

MT試験片を用いた極低サイクル疲労における き裂進展式の評価

Evaluation of Crack Propagation Condition in Extremely Low Cycle Fatigue using MT Specimens

和田義孝¹⁾, 戸田翔希²⁾

Yoshitaka Wada, Shoki Toda

1) 博(工) 近畿大学 理工学部機械工学科 教授 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1, E-mail: wada@mech.kindai.ac.jp)

2) 近畿大学 総合理工学研究科 メカニクス系工学専攻 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

This study evaluates a proposed crack propagation condition for extremely low cycle fatigue. Generation phase and validation phase analysis are conducted using nonlinear finite element analysis. Crack propagation is simulated by nodal release method. The relationship between load point displacement and crack length is used for generation phase analysis. The result shows a good agreement with the experimental result except for near breaking cycle. Using generation phase analysis result, parameters of proposed crack propagation condition are determined. Those determined parameters are largely different from CT specimen parameters due to constraints effect caused by specimen shape and boundary conditions. We'd like to discuss the validity of the condition.

Key Words : Low cycle fatigue, crack propagation criterion, local approach and fracture mechanics

1. 緒言

破壊力学はさまざまなき裂進展現象へ適用し検討され、その知見は蓄積されてきた。しかし、さまざまな材料と荷重条件などを考慮した破壊のクライテリオンはなく、破壊様式を特定しその現象に適した破壊パラメータを用いてはならない。別の言い方をすると、数値解析により破壊の予測を行うためには、適切な構成式、適切な離散化モデル(有限要素法であればメッシュ)、物理量から得られる適切な破壊クライテリオン[1,2]を見出すことが重要である。

著者らはこれまでCT試験片の実験結果を用いて generation phase解析を試みた[3,4,5]。本報では提案した亀裂進展条件式が、異なる形状を持つMT試験片に対しても同様に有効かどうかを調べる。

2. 材料モデルとFEモデル

最終目標は、弾塑性解析(数十サイクル、大変形、大ひずみ、繰り返し荷重)のため、一般的な構成式の中から選ぶとすれば、非線形移動硬化則と等方硬化則を用いる必要がある。本報では、解析の妥当性を示すためにChabocheモデルと等方硬化の組み合わせを用いて解析を行う。Chabocheモデルは非線形移動硬化則を表現可能である。

$$\dot{\epsilon} = \sum_i^n \dot{\epsilon}_i = \frac{2}{3} \sum_i^n C_i \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma_i X_i \dot{p} \quad (1)$$

X は背応力テンソル、 ϵ^{pl} は塑性ひずみテンソル、 C_i と γ_i は材料定数、 p は累積相当塑性ひずみ、 n は硬化モデルの数を示し、上付きのドットは時間に関する1階微分を表す。

材料はA2024-T3、ヤング率70GPa、ポアソン比0.33とした。

サムネイル形状およびシアリップを含むモデルを生成するために六面体要素によるモデル化は極めて困難である。一方で、今回の実験結果からはき裂の形状は表面側で若干の進展の遅れがあるが、メッシュサイズ程度であったため、き裂前縁は直線形状でモデル化した。今後の精密なモデル化のため四面体二次要素を用いる。Fig.1にFEメッシュと亀裂前縁近傍部の例を示す。亀裂進展の間隔は0.15で統一した。なお板厚 $t=15\text{mm}$ で、モデルではその半分である7.5mmの寸法となっている。要素数は64,194、節点数は41,216である。

実験結果より、荷重点変位とき裂進展量の関係式を構築しこの近似曲線に基づき generation phase解析を実施した。この結果をFig.2に示す。なお、き裂進展量はコンプライアンス法により求めた。

