

# もう腐食なんかこわくない！ ～適切な維持管理と対策で鋼橋は守れる～

保全委員会 保全第一部会  
貞島 健介, 稲田 博史

## 1. はじめに

鋼にとって腐食（酸化）は自然現象であり、その備え、対応は鋼橋の維持管理上の永遠のテーマといえる。しかし、防食を考慮した構造の採用、適切な維持管理を行うことで腐食を防ぐことは可能であり、また、たとえ腐食が進行したとしても鋼橋は補修・補強が十分可能である。

本発表では、老朽化橋梁のストック増大により、今後増えるであろう腐食損傷において、少しでも参考になればと考え「もう、腐食なんかこわくない！」と題して、適切な維持管理方法、補修・補強の事例を紹介する。

## 2. 腐食とは

### 2.1 腐食のメカニズム

鉄は、強度の割りに廉価で、加工が容易なため様々な構造物の素材として広く活用されているが、もとは鉄鉱石という地球環境下で安定していたもの（鉄の酸化物の状態）を精錬（溶鉱炉などを用いて人工的に酸化物を還元する作業）により作られたものである。したがって、大気中でそのままにしておくと、酸化されて元の酸化鉄に戻ってしまう。この鉄が大気中で酸化されて錆が発生することを腐食と呼んでいる。

酸化は常温の状態では水と酸素の存在下で生じるということは広く知られており、腐食を防止するうえで非常に重要なファクターである。なお、常温下での腐食は湿食に分類され、特殊な高温化では酸素のみで腐食が生じる乾食などもある。

図-2.1 に腐食の化学式と模式図を示す。

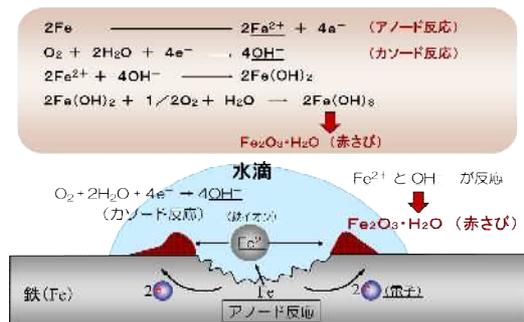


図-2.1 腐食化学式と模式図

アノード反応とカソード反応から、水酸化第一鉄が生成され、この水酸化第一鉄は空気中の酸素により、さらに酸化されて赤錆（酸化第二鉄）になる。これが鉄の腐食のメカニズムである。

### 2.2 鋼橋における腐食因子

通常的环境下における基本的な腐食因子は酸素と水である。特に水には注意が必要で、漏水や滞水による局部的な腐食事例が多くみられる。

写真-2.1 に桁端部の局部的な腐食事例を示す。支承前面直上付近の一部は激しく腐食しているが、その上部分はまだ塗装もきれいに残っており発錆もしていないのがわかる。これは伸縮装置からの漏水および滞水などの影響で、部分的に水の影響を受けて局部的な腐食が進んだものと考えられる。つまり、腐食因子を除けば、対策は可能ということを示している。



写真-2.1 桁端部の局部的な腐食事例

その他、腐食を促進する因子としては、飛来塩分（海水や凍結防止剤に含まれる）や、大気汚染ガス（排気ガス、工場排出物）などがある。

また、異種金属が接触することで電池、すなわち、鉄のイオン化が促進されることがあるので、注意が必要である（異種金属接触腐食）。

## 3. 防食

### 3.1 防食の考え方

鋼構造物の防食方法としては、表面被覆、高耐食性材の使用、環境改善、電気防食などがあげられる。

表面被覆による防食は、腐食因子である水や酸素、促進因子の塩分などを遮断し、鋼材を保護する防食方法である。被覆材としては、塗装が最も一般的であるが、熔融亜鉛メッキや亜鉛やアルミ、マグネシウムを溶射する方法などもある。

高耐食性材としては、耐候性鋼やステンレス鋼などが用いられている。

環境改善としては、腐食因子の除去を目的に、滞水や漏水を防ぐ構造改善、積極的な除湿、腐食促進因子を定期的に除去する水洗いなどが行われている。

その他、腐食する方向と逆になる防食電流を流して腐食を抑える電気防食方法などがある。

### (1) 表面被覆による防食方法

表-3.1 に各表面被覆の種類と耐用年数を示す(耐用年数は腐食促進因子の影響の差異、すなわち、腐食環境により3つに分類)。

重防食塗装では、下塗り、中塗り、上塗りと機能の異なる塗料を複数層組み合わせることで、塗膜が劣化するものの、防食機能が完全に失われる前、すなわち、錆が発生する前に塗り替えることを前提としており、そのサイクルは20年から35年と言われている。

熔融亜鉛メッキでは、一般環境では100年程度の長期の耐用年数が期待できるが、厳しい環境下では短く25年程度となっている。特に、飛来塩分に弱い点に注意が必要である。なお、亜鉛層の消耗後は、塗装による防食で対応可能である。

亜鉛アルミ溶射は、塗装に比べ耐久性の高い金属で皮膜することで、高い耐用年数を確保している。初期コストが高いという課題もあるが、LCCの観点から採用されている事例も増加している。溶射皮膜が消耗した場合には、再溶射、あるいは、塗装による防食が可能である。

表-3.1 表面被覆の種類と耐用年数<sup>1)</sup>

防食の種類	耐用年数		
	一般環境 - 山間部 -	やや厳しい環境 - 市街地部 -	厳しい環境 - 海岸部 -
重防食塗装<C5塗装系>	35年(60年)	30年(45年)	20年(30年)
熔融亜鉛メッキ	100年	60年	25年
亜鉛アルミ溶射+封孔処理	100年	70年	60年

( )内は塗膜が防食機能を失い錆が10~15%程度となる期間

### (2) 高耐食性材の使用

高耐食性材の使用の一例として、耐候性鋼材の例を紹介する。

耐候性鋼材は、鋼表面に保護性さびが形成されるよ

うに、クロムやニッケル、銅などが添加された鋼材である。保護性さびの生成により長期防食性が発揮され、200年以上の耐用年数が期待されている。保護性さびが生成されるまでは(一般的には5~10年程度)留意が必要であるが、実績も多くあり、留意点も明確である。

耐候性鋼橋梁の点検・調査の支援ツールとして、橋建協ホームページでさび外観評価補助システムを提供しているほか、樹脂模型によるさびサンプルの販売を行っている(図-3.1)。さび外観評価補助システムでは、外観評点写真、評点別の動画も提供しており、調査現場で見比べて判断することが出来る(さび外観評価補助システム URL-http://www.jasbc.or.jp/sabi/)。

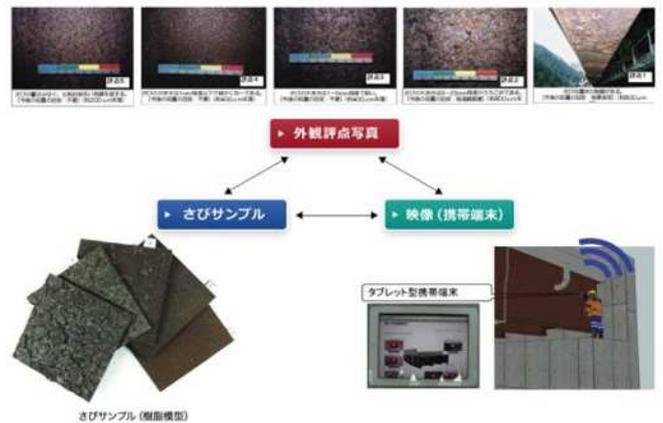


図-3.1 さび外観評価補助システム<sup>2)</sup>

その他、腐食環境の厳しい桁端部にステンレス鋼を使用する方法など、ステンレス鋼を橋梁に用いる研究なども進められている<sup>3)</sup>。

### (3) 環境改善

環境改善の例としては、滞水を防止する構造の採用、例えば、止水板や水抜き孔などの設置があげられる。

写真-3.1は、鋼部材とコンクリートの接触部を積極的に開口することで滞水を防止した事例、写真-3.2は箱桁下フランジに水抜き孔を設けた事例である。

また、塗装あるいは塗替え時の品質確保が難しい箇所などを溶接で密閉化することで酸素と水を遮断する方法などもこれにあたり、鋼床版Uリブ内部などもこの例として挙げられる。

その他、長大橋や吊り橋などで、除湿剤あるいは除湿装置により強制的に湿度を一定値以下に保つ方法なども事例として挙げられる。



写真-3.1 部材貫通部開口改造例



写真-3.2 下フランジへの水抜き孔設置例

### 3. 2 防食を考慮した構造・工夫

防食を考慮した構造・工夫としていくつかの事例を紹介する。

#### (1) 桁端部での構造詳細

桁端部には桁の移動を吸収する伸縮装置が設置されていることが多い。この伸縮装置が劣化損傷すると、本体でなくとも伸縮の排水機構や非排水部が損傷すると、橋台・橋脚上（支承廻り）に土砂、雨水が流れ落ち、支承廻りに土砂の堆積、雨水等の滞水が生じる。桁端部は一般的に閉鎖的な空間で風通しが悪い。狭隘でメンテナンスもしにくい。一度堆積、滞水した土砂・雨水がそのままになりやすく、発錆・腐食が生じやすい。

