Dugdale モデルを用いた下限界応力拡大係数範囲の解析

福村直樹^{*1}, 佐々木大輔^{*2}, 濱田繁^{*3}, 野口博司^{*4}Threshold Stress Intensity Factor Range Analysis
Using Dugdale ModelNaoki FUKUMURA^{*5}, Daisuke SASAKI,
Shigeru HAMADA and Hiroshi NOGUCHI^{*5} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Kyushu University, Moto-oka 744, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 819-0395 Japan

An evaluation for threshold stress intensity factor range under a stress controlled condition, using effective threshold stress intensity factor range, was proposed. Threshold stress intensity factor range was evaluated by analyses of plasticity-induced crack closure for two types of crack size: a small crack and a long crack. Plasticity-induced crack closure was analyzed for two dimensional crack in plane stress. Besides, theoretical examinations were performed in order to explain the mechanism that the fatigue limit of high hardness steel decrease with a rise of hardness. Relationship between threshold stress intensity factor range and pre-crack length which was evaluated by analysis of plasticity-induced crack agreed with experimental results qualitatively. Dependency of yield stress was different between a small crack and a long crack. The threshold stress intensity factor range of a long crack decrease with a rise of yield stress. This result could be helpful to reveal the mechanism that the fatigue limit decrease with a rise of hardness in high hardness.

Key Words : Fatigue, Stress Intensity Factor, Crack Closure, Crack Propagation, Dugdale model
Numerical Simulation

1. 結 言

一般的に下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の測定には ΔK 漸減試験が用いられる。しかし、疲労限度は荷重履歴に依存するため、 ΔK_{th} は条件によって多様に変化することが予想される。そこで宮崎ら⁽¹⁾は実用部材の疲労強度設計を念頭に、応力制御下におけるき裂のき裂停留限界を定量的に評価する値として、 ΔK_{th} を提案している。図1に宮崎らによる ΔK_{th} とき裂寸法 $\sqrt{area}$ の関係を示した模式図を示す。ここで ΔK_{th} がき裂寸法に依存するき裂を短いき裂、き裂が十分長く ΔK_{th} がき裂寸法に依存しないき裂を長いき裂と定義する。この ΔK_{th} と $\sqrt{area}$ の関係を力学的に検証するため、疲労き裂閉口現象に注目し解析的研究を行う。疲労き裂閉口現象のメカニズムには塑性誘起、酸化物誘起、破面粗さ誘起などが挙げられるが、本研究では豊貞ら⁽²⁾によ

る塑性誘起き裂閉口解析モデルを応用して検討を行う。

一方、疲労限度は硬さがある程度大きくなると硬さに対し低下する報告がなされている⁽³⁾。一般に硬さと引張強さや降伏応力は相関があるので、引張強度や降伏応力についても同傾向があると思われる。報告の中では原因について材料が欠陥に対して敏感になるためと解釈しているが、著者らは塑性誘起き裂閉口に起因して疲労限度が硬さに対して低下するものと考え、任意のき裂長さをもつ金属材料の、応力制御下における疲労き裂停留限度に及ぼす降伏応力の影響について検討する。

Fig.1 Relationship between ΔK_{th} and $\sqrt{area}$.⁽¹⁾

^{*1} 学生員, 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

^{*2} 正員, 九州大学大学院工学府

^{*3} 正員, 九州大学大学院工学府

^{*4} フェロー, 九州大学大学院工学府

E-mail: n.fukumura16@kyudai.jp

以上のことを踏まえ、本研究では下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} について解析的な評価を行うことを目的として、豊貞らによる塑性誘起き裂開口解析を応用して ΔK_{th} を解析的に求める。次いで ΔK_{th} の初期き裂長さ・降伏応力依存性について検討を行う。

