

## 積層ゴム支承の軸挙動を考慮した高層免震建物の地震応答特性に関する研究

諏訪 仁 野畑 有秀  
関 松太郎A Study on Dynamic Characteristics of Base Isolated High-rise Structure  
with Axial Behavior of Laminated Rubber BearingsHitoshi Suwa Arihide Nobata  
Matsutaro Seki

## Abstract

Applying the base isolation system to a high-rise structure, it is very important to protect the laminated rubber bearings from suffering tensile force. The limit aspect ratio, which makes the laminated rubber bearings located at the corner not suffering tensile force, is formulated based on the static equilibrium condition. Furthermore, in the case of an extreme earthquake, assuming that the vertical stiffness degradation of the laminated rubber bearings owing to tensile force, the dynamic behaviors of the base isolated story and superstructure are evaluated. Earthquake response analysis subjected to coupling of horizontal and vertical seismic motion is carried out for the high-rise base isolated structure with the aspect ratio of 2.5. It is verified that the maximum horizontal, vertical and rotational acceleration response of the base isolated story and superstructure are considerably influenced by the vertical stiffness degradation of the laminated rubber bearings. Especially, the maximum horizontal and rotational acceleration response tends to be larger compared with the model that is defined by eliminating vertical stiffness degradation. But it is confirmed that this phenomenon hardly influences on the maximum horizontal, vertical and rotational displacement response of the base isolated story and superstructure.

## 概要

高層建物を免震化するとき、積層ゴムに引張軸力を生じさせないように設計することが重要になる。本研究は、隅柱に位置する積層ゴムに引張軸力を生じさせない建物のアスペクト比(以下、限界アスペクト比と呼ぶ)を静的な釣合条件に基づき定式化し、限界アスペクト比と応答ベースシアー係数および積層ゴムの配置個数の関係をコンター図にまとめた。さらに、極大地震時において仮に積層ゴムに対して引張軸力が働きその鉛直剛性が低下した場合、この現象が免震層および上部建物の応答性状に与える影響を定量的に検討するため、アスペクト比2.5の板状高層免震建物を対象に水平および上下動同時入力に対する地震応答解析を行った。その結果、積層ゴムの鉛直剛性低下が水平、上下および回転加速度応答に与える影響は大きく、特に水平および回転加速度応答が大きくなる傾向があることを示した。しかし、この現象が免震層および上部建物の水平、上下および回転変位応答に対して与える影響はほとんどないことを確認した。

## 1. はじめに

近年、免震建物に対する要求性能も多様化して高層建物の免震化も検討され始め、一部では実用化されつつある<sup>1)</sup>。ところで、既存の免震建物のアスペクト比(=建物高さを見付け幅で除した値)を調べてみるとその上限値の目安は3前後であり、アスペクト比が4を超えるような板状建物の免震化は行われていないのが現状である。この原因として、アスペクト比が大きくなるにつれて水平動による上部建物の転倒モーメントが増加しさらに上下動の影響が加わると積層ゴムに対して引張軸力が働く可能性が高くなり、引張軸力を許容しないという従来の設計クライテリアを満足しなくなるためである。

しかし、積層ゴムに引張軸力を働かせた地震応答解析

も数多く行われ<sup>2),3)</sup>、引張側は伸び変形に圧縮側は圧縮軸力に着目すれば極端に大きな伸び変形にならない限り引張側に伸び変形が生じること自体は問題ないことが指摘されている。さらに、アスペクト比が6を超える免震架構の振動実験も行われ、積層ゴムに引張軸力が働いてもその後の上部建物の挙動に大きな影響が無いことも報告されている<sup>4)</sup>。

このような背景を踏まえ、本研究は隅柱に位置する積層ゴムに対して引張軸力を働かせない建物のアスペクト比を、上部建物の転倒モーメントと積層ゴムの抵抗モーメントの両者を等値した静的な釣合条件に基づき定式化し、この結果を用いて免震周期と建物の限界高の関係を定量的に評価した。さらに、アスペクト比2.5の板状高層免震建物を対象に、水平動および上下動同時入力に対

する地震応答解析を行い、仮に積層ゴムに引張軸力が働き鉛直剛性が低下したとき、この現象が免震層および上部建物の応答性状に与える影響について検討した。

## 2. 限界アスペクト比の定式化

### 2.1 解析モデル

上部建物は、Fig.1に示すようにn質点せん断型弾性モデルとし各層の重量および階高はすべての層に対して等しいとし、各層の階高hは3(m)とした。ここで、1次モードにおける変形分布が逆三角形  $u_i = i$  で振動している状態を考えると、i層の層間変位は  $u_{i+1} - u_i = 1$  となるので層剛性  $K_i$  が次式から求められる。

$$K_i = \frac{1}{2} \{n(n+1) - i(i-1)\} \times m \times \omega^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\omega$  は1次の固有円振動数であり、次式の基礎固定時における設計用1次固有周期  $T_b$  から定めた。

$$T_b = 0.02 \times (n \times h) \dots \dots \dots (2)$$

一方、各層の平面的な重量分布に偏心はないものと仮定し、免震層の床は剛床であるとした。

このとき、建物の見付け幅を  $B(m)$  として、Fig.2に示すようにL個の積層ゴムを並列に等間隔  $(B/L-1)$  で配置した。ここで、積層ゴムの圧縮鉛直剛性  $K_C$  はすべての積層ゴムに対して等しいと仮定した。

### 2.2 解析手法

免震層に微小の回転角  $\theta$  を与えたとき、積層ゴムの圧縮鉛直剛性による免震層の抵抗モーメント  $M_R$  は、それぞれに位置する積層ゴムの鉛直変位が直線分布であると仮定すると次式から得られる。

$$M_R = \sum_{j=1}^L \{K_C \times (e - d_j)^2 \times \theta\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $d_j$  はj番目に位置する積層ゴムの重心からの距離であり次式で与えられる。

$$d_j = \left(\frac{j-1}{L-1} - \frac{1}{2}\right) \times B \dots \dots \dots (4)$$

また、eは重心からの剛心の距離(偏心距離)であり、上記の仮定からe=0となる。以上の条件のもとで(3)式を整理すると、免震層の抵抗モーメント  $M_R$  は次式となる。

$$M_R = \frac{\sum_{j=1}^L \left(j - \frac{1}{2} \times L - \frac{1}{2}\right)^2}{(L-1)^2} \times K_C \times B^2 \times \theta \dots \dots \dots (5)$$

