

疲労き裂進展下限界応力拡大係数に及ぼす負荷 上昇速度および負荷下降速度効果

横堀 寿光*, 横堀 武夫**,
前川 一郎*, 田辺 裕治*

Effect of Stress Increasing Velocity and of Stress Decreasing
Velocity separately on Near Fatigue Threshold Stress

A. Toshimitsu YOKOBORI*, Jr., Takeo YOKOBORI**,
Ichiro MAEKAWA* and Yuji TANABE*

Abstract

Each effect of stress increasing velocity and stress decreasing velocity was separately studied as a function of load repetition frequency upon near fatigue threshold stress.

1. 緒 言

疲労き裂進展に関する下限界応力拡大係数 ΔK_{th} については、その応力比の影響、結晶粒度依存性について、実験的研究が行なわれており^{(1),(2)}、理論的にも解析されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。また繰返し速度依存性については、荷重の上昇時間 T_R と下降時間 T_D が等しい対称荷重条件について、あまり大きな依存性を示さないことが実験的に求められているが明確な形で明らかにされていない。しかしながら繰返し速度の影響を考える場合、応力上昇速度と応力下降速度とでは、疲労き裂進展下限界応力拡大係数に及ぼす影響が異なってくると考えられる。従来、この影響を分離して研究された例は、あまり知見されない。そこで、本論文では、下限界応力拡大係数の繰返し速度依存性について、それを応力上昇速度と、応力下降速度の両者の影響に分けて、実験的研究を行なった結果について報告する。

2. 供試材、試験片、実験装置

本実験に用いた供試材は、低炭素高張力鋼 WT80P である。その化学成分、機械的性質を表 1、表 2 に示す。試験片は、図 1 に示す CT 試験片を用いた。本実験に用いた試験機は、 ± 10 ton (98 KN) 電動油圧式サーボ疲労試験機である。疲労き裂長さの測定には、25 倍の倍率の 1/100 mm まで読み取り可能なバーニア尺を有する顕微鏡にて行なった。

* 東北大学工学部
** 工学院大学
日本材料強度学会誌 (1984)

表1 化学成分

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Mo	Nb	B
0.13	0.36	1.35	0.013	0.004	0.58	0.03	0.12

表2 静的機械的性質

Tensile Strength σ_b	Yield Strength σ_{ys}	Elongation ϵ (%)
89 kg/mm ² (872 MPa)	85 kg/mm ² (833 MPa)	23

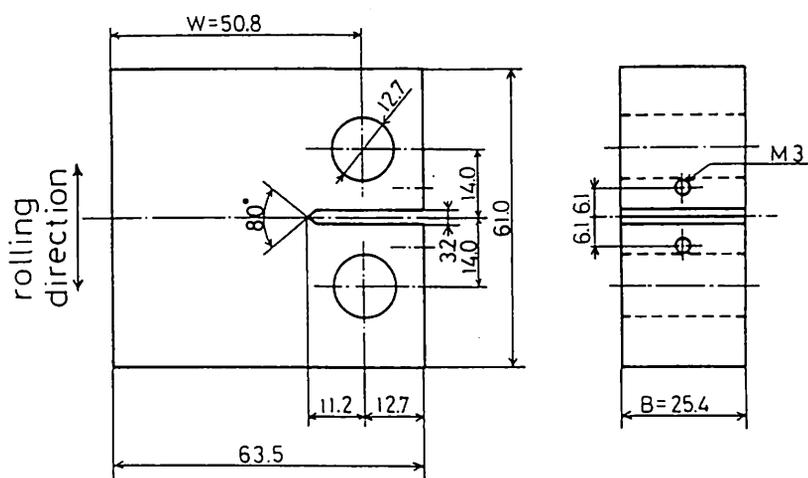


図1 CT 試験片

3. 実験方法

本実験のように、応力上昇速度、下降速度の影響、すなわち荷重波形の影響を考察する場合には、一つのシリーズの実験を通して、荷重波形と繰返し速度を一定にしておくことが必要である。そのため、通常下限応力拡大係数を求める方法として用いられている、step-decreasing法を用いることができないため、K漸増法を用いて実験を行った。

