繰返し荷重下におけるステンレス鋼ならびにその 溶接部の応力腐食割れに関する研究 (第3報)*

—— 正弦波部分片振り引張荷重下における割れ特性 ——

渡辺 正紀** 向井 喜彦**
黒岩 敏明*** 下田 広一郎***

Study on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel and Its Welded Joint under Pulsating Load (Report 3)*

—Cracking properties under pulsating sine wave load—

by Masaki Watanabe**, Yoshihiko Mukai**, Toshiaki Kuroiwa***
and Kohichiro Shimoda***

Abstract

In this report we studied the effect of stress pulsation on resistance to stress corrosion cracking of AISI304 stainless steel in the boiling solution of 42 % MgCl_2 under partial pulsating sine wave load.

The experimental time to failure of stress corrosion cracking test was compared with the estimated time to failure calculated according to the static linear damage law, in which the time to failure was given as the accumulation of only static damage.

The influence of the variation of stress amplitude on the life is larger for the case in which the mean stress is low than for the case of the mean stress being high.

Moreover, when the stress amplitude is comparatively small (within about 4 kg/mm²), the estimated time to failure t_{eq} calculated according to the static linear damage law almost coincides with the experimental value and so the static linear damage law is applicable.

When the minimum stress σ_{min} in the sine wave load is larger than the threshold stress of static stress corrosion cracking, the time to failure can be estimated by the time to failure of the static stress corrosion cracking test at the stress σ_{min} and the stress variation ratio.

The threshold stress of stress corrosion cracking which is important from the viewpoint of design is also varied by the change of stress amplitude. When the threshold stress under the pulsating stress is expressed by the equivalent static stress, it almost coincides with the threshold stress under static stress.

1. 緒 言

前報¹⁾²⁾までの研究においては実装置における start と stop の繰返しを想定して片振り引張荷重下での応力腐食割れ現象について報告した。しかし多くの場合に見られる応力状態としては溶接残留応力に変動使用応力が重畳し、また応力腐食割れの発生部位に関しては応力の集中し易い構造部分に腐食割れが発生しやすい。

本報ではこのような場合を想定し、これを再現する試験として部分片振り引張荷重下における AISI 304 ステ

ンレス鋼の 42% MgCl_2 沸騰水溶液中での応力腐食割れ特性を検討した。

2. 実験方法

2-1 供試材料および試験片

供試材料は AISI 304 ステンレス鋼でその化学組成ならびに機械的性質を Table 1 に示す。

この板の圧延方向から Fig. 1 に示す寸法の試験片を

Fig. 1 Dimensions of test piece (mm)

* 原稿受付 昭和47年6月8日(46年度秋季全国大会に発表)

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering of Osaka Univ.

*** 学生員 大阪大学工学部 Student Member, Faculty of Engineering of Osaka Univ.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested material

Chemical composition							Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	0.2% P. S. (kg/mm ²)	U. T. S. (kg/mm ²)	El (%) (G. L. = 20 mm)	R. A. (%)
0.07	0.72	1.70	0.028	0.008	8.88	18.40	24.0	65.5	77.0	53.8

機械切削で採取し、次の処理を経て応力腐食割れ試験に供した。

機械切削→固溶化熱処理 (1050°C, 30分, 水冷)
→酸洗い (15% HNO₃ + 2% HF 水溶液, 65°C, 5分)
→研磨 (平行部片面バフ仕上げ) →シリコンゴム塗装 (Fig. 1 のハッチング部両面)

試験片の平行部中央に 0.5 mmφ の円孔をあけたのは、これによって応力集中を起こさせ、割れが必ずここから発生するようにしたものである。このような方法で割れの発生および伝播の状況を追跡することができる。なお以下で表示する応力値はすべて便宜的に称呼応力によることとし、円孔による集中応力値では表示していない。

また、試験片の腐食液にさらされる表面積が破断時間に影響のあることが実証されているので²⁾ この影響を一定にするために Fig. 1 に示すようにハッチング部を塗装して試験片の腐食後にさらされる面積を一定にした。

2-2 試験方法

応力腐食割れ試験は 42% MgCl₂ 沸騰水溶液中で行なった。付加荷重の波形は、正弦波引張部分片振り荷重とし、その平均応力と応力振幅とを変化させて破断時間および限界応力値におよぼす影響を検討した。荷重繰返し速度は第2報²⁾ で得られた結果より荷重の繰返しによる動的損傷をほとんど無視できると考えられる 0.03 c.p.m. を選んだ。