これらの改善構造として図-3.2 に示す構造を推奨している。

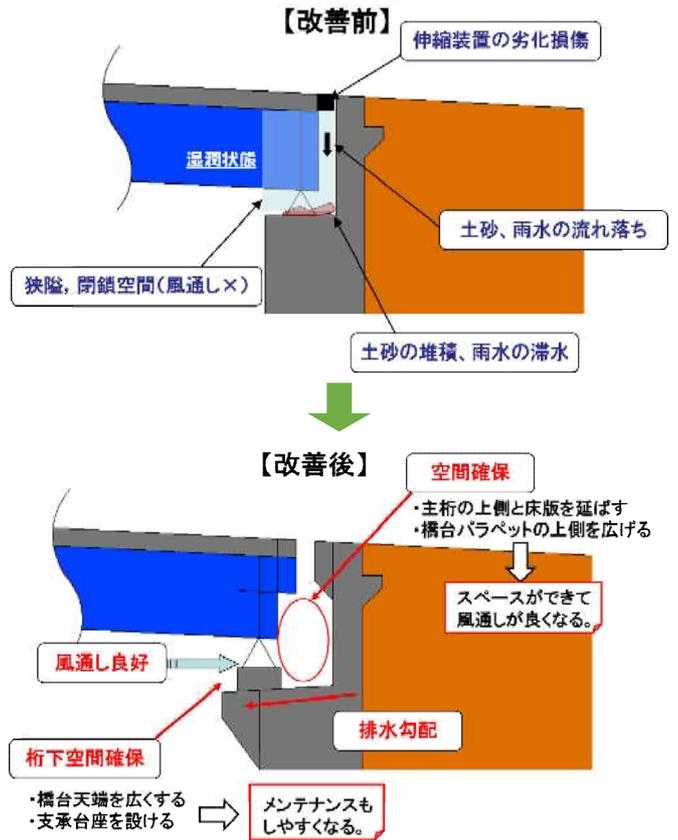


図-3.2 桁端部の構造改良案

主桁の上側と床版を延ばすとともに、橋台パラペットの上側を広げることで桁遊間部に空間を確保する。また、橋台天端前面を広くし、支承台座を設けることで桁下空間を確保する。これにより風通しがよくなる。さらに橋台面に適度な排水勾配を設けることで、土砂等の堆積、滞水防止に大きな効果が期待できる。

#### (2) 塗装桁における細部構造

細部構造においても、防食を考慮した種々の工夫が行われている。それらの数例を紹介する。

##### ①部材角部のR加工

部材角部は膜厚の確保がしにくい箇所であるため、2R以上の面取りを行って曲面仕上げとすることで(図-3.3 参照)、一般部とほぼ同等の塗膜性能(塗膜厚)を得られるようにしている。写真-3.3は曲面加工用工具による加工状況である。

また、R加工しても塗膜厚が薄くなりやすいため、写真-3.4のように当該部位のみ刷毛で先行塗装を実施して、確実に塗膜厚を確保するなどの方法もある。

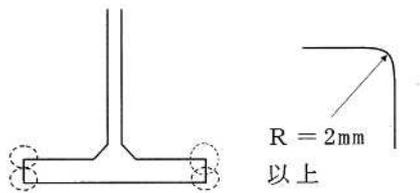


図-3.3 角部の曲面仕上げ



写真-3.3 曲面加工用工具



写真-3.4 角部への先行塗装例

### ②添接板と母材の寸法

添接部において添接板と母材のコバを揃えると溝ができ、そこに塗装をするとピンホールが発生しやすい。添接板の接触面側をR加工せず、添接板のサイズを5mm控えることで溝の発生（ピンホールの発生）を防ぐ工夫がなされることが多い（図-3.4）。

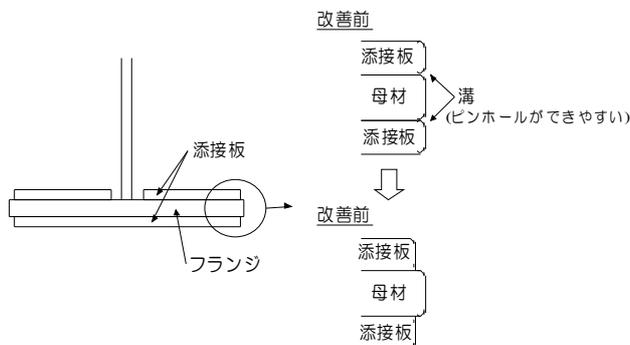


図-3.4 添接板と母材の寸法関係

### (3) 耐候性鋼橋梁における細部構造

耐候性鋼橋梁は保護性さびの形成が非常に重要であることから、保護性さびの生成に配慮した細部構造が多くみられる。その中の数例を紹介する。

#### ①水切り板の設置

図-3.5 は桁端付近の下フランジに水切り板を設置した例である。縦断勾配の高い側・低い側ともに水切り板を設置している。これは、縦断勾配の高い側は桁端部で漏水があった場合に塗装を行っていない一般部に流れ込むことを防ぐためであり、縦断勾配の低い側は一般部へ降り注いだ雨水や漏水による流れさびが支承部や橋台部にかからないようにするためである。

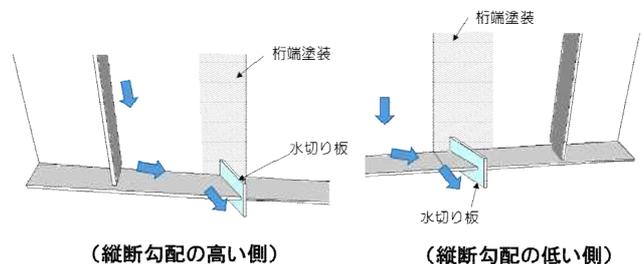


図-3.5 水切り板の設置例

#### ②添接部構造

図-3.6 に添接部の構造例を示す。

腹板連結板は、連結板周辺が湿潤状態にならないように1枚板で構成し、フランジと添接板との隙間は広くする。また、下フランジ添接板は分割タイプにして水抜きや乾燥を容易にしている。

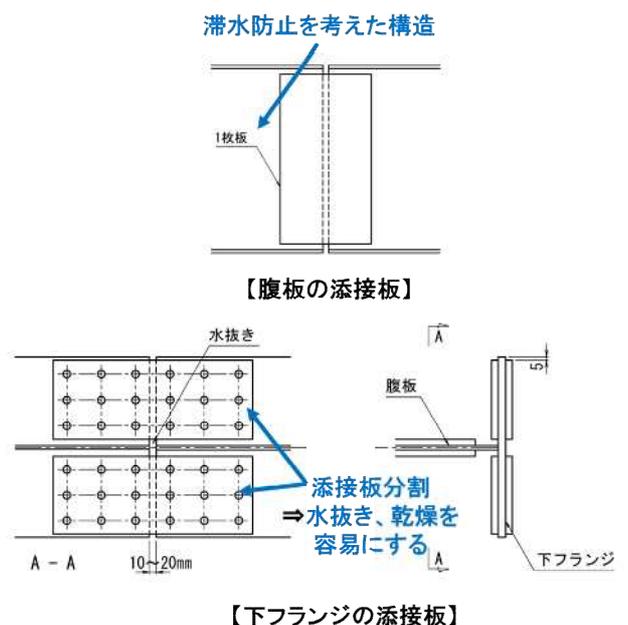


図-3.6 添接部の構造例

#### (4) 鋼とコンクリートの境界部の防食

鋼製橋脚根巻きコンクリート天端付近は雨水の影響により発錆・腐食しやすい部位である。この対策として、コンクリート境界部の鋼製橋脚面に重防食塗装を施すとともに、雨水の浸入を避けるためにシール処理を全周に施している。写真-3.5 に施工前後の状況を示す。

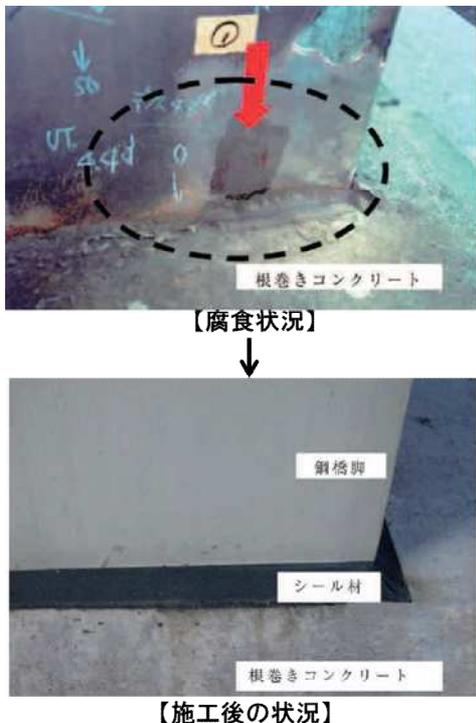


写真-3.5 鋼製橋脚におけるコンクリート橋脚の防錆例

#### 4. 塗替え

塗装は最も代表的な防食法であるが、そのライフサイクルの中で塗替えが発生する。塗替えについて特徴や留意点を紹介する。

##### 4-1 塗装の考え方

###### (1) 重防食塗装系の塗替え

重防食塗装系の塗替えの考え方は、中塗り・上塗りの塗膜厚が減ってきた段階で、目荒らしをして、中塗り・上塗りを塗り重ねていくのが基本の考え方である。下塗りは紫外線等に弱く、上塗り・中塗りが傷んで、下塗りが露出すると劣化しやすくなる。下塗りや防食下地を傷め、鋼材を発錆させると、その錆の除去作業は大掛かりになり、コストも嵩むため、上塗り・中塗りが劣化した段階で、上塗り・中塗りだけを塗替えるというサイクルが望ましい。

