

広域な面積を有するジャケット栈橋における合理的な電気防食の性能確認調査の提案

The performance confirmation plan of the electrolytic protection method of construction in the jacket pier

野口孝俊¹・鈴木紀慶¹・鈴木大介¹・関口太郎²

Takatoshi NOGUCHI, Noriyoshi SUZUKI, Daisuke SUZUKI, Taroh SEKIGUCHI

¹正会員 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港 3-3-1)

²工修 新日鉄エンジニアリング (株) 羽田空港再拡張プロジェクト部 (〒141-8604 東京都品川区大崎 1-5-1)

The Haneda Airport D runway is built by a steel structure jacket type for the first time in Japan. As a way of protection against corrosions to secure the durability of 100 years, we adopted electrolytic protection method. In this report, we made an electrolytic protection design of a steel structure jacket and then we investigated the rational way of health grasp of an protection method which a large quantity of anode was installed around steel. I suggest performance confirmation investigation of rational electrolytic protection.

Keyword: Electrolytic protection, Jacket type pier, Tokyo International Airport, D-runway

1. はじめに

現在建設が進められている東京国際空港 (羽田空港) D滑走路は、図-1 に示すように羽田空港の沖合い海上において、埋立法と栈橋工法を組み合わせた構造を採用した。多摩川側約 1,100m は、多摩川河口域に建設することから河川の流れを阻害しない構造が必要であること、供用中の羽田空港の運用条件による制約及び海上工事を短期間とすることから栈橋構造とし、ジャケット式鋼構造物を採用した¹⁾。

D滑走路で採用した栈橋部ジャケット式鋼構造物は、ブレース材 (水平材や斜材) を水中部に配置し、水面付近にはジャケット支柱 (レグ) のみを配置する構造とした (図-2)。鋼管柱の本数は全体で約 1,800 本に及び、これらの防食は構造物の耐久性を確保する上で重要な課題であるとともに、河口域の海上部に建設され、厳しい腐食環境下に曝されることから、鋼材の腐食対策を十分に実施する必要がある。また、防食工法は 100 年間の設計供用期間において、有効に機能させるために、維持管理性に重点をおいた

耐久性が期待できる防食技術を採用した。

本稿では、広大な空港施設としての適用は初めての試みとなる栈橋部ジャケット式鋼構造物の電気防食設計と大量の陽極を設置した栈橋の合理的な陽極の健全度把握手法の検討を行い、最適な調査計画を提案する。

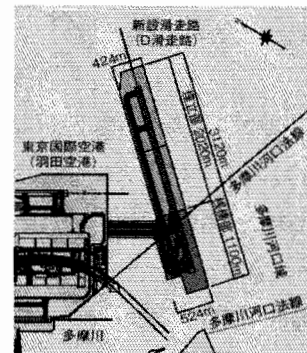


図-1 羽田空港 D 滑走路栈橋部平面図

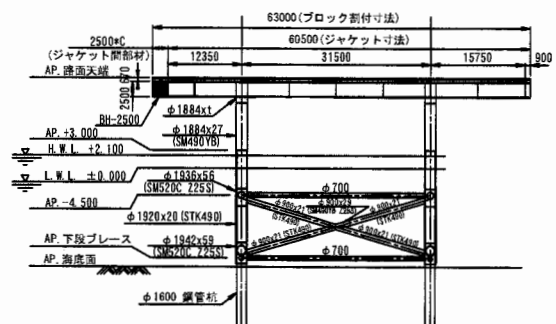


図-2 栈橋部標準断面図

2. ジャケット栈橋防食工法の選定

ジャケット式鋼構造物の上部鋼桁部は、飛沫帯・干満帯とともに、広大な床版により覆われており、飛来して付着した塩分（海塩粒子）が降雨によって洗浄されない極めて厳しい腐食環境におかれる。さらに、設置環境が海上部であることから、防食工の補修は容易ではない。これらを踏まえて、鋼材の防食工法は長期耐久性を期待できる仕様を優先的に選定した²⁾（図-3）。

