

氏名	王 澤鋒 (中国)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第421号
学位授与の日付	平成28年9月23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	Debonding Strength Evaluation for Bonded Axi-symmetric Bodies in Terms of Intensity of Singular Stress (特異応力場の強さに注目した異種材料接合軸対称体の構造強度評価に関する研究)
論文審査委員	主 査 教授 野田 尚昭 副 査 " 松田 健次 副 査 " 恵良 秀則 副 査 " 平木 講儒 副 査 " 佐野 義一 副 査 " 宮崎達二郎

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

近年、パイプ接合などの軸対称接合構造が鉄鋼、石油産業などにおいて使用されてきている。しかし、異種材料接合体の界面端で特異応力が発生することがあり、それは接合部の損傷へとつながり、そこから広範囲の破壊に波及する場合がある。異材接合板に生じる特異応力場の強さ (ISSF: Intensity of Singular Stress Fields) に関しては、任意の材料を組合せに対して精度の良い解析が行われている。しかし、軸対称接合体の特異応力場の強さに関する研究は、ほとんど見当たらない。そこで、本研究では、軸対称接合体の特異応力場の強さの問題に注目して、任意の異種材料組合せによる種々の ISSF を調査・解析して考察を加えている。本研究で得られた知見や解析方法を用いることによって、一般的な軸対称接合問題の強度の理解に役立てることができるだけでなく、実用問題にも応用可能である。

本論文は、全6章から構成されている。

まず、第1章では本研究の背景として、航空産業、マイクロエレクトロニクス部品のパッケージ、鉄鋼プロセス装置などにおける複合構造の応用例について述べている。また、接合された軸対称構造のアプリケーションと重要性が調査されている。例えば、薄鋼板を生産する連続焼鈍炉内で用いられる表面コーティングされたハースロールとオフショア石油堀削・生産装置で用いられるライザ管継手等である。しかし、文献調査の結果により、接合軸対称体の特異応力場の強さに対する研究が少ないことが示されてお

り、異種材料で接合された軸対称体を対象にした特異応力場の強さの解析を本研究の目的としている。

第2章では異種材料接合軸対称問題の解析方法が説明されている。有限要素法(FEM)の結果は、メッシュに依存性するので、工夫が必要である。そこで、応力場の相似性を利用してFEMの解析誤差を除去する比例法の考え方により、特異応力問題の解析を考察している。しかし、平面問題と軸対称問題は異なり、周方向ひずみ $\varepsilon_\theta$ がゼロにならないことから非特異応力項が生じるため、この比例法を軸対称問題に直接適用することが困難になる。そこで、この非特異応力を導出し、FEMにおける応力成分から取り除くことで、これまでの比例法を軸対称接合に拡張しており、これにより、良好な結果が得られることを確認している。

第3章では具体的に接合円柱の特異応力場の強さを材料の組合せを変えて系統的に解析している。さらに、得られた結果を平面問題と比較し、その違いについて考察している。平面応力問題において知られている界面端部付近のISSFは、Dundersパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ により支配される。しかし、接合円柱問題におけるISSFは $\alpha$ 、 $\beta$ のみにより表現できない。そこで、 $\alpha$ 、 $\beta$ を固定したときのISSFの最大値と最小値とを比較検討しており、図表の形で示している。

第4章では、接合管の問題を接合板の問題と比較対比して解析している。ここでは、ISSFへの内半径の影響も検討されている。まず、接合板に近いと考えられる接合管内半径が $\infty$ の場合が考察されている。このようなパイプ形状では、一般には平面ひずみとみなされるが、この近似によりどの程度の誤差が生じるかについて明らかにしている。そして、応力場の強さISSFの最大値と最小値を比較検討し、Dundersパラメータを用いて図表の形で示している。

第5章では、第4章で述べた方法を実用的な工学上の問題への適用例が述べられている。軸対称接合構造に本解析法を適用するために、前述の結果を用いて、メッキ鋼板生産用連続焼鈍炉内で用いられるハースロールが取り挙げられているハースロールでは、ステンレス製中空スリーブの外径面に最外層のセラミックコーティングを含む2、3層のコーティングが施されて使用され、この構造は多重管とみなすことができる。コーティング層が長時間使用にともなうはく離が課題となっており、炉の降温過程で作用する熱応力が主たる要因と考えられている。したがって、第5章では、ロール冷却時における熱衝撃下でのスプレーコーティングの強度を向上させる方法に焦点を当てた解析がなされている。その結果、最表層のトップコートが薄いほど、耐熱衝撃性に良いことが見出されている。また、トップコート(厚さH)とその下層のボンドコート(厚さh)の最適な厚比H/hは、特異応力場の観点から考察した結果、 $H/h \cong 2.0$ で最適であることが示されている。この結果は、平面ひずみ条件で考察した以前の研究や直方形の一面にコーティングを施して、行った実験結果とも一致することが述べられている。

最後の第6章では結論として、接合軸対称問題の特異応力場の強さ、及び溶射皮膜の

最適設計への応用を議論するとともに本研究論文全体をまとめている。

## 学位論文審査の結果の要旨

近年、パイプ接合などの軸対称接合構造が鉄鋼、石油産業などにおいて使用されてきている。しかし、異種材料接合体の界面端で特異応力が発生することがあり、それは接合部の損傷へとつながり、そこから広範囲の破壊に波及する場合がある。異材接合板に生じる特異応力場の強さ(ISSF: Intensity of Singular Stress Fields)に関しては、任意の材料を組合せに対して精度の良い解析が行われている。しかし、軸対称接合体の特異応力の強さに関する研究は、ほとんど見当たらない。そこで、本研究では、軸対称接合体の特異応力場の強さの問題に注目して、任意の異種材料組合せによる種々の ISSF を調査・解析して考察を加えている。本研究で得られた知見や解析方法を用いることによって、一般的な軸対称接合問題の強度の理解に役立てることができるだけでなく、実用問題にも応用可能である。

