異方性をもつ圧延鋼材の疲労き裂伝ば特性と疲労破面*
(CT 試験片による検討)

鹿毛 正 治**, 西 谷 弘 信***

Crack Propagation Property and Fracture Surface
of Anisotropic Rolled Steel in Fatigue
(Examinations Based on CT Specimens)

Masaharu KAGE and Hironobu NISITANI

Pulsating tensile fatigue tests were carried out, using CT specimens cut out in three different directions from a rolled steel having inclusions with a remarkable directionality, in spite of having slightly laminated structures. The crack growth rate in each directional specimen was measured by an optical microscope and the fracture surface was observed by a scanning electron microscope. The main results obtained are as follows. (1) The crack growth resistance is lowest in the case of SL specimens whose cracks propagate along the inclusions with directionality, but anisotropy of the crack growth rate is small in comparison with that of the fatigue limit. (2) The anisotropy of the crack propagation is clearly recognized also by observing the fracture surface in fatigue. (3) The effect of material strength on the crack growth rate is remarkable when the stress intensity factor range ΔK is large, while it is slight when ΔK is small.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Anisotropy, Rolled Steel, CT Specimen, Inclusion, Fractography

1. 緒 言

圧延鋼材の疲労強度および疲労き裂伝ば特性は試験片を切り出す方向によって異なる。特に、板厚方向を含む面内においてそれが顕著である。圧延面内の異方性は、製造上交差圧延などの方法を採用することによりある程度解消できるが、板厚面内については、その異方性が直接問題となることが少なかったため、特別な配慮はなされていなかった。しかし、近年、造船、建築、橋りょうなどの大形化により厚鋼板が多く使用されるようになり、異方性による強度低下の最も著しい板厚方向の疲労特性も重要になってきたといわれている。板厚方向の疲労強度低下には、介在物量やその方向性が大きく関与することから、不純物をできるだけ低減する努力が払われ、また介在物を球状化する方法も採られている。

板厚面内の疲労き裂伝ばの異方性については、これまでも多くの研究がある^{(1)~(5)}。著者らも、以前より種々の圧延鋼材を用いて、板厚面内の各方向より切り出した試験片により、疲労強度ならびに疲労き裂伝ば

特性の異方性について検討を行ってきた^{(6)~(10)}。しかし、これまでの実験では、部分切欠材や小穴材を用いた回転曲げや平面曲げ疲労であり、大部分が小規模降伏条件を逸脱し、主として ΔK でコントロールできない範囲であったため、 $\Delta K-dL/dN$ 関係を用いることができなかった。そこで、前々回より CT 試験片を用いて同様な疲労き裂伝ばの異方性に関する実験を行い、 $\Delta K-dL/dN$ 関係により疲労き裂伝ばの異方性を検討してきた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

今回は、層状組織の程度は小さいが介在物に大きな方向性があり、疲労限度に大きな異方性をもつ一般構造用圧延鋼材 SS 41 の各方向から切り出した CT 試験片を用いて、疲労き裂伝ばを観察し、併せて走査形電子顕微鏡による破面観察も行い、圧延鋼材の疲労き裂伝ばの異方性と破面との関連について検討を行った。また、これまでに実験を行った高張力圧延鋼材 WT 80 C および疲労限度の異方性は小さいが顕著な層状組織をもつ溶接構造用圧延鋼材 SM 50 との疲労き裂伝ばの比較検討も行った。

2. 実験方法

素材は、一般構造用圧延鋼材 SS 41 (板厚 95 mm, 幅 300 mm, 長さ 300 mm, 圧延前の厚さ: 圧延後の

* 昭和 61 年 11 月 3 日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演。原稿受付 昭和 61 年 5 月 27 日。

** 正員、大分工業高等専門学校(〒870-01 大分市大字牧 1666)。

*** 正員、九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

厚さ $\approx 8:1$, 図1のX方向およびY方向にはほぼ同程度に圧延されている)である。

素材の化学成分を表1に示す。

図1に, 試験片採取方法を示す。図1のように, SL, LT, LSの3方向よりCT試験片を切り出した。

表2に, 機械的性質および疲労限度を示す。

図2に, 素材の各断面の介在物および組織を示す。本材料中の非金属介在物は小形欠陥(0.2 mm以下)で, A系介在物(硫化物およびけい酸塩)が主で, その清浄度はJIS法によれば, $dA_{60 \times 400} = 0.22$ である。また, 介在物の形状はほぼ円板状である。

