

# 免震部材の多軸連成力学モデルの開発

菊地 優（北海道大学）

## 1. はじめに

免震構造に関する最新の知見によれば、減衰性能を有する免震部材では、水平 2 方向に同時に変形すると 1 方向よりも限界性能が低下する現象が確認されている<sup>1)</sup>。日本免震構造協会では、技術委員会の下に「水平 2 方向加力時の免震部材の特性と検証法」WG を設置して検討を行い、これまでに主として高減衰ゴム系積層ゴムの限界特性と応答特性に関する検討結果を公表してきた。

以上の背景を踏まえ、本研究では免震部材の 2 方向変形時の極限挙動を再現できる力学モデルの開発を目的に掲げた。巨大地震時における免震建物の過大な応答を対象とすると、免震部材の多軸連成挙動に対しては、水平 2 方向のみならず大変形時に顕著となる軸力変動の影響も無視できないと考えられる。そこで本研究で開発する力学モデルは、水平 2 方向変形と軸力の 3 軸連成効果を考慮できるものとした。

## 2. 力学モデルの構成

本研究で開発した力学モデル（並列軸ばねモデル）の概念を図1に示す。このモデルは、積層ゴムの引張・圧縮特性を表現するための軸ばね群と、中間部に位置する水平2方向連成ばねで構成される。上下端部軸ばね群と中間部水平2方向連成ばねとをリジッドリンクを介して接続することで、上下端部軸ばねの伸縮による断面全体の回転変形と中間部水平2方向連成ばねの傾きが相互に影響しあう。また、上下端部の軸ばね群には、積層ゴム断面をメッシュに分割した際の各断面積に対応する軸剛性と、圧縮と引張で非対称な復元力特性を与える。作用軸力に応じた軸ばね群の軸剛性を断面内で積分することにより、軸力に依存した曲げ剛性が自動的に評価される。これは、曲げと軸力を受けるRC部材の断面解析に用いられるファイバーモデルと同じコンセプトである。

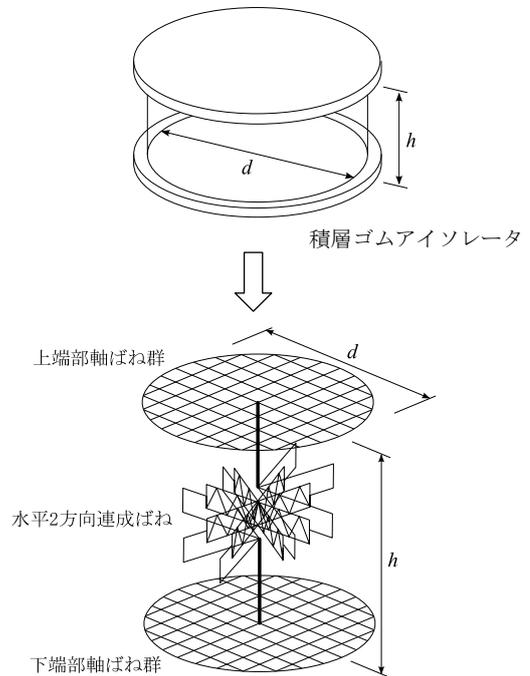


図1 並列軸ばねモデル

さらに、図2のような変形状態を考えて、中間部せん断ばねと上下端部軸ばねの非線形性、リジッドリンクと介して荷重が伝達されることで生じる付加曲げモーメントとばねの変形と傾きに起因する幾何学的非線形性を考慮することで、水平変形と鉛直力の相互作用が表現できる。

