

氏 名	小 沢 喜 仁
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 3 月 27 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	分散形複合材のき裂初生と界面はく離に関する破壊 力学的研究
指 導 教 官	東北大学教授 阿部 博之
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 阿部 博之      東北大学教授 渥美 光 東北大学教授 前川 一郎      東北大学教授 高橋 秀明 東北大学助教授 関根 英樹

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

近年, 省エネルギー・省資源が叫ばれ, 材料の使用条件が過酷になりまた複雑化するとともに, 使用する材料の性質についての要求は極めて多種多様なものとなっている。ここに個々の要求に適合する材料を複合させ短所を補い合って単独材料では発揮できない各種の性質の向上を意図した複合材料の開発の必然性がある。複合材料においては分散相の種類や形状および複合形態の相異により分散相の役割, 界面の効果も異なり, 破壊の様相は複雑かつ多様である。したがって, 複合材料の正確な強度評価のためには複合材料の破壊の過程の一つ一つを精密に把握し強度を評価するということが必要となるが, これまで複合材料の微視的な破壊現象を明らかにするにいたっていない。

このような状況にかんがみ, 本論文においては分散形複合材料の破壊過程において生じる分散相の結合界面からのき裂初生や界面に沿ってのはく離およびはく離端からマトリックス相へのき裂初生などの微視破壊現象を破壊力学的な考え方に基づいて検討することを目的としている。破壊力学によれば, き裂端応力拡大係数 $K$ は材料の破壊靱性の評価に用いられ, 機械・構造物のぜい性破壊の防止や予知に重要な役割を果たすパラメータであることはよく知られている。ここでは応力拡大係数 $K$ に匹敵する新しいパラメータを導入し, 分散偏平介在物を有する複合材料の微視破壊現象を

この新しく導入したパラメータを基準として統一的に明らかにしたものである。

## 第2章 分散偏平介在物先端近傍からのき裂初生に関するクライテリオンの提案

二次元応力場において、偏平介在物先端の応力は先端からの距離の平方根に逆比例する特異性を有する。偏平介在物先端を原点とする極座標系(  $r, \omega$  )を用いれば、偏平介在物先端における特異な応力場は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{\sqrt{2r}} \left\{ F_1 \cos \frac{\omega}{2} \left( \frac{\kappa+3}{2} - \sin \frac{\omega}{2} \sin \frac{3\omega}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + F_2 \sin \frac{\omega}{2} \left( \frac{\kappa-3}{2} - \cos \frac{\omega}{2} \cos \frac{3\omega}{2} \right) \right\} \\ \sigma_y &= -\frac{1}{\sqrt{2r}} \left\{ F_1 \cos \frac{\omega}{2} \left( \frac{\kappa-1}{2} - \sin \frac{\omega}{2} \sin \frac{3\omega}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + F_2 \sin \frac{\omega}{2} \left( \frac{\kappa+1}{2} - \cos \frac{\omega}{2} \cos \frac{3\omega}{2} \right) \right\} \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{\sqrt{2r}} \left\{ F_1 \sin \frac{\omega}{2} \left( \frac{\kappa+1}{2} + \cos \frac{\omega}{2} \cos \frac{3\omega}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. - F_2 \cos \frac{\omega}{2} \left( \frac{\kappa-1}{2} + \sin \frac{\omega}{2} \sin \frac{3\omega}{2} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $F_1, F_2$  はそれぞれ偏平介在物先端における対称形および反対称形の応力の特異性の強さを表すパラメータであり、 $\kappa$  はマトリックス相の等価ポアソン比である。

偏平介在物先端からのき裂初生の様相を明らかにする目的で、エポキシ樹脂製帯板の中央に長さ方向に偏平な金属片を埋込んだモデル試験片を作製し介在物方向の引張試験を行い、介在物先端からのき裂初生を観察し、き裂初生時の対称形の応力の特異性の強さ  $F_{1c}$  および介在物延長線と破断面のなす角度を測定した。その結果、き裂初生時の応力の特異性の強さ  $F_{1c}$  値は偏平介在物の長さによらずほぼ一定な値をとっており、 $F_{1c}$  値は偏平介在物先端からのき裂初生を支配する量と考えられることを明らかにした。また、破断面と介在物延長線とのなす角は偏平介在物方向に引張荷重が作用する場合、偏平介在物先端における最大主応力の主軸に垂直な方向とよく一致している。以上の結果に基づき、分散偏平介在物を有する複合材料の偏平介在物先端近傍からのき裂初生に関して次の最大主応力クライテリオンを提案した。「分散偏平介在物を有する複合材料において、マトリックス相がぜい性材料で介在物方向に引張荷重を受ける場合、き裂初生は分散偏平介在物先端ごく近傍に生じ偏平介在物先端における応力の特異性の強さである  $F_1$  パラメータがその限界値  $F_{1c}$  に達した時に最大引張主応力に垂直な方向に生じる」。

## 第3章 分散偏平介在物先端からのき裂初生に関するその他の各クライテリオンについての考察

本章においては、偏平介在物先端からのき裂初生に関して最大周応力クライテリオン、最小ひず

みエネルギー密度クライテリオンによる結果を解析的に求めるとともに、新たに最大エネルギー解放率クライテリオンを導入し、その結果について述べた。

#### 第4章 分散偏平介在物先端からのき裂初生に関する各クライテリオンの比較と総合的検討

第2章および第3章の結果を踏まえて分散偏平介在物先端近傍からのき裂初生に関して最大周応力クライテリオン、最小ひずみエネルギー密度クライテリオン、最大エネルギー解放率クライテリオンおよび最大主応力クライテリオンの比較検討を行い、さらに軟鋼製偏平介在物を埋込んだエポキシ樹脂製試験片を用いた引張および等価圧縮試験の結果より、上記のそれぞれのクライテリオンの総合的評価を行った。き裂初生角に対する各クライテリオンによる理論結果および実験結果を表1に示す。第2章で提案した最大主応力クライテリオンは、実験した2種の荷重の場合については、対比した他のクライテリオンに比し分散偏平介在物先端近傍からのき裂初生をよく評価しうる最も優れているクライテリオンであることが明らかとなった。

表1 き裂初生角  $\omega_c$

Criterion	$\omega_c$	
	Tension test	Equivalent compression test
Maximum hoop stress criterion	$\pm 113.1^\circ$	$0^\circ$
Minimum strain-energy density criterion	$\pm 95.1^\circ$	$\pm 95.1^\circ$
Maximum energy-release-rate criterion	$\pm 113.1^\circ$	$\pm 180.0^\circ$
Maximum principal stress criterion	$\pm 90.0^\circ$	$\pm 135.0^\circ$
Experimental results	$\pm 90.3^\circ$	$\pm 118.0^\circ$

#### 第5章 分散偏平介在物先端からの界面はく離

分散相およびマトリックス相のそれぞれの強度に比べ接着強度が低い場合には界面はく離が生じる。本章においては、分散偏平介在物を有する複合材料において偏平介在物先端から進展する界面はく離に関するクライテリオンをはく離端近傍の特異な応力場に着目して明らかにした。

1個の剛体偏平介在物を有するマトリックス相に介在物方向の引張荷重が作用する場合、二次元弾性理論によれば、介在物のはく離端近傍の応力場はこの端からの距離の平方根に逆比例する特異性を有する。介在物のはく離端を原点とする局所極座標系  $(r, \omega)$  を用いれば、はく離端における特異な応力場は、式(1)において  $F_2 = 0$  とおいた表示となる。ただし、 $F_1$  は偏平介在物のはく離端における応力の特異性の強さを示すパラメータである。

軟鋼製偏平介在物を埋込んだエポキシ樹脂製のモデル試験片を作製し、その試験片に偏平介在物方向の引張荷重を作用させてはく離試験を実施した。はく離進展時の応力の特異性の強さ  $F_{1c}$  値は偏平介在物の接着部長さによらずほぼ一定な値をとっており、 $F_{1c}$  値は偏平介在物先端からの界面はく離進展を支配する量と考えることができた。以上より、偏平介在物先端からの界面はく離の進展に関する次のクライテリオンの提案を行った。「マトリックス相に偏平介在物方向の引張荷重が作用する場合、はく離端における応力の特異性の強さを示す  $F_1$  パラメータが一定値  $F_{1c}$  で偏平介在物とマトリックス相とのはく離が進展する」。

## 第6章 分散偏平介在物のはく離端からマトリックス相へのき裂初生に関する各クライテリオンとその考察

偏平介在物とマトリックス相との結合強度がマトリックス相の強度に比べて大きい場合には、はく離端からマトリックス相へのき裂初生が起きる。

本章では、先端から一部界面はく離した偏平介在物のはく離端からマトリックス相へのき裂初生を検討するために、最大周応力クライテリオン、最小ひずみエネルギー密度クライテリオン、最大エネルギー解放率クライテリオンおよび最大主応力クライテリオンのそれぞれについて理論的に再考察した。

## 第7章 分散偏平介在物のはく離端からマトリックス相へのき裂初生に関する各クライテリオンの比較と総合的検討

本章では、軟鋼製偏平介在物を埋込みその両端の一部がはく離したエポキシ樹脂製試験片を作製し引張試験を実施してはく離端からのき裂初生に関して前章に述べた各クライテリオンの総合的評価を行った。

き裂初生時のはく離端における応力の特異性の強さ  $F_{1c}$  値もしくはエネルギー解放率の最大値  $G_c$  は偏平介在物の接着部長さによらずほぼ一定値をとった。前記の各クライテリオンおよび実験により得られたき裂初生方向を表2に示した。偏平介在物方向に引張荷重が作用する場合のはく離端からマトリックス相へのき裂初生に関するクライテリオンとしては最大周応力クライテリオン、最小ひずみエネルギー密度クライテリオンおよび最大主応力クライテリオンは適切であるが、最大エネルギー解放率クライテリオンは妥当でないことが明らかと

表2 き裂初生角  $\omega_c$

Criterion	$\omega_c$
Maximum hoop stress criterion	113.1°
Minimum strain-energy density criterion	95.1°
Maximum energy-release-rate criterion	180.0°
Maximum principal stress criterion	90.0°
-----	-----
Experimental result	100.2°

なった。

## 第 8 章 結 論

分散形複合材料の破壊過程において生じる分散相の結合界面からのき裂初生や界面に沿ってのはく離およびはく離端からマトリックス相へのき裂初生という均質材料にはない特殊な微視破壊現象を破壊力学的な考え方に基づいて理論的ならびに実験的に検討を行った。分散相の偏平介在物の先端や分散相の界面に沿ってのはく離の端において応力はき裂端の場合と同様に特異性を有することに着目して、応力拡大係数  $K$  に匹敵する新しいパラメータを導入し、分散偏平介在物を有する複合材料の微視破壊現象のこの新しく導入したパラメータを基準としての統一的な検討を試み分散形複合材料の強度研究上重要な知見を得た。

## 審査結果の要旨

分散形複合材料の破壊過程においては、分散相の結合界面からのき裂初生や界面に沿ってのはく離など、均質材料にはない特殊な微視破壊現象が生じる。この現象の解明は分散形複合材料の強度研究の主要テーマとして切望されてきたが、いまだ不明であった。

本論文は分散偏平介在物を有する複合材料の微視破壊現象を破壊力学に基づいて弾性論ならびにモデル実験により検討し、破壊の基準が新しいパラメータによって表されることを示したもので、全編8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章では偏平介在物の先端からマトリックス相へのき裂の初生に注目し、特異応力場を表すパラメータを新たに導入して理論的ならびに実験的検討を行い、偏平介在物先端からのき裂初生に関して最大主応力クライテリオンを提案している。

第3章では、偏平介在物先端からのき裂初生に関する他のクライテリオン、すなわち最大周応力、最小ひずみエネルギー密度、最大エネルギー解放率の各クライテリオンによる結果を解析的に求めている。なお刃状転位、集中力両者の連続分布を併用する解法を工夫しており、これは新しい試みである。

第4章では、第2章および第3章で述べた各クライテリオンによる結果とモデル試片の引張および圧縮試験の結果を比較検討し、総合的評価を行い、最大主応力クライテリオンが最も優れ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5章では、次に偏平介在物の先端から生じる界面はく離に着目し、その進展を理論的ならびに実験的に検討し、界面はく離の進展に関するクライテリオンを見出している。分散形複合材料の強度評価を行う上で有用な知見である。

第6章は、先端から一部界面はく離した偏平介在物のはく離端からマトリックス相へのき裂初生を取上げ、前述の各クライテリオンについて理論解析を行っている。

第7章では、第6章で述べた各クライテリオンの結果とモデル実験結果を比較検討し、総合的評価を行っている。その結果、はく離端からのき裂初生に関しては、最大エネルギー解放率を除く各クライテリオンがほぼ適切であることを明らかにしている。

第8章は結論である。

以上要するに、本論文はき裂問題の応力拡大係数に匹敵する新しいパラメータを導入し、分散偏平介在物を有する複合材料の微視破壊現象を支配するクライテリオンをはじめて明らかにすると共に、分散形複合材料の破壊強度の評価に有用ないくつかの新知見を提供しており、機械工学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。