

第Ⅰ部門

拡張有限要素法(X-FEM)による疲労き裂進展シミュレーション

京都大学工学部 学生会員 ○金久 隆弘

京都大学大学院 正会員 宇都宮 智昭

1. はじめに

現在破壊力学分野において一般的に多く用いられている数値解析手法として有限要素法(FEM)がある。しかし、破壊力学におけるき裂の特殊性を考慮した上でのモデル化は複雑な処理となる。さらにき裂の進展過程を考慮すると、き裂進展による特異場の変化により必要となる要素のリメッシュ処理と FEM 解析とを交互に行う必要があり、非常に効率の悪い計算処理となる。このような要素のリメッシュ処理を避けるために提案されたのが拡張有限要素法(X-FEM : eXtended Finite Element Method)である。本研究は、近年問題となっている疲労き裂を対象とし、X-FEM を用いて、き裂を含む二次元弾性問題の変位場の解析結果より線形破壊力学パラメータ K を評価し、それに基づいた疲労き裂進展シミュレーションを行い、既往の疲労試験との比較により、進展解析の精度検証を行った。

2. 拡張有限要素法(X-FEM)

X-FEM は、き裂などによる変位の不連続面や特異場を、要素節点に新たな自由度とそれに対応した内挿関数を付加することにより表現する手法である。具体的には要素内の変位場を次の近似式で表す¹⁾。

$$\mathbf{u}^e = \sum_{i=1}^m \phi_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i + \sum_{i \in C} \phi_i(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^4 \gamma_k(\mathbf{x}) \mathbf{c}_i^k + \sum_{i \in J} \phi_i(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_i$$

ここで ϕ_i は通常の要素の定式化で用いられる内挿関数、 m は要素を構成する節点数である。 C はき裂先端近傍の変位の特異性を考慮する節点の集合、 J は C 以外でき裂の不連続面を考慮する節点の集合であり、それぞれの節点属性を C 属性、 J 属性と呼ぶこととする。 $\mathbf{u}_i$, $\mathbf{c}_i$, $\mathbf{b}_i$ はそれぞれ節点に割り付けられる節点自由度である。 $\gamma_k(\mathbf{x})$ ($k=1, \dots, 4$) はき裂先端近傍における特異場を表す関数、 $H(\mathbf{x})$ はき裂近傍の変位の不連続性を表す関数である。応力拡大係数の評価法としては混合モードにおいて J 積分を用いる手法である M 積分法を用いる。

3. 疲労き裂進展解析手法

き裂を含む二次元弾性モデルにおいて、各ステップで一定振幅荷重を境界条件として付与し、X-FEM によりき裂先端での応力場の解析を行い、応力拡大係数 K_I , K_{II} を評価し、各モードに対応した応力拡大係数範囲 ΔK_I , ΔK_{II} を算定する。そして、応力拡大係数範囲及び応力比 R から求めたき裂開口比 U により、各モードに対応した有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I,eff}$, $\Delta K_{II,eff}$ を求め、混合モード時の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を決定する。き裂進展経路の予測は、脆性破壊の理論におけるパラメータ K_{II}/K_I を $\Delta K_{II,eff}/\Delta K_{I,eff}$ に置き換え、最大周方向応力説に従うものとする。また、疲労き裂の進展速度は有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を用いて、日本鋼構造協会の疲労設計指針における平均設計曲線に基づき、次式により評価する。

$$da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K_{eff}^{2.75} - \Delta K_{th}^{2.75}), \Delta K_{th} = 2.9$$

$$(da/dN : m/cycle, \Delta K_{eff}, \Delta K_{th} : MPa\sqrt{m})$$

定まった進展方向と伝播速度によりき裂を一定サイクル進展させ、次のステップに移る。また、本研究の疲労き裂進展シミュレーションでは、予め疲労き裂が存在していることを前提とし、そこからの疲労き裂の成長を解析対象としている。

