

# バックフィル材が犠牲陽極材の性能に与える影響とその作用メカニズムの解明

維持管理工学研究室 池田光

## 1. 研究背景と目的

犠牲陽極材は、コンクリート中の鋼材に電氣的に接続するという簡易な施工のみで防食電流を鋼材に供給でき、かつ、長期間鋼材腐食を抑制できる。さらに、継続的なメンテナンスやモニタリング等の維持管理が不要なため、近年注目されている。一般にコンクリート構造物には犠牲陽極として亜鉛が用いられるが、防食性能の向上には、亜鉛の酸化反応を活発な状態に維持することが求められる。亜鉛の酸化反応には水と酸素が必要である。また、亜鉛の酸化反応性は pH に依存する<sup>1)</sup>。そのため、犠牲陽極材は亜鉛をバックフィル材で覆う構造となっており、バックフィル材を高水分率、高アルカリ性に維持することが重要である。さらに、亜鉛表面における亜鉛酸化物の析出やそれに伴う堆積は新たな酸化反応を阻害するため、犠牲陽極材の長寿命化にはそれらの抑制が不可欠であるが、それにはバックフィル材が大きく寄与すると考えられている<sup>2)</sup>。

そこで、本研究では、異なるバックフィル材を用いた3種類の犠牲陽極材ならびにバックフィル材を用いない犠牲陽極材を使用した屋外曝露試験を実施し、バックフィル材が犠牲陽極材の防食効果に及ぼす影響、およびバックフィル材が犠牲陽極材の性能向上に寄与する作用メカニズムを明らかにすることを目的とした。

## 2. 犠牲陽極材の防食効果の比較

### 2.1 実験概要

岐阜大学構内の屋外に供試体を曝露し実験を行った。作製した供試体のコンクリートの W/C は 60% で、塩分 (Cl<sup>-</sup>) 濃度は対セメント比で 0.8%, 1.5%, 2.0% である。

供試体中の鋼材には異なる 4 種類の犠牲陽極材

(表 1) のいずれかが結束されている。鋼材に接続したリード線と犠牲陽極材から伸びるリード線をワンタッチコネクタで接続することで通電を行った。供試体は、各塩分濃度と犠牲陽極材の組み合わせに対して同一の供試体を各 6 体ずつ、合計で 72 体作製した。

電気防食は約 2 週間を 1 サイクルとし、13 日間通電し、その後 24 時間は通電を遮断し、遮断直前の防食電流を計測した。

全サイクル終了後 (屋外曝露試験開始から約 2 年 4 か月経過後) に、供試体を破壊し、供試体内部の鋼材の腐食状況を目視で観察した。

表 1 犠牲陽極材の概要

犠牲陽極材	亜鉛量	バックフィル材
A	60g	水酸化リチウム
B	100g	臭化リチウム 硝酸リチウム
C	60g	硫酸塩
D (A の亜鉛コア)	60g	なし

### 2.2 防食電流密度の経時変化

塩分濃度 2.0% における犠牲陽極材別の防食電流密度の経時変化を図 1 に示す。

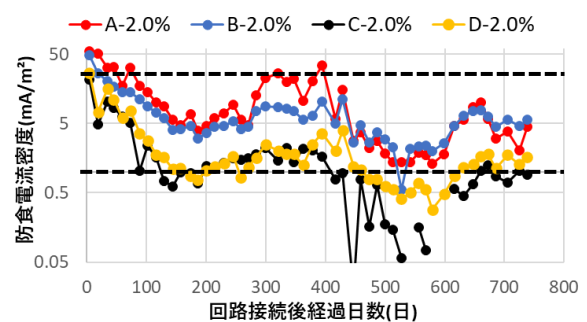


図 1 防食電流密度の経時変化



A-2.0



A-2.0



B-2.0



B-2.0



C-2.0



C-2.0



D-2.0



D-2.0

写真1 鋼材の腐食状況（犠牲陽極材設置側）

写真2 鋼材の腐食状況（かぶり側）

一般的に大気中に存在するひび割れが生じていないコンクリート構造物に対して、防食効果が得られる防食電流密度が鋼材表面積あたりで $1\sim 30\text{mA/m}^2$ とされている<sup>3)</sup>ため、これを防食基準として防食効果を判断した。なお、図1中の黒点線はこの範囲を示したものである。

