研究論文

電子ビーム溶接部における疲労きれつ伝播挙動
ならびに弾塑性解析によるその推定*

向井喜彦**, 西村 新**

Fatigue Crack Propagation Behaviour and its Analytical
Estimation on the Electron Beam Weld Bead*

by Yoshihiko Mukai** and Arata Nishimura**

The fatigue crack propagation behaviour which propagated on the electron beam weld bead was investigated and its estimation was done by elasto plastic analysis.

The fatigue crack propagation rate was increased monotoniously when the crack was remote from the weld bead. The crack coming near the bead, the bead was found to reduce the increment of its rate. On the fusion line, the rate became very small. After the crack came into the bead, the rate was increased again monotoniously.

As the crack was coming near the bead, the fatigue crack path was beginning to get inclined to base metal. The weld bead was also found to influence the fatigue crack propagation direction.

The fatigue crack propagation behaviour estimated by elasto plastic analysis was in good agreement with the behaviour which was observed in fatigue test.

1. 緒 言

近年, 電子ビーム溶接技術の進歩に伴い, 多くの溶接構造物の製作に電子ビーム溶接が用いられるようになり, 一部異種材料間の接合にも応用されている¹⁾. 電子ビーム溶接は, 溶接部の冷却速度が大きいため溶接部が著しく硬化するが, こういった著しく硬化する電子ビーム溶接部における疲労きれつ伝播挙動に関する研究は, ほとんど行なわれていないのが現状であり, 電子ビーム溶接に伴う硬さ変化が, 疲労きれつ伝播挙動にどのような影響を及ぼすのか十分に明らかにされていない.

そこで, 本研究では, 電子ビーム溶接部およびその周辺を伝播する疲労きれつの伝播挙動について, 溶接に伴う硬さ変化に注目して検討を行ない, さらに, 既報²⁻⁴⁾において示した硬さ不均一場での疲労きれつ伝播特性, および繰返し弾塑性解析に基づいて, 伝播挙動の推定を

試み, 実験結果との対応性について検討を行なった。

2. 供試材および実験方法

供試材は板厚 35 mm および 28 mm の 40 kgf/mm² 級の溶接構造用軟鋼板 (SM 41), ならびに板厚 35 mm の 80 kgf/mm² 級の高張力鋼板 (HT 80) である. それらの化学的組成および機械的性質を Table 1 に示す. Tab-

Table 1 Chemical composition (wt%) and mechanical properties

	Chemical composition (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
SM 41 (I)	0.22	0.04	0.93	0.024	0.017	—	—	—	—	—	—
SM 41 (II)	0.12	0.22	0.84	0.015	0.034	—	—	—	—	—	—
HT 80	0.11	0.30	0.81	0.010	0.004	0.19	1.10	0.51	0.47	0.003	0.0015

	Mechanical properties			Note
	Yield stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%) (G.L.=20mm)	
SM 41 (I)	27.7	44.9	44.3	As received
	26.2	41.9	40.7	600°C 3hr. F.C.
SM 41 (II)	25.6	42.6	52.5	As received
	78.2 ^{*1}	84.5	28.5	As received
	66.5 ^{*1}	74.7	28.2	600°C 3hr. F.C.
Bead (I)	71.5 ^{*1}	87.9	11.2 ^{*2}	600°C 3hr. F.C.
Bead (II)	56.0 ^{*1}	65.8	17.0 ^{*2}	As welded

*1 0.2% offset stress *2 G.L.=10mm F.C.: Furnace cooling

*原稿受付 昭和56年11月6日 (昭和56年度秋季全国大会にて発表)

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

e1 で SM 41 (I) および SM 41 (II) はそれぞれ板厚 35 mm および 28 mm のものを示している。また, Bead (I) および Bead (II) は, それぞれ後述する SM 41 (I) と HT 80 の突合せ電子ビーム溶接の溶接金属, および SM 41 (II) を電子ビーム溶接でメルトランさせた溶接金属の機械的性質を示す。

Table 2 Electron beam welding conditions

	Condition (I)	Condition (II)
Welding voltage	100 kV	50 kV
Welding current	300 mA	300 mA
Welding speed	400 mm/min.	400 mm/min.
Working distance	450 mm	227 mm
Focal distance	320 mm	185 mm