干満帯・飛沫帯及び海上大気部のジャケットのレグ部は、耐海水性ステンレス鋼被覆を適用し、100年のメンテナンスミニマム化を可能とした。床版の軒下部については、上部鋼桁部分をカバープレート³⁾で覆う構造として風雨・飛来塩分遮断の機能を持たせるとともに、内部は塗装に加えて除湿管理を行うことによる防食工法を採用することとした。これにより、160万㎡に及ぶ塗装の塗替えを最小とすることができる。また、海中部及び海底土中部は、実績が豊富で信頼性が高い電気防食工法を採用した。これらの防食工法の適用により、鋼構造物の維持管理費用をミニマムにすることが可能となり、ライフサイクルコストの低減に大きく貢献している。

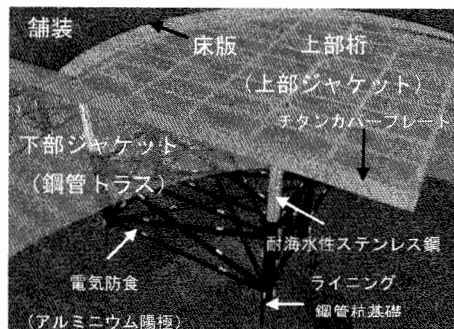


図-3 栈橋部ジャケット式鋼構造物の防食仕様

3. 電気防食の設計

(1) 鋼構造物水中部に対する環境条件

一般的に腐食に影響を与える環境条件としては、塩分濃度、溶存酸素量、流れ、水温などの要因⁴⁾があるが、これらは傾向を示すものであり、優位な関連性は見いだされていない。しかし、広大な栈橋面積を考えれば一様な調査を行うことは経済的にも不可能であり、腐食の観点から環境を区分して、区域ごとに適切な点検計画を策定することが合理的である。そこで、水中部の鋼構造物に対する環境条件の特徴を以下のように想定し、腐食環境の厳しい箇所を設定した。（図-4）

- ① 一般的な海中部に比べて多摩川の河川水の影響を受けるため、腐食速度が大きい。
- ② 埋立/栈橋接続部、現空港接続部は、砕波による海中の溶存酸素濃度変化の影響を受ける。

- ③ 新滑走路島沖側は、波浪、潮流等の海流環境の影響を受ける可能性がある。
- ④ 新滑走路島現空港側は、海水の停滞域が形成され影響を受ける可能性がある。

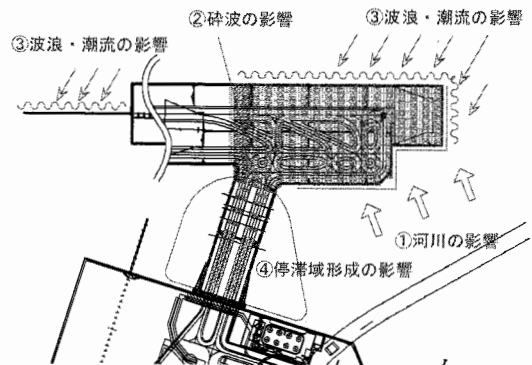


図-4 栈橋部における環境条件

(2) 電気防食設計

海中部及び海底土中部は、港湾施設に実績が豊富で信頼性が高く維持管理の容易なアルミニウム合金陽極（Al-Zn-In系）を用いた流電陽極方式による電気防食工法⁵⁾を採用した。

東京湾は上層が汚染海域で下層が清浄海域である「汚染少」の海域と設定した。羽田空港C滑走路進入灯付近においてもこのような傾向が認められている²⁾。そこで、表-1に示すように初期防食電流密度を上層部（A.P.-2.0m以上）で130mA/m²とし、それ以下の海中部（A.P.-2.0m以下）を100mA/m²と設定した。

