

チタン薄板溶接継手の疲労強度

正員 松岡 一 祥* 正員 岩田 知 明*

Fatigue Strength of Welded Thin-Plated Titanium Joints

by Kazuyoshi Matsuoka*, Member Toshiaki Iwata*, Member

Summary

Nowadays, titanium has been focused on marine use. A few fishing boats and yachts were built of titanium plates. The advantages of titanium use are that they are free from corrosion and fouling in marine environment, and that light structural weight gives a benefit of the improvement in fuel consumption, etc. However, there is no suitable rule or recommendation for welded built-up plated titanium structure. Especially, the fatigue strength data of welded titanium joints are much limited.

In this study, the fatigue tests of base metal specimens, butt welded joints, transverse fillet welded joints and longitudinal fillet welded joints were carried out. Using the fatigue test results, the fatigue strength of welded thin-plated titanium joints was discussed based on modified MIL-HDBK-5 method.

According to the examination, the followings were obtained as the main conclusions.

- (1) The modified MIL-HDBK-5 method is applicable to estimating the fatigue strength of welded titanium joints taking weld residual stresses and stress concentration into consideration.
- (2) The fatigue strength of TIG welded titanium joints is superior to that of MIG welded steel joints, in the long lifetime region of over a hundred thousand cycles.

記 号

B : 試験片記号, 突合せ溶接
 C : 試験片記号, 圧延に垂直方向の試験片
 K_t : SR 202 B 法による構造的応力集中係数
 N : 疲労寿命, 破断までの回数
 L : 試験片記号, 縦すみ肉 (角回し) 溶接継手
 m : 応力比効果の指数
 R : 応力比 ($=1-(S/S_{max})$)。試験片記号, 圧延方向の試験片
 R_n : 負荷 (公称) 応力比 ($=S_{n,min}/S_{n,max}$)
 S : 応力。ホットスポット応力範囲
 $(=K_t (S_{n,max} - S_{n,min}))$
 $S_{0.2}$: 0.2%耐力

S_{eq} : 等価応力 ($=S_{max}(1-R)^m = S^m S_{max}^{1-m}$)

S_{max} : 残留応力を考慮したホットスポット最大応力
 $(=K_t S_{n,max} + S_r)$

$S_{n,max}$: 負荷 (公称) 最大応力

$S_{n,min}$: 負荷 (公称) 最小応力

S_r : 残留応力, ホットスポット位置の残留応力

T : 試験片記号, 横すみ肉溶接継手

α, β : $S-N$ 関係の係数, ($\log(S_{eq}) = \alpha + \beta \log(N)$)

1. 緒 言

1.1 船舶へのチタンの適用

純チタンは海洋環境での耐食性, 耐生物付着性等の特徴から, 火力等発電施設の冷却用海水管に使用されている。また, その高い比強度の利点は競技用ヨットで実証されている。しかし, 船体そのものをチタン製とする船舶は, 数隻の漁船と上述の競技用ヨットを除けば存在しない。その理由としては, 材料費が高い, 工作工数がかかり建造コストが高いことに加えて, チタンを主要構造部材として使用することを認める基準が存在しないことがあげられる。一

* 海上技術安全研究所

方、補助的な部材、艤装品等への使用は拡大しだしている。すなわち、舵、中間軸受け、配管等には使用実績があり、上部構造への使用に対しては特に制限が付けられるとは考えがたい。特に、配管については長期的な維持経費、廃棄時のコストまで勘案すると経済的にも成立する。

1.2 チタン使用の問題点

純チタンを用いる場合の最大の問題点は圧延母材および溶接継手の強度データの不足である。例えば、米軍航空機用材料規格¹⁾ではTi-8 Al-1 Mo-1 VおよびTi-6 Al-4 V合金の圧延シートについては母材疲労強度までデータベース化されているにもかかわらず、純チタンの疲労強度の欄は空白である。まして、溶接継手の強度データは皆無といえる。このことが、船体等の溶接構造物への適用の妨げとなっている。また、実際に適用されている配管等についても疲労寿命については、これを考慮せずに用いているのが現状である。

