鉛プラグ内蔵型積層ゴムの履歴復元力特性と 破断限界に関する実験的研究* (上下面ボルト固定の場合)

藤田 隆 史^{*1}, 池 永 雅 良^{*2}, 下 田 郁 夫^{*2}

Experimental Study of Hysteretic Restoring Force Characteristics and Breaking Conditions of Lead-Rubber Bearing (The Case of Bolt-Type Connection)

Takafumi FUJITA, Masayoshi IKENAGA and Ikuo SHIMODA

This paper describes static test results of lead-rubber bearings using bolts for connection to the isolated superstructure and the foundation. The bearings used for the tests were 0.1- and 0.27-scale models of a 4 900 kN rated load bearing which was designed for preliminary study of the seismic isolation bearings for nuclear facilities. The fundamental tests revealed various properties of the horizontal stiffness and damping obtained from the hysteretic restoring force loops. The repeated shear deformation tests showed that the bearings could keep their integrity through the 80-cycle repetition tests under a $\pm 227\%$ shear strain amplitude, and that the bearings had the fatigue resistance even against the 80-cycle repetition tests under a $\pm 445\%$ shear strain amplitude. The breaking tests by shear and compression for the bearings with and without the lead plug showed that the lead plug scarcely affected the breaking conditions of the bearings, and that the breaking shear strains were 518~550 %, corresponding to 1.14~1.21 m horizontal displacements in full size.

Key Words: Isolation, Seismic Motion, Seismic Isolation, Lead-Rubber Bearing, Hysteretic Damping, Breaking Test, Repeated Deformation Test

1. ま え が き

積層ゴムの中心に鉛の円柱を埋め込んだ鉛プラグ内蔵型積層ゴムは、ニュージーランドで開発・実用化されたダンパー体形の免震用積層ゴムである⁽¹⁾。我国やアメリカでも実用化されており、高減衰積層ゴムと並んで標準的な建物用免震装置になっている。

ところで、積層ゴムを基礎と建物へ取付ける方法として、積層ゴムの上下面に取付けたフランジをボルトで固定するボルト固定方式と、積層ゴムの上下面に設けたほぞ穴にダウエルピンを挿入して水平方向だけを固定するダウエル方式が用いられている。我国ではボルト固定方式が多く使用されているが、アメリカやニュージーランドではダウエル方式が用いられている。ただし、鉛プラグ内蔵型積層ゴムの場合、我国でも、ダウエル方式が多く用いられてきた。

両方式には一長一短があるが、原子力施設の免震では、ボルト固定方式の採用が予想される。例えば、1987年度から(財)電力中央研究所が中心となって高速増殖

炉プラント免震システムの確証試験が実施されており、3種類の積層ゴム(低減衰積層ゴム、鉛プラグ内蔵型積層ゴム、高減衰積層ゴム)についての大規模な信頼性実証試験が進行中であるが、すべてボルト固定方式が対象となっている⁽²⁾。また、アメリカにおいても、原子力用にはボルト固定方式が検討されようとしている。

しかしながら、ボルト固定方式の鉛プラグ内蔵型積層ゴムについての研究は非常に少なく⁽³⁾、特に、鉛プラグが積層ゴム単独の場合の限界変形能力にどのような影響を与えるのか、また、その近傍で復元力特性はどのようなになるのかなどは、従来、全く不明であった⁽⁴⁾。そこで、本研究では、ボルト固定方式の鉛プラグ内蔵型積層ゴムについて、原子力施設免震用積層ゴムを試設計し、その縮尺モデルを用いた静的加力実験により、基本的な履歴復元力特性だけでなく、繰返し変形に対する耐久性や破断限界などを研究した。本論文はその結果について述べたものである。

2. 供 試 体

図1は、本研究で原子力施設免震用に試設計した鉛プラグ内蔵型積層ゴムであり、設計値として、定格搭載質量 500 t に対して水平 0.5 Hz、鉛直 20 Hz の固有

* 原稿受付 平成2年4月27日。

^{*1} 正員、東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

^{*2} 正員、オイレス工業(株) (〒252 藤沢市桐原町8)。

振動数を与える剛性、水平復元力に荷重幅 ± 210 kN の履歴ループを与える弾塑性減衰、0.5 m の許容水平変位(水平復元力に顕著なハードニングが生じない変位)、1 m の破断水平変位を持つように設計されたものである。図2は縮尺比約0.27の縮尺モデル、図3は縮尺比0.1の縮尺モデルであり、前者は主として許容水平変位までの履歴復元力特性を調べる実験に、後者はそれ以上の大変位での履歴復元力特性、繰返し変形に対する耐久性、破断限界などを調べる実験に用いられた供試体である。

