

き裂材の疲労限度特性 ΔK_{th} における特異な材質依存性

九州大学大学院
工学研究院
教授

工学博士 野口 博司
Hiroshi Noguchi



Singular Dependency of Material Property in ΔK_{th} of
Metal Fatigue Limit in Cracked Specimen

1. はじめに

事故の原因の 80%は、金属疲労であるといわれている¹⁾。金属疲労に対する限界強さは、平滑材では疲労限度とよばれ、重要な材料定数の一つである。その疲労限度は、1 結晶粒程度 ($10\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$) の発生した疲労き裂が伝ば後停留できる限界の応力 (MPa の次元をもつ) に対応していることが多い²⁾。一方、Compact Tension 試験片を用いた長いき裂の疲労き裂伝ば特性は、き裂先端近傍の弾性特異場の強さを表す応力拡大係数の幅 ΔK が駆動力として用いられ、疲労き裂伝ばがするかどうかの敷居値として、 ΔK_{th} という材料定数 (MPa $\sqrt{\text{m}}$ の次元をもつ) が用いられる³⁾。以上から、ある材料を種々の形状で繰返し荷重で用いる場合の疲労安全限界は、種々の寸法のき裂を持つ部材の ΔK_{th} で評価できることがわかる。そこで、本解析記事においては、 ΔK_{th} に及ぼす材質依存性について述べる。

2. 疲労き裂伝ばメカニズム

安定的に伝ばしている疲労き裂の先端では、鈍化と再鋭化が連続的かつ相似的に繰返されている⁴⁾。図 1 に疲労き裂の開閉口過程の走査型電子顕微鏡 SEM 写真を示す⁴⁾。1~4 はき裂閉口過程であり、5、6 はき裂開口過程である。き裂先端前方では、き裂面の上下に多数のすべりのこん跡が見られる。このことから、すべりはき裂の開閉口に交互に作動したことがわかる。図 2 に疲労き裂の伝ばモデルを示す⁴⁾。図中の転位記号の横に付した英数記号は、荷重サイクルにおける位置を意味する。(c) のように、負荷過程でき裂先端から転位が射出され、き裂は開口する。やがて、転位は加工硬化 (または

転位の逆応力) によって、その運動を阻止され、そして阻止された転位の逆応力によって転位の発生も止まる。そこで、(d) のようにもう一方のすべり系 **b** が作動し始めるが、こちらもまた同様な経過をたどり、最大応力ではもはや新たな転位は発生しなくなる。除荷過程では、(e) のようにまず **b** の近くのすべり面で転位が発生し、すべりを起こす。その後、き裂面は接触し、転位の発生は止まり、き裂の上側のすべり面に転位が発生し、作動するようになる。以後、順次番号順に転位が作動し、き裂は 1 サイクル中に、繰返し塑性変形によって生じた自由表面だけ進展する。