一方、水平動入力に対する免震層位置での転倒モーメント  $M_B$  は次式から得られる。

$$M_B = \sum_{i=1}^n \{m_i \times (\ddot{X}_i + \ddot{X}_g) \times H_i\} \dots \dots \dots (6)$$

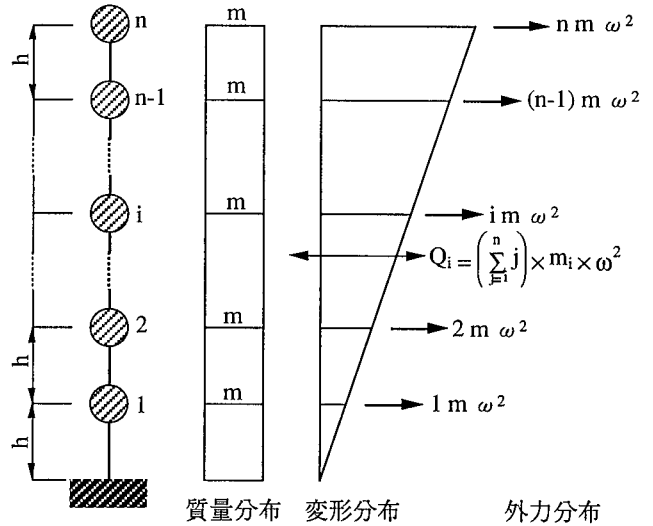


Fig.1 上部建物のモデル化 Model of Superstructure

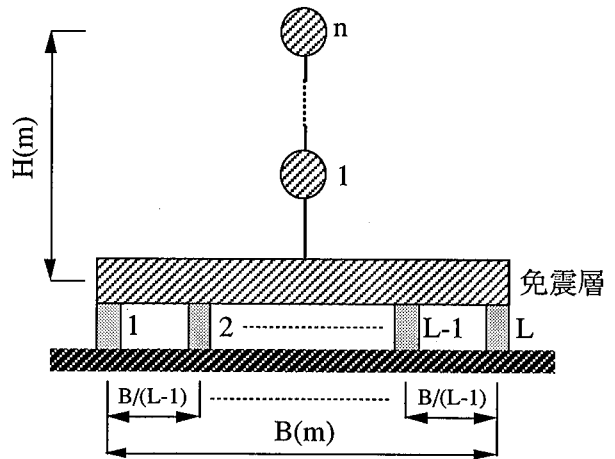


Fig.2 解析モデル Analytical Model

ここで、 $\ddot{X}_i$  はi層の相対加速度応答、 $\ddot{X}_g$  は水平方向の地動加速度、 $H_i$  はi層の免震層位置からの高さである。このとき、免震建物では1次モードが卓越するので(6)式の転倒モーメントを1次モードのみで近似的に評価すると  $M_B$  は次式となる。

$$M_B \approx (\lambda_M \times \lambda_H \times W \times H) \times \alpha_S \dots \dots \dots (7)$$

ここで、Wは建物の全重量、Hは建物の全高さ、 $\lambda_M$  は建物の全質量に対する1次の有効質量の比、 $\lambda_H$  は建物の全高さに対する1次の有効高さの比、 $\alpha_S$  はベースシア係数である。このとき、免震周期比r(すなわち、免震周期を基礎固定時の1次固有周期で除したものを)を1.5~5.0までパラメトリックに変化させたとき、基礎固定時における建物の1次固有周期  $T_b$  と有効質量の比  $\lambda_M$  および有効高さの比  $\lambda_H$  の関係をFig.3とFig.4にそれぞれ示す。これらの図より、建物の1次固有周期の大きさにほぼ関係なく、免震周期比が大きくなるにつれて  $\lambda_M$  は1に、 $\lambda_H$  は0.5に漸近してきており、免震化することによ

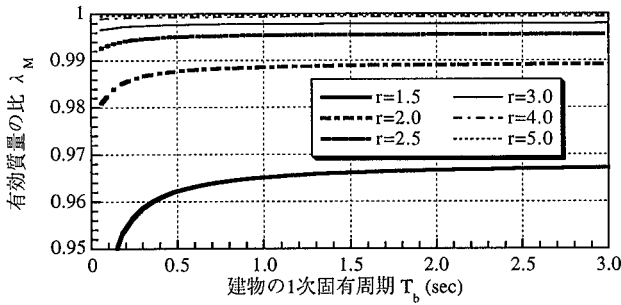


Fig.3 建物の全質量に対する1次の有効質量の比  
Ratio of First Mode Effective Mass over Total Mass

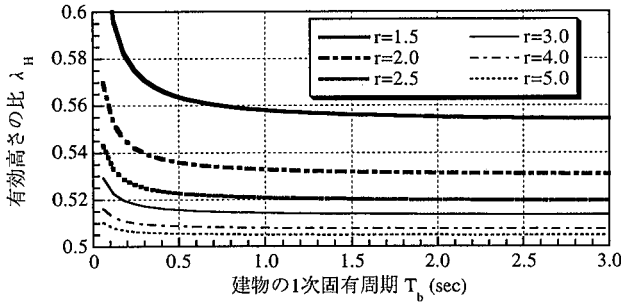


Fig.4 建物の全高さに対する1次の有効高さの比  
Ratio of First Mode Effective Height over Total Height

り上部建物が剛体に近づくことがわかる。例えば、免震周期比 $r$ が3のとき、 $\lambda_M$ と $\lambda_H$ は建物の1次固有周期の大小に関係なく $\lambda_M \approx 0.998$ 、 $\lambda_H \approx 0.515$ 程度であるといえる。

以上のことより、(5)式の免震層の抵抗モーメント $M_R$ と(7)式の転倒モーメント $M_B$ を等値することにより、免震層の回転角 $\theta$ が得られる。したがって、地震時において引張軸力が生じる可能性が高い隅柱に位置する積層ゴムの軸力 $P$ は、水平動入力に対して免震層の回転により生じる引張軸力 $N_H$ および上下動入力に対して生じる引張軸力 $N_V$ と長期軸力 $N$ を用いて次式から得られる。

$$P = (N_H + N_V) - N \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{ここに、 } N_H = K_C \times \left(\frac{1}{2} \times B \times \theta\right) ; N_V = \alpha_V \times N$$

このとき、 $P \geq 0$ の状態になると引張軸力が働くことになるので、隅柱に位置する積層ゴムに引張軸力を生じさせない建物のアスペクト比 $\eta$ (以下、限界アスペクト比と呼ぶ)が次式のように定式化できる。

$$\eta = C \times \left(\frac{N}{W}\right) \times \left(\frac{1 - \alpha_V}{\alpha_S}\right) \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{ここに、 } C = 2 \times \frac{\sum_{j=1}^L \left(j - \frac{1}{2}L - \frac{1}{2}\right)^2}{(L-1)^2} \times \frac{1}{\lambda_M \times \lambda_H}$$

また、長期軸力 $N$ は積層ゴムの配置個数 $L$ に対応させて次式で定めた。

$$N = \frac{W}{L} \quad (L=2) ; N = \frac{1}{2} \times \left(\frac{W}{L-1}\right) \quad (L \geq 3)$$

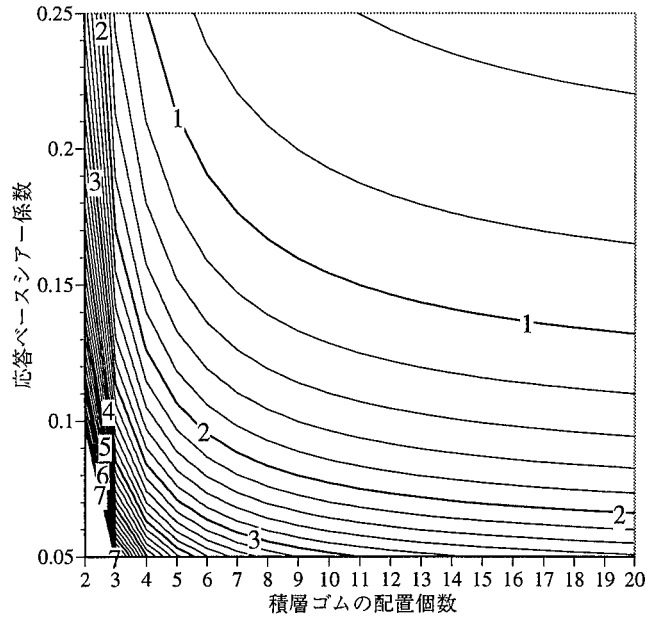


Fig.5 限界アスペクト比  
Limit Aspect Ratio with respect to Relationship between Arrangement of Laminated Rubber Bearings and Response Base Shear Coefficient

### 2.3 解析結果

上下動入力により長期軸力 $N$ の0.3倍の引張軸力が生じた(すなわち、 $\alpha_V = 0.3$ )と仮定した場合、積層ゴムの配置個数および応答ベースシアー係数をパラメトリックに変化させたとき、限界アスペクト比との関係をコンター形式でFig.5に示す。

建物の平面形状から積層ゴムの配置個数を決定し応答ベースシアー係数が地震応答解析から得られると、Fig.5を用いて限界アスペクト比が評価でき、この数値に建物の見付け幅 $B$ (m)をかけることにより隅柱に位置する積層ゴムに対して引張軸力を生じさせない建物の高さ(以下、建物の限界高さと呼ぶ)が容易に推定できることになる。

### 3. 免震周期と建物の限界高さの関係

免震周期を長周期化して上部建物の転倒モーメントを低減することにより、隅柱に位置する積層ゴムに対して引張軸力を生じさせない建物の限界高さをどの程度まで大きくすることができるのかについて検討した。

ここで、免震装置部は天然ゴム系積層ゴムに履歴ダンパーを並列型に組み合わせたものとし、履歴ダンパーの降伏せん断力係数は0.05に設定した。また、入力地震波は日本建築センターのレベル2地震波を用い、減衰定数5%の最大速度応答が100(cm/s)となるように最大加速度を規準化した。このとき、それぞれの免震周期に対して地震応答解析を行い応答ベースシアー係数を求めた。

建物の1スパンの長さを8(m)の間隔としたとき、積層ゴムの配置個数を2~10個までパラメトリックに変化させたときの免震周期と建物の限界高さの関係をFig.6に示す。この図から、建物の限界高さをより大きくする

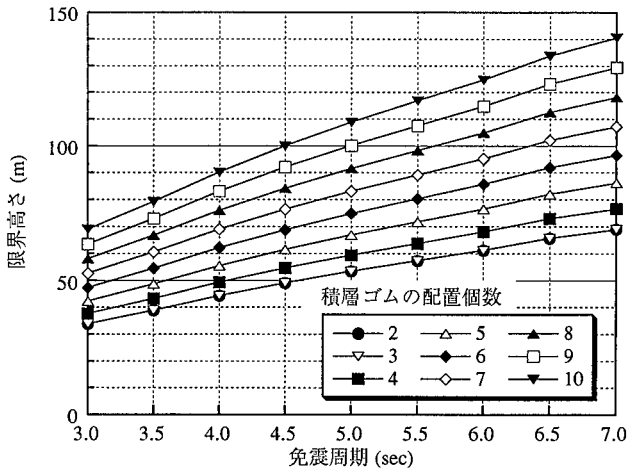


Fig.6 免震周期と建物の限界高さの関係  
Relationship between Period of Base Isolated System and Limit Height of Structure

ためには、積層ゴムの配置個数を多くして建物の見付け幅を大きくし、かつ免震周期をより長周期化すればよいことがわかる。例えば、建物の見付け幅が40(m)のとき(積層ゴムの配置個数が6個のときに対応)、高さ100(m)の免震建物を実現するためには免震周期を7(sec)以上になければならないことがわかる。

ただし、以上の検討は免震層の床が剛床で回転し、かつ建物全体が1次モードのみで上下振動するという条件のもとに得られた結果である。しかし、実際には基礎梁の上下変形などにより積層ゴムに対する引き抜き現象は緩和され、建物の限界高さはこの検討結果よりもさらに大きくなると考えられる。

#### 4. 板状高層免震建物に対する地震応答解析

極大地震時において、仮に積層ゴムに引張軸力が働きその鉛直剛性が低下したとき、この現象が免震層や上部建物の応答性状に与える影響を定量的に評価しておくことは、高層免震建物を実現化するうえで重要であると思われる。このため、積層ゴムの引張鉛直剛性を剛性低下するものとし、二種類でモデル化し、このモデル化の相違が応答性状に与える影響を検討した。

