

平面ひずみ条件下における非線形き裂力学に関する 研究

川村 壮司*¹

A study about on Non-Linear Crack Mechanics under Plane Strain Conditions

Takashi KAWAMURA

In this study, I apply Non-Linear Crack Mechanics (NLCM) under plane strain conditions and verifying its usefulness. NLCM is applied up to an equivalent plastic strain value of about 30% under plane stress conditions. Therefore, NLCM is applied to the equivalent plastic strain value of about 30% for verification under plane strain conditions. As a result, NLCM can be applied to the equivalent plastic strain value of about 30% for three types of problems of strips with a center crack under plane strain conditions.

KEYWORDS : FEM, Non-Linear Crack Mechanics, Plane Strain

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¹⁾。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²⁾。しかし、非線形き裂力学の解析は、平面応力条件下において適用されたものが大半で、平面ひずみ条件下において適用し、き裂長さが短い形状について調査はされていないようである。

そこで、FEM 解析において平面ひずみ条件下において非線形き裂力学を適用し、相当塑性ひずみ値 30%程度までの有用性について調査した。また、き裂長さが短い形状についても適用した。なお、平面ひずみの解析から形状の厚さ方向の特性

について知見が得られる。

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

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

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。

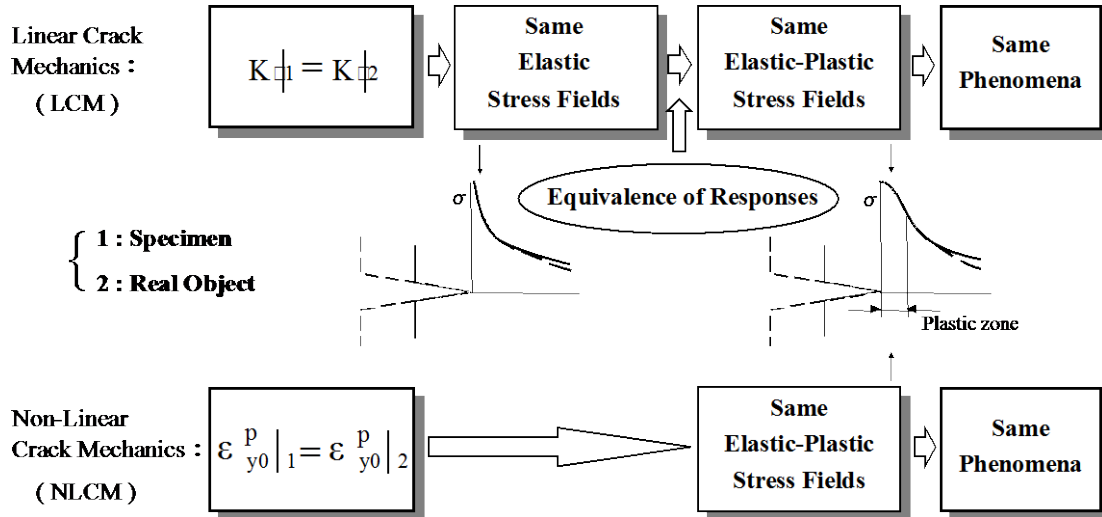


図 1 線形き裂力学と非線形き裂力学の原理

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 3 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た。実際の解析では、試験片 1/4 を対象とした。これは、中央にき裂を有する帯板と考えると全体的に解析する必要がないからである。

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 として板幅 W の 3 倍とした。き裂長さは $a=1\text{mm}$ 、 $a=6\text{mm}$ 、 $a=18\text{mm}$ とした。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。基準とした理由は板幅に対してリガメントが十分に確保されているからである。

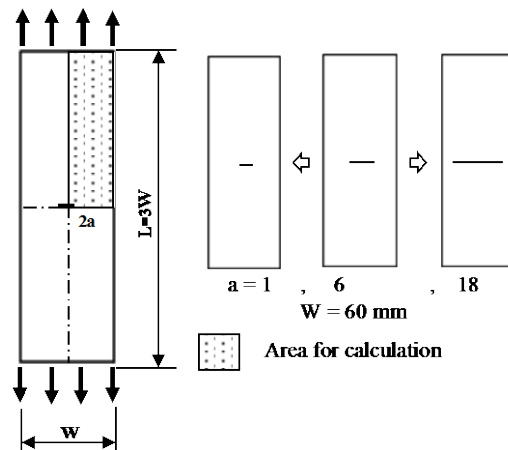


図 2 解析形状と寸法

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。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。これは、き裂先端近傍より十分離れているため計算誤差に影響を与えないと考えられる。

