

# 論文 二層形式犠牲陽極材の消耗特性に関する検討

近藤 拓也\*1・森岡 海星\*2・七澤 章\*3・五十嵐 教馬\*4

**要旨:**異なる塩分量で作製した鉄筋コンクリート中に二層形式犠牲陽極材を用いて、約2年間暴露を行った。その後、供試体を解体し、鉄筋腐食状況および犠牲陽極材の減耗状況について調査を行った。犠牲陽極材の消耗量と暴露期間中に測定した電流量の関係を調査した結果、塩分量が多い供試体では相関関係が確認できた。また、犠牲陽極材の芯材および被覆材ともに防食効果に寄与している可能性を示した。そのため、今回検討した二層形式犠牲陽極材については、定期的に電流測定を行うことで耐用年数を推定できる可能性を示した。

**キーワード:**二層形式犠牲陽極材, 電流密度, 消耗特性, 耐用年数の推定

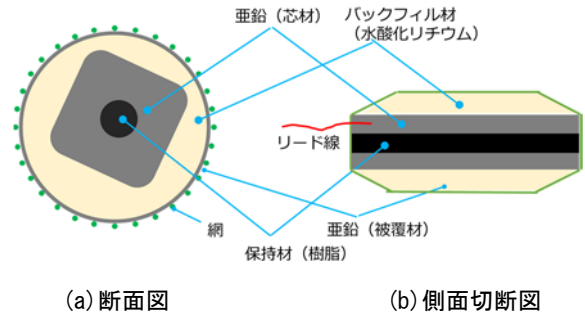
## 1. はじめに

社会資本を形成するコンクリート構造物は、適切に維持管理されることにより、市民の生活や経済活動に貢献する。日本の場合、これら活動域の多くが海岸沿いとなるため、コンクリート構造物は塩害に関する保護が必要となる。これら塩害により鉄筋が腐食したRC構造物では、補修方法として断面修復が多く適用される。この断面修復工法は、工法としてはほぼ確立されているが、費用やマクロセルの発生が課題となるため、これらの解決手段として犠牲陽極工法が併用されることがある。

本工法で使用される犠牲陽極材は、例えば渡辺らが検討しているように<sup>1)</sup>、亜鉛をバックフィル材で包み込む構造のものがある。各種検討が実施されているが、犠牲陽極材1体当たりの体積が小さいため、所定の効果を満足するためには、多くの犠牲陽極材を設置しないといけない課題があった。そのため、この課題を解決するため、**図-1**に示すように、筒状の亜鉛被覆材の中に棒状の亜鉛材（以下「芯材」と呼ぶ）を配置し、空隙部を粒状水酸化リチウムで充填した犠牲陽極材を開発した（以下「二層形式犠牲陽極材」と呼ぶ）。これらの基本性能について森岡らは検討を行ってきた<sup>2)</sup>。

一連の検討において、電流の出力量や防食性能について確認することができた。しかし、同一材料の二層形式であるため、犠牲陽極材内の電流放出メカニズムについては未解明のままであった。また、犠牲陽極材はコンクリート内に埋設して使用されることが多いため、耐用年数の推定方法を確立することは重要であると考えられる。しかし、メカニズムについて不明な点があったため、課題であった。

そのため本検討では、塩分量を3水準設定した鉄筋コ



(a) 断面図 (b) 側面切断図

図-1 犠牲陽極材の断面図

表-1 実験要因および水準

試験要因	水準
コンクリート中のNaCl量	3kg/m <sup>3</sup> , 6kg/m <sup>3</sup> , 9kg/m <sup>3</sup> (3水準)
犠牲陽極材の設置	あり, なし (2水準)

ンクリート供試体中に二層形式犠牲陽極材を埋設し、約1年の室内環境暴露後、約1年の屋外暴露下で供試体を暴露した。この供試体を用いて、EPMA法を用いて亜鉛の消耗状況について確認を行い、犠牲陽極材内の電流放出状況について確認を行った。また、暴露終了後の犠牲陽極材中の芯材を取り出し、芯材減少量と継続的に測定した電流密度の相関について調査した。これにより、検討してきた二層形式犠牲陽極材の寿命推定方法について検討を行ったので報告を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 検討パラメータ

実験要因及び水準を**表-1**に示す。コンクリート内の

\*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 高知工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (学生会員)

\*3 デンカ(株) 青海工場セメント・特混研究部 先任研究員 博士(工学) (正会員)