3.1 予き裂の導入

予き裂の導入は表3に示すように、正弦波応力条件にて、最大荷重 $P_{max}=29.4$ kN, 繰返し速度 5 Hz, 応力比 $R=0.1$ からき裂進展につれて、段階的に荷重を 19.6 kN まで下げた。その後、繰返し速度 10 Hz として、 P_{max} を 7.84 kN までさらに荷重を段階的に減少させて予き裂を進展させた。その後、後述する各実験条件と同じ鋸歯状応力波形荷重 ($f=10, 5, 2.5$ Hz, $R=0.2, P_{max}=7.35$ kN) で、さらに予き裂を伸長させ、全予き裂長さを $\Delta a \approx 2.3$ mm となるようにした。また予き裂導入による加工硬化の影響を取り除くために 550°C, 2 hr の歪取り焼鈍を行なった。本試験片の結晶粒大きさは、ASTM G.S 10.2 である。

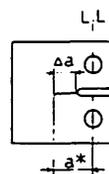
3.2 K漸増法による ΔK_{th} 試験

実験は、表4に示すように、 $P_{max}=6.86$ kN, $R=0.2$ で行なった。応力条件は、応力上昇時間 $T_R=0.03$ s 一定として、応力下降時間 T_D を $T_D=0.07, 0.17, 0.37$ s と変化させて、応力繰返し速度を 10 Hz, 5 Hz, 2.5 Hz と変化させた fast-slow 波形の場合と、その逆対称応力波形、すなわち、応力下降時間 $T_D=0.03$ s 一定として、応力上昇時間を $T_R=0.07, 0.17, 0.37$ s と変化させて、応力繰返し速度を 10 Hz, 5 Hz, 2.5 Hz と変化させた slow-fast 波形について、実験を行なった。疲労き裂伝播速度は ASTM-E647 規格に従って、 $a^*=13.74$ mm となってから求めた⁽⁷⁾。応力振大係数幅 ΔK は次式より求めた⁽⁸⁾。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} f(a^*/W) \tag{1}$$

表3 疲労き裂の導入法

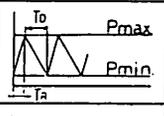
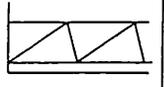
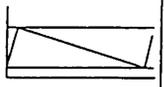
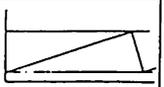
	Load	Frequency f (Hz)	Pmax (kg) (kN)	Load Ratio $R = \frac{P_{min}}{P_{max}}$	Pre-crack Extension (μm)	Crack Length a^* (mm)	SIF Range ΔK ($kg \cdot mm^{3/2}$) ($MPa \cdot m^{3/2}$)
1		5	3000 (29.4)	0.1	600	11.8	79.11 (24.57)
2			2500 (24.5)		500	12.3	66.58 (20.68)
3			2000 (19.6)		400	12.7	53.75 (16.69)
4			1500 (14.7)		300	13.0	40.63 (12.62)
5		1200 (11.76)	200		13.2	32.67 (10.15)	
6		1000 (9.8)	100		13.3	27.30 (8.48)	
7		900 (8.82)	100		13.4	24.53 (7.65)	
8		800 (7.84)	50		13.45	21.92 (6.81)	
9		10	750 (7.35)	0.2	50 *	13.5	17.08 (5.30)
		2.5					
			10				
5							
	2.5						



*Total Pre-crack Extension:
 $\Delta a=230$ (mm)

a^* : Crack Length from
Loading Line to Crack
tip.

表4 ΔK_{th} の応力上昇, 下降速度効果実験条件

	Load	f (Hz)	P _{max} (kg) (kN)	R	Rise Time T _R (sec)	Decrease Time T _D (sec)	T _R /T _D
I		10	700 (6.86)	0.2	0.03	0.07	0.43
			700 (6.86)		0.07	0.03	2.3
II		5	700 (6.86)	0.2	0.03	0.17	0.18
			700 (6.86)		0.17	0.03	5.7
III		2.5	700 (6.86)	0.2	0.03	0.37	0.08
			700 (6.86)		0.37	0.03	12.3

ここで

$$f(a^*/W) = 29.6(a^*/W)^{1/2} - 185.5(a^*/W)^{3/2} + 655.7(a^*/W)^{5/2} - 1017(a^*/W)^{7/2} + 638.9(a^*/W)^{9/2}$$

$\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min}$, B : 試験片厚さ, W : 試験片幅, a^* : き裂長さ

以上の方法で求められた da/dN と ΔK とを両対数グラフ上にプロットし, この曲線を外挿して, $da/dN = 10^{-10}$ m/cycle での ΔK を ΔK_{th} と定義して求めた。また $da/dN = 2 \times 10^{-10}$ m/cycle での ΔK 値も比較のため求めた。