3. 実験装置および実験方法

実験装置を図4に示す。本装置は、供試体に鉛直荷重と同時に水平せん断変形を与えるため、供試体の上フランジの取付け板がローラによって水平方向に低摩擦で移動できる構造となっている。なお、鉛直荷重用には荷重容量1960 kNの油圧アクチュエータが、水平変位用には荷重容量196 kN、ストローク ± 0.2 mの油圧アクチュエータが用いられた。

履歴復元力特性を調べる実験では、0.27縮尺モデル2個と0.1縮尺モデル6個、および、比較のためにそ

れから鉛プラグを取り除いたモデルを供試体として用い、実大モデルと面圧が等しくなる鉛直荷重(0.27縮尺モデルでは363 kN、0.1縮尺モデルでは49 kN)を定格荷重として実験を行った。また、種々の条件下での加力を4サイクル繰返し、3サイクルめの履歴ループから特性値を求めた。

繰返し変形に対する耐久性を調べる実験では、0.27縮尺モデル1個と0.1縮尺モデル3個を供試体として用い、各回4サイクルの連続加力を10 min間程度の休止をはさんで20回(合計80サイクル)繰返す実験を行った。

破断限界を調べる実験では、0.1縮尺モデル4個とその鉛プラグのないモデル2個を供試体として用い、破断に至るまで一気にせん断変形を与える実験を行った。

4. 履歴復元力特性

4.1 水平および鉛直復元力特性の概要

4.1.1 水平復元力特性 図5は、0.27縮尺モデルの鉛入り積層ゴムと鉛なし積層ゴムの、水平復元力の履歴曲線を重ねて示したものである。せん断ひずみ

図1 50トン用鉛プラグ内蔵型積層ゴム

図3 0.1縮尺モデル

図2 0.27縮尺モデル

図4 二軸加力試験装置

振幅 $\pm 227\%$ は実大モデルの変位振幅で $\pm 0.5\text{ m}$ に、 $\pm 114\%$ は $\pm 0.25\text{ m}$ に相当する。このせん断ひずみ範囲では積層ゴムだけの復元力はほぼ線形である。鉛入り積層ゴムの復元力は鉛なし積層ゴムの復元力に鉛プラグのせん断変形による弾塑性履歴が加わった形となっている。

本論文では、鉛入り積層ゴムの水平剛性を、履歴曲線の原点と変位(または荷重)最大点を結んだ直線の傾き(等価剛性)と、履歴曲線の荷重軸切片と最大荷重点を結んだ直線の傾き(降伏後剛性)の二つの剛性によって評価している。また、水平履歴減衰については、履歴曲線が水平変位の全域でほぼ平行であることから、荷重軸切片を履歴減衰の代表値として用いている。

4.1.2 鉛直復元力特性 図6に0.27縮尺モデルの鉛入り積層ゴムの鉛直復元力特性を示す。この特性は、定格荷重の363 kNを載荷し、その1/2の $\pm 181\text{ kN}$ の荷重振幅で4サイクルの静的加力を行った場合の結果である。鉛直復元力は鉛直変位の増加につれて剛性が増加するハードニング特性を示す。しかし、水

図5 水平履歴復元力特性

図6 鉛直復元力特性

平の場合のような顕著な履歴特性は見られない。図6の復元力特性から得られた鉛直剛性は 2.08 GN/m で、これを実大モデルの定格質量に対する鉛直固有振動数に換算すると 19.4 Hz となる。

4.2 水平剛性の振幅依存性と鉛直荷重依存性

4.2.1 振幅依存性 水平剛性の振幅依存性を図7, 8に示す。小振幅域ではソフトニング特性、大振幅域ではハードニング特性を持っている。ただし、図7では、降伏後剛性の代わりにそこから求めた見かけの降伏後横弾性係数 G_{py} とせん断ひずみ振幅の関係を、図8では、等価剛性の代わりにそこから求めた見かけの等価横弾性係数 G_{eff} とせん断ひずみ振幅の関係を示している。また、両図とも、縦軸には実大モデルの定格質量に対する水平固有振動数を、横軸には水平変位振幅が併記されている。

