

鋼製橋脚飛沫干満部防食用チタンクラッド鋼板の防食性能について

香川祐次*・中村俊一**・本間宏二***・
等 俊一****・田所 裕*****

チタンクラッド鋼板を用いた鋼製橋脚の飛沫干満帯部の防食法を開発し、その防食性能を実験により検討した。その結果、チタン面はいかなる条件においても腐食せず、海水に接する境界面では電気防食と併用することにより、また大気部と接する境界面では塗装と併用することにより異種金属腐食が防止できることが判明した。また、これらの結果は海洋暴露試験によっても検証された。さらに、東京湾横断道路の実構造物に適用するための施工基準を作成した。

Keywords : titanium clad steel plates, corrosion protection of steel piers, galvanic corrosion, cathodic protection

1. はじめに

東京湾横断道路は、約10 kmのトンネルと43基の橋脚に支持される4.4 kmの橋梁部、2つの人工島からなっており、その沖合橋梁の下部工は、図-1に示すような12基の鋼製水中橋脚形式である。東京湾横断道路は耐用年数50~100年を目標としており、腐食環境の極めて厳しい海上に架設される橋梁であるため、その防食対策の重要性は極めて高い。海洋鋼構造物の防食法の概要は、水中部は電気防食、海上大気部は塗装が用いられ、それをある期間ごとに更新していく考え方をとっている。その両者の接点にあたる飛沫・干満部については補修が困難であるため、腐食環境が過酷であるにもかかわらず、十分な長期耐食性を有し維持補修を必要としない方法は未だ確立されていない。従来から飛沫・干満部に対して各種の防食法の開発が試みられてきたが、長期耐用年数の期待に応えるため、耐食性を有する金属の利用が期待される。

海水に対する耐食性を有し、工業的に十分供給可能な金属として、ステンレス鋼、チタンなどがあげられるが、チタンは海水中、大気中はもちろん海洋生物付着下での隙間腐食に対しても優れた耐食性を有しており、鋼製橋脚の飛沫・干満部の被覆防食材料として十分な性能を発揮することが期待される。しかしながら、一方では炭素鋼とチタンのように異なる金属が海水中に共存する場合には、異種金属接触腐食が発生し炭素鋼部分の腐食が加速される懸念があり、この防止策が開発のポイントであるといえる。

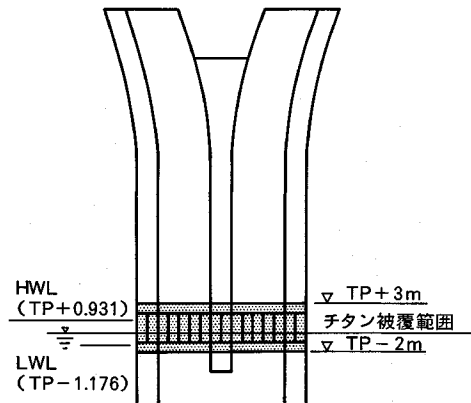


図-1 東京湾横断道路の鋼製橋脚外観

本報告では、新しく開発された本防食法の基本的考え方と、その防食性能に関する実験室における腐食試験と実海域での曝露試験の結果およびそれに基づく考察について述べる。

2. チタンクラッド鋼板による防食法の基本的考え方

チタンの一般的性質としては、密度 4.5 g/cm^3 で鋼に比べて60%以下と軽量であり、ヤング率 10850 kgf/mm^2 (106.3 GPa)は鋼のおよそ半分である。引張強さはJISに規定されるチタン板(2種)では $35\sim 52 \text{ kgf/mm}^2$ ($343\sim 510 \text{ MPa}$)であり、重量に比べ強度が高い金属であると言える。また、チタンは優れた耐食性を有する金属であり、 Cl^- イオンの存在下においても、全面腐食はもちろん孔食および隙間腐食にも著しく強いという特徴を持っている¹⁾。その耐食性の機構は、酸化性の環境下で極めて安定な不動態被膜を生成し、腐食を抑制することによることが知られている²⁾。

一方、チタンと鋼を溶接することは、脆い金属間化合

* 正会員 (前)東京湾横断道路(株) 設計部設計第三課 課長 (〒102 千代田区一番町15-5)

** 正会員 Ph. D. 新日本製鐵(株) 橋梁構造部

*** 正会員 新日本製鐵(株) 設備技術本部土木建築技術部

**** 正会員 新日本製鐵(株) 第二技術研究所

***** 新日本製鐵(株) 第二技術研究所

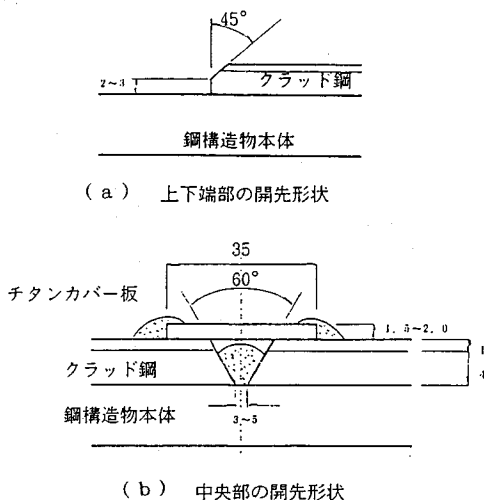


図-2 チタンクラッド鋼板溶接図

物が生成するため、一般に不可能であることが知られている。そのためチタンを鋼構造物に直接溶接接合する以外の方法をとる必要があり、図-2に示すようにあらかじめ工場で製造されたチタンクラッド鋼板を鋼構造物に取り付ける方法を考案した。すなわち、まずチタンクラッド鋼の鋼材部と橋脚本体とを溶接し、次いでチタンクラッド鋼の突合せ部をチタン板で被覆し、チタン同士の溶接を行う。最後に端部の隙間をろう材によりシールする方法をとっている。海洋構造物の飛沫・干満部の防食板としての用途の場合、チタンの厚みは流木等の衝突による損傷防止のため1mm程度確保することが好ましいといわれている³⁾。また、チタンクラッド鋼の鋼材部分の厚さは本体との溶接を考慮し、4mmを確保した。