\*4 デンカ(株) 特殊混和材部 技術課長 (工修) (正会員)

NaCl量は3水準とした。また、防食効果の確認を目的として、犠牲陽極材設置有無の要因を設定した。

## 2.2 犠牲陽極材の概要

今回検討した犠牲陽極材を図-1に示す。犠牲陽極材は亜鉛の表面積を大きくするため表面及び内部に配置しており、モルタルとの付着をよくするため表面に網、そして亜鉛の反応が活性化される状態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ものから構成されている。

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	282	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	169	281	787	1013	9.00

## 2.3 供試体概要

供試体の配合表を表-2から表-4に示す。供試体は各NaCl量に対して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、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は硬質砂岩砕砂、粗骨材は硬質砂岩砕石、混和剤として変性ロジン酸系のAE助剤を使用した。なお、母材コンクリートのNaCl量に応じた防食効果を検討するために、それぞれ3kg/m<sup>3</sup>、6kg/m<sup>3</sup>、9kg/m<sup>3</sup>の食塩を混入した。除塩不足の海砂使用を模擬するため、既往の文献を参考に<sup>4)</sup>細骨材置換を行った。

犠牲陽極材設置あり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ネジ止めしたφ16mmの鉄筋を設置した状態で、図-2中灰色の断面部分にコンクリートの打込みを行った。打込み後脱型せずに、材齢7日まで湿布養生した。

材齢7日で図-2中緑色の断面部分に、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た。その後ポリマー無含有の無収縮モルタル（水材料比15.6%、材料は混和材、混和剤、繊維などを含む）を施工した。それ以降、材齢14日まで室内養生した。鉄筋のビニ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

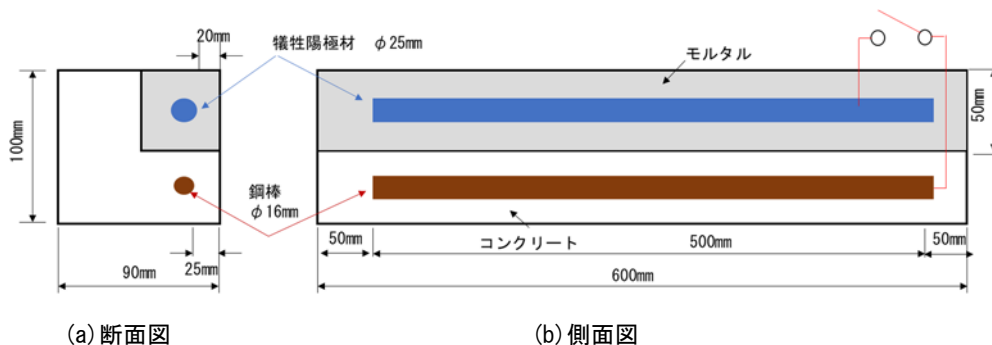


図-2 犠牲陽極材設置あり供試体 概要図

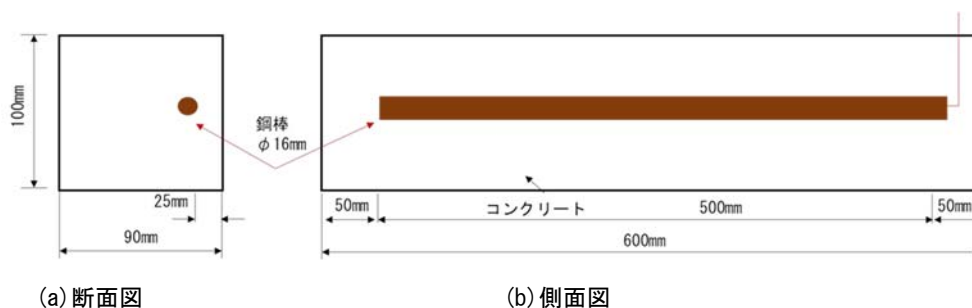


図-3 犠牲陽極材設置なし供試体 概要図

た。

犠牲陽極材設置なし供試体の概要図を図-3に示す。供試体は、端部に穴をあけてビニル平行より線をネジ止めたφ16mmの鉄筋を配置した状態で、コンクリートを打込んだ。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。

犠牲陽極材設置供試体は、材齢14日で回路接続を行った。その後約1年間は、室内環境条件下で存置した。その後約1年間は屋外環境条件下で供試体を暴露した。期間中の平均気温は19.4℃、月間平均降水量は207.9mm/月であった。

