

# 論文 電気防食工法における電流分布性状と分極性状の評価

佐藤唯\*1・鹿島篤志\*2・皆川浩\*3・久田真\*4

**要旨：**電気防食における防食電流の分布は防食効果に大きな影響を及ぼすが、防食電流の分布を実寸大の供試体において定量的に評価した事例は少ない。本研究では、港湾栈橋の梁を模擬した RC 供試体を使用し、鉄筋と陽極の分極特性、それらから流入・流出する防食電流の分布、および、防食効果の関係を把握することを目的として実験を行った。その結果、防食効果を特定のモニタリング箇所の分極量で評価する場合、モニタリング箇所で得られる鉄筋の分極特性が陽極の配置に関わらず同等であったとしても、各鉄筋の流入電流量や各陽極の流出電流量の分布は必ずしも一致しないことが、あらためて確認された。

**キーワード：**電気防食, 防食効果, 電流分布, 分極特性, 実寸大供試体

## 1. はじめに

電気防食工法とは、コンクリート表面に設置したアノード電極からカソードとなる内部鋼材へ微小な直流電流を流し、鋼材の電位を強制的に卑化させることで防食する工法である。その防食メカニズムより、他の塩害対策工法と比較して、対策が恒久的に可能であること、どのような腐食状況においても適用可能であることなどの利点から社会基盤の長期安全性、維持管理が重要視される今日では需要が高まってきている。さらに 2001 年には、土木学会から「電気化学的防食工法設計・施工指針」<sup>1)</sup>が発刊され、本工法の施工実績も増加している。

電気防食工法の要求性能は、設定された防食期間において、所定の防食電位の変化量または絶対値を満足するように、適切な量の防食電流を適切な分布で供給し続ける事である<sup>2)</sup>。すなわち電位変化量、防食電流およびその分布を設計段階で予測する事が望ましい。しかし、必要とされる防食電流は鉄筋の腐食程度、塩化物イオン濃度、含水状態、および、配筋や陽極の配置などにより異なる<sup>3)4)</sup>ため、実際には高精度で予測することは難しい。

その一方で、FEM などによる数値解析モデルが開発され、電位変化量、防食電流およびその分布の予測技術は進歩している<sup>5) 6)</sup>。これら解析モデルでは、鉄筋のカソード分極抵抗、陽極のアノード分極抵抗およびコンクリートの比抵抗などを入力パラメータとし、鉄筋へ流入する電流量および陽極から流出する電流量をアウトプットすることで、電位変化量を予測している。

既往の研究<sup>7)</sup>によると、コンクリートの形状や鋼材および陽極材の配置などの幾何学的条件と構造物の環境や電流密度に応じた鋼材および陽極の分極特性を設定することで、数値解析により鋼材電位や陽極材電流密度が推

定できると述べられている。これら電位や電流密度は電気防食の運用における防食効果を確認する上では重要なファクターの一つであり、数値解析によりアウトプットされた電流量から予測している。

しかし、実際の電流分布などを、実寸大スケールの供試体を使用して検討した例は未だ少なく、解析モデルの信頼性を確保するためにはさらなるデータの蓄積が必要とされている。本研究では、鉄筋および陽極から流入・流出する電流量の分布および分極特性と防食効果の関係を実験的に把握することを目的とし、異なる形状の陽極材を設置した実寸大の供試体を使用して分極試験を実施し、陽極材の配置を変化させることで鉄筋および陽極から流入・流出する電流の分布を測定した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の概要

#### (1) 使用材料と配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。結合材は普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3300 cm<sup>2</sup>/g）、細骨材は茨城県産砂（表乾密度 2.60 g/cm<sup>3</sup>）と栃木県産砕砂（表乾密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>）の混合砂、粗骨材は茨城県産砕石（表乾密度 2.65 g/cm<sup>3</sup>）栃木県産石灰砕石（表乾密度 2.70 g/cm<sup>3</sup>）の混合砕石を使用した。

