

(昭和 56 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

疲労き裂伝播開始条件に及ぼす 応力比と応力履歴の影響

正員 樋口 道之助* 正員 河野 一之**
正員 栗原 正好*** 正員 栗田 義之****

Effects of Stress Ratio and Stress History on the Threshold
for Fatigue Crack Propagation

by Michinosuke Higuchi, *Member* Kazuyuki Kawano, *Member*
Masayoshi Kurihara, *Member* Yoshiyuki Kurita, *Member*

Summary

In the present paper, authors have performed an experimental study on fatigue crack propagation at threshold level to clear the effects of stress ratio and stress history upon the threshold stress-intensity factor (K -threshold). Fatigue tests were carried out under load controlled three-point bending condition using side notch type specimens.

The K -threshold values under the different stress ratio conditions are obtained by load decreasing test method which can eliminate the influences of loading history. The results show that the K -threshold range decreases with the increasing of stress ratio. An empirical equation which represents the relation between K -threshold range and stress ratio is proposed based on the comparison among present results and other researchers' data.

The K -threshold values after crack propagation at constant stress range are obtained by load increasing test method under various stress ratio conditions. It is found that the K -threshold value after stress history increases with the increasing of stress range at stress history process. And this tendency is well characterized by using maximum stress-intensity factor at stress history process and at threshold. A simplified equation for the prediction of K -threshold value after given stress history of constant stress range is derived from the present study. Estimated K -threshold values by proposed equation show fairly good agreements not only with present results but also with other researchers' data.

記号

σ : 応力 (kgf/mm²)
 K : 応力拡大係数 (kgf/mm^{3/2})
 K_{\max} : 応力拡大係数変動幅の最大値
 K_{\min} : 応力拡大係数変動幅の最小値
 ΔK : 応力拡大係数変動幅, $K_{\max} - K_{\min}$
 K_{c1} : き裂が開口をはじめる応力拡大係数
 ΔK_0 : き裂が伝播を開始するのに必要とされる ΔK
 R : 応力比, K_{\min}/K_{\max}
 R_{th} : 応力履歴後の応力比
 a : き裂長さ (mm)
 da/dN : き裂伝播速度 (mm/cycle)

C, m : き裂伝播則の材料定数
 W : 試験片幅 (mm)
 γ, B : ΔK_{thb} 推定式の材料定数
 n : ΔK_{thb} 推定式の指数
 α : $K_{a(th)}$ 推定式の指数
 β : 応力履歴後の下限界値推定式の指数
添字
th : き裂伝播開始条件を表わす
thb : 応力履歴の影響の無い条件下で得られたき裂伝播開始条件を表わす
ol : 応力履歴時の値を表わす
a : 振幅を表わす
|_R : 応力比の条件を表わす

* 横浜国立大学工学部

** 横浜国立大学大学院工学研究科(現・新日鉄(株))

*** 日本鋼管(株)技術研究所

**** 日本鋼管(株)技術研究所(現・企画部)

1 緒言

溶接構造物の破壊や損傷のしばしば原因となる、溶込

み不足などの欠陥やなんらかのキズを起点とした疲労き裂伝播に対する構造物の安全性を評価する上で、疲労き裂の伝播開始条件に関する検討はき裂伝播寿命の算定とともに重要な課題とされる。

疲労き裂の伝播開始条件は、疲労き裂の安定成長域における伝播速度と同じく応力拡大係数を用いて表わされ、き裂伝播に対する応力拡大係数の下限界値 K_{th} (K -threshold) として与えられる。この伝播開始条件に影響を及ぼす因子としては、材料の機械的性質、組織的特性、外力負荷条件、使用環境などが指摘されており、たとえば、弾性係数・降伏強さと下限界値の関係¹⁾、低炭素鋼における下限界値近傍での破壊機構の検討²⁾、応力比の影響³⁾、大気中と水中における下限界値の比較⁴⁾、などについて報告されている。疲労き裂伝播開始に対する構造物の安全性の検討に際しては、これら影響因子に対する総合的な評価が必要とされるが、特に外力負荷条件の影響の評価は、定期点検などにより発見された欠陥の補修の必要性や操業条件の変更を検討するに際し第一に重要な判断基準となる。

この外力負荷条件の影響に関する研究として、P. Lukáš⁵⁾、C. J. Beevers⁶⁾、太田ら⁶⁾は下限界値の応力比依存性について調べ、応力比の上昇により下限界値は低下することを明らかにするとともに、試験結果に基づく下限界値と応力比との関係式を提案している。一方、R. A. Schmidt⁷⁾はこの下限界値の応力比依存性をき裂の閉開口現象面より検討し、P. Lukáš らの提案式とは異なる関係式を導き、最近では O. Vosikovskiy⁸⁾が下限界値に関する広範囲なデータを再整理し新たな関係式を提案している。また P. Lukáš ら⁹⁾は下限界値に及ぼす応力履歴の影響についても調べ、応力変動幅一定の履歴下では応力変動幅が大きいほど下限界値も上昇すること、S. W. Hopkins ら¹⁰⁾も過大応力の負荷により下限界値が上昇することを報告している。しかし、小寺沢¹¹⁾、菊川ら¹²⁾は下限界値レベルを含むプログラム荷重下でのき裂伝播試験より、高荷重の重畳により下限界値以下の応力でもき裂が進展することを確認している。以上のように応力比、応力履歴が下限界値に及ぼす影響についてこれまでに報告されている結果は必ずしも一致した傾向を示さず、試験条件によっては互いに相反する傾向も認められ、いまだ定量的な評価が確立されるまでには至っていない。

そこで本論文では、各種応力比条件下での下限界値を荷重漸減試験により求め、他研究者のデータをも含めた比較検討により下限界値の応力比依存性に関する統一的な評価式の提案を目指すとともに、応力履歴の影響の基本的特性を明らかにするための第一歩として、応力変動幅一定の履歴を受けた後の下限界値の推定について検討

