$\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験法による SM570Q 鋼荷重非伝達 十字すみ肉溶接継手の疲労強度特性*

太田 昭彦**, 前田 芳夫**, 鈴木 直之**

Fatigue Strength of SM570Q Steel Non-Load -Carrying Cruciform Welded Joints by $\sigma_{\max} = \sigma_y$ Test*

By OHTA Akihiko**, MAEDA Yoshio** and SUZUKI Naoyuki**

The fatigue strength of non-load carrying cruciform welded joints were investigated on small welded specimens by the testing method keeping the maximum stress to be the yielding strength of base metal. This stress pattern modifies the existence of welding tensile residual stress in real welded structures. Some fatigue tests were performed at $R=0$. Slit welded specimens of 250 mm width were prepared to realize the residual stress existed in real welded structures. The tensile residual stress at slit welded part reached to the yield strength. The tensile residual stress on small welded specimens was smaller than the yield strength. The fatigue strength of small welded specimens at $R=0$ was larger than that of slit welded specimen near fatigue limit region. The fatigue strength of small welded specimens by $\sigma_{\max} = \sigma_y$ tests coincided well with that of slit welded specimen. The knee point appeared around 2×10^7 cycles for slit welded specimens ($R=0$) and small welded specimens ($\sigma_{\max} = \sigma_y$). It is pointed out that the design S-N curves in JSSC have same concept with this paper.

Key Words: Fatigue strength, Residual stress, Welded structure, Testing method, Welded joint, Stress ratio, Steel

1. 緒 言

溶接構造物の疲労強度は、黒皮母材のそれに比べ著しく低い。この原因は、溶接部に誘起される高い引張残留応力^{1,2)}による応力比効果と溶接余盛にもとづく応力集中³⁾にある。そして、溶接構造部材の疲労強度は、応力比が変化しても同一である(但し、応力比が-1より負側では強くなる場合がある)。しかし、小型溶接試験片の場合、応力比が高いほど疲労強度が低下する場合⁴⁾がある。

そして、溶接構造物の疲労設計規格では、応力比によらず設計S-N線は同一とされるのが一般的である。これは、溶接構造物に存在する残留応力が降伏強度に達しており、残留応力と作用応力との和はシェークダウンにより最大応力を降伏強度として作用応力の変動成分だけ垂下するような応力波形を形成する^{1,2)}ので、この応力波形には応力比は影響を与えなくなること起因する。

上記を踏まえ、溶接継手の疲労強度を求める試験法として、作用応力波形の最大値を降伏強度とし、応力範囲に応じて最小応力を変化させる $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験法が提案されている⁴⁻⁶⁾。

本報では、この試験法を板幅 40mm と 10mm の SM570Q 鋼荷重非伝達十字すみ肉溶接継手に適用すると共に、残留応力が降伏強度規模となるスリット溶接部を板幅中央に持つ板幅 250mm の試験片の応力比 0 の試験結果を比較し、

$\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験法の有用性を示す。なお、残留応力が降伏強度規模である荷重非伝達十字すみ肉溶接継手の疲労限の折曲り回数が 2×10^7 回と高繰返し回数に達することも示す。

2. 実 験 方 法

本研究に用いた鋼板は、板厚 20mm の溶接構造用鋼 SM570Q である⁷⁾。この鋼板の化学成分と機械的性質を Table 1 および 2 に示す。疲労試験片の形状寸法を Fig.1 に示す。Fig.1 (a) は母材試験片、(b) は板幅 40mm の小型試験片、(c) は板幅 10mm の小型試験片、(d) は残留応力が降伏強度となるように板幅中央の 70mm を除いて溶接を行い、溶接を除外しておいた中央 70mm のスリット部を冷却後に溶接した試験片(以降ではスリット溶接試験片と称する)である。

試験片(b)の形状について説明しておく。試験部である板幅平行部から掴部に遷移する部分に楕円を用いたのは、試験片全長を短く出来、かつ掴部幅を広く出来るのでチャック切れを防いで試験速度も高速とすることが可能となることによる。(c)については、チャック切れを防ぐため、#40の布製サンドペーパーを板幅端の研削面に、これとチャック駒の間に1mm厚のアルミ板を挟んだ。

