

氏名	任 飛 (中国)
学位の種類	博 士 (工学)
学位記番号	工博甲第459号
学位授与の日付	平成30年9月21日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Analysis of Intensity of Singular Stress Field for Cylindrical and Three-Dimensional Butt Joints in Comparison with Two-Dimensional Model (3次元突合せ継手の特異応力場の強さの解析と2次元モデル との比較)
論文審査委員	主 査 教 授 野田 尚昭 " 秋山 哲也 " 松田 健次 " 梅景 俊彦 所 長 鈴木 靖昭 (鈴木接着技術研究所) 顧 問 佐野 義一 (丸栄化工株式会社)

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

接着継手は、自動車、航空、マイクロエレクトロニクスなどの多くの産業分野で広く使用されているが、異材接合端部を起点に破損を生じる場合が多い。接着強度評価を特異応力場で表現することによって、JISで規定される突合せ継手と重ね合わせ継手試験片について、その破損が特異応力場の強さ  $ISSF$  = 一定で表現できることが最近示されている。その解析には2次元モデルが用いられているが、実際の試験片は3次元形状を有するため、その  $ISSF$  への影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では、基本的な3次元モデルとして角柱状突合せ継手試験片ならびに円柱状突合せ継手試験片を対象に  $ISSF$  を精度良く解析し、先の研究で用いられた2次元解析の妥当性について議論している。この論文は、計5章で構成されており、その各章の構成は以下のようになっている。

第1章では、自動車、航空産業、マイクロエレクトロニクスのパッケージングに適用される複合材料および結合構造の概要を紹介している。この技術の広範な応用の場で、構造的な強度の問題が顕在化しており、その対策の必要性を述べている。また、接合構造の特異応力に関する研究を調査し、 $ISSF$  に焦点を当てた3次元問題に関する論文は少ないことを述べている。最後に、3次元形状を考慮した  $ISSF$  解析の重要性を説明している。

第2章では、まず、2次元板状突合せ継手のISSFを、任意の材料の組み合わせの下で解析し、接着層厚さの全範囲(すなわち厚さ $h=0\sim\infty$ )にわたって明らかにしている。解析困難のため、これまで明らかにされていなかった、接着層が極めて薄い場合において、ISSFを接着層厚さ基準で無次元化することで、無次元化ISSFが一定となることを示している。一方、接着層が厚い場合には、試験片の板幅基準で無次元化したISSFの値が一定となることを示している。これらの無次元表示から接着層厚さの全範囲のISSFを精度良く求めることができる。解析ではメッシュに依存せずにISSFを求め得る比例法を用いており、体積力法で解かれた接合継手を基準解として、全範囲の接着層厚さに対してISSFを議論している。

第3章では、3次元円柱状突合せ継手の接着層厚さの全範囲におけるISSFの値を明らかにしている。円柱状突合せ継手の解析では、円周方向ひずみが有限となることに起因する非特異応力が界面端のFEM応力に含まれているため、第2章の方法を直接適用できない。よって、比例法の適用にあたり、「非特異応力を差し引いた応力」と、基準解として用いた「2次元板状突合せ継手の応力」との比からISSFを正確に計算している。また、軸対称問題のISSFは、Dundursパラメータのみで決まらないため、Dundursパラメータを与えた際の、ISSFの最大・最小値を表とグラフに示している。そして、第2章と同様の無次元化表示によって接着層厚さの全範囲でISSFが精度良く求められることを明らかにしている。

第4章では、3次元角柱状突合せ継手について接合界面外縁部のISSFの分布を、2次元板状突合せ継手と比較して議論している。そして、角柱状突合せ継手の界面全体の応力分布を、FEMメッシュサイズを変えて求め、界面の外縁に沿って特異応力場が生じることと、その位置による大小を述べている。そして基準となる解として「2次元平面ひずみの解」と「3次元接合柱の解」を用い、ISSFの比に注目して、角柱突合せ継手のISSFを精度良く求めている。その結果、接着強度がISSF=一定の分布として評価することができることを示している。さらに、3次元問題での界面外縁の中間点におけるISSFと2次元問題のISSFが一致することから3次元形状が与える影響は角部とその近傍にのみ表れる。すなわち、先に行った2次元モデル解析で角柱状突合せ継手のほとんどの部分のISSFを議論できることを明らかにしている。また、界面角部のISSFは特異性指数が異なるため直接大小を比較することができないことから、界面角部に曲率半径の小さい丸みを設けて、滑らかなISSFを求め、その大小を議論している。その結果、フィレット半径 $r$ の試験片幅 $W$ に対する相対値 $r/W \geq 0.0005$ の場合、界面外縁の中間点に最大のISSFが生じるため、その値を用いて接着強度を評価することができることを明らかにしている。

第5章は、総括であり、この研究で得られた主要な結論を要約している。

## 学位論文審査の結果の要旨

接着継手は、自動車、航空、マイクロエレクトロニクスなどの多くの産業分野で広く使用されているが、異材接合端部を起点に破損を生じる場合が多い。接着強度評価を特異応力場で表現することによって、JIS で規定される突合せ継手と重ね合わせ継手試験片について、その破損が特異応力場の強さ  $ISSF$  = 一定で表現できることが最近示されている。その解析には 2 次元モデルが用いられているが、実際の試験片は 3 次元形状を有するため、その  $ISSF$  への影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では、基本的な 3 次元モデルとして角柱状突合せ継手試験片ならびに円柱状突合せ継手試験片を対象に  $ISSF$  を精度良く解析し、先の研究で用いられた 2 次元解析の妥当性について議論している。この論文は、計 5 章で構成されており、その各章の構成は以下のようになっている。

第 1 章では、自動車、航空産業、マイクロエレクトロニクスのパッケージングに適用される複合材料および結合構造の概要を紹介している。この技術の広範な応用の場で、構造的な強度の問題が顕在化しており、その対策の必要性を述べている。また、接合構造の特異応力に関する研究を調査し、 $ISSF$  に焦点を当てた 3 次元問題に関する論文は少ないことを述べている。最後に、3 次元形状を考慮した  $ISSF$  解析の重要性を説明している。

第 2 章では、まず、2 次元板状突合せ継手の  $ISSF$  を、任意の材料の組み合わせの下で解析し、接着層厚さの全範囲 (すなわち厚さ  $h=0\sim\infty$ ) にわたって明らかにしている。解析困難のため、これまで明らかにされていなかった、接着層が極めて薄い場合において、 $ISSF$  を接着層厚さ基準で無次元化することで、無次元化  $ISSF$  が一定となることを示している。一方、接着層が厚い場合には、試験片の板幅基準で無次元化した  $ISSF$  の値が一定となることを示している。これらの無次元表示から接着層厚さの全範囲の  $ISSF$  を精度良く求めることができる。解析ではメッシュに依存せずに  $ISSF$  を求め得る比例法を用いており、体積力法で解かれた接合継手を基準解として、全範囲の接着層厚さに対して  $ISSF$  を議論している。

第 3 章では、3 次元円柱状突合せ継手の接着層厚さの全範囲における  $ISSF$  の値を明らかにしている。円柱状突合せ継手の解析では、円周方向ひずみが有限となることに起因する非特異応力が界面端の FEM 応力に含まれているため、第 2 章の方法を直接適用できない。よって、比例法の適用にあたり、「非特異応力を差し引いた応力」と、基準解として用いた「2 次元板突合せ継手の応力」との比から  $ISSF$  を正確に計算している。また、軸対称問題の  $ISSF$  は、Dundurs パラメータのみで決まらないため、Dundurs パラメータを与えた際の、 $ISSF$  の最大・最小値を表とグラフに示している。そして、第 2 章と同様の無次元化表示によって接着層厚さの全範囲で  $ISSF$  が精度良く求められるこ

とを明らかにしている。

第4章では、3次元角柱状突合せ継手について接合界面外縁部のISSFの分布を、2次元板状突合せ継手と比較して議論している。そして、角柱状突合せ継手の界面全体の応力分布を、FEMメッシュサイズを変えて求め、界面の外縁に沿って特異応力場が生じることと、その位置による大小を述べている。そして基準となる解として「2次元平面ひずみの解」と「3次元接合柱の解」を用い、ISSFの比に注目して、角柱突合せ継手のISSFを精度良く求めている。その結果、接着強度がISSF=一定の分布として評価することができることを示している。さらに、3次元問題での界面外縁の中間点におけるISSFと2次元問題のISSFが一致することから3次元形状が与える影響は角部とその近傍にのみ表れる。すなわち、先に行った2次元モデル解析で角柱状突合せ継手のほとんどの部分のISSFを議論できることを明らかにしている。また、界面角部のISSFは特異性指数が異なるため直接大小を比較することができないことから、界面角部に曲率半径の小さい丸みを設けて、滑らかなISSFを求め、その大小を議論している。その結果、フィレット半径 $r$ の試験片幅 $W$ に対する相対値 $r/W \geq 0.0005$ の場合、界面外縁の中間点に最大のISSFが生じるため、その値を用いて接着強度を評価することができることを明らかにしている。

第5章は、総括であり、この研究で得られた主要な結論を要約している。

以上のように、本論文では、自動車、航空、マイクロエレクトロニクスなどの多くの産業分野で必要となる接着強度の評価によく用いられる突合せ継手試験を取り扱っている。詳細な研究が見当たらない、その3次元形状を考慮した場合における特異応力場について議論を行い、円柱突合せ継手に関しては、そのISSFを全ての接着厚さに対して与える表示を任意の材料組み合わせに対して示している。また、3次元角柱状突合せ継手の界面端部におけるISSFの分布を明らかにしており、界面端部の丸みが極端に鋭くない限り、ISSFの最大値は界面縁中心部のISSFで得られることや、簡便な2次元解析で求めたISSFの有用性を明らかにしている。この新たな知見は工業上や接着工学や機械工学上寄与するところ大である。

なお、本論文に関し、審査委員並びに公聴会出席者からは、角柱突合せ継手の接合界面端部の中心部でのISSFと角部でのISSFとの関係や、本研究の実際の設計への適用、ならびに試験片形状・寸法のISSFへの影響等について詳細な質問がなされたが、いずれも適切な回答がなされた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。