

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	地震動観測記録を用いた超高層・中高層免震建物の水平・上下応答解析に基づく積層ゴムの軸力評価
Title(English)	EVALUATION OF THE AXIAL FORCE OF THE RUBBER BEARINGS BASED ON HORIZONTAL AND VERTICAL RESPONSE ANALYSIS OF THE HIGH-RISE AND THE MIDDLE ISOLATED BUILDINGS USING THE OBSERVATION EARTHQUAKE RECORDS
著者(和文)	本郷貴之, 佐藤大樹, 北村春幸
Authors(English)	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 20, No. 46, pp. 905-910
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 20, No. 46, pp. 905-910
発行日 / Pub. date	2014, 10
権利情報	日本建築学会
Relation	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/20/46/20_905/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/20/46/20_905/_article/-char/ja/</a>
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

# 地震動観測記録を用いた超高層・中高層免震建物の水平・上下応答解析に基づく積層ゴムの軸力評価

# EVALUATION OF THE AXIAL FORCE OF THE RUBBER BEARINGS BASED ON HORIZONTAL AND VERTICAL RESPONSE ANALYSIS OF THE HIGH-RISE AND THE MIDDLE ISOLATED BUILDINGS USING THE OBSERVATION EARTHQUAKE RECORDS

本郷貴之 — \* 1 佐藤大樹 — \* 2  
北村春幸 — \* 3

Takayuki HONGO — \* 1 Daiki SATO — \* 2  
Haruyuki KITAMURA — \* 3

キーワード：  
免震建物, 観測記録, アスペクト比, 積層ゴム, 応答軸力

Keywords:  
Isolated building, Observation records, Aspect ratio, Rubber bearing, Axial force

The purpose of this study is in order to grasp the behavior of rubber bearings in strong motion by using the three-dimensional analysis model. It was confirmed that the axial force of rubber bearings received not only the earthquake ground motion but also the influence of the building shape. Because effective area of rubber bearings supporting isolated buildings is decreased by horizontal deformation, the axial force acting on effective area becomes large. The axial force evaluation method which is used in this paper is effective in most cases, but it is necessary to note it to become undervaluation in part.

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災以降, 免震構造の有用性が広く周知され, 近年では超高層建物にも積極的に採用されている。2011年東日本大震災では広範囲にわたって継続時間の長い長周期地震動を受けたにも関わらず, 免震建物の躯体の被害がほとんどなかったことや免震構造による応答低減効果が多く報告されており<sup>1)</sup>, 震災後も免震構造の採用が増え続けている。

免震構造において, 建物重量を支える積層ゴムアイソレータの鉛直剛性は水平剛性に比べて1000倍以上高く, 地震動による上下方向の挙動は一般構造物とほぼ同様の傾向を示すことが確認されている。アスペクト比(建物の塔状比)が大きい高層免震建物では水平動による転倒モーメントの影響で応答軸力が作用しやすい。さらに, 内陸直下地震では相対的に上下動による影響が増加し, 高層免震建物でも上下動により積層ゴムに引張力が生じる可能性がある<sup>2)</sup>。積層ゴムの圧縮特性では水平変形が作用した場合でも建物荷重などの支持能力は維持されているが, 建物を支持する有効な面積および圧縮剛性が減少するため, その部分に作用する応答軸力は非常に大きくなることが確認されている<sup>3)</sup>。積層ゴムに作用する引張りおよび圧縮力に関しては, アスペクト比の違いが及ぼす影響<sup>4)</sup>や強震動記録を用いた検証<sup>2)</sup>など様々な報告がされているが, 実在する建物の解析モデルを用いて, かつその建物観測記録を用いた積層ゴムの応答軸力の検討はほとんどない。

そこで本報では建物形状・規模の異なる2棟の免震建物の水平・

上下応答の観測記録を精度良く評価できる立体架構解析モデル<sup>5)</sup>を用いて, 地震動による積層ゴムに作用する軸力の評価を行ったものである。まず, 地震動特性の異なる観測波の水平動と上下動を用いて, 建物形状の異なる免震建物の積層ゴムの応答軸力が, 何の影響を強く受けるかを検討する。ここでは, 積層ゴムにおける引張りおよび圧縮側最大応答軸力の評価を行う。さらに, 時刻歴波形の重ね合わせによる3方向同時入力時の最大軸力と, 1方向入力時の最大応答軸力を用いた値を比較する。なお, 本報での検討範囲は積層ゴムに作用する引張軸力が長期軸力以下であり, 引き抜きによる非線形挙動が生じないことを確認している。よって, ここでは応答軸力を変動軸力で評価し, 正値を引張軸力, 負値を圧縮軸力とする。

## 2. 建物概要と解析諸元

### 2.1 建物概要

対象建物の外観と免震部材配置図を図1(a),(b)にそれぞれ示す。図1(a)に示す東京理科大学講義棟(以後, 講義棟と呼ぶ)は, 2003年竣工の7階建て鉄筋コンクリート造中高層免震建物であり, 高さ36.1m, 平面形状36.5m×70.4m, 短辺方向のアスペクト比が1と比較的平面規模の大きな建物である。講義棟は1階床下に免震層を設けた基礎免震構造である。講義棟の免震層は図1(a)の(ii)に示すように, 直径700, 800, 900mmの天然ゴム系積層ゴム(計34基), 直径900, 1000mmの鉛プラグ入り積層ゴム(計10基), 直径500mmの弾性滑り支承(4基), 鋼材ダンパー(22基)から構成されてい

