

## 論文の内容の要旨

氏名：トリン タン フォン

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：有限要素法による傾斜機能材料を用いた梁構造の解析手法に関する研究

1980-1990 年にかけて日本では様々な材料概念が提唱された。新規材料である傾斜機能材料 (Functionally Graded Material: FGM) は研究者の創意工夫, 時代の要請および国の政策によって生み出されたものである。FGM はスペースプレーン (有人宇宙往還機) 用の耐熱材料分野でまず実用化された。大気圏内を長時間高速で飛行すると, 機体の表面は超高温に達し, 覆っている耐熱セラミックスの剥離・脱落が生じる。そこでスペースプレーンの機体を超高温から保護するために, 新しい概念の耐熱材料が必要とされた。そのために提案されたのが, 金属からセラミックスへと組成を連続的に変化させた材料である。得られた材料の有効特性は連続的に変化するので, 素材の継ぎ目の問題が軽減し, 従来の複合材料 (Composite) でよく見られる応力集中が低減する。この新材料は, セラミックと金属合金といった大きく異なる 2 つの材料相からなり, セラミックの優れた高温強度と耐クリープ性に, 金属合金の高破壊靱性及び優れた耐熱衝撃性という両者の利点を合わせ持ち, 界面近傍に発生する熱応力を 30% 以上低下させることができた。これが FGM の誕生である。

傾斜機能材料は, 構造力学上において幅広い応用が可能のため, 技術者や研究者から大きな注目を集めている。FGM は, 目的とする物性や機械的特性をもった新材料を創り出すことが可能であるため, 指定の方向に対して素材の割合を変えることによって形成することができる。このような部材を大規模な建築・土木構造物に適用すると, その構造物を最適な強度分布にすることができる。その結果, 均質な強度を持つ建物や意図的に強度を変化させた建物の設計が可能となる。

現在, このような特性を持つ部材の解析には, フーリエ変換やラプラス変換, あるいは, 理論解が用いられているが, これらは, 複雑で汎用性に乏しい。そこで本研究では, 一般的な有限要素法 (FEM) に傾斜機能材料を有する部材を解析できる理論式を組み込み, 新しい解析手法を提案する。なお, 研究の一環として, FEM を用いた梁構造を最小限の要素分割数かつ高精度な解析結果を得るための形状関数も新たに開発している。

本論文は10章から構成されている。

第1章では, 本論文の序論にあたり, 研究計画の背景, 目的や意義, ならびに本論文の構成について述べている。

第2章では, 梁の理論に基づいて変断面梁や断面方向および軸方向 FGM 梁構造の定式化を行い, 新しい梁の形状関数を提案している。梁幅または梁せいが断面変化する FGM Timoshenko 梁について, その変断面および FGM 材料に対する形状関数の公式化を整合的に梁の釣合い方程式より導出した。提案した形状関数は, 釣合い方程式に関するマトリックスを構成するため, 通常有限要素コードに組み込んで使用することができる。また形状関数の精度については, 解析例を通して検証し, 最も少ない要素分割に対して高精度が得られた。従って, 構成される構造解析に対し有用な梁要素を提供するものである。

第3章では, 有限要素法で用いる FGM 梁構造の定式化について述べている。

第4章では, 非線形釣合い方程式を解いて, 大変形を解析する際に, 共回転アプローチのみならず, 円弧長制御法との組み合わせによる増分反復法を使用することで, 弾塑性解析や座屈後解析が容易に行えることを示している。

第5・6章では, 静的解析および動的解析における変断面梁の応用例を用いて, 本研究で提案している新しい形状関数の精度を検証し, 他の研究成果との比較検討を行っている。ニューマーク法は動的解析に応用し, 材料の不均一性や移動速度の影響は, 指数  $n$  (アルミとアルミナ合比) の FGM 梁が高い場合, 最大の動的変位および移動速度も大きくなった。よって, 低い指数  $n$  の FGM 梁の方が最大の動的変位および移動速度を減少することが解った。

第7章では、多スパン FGM 梁構造上に移動荷重を作用させた動的問題における有効性について述べている。変動する高調波負荷がかかる複数スパン FGM ビームの動的応答が、材料異質性、スパン数、負荷パラメーターの影響下にあることが証明にされた。

第8章では、軸方向 FGM 梁部材からなるフレーム構造における座屈後挙動について検討を行っている。鉄とアルミナを組合せた梁軸方向 FGM 梁の座屈後の荷重-変位より、アルミナと鉄を組み合わせた場合は、座屈後の耐力が増加したことが解った。

第9章では、地盤バネ上の FGM 梁構造の弾塑性解析を行い、塑性変形領域における梁部材の変形や応力について述べている。鉄とセラミックス FGM 片持ち梁の座屈後の荷重-変位関係より、バネ定数の影響を確認した。

第10章で、本研究のまとめおよび今後の将来性について述べている。

このような研究成果が得られたことは、論文提出者の豊富な学識と優れた研究能力を裏付けるものである。よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。