

3次元構造体の板厚貫通型疲労き裂に対するXFEMを用いたき裂進展シミュレーション

京都大学大学院 学生員 ○柴沼一樹, 学生員 青井弘樹, 正会員 宇都宮智昭
関西大学 正会員 坂野昌弘, 日本橋梁建設協会 正会員 夏秋義広

1. はじめに

現在, 経年した鋼橋の鋼床版において疲労き裂の発生が多数報告されており, その原因解明と効果的な補修・補強や点検等の維持管理の合理化が喫緊の課題となっている. これに対し, 疲労き裂の進展挙動を精度良くシミュレート可能となれば, 損傷原因のより確実な推定や, 補修・補強の必要性の判別と緊急度の定量的な評価など, 鋼橋における疲労き裂の発生・進展のメカニズム解明とその維持管理の合理化に有効であると考えられる.

構造解析に広く採用されている有限要素法(FEM)は, 本来連続体を対象として構築されたものである. そのため, き裂解析ではメッシュ生成に多大なノウハウを要し, さらにその進展過程ではリメッシュ処理が必要となる. 特に土木構造物を対象とした場合, 大規模なシステムにおいて局所的に発生した疲労き裂の挙動を評価する必要性から, FEMによる疲労き裂進展解析に基づいた対策の検討は, ほとんど実施されていないのが現状である.

一方で, 近年提案された拡張有限要素法(eXtended FEM: XFEM)は, 従来のFEMの枠組みにおける数値解析手法であるにも関わらず, 任意の局所的な領域において, 要素内部に不連続性を含む高度な近似の構成を可能とする. すなわち, 要素と独立にき裂のモデル化が可能となり, 大規模なシステムにおける従来のFEMを用いたき裂進展シミュレーションに関する課題を, 多くの部分で解決あるいは改善することが可能であると考えられる.

本研究では, 汎用のFEM解析ソフトウェアであるABAQUSに, XFEMに基づくき裂解析機能を組み込むことで, 容易かつ効率的に板厚方向貫通き裂を対象とした疲労き裂進展シミュレーションを実施可能な解析ツールの開発を行った. さらに, その実問題への適用性を検証するため, バルブリブ鋼床版模擬試験体に発生した疲労き裂を対象として, 疲労き裂進展シミュレーションを実施した.

2. XFEMによるき裂解析の定式化と疲労き裂進展シミュレーションシステムの構築

XFEMとは, 従来の有限要素法の枠組みの中で, 局所的な領域において既知である解の性質を利用した高度な近似(エンリッチメント)を可能とする手法である. しかし, 従来のXFEMを用いて近似を構成した場合, 局所的なエンリッチメントの周囲において近似精度の低下が生じる. この問題を改善するために, 最近著者らは領域全体で包括的に近似精度が保証されるPUFEM近似に基づいて, 次式に示すXFEMの再定式化を提案した¹⁾.

$$\mathbf{u}_{ap}(\mathbf{x}) = \varphi_0(\mathbf{x})\mathbf{v}_0^{ap}(\mathbf{x}) + \varphi_c(\mathbf{x})\mathbf{v}_c^{ap}(\mathbf{x})$$

$$\text{ただし, } \begin{cases} \mathbf{v}_c^{ap}(\mathbf{x}) = \sum_I \phi_I(\mathbf{x}) \left(\mathbf{u}_I + \sum_{k=1}^4 \gamma_k(\mathbf{x}) \mathbf{c}_I^k \right) + \sum_{I \in J} \phi_I(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_I \\ \mathbf{v}_0^{ap}(\mathbf{x}) = \sum_I \phi_I(\mathbf{x}) \mathbf{u}_I + \sum_{I \in C} \phi_I(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_I \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_c(\mathbf{x}) = \sum_{I \in C} \phi_I(\mathbf{x}) \\ \varphi_0(\mathbf{x}) = 1 - \varphi_c(\mathbf{x}) \end{cases}$$

ここで ϕ_I はFEMの内挿関数, C および J はそれぞれき裂先端近傍およびき裂面近傍に位置する節点集合(図-1参照), $\mathbf{u}_I, \mathbf{c}_I^k, \mathbf{b}_I$ は節点 I における自由度である. $\gamma_k(\mathbf{x}) (k=1, \dots, 4)$ はき裂先端近傍変位場の漸近解基底, $H(\mathbf{x})$ はき裂の不連続性を表すHeaviside基底である.

