論文　犠牲陽極材を用いた低電流下での鉄筋コンクリート鋼材の防食効果

小野田　基[*1]，米窪　祥平[*2]，DINH NAM THIEN[*3]，小林　孝一[*4]

要旨：近年インフラ構造物の効率的な維持管理が重要な課題となっているが，コンクリート構造物の中長期的な延命対策の一つとして電気防食が採用されている。電気防食として様々な工法が存在するが，その中でも費用対効果に優れ継続的なモニタリングやメンテナンスを必要としない犠牲陽極材に着目し，犠牲陽極材によって発生することが可能なような低電流の条件下での防食効果の検証を行った。その結果，低電流の条件下であっても犠牲陽極方式は優れた防食効果を発揮し，外部電源方式用の防食基準を必ずしも適用しなくても良いことが明らかになった。

キーワード：犠牲陽極材，電気防食，低電流，鉄筋腐食

1.　はじめに

近年インフラ構造物の老朽化が問題となり，効率的な維持管理により延命化を図ることが重要な課題となっている。日本は地理的要因もあり，塩害による鉄筋コンクリート構造物の維持管理には多額の人件費や補修費用がかかっており非常に大きな負担となっている。塩害が生じた鉄筋コンクリート構造物の補修においては，鉄筋の防錆やマクロセル腐食対策が必要となる。

電気化学的防食工法はコンクリート構造物中の鋼材腐食を抑制する，既に確立された工法である[1)]。そのうち流電陽極工法に属するコンクリート埋設型犠牲陽極工法は実構造物で多数の実績を持つが比較的歴史の浅い技術である。外部電源方式の電気防食工法であれば，復極量が 100mV となるようモニタリングを行うことで適切な防錆効果が得られるようコントロールすることができるとされている[1,2)]。一方，犠牲陽極材は異種金属間のイオン化傾向の差により防食電流を供給するため，人為的に防錆効果をコントロールすることができず，また比較的小さい電流密度での運用となるが，このような条件下での防食性能とその適用範囲は明確ではない。しかしながら，犠牲陽極材はマクロセル腐食対策として既に多く採用されており，中長期的な防食の実績も有する。

そこで本研究ではコンクリート構造物用犠牲陽極材に着目し，一般的な亜鉛を用いた犠牲陽極材が発生可能な低電流下での防食効果を検証することで，より費用対効果の高い効率的な工法選定や合理的な設計が可能になると考え，外部電源方式との比較を行うことで犠牲陽極材の防食効果を評価することとした。

2.　実験概要

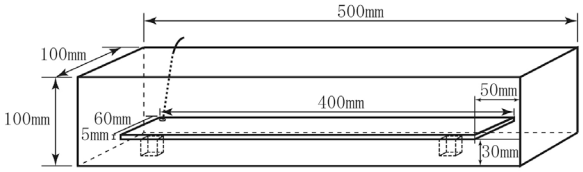
本研究では犠牲陽極材による低電流下における防食状況を塩分濃度別に実験評価した。腐食前の健全な鋼板をコンクリート中に埋設し実験を行ったため，主に新規の腐食発生や，劣化して補修された部位の近傍でのマクロセル腐食の抑制効果に対する評価となっている。また，外部電源方式による防食を行った供試体を同時に作製し，犠牲陽極材を使用した場合との客観的な比較を行なった。

2.1　コンクリート供試体中の鋼材電位変化と腐食確認

コンクリート供試体を Cl^-濃度 0.8%，1.5%，2.0%（対セメント比）にて作製し，コンクリート中の鋼材の電位を測定した。また，一定の材齢が経過した後に，一部の供試体を破壊して鋼材の腐食状況を確認した。

(1) 供試体概要

表－1 に使用材料の一覧と概要を示す。普通ポルトランドセメントを使用し，塩化ナトリウムを配合した（**表－2，3**）。供試体の寸法は 100mm×100mm×500mm で，コンクリート中には鉄筋の代わりに 60mm×400mm×3mm の鋼板を埋設し計測用被覆銅線を結束した（**図－1**）。



