疲労きれつ伝播経路に関する研究*

—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)—

向井 喜彦**, 西村 新**

Study on the Fatigue Crack Propagation Path*

—Fatigue Crack Propagation Behavior in the Hardness Heterogeneous Field (Part 2)—

by Yoshihiko Mukai** and Arata Nishimura**

Fatigue crack propagation path in welded metal or H.A.Z. is not always straight and also not vertical to the stress axis. In this report, the affection of the hard region to the fatigue crack propagation direction was investigated.

The hard region was found to influence the fatigue crack propagation direction. As the plastic zone shape became asymmetric to the vertical direction to the stress axis, fatigue crack was beginning to get inclined. The fatigue crack propagation direction was related to the difference of the crack opening displacement of each side.

By the fractography, symmetric striation was observed where the crack propagated straightly, and also asymmetric striation and secondary crack which grew out of slip band crack were observed where the crack inclined.

1. 緒 言

溶接金属内部や熱影響部を伝播する疲労きれつは溶接に伴う硬さ変化の影響を受け、伝播経路が湾曲することがある¹⁾。このような湾曲現象を解明するための基礎的な知見を得るため、本研究では、伝播方向に傾斜した硬化域をもつ試験片を用いて疲労きれつ伝播試験を行なった。そして疲労きれつ先端での変形領域および開口挙動の非対称性と伝播方向の関係を検討し、さらに破面観察によりきれつが湾曲する機構について考察を行なった。

2. 供試材および実験方法

本報で用いた供試材、試験片形状、試験片作成方法、実験方法、試験片番号および実験条件は前報²⁾に示したものと同一である。

3. 実験結果

3.1 疲労きれつ伝播経路

試験片表面での疲労きれつ伝播経路の一例を Fig. 1 に示す。いずれも伝播試験後残留断面にソーカットを入れ引張破断させたものである。(a) は母材試験片、(b) は焼

入れのままの試験片、(c) は焼入れ焼もどしを行なった試験片で、(b)、(c) は硬化域傾斜角度が 20° のものである。均一硬さ中(母材)ではほぼ応力軸に垂直に直線的に伝播するが、硬化域が存在する場合には、直線的に伝播した後軟硬境界手前から少しずつ伝播方向が変化しはじめ、硬化域に沿うようにして軟かい側を伝播する。同様のことが焼入れ焼もどし材(c)でも認められることから、伝播方向の変化に及ぼす残留応力の影響は比較的小さく、硬さ不均一が大きく影響しているものと考えられる。

3.2 疲労きれつ先端での変形領域および開口挙動の非対称性と伝播方向

湾曲したきれつ周辺の試験片表面での変形領域を顕微鏡で観察した。その結果の一例を Fig. 2(a) に示す。Fig. 2(b) はその模式図を示したもので、変形領域の形状が非対称となっていることがわかる。この非対称性の程度を表わすために次のようなパラメータを用いた。線形破壊力学の K_I モードの結果によれば、最大剪断応力の方向は応力軸に垂直な方向から士約 70.5° である。ところで、この試験では (i) 明らかな塑性変形が認められ (ii) きれつが傾斜してゆくために、最大剪断応力の方向が上述の結果と一致するとは考え難い。しかし、きれつがさまざまな傾斜角度を有する場合に、統一したパラメータ

*原稿受付 昭和56年9月2日(昭和56年度春季全国大会にて発表)

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

Fig. 1 Fatigue crack propagation path on the specimen surface
(a) Base metal (b) 20 No. 1 B (As induction hardened) (c) 20 No. 2 B (Induction hardening and tempered)

Fig. 2 Deformed region around the fatigue crack
(a) Interference photograph (20 No. 2 B)
(b) Illustration of deformed region

Fig. 3 θ^* vs W_H/W_S

により変形領域の非対称性を表わすための便法として, Fig. 2(b)に示すように, 応力軸に垂直な方向に対し $\pm 70^\circ$ 方向への, き裂先端から変形域境界までの距離の比(W_H/W_S)を考えることにする. また, その位置での応力軸に垂直な方向と伝播方向とのなす角度を θ^* とする. Fig. 3は θ^* と W_H/W_S の関係を示したものである. 実験点はほぼ双曲線上にあり, 実験の範囲内で次式のように近似される.

$$\theta^* = \frac{15.20}{W_H/W_S + 0.20} - 12.70 \quad (\theta^* < 40 \text{ deg.}) \quad \dots\dots(1)$$