このようなチタンクラッド鋼板を利用して、飛沫・干満帯を防食する場合、先に述べたようにチタンと鋼の間で異種金属接触腐食の発生を防止することを念頭におかなければならない。そのため、海洋環境において予測される異種金属接触腐食がどの程度のものなのか、またそれを防止する有効な方法はあるか、という点について明らかにする必要がある。

3. 異種金属接触腐食とその防止法

金属材料を海水中に浸漬すると、その材料に固有の電位を示す。種々の金属材料を浸漬した結果、図-3に示す電位列⁴⁾が得られている。炭素鋼は通常の海水中において腐食するが、図-3の電位列において炭素鋼より貴な電位の金属(例えばチタンあるいはステンレス鋼など)が接触すると炭素鋼の腐食が早められる現象すなわち異種金属接触腐食のみられる場合がある。

異種金属接触腐食には、卑な金属と貴な金属の組合せ(電位差)、極極特性、面積比、溶液の電気伝導度、溶

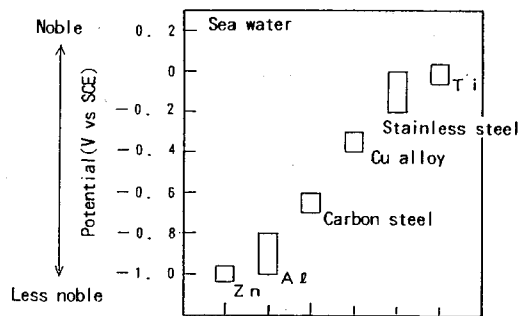


図-3 海水中での金属材料の電位列

存イオン濃度、pH、温度などが影響を与えるといわれている。

チタンクラッド鋼板橋脚防食材は鋼製橋脚と溶接接合された後、橋脚の炭素鋼露出部が塗装されるため異種金属接触腐食はそのままの状態では起こりにくいとみられる。しかし長時間経過後には、① 塗装の局部的剝離、② 流木や船舶の衝突による表層チタン板の損傷などにより炭素鋼が露出する状況が起こり得ないとはいえない。また、その状況においてチタンと炭素鋼の面積比によっては炭素鋼の腐食がかなり早められ、橋脚の耐用年数が著しく低下することが懸念される。そのため、異種金属接触腐食の防止対策を施す必要がある。

チタンクラッド鋼板橋脚防食材が適用される環境は、飛沫帯、干満帯、海水中と複雑であり、異種金属接触腐食はそれらの環境によって異なった挙動を示すと推測される。したがって、異種金属接触腐食現象の把握およびその防止対策の評価についてはそれぞれの環境を模擬した試験を行うのが適切であると考えられる。

本研究では飛沫帯、干満帯、海水中の腐食環境を模擬した室内試験により異種金属接触腐食現象の把握、および防食対策として従来鋼製橋脚の防食に用いられてきた流電陽極法による異種金属接触腐食防止の効果について評価した。

(1) 供試材および試験方法

a) 供試材

厚さ5mm(チタン1mm、炭素鋼4mm)の熱延チタンクラッド鋼製品板を用いた。面積比の影響を調べる為に、チタン表面積2000mm²に対して、鋼板中心部にチタン表面から深さ2mmの穿鑿および旋盤加工を行い、炭素鋼の露出面積を変化させ、チタン表面積/炭素鋼表面積の比を0~1000とした。表面をアセトンで脱脂、洗浄し、裏面および端面をエポキシ樹脂で塗装した後腐食試験を行った。

