建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究*

(第3報, 100トン用積層ゴムの破断実験)

藤田 隆 史^{*1}, 藤田 聡^{*1}
鈴木 重 信^{*2}, 芳 沢 利 和^{*2}An Experimental Study of Laminated Rubber Bearings
for Earthquake Isolation of Buildings

(3rd Report, Breaking Tests for Rubber Bearings of 980-kN Rated Load)

Takafumi FUJITA, Satoshi FUJITA, Shigenobu SUZUKI
and Toshikazu YOSHIZAWA

Rubber bearings of a 980-kN rated load were tested to investigate the breaking conditions of rubber bearings whose top and bottom planes were bonded to thick steel plates for fixing by bolts. Breaking tests by simple tension were carried out for the full-sized rubber bearings, showing that the breaking tensile forces were larger than the rated load (1.2 to 1.9 times). Biaxial breaking tests by tension and shear were performed using 0.4 scale models of the bearing. The tests showed that, through the breaking tensile forces decreased with increased shear deflexion, the breaking forces were still large (0.80 to 0.94 times of the rated load) even under a shear deflection of 0.3 m in full size. Biaxial breaking tests by compression and shear for the 0.4 scale models revealed that breaking shear strains were almost constant under various vertical loads up to 2 times the rated load and they were about 500% corresponding to a shear deflexion of 0.8 m in full size, which was larger than the diameter of the bearing. The breaking shear forces were 1.6 or 1.7 times that of the rated load.

Key Words: Vibration, Earthquake Isolation, Rubber Bearing, Breaking Test, Shear and Tension/Compression

1. ま え が き

著者らは、実大規模の建物免震用積層ゴムの諸特性を検討するために、50トンおよび100トン用積層ゴムを設計、製作し、これらについての静的加力実験を行った⁽¹⁾⁽²⁾。この段階では主に剛性と、使用範囲の変位吸収能力に関し検討し、本積層ゴムが建物免震用支持材として十分に実用に供しうるものであることを検証した。ただし、積層ゴムの信頼性を検討する上で重要な限界特性(破断特性)を確認することはできなかった(実験治具の能力に制約があったため)。

現在までに行われた積層ゴムの破断実験例は極めて少ない。Gentら⁽³⁾による両端を鉄板に接着した円形ゴム板を用いての単純引張破断実験、多田ら⁽⁴⁾による圧縮下での積層ゴムのせん断破断実験、高林ら⁽⁵⁾による鉛プラグ入り積層ゴムの単純引張破断実験に例を見るだけである。

一般に、ゴムは非圧縮性に近い性質を有しており、

積層ゴムは鉛直荷重に対しては極めて大きな強度を持っている。著者らは、仮に積層ゴムの破断が生じるとすれば、それは、非常に細長い(重心位置の高い)建物、構造物を強引に免震した際に、大きなロッキング振動により、積層ゴムに過大な水平せん断力と鉛直方向の引張力が同時に作用する場合であると考え、基本的な単純引張破断実験と、水平せん断状態における引張破断実験を行った。さらに、通常使用状態を想定した圧縮下における水平せん断破断実験を行い、本積層ゴムの破断条件を明確にした。

2. 供 試 体

本実験では、第2報⁽²⁾で述べた100トン用積層ゴム(第2報の図1参照)を単純引張破断実験に使用した。また、実験装置の能力を考慮し、せん断・引張破断実験(積層ゴムにあらかじめある水平せん断変形を与えておき、鉛直方向に引張破断させる実験)と圧縮・せん断破断実験(鉛直荷重下のもとで水平にせん断変形を加えて破断させる実験)に対しては、図1に示すような0.4縮尺モデルを使用した。

本縮尺モデルは、寸法縮尺比0.4でゴム材等の材質(第2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り、せん断ひずみや面圧等は実大系の場合と

* 昭和63年8月24日 第951回講演会において講演、原稿受付 昭和62年12月26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、㈱ブリヂストン開発本部(〒187 小平市小川東町2800-1)。

