

鉄道車体の三次元弾性振動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

古くからの車体製作方法に基づく鉄道車体では、車体台枠により乗客の荷重を支える構造が用いられてきた。このような鉄道車体においては、台枠の変形に起因する振動が乗り心地に影響を及ぼす主な要因であった。そして、その振動モードが両端自由はりの一次曲げ振動に類似していることから、車体をはりとみなした解析が行われていた。しかし、最近では軽量化、構造の簡素化を目的として航空機、自動車などに用いられるモノコック(張殻)構造が採用されている。車体の側面など、台枠以外の部分でも荷重を分担する構造であり、これらの軽量化、構造の簡素化が進められた車体では、「はり」の曲げ振動に類似する振動モードだけではなく、屋根と床が逆位相で振動するなど、構体の各面が連成した振動モードが乗り心地に影響を与えている。一般的な鉄道車体では、これらの車体弾性振動は人間が上下方向加速度を敏感に感じる周波数帯に複数存在するため、対策が重要である。

この車体弾性振動について検討するためには、車体を三次元構造物として振動解析を行う必要がある。一般に複雑な構造物の振動解析を行う場合、有限要素法(FEM)を用いることが考えられ、鉄道車両の振動解析についても詳細な設計図面情報をもとにしたモデルを用いて解析した例が報告されている。有限要素法を用いることで詳細なモデルにより解析を行うことが可能となる反面、要素分割の違いにより解析精度に差が生じること、モデルの作成、解析に多大な労力を必要とすることなどの問題点があるため、構造変更による影響を調査するパラメータスタディを実施する場合は、解析の障害となる。

本論文では、鉄道車体の三次元弾性振動について検討するために、車体を両端で単純支持された非円形断面筒状シェル構造物としてモデル化し、伝達マトリックス法を用いて数値解析を実施した。また、自由振動解析により得られる固有振動数と振動モードを用い、数値積分を利用してモーダルパラメータを計算する手法について示し、この手法が車体を模擬した三次元構造物に対しても適用可能であることを示した。その主要な成果は次の二点である。

(1) 鉄道車体は横断面全幅に比べて、長軸方向が7倍程度と長い構造であるために、両端の境界条件の影響は小さく、両端を単純支持する非円形断面筒状シェル構造物として取り扱うことが可能である。この筒状シェルに対して、計算負荷の小さい伝達マトリックス法を適用することで、車体の三次元弾性振動を簡便に取り扱うことが可能になる。

(2) 従来の有限要素法をベースにした解析手法からモーダルパラメータを求める際には、有限要素

法による定式化ならびに離散化した方程式が必要になるが、これらを用いることなくモーダルパラメータの決定が可能となる。この手法は長方形平板などの単純な構造のみならず、筒状シェル構造物の場合にも適用可能であり、計算負荷が小さな手法により固有振動数ならびに固有振動モードが得られる場合は、効率的に周波数応答を得ることが可能である。

本論文は全 10 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、本論文の背景ならびに各章の概要を述べる。

第 2 章では、鉄道車両の振動に関する従来の研究について、鉄道車体弾性振動を中心に述べる。また、乗り心地に影響を及ぼす車体弾性振動の例を、実車の車体弾性振動モードとともに示す。併せて本論文により期待されることを述べる。

第 3 章では、実際の鉄道車両構体の例を示した後、本論文で用いる数値解析用シェルモデルについて述べる。定式化手順ならびに運動方程式を示すと同時に、シェルモデル形状の設定方法についても述べる。小型の車体を想定した数値解析モデルを作成し数値解析を実施し、三次元の弾性振動モードが得られることを確認する。

第 4 章では、第 3 章で示す数値解析モデルの妥当性を確認する目的で、実験用小型車体の実験モード解析を実施し、数値解析結果と比較する。また、実験用小型車体と数値解析用モデルの境界条件、ならびに一部の部材の構成が異なるため、これらの影響について検討する。

第 5 章では、実際の車体の弾性振動特性を表現することを目的に、いずれの面にも曲率は設定せず、構体各面に実車に相当する質量比、ならびに剛性比を配分し、数値解析を実施する。また、これにより得られる数値解析の結果と、実際のステンレス鋼製車体により得られている弾性振動モードとの比較を行い、作成した数値解析モデルの妥当性を確認する。

第 6 章では、実際のステンレス鋼製車体ならびにアルミニウム合金製車体を用いた実験により得られている車体弾性振動特性について整理する。

第 7 章では、第 6 章で示すステンレス鋼製車体の弾性振動特性について、作成した筒状シェルモデルを利用したパラメータスタディにより検討する。また、三次元構造中に曲率を持つ面が有る場合の影響についても検討する。

第 8 章では、連続体の振動解析や、連続体の振動を含む制御系の設計に重要となるモーダルパラメータを効率的に計算する手法について述べる。提案する計算手法を長方形平板に対して適用することで、その効果を検討する。

第 9 章では、第 8 章で示したモーダルパラメータの計算手法を三次元構造物に適用し、筒状シェル構造としてモデル化する小型車体についての計算を実施する。数値解析と併せて小型車体の加振試験を実施することで、数値解析の妥当性について検討する。

第 10 章は総括であり、本論文で得られる研究結果をとりまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 林 幸 徳
副 査 教 授 成 田 吉 弘
副 査 教 授 林 川 俊 郎

学 位 論 文 題 名

鉄道車体の三次元弾性振動解析に関する研究

鉄道車体の性能向上に伴い、構体の各面が連成した振動モードを考慮するために、車体を三次元構造物として振動解析を行う必要性が求められている。有限要素法を用いることで詳細なモデルにより解析を行うことが可能となる反面、要素分割の違いにより解析精度に差が生じること、モデルの作成、解析に多大な労力を必要とすることなどの問題点があるため、構造変更による影響を調査するパラメータスタディを実施する場合は、解析の障害となる。

本論文では、車体を両端で単純支持された非円形断面筒状シェル構造物としてモデル化し、伝達マトリックス法を用いて数値解析を実施している。また、自由振動解析により得られる固有振動数と振動モードを用い、数値積分を利用してモーダルパラメータを計算する手法について示し、この手法が車体を模擬した三次元構造物に対しても適用可能であることを示している。その主要な成果は次の二点である。

(1) 鉄道車体は横断面全幅に比べて、長軸方向が7倍程度と長い構造であるために、両端の境界条件の影響は小さく、両端を単純支持する非円形断面筒状シェル構造物として取り扱うことが可能である。この筒状シェルに対して、計算負荷の小さい伝達マトリックス法を適用することで、車体の三次元弾性振動を簡便に取り扱うことが可能になる。

(2) 従来の有限要素法をベースにした解析手法からモーダルパラメータを求める際には、有限要素法による定式化ならびに離散化した方程式が必要になるが、これらを用いることなくモーダルパラメータの決定が可能となる。この手法は長方形平板などの単純な構造のみならず、筒状シェル構造物の場合にも適用可能であり、計算負荷が小さな手法により固有振動数ならびに固有振動モードが得られる場合は、効率的に周波数応答を得ることが可能である。

本論文は全10章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本論文の背景ならびに各章の概要を述べている。

第2章では、鉄道車両の振動に関する従来の研究について、鉄道車体弾性振動を中心に述べている。また、乗り心地に影響を及ぼす車体弾性振動の例を、実車の車体弾性振動モードとともに示し、併せて本論文により期待されることを述べている。

第3章では、実際の鉄道車両構体の例を示した後、本論文で用いる数値解析用シェルモデルについて述べている。また、定式化手順ならびに運動方程式を示し、シェルモデル形状の設定方法について述べている。そして、小型の車体を想定した数値解析モデルを作成して数値解析を実施し、三次元の弾性振動モードが得られることを確認している。

第4章では、第3章で示した数値解析モデルの妥当性を確認する目的で、実験用小型車体の実験モード解析を実施し、数値解析結果と比較している。また、実験用小型車体と数値解析用モデルの境界条件、ならびに一部の部材の構成が異なるため、これらの影響について検討している。

第5章では、実際の車体の弾性振動特性を表現することを目的に、いずれの面にも曲率は設定せず、構体各面に実車に相当する質量比、ならびに剛性比を配分し、数値解析を実施している。また、これにより得られる数値解析の結果と、実際のステンレス鋼製車体により得られている弾性振動モードとの比較を行い、作成した数値解析モデルの妥当性を確認している。

第6章では、実際のステンレス鋼製車体ならびにアルミニウム合金製車体を用いた実験により得られている車体弾性振動特性について記述している。

第7章では、第6章で示したステンレス鋼製車体の弾性振動特性について、作成した筒状シェルモデルを利用したパラメータスタディを実施している。また、三次元構造中に曲率を持つ面が有る場合の影響についても検討している。

第8章では、連続体の振動解析や、連続体の振動を含む制御系の設計に重要となるモーダルパラメータを効率的に計算する手法について述べている。提案する計算手法を長方形平板に対して適用することで、その有用性を検討している。

第9章では、第8章で示したモーダルパラメータの計算手法を三次元構造物に適用し、筒状シェル構造としてモデル化する小型車体についての計算を実施している。数値解析と併せて小型車体の加振試験を実施することで、数値解析の妥当性についても検討している。

第10章は総括であり、本論文で得られた研究結果をとりまとめている。

これを要するに、著者は、鉄道車体の三次元弾性振動解析に適した手法を提案し、その有効性を各種実験によって検証するとともに、鉄道車体の振動特性に関して有益な知見を得たものであり、機械工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。