1.3 本論文の目的

本論文の目的は、圧延された純チタンの薄板を、船舶の配管、上部構造等に使用することを想定して、その溶接継手の疲労強度の評価法を確立しようとするものである。

厚さ2mmのJIS2種純チタン板について、母材、突合せ溶接継手、横すみ肉溶接継手および縦すみ肉（角回し）溶接継手の疲労試験結果を示す。溶接継手の疲労試験結果および溶接残留応力測定結果に応力集中を考慮して、修正MIL-HDBK-5法²⁾による評価を試みる。溶接継手で得られた修正MIL-HDBK-5法による等価応力/疲労寿命関係と母材疲労試験結果を比較し、薄板純チタン溶接構造物の疲労強度評価法について論じる。

2. 材料および試験方法

2.1 材料

材料には、板厚2mmの純チタン（JIS H 4600, 2種）の圧延シートを用いた。材料試験の結果をTable 1に示した。純チタン圧延板の強度は、溶存酸素量が多いほど高く、耐力は圧延方向より、その直角方向の方が高い。

2.2 試験片

試験片形状をFig. 1に示した。主板母材の採取方向により、圧延方向の試験片にはR、圧延に直角方向にはCの記号を与えた。突合せ溶接継手、横すみ肉溶接継手および縦すみ肉溶接継手にはそれぞれ、B、TおよびLの記号を付した。すなわち、Rは圧延方向の母材試験片、CTは主板の軸方向がロール方向に垂直な横すみ肉溶接継手である。主板がロール方向に垂直な縦すみ肉溶接継手の試験は実施しなかった。

溶接は手動TIGで、アークシールドおよび背面シールドガスにアルゴンを用いた。溶接条件はRBとCB、RTとCTおよびRLのそれぞれで一定となるようにつとめ

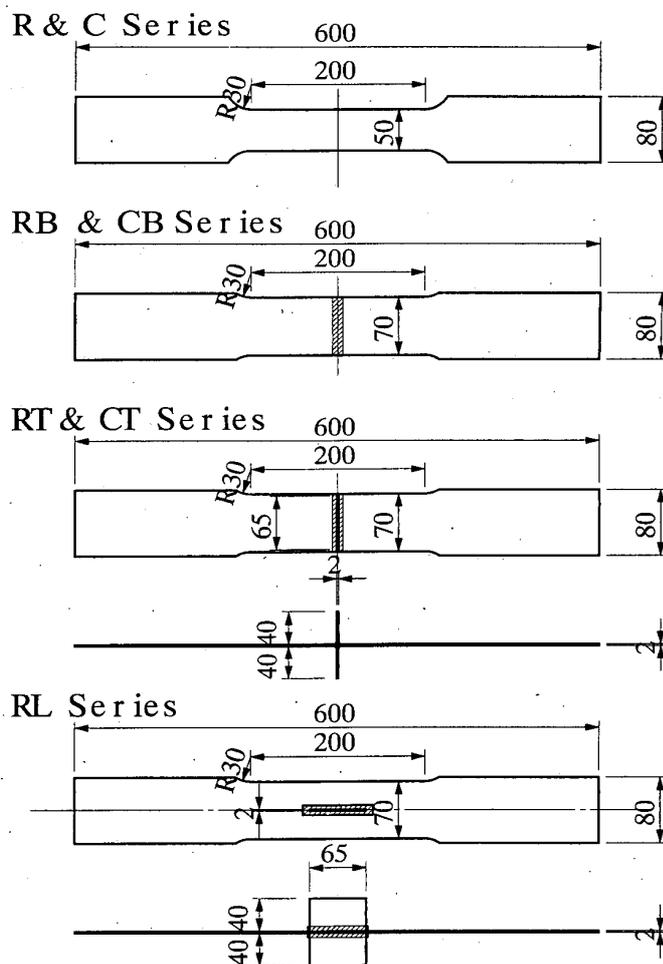


Fig. 1 Test Specimens.

Table 1 Mechanical Properties.

Direction of Main Plate	0.2 % Offset Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Rolling Direction	223	365	60.8
Cross to Roll. Dir.	288	349	79.0

Table 2 Welding Conditions.

