

電気防食 PI-Slit 工法 (ピーアისリット工法)

| | | |
|------|-----|------|
| 技術本部 | 技術部 | 青山敏幸 |
| 技術本部 | 技術部 | 鴨谷知繁 |
| 技術本部 | 技術部 | 石井浩司 |

概要: チタングリッド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防食効果が認められた。

Key Words: 電気防食, 線状陽極, コスト縮減

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線状のチタングリッド陽極を用いた PI-Slit 工法がある。陽極を横置きとするチタングリッド工法に対して、本工法は、陽極を縦置きとすることで切削手間の削減および溝修復の省力化施工によりコスト縮減を図ってきた。本工法の更なる普及とコスト縮減を図るためには、陽極設置に関わる合理化が必要不可欠である。

そこで本稿では、上記を目的として、①陽極のバリエーションの追加、②陽極設置方法の改良、についての取り組みと、②による防食効果を確認するための通電試験の結果について報告する。

2. PI-Slit 工法の改良項目

2.1 陽極のバリエーションの追加

従来は、15mm, 20mm 幅のチタングリッド陽極を使用しており、陽極を設置する溝深さを 20~25mm で設定していた。今回、10mm 幅のチタングリッド陽極もバリエーションに追加することにより、溝切削深さを 15mm 程度に低減することができ、かぶりが小さい構造物への適用も可能となった。また溝切削深さの低減により、既設構造物への損傷ダメージを最小限に抑えること、溝切削深さの低減、陽極材料費、溝切削量の低減によるコスト縮減が可能となった。

2.2 陽極の設置方法の改良

防食性能を確保させながら、溝切削深さ、溝切削量の低減を目的として、図-1 に示すように切削溝 1 本につき 2 枚の陽極を設置する方法を確立した。陽極設置方法は、切削溝 1 本につき設置する陽極の枚数に応じて、type-S (切削溝 1 本につき 1 枚 (Single) の陽極を設置)、type-D (切削溝 1 本につき 2 枚 (Double) の陽極を設置) とした。

ここで、線状陽極方式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、陽極から鋼材への電流の広がりを満足してかつ、陽極から発生する電流が限界電流量以内に収まるように決定する。陽極から鋼材への電流の広がりは、陽極と鋼材の間隔、コンクリートの



青山敏幸



鴨谷知繁



石井浩司

比抵抗等により異なるが、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酸素発生反応、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、米国腐食防食協会 (NACE) では限界電流密度を陽極材の表面積に対して $110\text{mA}/\text{m}^2$ と設定している。

例えば、図-2 に示すように、PC 桁では、下フランジの鋼材量が多く、ウェブの鋼材量が少ないのが一般的である。そのため、下フランジでは陽極の限界電流密度が、ウェブでは電流の広がり方が支配的となり、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、従来使用していた 15mm や 20mm 幅の陽極に対して、10mm 幅の陽極幅を使用し、ウェブのように鋼材量の少ない部位には type-S、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、type-D による設置を行えば、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、図-3 に示すように、鋼材量の多い部位は type-D による陽極設置を行うことで、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。