##### 4.1 上部建物のモデル化

解析建物として、Fig.7に示すようにアスペクト比2.47の連壁耐震壁からなる14階建てRC造板状高層集合住宅を採用した。

このとき、各層の曲げモーメント-曲率の関係は、コンクリートの応力度-ひずみ度関係を $e$ 関数で仮定し柱と耐震壁を一体とした塑性理論から求めこれをトリリア型に近似的に置換した。一方、各層のせん断力-せん断ひずみ度関係は、ひび割れ点を主応力度式から求め、またせん断終局強度は広沢式から求めせん断ひずみ度は $4 \times 10^{-3}$ に固定した。ここで、各層のM- $\phi$ 関係とQ- $\gamma$ 関係を、Table1にまとめて示す。

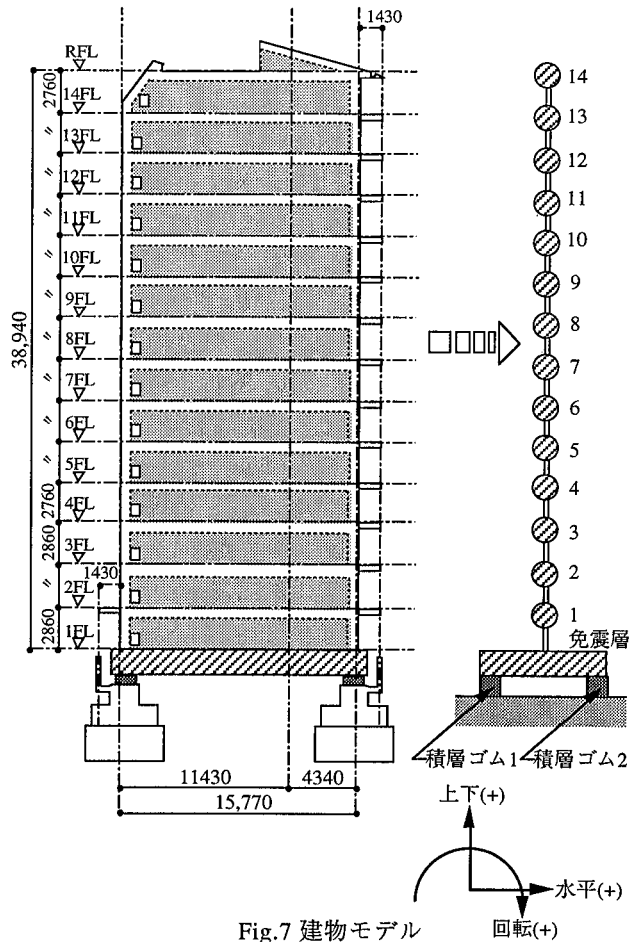


Fig.7 建物モデル  
Analytical Model

以上の条件のもとで、上部建物を14質点軸曲げせん断モデルに置換した。ここで、曲げモーメント-曲率の復元力特性はTakedaモデルで、せん断力-せん断ひずみ度の復元力特性は無履歴弾性モデルでモデル化し、軸剛性は弾性とした。また、減衰型は歪エネルギー比例型で与えて各要素の減衰定数を3%とした。

##### 4.2 免震装置部のモデル化

免震装置部は、天然ゴム系積層ゴムに履歴ダンパーを並列型に組み合わせたものとした。

積層ゴムの直径は120(cm)、水平剛性は2.57(t/cm)、圧縮鉛直剛性は7872(t/cm)とし、水平方向の復元力特性は線形モデルで、上下方向は免震層のせん断変形に伴う圧縮鉛直剛性の低下を考慮するため有効支持面積に比例して低下させ、積層ゴムの上下方向の減衰定数は4%を仮定した。さらに、積層ゴムに引張軸力が働いた場合はFig.8に示すように鉛直剛性が低下しないモデル(以下、モデル1と呼ぶ)と引張鉛直剛性が低下し圧縮鉛直剛性の1/60となるモデル(以下、モデル2と呼ぶ)の二種類でモデル化して比較検討した。

履歴ダンパーの降伏変位は1(cm)、降伏せん断力係数は0.042とし、復元力特性は変動軸力による履歴ダンパー降伏耐力の変動を無視したバイリニア型で与えた。

このとき、免震周期は3.82(sec)に、建物全体の1次の上

Table 1 上部建物の概要  
Specification of Superstructure

層	W(t)	I(t*cm**2)	$\phi c$ (1/cm)	Mc(t*cm)	$\phi u$ (1/cm)	Mu(t*cm)	$\gamma c$	Qc(t)	$\gamma u$	Qu(t)
14	145.7	2.58E+7	4.0E-8	1.10E+5	1.49E-6	5.71E+5	1.72E-4	419.5	4.0E-3	1077.9
13	117.6	2.56E+7	6.0E-8	2.20E+5	1.36E-6	7.30E+5	1.82E-4	489.6	4.0E-3	1163.0
12	117.6	2.56E+7	8.0E-8	3.10E+5	1.38E-6	8.16E+5	1.92E-4	516.5	4.0E-3	1173.1
11	117.5	2.56E+7	9.0E-8	3.60E+5	1.41E-6	9.02E+5	2.01E-4	542.0	4.0E-3	1183.1
10	117.5	2.56E+7	1.1E-7	4.60E+5	1.43E-6	9.87E+5	2.10E-4	566.3	4.0E-3	1193.2
9	117.5	2.56E+7	1.3E-7	5.30E+5	1.46E-6	1.07E+6	2.19E-4	589.7	4.0E-3	1203.3
8	119.0	2.59E+7	1.4E-7	6.20E+5	1.46E-6	1.21E+6	2.22E-4	634.3	4.0E-3	1322.6
7	119.8	2.61E+7	1.5E-7	7.10E+5	1.49E-6	1.30E+6	2.29E-4	656.1	4.0E-3	1332.6
6	119.9	2.61E+7	1.7E-7	7.90E+5	1.51E-6	1.38E+6	2.37E-4	677.2	4.0E-3	1322.2
5	119.7	2.61E+7	1.8E-7	8.70E+5	1.53E-6	1.47E+6	2.44E-4	697.6	4.0E-3	1246.1
4	119.8	2.61E+7	2.0E-7	9.40E+5	1.56E-6	1.55E+6	2.51E-4	717.5	4.0E-3	1191.4
3	121.6	2.65E+7	2.2E-7	1.00E+6	1.58E-6	1.63E+6	2.57E-4	737.1	4.0E-3	1148.0
2	121.9	2.66E+7	2.4E-7	1.08E+6	1.61E-6	1.72E+6	2.64E-4	756.2	4.0E-3	1117.4
1	121.8	2.68E+7	2.6E-7	1.12E+6	1.63E-6	1.80E+6	2.71E-4	774.9	4.0E-3	1085.6
免震層	150.1	3.20E+7								