<sup>1)</sup> 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 大学院生  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2)</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・博士(工学)

<sup>3)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

<sup>1)</sup> Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

<sup>2)</sup> Assoc. Prof., Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

る。講義棟の詳細な観測概要や周辺地盤情報は文献(6)を参照されたい。図中の $KI_1 \sim KI_4$ は本報で変動軸力の検討を行う積層ゴムの名称である。

図1(b)に示す東京工業大学J2棟(以後、J2棟と呼ぶ)は、2005年竣工の20階建て鉄骨造超高層免震建物であり、高さ90.9m、平面形状15.8m×42.6m、上部構造のアスペクト比が5と比較的スレンダーな形状である。J2棟は2階床下に免震層を設けた中間層免震構造である。J2棟の免震層は図1(b)(ii)に示す通り、直径1100、1200mmの天然ゴム系積層ゴム(計16基)、鋼製ダンパー(計14基)、建物の短辺方向のみに作用するオイルダンパー(2基)から構成される。そのうち直径1100mmの天然ゴム系積層ゴムは、鋼製ダンパーと一体型が用いられている。J2棟の詳細な観測概要や周辺地盤情報は文献(7)を参照されたい。図中の $JI_1 \sim JI_4$ は本報で軸力の検討を行う積層ゴムの名称である。

## 2.2 解析モデル概要

本報で用いる講義棟およびJ2棟の3次元立体架構モデルは設計図書の柱・梁断面および質量を用いて作成した後、観測記録と一致するように部材剛性の調整などを行っている。部材の曲げと軸方向に対する弾塑性挙動は材端部に設けたMulti Spring Modelでモデル化している。積層ゴムなどの免震部材は文献(8)を基に、Multi Shear Spring Modelで1基ずつモデル化している。表1に解析モデルの固有周期を示す。表1における免震層固定時とは上部構造の固有周期を表している。表中のせん断ひずみとは、免震層に設置されている

最小径の積層ゴムでの値を意味し、その変形量における免震層の等価剛性を用いて固有周期を求めている。なお、せん断ひずみ250%はレベル2相当の最大応答値を表している(詳細は図7に後述している)。

減衰定数についても観測記録と一致するように調整を行った。講義棟の水平応答解析では、上部構造の減衰定数を $h=3\%$ となる剛性比例減衰、免震層を $h=0\%$ としている。上下応答解析では、上部構造を $h=2\%$ の剛性比例減衰、免震層を $h=1\%$ としている。J2棟の水平応答解析では、上部構造の1次減衰定数を $h_1=3\%$ 、2次減衰定数を $h_2=4.5\%$ となるレーリー減衰で設定し、免震層を $h=0\%$ としている。上下応答解析では上部構造の減衰定数を $h=1.5\%$ となる定値減衰を用いている。以上の時刻歴応答解析はX、Y、Zの3方向それぞれ単独に入力する1方向入力の応答解析を行い、時刻歴上で足し合わせた応答値を3方向同時入力時の応答値と考えている。モデル化の詳細、解析手法および観測記録と解析結果との整合性については文献(5)を参照されたい。

表1 解析モデルの固有周期

せん断歪	固有周期(s)			
	講義棟		J2棟	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
免震層固定時	0.57	0.60	1.84	1.92
0%	0.77	0.79	2.53	2.58
250%	2.86	2.86	4.10	4.13

## 2.3 使用地震動

本報で用いる講義棟とJ2棟の観測地震動の震央位置を図2(a),(b)に、観測地震動の詳細を表2(a),(b)にそれぞれ示す。表中のKは講義棟、JはJ2棟の観測記録を示しており、Mはマグニチュード、距離は震央距離、MFは免震層を表す。また、各地震動におけるX、Y、Z方向の最大加速度値および最大速度値をそれぞれ $xA_{max}$ 、 $yA_{max}$ 、 $zA_{max}$ および $xV_{max}$ 、 $yV_{max}$ 、 $zV_{max}$ としている。使用地震動は対象建物で観測された地震動のうち、マグニチュードが大きい地震動を6波選定している。本報における入力地震動は、観測加速度記録を周波数領域で1階積分して算出した速度波形の最大値が大きい水平成分を50cm/sに基準化する倍率(表2)を求めて、その倍率を用いて各地震動の加速度波形(X、Y、Z方向)を増幅したものをを用いる(以後、レベル2と呼ぶ)。

レベル2相当に基準化した使用地震動の水平動と上下動における擬似速度応答スペクトル $pS_v(h=5\%)$ をそれぞれ図3,4(a),(b)に示している。なお、図3,4は近傍で発生した1秒以下の短周期成分を比較的多く含む地震動を(a)に、遠方で発生した長周期成分を比較的

