

非線形き裂力学の紹介

Introduction of Non-Linear Crack Mechanics

川村 壮司

Takashi KAWAMURA

1. はじめに

西谷によって提案された非線形き裂力学は、大規模降伏条件下におけるき裂による破壊荷重を予測する工学的手法である。

機械や構造物においては、材料中にき裂状欠陥が存在したり使用中に微小なき裂が発生することも稀ではないので、き裂をもつ部材の強度評価は実用上も極めて重要な課題である。機械や構造物を安全に使用するためには、その強度予測体系の確立が強く望まれる。

これまで、非線形き裂力学は二次元平面応力問題の幾何学的条件が異なる場合、組合せ応力問題などに適用され、その有用性が示されている。しかし、非線形き裂力学の有用性を示すためには、加工硬化特性が異なる場合についても調べておく必要がある。

そこで本論文は、大規模降伏条件下で有用な非線形き裂力学について、加工硬化特性が異なる場合に適用した結果を述べるとともに、非線形き裂力学の紹介としたい。

2. 非線形き裂力学の概念

非線形き裂力学の概念について二次元問題のモード I 型き裂材を例にとって説明する。以下、き裂先端を原点とする。

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。

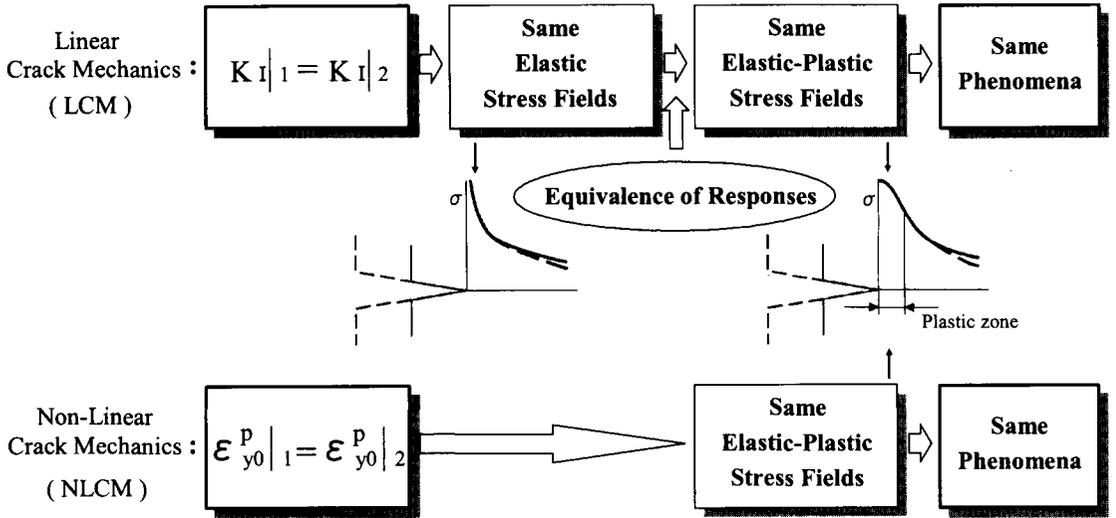
線形き裂力学は、試験片 (1) と実物 (2) において、応力拡大係数 K_I が両者で等しいとき、き裂

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。

一方、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 ϵ_{y0}^p 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 ϵ_{y0}^p を厳しさの尺度 (力学的厳しさを表す尺度) とするものである。

以下に、NLCCM でき裂発生荷重を予測するときの具体的な方法について述べる。

今、大規模降伏条件下において、き裂を有する一つの帯板材のき裂発生時の引張り荷重が求まっているとする。このとき寸法の異なるき裂を有する帯板のき裂発生時の引張り荷重の予測法について説明する。まず、き裂発生時の引張り荷重が実験で求められている形状について、その荷重が作用するときの FEM 解析を行いき裂先端第ゼロ節点の y 方向の塑性ひずみ ϵ_{y0}^p を求める。次に、予測する方の形状について同様に FEM 解析を行い、 ϵ_{y0}^p が先に求められた ϵ_{y0}^p の値に一致する荷重を求める。その荷重が第二の試験片におけるき裂発生時の引張り荷重の予測値である。



ϵ^p_{y0} : the value of plastic strain at a crack tip obtained by FEM [y : tensile direction]
Fig.1 Linear crack mechanics and non-linear crack mechanics [1 : Specimen , 2 : Real Object].

