

耐候性鋼材の錆状態の定量的評価に向けた取組み

～ 錆厚とイオン透過抵抗の測定による耐候性鋼材の錆状態評価の信頼性向上を目指して～

西原知彦・篠田隆作・高橋 実・澤田 守

1. はじめに

1960年代から道路橋では無塗装で使用できる耐候性鋼材が使用され始めた¹⁾。耐候性鋼材の防食機能は、鋼材表面に緻密な錆層を形成させ、鋼材表面を覆って保護することで鋼材の腐食速度を普通鋼と比べて低下させるものである²⁾。このような緻密な錆層が形成されるには、鋼材表面に塩分付着が少ないこと、雨水の滞留などで長時間湿潤環境が継続することがないこと、適度な乾湿の繰り返しを受けること等の一定の環境条件が要求される²⁾。しかし、経年劣化による排水機能喪失等により局部的に湿潤状態が継続する環境条件となったり、あるいは想定より多い塩分量の環境条件であった場合等においては緻密な錆層が形成されず、層状剥離錆等の異常錆が形成され、耐候性鋼の防食機能を失う事例も報告されている¹⁾。このため、耐候性鋼材の維持管理では、不適合が明らかとなった場合には、速やかにその原因を取り除くことや、必要に応じて塗装を行うなどの適切な対策を講じることが求められる。

一方、耐候性鋼材の点検では、健全な錆なのか異常な錆なのか、形成される錆の違いを目視により判断することが求められるが、塗装劣化と比較して一般的に判断が難しく、熟練技術者の暗黙知に依存している等の技術的課題が挙げられる。このため、耐候性鋼材の錆状態を定量的に評価するための技術開発を目標とした研究（例えば、イオン透過抵抗法に関する研究^{3),4)}や、電位測定に関する研究⁴⁾等）が進められているものの技術的な課題がある。

本稿では、耐候性鋼材の錆の状態を定量的に評価する手法として錆厚とイオン透過抵抗を測定する技術を取り上げ、実橋で継続的に調査を行うとともに、測定値に影響を及ぼすと考えられる因子に着目して試験片を用いた測定試験を行い、現場で適用する際の留意点を検討した結果を報告する。

2. イオン透過抵抗法の概要

イオン透過抵抗法は、錆厚とイオン透過抵抗を別々の機器により測定し、それらの関係から鋼材の錆の状態を評価する手法である。それぞれの測定原理の概要を以下に示す。

(1) 錆厚の測定原理

錆厚の測定には、一般的に塗装の膜厚を測定するものと同じ電磁式の膜厚計が用いられる。測定原理は、コイルから成る交流電磁石を鋼材（磁性金属）に接近させると、接近距離に応じてコイルを貫く磁束数が変化し、これに伴って変化するコイル両端の電圧を電流値から読み取り、錆厚に換算するものである。錆が磁性金属ではなく電磁石に反応しないことを前提としているが、錆の種類の中には磁性金属の錆もあるため、錆厚の測定値に誤差が混入する可能性がある。しかしながら、耐候性鋼材の錆厚の測定は、厳密な錆厚を求める目的ではなく錆状態を特定し評価するために用いるものであるため、電磁式膜厚計を用いても実用上問題なく、且つ複数の測定値を平均した代表値が用いられている¹⁾。

(2) イオン透過抵抗の測定原理

イオン透過抵抗は、鋼材表面に形成された錆層に電解液として硫酸ナトリウム水溶液を介して2点の電極を有するセンサを圧着させて測定される値で、錆層をイオンが透過する度合い（錆層の電荷移動抵抗）を示すものであり、値が高いほどイオンの透過が妨げられすなわち環境遮断性能（防食性能）が高く、鋼材の腐食速度が遅い状態にあることを示す指標である。

イオン透過抵抗の測定原理は、交流インピーダンス法に基づくものであり、鋼母材と錆層と電解液の間に電圧を加えることによって生じる酸化還元反応について、この部分を単純化した等価回路に置き換えて評価するものである。具体的には、交流周波数を変化させながら印加した交流電圧に

対して得られたインピーダンス応答特性を等価回路のインピーダンス特定図にあてはめることにより、イオン透過抵抗を求めるものである（詳細は参考文献3)を参照）。

この測定原理を現場に適用できるようにセンサと測定器を小型軽量化したものがイオン透過抵抗測定装置であり、構成図を図-1に示す。

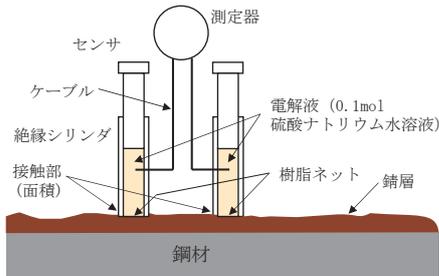


図-1 イオン透過抵抗測定装置の構成図

(3) 鍍厚とイオン透過抵抗の関係に維持管理の現場対応の実態を考慮した評価区分の例

図-2に無塗装で使用する耐候性鋼材の鍍厚とイオン透過抵抗の関係に維持管理の現場対応の実態を考慮した評価区分の例⁵⁾を示す。図中のI-1～I-5の評価区分は、鍍状態の外観評点(1～5)と関連付けられており、且つ同図中の赤色破線で区切られたA、B、C1、C2の評価区分は、定期点検の対策区分判定(表-1参照)と関連付けられている⁶⁾。経年的な耐候性鋼橋の測定データを蓄積し、鍍状態が保護性鍍の領域(図のAの上方の領域)に推移して腐食速度が遅くなるのか、それ以外の領域(図のB、C1、C2の領域)に推移するのを見極め、早期に措置の必要性を定量的に判断できるようにすることが期待される。しかし、技術的な課題として、これらの手法は確かに定量的な指標ではあるものの、その指標の値に影響を及ぼす因子によるばらつきの程度や、測定にあたっての適用条件や留意点については必ずしも明らかになっておらず、鍍状態の適切な評価には至っていない。

3. 実橋を対象とした継続調査

耐候性鋼材の鍍状態の評価技術としてイオン透過抵抗法を実橋に適用した際の測定値の経年変化の傾向とそのばらつきの程度等を把握するために、供用開始後10年以内の無塗装で使用している耐候性鋼橋を対象に鍍状態の継続的な調査を行った。対象橋は、架設完了が2015年1月、橋長276mの鋼5径間連続合成少数(2主桁)鉸桁橋、離岸距離

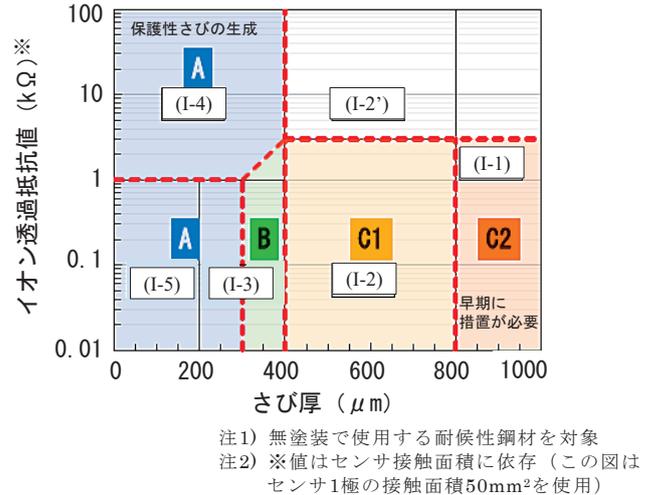


図-2 イオン透過抵抗測定法による評価区分の例⁵⁾

表-1 対策区分の判定区分⁶⁾

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。

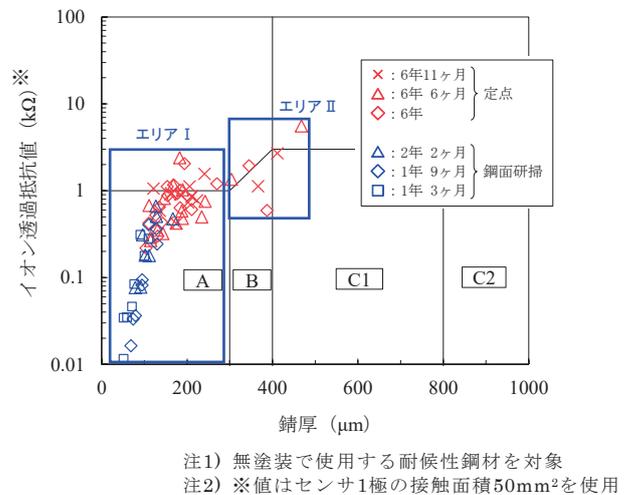


図-3 イオン透過抵抗測定法の実橋への適用性確認

2.0km、飛来塩分量0.022mddである。調査対象部位は河川上の1基の中間橋脚部(橋脚高:18.5m)の支承近くの主桁(内外面)の上下フランジ・ウェブ等の複数の箇所(定点)、およびこの定点に近接した位置で2019年10月に鋼材表面をディスクグラインダにより研掃した箇所(鋼面研掃箇所)とした。併せて比較のために目視による外観評価を2名の熟練技術者により実施した。なお、鋼面研掃箇所を設けた理由は、測定開始時期が架設後4年9ヶ月経過以降であり、それ以前の架設直後からの測定値に相当する値を得るためである。