## 2.4 測定項目

### (1) 電位および電流測定

暴露期間中、定期的に携帯用無抵抗電流計を用いて電位および電流を測定した。また同時にデジタル温湿度計を用いて温度を測定した。照合電極は銅硫酸銅（CSE）電極を用いた。

### (2) 解体調査

供試体暴露後110日、510日、そして780日後に犠牲陽極材設置供試体を1体ずつ取り出した。その後、端部から100mm離れた位置で供試体を切断した。切断供試体は、犠牲陽極材設置箇所を中心として、JSC-E 574-2013（案）に基づきEPMA法による元素の面分析測定を行った。測定元素はZnとした。

また、暴露後780日の供試体については、鉄筋および犠牲陽極材を取り出した。犠牲陽極材については、被覆材がモルタルとの付着により取り出すことが不可能であったため、芯材のみを取り出した。その後、鉄筋および犠牲陽極材芯材の減少量を測定した。いずれもJCI-SC1法に基づいて、60℃のクエン酸水素2アンモニウム10%水溶液中に約8時間浸漬することで除錆を行った。その後、直径は電子ノギスを用いた直径測定（感量：0.01mm）、およびはかりを用いて質量測定（精度：0.1g）を行った。なお直径測定は5断面を直交する2方向で測定した。ここで直径減少率は鉄筋もしくは芯材の打込み前と除錆後の平均直径の差と打込み前の平均直径の百分率とした。また質量減少率は鉄筋もしくは芯材の打込み前と除錆後の平均質量の差と打込み前の平均質量の百分率とした。

## 3. 測定結果

### 3.1 通電電流密度

各NaCl量における通電電流密度および気温の経時変化を図-4に示す。ここで電流密度は、各NaCl量の電流の平均値を鉄筋1本の表面積で除した値とした。

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。この傾向は、屋外環境下に設置後顕著になった。これはNaCl量6、