図3に, CT試験片の形状を示す。板厚は13 mmと6.5 mmについて実験を行った。試験片は制作後, 600 °C, 1 hの真空焼なましを行った後実験に供した。

表1 化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.20	0.10	0.50	< 0.03	< 0.03

表2 機械的性質

	σ_{al} MPa	σ_{a} MPa	σ_{f} MPa	ϕ %	ψ %	σ_{w} MPa
Rolling direction	263	493	949	31.4	59.3	211
Thickness direction	245	475	594	17.4	24.3	162

σ_{al} : Lower yield stress, σ_{a} : Tensile strength, σ_{f} : Actual stress at fracture, ϕ : Percentage elongation, ψ : Area contraction, σ_{w} : Fatigue limit

図1 試験片採取方法

(a) 縦断面

(b) 横断面

図2 断面の介在物および組織

使用した試験機は, 電気油圧式サーボ疲労試験機(容量: ± 49 kN)で, 部分片振り引張条件下, 応力比0.1, 繰返し速度20 Hz, 一定荷重振幅のもとで実験を行った。

き裂長さの測定は, 所定の繰返し数ごとに試験機を止め, 試験機に取付けた光学顕微鏡により行った。

3. 実験結果および考察

図4に, 板厚13 mmと6.5 mmにおける各方向試験片のき裂伝ば曲線を示す。縦軸のき裂長さは荷重点からの長さとし, 表裏の測定値の平均値を用いた。繰返し数としては, 初期切欠の影響を取り除くため, き

図3 試験片形状

(a) $t=13$ mm ($\Delta P=5300$ N)

(b) $t=6.5$ mm ($\Delta P=2650$ N)

図4 き裂伝ば曲線

裂長さが8.5 mm (切欠底から約2 mm) になってからの繰返し数 ($N - N_{s.s}$) をとっている。いずれの板厚の試験片でも、き裂伝ばはSL試験片(き裂が介在物の面に沿ってあるいは連結して伝ばする場合)において最も速く、LS試験片(き裂が介在物の面を次々と切つて伝ばする場合)において最も遅い。

図5に、板厚13 mmと6.5 mmにおける各方向試験片の応力拡大係数幅 (ΔK) とき裂伝ば速度 (dL/dN) との関係を示す。ここで、 dL/dN は図4のき裂伝ば曲線において、各5点ずつを最小二乗法により二次式で近似し、接線の傾きにより求めた。また、図5中の直線は、べき乗き裂伝ば則 $dL/dN = C(\Delta K)^m$ を適用し、最小二乗法により決定したものである。また、 ΔK の算出は次式によった⁽¹³⁾。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{tW^{1/2}} \times \frac{(2+L/W)(0.886+4.64L/W-13.32L^2/W^2)}{(1-L/W)^{3/2}}$$

図5 ΔK - dL/dN 関係

図6 ΔK - dL/dN に及ぼす板厚の影響

$$+14.72L^3/W^3 - 5.6L^4/W^4)$$

ここで、 ΔP は荷重幅、 t は試験片厚さ、 W は試験片幅、 L はき裂長さである。図5からわかるように、両板厚試験片とも同一 ΔK のもとではSL試験片のき裂伝ば速度が最も大きく、LT, LSの順になっている。しかし、疲労限度の異方性が大きいわりにはき裂伝ば速度の異方性は比較的小さい。これは、板厚方向の疲労限度が介在物から発生したき裂伝ば限界条件によって決定されるのに対して板厚方向のき裂伝ば速度は、介在物を連ねた平均的な性質によって決まるためである。このことは、逆に、き裂伝ば速度に異方性が無い場合でも疲労限度に異方性が存在することも有り得ることを意味している。

図6に、板厚の影響を調べるため、各方向試験片ごとに、 ΔK - dL/dN 関係を示したものである。LS試験片において若干板厚の影響が見られるものの他の方向試験片においては、ほとんど両板厚で一致している。

