微小き裂材の極高応力比下における $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ の急減†

近藤 良之* 栄 中*
久保田 祐信* 工藤 隆夫**

Large Reduction in the $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ of Short Crack at Extremely High Stress Ratio

by

Yoshiyuki KONDO*, Chu SAKAE*, Masanobu KUBOTA* and Takao KUDOU**

It has been recognized that the threshold stress intensity factor ΔK_{th} of short crack is dependent on many factors. Dependencies of ΔK_{th} on material hardness, mean stress and crack size could be successfully evaluated on the basis of crack closure phenomenon. As a consequence, the $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ was almost constant for a wide range of conditions. In this study, however, extraordinary decrease in the $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ was found to occur in some limited condition. It was shown that the reduction was caused by the conjunction of three conditions, namely, high stress ratio (R) larger than 0.8, short crack and hard material whose Vickers hardness was higher than 300. The lowest value of $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ obtained in this study was $0.7\text{MPam}^{1/2}$ for steel. The fracture surface morphology was trans-granular and no indication of environmental effect was found. The fatigue crack propagation rate near the threshold condition could be uniquely evaluated even in such a short crack regime using the effective stress intensity factor with the following modification $\{\Delta K_{\text{eff}} - (\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th},a}\}$. Here, $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th},a}$ is the $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ for crack length a . This evaluation could be applicable in short crack regime as short as 0.04mm. ΔK_{eff} still plays a role as the governing parameter for fatigue crack propagation of short crack.

Key words : Fatigue, Short crack, Small defect, Fatigue limit, Hardness, Crack closure, Threshold stress intensity factor

1 緒言

疲労き裂の進展下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は、き裂を有する機械構造物の疲労に対する安全性を評価する際の重要な破壊力学的パラメータとして使用されている。 ΔK_{th} は応力比をはじめ各種の因子に影響されるが、これらの影響のほとんどはき裂閉口現象¹⁾によって説明されてきている。き裂閉口現象を考慮した下限界有効応力拡大係数範囲 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ は応力比やき裂寸法にあまり影響されない一定値であり、 ΔK_{th} の最小値と一致すると認識されてきた。この知見に基づきき裂閉口を起こさないように K_{max} を高い値に保ちつつ ΔK 漸減試験を行って高応力比領域で最小の ΔK_{th} を求めるいわゆるワーストケース²⁾ の疲労き裂進展試験法が提案されている。鉄鋼材料の ΔK_{th} の最小値としてはおおそ $2.2 \sim 4\text{MPam}^{1/2}$ 程度の値が得られている。

一方、微小き裂材の ΔK_{th} には長いき裂の場合と異なり、応力比に加えて材料硬さとき裂寸法が影響することが知られている。³⁾ 前報^{4), 5)} では著者らも微小欠陥材の疲労限度に及ぼす材料硬さと平均応力の効果の原因について検討を行った。その結果、Fig. 1 に示すように広い範囲にわたって $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ はほぼ一定で、かつ長いき裂のデータと同じであり、 ΔK_{th} に及ぼす材料硬さ、き裂寸法、応力比の影響はおおむねき裂閉口現象によって説明できる

ことが示された。しかし、同図中で応力比が 0.8 以上の極めて高い応力比条件において、硬さの高い SCM435 (■印) の $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ が著しく低下することが見いだされた。これは $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ の数値としては $1.2\text{MPam}^{1/2}$ であり、著者の経験では、長いき裂の場合にはき裂閉口を起こさないように配慮した試験を行っても、得られない低い値である。

前報^{4), 5)} では材料硬さと平均応力の効果を調べるために欠陥深さは $170\mu\text{m}$ 一定として検討を行ったが、この事象には材料硬さと欠陥寸法が影響すると推察されたため、本報では材料硬さの範囲を広げるとともに、欠陥寸法の影響について検討を行った。

Fig. 1. Effect of stress ratio on $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ of short crack.⁵⁾

† 原稿受理 平成 15 年 8 月 13 日 Received Aug. 13, 2003

* 正会員 九州大学大学院工学研究院知能機械システム部門 〒812-8581 福岡市東区箱崎, Dept. of Intelligent Machinery and Systems, Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

