論文　流電陽極方式における陽極被覆材および乾湿条件が防食効果に与える影響に関する実験的検討

香田　真生[*1]・青山　敏幸[*2]・山本　大介[*3]・濵田　秀則[*4]

要旨：電気防食工法のひとつである流電陽極方式において，陽極材の被覆条件および乾湿条件の違いが防食効果に与える影響に着目し，陽極被覆材の選定実験，および選定した被覆条件における複数本の鉄筋に対する防食効果の確認実験を行った。陽極被覆材に亜硝酸リチウムを混入することによって，陽極材が活性化することが確認され，また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。また，水分が供給される環境では亜鉛および鉄筋の電位が卑化するがことが確認された。さらに，本実験の範囲では，選定した陽極被覆材を用いることで，約 300 日間の測定より，複数本の鉄筋に対して十分な防食効果が確認された。

キーワード：流電陽極方式，防食亜鉛，陽極被覆材，亜硝酸リチウム，乾湿条件

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が，コンクリート構造物への適用では一般に，外部電源方式は大規模な防食に対しての適用性が高く，流電陽極方式は小規模な防食に対する適用性が高いといえる。また，流電陽極方式は，防食対象の鋼材よりもイオン化傾向の高い金属を犠牲陽極材として使用し，両者間の電位差を利用して防食電流を流す方式である。本実験は，流電陽極方式における，陽極材の被覆条件および乾湿条件の違いが防食効果に与える影響に着目し，陽極被覆材の選定実験，および選定した被覆条件における複数本の鉄筋に対する防食効果の確認実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験の目的と概要

本実験では，犠牲陽極材には棒状φ10mm の防食亜鉛を用い，陽極材の被覆材（以降，被覆材）は，市販のプレミックス材をベースに亜硝酸リチウムを混入するなどの配合とした。被覆材の違いが防食効果に与える影響について確認することを目的とし，1 本の鉄筋をコンクリートに埋設した被覆材の選定試験（試験体 1）を行い，また，亜硝酸リチウムの混入量および乾湿の環境条件が防食効果に与える影響に関する確認試験（試験体 2）を行った。さらに，選定した被覆材を使用した複数本の鉄筋に対する防食効果の確認実験（試験体 3）を行った。

一方，試験体 1 と 2 は，一般的な鉄筋コンクリート構造を想定した W/C=65%のコンクリートを使用し，試験体 3 はプレストレストコンクリート構造を想定した W/C=42%のコンクリートを使用した。

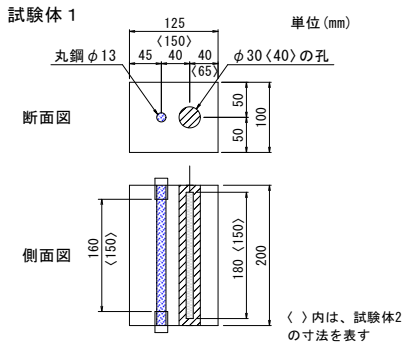
2.2 測定項目と測定方法

防食亜鉛を設置してから，試験体 1 は翌日，試験体 2 は 7 日後および試験体 3 は 12 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，および短絡を切断した直後の電位（以降，インスタントオフ電位）を測定した。また，短絡切断後 24 時間が経過した時点での電位を自然電位として測定し，インスタントオフ電位との差を求めることで，復極量を算定した。なお，亜鉛および鉄筋の電位計測は，可搬式の照合電極を用いた。

3. 被覆材の選定試験（試験体 1）

3.1 試験体

試験体の詳細は**図－1** に示すが，125mm×100mm×200mm の角柱とし，φ13mm のみがき丸鋼もしくは予め腐食させた丸鋼を 1 本埋設した。丸鋼の外観を**写真－1** に示す。防食亜鉛を配置するスペースとしてφ30mm の孔を空けた。使用したコンクリートの配合を**表－1** に示す。打設後，温度 20℃の室内で 14 日間の湿布養生を行



図－1　試験体

*1 (株)ピーエス三菱　九州支店 土木技術部　(正会員)
*2 (株)ピーエス三菱　技術本部　博士(工学)　(正会員)
*3 九州大学大学院　工学研究院 社会基盤部門　修士(理学)　(正会員)
*4 九州大学大学院　工学研究院 社会基盤部門教授　博士(工学)　(正会員)

