チタンをメンブレンとして用いた防水工法のシーム溶接の最適化に関する基礎研究

BASIC STUDY ON THE OPTIMUM SEAM WELDING OF TITANIUM MEMBRANE FOR WATERPROOFING CONSTRUCTION

飛田春雄 —— * 1

キーワード：
チタニウム, シーム溶接, 防水工法, 屋根

Keywords:
Titanium, Seam welding, Waterproofing construction, Roof

Haruo TOBITA —— * 1

Basic study on the optimum seam welding of membrane made from titanium sheets for waterproofing roof construction has been carried out by means of various tests such as peel tests, water pressure tests, appearance tests, microscopic observations and sectional hardness tests on the welded specimens prepared in compliance with JIS H4600 Class 1. As a result, it has been confirmed that the specimen welded under appropriate conditions, including the area close to the clips' edges, has no issue for the purpose of use and has a sufficient peel strength over 62N/mm comparing with that required from the wind resistance performance.

1. はじめに

チタンは、抜群の耐食性を有していることから、近年、建築物の適材として、とくに腐食環境のきびしい海浜地域を中心に使用されてきた。悪化する一方の自然環境の中で、建築物外装材の長期耐久性および防水性の要求と相まって、屋根材への使用は顕著であり、'73～'92年の20年間の実績は、約10万㎡であったが、それ以降'99年までの7年間で約25万㎡と大幅に増加している。

施工実績は、ステンレスシート防水工法に準じたチタンシートをメンブレンとして用いた溶接工法がほぼ半分に近い実績を占めているが、チタンは高温において活性な金属のためシーム溶接に伴う脆化が発生する。従ってチタンシートを防水工法に適用するためにはシーム溶接の信頼性の検討、つまり最適な溶接条件の検討をしなければならない。

筆者は、かねてより、このシーム溶接の信頼の確立に向け、チタンシートを用いた防水工法の開発、実用化研究に取り組んできた。また、チタン溶接工法の施工実績の増加も背景となり日本建築学会発行「建築工事標準仕様書・同解説 JASS8 防水工事」(以下、JASS8と呼ぶ)の第4次改定(平成12年7月1日)のステンレスシート防水工事においてチタンが現状のステンレスに追加して対象材料となった。以下に、現在まで研究検討したデータに依拠してシーム溶接の最適化に関する基礎研究結果を報告する。

2. チタンの特性及び防水工法概要

2.1 チタンの特性

建材用途に使われているのは大部分純チタンであるがこの純チタ

ンは、単一元素からなる金属で、純度約99.5%、おもに耐食性を目的とした用途に使われている。防水工法にはJISH4600 1種を使用し板厚は、ステンレスシート防水工事と同様0.4mmを採用しているが、特性は次の通りである。

- (1) 比重は4.51と炭素鋼の約60%であり、軽い。
- (2) 熱伝導度および電気抵抗はオーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同じレベルで、電気抵抗の溶接に必要なジュール熱が期待できる。
- (3) 線膨張係数は、 $8.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ で炭素鋼の約2/3で、オーステナイト系ステンレス鋼の約50%である。
- (4) 引張強さは270～410N/mm²(JIS規格値)である。また、ヤング率はステンレス鋼(SUS304)の約50%程度である。

このようにチタンは軽量であり、線膨張係数が小さく外気温の変化による熱伸縮が少ないため金属屋根の特徴である長尺屋根に適している。さらに、これらの特性と相まって耐食性とくに塩素イオンに対して強固な化学的性質もあり、メンブレン防水層として適材である。

2.2 防水工法概要

チタンシートを用いたシーム溶接工法を図1に示すが、溶接方法は、用途により下記に示す方法がある。

- ① スポット溶接：吊子～チタンシート仮止め、チタンシート同士仮止め
- ② シーム溶接：チタンシート同士本溶接
- ③ TIG溶接：四枚合せ及び仕舞部

*1 明治大学理工学部機械情報工学科 兼任講師
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*1 Lecturer, Dept. of Mechanical System Science and Engineering, School of Science and Technology, Meiji Univ.