図7, 8において、0.1縮尺モデル(鉛入り積層ゴムと鉛なし積層ゴム)の実線で示された結果は、ひずみ振幅を $\pm 50\%$ 、 $\pm 136\%$ 、 $\pm 227\%$ 、 $\pm 341\%$ 、 $\pm 455\%$ まで増加させ、その後は逆に $\pm 227\%$ 、 $\pm 136\%$ 、 $\pm 50\%$ と減少させた場合の結果である。また、破線で示された0.1縮尺モデルの結果および実線で示された0.27縮尺モデルの結果は、 $\pm 227\%$ で折り返した場合の結果である。

鉛入り積層ゴムの水平剛性を鉛なし積層ゴムのそれ

図7 降伏後剛性のせん断ひずみ依存性

図8 等価剛性せん断ひずみ依存性

と比較すると、ひずみ振幅 $\pm 50\%$ においては、降伏後横弾性係数 G_{pv} で 10% 程度、等価横弾性係数 G_{eff} で 30% 程度大きくなるが、ひずみ振幅が大きくなるにつれてその差は小さくなる。

ひずみ振幅が $\pm 341\% \sim \pm 455\%$ に達するとゴムのハードニング特性のために水平剛性が増加する。ただし、このハードニングは、後述の図 16 に示すように、1 サイクルめに顕著に現れ、2 サイクルめ以降は緩和する。これは加硫ゴム材特有の性質が現れたためであるが、その結果、 $\pm 341\% \sim \pm 455\%$ のひずみ振幅を経験した後は $\pm 227\%$ 以下のひずみ振幅でも初期に比べて水平剛性が 20% 近く低下する。この現象は復元力が線形領域にある $\pm 227\%$ 以下のひずみ振幅では現れず、水平変形の経歴による変化は極めて小さい。

4.2.2 鉛直荷重依存性 降伏後横弾性係数 G_{pv} の鉛直荷重依存性を図 9 に示す。これは、 0.1 縮尺モデルでの、定格荷重の 50% , 100% , 150% , 200% の荷重条件による試験結果である。 G_{pv} の鉛直荷重依存性はきわめて小さい。 G_{eff} についても同様である。一般に鉛直荷重の増加によって水平剛性は低下するが、本供試体のように設計面圧が 2.44 MPa と低く、直径/高さの比が 7.3 と大きい積層ゴムでは、鉛直荷重の影響は小さくなる。

図 9 降伏後剛性の鉛直荷重依存性

図 10 セン断応力特性値のせん断ひずみ依存性

4.3 水平履歴減衰の振幅依存性と鉛直荷重依存性

4.3.1 振幅依存性 図 10 に鉛入り積層ゴムの履歴曲線の荷重軸切片から求めた、見かけの鉛プラグのせん断応力特性 σ_0 とひずみ振幅の関係を、また、図 11 には、鉛入り積層ゴムの荷重軸切片から鉛なし積層ゴムのそれを差し引いた、鉛プラグのみのせん断応力特性値 σ_d とひずみ振幅の関係を示す。両図とも、縦軸には実大モデルでの荷重軸切片が、横軸には水平変位振幅が併記されている。

σ_0 はひずみ振幅が大きくなるに従って大きくなる傾向があるが、 σ_d はほぼ一定である。 σ_0 についての傾向は、鉛のせん断応力特性値が上昇するためではなく、ゴムの履歴が大きくなるためである。

4.3.2 鉛直荷重依存性 σ_0 の鉛直荷重依存性を図 12 に示す。定格荷重の 0.5 倍 ~ 2 倍の範囲で σ_0 は一定であり、鉛直荷重依存性は見られない。 σ_d についても同様である。

5. 繰返し変形に対する耐久性

1 個の 0.27 縮尺モデルでは $\pm 0.3 \text{ m}$ 相当 (せん断ひずみ $\pm 136\%$) の変形を、3 個の 0.1 縮尺モデルでは ± 0.3 , ± 0.5 , $\pm 1 \text{ m}$ 相当 (せん断ひずみ ± 136 , ± 227 , $\pm 455\%$) の変形を 4 サイクルずつ 10 min 間の

図 11 鉛だけのせん断応力特性値のせん断ひずみ依存性

図 12 セン断応力特性値の鉛直荷重依存性

休止時間を置いて 20 回まで合計 80 サイクルの繰返し試験を行った。図 13 に 0.1 縮尺モデルの ± 0.5 m 相当変形での σ_0 , G_{py} の変化の様子を、図 14 に 1 回めの 4 サイクルと 20 回めの 4 サイクルの履歴曲線を示す。20 回までは水平剛性、水平減衰ともにほぼ一定で、履歴

図 13 繰返し変形による特性の変化
(せん断ひずみ $\pm 227\%$ の場合)

