SB49 鋼の疲労破壊機構に及ぼす異方性組織の影響†

増 田 千 利* 西 島 敏*
住 吉 英 志** 下 平 益 夫*

Influence of Lamellar Structure on Fatigue Fracture Mechanism for SB49 Steel

by

Chitoshi MASUDA, Satoshi NISHIJIMA, Hideshi SUMIYOSHI
and Masuo SHIMODAIRA
(National Research Institute for Metals, Tokyo)

In order to discuss the influence of lamellar structure and MnS inclusion on fatigue fracture mechanism, the fatigue crack propagation tests were carried out along different orientations of a hot rolled SB49 steel plate with or without homogenized heat treatment.

The as-received material showed directionality in fatigue crack propagation due to the effect of lamellar structure, while the homogenizing treatment made crack growth isotropic both macroscopically and microscopically. Fractographic examination revealed that the ordinary striation mechanism was predominant when the crack plane was normal to the lamellar structure as well as for any orientation of the homogenized structure. For the case where crack plane was parallel to the lamellar structure, however, sub-cracks initiated at the edge of MnS inclusions locating ahead of the main crack and each propagated independently by striation mechanism to join with the main crack. The increase in fatigue crack propagation rate was explained by the interactive effect of MnS inclusions and lamellar structure.

(Received Aug. 8, 1983)

キー・ワード：疲労破壊，異方性組織，MnS 介在物，局部き裂，フラクトグラフィ

1 ま え が き

圧力容器や構造物に広く用いられる圧延鋼板においては素材の切出し方向によって強度やじん性が異なる場合があることが知られている¹⁾。また疲労の場合には疲労き裂の発生に及ぼす非金属介在物の影響^{2,3)}やき裂伝ば特性に層状組織の影響^{3)~5)}があることが報告されている。このためクロス圧延などにより組織の異方性を減らす方法が現在行われているが、Mn 等の偏析による板面に平行な層状組織や圧延により伸ばされた MnS 系介在物などは存在することが多い。このためき裂伝ば面が板面と平行な場合には、疲労き裂伝ば特性は層状組織や非金属介在物の影響を受けるものと考えられる。

本研究では疲労き裂伝ば特性に及ぼす層状組織と、MnS 系介在物の影響を個別に検討するために、ボイラー用圧延鋼板 SB49 の受領材および均質化組織材について板面と平行および直角な向きにき裂が伝ばするように試験片を切出し、疲労き裂伝ば試験を行い、破

壊機構をフラクトグラフィ的に調べた。

2 実 験 方 法⁶⁾

供試材は金材技研疲れデータシートの作成に用いられた SB49 鋼で、その化学成分を Table I に示す。S 量は 0.01% 程度で特別多いものではない。受領材は 900°C×4 hAC、620°C×3.5 hAC のいわゆる N 処理を施されたもので、その寸法は 67.6¹⁾×1 620²⁾×4 400³⁾ mm であった。本研究ではこれに 1 200°C×1 hAC の均質化処理⁴⁾後、再び受領材と同じ N 処理を施したものを⁵⁾用いた。以下では両材をそれぞれ N 材および H/N 材と呼ぶ。

両材の金属組織を Fig. 1 に示すが、(a)の N 材では板面に平行な層状組織が見られ、その間隔は約 60 μm であった。これに対し(b)の H/N 材の場合、層状組織は認められない。これらの試料内部には(c)に示すよう

Table I. Chemical composition (wt%).

	C	Si	Mn	P	S
SB 49	0.27	0.26	0.77	0.007	0.011

† 原稿受理 昭和58年8月8日

* 正 会 員 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒

** 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒

Table II. Mechanical properties.

Material	Orientation	σ_s (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	δ_u (%)	δ (%)	ϕ (%)	ΔK_s (MPa $m^{1/2}$)
As received (N)	Short T.	309	490	700	13	17	30	63
	Long.	309	498	1040	22	30	66	63
	Long T.	284	512	1010	21	29	62	58
Homogenized (N/H)	Short T.	301	480	720	16	20	28	61
	Long.	320	507	1010	23	40	65	64
	Long T.	319	508	1000	23	39	62	64

Fig. 1. Microstructures (a) lamellar structure, (b) homogenized structure, and (c) nonmetallic inclusion.

に板幅方向 Long transverse にある程度の幅をもち、板厚方向 Short transverse には薄く圧延方向 Longitudinal に長く伸ばされた MnS 系介在物と、小さな球状の介在物が認められる。

両組織材について直径 4 mm の JIS 14A 号試験片により求めた機械的性質を Table II に示す。試験片の切出し方向による差が顕著に認められるのは真破断応力 σ_T 、一様伸び δ_u 、伸び δ 、絞り ϕ で、それらは特に板厚方向の場合に、他と比べ小さい。また表中にはき裂先端の最大塑性域寸法 $\omega_{max} = (\pi/8)(K_{max}/\sigma_y)^2$ ¹⁾ が板厚 $B=10$ mm と等しくなるときの ΔK_s を示したが、切出し方向および組織による差はほとんどないこ

とがわかる。

疲労試験片としては Fig. 2 に示すように、ASTM 規格 E399⁷⁾ に従って表示するとき裂面および伝ば方向が層状組織、MnS 系介在物に直角な L-T, T-S と、それらに平行な S-L, S-T の 4 種類の方向に切出した板厚 $B=10$ mm、板幅 $W=50$ mm の CT 試験片を用いた。

Fig. 2. Specimen orientation.

疲労試験は容量 50 kN の電気油圧式サーボ疲労試験機を用い、低伝ば速度領域では 50 Hz で、荷重を 5 % ずつ漸減させ、また中間および高伝ば速度領域では 2~10 Hz で、荷重を 10 % ずつ漸増させながら応力比 $R=0.1$ の条件下で行った。なお H/N 材では応力比一定の試験を行った。

応力拡大係数は式(1)により計算した。

$$\Delta K = \frac{4P}{BW} \cdot \frac{(2+t)}{(1-t)^{3/2}} (0.886 + 4.64t - 13.32t^2 + 14.72t^3 - 5.6t^4) \quad (1)$$

ここで $4P$ は荷重範囲、 a はき裂長さ、 $t=a/W$ である。

破面観察は板厚中央部について走査型電子顕微鏡により、非金属介在物の分析は X 線マイクロアナライザにより行った。

3 実験結果

3・1 疲労き裂伝ば特性

SB 49 鋼の疲労き裂伝ば曲線を Fig. 3, 4 に示す。図中の矢印は ΔK_s (Table II) を示す。

3・1・1 異方性組織 (N) 材の場合 (Fig. 3) N 材のき裂面が板面と直角に伝ばする L-T, T-S 方向の場合、 $10^{-8} \leq da/dN \leq 10^{-6}$ m/c の中間速度領域およびそれを越える高速度領域まで両対数紙上で da/dN

Fig. 3. Fatigue crack propagation property for lamellar structure.

Fig. 4. Fatigue crack propagation property for homogenized structure.

と ΔK との間に直線関係がある。

一方、き裂が板面と平行にき裂が伝ばする S-L, S-T 方向の場合、中間速度領域においてのみ da/dN と ΔK の間に両対数紙上で直線関係が成立する。しかし高速度領域で $\Delta K > \Delta K_c$ となる条件下では da/dN が急激に増加する傾向が認められる。

N 材の da/dN - ΔK 関係をパリス式 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 中の定数 C , 指数 m で表示したときの値を Table III に示した。これからき裂が板面に直角に伝ばする L-T, T-S 方向の m 値に比べ、それと平行に伝ばする S-L, S-T 方向の場合の m 値の方が大きく、同一 ΔK に対する da/dN も大きいことがわかる。これは従来の報告⁴⁾⁵⁾と傾向はほぼ一致する。

板面に直角および平行にき裂が伝ばする例として L-T および S-L 方向を選び、 $da/dN < 10^{-8}$ m/c の低速度領域の試験を行った。両者とも ΔK の減少に伴って急激に da/dN が低下するが、同一 ΔK に対し L-T 方向に比べ、S-L 方向がわずかながら速い。 da/dN

Table III. Log C, m and ΔK_{th} .

