免震・制振装置用積層ゴムの復元力特性に関する研究* (積層ゴムの復元力特性への回転拘束度の影響)

正 木 信 男^{*1}

Restoring Force Characteristics of Laminated Rubber Bearings used for Base Isolation and Vibration Control Devices (Effect of Rotation on Static Restoring Force Characteristics of Rubber Bearings)

Nobuo MASAKI

The vertical load dependency and the influence of rotation angle on the horizontal stiffness of element rubber bearings has been measured by using biaxial loading test equipment and a combined loading test machine. The results of the experiment show that the horizontal stiffness of the element laminated rubber depends on the shape of laminating rubber bearing, that is, shape factor (s_1) and second shape factor (s_2) have great influence on the horizontal stiffness. The horizontal stiffness of rubber bearings which have large values of shape factor and second shape factor could be changed by increasing vertical load. From the combined loading test, it was found that the horizontal stiffness of the rubber bearings which have no vertical load dependency could be changed by increasing the degree of freedom of the tilting angle of the upper and lower flange of the rubber bearings. Therefore, by increasing the degree of freedom of the tilting angle, the horizontal stiffness of the rubber bearings could be decreased and buckled with a small horizontal displacement. These phenomena could be predicted by the theory of the shear bending beam.

Key Words: Vibration Control Device, Vibration, Multistage Rubber Bearing, Stability, Buckling, Factor of Safety

1. は じ め に

多段積層ゴムは、免震・制振装置として多く用いられている^{(1)~(6)}。特に、多段積層ゴムの制振装置として用いる場合には、比較的大きな荷重を支持しながら1 m 以上にも及ぶ変形能力を確保しなければならない。このような背景のもと、著者らは、制振装置用大形多段積層ゴムの大変形加力実験を実施し、安定板の曲げ剛性が復元力特性に大きく影響することを明らかにしている⁽⁷⁾。他方、多段積層ゴムの復元力特性を把握するためには、構成部材である要素積層ゴムの復元力特性を把握することも重要である。積層ゴムの復元力特性および変形能力に関しては、すでに多くの理論的・実験的検討がなされている^{(8)~(10)}。このなかで、積層ゴムの水平復元力に及ぼす鉛直軸力の影響について Haringx をはじめ多くの研究がなされている⁽⁹⁾。水平剛性が鉛直軸力の増加とともに低下していく現象は、軸力依存性としてよく知られている。この軸力依存性は、積層ゴムの形状に大きく依存し、積層ゴムの直径/ゴム部高さの比率が小さくなると、すなわち積層ゴム形状がよりスレンダになるとより顕著になる。

一方、従来積層ゴムは使用目的(おもに建築用免震装置)から、水平復元力は回転が拘束された状態で測定されている。このような状態で測定された復元力特性は、上部・下部構造が十分剛である場合には有効であるが、多段積層ゴムのように、回転が必ずしも拘束されない場合は、積層ゴムの水平復元力特性におよぼす回転拘束度の影響を考慮しなければならない。そこで本報では積層ゴムの水平復元力におよぼす鉛直軸力依存性および回転拘束の影響について、実験的および理論的に検討する。

2. 水平復元力の軸力依存性

2.1 実験の概要

2.1.1 試験体 試験体としては従来あまり検討されていなかった比較のスレンダな形状とし、図1に示す一次形状率($S_1=20, 25, 30$)および二次形状率($S_2=2.5, 3.0, 3.5$)の異なった9種類(試験体番号A~I)の積層ゴムの製作した。表1に試験体のおもな寸法を示す。なお、一次形状率と二次形状率の定義を式(1)、(2)に示す^{(11)~(13)}。

$$S_1 = d_r / (4 \cdot t_r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S_2 = d_r / (n \cdot t_r) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 d_r は積層ゴムの直径、 t_r はゴム板1枚あたり