Fig. 4はレプリカによって得られた最大, 最小荷重時のき裂先端の

開閉口状態を示したもので, Fig. 5にその模式図を示す. これらの写真からき裂の開口の非対称性を次のようにして測定した. 最小荷重の状態でき裂先端から0.1~0.2mmの間にある研磨傷を1本決め, き裂面との交点(O点)でき裂先端へのなす角度(θ_0)を求める. 最大荷重時には傷はき裂左右でくい違いを生じるが, それぞれのき裂面と傷との交点(A'点, C'点)でき裂先端へのなす角度(θ_1, θ_2)を求める. OA, OCをそれぞれ硬い側および軟かい側への開口変位量(δ_H, δ_S)と定義し, き裂先端での開口の非対称性を示すパラメータとして δ_H/δ_S を考える, 最

Fig. 4 Photographs around the fatigue crack tip

(a) At max. load

(b) At min. load

Fig. 5 Illustration of Fig. 4

大, 最小荷重時にこれらの傷が平行であると仮定すれば, δ_H/δ_S は近似的に $\delta_H/\delta_S = \tan(\theta_0 - \theta_1)/\tan(\theta_2 - \theta_0)$ となる。 θ^* と δ_H/δ_S の関係を Fig. 6 に示す。○印は単純平均値を示したもので, 両者の間には実験の範囲内で次式の関係が認められる。

$$\theta^* = \frac{19.06}{\delta_H/\delta_S + 0.12} - 17.10 \quad (\theta^* < 40 \text{ deg.}) \quad \cdots(2)$$

4. 破 面 観 察

観察に供した試料は 20 No. 1 B である。観察位置は

Fig. 6 θ^* vs δ_H/δ_S

Fig. 1(b) に示す A, B, C 点で, いずれも試験片表面から約 2 mm 内部の位置で観察した。A 点はきれつ長さ約 18.5 mm ($\Delta K \approx 135 \text{ kgf/mm}^{3/2}$) の位置できれつが応力軸に垂直に直線的に伝播した場所, B 点は投影きれつ長さ約 25.5 mm ($\Delta K \approx 199 \text{ kgf/mm}^{3/2}$) の位置できれつが湾曲しはじめた場所, C 点はきれつ長さ約 30.5 mm ($\Delta K \approx 286 \text{ kgf/mm}^{3/2}$) の位置できれつが傾斜しながら伝播した場所である。

4.1 破面観察結果

Fig. 7 は A 点での破面で, 2 次割れが少なく破面は比較的平坦である。(以下の破面写真中の太い矢印は巨視的伝播方向を示す。) Fig. 8 は D の拡大写真で明瞭なストライエーションが見られ, その形は硬い側, 軟かい側ともにほぼ同じである。Fig. 9 は B 点での破面で, E に示すようなストライエーションとともに, F, G のような 2 次割れが見られる。Fig. 10 は E の拡大写真で, Fig. 8 と異なり, ストライエーションの山の位置が少しずれているように見える。Fig. 11 は F の拡大写真で, 両破面に対応する 2 次割れ (H と H', I と I') がある。H と H' および I' は明らかな 2 次割れであるが, I は 2 次割れというよりむしろすべり帯きれつである³⁾。Fig. 12 は C 点の硬い側にみられた大きな 2 次割れで, 2 次割れ付近および右側のブロックの上部にストライエーションがみられる。2 次割れの両側面 (J と J') を拡大して Fig. 13 に示す。明瞭なストライエーションがあり, 周辺の破壊の状況から J と J' は対応面であろうと思われる。Fig. 14 は J の上部を見たもので, 3 と 4 のストライエーションの谷の部分にすべり帯きれつ (L) が見える。さらに, 4 のストライエーションの右には無特徴な破面 (M) があり, J のストライエーションへと続いている。5 と 4 のストライエーションが M の前縁および後縁に沿って形成されていることから, M はすべり帯きれつの破面であろうと推測される。Fig. 15 は 2 次割れ内部

(Fig. 12 の K の部分) を見たもので, 多数のストライエーションがある. Fig. 13 と Fig. 15 のストライエーション間隔を比べると, 2 次割れ内部のストライエーション間隔の方が狭いように思われる. 2 次割れのほぼ最深部と思われる所には, Fig. 16 の N に示すストライエーションとともに O のような痕跡がみられた. これは

Fig. 7 (a) Fracture surface at A (Hard side)
(b) Matching of (a) (Soft side)

Fig. 8 (a) Magnified image of D (Hard side)
(b) Matching of (a) (Soft side)

Fig. 9 (a) Fracture surface at B (Hard side)
(b) Matching of (a) (Soft side)

Fig. 10 (a) Striation pattern at E (Hard side)
(b) Matching of (a) (Soft side)

Fig. 12 において, 上側のブロックが右側にずれた際にできたものと思われる.

4.2 ストライエーション形状について

上述のように A 点でのストライエーションは両破面ではほぼ同じ形をしており, B, C 点では異なるように思われる. そこで次のようにしてストライエーション形状の測定を試みた.

