

流電陽極方式による鉄筋の防食技術の開発

技術本部
大阪支店

技術部
土木技術部（九州支店駐在）

青山敏幸
香田真生

概要：塩害対策工法として流電陽極方式による防食技術に着目し、陽極材料として亜鉛の周辺に、亜硝酸リチウム水溶液を混入したセメント材料により被覆したものをコンクリート内部に設置することで、鉄筋を防食する技術を開発している。本検討では、環境条件、亜硝酸リチウムの添加量、および防食対象となる鉄筋の量などをパラメータとして防食効果を確認するための試験を実施した。その結果、陽極被覆材への亜硝酸リチウムの減少によって防食効果が低下する傾向にあること、および開発した陽極材料は約430日経過後も防食効果を維持していることが確認された。

Key Words：塩害，防食，流電陽極方式，亜硝酸リチウム

1. はじめに

電気防食工法は、外部電源方式と流電陽極方式に大別される。日本では、外部電源方式による電気防食工法が多く採用されているが、海洋構造物の干満帯のようにコンクリートの乾燥と湿潤が繰り返される環境下では防食基準がなく、通電量の調整が難しいといった課題がある。また、凍結防止剤を散布するような環境下では、桁端部などにおいて部分的な塩害が発生することがあるが、防食対象面積が小さい場合でも直流電源装置が必要となるため、外部電源方式では防食対象面積あたりのコストが高くなるといった課題がある。

そこで、上記のような部位における塩害対策工法として流電陽極方式による防食技術を開発している。流電陽極方式は、防食対象の鉄筋よりもイオン化傾向の高い金属を陽極材料として使用するため、電源装置が不要であり、電流量の調整が不要となることから、干満帯部や桁端部等の特殊な環境においては、外部電源方式に比べてコストを低減しつつ、鉄筋の防食が可能になると考えている。

これまでの実験¹⁾から、陽極材料として亜鉛の周辺を、亜硝酸リチウム（以下 LiNO_2 と称す）水溶液を混入したセメント材料により被覆することで亜鉛が活性化することを確認しているが、暴露環境や LiNO_2 添加量が防食効果に及ぼす影響については明確になっていない。また、1箇所²⁾の陽極材が防食できる鉄筋の量や陽極材の配置方法が防食効果に及ぼす影響についても明らかになっていないことから、環境条件、 LiNO_2 の添加量および鉄筋の量（本数）をパラメータとして、防食効果を確認するための試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 環境条件・ LiNO_2 に対する防食効果の確認試験

試験体の形状・寸法を図-1に示す。試験体は $100\text{mm} \times 150\text{mm} \times 200\text{mm}$ の直方体とし、 $\phi 13\text{mm}$ のあらかじめ腐食させたみがき丸鋼（SGD290）を1本埋設した。防食亜鉛を配置するスペースとして、 $\phi 40\text{mm}$



青山敏幸



香田真生

の孔を設けた。コンクリートは、一般的な鉄筋コンクリート構造を想定した W/C が 65% のコンクリートを使用し、コンクリートには塩化物イオンを 5kg/m^3 添加した。

試験要因を表-1 に示す。試験要因は、環境条件と陽極被覆材に添加する亜硝酸リチウム水溶液の添加量とした。環境条件は、水中(水道水)に浸漬する湿潤環境、および相対湿度 60～80% の気中環境の 2 通りとした。また、 LiNO_2 の混入量は、被覆材の選定試験における混入量と同量(基準)、その 75% および 50% の 3 種類とした。なお被覆材の単位水量および単位粉体量は全ての試験体で同一とし、 LiNO_2 の添加量のみを変えた。

防食亜鉛を設置して 7 日後から、亜鉛と鉄筋の通電を開始した。亜鉛と鉄筋間に流れる電流量、通電中の亜鉛と鉄筋の電位、接続を一時的に停止した直後の電位(以降、インスタントオフ電位)および自然電位を測定した。なお、自然電位は接続を停止して 4 時間が経過した時点での電位とし、インスタントオフ電位との差を復極量とした。また亜鉛および鉄筋の電位計測では、可搬式の飽和カロメル照合電極を用いた。なお、コンクリート構造物の電気防食工法では、一般的に復極量が 100mV 以上であれば防食効果があると言われている。