溶接の積層法は小型試験片ではFig.2 (a)の2層3パス溶接を用いた。スリット溶接試験片の板端部の溶接ではFig.2 (b)に示すように2層2パスで、中央のスリット部の溶接では予備溶接で溶接引張残留応力が大きくなることが分かったFig.2 (a)の2層3パスとした。なお、小型試験片の積層法で2層3パスを選んだ理由は、Fig.3に示すスリット溶接試験片の破面のビーチマークから分かるように、疲労き裂

* 原稿受付 平成14年12月3日 平成14年11月溶接構造シンポジウムで発表

** 正 員 (独)物質・材料研究機構 Member, National Institute for Materials Science

Table 1 Chemical composition of material.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ceq	P _{CM}
0.12	0.25	1.45	0.014	0.004	0.01	0.029	0.055	0.042	0.01	0.023	0.39	0.21

Fig.1 Fatigue specimens.**Table 2** Mechanical properties of material.

Tensile properties			Charpy Absorbed Energy (J/°C)	Vickers Hardness (HV 98N)
Yield strength at 0.2% offset (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)		
606	669	35	302/5	212

Fig.2 Welding pass sequence. **Fig.3** Beach marks on fractured specimen.

試験応力軸方向の残留応力 σ_{ry} の測定は、ひずみゲージを用いた。

板幅方向分布を測定する場合は、解放ひずみ法を用いた。2軸ひずみゲージを溶接止端から 5mm 離れた位置で溶接線に沿って多数接合した。ひずみゲージの周りを切断して解放されたひずみ、 ϵ_x 、 ϵ_y 、から (1) 式⁹⁾ で求めた。

$$\sigma_{ry} = \frac{-E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu\epsilon_x) \quad (1)$$

ここで、 σ_{ry} は応力軸方向の残留応力、E はヤング率、 ν

発生点が中央のスリット部であったことから、スリット部と同じ積層法を用いたことにある。溶接条件を Table 3 に示す。

Table 3 Welding condition.

Part of weld	Slit part or small specimen	Edge part
Pass sequence	Two layer three passes	Two layer two passes
Welding rod	Low hydrogen type 3.2 mm diameter	Low hydrogen type 4.0 mm diameter
Welding position	Flat	Flat
Welding current	135 A	135-170 A
Welding speed	1.33-2.83mm/s	1.67-2mm/s
Arc voltage	24 V	24 V
Heat input	1.62-1.94 MJ/m	1.14-3.06 MJ/m
Preheating	None	None
Re-drying of rod	350°C	350°C
Interpass temperature	Free	Free

はポアソン比である。

また、板幅が10mm以外の試験片については以下の手順で試験片の疲労破壊起点である溶接止端の残留応力を推定した。

1. 試験片中央から板幅10mmの板を切り出すに当たり、溶接止端から $y = 3, 5, 7, 9, 11$ mmの位置に5連2軸のひずみゲージをFig.2のA, B, C, Dの4断面に貼った。
2. 切断後(1)式で σ_{ry} を計算し、溶接止端位置($y = 0$)のそれを外挿した(Fig.6(c)(d))。
3. 削り出した板幅10mmの試験片について、次に述べる層状削り法で溶接止端断面の板厚に沿う残留応力分布を求めた(Fig.6(e)(f)(i))。なお、層状削り法では、余盛りを板表面まで削った溶接止端位置に単軸のひずみゲージを貼って行った。
4. 項2で外挿して求めた溶接止端部の σ_{ry} の値を、項3で求めた残留応力の分布図の縦軸の0をこの値に移動させるように上昇させ、板厚および板幅の両情報を含んだ σ_{ry} の分布を推定した(Fig.6(g)(h))。これによって、板幅10mmの板を削り出す前の疲労試験片中央部に存在する溶接止端での残留応力を求めたことになる。

