

き裂不安定成長問題へのX-FEMの適用

近畿大学 正員 ○沖中 知雄

1. はじめに

準静的な载荷下でのき裂の不安定成長は固体の破壊現象を考える上で重要な問題であり、既に多くの解析的研究がなされている。解析的研究の中でも、X-FEM はき裂を含む連続体中の変位場を不連続面に起因する変位の不連続性を表現する基底関数とき裂先端部近傍の変位場を表現する基底関数の重ね合せとして表現する。そのため、き裂の進展解析に際してき裂の成長に合わせてメッシュを再生成したり移動させる必要がない。またき裂の進展経路、進展量をメッシュに依存せずに定義できるため、効率的なき裂進展解析が可能である。

沖中¹⁾はX-FEM を動的問題に拡張し、き裂の不安定成長問題に適用した。解析結果は実験により得られた準静的な载荷下でのき裂の不安定成長の画像計測結果と比較され、両者は良好に一致することが示された。これにより、動的なき裂の不安定成長問題へのX-FEM の拡張の妥当性が示された。しかし、沖中等の解析は不安定成長するき裂の進展経路、進展量として実験により計測された値を参照しており、き裂進展解析として十分な議論がなされたとは言いがたい。そこで本研究では、不安定成長するき裂周りの動的J積分値を求め、得られた動的J積分値によりき裂進展量を予測した解析を行うことを試みる。

2. き裂不安定成長の数値解析

(1) 解析モデル

解析に使用したモデルを図-1に示す。縦20mm、横69.8mm、厚さ6.5mmの矩形供試体を0.2mm刻みで分割し、35,350節点、34,900四角形要素の解析モデルを作成し、平面応力状態で解析を行った。初期き裂として、矩形供試体下辺中央部に長さ3mmの初期き裂を設定している。材料としてエポキシ樹脂を採用する。これは解析精度の検証のため、エポキシ樹脂製供試体を用いた光弾性実験の画像計測結果を使用するためである。計算に使用した材料定数を表-1に示す。

解析結果との比較に用いる実験では、供試体は変

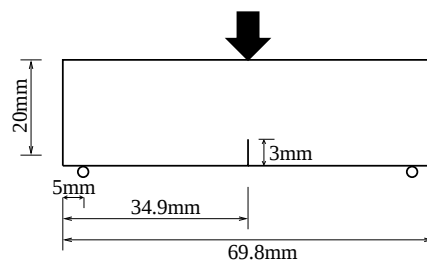


図-1 解析モデル図

表-1 解析に使用した材料定数

ヤング係数	2.69GPa
ポアソン比	0.379
密度	$1.15 \times 10^3 \text{ kgf/m}^3$

位制御の载荷装置によって载荷し、破壊荷重を計測している。そのため、先ず破壊荷重627.9Nを荷重境界条件として矩形供試体の上辺中央部を挟む2つの節点に与えた予備解析を行い、载荷点における節点変位を求めた。得られた载荷点の節点変位を変位境界条件として与え、供試体が変形した状態から変位境界条件一定の条件下でき裂を進展させ、き裂進展解析を行った。

(2) き裂の動的J積分評価とき裂進展量の決定

不安定成長するき裂の破壊力学パラメーターとして、Nishioka等²⁾によって経路独立な動的J積分が導出されている。き裂先端を囲む領域内 $\mathbf{x} \in \mathbf{V}_\Gamma$ で1, その境界 Γ 上で0の値をとる滑らかな関数 s を用いて、動的J積分は

$$J'_k = \int_{V_\Gamma} \left\{ \sigma_{ij} u'_{i,k} - (W + K) s_{,k} + \rho \ddot{u}'_i u'_{i,k} s - \rho \dot{u}'_i \dot{u}'_{i,k} s \right\} dV \quad (1)$$

として得られる。

式(1)を用いて算定された不安定成長中のき裂周りの動的J積分値を用いて、き裂の進展量を決定する。新たに生成されるき裂面の生成速度が動的J積分値に比例するとし、時間ステップ $t^{(n)}$ におけるき裂長さ $L^{(n)}$ を時間ステップ $t^{(n-1)}$ における動的J積分値

Key Words: X-FEM, き裂不安定成長, 動的J積分

連絡先: 〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1 Tel 06-6721-2332

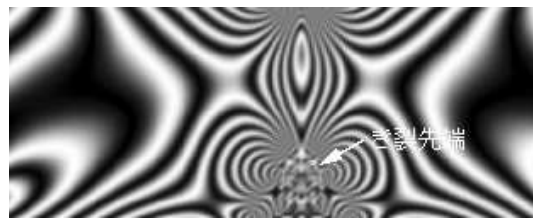
(a) 時刻 $t = 0\mu s$ (b) 時刻 $t = 10\mu s$ (c) 時刻 $t = 20\mu s$

図-2 数値解析結果

を用いて $L^{(n)} = L^{(n-1)} + \alpha J^{(n-1)} \Delta t$ として求めて解析を行った．本解析では $\alpha = 375.0$ を採用している．

(3) 解析結果

20 μ 秒まで行った解析結果から，0, 10, 20 μs の解析結果を図-2 に示す．図中には解析により求められた要素中心での最大・最小主応力から $I = A_0 \sin^2\{\alpha t(\sigma_1 - \sigma_2)\}$ として計算された干渉縞パターンを示している．解析は供試体全体について行っているが，検証のために図-3 に示した実験結果との比較を容易にする目的で実験により画像計測された領域のみを切り抜いて示している．時刻 10 μs で図-2,3 の (b)，20 μs で図-2,3 の (c) を比較すると，き裂後方の干渉縞パターンで実験結果と解析結果のかい離がみられるものの，き裂先端部近傍では干渉縞の縞次数，形状共によく一致しており，主応力差の分布は実測データと良好な一致を示している．

解析により求められたき裂長さの時間変化を図-4 に示す．図中には実験による画像計測から求められたき裂長さを併記している．き裂長さの時間変化は実験値と解析値で良好な一致を示している．

3. まとめ

本研究では，動的に拡張された X-FEM を用いてき裂の不安定成長の解析が示された．解析結果により

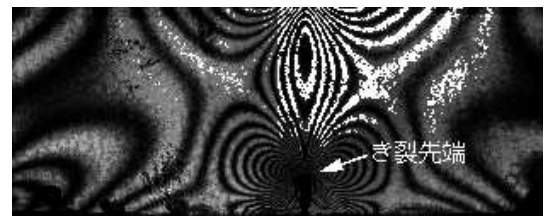
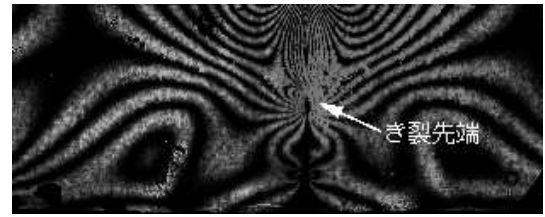
(a) 時刻 $t = 0\mu s$ (b) 時刻 $t = 10\mu s$ (c) 時刻 $t = 20\mu s$

図-3 実験による画像計測結果

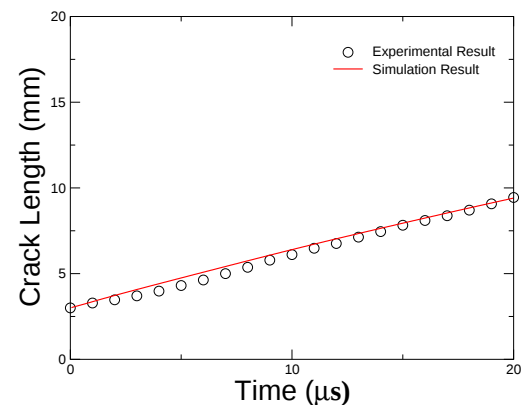


図-4 き裂長さの時間変化

再現された供試体中の主応力差分布とき裂長さの時間変化は実験により画像計測された結果と比較され，提案された解析手法が良好な解析精度をもつことが示された．

参考文献

- 1) 沖中 知雄: 準静的载荷下でのき裂の不安定成長の実験と数値解析による検討, 日本機械学会論文集, Vol.75 A, pp.1193-1201, 2009.
- 2) Nishioka, T. and Atluri, S.N.: Path-Independent Integrals, Energy Release Rates, and General Solutions of Near-Tip Fields in Mixed-Mode Dynamic Fracture Mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.18, pp.1-22, 1983.