b) 飛沫帯環境を模擬した腐食試験

飛沫帯は海水飛沫による濡れおよび日射や風による乾燥が繰返される環境とみられる。そこで、図-4に示す

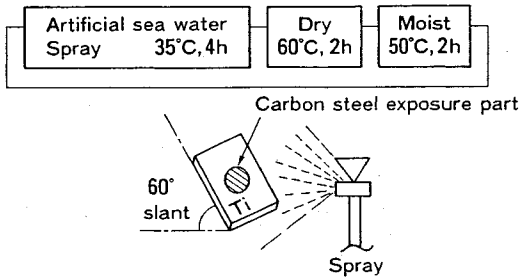


図-4 複合サイクル腐食試験

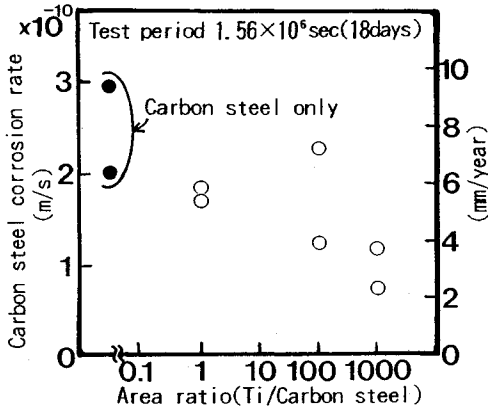


図-5 複合サイクル腐食試験における炭素鋼腐食速度

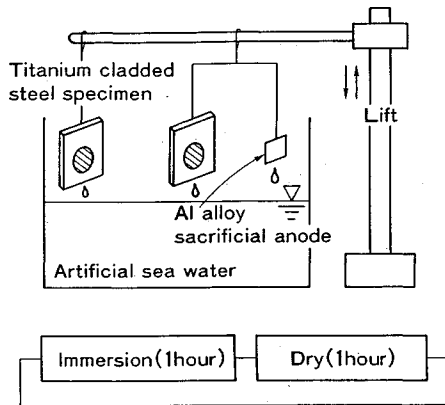


図-6 乾湿繰返し試験

ように、人工海水噴霧および高温熱風乾燥の繰返しを基本とし、さらに高めの温度の湿润状態を加えた複合サイクル腐食試験を行った。実際の飛沫帯に比較してかなり苛酷な環境であり腐食が大きく促進されると考えられたので、短期間(18日)の試験を行った。

c) 干満帯環境を模擬した腐食試験

干満帯は海洋の干満により浸漬状態と乾燥状態が繰返される環境とみられるので、図-6に示す試験片昇降装置を用いて乾湿繰返し試験を行った。試験条件は人工海水浸漬1時間と自然乾燥1時間で、実際の干満帯の平均

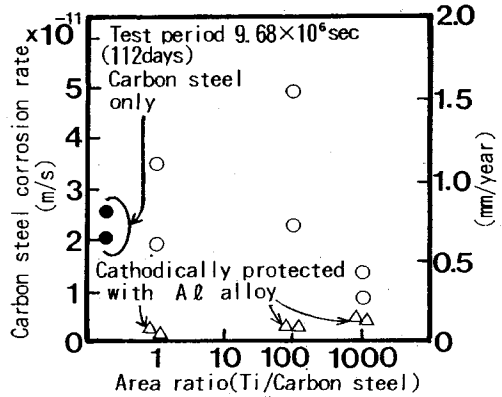


図-7 乾湿繰返し試験における炭素鋼腐食速度と電気防食効果

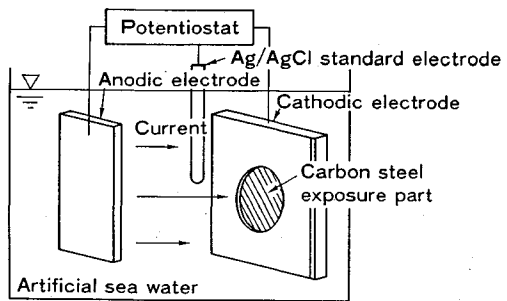


図-8 炭素鋼が露出したチタンクラッド鋼板の電気防食試験

海面の浸漬6時間、乾燥6時間に比し、単位時間の繰返し回数を多くし腐食を促進させたが、促進の程度が小さかったので比較的長期間(112日)試験を続けた。防食についてはAl電流陽極を供試材にエナメル銅線で結合し、裏面および側面はエポキシ樹脂で被覆した。

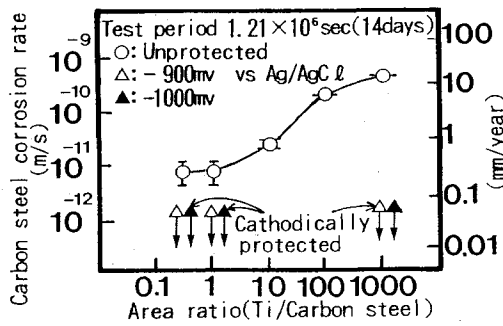
d) 海水中環境を模擬した腐食試験

海水中環境については人工海水における浸漬腐食試験を行った。防食についてはAl系合金電流陽極による電気防食を想定し、鋼構造物の防食電位が-780 mV以下(銀-塩化銀電極基準)であることから図-8に示すようにポテンショスタットを用い-900 mVおよび-1000 mV(銀-塩化銀電極基準)に設定した定電位試験を行った。

(2) 試験結果および考察

a) 飛沫帯環境を模擬した腐食試験

チタンクラッド鋼板のチタン面は腐食が全くみられなく炭素鋼露出部のみに腐食がみられた。図-5に実験前後の形状変化より求めた炭素鋼の最大腐食深さから計算した腐食速度を示す。鋼の飛沫帯における腐食速度がおよそ0.3 mm/year⁵⁾であることと比較すると、炭素鋼単独の腐食速度が非常に大きく試験環境がかなり厳しいことを示している。しかし予想に反しクラッド鋼板の炭素鋼露出部の腐食速度は、いずれの面積比においても炭素



