

3次元免震装置における積層ゴムの回転剛性評価と解析モデルの検証

西村 拓也 渡辺 宏一
(技術研究所) (技術研究所)

Evaluations of Analytical Models on Rotational Characteristics of Rubber Bearings for 3D dimensional Seismic Isolation Device

by Takuya Nishimura and Koichi Watanabe

Abstract

The mechanical characteristics of a rubber bearing subjected to rotational deformation on the flange plate should be properly evaluated in order to express the structural performances of the previously developed 3D seismic isolation system. In this study, an analytical model for a rubber bearing has been developed to evaluate the rotational stiffness under large horizontal deformations and low compressive pressures. Static loading tests of a full-scale rubber bearing have been carried out under the condition that the lower flange plate is connected to a pin joint that allows the flange plate's rotation. The developed analytical model is able to take account of a nonlinear property of the moment-rotation relationship of a rubber bearing and explain the results of the static loading tests under constant axial loads as well as variable ones.

概要

3次元免震装置の力学特性を表すためには、構成要素の一つである積層ゴムのフランジ面に回転が生じる場合の力学挙動を適切に評価する必要がある。本論では、低面圧かつ大変形時における積層ゴムの回転剛性の評価法を提案する。はじめに3次元免震装置に用いる実大天然ゴム系積層ゴムの下フランジ面をピン支持とした圧縮せん断試験を実施した。次に、既往の研究を組み合わせた評価モデルと試験結果との整合性を検証した。本評価モデルは、積層ゴムの回転剛性における非線形特性を表現でき、さらに一定軸力条件下のみならず変動軸力時においても試験結果を模擬することができた。

§ 1. はじめに

建物全体を対象とした従来の免震構造は水平方向の揺れを対象としている。上下方向に対しても免震効果を発揮できれば、従来の免震効果に加え、縦揺れの衝撃を緩和でき、居住者の不安感を低減することも可能となると考えられる。この観点から低中層建物向けの3次元免震システムが開発され、集合住宅への適用が計画されている^{1)~3)}。上記システムにて使用する3次元免震装置を図-1に示す。本装置は、複数の空気ばね、せん断力伝達装置(スライダー)、積層ゴムおよびこれらの部材を繋ぐ鉄骨部材から構成される。空気ばねは上下方向の免震装置である。空気ばねと同レベルに設置されるスライダーは、水平方向のせん断力を伝達する。鉄骨架台上に設置された積層ゴムは水平方向の免震装置である。3次元免震装置の変形状態模式図を図-2に示す。積層ゴムに水平変形が生じた場合、鉛直力による付加曲げが生じる。従来の免震構造では