** 九州大学大学院工学府 〒812-8581 福岡市東区箱崎, Graduate School, Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

2 試験片および試験方法

2・1 供試材および試験片

供試材は低合金鋼 SNCM439 焼入れ・焼もどし材である。前報^{4),5)}の S25C 焼きならし材, S45C および SCM435 の焼入れ・焼もどし材をあわせて機械的性質を Table I に示す。Fig. 2 (a) に試験片形状を示す。試験片には Fig. 2 (b) に示すように板厚全体にわたり、深さ 0.11mm, 角度 60 度, 先端半径 0.015mm の切欠きを機械加工してある。

2・2 高感度の交番直流電位差法によるき裂深さ計測法と予き裂導入方法

初期欠陥としては深さ 0.04 ～ 2.5mm の 2 次元疲労予き裂を用いることとし、深さ 0.17mm 以上の欠陥の場合は切欠きを含めた疲労予き裂を初期欠陥とした。深さ 0.17mm 未満の場合には切欠き底に所定深さの疲労き裂を発生させた後に切欠きを研削加工で除去し、疲労予き裂のみを初期欠陥とした。研削加工による残留応力が懸念されるので、最終仕上げの 30μm 程度はエメリー紙で研磨して残留応力の低減につとめた。

浅い疲労予き裂を作製するには特に高い分解能での疲労き裂深さ計測と、き裂形状の 2 次元性を実現することが重要である。ビッカース硬さ HV が低い材料の場合はき裂の上に貼ったひずみゲージを用いたコンプライアンス法で 0.005mm 程度の分解能でき裂深さを測定しながら予き裂を導入することができたが、⁴⁾ HV が 350 より高い材料の場合は疲労限度が高いために、ひずみゲージが疲労破損するのでコンプライアンス法が使えない。そこ

Table I . Mechanical properties of materials.

Material	$\sigma_y, \sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	δ (%)	φ (%)	HV
S25C	305	544	34.3	59.3	141
S45C	585	790	27.1	60.9	261
SCM435	870	989	22.4	65.4	305
SNCM439	1128	1201	17.1	52.2	386

Fig. 2. Test specimen.

で 0.01mm 程度の分解能を目標として交番直流電位差法によるき裂深さ測定法を新たに開発した。測定装置のブロック線図を Fig. 3 に示す。電源は 0.7A の直流電流とした。電位差測定には直流電圧分解能の製品仕様値が 0.1nV のデジタルマルチメータを使用した。電流供給用と電位差測定用リード線には直径 0.3mm の SUS304 ステンレス鋼細線を使用し、試験片にスポット溶接で取付けた。電圧測定においては試験片と測定用リード線間の熱起電力が影響するので、電流方向を反転させたときの電圧範囲を電位差として用いる交番直流法を採用した。電位差の表示には切欠き状態の電位差 V_0 とき裂が発生した状態の電位差 V との偏差分 $(V-V_0)$ を、初期値 V_0 で無次元化した $(V-V_0)/V_0$ を採用することとした。切欠き底から浅い疲労き裂を発生させた際の疲労き裂深さと電位差の関係を Fig. 4 に示す。これより、電気的には $(V-V_0)/V_0$ を 0.002 程度の精度で分解できるので、き裂深さとしては 0.01mm 程度の分解能を有するき裂深さ測定手法ができた。

予き裂導入時にはき裂開口点が増加することを防止するため、最大応力が疲労試験時の最大応力を超えないよ

Fig. 3. Potential drop method for crack depth measurement.

Fig. 4. Calibration curve between potential drop and fatigue crack depth.