Fig. 17 は空間に存在する線分 AE (実長 L) の状態を示したもので, それぞれの幾何学的形状から

$$\sin \theta = a \sin \alpha / \sqrt{L^2 - a^2 \cos^2 \alpha} \quad \dots (3)$$

$$\sin(\theta - \varphi) = b \sin \beta / \sqrt{L^2 - b^2 \cos^2 \beta} \quad \dots (4)$$

となる. チルトさせた 2 枚の写真から a, b, α, β を求め, (3), (4) 式を L について解けば 2 点間の実長が求まる. Fig. 18 はストライエーションを模式的に示したもので, l, n はストライエーションの山の部分, m は谷の部分である. l, m, n が平行であると仮定すると, 谷の深さ (h) は幾何学的に次式によって求められる.

$$h = \sqrt{a_1^2 + D^2 - 2a_1 D \cos A_1} - \{(C + e^2) / (-2e)\} \quad \dots (5)$$

ここで,

$$A = 2(a_1 \cos A_1 - a_2 \cos A_2),$$

$$B = 2(b_1 \cos B_1 - b_2 \cos B_2),$$

$$C = \sqrt{\{B(a_1^2 - a_2^2) + A(b_1^2 - b_2^2)\}}$$

$$-ABL\} / (A + B),$$

$$D = -(C - a_1^2 + a_2^2) / A$$

また, 山と山の間隔 (TV) は次式により求まる.

$$TV = \{1 + (L - PO) / PO\} \cdot \sqrt{TQ^2 - h^2} \quad \dots (6)$$

ここで, $TQ = a_1 \sin[\cos^{-1}\{(PQ^2 - a_1^2 - RQ^2) / (2a_1 RQ)\}]$, $PO = D$,

$$RQ = \sqrt{h^2 + D^2}, PQ = (C^2 + e^2) / (-2e)$$

(5), (6) 式から, $a_1, a_2, b_1, b_2, A_1, A_2, B_1, B_2, e$ を知れば, h および TV を求めることができる. P, U, R, S の各点はステレオマッチングを行ない決定した. A, B, C 点でそれぞれ 15 本, 12 本, 14 本のストライエーション形状を測定した. それらの単純平均値を Table 1 に示す. この結果から, ストライエーション形状を模式図に示すと Fig. 19 のようになる. A 点では上下面にはほぼ対称なストライエーションが形成されているが, B, C 点では最深位置にずれが見られ非対称になっている. また

Fig. 11 (a) Magnified image of F (Hard side)
(b) Matching of (a) (Soft side)

Fig. 12 Fracture surface at C (Hard side)

Fig. 13 (a) Striation pattern on the J side
(b) Striation pattern on the J'side

Fig. 14 Slip band crack (L) and
its fracture surface (M)

その程度は B, C 点ではほぼ等しい。Fig. 20 は従来からのストライエーション形成モデル^{3,4)}を用いて、この非対称なストライエーションの形成機構を模式的に示したものである。引張過程では、きれつ先端近傍の 2 つのすべり面でのすべりのためきれつの開口鈍化が起こる。こ

の時、均一場では上下面での開口鈍化はほぼ対称となるが、きれつ先端近傍に硬化域が存在すると、硬化域のため硬い側へのすべりが抑制され、相対的に軟かい側へのすべり量が多くなるため、きれつ先端の位置は軟かい側へずれることになる。圧縮過程では、均一場では再び上下面で対称な逆すべりを生じるが、硬さ不均一場では軟かい側での逆すべりが硬い側に比べて大きくなるため、最深位置が上下面で対称な位置にならずれを生じることになる。

4.3 2次割れについて

観察結果から推定される 2 次割れの形成機構の模式図を Fig. 21 に示す。きれつが伝播中にきれつ先端にすべり帯きれつ (1, 2) が生じ (Fig. 21 にその時のきれつ形状を破線で示す), 繰返しに伴い, C 方向に伝播する微小きれつとともに, すべり帯きれつから成長した A, B 方向に伝播する微小きれつが形成される。これらの微小きれつのうち, その先端部に大きな繰返しすべりが比較的長期にわたって作用した微小きれつが主きれつ

となり, 他のものは伝播しなくなり, 破面上に 2 次割れとなって残存するようになると考えられる。このような 2 次割れは Fig. 11 の H と H' に認められる。また Fig. 11 の I と I' の場合は, Fig. 21 においてすべり帯きれつが A 方向 (硬い側) に向って成長せず, B 方向 (軟かい側) に向ってのみ成長, 伝播し, さらに C 方向に伝播した微小きれつが主きれつとなったため, 硬い側の破面上にはすべり帯きれつ (I) のみが見られ, 軟かい側には比較的大きな 2 次割れ (I') が見られたものと推測される。Fig. 12 の 2 次割れの場合の模式図を Fig. 22 に示す。きれつの伝播中に上述の微小きれつが形成され A, B 方向にきれつが伝播した後, A 方向へのきれつが主きれつとなり, B 方向へのきれつの伝播速度が低下したものと考えられる。そして, ブロック周辺でのきれつの伝播が進むにつれ, 右側のブロックが周囲の変形に耐えられなくなり A 方向にずれたため, 割れ口の大きな 2 次割れが形成されたものと推定される。