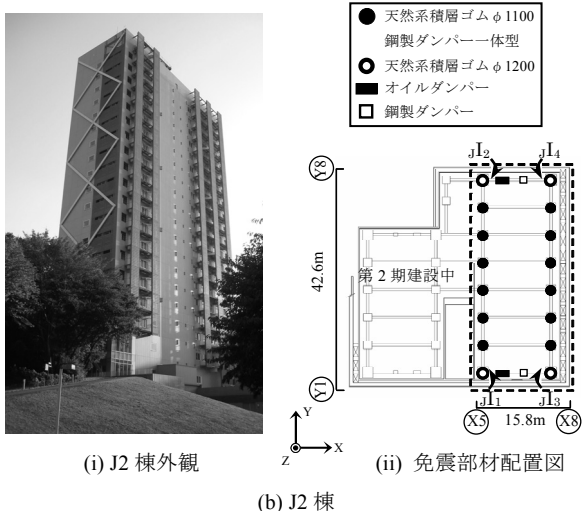
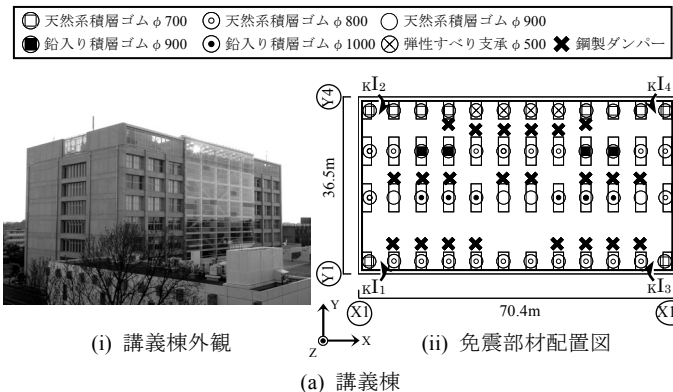


図1 対象建物の概要

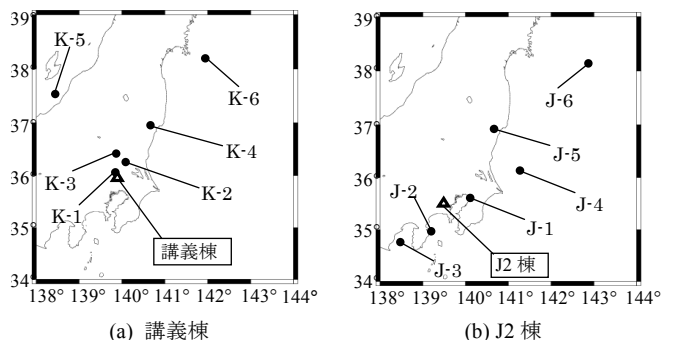


図2 対象建物と震央位置

多く含む地震動を (b) に分類して示している。図 3 (a), (b) について、講義棟における積層ゴムのせん断歪み 250 % (レベル 2 相当) 時の水平方向の固有周期 (表 1 ; 2.86s) および上下方向の固有周期付近 (約 0.13s<sup>5</sup>) に着目すると、(a) K-1~3 では X, Y, Z 方向で概ね同様の速度応答スペクトルを示しており、上下動が積層ゴムの応答に与える影響は大きいと推察される。(b) K-4~6 の X 方向と Y 方向では、Z 方向に対して 3 倍以上の値を示す。図 4 の J2 棟における積層ゴムのせん断歪み 250 % (レベル 2 相当) 時の水平方向の固有周期 (表 1 ; 4.10s) , 上下方向の固有周期付近 (約 0.25s<sup>5</sup>) に着目すると、(a) J-1~3 の X 方向と Y 方向では Z 方向と比較して 2 倍程度の値を示す。(b) J-4~6 では X 方向と Y 方向に比べて、Z 方向の値が非常に小さく、水平動による応答が支配的と予想され

### 3. 積層ゴムに加わる応答軸力に関する検討

#### 3.1 時刻歴応答

X, Y, Z の 1 方向入力の応答解析から得られた積層ゴムに作用する変動軸力の最大値を  $xN_{max}$ ,  $yN_{max}$ ,  $zN_{max}$  として、3 成分の時

刻歴波形を重ね合わせた変動軸力 (以後、総和軸力と呼ぶ) の最大値を  $sN_{max}$  とする。また、最大軸力値において右上添え字の表記で、+は引張側、-は圧縮側を表している。図 5(a)~(d) に特徴的な 4 つの地震動 (K-2, 4 および J-1, 6) における積層ゴムに作用する変動軸力の時刻歴波形を示している。図の縦軸は正值で引張を、負値で圧縮を表す。図 5 に示す変動軸力の時刻歴波形は隅角部アイソレータ 4 基の内、引張軸力の最大値  $sN_{max}^+$  が最大となる積層ゴムを選定している (図 1)。図 5 より、建物の平面規模の比較的大きい講義棟における (a) K-2 では総和軸力に対して Z 方向入力が支配的である。(b) K-4 では総和軸力に Y 方向入力も多く含まれているが、最大総和軸力  $sN_{max}^+$  は  $zN_{max}^+$  と同じ時刻に発生している。スレンダーな建物形状をした J2 棟に着目すると (c) J-1 では総和軸力に水平成分だけでなく上下成分の影響が確認出来るが、(d) J-6 には上下成分の影響が見られず、水平成分が支配的となる。よって、上下動入力時による変動軸力は、地震動特性による影響だけでなく建物形状の影響も大きく受けていると言える。