図1 シーム溶接工法

図2 シーム溶接の原理

シーム溶接は図2のように、Cu円形電極（内部水冷）でチタンシートを25mm程度立上げた箇所を自動走行可能な溶接機により連続溶接するもので、チタンシート同士の二枚重ね溶接と吊子（300～600mmピッチ）を介した三枚重ね溶接がある。

とくに、シーム溶接では吊子前後の二枚→三枚、三枚→二枚部の通過点の接合性が問題となるため以下、三枚重ねも含めた溶接性の試験を実施した。なお、左右の電極を加圧させた状態で溶接するのでビード部に大気を巻き込む恐れなく、TIG溶接のようなアルゴンなどのシールドガスは不要である。

3. 試験方法

3.1 試験材

試験材は、厚さ0.4mmを使用し、成分及び機械的性質は表1に示す通りである。

表1 試験材の成分及び機械的性質

	化学成分 %					機械的性質		
	H	O	N	Fe	Ti	引張強さ N/mm ²	耐力 N/mm ²	伸び %
JIS 1種	0.013 以下	0.15 以下	0.05 以下	0.20 以下	残部	270～410	165 以上	27 以上
試験材	0.0014	0.043	0.004	0.034	残部	333	216	45

試験片寸法：二枚合せ用 0.4mm厚×30mm高×L（試験片同士溶接）

三枚合せ用 二枚合せ用試験片＋吊子用試験片 0.3mm厚×40mm

幅×30mm高（二枚合せ用試験片の間に挟んで溶接）

3.2 溶接試験条件と評価項目

溶接の試験をするために実際に現場で使用している溶接機（図3）を上下逆にして試験材を溶接した。溶接条件は加圧力、電流値のほか、高熱入力による脆化を避けるため、溶接電流断続とし、事前試験により安定した溶接表面が得られた溶接速度 1m/min、3 サイクル通電→1 サイクル休止（以下、ON-OFF3:1と示す）の設定とした。また、事前試験において電極先端の接触面形状が平坦な場合、チタンシートのビードの境界に加圧溶接時により段（みぞ）が付き、この部分が応力集中による接合強度の低下を招く事が明らかになったため電極先端形状は R 形状を採用し、接触部半径 R30mm、R75mm 二種類準備して先端形状の曲率による接合強度への影響が判明するようにした。

評価項目は、表2に示すように接合強度が判明するはく離試験、

耐風強度を検証出来る水圧試験及び外観試験、ミクロ試験、断面硬度試験とした。これらの評価項目に対して、最適条件を得るため試験材 24 サンプル（以下、条件 NO と呼ぶ）準備して、表3にの組合せについて調査した。

図3 溶接機

表2 溶接条件及び評価項目

電極	材質 : 銅合金
	直径 : 10.5 mm
溶接条件	先端形状 : R30, R75mm
	加圧力 : 980N, 1270N, 1570N (100Kgf) (130Kgf) (160Kgf) (0.4mm厚2枚重ね部で設定)
評価項目	電流 : 2.9～4.7KA
	通電サイクル : 3サイクル
	休止サイクル : 1サイクル
	速度 : 1,000mm/min.
評価項目	(1) はく離試験 (ピール試験)
	(2) 水圧試験
	(3) 外観試験 (溶接部表面状況観察)
	(4) ミクロ試験 (顕微鏡観察)
	(5) 断面硬度試験

表3 試験材溶接条件組合せ

溶 接 条 件			
条件No.	電極先端形状 R mm	加圧力 P N (Kgf)	電流値 I KA
A 1	30	980(100)	2.9
A 2	30	980(100)	3.0
A 3	30	980(100)	3.5
A 4	30	980(100)	4.0
A 5	30	980(100)	4.1
B 1	30	1270(130)	4.1
C 1	30	1570(160)	3.0
C 2	30	1570(160)	3.3
C 3	30	1570(160)	3.4
C 4	30	1570(160)	3.9
C 5	30	1570(160)	4.3
D 1	75	980(100)	3.8
D 2	75	980(100)	4.5
E 1	75	1270(130)	3.9
E 2	75	1270(130)	4.4
E 3	75	1270(130)	4.7
F 1	75	1570(160)	3.5
F 2	75	1570(160)	4.0
F 3	75	1570(160)	4.3
F 4	75	1570(160)	4.6

