論文 電気防食工法における犠牲陽極モニタリングセンサの基礎的検討

江里口 玲*1・藤原 浩己*2・齋藤 彰*3

要旨:鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食の防食工法として電気防食が広く用いられている。電気防食工法 の中でも,流電陽極方式は維持管理の簡便さや運用費用が抑制されることから多くの適用事例がみられる。 一方,実環境における流電陽極方式に用いられる犠牲陽極は,設計時に想定していた塩分浸透量と異なる可 能性もあることから,適切に消費量を把握できない課題がある。本研究においては鉄筋腐食を検知するセン サである鉄箔状のセンサに犠牲陽極を模した亜鉛線を接続し,防食効果と防食効果が終了した時点からのセ ンサの腐食検知性能を確認した。その結果,防食効果の確認と腐食を検知できることが明らかになった。 キーワード:電気防食,犠牲陽極,鉄筋腐食,腐食センサ,モニタリング

1. はじめに

電気防食工法は鉄筋腐食対策の最終手段と言われる維 持管理方法であり,防食電流を鉄筋に供給することで鉄 筋腐食を抑制する工法である。電気防食工法は外部の電 源装置を用いて防食電流を流す外部電源方式と,犠牲陽 極と鉄筋のイオン化傾向の差を使って防食電流を流す流 電陽極方式に大別される。いずれの方式においても防食 電流を安定的に供給することが重要であるため,外部電 源方式は外部の電源装置が停止しないように維持する必 要がある。流電陽極方式は外部電源方式の電気防食に比 べ,電源装置を必要としないため,設置後の管理労力や ランニングコストが抑制できる。

流電陽極方式の電気防食工法には様々な方法が提案 されている。コンクリート構造物表面に犠牲陽極を設置 する方法としては、陽極となるパネルやシートを設置す る方法¹⁾や、溶射により表面に塗膜する方法²⁾が提案さ れており、コンクリート内部に犠牲陽極を埋設する方法 としては、犠牲陽極をバックフィル材に包含した部品を 鉄筋と接続し設置する方法³⁾が実用化されている。

犠牲陽極をコンクリート内部に埋設する方法は,表面 に犠牲陽極を設置する方法に比べると,新設時に配筋作 業と同時に施工できることから,施工労力を抑えること が可能である。また,断面修復等の補修時には,補修材 にポリマー入りの電気抵抗が高い材料を用いても犠牲陽 極を包含するモルタル材料により一定の導電性を保持す ることで,防食電流を供給することが可能である。それ らのことから様々な適用事例がみられる。

一方,犠牲陽極をコンクリート内部に埋設する場合, 犠牲陽極が消耗しながら防食電流を鉄筋に付与すること から,犠牲陽極の消費状態をある程度把握できることが 望ましいが直接的には確認できない。すなわち,犠牲陽

*1 太平洋セメント株式会社 中央研究所 (正会員)

*2 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科・教授・工博(正会員)

*3 長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻

極の防食効果の確認や犠牲陽極自身の更新時期の判定が 困難という課題がある。

そこで,著者らは犠牲陽極の状態をモニタリングする ことを目的に,鉄筋の予防保全を目的として開発された 鉄箔状のセンサ(以下,腐食センサ)と亜鉛線を接続し, 防食効果の確認に加え,防食効果が低下した後の腐食検 知性能を各種の溶液を用いて確認試験を行い,その結果 より流電陽極方式の電気防食工法における犠牲陽極モニ タリングセンサを検討した。

2. 腐食センサおよび犠牲陽極の概要

2.1 腐食センサの概要

腐食センサの外観を図-1 に示す。本センサは高純度 な鉄箔で回路が構成されており、端部に貴金属膜を成膜 している。通常、腐食センサはコンクリート構造物のか ぶり部に埋設し、腐食センサ近傍が腐食因子の侵入によ り鉄を腐食させる環境であるかをセンサ自身が腐食して 断線することで評価するセンサである。

腐食による腐食センサの断線を把握する計測項目と しては電気抵抗を計測しており、健全な状態であれば数 Ω~20Ωと極めて低い抵抗を示す。腐食に至り断線する ことで100Ω以上の抵抗を示すこととなる。