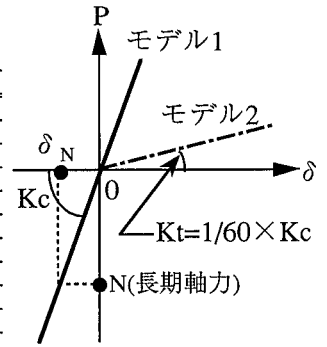


Fig.8 鉛直剛性のモデル化  
Vertical Stiffness Model of Laminated Rubber Bearing

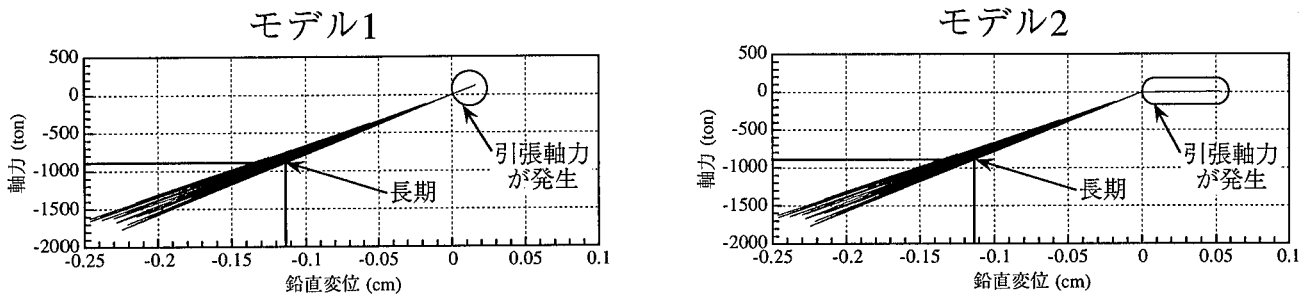


Fig.9 積層ゴムの鉛直変位と軸力の関係  
Relationship between Vertical Deformation and Axial Force of Laminated Rubber Bearing

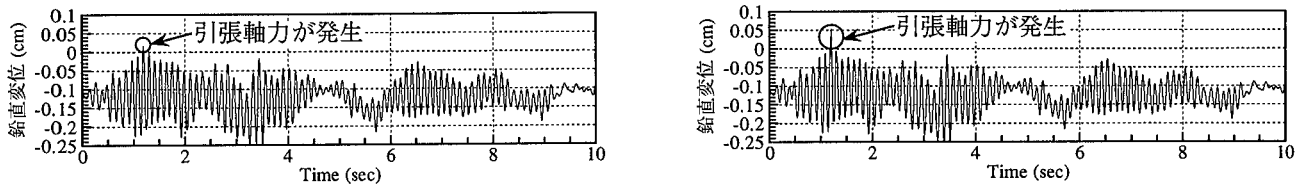


Fig.10 積層ゴムの鉛直変位の応答波形  
Response Wave of Vertical Deformation of Laminated Rubber Bearing

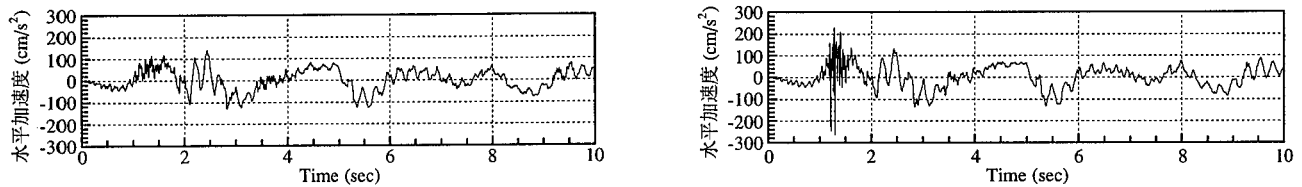


Fig.11 免震層の水平加速度の応答波形  
Response Wave of Horizontal Acceleration of Base Isolated Story

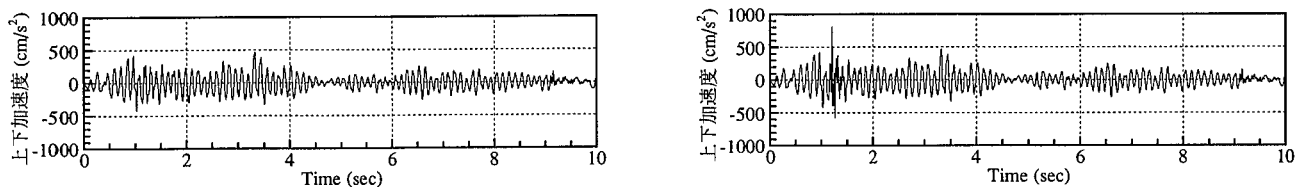


Fig.12 免震層の上下加速度の応答波形  
Response Wave of Vertical Acceleration of Base Isolated Story

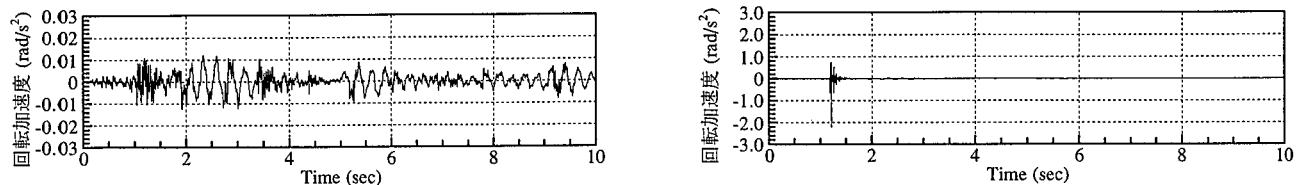


Fig.13 免震層の回転加速度の応答波形  
Response Wave of Rotational Acceleration of Base Isolated Story

