

鋼橋の腐食事例とその対策

(株)横河メンテック 名取 暢

1. はじめに

鋼橋の代表的な劣化現象として腐食が挙げられる。腐食は、鋼部材にとって不可避な劣化現象であり、それを防止するには何等かの防錆防食対策を行うことが必要である。

防錆防食としては塗装が一般的に行われるが、経年に伴う塗膜の劣化は避けられない問題である。このため、供用中における塗り替えを含めた維持管理は必要不可欠であり、これを怠ると腐食が予想以上に進行してしまう。

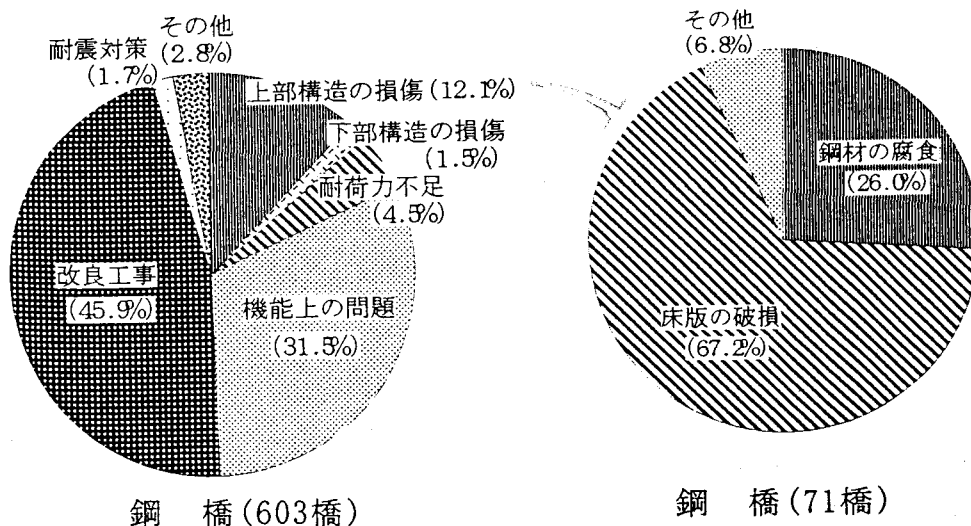
ここでは、鋼橋の腐食問題を取り上げ、腐食事例と対策を紹介するとともに、点検から補修補強に至るまでの維持管理上の留意点について概説する。

2. 腐食に対する維持管理の重要性

鋼部材に発生する腐食は長期間に徐々に進行する劣化現象である。腐食の発生は部材断面を減らし強度を低下させる。局所的な腐食については、腐食部

分を修復（補修）し、耐荷性能を回復させることが可能である。しかし、全体的に腐食が進行し、特に主要部材の腐食が著しい場合には、供用の安全性の確保が困難な場合も想定され、交通規制や使用停止などの対策を実施しなければならなくなる。さらに、修復のための補修が広範囲、かつ大掛かりとなり経済的な見地から架け替えを考える必要も生じてくる。したがって、腐食の進行が軽微な内に早期に発見し、適切な対策を講じることが肝要であり、そのための維持管理は重要であると言える。

図—1は、昭和61年から平成8年までの10年間に架替工事を実施した鋼道路橋についてその理由を調査した結果である¹⁾。架け替え理由については、改良工事および幅員不足などの機能上の問題によるものが大半を占めており、続いて上部構造の損傷（12.1%）、耐荷力不足（4.5%）となっている。この上部構造の損傷が原因とされた橋梁についてその内容をみると床版の破損（67.2%）と鋼材の腐食（26.0%）



図—1 道路橋の架け替え理由の内訳¹⁾

がほとんどを占めており、架け替え理由において腐食は大きな動機となっている。このことから腐食およびその維持管理の重要性を認識することができる。

3. 腐食の形態と防錆防食技術

(1) 腐食の形態

鉄はその化合物である鉄鉱石を相当のエネルギーを投入して還元したものである。したがって、遊離の元素 (Fe) として存在するよりも化合物として存在する方が安定であると言える。このことが腐食の根本であり、鉄鋼材料を使用する際に防錆防食が必要となることの所以である。

鉄の腐食には湿食と乾食とがある。湿食は常温状態において水と酸素の存在下で起こる腐食である。通常の鋼構造物、機械、プラントなどに見られる発錆のほとんどはこの湿食である。

湿食をその形態により分類すると図-2に示すように前面腐食と局部腐食とに大別できる。鋼材表面が均一に消耗していく現象を全面腐食と呼んでいる。全表面が平滑な場合には均一に腐食するが、穏やかな凹凸があったり、表面に付着物があったりした場合には多少均一性に欠けることもある。一方、局部

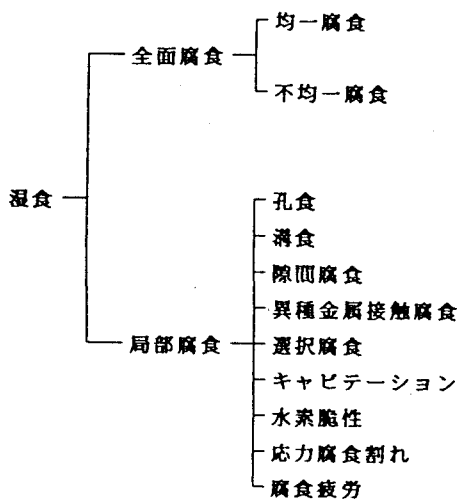


図-2 湿食の分類

腐食とは、鋼材表面における腐食の分布状況が様でなく、部分的に深い孔状あるいは溝状の腐食を生じることである。前者を孔食と言い、後者を溝食と呼んでいる。しかし、このような分類は定性的なものであり、腐食の状況を定量的に表現することはかなり難しい。

