

# 大規模降伏条件下におけるき裂開口形状の比較

川村 壮司\*<sup>1</sup>

## Comparison of Crack Opening Shape under Large Scale Yield Conditions

Takashi KAWAMURA

This paper is the result that applied Non-Linear Crack Mechanics when Plane stress condition and Plane strain condition. The difference in crack opening shape under plane stress conditions and plane strain conditions was investigated up to an equivalent plastic strain value of approximately 20%.

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

### 1. はじめに

き裂を有する材料の破壊の予測には、小規模降伏条件下では線形破壊力学が有効であることが実証されている。そこで、西谷は大規模降伏条件下にも有用な非線形き裂力学を提案し、その有効性を検証している<sup>1)</sup>。しかし、大規模降伏条件下において、平面応力状態と平面ひずみ状態による塑性ひずみ分布とき裂の開口形状を詳細に比較したものはないようである。

そこで本研究は、FEM 解析において平面応力条件下と平面ひずみ条件下でのき裂の開口形状の違いについて相当塑性ひずみ値 20%程度まで計算して調査した。き裂の開口形状を知ることが破壊の予測に関連する。

### 2. 非線形き裂力学の原理

非線形き裂力学は、FEM 解析により得られた解を利用して、試験片の強さから実物の強さを予測するものである。

図1は、非線形き裂力学と線形き裂力学の概念を模式的に示したものである。

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。

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。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。

一方、線形き裂力学は、試験片(1)と実物(2)に

---

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

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、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。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。

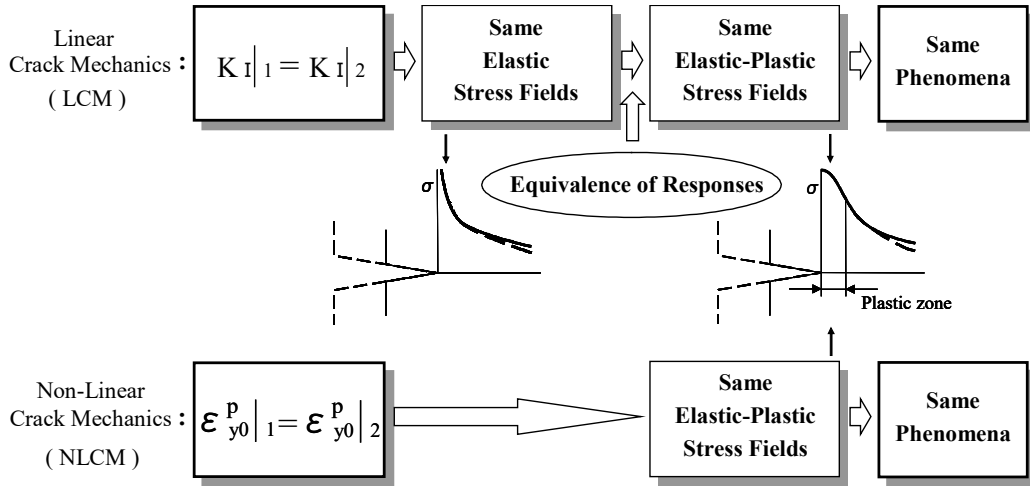


図1 線形き裂力学と非線形き裂力学の原理 [ 1 : 試験片 , 2 : 実物 ]

### 3. 解析形状および解析条件

図2は、FEM解析で平面応力条件下と平面ひずみ条件下に用いた、中央にき裂を有する帯板の形状と寸法を示している。また、寸法は図2に示すとおりである。

図3は、FEM解析で用いた解析形状に対する要素分割を示している。なお、計算対象領域は対称性を考慮して図2の細線を施した1/4の部分に該当している。

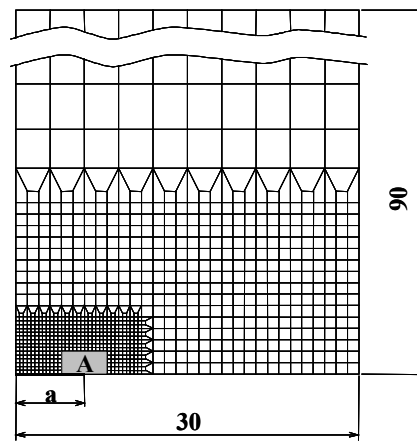


図3 FEM要素分割[mm]

