

# 非線形き裂力学の適用限界に関する研究

川村 壮司\*<sup>1</sup>

## A study about the application limit of Non-Linear Crack Mechanics

Takashi KAWAMURA

In this study, I investigate an application limit of Non-Linear Crack Mechanics (NLCM). NLCM is applied up to an equivalent plastic strain value of about 30%. Therefore, NLCM is applied to the equivalent plastic strain value of about 45% for verification. NLCM was applied to a strip with a crack in the center up to an equivalent plastic strain value of about 45%. As a result, NLCM can be applied to the equivalent plastic strain value of about 45% for two types of problems of strips with a center crack.

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<sup>1)</sup>。非線形き裂力学の有用性については、多くの論文が投稿されている<sup>2)</sup>。しかし、非線形き裂力学の解析は、解析パラメータの相当塑性ひずみ値が 28%程度までに留まっており、それ以上の解析について調査はされていないようである。なお、簡易計算方式では、相当塑性ひずみ値が 35%までを従来法と比較検討している。

そこで、FEM 解析において解析パラメータの相当塑性ひずみ値を 28%以上の 45%程度を目安に行い、その有用性を調査した。また、非線形き裂力学の適用限界を調べることが目的ではあるが、応力拡大係数についても比較しやすいように計算

を実施して検証した。

### 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ている。

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。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。

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  $\varepsilon_{p,0}$  が両者で等しい

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

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  $\varepsilon_{p0}$  を厳しさを尺度とするものである。

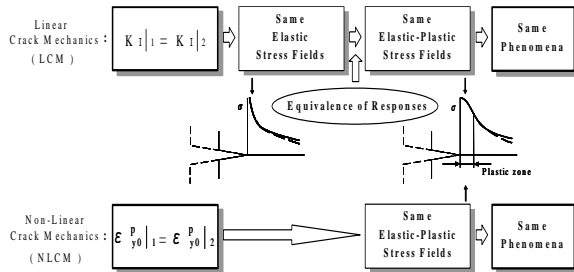


図1 線形き裂力学と非線形き裂力学の原理

### 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2種類に変化させた。解析はMSC社の応力解析専用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。

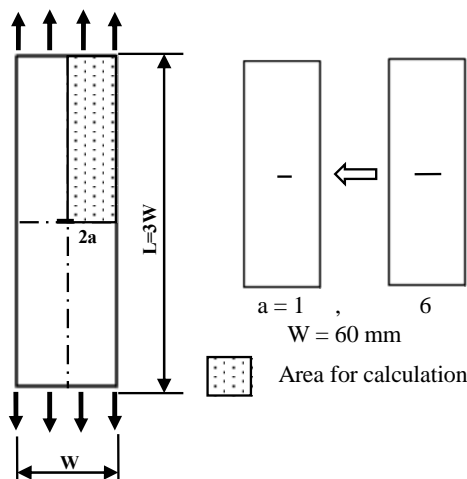


図2 解析形状と寸法

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  $60\text{mm}$  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。図には示していないが応力拡大係数との比較のため中央き裂問題だけではなく両側き裂問題に関しても解析結果を示す。なお、非線形き裂

力学では、き裂長さ  $a=6\text{mm}$  を基準として計算を実施している。

#### 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。き裂先端近傍の要素分割以外は、段階的に要素を大きくしている。

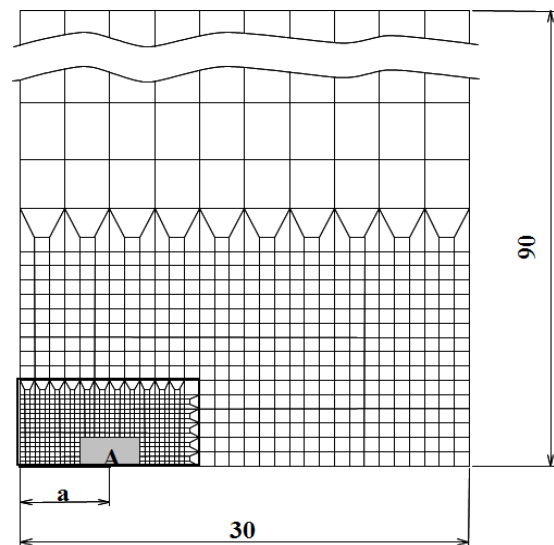


図3 要素分割 (全体)

