCM システムの要素技術として蓄積した知見を体系的に取りまとめるとともに、個々の要素技術を結びつけるための手法を提案した。具体的には、点検診断に基づいた保有性能評価と将来予測手法、対策工および実施時期の選定手法、また、構造物の維持管理レベルに応じた性能低下度の限界値の設定などである。さらに、LCMの具現化と普及を目的として、栈橋の維持管理計画の策定を支援するためのプログラムを開発した。本稿では、これらについて述べる。

2. LCMに基づく港湾施設の維持管理の流れ

LCMに基づく維持管理は、現況を統一的な基準に基づいて把握する点検診断、点検診断から判断される構造物あるいは部材の保有性能評価と将来の性能低下予測、また、これらに加えて将来の利用計画やライフサイクルコスト等を制約条件として行う総合評価、その結果に基づいて必要に応じて実施する対策工という流れで構成される(図-2)³⁾。

合理的な維持管理には、部材の性能に及ぼす影響が大きく、かつ、点検の対象としやすい損傷、劣化等の変状を主要な変状として選定し、点検診断の対象とすることが有効である。点検診断は、日常の巡回で点検可能な箇所を対象とする日常点検、部材の性能の把握を目的として変状の有無や程度の点検を行う定期点検診断などに分類される³⁾。

総合評価においては、まず、各部材・部位の点検診断結果を総括し、施設全体としてどのような損傷、劣化等の変状が発生あるいは進展するのかを整理し、現在および将来の施設の性能低下度を評価することが求められる。将来の施設の性能低下度は、各部位・部材の損傷、劣化等の発生により評価されるため、各部位・部材の劣化・変状予測を行うことが望ましい。これに加えて、施設の利用計画、残存供用年数、重要度、財政上および将来の維持管理上の制約などを考慮し、必要に応じて実施すべき対策工の方法および実施時期を検討する。

総合評価の結果から対策工の実施計画が策定されるが、

表-1 部材の維持管理レベル

維持管理レベル	部材の劣化予測に基づく維持管理レベルの考え方
レベル I (事前対策型)	設計時点における部材の劣化予測において、設計供用期間中に、構造物・部材の性能に影響を及ぼす劣化・変状が軽微な状態であること(維持管理上の限界状態に達しないこと)を確認(照査)した構造物・部材に対する維持管理レベル。
レベル II (予防保全型)	設計時点における部材の劣化予測において、設計供用期間中に、構造物・部材の性能に影響を及ぼす劣化・変状の発生(維持管理上の限界状態)が予測されるが、維持管理段階において予防保全的な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、維持管理上の限界状態に至る前に維持補修が行えるよう配慮された構造物・部材に対する維持管理レベル。
レベル III (事後保全型)	設計時点における部材の劣化予測において、設計供用期間中に、劣化・変状の発生により構造物・部材の性能低下が予測されるが、予防保全的な対策は困難であり、構造物・部材の要求性能が満足されなくなる前に事後保全的な対策を実施することを想定した構造物・部材に対する維持管理レベル。

現在あるいは将来になんらかの対策(点検強化、保守、補強、解体・撤去など)が必要であると判断された場合には、今後の供用期間を考慮した上で、対策の実施時期を検討することが必要である。その際、技術的判断に加えて、ライフサイクルコスト、構造物の社会的影響度などを総合的に考慮して検討することが重要である。なお、ここでいうライフサイクルコストとは、初期建設費用、運用・維持管理費用、解体・撤去費用の総額を指しているが、既に建設され供用されている施設については、初期建設費用を含むことはできない。

本来であれば、全ての施設に対して高い水準の損傷・劣化対策を建設時点で施しておき、供用期間中に性能低下を生じない範囲に損傷・劣化を留めるようにしておく、すなわち、表-1の維持管理レベル I とすべきであるが、海洋環境の過酷さやコストなどの観点から、現実的ではないこともある。しかし、技術基準対象施設においては、その供用期間のいずれの時点においても、所要の性能が保持される必要がある。そのためには、表-1に示す各部位・部材に設定した維持管理レベル³⁾を実現できるよう当初設計がなされていること、また、設定した維持管理レベルに対応した各部位・部材の維持管理計画を策定し、確実に実行していくことが重要である。つまり、LCMに基づく港湾施設の維持管理は、各部位・部材の維持管理レベルを基準として成り立つものであるといえる。

3. 栈橋のLCMシステムの構築

3.1 検討事項

本研究では、波浪および海水の飛沫などの影響により、他の構造物と比較して、供用後早期に劣化・変状が発生することが懸念される栈橋を対象とする。栈橋は他の構造物に比べ、構造体自身の変状（波浪による移動、傾斜、地盤の圧密現象による不同沈下など）よりも、部材の劣化が構造物の性能に与える影響が大きい。また、コンクリート構造である上部工と、鋼構造である下部工の双方についての検討が必要であり、今回の検討結果を他の構造形式へ展開できる可能性が高いと考えられる。

本章では、これまで LCM システムの要素技術として蓄積された知見を体系的に取りまとめるとともに、個々の要素技術を結びつける手法を構築した。具体的には、上部工および下部工の点検診断に基づいた保有性能評価（4.）と将来予測（5.）、また、これらをふまえた対策工および実施時期の選定手法（6.）である（図-2 参照）。なお、点検診断の方法、調査技術、劣化予測の方法など、既に開発済みである要素技術の詳細については、港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾に掲載されている。

ここで、2. で述べたとおり、LCM に基づく港湾施設の維持管理は、各部位・部材の維持管理レベルを基準として成り立つものである。そこで、まず、部材の維持管理レベルと性能低下の関係について 3.2 で検討する。

3.2 維持管理レベルと維持管理上の性能限界の検討

LCM に基づく維持管理では、部材の維持管理レベルを適切に定め、劣化予測により、部材の性能低下度が維持管理上の限界値を供用期間中に下回ることのないよう、また、下回ると予測された場合には適切な対策工とその実施時期を選定することが基本となる³⁾。しかし、維持管理レベルに応じた性能低下の限界値、また、そのときの部材の性能低下履歴については、これまで概念図として示されているのみである。

部材の性能低下の程度に関しては、コンクリート、鋼材、防食などの構成材料の劣化による耐久性の低下や、コンクリートおよび鋼材の劣化による構造性能の低下などについて、既往の研究により様々な知見が得られている。しかし、これらの性能低下を定量化するにあたっては、専門知識を要する詳細な調査と、場合によっては調査結果の技術的な判断が要求される。このため、現状では、部材の外観上の劣化・変状による不具合を劣化度として表し、これを部材の性能の代替値として用いるのが一般的である。

表-2 劣化度の判定基準

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 栈橋上部工 RC 床版（下面部）の劣化度判定基準

劣化度	判定基準
a	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50% 以上ある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。
b	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50% 未満である。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。
c	<input type="checkbox"/> 一方方向のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル吐出析出物がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。
d	<input type="checkbox"/> 変状なし。

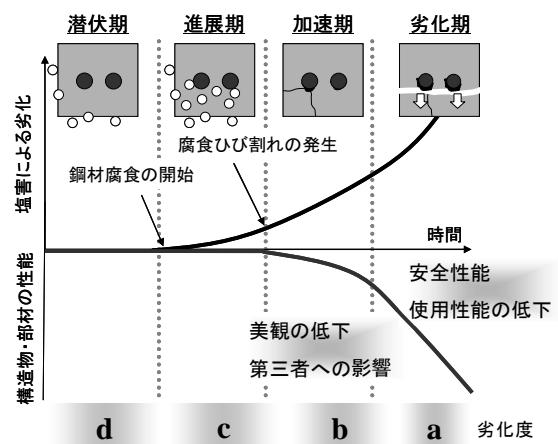
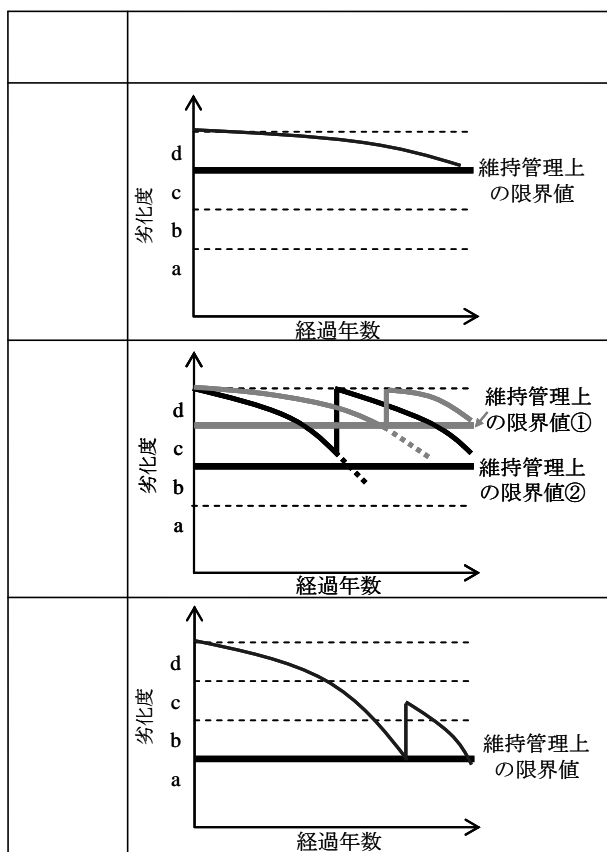
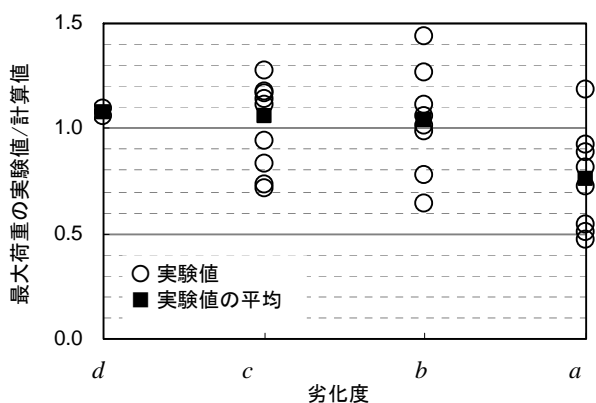


図-3 栈橋上部工の劣化状態・保有性能と劣化度の関係

本研究では、港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾に示される a~d の 4 段階の劣化度を部材の性能を表す指標として用いる。このマニュアルでは、表-2 に示す基本方針に基づいて、部材・部位毎に点検診断で着目すべき項目と劣化度の判定基準を示している。参考として、表-3 に栈橋上部工の RC 床版（下面部）の劣化度判定基準を、図-3 に同書に概念として示されている栈橋上部工の劣化状態・保有性能と劣化度の関係を示す。

部材の外観上の不具合をできるだけ性能に結びつけるための試みとして、著者らは既存の栈橋上部工床版部から切り出した RC 部材の劣化度と耐荷力比の関係について調査を行った⁷⁾。ここで、耐荷力比とは、実験で得られた最大荷重の実測値と、はりの曲げ理論により求めた最大荷重の計算値の比である。図-4 に床版から切り出



した RC 部材の目視による劣化度と耐荷力比の関係を示す。劣化度と耐荷力比の関係にはかなりばらつきが見られ、劣化度 c ～a と判定された部材において、耐荷力比が 1.0 以下となるものが存在した。この結果から、安全側の判断としては、外観に劣化・変状が認められる RC 部材の耐荷力は、初期値を下回る可能性があるといえる。

ここで、表-1 に示す部材の維持管理レベルの考え方によれば、維持管理レベル I (予防保全型) は、設計供

用期間中に部材の性能に影響を及ぼす劣化・変状が軽微な状態であることが条件となる。つまり、図-4 の劣化度と耐荷力比の関係に基づけば、供用期間を通じて、補修・補強等の対策を施すことなく劣化度 d の状態が維持されることが、維持管理レベル I と設定された部材の維持管理上の制約条件となるべきである。

また、図-4 において、劣化度 a と判定された RC 部材の耐荷力比は 1.0 を下回る可能性が極めて高く、0.5 程度の耐荷力比を示すケースも見られた。RC 部材の耐荷力は、部材の使用性や安全性に密接に関係するものである。部材の使用性や安全性などの要求性能について、その限界値をどのように設定するかについては、実際は、その部材の構造上の重要度や、施設の重要度等により異なる。しかし、図-4 に示される劣化度 a 以降の急激な劣化速度の増加と部材性能の低下を考慮すれば、要求性能が満足されなくなる前に事後保全的な対策を実施することが要求される部材、つまり維持管理レベル III (事後保全型) と設定された部材では、劣化度 a に至らないことが維持管理計画上の制約条件となる。

維持管理レベル II (事前対策型) では、部材の劣化・変状の発生を許容するが、部材の要求性能に対して予防保全的な対策を実施することが求められる。このため、前述の維持管理レベル I および III での考え方も考慮すると、構造物および部材の状況に応じて、劣化度 b または劣化度 c に至らないことが維持管理上の制約条件となる。

以上の検討から、本研究では 3 段階の維持管理レベルに応じた部材の性能履歴と維持管理上の限界値を表-4 のように設定する。

港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾に示される点検項目と劣化度は、全ての部位・部材に対して表-2 の劣化度の基本方針に則って示されていることから、本研究では、表-4 に示す維持管理レベルと部材の性能の関係を、検討対象とする全ての部材に適用する。なお、本来であれば、RC 部材の劣化による構造性能低下から検討した維持管理上の限界値を、鋼管杭や各種防食で構成される下部工に適用すべきではなく、別途、構造部材・部位毎に維持管理上の限界値を検討すべきと考えられるが、これについては今後、明らかにしていかなければならない。

この定義に基づけば、技術基準対象施設では、栈橋の上部工は維持管理レベル I ～ III、下部工本体 (鋼管杭) は維持管理レベル I、防食は維持管理レベル I ～ III のいずれかから選定することとなる。ここで、鋼管杭を維持管理レベル I のみとしているのは、栈橋の構造体としての状況や、点検診断、維持補修のための対策実施の難易

度などを考慮すれば、鋼管杭の腐食による性能低下は施設の使用性や安全性の喪失に直ちに結びつくものであり、性能低下が顕著でない間に、防食の適用などにより何らかの防食対策を施すことが施設の安全上や経済性からも妥当と考えられるためである。

なお、維持管理計画の策定上は、維持管理レベルⅠについては、劣化度 c に至らないことを、維持管理レベルⅡについては、劣化度 c あるいは劣化度 b に至らないことを、維持管理レベルⅢについては、劣化度 a に至らないことを維持管理上の限界値としている。しかし、実際の部材・部位の維持管理にあたっては、維持管理上の限界値である劣化度に達してから間もない期間であれば、対策を施すことも可能である。

