

氏名(本籍) 福山 慶介 (岐阜県)
 学位の種類 博士(工学)
 学位記番号 甲第26号
 学位授与日 平成16年3月19日
 学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
 工学研究科 生産システム工学専攻
 論文課題目 応力拡大係数の解析における有限要素法の有効利用に関する研究
 審査委員 主査 九州産業大学
 教授 西谷 弘 信
 副査 九州産業大学
 教授 藤 崎 涉
 副査 九州産業大学
 教授 日 垣 秀 彦

内容の要旨

機械や構造物の破壊は一般に応力集中部より発生したき裂の伝ば拡大によって生じる。したがって、き裂を持つ部材の強度評価は極めて重要であり、その際の強度評価パラメータである応力拡大係数 K を求めることは実用上大きな意味を持っている。

一方、有限要素法(FEM)は、1950年代初めに数値解析の方法として開発され、その後さらにFEM汎用ソフトが開発されたことによって、工学的に広く使用されている。しかしながら、FEMは汎用性にすぐれた有力な解析手法ではあるが、そのままでは K の解析には不向きである。そのためFEMでき裂材の K を求める場合には特別な工夫が必要である。

現在までに、FEMを用いて K を求める手法は数多く提案されており、直接法、エネルギーに関連した方法、重ね合わせ法および比例法の四つに分類出来る。直接法に関しては応力外挿法、変位外挿法、接続外挿法、J積分に基づく方法などが提案されている。エネルギーに関連した方法の中には、エネルギー法、コンプライアンス法、仮想き裂進展法などがある。

また、重ね合わせ法に関しては、解析解との重ね合わせ法があり、比例法にはき裂先端近傍の応力や変位を利用する方法がある。それらは、それぞれに一長一短があり、簡便に高精度の K を求める方法とはいえない。

最近、西谷らは応力拡大係数を得る手法の一つとして、FEMによって得られるき裂先端の応力値が、き裂先端近傍の応力場を最も忠実に代表していることに着目し、簡便で高精度な応力拡大係数の決定法を提案している。この方法はFEM解析で求まるき裂先端の応力値、つまり第

ゼロ番目の節点の応力値 $\sigma_{Y0,FEM}$ を用いて K を求める方法であることから第ゼロ節点法と呼ばれている。この方法は外挿を必要とせずに K を一意的に求めることが出来る点で、他のFEMを利用した K の解析法と大きく異なっている。しかしながら、第ゼロ節点法は界面き裂問題や軸対称問題などの実用的問題には、まだ適用されていない。

本論文では、以上の点を考慮して、第ゼロ節点法をこれまで未解決であった異種接合材や軸対称問題に拡張して適用し、工学的に重要な諸問題の応力拡大係数を求めるとともに、それらの結果の一部をこれまでに得られている体積方法の結果と比較して、その有効性を示したもので、7章からなる。

第1章では、有限要素法で直接応力拡大係数 K を解析することが極めて困難であることに触れ、さらにこれまで提案されたFEMによる応力拡大係数の決定法について述べた。

第2章では、FEMによる応力拡大係数の解析法の代表的なものである接続外挿法を例にとり、その欠点を具体的に述べた。すなわち、帯板のリガメントが非常に小さい場合には応力拡大係数を決定出来ない点、き裂先端の要素サイズを極端に小さくしても常に有限な誤差が生じる点などについて述べた。

第3章では、第ゼロ節点法の物理的背景と適用方法及び拡張方法を示した。

適用方法の中では、全ての要素サイズがかなり大きいときでも比較的小さい誤差で応力拡大係数が求まること、き裂先端の最小要素サイズを細かくすると K がさらに高精度に求まることなどを確認した。また、本論文で使用した基準問題の形状および基準値を具体的に示した。本手法を軸対称問題、異種接合問題及び切欠き問題に拡張して適用する方法についても述べた。