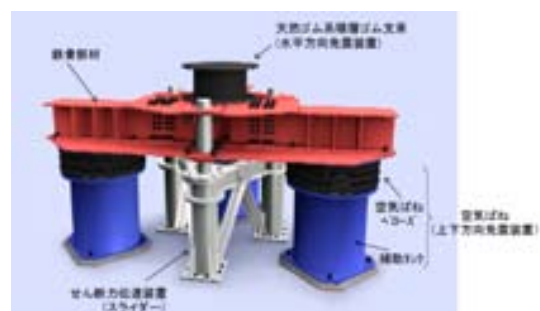


図-1 3次元免震装置

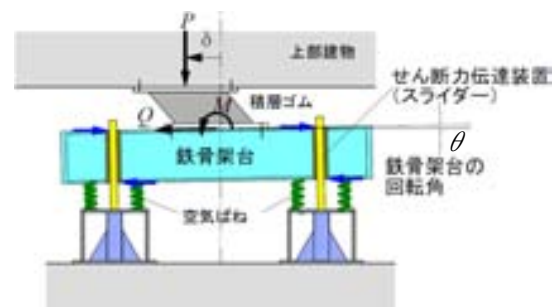


図-2 3次元免震装置の変形状態模式図

積層ゴム上下面の回転角は微小であるとみなし、積層ゴムの上下回転角による影響は考慮されない。一方、3次元免震装置においては積層ゴムの下面に接続する鉄骨部材は軸剛性の小さな空気ばねによって支持されているため、通常の免震に比べ積層ゴム下面の回転角が大きくなる可能性がある。したがって3次元免震装置では、フランジ下端の回転角を精度よく評価する必要がある。また、個々の空気ばねに生じる鉛直変位やスライダの軸部傾斜量が許容値内であることが求められる。これらの値を算出する際に、積層ゴム、空気ばね、鉄骨部材およびせん断力伝達装置の剛性を考慮することが必要となる。本論では、このうち通常の免震では特に問題とならない積層ゴムの回転剛性に関する評価法について検討する。3次元免震装置における積層ゴムの常時面圧は 4.2N/mm^2 であり、これは空気ばねの常時鉛直荷重から決定される。また大地震時を想定し、ここでは低面圧かつ大変形時を検討対象とする。なお積層ゴム以外についての力学特性は、文献²⁾で述べられている。

本論では、実大スケールの3次元免震装置で使用される直径 600mm の天然ゴム系積層ゴムに対し、下面フランジに回転角を伴う圧縮せん断試験を実施し、積層ゴムの力学挙動を確認する。次に試験から得られた積層ゴムの回転剛性が既往の文献における知見を組み合わせた評価モデルにより表現できることを確認する。本論で用いた評価モデルは、文献⁴⁾にて提案された積層ゴムの水平および回転自由度を考慮したモデルに、文献⁵⁾により提案されたモーメント回転角関係における非線形曲げ特性を組み合わせて表現したものである。なお文献⁵⁾では、積層ゴムの回転剛性に関わる非線形特性はせん断応力度-せん断ひずみ特性の実験結果から求めており、曲げモーメント-回転角関係において評価モデルと実験結果を直接比較していない。本論では曲げモーメント-回転角の実験結果と評価モデルによる計算値を直接比較しその整合性を確認する。