#### (2) 供試体の形状と寸法

供試体は大井コンテナ埠頭<sup>8)</sup>における栈橋の梁部を模擬しており、図-1 に形状と寸法を示す。供試体寸法は 800×950×1100 mm とし、供試体上部 200 mm 部分のコンクリートには塩化物イオン量で 10 kg/m<sup>3</sup> となるように、練り混ぜ水に NaCl を混入させて打設した。主筋および帯鉄筋はそれぞれ D29, D16 の無垢な状態の異形鉄筋を

\*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 住友大阪セメント(株) 建材事業部 (非会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教 博(工) (正会員)

\*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)

使用しており、これらの鉄筋の接触部は電氣的に絶縁されている。図-2 に鉄筋のラベルを示す。また、陽極材については図-3 に示すように、チタンリボンメッシュ陽極とチタンメッシュ陽極を使用した。なお、鉄筋および陽極は全て供試体外部にて導通が取れるように配筋、設置した。鉄筋および陽極の電位を測定するために、供試体内部四ヶ所に鉛照合電極を埋設した。

### (3) 供試体の作製方法

コンクリートを供試体下部 750 mm まで打設後、一定期間、供試体上部の主筋のみを屋外空中曝露により腐食促進させた。曝露後の鉄筋表面には、全周に渡って浮き錆びが認められた。さらに、塩化物イオンを混入させたコンクリートを打設し、ブルーシートにて覆い、約一ヶ月間、屋外にて養生させた後、各陽極を設置した。各陽極は供試体表面から 20 mm の深さの位置に設置し、電気防食陽極被覆モルタルにて陽極を被覆した。

## 2.2 実験の要因と水準

チタンリボンメッシュ供試体（以降、リボン供試体と呼称）とチタンメッシュ供試体（以降、メッシュ供試体と呼称）に対して分極試験を実施する際、陽極の配置を実験要因とした。各供試体における陽極の配置パターンは、主筋本数や塩化物イオンの有無を検討するために、図-4 に示すような3水準とした。なお、図-4 では防食回路に使用する鉄筋および陽極のみを示している。

## 2.3 実験方法

### (1) 分極試験方法

所定の養生期間終了後、供試体に設置した陽極材と鉄筋に直流電源を接続し、所定の電流量を鉄筋および陽極のオン電位が安定するまで30分間以上印加し、通電時の鉄筋および陽極電位、通電遮断直後の鉄筋および陽極のインスタントオフ電位を測定した。各電位の測定は供試体内部四ヶ所に埋設した鉛照合電極を使用し、全四ヶ所にて測定される鉄筋の分極量が 250 mV 近傍を達成するまで、電流量を変化させて測定を実施した。なお、鉄筋、陽極、照合電極は全て外部にて導通を取っており、使用したリード線は抵抗を等しくするために長さを全て統一させた。また、分極試験は屋外にて実施し、温度計を用いて外気温を適宜測定した。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	Air (%)	Slump (cm)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AE減水剤
60	4.5	8.0	44	162	270	821	1054	2.70