Joint Type	Current (A)	Voltage (V)	Traveling Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/m)
RB	90.0	17.5	12.6 ± 0.6	747
CB	84.5 ± 0.5	16.4	12.4 ± 0.2	669
RT	73.2 ± 0.3	13.4 ± 0.4	13.5 ± 0.3	436
CT	73.6 ± 0.1	13.6 ± 0.2	13.1 ± 0.4	456
RL	73.5 ± 0.1	13.7	10.0 ± 1.0	604

たが、手動であるため、若干のばらつきは避けられない。

Table 2 に溶接条件の計測例を示した。

2.3 試験方法

RL シリーズについて応力集中を見るための引張試験を、RB, CB, RT, CT および RL シリーズについては残留応力測定を行った。

残留応力計測はひずみゲージを用いた切り出し法によった。溶接部近傍ではグリッド長 1 mm の縦方向および横方向の応力集中ゲージを用い、2 枚の応力集中ゲージを試験片中心線を挟む位置で、初めのグリッド中央が止端位置になるように貼付した。そこで、RL シリーズでは、対称性を仮定して中心線から 1.5 mm 程度横方向にずれた位置の残留応力を計測したことになる。

総てのシリーズで負荷応力比 0 の完全片振りの疲労試験を実施した。

3. 試験結果

3.1 縦すみ肉溶接継手の応力集中

本論文では溶接継手の応力集中を、止端部の局所的な形状によるものと部材配置等の構造的なものに分け、構造的な応力集中に注目する（いわゆるホットスポット応力法）。すなわち、構造的な応力集中がない突合せ溶接継手および横すみ肉溶接継手を基礎継手とし、この構造的応力集中係数 K_t を 1.0 とする。これに対する応力集中の倍率として縦すみ肉溶接継手の構造的応力集中係数が定まる。この決定方法にはいくつか有るが、ここでは SR 202 B 法³⁾を用いることとする。

縦すみ肉溶接継手の引張試験における試験片中央線上での応力分布を Fig. 2 に示した。図の横軸は角回し溶接止端からの距離、縦軸は軸方向応力を公称応力で無次元化した。

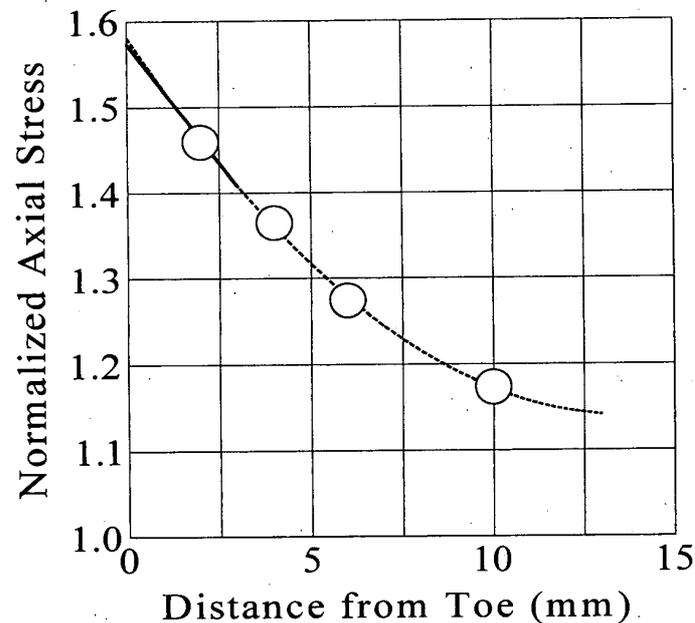


Fig. 2 Axial Stress Distribution.

ている。図中の○印は測定値、破線は最適合曲線である。

SR 202 B 法によるホットスポット応力基準に対応する応力集中係数は、止端から板厚の 0.5 と 1.5 倍の点の応力値を用いて止端部に直線外挿して求められる。しかし、ここで用いた主板厚が 2 mm と薄い試験片では止端から 1 mm の位置の応力を求めることは困難であり、最適合曲線の 1 および 3 mm の値から外挿し、1.57 となった。図には外挿直線が実線で示されている。

なお、最適合曲線の止端での値は 1.58 であり、SR 202 B 法による 1.57 とほとんど変わらない。

3.2 残留応力分布

RB, CB, RT および CT 試験片の溶接残留応力測定結果を Fig. 3 に、RL のそれを Fig. 4 に示した。

突合せ溶接継手 (Fig. 3 中、RB □印および CB ■印) と横すみ肉溶接継手 (RT △印および CT ▲印) の残留応力分布の違いはほとんどない (Fig. 3 参照)。この 4 種の継手止端部の残留応力は、平均すると 26 MPa であった。

