

日本機械学会論文集(A編)
51巻472号(昭60-12)

S 45 C 鋼平板試験片における表面疲労き裂の進展 および下限界特性*

鷺田 朗秀**, 土田 栄一郎***, 小林 英男****
Akihide WASHIDA, Eiichiro TSUCHIDA, Hideo KOBAYASHI

Key Words: Fatigue, Surface Crack, Crack Growth Rate, Stress Intensity Factor Range, Crack Closure, Threshold

1. 緒 言

貫通疲労き裂について、種々の材料、環境条件に対して研究が行われており、進展特性が明らかにされつつある^{(1)~(4)}。従来、主として貫通き裂のデータに基づいて、構造物の欠陥評価が行われてきた。しかし、構造物の欠陥の多くは、表面欠陥あるいは埋没欠陥であり、欠陥評価を行う場合に、貫通き裂のデータのみでは不十分だと考えられる。特に、実際上から重要な表面欠陥からの疲労き裂の進展および下限界特性を明らかにすることは、構造物の疲労破壊の防止に不可欠である。表面疲労き裂の進展特性については、最近多くの研究が行われている^{(5)~(8)}。しかし、下限界特性まで調べた研究は少ない⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本研究では、S 45 C 鋼平板試験片に表面切欠きを付し、大気中、室温において荷重範囲 ΔP 一定試験および ΔP 漸減試験を行い、表面疲労き裂の進展特性、下限界特性およびき裂開口を調べた。また、それらに及ぼす材料の結晶粒径の影響についても検討を加えた。

2. 実験方法

供試材は機械構造用鋼 S 45 C であり、その化学成分を表 1 に示す。図 1 に試験片形状および表面切欠きを示す。表面切欠きは放電加工により、試験片前面中央部に付した。その後、次の 2 種類の真空焼なましを行い、結晶粒径を変化させた。

(A) 850°C, 1 時間保持, 炉冷。

(B) 850°C, 24 時間保持, 炉冷。

熱処理後の機械的性質と結晶粒径を表 2 に示す。

疲労試験は大気中、室温において MTS 社製疲労試験機(荷重容量 ± 245 kN)を用い、荷重制御で行った。荷重条件は正弦波の片振り引張繰返し荷重で、応力比 $R=0$ 、繰返し速度 3 Hz~8 Hz とした。荷重範囲 ΔP を一定とし、き裂進展特性を調べる実験と、 ΔP を漸減させ(減少率 7.5%~15%)、下限界特性を調べ、その後、 ΔP を増加させ、さらにき裂進展特性を調べる実験を行った。図 2 にき裂寸法の定義を示す。表面き裂長さ $2b$ は読取り顕微鏡を使用して直接測定し、き

表 1 化学成分(重量%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.46	0.19	0.70	0.03	0.009	0.01	0.06

表 2 降伏応力と結晶粒径

	Yield stress (MPa)	Average grain size (mm)	Grain size number
Anneal A	355	0.012	10
Anneal B	336	0.025	8

* 昭和 59 年 3 月 31 日 第 61 期通常総会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 58 年 9 月 30 日。

** 学生員, 東京大学大学院 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

*** 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。

**** 正員, 東京工業大学工学部 (〒151 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

裂深さ a はピーチマーク法により破断後に測定した。

き裂開口荷重 P_{op} は試験片前面のき裂先端近傍と背面中央部の2箇所に貼ったひずみゲージの出力を使用して、除荷弾性コンプライアンス法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾により測定した。測定の際に、繰返し速度を0.05 Hz~0.1 Hzに落とした。ひずみゲージの位置を図3に示す。