表 2 採用観測記録一覧

(a) 講義棟										(b) J2 棟											
震源地 [名称]	年月日	M	距離 (km)	レベル2相当 50 cm/s 基準化倍率	レベル2																
					MF 最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )			MF 最大速度(cm/s)													
					$xA_{max}$	$yA_{max}$	$zA_{max}$	$xV_{max}$	$yV_{max}$	$zV_{max}$											
千葉県北東部 [K-1]	12/6/1	5.1	13	8.5	940.5	1171.3	309.5	32.5	<b>50.0</b>	15.3	千葉県北西部 [J-1]	05/7/23	6	61	27.1	436.1	395.4	268.1	<b>50.0</b>	28.3	17.5
茨城県南部 [K-2]	11/3/24	4.8	31	13.2	1067.2	854.4	399.0	<b>50.0</b>	19.8	9.6	伊豆半島東方沖 [J-2]	06/4/21	5.8	69	89.7	358.9	251.3	197.4	<b>50.0</b>	30.3	20.2
茨城県南部 [K-3]	11/4/16	5.9	47	15.4	1015.5	920.1	415.0	<b>50.0</b>	39.5	20.8	駿河湾沖 [J-3]	09/8/11	6.5	121	30.1	377.1	202.8	154.8	<b>50.0</b>	28.7	20.6
福島県浜通り [K-4]	11/4/11	7	134	11.0	397.3	554.3	274.8	45.5	<b>50.0</b>	20.6	茨城県沖 [J-4]	11/3/11	7.7	172	3.5	74.0	90.3	46.6	27.1	<b>50.0</b>	14.4
新潟県中越沖 [K-5]	07/7/16	6.8	216	15.4	313.5	229.6	154.2	35.6	<b>50.0</b>	21.5	福島県浜通り [J-5]	11/4/11	7	191	26.6	235.1	185.8	144.3	43.1	<b>50.0</b>	30.1
宮城県沖 [K-6]	11/4/7	7.1	314	28.2	516.9	505.6	296.6	47.8	<b>50.0</b>	21.5	三陸沖 [J-6]	11/3/11	9	413	2.9	144.6	194.6	98.6	42.6	<b>50.0</b>	25.7

