

鋼製橋脚飛沫干満部防食用チタンクラッド鋼板の基本特性と溶接加工法について

香川祐次*・中村俊一**・長谷泰治***・
山本章夫****

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、その基本強度および溶接性能を実験により検討した。その結果、チタンクラッド鋼板のせん断接合強度および疲労強度ともに防食機能上の必要強度を十分上回ることが判明した。また、チタンクラッド鋼板を一体で母材に取付することは不可能なため、クラッドの鋼材部のみを母材に溶接し、クラッド板間は別のチタン板を上重ねる方法を開発した。

Keywords : titanium clad steel plates, corrosion protection of steel piers, welding of titanium plates

1. はじめに

東京湾横断道路の沖合部橋梁下部工は、水深約 20 m 地点に建設され、構造形式としては Fig.1 に示す鋼製水中橋脚である。この形式の橋脚は、現地での作業期間を極力短縮するために、工場にて鋼製橋脚を製作し、これを大ブロックのまま設置地点まで曳航し事前に打設した鋼管杭上に仮置き、水中不分離性コンクリートにて本体と杭を結合する方式である。関西空港連絡橋の橋梁下部工にも同様の形式が採用された¹⁾。

東京湾横断道路は重要な社会資本であるため、腐食環境の厳しい海洋構造物であるにもかかわらず、耐用年数は 50~100 年を目標としており、防食対策にも細心の注意を払っている²⁾。鋼製橋脚の大気部分は、厚膜型ジンクリッチペイント (75 μm)、エポキシ樹脂塗料 (120 μm) およびふっ素樹脂塗料 (55 μm) による塗装としている。海中部は、厚膜型ジンクリッチペイント (75 μm)、タールエポキシ樹脂塗料 (300 μm) および流電陽極による電気防食としている。大気部および海中部のこれらの防食法は 100 年の耐食性を有さないため、補修更新を前提としている。

一方、飛沫干満部は補修が極めて困難であり、特に飛沫部は海水の飛沫による濡れと乾燥の繰返し、太陽による温度上昇により腐食が最も激しく、年間 0.3~0.4 mm の鋼材腐食速度であると言われている²⁾。この飛沫干満部の防食法として多くの方法が提案され実施されているものの、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まだ確立されていない。

本論文では、種々の耐食材料を用いた鋼製橋脚の飛沫

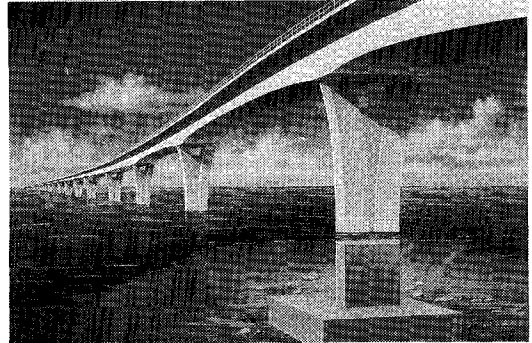


Fig.1 Estimated illustration of steel piers of Trans-Tokyo Bay bridge using titanium clad steel sheet for prevention of corrosion at splash and tidal zone.

干満部の防食法の基本的な考え方と、新しく開発されたチタンクラッド鋼を防食材に用いることを想定した上で、チタンクラッド鋼板の機械的性質、溶接加工法等について述べる。

2. 飛沫干満部の防食法

海洋構造物の飛沫干満部の防食法は、塗装、有機ライニングおよび無機ライニングによる被覆法に大別される。

塗装による被覆は、大気部の防食に最も一般に用いられるが、厚膜ジンクリッチペイントとエポキシ樹脂塗料、タールエポキシ樹脂塗料、あるいはガラスフレーク樹脂塗料の組合せによる重防食塗装を施せば、飛沫干満部への適用も可能である。しかし、合計塗膜厚は、1 000 μm 以下であり長期耐食性に乏しく、頻繁に塗り変えが必要となる。

有機ライニングにはポリエチレンライニング、エポキシ樹脂系あるいはポリウレタン樹脂系の厚膜無溶剤ライ

* 正会員 (前) 東京湾横断道路 (株) 設計部設計第三課長 (〒102 東京都千代田区一番町 15-5)

** 正会員 Ph.D. 新日本製鐵 (株) 橋梁構造部

*** 新日本製鐵 (株) 接合研究センター

**** 工博 新日本製鐵 (株) 室蘭技術研究部

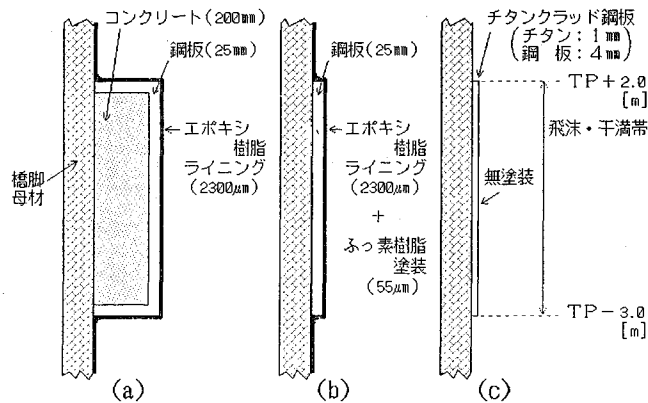


Fig.2 Considerations of corrosion protection method for splash and tidal zone of steel piers and its schematic diagram of vertical section.

