

鋼鉄道橋の腐食対策の現状と理想

RETROFITTING AND IDEAL FOR CORRODED STEEL RAILWAY BRIDGES

木村元哉*, 丹羽雄一郎**

Motoya KIMURA, Yuichiro Niwa,

ABSTRACT This paper presents the outline of maintenance of steel railway bridge from the viewpoint of corrosion compared with steel road bridge, examples of retrofitting methods of actual corroded steel railway bridges, and suggestion of the ideals and needs for the future maintenance method of corroded steel railway bridge.

KEYWORDS: 鋼鉄道橋, 腐食, 補修・補強

Steel railway bridge, corrosion, retrofitting

1. はじめに

わが国の鋼鉄道橋は古いものが多く、長い供用期間中に腐食環境が変化したものなどが存在する。また、腐食・防食という観点で考えると、道路橋と異なり、床版がない場合が多いことや、凍結防止剤を散布しない等の特徴がある。本稿では、これらの鋼鉄道橋の腐食・防食に関する特徴を示した後、J R西日本における鋼鉄道橋の維持管理の概要、防食および腐食損傷対策について実事例を交えて紹介し、今後の腐食対策に望まれることについても述べる

2. 鋼鉄道橋の維持管理の概要

2.1 特徴

腐食損傷に関する鋼鉄道橋の特徴としては以下のようなものが挙げられる。

(1) 経年の長い鋼鉄道橋

わが国では明治、大正から昭和初期にかけて鉄道網の整備が進められ、その頃に建設され、現在まで供用され続けている橋梁が非常に多い。このため、主要幹線にもかかわらず経年100年に達する橋梁も珍しくなくなってきた。

長い間には、例えば河川護岸が整備され、桁下の雑草繁茂による湿潤状態が変化するなど、腐食環境が大きく変化した橋梁もある。一方、戦時中に保守が困難な状況におかれて荒廃が進行した例のように維持管理レベルも時代に応じて変動してきた。

経年の長い鋼鉄道橋では、いつごろどのような原因で腐食が進行したのか不明確なケースもあり、健全度判定を行うには、現時点での変状程度や近年の進行性だけでなく、過去の架設環境を類推しなければならない場合もある。

(2) その他の特徴

鋼鉄道橋においては、1957年に鋼床版が開発されるまで、都市部の一部で採用されたバックルプレ

*博(工) J R西日本 鉄道本部 施設部 土木技術課 課長 (〒530-8341 大阪市北区芝田 2-4-24)

**工修, J R西日本 構造技術室 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20)

ート形式を除く全ての鋼橋が床版を持たないタイプの橋梁であった¹⁾。本稿では、床組の有無にかかわらず、床版を持たない橋梁のことを開床式橋梁と呼ぶこととする。その後、周辺環境への配慮から徐々に道床式等の床版を有するタイプが増加しているが、わが国の鋼鉄道橋全数をみると、現在も開床式橋梁が多数を占めている。

開床式橋梁では、橋梁のほぼ全体が雨に濡れる状態となるため、床版がある橋梁とは腐食性状が異なる。

また、鉄道橋では凍結防止剤を散布しないため、基本的に内陸部では鋼橋の塩害が発生しない。橋梁近傍の道路で凍結防止剤を散布するケースも考えられるが、JR西日本管内では、その影響による腐食が顕著な橋梁は報告されていない。

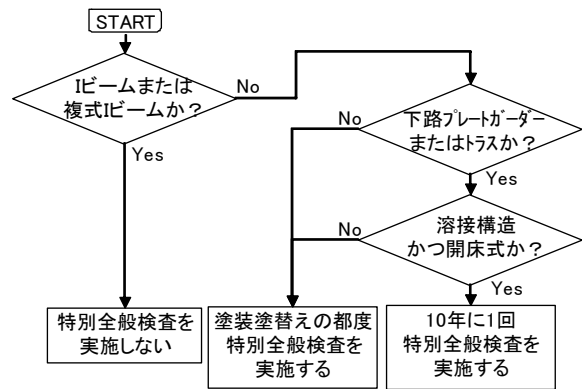


図-1 JR西日本の特別全般検査周期フロー

2.2 維持管理手法

(1) 鋼鉄道橋の検査方法（JR西日本の例）

鋼鉄道橋を含む鉄道構造物では、従来より2年に1回、全般検査を実施し、何らかの異常が見つかった場合に随時実施する個別検査を組み合わせる構造物の損傷を発見し対策を施す体制をとってきた。

JR西日本では在来線・新幹線とも2006年から塗装足場を活用した近接目視点検による特別全般検査を導入しており、特別全般検査の周期は疲労損傷の頻度や重大性を勘案し図-1のフローに示すとおりとしている²⁾。なお、鉄道事業者で初めて近接目視点検を取り入れたのはJR東海で、東海道新幹線において「新幹線構造物検査センター」を中心とする専任体制を設け、1993年から「鉄けた特別検査」という塗装足場を活用した近接目視点検を実施している³⁾。

その後、2007年に国土交通省より鉄道構造物等維持管理標準が通達され、全鉄道事業者が行う構造物の検査は初回検査、全般検査、個別検査および随時検査の4つに区分された。このうち全般検査は通常全般検査と特別全般検査とに細分された。

このうち特別全般検査は検査の精度を上げるために行われるもので、実施体制や具体的な検査方法はそれぞれ異なるものの鉄道各社で実施され始めている。JR西日本では遠望目視で捕捉しにくい疲労損傷に対応することを主眼としているが、下路トラスの上弦材付近など、腐食損傷についても検査精度の向上に役立っている。

(2) 既設鋼鉄道橋の耐荷性

腐食損傷が生じた場合などに行う既設鋼鉄道橋の耐荷性の照査は式(1)によっている⁴⁾。すなわち、部材の発生応力度に各種安全係数を乗じた値と限界値(鋼材の降伏点強度)の比較を行うものである。

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot \frac{\sigma}{\sigma_y} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 γ_a ：構造物解析係数(1.0)、 γ_b ：部材係数(リベット:1.0、溶接:1.1)、 γ_i ：構造物係数(1.2)
 σ ：部材の発生応力度、 σ_y ：鋼材の降伏点強度

また、従来より、式(2)に示す許容応力度法の考え方に基づいた現有応力比率による照査も行われている。これは、発生応力度と保守限応力度⁵⁾の比較をする照査手法であるが、この手法の考え方のベースとなった実耐率という指標が1967年の橋梁入線基準規程で取り入れられてから、長く実務に浸透している照査手法である。

$$\text{現有応力比率} \quad SR_S = \frac{\sigma_m}{\sigma} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

ここに、 σ_m ：保守限応力度[N/mm²]、 σ ：発生応力度[N/mm²]