AとBの防食電流密度は $1\sim 30\text{mA/m}^2$ の範囲内にあり、鋼材の腐食に対して有効な防食電流を供給できていると考えられる。一方、CとDの防食電流密度は、ほとんど基準値を下回り、鋼材に対して十分な防食電流を供給することができていないといえる。これらのことから、防食電流は、バックフィル材を用いた犠牲陽極材の方が大きく、バックフィル材が犠牲陽極材における防食電

流の安定供給に寄与していると考えられる。また、バックフィル材の種類も防食電流の供給に影響を及ぼすと考えられる。

### 2.3 鋼材の腐食状況

塩分濃度2.0%における全サイクル終了後の鋼材の腐食状況を写真1、写真2に示す。

Aのほとんどの鋼材は腐食が確認されたが、全く腐食が発生していない鋼材も見られた。Bの鋼材のみ、犠牲陽極材の設置位置に近接する箇所に厚みのある顕著な腐食が見られた（写真1、写真2中の丸で囲まれた範囲）。これはBのバックフィル材に用いられる臭化リチウムが酸化剤で、鋼材（鉄筋）に対しても腐食性を有する<sup>3)</sup>ことが原因だと考えられる。CとDの鋼材は、AとBの鋼材

よりも腐食の程度は大きく、鋼材が全面腐食していた。

### 3. バックフィル材による性能向上効果

#### 3.1 実験概要

屋外曝露試験で使用した犠牲陽極材 A, B, C のバックフィル材について、未使用状態、および全サイクル終了後における pH 測定を行った。また、全サイクル終了後の犠牲陽極材 A, B, C, D の断面を観察し、犠牲陽極材中の亜鉛酸化物の堆積状態を確認した。

バックフィル材の pH は、宮口<sup>1)</sup>の方法を参考に測定した。亜鉛を覆っていたバックフィル材をすり鉢で粉碎し、水道水と粉末状のバックフィル材を質量比 2:1 で混合した後、20°C の室内に 24 時間静置した。静置後、上澄み部分を pH 試験紙にて測定した。測定は表 2 に示す 5 条件で行い、各条件 3 回ずつ pH 試験紙を上澄み液に浸して測定を行った。

犠牲陽極材の断面観察は、A-2.0%、B-2.0%、C-2.0%、D-2.0% の 4 条件の供試体を各 2 体ずつ、犠牲陽極材の設置位置で、軸直角方向にコンクリートカッターを用いて厚さ 30mm になるように切断し、犠牲陽極材の断面を観察した。

表 2 pH 測定を行った犠牲陽極材

犠牲陽極材	条件 No.	状態
A	A <sub>1</sub>	未使用
	A <sub>2</sub>	全サイクル終了後
B	B <sub>1</sub>	未使用
	B <sub>2</sub>	全サイクル終了後
C	C <sub>2</sub>	全サイクル終了後

#### 3.2 バックフィル材の pH の測定結果

pH の測定結果を表 3 に示す。なお、pH は 3 回の測定の平均値を示している。

A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> の pH は 14 を示した。このことから、犠牲陽極材 A のバックフィル材は強アルカリ性であり、さらに、使用開始から約 2 年 4 か月経過した後においても、強アルカリ性が維持されることが確認された。B<sub>1</sub> の pH は 14、B<sub>2</sub> の pH は 9 を示

表 3 pH の測定結果

条件 No.	pH
A <sub>1</sub>	14
A <sub>2</sub>	14
B <sub>1</sub>	14
B <sub>2</sub>	9
C <sub>2</sub>	9.3

した。このことから、犠牲陽極材 B は、使用の進行に伴いバックフィル材の pH が低下する傾向があるといえる。C<sub>2</sub> の pH は 9.3 を示し、全サイクル終了後の pH は弱アルカリ性であることが示された。