下周期は0.12(sec)となる。

### 4.3 入力地震波

入力地震波は、エルセントロ波の水平成分(NS)と上下成分(UD)とし、水平方向の最大速度が50(cm/s)となるように水平方向の最大加速度を増幅させ、上下方向もこれと同比率で増幅させたものとする。このとき、水平方向の最大加速度は510.8(cm/s<sup>2</sup>)、同様に上下方向の最大加速度は308.4(cm/s<sup>2</sup>)となる。

以下の検討では、水平および上下方向同時入力に対する地震応答解析を行い、応答解析の時間刻みは積層ゴムの鉛直剛性が変化したときに生じる不平衡力をできるだけ小さくするため1/2000(sec)とした。また、数値積分は $\beta=0.25$ の平均加速度法を用いた。

### 4.4 免震層の応答性状

#### 4.4.1 各種の応答波形

Fig.7において積層ゴム1の鉛直変位と軸力の関係を、モデル1とモデル2に対してFig.9に示す。ただし、モデル1とモデル2ともに積層ゴム2については引張軸力は働いていない。なお図中、圧縮側を負、引張側を正で表現している。この図より、積層ゴムに引張軸力が働いたとき、モデル1では引張鉛直変位は小さいが引張軸力が大きくなり、モデル2ではこの逆の現象となっているといえる。また、免震層のせん断変形が積層ゴムの直径と比較すると小さいため、免震層のせん断変形に伴う積層ゴムの圧縮鉛直剛性の低下は小さく圧縮側の鉛直剛性はほぼ線形であることがわかる。

つぎに、Fig.7において積層ゴム1の鉛直変位の応答波形をFig.10に、免震層の重心位置での水平加速度の応答波形をFig.11に、上下加速度の応答波形をFig.12に、回転加速度の応答波形をFig.13にそれぞれ示す。モデル2の応答波形に着目すると、1秒付近で積層ゴムに引張軸力が働いた瞬間に免震層の回転加速度がモデル1と比較して大きくなり、この直後に免震層の水平加速度と上下加速度の応答波形にパルス波が生じていることがわかる。しかし、この現象は一過性であり、2秒付近からはモデル1と2の応答波形を比較してもその差異はほとんどないといえる。

#### 4.4.2 応答波形の詳細検討

モデル2について、積層ゴムに引張軸力が働いた前後の時刻歴の応答性状を詳細に調べるため、Fig.10～13の応答波形に対して解析時刻が1.1～1.4(sec)までの間を拡大してFig.14～17にそれぞれ示す。

積層ゴムの鉛直変位波形に着目すると、解析時刻が約1.18～1.21(sec)の間で引張軸力が働いていることがわかる。ここで、Fig.15～17に対して積層ゴムに引張軸力が働いている時間帯を矢印⇔で図中に表示している。

免震層の水平加速度波形を見ると、積層ゴムに引張軸力が働いた直後に水平加速度が正側に増加して静的に左向きの方が働き、1.19(sec)付近からは正側の水平加速

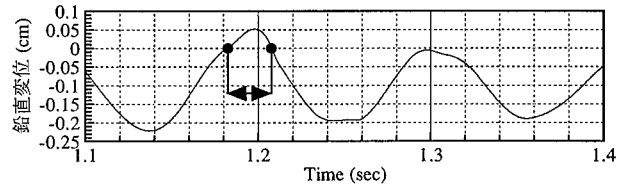


Fig.14 積層ゴムの鉛直変位の応答波形(1.1～1.4sec)  
Response Wave of Vertical Deformation of Laminated Rubber Bearing (Time is from 1.1 to 1.4 sec)

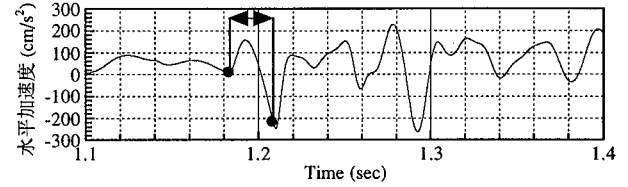


Fig.15 免震層の水平加速度の応答波形(1.1～1.4sec)  
Response Wave of Horizontal Acceleration of Base Isolated Story (Time is from 1.1 to 1.4 sec)

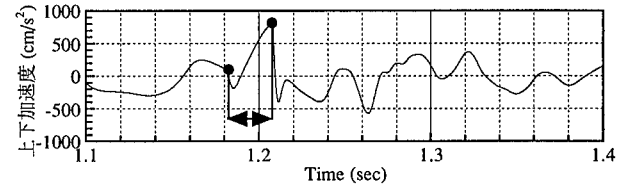


Fig.16 免震層の上下加速度の応答波形(1.1～1.4sec)  
Response Wave of Vertical Acceleration of Base Isolated Story (Time is from 1.1 to 1.4 sec)

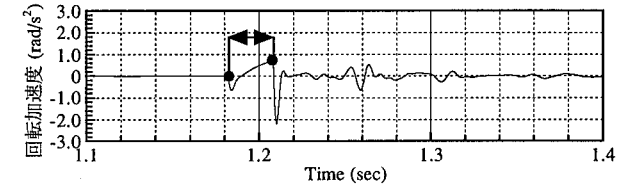


Fig.17 免震層の回転加速度の応答波形(1.1～1.4sec)  
Response Wave of Rotational Acceleration of Base Isolated Story (Time is from 1.1 to 1.4 sec)

度は徐々に減少し始めて1.2(sec)付近で負側に転じ、1.21(sec)付近で積層ゴムが着地した直後に再び正側に戻っていることがわかる。

免震層の上下加速度波形を見ると、積層ゴムに引張軸力が働いた直後にそれまで正側の上下加速度が負側に転じて静的に上向きの力(すなわち、引張軸力)が働き、1.19(sec)付近からは再び正側に転じて静的な圧縮軸力が徐々に増加して引張軸力を減少させる力が働き、1.21(sec)付近で積層ゴムが着地した後は鉛直剛性が引張側から圧縮側に移行し剛性が固くなるため再び引張軸力が働いていることがわかる。

免震層の回転加速度波形を見ると、積層ゴムに引張軸力が働くまでの間その変化はほとんどないが、引張軸力が働いた後は上下加速度とほぼ同じ挙動を示しているといえる。

#### 4.4.3 応答波形のスペクトル解析

免震層の回転加速度で生じているパルス波がどの周期帯の成分を有しているを調べるため、免震層の回転加速度のフーリエスペクトルをFig.18に示す。ただし、バンド幅0.5(Hz)のParzenの