Orientation		Log C	m	K_{th} (MPa m ^{1/2})
Lamellar structure	L-T	-11.81	3.4	9.4
	T-S	-11.81	3.4	—
	S-L	-12.42	4.1	9.0
	S-T	-12.24	3.9	—
Homogenized structure	L-T	-11.89	3.4	—
	T-S	-11.89	3.4	—
	S-L	-11.89	3.4	—
	S-T	-11.89	3.	—

$\approx 10^{-10}$ m/c における ΔK 値を ΔK_{th} として Table III に併せて示した。

以上のように N 材の場合、素材の板面とき裂面が平行か直交するかにより伝ば特性の差が顕著に認められるが、き裂伝ば方向のみによる差は著しくない。

3・1・2 均質化組織 (H/N) 材の場合 (Fig.4)

H/N 材では中間速度領域の da/dN - ΔK 関係はばらついてはいるが、き裂面や伝ば方向によらず、両対数紙上ではほぼ一本の直線となる。この場合の C , m は N 材の板面と直角にき裂が伝ばする場合のそれと大略一致する (Table III)。大路らも同様の結果を報告している。

N 材で支配的な異方性は非金属介在物の形状および配列であるから、非金属介在物のみによる差は本来小さく、非金属介在物の方向と層状組織の方向との組合せによっては一種の相乗効果があるために、 da/dN に差が生ずる場合があるものと考えられる。

3・2 マクロ破面

3・2・1 異方性組織 (N) 材の場合 マクロ破面の例を Fig.5 に示す。なお写真左上の矢印はき裂伝ば方向を示す (以下同様)。

き裂面と板面と直交する L-T および T-S 方向の場合、写真(a), (b)からわかるように破面上において非金属介在物は認められない。しかしき裂面と板面とが平行な S-L, S-T 方向の場合、写真(c), (d)に示すように最大長さ 600 μ m 程度の MnS 系介在物が 50~100 μ m の間隔で平行に並んだ領域が、破面上のいたるところに認められた。

3・2・2 均質化組織 (H/N) 材の場合 き裂面が板面と直交する場合には、N 材と同様に破面上に MnS 系介在物は認められなかった。また、き裂面が板面と平行な場合にも Fig.6 に示すように、MnS 系介在物が破面上に現れることは少なかった。これは Fig.5 (c), (d) とほぼ同程度の ΔK における破面であることから、MnS 系介在物と層状組織の相互作用効果の存在を示唆するものと考えられる。

Fig. 5. Macro-fractographs for lamellar structure (a) L-T ($\Delta K=72\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=4.6 \times 10^{-6}\text{m/c}$), (b) T-S ($\Delta K=66\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=2.5 \times 10^{-6}\text{m/c}$), (c) S-L ($\Delta K=11\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=5.7 \times 10^{-9}\text{m/c}$), and (d) S-T ($\Delta K=19\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=4.6 \times 10^{-8}\text{m/c}$).

Fig. 6. Macro-fractographs of homogenized structure for (a) S-L ($\Delta K=20\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=2.6 \times 10^{-8}\text{m/c}$) and (b) S-T ($\Delta K=14\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=1.0 \times 10^{-8}\text{m/c}$).

3・3 ミクロ破面

3・3・1 異方性組織 (N) 材の場合 き裂面と板面が直交する場合は高速度領域まで両対数紙上で $da/dN-\Delta K$ の直線関係が成立することから予測されるように, Fig. 7 に示すように明りょうなストライエーションが現れる. その間隔 s と ΔK との間には両対数紙

Fig. 7. Micro-fractograph for lamellar structure (L-T) at $\Delta K=30\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=2 \times 10^{-7}\text{m/c}$.

上で傾き 2.2 の直線関係があった. この関係はき裂面が板面と平行な場合もほぼ同様であった.

低速度領域では L-T 方向のみ調べたが, C% 量が同程度の S 25 C 鋼と同様に粒界破面が現れ, その破面率は $\Delta K \approx 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ で最大値を示した.

き裂面が板面と平行な場合, き裂伝ば方向によりミクロ破面の特徴が多少異なるので個別に述べる.