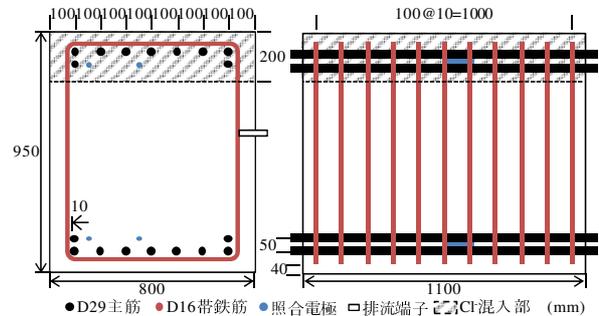


図-1 供試体の形状と寸法

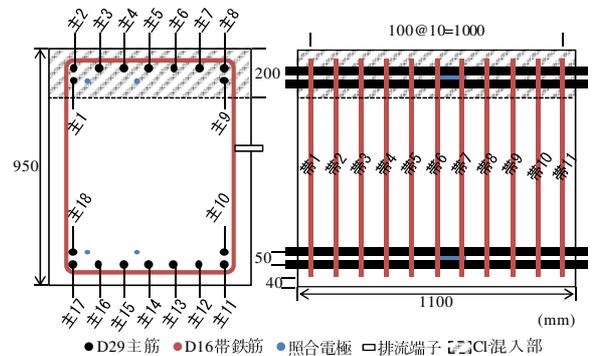


図-2 主筋および帯鉄筋のラベル

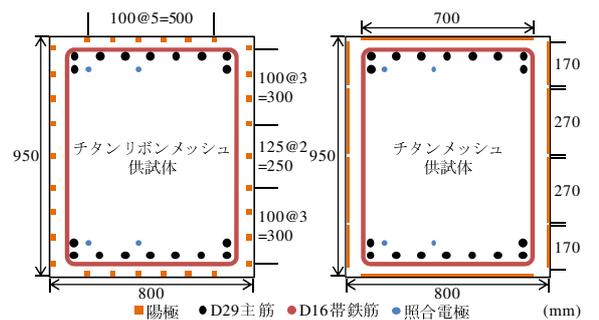


図-3 各供試体における陽極設置位置

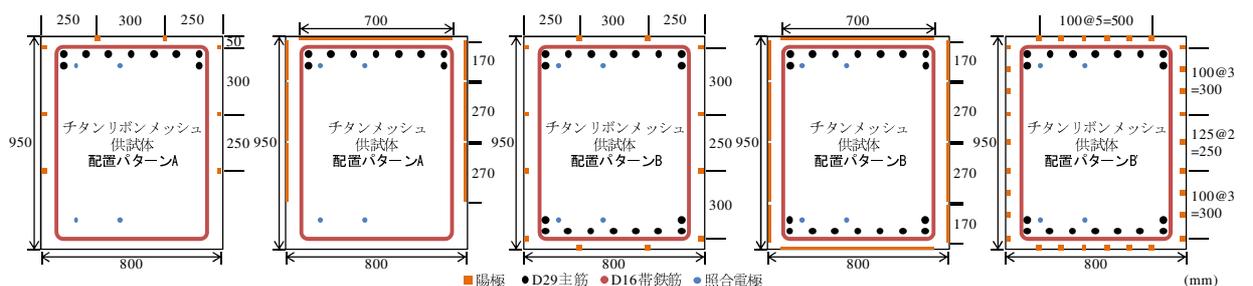


図-4 各供試体における陽極の配置パターン

## (2) 鉄筋および陽極の流出・流入電流量の測定方法

分極試験時における回路中に1Ωのシャント抵抗を設置し、抵抗間の電圧を測定することで、鉄筋および陽極の流出・流入電流量を測定した。抵抗は外部にて導通を取ったリード線と外部電源装置の間に設置した。

### 2.4 測定項目

#### (1) 鉄筋の流入電流量および陽極の流出電流量

鉄筋および陽極を外部にて導通させたリード線と外部電源装置の間に設置した1Ωのシャント抵抗を使用し、抵抗間の電圧を測定することで電流量を測定した。本研究では、各鉄筋の流入電流量および陽極の流出電流量における分布性状を把握するために、式(1)のように電流密度比を算出した。式(1)を用いて電流分布を無次元化することで、供試体に流れる電流値の相違に関わらず、電流の分布性状を評価することが可能になる<sup>9)</sup>。

$$i_c = \frac{i_n/I}{A_n/A_s} \quad (1)$$

ここで、 $i_c$ ：電流密度比、 $i_n$ ：各鉄筋（各陽極）に流入（流出）する電流量 [A]、 $I$ ：供試体に流す総電流量 [A]、 $A_n$ ：各鉄筋（各陽極）の表面積 [m<sup>2</sup>]、 $A_s$ ：各鉄筋（各陽極）の表面積の総和 [m<sup>2</sup>]である。

#### (2) 鉄筋および陽極の電位

供試体内部に埋設した鉄筋および陽極の自然電位、防

食電流通電中における通電遮断直後のインスタントオフ電位を測定した。測定された自然電位からインスタントオフ電位を減じて、鉄筋および陽極の分極量を評価した。なお、同一供試体において各配置パターンを検討するには、通電終了後から数日保管し、各鉄筋が復極したことを確認した後に測定を実施した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 陽極の配置が鉄筋の電流分布に及ぼす影響