図—9 浸漬試験における炭素鋼腐食速度と電気防食効果

鋼単独の腐食速度を超えることがなく、チタンの接触による影響はみられなかった。万が一の防食対策としては浸漬状態がなく電気防食が期待できない環境であることからクラッド鋼板端面の炭素鋼露出部については塗装を施し、衝突によるクラッド鋼板損傷部についてはチタン板による補修等を施すことが考えられる。

b) 干満帯環境を模擬した腐食試験

図—7に炭素鋼の最大腐食深さから計算した腐食速度を示す。鋼の干満帯における腐食速度が0.1~0.3 mm/year⁵⁾であることと比較すると炭素鋼単独の腐食速度は若干大きい程度であり、腐食促進の程度は小さい。Al流電陽極を結合しない場合すなわち電気防食のない場合は、面積比が100以下では面積比が増大するに伴って炭素鋼露出部の腐食速度が増加する傾向がみられ、チタンの接触による影響がみられた。ところが面積比が1000の場合は腐食速度が小さくなっている。これはa)についても言えることであり、炭素鋼露出部が小さく、全面が堅い錆で覆われているため、その錆が環境を遮断し腐食を抑制したのではないかと考えられる。ただし、水中ではさびは硬化しないため、この現象はc)の海水中では見られなかった。

Al流電陽極を結合した場合は腐食速度がかなり小さく浸漬状態における電気防食が有効であることがわかった。したがって、干満帯環境においても電気防食が異種金属接触防食防止に有効であるとみられる。

c) 海水中環境を模擬した腐食試験

図—9に炭素鋼の最大腐食深さから計算した腐食速度を示す。電気防食のない場合、面積比が1以下の場合には炭素鋼単独の腐食速度と大差なく、また鋼の海中部の腐食速度0.1 mm/year⁵⁾とほとんど変わらない。ところが面積比が増大するに伴って腐食速度の増加がみられ、飛沫帯、干満帯に比し、チタン接触による大きな影響がみられた。

一方、電気防食のある場合は面積比が大きい場合でも腐食はみられなく、電気防食の効果が非常に大きいことがわかった。したがって、海水中においては電気防食に

より異種金属接触腐食防止が可能であるとみられる。

4. チタンクラッド鋼への塗膜付着性について

チタンはその優れた耐食性から、一般には塗装しないて用いることができるが、鋼製橋脚本体とチタンクラッド鋼板との取り付け部については、端部を防食するために塗装を用いることが考えられる。海洋環境ではエポキシ樹脂塗料がチタンに対しても良好な付着を得るとの報告⁶⁾もあるが、普通鋼と同様な塗装方法で同様な付着が得られるか否かが不明である。

塗膜の付着に関わる要因として素地調整の方法や塗料の種類が考えられる。また電気防食との併用時に塗膜の陰極剝離の問題がある。ここではこれら要因により、チタン面への付着性の影響を検討した。

(1) 塗膜の付着性評価

素地調整の方法に関しては、使用する研掃材、表面粗さの違いによる影響を検討する必要がある。また、塗料の種類に関しては着色を目的としたフッ樹脂塗料のみを使用する場合とチタンへの付着を期待したエポキシ樹脂塗料を下塗りに使用する場合を比較した。

供試体はチタンクラッド鋼および普通鋼とし、素地調整はサンドブラストおよびグリッドブラストで行い、表面粗さは20および40 μm とした。塗装仕様としては、フッ樹脂のみ(60 μm)で塗装したものと、エポキシ樹脂(200 μm)下塗りの上にフッ樹脂(60 μm)で塗装した2ケースを比較した。サンプルの評価方法は、一次物性として塗膜硬化後(20°Cにて塗装, 7日間養生)、塗膜の付着力を測定する。さらに、二次物性として塗膜硬化後、食塩水(40°C, 3%)に一月間浸漬し、塗膜の付着力を測定する。塗膜の付着力はゴバン目試験、アドヒージョン試験(図—10参照)にて測定する。ゴバン目試験の試験方法については、JIS K 5400にしたがった。アドヒージョン試験については、アルミニウム製のドーリーを直径25 mmの円形範囲の塗膜に接着し、接着面の外側と縁を切ったうえで、ドーリーを引張り上げて、それが塗膜から離れた瞬間の密着力を測定した。

素地調整方法(研掃材、表面粗さ)および塗料の種類による付着力の試験結果を表—1および図—11に示す。これによれば、アドヒージョン試験の一次・二次物性の結果は、素地調整の方法(研掃材、表面粗さ)によらず、チタンと普通鋼とは同様の塗料の付着性を示している。しかし、塗料の種類で見るとフッ樹脂塗料のみの場合、アドヒージョン試験の二次物性値は一次に比べて低下しているのがわかる。また、破壊形態に界面破壊が観察され、明らかに塗膜の付着力が低下している。一方、エポキシ樹脂塗料を下塗りとした場合、付着力の低下は見られない。破壊形態は塗膜の凝集破壊であり、ここに示すアドヒージョン試験の値は塗膜の凝集力であるが、付着

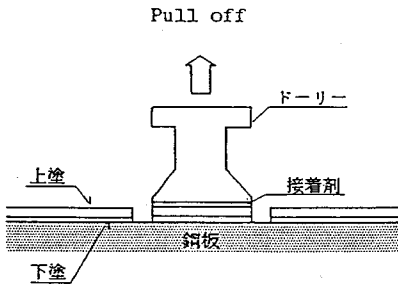
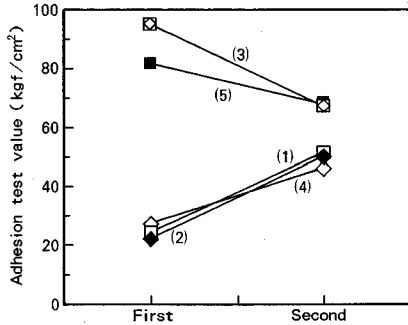
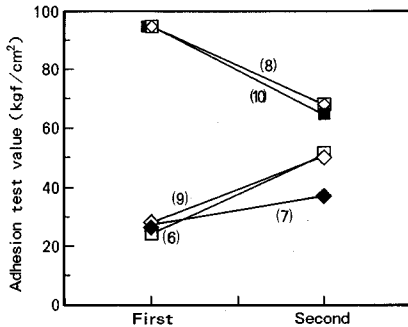