4. 実験結果

4.1 疲労き裂成長曲線

図2は slow-fast 波形で, 応力下降時間 $T_D = 0.03$ s 一定に保ち, 応力上昇時間 T_R を変化させた場合の疲労き裂成長曲線である。図3は fast-slow 波形で応力上昇時間 $T_R = 0.03$ s 一定に保ち, 応力下降時間 T_D を変化させることにより, 応力繰返し速度を変化させた疲労き裂成長曲線である。

4.2 下限界応力拡大係数幅値 ΔK_{th} の T_R , T_D 依存性

図4は, slow-fast 応力波形にて, 応力下降時間 $T_D = 0.03$ s 一定に保ち, 応力上昇時間

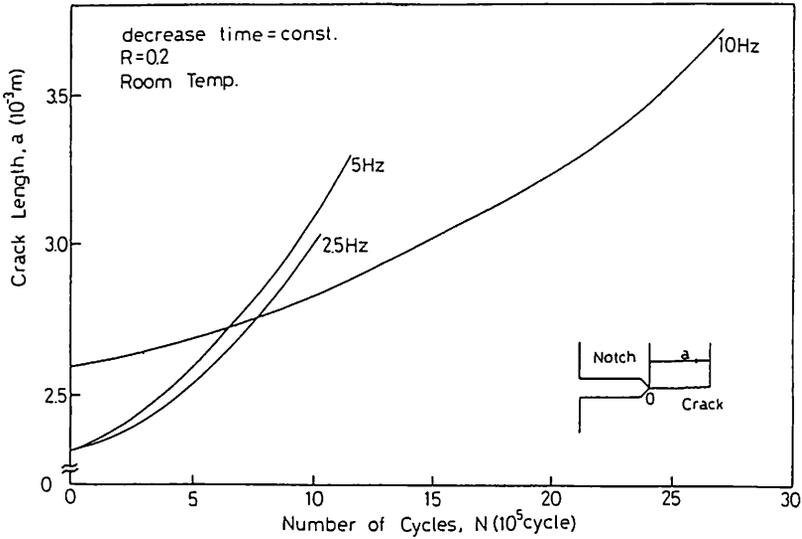


図2 slow-fast 応力波形にて T_R を変えた時の疲労き裂進展曲線 ($T_D=0.03$ s)

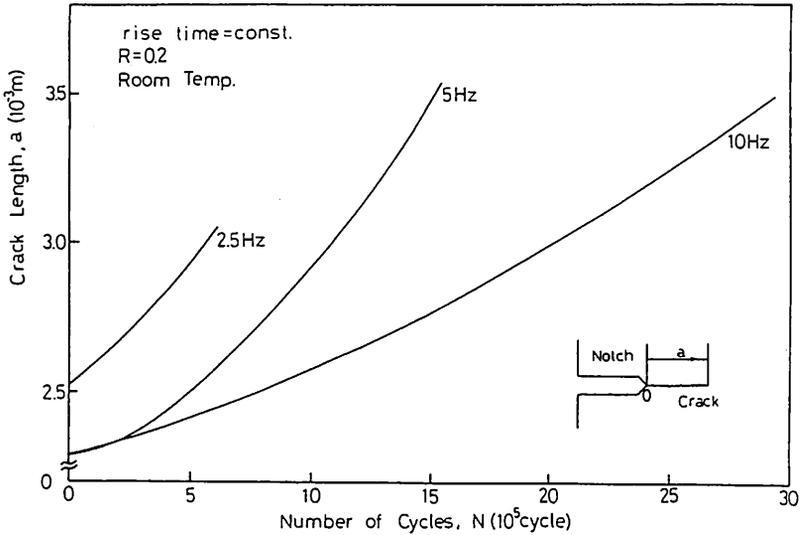


図3 fast-slow 応力波形にて T_D を変えた時の疲労き裂進展曲線 ($T_R=0.03$ s)

T_R を変えることにより、応力繰返し速度 f を 10 Hz, 5 Hz, 2.5 Hz と変化させた時の初期疲労き裂伝播速度と応力拡大係数幅 ΔK との関係を示したものである。図 5 は、fast-slow 応力波形にて、応力上昇時間 $T_R=0.03$ s 一定に保ち、応力下降時間を変えることにより、応力繰返し速度 f を 10 Hz, 5 Hz, 2.5 Hz と変化させた時の初期疲労き裂伝播速