§ 2. 積層ゴムの圧縮せん断試験

積層ゴムの下面に回転角が作用する場合の積層ゴム上端のモーメントと下端のせん断力を評価するために、積層ゴム単体の静的加力を実施した。

2.1 試験概要

試験装置は、図-3に示すような積層ゴムの下端をピン支持とする機構を2軸せん断試験機に取り付けた

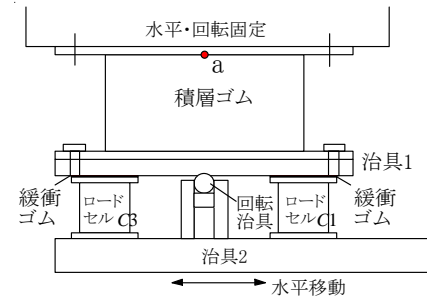


図-3 加力装置側面図

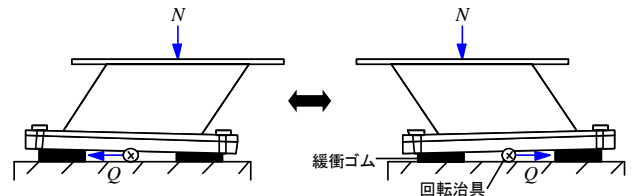


図-4 積層ゴムの変形模式図

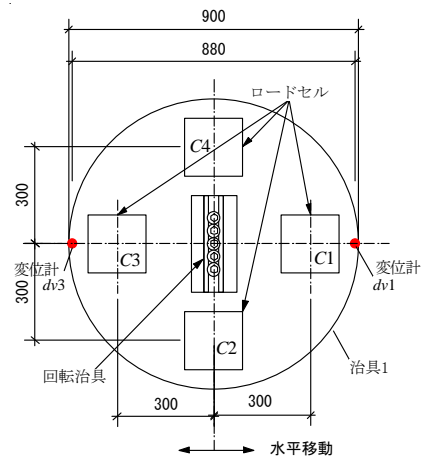


図-5 試験治具1およびロードセル配置図

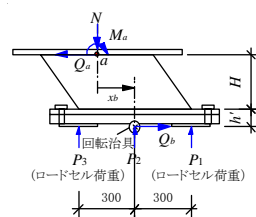


図-6 モーメント M_a

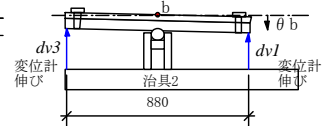


図-7 回転角 θ_b

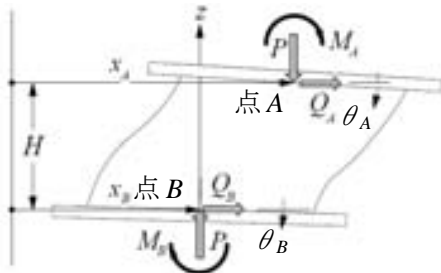
ものである。積層ゴム上端は水平・回転ともに固定とし、積層ゴム下端は水平移動が可能であり、緩衝ゴムの変形に応じて回転が可能である。試験体の変形状態を図-4に示す。積層ゴムに水平せん断変形を与えると、積層ゴム下フランジ鋼板 ($\phi 900\text{mm}$ 、厚さ 25mm) とボルト締めにより一体となった治具1 (鋼板厚さ 50mm) が図-3に示す回転治具を中心として回転角を生じる。治具1の下面にロードセルが4個設置され、

表－１ 試験体諸元

せん断弾性率 G (N/mm ²)	0.34
ヤング率 E_0 (N/mm ²)	0.49
補正係数 κ	0.95
体積弾性率 E_b (N/mm ²)	1961
外径 D (mm)	600
内径 d (mm)	15
ゴム厚 t_r (mm)	3.35
ゴム総数 n	45
中間鋼板厚 t_s (mm)	3.2
1次形状係数 S_1	43.7
2次形状係数 S_2	4
体積弾性率にて補正された ゴムの曲げ弾性係数 $E_{rb}^{(6)}$ (N/mm ²)	454.7
フランジ外径(mm)	900
フランジ厚さ(mm)	25

表－２ 試験条件

No.	面圧 σ (N/mm ²)	せん断 ひずみ γ (%)	緩衝ゴムの剛性
T-1	4.2	±200	大
T-2	4.2	±200	小
T-3	4.2	±225	大
T-4	2.3～8.5	±200	大
T-5	2.7～12.4	±225	大



図－８ 積層ゴム評価モデル概念図

計測した荷重はモーメントの算出に用いられる。回転治具およびロードセルの配置図を図－５に示す。緩衝ゴムの挿入位置は、治具１と各ロードセルの間とした。ここでは、図－６および図－７に示す回転角 θ_b とモーメント M_a は以下の式(1)および式(2)より算出した。

$$\theta_b = \frac{dv3 - dv1}{880} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M_a &= P_1(x_b + 300) + P_2x_b + P_3(x_b - 300) + Q_b(H + h') \\ P_2 &= N - P_1 - P_3 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

x_b : 下フランジプレート中央の水平変位(mm)

H : 積層ゴム高さであり、291.55 (mm)

h' : 下フランジ上面から回転治具中心までの距離であり、100 (mm)

Q_b : 積層ゴムに作用するせん断力(N)
(回転治具中心に作用するものと仮定)

N : 積層ゴムに作用する軸力(N)

P_1 : ロードセル C1 の荷重計測値(N)

P_2 : 回転治具、および中央 2 台のロードセル C2、C4 に作用する鉛直荷重和(N)

P_3 : ロードセル C3 の荷重計測値(N)

$dv1$: 治具 2 から治具 1 の鉛直方向に対して計測された変位計の指示値 (図－５および図－７参照) (mm)

$dv3$: 同上

である。積層ゴムに作用するせん断力は、2 軸せん断試験機内蔵のロードセルによる計測値とした。

2.3 試験体と加力条件

試験体は、3次元免震装置実機と同一スケールの天然ゴム系積層ゴムである。試験体諸元を表－１に示す。

加力条件を表－２に示す。No. T-1～T-3 は、積層ゴムの常時面圧 4.2N/mm² で一定とした場合、No. T-4、T-5 は変動面圧下による圧縮せん断試験である。緩衝ゴムの硬度は 2 種類であり、No. T-2 では、より大きな回転角を与えるために他の試験条件よりも剛性が小さい緩衝ゴムを用いた。