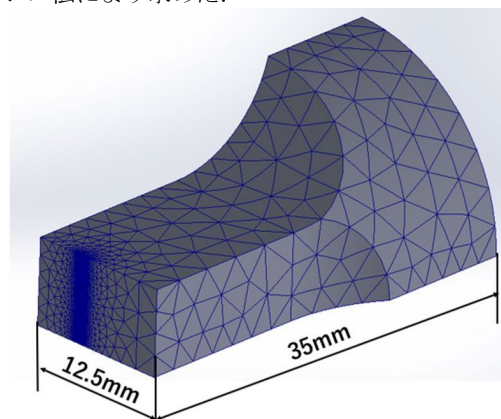


Fig.1 FE mesh of 1/8 MT specimen

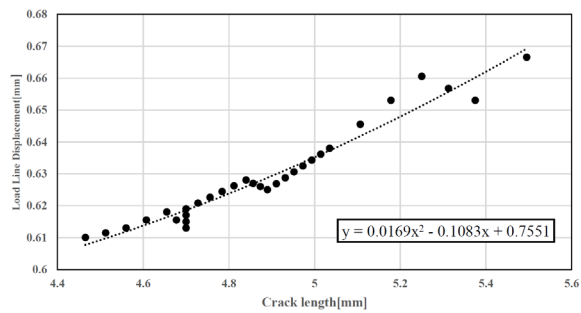
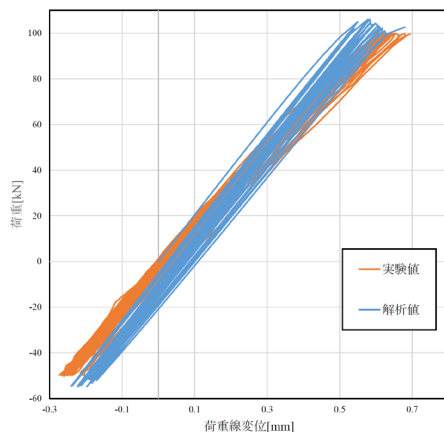


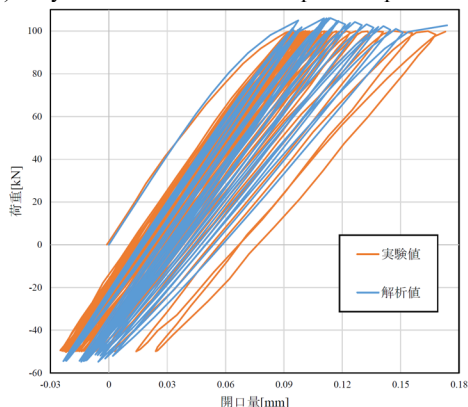
Fig.2 Approximation of load point displacement and crack length.

3. Generation phase解析

Fig.3にMT試験片の実験および解析による荷重と荷重点変位および亀裂開口量のヒステリシスを示す。荷重は単純引張による最大荷重を P_{\max} の0.85倍の荷重である100kNとし応力比 $R=-0.5$ とした。引張側の最大値はサイクル初期では過大に評価しているが徐々に100kNに近づいている。亀裂進展は一度に板厚すべての節点の拘束を解放することで亀裂進展を模擬する。進展条件はFig.2に示す関係を用いる。今回の亀裂前縁形状は直線であるが基本的に板厚中央の物理量を用いて、平均的な亀裂長さ（リガメント部面積から得られる）を用いる。



(a) Hysteresis of load and load point displacement.



(b) Hysteresis loops of load and COD.

Fig.3 Hysteresis loops of experiment at stress ratio $R=-0.5$

CT試験片とは応力比が異なるが、本評価においても、板厚の異なるモデルで同様の結果が得られた。以上よりある一定の再現性がある解析結果が得られたと判断した。数値解析において試験片形状に関わらず同様の傾向がみられた。

既報においては亀裂前縁近傍の物理量（相当塑性ひずみ増分と応力三軸度）を取得するために亀裂前縁形状の影響を調査した[5]。亀裂前縁形状は物理量分布に大きく影響を与えるため実験結果から得られる亀裂前縁形状は可能な限り精密に再現すべきである。一方で、全体の挙動である荷重、亀裂開口量などは平均的な亀裂長さ（リガメント部面積）で表現可能であり、亀裂進展則を局所アプローチにより記述するためには亀裂前縁形状の精密な再現が必要であることを示している。

これらの既報による結果および今回の解析結果も同様の議論が成り立つと仮定し検討を進める。

4. 提案式のMT試験片への適用

著者の研究グループでは、亀裂進展は相当塑性ひずみおよび応力三軸度が支配的[6]であることから主にこの2つを主たるパラメータとして亀裂進展式を評価してきた。一方で、破壊力学では線形であれば1パラメータ、弾塑性では2以上のパラメータが必要で、本来は3つのパラメータで破壊条件を記述できることが示唆されている。一方で、大きな塑性域を伴う亀裂進展は塑性域が対象である構造や試験片の形状に大きく依存して、亀裂先端の特異性が変化する。したがって、破壊力学においては形状による応力場の変化を何らかの方法で記述する必要がある。ここでは、O'DowdとShih[7]による式(2)は、相当塑性ひずみと応力三軸度は互いに γ の大きさに損傷に寄与する度合いを表している。この考え導入し式(3)を提案した[5]。CT試験片では、既報の解析結果[5]から A, B, C, m をTable 1ように決定した。 $0.7P_{\max}$ 以外にも0.8および0.9 P_{\max} の条件で定数値を決定した。これらの値を参考値として、MT試験片に対しても式(3)の有効性を示すために係数を決定した。

$$\Phi = (\sigma_m/\sigma_0)^\gamma (\bar{\epsilon}_{pl})^{1-\gamma} \quad (2)$$

$$F_{elcf} = \Delta \epsilon_{eq}^m + A \left(\delta/a_0 \right) \sigma_{tri}^{1-m} \geq B(a/a_0) - C \quad (3)$$