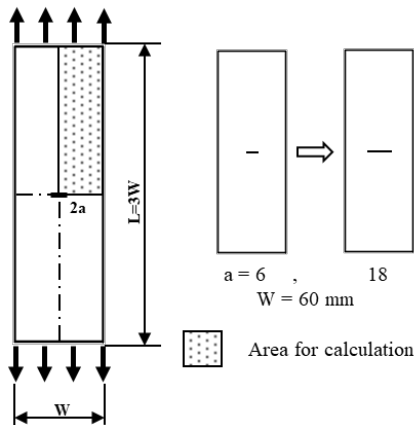


図2 解析対象

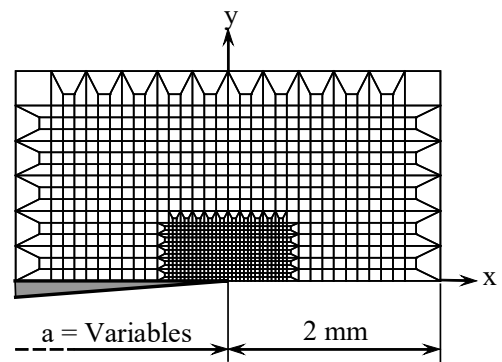


図4 A部拡大

図4は、図3におけるAの部分の詳細について示したものである。

非線形き裂力学の解析条件について述べる。加工硬化特性としては、図5に示す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  $E=70.6\text{GPa}$ 、 $H=d\sigma/d\varepsilon$ 、 $\varepsilon=1.24\text{GPa}$ 、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・ラグランジュ法を用いた。

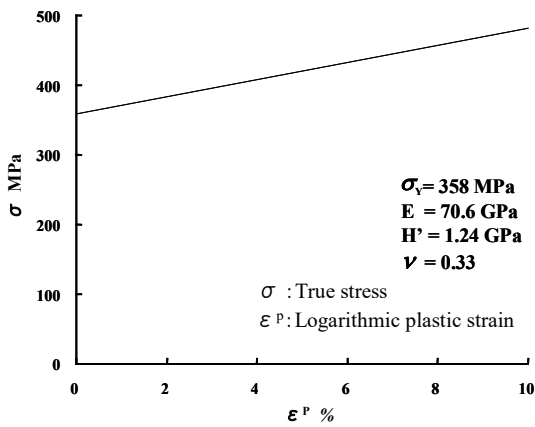


図5 真応力—対数ひずみ線図

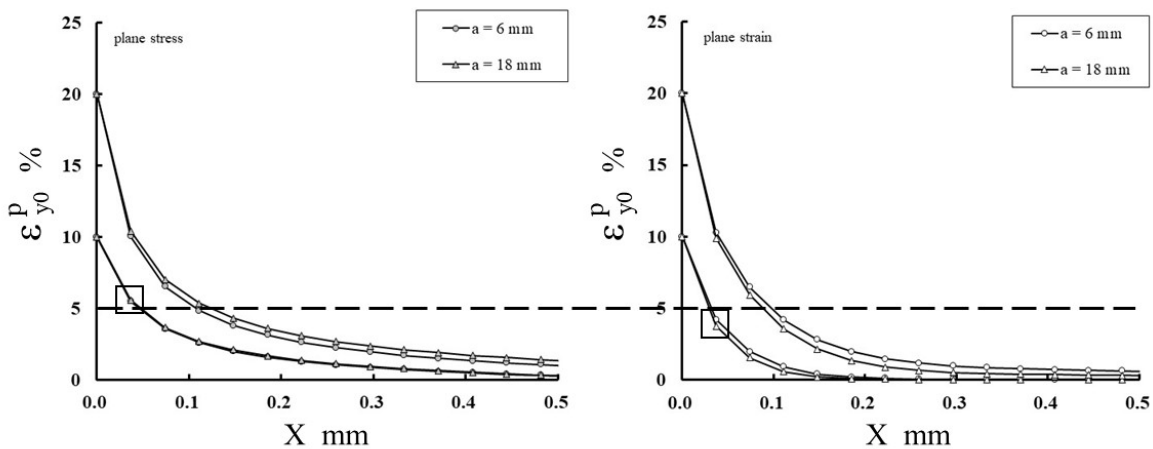
#### 4. 比較

ここでは、非線形き裂力学の解析に基づいて、平面応力条件下で解析と平面ひずみ条件下で解析、それぞれ得られた結果について検証する。

非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  が20%までの解析結果である。なお、中央に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  $a=18\text{mm}$  に適用して計算を実施している。

図6は、非線形き裂力学を平面応力条件および平面ひずみ条件下に適用し得られた塑性ひずみ分布である。これより、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  を一定で得られた塑性ひずみ分布は、き裂長さに関係なくなだらかによく一致する。すなわち、平面応力条件下（図左側）および平面ひずみ条件下（図右側）において、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\varepsilon_{p_{y0}}$  は有用であることを示している。また、平面応力条件下（図左側）および平面ひずみ条件下（図右側）では、 $\varepsilon_{p_{y0}}=10\%$  のときのき裂先端第一節点について相違が見られる（図中の四角部分）。き裂の開口形状に違いがあることを示唆している。

図7は、非線形き裂力学を平面応力条件および平面ひずみ条件下に適用し得られた塑性ひずみ値とき裂先端第一節点の関係である。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。



(a)

(b)

図6 塑性ひずみ分布

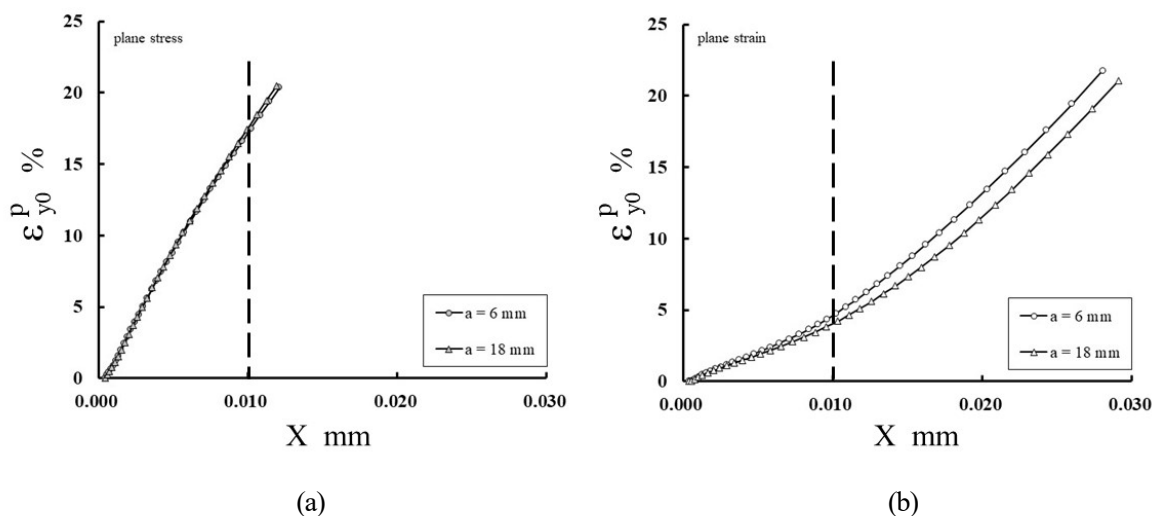


図7 塑性ひずみ値とき裂先端第一節点の関係

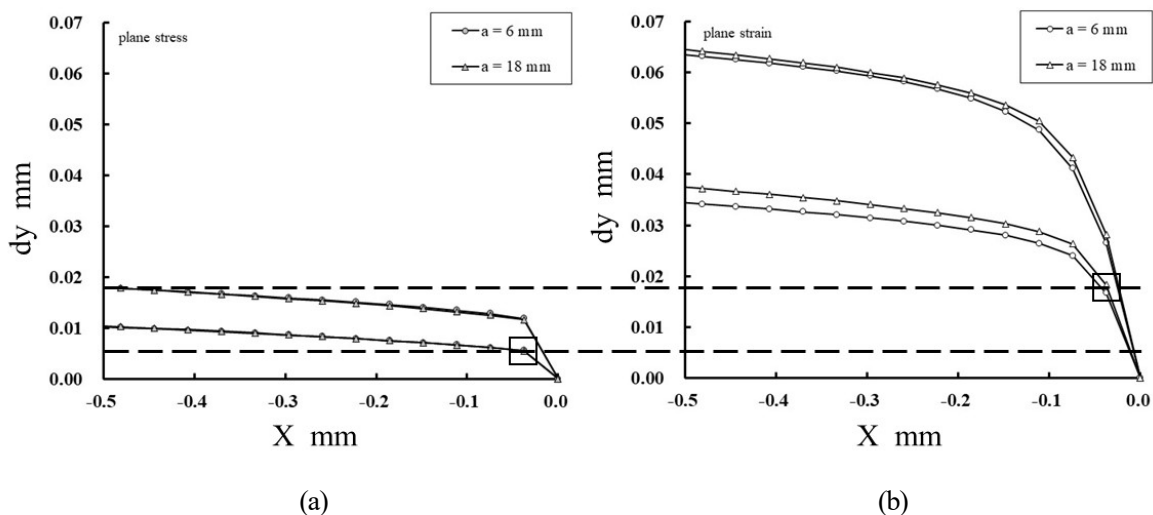


図8 き裂開口形状

これより、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\epsilon_{y0}^P$  を一定で得られた平面応力条件下（図左側）および平面ひずみ条件下（図右側）における塑性ひずみ値とき裂開口第一節点、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。また、塑性ひずみ値とき裂開口第一節点の関係も異なる傾向を示している。

図8は、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\epsilon_{y0}^P$  が20%までの解析から得られたき裂開口変位である。これより、図6と同じ平面応力条件下（図左側）および平面ひずみ条件下（図右側）では、 $\epsilon_{y0}^P=10\%$ のときのき裂先端第一節点について相違が見られ（図中の四角部分）、その後のき裂開口形

状に大きな違いが見られる。

## 5. おわりに

本研究で、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\epsilon_{y0}^P$  が20%までの解析結果から得られた知見として、非線形き裂力学を平面応力条件下および平面ひずみ条件下において、非線形き裂力学の厳しさの尺度である  $\epsilon_{y0}^P$  は有用であり、き裂開口形状に違いがあることを示すことができた。

### 参考文献

- 1) 西谷弘信・藤崎渉, 機論, 60-579, A(1994), 2525-2531.

[受理年月日 2023年9月15日]