§ 3. 評価モデル

本論で用いた評価モデルは、文献 4)より図－８に示す積層ゴムの材端での水平および回転自由度を考慮した剛性方程式を基に、文献 5)にて提案されたモーメント－回転角関係の非線形特性を組み合わせたモデルである。

積層ゴム上下面のせん断力 Q およびモーメント M に対する剛性方程式は、式(3)～式(6)となる。これらは、Haringx 理論 7)~9)に基づき求められる。

$$\begin{Bmatrix} Q_A \\ M_A \\ Q_B \\ M_B \end{Bmatrix} = [K_H + K_P + K_R] \begin{Bmatrix} x_A \\ \theta_A \\ x_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$K_H = K_h \begin{bmatrix} 1 & -H/2 & -1 & -H/2 \\ & H^2/4 & H/2 & H^2/4 \\ & & 1 & H/2 \\ sym. & & & H^2/4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_p = P \begin{bmatrix} 0 & -1/2 & 0 & -1/2 \\ & H/4 & 1/2 & H/4 \\ & & 0 & 1/2 \\ \text{sym.} & & & H/4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_R = K_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & -1 \\ & & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Q_i : せん断力 (N)

M_i : モーメント (N・mm)

x_i : 水平変位 (mm)

θ_i : 回転角

添字 i は、 $i=A$: 上面、 $i=B$: 下面を表す。

H : ゴム部と中間鋼板からなる積層ゴムの高さ (mm)

P : 鉛直荷重 (N)

式(3)～式(6)では、全体剛性マトリックスを水平剛性 K_H 、 $P - \Delta$ 効果による付加曲げモーメントの影響を示す剛性項 K_p および回転剛性 K_R に分離して表現している。 K_h 、 K_r は式(7)および式(8)にて表される。

$$K_h = \frac{GA}{nt_r} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$$K_r = \frac{E_{rb} I}{nt_r} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \phi_{rc} \quad (8)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi}{nt_r} \sqrt{E_{rb} IGA} \quad (9)$$

G : ゴムのせん断弾性係数 (N/mm²)

E_{rb} : 体積弾性率で補正された

ゴムの曲げ弾性係数^⑥ (N/mm²)

A : ゴム部のせん断断面積(mm²)

I : ゴム部の断面 2 次モーメント(mm⁴)

n : ゴム層数

t_r : ゴム 1 層厚さ (mm)

P_{cr} : 座屈荷重 (N)

K_r は式(8)より水平変位依存性 ϕ_{rc} を考慮している。
図-9 は、水平変形 $\delta = x_A - x_B$ が生じた場合における積層ゴムの変形と伏図である。ここで図-9 の伏図において上下面が重なる部分を領域 S とし、図中の色付部で示す。また領域 S の重心を通る直線 L 軸まわりの断面 2 次モーメントを $I(\delta)$ とする。 ϕ_{rc} は $I(\delta)$ と $I(\delta=0)$ との比である。 ϕ_{rc} は式(10)にて表される。

$$\phi_{rc} = \frac{I}{I(\delta=0)}$$

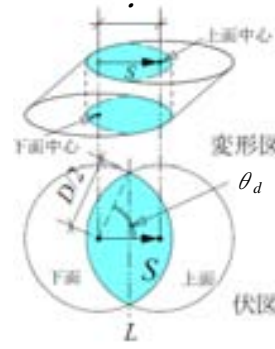


図-9 水平変形 δ 時の積層ゴムの変形図・伏図

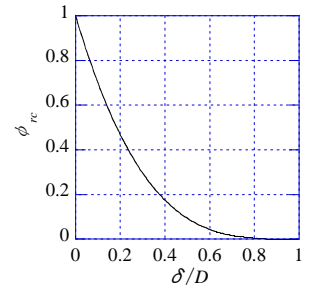


図-10 $\phi_{rc} - \delta/D$ 関係

$$= \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2} \theta_d + 2\theta_d \cos^2 \theta_d - \frac{13}{6} \sin^3 \theta_d \cos \theta_d - \frac{5}{2} \sin \theta_d \cos^3 \theta_d \right) \quad (10)$$

$$\theta_d = \cos^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) \quad \left(\frac{\delta}{D} \leq 1 \right) \quad (11)$$

$$\delta = x_A - x_B \quad (12)$$

δ : 積層ゴム上下面の水平相対変位 ($=x_A - x_B$) (mm)