2.2 複数本の鉄筋に対する防食効果の確認試験

試験体の形状・寸法を図-2 に示す。試験体は $310\text{mm} \times 210\text{mm} \times 200\text{mm}$ の直方体とし、 $\phi 13\text{mm}$ のみがき丸鋼(SGD290)を 8 本埋設した。コンクリートは、プレストレストコンクリート構造を想定し、W/C を 42% とし、コンクリートには塩化物イオンを 5kg/m^3 添加した。

防食亜鉛を設置するスペースとして $\phi 40\text{mm}$ の孔を削孔し、 $\phi 10\text{mm}$ の防食亜鉛を 2 本もしくは 4 本配置した後、亜硝酸リチウムを添加した被覆材を充填した。環境条件は、亜鉛と鉄筋の通電開始から 305 日までは相対湿度 50～60% の気中環境とし、それ以降は水中への部分浸せきと湿らせた布により相対湿度 90～95% の湿潤環境とした。

防食亜鉛の設置位置および設置本数による影響を確認するため、試験要因は表-2 および図-3 に示す条件とし、防食亜鉛を試験体の中央(No.1)、上側(No.2) および下側(No.3) の 3 通りに設置した。なお、No.3' は、No.3 の防食亜鉛を 4 本としたものである。No.1～3 の 2 本の亜鉛は、独立した状態とし、それぞれの亜鉛を Zn-1 および Zn-2 として記号で区別した。No.3' も同様に、4 本の亜鉛は独立した状態とし、それぞれを Zn-1, Zn-2, Zn-3 および Zn-4 として区別した。一方、鉄筋は上側を C1, C2, 下側を C3～C8 とし、記号で区別した。

防食亜鉛を設置して 12 日後から、亜鉛と鉄筋の通電を開始した。測定項目は、 $100 \times 150 \times 200\text{mm}$ の試験体と同一とした。

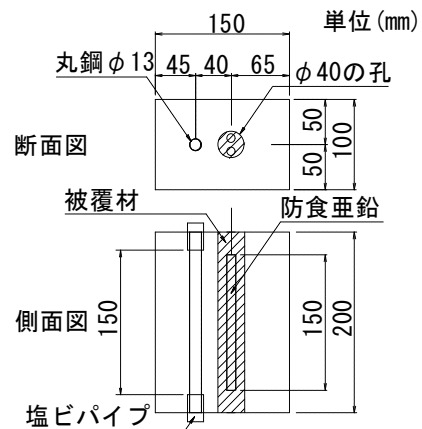


図-1 試験体の形状・寸法

表-1 試験要因

環境条件	LiNO_2 の混入比率	試験体名	試験体数
水中	1.00(基準)	水中-B -1.00	1
	0.75	水中-B -0.75	1
	0.50	水中-B -0.50	1
気中	1.00(基準)	気中-B -1.00	1
	0.75	気中-B -0.75	1
	0.50	気中-B -0.50	1

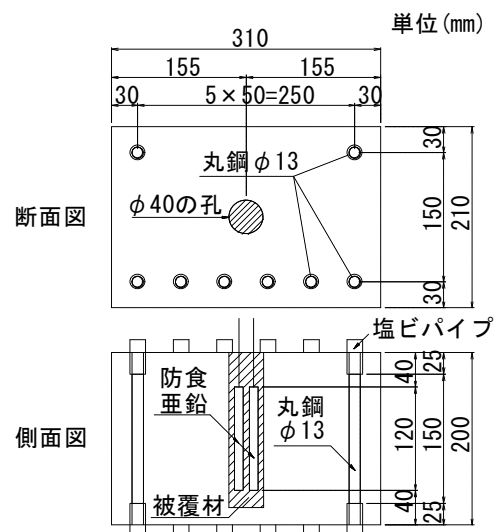


図-2 試験体の形状・寸法

3. 実験結果と考察

3.1 環境条件・ LiNO_2 に対する防食効果の確認試験

亜鉛と鉄筋の接続から約 200 日間の測定結果を報告する。亜鉛と鉄筋間の発生電流量の経時変化を図-4 に示す。亜硝酸リチウムを基準量に対して 50%まで減少させた場合、もしくは水中に浸漬した場合、発生電流量が小さくなる傾向が確認された。