* 原稿受付 1997年10月9日。

^{*1} 正員、(株)ブリヂストン(☎187-8531 小平市小川東町3-1-1)。

Table 1 Specification of test samples

Test Piece No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
dr:Diameter of rubber sheet(mm)	60								
tr:Thickness of rubber sheet(mm)	0.5	0.6	0.75	0.5	0.6	0.75	0.5	0.6	0.75
n:Number of rubber sheet	48	40	32	48	40	32	48	40	32
hr:Total height of rubber sheets(mm)	24			20			17		
S ₁	30	25	20	30	25	20	30	25	20
S ₂	2.5			3.0			3.5

Fig. 1 Element rubber bearing

の厚みおよび n はゴム板の枚数である。

試験体に用いた積層ゴムのゴム材料のおもな機械的性質は以下のとおりである。

硬度 (IRHD) = 40, $\epsilon_b = 6.6$

$G = 0.57$ MPa, $E_o = 2.24$ MPa

ここで, ϵ_b は引張破断ひずみである。

実験では, 従来一般的に積層ゴムの特性評価として行われてきた回転を拘束した圧縮せん断試験を行いおもに水平剛性の軸力依存性に着目し評価した。

2・1・2 二軸試験装置と実験方法 実験に用いた二軸試験装置を図2に示す。本実験装置は, 水平方向に1本, 鉛直方向に1本の油圧アクチュエータを有し, 積層ゴムに鉛直荷重(軸力)を載荷し, 回転を拘束した状態でせん断変形を与え, 水平復元力特性を評価できるようになっている。実験では, 上述の試験装置に試験体の積層ゴムを取付け, ゴム部のせん断ひずみがおのおの25%, 50%, 75%, 100%, 150%および200%に相当する振幅の水平変位を鉛直荷重を載荷した状態のまま一定周期(10秒)で3サイクルあたえ水平復元力と水平変位を計測した。積層ゴムの水平ばね定数 KH と損失係数 $\tan \delta$ は図3に示すような各変位振幅における最終サイクルの水平復元力-変位曲線から式(3)と(4)より算出した。

$$KH = F_m / X_m \dots\dots\dots (3)$$

$$\tan \delta = \Delta W / (\pi \cdot W) \dots\dots\dots (4)$$

ここで, F_m は最大変位点の荷重を, ΔW , W はそれぞれ積層ゴムが描く履歴ループの面積と最大変位 X_m と最大変位点での荷重 F_m で規定される四角形の面積[図3中の(ABCD)]である。なお, 損失係数 $\tan \delta$ と等価減衰比 heq との間には $\tan \delta = 2heq$ の関係がある。

Fig. 2 Biaxial loading test equipment

Fig. 3 Schematic drawing of hysteresis loop

2・2 実験結果 図4では, 各試験体ごとに実験から計測された各せん断ひずみにおける水平ばね定数 KH より積層ゴムの見かけのせん断弾性係数 G (MPa) を求め, 軸力をパラメータに示した。なお, 軸力も積層ゴムの断面積で除し面圧に換算している。また, 図5には実験から計測された各せん断ひずみにおける損失係数を, 図4と同様に面圧をパラメータに示した。本実験における軸力(面圧で0.98 MPaから7.84 MPa)の範囲で求められたせん断弾性係数と損失係数は, 明らかに一次形状率(S_1)と二次形状率(S_2)に依存することが確認された。せん断弾性係数は, 二次形状率が2.5, 3.0, 3.5と大きくなるにつれてばらつきが小さくなっていくことが認められる。すなわち, 二次形状率が大きくなるほど積層ゴムの水平剛性に及ぼす軸力の影響は小さくなる。また, せん断弾性係数に及ぼす一次形状率の影響については, 二次形状率が小さいほど影響が顕著になることも確認された。本実験では, 積層ゴムの二次形状率が3.5以上あるいは二次形状率3.0以上かつ一次形状率25以上であれば, 面圧換算の軸力で0.98 MPaから7.84 MPa, かつゴムせん断ひずみ200%に相当するせん断変位の範囲においてせん断弾性係数の軸力依存性はほぼ無視しうることが確認された。