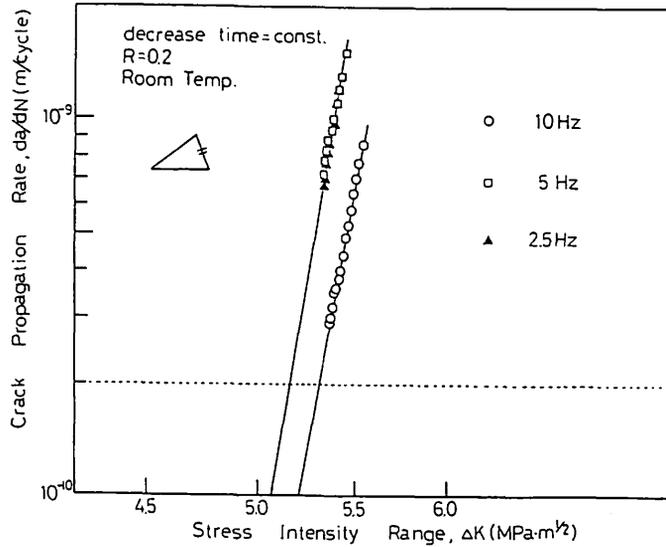


図4 slow-fast 応力波形にて T_R を変えた時の初期疲労き裂成長速度と ΔK との関係 ($T_D=0.03$ s)

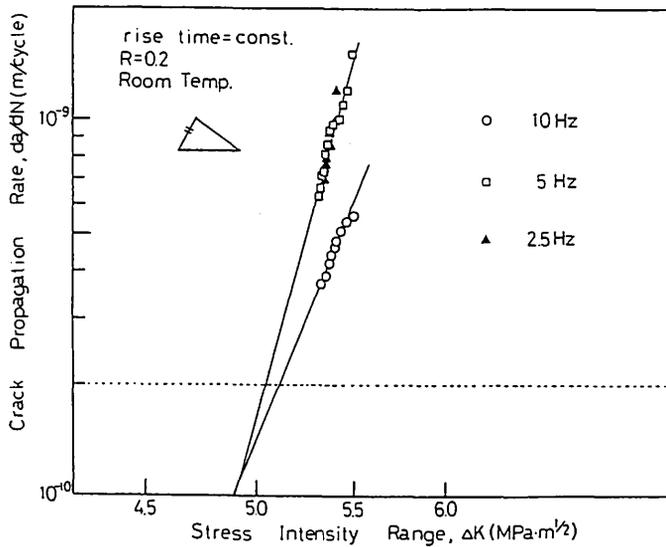


図5 fast-slow 応力波形にて T_D を変えた時の初期疲労き裂成長速度と ΔK との関係 ($T_R=0.03$ s)

度と応力拡大係数幅との関係を示したものである。図4、図5の実験結果から、疲労き裂伝播速度が $da/dN=10^{-10}$ m/cycle における応力拡大係数幅値、すなわち下限界応力拡大係数 ΔK_{th} 値をもとめてグラフに示したのが図6である。本結果より、slow-fast 応力

波形の時, $T_R/T_D=12.3, f=2.5$ Hz と, T_R をそれより短かくした $T_R/T_D=5.7, f=5$ Hz の場合は, ΔK_{th} 値はほとんど変化しなかったが, $T_R/T_D=2.3, f=10$ Hz と, T_R をかなり短かくした場合, ΔK_{th} 値は若干増加した。それに対して, fast-slow 応力波形にて, T_R を一定に保ち, T_D を変化させて, 応力繰返し速度を変化させた時の ΔK_{th} 値は $T_R/T_D=0.08\sim 0.43$ まで変化させ, f を 2.5 Hz~10 Hz まで変えてもほとんど変化しない。また同じ応力繰返し速度においては, slow-fast 応力波形の場合は, それと逆対称の fast