本研究では, 電子ビーム溶接部が応力軸に平行となる試験片 (平行試験片), および溶接部が応力軸と垂直な方向に対し 20° 傾斜した試験片 (20° 傾斜試験片) を準備した。そして, 前者の試験片を溶接部近傍での疲労き裂伝播速度の変化を検討するために用い, 後者の試験片を溶接部近傍での伝播経路の変化を検討するために用いた。Table 2 に溶接条件を示す。平行試験片の場合は SM 41 (I) と HT 80 を溶接条件 (I) で突合せ溶接し, 20° 傾斜試験片の場合は SM 41 (II) を溶接条件 (II) でメルトランさせた。いずれの場合も溶接姿勢は横向き水平であり, 板厚貫通溶接である。溶接板からの試験片の採取は, 平行試験片の場合は Fig. 1 (a) に示すように, 溶接線の中心が試験片幅の中央に, かつ応力軸と平行となるように採取し, 初期切欠を SM 41 (I) 側に設けた。また, 20° 傾斜試験片の場合は Fig. 1 (b) に示すように, 溶接線の中心が試験片幅の中央に, かつ溶接線が応力軸と垂直な方向に対して 20° 傾斜するように採取し, 初期切欠を, 疲労き裂が応力軸に垂直に直線的に伝播した場合に, 試験片幅の中央で溶接線の中心と交差する位置に設けた。いずれの場合も Fig. 2 に示すように, 溶接後板厚中央部が試験部となるように, 両表面から減厚し試験片とした。

疲労き裂伝播試験は, 平行試験片の場合 4 点曲げお

Fig. 1 Bead position (a) Weld bead parallel specimen (b) Weld bead inclined specimen

For weld bead parallel specimen $t = 35$ mm
Four point bending specimen $b = 20$ mm
Edge crack tension specimen $b = 5$ mm
For weld bead inclined specimen $t = 28$ mm
Four point bending specimen $b = 10$ mm

Fig. 2 Location of test specimen in welded plate

Table 3 Test conditions

	Maximum stress (kgf/mm ²)	Stress ratio	Weld bead inclined angle (deg.)	Thickness (mm)	Note
E. B. Bending	10.5	0.038	90	20	Four point bending
E. B. Tension	13.4	0	90	5	Edge crack tension
E. B. Inclined	23.5	0.040	20	10	Four point bending

よび片側切欠付引張型で行ない, 20° 傾斜試験片の場合 4 点曲げで行なった。それぞれの実験方法, 試験片形状, 疲労き裂伝播速度の測定方法, Δ CTOD の算定方法等は既報²⁾と同一である。実験条件を Table 3 に示す。平行試験片では残留応力の低減のため, 試験片に機械加工後, 600°C 3 hr. 保持後炉冷の焼もどしを行なった。

3. 解析方法および解析条件

本研究で用いた有限要素法による繰返し弾塑性解析プログラムは, 既報⁴⁾で示したものと基本的に同一である。解析形状は Fig. 3 に示すように 4 点曲げ試験片の試験部と同一であり, 解析は平行試験片に相当するモデル (E. B. 90 B, 対称性から $1/2$ モデルを作成した.), および 20° 傾斜試験片に相当するモデル (E. B. 20 B) を作成

Fig. 3 Shape and dimensions of F.E.M. model

し、純曲げ条件下で行なった。E. B. 90 B の場合、後に示す硬さ分布から、電子ビーム溶接部に相当する領域の幅を 2.4 mm とし、また長さを 25.6 mm とした。そしてモデル全体を SM 41 (I)、電子ビーム溶接部、HT 80 に相当する 3 領域に区分した。E. B. 20 B の場合は、溶接部との境界を硬さが急変する H. A. Z. と母材の境界とし、溶接線の中心から 2.5 mm の位置に設定した。そしてモデル全体を SM 41 (II) および溶接部に相当する 2 領域に区分した。解析に用いた材料定数を Table 4 に示す。(a) は E. B. 90 B に用いた材料定数で Mat. 1 は SM 41 (I)、Mat. 2 は電子ビーム溶接部、Mat. 3 は HT 80 の材料定数を示している。(b) は E. B. 20 B に用いた材料定数で、Mat. 1 は SM 41 (II)、Mat. 2 は電子ビーム溶接部の材料定数を示している。これらの材料定数のうち σ_y と H' はそれぞれの材料の引張試験結果を用いた。

Table 4 (a) Material constants used for E.B.90B

	σ_y (kgf/mm ²)	E (kgf/mm ²)	H' (kgf/mm ²)	ν
Mat. 1	26.2	21000	480	0.33
Mat. 2	71.5	21000	880	0.33
Mat. 3	66.5	21000	260	0.33