4. 点検診断に基づいた保有性能評価

4.1 点検診断種別と保有性能の評価レベルについて

点検診断に基づいた保有性能の評価方法とその評価レベル（精度）は、対象とする部材の点検診断の種別により大きく異なる。港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾では、目視・簡易計測により実施するものを一般点検診断、機器等を用いた高度な方法によるものを、また一般点検診断では対応できなかった部材に対するものを詳細点検診断と位置付けている。一般点検診断では、点検対象とする部位・部材にどのような劣化・変状が生じているかに着目した目視調査を行い、表-2 に示す基本方針に基づいて劣化度を判定する。また、詳細点検診断では、一般点検診断で対応できなかった部位・部材の一部について劣化度を判定するが、主として、機器等を用いた調査により得られた数値データを、部材の劣化度判定の根拠とする。

また、新規に建設された栈橋や、経過年数が数年程度の栈橋については、一般・詳細点検診断結果を保有している場合は少なく、また保有していたとしても、以降の劣化予測を精度よく行えるようなデータが得られない可能性がある。この場合、部材の設計データ等を用いることにより、以降の劣化予測、対策選定に関して検討することが可能となる。

以降では、栈橋上部工および下部工の一般および詳細点検診断に基づいた保有性能評価について述べる。

4.2 上部工の点検診断に基づいた保有性能評価

コンクリート構造である栈橋上部工は、通常、塩化物イオン等の劣化因子が容易に供給される苛酷な塩害環境に曝されている。塩害は、コンクリート中の鉄筋の腐食

が塩化物イオンの存在により開始され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を生じさせたり、鉄筋の断面減少を引き起こすことにより構造物の構造性能を低下させるものである。前述のとおり、本研究では表-2 に示す劣化度を部材の性能を表す指標として用いる。そのため、上部工の点検診断に基づいた保有性能評価にあたっては、上記の塩害による劣化の進行過程の中で、各部材（はりおよび床版）が現在どの過程に位置しているのか判断し、それぞれの劣化度を定めることが必要となる。

上部工の点検診断に基づいた保有性能評価の方法について、以降に、一般点検診断による場合と詳細点検診断による場合に分けて記述する。

(1) 一般点検診断による保有性能評価

一般点検診断は個々の部材について行う必要があり、各部材の点検診断結果から劣化度を判定することを保有性能評価とする。上部工の劣化度の判定基準を付録 A に示す。部材の劣化の進行過程と劣化度の関係は図-3 に示したとおりである。なお、床版およびはり等の各部材を代表する保有性能の評価方法については、4.4 で述べる。

(2) 詳細点検診断による保有性能評価

塩害による劣化進行過程を考慮した場合、詳細点検診断における主要な調査項目は、鉄筋周囲のコンクリート中の塩化物イオン濃度と、鉄筋の電気化学的特性値（自然電位および分極抵抗）の測定である。また、鉄筋位置を確認するための調査（特に、かぶり厚さの調査）も重要である。実際の調査にあたっては、基本情報としてコンクリートの強度測定などを行うことも考えられるが、ここでは塩害による劣化に限定した調査およびその評価についてのみ記述する。

なお、本研究では、部材の性能指標として劣化度を用いている関係上、詳細点検診断結果から劣化度を定める方法を検討した。しかし、実際、詳細点検診断は一般点検診断では見ることのできなかった部位・部材の状態の確認のほか、劣化・変状の原因推定や劣化進行予測を行うためのデータ収集を目的として行われるものである。詳細点検診断の結果は、調査項目に応じて部位・部材毎に測定値を記録し、それぞれ適した整理を行うことが必要である³⁾。

a) 鉄筋位置のコンクリート中の塩化物イオン濃度

図-3 によれば、劣化度 d の終了時期は鉄筋腐食の開始時期となる。鉄筋腐食の開始は、鉄筋位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度が、腐食発生限界塩化物イオン濃度を超過しているか否かで判定される。ここ

で、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、一般に $1.2 \sim 2.4 \text{ kg/m}^3$ という知見がある。港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾では 2.0 kg/m^3 を、コンクリート標準示方書[維持管理編]⁹⁾では 1.2 kg/m^3 を提示しており、港湾 RC 構造物では前者が、その他の環境における RC 構造物では後者が判定の基準値として用いられていることが多い。しかし、これは設計時における部材の耐久性の照査に用いる値として提示されているものであり、実際の腐食発生限界塩化物イオン濃度は、コンクリートの品質、かぶり、暴露環境等の様々な要因に影響を受けることとなる。したがって、腐食発生限界塩化物イオン濃度は上記の影響要因を考慮して適切に設定することが重要である。

また、既往の研究¹⁰⁾によれば、上部工コンクリート中の塩化物イオンの侵入は、海水の飛沫状況や波浪等による局所的な塩化物イオンの供給環境に影響を受けやすい。同一部材から採取したコアを比較した結果、鉄筋位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度は、2 倍以上異なる場合もあった¹⁰⁾。このため、塩化物イオン濃度による腐食開始時期の判定に基づいた性能評価の際は、部材内の塩化物イオン濃度のばらつきに留意する必要がある。

b) 自然電位および分極抵抗の測定

自然電位および分極抵抗は、非破壊試験の一種であり、部材に損傷を与えることなく、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を客観的に評価するために、有効な点検診断手法である。

自然電位の測定は、測定箇所の鉄筋の腐食が活性状態であるか否かの推定のために行われる。同一部材内であればどの部位が、同一環境下であれば各部材の測定値の比較により、どの部材の鉄筋腐食が最も進行している可能性があるかを推定することも可能である。しかし、コンクリートに腐食ひび割れが生じるまでが自然電位測定の適用時期であることを考慮すれば、自然電位による部材の評価は、劣化度が d であるか否かの判断のみとなる。このため、自然電位の測定だけでなく、目視調査も併用して部材の劣化度を評価する必要がある。ただし、自然電位測定値の比較により、劣化度 d の初期であるか、劣化度 d の後期であるかを評価することは可能である。また、各部材内あるいは鉄筋の自然電位を定期的にモニタリングすることにより、部材の劣化進行速度をある程度把握できる可能性もある。

分極抵抗は、測定箇所の鉄筋の腐食速度と反比例の関係にあるとされ、式(1)のように表される³⁾。

$$I_{corr} = K / R_p \quad (1)$$

ここで、 I_{corr} : 腐食電流密度 (A/cm^2)、 K : 鋼材の種類と環境条件により決定される定数 (一般に、 0.026 V)、 R_p : 分極抵抗 (Ωcm^2) である。

腐食速度を、供用開始 (あるいは、前回の測定時) から測定時までの期間で時間積分することにより、鉄筋の腐食程度を定量的に推定できる可能性がある。また、既往の研究¹¹⁾では、既存の栈橋上部工から切り出したはりおよび床版の分極抵抗と鉄筋の平均断面減少率の実測値の比較から、分極抵抗により鉄筋の腐食程度を推定できる可能性があることが示されている。

既往の研究¹²⁾では、港湾構造物の維持・補修マニュアル¹³⁾に示される 6 段階の劣化度 (0 ~ V) と、これに対応する鉄筋の腐食による平均断面減少率の関係を示している。6 段階の劣化度を、図-3 の劣化進行過程にしたがって劣化度 a ~ d の 4 段階に読み代えると、劣化度 c (劣化度 d 終了時) と判定されるのが鉄筋の平均断面減少率 1.0 % 時、劣化度 b (劣化度 c 終了時) と判定されるのが平均断面減少率 5.0 % 時となる。したがって、この指標を参考として、分極抵抗から部材の劣化度を評価することができる。

ただし、既往の研究¹⁴⁾によれば、自然電位の測定値には主としてコンクリートの含水率が、分極抵抗の測定値には主として環境温度が影響を及ぼすとされている。また、これらの影響の程度は、コンクリートの水セメント比、コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度に影響されることが示されている。このため、自然電位および分極抵抗により劣化度を評価する際には、目視調査の結果 (一般点検診断の結果) も踏まえて、測定値とその有意性を検討する必要がある。

4.3 下部工の点検診断に基づいた保有性能評価

鋼構造である栈橋下部工は、鋼管杭が直接海水に接することによる腐食が劣化の主な要因である。下部工の点検診断については、陸上および水面上から行えるものを一般点検診断、機器等を用いる他、潜水調査を要するものを詳細点検診断として、点検項目が定められている³⁾。

鋼管杭の顕著な腐食は、一般に、L.W.L. から M.L.W.L. の付近で起こりやすい¹⁵⁾。このため、点検診断は、一つの部材 (鋼管杭) に対して、干満帯、海中部に分けて行う必要がある。前述のとおり、技術基準対象施設では下部工の防食対策を施すことが基本とされており、一般的には干満帯には被覆防食が、海中部には電気防食が用いられている。したがって、鋼材、被覆防食、電気防食のそれぞれの点検診断から劣化度を判定し、保有性能評価を行う必要がある。そこで、鋼管杭、被覆防食、電気防

食に分けて、それぞれの保有性能評価の方法について記述する。なお、各部材を代表する保有性能の求め方については、4.4で述べる。

(1) 鋼材の点検診断による保有性能評価

一般点検診断では、水面上から鋼材の穴あきの有無、水面上の鋼材の腐食の目視調査から、付録A.に示す判定基準にしたがって各部材の劣化度を判定する。詳細点検診断については、潜水調査により、海中部の上記の事項について劣化度を判定する。なお、孔食が発見され劣化度bおよびaと判定された際には、鋼材の肉厚測定を行い、場合によっては鋼材の残存耐力から施設自体の安全性を評価する¹⁰など、速やかな対応が必要となる。

(2) 被覆防食の点検診断による保有性能評価

被覆防食では、塗装およびその他の被覆方法により点検診断項目が異なる。一般点検診断では水面上からの目視調査により、詳細点検診断では潜水調査により、付録A.に示す判定基準にしたがって各部材の劣化度を判定する。

(3) 電気防食の点検診断による保有性能評価

電気防食では、一般点検診断の場合、鋼材の電位を計測して防食管理電位と比較することにより劣化度を評価する。防食管理電位が維持されている場合は劣化度d、維持されていない場合は劣化度aと判定される。また、特に、流電陽極方式の場合については、詳細点検診断で行う潜水調査により陽極の取付け状況を確認し、陽極全数の3~5%の陽極について消耗量調査を行う。

4.4 部材の保有性能の代表値に関する検討

港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾では、栈橋の評価単位(上部工1スパン)を構成する全ての部材の一般点検診断結果を総合して、表-5に示す施設の性能低下度(A~D)を評価することが標準とされている。しかし、実際、一定のルールによって劣化度の代表値を導き出すことは極めて困難であり、同マニュアルにおいても、性能低下度の導出方法の試案が示されているのみである。そこで、施設の性能低下度導出の一助とすることを目的として、前節までに述べた部材毎の劣化度から、1評価単位当たりの上部工および下部工の部材の劣化度の代表値を定める方法について検討した。

同マニュアルでは、施設の安全性に及ぼす影響に基づいて、点検項目が表-6のように分類されている。これに基づけば、下部工の鋼材腐食・亀裂・損傷はI類、下部工の防食および上部工(下面)の劣化・損傷はII類に分類される。部材の劣化度の代表値を定めるにあたっては、部材の劣化・損傷が施設の安全性に及ぼす影響を考

表-5 評価結果の分類

性能低下度	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	施設の性能に関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	異常は認められず、十分な性能を保持している状態

表-6 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。

慮し、点検項目の分類毎にその方法を定めることが適切であると考えられる。したがって、本研究では、これまで収集した国有港湾施設の点検診断結果の分析、および技術的・工学的判断に基づいて、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について以下のとおり提案する。

I類の点検項目に対する劣化度の代表値

- 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

※ただし、維持管理上の限界値を劣化度bに至る以前とした場合

- 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 $\geq 70\%$

本研究では、劣化度a~dを部材の保有性能を表す指標として用いているが、劣化度判定の根拠となる部材の劣化・変状については、栈橋の設置環境、構造諸元等に左右されることが考えられる。したがって、本研究で提案した劣化度の代表値の導出方法については、今後の点検診断データの蓄積による検証が必要である。

5. 点検診断に基づいた保有性能の将来予測

5.1 上部工の点検診断に基づいた保有性能の将来予測

上部工の点検診断に基づいた保有性能の将来予測では、はりおよび床版のそれぞれについて、部材の劣化度の進行予測を行う。また、詳細点検診断データを有している場合については、鉄筋の腐食開始時期の予測や、腐食進行予測を行うことにより、高い精度で劣化度の将来予測を行うことが可能となる。したがって、ここでは、一般点検診断に基づいた各部材の劣化度の将来予測の方法と、詳細点検診断に基づいた塩害による劣化進行の予測方法について記述する。

さらに、新規に建設される栈橋の劣化予測を行う場合や、点検診断結果を有していない場合への対応を考慮し、上部工の設計データを用いた将来予測の方法についても述べる。

(1) 一般点検診断に基づいた将来予測の方法

上部工のはりおよび床版の各部材の劣化度から、劣化度分布の将来予測を行う場合、マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測が有効になることが多い³⁾。マルコフ連鎖は、「状態」と「推移」という2つの概念を用いて、物事がある「状態」から、ある「遷移率 p_x 」で次の「状態」へと移行する様子を確率論的に捉える統計手法である。初期状態として、すべての部材が劣化度 d であると仮定すると、部材の劣化過程は式(2)のように表される。

$$\begin{pmatrix} d \\ c \\ b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p_x & 0 & 0 & 0 \\ p_x & 1-p_x & 0 & 0 \\ 0 & p_x & 1-p_x & 0 \\ 0 & 0 & p_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 p_x ：遷移率、 t ：経過年数である。遷移率 p_x は劣化速度を表す指標と見なすことができ、進行予測を行う際は一定とみなすこととする。なお、ひとつの劣化度に対応するマルコフ連鎖モデルの状態を分割することで、劣化度の推移をより精度よく表すことが可能となる³⁾。

(2) 詳細点検診断に基づいた将来予測の方法

上部工の塩害による劣化の進行を詳細に予測するためには、鉄筋の腐食開始時期を予測するためのコンクリート中への塩化物イオンの侵入予測、鉄筋腐食の進行予測のための鉄筋腐食速度が必要である。本研究では、上部工の劣化度を予測するにあたり、劣化度 d 終了時期を鉄筋表面の塩化物イオン濃度により、劣化度 c 終了時期をひび割れ発生前後で設定された腐食速度を用いて算定される鉄筋の平均断面減少率1.0%により、劣化度 b 終了時期をひび割れ発生後の腐食速度を用いて算定される鉄