表-1 電気防食設計における初期防食電流密度と海水の抵抗率

		下層(清浄) A.P.-2.0m	上層(汚染) A.P.-2.0m以上
初期防食 電流密度	海水中	100mA/m ²	130mA/m ²
	海底土中	20mA/m ²	—
海水の抵抗率		30Ω・cm	—

鋼構造物に電気防食を施し防食電流を流すと、構造物の電位は次第に低い電位（卑方向）に移り、ある電位以下になると腐食が抑制されることが判っている。この防食電位を-780mv（照合電極：海水塩化銀電極）とし、陽極質量の算出については平均発生電流を初期発生電流の50%⁴⁾とみなして行った。

(3) 陽極の配置

設計上必要な防食電流量を満足させるためには、大きな電流発生量の陽極を少数配置することが、設置費用や維持管理段階の調査・点検箇所数が最小化され経済的となる。しかし、少数配置だと陽極の脱

落や不具合が生じた場合における腐食影響が大きいことから、陽極を均一な間隔で設置することとした。

レグでは最上 A.P.-2.0m, 最下 A.P.-25.0m, 上下ブレースの中間位置を標準としている。

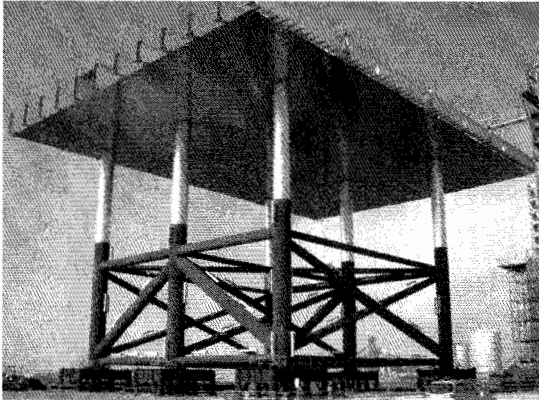


写真-1 陽極の配置例

陽極の設計寿命は35年とし、陽極の発生電流量を3.5A 型とした場合、ジャケット1基あたり約80個になり、栈橋部全体では約16,000個必要となった。

4. 性能型設計における電気防食点検・調査の考え方

(1) 電気防食点検・調査の目的

港湾施設の維持管理計画の策定⁷⁾では、陽極の耐用年数を見極めることが防食効果を確保するために必要であるとされる。そのため、詳細点検として陽極の残存質量を調査し、消耗量から寿命予測を行っている。全ての陽極を調査すれば数量が超大となり、代表点を選定するにしても確実に確認できるとも保証されない。そこで、従来方法を有効に組み合わせた計画を策定する必要があった。

流電陽極方式の維持管理のための調査には、以下に示す3つの目的が有ると設定した。

最初に、電気防食されているかを確認する調査である。この確認方法としては目視による陽極の脱落有無の確認がある。しかし、海中に設置された陽極を目視調査するためには潜水作業が必要となること

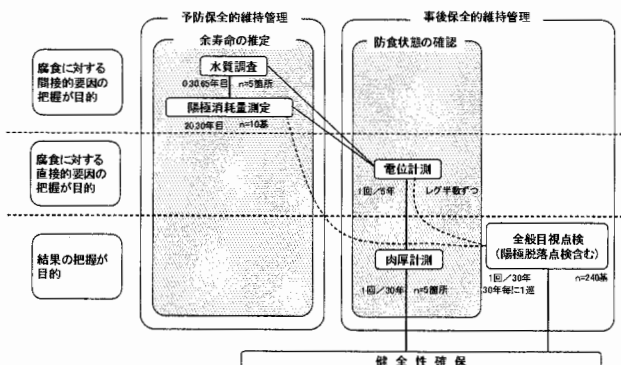


図-5 点検調査の目的

から、膨大な数量の調査には多額の費用がかかる。港湾鋼構造物防食・補修マニュアルでは、簡易な方法として電位測定による調査方法を紹介している。

次に防食設計どおりに機能しているのかを確認することにある。現在の設計では、電流密度や海水の抵抗率などは事前調査を踏まえているものの、防食開始後の確認行為は行われていない。そのため、海域の環境条件によっては防食電流に設計と差が生じ、耐用年数に大きな差が生じることが考えられる。