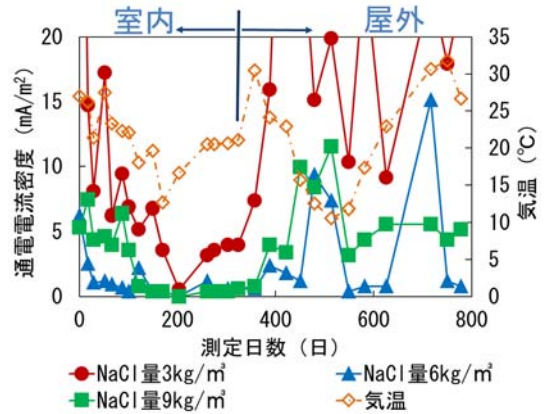


図-4 電流密度および気温の経時変化

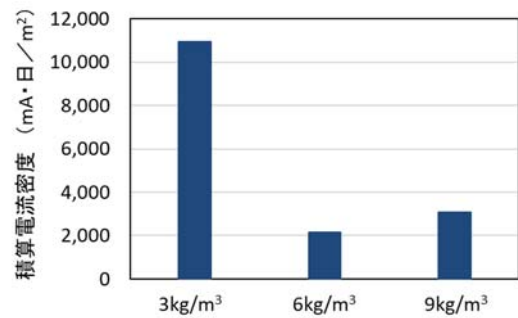


図-5 積算電流密度の比較

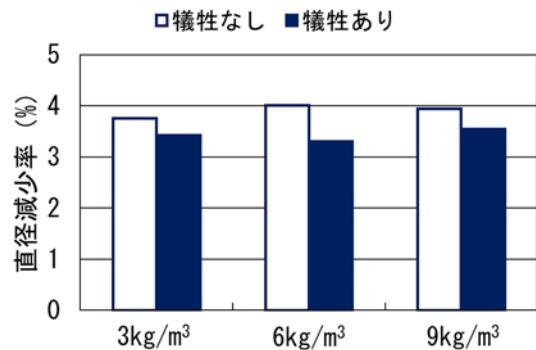


図-6 鉄筋の直径減少率（暴露後780日）

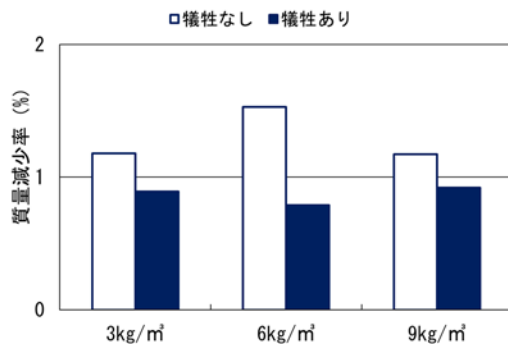


図-7 鉄筋の質量減少率（暴露後780日）

9kg/m<sup>3</sup>と比較してCl<sup>-</sup>量が少ないため、鉄筋腐食が大きく進行しておらず、鉄筋と犠牲陽極材の電位差が大きいことで、電流が安定しなかったと考えられる。一方で、NaCl量 6kg/m<sup>3</sup> および 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Cl<sup>-</sup>量が比較的多く、鉄筋腐食が進行したため、Cl<sup>-</sup>量に対応する防食電流が流れたためと考えられる。

測定開始時（材齢 14 日）から暴露試験終了時（材齢 780 日）までの積算電流密度を図-5に示す。NaCl量3kg/m<sup>3</sup>では、試験期間中、10,000mA・日/m<sup>2</sup>を超える積算電流

