

塗装はなぜ、橋を守るのか

— 腐食・劣化・時間を相手にする技術の本質 —

高木 千太郎¹⁾

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に整備された多くの社会基盤施設が更新期を迎えている。社会基盤施設は、主要材料によって大きく鋼構造とコンクリート構造に分けられ、今回の主題は、鋼構造、特に鋼製橋梁をターゲットとした維持管理、防食塗装についてであり、腐食という不可避の劣化現象と向き合い続けなければならない構造物が対象である。鋼製橋梁の維持管理の核心は、劣化を止めることではなく、その進行を管理することにある。適切な点検・診断と防食対策が機能すれば、供用期間は大きく延伸する。鋼製橋梁の維持管理の重要なポイントは、点検・診断と劣化抑止にあり、適切に点検・診断を行い、その結果を活かした効果的な劣化抑止策が機能すると、耐用年数は飛躍的に伸び、安全・安心にも寄与する。例えば、1928 年（昭和 3 年）に建設された首都東京・隅田川に架かる幹線道路橋、国の重要文化財でもある写真 1 に示す清洲橋が相応しい。



写真 1 約 100 年人々を支えてきた清洲橋

鋼部材が劣化する主原因は、鋼材の腐食や疲労があげられ、中でも損傷事例の多い腐食を抑止する代表的な技術が塗装である。塗装は、塗料によって対象鋼部材を覆うことから、私たちは日常的に「塗装は橋を守る」と語り、疑うことなくそれを前提としての設計や供用後の維持管理計画を立てている。

しかし、その本質を理論的に説明できる技術者は決して多くはない。鋼製橋梁の新設や塗装塗替え時においては、一般的に重防食系か一般系の塗装系選択、塗装仕様の選択、塗替え周期の設定、素地調整方法の選択などを検討することで、新設及び塗装塗替え時の実務は概ね確立している。一方で、「塗装は何と戦っているのか?」、「塗装が負けるとはどのような状態か?」、「なぜその仕様で 100 年供用が可能なのか?」と問われたとき、構造的に説明できるかどうかは別問題である。

すなわち塗装が抱えている問題は、仕様の妥当性ではなく、「腐食という時間積分の現象を、どのような物理的・化学的機構によって制御しているのか」を説明できるかどうかである。ここでいう時間積分とは、「腐食量が腐食速度の累積で決まる」という意味を指している。塗装の合理性については、塗料名や仕様の選択理由にとどまらず、腐食反応の進行速度をいかに制御するかという物理化学的根拠に基づいて説明する必要がある。

本稿の目的は、塗装を腐食速度制御技術として再整理し、橋梁の供用期間との関係を時間軸の視点から明確化することにある。

本稿の目的は、塗装を腐食速度制御技術として再整理し、橋梁の供用期間との関係を時間軸の視点から明確化することにある。

2. 腐食の時間構造と耐久性の本質

腐食は、たまたま起きる、予測不能な事故的現象を指す偶発的な不具合ではない。それは鋼という人工物が自然環境下で必然的に辿る時間的变化である。本章では、腐食を単なる材料劣化としてではなく、時間の中で進行する動的現象として再定義をする。そのうえで、塗装、再塗装、点検・診断を含む耐久

1) アイセイ株式会社 〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-40-3 横山ビル 6 階

一般社団法人 日本構造物診断技術協会 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-2-3

積時間の積分値として定義される。すなわち、時刻 t における劣化量 $D(t)$ は、瞬間的な腐食速度 $r(\tau)$ の時間積分として**式1**で表される。

$$D(t) = \int_0^t r(\tau) d\tau \quad \dots \dots \dots \text{式1}$$

本式は腐食進行を概念的に表しており、 $r(\tau)$ は単位時間当たりの減肉量であり、環境条件、温湿度、塩分付着量、酸素供給状態などの環境条件に依存する時間関数である。なお、本式は概念モデルであり、実際の腐食進行は確率的変動を含む。この式が意味することは単純である。腐食量とは、ある瞬間の状態ではなく、腐食速度を時間方向に積み上げた結果を示している。したがって、重要なのは腐食の有無ではなく、腐食速度 $r(t)$ の大きさであり、実務上は統計的または経験的手法により推定される。

このように腐食は静的な状態変化ではなく、環境と時間の相互作用によって支配される動的過程である。この構造は鋼材腐食特有のものではなく、疲労、凍害、ASR や塗膜劣化など橋梁に生じる他の劣化現象にも共通する基本特性である。橋梁の劣化現象はすべて時間依存型と言える。疲労は繰返し回数の累積、中性化や ASR は化学反応の進行、塗膜劣化は紫外線や水分の累積作用である。橋梁が性能を失うとは、これらの損傷が時間の中で積み上がった結果に他ならない。