図-5、図-6に陽極の配置を変化させたときのリボン供試体およびメッシュ供試体における鉄筋の電流密度比の分布を示す。また、各供試体における電流密度比の平均値および標準偏差を表-2に示す。なお今回は、各配置パターンにおいて、塩化物イオン混入部中の主筋の鉄筋分極量が100±5mVを達成した際の電流密度比を示している。

図-5、図-6に示す結果から、主筋と帯鉄筋に着目すると、主筋と比較してかぶり厚さの小さい帯鉄筋に多くの電流が流入していることが認められた。また、帯鉄筋における流入電流量は、端部の帯鉄筋（帯1および帯11）を除いて大きな違いが見られなかった。これは、帯鉄筋と陽極とが互いに直交し、かつ、等間隔の配置関係となっていたため、陽極と帯鉄筋の幾何パターンの関係がほ

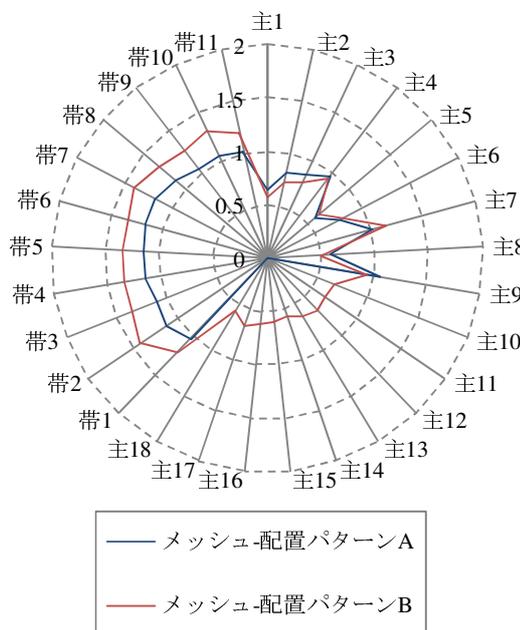
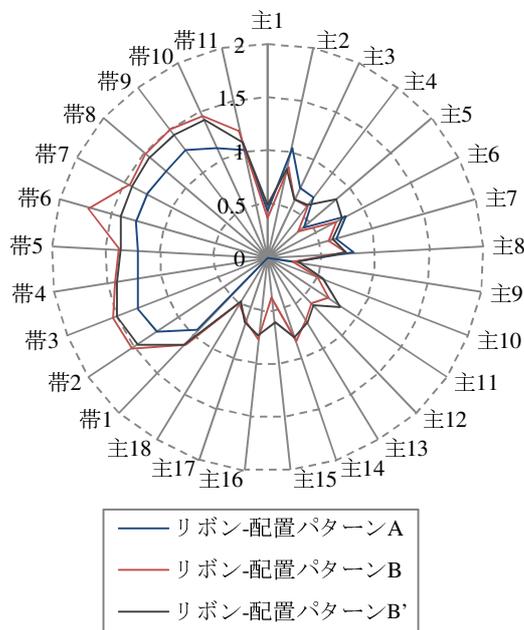


図-5 リボン供試体における鉄筋の電流密度比分布 図-6 メッシュ供試体における鉄筋の電流密度比分布

表-2 各供試体における電流密度比の平均値および標準偏差

Cl-の有無	塩化物イオン無混入部			塩化物イオン混入部									
	リボン供試体		メッシュ供試体	リボン供試体					メッシュ供試体				
通電方法	パターンB	パターンB'	パターンB	パターンA	パターンB	パターンB	パターンA	パターンB	パターンB	パターンA	パターンB	パターンA	パターンB
鉄筋	主筋	主筋	主筋	主筋	帯鉄筋	主筋	帯鉄筋	主筋	帯鉄筋	主筋	帯鉄筋	主筋	帯鉄筋
平均値	0.62	0.66	0.63	0.65	1.19	0.56	1.44	0.64	1.37	0.81	1.10	0.78	1.32
標準偏差	0.14	0.11	0.04	0.24	0.11	0.20	0.16	0.18	0.13	0.18	0.06	0.20	0.07

