

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 金 鍾 元

本論文は「非連続モデルによる繊維強化複合材料の破壊挙動評価法に関する研究」と題し、全7章からなる。

繊維強化複合材料は、繊維材とマトリックス材の適切な複合により達成される高比弾性、高比強度等の故に適用分野を益々広げつつあり、新たな材料の開発が進むと共にその構造部材としての適用において必要となる強度・破壊挙動評価手法の確立が求められている。繊維強化複合材料はその破壊プロセスを見るとマトリックス中でのき裂の発生・進展、繊維に到達したき裂端部からの繊維の引き抜け、繊維にまたがるき裂を閉じるように作用する繊維の架橋、それに続いての繊維の破断とき裂の進展といった段階に分けることが出来、従来の研究においてはこれらの段階を個々に取り上げ、異なる方法論、パラメータを用いて評価するということが行われている。本研究はこの繊維強化複合材料の上記各破壊段階を、破壊が生じ進行する面の非連続性を考慮に入れた非連続モデルを用い、パラメータとして常にひずみエネルギー面積密度の意味を持つ CED を導入することにより、各破壊段階を統一的な考え方で捉え、扱うことを可能にする方法論を開発し、基本的問題に対する数値解析を行ってその汎用性、有効性を示したものである。

第1章は「序論」であり、本研究の背景、目的・意義、および本論文の構成について述べている。

第2章「本研究に関連する基礎事項」では、本研究を展開する上で必要となる非連続モデル、CEDを中心とした破壊力学、繊維強化複合材料に関わる基礎的事項をまとめている。

第3章「繊維強化材中のき裂の CED 評価に関わる基本関係の導出」は上述の各破壊段階を表現する非連続モデルにおいて CED を評価するための基本関係を導いた部分であり、これを適用することにより以後の各章の研究が進められている。はじめに繊維ブリッジングの効果を取り入れた2次元モデルと繊維はく離を対象とした軸対称モデルに対し、き裂内面の分布力、また界面の摩擦力を考慮に入れて CED の評価を可能とする、非弾性挙動も考慮に入れた、CED と荷重-荷重点変位曲線の間に成り立つ関係を導いており、さらに繊維はく離現象を念頭に軸対称モデルにおける CED の径路独立積分表示を導いている。そして各破壊段階に対し従来用いられている破壊パラメータに関する問題点を指摘し、CED およびここで導いた関係を用いるとき、これらの問題点は克服されるものとなることを述べている。なお最も一般的な状況を対象に導いた径路独立積分を弾性問題、通常連続体モデルと特殊化することにより、これまでに物理的な意味ははっきりしないまま導かれている幾つかの径路独立積分の意味が明らかになることも示している。

第4章「繊維ブリッジング効果を考慮した破壊パラメータ評価」では、2次元モデルを用い、ブリッ

ジングの効果および非弾性挙動を反映できるモデルとして、き裂面内の2種類のSwift型構成関係に従う非連続要素と直交異方性を有する連続体要素からなる非連続モデルの有限要素解析を行い、き裂端部における量からの直接評価、また前章で導いたCEDと荷重・荷重点変位曲線の関係、径路独立積分によりCED評価を行い、ブリッジング、負荷中の繊維破断、き裂進展のCEDに与える影響につき基本的な検討を行っている。これらの解析を通じ、直接評価、CEDと荷重・荷重点変位曲線の関係からの評価、径路独立積分によるCEDはよく一致することが示され、これは、評価されたCEDの妥当性を示すと共に、前章で理論的考察により導いた基本関係が正しいことを数値的に実証するものとなっている。

第5章は「界面はく離問題における破壊パラメータ評価」であり、ここでは軸対称モデルを用い、繊維とマトリックス界面に非連続要素を入れた問題解析のための有限要素定式化を行い、繊維の引き抜けに対するシミュレーションを行っている。CED評価は直接評価、3章で求めたCEDと荷重・荷重点変位の間関係、径路独立積分により行い何れの結果もよく一致することからCEDが妥当に評価されていること、またCEDと荷重・荷重点変位の間関係、径路独立積分による評価の正しいことを数値的に実証している。そしてここで適用したモデルにより、従来法では困難であった、引き抜け問題における摩擦の効果、界面き裂端部での特異性の効果も入れたCED評価が容易に実施可能であることを示している。

第6章「非弾性挙動を考慮した繊維強化材中の破壊挙動評価」はマトリックス中き裂が繊維に近づくときのCED変化を、環状き裂が繊維に近づく軸対称モデルにより評価したものであり、通常の連続体モデル、き裂面に非連続要素を入れたモデル、さらには界面にも非連続要素を入れたモデルにより解析を行い、繊維に近づくことによる、さらにはき裂端の接近に伴う界面はく離の破壊パラメータへの影響が、CEDを導入することにより、通常の方法では困難な非弾性挙動の影響の効果も入れて、容易に行えることを明らかにしている。

第7章は「総括」であり、本論文の成果がまとめられている。

以上要するに本論文は、そのメカニズムが異なる各破壊段階に対し、それぞれの方法論、必ずしも意味が明確でないパラメータに基づき行われてきた繊維強化複合材料の破壊挙動・強度評価を、解析モデルとしての非連続モデルと破壊パラメータとしてCEDを導入することにより、従来困難であった非弾性効果や摩擦の効果も取り入れて、一貫した形で行うことを可能とする、汎用性ある方法論を提案しその有効性を実証したものである。今後益々適用範囲の広がりが期待される繊維強化複合材料の強度信頼性の向上と材料開発に寄与するところが大きいものと考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。