図-10 アドヒージョン試験方法



(a) Result of adhesion test on titanium



(b) Result of adhesion test on carbon steel

図-11 (a) チタンおよび (b) 普通鋼における塗膜の付着性 (1次および2次) 試験結果

力はこの値以上であることがわかる。

(2) 耐陰極剥離性の評価

塗膜は電気防食と併用した場合、陰極側(防食される側)に水が電気分解して水素が発生したり、OH-イオンが発生して剥離を生じる。この剥離の影響は主に塗料の種類によって異なる。チタンクラッド鋼および普通鋼にフッ樹脂塗料のみを塗装した場合と、エポキシ樹脂塗料を下塗りに使用した場合について、耐陰極剥離試験を実施した。供試体および素地調整、塗膜厚については前項とほぼ同様である。また、サンプル評価方法としては、サンプルの塗装面に直径5mmの金属面に達する傷を入れ、食塩水(20°C, 3%)に浸漬し、一か月後、塗膜の陰極剥離状況を観察する。電気防食は電極を白金と

表-1 塗膜の付着性

図-11の番号	研削材の種類	表面粗さ(Rz)	塗料の種類		ゴバン目試験結果	アドヒージョン試験密着力(kgf/cm ²)	
			下塗	上塗			
チタンクラッド	1	グリッド	40 μm	エポキシ	フッ	9/9 (9/9)	24 (51:凝集及び接着)
	2	サンド	40 μm	エポキシ	フッ	9/9 (9/9)	22 (50:凝集及び接着)
	3	サンド	40 μm	-	フッ	9/9 (9/9)	95 (67:凝集及び界面)
	4	サンド	20 μm	エポキシ	フッ	9/9 (9/9)	27 (46:凝集及び接着)
	5	サンド	20 μm	-	フッ	9/9 (9/9)	82 (68:凝集及び接着)
普通鋼	6	グリッド	40 μm	エポキシ	フッ	9/9 (9/9)	24 (51:凝集及び接着)
	7	サンド	40 μm	エポキシ	フッ	9/9 (9/9)	27 (37:凝集及び接着)
	8	サンド	40 μm	-	フッ	9/9 (9/9)	95 (68:凝集及び界面)
	9	サンド	20 μm	エポキシ	フッ	9/9 (9/9)	28 (50:凝集及び接着)
	10	サンド	20 μm	-	フッ	9/9 (9/9)	95 (65:凝集及び接着)

一次物性 / () 内二次

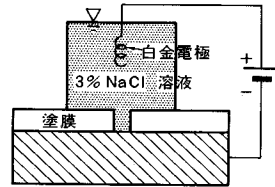


図-12 陰極剥離の測定方法

した外部電源方式により、印加電圧を-1.2V (v.s. SCE:飽和甘こう電極基準)で行った。図-12に測定方法を示す。

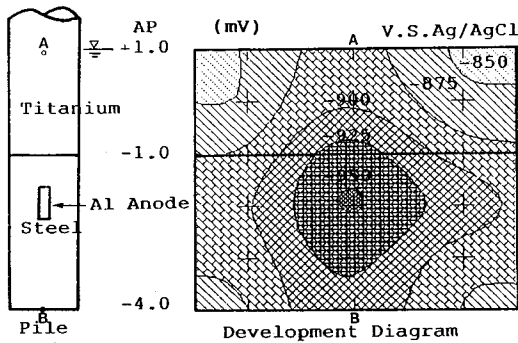
耐陰極剥離性試験一か月後に供試体を観察した結果、フッ樹脂のみを塗装したチタンクラッド鋼表面では、全面に直径2~3mmの小さなふくれがみられ、塗膜が剥離していた。しかし、エポキシ樹脂およびフッ樹脂を塗装したチタンクラッド鋼表面では、傷部周辺の塗膜に変色が見られるが塗膜剥離はなかった。また、普通鋼の供試体についても同様の状況であった。したがって、チタンへの塗膜付着性は普通鋼のそれと同様に十分に期待できること、また、塗膜の付着性を得るには、下塗り塗料に耐水密着性のよいエポキシ樹脂塗料を使用することが有効であるといえる。しかし、今回の試験では供試体の数も少ないため今後更に検討する必要がある。

5. 海洋曝露実験

室内試験の結果から、チタンクラッド鋼を適用するにあたって、チタンと鋼が接する境界部や万一損傷を生じた部分に対して異種金属接触腐食の防止策が必要であり、その方法として水中部および干満帯では電気防食が有効であることを示した。また、飛沫帯では異種金属接触腐食の影響は小さいこと、およびチタンへの塗膜付着