本施設における防食の目的は、所要の電流が発生する陽極を設置することではなく、防食状態が一定期間保持されることにより、鋼構造物の肉厚が減少されることなく健全度が保たれることが目的である。したがって従来の陽極試験⁸⁾では、製品としての陽極の品質は確認しているものの、実際の発生電流量とそれに伴う耐用年数とを確認していないため、完全に性能設計に対応していることにはならない。そのため、初期の段階において海中に設置された陽極の初期電位および電流の変化を把握すること、及び設置環境における水質調査を行うことが必要である。

最後に確認行為のための調査である。陽極が存在し電位が一定となっても、鋼構造物に腐食が発生していないことまでの確認はできない。そこで、陽極の耐用年数の数年前には鋼管の肉厚調査、陽極の脱落調査、陽極消耗量調査を実施する計画とした。

広大な面積を持つ構造物の劣化状況を調査する方法としては、2つの考え方が考えられる。代表的な調査箇所を選定し、継続的なデータを取得して全体を評価する方法と、一定期間の間に対象とする構造物の調査を1回は実施し健全であることを確認する方法である。前者は陽極の性能が変わらないことを確認する場合に有効であり、D滑走路では、電位や陽極消耗量、部材肉厚の変化を確認する調査に採用した。後者は構造物の異常や陽極の脱落などの状況を確認する調査に採用している。

(2) 性能設計に対応する所要電流量設計

D滑走路で採用したジャケット構造は、図-2に示すようにトラス部分が A.P.-4.0m 以下の海中部に設置され、レグ部の面積よりも面積比で5倍程度多い。従って初期防食電流密度の設定に関して、清浄と汚染の境界水深をどこにするかにより防食電流量に大きな差が生じてしまう。表-2に条件を変えてどの程度の感度があるのか試算した例を示す。トラス部の水平レグまで汚染海域とした場合は6%、海底面まで汚染海域であれば耐用年数に26%の差が生じる。ケース2は電流密度の設定を変えた場合であるが、電流密度を上層 A.P.-4.0m まで100mA/m²、150mA/m²としても大きな違いは生じない。次に土中電流の電流密度を変えた場合も6%の差に留まる。以上のことから、深度方向に対する電流密度の設定が、陽極の耐用年数に大きく影響するため、深度方向に調査が可能電流量・電位測定が必要であると言える。

表-2 条件の違いによる所要電流量の試算

	適用深度の指定			電流密度(mA/m ²)						基本所要電流比
	海水中 上層	海水中 下層	土中 上層	土中 下層	土中 上層	土中 下層	土中 上層	土中 下層	土中 上層	
	AP+1.2~ -2.0	AP-2.0~ -17.5	AP-17.5 ~-87.8		100	130	150	130	100	
基本ケース	○	○	○		100	100	130	130	100	
ケース1-1	○	○	○		20	20	20	30	10	1.06
ケース1-2	○	○	○							1.25
ケース2-1	○	○	○							0.99
ケース2-2	○	○	○							1.26
ケース3-1	○	○	○							1.06
ケース3-2	○	○	○							0.94

(3) 実海域における所要発生電流の確認

1 個の陽極が担う発生電流量を 3.5A/個と設定しているが、防食開始より数年経過後にはエレクトロコーティングの生成により陽極発生電流は初期発生電流量から低下し、50%程度の低減率が見込めると考えられる。

東京港大井ふ頭の調査結果⁹⁾からもこのような傾向は伺えるが、環境条件によっては異なる傾向となる可能性もある。そこで、シャント抵抗を用いた発生電流測定装置により電流量を測定した。