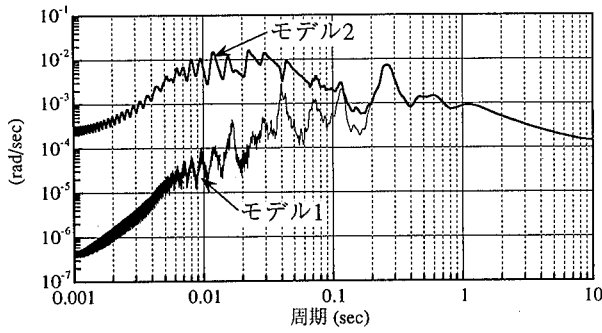


Fig.18 免震層の回転加速度のフーリエスペクトル  
Fourier Spectrum of Rotational Acceleration of Base Isolated Story

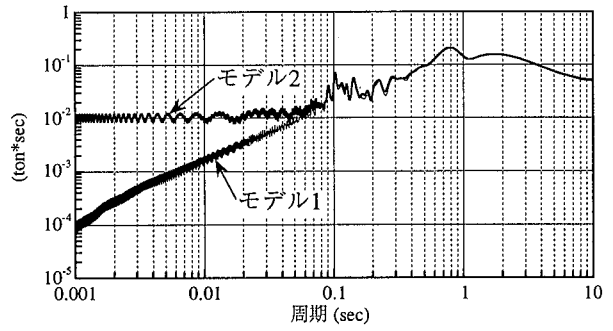


Fig.20 不平衡軸力のフーリエスペクトル  
Fourier Spectrum of Unbalanced Axial Force

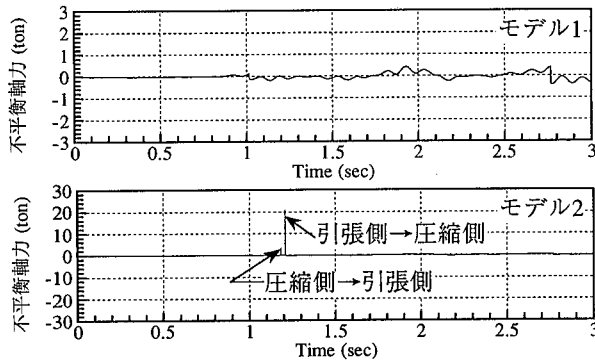


Fig.19 積層ゴムの鉛直剛性変化による  
不平衡軸力の応答波形

Response Wave of Unbalanced Axial Force owing to Vertical Stiffness Variation of Laminated Rubber Bearing

ラグウインドで平滑化している。モデル1とモデル2を比較すると、周期が約0.1(sec)以上の長周期領域においてはその差異はほとんどないことがわかる。しかし、これよりも短周期領域ではモデル2のフーリエ振幅がモデル1と比較して極端に大きくなっていることがわかる。

この原因として、積層ゴムの鉛直剛性が変化したとき、解析上の軸力からスケルトン上の軸力を差し引いた量を不平衡軸力と定義し、次ステップでこの量を外力項に加えて解除するという数値積分を用いていることが考えられる。このため、積層ゴム1の不平衡軸力の応答波形を、モデル1とモデル2について解析時刻が0~3(sec)の間をFig.19に示す。モデル2の応答波形に着目すると、積層ゴムに引張軸力が働いて浮き上がった瞬間と着地した瞬間にパルス波が2回生じていることがわかる。

ここで、積層ゴム1の不平衡軸力のフーリエスペクトルをFig.20に示す。周期が約0.1(sec)以下の短周期領域に着目すると、フーリエ振幅がモデル1では徐々に減少していくが、モデル2ではサイドローブが生じているもののフーリエ振幅は一定値になる傾向があり短周期の領域まで成分を有している。この現象は、単位衝撃関数のフーリエスペクトルは全周期帯にわたり一定の成分を有することからも理解できる。

一方、積層ゴムに生じる不平衡軸力が免震層へのみかけの回転入力となるので、免震層の回転方向にのみ単位外力を加えたときの免震層の回転方向の刺激関数を各固

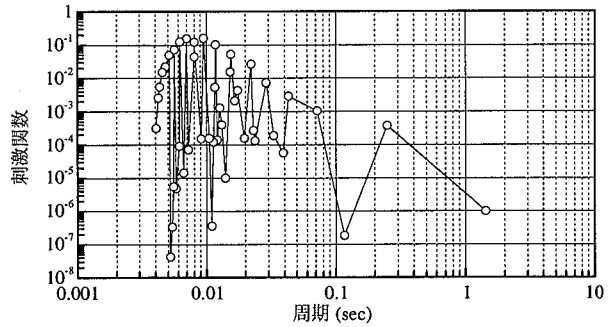


Fig.21 免震層の回転方向の刺激関数  
Participation Function of Base Isolated Story

有モード(ここでは、45モード存在する)に対してFig.21に示す。この図より、周期が約0.01(sec)前後の刺激関数が極端に大きくなっており、このためモデル2の回転加速度のフーリエ振幅が周期0.01(sec)前後で極端に大きくなるといえる。ただし、本解析では減衰型を歪エネルギー比例型で与えているため高次モードまではほぼ4%程度の減衰定数となり、短周期領域の成分が増幅したと考えられる。ちなみに、減衰を剛性比例型で与えたときには周期0.01(sec)前後の固有モードは過減衰振動となり、この周期帯の成分が増幅しないことを確認している。

4.5 上部建物の応答性状

各層の最大水平、上下および回転変位応答をFig.22~24に、最大水平、上下および回転加速度応答をFig.25~27にそれぞれ示す。ただし、すべての層について曲げモーメントとせん断力は弾性範囲に収まっている。

モデル1とモデル2の応答結果を比較すると、積層ゴムの鉛直剛性低下が上部建物の最大変位応答に与える影響は水平、上下および変位応答に対してはほとんどないといえる。しかし、この現象が各種の加速度応答に対して与える影響は大きく、特に回転加速度の影響を受けて水平加速度応答が大きくなる傾向があるといえる。これらの解析結果は、アスペクト比4.5の免震架構の振動実験を行うとロッキング振動により頂部の水平加速度応答が大きくなるという実験結果とも一致している<sup>4)</sup>。