(2) 防錆防食技術

鋼材の腐食を防ぐ方法として、以下のような考え方があある。

- ①鋼材表面を被覆し、水や酸素に触れないように腐食環境と遮断する。
- ②適当な合金成分の添加により鋼材自体の改質を行い鋼表面の腐食反応性を低下させる。
- ③鋼に電気を注ぎ込んで金属としての結合力を高める。
- ④腐食環境の改善を行う。

図-3はこれら方法の具体的な技術をまとめて示したものである。

①の腐食環境の遮断については、塗膜による被覆が最も一般的である。しかし、この方法においては塗膜の経年劣化による防錆性能の低下は避けられないことから、一定周期において塗替えが必要となる。近年では腐食環境の厳しい海岸部における長大構造

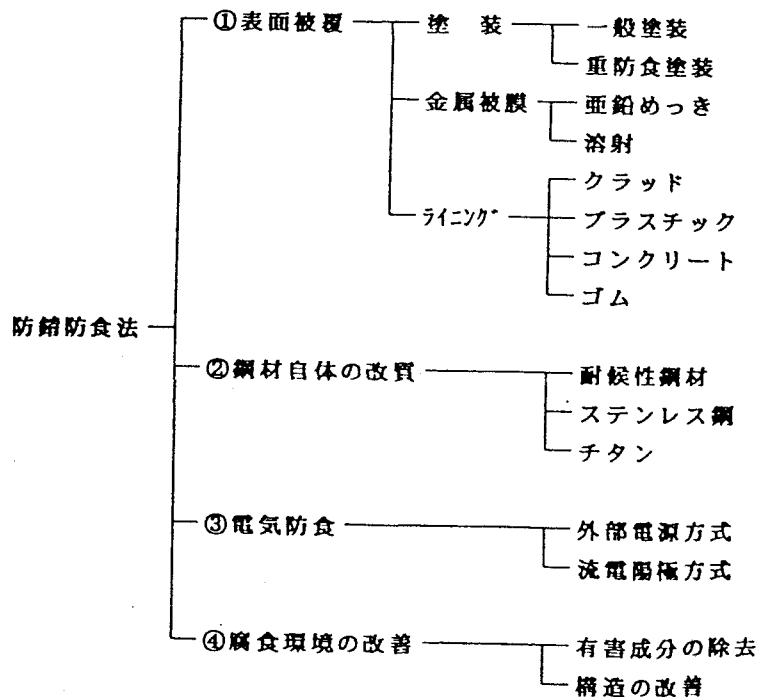


図-3 防錆防食技術の分類

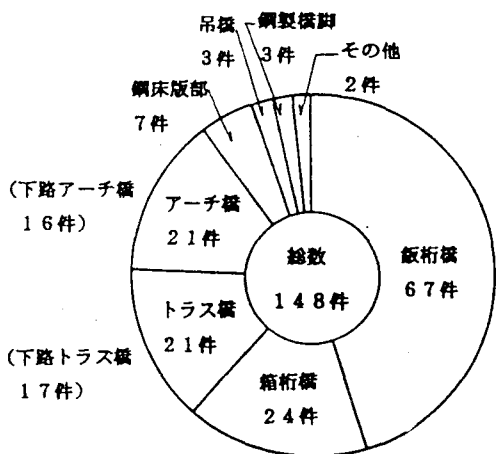
物を対象として、防錆力と耐久性が期待できる重防食塗装を用いる場合が多い。また、さらなる維持管理の低減を意図して、長期における防食効果を期待するような場合、あるいは塗装の塗替えが困難であるような場合には溶融亜鉛めっきや金属溶射による防錆防食が行われている。

②の鋼材自体の改質による方法としては、耐候性鋼材、ステンレス鋼さらにはチタンの使用などがある。生成する安定錆をうまく利用し、自然の成り行きにまかせ、錆で錆止めする方法が耐候性鋼材の裸使用である。大気中における数年の暴露により鋼材表面に緻密な錆層（安定錆と呼ばれる）が生成され、これが地金部分への水や酸素の供給を防ぎ腐食反応を抑えると言うものである。安定錆が生成されるためには、鋼材表面が大気中において適度な乾湿の繰り返しを受けること、塩分が付着しない等の一定の環境条件が要求される。最近では、塩分の付着するような海浜などの環境下でも適用可能な鋼材の開発もなされている。

③の電気防食は鋼材表面に発生する腐食電位を外部から電気を流すことによってコントロールする方法である。これについては港湾構造物を除く土木構造物では、これまでその適用例は少なかった。しかし、近年海中に建設される鋼製橋脚における防食対策あるいはRC構造物の鉄筋の腐食として実施検討されている²⁾。