亜鉛および鉄筋のインスタントオフ電位と接続を停止してから 4 時間後電位の経時変化をそれぞれ図-5 および図-6 に示す。なお、図中の E_{io} はインスタントオフ電位を、 E_{of4} は通電を停止してから 4 時間後の電位を示す。亜鉛および鉄筋のインスタントオフ電位は、亜硝酸リチウムの添加量を減少させると、電位がプラス側の値を示す傾向が確認された。一方、水中に浸漬した方がマイナス側の電位を示す傾向が確認され、水分によってコンクリートの抵抗が小さくなったことおよび水中環境のため酸素の供給量が少なくなったことが影響していると考えられる。亜鉛および鉄筋の接続を停止してから 4 時間後の電位は、水中に浸漬した場合のばらつきが大きく、特に鉄筋においてばらつきが大きい。水中においては 4 時間では十分に復極していないと考えられ、接続を停止してから時間の経過とともに、亜鉛はマイナス側に、鉄筋はプラス側に電位がシフトしていくと考えられる。

3.2 複数本の鉄筋に対する防食効果の確認試験

亜鉛と鉄筋の接続から約 430 日間の測定結果を報告する。亜鉛と鉄筋間の発生電流量と外気温の経時変化を図-7 に示す。防食亜鉛を 2 本配置した試験体 (No.1, 2, 3) の発生電流量に大きな差はなかった。一方、4 本配置した No.3' は No.1~3 と比較して、通電開始から約半年間は大きな発生電流量であったが、それ以降においては両者に大きな差は認められなかった。また、すべての試験体で時間の経過に伴って発生電流量は減少したが、湿潤環境への変化によって増加傾向となり、さらに外気温の上昇に伴って No.1~3 の電流量は増加することが確認された。No.2 のみは時期によってはばらつきが生じているものの、2 本および 4 本のそれぞれの防食亜鉛から概ね均等に電流が発生していることが確認された。電流密度は、亜鉛と鉄筋間の発生電流量を陽極表面積および鉄筋表面積あたりの電流密度に換算したものである。亜鉛と鉄筋の電流密度の経時変化を図-8 に示す。

防食亜鉛を 4 本配置した No.3' は No.1~3 と比較して、陽極表面積あたりの電流密度は小さい一方で、

表-2 試験要因

	試験体 No.			
	No.1	No.2	No.3	No.3'
a (mm)	105	67.5	142.5	142.5
b (mm)	105	142.5	67.5	67.5
防食亜鉛	2 本			4 本
試験体数	1	1	1	1