ただし、以上の検討は積層ゴム2個で支持された板状建物の梁間方向を対象とし、かつFig.8に示すように積層ゴムに引張軸力が働いた瞬間に鉛直剛性が極端に低下す

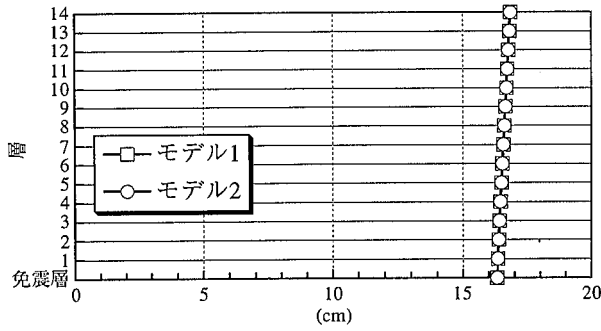


Fig.22 各層の最大水平変位応答  
Maximum Horizontal Displacement of Each Story

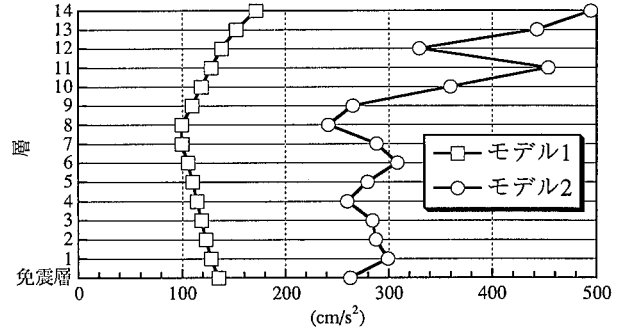


Fig.25 各層の最大水平加速度応答  
Maximum Horizontal Acceleration of Each Story

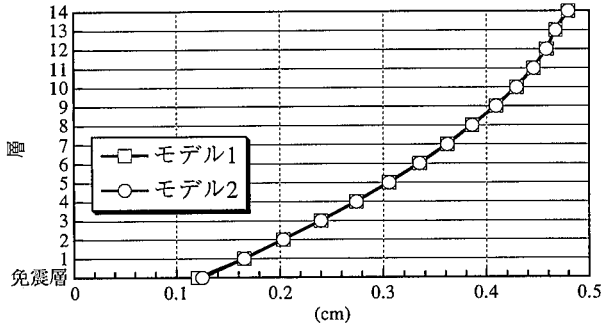


Fig.23 各層の最大上下変位応答  
Maximum Vertical Displacement of Each Story

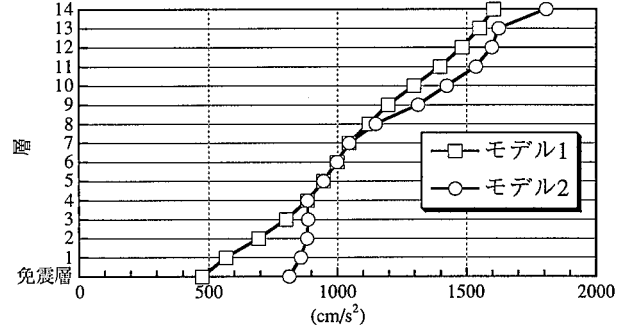


Fig.26 各層の最大上下加速度応答  
Maximum Vertical Acceleration of Each Story

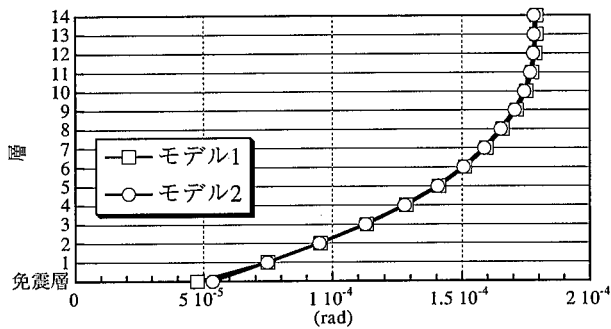


Fig.24 各層の最大回転変位応答  
Maximum Rotational Displacement of Each Story

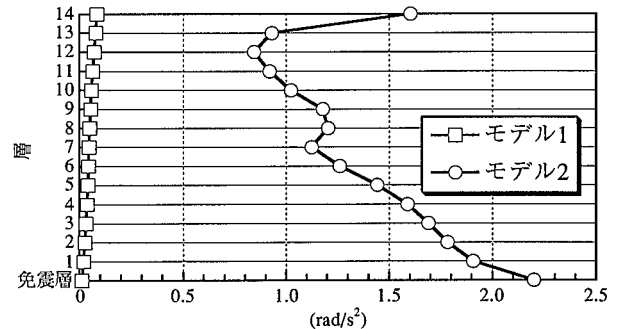


Fig.27 各層の最大回転加速度応答  
Maximum Rotational Acceleration of Each Story

るといふ条件のもとに得られた結果であり、通常の多スパンの建物を対象とした場合、加速度応答の増幅は低減されると考えられる。

## 5. まとめ

高層建物を免震化するに当り、隅柱に位置する積層ゴムに引張軸力を生じさせない建物のアスペクト比を静的な釣合条件に基づき定式化した。さらに、極大地震時において仮に積層ゴムに引張軸力が働き鉛直剛性が低下したとき、この現象が免震層や上部建物の応答性状に与える影響を検討した。その結果、積層ゴムの鉛直剛性低下が免震層や上部建物の加速度応答に与える影響は大きく、特に水平および回転加速度応答が大きくなる傾向があることを示した。しかし、免震層の上下および回転変位を含め、この現象が上部建物の水平、上下および回転変位応答に与える影響はほとんどないことを確認した。

今後の課題として、免震建物の上下方向を含めた高次モードの減衰評価ならびに積層ゴムの引張領域における詳細モデルの検討などが考えられる。

## 参考文献

- 1) 村田 信義ほか：超高層免震構造の開発と適用(その1)～(その5),大会梗概集,B-2,p.589～598,(1998.9)
- 2) 田村 和夫,菊地 優,北村 佳久：細長い立面形状を有する免震建築物の極大地震時応答解析,大会梗概集,B-2, p.587～588,(1998.9)
- 3) 諏訪 仁,関 松太郎,寺村 彰：積層ゴムの鉛直剛性低下を考慮した高層免震構造物のロッキング振動,構造工学論文集,Vol.44B,p.231～236,(1998.3)
- 4) 猿田 正明,田村 和夫,菊地 優：積層ゴムに引張軸力を生じる免震架構の振動実験,大会梗概集,B-2,p.669～670,(1997.9)