図-4.1 に塗装塗替えサイクルのイメージを示す。

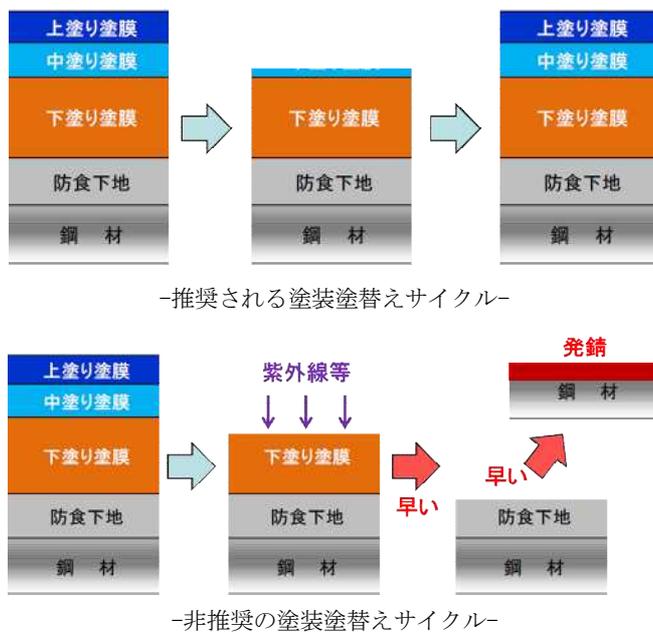


図-4.1 塗装塗替えサイクルのイメージ

###### (2) 一般塗装系の塗替え

重防食以外の古い塗装系で塗られた橋梁は、塗膜全厚を除去して、重防食塗装系へ塗りなおすことが望ましい(表-4.1)。一般塗装系のままの塗替えは、特殊な場合(環境的にブラストが出来ない、橋の残存寿命が20年程度など)を除いて推奨されない。

表-4.1 塗替え重防食塗装系(Rc-I)

素地調整	1種 ※
防食下地	有機ジンクリッチペイント
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗

※ ブラスト処理 除錆度 ISO Sa 2 1/2

全塗替えの場合の素地調整は基本的に1種(ブラスト処理)となる。また、重防食塗装系以前の時代の塗膜には、鉛・PCB等の有害物質を含有しているものがあるため、「周囲に撒き散らさない」、「作業者に吸い込ませない」等の対応が必要であり、塗替え作業における留意点は塗膜剥離と素地調整にあると言える。

###### 4-2 塗膜剥離と素地調整

表-4.2 に近年用いられている塗膜剥離および素地調整工法を示す。

表-4.2 塗膜剥離および素地調整工法

工法名称	塗膜剥離	素地調整	養生	適用箇所
剥離剤	○	—	簡易	平面・曲面
電磁誘導 (IH)	○	—	簡易	広い平面
ブリストル ブラスター	—	○	簡易	平面・曲面 (小面積)
バキューム ブラスト	○	○	密閉	養生エリア内 ならどこでも
回収分離式 オープンブラスト	○	○	完全 密閉	養生エリア内 ならどこでも

各工法とも長所・短所があり、施工箇所の制約、条件等に応じて、幾つかの工法を組み合わせる事が有効である。以下に各工法を紹介する。

### ①剥離剤工法

塗膜剥離専用が開発された剥離剤を塗布して、24時間程度放置し、軟化した塗膜をスクレーパー等で剥ぎ取る方法である。低温では極端に性能が落ちることや、塗料種類により適用の可否があること（プライマーやジンク、錆は基本的に除去できない）、膜厚が厚い場合は回数が必要になるなど留意すべき点もあるが、旧塗膜を剥離するには非常に有効な方法である。以前は有機溶剤系の剥離剤が多かったが、最近では臭いが少なく環境にやさしい水系タイプが主流になっている。

なお、剥離剤工法はあくまでも塗膜を剥離するための工法であり、別途電動工具またはブラストによる素地調整が必要である。

写真-4.1 に剥離剤による剥離状況写真を示す。



写真-4.1 剥離剤による塗膜剥離状況

### ②電磁誘導 (IH) 工法

専用の機械を使用し、電磁誘導で鋼材表面近傍のみを温め、塗膜の付着を弱めた後、スクレーパー等で塗膜を剥がす方法である。高温になるのは鋼材表面だけで、鋼材裏側の塗装は傷めないとされている。

錆やプライマーを除去することはできず、剥離剤と同様にあくまでも塗膜の剥離工法であるため、別途電動工具またはブラストによる素地調整が必要である。

図-4.2 に工法イメージ図を、写真-4.2 に剥離状況を

示す。

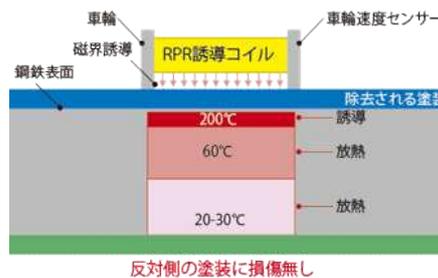


図-4.2 電磁誘導 (IH) 工法のイメージ



写真-4.2 電磁誘導 (IH) 工法による塗膜剥離状況

### ③ブラスト面形成動力工具 (ブリストルブラスター)

本工具は塗膜剥離ではなく、塗膜剥離後の素地調整用工具である。金属ブラシを縦回転させ、その先端の衝突により、錆、ミルスケール等を除去するとともに、素地調整1種相当のアンカーパターンを鋼材表面に形成するものである<sup>4)</sup>。

写真-4.3 にブリストルブラスターによる素地調整状況を、写真-4.4 に各種の方法で処理した鋼材表面写真を示す。



写真-4.3 ブリストルブラスターによる素地調整状況

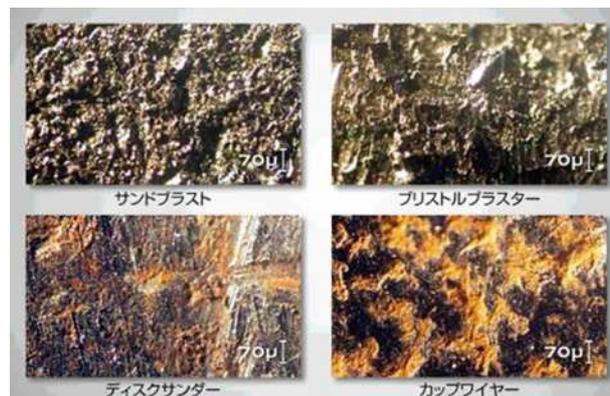


写真-4.4 各種の方法で処理した鋼材表面写真

ブリストルブラスターでの処理面は、錆は取れており、サンドブラストの仕上がりに近い状態になっていることがわかる。条件的にブラスト施工が出来ない場合や小面積の処理などでは簡易に施工でき非常に有効な方法であるが、あくまでも素地調整1種相当であること、処理面積が大きいとかなりの時間を要することなどに留意が必要である。

#### ④バキュームブラスト工法

ブラストとは、研削材（研掃材）を金属表面に衝突させ、金属表面を細かく切削及び打撃することによってさび、スケールなどの付着物を除去して金属表面を清浄化又は粗面化させる方法であり、塗装塗替え時における素地調整1種はブラスト処理が基本となる。現場でのブラスト処理においては塗膜および研削材などが粉塵となり大量に飛散するため、足場などを厳重に密閉養生することが必要となる。

一方、バキュームブラストは、噴射ノズルと回収ホースとが一体になったブラストガン（ノズルヘッド）により、処理と同時に研削材を吸引回収するものである。図-4.3 にバキュームブラストのシステムを示す。

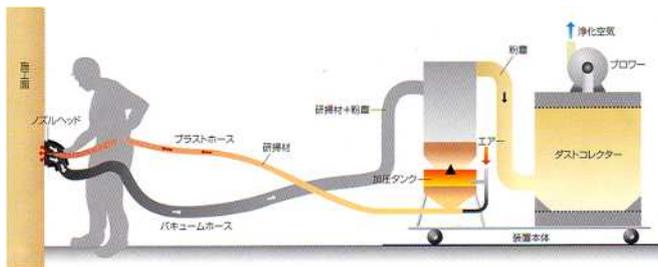


図-4.3 バキュームブラストのシステム

吸引口をシールし難い複雑な形状には適用が困難で完全な吸引は不可能なため、足場の養生は必要である。また、作業効率が低いので、広範囲の作業には不向きといった点に留意が必要である。

#### ⑤回収分離式オープンブラスト

通常の現場ブラストでは、非鉄系研削材が用いられている。この非鉄系研削材はブラスト投射により破碎するため廃塗膜と分離することは難しく、研削材と廃塗膜は併せて産業廃棄物として処理される。廃塗膜にPCB や鉛などの有害物質が含有されている場合は、廃塗膜とともに研削材も特定産業廃棄物として処理しなければならず、処理費用が大幅に嵩むこととなる。