うに圧縮側応力でき裂発生に必要な応力範囲を与えるようにした。予き裂材の試験ではき裂導入後に熱処理を行うことが多いが、高温の熱処理を行うと材料の硬さが低下するので、本研究では熱処理は行わないこととした。

2・3 疲労試験方法

負荷条件としては繰返し純曲げモーメントを周波数 28 Hz で与えた。試験環境は室温大気中である。疲労限度は 10^7 回における非破断をもって定義した。応力拡大係数 K は純曲げモーメント荷重状態での片側き裂の式⁹⁾を用いた。き裂開閉口挙動の測定には、き裂深さが 0.5mm 以下の場合はき裂の上から貼付けたゲージ長 1mm のひずみゲージを用いた。また、き裂深さが 0.5mm より深い場合には背面ひずみゲージを用いた。き裂開閉口挙動の測定はいずれの場合も除荷弾性コンプライアンス法⁷⁾によった。なお、本報の全ての実験点は応力比の高い条件であったためき裂閉口は生じず、 $\Delta K = \Delta K_{\text{eff}}$ であった。

3 実験結果および考察

3・1 硬さと応力比の影響

Fig. 5 に深さ 0.17mm の予き裂材の疲労限度線図を示す。両振り近傍の低平均応力領域では硬さの高い材料ほど疲労限度が高いが、高平均応力域では逆の傾向を示し、硬さの高い材料ほど疲労限度が低くなる結果が得られた。

疲労限度で 10^7 回繰返し後の試験片を試験終了後に加熱着色し、破面開放して測定した疲労き裂の深さを用いて求めた ΔK_{th} を Fig. 6 に示す。ハッチングは文献^{9)~10)}による従来の K 減少法で求められた長いき裂の ΔK_{th} のデータバンドを示すが、多くのデータに基づくのでばらつき幅は大きい。応力比 $R = 0.85$ で比較してみると、◆印で示す S45C の場合は長いき裂のデータバンドのほぼ下限に位置し、大きな低下は見られない。しかし硬さの高い■印で示す SCM435 と▲印で示す SNCM439 では、応力比 $R = 0.85$ 以上の領域で長いき裂の ΔK_{th} バンドよりも著しく低下するのが認められた。硬さの効果としては HV が 300 を超えると急激な ΔK_{th} の低下が生じることが分かった。

3・2 き裂寸法の影響

前項では高硬度材料の高応力比において、き裂深さを 0.17mm 一定として試験を行ったが、低下事象にはき裂

Fig. 5. Effect of material on the fatigue limit diagram.

Fig. 6. Comparison of ΔK_{th} of short pre-crack and long crack.

寸法の影響があることが予想されたので、本項では大きな低下事象が起こる条件のうちの2つ（材料は高硬度材料 SNCM439 で、応力比は $R = 0.85 \sim 0.95$ ）を満たした上で、き裂寸法を変えた場合の $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ を求めた。試験したき裂深さは、0.04mm から 2.5mm までである。試験結果を Fig. 7 に示す。図中の数字はき裂深さを示す。き裂深さが約 1mm 以上ではハッチングで示す長いき裂のデータバンドに入っているが、それより浅いとデータバンドよりも低下する現象が認められた。同様に、下限有効応力拡大係数 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ も Fig. 8 に示すように、極高応力比ではき裂深さが 1mm 未満になると、長いき裂のデータバンド⁹⁾から大きく低下する現象が認められた。

3・3 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 急減事象の要件のまとめ

Fig. 9 に $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ の欠陥寸法依存性を示す。図には複数の硬さの材料と応力比の結果を併せ示している。全体的傾向は次のようにまとめられる。

(1) 実線で結んだデータ群は、応力比にかかわらず低硬度材料の場合および高硬度材料で低応力比の場合である。き裂深さ 0.1mm 程度以上では $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ はほぼ一定である。0.1mm 未満の領域で若干の低下事象が認められた。

(2) 破線で結んだデータ群は高硬度材料でかつ極高応

Fig. 7. Effect of crack depth on the ΔK_{th} of hard material.

Fig. 8. Effect of crack depth on the $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ of hard material.

Fig. 9. Effect of crack depth on $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$.

