

第I部門

XFEMによるバルブリブ鋼床版の疲労き裂進展シミュレーション

京都大学工学部 学生員 ○青井 弘樹
 京都大学大学院工学研究科 正会員 宇都宮 智昭

京都大学大学院工学研究科 学生員 柴沼 一樹
 関西大学環境都市工学部 正会員 坂野 昌弘

1.研究背景と目的

近年、鋼橋において、交通量の増大や長期間にわたる過積載車等の重荷重などにより多数の疲労き裂が発生、成長しており、早急な対応が求められている。これに対し、疲労き裂を精度良くシミュレーションすることが可能となれば、補修や補強を必要としている箇所が明確になり、さらには点検の時期、間隔などが逆算可能になるなど、維持管理の合理化に大きく貢献するものと考えられる。

従来き裂進展解析でよく用いられてきた有限要素法(FEM: Finite Element Method)はき裂進展に伴う要素のリメッシュ処理と数値解析とを交互に行う必要があり、非常に計算効率が悪いという問題点があった。これに対し、近年提案された拡張有限要素法(XFEM: eXtended Finite Element Method)ではFEMで必要であった要素のリメッシュ処理を避け、容易にき裂を含んだ連続体をモデル化することが可能である。

本研究では、バルブリブを有する鋼床版の模擬試験体に対し、XFEMを汎用の3次元有限要素解析コードABAQUSに組み込むことにより、応力拡大係数Kを評価し、疲労破壊によるき裂進展をシミュレーションする。

2.XFEMと疲労き裂進展解析

XFEMはき裂先端近傍の特異場やき裂の不連続面を、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方法である。XFEMによる変位場の近似を次式のように行う¹⁾。

$$\mathbf{u}_{\text{ap}}(\mathbf{x}) = \phi_0(\mathbf{x})\mathbf{v}_0^{\text{ap}}(\mathbf{x}) + \phi_c(\mathbf{x})\mathbf{v}_c^{\text{ap}}(\mathbf{x})$$

ただし

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0^{\text{ap}}(\mathbf{x}) = \sum_I \phi_I(\mathbf{x})\mathbf{u}_I + \sum_{I \in J} \phi_I(\mathbf{x})H(\mathbf{x})\mathbf{b}_I \\ \mathbf{v}_c^{\text{ap}}(\mathbf{x}) = \sum_I \phi_I(\mathbf{x})\left(\mathbf{u}_I + \sum_{k=1}^4 \gamma_k(\mathbf{x})\mathbf{c}_I^k\right) + \sum_{I \in J} \phi_I(\mathbf{x})H(\mathbf{x})\mathbf{b}_I \end{cases} \begin{cases} \phi_c(\mathbf{x}) = \sum_{I \in C} \phi_I(\mathbf{x}) \\ \phi_0(\mathbf{x}) = 1 - \phi_c(\mathbf{x}) \end{cases}$$

ここで $\phi_I(\mathbf{x})$ は通常のFEMで用いられる内挿関数、 $\mathbf{u}_I, \mathbf{b}_I, \mathbf{c}_I^k$ はそれぞれ節点Iにおける自由度であり、 $H(\mathbf{x})$ はき裂面における変位の不連続性を表すHeaviside

関数、 $\gamma_k(\mathbf{x})$ はき裂先端近傍変位場の漸近解の基底関数である。また、Cはき裂先端近傍付近の節点集合、JはC以外でき裂面近傍に位置する節点集合である(図-1)。

本研究では、応力拡大係数の評価にM積分法を用いた。M積分は実問題と、き裂先端周辺の積分経路内部において応力拡大係数の理論解と変位場および応力場が既知である参照問題とを重ね合わせることで混合モードにおける変位、応力を各モードに分離するというものである。M積分は次式のように表わされる。

$$M = \int_A \left\{ \left(\sigma_x^{\text{aux}} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \tau_{xy}^{\text{aux}} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \sigma_x \frac{\partial u_x^{\text{aux}}}{\partial x} + \tau_{xy} \frac{\partial u_y^{\text{aux}}}{\partial x} - \sigma_{ij} \epsilon_{ij}^{\text{aux}} \right) \frac{\partial q}{\partial x} + \left(\tau_{xy}^{\text{aux}} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \sigma_y^{\text{aux}} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \tau_{xy} \frac{\partial u_x^{\text{aux}}}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial u_y^{\text{aux}}}{\partial x} \right) \frac{\partial q}{\partial y} \right\} dA$$

また、本研究では、き裂の進展を図-2のように表わすこととする。なお、進展距離 Δa は解析条件として指定し、進展前後のK値より载荷繰返し数Nを逆算するものとする。

き裂進展に対して、疲労き裂進展方向の判断基準として、次式の最大周方向応力説に従うものとする。

$$\theta_c = 2 \arctan \frac{1}{4} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \pm \sqrt{\frac{K_I}{K_{II}} + 8} \right)$$

また、伝播速度は次式の鋼構造物の疲労設計指針・同解説の平均設計曲線を採用した²⁾。

$$\frac{da}{dN} = 1.5 \times 10^{-11} \left(\Delta K^{2.75} - \Delta K_{th}^{2.75} \right), \Delta K_{th} = 2.9$$