保守限応力度は、鋼鉄道橋の耐荷力照査を行う際に用いる応力度として定められたもので、新設橋の設計に用いる許容応力度より高く設定されている。これは、許容応力度は将来の荷重増の可能性や腐食による断面減少など、確定的にわかっていない諸々の事柄に対する備えや余裕を安全率として考慮し設定されているのに対し、既設橋の耐荷力照査においては、照査対象の荷重や照査時点の腐食の程度がわかっているため、その照査に用いる保守限応力度は許容応力度より高く設定することができるという思想による。引張部材の保守限応力度を表-1に示す。これは、これまでの保守の実績や米国の AREA における既設桁の耐荷力照査で用いる応力度に基づき式(3)によったものである。一方、圧縮部材の保守限応力度は、基本的には許容応力度をベースに考えられたものであるが、図-2に示すように短柱域においては許容応力度に対し幾分の割増しを考慮し、長柱域においては老朽化等による部材の不整に対する安全性も考慮して許容応力度に漸近させている。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= 0.8 \times \sigma_y \quad (\text{リベット桁}) \\ \sigma_m &= 0.7 \times \sigma_y \quad (\text{溶接桁}) \end{aligned} \right\} (3)$$

表-1 保守限応力度 (引張応力度)

鋼材の年度別区分	普通鋼				高張力鋼			
	昭和3年以前	昭和4年～昭和25年	昭和26年～昭和44年		昭和45年以降	SM490	SM490Y SM520 SMA490	SM570 SMA570
			リベット桁	溶接桁				
保守限応力度 [N/mm ²]	165	176	184	161	168	224	252	322

注：錬鉄、ベッセマー鋼は一律 115N/mm²

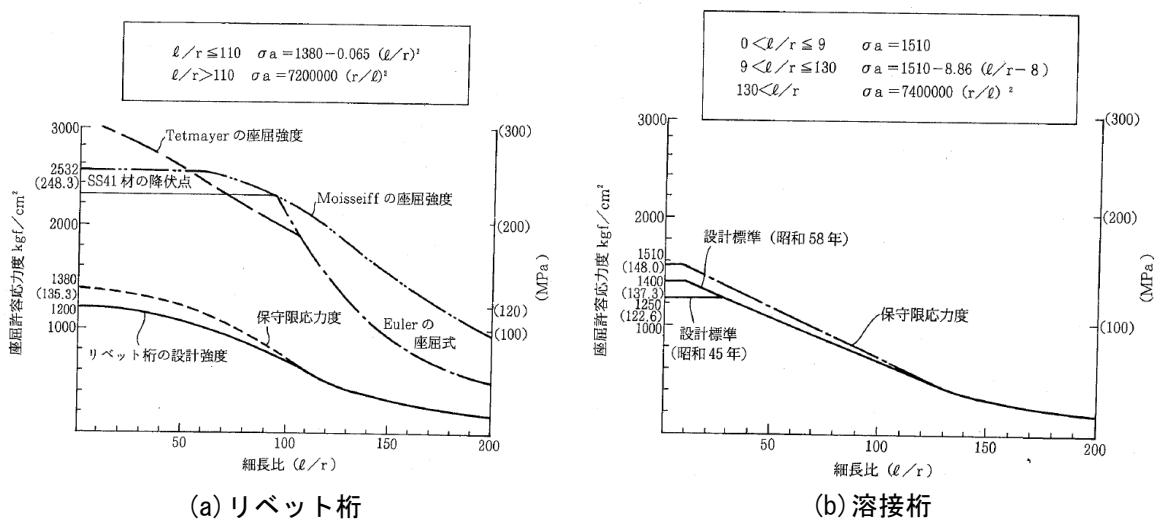


図-2 保守限応力度 (圧縮応力度) (文献 5) より引用)

3. 鋼鉄道橋の防食

3.1 鉄道橋塗装の変遷と現状⁶⁾

鋼鉄道橋の塗装の変遷のうち主なものを表-2に示す。わが国では明治初期から輸入塗料が主流であり、明治末期になってから国産され始めた。その後1950年代まで現場で調合する鉛丹さび止めペイントが用いられていた。1970年代になると一般環境では鉛・クロム系さび止めペイント+長油性フタル酸樹脂塗料が、腐食性の高い環境では、新設時にジンクリッチペイント+エポキシ樹脂系塗料+ポリウレタン樹脂塗料などを用いた長期防錆型塗装仕様を用いるようになった。1990年代にはLCCの観点から一般環境でも長期耐久性が求められるようになり、厚膜型変性エポキシ樹脂塗料を用いた塗装が使われるようになった。近年では環境負荷低減のため、鉛・クロムフリー塗料、低VOC水系塗料等の採用が進められている。

表-2 鋼鉄道橋塗装の主な変遷

年	内容
明治時代	明治末期から国産塗料(現場調合鉛丹さび止めペイント+現場調合赤錆ペイント)
1943年	鉄道初の塗装基準「土木工事標準示方書」(現場調合鉛丹さび止めペイント+調合ペイント)
1963年	「鋼鉄道橋製作仕様書」桁製作時にプラスト処理採用(1970年仕様書改訂でプラスト一般化)
1964年	新設時(既調合鉛丹さび止めペイント(工場塗装)+長油性フタル酸樹脂塗料(現場塗装)), 塗替え(既調合鉛系さび止めペイント+長油性フタル酸樹脂塗料)
1967年	タールエポキシ樹脂塗料, フェノール樹脂塗料採用
1976年	暫定仕様”長期防錆型塗装系”(厚膜型ジンクリッチペイント, エポキシ樹脂塗料, 編成エポキシ樹脂系塗料, ポリウレタン樹脂塗料等)
1980年	鉛丹さび止め廃止
1987年	「鋼構造物塗装設計施工指針」に改訂改称, ガラスフレーク塗料採用
2005年	「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂, 全塗料鉛クロムフリー化, 低VOC水系塗料等採用
2013年	「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂, 水系塗料の適用範囲を規定, 局部腐食に対する塗膜劣化度判定法Qを解説

表-3 要求性能項目

項目	グレード
施工前の塗装等劣化度	塗膜劣化度 ⁸⁾ PI/PIII
要求する耐久性 (塗替え周期)	10年/20年/30年
素地調整	プラスト/替ケレン-1/替ケレン-2, 3/浮き錆除去程度
環境程度(塩害)	北陸・山陰/瀬戸内/その他

3.2 防食塗装の課題

JR西日本では、過去に表-3に示す要求性能を提示して塗装システム(塗装系)を公募⁷⁾して、適材適所に用いることができる塗装等を模索したことがある。促進環境試験や大気暴露試験の結果、マイルドな環境や素地調整を入念に行うグレードでは耐久性を確保できるケースが多かった。しかし、厳しい腐食環境、特に、素地調整が不十分な状態になるにつれて、耐久性は低下し、要求する耐久性から乖離する傾向が強くなった。応募者である塗料メーカー側に公募の意図を適切に伝えられていたかという問題は別途あるものの、厳しい腐食環境の認識に対して、我々設備管理者と塗料メーカーとの間でずれが生じていた可能性がある。