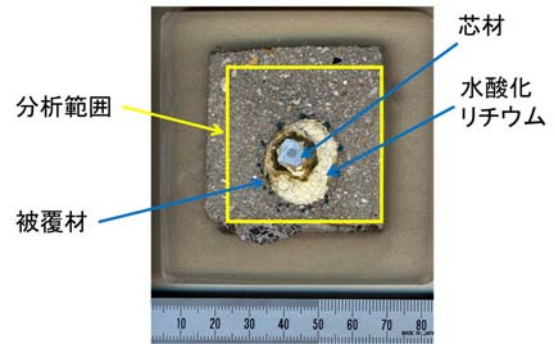


図-8 EPMA 撮影状況（780 日、NaCl 量 9kg/m<sup>3</sup>）

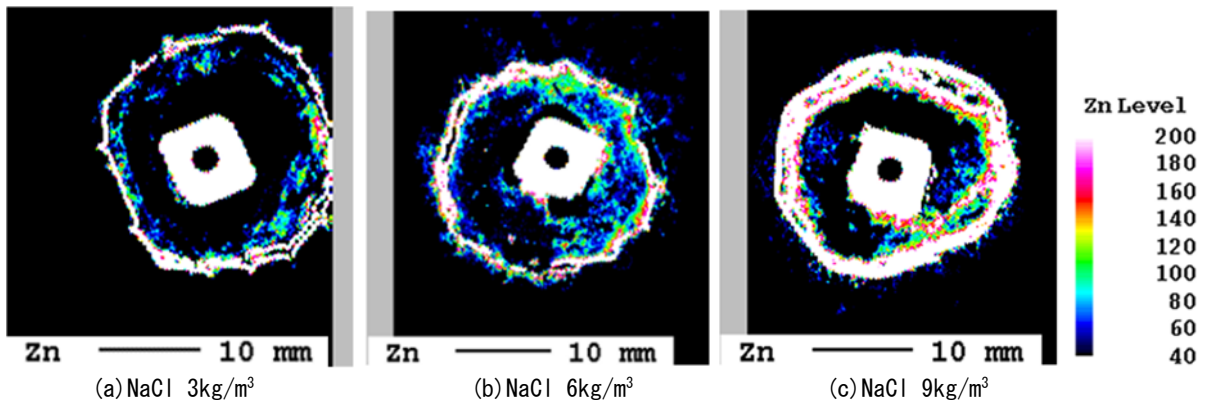


図-9 EPMA による Zn 分布状況（暴露後 110 日解体）

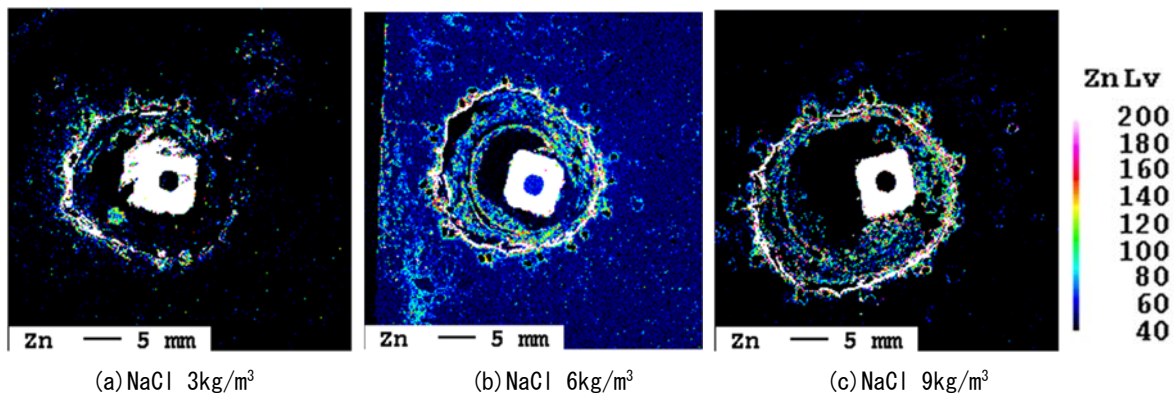


図-10 EPMA による Zn 分布状況（暴露後 510 日解体）

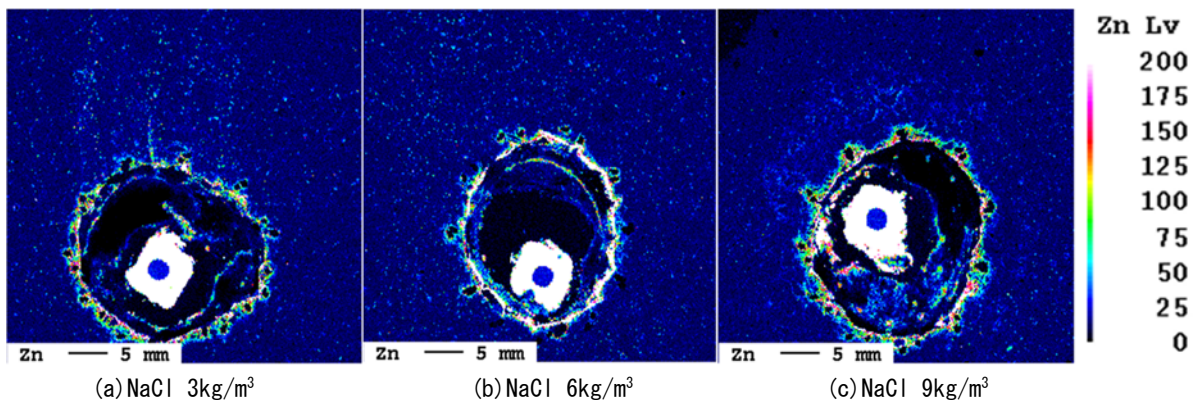


図-11 EPMA による Zn 分布状況（暴露後 780 日解体）

量を記録したことが分かる。

### 3.2 鉄筋腐食量

暴露後 780 日で解体した供試体における鉄筋の直径減少率を図-6、質量減少率を図-7 に示す。図-6 より、いずれの NaCl 量でも、設置あり供試体は設置なし供試体と比較して鉄筋の直径減少率が小さい傾向を示した。また図-7 より、設置あり供試体は設置なし供試体と比較して鉄筋の質量減少率が小さい傾向を示した。そのため、今回の試験の範囲では、犠牲陽極材を設置することによる防食効果が確認できた。

### 3.3 犠牲陽極材からの亜鉛分布状況

暴露後 110 日、510 日および 780 日後の犠牲陽極材を設置した供試体を切断した。EPMA 測定の写真状況および凡例を図-8、Zn マッピング状況を図-9 から図-11 に示す。

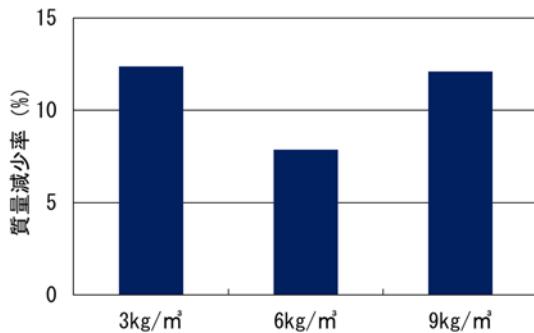


図-12 芯材の質量減少率 (暴露後 780 日)