2. 解析方法

本研究では均質等方性材料の無限板中に存在する二次元き裂を対象とし、平面応力条件下において遠方から一様な繰返し応力を受ける疲労き裂伝ばに伴うき裂開口挙動の解析を行う。材料は弾完全塑性体を仮定し、き裂先端の塑性域に対し Dugdale 型の結合力モデルを採用する。材料定数は縦弾性係数 $E=206 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、応力比は $R=0$ 、降伏応力 $\sigma_Y=294 \text{ MPa}$ とした。

2.1 解析モデル

図2に解析モデルの模式図を示す。このモデルでは Newman のき裂開口解析モデル⁽⁴⁾と同様に、き裂前方の塑性域を n 個の棒要素に分割し、き裂伝ばに伴いき裂先端前方の棒要素がき裂先端後方に残留するとした。無限板における Dugdale モデル⁽⁵⁾では、き裂半長 c のき裂におけるき裂中央からの塑性域先端位置は、最大外応力を σ_{max} として次式で与えられる。

$$a = c \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot \sigma_{max}}{2\sigma_Y}\right) \quad (1)$$

Dugdale モデルにおける仮想き裂部に棒要素を n 個配置すると、一様外応力 σ_∞ が作用した際のき裂中央からの位置 x_j における開口変位 $V(x_j)$ は次式のようになる。

$$V(x_j) = \sigma_\infty \cdot f(x_j) - \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot g(b_i, x_j) \quad (2)$$

ここで、 $f(x_j)$: 単位外応力による j 番目要素の開口変位、 $g(x_j)$: 単位内部応力による j 番目要素の開口変位である。き裂中央側から j 番目の棒要素に応力 σ_j が作用したとすると、棒要素のゲージ長さ L_j と開口変位 $V(x_j)$ の関係は次のように表される。

$$V(x_j) = L_j \left(1 + \frac{\sigma_j}{E}\right) \quad (3)$$

また、き裂開口応力 σ_{op} は実き裂先端後方一つ目に配置

Fig.2 Schematic illustration of plasticity-induced crack closure model.

されている棒要素が分離し始めるとき、すなわち棒要素に作用する応力が0のときの一様外応力とした。そして得られたき裂開口応力 σ_{op} より、以下のように ΔK_{eff} を計算した。

$$K_{eff} = (\sigma_{max} - \sigma_{op}) \sqrt{\pi \cdot c} \quad (4)$$

き裂を進めるタイミングとしては最小荷重時とした。

2.2 き裂停留条件

図3にき裂を1mmから伝ばさせた場合の、式(4)によって得られたき裂伝ばに伴う ΔK_{eff} の推移を示す。応力制御下において疲労き裂が伝ばし始めると、塑性誘起き裂開口により開口応力 σ_{op} が上昇するため ΔK_{eff} が低下しその後 ΔK_{eff} は極小値をとる。この極小値が後に述べる $\Delta K_{eff,th}$ より小さくなると疲労き裂は停留する。ここで $\Delta K_{eff,th}$ の物理的意味を考慮すると、疲労き裂は除荷過程においてき裂先端で逆塑性域が形成されなければ伝ばできずに停留すると考えられる。つまり、除荷過程において転位が射出されない条件より停留条件は、転位が射出される限界の応力拡大係数 K_e を用いて以下のように表すことができる。

$$\Delta K_{eff,th} = 2K_e \quad (5)$$

したがって、下限界有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff,th}$ は材料定数であり、き裂長さによらず一定値をとる。鉄鋼の場合、 $\Delta K_{eff,th} = 3.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 程度⁽⁶⁾である。そこで今回は鉄鋼材料を想定し $\Delta K_{eff,th} = 3.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ とした。

3. 解析結果および考察

3.1 初期き裂長さについて

図4に前章で示した方法によって得られた ΔK_{th} と初期き裂長さの関係を示す。図4において停留き裂が存在する領域は初期き裂長さによって二つの領域に分けられる。一つ目は小規模降伏条件を十分満たし ΔK_{th} が初期き裂長さに依存せず一定となる長いき裂の領域、二つ目は ΔK_{th} が初期き裂長さに依存する短いき裂の領域である。短いき裂の領域では初期き裂長さの増加に

Fig.3 Change of ΔK_{eff} with crack propagation.

伴い ΔK_{th} の値が増加し、初期き裂長さが 1mm を越えたあたりから徐々に飽和していく傾向を示す。この傾向は実験結果⁷⁾と定性的に一致する。しかし、短いき裂領域での ΔK_{th} をよく近似しているとされる村上の式⁷⁾と比較してみると、村上の式では傾きが 1/3 であるのに対し、今回の解析の結果では 1/3 より若干小さい傾きを示した。

3・2 降伏応力依存性

次に図 4 に示した関係における降伏応力依存性を調べるための解析を行った。結果を図 5 に示す。短いき裂の領域では ΔK_{th} の値は降伏応力の増加に伴い上昇する。一方、長いき裂の領域では降伏応力が増加すると ΔK_{th} の値は減少している。

疲労き裂の停留はき裂長さの増加によるき裂進展駆動力の増加と、塑性誘起き裂閉口によるき裂進展抵抗の増加の相対関係によって成り立つ非定常現象であるため、 ΔK_{th} は多様に変化することが想像できる。き裂先端において形成される塑性域の寸法は降伏応力に反比例して小さくなる。長いき裂の領域では小規模降伏条件を満足しており、塑性域寸法が小さくなると塑性誘起き裂閉口の影響が減少しき裂面を閉口しようとする応力が減少する。したがって、き裂面は降伏応力の増加に伴い開きやすくなり疲労き裂は停留しにくくなるため、 ΔK_{th} の値が低下したものと考えられる。一方短いき裂の領域では村上の式⁷⁾によって経験的に良く表される傾向と同一の傾向を示しているが、具体的なメカニズムについては今後検討を要する。また、降伏応力が増加するときき裂長さに対して塑性域が小さくなり、小規模降伏を満たしやすくなるため短いき裂と長いき裂の閾値はき裂の短い側に移行していることがわかる。以上の結果から得られた知見を整理すると図 6 のような関係が分かる。図 6 に示した関係を考慮すると ΔK_{th} が硬度や降伏応力に対して低下する現象を説明できると考えられる。

以上のように、硬さや降伏応力が高く、一見疲労特性に優れていると思われるような材料に対しても、き裂長さによってその優位性が崩れる可能性があると考えられる。

Fig.4 Relationship between threshold stress intensity factor range ΔK_{th} and initial crack length c_0 .

4. 結 言

塑性誘起き裂閉口に注目し Dugdale モデルを応用した塑性誘起き裂閉口解析モデルを用いて下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の初期き裂長さ、降伏応力依存性について解析的検討を行った。その結果、塑性誘起き裂閉口解析によって求めた ΔK_{th} の値は、村上らの結果と定性的に一致し、また、 ΔK_{th} の降伏応力の依存性についても説明が可能であることが示された。

文 献

- (1) Miyazaki, T., et al, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Series A, Vol.68, No.673, (2002) pp.68-72.
- (2) Toyosada, M., et al, Int J Fatigue, Vol.26, No9, 2004, pp983-992.
- (3) M.F. Garwood, Interpretation of Tests and Correlation with Service, ASM(1951) pp.1-77.
- (4) Newman, Jr. J.C., ASTM STP 748, (1981), 53-84.
- (5) Dugdale, D.S., J. Mech. Phys. Solids, 8(1960), pp.100-104.
- (6) Liaw, P.K. et al, Acta Metal., Vol.31, No.10(1983), pp.1581-1587.
- (7) Murakami, Y., Metal Fatigue: Effect of small crack and Nonmetallic Inclusions (2002), pp1-72, Elsevier.

Fig.5 Relation between threshold stress intensity factor range ΔK_{th} and yield stress σ_Y .

Fig.6 Effect of yield stress on ΔK_{th} .