3. 実験結果

繰返し荷重の平均応力と破断時間の関係および静応力腐食割れ試験 (応力振幅 = 0 の場合に相当) における応力と破断時間の関係をあわせて Fig. 2 に示す。この図で明らかなように、応力振幅が 1 kg/mm² ときわめて小さい場合は静応力腐食割れ試験結果とほとんど変わりはない。しかし、応力振幅が 5, 7, 8.5 kg/mm² と大きくなっていくと破断時間はしだいに短時間側に移行していく傾向にあり、その程度は平均応力値の小さい場合ほど大きくなっている。換言すれば、平均応力値の高い場合には応力振幅の変化が寿命に与える影響は小さくなっている。この傾向を更に明瞭に示すために、平均応力が 18, 14 および 10 kg/mm² の場合について応力振幅と破断時間の関係に書き改め、さらに若干の実験点を追加したのが Fig. 3 である。また Fig. 2 の二重丸およびこ

Fig. 2 Relation between mean stress and time to failure for each stress amplitude

Fig. 3 Relation between time to failure and stress amplitude for each mean stress 18, 14, 10 (kg/mm²)

れを結んだ破線は片振り (平均応力と応力振幅が等しい場合に相当) 荷重試験における平均応力と破断時間の関係を示す。ところで本研究で用いた試験装置は引張片振り方式であるので各応力振幅の場合の平均応力と破断時間の関係を示す直線はこの片振り荷重試験の場合の破線より下に出ることはない。

4. 考察

4-1 部分片振り荷重下における破断時間の静的被害則的検討

正弦波荷重繰返し付加中, 静応力腐食割れ試験の場合と同じ損傷のみが起り, 荷重繰返しに伴う損傷は起こらないものと仮定すると, その場合の破断時間は次のような仮定に立て算定することができる (この破断時間を与える損傷を静的損傷とよぶ)。

仮定 1. 試験中のどの時間帯においても, 単位時間を受ける損傷量は同じ応力値に対しては常に一定である (直線被害則)。

仮定 2. 応力 σ_i で静応力腐食割れ試験した場合の破断時間を t_i とすると, 繰返し荷重中の任意の瞬時応力 σ_i が Δt 時間付加された場合に受ける損傷量は $\Delta t/t_i$ であるとし, 損傷量が 1 になった時に破断するものとする。

今, Fig. 4(a) のような応力波形の時, 破断時間を t , 応力波形の周期を T とすると, 破断までの応力繰返し回数は $N=t/T$ であるから, 一周期中に任意の瞬時応力 σ_i が $(\Delta t)_i$ 時間保たれたとすると, 破断に到るまでに材料が σ_i の応力を受けている全時間は

Fig. 4 Schematic explanation for introducing static stress corrosion cracking result (b) into phenomenon under pulsating sine wave load (a)

$$\sum_i (\Delta t)_i = (\Delta t)_i \times N = \frac{t(\Delta t)_i}{T}$$

瞬時応力 σ_i と等しい一定応力 σ_i で静応力腐食割れ試験した時の破断時間を t_i とすると, 繰返し荷重を受ける材料が破断に到るまでに瞬時応力 σ_i により受ける静的損傷量は上述の仮定 2 により

$$D_i = \frac{\sum (\Delta t)_i}{t_i} = \frac{t(\Delta t)_i}{T t_i}$$

となる。一周期中の各瞬時応力 $\sigma_i (i=1, 2, 3, \dots)$ によって受ける損傷量の和が 1 になった時に破断が起こる。この時の破断時間を t_{eq} とおくと,

$$\sum_i D_i = 1 = \frac{t_{eq} \sum (\Delta t)_i}{T t_i} \quad \therefore t_{eq} = T / \sum \frac{(\Delta t)_i}{t_i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで Fig. 2 でみられるように, 静応力腐食割れ試験の付加応力 (σ_i) と破断時間 (t_i) との間には両対数

表示で直線関係があるから次のように示すことができる。

$$\left. \begin{aligned} t_i &= a \sigma_i^{-\alpha} \quad (a, \alpha \text{ は定数}) \\ \text{但し, } \sigma_i &> \sigma_c \text{ (限界応力)*} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式を(1)式に代入すると

$$\begin{aligned} t_{eq} &= aT / \sum \frac{(\Delta t)_i}{\sigma_i^{-\alpha}} \\ &= aT / \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \sigma_i^{-\alpha} dt \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