を加えた結果を報告する。

2 試験方法

供試材としては、50キロ級の高張力鋼を用いた。その化学成分を Table 1 に、引張り特性を Table 2 に示す。試験片は、その長手方向を圧延方向と一致させて切り出し、試験片中央に 21 mm 深さの初期切欠きを入れ、先端部 2 mm は幅 0.2 mm のソーカット仕上げとし疲労き裂のスターターとした。Fig. 1 に試験片の形状寸法を示す。試験は、Fig. 2 に示すように下支点間距離 280 mm の 3 点曲げ片振り載荷方式により 10t 電気油圧サーボ疲労試験機を用いて実施した。き裂長さの測定には、倍率 50 倍、1/100 mm まで読み取り可能な測微望遠鏡を用い、き裂伝播経路となる試験片表面は十分に研磨したのち試験に供した。

き裂伝播開始条件に及ぼす応力比の影響に関する試験では、応力比 $R=0.1, 0.3, 0.5, 0.8$ の各条件について、応力比一定の荷重漸減試験によりき裂伝播に対する応力拡大係数の下限界値を求め、その後荷重を増加させ漸減過程で得られたき裂伝播曲線ならびに下限界値の確認を行った。荷重漸減過程におけるき裂伝播に伴われる応力

Table 1 Chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al
0.10	0.30	1.55	0.013	0.002	0.03	0.09	0.029

Table 2 Tensile properties

Y.S. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	E.I. (%)
47.1	59.6	27.5

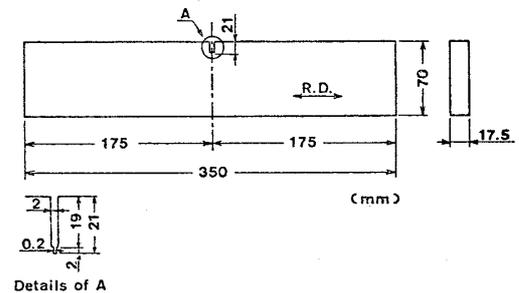


Fig. 1 Specimen geometry

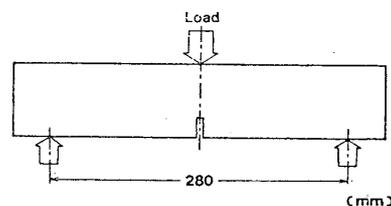


Fig. 2 Loading condition

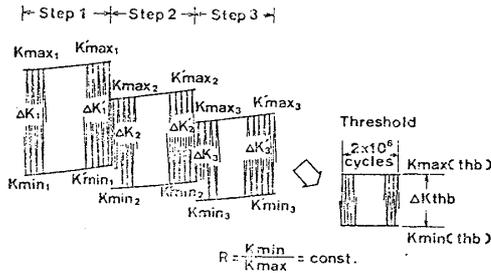


Fig. 3 Schematic representation of load decreasing process for basic K -threshold test

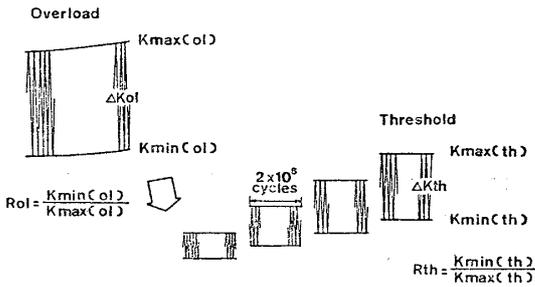


Fig. 4 Schematic representation of load increasing process for K -threshold test after stress history

拡大係数変化の模式図を Fig. 3 に示す。荷重の漸減幅は、荷重漸減直前のステップにおける荷重変動幅の 5~20% とし、下限界値に近づくにつれ漸減幅も減少させていった。また各ステップにおけるき裂の進展量は、前ステップにおいて形成された最大塑性域寸法を Rice¹³⁾ の式により評価し、その寸法より十分大きな値となるよう設定してした。下限界値の判定は、 2×10^6 回の繰返し負荷に対しき裂の進展が 1/100 mm 未満であることを条件とした。この条件に対応するき裂伝播速度は 5×10^{-9} mm/cycle であり、下限界値の判定条件として実用上十分と考えられる。なお、本試験により得られる下限界値は応力履歴の影響を受けてない材料固有の特性値であることより、疲労き裂伝播に対する応力拡大係数の基礎的な下限界値 (Basic Threshold Stress-intensity Factor) という意味で、“ K_{th} ” と記述する。

き裂伝播開始条件に及ぼす応力履歴の影響に関する試験では、初期疲労き裂導入後、一定の荷重変動幅でき裂を進展させ、その後応力履歴の影響の無い条件で得られている下限界値以下の値まで荷重を低下させ、それ以後順次荷重を漸増させてき裂の再進展が確認された時の応力拡大係数値をもって応力履歴後の下限界値 “ K_{th} ” とした。応力履歴時ならびに荷重漸増過程における応力拡大係数の変化の模式図を Fig. 4 に示す。荷重の漸増は、 2×10^6 回の負荷繰返しによってもき裂進展が確認されない場合、次のステップへ移ることとし、荷重の漸増幅は応力拡大係数変動幅の最大値で 2~3 kgf/mm^{3/2} 程度と

した。試験は、応力履歴時の応力比 (R_{01}) と履歴後の荷重漸増過程の応力比 (R_{th}) とが同一の場合と異なる場合の 2 つの応力比の組み合わせ条件について実施した。

3 き裂伝播開始条件に及ぼす応力比の影響

3.1 試験結果

き裂伝播開始条件の応力比依存性検討のため、応力比 $R=0.1, 0.3, 0.5, 0.8$ の各条件について試験を実施した。応力比 $R=0.3$ の場合における荷重漸減過程での応力拡大係数の変化とき裂伝播長さの関係を Fig. 5 に、また、き裂伝播長さとし負荷繰返し数の関係を Fig. 6 に示す。なお応力拡大係数の算定には次式を用いた¹⁴⁾。

$$K = \sigma \cdot F(a) \quad (1-1)$$

$$F(a) = \sqrt{\pi a / (1 - a/W)^3} \cdot [1.12 - 2.85(a/W) + 5.42(a/W)^2 - 5.32(a/W)^3 + 2.01(a/W)^4] \quad (1-2)$$

