



## 第 104 話 免震層の履歴特性

今回は、免震層で用いられる履歴特性についてお話しする。履歴特性は解析目的に合わせて使用することになるが、そのためにも、各履歴特性について理解する必要がある。

高減衰の復元力特性は、バイリニアモデルで近似することができる。しかしながら、高減衰の履歴曲線は図 1 のようにひずみ依存性を示す。履歴ループはバイリニア型であるが、ループ形状を規定する 3 つのパラメータ (初期剛性  $K_1$ 、降伏後剛性  $K_2$ 、降伏せん断力  $Q_y$ ) の値を、実験から得られた履歴ループ面積と等価になるように次式で決定する。

$$K_1 = \frac{2u - (1-u)h_{eq}}{2u - \pi h_{eq}} K_{eq}; \quad K_2 = (1-u)K_{eq}; \quad Q_y = \frac{uQ_m K_1}{K_1 - K_2}$$

ここで、 $K_{eq}$  は等価剛性、 $h_{eq}$  は等価粘性減衰定数、 $u$  は荷重切片比である。等価剛性  $K_{eq}$  は、ゴムの等価せん断弾性率  $G_{eq}$ 、積層ゴムの断面積  $A_r$ 、積層ゴムのゴム層厚  $H_r$  より、 $K_{eq} = G_{eq} A_r / H_r$  で評価される。通常、 $G_{eq}, h_{eq}, u$  はせん断ひずみ  $\gamma = \delta / H_r$  の関数として表現され、ループが第 2 勾配から戻る際 (除荷となる時点) に上の 3 つのパラメータが再計算される。通常的设计で想定するひずみレベル (せん断ひずみ 250%程度) であれば、修正バイリニアモデルで問題ないが、それ以上のひずみレベルであるとハードニングや特異な履歴ループを表現できなくなる。

立体解析を行う場合、2 方向の免震モデルが必要となる。しかも、大変形・大ひずみとなるため、2 方向の復元力特性は互いに相関する。そこで、立体解析では MSS (Multiple Shear Springs) モデルが多用される。MSS モデルは同一の非線形せん断ばねを等間隔に配置した仮想的なモデルであり、円周上に置かれたスプリングは円周面からの法線方向の変位に対して挙動する。1 方向のせん断ばねを定義することによって、2 方向の相互作用を考慮した連成ばねモデルが設定可能となる。各履歴モデルと MSS モデルを併用することによって、免震立体骨組が解析できることになる。円周方向に配置されたばねは、法線方向の変位とせん断力で評価される。

免震層の積層ゴムのせん断ひずみが 250%程度以下であると、修正バイリニアモデルでも問題なく表現できるが、それ以上の変形が生じるとハードニングやそれに続く特異な履歴ループを表現できなくなる。そこで、大変形時に対し、菊池と山本及び他の研究者は各々独自に新しいモデル

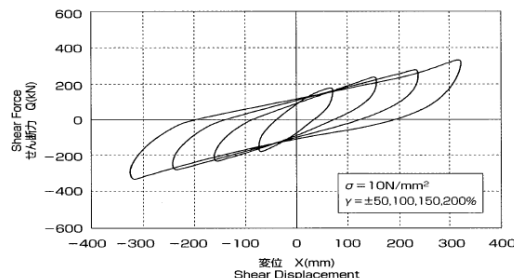


図 1 高減衰の積層ゴムの履歴曲線

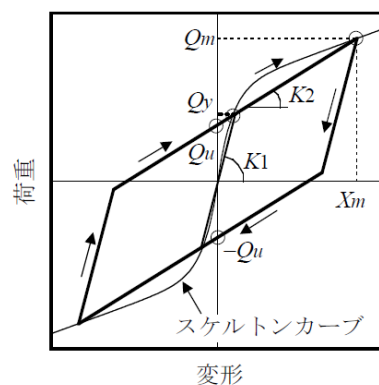
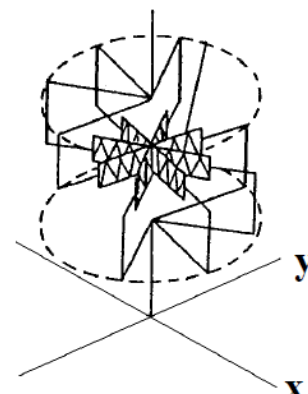
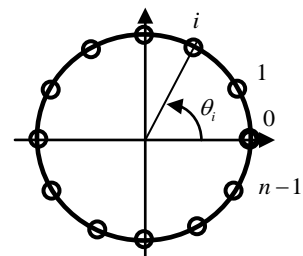