図－1 基準供試体（無防食）

表－1　使用材料

材料	概要
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	密度 2.63g/cm^3
粗骨材	密度 2.63g/cm^3
鋼板	酸洗鋼板（SS400 相当）

*1　岐阜大学大学院工学研究科生産開発システム工学専攻（学生会員）
*2　岐阜大学大学院自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻
*3　昭和コンクリート工業株式会社　技術工事本部　修士（工学）
*4　岐阜大学工学部社会基盤工学科　教授　博（工）（正会員）

表－2 コンクリート配合(kg/m³)

W/C(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	885	906	※

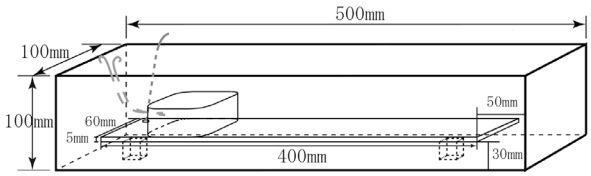
※ 表－3 参照

表－3 塩化物混入量

Cl^-（対セメント質量）	Cl^-（対コンクリート体積）	NaCl（対コンクリート体積）
0.8%	2.26kg/m³	3.73kg/m³
1.5%	4.25kg/m³	7.00kg/m³
2.0%	5.66kg/m³	9.32kg/m³

(2) 犠牲陽極材供試体概要

犠牲陽極材を鋼材の端部に設置し，プラスチックバンドにて鋼材と固定した（**図－2**）。使用した犠牲陽極材は5種類（**表－4**，**図－3**）であり，すべての犠牲陽極材にはバックフィル材内に水酸化リチウムが活性剤として使用されているが，それは水酸化リチウムが持つ高アルカリ性（pH14以上）によりコンクリート中の鋼材を腐食させることなく亜鉛のみを酸化させ，また，亜鉛酸化物が高アルカリに溶解する特性を利用し亜鉛酸化物が金属亜鉛表面に堆積することを防ぐためである。なお，それぞれの陽極材は亜鉛量や防食性能に違いがあり，最大発生可能防食電流はA＜B＜C＜D＜Eであるが，犠牲陽極材Dは供試体サイズに切断して使用したため，本来の性能に劣る可能性がある。また，犠牲陽極材Eは亜鉛と電池による電気防食の両方を活用するもので，初期に電池により直流電流による電気防食が施され，後に亜鉛による流電陽極工法に自動的に変換される。なお，犠牲陽極材より左右2本ずつ計4本の結束線がでているものについては，片側の2本は切断し，残りの2本のみを使用した。



図－2 犠牲陽極材供試体

表－4 犠牲陽極材一覧

種類	亜鉛量(g)	寸法(mm)
A	60	25×25×125
B	100	32×70×60
C	160	32×110×54
D	110	Ø32x150
E	60（+電池）	Ø29x135

a) 犠牲陽極材 A　b) 犠牲陽極材 B

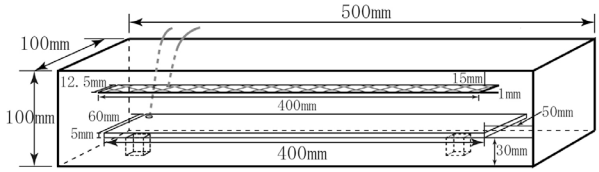
c) 犠牲陽極材 C　d) 犠牲陽極材 D

e) 犠牲陽極材 E

図－3 使用した犠牲陽極材

(3) 外部電源方式供試体概要

犠牲陽極材による低電流下での防食効果と比較するために，チタンメッシュを陽極とした外部電源方式の電気防食供試体も併せて準備した（**図－4**）。陽極であるチタンメッシュはコンクリート表面より約15mmの位置に設置し，被覆銅線を結束した。一般的に十分な防食効果が得られる防食電流量が鋼材表面積あたりで1mA/m²程度以上とされている[1,2]のに対し，本研究では低電流下での防食効果を検討するために，それ以下の値も含めた0.2，1.0，2.0，4.0（mA/m²，対鋼材全表面）の4種類を適用した。