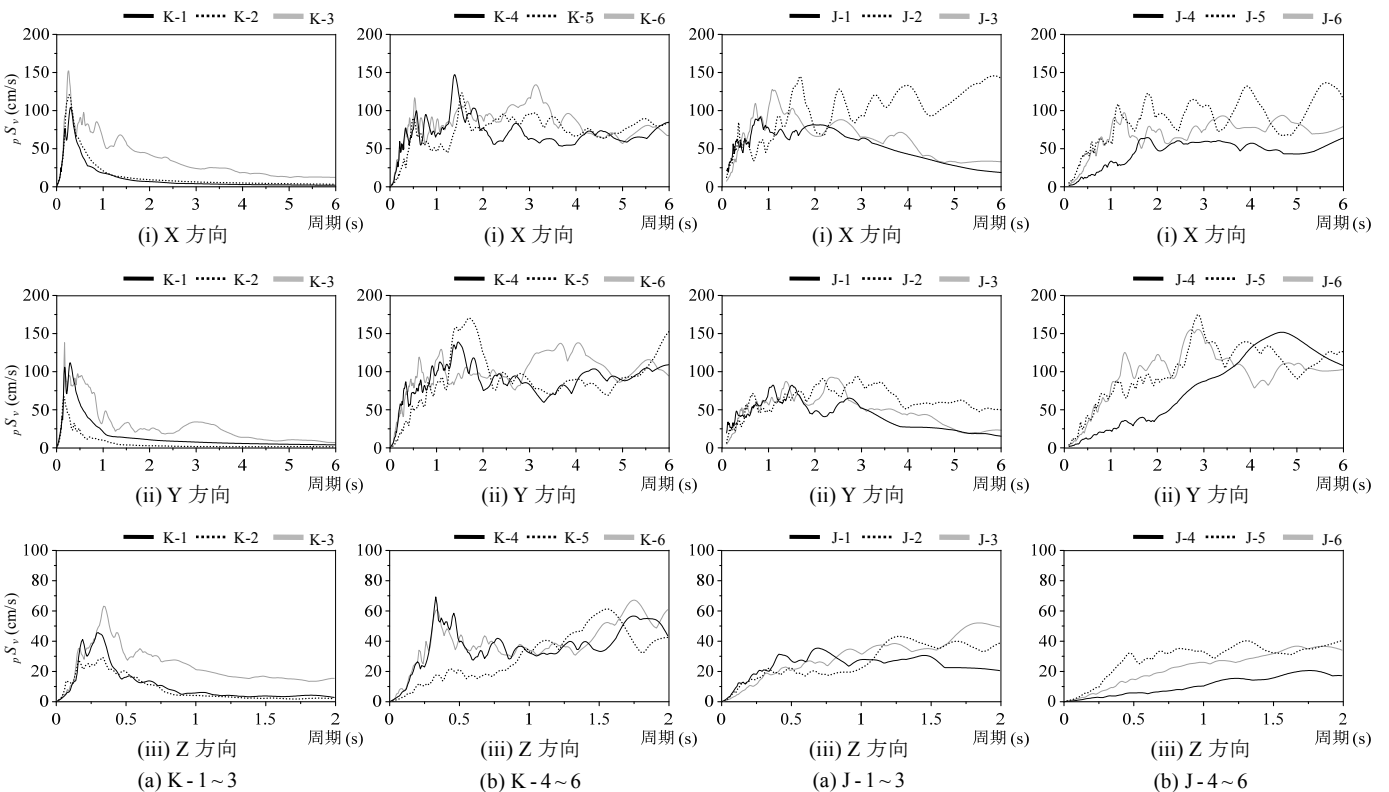


図 3 擬似速度応答スペクトル  $pS_v$  ( $h=5\%$ ) 講義棟

図 4 擬似速度応答スペクトル  $pS_v$  ( $h=5\%$ ) J2 棟

### 3.2 最大軸力発生時における検討

本節ではさらに詳細な検討として、引張側および圧縮側の総和軸

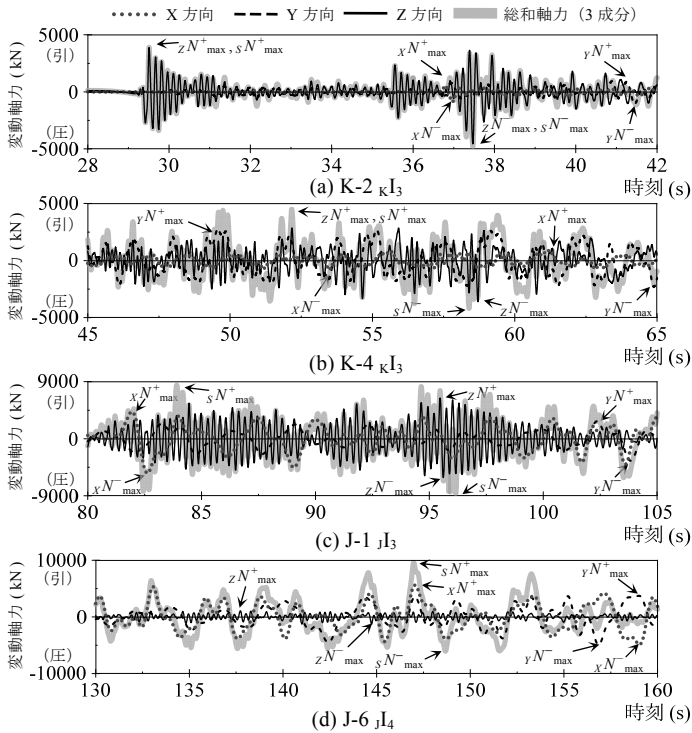


図5 変動軸力時刻歴

力の最大値  $sN_{max}^+$ ,  $sN_{max}^-$  の発生時刻に着目し、上下および水平の応答結果を用いて最大軸力発生時の積層ゴムの状態について述べる。まず、上下動による軸力の評価では、引張側および圧縮側の総和軸力の最大値発生時刻をそれぞれ  $t_m^+$ ,  $t_m^-$  と定義し、Z 方向入力に応答軸力  $zN(t_m^+)$ ,  $zN(t_m^-)$  をそれぞれ  $sN_{max}^+$  および  $sN_{max}^-$  で除した「上下動寄与率」<sup>2)</sup> を用いて評価する。図 6(a), (b) に、講義棟と J2 棟について隅角部アイソレータ毎の上下動寄与率をそれぞれ示す。なお、図 6 の凡例で白色プロットは引張側、黒色プロットは圧縮側の応答値を表す。図 6(a) の講義棟において、上下動入力により発生した変動軸力が、総和軸力の最大値に及ぼす影響が大きいため、ほとんどの地震動で高い上下動寄与率を示していることが確認できる。図 6(b) の J2 棟において、J-1~3 では引張側の上下動寄与率の最大値が 0.5~0.75 を示し、J-4~6 と比較して上下動入力による変動軸力の影響が確認された。

