

塩害を受けたP C 構造物の電気防食による補修

高尾 智満* 高柴 保明** 熊谷 守晃***

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因の一つに、塩害による鋼材の腐食がある。その対策として、鋼材の腐食反応を制御し、腐食を停止させる電気防食法があり、最近R C 構造物の塩害補修に際しては、電気防食法が採用されるケースが増えてきている。しかし、P C 構造物については、従来P C 鋼材に水素脆化が起こる恐れがあることからほとんど適用されてこなかった。水素脆化とは、鋼材に水素が侵入することにより、その鋼材がもろくなり、強度が低下する現象である。

これまで、P C 構造物へ電気防食法を適用するために、多くの試験・研究が行われ、実際にP C 橋梁に電気防食を適用した例¹⁾も出てくるなど実用化の域に達している。

材料研究室においても、電気防食に関して、増毛における暴露試験や留萌、小樽開発建設部管内における実橋試験など種々の試験研究を行ってきており^{2~15)}、今回それらの成果に基づきマニュアル(素案)¹⁶⁾を作成した。これらをもとにP C 構造物における電気防食について説明する。

また、従来、電気防食法は防食電流の管理が煩雑であるという難点があった。この煩雑さを解消する方法として、管理事務所等から遠隔操作を行うリモートモニタリングシステムが開発されているので、これについても紹介する。

2. 塩害

2.1 塩害

アルカリ環境下の炭素鋼は、不動態被膜という薄い膜を作り、腐食しない。よって、健全なコンクリート(アルカリ性)中では、鋼材は腐食しない。しかし、塩化物が存在すると、不動態被膜は破壊され、腐食が進行する。劣化原因となる塩化物としては、海岸からの飛来塩分や路面からの凍結防止剤があげられる。

2.2 腐食のメカニズム

不動態被膜が破壊されると、図-1のように鋼材に電位の低い部分(アノード)と高い部分(カソード)が発生し、化学反応が生じ腐食電池が形成される。ここで発生した水酸化第二鉄がさびに変化し¹⁷⁾、体積が2~4倍になり、その膨張圧によりコンクリートにひび割れが発生する¹⁸⁾。

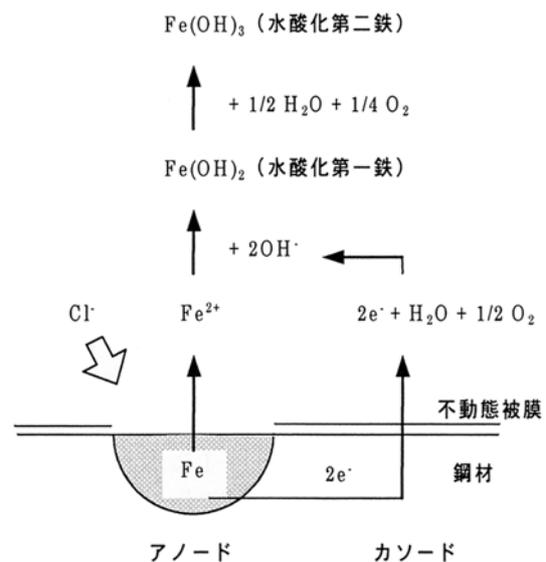


図-1 鋼材の腐食反応

3. 電気防食法

3.1 電気防食の歴史

電気防食法は、海洋環境下の鋼構造物や地中埋設されたパイプラインの防食法として使われてきた。コンクリート構造物に対しては、1960年代後半から米国で主に凍結防止剤による橋梁床版劣化に対して用いられ始めた。その後、1980年代から、欧州、アジア、中東へと広がっていった。日本でも、1986年に実橋で試験施工され、その後徐々に実施例が出てきている。

3.2 従来工法との違い

従来の補修は、表面にコンクリートを打ち増したり、

塩化物を含んだコンクリート表面をはつり取るなどの方法が用いられる。しかし、これらの方法では再劣化を完全に防ぐことはできない。

また、コンクリート表面に塗装することで塩化物の侵入を阻止するという方法もあるが、既にコンクリート内部に塩化物が侵入している場合は鋼材の腐食を止めることはできない。