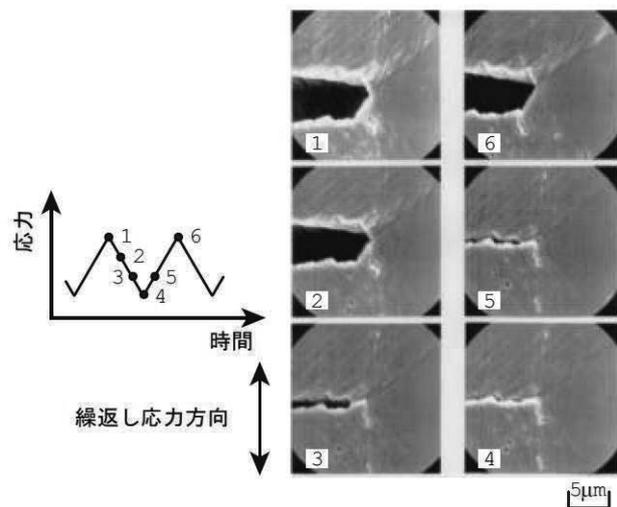


図 1 疲労き裂の一サイクル中の開閉口と伝ば

つまり、疲労き裂伝ばは、塑性変形の繰返しによって起こる。疲労限度は、繰返し塑性変形が消失する状態に対応する。

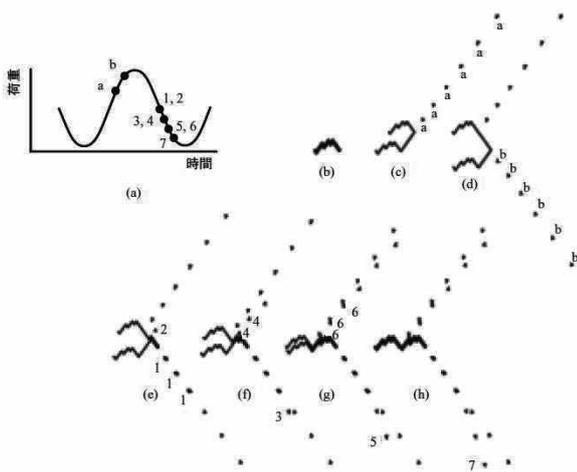


図2 疲労き裂伝ばのマイクロ力学モデル

3. Dugdale モデルを用いた疲労き裂伝ばシミュレーション結果

第二章のメカニズムにもとづいて、疲労き裂伝ばシミュレーションを行った結果を示す。疲労き裂伝ばの本質は塑性変形の繰返しであり、Dugdale モデルでは、その塑性変形を棒要素で弾性体に付加することによって、表現する。図3、4に、Dugdale モデルを用いた疲労き裂伝ばシミュレーションの概略を示す⁵⁾。計算は、最大応力 $\sigma_{\infty, \max}$ 、最小応力 $\sigma_{\infty, \min}$ 、疲労き裂開口応力 $\sigma_{\infty, op}$ で順次計算し、き裂伝ば量 Δc を、そしてき裂先端後方に残留させる塑性変形を決定している。

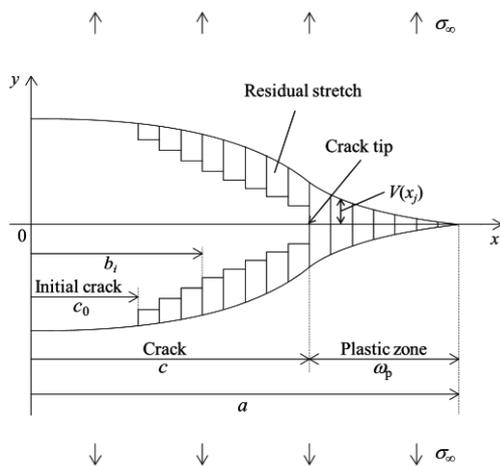


図3 Dugdale モデルによる塑性変形の表現

有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} は、以下で計算している⁵⁾。ここで、 N :繰返し数、 c_0 :初期き裂長さ、

c :今のき裂長さ、 C と m は材料定数である。

$$\Delta K_{\text{eff}} = (\sigma_{\infty, \max} - \sigma_{\infty, op}) \cdot \sqrt{\pi \cdot c} \quad (1)$$

そして、伝ば速度は、下記の修正パリズ則³⁾を用いている。

$$\frac{dc}{dN} = C \cdot (\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (2)$$

