

## 改良した犠牲陽極材による電気防食工法の適用性に関する基礎的検討

高知高専 ○森岡 海星  
 高知高専 正会員 近藤 拓也  
 高知高専 正会員 横井 克則  
 デンカ 松久保 博敬

Abstract : Conventional sacrificial anode material was improved and applicability as a cathodic protection method was studied. For the review method, the amount of NaCl was used as a parameter. Also, based on the survey results of on-potential, off-potential and depolarization obtained from them, the amount of corrosion of the reinforcing bar obtained from the disassembly investigation at the age of 110 days, and the elution status by EPMA analysis of the removed sacrificial anode material, it was confirmed the usefulness of the improved sacrificial anode material when it is used as a cathodic protection method.

Key words : Sacrificial anode material , Depolarization , Corrosion area rate , EPMA analysis

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長寿命化を図るためには、中性化や塩害といった劣化機構による鋼材腐食をできるだけ引き起こさないことが大事である。この鋼材腐食は鋼材の不動態被膜が破壊され、電気化学反応により電位差が生じて腐食電流が流れることで進行する。そのため、この鋼材腐食による劣化を防ぐために電気化学的に腐食反応を制御し、劣化の進行を抑制する工法として電気防食工法が挙げられる<sup>1)</sup>。その中でも陽極材自身が腐食して防食電流を流すことで電位差を小さくし、腐食電流を抑制する流電陽極方式の犠牲陽極工法が検討されている<sup>2)</sup>。この工法は、電源を必要としないため比較的施工が容易であり、施工後のメンテナンスが省力化されることから、予防保全にも期待できる工法である。犠牲陽極材を電気防食工法として検討した事例として宮口らの事例があるが<sup>2)</sup>、防食効果を発揮できる範囲が小さいため、設置する犠牲陽極材が多くなることが課題であった。そのため、従来の犠牲陽極材からイオン放出出力をより効率的にした犠牲陽極材を検討した。これにより、設置個数の削減につながり、より経済的で効率的な鉄筋コンクリート構造物の維持管理を行うことができると考えられる。

そこで本論文では、改良した犠牲陽極材を電気防食工法として適用した場合の有用性の把握を目的として、電気防食工法として適用した場合の母材コンクリートのNaCl量が防食効果に与える影響について、復極量や鉄筋の解体調査結果、EPMA分析結果より検討を行った。

## 2. 試験概要

## 2.1 試験パラメータ

試験要因および水準を表-1に示す。母材コンクリートのNaCl量に応じた電気防食工法としての犠牲陽極材の適用性を検討するために、NaCl量は3種類の水準とした。犠牲陽極材の有無による防食効果を検討するために、2種類の水準とした。なお、

表-1 試験要因および水準

		NaCl 量			合計 (体)
		3kg/m <sup>3</sup>	6kg/m <sup>3</sup>	9kg/m <sup>3</sup>	
犠牲陽極材 の設置	あり	3	3	3	9
	なし	3	3	3	9
合計 (体)		6	6	6	18

NaCl量については渡辺<sup>3)</sup>の供試体概要を参考に採用した。

### 2.2 犠牲陽極材の改良概要

今回検討した犠牲陽極材を写真-1に示す。改良した犠牲陽極材は、亜鉛の表面積を大きくするため、亜鉛を犠牲陽極材表面および内部に配置した。モルタルとの付着をよくするため、表面の網 (写真-1の緑色の部分) ,そして亜鉛活性となる水酸化リチウム入りのバックフィル材を表面と内部の亜鉛の間に配置したもから構成されている。これらによって、従来の犠牲陽極材<sup>2)</sup>より、防食電流の出力を強化した。

### 2.3 供試体概要

供試体の配合表を表-2~4に示す。供試体は防食効果供試体として各NaCl量に応じて3体ずつ、90mm×100mm×600mm角柱供試体 (犠牲陽極材設置あり) ,および90mm×100mm×600mm角柱供試体 (犠牲陽極材設置なし) を作製した。水セメント比は60%とし、混和剤として変性ロジン酸系のAE助剤を使用し、スランプおよび空気量を調整した。なお、それぞれ3, 6, 9kg/m<sup>3</sup>の食塩を混入し、細骨材置換とした。以降、材齢は母材コンクリートの材齢を指す。