本論文は、全6章から構成されている。

まず、第1章では本研究の背景として、航空産業、マイクロエレクトロニクス部品のパッケージ、鉄鋼プロセス装置などにおける複合構造の応用例について述べている。また、接合された軸対称構造のアプリケーションと重要性が調査されている。例えば、薄鋼板を生産する連続焼鈍炉内で用いられる表面コーティングされたハースロールとオフショア石油掘削・生産装置で用いられるライザ管継手等である。しかし、文献調査の結果により、接合軸対称体の特異応力場の強さに対する研究が少ないことが示されており、異種材料で接合された軸対称体を対象にした特異応力場の強さの解析を本研究の目的としている。

第2章では異種材料接合軸対称問題の解析方法が説明されている。有限要素法(FEM)の結果は、メッシュに依存性するので、工夫が必要である。そこで、応力場の相似性を利用して FEM の解析誤差を除去する比例法の考え方により、特異応力問題の解析を考察している。しかし、平面問題と軸対称問題は異なり、周方向ひずみ  $\varepsilon_{\theta}$  がゼロにならないことから非特異応力項が生じるため、この比例法を軸対称問題に直接適用することが困難になる。そこで、この非特異応力を導出し、FEM における応力成分から取り除くことで、これまでの比例法を軸対称接合に拡張しており、これにより、良好な結果が得られることを確認している。

第3章では具体的に接合円柱の特異応力場の強さを材料の組合せを変えて系統的に解析している。さらに、得られた結果を平面問題と比較し、その違いについて考察している。平面応力問題において知られている界面端部付近の ISSF は、Dunders パラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  により支配される。しかし、接合円柱問題における ISSF は  $\alpha$ 、 $\beta$  のみにより表現できない。そこで、 $\alpha$ 、 $\beta$  を固定したときの ISSF の最大値と最小値とを比較検討

しており、図表の形で示している。

第4章では、接合管の問題を接合板の問題と比較対比して解析している。ここでは、ISSF への内半径の影響も検討されている。まず、接合板に近いと考えられる接合管内半径が $\infty$ の場合が考察されている。このようなパイプ形状では、一般には平面ひずみとみなされるが、この近似によりどの程度の誤差が生じるかについて明らかにしている。そして、応力場の強さ ISSF の最大値と最小値を比較検討し、Dundurs パラメータを用いて図表の形で示している。

第5章では、第4章で述べた方法を実用的な工学上の問題への適用例が述べられている。軸対称接合構造に本解析法を適用するために、前述の結果を用いて、メッキ鋼板生産用連続焼鈍炉内で用いられるハースロールが取り挙げられているハースロールでは、ステンレス製中空スリーブの外径面に最外層のセラミックコーティングを含む2、3層のコーティングが施されて使用され、この構造は多重管とみなすことができる。コーティング層が長時間使用にともなうはく離が課題となっており、炉の降温過程で作用する熱応力が主たる要因と考えられている。したがって、第5章では、ロール冷却時における熱衝撃下でのスプレーコーティングの強度を向上させる方法に焦点を当てた解析がなされている。その結果、最表層のトップコートが薄いほど、耐熱衝撃性に良いことが見出されている。また、トップコート（厚さ  $H$ ）とその下層のボンドコート（厚さ  $h$ ）の最適な厚比  $H/h$  は、特異応力場の観点から考察した結果、 $H/h \cong 2.0$  で最適であることが示されている。この結果は、平面ひずみ条件で考察した以前の研究や直方形の一面にコーティングを施して、行った実験結果とも一致することが述べられている。最後の第6章では結論として、接合軸対称問題の特異応力場の強さ、及び溶射皮膜の最適設計への応用を議論するとともに本研究論文全体をまとめている。

以上のように、本論文は軸対称接合体の応力拡大係数 ISSF の問題に注目して、任意の異種材料組合せによる種々の接合軸対称問題の応力拡大係数 ISSF を調査・解析・考察し、実際の工学上の問題への適用例も考察されている。特に、軸対称問題への比例法の導入は、他の軸対称問題にも広く応用できる道が拓かれたとみなされる。なかでも、溶射皮膜の最適設計への応用に関する研究は、異種材料接合軸対称体の構造強度評価に貢献するものと期待される。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認められる。

なお、本論文に関し、審査委員並びに公聴会出席者からは、ここで、 $K_{\sigma}$  で表される ISSF とき裂問題で用いられる応力拡大係数  $K$  との違い、特異性指数  $\lambda$  が Dundurs パラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  のみで表現できる理由、実ロールの中央部の剥離問題を異層境界端部の特異性を用いて評価できる理由、実際のセラミックスでは、温度依存性があると思われるのに解析ではこの考慮がなされていない理由、実際の境界には小さな欠陥があると思われるのに解析ではこの考慮がなされていない理由、提案する解析法の精度、JIS 熱衝撃試験法と実際のコーティングの強度評価の違い、トップコートの厚みと ISSF の関

係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、論文審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）に十分値するものであると判断した。