

# 平面応力条件下における非線形き裂力学の簡便計算 法と要素分割の関係

川村 壮司\*<sup>1</sup>

Relations of simple calculation method of Non-Linear Crack Mechanics under plane  
stress condition and the element division

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. If an accurate calculation result is obtained, it is necessary to use a conventional calculation method. It was confirmed that the calculation of NLCM was established using the function of FEM. It was confirmed that NLCM is established even if the element division of FEM is finely divided. It was confirmed that the auto step function of FEM had no effect.

KEYWORDS : FEM, Non-Linear Crack Mechanics

## 1. はじめに

非線形き裂力学は、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<sup>1),2)</sup>。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。三次元による解析を進めるためには、なるべく簡易な方法が求められる。昨年度は、FEM解析における解析を簡素化するため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、その有用性を確認した。

そこで、本年度は、非線形き裂力学の計算において、FEM解析におけるオートステップ機能を使

用したときの要素分割の影響について検証する。なお、き裂の解析においては、き裂先端近傍の最小要素長さを細かくすると計算精度の向上が得られるため要素分割を細かくする方向で検証した。

## 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

---

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

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。

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  $\varepsilon_{p_{y0}}$  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  $\varepsilon_{p_{y0}}$  を厳しさの尺度とするものである。

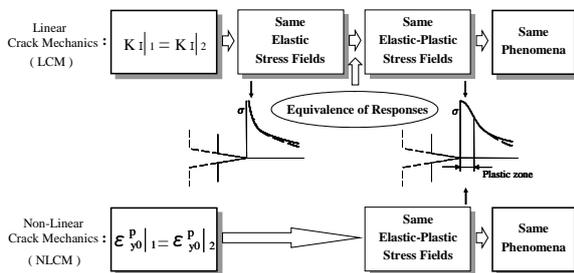


図1 線形き裂力学と非線形き裂力学の原理

### 3. 解析

#### 3.1 解析形状

解析対象の試験片形状は中央にき裂を有する帯板とした。解析はMSC社のソフトを用い試験片1/4を計算対象領域とした。

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  $60\text{mm}$  とし、板長を  $L$  として板幅  $W$  の3倍とした。き裂長さは  $a=6\text{mm}$  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検証する試験片として採用した。

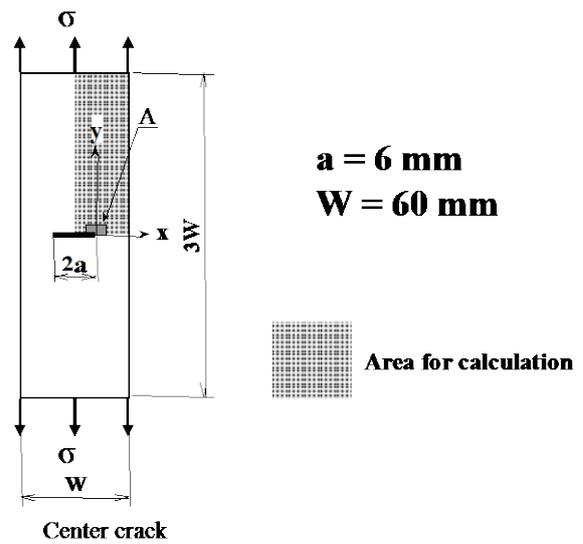


図2 解析形状と寸法

#### 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。

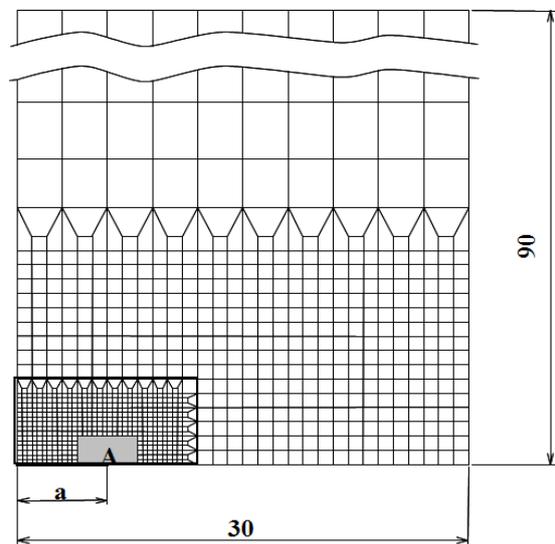


図3 要素分割 (全体)