い，養生終了後にφ30mm の孔にφ10mm の防食亜鉛を 1 本設置し，各種の被覆材を充填した。また，環境条件は，2 日水中，5 日気中の乾湿繰り返しのサイクルとした。

3.2 陽極材の被覆条件

試験要因は**表－2** に示す条件とし，塩分添加の有無，鉄筋腐食の有無および被覆材の種類を試験要因として 14 体のコンクリート試験体を作製した。

被覆条件は A ，B ，C ，D の 4 通りであり，それぞれの配合を**表－3** および**表－4** に示す。条件 A ，B は各種のセメントモルタルを使用して，それぞれ 40%亜硝酸リチウム水溶液を練混ぜ水として用いた。条件 C は普通ポルトランドセメントを用いたモルタルであり，条件 D は被覆材を用いず，防食亜鉛を直接コンクリートの試験体に埋設したものである。

写真－1　丸鋼の外観（上段：腐食なし，下段：腐食あり）

3.3 実験結果

亜鉛と鉄筋の短絡から約 1 年間の測定結果を報告する。なお，同一条件で試験体数が 2 つあるものは，それぞれの測定結果の平均値とした。

亜鉛と鉄筋間の発生電流量の経時変化を**図－2** に示す。条件 A ，B ともに約 30 日をピークとして時間経過に伴い発生電流量が減少し，約 60 日までは条件 A よりも条件 B の方が発生電流量は大きな傾向であったが，それ以降は両者に大きな差は生じない結果となった。一方，条件 C ，D の発生電流量は 0.01～6.0μA と小さな値であり，被覆条件として普通ポルトランドセメントを用いたモルタルの場合，または直接コンクリートの試験体に埋設した場合，防食亜鉛からの発生電流量は著しく小さくなることが確認された。

防食亜鉛の自然電位の経時変化を**図－3** に示す。条件 A ，B は試験の開始段階では-800～-1000mV の卑な値で

表－1　試験体 1 のコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤 (kg/m³)	
		W	C	S	G	Cl	AE 減水剤	AE 剤
65	47.6	172	265	851	1015	0 or 5	0.829	0.0156

表－2　試験要因の一覧

塩化物イオン (kg/m³)	鉄筋腐食	被覆材の種類	試験体名	試験体数
0	なし	A	0-A	2
		B	0-B	2
5		A	5-A	2
		B	5-B	2
		C	5-C	1
		D	5-D	1
	あり (Y)	A	5-Y-A	2
		B	5-Y-B	2

