変動荷重を受ける HT80 鋼溶接 継手の疲労き裂伝ば挙動の評価*

橘 内 良 雄^{*1}, 吉 久 悦 二^{*1}

Estimation of Fatigue Crack Growth Behavior of HT80 Steel Weldments under Variable-Amplitude Loading

Yoshio KITSUNAI and Etsuji YOSHIHISA

The influence of residual stress on the fatigue crack growth behavior of HT 80 steel weldments under two-step block loadings was evaluated by utilizing linear elastic fracture mechanics. The crack growth rates of the welds were dominated by residual stress rather than the block size or the load sequence. The crack opening stress intensity factor, K_{op} , in the welds subjected to two-step loading was found to be almost the same in each block and was governed by the maximum stress intensity factor in the block. The crack growth rates of the welds with residual stress under two-step block loading were correlated with the effective stress intensity factor range, ΔK_{rem} , estimated based on linear accumulation of the stress intensity factor range which is defined as $K_{irmax} - K_{op}$, where K_{irmax} is the maximum stress intensity factor which takes into account the residual stress at each step in a block.

Key Words: Fatigue, Crack Growth, Two-Step Load, Weldment, Crack Closure, Residual stress, Superposition

1. 緒 言

近年、機械や構造物に対して損傷許容設計の思想が取り入れられるようになり、疲労き裂の発生寿命と同時に伝ば寿命が重視されている。これらの機械や構造物は一定振幅荷重よりも、むしろ何らかの変動荷重を受けている場合が多い。したがって、実動荷重下での疲労き裂伝ば寿命を高精度で予測する手法を確立することが重要となっている。

機械や構造物には溶接が施されることが少なくないが、このような溶接部の疲労き裂伝ば寿命は残留応力に強く支配されることが知られている。このため、残留応力場における疲労き裂伝ば挙動の評価法について、多くの検討がなされている^{(1)~(13)}。このうち残留応力の定量的評価法としては、残留応力によって誘起される応力拡大係数 K と外荷重によるそれを加算して全体の K を算出し、残留応力の効果を応力比の変化として扱うことにより疲労き裂伝ば速度 da/dN の評価が行われている^{(1)~(12)}。しかし、これらの研究の多くは一定振幅荷重を対象としたもので、実用上重要な変

動荷重下での残留応力場のき裂を対象にした研究⁽⁹⁾は少ない。

本研究では、変動荷重を受ける溶接継手の疲労き裂伝ば寿命を予測する手法を確立するために、手始めとして HT 80 鋼突合せ溶接板とその母材から作製した 3 種のタイプの試験片を用いて、一定振幅荷重ならびに 1 ブロックが 2 段からなる変動荷重を負荷して疲労き裂伝ば試験を行い、変動荷重下での疲労き裂伝ば挙動に及ぼす残留応力の影響について検討した。さらに、残留応力を考慮した有効応力拡大係数範囲に線形加算則を適用して、変動荷重下での溶接継手の疲労き裂伝ば速度の評価を試みた。

2. 試験片および実験方法

供試材は長さが 3 000 mm、幅が 1 800 mm、厚さが 16 mm の HT 80 鋼であって、その化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。供試材を圧延方向と直角に 10 等分に溶断後、表 3 に示す条件で突合せ溶接を実施した。溶接後、溶接金属中をき裂が伝ばするように切欠を付けた CCT 試験片〔図 1(a)〕、CT 試験片〔図 1(b)〕、および SEC 試験片〔図 1(c)〕を溶接板から切り出して疲労試験に供した。母材試験片は溶接線から十分離れた位置から採取し、寸法は CT 試験片と同

* 平成元年 11 月 9 日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年 5 月 26 日。

^{*1} 正員、労働省産業安全研究所清瀬実験場(〒204 清瀬市梅園 1-4-6)。

一になるように加工した。

疲労き裂伝ば試験は電気油圧式疲労試験機を用いて、一定振幅荷重および2段変動荷重を負荷して行った。応力比 R はいずれも 0.05, 繰返し速度は 0.1~10

表 1 供試材の化学成分(wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Cr
0.13	0.25	0.88	0.016	0.005	0.17	0.40	0.79