ここで重要なのは、腐食は「存在するか否か」ではなく「どの速さで進むか」という問題である。この視点に立てば、塗装は防食設計と腐食反応を停止することではなく、腐食速度を低減させるための環境制御技術と位置付けられる。塗膜は酸素や水分の透過を完全に遮断するものではないが、拡散係数および透過速度を大幅に低減させる層として機能する^{4),5),6)}。すなわち、塗膜は「ゼロ透過」を実現する絶対的な障壁ではなく、腐食反応に必要な反応物質の供給速度を物理的に遅延させる調整層として機能していることが理解できる。塗膜外面を覆う腐食因子は、実際には塗膜があることでゆっくりと透過している。しかし、その透過速度は大幅に制御されており、鋼材表面に到達する腐食因子である酸素・水分量及び塩分は著しく制限される。このようなことから、塗膜に覆われた鋼材は、無塗装鋼材と比較すると腐食速度は著しく低下している。この腐食速度の低減効果は、塗膜が単なる物理的被膜ではなく、腐食反応に関与する物質移動過程を支配していることに起因している。

2.3 腐食速度の制御としての防食設計

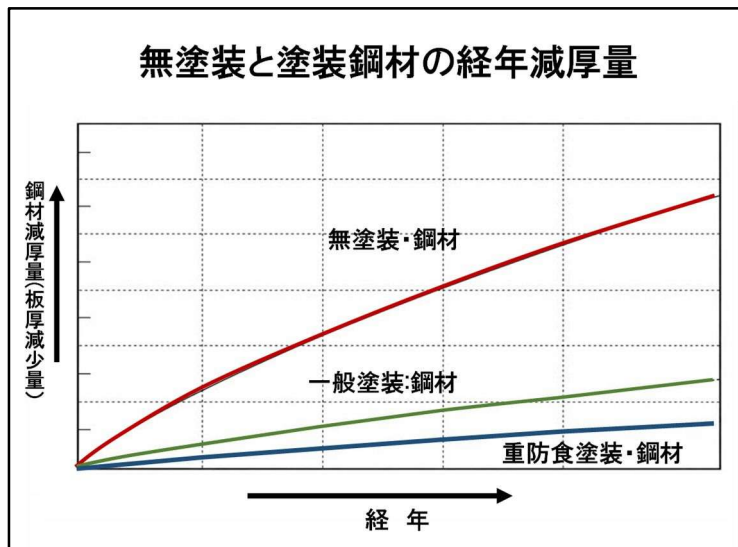


図 2 無塗装と塗装鋼材の減厚量比較概念図

塗装の本質は、反応物の供給を減らし、拡散を遅らせ、電気化学反応の進行速度を抑制することにある。すなわち塗装とは、「腐食を止める技術」ではなく、「腐食反応の時間定数を操作する技術」なのである。時間定数が増大すれば、腐食速度 $r(t)$ は低減し、その積分値である劣化量 $D(t)$ の増加率も小さくなる。その結果、劣化曲線の傾きを緩やかにし、性能限界に到達する時期が後方へ移動し、供用年数の延伸が実現する。すなわち重要なのは、腐食をゼロにすることではなく、性能が要求水準を満たす期間を合理的に確保することにある。例えば、海塩環境下の無塗装鋼材では腐食速度は $0.1 \sim 0.2 \text{ mm/year}$ 程度に達することが知られている。一方、重防食塗装系ではこれが $1/10$ 以下に低減される。

図 2 に無塗装鋼材と一般塗装鋼材の経年での断面減厚量のグラフを示した。図 2 に示すように、重要なのは減厚量の絶対値ではなく、曲線の傾き、すなわち腐食速度である。このような時間軸に基づく性

能確保の思想は我が国の設計基準にも明確に表れている。先に示した防食設計の体系については、実務的には土木学会「鋼橋の防食技術」⁷⁾に整理され、基本的な考えとなっている。

2.4 道路橋示方書の耐久思想

道路橋示方書（共通編）においては、供用期間中に要求性能を満足することが求められている⁸⁾。同様の考え方は、AASHTO, LRFD⁹⁾, EN1990¹⁰⁾にも見られる。先に示した技術基準・道路橋示方書が求めているのは、「錆びない橋」ではない。求められているのは、腐食の有無ではなく性能の維持、供用期間中に要求性能を下回らない橋である。この性能確保を時間軸上で成立させるためには、劣化進行速度の制御が不可欠となる。