本センサは,通常セラミックス製の筐体内部に埋設さ れており,表面をモルタルで被覆し,電気抵抗の計測に



図-1 腐食センサの外観

は短距離無線技術である RFID を適用し、塩害や中性化 が懸念される多くの構造物に適用されている4。

2.2 犠牲陽極と腐食センサの接続

流電陽極方式の防食工法を模すために、図-2 に示す とおり腐食センサと犠牲陽極の亜鉛線を用いケーブルに より半田付けで接続した。亜鉛線は99.99%の純度のもの を使用し海水中における防食時の陽極必要量を文献 5に 基づき式(1)より計算し, 0.5mm φと 1mm φの2水準とし た。式中 li は軟鉄系に用いられる 100 を代入し、陽極の 有効電気量は780を用いた。

亜鉛線は露出部を 6mm に調整し、それ以外の露出部 を樹脂でコーティングし防水処理を実施した。

なお,式(1)で計算した防食期間の設計値は1mm oの亜 鉛線で288時間,0.5mm φの亜鉛線で72時間の防食期間 である。

$$W = \frac{Ii \times Ai \times L \times 8.76}{C}$$

W: 陽極の合計質量 [kg] Ii:計画防食電流密度 [mA/m²] Ai: li に対する防食対象部材の表面積 [m²] L: 陽極の耐用寿命 [y] C: 陽極の有効電気量 [A・h/kg]



3. 試験に用いた溶液種類

表-1に試験に用いた溶液の種類を示す。ケース1と して人工海水を用いた浸漬試験を実施し、ケース2とし てコンクリート模擬溶液を用いて浸漬実験を実施した。

表一1 試験に用いた溶液						
	塩分濃度(%)	pН	酸素濃度(ppm)			
ケース1	3	7.7	6			
ケース2	10	12.3	6			

計験に用いた液体

4. 人工海水中における基本性能の確認(ケース1)

4.1 人工海水中における試験方法

ケース1として人工海水中における腐食センサと亜 鉛線の接続状態の防食効果について、腐食促進試験を実

施した。試験方法として、図-3に示す溶液槽に3%塩分 濃度に調整したイオン交換水に空気をポンプで投入し, 腐食センサ単体(無防食)と亜鉛線を接続した犠牲陽極 付き腐食センサを、それぞれ n=3 で浸漬した。

4.2 計測項目

(1)

計測項目は図-3に示すとおり、飽和銀塩化銀電極を



用いて腐食センサと亜鉛線の自然電位と復極量を定期的 に計測するとともに亜鉛線・腐食センサ間に発生する防 食電流を計測した。なお、防食電流は無抵抗電流計を用 いて計測し、復極量は溶液中であることから IR ドロッ プの影響は除外した。また,腐食センサが腐食を判定す る抵抗値に達した時点の表面状態を目視で確認した。

試験期間中における水溶液の環境変化についても、定 期的に溶存酸素濃度と pH を計測して変化がないことを 確認している。

5. ケース1の試験結果

5.1 電流密度の挙動

図-4 に亜鉛線-腐食センサ間で計測した電流密度の 経時変化を示す。電流密度は、計測した電流値を腐食セ ンサの検知部分の表面積で除した値、すなわち防食対象 面積における電流密度とした。



試験開始直後の電流密度は,設計時に用いた 100 mA/m²を上回り 170 mA/m²を示し,水溶液浸漬直後が最 も高く時間経過に伴い減少傾向を示した。1mm φ の亜鉛 線については,60 時間程度まで試験開始時の電流密度を 保ち,その後減少傾向を示し130 時間以降で最低値を示 した。0.5mm φ の亜鉛線は試験開始直後から急速に減少 傾向となり 45~60 時間でほぼ最低値を示した。