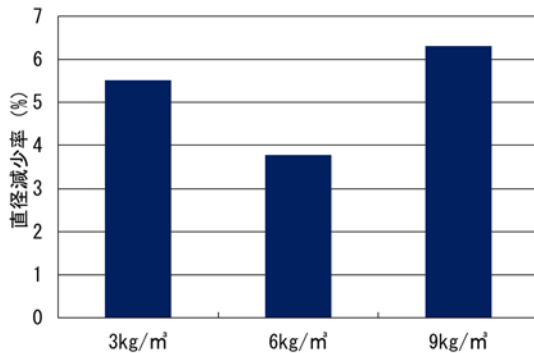


図-13 芯材の直径減少率 (暴露後 780 日)

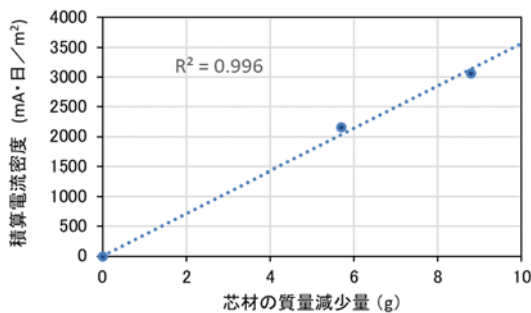


図-14 芯材の質量減少率と積算電流密度の関係

す。

暴露後 110 日では、コンクリート中の NaCl 量の増加とともに、芯材から流出する Zn 量が増加する傾向が確認できる。これは、芯材からの通電確保を目的として、被覆材が目視では確認できないほど小さい孔を無数に有している。この効果が確保できているため、芯材から亜鉛の溶出がしているものと考えられる。しかし、Zn を通せるほどの孔径ではないため、被覆材周辺部の Zn 濃度が大きくなったものと考えられる。

暴露後 780 日では、いずれの NaCl 量においても、被覆材の白色部分の面積が減少している。そのため、被覆材部分の Zn 濃度が減少している状況が確認できる。特に、図-5 において積算電流密度が高い NaCl 量 3kg/m³ および 9kg/m³ では、被覆材の Zn 濃度低下が著しい。また NaCl 量 9kg/m³ では、芯材も原形 (四角形) を留めていない状況が確認できる。これは、積算電流量が多いことから、電子の放出量が多くなり、亜鉛が多く消費されたことが考えられる。また、被覆材の亜鉛の消耗により、被覆材中の孔径も大きくなり、グラウト部分に亜鉛が流出した可能性も考えられる。

これら犠牲陽極材中の亜鉛の減少傾向より、犠牲陽極材の被覆材と芯材ともに防食に対して効果を発揮していることが確認できた。ただし本試験条件では、暴露 780 日以降では、被覆材による犠牲防食効果は低くなることが想定されるため、それ以降の調査が必要であると考えられる。

### 3.4 犠牲陽極材の芯材消耗状況

3.3 で示したように、犠牲陽極材が防食効果を発揮することにより、亜鉛が消耗されることを確認した。そのため、暴露 780 日後の犠牲陽極材から取り出した芯材の消耗状況について検討を行う。なお被覆材については、モルタルとの付着が大きく、正確な採取が困難であった。

犠牲陽極材芯材の質量減少率を図-12 に、直径減少率を図-13 に示す。質量減少率および直径減少率ともに、NaCl 量 6kg/m³ の消耗量が小さくなる傾向を示した。図-5 において積算電流密度が最も大きかったのは NaCl 量 3kg/m³ であるが、消耗量は 3kg/m³ と 9kg/m³ でほぼ同量であった。これは暴露期間中の経時的なオン電位測定で、NaCl 量 3kg/m³ 供試体では-1,000(mV vs CSE)より卑な値を示すことがあった。これは一般的に知られる水素発生電位<sup>5)</sup>となるため、NaCl 量が少ない供試体においても供試体内部にひび割れが発生した可能性がある。そのため、コンクリート中の NaCl 量が少ない条件下での電流発生メカニズムおよびこれに伴う亜鉛流出メカニズムについては、今後詳細に考察を行う必要がある。一方で、防食電流が発生したと考えられる NaCl 量 6kg/m³ 以上のシリーズについては、NaCl 量の増加とともに芯材の消耗が進

んだと考えられる。

### 3.5 犠牲陽極材の寿命予測

図-5 で示した積算電流密度、そして図-12 で示した犠牲陽極材芯材の質量減少率の関係を図-14 に示す。ここで NaCl 量 3kg/m<sup>3</sup> については、電流発生メカニズムが他と異なると考えられるため、データからは除外した。また回帰直線の算定にあたっては、ファラデーの電気分解の法則の従い、新品の状態では質量減少がない前提で行った。犠牲陽極材の消耗速度については、吉田の研究事例では自然対数によりこの2つの関係が得られているが<sup>9)</sup>、今回は3点のみの評価であるため、直線回帰で評価を行った。