ここで、 σ : 応力、 a : き裂長さ、 W : 試験片幅。

Fig. 7 には各応力比条件において得られたき裂伝播速度 (da/dN) と応力拡大係数変動幅 (ΔK) の関係を示す。図中黒丸印のプロットは荷重漸減過程で得られた結果を、白丸印は荷重増加過程の結果を示すものであり、両者はほぼ良い一致を示し、漸減過程において得られた結果は荷重切り換えによる応力履歴の影響を受けていな

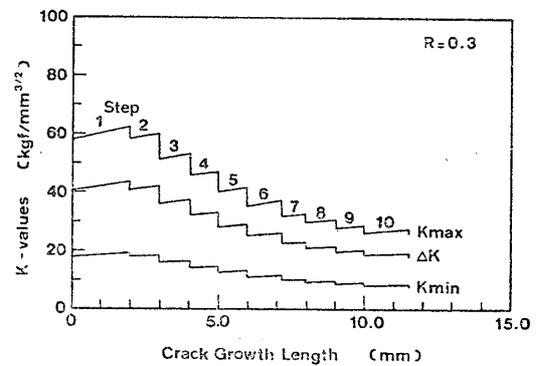


Fig. 5 Relation between stress-intensity factor and crack growth length during load decreasing process

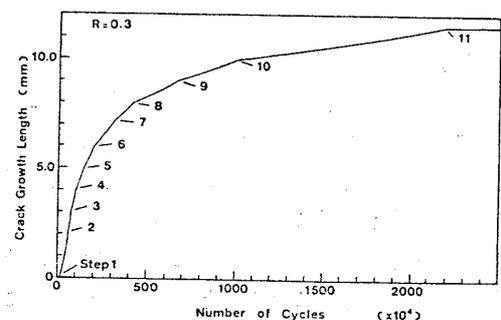


Fig. 6 Relation between crack growth length and number of loading cycles during load decreasing process

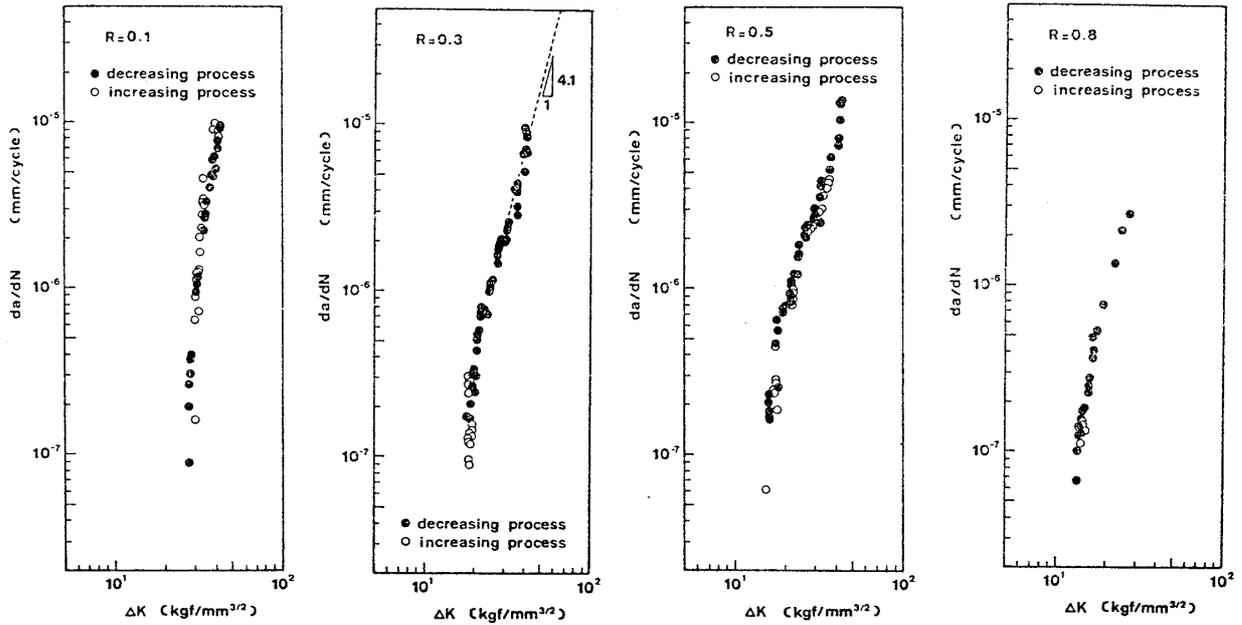


Fig.7 Relation between crack propagation rate and stress-intensity factor range

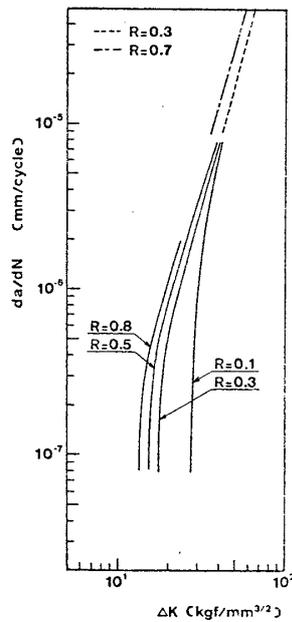


Fig.8 Effect of stress ratio on da/dN vs. ΔK curves

いことが確かめられる。

Fig.8は、各応力比条件における $da/dN-\Delta K$ 関係のプロットの代表線を、き裂の安定成長域においてこれまで得られている伝播線図 ($R=0.3, 0.7$) とともに示したもので、今回の試験で得られた伝播線図と安定成長域における伝播線図との間に良い結びつきが見られる。図より、き裂伝播速度は応力比の上昇により増加し、その傾向は低き裂伝播速度域になるほど著しく現われること、またき裂伝播開始に対する応力拡大係数変動幅の下限界値は高応力比になるほど低下する傾向が認められる。Table 3 に本試験に用いた材料について得られているき

