

ルートき裂の破壊力学パラメータおよび 進展経路評価に関する研究

田中 智行
広島大学

1 はじめに (研究の背景)

溶接は輸送機器や鋼構造物などの、さまざまな工業製品に用いられる重要な基盤技術である。現代社会において溶接の適用範囲は広がりつつあり、今まで以上の耐久性と安全性が求められている。溶接構造物に荷重が加わると、き裂が発生、進展する危険性がある。溶接構造物に発生する疲労き裂には、溶接止端部の表面から発生する止端き裂と、溶接継手の内部に存在する未溶着部や溶接欠陥から発生するルートき裂がある。このうちルートき裂は、継手内部から発生・進展するため外観からはき裂が見えず、発見や評価が難しいとされている。溶接継手表面に到達した時には、き裂はかなり進展しており大規模な修繕が必要となる。

構造物に生じたき裂の検出には、主に非破壊検査を用いる。しかし、非破壊検査の検知限界より小さい欠陥は発見できず見逃されてしまう可能性がある。また、構造物の信頼性評価は、き裂の発生を防止するだけでなく、発生後のき裂進展挙動を把握する必要がある。余寿命評価を行い適宜補修することが、構造物や継手の寿命を延ばすうえで非常に重要となる。一方、形状の複雑さからルートき裂のき裂進展解析および評価を行った例はあまり多くない。

本研究では、種々のすみ肉溶接継手に存在するルートき裂を対象に破壊力学解析を行った。形状や荷重条件の

違いによる K 値と、き裂進展挙動について評価を行った結果について報告する。

2 研究方法

破壊力学解析は、拡張有限要素法 (X-FEM)^{1),2)}を用いて評価を行う。き裂進展解析は通常の有限要素法でも可能であるが、解析モデルのき裂部分に二重節点を導入する必要があり、解析モデル作成作業が煩雑となる。X-FEMでは、き裂と要素をそれぞれ独立に定義することが可能であるため、解析モデル作成の自由度が高い。

解析には、構造解析用ソフトウェアCode_AsterのX-FEM機能³⁾を用いた。このソフトウェアは、オープンソースソフトウェアであり、スクリプトファイルを適宜制御することでさまざまな破壊力学解析が可能である。当研究室では、Code_Asterを用いて、種々の溶接継手の解析を実施してきた^{4)~6)}。X-FEMにより得られた解析結果を参照解と比較することで、妥当性を評価した。また、十字継手の荷重条件、脚長や初期き裂長さを変化させてき裂進展解析を行い、結果を体系的にまとめた。ここではその一部について紹介する。

3 主な研究成果

本研究で解析対象とした十字継手の形状を図1(a)に示す。2次元問題として、対称条件を用いて図1(b)に示すような4分の1モデルを作成した。図1(b)中の、 T_1 と T_2 は板厚を、 S は溶接部の脚長を表している。今回は、脚長の縦方向と横方向は等しい大きさとした。モデル寸法は、 $T_1 = T_2 = 15$ mm、 $H = W = 25$ mmである。荷重条件として、 $\sigma_{yy} = 1.0$ MPa、 $\sigma_{xx} = 0$ MPaを負荷した。初期き裂長さ a 、脚長 S をそれぞれ変化させて、初期き裂の K 値を算出した。図2(次ページ)に初期 K 値を無次元化した結果と板厚に対する初期き裂長さの比 $2a/T_1$ の関係を参照解⁷⁾とともに示す。結果は、板厚に対する脚長の比ごとにまとめている。解析結果のうち、 K_I は参照解と概ね一致する結果が得られた。

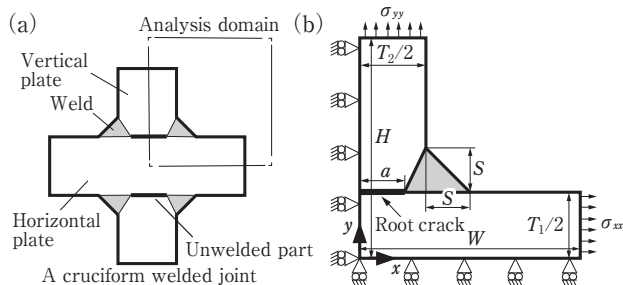


図1 解析モデルの形状
[(a) モデル全体, (b) 対称条件を用いた4分の1モデル].

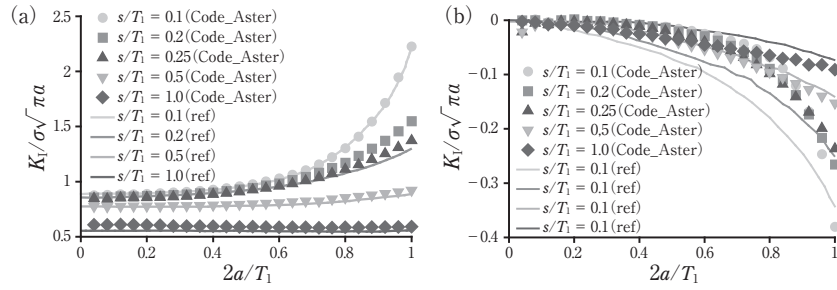


図2 板厚に対する初期き裂長さ と解析結果 [(a) $K_I / (\sigma \sqrt{\pi a})$, (b) $K_{II} / (\sigma \sqrt{\pi a})$].

表1 Rごとの初期き裂のK値

R	K_I (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)	K_{II} (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)
-1	333.8	-12.92
0	286.9	-24.83
1	239.9	-36.73

初期き裂長さ $a=3.0, 5.0, 7.5\text{mm}$ の場合についてき裂を進展させて、その時のき裂進展経路を図3に示す。き裂が貫通する位置は、初期き裂長さの影響を受けることなくほぼ同じ経路をたどることが分かった。つまり、今回対象とした継手では、初期き裂長さがき裂の貫通位置に与える影響は小さいことが分かる。

一般の構造中の十字継手は、複合荷重を受ける。そこで図1(b)の解析モデルに対して、 $a=5\text{mm}$ として、 σ_{xx} を追加で負荷した解析を行った。 $\sigma_{yy}=100\text{MPa}$ で固定して、 σ_{xx} を変化させた際の初期き裂のK値を表1に示す。ここで $R = \sigma_{xx} / \sigma_{yy}$ とする。 K_I の値は、 R の値が大きくなるに従って減少した。一方、 K_{II} の値は、 R の値が大きくなるに従って増加する結果となった。

き裂進展経路を図4に示す。この結果、き裂の進展経路が水平方向へ進展した。その後徐々に上向きな経路をたどったが、 $R=0$ と比較してき裂の貫通位置は低くなった。 $R=1$ の場合は、初期 K_{II} が大きくなったことで初期形状から折れ曲がるように進展した。その後は角度を維持したまま直線的に進展したため、 $R=0$ と比較してき裂の貫通位置は高くなった。以上より、今回対象とした継手のき裂進展経路は、荷重条件が影響を与えることが分かる。

4 おわりに (今後の展望)

今回は十字継手を対象に、初期き裂長さや脚長の大きさと、荷重条件の違いによる、K値とき裂進展挙動について評価を行った。誌面の都合上省略したが、パリス則を用いてき裂進展寿命の評価も行った。き裂進展寿命の長い継手形状の提案や、非破壊検査で検出すべきき裂の大きさを決定することができるなど、実現場に応用可能な結果が得られることが期待される。今後の検討課題と

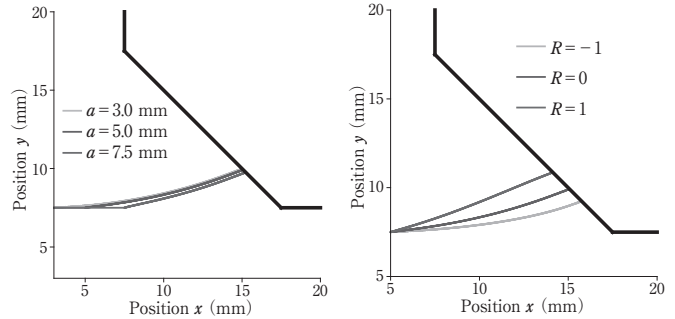


図3 初期き裂ごとのき裂進展経路

図4 Rごとのき裂進展経路

してK値の算出に残留応力の影響、き裂面の開閉口挙動の考慮などがある。また、解析モデルを3次元へと拡張して、より詳細なき裂進展経路の把握と疲労寿命の評価も実施予定である。

謝辞

本研究は、富田悠紀氏(研究当時、広島大学)、広島大学研究員の久保田将矢氏の協力により行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- Belytschko T., Black T., Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 45, pp.601-620, 1999.
- Moës N., Dolbow J., Belytschko T., A finite element method for crack growth without remeshing, International Journal for Numerical Method in Engineering, 46, pp.131-150, 1999.
- <https://code-aster.org/V2/spip.php?rubrique2> [accessed 24.8.2023].
- 前田研吾, 田中智行, 高橋大樹, 八木一桐, 大沢直樹, 溶接止端半径の異なるT字円筒継手に生じた疲労破面の力学的評価に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.32, pp.141-152, 2020.
- 前田研吾, 田中智行, 高橋大樹, 田添広喜, X-FEMを用いた直交交差隅内溶接部のき裂進展挙動の評価に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.33, pp.137-148, 2021.
- 富田悠紀, 溶接継手ルート部から生じるき裂の破壊力学解析に関する研究, 令和4年度広島大学卒業論文, 2023.
- Usami S., Kusumoto K., Fatigue strength at root of cruciform, tee and lap joints (Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Strength of Welded Joints, 1st Report), Transaction of the Japan Welding Society, Vol.9, pp.3-10, 1978.