鍍厚とイオン透過抵抗の関係を図-3に示す。図中には6年～6年11ヶ月経過した定点での測定結果に加えて、1年3ヶ月～2年2ヶ月経過した鋼面研掃箇所での測定結果を一連の経年月変化としてみなしてまとめており、また、本来、図中の測定値は、主桁の上下フランジ・ウェブの異なる箇所の測定値であるが、ここでは区別なく同一記号としてまとめている。なお、図中の測定値は、本稿の末尾に記す共同研究の期間終了後に当所による継続調査にて取得したデータである。

図中のエリアⅠの箇所は、いずれも熟練技術者による外観評価が5～3(防食機能が維持されている状態)であり、経過年数を考慮すると腐食速度は微小の領域と判断される。経年とともに、「I-5；初期鍍、未成長鍍(A) 5)」から「I-4；保護性鍍5)」に向かいつつある箇所(定期点検の対策区分判定ではA)がほとんどである。一方、図中のエリアⅡ内は外観評価2または1(いずれも防食機能が維持されていない状態)と判断された箇所であり、測定箇所は下フランジ下面、桁端部である。エリアⅠと比較して腐食速度が速い領域と判断でき、「I-3；未成長鍍(B) 5)」から「I-2；要観察状態を示す鍍5)」に向かいつつある箇所(定期点検の対策区分判定ではB)である。

以上より、調査データは限定的ではあるが、熟練技術者による外観評価との比較により、耐候性鋼材の鍍状態の評価技術としてイオン透過抵抗法を実橋に適用した際には、ある程度のばらつきはあるものの、鍍状態を示す定量的な指標値がどのように推移していくのか、その傾向を把握できることを確認した。次章に測定値のばらつきについて検討した一例を示す。

4. 測定値に影響を及ぼす因子の分析

耐候性鋼材の鍍状態の評価技術としてイオン透過抵抗法を現地で適用する際に、測定値に影響を及ぼすと考えられる因子として、①測定面の埃や浮き鍍等を刷毛等により除去した状態と除去しない場合の違い、②冬夏期の気温湿度差、③降雨直後・結露時など鋼材表面が湿った状態と乾燥状態の違い等に着目し、測定試験を行った。また、使用するイオン透過抵抗測定装置のセンサの仕様のうち、測定原理上、イオン透過抵抗に影響を及ぼす因子として、④センサ接触部の面積の大きさの

違いも挙げられる(面積が大きくなれば透過するイオンの量が増えるため抵抗値が小さくなる)。ここでは主として②と④(いずれもイオン透過抵抗の測定)の結果を示す。

4.1 試験片

対象とした試験片は、無塗装耐候性鋼材を海岸部で約6ヶ月暴露した鋼板試験片とした。試験片の外観を写真-1に示す。ケース一覧を表-2に示す。

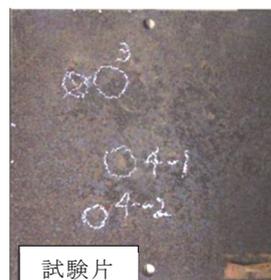
4.2 試験結果と考察

(1) 冬夏期の気温湿度差がイオン透過抵抗に及ぼす影響

温湿度がイオン透過抵抗に及ぼす影響を確認した。測定は、測定者も含めて試験片と測定装置を恒温室内に入れて温湿度の管理を行い、温湿度が目標値に到達してから十分な時間経過後に実施した。図-4に測定結果を示す。イオン透過抵抗は、温度が40℃の場合に比べ、20℃と0℃では温度が低くなるに従って高い測定値となった。他方、湿度の違いによる測定値の変化は温度と比較して小さかった。従って、測定時の温度が低いとイオン透過抵抗は高く測定される傾向があるため、追跡調査など同一箇所でも複数の測定値を比較する場合は、季節変動および日変動を考慮し、測定時の温度条件が同程度となる様に適切な時期を選定するなど、温度による変動量を極力小さくするよう工夫して測定することが望ましいと考えられる。