縦すみ肉溶接継手の残留応力は、突合せおよび横すみ肉溶接継手に比べてはるかに大きい (Fig. 4 参照)。角回し

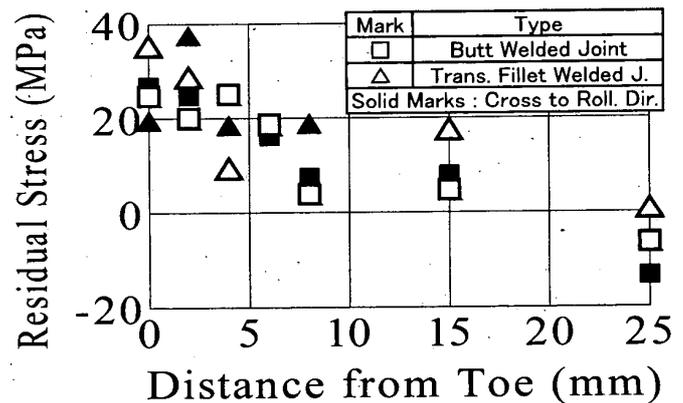


Fig. 3 Residual Stress Distributions in RB, CB, RT and CT Specimens.

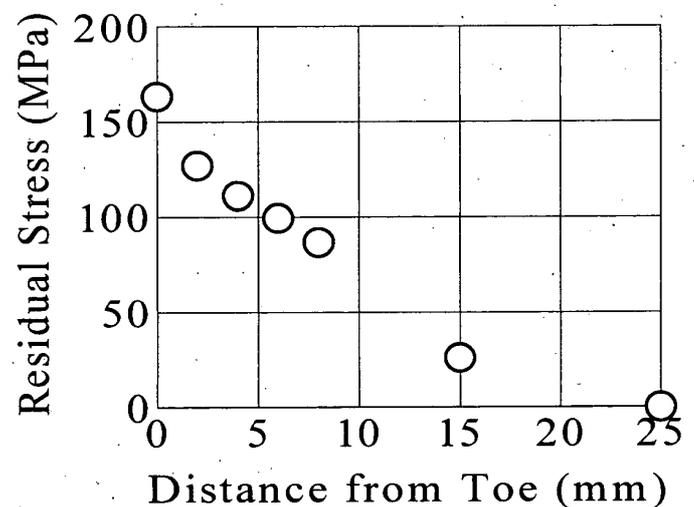


Fig. 4 Residual Stress Distribution in RL Specimen.

Table 3 Fatigue Test Results.

Joint Type	Direction of Main Plate	Specimen Number	Applied Maximum Stress $S_{n,max}$ (MPa)	Number of Cycles to Failure	Crack Initiation Spot
Base Metal Specimen	Rolling Direction	R2	234.2	265,000	B.M. (Base Metal)
		R3	189.6	1,670,000	
		R4	211.9	7,230,000	
		R6	223.0	232,000	
		R8	200.7	500,000	
		R10	211.9	167,000	
		R11	223.0	605,000	
	Cross to Rolling Direction	C2	273.6	181,000	
		C3	244.8	1,210,000	
		C4	244.8	620,000	
		C6	288.0	78,000	
		C8	259.2	189,000	
		C9	252.0	245,000	
		C10	216.0	2,870,000	
Butt Welded Joint	Rolling Direction	RB1	168.0	1,240,000	B.M. (Weld Bond)
		RB5	176.0	1,210,000	
		RB11	184.0	705,000	
		RB6	160.0	1,150,000	
		RB10	192.0	147,000	
		RB12	200.0	96,000	
		RB13	192.0	213,000	
	Cross to Rolling Direction	CB1	221.4	2,640,000	B.M. (Toe)
		CB2	209.1	536,000	
		CB10	209.1	120,000	
		CB11	184.5	319,000	
		CB4	221.4	130,000	
		CB5	230.0	106,000	
Trans. Fillet Welded Joint	Rolling Direction	RT12	198.8	248,000	Toe
		RT2	167.0	675,000	
		RT5	190.8	568,000	
		RT6	159.0	1,780,000	
		RT9	174.9	701,000	
		RT10	151.1	4,610,000	
		RT11	182.9	521,000	
	Cross to Rolling Direction	CT10	184.0	5,840,000	Toe
		CT2	149.5	4,210,000	
		CT3	218.5	189,000	
		CT4	241.5	142,000	
		CT6	230.0	217,000	
		CT9	207.0	679,000	
		CT11	172.5	521,000	
Long Fillet Welded Joint	Rolling Direction	RL3	114.5	448,000	Toe
		RL4	103.6	346,000	
		RL5	103.6	752,000	
		RL6	109.0	454,000	
		RL9	119.9	155,000	
		RL11	98.1	441,000	
		RL12	92.7	1,120,000	
	Cross to Rolling Direction	R9	156.1	> 1.00E7	Run Out
		G5	230.4	> 1.00E7	
		CB3	172.2	> 9.26E6	
		CB7	196.8	> 7.75E6	
		CB14	184.5	> 1.00E7	
		CT5	184.0	> 6.61E6	
		RL2	87.2	> 1.00E7	
T. Fillet J.	Rolling Direction	RL10	98.1	> 1.00E7	