4. き裂進展シミュレーション

板厚貫通切欠材を用いて実際に行われた2種類の疲労試験におけるき裂の伝播挙動を疲労き裂進展シミュレーシ

ョンによる解析結果と比較し、解析手法を検証した。各試験の荷重条件は次の通りである。

疲労試験 1²⁾：単軸荷重条件・応力比 0.05, 0.3, 0.5

疲労試験 2³⁾：単軸荷重条件・応力比 0.3, 二軸荷重条件・応力比 0.3・二軸荷重間同位相

解析モデルは半分の領域で計算が行えるように境界条件を置き換え、図-1（試験 1）及び図-3（試験 2）のようにモデル化を行った。試験 1 では、要素分割はき裂進展経路周辺領域において四辺形要素における辺長 0.5mm を基本とし、要素数 3950、節点数 4080 とした。また、各ステップにおいて 2000 サイクル進展させ、進展回数約 100 ステップ、全体の計算時間約 10 分の条件の下で解析を行った。疲労試験での計測値と解析値の比較を図-2 に示す。応力比が 0.05 の場合については計測値と解析値の間に差があるものの、応力比が 0.3 及び 0.5 の場合に関しては疲労試験を比較的精度良く再現することができた。応力比が小さい場合に差が生じてしまった原因としては、疲労き裂開口挙動を厳密に有効応力拡大係数範囲に反映できていないために、伝播速度を過大評価してしまっていると考えられる。次に、試験 2 では、要素分割は辺長 1.2mm を基本とし、要素数 9915、節点数 10160 とした。また各ステップにおいて 5000 サイクル進展させ、進展回数約 200 ステップ、全体の計算時間約 30 分の条件の下で解析を行った。計測値と解析値の比較を図-4 に示す。二軸荷重条件の場合において、計測値と解析値の間に差が生じてしまったものの、単軸荷重条件に比べ、き裂に平行な方向の荷重によるき裂成長速度の減少を再現することができた。

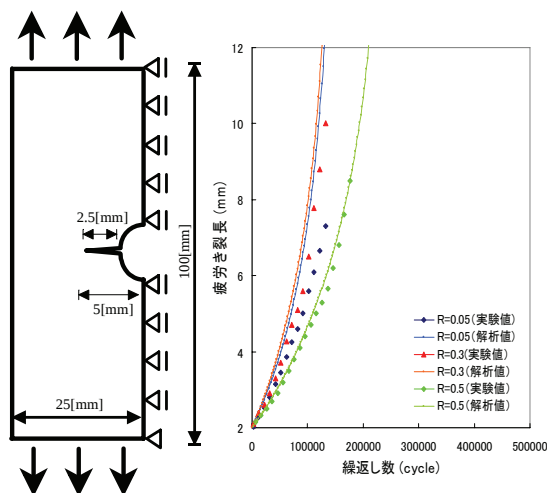


図-1.解析モデル
(試験 1)

図-2.計測値²⁾と解析値の比較
($R=0.05, 0.3, 0.5$)

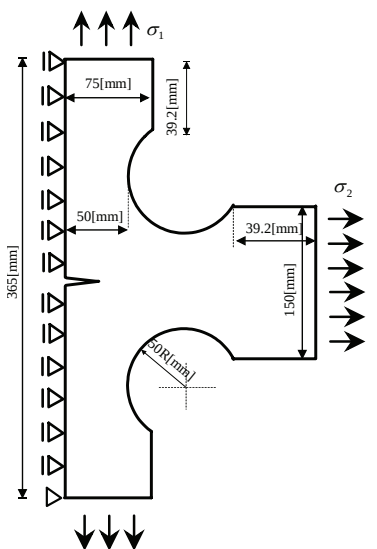


図-3.解析モデル
(試験 2)

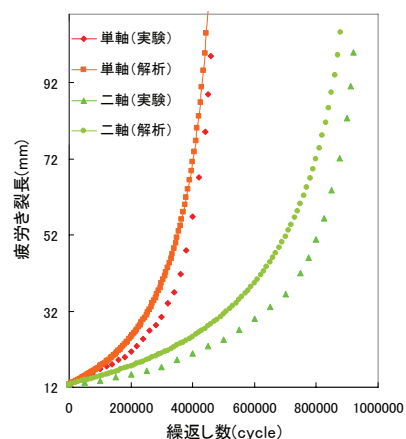


図-4.計測値³⁾と解析値の比較
(単軸 (σ_1 のみ), 二軸 ($\sigma_2/\sigma_1=1$))

5. 結論及び今後の課題

応力比の小さい場合における進展速度の評価について課題を残すこととなったものの、本研究の解析において、有効応力拡大係数範囲を求める段階で使用了式中の定数が疲労設計指針において安全側に設定されたものであることを考慮すると、比較的良い精度でモードⅠ破壊下での疲労き裂進展をシミュレーションできることが確認できた。また、今回の解析は、一定振幅荷重という最も基本的な荷重条件の下で行ったが、実際の構造物では、繰返し負荷される荷重は一定振幅とは限らず、疲労き裂は過大荷重や変動振幅といった変動荷重条件下にある。また二軸荷重条件においても、二軸荷重間で位相差がある場合も考えられる。実際の構造物中における疲労き裂の成長をより正確に再現するためには、これらの複雑な条件を考慮できるようにならなければならない。

(参考文献)

- 1) 柴沼一樹, 宇都宮智昭 : X-FEM を用いた曲線き裂のモデル化とき裂進展シミュレーションへの適用, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.108-121, 2007
- 2) Toyosada M, Gotoh K, Niwa T : Fatigue crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, International Journal of Fatigue, Vol.26, pp.983-992, 2004.
- 3) 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎, 角田義秋 : 面内二軸荷重を受ける高張力鋼平板中の疲労き裂成長の破壊力学的研究, 日本機械学会論文集 A, Vol.45-395, pp.707-716, 1979