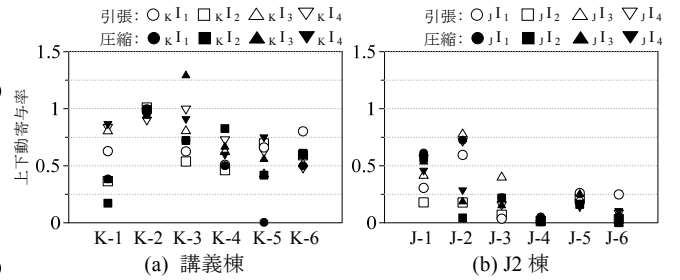


図6 上下動寄与率の検証

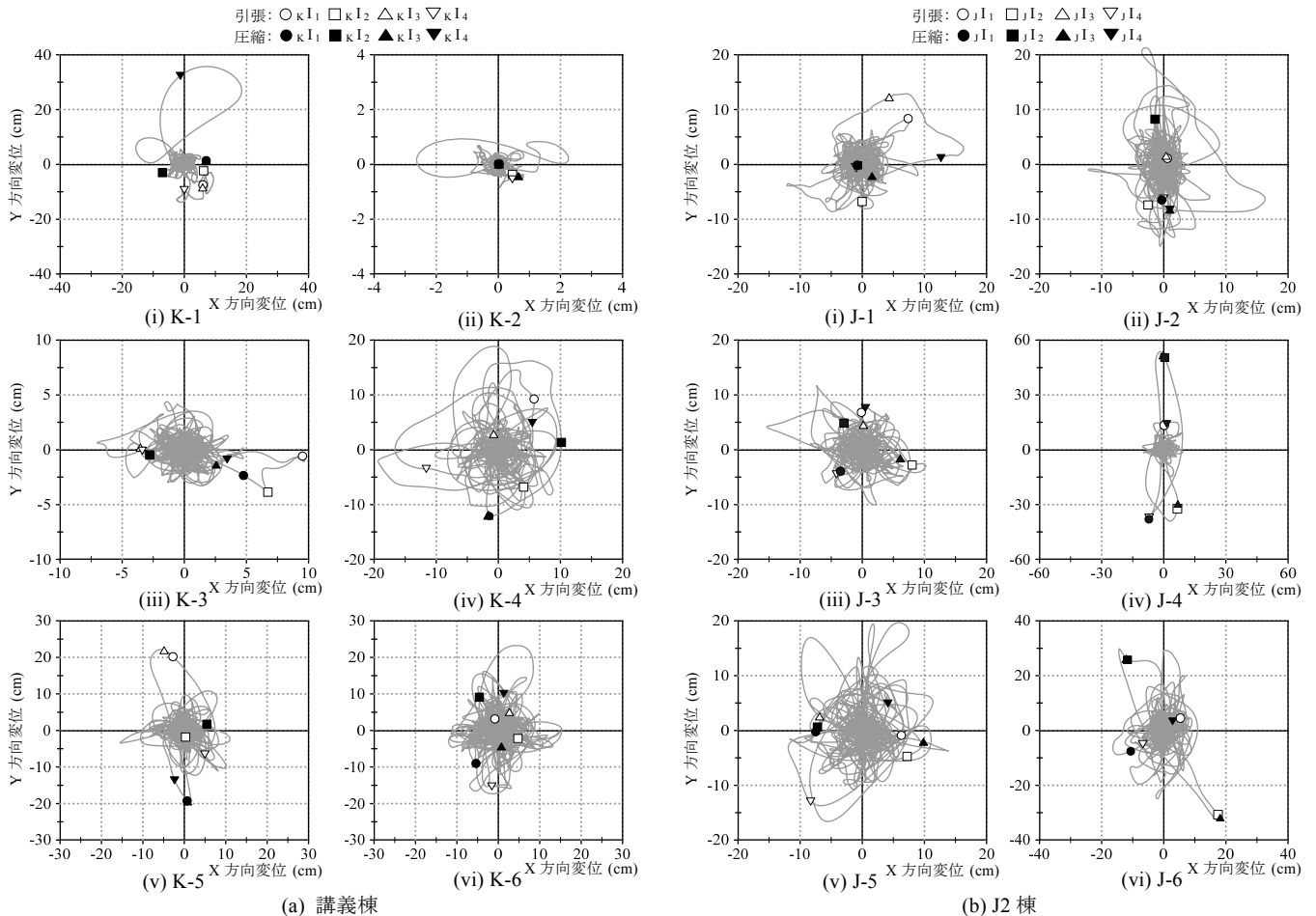


図7 最大軸力発生時における免震層変位オービット

次に、水平動による軸力の評価では、隅角部の積層ゴムの引張側と圧縮側の最大軸力  ${}_s N_{\max}^+$ 、 ${}_s N_{\max}^-$  発生時における免震層の状態を検討する。図 7(a), (b) に講義棟と J2 棟の引張側および圧縮側の最大値発生時の変位をプロットした免震層の変位オービットをそれぞれ示す。なお、図中の凡例は図 6 と同様に表している。図 7(a) の K-5 の  ${}_k I_1$ 、 ${}_k I_3$  (プロット:  $\circ$ ,  $\triangle$ ) では変位の大きい位置で最大引張軸力が発生しており、図 6(a) で上下動寄与率も高いことから、水平動と上下動入力による変動軸力の影響により大きな引張軸力が生じたと考えられる。図 7(b) の J2 棟はほとんどの地震動で、変形の大きな位置に引張側、圧縮側の最大応答値が確認でき、水平動による転倒モーメントの影響が大きいと考えられるが、変形の小さい J-1 の  ${}_j I_1$  (プロット:  $\bullet$ ) および J-2 の  ${}_j I_3$  (プロット:  $\triangle$ ) では、図 6(b) で高い上下動寄与率を示す傾向が確認できる。図 7(b) の J-6 において、免震層の変形の同じ位置に  ${}_j I_2$  (プロット:  $\square$ ) と  ${}_j I_3$  (プロット:  $\blacktriangle$ ) が発生していることが分かる。この 2 基の積層ゴムは免震層の対角に位置しており、最大引張軸力と最大圧縮軸力がほぼ同時に発生していることから、水平動による転倒モーメントの影響で  ${}_j I_3$  に大きな圧縮力が作用したと考えられる。