表—2 チタンクラッド鋼板被覆鋼管杭の曝露試験仕様

構造部位	仕様1	仕様2	仕様3
A 空中鋼材	フッ素樹脂系塗装	重防蝕塗装(標準)	重防蝕塗装(欠陥付)
B 空中クラッド端部	フッ素樹脂系塗装	重防蝕塗装(標準)	重防蝕塗装(欠陥付)
C 空中チタン	フッ素樹脂系塗装	裸チタン	裸チタン欠陥付き
D 干満帯	フッ素樹脂系塗装+(電防)	裸チタン+(電防)	裸チタン欠陥付き+(電防)
E 水中チタン	フッ素樹脂系塗装+電防	裸チタン+電防	裸チタン欠陥付き+電防
F 水中クラッド端部	フッ素樹脂系塗装+電防	裸チタン+電防	裸チタン+電防
G 水中鋼材	無機ジंकケータールエポ+電防	裸鋼材+電防	裸鋼材+電防

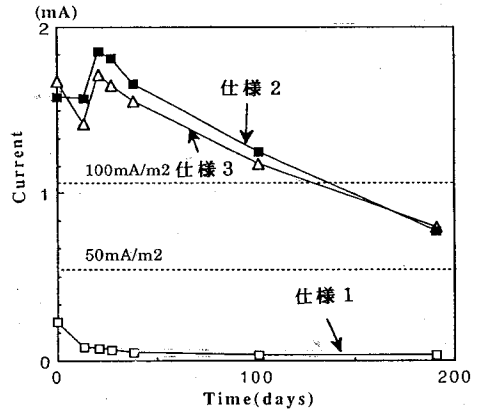


図—13 電気防食電位測定結果 (100 日目)

性も確保されることから、塗装の適用が可能であることが示された。

しかしながら、以上の検討は室内試験が主体であり、構造物レベルでの実際の海洋環境における性能の確認が必要である。そこで、チタンクラッド鋼板によって被覆した鋼管杭を平成2年4月より5か月間曝露し、その間、金属表面の電位と電気防食陽極発生電流等電気化学測定を行って防食性能の確認を行った。曝露は東京湾に面した新日本製鉄君津製鉄所の東岸壁(水深約11m)において実施した。

実験条件としてはφ600×8.5mの鋼管杭の飛沫・干満帯にあたる中央部4mの部分をチタンクラッド鋼板により被覆し、表—2に示す3種類の仕様を用意した。先に述べたようにチタン自体の海洋環境における耐食性は極めて良好であり、本試験では主にチタンと鋼材間の異種金属接触腐食の防止法の部分に主眼をおいた試験計画とした。仕様選定の考え方としては、仕様1はチタ



図—14 電気防食電流の経時変化

ンクラッド鋼に塗装した場合の塗膜密着性の評価を目的とするもの、仕様2はチタンクラッド鋼を未塗装でしようした場合の防食性能評価と電気防食効果の調査を目的とするもの、仕様3は仕様2の条件と同じものに対してチタンクラッド部分に故意に炭素鋼板に到達する孔をあけ、異種金属接触腐食に対する電気防食の効果を検査する目的のものとした。

一方、鋼管杭の曝露に隣接してモニタリングプレートによる曝露実験も行っている。モニタリングプレートの仕様は10cm×10cmのチタンクラッド鋼板に対して、鋼管杭に付与したものと同等の欠陥孔をあけ、電気防食の有無による異種金属接触腐食の状況の調査を行った。モニタリングプレートの設置位置としては、飛沫帯(AP+3.0m)・干満帯(AP±0m)・海中部(AP-1.0m)の3水準とし、各環境における腐食の特性の把握を行うことも目的としている。

これまで設置直後、38日目、100日目、180日の4回にわたる調査を行った。調査項目としては、鋼管杭の曝露材に対して、電気防食の電位・アルミ陽極の発生電流の測定を行った。図—13に鋼管杭の電気防食の電位測定結果を、図—14に陽極発生電流の変化を示す。電気防食の所用防食電流密度の設計にあたっては、チタン表面、鋼材表面ともに初期100mA/m²と仮定し、1.5A/10年用アルミ陽極を取り付けている。電位測定の結果、裸鋼材部分の電位は人工海水銀塩化銀電極基準で-850~-1000mVに達しており、電気防食が効果的に作用する「防食電位-780mV以下」の基準⁷⁾を満足していることが確認された。また、陽極発生電流の値は曝露期間の経過とともに低減し、180日目には100mA/m²以下に達し、初期設計値を満足した。

一方、38日目にはモニタリングプレートの回収を行った。図—15に飛沫帯・干満帯・海中部の各部位におけるモニタリングプレート欠陥孔からの腐食の状況を示

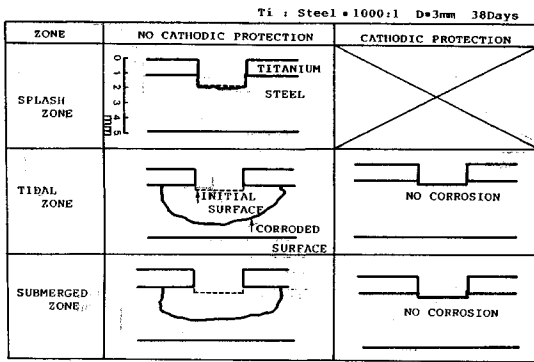


図-15 モニタリングプレート欠陥孔からの腐食状況

す。電気防食の無い場合、室内試験での検討から予測されたように、干満帯・海中部とも異種金属接触腐食の作用で著しく腐食が加速されているのに対し、電気防食が有る場合、異種金属接触腐食は見られないことが確認された。一方、電気防食の作用しない飛沫帯では、腐食は認められたものの、海中部・干満帯に比べ異種金属接触腐食の影響は小さいことが判明した。