これらに対し、電気防食法は、鋼材上で生じている

腐食反応を強制的かつ直接的に制御し、腐食を停止させる方法であり、再劣化することはないという大きなメリットを有している。

3.3 電気防食のメカニズム

コンクリート中の鋼材の電気防食は、鋼材とコンクリート表面の間に電圧をかけることで、電流の方向を変え、腐食反応を止めることを目的としている(図-2)。

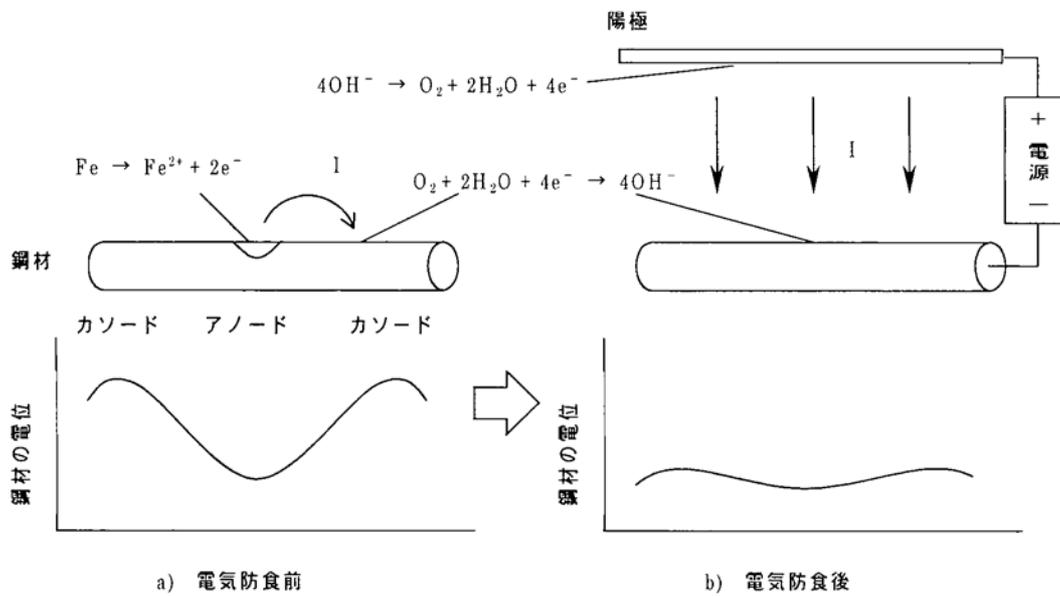


図-2 電気防食適用前後の状態

3.4 電気防食の種類

電気防食法の主な種類を表-1に示す。

外部電源方式とは、直流電源を用いて、コンクリー

ト表面から鋼材に電流を流す方法である。図-3と写真-1にチタンメッシュ方式の模式図と写真を示す。

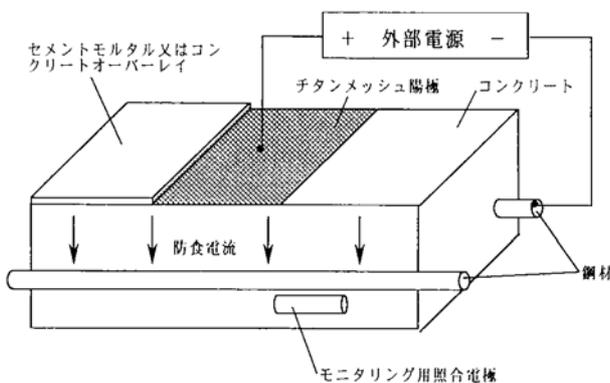


図-3 チタンメッシュ方式



写真-1 チタンメッシュ方式(施工中)

外部電源方式の特徴は、

- 1) 防食電流を自由に調整できること
- 2) 過防食による危険があること

である。

流電陽極方式とは、鋼材より電位の低い金属（亜鉛等）をコンクリート表面に張りつけ、その金属と鋼材の電位差を利用し電流を流す方法である。図-4に亜鉛シート方式の模式図を示す。