力比条件の場合であり、格段に顕著な低下事象が認められる。本研究の範囲で最も浅い0.04mmのき裂の場合は、 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ として0.7MPa $\sqrt{\text{m}}$ ^{1/2}という鋼材でこれまでに経験したことのない低い数値が得られた。

(3) 高硬度材料のSCM435ではFig. 9に■印で示す極高応力比の場合は顕著な低下を起こすが、□印のように応力比が低い場合には低下事象は認められない。

これらのことより、 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ の急減事象には高硬度材料、極めて高い応力比、浅いき裂の3条件の重畳が必須であることが分かった。

このような急激な低下が生じる材料的、力学的な原因については現時点ではまだ明らかではない。高応力比条件の微小き裂に対して応力拡大係数を使用することの妥当性はさらに検討する必要があるかもしれないが、最大応力についてみるとSNCM439では $\sigma_{0.2}$ の40パーセント以下、SCM435では50パーセント以下でこのような現象が起こっており、大規模降伏による塑性変形が主要因ということではないものと思われる。

3・4 微小き裂の進展限界条件

従来の研究において、平滑材からき裂が発生して破断に至るき裂についてき裂成長過程を測定し、線形破壊力学によりFig. 10に示すような表示をすると、長いき裂の ΔK_{th} や $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 未満でもき裂進展が生じることから、 ΔK_{th} や $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ を使うことの不適切さが指摘され、線形破壊力学の適用限界の議論や微小き裂効果の分類等がなされている。しかしこのことは必ずしも ΔK_{eff} が微小き裂材の疲労き裂進展評価パラメータとしての意義を失ってしまうことを意味しないと考えている。微小き裂についても、作用する ΔK_{eff} がある値より大きければき裂進展開始するし、ある値以下であればき裂進展開始しないという限界値が存在し、以下に示すように0.04mm程度の浅いき裂に対しても ΔK_{eff} はき裂進展を支配する力学パラメータとして機能する。

Fig. 9を求める実験において測定したSNCM439のき裂進展速度を ΔK_{eff} で整理したものをFig. 11に示す。微小き裂材のデータで矢印付きのものは予き裂材の疲労限度に対応するものである。これはき裂の上に貼付けたひずみゲージによるき裂深さ分解能が0.01mmのコンプライアンス法でき裂計測を行いながら疲労試験を実施した結果、 10^7 回繰返し後も予き裂からのき裂進展が観察されなかったことを示す。一般的に応力比が低い場合には予き裂から少しき裂進展した後き裂閉口が発達して停留に至るという現象が起こることが多いが、¹¹⁾高応力比でき裂閉口が生じない場合には進展し始めたものが停留き裂化する事象は認められず、進展開始しないき裂は最後まで非進展であり、進展開始したき裂は継続進展して破断に至った。矢印付き以外の微小き裂の実験点はき裂材の疲労限度より1段階上の応力で破断した試験片のものである。□印は参考データとして類似の硬さの3.5NiCrMoV低合金鋼のもので、長いき裂に対してき裂閉口を起こさないように高応力比で求めたワーストケースの実験結果である。これより $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ は必ずしも材料定数ではなく、微小き裂の場合には長いき裂の $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 未満でもき裂進展

Fig. 10. Fatigue crack propagation behavior of short crack.

Fig. 11. Effect of crack length on fatigue crack propagation rate.

展し, $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ にき裂寸法依存性が存在することが確認された。

疲労き裂進展下限界条件近傍でのき裂進展速度を記述するパラメータとして, McEvily らは $\{\Delta K_{\text{eff}} - (\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}\}$ を提案し, 疲労き裂進展速度が $\{\Delta K_{\text{eff}} - (\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}\}^2$ に比例することを報告している。^{12)~14)} 彼らの対象としたき裂寸法は 0.3mm 以上で, おおむね長いき裂の領域と考えられ, $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ は一定値として取り扱っている。本報ではさらにき裂寸法の小さな領域で $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ がき裂寸法に影響される結果が得られたので, Fig. 12 に示すように, あるき裂深さで作用する ΔK_{eff} と, そのき裂深さに対応した下限値 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th},a}$ との差, すなわち偏差分 $\{\Delta K_{\text{eff}} - (\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th},a}\}$ をパラメータとしてき裂進展速度を整理することを考えた。その結果を Fig. 13 に示す。図中□印は長いき裂のデータを示しているが, き裂長さによらずほぼ 1 本のデータバンドに収まっている。データ中心線は細かく見ると勾配の少し異なる 2 直線で表されるようであるが, 大

Fig. 12. Definition of a parameter for fatigue crack propagation.

Fig. 13. Fatigue crack propagation rate of short crack plotted against $\{\Delta K_{\text{eff}} - (\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th},a}\}$.