D : 積層ゴムの外径(mm)

式(10)および式(11)の θ_d は図-9 の伏図にて示す角度を意味する。

ϕ_{rc} と δ/D の関係を図-10 に示す。 ϕ_{rc} は δ の増加とともに低減する。 $\delta/D=1$ のとき、つまり積層ゴム上下面の重なりがなくなるときに ϕ_{rc} は 0 となる。本論で示した試験条件における最大せん断ひずみ $\gamma = 225\%$ 時の δ/D は 0.56 であり、 ϕ_{rc} は 0.059 である。

また文献^⑤より、平面保持を仮定して求めた縁応力度 σ が引張降伏応力度 σ_y に達すると回転剛性 K_r が非線形となる材料非線形特性 ϕ_σ を考慮する。ここで、積層ゴムの断面係数を Z とすると、 ϕ_σ は、式(13)、式(14)で表せる。

$$\phi_\sigma = 1 \quad (|\theta| \leq \theta_y, \theta = \theta_A - \theta_B) \quad (13)$$

$$\phi_\sigma = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta} \left(\left| \frac{\theta}{\theta_y} \right| - 1 \right)^{\frac{1+\alpha}{\alpha}}} \quad (|\theta| > \theta_y) \quad (14)$$

ここで、

$$\theta_y = \frac{Z(P/A + \sigma_y)}{(K_h H^2 / 4 + PH / 4 + K_r)} \quad (15)$$

Z : ゴム部の断面係数 (mm³)

σ_y : ゴム部の引張降伏応力度 (N/mm²)

θ_y : 縁応力度 σ が σ_y に達する時の回転角 (rad)

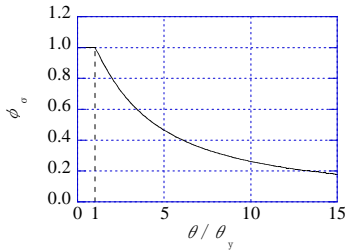
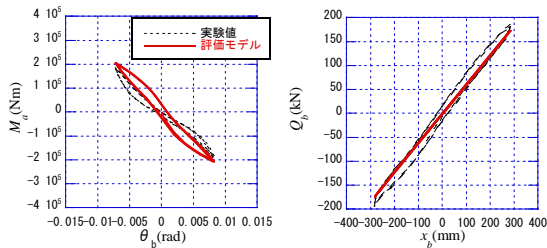


図-11 $\phi_0 - \theta / \theta_y$ 関係

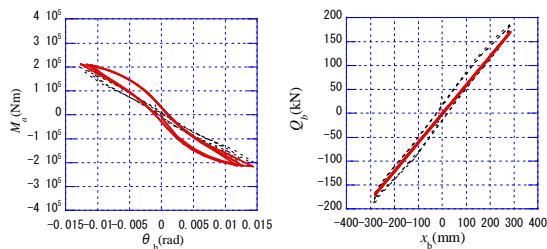
表-3 評価モデルとの比較

No.	面圧 σ (N/mm ²)	せん断 ひずみ γ (%)	緩衝 ゴム 剛性	解析最大値 実験最大値		解析最小値 実験最小値	
				M_a	Q_b	M_a	Q_b
T-1	4.2	± 200	大	1.12	0.94	1.10	0.90
T-2	4.2	± 200	小	1.07	0.91	1.09	0.91
T-3	4.2	± 225	大	1.02	0.93	0.99	0.96
T-4	2.3~8.5	± 200	大	1.12	0.88	1.13	0.87
T-5	2.7~12.4	± 225	大	1.10	0.94	0.97	0.90