板厚に沿う残留応力分布を測定するための層状削り法⁹⁾について述べる。

溶接止端断面に接着したゲージにより測定される長手方向ひずみ ε の変化と切削深さ z の関係から残留応力を(2)(3)式で(Fig.4参照)計算した。

$$\sigma_{ry1} = E \left\{ 2\varepsilon - \frac{t-z}{2} \frac{d\varepsilon}{dz} - 3(t-z) \int_0^z \frac{\varepsilon}{(t-z)^2} dz \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_{ry2} = E \left\{ 2\varepsilon' - \frac{t-2z'}{4} \frac{d\varepsilon'}{dz'} - 3 \left(\frac{t}{2} - z' \right) \int_0^{z'} \frac{\varepsilon'}{\{(t/2) - z'\}^2} dz' \right\} \\ + \frac{3E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{4} - z' \right) \left\{ \int_0^{t/2} \frac{\varepsilon}{(t-z)^2} dz - \frac{2}{t} \varepsilon'_{t/2} - \frac{2}{t} \int_0^{t/2} \sigma_1 dz \right\} \quad (3)$$

記号は、Fig.4(c)に示した。 ε は削ることによって生じたひずみである。

疲労試験は、荷重容量が1.5MN, 1MN, 500kN, 400kN, 300kNの油圧サーボ式疲労試験機を用い、軸荷重制御で室温大気中で行った。応力波形はFig.5に示す正弦波で、(a)の $\sigma_{\max} = \sigma_y$ と(b)の応力比 $R = 0$ の定振幅試験、(c)の2段多重試験の3種である。試験速度は、10-50Hzとした。試

Fig4 Concept of residual stress measurement along plate thickness.

Fig5 Stress patterns.

験片の把持は油圧チャックで行った。板厚10mm以外の試験片については黒皮母材試験片掴部の板厚表面を直接チャック歯で締付けて把持した。

一部の疲労試験については、疲労破面に疲労き裂の進展状況を明らかにするビーチマークを印すため、Fig.5(c)に示した2段多重試験を行なった。

3. 結果および検討

Fig.6に計測した残留応力分布を示す。図の○印等の脇に記されたA, B, C, DはFig.2に示したA, B, C, Dの溶接線を表している。(a)(b)は板幅方向の残留応力分布である。(a)のスリット試験片では、板幅中央のスリット部分に高い引張残留が生じていることがわかる。また、(b)の40mm幅試験片では板幅中央にわずかな引張残留応力が板幅中央でみられる。

(c)-(i)は別の試験片で疲労試験片の板厚中央部に存在する残留応力を推定する手順ごと、およびその総合結果である。

(c)のスリット試験片では、溶接止端部に外挿される残留応力が400-500MPa程度に達する。(d)の板幅40mmの試験片では、外挿される残留応力が50-90MPaである。(e)(f)にスリット試験片及び板幅40mmの試験片の板幅中央から切出した板厚10mmの継手での残留応力の板厚方向分布を示す。いずれも、板表面側すなわち溶接止端位置に引張残留応力が、板厚中央に圧縮残留応力が誘起されていることを示している。

(a) distribution along weld line 5mm apart from weld toe on slit welded specimen,

(b) distribution along weld line 5mm apart from weld toe on 40mm width specimen,

(c) distribution toward weld toe on slit welded specimen,

(d) distribution toward weld toe on 40mm width specimen,

(e) distribution along plate thickness on slit welded specimen,

(f) distribution along plate thickness on 40mm width specimen,

(g) distribution along plate thickness on middle width of slit welded specimen.

(h) distribution along plate thickness on middle width of 40mm width specimen,

(i) distribution along plate thickness on middle width of 10mm width specimen.

Fig6 Residual stress distribution.

Fig.7 S-N curves for R=0 tests for non-load-carrying cruciform welded joints.

Fig.8 S-N curves for small specimens of non-load-carrying cruciform welded joints.