止端部の残留応力の測定値は163 MPaであった。

3.3 疲労試験結果

疲労試験の結果をまとめて Table 3 に示した。表には、母材、継手形式の別 (Fig. 1 参照)、主板の方向、試験片番号、負荷 (公称) 最大応力 (応力比 0 なので公称応力範囲に等しい)、破断までの回数及び疲労き裂発生箇所が示されている。表には疲労き裂の発生を見ずに中断した試験についても併せて示している。

4. 結果の検討

4.1 修正 MIL-HDBK-5 法

米軍の航空機用材料規格の手引き書 (MIL-HDBK-5)¹⁾ では、総ての材料の $S-N$ 関係を (1) 式の等価応力 S_{eq} と寿命 N の関係 (2) 式で表している。

$$S_{eq} = S_{max}(1-R)^m \quad (1)$$

$$\log S_{eq} = \alpha + \beta \log N \quad (2)$$

ここに、 S_{max} は負荷した最大応力、 $R = S_{min}/S_{max}$ は応力比、 m は $S_{eq}-N$ 関係を最適化する指数である。

MIL-HDBK-5 は航空機用の材料を対象とするため、溶接継手は取り扱っていない。

船舶等の溶接構造物では、疲労損傷は溶接継手に生じ、応力集中と溶接残留応力の影響を受ける。この応力集中と残留応力の影響を考慮した等価応力で疲労挙動を評価する手法が修正 MIL-HDBK-5 法である²⁾。この方法では、

(1) 式を書き直して (3) 式とし、(4)、(5) 式により S_{max} と $S = S_{max} - S_{min}$ に応力集中と残留応力を考慮する。

$$\begin{aligned} S_{eq} &= S_{max}(1-R)^m \\ &= S_{max}(S_{max}/S_{max} - S_{min}/S_{max})^m \\ &= S_{max}^{1-m}(S_{max} - S_{min})^m \\ &= S_{max}^{1-m} S^m \end{aligned} \quad (3)$$

$$S_{max} = K_t S_{n,max} + S_r \quad (4)$$

$$S = K_t (S_{n,max} - S_{n,min}) \quad (5)$$

ここに、 $S_{n,max}$ は負荷した最大応力、 $S_{n,min}$ は負荷した最小応力である。またここに、本論文ではホットスポット応力法に従うため、 K_t は構造的応力集中係数、 S_r はホットスポット位置における残留応力である。

溶接用鋼溶接継手の場合、 S_{max} には降伏応力の上限がある³⁾。しかし、明白な上下降伏点を持たないアルミニウム合金では S_{max} に上限を設定できない⁴⁾。純チタンも明確な降伏点を持たないため、文献 4) に従って、(4) 式の S_{max} に上限を設定しないものとした。