3. 実験結果および考察

以下、図中のSは結晶粒径小を、Lは結晶粒径大を表し、添え字Bは表面方向、Aは深さ方向を表す。

3.1 ΔP一定試験

3.1.1 表面疲労き裂の進展特性 図4に巨視的

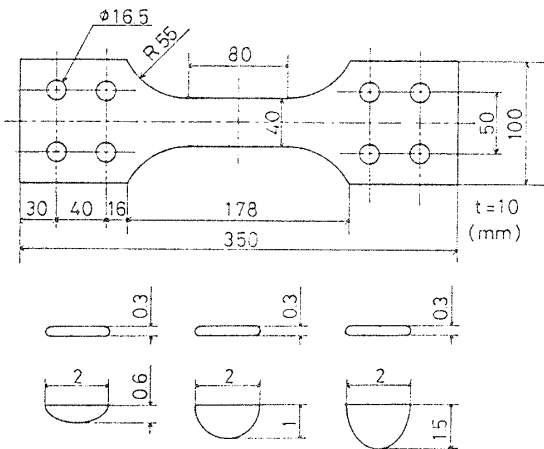


図1 試験片形状と表面切欠き形状

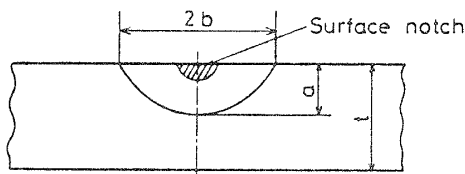


図2 き裂寸法の定義

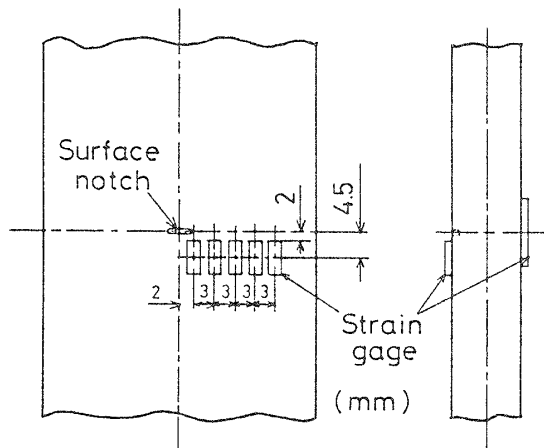


図3 ひずみゲージ位置

破面様相を示す。図5にき裂形状比 a/b とき裂深さの試験片厚さに対する比 a/t の関係を示す。

a/b の値はき裂進展の初期において表面切欠きの影響を受けるが、1.0に近づくように変化し、 $a/b \approx 1.0$ (半円形) に落ちついた後、 a/b が減少し、偏平化傾向を強めながら破断に至る。表面き裂の偏平化傾向は、他の研究者⁽⁶⁾⁽⁷⁾によって報告されている結果と同様である。偏平化の原因として、リガメントに作用する曲げモーメントが考えられる。一様引張荷重を平板試験片の端面に負荷しているにもかかわらず、き裂進展に伴い、リガメントに曲げモーメントが作用するようになる。別の同形状の試験片について行った曲げ応力成分の測定法、測定結果をそれぞれ図6、図7に示す。図7の縦軸は最大荷重時の背面と前面のひずみの比 $\epsilon_{Bmax}/\epsilon_{Fmax}$ 、横軸は a/t である。添え字B、Fはそれぞれ背面、前面を表す。 $\epsilon_{Bmax}/\epsilon_{Fmax}$ が1.0以下になるのは、 $a/t \approx 0.4$ 以降である。これは $a/t \approx 0.4$ 以降で、き裂が偏平化することと一致している。

表面方向および深さ方向のき裂進展速度 db/dN 、 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK_B 、 ΔK_A の関係をそれぞれ図8、図9に示す。 ΔK の算出には Kobayashi の解⁽¹¹⁾、一部に Raju-Newman の解⁽¹²⁾ を用いた。次式