となる。なお(3)式で積分区間を t_1 から t_2 までとしたのは, Fig. 4(a) で見られるように正弦波応力が静応力腐食割れの限界応力 (σ_c) 以下にある時には, 仮定 2 により損傷を受けないことになるので, この領域を積分区間からはずしたためである。したがって(3)式の t_{eq} が繰返し荷重下での破断が静的損傷のみによって与えられるとした場合の破断すべき時間を示しているわけである。

ところで, 本研究における応力波形は, 正弦波部分片振り波形であるので,

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t \\ &= \sigma_m (1 + A \sin \omega t) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

但し, σ_m : 平均応力
 σ_a : 応力振幅
 ω : 角速度
 A : σ_a/σ_m (応力変動率)

(4)式を(3)式に代入すると,

$$\begin{aligned} t_{eq} &= aT / \int_{t_1}^{t_2} \{ \sigma_m (1 + A \sin \omega t) \}^{-\alpha} dt \\ &= a \sigma_m^{-\alpha} / \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} (1 + A \sin \omega t)^{-\alpha} d(\omega t) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

となり, $a, \alpha, \sigma_m, \sigma_a$, および限界応力値に関する角度 $\omega t_1, \omega t_2$ 等が定まれば t_{eq} を(5)式より計算で求めることができる。

ところで(5)式の分子は, 応力 σ_m (但し, $\sigma_m > \sigma_c$) の場合の静応力腐食割れ試験における破断時間を示し, 一方, 分母は応力を変動させたことによる破断時間の補正項の役目をしていることが(5)式から理解できる。

以上の考え方で計算される t_{eq} を Fig. 3 の実験結果にあわせて記入すると Fig. 5 の一点鎖線のようになる。各平均応力の場合について t_{eq} 値と実験結果とを比較してみると, おおまかにいえば比較的良好にその特性を現わしているといえよう。しかし仔細にみるといずれの平均応力値の場合にも応力振幅が比較的小さい範囲では応力振幅が 3 kg/mm^2 における実験結果を除いて実験結果と t_{eq} 値とがほぼ一致する。応力振幅が 3 kg/mm^2 の場合は実験による破断時間が t_{eq} 値よりもやや長くな

*) 限界応力—静応力腐食割れ試験 (応力振幅 = 0 の場合に当る) での threshold stress でここでは Fig. 2 より $\sigma_c = 7.8 \text{ kg/mm}^2$ である。

Fig. 5 Relation between t_{eq} calculated from the test results under static stress and the experimental results under pulsating stress

Fig. 6 Relation between stress amplitude and mean stress for each time to failure
[AB: the line on which the minimum stress of sine wave load equals to threshold stress 7.8 kg/mm²]

っている。一方、応力振幅が比較的大きい場合には、実験による破断時間は t_{eq} 値よりも次第に短くなっていく。これは本研究における荷重繰返し速度が 0.03c.p.m. ときわめて低速であるにもかかわらず応力振幅が大きくなってくると、この応力変動のために第 2 報で推論したような動的損傷が現われて来たためと考えられる。

次に、Fig. 6 に等破断時間線図を示す。これは等しい破断時間を与える平均応力と応力振幅の関係を示したもので Fig. 2 で求めた実験点を結ぶ各直線上から等破断時間を与えるデータを拾い出し、平均応力と応力振幅との関係を求めたものである。なお(5)式で t_{eq} に一定値を与えれば平均応力と応力振幅の関係式が得られるのでこれを利用して計算したものを Fig. 6 に理論値として破線で示した。また限界応力の変化をもあわせて示し

た。ところで、Fig. 2 で示したように平均応力 7.8 kg/mm²、応力振幅 0 kg/mm² すなわち静応力腐食割れ試験における限界応力を与える点を通して片振りの直線に平行線 AB を引くと、この直線上は正弦波応力波形の最小応力 σ_{min} が常に静応力腐食割れ試験における限界応力値 7.8 kg/mm² になっており、この直線 AB より右側の範囲の平均応力と応力振幅の組み合わせではその応力波形の最小応力 σ_{min} が常に限界応力値より高くなっている。そしてこのような範囲では比較的理論値と実験値とが一致していることがわかる。したがって比較的大きな平均応力と比較的小さい応力振幅の場合は、以上述べたような計算によって応力腐食割れ寿命を推定することが可能となる。このような比較的大きな平均応力と比較的小さい応力振幅という応力条件は、実装置の運転中の状況の多くがこの状態にあると見られる引張溶接残留応力を考えるとなおさらである。