一方、回収分離式オープンブラストは、研削材にスチールグリッド（投射しても破碎しない）を使用し、ブラスト後の廃材を回収、研削材と廃塗膜を分離して、

産業廃棄物を廃塗膜だけにすることで廃棄物処理量を大幅に削減するものである（スチールグリッド研削材は再利用）。通常のブラストに比べて産業廃棄物の発生量は1/30～1/50になると試算されている<sup>5)</sup>。

図-4.4 に回収分離式オープンブラストのシステム例を示す。

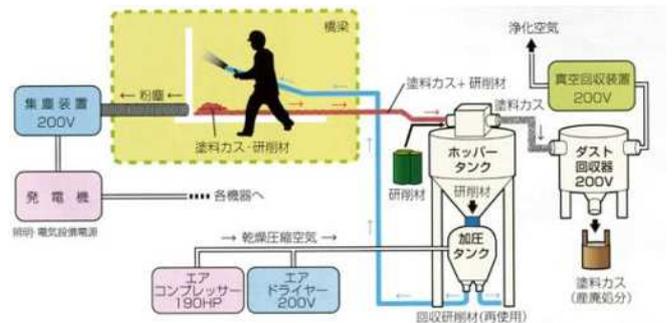


図-4.4 回収分離式オープンブラストのシステム

通常のブラストに比べて機材が多くなるため、ある程度の規模の機材設置ヤードが必要となること、機材ヤードから施工箇所まで200m程度以内であること、スチールグリッドを使用しているとともにオープンブラストであるため、雨水が浸入せず、粉塵を飛散させない養生が必要となるといった点に留意が必要である。

一般塗装系の塗替えで重要な作業は塗膜剥離と素地調整である。幾つかの工法を組合せて、良質の施工を最小コストで行い重防食塗装に変えることが、限られた予算で鋼橋を長持ちさせる鍵と考える。

## 5. 補修事例

腐食部補修における補修方法選定フロー例を図-5.1 に示す。

まず、事前調査としての腐食の確認を行い、対策が必要なレベルと考えられたら、腐食部の詳細調査を実施する。この詳細調査では、正確な現状把握が必要であるため、現地にて浮錆等を事前に撤去する必要がある。詳細調査の結果により、補修方法や補修範囲の設定を行う。軽微な腐食に対しては除錆と補修塗装のみ、中程度の腐食に対しては主に当板補強を、重度の腐食に対しては部材取替を選定するのが一般的と考えられる。

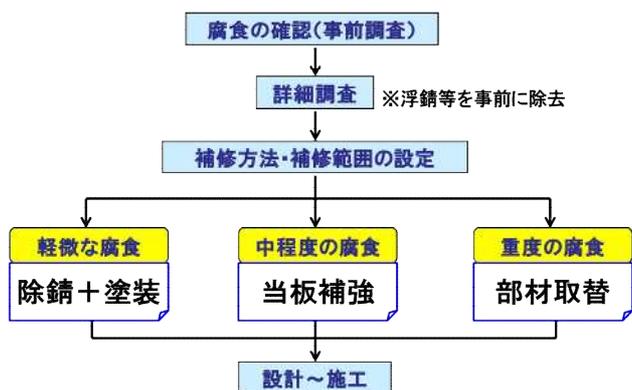


図-5.1 腐食部補修における補修方法選定フロー例  
以下，5つの施工事例を紹介する。

### 事例1 吊橋ケーブルの腐食補修

架設後35年が経過した吊橋で，ハンガーロープの取替，メインケーブルの防食・水切り設置，ケーブルバンドボルトの取替等を実施したものである。

#### 一 橋梁概要一

橋梁形式：1径間補剛トラス吊橋

架 橋：1983年（昭和58年）

橋 長：444m(401m + 43m)

工事内容：ハンガーロープ取替，メインケーブル水切設置，ケーブルバンドボルト取替他

図-5.2に橋梁一般図を示す。

#### (1) 腐食状況

腐食状況としては，致命的なものはなかったが，ハンガーロープについてはメッキ皮膜の消耗，メインケーブルラッピングワイヤについては塗膜劣化，ケーブルバンドボルトについては軸力低下と塗膜劣化などが発生していた。

写真-5.1にハンガーロープの腐食状況を示す。ハンガーロープの上側に腐食が集中していることがわかる。

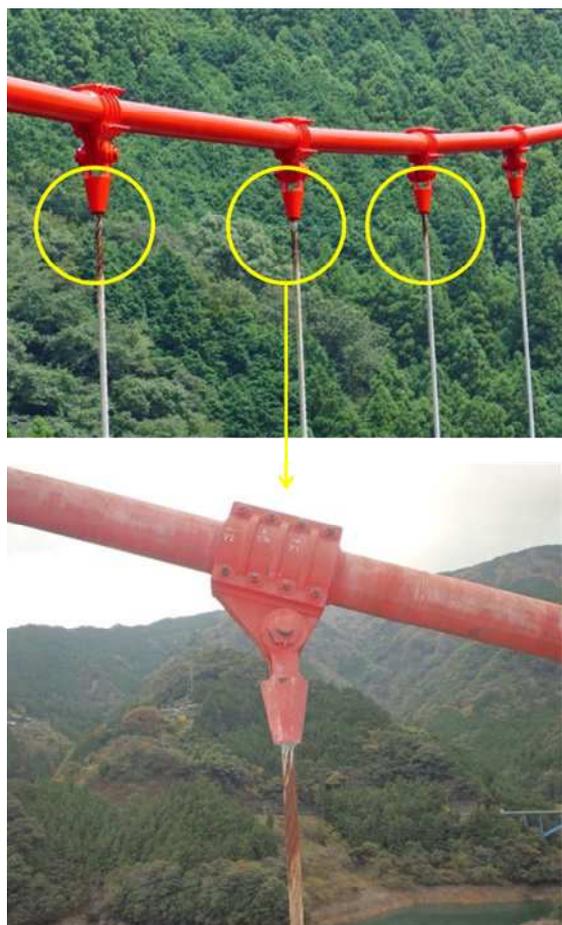


写真-5.1 ハンガーロープ腐食状況（メッキ被膜消耗）

ラッピングワイヤについては，ケーブルバンドとの境界部で塗膜劣化，剥離が発生していた。メインケーブルについては，ラッピングワイヤを部分的に撤去し確認した結果，大きな腐食進行は見られなかった。

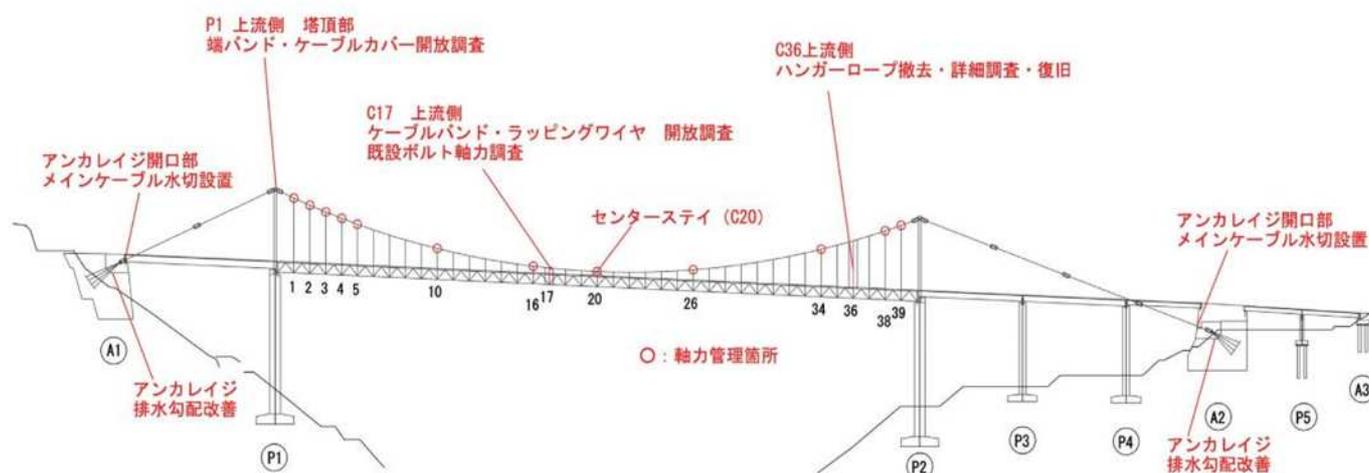


図-5.2 橋梁一般図

ケーブルバンドボルトについては、ボルト・ナット頭の塗膜劣化・発錆が見られた。また、ボルトの軸力調査を行ったところ、場所によっては設計軸力の40%程度まで低下しているものが見られた。

写真-5.2～5.4にそれぞれの状況を示す。



写真-5.2 ラッピングワイヤ塗膜劣化状況



写真-5.3 メインケーブル腐食状況（レベル小）



写真-5.4 ケーブルバンドボルトの状況

### (2) 腐食原因

腐食原因としては塗替え塗装が実施されておらず、防食機能（塗膜）が経年劣化していたということがまず挙げられる。またケーブル各部の局所的な腐食については、各部材同士の境界部で水が溜まりやすい構造になっていたということも大きな要因と考えられる。ハンガーロープと定着金具の境界部やメインケーブル