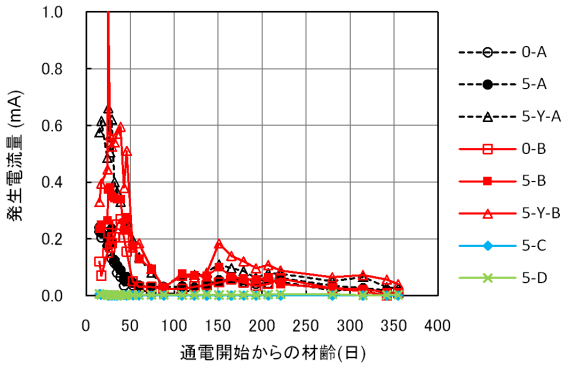
表－3　条件 A ，B の被覆材配合

条件	粉体 (P)	W/P(%)	備　考
A	プレミックス材 A	26	断面修復材系
B	プレミックス材 B	73	注入材系

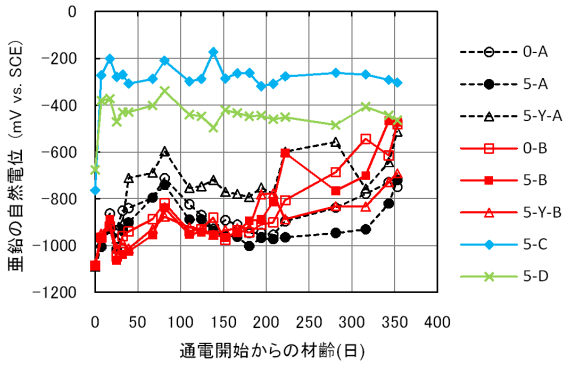
表－4　条件 C の被覆材配合

条件	粉体	W/C (%)	単位量(kg/m³)		
			W	C	S
C	OPC	65	287	442	1326

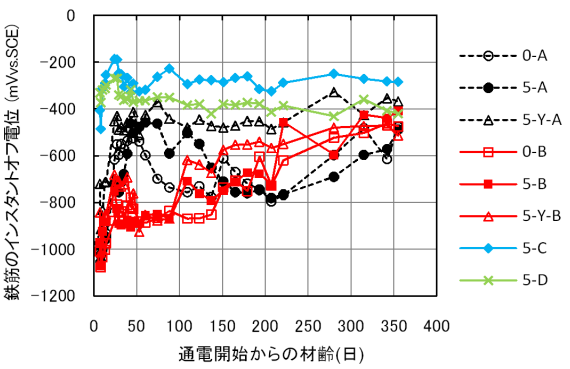
OPC：普通ポルトランドセメント



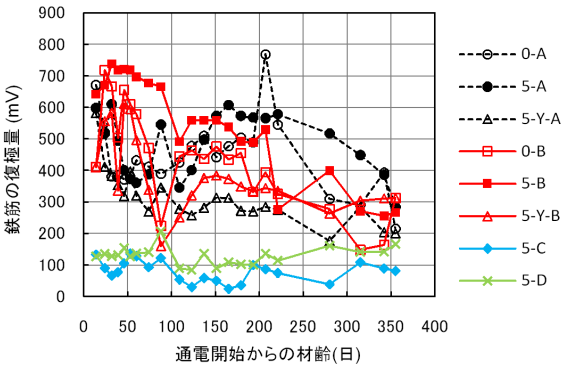
図－2　発生電流量の経時変化



図－3　亜鉛の自然電位の経時変化



図－4　鉄筋のインスタントオフ電位の経時変化



図－5　鉄筋の復極量の経時変化

あったが，約 1 年間で 300～500mV 貴化した。一方，条件 C ，D は大きな変動なく貴な値を示した。

鉄筋のインスタントオフ電位の経時変化を**図－4** に示す。条件 C ，D に対して，条件 A ，B はインスタントオフ電位が卑な値を示しているが，時間経過に伴って貴化している。約 150 日までは条件 A と比較して，条件 B の方が緩やかな貴化であったが，約 1 年間で両者ともに試験開始から 500～600mV 貴化した。また，塩分添加の有無については，内在塩分による影響が一定の傾向としては確認されなかったが，鉄筋腐食の有無に着目すると，鉄筋が腐食している方が貴な電位を示す傾向となることが確認された。

鉄筋の復極量の経時変化を**図－5** に示す。防食基準のひとつとして，100mV 以上の復極量を満足する必要があると規定[1] されている。条件 A ，B は鉄筋が腐食している方が復極量は小さくなる傾向であったが，すべての条件で 100mV 以上の復極量を満足することが確認された。一方，条件 C ，D は，鉄筋のインスタントオフ電位および防食亜鉛の自然電位が貴な値を示し，また復極量が 100mV 以上を維持できていないことから，十分な防食効果を期待できない結果であった。

3.4 被覆材の選定

被覆条件の違いが防食亜鉛の活性化および鉄筋の防食効果に影響があることが分かり，条件 A ，B は防食効果を期待できることが確認された[2]。一方，条件 A ，B の防食効果に有意な差は確認されなかったが，被覆材の充填性を勘案し，高い流動性を有する条件 B を被覆材として選定した。

4. 防食効果への影響要因の確認試験（試験体 2）

4.1 試験体

被覆材として条件 B を選定したが，亜硝酸リチウム（$LiNO_2$）の混入量および乾湿の環境条件が，防食効果に与える影響があると考えられたため，これらの影響に関する確認試験を行った。試験体は，形状およびコンクリートの配合は試験体 1 と概ね同じ条件として，コンクリートには塩化物イオンを 5kg/m^3 添加し，φ13mm の予め腐食させた丸鋼を 1 本埋設した。試験体には防食亜鉛を配置するスペースとしてφ40mm の孔を削孔した。養生終了後にφ40mm の孔にφ10mm の防食亜鉛を 2 本設置し，以下に示す被覆材を充填した。

4.2 試験要因

試験要因は**表－5** に示す条件とし，6 体のコンクリート試験体を作製した。環境条件は，水中（水道水）に浸漬する条件，および相対湿度 60～80%の気中環境に暴露する条件の 2 通りとした。また，試験体 1 において選定した被覆材に使用した 40%水溶液中の亜硝酸リチウム量を基準（100%）とし，水量（W）および粉体量（P）を一定のもと，亜硝酸リチウムの混入量は基準に加え，75%および 50%の 3 通りとした。