図－4 外部電源方式供試体

(4) 実験方法

犠牲陽極材供試体，外部電源供試体ともに，養生期間中の鋼材腐食の進行を避けるため，脱型の直後から通電を開始した。

12日間の通電が終了した度毎に，すべての供試体の鋼

材の ON 電位と犠牲陽極材供試体における防食電流とを測定し，かつ，犠牲陽極材供試体の鋼材のインスタント OFF 電位，及び 48 時間後の OFF 電位を測定し，復極量を求めた。外部電源方式供試体は外部電源装置に複数の供試体が直列に接続され電源供給を受けているため，インスタント OFF 電位を測定することができない。従って ON 電位と 48 時間後の OFF 電位を測定し，これらの差を復極量とした。なお，電位の測定位置は被覆銅線より鋼材最遠部側面とし，銅―硫酸銅電極を使用した。**図－5** に実験状況を示す。

実験室は室温約 20℃に管理され，供試体をそれぞれ合成樹脂製のトレー内に設置することによって，互いに絶縁した。さらにトレー内に水を供給することで供試体の湿潤状態を保持した。供試体上面の表面水分率は概ね 4%台に保たれていたが，水分の過剰供給に起因すると思われる現象も発生していた。詳しくは 3.3 節で述べる。

計測は全供試体を 2 グループに分け，通電 12 日＋電流遮断 48 時間=2 週間を 1 サイクルとし，10 サイクル終了後に犠牲陽極材供試体 A，外部電源供試体 0.2mA/m^2 と同 2.0mA/m^2 をそれぞれ 1 体ずつ破壊し，鋼材の腐食状況を確認した。その結果，供試体寸法が小さいために犠牲陽極材の防食電流が外部電源供試体と比較して過大であると判断されたため，鋼材と犠牲陽極材との間に電気抵抗を設置し，犠牲陽極材より供給される防食電流を減少させることとした。さらに供試体 A，B，C は 15 サイクル終了後に抵抗を再度変更することにより，防食電流が外部電源方式供試体と同レベルとなるように調整した。

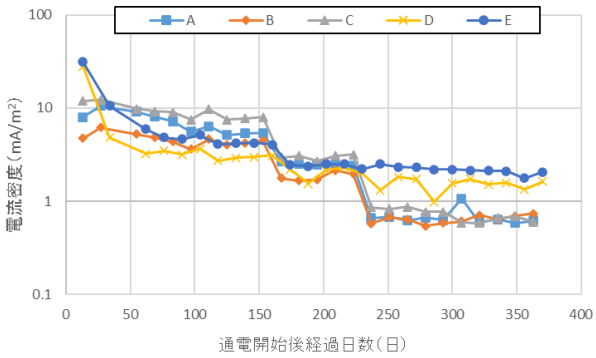
図－5　実験状況

3. 実験結果

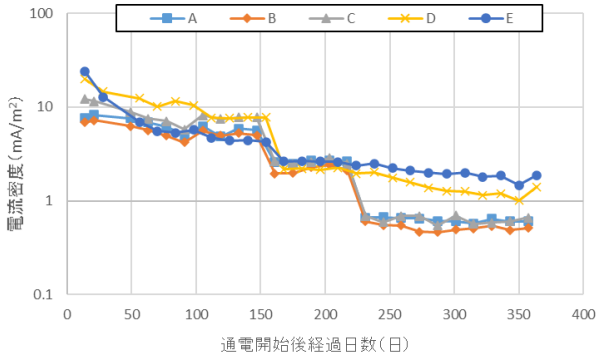
3.1，3.2 節の結果は，すべて 3 体の同一要因の供試体から得られた値の平均値である。

