

立命館大学大学院 学生員○炭村 透  
立命館大学理工学部 正会員 伊津野和行

**1. はじめに** 現在、地震時水平力分散支承の設計にあたっては、等価な線形ばねに置き換えて考えることが多い。しかし、ゴムにはひずみ硬化特性(ハードニングと呼ばれる)等の様々な複雑な現象があり、詳細な検討の際にはこれらの現象を考慮する必要があると考えられる。本研究は、積層ゴムのせん断載荷実験に基づいてハードニング等を考慮した履歴復元力特性のモデル化を目指したものである。

**2. せん断載荷実験** 実験は3種類の供試体について行われた。表-1にそれぞれの種別と静的せん断弾性係数の設計値を、図-1に実験に用いた供試体を示す。ゴム材の種別は天然ゴムである。面圧はそれぞれ  $1.5\text{N/mm}^2$ (軸力  $540\text{kN}$ )、 $6.0\text{N/mm}^2$ ( $2160\text{kN}$ )の2通りについて、速度は 4, 8,  $12\text{mm/sec}$  の3通りで行われた。変形量はゴム層厚の 70, 100, 150, 175, 200, 250%をそれぞれ繰り返し載荷したもの、及び図-2に示した変形パターンに基づいて軸力  $6.0\text{N/mm}^2$ 、速度  $8\text{mm/sec}$  のもとで載荷させたものである。ただし、試験装置の都合で面圧が  $1.5\text{N/mm}^2$  の時は 200%以上の実験は行われなかった。また、ゴムにはそれまでに経験したひずみ量によって剛性等の特性が変化するため、実験は供試体に一度 250%以上の変形を与えた後に行われた。

**3. 実験結果**

**①履歴曲線の特徴** 図-3に供試体2を用いた実験結果の一例を示す。この履歴曲線は、70, 100, 150, 175, 200, 250%について、一般的に履歴曲線が安定するといわれる3回目の繰り返し載荷データを1つのグラフで表示したものである。この図より、せん断変形率が 150%(約 140mm)付近までは履歴曲線はほぼ線形的に増加していくことがわかる。しかし、それ以上の変形を受けるとハードニングの影響により逆S字を描いていくことが確認できる。

また、履歴曲線には一度除荷してから再び載荷する前に除荷を始めた点を目指す傾向が見られた。図-4に供試体2におけるケース3の実験結果の一部分を示す。この図は 100%→50%→150%の順に載荷した部分であるが、100%から 50%まで除荷した後に再載荷した履歴曲線は元の 100%の点を目指して進んでいるのがわかる。

**②速度依存性** 図-5に供試体1の面圧  $6.0\text{N/mm}^2$  における等価剛性、等価減衰定数について、せん断変形率 70, 100, 175%での値を 4, 8,  $12\text{mm/sec}$  の各速度について示す。この図より、等価剛性には速度によらずほぼ一定の値を示していることがわかる。等価減衰定数は、速度が大きくなるにつれて若干値が大きくなる傾向が見られるが、差はわずかで

表-1 供試体の設計値

	静的せん断弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
供試体1	0.78
供試体2	0.98
供試体3	1.18

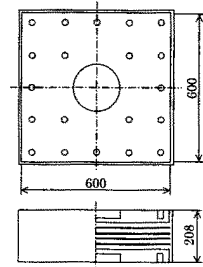


図-1 実験に用いた供試体

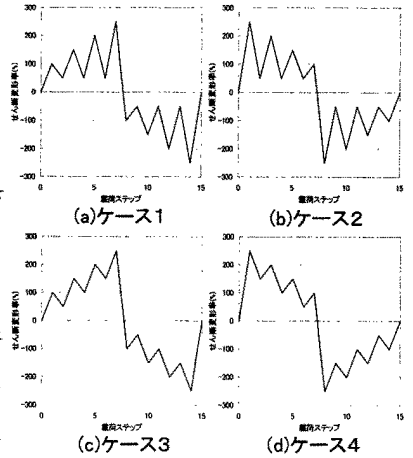


図-2 変形パターン

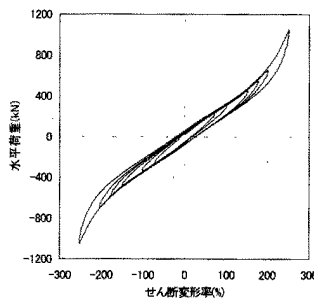


図-3 供試体2の実験結果

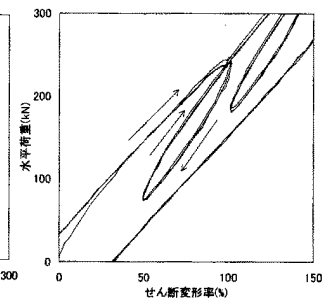


図-4 供試体2ケース3の実験結果(一部)