表－5　試験要因の一覧

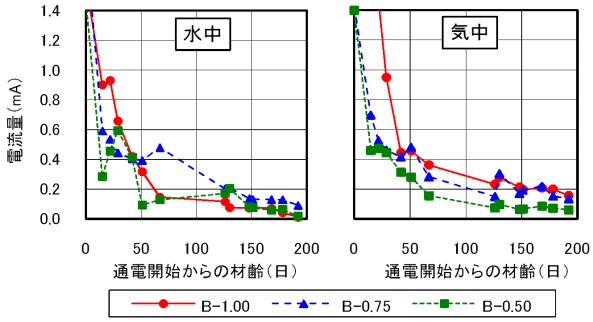
被覆材の種類	環境条件	$LiNO_2$ の混入比率	試験体名	試験体数
B	水中	1.00（基準）	水中-B -1.00	1
		0.75	水中-B -0.75	1
		0.50	水中-B -0.50	1
	気中	1.00（基準）	気中-B -1.00	1
		0.75	気中-B -0.75	1
		0.50	気中-B -0.50	1

4.3 実験結果

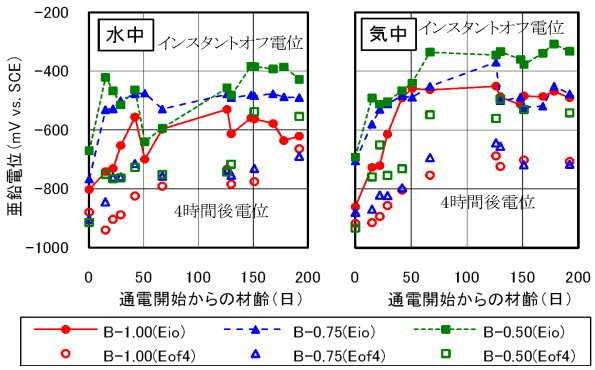
亜鉛と鉄筋の短絡から約 200 日間の測定結果を報告する。亜鉛と鉄筋間の発生電流量の経時変化を**図－6** に示す。亜硝酸リチウムを基準量に対して 50%まで減少させた場合，もしくは水中に浸漬した場合，発生電流量が小さくなる傾向が確認された。

亜鉛および鉄筋のインスタントオフ電位と短絡切断から 4 時間後電位の経時変化をそれぞれ**図－7** および**図－8** に示す。亜鉛および鉄筋のインスタントオフ電位は，亜硝酸リチウムの混入量を減少させると，電位が貴な値を示す傾向が確認された。一方，水中に浸漬した方が卑

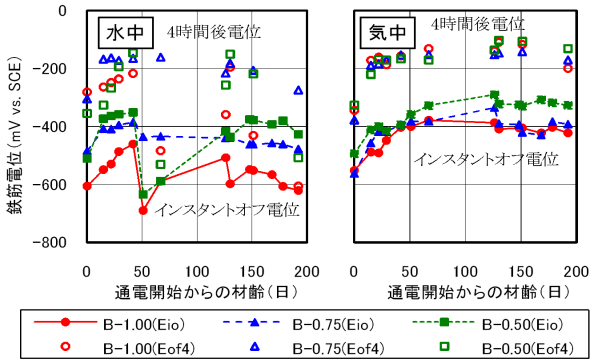
な電位を示す傾向が確認され，水分によってコンクリートの抵抗が小さくなったことおよび水中環境のため酸素の供給量が少ないことが影響している[3]と考えられる。亜鉛および鉄筋の短絡切断から 4 時間後電位は，水中に浸漬した条件はばらつきがあり，特に鉄筋のばらつきが大きい。水中においては 4 時間では十分に復極していないと考えられ，短絡切断から時間経過とともに，亜鉛は卑側に，鉄筋は貴側にシフトしていくと考えられる。