ば同等であることが主因であると考えられる。なお、各供試体端部の帯鉄筋において流入電流量が若干小さくなったが、これは線状陽極および面状陽極共に端部 5 cm 程度を排流端子と接続していたためである。

配置パターンを比較する観点から図-5、図-6を見ると、帯鉄筋に流入する電流量に関しては、配置パターン B と B'において多く電流が流入していた。この原因としては、配置パターン B と B'では防食回路中の主筋本数が配置パターン A と比較して多く、帯鉄筋の電流密度比における式(1)中の  $A_n/A_s$  が小さくなったこと、また、配置パターン B と B'では供試体の全周に陽極が配置されていたため、配置パターン A と比較して帯鉄筋に流入する電流量が多くなったことが挙げられる。

図-5、図-6中に示す塩化物イオン無混入部における主筋(主10~主18)の電流密度比の結果より、陽極種類を比較すると、面状陽極であるメッシュ供試体における電流密度比の分布はより均一になる傾向が認められた。なお、リボン供試体において、線状陽極を 300 mm ピッチに配置したリボンパターン B と比較して、100 mm ピッチに配置したリボンパターン B'では電流密度比の分布が平準化される傾向が認められる。表-2に示す結果からも、塩化物イオン無混入部においては、リボンパターン B、リボンパターン B'、メッシュパターン B と陽極量が増加するほど標準偏差が減少している。

図-5、図-6中に示す塩化物イオン混入部における主筋(主1~主9)の電流密度比の結果より、陽極種類を比較すると、面状陽極において主筋に流入する電流量が多くなる傾向が認められた。なお、リボン供試体の配置パターン A において電流密度比が高い結果となった原因として、図-4に示すようにリボン配置パターン A では、防食対象とした主筋の本数が配置パターン B、B'と比較して少なく、流入電流量の比率が増加したためと考えられる。また、リボン供試体およびメッシュ供試体において、各主筋の流入電流量を比較すると、僅かながら差が認められる。ここで、メッシュ供試体における、比較的密な配筋部(主4~主8)に対して測定した交流インピーダンス法による分極抵抗を図-7に示す。図-7より、主筋の分極抵抗が増加するほど、電流密度比が低下していることから、差が生じた要因として、鉄筋の腐食状況に起因しているものと推察される。以上の鉄筋に対する流入電流量の観点からは、陽極の設置間隔および陽極量を増加させることで電流分布を均一にさせることが可能であると考えられる。