Table 4 (b) Material constants used for E.B.20B

	σ_y (kgf/mm ²)	E (kgf/mm ²)	H' (kgf/mm ²)	ν
Mat. 1	25.6	21000	500	0.33
Mat. 2	56.0	21000	870	0.33

(a) E.B. 90 B

(b) E.B. 20 B

Fig. 4 Mesh deviation around the crack tip

要素分割にあたっては、いずれのモデルでも初期き裂の延長線上で、モデル幅の中央 (25.0 mm) の位置に

節点がかかるようにし、底辺および高さが等しい二等辺三角形を要素の基本形状とした。解析モデルのき裂先端付近の要素分割の一例を Fig. 4 に示す。(a) は E. B. 90 B のき裂長さ 22.6 mm の場合で、最小要素は底辺および高さが 0.1 mm の二等辺三角形要素である。(b) は E. B. 20 B のき裂長さ 7.8 mm の場合で、き裂が伝播するであろう領域を底辺および高さが 1.6 mm の二等辺三角形要素に均一に分割し、き裂先端から約 3.2 mm 以内の領域を底辺および高さが 0.8 mm の二等辺三角形要素に、き裂先端に極めて近い領域を底辺および高さが 0.4 mm の二等辺三角形要素に分割した。Table 5 に解析に用いた外力条件および解析を行なったき裂長さを示す。解析は既報⁹⁾の結果に基づき、E. B. 90 B の場合は 3 回目の最大応力値まで、E. B. 20 B の場合は 1 回目の最大応力値まで行なった。外力条件は実験条件と一致させた。各モデルの節点総数および要素総数は Fig. 4 に示した E. B. 90 B 22.6 の場合、それぞれ 265, 426 であり、E. B. 20 B 7.8 の場合はそれぞれ 449, 833 であるが、これらの値はき裂長さを変えた場合若干増減する。

Table 5 Summary of boundary conditions

	Crack length (mm)	Maximum stress (kgf/mm ²)	Stress ratio	Weld bead inclined angle(deg.)
E. B. 90 B	18.6, 21.7, 22.6, 24.0, 25.6, 27.4	10.5	0.038	90
E. B. 20 B	7.8, 11.2*, 14.8*, 18.4*, 21.6*, 25.6*	23.5	—	20

* Projected crack length

4. 実験結果および考察

4.1 電子ビーム溶接部の硬さ分布と残留応力分布

Fig. 5 (a), (b) は SM 41 (I) と HT 80 を電子ビーム溶接した後、600℃ 3 hr. 保持後炉冷をした場合、および SM 41 (II) を電子ビーム溶接でメルトランさせた場合の溶接部付近のビッカース硬さ分布を示したもので

Fig. 5 Hardness distribution on the weld bead

(a) Weld bead parallel specimen

(b) Weld bead inclined specimen

ある。(a) の場合は SM 41 (I) から溶接金属に向けて急激に硬くなり, HT 80 に向けて再び急激に軟化する。(b) の場合は SM 41 (II) からゆるやかに硬化し, 溶接熱影響部との境界で急激に硬くなる。そして溶接金属内部で若干軟化している。硬い領域の幅は, (a) の場合約 2.5 mm, (b) の場合約 5 mm である。

試験片長手方向残留応力の, 試験片幅方向の分布を,

Fig. 6 Transverse distribution of longitudinal residual stress (Weld bead parallel specimen)

(a)

(b)

Fig. 7 Variation in da/dN , $\Delta CTOD$ and Hv along the crack length
(a) E.B. Bending
(b) E.B. Tension

Fig. 8 da/dN vs $\Delta CTOD$

4点曲げ試験片の片側表面で応力弛緩法により測定した。使用した2軸ゲージのゲージ長は1 mmである。残留応力への換算では $\nu=0.33$, $E=21000 \text{ kgf/mm}^2$ とした。Fig. 6に残留応力分布を示す。溶接後には溶接部付近に 10 kgf/mm^2 程度の引張残留応力, 上下部に 15 kgf/mm^2 程度の圧縮残留応力が存在するが, 焼もどしにより $\pm 1 \text{ kgf/mm}^2$ 程度に激減しているのがわかる。