図－6　発生電流量の経時変化



図－7　亜鉛のインスタントオフ電位と
短絡切断から 4 時間後電位の経時変化



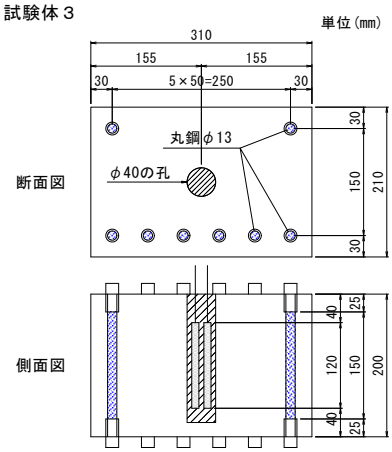
図－8　鉄筋のインスタントオフ電位と
短絡切断から 4 時間後電位の経時変化

亜硝酸リチウムを基準量に対して 50%まで減少させると，発生電流量が減少し，また亜鉛および鉄筋の電位が貴化しており，防食効果が低下することが確認された。亜鉛の活性化は，亜硝酸リチウムの混入によって pH 値が大きくなった影響があると考えられ[4]，混入量が防食効果に影響したと考えられる。

5. 複数本の鉄筋に対する防食効果（試験体 3）

5.1 試験体

試験体の詳細は**図－9** に示すが，310mm×210mm×200mm の角柱とし，φ13mm のみがき丸鋼を 8 本埋設した。使用したコンクリートの配合を**表－6** に示す。試験体の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φ40mm の孔を削孔し，φ10mm の防食亜鉛を 2 本もしくは 4 本配置した後，条件 B（亜硝酸リチウムは基準量）の被覆材を充填した。環境条件は，相対湿度 50～70%の気中環境に暴露する条件とした。



図－9　試験体

5.2 試験要因

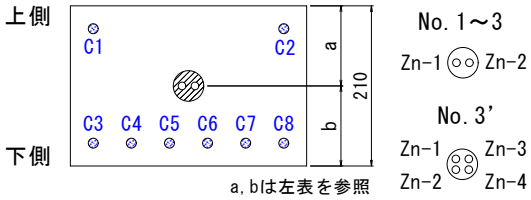
防食亜鉛の設置位置および設置本数による影響を確認するため，試験要因は**表－7** および**図－10** に示す条件とし，防食亜鉛を試験体の中央（No.1），上側（No.2）および下側（No.3）の 3 通りに設置した。なお，No.3’は，No.3 の防食亜鉛を 4 本としたものである。No.1～3 は 2 本の亜鉛同士を短絡していない状態でのそれぞれの亜鉛を Zn-1 および Zn-2，No.3’も同様に，4 本のそれぞれの亜鉛を Zn-1，Zn-2，Zn-3 および Zn-4 の記号で区別し，鉄筋は上側を C1，C2，下側を C3～C8 の記号で区別した。

表－6　試験体 3 のコンクリート配合

W/C	s/a	単位量(kg/m^3)					混和剤(kg/m^3)	
(%)	(%)	W	C	S	G	Cl	高性能減水剤	AE 剤
42	44.1	165	393	751	972	5	2.75	0.11

表－7　試験要因の一覧

試験体 3	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－10　防食亜鉛の設置位置および記号

5.3 実験結果

亜鉛と鉄筋の短絡から約300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－11**に示す。防食亜鉛を2本配置した試験体(No.1，2，3)の発生電流量に有意な差はなく，4本配置したNo.3’はNo.1～3と比べて大きな発生電流量ではあるものの，すべての試験体で時間経過に伴って発生電流量は減少した。また，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流出していることが確認された。

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結果を**図－12**に示す。電流密度の比率はNo.3’をNo.1～3の平均値で除した値を示す。防食亜鉛を4本配置したNo.3’は，2本配置のNo.1～3に対して，陽極表面積あたりでは0.60～0.90の比率となり，鉄筋表面積あたりでは1.25～1.75の比率となった。発生電流量は防食亜鉛の本数による影響はあるものの，本数に比例する程の影響がないことが分かった。

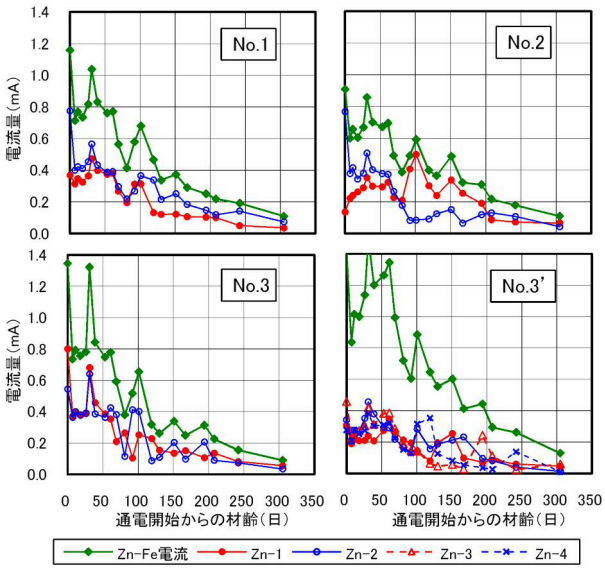
亜鉛のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化を**図－13**に示す。亜鉛の自然電位は，約100日までは-800～-900mVの卑な値を示したが，すべての試験体において時間経過に伴って約-600mVまで貴化した。