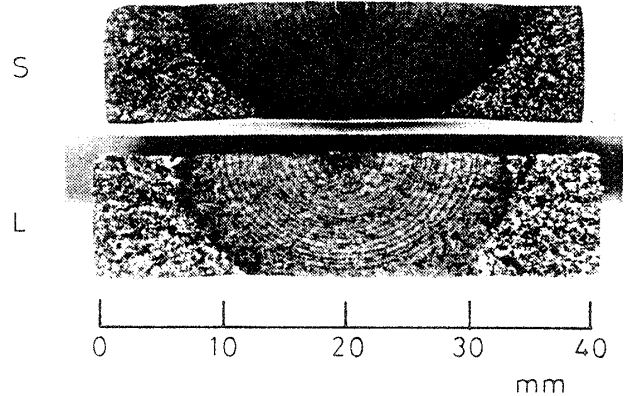


図4 巨視的破面様相

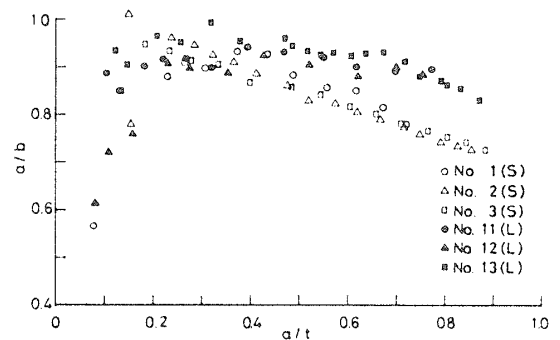


図5 a/b - a/t 関係 (mm)

の Paris 則が成立している。

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \dots \dots \dots (1)$$

最小二乗法により両対数表示直線回帰を行い、得られた m, C の値を表 3 に示す。図 8, 図 9 より表面方向と深さ方向のき裂進展速度 $db/dN, da/dN$ を比較すると、 ΔK の小さい範囲において da/dN は db/dN よりも大きい。また、 ΔK の大きい範囲では逆転する。この傾向はき裂の扁平化の大きい結晶粒径小の場合に顕著である。

3.1.2 結晶粒径の影響 図 5 において結晶粒径の影響が認められ、結晶粒径小のほうに扁平化傾向が強い。また、図 8, 図 9 においてき裂進展速度に対しても、結晶粒径の影響が認められる。表面方向では同一 ΔK_B に対して、結晶粒径小のほうに db/dN は大

きい。深さ方向では ΔK_A が小さい範囲において結晶粒径小のほうに da/dN は大きいけれども、 ΔK_A の大きい範囲において逆転する。逆転の生じる点は、き裂が扁平化し始める点とほぼ一致している。

3.2 ΔP 漸減試験

3.2.1 表面疲労き裂の下限界特性 図 10 に巨視的破面様相を示す。下限界でき裂進展が停止した際のき裂前縁までは、赤黒いフレッチング酸化物が付着しており、停止前縁に近づくほど色が濃くなっている。ここで、 8.5×10^6 回以上繰返しても、表面においてき裂進展が認められない場合を、き裂進展の下限界とした。破面観察の結果、下限界において結晶粒径小の試験片は、内部でもき裂進展は認められなかった。しか