4-2 応力変動率による寿命の減少率特性

Fig. 5 で応力振幅 σ_a を増大させていくと実験による破断時間および t_{eq} が次第に減少していく傾向にあることは既に述べたが平均応力 σ_m および応力振幅 σ_a の値によって破断時間が静応力腐食割れの場合の破断時間からどれだけ減少するかを式で示すことができれば設計の立場からはきわめて有効であると考えられる。

今、ある応力での静応力腐食割れ破断時間 (t_f^0) とこの応力を最小応力 σ_{min} とし任意の振幅をもつ正弦波応力下での破断時間 (t_f) とを比較してその差 ($t_f^0 - t_f$) と t_f^0 との比を寿命減少率 R と定義する。そしてこの任意の応力振幅の場合の破断時間に対して前述の計算による推定破断時間 t_{eq} を利用すると寿命減少率は理論的には次のように与えることができる。すなわち

$$R = \frac{t_f^0 - t_f}{t_f^0} = \frac{t_f^0 - t_{eq}}{t_f^0} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(2)式および(5)式より

$$\left. \begin{aligned} t_f^0 &= a \sigma_{min}^\alpha \\ t_{eq} &= a \sigma_m^\alpha / \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (1 + A \sin \omega t)^\alpha d(\omega t) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(7)式を(6)式に代入すると

$$\begin{aligned} R &= \left\{ a \sigma_{min}^\alpha - a \sigma_m^\alpha / \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (1 + A \sin \omega t)^\alpha d(\omega t) \right\} \right\} \\ &\quad / a \sigma_{min}^\alpha \\ &= 1 - (1 - A)^{-\alpha} / \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (1 + A \sin \omega t)^\alpha d(\omega t) \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、寿命減少率 R は応力変動率 A の関数となる。

また、(8)式は次のように考えても求めることができる。すなわち、Fig. 7 のように応力波形を σ_{min} で分離して考え、 σ_{min} 以下の応力によって受ける損傷を

Fig. 7 Diagram for the explanation of stress variation ratio S

D_1 , $\sigma_{\min}$ 以上の応力変動分によって受ける損傷を D_2 とし, この波形の繰返し応力下での破断時間を t_f , $\sigma_{\min}$ の静応力下での破断時間を t_f^0 とすると,

$$D_1 = t_f / t_f^0$$

また, 仮定 2 より

$$D_1 + D_2 = 1$$

が成立する.

ゆえに,

$$D_2 = 1 - D_1 = 1 - t_f / t_f^0$$

$$= 1 - (1 - A)^{-\alpha} / \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} (1 + A \sin \omega t)^{-\alpha} d(\omega t)$$

となり, (8) 式の右辺と一致する.

したがって, この寿命減少率 R は応力波形の変動分による被害量 D_2 を意味していることがわかる. この寿命減少率 R と応力変動率 A の関係を示すと Fig. 8 の曲線ようになる. Fig. 8 には Fig. 2 および Fig. 3 の実験値のうち繰返し応力の最小応力 $\sigma_{\min}$ が静応力腐食割れの限界応力値 ($\sigma_c = 7.8 \text{ kg/mm}^2$) 以下にならない応力条件で実験したものだけ^{*}を取り上げて, (6) 式の定義で寿命減少率を求めた実験値もあわせて記入した. Fig. 8 で明らかなように, 計算曲線と実験点とが比較的良好に一致しておりいかなる基準応力 $\sigma_{\min}$ をとっても応力変動率が一定ならば寿命減少率もほぼ同じ値を示す

Fig. 8 Relation between reduction ratio of time to failure and stress variation ratio A

^{*} ここで波形の最小応力が限界応力値以下になる場合を除いたのは(8)式において $t_f^0 = \infty$ となり, R を求めることができないためである.

ことがわかる. したがって, いかなる形の正弦波応力であってもその最小応力 $\sigma_{\min}$ が静応力腐食割れの限界応力値より大きい場合には, $\sigma_{\min}$ と同じ応力下の静応力腐食割れ破断時間さえわかればこの寿命減少率曲線により寿命をある程度推定することが可能である.