#### (1) 防食効果供試体 (犠牲陽極材設置あり)

供試体の概要図を図-1に示す。供試体は端部に穴をあけてビニル平行より線をねじ止めしたφ16mmの鉄筋を設置した状態で、図-1の白色の断面部分にコンクリートを打設した。打設後脱型せずに、材齢7日まで湿布養生した。材齢7日で図-1の緑色の断面部分に、端部にビニル平行より線をはんだ付けで接続した犠牲陽極材を設置し、ノンポリマーの無収縮モルタル (W/B=15.6%) を施工した。それ以降、材齢14日まで室内養生した。その後、室内に静置した。鉄筋のビニ

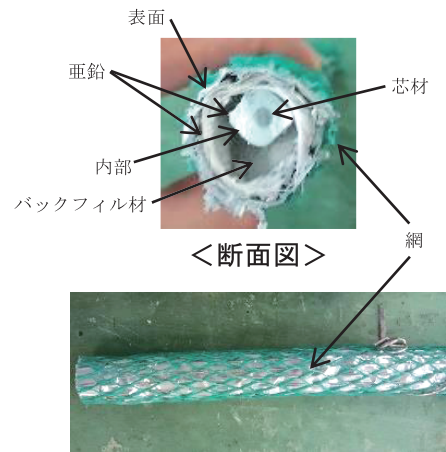


写真-1 犠牲陽極材

表-2 配合表 (NaCl 量 3kg/m<sup>3</sup>)

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	795	1015	3.00

表-3 配合表 (NaCl 量 6kg/m<sup>3</sup>)

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	792	1015	6.00

表-4 配合表 (NaCl 量 9kg/m<sup>3</sup>)

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	789	1015	9.00

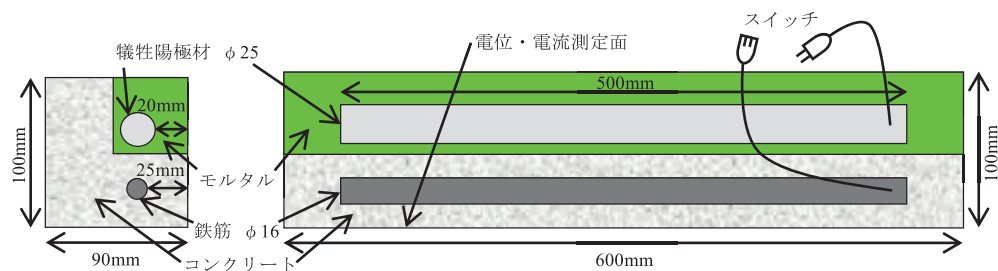


図-1 防食効果検討供試体 (犠牲陽極材設置あり)

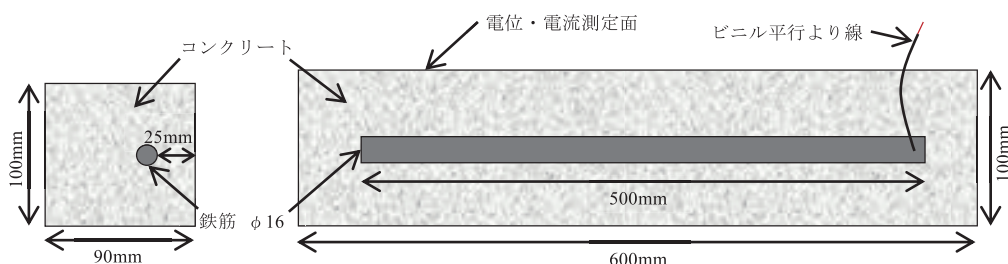


図-2 防食効果検討供試体 (犠牲陽極材設置なし)

ル平行より線と犠牲陽極材のビニル平行より線の先端部で、コンセントとプラグを用いて接続できるようにした。

(2) 防食効果供試体 (犠牲陽極材設置なし)

供試体の概要図を図-2に示す。供試体は図-2に示すように、端部に穴をあけてビニル平行より線をねじ止めしたφ16mmの鉄筋を配置した状態で、コンクリートを打設した。打込み後1日で脱型して、材齢7日まで湿布養生した。それ以降、材齢14日まで室内養生した。その後、室内に静置した。