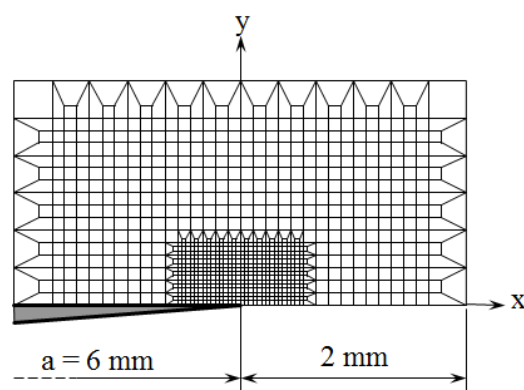


図4 要素分割 (A部詳細)

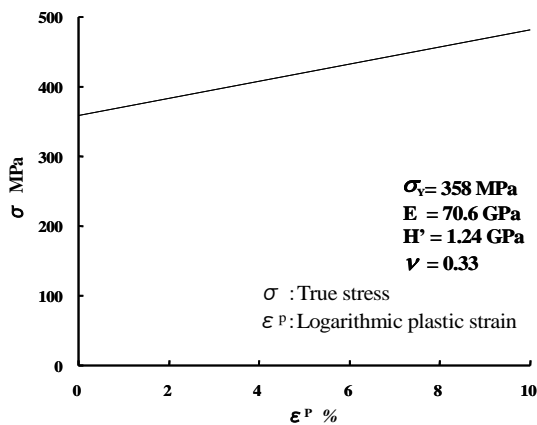


図5 真応力-対数ひずみ線図

図4は、解析に使用したFEMの要素分割のき裂先端近傍の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、図5の線形硬化則に基づく真応力-対数塑性ひずみ線図を用いた。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  $\sigma_s=358\text{MPa}$ 、ヤング率  $E=70.6\text{GPa}$ 、 $H=d\sigma/d\varepsilon=1.24\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.33$  とした。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

非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  が30%以上でも成立するかを検証する。検証は、基本的なき裂先端第一節点の開口変位を用いて行う。これは、き裂の開口変位は全体的に見る必要があるがき裂先端からの距離が一番近い第一節点に起因して開口形状が左右されるためである。最初に、従来どおり  $\varepsilon_{p_{y0}}$  が30%程度まで行った計算値で非線形き裂力学の成立を確認し、その後、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  を45%程度までを目安に計算を実施して検証する。

##### 4. 1 非線形き裂力学と応力拡大係数の比較

ここでは、中央なき裂を有する帯板のき裂長さ  $a=6\text{mm}$  を基準として計算を実施している。また、両側なき裂を有する帯板についても解析を行い非線形き裂力学が成立するかを確認している。その後、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  が30%以上でも成立するかを検証する予定である。

図6は、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  が30%までの解析結果である。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、中央なき裂を有する帯板と両側なき裂を有する帯板のき裂長さが異なる4つの板材に対して非線形き裂力学を適用して計算した。その結果、形状およびき裂長さが違うにも関わらず一直線上に一致しており、破壊の予測ができる結果を得られた。

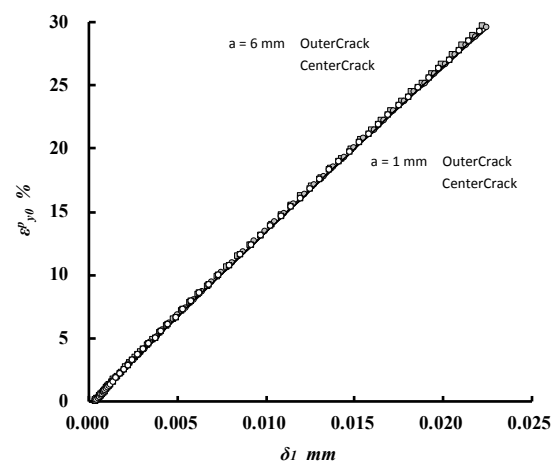


図6 相当塑性ひずみ30% (a=6mm基準)