図 14 繰返し変形による履歴曲線の変化
(せん断ひずみ $\pm 227\%$ の場合)

図 15 繰返し変形による特性の変化
(せん断ひずみ $\pm 455\%$ の場合)

曲線も 1 回めと 20 回めでは重なり合っていて ± 0.5 m 変形では安定した履歴復元力特性を示す。

0.1 縮尺モデルで行った ± 1 m 相当の試験結果を図 15, 16 に示す。図 15 において、 σ_0 は 7 回め以降から低下し始め、20 回めでは 1 回めの 73 % になっている。 G_{py} にも低下傾向が見られるが、 σ_0 と違って繰返し初期で低下が大きく、1 回めに対し 2 回めは 87 %、20 回めは 70 % に低下している。このように ± 1 m 相当の変形では減衰や剛性に低下が見られるが、 ± 1 m 相当の変形を 80 サイクル繰返しても破壊しなかったことのほうがより重要な結果であると考えられる。

6. 破断限界

図 17 は定格荷重下で鉛のない場合のせん断破断実験結果を、図 18 は定格荷重下で鉛入りの場合の破断実験結果を、また、図 19 は定格荷重の 2 倍の荷重下での鉛入りの場合の破断実験結果を示している。各実験

図 16 繰返し変形による履歴曲線の変化
(せん断ひずみ $\pm 455\%$ の場合)

図 17 破断特性 (鉛プラグなしの場合)

図 18 破断特性 (定格荷重の場合)

図 19 破断特性 (定格荷重×2の場合)

には2個ずつの供試体が用いられた。

図17と図18の結果を比較すると、破断ひずみと破断応力に有意な差は見られない。したがって、少なくとも、本研究で対象としたような形状の鉛プラグ内蔵型積層ゴムでは、鉛プラグがせん断破断特性に及ぼす影響はほとんどないと結論できよう。

図18と図19の比較でも、両者の結果に有意の差は見られない。したがって、この程度の面圧では、面圧が2倍になっても、破断特性は変化しないものと考えられる。

図18, 19は、せん断ひずみが250%を超えると水平剛性にハードニングが起こり、せん断ひずみ518%~550%で破断に至ることを示している。この破断ひずみは、実大モデルでの1.14m~1.21mの水平変位に相当する。また、破断応力は9.5MPa~11.3MPaで、実大モデルでの19100kN~22700kNの水平力に相当し、定格荷重の約4倍の水平力である。

7. あとがき

本研究では、原子力施設免震用として試設計したボルト固定方式の鉛プラグ内蔵型積層ゴムについて、縮尺モデルによる加力実験を行い、その履歴復元力特性と破断特性を明らかにした。主な結果を要約すると以下になる。

(1) 鉛入り積層ゴムの水平剛性は、鉛なし積層ゴムのそれと比較して、ひずみ振幅±50%においては、降伏後剛性で約10%、等価剛性で約30%大きくなる

が、ひずみ振幅が大きくなるにつれてその差は小さくなる。

(2) 鉛入り積層ゴムの履歴減衰は、ひずみ振幅が大きくなるに従って大きくなる傾向があるが、これはゴムの履歴が大きくなるためであって、鉛による弾塑性減衰はほぼ一定である。

(3) せん断ひずみ±227% (実大での±0.5mの水平変位に相当) では、80サイクルの繰返しによっても、水平履歴曲線は変化しない。

(4) せん断ひずみ±455% (実大での±1mの水平変位に相当) では、80サイクルの繰返しによって、減衰や剛性は低下するが、破壊には至らない。

(5) 本研究で対象としたような形状の鉛プラグ内蔵型積層ゴムでは、鉛プラグがせん断破断特性に及ぼす影響はほとんどない。

なお、鉛プラグ内蔵型積層ゴムの良好な免震性能については振動実験により確認されている⁽⁵⁾。

文 献

- (1) Robinson, W. H., *Int. J. Earthqu. Eng. Struct. Dyn.*, 10-4(1982), 593.
- (2) Mazda, T., Shiojiri, H., Oka, Y., Fujita, T. and Seki, M., *10th SMIRT*, (1989-8), K-679.
- (3) 飯塚・ほか3名, 第7回日本地震工学シンポジウム(1986-12), 1663.
- (4) 藤田, 原子力工業, 34-12(1988-12), 29.
- (5) Fujita, T., Sasaki, Y., Fujimoto, S. and Tsuruya, C., *ASME PVP Conf.*, (1989-7), 141.