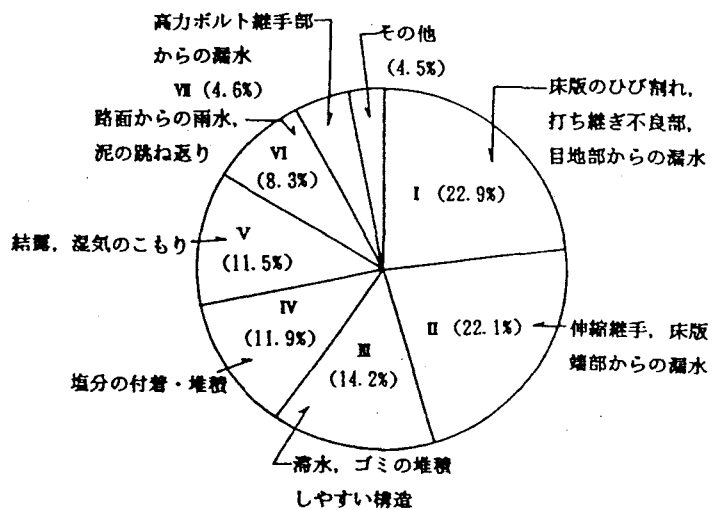
④の対策は、構造物の腐食環境を改善することにより腐食を防止する方法である。具体的には除湿、酸素供給、硫酸ガス・海塩粒子などの有害物質の除去などである。構造物の一部に対しての実施例としては、橋梁の箱部材内部を対象に乾式除湿機を用い除湿コントロールを試験的に行った例や長大橋梁のケーブル材を対象としてケーブル内に送風し防錆を行う例などが報告されている³⁾。また、特定部位における腐食については、①～③までの防錆防食対策の補助対策として、構造詳細を改良し局所的に腐食環境を改善することが有効である。例えば、「部材の格点部において滞水が生じないように水抜き孔を設ける」、「小型の箱断面部材については内部を密閉構造とする」、「水漏れが生じないように止水装置を取り付ける」、あるいは「材片のこぼ面に丸みを付けこの部位からの塗膜の早期劣化を防止する」などの対策は設計、施工段階でのちょっとした工夫と言える。

その他の対策として次のような考え方もある。十分な防錆防食を行うことができないような場合には、設計時に将来における腐食量を想定して予め部材板厚を増加させておくことがある。この増厚量を腐食代と呼んでいるが、このような対策も広い意味での腐食対策と考えることができる。また、腐食環境の厳しい部位に取り付けられた部品については、将来



耐候性鋼材裸使用橋梁の事例6件を含む。

(a) 腐食事例橋梁の内訳



(b) 腐食原因の内訳

図一4 鋼道路橋における腐食原因

における維持管理の容易さを考慮し、取り替えが簡単に行える構造とする、あるいは取替え方法を当初設計段階で明記しておくことも一つの方法と言える。

4. 鋼道路橋における腐食事例

(1) 鋼道路橋における腐食の特徴

鋼橋において“どのような部位に”，“どのようなことが原因で”腐食が生じるのかを理解することは維持管理を行う上で重要なことである。

鋼橋における腐食は、周辺環境、部材の種類や部位に大きく左右され、その原因もある程度限定されたものであると言える。図-4は約150橋の腐食事例からその原因を整理したものである⁴⁾。鈹桁橋における事例が最も多く全体の半数程度を占めているが、箱桁橋、トラス橋、アーチ橋についても20橋程度の事例が収集されている。

橋梁形式を問わず、床版ひび割れ損傷部や打継ぎ不良部等からの漏水(I)、伸縮継手部や床版端部からの雨水の落下・漏水(II)が腐食原因全体の半数程度を占めている。箱桁橋においては、高力ボルト継手部からの漏水(VII)により桁内部に滞水(III)が生じ腐食が発生する事例が多い。下路のアーチ橋やトラス橋においては、路面からの雨水や泥の跳ね返り(VI)により主構や弦材あるいは格点部に滞水、ゴミの堆積(III)が生じ腐食している事例が多い結果となっている。これらの腐食事例はいずれも局所的なものであり、このことは鋼橋における腐食の特

徴として第一にあげることができる。

橋梁の全体的な腐食としては、海塩粒子の付着(IV)が原因で発生する腐食があげられる。海岸に面した位置あるいは河口部に設けられた橋梁において海塩粒子の付着が腐食を促進し、全体的に腐食が進行している事例がある。しかし、この場合においても、腐食の程度は橋梁の各部位で異なり付着塩分が雨水で流されにくく堆積するような部位、例えば桁の内側、床組部材、部材の格点部などが腐食の発生が特に著しいものとなっている。

(2) 腐食事例⁵⁾と腐食マップ

一般環境の道路橋において、最も腐食の発生しやすい部位は桁端部である。桁端部には桁の変形を吸収し、かつ路面の平坦性と連続性を保つために伸縮装置が設けられている。この伸縮装置の排水機能が不十分な場合に、この部位から雨水が漏水・落水し腐食が発生する。桁端部は死荷重あるいは活荷重を支える重要な部位であり、腐食の発生は橋梁の耐荷性能、使用性能に大きな影響を及ぼすことにもつながる。また、支承の腐食は、支承機能を低下させ桁端部に思わぬ損傷を招くこともある。支承のソールプレート取り付け溶接部からの疲労損傷はその代表例と言える。このような腐食を防止するには、図-5に示すように非排水構造の伸縮装置を使用する、清掃の簡単な排水構造に改良する、支承部に点検が可能な防塵カバーを設置するなどの対策が必要である。