損失係数についても, せん断弾性係数とほぼ同様な傾向が認められる。すなわち, 損失係数は二次形状率

Fig. 4 Shear Stiffness of element rubber bearing under various axial loads

Fig. 5 Loss factor of element rubber bearing under various axial loads

が2.5, 3.0, 3.5と大きくなるにつれてばらつきが縮小し、積層ゴムの損失係数に及ぼす軸力の影響は小さくなる。また、損失係数に及ぼす一次形状率の影響についてもせん断弾性係数の場合と同様に、二次形状率が小さいほど影響が顕著になることがわかった。しかしながら、損失係数はせん断弾性係数より軸力依存性が大きく現れる傾向が認められる。これは、図3に示したように損失係数がせん断弾性係数と履歴ループの面積によって決まり、この両者ともに軸力の影響を受

けるためと考えられる。つまり、軸力の増大に伴って、せん断弾性係数は低下し、ループ面積の面積は増加するからである。なお、ループ面積の軸力の増大に伴う増加の機構としては、積層ゴムのせん断変形に伴う鉛直変位の増加によるものとの説明がある⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

3. 軸力依存性の理論的検討

積層ゴムの水平剛性の軸力依存性は、曲げせん断座屈理論に基づき解析的に導くことができる。ここで

Fig. 6 Internal forces and external loads on the column

は、Haringx の論文に基づき積層ゴムの水平剛性の軸力依存性について検討する⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。図6の積層ゴム柱において、積層ゴムの水平変位 (z) と、積層ゴムの曲げ回転角 $\psi(z)$ およびせん断ひずみ $\gamma(z)$ は、

$$\nu' = \frac{d\nu}{dz} = \gamma + \psi \quad (5)$$

積層ゴム柱の中での力の釣合いは、

$$S_s \nu'' - (P + S_s) \psi' = 0 \quad (6)$$

$$(P + S_s)(\nu' - \psi) + S_b \psi' = 0 \quad (7)$$

のようになる。

ここで、 S_b および S_s はそれぞれ、曲げおよびせん断剛性であり、 P は軸力である。式(6)、(7)は以下のように解ける。

$$\nu = \frac{1}{q} (C_1 \cos qz + C_2 \sin qz + C_3 qz + C_4) \quad (8)$$

$$\psi = \xi (-C_1 \sin qz + C_2 \cos qz) + C_3 \quad (9)$$

ここで $q^2 = P/(\xi S_b)$ 、 $\xi = 1/(1 + P/S_s)$ である。積分定数 $C_1 \sim C_4$ は境界条件より求めることができる。

両端の回転が拘束され軸方向に加力されている曲げせん断ばり柱のよこ方向の剛性 K_H は、式(8)と(9)に境界条件として、

$$z=0 \text{ において、} \nu=0 \quad (10)$$

$$z=0, 1 \text{ において、} \psi=0 \quad (11)$$

とすることより、以下のようになる。

$$K_H = \frac{P}{l} \left(\frac{\tan\left(\frac{ql}{2}\right)}{\frac{\xi ql}{2}} - 1 \right)^{-1} \quad (12)$$

P の値が小さいとき (すなわち $ql \ll 1$)、式(12)は以下のように簡単になる。

$$K_H = \frac{1}{\frac{l}{S_s} + \frac{l^3}{12S_b}} \quad (13)$$

積層ゴムに適用するために、連続体としての S_b と S_s をそれぞれ積層ゴムの平均の曲げ剛性とせん断剛性を用い書き直す。これらの剛性は1層のゴム板の特性から求めることができ、1層のゴム板と鋼板の1/2層2枚分かなるモジュールの厚みを有する層の剛性を見なすことにより修正を加えている。