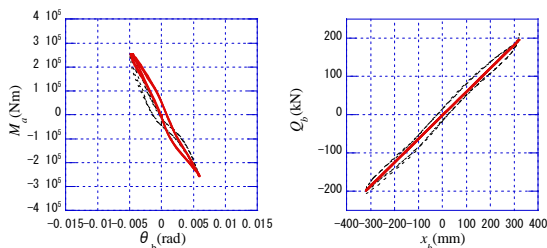
(a) $M_a - \theta_b$ 関係 (b) $Q_b - x_b$ 関係

図-12 試験 No. T-1



(a) $M_a - \theta_b$ 関係 (b) $Q_b - x_b$ 関係

図-13 試験 No. T-2



(a) $M_a - \theta_b$ 関係 (b) $Q_b - x_b$ 関係

図-14 試験 No. T-3

本論にて σ_y は文献⁵⁾と同様に 1N/mm²とした。式(14)中の α および β は、本論の圧縮せん断試験におけるモーメント-回転角の履歴形状から $\alpha = 10$ 、 $\beta = 40$ とし

た。上下面の相対回転角 θ を式(15)で示す降伏回転角 θ_y により無次元化した θ / θ_y と ϕ_0 との関係を図-11に示す。 θ / θ_y が 1 より大きくなると、 ϕ_0 は θ の上昇とともに漸減する。これより式(6)の K_r は式(16)にて表現され、せん断ひずみによる回転剛性の低下とモーメントの非線形特性が表現可能となる。

$$K_r = \frac{E_{rb} I}{n t_r} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \phi_{rc} \phi_0 \quad (16)$$

§ 4. 評価モデルの検証

圧縮せん断試験にて計測された軸力、水平変形および回転角を評価モデルに与え、積層ゴムのゴム部上端図心位置のモーメント M_a 、せん断力 Q_b を求め、実験値との比較を行った。一定軸力下における実験値および評価モデルによる解析値の荷重履歴を図-12~図-14に示す。各図において(a)はゴム部上端モーメント M_a -下端回転角 θ_b 関係、(b)はせん断力 Q_b -水平変形 x_b 関係を示す。図(a)より M_a の最大値および最小値は実験値と解析値でよく対応していることがわかる。評価モデルと実験値との比較を表-3に示す。試験 No. T-1~T-3 の場合、評価モデルによるモーメントは実験値に対して 0.99~1.12 倍となっており、概ね解析値は実験値の最大最小値を表現できている。

軸力を変動させた場合(試験 No. T-4, T-5)の荷重履歴を図-15および図-16に示す。これらには載荷軸力 N と水平変形 x_b の計測値(図(c))も併せて示す。試験 No. T-4, T-5 とともに軸力の最小値は水平変形の絶対値が最大の時に発生し、軸力の最大値は水平変形が 0 の場合に生じている。図(a)より変動軸力下においても M_a の実験値と評価モデルは良い対応を示している。

水平せん断剛性は、図-12(b)~図-16(b)より水平変形 x_b の増大とともに小さくなる。 $Q_b - x_b$ 関係において、せん断力 Q の解析値は同一変形の実験値に対してやや小さめに評価する傾向にあるが、対応は良好である。表-3よりせん断力 Q の解析値は実験値に対して 0.87~0.94 である。

図-12(a)~図-14(a)において、評価モデルの初期剛性は実験値よりも大きくなっている。この一因としては、評価モデルにおいて緩衝ゴムの圧縮剛性を直接考慮していないことが考えられる。試験 No. T-1 および T-2 における積層ゴム下に設置したロードセル C3 の計測値 P_3 とその横に設置した積層ゴム下フランジの鉛直変位を計測する変位計の計測値 dv_3 の関係を図-17に示す。 dv_3 は、所定の面圧載荷直後を 0 としている。図-17は緩衝ゴムの鉛直方向荷重変形関係に相当するが、