第4章では、第ゼロ節点法をき裂を有する二次元問題の範囲で一般化する際の諸問題について検討し、厳密解である体積法との解と比較することで、本手法が一般の二次元問題に対して十分有効である事を確認した。

第5章では、き裂を有する異種接合材に関して、これまでに解が与えられている問題および新しい問題について、第ゼロ節点法に基づいて応力拡大係数の値を求め、その有効性を検討した。き裂先端が均質母材中にある場合は、均質材のき裂問題に用いる第ゼロ節点法をそのまま用いることができることを確認した。き裂先端が異種接合材の界面中にある問題においては、第ゼロ節点法に基づく外挿法によって応力拡大係数を求めることができ、その際の外挿性はこれまでの単純な外挿法より遙か

に優れており、本手法が異種接合材においても実用上十分な精度を有している事を確認した。

第 6 章では、第ゼロ節点法を円周き裂を有する軸対称問題に適用し、一部の問題に関して体積方法の解と比較することでその有効性を検討した。体積方法では解析にかなりの労力を必要とする軸対称問題に対しても、第ゼロ節点法は適用が極めて容易であり、しかも十分高精度である事を確認した。

第 7 章は全ての結果をまとめたものである。

審査の結果の要旨

Irwinによる線形破壊力学の提案以来、き裂をもつ部材の強度評価は応力拡大係数 K を用いて合理的に行えるようになった。一方、 K を得るための解析法としては、有限要素法、境界要素法、体積法などがあり、それぞれ得意の分野で多くの解が蓄積されつつある。なかでも、有限要素法 (FEM) は様々な汎用ソフトが開発されており、 K を含め多くの応力解析に用いられている。しかしながら有限要素法はき裂以外の問題に対しては、かなりの精度を発揮しているものの、元来き裂の解析には不向きである。そのため K を有限要素法で求めるための多くの特別な手法が提案されているが、いずれも高精度の解を得るまでには至っていない。最近になって西谷はFEMを有効利用する立場に基づいて第ゼロ節点法を提案し、主に等方性材料の二次元平面応力問題についてその有用性を示している。

本論文は、以上の点を考慮して、第ゼロ節点法の物理的背景を詳細に検討したあと、多くの二次元平面問題を第ゼロ節点法で解析し、その解の精度を体積法の解やこれまでに得られている他の研究者による解と比較して、本手法の精度を検討するとともに、これまで解を与えられていなかった各種問題の解を与えたものである。

本研究の主な成果は、次の 6 点にまとめられる。

第一はこれまでの外挿法の欠点に関するものである。著者はまず有限要素法に基づいて K を解析する事が困難な理由を詳細に述べている。ついで一般によく用いられている接続外挿法の欠点を、有限要素法で求めた応力分布に基づいて指摘している。すなわち、外挿曲線がき裂先端付近で直線から大きくはずれるため外挿値を唯一に決定することが困難であることおよびき裂が相対的に大きいときは外挿曲線に直線部が殆どなくなることなどを明らかにしている。

第二は、第ゼロ節点法の物理的背景に関するものである。まず中央き裂を有する帯板の引張り問題を例にとり、

K の値が同一となる条件のもとで、相対き裂長さ a/w (w : 板幅、 a : き裂長さ) を広範囲にかえてき裂先端付近の応力分布を求め、FEMで計算された応力分布がき裂先端の値も含めて、 a/w に無関係に互いに極めて近いことを示している (このときき裂先端付近のメッシュパターンは等しくとっている)。このことから、第ゼロ節点法の基本関係式が導かれる。

第三は、第ゼロ節点法における基準問題に関するものである。第ゼロ節点法で適用問題の K の値を求めるためには、まず基準問題についてFEM解析を行う必要がある。したがって著者は均質材、異種接合材、および軸対称問題に関する基準問題についてFEM解析を行って基準値を与えている。