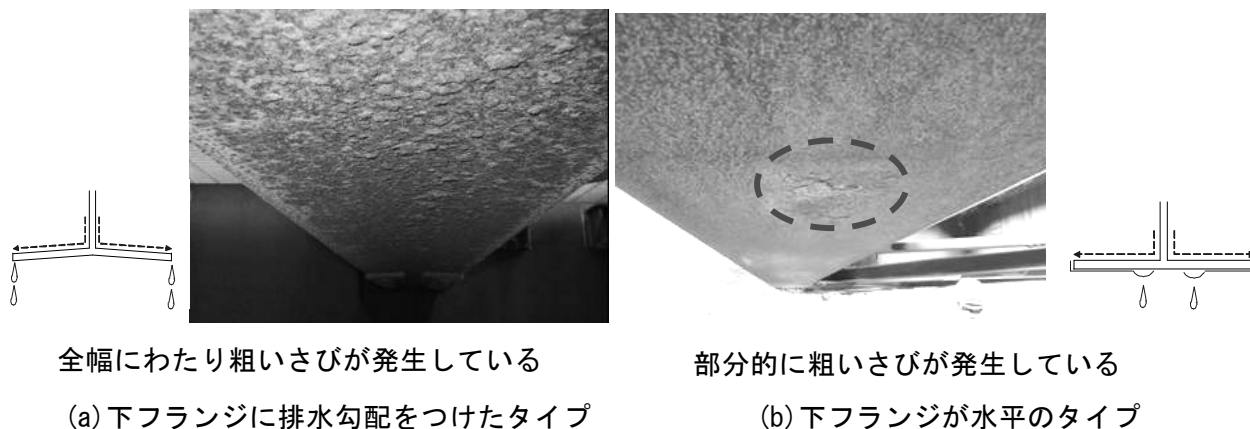
本件に限らず、防食塗装に関する検討を行うにあたり、設備管理者、施工者および塗料メーカーの三者の意思疎通が必要と考える。防食技術向上にあたっては設備管理者の持つ情報、例えば管理する設備の数量規模、あるいは腐食をどの程度許容するのかといった目指す維持管理レベルが前提として存在する。施工者は素地調整をはじめとする施工品質をどのような機器を活用し、どのレベルで確保できるのか、そして、このような情報に照らし合わせて、塗料メーカーが提供できる塗装システムの性能レベルがどの程度か、といった議論を三者で深める必要があると考える。

3.3 耐候性鋼

(1) 耐候性鋼を用いた鉄道橋の特徴

2.1で述べた鋼鉄道橋の特徴である雨がかりの違いの影響は耐候性鋼橋において顕著に現われている。JR西日本が管理する耐候性鋼橋は、近年でこそ騒音の少ないSRC床版を有する下路トラスが多く架設されているが、過去には開床式橋梁が多くを占めていた。

また、耐候性鋼が導入され始めた頃は下フランジに雨水が溜まらないよう、図-3(a)の図に示すとおり、I断面では下フランジに排水勾配を有する構造が採用されていた。しかし、下フランジ端部が水切りとなって下フランジ下面に雨水が回り込まず、塩分等が洗い流されないため、かえって層状剥



全幅にわたり粗いさびが発生している

(a) 下フランジに排水勾配をつけたタイプ

部分的に粗いさびが発生している

(b) 下フランジが水平のタイプ

図-3 下フランジ勾配の有無によるさび発生の違い

離さびが生成しやすくなっていることが分かった⁹⁾。図中の写真においても、フランジ端部のわずかな幅を除いてほぼ全幅にわたって粗いさびが発生している。そこで現在では図-3(b)の図のように水平に改良された下フランジ構造が用いられている。水平タイプでは一部に粗いさびが見られるものの、下面の大部分の範囲は水が伝うため、粒子が細かい良好なさび発生状況であった。下フランジの勾配の違いによるフランジ下面の錆状況の違いは、どの開床式橋梁でも生じており、フランジ形状を改良したことによりフランジ下面の錆状況は明らかに改善されているといえる。



図-4 ガセット部の塵埃堆積

図-4は下路トラスの下弦材と端横桁および下横構をつなぐ部分の連結ガセット上に塵埃が堆積した状況である。このようにウェブ等とガセットで囲まれた隅部には落下したさびや塵埃が堆積しやすい。塵埃は水分を蓄えるため腐食が進行しやすく、層状剥離さびに至ることもある。特に、支点近くでは枯葉が溜まったり、風通しが悪いことなどにより、塵埃が溜まりやすい傾向にある。ガセットには水抜き孔を設けるが、隅部でうまく水が捌けないケースも多い。そこで、極力塵埃が堆積しないよう構造を工夫するとともに、塵埃が溜まりやすい部分に塗装を施す必要がある。

他方、開床式橋梁の耐候性鋼に関するデメリットとして、橋梁下の湿潤が挙げられる。開床式橋梁では橋梁下でも降雨によってある程度雑草が繁茂するので、河川の高水敷等で橋梁下空頭が比較的低い場合、雑草繁茂による湿潤環境が橋梁の錆に悪影響を与える場合がある。

(2) 耐候性鋼の適用

鉄道橋は凍結防止剤を散布しないため、海岸近くの橋梁を除くと、塩分の影響を受けるのはほとんど海からの飛来塩のみである。上記(1)で述べた弱点部位に対して、予め塗装を施しておく等の対処を行うことで、海岸近くを除く地域に耐候性鋼を適用することができると考える。

4. 鋼鉄道橋の腐食損傷対策

4.1 塩害環境と一般環境

J R 西日本では海岸沿いから内陸まで、様々な環境条件の橋梁を管理している。次節以降では著しい腐食環境と腐食性の低い一般環境の両極端な2つの環境に架設されている橋梁から、経年100年前後の大規模橋梁をそれぞれ選定し、その維持管理事例について述べる。

4.2 塩害環境の橋梁維持管理事例¹⁰⁾

本節で示す橋梁は、日本海から約1kmの位置に架設され、飛来塩により腐食が著しく進行している橋梁である。

(1) 橋梁概要

図-5に橋梁の全体図を、表-4に諸元を示す。トラス部は、曲弦ワーレントラスであり、格点部では図-6に示すとおり、リベット構造特有の複雑な集成構造となっている。

表-4 橋梁諸元

供用開始	1919年
橋種構成	上路プレートガーダー 21.3m×7連 下路曲弦ワーレントラス 62.4m×5連 槽状桁 6.1m×1連
総延長	486m
設計荷重	クーパー-E33 (KS15相当)