表 2 供試材の機械的性質

Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
760	817	26.0

表 3 溶接条件

Parameter	Value
Groove	Double V
Position	Flate
Electrode	JIS D8016
Electrode dia	4 and 8 mm
Current	180 - 220 amps.
Arc voltage	35 volt
Welding speed	180 - 220 mm/min.
Heat input	17.2 - 25.7 kJ/cm
Number of runs	6

図 1 試験片の形状と寸法

Hz である。二段変動荷重の多くは、第2段(第2ステップ)の振幅荷重が第1ステップのその 1/2 で、1ブロックの繰返し数が 100~1010 とした。疲労き裂伝ば速度 da/dN は、一定振幅荷重では Secant 法⁽¹⁴⁾により求めた。一方、変動振幅荷重による da/dN は、実測したき裂長さ繰返し数に最小二乗法を適用して多項式近似を行った後、この式を用いて1ブロック当たりのき裂伝ば量 Δa を算出し、 Δa を1ブロックの総繰返し数 ΔN で除すことにより求めた。き裂開口荷重の測定は、除荷弾性コンプライアンス法により行った。なお、これらの結果の多くはデータレコーダに連続して記録した。残留応力の計測は前報⁽⁸⁾と同様、切欠を有しない試験片の表裏の同一箇所に長さが 1 mm の 3 軸ひずみゲージをはり付けた後、ゲージの周囲を切断して解放されたひずみから弾性計算により求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 母材の疲労き裂伝ば挙動 母材について、一定振幅荷重における da/dN は ΔK を、2段変動荷重におけるそれは ΔK の m 乗重み平均 ΔK_m を用いて評価した。ここで、 ΔK_m は以下のように表される。すなわち、一定振幅荷重における da/dN は c , m を定数として式(1)で表されることが知られている。したがって、2段変動荷重下のステップ i でのき裂伝ば速度 $(da/dN)_i$ が式(1)に従うならば、 $(da/dN)_i$ はステップ i での応力拡大係数範囲 ΔK_i を用いて式(2)のように記述できる。

$$da/dN = c(\Delta K)^m \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(da/dN)_i = c(\Delta K_i)^m \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)より1ブロック当たりの平均的なき裂伝ば速度 $(da/dN)_B$ は、線形加算則により以下のように記述される。

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dN}\right)_B &= \sum_{i=1}^2 \left(\frac{da}{dN}\right)_i \frac{N_i}{\sum N_i} \\ &= c \sum_{i=1}^2 (\Delta K_i)^m \frac{N_i}{\sum N_i} = c \Delta K_m^m \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N_i はステップ i での繰返し数、 $\sum N_i$ は1ブロック内の総繰返し数、 ΔK_m は ΔK_i の m 乗重み平均であり、次式で表される。

$$\Delta K_m = \left(\sum_{i=1}^2 \Delta K_i^m \frac{N_i}{\sum N_i} \right)^{1/m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

変動荷重における da/dN の評価にしばしば用いられる ΔK_{rms} は、式(4)において $m=2$ の場合を表している。

一定振幅荷重の da/dN を ΔK に対して、また変動

振幅荷重のそれを ΔK_m に対してプロットした結果を図2に示す。なお、 ΔK_m の算出に際して式(4)の m の値は、一定振幅荷重試験の結果から $m=2.73$ を用いた。図2において、変動荷重下の da/dN はこれまでの多くの報告と同様、一定振幅荷重のそれよりも遅延する傾向が認められる。また、変動荷重下では ΔK_m の増加に伴い da/dN が若干低下する場合が認められるが、これは最小二乗近似によって定めた $a-N$ 関係を用いて da/dN を算出しているためと推察される。なお、斜線を付けたデータは1ブロック中の最大応力拡大係数 K_{Hmax} が、ASTM から提案されているCT試験片の平面寸法に関する基準⁽¹⁴⁾、式(5)を満足しないデータである。

