

論文の要旨

題目 X-FEM を用いた溶接継手内で複雑形状に成長するき裂進展評価に関する研究
(X-FEM fracture behavior investigation
for complex-shaped propagating cracks in welded joints)

氏名 前田 研吾

構造物の強度評価は有限要素法 (FEM) を用いることが一般的であるが、複雑に進展するき裂問題においては、煩雑な解析処理を伴ったり、解析自体が困難になることも多い。そのような学術的な背景のもと、比較的簡単に複雑なき裂進展解析が可能な方法として、拡張有限要素法 (X-FEM) が提案された。X-FEM は商用ソフトやオープンソースソフトで実装されてきているが、比較的新しい数値解析法であるため、実際の構造物中に発生した複雑形状を有する疲労き裂の解析、3次元き裂進展解析での精度評価などは適用事例があまり多くなく詳細な検討が必要とされている。

本研究では、X-FEM の疲労き裂進展解析法を実構造物中に存在する複雑形状へ進展するき裂問題への適用を目的として、いくつかの疲労試験結果、他解析ソフトでの評価事例を研究対象として、X-FEM の実用に資する解析手法を開発した。本研究では、オープンソースソフトである Code_Aster の X-FEM 機能を用いた。ソースコードを直接操作することができ、Python で記述されたスクリプトファイルで解析を制御することで自由度の高い X-FEM 解析が可能である。本解析を行うにあたり、ソースコードおよびスクリプトファイルの修正を行い、解析対象に対して高精度かつ効率的な X-FEM 解析およびき裂進展現象の力学的評価を行いいくつかの有用な知見を得た。

第 2 章では、X-FEM の理論、および Code_Aster での X-FEM 機能について説明する。X-FEM では FEM の近似関数に不連続面や、き裂先端の漸近特性を表現できる内挿関数を追加することで、き裂の自由表面を比較的簡単に取り扱えるように拡張したものである。Code_Aster の X-FEM 機能では、き裂面を Level Set 関数を用いて表現する。き裂面の位置情報は要素の節点において Level Set Normal (LSN) および Level Set Tangent (LST) の 2 つの値を用いて与える。LSN=0 がき裂面を表し、LST<0 が不連続面、LST>0 が連続面、LST=0 がき裂前縁を表す。またき裂前縁は、き裂前縁の線分と要素表面の交点を節点として定義し、節点上で応力拡大係数などを計算する。Code_Aster では、この節点を中心として、き裂前縁周辺の要素を細分化するリファインメントを行うことで、解析精度の向上を図っている。

第 3 章では、3次元的自由表面へと進展していくき裂を解析対象として検討を行う。円筒継手の溶接止端部に発生した疲労試験結果を比較対象として、表面き裂から貫通き裂へと進展していく現象を捉えるための X-FEM 解析を行う。疲労試験結果では、き裂面はなめらかな曲面状へと進展していくが、ある段階より曲面の傾斜角度が急激に変化する現象が

確認された。X-FEM 解析においても同様の現象が確認できた。この力学現象について詳細な検討を行い、き裂が表面き裂から貫通き裂へと遷移する前後からき裂面の傾斜角度が急激に変化することがわかった。き裂が貫通し、継手の変形状態が変わったことが原因とわかった。従来の解析手法では、3次元的な表面き裂から貫通き裂への遷移現象を再現することは困難であったが、X-FEM を用いることでき裂形状の近似や簡易的なモデル化を用いることなく、直接的に表面き裂から貫通き裂へと遷移させることが可能となり、実現に近い結果が得られた。

第4章では、き裂の合体箇所での急上昇する応力拡大係数を高精度に評価する方法の開発およびその精度検証を行った。Code_Aster の X-FEM 機能ではき裂前縁に分布する応力拡大係数が振動することがあるため、ルジャンドル多項式で応力拡大係数を平均化している。一方で、1つの多項式近似ではき裂の合体箇所での応力拡大係数の急激な変化を表現することが難しいことがわかった。そこで、スクリプトファイルを用いて多項式近似の領域を合体点を境界として分割する方法を開発した。さらに、多項式近似の次数についても従来用いていた最大7次のルジャンドル多項式近似で表現することが難しいことがわかり、最大10次のルジャンドル多項式近似が可能ないようにソースコードの拡張を行った。次数を上げたためによる不自然な応力拡大係数の振動を抑制するために7~10次までの多項式の平均値として算出するようにした。これらの改良により、き裂合体点での応力拡大係数を精度良く算出することが可能となった。

第5章では、き裂の複雑な進展現象を解析対象とした。解析対象は未溶着部を含むT字隅肉溶接継手である。疲労試験でのき裂進展挙動では、ウェブに端部き裂として生じたき裂が進展、溶接継手中の未溶着部で2つに分岐、さらに未溶着部を回り込むように隅肉溶接部へと進展、2つのき裂が再び合体して1つのき裂前縁となり、主板を貫通して進展するものである。標準のCode_Aster の X-FEM 機能では、合体点の応力拡大係数の精度が低かったため応力拡大係数が低く見積もられ、合体点の進展速度が低下し2つの半円状の形状が不自然に残ったままであった。第4章で述べた改良を導入することで合体点の応力拡大係数を精度良く算出することができ、また計算ステップに応じてエンリッチ範囲の変更、レベルセット値の操作を行うことで、より実現に近いき裂の進展形状を再現が可能となった。さらに、疲労試験結果で述べられていた隅肉溶接部を通過した時点から応力拡大係数が一時的に低下する現象が確認できた。この現象の理由として、き裂面の面積とき裂前縁長さの増大比において、き裂前縁長さの増大率が卓越し、き裂前縁の負担する応力が低下したことが原因と推察された。

本研究では、Code_Aster の X-FEM 機能に新しく改良を加え、実構造物中を複雑に進展するき裂進展解析を実施することができた。さらに、それらの進展現象に対して力学的評価を行い、新しい知見を得ることができた。今後の進展課題としては、以下の2点が挙げられる。

1. 提案したき裂合体点の応力拡大係数の算出方法は、現状では左右対称形状に限定されている。より多様な問題を解くためには、ソースコードをさらに改良を加え、任意の形状のき裂合体において多項式近似の適用領域を分割する方法を組み込む必要がある。
2. 今回のき裂合体の精度検証は、2つのき裂面が同一平面上にある場合に限りされており、より実現象に近い問題を解くためには、3次元的な自由表面のき裂同士の合体の精度検証を行い、適した方法を開発する必要がある。