鉛プラグ入り免震積層ゴムの極限挙動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

免震構造の普及と適用対象の拡大により、従来の想定を超えたより広範囲に及ぶ免震建物の挙動評価が必要となっている。より過酷な状況下における免震建物の安全性検討には、大変形時の免震装置の力学的挙動を適切に評価できる解析手法が必要となる。本論文は、主要な免震装置のひとつである鉛プラグ入り積層ゴムを対象に、大変形時挙動の評価手法を提案しており、全5章より構成される。

第1章は「序論」であり、近年の免震構造に対する社会的背景や、要求される機能について述べた。さらに、免震構造に関する既往の研究を整理・概観することで、本研究で解決すべき課題を明確にした。

第2章「変動軸力の影響を考慮した積層ゴムの解析モデル」では、積層ゴムの大変形時挙動の解析を目的に、新たな力学モデルを提案した。積層ゴムの大変形時の挙動には、せん断力と軸力の間の相互作用、及び積層ゴムの非線形材料特性を考慮する必要がある。加えて、地震時には上下動、及び転倒モーメントによって積層ゴムに作用する軸力が変動するため、免震建物のより詳細な地震時挙動評価にはこの変動軸力の影響を考慮する必要がある。提案モデルは、非線形ばねとリジッドリンクの組合せにより構成される。力学モデルの上下端に並列多軸ばね群を用いることにより、変動軸力を捉えた上でせん断-軸力間の相互作用を表現可能とした。積層ゴムの材料特性は、力学モデルの構成要素である非線形ばねに適用する復元力モデルにより表現される。鉛プラグ入り積層ゴムのせん断加力試験の結果を基に、せん断特性、及び軸方向特性について大変形状態まで適用可能な復元力モデルを提案した。積層ゴムのせん断特性は、せん断ひずみレベルによって変化する。本論では、主に高減衰積層ゴムの解析を目的に提案されている既往の復元力モデルを基に、鉛プラグ入り積層ゴムに対してせん断ひずみ400%まで適用可能な復元力モデルを提案した。提案した復元力モデルは、せん断ひずみレベルによって変化する鉛プラグ入り積層ゴムのせん断履歴ループを、低ひずみから高ひずみに至るまで精度良く再現することができた。積層ゴムの軸方向特性については、力学モデル上下端の並列多軸ばね群に適用する応力度-ひずみ度関係により表現した。鉛プラグ入り積層ゴムのせん断加力試験結果に見られた、軸力の影響によるせん断剛性の低下や、座屈現象を表現することを目的に、直線の組合せによる応力度-ひずみ度関係を提案した。

第3章「鉛プラグ入り積層ゴムのせん断加力実験とシミュレーション解析」では、第2章において提案した解析モデルの妥当性を検証するため、鉛プラグ入り積層ゴムのせん断加力実験とそのシミュレーション解析を行った。積層ゴムは、せん断ひずみレベルにより履歴ループ形状が変化する。加えて、積層ゴムに作用する軸力の影響により、せん断剛性の低下や座屈現象を生じる。このような、せん断ひずみレベルと軸力の影響によるせん断履歴ループ形状の変化を把握するため、鉛プラグ入り積層ゴムの縮小試験体によるせん断加力実験を行った。実験は、一定軸力下におけるせ

せん断加力試験、せん断力と連動して軸力も変化する変動軸力下におけるせん断加力試験、及び角型積層ゴムの異なる二方向へのせん断加力試験を行った。一定軸力下のせん断加力試験結果では、高面圧時にせん断剛性の著しい低下と、荷重-変形関係が負勾配を示す座屈現象が確認された。変動軸力下のせん断加力試験においては、高ひずみ領域において、低面圧側ではハードニングを示し、高面圧側では座屈現象を示す非対称の履歴ループ形状が確認された。角型積層ゴムの異なる二方向へのせん断加力試験では、軸力が作用していない状態では加力方向の違いによる履歴ループ形状の違いは現れず、せん断ひずみ 400% に至るまで異方性がないことが確認された。しかし、軸力が作用している状態ではせん断ひずみ 400% のせん断履歴ループにおいて、加力方向の違いによりせん断履歴ループ形状に明確な違いが現れた。提案モデルを用いたシミュレーション解析では、一定軸力下、及び変動軸力下とも実験結果に見られた軸力の影響によるせん断履歴ループ形状の変化を捉えることができた。また、角型積層ゴムに対しても加力方向の違いによるせん断履歴ループの違いを精度良く再現することができた。

第 4 章「鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性の検討」では、せん断変形量と面圧の影響による鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性について検討を行った。積層ゴムの限界特性については、せん断変形量と面圧によるせん断特性変化を精度良く追跡できる解析手法が確立されていなかったため、理論的な座屈荷重を基にした限界式による座屈限界の検討に留まっているのが現状である。また、座屈に至るまでの限界特性を把握しようとする場合、実験を基にした検証では試験機や試験体の制約が生じる。本論では、実験では検証しきれない鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性評価を補うことを目的に、第 2 章において提案した解析モデルを用いて、鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性について解析的検討を行った。検討には、メーカーによって実施された一定軸力下での正負繰返しせん断加力試験の実験データがある、直径 600mm~1300mm の 8 種類の実大サイズの鉛プラグ入り積層ゴムを用いた。本論では、鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性の評価指標として、座屈点、切片剛性、及び等価剛性を取り上げた。座屈点については、ISO によって提案されている限界式と、実験データ及び提案モデルによる解析結果の座屈点を比較した。実験データのせん断履歴ループからは、高面圧状態におけるハードニングの影響の有無により 2 種類の座屈挙動が確認された。2 種類の座屈挙動のうち、高面圧状態においてハードニングの影響が見られない挙動については ISO による限界式、及び提案モデルともその座屈点を精度良く予測できたが、高面圧状態においてハードニングの影響が強い挙動については、ISO による限界式、及び提案モデルとも実験結果の座屈点を追跡できず、今後の検討が必要であることが明らかとなった。また、積層ゴムの限界特性は座屈発生の有無だけでは評価しきれないことから、切片剛性、及び等価剛性の変動について検討を行った。材料の線形性を仮定した理論解から求められる軸力の影響による水平剛性の低下率を比較対象として、切片剛性、及び等価剛性の変動について考察した。切片剛性は理論解による水平剛性の低下率よりもやや急勾配の低下率を示した。等価剛性は、せん断ひずみ 200% 以上において大変形領域における非線形性の影響から、理論解より急勾配の低下率を示した。このように、非線形材料特性と減衰機能を持つ鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性は、材料の線形性を仮定した理論解のみでは十分に評価しきれない。よって、提案モデルのように非線形材料特性を含めて、せん断変形量と面圧の影響による特性変化を表現可能な解析モデルによる検討が必要であることを示した。

第 5 章「結論」では、本論文の結論を述べるとともに、今後の課題と展望について言及した。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 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

鉛プラグ入り免震積層ゴムの極限挙動解析に関する研究

近年の長周期地震動を伴う巨大地震発生の懸念から、免震構造を含む長周期構造物に対しては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、より高いレベルの地震防災を必要としている。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挙動評価が必要とされ、それを可能にする解析手法が模索されている。本論文は、主要な免震装置のひとつである鉛プラグ入り積層ゴムを対象に、大変形領域を含むより広範囲に及ぶ挙動評価を可能にする新たな解析手法を提案しており、全5章で構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、まず近年の免震構造に対する社会的背景や、要求される機能について述べている。続いて、本論で対象とする免震積層ゴムに関する既往の研究を整理・概観し、本論で解決すべき課題について示している。

第2章では、積層ゴムの大変形時挙動の解析を目的に、新たな力学モデルを提案している。提案モデルは、非線形ばねとリジッドリンクの組合せにより構成される。力学モデルの上下端部には軸ばねを多数本並べた並列多軸ばね群を用いることにより、積層ゴムの大変形時挙動の評価で重要なせん断-軸力間の相互作用と地震時の変動軸力の影響を同時に考慮可能な力学モデルとしている。加えて、積層ゴムの材料特性を表現する非線形の復元力モデルの提案が行われている。せん断特性については、高減衰積層ゴムを対象に提案されている既往の復元力モデルを基に、鉛プラグ入り積層ゴムに対してせん断ひずみ400%まで適用可能な復元力モデルを提案している。また軸方向特性については、軸力の影響によるせん断剛性の低下や座屈現象といった大変形時のせん断挙動の表現を目的に、直線の組合せによる簡易な応力度-ひずみ度関係を提案している。

第3章では、第2章における提案モデルの妥当性の検証を目的とした鉛プラグ入り積層ゴムのせん断加力実験とそのシミュレーション解析について示している。実験は丸型断面、及び角型断面を持つ鉛プラグ入り積層ゴムの縮小試験体を対象としたせん断加力実験である。丸型断面の試験体に対しては、一定軸力、及び変動軸力と2種類の軸力条件を設定してせん断加力を実施し、軸力の影響によるせん断履歴ループ形状の変化を確認している。また、丸型と異なり方向性を有する角型断面の積層ゴムに対しては、異なる二方向へのせん断加力を実施し、加力方向によるせん断挙動の違いを確認している。これらの実験に対し、提案モデルを用いたシミュレーション解析を行い、実験

結果と解析結果の比較により提案モデルが軸力の影響によるせん断履歴ループ形状の変化、および角型積層ゴムにおける加力方向の違いによるせん断挙動の違いを再現可能であることを示している。

第4章では、せん断変形量と面圧の影響による鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性について検討を行っている。本論では、鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性の評価指標として、座屈点、切片剛性、及び等価剛性を取り上げている。座屈点については、実験データを基に鉛プラグ入り積層ゴムの座屈挙動の特徴を把握すると共に、ISOによって提案されている座屈限界式と、実験データ及び提案モデルによる解析結果の座屈点の比較を行っている。切片剛性、及び等価剛性については、材料の線形性を仮定した理論解から求められる軸力依存性の水平剛性低下率を比較対象として、その変動傾向について考察している。これらの検討より、非線形材料特性と減衰機能を持つ鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性は、提案モデルのように非線形材料特性を含めて、せん断変形量と面圧の影響による特性変化を表現可能な解析モデルによる検討が必要であると示している。

第5章では、免震建物の極限挙動解析を目的に積層ゴム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、続いて、本研究の今後の課題と展望について言及している。

以上より、著者は免震建物のより広範囲に及ぶ挙動評価を目的として、鉛プラグ入り積層ゴムを対象に新たな解析手法を提案し、その有用性を明らかにしており、今後の免震構造のさらなる発展に大きく寄与するものと考えられる。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。