

平面応力条件下における非線形き裂力学の 簡便計算法

川村 壮司*¹

Simple calculation method of Non-Linear Crack Mechanics under plane stress
condition

Takashi KAWAMURA

In this research, we are investigating the simple calculation method using FEM software. The simplified calculation method obtained a result that was almost the same between the standard and the value to be predicted. However, it has been found that the calculation result becomes rough as it approaches the target value. If an accurate calculation result is obtained, it is necessary to use a conventional calculation method.

KEYWORDS : FEM, Non-Linear Crack Mechanics

1. はじめに

非線形き裂力学 (Non-Linear Crack Mechanics) は、弾塑性降伏条件下において破壊の予測を行うことができる工学的手法である。非線形き裂力学の有用性は、論文が投稿されている^{1),2)}。しかし、非線形き裂力学の解析は、1つの形状でも解析時間がステップごとに計算を合わせる必要があるため増大する傾向にある。

そこで、FEM 解析における解析を簡素化するため FEM ソフトの機能を有効に使用して、非線形き裂力学の有用性を明らかにする。まずは、平面応力状態について FEM のオートステップ機能を使用して解析を行い、その有用性を調査する。

2. 非線形き裂力学の原理

図 1 は、線形き裂力学と非線形き裂力学の概念を模式的に示したものである。

線形き裂力学と非線形き裂力学について図 1 を用いて二次元問題のモード I 型き裂材を例にとり説明する。以下、き裂先端を原点とする。

まず、線形き裂力学は、試験片(1)と実物(2)において、応力拡大係数 K_I が両者で等しいとき、き裂先端付近の弾性応力場が等しくなり、さらにレスポンスの等価性により弾塑性応力場も等しくなり、したがって試験片と実物で同一現象が生じることを保証するものである。すなわち、線形き裂力学は応力拡大係数 K_I を厳しさの尺度とするものである。

*1 機械工学科(Dept. of Mechanical Engineering), E-mail: t-kawamura@oyama-ct.ac.jp

次に、非線形き裂力学は試験片(1)と実物(2)において、FEM 解析で求められるき裂先端第ゼロ節点の y 方向の塑性ひずみ値 $\epsilon_{p_{y0}}$ が両者で等しいとき、弾塑性応力場が等しくなり、したがって試験片と実物で同一現象が生じることを保証するものである。すなわち、非線形き裂力学は $\epsilon_{p_{y0}}$ を厳しさを尺度とするものである。

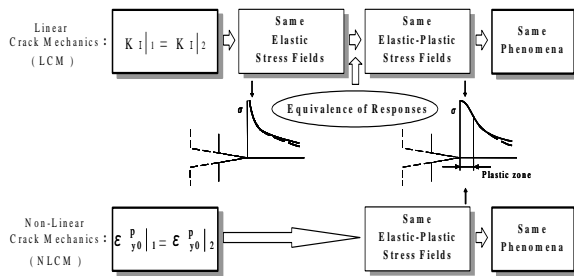


図1 線形き裂力学と非線形き裂力学の原理

3. 解析

3.1 解析形状

解析対象の試験片形状は板幅を一定にしてき裂長さを変化させた。解析はMSC社のソフトを用い試験片1/4とした。これにより、非線形き裂力学による破壊の予測が可能かのデータが得られる。

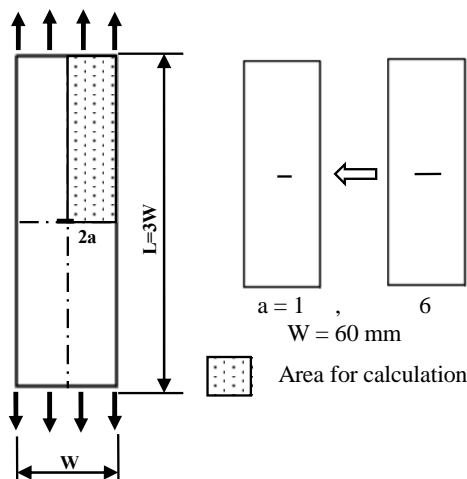


図2 解析形状と寸法

図2は、解析した試験片形状の寸法を示している。板幅 W を 60mm とし、板長を L とし、板幅 W の3倍とした。き裂長さは $a=1\text{mm}$ 、 $a=6\text{mm}$ とした。非線形き裂力学では、今までき裂長さ $a=6\text{mm}$ を基準としているので今回も基準として採用した。

3.2 要素分割

図3は、解析に使用したFEMの要素分割を示している。この要素分割は、FEM解析ソフトの誤差を検討するためにオート機能を使用せずに作成した。形状全体の比較を容易にするためである。