(g)(h)(i)を比較すると、3種の試験片で試験片板幅中央の溶接止端位置の板表面の引張残留応力が、スリット溶接試験片、板幅40mmの試験片、板幅10mmの試験片の順に小さくなっていることがわかる。

疲労試験により破断した試験片のき裂発生位置は、小型溶接試験片の場合、ほぼ板幅中央であり、スリット試験片の場合、中央のスリット溶接部であった。

Fig.7および8はS-N線図である。Fig.7はR=0の試験結果で、黒皮母材と板幅250mmのスリット溶接試験片の結果を示している。母材に比べ溶接継手の疲労強度が著しく弱い。溶接継手の結果について、直線回帰式を求め、90%信頼区間を示した。6本の試験片を用いたステヤークス法⁹⁾による疲労限は52MPaであった。これから、疲労限の折曲り回数がおよそ 2×10^7 回である。

Fig.8に、小型試験片の $\sigma_{\max} = \sigma_y$ およびR=0の試験結果を、それぞれ白印および黒印で示す。母材の場合、 $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験結果はR=0の結果に比べ明らかに弱い。この図には、Fig.7で示したスリット溶接試験片の90%信頼区間も合わせて示している。小型溶接継手試験片の結果はほぼこの信頼区間に含まれている。小型溶接継手試験片の $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験による6本の試験片によるステヤークス法で求めた疲労

限は、板幅40mmおよび10mmの両者とも52MPaと、スリット溶接試験片のそれと一致した。従って、小型溶接継手試験片の $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験によるS-N特性は、実構造物と同様な残留応力を含むスリット溶接試験片のR=0試験の結果と一致したことになる。

小型溶接試験片のR=0試験による疲労限は、板幅40mmで55MPa、板幅10mmで65MPaであり、Fig.6 (g) - (i)に示した試験片板幅中央での板厚方向残留応力分布図上の溶接止端での引張残留応力が小さいものほど疲労限が上昇する傾向を示す。すなわち、引張溶接残留応力がかなり高くなる板厚20mmの荷重非伝達十字すみ肉溶接継手でさえ、R=0試験によってS-N特性を求めると、疲労限近傍で非安全側のデータを取得することになってしまうことが分かる。

小型溶接継手試験片のR=0試験による疲労限が、今回の実験では $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験によるそれとあまり違わなかったことは、それほど高くない応力比の試験でも $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験で得た疲労限と同じ値が今回の試験片では得られるであろうことを示唆しているが、残留応力と作用応力の和が降伏強度の2倍程度となる $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験でもシェークダウンの作用で残留応力が降伏強度である実構造物に対応する疲労限が得られた。すなわち、作用応力の最大値が降伏強度である場合は、残留応力と作用応力の和が降伏強度の2倍程度となっても、過度に安全側のデータが得られるわけではなく、残留応力が降伏強度である実構造物と等価な値が得られることになる。なお、Fig.1 (c)の様に板厚より狭い板幅の試験片を用いれば、試験機の荷重容量を大きくしなくても、最大応力を降伏強度とする試験を行うことは容易である。

溶接残留応力が今回の実験ほど大きくならない突合せ溶接継手 (Fig.9)⁵⁾では、板幅中央にスリット溶接部を持ち残留応力が降伏強度規模 (○印)の疲労限 (70MPa)と同一の値が $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験 (□印)によって得られたが、R=0 (△印)では疲労限 (115MPa)はおよそ6割も大きくなった。実溶接構造物に比べ、小型溶接継手試験片では残留応力が小さくなるのが一般的であることから、 $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験の採用が安全側情報を与えるので有用と云える。

残留応力が降伏強度規模である荷重非伝達十字すみ肉溶接継手の疲労限の折曲り回数が 2×10^7 回と高繰返し回数に達したことは、ランダム荷重に対するHaibachが提案した設計S-N線¹⁰⁾について次のような示唆を与えていると云える。すなわち、残留応力が降伏強度規模である溶接継手の応力比依存性を示さなくなる本来のS-N線は単純な2本の折線 (勾配3の傾斜部と水平線)で表されるが、残留応力が小さい小型溶接継手試験片では疲労限が高くなるため折曲り回数が短寿命側に移動してしまう。それに対して、ランダム荷重を加えると疲労限の折曲り回数が高繰返し数である応力比依存性を示さなくなる勾配3の最安全側の線と水平線からなるS-N線に近づく。そこで、ランダム荷重に対する疲労限を下げ、定振幅の疲労限とランダム荷重の疲労限との間の勾配を、3と水平の中間である5にするように設