また, 本研究で用いるき裂進展のモデル化の模式図を図-2に示す. 伝播速度は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, 指定した進展距離 Δa および進展前後の ΔK 値より载荷回数 N を算出する.

ところで, 近年FEM解析では, 汎用ソフトウェアが広範囲に利用されている. そこで本研究では, 汎用のFEM解析ソフトウェア ABAQUS

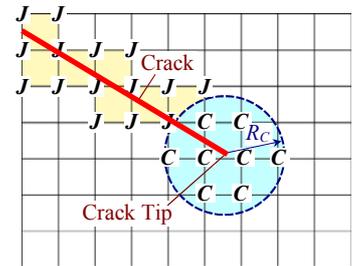


図-1 節点集合のモデル化

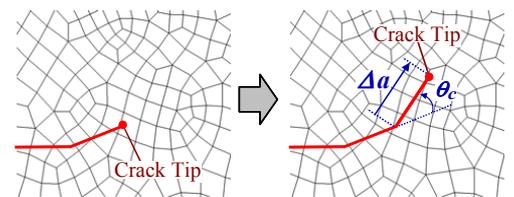


図-2 き裂進展解析のモデル化

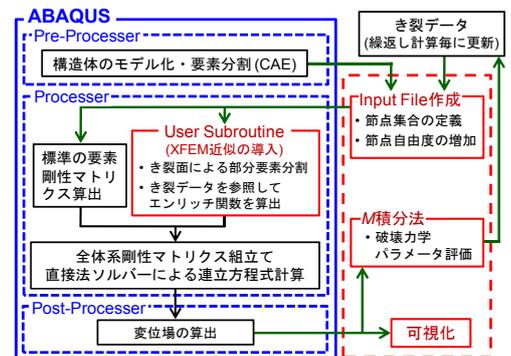


図-3 疲労き裂進展解析システムのフロー

キーワード crack propagation; extended finite element method; fatigue; fracture mechanics; XFEM

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

をベースとして、(1)平板シェル要素にXFEMのき裂解析機能を組み込むことにより、板厚貫通型疲労き裂の評価が可能となる3次元問題への適用性の拡大、(2)き裂に対応するエンリッチメントのモデル化を、ソフトウェアの機能であるCAE (Computer Aided Engineering)に直接対応させた全体解析モデル作成の効率化、を可能とする解析システムを構築した。本システムのフローを図-3に示す。

3. 疲労き裂進展シミュレーション

図-4 のバルブリブ鋼床版試験体の解析モデルに対して、本解析システムによる疲労き裂進展シミュレーションを実施し、別途実施された疲労試験²⁾との比較検討を行う。

まず Case-1 として初期き裂長さ $a_0 = 1.60\text{mm}$ をバルブリブとウェブプレートの溶接部近傍に仮定し、疲労き裂の進展シミュレーションを実施した。疲労き裂の進展経路に関する Case-1 の解析結果および疲労試験結果を比較するため、それぞれを重ね合わせて図-5(a)に示す。図-5(a)の結果より、解析結果は、バルブリブ鋼床版の模擬試験体という複雑な3次元構造体の局所的な部分における疲労き裂進展の試験結果に対して、全体的に良い一致を示し、今回開発した解析システムの有効性が確認された。ただし、疲労試験結果では、溶接部近傍の進展序盤において、き裂は斜め方向に直線的に進展した後屈折が観察された。これに対して解析結果では、き裂進展に関する全体的な傾向として比較的なめらかな曲線で疲労き裂が進展することが示された。

そこで、次に Case-2 として、実際の疲労試験で急激な曲がりを見せた屈折点までのき裂長さ 9.45mm を初期き裂長さ a_0 とし、疲労試験における溶接部から離れた中盤以降のき裂進展に関するシミュレーションを実施した。Case-2 および疲労試験の疲労き裂の進展経路の結果をそれぞれ重ね合わせて図-5(b)に示す。これより、溶接部近傍からき裂先端が離れた場合には、解析結果は試験結果の進展経路と良い一致を示し、き裂進展を正確に再現できることが示された。