$$w-a > (4/\pi) (K_{Hmax}/\sigma_y)^2 \quad (5)$$

ここで、 w は試験片の幅、 a はき裂長さ、 σ_y は材料の降伏応力である。

変動荷重下における da/dN の遅延は、き裂開口レベルの変化に起因することが知られている。そこで、除荷弾性コンプライアンス法により変動荷重下のき裂開口荷重 P_{op} を計測した。その結果、菊川ら⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾や城野ら⁽⁹⁾の報告と同様、 P_{op} は1ブロックを通してほぼ一定であって、1ブロック中の最大荷重(第1ステップの荷重)に強く支配されていた。ここで、第1ステップのき裂開口比 U_H に着目すると同時に、 K_{Hmax} と一定振幅荷重試験における ΔK が等しいときには両者の P_{op} が一致する⁽⁹⁾と仮定すると、 U_H は式(6)のように表される。

$$U_H = (K_{Hmax} - K_{op}) / (K_{Hmax} - K_{Hmin})$$

$$= \gamma + \delta R \quad (0 \leq R \leq 0.6) \quad (6)$$

ここで、 K_{Hmin} は第1ステップの最小応力拡大係数、 R は応力比、 γ と δ は定数であって、一定振幅荷重試験の結果⁽⁸⁾から、 $\gamma=0.85$ 、 $\delta=0.25$ である。

式(6)を用いて2段変動荷重下の U_H を推定した結果、 $U_H=0.863$ が得られた。一方、小規模降伏状態にある $15 < \Delta K_m < 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の範囲について実測した U_H の平均値は0.855であって、両者はほぼ良く一致しており、したがって一定振幅荷重の $U-R$ (U はき裂開口比) 関係を用いて変動荷重下のき裂開口レベルを推定することができる。また、前記したように、 K_{op} は1ブロックを通してほぼ一定であるので式(6)を用いて K_{op} を算出し、これを各ステップの最大応力拡大係数 K_{imax} から減じれば、各ステップの有効応力拡大係数範囲 ΔK_{ieff} が定められる。

$$\Delta K_{ieff} = K_{imax} - K_{op} \quad (7)$$

この ΔK_{ieff} を式(4)の ΔK_i に代入すれば、有効応力拡大係数の m 乗重み平均 ΔK_{effm} が算出できる。

$$\Delta K_{effm} = \left(\sum_{i=1}^2 \Delta K_{ieff}^m \frac{N_i}{\sum N_i} \right)^{1/m} \quad (8)$$

図3は図2に示した da/dN のうち、一定振幅荷重下の da/dN を $\Delta K_{eff} (= U \Delta K)$ で、変動荷重下のそれを ΔK_{effm} で整理したもので、 ΔK_{effm} が $10 \sim 35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の範囲では変動荷重による遅延の効果が取り除かれ、 da/dN は一定振幅荷重の結果とほぼ一致している。

3・2 溶接継手の疲労き裂伝ば挙動 図4は溶接継手の da/dN を ΔK_m に対してプロットしたもので、

図2 母材の da/dN と ΔK , ΔK_m の関係

図3 母材の da/dN と ΔK_{eff} , ΔK_{effm} の関係

図4中には比較のために $da/dN > 2 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$ の母材のデータを点線で示した。また、図4中の斜線を付けたデータは小規模降伏状態から逸脱したデータであって CT 試験片では式(5)⁽¹⁴⁾の、CCT 試験片では式(9)⁽¹⁴⁾の条件を満足しないデータである。

$$\sigma_y > \sigma_n = \frac{P_{H\max}}{BW(1-2a/W)} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 σ_n は公称応力、 $P_{H\max}$ は1ブロック中の最大荷重、 B は試験片の厚さ、 W は試験片の幅である。