3. 解析条件

図 2 は、平面応力条件下の解析に用いた形状と寸法を示している。形状は中央にき裂を有する帯板である。また、寸法は図 2 に示すとおりである。

図 3 は、本解析に用いた形状に対する要素分割を示している。計算対象領域は対称性を考慮して細線を施した 1/4 の部分とした。

非線形き裂力学における解析では、試験片が異なってもき裂先端近傍の要素分割(A部)として同一のものをういなければならない。これは、FEM 解析における相対誤差を揃えるためである。

加工硬化特性は、線形硬化則に基づく 3 種の真応力-対数塑性ひずみ線図(図 4)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 $E=70.6\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.33$ 、 $H'=1.0\text{GPa}$ 、 2.0GPa 、 3.0GPa である。有限要素法汎用プログラムは、大変形問題を取り扱うことができるものを用いた。

弾塑性解析の際には、平面応力条件下を仮定

し、Mises の降伏条件とひずみ増分理論を採用した。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・ラグランジュ法を用いた。

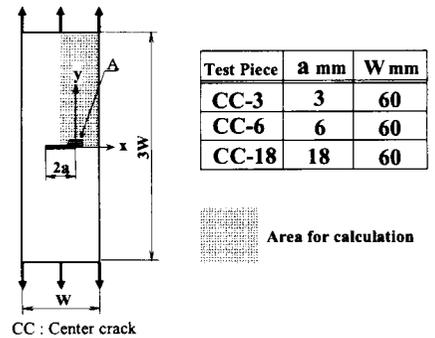


Fig.2 Treated problems.

非線形き裂力学の紹介

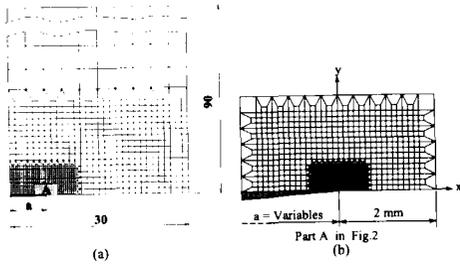


Fig.3 FEM mesh pattern
(minimum mesh size= $1/27$ mm).

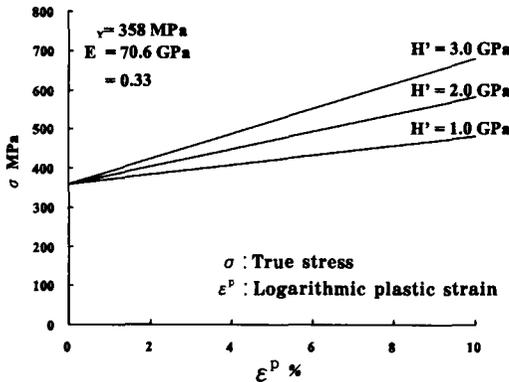


Fig.4 True stress - logarithmic plastic strain diagram used in FEM analysis.

4. 適用事例

本論文では、同一現象を保証する量としてき裂先端第一節点の開口量 δ_1 を用いる (δ_1 に関しては図7参照)。それは、 δ_1 がき裂先端付近の開口形状および塑性ひずみ分布を直接支配しており、 δ_1 とき裂先端付近の変形の間が対一に対応していると考えられるからである。

4.1 $H'=1.0$ GPa の場合

図5は、 $H'=1.0$ GPa の場合における3種のき裂長さをもつ試験片の公称応力 σ_n - 公称ひずみ ϵ_n 線図である。中央にき裂を有する3種の試験片において ϵ_{eq}^p が100%に至るまで解析を行った。したがって、各曲線における最後の点は $\epsilon_{eq}^p = 100\%$ の状態を表している。

図6は、3種のき裂長さをもつ試験片において

ϵ_{y0}^p が一定のときのき裂先端近傍の開口形状と塑性ひずみ分布を示している。この図よりわかるように、 ϵ_{y0}^p が一定のとき3種の試験片におけるき裂先端近傍の開口形状と塑性ひずみ分布は、き裂長さに無関係にそれぞれ互によく似ている。

図7は、き裂先端第ゼロ節点の y 方向塑性ひずみの値 ϵ_{y0}^p とき裂先端第一節点の開口量 δ_1 の関係を示している。この図よりわかるように、き裂長さに無関係に ϵ_{y0}^p と δ_1 は対一に対応している。 δ_1 は、その値が等しいとき同一現象を保証する量なので、この図からも、非線形き裂力学は $H'=1.0$ GPa の場合において有効であるといえる。

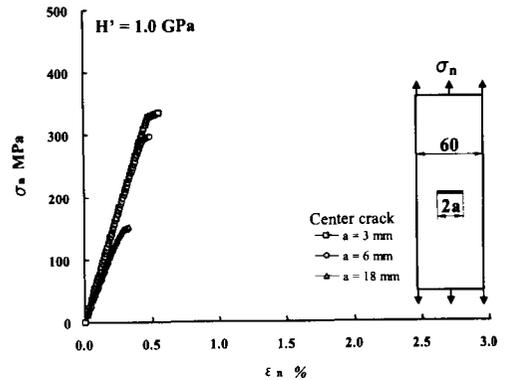


Fig.5 Stress-strain curve of center crack specimens ($H'=1.0$ GPa).