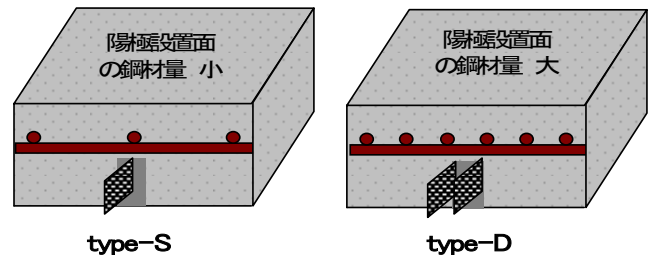


図-1 陽極設置方法の改良

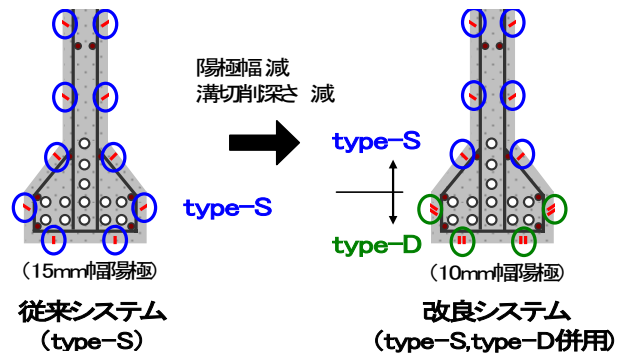


図-2 PC 桁の陽極設置イメージ

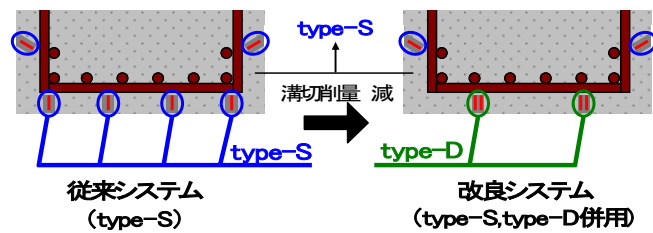


図-3 RC 栈橋の陽極設置イメージ

3. 陽極設置の改良方法に関する実験概要

3.1 供試体の概要

3.1.1 供試体の形状・寸法

本実験では、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）を用いた通電試験を実施した。

PC 供試体の形状・寸法を図-4 に、RC 供試体の形状・寸法を図-5 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 $\phi 40\text{mm}$ のシースおよび 13mm の丸鋼を、スターラップには 9mm の丸鋼を 300mm ピッチで配置した。

RC 供試体は、 $600 \times 360 \times 3500\text{mm}$ 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。

3.1.2 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。

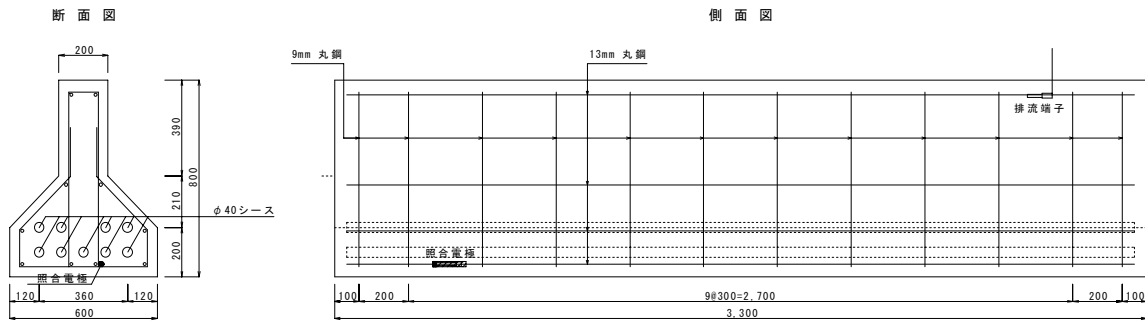


図-4 PC 供試体の形状・寸法

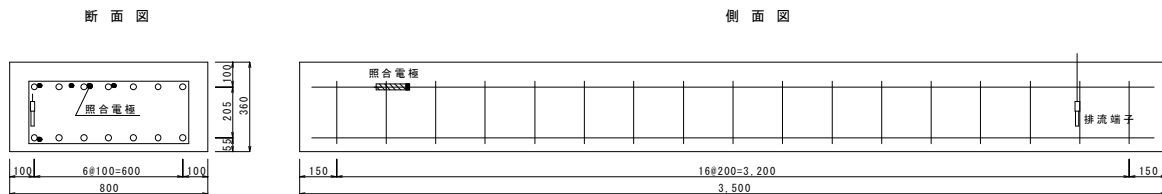


図-5 RC 供試体の形状・寸法

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^3 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グリッド陽極を使用した。陽極被覆材には、流動性の高いセメント系の陽極被覆材を充てんした。

3.1.3 陽極設置方法

PC 供試体の陽極設置位置を図-6 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。陽極被覆材は、側面で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-7 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) では、幅 15mm の陽極を 2枚セットした。