$$S_s = GA_r \frac{t_r}{(t_r + t_s)} \quad (14)$$

$$S_b = E_b' I \frac{t_r}{(t_r + t_s)} \quad (15)$$

ここで、 G はゴム板のせん断弾性係数、 A_r は積層ゴムの断面積、 t_r はゴム板1枚あたりの厚さ、 t_s は鋼板1枚あたりの厚さ、 E_b' はゴム板の曲げに関する弾性係数および I は断面二次モーメントである。式(1)、(2)、(14)、(15)を用い、さらに $A_r = \pi d_r^2/4$ 、 $I = \pi d_r^4/64$ 、 $E_b' = 2E_o \kappa S_1^2/3$ 、 $E_o \approx 3G$ 、に注目して式(13)を書き直すと以下ようになる。ここで、 d_r は積層ゴムの直径、 E_o は縦弾性係数および κ はゴム硬度によって決まる定数である。

$$K_H = \frac{S_s}{l} \left(1 + \frac{1}{\frac{3}{2} \kappa S_1^2 S_2^2} \right)^{-1} \quad (16)$$

このように、積層ゴムの水平変形は式(13)でわかるようにゴムのせん断変形と曲げ変形の和として与えられる。また、式(16)で示されるように、積層ゴムの水平方向の剛性は一次形状率と二次形状率に依存し、一次形状率と二次形状率を大きくすることにより水平方向の剛性は曲げの影響が小さくなり、水平変形にともなう変形はもっぱらゴムのせん断変形となる。したがって、水平方向の剛性は軸力の影響を受けなくなる。

4. 回転拘束度の影響

4.1 回転拘束の影響 積層ゴムの水平復元力特性は、通常二軸加力装置で回転が拘束された状態で評価される。これらの特性は積層ゴムが取付けられている上部構造および下部構造が十分剛でかつ回転が拘束されている場合には有効であるが、多段積層ゴムのように安定板の曲げ剛性が必ずしも剛といえない場合は、安定板が積層ゴムの水平変位による軸力と水平復元力から生じる曲げモーメントを完全に負担できず、回転拘束度の影響を考慮しなければならないと考えられる。しかしながら、水平復元力特性に及ぼす回転拘束の影響を調査した例は非常に少ない。そこで、積層ゴムの回転拘束度を任意に変化させられる二軸偏心試験装置を製作し、積層ゴムの水平復元力特性に及ぼす回転拘束度の影響と曲げ剛性の測定を行った。

4.2 試験体 実験に用いた積層ゴムは、既報で述べた制振装置用大型多段積層ゴムの要素積層ゴムに使用されたものである⁽⁷⁾。積層ゴムは、ゴム直径 190 mm、ゴム厚さ 2.1 mm の天然ゴム系ゴムシートを厚み 0.6 mm の鋼板を介して 29 枚加硫接着し積層している。積層ゴムの一次形状率と二次形状率はそれぞれ 23.75 と 3.28 であり、通常の建物免震用積層ゴムより

形状がややスレンダである。また、細長比は1.22となっている。

4.3 実験の概要 回転拘束度の影響を調べるための実験に用いた二軸偏心試験装置のおもな仕様と構造を図7に示す。本試験装置は、鉛直方向に2本と水平方向に1本のアクチュエータを備え、積層ゴムに軸変位、せん断変位ならびに回転変位を同時に与えることができる。また、本装置の実施できる試験項目は表2のとおりである。実験1は回転を拘束した状態で積層ゴムにせん断変形を加えるもので通常の二軸試験装置と同じ測定が可能である。実験2は積層ゴムの回転を拘束する曲げモーメントを、せん断変形に伴って変化させながら水平復元力特性などを測定できる。実験3は、積層ゴムのせん断変形量を一定に保ったまま積層ゴムに曲げモーメントを与え回転角の変化を調べられる。なお、いずれの実験も常に軸力を一定に保持した状態でやっている。

4.4 実験結果

4.4.1 予備実験 図8は通常の二軸加力試験装置を用いて測定された水平剛性の軸力依存性である。軸力は27.8 kN から333 kN(面圧換算で0.98 MPa から11.76 MPa)まで変化させた。第2章の実験結果を裏付けるように本積層ゴムについても回転を拘束した状態では、実験を行った面圧11.76 MPaまで水平剛性の軸力依存性がないことが確認された。