とケーブルバンドの境界部、アンカレッジへのケーブル挿入部等がこれに該当する（写真-5.5）。



写真-5.5 各部材同士の境界部（腐食しやすい部位）

### (3) 対策

一部材境界部滞水箇所の対策（構造対策）－

#### ① ケーブルバンド・メインケーブル境界部

水浸入対策として気体透過性が極めて小さいブチルゴムとシーリング材による防水処理を施した後（写真-5.6）、境界部手前でケーブルを伝った水が途切れるよう水切りを設置した（写真-5.7）。メインケーブルは重要部材であることから、ブチルゴム+シーリングと水切の2重対策を施した。水切りについては簡易な工夫ではあるが高い効果が望める方法と考える。



写真-5.6 ケーブルバンド部の防水処置



写真-5.7 ケーブル下面水切りの設置

②ハンガーロープ定着金具境界部

ハンガーロープと定着金具との境界部については、金具下端に水切り構造を設置し、境界部の滞水、ハンガーロープ本体への浸水を極力少なくするように工夫した(写真-5.8)。ハンガーロープ本体の防食は、防水・防食性能が高く、また柔軟性がありケーブルの凹凸にも追従して密着するペトロラタム系被覆防食テープを巻き付け、その上に柔軟形塗装を施した(写真-5.9)。

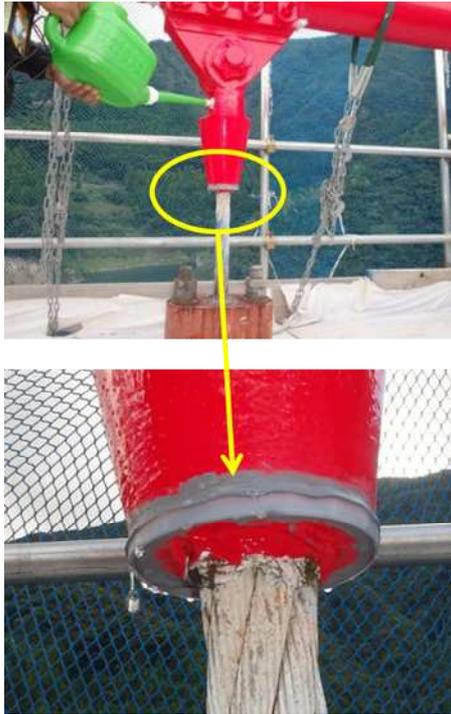


写真-5.8 ハンガーロープ上端部の水切りの設置



写真-5.9 ハンガーロープ本体の防食（防食テープ巻き）  
— 一部材取替（構造機能回復） —

①ケーブルバンドボルトの取替

ケーブルバンドボルトについては、発錆状況、軸力低下状況により取替を実施した。取替後のケーブルバンドボルトには防錆機能を持つ取り外し可能なボルト

キャップを取り付ける方法とし、防錆機能を確保しつつ、将来的な軸力の確認も容易に行えるよう考慮した(写真-5.10)。



【ボルト取替状況】



【ボルトキャップ取付状況】

写真-5.10 ケーブルバンドボルトの補修状況

②ハンガーロープの取替

発錆の著しいハンガーロープについては調査を実施することも目的として、取替を行った。

バイパス材を設置しセンターホールジャッキで荷重を受替えた後、無応力下で取替を実施した(写真-5.11～5.12)。



写真-5.11 バイパス材の設置状況



写真-5.12 ハンガーロープの取替状況

— 塗装塗替え（防食機能回復） —

最終的には劣化した防食機能の回復のために塗装塗替えを実施した（写真-5.13）。塗替えはケーブル廻りだけでなく、主塔についても行い、当初滞水の痕跡が見られた水平横梁下フランジには「水抜き孔と防虫ネット」を設けた（写真-5.14）。



写真 - 5.13 ケーブル廻りの塗替え状況



写真 - 5.14 主塔横梁の塗替えおよび水抜き孔の設置

(4) 補修のポイント

- ・本工事だけの問題ではないが、やはり定期的な塗替

えて防食機能を保持することが一番である。

- ・ケーブル構造などでは、特に水仕舞いの水切りや確実な防水などのちょっとした工夫が非常に有効である。
- ・また、本工事で採用した取り外し可能なボルトキャップなどのように、補修するにあたっては将来的な維持管理性も考慮して対策することが必要である。

事例2 腐食した横桁上フランジのバイパス材による補強事例

腐食した横桁上フランジの下側に下フランジの代わりとなる補強材（バイパス材）を追加して補強した事例である。

— 橋梁概要 —

橋梁形式：鋼単純ワーレントラス

架 橋：1955年（昭和30年）

橋 長：570.8m(63.5m+7@63.4m+63.5m)

工事内容：横桁補強工，歩道高欄補修工

図-5.3に一般図を、写真-5.15に全景写真を示す。

(1) 腐食状況

横桁上フランジが激しく腐食し断面減少が生じており、ケレン後に板厚を計測したところ、当初板厚20mmのところ13mm程度まで減少している箇所が散見された（写真-5.16）。



腐食フランジ箇所

【横桁腐食状況】



【ケレン後板厚計測】

写真-5.16 腐食状況

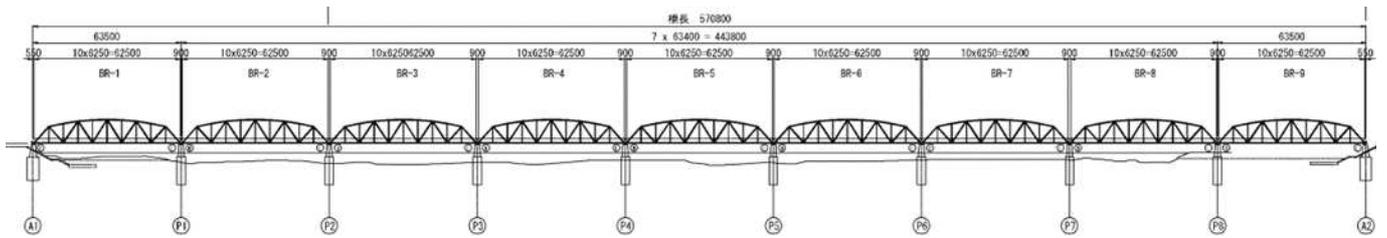


図-5.3 橋梁一般図



写真-5.15 橋梁全景

### (2) 腐食原因

本橋梁の床版は横桁間隔で PC 版を敷き詰めた構造となっているため、全ての横桁上に目地が存在しており（写真-5.16）、その目地から雨水が浸入し、横桁上フランジ上に滞水、腐食したものと考えられた（図-5.4）。

また、本橋梁は豪雪地帯に位置しており、冬場は凍結防止剤が散布されるため、さらに腐食が促進されたものと考えられた。



写真-5.16 横桁上の床版目地

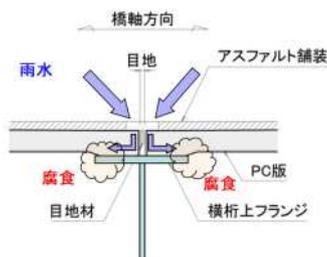


図-5.4 床版目地からの漏水（横桁断面）

### (3) 対策

フランジの板厚が 5mm 以上減厚している箇所について

では、既設横桁フランジの下側に補強用の新たなフランジを設置してバイパス補強を行った。腐食した上フランジについては、腐食部のケレン、現場塗装を行い存置することとした。なお、PC 版の目地からの漏水という腐食要因に対しては、別件工事にて舗装の打替えによる漏水防止対策を実施した。

図-5.5 に補強構造図を示す。

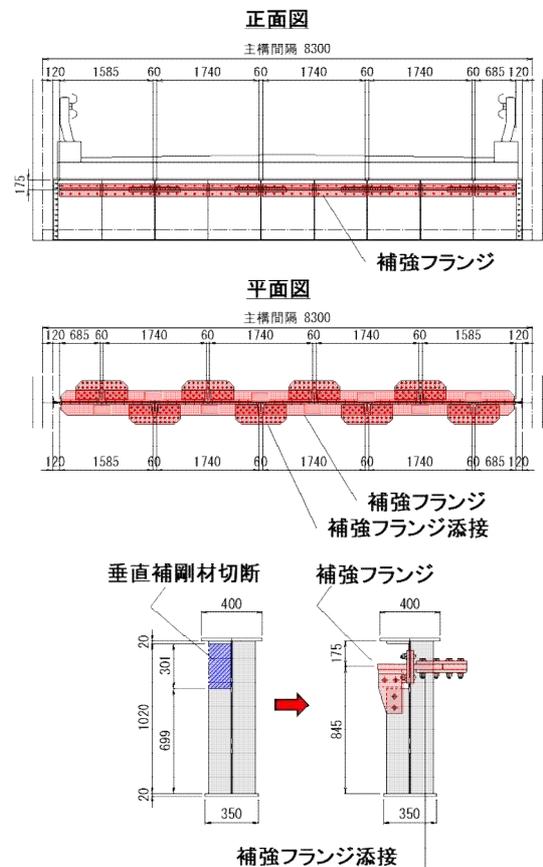


図-5.5 補強構造

補強構造は、新たな補強フランジを既設上フランジから 175mm 下がりの位置に、横桁全長にわたって設置するものとした。ただし、900mm 間隔で垂直補剛材があるため、垂直補剛材と干渉する箇所は 2 種類の方法（構造）で対処した。一つは切断・仕上げして新設の補強フランジを通す構造、もう一つは垂直補剛材は残して補強フランジを分割し、添接板で連続化する構造である。