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^3) | 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3) |
| 細骨材 S1 | 砕砂 (表乾密度 2.66g/cm^3) | |
| 細骨材 S2 | 山砂 (表乾密度 2.60g/cm^3) | |
| 粗骨材 | 碎石 (表乾密度 2.70g/cm^3) | |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 遅延形(1種) | AE減水剤 遅延形(1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^3) | | | | | | |
|-----|------------|----------|------------------------|--------|-----|-----|-------|-------|--------|
| | | | 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 |

3.2 通電方法と測定項目

3.2.1 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/mm²、RC供試体の圧縮強度は34.2N/mm²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/m² (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/m² (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/m²を超えた場合には、米国腐食防食協会(NACE)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/m² (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。

3.2.2 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_{io}と称す)、電流遮断24時間後の電位(以下E₂₄と称す)、および可搬式照合電極による陽極のE_{io}を測定した。

PC供試体の可搬式照合電極による鋼材のE_{io}およびE₂₄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-8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_{io}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_{io}およびE₂₄の測定は、供試体のスターラップ位置17箇所に関して、図-9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_{io}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

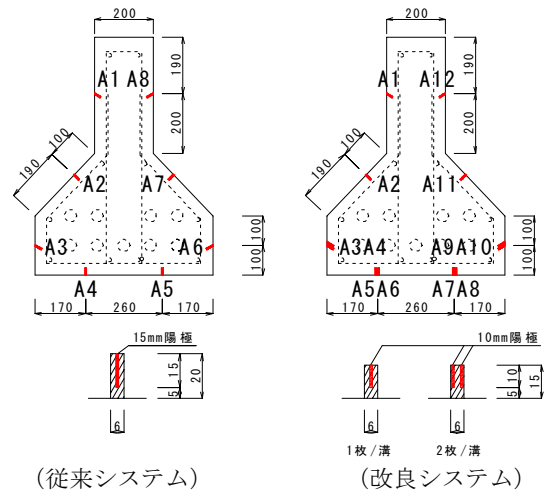


図-6 PC供試体の陽極設置位置図

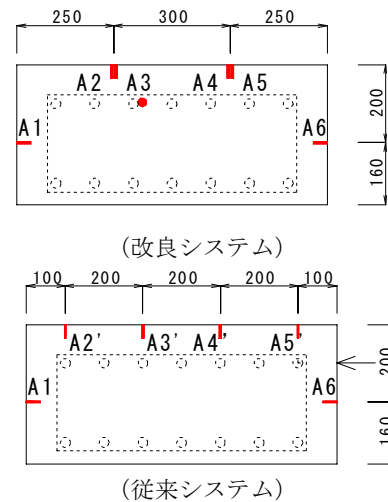


図-7 RC供試体の陽極設置位置図

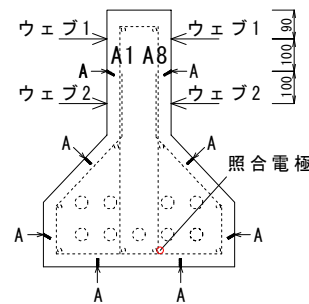


図-8 PC供試体の電位測定位置

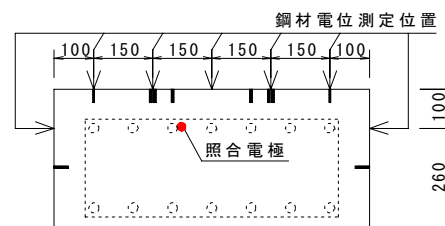


図-9 RC供試体の電位測定位置

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_{io} も測定した。

4. 陽極設置の改良方法に関する実験結果と考察

4.1 PC 供試体

4.1.1 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-10 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。

4.1.2 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-11 に示す。なお鋼材の復極量は、鋼材の E_{io} 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復極量を有している。この理由は、改良システムではウェブ位置に 10mm 幅の陽極を 1 枚配置しており、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