同一に保たれる。ただし、積層ゴムの上下フランジは補強の意味で相似比で決定される値よりも厚く製作した。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実大積層ゴムの単純引張破断実験の場合

図2は100トン用積層ゴムの単純引張破断実験用治具である。積層ゴムの上下フランジを厚さ100mmと60mmの剛円板により補強し、実験を行った(ただし、補強しない場合の実験も行い、比較、検討した)。このような治具に固定された積層ゴムを、最大引張容量9800kN(1000tonf)の大形構造物試験機(日本大学理工学部工学研究所大形構造物試験棟)を用いて破断させた。

計測は、積層ゴム上下フランジ間距離を、10mmまでの微小変形領域ではダイヤルゲージ2台によって、破断までの大変形をポテンショメータ(最大1m)2台により測定し、各々の計測値の平均値をもって測定値とした。また、積層ゴムに加える引張力は、論験機内蔵のロードセルにより測定した。

供試体としては、4個の100トン用積層ゴムを使用した(F1~F4)。ここで、供試体F1は未使用のもので、上述のようにフランジを補強した上で破断させ

図1 100トン用積層ゴムの0.4縮尺モデル

図2 単純引張破断実験の実験装置

た。供試体F2は第2報の静的加力実験に使用した積層ゴム(水平変位30cmを20回以上経験したもの)であり、フランジ補強の上、破断させた。F3は未使用のもので、フランジ補強の上、まず1mm, 2mm, 5mm, 1cm, 2cm, 5cm, 10cm, 20cmの繰返し引張変形実験を行った後、破断させた。F4はF2と同様に静的加力実験に使用したもので、フランジの補強を行わずに、1cm, 5cm, 10cm, 20cmの繰返し引張変形実験を行った後、破断させた。

3.2 縮尺モデルのせん断・引張破断実験の場合

図3は0.4縮尺モデルのせん断・引張破断実験装置である。図1に示した積層ゴム2個を一組とし、水平せん断変形用油圧シリンダにより、まず積層ゴムにある予水平せん断変形を与え、三軸載荷実験用架構(東京大学生産技術研究所千葉実験所構造物動的破壊実験棟)の上部はりに設置された、鉛直引張加力用油圧シリンダにより、積層ゴムに引張力を加えた。計測は、単純引張破断実験の場合と同様に行った。

供試体としては、12個の0.4縮尺モデル積層ゴム(S1~S12)を使用した。これらの積層ゴムは2個を一組とし、まず水平せん断変形を加えずに単純引張破断させる実験を行った(PairA~PairCの3実験)。PairA, PairBは2mm, 4mm, 8mm, 2cm, 4cm, 8cmの繰返し引張変形実験を行った後に引張破断させ、PairCは即引張破断させた。続いて、積層ゴムに実大系での設計上の許容変位である30cmに相当する12cmの水平せん断変形(せん断ひずみ185%)を加え、同様な実験を行った(PairD~PairFの3実験でPair

図3 0.4縮尺モデルのせん断・引張破断実験装置

Fは即引張破断させた)。最後に、積層ゴムに20 cmの水平せん断変形(せん断ひずみ309%)を加えた場合の実験を行った(Pair G~Pair Iの3実験でPair Iは即引張破断させた)。なお、これらの実験では、供試体一組(2個)のうち破断しなかったものは後の実験に使用したため、12個の積層ゴムで計9組の実験を行った。

3.3 縮尺モデルの圧縮・せん断破断実験の場合

図4は0.4縮尺モデルの圧縮・せん断破断実験装置で、第1報⁽¹⁾で述べた50トン用積層ゴムの静的加力実験装置を改造したものである。

計測は、積層ゴムの水平変形量をポテンショメータによって、沈み込み量をダイヤルゲージにより測定した。水平引張力は、油圧シリンダに設けたロードセルによって、鉛直荷重はアムスラ内蔵のロードセルにより測定した。水平引張力および沈み込み量は計測値の1/2を測定値とした。