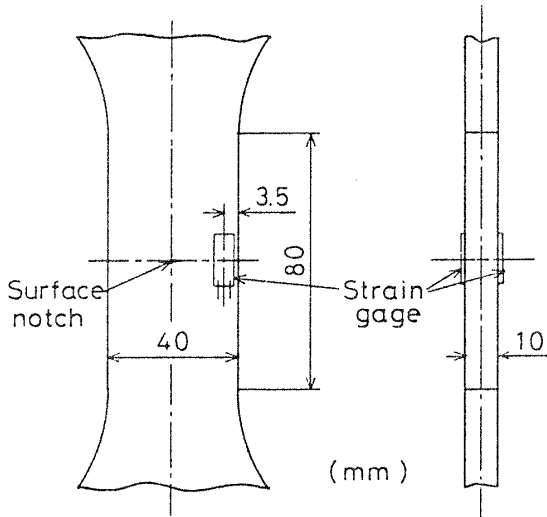


図 6 ひずみゲージ位置

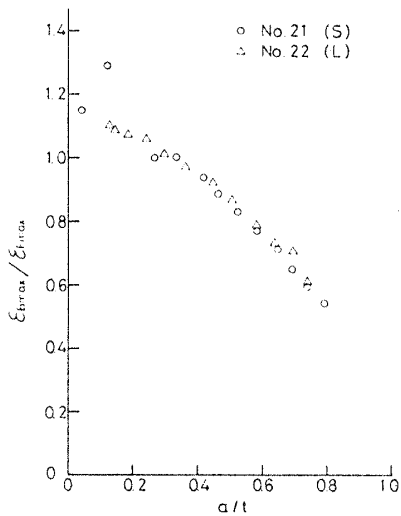


図 7 $\epsilon_{Bmax}/\epsilon_{Fmax}-a/t$ 関係

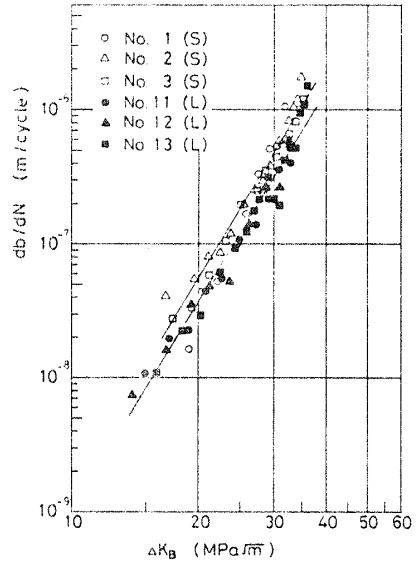


図 8 $db/dN-\Delta K_B$ 関係 (表面方向)

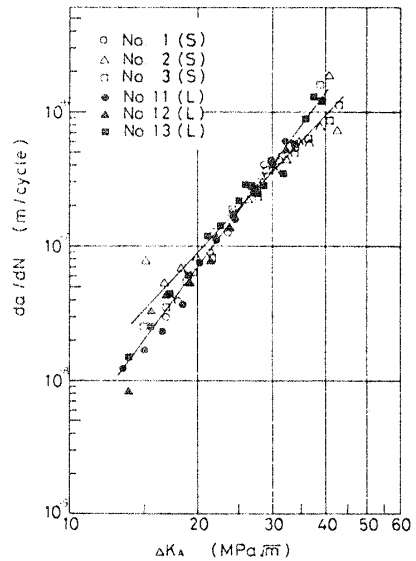


図 9 $da/dN-\Delta K_A$ 関係 (深さ方向)

し、結晶粒径大の試験片では上記の繰返しの間に、内部で局所的なき裂進展が生じた後、停止したことがわかった。

図 11 に a/b と a/t の関係を示す。図中、黒塗り印の点は下限界を示している。図 5 と異なり、 ΔK の減少に伴い、 a/b は急激に減少する。これは表面と内部のき裂開口の相違に起因しており、内部のほうがき裂開口が大きいと思われる。

表面方向および深さ方向のき裂進展速度 db/dN 、 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK_B 、 ΔK_A の関係をそれぞれ図 12、図 13 に示す。図中に ΔP 一定の結果も実線(S)と破線(L)で併記した。ここで、試験片 No.101 のデータは ΔK の減少率が大きく、き裂進展速度も急激に低下したので、下限界特性として採用しないことにする。表面、深さ方向ともに、き裂進展の下限界が

表 3 m と C の値

		m	C	ΔK range (MPa \sqrt{m})
Surface	S	5.32	6.55×10^{-15}	$16.0 < \Delta K_B < 35.5$
	L	5.20	6.31×10^{-15}	$13.5 < \Delta K_B < 36.0$
Depth	S	3.39	3.55×10^{-12}	$15.0 < \Delta K_A < 43.0$
	L	4.35	1.56×10^{-13}	$13.5 < \Delta K_A < 40.0$

表 4 ΔK_{th} の値

	ΔK_{Bth} (MPa \sqrt{m})	ΔK_{Ath} (MPa \sqrt{m})
S	6.33	6.86
L	9.24	9.57

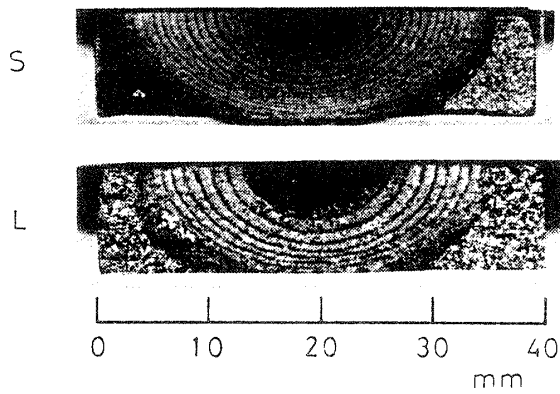


図 10 巨視的破面様相

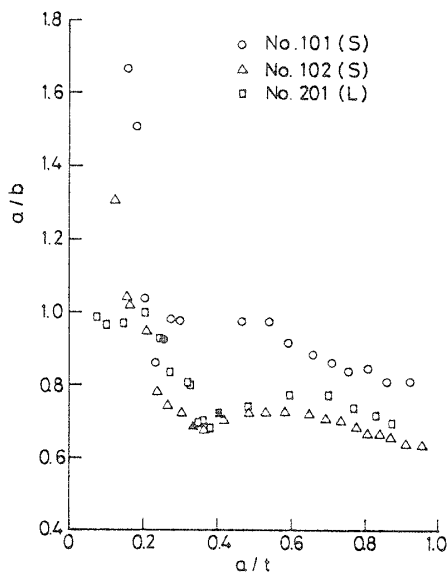


図 11 a/b - a/t 関係

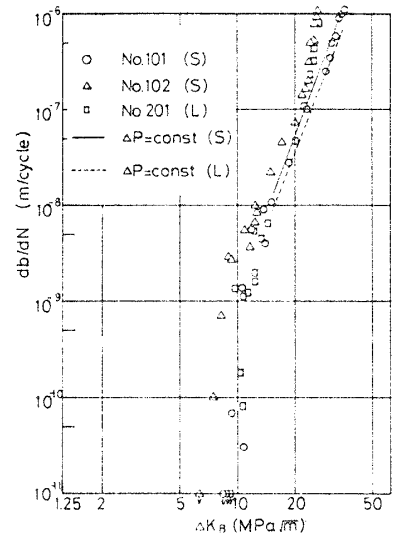


図 12 db/dN - ΔK_B 関係 (表面方向)

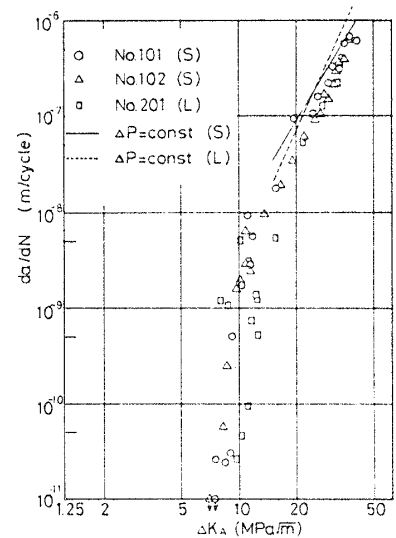


図 13 da/dN - ΔK_A 関係 (深さ方向)

明確に存在することがわかる。下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の値を表 4 に示す。結晶粒径小の場合、深さ方向の $\Delta K_{A,th}$ は表面方向の $\Delta K_{B,th}$ よりも約 8% 大きく、結晶粒径大の場合は約 4% 大きい。これは下限界においてき裂形状が扁平であることに起因している。 $\Delta K_B = \Delta K_A$ となる a/b を計算すれば、0.8 前後であり、 $a/b < 0.8$ では $\Delta K_A > \Delta K_B$ となる。図 11 に示したように、下限界において実験結果は $a/b < 0.8$ である。

3・2・2 下限界に及ぼす結晶粒径の影響 図 12, 図 13 を参照して、結晶粒径の影響は特に下限界近傍において顕著である。表 4 を参照して、 ΔK_{th} は表面、深さ方向ともに、結晶粒径大のほうが約 40% 大きい。これは結晶粒径の大小により、き裂開口が異なるためと考えられる。すなわち、結晶粒径大のほうが破面が粗く、この破面粗さが局所的な破面接触を助長する⁽¹³⁾。さらに、破面相互のたたき合いによってフレッチング酸化物が生じ、それがき裂開口を誘起する。その結果、 ΔK_{th} が大きくなると考えられる⁽⁴⁾。したがって、 ΔP 漸減開始条件も ΔK_{th} に影響することが考えられる⁽¹⁴⁾。

