疲労き裂進展挙動における K_{III} の影響* (第 2 報 : き裂進展クライテリオンの検証)

菊池正紀^{*1}, 和田義孝^{*2}, 須賀一博^{*3}, 大玉千香子^{*4}

Effect of K_{III} on Fatigue Crack Growth Behavior (2nd Report, Verification of Crack Growth Criterion)

Masanori KIKUCHI^{*1}, Yoshitaka WADA, Kazuhiro SUGA and Chikako OHDAMA

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510 Japan

Mixed mode fatigue tests are conducted using through cracked specimen. Slant through cracked specimens are made where crack angle is 15° , 30° and 45° . It is shown that factory roof is made in all crack tips due to ΔK_{III} , and crack growth rate decreases by the factory roof. Fatigue crack growth is simulated using S-version FEM(Finite Element Method) using crack growth criteria. It is shown that conventional crack growth criteria are not available to predict fatigue crack growth with factory roof. In authors' previous study, modified new criterion for the prediction of crack growth rate is proposed. In this study, by using new criterion, fatigue crack growth simulation is conducted, and results are compared with those of experiments and discussed.

Key Words : Fatigue, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Factory Roof, ΔK_{III}

1. 緒 言

構造物破壊の八割以上が疲労破壊を原因としていることはよく知られている。そのため、構造物を健全に保守管理するには、疲労破壊を未然に防ぐことが重要となる。特にき裂検出後の余寿命を正しく予測するために、疲労き裂の進展解析が不可欠となる。通常、構造物が使用されているとき、構造物を構成する各材料には荷重が負荷しているが、それが繰り返し荷重ならば、応力集中源を起点として疲労破壊に至る場合が考えられる。例えば、構造物が物体の衝突や地震などにより予期せぬ大きな荷重を受け、き裂が発生したとすると、このき裂が応力集中源となり、複雑な荷重条件により混合モード疲労き裂進展に至るケースも考えられる。このような混合モード荷重負荷下にき裂が存在するとき、き裂は複雑な挙動を示すと予想される。ところが、混合モード三次元き裂の疲労き裂進展挙動は、現実問題としてとても重要であるにもかかわらず、数値解析手法が完全に確立していなかったことからその研究例は極めて少ない⁽¹⁾。

き裂が混合モード下で疲労き裂進展するとき、FEM 等の数値解析により疲労き裂進展挙動を予測するためには二つのき裂進展クライテリオンが必要となる。それは、き裂進展方向クライテリオンとき裂進展速度クライテリオンである。二次元問題では、き裂進展方向の推定に MTS (Maximum Tangential Stress) クライテリオン⁽²⁾が用いられ、き裂進展速度は等価応力拡大係数範囲を Paris 則⁽³⁾に適用することにより予測される。これら二つのクライテリオンを用いて、疲労き裂進展シミュレーションが行われ^{(4),(5)}、疲労試験と数値解析の比較が行われている。

しかし三次元問題ではこうした研究はまだ多くはない。Ailabadi ら⁽⁶⁾は Dual BEM を用いた三次元疲労き裂進展

* 原稿受付 2011 年 4 月 28 日

^{*1} 正員, フェロー, 東京理科大学 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

^{*2} 正員, 諏訪東京理科大学 (〒391-0292 長野県茅野市豊平 5000-1)

^{*3} 東京理科大学機械工学科

^{*4} 東京理科大学大学院理工学研究科機械工学専攻

E-mail: kik@me.noda.tus.ac.jp

解析を行っている。また、Citarella ら⁽⁷⁾は、三次元疲労き裂進展解析に FEM を用いている。これらの研究では、Richard ら⁽⁸⁾によって提唱されたき裂進展方向予測クライテリオンが用いられている。しかし、き裂形状が変化する度にき裂モデルを作り直す作業は容易ではないため、疲労試験結果と三次元疲労き裂進展解析との比較は十分に行われていない。そのためこれらのクライテリオンの妥当性の検証はまだ十分に行われていないのが現状である。

この問題は最近の数値解析技術の進歩により解決されつつある。菊池ら⁽⁹⁾は重合メッシュ法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ (S-FEM) を用いて三次元表面き裂の疲労進展解析の自動化に成功し、複数の表面き裂の相互作用の問題を解析しており、Maitireyimu ら⁽¹²⁾はこれを用いて複合荷重負荷下における平板の疲労き裂進展を解析している。また菊池ら⁽¹³⁾は表面き裂の疲労進展試験との比較を行き裂開閉挙動の評価の重要性を指摘している。このように三次元疲労き裂進展問題に対して実験と数値解析との比較を行える環境が整ってきた。