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つのき裂長さで計算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 $\sigma_Y=358\text{MPa}$ 、ヤング率 $E=70.6\text{GPa}$ 、 $H=d\sigma/d\varepsilon=1.24\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.33$ とした。

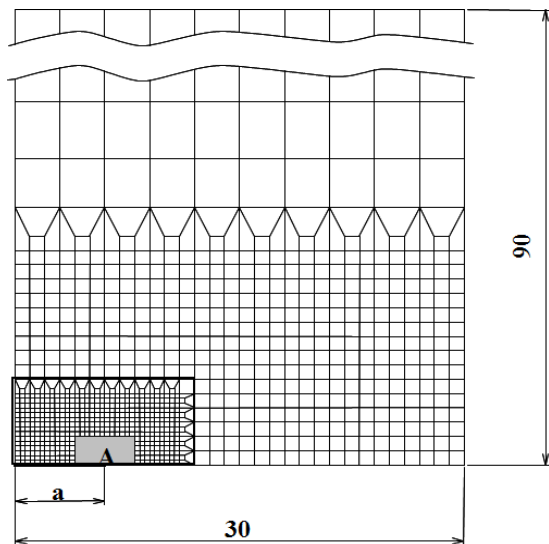


図 3 要素分割 (全体)

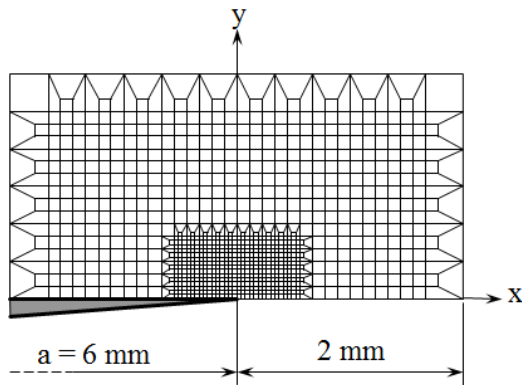


図 4 要素分割 (A 部詳細)

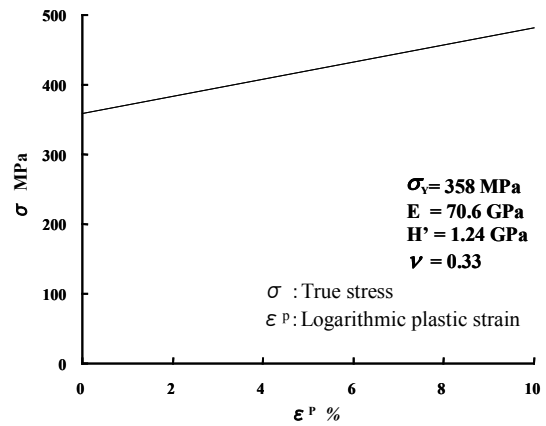


図 5 真応力—対数ひずみ線図

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 $\varepsilon_{P_{y0}}$ が平面ひずみ条件下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る。これは、き裂の開口変位は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。

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、き裂長さ $a=1\text{mm}$ とき裂長さ $a=18\text{mm}$ に適用して計算を実施している。

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き裂長さが異なる 3 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ある程度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。しかし、き裂長さ $a=1\text{mm}$ に関しては注意が必要である。き裂長さが短いことにより厚さ方向の補正が必要と考えられる。