(2) センサ接触部面積がイオン透過抵抗に及ぼす影響

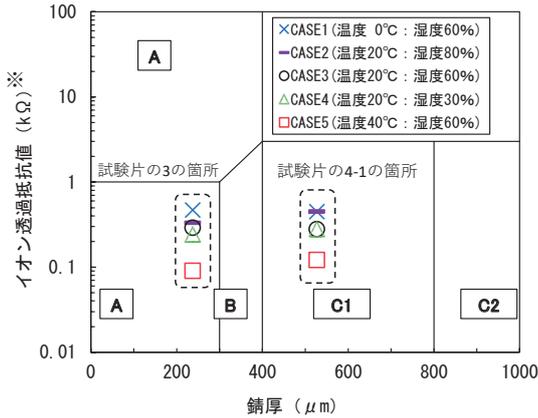
イオン透過抵抗値の測定において、鋼材と測定装置のセンサ接触部の面積(図-1)がイオン透過抵抗に及ぼす影響を確認した。図-5に測定結果を示す。この確認における温湿度は温度20℃、湿度



海岸部で約6カ月暴露
写真-1 試験片

表-2 検討ケース一覧

CASE	温度(°C)	湿度(%)	センサ接触部面積(mm ²)
1	0	60	50
2	20	80	
3		60	
4		30	
5	40	60	25
6	20	60	
7			
8			90



※：センサ1極の接触面積50mm²を使用

図-4 錆厚とイオン透過抵抗の関係（温湿度の比較）

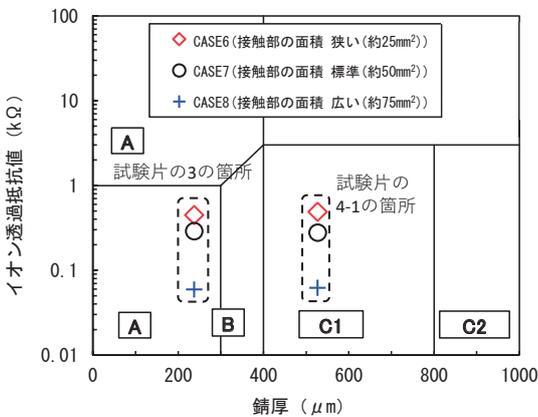


図-5 錆厚とイオン透過抵抗の関係(接触部の面積の比較)

60%とした。なお、図-4のCASE3と図-5のCASE7は同じ値である。接触部の面積を変化させた場合、面積が広いほどイオン透過抵抗が低くなった。これは測定原理からの理屈と同じであった。現状では測定装置における接触部の面積に定めはないが、接触部の面積が測定値に影響を及ぼすことから、耐候性鋼材の錆状態の評価技術としてイオン透過抵抗法を現地で適用する際には留意する必要がある項目のひとつであると考えられる。

5. まとめ

本稿では、無塗装で使用する耐候性鋼橋の錆状態を定量的に評価する手法の現場への適用性を確認するとともに、主としてイオン透過抵抗の測定における気温湿度差などの留意点について検討した結果の概要を述べた。引続き、耐候性鋼材を含め鋼橋の維持管理に関する研究開発に努めていく。

謝 辞

本稿における耐候性鋼橋の測定箇所は、国土交通省国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所、(一社)日本橋梁建設協会、(一社)日本鉄鋼連盟、長岡技術科学大学、日鉄住金防蝕株式会社による共同研究「耐候性鋼橋の長寿命化に関する共同研究」において対象とした測定箇所の一部が含まれている。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、2014
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編、2017
- 3) 紀平寛：耐候性鋼上の安定さび形成状況評価と診断、材料と環境、No.48、No.11、1999
- 4) 紀平寛ほか：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化、土木学会論文集、No.745、2003
- 5) 西川和廣ほか：イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁の異常さびの早期検出～定期点検における健全度判定の信頼性向上を目指して～、土木技術資料、第59巻、第4号、2017
- 6) 国土交通省道路局国道・技術課：橋梁定期点検要領、2019

西原知彦



土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
NISHIHARA Tomohiko

篠田隆作



研究当時 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員、現 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第二建設事業所
SHINODA Ryusaku

高橋 実



土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
TAKAHASHI Minoru

澤田 守



土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
SAWADA Mamoru