6. チタンクラッド鋼ライニング施工基準

新しく開発されたチタンクラッド鋼板による防食法に関して、材料面、溶接・加工性、防食性等について検討を重ねてきた。これと並行して、実際の構造物に適用する場合の詳細構造、施工方法、検査方法等についての基準を作成した。ここでは、この基準の主要な項目について述べる。

(1) 材 料

チタンクラッド鋼の JIS 規格では強度材として使用する 1 種と、強度材として考えないで設計するもの、またはライニング用として使用する 2 種を規定している。防食ライニング材として使用する本基準では 2 種を使用するものとする。チタンクラッド鋼の機械的性質についてはライニング材としての本用途を考慮して、引張強さ 32.8 kgf/mm^2 以上、伸び 26 % 以上、曲げ性については本橋脚形状に合わせて 90° 曲げ (半径 5 mm)、せん断強さは 1.5 kgf/mm^2 以上とした。このせん断強さは、従来のプラスチック被覆重防食の 3 倍程度に相当する。接合状態は超短波探傷により検査し、チタンクラッド鋼 JIS 規格の S 等級、すなわち、探傷範囲を縦・横 200 mm ピッチの線上、周辺 50 mm 以内とし、1 個の非接合部の面積が 60 cm^2 以下であり、さらに検出した非接合部の全面積がクラッド鋼の全面積の 5 % 以下であることを満足することとした。試験頻度について、一般部は抜取りで 10 % とするが、環境に晒される上側クラッド板の上端部と下側クラッド板の下端部は全量検査を行い、検査基準についても欠陥があってはならないものと

する。チタンクラッド鋼の板厚は全厚を 5 mm とし、チタン材は 1 mm、鋼材は 4 mm とする。但し、チタン材の厚さの許容値として -0.10 mm とした。

チタン薄板の JIS 規格 (JIS H 4600) では 1~3 種が規定されている 3 種では曲げ加工時に割れ等の発生する恐れがあるため、1 種または 2 種を使用するものとする。チタンクラッド鋼の鋼材部に使用する鋼材は、クラッドの合わせ材に使用するチタンと強度・伸び等特性の近い材質を選定し、JIS 規格 (JIS G 3101) の SS 34 を使用するものとする。また、カバープレート用のチタン板は溶接性を考慮し、1.5 mm 以上とする。

(2) チタンクラッド鋼ライニングの溶接施工

チタンクラッド鋼の鋼材部と鋼構造物は TIG または MIG 溶接により取り付けものとする (図-2 (a) 参照)。但し、中間の突合せ形状部分の鋼溶接部はチタン薄板でカバーする。このチタンカバー板はチタンクラッド鋼のチタン材部と TIG 溶接にて取り付けものとする (図-2 (b) 参照)。また、チタンクラッド鋼の、突合せ形状本体固定溶接部の上下端部での鋼溶接部とチタンカバー板との隙間は、鋼-チタン双方と使用上有害な金属化合物を形成しない金属溶材の溶融接合によりシールするものとする。溶材は試験の結果、作業性を考慮し Ag-Cu-Sn-Li 系の材料が良いと思われる。

(3) 品質管理および検査

チタンクラッド鋼ライニングに関しては、材質、ライニング位置および寸法、溶接部、外観について確認・検査を行うものとする。材質については、JIS 規格および本指針規定に適合する材料であることをミルシートにて確認する。ライニングは通常、腐食環境の最も厳しい飛沫・干満帯に施工するので被覆範囲の設定は重要であり、製作精度を考慮し、設計位置の上下方向に $\pm 20 \text{ mm}$ とした。施工完了後の外観状態の検査はきずや溶接ビードの形状不整などないことを目視により行う。また、溶接部 (上下端部の鋼-鋼、チタン-チタン) は PT 試験により欠陥がないことを確認する。シール溶接部は加圧試験により検査を行い漏れが無いことを確認する。空気圧は $0.2 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ とし、テスト用孔は試験終了後溶接にて埋める。埋め溶接部は PT 試験により欠陥がないことを確認する。

(4) 電気防食設計

チタンと鋼のように異なる金属が接触して海水に浸漬されるような場合には、異種金属接触腐食により、接触部近傍で鋼の腐食が加速される現象が起きる。このような異種金属接触腐食は電気防食により防止することができる。したがって、チタンそれ自身は十分な耐食性を有するが、接触部の鋼の腐食を抑制するために、電気防食が必須である。防食電位は一般の鋼構造物の電気防食設計と同じく表-3 の値を標準とする。チタン部分の電位

表—3 防食電位 (飽和甘こう電極基準)

電気防食の種類 環境	電気防食単独	複合電気防食 (塗覆装併用)
清浄海域 (低温、希釈環境を含む)	- 770 mV	- 770 mV ただし下限値は
汚染海域	- 900 mV	- 1100 mV
高潮流海域	- 770 mV	

表—4 防食電流密度 (mA/m²) (一般清浄海域)

表面状況	電気防食単独		複合電気防食 (塗覆装併用)
	初期	定常	
ショット酸洗肌	100	100	左記の値に塗覆装の剥離率を乗じた値。

についても、この条件を満足するものとする。

チタンクラッド鋼ライニングを海中部・干満帯に使用した場合、HWL 以下のチタン部分に流入する防食電流を考慮する必要がある。チタン部分の防食電流密度の設計にあたっては、チタンを裸で使用した場合と、塗覆装を併用した場合ともに、表—4の防食電流密度を標準とする。

