# 81 チタン隅肉溶接継手の疲労強度

#### 1. はじめに

チタンの、高い耐食性による維持コスト削減、 高比強度による燃費向上などの、環境・経済効果 が船舶分野で近年注目されて来ており、検査規準 の緩い漁船においては、既に構造部材に使われ始 めている。しかし、検査規準の厳しい客船・貨物 船においては、実績が乏しく、設計、製造及び検 査方法が確立されていないので、規準化のための 基礎資料整備が望まれている。特に船舶では、船 体構造特有のすみ肉溶接個所が多く、これらのデ ータ不足が適用の妨げになっている。本研究では、 チタン船開発を促進するため、チタン薄板溶接構 造の基礎資料整備の第1段階として、突合せ溶接 継手・横すみ肉溶接継手・縦すみ肉溶接継手の疲 労試験を行った。

## 2. 各種規格値及び供試材の機械的特性

供試材に、JIS H 4600 チタン合金圧延材 TP 340C を使用した。表1 に船舶用軟鋼、JIS 2 種 チタン、ASTM Grade 2 チタンの規格値を示す。 表中に、使用材料の母材強度試験結果も同時に示 した。試験時のひずみ速度増加率は、耐力までが 0.2~0.35 %/min、耐力後が 1.0~1.6 %/min で行 った。

表 1	機械的特性
<b>X</b> I	

	0.2% Offset Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Mild steel for ship		
(In Japan)	≥235	400 to 490
JIS H 4600 2	≥215	340 to 510
ASTM Grade 2	275 to 450	≧ 345
Test Result (C)	288	349
Test Result (L)	223	365

# 3. 実験項目及び手法

応力比 R = 0, 周波数 5Hz の条件で疲労試験 を行った。試験片は母材 (LA·TYPE・CA·TYPE)、 突合せ溶接継手 (LB·TYPE・CB·TYPE)、横す

# 材料加工部 \*岩田 知明、松岡 一祥

み肉溶接継手(LT·TYPE・CT·TYPE)及び縦す み肉溶接継手(LL·TYPE)とした。試験片記号の 先頭文字は、圧延方向(L)又は圧延垂直方向(C)を 表し、続く文字は母材(A)、突合せ(B)、横すみ肉 (T)又は縦すみ肉(L)を表す。表2 に試験片の一覧

表2 試験片の種類

	Base Metal (LA)
Rolling Direction	Butt Joint(LB)
(L)	Transverse Fillet Joint (LT)
	Longitudinal Fillet Joint (LL)
Vertical to	Base Metal (CA)
Rolling Direction	Butt Joint(CB)
(C)	Transverse Fillet Joint (CT)



を示す。試験片の形状及び寸法を 図 1 に示す。 薄板のため、T-TYPE 試験片も一本ずつ作成し、 端部の処理は角回し溶接とした。溶接法は手動 テ ィグ 溶接で、使用した溶接棒は JIS YTB35 Ø 1.6 mm である。溶接ガス及び背面シールドガス として Ar を使用した。溶接条件を表 3 に示す。

Joint Type	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm∕min)	Heat Input (kJ/m)
LB	90.0±0	17.5±0	$12.65 \pm 0.55$	747
LT	73.18±0.32	$13.38 \pm 0.42$	$13.48 \pm 0.32$	436
LL	$73.53 \pm 0.07$	13.7±0	10±1.0	604
CB	84.5±0.5	$16.35 \pm 0.05$	12.4±0.2	669
СТ	$73.6 \pm 0.1$	$13.55 \pm 0.15$	$13.13 \pm 0.37$	456

表 3 溶接条件

#### 4. 実験結果及び考察

図2から6に疲労試験結果を示す。図2は荷重 方向を母材及び溶接継手の主板の圧延方向とした 場合の疲労試験結果を示し、図3は荷重方向を母 材及び溶接継手の主板の圧延方向と垂直な方向と した場合の疲労試験結果を示す。図2と3を比較 すると、圧延の方向によって、母材の疲労強度は 影響を受けるのに対し、継手の疲労強度はほとん ど影響を受けるのに対し、継手の疲労強度はほとん ど影響を受けないことが分る。そこで、継手の試 験結果を図4と図5に整理し直した。ただし、母 材の疲労比は、0.51(L)及び 0.64(C)であり、圧延 方向の疲労強度は表面粗さの影響が大きいものと 考えられる。図4は突合せ溶接継手の結果を示し、図 5は横すみ肉溶接継手の結果を示す。また、図 6はホットスポット応力範囲の結果を示す。

図 2 と図 3 中の二点鎖線は母材の 0.2%耐力を 示す(圧延方向は 223 MPa、圧延垂直方向は 288 MPa)。鋼材との比較のために、図中に鋼材の溶 接継手の設計疲労強度曲線 <sup>1)</sup>を細線で示す。各細 線上の数字は、疲労等級 FAT を表している。鋼材 においては、突合せ溶接継手の FAT 値は 100 (下 向き姿勢で工場製作、止端角≦30°、NDT)、荷 重非伝達型横すみ肉溶接継手の FAT 値は 80 (主 板よりも厚くない付加物、片面を含むすみ肉溶接、 溶接のまま)、面内ガセットすみ肉溶接継手の FAT 値は 71 (ガセット長さ 50mm 以上 150mm 未満)となっている。図中で 100 の FAT 値は一 点中鎖線で、80 の FAT 値は二点中鎖線で、71 の FAT 値は中破線で示されている。疲労等級 FAT は 200 万回疲労強度(応力範囲)で示される。

