建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究*
(第2報, 破断限界)鈴木重信^{*1}, 藤田隆史^{*2}, 嶋崎 守^{*3}High Damping Rubber Bearings for Seismic Isolation of Building
(2nd Report, Breaking Tests)

Shigenobu SUZUKI, Takafumi FUJITA, and Mamoru SHIMAZAKI

This paper describes the results of breaking tests of high damping rubber bearings. The breaking tests were carried out for 0.5 scale models of two types of rubber bearing which had the same shape but differed in rubber hardness. The full-scale rubber bearings were tested to investigate their hysteretic restoring force characteristics, which were mentioned in the 1st report. Biaxial tests by compression and shear showed that the breaking shear strains gradually decreased with increased compressive stresses. The breaking shear strains under various compressive stresses were larger than 600 % for the low hardness type and larger than 400 % for the high hardness type. These breaking strains are large enough for reliable seismic isolation of buildings. Biaxial tests by tension and shear revealed that the breaking tensile stresses and strains were decreased with increased shear strains, and that the rubber bearings had considerably hard stiffnesses in small tensile strains. For simple tension without shear, the tensile stiffnesses were about 1/3 of the compressive one for the low hardness type and about 1/4 for the high hardness type.

Key Words: Vibration, Seismic Isolation of Building, High Damping Rubber Bearing, Breaking Test, Shear and Tension/Compression

1. ま え が き

著者らは、建物免震用として、低減衰積層ゴム(別置きエネルギー吸収装置を必要とする積層ゴム)の開発研究に続いて、ゴム材料自体に免震に必要なエネルギー吸収機能を持たせた高減衰積層ゴムの開発研究を行ってきた。第1報⁽¹⁾では、実大規模の供試体の動的加力実験によって得られた高減衰積層ゴムの剛性、減衰などの基本的特性、および、履歴復元力特性の解析モデルについて報告した。

ところで、積層ゴムの信頼性を検討するうえで、限界特性(破断特性)を明確にすることは非常に重要である。低減衰積層ゴムについては、既報の破断実験⁽²⁾により、その十分な変形能力を確認した。高減衰積層ゴムについても、本報で述べるように、限界特性を明確にするための破断実験を行った。実験では、低減衰積層ゴムの場合と同様に、通常の使用状態を想定した、圧縮荷重下でのせん断破断実験と、ロッキング振動に

より積層ゴムに引張力が生じる場合(非常に細長い建物を免震した場合に起こり得る)を想定した、せん断変形下での引張破断実験を行った。

2. 供 試 体

第1報の動的加力実験では、硬度の異なる2種類のゴム材料を用いた同じ形状の積層ゴム、すなわち、60 t用積層ゴム(低硬度ゴム材料を用いた場合)と80 t用積層ゴム(高硬度ゴム材料を用いた場合)を供試体とした。本報の破断実験では、これら2種類の同一形状の積層ゴムについて、実験装置の能力を考慮に入れて、図1に示すような縮尺モデルを用いた。

本縮尺モデルは、寸法縮尺比0.5でゴム材料などの材質(第1報参照)を実大のものと変えることなく製作したものである。ただし、積層ゴムの上下フランジの厚さは補強の意味で相似比で決定される値よりも厚くし、また、内部鋼板の厚さは、相似比より1.1 mmとなるが、材料の寸法規格上の理由から1.2 mmとした。ただし、この程度の内部鋼板厚さの違いは、性能にはほとんど影響ないと考えられる。

3. 実験装置および実験方法

3・1 圧縮・せん断破断実験の場合 図2に圧

* 平成元年11月11日 機械力学講演会において講演、原稿受付 平成元年6月30日。

^{*1} 正員、(株)ブリヂストン研究開発第2本部(〒187 小平市小川東町3-1-1)。

^{*2} 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)。

^{*3} 准員、東京大学生産技術研究所。

縮・せん断破断実験装置を示す。この実験装置は2個の積層ゴムを1組として用い、アムスラにより鉛直荷重を載荷しながら、水平方向の油圧シリンダにより、せん断力を与えて破断させるものである。なお、積層ゴム上下の取付板は、リンク機構により常に平行に保たれている。

計測は、積層ゴムの復元力、鉛直荷重、水平変位、沈み込み量について行い、沈み込み量はアムスラのヘッド部とベッド部の相対変位量を測定した。ただし、水平復元力、沈み込み量については計測値の1/2を積層ゴム1個当たりの測定値とした。