ニング、ペトロラタムライニング、防食テープライニング、ゴムライニング等がある。これらは、塗装に比べて膜厚が2~10 mmと厚く防食性は優れている。しかし、100年の耐食性を有することは不可能であり、補修が必要である。また、流木や小型船舶が衝突した場合の耐衝撃性にも問題がある。

無機ライニングには、モルタルライニングと金属ライニングがある。モルタルライニングは、セメントモルタルやコンクリートにより被覆する方法であり、型枠を保護カバーとして残すことも可能である。金属ライニングには、犠牲鋼板巻、ステンレス、モネル等の金属巻による方法があり、他の防食被覆に比べて機械的強度が大きく耐衝撃性、耐摩耗性にも優れる。また、施工中にも損傷を受けにくく、長期耐食性も期待できる。しかし、これらの被覆金属は飛沫干満部では完全な耐食性は保有していないため、表面の塗装とその塗り替えなどのメンテナンスは不可欠である。

ところで、海洋環境ではほぼ完全な耐食性が期待できる実用金属にチタンがある。しかも、チタンはステンレス鋼等と違い、海生物が付着しても隙間腐食は発生せず、ほぼメンテナンスフリーになると考えられる。しかし、チタンは非常に高価であるために、防食材としての使用にはコスト的に引合わなかった。コストの低減にはチタンクラッド鋼板の使用が考えられるが、これまでチタンクラッド鋼は厚板しか製造できないために、施工費用まで考慮するとむしろコストアップとなり、やはり適用はできなかった。

最近、チタンクラッド鋼板を通常の鉄鋼製造プロセスで製造する技術が開発され^{3),4)}、高級ステンレス鋼の価格に匹敵する非常に安価なチタンクラッド鋼板が開発された。したがって、このチタンクラッド鋼板で被覆すれば将来のメンテナンス費用が大幅削減でき、コスト的に

も十分従来の防食法と対抗できると考えられた。

以上の耐食材料の現状から、東京湾横断道路の鋼製橋脚に要求される50~100年の防食性能を満足するためには、3種類の飛沫干満部の防食方法が考えられる。第1の方法は、Fig.2 (a)に示すように、犠牲鋼板(25 mm厚)と母材間にコンクリート(200 mm)を注入し、しかも犠牲鋼板には超厚膜型エポキシライニング(2300 μm)を施すもので、関西空港連絡橋で用いられた方法である⁵⁾。ここでは、ライニングで30年、犠牲鋼板で55年さらにコンクリートで15年、合計100年の耐食性があると考えられている。第2の方法は、Fig.2 (b)に示すように、犠牲鋼板(25 mm厚)および超厚膜型エポキシライニング(2300 μm)およびふっ素樹脂塗料(55 μm)による方法であり、表層の塗覆層で40年、犠牲鋼板で60年の耐食性を期待している。第3の方法は、Fig.2 (c)に示すように、チタンクラッド鋼板(チタン板1 mm、鋼板4 mm)を直接母材に溶接する方法である。チタンは海水に対して非常に良好な耐食性を示すため、ほぼメンテナンスフリーと考えられる。また、全厚も5 mmであり、橋脚表面も滑らかであり景観上も好ましく、これらの3種類の防食法のうち最も優れていると考えられる。

しかしながら、チタンクラッド鋼板による防食法はこれまで実績がないので、実用化のためには強度面や防食性能の検証および加工法施工法の開発が不可欠である。これらの問題点を明確にするために、各種の実験を実施した。以下に、これらの実験結果および考察を具体的に述べる。

3. チタンクラッド鋼の製造方法と特性

(1) チタンクラッド鋼の製造方法

クラッド鋼の製造には、熔融金属の合せ材の周りに凝

Table 1 Typical example of chemical compositions of titanium clad steel sheet. [wt %]

	C	Si	Mn	P	S	N	O	H	Fe
Base	0.135	0.011	0.354	0.019	0.005	0.0043	0.0016	—	—
Ti	0.012	—	—	—	—	0.0065	0.040	0.0022	0.016

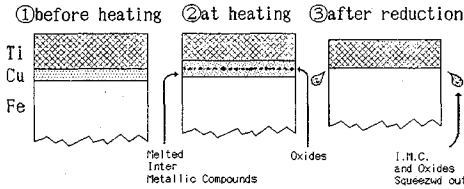


Fig.3 Schematic diagram of concept for joining titanium on steel with liquid phase.