4. 試験結果

溶接試験により、以下の結果が得られた。

(1) はく離試験強度

図4に示すように、サンプル 20mm 幅でカットし、二枚重ね部と吊子部分の三枚重ね部について実施した。強度はビード長さ 1mm 当りの値で示したが、表4に示す様に二枚重ね、三枚重ねとも 62N/mm～98N/mm の範囲を示した。強風地域に相当する風圧（以下負圧を指す）3920N/m²、働き幅 278mm、吊子ピッチ 450mm の条

件において、吊子1個当りにかかる引張り荷重は約490Nである。これに対して条件C5の最低値62N/mmのはく離強度（以下、ピール強度と呼ぶ）でも吊子（幅40mm）1個当たり2480Nとなり、約5倍以上の強度となるため工法上十分許容出来る値である。なお、二枚重ねの方が三枚重ねに比較し僅か強度が高い。先端R形状については、R30mm（条件A1～C5）の方がR75mm（条件D1～F4）に比較して接合状況に良い傾向が見られた。溶接表面状況から明らかにビード幅が細く、未溶接が発生している試験材については、はく離試験を省略した。

(2) 水圧試験

(1) 項のピール強度が風圧に対して十分な強度であることを立証するため、図5に示す試験装置を製作して水圧試験を実施した。溶接条件はON-OFF制御 3:1、速度1m/min、電流4.1kA、加圧力1570N、電極先端形状はR30mmを使用した結果、面材同士の接合力は表5に示すように、9800N/m²を超える耐圧力値が得られた。これにより、ピール強度62N/mm～98N/mmが耐風性能上、十分な強度を有する事が立証された。

ただし、チタンシートは0.4mmの薄板のため、圧力増大に伴いたわみも大きくなるので、風圧が大きくなる条件下では働き幅を狭くすべき点が併せて実験結果より判明した。なお、十分な接合強度が得られたため、試験は水柱高さ1750mmで中止したが、溶接部での漏れも認められなかった。

(3) 外観試験（溶接部表面状況観察）

表4に示すように、高電流値で電極先端形状R30mmの条件では写真1に示すように良好な溶接線を得られた一方、低電流値側（条件A1、A2、C1～C3）及び電極先端形状R75mmで加圧力1570Nの組合せ（条件F1～F3）においてビードの幅が細くまた、ビードの欠落（以下、「ビードのとび」と呼ぶ）が多く未溶接が発生した。

(4) ミクロ試験（顕微鏡観察）

ピール強度、溶接部表面状況も良好な試験材は、写真2写真3に示すように、鋸歯及び板状α組織の良好な組織となっている。また、移行部も写真4に示すように、接合面内部空洞（以下ボイドと称す）もなく熱影響部も少ない健全な組織を呈している。

(5) 断面硬度試験

ピール強度及び溶接部表面状況とも良好な結果を得られた条件A5の試験材の試験材の横断面（図6）の硬度は、図7に示すように、接合界面で硬さの上昇が見られるが、ビッカース硬さで200前後であり、顕著な汚染による影響はない。

以上の結果を要約すると下記に示す溶接条件となる。

図4 はく離試験

表4 ピール強度及び接合状況

条件	ピール強度 N/mm		接合状況	
	2枚重ね 部分	3枚重ね 部分	2枚→3枚 移行部	3枚→2枚 移行部
A1	—	—	×	×
A2	71.6	84.3	×	△
A3	80.4	65.7	○	○
A4	75.5	72.6	○	○
A5	73.5	67.7	○	○
B1	83.4	76.5	○	○
C1	—	—	×	×
C2	97.1	93.2	×	×
C3	98.1	76.5	×	△
C4	96.1	74.5	○	○
C5	80.4	61.8	○	○
D1	—	—	×	×
D2	78.5	62.8	○	○
E1	89.2	84.3	×	△
E2	79.4	74.5	○	○
E3	79.4	84.3	○	○
F1	—	—	×	×
F2	—	—	×	×
F3	—	—	×	×
F4	83.4	62.8	×	△