Table 3 Material constants of da/dN vs. ΔK curves

$da/dN=C(\Delta K)^m$		
Stress Ratio	m	C
0.3	4.1	2.29×10^{-12}
0.7	3.6	2.20×10^{-11}

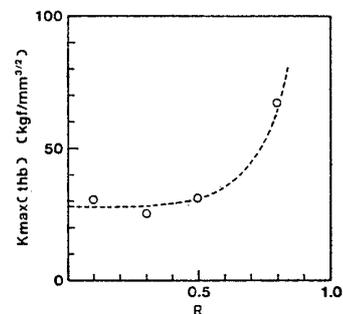
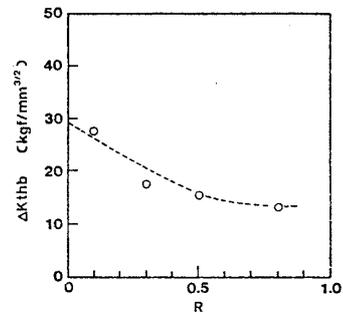


Fig.9 Relation between basic K -threshold and stress ratio

裂の安定成長域における $da/dN-\Delta K$ 関係式の定数を示す。

本試験で得られたき裂伝播に対する応力拡大係数の下

限界値と応力比との関係を、下限値の変動幅 (ΔK_{thb}) と下限値の最大値 ($K_{max(thb)}$) をそれぞれパラメータとして Fig.9 に示す。 ΔK_{thb} は低応力比領域では応力比の増加に伴い減少し、高応力比側で一定の値へと近づく傾向を示し、一方 $K_{max(thb)}$ は低応力比領域ではほぼ一定の値をとり、高応力比側で急激に上昇する傾向を示している。

3.2 考察

き裂伝播に対する応力拡大係数変動幅の基礎的下限界値 (ΔK_{thb}) と応力比 (R) の関係式として太田ら⁶⁾は次式を提案している。

$$\Delta K_{thb}/2 = (1-R)^{\gamma} |\Delta K_{thb}/2|_{R=0} \quad (2)$$

ここで、 γ : 材料定数、 $|\Delta K_{thb}/2|_{R=0}$: $R=0$ における $\Delta K_{thb}/2$ 。また、Lukáš ら³⁾の提案式も応力履歴の影響の無い場合に (2) 式と同様の関係式となる。一方 Vosi-kovsky⁸⁾は、広範囲なデータを再整理し、次の単純な関係式により応力比の影響が表現可能であることを報告している。

$$\Delta K_{thb} = |\Delta K_{thb}|_{R=0} - B \cdot R \quad (3)$$

ここで、 B : 材料定数。Fig.10, Fig.11 は (2), (3) 式で表わされる関係を他研究者のデータ^{3),5),6),7),10)}をも含めて示したものである。(2), (3) 式はいずれも応力

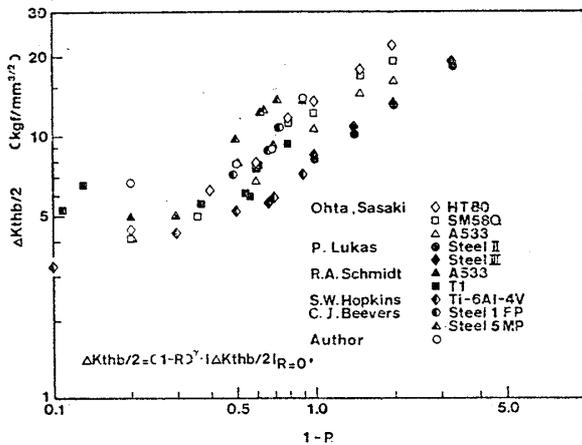


Fig.10 Relation between basic K -threshold amplitude and stress ratio on logarithm scale

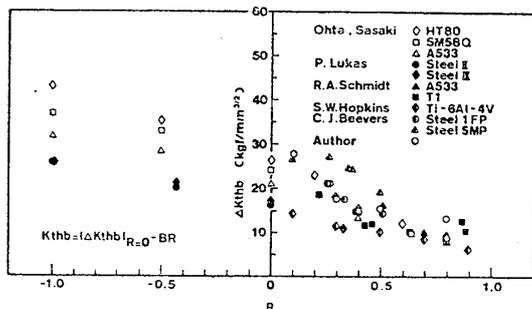


Fig.11 Relation between basic K -threshold range and stress ratio on normal scale

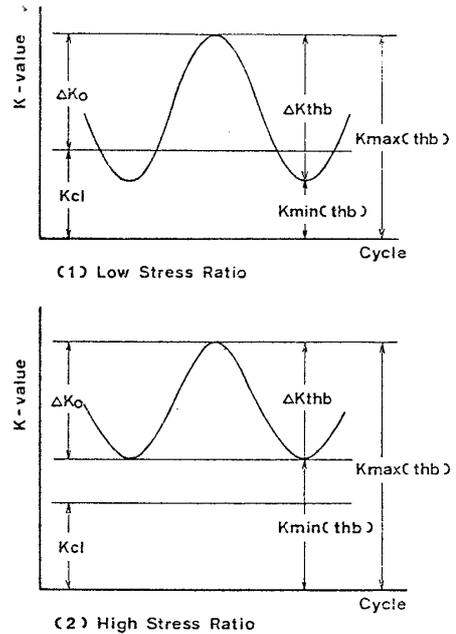


Fig.12 Threshold condition for crack propagation proposed by Schmidt et al.⁷⁾

比の上昇により下限値 ΔK_{thb} が低下することを意味する関係式である。

一方 Schmidt ら⁷⁾は、応力比の下限界値に及ぼす影響が低応力比側と高応力比側とで異なることに着目し、き裂閉開口現象に基づく下限値の解析モデルを提案している。Schmidtらは、き裂が伝播を開始するためには、き裂が開口をはじめる応力拡大係数 (K_{cl}) とき裂が伝播するために必要とされる応力拡大係数変動幅 (ΔK_0) の2つの条件が満たされることが必要であると示し、Fig.12 に示すモデルにより下限値と応力比の関係を次のように説明している。