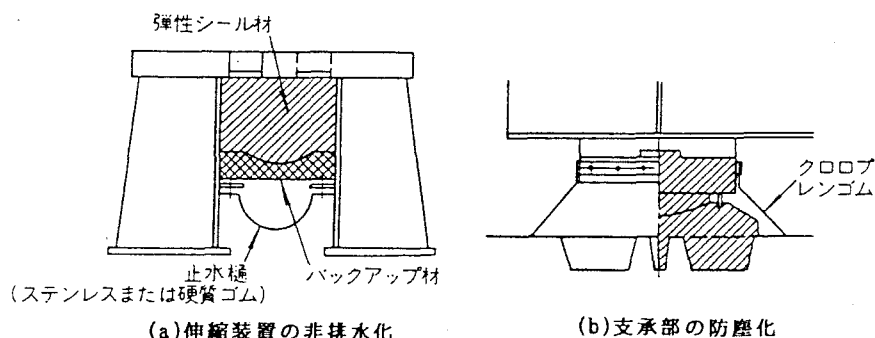


図-5 桁端部の腐食対策

同様な桁端部の腐食であるが、漏水の経路が異なる場合の事例を写真-1に示す。伸縮装置上を車両が通過するときの衝撃により鉄筋コンクリート床版の端部が損傷し、この部位からの遊離石灰を含んだ雨水の漏水により端対傾構の上弦材側が腐食した事例である。伸縮装置と舗装材あるいは後打ちコンクリートの境界部には段差が生じやすく、これが衝撃の主原因となっている。また、伸縮装置の定着部は補強鉄筋やアンカー材などが複雑に配置されており、十分なコンクリート打設が行われにくい部位でもある。したがって、腐食の原因である床版の損傷を少しでも軽減するには、この部位の施工を丁寧に行う必要がある。

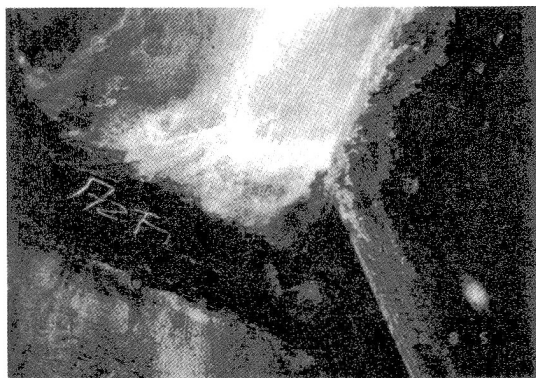


写真-1 床版端部からの漏水による腐食



写真-2 床版損傷部からの漏水による主桁の腐食

床版一般部の損傷が著しい場合にも、床組部材あるいは主桁、主構に腐食が発生する。写真-2はコンクリート床版損傷部からの漏水により桁が腐食した事例を示したものである。床版内を伝わった雨水にはアルカリ成分が含まれており、アルカリ成分に弱い塗装系においては塗膜が早期に劣化することとなり、腐食が進行する。写真-3は下路アーチ橋における腐食事例を示したものである。下路のアーチ橋、トラス橋の床組に死荷重、活荷重が载荷されると主構と床組（縦桁）とのたわみ差によって橋軸方向に変位差が発生する。この変位差により床版には幅員方向のひび割れが生じやすく、長スパンの橋梁では床版目地を設けることも行われている。写真に示した事例は、このような床版ひび割れ部からの漏水により腐食が生じたものである。この場合の対処としては、床版にひび割れを生じさせないことが重要であるが、ひび割れが発生しても雨水が下面に浸透しないように床版と舗装との間に防水層を設ける必要がある。また、このような腐食の生じている場合には、腐食発生部の直上において路面にもひび割れが生じていることが多く、路上点検においてひび割れが確認された場合には、桁下点検を実施し床版からの漏水、腐食の有無を確認する必要がある。

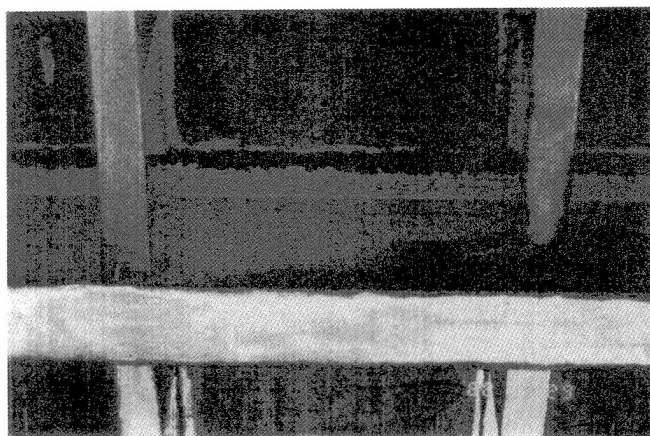
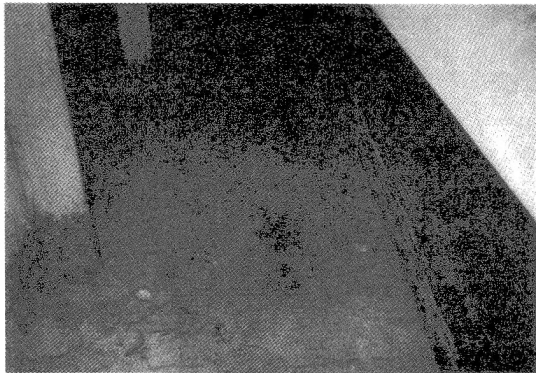


