ランダム荷重下における溶接継手の疲労き裂伝ば†

太 田 昭 彦* 前 田 芳 夫**
町 田 進*** 吉 成 仁 志***

Fatigue Crack Propagation in Welded Joints
under Random Loading

by

Akihiko OHTA*, Yoshio MAEDA**, Susumu MACHIDA***
and Hitoshi YOSHINARI***

Fatigue crack propagation properties of welded joints under random loading were investigated in air and synthetic sea water. The fatigue crack closure did not occur for whole excursion of loading, because the stress ratio around crack tip became high due to the tensile residual stresses around crack tips. That is, the applied range of stress intensity factor coincided with the effective range of stress intensity factor. The fatigue threshold in synthetic sea water was about a half of that in air. The fatigue crack propagation rates under random loading could be well estimated by the results obtained from constant amplitude tests assuming a linear cumulative damage law. That is $\frac{da}{dn} = C|\Delta K_{eq}^m - \Delta K_{th}^m|$, where $\Delta K_{eq} = \sqrt{\sum (\Delta K_i^m \cdot n_i) / \sum n_i}^{1/m}$, $n_i = 0$ at $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$ or $n_i = n_i$ at $\Delta K_i > \Delta K_{th}$.

Key words: Fatigue crack propagation, Random loading, Welded joints

1 緒 言

溶接継手の疲労き裂伝ばに関する系統的な研究が行われ、溶接法、溶接条件、作用応力比、試験部位（溶接金属または熱影響部）などが異なっても同一の特性が得られることが明らかにされてきた^{1)~3)}。この原因は、き裂先端に常に誘起される引張残留応力がき裂先端の応力比を高め、き裂閉口現象が生じない条件を形成し、常に $\Delta K = \Delta K_{eff}$ となるためである^{1)~4)}。

一方、構造物が使用される荷重環境は、一般のき裂伝ば試験で用いる定常振幅試験とは異なり、非定常に変化するランダム荷重である。そこで、ランダム荷重下の疲労き裂伝ば特性を把握することが重要となる。母材の場合、き裂閉口現象が荷重履歴によって複雑に変化し、定常振幅試験の結果からランダム荷重下の特性を推定することは困難である。特に、疲労下限界値 ΔK_{th} 近傍の伝ば特性は母材の場合定常振幅試験で得られるものに比べ著しく変化し、定常振幅試験で得られた疲労下限界値以下でもき裂が見かけ上伝ばし危険であることが指摘されている^{5), 6)}。しかしながら、先に述

べたように、中央き裂横突合せ溶接継手試験片では、引張残留応力の作用でき裂閉口現象が全く現れなくなるため、疲労き裂伝ば特性は条件にかかわらず単一となり^{1)~4)}、母材では伝ば速度の著しい加速が生ずる二段多重試験条件でも、溶接継手では加速が生ぜず、定常振幅試験と同一速度となった⁷⁾。このことから類推すると、溶接継手のき裂伝ば速度は、ランダム荷重のもとでも定常振幅試験の場合と同一な特性を示すことが推察される。

そこで、本報では HT80 鋼の中央き裂横突合せ溶接継手試験片を用い、レーリー分布に従うランダム荷重下の疲労き裂伝ば特性を大気中と人工海水中で調べた。

2 試験方法

本試験で用いた材料は、素材板厚が 20 mm の HT80 鋼の板材である。この材料の化学成分と機械的性質を Table I と Table II に示す。溶接試験板は、Table III に示す溶接条件で製作した。疲労試験片は、これらの溶接試験板から Fig. 1 に示す板幅 200 mm、

Table I. Chemical composition of HT80 steel (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	B
0.12	0.32	0.85	0.013	0.003	0.80	0.48	0.41	0.04	0.20	0.056	0.0007

† 原稿受理 平成 3 年 1 月 14 日 Received Jan. 14, 1991

* 正 会 員 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒, National Research Institute for Metals, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

** 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒, National Research Institute for Metals, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

*** 東京大学 東京都文京区本郷, Faculty of Engineering, Tokyo University, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Table II. Mechanical properties of HT80 steel.

Tensile properties			Charpy absorbed energy (J)
Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	
784	824	31	186 (-15 °C)

Table III. Welding conditions.

Welding process	Submerged arc welding
Weld length	500 mm
Welding position	Flat
Welding current	400~600 A
Welding speed	26~35 cm/min
Arc voltage	30~32 V
Heat input	21~44 kJ/cm

Fig. 1. Fatigue specimen.