5.2 腐食センサ・亜鉛線の電位変化

図-5 に 0.5mm ¢ の亜鉛線水準の腐食センサおよび亜 鉛線の電位計測結果を示す。腐食センサは-600mV vs SHE から 40 時間経過時点で若干卑下傾向となった。亜鉛線 の電位は開始直後から貴な方向に変化し、各個体差によ るバラつきは大きいが 20~50 時間の時点で大きく貴な 方向に変化した結果となった。0.5mm ¢ については、こ の亜鉛線の電位変化に併せ試験開始直後から電流密度も 急速に減少していることから、防食環境を安定的に維持 できていないと推察される。

図-6には1mmφの亜鉛線水準の腐食センサおよび亜 鉛線の電位変化を示す。腐食センサの電位は約100時間 程度まで開始直後と同様の-600mV vs SHE を示し、その 後卑化傾向となった。亜鉛線の電位は開始直後から100 時間まで徐々に貴化傾向に上昇し、その後は大きな変化 はなく横ばいとなった。また、0.5mmφと比較すると個 体差によるバラつきが少ない結果であったことから防食 環境を安定的に維持できていると考えられる。

0.5mm φ, 1mm φ のどちらの結果においても防食設計 時間である 72 時間, 288 時間を大きく下回る結果であっ た。この理由としては, ポンプから水溶液中に投入した 空気により溶液内に流速が発生したことが影響して酸素 拡散速度が上昇したことから腐食速度が促進されたと推 察している。また, 電流密度が設計時の 1.7 倍程度であ ったことからも同様のことが考えられる。

5.3 腐食センサの抵抗変化

図-7 に腐食センサ単体と 0.5mm φ, 1mm φ の亜鉛線 を接続した腐食センサの抵抗変化を示す。腐食センサ単 体 (無防食) においては数時間から 35 時間の間にすべて のセンサが腐食状態を示し, 0.5mm φ の亜鉛線防食につ いては 50~100 時間で腐食に至った。1mm φ の亜鉛線水 準は 140~160 時間ですべてのセンサが腐食に至った。

防食有無に関わらず腐食検知時期はいずれの試料に おいても個体によるバラつきは認められる結果ではある が,無防食→0.5 mm亜鉛線防食→1mmφ亜鉛線防食の順 番で 100 Ω を超える抵抗値を示すまでの経過時間が長時 間となっており1mm ϕ については無防食に比して約3倍 の時間を要しており,防食効果が得られたと考えられる。

5.4 亜鉛線による腐食センサの防食効果

電流密度、電位変化、腐食センサの抵抗変化のそれ









図-7 腐食センサの抵抗変化(ケース 1)

ぞれの計測結果の関係性について考察を実施した。

人工海水中において無防食の腐食センサは,凡そ40時 間以内で腐食状態に至る。

0.5mm φの亜鉛線で防食した腐食センサは 50~100 時間で腐食を示しており、無防食の腐食センサの腐食検知時間を引くと、10~60時間程度の防食効果となる。1mm

電流密度で 85~130mA/m² 以下および亜鉛電位が初期 値より 150mV 程度貴化したところが防食終了の時点と 予想される。

	$0.5 \text{ mm } \phi$		$1 \text{ mm } \phi$	
経過時間 (h)	電流 密度 (mA/m ²)	亜鉛 電位 (mV vs SHE)	電流 密度 (mA/m ²)	亜鉛 電位 (mV vs SHE)
10	110	1020	—	_
60	85	948	—	_
90	—	_	130	950
120	—		110	944

表-2 防食終了と想定される時期の電流密度と電位

 コンクリート模擬溶液中における基本性能の確認(ケ ース 2)

6.1 コンクリート模擬溶液環境における試験方法

前項の結果より亜鉛線を腐食センサに接続すること で防食効果が得られた結果であったため,ケース2とし てコンクリート模擬溶液を用いて防食効果の確認試験を 行った。

試験環境は既報⁶の内容に従い,図-8に示すとおり, 塩分濃度を 10%に調整した飽和水酸化カルシウム溶液 (pH:12.3)内にポンプで飽和水酸化カルシウム溶液を通 じて二酸化炭素を除去した空気を混入させ,溶液に腐食 センサ単体と 0.5mm φ, 1mm φの亜鉛線を接続した腐食 センサをそれぞれ n=3 で浸漬した。