Table 2 Control modes of combined loading test equipment

Test number	Control mode
Test 1	Shear with rotation restrained
Test 2	Shear with various bending moment
Test 3	Rotation with fixed shear displacement

Fig. 7 Combined loading test equipment

4.4.2 水平復元力特性の軸力依存性 図9から11は回転を拘束した場合の積層ゴムの復元力特性、鉛直変位および回転拘束モーメントの二軸偏心試験装置で測定された結果である(実験1)。実験では、ゴムせん断ひずみ200%に相当する変位116 mmまでの水平復元力を4ケースの鉛直軸力のもと測定した。鉛直軸力は41 kN, 83 kN, 163 kN および244 kNとし、多段積層ゴムの定格質量載荷時の軸力83 kNのそれぞれ0.5, 1, 2および3倍に相当する。本試験は、通常の積層ゴム試験に相当するもので、2本の鉛直方向载荷用アクチュエータの荷重を調節することによって回転拘束のための曲げモーメントを加え、積層ゴムの上下フランジの回転を拘束し、試験中積層ゴムの上下のフランジの平行が保たれるようにしている。実験の範囲内の軸力では、予備実験で確認されたように水平復元力特性変化はほとんどない(図9)。また、鉛直変位も軸力によって変化するがその変化量は微小である(図10)。回転拘束のための曲げモーメントは2本の鉛直方向のアクチュエータの荷重差とアクチュエータの取付間隔より計算して求めた。曲げモーメントの測定結果は軸力とせん断変形の増加にともない大きくなる傾向が認められた(図11)。

4.4.3 水平復元力特性への回転拘束度の影響 図12から15は、モーメント可変-水平変位可変実験(実験2)での測定結果(拘束モーメント、水平復元力、沈み込み量、回転角)で、本実験の場合、積層ゴムに多段積層ゴムの定格支持荷重に相当する軸力(81 kN)を一定に保持しながら、図12に示すせん断変位に比例した曲げモーメントを加えた。実験では、先に述べた実験1で測定した回転拘束モーメントが作用した状態を拘束度100%と定義し、順次拘束度(回転拘束モーメント)を減少させ水平復元力、回転角および沈み込み量を測定した。定義より拘束度0%は回転自由である(図12)。拘束度100%すなわち回転を拘束した状態ではゴムせん断ひずみ200%に相当する変位116 mm付

Fig. 8 Vertical load dependency on horizontal stiffness

Fig. 9 Horizontal restoring force with rotation restrained

Fig. 10 Vertical displacement with rotation restrained condition

Fig. 11 Rotation restraining bending moment

Fig. 12 Rotation restraining bending moment

Fig. 13 Restoring forces under various bending moment

Fig. 14 Vertical displacement under various bending moment

Fig. 15 Rotation angle under various bending moment

近で水平復元力が若干立ち上がる傾向があるのに対して、拘束度が低下すると積層ゴムの水平復元力は順次低下することが確認された。なお、拘束度が小さいとき水平変位の測定結果がせん断ひずみ 200%に相当する変位以内で終了しているのは、鉛直アクチュエータのストロークがリミットに達したためである。また、この実験では拘束度 0%、せん断変位 0.05 m 付近で水平復元力が極大値を取りそれ以上のせん断変位では復元力が減少するいわゆる座屈現象が発生することもあった(図 13)。さらに、鉛直沈み込み量は拘束度が低下すると逆に非常に大きくなることも認められた(図 14)。積層ゴムの回転角は、鉛直沈み込み量と同じように拘束度を小さくすると大きくなり、さらに水平変位が大きくなると、急激に増大することがわかった(図 15)。図 16 に積層ゴムの変形状態を示す。

4・4・4 曲げ剛性 積層ゴムの曲げ剛性のせん断ひずみおよび軸力の影響を調べるための実験を行った(実験 3)。曲げ剛性は実験からえられた各せん断ひずみにおける曲げモーメント-回転角線図(図 17)より、回転角度 0 から 0.01 rad までの曲げモーメントの変化で定義した。図 18 に曲げ剛性のせん断ひずみ依存