切断・仕上げする箇所は、図-5.5 中、青で着色したような形で切り欠いて、補強フランジと垂直補剛材とを高力ボルトで連結した。垂直補剛材を切断する箇所と残す箇所は互い違いに配置している。

写真-5.17～5.20 に施工状況写真を示す。



写真-5.17 罫書，孔明



写真-5.18 垂直補剛材切断



写真-5.19 部材取付，本締め



写真-5.20 補強完了

#### (4) 補修のポイント

- ・新設の補強フランジは、既設の垂直補剛材とボルトで取り合うため、製作前には詳細な計測が必要。
- ・部材の取付はほぼ人力施工となるため、人力施工可能な部材重量で設計することが必要。
- ・鋼橋では、本事例のように、損傷部を残して補強部材を別途取り付けるなどの柔軟な補強方法が可能。  
⇒「損傷部は撤去する」という固定観念は捨て、色々なパターンの補修・補強方法を考えてみることも必要かつ有効と考える。

### 事例3 腐食減厚部にエポキシ樹脂を塗布した当板補強

供用開始から 80 年以上が経過しており、これまでに幾度かの維持修繕工事が行われてきたが、床版の損傷や塗膜の再劣化、主桁の腐食による損傷が著しいことから、早期の大規模補修が必要となり約 2 年間の全面通行止めを実施し、桁の腐食補修や連続化、床版・地覆・防護柵・舗装の全面更新、塗替え塗装等の長寿命化工事を行ったものである。本稿では腐食に伴う主桁補修について報告する。

#### 一橋梁概要一

橋梁形式：①9 径間単純 2 主桁

②8 径間単純 4 主桁

架 橋：①1933 年(昭和 8 年)

②1922 年(大正 11 年)

橋 長：①154.8m(9@16.8m)

②179.2m(8@21.5m)

工事内容：主桁補修，桁連結，支承取替，床版取替  
付属物・橋面工更新，塗替塗装

図-5.6 に一般図を，写真-5.20 に全景写真を示す。

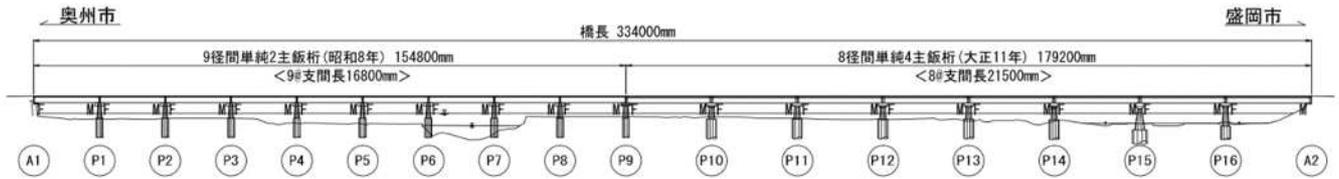


図-5.6 橋梁一般図



写真-5.20 橋梁全景

(1) 腐食状況

過年度の補強工事で設置された水平補強材の腐食や床版下面からの漏水に伴う横桁等の腐食，支点部腐食およびそれに伴う支承水平移動機能の低下が生じていた（写真-5.21）。



【主桁腹板腐食状況】



【床版下面腐食状況】



【支点部腐食状況】

写真-5.21 腐食状況

(2) 腐食原因

腐食は，主に床版劣化による雨水等の漏水に起因したものである。主桁腹板水平補強材の著しい腐食については，車道床版と歩道橋との隙間からの漏水によるものと考えられた（写真-5.22）。



写真-5.22 車道と歩道の隙間からの漏水

(3) 対策

床版下面からの漏水に伴う腐食に対しては，腐食状況に応じて，部材取替や当板補強を実施した。

主桁腹板水平補強材については，この補強材をすべて撤去し当板補強部材を設置した。この際に，主桁腹板減厚部においては，当板補強部材との隙間となる腐食減厚部にエポキシ樹脂を充填・塗布し，腐食面と当板面の接触度向上効果とともに補強後の漏水防止効果を図っている。エポキシ樹脂塗布作業においては，隙間を生じさせないために多めに塗布しておき，部材設置時にボルト孔よりあふれであることを確認して，ボルト本締め作業を実施した。

図-5.7 に腐食補修範囲図および主桁腹板補強概要図を，写真-5.23～5.29 に施工状況写真を示す。

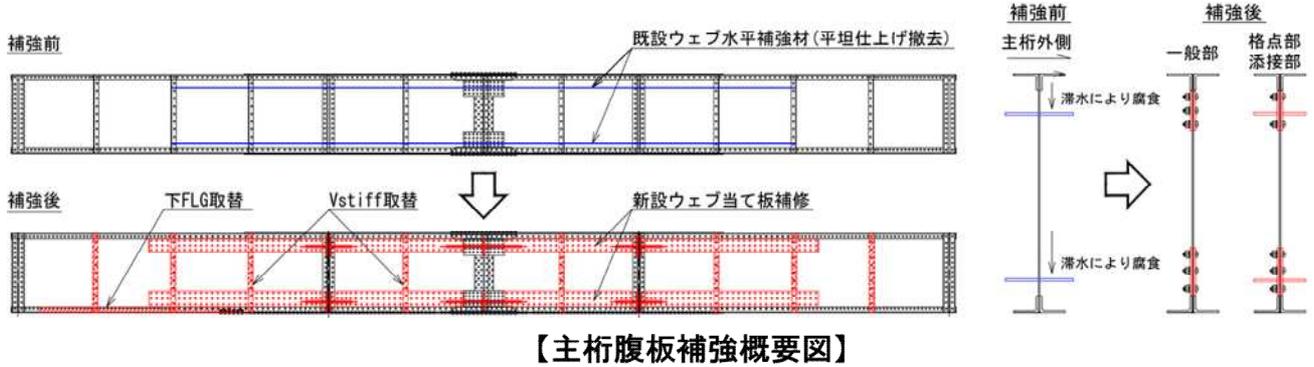
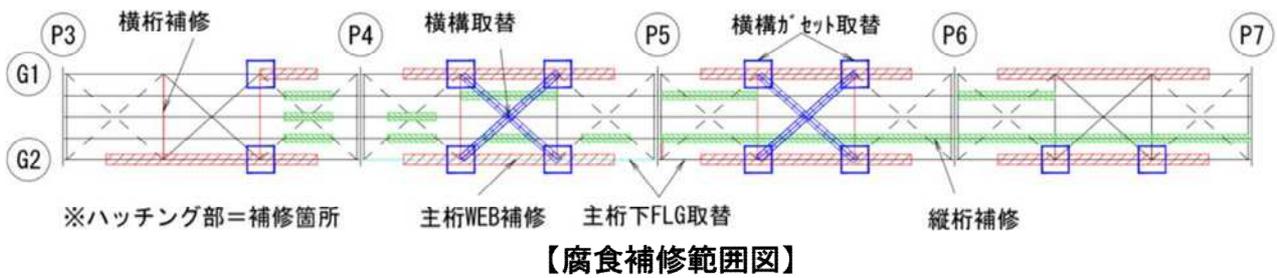


図-5.7 腐食補修範囲および主桁腹板補強概要図



写真-5.23 補修・補強前



写真-5.25 水平補強材撤去完了



写真-5.24 腐食水平補強材切断撤去



写真-5.26 ケレン後罝書, 孔明



写真-5.27 エポキシ樹脂接着剤の塗布



写真-5.28 当板取付け，ボルト締め



写真-5.29 現場塗装，補強完了

#### (4) 補修のポイント

- ・腐食補修範囲や補強方針を設定する前の現場計測においては，腐食部の浮錆を事前に撤去することが必要。
- ・腐食減厚部へのエポキシ樹脂の塗布の要否は，腐食の状況(減厚量)により判断する。減厚量が大きい場合は，フィラープレートを採用する必要もある。
- ・供用開始から80年以上供用している橋でも，架け替

えではなく適切な補修・補強を行えば，さらなる長寿命化が可能となる(写真-5.30)。



写真-5.30 工事完了全景

#### 事例4 耐候性鋼橋梁における桁端部の腐食補修

耐候性鋼橋梁において，保護性さびが形成されずに腐食・減厚が進行したため，腐食部の部分取替等の補修・補強を行った事例である。

##### 一橋梁概要一

橋梁形式：2径間連続非合成鋼桁橋

架 橋：1989年(平成元年)

橋 長：60m(29.550m+29.550m)