図 2 修正バイリニア特性



(a) MSS モデルの概念図



(b) MSS モデルの配置図

図 3 MSS モデル

を提案している。菊池モデルの復元力特性を図 4 に示す。試験体は高減衰ゴム系で、面圧は  $13\text{MPa}$  の下にせん断ひずみを 50% から 400% まで正負繰り返し加力して履歴ループを求めている。同図には、実験結果と菊池モデルの復元力特性が示されており、ひずみレベル 400% 程度まで十分精度良く追跡されている。

長周期地震動や想定を超える大きな地震動が入力すると、免震ゴムが終局状態に近い応答を示すようになる。そのため大変形状態でも精度良く表現できるモデルが必要となる。さらに積層ゴムには、軸力に依存してせん断特性が変化する性質がある。終局状態で面圧が小さいと引張側でゴムが破断し、同じく面圧が大きいと圧縮側で座屈を生じる。このような特異な現象は積層ゴムの 2 次形状が小さい場合や、軸力の変動が大きい場合に生じる。

免震層の終局挙動を表すために、立体的に評価するマクロモデルが多数提案されている。軸力とせん断力の相互作用を考慮できる Koh-Kelly モデルは、その後のマクロモデルの基本となっており、多くのマクロモデルが同モデルの拡張版となっている。このモデルは、積層モデルの基部に回転ばねとせん断ばねを設け、積層ゴムの高さを剛体要素で表すモデルより拡張され、図 5 に示すように回転ばねを基部だけでなく上下端に設けている。Koh-Kelly モデルは、上下端の回転ばねと剛体の回転によってせん断ばねを傾かせ、また、 $P-\Delta$  効果によって発生する曲げモーメントを考慮することで軸力とせん断力との相互作用を表す。さらに、菊池らはこのような幾何学的非線形性と共に回転ばねとせん断ばねに材料非線形性を与えることで、免震ゴムの終局状態、ハードニングや座屈現象が表現できることを示している。

平面骨組あるいは立体骨組の柱直下に各々免震装置を設置し、時刻歴応答解析を実施すると、転倒モーメントに関連する付加軸力が柱に発生し、軸力が変動する。このような変動軸力に対し、高岡は、Koh-Kelly モデルに軸方向ばねを付加した修正マクロモデルを提案している。このモデルは、非線形の軸方向ばねを設置し、回転ばねの材料非線形特性を変化させて解析する。

Koh-Kelly モデルでは、変動する軸力に応じた積層ゴム端部の非線形性を扱うことができない。そこで、菊池らはモデル端部の回転ばねを 3 次元並列多軸ばねに置き換え、変動する軸力と曲げの相互作用を表すモデルを提案している。このモデルは、柱の解析モデルとして使用されている中央にせん断ばねを有する両端マルチスプリングモデルと類似する。

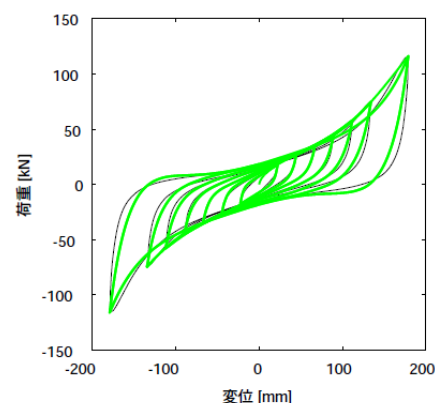


図 4 菊池モデルによる履歴特性

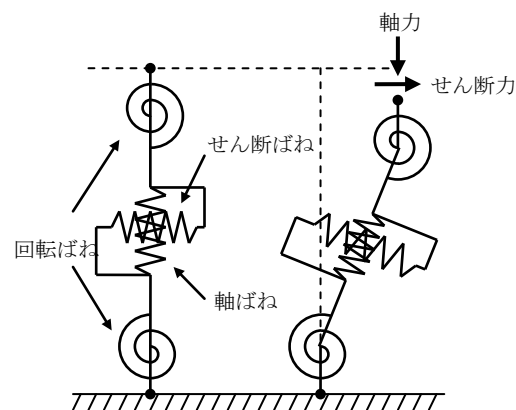


図 5 Koh-Kelly モデル