5. 考 察

硬化域が伝播方向に対して傾斜して存在する場合, 次のような過程により伝播方向が変化すると考えられる。

きれつが硬化域から充分に離れている場合, きれつ先端での変形領域形状および開口挙動はきれつ面の左右で対称となり, 破面には対称なストライエーションが形成

Fig. 15 Striation pattern inside of the secondary crack

Fig. 16 Slid trace at the bottom of the secondary crack

Fig. 17 Illustration of 2 points distance in 3 dimensional space (a) Tilt angle; 0 deg. (b) Tilt angle; φ deg.

される。その結果、き裂は応力軸に垂直に直線的に伝播する。き裂が軟硬境界に近づくとき、硬い側への変形が抑制され、相対的に軟かい側への変形領域が大きくなり、軟かい側への開口量が増加する。これらのことはき裂先端近傍での軟かい側へのすべり量が硬い側と比べて大きくなることを意味しており、そのために破面に非

Fig. 18 Process of striation depth and width calculation

Table 1 Estimated results of striation shape

	L_H/L_S	C_S/L_S	C_H/L_H	D_H/D_S
Point A	1.025	0.498	0.513	0.998
Point B	0.992	0.676	0.410	1.018
Point C	1.018	0.650	0.412	1.000

Fig. 19 Schematic view of striation (a) Symmetric striation (b) Asymmetric striation

Fig. 20 Illustration of striation formation model (a) Symmetric striation (b) Asymmetric striation

Fig. 21 Illustration of secondary crack formation model

Fig. 22 Illustration of secondary crack in Fig. 12

対称なストライエーションが形成され、直進していたきれつはしだいに軟かい側に向ってその伝播方向を変えたものと考えられる。さらに硬化域に近づくと、変形領域形状および開口挙動の非対称性が増し、非対称なストライエーションが形成されるとともに、きれつ先端付近に微小きれつが発生するようになる。これら微小きれつのうち、その先端部に大きな変形が作用した微小きれつが主きれつとなって伝播し、巨視的な伝播方向の変化がさらに顕著になったものと考えられる。

6. 結 言

硬さ不均一場での疲労きれつ湾曲現象について検討を

行なった。得られた結果を要約すると次のとおりである。

1. 均一母材では疲労きれつは応力軸に垂直に直線的に伝播するが、伝播方向に対して傾斜した硬化域が存在する場合、応力軸に垂直に直線的に伝播した後、軟硬境界に沿うようにして軟かい側を伝播する。

2. 伝播方向はきれつ先端での変形領域の非対称性をパラメータとして、実験の範囲で (1) 式のように示され、また、開口挙動の非対称性には (2) 式の関係がみられた。

3. きれつが応力軸に垂直に直線的に伝播した場所では対称なストライエーションが見られ、傾斜しながら伝播した場所では非対称なストライエーションが見られた。また、傾斜しながら伝播した場所では、すべり帯きれつの成長、伝播による微小きれつの分岐が認められた。これらのことから、非対称なストライエーションの形成および微小きれつの分岐により、巨視的なきれつの伝播経路が湾曲したものと考えられる。

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君、米沢昌久君（当時大阪大学工学部学生）に深く感謝します。また、高周波焼入れに協力を頂いた富士電子工業㈱に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K.R. Dowse and C.E. Richards; Fatigue crack propagation through weld heat affected zones, Met. Trans. Vol. 2, No. 2 (1971) 599-603
- 2) 向井, 西村; 硬さ不均一場における疲労きれつ伝播挙動 (第1報) 本誌, Vol. 51, No. 1 (1982), 52-57
- 3) 北川, 小寺沢; フラクトグラフィー 培風館 (1977)
- 4) C. Laird; The influence of metallurgical structure on the mechanisms of fatigue crack propagation, ASTM STP 415 (1967) 131-168

サブマージーク溶接の溶融池現象*

—X線透視による観察—

野村 博一**, 杉谷 祐司**, 辻 正男**

Behavior of Molten Pool in Submerged Arc Welding*

—Observation by X-ray Fluoroscopy—

by Hirokazu Nomura**, Yuji Sugitani**, and Masao Tsuji**

The digging action of arcs and behavior of molten pool during submerged arc welding have been analyzed by X-ray fluoroscopic observation.

*原稿受付 昭和56年9月3日 (昭和56年度春季全国大会にて発表)

**正 員 日本鋼管(株) Member, Nippon Kokan K.K.