

氏 名	補 谷 庄 司
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	繊維強化複合材料の破壊抵抗に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 関根 英樹
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 関根 英樹 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

近年, 各種の機械, 構造物の大型化, 高性能化にともない材料に対する要求は一段と厳しいものになってきている。このような多様かつ過酷な要求に対し, 従来の, 材料を単独に用いる方法はすでに限界に達しており, これにかわって目的に適した複数の材料を組み合わせ, 材料を設計し, 作製するという複合材料の技術が急速な発展をとげている。

このような複合材料を用いた構造物の極限設計, あるいは健全性評価のためには, 複合材料の破壊特性の把握が不可欠である。しかしながら複合材料は複数の材料を組み合わせで構成されるため, 従来の単一材料には見られない特異な変形, 破壊挙動を示すものが多く, また破壊形態も非常に多様である。これまで複合材料の破壊に関して数多くの研究がなされているが, いずれも個々の材料について限られた試験片形状のもとでの破壊挙動の断片的観察がなされているにすぎない。したがって多様な破壊挙動を支配する本質的因子を抽出し, 複合材料の強度を総合的, 統一的に評価し得る工学方法論の確立が急務となっている。

このような状況に鑑み, 本論文では脆性材料で構成される繊維強化複合材料の破壊に伴う破壊抵抗の増大という現象を対象とし, その支配因子の抽出と定量的把握を試みた。具体的には一方向連続ガラス繊維強化エポキシ樹脂および連続ガラス繊維強化クロスプライ複合材料を取り扱い, 試験片中の切欠きに代表される初期き裂からの破壊の進展とみかけの破壊抵抗との関係の詳細な検討を行い, これを決定する要因を解明した。

第2章 一方向連続繊維強化複合材料中のき裂上、下面の干渉とき裂進展抵抗

一方向連続繊維強化複合材料中を繊維と平行に進展するき裂に対し、その進展抵抗の増加に寄与する繊維の橋渡しによるき裂上、下面の干渉についての検討を行った。ここではこの干渉がき裂面に及ぼす干渉応力に関する結合応力モデル(図1)を導入し、この結合応力の定量的把握を試みた。具体的には、一方向連続ガラス繊維強化エポキシ複合材料を用いて開口型および面内せん断型の二種類の変形様式におけるき裂進展について実験を行い、得られたき裂進展抵抗曲線から結合応力 σ とき裂上、下面の相対変位量 U の関係を求める逆問題を取り扱った。

図2, 3には開口型の場合、図4, 5には面内せん断型の場合のき裂進展抵抗曲線および $\sigma-U$ の関係を示す。 $\sigma-U$ の関係はどちらの変形様式の場合もそれぞれほぼ同一であることができ、き裂進展が固有の関数 $\sigma(U)$ に支配されていることが理解できる。二つの変形様式における結合応力を比較すると、面内せん断型の結合応力が開口型のそれに比して著しく大きい。さらに、面内せん断型の結合応力は大きな相対変位量において急速に零に近づいており、大きな相対変位量において一定値に漸近する傾向を持つ開口型の場合と対照的である。二つの変形様式において干渉機構が異なるために生じたと考えられるこのような $\sigma-U$ の関係の違いが、図2, 図4に示すそれぞれの変形様式のき裂進展挙動の特徴を作り出していることが明らかとなった。

第3章 一方向連続繊維強化複合材料中の開口型き裂のき裂進展抵抗に及ぼす繊維橋渡し効果

前章の結果をふまえ、一方向連続繊維強化複合材料中の繊維方向の開口型き裂進展について、進展抵抗の増大を引き起こす繊維橋渡しのメカニズムの詳細な検討を行った。開口型の変形を受けるき裂面上の1本の繊維の橋渡しの状態を図6に示すようにモデル化し、これにより多数の橋渡し繊維がき裂面に及ぼす結合応力 σ とき裂開口変位 U の関係を算出した。得られた $\sigma-U$ の関係を第2章で求めたものと同時に図7に示したが、両者はきわめてよく一致している。大きな開口変位の下では結合応力 σ は一定値に漸近するが、これがき裂面からの橋渡し繊維の引きはがしに起因するものであることが明らかとなった。