3.1　犠牲陽極材供試体における防食電流

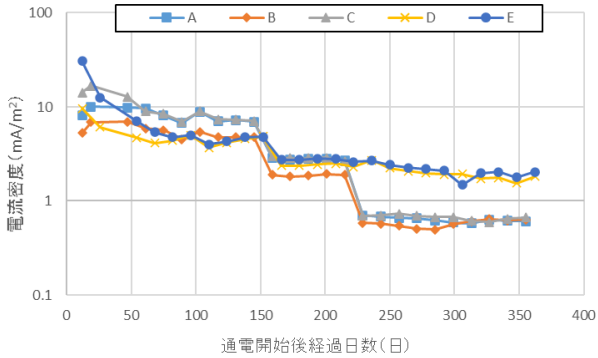
図－6 に，2 週間に 1 度測定した犠牲陽極材から鋼材への防食電流を示す。サイクル 1 から 10 では電気抵抗の使用はなく，サイクル 11 から 15 では 4.3kΩ，サイクル 16 以降では供試体 A，B，C には 20kΩを，供試体 D，E には引き続き 4.3kΩの抵抗器を犠牲陽極材と鋼材の間に使用し，防食電流を調整した。電気抵抗設置後の犠牲陽極材 A，B，C の電流密度は，これら犠牲陽極材の性能が異なるにもかかわらず，塩分濃度に左右されず，いずれも約 0.6mA/m^2 であった。このことから，犠牲陽極の防食能力内であった場合には，塩分濃度等の鋼材の腐食環境によらず，近似の防食電流を発生させることができる可能性が高い。また，小さな抵抗器を使用し続けた供試体 D，E では約 1.2-2.0mA/m^2 の電流密度が持続した。これら供試体においてもサイクル 11 から 15 では供試体 A，B，C と同様の電流値となっていることから，やはり犠牲陽極材の種類や塩分濃度は防食電流に影響を与えないといえる。