S-L 方向の場合, パリス式の成立する中間速度領域においては Fig. 8 (a) に示すように, MnS 系介在物 A と, それ折れて脱落した B 部分の周囲に, き裂伝ば方向に平行に並んだストライエーションが認められた. この特徴は上下破面でマッチングしており, 介在物 A から発生したき裂が局部的には印で示すような方向に伝ばしたことを示している. また, C にステップが認められるが, これはストライエーションの向きから考えて, 写真上外側の介在物から発生, 伝ばしたき裂が合体した痕跡を示している.

Fig. 8. Micro-fractographs for lamellar structure (S-L) at (a) $\Delta K=17\text{MPam}^{1/2}$, $da/dN=4.6 \times 10^{-8}\text{m/c}$, and (b) $\Delta K=66\text{MPam}^{1/2}$, $da/dN=1.88 \times 10^{-5}\text{m/c}$.

写真のストライエーション間隔 s は約 $0.3\mu\text{m}$ で da/dN より約 6 倍大きく、き裂面が板面と直交する場合に得られる $s-\Delta K$ 関係から外挿される値より約 4 倍大きい。すなわちこの場合、層状組織により MnS 系介在物の周囲の塑性変形が拘束を受け応力集中が生じるため、主き裂に先行して介在物から局部き裂が発生し、これが巨視的き裂伝ば方向とは平行な向きにストライエーションを形成しつつ伝ばし、やがて主き裂と合体するものと考えられる。

同じ S-L 方向の高速度領域であっても ΔK が ΔK_c 以上の不安定破壊条件下では Fig. 8 (b) に示すように MnS 系介在物 (例えば A) と、それが折れて脱落した部分 (B) が認められた。また隣接する MnS 系介在物間にはストライエーションは見られず、その周囲には底の浅い空洞 C が認められる。詳細に観察すると MnS 系介在物は約 $5\sim 12\mu\text{m}$ の寸法で折れており (A)、しかもその周囲の空洞内には白く見える特徴 D が見られる。この特徴を連ねると写真中に破線で示すように巨視的き裂伝ば方向と直角な向きに並ぶ規則性を有していることがわかる。この規則的な特徴は上下破面でマッチングしており、巨視的き裂伝ば速度 $da/dN=18\mu\text{m/c}$ と大略程度であることから、応力の繰返し 1 回ごとにき裂先端の介在物周囲が延性破壊したときに形成されたものと考えられる。またこの間隔はき裂面が板面と直交する場合の $s-\Delta K$ 関係から外挿される値より 3~6 倍大きかった。

S-L 方向の低速度領域の破面には L-T 方向と同様粒界破面も認められた。特に異なる点はやはり MnS 系介在物が見られることで、その周囲にはストライエーションは認められなかった。

S-T 方向の中間速度領域で Fig. 9 (a) に示すように、MnS 系介在物 A の周囲にストライエーションが部分的にしか認められず、特にパーライト相境界はく離れたと思われる特徴 C がよく見られる点が、S-L 方向の場合と異なる。特徴 C は S-T 方向で非常に多いが、これは介在物周囲の応力集中によって局部き裂が発生、伝ばするときに、近傍のパーライト相境界がぜい性的に破壊するためと考えられる。大路らはマクロ的にしま模様の段差の見られる部分にへき開や MnS 系介在物割れが認められ、ストライエーション状模様はあまり認められないと報告しているが、今回の場合へき開はほとんど見られず、むしろストライエーションはかなり認められる点が異なる。

Fig. 9. Micro-fractographs for lamellar structure (S-T) for (a) $\Delta K=17\text{MPam}^{1/2}$, $da/dN=1.7 \times 10^{-7}\text{m/c}$ and (b) $\Delta K=62\text{MPam}^{1/2}$, $da/dN=7.0 \times 10^{-6}\text{m/c}$.