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

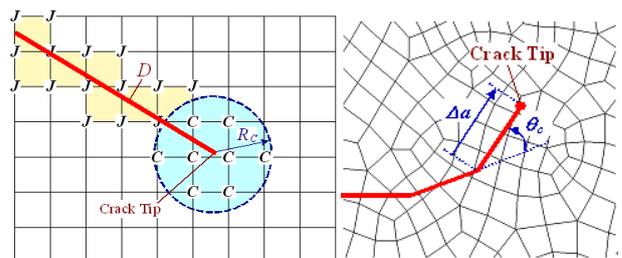


図-1.節点属性

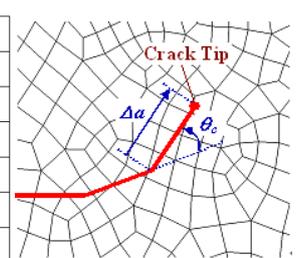


図-2.き裂進展のモデル化

3. 鋼床版バルブプレート試験体の疲労き裂進展解析

図-3 に示すような鋼床版バルブプレート試験体の解析モデルを作成した。関西大学で実施された疲労試験では、三本ある横桁の中央の横桁の一番左のスリット付近に初期き裂として切り欠きを 1.6mm 入れ、載荷試験を行っている。疲労試験におけるき裂進展経路を図-4 に示す。解析ではまず、初期き裂を合わせて解析を行った(case-1)。そのときの進展経路を図-5 に示す。この場合では特にき裂進展初期において、解析と載荷試験とで異なった経路をたどっていることがわかる。よって、次に、載荷試験で進展経路が上を向いているき裂=9.45mm を初期き裂として与え、き裂進展シミュレーションを行った(case-2)。解析、載荷試験それぞれで得られた載荷回数とき裂長さの関係を図-6 に、き裂に伴う最大主応力の推移を図-7 に示す。図-6 でいう解析での載荷回数は、き裂長さ 9.45mm のときの載荷回数を疲労試験と解析とで合わせた。

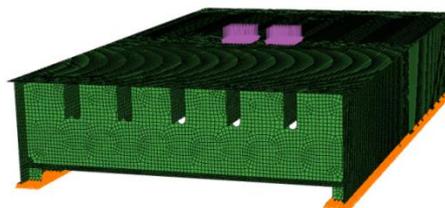


図-3. 解析モデル
(■ : 載荷荷重位置)



図-4. 疲労試験のき裂進展経路

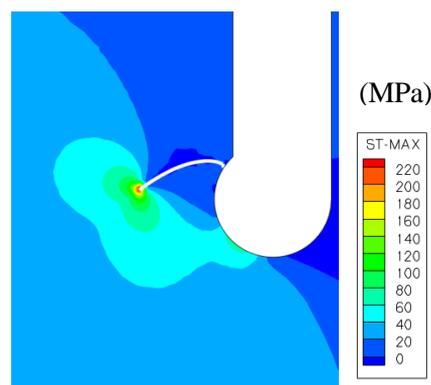


図-5. き裂進展経路(case-1)

4. まとめ

今回の鋼床版バルブプレートの解析では、溶接部分の残留応力を考慮していないため、特にき裂進展過程の初期において、実験値と解析値の間に差異が見られた。これより、溶接部付近のき裂進展を扱う際には、残留応力の考慮が必要であることが分かった。また、載荷回数とき裂長さの関係は進展の初期においては課題が残るが、全体としては進展シミュレーションの妥当性を示していると言える。

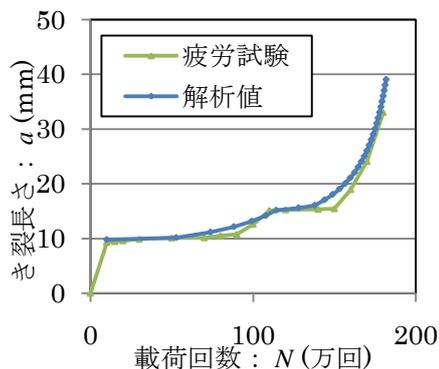


図-6. き裂長さとき裂進展の関係
(case-2)

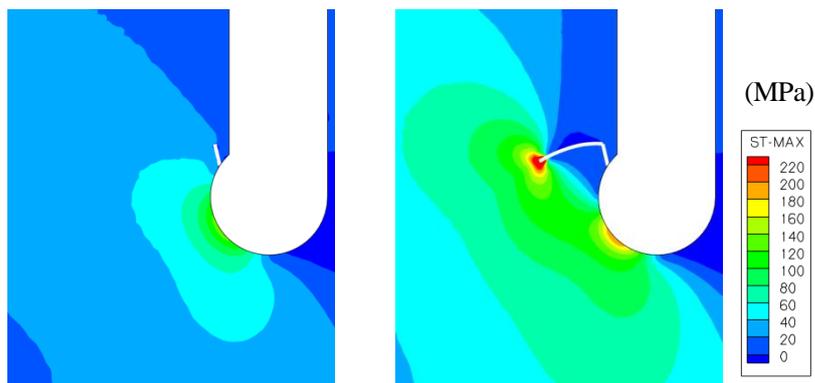


図-7. き裂進展に伴う最大主応力の推移(case-2)

参考文献

- 1) 柴沼一樹, 宇都宮智昭 : PUFEM に基づき Blending Elements での問題を回避した XFEM の定式化, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.224-228, 2009.
- 2) 日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, pp.245-246