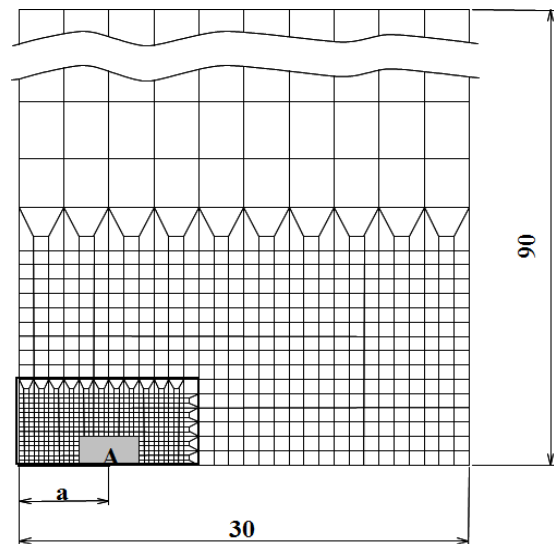


図3 要素分割 (全体)

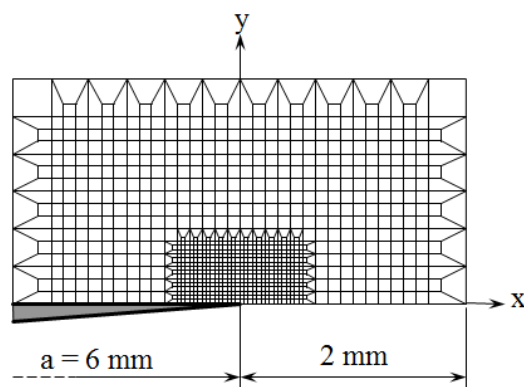


図4 要素分割 (A部詳細)

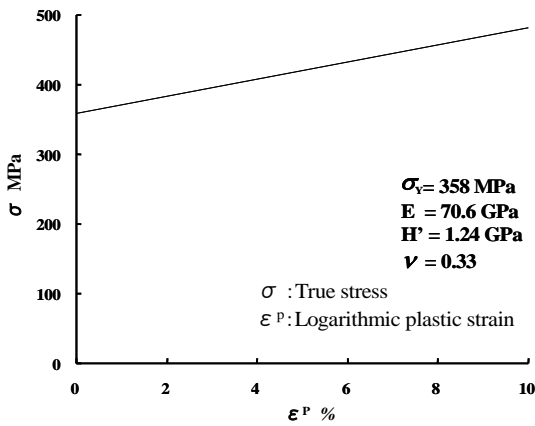


図5 真応力-対数ひずみ線図

図4は、解析に使用したFEMの要素分割のコアにした要素分割部分であるA部を示している。き裂先端近傍の要素分割に関しては、2つのき裂長さで誤差を抑えるため同じ形状を用いた。これにより、き裂先端近傍の影響を最小限にできると考えている。

解析条件について述べる。加工硬化特性としては、線形硬化則に基づく真応力-対数塑性ひずみ線図(図5)を用いた。本解析で用いた応力-ひずみ関係に関する定数は、降伏応力 $\sigma_Y=358\text{MPa}$ 、ヤング率 $E=70.6\text{GPa}$ 、 $H=d\sigma/d\varepsilon=1.24\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.33$ である。非線形方程式の解法はニュートン・ラプソン法による増分解法を用い、大変形の定式化ではアップデート・ラグランジェ法を用いた。

4. 解析結果

これより、非線形き裂力学の厳しさの尺度である ε_{y0}^P が成立するかを検証する。最初に、従来どおりの計算手法である人が行った計算値 (FEM解析で求められるき裂先端第ゼロ節点のy方向の塑性ひずみ値 ε_{y0}^P を試験片と実物で揃える作業をステップ数としている) で非線形き裂力学の成立を確認し、その値を利用してオートステップ機能を利用して非線形き裂力学が成立するかを検証する。

4.1 弾塑性解析

き裂長さ $a=6\text{mm}$ を基準として計算を行っている。

図6は、従来の計算手法で行った結果である。縦軸にy方向の塑性ひずみ値、横軸にき裂先端からの距離をとり、一点の塑性ひずみ値がき裂先端近傍の開口形状と一対一に対応しているのかを示している。これより、き裂長さが異なる2つの板材に対して非線形き裂力学を適用して計算すると破壊の予測ができる結果を得られた。

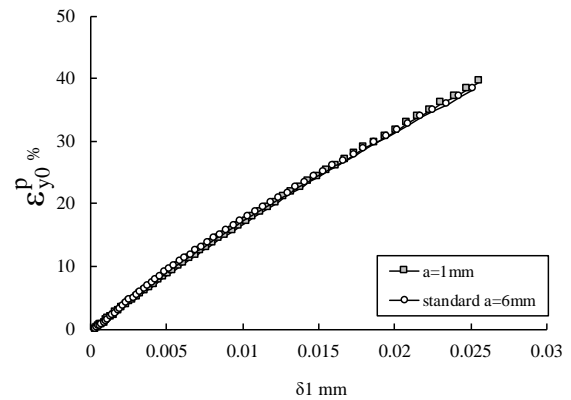


図6 従来の計算方法 (a=6mm 基準)