筋の平均断面減少率5.0%によりそれぞれ規定することとした¹²⁾。

a) 劣化度 d の終了時期の予測

コンクリート中の塩化物イオンの移動は拡散現象と見なせることから、フィックの第二法則として知られる式を、適切な境界条件で解いた解を用いる³⁾。式(3)は一般的に用いられているこの式の解である。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right) \quad (3)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：コンクリート表面からの深さ x (mm)、時刻 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_0 ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/year)、 erf ：誤差関数である。

式(3)を用いて鉄筋位置(かぶり)のコンクリート中の塩化物イオン濃度が、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度に達する時期、すなわち劣化度 d の終了時期を予測する。見かけの拡散係数 D_{ap} とコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 は、上部工から採取したコアのコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の測定結果に最も合致する D_{ap} と C_0 を回帰分析により算出するのが一般的である。

b) 劣化度 c および b の終了時期の予測

塩害による鉄筋の腐食は、影響要因が複雑であることや、部分的に集中して進行する場合が多い。このため、劣化度 c 以降で行う鉄筋の腐食進行予測については、困難な場合が多いのが現状である。港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾では、腐食速度の設定について、分極抵抗測定値を用いる方法、はつり調査による方法、また、既往の調査結果を用いる方法などが挙げられている。

分極抵抗測定値を用いる方法では、式(1)より求めた腐食速度の時間積分(但し、劣化度 d 終了時を初期とする)により、劣化度 c 終了時を鉄筋の平均断面減少率1.0%、劣化度 b 終了時を平均断面減少率5.0%への到達時期から予測することができる。しかし、ひび割れ発生後の腐食因子の鉄筋への到達のし易さを考慮すれば、腐食ひび割れ発生前および発生後のそれぞれについて、適切な腐食速度を設定すべきである。

はつり調査による方法では、コンクリートを局部的にはつることにより、鉄筋の腐食による径の減少をノギス等で測定する。鉄筋の断面減少分を腐食が生じている期間で除すことにより腐食速度を設定できる。劣化度の推移については、分極抵抗を用いた場合と同様に行うことができる。しかし、この方法についても、ひび割れ発生

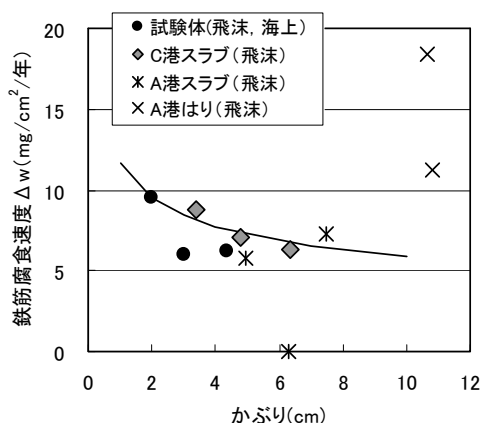


図-5 かぶりと鉄筋腐食速度の関係³⁾

前後のそれぞれについて適切な腐食速度を設定することが必要である。

既往の調査に基づく腐食速度の設定方法として、図-5に約30年供用された栈橋上部工の解体調査に基づく、コンクリートに腐食ひび割れが発生する以前のかぶりと鉄筋腐食速度の関係を示す³⁾。これより、ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度 Δw はかぶりの関数として式(4)で表すことができる。

$$\Delta w = 10.7 c^{-0.3} \quad (4)$$

ここで、 Δw ：鉄筋の腐食速度 (mg/cm²/year)、 c ：かぶり (cm) である。

劣化度 d 終了時を初期とした式(4)の時間積分により、腐食による平均断面減少率が1.0%に到達した時期から劣化度 c の終了時を決定できる。

また、前述の調査における腐食ひび割れ発生後の鉄筋の最大腐食速度を参考に、劣化度 b 以降の鉄筋の腐食速度を48.9 mg/cm²/yearと設定することとした³⁾。劣化度 c 終了時を初期値とした時間積分により、劣化度 b の終了時を平均断面減少率5.0%到達時期から決定できる。

既往の研究¹⁶⁾では、鉄筋コンクリートはりの長期曝露試験から、目視調査で劣化が認められない場合でも、鉄筋の腐食は既に発生・進行している可能性があることが確認されているが、上記の方法による劣化予測では、劣化度 d 終了時までには、鉄筋の平均断面減少率は0.0%として取り扱っている。

鉄筋の腐食開始時期と鉄筋の腐食速度は、コンクリート中への塩化物イオンの供給条件や、腐食反応に必要な水や酸素の供給条件に支配されるため、部材が位置する環境やコンクリートの品質によって異なるものとなる。しかし、前述のとおり、ひび割れ発生前後の鉄筋の腐食速度を適切に設定する技術は未だ開発されていない。上

部工の暴露環境を考慮した適切な腐食速度の設定方法については、今後のデータの蓄積により検討が必要である。

(3) 設計データを用いた将来予測の方法

ここで述べる予測方法は、新規に建設される栈橋の劣化予測を行う場合や、点検診断結果を有していないが上部工の設計データを有している場合に用いる。つまり、部材の劣化度の代表値を予測する方法となる。

港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾では、以下の式を用いて、水セメント比 W/C から拡散係数の設計値 D_d を求めてよいとしている。なお、 D_d は式(3)における D_{ap} とみなしてよい。また、構造物にひび割れが生じていない、もしくはひび割れ本数が少ない場合は、右辺第2項は省略できる。

$$D_d = \gamma_c D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 D_0 \quad (5)$$

ここで、 γ_c ：コンクリートの材料係数（一般に1.0としてよい）、 D_k ：コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm²/年)、 D_0 ：コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数。一般に200 cm²/年としてよい。 w ：ひび割れ幅 (mm)、 w_a ：ひび割れ幅の限界値 (mm)、 w/l ：ひび割れ幅とひび割れ間隔の比 ($w/l = 3(\sigma_{se} / E_s + \epsilon'_{csd})$)、 σ_{se} ：鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)、 E_s ：鉄筋のヤング係数 (N/mm²)、 ϵ'_{csd} ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である。

式(5)中のコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k は、実際に使用するコンクリートが分かっている場合には、そのコンクリートから作製した供試体による実験により定め、そうでない場合には、下式を用いて定めることができる。

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p \quad (6)$$

普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (7)$$

高炉セメントやシリカフェームを使用する場合

$$\log D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (8)$$

ここで、 α ：換算係数で、普通ポルトランドセメントを使用する場合は一般に0.65、高炉セメントやシリカフェームを使用する場合は一般に1.0としてよい。 γ_p ： D_p の精度に関する安全係数で、一般に1.0としてよい。 D_p ：コンクリートの拡散係数の予測値 (cm²/year) である。

また、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾では、以

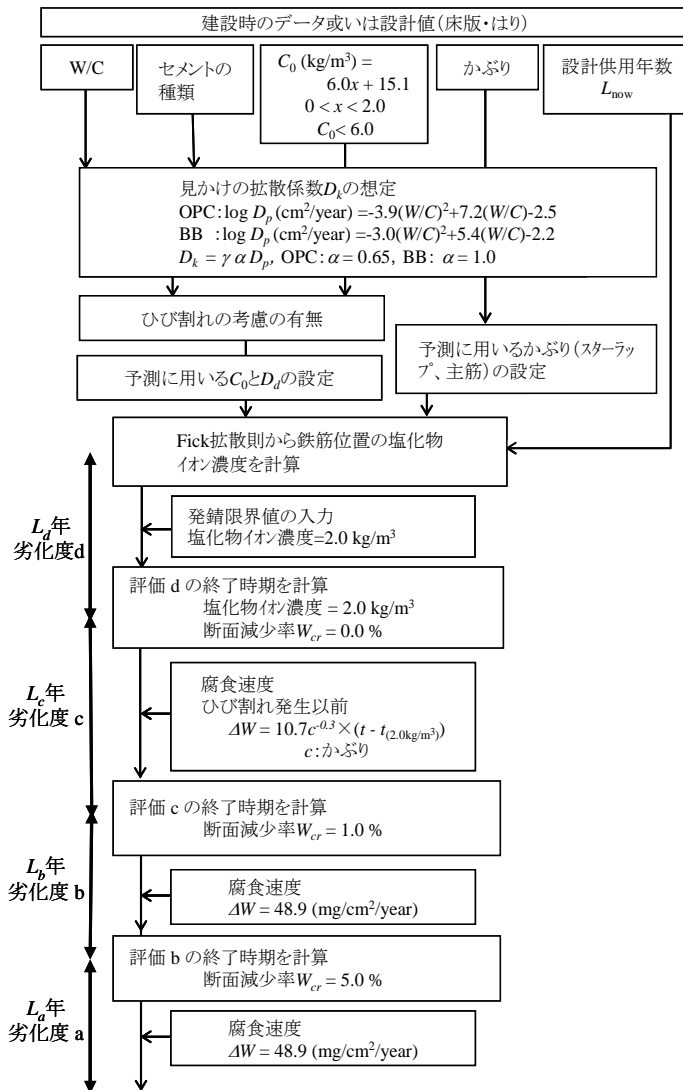


図-6 上部工の劣化予測フロー

下の式を用いてコンクリート表面での塩化物イオン濃度 C_0 を求めてよいとしている。なお、この式は多数の栈橋上部工における調査結果に基づいた平均的な関係である。

$$C_0 = 6.0x + 15.1 \quad (9)$$

ここに、 x : H.W.L.からコンクリート表面までの距離 (m) である。ただし、 x の適用範囲は $0.0 \leq x \leq 2.0$ 程度とし、 C_0 の値は 6.0 kg/m^3 を下回らないものとする。

以上の方法により求めた見かけの拡散係数 D_a とコンクリート表面における塩化物イオン濃度を式(3)に当てはめ、鉄筋位置のコンクリートが腐食発生限界塩化物イオン濃度に達する時期を求めることにより、劣化度 d の終了時期を予測できる。

劣化度 c および b の終了時期の予測については、前述のとおり、鉄筋の腐食速度を適切に設定する技術が開発

表-7 鋼材の腐食速度の標準値

腐食環境	腐食速度 (mm/year)
H.W.L. 以上	0.3
H.W.L. ~ L.W.L.-1.0	0.1~0.3
海中部	0.1~0.2
海底土中部	0.03

されていない。現段階では、塩害による劣化進行の詳細な予測方法で示した、既往の調査に基づく腐食速度の設定方法を適用することが妥当であると考えられる。

上部工の劣化予測の流れは、図-6 のようにまとめられる。

5.2 下部工の点検診断に基づいた保有性能の将来予測

下部工の点検診断に基づいた保有性能の将来予測では、鋼材、被覆防食、電気防食のそれぞれについて劣化度の進行予測を行う。

鋼材および被覆防食の一般点検診断により判定された劣化度に関しては、5.1 で述べたマルコフ連鎖による各部材の劣化度の将来予測を行うことが効率的である。

詳細点検診断により鋼材の残存肉厚データを有している場合については、鋼材の肉厚減少予測を行う。調査データがない場合については、既往のマニュアル¹³⁾にしたがって、環境別に表-7 の値を用いて予測することもできる。ただし、鋼材に集中腐食が発生している場合には、この値を大きく上回るため、腐食速度の設定にあたっては注意が必要である。現在、技術基準対象施設については防食を施すことが基本となっているため、今後、肉厚測定による保有性能評価および性能低下予測の機会は減少していくことが予測される。

詳細点検診断により、電気防食の陽極消耗量データを有している場合は、陽極交換時期の決定のための陽極の消耗量予測を行う。陽極の年間平均消耗速度は、陽極初期質量と残存量の差を、陽極の経過年数（構造物の供用年数ではない）で除すことにより求められる。陽極の消耗速度は、部材が置かれている環境が供用中に変化した場合、設計時とは異なる可能性があることに留意が必要である。各部材の劣化度は、防食効果が有効である期間、つまり、陽極が残存している期間を劣化度 d とし、陽極の完全消耗後を劣化度 a と表すことができる。

被覆防食の劣化進行のメカニズムに関しては、現状では明確になっていない場合がほとんどである。使用した被覆防食の種類・材料により、防食効果の消失を防止す

の意味で、メーカから耐用年数が提示されている。したがって、現状では、将来の性能予測による方法ではなく、提示された耐用年数に達した時点で被覆防食を更新するという管理方法が主流である。

6. 対策工と対策の実施時期の選定

6.1 対策工と実施時期の選定の原則

対策工の選定とその実施時期は、供用期間中の各部材の性能が、維持管理レベルに応じて設定された維持管理上の限界値を下回ることのないよう、部材の性能の将来予測に基づいて計画・実施されるべきである。また、このとき、施設のライフサイクルコストを低減できるような対策とその実施時期を選定することが重要である。施設に対する対策には、補修、補強、経過観察、供用制限など多種多様なものが含まれるが、本研究では、部材の性能や耐久性を当初レベルまで回復することを目的として実施される補修のみを対象とした³⁾。

補修による対策は、劣化予測の結果、対象とする部材が表-4で示した維持管理上の限界値である劣化度を越えない時期に、適切な工法で行うことが必要である。ここでいう適切な工法とは、部材の残存供用期間の性能を確保しながら、ライフサイクルコストが適切であるような工法という意味である。部材の劣化が進行していない場合は、劣化度 d である間に予防保全的な対策を施すことにより、ライフサイクルコストを低減できる可能性がある。また、特に、劣化が進行した上部工については、劣化度 b の期間よりも、劣化度 c の期間に補修を実施する方が、補修する部材の数量や、劣化度に応じた補修工法にかかる技術的費用の観点から、総補修費用は小さくなるという意見が一般的である。劣化の進行のばらつきを考慮すれば、上下部工中の部材のひとつひとつに対して、適切な補修実施時期がそれぞれ存在することが考えられる。しかし、本研究では、栈橋上下部工の各部材に対して総合的なライフサイクルマネジメントを実施する観点から、上部工または下部工の1評価単位(上部工1スパン)の部材の劣化度の代表値が、維持管理上の限界値を下回る以前を補修の実施時期として、それぞれの部材の劣化度に応じた補修工法を検討した。

点検診断時に維持管理上の限界値を越えている部材については、可能な限り早期に対策を実施することが望ましいが、場合によっては、設定した維持管理レベル自体を見直すことが必要となる。