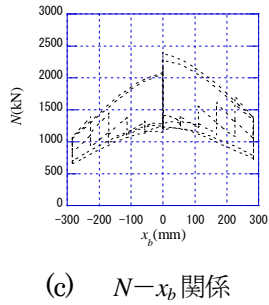
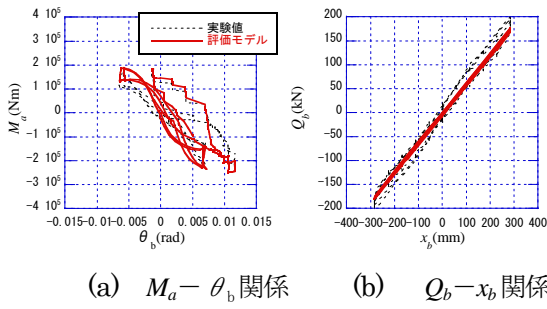


図-15 試験 No. T-4

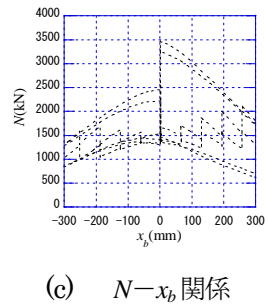
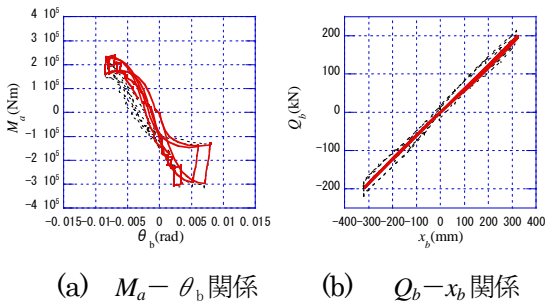


図-16 試験 No. T-5

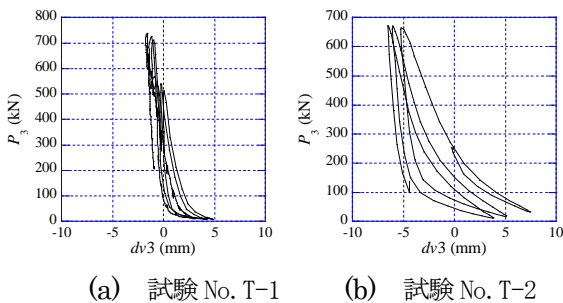


図-17 ロードセル C3 の計測値 P_3 と鉛直変位 $dv3$ の関係

緩衝ゴムの圧縮剛性は圧縮荷重とともに高くなること
 がわかる。本論の評価モデルは積層ゴム下の緩衝ゴム

の軸剛性を直接的に評価したものではない。より広い
 回転角において高精度な評価モデルとするには、緩衝
 ゴムの軸剛性を適切に評価することが必要と考えられ
 る。

§ 5. おわりに

本論では、3次元免震装置で用いる直径 600mm の天
 然ゴム系積層ゴムにおいて、低面圧かつ大変形時に
 おける積層ゴムの回転剛性の評価手法を示した。まず、
 積層ゴムの下フランジ面を回転可能とした圧縮せん断
 試験を実施し、ゴム上端のモーメントおよび下端のせん
 断力を求めた。次に、回転剛性にせん断ひずみ依存
 性および材料非線形性を考慮した積層ゴムの評価モデ
 ルを示し、モーメント-回転角関係およびせん断力-
 水平変位関係において実験結果と評価モデルの検証を
 実施した。

本論における試験時の面圧 σ およびせん断ひずみ γ
 の範囲は $\sigma = 2.3 \sim 12.4(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、 $\gamma = \pm 200\%$ および
 225% である。この条件下において積層ゴムのフランジ
 下端回転角 $0.005 \sim 0.014$ までのモーメント最大最小値
 およびせん断力-水平変位関係における評価モデルと
 実際の挙動との整合性が確認された。よって、本論で
 示した評価モデルは、大地震時における3次元免震装
 置の積層ゴム下フランジ最大回転角を評価する上で有
 効であると考えられる。

今回の検討では、一定面圧条件下において評価モデ
 ルの初期回転剛性が実験値よりも過大評価となった。
 今後は、本論で検討対象としなかった積層ゴム下フラ
 ンジ面下に設置した緩衝ゴムの非線形特性を直接的に
 考慮し、より高精度なモデルの構築を行う予定である。