耐久設計とは、劣化の発生を否定することではなく、その進行を時間軸上で管理することである。このような時間軸上の性能管理思想、劣化進行速度を管理するという思想は、個別構造物にとどまらず、組織的資産管理にも共通する考え方ともなっている。また、時間軸上の性能管理の考え方は、構造設計の枠を超え、資産管理の国際規格 ISO55000¹¹⁾においても重要概念として位置付けられている。塗装は耐荷力を直接向上させるものではないが、性能低下の勾配を制御することで耐久性能を成立させる最も基礎的なマネジメント手段と言える。そして性能管理上重要なこの勾配は、適切な時期に塗装を塗り替える（再塗装）ことによって再設定することが可能である。

2.5 時間的再設定行為の再塗装

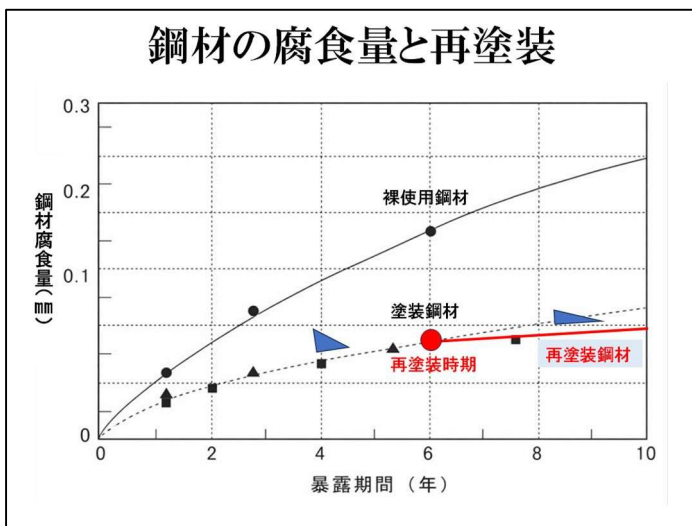


図 3 再塗装による腐食勾配の再設定イメージ図

再塗装、塗装の塗り替えは新設時に戻す行為ではない。なぜなら、鋼材の腐食は不可逆的な断面減少を伴う現象であり、既に生じた断面減少や腐食生成物質による表面粗度の変化は、完全に消去することが出来ない。すなわち再塗装とは、腐食が進行し断面減少や表面粗度の変化が残る中で、「現在の劣化状態を起点として時間軸を再設定する」技術的介入行為であり、新たな劣化勾配を与え直す行為である。再塗装は、腐食反応を停止する技術ではなく、腐食速度を低減させる環境制御技術であり、**図 3**に示すように時間軸上の劣化勾配を再設計する操作である。

再塗装後は、劣化量は残存するが、腐食速度が再び低減し、曲線の傾きが小さくなる。したがって、再塗装とは「劣化量を消す技術」

ではなく「劣化の進み方を変える技術」、時間を「買い戻す」行為とも言える。言い換えれば、再塗装は、劣化進行速度を再設定することによって、性能限界到達時刻を後方へ移動させる技術的介入なのである。

ここで重要なのは、「買い戻す」という表現の意味である。それは過去を取り消すことではない。未来に向けて劣化速度を抑制することによって、将来到達する限界状態までの時間を延伸する行為を指している。このように捉えると、供用年数は単一の設計値ではなく、時間に対する制御行為として再定義されるべきである。供用年数（寿命）は、設計による初期品質（初期断面・応力余裕・防食仕様）、塗装による腐食速度 t の低減、維持管理による継続的介入、これらの相互作用によって決まる時間管理結果である。概念的には以下に示す**式2**のように整理できる。

$$L(t) = f(Q_0, r(t), I(t)) \quad \dots \dots \dots \text{式2}$$

$L(t)$: 寿命, Q_0 : 設計時の初期品質, $r(t)$: 時間依存的な腐食速度, $I(t)$: 維持管理介入関数

すなわち鋼製橋梁の供用年数とは、「設計値×塗装×維持管理」という単純な掛け算ではなく、時間軸上の劣化勾配を制御し続けた結果である。再塗装は、この時間制御体系の中核に位置する行為であり、構造物の物理的回復を意味するのではなく、時間の再設計行為である。

2.6 残された時間を読む技術の点検・診断



写真3 点検状況：鋼製橋梁外面・連結部

写真3に示す定期的に行う点検・診断もまた時間を扱う技術である。点検・診断とは、腐食の有無を確認する行為ではない。現在の劣化量と腐食速度を推定し、性能限界までに達する残存時間を評価する時間管理行為である。