### 3.2 陽極の配置パターンが陽極の電流分布に及ぼす影響

各陽極の流出電流量における電流密度比を比較するために、図-8に示す位置の陽極における電流密度比を算出した。その結果を図-9、図-10に示す。鉄筋の電流

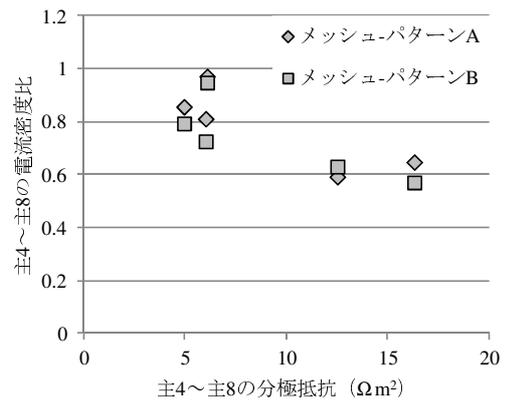


図-7 メッシュ供試体における分極抵抗

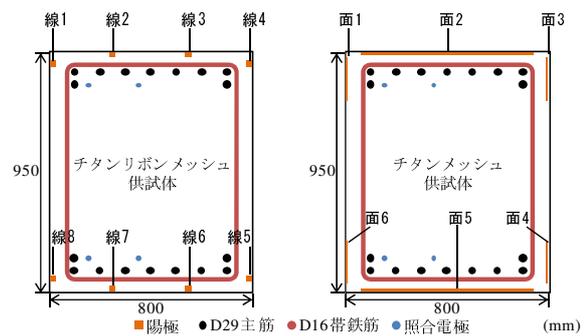


図-8 各供試体における陽極のラベル

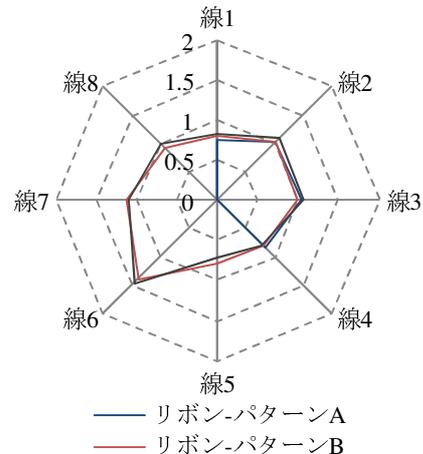


図-9 リボン供試体における陽極の電流密度比分布

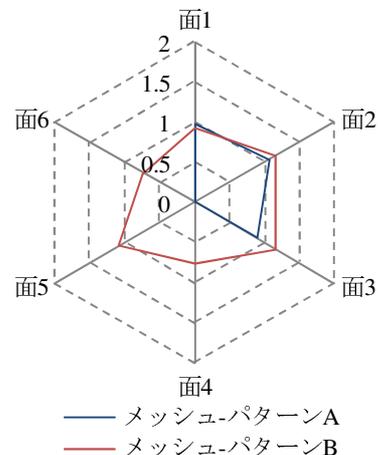


図-10 メッシュ供試体における陽極の電流密度比分布

密度比を算出した際と同様に、各配置パターンにおいて、塩化物イオン混入部中の主筋の鉄筋分極量が  $100 \pm 5$  mV 近傍を達成した際の電流密度比を示している。図-9、図-10 に示す結果より、各陽極における電流密度比は配置パターンに依らず、大きな差は認められなかった。また、塩化物イオンの有無および陽極種類の違いが及ぼす影響に関しても、電流密度比の分布性状に大きな差は認められなかった。一方で、陽極の設置位置による流出電流密度の違いに関して比較すると、供試体隅角部における陽極からは、流出する電流量が 10~20 %程小さくなる傾向が認められた。各供試体共に、隅角部を含む側面では陽極と鉄筋間の距離が 2 cm ほど、供試体上面および下面よりも大きく、電流が流れにくかったことが考えられる。また、図-9 における線 7 では、他の線状陽極の流出電流密度と比較して僅かながら大きい値を示した。配置パターン A, B 共に同様な傾向が認められたことから、線 7 周辺部における主筋あるいは帯鉄筋が供試体打設前の段階において、鉄筋表面の微細な傷や保管状況により、僅かに腐食していた可能性が考えられる。

### 3.3 陽極の配置パターンが分極試験結果に及ぼす影響

リボン供試体およびメッシュ供試体の各四ヶ所において分極試験を実施した。なお、測定時の外気温は日平均 8.5 °C であった。塩化物イオン混入部および無混入部において、中央に設置した鉛照合電極より得られた、各配置パターンの分極試験結果を図-11~図-14 に示す。図中の白抜きが塩化物イオン混入部、塗潰しが無混入部を示す。なお、供試体隅角部に設置した照合電極における分極試験結果についても同様の結果だった。

図-11、図-12 に示す結果から、塩化物イオンおよび鉄筋腐食の有無によって、インスタントオフ電位の線形は異なるという従来通りの結果が得られた。また、リボンパターン A、メッシュパターン A では、電位モニタリング位置において陽極材が配置されていないことから、各パターン B の結果と比較して僅かに分極し難い傾向が認められた。一方で、今回の電位モニタリング位置においては、陽極の配置パターンが鉄筋の通電時のインスタントオフ電位に及ぼす影響が生じないものも認められた。

図-13、図-14 に示す結果から、リボンパターン A-Cl, A を除いて、配置パターンが陽極の通電時のインスタントオフ電位に及ぼす影響も少ないという傾向が認められた。一方で、インスタントオフ電位は 500 [mV vs CSE] 近傍に変局点が認められることから、酸素ガスの発生が考えられる。さらに、図-13 におけるリボンパターン A では、1100 [mV vs CSE] 近傍に変局点が再度認められることから、塩素ガスが発生していると考えられる。