図7は、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  が30%までの解析結果を用いて同じように応力拡大係数について求めた結果を示している。縦軸に応力拡大係数、横軸にき裂先端からの距離をとり、応力拡大係数とき裂先端近傍の開口形状とが一対一に対応しているのかを示している。これより、先程との結果とは違い、応力拡大係数の適用限界の結果が得られている。

まずは、き裂長さが違う形状について、 $a=6\text{mm}$  と  $a=1\text{mm}$  では、一対一に対応していない状態で応力拡大係数が大きくなるにつれ離れていく傾向にある。次に、中央き裂と両側き裂の形状について、き裂長さが同じ同士  $a=6\text{mm}$  では、き裂長さが同

じということもあり、比較的緩やかに応力拡大係数とき裂先端第一節点の開口変位が一致している。

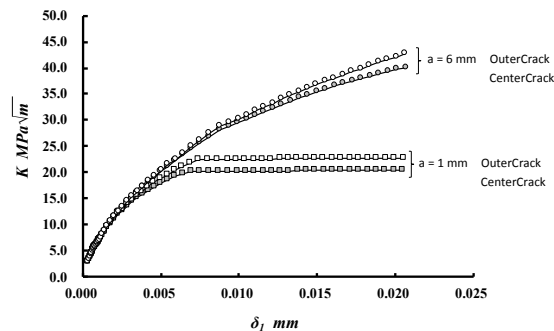


図7 応力拡大係数 (a=6mm 基準)

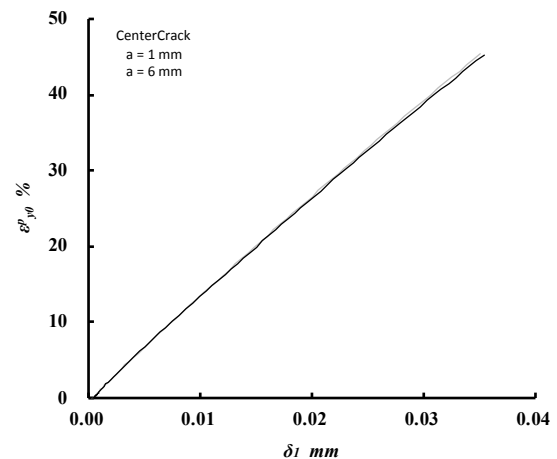


図9 相当塑性ひずみ値 45% (記号なし)

#### 4. 2 適用限界

非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{pY0}$  が 30%以上でも成立するかを検証するため  $\varepsilon_{pY0}$  を 45%程度までを目安に計算を実施して検証する。

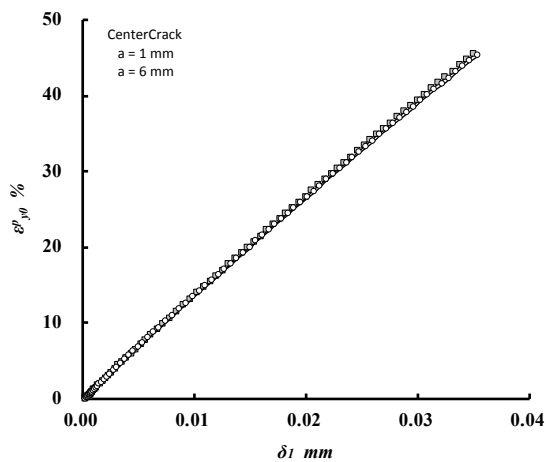


図8 相当塑性ひずみ値 45%

図8は、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{pY0}$  が 45%までの解析結果である。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、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がわかる。すなわち、 $\varepsilon_{pY0}$  が 45%まで中央にき裂を有する帯板のき裂長さが異なる2つの帯板について成立することが判明した。

図9は、先ほどの計算結果からグラフの記号を非表示にしてわかりやすくしたものである。これより、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ほぼ一致しており、ほぼ一直線上にあることから成立していることがよくわかる。

#### 5. まとめ

非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{pY0}$  が 45%以上でも成立するかを検証した。

今回は、き裂を有する帯板のき裂長さが異なる2つの問題についてのみであるので、他のき裂長さについても調査が必要であると考えられる。

#### 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 2021年9月16日]