点検・診断・マネジメントした結果によって決められた過度に早い更新は、機能を維持している施設の残存性能を放棄することになり、社会的資源の非効率な消費を招く。一方で、最適な時期を逃した遅すぎる維持管理の介入は性能限界を超過させ、安全性および信頼性を低下させる危険を伴う。

すなわち供用中の種々な維持管理とは、性能低下曲線の傾きを適切に調整し続ける判断と行為が求められる。合理的で適切な維持管理とは、要求性能限界に到達する前に劣化速度を再設定し、時間軸上の余裕を回復させ続けることに尽きる。今後、AIやDXの急速な進展、例えば画像解析による腐食進行度の定量化などによる維持管理行為の意思決定は、データとして記録・可視化され、第三者による検証が可能な形で蓄積されていく。その結果、維持管理における技術判断は、経験や慣習のみに依存することが許されず、「なぜその塗り替え時期なのか?」「なぜその塗装仕様なのか?」といった合理的な根拠が求められることになる。すなわち、維持管理に関する種々な技術は常に説明可能でなければならない。

今回の主題である塗装については、腐食速度制御という理論的枠組みによって語れない限り、社会が求めているデータに基づく合理的な維持管理体系の構築は困難である。

3. おわりに



写真4 地域のランドマークとなっている橋梁

塗装は目立たない技術である。橋梁を通行する利用者が塗膜の存在を意識することはほとんどない。目に映るのは鋼の構造美であり、風景と調和した橋梁の姿である。写真4に示すランドマーク橋梁もその一例である。

しかし、その美しい外観の背後で塗装は、常に腐食という自然現象と向き合い続けている。腐食は止めることのできない現象であり、水と酸素が存在する限り、鉄はより安定な酸化物へと移行しようとする。これは熱力学的に自発的な過程であり、人為的に完全に消滅させることはできないが、腐食の進行速度は制御することができる。先にも示したように腐食は時間の積分現象である。

すなわち、ある時点での劣化量は、腐食速度を時間方向に積み重ねた結果である。したがって、防食設計の本質は「腐食を止めること」ではなく、「腐食速度をどこまで低減できるか」という時間制御の問

題にある。言い換えれば塗装は腐食を消す技術ではなく、腐食の勾配を下げる技術である。塗装の適切な管理によって、対象橋梁が限界状態に到達するまでの時間を延ばす結果をもたらす。橋梁の未来は、この勾配制御の積み重ねによって設計されていると言っても過言ではない。

再塗装、塗装の塗り替えは、時間軸を巻き戻す行為ではない。既に生じた腐食による鋼材の断面減少は不可逆であるが、再塗装によって腐食速度を再び低減させることで将来に向けた劣化勾配を再設定することができる。すなわち再塗装とは、時間軸上の設計をやり直す技術的介入である。

点検・診断もまた、時間を扱う技術である。劣化の有無を確認するだけでなく、現在の腐食速度を推定し、残存時間を評価することに本質がある。そして近年重要度が増してきた維持管理とは、適切な時期に適切な介入を行い、性能低下の勾配を調整し続ける時間管理体系であることが理解できる。

橋梁の安全は偶然ではない。それは、腐食という不可避の自然現象を前提とし、その進行速度を継続的に制御してきた結果である。維持管理時代の技術は説明責任を伴い、「なぜ塗り替えるのか?」、「なぜその判断が合理的と判断したのか?」など、これらに対し、経験や慣習だけでなく、腐食を時間の積分構造として捉え、腐食速度という勾配を定量的に示し、論理的に説明できなければならない。塗装を経験則に依拠した作業から、腐食速度制御理論に基づく設計行為として位置付け直すこと、それは単なる表現の変更ではない。判断根拠を明示できる体系を構築することこそが、維持管理を持続可能で合理的な技術体系へと進化させる前提条件である。橋梁の耐久性能は、材料特性だけで決まるものではなく、時間軸上の劣化制御の結果である。その時間を制御する技術こそが塗装なのである。

参考文献

- 1) Uhlig, H.H., Revie, R.W.: Corrosion and Corrosion Control, Wiley, 2008.
- 2) Jones, D.A.: Principles and Prevention of Corrosion, 1996.
- 3) 土木学会: 鋼構造物の腐食・防食 Q&A, 2010.
- 4) Funke, W.: Progress in Organic Coatings, 1997.
- 5) Mayne, J.E.O.: Official Digest, 1952.
- 6) 日本鋼構造協会: 重防食塗装便覧, 2014.
- 7) 土木学会: 鋼橋の防食技術, 2018.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書, 2023.
- 9) AASHTO LRFD, 2020.
- 10) EN 1990, 2002.
- 11) ISO 55000, 2014.