a）塩分濃度 0.8%

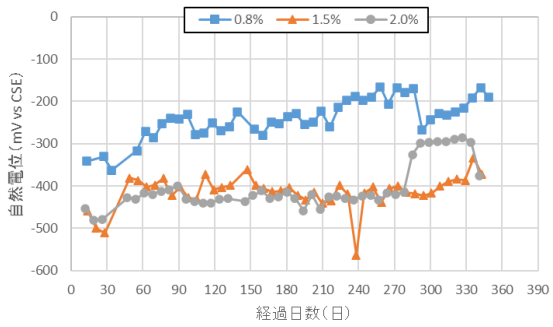


b）塩分濃度 1.5%

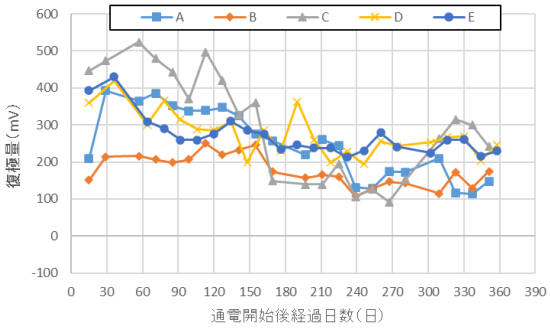


c）塩分濃度 2.0%

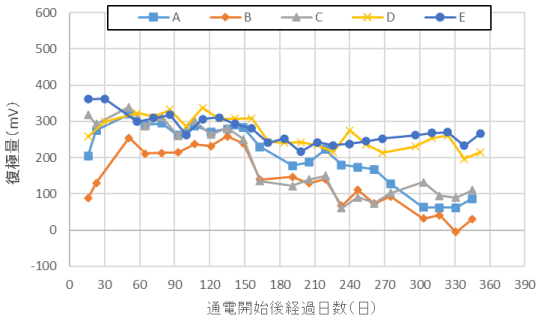
図－6　犠牲陽極材供試体における防食電流密度



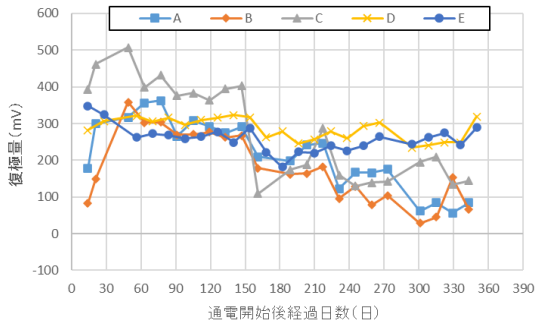
図－7　基準供試体の自然電位



a）塩分濃度 0.8%



b）塩分濃度 1.5%



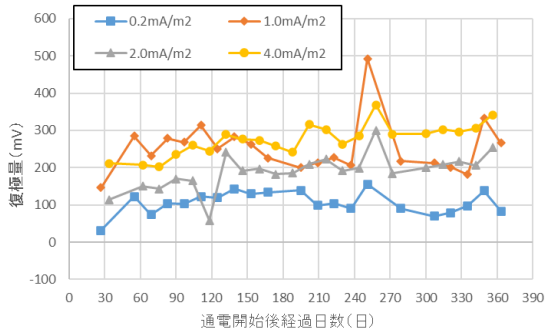
c）塩分濃度 2.0%

図－8　犠牲陽極材供試体における復極量

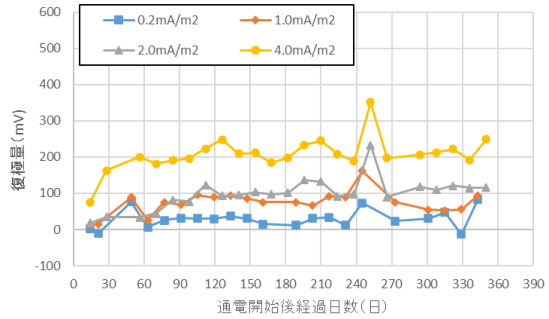
3.2　自然電位と復極量

(1) 基準供試体の自然電位

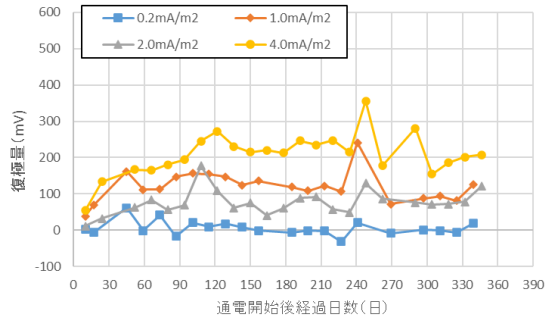
無防食である基準供試体の 2 週間毎の自然電位を**図－7** に示す。ASTM C876[3]にて判定すると，塩分濃度 0.8%



a）塩分濃度 0.8%



b）塩分濃度 1.5%



c）塩分濃度 2.0%

図—9 外部電源供試体における復極量

は Intermediate corrosion risk, 1.5%以上の供試体は High risk of corrosion と判定されるが，1.5%と 2.0%との間の差は小さかった。また，自然電位が時間の経過とともに貴側にシフトしているが，水和の進行にともない，供試体内の腐食環境が緩和されたためと考えられる。

(2) 犠牲陽極材供試体の復極量

2 週間毎の鋼材の復極量を**図－8** に示す。塩分濃度 0.8%では全ての供試体で概ね復極量 100mV を達成していた。しかしながら塩分濃度が 1.5%，2.0%と高い場合には，一部の供試体で電気抵抗の追加や交換後に復極量が 100mV を下回る結果となった。

(3) 外部電源方式供試体の復極量

2 週間毎の鋼材の復極量を**図－9** に示す。復極量 100mV を防食基準として判定すると，塩分濃度 0.8%では電流密度が最小の 0.2mA/m^2 のケースで復極量がこの防食基準

にほぼ一致した。塩分濃度が 1.5%と 2.0%の場合では 4.0mA/m^2 ではこの防食基準を達成できているものの，1.0mA/m^2 と 2.0mA/m^2 では防食基準を達成できていない時期があるという結果となった。この両者の復極量を比較すると，電流密度が小さな 1.0mA/m^2 の方が復極量が大きくなることもあり，電流密度が復極量に与える明確な違いは見られず，これら電流密度が防食を達成できるかどうかの境界値付近であるものと考えられる。