2.4 測定項目

各供試体のシリーズにおいて、携帯用無抵抗電流計 (デジタル・マルチメータRD701型) を用いて電位・電流を約2週間ごとに測定日数203日まで測定した。また毎回、デジタル温湿度計を用いて室内温度と湿度を測定した。照合電極は銅硫酸銅 (CSE) 電極を用いた。暴露開始約110日後、各要因1体ずつ供試体を解体して、鉄筋の腐食面積を測定した。腐食面積率は鉄筋の表面積と腐食面積の百分率とした。また同時に、防食効果供試体 (犠牲陽極材設置あり) のうち各要因1体ずつ、供試体端部から約100mmの部分で切断した1断面について、「JSCE-G 574-2013」(案)<sup>4)</sup>に基づきEPMA法による元素の面分析測定を行った。切断箇所を図-3に示す。測定元素はZnとした。

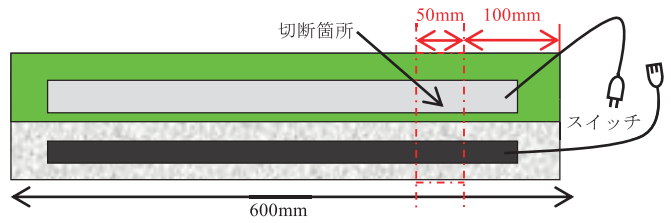


図-3 防食効果供試体 (犠牲陽極材設置あり) の面分析測定用の切断箇所

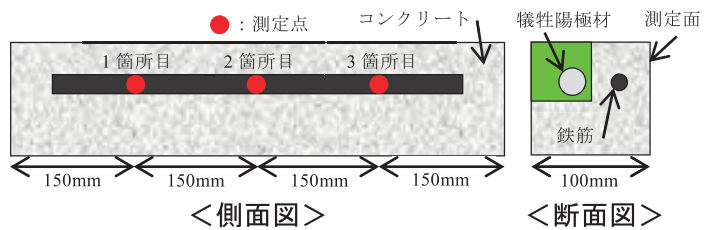


図-4 防食効果供試体の電位測定箇所

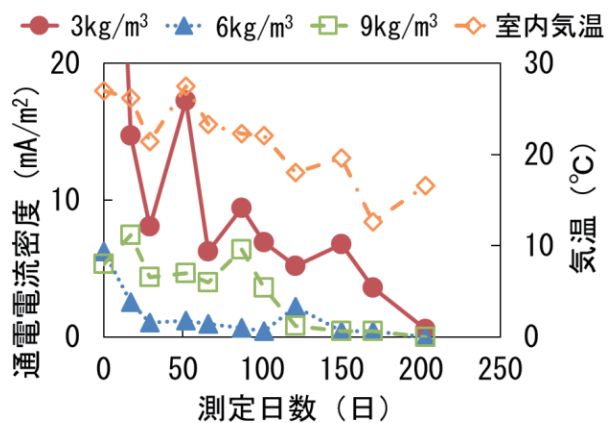


図-5 通電電流密度の経時変化

(1) 防食効果供試体 (犠牲陽極材設置あり)

電位測定箇所を図-4に示す。各供試体において、回路を接続した状態のオン電位、回路を切断してから24時間後のオフ電位をそれぞれ計3箇所測定した。また、オン電位測定後に直流電流も測定した。全測定後、次の測定まで回路を接続状態にした。なお、回路を切断した直後のインスタントオフ電位は、各供試体の図-4に示す2箇所目の測定点を測定した。この部分のインスタントオフ電位と、24時間後に同じ箇所でも測定したオフ電位との差を復極量とした。

(2) 防食効果供試体 (犠牲陽極材設置なし)

図-4に示すように、各供試体の鉄筋の自然電位をそれぞれ計3箇所測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 通電電流密度

各NaCl量における鉄筋の電流密度の経時変化および室内気温の変化を図-5に示す。なお、電流密度は、各NaCl量の供試体3体の電流の平均値を鉄筋の表面積で除した値とした。図-5より、NaCl量6kg/m<sup>3</sup>、9kg/m<sup>3</sup>では初期から電流密度はほぼ一定の値を示した。これは鋼材腐食の進行により、鉄筋と犠牲陽極材の電位差が小さくなることで防食電流量が小さくなったためだと考えられる。一方で、NaCl量3kg/m<sup>3</sup>では初期に大きな電流密度を示し、その後増加と減少を繰り返す傾向を示した。これは