設置場所は河川水の影響を受ける連絡誘導路と海域の流れの影響を最も受ける2箇所とし、上層 AP-6.0m 下層 AP-11.5m において測定した。(図-6) 測定は施工初期に当該ジャケットが設置された直後から行い、維持管理が始まるまでの二年間の連続計測を実施した。測定開始直後は電流量が 1.5A 程度まで低下したが、夏から秋にかけて設計で設定した初期発生電流の低減率(50%)を超える傾向を示した。その後は緩やかに低下し、1.0A 程度で安定状態を保っている。しかし、東京港大井ふ頭の計測傾向では夏場に再上昇する傾向も見られるため、継続的な計測が必要であるものの、当初設定した 50%程度の低減率は確保されていると考えられる。本調査の詳細は別途報告したい。

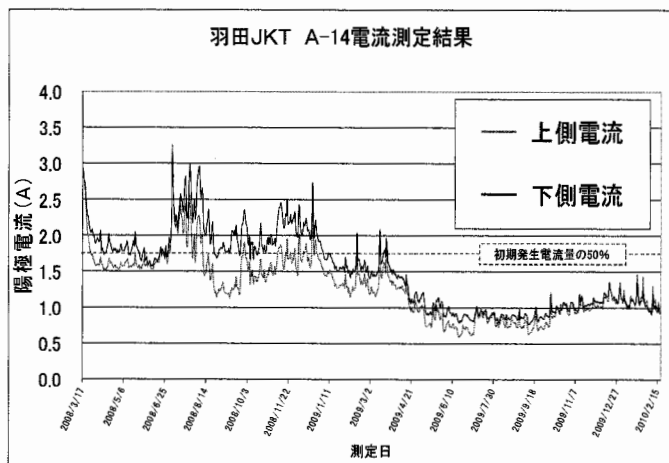


図-6 陽極発生電流の経時変化

(4) 性能設計に対応する電位計測の有意性

図-7に当初設計で求めた所要電流量(ケースa)および4. (2)で試算したケースの内、多くの電流が必

要となった場合(ケースb)を示す。設計段階ではエレクトロコーティングの生成により安定状態になった平均電流発生量を求めることが出来ないため、あくまで過去の例を参考にして、必要な耐用年数での平均防食電流量を初期の50%として陽極質量を算出している。今回35年耐用年数で設計したものが更に伸びる可能性が高いことは性能発注としては問題がないが、低減率が50%より小さければ陽極質量を縮減できたことになる(ケースc)。逆に清浄・汚染海域の設定における水深方向での不確定要素や将来の水質変化で打ち消し合い、結果として設計どおりの耐用年数に落ち着くことも否定できない。今後、性能設計に基づく合理的な電気防食調査は、工事中における電位・電流量調査に基づき、その結果を反映した頻度や数量の見直しを行って実施することが望ましいと考える。

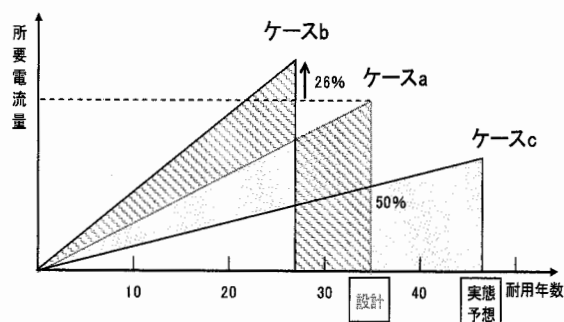


図-7 陽極の性能確認

5. 電位測定の点検数量・頻度の最適化検討

(1) 対象測定範囲

予想される変状には、機械的衝突損傷などによる陽極の脱落など場所を特定できない変状要因も考えられることから、施設の健全性を確保するために、図-8に示すとおり全域を測定対象とした。しかし、全域を同じ頻度を以て点検することではなく、図-4で検討した環境条件に応じて5つの環境区分に区域を分け、計測頻度にメリハリを付けることにした。