供試体としては、12個の縮尺モデル(S13~S24)を使用した。これらの積層ゴムは2個を一組とし、まず12 cmの水平変形を加え、剛性の確認を行った後、せん断破断させた。Pair J, Pair Kは鉛直荷重として治具のみによる荷重(7.84 kN)で行った実験、Pair L, Pair Mは定格鉛直荷重156.8 kN(実大系の980 kNに相当)下で行った実験、そしてPair N, Pair Oは定格の2倍の鉛直荷重(313.6 kN)下で行った実験である。

4. 実験結果と考察

4.1 単純引張破断実験の場合 図5(a)~(d)

図4 0.4縮尺モデルの圧縮・せん断破断実験装置

図5 実大100トン用積層ゴムの単純引張破断特性

は、実大積層ゴムの単純引張破断実験結果である。積層ゴムの鉛直引張剛性は微小変形領域では非常に大きいものの、おおむね600~800 kNの引張力を越えると急激に変形量が増大し、破断に至った。また、繰返し変形を加えた場合〔図5(c), (d)参照〕には、2度めのヒステリシスループは1度めのものの下側を通る結果が得られたが、これは積層ゴム内部で応力緩和が生じたためと考えられる。ただし、過去に経験していない変形領域に入ると、再び図5(a), (b)に示される復元力特性曲線に一致するような曲線を描くことが示された。

破断はいずれの供試体の場合も、図中波線で示すようにフランジへの接着部近傍のゴム部において生じた。また、破断変位は0.361 m(破断ひずみ223%)から0.595 m(破断ひずみ367%)であり、図6に示すように鉛直方向に非常に大きな伸びを示して破断した。なお、その際の破断荷重は1145 kN~1894 kNとなり、これは本積層ゴム定格搭載荷重(980 kN)の1.17倍から1.93倍に相当する。このことは、仮に免震建物をそれに用いられている積層ゴムで吊り下げたとしても、積層ゴムは破断しないことを示すものである。

図5(a)と(b)は、それぞれ未使用の積層ゴムと第2報で使用した積層ゴムを用いた実験結果の差異を示している。供試体F2はF1の約83%の引張力、約77%の変形量で破断が生じた。これは、供試体F2が静的加力実験によってゴムに若干の亀裂が生じ、鉛直方向の引張に対してその部分でのゴムの破断が早く生じたためと推察される。

一方、適当な変位量での繰返し変形による積層ゴムの応力緩和は、むしろ破断強度を向上させることもある。図5(a)と(c)の比較から、同じ未使用の積層ゴムでは、供試体F3のように繰返し変形を行ってから破断させるほうが破断変位が大きい。これは、ゴムにき裂が生じない程度の変形を加えることにより、ゴムが変形になじみ、即破断させた場合に比べてより大きな変位吸収能力を示したためとも考えられる。

図5(c)と(d)は、フランジ補強の有無による破断特性の差を示している。ただし、供試体F4は、静的加力実験ですでに使用しているため、これらのデータの比較には、この影響が含まれる。供試体F4の場合、引張変形が増大すると、フランジの変形が確認された。また、供試体F2の場合に比べて、引張荷重(応力)値が若干低めになった(小変形領域では、繰返し変形の影響でフランジの変形が生じなくても低くなる)。ただし、その差は極めて小さく、破断荷重、破断変位については、供試体F2とF4は同程度であった。したがって、フランジ補強の有無による破断特性の差は極めて少なく、過去に経験した変形によって、ゴムがどの程度の損傷を受けたかが、引張破断特性を決定すると考えられる。

図7は0.4縮尺モデルと実大積層ゴムの単純引張破断特性を比較したもので、実大積層ゴムの復元力特性は破線で示した。各積層ゴムの復元力特性のこう配(剛性)に関しては良く一致しているが、引張荷重(応力)値に関しては縮尺モデルのものは実大積層ゴムのものに比べてかなり下回った。また、破断に至る変形量に関しても、実大の供試体F1、F3と比較すると、Pair Cを除いてかなり低い値を示した。これらの結果は、相似則が近似的にしか成立していないことを示すと同時に、以下に示す縮尺モデル実験の結果は、実大積層