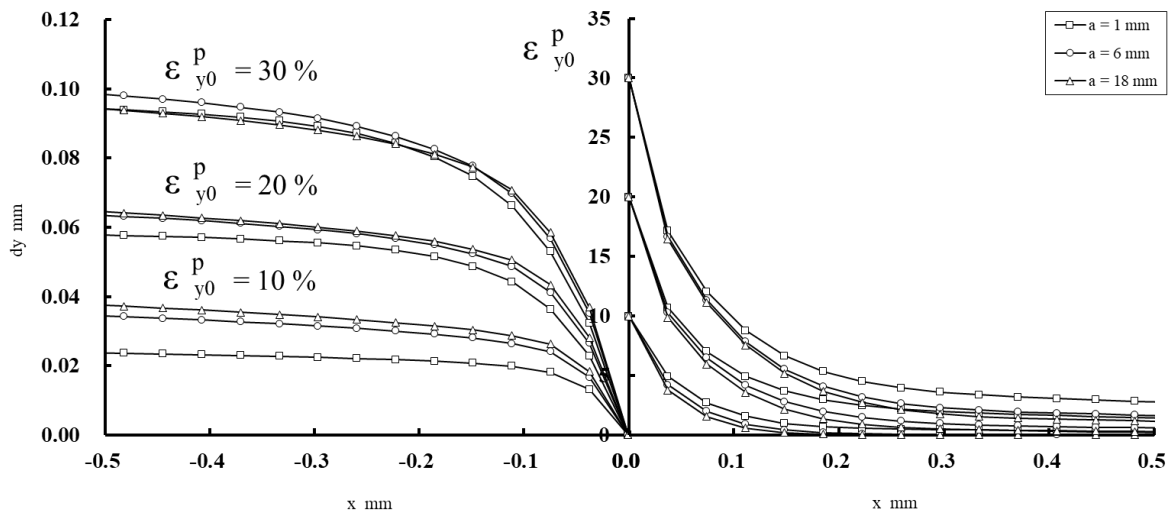


図 7 き裂開口変位と塑性ひずみ分布

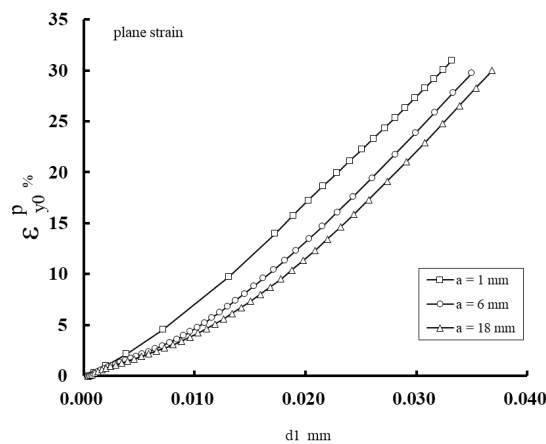


図 6 相当塑性ひずみ (a=6mm 基準)

図 7 は、非線形き裂力学の厳しさの尺度である ϵ_{y0}^p が 30% までの解析結果を用いて、き裂開口変位と塑性ひずみ分布について求めた結果を示している。同時に見ることでき裂の状況について判断ができることになる。縦軸にき裂開口変位と塑性ひずみ値、横軸にき裂先端からの距離をとっている。これにより、塑性ひずみ値とき裂先端近傍の開口形状との関係がわかりやすくなる。

き裂の開口変位について見てみる。まずは、き裂長さが違う形状の、 $a=6\text{mm}$ と $a=1\text{mm}$ では、一対一に対応していない状態ではあるがき裂の開口が大きくなるにつれ一致していく傾向にある。塑性ひずみ値は離れているのに開口形状は一致するという矛盾が起きている。

次に、き裂長さが違う形状の、 $a=6\text{mm}$ と

$a=18\text{mm}$ では、き裂の開口変位が大きくなるにつれても一対一に対応にほぼ対応していることがわかる。また、塑性ひずみ値も大きくなるにつれても一対一に対応にほぼ対応していることがわかる。き裂長さがある程度長いと厚さ方向の補正が必要ないことがわかる。

5. まとめ

非線形き裂力学の厳しさの尺度である ϵ_{y0}^p が平面ひずみ条件下でも成立するかを検証した。これより、非線形き裂力学は平面応力と平面ひずみの両方で成立することが判明した。ただし、平面ひずみ条件下において、き裂長さが短いと注意を要することがわかった。

今回は、き裂を有する帯板のき裂長さが異なる 3 つの問題についてのみということもあり、他のき裂長さについても調査が必要であると考えます。

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 2022 年 9 月 14 日]