固させる鋳込法、熱間圧延や冷間圧延で金属の新生面を圧着して接合する圧延法、肉盛溶接による肉盛法がある。しかし、チタンクラッド鋼は、チタンが酸化や炭化し易いことおよびチタンと鉄の金属間化合物を生成し易いことから、これらの方法は適用できず、爆発エネルギーを利用して瞬間的にミクロ的な嵌合とともに圧着させる爆着法^{6),7)}、あるいは真空中で圧延する真空圧延法^{8),9)}など、極めて特殊な技術や設備を必要とする方法で製造されている。これらの方法は製造コストが著しく高いため、鋼に対するチタンの厚さ比率（合せ材比率）が小さい厚板しか実用化されておらず、鋼橋の防食板に適するような薄板はなかった。

防食材料としてのチタンクラッド鋼板の場合、複雑な加工はないことや、塗装やライニングなどの他の防食材料との比較から、接合強度は必ずしも厚板のような高いレベルは不要である。そこで、大気中でかつ通常の鋼並みの圧延でチタンクラッド鋼板を製造するために、接合界面を液相にしその液相を絞り出すことで2種の金属を接合させることを考え出した^{3),4),10)}。Fig.3に、この接合の考え方を模式的に示した。

このために、チタン系のろう材であるチタンと銅の金属間化合物を想起し、合せ板のチタンの直下に銅板を挿入し（銅と鋼は大気加熱で容易に接合可能）、固相反応によって低融点のチタンと銅の金属間化合物（TiCu₃の共融融点は約880℃）を生成させ界面の液相とした。次いで、圧延ロールの圧下によってその液相を絞り出し、界面の酸化物や残留ガスを除去するとともに、新生面で接合した。

(2) チタンクラッド鋼の断面構造

本方法で製造した片面チタンクラッド薄鋼板の化学組成の一例をTable 1に、断面構造を示す写真およびチタン/銅/鋼の界面部分の拡大写真をPhoto.1に示した。拡大写真では、軽く腐食して金属の結晶粒界を顕示させて観察した。また、Fig.4に界面部分のCMA¹¹⁾による

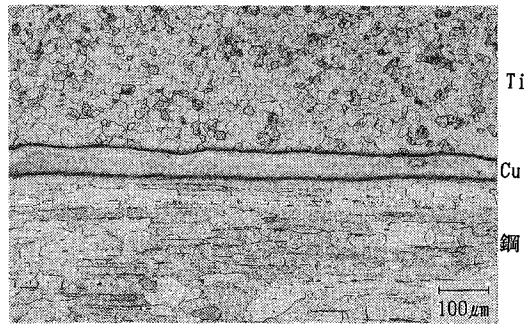


Photo.1 Optical micrographs of cross section of titanium clad steel sheet.

成分線分析結果を示した。図から明らかとなり、本方法で製造したチタンクラッド鋼の断面構造は、表層からチタン、中間に銅、次いで母材の鋼と大きく3層で構成されており、媒接に使用した銅が残留していることが特徴である。また、チタンの厚さは1.03~1.12 mmの範囲であり、ばらつきは非常に小さい。

Photo.2に非水溶媒中での電解腐食（SPEED エッチ¹²⁾）により、金属部分を溶解して非金属部分を残したチタン/銅界面の走査型電子顕微鏡写真を示した。写真の上側の石垣状の結晶粒を呈した層は、チタンであり、比較的平滑な部分が銅層、部分的に白い筋状析出物の認められる層が鋼部分である。チタン層と銅層の中間に、微細な粒状物の焼結体のような薄い層が認められる。この層は、EDS (Electron Disperse Spectroscopy: 電子線照射により発生した元素特有のX線の解析装置)によりチタンと銅が検出されることから、チタンと銅の金属間化合物層と同定した。この層の厚さは、概ね1μmであった。

(3) チタンクラッド鋼板の接合強度

全厚8 mm以上のクラッド鋼の接合強度は、剪断強さの測定方法がJIS-G 0601に定められ、JIS-G 3603に定められた爆着チタンクラッド鋼板の場合、14 [kgf/mm²] (137.3 [MPa])以上であることが規定されている。しかし、全厚が8 mm未満でしかも圧延法によるチタンクラッド薄鋼板については現状では規格が定められていない。

Table 2 Typical example of Tensile properties of titanium clad steel sheet.

	Tensile Strength [MPa]	Yielding Strength [MPa]	Total Elongation [%]	Titanium Elongation [%]	Width Reduction [%]	Joining Strength [MPa]
Ti-Clad sheet	325.5	205.0	44.0	41.5	19.0	192.4
Base metal	378.5	182.4	44.5	—	21.5	—

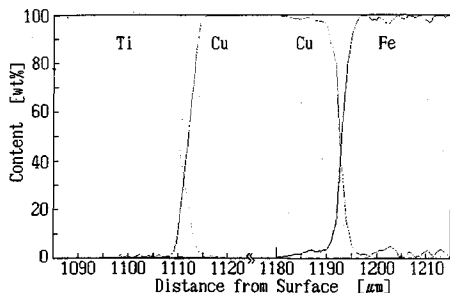


Fig.4 Line analysis of element at sectional interface of titanium clad steel sheet by CMA.