(2) 変状と健全度判定

本橋梁において、塗装塗替え時の仮設足場を利用した至近目視検査を行なったところ、上弦材格点内部の材片境界部など塩分が付着しやすく、かつ直接雨水にさらされない部材を中心に著しい腐食が発見された。特に図-7に示すとおり、上弦材と斜材・垂直材を結ぶガセットプレートの欠食が著しいため、対策を行なうこととした。橋梁架け替えの可能性も含めて検討した結果、

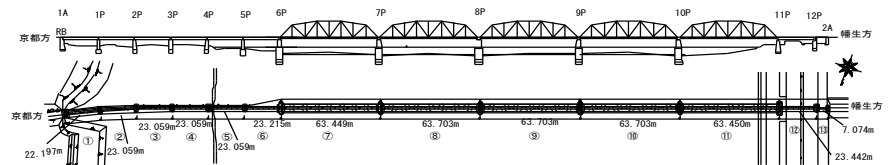


図-5 橋梁全体図

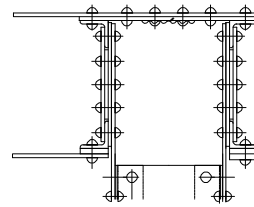


図-6 上弦材断面(格点部)



図-7 腐食劣化の例

経済性および施工性を考慮し、昼間施工可能である当て板工法による補修を行うことにした。

(3) 補修工法の概要と施工

今後の維持管理と二次応力の発生を考慮して、現状のガセットプレート程度の大きさとなるように補修部材の検討を行った。また、昼間の列車間合いにて施工するため、施工途中においても活荷重に耐えることができるように、当て板の形状を工夫したほか、必要ボルト本数を常に確保できる施工方法を検討した。一例を図-8および図-9に示す。

腐食凹凸面には金属粉配合エポキシ樹脂を塗布してから、当て板を行い、高力ボルトの締付を行った。また、補修した格点部の塗装には、紫外線による塗膜厚の減少を考慮し、超厚膜エポキシ樹脂塗料を用いた。施工から約10年後に近接目視を実施した結果、高力ボルトの一部においてナット側面からの塗膜剥離がみとめられたが、それ以外の当て板補修を行った部位に腐食等の再変状は見られず、腐食に対しては良好な状態が保たれていた。

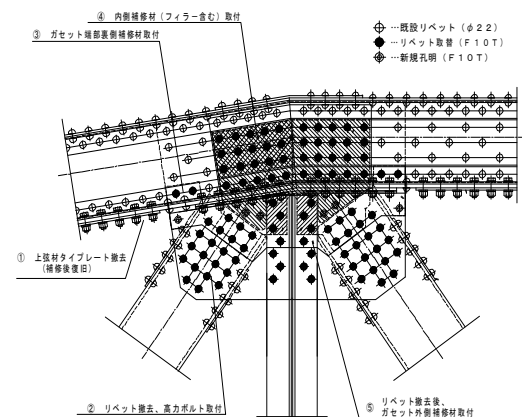


図-8 格点部当て板補修手順

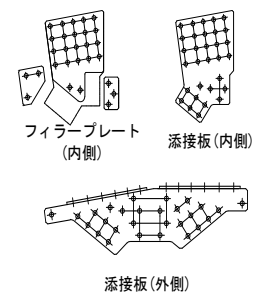


図-9 当て板加工



図-10 対象橋梁外観

表-5 対象橋梁の主要諸元

橋梁形式	リベット構造複線下路プラットラス
供用開始	1901年
支間長	31.623m (5格間) × 22連
総延長	729.28m
設計荷重	206000 lb 機関車×2+3000 lb/ft (KS-14.6相当)
軌道構造	開床式・橋まくらぎ式・60K レール

4.3 一般環境の橋梁維持管理事例

(1) 概要

腐食性の低い一般環境の都市部に架設されている下路トラス橋について、維持管理方針を検討した結果について述べる。図-10に外観を示し、表-5に対象橋梁の主要諸元を示す。本橋梁は、経年が100年を超える橋梁で、過去から繰返し補修・補強が行われており維持管理に要する労力が大きくなっている。また、都市部に架かる総延長730mの長大橋梁であることから別線改築も困難なため、現橋の長寿命化を目指した維持管理方針を策定することを目的に、鋼橋の寿命に影響を与える腐食、疲労に着目した変状分析および必要な対策の検討を行った。

(2) 腐食に対する検討

鋼材の腐食状況、塗膜劣化状態、架設環境の腐食性の調査を行った。鋼材の腐食状況は、一部の箇所でも過去に局所的に腐食が進行した箇所があったが、現在では特段進行している様子ではなかった。塗膜劣化状態は、表層劣化（白亜化および汚れ）が主で比較的健全な状態であった。また、部材表面の付着塩分量は最大10mg/m²程度であり、文献8)に示される、塗装時の被塗物の付着塩分量の制限値（長油性フタル酸樹脂塗料：50mg/m²、前記以外の塗料：100mg/m²）より少なく、架設環境の腐食性は低いと考えられた。以上より、従来通り定期的な塗装塗替えを行うことで、腐食の進行は防止できるものと考えられた。一方で、図-12に示すすり鉢状切削膜厚計による塗膜厚みの計測例のように、塗膜厚みが700μm程度と比較的厚くなっている箇所もあり、今後の塗り重ねにより大面積剥離が生じる可能性が考えられたため、塗替え塗装時には旧塗膜の健全性を基盤目試験等により評価し、適切な素地調整を行うことが重要であると考えた。

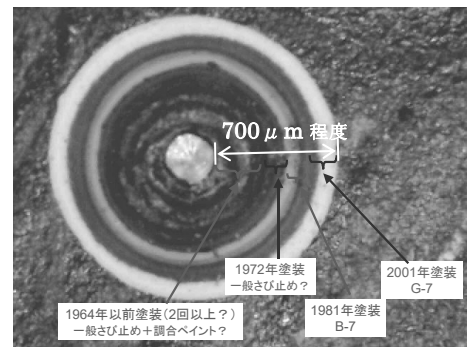


図-12 塗膜厚みの計測例

(塗膜厚みが比較的厚い箇所の例)