チタンクラッド鋼ライニングされた構造物では、チタンと接する鋼材部分の異種金属接触腐食を防止するために、電気防食は継続的に所定の性能を維持することが重要である。そのため、各構造物単位に必要なモニタリング装置を設定し、陽極発生電流および被防食体の電位を定期的に測定し防食性能の確認を行う必要がある。

(5) 塗装

海上大気部 (飛沫帯) のチタンクラッド鋼ライニングの上部境界においては、塗装により防食することが必要である。表—5に塗装仕様を示す。塗装の施工はすべて工場にて行うものとする。現場にて塗膜に損傷が生じた場合には、速やかに同種の塗料で補修しなければならない。海中部でもチタン面は防食上塗装は不要であり、また鋼材との異種金属接触腐食による腐食促進も電気防食により防止できる。しかし、海中部のチタン面にも、防食電流がロス電流として流れるため、電気防食費用低減のため鋼材部分と同様に LWL (TP-1.0) 以下のチタン面にもタールエポキシ樹脂塗装を行う。

7. 結 論

本報告では、チタンクラッド鋼板を鋼製橋脚の飛沫・干満部の防食法として適用するにあたり、異種金属接触腐食と電気防食効果、チタン面への塗膜の付着性、および海洋での曝露実験について、種々の実験を実施し検討を行ってきた。その結果を以下にまとめる。

a) 異種金属接触腐食は海水中でチタンと鋼の接触に

表—5 海上大気部でのチタンへの塗装仕様

工程	塗料名 (塗料規格)	塗装回数	塗装法	使用量 (g/m ²)	塗膜厚 (μm)	塗装間隔 (20℃)
素地調整	S I S Sa 2 1/2 相当 (サフラス)					
第1層	Eポキシ樹脂塗料下塗	1	スプレー	300	60	1日~1ヶ月
第2層	Eポキシ樹脂塗料下塗	1	スプレー	300	60	1日~3ヶ月
第3層	Eポキシ樹脂塗料中塗	1	スプレー	170	30	1日~7日
第4層	Eポキシ樹脂塗料上塗	1	スプレー	140	25	

より発生し、その面積比によっては鋼の腐食速度の著しい増加が見られるが、電気防食を併用することによって異種金属接触腐食は防止できる。一方、飛沫帯では異種金属接触腐食はみられなかった。

b) チタンへの塗膜付着性は、普通鋼と同等に期待でき、飛沫帯のチタンと鋼材の境界部は、塗装により防食可能である。

c) 飛沫帯・干満帯・海中部を模擬した実験室での異種金属接触腐食に関する試験結果は、海洋曝露実験によっても検証された。実環境でも異種金属接触腐食防止に対しては、電気防食が有効であることが示された。

以上、述べたように、チタンクラッド鋼板による新防食法は、懸念されていた異種金属接触腐食も防止できることがわかり、実用化への見通しを得た。また、実構造物への本防食法の適用に関する施工基準を作成し、その主要な項目について、本報告で説明した。本方法は従来の有機および無機ライニングに比して耐食性に優れるばかりでなく、維持補修上も有利でありコスト面でも競争力を発揮できると考えられる。また、本防食法は鋼製橋脚のみならず、鋼管杭、鋼欠板、ジャケット等にも適用可能であり、用途は広いと予想される。

参 考 文 献

- 1) 腐食防食協会編：防食技術便覧，日刊工業新聞社，pp. 428~431, 1985.
- 2) H. H. ユーリック：腐食反応とその制御，産業図書，pp. 347~352, 1979.
- 3) 建設省土木研究所・鋼管杭協会：海洋鋼構造物の防食指針・同解説 (案)「飛沫・干満帯編」1990年8月。
- 4) Laque, F.L.: MARINE CORROSION, John Wiley & Sons, Inc., pp.177~200, 1975.
- 5) 腐食防食協会編：防食技術便覧，日刊工業新聞社，pp. 197~198, 1985.
- 6) Shigeru, S. & Itoh, H.: CONSIDERATION ON MARINE BIO-FOULING PREVENTION OF TITANIUM BY FOULING INHIBITOR, 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON TITANIUM, KYOTO, 1980.
- 7) 東京湾横断道路 (株)：鋼構造物の防食指針 (案)，1989年7月。

(1990.1.30 受付)

CORROSION PREVENTION PERFORMANCE OF TITANIUM CLAD STEEL PLATES APPLIED ON THE SPLASH AND TIDAL ZONES OF STEEL PIERS

Yuji KAGAWA, Shunichi NAKAMURA, Koji HONMA,
Shunichi HITOSHI and Yutaka TADOKORO

A new corrosion prevention method for splash and tidal zone of steel piers has been developed by using titanium clad steel sheet. The design life of the Trans-Tokyo Bay highway is required at least 50 years, therefore, corrosion protection is essential for the steel piers under marine environment. Although splash and tidal zone is most corrosive and hard to repair, conventional methods are not reliable as for long term durability. On the other hand, titanium is expected to be a perfect corrosion resistant material under marine environment, and application method of titanium as corrosion prevention was investigated. This paper reports the results of experiments on corrosion prevention performance of this method, especially on prevention of galvanic corrosion between titanium and steel both in the laboratory and in the marine environment.
