

審査の結果の要旨

氏名 山崎 美稀

本論文では、環境調和、小型・軽量、省資源の観点から電力機器の設計において必要性の高い樹脂モールド構造の内部界面強度評価方法に関し、実験的および解析的検討を通じて、実用性の高い手法を提案している。まず、金属と樹脂間からなる樹脂モールド構造の界面強度を明らかにするため実験的に界面の接着特性を調査している。実験結果に基づき界面挙動のモデル化を行い、接着強度指標を新たに定義している。この指標を有限要素法解析モデルに組み込むことにより、樹脂モールドにおける界面強度評価に応用できることを示している。一方で、界面強度の発現機構を原子レベルモデリングによる計算で検討したものである。

本論文は以下の章で構成されている。

第1章では、製品の需要と工学的技術の背景に基づき、本研究の目的について述べている。

第2章では、樹脂モールド構造の力学的特性を明らかにするため、界面生成のプロセスの実験的検討を行っている。モールド製作プロセスにおいて液状樹脂から固体樹脂までの硬化過程におけるひずみ履歴の測定を行うために、ひずみセンサーにより測定している。その結果、1次硬化および2次硬化の間の硬化反応に伴うひずみはクリープひずみの発生によりリセットされることを示し、その結果、残留応力の主因は徐冷で高温から常温に戻す際に発生する熱ひずみであることを明らかにしている。これに基づき、モールド時に界面に働く力や樹脂層に発生する応力を明らかにした。

第3章では、樹脂モールド構造の内部界面に作用する力を把握するために、試験体の内部接着界面のはく離実験を行い、金属と樹脂間の接着界面に生じるせん断力を測定している。これに基づき、樹脂モールド構造の金属と樹脂間の界面に作用する摩擦力と接着力および面圧力と測定せん断力との関係を調べ、これらの力学的特性と樹脂モールド構造全体の挙動との関係を明らかにしている。

第4章では、第3章の実験により求めた界面のせん断力の結果から、界面に作用する力のモデル化を行っている。つまり、新たに接着強度指標を定義するため、界面に作用する力を摩擦力、接着力、残留応力による面圧の三つの力に分解し、分解した力を法線方向と接線方向に非線形ばねを使った単純モデル化を行っている。これに基づき、接着・摩擦有限要素解析手法を提案している。モデル化の簡略化にあたり、残留

応力による面圧のモデル化のために焼き嵌め理論の適用を提案している。この根拠は、モールド製作プロセスの中で液状樹脂から固体樹脂までの硬化過程をひずみセンサーにより測定した円周方向ひずみと FEM の熱応力計算によりひずみがほぼ一致していること、FEM による半径方向の平均面圧と焼き嵌め理論による面圧がほぼ一致していることが確認されたことに拠る。提案手法については妥当性を実験結果への適用から検証し、界面の特性をよく表現していることを示した。さらに、実機部品である絶縁ロッドの強度実験の評価に、提案する接着・摩擦有限要素解析手法を適用した。その際、評価法内部界面の接線方向はせん断ばねとし、法線方向は垂直ばねとするモデル化を行った。その結果、破断強度試験がよくシミュレートできることが確認されている。

第 5 章では、界面強度の発現機構を原子レベルの観点から検討している。界面の結合の解離を扱う分子動力学法を実施し、界面接着強度を表すひとつの指標として、界面破壊エネルギーを定義している。計算により求まる界面破壊エネルギーと実験で得られた接着強度指標を比較したところ定性的に一致していることが確認された。従って、計算により相対的な接着強度の大小の予測が可能であることを示している。

また、実際の界面は表面粗さに基づくミクロ的な結合のモード I 型の解離に起因して、はく離が進展しているものと考えられることから、界面はく離進展モードのメカニズムについて、結合の解離を扱う分子動力学のモード I 型の破壊エネルギーをはく離進展と結びつけることを試み、実験結果をよく説明できることを示した。

最後に、ナノスケールの化学結合とミクロスケールのはく離強度の関係を、主に表面粗さの影響に着目して考察している。破壊応力について計算と実験では大きな差異が認められるが、この大きな原因として有効接着面積の減少と初期欠陥の存在が考え、界面状態を考慮し見積った。その結果、計算と実験の差分の原因は界面状態による有効接着面積の減少の影響よりは、界面に存在する欠陥の影響の方が大きいと考えられることを示している。このように界面接着強度には界面状態による界面結合の不完全性が関係しており、その支配因子を明らかにしている。

第 6 章では、本研究の成果を要約し、製品開発における本研究成果の位置付けや今後への展開についても言及している。

以上、本論文は、近年の各種産業分野で用いられる構造部材において界面の存在している異材ないしは複合材が不可欠の存在となっていることから、産業界でのニーズが高まっている樹脂モールド構造の強度について、新たな力学モデルを提案し、強度評価の精度を高めることに結び付けている。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。