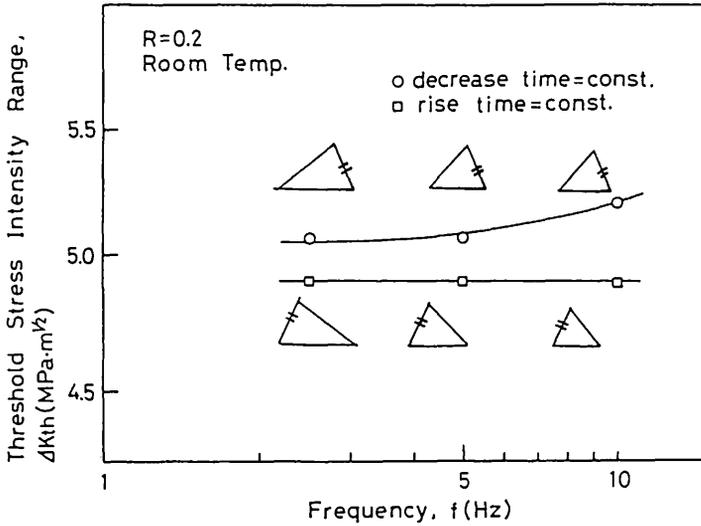


図6 下限界応力拡大係数幅値 ΔK_{th} の T_R, T_D 依存性

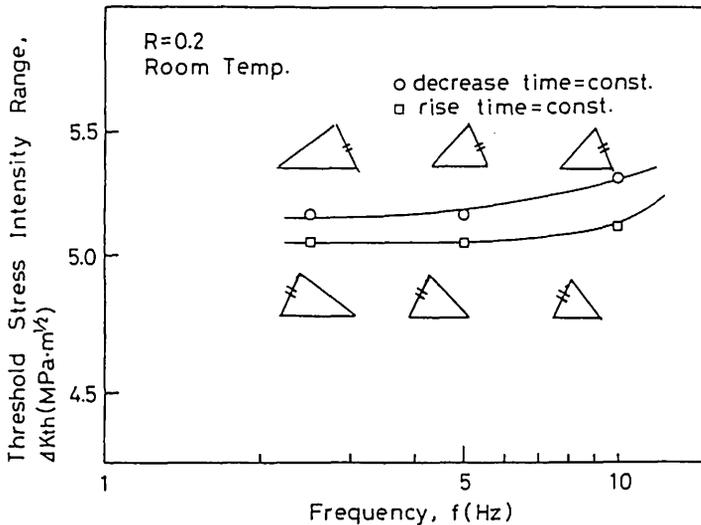


図7 $da/dN = 2 \times 10^{-10}$ m/cycle における ΔK 値の T_R, T_D 依存性

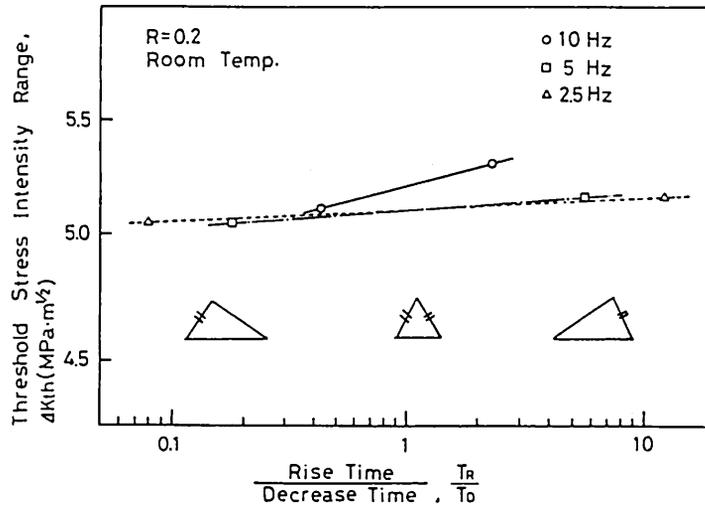


図8 同一の応力繰返し速度における, slow-fast, fast-slow 逆対称応力波形における下限界応力拡大係数幅値 ΔK_{th} の比較

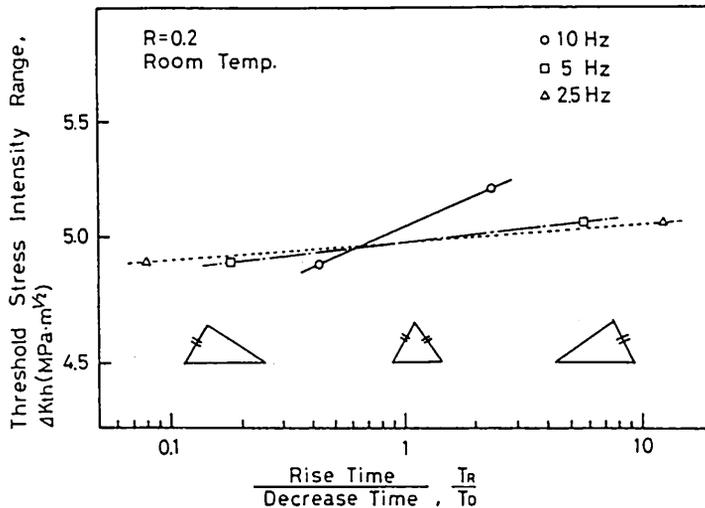


図9 同一の応力繰返し速度における, slow-fast, fast-slow 逆対称応力波形における, $da/dN = 2 \times 10^{-10}$ m/cycle における ΔK 値の比較

-slow 応力波形に比べて, すべて, ΔK_{th} 値は高くなる。図7は, 疲労き裂伝播速度 $da/dN = 2 \times 10^{-10}$ m/cycle における ΔK 値を同じようにして求めたものである。本結果より, slow-fast 応力波形にては, 図6の結果とほぼ同じ傾向を示し, $f = 10$ Hzにて, ΔK は若干増加する。また fast-slow 応力波形においても, $T_R/T_D = 0.43$, $f = 10$ Hz と対称応力波形に近づくにつれて, ΔK 値の増加率は少ないものの, slow-fast 応力波形の結果と

近づく傾向を示す。図8は、同じ応力繰返し速度 f における slow-fast 波と fast-slow 波での下限界応力拡大係数幅値 ΔK_{th} を比較したものである。