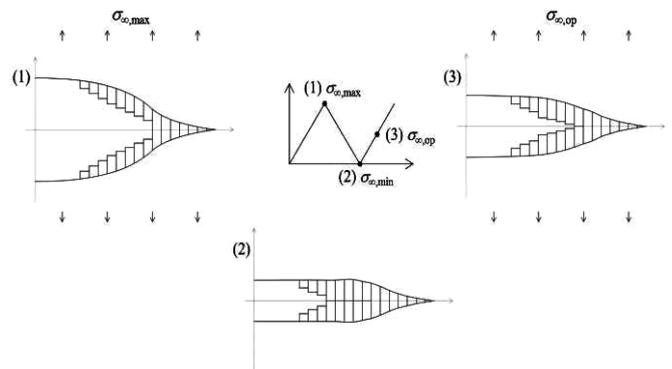


図4 Dugdale モデルによる一サイクル中の塑性変形解析

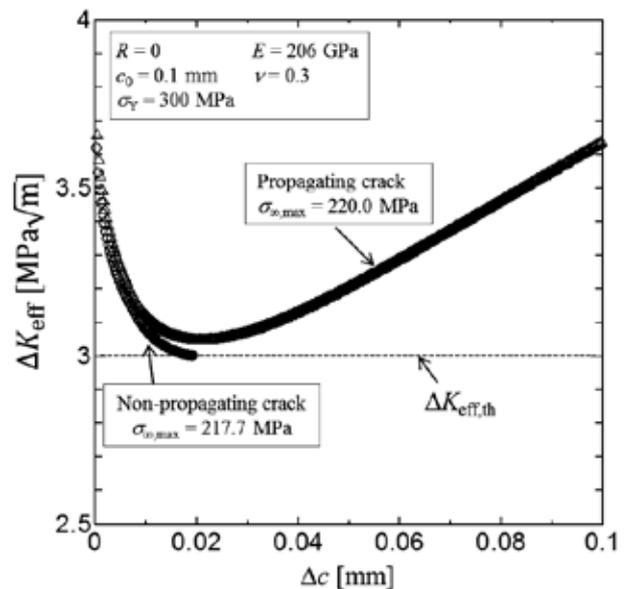


図5 疲労き裂伝ば解析結果例

図5に示すように、疲労き裂は初期き裂から伝ばした後、 ΔK_{eff} は局所的に最小値をとる。この最小値が $\Delta K_{\text{eff, th}}$ より小さくなると、伝ばしていた疲労き裂は停留してしまう。 $\Delta K_{\text{eff, th}}$ は、き裂先端に繰返し新たに塑性変形が生じない状態に対応しており、き裂先端から刃状転位が射出する応力拡大係数

K_e に対応する。

$$\Delta K_{\text{eff,th}} = 2K_e \quad (3)$$

$$K_e = \frac{E}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{b}{\pi b_0}} \quad (4)$$

ここで、 E :ヤング率、 ν :ポアソン比、 b :バーガーベクトル、 b_0 :転位しんの大きであり、 E が大きな因子となる。局所最小 ΔK_{eff} がちょうど $\Delta K_{\text{eff,th}}$ になるときの外力 σ_∞ がき裂材の疲労限度 $\sigma_{\infty,w}$ に対応する。そして、 ΔK_{th} は次式で定義している。

$$\Delta K_{\text{th}} = \sigma_{\infty,w} \sqrt{\pi \cdot c_0} \quad (5)$$

図6に解析結果を示す。微小き裂においては、疲労限度は降伏応力 σ_Y 、降伏ひずみ ε_Y の上昇とともに、上昇する。しかし、長いき裂ではこれらに依存せず、 ΔK_{th} と $\Delta K_{\text{eff,th}}$ の比は、あらゆる材料で一定値となる。

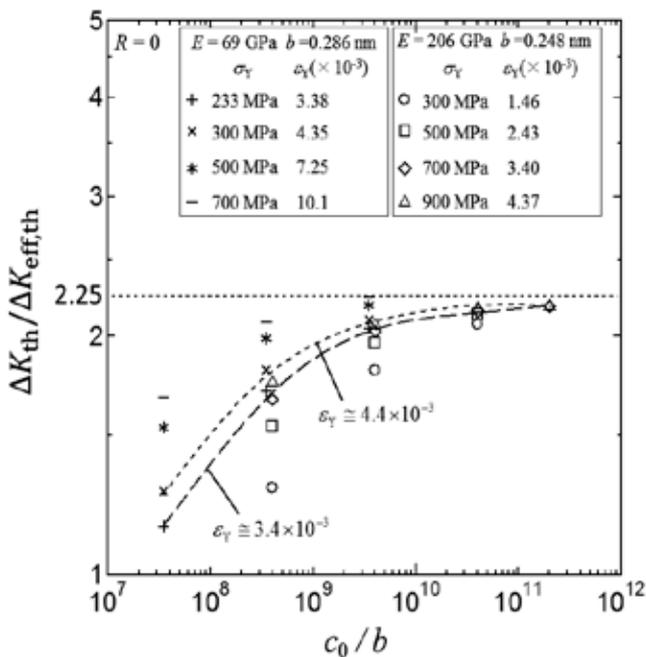


図6 ΔK_{th} の特性

4. 疲労実験結果

図7に、実材料において ΔK_{th} とき裂長さの関係を示す⁶⁾。これは、図6と同様な傾向がある。図8には、種々の材料において、CT試験片で求められた ΔK_{th} の値をまとめている⁶⁾。ブリネル硬さ H_B がほぼ400までは、 ΔK_{th} は H_B に依存しない結果となっており、図6の傾向と一致している。