Fig. 16 Rubber bearing under combined loading test

Fig. 17 Moment vs. rotation angle

Fig. 18 Bending stiffness under various axial loads

性を、軸力をパラメータに示す。積層ゴムの曲げ剛性はせん断ひずみに大きく依存し、せん断ひずみの増加に伴って急速に低下することがわかった。さらに軸力が大きくなると曲げ剛性も大きくなることが確認された。

5. 回転拘束の理論的検討

積層ゴムは回転すると、水平反力が小さくなる特徴が実験的に確認された。この特徴は理論計算でも示すことができる。この計算は飯塚によって、Haringx の理論を用いてなされている⁽¹⁸⁾。理論計算の出発点は、第2章の式(1)から(3)の方程式である。この方程式を図19に示すような境界条件のもとに解き剛性マトリックスの形式で書くと式(17)のようになる。

Fig. 19 Internal forces and external loads on tilted rubber bearing

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ M_i \\ F_j \\ M_j \end{Bmatrix} = K_H \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & -k_1 & k_2 \\ & k_3 & -k_2 & k_4 \\ & & k_1 & -k_2 \\ \text{sym.} & & & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ \phi_i \\ v_j \\ \phi_j \end{Bmatrix} \quad \dots (17)$$

ここで、 K_H は式(12)で示される値を取り、 k_1 から k_4 は以下になる。

$$k_1 = 1$$

$$k_2 = -\frac{S_b q}{P} \tan \frac{ql}{2}$$

$$k_3 = \frac{S_b q}{K_H} \frac{1}{\tan ql} + \left(\frac{S_b q}{P} \tan \frac{ql}{2} \right)^2$$

$$k_4 = -\frac{S_b q}{K_H} \frac{1}{\sin ql} + \left(\frac{S_b q}{P} \tan \frac{ql}{2} \right)^2$$

したがって、積層ゴムの上端と下端に作用するせん断力の関係は、式(17)の剛性マトリックスの1行めから、

$$F_j = -F_i = K_H(v_j - v_i) - K_H \frac{S_b q}{P} \tan \frac{ql}{2} (\phi_i + \phi_j) \quad \dots (18)$$

となる。ここで、右辺第2項の端部回転角に関する係数が P が大きくなると $-P/2$ で近似できる。

$$F_j = -F_i \approx K_H(v_j - v_i) - \frac{P}{2} (\phi_i + \phi_j) \quad \dots (19)$$

式(19)において、積層ゴムの端部回転を拘束すれば式(20)のようになり式(12)と同じになる。

$$F_j = -F_i = K_H(v_j - v_i) \quad \dots (20)$$

この式(19)からわかるように、積層ゴムの上端と下端に作用するせん断力 F_i と F_j は、積層ゴムの上端と下端の回転角が正であれば、回転角が大きくなるに従って減少していくことがわかる。この解析結果は、実験結果の拘束モーメントが低下すると、積層ゴムの回転角が増加し結果として水平復元力が低下(図12, 15, 13)する現象を説明できる。

6. ま と め

多段積層ゴムに用いられる要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性と回転拘束度の影響について実験と理論

より検討した。結果をまとめると以下ようになる。

(1) 実験と理論解析より、積層ゴムの水平剛性の軸力依存性は、積層ゴムの一次形状率(S_1)と二次形状率(S_2)がそれぞれ影響し、一次形状率と二次形状率がともに大きくなるほど軸力依存性が小さくなることが確認された。今回実験した範囲($S_1=20\sim30$ と $S_2=2.5\sim3.5$)では、積層ゴムの単位面積当たりの軸力すなわち面圧 $0.98\sim7.84$ MPaで、 $S_1=25$ かつ $S_2=3.0$ 以上では軸力依存性はほとんど認められなかった。