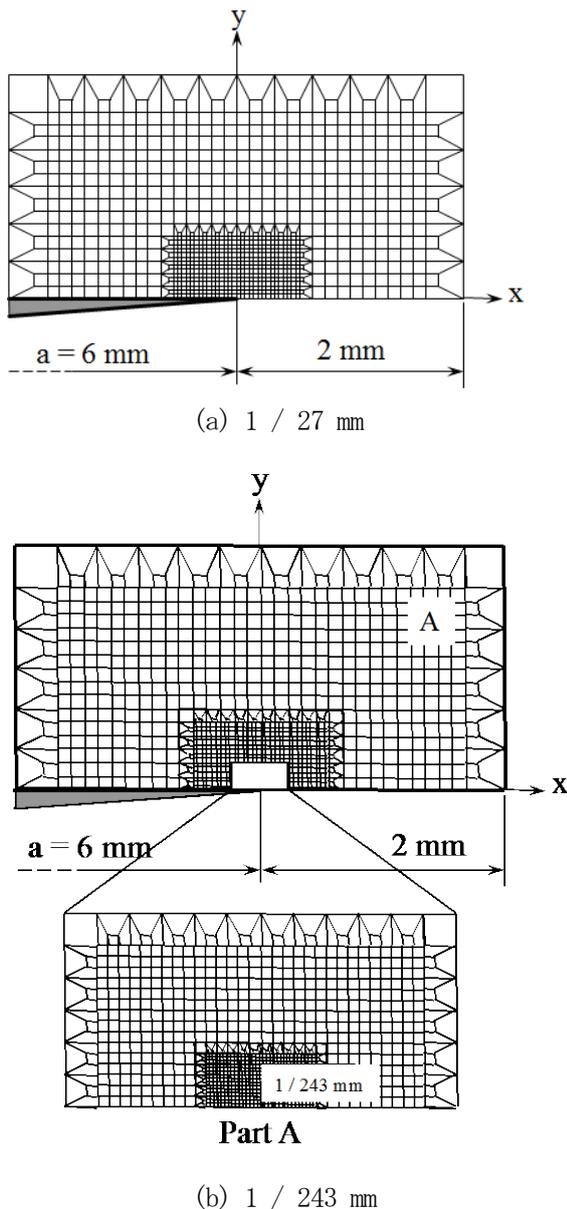


図4 要素分割 (A部詳細)

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。(a)は最小要素長さを1/27mmとしており、(b)は最小要素長さを1/243mmとしている。この2つの比較により、要素分割の影響があるかを検証した。なお、き裂先端近傍の要素分割に関しては、2つの試験片で計算誤差を抑えるため同じ形状を用いており、き裂先端近傍の影響を最小限にできると判断して使用している。

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・ラブ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。

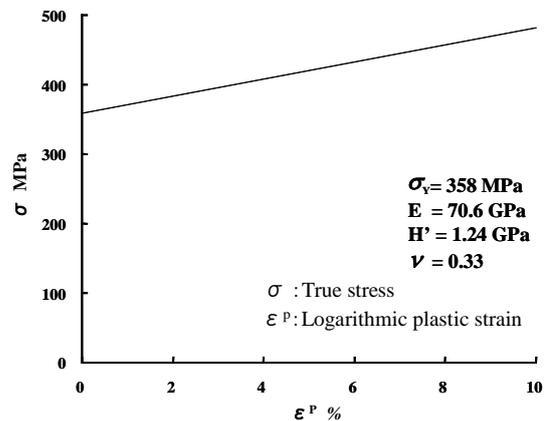


図5 真応力-対数ひずみ線図

#### 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  $\varepsilon_{Py0}$  が要素分割を変更しても成立するかを検証する。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  $\varepsilon_{Py0}$  を試験片と実物で揃える作業をステップ数としている) と非線形き裂力学の成立を確認されている。本年度は、要素分割を変更して、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(要素分割の依存)