流電陽極方式の特徴は、

- 1) 防食電流の制御が困難であること
 - 2) 施工・管理の手間が軽減されること
- ・外部電源が不要
 - ・過防食の心配がない

である。

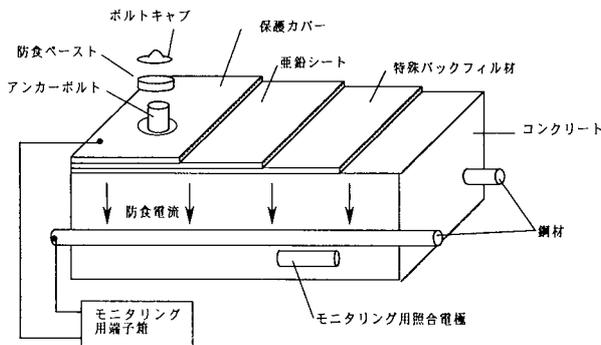


図-4 亜鉛シート方式

表-1 電気防食方式

外部電源方式	チタンメッシュ方式
	導電塗料方式
	亜鉛溶射方式
	チタングリッド方式
	内部挿入陽極方式
流電陽極方式	亜鉛シート方式
	亜鉛溶射方式

4. PC 構造物への適用

従来、PC 構造物に対して電気防食法を適用することはほとんどなかった。それは、過防食状態になると PC 鋼材に水素脆化が生じる可能性があるからである。

4.1 水素脆化

過大な電流が流れた場合（過防食状態）、水が電気分解し陰極である鋼材付近で水素が発生する。



生成された水素の大部分は水素ガス（ H_2 ）となり、外部へ放出されるが、一部の水素が鋼材中に侵入し、鋼材のねばりや強度を急激に低下させる。これが、水素脆化と呼ばれる現象である。鋼材の降伏強さが高くなるほど、水素脆化を起こしやすく、少量の水素でも脆性破壊を起こすようになるので¹⁹⁾、普通の鉄筋よりも PC 鋼材の方が水素脆化の危険性が高い。

ポストテンション方式の PC 構造物の場合、シーラがあるので、シーラが陰極となる。従って、シーラが健全ならば、PC 鋼材へ電流は流れにくい。しかし、シーラが腐食し、穴があいた場合などには、その部分から PC 鋼材に電流が流れ、水素脆化を起こすことがあるので注意が必要である。

4.2 水素脆化への対応

鋼材の水素脆化は、水素発生 侵入 溶解・集積 クラック発生 伝播 割れという過程を経るので¹⁷⁾、水素が発生したからといって直ちに割れがおこるわけではない。対策は、水素を発生させないことが第一であり、次に、水素の発生が確認されたら、鋼材にたまった水素を直ちに除去することである。

水素が発生するのは、鋼材の電位が低くなりすぎた場合であるが、通常の電気防食では鋼材の電位がここまで下がることはない。しかし、何らかの原因で、鋼材の電位が異常に下がる可能性があるため、定期的な点検が必要となる。

なお、水素が 0.2~0.7ppm 程度吸蔵された PC 鋼線を通電停止後 2 週間放置したところ、水素濃度が 0.1ppm 以下まで減少したという報告がある²⁰⁾。このことは、過防食が生じ水素が発生しても電流を一時的に遮断することで、水素脆化の状態から回復する可能性があることを示している。

これらのことから、適切な維持管理を行うことにより、PC 構造物に対して電気防食を適用できる。

5. 設計・施工における留意点

PC 構造物に電気防食法を適用する場合は、以下の点に注意しなければならない。

5.1 シース

シースは肉厚が薄いため、塩害環境下では腐食し欠損している場合がある。この場合、欠損部からシース中の PC 鋼材に電流が流れるので注意が必要がある。

また、グラウトの充填が不十分でシース内に空隙がある場合、そこに塩分を含んだ雨水等が侵入し溜まっていることがある。これは、PC鋼材やシースの腐食を促進する。従って、このような欠陥は再充填して補修しなければならない。