第四は第ゼロ節点法の具体的適用法に関するものである。第ゼロ節点法は、き裂先端のメッシュパターンを同一または相似にとった上で、1) 基準問題のFEM解析、2) 適用問題のFEM解析、3) 基本関係式の適用の 3 過程を通じて K の近似値を求める手法である。ここではそれらの手法を具体的に示している。

基準問題としては通常無限板に 1 個のき裂が存在するときの問題を用いる。このときの K は厳密解が与えられている。第ゼロ節点法ではこの無限板のFEM解析を行う必要があるが、その際、具体的には無限板を一辺がき裂の長さの約3,000倍の正方形板とみなして計算する。

第五は、第ゼロ節点法の精度に関するものである。ここでは多くの既知の解を第ゼロ節点法を用いて解析し、両者の結果を比較することによって第ゼロ節点法の精度を検討している。取り扱った問題は、中央に一き裂または二き裂を有する帯板などである。

第六は、これまで解が与えられていない問題の解析結果に関するものである。それらの問題は、接着層界面にき裂が存在するときの帯板の引張り、界面の両端にき裂が存在する帯板の引張り、2 個の円周き裂を有する丸棒の引張りなどである。

以上要するに、本論文は応力拡大係数のFEMによる解析法である第ゼロ節点法について、その物理的背景を詳細に検討すると共に、これまで得られている多くの問題の解と本手法で得られた解を比較して本手法が十分な精度を有することを示し、さらにこれまで未解決であった多数の問題の解を与えたものであり、材料強度学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。

(試験の結果)

本論文に関し、審査委員から、有限要素法がそのままでは応力拡大係数の解析には適していない理由、軸対称問題の基準解として二次元平面ひずみ問題の基準解を使用する理由、最小要素サイズの影響などについて質問がなされたが、著者の回答はいずれも明確であった。また、公聴会においても出席者から種々質問がなされたが、著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上の結果から、著者は試験に合格したものと認めた。

氏名(本籍)	田中 孝久 (福岡県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第27号
学位授与日	平成16年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科 社会開発・環境システム工学専攻
論文課題目	ハイブリッド吊床版歩道橋の提案とその構造特性に関する基礎的研究
審査委員	主査 九州産業大学 教授 吉村 健 副査 九州産業大学 教授 水田 洋司 副査 九州産業大学 教授 久保 喜延

内容の要旨

プレストレストコンクリート(PC)吊床版歩道橋においては、床版の内部ケーブル張力(その水平成分 H_w)が非常に大きい。この H_w の低減を図る目的で、'吊床版橋と吊橋'および'吊床版橋と斜張橋・吊橋(斜張吊橋)'を組み合わせたハイブリッド歩道橋を提案した。本橋の主桁は、鋼管あるいは円形断面PCのエッジガーダーとオープングレーティング等で構成されており、重量軽減(H_w の低減)と耐風安定性向上を図った。スパン $L=123\text{m}$ を有するこれら2種の吊形式橋梁について予備設計し、完成系と架設系の静力学特性と耐風安定性を検討した。得られた結果を章毎に要約すると以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的を記した。第2章では、初期に提案された床版主桁構造および吊形式から、最終提案として採用し検討を重ねる床版主桁および吊形式までの変遷とそれぞれの結果を示している。

第3章では、予備設計に必要な基礎研究と設計の結果について述べた。特に重量軽減とたわみ制御については次の事柄が明らかにされた。

- ・本研究で比較対象として選定した陣屋の森吊橋($L=123\text{m}$ のPC吊床版歩道橋)と比べると、主桁の単位長さ当たり重量 w と H_w は、最も軽量な $\phi=165\text{mm}$ の2鋼管主桁構造の吊床版吊橋では約 $1/17$ と $1/9$ に減少できることがわかった。また、最も重い $\phi=216\text{mm}$ の2PC主桁構造の場合、これらの値はそれぞれ約 $1/8$ と $1/4$ であった。
- ・吊床版吊橋において活荷重半載時には、上ケーブルが載荷方向に水平変位することによってアーチ効果が半