4.2 電子ビーム溶接部近傍での疲労き裂伝播挙動

平行試験片での溶接部近傍における疲労き裂伝播速度, および $\Delta CTOD$ の変化を硬さ分布とともに Fig. 7に示す。4点曲げ, 片側切欠付引張型いずれの場合でも, SM 41 側では伝播速度, $\Delta CTOD$ ともに単調に増加するが, 溶接部に近づくにつれしだいにそれらの増加は抑制され, 融合線付近でいずれも極小値となる。溶接金属内部に進入した後は, HT 80 に向いていずれも再び単調に増加する。これらのことは Dowse ら⁵⁾の結果と同様であり, また既報^{2,6)}で示した硬さ不均一場および HT 80 鋼溶接部における結果と傾向的に一致している。

疲労き裂伝播速度と $\Delta CTOD$ の関係を Fig. 8に示す。両者の間には良好な直線関係が認められ, 次式の関係がある。

$$da/dN = 1.92 \times 10^{-1} \cdot (\Delta CTOD)^{1.36} \quad \dots\dots (1)$$

この実験式は既報^{2,6)}に示した実験式と同一である。

Fig. 9 (a) は 20° 傾斜試験片の, 試験片表面での疲労き裂伝播経路を示したもので, (b) にその模式図を示す。疲労き裂は, 初期切欠からほぼ応力軸に垂直に直線的に伝播し, 約 2 mm 伝播した後伝播方向をわずかに変え, そのまま溶接部に向かって伝播する。そして, 溶接部に近づくとき熱影響部に沿うようにして母材側を伝播する。このことは既報³⁾で示した不均一場での疲労き裂伝播挙動と同じである。

Fig. 9 (a) Fatigue crack propagation path on the specimen surface
(b) Illustration of fatigue crack propagation path

5. 繰返し弾塑性解析による溶接部近傍での疲労きれつ伝播挙動の推定

5.1 溶接部近傍での伝播速度の変化

解析により得られた $\Delta CTOD$ (定義は既報⁴⁾と同じ) から実験値を対応する値への換算は、既報⁴⁾に示した次式により行なった。

$$\Delta CTOD_{ex} = 1.31 \times \Delta CTOD_{cal} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $\Delta CTOD_{cal}$ は解析値、 $\Delta CTOD_{ex}$ は実験値である。

本研究では実験によって得られた $\Delta CTOD$ を $\Delta CTOD_{ex}$ とし、(2) 式により得られた $\Delta CTOD$ を $\Delta CTOD_{es}$ と呼ぶことにする。さらにこの $\Delta CTOD_{es}$ を用いて、伝播速度を (1) 式により求めた。こうして求めた伝播速度を $(da/dN)_{es}$ とし、実験で得られた伝播速

度 $(da/dN)_{ex}$ と区別することにする。Fig. 10 は、きれつ長さに伴う $\Delta CTOD_{es}$ と $(da/dN)_{es}$ の変化を実験結果とともに示したもので、黒印が解析的に推定した値を示し、白印が実験結果を示している。 $\Delta CTOD_{es}$ は SM 41 側で単調に増加するが、溶接部では大きく低下し、HT 80 側に向って再び増加する傾向を示す。この傾向は実験結果と良く一致しており、その値についても溶接部に進出した直後を除いて、実験結果とはほぼ同程度の値となる。伝播速度の変化についてみると、SM 41 側では推定値と実験値は良く一致しているが、溶接部に進出した直後は推定値の方が若干大きく、HT 80 側では逆に若干小さくなる。しかしながら、いずれの領域においても両者はほぼ同程度の値となる。

5.2 溶接部近傍での伝播経路の変化

疲労きれつ伝播経路の推定は次のような手順で行なった。(1) 解析モデルで、きれつが伝播するであろう領域を底辺および高さが 1.6 mm の二等辺三角形要素に均一に分割し、節点の座標を固定する。(2) 初期きれつ長さを試験片に挿入した初期切欠 (8 mm) とほぼ同じ長さ (7.8 mm) にする。(3) (1) で固定した節点座標に基づいて、きれつ先端付近を細かく要素分割する。(4) 最大荷重まで負荷し最大荷重時での塑性変形域を求める。そして、既報³⁾の定義 (応力軸に垂直な方向から $\pm 70^\circ$ 方向への、きれつ先端から硬い側および軟かい側への塑性変形域の境界までの距離の比) に基づいて W_H/W_S を求める。(5) この W_H/W_S を既報³⁾に示した次式に代入しきれつの傾斜角度 (θ^*) を求める。 $\theta = 15.20/(W_H/W_S + 0.20) - 12.70$ (6) 求めたきれつ傾斜角度の方向で、か

Fig. 10 Variation in $(da/dN)_{ex}$, $(da/dN)_{es}$, $\Delta CTOD_{ex}$, $\Delta CTOD_{es}$, and H_v along along the crack length

Fig. 11 Variation in shape of plastic region and crack tip position

つ投影長さで 3.6 mm 加えた位置に最も近接した節点を次の解析でのきれつ先端とする。ただし、この時 (1) で固定した座標に基づいて次の解析できれつ先端となる節点を決定する。そして現在のきれつ先端から次の解析できれつ先端となる節点までの最短距離上、または近接する節点の拘束をはずしきれつ長さを増加させる。(7) 応力・歪状態を初期状態にもどし、(3) から再び繰返し投影きれつ長さが 25.0 mm 以上となった時点ですべての解析を終了する。

Fig. 11 は上述のようにして求めた塑性変形域形状の変遷を示したもので、○印はその時のきれつ先端位置を示す。投影きれつ長さが増加するにつれ塑性変形域形状の非対称性が増し、きれつ先端の位置が軟かい側に向かって変化してゆくのがわかる。Fig. 12 は解析により求めたきれつ先端位置と、Fig. 9 に示した実験結果とを比較して示したものである。最終破壊の直前では、解析結果は実験結果と若干異なるが、定常的に伝播した領域では両者はほぼ一致している。

Fig. 12 Comparison estimated crack tip position with the fatigue crack path (E.B. Inclined, E.B. 20 B)

6. 結 言

本研究では、電子ビーム溶接部およびその近傍を伝播

する疲労きれつの伝播挙動について実験的に検討を行ない、さらに解析的にその挙動を推定することを試みた。得られた結果を要約すると次のとおりである。

1. 電子ビーム溶接部に向って垂直に疲労きれつが伝播する場合、伝播速度、 $\Delta CTOD$ とともに単調に増加した後、溶接部手前から減少しはじめ溶接部直前で両者は極小となる。そして溶接部に進入した後はいずれも再び増加する。伝播速度を $\Delta CTOD$ を用いて整理した場合、硬さ変化や残留応力の影響をほとんど受けず一義的に整理され、(1) 式のように示される。

2. 疲労きれつ先端前方に、伝播方向に対して 20° 傾斜した電子ビーム溶接部が存在する場合、疲労きれつは応力軸に垂直に直線的に伝播した後、ゆるやかに湾曲しながら溶接熱影響部に沿うようにして母材側を伝播する。

3. 繰返し弾塑性解析により、電子ビーム溶接部近傍での伝播速度の変化の挙動を推定した結果、溶接部直前での急激な伝播速度の低下が起こる領域を除いて、実験結果と良好な一致が認められた。また、伝播経路の変化の挙動を推定した結果、最終破壊直前を除いて実験結果とほぼ一致した。これらのことから、電子ビーム溶接部近傍での疲労きれつ伝播挙動を、解析的に推定することが可能であることが明らかとなった。

最後に、本研究を進めるに際し多大な協力を頂いた古崎博一、米沢昌久、金 應俊、仲野修朗各氏に深く感謝します。また、材料の提供および突合せ電子ビーム溶接に協力頂きました三菱重工㈱の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 元尾昭彦; わが社の電子ビーム溶接技術, 溶接技術, Vol. 29, No. 9 (1981), 51-55
- 2) 向井喜彦, 西村新; 硬さ不均一場における疲労きれつ伝播挙動に関する研究 (第1報), 本誌, Vol. 51, No. 1 (1982), 52-57
- 3) 向井喜彦, 西村新; 硬さ不均一場における疲労きれつ伝播挙動に関する研究 (第2報), 本誌, Vol. 51, No. 9 (1982), 761-767
- 4) 向井喜彦, 西村新; 硬さ不均一場における疲労きれつ伝播挙動に関する研究 (第3報), 本誌, Vol. 51, No. 10 (1982), 873-878
- 5) Dowse, K.R. and Richards, C.E.; Fatigue Crack Propagation Through Weld Heat Affected Zones, Met. Trans., Vol. 2, No. 2 (1971), 599-603
- 6) 向井喜彦, 西村新; 高張力鋼溶接部での疲労きれつ伝播挙動, 本誌, Vol. 51, No. 10 (1982), 832-837