謝辞

本報告の検討におきまして、株式会社構造計画研
 究所よりデータの提供等を含めまして、多大な御協
 力を賜りました。東洋ゴム工業株式会社には試験体
 の製作、実験の遂行ならびにデータ提供等に関し多
 大な御協力を賜りました。独立行政法人防災科学技
 術研究所の甲斐芳郎氏(元清水建設株式会社)より、
 解析モデルの評価におきまして大変有益な御助言を
 賜りました。また、清水建設株式会社原子力・火力
 本部の岡本修平氏、須原淳二氏、松本良一郎氏およ
 び黒澤到氏には積層ゴムの回転剛性を考慮した3次
 元免震装置の解析モデルの構築に関しまして有意義
 なご助言を頂きました。ここに記して謝意を表しま
 す。

<参考文献>

- 1)高橋治, 會田裕昌, 須原淳二, 露木保男, 藤田隆史:“3次元免震建物の開発(その1)~(その4)”, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 構造 II, pp.435~432, 2008.
- 2)高橋治, 會田裕昌, 岡本修平, 露木保男, 藤田隆史:“3次元免震建物の開発(その5)~(その12)”, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 構造 II, pp.957~972, 2009.
- 3) http://www.kke.co.jp/news/pdf/2007/NewsRelease_3d.pdf
- 4)三山剛史:“積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究”, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.43~50, 2002.1.
- 5)飯塚真巨:“積層ゴムの大変形挙動をシミュレートする巨視的力学モデル”, 日本建築学会構造系論文集, No.568, pp.83~90, 2003.6.
- 6)日本建築学会編:“免震構造設計指針”, 丸善, 2001.
- 7)Haringx, J. A. : “On Highly Compressible Helical Springs and Rubber Rods and Their Application for Vibration-Free Mountings I”, Philips Research Reports, Vol.3, pp. 401-449, 1948.
- 8)Haringx, J. A. : “On Highly Compressible Helical Springs and Rubber Rods and Their Application for Vibration-Free Mountings II”, Philips Research Reports, Vol.4, pp. 49-80, 1949.
- 9)Haringx, J. A. : “On highly compressible helical springs and rubber rods and their application for vibration-free mountings. III”, Philips Research Reports, Vol.4, pp. 206-220, 1949.
- 10)高岡栄治, 引田真規子, 竹中康雄, 室田伸夫:“端部回転を受ける積層ゴムの力学挙動”, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 構造 II, pp.909-910, 2007.
- 11)鈴木重信, 正木信男, 大島靖樹:“積層ゴムの曲げ剛性に関する研究 ゴムディスクの曲げ試験”, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 構造 II, pp.539~540, 1998.
- 12)北村佳久, 猿田正明, 西村拓也, 石井建, 菊地優:“積層ゴムにおける傾斜付加時の力学特性について(その1)~(その3)”, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 構造 II, pp.371-376, 2008.
- 13)飯塚真巨:“積層ゴムの剛性マトリックス (Haringx 理論に基づく定式化)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造(2), pp.619~620, 1995.
- 14)飯塚真巨, 濱本卓司:“端部回転を受ける免震用積層ゴムの弾性理論”, 日本建築学会構造系論文集, No.608, pp.45~52, 2009.10.
- 15)三山剛史, 加藤泰正, 飯塚信一, 石橋久義, 安田征一郎, 柳下和男, 稲井栄一, 曾田五月也:“柱頭免震を想定した積層ゴムの静的加力試験 その1. ~その2.”, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 構造 II, pp.567~570, 1998.
- 16)日本ゴム協会編:“設計者のための免震用積層ゴムハンドブック”, 理工図書, 2001.
- 17)高山峯夫:“改訂版4秒免震への道”, 理工図書, 2007.
- 18)ジェームズ・M・ケリー著, 日本振動技術協会訳:“免震構造と積層ゴムの基礎理論”, 東京電機大学出版局, 2005.

