

# 論文 線状陽極を用いた電気防食の陽極設置の合理化に関する実験的検討

青山 敏幸\*1・鴨谷 知繁\*1・石井 浩司\*2

**要旨:** 本稿では、チタン系の線状陽極を用いた電気防食工法の陽極設置の合理化を目的として、陽極設置面の鋼材量に応じて、切削溝 1 本に設置する陽極枚数を使い分ける方法を検討した。本方式による通電性状を確認するため、PC 桁および RC 栈橋を模擬した供試体により通電試験を実施し、鋼材の防食効果、陽極材の性能について検討した。その結果、PC 桁、RC 栈橋を想定したどちらの供試体についても、本方式による通電による鋼材の防食効果が認められるとともに、陽極のインスタントオフ電位についても大きなばらつきは生じておらず、効率的な防食が可能であることを確認した。

**キーワード:** 電気防食, 線状陽極, 電位分布, 電流分布

## 1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物の補修方法のひとつにチタン系の線状陽極を用いた電気防食工法がある。本工法は、補強工法との併用が容易であること、陽極の設置を任意に設定できること等のメリットがあることから、施工実績も増加し、品質や経済性の向上を目指した工法の開発<sup>1)</sup>も行われている。今後、更なる経済性の向上を図るには、防食性能を確保した上で、溝切削工の削減、陽極材料の低減等、陽極設置にかかわる改良が望まれる。

線状陽極を用いた場合の陽極の設置間隔は、コンクリート内部の鋼材量や腐食程度をもとに、必要防食電流量を算出し、電流の広がりをも満足してかつ陽極に流す電流が限界電流量以内に収まるように決定している。電流の広がりについては、一般的には 300mm 程度以下の間隔で陽極を設置すれば、防食効果があるとしている。陽極の限界電流量については、過大な電流を流すことで、陽極周辺の塩素発生反応により pH が低下し、陽極被覆材が劣化してしまう可能性があるため、NACE<sup>2)</sup> では限界電流密度を陽極材の表面積に対して 110mA/m<sup>2</sup> と設定している。

例えば、図-1 に示すように、PC 桁のように下フランジの鋼材量が多く、ウェブのように鋼材量が少ない構造物では、下フランジでは陽極の限界電流密度が支配的となり、ウェブでは電流の広がりが支配的となるため、ウェブに設置する陽極の容量は過剰になる傾向にある。そこで、従来の陽極幅よりも小さい陽極を使用するとともに、下フランジのように鋼材量が多く、陽極の限界電流密度が支配的となる箇所では、溝 1 本につき陽極を 2 枚設置し、それぞれの陽極が有効に機能すれば、陽極設置の合理化が可能になるものと考えられる。

一方、RC 栈橋に線状陽極を設置する場合には、コンクリート内部の鋼材量が多いため、陽極の限界電流密度

が支配的となるため、これまでは陽極の設置間隔を小さくすることで対応してきた。しかし、溝 1 本につき 2 枚の陽極を設置し、陽極の限界電流密度を高めれば、溝切削量が削減し、陽極設置の合理化が可能になるものと考えられる。そこで著者らは、陽極設置面の鋼材量等に応じて、切削溝 1 本に設置する陽極の枚数を使い分けた場合の通電性状を小型試験体により確認し、本手法が有効に機能することを確認している<sup>3)</sup>。

本稿では、今回提案する方法を実構造物に適用した場合の防食効果および陽極材の性能について確認することを目的として、ポストテンション方式の PC 桁を模擬した供試体（以下 PC 供試体と称す）および RC 栈橋を模擬した供試体（以下 RC 供試体と称す）の通電試験の結果について報告する。

