

報告番号 ※ 第 3082号  
乙

## 主論文の要旨

題名 金属系接着継手の強度特性  
に関する研究

氏名 今中 誠

# 主論文の要旨

報告番号	※ 甲 第 乙	号	氏名	今 中 誠
------	------------	---	----	-------

航空機の製造工業において発展し、航空機の機体の接合に應用されている構造接着技術は、現在、化学装置、自動車、産業機械などの分野においてもその重要性を増しつつある。特に、化学装置は、一般の機械装置と比べ、より過酷な環境条件下で運転されるため耐熱・耐食性が、また、化学プラントの大型化に伴い軽量化が要求される。そのため、耐熱・耐食性の観点から耐熱合金やセラミック、また、軽量化や耐食性の観点からFRP等の材料の化学装置への使用が求められている。しかし、このような素材のみで装置を作製することは不可能であり、例えば、FRP-鋼やセラミック-鋼といった異種材料の複合化が装置を作製する上で必要となる。しかし、これらの接合には、従来、機械工業において広く用いられてきた溶接、ボルト締結、リベット締結等の方法では困難であり、このような異種材料の接合を可能とする接着接合法が、特に注目を集めている。しかるに、接着接合の現状は厳しい施工条件のもとに独自の経験則に基づき行われているため、接着設計ならびに接着施工に関する合理的な指針の確立が要望されている。かかる観点から本研究は、金属系接着継手の理論的な継手強度の推定法を得ることを目的として、継手の設計・製作時に必要となる継手形状や接着層厚さ等の諸特性と継手強度の関係を明らかにしたものである。

接着継手強度に関する既往の研究は、ほとんどが静的強度特性に限定されており、継手設計時に必要な動的荷重下での挙動、特に、機械設計の際に重要となる疲労強度に関する研究は少ない。さらに、それらの研究も特定の接着剤による実験的研究であり、種々の接着剤や継手形状をもつ一般的な接着継手の疲労強度の推定に應用できる応力解析に基づいた理論的研究は皆無といえる現状である。本研究では、まず継手作製時の重要な因子である接着層厚さや継手形状等の継手強度に及ぼす影響を静的ならびに疲労荷重下において検討し、次いで、接着層の応力分布に基づく疲労強度の推定法を最も広く用いられている重ね合せ接着継手について提案した。さらに今後、特に化学装置分野で應用が期待されているFRP-鋼板接着継手の強度評価への適応性をも検討した。

本論文は8章からなり、1章は接着継手強度に関する既往の研究、2章から8章まではエポキシ樹脂を主剤とする接着剤による接着継手強度の理論的ならびに実験的解析法に関する研究にあてている。

第1章では、既往の研究とその問題点および金属系接着継手の強度特性の解析に利用で

# 主論文の要旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏名	今 中 誠
<p>きる諸事項を概説し、本研究との関係を述べた。</p> <p>第2章では、静的荷重下において接着継手設計の基礎となる継手のせん断強度特性を調べた。まず、エポキシポリアミド系接着剤を用いて接着層に均一な応力分布を与えることが可能な薄肉円筒突合せ接着継手を作成し、接着層厚さの影響について検討した。すなわち、有限要素法による応力解析により、硬化収縮に伴う残留せん断応力が接着層厚さの増加に伴うせん断強度低下の原因となっていることを明らかにした。さらに、本解析に基づき、硬化収縮を低下させる効果をもつ充てん材の添加によって、接着層厚さの増加に伴うせん断強度の低下を改善しえた。</p> <p>次いで、アミン硬化のエポキシ系接着剤を用いて被着体表面粗さのねじりせん断強度と接着層のじん性値との関係について調べた。すなわち、硬化条件の変化ならびに可塑剤の添加により接着層のじん性値を変化させた結果、じん性値が高い場合は表面粗さが大なるほどせん断強度が高く、じん性値が低い場合は表面粗さが小なるほどせん断強度が高くなることを見出した。</p> <p>第3章では、比較的均一な応力分布が得られる突合せ接着継手の衝撃ならびに正弦波荷重下での疲労強度特性を調べた。その結果、エポキシポリアミド系接着剤による突合せ接着継手の衝撃疲労強度は低繰返し数領域（<math>10^5</math>回以下）では正弦波荷重下の疲労強度を上回るが、繰返し数の増加につれて衝撃疲労強度が急激に低下する傾向を見出した。また、このような傾向に関連して正弦波ならびに衝撃荷重下の疲労過程における接着層のひずみ幅の変化傾向に相違があることを確認した。さらに、CTBN (Carboxy-terminated butadien acrylonitrile) によるエポキシポリアミド系接着剤の改質により、正弦波ならびに衝撃荷重下の疲労強度を向上させ、特に高繰返し数領域（<math>10^6</math>回以上）における急激な衝撃疲労強度の低下傾向を改善した。また、充てん材（石綿）添加の疲労強度に及ぼす影響についても検討し、充てん材添加は、接着層厚さが小なる場合（0.1mm）、低繰返し数領域の疲労強度を増大させ、接着層厚さが大なる場合（0.3mm）には全繰返し数領域の疲労強度を増加させることを確認した。</p> <p>第4章では、接着継手の強度評価ならびに品質管理を行う上で重要な接着欠陥の疲労強度に及ぼす影響について検討を行った。ここでは、エポキシポリアミド系接着剤による</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※ 甲 第 乙	号	氏名	今 中	誠
<p>突合せ接着継手を用い、接着欠陥として代表的な接着層内の気泡ならびに接着層界面における未接着部を取扱った。その結果、接着層における分散気泡は、低繰返し数領域の疲労強度を低下させるが、高繰返し数領域においては分散気泡を含む接着継手と含まない接着継手の疲労強度の差異が減少することを見出した。このような傾向と関連して、分散気泡を含む接着継手と含まない接着継手の接着層での疲労過程におけるひずみ幅の変化傾向を比べると、分散気泡を含む継手は含まない継手よりひずみ幅がゆるやかな増加傾向を示すことを確認した。</p> <p>さらに、疲労強度に及ぼす接着層界面の未接着部の影響については、分散気泡を含む場合と同様に、特に低繰返し数領域では未接着部の影響により疲労強度の低下をきたすが、繰返し数の増加に伴いその影響が低下することを確認した。</p> <p>第5章では、エポキシ-ポリアミド系接着剤を用いて実用上、最も多用されている重ね合せ接着継手の設計において重要な重ね合せ長さ<math>l</math>と疲労強度の関係を、衝撃ならびに正弦波荷重下において調べた。その結果、正弦波荷重下における重ね合せ接着継手の荷重規準としての継手疲労強度は、重ね合せ長さの増加に伴い全繰返し数領域で増大することが認められた。さらに、せん断強度と疲労強度の関係から、重ね合せ長さ<math>l</math> (mm) をパラメータとして次式で示す疲労強度の推定式を提示した。</p> $\tau_{\max} = 1.71 (28.74 - 0.79 l + 0.0085 l^2) \cdot N_f^{-0.12}$ <p>ここで、<math>\tau_{\max}</math> は最大引張応力 (MPa)、<math>N_f</math> は破断繰返し数である。一方、衝撃荷重下では低繰返し数領域の継手疲労強度は<math>l</math>の増加に伴い増大するが、繰返し数の増加につれて<math>l</math>の差による疲労強度差が減少することを明らかにした。また、重ね合せ先端部における応力集中係数を用いて疲労強度を整理すると、応力集中係数の増加に伴う衝撃疲労強度低下の割合が正弦波荷重下のそれに比して大きいことを見出した。</p> <p>第6章では、エポキシ-ポリアミド系接着剤を用いて接着継手の疲労特性を考える上で重要な疲労機構について検討を行った。ここでは、疲労過程における重ね合せ接着継手の剛性率の変化ならびに疲労き裂の進展挙動を測定し、疲労き裂の進展特性について検討した。さらに、有限要素法を用いて、き裂長さ<math>a</math>と接着継手の剛性率との関係について解析した。その結果、疲労寿命の短い場合は疲労き裂発生前における接着層自体の劣化が大きく、</p>					

# 主論文の要旨

報告番号	※甲 乙	第 号	氏名	今 中 誠
<p>疲労寿命の増加に伴い疲労き裂発生前の接着層自体の劣化が低下することを見出した。しかし、疲労き裂発生後は疲労寿命に関係なく接着層自体の剛性率は一定で、接着継手の剛性率の低下は疲労き裂成長に伴うコンプライアンスの低下に対応することを確認した。</p> <p>第7章では、エポキシ-ポリアミド系接着剤を用いて接着継手の強度設計の際の規準となる接着継手の応力状態と疲労強度の関係について検討した。さらに、前章までの接着継手の疲労強度特性に関する研究をふまえて、重ね合せ接着継手の疲労強度推定法を提示した。すなわち、有限要素法により重ね合せ接着継手の接着層の応力分布を求め、次に、重ね合せ接着継手の疲労強度を支配する応力分布の代表値として最大引張応力を仮定し、均一な応力分布が得られる薄肉円筒突合せ接着継手の引張-引張疲労試験のS-N関係から、任意寸法の重ね合せ接着継手の疲労強度を推定した。その推定値は重ね合せ接着継手の疲労強度の実測値より安全側に偏り、特に重ね合せ長さの短い場合について推定値と実測値の良好な一致が認められた。</p> <p>第8章では、エポキシ-ポリアミド系接着剤を用いて、今後、化学装置の製造に応用が期待されているFRP-鋼板重ね合せ接着継手のせん断強度特性と応力分布の関係について、FRP-FRPならびに鋼板-鋼板重ね合せ接着継手のそれと比較することにより検討した。その結果、第7章で得られた重ね合せ端近傍の引張応力の最大値が、これら重ね合せ接着継手の強度を決定する共通の指標になることを見出した。</p> <p>以上のように、本研究は金属系接着継手作製時に要求される継手形状や接着層厚さと継手強度の関係を明らかにし、これらの結果に基づき、接着継手として多用されている重ね合せ接着継手の疲労強度推定法を提示した。この結果は、従来、経験的に行われていた接着継手の設計・製作に広く適用できるものと考えられる。</p>				