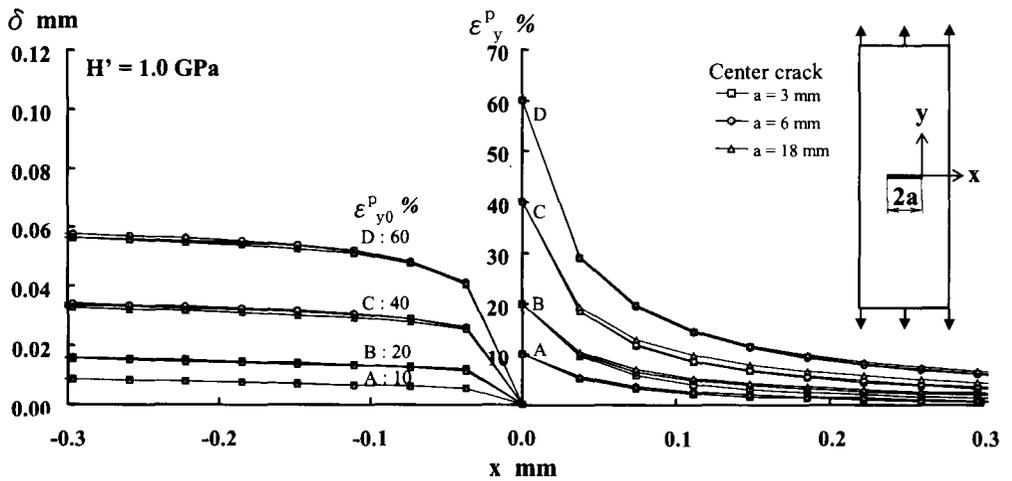


Fig.6 Crack opening displacements and plastic strain distributions near a crack tip are controlled by the value of ϵ_{y0}^p alone ($H'=1.0\text{GPa}$).

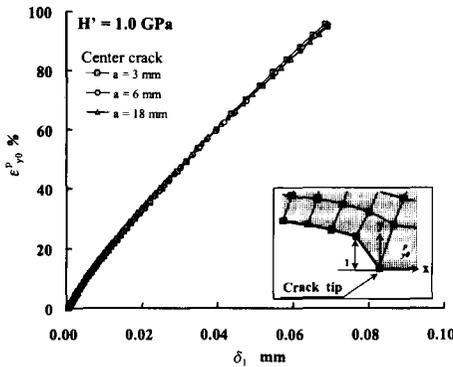


Fig.7 Relation between the plastic strain at a crack tip ϵ_{y0}^p and the displacement at 1st nodal point δ_1 ($H'=1.0\text{GPa}$).

4.2 $H'=2.0\text{GPa}$ の場合

図 8 は、 $H'=2.0\text{GPa}$ の場合における 3 種のき裂長さをもつ試験片の公称応力 σ_n —公称ひずみ ϵ_n 線図である。中央にき裂を有する 3 種の試験片において ϵ_{y0}^p が 100% に至るまで解析を行った。したがって、各曲線における最後の点は $\epsilon_{eq0}^p=100\%$ の状態を表している。

図 9 は、3 種のき裂長さをもつ試験片において ϵ_{y0}^p が一定のときのき裂先端近傍の開口形状

と塑性ひずみ分布を示している。この図よりわかるように、 ϵ_{y0}^p が一定のとき 3 種のき裂長さをもつ試験片におけるき裂先端近傍の開口形状と塑性ひずみ分布は、き裂長さに無関係にそれぞれ互いによく似ている。

図 10 は、き裂先端第ゼロ節点の y 方向塑性ひずみの値 ϵ_{y0}^p とき裂先端第一節点の開口量 δ_1 の関係を示している。この図よりわかるように、き裂長さに無関係に ϵ_{y0}^p と δ_1 は一対一に対応している。この図からも、非線形き裂力学は $H'=2.0\text{GPa}$ の場合において有効であるといえる。