Fig.9 S-N curves for butt welded joints⁵⁾. Fig.10 Random loading fatigue test results on butt welded joints. Open marks correspond Miner's rule ($n_i = 0$ for $\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_w$). Solidmarks correspond modified Miner's rule ($n_i = n_i$ for all $\Delta\sigma$).

計 S-N 線を定めた¹⁰⁾ 可能性がある。これは、 10^8 回相当の長寿命域のランダム試験結果があまり存在しなかったことと、降伏強度規模の残留応力を含まない小型試験片でのランダム疲労試験結果がもたらした結論であり、実溶接構造物と異なる可能性がある。

ランダム疲労試験を、疲労限以下の応力範囲が大部分を占める長寿命領域 (10^6 - 10^8 回) で実施した横突合せ溶接継手の結果¹¹⁾ では、 $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験法によればマイナー則が成立した (Fig.10)。すなわち、 $\sigma_{\max} = \sigma_y$ の定振幅試験では勾配が 3 で、折曲り点の繰返し数が 2×10^6 回である 2 直線となった。そして、この疲労限以下の応力を無視する形であるマイナー流の評価をしたランダム試験の結果 (○および □印) は、定振幅 (△印) で得られる S-N 線と一致した¹¹⁾。これは、定振幅で得られた S-N 線が、応力比に依存せず最安全側の線となっている場合に起こることであろう。

すなわち、疲労き裂閉口¹²⁾ が介在しない場合に、き裂伝ば特性にマイナー側が適応できる¹³⁾ ことに対応する現象であろう。

一方、 $R=0$ 試験によると定振幅試験結果より短寿命側で破断した¹¹⁾。これは、 $R=0$ の定振幅試験結果は、高応力比試験結果より高い側にある場合に起こることであろう。

以上のランダム荷重試験結果と、今回の実験結果で S-N 線の折曲り回数が 2×10^7 回であったことから、降伏強度規模の引張残留応力が存在する溶接継手のランダム疲労特性は、疲労限以下の繰返しを無視する完全なマイナー則に従うとして良いと云えるかもしれない。

なお、鋼構造協会の疲労設計 S-N 線¹⁴⁾ は、本結果と同じ勾配 3 を採用し、疲労限の折曲りも 4×10^7 回に与えてある。この点は、本論文の結果に近い形となっている。また、この疲労設計 S-N 線では、ランダム荷重についての S-N 線も 2 直線と与えてあり、本論文の結果に近い形となっている。なお、この疲労設計 S-N 線では、継手形式に応じて、低い S-N 線ほど折曲り点の繰返し数を長寿命側に移動させている点でも、上述の記述と一致している。

以上述べたように、 $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験法は最安全側のデータを供給するので、実溶接構造物に存在する残留応力が降伏強度より小さいことが経験的に判明している場合には、このデータに適応させる安全率は 1 よりも小さな値とすることが合理的であろう。

4. 結 言

板厚 20mm の溶接構造用鋼 SM570Q の荷重非伝達十字すみ肉溶接継手の疲労強度を、板幅中央にスリット溶接を行って高い引張残留応力を導入したスリット溶接試験片の応力比 $R=0$ の試験と、小型溶接継手試験片の $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験によって調べた結論を得た。なお、小型溶接継手試験片は、板幅が板厚の 2 倍である 40mm と、板厚の半分である 10mm の 2 種類を用いた。