犠牲陽極材の亜鉛コアは、pH>13 の強アルカリ性水溶液中では、腐食反応は抑制されることなく継続するが、pH7~12 の微アルカリ水溶液中では、水酸化物被膜が形成され、後続の腐食反応が抑制される<sup>2)</sup>と考えられている。そのため、犠牲陽極材 B, C は継続的な使用により、亜鉛の腐食反応が抑制され、防食電流の供給が減少し、防食効果が低下する可能性があることが示唆された。

#### 3.3 犠牲陽極材の断面の目視観察

全サイクル終了後の犠牲陽極材 A, B, C, D の断面を写真 3 に示す。

犠牲陽極材 A のバックフィル材は多孔質であることが確認された。これにより、亜鉛酸化物の生成時に生じる体積膨張の影響を緩和し、さらに亜鉛酸化物がバックフィル材中を容易に移動することを可能としている。また、亜鉛コア近傍のバックフィル材は茶色に変色し、亜鉛コア表面には白色生成物が堆積していた。犠牲陽極材 B のバックフィル材も多孔質であることが確認されたが、その程度は A と比較して小さかった。また、亜鉛コア周辺に顕著な白色生成物の堆積が確認された。これは亜鉛酸化物であると考えられるが、亜鉛酸化物は高アルカリ環境下で溶解すると報告されている<sup>2)</sup>。しかし、B のバックフィル材はアルカリ性が低下していたことから、亜鉛酸化物を十分に溶解することができず、その結果、亜鉛表面に顕著に堆積したと考えられる。さらに、バ



犠牲陽極材 A



犠牲陽極材 B



犠牲陽極材 C



犠牲陽極材 D

写真3 犠牲陽極材の断面

ックフィル材にはひび割れが生じていたが、これは、生成物の堆積に伴う体積膨張によって発生したものと考えられる。これらのことから、Bのバックフィル材は、アルカリ性の低下により生成物を十分に溶解することができず、その結果、生成物が亜鉛表面に堆積し、犠牲陽極材にひび割れが発生することが明らかとなった。犠牲陽極材Cのバックフィル材にはひび割れが生じており、亜鉛コアの周りを十分に覆うことができていなかった。これが、防食電流の供給量がA、Bと比べて

小さかったことの一因として考えられる。また、Cの周囲のコンクリートは、Cを覆うように円形に湿っていた。このことから、Cのバックフィル材は高い保水性を有すると考えられる。犠牲陽極材Dでは、亜鉛コア周辺に白色生成物が堆積していた。

#### 4. まとめ

本研究では、バックフィル材が犠牲陽極材の性能に与える影響とその作用メカニズムを検討するために実験を行った。実験の結果から得られた代表的な知見を以下に示す。

- (1) バックフィル材は、犠牲陽極材における防食電流の安定供給に貢献し、バックフィル材の使用により犠牲陽極材の防食性能は向上する。
- (2) バックフィル材の種類の違いは、犠牲陽極材の防食効果、および防食特性に影響を及ぼす。これが生じる要因は、バックフィル材の pH (アルカリ性) が大きく関わると考えられる。
- (3) 防食電流の供給が大きかった犠牲陽極材 A と B の鋼材は、防食電流の供給が小さかった C と D の鋼材と比較して、腐食の進行は軽微であった。しかし、犠牲陽極材 B を設置した部分に隣接する鋼材の表面には顕著な腐食が認められた。このことから、臭化リチウムなどの鉄筋に対しても腐食性を有する可能性のあるバックフィル材を用いる場合には、その適用に十分な注意を要することが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 宮口克一, 塩素固定化材を用いた断面修復材と犠牲陽極材を併用した断面修復工法の鉄筋防食性能に関する研究, 九州大学博士論文, 2015
- 2) Sergi, G., Seneviratne, G.: Improved Design Considerations for Steel Reinforcement Corrosion Control with Galvanic Anodes Following Performance Evaluation from Analysis of Site Data, Structural Faults & Repair 2022. Edinburgh. 2022. 6
- 3) 香田真生, RC 構造物に適用する犠牲陽極方式電気防食の性能および防食評価に関する研究, 九州大学博士論文, 2017