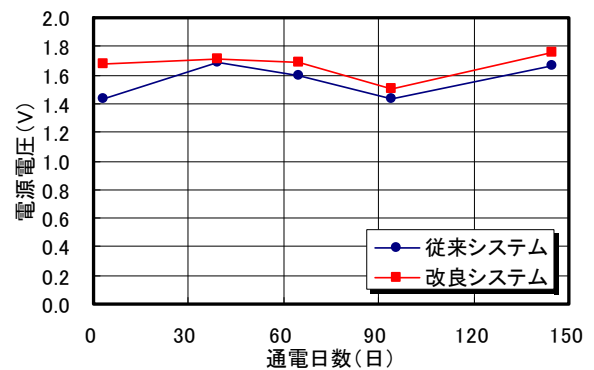


図-10 電源電圧の測定結果

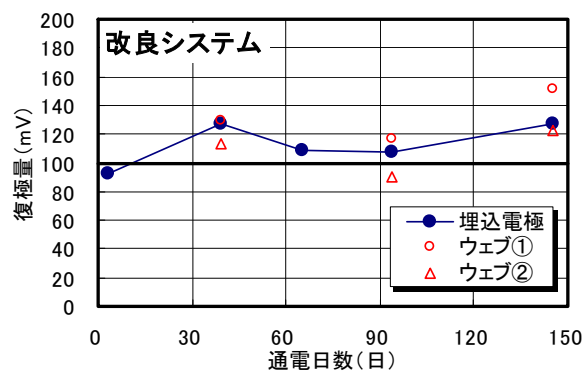
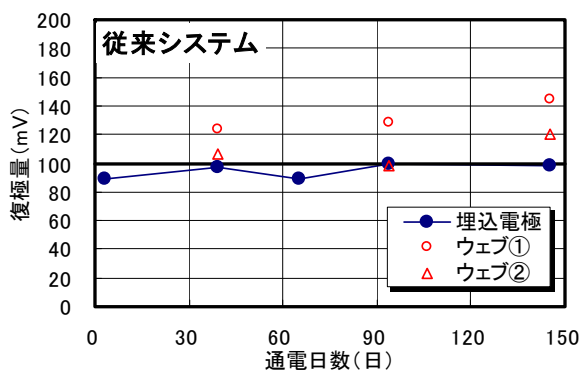


図-11 鋼材の復極量の測定結果

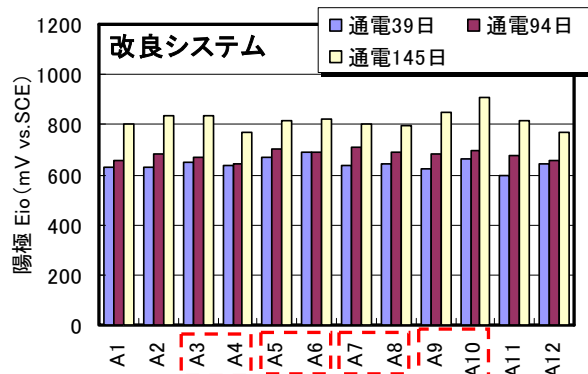
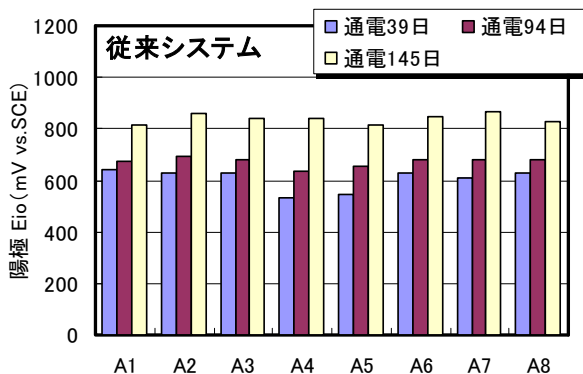


図-12 陽極のインスタントオフ電位の測定結果

陽極から発生する電流量が小さく、また、照合電極を設置した下フランジ底面で切削溝1本につき2枚の陽極を配置しているため、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。

4.1.3 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-12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-6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。

4.2 RC 供試体

4.2.1 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-13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