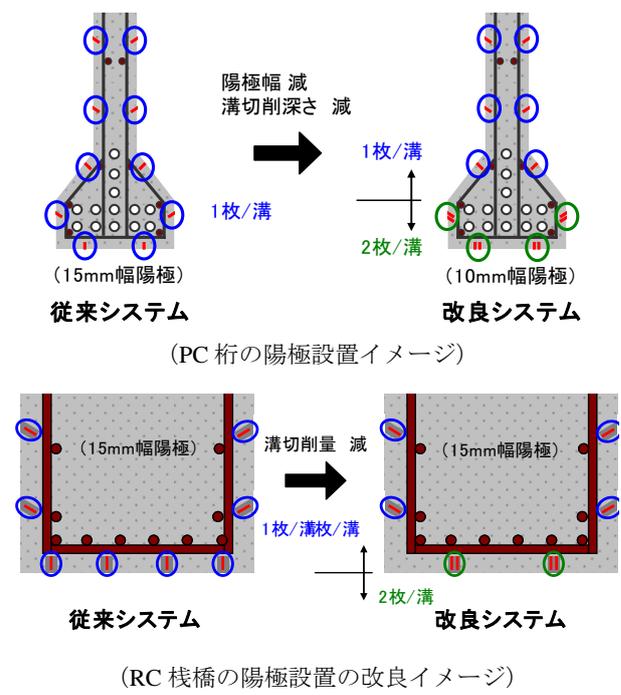


図-1 陽極配置の改良イメージ

\*1 (株) ピーエス三菱 技術本部 技術部 開発メンテナンスグループ 博 (工) (正会員)

\*2 (株) ピーエス三菱 技術本部 技術部 部長 工博 (正会員)

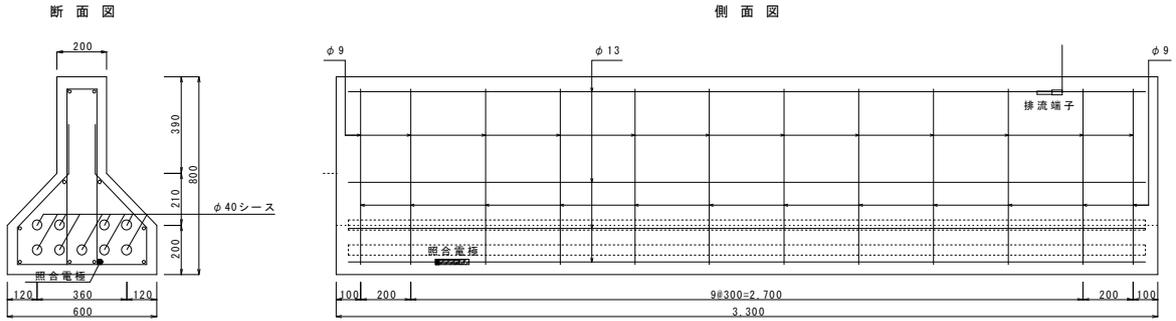


図-2 PC 供試体の形状・寸法

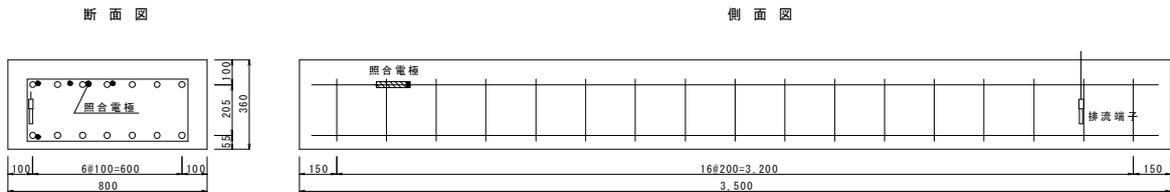


図-3 RC 供試体の形状・寸法

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の概要

#### (1) 供試体の形状・寸法

PC 供試体の形状・寸法を図-2 に、RC 供試体の形状・寸法を図-3 にそれぞれ示す。

PC 供試体は、幅 600mm、高さ 800mm、全長 3.3m のポストテンション方式の PC 桁の下フランジおよびウェブの一部を模擬した供試体とし、軸方向にはφ40mm のシースおよびφ13mm の鉄筋を、スターラップにはφ9mm の鉄筋を 300mm ピッチで配置した。

RC 供試体は、600×360×3500mm の矩形断面とし、主筋には D25 の鉄筋を 7 本、スターラップには D16 の鉄筋を 200mm ピッチで配置した。なお今回の実験では、陽極設置、通電期間中の計測等の作業性を考慮し、RC 供試体の上面が RC 栈橋の底面を模擬するものとした。RC 供試体は 1 体、PC 供試体は 2 体製作した。