5.2 緊張力

PC鋼材の緊張力が増加すると、指数関数的に鋼材の水素脆化感受性が高まる。鋼材の腐食による断面の欠損や、一部ストランドの破断等によって部分的にかなり高い緊張力が作用している状況が予想される。特に、緊張力が降伏強度の85%を超える状況になると、電気防食時の水素脆化の可能性は極めて高くなる。従って、このような場合には外ケーブルなどで補強を行い²¹⁾、PC鋼材の緊張力を下げた上で、電気防食による補修を行う必要がある。

6. モニタリング

外部電源方式の場合、電位の変化量を調整する必要がある。特に、PC構造物の場合には水素脆化の危険があるので、防食状態を適切に管理する必要がある。

6.1 電位シフト基準

大気中に暴露されるコンクリート中の鋼材に対しては、防食効果の判断基準として、電位シフト基準が使われることが多い。これは、防食電流適用前後の鋼材の電位変化量を基準として防食状態を管理する方法である。多くの機関はこの電位変化量が100mVあれば防食できると考え、その基準を100mVとしている²²⁾~²⁴⁾。ただし、腐食の進捗、環境によっては150~200mV必要となる場合もある²⁵⁾。

6.2 リモートモニタリング

現地における電位変化量の測定には、数時間から数十時間かかることもあり、場所・季節によっては保守管理が困難となる。また、何らかの原因で電流が流れなくなる可能性があるが、頻繁に現地に行きそれを確認するのは実際上難しい。そこで、リモートモニタリング装置を用いると、管理事務所などから電話回線を通し測定したり、装置の稼働状況を確認できる。

さらに、リモートモニタリング・制御装置を用いると、測定だけでなく、防食電流の変更を遠隔地から行うことができる。過防食による水素脆化の危険があるPC構造物に対しては、この種の装置を採用することが望ましい。

しかし、リモートモニタリング・制御装置を用いても、電流制御を行うには遠隔地からの操作が必要であり、

その操作を怠れば装置の機能を十分に利用できない。そこで、電位制御機能を付加した装置が開発されている。この装置は、自動的に、定期的な測定と防食電流の調整を行うものである。図-5にその概念図を示す。

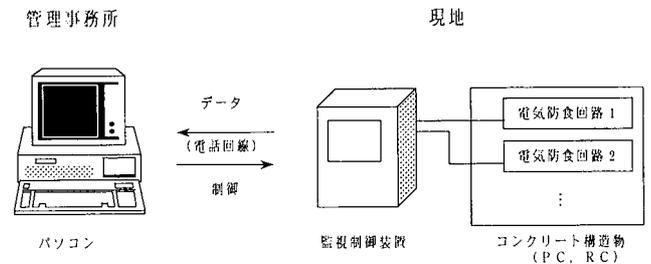


図-5 リモートモニタリング装置概念図

7. 実橋での試験施工

平成10年度に留萌開発建設部の一般国道232号遠別橋の補修工事で試験施工を行った²⁶⁾。遠別橋は、橋長239mの3径間連続PC合成桁橋で、昭和46年度に竣工した。今回の補修工事では、海側耳桁の一部でチタンメッシュ方式と導電塗料方式の電気防食を採用し、比較のため無防食の区間も設けた。また、リモートモニタリング制御装置も採用した。この装置は、自動通電調整および異常状態が発生したときの自動通報機能を備えている。今後、より確実な防食装置の稼働、維持管理手法を検討し、非防食部の腐食状況及び防食電流の隣接領域への波及等の追跡調査をしていく予定である。

8. おわりに

北海道内には、国道橋だけでも約2900橋あり、西暦2000年を境に再構築の必要な橋が毎年増加していき、2022年には年間100橋の再構築が必要になる想定される。

今後、公共投資が限られる中で、それらの全てを架け替えで対応することは不可能であり、少しでも大事に長く使うことが求められている。

現在、RC構造物に対する電気防食は普及し始めている。また、PC構造物に対しても研究が進み、実橋で試験施工をするなど実用化の段階まで来ている。今後ますます、電気防食法の利用拡大が予想される。