同じく S-T 方向の高速度領域で $\Delta K > \Delta K_c$ となる破面上には Fig. 9 (b) に示すような介在物 A の周囲には大きな空洞が認められた。そのまわりにはストライエーションも見られることがあった。

3・3・2 均質化組織 (H/N) 材の場合 き裂面が板面と直交する L-T、T-S 方向の中間速度領域においては、破面の特徴は N 材の場合と同様で、ストライエーション間隔 s と ΔK との関係もほとんど差はなかった。

き裂面と板面と平行な場合には, Fig. 10 に示すように破面上に MnS 系介在物はあまり認められず, ストライエーションが多かった. なお S-L 方向では巨視的き裂伝ば方向に平行に並んだストライエーションが見られることがあったが, その割合は小さかった. ストライエーションの破面率は約50%以上で, N材に比べ両方向とも大きかった. なお他に直径の小さなアルミナ系介在物を核とするディンプルが見られたが, その破面率は最終破壊近傍で急激に増加し, 最大約40%であった.

Fig. 10. Micro-fractographs of homogenized structure for (a) S-L ($4K=32\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=3.0\times 10^{-6}\text{m/c}$) and (b) S-T ($4K=50\text{MPa m}^{1/2}$, $da/dN=1.0\times 10^{-5}\text{m/c}$).

以上の観察結果から H/N 材の破壊機構はき裂面と板面との関係・方向によらず, 主き裂がストライエーションを形成しつつ伝ばすると考えられるため, 中間速度領域では da/dN に差がほとんど認められないものと考えられる.

4 結果の検討

4・1 層状組織と偏平長大介在物の相乗効果に関する観察のまとめ

(1) 異方性組織 (N) 材では層状組織および MnS 系介在物と平行にき裂が伝ばする S-L, S-T 方向の da/dN は, それらと直角方向に伝ばする L-T, T-S 方向より速い. 均質化組織 (H/N) 材の da/dN は後者と等しく, 方向によらない.

(2) N材の S-L, S-T 方向については, 主き裂前方で MnS 系介在物から発生した局部き裂がストライエーションを形成しながら, あるいはパーライト相境

界を破壊しながら伝ばし, 後続の主き裂と合体したと考えられる特徴が多く見られる. またき裂先端の最大塑性域寸法 $w_{\max}$ が試験片板厚程度になると MnS 系介在物の周囲に空洞の生成が認められた. しかしこのような特徴は H/N 材では認められない. このことは介在物と層状組織とが相乗的に作用し, き裂伝ば速度に影響を及ぼすものと考えられる.

(3) フラクトグラフィ的観察結果を確認する目的で, N材の S-L 方向試験片を用いて疲労き裂伝ば試験を行い, 主き裂前方の偏平な介在物からのき裂発生を試験片表面において観察した例を Fig. 11 に示す. このときの $4K$ は約 $15\text{MPa m}^{1/2}$ (応力比 $R=0.1$) で, 最大塑性域寸法は約 $863\mu\text{m}$ であるが, 主き裂上方に約 $60\mu\text{m}$ の位置にある MnS 系介在物から局部き裂が³⁾発生, 伝ばしている. 大路からも主き裂前側の介在物からの局部き裂の発生を認めている.

Fig. 11. Inclusion originated sub-crack at the specimen surface for lamellar structure ($4K=14.5\text{MPa m}^{1/2}$).

4・2 相乗効果として考えられるモデル

以上の観察結果を基に N材の S-L 方向にき裂が伝ばする場合の機構を Fig. 12 に示すように考えた. き裂前縁が 1 の位置にあるとき, き裂先端の塑性変形が層状組織により拘束を受けるために, 前方に存在する介在物 A, B, C のまわりの応力拡大係数が高くなり, 主き裂とは別にき裂が発生し, 1' までストライエーションを形成しながら伝ばする. さらに 2 まで主き裂が伝ばする間に介在物周囲のき裂も 2' まで伝ばし, 隣接する介在物間で合体すると共に, 主き裂を 3 の位置へ急速に伝ばさせる. H/N 材の場合には層状組織

Fig. 12. Schematic representation of crack propagation for S-L direction with lamellar structure.