### 3.3 有効面積を考慮した圧縮軸力に関する検討

前節では、講義棟、J2 棟ともに最大圧縮軸力が発生しているのは免震層の最大変位付近であることを述べた。積層ゴムがせん断変形をした際、積層ゴムは上面と下面の重複部分 (以後、有効支持面積  $A_{eff}$  と呼ぶ) で建物重量を支持している。せん断変形による積層ゴムの移動距離  $\delta(t)$  を考慮した有効支持面積の時刻歴波形  $A_{eff}(t)$  は、積層ゴム径  $D$  および  $\delta(t)$  を用いて下式で表現される<sup>9)</sup>。

$$\delta(t) = \sqrt{\delta_x(t)^2 + \delta_y(t)^2} \quad (1)$$

$$A_{eff}(t) = \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\delta(t)}{D} \sqrt{1 - \left( \frac{\delta(t)}{D} \right)^2} + \sin^{-1} \left( \frac{\delta(t)}{D} \right) \right\} \right] A_0 \quad (2)$$

式(1)で  $\delta_x(t)$  および  $\delta_y(t)$  はそれぞれ X 方向、Y 方向のせん断変形を表す。表 3 に  $A_{eff}(t)$  の時刻歴上での最小値  $A_{eff\min}$  を、積層ゴムの断面積  $A_0 (= \pi(D/2)^2)$  で除した有効面積低減率  $\beta_A$ 、有効面積を考慮した最大圧縮面圧  $\sigma_{eff\max}$ 、 $A_0$  から算出した最大圧縮面圧  $\sigma_{0\max}$  を示している。ここで、 $\sigma_{eff\max}$  は総和軸力の時刻歴波形  ${}_s N(t)$  を積層ゴムの有効面積  $A_{eff}(t)$  で除して算出した圧縮側の最大値である。表 3 より、 $\sigma_{0\max}$  を  $\sigma_{eff\max}$  で除した値 (表中の  $\sigma_{0\max}/\sigma_{eff\max}$ ) と  $\beta_A$  の値は必ずしも一致していないことが分かる。これは、有効面積が最小となる時に最大圧縮面圧  $\sigma_{eff\max}$  が発生していないためである。

$A_0$  から算出した最大圧縮面圧  $\sigma_{0\max}$  と有効面積を考慮した  $\sigma_{eff\max}$  を比較すると、圧縮面圧を最大で 0.4 倍程度、過小評価していることが分かる (表 3 (a))。このように、免震装置に作用する圧縮面圧を評価する際には、軸力を保持する免震装置の面積の低減を考慮した有効面積を用いる必要がある。

## 4. 評価式の検証

### 4.1 引張・圧縮軸力の最大値

ここでは、各方向の応答解析から求まる引張側および圧縮側の変動軸力の最大値  ${}_x N_{\max}$ 、 ${}_y N_{\max}$ 、 ${}_z N_{\max}$  を用いて、設計でよく用いられている<sup>3)</sup> 3 成分を重ね合わせた総和軸力の最大値を評価する式

(3),(4) (以後、評価式と呼ぶ) を検証する。なお、下記の評価式は水平方向入力時の最大軸力  ${}_x N_{\max}$ 、 ${}_y N_{\max}$  が同時に発生しないと仮定した式である。

$${}_s \bar{N}_{\max}^+ = \sqrt{{}_x N_{\max}^+{}^2 + {}_y N_{\max}^+{}^2} + {}_z N_{\max}^+ \quad (3)$$

$${}_s \bar{N}_{\max}^- = \sqrt{{}_x N_{\max}^-{}^2 + {}_y N_{\max}^-{}^2} + {}_z N_{\max}^- \quad (4)$$

図 8(a),(b) に、講義棟および J2 棟の式 (3),(4) より求めた引張側と圧縮側の  ${}_s \bar{N}_{\max}^+$ 、 ${}_s \bar{N}_{\max}^-$  と最大軸力  ${}_s N_{\max}^+$ 、 ${}_s N_{\max}^-$  の比をそれぞれ示している。なお、図中の凡例は図 6,7 と同様に表している。図 8(a) の講義棟より、引張側と圧縮側の評価ともに 1.0 以上の値を示し、評価式より求めた軸力が精解の  ${}_s N_{\max}$  に対して安全側の値となっていることが確認できる。これは、3 章で述べたように講義棟において、地震動種別に関わらず Z 方向入力の応答軸力が支配的になっているためである。よって、講義棟のようにアスペクト比が小さく、かつ平面規模の大きな免震建物では、水平方向の最大応答軸力の同時性は考慮しない式 (3),(4) で安全側に評価できると考えられる。一方、アスペクト比の大きい J2 棟では (図 8(b))、長周期成分を多く含む J-4,6 において、式 (3),(4) より求めた値は  ${}_s N_{\max}$  より小さ