板厚 10 mm の中央き裂試験片に加工した。なお、応力軸方向は板の圧延方向に一致させた。疲労き裂伝ば試験は、室温大気中および人工海水中において、応力比 0, 周波数 23 Hz の正弦波で実施した。

人工海水は、溶存酸素濃度が飽和状態になるように気泡を常に吹き込むようにして ASTM D1141-52 の処方に従う溶液を中央き裂試験片切欠孔に供給した。

荷重パターンは、Fig. 2 に示すレーリーの頻度分布に従うものを用いた。なお、無次元化した確立密度 p は、以下の式に従って算出した。

$$p = 1.011 X \exp(-X^2/2) \quad (1)$$

ここで、 $0 \leq X \leq 3$, $X = (\Delta\sigma - \Delta\sigma_{\min}) / \Delta\sigma_d$ であり、 $\Delta\sigma_m$, $\Delta\sigma_{\min}$, $\Delta\sigma_d$ は Fig. 2(a) に示すように定義される。また、散布度 $s = \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_m$ を Fig. 2(b) に示すように、0.25, 0.5, および 1.0 の 3 種類選んだ。なお、この頻度分布を試験機で再現する際には、 X を 62 に等分割し、 p を 62 ステップの折れ線で近似し、62 ステップの変動荷重 1 ブロックの総繰返し数 $\sum n_i$ を 10000 回とし、 X の出現順序は乱数表に従って無作為に並べた。一部の試験では、疲労下限界値以下に対応する荷重の繰返しを省略し、ランダム試験においても疲労下限界値が定常振幅試験の場合と同一であることを確認するとともに試験時間の短縮化を狙った試験も実施した。き裂伝ば試験に際しては、伝ば速度に応じてこの 62 ステップのブロック荷重を 1 から 1000 ブロック (7 分~5 日) 試験片に繰返し与えた後、

(a) Determination of symbols.
(b) Three kinds of distribution curves.

Fig. 2. Rayleigh probability curves.

き裂長さ a を測定した。Fig. 3 は、試験片に加えた荷重パターンである。

応力拡大係数範囲の算出は、次式に従った⁹⁾。

$$\Delta K = \Delta P \sqrt{a} [1.77 + 0.227(2a/W) + 0.51(2a/W)^2 + 2.7(2a/W)^3] / BW \quad (2)$$

ここで、 P は荷重、 B は板幅、 W は板厚である。

疲労き裂閉口が生じていないことを確認するため、試験片中央の切欠き孔をまたいで取り付けけた伸び計出力 δ と荷重信号 P を用い、除荷弾性コンプライアンス法¹⁰⁾による測定を行った。

溶接線に直交する方向の残留応力 σ_{ry} は、あらかじめ試験片に貼った二軸のひずみゲージの周りを切断し、切断後のひずみ変化から求めた¹¹⁾。

3 結果および考察

溶接残留応力の測定結果を Fig. 4 に示す。試験片中央部に引張りの残留応力が存在していることが確認された。Fig. 5 は、定常振幅試験による疲労き裂伝ば速度と応力拡大係数範囲の関係を示している。この図で、

(a) $s=0.25$. (b) $s=0.5$. (c) $s=1.0$. (d) $s=0.5$, $n_i=0$ for $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$.

Fig. 3. Loading patterns.

大気中の特性に比べ人工海水中の特性は疲労下限界近傍で劣っていることが分かる。なお、この図に描かれた細い曲線は、大気中で得られた種々の HT80 鋼溶接継手試験片について得られている 495 点のデータに対する回帰曲線および 99% 信頼区間¹²⁾を示している。回帰曲線は、次の式(3)で表される。

$$da/dn = C \{ \Delta K^m - \Delta K_{th}^m \} \quad (3)$$

ここで、 da/dn を m /回、 ΔK を $MN/m^{3/2}$ で表すと、 $C=2.28 \times 10^{-11}$ 、 $m=2.6$ 、 $\Delta K_{th}=2.2 MN/m^{3/2}$ である。また、太い一点鎖線は人工海水中のデータに対する曲線で、 $C=2.28 \times 10^{-11}$ 、 $m=2.6$ 、 $\Delta K_{th}=1.0 MN/m^{3/2}$ としたものである。

以下のランダム荷重試験結果の解析では、これらの C 、 m および ΔK_{th} を用いた。すなわち、ランダム荷重下の疲労き裂伝ば特性の評価では、疲労下限界値が定常振幅試験での値と一致し、ランダム試験において

Fig. 4. Residual stress distribution.

も疲労下限界値以下では疲労き裂伝ばが生じないとして式(4)で表される等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} を算出した。

$$\Delta K_{eq} = \{ \Sigma (\Delta K_i^m \cdot n_i) / \Sigma n_i \}^{1/m} \quad (4)$$

ただし、 $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$ で $n_i=0$ とした。また、これに対応する平均き裂伝ば速度 $\overline{da/dn}$ も、疲労下限界値以下の繰返し数を 0 として算出した。Fig. 6 に大気中

Fig. 5. Constant amplitude test results.

Fig. 6. Random loading test results in air.

Fig. 7. Random loading test results in synthetic sea water.

の, Fig. 7 に人工海水中のランダム荷重試験結果を示す。いずれの図においても、散布度にかかわらずデータプロットは定常振幅試験結果を表す曲線と良く合っており、式 (4) による等価応力拡大係数範囲の有効性を示している。

このような結果が得られた原因は、初めにも述べた

Fig. 8. Records of fatigue crack closure.

ようにき裂先端に常に誘起される引張残留応力の作用によって疲労き裂閉口が消失したことによるものと考えられた。これを確認するため、疲労き裂閉口挙動を実測した。Fig. 8 は、人工海水中の場合の実測例である。一番左側の定常振幅試験の場合だけでなく、ランダム試験の場合でも $P-\delta'$ 関係は全荷重範囲にわたって垂線であり、き裂が常に開口していることが確認された。

なお、疲労下限界近傍では、き裂伝ばに有効に作用するステップ、すなわち $\Delta K_i > \Delta K_{th}$ に対応するステップは、全ステップの 62 のうち $s=0.25, 0.5$ および 1.0 について、大気中については 16, 10 および 8 ステップ、人工海水中については 52, 27 および 30 ステップのみであり、これ以外の繰返しは無効であった。そこで、 $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$ に対応する繰返しを省略した試験を実施した。Fig. 9 の黒三角印は試験結果である。この場合、省略した繰返し数は 1 ブロック 10000 の

Fig. 9. Random loading test results for ignoring ΔK_i below ΔK_{th} .

うちの3194回であったが, レーリー分布に従うすべての波形を与えた場合と同一の平均き裂伝ば速度が得られた。したがって, 疲労下限界値以下の応力拡大係数範囲は, ランダム荷重においても疲労き裂伝ばになんら寄与しないことが確認できた。なお, この場合, 試験時間は約2/3に短縮できたことになる。

4 結 論

HT80鋼中央き裂横突合せ溶接継手試験片を用い, ランダム荷重下の疲労き裂伝ば特性を大気中および人工海水中で調べ, 以下の結論を得た。

(1) 試験片中央部に引張残留応力が存在し, 常にき裂閉口が起こらないこと, すなわち $\Delta K = \Delta K_{\text{eff}}$ が成立することが確認された。

(2) 大気中に比べ人工海水中での疲労き裂伝ば速度は疲労下限界近傍で加速し, 疲労下限界値はおよそ1/2となった。

(3) 定常振幅試験によって求めた疲労き裂伝ば特性および疲労下限界値を用い, 疲労下限界値以下の繰返しを無視して算出される等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} は, ランダム荷重下の平均き裂伝ば速度 $\overline{da/dn}$ を正しく評価した。ここで, ΔK_{eq} , $\overline{da/dn}$ は, 以下の式で表される。

$$\Delta K_{\text{eq}} = \{ \Sigma (\Delta K_i^m \cdot n_i) / \Sigma n_i \}^{1/m}$$

ただし, $\Delta K_i \leq \Delta K_{\text{th}}$ で $n_i = 0$

$$da/dn = C |\Delta K_{\text{eq}}^m - \Delta K_{\text{th}}^m|$$

(平成2年11月15日 第20回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 太田昭彦, 佐々木悦男, 鎌倉将英, 二瓶正俊, 小菅道雄, 金尾正雄, 稲垣道夫, 溶接学会誌, **50**, 161 (1981).
- 2) A. Ohta, E. Sasaki, M. Nihei, M. Kosuge, M. Kanao and M. Inagaki, Int. J. Fatigue, **4**, 233 (1982).
- 3) 金材技研疲労データシート資料, **3**, 1 (1984).
- 4) 太田昭彦, 前田芳夫, 小菅通雄, 町田 進, 吉成仁志, 溶接学会論文集, **20**, 17 (1988).
- 5) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 日本機械学会論文集, **49**, 278 (1983).
- 6) 小寺沢良一, 機械の研究, **33**, 483 (1981).
- 7) A. Ohta, T. Konno and S. Nishijima, Engng. Fracture Mech., **21**, 521 (1985).
- 8) K. H. Klippstein and C. G. Schilling, ASTM STP 595, 203 (1986).
- 9) W. F. Brown Jr. and J. E. Srawley, ASTM STP 410, 230 (1971).
- 10) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, **25**, 899 (1976).
- 11) 川田雄一, 平 修二, 多田美朝, “応力測定マニュアル”, p. 344 (1972) オーム社
- 12) A. Ohta, I. Soya, S. Nishijima and M. Kosuge, Engng. Fracture Mech., **24**, 789 (1986).