得られた回帰直線は、式(1)で表すことができる。

$$y=3.6 \times 10^2 \times x \quad (1)$$

ただし、y：積算電流密度(mA・日/m<sup>2</sup>)、x：芯材減少量(g)とする。

この式を活用して、犠牲陽極材の寿命予測に関するシミュレーションを行った。仮定として、被覆材の減少量は防食効果から除外すること、そして吉田の事例を参考として<sup>9)</sup>、芯材の質量が50%になると寿命に達するとした。その結果、本実験環境下においては、NaCl 量 6kg/m<sup>3</sup> で約 13.7年、9kg/m<sup>3</sup> で8.9年経過すると耐用年数に達することが予測された。ただし、今回の算定結果は被覆材の効果も含んでいるため、被覆材の防食効果を見込むと係数は小さくなることが想定される。またこれ以降、被覆材の消耗がさらに見込まれるため、本式の適用については、さらに暴露等を行うことにより、被覆材の消耗程度を見込む必要がある。

本形式における犠牲陽極材の質量減少速度については、さらにデータを増やすことによって、その傾向を把握する必要があるが、定期的に電流測定を行うことで耐用年数を推定できる可能性を示すことができた。ただし、本推定手法は、コンクリート中の塩分量が比較的大きい箇所での適用となるため、防食電流の発生メカニズムなど、実用化に向けたさらなる検討が必要であると考えられる。また、被覆材の効果が耐用年数に与える影響についても、今後適切に検討を行う必要があると考えられる。

### 4. おわりに

本論文では、塩分量を変化させた鉄筋コンクリート供試体を作製し、二層形式犠牲陽極材を配置した。その後約2年にわたる暴露を行った。暴露期間中での定期的な電流測定、および約780日後に解体を行い、犠牲陽極材の減耗特性について調査を行った。そして、それらから得られた結果を利用して、寿命推定方法の検討を行った。得られた結果を下記に示す。

(1) 測定した電流密度は、コンクリート中の NaCl 量が小

さい場合、安定しない傾向が確認できた。一方で 6kg/m<sup>3</sup> を超える場合、塩分量の増加とともに電流密度が増加する傾向を確認した。

- (2) 約2年間の暴露試験の結果、この二層形式犠牲陽極材による防食性能を確認することができた。
- (3) EPMA法により、犠牲陽極材中の Zn の流出状況を経時的に確認した。Zn は犠牲陽極材の芯材および被覆材ともに消耗していることを確認した。
- (4) 暴露780日における芯材の減少量は、積算電流密度と必ずしも比例する傾向とはならなかった。
- (5) 防食電流が正常に流れていると判断した供試体を選び、積算電流量と芯材減少量の関係を調べた。また、これに基づき本環境条件における耐用年数について算定した。

### 謝辞

本研究は、高知工業高等専門学校卒業生 野町佑聖氏(現：植田機工(株))に多大な協力をいただいた。また測定に関しては、高知工業高等専門学校 横井克則教授に協力をいただいた。また試験立案および実施に関してはデンカ(株)松久保博敬氏に協力いただいた。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 渡辺佳彦, 神尾守人, 山本賢司, 山本貴士, 宮川豊章: 塩害劣化 RC 部材に対する犠牲陽極材を用いた部分断面修復工法の適用性, 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.9, pp.331-336, 2009.10
- 2) 森岡海星, 近藤拓也, 松久保博敬, 五十嵐数馬: 改良した犠牲陽極材の予防保全対策としての適用検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1503-1508, 2018.7
- 3) 森岡海星, 近藤拓也, 松久保博敬, 五十嵐数馬: 腐食した RC 部材への犠牲陽極工法適用による防食効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1631-1636, 2019.7
- 4) 荒巻智: 中性化と内的塩害を受けた鉄筋コンクリート鉄道構造物の鉄筋腐食に関する研究, 京都大学学位論文, 2006.3
- 5) 石井浩司, 関博, 福出勤, 井川一弘, 杉橋直行: PC 鋼材の水素脆化に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.131-140, 1996.2
- 6) 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, 2015.4