次節より、上部工および下部工の補修工法と実施時期の選定について述べる。

表-8 部材の劣化度と適用する対策工

実施期間				適用する工法
d	c	b	a	
■				表面被覆, ひび割れ注入
	■			断面修復, 脱塩(表面被覆を併用), 電気防食
			■	撤去・更新

表-9 主な補修工法別の適用範囲(各部材)

主な工法	適用工法	各劣化度の部材への適用範囲			
		d	c	b	a
表面被覆	表面被覆 (%)	100	100	100	100
	大断面修復 (%)	0	0	70	100
	小断面修復 (%)	0	5	30	0
	ひび割れ注入 (m/m ²)	0.05	0	0	0
断面修復	表面被覆 (%)	70	100	100	100
	大断面修復 (%)	0	50	70	100
	小断面修復 (%)	70	50	30	0
	ひび割れ注入 (m/m ²)	0.05	0	0	0
電気防食	電気防食	100	100	100	30
	大断面修復 (%)	0	0	70	100
	小断面修復 (%)	0	5	30	0
	ひび割れ注入 (m/m ²)	0.05	0	0	0
脱塩	脱塩	100	100	50	30
	表面被覆 (%)	100	100	100	100
	大断面修復 (%)	0	0	70	100
	小断面修復 (%)	0	5	30	0
	ひび割れ注入 (m/m ²)	0.05	0	0	0
撤去/更新	撤去・更新	100	100	100	100

*各劣化度の部材総数に対する適用割合として表示(ひび割れ注入以外)

*ひび割れ注入は、各劣化度の部材総面積に対する割合として表示

6.2 上部工の補修工法と補修実施時期の選定

(1) 点検診断結果を有する場合

既往の研究¹²⁾では、栈橋上部工の劣化度毎の代表的な補修工法、工法の概算費用、工法の耐用年数等について、ヒアリングおよび施工事例に基づいた設定がなされている。本研究では、これらの各項目について見直しを行うとともに、補修工法の適用時期と適用範囲については、上部工の劣化予測から得られる各部材の劣化度を基準として選定する。

各劣化度において適用する補修工法と適用範囲を、港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾、栈橋上部工の補修実績のヒアリングをもとに、表-8および表-9のようにまとめた。なお、表-9における大断面修復は、はつり深さ100mm程度、小断面修復ははつり深さ50mm程度の断面修復工法を示す。例えば、部材の劣化度の代表値が劣化度cである場合でも、各部材に着目すれば、劣化度d~aまで様々な部材が存在する。このため、劣化度の代表値が劣化度cである上部工の主な補修工法として断面修復を選定する場合は、劣化度cを示した部材の50%に対して小断面修復を、残り50%に対して大断面修

表-10 事前対策とその効果

対策	効果
コンクリートの W/C の低減	コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数の低減
かぶりの増加	鉄筋表面への塩化物イオン到達時期の遅延
高強度高耐久パネル(型枠)の設置	コンクリート中への塩化物イオンの侵入の抑制
エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用	鉄筋の高耐久化
電気防食工法の適用	鉄筋の防食

表-11 主な補修工法別の適用範囲(代表値)

主な工法	適用工法	劣化度の代表値毎の適用範囲(%)				
		d	d-c	c-b	b-a	a
表面被覆	表面被覆(%)	100	-	-	-	-
	大断面修復(%)	0	-	-	-	-
	小断面修復(%)	0	-	-	-	-
	ひび割れ注入(m/m ²)	0.05	-	-	-	-
断面修復	表面被覆(%)	-	50	75	100	-
	大断面修復(%)	-	20	67.5	95	-
	小断面修復(%)	-	30	7.5	5	-
	ひび割れ注入(m/m ²)	-	0	0	0	-
電気防食	電気防食	-	70	70	70	-
	大断面修復(%)	-	3.5	14	14	-
	小断面修復(%)	-	0.7	3.5	10.5	-
	ひび割れ注入(m/m ²)	-	0.15	0.25	0.30	-
脱塩	脱塩	-	70	70	70	-
	表面被覆(%)	-	70	70	70	-
	大断面修復(%)	-	3.5	14	21	-
	小断面修復(%)	-	0.7	3.5	10.5	-
ひび割れ注入(m/m ²)	-	0.15	0.25	0.30	-	
撤去/更新	撤去・更新	-	-	-	-	100

*はりおよび床版の総面積に対する適用割合として表示
 *ひび割れ注入は、対策実施面積に対する割合として表示

復を、さらに補修を施した部分へ表面被覆を適用する。また、劣化度 d を示した部材については、70% に対して小断面修復をおよび補修部分へ表面被覆を、0.05 m/m² に対してひび割れ注入を適用するということになる。つまり、表-9 は、各部材の点検診断結果あるいは劣化予測から得られた劣化度のばらつきを考慮して設定した値といえる。

ここで、既往の研究¹⁷⁾では、表面被覆により補修した既存 RC 構造物の補修効果の持続性に関して調査を行っている。これによれば、塩害が生じた RC 構造物に表面被覆を施す場合、内部に存在する塩化物イオンを除去する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、鉄筋腐食に起因するひび割れや被覆材の剥離等の再劣化が生じ、補修効果の持続は期待できない可能性がある。つまり、部材の表面に劣化・変状が顕在化していない場合でも、表面被覆による補修効果は適用できないケースがある。このため、主な補修工法として表面被覆を選定

する場合は、部材が劣化度 d の初期であること、詳細点検診断の結果あるいは設計データから推定できる場合は、鉄筋位置のコンクリート中の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオンに達する時期よりも、ある程度早期に補修を実施する必要がある。

また、表面被覆を適用する場合には、被覆材料の耐用年数を考慮し、それを越える以前に再補修を行う必要がある。電気防食工法については、電線管や電源装置等の耐用年数に応じて、機器の取替えを検討しなければならない。これらの工法を適用した場合の維持管理計画を策定する場合、またライフサイクルコストの算定時には、補修にかかる費用だけでなく、補修材および機器の撤去と再補修・再整備の費用を考慮する必要がある。

なお、補修工法を決定する際や、補修範囲を決定する際、定期点検診断結果だけでは情報が不十分である場合には、追加調査が必要となる。

(2) 新規建設される上部工の場合

新規建設される上部工において、設計データを用いた劣化予測の結果、現在の上部工の諸条件設定(水セメント比、セメント種類、H.W.L からの距離、コンクリート表面での塩化物イオン濃度、かぶりなど)では、予定する維持管理レベルでの維持管理の実現が不可能と判定された場合には、設計段階での諸条件の再検討により予防保全的な対策を適用する必要がある。設計段階で検討可能な予防保全対策としては、近年の目覚ましい材料開発により様々な方法が考えられる。これまでに適用実績がある、あるいは近年竣工の栈橋上部工の事前対策として取り入れられている工法とその効果は、表-10 のようにまとめられる。

維持管理レベルⅡおよびⅢとして、事前の予防保全対策を取らない上部工については、部材の劣化度の代表値から、補修工法とその時期、また適用範囲を設定する必要がある。これについて、既往の研究¹²⁾では、既存の栈橋の補修実績をもとに、劣化度とその補修範囲を関連づけている。文献 12)における 6 段階の劣化度を 4 段階の劣化度に変換するとともに、工法別の適用範囲を再検討し、劣化度の代表値毎の適用範囲として表した補修工法別の適用範囲を表-11 に示す。文献 12)では、栈橋全体としては劣化していても実際には補修の必要がない部材が 30%程度存在すると仮定して、補修工法の数量が設定されている。数値の信頼性については、今後の補修実績調査データの積み重ねにより検証していく必要があるが、この方法は各部材に発生する劣化度のばらつきを考慮することと同義であると考えられる。

表-12 被覆防食工における劣化度毎の対策工例

劣化度	対策工例
d	従来どおりの定期点検診断を継続する。
c	特に補修の必要はないが、多少劣化が始まった時期のため、被覆防食工の種類によっては、以降の定期点検診断時期を早めるなどの配慮が臨まれる。
b	劣化した箇所を補修し、以降の定期点検診断時期を早めるなどの配慮が必要である。
a	被覆防食工の全面的な補修を実施する必要がある。

表-13 防食対策とその耐用年数

防食方法	工法	耐用年数(例)
被覆防食	水中施工型 ¹⁾ 樹脂被覆	約15年
	ウレタンエラストマー被覆	約30年
	超厚膜形被覆	約30年
	ポリエチレン被覆	約30年
	ペトロラム被覆(耐食性金属)	約35年
	ペトロラム被覆(樹脂)	約30年
	耐食性金属被覆	約50年
	クラッド鋼	約50年
	モルタル被覆+FRP工法	約30年
電気防食	電気防食	(陽極による)

6.3 下部工の補修工法と補修実施時期の選定

(1) 点検診断結果を有する場合

被覆防食および電気防食の補修実施時期の選定について検討する。これらの防食工法を適用する場合には、施設の残存供用年数とともに、被覆防食および陽極の耐用年数も考慮し、それを越える以前に再補修を行う必要がある。また、維持管理計画を策定する場合やライフサイクルコストの算定時には、上部工と同様に、補修にかかる費用だけでなく、補修材の撤去と再補修・再整備の費用を考慮する必要がある。

被覆防食に対する対策は、補修対象部位の劣化状況や被覆材の塗り重ね適合性を考慮して選定するが、港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾では、表-12に示す劣化度毎の対策工例が示されている。これによれば、劣化度bおよびaと診断あるいは予測された部材に対して補修を施す必要がある。しかし、前述のとおり、提示された耐用年数に達した時点で被覆防食を更新するといった維持管理が現状である。そこで、本研究では、下部工の1評価単位(上部工1スパン)の部材の劣化度の代表値が劣化度aとなる以前を、各部材の補修実施時期とする。

電気防食に対する対策についても、陽極の消耗量調査から、各部材の防食効果が失われる時期を劣化度aとして取り扱っているため、部材の劣化度の代表値が劣化度

aとなる以前を各部材の補修実施時期とする。

下部工の防食対策について、近年、実際に適用された防食工法と期待できるおおよその耐用年数に関してヒアリング調査を行った。うち、代表的な10工法を表-13に示す。

(2) 新規に建設される下部工の場合

今後、新規に建設される栈橋については、下部工本体(鋼管杭)ではなく、防食の定期的な点検診断を行うとともに、その耐用年数を考慮しながら維持管理を行っていくことが主体となる。このため、表-13に示す代表的な工法等を適用し、適切な点検診断に基づいた対策選定が必要となる。(1)の方法は、下部工内の各部材の劣化度のばらつきを考慮しているため、点検診断結果を有する下部工にのみ適用できる。新規に建設される栈橋については、供用開始後から行われる定期的な点検診断により、当初予定した防食工法と適用範囲、その改修時期を適宜修正する必要がある。

7. 維持管理計画策定支援プログラムの開発

7.1 維持管理計画の策定

1.で述べたとおり、平成19年4月より、技術基準対象施設については、新規建設される施設の場合は設計時に、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となった。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において、維持管理計画書等は施設の設置者が定めることが標準とされている。想定される供用期間および要求性能に基づいて、施設全体および構成部材の維持管理のあり方や、想定されるシナリオを十分に検討した上で、点検診断から対策工の実施計画に至るまでの維持管理の流れについて定めておかなければならない(図-7 維持管理計画書の標準的な構成と定めるべき事項¹⁾)。

維持管理計画の策定レベルは、施設の規模、構造形式、利用上の重要度等に応じて、標準型(I)および(II)、共通指針準拠型の3つに分類されている。これに応じて、維持管理の項目を選定し、維持管理計画書を作成する²⁾。標準型(I)および(II)の一部では、主要部材の劣化予測に基づいて維持管理を実施することが基本とされており、各部材の点検診断結果に基づいた劣化予測の方法や、それを考慮した維持補修計画などの項目について、ある程度具体的に記しておく必要がある。例として、表-14に標準型(I)に対する維持管理計画書の策定項目の標準を示す。

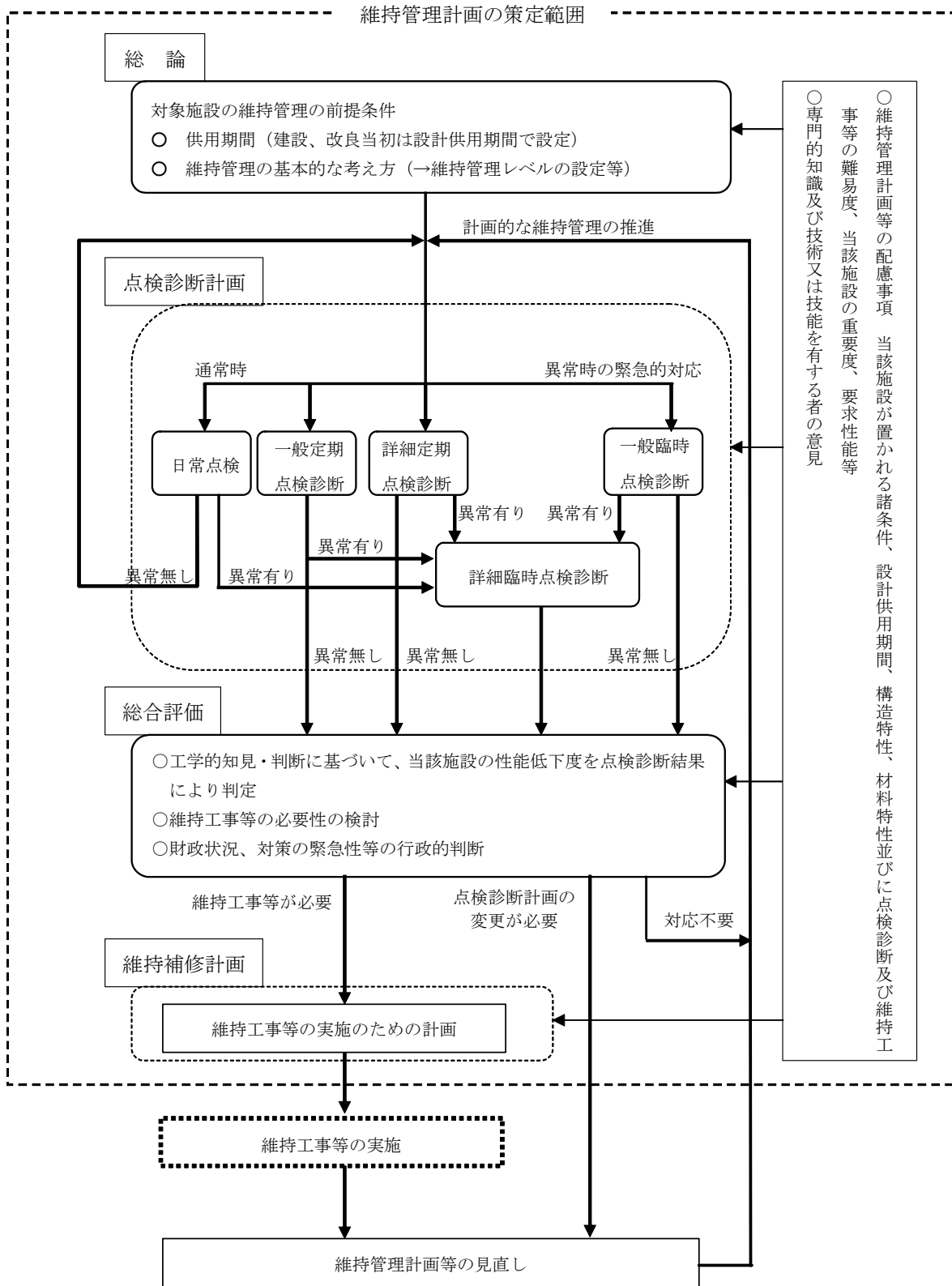


図-7 維持管理計画書の標準的な構成と定めるべき事項

表-14 維持管理計画書の項目 (例)

