

学 位 論 文 題 名

高減衰積層ゴムの水平2方向変形時の限界特性と力学挙動
の評価に関する研究(Ultimate Properties and Mechanical Behavior of High-damping Rubber
Bearings under Bi-directional Loading)

学位論文内容の要旨

地震災害に対する防災体制の充実・強化は我が国にとって大きな重要性を持ってきた。建築分野においては、建築物の耐震性の向上のため、耐震構造、制振構造、免震構造などの構造様式が採用されている。特に、建物を地震動から絶縁することによって地震災害を免れる免震構造については、その安全性の高さから社会的な注目を浴びている。本研究ではこれまでの免震構造の研究において新たに発生した課題に着目して以下のような目的を掲げることとした。

1. 免震用積層ゴムの水平2方向変形時の限界特性の予測手法の提案
2. 高減衰積層ゴムの水平2方向変形を考慮した解析モデルの提案
3. クリープ的挙動を伴う高減衰積層ゴムの応答予測手法の評価

第1章では、はじめに本研究の背景と目的について述べ、我が国において免震構造が普及するに至った背景と免震構造の普及に伴い新たに顕在化してきた課題について提示した。次に、免震構造の基本原理解や免震構造物を構成する主要部材であり本研究の対象でもある積層ゴムについて、その構造や一般に用いられているいくつかの種類の積層ゴムの特徴について述べた。最後に、本研究の位置づけを明確にする目的から、本研究に係る免震構造に関する既往の研究について概観した。

第2章では、積層ゴムの水平2方向変形試験の限界特性について検討した。初めに、高減衰積層ゴムのほか、天然ゴム系積層ゴムや鉛プラグ挿入型積層ゴムを用いた水平1方向および水平2方向変形実験を行い、積層ゴムの限界特性について把握した。実験においては、水平2方向変形時に積層ゴムに発生するねじれ変形を定量化する目的で試験体表面にマーキングを行い、画像解析にて試験時における試験体の状態について調査した。その結果、天然ゴム系積層ゴムや鉛プラグ挿入型積層ゴムは水平2方向変形時に高減衰積層ゴムには発生するねじれ変形があまり発生せず、限界ひずみも水平1方向変形時と比較して大きくは低下しないことを明らかとした。また、高減衰積層ゴムに発生する限界ひずみの低下は、水平1方向変形時の限界ひずみにねじれ変形により発生する最大せん断ひずみを考慮することで表現できることを示した。限界特性の低下現象が高減衰積層ゴムにのみに現れる原因については、高減衰ゴムの持つクリープ特性が関係している可能性について示した。次に、水平2方向変形時の限界特性の低下が特に顕著であった高減衰積層ゴムについて、積層ゴムの2次形状係数や、面圧、加力振動数による限界特性の低下現象への影響について実験的に調査した。その結果、水平2方向変形は積層ゴムの終局形態の1つである座屈現象には影響を与えず、むしろ座屈現象を抑制する効果があることを示した。また、加力振動数の増加とともに水平2方向変形時の限界ひずみが増加することを確認した。最後に、これらの実験評価結果から、水平2方向変形時の限界ひずみの低下量についての予測式の提案を行った。予測式は、ねじれ変形による最大せん断ひずみと2次形状係数の乗算値が楕円変形時の長軸方向の最大せん断ひずみを用いた特性関数にて表現できることに着目し、試験体の形状によらず水平2方向変形時の限界ひずみを算出できるものである。この予測式を用いて設定した終局特性線図と実験結果を比較した結果、終局特性線図は実

験結果を包括的に表現していることを確認した。

第3章では、著者らが既往の研究にて提案した変形履歴積分型の弾塑性構成則を基本式とした高減衰積層ゴムの水平2方向変形を考慮した復元力モデルの提案を行った。初めに、変形履歴積分型の弾塑性構成則についてその特徴を示した。次に、6自由度にて定義された変形履歴積分型の弾塑性構成則を水平2方向せん断成分のみに自由度を縮退させることで復元力モデルを導出した。また、高減衰積層ゴムを用いて、せん断ひずみ0.1～4.0の広いひずみ範囲における動的水平2方向変形試験を実施し、水平1方向及び2方向時の高減衰積層ゴムの復元力特性について評価した。その結果、せん断弾性係数については、1方向変形と楕円変形の結果で大きな差異はなかった。吸収エネルギーについては、1方向変形に比較して楕円変形の方が大きく、その差はせん断ひずみの増加と共に増加した。等価減衰定数については、楕円変形の方が大きくなった。最後に、提案モデルを用いた解析結果と実験結果を比較し、その妥当性について検証した。合わせて、有限要素モデルや既往の水平2方向変形に対応した復元力モデルとして、要素ばねに修正バイリニアモデルを用いた Multiple Shear Springs モデル (以下、MSS モデル) を用いた解析結果と実験結果の比較も実施した。その結果、提案モデルは、高減衰積層ゴムの復元力特性を高い精度で再現できることを確認した。また、本研究にて提案した復元力モデルを用いた解析結果と、提案モデルと同じ材料パラメータを用いた有限要素モデルによる解析結果を比較し、高い精度で一致することを確認した。このことは、積層ゴムの復元力特性は水平せん断変形による応答が支配的であり、水平せん断変形のみに自由度を縮約した提案モデルでも十分に精度が確保できることを示している。また、提案モデルと MSS モデルの解析結果を比較し、MSS モデルは提案モデルと比較して実験結果の再現性が低いことを確認した。これは、MSS モデルが水平2方向変形によるせん断応力への影響を十分に表現できないためであると考えられる。

第4章では、第3章にて提案した水平2方向変形を考慮しかつクリープ現象を表現できる高減衰積層ゴムの復元力モデルを用いて、高減衰積層ゴムの風応答時の特性の再現を試みた。初めに、風荷重を想定した動的加力試験及び風応答加力試験を実施し、提案モデルの風応答に対する妥当性を評価した。積層ゴムの温度上昇による影響を受けない加力条件の範囲であれば、提案モデルによる解析結果は実験結果とよく一致した。提案モデルによる解析結果における残留ひずみは実験結果と比較して若干小さめとなったが、これは提案モデルが積層ゴムの鉛直荷重による沈み込みの影響を無視しているためであると推測される。よって、使用範囲を限定すれば、提案モデルの妥当性を確保することが可能であると考えられる。次に、提案モデルを用いて、水平2方向同時入力による風応答解析を実施した。その結果、水平1方向入力時と比較して水平2方向入力時の方が最大ひずみが大きくなった。このような2方向変形時に1方向変形時よりも応答変形が大きくなる現象は地震応答でも見られており、免震建物の設計上考慮すべき点であると考えられる。

第5章では、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	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

高減衰積層ゴムの水平2方向変形時の限界特性と力学挙動 の評価に関する研究

(Ultimate Properties and Mechanical Behavior of High-damping Rubber Bearings under Bi-directional Loading)

地震国である日本にとって地震防災体制の整備は重要であり、南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生が懸念される中、その充実と強化が急務となっている。建築分野においては、耐震構造、制振構造、免震構造などを採用することで建築物の耐震性を向上させることができ、建築の耐震技術が地震防災対策の一環を担っている。特に、建物を地震動から絶縁することによって地震災害を免れる免震構造については、その安全性の高さから社会的に注目を浴びている。本研究ではこれまでの免震構造の研究において新たに見出された課題に着目して、免震用積層ゴムの水平2方向変形時の限界特性の予測手法の提案、高減衰積層ゴムの水平2方向変形を考慮した解析モデルの提案、クリープ的挙動を伴う高減衰積層ゴムの応答予測手法の評価の3点を目的と掲げている。

第1章では、初めに本研究の背景と目的について述べ、我が国において免震構造が普及するに至った背景と免震構造の普及に伴い新たに顕在化してきた課題について提示している。次に、免震構造の基本原理や免震構造物を構成する主要部材であり本研究の対象でもある積層ゴムについて、その構造や力学的特性について述べている。最後に、本研究の位置づけを明確にする目的から、本研究で対象とする免震構造に関して既往の研究について概観している。

第2章では、積層ゴムの水平2方向変形時の限界特性について検討している。初めに、高減衰積層ゴムのほか、天然ゴム系積層ゴムや鉛プラグ挿入型積層ゴムを用いた水平1方向及び水平2方向変形実験を行い、積層ゴムの限界特性について調査し、天然ゴム系積層ゴムや鉛プラグ挿入型積層ゴムは水平2方向変形時に高減衰積層ゴムには発生するねじれ変形があまり発生せず、限界ひずみも水平1方向変形時と比較して大きくは低下しないことを明らかにしている。また、高減衰積層ゴムに発生する限界ひずみの低下は、水平1方向変形時の限界ひずみにねじれ変形により発生する最大せん断ひずみを考慮することで表現できることや、水平2方向変形は、積層ゴムの終局形態の1つである座屈現象には影響

を与えず、むしろ座屈現象を抑制する効果があることを示している。最後に、水平 2 方向変形時の限界ひずみの低下量についての予測式の提案を行い、実験結果との比較からこの予測式の妥当性を確認している。

第 3 章では、変形履歴積分型の弾塑性構成則を基本式とした高減衰積層ゴムの水平 2 方向変形を考慮した復元力モデルを新たに提案している。有限要素への適用を意図し 6 自由度にて定義された変形履歴積分型の弾塑性構成則を水平 2 方向せん断成分のみに自由度を縮退させることによって、簡易に扱える復元力モデルを導出している。また、高減衰積層ゴムの動的水平 2 方向変形実験を実施し、水平 1 方向及び 2 方向変形時の高減衰積層ゴムの復元力特性について評価し、提案モデルを用いた解析結果と実験結果を比較することでモデルの妥当性を検証している。検証では、提案モデルが水平 2 方向変形に対応した既往の復元力モデルと比較して、高減衰積層ゴムの復元力特性を高い精度で再現できることを示している。

第 4 章では、第 3 章にて提案した水平 2 方向変形を考慮し、かつクリープ現象を表現できる復元力モデルを用いて、高減衰積層ゴムの風応答時の特性の再現を行っている。初めに、風荷重を想定した動的加力実験及び風応答加力実験を実施し、提案モデルの風応答に対する妥当性を評価している。積層ゴムの温度上昇による影響を受けない加力条件の範囲であれば、提案モデルによる解析結果は実験結果とよく一致する。次に、提案モデルを用いて水平 2 方向同時入力による風応答解析を実施し、水平 1 方向入力時と比較して水平 2 方向入力時の方が最大応答ひずみが大きくなることを見出している。2 方向変形時に 1 方向変形時よりも応答変形が大きくなる現象は地震応答でも見られており、免震建物の設計上考慮すべき点であることを主張している。

第 5 章では、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ている。

これを要するに、本論文は、免震構造における主要な構成要素である高減衰積層ゴムの限界特性を評価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。