前報⁽¹⁴⁾では、平板に導入された表面き裂に対して混合モード疲労試験を実施した結果、ファクトリールーフ発生個所で、き裂面の摩擦により疲労き裂進展速度に遅れが生じることが明らかとなった。ファクトリールーフとは、き裂進展においてモード III により発生し、モード III からモード I に遷移する過程で形成される複雑形状であり、工場の屋根の形に似ていることからこの呼び名で呼ばれる。ファクトリールーフが生じると面内摩擦が起きるなど、き裂進展速度に影響を及ぼすものとされている⁽¹⁵⁾。前報では疲労試験結果をもとに、ファクトリールーフの影響を加味したき裂進展クライテリオンを新たに導いた。そこでここでは第2報として、求めたき裂進展クライテリオンの妥当性を検討するため、貫通き裂における混合モード疲労試験を実施し、数値解析によって詳細に調べた結果を報告する。

2. 疲労試験

疲労試験で用いられる試験片の材質は、アルミニウム合金の A7075-T6 である。この材料のヤング率とポアソン比は、それぞれ 71.7GPa と 0.3 である。平板に 15°, 30°, 45° の角度となるよう斜め貫通き裂を導入し、四点曲げにて混合モード疲労試験を行った。

2・1 試験片

図1に示すような 250×80×20mm の平板に深さ 20mm、厚さ 0.3mm のノッチを EDM (Electric Discharged Machining, 電気放電加工) によって導入する。このとき、ノッチ導入角度を調整することで斜め貫通き裂を有した試験片を得る。き裂角度は図2に示すように、試験片の厚さ方向の軸と貫通き裂のなす角とし、15°, 30°, 45° の斜め貫通き裂試験片を作成した。以下、試験片をそれぞれ 15° specimen, 30° specimen, 45° specimen と呼ぶことにする。

Fig.1 Prepare specimen

Fig.2 Slant through cracked plate

2・2 疲労試験

疲労試験は4点曲げ試験によって行った。図3に示すように、荷重点間距離は上下それぞれ 70mm, 220mm とし、き裂の存在する範囲では一様曲げモーメントのみが作用している。最大応力は 15~20kN, 応力比 R を 0.1 として疲労試験を行った。また、き裂進展過程のき裂形状・き裂進展速度の変化を測定するために、 $R=0.8$ とす

ることで、ビーチマークを導入した。各条件の試験を5回ずつ行い、以下にはそのうちのひとつを示した。説明の簡便性のため、以下図3に示すように、貫通き裂の中央に原点を持つ座標系を用いる。

Fig.3 Four point bending test

2・3 疲労試験結果

45°specimen の疲労試験の結果を図4に示す。図4(a)の写真は、疲労破断後の試験片の片側を斜め上部から観察したものである。試験片の下部の平らな面は、EDMによって導入された深さ20mmの初期き裂である。このき裂は先に述べたとおり、斜め45°の角度がつけられている。初期き裂から、き裂はねじれながら進展している。図4(b)は試験片表面を示した写真であり、き裂が混合モードを経てモードIに遷移しながら進展する様子が観察できる。つまり、最終的にき裂はモードIで進展することが分かる。また、き裂がねじれて進展する過程で、ぎざぎざとした荒れた破面が観察された(図4(a))。これはファクトリールーフと呼ばれるもので、モードIIIのき裂進展時によく観察される。ファクトリールーフ部分に見られる黒く着色された部分は、き裂進展中にき裂面内で摩擦が生じたことを意味している。この摩擦を原因のひとつとして、き裂の進展速度が遅くなっていたものと考えられる。図4(c)は破面を正面から観察した写真である。ファクトリールーフが放射状に広がるようにして形成されている。また、破面に見られる黒い線がビーチマークである。ビーチマークを測定することで各サイクル数におけるき裂形状を観察することができる。

Fig.4 Experimental result at 45° specimen

図5(a)-(c)は、各角度における疲労試験結果である。左から順番に初期き裂角度が大きくなるよう試験片破面を並べた。写真下部に確認できる平らな面がノッチであり、初期き裂に相当する。そこから弧を描くようにしてビーチマークが観察される。写真の線はビーチマークを見やすいように強調したものである。き裂進展挙動はこの

ビーチマークによって観察される。ファクトリーループは、き裂前縁全体から発生し、放射状に広がりながら形成されている。ファクトリーループ部分にあるビーチマークを観察すると、きれいな弧ではなく、ファクトリーループ部分で弧が途切れていることが分かる。これは、ファクトリーループを起点として、き裂の進展に遅れが生じているものと考えられる。また図 5(a)-(c)を比較すると、初期き裂角度が大きくなるにつれてファクトリーループの大きさも大きくなっている。