第4章 一方向連続繊維強化複合材料中の面内せん断型き裂のき裂進展抵抗に及ぼす繊維橋渡し効果

第3章にひきつづき、一方向連続繊維強化複合材料中の繊維方向の面内せん断型き裂進展について、繊維橋渡し現象の詳細な検討を行った。図8にモデル化して示すように、面内せん断型の場合の橋渡し繊維はき裂上、下面の相対変位により直接引張変形を受け、高い荷重にさらされる。ここでは多数の繊維によってき裂面に与えられる荷重の確率的期待値が実際にき裂面に作用する結合応力であると考え、橋渡し繊維の破断の確率過程を検討して図9に示す $\sigma-U$ の関係を得た。図9には同時に第2章で実験結果から求められた $\sigma-U$ 関係をも示したが、両者はよく一致している。面内せん断型の場合の $\sigma-U$ 関係は橋渡し繊維の破断の確率過程に支配されており、このため不安定き裂進展がおきやすくなることが明らかとなった。

第5章 連続繊維強化クロスプライ複合材料中の損傷と破壊抵抗

本章では連続ガラス繊維強化エポキシクロスプライ複合材料に対し、初期き裂先端近傍における損傷領域の形成、安定成長とこれに伴うみかけの破壊抵抗の増大について詳細な検討を行った。脆性材料からなる本材料の損傷は各プライ内を進展する独立した微小き裂により構成されている。ここではまず材料板厚方向に平均化した微小き裂の密度に着目して損傷の状態を定量化し、微小き裂の進展すなわち損傷の拡大とこれに伴って解放される弾性ひずみエネルギーとの関係式を導出した。この微小き裂の進展に関するエネルギー解放率を一定とする条件をもって損傷領域の拡大が進行するとの考えのもとに、損傷領域の拡大の計算機シミュレーションを実行し、実験において観察される損傷領域の挙動との比較を行った。なお、本章で実験に供したクロスプライ複合材料は第2章において実験を行った一方向連続繊維強化複合材料と同一の繊維、樹脂で構成されているため、微小き裂の進展に関する限界エネルギー解放率としてここでは第2章で測定されたき裂初生時のそれを用いた。図10にシミュレーション結果および実験結果を同時に示す。図10において、縦軸は初期き裂先端におけるみかけの応力拡大係数であり、横軸は初期き裂延長方向への微小き裂の最大進展量である。シミュレーション結果と実験結果はよく一致しており、損傷領域の拡大が微小き裂の進展による弾性ひずみエネルギーの解放に支配されていることが明らかとなった。

第6章 結 論

本論文では連続繊維強化複合材料を対象としてその破壊抵抗の増大を支配する因子の抽出と定量的把握を行った。具体的には一方向連続ガラス繊維強化エポキシ樹脂および連続ガラス繊維強化クロスプライ複合材料を取り扱い、初期き裂からの破壊の進展とみかけの破壊抵抗との関係を決定する因子を解明し、連続繊維強化複合材料の多様な破壊挙動の本質を総合的に理解するための重要な知見を得た。

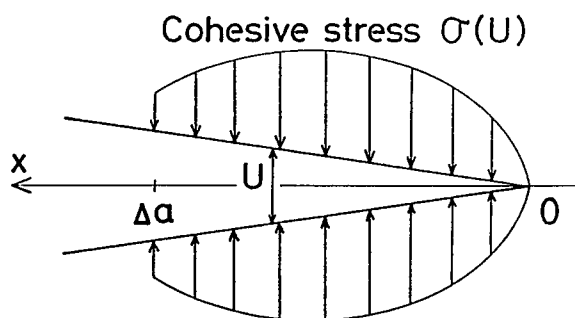


図1 進展するき裂の先端付近および後方の結合応力と座標

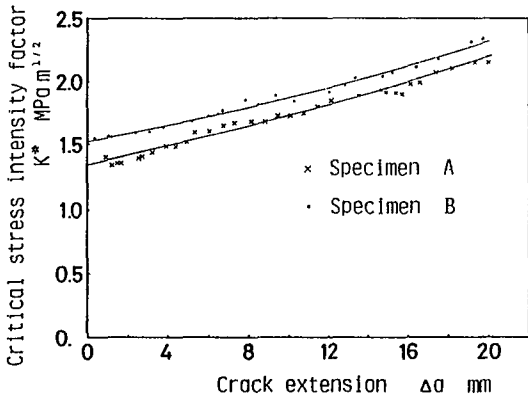


図2 開口型のき裂進展抵抗曲線

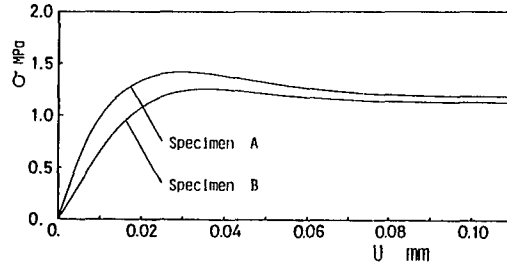


図3 開口型き裂進展の結合応力-
相対変位量関係

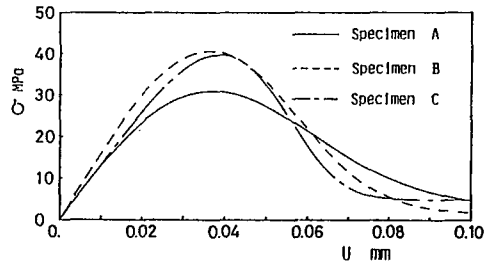


図5 面内せん断型き裂進展の結合応力-
相対変位量関係

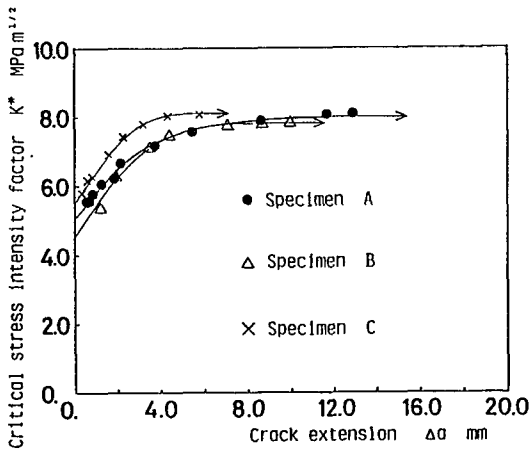


図4 面内せん断型き裂進展抵抗曲線

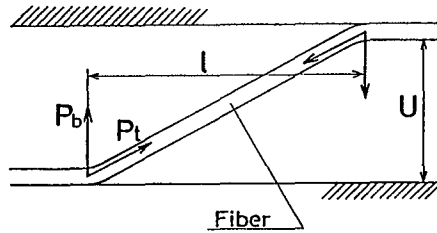


図6 き裂の開口状態と繊維橋渡しのモデル

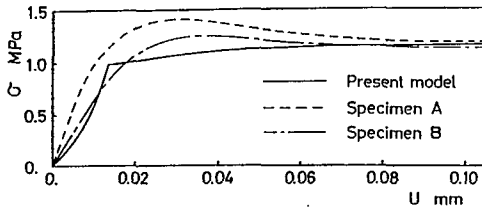


図7 結合応力

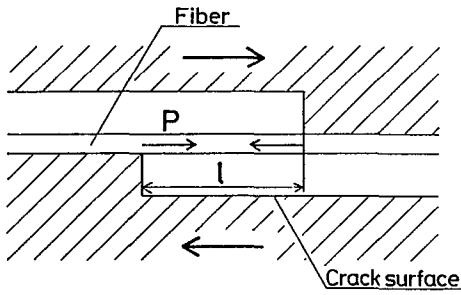


図8 繊維橋渡しのモデル

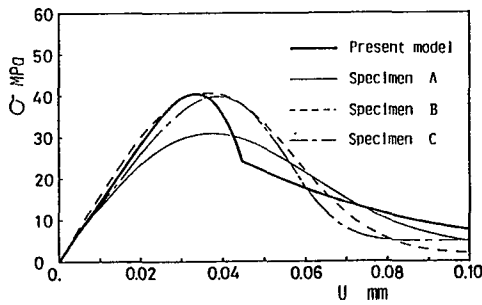


図9 結合応力

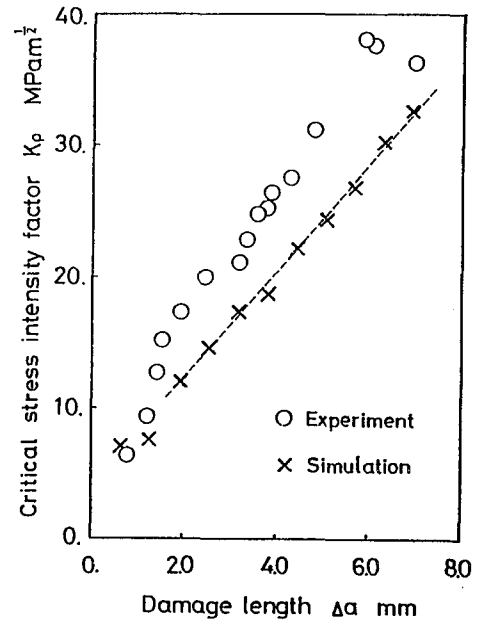


図10 限界応力拡大係数の
損傷域長さに対する変化

審査結果の要旨

繊維強化複合材料の破壊抵抗の把握は、機器・構造物に繊維強化複合材料をより広範囲に使用する上で必須の課題であるが、破壊抵抗を支配する本質的因子を抽出し、これに基づいた統一的、総合的な解明は未だなされていない。