図4において、溶接継手の da/dN は以前に報告⁽⁸⁾した一定振幅荷重の場合と同様、試験片のタイプに強く依存していた。すなわち、試験片の板幅の端から中心に向かって溶接線中をき裂が伝ばする CT や SEC 試験片では、 da/dN が母材よりも著しく遅延するのに対して、板幅の中央から端に向かってき裂が伝ばする CCT 試験片の da/dN は、母材のそれとほぼ等しい。このような da/dN の差異は、残留応力によってき裂先端に誘起される応力拡大係数が試験片のタイプに依存して異なるためである。

第1ステップの繰返し数を N_H 、第2のステップのそれを N_L として溶接継手の da/dN と繰返し数比 N_H/N_L の関係について検討した結果、 N_H/N_L が同じであっても記号▽のデータは溶接 CCT 試験片の da/dN の上限となっているのに対して、記号▷のデータは下限近傍となっており、 da/dN と N_H/N_L との間に系統的な関係は認められない。これは N_H/N_L が 1/

99~1/1010 であって N_H/N_L の変動幅が小さいこと、ならびに同一のタイプの試験片でも残留応力分布が試験片ごとに若干異なっているためと推察される。

溶接試験片の変動荷重下におけるき裂開閉口挙動について検討した結果、CCT 試験片では繰返し数比によらず1ブロックを通してき裂先端はほぼ開口していた。一方、CT や SEC 試験片ではき裂閉口現象が明確に認められた。さらに、小規模降伏状態にあるき裂の開閉レベルは、図5に見られるように1ブロック中で一定であって、開閉レベルは母材と同様1ブロック中の最大荷重に支配されていた。

3・3 残留応力場における da/dN の評価 前記したように、残留応力を有する溶接継手の変動荷重を受ける場合にも、き裂開口荷重は1ブロック中でほぼ一定であった。このため、各ステップにおいて残留応力による応力拡大係数と外荷重によるその和から、き裂開口応力拡大係数 K_{op} を減じた応力拡大係数範囲が各ステップの da/dN を支配していると考えられる。この K_{op} は式(10)によって与えられる。

$$K_{op} = K_{i\max} + K_{res} - (\gamma + \delta R_{ires}) \Delta K_i \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $K_{i\max}$ と ΔK_i はステップ i での最大応力拡大係数と応力拡大係数範囲、 K_{res} は残留応力による応力拡大係数、 R_{ires} はステップ i において残留応力を考慮した応力比であって、式(11)によって与えられる。

$$R_{ires} = (K_{i\min} + K_{res}) / (K_{i\max} + K_{res}) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $K_{i\min}$ はステップ i での最小応力拡大係数である。

残留応力によってき裂先端に誘起される応力拡大係数 K_{res} は、残留応力 $\sigma_R(x)$ と等価逆符号の分布荷重がき裂面に内圧として作用するときの K 値として算出できる。実験に用いた CCT や SEC 試験片では、き裂面に集中荷重が作用する場合の解が Tada ら⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾によって与えられているのでこの解を用いるとともに、集中荷重をき裂面の微小部分に作用する分布荷重に置き換え、分布荷重をき裂面に沿って積分すること

図4 変動荷重下の溶接継手の da/dN と ΔK_m の関係

図5 変動荷重下の溶接継手のき裂開閉レベル

により K_{res} を算出した。なお、 K_{res} の算出に際して、残留応力 $\sigma_R(x)$ は測定した試験片の残留応力分布に最小二乗法を適用して、以下のように多項式近似を行った。

$$\sigma_R(x) = \sum c_i x^i \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 x は試験片の端からの距離(mm)、 $\sigma_R(x)$ の単位は MPa である。