NaCl量6kg/m<sup>3</sup>, 9kg/m<sup>3</sup>と比較して鋼材腐食が進んでおらず、鉄筋と犠牲陽極材の電位差が大きいため、気温による影響をうけて電流が安定しなかったと考えられる。

### 3.2 オフ電位

各 NaCl 量供試体における鉄筋のオフ電位と自然電位の経時変化を図-6~8 に示す。なお、各電位の値は各 NaCl 量の供試体 3 体の平均値である。NaCl 量が増加するほど、鉄筋のオフ電位と自然電位との差が大きくなる傾向を示した。これは時間の経過とともにコンクリート中の NaCl により鋼材腐食が促進していると考えられるが、継続的に一定の電流が流れたことにより、防食性能が保たれたためと考えられる。

### 3.3 復極量

各NaCl量供試体における復極量の経時変化を図-9に示す。一般的に防食効果は、復極量100mV以上を基本としている<sup>1)</sup>。測定初期から203日まで、復極量は100mV以上を示していることが分かる。また、NaCl量6kg/m<sup>3</sup>, 9kg/m<sup>3</sup>の供試体においては復極量が52日以降、室内気温の変動とほぼ同じ傾向を示した。これらは継続的に一定の電流が供給されたことによるものと考えられる。以上より、温度による変動はあるものの、復極量は安定した値が得られていると考えられる。

### 3.4 鉄筋の腐食面積率

暴露後約110日で解体した供試体における各NaCl量の鉄筋の腐食面積率を図-10に示す。また、解体後の鉄筋の腐食状況についてNaCl量ごとに整理したものを写真-2に示す。写真-2より、犠牲陽極材を設置した供試体の鉄筋の腐食はほとんど確認できない。一方で、犠牲陽極材を設置していない供試体の鉄筋では、NaCl量が増加するほど腐食が発生しているのが確認できる。図-10より、NaCl量3kg/m<sup>3</sup>および9kg/m<sup>3</sup>の犠牲陽極材を設置した供試体の鉄筋は腐食が発生しておらず、6kg/m<sup>3</sup>においても腐食の発生は軽微であった。これは、暴露後約110日までいずれのNaCl量においても、継続的に一定の電流が供給されたためと考え

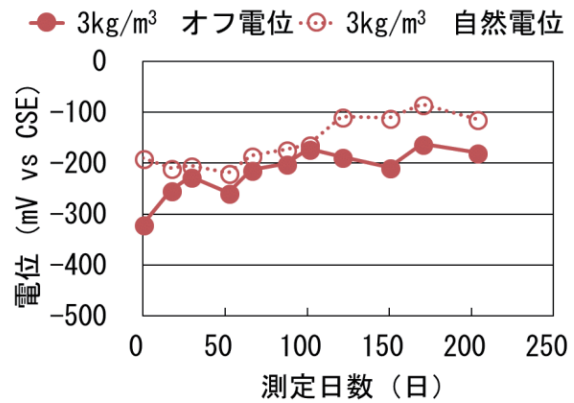


図-6 鉄筋の電位の経時変化 (NaCl 量 3kg/m<sup>3</sup>)

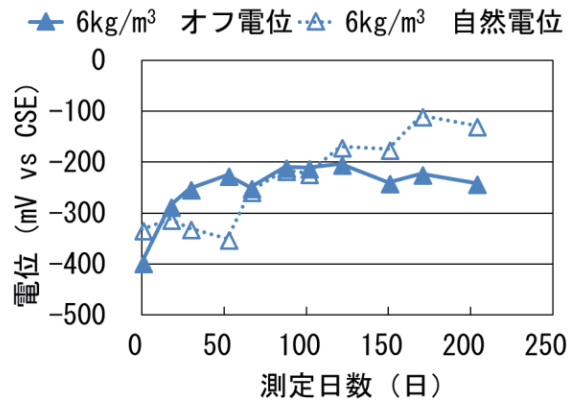


図-7 鉄筋の電位の経時変化 (NaCl 量 6 kg/m<sup>3</sup>)