供試験体として、低硬度タイプの場合は3組(Pair A~C)、高硬度タイプの場合は4組(Pair A~D)を用いた。それぞれのタイプについて、鉛直荷重として、定格荷重、0荷重、定格荷重の2倍の3通りの荷重を与えて、単純に1回の加力でせん断破断させた。さらに、高硬度タイプについては、定格荷重下で、せん断ひずみ181%までの領域で繰返し変形を与えた後に破断させる実験も行った。

3・2 せん断・引張破断実験の場合 図3に積層ゴムのせん断・引張破断実験装置を示す。この実験装置の場合も供試体2個を1組として、水平方向の油圧シリンダにより、あらかじめ積層ゴムに一定のせん断変形を与え、鉛直方向に取付けた油圧シリンダにより引張力を与えて破断させるものである。

計測は、積層ゴムの鉛直方向の荷重と変位について行い、変位については、積層ゴム上下取付板間の相対変位を、20 mm までの小変形領域はダイヤルゲージにより、破断に至る大変形領域はポテンショメータにより測定した。

供試験体として、低硬度タイプの場合は3組(Pair D~F)、高硬度タイプの場合は4組(Pair E~H)を用い、せん断ひずみを、それぞれ、0.174, 290%(実大系で0, 24, 40 cmの水平変位に相当する)を与えた状態

図1 60 t用(低硬度タイプ)および80 t用(高硬度タイプ)積層ゴムの0.5縮尺モデル

で、単純に1回の加力で引張破断させた。さらに、高硬度タイプについては単軸(せん断ひずみ0%)で繰返し変形を与えた後は破断させる実験も行った。

4. 実験結果と考察

4・1 圧縮・せん断破断実験の場合 図4は、高硬度タイプの高減衰積層ゴムについて、定格荷重(圧縮応力で4.93 MPa)下での、破断に至るまでの復元力および沈み込み量を示したものである。本供試体(Pair C)では、せん断ひずみ14.5~181%に相当する変位(実大系で2~25 cm)を順に繰返し与え、その後、破断させた。図4において、繰返し変形時の復元力は、第1象限の部分のみが示されている。

繰返し変形の結果、復元力の低下(荷重履歴効果)が見られるが、これは、数サイクル後には安定するものであることが第1報で確認されている。この荷重履歴効果は、ゴム材料特有の性質であり、減衰の大きい材料ほど顕著になる傾向を持っている。

繰返し変形後、変形を増大していくと、せん断ひずみ300%(実大系で41.4 cm)を超える変形で復元力はわずかに負こう配となり、復元力上での座屈現象が見

図2 圧縮・せん断破断実験装置

図3 せん断・引張破断実験装置

られるが、その後ハードニングを生じて破断に至る。後に示す直ちに破断させた場合の結果(図6のPair B)と併せて、破断時のせん断ひずみは477% (実大系の変位換算で65.8 cm)、応力は4.98~5.23 MPa (実大系の荷重換算で792~832 kNで定格荷重の1.01~1.06倍に相当する)であった。また、沈み込み量は、座屈を生じる変位前後から急激に増大し始め、破断時にはゴム総高さの56~57%にまで達している。積層ゴムの破断位置は、フランジと隣接している端部でなく、中間部であった。なお、図4の復元力の細かい変動は、沈み込み量が急激に増大してアムスラの加力速度が追従しないため、随時、水平加力を中断して鉛直荷重を調整したことに起因するものであり、積層ゴムの本質的な特性ではない。

図5, 6は、それぞれ低硬度タイプ、高硬度タイプの高減衰積層ゴムについて、0荷重(実際には試験装置の自重が作用している)、定格荷重、定格荷重の2倍の鉛直荷重下で、直ちに破断させた場合の結果を重ねて示したものである。

図5に示されるように、低硬度タイプの場合も、定格荷重(圧縮応力3.70 MPa)下での実験(Pair B)では、一時的に座屈が生じた後、破断に至っている。破断時のせん断ひずみは688% (実大系の変位換算で94.4

cm)、せん断応力は8.12 MPa (実大系の荷重換算で1290 kNで定格荷重の2.19倍に相当する)であり、高硬度タイプより大きい値が得られている。ただし、図5のPair A(圧縮応力0.197 MPa)の実験では、水平油圧シリンダのストロークが限界に達したために、破断させることはできなかった。