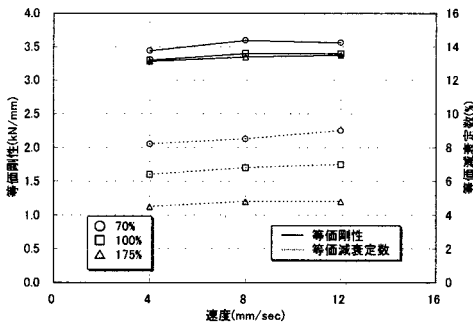


図-5 速度依存性

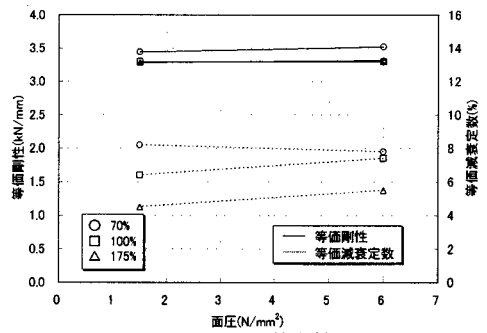


図-6 面圧依存性

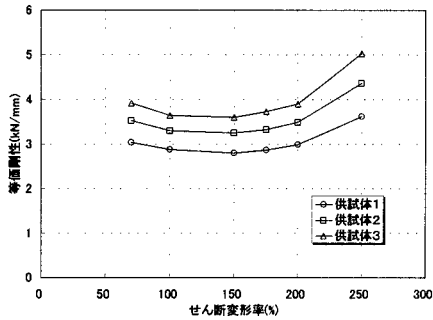


図-7 ハードニング状況

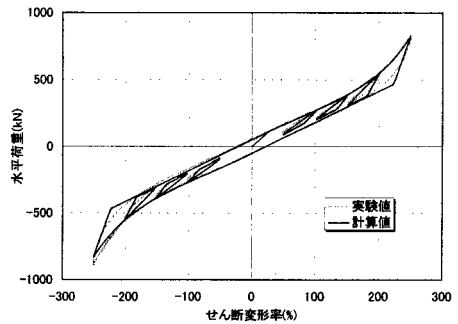


図-8 実験値と計算値との比較

あり 10%以内である。したがって、このゴム支承の履歴復元力特性には、本実験範囲の速度では影響がほとんどないと考えられる。

**③面圧依存性** 図-6 に供試体2の速度 4mm/sec における等価剛性、等価減衰定数について、せん断変形率 70,100,175%での値を 1.5, 6.0N/mm<sup>2</sup>の各面圧について示す。この図では、等価剛性に軸力による依存性はほとんどなくほぼ一定の値を示している。また、等価減衰定数は、若干の変動が見られるが、これも差はわずかであり20%以内である。したがって、このゴム支承の履歴復元力特性には、本実験範囲の面圧による影響もほとんどないと考えられる。

**④ハードニング** 図-7 に面圧 6.0N/mm<sup>2</sup>、速度 4mm/sec における各供試体の等価剛性とせん断変形率の関係を示す。変形率が 150%を越えるとハードニングによる剛性の上昇がみられる。本供試体では、免震支承の有効設計ひずみである 250%変形時の等価剛性は、供試体1で設計値より最大で 23%、供試体2で 18.4%、供試体3で 14.4%高くなっている。

**4. モデル化** 図-8 に供試体2のケース3についてのモデルによる計算値と実験値との比較を示す。このモデルは、完全弾塑性モデルを改良したものに線形なばねを付加したものである。具体的には、完全弾塑性モデルの降伏荷重にひずみ依存性を付加してハードニングを表現し、繰り返し载荷にも対応できるようにするために、除荷後に再载荷した場合最大点を目指すようにした。また、初期勾配にもひずみ依存性を考慮することにより、ハードニング後の履歴減衰を考慮した。このモデルにより実験結果を比較的良好に再現できているのがわかる。

**5. まとめ** 本研究では、せん断試験に基づいて積層ゴムの履歴復元力特性のモデル化について検討した結果、以下のようことがわかった。

- ①本供試体の履歴復元力特性には、速度や面圧による差異がほとんど見られない。したがって、速度や軸力を考えずにモデルを構築することができると考えられる。
- ②いずれの供試体においてもせん断変形率が 150%付近からハードニングが始まり、250%付近では設計値より 15~25%ほど剛性が高くなる。
- ③完全弾塑性モデルを改良したものに線形なばねを付加したモデルによって、実験結果を比較的良好に再現することができる。

なお、実験では(株)ビービーエムにお世話になった。記して謝意を表す。