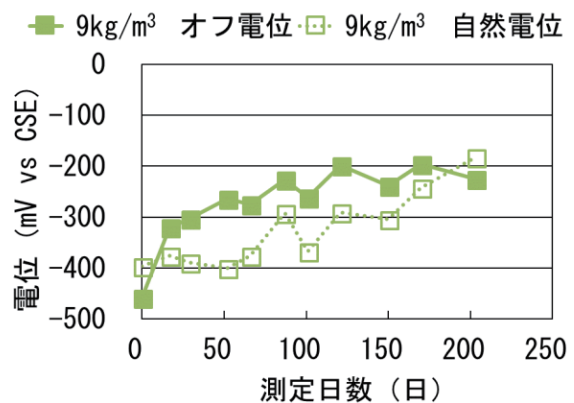


図-8 鉄筋の電位の経時変化 (NaCl 量 9 kg/m<sup>3</sup>)

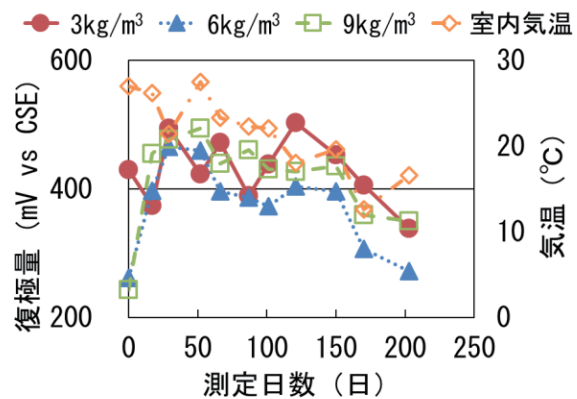


図-9 復極量の経時変化

られる。また、いずれのNaCl量でも、犠牲陽極材を設置した供試体の鉄筋は設置していない供試体の鉄筋と比較して、腐食面積率が小さい傾向を示した。これは、犠牲陽極材により鉄筋に電流が流れることで、犠牲陽極材を設置していない供試体に比べて鋼材腐食が抑制されたことによる影響と考えられる。また、犠牲陽極材を設置していない供試体の鉄筋については、NaCl量が増加するほど腐食面積率が大きくなる傾向を示した。これは、コンクリート中のNaCl量が増加するほど鉄筋の腐食速度が大きくなることによる影響と考えられる。

### 3.5 EPMA 法による元素の面分析

EPMA 法による Zn の分布状況を図-11 に示す。コンクリート中の NaCl 量が増加するほど、犠牲陽極材近傍に Zn が存在する面積が大きくなっている。これはコンクリート中の NaCl 量が増加するほど鋼材腐食が進行しやすくなるため、それに伴って電流を供給するために犠牲陽極材表面で酸化反応が進んだことにより、Zn がコンクリート中に溶出したことが考えられる。しかし、吉田の報告では、電子の放出とともに犠牲陽極材外周部の Zn 濃度は低下していたが<sup>9)</sup>、今回はそのような傾向は確認できなかった。そのため、さらなる考察が必要である。

## 4. おわりに

本論文では、改良した犠牲陽極材を電気防食工法として適用した場合における母材コンクリートのNaCl量が防食効果に与える影響について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) コンクリート中のNaCl量が増加するほど、電流密度は初期からほぼ一定の値を示した。NaCl量3kg/m<sup>3</sup>では、初期に大きな電流密