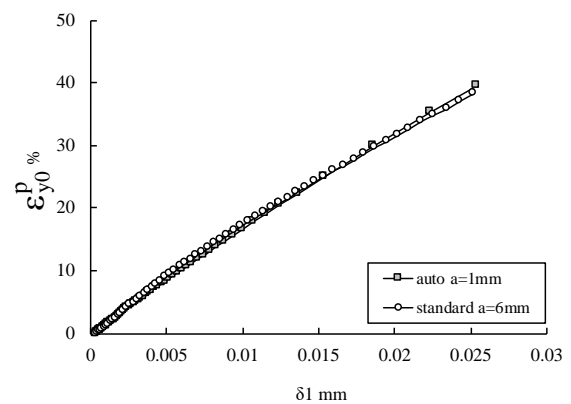


図7 オートステップによる計算方法 (従来 a=6mm 基準で a=1mm を予測)

図7は、先ほど従来の計算手法で求めたき裂長さ $a=6\text{mm}$ のデータを基準として用いて、弾塑性解析で人がワンステップずつ行う作業をFEMソフトの機能であるオートステップを利用して行った結果である。従来の計算手法で行った結果である。縦軸にy方向の塑性ひずみ値、横軸にき裂先端からの距離をとっている。これより、オートステップ機能を利用して非線形き裂力学は成立する。しかし、解析結果のデータを見ると弾塑性解

析の初期段階での数値の上がり方が細かく、解析目標値である 40%に近づくにつれ粗くなっている。したがって、塑性域が大きくなると非線形き裂力学の成立に対して信頼性が懸念される。

4. 2 破壊の予測

ここでは、FEM ソフトのオートステップ機能を利用して非線形き裂力学による破壊の予測をした場合の解析結果を検証する。

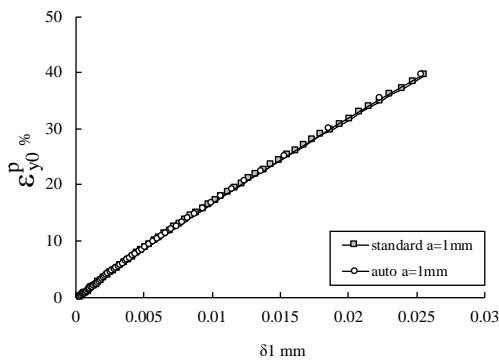


図8 オートステップによる計算方法
(従来 a=1mm 基準で a=1mm を予測)

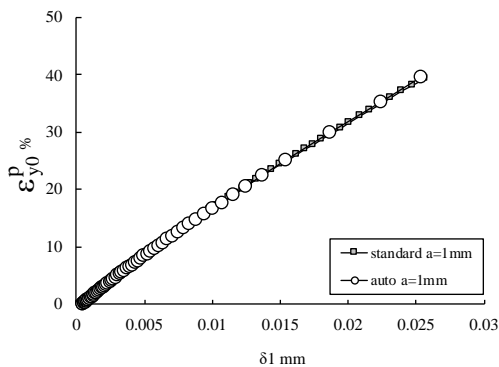


図9 オートステップによる計算方法 (拡大)

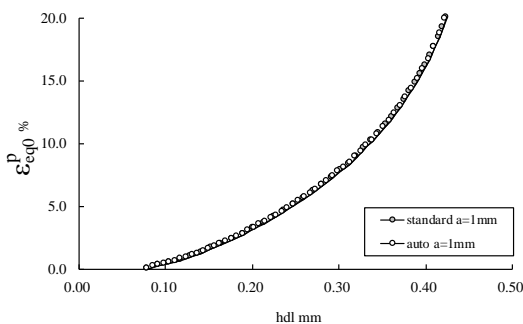


図10 オートステップによる計算方法
(相当塑性ひずみ)

図8は、a=1mm について従来の計算手法で求めた結果と、オートステップ機能を利用して計算し比較したものである。縦軸に y 方向の塑性ひずみ値、横軸にき裂先端からの距離をとっている。このように、ほぼ同じ計算結果が得られている。

図9は、先ほどの計算結果が粗くなっているものをわかりやすくしたものである。これより、解析目標値に近づくにつれ解析結果がワンステップで大きくなっていくことがわかる。

図10は、オートステップ機能を利用して計算したときの相当塑性ひずみと伸びの関係を示している。縦軸にき裂先端の相当塑性ひずみ値、横軸に帯板全体の伸びをとっている。これより、従来の計算手法とオートステップ機能を利用した計算手法はほぼ同じ結果が得られている。

5. まとめ

FEM 解析ソフトのオートステップ機能を利用することは計算時間の短縮に繋がるが目標とする値までに到達するまでに計算初期の結果が細かく得られる一方、目標値付近の結果より粗い計算を行っていることが判明した。

よって、試験片の伸びとしては同じであるため確認の計算等には適しているように見える。そのため、弾塑性解析で得られる結果の信頼性について調査が必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 西谷弘信・藤崎渉, 機論, 60-579, A(1994), 2525-2531.
- 2) 西谷弘信・橋本剛・藤崎渉, 機論, 64-626, A(1998), 2497-2501.

【受理年月日 2019年9月13日】