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－14** に示す。すべての試験体でインスタントオフ電位が自然電位に対して卑な値を示す一方で，時間経過に伴って貴化している。また，防食亜鉛を下側に配置した No.3 および No.3’は，防食亜鉛と近い位置にある C5，C6 の鉄筋電位がその他の鉄筋と比較して卑な値となっているが，各鉄筋の電位に大きな差は生じていない。

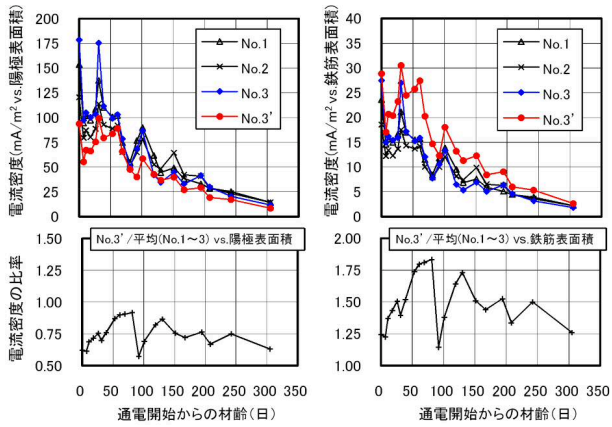
鉄筋の復極量の経時変化を**図－15** に示す。すべての試験体で鉄筋 8 本それぞれの復極量に大きな差は生じておらず，また，すべての試験体で 100mV 以上の復極量を満足することが確認された。

以上より，すべての試験体において，時間経過に伴って，発生電流量は減少し，亜鉛の自然電位および鉄筋のインスタントオフ電位は貴化した。一方，鉄筋の復極量はすべての試験体で大きな差は生じておらず，本実験の範囲では，防食亜鉛の配置位置および配置本数が鉄筋の電位に与える影響は小さい結果であった。

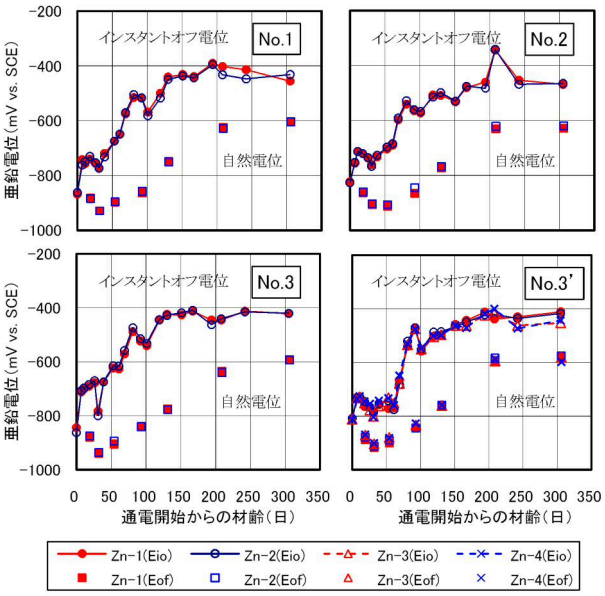
一方，試験体 1 の 5-B と試験体 3 は，被覆材の種類，塩化物イオン濃度および鉄筋腐食なしは共通であるが，試験体寸法，コンクリート強度，防食亜鉛と鉄筋の本数および乾湿条件は異なる。条件は異なるが，両者共に発生電流量は時間経過に伴って大幅に減少していく一方で，亜鉛の自然電位は通電初期の約-900mV に対して 300～500mV の緩やかな貴化で留まった。犠牲陽極材の発生電流量は個々の陽極材によって異なり，鋼材の腐食状態の影響を受けない[5] との報告もあるが，防食亜鉛の発生電流量および自然電位は，本実験での条件の差異による影響は長期的には小さいと推測される。一方，鉄筋に対する防食効果は，鉄筋の腐食度や配置量，塩化物イオンの濃度分布およびコンクリートの強度や含水率による影響があると考えられるため，今後の検討が必要である。



