

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420480

研究課題名(和文) 免震用積層ゴム支承の変形・最大変形依存性を考慮した拡張バイリニアモデル

研究課題名(英文) Extended hysteretic bilinear models for laminated rubber bearings

研究代表者

吉田 純司 (YOSHIDA, Junji)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：90345695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、既往のバイリニアモデルを拡張し、免震用積層ゴム支承が大変位時に示すハードニングや最大経験ひずみ依存性を精度よくかつ簡易にモデル化する手法を提案した。具体的には、バイリニアモデルを完全弾塑性バネと弾性バネに分離し、それぞれにせん断ひずみの関数を掛け合わせ、ゴムの準弾性構成モデルを1次元に縮退して弾性バネに導入した。次いで、この復元力モデルを2次元に拡張した水平2方向復元力モデルを提案した。最後に、1質点系モデルと、免震橋梁を簡易的に表す2質点系モデルとを用いて提案した復元力モデルの収束性と地震応答解析における精度を検討した。

研究成果の概要(英文)：Two hysteretic models for reproducing restoring forces of laminated rubber bearings are proposed. One is including only hardening effects in large deformation range and the other is modeling experienced shear strain dependency in addition to the hardening effect. Tangent modulus of those models are also derived. The key point of those models is that they are extended directly from bilinear hysteretic model, and the restoring forces of them could be computed easily by using the bilinear model. Then, those models are extended into 2D model with the aid of classical elasto-plastic theory. Finally, their accuracy in predicting seismic responses is evaluated. From the seismic response analysis, it is found that modeling of the hardening and the experienced shear strain dependency are important factors in order to accurately predict responses of the piers and bearings in base-isolation bridges

研究分野：耐震工学

キーワード：積層ゴム支承 復元力特性 バイリニアモデル 最大経験ひずみ依存性 ハードニング 水平2方向モデル

1. 研究開始当初の背景

1995年の兵庫県南部地震における社会基盤施設の甚大な被害を受け、鉛プラグ積層ゴム支承や高減衰積層ゴム支承などの積層ゴム支承を採用する免震構造物が増加している。免震用積層ゴム支承は水平方向に高い柔軟性と減衰性能を有していることから、構造物を長周期化し地震による慣性力を低減するとともに支承に生じる変位応答を抑えることが可能になる。このように免震構造物では、支承の動力学的性質を積極的に利用していることから、支承の復元力特性が構造物全体の地震時の応答に大きく影響することになる。従って構造物の応答を精度よく予測するためには積層ゴム支承の精緻な力学モデルが必要となる。

積層ゴム支承の復元力特性は、ゴムの材料レベルでの力学特性が強く反映されており、支承に生じる変形レベルや、過去に経験した変形量により変化することが知られている。また、建築免震用の支承などで硬度の低いゴムを利用する場合には、支承の復元力特性が温度や載荷速度により変化することも報告されている。既往の研究では、支承の載荷実験結果をベースに、これらの性質を近似する様々な復元力モデルが提案されている。最も広く利用されている復元力モデルは、バイリニア型の弾塑性モデル(以後、バイリニアモデルと呼ぶ)である。バイリニアモデルは、簡易で利用しやすい反面、上述した様々な依存性を無視した復元力モデルであり近似精度は低い。このことから精度の向上を目的として、支承の最大変位量によりバイリニアモデルのパラメータを変化させる手法が提案されているものの、最大変位の推定に繰り返し計算を要するという欠点を有している。

一方、高精度な復元力モデルとしては、弾塑性モデルをベースに、履歴ルールを改良するモデルや、パラメータを変位あるいは最大変位の関数とするモデルなどが知られている。また、粘弾性モデルと弾塑性モデルを組み合わせるモデルや、分数次導関数を用いた粘弾性モデルにより復元力を近似している事例もある。これらのモデルは、その適用範囲内においていずれも積層ゴム支承の復元力特性を高精度に近似可能であるが、複雑な履歴ルールを実装する、あるいは微分方程式を解く、などの手続きが含まれ、実務で免震構造物の動的解析などに利用するには困難が伴う。特に適用範囲が広く高精度なモデルほどパラメータ数が増大する点も大きな弊害になっている。加えて、モデルの接線剛性を提示している事例は希少であり、これらのモデルは、構

造物全体の動的解析に組み込むことが困難である場合が多い。

以上より、最小限のパラメータで支承の復元力特性の特徴を再現でき、かつ動的解析に利用しやすい復元力モデルの構築が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、バイリニアモデルを拡張し、積層ゴム支承の復元力特性が示す変形量および最大変形量への依存性を精度よく簡易に再現でき、かつ汎用構造解析ソフトに導入しやすい力学モデルの構築を目的とする。具体的には、橋梁用免震用積層ゴム支承として広く利用されている鉛プラグ入り積層ゴム支承および高減衰積層ゴム支承を対象として、

- ・ハードニングなど、変形量に依存する復元力特性を再現するためのハードニングモデル(以下、Hモデル)の提案、
 - ・Hモデルをさらに拡張し、最大変形量への依存性を導入したハードニングダメージモデル(以下、HDモデル)の提案、
 - ・提案した2つの復元力モデルの水平2方向の変形に対応する2次元モデルへの拡張、
 - ・水平1方向、水平2方向の復元力モデルの地震応答予測精度の検討、
- の順で実施していく。