また、補修だけでなく、新設時に電気防食装置を設

置することも可能である。海岸直近等で飛来塩分量が多く塩害発生が確実と予想される場合には、新設時に電気防食装置を予め設置しておくことも考えられる。その方がトータルコストとして有利となるケースもあり、今後はそうした利用法も検討の対象となり得る。

参考文献

- 1) 建設省東北地方建設局酒田工事事務所；温海地区塩害橋対策技術報告書、1998.3
- 2) 堺孝司他；積雪寒冷地における鉄筋コンクリート構造物への電気防食法の適用、第 13 回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、1991.6
- 3) 千葉丈夫、堺孝司他；積雪寒冷地における流電陽極方式による鉄筋の電気防食、土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1991.9
- 4) 川俣孝治、堺孝司他；積雪寒冷地におけるチタンメッシュ方式による鉄筋の電気防食、土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1991.9
- 5) 石川光男、堺孝司他；積雪寒冷地における導電性塗料方式による鉄筋の電気防食、土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1991.9
- 6) 大越威他；コンクリート構造物の電気防食、開発土木研究所月報、1992.4
- 7) 大越威他；塩害を受けたコンクリート構造物の電気防食 - RCT 桁への試験施工 -、第 36 回北海道開発局技術研究発表会講演概要集、1993.2
- 8) 峰松敏和、堺孝司他；コンクリート中の鋼材の電気防食に及ぼす各種要因の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No2、1993.6
- 9) 千葉丈夫、堺孝司他；流電陽極方式による電気防食における環境因子の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993.6
- 10) 石川光男、堺孝司他；コンクリート中鉄筋の電気防食における通電システムに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993.6
- 11) 川俣孝治、堺孝司他；積雪寒冷地におけるチタンメッシュ陽極方式の電気防食の適用に関する研究、土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1993.9
- 12) 石川光男、堺孝司他；積雪寒冷地におけるポステン P

C げたの導電性被覆電極方式による電気防食、土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1993.9

- 13) 千葉丈夫、堺孝司他；積雪寒冷地におけるプレストレストコンクリートの流電陽極方式による電気防食、土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、1993.9
- 14) 峰松敏和、堺孝司他；水素発生領域におけるプレストレストコンクリートの電気防食（その ）、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、1994.6
- 15) 川俣孝治、堺孝司他；積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の電気防食に関する研究、土木学会論文集、No.557、V-34、1997.2
- 16) プレストレストコンクリート構造物の塩害補修における電気防食設計・施工マニュアル（素案）、北海道開発局開発土木研究所材料研究室、1999.3
- 17) コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書、（社）日本コンクリート工学協会、1994.10
- 18) 藤原忠司他編、コンクリートのはなし、技報堂出版、1993.6
- 19) 荒木透他編集、鉄鋼工学講座 11、鉄鋼腐食科学、朝倉書店、P.242、1972.5
- 20) 川俣孝治；電気防食によるコンクリート構造物の塩害補修に関する研究、鹿児島大学博士論文、1997
- 21) コンクリート橋における外ケーブル方式設計・施工マニュアル（素案）、北海道開発局開発土木研究所材料研究室、1999.3
- 22) 港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書 - 劣化防止・補修マニュアル -、（財）沿岸開発技術研究センター、1987.9
- 23) コンクリート構造物中の鋼材の電気防食要領（案）、建設省土木研究所（財）土木研究センター、1988.8
- 24) 海洋コンクリート構造物の防食指針（案）、（社）日本コンクリート工学協会、1990.3
- 25) 川俣孝治他；コンクリート構造物における電気防食の電位シフト基準に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、1997.6
- 26) 川端光人他；一般国道 232 号遠別町遠別橋における床版の塩害対策について、第 42 回北海道開発局技術研究発表会発表概要集、1999.2



高尾 智満*
開発土木研究所
構造部
材料研究室
研究員



高柴 保明**
開発土木研究所
構造部
材料研究室
研究員



熊谷 守晃***
開発土木研究所
構造部
材料研究室
室長