Fig.5 Fracture surface

3. 重合メッシュ法を用いたき裂進展解析

疲労試験と同じ問題を重合メッシュ法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用いて数値解析し、疲労き裂進展挙動の比較を行う。図 6(a)には、モデル化した試験片の全体図を示し、図 6(b)はき裂部分を拡大したものを示している。重合メッシュ法では、試験片全体を表すグローバルメッシュと、き裂部分を表すローカルメッシュを別々に用意し、重ね合わせることで数値計算を施している。なお重合メッシュ法については他⁽⁹⁾で詳述しているのでここでは説明を省略する。

Fig.6 Global and local meshes

3・1 三次元問題におけるき裂進展クライテリオン

疲労き裂進展解析のためには、応力拡大係数範囲 ΔK_I 、 ΔK_{II} 、 ΔK_{III} を評価する必要がある。本研究では、VCCM (Virtual Crack Closure Method, 仮想き裂閉口積分法)⁽¹⁶⁾を応力拡大係数の評価に用いた。求めた応力拡大係数範囲から、いくつかのクライテリオンを用いることでき裂進展方向を予測する。三次元問題では、き裂進展方向予測のためのクライテリオンがいくつか提唱されている^{(8),(17),(18)}が、疲労試験結果との詳細な比較はまだ十分実施されていない。

本研究ではまず、過去の多くの研究で用いられている Richard ら⁽⁸⁾が提案したクライテリオンを用いて、き裂進展予測を行う。このクライテリオンでは、き裂進展方向は次式で決定される。また、図7はき裂進展方向を示している。

$$\varphi_0 = \mp \left[140^\circ \frac{|K_{II}|}{K_I + |K_{II}| + |K_{III}|} - 70^\circ \left(\frac{|K_{II}|}{K_I + |K_{II}| + |K_{III}|} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ただし、 $\varphi_0 < 0^\circ$ のとき $K_{II} > 0$ 、または $\varphi_0 > 0^\circ$ のとき $K_{II} < 0$ かつ $K_I \geq 0$ である。

$$\psi_0 = \mp \left[78^\circ \left(\frac{|K_{III}|}{K_I + |K_{II}| + |K_{III}|} \right) - 33^\circ \left(\frac{|K_{III}|}{K_I + |K_{II}| + |K_{III}|} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここで $K_{III} > 0$ のとき $\psi_0 < 0^\circ$ 、または $K_{III} < 0$ 、 $K_I \geq 0$ のとき $\psi_0 > 0^\circ$ である。

Fig. 7 Crack growth direction

しかしながら本研究では、式(2)は用いていない。その理由は先の論文⁽¹⁴⁾に詳述したが、 ψ_0 を考慮した場合き裂面がねじれて不連続になるためである。それを正確にモデル化することは現在のコンピュータの能力を超えている。この問題の詳細な検討は将来の課題である。また、等価応力拡大係数範囲は式(3)で定義される。き裂進展速度は、式(4)のParis則⁽³⁾に等価応力拡大係数範囲を代入することで決定できる。なお、本研究では $C=2.29 \times 10^{-4}$ 、 $n=2.88$ の値を用いた⁽¹⁹⁾。

$$\Delta K_{eq} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(1.115 \Delta K_{II})^2 + 4(\Delta K_{III})^2} \quad (3)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eq})^n \quad (4)$$

3・2 新しいクライテリオン

前報では、疲労試験と数値解析の比較から、 ΔK_{III} が存在するとき、疲労き裂進展におけるファクトリーループの評価が重要であることが明らかになった。しかし、FEM解析でファクトリーループを再現するためには、ファクトリーループの不連続形状をモデル化し、き裂面間の接触や摩擦を考慮する必要がある。これは非常に複雑な問題となるので、これらのモデリングの代わりに、き裂進展クライテリオンにファクトリーループの影響を加味

することを考えた。ファクトリーループが発生することによりき裂進展が遅くなることから導かれた⁽¹⁴⁾式が次式である。

$$\Delta K_{eq(I,III)} = \frac{\sqrt{(\Delta K_I - \sqrt{2}|\Delta K_{III}|)^2 + \Delta K_I^2}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$\Delta K_{eq(I,II,III)} = \frac{\Delta K_{eq(I,III)}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_{eq(I,III)}^2 + 4(1.155\Delta K_{II})^2} \quad (6)$$