総論	地区および施設の位置 計画策定のための配慮事項 (構造概要, 標準断面図, 平面図等, 施工履歴, 設計供用期間, 自然条件, 材料特性等) 維持管理レベルの設定 等
点検診断計画	各部材の点検診断計画 初回点検 (現地調査) 結果 位置座標 劣化予測項目の選定 劣化予測 (塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食 の予測, 防食の劣化予測) 点検診断の内容 (一般定期, 詳細定期, 一般臨 時, 一般詳細点検診断) 点検診断の実施時期 (初回点検結果, 劣化予測 結果等により実施時期を決定)
総合評価	点検診断結果の評価方法
維持補修計画	各部材の維持補修対策の考え方 各部材の標準的な対策工法 対策工法の選択と想定される実施時期 等
異常時 点検診断	異常時 (地震, 波浪等) の点検診断の内容
参考資料	使用材料特性 施工図面 初回点検 (現地調査) の結果 電気防食 陽極配置図 点検記録用紙 等

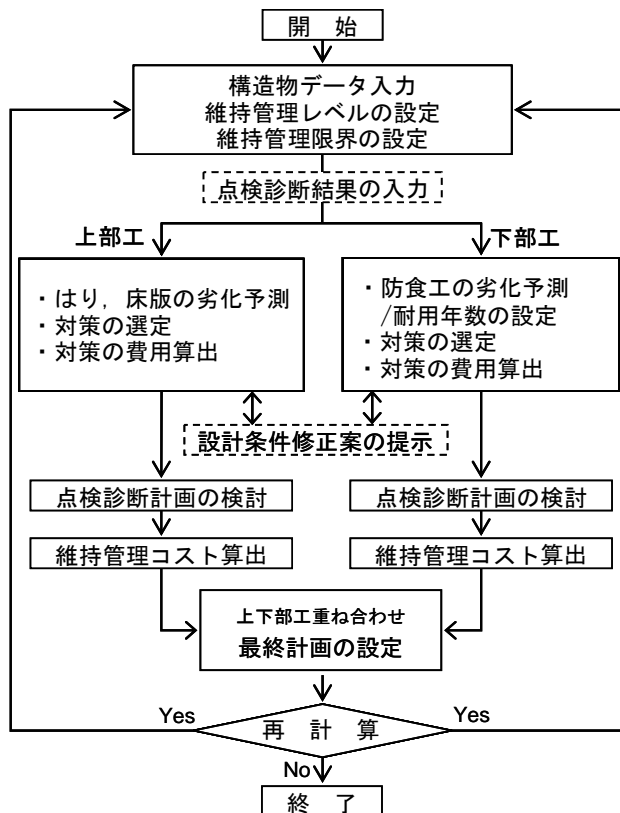


図-8 維持管理計画策定支援プログラムのフロー

7.2 維持管理計画策定支援プログラムの目的

運輸省港湾技術研究所 (当時) は, 近年の社会基盤の維持管理に対する社会情勢や制度の充実に先立って, 劣化進行予測からライフサイクルコストが最小となるような維持補修工法の選定支援を行う『港湾施設マネジメントシステム』を平成 12 年度に作成した¹²⁾. これは, 栈橋を対象として開発され, ライフサイクルマネジメントに基づく構造物の維持管理を支援するプロトタイプ・システムといえるものである.

本研究では, 既往のシステムを発展させ, 3. で述べた栈橋の LCM システムをベースとした維持管理計画の策定を支援するプログラム『維持管理計画策定支援プログラム』を開発した. 当該プログラムの活用により, 港湾の施設の技術上の基準および維持管理の技術資料¹⁾⁻³⁾に即した劣化予測や対策選定などが可能となり, 合理的な維持管理計画の策定が可能となることが期待される.

7.3 プログラムの構成

技術基準対象施設においては, 施設の維持管理レベルに応じて, その供用期間のいずれの時点においても所要

の性能を保持しなければならない. そのためには, 設定した維持管理レベルを実現できるよう当初設計がなされていること, また, 設定した維持管理レベルに対応した維持管理計画を策定することが必要である. したがって, 『維持管理計画策定支援プログラム』では, 表-4 に示す部材の維持管理レベルを制約条件として, 点検診断から対策工の実施計画に至るまでの維持管理の一連の行為の実施計画と, それに係る費用についての情報を提供する構成とした.

ここで, 新規建設される構造物については, 設計段階での性能照査と供用中の維持管理の両輪で, 施設の供用期間中の性能・機能の保持を確固たるものとすることができる. しかし, 近年, 変状や老朽化等による機能・性能の低下が危ぶまれる既存構造物については, その残存供用期間を考慮した確実な維持管理の実施により, 設計段階での非配慮分を補っていくしかない. このためには, 今後最初に実施する点検診断に基づいて, 以降の維持管理計画を策定することが重要である. そこで, 部材の点検診断に基づいて, 以降の効率的かつ効果的な対策の方法とその実施時期を選定する【既設版】と, 構造物の設計時に使用することを想定して, 設定された維持管理レ

ベルに見合う設計条件を提示する機能を備えた【新設版】の2つのプログラムを作成した。

図-8 に維持管理計画策定支援プログラムの概略を示す。【既設版】、【新設版】ともにプログラムの基本的な流れは同様であるが、前述のような維持管理計画策定のスタートラインの違いにより、保有性能評価および劣化予測手法、対策の選定手法に関するプログラム構成と計算ロジックを適宜変化させた。

付録B. に、維持管理計画策定支援プログラム【既設版】および【新設版】の概略を示す。

8. まとめおよび今後の課題

本研究では、これまで LCM システムの要素技術として蓄積された上部工および下部工の点検診断に基づいた保有性能評価と将来予測、対策工および実施時期の選定手法に関する知見を体系的に取りまとめるとともに、個々の要素技術を結びつける手法を構築した。特に、部材の維持管理レベルと維持管理上の性能限界の設定方法、および部材の保有性能の代表値の導出方法に関して新たな手法を提案した。

提案した手法の一部は、数値的な根拠の不足や、劣化メカニズムが解明されていないことにより、工学的判断や維持管理の実状を基に構築されている。これについては、今後の維持管理実績データや上下部工の構成材料に関する知見の蓄積により、検証・修正していくことが必要である。

また、構築した LCM システムを実際の港湾施設の維持管理へ具体的に適用することを目指し、維持管理計画書策定支援プログラムを開発した。当該プログラムの活用により、港湾の施設の技術上の基準および維持管理の技術資料に即した劣化予測や対策選定などが可能となり、合理的な維持管理計画の策定が可能となることが期待される。しかし、維持管理の一連の行為に必要なコストの算定については、今後、既存の栈橋の維持管理実績についてデータ収集を行い、精度を向上させることが必要である。

本研究で構築した LCM システムにより、港湾施設の合理的かつ効果的な維持管理が一層推進されることを期待する。

(2009年1月29日受付)

謝辞

本研究は、平成18~20年度 特別研究「海域施設のライフサイクルマネジメントのための確率論的手法に基づく

劣化予測システムの開発」として行われたものである。また、本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(B)「海洋コンクリート中の鉄筋腐食分布の空間構造評価に関する研究」(平成18~19年度、研究代表者：横田弘)、基盤研究(B)「塩害を受けるコンクリート構造物の寿命予測の信頼性に関する研究」(平成20年度、研究代表者：横田弘)、二国間交流事業共同研究「沿岸コンクリート構造物のライフサイクルマネジメントに関する研究」(平成20年度、代表者：横田弘)、日本鉄鋼連盟 土木鋼構造研究助成金「港湾鋼構造物のライフサイクルマネジメントに関する研究」(平成18~19年度、代表者：横田弘)により行った。ここに記し謝意を表する。

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、港湾空港建設技術サービスセンター、2007年。
- 2) 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年。
- 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年。
- 4) 宮川豊章、保田敬一、岩城一郎、横田弘、服部篤史：土木技術者のためのアセットマネジメント—コンクリート構造物を中心として—、土木学会論文集F, Vol.64, No.1, 2008年, pp.24-43。
- 5) 日本コンクリート工学協会：技術者向け よく分かるアセットマネジメント、<http://jci-web.jp/asetto/>、コンクリート構造物のアセットマネジメント研究委員会、2006年、8p。
- 6) Yokota, H., Iwanami, Kato, E. and Yamaji, T.: Life-cycle management of concrete structures in coastal area, Proceedings of the 2nd International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures, Hang Zhou, China, November 2008, pp.53-58.
- 7) 加藤絵万、岩波光保、山路徹、横田弘：建設後30年以上が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年、87p。
- 8) 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年。
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]、2007年。
- 10) 加藤絵万、濱田洋志、審良善和、横田弘：供用40年が経過したコンクリート部材の塩化物イオン浸透性

状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，
Vol.30, No.1, 2008年，pp.837-842.

- 11) 加藤絵万，濱田洋志，岩波光保，横田弘：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, 2008年，pp.57-82.
- 12) 古玉悟，田邊俊郎，横田弘，濱田秀則，岩波光保，日比智也：栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発，港湾技研資料，No.1001, 2001年，41p.
- 13) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.6, 沿岸開発技術研究センター，1999年.
- 14) 鈴木僚，西村次男，加藤佳孝，岩波光保：測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No2, 2007年，pp.751-756.
- 15) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版），1997年.
- 16) 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特性に及ぼす影響，港湾技術研究所報告，Vol.38, No.2, 1999年，pp.169-222.
- 17) 加藤絵万，堤知明，岩波光保，山内浩，山路徹，横田弘：海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物に対する補修効果の定量評価手法の構築に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1133, 2006年，12p.

付 録

付録 A. 点検診断の標準様式

付録 B. 維持管理計画策定支援プログラムの概略

付録 C. 維持管理計画策定支援プログラムの初期設定
単価一覧

付録A. 点検診断の標準様式

付表-A.1 栈橋の一般点検診断の項目と判定基準

点 検 項 目		点 検 方 法	判 定 基 準 案		
上部工 (下面部)	コンクリートの劣化, 損傷 (RCの場合)	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数,長さと同幅 ・かぶりの剥落状況 ・錆汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	a	スラブ: <input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%以上ある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。 はり・ハンチ: <input type="checkbox"/> 幅 3mm 以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。	
			b	スラブ: <input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%未満である。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。 はり・ハンチ: <input type="checkbox"/> 幅 3mm 未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。	
			c	スラブ: <input type="checkbox"/> 一方向のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル吐出析出物がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。 はり・ハンチ: <input type="checkbox"/> 軸と直角な方向のひび割れのみがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。	
			d	<input type="checkbox"/> 変状なし。	
上部工 (上・側面部)	コンクリートの劣化, 損傷	目視 ・ひび割れ,剥離,損傷 ・鉄筋腐食 ・劣化の兆候 など	a	<input type="checkbox"/> 係船岸の性能を損なうような損傷がある。	
			b	<input type="checkbox"/> 幅 3mm 以上のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> 広範囲に亘り鉄筋が露出している。	
			c	<input type="checkbox"/> 幅 3mm 未満のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> 局所的に鉄筋が露出している。	
			d	<input type="checkbox"/> 変状なし。	
鋼管杭等	鋼材の腐食,亀裂,損傷 (防食を施している場合)	目視 ・穴あきの有無 ・水面上の鋼材の腐食 ・表面の傷の状況	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形,その他著しい損傷がある。	
			b	<input type="checkbox"/> L.W.L.付近に孔食がある。 <input type="checkbox"/> 全体的に発錆がある。	
			c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆がある。	
			d	<input type="checkbox"/> 付着物は見られるが,発錆,開孔,損傷は見られない。	
	被覆 防食	塗装の場合	目視 ・欠陥面積率	a	<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 10%以上
				b	<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 0.3%以上 10%未満
				c	<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 0.03%以上 0.3%未満
				d	<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 0.03%未満
		有機被覆,ペ トロラタム 被覆,モルタル 被覆,金属 被覆の場合	目視 ・鋼材の腐食,露出 ・被覆材の損傷 ・保護カバー等の状態	a	<input type="checkbox"/> 鋼材が露出し,錆が発生している。
				b	<input type="checkbox"/> 被覆材に鋼材まで達するすり傷,あて傷,は がれ等の損傷が生じている。 <input type="checkbox"/> 保護カバー等に欠損がある。
				c	<input type="checkbox"/> 被覆材に鋼材まで達していないすり傷,あて 傷,はがれ等の損傷がある。 <input type="checkbox"/> 保護カバー等に損傷がある。
				d	<input type="checkbox"/> 変状なし。
電気防食	電位測定(電極ごとの防食管理 電位) ・飽和甘こう-800mV ・海水塩化銀-800mV ・飽和硫酸銅-850mV	a	<input type="checkbox"/> 防食管理電位が維持されていない。		
		b	---		
		c	---		
		d	<input type="checkbox"/> 防食管理電位が維持されている。		

