

延性の異なる材料にき裂進展則を適用した際の注意点について

オリエンタルコンサルタンツ

正会員 ○猪飼 豊樹

名城大学

フェロー

葛 漢彬

1. 序論

1995年に発生した兵庫県南部地震では、溶接構造物等において延性き裂を起点とした脆性的な破壊が確認された。この脆性的な破壊は、鋼構造物の重要な破壊現象の一つであるため、防止するためには延性破壊を予測できる手法の確立が必要である。著者らは延性破壊を予測する手法を確立するため、Hillerborgらの手法に基づくき裂進展則を適用した検討を行ってきた¹⁾。この手法は定式に要素の特性長さ L_e を導入することで、メッシュ依存性を大きく緩和することが出来る²⁾。実際にコンクリート分野では数多くの適用事例があり、メッシュ分割が異なっても同等のひび割れ現象を評価できることを報告している³⁾。しかし、文献4)では、鋼材に対してき裂進展則を適用したメッシュ依存性の検証を行い、同一の損傷進展エネルギー G_f を与えていてもメッシュ分割が異なると、き裂進展状況が著しく異なることを示し、メッシュ依存性をほぼ解消できる手法を提案した。すなわち、き裂進展則を用いても対象材料によっては、解析結果にメッシュ依存性が現れることを示している。そこで本研究では、メッシュ依存性を引き起こす要因について究明することとき裂進展則を適用する際の注意点を明確にすることを目的としている。

2. 解析概要

本解析では、文献4)と同様に母材部に切り欠きを有しているNo.4 R1.0-NWB-I-Baseをモデル化する。解析モデルは解析時間短縮のためシェル要素を用い、構成則には引張実験を基に換算した真応力-真ひずみ関係にPLT法を適用することにより算出している¹⁾。適用した境界条件とメッシュ分割の例を図-1に示す。実験の支持条件を再現するために解析モデル両端にバネ要素を使用している。検討にはき裂進展箇所を0.5mmになるように分割したCoarse meshと0.375mmになるように分割したMedium meshおよび0.25mmになるように分割したFine meshのメッシュ分割を使用した。使用した延性破壊モデルは、3段階2パラメータ延性破壊モデルであり、弾性域、塑性域および軟化域の3段階からなっている。延性破壊モデルの詳細については文献1)を参照されたい。Hillerborgらの手法に基づくき裂進展則は、塑性域から軟化域へと移行した時に導入され、損傷指数 D_{prop} は以下の式で定義されている。

$$D_{prop} = \frac{u_{eq}}{u_{eq}^f} = \frac{L_e \times \varepsilon_{eq}}{2G_f / \sigma_{ini}} \quad (1)$$

ここで、 L_e は要素の特性長さ(要素の面積の平方根)、 ε_{eq} は軟化域に移行してからの相当塑性ひずみ(以降、軟化域のひずみと称する)、 σ_{ini} は D_{ini} が1に達した時のvon-Mises応力、 G_f は損傷進展エネルギーである。軟化域へと移行すると D_{prop} が増大し、 D_{prop} が1に達した時に要素が削除されると定義している。 G_f はコンクリートの場合では 0.1J/mm^2 程度であるが³⁾、No.4 R1.0-NWB-I-Base-Fine mesh(鋼材)の場合では $G_f=150\text{J/mm}^2$ を与えることで、実験結果と同等の破壊現象を評価できている¹⁾。そのため、本研究では G_f には 0.1J/mm^2 と 150J/mm^2 を与える。