4.2 溶接継手の止端を起点とする場合

Table 3 の結果の中から止端を起点とする試験結果 (表中 Toe と記されている) を Fig. 5 に示す。図注の □印は CB, △は RT, ▽は CT, ○は RL シリーズの試験片で止端部に疲労き裂が発生したものである。×印は突合せ溶接継手 (RB および CB シリーズ) で溶接金属 (溶接部中央の融合面) から疲労き裂が発生したものである。

前述3.1および3.2節により、CB、RTおよびCTシリーズの止端部での構造的応力集中係数は1.0、残留応力 S_r は26 MPaとした。RLシリーズについては、 $K_t=1.57$ 、 $S_r=163$ とした。

以上の値を、Fig. 5の×印を除く結果に適用し、(4)、(5)式により S_{max} および S を求め、(1)、(2)式の m 、 α 、 β の係数を最小自乗法で決定した。結果は以下のようになった。

$$m=0.712 \quad (6)$$

$$\alpha=2.98 \quad (7)$$

$$\beta=-0.120 \quad (8)$$

$$\sigma(\alpha)=0.0244 \quad (9)$$

(9)式は(6)から(8)の値による $S_{eq}-N$ 関係(2)式と実験結果との誤差の標準偏差である。

Fig. 5に示した試験結果を $S_{eq}-N$ 関係として整理すると、Fig. 6となる。図中の記号はFig. 5と共通で、実線は(2)式による50%生存確率線、破線はそれから2標準偏差減じた97.5%生存確率線である。

Fig. 5とFig. 6を比べると、修正MIL-HDBK-5法が、

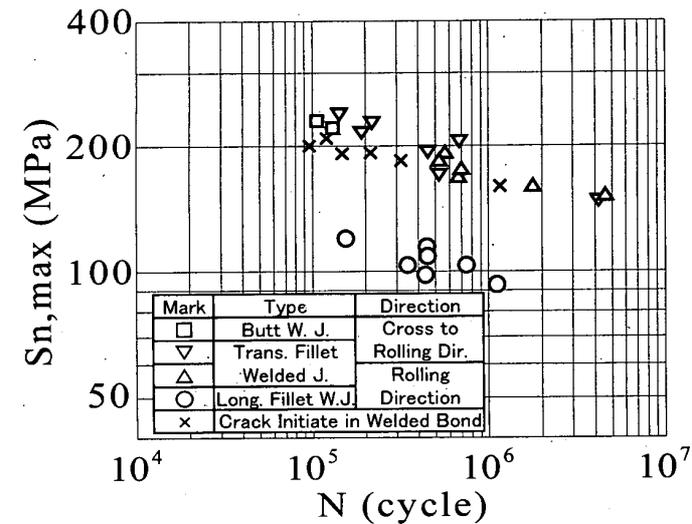


Fig. 5 Fatigue Test Results of Which Cracks Initiate in Weldments.

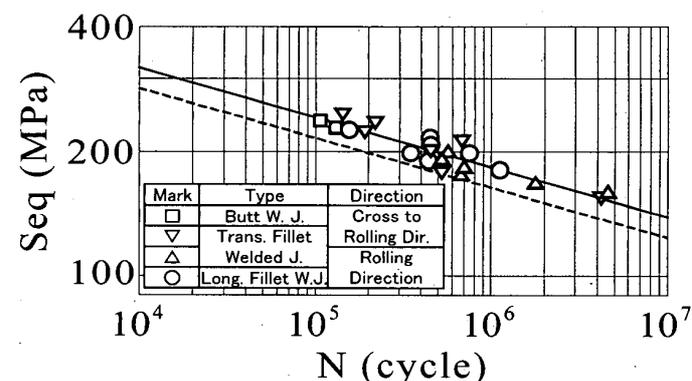


Fig. 6 Equivalent Stress-Fatigue Life Relation of Test Results of Which Cracks Initiate at Weld Toes.