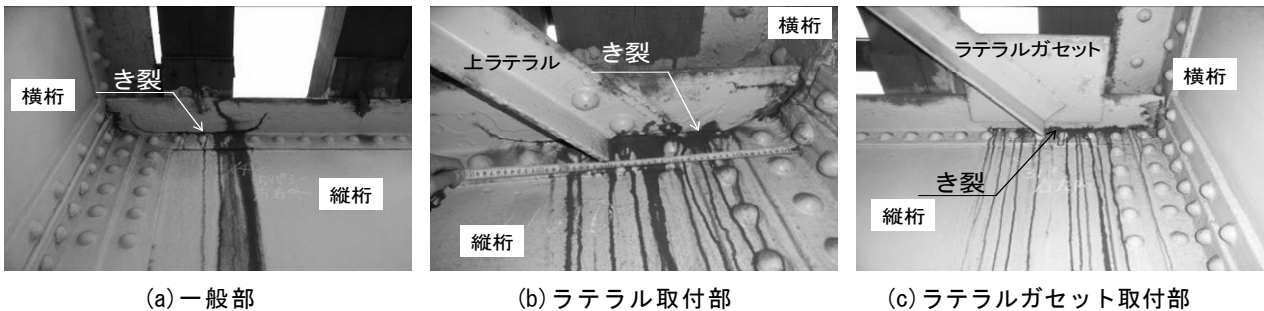


図-13 縦桁上フランジ山形鋼の代表的なき裂発生状況

リベット構造鋼鉄道トラス橋の代表的な疲労損傷に、縦桁上フランジ山形鋼コーナー部に沿って発生する疲労き裂があり、近年本橋梁においても、図-13 に示すようなき裂が発見されている。き裂発生原因は、列車載荷時、まくらぎによって上フランジが下方に押し曲げられ、面外変形を繰り返すためと考えられる¹¹⁾。き裂の発生傾向の分析、縦桁上フランジ山形鋼コーナー部の応力測定、まくらぎと上フランジの接触状態の調査を行った結果、縦桁上フランジの面外曲げの発生には、まくらぎと縦桁上フランジの接触状態が影響することがわかった。

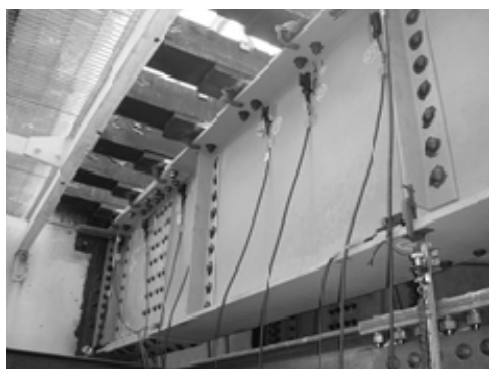
以上の検討を踏まえて、疲労き裂の発生状況および応力発生状況から、縦桁上フランジには今後も疲労き裂が発生する可能性が高いと考え、計画的に対策を実施していくこととした。対策の基本方針は、き裂が多発している縦桁を交換することとし、まくらぎを介して列車荷重が作用することによる上フランジの面外曲げを緩和するため、まくらぎ受けを設けることとした。当初は図-14(a)に示すとおり、縦桁全交換を行ったが、その後、図-14(b)～(d)に示すように、弱点部位である上フランジのみを交換する方針に転換し、施工の効率化も図りながら順次施工を進捗させている¹²⁾。

5. これからの腐食対策

5.1 腐食対策の現状

古い鋼鉄道橋では現在の設計荷重よりも大きい蒸気機関車を想定した設計荷重を用いて設計されている場合が多いこと、また、2.2 に示すように許容応力度を割り増した保守限応力度という概念を導入していたことなどから、橋梁の耐力に余裕があることが多い。そのため、腐食による板厚減少が生じていても、耐力上問題がなければ、それ以上腐食を進行させないことを目的とし、補修としての塗装を施すことが多い。

一方、腐食や疲労が進行した事例として、4. では厳しい塩害環境とマイルドな環境の2タイプの補修・補強事例を示した。どちらも検討の結果、部分的な部材交換や補強により今後も供用し続けて



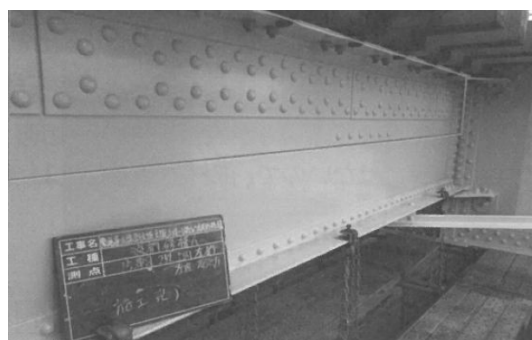
(a) 縦桁全交換



(b) 縦桁上フランジ交換（施工中）



(c) 縦桁上フランジ交換（交換後）



(d) 縦桁上フランジ交換（完成）

図-14 縦桁上フランジき裂対策

いく方針となった。

小規模な橋梁は、少ない労力で夜間の列車間合いで交換できる場合が多いことから桁交換が行われる場合もあるが、これらを除くと、鋼鉄道橋は腐食や疲労損傷が進行した場合でも、橋梁を取り替えることは少なく、部分的に部材交換を行ったり、補強することが可能で、そのように供用し続けるケースが多い。

5.2 腐食対策の理想

前節で述べたとおり、腐食が軽微であれば、補修としての塗装を、腐食が進行すれば部材交換等、変状程度に応じて対策を選定することになる。

まずは腐食を進行させない安価で性能のよい防食工法が望まれるところであり、3.2 で述べたように設備管理者、施工者および塗料等のメーカーの三者が意思疎通を行って技術開発を行う必要があると考える。

次に、経年の長い鋼鉄道橋を維持管理するうえで避けがたい腐食に対する弱点とそれらに対して望まれる姿について述べる。

(1) 接合部

高力ボルトは腐食に対して弱点となりやすく、ボルト頭部やナットが腐食するとボルト軸力が低下し、接合強度に直接影響を与えるため、維持管理上の問題となる。

供用中の鋼鉄道橋は古いものが多く、リベット接合が多く用いられているが、リベット頭部が多少腐食しても接合強度は低下しないことから、リベット接合の維持管理性は高力ボルトに比べて良好である。現場リベット接合には騒音を伴うこと、また、何よりも、リベット接合に必要な熟練した技能者がいないことから、現在では実質上ほぼ途絶えた技術といえる。できればリベット接合の長所を受け継ぐ新たな接合技術が望まれる。

(2) 支点部

支点部付近は湿潤環境になりやすいことから、腐食しやすい部位といえる。部位としては限定的であるため、支点部付近に特化した防食材料等、適用可能な技術が望まれる。

また、支点部は部材が集中するため、素地調整におけるブラストや防食として溶射等を施す際には死角が生じやすい。特に鉄道橋のように小規模な橋梁においてこの傾向は顕著であることから、新設時には、支点部の部材の組み合わせを工夫するなどして、シンプルな構造にすることで、防食性を向上させることが必要と考える。