写真-3 床版ひび割れ部からの漏水による腐食

桁外側からの外観の目視点検では、腐食の発生を確認することが困難な部位もある。写真—4は、箱桁内部の腐食事例を示したものである。湿気のこもりや結露などが補助的な原因として考えられるが、その主原因は、高力ボルト継手部の隙間からの侵水、あるいは桁端ダイヤフラムの開口部からの雨水の浸入である。高力ボルト継手部の近傍に床版損傷部からの漏水が確認されるような場合、端ダイヤフラムに開口部が設けられているような構造の場合には注意が必要である。なお、このような箱内部における腐食を防止するためには、侵入した雨水が箱内部で滞水しないように箱桁下フランジに排水孔を設置することが有効である。

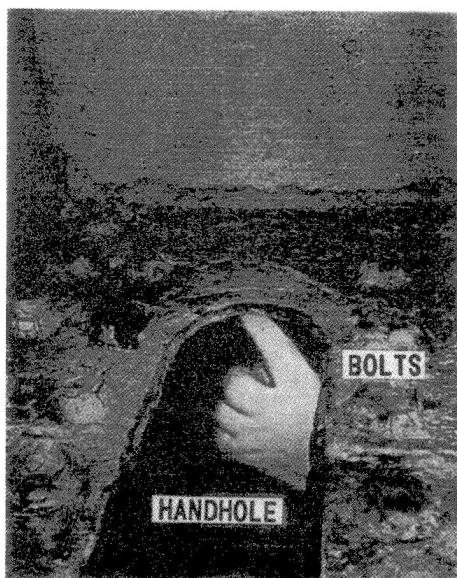


写真—4 箱桁内部の腐食

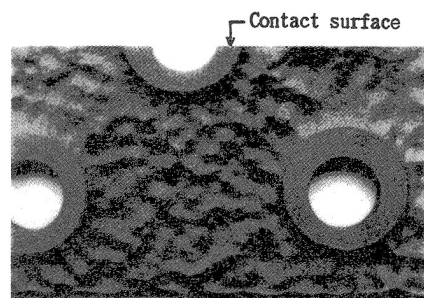
コンクリートへの埋め込み部材における腐食も確認が困難な事例である。写真—5は下路トラス橋の斜材が歩道床版部を貫通している部位における腐食事例を示したものである。外観目視では確認できない部位に予想以上の腐食が進行している。このような埋め込み構造に対する防錆防食に関しては塗装のみでは不十分であり、防食テープの貼付、FRPカバーの実施といった他の特殊な防錆対策が必要と思われる。むしろ、維持管理を考慮した場合には、箱抜き構造の採用も考慮すべきとも考える。



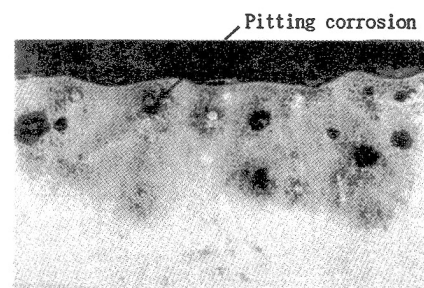
写真—5 トラス斜材の
コンクリート埋め込み部の腐食



写真—6 下弦材ボルト継手部内部の腐食



(a) ピットを伴う凹凸



(b) ピット底部の吸水と発錆

写真—7 腐食面の凹凸状況

がある。この部位は一般部に比べ塗膜の劣化が生じやすく、適切な塗り替えが実施されないと、他の部位に比較して早期に腐食が進行することになる。

海岸地域に位置する橋梁においても、付着塩分が雨水により洗い流されない部位に腐食が発生した事例がある。一般的には床版下の床組部材やその格点部、主桁・主構の内面側などに著しい腐食が発生する。写真一六はトラス橋の下弦材高力ボルト継手部における事例を示したものである⁶⁾。箱断面弦材の高力ボルト継手部に設けられたハンドホールより海塩粒子が侵入し、内部の添接版に著しい腐食が生じている。このような部位は雨水による洗浄を受けないので、塩分が徐々に堆積し腐食を助長したものと考えられる。写真一七は、実橋より撤去した添接板について、表面の錆層をサンドブラスト処理により除去した状況を示したものである。ピットを伴った凹凸の激しい腐食状況を呈している。また、ピットの底部には除去しきれない塩分が残っており、ブラスト処理後、直ちに水分を吸収し錆が再発生している。このように、錆層に侵入した塩分の除去はかなり困難であり、ブラスト処理でもかなり丁寧な作業が必要となる。

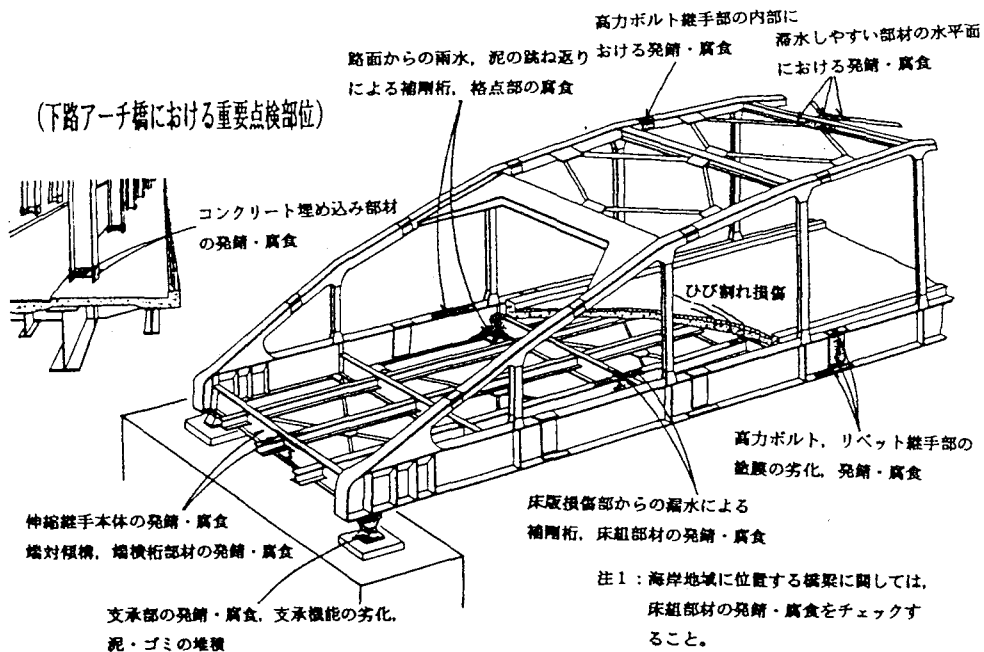
以上述べたような腐食事例を整理し、橋梁形式別に腐食の発生しやすい部位を示したのが腐食マップである。下路アーチ橋の腐食マップを図一六に示す。どのような部位を重点的に点検したらよいかを具体的に点検員に伝えることにより、より効果的な点検が可能となる。

5. 非破壊検査による腐食の検出と計測

(1) 腐食の検出

腐食は鋼材の表面に現れる劣化現象であることから、その検出には目視による点検が主としたものとなる。しかし、事例でも示したように目に見えない部位における腐食の発生、進行事例も多い。ここでは、このような腐食を早期に発見するための非破壊検査の利用方法について述べる。

図一七は、鋼床版デッキプレートの舗装接触面における腐食の発生を検出している事例である。舗装にひび割れが生じ、かつ鋼床版上面の防水処理が十分でない場合には、ひび割れ部より雨水が浸入しデッキプレート上面に腐食が発生する⁷⁾。舗装のひび割れ位置が特定できるような場合には、ひび割れ直下の鋼床版を対象に超音波探傷を行い裏面側から腐

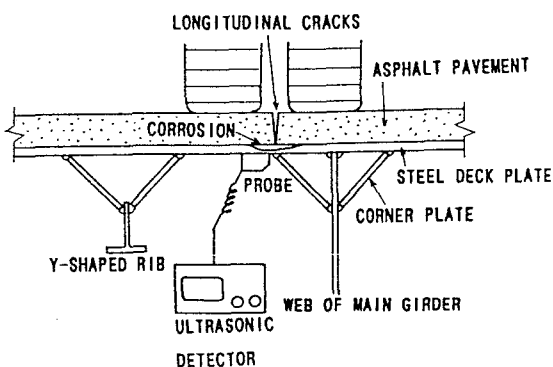


図一六 腐食マップの一例（下路アーチ橋の場合）

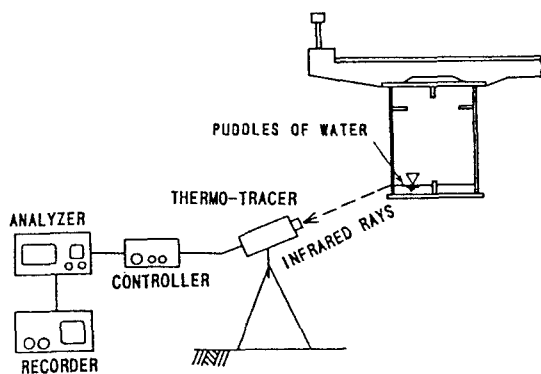
食の発生を確認することも可能である。

閉断面部材内部の滞水状況を外面から確認できる方法もある。図一八は赤外線を用いて箱桁内部における滞水を確認するシステムを示したものである。滞水に伴う鋼板の微小な温度差を感知するものであり、箱内に点検員が直接入らなくても桁下点検により滞水の有無を確認が可能となる⁹⁾。

ファイバースコープを利用する方法も目視点検を補助する手段として有効である。応力的に問題のない部位に小穴を設け、そこからカメラを挿入し内部の状況を観察することで腐食発生の確認が可能である。



図一七 鋼床版デッキ上面の減厚の検知



図一八 赤外線センサーによる滞水の検知

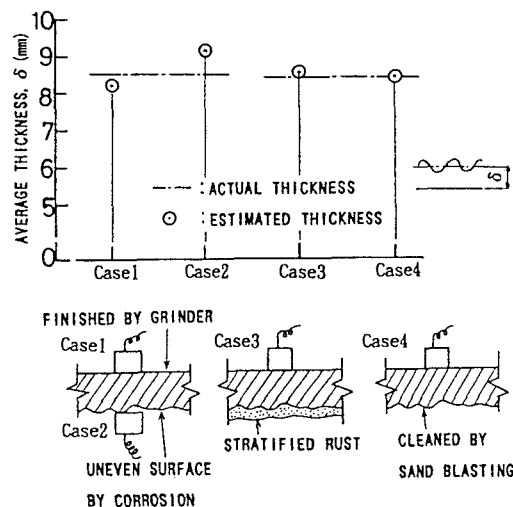
(2) 腐食量の計測

腐食が確認された場合には残存強度の推定を行い、補修の必要性の有無あるいは補修の程度を検討することとなる。

残存強度の推定を行う場合、腐食による板厚減少あるいは残存板厚を何等かの方法により把握する必要がある。最も一般的に用いられている方法はキリパーやノギスなどの機械的な器具を用いた測定であるが、面的な広がりを持つ橋梁部材では、このような方法は限られた部位にしか適用できない。

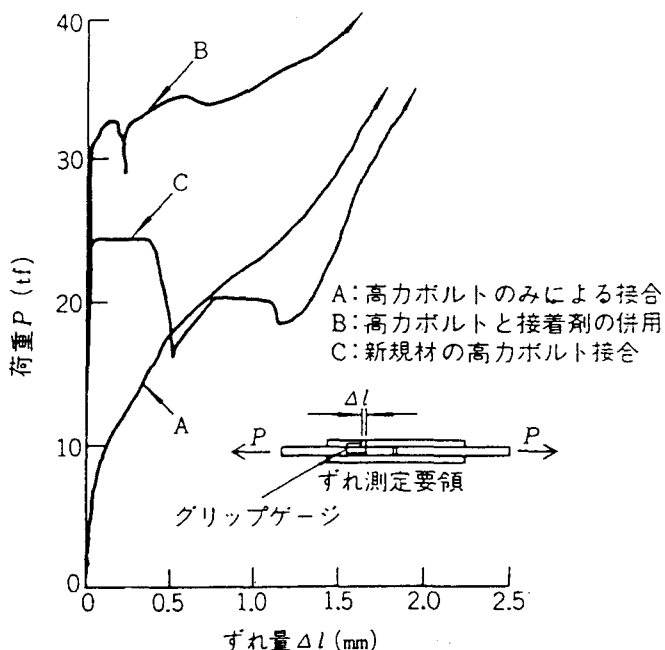
これに対し超音波による板厚測定は、部材の片側からの作業で測定が可能であることから実橋部材の測定に適した方法と言える。しかし、腐食面には錆が付着しているのが一般的であり、また、孔食による凹凸を伴った場合も多い。このような腐食面を対象として超音波を実施する場合には、表面の凹凸、錆の付着の影響を明らかにしておくことが必要である。

図一九は鋼材の板厚測定に一般的に用いられている市販の超音波板厚計（分割型、10mmφ）を用い、腐食材の板厚を種々の表面状態に関して測定した結果である⁹⁾。平滑に仕上げた面からの探傷板厚は実



図一九 超音波板厚計による腐食材の板厚計測

厚と良い一致を示しているのに対し、凹凸を有した腐食面からの測定結果は実厚より大きめ目の値を示しており、測定精度が劣る結果となっている。表面の凹凸の存在により探触子と非測定物との間が十分に接触しなかったことが測定精度に影響を及ぼしたものと考えられる。このことは、超音波探傷による板厚評価においては、腐食面の凹凸の程度と測定精度との関連を十分に把握しておくことが重要であることを示している。また、探傷面に錆が付着している場合には測定が不可能であるが、探傷裏面側における錆の付着に関しては測定精度に大きな影響を及ぼさない結果となっている。したがって、目に見えないブラインド側の腐食を探知する方法としては超音波探傷が有効であるといえる。なお、ある範囲内で板厚の分布状況を得ようとする場合には、自動探傷を用いた測定が効果的である。画像処理も含めたシステムが開発されており、今後はその利用について検討を行う必要がある。さらには、表面の凹凸の影響が少ないと考えられる水浸探傷に関しても局部水浸方法の開発に伴い今後は有用な方法に成りうると思われる。



図—10 高力ボルト接合による腐食材の当て板補強

6. 腐食部材の補修方法

腐食が生じた部材に対しては何等かの対策を講じることが必要となってくる。耐力的に問題がなく、かつ使用性に支障をきたさないような場合には、腐食の原因を除去し、再塗装するような対策で十分と言えるが、断面の欠損が著しく、耐力不足を生じているような場合には、断面回復のための処置が必要となってくる。もちろんこの場合についても、構造的な改良により腐食の原因を除去する、あるいはより防食性に優れた他の処理を実施するなどの対策を併用することは必要である。