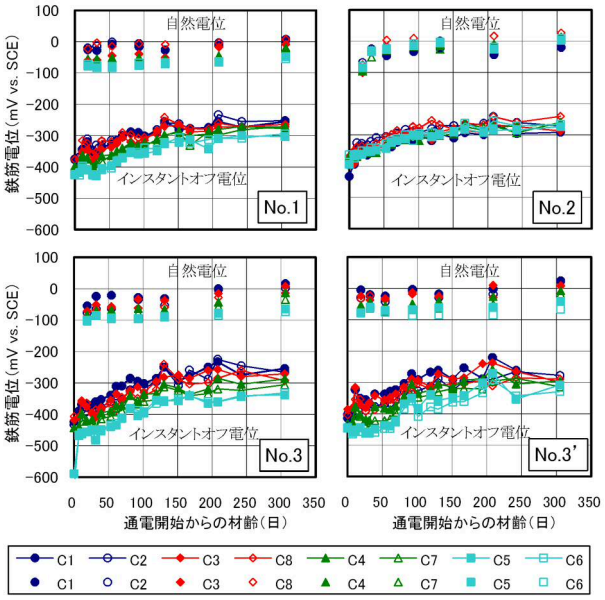
図－11　発生電流量の経時変化



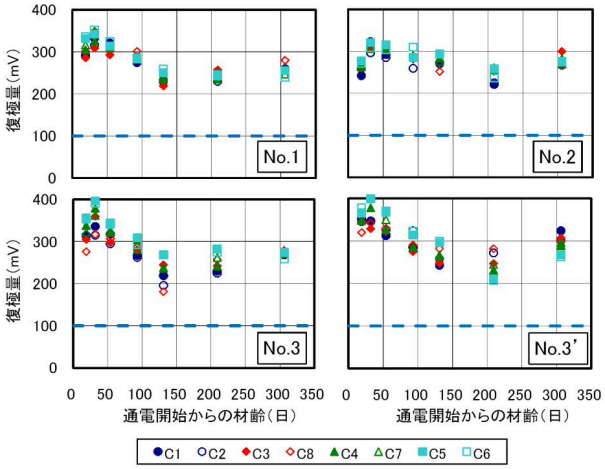
図－12　電流密度の経時変化



図－13　亜鉛のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化



図－14　鉄筋のインスタントオフ電位と自然電位の経時変化



図－15　鉄筋の復極量の経時変化

6. まとめ

本実験により，確認された事項を以下にまとめる。

(1)被覆条件の違いが防食亜鉛の活性化および鉄筋の防食効果に影響があることが分かり，断面補修材系および注入材系のセメントモルタルを使用して，それぞれに 40%亜硝酸リチウム水溶液を練混ぜ水として用いた被覆条件Aおよび被覆条件Bの有効性が確認された。

(2)陽極被覆材への亜硝酸リチウムの混入量を変動させた結果，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。

(3)水分が供給される水中および乾湿繰り返しの環境では，気中環境と比較して，亜鉛および鉄筋の電位は卑化する傾向となった。

(4)本実験の範囲では，防食亜鉛の配置位置が±40mm 程度の違いがある場合でも，またその本数が 2 本と 4 本の違いがある場合でも，鉄筋電位に与える影響は小さく，8 本埋設したすべての鉄筋で十分な防食効果が確認された。

謝辞

本実験の遂行にあたり，九州大学の修士 2 年薬師寺輝氏および学士 4 年大橋宜紘氏ならびに共同研究者の(株)美和テック上西裕樹氏にご協力をいただきました。ここに，関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 土木学会：コンクリートライブラリー107　電気化学的防食工法　設計施工指針(案)，2001

2) 香田真生，青山敏幸，山本大介，濵田秀則：流電陽極方式における陽極被覆材が防食効果に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 回シンポジウム論文集，pp.623-626，2014.10

3) 岡本理沙，山本誠，本田和也，福手勤：干満帯環境下における鉄筋コンクリートの電位制御および防食管理に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，2012

4) 青山實伸，平野誠志，宮里心一：塩害損傷を受けたコンクリート構造物の効率的補修法の考案，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，2008

5) 横田優，松場新吾，中川祐之：犠牲陽極材の防食性能に関する基礎的研究，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，pp.521-522