(2) 対象測定箇所

レグ間隔が10m程度と広く、電位測定しているレグ以外の変状(陽極脱落など)を把握するのは困難と判断し、各ジャケット1回に1本ずつ全レグを測定する。

(3) 測定深度

ジャケット構造である東京港の大井ふ頭第5バースにおける電位調査の結果から陽極から発生する電位を計測することが可能になった結果を踏まえ(未発表)、レグに設置した3水深での陽極の測定により、その近接陽極から防食電流が発生していることが把握できると判断した。また、多摩川河口域であり環境条件も異なることから深度方向に測定点をとる必要があると判断した。ただし、環境により区分

したエリア内に代表点を2箇所とり、ここでは2m毎に測定して陽極間でも防食電位が保たれていることを確認する。

(4) 測定頻度

供用後の計測頻度は2年毎とし、1ジャケット当たり1本行うものとする。無防食状態になってから設計で考慮した腐食代を超えない期間(12年)で一巡させることにした。

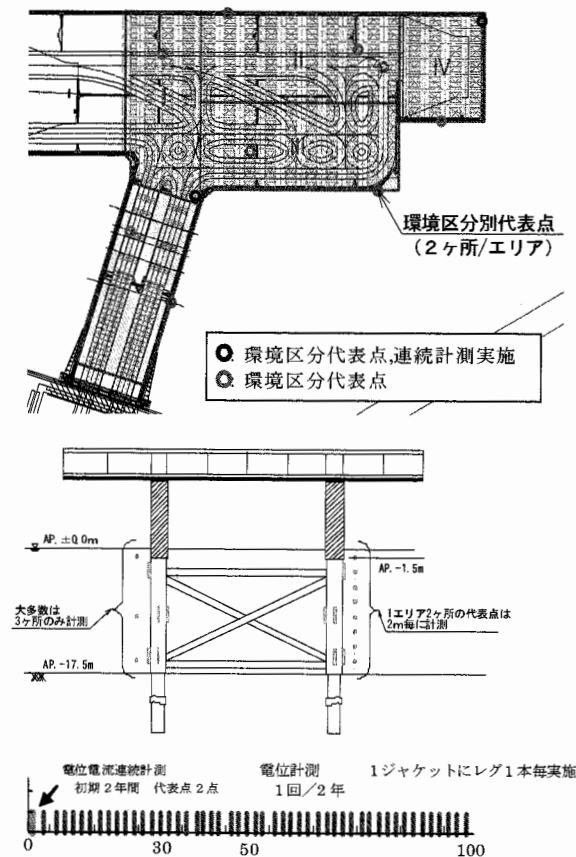


図-8 電位測定位置および測定頻度

何らかの理由により、あるレグが無防食状態になった場合、海中部の鋼材の一般的な腐食速度は0.2mm/年程度と想定されるが、本ジャケットのレグ海中部の表面にはエレクトロコーティングが形成されており一定期間の防食効果が期待できること、大きな腐食が発生しやすい干潮面直下付近は耐海水性ステンレス鋼被覆により防食されており鋼材腐食の懸念がないこと、およびレグに設定している腐食代が2mmであることから、腐食代を超えるまでに10年以上の猶予があると判断した。したがって、電位測定は2年毎とし、大きな異常を早期に発見できるようにするとともに、各ジャケット1本のレグで計測し、各レグに着目すれば12年毎の測定がおこなわれるよ

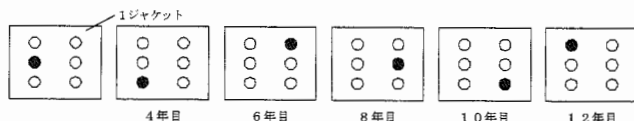


図-9 電位計測

うに設定した。(図-9)

6. 合理的な電気防食調査の在り方

(1) 点検計画策定の考え方

点検は施設の維持管理上、非常に重要な位置づけにあり、特に予防保全施設に重点を置いた点検が必要である。しかし、むやみに点検頻度を上げるとは維持管理費用の増加を招くため、点検を補い、かつ定量的な情報が得られるモニタリングや調査・計測を追加して充実を図った維持管理計画が必要である。