以上の結果と 3.1 および 3.2 の結果を併せて考察すると、あるモニタリング位置の分極性状が陽極配置に依存

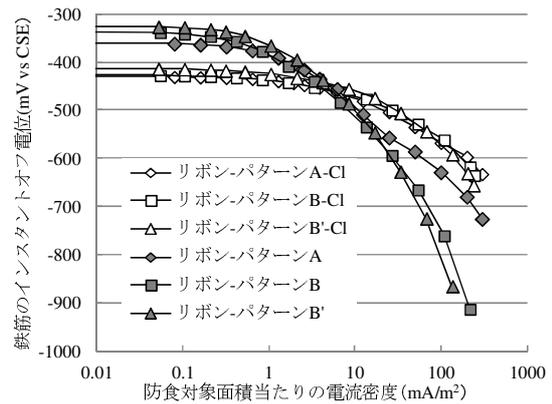


図-11 リボン供試体の鉄筋のインスタントオフ電位

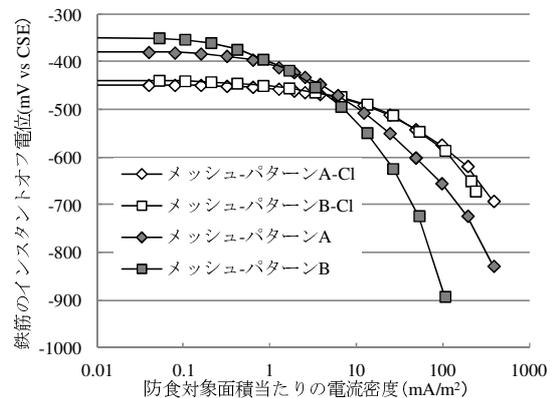


図-12 メッシュ供試体の鉄筋のインスタントオフ電位

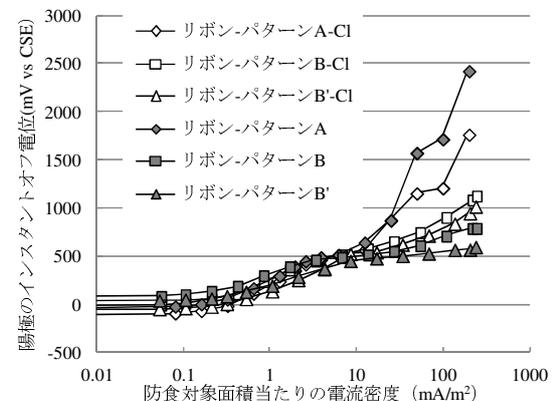


図-13 リボン供試体の陽極のインスタントオフ電位

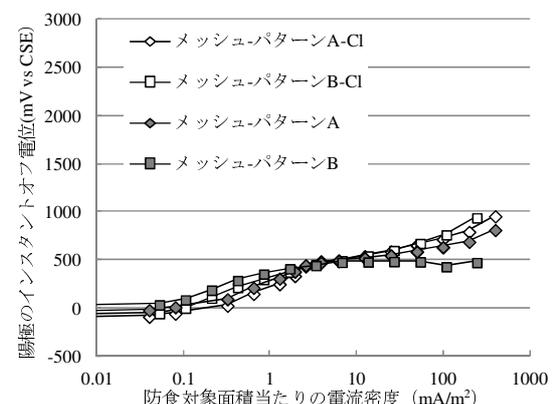


図-14 メッシュ供試体の陽極のインスタントオフ電位

せずと同等であったとしても、他の部位において防食電流の疎密の変化が生じている可能性がある。従って、防食効果を分極量で評価する場合、防食電流の疎密をあらかじめ予測してモニタリング位置を決定することで、工法の信頼性を向上させることが可能になると考えられる。

### 3.4 陽極材の配置パターンに伴う負荷に関する検討

陽極から流出した電流量の測定結果より、陽極単位表面積当たりの電流密度を算出し、各配置パターンにおける最大値と最小値を比較したグラフを図-15に示す。なお、3.1、3.2同様に各配置パターンにおいて、塩化物イオン混入部中の主筋の鉄筋分極量が  $100 \pm 5 \text{ mV}$  近傍を達成した際の電流量から、電流密度を算出している。