なお、支承は支点反力を集中的に受け持つ部位でもあることから、摩耗や変形、支点のあおりやバタつきを生じることも多い。鋼鉄道橋の100年以上に及ぶ長い供用期間を考えると、支承やそのまわりの部材について、筆者は耐用年数が数十年の“消耗品”と捉えている。条件が良ければ取り替えずに済む場合もあるが、供用期間中に1、2度の支承取替は想定しておく必要があると考える。よって、支承は耐摩耗性に優れた材質であることが必要となるが、予め支承取替しやすい構造にしておくことも有意義と考える。

(3) 塩害環境の橋梁更新時の桁形式選定

箱桁内部は雨水の浸入等がなければ、長期にわたって良好な防食が維持されるため、箱桁形式は塩害環境に適した構造といえる。箱桁外面の防食については、工夫すれば腹板の補剛材等も外面に取り付けずにすみ、シンプルな外面とすることで腐食に対する弱点を減らすことができる。塩害を受けるような架設環境で新設あるいは架け替えを行う際は、箱桁形式を採用し、さらに場合によっては現場溶接を採用するなどして弱点となる高力ボルトを用いない工夫をすることが望まれる。

6. おわりに

冒頭に述べたとおり、鋼鉄道橋は古いものが多いが、腐食に対しては部材交換や補修・補強で対応できる場合が多い。しかし、今後労働力人口の減少が進み、特に地方では持続可能な地域公共交通のあり方が議論されている状況で、より効率的な維持管理が要求されている。

安価で性能のよい防食工法の開発が望まれ、また維持管理性に優れた接合方法の開発や部材取り替えを前提とした構造の考案など、これまで100年間供用を続けてきた鋼鉄道橋を今後さらに100年、しかもこれまでより少ない労力で、健全に使い続けられるよう検討しなければならないと考えている。

参考文献

- 1) 矢島秀治：鋼鉄道橋の床版，橋梁と基礎，Vol. 48, No. 4, pp. 42-47, 2014. 4.
- 2) 近藤拓也，木村元哉：J R 西日本における鋼構造物維持管理のための橋りょうカルテの導入，日本鉄道施設協会誌，pp. 63-66, 2007. 3.
- 3) 大竹敏雄，神田仁：東海道新幹線の橋梁と保守，橋梁と基礎，Vol. 43, No. 8, pp. 45-47, 2009. 8.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説-鋼・合成構造物-，丸善，pp. 54-59, 2007. 1.
- 5) (例えば) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，pp. 328-340, 1992. 7.
- 6) 田中誠：社会資本の維持・防錆技術 50 年の変遷，防錆管理，2007. 10.
- 7) 木村元哉，村田一郎，中山太士：鉄桁塗替え塗装に対する新たな取組み，Structure Painting, Vol. 33, No. 1, pp. 13-17, 2005. 1.
- 8) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，p. III-7, 2013. 12.
- 9) 市川篤司，加藤健二，川原田亨：海岸線近くに架設された鉄道無塗装トラス橋の調査，鉄道総研報告，1998. 9.
- 10) 佐藤崇，大間 秀樹，前田 静男：トラス橋梁格点部の腐食劣化に対する補修について，第 60 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部，1-043, 2005.
- 11) 大都亮，松本健太郎，丹羽雄一郎，中山太士，坂野昌弘：下路トラス鉄道橋縦桁におけるマクラギ直上フランジの面外曲げ挙動，鋼構造年次論文報告集，Vol. 16, pp. 703-710, 2008. 10.
- 12) 梅本幸典：第 4 回鉄道施設技術発表会，日本鉄道施設協会誌，Vol. 54, pp. 99-103, 2016. 9.

鋼鉄道橋の腐食対策の現状と理想

- 鋼鉄道橋の特徴
- 鋼鉄道橋の維持管理（J R 西日本の例）
 - ・ 検査体系と方法
 - ・ 耐荷性評価法
- 鋼鉄道橋の防食
- 維持管理事例
- 腐食対策の理想

J R 西日本 木村元哉

鉄道網の発達(創業期);1980年(明治13年)



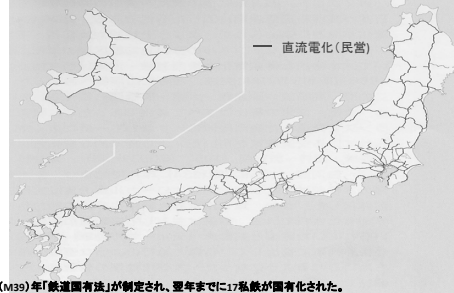
①官設鉄道（新橋～横浜間）、②官設鉄道（神戸～大津間）、③横内鉄道（手宮(小樽)～札幌間）、④釜石製鉄所鉄道（大橋～釜石間）が別個に営業しているに過ぎなかった。鉄道機材は輸入に依存していた。

鉄道網の発達(幹線伸長期);1900年(明治33年)



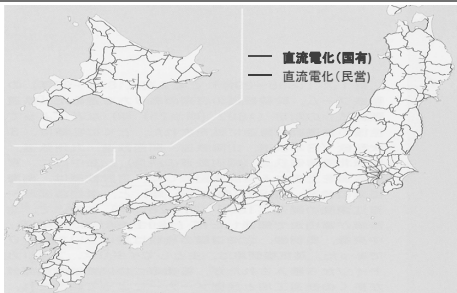
・1892年「鉄道敷設法」の制定などにより、全国の鉄道網は急速に拡大された。特に私鉄は、5大私鉄(日本鉄道、山陽鉄道、関西鉄道、九州鉄道、炭炭北海道礦産鉄道)を中心に官設鉄道を上回る発展を記録した。
 ・官設鉄道は、東海道線全通(明治22年)、信越線高崎～直江津開通(明治26年)に続いて、北陸線が富山まで開通(明治32年)した。

鉄道網の発達(興隆期の国鉄);1920年(大正9年)



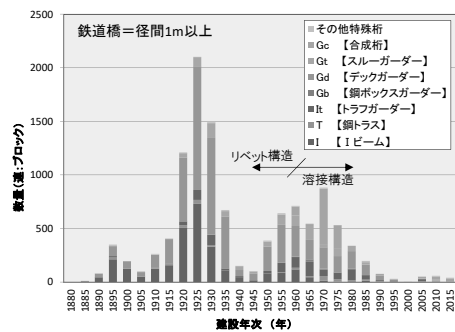
・1906(M39)年「鉄道国有法」が制定され、翌年までに17私鉄が国有化された。
 ・一方、少ない資本で鉄道を建設できるように、1910(M43)年「軽便鉄道法」が制定され、幹線鉄道から分岐する規模の小さな鉄道が多く建設された。
 ・東京、京阪神、名古屋地区では、市内や郊外に電気鉄道が開業して次第に大きな交通需要に対応していた。
 ・国鉄では、それまで輸入に依存していた蒸気機関車の国産化と標準化に着手し、1920年代初頭までに完全な国産化を達成した。