低硬度、高硬度タイプともに、せん断ひずみ217% (実大系換算で許容変位量である30 cmに相当)以下では、復元力に鉛直荷重の依存性はほとんど見られないが、これを超える大変形領域では、鉛直荷重の増大に従って復元力は低下し、定格荷重の2倍の荷重下では、完全な座屈現象が生じた後に破断に至っている。破断についても、鉛直荷重の増大に従い、破断荷重は減少し、破断変位もわずかなではあるが減少している。このような鉛直荷重依存性は、積層ゴムの形状(縦横比)に影響されるものであり、より扁平な供試体を用いれば、座屈現象を生じることもなくなり、この依存性は小さくなると考えられる。

本実験においても、低減衰積層ゴムの場合と同様に、変形量が直径を超えても直ちに破断することはなかった

図4 定格荷重下でのせん断破断特性 (高硬度タイプの場合)

図5 各鉛直荷重下でのせん断破断特性 (低硬度タイプの場合)

た(図7参照)。ただし、本結果のように、座屈現象が生じる場合は、これを事実上の変形限界と考えるべきであろうと思われる。

4・2 セン断・引張破断実験の場合 図8は高硬度タイプの積層ゴムの水平変位を与えていない状態(単軸引張りの状態)で、鉛直方向に繰返し加力した後に破断させた結果(Pair E)と直ちに破断させた結果(Pair F)と併記して示したものである。

微小変形時は、大きな剛性を有しているが、おおよそ3.8 MPaの引張応力(実大系の荷重換算で600 kN)から急激に変形が増大し破断に至っている。破断時の引張ひずみは290~306% (実大系の変位換算で40.0~42.2 cm)、引張応力は3.95~4.10 MPa (実大系の荷重換算で628~652 kNであり定格荷重の0.80~0.83倍に相当する)であった。図8中、右上部に示した小変形領域での荷重-変位曲線に注目すると、変形の急激な増大が始まる荷重(以下臨界荷重と呼ぶ)以下での領域では、履歴の小さい線形性のある曲線で、繰返しによる復元力の低下は生じていない。しかし、臨界荷重を超えると、大きな履歴ループを描くようになり、繰返しによる復元力の低下が生じる。ただし、新しい変形域に入ると、繰返しのない単純加力による

曲線に近づく傾向がある。このような引張りによる復元力低下は、ゴムの内部にボイド(空けき)が発生、成長していくためであり、高減衰積層ゴムに限らず低減衰積層ゴムにも見られる現象である。この現象は、Gentらの実験⁽³⁾においても示されており、本実験の破断面にもそのこん跡が確認された。

図9, 10は、それぞれ低硬度、高硬度タイプの高減衰積層ゴムについて、それぞれ0, 174, 290%のせん断ひずみ(実大系で0, 24, 40 cmの変位に相当する)を与えた状態で、単純破断させた結果を重ねて示したものである。

低破度タイプ(Pair D)の単軸引張破断時の引張ひずみは430% (実大系の変位換算で59.3 cm)、引張応力は5.78 MPa (実大系の荷重換算で919 kNで定格荷重の1.56倍に相当する)であり、圧縮・せん断破断実験の場合と同様に高硬度タイプより大きい値となっている。

図7 圧縮・せん断破断実験(破断直前の状態)
(高硬度タイプ: Pair D, 破断せん断応力: 3.27 MPa, 破断せん断ひずみ: 438%)

図6 各鉛直荷重下でのせん断破断特性
(高硬度タイプの場合)

図8 単軸引張破断特性(高硬度タイプの場合)

図9 各せん断ひずみ下での引張破断特性
(低硬度タイプの場合)

図11 微小変形時のせん断・引張特性
(低硬度タイプの場合)

図10 各せん断ひずみ下での引張破断特性
(高硬度タイプの場合)

図12 微小変形時のせん断・引張特性
(高硬度タイプの場合)

低硬度、高硬度タイプともに、硬断時の荷重、変位、さらに、臨界荷重は、せん断変形の増大に従い、減少する傾向を持っており、特に、破断変位の低下は著しい。また、破断位置は、せん断変形を与えた場合、すべて端部に集中した。これは、積層ゴム端部のゴム側面とフランジ面のなす角が鋭角の側に、軸心がずれたことにより、局所的に大きな引張応力が生じ、ここから破断が進行していったためである (図13参照)。