局的には勾配は約 2 であり, McEvily らの結果と同様の傾向を示している。

このような評価により, 長いき裂から微小き裂に至るまでほぼ一本のデータバンドに収まっており, 高硬度材料の下限界条件近傍では 0.04mm 程度の微小き裂領域に至るまで, ΔK_{eff} がき裂進展を支配する力学パラメータとして機能しているものと考えられる。

3・5 破面観察結果

Fig. 14 に疲労限度の条件を■印, 疲労限度よりも 1 段階上の応力で破断した条件を×で示す。硬い材料の極高応力比領域で ΔK_{th} が著しく低下する現象が生じた原因の 1 つとして環境効果が考えられたので, 疲労限度より 1 段階上の応力で破断した試験片について, 予き裂先端

Propagation direction

Fig. 14. Fracture surface of SNCM439.

から 0.02mm 前方での SEM 写真を示す。破面は低疲労き裂進展速度領域に特徴的な組織状模様で占められた通常の粒内破壊破面であった。今回の観察では粒界破面や擬へき開等の環境効果の存在を明瞭に示す様相は認められなかったが、雰囲気による影響は否定しきれないので、今後の課題としたい。

4 結 言

微小予き裂材を用いて鉄鋼材料の ΔK_{th} , $(\Delta K_{eff})_{th}$ に及ぼす材料硬さ、平均応力およびき裂寸法の影響について検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 交番直流電位差法により、0.01mm 程度のき裂深さ分解能を有するき裂深さ計測法ができた。これを用いて深さ 0.04mm 程度の 2 次元微小疲労予き裂を作製し、これを用いた疲労試験ができるようになった。

(2) 微小き裂材において、3 条件（高硬度材料・極高応力比・微小き裂）が重畳する場合に、 $(\Delta K_{eff})_{th,a}$ が著しく低下することが示された。

(3) $(\Delta K_{eff})_{th}$ の急減事象が生じる場合でも、破面形態は低速の疲労き裂進展破面に特徴的な組織状模様の粒内疲労破面であり、環境に影響されたことを示す明瞭な形跡は認められなかった。

(4) 下限値からの偏差分である $\{\Delta K_{eff} - (\Delta K_{eff})_{th,a}\}$ によりき裂進展速度を整理すれば、長いき裂から微小き裂に至るまで一本のデータバンドに収まった。高硬度材料の下限界条件近傍では 0.04mm 程度の微小き裂領域に至るまで、応力拡大係数が疲労き裂進展挙動を記述できる力学パラメータとして機能しているものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) W. Elber, ASTM STP 486, 230 (1971).
- 2) R. O. Ritchie, D. L. Davidson, B. L. Boyce, J. P. Campbell and O. Roder, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **22**, 621 (1999).
- 3) 村上敬宜, 金属疲労微小欠陥と介在物の影響, p.58 (1993) 養賢堂.
- 4) 近藤良之, 栄 中, 久保田祐信, 工藤隆夫, 日本機械学会論文集, **A-68**, 1185 (2002).
- 5) 柏木聖紘, 工藤隆夫, 久保田祐信, 栄 中, 近藤良之, 材料, **52**, 1345 (2003).
- 6) W. F. Brown, Jr. and J. E. Slawley, ASTM STP 410, 13 (1966).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, **25**, 899 (1976).
- 8) S. Usami, "Fatigue Thresholds", p.205 (1982) Eng., Advisory Service.
- 9) 日本材料学会編, "疲労設計便覧", p.180 (1995).
- 10) J. M. Barsom and S. T. Rolfe, "Fracture and Fatigue Control in Structures 3rd edition", p.199 (1999) ASTM.
- 11) 秋庭義明, 田中啓介, 張 洛明, 日本機械学会論文集, **A-63**, 233 (1997).
- 12) K. Minakawa, G. Levan and A. J. McEvily, Metallurgical Trans., **17A**, 1787 (1986).
- 13) A. J. McEvily and Z. Yang, Metallurgical Transactions, **21A**, 2717 (1990).
- 14) S. Ishihara and A. J. McEvily, Proc. of Fatigue 2002, 1981 (2002).