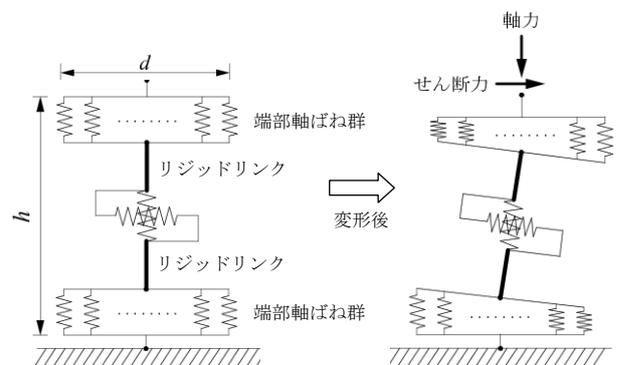


図2 力学モデルの変形状態

## 3. 水平 2 方向連成ばねの換装

図1では中間部に水平2方向連成ばねとして、MSS

モデルを配置しているが、上下節点の水平方向にそれぞれ2自由度を有している力学要素であれば、換装可能である。すなわち、並列軸ばねモデルをプラットフォームとして、免震部材の種類に応じた水平2方向連成モデルを適用することで、多様な3軸連成モデルが構築可能となる。冒頭に述べた日本免震構造協会での検討結果を踏まえると、高減衰ゴム系積層ゴムの水平2方向特性はMSSモデルでは十分に表現できず、それに代わるモデルとして山本モデル<sup>1)</sup>や加藤モデル<sup>2)</sup>が提案されている。鉛プラグ入り積層ゴムに関しては、水平2方向の連成効果が少なくMSSモデルが適用可能なようである。弾性すべり支承では摩擦面の水平1方向特性は完全剛塑性となるので塑性論モデルが適用可能と考える。以上のように、並列軸ばねモデルは免震部材の種類に応じて水平2方向連成モデルの使い分けができるという汎用性を有している。

#### 4. 内部鋼板の拘束効果による鉛直剛性分布

積層ゴムの高い鉛直剛性は、鉛直力を受けたゴムの外側への変形を内部鋼板が拘束することで発揮される。本モデルでは、上下端部の軸ばね群の剛性評価に、内部鋼板によるゴムの拘束効果を考

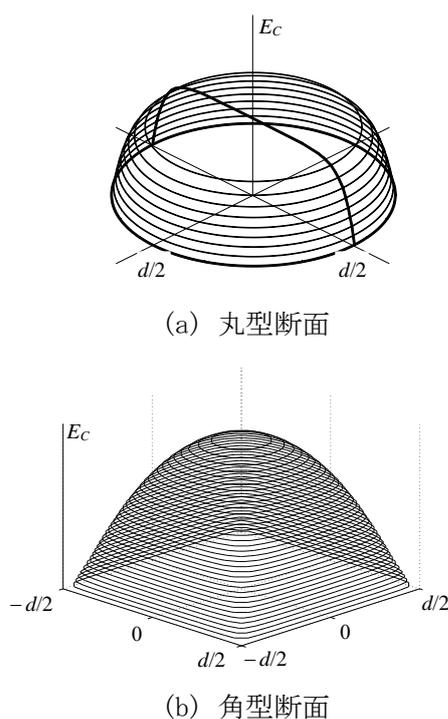


図3 ゴムシートの縦弾性係数分布

慮できる。例えば、鋼板によって変形が拘束されたゴムシートでは、ゴムの体積変化を考慮した場合の縦弾性係数  $E_c$  の支配方程式の解は、丸型断面では Bessel 関数、角型断面では 2 重フーリエ級数で表現され、それらの分布形状は図 3 のようになる<sup>3)</sup>。軸ばねの剛性分布は、積層ゴム断面の曲げ特性および P- $\Delta$  効果に影響を及ぼし、最終的には解析精度を左右することになる。本モデルでは、従来から用いられている一様分布の剛性評価に加え、図 3 のように断面形状に応じて異なる剛性分布も考慮することが可能である。

#### 5. まとめ

本研究では、積層ゴムの軸力と水平 2 方向変形が相互に影響を及ぼす 3 軸連成効果を表現できる力学モデルを新たに開発した。これまでに本モデルを高減衰積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムに適用し、3 軸連成効果が顕著となるような高軸力・大変形状態における極限挙動を良好に再現することができた。解析結果については今年度発表予定の文献<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>を参照されたい。今後、本モデルを地震応答解析に適用し、長周期地震動下で過大な応答を生じる場合の免震建物の地震時挙動について検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 山本ほか:高減衰積層ゴム支承の水平2方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第638号, pp. 639-645, 2009年4月
- 2) 加藤ほか:高減衰積層ゴムの変形履歴積分型復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第667号, pp. 1721-1728, 2011年9月
- 3) J. M. Kelly, Earthquake-resistant Design with Rubber (2<sup>nd</sup> edition), Springer, London (1997)
- 4) 藤原・菊地ほか:水平2方向大変形・高軸力下における高減衰積層ゴムの力学挙動解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 2012年
- 5) M. Kikuchi et al., Simulation analysis for the ultimate behavior of full-scale lead-rubber seismic isolation bearings, 15WCEE, 2012.