3.3　鋼材腐食状況

サイクル 25 終了時（試験期間 50 週）に全種類の供試体のうちそれぞれ 1 体を解体し，鋼材の腐食状況を確認した。なお、腐食が発生している供試体では，鋼材下面に腐食が集中し上面での腐食はほとんど発生しなかった。これは打設時のブリージングにより鋼材下面の組織が粗となり，また供試体を入れたトレーに水を張ることにより水分供給を行っていたため，鋼材下面がより腐食しやすい環境となったためであると考えられる。また鋼材腐食部には水酸化鉄と思われる生成物が付着しており，酸素の供給不足が生じていたと考える。以下に示す写真は，**図－11** の a)を除きすべて鋼材の下面側の写真である。

(1) 基準供試体

腐食状況を**図－10** に示す。塩分濃度 0.8%から腐食が発生した。腐食の程度は塩分濃度に依存し，塩分量の大きなものほど腐食が進んでいた。

a) 基準供試体　塩分濃度 0.8%

b) 基準供試体　塩分濃度 1.5%

c) 基準供試体　塩分濃度 2.0%

図－10　基準供試体鋼材下面の腐食状況

(2) 犠牲陽極材供試体

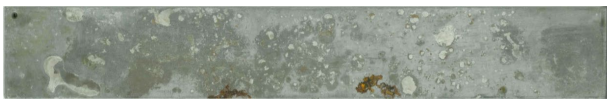
図－11 に犠牲陽極材供試体における鋼材腐食状況を示す。ここには腐食の確認されたもののみを示しており，塩分濃度 0.8%の犠牲陽極材供試体では，供試体 C のみ鋼材上面に軽微な腐食が見られたが,その他の犠牲陽極材では腐食は発生していなかった。塩分濃度が 1.5%や 2.0%の場合には，大きな抵抗を挿入した犠牲陽極材 A，B，C 供試体の鋼材下面に腐食が見られたものの，比較的軽微であった。これら供試体については当初は目標とするよりも大きな防食電流が供給されていたが，最後に電気抵抗を交換して防食電流を減少させてから，少なくとも 100 日が経過しており，これはもし防食電流が過小であった場合に腐食が発生，進行するのに十分な期間であったと考えられる。犠牲陽極材 A, B, C で約 0.6mA/m^2，犠牲陽極材 D と E で 1.2-2.0mA/m^2 であり，特に前者の場合には外部電源方式の電気防食にて求められる防食電流密度 1.0mA/m^2 の半分程度の値である [2)]。埋設型の犠牲陽極材は小型であり，起電力は大きくないにもかかわらず，3.1 節で述べたように，塩分濃度が異なって鋼材の腐食傾向が異なっていても，能力の範囲内である限り，一定の防食電流を発生させていた一方，復極量が 100mV を下回る場合もあった。犠牲陽極は金属毎にイオン化傾向が異なることを利用して鋼材の腐食を防ぐ。このような本質的な電気化学の原理を利用しているため，鋼よりもイオン化傾向の強い材質を利用している限り，復極量や防食電流のモニタリングやそれらを用いた厳密な管理を行なわなくとも大きな防食効果を達成することが可能で，外部電源方式用に設定されている種々の管理値を犠牲陽極方式に対して無理に適用する必要がないといえる。

a) 犠牲陽極材 C　塩分濃度 0.8%

b) 犠牲陽極材 A　塩分濃度 1.5%

c) 犠牲陽極材 B　塩分濃度 1.5%

d) 犠牲陽極材 A　塩分濃度 2.0%



e) 犠牲陽極材 B　塩分濃度 2.0%

f) 犠牲陽極材 C　塩分濃度 2.0%

図－11　犠牲陽極材供試体の腐食状況

(3) 外部電源方式供試体

図-12 に外部電源方式供試体における鋼材腐食状況を示す。電流密度の大小に関わらず，もっとも塩分量が少ない塩分濃度0.8%より腐食が見られ，塩分量が大きいほど腐食面積が大きくなる傾向が見られた。また復極量が100mV 以上であるにも関わらず腐食が進行している供試体が多かった。腐食は全て供試体下面側で生じていたことから，ブリージングによる空隙の発生やセメント硬化体の組成の違いなども腐食の要因と考えられるが，同様の形状である犠牲陽極材供試体では顕著な腐食の進行は観察されていない。外部電源方式の電気防食では，鋼材全体の電位を均一に卑側にシフトさせ，かつ，腐食反応で失われる以上の電子を与えることにより鋼材の腐食を防ぐ。それが確実に行なわれることを担保するために復極量や電流量に関する管理基準が定められているが[1)2)]，特に塩分量が多い場合等，条件によってはこれら基準による防食では不十分な場合もあるため，外部電源方式を適用する場合には，設計時に十分な事前の検討が求められるといえる。

4. 結論

本研究では，復極量や防食電流のコントロールができない犠牲陽極方式の電気防食工法を対象に，補修の合理的設計に資することを目的として Cl^-濃度 2.0%までの範囲において低電流下での防食効果を確認した。以下に，本研究での検討の範囲から得られた結果をまとめる。

(1) 犠牲陽極の防食能力内であった場合には，塩分濃度等の鋼材の腐食環境によらず，近似の防食電流を発生させることができる。

(2) 犠牲陽極材を使用した場合，電流密度 1.0mA/m^2 や復極量 100mV といった外部電源方式に対する一般的な防食基準を満たさない供試体でも，完全に鋼材を防食できていた，あるいは腐食量を大幅に低減できていた。

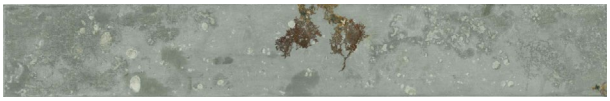
(3) 今回の実験の範囲からは，同等の防食電流密度であった場合，犠牲陽極材を使用した場合の方が外部電源方式と比較して優れた防食効果を示した。

参考文献

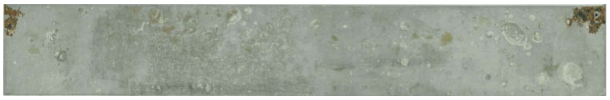
1) 土木学会コンクリートライブラリー157　電気化学的防食工法指針，2020.

2) EN 12696: 2012 Cathodic Protection of Steel in Concrete, 2012.

3) ASTM C876-15: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2015.

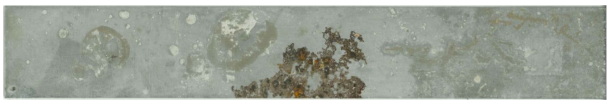


a) 0.2mA/m^2　塩分濃度 0.8%

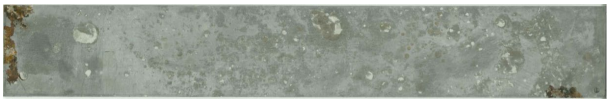


b) 2.0mA/m^2　塩分濃度 0.8%

c) 4.0mA/m^2　塩分濃度 0.8%



d) 0.2mA/m^2　塩分濃度 1.5%

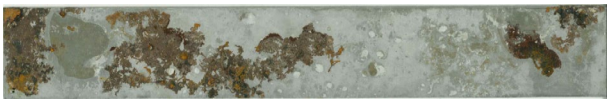


e) 1.0mA/m^2 塩分濃度 1.5%

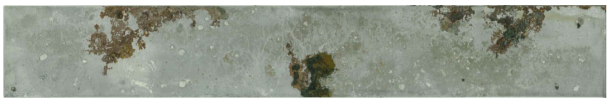
f) 2.0mA/m^2　塩分濃度 1.5%

g) 4.0mA/m^2　塩分濃度 1.5%

h) 0.2mA/m^2　塩分濃度 2.0%



i) 1.0mA/m^2　塩分濃度 2.0%



j) 2.0mA/m^2　塩分濃度 2.0%

k) 4.0mA/m^2　塩分濃度 2.0%

図－12　外部電源方式供試体鋼材下面の腐食状況