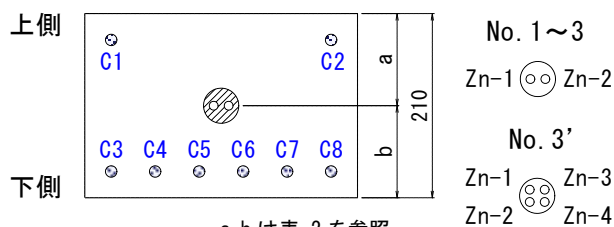


図-3 防食亜鉛の設置位置および記号

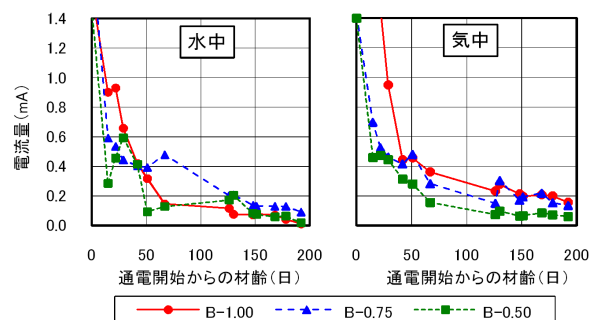


図-4 発生電流量の経時変化

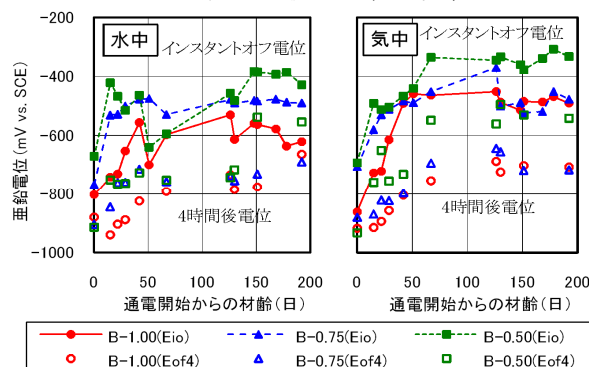


図-5 亜鉛のインスタントオフ電位と通電停止から 4 時間後電位の経時変化

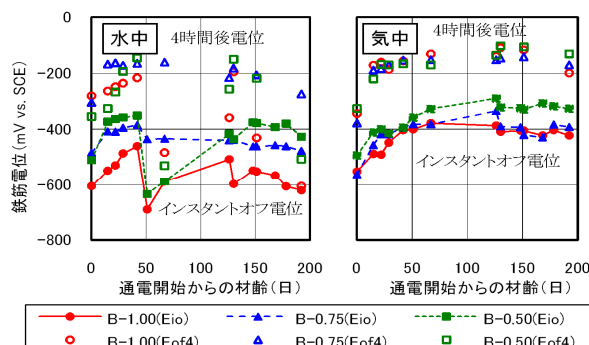


図-6 鉄筋のインスタントオフ電位と通電停止から 4 時間後電位の経時変化

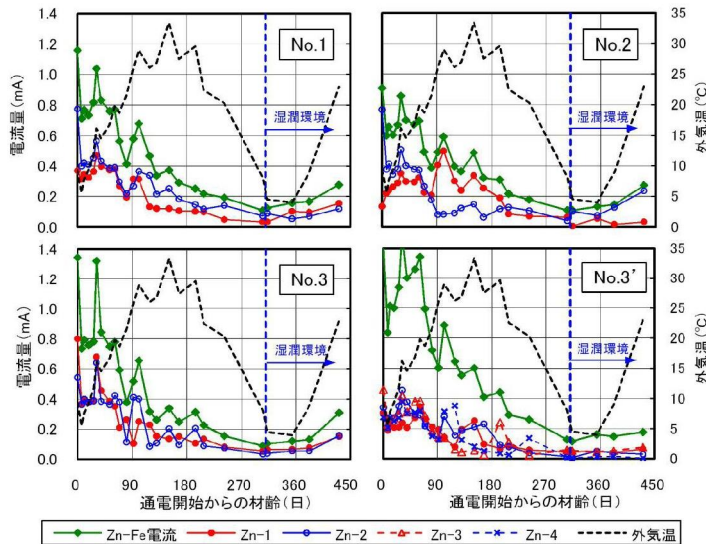


図-7 発生電流量と外気温の経時変化

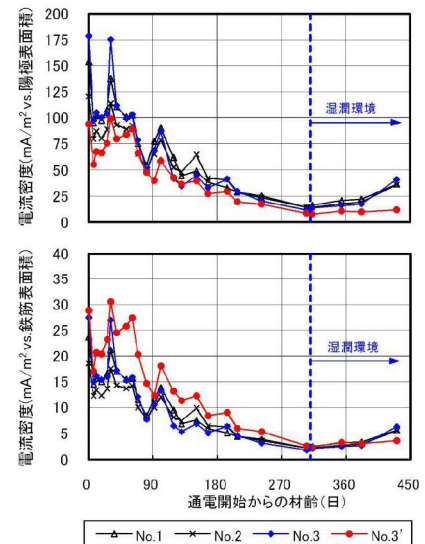


図-8 電流密度の経時変化

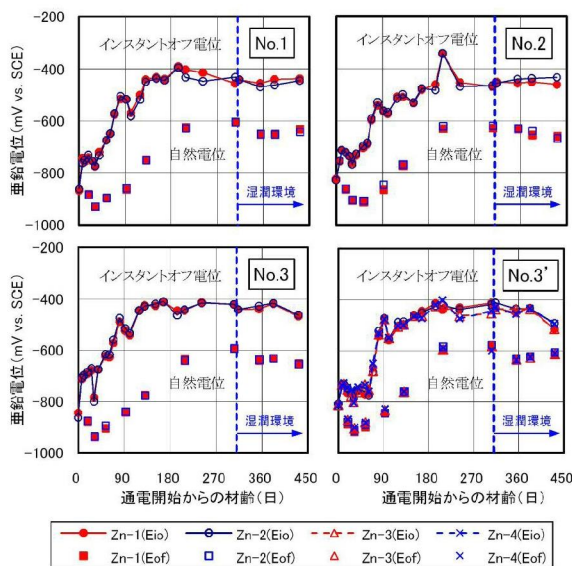


図-9 亜鉛のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化

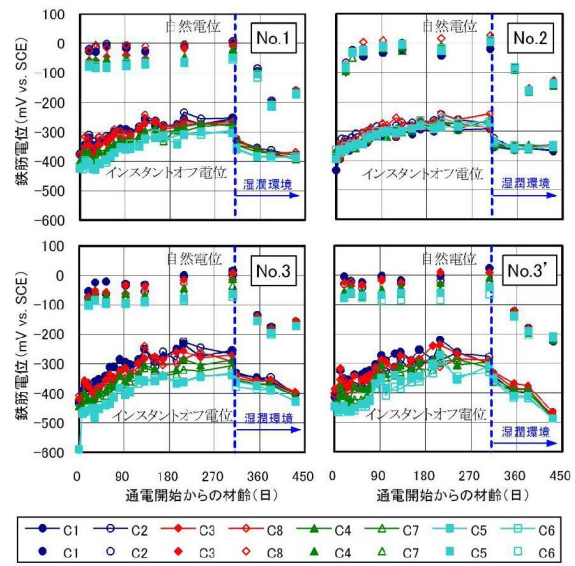


図-10 鉄筋のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化

鉄筋表面積あたりの電流密度は大きいですが、時間の経過に伴ってその差は小さくなり、防食亜鉛の本数の違いが電流密度へ与える影響は小さくなる傾向にあった。

亜鉛のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化を図-9に示す。亜鉛の自然電位の変化が小さいほど、陽極の性能変化も小さいと考えられる。今回の実験では、亜鉛の自然電位は約100日までは-800~-900mVの値を示したが、通電開始から200日経過後には全ての試験体で約-600mVまでプラス側に変化した。しかし、その後は電位の変化は小さいことから、陽極としての機能は保持しているものと考えられる。

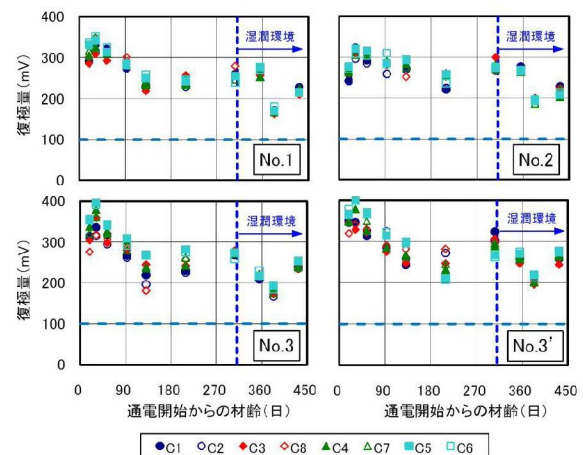


図-11 鉄筋の復極量の経時変化