日本の鉄道網の発達(戦時の国鉄);1940年(昭和15年)



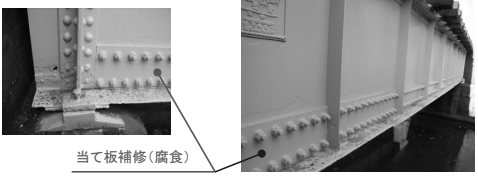
・幹線鉄道網はほぼ完成し、ローカル線の建設を主とした「改正鉄道敷設法」が、1922(T11)年制定された。
 ・幹線鉄道の電化が始まったが、鉄道動力の主力は蒸気機関車であった。東京、京阪神、名古屋などの大都市地域には高速電車が開業し、急速に拡大する通勤・通学輸送需要に応じた。
 ・1930年代後半より逐次戦時体制に突入し資材の逼迫、機材の融使、ガソリンの統制など苦難の道を歩む。

JR西日本 鋼・合成構造物の経年分布

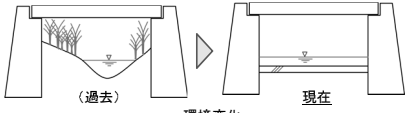


腐食環境の変化


河川の護岸(底版)が整備され、腐食環境が変化したと思われる事例



当て板補修(腐食)




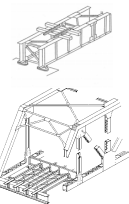
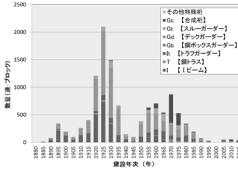
(過去) 環境変化 現在



上流側の様子(現在)



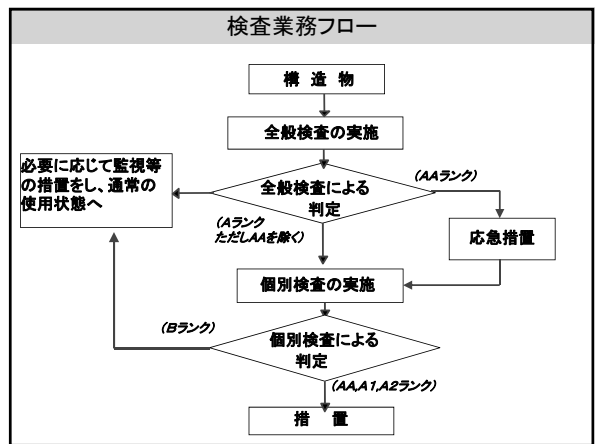
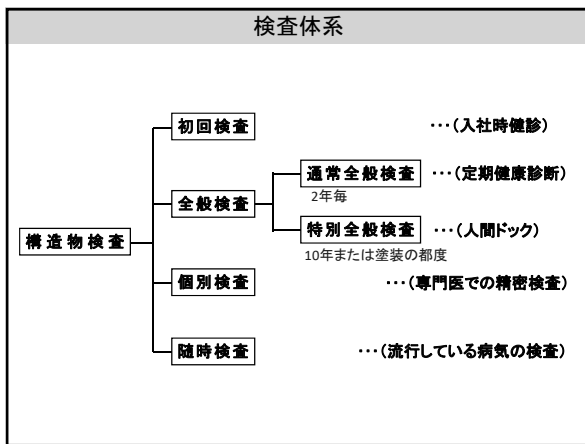
鋼鉄道橋の特徴

開床式橋梁が多数を占める


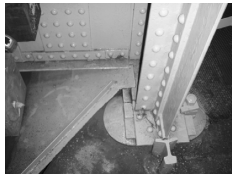
閉床式橋梁の変遷

大正～昭和初期	バックルプレート桁
1954年～	合成桁
1957年～	鋼床版
1972年～	RC床版
2000年～	SRC床版




通常全般検査

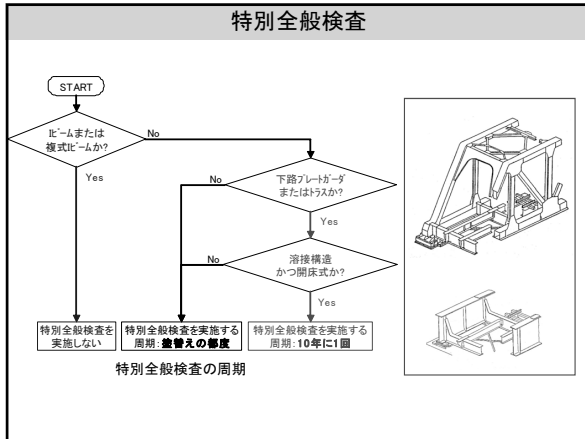
- ・一定期間毎(2年に1回)に定期的に行う検査
- ・主として目視検査
- ・重点検査箇所の検査
- ・環境変化の捕捉

特別全般検査

- ・ペイント足場を活用した検査 (塗替え塗装時に実施)
- ・一部の橋梁は10年周期で実施
- ・主に至近距離からの目視検査
- ・橋梁カルテの整備, 更新
- ・重点検査項目の指定



耐荷性の評価

腐食損傷が生じた場合などに行う耐荷性の照査

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot \frac{\sigma}{\sigma_y} \leq 1.0$$

- γ_a : 構造物解析係数 (1.0)
- γ_b : 部材係数 (リベット1.0, 溶接1.1)
- γ_i : 構造物係数 (1.2)
- σ : 部材の発生応力度
- σ_y : 部材の降伏点強度

従来の方法 = 保守限度応力度を用いた照査

$$SR_s = \frac{\sigma_m}{\sigma} \times 100 \text{ [%]}$$

- SR_s : 現有応力比率
- σ_m : 保守限度応力度
- σ : 発生応力度

許容応力度 = 設計時に未確定な事柄への備えや余裕を安全率として考慮
 保守限度応力度 = 照査時の荷重や腐食程度など確定的 → 安全率を小さく設定

許容応力度 < 保守限度応力度

鉄道橋塗装の変遷

年	内容
明治時代	明治末期から国産塗料(現場調合鉛丹さび止めペイント+現場調合赤錆ペイント)
1943年	鉄道初の塗装基準「土木工事標準示方書」(現場調合鉛丹さび止めペイント+調合ペイント)
1963年	「鋼鉄道橋製作仕様書」桁製作時にプラスト処理採用(1970年仕様書改訂でプラスト一般化)
1964年	新設時(既調合鉛丹さび止めペイント(工場塗装)+長油性フタル酸樹脂塗料(現場塗装)), 塗替え(既調合鉛系さび止めペイント+長油性フタル酸樹脂塗料)
1967年	タールエポキシ樹脂塗料, フェノール樹脂塗料採用
1976年	暫定仕様「長期防錆型塗装系」(厚膜型シンクリッチペイント, エポキシ樹脂塗料, 変成エポキシ樹脂系塗料, ポリウレタン樹脂塗料等)
1980年	鉛丹さび止め廃止
1987年	「鋼構造物塗装設計施工指針」に改訂改称, ガラスフレーク塗料採用
2005年	「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂, 全塗料鉛クロムフリー化, 低VOC水系塗料等採用
2013年	「鋼構造物塗装設計施工指針」改訂, 水系塗料の適用範囲を規定, 局部腐食に対する塗膜劣化判定法Qを解説

ガラスフレーク塗料: まくらぎ下の防食用 → 代替となる塗料?