- 1) 板幅中央の溶接止端部位置での引張残留応力は、スリット溶接試験片で降伏強度程度であり、次いで、板幅 40mm の試験片、板幅 10mm の試験片の順に値が小さくなった。
- 2) スリット溶接試験片を $R=0$ で試験した結果と、板幅 40mm および 10mm の試験片を $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験した結果は一致し、 $\sigma_{\max} = \sigma_y$ 試験によれば小型試験片によって、残留応力が降伏強度である実溶接構造物に相当する疲労特性を容易に得られることが確認された。
- 3) 板幅 40mm の試験片および板幅 10mm の試験片を $R=0$ で試験した結果は、残留応力が降伏強度である実溶接構造物に相当する疲労限より高強度となり、危険側データを与えることとなった。
- 4) 日本鋼構造協会の設計指針と本論文の記述は一致している。すなわち、低い S-N 線ほど折曲り点が長寿命側に移動する点と、ランダム荷重に対しても設計 S-N 線が与

えられており, ランダム荷重に対する応力範囲の打切限界がマイナー流に与えられている点は, 本論文の主旨と整合性がある.

謝 辞

本研究は, 物質・材料研究機構の構造材料データシート・溶接継手の疲労データシート計画として実施された. 計画の立案, 結果の検討は溶接継手疲労特性検討会において行われ, 疲労強度データシート No.90 として数値データが出版されている. 本論文はこれらのデータと検討結果を踏まえて取りまとめたものである. 著者等は, ここに同検討会委員の方々の貴重な御支援と御検討に対して深く感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) J.W.Fisher, Fatigue Strength of Welded A514 Steel Beams, Proc. Conf. Fatigue of Welded Structures 1, The Welding Institute (1971) 135-148.
- 2) T.R.Gurney, Fatigue Design Rules for Welded Steel Joints, Welding Institute Res. Bul. 17 (1976) 115-124.
- 3) W.W.Sanders, A.T.Derecho and W.H.Munse, Effect of External Geometry on Fatigue Behavior of Welded Joints, Welding Journal (1965) 49s-55s.
- 4) A.Ohta, Y.Maeda, T.Mawari, S.Nishijima and H.Nakamura, Fatigue Strength Evaluation of Welded Joints Considering High Tensile Residual Stresses, Int.J.Fatigue 8 (1986) 147-150.
- 5) H.Nakamura, S.Nishijima, A.Ohta, Y.Maeda, K.Uchino, T.Kohno, K.Toyomasu and I.Soya, A Method for Obtaining Conservative S-N Data for Welded Structures, J.Testing Evaluation 16 (1988) 280-285.
- 6) H.P.Lieurade, Fatigue Testing of Welded Components, ISO Standard Proposal, IIR-XIII-1516-93 (1993) 1-38.
- 7) NIMS Fatigue Data Sheet No.90, Data Sheet on Fatigue Properties of Non-Load-Carrying Cruciform Welded Joints of SM570Q Rolled Steel for Welded Structure -Effect of Residual Stress-, Nat. Inst. Mater. Sci., Tokyo (2002) 1-10.
- 8) Y.Kawada, S.Taira and Y.Tada 応力測定マニュアル, Ohm (1972) 363-372.
- 9) 日本機械学会基準 JSME S 002, 統計的疲労試験法, Japan Society of Mechanical Engineers (1981).
- 10) E.Haibach, The Allowable Stresses under Variable Amplitude Loading of welded Joints, Proc. Conf. Fatigue Welded Structures 2, The Welding Institute (1971) 328-339.
- 11) A.Ohta, Y.Maeda and N.Suzuki, Fatigue Strength of Transverse Butt Welded Joints under Random Loading -Application of Miner's Rule on $\sigma_{\max} = \sigma_y$ Test Results-, Quar.J.JWS 15 (1997) 122-128. (in Japanese)
- 12) W.Elber, The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486 (1971) 230-242.
- 13) A.Ohta, N.Suzuki and Y.Maeda, Unique Fatigue Threshold and Growth Properties of Welded Joints in a Tensile Residual Stress Field, Int. J. Fatigue 19 (1998) s303-s310.
- 14) 日本鋼構造協会編, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂 (1993) 1-18.