

題 目 静的荷重を受けるスカーフ接着継手の有限要素法応力解析と強度に関する研究

(A Study on Finite Element Stress Analysis and Strength of Scarf Adhesive Joints under Static Loadings)

氏 名 中 野 博 子

従来より多くの接着継手に関する研究がなされているが、基本接着継手形態の一つであり利用の拡大が大きいスカーフ接着継手は他の基本的接着継手に比べて研究が少なく、その特性が十分に把握されていない。また二次元応力解析が多く、三次元応力解析による応力特性の解明は十分なされていない。引張荷重作用下の研究が多く、曲げモーメント作用下での研究はなされていない。接着の利点である異種材料被着体の検討も十分ではない。さらに従来の研究では接着長さを一定とし、スカーフ角により被着体幅を変えているが、実際には被着体幅が与えられていることがほとんどであるため、この場合の検討も必要である。加えて、接着界面で部分的に接着するバンド接着継手が経験的に用いられているが、その特性を明らかにし、スカーフ接着継手の強度向上も検討する必要がある。

本論文では、引張荷重と曲げモーメントを受けるスカーフ接着継手の接着界面応力分布と継手強度予測に関して、三次元有限要素法 (FEM) 応力解析により検討し、ひずみおよび強度測定実験により妥当性を検証し、設計指針を提案することを目的としている。本論文で得られた成果は以下の通りである。

第1章「緒論」では、接着継手に関する従来の研究を展望し問題点を明確にし、さらに必要な研究項目を述べ、本論文の目的と意義を述べている。すなわち、1) スカーフ接着継手の三次元応力解析による正確な評価が必要であることを指摘し二次元解析との応力特性の差異の明確化、2) 引張荷重の他に曲げモーメント作用下での応力特性と継手強度、3) 同種材料被着体の他に異種材料被着体スカーフ接着継手に関する特性解明、4) 全面接着に対してバンド接着継手の応力特性と継手強度の解明、5) 接着長さ一定の場合と被着体幅一定の場合との応力および強度特性の差異、を主たる目的とした本研究の課題を述べている。

第2章「静的引張荷重を受ける同種材料被着体スカーフ接着継手の三次元有限要素法解析と強度推定」では、二次元有限要素法 (FEM) 計算ではスカーフ角 $\theta=52^\circ$ で特異性は消失するが、三次元 FEM 計算では θ が 60° の時最大主応力が最小、すなわち継手強度最大と推測している。三次元 FEM 計算では接着層の縦弾性係数が大きくなるほど、また接着層厚さが小さくなるほど接着界面端部での最大主応力は小さくなることを示し、最大主応力の最大値は継手表面で発生することが新たに明らかにされ、二次元解析結果と三次元解析結果の最大主応力の差異が顕著であることを示している。

被着体幅一定の場合と接着長さ一定の場合の無次元化された最大主応力に関する差異は小さいことが示されている。三次元弾塑性 FEM 計算により継手強度推定結果は実験結果とかなりよく一致し、スカーフ角 θ が約 60° で最大となり、被着体幅一定の接着継手の破断時引張荷重は接着長さ一定の接着継手のそれより大きい、両者の継手強度の差異は小さいことを示している。

第3章「静的引張荷重を受ける異種材料被着体スカーフ接着継手の三次元有限要素法解析と強度推定」では、スカーフ角 θ が約 60° の時接着界面端部での最大主応力が最小となること、接着層の縦弾性係数と接着層厚さに関しては第2章の特性と同様としている。さらに、異種材料被着体の縦弾性係数比の値が大きくなるほど接着界面両端部での特異応力は大きくなること、および最大主応力の最大値は縦弾性係数の大きい被着体側界面で発生することも示している。

三次元弾塑性 FEM 計算による最大主応力説に基づく継手強度推定と継手強度実験はかなりよく一致し、継手強度はスカーフ角 θ が約 60° で最大となること、被着体幅一定の場合の破断時引張荷重は接着長さ一定の場合よりもやや大きいことが示されている。

第4章「静的曲げモーメントを受ける同種材料被着体スカーフ接着継手の三次元有限要素法解析と強度推定」では、二次元と三次元 FEM 計算における接着界面最大主応力分布の差異は顕著であることが示されている。曲げモーメントを受ける場合も、接着層の縦弾性係数と接着層厚さに関しては引張荷重の場合と同様の特性となることを示している。スカーフ接着継手の破断時曲げモーメント測定結果と、三次元弾塑性 FEM 計算による最大主応力説に基づく推定結果はかなりよく一致し、スカーフ角が 60° のときに破断時曲げモーメントの値が最大となり、計算の妥当性を示している。

第5章「静的曲げモーメントを受ける異種材料被着体スカーフ接着継手の三次元有限要素法解析と強度推定」では、異種材料被着体の縦弾性係数比の値が大きくなるほど引張り側接着界面の端部での無次元化された最大主応力の値は大きくなること、および接着層の縦弾性係数が大きくなるほど、接着層厚さが小さくなるほど接着界面端部での無次元化された最大主応力は小さくなることなど接着界面応力特性を示している。三次元 FEM 計算の結果、被着体幅一定の場合にスカーフ角 θ が 60° の時、無次元化された最大主応力が最小となるが、接着長さ一定の場合には継手破断時曲げモーメントはスカーフ角 θ が小さくなるにつれて小さくなることを示している。

第6章「静的引張荷重を受けるバンド接着されたスカーフ接着継手の三次元有限要素法解析と強度推定」では、最大主応力の最大値は縦弾性係数の大きい側の接着層界面端部で生じること、およびバンド接着されたスカーフ接着継手の最大主応力も、同種材料被着体の継手よりも異種材料被着体のその場合の方がより大きいことを示している。異種材料被着体のバンド接着されたスカーフ接着継手の被着体縦弾性係数比、接着層厚さおよびスカーフ角に関する特性は、第2章および第3章で示した全域で接着されたスカーフ接着継手の場合と同様であることを示している。他方接着層縦弾性係数が小さいほど、接着界面で発生する最大主応力は小さくなるという結果を示し、接着面全域で接着される継手と逆の特性であることを示している。バンド接着領域数は大きくなるほど、無次元化された最大主応力が小さくなることを示し、さらに引張荷重を受ける継手の破断時荷重の推定結果は実験結果とかなりよく一致し、計算の妥当性を示している。

第7章「静的曲げモーメントを受けるバンド接着されたスカーフ接着継手の三次元有限要素法解析と強度推定」では、被着体縦弾性係数比が1（同種）に近づくほど、静的曲げモーメントを受けるバンド接着されたスカーフ接着継手の接着界面の最大主応力は小さくなること、および接着層縦弾性係数が高いほど、接着界面で発生する最大主応力は小さくなることを示し、さらに接着層厚さが大きくなるほど、最大主応力は小さくなり、引張荷重を受けるバンド接着スカーフ継手および全域で接着されたスカーフ接着継手の場合と逆の特性であることを示している。スカーフ角 $\theta=60^\circ$ の時に最大主応力は最小になることを示し、継手強度は最大になると推測され、接着領域数は、 $N=2$ の場合が最適であることを示している。この結果は第6章の引張荷重を受ける場合とは逆の特性である。破断時曲げモーメントの推定値は、実験結果とかなりよく一致し、接着長さ一定の場合には継手破断時曲げモーメントは $\theta=90^\circ$ の場合が一番大きくなることを示している。

第8章「スカーフ接着継手の設計への指針」では、第7章までの検討結果に基づき、スカーフ接着継手に静的引張荷重と曲げモーメントが作用する場合、被着体が同種および異種の場合、全域接着とバンド接着の場合に、スカーフ角、接着剤の縦弾性係数、異種材料被着体の縦弾性係数比、接着層の厚さ、バンド領域数、バンド接着長さ等のパラメーターが接着界面応力分布に及ぼす影響を整理し、設計指針をまとめている。

第9章「結論」では、本研究で得られた成果を述べている。すなわち以下のようなことになる。

- 1) 三次元 FEM 結果より被着体厚さ方向にも特異性が発生することが見出され、このため二次元 FEM 結果に比べて三次元 FEM 結果による最大主応力が大きいことが示され、三次元応力解析の必要性を指摘している。
 - 2) 曲げモーメント作用下での接着界面応力特性を示し、曲げモーメント作用下の接着界面応力特性は引張荷重下のそれと同様となることを示している。
 - 3) 異種材料被着体の継手の方が同種材料被着体による継手よりも接着界面端部で発生する最大主応力の値が大きいことを示している。さらに接着層の縦弾性係数が大きいほど、また接着層厚さが小さいほど、最大主応力の最大値は小さくなり継手強度は大きくなることを示している。
 - 4) スカーフ接着継手のスカーフ角は、 $\theta=60^\circ$ が適切であり、最も継手強度が向上することが示されている。しかし曲げモーメントを受ける接着長さ一定の被着体の場合には被着体幅が減少するため注意が必要であることを指摘している。
 - 5) バンド接着スカーフ継手と全面接着スカーフ継手の特性の差異を示し、引張荷重と曲げモーメント作用下では特性が逆になる場合があることを示している。すなわち引張荷重を受ける場合には、接着層の縦弾性係数が小さいほど強度は大きくなり、これは全面接着の場合と逆である。また、曲げモーメントを受ける場合、接着層厚さが大きいほど強度は大きくなり、全面接着の場合や引張荷重を受けるバンド接着継手と逆の特性であることを示している。バンド接着領域数は、引張荷重を受ける場合は多い方が、曲げモーメントを受ける場合は 2 の場合が強度は向上することを示している。
 - 6) 接着長さ一定の場合と被着体幅一定の場合のスカーフ接着継手に関して、引張荷重を受ける場合の破断時引張荷重は被着体幅一定の場合のスカーフ継手の方が大きくなり、継手強度は両者での差異が小さいことを示している。曲げモーメントを受ける場合には被着体幅が重要な因子となり、被着体幅一定の場合のスカーフ継手の方が有利であることを示している。
- 最後に、今後さらに検討が必要な研究課題についても述べている。