各鉄筋のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化を図-10 に示す。すべての試験体でインスタントオフ電位は時間の経過に伴ってプラス側に変化していく傾向であったが、湿潤環境へ変更して以降、100～150mV マイナス側に变化した。湿潤環境となったことで酸素の供給量が少なくなったことが影響していると考えられる。また、湿潤環境へ変更して以降、コンクリートの比抵抗が小さくなり、鉄筋間の防食効果が均等になる傾向があった。

鉄筋の復極量の経時変化を図-11 に示す。すべての試験体で鉄筋 8 本それぞれの復極量に大きな差は生じないことが確認された。また、湿潤環境へ変更したことによって、亜鉛と鉄筋の電位差が小さくなることで復極量は減少する傾向となったが、全ての試験体で 100mV 以上であり、本方式による防食効果が確認された。

4. まとめ

本実験の範囲で確認された事項を以下にまとめる。

- 1) 陽極被覆材への亜硝酸リチウムの混入量を変化させた結果、混入量の減少によって防食効果が低下することが確認された。
- 2) 亜鉛の自然電位は、通電開始から 200 日程度までプラス側に变化したものの、その後の電位の変化は小さいことから、陽極としての機能は保持しているものと考えられる。
- 3) 陽極の配置方法、環境条件によらず鉄筋の復極量は 100mV 以上であり、本方式による防食効果が確認された。

なお現在は、RC 栈橋を模擬した試験体を用いて防食効果の確認試験を実施している。

謝辞

本実験は、九州大学濱田研究室との共同研究の成果の一部をとりまとめたものである。本実験の遂行にあたりご指導とご協力をいただきました関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 香田真生，青山敏幸，山本大介，濱田秀則：流電陽極方式における陽極被覆材が防食効果へ与える影響に関する実験的検討，プレストレストコンクリート工学会 第 23 回シンポジウム報告集，pp.623-626, 2014 年 10 月
- 2) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）2001 年 11 月