ゴムに対して、安全側の結果を示すものと考えられる。

4.2 セン断・引張破断実験の場合 図8は、積層ゴムに185%の水平せん断ひずみ(水平変形量12cm)を加えた場合の引張破断実験の結果である。この185%のせん断ひずみは、本積層ゴムの水平許容変形量(実大系での30cmに相当する)の設計値である(第2報参照)。

小変形時での復元力は、単純引張実験の場合に比べて低い値となっているが、さらに変形が進行し、引張応力が支配的になると、復元力特性は単純引張の場合とほぼ等しい傾向を示して破断に至る(破断箇所は図中破線で示す)。破断荷重(応力)、破断変位(ひずみ)は、単純引張破断実験の場合と同程度であり(平均値が若干下回る程度)、この程度の水平せん断変形量は、積層ゴムの引張破断限界にはあまり影響しないことが確認された。また、このときの破断直前の状態を図10に示す。

図9は、さらに大きな309%のせん断ひずみ(水平変形量20cm)を加えた場合の結果である。このせん断ひずみ(変形量)は積層ゴムの直径の5/6に相当する変形量(実大系で50cm)となり、このような大変形下では、二軸荷重の影響が表れ、破断荷重(応力)、破断

破断直前の状態
(供試体F3)
破断荷重 1894 kN
破断変位 0.595 m
破断ひずみ 367%

図6 実大100トン用積層ゴムの単純引張破断実験

図7 0.4縮尺モデルと実大100トン用積層ゴムの単純引張破断特性の比較

(a)

(b)

(c)

図8 0.4縮尺モデルの185%せん断ひずみ下での破断特性

図9 0.4縮尺モデルの309%せん断ひずみ下での破断特性

破断直前の状態
(供試体 Pair F)
破断荷重 148 kN
破断変位 0.138 m

図10 0.4縮尺モデルによるせん断・引張破断実験

変形量(ひずみ)ともに,単純引張破断実験や185%せん断ひずみの場合に比べてかなり低下した。実大系に換算すると,約600kNの引張力を受けた場合に,約10数cmの鉛直変形を示して破断することになる。

積層ゴムは,圧縮に対しては極めて高い限界性能を示すが,過大なせん断と引張りの同時荷重に対しては,破断に至る可能性がある。したがって,免震構造設計においては,地震時の過大なロッキング振動の発生を防止するため,できる限り鉛直剛性の高い積層ゴムを使用し,水平方向の積層ゴム取付間距離を大きくしたりするなどの考慮が常に必要である。ただし,免震により,上部構造物の水平応答加速度は極めて小さくなるため,免震構造における転倒モーメントは通常の場合に比べて非常に小さく抑制される。また,万一,積層ゴムに若干の引張力が加わった場合でも,本実験で確認したように,破断限界は極めて高く,実用上の問題点になるとは考えていない。

4.3 圧縮・せん断破断実験の場合

図11は鉛直荷重を定格の156.8kN(実大系での980kN)にした場合の結果である。復元力特性曲線上の凸凹は,鉛直荷重を加えるアムスラ(手動制御による)の加力速度が遅いため,大変形時の積層ゴムの急激な沈み込みにアムスラヘッドが追従せず,適宜水平加力を中断して鉛直荷重を調整したために生じたものであり,積層ゴムの本質的な特性ではない。同図において,水平変位20cm(実大系で50cm)程度までは,復元力特性はお

図11 0.4縮尺モデルの圧縮・せん断破断特性と沈み込み量(鉛直荷重156.8kN)

図12 0.4縮尺モデルの圧縮・せん断破断特性と沈み込み量(鉛直荷重313.6kN)