(i) 低応力比領域

$K_{min} \leq K_{cl}$ の場合にはき裂が閉口している範囲が存在するため、き裂伝播に対し有効な応力拡大係数変動幅は $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl}$ となり、 $\Delta K_{eff} \geq \Delta K_0$ でき裂は伝播を開始する。したがってこの場合、下限値 $K_{max(thb)}$ は一定となり、

$$K_{max(thb)} = K_{cl} + \Delta K_0 = \text{const.} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \Delta K_{thb} &= K_{max(thb)}(1-R) = (K_{cl} + \Delta K_0)(1-R) \\ &= |\Delta K_{thb}|_{R=0}(1-R) \end{aligned} \quad (4-2)$$

(ii) 高応力比領域

$K_{min} > K_{cl}$ の場合にはき裂は常に開口しているため、 $\Delta K \geq \Delta K_0$ でき裂は伝播を開始する。したがってこの場合、下限値 ΔK_{thb} は一定となり、

$$\Delta K_{thb} = \Delta K_0 = \text{const.} \quad (5-1)$$

$$K_{max(thb)} = \Delta K_{thb}/(1-R) = \Delta K_0/(1-R) \quad (5-2)$$

Fig.10 の関係を見ると各材質に対応するプロットは、太田らの提案式 (2) 式で与えられる直線傾向に低応力

比範囲では良い一致が認められるが、高応力比側では直線関係から外れ、Schmidt らの提案する ΔK_{thb} 一定の傾向を示すものもある。このことは (2) 式を用いて下限界値を推定した場合、推定値は高応力比側において実際の値よりも小さく求まり過大安全側の評価となることを意味する。Vosikovsky の提案式 (3) 式の関係を示す Fig. 11 においても同様の傾向を指摘でき、さらに各材質のプロットを応力比が正と負の範囲に分けそれぞれに対し直線のあてはめを試みると、正の範囲のプロットを代表する直線の勾配の方が負の範囲の代表線の勾配より大きいことが明らかとなる。この代表線の勾配の違いは、応力比の正負による圧縮応力領域の存在の有無に起因するものと考えられるが、この点からも全範囲にわたり一定の勾配の直線により代表させる Vosikovsky の提案式は必ずしも妥当とは言えない。

一方、Schmidt らの提案式も応力比が正の場合には有効であるが、応力比が負の範囲に対する考慮はされておらず、提案式を負の範囲に対してそのまま適用すると推定値が 30% 近く実測値を上まわることもあり非安全側の評価となる。

そこでより実用的かつ広範囲のデータに対して良い適合を示す下限界値と応力比の関係式として、低応力比範囲では太田らの提案式に一致し、高応力比側では Schmidt らの提案式と一致するような式の構成を試みる。

いま、直線 $g(x)$, $h(x)$ を漸近線とする曲線 $y(x)$ の式は次式で与えられる。

$$y^n(x) = g^n(x) + h^n(x) \quad (6)$$

(6) 式中の指数 n は曲線の直線への漸近度合を表わすパラメータで n が大きいほどより漸近することとなる。応力拡大係数の下限界値の変動幅 ΔK_{thb} が (2), (5-1) 式を漸近線とする曲線で表現可能とすると、(6) 式より ΔK_{thb} は次式で表現される。

$$\Delta K_{thb} = [\Delta K_0^n + (1-R)^n \cdot |\Delta K_{thb}|_{R=0}^n]^{1/n} \quad (7)$$

ここで、 ΔK_0 は応力比の十分高い領域での ΔK_{thb} に等しく $\Delta K_0 = |\Delta K_{thb}|_{R=1}$ であることを考慮すると (7) 式は次式となる。

$$\Delta K_{thb} = [|\Delta K_{thb}|_{R=1}^n + (1-R)^n \cdot |\Delta K_{thb}|_{R=0}^n]^{1/n} \quad (8)$$

Table 4 Correlation coefficients between estimated and measured basic K-threshold

		Correlation Coefficient
Ohta's Eq.		0.965
Schmidt's Eq.		0.975
Proposed Eq.	n = 5	0.983
	6	0.984
	7	0.984

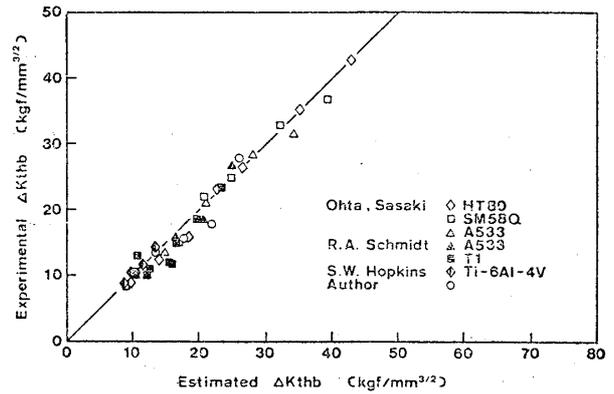


Fig. 13 Comparison between experimental $\Delta K_{(thb)}$ and estimated $\Delta K_{(thb)}$ by proposed Eq. (9)