以上の Case-1 と Case-2 の解析結果と試験結果との比較から、き裂先端が溶接部に比較的近いき裂の初期段階では、残留応力がき裂進展に大きく影響していることが推測される。なお、き裂先端が溶接部近傍から離れた Case-2 の場合におけるき裂進展に伴うき裂周囲の最大主応力分布の推移を図-6に示す。

さらに、Case-2 において、日本鋼構造協会「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」の平均設計曲線に基づいて疲労寿命を算出した結果、4倍程度安全側に評価されることが示された(図-7)。

4. 結論

本研究では、汎用のFEM解析ソフトウェア ABAQUS にXFEMによるき裂解析機能を組み込み、容易かつ効率的に板厚方向貫通型疲労き裂の進展をシミュレート可能な解析システムの開発を行い、バルブリブ鋼床版模擬試験体の疲労試験を対象として、本解析システムによる疲労き裂進展シミュレーションを実施した。その結果、従来き裂の進展解析が困難であった複雑な3次元構造体の試験結果に対しても、疲労き裂の進展挙動の傾向は試験結果と良い一致を示した。今後、溶接部近傍の残留応力などを考慮したモデル化の研究が必要となる。なお本研究は、新都市社会技術融合創造研究会でのプロジェクト研究の一環として行われた。記して謝意を表す。

[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, 土論 A, 65(1), 228-242, 2009.
2) 崎谷淨 他: 開断面リブを有する鋼床版の横リブ疲労損傷対策に関する室内疲労試験, 土木学会全国大会講演論文集, 2009.

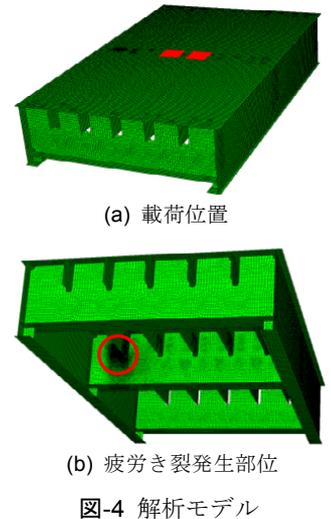


図-4 解析モデル

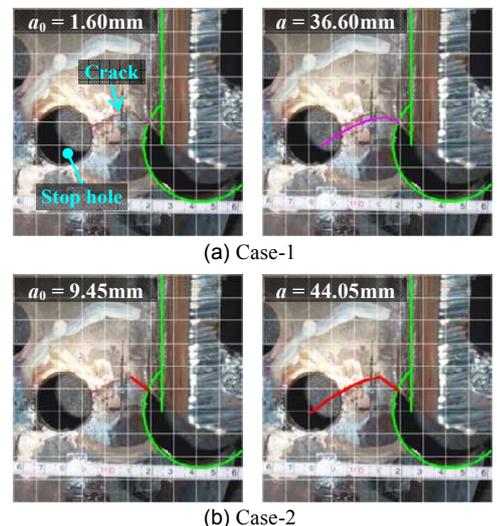


図-5 疲労き裂進展経路の比較

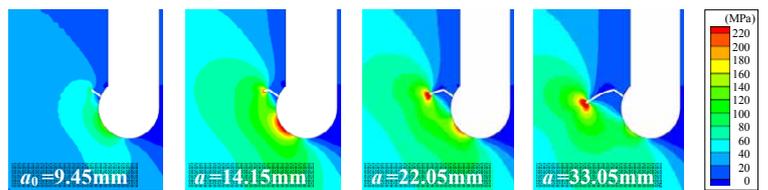


図-6 き裂進展に伴う最大主応力分布の推移 (Case-2)

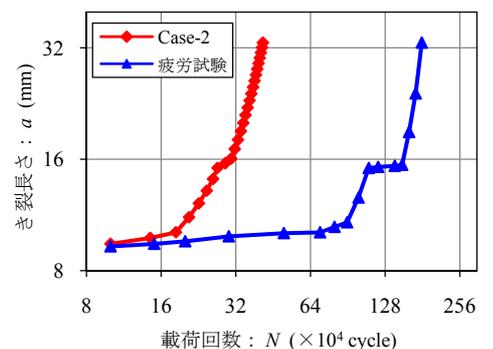


図-7 疲労き裂進展速度の比較