最小自乗法によって求められた S/N 関係を各図 中に示す。S/N 特性曲線は、完全に破断するまで の繰返し数を N、応力範囲をΔS として、

#### $N_f = C/\Delta S^m$

によって求められる。ここで、C は比例定数、m は疲労強度曲線の傾きを表している。例えば、鋼 材・アルミニウム合金溶接継手の疲労設計規格で は、m = 3が採用されている。表 4 は S/N 特性 曲線のパラメータを示す。突合せ溶接継手におい ては、溶接部から破断したデータは別にしてまと めた。応力が対数正規分布すると仮定して、95% 生存確率上下限の S/N 特性曲線を図中に示す。こ れらの曲線は平均±2 標準偏差である。図 4 と 5

表 4 S/N 特性曲線のパラメータ

		C		Standard Deviation
Rolling direction	Base metal	2.48E+27	9.27	0.485
(as shown in Fig.2)	Butt	3.57E+31	11.36	0.184
	Transverse fillet	6.15E+26	9.31	0.261
	Longitudinal fillet	5.84E+16	5.49	0.166
	Butt (cracked on the welding zone)	6.47E+29	10.77	0.155
Vertical direction	Base metal	2.46E+36	12.81	0.102
to rolling direction	Butt	2.52E+40	14.87	0.617
(as shown in Fig.3)	Transverse fillet	2.26E+23	7.64	0.457
	Butt (cracked on the welding zone)	1.52E+23	7.80	0.108
Butt	as shown in Fig.4	1.11E+20	6.20	0.421
Butt (cracked on the welding zone)	as shown in Fig.4	8.09E+26	9.47	0.108
Transverse fillet	as shown in Fig.5	8.12E+20	6.60	0.366
Hot Spot Stress Range	as shown in Fig.6	2.85E+24	8.34	0.294



に示す再分類から、実験結果は比較的狭い範囲に 分布していることがわかる。よって、突合せ溶接 継手と横すみ肉溶接継手の疲労強度は圧延方向の 影響を受けないことが明らかである。

平均-2 標準偏差の値から、チタンの疲労等級 は、突合せ溶接継手 147、溶接部で破断した突合 せ溶接継手 149、横すみ肉溶接継手は 138、縦す み肉溶接継手は 81 である。しかし、今回のよう な薄板試験片は通常残留応力が小さいため、実構 造への適用に際しては結果を補正する必要がある。 通常は 20%疲労強度を低下して補正が行われる ので<sup>1)</sup>、突合せ溶接継手 117、溶接部で破断した 突合せ溶接継手 119、横すみ肉溶接継手 111、縦 すみ肉溶接継手 64 となる。本試験の範囲では、 溶接部から破断した突合せ溶接継手及び縦すみ肉 継手以外は、チタンの疲労強度は鋼材の設計用疲 労強度より強い。ただし、突合せ溶接継手におい





図6 S/N 特性曲線(ホットスポット応力範囲)

て、溶接部から破断したデータの取扱いは今後の 課題であり、溶接欠陥の影響の詳細な評価が必要 である。また、図2で示されるように、縦すみ肉 溶接継手の疲労強度は、母材や他の継手の疲労強 度を大きく下回ったため、鋼材の設計用疲労強度 を満たさなかった。鋼材においては、縦すみ肉溶 接継手の疲労強度は突合せ溶接継手の約 70%で あるのに対し、本試験片形状のチタンにおいては 約 50%であり、縦すみ肉溶接継手の疲労強度の低 下が著しい。特に、鋼材の場合と S/N 曲線の勾配 が異なっているため、短寿命側の強度低下が大き い。また、縦すみ肉の疲労強度は試験片幅とすみ 肉板厚の比の影響を受けるので、今後は厚板によ り更に評価を行なう必要がある。

図 6 中に、ひずみ分布測定の結果 <sup>2</sup>からの構造 的応力集中係数(縦すみ肉溶接継手 1.57、突合せ・ 横すみ肉溶接継手 1.02)を用いて計算したホット スポット応力を示す。図から、縦すみ肉継手の場 合も、構造的形状応力の効果を取り除けば、他の 溶接継手に近い疲労強度となることがわかる。他 の溶接継手より 20 MPa ほど低下しているのは、 残留応力の寄与分と考えられる。特に長寿命側ほ ど低下が大きくなる。残留応力に関しては、現在 計測中である。

本試験では、板厚が 2mm と薄いため残留応力 が小さいと考えられること、及びティグ溶接で止 端半径が大きく局所的応力集中が小さいことから、 鋼材の場合とS/N曲線の勾配が異なっていると思 われる。よって、今後は、更に厚い板の試験片で の検証が必要である。現在、10mm 板厚の引張試 験・疲労試験を実施中である。

# 5. むすび

本研究により以下の結論が得られた。

- 日材の疲労強度が圧延方向の影響を受けるのに対し突合せ溶接継手・横すみ肉溶接継手の疲労強度はその圧延方向の影響を受けない。
- 2)構造的形状応力を持つ縦すみ肉継手の疲労 強度は、母材や他の継手の疲労強度を大き く下回った。特に長寿命側で低下が大きく なるのは、残留応力の影響と考えられる。
- 3) 鋼材の場合と S/N 曲線の勾配が異なった。 その理由としては溶接残留応力や応力集中 の違いが考えられるので、厚板の試験を実 施中である。

### 謝辞

材料の提供、溶接の施工等でご協力いただいた、(社)日本チタン協会に感謝いたします。

## 参考文献

- A. Hobbacher 編:溶接構造の疲労設計(IIW)、
  (社)溶接学会訳、(2000)、pp. 22 73
- 2) 岩田、松岡:チタン溶接継手の強度、軽金属 溶接構造協会研究発表会講演概要 Vol. 30、 (2000)、pp. 45 – 47