計測項目はケース1と同等の項目を計測し, 陽極電位 の変化と腐食センサの腐食判定時間に着目した。



図-8 腐食促進試験の構成 (ケース2)

7. ケース2の試験結果

7.1 亜鉛線の電位変化

図-10 に 0.5mm φ, 図-11 に 1mm φ の亜鉛線の電位

変化を示す。0.5mm φの亜鉛線については,試験途中の 150時間経過時点で亜鉛線の消費と水酸化カルシウムの 固着に伴い亜鉛線自身が接続ケーブルから脱落し,その 後は防食効果が極端に低下したと推察される。そのため 電位は試験開始後から早期に貴化傾向となり,個体差の バラつきも大きい。ケース1と同様に,0.5mm φの亜鉛 線ではコンクリート模擬溶液中においても安定的に防食 効果を得ることは困難と考えられる。

Imm φ の亜鉛線は試験期間中,継続的に安定した状態を保ち,人工海水中の試験結果と同様に緩やかに電位が 貴化する傾向を示しているが,270時間付近より B の亜 鉛線のみ大きく貴化傾向を示した。この結果は,B の亜 鉛線においては防食効果が低下傾向であることを示して いると推察されるが,B のみが低下した理由としては個 体差によるバラつきと考えられる。







⁽ケース 2)

7.2 腐食センサの抵抗変化

図-12 に腐食センサの抵抗変化を示す。無防食と 0.5 mmの亜鉛線はほぼ同時期に腐食を判定している。0.5 mmの 亜鉛線による防食水準は前述したとおり,途中で亜鉛線が脱落したため,防食効果が発揮されずに無防食と同時 期に腐食を判定したと考えられる。無防食のセンサにつ いては,約300~350時間で腐食に至り,ケース1の10倍 程度の腐食判定時間が必要であったが、1mmφの亜鉛線 防食については,350時間経過時点においても,表面的 には腐食箇所が現れてきているものの,腐食を判定する 抵抗値に至っておらず,防食効果が持続できているとい える。

8. 復極量の計測結果

0.5mm φの亜鉛線においては安定的な防食効果を得る ことができなかったため、1mm φの亜鉛線におけるケー ス1およびケース2の復極量を評価した。図-13にケー ス1の復極量の経時変化を、図-14にケース2の復極量 の経時変化を示す。なお比較のため、経過時間を合わせ た。どちらのケースにおいても開始後から減少していき、 陽極消費に伴う復極量の減少が確認された。また、鋼材 の水素脆化が懸念される1000mVを超過していないこと も確認できた。

ケース1においては、120時間経過後から急速に減少 しており、前述した防食効果の低下時期とほぼ同時期で あり、亜鉛電位の貴化に伴う防食電流の減少による復極 量の減少が現れた結果となった。

ケース2についてはコンクリート中の防食基準である 100mVを超えた値を維持し続けていることがわかる。更 に、完全防食の値である850mV付近を示した後、徐々に 減少傾向を示した。また、270時間付近からBの亜鉛線 のみ復極量が減少しており、コンクリートの防食基準で ある100mV以下となった。この結果は、図-11で示す とおり電位の貴化傾向を示した時期と同時期であり、防 食効果の大幅な低下を示した結果と判断できる。一方、 A、Cについては350時間を経過した時点でも、100mV 以上を維持できているが、全体的に減少傾向であること から防食効果は徐々に低下していると判断できる。

9. 腐食判定後の腐食センサの状態

写真−1にケース1およびケース2における腐食セン サの腐食判定後の表面状態と、同時期の1mm¢の亜鉛線 で防食したセンサCの状態を示す。

ケース1においては,腐食範囲が広くセンサ表面の全体に錆が発生している。一方,ケース2では,センサの 一部が局所的に孔食し,その箇所の腐食が進行している。

環境条件から、どちらも孔食による腐食が進展して断線に至ると推察されるが、明らかにその状態は異なる結果であり、既往の知見⁷⁾より pH の違いによる腐食生成物の差異も考えられる。

lmm φ の亜鉛線で防食した腐食センサは、細かい孔食が 確認されるものの、無防食のセンサより明らかに腐食箇 所が少ない状態である。



(ケース1無防食) (ケース2無防食)(ケース2:1mm防食C)写真-1 試験後の腐食センサの状態





図-13 1mm Ø 陽極亜鉛線を用いた防食時の復極量変 化(ケース 1)