図-15に示す結果から、各配置パターンを比較すると、線状陽極を  $100 \text{ mm}$  ピッチに設置したリボンパターンB'が最も電流密度が小さく、陽極への負荷が少ないという結果が得られた。一方で、電流密度の最大値と最小値の差を比較すると、リボンパターンB'を除いて  $0.05 \sim 0.1 \text{ A/m}^2$  程度異なり、局所的に陽極へ負荷がかかっていることが考えられる。以上のことから、面状陽極においては、配置パターンが陽極材の負荷に及ぼす影響は少ないが、線状陽極においては、陽極間隔を狭めることで、負荷を軽減できると考えられる。

### 4. まとめ

鉄筋および陽極から流入・流出する電流量の分布性状および分極性状と防食効果の関係を検討することを目的とし、港湾栈橋の梁部材を模擬した実寸大の供試体に対して、陽極の配置パターンを変化させて分極試験および電流量測定を実施した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 鉄筋に流入する防食電流は、主筋と比較して帯鉄筋に流入しやすい傾向が認められた。また、その電流分布は、陽極の配置パターンや陽極と鉄筋間の距離、鉄筋の腐食程度によって異なる。
- (2) 今回の電位モニタリング位置において、陽極の配置パターンが鉄筋のインスタントオフ電位に及ぼす影響が生じないものが認められた。あるモニタリング位置の鉄筋の分極性状が陽極配置に依存せずと同等であったとしても、他の部位において防食電流の疎密の変化が生じる可能性がある。
- (3) 本研究の範囲内における陽極材の配置パターンに伴う負荷の検討から、線状陽極においては、陽極間隔を狭めることで、より負荷を軽減することが可能であることが示された。

### 謝辞

本研究の遂行にあたりご助力を賜りました住友大阪セメント（株）山本誠氏、若杉三紀夫氏をはじめ関係各位に謝意を表します。

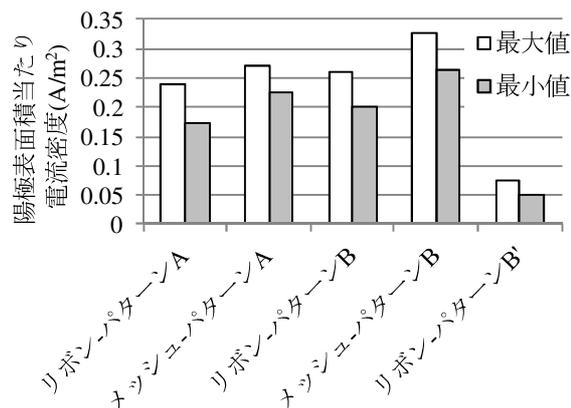


図-15 陽極表面積当たり電流密度の最大値、最小値

### 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），2001.11
- 2) 土木学会：コンクリート委員会 コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338 委員会）委員会報告書，p.315，2009
- 3) 上野萌，山本悟，石井浩司，関博：干満帯における鉄筋コンクリート部材の電気防食効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.1, pp.1163-1168，2011.9
- 4) 佐藤唯，鹿島篤志，皆川浩，久田真：温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1067-1072，2010.9
- 5) 増田正孝，有田誠，LEE En Ju，花田賢志，川俣孝治，皆川浩：コンクリート中の鉄筋に対するカソード電気防食のFEMによる評価，土木学会論文集，No.791, pp.59-67，2005.6
- 6) 皆川浩，増田正孝，川俣孝治：有限要素法による鉄筋コンクリートの電気防食の電流分布に関する検討，コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，pp.351-356，2004
- 7) 青山敏幸，関博，福手勤：PC 桁への電気防食の適用に伴う PC 鋼材および陽極の特性変化に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.65, No.4, pp.589-606，2009.12
- 8) 関博，石山明久：RC 栈橋の塩害劣化とリニューアル大井コンテナ埠頭について，コンクリート工学，Vol.44, No.1, pp.70-73，2006.1
- 9) 皆川浩，田上孝樹，久田真：断面修復材の電気抵抗率および断面修復材が脱塩工法に及ぼす影響，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.215-222，2009