各種の公的な基準、指針等を参考として設定した点検頻度は耐用期間中同一頻度であったが、リスク評価に基づき保全種別を設定し、予防保全対象(滑走路・誘導路)の施設においては、腐食環境の厳しい条件との観点から点検すべき区域と点検すべき時期を明確にして重点化を、また、事後保全施設については頻度を下げる方向で、一定コスト内における点検頻度の最適化を図った。

なお、供用後の維持管理段階においては、実際の劣化・損傷状況を踏まえた劣化予測に基づいて頻度を適宜、見直す方針とする。

(2) 電気防食における維持管理計画の策定手順

広大な面積を有する栈橋など施工期間が長くとれる工事では、供用までの期間を利用して電位調査が

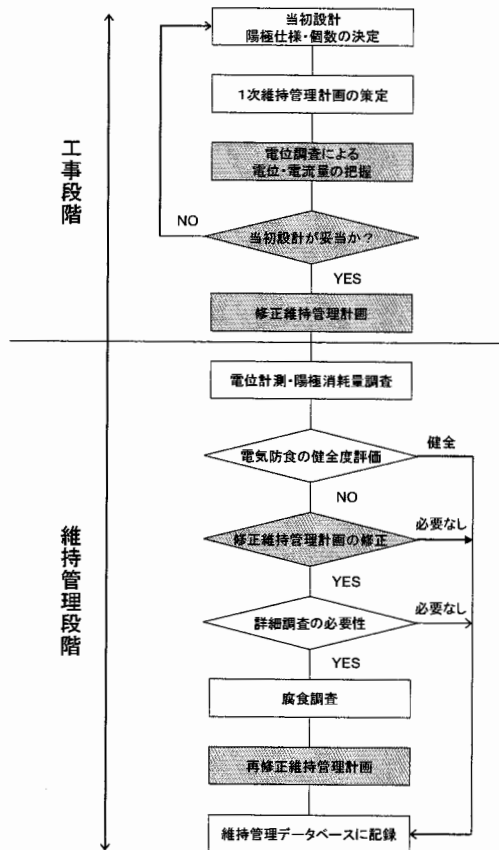


図-10 維持管理計画策定の手順

可能である。その結果を反映し、当初策定した維持管理計画を見直せば、鋼管の穴あきなど構造物の健全度を損なうようなことにならず、結果的にライフサイクルコストの低減につながる。点検に多額の費用を投じずに最小限の点検項目で安定した健全度を保つことができよう。陽極が確実に設置されていれば、電気防食の信頼度はかなり高く、防食効率も100%であると想定される。さらに、電位計測を確実に実施し、結果が良好であれば、海中作業を伴う肉厚調査や陽極調査が不要となることも想定できる。

(図-10)

(3) 合理的な点検頻度の見直しの考え方

維持管理の目的は栈橋の健全性を保つことであり当初に策定された調査・点検を実施することが目的ではない。防食性能の点検、調査・計測の結果、劣化の進行が供用前の劣化予測と異なる傾向を示す場合には、点検頻度の見直しを行うことは必然である。

図-11に示すように劣化により性能保持の限界に近づいてきた場合は、頻度や数量を増やして防食状態を的確に把握し、適切な時期に補修、交換を実施することが重要である。また、点検、調査・計測の結果、劣化スピードが当初予測よりも遅く性能保持限界まで余裕を有する場合は、点検、調査・計測頻度を下げ、逆に、当初予測よりもスピードが速く性能保持限界に近づいていると判断される場合には、点検、調査・計測頻度を密にする、という基本的な考え方で見直しを行うものとする。