CT と CCT 試験片の残留応力分布を図 6 に、それらの試験片に対する式(12)の係数を以下に示す。なお、SEC 試験片の残留応力分布は、CCT 試験片のそれと同一であると仮定した。

CT 試験片に対する式(12)の係数

$$\begin{aligned} c_0 &= -0.1593 \times 10^3, c_1 = -0.3901 \times 10^1 \\ c_2 &= 0.9583 \times 10^0, c_3 = -0.3192 \times 10^{-1} \\ c_4 &= 0.4663 \times 10^{-3}, c_5 = -0.3208 \times 10^{-5} \\ c_6 &= 0.8382 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

CCT 試験片に対する式(12)の係数

$$\begin{aligned} c_0 &= -0.2790 \times 10^3, c_1 = 0.2907 \times 10^2 \\ c_2 &= -0.8921 \times 10^0, c_3 = 0.1203 \times 10^{-1} \\ c_4 &= -0.6017 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

式(11)から算出される R_{ires} は、本実験範囲内では 0.6 を超えなかった。しかし、負となる場合にはその扱いが問題となる。そこで、母材を用いて $R < 0$ の条件で一定振幅荷重の疲労き裂伝ば試験を実施した結果、圧縮荷重側ではき裂の開口は認められなかった。疲労き裂の伝ばにはき裂開口点以上の応力拡大係数範囲が寄与しているので、 R_{ires} が負となるとときには $R_{ires} =$

0 として扱った。この場合の K_{op} は次式で表される。

$$K_{op} = (1 - \gamma)(K_{Hmax} + K_{res}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

圧縮残留応力場をき裂が伝ばする場合、圧縮残留ひずみが解放されるのに伴いき裂面が弾性接触するようになり、き裂面接触による応力拡大係数 K_{co} が誘起される⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。このため、 K_{op} を正確に推定しようとするときには、式(10)、(11)および(13)にこの K_{co} を取り入れる必要がある。しかし、CT 試験片では K_{op} や残留応力を考慮した応力比 R_{res} に及ぼす K_{co} の影響は比較的小さいことが報告⁽¹²⁾されていることから、本報では CT 試験片に対してき裂面弾性接触の影響を無視した。また、SEC 試験片においてもどの程度の K_{co} が誘起されるのか明らかでないので、き裂面接触の効果を考慮していない。

式(10)および式(13)から算出した K_{op} を残留応力を考慮した各ステップの最大応力拡大係数 K_{iRmax} から減じることにより、各ステップでの有効応力拡大係数範囲が算出できる。ここで、ステップ i でのき裂伝ば速度 $(da/dN)_i$ は、ステップ i での残留応力を考慮した有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{iR eff}$ を用いて式(14)のように記述できると仮定する。

$$(da/dN)_i = c(\Delta K_{iR eff})^m \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta K_{iR eff} = K_{iR max} - K_{op}$$

ここで、 c および m は材料定数である。なお、式(14)より 1 ブロックごとのき裂伝ば速度 $(da/dN)_B$ は、線形加算則を用いて以下のように表される。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_B = c(\Delta K_{Rem})^m \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 ΔK_{Rem} は $\Delta K_{iR eff}$ の m 乗重み平均であり、次式で与えられる。

$$\Delta K_{Rem} = \left(\frac{\sum_{i=1}^2 \Delta K_{iR eff}^m N_i}{\sum N_i}\right)^{1/m} \quad \dots\dots\dots (16)$$

図 4 に示した溶接継手の da/dN を式(16)で定義する ΔK_{Rem} に対して再プロットした結果を図 7 に示す。なお、 ΔK_{Rem} の算出に際して式(16)の m の値は、先に報告⁽⁸⁾した HT 80 鋼の母材に対する $da/dN - \Delta K_{eff}$ の関係から、 $m = 2.66$ を用いた。図 7 において、斜線を付けたデータを除くと、各データは点線で示す母材の一定振幅荷重の da/dN の近傍の比較的狭い散布帯中に表示される。なお、データのばらつきは試験片ごとに若干残留応力分布が異なると予想されるにもかかわらず、1 本の試験片の残留応力分布を用いて他の試験片の K_{res} を算出しているためと推察される。図 7 において斜線を付けたデータは、残留応力を考慮した最大応力拡大係数が小規模降伏条件から逸脱したデータであって、CT と SEC 試験片では式(17)を、CCT 試験片