本結果より、 $f=2.5$ Hz とおそい場合、 $T_R/T_D=12.3$, $T_R/T_D=0.08$ ときわめて逆対称性の大きい場合でも、slow-fast 波と fast-slow 波とで、 ΔK_{th} 値に、さほど大きな差は見られないが、繰返し速度が高くなると、たとえば $f=10$ Hz の時は、 $T_R/T_D=0.42, 2.3$ と、かなり対称波に近くなっても、slow-fast 波の方が ΔK_{th} 値は大きくなることわかる。図9は、 $da/dN=2 \times 10^{-10}$ m/cycle における ΔK 値で、図8の結果と、ほぼ同様の結果を示す。

5. 考 察

図6, 図7において、応力上昇時間 T_R , あるいは、応力下降時間 T_D のどちらか一方を変化させて、応力繰返し速度を増加させていくと、slow-fast 応力波形と fast-slow 応力波形は、本実験の荷重条件では $f=f^*=16.7$ Hz にて対称応力波形となる(図10)。さらに f を増加させると slow-fast 応力波形は fast-slow 応力波形に、fast-slow 応力波形は、slow-fast 応力波形へと逆転する(図10)。本実験では、この f^* 値まで行なわなかったが、 $f=f^*$ 近傍の $\Delta K |_{da/dN=2 \times 10^{-10} \text{m/cycle}}$ 値は、 T_R を変えた場合と T_D を変えた場合とで、ほぼ一致する傾向がみとめられる。さらに、 T_R, T_D を変えることにより、応力波形が逆転した後の傾向も、夫々の曲線を外挿することにより推測すると図10のようになり、両曲線が交叉したのちは、明らかに slow-fast 応力波形の方が fast-slow 応力波形に比べて、 ΔK_{th} 値、 $\Delta K |_{da/dN=2 \times 10^{-10} \text{m/cycle}}$ 値は大きくなることわかる。すなわち、応力繰返し速度増加に伴う ΔK_{th} 値の変化は、きわめて小さいが、若干増加の傾向を示し、またその絶対値は slow-fast 応力波形の方が fast-slow 応力波形の場合に比べて大きな値となる。また fast-slow 応力波形において、応力下降時間を変化させることによって、応