10. 実構造物への適用方法に対する今後の検討

実際の構造物に対して,流電陽極方式の電気防食を適 用する場合,対象であるコンクリートの面積や鉄筋量, 塩分濃度等の各種の条件と耐用年数によって犠牲陽極の サイズ・設置個数を設計することから,モニタリングセ ンサにおいても犠牲陽極の量を任意にコントロールでき ることが望ましいと考えられる。

今回の試験で把握した防食電流値は、ケース1におい て最大170 mA/m²であったため、10 年間の供用期間を 想定したうえで、式(1)より必要陽極質量を計算すると、 約17g と算出される。亜鉛の比重である7.149g/cm³より 1mm の線材で犠牲陽極モニタリングセンサを構成する 場合を想定すると、約3mの亜鉛線材が必要となるため、 現実的とは言えない。**写真-2** に示すとおり、実構造物 に適用する腐食センサはセラミックスの筐体内部に設置 され、2mm 厚のモルタル層をバックフィル材として亜鉛 線より防食電流を供給する仕組みを想定しているため、 適切な亜鉛線のサイズや形状、防食効果の耐用年数や設 計供用期間に応じた調整方法等、今後の更なる検討が必 要と考えられる。



写真-2 実際の腐食センサへ亜鉛線による犠牲陽極を 設置した状態

11. まとめ

本研究では,鉄筋の予防保全用腐食センサを犠牲陽極 となる亜鉛線と接続し,その防食効果を確認するととも に,犠牲陽極のモニタリングセンサとして適用可能か基 礎的な試験を実施した。その結果,得られた知見を以下 に示す。

- (1) 腐食センサに 0.5mm φ と 1mm φ の亜鉛線を犠牲陽 極として接続した場合, 0.5mm φ は消耗が早く安定 的な防食効果を維持できないため, 1mm φ 以上の太 さを有することが望ましい。
- (2) Imm φの亜鉛線を腐食センサの犠牲陽極に用いた 場合,安定的に防食効果が得られ,人工海水中にお いては無防食センサの約3倍の防食効果が得られた。
- (3) コンクリート模擬溶液中における 1mm φ の亜鉛線 による腐食センサの防食効果として、コンクリート の防食基準である復極量 100mV 以上を 300 時間程 度維持した。
- (4) 実際の構造物に適用するためには、1mm φ以上の太 さを有する亜鉛線を用い、長さや本数を耐用年数や 環境条件に応じて調整できることが望ましい。

参考文献

- 加納伸人,望月紀保,篠田吉央,千葉丈夫:流電陽 極方式によるコンクリート中の鉄筋の防食,コンク リート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.517-522, 1988
- 2) 牛島栄,酒井芳文,杉本正威,鈴木光夫:金属溶射 被膜による鉄筋の電気防食効果の検討,コンクリー ト工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.797-802, 1992
- 3) 土木学会:電気防食工法設計施工指針(案), コンクリ ートライブラリー107, 2001.11
- 江里口玲,平林克己,佐藤達三,高橋英孝:RFID腐 食環境検知システムと施工事例,コンクリート構造 物の非破壊検査論文集,Vol.4, pp.47-52,2012.8
- 5) 一般社団法人 軽金属溶接協会:アルミニウム合金 製船殻工作標準, LWS W 8101, 2019
- 6) 大谷俊介,板屋隼人,若林徹,江里口玲,早野博幸, 他,:コンクリート模擬環境での腐食環境センサの 性能評価,土木学会全国大会第74回年次学術講演 会,V-187,2019.9
- 7) 高谷哲,西沢彩,中村士郎,山本貴士,宮川豊章: コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成 プロセスおよび電気化学的特性,土木学会論文集 E2, Vol.71, No.3, pp.235-247, 2015