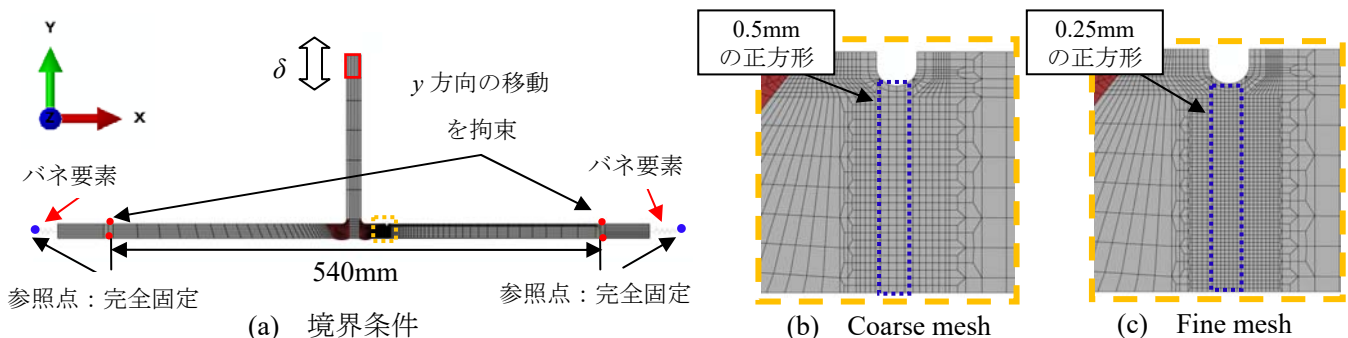


図-1 境界条件およびメッシュ分割の例

キーワード 鋼材, 延性, き裂進展則, 損傷進展エネルギー, 軟化域のひずみ

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

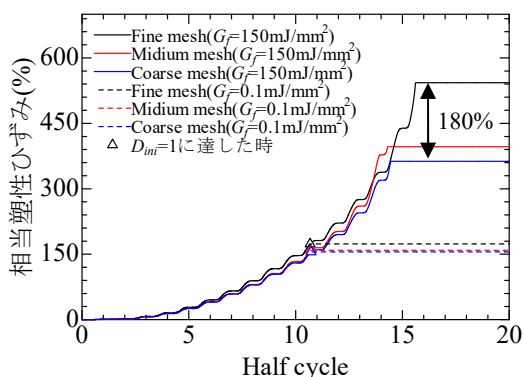


図-2 相当塑性ひずみ-Half cycle 関係

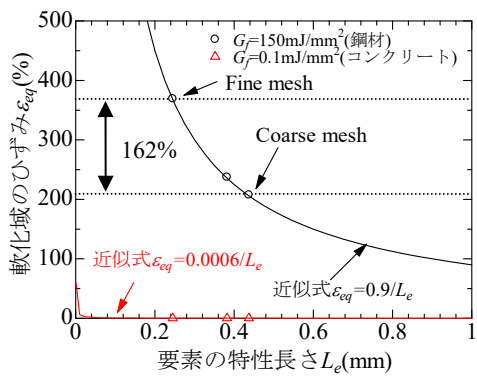


図-3 軟化域のひずみ-要素の特性長さ関係

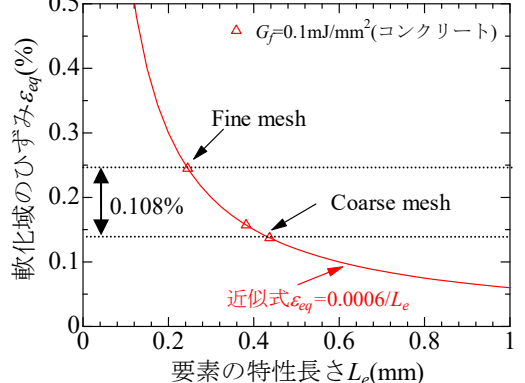


図-4 拡大した軟化域のひずみ-要素の特性長さ関係

表-1 G_f が異なる場合の軟化域のひずみ一覧

解析モデル	要素の特性長さ (mm)	軟化域のひずみ(%)	
		$G_f=0.1\text{J/mm}^2$	$G_f=150\text{J/mm}^2$
Fine mesh	0.245	0.245	370
Coarse mesh	0.437	0.137	208
差		0.108	162

※差：Fine mesh－Coarse mesh

3. 解析結果が異なる要因

鋼材にき裂進展則を適用した際にメッシュ依存性が現れる要因については、文献4)で考察しているが軟化域のひずみが大きく異なるためである。実際に最初に削除された要素より抽出した相当塑性ひずみ-Half cycle 関係と軟化域のひずみ（要素削除時から D_{ini} が1に達した時を差し引いたひずみ）-要素の特性長さ関係をそれぞれ図-2と図-3に示す。図-2より、 $G_f=0.1\text{J/mm}^2$ を与えた場合（点線）では、要素削除時の相当塑性ひずみは同程度であるが、 $G_f=150\text{J/mm}^2$ を与えた場合（実線）では要素削除時の相当塑性ひずみは大きく異なり、Fine meshとCoarse meshを比較すると180%程度異なっている。また、図-3より要素の特性長さが同一の場合においても、損傷進展エネルギーが異なると軟化域のひずみが大きく異なっており、 $G_f=150\text{J/mm}^2$ を与えた場合のFine meshとCoarse meshの軟化域のひずみを比較すると、162%（約1.78倍）と大きく異なっているため、解析結果に影響を及ぼすと考えられる。しかし、図-4に示すように $G_f=0.1\text{J/mm}^2$ を与えた場合のFine meshとCoarse meshの軟化域のひずみを比較すると0.108%となり、メッシュ分割が異なっても軟化域のひずみは概ね一致している。両者のグラフは縦軸のオーダーが3桁異なっている点に注意されたい。これらをまとめると表-1のようになる。これはコンクリートの場合、引張力が作用するとすぐにひび割れが生じるため G_f が小さな値であるが、鋼材は延性に優れているため G_f が大きな値となる。これらの結果から、延性に優れた材料（損傷進展エネルギーが大きい材料）ほど、メッシュ分割が異なる場合に同一の損傷進展エネルギーを与えると、軟化域のひずみが大きく異なることがわかった。そのため、延性が優れた材料にき裂進展則を適用した場合は、メッシュ依存性が生じる可能性があるため注意する必要がある。

4. 結論

本研究では、き裂進展則を適用した際にメッシュ依存性を引き起こす要因と適用する際の注意点を明確するために検証を行った。その結果、延性に優れた材料の場合はメッシュ依存性を生じる可能性が高いことがわかった。そのため延性が優れた材料の場合は、文献4)で提案した手法を用いて損傷進展エネルギーを補正する必要がある。

参考文献：1) 猪飼ら：構造工学論文集，Vol.64A，pp.194-207，2018。2)ABAQUS, Inc, ABAQUS/Analysis user's manual, version 6.13-4。3)車谷ら：日本計算工学会論文集，論文番号 20130015，2013。4)猪飼ら：土木学会第72回学術講演会論文概要集，I-110，pp.219-220，2017。