3・2・3 き裂開口 除荷弾性コンプライアンス法によるき裂開口荷重 P_{op} の測定結果の一例を、図 14 に示す。縦軸は荷重 P 、横軸はひずみ ϵ と荷重 P の引算結果 ($\epsilon - \alpha P$)、 α は係数である。ここで、き裂開口荷重 P_{op} とき裂閉口荷重 P_{cl} は等しいとして取扱う。図中の矢印(→)で示した点が、 P_{op} である。表面方向の開口荷重 $P_{B,op}$ は試験片前面のき裂先端近傍に貼った

ひずみゲージの出力から、深さ方向の開口荷重 $P_{A,op}$ は背面中央部に貼ったひずみゲージの出力から測定した。

開口比 U_B, U_A は次式により定義される。

$$U = \frac{P_{max} - P_{op}}{P_{max} - P_{min}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $P_{op} \geq P_{min}$ である。

表面、深さ方向の U_B, U_A と応力拡大係数範囲 $\Delta K_B, \Delta K_A$ の関係をそれぞれ図 15, 図 16 に示す。図中、黒塗り印の点は下限界を示している。図 15 の ΔK_B の小さい範囲において、同一 ΔK_B に対して、結晶粒径大のほうが U_B の値が小さい。これは 3・2・2 項で示したように、フレッチング酸化物によるき裂開口の相違によるものと思われる。しかし、表面方向の U_B と深さ方向の U_A には、明確な相違は認められなかった。

有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} は次式により定義される。

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K \dots\dots\dots (3)$$

表面方向および深さ方向のき裂進展速度 $db/dN, da/dN$ と有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{B,eff}, \Delta K_{A,eff}$ の関係をそれぞれ図 17, 図 18 に示す。 ΔK_{eff} に対してもき裂進展の下限界が明確に存在する。これには P_{op} の測定精度も関連していると考えられる。

表面き裂の場合、表面と内部の P_{op} を精度よく区別して測定する必要がある。しかし、測定手法は確立されていない。本研究の測定手法では、表面と内部の P_{op} はそれぞれ他のき裂前縁におけるき裂開口の影響を受

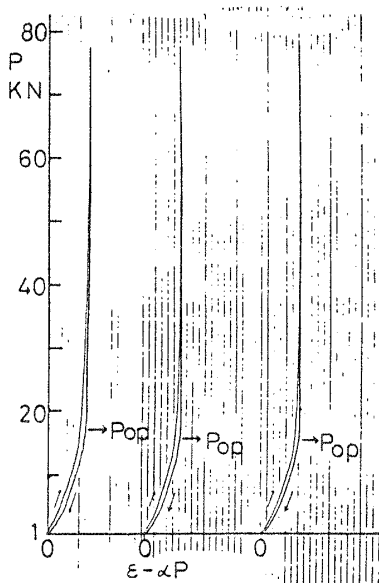


図 14 P_{op} 測定結果の一例 (表面方向)

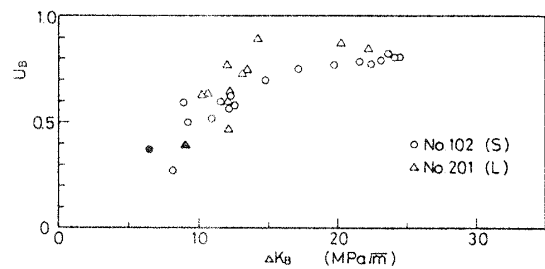


図 15 $U_B - \Delta K_B$ 関係 (表面方向)