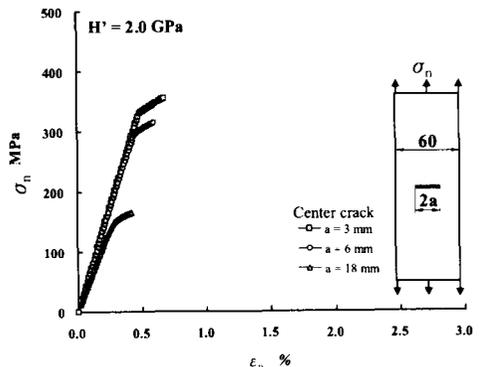


Fig.8 Stress—strain curve of center crack specimens ($H'=2.0\text{GPa}$).

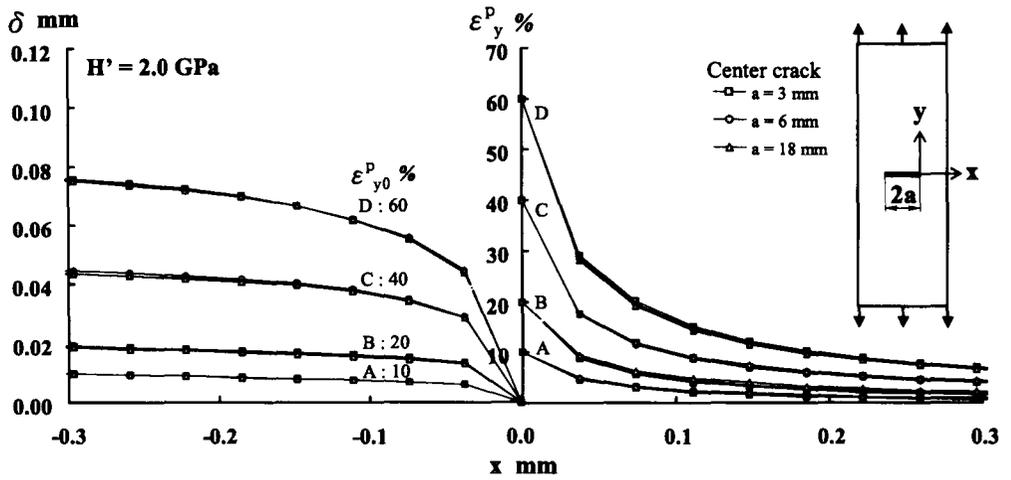


Fig.9 Crack opening displacements and plastic strain distributions near a crack tip are controlled by the value of ϵ_{y0}^p alone ($H'=2.0\text{GPa}$).

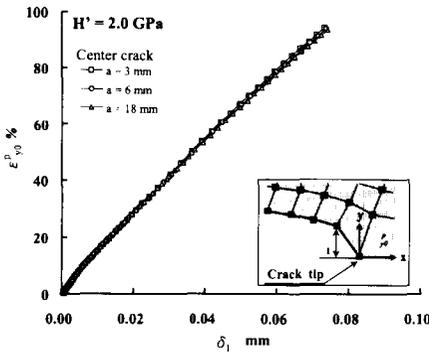


Fig.10 Relation between the plastic strain at a crack tip ϵ_{y0}^p and the displacement at 1st nodal point δ_1 ($H'=2.0\text{GPa}$).

4.3 $H'=3.0\text{GPa}$ の場合

図 11 は、 $H'=3.0\text{GPa}$ の場合における 3 種のき裂長さをもつ試験片の公称応力 σ_n —公称ひずみ ϵ_n 線図である。中央にき裂を有する 3 種の試験片において ϵ_{y0}^p が 100% に至るまで解析を行った。したがって、各曲線における最後の点は $\epsilon_{y0}^p=100\%$ の状態を表している。

図 12 は、3 種のき裂長さをもつ試験片において ϵ_{y0}^p が一定のときのき裂先端近傍の開口形状

と塑性ひずみ分布を示している。この図よりわかるように、 ϵ_{y0}^p が一定のとき 3 種のき裂長さをもつ試験片におけるき裂先端近傍の開口形状と塑性ひずみ分布は、き裂長さに無関係にそれぞれ互によく似ている。

図 12 は、き裂先端第ゼロ節点の y 方向塑性ひずみの値 ϵ_{y0}^p とき裂先端第一節点の開口量 δ_1 の関係を示している。この図よりわかるように、き裂長さに無関係に ϵ_{y0}^p と δ_1 は一対一に対応している。この図からも、非線形き裂力学は $H'=3.0\text{GPa}$ の場合において有効であるといえる。