3. 研究の方法

(1) Hモデルの構築

2つの復元力モデルのうち、積層ゴム支承が大変形した際に復元力に現れるハードニングを表すHモデルの構築を進める。ハードニングは、大変形領域において、剛性が硬化し、かつ履歴面積が増大することから、基礎として用いるバイリニアモデルを、剛性を表す要素と履歴面積を再現する要素に分離し、それぞれに変形量に依存する関数を導入して、ハードニングを再現することを考えている。加えて、これらの関数を導入した後のモデルの接線剛性を導出する。接線剛性についても、基になっているバイリニアモデルの接線剛性をそのまま利用可能な形にできるものと考えている。次に、提案したHモデルの地震応答予測性能について検証を行う。具体的には、Hモデルと、他2つの復元力モデルを、免震構造物の地震応答解析に導入し、過去の様々な地震記録に対する応答の予測精度を比較検討する。他の復元力モデルとして採用する1つ目は、従来から積層ゴム支承の標準的なモ

デルとして広く利用されているバイリニアモデルである。2 つ目は、研究代表者らがこれまでの研究で開発してきた高精度な復元力モデル（以下、高精度モデル）である。高精度モデルは、パラメータ数が 13 個と非常に多く、かつ複雑な微分方程式を解く必要があるという短所を有するものの、積層ゴム支承を用いたハイブリッド地震応答実験結果とよく一致することが既に証明されている。対象とする免震構造物は、質点が支承のみに支持されている簡易な 1 質点系モデルと鋼製橋脚を有する免震橋梁を想定した 2 質点系モデルを考えている。

(2) HD モデルの構築

上述した H モデルに更なる改良を加え、過去に経験した最大変位量に依存して剛性や履歴面積が低下していく性質（ゴムの Mullins 効果）を再現する HD モデルを構築する。具体的には、ゴムの 3 次元の構成則に利用されているダメージモデルを、1 次元に縮退して応用することを考えている。次いで、H モデルの場合と同様な方法により、橋梁用の主要な免震用積層ゴム支承についてパラメータを同定し、さらに地震応答予測精度について検討する。ここでは、特に HD モデルと、H モデルの応答解析結果を比較することで、最大変形量に依存する性質が免震構造物の応答予測に及ぼす影響について調べる。

(3) 水平 2 方向モデルの構築

提案した 2 つのモデルを拡張し、水平 2 方向の復元力特性の再現を試みる。本研究では、古典弾塑性論を参考に、モデルの水平 2 方向への拡張を試みる。1 方向のバイリニアモデルのコードをそのまま利用することは困難であると予測されるため、古典弾塑性論における完全弾塑性モデルを代用して、1 方向の場合と同一のパラメータの数および値が利用できることを目指す。また、この復元力モデルについても、免震構造物の動的応答解析での利用を想定して、時間積分法を併せて開発するとともに、それに整合した接線係数を導出する。

(4) モデルの地震応答予測性能の確認

最後に、提案した 2 つのモデルが、実地震時における免震構造物の地震応答を、実用に耐えうるレベルで再現できることを確認するため、鋼製橋脚を有する免震橋梁を模擬した振動実験を行う。具体的には、積層ゴム支承の模型を用い、支承の復元力特性のみを実験

から直接得てそれを用いて桁・橋脚の応答を数値計算で算出するハイブリッド実験を行う。このハイブリッド実験結果と、すべてモデルを用いた解析結果とを比較検討することにより、本モデルの実用レベルでの妥当性を検証できるものと考えている。

4. 研究成果

(1) 水平 1 方向復元力モデルの構築

本研究では、まず、最大経験ひずみ依存性、変形量依存性を考慮した水平 1 方向の復元力を再現するための H モデル、HD モデルを構築した。具体的には、既往のバイリニアモデルを拡張し、それらにひずみ依存性の関数と最大経験ひずみ依存性の関数を掛け合わせている。加えて、これらの復元力モデルの時間積分法と接線係数も併せて提示した。提案したモデルにより、様々な積層ゴム支承の実験結果を精度良く再現できることがわかった。また、今回導入した最大経験ひずみ依存性および変形量依存性は、いずれも積層ゴム支承を用いた免震橋梁の地震応答に比較的大きな影響を及ぼすことから、地震時の免震構造物の挙動を精緻に予測するためには、これらを共に考慮した復元力モデルを用いる必要があることがわかった。

(2) 水平 2 方向復元力モデルの定式化

次に、上述した 2 つの復元力モデルを、水平 2 方向に拡張した水平 2 方向復元力モデルを構築した。具体的には、まず、バイリニアモデルの代わりに、古典弾塑性論より水平 2 方向の弾塑性復元力モデルを導出した。次に、それをベースとして、水平 2 方向に対応した H モデル、HD モデルを導出した。加えて、これらのモデルの時間積分法を構築し、それと整合した接線係数も併せて導出している。

(3) 水平 2 方向復元力モデルの検証

最後に、研究代表者らが過去に行った積層ゴム支承の水平 2 方向の載荷実験結果を用いて、提案した水平 2 方向復元力モデルの精度の検証を行った。その結果、提案した復元力モデルで、実際の支承の挙動を再現できていない点がいくつかみられた。その原因として実験時の温度や最大経験ひずみの影響などが考えられる。そこで、支承の精緻な水平 2 方向載荷実験を再度実施するために、新たに動的 3 軸載荷装置を設計・製作した。現在は、実験のための支承を製作している段階であり、それが完成した後、再度、載荷実験を実施し、モデルの精度について検討するつもりである。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

吉田純司, 杉山俊幸: 耐震設計における動的解析のための免震用積層ゴム支承の拡張バイリニアモデル, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.2, pp.238-251, 2014. (査読有)

〔学会発表〕(計 1 件)

小泉和土, 吉田純司: 免震用積層ゴム支承の水平 2 方向復元力に対応した拡張バイリニアモデルの構築, 第 70 回年次学術講演会, 土木学会, CD-ROM, 2015.09.16. (岡山大学).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 純司 (YOSHIDA Junji)
山梨大学・大学院総合研究部・准教授
研究者番号: 90345695

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号: