

論文 チタンロッド内部挿入陽極方式による電気防食工法の 桟橋上部工への適用性に関する研究

田中 英紀^{*1}・宮添 憲昭^{*2}・小川 文生^{*3}・阿部 正美^{*4}

要旨: 本研究では、チタンロッド内部挿入陽極方式による電気防食工法を桟橋上部工に適用するに当たり、劣化部である下面に陽極を設置する従来方式と上面から設置する方式とを模擬試験体を用いてその効果を比較検討した。その結果、上面からの設置方式は、従来設置方式と同等な防食効果を得るには2倍程度ロッド数が増加するが、足場を含む仮設材費の軽減や陽極設置の施工性向上が図れるため、補修コストを従来方式と同等程度にできる場合があり、桟橋上部工への適用が期待できることが判明した。

キーワード: 電気防食、内部挿入陽極方式、桟橋上部工、陽極設置方法

1. はじめに

一般に電気防食工法は、外部電源方式と流電陽極方式に大別され、コンクリート構造物には前者の適用例が多い。さらに、外部電源方式にはチタンメッシュ方式、チタングリッド方式、導電性塗料方式、内部挿入陽極方式があり、各構造物の劣化状態や立地条件等を考慮して、最適な方式が採用されている。¹⁾

桟橋上部工の塩害による劣化は、海象条件下飛沫帶となる下面に集中し、より効果的な防食効果を得るために、下面に陽極を設置する方式を採用している（以下、従来方式と称す）。しかし、従来方式では鋼管杭を利用した仮設足場を必要とする上、補修工程が潮位によって制限される場合が多い。

そこで、本研究では制約条件をできるだけ低減できる上面からの陽極設置方式に着目し、桟橋を模擬した試験体の防食実験結果から、従来方式と同等の防食効果を得るロッド本数や設置位置を設定した。また、補修コストを両方式で比較検討し、上面設置方式が従来方式と同等度になることを確認した。

2. 実験概要及び計測手法

2. 1 試験体概要

試験体は、桟橋上部工の床版を模擬して、幅800mm、長さ1,000mm、厚さ300mmの平板とし、下面への塩分浸透を考慮して300mmの部材厚のうち、下段150mm領域は15kg/m³のNaClを混入したコンクリートを用いた。

表-1に使用したコンクリートの配合表と材料一覧を示す。

表-1 コンクリート配合表と使用材料

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	設計基準強度 N/mm ²
55.0	43.3	8.0	4.5	24
単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	NaCl 混和剤
157.0	285.0	789.0	1083.0	15.0 3.05

セメント種類：	普通ポルトランドセメント
細骨材	種類：砂（陸砂） 产地：千葉県富津市横山産
粗骨材	種類：碎石2005 产地：栃木県安蘇郡葛生町

なお、鉄筋はφ13mmを幅方向に200mm間隔

*1 五洋建設㈱技術研究所係長 工修（正会員）

*2 東興建設㈱電気防食プロジェクトリーダー

*3 ㈱東京興業貿易商会建材設備営業部第一建材課

*4 港湾空港技術研究所構造部防食主任研究官 工博（正会員）

で上下2段に計8本配置した。また、試験体はチタンロッド陽極の挿入方式による相違を相対比較するために2体作成した。その概略構造図を図-1に示す。

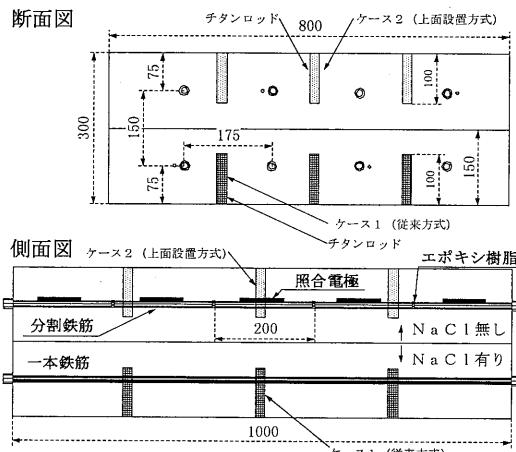
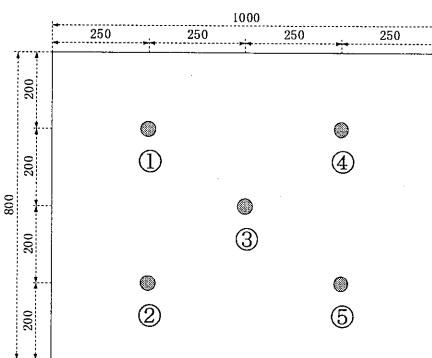


図-1 試験体構造図 (単位 : mm)

次に、チタンロッドは、NaClを混入したアノード側から挿入したケース1（従来方式）とNaClを混入していないカソード側から挿入したケース2（上面設置方式）の2ケースとし、その長さは、NaClの有無領域のどちらかに収まるように100mmに調整した。図-2にチタンロッドの平面配置図を示すが、両ケース共にロッドの平面配置は同一とした。表-2に各試験体の分割鉄筋位置での計測点対応表を示す。



注) ①～⑤はロッド配置位置を示す(単位 : mm)

図-2 チタンロッド平面配置図

表-2 各試験体計測点対応表

断面図		ケース1	ケース2
側面図			
C11	○	●	○
C12	○	●	●
C13	○	●	○
C14	○	●	●
C24	○	●	●
C23	○	●	○
C22	○	●	●
C21	○	●	○
5	4	3	2
1	2	3	4
1	2	3	4
5			
ケース	1	2	
鉄筋番号	分割番号	鉄筋番号	分割番号
C 1 1	1～5	C 2 1	1～5
C 1 2	1～5	C 2 2	1～5
C 1 3	1～5	C 2 3	1～5
C 1 4	1～5	C 2 4	1～5

注) C111はC11鉄筋の1番目の分割鉄筋を示す。

φ13mmの鉄筋は、約200mmに5分割したものをエポキシ樹脂で連結し、全てを短絡すれば電気的に一本の鉄筋となる分割鉄筋²⁾と一本鉄筋を比較できるように配置した。

2. 2 実験環境条件

作成した2試験体は、港湾空港技術研究所の暴露試験場に設置し、桟橋の環境条件を考慮して、試験体のNaClを混入した側に海水シャワーが噴射する環境下とした。図-3に海水シャワーサイクル時間を示す。

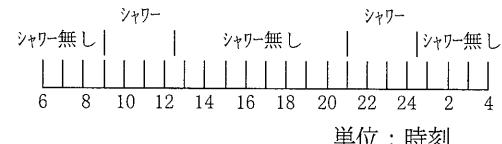


図-3 海水シャワーサイクル時間

2. 3 測定項目

本実験で行った測定項目一覧を表-3に示す。なお、照合電極はチタン製を用いており、自然電位計測結果は、CSE換算している。

表-3 測定項目

測定項目	計測頻度	ケース1	ケース2
電源電圧	連続	○	○
電流	連続	○	○
自然電位	通電前	○	○
防食電位	連続	○	○
復極量	適時	○	○
鉄筋電流値	連続	○	○
温度湿度	1時間毎	○	○
備考	計測頻度は適宜見直す		

2.4 通電方法

本実験における通電方法は、陽極をチタンロッド、陰極を分割鉄筋及び一本鉄筋とし、外部電源方式の定電圧制御による通電を行った。図-4に分割鉄筋の通電回路図を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 通電前の初期状態

通電前の分割鉄筋の初期状態を把握するため、自然電位測定を行い、ASTM基準³⁾で分類した。図-5と図-6にその結果を示すが、両試験体ともにNaClを混入した側の鉄筋は腐食している状態で、一部端部の分割鉄筋を除けば、同一の初期条件であったと推定できる。

表-4 腐食判定基準³⁾

ASTM C876 (腐食の判断基準)	照合電極：チタン電極 下記値：CSE換算値
-200mV以下(CSE)	■ 90%以上腐食無し
-200 > E ≥ -350mV	■ 不確定
-350mV以上	■ 90%以上腐食有り

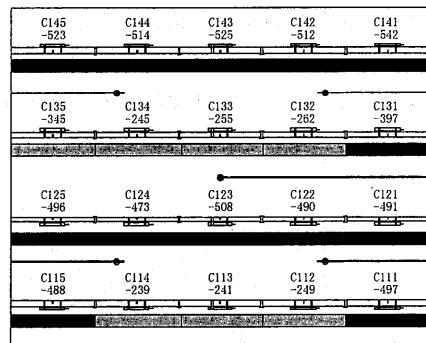


図-5 自然電位分布 (ケース 1 : 単位(mV))

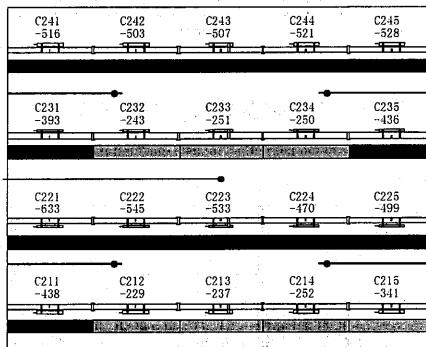


図-6 自然電位分布 (ケース 2 : 単位(mV))

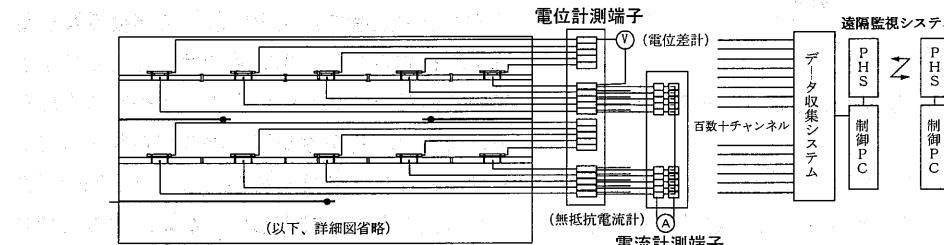


図-4 通電回路図

3.2 印加電圧による影響

平面的に5本配置したチタンロッドのうち、中央部の③のみに(図-2参照)3, 4, 5Vの電圧を印加した場合の結果を次頁の図-7, 図-8, 図-9及び図-10に示す。

ケース1の場合、ロッド近傍の分割鉄筋の復極量が大きくなる傾向を示している。印加電圧による復極量は3Vと4Vでは、電圧比率に応じた復極量分布を示すが、5Vではロッド近傍以

外ではその影響が小さいことがわかった。理由のひとつとして、今回設置した100mmのロッド長では、4V程度の印加電圧が防食効果の上限であることが考えられる。

また、本ケースでは、1本のロッドで試験体全体の鉄筋に対して、防食効果が期待できる100mV以上の復極量を示した。このことはマクロセルのアノード側に陽極を設置する方が効果

的な防食が得られる結果と整合している。⁴⁾しかし、電流密度は端部の分割鉄筋では負、あるいは零となり、中央1本の陽極では十分な防食効果が得られないことがわかった。

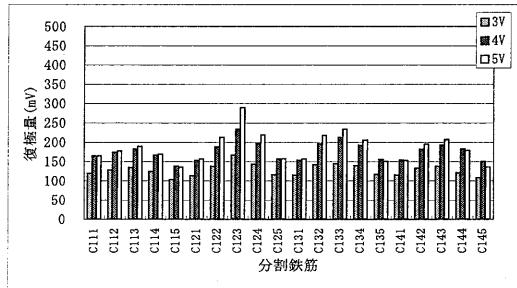


図-7 復極量分布（ケース1）

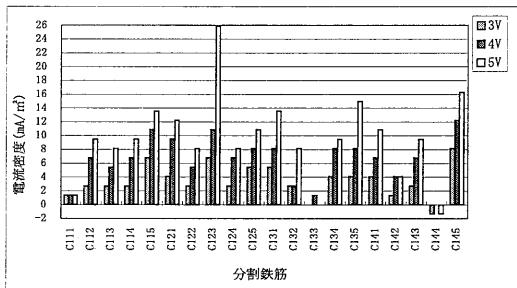


図-8 電流密度分布（ケース1）

一方、ケース2では、印加電圧の影響はケース1と同様、3V及び4Vでは電圧比率に応じて復極量は増加し、5Vではほとんど変化しなかつたが、全体的にケース1の1/3程度の復極量分布となった。また、電流密度もケース1よりも小さく局部的に負となる箇所もあった。

以上の実験より、ケース1では防食効果が期待できる100mV復極量は満足するものの、電流密度については両ケースともに負、あるいは零となる分割鉄筋が存在することから、中央部③1本のみの陽極設置（図-2参照）では試験体全体を十分防食できないものと判断した。