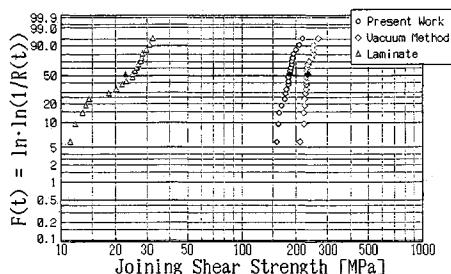


Fig.5 Weibull plots of joining strength obtained by the method defined in JIS-G 0601.

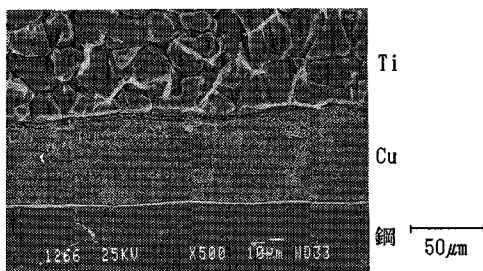


Photo.2 Scanning electron micrographs of cross sectional joining interface of titanium clad steel sheet after SPEED etching.

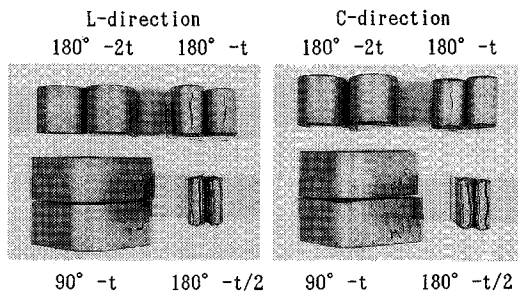


Photo.3 Results of bending test (Ti-surface to outside).

Table 3 Results of bending test.

Surface	Ti-surface to outside								Ti-surface to inside							
	L-direction				C-direction				L-direction				C-direction			
	0t	t/2	t	2t	0t	t/2	t	2t	0t	t/2	t	2t	0t	t/2	t	2t
180°	×	○	×	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
90°	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○ : Good Bending (without cracking) × : Bad Bending (Cracked)

そこで、本方法で製造した5 mm厚のチタンクラッド薄鋼板（熱延材）の接合強度はJIS-G 0601規格に準じて測定した。剪断強度は、おおむね170~220 [MPa] (17~22 [kgf/mm²])の値を示した。この値を、ワイブル確率紙で整理した結果をFig.5に示した。比較として、実験的に真空中で圧延したチタンクラッド鋼板と市販のラミネート鋼板の剪断強度の求めたところ、それぞれ220~280 [MPa] (22~28 [kgf/mm²]), 10~40 [MPa] (1~4 [kgf/mm²])の値を示した。本方法によるチタンクラッド鋼板の接合強度は、真空圧延法によるものより劣るが、ラミネート鋼板よりは大きいことが確認され

た。

(4) 機械的特性

Table 2に全厚5 mmクラッド比20%のチタンクラッド鋼板とその母材鋼板の材質特性を示した。通常、複合材の機械的特性は複合則に従うことが認められているが、チタンクラッド鋼板の場合、合せ材であるチタンの比率がかなり小さいのでその寄与分はほとんど無視され、母材の特性に概ね一致した。

Table 3およびPhoto.3に、曲げ試験の結果を示した。チタン外曲げはL方向C方向ともに180°-2t曲げおよび90°-t/2曲げは充分に可能であった。また、チタン

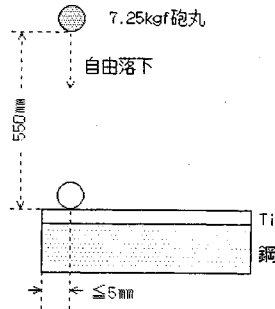


Fig. 6 Apparatus and schematic image of dropping impact test.

の内曲げはC方向の180°密着曲げで割れを生じたが、180°-t/2曲げまでチタンが剥離することなく充分に可能であった。

(5) 端部衝撃特性 (端面落重試験結果)

鋼橋基礎部分は、流木や船などの衝突の危険は避けられない。したがって、防食材料としてのチタンクラッド鋼板はこれらの衝撃に対して剥離等の問題が生じないことが必要である。そこで、表面処理鋼板などの被覆材の剥離強度測定に用いられる落重試験装置を用いて、主として端部の衝撃に対する強度を調査した。

試験は7.25 kgの砲丸を550 mmの高さから試料端部のチタン面に自由落下させ、PT試験により界面の亀裂発生の有無を判定し、強度を評価した。落下位置は、端部より約5 mm内側を狙った。試験方法の概略をFig. 6に示した。