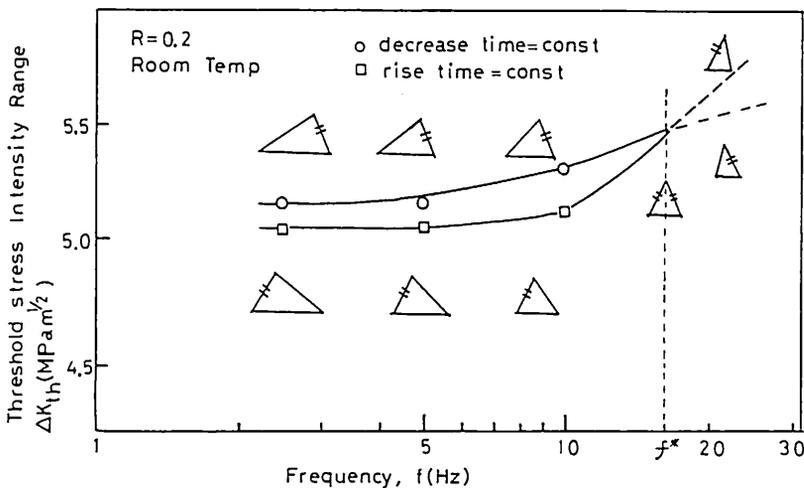


図10 下限界応力拡大係数幅値 ΔK_{th} の T_R, T_D 依存性

力繰返し速度を変化させた場合、slow-fast 応力波形において、応力上昇時間 T_R を変化させた場合に比較して対称波形に近づく直前まで、 ΔK_{th} 値は、応力繰返し速度 f の影響をうけにくい傾向を示す。また図 8 において、逆対称となる slow-fast 応力波形と fast-slow 応力波形とでの ΔK_{th} 値は、slow-fast 応力波形の方が若干大きな値となるが、 $f \leq 5$ Hz と、 f が低い場合、応力波形の逆対称性が著しくなっても、両者の間にさほど大きな差はない。以上のことから、応力繰返し速度が高く、応力波形の逆対称性が著しいほど、slow-fast 応力波形と fast-slow 応力波形とでの ΔK_{th} 値の差が著しくなると考えられる。

また本結果から、空気中の ΔK_{th} 値に及ぼす T_R , T_D 効果があまり大きくないことがわかり、 f を一定として $T_R = T_D$ を遅くすることにより、応力レベルを徐々に下げていく、step-decreasing 法が、空気中の ΔK_{th} 値を求める方法としては適当であることもわかる。

6. 結 論

疲労き裂進展下限界応力拡大係数 ΔK_{th} 値に及ぼす負荷応力波形効果を、応力下降時間 T_D を一定にして、応力上昇時間 T_R を変える場合と、それと逆対称の応力波形にて、応力上昇時間 T_R を一定にして、応力下降時間 T_D を変えることにより、実験的に調べた結論を得た。

(1) 応力繰返し速度 2.5 Hz~10 Hz にわたって、両者とも ΔK_{th} 値の著しい変化は見られなかったが、常に slow-fast 応力波が fast-slow 応力波に比べて、 ΔK_{th} 値は高くなった。

(2) また応力下降速度が速くなることによる応力繰返し速度の変化に対しては、応力上昇速度を速くする場合に比べて、 ΔK_{th} 値は、応力波形が対称波形になる直前まで、その影響をうけにくい傾向を示す。

(3) 同一応力繰返し速度における slow-fast 波と fast-slow 波とでの ΔK_{th} 値の差は、応力繰返し速度が低い時は、応力の逆対称性が大きくなってあまり変化がないが、応力繰返し速度が高く、かつ応力逆対称性が大きい時、著しくなると考えられる。

(4) 本実験結果から、空気中の ΔK_{th} 値に及ぼす T_R , T_D 効果があまり大きくないことがわかり、 f を一定として、 $T_R = T_D$ を遅くすることにより、応力レベルを徐々に下げていく、step-decreasing 法が、空気中の ΔK_{th} 値を求める方法としては、適当であることがわかる。

参 考 文 献

- (1) W.W Gerberich and N.R. Moody: ASTM STP675 (1972) 292
- (2) J. Masounave and J.P. Bailon: Script. Met 10, 165 (1976)
- (3) S. Taira, K. Tanaka and M. Hoshina: ASTM STP675 (1979) 135

- (4) A.T. Yokobori, Jr and T. Yokobori, Proc. ICF 5, Vol 3, (1981) p. 1373
- (5) A.T. Yokobori, Jr and T. Yokobori, Fatigue Thresholds vol 1, 171, 1982 EMAS LTD
Edited by Jan. Backlund, A. Blom & C.J. Beevers
- (6) 横堀寿光, 横堀武夫: 材料, 31, 344 (1982) 488-492
- (7) ASTM Designation E-399-78a, ASTM Annual Stand.
- (8) W.F. Brown Jr. and J.F. Srawley: ASTM STP410 (1969) 142