図 6 CT および CCT 試験片の残留応力分布

図 7 変動荷重下の溶接継手の da/dN と ΔK_{Rem} の関係

では便宜的に式(17)の左辺を $1/2$ して用いた。

$$w-a > (4/\pi) \{ (K_{Hmax} + K_{res}) / \sigma_y \}^2 \dots\dots\dots (17)$$

以上の結果から、溶接継手が変動荷重を受ける場合には、ブロック内において残留応力を考慮した各ステップの最大応力拡大係数から、 K_{op} を減じた有効応力拡大係数範囲を m 乗重み平均することにより、 da/dN を評価することができる。本報では 2 段変動荷重下の da/dN を対象にしたが、多段変動荷重を溶接継手が受ける場合においても、1 ブロック中で K_{op} が変動しない場合には、上記の手法を適用して da/dN を評価することが可能と考えられる。

4. 結 論

突合せ溶接した HT 80 鋼溶接板から切り出した 3 種のタイプの試験片に、2 段変動荷重を負荷して疲労

き裂伝ば試験を行い、き裂伝ば速度に及ぼす残留応力の影響について破壊力学的評価を行った。得られた結果は以下のように要約される。

(1) 2 段変動荷重を受ける溶接継手の da/dN に及ぼす繰返し数比の影響は認められない。しかし、 da/dN は一定振幅荷重の場合と同様、試験片のタイプに依存した残留応力分布に強く支配されていた。すなわち、CT や SEC 試験片の da/dN は、試験片の残留応力分布を反映して CCT 試験片のそれよりも著しく遅延する。

(2) 変動荷重を受ける残留応力場のき裂開口荷重は 1 ブロック中ではほぼ一定であって、1 ブロック中の最大荷重に支配されている。

(3) 変動荷重を受ける溶接継手の da/dN は、ブロック内において残留応力を考慮した各ステップの最大応力拡大係数から、式(10)あるいは式(13)を用いて推定した K_{op} を減じて各ステップごとに有効応力拡大係数範囲を算出し、これを m 乗重み平均した応力拡大係数範囲 ΔK_{Rem} を用いて評価することができる。

文 献

- (1) Glinka, G., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 677(1979), 198.
- (2) 仁坂・ほか 2 名, 日本造船学会論文集, 152(1982), 390.
- (3) Parker, A. P., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 776(1982), 13.
- (4) Nelson, D. V., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 776(1982), 172.
- (5) 本田・ほか 2 名, 材料, 33(1984), 103.
- (6) 小林・森, 材料, 35(1986), 401.
- (7) 大野・ほか 4 名, 機論, 53-492, A(1987), 1516.
- (8) 橋内・吉久, 機論, 53-492, A(1987), 1525.
- (9) 城野・菅田, 材料, 36(1987), 1071.
- (10) 橋内・ほか 4 名, 機論, 54-501, A(1988), 941.
- (11) 森・小林, 機論, 54-497, A(1988), 269.
- (12) 森・ほか 2 名, 機論, 54-498, A(1988), 30.
- (13) 橋内, 機論, 50-459, A(1984), 1811.
- (14) Annual Book of ASTM Standards, E-647-81(1981).
- (15) 菊川・ほか 2 名, 材料, 28(1979), 946.
- (16) 菊川・ほか 2 名, 機論, 47-417, A(1981), 468.
- (17) Tada, H., ほか 2 名, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, (1985), 2, 27, Del Research Corp.
- (18) 文献(17)の 2.23 ページ.