この値をTable 2に示す。この関係式を用いて、亀裂長さを初期亀裂長さで無次元化した a/a_0 の関係をFig.4に示す。亀裂進展中盤まではほぼ直線関係にあり良好な表現を可能としている。一方で、進展速度が急速に増大する破断直前の状態ではばらつきが大きくなるものの平均的な値としては許容できると考える。なお、CT試験片では、決定係数が0.987となり高い相関を示しており、他の荷重条件においても同様に0.9を超える決定係数の値が得られた。

一方で、その係数はCT試験片とMT試験片で大きく異なっていることが分かる。今後の詳細な検討が必要ではあるが、塑性域が大きく異なり拘束効果も異なる。現状ではこれらの係数と亀裂先端部分を含む塑性域の形状に關しての相関関係はいまだ不明である。今後の重要な課題である。

Table 1 Constant values for proposed fracture criterion [5]

CT specimen	B	C	A	m
$0.7P_{\max}$	3.463	2.697	0.90	0.1
$0.8P_{\max}$	3.472	2.649	0.55	
$0.9P_{\max}$	3.492	2.614	0.50	

Table 2 Constant values for MT specimen

MT specimen	B	C	A	m
$0.85P_{\max}$	0.265	-0.200	10.0	0.9

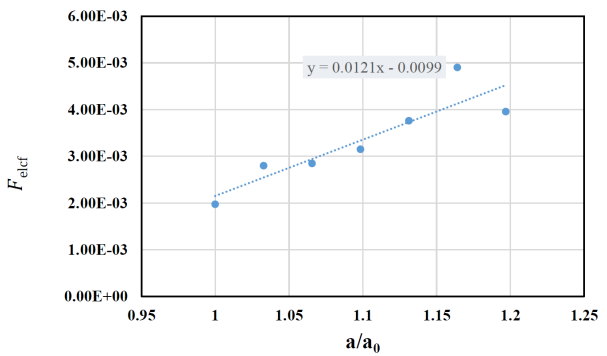


Fig.4 Linear regression of F_{elcf} vs. a/a_0

5. 結言

本研究では極低サイクル疲労を想定したき裂進展条件を提案し、その有効性を示すために、板厚の異なるCT試験片の相互評価を実施した。また、亀裂前縁形状の影響も調べた。その結果を基にして、提案した式を用いて局所亀裂進展を評価するためのvalidation phase解析を行った。

適用の可能性を示すためより多くの条件で調査する必要がある。本報の結果は、良好な一致を見せるが、相当塑性ひずみ影響が大きいと思われる挙動を示している。一方で、亀裂が存在する構造や試験片の形状に影響を受けるため、ローカルな状態とグローバルな状態の2つを表現できる方法が必要である。

参考文献

[1] V. Budaházy, et al, “Parameter-refreshed Chaboche model for mild steel cyclic plasticity behavior”, Periodica polytechnica, Civil Eng., 57/2, 139-155, 2013

[2] 池上他, 炭素鋼 SGV410 の疲労き裂進展の上限界特性と破壊抵抗曲線, 機論A, Vol.79, No.802, 692-696, 2012

[3] 和田, 低サイクル疲労による弾塑性き裂進展解析, 日本機械学会第29回計算力学講演会, No.16-4, 2 pages, 2016

[4] 和田, 極低サイクル疲労下におけるき裂先端近傍の力学状態を考慮したき裂進展則の提案, 第26回計算工学講演会公園論文集, No.26, 4 pages, 2021

[5] 和田, 極低サイクル疲労における板厚が異なる場合の亀裂進展条件の検討, 第27回計算工学講演会公園論文集, No.26, 4 pages, 2022

[6] J. Zuo, et al, "Crack tunneling effect of stress constraint", Proc. of IMECE04 2004 ASME Int. Mech. Eng. Congress, 8 pages, 2004

[7] Anderson, T.L., Vanapathy, N.M.R., and Dodds, R.H., Jr., Prediction of Specimen Size Dependence on Fracture Toughness for Cleavage and Ductile Tearing, Constraint Effect in Fracture, ASTM STP 1171, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 473-491, 1993