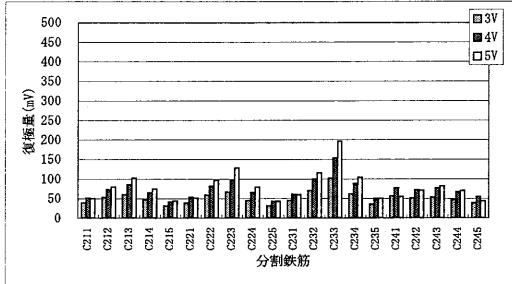


図-9 復極量分布（ケース2）

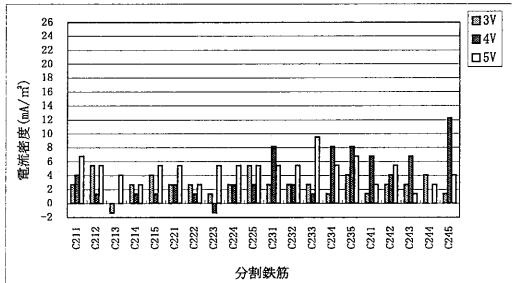


図-10 電流密度分布（ケース2）

3.3 ロッド本数による影響

従来方式（ケース1）と上面設置方式（ケース2）について、効率的な防食効果が得られるロッド配置を確認するために、以下の表-5に示すロッド配置で電圧を印加して復極量及び電流密度を測定した。本実験では、全ての分割鉄筋の復極量が100mV以上で、かつ電流密度が正となる最小陽極数配置の場合が各ケースで最も効率的な防食効果が得られるロッド配置パターンの条件として設定した。なお、本実験での印加電圧は、全て3Vとした。

表-5 最適配置確認実験一覧

従 來 方 式	実験ケース	ケース1-1	ケース1-2	ケース1-3
使用	①	④	① ④	
ロッド番号	③	③	③	
②	②	②	② ⑤	
実験ケース	ケース2-1	ケース2-2	ケース2-3	
使用	①	④	① ④	
ロッド番号	③	③	③	
②	②	②	② ⑤	

注) 各丸数字は、使用したロッドを表示する。

詳細位置関係は図-2を参照のこと。

図-11, 図-12, 図-13 及び図-14
に復極量分布と電流密度分布を示す。

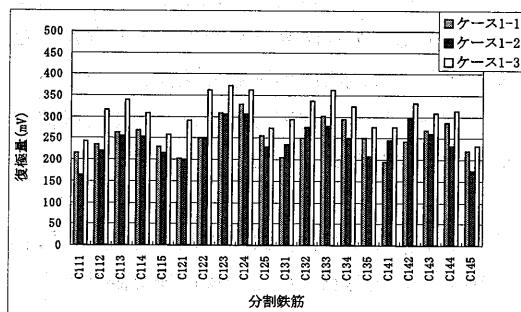


図-11 復極量分布 (従来方式)

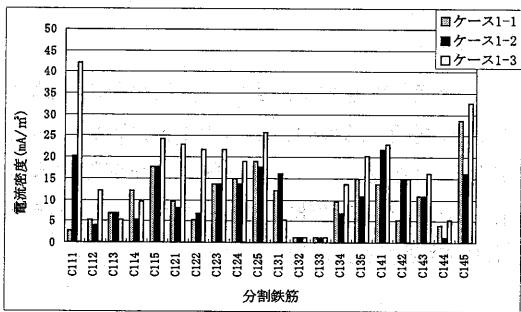


図-12 電流密度分布 (従来方式)

従来方式では、ケース1-1とケース1-2の3本の陽極を用いた場合が条件を満たす最小ロッド数であるが、ケース1-1の場合、試験体の隅角部での電流密度が小さくなるため、ここではケース1-2を従来方式の最適配置とした。

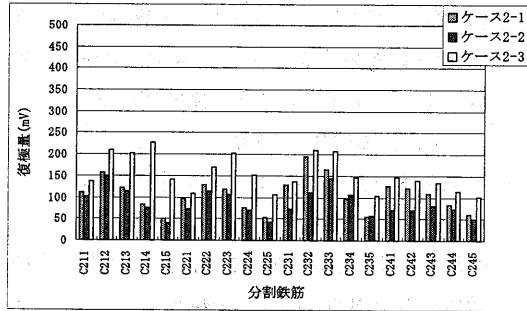


図-13 復極量分布 (上面設置方式)

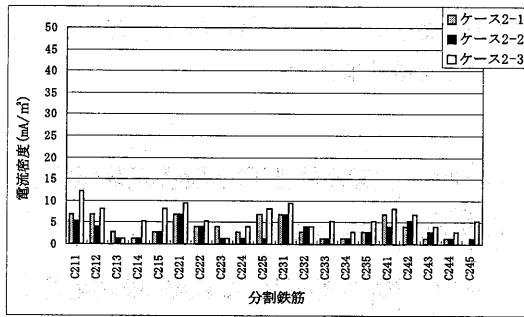


図-14 電流密度分布 (上面設置方式)

上面設置方式ではケース2-3の5本陽極の場合のみが条件を満足するので、これを上面設置方式の最適配置とした。

復極量は、両方式ともに陽極設置付近が大きくなり、陽極から離れるに従って小さくなる傾向を示した。一方、電流密度は、一部の鉄筋を除いて自然電位との相関が認められた。即ち、90%以上の確率で腐食がありと推定された分割鉄筋の電流密度は大きく、不確定と推定された分割鉄筋は小さくなる傾向が確認された。NaClを混入しなかった側の鉄筋表面には不動態皮膜が存在し、防食電流が小さくても効果が得られていることが推定された。⁵⁾