純チタン溶接継手にも有効であることがわかる。

4.3 母材を起点とする場合

応力集中が無く、残留応力もない母材試験片では、試験条件 ($R=0$) により、等価応力は負荷応力範囲および負荷最大応力と等しい。

Fig. 7に母材試験片の結果を示した。図中の○印は試験片の方向が圧延方向、●印は圧延に垂直な方向である。図には、溶接止端部を起点とする溶接継手の疲労試験結果の50%生存確率線 (実線)、97.5%生存確率線 (破線)、母材の2方向の0.2%耐力の値 (223 (圧延方向) および288 MPa (圧延垂直方向)) が2点鎖線で示されている。図中のその他の記号は溶接継手試験片で母材部が起点となった場合であるが、これについては後に述べる。

図の○印と●印を比べると、圧延垂直方向 (●印)の方が疲労強度は大きい。これは母材耐力の差の影響であると考えられる。すなわち、残留応力と応力集中のない母材平滑試験片では、0.2%耐力の大きい圧延垂直方向の方が、圧延方向より疲労強度が大きい。

Fig. 7のその他の記号、□、■、△および▲はそれぞれ、突合せ溶接継手で軸方向が圧延方向と圧延に垂直方向、横すみ肉溶接継手で主板の軸方向が圧延方向および圧延に垂直方向の試験片で母材部に疲労き裂が生じたものである。これらの疲労き裂発生箇所は2例を除いて溶接部から離れた母材部の極微細な加工傷を起点としており、2例はき裂の一部が溶接部にかかっているものの起点は母材部側端の加工傷と判断された。これらの疲労き裂発生箇所では構造的応力集中はないが、若干の溶接残留応力は存在する。しかし、その値は止端部に比べると小さいと考えられるため、残留応力を無視してFig. 7上に示している。

図を見ると、溶接継手で母材部からき裂の生じたものについても、圧延方向 (白抜き) に比べて圧延垂直方向 (黒塗り)の方が疲労強度は大きい。

上述のように、母材および溶接継手で母材部からき裂の生じた試験結果は、圧延方向と垂直方向で明らかな疲労強度の違いが存在する。しかし、溶接止端部から疲労き裂が

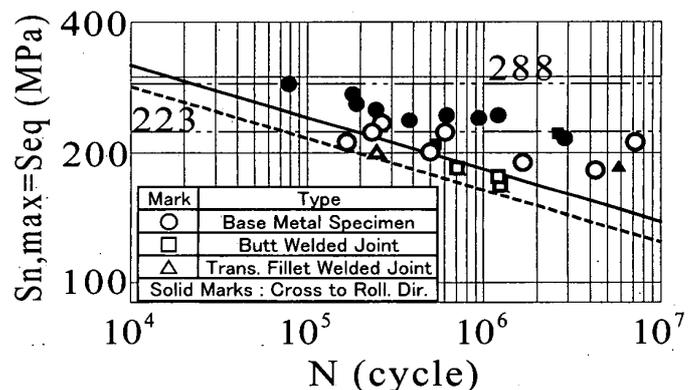


Fig. 7 Fatigue Test Results of Which Cracks Initiate in Base Metal.

生じた試験結果から得られた $S_{eq}-N$ 関係の 97.5% 生存確率の範囲 (図中破線より上方) には入っている。そこで、溶接止端部から疲労き裂が生じた試験結果から得られた $S_{eq}-N$ 関係を母材に適用しても安全側の評価となる。

4.4 溶接部を起点とする場合

Fig. 5 の×印は突合せ溶接継手 (RB および CB シリーズ) で、溶接ボンド部から疲労き裂が生じたものである。溶接ボンド部からき裂が生じた場合の疲労強度 (公称応力範囲あるいは負荷最大応力) は、止端部からき裂が生じた場合に比べて若干小さい。その理由は本検討の範囲では明確でないが、溶接ボンド部の残留応力が止端部に比べて高いこと、融合不良等の溶接欠陥の影響等が考えられる。今後の課題としたい。

5. 純チタン溶接継手の疲労強度

純チタン母材、および、溶接ボンド部からき裂が生じた場合を除いた溶接継手の疲労強度を鋼板溶接継手の場合と比較すると、Fig. 8 となる。ここに、鋼板溶接継手の等価応力についても (1) 式から (5) 式に従って、残留応力と応力集中が考慮されている。違いは、鋼の場合 S_{max} の上限を降伏応力としているだけである。なお、図中の FS は疲労強度、Proof は 97.5% 生存確率線であることを示している。

図中の実線は純チタン溶接継手の 97.5% 生存確率の線であり、これは母材に対しても安全側で適用可能である。図中の破線は鋼板溶接継手の 97.5% 生存確率の線²⁾ である。図には、JIS 2 種純チタンの 0.2% 耐力の規格値 215 MPa の線を併せて示している。