付表－A.2 被覆防食の一般点検診断の方法と劣化度判定基準

被覆防食の種類	点検方法	判定基準案
塗装	目視 ・錆，塗膜のふくれ，割れ，はがれ ・欠陥面積率	a <input type="checkbox"/> 広範囲に錆やふくれがある。 <input type="checkbox"/> 錆を伴うはがれやひび割れが広範囲に発生している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が10%以上である。
		b <input type="checkbox"/> 大きな錆やふくれがある。 <input type="checkbox"/> 錆を伴うはがれが広範囲に発生している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.3%以上10%未満である。
		c <input type="checkbox"/> 錆やふくれが点在している。 <input type="checkbox"/> 上塗り塗料のはがれやひび割れが点在している。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.03%以上0.3%未満である。
		d <input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく，健全な状態である。 <input type="checkbox"/> 欠陥面積率が0.03%未満である。
有機被覆	目視 ・錆，塗膜のふくれ，割れ，はがれ	a <input type="checkbox"/> はがれや欠陥が著しく，鋼材が露出し錆が発生している。
		b <input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達するすり傷，あて傷，はがれが生じ，わずかに錆が認められる。
		c <input type="checkbox"/> 一部に鋼材まで達していないすり傷，あて傷，はがれが点在している。
		d <input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく，健全な状態である。
ペトロラタム被覆	目視 ・保護カバーの脱落，亀裂，変形，剥離 ・ボルトの腐食やゆるみ	a <input type="checkbox"/> 保護カバーが脱落し，ペトロラタム材が露出または脱落し，鋼材表面に錆が出ている。
		b <input type="checkbox"/> 保護カバーや当板に亀裂がある。 <input type="checkbox"/> ボルトやナットに腐食が見られる。
		c <input type="checkbox"/> 保護カバーが変色または白亜化している。 <input type="checkbox"/> 表面に微細なクラックがある。 <input type="checkbox"/> ボルト，ナット，バンド材などにゆるみがある。
		d <input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく，健全な状態である。
モルタル被覆	目視 (保護カバーなし) ・モルタルの欠落やひび割れ，剥離 (保護カバーあり) ・保護カバーの脱落，亀裂，変形 ・ボルトの腐食やゆるみ	a <input type="checkbox"/> モルタルなどのセメント硬化体が欠落し，鋼材表面に錆が発生している。
		b <input type="checkbox"/> ひび割れの幅が大きくなり，一部の小さな欠落があるが，錆の流れ出しはない。 <input type="checkbox"/> 保護カバーに欠損などがあるが，錆の流れ出しはない。
		c <input type="checkbox"/> 表面に小さなひび割れがある。保護カバーに小さなクラックがある。
		d <input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく，健全な状態である。
金属被覆	目視 ・錆，損傷，脱落	a <input type="checkbox"/> 鋼材表面まで達する傷や剥離があり，錆が発生している。
		b <input type="checkbox"/> 被覆材に腐食や傷があり，近い将来鋼材まで達する恐れがある。
		c <input type="checkbox"/> 被覆材に小さなあて傷やわずかな腐食がある。
		d <input type="checkbox"/> 初期状態とほとんど変化なく，健全な状態である。

付表－A.3 上部工の詳細点検診断の項目と判定基準

点検項目	点検方法	判定基準案
コンクリートの劣化，損傷	詳細調査 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数，長さ，幅 ・かぶりの剥落状況 ・錆汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	ひび割れ等の変状図として整理する。
コンクリートの強度	コアによる圧縮強度試験，反発強度法	測定値を記録する。
コンクリートのひび割れ深さ	超音波法 など	測定値を記録する。
かぶりの厚さ	はつり試験，電磁波レーダ試験 など	かぶり厚さの実測値または推定値を記録する。
鉄筋の腐食状況	自然電位測定	自然電位の測定値を記録し，等電位線図（コンタ図）等の形式で整理する。
鉄筋の腐食速度	分極抵抗測定	分極抵抗の測定値を記録し，等値線図（コンタ図）等の形式で整理する。
コンクリートの分析	塩化物イオン含有量測定 (場合によっては，中性化測定，化学分析)	測定値を記録し，コンクリート表面からの深さ方向分布等の形式で整理する。

付表－A.4 下部工の詳細点検診断の項目と判定基準

点 検 項 目		点 検 方 法	判 定 基 準 案	
鋼材の腐食，亀裂，損傷（防食を施している場合）	潜水調査	潜水調査	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形，その他著しい損傷がある。 <input type="checkbox"/> 裏裡材が流出している兆候がある。
			b	<input type="checkbox"/> L.W.L.付近に孔食がある。 <input type="checkbox"/> 全体的に発錆がある。
c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆がある。			
d	<input type="checkbox"/> 変状なし。			
		詳細調査	孔食等を変状図として整理する。	
肉厚測定		超音波厚み計	測定値を記録する。	
被覆防食	塗装	潜水調査 ・錆，塗膜のふくれ，割れ，はがれ ・欠陥面積率	a	<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 10%以上
			b	<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 0.3%以上 10%未満
	c		<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 0.03%以上 0.3%未満	
	d		<input type="checkbox"/> 欠陥面積率 0.03%未満	
		詳細調査 ・錆，塗膜のふくれ，割れ，はがれ	錆，塗膜のふくれ，割れ，はがれ等を変状図として整理する。	
有機被覆，ペトロラタム被覆，モルタル被覆，金属被覆	潜水調査 ・鋼材の腐食，露出 ・被覆材の損傷 ・保護カバー等の状態	潜水調査 ・鋼材の腐食，露出 ・被覆材の損傷 ・保護カバー等の状態	a	<input type="checkbox"/> 鋼材が露出し，錆が発生している。
			b	<input type="checkbox"/> 被覆材に鋼材まで達するすり傷，あて傷，はがれ等の損傷が生じている。 <input type="checkbox"/> 保護カバー等に欠損がある。
			c	<input type="checkbox"/> 被覆材に鋼材まで達していないすり傷，あて傷，はがれ等の損傷がある。 <input type="checkbox"/> 保護カバー等に損傷がある。
			d	<input type="checkbox"/> 変状なし。
		詳細調査 ・鋼材の腐食，露出 ・被覆材の損傷 ・保護カバー等の状態	錆，塗膜のふくれ，割れ，はがれ等を変状図として整理する。	
電気防食（流電陽極方式）	電位	電位測定（電極ごとの防食管理電位） ・飽和甘こう-800mV ・海水塩化銀-800mV ・飽和硫酸銅-850mV	電位の測定値を記録し，等電位線図（コンタ図）等の形式で整理する。	
			陽極	潜水調査 ・現存状況の確認（全数）
	b	<input type="checkbox"/> 陽極取付に不具合がある。（ぶら下がり）		
	c	---		
		陽極消耗量測定（全体の3～5%）	陽極消耗量の測定値を記録し，残寿命を推定する。	
		陽極電流測定 ・施設の両端，中央部，異常摩耗部	電流量の測定値を記録し，電気防食の状態を評価するために用いる。	
電気防食（外部電源方式）	直流電源及び電気設備	詳細調査 ・端子の変色 ・ボルト，ナットのゆるみ等	a	<input type="checkbox"/> 端子の変色，ボルトやナットのゆるみ等がある。
			b	---
	c	---		
		直流電源の電圧，電流測定 整流器の絶縁抵抗 回路の絶縁抵抗	測定値を記録し，電気防食の状態を評価するために用いる。	
		電位測定（電極ごとの管理電位） ・飽和甘こう-800mV ・海水塩化銀-800mV ・飽和硫酸銅-850mV	電位の測定値を記録し，等電位線図（コンタ図）等の形式で整理する。	

付録B. 維持管理計画策定支援プログラムの概略

維持管理計画策定支援プログラム【既設版】および【新設版】の概略を示す。

作成したプログラムは、本編のライフサイクルマネジメントシステムを具現化したものである。しかし、本編で述べたとおり、その構成の一部は理論的根拠の不足のため、工学的判断に基づいて構築されている。また、プログラム内部における計算の発散を防止するために、結果の算出に制限を設けた箇所もある。このため、本プログラムの使用にあたっては、上記に留意しながら、検討対象とする構造物の維持管理計画の策定のプロセスとその結果を十分精査する必要がある。また、検討対象とする構造物の劣化の現状を定期的な点検診断により把握しながら、構造物の維持管理計画を適宜修正していくことも重要である。本プログラムにおける上記の問題点については、維持管理実績データや上下部工の構成材料に関する知見の蓄積と合わせ、今後、検証・修正を行っていく予定である。

B.1 既設版プログラムの流れ

ここでは、点検診断で判定される劣化度に基づいて部材の劣化予測を行い、対策工法と実施時期を選定し、以降の点検診断計画を策定する【既設版】について概説する。

(1) 構造物データの入力

まず、検討対象とする栈橋のデータを入力する。ここでは、施設名、供用開始年、維持管理期間(検討年)、H.W.L.等の施設の基本データ、および部材の維持管理レベルの設定を行う。維持管理レベルの設定は、上部工、下部工(干満帯)、下部工(海中部)毎に設定する。実際のプログラム操作にあたっては、表-4の関係はデフォルトとして示されるのみであり、維持管理レベルに応じた維持管理上の劣化度の限界値は、ユーザーが自由に設定できる。ただし、維持管理レベルIのとき維持管理上の限界値を劣化度 aとするなどの矛盾するケースの設定は自動的に排除される。

また、必要に応じて、社会的割引率の設定や、構造物の維持管理の実績による毎年必要な費用(防舷材や舗装などの劣化予測を行わない付帯設備にかかる費用)をライフサイクルコストの算定に取り入れることができる。

(2) 上部工データの入力

a) 上部工構造データの入力

上部工の構造データについて、対象となる部材の面積や部材数によって、あるいは上部工の総面積を入力する。

付表-B.1 プログラム内部で仮定した劣化度分布

劣化度の代表値	各部材の劣化度	各部材の劣化度分布		
		初期	基準値(中期)	後期
d	d	0.80	0.70	0.60
	c	0.20	0.20	0.25
	b	0.00	0.10	0.15
	a	0.00	0.00	0.00
c	d	0.20	0.10	0.00
	c	0.80	0.80	0.80
	b	0.00	0.10	0.20
	a	0.00	0.00	0.00
b	d	0.00	0.00	0.00
	c	0.20	0.10	0.00
	b	0.80	0.80	0.80
	a	0.00	0.10	0.20
a	d	0.00	0.00	0.00
	c	0.20	0.10	0.00
	b	0.20	0.20	0.20
	a	0.60	0.70	0.80

ここで入力する数値は、以降の維持管理に関わる様々なコストに乗じられる。また、床版およびはりの鉄筋量とレベルの入力値は、以降の劣化予測に用いられる。さらに、上部工の竣工時のデータが残っていれば、コンクリートの水セメント比やセメント種類等を入力することにより、以降の劣化予測の際、5.1 に示した設計データを用いた劣化予測の方法を選択することができる。

b) 上部工点検診断データの入力

点検診断データの入力方法は、次の5ケースに対応できる。①床版およびはりの劣化度分布を入力する、②床版およびはりの遷移率を入力する、③床版およびはりの劣化度の代表値を入力する、④上部工全体の劣化度の代表値を入力する、⑤データを入力しない。①～④のデータは、マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測、⑤のデータは、設計データを用いた劣化予測に適用される。

(3) 上部工の劣化予測

上部工の劣化予測は、点検診断データの入力方法により異なる。

入力方法が(2) b) ①～④の場合、マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測を行う。①では、床版およびはりの遷移率をプログラム内部で算出し、②の場合は、遷移率の入力値から劣化予測を行う。

③および④の場合は、プログラム内部で劣化度の代表値から逆算した遷移率を用いて劣化予測を行う。このためには、劣化度の代表値から各部材の劣化度分布を設定する必要がある。プログラム上では、劣化度の代表値に対して、付表-B.1 中に基準値として示した各部材の劣

化度分布を与えた。仮定した各部材の劣化度分布から 4.4 の方法により求める劣化度の代表値は、入力した劣化度の代表値と合致する。しかし、ここで仮定した劣化度分布は、現状では、具体的な点検診断結果に基づく検証は十分にはできていないため、今後、データの蓄積により確認・修正することが必要である。プログラムでは、これらの劣化度分布に、各劣化度の分割数を3としたマルコフ連鎖モデルを適用して遷移率が算出される。

入力方法が⑤の場合には、5.1 に示す設計データを用いた劣化予測を行う。この場合、床版およびはりの劣化進行過程を数値的に予測できる。本プログラムでは部材の性能を示す指標として劣化度を用いることを原則としているため、各部材の劣化進行を示す数値（例えば、鉄筋位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度や、鉄筋の腐食量）は、4.2 の方法で部材の劣化度 a~d に置き換えられる。したがって、設計データを用いた劣化予測の結果は、部材の劣化度の代表値として取り扱われ、これに対して劣化度の代表値が d の期間（年数）、劣化度の代表値が c の期間（年数）、といった期間の予測が可能となる。このため、プログラム中では、部材の劣化度の代表値が、例えば、劣化度 d を示す期間を初期、中間期、後期に3分割し、そのときの各部材の劣化度分布を付表-B.1 に示すよう仮定して、劣化度の代表値からマルコフ連鎖による劣化予測時の遷移率を逆算する機能を設けた。これは、実構造物における劣化発生のばらつきを考慮するための試みである。しかし、劣化度の初期～後期における劣化度分布の設定については、今後、実構造物の劣化度分布とどの程度整合するか検証が必要である。

(4) 上部工の補修工法と適用範囲の選定

予定供用期間中の劣化予測の結果から、部材の劣化度が維持管理上の限界値に達する可能性があるか判定される。判定結果は以下の4ケースである。①対策の検討が必要である、②直ちに対策が必要である、③維持管理レベル/維持管理上の限界値を修正する、④対策の必要はない。

判定が①および②の場合、(3) で述べた上部工の劣化予測により、将来あるいは現在（ただし、(1) における維持管理期間（検討年）を現在に設定した場合）の部材の劣化度分布が得られていることから、各部材の劣化度に応じた補修工法とその適用範囲を設定する。プログラムでは、デフォルト値として、表-9 の補修工法と工法別の適用範囲を示したが、対象構造物が建設される地域・時期あるいはこれまでの実績などにより、それぞれの工法の適用範囲を変更することもできる。また、こ

で、表面被覆工法のみが適用できるのは、栈橋の経過年数が、部材の劣化度の代表値が劣化度 d である期間の30%以内の期間とした。これは、補修後の再劣化の発生を避けるためである。

その後、各補修工法にかかる費用、耐用年数、また、再補修費用に関する詳細情報について、デフォルト値を確認する、あるいは、詳細情報を所有している場合には入力する。デフォルト値は、近年の実構造物における補修実績を元に設定した値である。これらの情報をもとに、供用期間を通じて、設定された維持管理レベルを満足するような補修工法およびその時期（ある劣化度の期間）の全てについて、供用期間中の再補修も含めた総補修費用が算定され、うち費用が小さい5ケースが表示される。この中から、コスト面および施工面から最適と思われる工法を選択する。補修工法の選定と適用範囲の設定については、はりおよび床版のそれぞれについて行うことができるが、実際、はりおよび床版は同時期に補修するため、どちらか補修時期が早い方を上部工の補修時期として設定することも可能である。

