

氏名	Rong LI (中国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第432号
学位授与の日付	平成29年3月24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	Adhesive Strength Evaluation Method Focusing on the Intensity of Singular Stress Field to Minimize Bend Effect for Single Lap Joint (特異応力場の強さに注目した接着強度評価法と単純重ね合わせ継手の曲がりの影響の解消)
論文審査委員	主査 教授 野田 尚昭 " 秋山 哲也 " 赤星 保浩 " 松田 健次 技術顧問 佐野 義一 (丸栄化工株式会社) 准教授 宮崎達二郎 (琉球大学)

## 学位論文内容の要旨

接着接合継手は古くから使用され簡便で比較的安価な利点があるため、様々な産業で益々広く用いられてきている。一方では、接着剤や適用材料の変化に対応して、はく離を含む接着層の破壊が生じないようにその強度を適切に評価する合理的で簡便な方法が望まれている。設計に必要な接着剤固有の接着強度を求める試験方法は JIS で規格化されており、多く用いられている重ね合わせ継手試験の剥離強度は負担可能な荷重の大きさとして定義されている。しかし、その強さは試験片形状寸法や材質の影響を受けるため、本来同じとなるべき接着強度が試験方法の違いにより大きく異なるなど、実験のばらつきを考慮しても合理性を欠く結果が報告されている。そこで本研究では、接着端部に生じる特異応力場の強さ ISSF (Intensity of Singular Stress Field) に注目して、接着強度を評価する新しい方法を提案している。また、JIS 試験方法をこの観点から考察し、接着剤固有の強度を評価する上で問題となる試験片の曲がりの影響を解消する方法を考察している。この論文は7つの章で構成され、以下のように編成されている。

第1章では、緒言であり、最近の自動車産業の応用例や航空機や IC パッケージへの接着構造の適用例を示し、その有用性とその重要性を説明している。また、はく離等が生じる問題点を紹介し、この研究の目的と論文全体の構成が示されている。

第2章では、接着端部に生じる特異応力に関して、これまでに得られている研究成果

を紹介するとともに、その接着強度を考察した代表的研究をまとめている。特に、接着強度を評価するために端部の特異応力場の強さを求めるため過去の研究された解析手法について説明している。

第3章では、突合せ継手の接着強度を接着端部の特異応力場の強さ  $ISSF$  から考察している。突合せ継手の接着強度が接着層の厚さ減少につれて増加する現象は、これまで接着層内に含まれる欠陥の減少で説明されてきた。しかし、特異応力場に注目すると、それらの実験結果は特異応力場の強さ  $ISSF$  を一定値で表現できることを示している。均質で欠陥のない弾性接着層を仮定して、炭素鋼とエポキシ樹脂、アルミニウムとアルダイト、黄銅とはんだなどの種々の組合せに関して、接着強度が、 $ISSF = \text{一定}$ 、として表されるとしている。また、接着端部の幾何学的形状が変わる場合の評価も考慮に入れて、接着端部に仮想的な界面き裂を想定したモデルを用いても同様な評価が可能であることも説明し、その仮想き裂の適切な寸法についても言及している。

第4章からは、接着強度評価に最もよく用いられる重ね合わせ継手による試験方法を扱っている。接着端部の特異応力場の観点から評価するため、まず、その解析法を考察している。重ね合わせ継手に生じる特異応力場の表現式は突合せ継手のそれより複雑で、2つの異なる特異応力場が存在する。ここでは、接着部の幾何学的形状が変化しても、それらの特異場はほとんどの場合相似になることを明かにしている。このことを用い、同じ有限要素法メッシュパターンを未知問題と基準問題に適用し、接着端部の有限要素法応力に注目することで、特異応力場の強さ  $ISSF$  を簡便に求め得る方法を説明している。提案する手法は他の解析手法とくらべて容易で有用性があり、計算時間を要するより複雑な解析も行って、両者の結果がよく一致することを示し、その妥当性を実証している。

第5章では、重ね合わせ継手を用いた実験結果を特異応力場の強さ  $ISSF$  の観点から考察している。第4章で示した解析法を用いることで、接着長さおよび接着厚さを変えた単純重ね合わせ継手の接着強度を調べ、特異応力場の強さ  $ISSF$  の有用性を研究している。その結果、接着端部からはく離が生じる場合の実験結果が、 $ISSF = \text{一定}$ 、として評価できることを示している。

第6章では、接着材固有の強度を求め得る理想的な単純重ね合わせ継手の試験方法を考察している。負荷荷重と接着層寸法を固定して、試験片厚さを増加させるとき、接着層端部の特異応力場の強さ  $ISSF$  は減少し、一定値に収束することが示されている。また、試験片を十分厚くするとき、境界端部の変形角すなわち曲げ変形も最小値に近づく。すなわち、単純重ね合わせ継手試験では、荷重負荷時に試験片に曲げ変形が生じるため、その曲げの影響を最小化することで、接着強度を理想的なせん断荷重下で求めることができる。この目的のため、荷重一定条件下で、接着端部の特異応力場の強さを最小にする評価方法を調べており、例えば試験片被着部厚さを  $25\text{mm}$  程度に十分大きくして曲げ変形を十分小さくすれば、最小値が得られることを明かにしている。

同様に、第6章では、荷重一定条件下で特異応力場の強さ  $ISSF$  を単純重ね合わせ継手  $SLJ$  と二重重ね合わせ継手  $DLJ$  で等しくする条件より、同一強度が得られることを示している。JIS に規定されている二重重ね合わせ継手  $DLJ$  の被着材厚さ  $1.5\text{mm}$  と等しい強度を単純重ね合わせ継手  $SLJ$  で得るためには被着部厚さを  $7\text{mm}$  と厚くすればよいことを示している。

第7章はこの論文の最終章であり、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

接着接合継手は古くから使用され簡便で比較的安価な利点があるため、様々な産業で益々広く用いられてきている。一方では、接着剤や適用材料の変化に対応して、はく離を含む接着層の破壊が生じないようにその強度を適切に評価する合理的で簡便な方法が望まれている。設計に必要な接着剤固有の接着強度を求める試験方法は JIS で規格化されており、多く用いられている重ね合わせ継手試験の剥離強度は負担可能な荷重の大きさとして定義されている。しかし、その強さは試験片形状寸法や材質の影響を受けるため、本来同じとなるべき接着強度が試験方法の違いにより大きく異なるなど、実験のばらつきを考慮しても合理性を欠く結果が報告されている。そこで本研究では、接着端部に生じる特異応力場の強さ  $ISSF$  (*Intensity of Singular Stress Field*) に注目して、接着強度を評価する新しい方法を提案している。また、JIS 試験方法をこの観点から考察し、接着剤固有の強度を評価する上で問題となる試験片の曲がりの影響を解消する方法を考察している。この論文は7つの章で構成され、以下のように編成されている。

第1章では、緒言であり、最近の自動車産業の応用例や航空機や IC パッケージへの接着構造の適用例を示し、その有用性とその重要性を説明している。また、はく離等が生じる問題点を紹介し、この研究の目的と論文全体の構成が示されている。

第2章では、接着端部に生じる特異応力に関して、これまでに得られている研究成果を紹介するとともに、その接着強度を考察した代表的研究をまとめている。特に、接着強度を評価するために端部の特異応力場の強さを求めるため過去の研究された解析手法について説明している。

第3章では、突合せ継手の接着強度を接着端部の特異応力場の強さ  $ISSF$  から考察している。突合せ継手の接着強度が接着層の厚さ減少につれて増加する現象は、これまで接着層内に含まれる欠陥の減少で説明されてきた。しかし、特異応力場に注目すると、それらの実験結果は特異応力場の強さ  $ISSF$  を一定値で表現できることを示している。均質で欠陥のない弾性接着層を仮定して、炭素鋼とエポキシ樹脂、アルミニウムとアルダイト、黄銅とはんだなどの種々の組合せに関して、接着強度が、 $ISSF = \text{一定}$ 、として表されるとしている。また、接着端部の幾何学的形状が変わる場合の評価も考慮に入れて、接着端部に仮想的な界面き裂を想定したモデルを用いても同様な評価が可能で

あることも説明し、その仮想き裂の適切な寸法についても言及している。

第4章からは、接着強度評価に最もよく用いられる重ね合わせ継手による試験方法を扱っている。接着端部の特異応力場の観点から評価するため、まず、その解析法を考察している。重ね合わせ継手に生じる特異応力場の表現式は突合せ継手のそれより複雑で、2つの異なる特異応力場が存在する。ここでは、接着部の幾何学的形状が変化しても、それらの特異場はほとんどの場合相似になることを明かにしている。このことを用い、同じ有限要素法メッシュパターンを未知問題と基準問題に適用し、接着端部の有限要素法応力に注目することで、特異応力場の強さ  $ISSF$  を簡便に求め得る方法を説明している。提案する手法は他の解析手法とくらべて容易で有用性があり、計算時間を要するより複雑な解析も行って、両者の結果がよく一致することを示し、その妥当性を実証している。

第5章では、重ね合わせ継手を用いた実験結果を特異応力場の強さ  $ISSF$  の観点から考察している。第4章で示した解析法を用いることで、接着長さおよび接着厚さを変えた単純重ね合わせ継手の接着強度を調べ、特異応力場の強さ  $ISSF$  の有用性を研究している。その結果、接着端部からはく離が生じる場合の実験結果が、 $ISSF = \text{一定}$ 、として評価できることを示している。

第6章では、接着材固有の強度を求め得る理想的な単純重ね合わせ継手の試験方法を考察している。負荷荷重と接着層寸法を固定して、試験片厚さを増加させるとき、接着層端部の特異応力場の強さ  $ISSF$  は減少し、一定値に収束することが示されている。また、試験片を十分厚くするとき、境界端部の変形角すなわち曲げ変形も最小値に近づく。すなわち、単純重ね合わせ継手試験では、荷重負荷時に試験片に曲げ変形が生じるため、その曲げの影響を最小化することで、接着強度を理想的なせん断荷重下で求めることができる。この目的のため、荷重一定条件下で、接着端部の特異応力場の強さを最小にする評価方法を調べており、例えば試験片被着部厚さを  $25\text{mm}$  程度に十分大きくして曲げ変形を十分小さくすれば、最小値が得られることを明かにしている。

同様に、第6章では、荷重一定条件下で特異応力場の強さ  $ISSF$  を単純重ね合わせ継手  $SLJ$  と二重重ね合わせ継手  $DLJ$  で等しくする条件より、同一強度が得られることを示している。JISに規定されている二重重ね合わせ継手  $DLJ$  の被着材厚さ  $1.5\text{mm}$  と等しい強度を単純重ね合わせ継手  $SLJ$  で得るためには被着部厚さを  $7\text{mm}$  と厚くすればよいことを示している。

第7章はこの論文の最終章であり、この研究で得られた主要な結論を要約している。以上本論文では特異応力場の強さ  $ISSF$  に基づく簡便で新しい接着強度評価法を提案するとともに、従来の試験法の問題点と対策を明らかにしており、機械工学上寄与するところ大である。

本論文に関し審査委員並びに公聴会出席者からは、特異応力場の相似性と特異性指数、被着材厚さを大きくする際の解の収束性、試験片の3次元形状の影響、接着部のフィレ

ット形状の影響等について種々の質問がなされたが、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。