図7に、板厚が6.5 mmの場合の各方向試験片の走査形電子顕微鏡による疲労破面を示す。き裂伝ばが最も速いSL試験片では、特徴的破面を示す。すなわち

図7 破面の状態

図8 破面における介在物の状態

(a) SL 試験片 (b) LT 試験片 (c) LS 試験片

A: $\Delta K = 15.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, B: $\Delta K = 18.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
C: $\Delta K = 24.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ↓: き裂伝ば方向

図 9 3 方向試験片の同一 ΔK における破面の比較

破面が粗く、破面に多くの介在物が認められる。また、LS 試験片では、破面と垂直な面に水平方向に介在物によるき裂が認められる。以上のことは、き裂が大きいところで顕著である。LT 試験片では最終破断面に近いところまで、非常に滑らかである。したがって、LS 試験片では、介在物はほとんどき裂伝ばに関与していないことが伺える。

図 8 に、各方向試験片における典型的な介在物の状態を示す。SL 試験片では明瞭な円板状介在物が認められ、先行き裂の原因になっている。LS 試験片では介在物面は破面と垂直であり、介在物が水平き裂の原因となっており、き裂伝ばを遅らせる一つの要因ともなっている。

図 9 に、各方向試験片において、ほぼ同じ ΔK のもとの破面を示す。

図 10 は、強度レベルの異なる 3 種の鋼材の SL, LT 試験片の $\Delta K-dL/dN$ を比較したものである。引張強さは、圧延方向試験片において、SS 41 材が 493 MPa, SM 50 材で 540 MPa, WT 80 C 材で 819 MPa である。前述のように、疲労限度の異方性が大きくてもき裂伝ば速度の異方性は小さいので、明確な特徴は現れていないが、各方向試験片とも強度レベルが大きい材料ほどき裂伝ば抵抗が大きいことがわかる。また、強度レベルの影響は、 ΔK が大きいところで顕著に認

図 10 3 種の鋼材の $\Delta K-dL/dN$ の比較

められ、 ΔK が小さいところでは比較的小さい傾向にある。

4. 結 論

層状組織の程度は小さいが、大きな方向性をもった介在物を有する一般構造用圧延鋼材 SS 41 の 3 方向から切り出した CT 試験片を用いて、片振り引張疲労試験を行い、各方向試験片のき裂伝ばを観察し、併せて走査形電子顕微鏡により破面観察も行い、疲労き裂伝ばの異方性と破面との関連について検討を行った。

得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 同一 ΔK のもとでは、介在物に沿って、き裂が伝ばする試験片 (SL 試験片) において、き裂伝ば速度が最も大きい。しかし、疲労限度の異方性が大きいわりには、き裂伝ばの異方性は比較的小さい。それは、疲労限度が、介在物から発生したき裂伝ば限界条件によって決まるのに対して、き裂伝ば速度は介在物を連ねた平均的な性質によって決まるためである。

(2) き裂伝ばの異方性は、疲労破面の観察からも認められる。

(3) 鋼材の強度レベルがき裂伝ばに及ぼす影響は ΔK の大きいところで顕著に認められ、 ΔK が小さいところでは比較的小さい傾向にある。

文 献

- (1) 大路・ほか 3 名, 機論, 43-374 (昭 52), 3594.
- (2) 小林・ほか 3 名, 鉄と鋼, 64-7 (昭 53), 244.
- (3) 大路・ほか 4 名, 機論, 45-390, A (昭 54), 117.
- (4) 原田・Kusumaul, K., 機論, 49-447, A (昭 58), 1403.
- (5) 原田・ほか 3 名, 機論, 50-460, A (昭 59), 1937.
- (6) 鹿毛・西谷, 機論, 41-344 (昭 50), 1080.
- (7) 西谷・鹿毛, 材料, 29-321 (昭 55), 574.
- (8) 鹿毛・西谷, 機論, 46-411, A (昭 55), 1183.

- (9) 西谷・鹿毛, 機論, 47-415, A (昭 56), 235. -
 - (10) 鹿毛・西谷, 機論, 49-445, A (昭 58), 1046.
 - (11) 西谷・鹿毛, 材料, 34-381 (昭 60), 658.
 - (12) 鹿毛・西谷, 機論, 52-476, A (昭 61), 875.
 - (13) 日本機械学会基準, 弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法, (昭 56), 19. 日本機械学会.
-