図を見ると、公称最大応力が規格耐力以下の範囲で純チタンを使用する場合、突合せ溶接継手および横すみ肉溶接継手の疲労強度は、鋼板のそれより大きいことがわかる。一方、構造的応力集中があり、残留応力も大きい角回し溶接継手等では、4.1 に示した修正 MIL-HDBK-5 法による評価を行う必要があるが、 10^5 回以上の長寿命領域では、純チタン溶接継手の $S_{eq}-N$ 関係は鋼溶接継手のそれより長寿命である。

以上から、規格耐力を設計強度として、純チタン溶接構造物の設計を行う場合、疲労強度の検討は鋼溶接構造物に比べて厳しくする必要のないことがわかる。

ところで、溶接継手の疲労強度は、一般的には、弾性定数あるいは比重に比例する。しかし、ここで取り扱った範囲では、弾性定数、比重共に鋼の半分程度である純チタン溶接継手の疲労強度が鋼のそれよりも長寿命側で大きくなっている。その理由の 1 つとして溶接方法の違いが挙げられる。Fig. 8 の破線は鋼の炭酸ガス MIG 溶接継手の結果であるのに対し、実線はアルゴンガス TIG 溶接継手の結

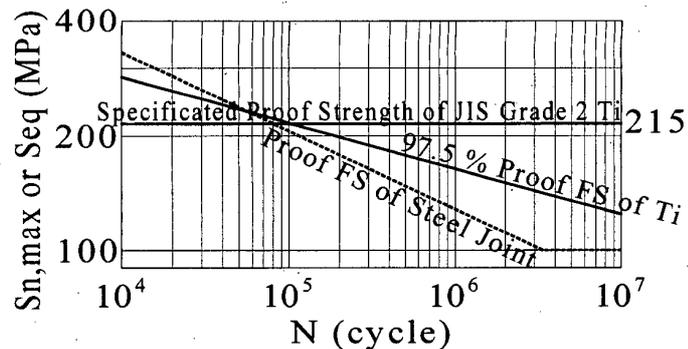


Fig. 8 Comparison between Fatigue Strength of Titanium Joint and That of Steel Joint.

果である。一般に TIG 溶接の方が止端部の形状は滑らかで、疲労強度も大きい。そこで、Fig. 8 は、鋼の MIG 溶接継手と純チタンの TIG 溶接継手についての比較であることに留意すべきである。

6. 結 言

JIS 2 種純チタンの板厚 2 mm の圧延材を用いて溶接継手の疲労強度の検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 溶接止端部から疲労き裂が発生した試験結果について修正 MIL-HDBK-5 法を適用し、等価応力/破断寿命関係を得た。
 - 2) 母材試験片および溶接継手試験片で母材部から疲労き裂が発生した試験結果と上述の等価応力/破断寿命関係を比較し、これが止端部以外からき裂が発生する場合について安全側の評価を与えることを示した。
 - 3) 鋼溶接継手の等価応力/破断寿命関係と純チタン溶接継手のそれを比較し、長寿命側ではチタン溶接継手の疲労強度が鋼溶接継手のそれより大きいことを示した。
- なお、上述 3) については、鋼は MIG、純チタンは TIG と溶接方法が異なることに留意する必要がある。

参 考 文 献

- 1) US Military Standard, MIL-HDBK-5 G, (1997).
- 2) 松岡, 藤井: 溶接継手の疲労き裂発生寿命の一評価法, 日本造船学会論文集, 第 178 号, 513, (1995). または, Matsuoka, K. and Kobayashi, Y.: Influence of Maximum Stress on Fatigue Crack Initiation Life of Welded Steel Joints and Notched Steel Plates, *Welding in the World*, Vol. 42, No. 6, 18 (1999).
- 3) 第 202 研究部会: 海洋構造物の疲労設計法および溶接部の品質に関する研究報告書, 日本造船研究協会, (1991).
- 4) 松岡, 上村, 鎌田: アルミニウム合金 A 6 N 01 押出材溶接継手の疲労強度とその改善法, 日本造船学会論文集, 第 176 号, 475, (1994).