接合状況判定基準

- ：良好
- △：ボイド多く発生
- ×：ビードとび発生
- ×～△：ボイド及び部分的な空洞発生
- ：ビード幅細く未溶接発生

図5 水圧試験装置概要

表5 水圧試験結果

圧力 N/m ²	水柱高さ mm	試験体中心位置 (A点)フレ変 位置mm
490	50	19
980	100	22
1470	150	25
1960	200	28
2450	250	30
2940	300	32
4900	500	40
5880	600	45
6860	700	50
7850	800	54
8830	900	58
9810	1000	61
17160	1750	84

写真1 良好な接合表面状況例（条件A5）

写真2 三枚重ね溶接部のミクロ組織（条件A4、倍率×400）

← 接合部

← 接合部

写真3 三枚重ねシーム溶接部のマイクロ組織 (条件A4, 倍率×50)

切断部

写真4 二枚→三枚移行部溶接部のマイクロ組織 (条件A4, 倍率×50)

図6 断面硬さ測定位置

図7 断面硬さ

表6 試験条件-判定 相関表

加 圧 力 N/mm ² 判定 電 流 値	電極先端形状 R 30 mm						電極先端形状 R 75 mm					
	980 N		1270 N		1570 N		980 N		1270 N		1570 N	
	No.	判定	No.	判定	No.	判定	No.	判定	No.	判定	No.	判定
4.8KA												
4.7									E3	○		
4.6											F4	△
4.5							D2	○				
4.4									E2	○		
4.3					C5	○					F3	×
4.2												
4.1	A5	○	B1	○								
4.0	A4	○									F2	×
3.9					C4	○			E1	△		
3.8							D1	×				
3.7												
3.6												
3.5	A3	○									F1	×
3.4					C3	△						
3.3	A2	△			C2	△						
3.2												
3.1												
3.0					C1	×						
2.9	A1	×										

○: 良好

△: 吊子2枚→3枚移行部、または吊子移行部両方ともボイド多し

×: ビードのとび

図8 電流値-ピール強度 相関図

5. まとめ

本研究結果は、以下のように要約出来る。

表6の相関表に示すように、シーム溶接による溶接に関し電極先端の形状については、R 30mmとR 75mmの比較では、R 30mmの方が良好な結果が得られた。また電極が銅合金であり、使用により徐々に平坦になるためRは小さい(曲率大)方が有利である。加圧力は1270Nが最も良好な結果が得られた。電流値は加圧力との関連もあるが、入熱過大による過酸化による脆化を抑制するため下限値管理が望ましく、本試験では図8に示すように4KA以上となる。適正な溶接を行えばピール強度は最低62N/mm以上確実に得られる。この強度は、水圧試験において十分耐風性能において許容出来る強度であることが立証された。併せて防水性能も確認出来た。また、本研究結果による最適な溶接条件下では、現状においても完全な防水施工実績を得ている。

吊子については、板厚を0.3mmでテストをしたが、吊子前後の移行部でも条件により健全な接合が得られた。しかし、実施工下では条件変動の可能性があるため吊子前後の移行部において溶接前の吊子の板厚によりチタンシートとの間で生じる三角隙間が小さく容易に溶接が出来る板厚0.2mmを採用する事が望ましく、吊子の強度は吊子の幅を広くすることで対応可能である。

ただし、実際の屋根における吊子にかかる荷重の挙動は一律でないためさらに今後検討していきたい。

謝 辞

本研究にあたり、実施工技術の実態調査に際し協力頂きました住友金属建材(株)大八木亮太郎技術担当部長殿、また、水圧試験及び溶接試験、溶接部のマイクロ試験、硬度試験を当時の日本ステンレス(株)とくに同直江津研究所(現住友金属工業(株)総合技術研究所ステンレス・チタンプロジェクト推進本部直江津開発室)に協力頂きここに記して感謝の意を表します。

[2001年4月12日原稿受理 2001年7月27日採用決定]