本論文は、一方向連続繊維強化複合材料および連続繊維強化クロスプライ複合材料を対象として、破壊抵抗の増大を支配する因子の抽出と定量的把握を試みたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、一方向連続繊維強化複合材料において繊維と平行に進展するき裂の進展抵抗特性を検討し、結合応力とき裂面相對変位量との関係が材料固有のものであること、および開口型、面内せん断型の二種類の変形様式におけるき裂上、下面の干渉機構の差異がそれぞれのき裂進展挙動を特徴づけていることを明らかにしている。これは重要な知見である。

第3章では、一方向連続繊維強化複合材料中を繊維と平行に進展する開口型のき裂について、繊維橋渡しのメカニズムを詳細に検討し、この成果をもとにき裂進展のシミュレーションを実行し、き裂進展抵抗におよぼす繊維橋渡し現象の効果を定量的に確認している。これは有用な知見である。

第4章では、一方向連続繊維強化複合材料中の繊維に平行な面内せん断型のき裂進展の場合について、き裂進展抵抗におよぼす繊維橋渡し現象の効果を詳細に論じている。

第5章では、連続繊維強化クロスプライ複合材料中に生じる損傷について、プライ内の微小き裂の挙動そのものに着目して損傷領域の拡大に対する支配因子を解明し、さらにこれに基づいて損傷領域拡大のシミュレーションを実行し、損傷領域の拡大と破壊抵抗の関係を定量的に明らかにしている。これは貴重な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、一方向連続繊維強化複合材料および連続繊維強化クロスプライ複合材料を対象として、破壊抵抗を支配する本質的因子を解明し、さらにこの成果に基づいて破壊抵抗の定量的把握を試みたもので、いくつかの有用な新知見を提供しており、機械工学ならびに複合材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。