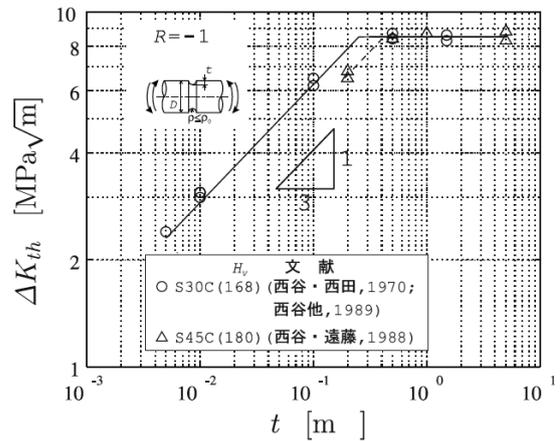


図7 ΔK_{th} のき裂長さ依存性

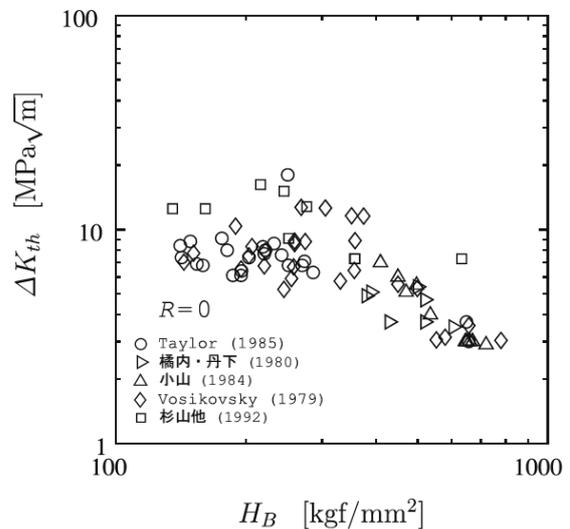


図8 CT試験片で求めた ΔK_{th} の材質依存性

5. おわりに

疲労安全は、応力を用いた下記の式を使用して、保障している。

$$\sigma_a \leq \sigma_w / S \quad (6)$$

ここで、 σ_a :応力振幅、 σ_w :疲労限度、 S :安全係数である。 σ_a はコンピュータを用いた解析やひずみゲージゲージを用いた実測から得、 σ_w は材料カタログやデータベースまたは材料試験から得ることができる。疲労の本質は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の次元をもつ ΔK_{th} によって表現されるべきものであるから、使用条件に変わる σ_w を補正するための S が必然となる。従来の材料選択は、平滑材から求められた疲労限度を用いて行われたきたが、 ΔK_{th} における材質依存性を考慮すれば、より合理的な材料選択と設計ができる、と思われる。近い将来、そのように発展することが望まれる。

参考文献

- 1) 西田新一、機械・機器の破損原因と対策、日刊工業新聞
- 2) 西谷弘信、総合材料強度学講座6「疲労強度学」、オーム社
- 3) 日本材料学会編、疲労設計便覧、養賢堂
- 4) Yasuji ODA, Yoshiyuki FURUYA, Hiroshi NOGUCHI and Kenji HIGASHIDA AFM and SEM Observation on Mechanism of Fatigue Crack Growth in an Fe-Si Single Crystal, International Journal of Fracture Vol.113, (February 2002), pp.213-231.
- 5) Na-oki FUKUMURA, Tomohiro SUZUKI, Shigeru HAMADA, Kaneaki TSUZAKI and Hiroshi NOGUCHI, Mechanical Examination about Crack Length Dependency and Material Dependency of Threshold Stress Intensity Factor Range with Dugdale Model, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 135 (February 2015), pp. 168-186.
- 6) Tatsujiro MIYAZAKI, Hiroshi NOGUCHI and Keikaku OGI, Quantitative Evaluation of the Fatigue Limit of a Metal with an Arbitrary Crack under a Stress Controlled Condition (Stress Ratio = -1) , International Journal of Fracture, Vol.129, No.1 (2004) , pp.21-38.