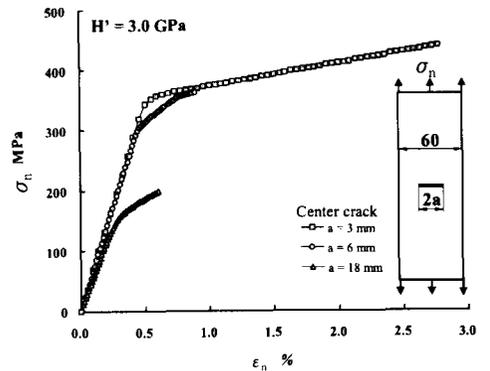


Fig.11 Stress—strain curve of center crack specimens ($H'=3.0\text{GPa}$).

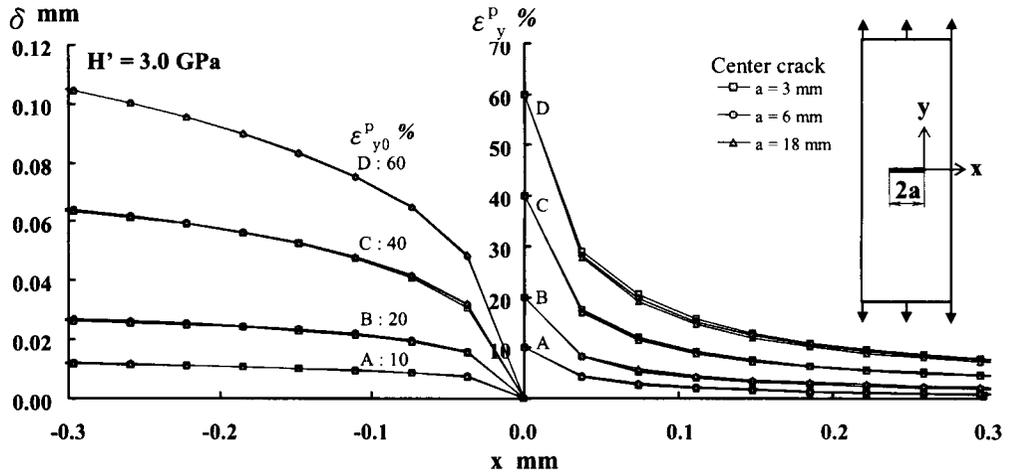


Fig.12 Crack opening displacements and plastic strain distributions near a crack tip are controlled by the value of ϵ_{y0}^p alone ($H'=3.0\text{GPa}$).

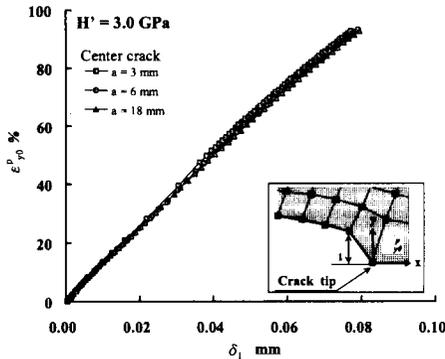


Fig.13 Relation between the plastic strain at a crack tip ϵ_{y0}^p and the displacement at 1st nodal point δ_1 ($H'=3.0\text{GPa}$).

また、特に注目すべき点は、き裂長さが異なることによって降伏規模が違う(図 11)にもかかわらず、非線形き裂力学パラメータ ϵ_{y0}^p とき裂先端第一節点の開口変位 δ_1 がよい相関を持っていることである。

以上 4.1~4.3 までの結果から、非線形き裂力学は加工硬化特性の影響を受けることなく成立する。このことは、非線形き裂力学パラメータ ϵ_{y0}^p が、平面応力条件下において、き裂長さや降伏規模に関係なく、き裂を有する帯板の弾塑

性問題における有効な強度評価パラメータであることを意味している。

5. おわりに

本論文では、非線形き裂力学の有用性について、加工硬化特性が異なる場合に適用した結果を述べた。

大規模降伏条件下におけるき裂を有する帯板の破壊荷重を予測する手法は、未だ小規模降伏条件下におけるほど確立されていない。よって、今後も大規模降伏条件下におけるき裂を有する部材の強度評価について研究を行って参りたい。

最後に、教育・研究を行う環境を与えてくれた小山工業高等専門学校および恩師である西谷弘信先生に心から感謝します。

〔受理年月日 2003年9月30日〕