施工性に課題

防食工法の公募

- 鉄桁防食上の問題点
 - 塩分環境下の早期劣化
 - 素地調整困難箇所
- 最近の鉄桁検査体系
 - 至近目視検査の導入と塗装足場活用
 - 検査が主目的, 定期的な塗替え塗装
 - 塗装周期を延伸し, トータルコストを削減等

耐久性に大きな影響

要求される耐久性が多様に

要求性能項目
 ・素地調整の程度
 ・地域別(塩分環境)
 ・要求する耐久性

→ これらの項目を組み合わせることで要求性能のカテゴリーを分類

要求性能の分類の一例(一般部位)

分類番号	要求性能と条件			環境		
	施工時の塗装劣化度	要求する耐久性	素地調整	北陸・山陰	瀬戸内	その他
A1	P-III (になるまで)	10+α年	替ケレン 2, 3	不要	○	○
A2		30+α年		不要	○	○
A3	P-I (になるまで)	10+α年	プラスト	○	○	○
A4		30+α年		○	○	○
A5		50+α年		○	○	○
A6		40+α年		替ケレン 1	○	○

室内促進試験(供試体作製)

- 塩水噴霧試験によりさび鋼板作製
- 素地調整グレードにより除錆方法・程度を区別

ナイロンブラシ
ケレン(困難箇所を想定し, 浮き錆除去)

ワイヤブラシ
通常の素地調整(替ケレン)を想定

現場プラストを想定
わずかに錆が残存

プラスト機

防食塗装の課題

促進環境試験や大気暴露試験の結果、

- マイルドな環境や素地調整を入念に行うグレードでは耐久性を確保できるケースが多かった
- 厳しい腐食環境、特に、素地調整が不十分な状態になるにつれて、耐久性は低下し、要求する耐久性から乖離する傾向あり

〔 公算の意図を適切に伝った？
環境条件に対する認識 設備管理者と塗料メーカーとの間でずれ？
キーとなる素地調整＝施工者

▽

三者の十分な意思疎通が必要

耐候性鋼(下フランジ下面の排水勾配)

フランジ上面に水を溜めない

5%勾配 (当初) → (変更後)

下路トラス下弦材の構造例

雨洗効果

5%勾配 (当初) → (変更後)

1断面桁の構造例

解説図3.4 雨洗効果に配慮した下フランジ下面の構造変更

耐候性鋼(部材下面の勾配の影響)

部材下面への雨水の回りこみ

耐候性鋼(幅が広い水平部材)

水抜き孔を設けた例

塵埃の堆積

落下したさび、塵埃 = ぬれ時間の増加

塩害環境の橋梁維持管理事例(当て板補強)

表-4 橋梁諸元

供用開始	1919年
橋種構成	上路プレートガーダー 21.3m×7連 下路曲弦ワーレントラス 62.4m×5連 槽状桁 6.1m×1連
総延長	486m
設計荷重	クーパー-E33 (KS15相当)

海岸から約1km ←

施工前

・昼間の列車間合いに施工
・活荷重を考慮した当て板形状・ボルト本数
(健全な引張部 当て板のため撤去)

施工後

腐食凹凸接合面
= 金属粉配合エポキシ樹脂

補強部の塗装
= 超厚膜型エポキシ樹脂

施工10年後

一部のボルトを除き
良好な塗膜状態

一般環境の維持管理事例(縦桁部分交換)

表-5 対象橋梁の主要諸元

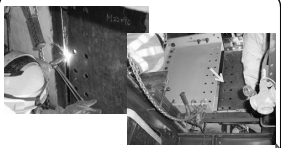
橋梁形式	リベット構造複線下路プラットラス
供用開始	1901年
支間長	31.623m (5格間) × 22連
総延長	729.28m
設計荷重	206000 lb機関車 × 2+3000 lb/ft (KS-14.6相当)
軌道構造	開床式・橋まくらぎ式・60Kレール

総合的診断の結果


要因	主な調査結果	喫緊の対策	維持管理方針
腐食	・塗膜厚大きい ・大面積剥離の可能性 ・腐食環境ではない	不要	塗替え事前に旧塗膜調査を実施し、適切な素地調整レベルを選定する。
支承機能	・交換したすべり支承の可動状況は良好	不要	・継続的に年2回程度支承移動量測定を実施 ・異常が認められれば、対策を検討
疲労	・縦桁上フランジのき裂多数 ・縦桁上フランジの応力大きい ・今後もき裂が増加する可能性大	必要	・検査の強化(特に縦桁上フランジ) ・中長期的な計画で縦桁の部材交換を行う


一般環境の維持管理事例(縦桁の疲労対策)

縦桁交換(当初)




縦桁上フランジ交換





新縦桁



新規上フランジ

桁交換

小規模橋梁 Iビーム, 槽状桁など

- ・部材が小さく, 当て板が困難
- ・架け替え費用が比較的安価 LCC有利

⇒条件が満たされれば桁交換



クレーン一括架設



定置式門構

上記以外の橋梁

- ・部材交換, 当て板等の補修・補強

腐食対策の理想

腐食による変状の程度	措置	
変状なし	塗替え塗装	} 安価で高性能の防食工法 設備管理者, 施工者, メーカー 意思疎通し技術開発
↓ 軽微	補修としての塗装	
↓ 進行	部材交換, 当て板	
接合部	<ul style="list-style-type: none"> ・高力ボルト=防食上の弱点 ・リベット=維持管理上理想的な接合方法 	リベット接合の長所を備えた新しい接合方法
支点部	<ul style="list-style-type: none"> ・湿潤により腐食しやすい部位 ・支点部に特化した防食材料, 防食技術 ・摩耗等による変状進行不可避 → 部分取替しやすい構造に 	
新設時の構造	<ul style="list-style-type: none"> ・箱桁形式(内部=良好な環境, 外面の構造を工夫) ・高力ボルトを避ける 	

おわりに

これまで100年 供用してきた鋼鉄道橋をさらに100年 健全に使い続ける

これまでより少ない労力で維持管理可能な方策を検討




関西本線 木津川橋梁
 ...当社管内で最も古いトラス橋(供用開始 1897年)