太田らの提案式において指数 γ は材料定数とされているが、フェライト系の鋼材では $\gamma=0.7$ の一定値として下限界値の推定を行っても大きな誤差を生じないことが報告されている⁶⁾。Table 4 に下限界値推定精度の比較として、今回の試験結果ならびに他研究者のデータ^{6),7),10)}をもとに、太田らの提案式 (2) 式を用い $\gamma=0.7$ として下限界値を計算した場合、Schmidt らの提案式 (4-2), (5-1) 式を用いて計算した場合、今回提案した (8) 式を用い $\gamma=0.7$, $n=5,6,7$ のケースについて計算した場合のそれぞれにおける下限界値の推定値と実測値の相関係数を示す。計算に用いたデータは、引張り強さ T.S.: 約 60~100 kgf/mm² の材料について、応力比 $R: -1.0 \sim 8.9$ の条件下で得られたものであり、 $|\Delta K_{thb}|_{R=0}$, $|\Delta K_{thb}|_{R=1}$ の値が与えられてない場合にはそれぞれの応力比条件に最も近い値を用いて計算を行った。表より、(8) 式による推定値が実測値と最も良い相関を示し、 $n=6$ 程度まで漸近させれば相関係数は一定となることが認められる。(8) 式において $\gamma=0.7$, $n=6$ とした次式を用いて計算した下限界値の推定値と実測値との比較を Fig. 13 に示す。

$$\Delta K_{thb} = [|\Delta K_{thb}|_{R=1}^6 + (1-R)^{4.2} \cdot |\Delta K_{thb}|_{R=0}^6]^{1/6} \quad (9)$$

下限界値の大きい低応力比範囲から下限界値の小さい高応力比範囲を通じて推定値と実測値の間に良い一致が認められる。

4 き裂伝播開始条件に及ぼす応力履歴の影響

4.1 試験結果

応力変動幅一定の応力履歴を受けた後のき裂伝播開始下限界値を、下限界値の応力拡大係数の変動幅 (ΔK_{th}) と応力履歴時における応力拡大係数の変動幅 (ΔK_{ol}) の関係で Fig. 14 に示す。なお、応力履歴時の応力拡大係数の値はき裂の進展とともに増加することより、試験結

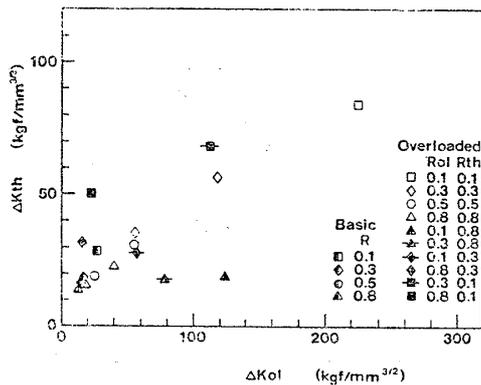


Fig. 14 Relation between K -threshold range after constant stress history and K range at stress history

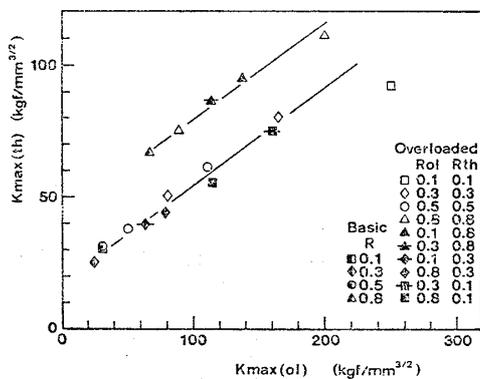


Fig. 15 Relation between maximum K -threshold value after constant stress history and maximum K -value at stress history

果の整理ならびに考察に際しては、応力履歴最終時の値をもって履歴時の応力拡大係数値とした。図中、半塗りのプロットは、前節において荷重漸減法により求めた応力履歴の影響の無い基礎的下限界値の変動幅 (ΔK_{thb}) であり、 $\Delta K_{th} = \Delta K_{oi}$ の位置にプロットした。いずれの応力比条件においても、応力履歴後の下限界値は基礎的下限界値より高い値を示し、また応力履歴時の応力比 (R_{oi}) と履歴後荷重漸増過程における応力比 (R_{th}) とが同じ場合には、 ΔK_{oi} が大きいほど下限界値 ΔK_{th} も高くなる傾向を示している。しかし図中黒塗りのプロットで示される $R_{oi} \approx R_{th}$ の場合には、 ΔK_{oi} と ΔK_{th} の間に定性的傾向はつかめず、 ΔK_{oi} が大きいにもかかわらず同一の履歴後の応力比 R_{th} 条件で ΔK_{th} が小さいものもある。

Fig. 15 には応力履歴のパラメータとして履歴時の応力拡大係数変動幅の最大値 ($K_{max(oi)}$) をとり、履歴後の下限界値の変動幅の最大値 ($K_{max(th)}$) との関係プロットした。データプロットは履歴後の応力比条件が高応力比である $R_{th} = 0.8$ の結果と、 $R_{th} = 0.1 \sim 0.5$ で得られた結果の 2 グループに分かれ、それぞれのグループ

では応力履歴時の応力比の値によらず $K_{max(oi)}$ が大きいほど下限界値 $K_{max(th)}$ も高くなる傾向が認められる。このことより、応力履歴後のき裂伝播開始条件を検討するに際しては、応力拡大係数の変動幅よりもその最大値により検討すべきであることが推察される。

4.2 考察

応力変動幅一定の応力履歴後のき裂伝播開始に対する応力拡大係数の下限界値は、応力比一定の条件下では次式で与えられることを Lukáš ら^{3),9)}は試験結果より導いている。

$$K_{a(th)} = K_a^2 \cdot K_{a(thb)}^{1-\alpha} \quad (10)$$

ここで、 K_a : 応力履歴時の応力拡大係数の振幅、 $K_{a(th)}$: 履歴後の下限界値の振幅、 $K_{a(thb)}$: 履歴の影響の無い下限界値の振幅、 α : 材料の強度に依存する定数で 0.36~0.64 (T.S. = 33~90 kgf/mm²) の値をとる。

本考察においてもまず第一に今回の試験結果に対する (10) 式の適合性を検討した。その結果を Fig. 16 に示す。(10) 式は次式の関係に変形可能なことより、(11-2) 式の左辺を縦軸に右辺を横軸にとった。

$$K_{a(th)}/K_{a(thb)} = [K_a/K_{a(thb)}]^\alpha \quad (11-1)$$

$$\Delta K_{th}/\Delta K_{thb}|_{R_{th}} = [\Delta K_{oi}/\Delta K_{thb}|_{R_{th}}]^\alpha \quad (11-2)$$