判定③は、検討対象とした上部工が既に維持管理上の限界値である劣化度を超過している場合に表示される。この場合、上部工の維持管理情報を変更するか、即補修の対策を検討する（判定②と同様）。

判定④の場合、上記の検討は省略し、後述の点検診断計画の検討を行う。

(5) 下部工データの入力

a) 下部工構造データの入力

下部工の検討にあたっては、防食が適用されていることを前提としてプログラムを作成した。構造データについては、上部工と同様に、対象となる部材の面積や部材数によって、あるいは下部工の防食対象面積を入力する。また、現在適用されている防食工法の種類を設定するが、これは表-13の工法から選定するか、直接、工法と耐用年数を入力する。なお、6.3で述べたように、以降の下部工に対する検討では、耐用年数によってコストを算定することとなるため、防食の耐用年数と施工年、あるいは残存耐用年数を入力する。不明である場合、以降の詳細な検討は行わず、詳細臨時点検診断の実施が求められる。

b) 下部工点検診断データの入力

点検診断データの入力方法は干満帯および海中中部で異なる。

干満帯の場合、次の4ケースに対応できる。①各部材の被覆防食の劣化度分布を入力する、②被覆防食の遷移率を入力する、③被覆防食の劣化度の代表値を入力する、④被覆防食の残存耐用年数から補修実施時期を決定する。

①～③の場合、5.1に示したマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測を行い、④の場合、劣化予測は行わず被覆防食の耐用年数を考慮した管理を行う。

海中部の場合、陽極の経過年数か残存耐用年数を入力し、陽極の耐用年数をベースとした維持管理を行う。また、防食管理電位の測定値が -800 mV (vs 海水塩化銀電極) を満足するか否かをチェックする。満足しない場合は、海中部における以降の詳細な検討は行わず、詳細臨時点検診断の実施が求められる。

(6) 下部工の劣化予測

干満帯について、入力方法が(5) b) ①～③の場合、マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測を行う。①の場合、被覆防食の遷移率をプログラム内部で算出し、②の場合、遷移率の入力値から劣化予測を行う。

③の場合、上部工の劣化予測方法と同様に、各部材の劣化度分布を付表-B.1のように仮定して、実構造物における劣化発生のばらつきを考慮した劣化予測を行う。なお、前述のとおり、この劣化度分布については、今後、実際の被覆防食の劣化度分布とどの程度整合するか検証が必要である。

ここで、当該プログラムは、予定供用期間中の劣化度の代表値の推移を出力する機能を有するが、被覆防食の劣化度の代表値の算出方法は、上部工の場合の算出方法と異なる。被覆防食の場合は、マルコフ連鎖による劣化予測から求められたそれぞれの劣化度の発生割合に、劣化度毎に設定した点数と重みを乗じて求めた全部材の平均点 P_{ave} から、ある判定基準にしたがって部材の劣化度の代表値を算出する。劣化度毎に設定した点数は、劣化度 a の部材に対して、劣化度 a の後期は 0 点、初～中期は 40 点を、劣化度 b の部材に対して 60 点、劣化度 c の部材に対して 80 点、劣化度 d の部材に対して 100 点である。また、部材の劣化度の代表値の判定基準は以下のように設定した。

劣化度の代表値 d : $P_{ave} > 90$

劣化度の代表値 c : $90 \geq P_{ave} > 75$

劣化度の代表値 b : $75 \geq P_{ave} > 55$

劣化度の代表値 a : $55 \geq P_{ave}$

これは、大半の被覆防食の劣化メカニズムが未解明であることや、コンクリート部材と比較してマルコフ連鎖を用いた劣化予測の精度が不明であることに起因する。しかし、これらについては、今後の検討により解明される可能性が高いため、その発展性を十分に生かせるような措置をとり、プログラム中では上記のような算出方法を設定した。なお、本研究の範囲では、上記の方法による判定結果は、上部工の劣化度の代表値の判定方法によ

る結果とほぼ同等となる。以上の劣化度の代表値の算出方法については、今後、実際の被覆防食の劣化度の推移とどの程度整合するか検証が必要である。

(7) 下部工の補修工法と適用範囲の選定

予定供用期間中の劣化予測および耐用年数から、部材の劣化度が維持管理上の限界値に達する可能性があるか、または耐用年数が予定供用年数以下であるかが判定される。その後、各補修工法にかかる費用、耐用年数、また、再補修費用に関する詳細情報について、デフォルト値を確認する、あるいは、詳細情報を所有している場合には入力する。表-13の防食工法と耐用年数、それにかかる費用のデフォルト値は、近年の補修実績に関する独自の調査から設定した値である。この中から、コスト面および施工面から最適と思われる工法を選択する。

(8) 上下部工の定期点検診断の計画

港湾の施設の維持管理技術マニュアルでは、施設の合理的な維持管理を目的として、日常点検で把握し難い構造物あるいは部材の細部を含めて、変状の有無や程度の点検を、部材の性能把握のための定期点検診断として行うこととされている。定期点検診断は、比較的短い間隔で主に目視調査により行う一般定期点検診断と、比較的長い間隔で高度な方法により行う詳細定期点検診断に区分される。点検診断計画を策定するにあたっては、一般定期および詳細定期点検診断を、構造物の供用期間中にどれだけの頻度で行うか、またその調査項目についても定めておくことが重要である。

このことから、点検診断計画項目、点検間隔、調査項目と数量を検討し、点検診断にかかる費用を算出する機能をプログラムに付加した。これは、栈橋の点検診断には、陸上からの調査だけでなく海上からの上下部工の目視調査、潜水士による海中部調査、足場を設置しての詳細点検等、陸上構造物の点検診断と比較して手間や時間がかかり、外部委託せざるを得ない項目が多く、それらに係る費用が構造物のライフサイクルコストに少なからず影響を及ぼすことが考えられるためである。

プログラムは、一般定期点検診断は 10 年以下、詳細定期点検診断は 15 年以下の間隔で計画されるよう制御機能を付加し、特に詳細点検診断については、優先的に行うべき調査項目を示した。また、近年の実構造物における点検診断実績を独自に調査し、それぞれの調査項目に係る費用をデフォルト値として表示した。付表-B.2に、上部工および下部工の点検診断種類と調査項目を示す。

特に、下部工の防食の詳細が不明である場合、または海中部の電位が防食管理電位を満足しない場合は、別途、詳細臨時点検診断の実施を検討する。

付表-B.2 点検診断種類と調査項目

部材	点検診断	調査項目
上部工	初回点検	目視調査（簡易） / （詳細） コンクリート中の塩化物イオン濃度 かぶりの厚さ（非破壊試験） 測 量
	一般定期	
	詳細定期	
下部工 （干満帯）	初回点検	目視調査（簡易） / （詳細） 肉厚測定
	一般定期	
	詳細定期	
下部工 （海中部）	初回	目視調査（詳細） 電位測定 陽極消耗量調査 陽極電流量測定
	一般定期	
	詳細定期	
	詳細臨時	肉厚測定 陽極消耗調査

(9) 栈橋の維持管理計画の策定

以上により策定された維持管理計画とライフサイクルコストは、Microsoft Excelに出力される。出力後、維持管理計画の見直しが必要となった場合は、出力されたExcelシート上で計画を変更し、ライフサイクルコストを再計算することができる。

B.2 新設版プログラムの流れ

ここでは、栈橋の設計時に使用することを想定して、設計データを用いた劣化予測から将来の対策工法と実施時期を選定し、以降の点検診断計画を策定する【新設版】について概説する。

プログラムは、【既設版】とほぼ同様であり、以下の流れとなっている。

- (1) 構造物データの入力
- (2) 上部工構造データの入力
- (3) 上部工の劣化予測
- (4) 上部工の対策の選定
 - a) 維持管理レベルⅠの場合、予防保全対策の選定
 - b) 維持管理レベルⅡの場合、補修工法および実施時期の選定
- (5) 下部工構造データの入力
- (6) 下部工の防食対策の選定
- (7) 上下部工の定期点検診断の計画
- (8) 栈橋の維持管理計画の策定

【新設版】では、5.1および6.2で述べた新規建設される上部工に対する劣化予測と対策の選定を行う。特に、維持管理レベルⅠと設定した場合は、事前対策の方法について検討する。事前対策は表-10から選択するが、構造物条件等に応じて実現が可能な対策を複数選択し、供

用期間中に必要な対策費用を比較して最終案を決定することができる。維持管理レベルⅡの場合は、表-11を基準として補修工法と実施時期を検討する。

B.3 栈橋の維持管理計画の策定例

ここでは、維持管理計画策定支援プログラム【既設版】を用いた栈橋の維持管理計画の策定の事例を示す。

(1) 栈橋概要

検討の対象は、1983年4月から供用が開始され、50年の供用を予定している栈橋である。上部工は鉄筋コンクリート構造である。下部工は、1995年に干満帯にモルタル被覆による防食が、海中部に20年耐用設計の電気防食が施された。栈橋の断面図を付図-B.1に示す。上部工および下部工（干満帯、海中部）の維持管理レベルをⅡとして、劣化度の代表値が劣化度bに至らないことを維持管理上の限界と設定した。なお、竣工時のデータは残されていない。

(2) 保有性能評価

2008年4月の部工、下部工（干満帯）の一般点検診断結果を付図-B.2および付図-B.3に示す。上部工、下部工（干満帯）ともに既に劣化度aに達している部材も見られ、劣化の進行は深刻な状況である。点検診断より得られた劣化度分布と各部材の劣化度の代表値を付表-B.3に示す。上部工、下部工（干満帯）ともに、現時点で既に維持管理上の限界を下回る状態であった。

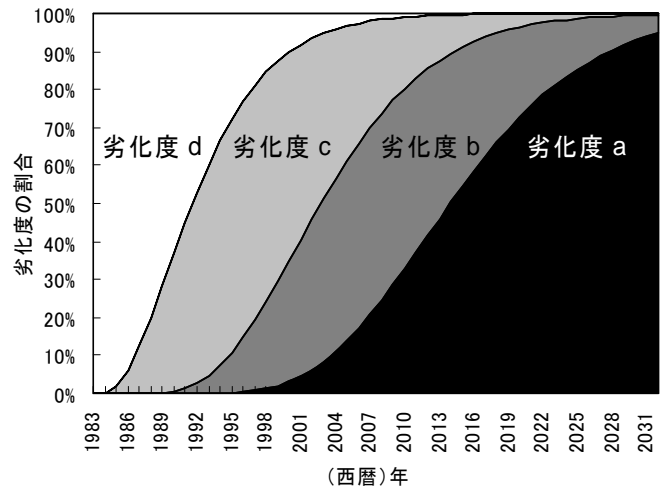
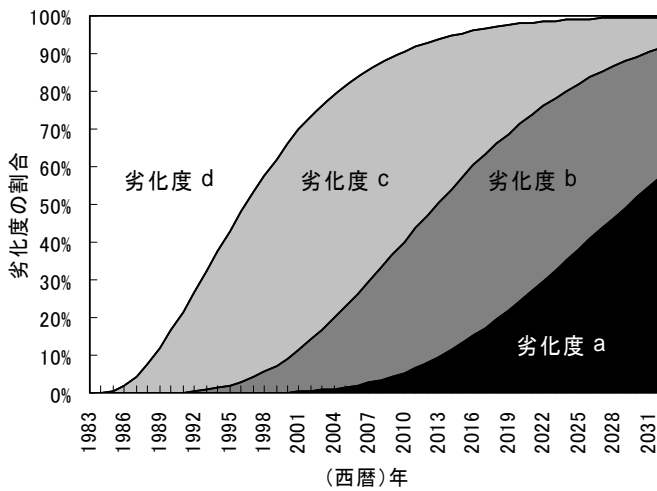
また、同時に下部工（海中部）の防食管理電位の測定を行った結果、全ての電極について、測定値は-800 mV（vs 海水塩化銀電極）より卑であった。このため、海中部の防食効果は有効であると判断された。

(3) 上部工の劣化予測

既に維持管理上の限界値を超えてはいるが、床版およびはりの劣化予測を行った。付表-B.3の劣化度分布を用いて、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測を行った結果を、付図-B.4に床版について、付図-B.5にはりについて示す。なお、遷移率は床版で0.182、はりで0.269と算定された。

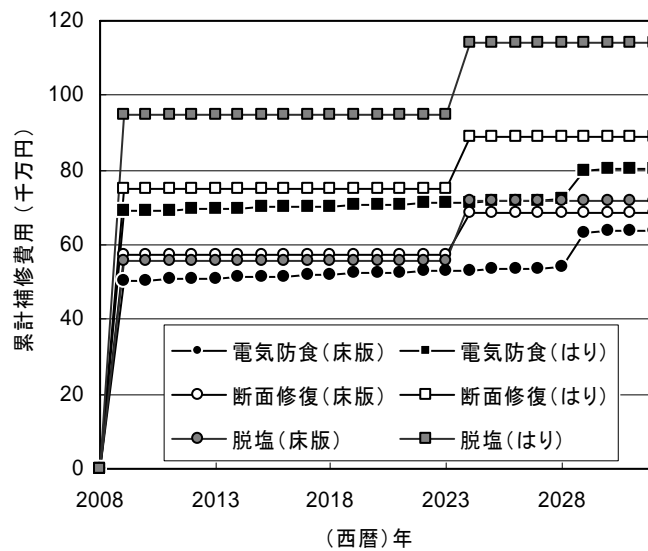
(4) 上部工の対策の選定

前述の通り、上部工は現時点で維持管理上の限界を下回っている。このため、維持管理レベルと維持管理上の限界値を修正するか、即補修対策を検討する必要があるが、ここでは即補修対策を選択した。補修工法の候補として、表-8に示す部材の劣化度と適用する対策工にしたがって、電気防食工法、断面修復工法、脱塩工法が挙げられた。表-9の補修工法別の適用範囲、および付録Cに示す各工法にかかる費用を設定し、残存供用期間の累計