試験の結果、端面からの亀裂発生がなく開口しないこと、チタン面の割れや剥離が発生しないことが判明した。なお、エポキシ塗膜は、本試験の衝撃により亀裂を発生し剥離を生ずることが認められていることから、チタンクラッド鋼板は衝撃に対して塗装よりも強いことが予測された。

(6) 熱疲労特性

チタンクラッド鋼板は、チタンと鋼の熱膨張率が異なる ($Ti: 8.9 \times 10^{-6}$, $Fe: 12.1 \times 10^{-6}$) ことから、界面に応力が加わり、熱疲労を起こす懸念がある。そこで、1m×1mのチタンクラッド鋼板の切板に、鋼橋部分で予想される0°C-2hと100°C-2hの温度変化を繰返し加えて、界面剥離の可能性の有無を調査した。その結果、42サイクルでも全く剥離は生じなかった。

また、剪断応力を周期的に界面に付与した疲労試験の結果、Fig. 7に示したとおり疲労限界は約6 [MPa] (0.6 [kgf/mm²])であった。1mの長さの試験片の場合、熱膨張率の差および温度変化から予想される界面の剪断応力は、せいぜい0.2 [MPa] (0.02 [kgf/mm²])と計算される。従って、熱疲労による剥離等は全く問題がないものと推定された。

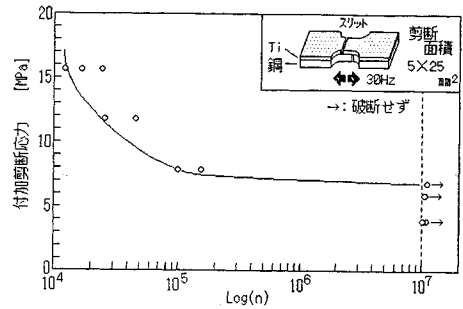


Fig. 7 Results of shear stress fatigue test.

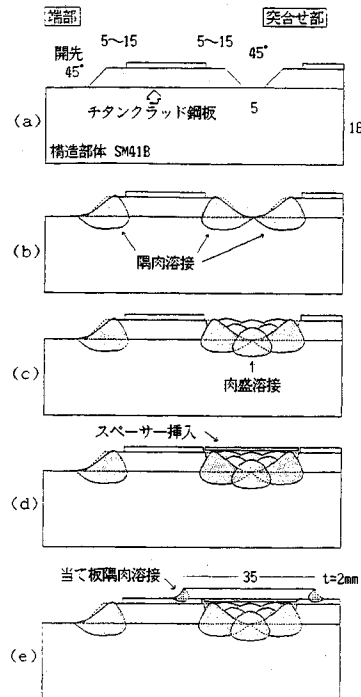


Fig. 8 Schematic drawings of recommended form of groove and procedure to weld titanium clad steel sheet.

4. チタンクラッド鋼板の加工・溶接性

(1) チタンクラッド鋼板の溶接方法

チタンと鋼を直接溶接すると極めて脆い金属間化合物を生成するため、鋼間のような溶接接合方法は適用できない。したがって、鋼とチタンの接合には、その両者と完全固溶し金属間化合物を形成しない中間金属をインサート材として挿入して接合するか、銀蠟等による蠟付け法で接合せざるを得ない。

鋼構造体にチタンクラッド構造物を接合する場合、合せ材のチタンと構造部体の鋼が直接溶融しないように、合せ材のチタン層を切削除去し溶接した。突合せ溶接部は、同様に合せ材のチタン層を切削除去し、下側母材鋼

Table 4 Recommended welding conditions of titanium clad steel sheet.

溶接箇所	溶接方法	溶接条件			
		溶接電流	溶接速度	ワイヤ径、種	ワイヤ送給速度
構造部材／クラッド材 突合わせ	TIG	160 A	15 cm/min	1.6mm φ (YM-28)	45 cm/min (7.0 g/min)
構造部材／クラッド材 隅肉溶接	TIG	160 A	15 cm/min	1.6mm φ (YM-28)	45 cm/min (7.0 g/min)
スペーサー／合せ板 なめづけ	TIG	50~60 A	15 cm/min	—	—
合せ板／当て板 隅肉溶接	TIG	115 A	25 cm/min	2.0mm φ (Ti)	19 cm/min (2.6 g/min)
クラッド端部シール材	TIG	60~70 A	15 cm/min	1.6mm φ (Ag-Cu-Sn)	

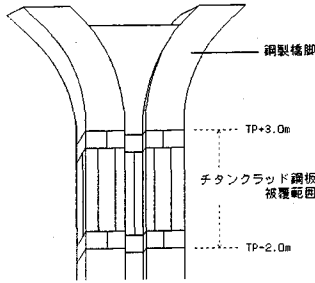


Fig.9 Illustration of mounting image of titanium clad steel sheet to steel piers of bridge.