以下では、疲労試験結果より導いた式 (5) の妥当性を検討するため、貫通き裂における疲労試験結果と Richard のクライテリオンとの詳細な比較を行っていく。

4. 数値解析結果と疲労試験との比較

4・1 き裂進展速度

まずはじめに、き裂進展速度の比較を行う。図8は各き裂角度におけるき裂進展速度の比較を示している。横軸は試験片中央部におけるき裂長さ、縦軸はサイクル数とした。すべての試験片の比較結果で、新しいクライテリオンによる数値解は、Richard のクライテリオンによる数値解よりも疲労試験結果に近づいている。また、予き裂角度が大きくなるに従って、その近づき方が大きくなっている。これは先の疲労試験結果で、予き裂角度が大きいほどファクトリーループの影響が大きく、ファクトリーループが大きいほどき裂進展速度が遅くなるという疲労試験結果を反映している。つまり、Richard のクライテリオンに比べ、新しく提案したクライテリオンではファクトリーループによるき裂進展速度の遅れを表現することができていることが明らかである。

(a) 15° specimen

(b) 30° specimen

(c) 45° specimen

Fig.8 Relation between cycle number and the crack depth

4・2 応力拡大係数範囲

次に応力拡大係数範囲の分布を調べる．図9は，45° specimen におけるき裂進展初期の応力拡大係数範囲の分布を示している．横軸がき裂の厚み方向の長さ，縦軸が応力拡大係数範囲の分布を示している．き裂全域で ΔK_I の値が最も大きく， ΔK_{II} はき裂表面部分で高くなっている．ファクトリーループの発生源となる ΔK_{III} はき裂全域に渡って大きな値を示しており，疲労試験結果でもき裂全域にファクトリーループが確認された．また，各予き裂角度における ΔK_{III} の分布は図10のようである．横軸がき裂の厚み方向の長さ，縦軸が ΔK_{III} の値を示している．予き裂角度が大きくなるにつれて， ΔK_{III} の値が大きくなっていることが分かる．また，疲労試験では，予き裂角度が大きくなるにつれてファクトリーループの影響も大きくなることが図5(a)-(c)からも分かる．

Fig.9 Stress intensity factor ranges

Fig.10 ΔK_{III} on crack tip

また，45° specimen における応力拡大係数範囲の変化を図11に示す．これは新しいき裂進展則を用いて解析を行った結果である．き裂の進展が始まると， ΔK_{II} が急激に小さくなり， ΔK_I と ΔK_{III} にのみよってき裂が進展する．サイクル数を重ねることでき裂がねじれて進展し，ファクトリーループが形成される．この間，試験片の両端では徐々に ΔK_{III} の値が小さくなるが，試験編中央では値が残る，徐々に大きくなる．最終的には ΔK_{II} と ΔK_{III} がほぼゼロとなり， ΔK_I が支配的なき裂進展となる．これは，どの予き裂角度のときも同様の傾向を示し，ファクトリーループの影響範囲は初期の ΔK_{III} の大きさに依存している．

Fig.11 Stress intensity factors during crack propagation (45° specimen)

4・3 き裂形状

最後にき裂形状の比較を行う。図12は各ビーチマークを x - y 面に投影したものである。き裂はノッチから進展するため、初期き裂の位置は20mmから始まっている。また、ビーチマークと数値解析結果の比較は、き裂表面の座標を基準に行っている。Richardによる数値解析結果では、き裂はほぼ水平な形状を保ったまま進展するのに対し、新しいクライテリオンでは、試験片中央部でのき裂進展に遅れが見られる。図13はき裂が進展する過程を x 方向から観察したものである。各線は変化するき裂先端形状を示し、凡例は各き裂形状時のサイクル数を示す。

Richardのクライテリオンでは、き裂中央部から表面部にかけて一定の速度でき裂が進展している。それに対し、新しいクライテリオンでは、中央部でき裂の進展が極端に遅くなり、試験片中央部で角度をもった面が残留することになる。これは、図11(a)において、試験片中央部の ΔK_I 値が低く、 ΔK_{III} 値が高いため、新しいクライテリオンでは試験片中央部で ΔK_{eq} が小さくなるためである。その結果、図13(b)のように試験片中央部で傾きが急になり、さらに中央部でき裂進展が遅れる結果となる。この影響で図12(b)の新しいクライテリオンによる数値解析結果では、き裂の中央部分で進展に遅れが出ているものと考えられる。

疲労試験結果では、試験片全域からファクトリールーフが発生し、各々の場所で遅れが生じている。それに対して、新しいクライテリオンではファクトリールーフでの遅れを表現できているものの、メッシュ生成の問題からそれは中央の一点のみに現れている。また、実験で生じた多数のファクトリールーフはサイズが小さいため、すぐにモードIに移行するが、解析結果では1点でその効果を代表していることから、モードIに移行するのに多数のサイクル数を要している。そのため、今回の解析では実験と一致するき裂形状を得ることができなかった。しかしながら、本研究の目的は疲労寿命の正確な予測にあり、形状の正確な予測は目的としていない。こうした形状の予測は将来の課題としたい。

Fig.12 Crack shape (45° specimen)

Fig.13 Crack shape for low angle (45° specimen)

5. 結言

前報で提案した、ファクトリールーフの影響を加味したき裂進展クライテリオンの検証を行った。その結果、貫通き裂疲労試験においても、よりよいき裂進展速度予測結果を得られた。前報の表面き裂における混合モード疲労試験 (I+II+III) 結果と、今回行った貫通き裂における混合モード疲労試験結果 (I+II+III) を踏まえると、このき裂進展クライテリオンは、ファクトリールーフ発生時に生じるき裂進展速度の遅れを評価できているといえる。

文献

- (1) 大塚昭夫, 東郷敬一郎, 吉田誠, せん断負荷を受ける半だ円表面き裂からの疲労き裂進展破面, 社団法人日本材料学会, (1988) vol. 38, No. 42, pp. 514-519.
- (2) M. schollmann, G. Kullmer, M. Fulland and H. A. Richard, A new criterion for 3D crack growth under mixed-mode(I+II+III) loading, *Proceedings of 6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture*, vol. I, (1963), pp. 589-596.
- (3) P. Paris and F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, (1963), pp. 528-534.
- (4) D. Lebaillif and N. Recho, Brittle and ductile crack propagation using automatic finite element crack box technique, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, (2007), pp. 1810-1824.
- (5) T. N. Bittencourt, Quasi-automatic of crack propagation for 2D lefm problems, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 55, No. 2(1996), pp. 321-334.
- (6) D. N. dell'Erba, M. H. Aliabadi, On the solution of three-dimensional thermo-elastic mixed-mode edge crack problems by the dual boundary element method, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 66, (2000), pp. 269-285.
- (7) R. Citarella and F.-G. Buchholz, comparison of crack growth simulation by DBEM and FEM for SEN-specimens undergoing torsion or bending loading, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, (2008), pp.489-509.
- (8) H. A. Richard, M. Fulland, and M. Sander, Theoretical crack path prediction, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 28, (2005), pp. 3-12.
- (9) 菊池正紀, 和田義孝, 清水勇登, 須山ひとみ, 重合メッシュ法を用いた溶接熱影響部におけるき裂進展解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.75, (2009), pp.123-128.
- (10) J. Fish, S. Markolefas, R. Guttal, P. Nayak, On adaptive multilevel superposition of finite element meshes, *Applied Numerical Mathematics*, vol. 14, (1994), pp. 135-164.
- (11) H. Okada, S. Endoh, and M. Kikuchi, On fracture analysis using an element overlay technique, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 72, (2005), pp. 773-789.

- (12) M. Maitireyimu, M. Kikuchi, and M. Geni, Comparison of Experimental and Numerically Simulated Fatigue Crack Propagation, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol. 3, No.7 (2009), pp. 952-967.
  - (13) 菊池正紀, M. Maitireyimu, 佐野裕隆, 表面き裂の疲労き裂進展クライテリオンを検討, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, (2010), pp.154-160.
  - (14) 菊池正紀, 和田義孝, 須賀一博, 大玉千香子, 疲労き裂進展挙動における K_{III} の影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.772 (2010), pp.1674-1680.
  - (15) 谷口竜徳, 柏原健, 原田昭治, 黒島義人, モード III 荷重下におけるき裂面摩擦機構の研究, 年次大会講演論文集 pp.1007-1008.
  - (16) Rybicki, KF, Kanninen MF, A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 9, (1977), pp. 931-938.
  - (17) R. J. Nuismer, An energy release rate criterion for mixed mode fracture, *International Journal of Fracture*, vol. 11, No. 2(1975), pp. 245-294.
  - (18) P. S. Theocaris, G. A. Kordomateas and N. P. Andrianopoulos, Experimental study of the T-criterion in ductile fractures, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 17, No. 5(1982), pp. 439-447.
  - (19) I. S. Putra and J. Schjve, Crack opening stress measurements of surface cracks in 7075-T6 aluminum alloy plate specimen through electron fractography, *Fatigue Fracture Engineering Mater. Structure*, Vol. 15, No. 4 (1992), pp. 323-338.
-