おむね線形であり,免震効果を期待して使用し得る範囲と考えられる。さらに水平変位を増大させると,復元力特性はハードスプリングの傾向が顕著になり,破断に至る。この時の破断荷重は,実大系に換算すると,

破断直前の状態 (供試体 Pair O)
破断水平荷重 281 kN
破断水平変位 0.30 m

図 13 0.4 縮尺モデルによる圧縮・せん断破断実験

1 569~1 675 kN であり, 定格荷重 980 kN の 1.6~1.7 倍となる。すなわち, 破断水平荷重は定格搭載質量に 1.6~1.7G ($1G=9.8\text{ m/s}^2$) の加速度が作用した場合の慣性力に等しく, 実際に発生するとは考えられない水平荷重である。

さらに鉛直荷重を増大させ, 定格の 2 倍の 313.6 kN (実大系での 1 960 kN) とした場合の復元力特性を図 12 に示す。また, このときの破断直前の状態を図 13 に示す。

図 11, 12 に示したように, 鉛直荷重の増大は積層ゴムの沈み込み量を増大させるが, 破断変位と破断荷重には影響しない。例えば, 図 12(a) に示した供試体 Pair N の場合, 破断変位は 30.1 cm となるが, これは積層ゴム直径の 125% に相当するため, 積層ゴム上下面の重なり部分はすでに全くなっている状態である。それでも鉛直荷重を支持するという事は, 第 2 報で検証したように, 積層ゴムは水平変形を受けた際に, 鉛直荷重を主に上下面の重なり部分 (有効支持面積) で支持するという事実と反するものである。ところが, 積層ゴムはこのような大変形を受けた場合, 図 14 に示すように, ゴム端部において支持面積を維持するように局所的な変形を生じる (図 13 参照) ことが実験で観察された。数値上, 重なり部分がなくなるような変形領域 (この場合 24 cm 以上) に入ったとしても, 積層ゴムが鉛直荷重を支持しつつ, さらに水平変形することが可能となったのはこの理由によると考えられる。

4.4 引張/圧縮とせん断による破断条件 図 15 は, 全実験結果を引張/圧縮応力と水平せん断ひずみの関係にまとめたものである。破線は, 各条件下における結果の平均値を結んだものであり, この破線の左側での応力-ひずみ範囲で使用する限り, 積層ゴムは破断しないことを示す図である。

積層ゴム使用時に, 仮に鉛直方向の引張力が生じた

図 14 積層ゴムの局所変形による有効支持面積の増大

図 15 100 トン用積層ゴムの破断限界

場合は, 水平せん断変形量 (ひずみ) の増大に伴ってその許容値は低下するが, 圧縮力を受けている限りは, その大きさにかかわらず, 約 500% の水平せん断ひずみ (実大系で約 80 cm) で破断することを本図は示している。このように, 本研究で対象とした 100 トン用積層ゴムは大きな裕度をもって実用に供しうることが確認された。

5. あとがき

本報では, 実大 100 トン用積層ゴムによる単純引張破断実験, 0.4 縮尺モデルによるせん断・引張破断実験と圧縮・せん断破断実験により, 積層ゴムは実用上十分な強度を有していることを確認した。

なお, 本報で実験に供した積層ゴムと同等な積層ゴムに対して, 共著者の所属するゴムメーカーでは, 長期クリープ特性, 耐オゾン性, 接着力特性, ゴム疲労特性, 温度特性, 耐薬品特性, 耐老化特性などの項目についての試験, 解析がなされており, 60 年間の使用が可能な耐久性を有することを保証している。

文 献

- (1) 藤田(隆)・ほか 3 名, 機論, 53-485, C(昭 62), 71.
- (2) 藤田(隆)・ほか 3 名, 機論, 53-485, C(昭 62), 77.
- (3) Gent, A. N. and Lindley, P.B., *Proc. R. Soc., A.*, (1958), 249, 195-205.
- (4) 多田・ほか 3 名, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭 61-8), 817.
- (5) 高林・ほか 4 名, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭 61-8), 983.