工事内容：主桁・横桁・横構部材取替工，支承取替工  
台座改造工，桁端塗装工，伸縮止水工  
検査路撤去復旧工，添接部取替工

図-5.8に橋梁一般図を示す。

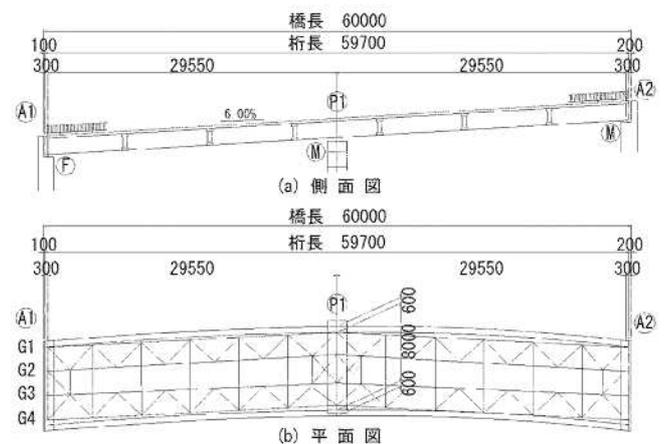


図-5.8 橋梁一般図

#### (1) 腐食状況

主桁端部，端横桁，横構，支承において，異常さびによる重度の腐食が見られ，主桁腹板の下フランジ近傍では腐食による開口が確認された。生成さびは層状

に膨らみ、何層も重ね合わさっている状況であった。異常さびの除去後の残存板厚が1～2mm程度の範囲や、断面が欠損している部位も確認された。

これらの腐食原因を究明するため、①生成さびの外観評価②架橋位置の環境調査③付着塩分量測定④さび構成成分分析等の各種調査についても行った。

写真-5.31～5.33に腐食状況写真を示す。



写真-5.31 桁端主桁部の腐食状況



写真-5.32 支承部の腐食状況



写真-5.33 横構の腐食状況

## (2) 腐食原因

環境的な要因としては、

- ・地山や植生が近接し（風通しが阻害され、日照が遮断され）、耐候性鋼材の安定さびの生成に欠かせない乾湿が起こりにくい環境となっていた（写真-5.34）。
- ・冬季の降雪時の凍結防止剤散布による塩分が供給される環境であった。さびの成分分析の結果、塩化物イオン存在下で生成されるβさびを確認したことから、凍結防止剤の影響があったことが分かった。



写真-5.34 地山、植生の近接状況

構造的な要因としては、

- ・橋面上の伸縮装置の止水構造は損傷しており、漏水・土砂が流入する状況となっていた。
- ・橋台天端の縁部には立ち壁が存在しており、伸縮装置の損傷によって橋面上より流入した土砂や水分が堆積し、湿潤状態が長く続く環境となっていた（写真-5.35）
- ・現在の基準類では規定されている耐候性橋梁の桁端部部分塗装については、耐候性鋼材の導入初期の建造のため実施されていなかった



図-5.35 桁端部の構造的腐食要因

以上から、異常さびの発生原因は凍結防止剤に含まれる塩分と湿潤環境の複合要因であると推定された。

### (3) 対策

#### ①腐食減厚部分の部分取替

腐食減厚部材に対しては、減厚量が著しいため、ジャッキアップして損傷部部分取替を行った。断面欠損の著しい主桁桁端部の下フランジ側・端横桁・横構を対象とした。部分取替では、切断部への剛性保持材の事前設置、新規部材設置時の精度確保のためのフィルム型を使用した施工等に留意した。

写真-5.36～5.39 に施工状況を示す。



写真-5.36 上部工付きジャッキアップブラケット

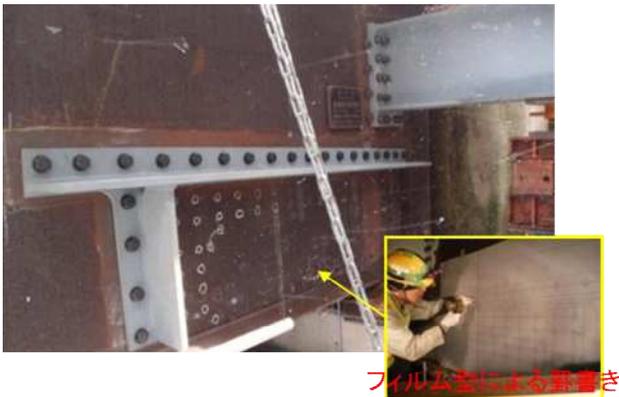


写真-5.37 腐食部切断時剛性保持材の設置



写真-5.38 支承撤去，主桁腐食部切断状況



写真-5.39 新規部材取付け状況

#### ②部分塗装の実施（防食機能の向上）

以下の部位に部分塗装を行うこととした（図-5.9）。

- ・桁端部の主桁腹板 2 パネル+100mm の範囲
- ・付着塩分量測定結果から、塩分付着量の多い下フランジから 100mm の範囲

また、橋台天端にコンクリート表面保護を実施し、凍結防止剤や漏水によるコンクリート劣化対策も行った（写真-5.40）。

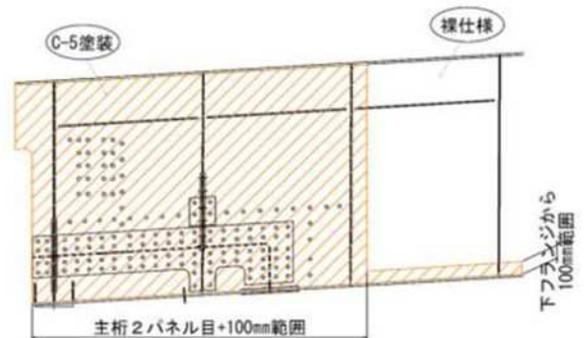


図-5.9 部分塗装範囲



写真-5.40 コンクリート表面保護工

#### ③橋台天端構造の改善（環境改善）

湿潤環境の構造的改善対策として、橋台天端の縁部の既設立ち壁構造を撤去するとともに、橋台天端に排水勾配を作ることで、滞水、堆積対策を行った。

また、主桁下フランジを流れてくる水分が桁端支承部・橋台に集まらないよう、水切り板も新規設置した（写真-5.41～5.42）。



写真-5.41 橋台縁部立ち壁の撤去



写真-5.42 橋台面排水勾配および水切り板の設置

(4) 補修のポイント

- ・耐候性鋼橋梁は保護性さび（緻密なさび）が生成されることで、鋼材の断面減厚量を抑えられる。保護

性さびの生成には留意すべき事項があるため、耐候性鋼材＝メンテナンスフリーという誤った認識を持たない。

- ・耐候性橋梁の特徴を理解し適した構造（ディテール）を採用することが必要（本事例の補修ではこれらのディテールを全て採用）。
- ・適切な維持管理（定期的な目視点検）が重要（早期発見）。

事例5 腐食したアーチリブの部分取替

多主構（9主構）の上路式アーチ橋において、アーチリブ支点廻りの主構の腐食が著しい状態であったため、仮受により部分取替を行った事例である。

一橋梁概要一

橋梁形式：3径間鋼ソリッドリブアーチ橋

架 橋：1931年（昭和6年）

橋 長：134m(42.1995m+49.504m+42.2145m)

工事内容：アーチリブ腐食部部分取替工，支承防錆，端部鉛直材，端対傾構，横桁取替工

図-5.10に橋梁一般図を示す。

(1) 腐食状況

アーチリブ端部において腐食層状剥離・減厚・孔食が激しく生じており、局部的には大きな断面減少が見られる状況であった。リベットについても断面欠損およびゆるみが見られる他、ピン支承については腐食により固結している状態であった。

図-5.11に腐食状況図を、写真-5.43に腐食状況写真を示す。

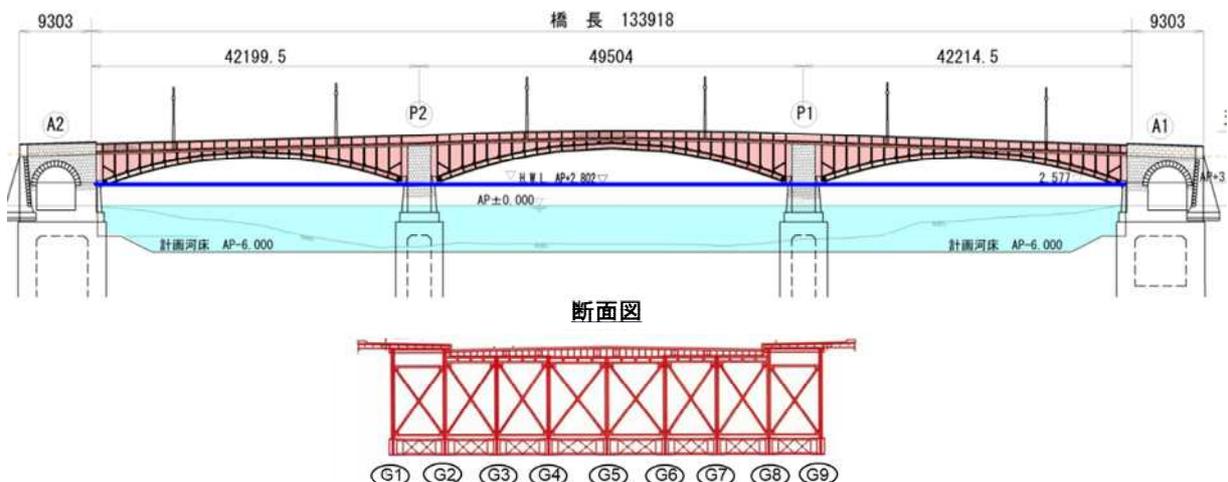


図-5.10 橋梁一般図

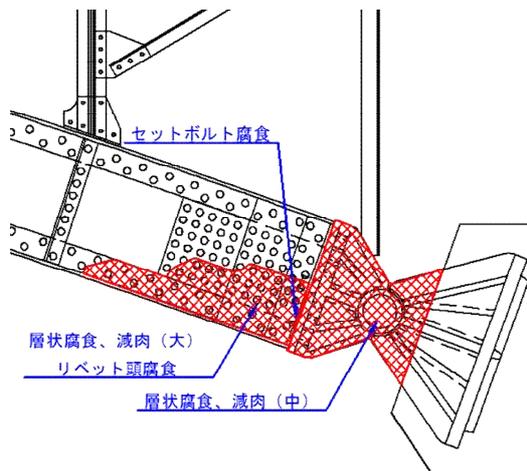


図-5.11 腐食状況図



【支承腐食状況】



【アーチリブ腐食状況(全景)】



【アーチリブ下フランジの層状腐食】

写真-5.43 腐食状況写真

## (2) 腐食原因

本橋は非常に水面に近い為、日常的に湿潤環境に置かれているという環境的な要因がまず挙げられる。

干満によりアーチ支承部では、時に水没する場合もあり大きな腐食要因となっている(図-5.12)。また、船舶による波の跳ね返り水の影響も大きいと考えられる。

構造的には、古い橋梁で形鋼の組合せで部材が構成されているため、部材交差部などに水が溜まり易い、アーチという構造的な勾配により支承廻りに雨水が集まってきてしまう、ということも要因として挙げられる。

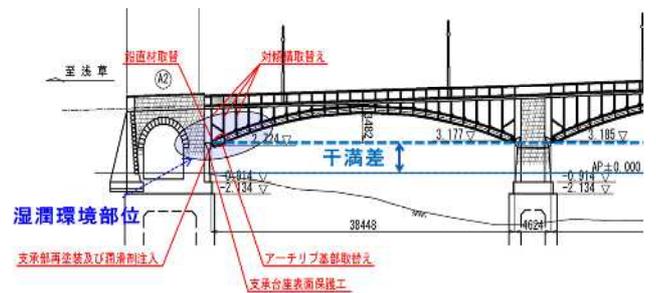


図-5.12 干満差による当該部位への影響

## (3) 対策

### ①防食機能向上(塗装仕様の変更)

水面から近いといった環境的な要因を排除することはできないため、基本的な防食機能の向上を図ることとし、橋梁本体については重防食塗装(C5系塗装系)の採用、支承部についてはA1・Mg(アルミ-マグネシウム)合金溶射を行った。また、支承部については支承回転機能の回復を目的に潤滑防錆剤の注入も併用した。

図-5.13に防錆施工フロー図を、写真-5.44~45に施工状況写真を示す。

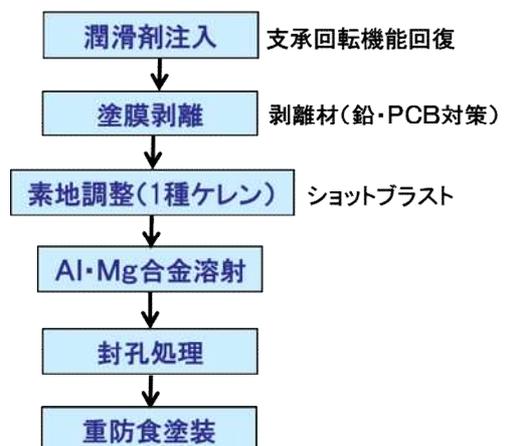


図-5.13 支承防錆施工フロー



写真-5.44 潤滑剤の注入状況



【溶射前プラスト状況】



【Al・Mg溶射状況】

写真-5.45 Al・Mg(アルミ・マグネシウム)合金溶射

②腐食断面減少部の断面回復

アーチリブの腐食断面減少部については、部材がリベットによる形鋼の組合せ部材ということから当板による補強は構造的に難しいため、腐食部の部分取替を採用した。

当該アーチリブを無応力にした後、腐食部材を切断撤去し、溶接構造で製作した新設部材に取り替えた。

図-5.14 に施工フローを、図-5.15 に部分取替要領を示す。

部材の取替は、バイパス材を設置しジャッキアップで荷重の受替えを行った後、取替部材を無応力状態にしてから実施している。図中の緑着色部材がバイパス材で、水色部分が取替部材を示しており、矢印で示し

た荷重の流れのように、バイパス材内に設置したジャッキで軸力導入することにより取替部材の荷重をバイパス材に移した後に取替部（水色着色部）の切断を行う方法である。この施工は、9主構を3主構ずつ3サイクルで行った。



図-5.14 部分取替施工フロー

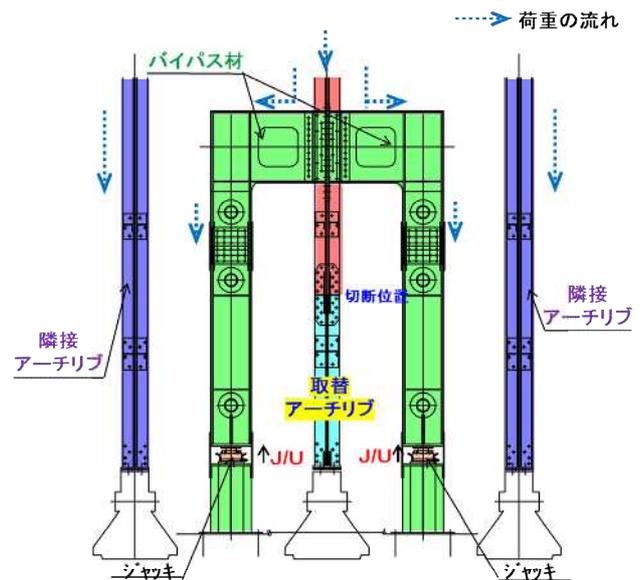


図-5.15 アーチリブ部分取替要領

写真-5.46 にバイパス材の設置状況を示す。



写真-5.46 バイパス材の設置状況

バイパス材を設置しただけでは既設のアーチリブは無応力とならないので、バイパス材内に仕込んだジャ

ッキでジャッキアップ（軸力導入）を行い、荷重をバイパス材に確実に受替え、取替部材を無応力状態にすることが非常に重要なプロセスである。本施工においては、荷重が完全に受替えられたことを確実に確認するために、荷重モニターによるチェックおよび部材縁切りによる目視確認を行った（写真-5.47）。



【荷重モニターによるチェック】



【ジャッキアップ時の縁切り確認】

写真-5.47 荷重受替え時の確認方法

写真-5.48 に既設アーチリブの切断から新規部材の設置状況を、写真-5.49 に施工前後写真を示す。



【既設アーチリブ切断・撤去】

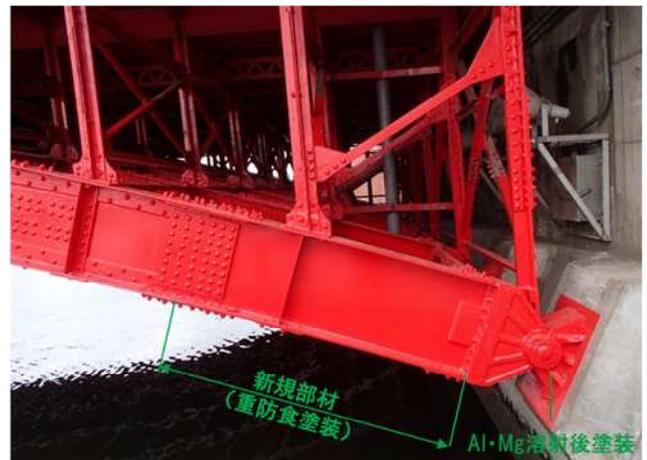


【新設部材の架設】

写真-5.48 アーチリブ部分取替施工状況



【施工前】



【施工後】

写真-5.49 施工前後の状況写真

#### (4) 補修のポイント

- ・補修部材の構造・寸法を正確に把握・認識し、これに基づいて計画すれば、複雑な構造でも部分取替は可能。
- ・部分取替の場合は、取り替える部材を無応力化してから施工することが重要。
- ・補修の場合、狭隘な場所での施工となり易く、本工事事例のようにアーチ部材の取替などでは高い精度の計測が必要。色々な手法を用いて計測確認することが望ましい。
- ・支承部の対策時は、機能回復も併せて考えておくことが望ましい。

#### 6. おわりに

本報告が、これからの鋼橋の維持管理において、何らかの形で少しでも役に立てれば幸いである。

## 〔参考文献〕

- 1) 日本橋梁建設協会：技術短信（2009.10）
- 2) 日本橋梁建設協会 HP
- 3) 松下裕明，矢吹哲哉，有住康則，下里哲弘：ステンレス鋼－構造用鋼ハイブリッド圧縮補剛板の耐荷力評価，土木学会論文集 A1，Vol.69，No.1，pp.121-132，2013.
- 4) ブラスト面形成動力工具「ブリストルブラスター」  
NETIS 登録 No. :CG-110021-VE
- 5) 循環式エコクリーンブラスト：NETIS 登録 No. :CB-100047-VE