

XFEM を用いたバルブリブ鋼床版試験体の疲労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

京都大学大学院

正会員

宇都宮智昭

関西大学

正会員 坂野 昌弘

国土交通省近畿地整大阪国道事務所

中村 香澄

国土交通省近畿地整近畿技術事務所

宮崎 幸雄

(社)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ける疲労き裂の発生が多数報告されており、早急な対策が必要となっている。これに対し、疲労き裂の補強・補修の必要性の評価、さらには補修・補強手法の有効性とそれらを行うまでの猶予期間などを定量的に評価するために、疲労き裂の進展シミュレーションが有効な手段となり得る。

構造解析で広く採用されている有限要素法(FEM)は、一般的にき裂発生前の応力解析に有効である。しかし、き裂の進展解析に関しては、1)き裂を考慮したメッシュ生成に関する高度なノウハウが必要、2)き裂進展に伴うリメッシュ処理が必要である。このため、FEMを用いたき裂進展解析は現実的には困難であるのが現状である。この従来のFEMの課題を解決するため、近年提案されたのが拡張有限要素法(XFEM)である。このXFEMでは、き裂の不連続面やき裂先端近傍の特異場を、き裂周りに位置する節点に新たな自由度とそれに対応した基底関数で定義する。これにより、XFEMは従来のFEMと異なり、1)き裂を要素と独立に定義するため、特に二次元問題の場合き裂形状を「線」で容易にモデル化でき、2)リメッシュ処理を要しないため、き裂の進展解析に有効であり、さらに3)比較的粗く単純な要素分割で高精度なき裂解析が可能である。すなわち、XFEMは上記したFEMの課題を解消あるいは軽減することが可能であると考えられる。

本研究では、鋼橋のバルブリブ鋼床版の模擬試験体を対象とし、まずき裂発生前の状態における三次元シェルモデルとそれを単純化した二次元モデルを用いた応力解析を行う。次に、これらと静的載荷試験との比較を含め、単純化二次元モデルの妥当性に関する検証を行なう。さらに、その検証結果に基づいて二次元XFEMを用いた疲労き裂進展解析を行い、疲労試験との比較を含めて二次元XFEMの解析ツールとしての有用性の検証を行う。

2. XFEM

XFEMにおける要素内の変位場を次式で近似する。

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

ここで ϕ_i は従来のFEMで用いられる内挿関数、 m は要素節点数、 C はき裂先端近傍に位置する節点集合、 J は C 以外でき裂面近傍に位置する節点集合であり、 $\mathbf{u}_i$ 、 $\mathbf{c}_i^k$ 、 $\mathbf{b}_i$ はそれぞれ節点 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における漸近解の基底関数、 $H(\mathbf{x})$ はき裂の不連続性を表すヘビサイド関数である。

3. 三次元モデルと単純化二次元モデルの応力解析比較

図-1に示すように、三次元形状の解析対象試験体のフランジ・リブ・デッキプレートとウェブプレートを平面ひずみ、ウェブプレートを平面応力として近似することで、より単純化した二次元問題としての取り扱いが可能となる。ここで、二次元XFEMを用いた疲労き裂進展シミュレーションを行なう前に、静的載荷試験の実測値と三次元シェルモデルを用いて、この単純化二次元モデルの妥当性の検証を含めた弾性応力解析を行う。なお、平面ひずみを仮定した部材に関してはそれぞれの板厚を要素寸法として組み込み、試験体の奥行を有限要素の厚さとして入力する。

それぞれのモデルに関する最大主応力分布を図-2に示す。なお図中の数値は実測値である。実測値と三次元シェルモデルの解析値を比較した結果、実測値の誤差範囲内で良い一致を示した。また、単純化二次元モデルは三次元構造体を簡易化した割には、概ね三次元シェルモデルと同様の傾向を示し、進展解析への適用が可能であることが示された。

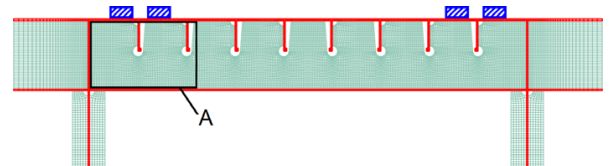
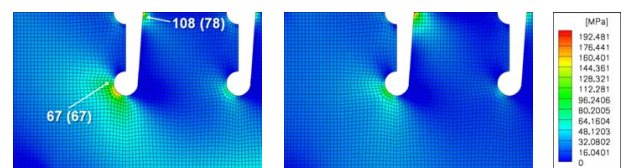


図-1 バルブリブ鋼床版試験体の単純化二次元モデル
(■: 平面ひずみ特性を付加する要素, ■: 載荷位置)



(a) 三次元シェルモデル (b) 単純化二次元モデル

図-2 最左端スリット近傍ウェブプレート(図-1のA部)の最大主応力分布(数値は実測値, 括弧内は裏側)