ここで、 $|\Delta K_{thb}|_{R_{th}}$ は、応力履歴後の応力比 R_{th} に対応する基礎的下限界値 ΔK_{thb} を表わす。Fig. 16 より、応力履歴時の応力比 (R_{oi}) と履歴後の応力比 (R_{th}) とが等しい条件については、 $\Delta K_{th}/\Delta K_{thb}|_{R_{th}}$ と $\Delta K_{oi}/|\Delta K_{thb}|_{R_{th}}$ の間に図中点線で示す (11-2) 式の直線関係が認められるが、 $R_{oi} \approx R_{th}$ のデータプロットはこの相関関係から外れており Lukáš らの提案式の適合性は良くない。

そこで、試験結果の整理の際、応力履歴時の応力拡大係数変動幅の最大値 ($K_{max(oi)}$) と履歴後の下限界値の最大値 ($K_{max(th)}$) の間に良い相関が認められたことに基づき、 $K_{max(th)}/K_{max(thb)}|_{R_{th}}$ と $K_{max(oi)}/K_{max(thb)}|_{R_{th}}$ による整理を試みた。その結果を Fig. 17 に示す。両者の間には良い直線関係が認められ、次式の関係が成立す

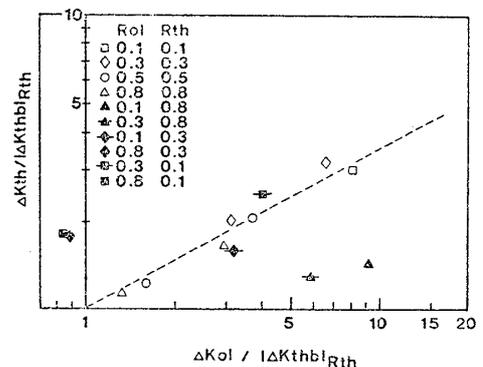


Fig. 16 Relation between $\Delta K_{th}/\Delta K_{thb}|_{R_{th}}$ and $\Delta K_{oi}/\Delta K_{thb}|_{R_{th}}$

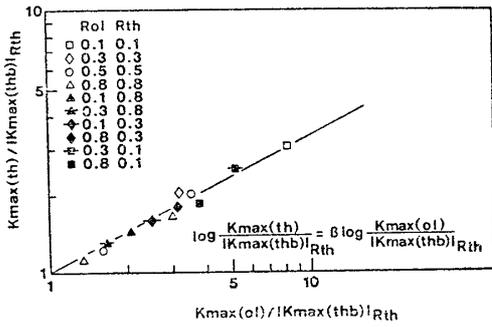


Fig. 17 Relation between $K_{max(th)}/|K_{max(thb)}|_{R_{th}}$ and $K_{max(ol)}/|K_{max(thb)}|_{R_{th}}$

る。

$$K_{max(th)}/|K_{max(thb)}|_{R_{th}} = [K_{max(ol)}/|K_{max(thb)}|_{R_{th}}]^\beta \quad (12-1)$$

$$K_{max(th)} = K_{max(ol)}^\beta \cdot |K_{max(thb)}|_{R_{th}}^{1-\beta} \quad (12-2)$$

指数 β の値は応力比条件によらず Table 5 に示すようにほぼ $\beta=0.5$ 程度と求められた。

Fig. 18 に $\beta=0.5$ として (12-2) 式により応力履歴後の下限界値 $K_{max(th)}$ を計算した結果と試験結果との比較を示す。両者の間にはほぼ良い一致が見られ、実用的な $K_{max(th)}$ の推定には $\beta=0.5$ としても十分であることが認められる。

(12-2) 式は、応力履歴の影響の無い場合には $K_{max(th)} = K_{max(thb)}$ となり、また応力拡大係数の変動幅で表示すると次式となる。

$$\Delta K_{th}/(1-R_{th}) = [\Delta K_{ol}/(1-R_{ol})]^\beta \times [|\Delta K_{thb}|_{R_{th}}/(1-R_{th})]^{1-\beta} \quad (13)$$

さらに上式は $R_{ol}=R_{th}$ の場合には、

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{ol}^\beta \cdot |\Delta K_{thb}|_{R_{th}}^{1-\beta} : R_{ol}=R_{th} \quad (14)$$

となり、Lukáš らの提案した (10) 式に一致する。

一定応力変動幅の応力履歴後の下限界値の推定式として今回の試験結果をもとに提案した (12-2) 式の他データとの適合性を検討するために、応力変動幅一定の条件でこれまでに得られている他研究者の下限界値データ³⁾、

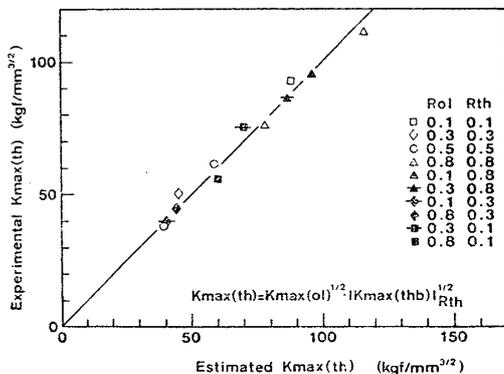


Fig. 18 Comparison between experimental $K_{max(th)}$ and estimated $K_{max(th)}$ for data by authors

Table 5 Relation between stress ratio condition and exponent β

$K_{max(th)} = K_{max(ol)}^\beta \cdot K_{max(thb)} _{R_{th}}^{1-\beta}$	
Referred Data	β
$R_{ol}=R_{th}$ test data	0.531
$R_{ol} \neq R_{th}$ test data	0.508
all test data	0.521