4. 補修コスト比較

次に、外観上のグレードでII-1(加速期前期⁶⁾)に相当し、電気防食と断面修復を併用した揚油桟橋の補修例を基に、チタンロッド陽極を従来方式と上面設置方式に適用した場合の補修コスト比較を行った。

コスト比較の前提条件は、①各方式の陽極設置数は、今回の実験結果を基に従来方式の3に対して、上面設置方式を5の割合で配置した、②項目は、補修コストに占める割合の大きなものに着目した、③断面修復を併用する状態(外観グレードII-1(加速期前期))⁶⁾程度と軽微な劣化状態(外観グレードI-1(潜伏期))⁶⁾以前で補修を実施した場合を対象とした、④補修コストが最も大きい場合を基準とし、他の例

はこれに対する比率として提示した。図-15にコスト比較結果を示す。

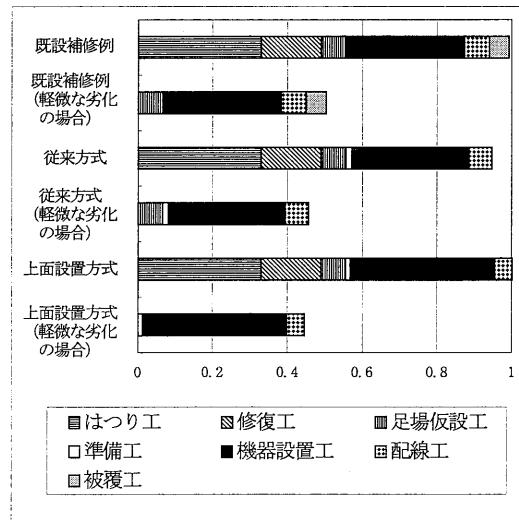


図-15 補修コスト比較例

同図より、劣化が進展した場合は、両方式のどちらを採用しても補修コストが増大することがわかった。しかし、劣化が軽微な場合は、コンクリートのはつりや断面修復を必要としないため、コストを大きく低減できる。この結果は、補修は劣化が軽微な段階で実施することがコスト面で最も有効であることを反映している。

また、従来方式と上面設置方式との比較では、ほぼ同等の補修コストであることがわかり、桟橋上部工の補修工法として適用可能であることが判明した。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

①印加電圧と防食効果の関係については、4V程度までは印加する電圧に応じて復極量は比例的に増加する傾向を示したが、5Vでは影響がほとんどなく、ロッド長による効果の上限が存在することが推定できた。

②中央部のみの陽極設置実験から、従来方式では100mV以上の復極量分布を得られたが、上面設置方式では、これの1/3程度の分布しか

得られなかつた。

③この場合、両方式ともに電流密度が負、あるいは零となる分割鉄筋が存在したため、中央1本陽極では十分な防食効果が期待できなかつた。

④復極量と電流密度の両者の条件を満足する陽極設置数比率は、従来方式では3、上面設置方式では5の割合となつた。

ロッド長の増大は、設置本数の低減化が図れる手法と考えられるので今後の研究課題として、コスト低減対策工法へと展開すると共に外気温度と防食効果、鉄筋の腐食状況を今回の実験で追跡調査して行く予定である。

謝辞

本研究を実施するに当たり、実験計画、試験体設置運搬、結果のまとめにご協力頂いた㈱東京興業貿易商会の古賀創一郎氏、東興建設㈱の徳永俊二氏、五洋建設㈱の田中靖之氏に紙面を借りて深謝致します。

参考文献

- 1) C P 工法研究会：コンクリート構造物の電気化学的補修工法パンフレット, 1997
- 2) 山本誠ほか：電気防食による防食電流分布に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp1039-1044, 1999.7
- 3) ASTM C876 Standard Test Method for Half Cell Potentials Of Reinforcing Steel in Concrete, 1980
- 4) 田中健一郎ほか：コンクリート構造物に内部挿入型電極方式を適用した場合の電極配置、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp913-918, 1995.6
- 5) 阿部正美ほか：コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食と電気防食によるアノード、カソードへ流入する電流及び分極量、港湾技術研究所報告、第33巻第2号, 1994.6
- 6) 土木学会, 【2001年制定】コンクリート標準示方書「維持管理編」, pp109-111, 2001.1