図11、12は、それぞれ、図9、10についての小変形域での復元力特性を示したものである。図11、12中に示されている剛性は、実大系に換算した初期の剛性であり、原点とせん断ひずみ0.5%の点のこう配により算出した。

両タイプともに、せん断ひずみの増大に従って初期剛性も減少する傾向を持っている。ただし、図12でのせん断ひずみが0% (Pair F) に対する剛性は、測定前に引張力を与えてしまったために小さくなっており、この剛性には図8のPair Eの結果 (初期剛性) を用いるべきであることをことわっておく。単軸引張状態での初期剛性は、定格荷重下での圧縮剛性と比べて、低

図13 せん断・引張破断実験 (破断直前の状態)
(高硬度タイプ: Pair G, 破断鉛直荷重: 3.14 MPa, 破断鉛直ひずみ: 110%)

硬度タイプの場合は1/3、高硬度タイプの場合は1/4程度であった。ただし、圧縮剛性も低荷重領域では定格荷重の近傍領域より剛性が低い値を示す (圧縮剛性はハードスプリング特性を持つ) ため、圧縮方向と引張方向の剛性が上に示した比率で不連続に変化するものではないと思われる。

4・3 引張/圧縮とせん断による破断条件 本破断

図 14 破断限界 (低硬度および高硬度高減衰積層ゴムの比較)

実験において、積層ゴムの破断はすべてゴム部の破壊であり、接着剤部などの破壊は認められなかった。これは、十分な強度を有する接着が実現されていることを示すものであり、積層ゴムの破断特性がゴム材料の特性により決定されることを示している。

図 14 は本実験より得られた全結果を引張/圧縮応力とせん断ひずみの関係にまとめたものである。積層ゴムに引張力を生じる場合は、せん断変形の増大に従って引張破断応力は減少する。しかし、通常使用状態である圧縮力が作用している場合は、圧縮力の増大に従って破断せん断ひずみは多少減少するものの、その傾向は小さく、常に、低硬度タイプの場合は 600 % 以上、高硬度タイプの場合は 400 % 以上の値を保有している。低硬度タイプと高硬度タイプを比較した場合、破断ひずみは、ゴム材料の伸び (低硬度、高硬度タイプのゴム材料の破断伸びは、それぞれ 880、750 % である) と明らかな相関を有している。

図 15 は高硬度タイプの高減衰積層ゴムの結果を低減衰積層ゴムの結果⁽²⁾と比較をしたものである。引張応力、圧縮応力どちらの領域においても、高硬度タイプの高減衰積層ゴムの結果は低減衰積層ゴムの結果と非常によく一致しており、同等の限界性能を有していることを示している。

5. あとがき

本報では、2 種類の高減衰ゴム材料を用いた積層ゴ

図 15 破断限界 (高硬度高減衰積層ゴムと低減衰積層ゴムの比較)

ムの破断実験結果について述べたが、その結果を要約すると次のようになる。

(1) 圧縮・せん断破断実験の結果、圧縮荷重の増大に伴い、破断せん断ひずみは低下するが、低硬度タイプの場合 600 %、高硬度タイプの場合 400 % 以上の破断ひずみを有することが確認された。

(2) 本供試体のように形状が比較的縦長で座屈の生じる積層ゴムの場合は、座屈によって変形限界が決定される。本実験では、定格荷重下で 60 t 用 (低硬度タイプ)、80 t 用 (高硬度タイプ) 積層ゴムの変形限界は 40 cm 程度であった。

(3) せん断・引張破断実験の結果、せん断変形の増大に伴い、引張破断ひずみ、応力はともに減少し、引張方向にもかなりの変形追従能力はあるものの、圧縮方向のような十分な復元性能を期待できるものではないことが示された。

(4) 引張方向の初期剛性は圧縮方向の剛性に対して、低硬度タイプの場合 1/3、高硬度タイプの場合 1/4 程度であった。

文 献

- (1) 本論文集 658 ページ。
- (2) 藤田・ほか 3 名、機論、54-507、C(1988)、2618。
- (3) Gent, A. N. and Lindley, P. B., *Proc. R. Soc., Ser. A.*, 249(1958)195-205。