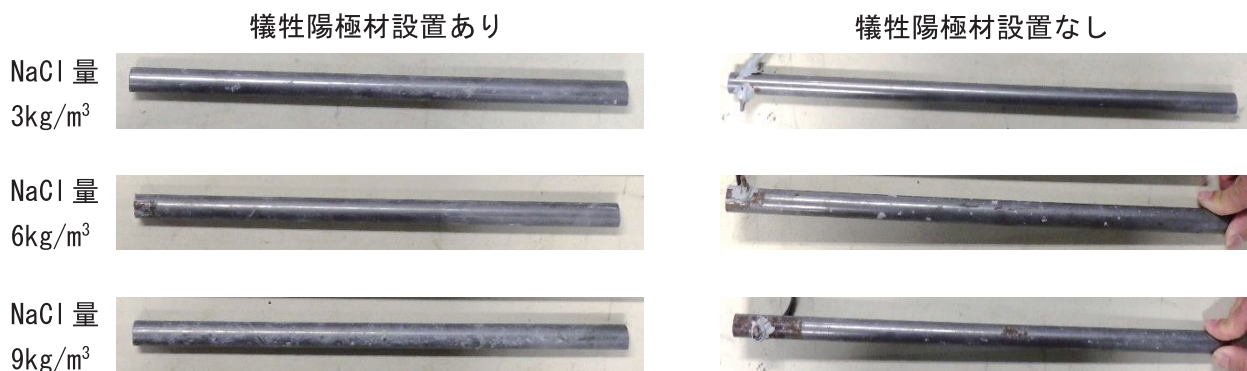
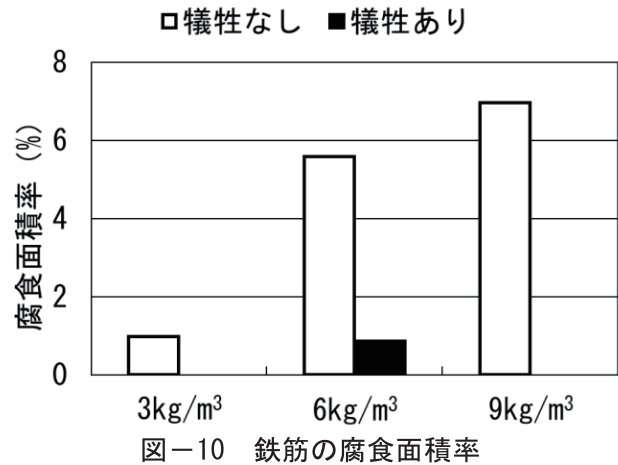


写真-2 鉄筋の腐食状況 (暴露後 110 日)

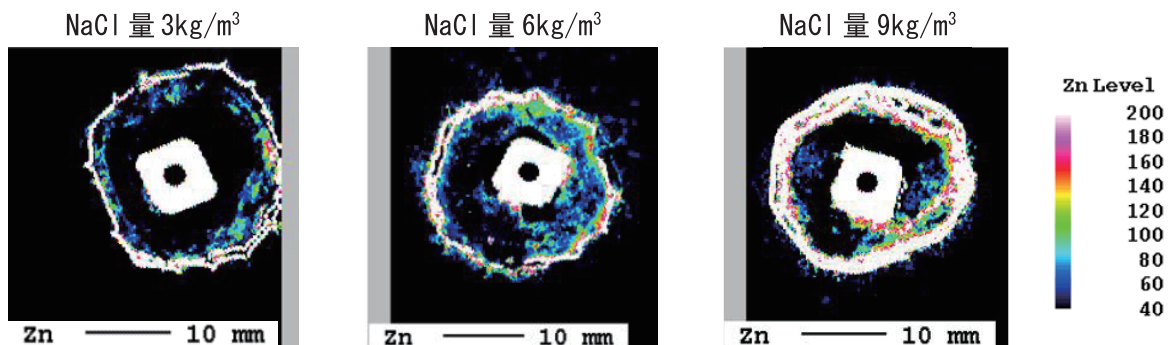


図-11 Zn の分布状況

度を示し、その後増減を繰り返す傾向を示した。

(2) 復極量は、各NaCl量で100mV以上を示し、温度による変動はあるものの、試験期間を通してほぼ安定した値が得られた。

(3) いずれのNaCl量でも、犠牲陽極材を設置した供試体が設置していない供試体と比較して、鉄筋の腐食面積率が小さい傾向を示した。

(4) コンクリート中のNaCl量が増加するほど犠牲陽極材近傍にZnが存在する面積が大きくなる傾向を示した。

測定期間203日までの復極量は各NaCl量で100mV以上を示し、腐食面積率も小さい傾向を示したが、電流密度などの気温による変動が見られた。そのため、暴露環境条件の変化による電気防食工法への適用性を今後検討することが必要だと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），2004.8
- 2) 宮口克一，高谷哲，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の塩化物イオン量を考慮した外部設置犠牲陽極材の鉄筋防食性能，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp.219-224，2017.10
- 3) 渡辺佳彦：鉄筋腐食により劣化した鉄筋コンクリート鉄道構造物における補修工法適用性と維持管理に関する研究，京都大学学位論文，2010.3
- 4) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準，2013.11
- 5) 吉田隆浩：流電陽極法を用いた鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関する研究，京都大学学位論文，2015.3