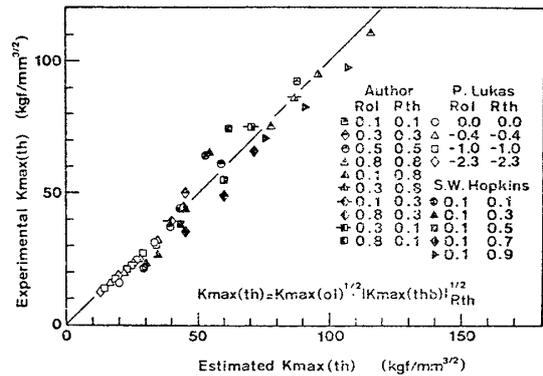


Fig. 19 Comparison between experimental $K_{max(th)}$ and estimated $K_{max(th)}$ for data by authors and other researchers

も含まれた計算結果と試験結果との比較を Fig. 19 に示す。計算に際しては $\beta=0.5$ とした次式を用いた。

$$K_{max(th)} = [K_{max(ol)} \cdot |K_{max(thb)}|_{R_{th}}]^{1/2} \quad (15)$$

筆者らのデータは引張り強さ T. S. $\approx 60 \text{ kgf/mm}^2$ の高張力鋼、Lukáš らのデータは T. S. $\approx 45 \sim 75 \text{ kgf/mm}^2$ の炭素鋼、Hopkins らのデータは T. S. $\approx 100 \text{ kgf/mm}^2$ のチタン合金について得られた下限界値の結果である。計算結果は試験結果と良い一致を示し、応力比条件、材料の引張り強さによらず (15) 式の成立することが確認される。なお、Fig. 19 における相関係数は $r=0.981$ であった。

ここで、(15) 式の $|K_{max(thb)}|_{R_{th}}$ に (9) 式の関係を入ると応力変動幅の一定の応力履歴後の下限界値の推定式として次式の関係が得られる。

$$K_{max(th)} = K_{max(ol)}^{1/2} \cdot [|\Delta K_{thb}|_{R_{th}}^6 + (1-R_{th})^{4.2} \times |\Delta K_{thb}|_{R_{th}=0}^6]^{1/6} / (1-R_{th})^{1/2} \quad (16)$$

5 結 論

溶接構造物の疲労き裂伝播に対する安全性を評価する上で重要な課題とされる疲労き裂伝播開始条件に関し、応力比、応力履歴の及ぼす影響について検討を加えた結果、以下の結論を得た。

(1) 疲労き裂伝播開始条件となる応力拡大係数の下限界値は応力比の影響を受け、応力拡大係数変動幅を用いて整理した場合、低応力比領域では応力比が大きくな

るにしたがい下限界値は低下するが、高応力比側では一定の値に近づく傾向を示す。

(2) き裂伝播開始に対する応力拡大係数の下限界値と応力比との関係式として、本試験結果ならびに他研究者の提案式の比較検討に基づく次式を提案し、 $n=6$, $r=0.7$ とした場合多くのデータと良い適合を示すことを確認した。

$$\Delta K_{\text{thb}} = [\Delta K_{\text{thb}}|_{R=1}^2 + (1-R)^{2n} \cdot \Delta K_{\text{thb}}|_{R=0}^2]^{1/2n}$$

(3) 応力変動幅一定の応力履歴負荷後のき裂伝播開始下限界値は、応力履歴の影響の無い条件で得られた下限界値より上昇し、応力拡大係数変動幅の最大値を用いて整理した場合、履歴時の最大値が大きいかほど下限界値の最大値も大きくなる傾向を示す。

(4) 応力履歴後の下限界値の推定式として応力比条件によらず有効な次式を提案した。

$$K_{\text{max(th)}} = K_{\text{max(ol)}}^\beta \cdot [K_{\text{max(th)}}]_{R=0}^{1-\beta}$$

ここで指数 β の値は、他研究者のデータをも含めた検討により、 $\beta=0.5$ となることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 北川, 松本: 金属材料における面外曲げ疲労き裂成長の下限界応力拡大係数, 日本機械学会論文集, 43巻, 371号, (昭52-7), p.2421.
- 2) C. J. Beevers: Micromechanisms of Fatigue Crack Growth at Low Stress Intensities, Metal Science, August-September (1980), p. 418.
- 3) M. Klesnil, P. Lukáš: Effect of Stress Cycle Asymmetry on Fatigue Crack Growth, Mater. Sci. Eng., 9 (1972), p.231.
- 4) P. C. Paris, R. J. Bucci, C. D. Little: Fatigue Crack Propagation of D6 ac Steel in Air and Distilled Water, ASTM STP 513, (1972), p. 196.
- 5) R. J. Cooke, C. J. Beevers: The Effect of Load Ratio on the Threshold Stresses for Fatigue Crack Growth in Medium Carbon Steels, Eng. Fract. Mech., Vol.5 (1973), p.1061.
- 6) 太田, 佐々木, 小菅: 疲労き裂伝播速度に及ぼす平均応力の影響, 日本機械学会論文集, 43巻373号 (昭52-9), p.3179.
- 7) R. A. Schmidt, P. C. Paris: Threshold for Fatigue Crack Propagation and the Effects of Load Ratio and Frequency, ASTM STP 536, (1973), p.79.
- 8) O. Vosikovskiy: The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in Steels, Eng. Fract. Mech., Vol.11 (1979), p.595.
- 9) M. Klesnil, P. Lukáš: Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilization of Fatigue Cracks, Eng. Fract. Mech., Vol. 4 (1972), p.72.
- 10) S. W. Hopkins, C. A. Rau, G. R. Leverant, A. Yuen: Effect of Various Programmed Overloads on the Threshold for High-Frequency Fatigue Crack Growth, ASTM STP 595, (1976), p.125.
- 11) 小寺沢: 過大過小応力下の疲労き裂伝ばと設計基準の考え方について, 材料, 27-300 (昭53-2), p.871.
- 12) 菊川, 城野: 低K領域における2段ならびに3段多重変動荷重下の疲労き裂進展と開閉挙動, 材料, 28-313 (昭54-10), p.946.
- 13) J. R. Rice: Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue, ASTM STP 415, (1966), p.247.
- 14) G. C. Sih: Handbook of Stress-Intensity Factors, Lehigh University, (1973).