

学位論文題名

複合応力下における免震積層ゴムの力学挙動解析法に
関する研究(Mechanical Behavior Analysis of Multilayered Elastomeric Bearings
under Combined Stress)

学位論文内容の要旨

近年では免震構造を採用した建築が普及する一方で、より広い適用範囲における免震部材の安全性を検討することの重要性が高まっている。本論文では、偏心荷重による付加曲げ作用時のせん断・水平2方向のせん断・建物のロッキング挙動による変動軸力下でのせん断といった各種の複合応力状態における免震積層ゴムの力学挙動解析手法を提案している。

第1章「序論」では、まず、本研究の背景と目的について述べた。この中で、免震建築が普及するにつれて、より多様な荷重条件における免震部材の力学特性を検討することの重要性が高まっていることに触れた。次に、免震積層ゴムの力学挙動解析法に関する既往の研究についてまとめた。既往の研究を概観して主な成果を整理するとともに、本研究の主題である複合応力状態における力学挙動解析法を充実させることの必要性を述べた。最後に、研究の流れと研究手法の概略を示した。

第2章「偏心荷重による付加曲げモーメントが作用する免震積層ゴムの力学挙動」では、表題の力学挙動解析を行うことを目的に、力学モデルを用いた解析手法を開発した。まず、並列軸ばねモデル・離散型並列軸ばねモデル・3層並列軸ばねモデルの構成手法について述べた。これらの力学モデルは、積層ゴムのせん断特性を表現するせん断ばねと圧縮・曲げ特性を表現する並列軸ばねを剛体要素で接続したものである。並列軸ばねの変形を通じて、鉛直方向と水平方向の連成効果が生じる。これらの力学モデルを用いて積層ゴムの力学挙動を再現するには、曲げ特性の評価が重要であることを確認した。次に、並列軸ばねの力学特性について詳細に検討した。ここでは、積層ゴムの圧縮特性および曲げ特性を並列ばねに正確に反映させることを目的に、積層ゴムにおける見かけの弾性係数の分布を明確に表現し、ゴムの形状と材料の諸元から定まる分布関数を導いた。分布関数および圧縮側と引張側で非対称な復元力特性を組み合わせて使用することにより、積層ゴムの圧縮挙動と曲げ挙動を同時に再現できることを示した。最後に、開発した力学モデルを用いて、鉛直ラグ入り積層ゴムの大変形・高軸力下における座屈特性の再現を試みた。積層ゴム縮小試験体の加力実験のシミュレーション解析を行い、分布関数を適用した解析モデルを用いることで、座屈特性をより良く評価した解析結果を得た。

第3章「水平2方向せん断力が作用する免震積層ゴムの力学挙動」では、表題の免震装置を対象に、力学挙動解析の手法を述べた。まず、既往の研究により提案されている2方向せん断モデルを紹介した。これらの力学モデルは、作用軸力の影響がない範囲において水平2方向のせん断特性を表現できる。次に、変動軸力にも対応できる免震積層ゴムの水平2方向モデルである3次元並列軸ばねモデルを構築する手法を述べた。積層ゴムの水平2方向特性を表現する部分には、既往の2方向せん断モデルを適用可能である。鉛直特性と曲げ特性を表現する並列軸ばね部分には、第2章で導いた積層ゴムの弾性係数分布を容易に取り入れることができる。さらに、弾性すべり支承の水平2方向モデルとして、新たな力学モデルを開発した。この力学モデルは、弾性すべり支承の構成を単純化して再現したものであり、線形のばね要素と完全剛塑性のすべり要素を直列接続して表現される。開

発した弾性すべり支承の力学モデルは、塑性論における Ziegler の移動硬化則に基づく復元力モデルと等価であることを示した。これらの力学モデルでは、鉛直方向と水平 2 方向の 3 軸連成効果が表現される。このほかに、既往の研究で用いられている水平 1 方向入力変位を拡張し、位相差変位入力による水平 2 方向入力変位を得る方法について述べた。位相差変位入力では、直交する 2 方向に時間差を付けた正弦波入力を行うことにより、水平 1 方向～楕円～真円と連続的に変化する変位オービットを生成することができる。位相差変位入力の手法を応用し、地震入力エネルギーが互いに等しい水平 2 方向の地震入力を生成する方法を示した。最後に、開発した力学モデルを用いて、高減衰系積層ゴム・鉛プラグ入り積層ゴム・弾性すべり支承の力学挙動解析を行った。いずれの力学モデルも、対象とする免震装置の水平 2 方向特性を良く表現することができた。

第 4 章「免震建物のロッキング挙動を考慮した地震応答解析」では、表題のモデル建物を対象として解析手法を述べた。まず、ロッキング挙動を考慮した免震建物の解析モデルを作成した。上部建物は振動特性を考慮して等価 1 質点系化し、免震建物全体と免震装置との相互作用を簡単に把握可能なものとした。ここでは、建物の等価高さと等価質量を考慮することで、上部建物に作用する転倒モーメントを生じさせる設定とした。免震層のモデル化にあたっては、基礎固定モデル・ロッキング非考慮モデル・ロッキング考慮モデルの 3 通りの解析モデルを作成した。次に、応答解析に用いる入力地震動を作成した。定常応答解析のために、入力周期ごとに告示スペクトルの形状から定まる加速度振幅を持つ調和地動を作成した。この入力により、短周期から長周期の領域まで、過度の入力や応答を生じない範囲での定常応答特性がわかる。地震応答解析のために、最大地動加速度を 25, 50, 75 cm/s に基準化した入力地震動を作成した。これらの入力により、通常的设计レベルおよび余裕度検討レベルでの免震建物のロッキング挙動特性がわかる。最後に、免震建物の地震応答解析を行った。免震建物モデルのロッキング挙動を考慮することで、変動軸力下での積層ゴムの応答性状が得られた。免震建物の定常応答解析では、入力や応答の振幅に対する依存性を含む非線形の応答曲線群が得られた。入力倍率が大きくなると、免震周期での応答のピーク付近では、ロッキング考慮モデルの最大応答加速度や最大応答変位はロッキング非考慮モデルの最大値よりも小さくなった。これは、並列軸ばねモデルにより積層ゴムの座屈挙動が表現されたことによるものである。免震建物の地震応答解析では、通常的设计範囲である 25, 50 cm/s の入力レベルにおいて、ロッキング非考慮モデルとロッキング考慮モデルはほぼ同等の応答値となった。これより、一般的な入力レベルでは、積層ゴムの水平方向特性のみを評価しても免震建物全体の挙動をほぼ捉えることができた。一方、余裕度検討レベルである 75 cm/s の入力において、ロッキング考慮モデルでは積層ゴムの座屈挙動が明瞭に現れた。このような現象はロッキング非考慮モデルでは再現することができないものである。以上により、ロッキング挙動を考慮した応答解析モデルおよび軸力変動の影響を反映可能な積層ゴムの力学モデルの必要性を示した。同時に、免震建物の応答解析において、ロッキング挙動を生じさせる転倒モーメントを簡単な式で算定し、積層ゴムの剛性低下によって軸力の変動幅が制限されることを導いた。これにより、免震積層ゴムの終局領域では自己安定性が発揮されることを示した。

第 5 章「結論」では、本論文の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	菊 地	優
副 査	教 授	緑 川	光 正
副 査	教 授	後 藤	康 明
副 査	教 授	林 川	俊 郎

学位論文題名

複合応力下における免震積層ゴムの力学挙動解析法に 関する研究

(Mechanical Behavior Analysis of Multilayered Elastomeric Bearings
under Combined Stress)

近年、長周期地震動を伴う巨大地震の発生が懸念されており、免震構造を含む長周期構造物に対して地震時安全性の再検討が求められている。加えて、近年の高度化した社会は、地震後の建物機能の維持と財産の保全という高いレベルの地震防災対策を必要としている。このような背景から、免震構造は従来の想定を超えたより広範囲に及ぶ力学挙動の評価が必要とされ、それを可能にする解析手法が模索されている。本論文は、免震構造における主要な装置のひとつである積層ゴムを対象に、大変形や水平2方向変形を含むより広範囲に及ぶ力学挙動の評価を可能にする新たな解析手法を提案しており、全5章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、まず、本研究の背景を記述し、研究対象としている免震積層ゴムに関する既往の研究についてまとめている。続いて、本研究の主題である複合応力状態における力学挙動解析法を充実させることの必要性に触れ、解決すべき課題を示している。

第2章では、偏心荷重による付加曲げが作用する免震積層ゴムの力学挙動解析を目的に、新たな力学モデルを開発している。初めに、積層ゴムの水平特性を表すせん断ばねと圧縮・曲げ特性を表す並列軸ばねを剛体要素で接続した力学モデルを構築し、並列軸ばねの変形を通じて鉛直方向と水平方向の連成効果が生じるため、曲げ特性の評価が重要であることを確認している。続いて、並列軸ばねの力学特性について詳細に検討し、積層ゴムの圧縮特性と曲げ特性を並列ばねに正確に反映させるために、積層ゴムの形状と材料の諸元から定まる弾性係数の重み分布関数を導いている。さらに、圧縮側と引張側で非対称な復元力特性を使用することで、積層ゴムの圧縮挙動と曲げ挙動を同時に再現できることを示している。最後に、開発した力学モデルを用いて、鉛プラグ入り積層ゴム縮小試験体の加力実験のシミュレーション解析を行い、大変形・高軸力下における座屈特性を再現している。

第3章では、水平2方向せん断力が作用する免震積層ゴムを対象とし、力学挙動解析法を提案している。初めに、前章で提案したモデルを拡張して水平2方向変形と変動軸力に

対応可能な3次元並列軸ばねモデルを構築している。この力学モデルの水平特性を表現する部分には、任意の2方向せん断モデルを適用可能である。また、鉛直特性と曲げ特性を表現する並列軸ばね部分には、第2章で導いた積層ゴムの弾性係数分布を適用できる。次に、弾性すべり支承の水平2方向モデルとして、線形のばね要素と完全剛塑性のすべり要素を直列接続した力学モデルを構築している。この力学モデルは、塑性論におけるZieglerの移動硬化則に基づく復元力モデルと等価であることが示されている。これらの力学モデルでは、いずれも鉛直方向と水平2方向の3軸連成効果が表現される。最後に、開発した力学モデルを用いて、高減衰系積層ゴム・鉛プラグ入り積層ゴム・弾性すべり支承の力学挙動解析を行っている。どの力学モデルも、対象とする免震装置の水平2方向特性を良く表現している。

第4章では、ロッキング挙動を生じる免震建物を対象とした数値解析手法を開発している。まず、免震建物の上部構造と免震装置との相互作用を簡単に把握可能な建物モデルを作成している。免震層は、ロッキング挙動による軸力変動の影響を考慮しない従来型のモデルのほか、第3章までに開発したモデルを用いて変動軸力の影響を考慮する新たなモデルを用いている。続いて行われた定常応答解析および地震応答解析では、ロッキング挙動を生じる免震建物の応答性状が得られている。応答解析結果から、積層ゴムの大変形領域における応答のピーク付近では、水平挙動と鉛直挙動の連成効果により、積層ゴムの剛性低下と応答加速度の低減が見られることを明らかにしている。同時に、ロッキング挙動を生じさせる転倒モーメントを算定し、積層ゴムの剛性低下によって軸力の変動幅が制限されることを導いている。これにより、ロッキング挙動を考慮した応答解析モデルおよび軸力変動の影響を反映可能な積層ゴムの力学モデルの必要性を示し、積層ゴムを用いた免震建物では自己安定性が発揮されると述べている。

第5章では、力学挙動解析法の充実を目的に免震積層ゴムおよび免震建物の新たな解析モデルの提案を行ってきた本研究を総括し、今後の課題と展望について言及している。

これを要するに、本論文は、複合応力状態における免震積層ゴムの力学挙動を高精度に再現できる解析手法を新たに提案し、その有用性を明らかにしており、建築構造学および耐震工学に対して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。