腐食減厚部の断面回復のための補修方法としては、

- ①腐食部に当て板を添接する。
- ②腐食部分を切断撤去し、同材、同厚の新規材を挿入する。
- ③腐食部材を新しい部材に交換する。

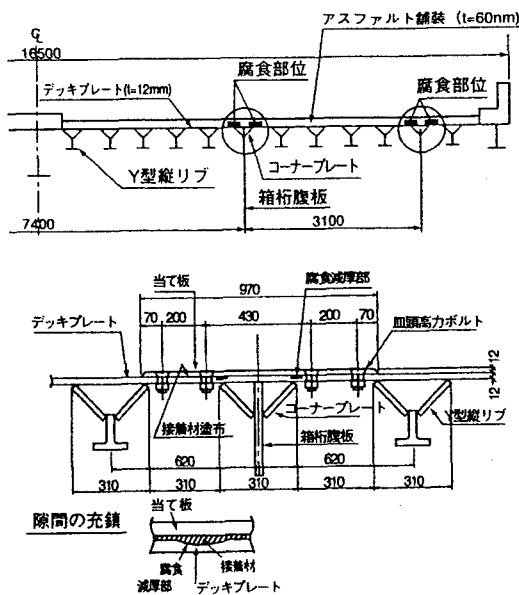
などの方法が考えられる。これら方法の内、③の方法に関しては、腐食の範囲が広範囲であり、かつ腐食の程度が著しく、①、②の対策では十分な回復が望めないような場合についてのみ行う対策である。大部分の腐食事例は局所的であり、①、②の方法で部材の耐荷性能を回復することが可能である。

①の方法は、腐食減厚部分を当て板の添接により補う方法である。接合方法として、溶接接合と高力ボルト摩擦接合が考えられる。疲労が問題となるような部材、部位での溶接接合に関しては、疲労に対する新たな弱点を設けることにつながることから、その使用にあたっては疲労強度上の検討が必要となる。高力ボルト摩擦接合に関しては、腐食による凹凸面を摩擦面として使用することの影響について検討しておくことが必要である。また、凹凸部と当て板間に生じる隙間部の防錆にも配慮することが重要である。図—10は著しい凹凸面を有する実腐食材に当て板を高力ボルトのみで添接した継手(A)と腐食材と当て板間の隙間部への充填機能を期待して接着材(エポキシ樹脂系)と高力ボルトを併用した継手(B)のすべり挙動を比較した結果である¹⁰⁾。

比較検討用として新規材料同士を高力ボルトのみで

添接した継手 (C) の結果も併記されている。高力ボルトのみで当て板を添接した場合には、荷重のごく初期段階からずれを生じ、摩擦接合的な挙動とは異なった性状となっている。高力ボルトと接着剤とを併用した場合には、新規材同士の高力ボルト継手と同等の継手剛性が得られており、また、すべり強度に関しては、新規材同士の場合を上回る強度が得られている。接着剤の強度や接着施工の確実性によっては、このような高い強度が期待でき、腐食による凹凸の激しい部位での当て板の接合方法として接着剤の併用は有用と考えられる。

実橋の当て板補修事例を図—11に示す。鋼床版橋梁のデッキプレート上面に発生した腐食に対する断面補修の事例である⁷⁾。腐食は、舗装のひび割れ部からの雨水の侵入と舗装とデッキプレートとの剥離によりデッキプレート上面が長期間湿潤状態に置かれていたために発生したものと考えられる。腐食部を覆うように幅約 1m、厚さ 12mm の鋼板が高力ボルトと接着材との併用によりデッキプレートに添接されており、当て板とデッキプレートとの合成挙動に関しては、模型供試体による室内実験での確認とともに継続的な実橋応力測定を実施し良好な結果を得ている。



図—11 鋼床版デッキの当て板補強事例

7. おわりに

今日の橋梁ストックは膨大な量となってきた。今後、これらの橋梁が年老いて行くに従い腐食の問題はますますその重要性を増してくるものと考えられる。そのため、「どのような点検手法で損傷を発見し、その点検結果をどのように評価し、どのような補修補強を行うか」と言った維持管理に関する一連の流れを確立しておくことが急務である。本稿ではその一端を紹介したが、今後、これらに関する各種の検討が望まれるところである。

参考文献

- 1) 土木研究所橋梁研究室：橋梁の架替に関する調査結果 (Ⅲ)，土木研究所資料第 3512 号，平成 9 年 10 月
- 2) 吉田、成田：東京湾横断道路、溶接学会誌、第 60 巻(1991)、第 8 号
- 3) 松井、寺西、他：鋼箱桁内部防錆実験について、土木学会第 48 回年次学術講演概要集第 1 部、平成 5 年 9 月
- 4) 名取、西川、他：鋼橋の腐食事例とその分析、土木学会第 48 回年次学術講演会概要集第 1 部、平成 5 年 9 月
- 5) 名取、村越：鋼橋の腐食とその原因、橋梁と基礎、Vol. 27, No. 6, 1993
- 6) T. NATORI AND T. TERADA: SURVEYS AND REPAIRS OF A TRUSS BRIDGE DAMAGED BY CORROSION, THE SECOND JAPAN-KOREA JOINT SEMINAR ON STEEL BRIDGES, July, 1992.
- 7) 結城、名取、他：鋼床版デッキプレートの腐食減厚に対する補修方法の検討、構造工学論文集 Vol. 39A(1993. 3)
- 8) K. NISHIKAWA AND T. NATORI: AN ATTEMPT ON EVALUATION OF CORRODED STEEL BRIDGE MEMBERS, 20th REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NDE, August, 1993
- 9) 大野、名取：腐食部材の板厚評価に関する基礎的研究、土木学会第 48 回年次学術講演会概要

集第1部、平成5年9月

- 10)名取, 寺尾: 接着材を併用した腐食材の当て板補強について, 土木学会第46回次学術講演概要集第1部、平成3年9月