がないためき裂先端の塑性変形の拘束も起らず、介在物周囲からのき裂発生は少ないものと考えられる。

なおき裂先端の最大塑性変形域寸法が板厚程度になると介在物周囲で空洞が形成され、不安定破壊に近づくため da/dN の急激な増加が現れたと考えられる。

4・3 疲労き裂伝ば速度の推定

いま、MnS 系介在物周囲が先行的に破壊した領域を例えば Fig. 8 (a) の写真右側に $\overline{f}$ で示した部分と考え、その破面率 f を求めて S-L 方向のき裂伝ば速度の加速率との関係付けを考えてみる。すなわち、主き裂が長さ Δa だけ成長するとき、 Δa 中には基準の伝ば量 Δa_0 と先行局部き裂による加速量 $f\Delta a$ が含まれると考える。基準の伝ば速度として L-T 材のデータを $(da/dN)_{L-T}$ をとると、S-L 方向の速度は式(2)となる。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{S-L} = \frac{1}{1-f} \left(\frac{da}{dN}\right)_{L-T} \quad (2)$$

いくつかの写真上で f を測定し、 ΔK との関係調べたものが Fig. 13 である。この結果 f は ΔK とともに増加するが $\omega_{\max} = B$ となると急激に増す。

Fig. 13. Area fraction of the crack initiated at nonmetallic inclusions.

Fig. 13 の結果を基に式(2)を用いて $(da/dN)_{S-L}$ を計算した結果を Fig. 3 に破線で示したが、実験点とよい一致を示している。

なお以上の考え方は S-T 方向についても全く同様に適用される。

5 結 論

異方性組織および均質化組織を有するボイラー用圧延鋼板 SB49 鋼を用いて、疲労き裂伝ば試験を応力比 $R=0.1$ の条件下で行い、き裂伝ば特性に及ぼす層状組織および MnS 系介在物の影響をフラクトグラフィ的に検討した。得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 異方性組織材の疲労き裂伝ば特性は巨視的伝ば方向により異なる。すなわち層状組織および MnS 系

介在物と直角に伝ばする場合 da/dN は最も遅く逆にそれらに平行に伝ばする場合最も速くなり、特に後者の場合には最大塑性域寸法が板厚以上となると急激な増加が認められた。しかし均質化組織材ではき裂伝ば方向によらず $da/dN-\Delta K$ 関係は両対数紙上でほぼ一本の直線となった。

(2) 層状組織および MnS 系介在物に平行にき裂が伝ばする場合、破面には S-L 方向では介在物に平行なストライエーション、S-T 方向ではパーライト相境界が破壊したと考えられる特徴およびストライエーションが、最大塑性域寸法が板厚以上となると、介在物周囲に空洞が見られた。一方均質化組織材の破面には、き裂伝ば方向によらず MnS 系介在物は認められることは少なく、ストライエーションが支配的であった。

(3) 異方性組織材において層状組織および MnS 系介在物と平行にき裂が伝ばする場合には主き裂前方の介在物から局部的にき裂が発生し、主き裂と合体するため da/dN が増加すると考えられる。この考えを基に先行的に介在物周囲が破壊した領域の破面率を調べ、S-L 方向の da/dN を計算したところ、実験値とほぼ一致した。

(4) フェライト・パーライトの層状組織の向きが主き裂面と平行である場合にのみ、主き裂先端部のひずみ拘束のため、主き裂前方の介在物から局部的にき裂あるいは空洞を生じて da/dN の増加が起ること、すなわち層状組織と介在物の相互効果が考えられることを指摘した。

(昭和57年5月18日 フラクトグラフィ部門委員会にて講演)

参 考 文 献

- 1) A.S. Tetelman and A.J. McEvily, Jr., "Fracture of Structural Materials" (1967) John Wiley & Sons.
- 2) 鹿毛正治, 西谷弘信, 日本機械学会講演論文集, No. 740-10, 180 (1974).
- 3) 大路清嗣, 小倉敬二, 原田昭治, 田路 勉, 本多啓介, 日本機械学会論文集, 45, 117 (1979).
- 4) F.A. Heiser and R.W. Hertzberg, Trans. ASME, D93, 211 (1976).
- 5) 大路清嗣, 小倉敬二, 原田昭治, 田路 勉, 日本機械学会論文集, 43, 3594 (1977).
- 6) 金材技研疲れデータシート, No. 22 (1980).
- 7) ASTM Standards, E399, 592 (1982).
- 8) J.E. Stawly, Int. J. Fract., 12, 475 (1976).
- 9) 増田千利, 西島 敏, 材料, 27, 59 (1978).