#### (2) 使用材料

RC 供試体、PC 供試体に用いたコンクリートの材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 にそれぞれ示す。コンクリート中には、練り混ぜ水に NaCl を混入し、コンクリート中の塩化物イオン濃度が 5kg/m<sup>3</sup> となるように調整した。鋼材およびシースは、1 日 2 回の塩水噴霧を約 1 週間実施し、コンクリート打設前に鋼材を強制的に腐食させた。回路形成のための排流端子、鋼材電位のモニタリング用の計測端子、照合電極もコンクリート打設前に設置した。照合電極には、鉛照合電極を用いた。

線状陽極には、幅 10mm あるいは 15mm の酸化被膜を施したチタン系の陽極材料を使用した。陽極被覆材には、既往の研究<sup>1)</sup>にて使用している流動性の高いセメント系

表-1 使用材料

	PC供試体	RC供試体
セメント	早強ポルトランドセメント (密度3.14g/cm <sup>3</sup> )	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材 S1	砕砂 (表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup> )	
細骨材 S2	山砂 (表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> )	
粗骨材	碎石 (表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup> )	
混和剤	高性能AE減水剤 遅延形 (I種)	AE減水剤 遅延形 (I種)

表-2 コンクリートの配合

供試体	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	混和剤 A	塩化物 Cl
					S1	S2			
PC	35.5	41.4	170	479	275	412	1002	5.51	5
RC	58.0	48.8	185	319	343	514	927	2.23	5

の陽極被覆材を充てんした。

#### (3) 陽極設置方法

PC 供試体の陽極設置位置を図-4 に示す。PC 供試体は、従来システムと改良システムの 2 種類とし、両システムとも同一位置に陽極を配置した。

従来システムは、幅 6mm 程度、深さ 20mm 程度の溝を切削した後に、幅 15mm の陽極をセットした。供試体の底面 (A4,A5)、ハンチ部 (A2,A7) はコンクリート表面に対して直角に溝を切削し、側面 (A1,A3,A6,A8) はコンクリート表面に対して約 60° の角度を持った状態で切削した。

側面は、溝の下面に受け型枠を設けた後に、簡易な容

器を用いて溝内部に流し込み、底面は、簡易型枠をセットした後に、陽極被覆材を圧入した。

改良システムは、幅 6mm 程度、深さ 15mm 程度の溝を切削した後に、幅 10mm の陽極をウェブ、下フランジハンチ部には切削溝 1 本につき 1 枚、下フランジ側面と底面には 2 枚配置した。この際、2 枚の陽極のセットは、約 300mm ピッチの間隔にてゴム状のスペーサーを陽極間に埋設し、陽極間の絶縁を確保した状態で陽極被覆材を充てんした。

次に RC 供試体の陽極配置位置を図-5 に示す。

RC 供試体は、1 体の試験体で従来システムと改良システムによる通電ができるように、陽極を設置した。

溝切削は、両システムとも幅 6mm 程度、深さ 30mm 程度とし、供試体の側面 A1、A6 および従来システムの A2'~A5' 位置では幅 15mm の陽極を 1 枚セットし、改良システムの上面の位置 (A2~A5) は、幅 15mm の陽極を 2 枚セットした後に陽極被覆材を充てんした。

## 2.2 通電方法と測定項目

### (1) 通電方法

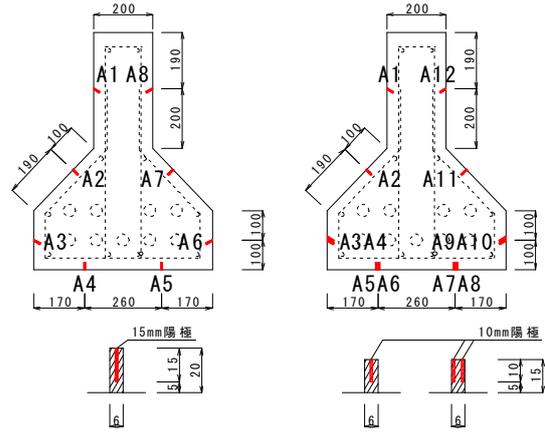
通電試験は、コンクリートを打設して約 1 ヶ月の養生を行った後に開始した。通電開始時の PC 供試体の圧縮強度は 73.9N/mm<sup>2</sup>、RC 供試体の圧縮強度は 34.2N/mm<sup>2</sup> であった。

通電は、直流電源装置の (+) 側から計測ボックスを介して、各陽極と電線を接続するとともに、各供試体の排流端子と直流電源装置の (-) 側を接続した後に開始した。

PC 供試体、RC 供試体の通電電流量は、通電開始時に実施した分極試験により、ほぼ 100mV の分極量が得られる電流密度を目標とし、PC 供試体は両システムとも 10mA/m<sup>2</sup> (vs.コンクリート表面積) に決定し、暴露期間中も同一電流量にて通電を行った。

一方 RC 供試体は、従来システムおよび改良システムの両方式にて通電を行ったが、20mA/m<sup>2</sup> (vs.コンクリート表面積) までの通電に対して、100mV の分極量を得ることができなかった。通電量が 20mA/m<sup>2</sup> を超えた場合には、NACE<sup>2)</sup> で規定される陽極の限界電流密度を超えるため、今回の実験では 20mA/m<sup>2</sup> (vs.コンクリート表面積) にて通電を行った。また RC 供試体は、改良システムによる通電性状の確認を主目的としているため、暴露期間中は改良システムでの通電を実施し、電流遮断 24 時間後の定期計測を実施した後に、従来システムにより 1 日間の通電と測定を行った。その後は、再度改良システムによる通電を行った。

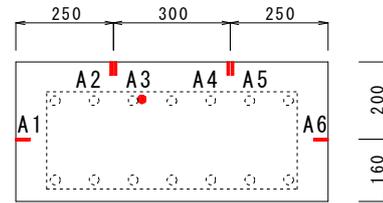
通電期間中は、RC 供試体、PC 供試体ともに、海岸から約 2km 離れた市街地の屋外にて、風雨に曝される環境に暴露した。



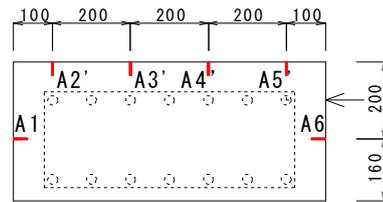
(従来システム)

(改良システム)

図-4 PC 供試体の陽極設置位置図



(改良システム)



(従来システム)

図-5 RC 供試体の陽極設置位置図

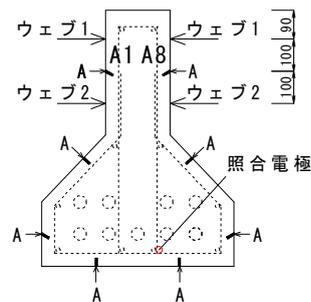


図-6 PC 供試体の電位測定位置

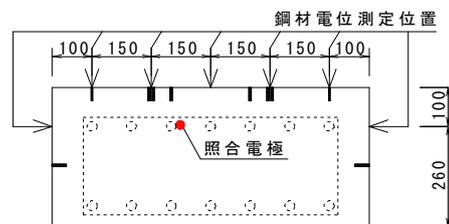


図-7 RC 供試体の電位測定位置

### (2) 測定項目

通電期間中は、PC 供試体、RC 供試体ともに電源電圧、埋込照合電極および可搬式照合電極による鋼材のインス

タントオフ電位（以下  $E_{i0}$  と称す），電流遮断 24 時間後の電位（以下  $E_{24}$  と称す），および可搬式照合電極による陽極の  $E_{i0}$  を測定した。

PC 供試体の可搬式照合電極による鋼材の  $E_{i0}$  および  $E_{24}$  の測定は，供試体のスパン中央部におけるスターラップ位置 7 箇所に関して，図-6 に示すウェブ位置 4 箇所，計 28 点を測定した。また陽極の  $E_{i0}$  もスターラップ位置の陽極直上 7 箇所にて測定した。

RC 供試体の可搬式照合電極による鋼材の  $E_{i0}$  および  $E_{24}$  の測定は，供試体のスターラップ位置 17 箇所に関して，図-7 に示す位置 7 箇所，計 119 箇所の測定を実施した。また陽極の  $E_{i0}$  もスターラップ位置の陽極直上 17 箇所にて測定した。

RC 供試体については，上記に加え改良システムによる通電時の各陽極に流れる電流量も測定した。また改良システムによる通電停止 24 時間後の鋼材の  $E_{24}$  の測定後に，従来システムにて 1 日間通電した後の埋め込み照合電極および可搬式照合電極による鋼材の  $E_{i0}$  も測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 PC 供試体

##### (1) 電源電圧

通電期間中に測定した電源電圧の測定結果を図-8 に示す。通電開始直後の従来システムの電源電圧は 1.44V 程度であるのに対して，改良システムの電源電圧は

1.67V と若干大きな値を示した。しかし，その後の電源電圧は両システムともほぼ同等な値を示しており，両システムとも，良好に電気防食システムが機能しているものと考えられる。

##### (2) 鋼材の復極量

従来システムおよび改良システムの通電期間全体において，埋め込み照合電極および可搬式照合電極により測定した鋼材の復極量の測定結果を図-9 に示す。なお鋼材の復極量は，鋼材の  $E_{i0}$  と  $E_{24}$  の差とした。またウェブ位置の可搬式照合電極の値は，各位置で測定した値の平均値とする。

埋込照合電極による復極量の測定結果から，通電期間によらず改良システムは，従来システムより若干大きな

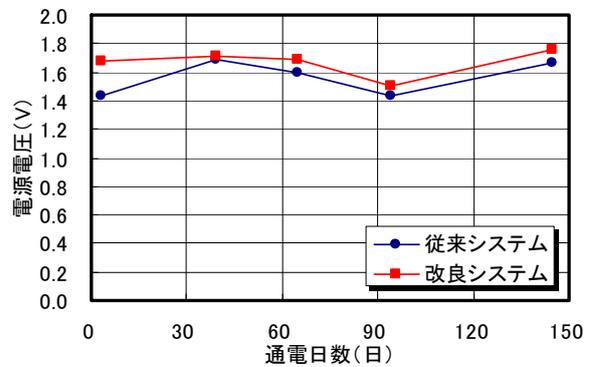


図-8 電源電圧の測定結果

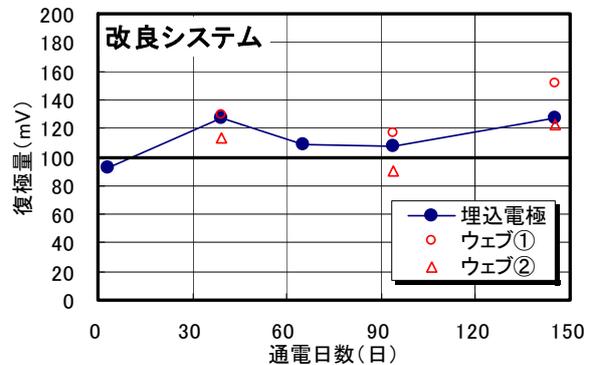
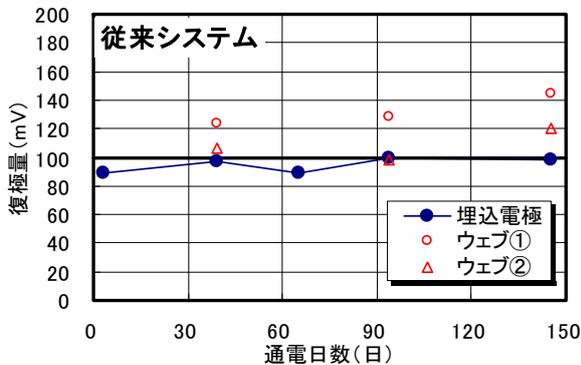


図-9 鋼材の復極量の測定結果

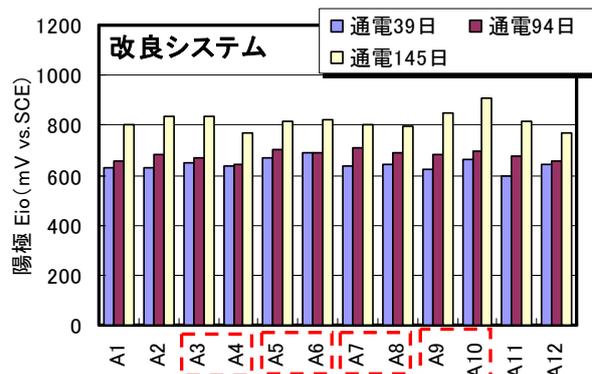
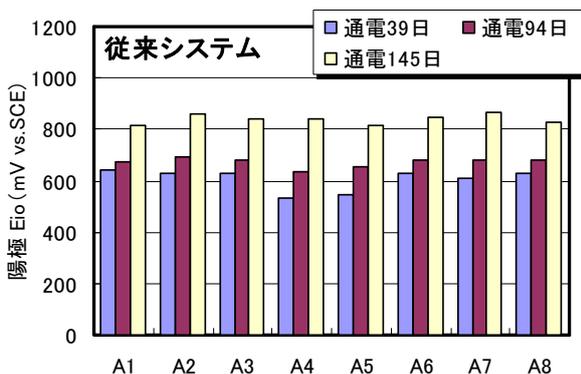


図-10 陽極のインスタントオフ電位の測定結果

復極量を有している。この理由は、照合電極を設置した位置は下フランジ底面であり、改良システムは切削溝 1 本につき 2 枚の陽極を配置したこと、およびウェブ位置の陽極には 10mm 幅のものを 1 枚使用しているため、15mm 幅の陽極を使用した従来システムに比べてウェブ位置の陽極から発生する電流量が小さいため、結果として下フランジ底面の復極量が若干大きくなったものと考えられる。また改良システムは、下フランジとウェブの復極量のばらつきが小さくなっていることから、陽極設置面の鋼材量等に応じて、陽極の枚数と幅を適切に選定することで、より確実に経済的な防食が可能になるものと考えられる。

### (3) 陽極材のインスタントオフ電位

線状陽極の電気防食を適用するにあたっては、鋼材に確実に防食電流を流すと同時に、陽極から発生する電流、電位分布が均一となるように陽極を設置することが、陽極システムの部分的な劣化を防ぐ上で重要であるものと考えられる。そこで本試験では、通電開始 39, 94, 145 日経過後に、可搬式照合電極により陽極の  $E_{i0}$  を測定した。その結果を図-10 に示す。ここで、従来システムの A1~A8 および改良システムの A1~A12 は、図-4 に示す陽極位置を示す。両システムとも、通電期間中の陽極の  $E_{i0}$  はほぼ同等であり、良好に陽極システムが作動しているものと推察される。また改良システムは、切削溝 1 本につき 1 枚の陽極位置 (A1, A2, A11, A12) も 2 枚の陽極位置 (A3~A9) もほぼ同等の値を示していることから、本システムは有効に機能しているものと推察される。

## 3.2 RC 供試体

### (1) 鋼材の電位変化量 (復極量, 分極量)

両システムの通電試験時に実施した鋼材の電位変化量の測定結果を図-11 に示す。ここで、改良システムの

電位変化量は、鋼材の  $E_{i0}$  と  $E_{24}$  の差 (復極量) とした。一方、従来システムの電位変化量は、鋼材の  $E_{24}$  と通電開始から 1 日経過後の鋼材の  $E_{i0}$  との差 (分極量) とした。図中の塗りつぶした値は、可搬式照合電極により測定した値であり、図中の白抜きの値は埋込照合電極により測定した値である。図の横軸は、供試体幅 800mm の中心を基準とした値であり、-400~400mm の範囲はコンクリート上面にて測定した値であり、-400mm より小さい値および 400mm より大きな値は側面にて測定した値を示す。また図中の点線は、陽極位置を示す。

改良システムの埋込照合電極の測定結果から、通電期間の増加に伴い電位変化量が大きくなっている。この理由としては通電開始が夏場であり、腐食に対して厳しい環境であったのに対して、通電 145 日は腐食に対しての環境が穏やかな冬場に測定していること、その他に通電期間の増大により、鋼材界面の環境が改善していること等が考えられる。また可搬式照合電極による測定結果から、今回の陽極配置に対して最も厳しい位置となる供試体中心位置においても、埋込照合電極の位置による値とほぼ同等の値を示していることから、改良システムにおいても鋼材の防食効果が確保されているものと考えられる。

陽極から最も離れた位置 (供試体中心位置) と陽極直上位置 (供試体中心から -150mm, 150mm 位置) については、電位変化量に差が生じているものの、通電 39 日、94 日の測定では約 20~30mV、通電 145 日では約 40mV 程度と著しく大きな差は認められなかった。通電 145 日による電位変化量が他の時期に比べて大きくなった理由としては、通電 39, 94 日の測定に比べて、通電 145 日ではコンクリートの比抵抗が高かったため、結果として電位変化量に差が生じたものと考えられる。

次に、陽極から最も離れた位置 (供試体中心位置) に

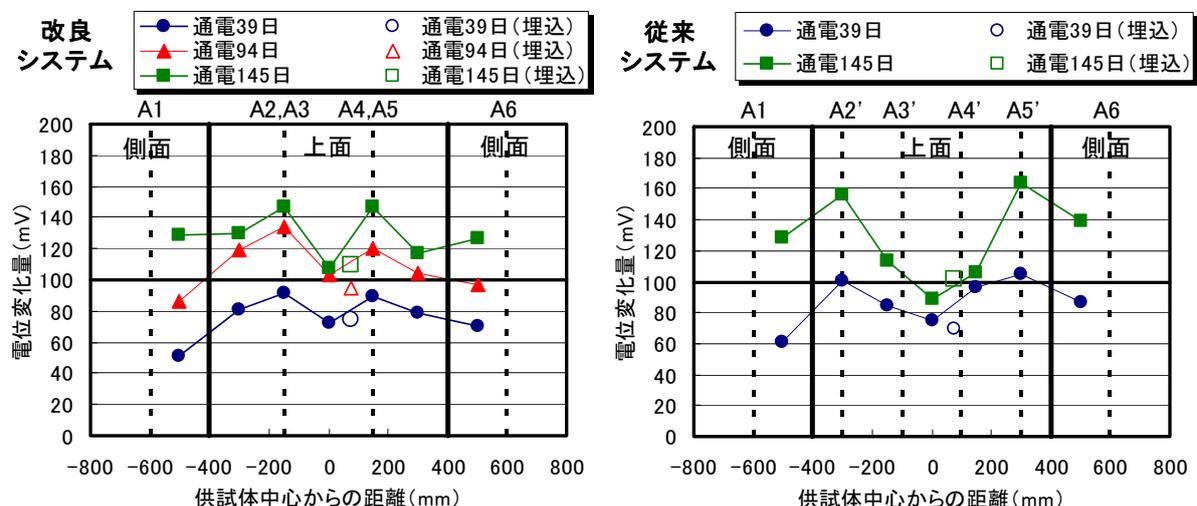


図-11 鋼材の電位変化量の測定結果

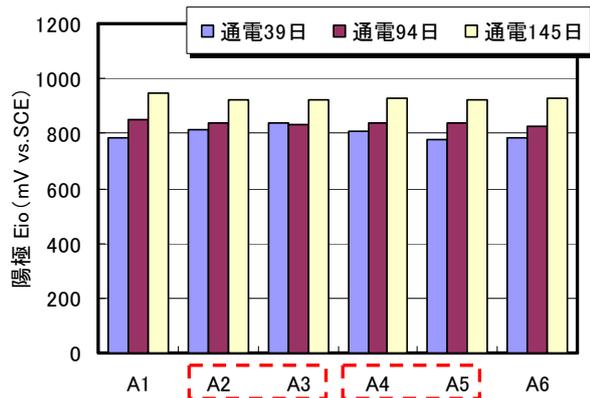


図-12 陽極のインスタントオフ電位の測定結果

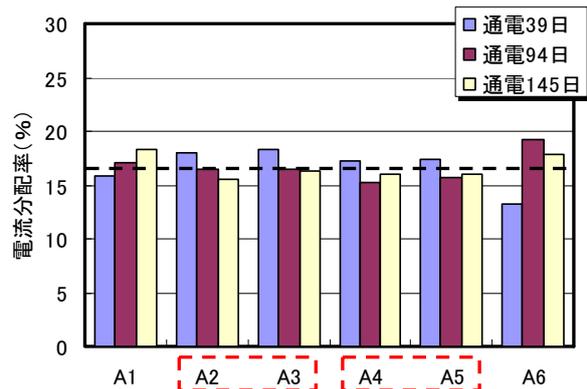


図-13 陽極の電流分配率の測定結果

における改良システムと従来システムによる電位変化量を比較すると、通电 39 日、通电 145 日ともに大きな差は認められなかった。以上の結果から、RC 供試体においても改良システムによる陽極設置でも、十分に防食効果はあるものと考えられる。

なお従来システムにおいては、陽極直上の A2'、A5' 位置の電位変化量が、他の場所に比べて大きくなる結果となった。この理由は、A2'、A5' の位置は、陽極の直上であることに加え、陽極 A1、A6 からも電流が流れやすい傾向にあるため、他の測定位置に比べて電位変化量が大きかったものと推定される。

#### (2) 陽極材のインスタントオフ電位

改良システムによる通电 39、94、145 日における陽極の  $E_{i0}$  の測定結果を図-12 に示す。

図に示す結果から、改良システムによる通电期間中の陽極の  $E_{i0}$  はほぼ均一な値を示していることから、1 本の切削溝に 2 枚の陽極を設置した場合も陽極システムは有効に機能しているものと考えられる。今後は、長期的に通电を行った場合の挙動についても検討する予定である。

#### (3) 陽極材の電流分配

改良システムによる通电 39、94、145 日において各陽極から発生する電流分配率の測定結果を図-13 に示す。ここに、陽極の電流分配率は、各陽極から発生する電流量を総電流量で除した値であり、図中の点線は、電流分配率の平均値を示す。

図-13 に示す結果から、通电 39 日測定時には A6 に流れる電流量が、他の陽極に比べて小さい傾向にあったが、通电 94、145 日の測定時には各陽極に流れる電流量に大きなばらつきは生じていなかった。また溝 1 本につき 2 枚の陽極を設置した A2 と A3、A4 と A5 も通电期間全体を通してほぼ均等な電流が流れていることから、電流分配の観点からも、陽極システムは有効に機能しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

チタン系の線状陽極を用いた電気防食工法の陽極設置の合理化を目的として、RC 栈橋、PC 桁を模擬した供試体を用いて、陽極設置面の鋼材量に応じて、切削溝 1 本に埋め込む陽極の本数を使い分ける陽極の設置方法について検討した。以下に、本実験により得た結果を示す。

- (1) PC 供試体、RC 供試体の鋼材の電位変化量の測定結果から、陽極設置面の鋼材量に応じて切削溝 1 本に設置する陽極の枚数、陽極幅を適切に選定することで、より確実に経済的な防食が可能になるものと考えられる。
- (2) PC 供試体、RC 供試体の陽極のインスタントオフ電位の測定結果から、切削溝 1 本につき 2 枚の陽極を設置した部位も、1 枚の陽極を設置した部位もほぼ同等の値を示していることから、陽極設置面の鋼材量に応じて切削溝 1 本に設置する陽極の枚数、陽極幅を適切に選定すれば、実構造物においても陽極システムは有効に機能するものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 池谷公一、石井浩司、関博：電気防食工法のコスト縮減に向けた技術開発 -西湘バイパス滄浪橋電気防食工事、橋梁と基礎、pp.18-22、2009-9
- 2) NACE Standard: Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, Item No.21043, 2000.
- 3) 青山敏幸、鴨谷知繁、石井浩司：電気防食に用いる線状陽極の効率的な設置方法に関する検討、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、第 11 巻、pp.59-64、2011.10