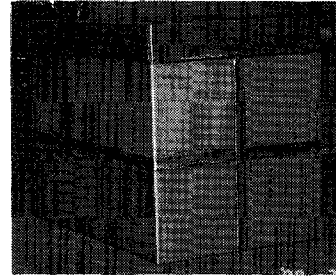


Photo.4 Appearance of experimentally produced steel pier model.

部は45°レ型開先として実施した。この開先形状を Fig.8 (a) に示した。

溶接方法は、スパッター発生によるチタンの耐食性劣化防止および溶接ヒュームによるチタン面への影響を考慮して TIG 溶接とした。

この開先に切出したチタンクラッド鋼の溶接では、まずチタン層を除去した部分までの鋼と構造部材とを TIG 溶接する。そして、チタンの除去部分を十分清掃した後、そこにスペーサとしてチタン板を挿入し、合せ材とスペーサのチタンどうしを TIG なめ付け溶接で固定し、さらにその上から当て板として 2 mm 厚のチタン板を隅肉溶接し完全に覆った。

以上の端部および付き合わせ部分の積層溶接方法を、Fig.8 (b~d) に示した。

チタンクラッド鋼を被覆する橋脚飛沫・干満部の上下の端部は、鋼構造体と溶接したチタンクラッド鋼の母材鋼部とスペーサ（チタン）との間は、隙間が生じた状態になる。このままでは、その隙間に雨水や飛散してきた海水が進入して防食材のチタンの内側から腐食を進行させることになり防食材としてなら機能しなくなる。これを回避するためには、溶融して隙間を埋める必要があり、異材接合を行わざるを得ない。このような異材接合部分をできるだけ少なくするために、Fig.9 に示したように飛沫・干満部の上端部には、帯状のチタンクラッド鋼板を巻き付けるような形に配置した。

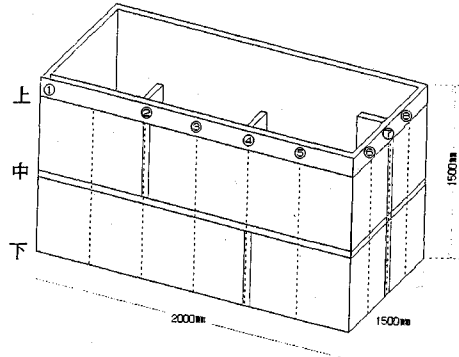


Fig.10 Schematic diagram of experimentally produced steel pier model and measured sites for plate distortion by welding.

(2) 橋脚モデルの試作検討

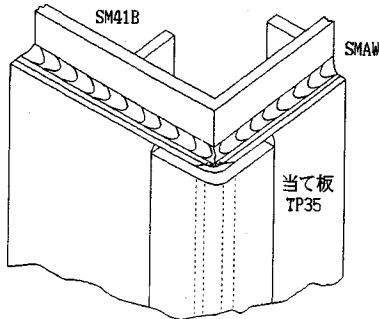
実施工における問題点把握のために、飛沫・干満部の鋼製橋脚モデルを製作した。このモデルを Photo.4 に示した。本モデル施工において、各突合せ溶接部の開先内の TIG 溶接は、Table 4 に示す溶接条件で実施した。

この橋脚モデルには、実際の構造物を想定してやせ馬を作成した。測定値の基準は供試体の両端とし、Fig.10 に示す線上位置でのやせ馬の測定値を Table 5 に示した。なお、供試体全体での最大値は 16 mm であった。このやせ馬部分にチタンクラッド鋼板を張合せた結果、やせ馬に沿った状態で支障なく張合わせる事が可能であった。

Table 5 Results of plate distortion by welding on experimentally produced steel pier model.

測定位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
上部	1.5	2.5	5.0	4.3	4.0	2.5	1.5	2.0
中央部	3.0	5.0	6.0	4.0	4.0	2.0	0.5	2.0
下部	3.5	4.0	5.5	4.5	3.5	3.0	2.5	3.0

[mm]

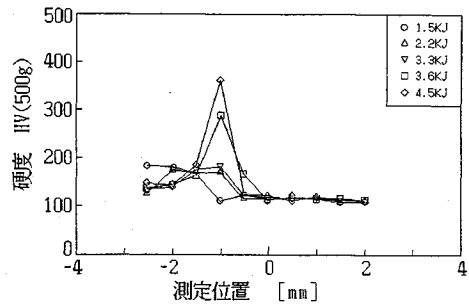
**Fig.11** Illustration of recommended method for mounting titanium clad steel sheet to corner steel piers of bridge.