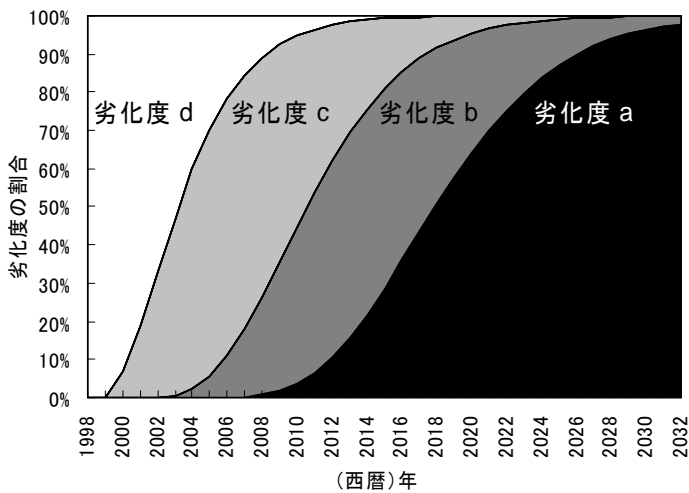


付図-B.4 床版の劣化予測結果

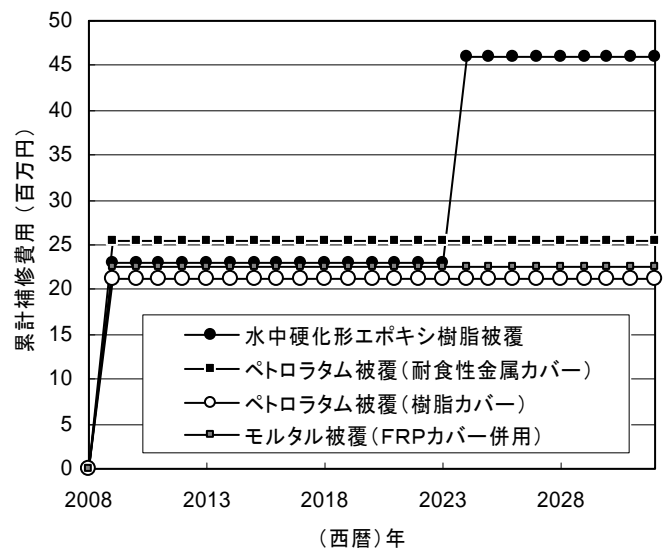
付図-B.5 はりの劣化予測結果



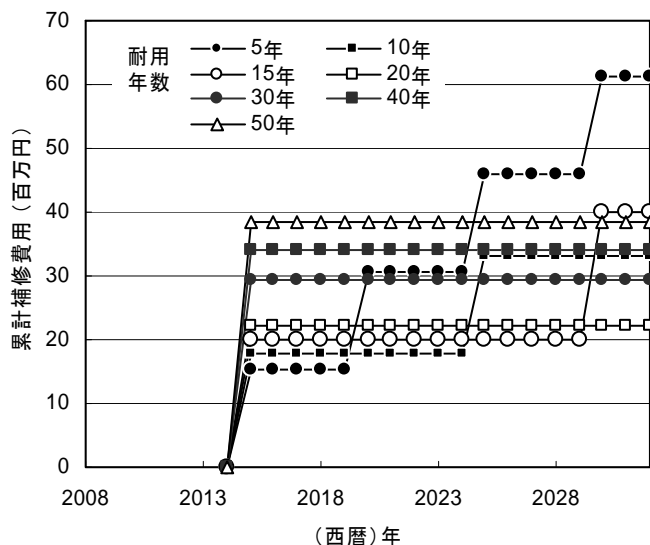
付図-B.6 累計補修費用の比較 (上部工)



付図-B.7 被覆防食の劣化予測



付図-B.8 累計補修費用の比較 (被覆防食)

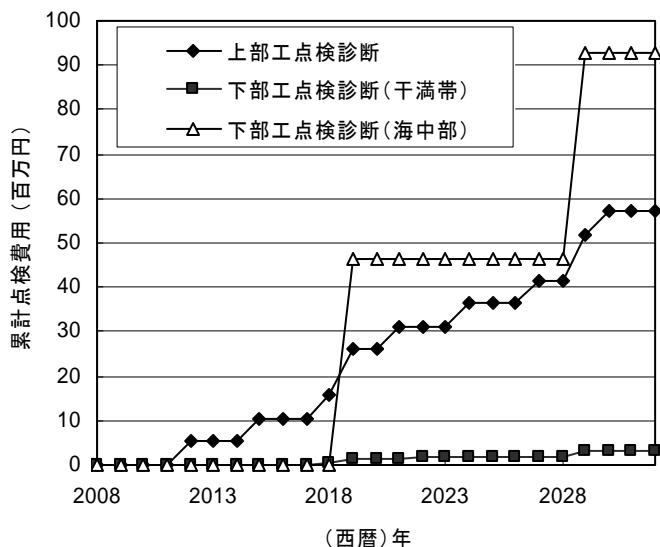


付図-B.9 累計補修費用の比較（電気防食）

付表-B.4 定期点検診断の調査項目と実施数量

部材	調査項目	一般 (3年間隔)	詳細 (10年間隔)
上部工	目視調査(簡易)(%)	100	100
	目視調査(詳細)(%)	0	20
	塩化物イオン濃度(箇所)	-	5
	かぶりの推定(箇所)	-	5
	鉄筋腐食診断(箇所)	-	5
	測量(座標/レベル)	実施する	実施しない
下部工 干満帯	目視調査(簡易)(%)	100	0
	目視調査(詳細)(%)	0	50
下部工 海中部	目視調査(詳細)(%)	0	100
	電位測定(箇所)	20	20
	陽極耗量調査(箇所)	0	3
	陽極電流量測定(箇所)	0	1

*目視調査は部材の総面積に対する割合(%)として表示



付図-B.10 点検診断にかかる費用の累計

補修費用を算定した結果を付図-B.6に示す。電気防食工法については陽極交換・電源装置補修等の維持管理費が発生する。しかし、これも含めた供用期間中の累計補修費用の比較から、床版、はりともに最も安価であったため、電気防食による補修を施すこととした。

(5) 下部工の劣化予測

既に維持管理上の限界値を超えてはいるが、被覆防食の劣化予測を行った。付表-B.3の劣化度分布を用いて、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測を行った結果を、付図-B.7に示す。なお、遷移率は0.492と算定された。

(6) 下部工の対策の選定

上部工と同様、下部工(干満帯)も現時点で維持管理上の限界を下回っている。このため、維持管理レベルと維持管理上の限界値を修正するか、直ちに補修対策を検討する必要があるが、ここでは後者を選択した。下部工(干満帯)の補修工法として、表-13に示す被覆防食が挙げられた。付録C.に示す各工法にかかる費用を設定し、付図-B.8に示すように、下部工(干満帯)の残存供用期間の累計補修費用を算定した。累計補修費用の比較から、干満帯には樹脂カバーを用いるペトロラタム被覆を施すこととした。

また、下部工(海中部)については、現在使用している陽極が消耗する2014年を陽極の交換時期として、干満帯と同様に、残存供用期間の累計補修費用を算定した(付図-B.9)。その結果、2014年に設計耐用年数20年の陽極を用いた電気防食を施す計画とした。

(7) 上下部工の定期点検診断の計画

対象とした栈橋上下部工について、今後、一般定期点検診断を3年に1回、詳細定期点検診断を10年に1回行う計画とした。また、一般および詳細定期点検診断の調査項目と実施数量については、付表-B.4のように定めた。付表-B.4中では、陸上からの目視調査を簡易、船上あるいは潜水士による目視調査を詳細と区分している。また、特に、上部工の詳細点検診断時には、コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定、非破壊試験による鉄筋のかぶりの推定、自然電位・分極抵抗の測定による鉄筋の腐食診断を5箇所ずつ実施することとした。付録C.に示す各調査項目にかかる費用を設定し、残存供用期間の点検診断にかかる累計費用を算定した結果を付図-B.10に示す。

付録C. 維持管理計画策定支援プログラムの初期設定単価一覧

付表-C.1～C.6に栈橋の上下部工の補修工法，予防保全対策，調査に係る維持管理計画策定支援プログラムの初期設定単価を示す。工法，調査にかかる単価，および工法の耐用年数の初期設定値は，近年の補修・調査実績に関する独自の調査，ならびに参考文献 12)から設定した値である。したがって，ここに示す単価および耐用年数は種々の条件で変動するものであり，使用にあたっては十分な配慮が必要である。

付表-C.1 上部工補修工法の単価（初期設定）

主な補修工法	補修工法（単位）	耐用年数	初期概算費用（円）	再補修前費用（円）	再補修概算費用（円）
表面被覆装工法	表面被覆（/m ² ）	15	17,500	5,000	14,500
	大断面修復工法（/m ² ）	(999)	120,000		
	小断面修復工法（/m ² ）	(999)	77,600		
	ひび割れ注入（/m）	(999)	10,000		
	仮設費（/m ² ）	(999)	11,000	11,000	
断面修復工法	断面修復工法(大)（/m ² ）	(999)	150,000		
	断面修復工法(小)（/m ² ）	(999)	97,000		
	表面被覆（併用）（/m ² ）	15	17,500	5,000	14,500
	ひび割れ注入（/m）	(999)	10,000		
	仮設費（/m ² ）	(999)	11,000	11,000	
電気防食工法	陽極・配線・電源設置（/m ² ）	50	100,000	5,000	80,000
	配線（/m ² ）	20		1,000	12,000
	電源装置（/m ² ）	20			6,000
	大断面修復工法（/m ² ）	(999)	120,000		
	小断面修復工法（/m ² ）	(999)	77,600		
	維持管理費（/m ² ・年）	(999)	600		
	ひび割れ注入（/m）	(999)	10,000		
	仮設費（/m ² ）	(999)	11,000	11,000	
脱塩工法	脱塩工法（/m ² ）	(999)	80,000		
	大断面修復工法（/m ² ）	(999)	120,000		
	小断面修復工法（/m ² ）	(999)	77,600		
	表面被覆（併用）（/m ² ）	15	17,500	5,000	14,500
	ひび割れ注入（/m）	(999)	10,000		
	仮設費（/m ² ）	(999)	22,000	22,000	
大規模改修	撤去・新設（/m ³ ）	50	300,000		

付表-C.2 上部工予防保全対策の単価（初期設定）

対 策	項 目（単位）	単価（円）	耐用年数(年)
電気防食工法の適用	陽極（円）	100,000	50
	配線（円/m ² ）	12,000	20
	電源装置（円/m ² ）	6,000	20
	維持管理費（円/m ² ・年）	600	—
コンクリートの W/C の低減 （W/C=0.40～0.45 の場合）	材料費用の増加分（円/m ³ ）	1,000	
コンクリートの W/C の低減 （W/C=0.30～0.40 の場合）	材料費用の増加分（円/m ³ ）	2,000	
かぶりの増加	材料費用の増加分（円/m ³ ）	20,000	
	施工費等の増加分（円/m ³ ）	5,000	
高強度高耐久パネル（型枠）の設置	材料費用の増加分（円/m ² ）	60,000	
	施工費等の増加分（円/m ² ）	5,000	
エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用	材料費用の増加分（円/kg）	60	
	施工費等の増加分（円/kg）	10	

付表-C.3 下部工補修工法の単価（初期設定）

防食工法の種類		耐用年数 (年)	初期概算費用 (円/m ²)	再補修前費用 (円/m ²)	再補修概算費用 (円/m ²)
被 覆 防 食	水中硬化形エポキシ樹脂被覆	15	85,000	7,000	85,000
	ベトセラタム被覆（耐食性金属カバー）	35	95,000	7,000	95,000
	ベトセラタム被覆（樹脂カバー）	30	78,000	7,000	78,000
	モルタル被覆（FRPカバー併用）	30	75,000	15,000	75,000
	ウレタンエラストマー被覆	30	45,000	7,000	45,000
	超厚膜形被覆	30	43,000	7,000	43,000
	ポリエチレン被覆	30	40,000	7,000	40,000
	耐食性金属被覆	50	300,000	7,000	200,000
電 気 防 食	クラッド鋼	50	300,000	7,000	200,000
	電気防食（5年対応）	5	3,000	300	3,000
	電気防食（10年対応）	10	3,500	300	3,500
	電気防食（15年対応）	15	4,000	300	4,000
	電気防食（20年対応）	20	4,500	300	4,500
	電気防食（30年対応）	30	6,000	300	6,000
	電気防食（40年対応）	40	7,000	300	7,000
	電気防食（50年対応）	50	8,000	300	8,000

付表-C.4 上部工調査項目別単価（初期設定）

目視調査（簡易）		目視調査（詳細）		測 量	
調査費（円/m ² ）	400	調査費（円/m ² ）	600	測量（円/ブロック）	10,000
結果整理（円/m ² ）	200	結果整理（円/m ² ）	400	結果整理（円/ブロック）	5,000
合 計（円/m ² ）	600	合 計（円/m ² ）	1,000	合 計（円/ブロック）	15,000
コンクリート中の塩化物イオン濃度		かぶりの厚さ（非破壊試験）		鉄筋腐食（非破壊試験）	
試料採取（円/箇所）	50,000	調査費（円/箇所）	50,000	調査費（円/箇所）	50,000
分析費用（円/箇所）	125,000	分析費用		分析費用	
足場費用（円/箇所）	100,000	足場費用（円/箇所）	100,000	足場費用（円/箇所）	100,000
結果整理（円/箇所）	50,000	結果整理（円/箇所）	50,000	結果整理（円/箇所）	50,000
合 計（円/箇所）	325,000	合 計（円/箇所）	200,000	合 計（円/箇所）	200,000

付表-C.5 下部工（干満帯）調査項目別単価（初期設定）

目視調査（簡易）		目視調査（詳細）	
調査費（円/m ² ）	300	調査費（円/m ² ）	8,000
その他費用	20	その他費用	
結果整理（円/m ² ）		結果整理（円/m ² ）	2,000
合 計（円/m ² ）	320	合 計（円/m ² ）	1,000

付表-C.6 下部工（海中部）調査項目別単価（初期設定）

電位測定		目視調査（詳細）		陽極消耗量調査		陽極電流量測定	
調査費（円/箇所）	100	調査費（円/m ² ）	8,000	調査費（円/箇所）	800	調査費（円/箇所）	800
結果整理（円/箇所）	20	結果整理（円/m ² ）	2,000	結果整理（円/箇所）	200	結果整理（円/箇所）	200
合 計（円/箇所）	120	合 計（円/m ² ）	10,000	合 計（円/箇所）	1,000	合 計（円/箇所）	1,000

港湾空港技術研究所報告 第48巻第2号

2009・6

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所
発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf	Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA3
Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field.	Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA37
Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiyuki MORIKAWA63
Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Tsuyoshi EMURA83
A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Takatoshi NOGUCHI, Masafumi MIYATA103
New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiaki KIKUCHI123
10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA145
Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers	Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Toru YAMAJI161
Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum	Katsuya HIRAYAMA, Ichiro MIYAZATO199