(2) 積層ゴムの回転による水平剛性の影響を把握するため、二軸偏心試験装置を開発し、積層ゴムの回転を拘束する曲げモーメントを直接計測した。この曲げモーメントを回転拘束度100%と定義し、回転拘束度を減少させ水平剛性の変化を測定した。実験から水平剛性への回転拘束度の影響では、軸力依存性の少ない積層ゴム(一次形状率と二次形状率がともに大きい)でも、拘束度が低下すると積層ゴムに曲げによる回転が発生し、水平剛性が急激に低下していくことがわかった。さらに、理論解析により回転によって水平剛性が低下していくことを示した。

(3) このことは、既報⁷⁾で示したように、多段積層ゴムの水平剛性が安定板の曲げ剛性を小さくすると急激に低下する現象を説明すると考える。また、要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性を小さくしても、多段積層ゴムの安定板の曲げ剛性が十分大きくないと要素積層ゴムの回転を拘束することができず多段積層ゴム自体の軸力依存性を大きくしてしまう可能性が実験および解析から示された。

本実験の実施に当たってご協力いただいた元東京電機大学工学部学生金子綾一氏と木村英明氏に感謝申し上げる。

文 献

- (1) 藤田隆史・森文男・正木信男・水津洋二, 除振床用多段積層ゴムの実験的研究, 機論, **53**-490, C(1987), 1147-1152.
- (2) 嶺脇重雄・相沢寛・東野雅彦・速水浩, 多段積層ゴムを用いた免震構造システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B(1990), 653-654.
- (3) 藤田隆史・松本洋一・正木信男・水津洋二, 多段積層ゴムを用いた高層建物制振用マスダンパの研究(第1報), 機論, **56**-523, C(1990), 108-113.
- (4) 前林和彦・中村豊・田村和夫・小川雄一郎・山原浩, ハイブリット型制振装置に関する研究(その1)多段積層ゴムを用いたTMDの振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B(1990), 787-788.
- (5) 峰隆俊・福山国夫・相沢寛・山本雅史・増田幸雄, 屋上ヘリポートを可動マスとしたアクティブ型制振システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), B(1994), 893-894.
- (6) 藤田隆史・鎌田崇義・寺本隆幸・北村春幸・水津洋二・正木信男・菅野正・河内宏充, 多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切替え型マスダンパの実用化, 機論, **60**-580, C(1994), 4107-4115.
- (7) 正木信男・田村和夫, 制振装置用大型多段積層ゴムの開発, 構造工学講文集, Vol. 44 B(1998), 237-244.
- (8) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1報, 50トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, **53**-845, C(1987), 71-76.
- (9) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第2報, 100トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, **53**-845, C(1987), 77-81.
- (10) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 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), 機論, **54**-507, C(1988), 2618-2623.
- (11) 多田英之・酒井章・高山峯夫・安藤勝利, 免震構造に関する実物実験(その10)実施構造物の Isolator, 日本建築学会大会講演梗概集, (1986), 817-818.
- (12) 八坂厚彦・水越薫・飯塚真臣・高林勝人, 形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性(その1 復元力特性), 日本建築学会大会講演梗概集, (1991), 599-600.
- (13) 八坂厚彦・水越薫・飯塚真臣・高林勝人, 形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性(その1 復元力特性), 日本建築学会大会講演梗概集, (1991), 601-602.
- (14) Thomas, A. G., The design of laminated bearing 1, *Proc. Conf. NR Earthquake Protection build.*, (1982), 229-246.
- (15) Derham, C. J., The design of laminated bearing 2, *Proc. Conf. NR Earthquake Protection build.*, (1982), 247-257.
- (16) Haringx, L. R., On highly compressive helical springs and rubber rods, and their application for vibration-free mountings, *Phillips Res. Report*, Part 1-3, (1948).
- (17) Stanton, J. F., Stability of laminated elastomeric bearings, *J. Eng. Mech.*, **116**-6(1990), 1351-1370.
- (18) 飯塚真臣, 積層ゴムの剛性マトリックス(Haringx 理論による定式化), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), B(1995), 619-620.