解析対象は、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とオートステップ機能と利用した結果の比較である。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孔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、き裂長さが同じ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従来法

と同じ計算結果を得られ、要素分割に依存するかどうかで破壊の予測が可能かの判断材料とする。

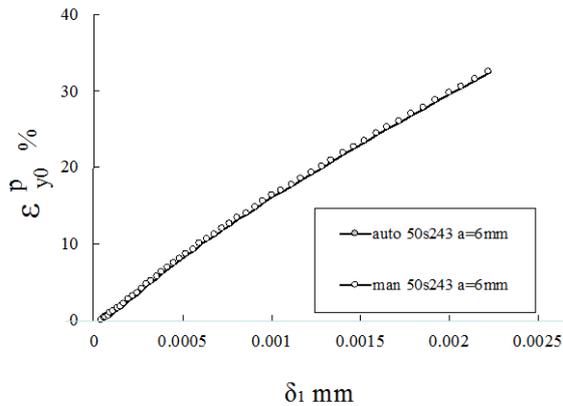


図6 従来法との比較

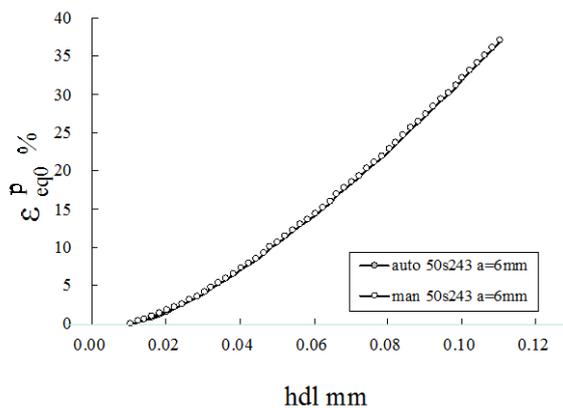


図7 相当塑性ひずみとの関係

図7は、先ほど従来の計算手法で求めたき裂長さ  $a=6\text{mm}$  のデータを用いて、弾塑性解析で人がワンステップずつ行う作業と 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との比較である。縦軸に相当塑性ひずみ値、横軸に試験片全体の伸びをとっている。これより、オートステップ機能を利用しても同じ計算結果を得られ成立する。

#### 4. 2 オートステップ数の確認

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。

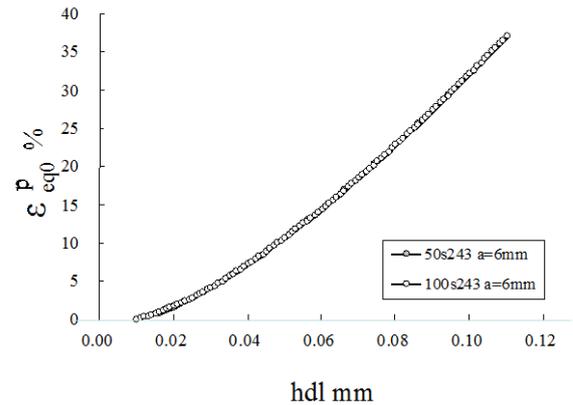


図8 オートステップ数による違い

図8は、 $a=6\text{mm}$  について、オートステップ機能を利用して計算しオートステップ数を 50s と 100s として比較したものである。縦軸に相当塑性ひずみ値、横軸に試験片全体の伸びをとっている。このように、ほぼ同じ計算結果が得られている。

### 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について検証した。その結果、非線形き裂力学の計算に関してオートステップ機能を利用することは有用であることが判明した。また、試験片の伸びを同じにして相当塑性ひずみとの関係も検証したが同じであるため確認の計算等には適しているように考えられる。

#### 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 2020年9月11日]