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

4. XFEM を用いた疲労き裂進展シミュレーション

疲労試験で発生したき裂は、最左端スリットの右上接合部近くから水平方向より緩やかに湾曲しデッキプレートに進行する進展経路をとることが確認された。この部位は溶接部であると同時に応力解析で最も強い応力集中が確認されており、試験体全体で最もき裂の発生確率が高いと推定される。また、同スリット左下部においても応力集中が確認された。この部位は実橋のバルブブリブ鋼床版において疲労き裂の発生事例が最も多く、溶接部ではないものの加工・組立時における損傷等を想定した場合、き裂の発生は十分に考えられるため、その進展挙動に関する十分な検証が必要といえる。そこで、Case1：最左端スリット右上部、Case2：最左端スリット左下部として、前節で妥当性を検証した単純化二次元モデルにXFEMを適用し、試験体に微小な疲労き裂が発生したと仮定することで、その後の進展シミュレーションを行う。なお、本検証の応力拡大係数の算出手法は著者らにより屈折・曲線き裂への適用性を改善した M 積分法を使用し、疲労き裂の進展基準は、進展方向として最大周方向応力説、進展速度として日本鋼構造協会疲労設計指針の平均設計曲線に従うものとする。

算出された疲労き裂の進展経路、応力拡大係数範囲 ΔK の推移、繰返し载荷数に対するき裂長さをそれぞれ図-3～図-5に示す。また最大主応力分布の推移を図-6に示す。これらより、Case1の場合、図-3および図-6(a)に示されるようにき裂は緩やかにデッキプレート側へ進展し、実験結果とよい一致を示した。また、本解析の範囲内ではこのき裂進展に伴う試験体の他の部位へ与える影響はほとんど確認できなかった。一方Case2の場合、一般にこのようなスリット下部に発生したき裂は様々な進展経路が報告されており、その推定は困難であるとされてきたが、本解析条件では図-6(b)に示されるように横桁下フランジと主桁の接合部の方向へ進展してゆくことが確認できた。なおこの場合、図-4に示したように ΔK はき裂長さが300mm以上の範囲において急激に低下し、き裂の進展速度も急激な減少がみられる。すなわち、き裂先端が横桁端部の下フランジ側にさらに接近した場合、き裂がそこで停留する可能性を示唆している。一方、図-6(b)よりき裂進展に伴いスリット右上部の応力集中がより強くなることが確認され、この場合のき裂進展は左端スリット上部におけるき裂の発生を誘発する要因となりうると推測できる。これより、本検証によりき裂の進展に伴う構造体の他の部位への影響評価が可能であることが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、鋼橋のバルブブリブ鋼床版の模擬試験体を単純化した二次元問題として取り扱い、その解析精度を三次元シェルモデルによって評価した。その結果、両者は概ね同様な傾向を示したことから、単純化二次元モデルが適用可能であることが示された。さらに、この検証された単純化二次元モデルにXFEMを適用することで疲労き裂進展シミュレーションを行った。スリット上部にき裂が発生した場合、き裂はデッキプレート方向へ進展し、実験と同様の傾向を示した。また、スリット下部にき裂が発生した場合、一般にこれらのき裂はその進展経路の推定が困難とされてきたが、その進展挙動を定量的にシミュレートでき、同時に進展に伴う他の部位への影響を評価することができた。以上の結果より、疲労き裂の進展挙動を評価するにあたり、二次元XFEMは解析ツールとして有効であることが示された。なお、本研究は新都市社会技術融合創造研究会「鋼橋の疲労亀裂進展シミュレーション手法の開発とその維持管理への応用」の一部として実施されたものである。

[参考文献] 1) 柴沼一樹, 宇都宮智昭: 写像による経路独立 M 積分の近似法の提案と X-FEM を用いた屈折または曲線き裂の解析, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, 2008. (掲載予定)

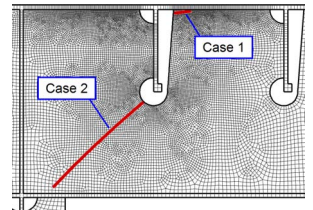


図-3 疲労き裂の進展経路

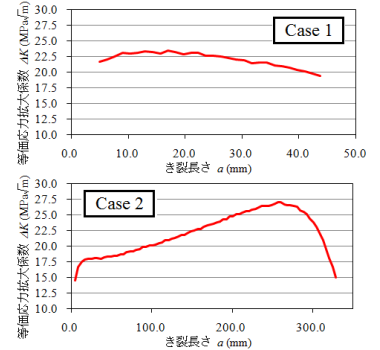


図-4 応力拡大係数範囲 ΔK の推移

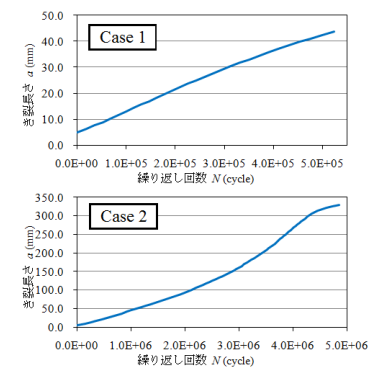


図-5 繰返し载荷数とき裂長さの関係

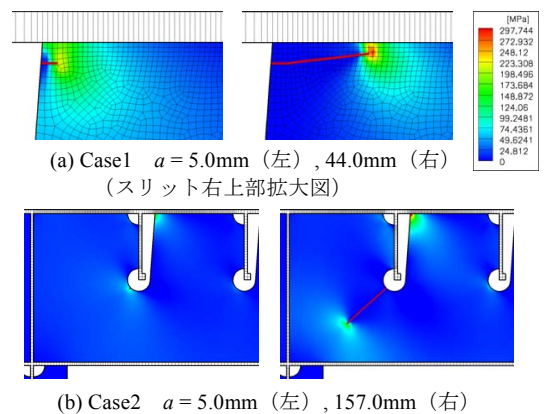


図-6 き裂の進展に伴う最大主応力分布の推移