4-3 繰返し荷重下における限界応力の代表応力

応力腐食割れの限界応力値は疲労における耐久限と同様な意味で設計上きわめて重要である. Fig. 2 でもみられるように, 繰返し荷重下での限界応力値は応力振幅の変化によって変化する. Fig. 2 は繰返し応力の表示を平均応力によって示したものであるが, この表示による限界応力値は応力振幅の変化に対して Fig. 9(b) のように変化する. また, これをそれぞれの繰返し応力の最大値で表示すると Fig. 9(a) のようになり, どちらの表示法をとっても任意の応力振幅における限界応力値を静応力腐食割れの限界応力値から簡単に推定しうような関係導き出すことは容易でない.

ところで, 繰返し応力の表示法としてこの他に変動応力下のクリープ試験⁴⁾などでよく用いられる等価静応力がある.

等価静応力は, 次のようにして導びかれる.

前節と同じ仮定のもとに(5)式で

$$I = 1 / \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} (1 + A \sin \omega t)^{-\alpha} d(\omega t)$$

とおけば, (5)式は

$$t_{eq} = a \sigma_m^\alpha I \quad \dots\dots\dots(9)$$

で表わされる. この I は静応力腐食割れの応力-破断時間線図のかたむき α がわかれば各応力変動率 A に対して求まる定数であるから

$$\sigma_m I^{1/\alpha} = \sigma_{eq}$$

とおき, (9)式をこの σ_{eq} で表わすと

$$t_{eq} = a \sigma_{eq}^\alpha \quad \dots\dots\dots(10)$$

となり, (2) 式の静応力腐食割れ破断の式と同形となる. σ_{eq} は繰返し応力の平均応力 σ_m に応力変動率 A によって定まる定数 $I^{1/\alpha}$ を乗じたものであるから, 繰返し応力下の破断時間と等しくなることを示している. すなわち σ_{eq} は繰返し荷重下の応力腐食割れ破断の静応力腐食割れ破断に対する等価静応力である.

この等価静応力によって前述の Fig. 2 の各応力振幅の場合の限界応力値を図示すると Fig. 9(c) のようになり, 他の (a) (b) 図と比べて応力振幅の変化に対して等価静応力で表示した限界応力値は最も変化が少なく, 応力振幅が 5 kg/mm^2 の場合をとってみても静応力腐食割れの限界応力値からただか 0.7 kg/mm^2 の低下を示すのみであり, これは, 限界応力値の 10% 程度である.

Fig. 9 Threshold stress expressed by each stress versus stress amplitude

すなわち、応力振幅が 5 kg/mm^2 程度までの場合には静応力腐食割れ応力値を基準にして等価静応力を求めることにより、各応力振幅の場合の限界応力値の低下度を10%程度以内の誤差で推定することができる。

5. 結 言

AISI 304 ステンレス鋼に 42% MgCl_2 沸騰水溶液中で、0.03 c.p.m. の正弦波の引張部分片振り荷重をかけて応力腐食割れ試験を行ない、次の各項が明らかになった。

(1) 応力振幅の変化が寿命に与える影響は、平均応力値の高い場合より平均応力値の低い場合の方が大きい。

(2) 応力振幅が比較的小さい範囲(約 4 kg/mm^2 以内)においては、静的損傷の累積のみによって破断するとして計算される推定寿命 t_{eq} と実験による破断時間とはほぼ一致しているとみることができ、静的損傷の累積被害則の適用が可能である。

(3) 繰返し応力の最小応力 σ_{min} が静応力腐食割れの

限界応力値より大きい場合は、その σ_{min} での静応力腐食割れ破断時間および応力変動率により寿命を推定することが可能である。

(4) 繰返し応力下での試験の限界応力値は応力振幅の変化により変化するが、等価静応力で整理すると静応力腐食割れの限界応力値と10%程度の誤差の範囲内で一致し、ほぼ一定とみなすことができる。

文 献

- 1) 渡辺, 向井, 四十万, 川方: "繰返し荷重下におけるステンレス鋼ならびにその溶接部の応力腐食割れに関する研究(第1報)", 溶接学会誌, Vol. 39 (1970), No. 6, 556-564
- 2) 渡辺, 向井, 四十万, 朽木: "繰返し荷重下におけるステンレス鋼ならびにその溶接部の応力腐食割れに関する研究(第2報)", 溶接学会誌, Vol. 39 (1970), No. 11, 1197-1208
- 3) R.B. Mears, R.H. Broun and E.H. Dix, Jr.: "A Generalized Theory of Stress Corrosion Cracking of Metals, A.S.T.M.E., A.I.M.E. (1944) 335
- 4) 渡辺, 小川: "Pulsating stress creep 特性に関する研究(第2報)", 溶接学会誌, Vol. 33 (1964), No. 10, 908-917