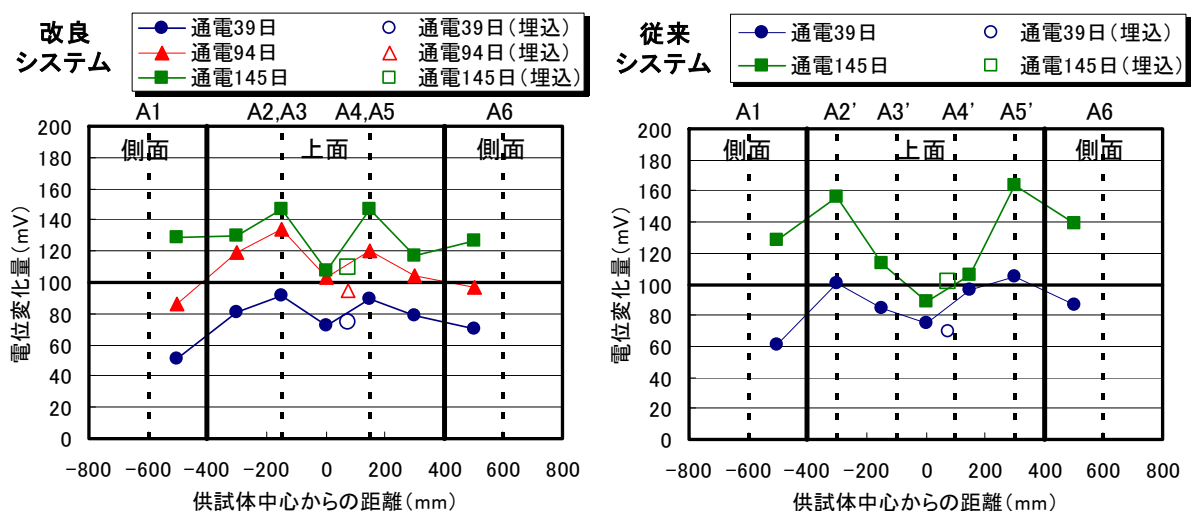


図-13 鋼材の電位変化量の測定結果

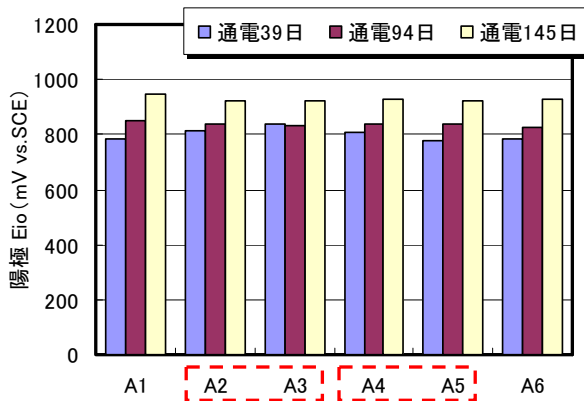


図-14 陽極のインスタントオフ電位の測定結果

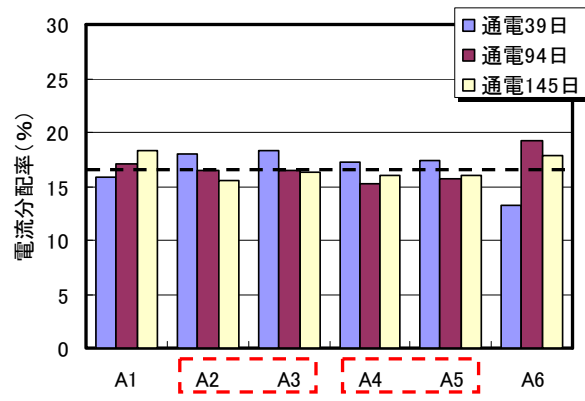


図-15 陽極の電流分配率の測定結果

は約 40mV 程度と著しく大きな差は認められなかった。通电 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、通电 39, 94 日の測定に比べて、通电 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 供試体において改良システムによる陽極設置は、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。

4.2.2 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_{io} の測定結果を図-14 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_{io} 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。

4.2.3 陽極材の電流分配

通电期間中は、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_{io} 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_{io} を測定した。

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-15 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-15 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。

5. まとめ

PI-Slit 工法における陽極設置の更なる合理化を目的として、陽極のバリエーションの追加と陽極設置方法の改良に取り組み、その効果を確認するために、RC 栈橋、PC 桁を模擬した供試体を用いた通电試験を実施した。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.

なお PC 桁を対象に, 改良システム (type-S, type-D 併用) による施工を 1 件実施している.