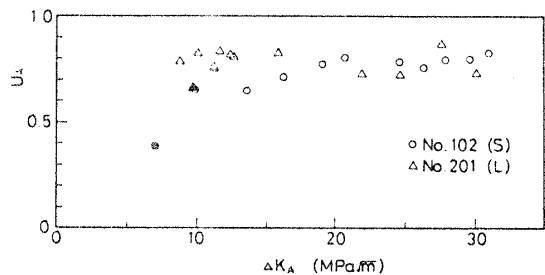
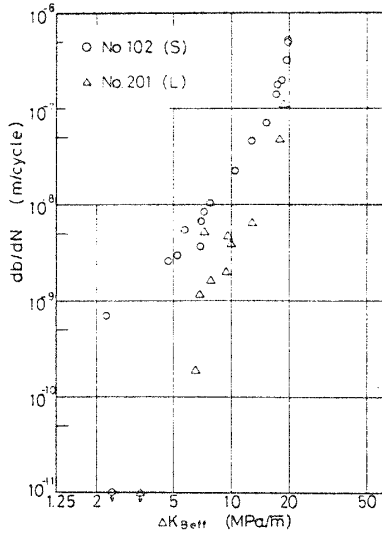
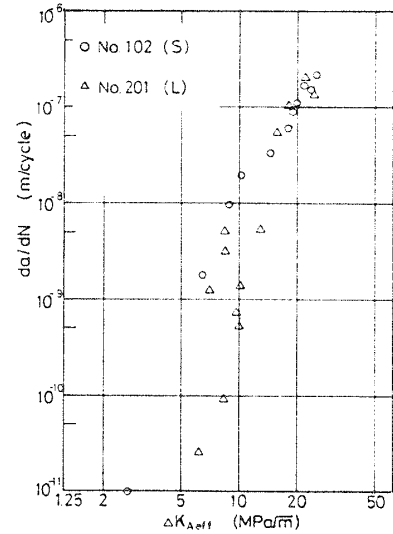


図 16 $U_A - \Delta K_A$ 関係 (深さ方向)

図 17 db/dN - ΔK_{eff} 関係 (表面方向)図 18 da/dN - ΔK_{eff} 関係 (深さ方向)

けている。この点に関して、今後の検討が必要である。

4. 結 論

結晶粒径を変えた S 45 C 鋼平板試験片について、大気中、室温において、荷重範囲 ΔP 一定および ΔP 漸減試験を行い、表面疲労き裂の進展および下限界特性を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) ΔP 一定試験の場合、表面き裂形状比はき裂進展の初期において表面切欠きの影響を受ける。その後、半円形に近い形状で進展するが、リガメントが減少すると曲げモーメントのために、き裂は偏平化する。

(2) Paris 則の成立する範囲において表面方向と深さ方向のき裂進展速度を比較すると、 ΔK の小さい範囲では深さ方向のほうが大きい、 ΔK の大きい範囲では逆転する。この傾向はき裂の偏平化の大きい結晶粒径小の場合に顕著である。また、き裂進展速度および形状比に結晶粒径が影響を及ぼす。

(3) 結晶粒径小の場合、 K_{th} は深さ方向が表面方

向よりも約 8% 大きく、結晶粒径大の場合は約 4% 大きい。これはき裂の偏平化に起因している。また、結晶粒径は特に下限界特性に顕著な影響を及ぼし、表面方向および深さ方向ともに結晶粒径大のほうが ΔK_{th} は約 40% 大きい。

文 献

- (1) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASME, Ser. D*, 85-4 (1963), 528.
- (2) Elber, W., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 486(1971), 230.
- (3) 菊川・城野・近藤, *材料*, 30-330(昭56), 276.
- (4) 小林, *機論*, 49-443, A (昭58), 771.
- (5) 笠井・小林・中沢, *機論*, No. 740-10(昭49-11), 211.
- (6) 川原・栗原, *造船学会論文集*, 137(昭50), 297.
- (7) 北川・高橋, *機論*, 45-399, A (昭54), 1289.
- (8) 星出・田中, *機論*, No. 810-11(昭56-10), 30.
- (9) 菊川・城野・田中・高谷, *材料*, 25-276(昭51), 899.
- (10) 河合, *機論*, 47-427, A (昭56), 859.
- (11) Kobayashi, A. S., *Proc. 2nd Int. Conf. Mech. Behavior of Materials*, (1976).
- (12) Raju, I. S. and Newman, J. C. Jr., *Eng. Fract. Mech.*, 11-4 (1979), 817.