また本モデルでは、橋脚コーナー部の施工法を検討するために、2種類の加工方式によりコーナー部を製作した。すなわち、Fig.11に示したチタンクラッド鋼の接合法を適用した当て板方式と、チタンクラッド鋼板をプレスにて曲げ加工して張合わせる曲げ加工方式について検討した。当て板方式は、突合わせ部分がコーナー部となり当て板のチタン板が曲げ加工されているだけであるため、平面部でのチタンクラッド鋼板の接合法と全く同様に施工できた。曲げ加工方式では、チタンクラッド鋼板を曲げる必要がある。表曲げは、チタンが伸び変形し鋼が圧縮変形することを考慮して、100~200°C程度に加熱し15rの曲げ加工を行った。裏曲げは、逆に鋼が伸びチタンが圧縮されるため、常温で3rの加工を行った。その結果いずれも、割れなどの不具合が発生せず良好な曲げ加工が可能であった。しかし、構造部本体のコーナー部はグラインダー等により、構造部体との密着性を考慮して15rの加工を行う必要がある。

以上の検討の結果、橋脚コーナー部の加工は、曲げ加工方式も当て板方式も施工可能であったが、飛沫干満帯上端の異材継手部を含めて継手部を減少できることから、曲げ加工方式が望まれる。

(3) 溶接部の検査

Fig.12に、チタンクラッド鋼の厚さ方向の硬度に及ぼす当て板溶接における入熱量の影響を示した。入熱量が大きいと、チタンと母材の接合面近傍（表層から約1mm付近）の硬度が高くなることが認められる。これは、当て板溶接の際溶接入熱が多くなると、合せ材のチタンとその下層にある銅の一部が溶融し脆い金属間化合物を

**Fig.12** Effects of inducing heat energy on the distribution of hardness at the cross section of welding zone.

生成するためである。このような脆弱層を作らないためには、できるだけ低入熱すなわち160 A/13 V, 28 cm/min ($Q=4.5$ kJ/cm) 以下で溶接することが好ましい。

チタンは大気中の酸素や窒素、炭素、水素などとの化学的親和力が極めて強いので、溶接前の前処理として表面の汚れや酸化物、水分の除去が必要である。この前処理が不完全な場合、溶接部にブローホールが発生したり、酸化物、窒化物などのコンタミネーションが生じやすい。

また、チタンは高温状態（300°C以上）で大気と接触すると、酸素を吸収したり、容易に反応して酸化物、窒化物および水素化物を形成するために、溶接部が硬化して延性の低下をまねき、著しい場合には割れを生ずる。したがって、チタン部分の溶接に当たっては、純アルゴンガス（JIS K 1105 1級）を用いてガスシールドすることが不可欠である。ガスシールドの良否は、Table 6に示した日本溶接協会のWES 7102 [イナートガスアーク溶接作業標準（チタン及びチタン合金）]¹³⁾などの判断基準を基に、溶接部の変色の程度により判定しなければならない。

チタンクラッド鋼の溶接部の試験検査も、日本溶接協会のWES 7602 [チタンクラッド鋼のイナートガスアーク溶接およびチタンライニング作業標準]¹⁴⁾あるいは、HPIS E 117 1986 [チタンクラッド鋼加工基準]¹⁵⁾のように規格化されたものがあるので、それに準じて実施しなければならない。

チタンクラッド鋼の母材側を溶接する際には、その熱影響によってクラッド界面に剝離を生じる危険がある。したがって、溶接前に目視検査および浸透探傷試験により、剝離の起点となりやすい割れ、ピッド等の有害な欠陥がないことを確認しておく必要がある。また隅肉溶接でも、同様に欠陥のないことを確認しておく必要がある。

Table 6 Relation between coloring level at welding zone and its properties¹³⁾.

チタン溶接部の 変色の程度	溶 接 部 の 性 質	チタンの溶接技術 検定における合否
銀 色	コンタミネーションのない健全な溶接部である。	合 格
金色又は変色	ほとんどコンタミネーションのない溶接部である。	
紫 又 は 青	溶接部表面の延性に少し影響する。しかし溶接部全体としては、その性質にほとんど影響がないとみてよい。	不 合 格
青白又は灰色	かなりのコンタミネーションがある。薄板の溶接部では延性がかなり低下する。	
白 又 は 黄 白	溶接部はぜい弱となる。	

5. 結 言

新たに開発されたチタンクラッド薄鋼板を、海洋構造物の飛沫干満部の防食に適用することを目的として、素材の材質および溶接法を検討した。以下に、その結果をまとめた。

(1) チタンクラッド薄鋼板の接合強度は、従来の特殊な設備方法で製造したものよりは劣るものの、防食材料として実績のあるライニング材や接着剤強度よりは大きな値を有している。また、流木や船などの衝突を想定した砲丸の落下試験の結果、チタンクラッド薄鋼板はエポキシ塗膜では亀裂を発生し剥離を生ずる条件でも、端面からの亀裂開口やチタン面の破れは発生しなかった。

(2) 海洋構造物の表面で予測される温度変化をチタンクラッド薄鋼板に付与したが、接合面の剥離は全く生じなかった。また、温度変化による熱膨張から推算される接合界面の剪断応力を1000年以上放置した場合に相当する回数を繰返し付与したが、やはり剥離は全く生じなかった。

