

鋼部材の延性き裂進展解析における損傷進展エネルギーの決定方法に関する一検討

名城大学大学院 学生会員 ○猪飼 豊樹
名城大学 フェロー 葛 漢彬

1. 序論

1995年に起きた兵庫県南部地震では溶接構造物や橋梁にて脆性的な破壊が確認された。被害原因の調査により、過大な塑性ひずみが生じたことで延性き裂が発生し、き裂発生箇所を起点として脆性的な破壊が生じていたことが明らかとなった。延性き裂発生により引き起こされる脆性的な破壊は鋼構造の重要な破壊現象の一つであり、溶接鋼構造物の脆性的な破壊を防止するためには、実験ならびに解析による延性き裂発生メカニズムの解明は重要である。そこで本研究では、鋼部材の延性き裂発生および進展を予測する延性破壊モデル¹⁾を用いた、数値解析を行う際の要素サイズが異なる場合の損傷進展エネルギーの決定方法について検討する。

2. 解析概要

本解析では、文献1)と同様に母材部に切り欠きを有している No.4 R1.0-NWB-C1-Base を取り上げてモデル化する。また、解析モデルは解析時間短縮のため、シェル要素にてモデル化している。構成則には引張実験を基に換算した真応力-真ひずみ関係を用いている。本研究で用いる延性破壊モデルは図-1に示すように、弾性域、塑性域、軟化域の3段階で構成されている。塑性域では塑性変形パラメータ D_{ini} が導入され、 D_{ini} を微小増分で表すと式(1)で表すことが出来る。

$$D_{ini} = \int dD_{ini} = \frac{d\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_f^p(\eta)} = \frac{d\varepsilon_{eq}^p}{\chi \cdot e^{\frac{3}{2}\eta}} \quad (1)$$

ここで、 $d\varepsilon_{eq}^p$ は相当塑性ひずみの増分、 ε_f^p は破壊ひずみ、 η は応力三軸度である。式(1)の延性破壊パラメータ χ を定義することにより破壊ひずみが算定され、異なる応力三軸度下において $D_{ini}=1$ に達した時(図-1のB点)、塑性域から軟化域へと移行し、損傷パラメータ D_{prop} が導入される。この延性破壊モデルは D_{ini} および D_{prop} のパラメータを用いて、実験のき裂進展特性を考慮している。損傷パラメータ D_{prop} は式(2)で定義される。

$$D_{prop} = \frac{u_{eq}}{u_f^f} = \frac{L \times \varepsilon_{eq}}{2 \times G_f / \sigma^{di}} \quad (2)$$

ここで、 G_f は損傷進展エネルギー、 σ^{di} は D_{ini} が1に達した時(図-1のB点)の応力、 L は要素の特性長さ(シェル要素は面積の平方根)、 ε_{eq} は損傷開始から要素削除までの相当塑性ひずみである。 D_{prop} が増大すると要素の応力が次第に減少していき、 D_{prop} が1に達した時(図-1のC点)、要素が削除されると定義している。

本研究ではまず式(1)の延性破壊パラメータ χ には、母材部は $\chi=2.55$ を、溶接部は $\chi=2.45$ を与え、また式(2)

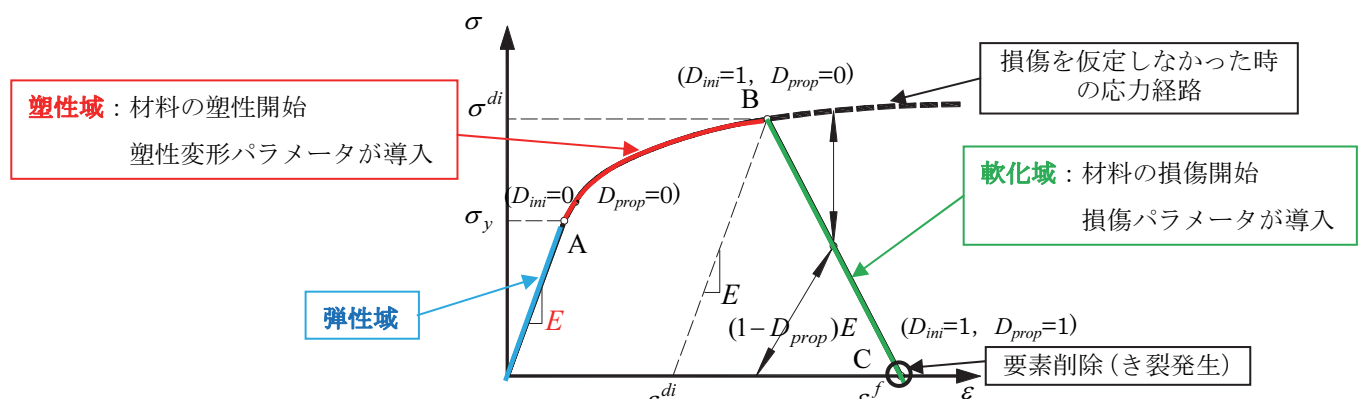


図-1 延性破壊モデル概念図

キーワード き裂発生、き裂進展、延性破壊モデル、損傷進展エネルギー、相当塑性ひずみ

連絡先 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科 TEL 052-838-2342

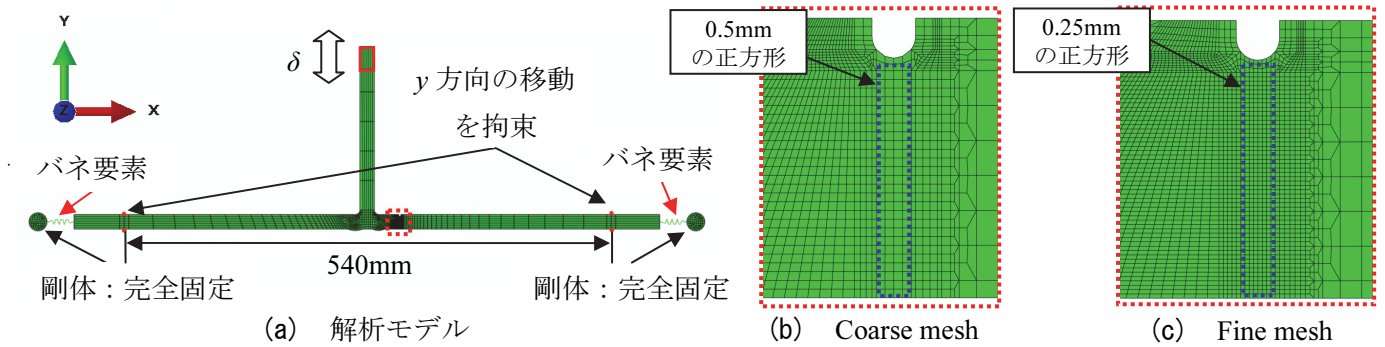


図-2 解析モデルおよびメッシュ分割図

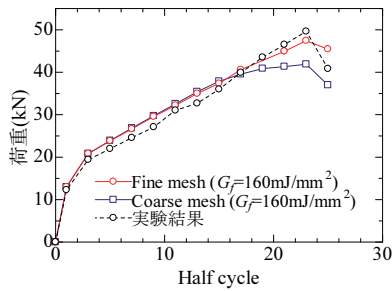


図-3 包絡線の比較

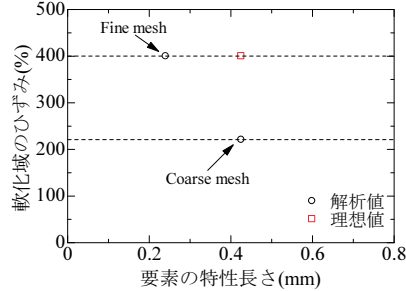


図-4 軟化域のひずみ－要素の特性長さ関係

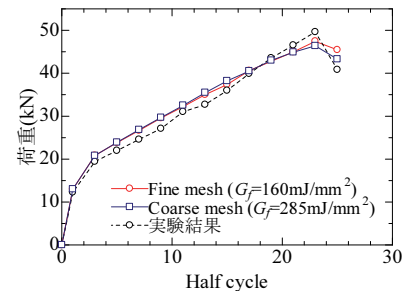


図-5 本手法による解析の包絡線の比較

の損傷進展エネルギー G_f には、文献 1)と同様に $G_f=160\text{mJ/mm}^2$ を与えている。

境界条件については図-2(a)に示しているが、文献 1)と同様であるため、詳しくは文献 1)を参考にされたい。メッシュ分割については、図-2(b), (c)に示しているように、き裂が進展するノッチ底部の要素サイズが、一辺 0.5mm の正方形になるように分割した Coarse mesh と、一辺 0.25mm の正方形になるように分割した Fine mesh の 2 ケースを用いている。

3. 解析結果

図-3 に解析結果と実験結果の荷重－変位履歴曲線の包絡線の比較を示す。包絡線とは、引張側の各サイクルの最大荷重点を繋いだものである。図-3 より、どのメッシュ分割に対しても同一の損傷進展エネルギー G_f を与えているが、両者の包絡線は異なり、実験結果と比較すると細かく分割している Fine mesh の方が実験結果と比較的一致している。そこで、始めに削除された要素から相当塑性ひずみを抽出し、軟化域のひずみ(図-1の C 点のひずみから B 点のひずみを差し引いた値)をプロットしたもの(黒丸)－要素の特性長さ関係を図-4 に示す。ここでは、初めに削除された要素(ノッチ底部)より抽出しているため、要素の特性長さはそれぞれ 0.425mm と 0.24mm となっている。図-4 より、Fine mesh と Coarse mesh の軟化域のひずみは異なり、Coarse mesh の方が削除されるまでに蓄積したひずみが小さい。そのため、図-3 の Coarse mesh の方がき裂進展による荷重低下が早いと考えられる。そこで、要素の特性長さが異なっても軟化域のひずみが同一であると仮定し(図-4 の理想値)、 $L=0.425\text{mm}$ と Fine mesh の軟化域のひずみである $\varepsilon_{eq}=4$ を式(2)に代入し、Coarse mesh の G_f を算出すると $G_f=285\text{mJ/mm}^2$ となった。そこで、Coarse mesh に $G_f=285\text{mJ/mm}^2$ を与え再度解析を行った。図-5 に解析結果と実験結果の包絡線の比較を示す。図-5 の Coarse mesh に $G_f=285\text{mJ/mm}^2$ を与えた包絡線は、図-3 の $G_f=160\text{mJ/mm}^2$ を用いた場合より、実験結果と比較的一致していることがわかる。

4. 結論

要素サイズが異なる場合、同一の損傷進展エネルギー G_f を与えると、要素が削除されるまでに蓄積するひずみ量が異なることが分かった。しかし、軟化域でのひずみが同一であると仮定し、損傷進展エネルギー G_f を算出する手法によれば、要素サイズが異なる場合においても実験の包絡線を精度よく再現することが出来た。

参考文献

- 1) 猪飼 豊樹, 葛 漢彬: T 型溶接継手の延性破壊のシミュレーション手法に関する一検討, 土木学会中部支部平成 28 年度研究発表会, I-27, pp.53-54, 2016.