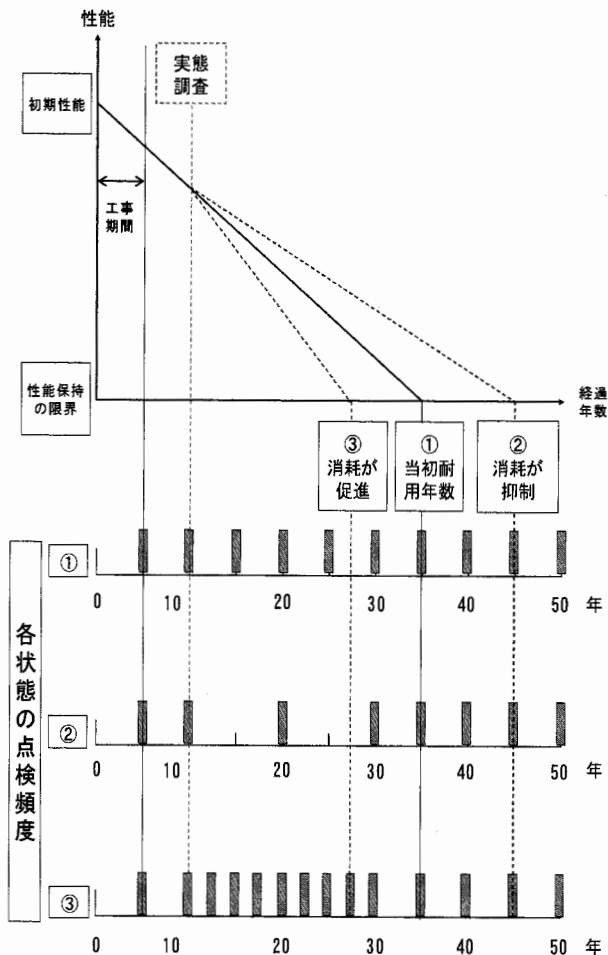


図-11 性能を担保するための点検頻度の見直し (イメージ)

7. おわりに

(1) 電気防食の性能設計のためには、単に陽極の品質を確認するだけではなく、実際に発生する電流量や電位を確認する電位・電流計測を工事中に実施し、当初設計の妥当性の検証を行うことが重要である。

(2) 性能規定型設計において耐久性を求める場合、腐食に対するリスク回避として、当初性能と比較することが可能な定期的な電位計測の確認が有効な手法である。

(3) 当初に策定された調査・点検計画に対して、その結果を反映させ当初設計と異なる傾向を示す場合は、点検頻度の見直しを行うことが性能を担保する上で重要である。

最後に、本設計にあたっては羽田空港D滑走路建設工事関係者の方々に御助言を頂いたことを付記し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 風野裕明, 片山能輔, 辻岡和男, 石田雅己, 藤川敬人, 岩廣真悟: 栈橋部ジャケット構造の設計, 建設図書「橋

梁と基礎」, Vol.43.13-14, 2009.1

- 2) 石田雅己, 佐藤弘隆, 関口太郎, 野口孝俊, 鈴木紀慶: 羽田空港再拡張事業—D滑走路・ジャケット構造物の防食—, 日本防錆技術協会「防錆管理」, Vol.51No.8, 2007.8
- 3) 藤川敬人, 野呂直以, 七浦恒康, 石原達也, 野口孝俊: 新しい鋼橋防食法としてのチタンカバープレート工法の性能確認, 建設図書「橋梁と基礎」, Vol.42.49-54, 2008.6
- 4) 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル: 沿岸開発技術研究センター, 1997.4
- 5) 阿部正美: 海洋鋼構造物の腐食と防食対策(日本防錆技術協会), P.27~41, 2002
- 6) 高橋宏直, 岩波光保, 横田弘: 港湾施設の維持管理計画策定に関する基本的考え方, 国土技術政策総合研究所資料, 国総研資料第376号, 2007.3
- 7) 流電陽極試験法 JSCE S-9301: 腐食防食協会, 1993.9
- 8) 宮田義一, 若林徹, 濱田秀則: 耐海水性ステンレスライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性, 港湾空港技術研究所報告, 第45巻第2号, 2006.6