(3) 構造部体に接合する防食材としては、材料の強度はなんら限定されるものではないが、施工時の加工を考慮すると低強度である方が望ましいし、部位によっては強度が限定される場合がある。チタンクラッド薄鋼板の強度は、ほぼ母材の強度に支配されることから、母材を適切に制御することで、材料としての強度設計を実施することが可能である。

(4) チタンクラッド鋼は、脆い金属間化合物を生成するため一体で溶接することは不可能である。そこで、周溶接では開先加工を行い鋼部分を構造部体にTIG溶接する方法を、また突合わせ溶接では開先加工を行い鋼部分を構造部体にTIG溶接した後、その上にチタンの当て板材を被せチタンクラッド鋼板のチタンと隅肉溶接する方法が望ましい。

(5) チタンクラッド鋼板の溶接では、チタンの溶接と同様に表面汚れ除去等の前処理を完全に行い、ガスシールドを完全に行う必要がある。さらに脆い金属間化合物を生成する危険性があるため、できるだけ低入熱で

溶接することが好ましい。

(6) 構造部体への実施工を想定して、やせ馬を有する鋼製橋脚モデルを作り接合上の問題点を検討した。その結果、チタンクラッド薄鋼板はやせ馬部分でも構造部体に沿って溶接可能であることを確認した。橋脚コーナー部の施工は、当て板方式と曲げ加工方式が考えられどちらでも施工は可能であるが、異材継手を含めて継手部を少なくすることができる曲げ加工方式が優れている。

以上示したとおり、新たに開発されたチタンクラッド薄鋼板を鋼製橋脚等の飛沫干満部の防食材に適用することは、接合強度および溶接施工の点から全く問題がないことが判明した。

参 考 文 献

- 1) 本山：関西国際空港連絡橋の計画と下部工の設計，橋梁と基礎，22(3, 3)1988.
- 2) 東京湾横断道路(株)：鋼構造物の防食指針(案)，1989年7月.
- 3) 山本章夫・倉橋隆郎・中村 宏：Cuを利用したチタンクラッド鋼の界面接合特性(接合に液相を利用したチタンクラッド鋼製造技術の確立-1)，材料とプロセス，3(5)，p.1672，1990.
- 4) 山本章夫・倉橋隆郎・中村 宏：Cuを利用したTiチタンクラッド鋼板の実験製造結果(接合に液相を利用したチタンクラッド鋼製造技術の確立-2)，材料とプロセス，3(5)，p.1673，1990.
- 5) 関西国際空港・土木研究センター：空港連絡橋の鋼構造物の防錆防食指針(案)，1986年3月.
- 6) 福本智賢：薄手チタンクラッド鋼板の製造方法，日本特許公開報，特開昭51-151653号.
- 7) 久保田彰：異種金属の爆発圧接，溶接技術，31(1)，p.40，1983.
- 8) 川並高雄・吉原征四郎：圧延クラッド材の製造技術，鉄と鋼，74(4)，p.617，1988.
- 9) 平部謙二：圧延チタンクラッド鋼板(NKK)チタニウム・ジルコニウム，35(1)，p.23，1987.
- 10) 山本章夫：溶融層を中間媒接材としたクラッド鋼板の製造方法，日本特許公開報，特開昭63-144881号.
- 11) 田口 勇・浜田広樹・谷誠一郎：新X線マイクロアナ

- イザー (CMA) の開発と鉄鋼分析への応用, 製鉄研究, 313, p.93, 1984.
- 12) 黒沢文夫・田口 勇・松本龍太郎: 非水溶媒系電解液定電位電解エッチング法による鉄鋼中の析出物と結晶面方位の観察, 日本金属学会誌, 43, p.1068, 1979.
- 13) 日本溶接協会 WES 7102 [イナートガスアーク溶接作業標準 (チタンおよびチタン合金)].
- 14) 日本溶接協会 WES 7602 [チタンクラッド鋼のイナートガスアーク溶接およびチタンライニング作業標準]
- 15) 日本高圧力協会 HPIS E 117 1986 [チタンクラッド鋼加工基準].
- (1991.1.30 受付)

MECHANICAL PROPERTIES AND WELDING PROCESS OF TITANIUM CLAD STEEL PLATES APPLIED ON THE SPLASH AND TIDAL ZONES OF STEEL PIERS

Yuji KAGAWA, Shunichi NAKAMURA, Taiji NAGATANI and Akio YAMAMOTO

A new corrosion prevention method for splash and tidal zone of steel piers has been developed by using titanium clad steel sheet. Shear strength value of joining interface of titanium clad steel sheet is higher level than that of laminated steel sheet or adhesive interface. Shear fatigue limit of joining interface exceed the estimated strength value due to thermal expansion. TIG welding method is recommended for mounting the titanium clad steel sheet to steel piers. For procedure of butt welding method, it is recommended that, at first the base metal is welded to mount to steel piers and overlay welded in the groove, and next, titanium sheet is welded to cover metal of titanium clad steel sheet at the corner for covering the welding zone of base metal.