表 3 有効面積を考慮した面積低減率および最大圧縮面圧  
(a) 講義棟

地震名称	$\beta_A$	圧縮評価							
		${}_k I_1$		${}_k I_2$		${}_k I_3$		${}_k I_4$	
		$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)	$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)	$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)	$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)
K-1	0.36	14.3	0.82	14.6	0.45	19.6	0.87	13.1	0.42
		17.5		32.2		22.5		31.1	
K-2	0.95	7.4	1.00	8.5	1.00	12.4	0.98	9.9	1.00
		7.4		8.5		12.6		9.9	
K-3	0.82	11.9	0.91	12.0	0.95	12.3	0.88	13.3	0.93
		13.2		12.6		13.9		14.3	
K-4	0.65	12.9	0.78	10.8	0.82	10.8	0.78	11.0	0.87
		16.5		13.2		13.8		12.6	
K-5	0.59	9.8	0.65	6.2	0.89	9.8	0.65	7.8	0.71
		15.0		6.9		15.1		10.9	
K-6	0.58	12.4	0.72	10.5	0.82	16.4	0.92	13.1	0.82
		17.4		12.8		17.9		16.1	

(b) J2 棟

地震名称	$\beta_A$	圧縮評価							
		${}_j I_1$		${}_j I_2$		${}_j I_3$		${}_j I_4$	
		$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)	$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)	$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)	$\sigma_{0\max}$ (MPa)	$\sigma_{eff\max}$ (MPa)
J-1	0.82	8.3	0.90	5.9	0.89	8.9	0.97	6.5	0.87
		9.3		6.6		9.1		7.5	
J-2	0.77	6.1	0.93	6.0	0.88	7.6	0.91	5.2	0.91
		6.5		6.8		8.3		5.7	
J-3	0.83	8.1	0.95	7.7	0.94	8.1	0.93	7.7	0.92
		8.6		8.2		8.7		8.3	
J-4	0.45	7.8	0.60	7.5	0.47	6.8	0.68	5.5	0.76
		13.1		15.7		10.0		7.3	
J-5	0.78	8.1	0.92	7.2	0.90	5.7	0.89	6.7	0.93
		8.8		8.1		6.4		7.2	
J-6	0.61	8.3	0.86	7.8	0.70	8.0	0.62	5.3	0.76
		9.7		11.1		12.9		7.0	

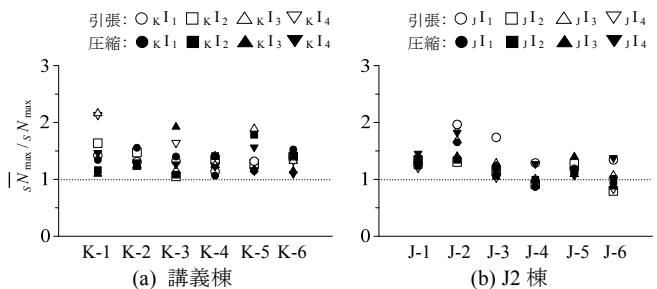


図 8 評価式の検討

い値を示し、危険側の評価となっていることが確認できる。1.0 より小さい値を示した J-4 の  $J_1 I_3$  (プロット: ●) と J-6 の  $J_1 I_3$  (プロット: ▲) は、図 6 (b) で低い上下動寄与率を示し、また、図 7 (b) では X, Y 方向の変形が大きい位置で最大軸力が発生しており、 $s N_{max}$  発生時に水平方向入力による最大軸力が同時に発生、もしくは  $s N_{max}$  に両成分の占める割合が大きいことが原因と推察される。危険側の評価値となる場合について、式 (3), (4) の水平成分の項を総軸力の最大値発生時における X, Y 方向入力の応答軸力で除した値は、0.7~0.9 程度を示しており、評価値は水平動入力による軸力を小さく評価している。なお、低い上下動寄与率を示したが、評価値で 1.0 以上の安全側となる場合は、比較的大きい  $z N_{max}$  が作用したと言える。このようにアスペクト比の大きい J2 棟のような免震建物では地震動の特性によって評価値が危険側となる可能性があるため、式 (3), (4) を用いて軸力を評価する際には注意が必要である。

#### 4.2 有効面積を考慮した最大圧縮面圧

次に前節で用いた評価式の圧縮側について、有効面積を考慮した最大圧縮面圧 (3.3 節) を評価する方法を検証する。有効面積を考慮した最大圧縮面圧は、軸力の評価式 (式 (4)) と有効面積を考慮した  $A_{eff}(t)$  の最小値  $A_{eff min}$  を用いて下式で評価する。

$$\bar{\sigma}_{eff max} = \frac{s \bar{N}_{max}}{A_{eff min}} = \frac{\sqrt{x N_{max}^2 + y N_{max}^2 + z N_{max}^2}}{A_{eff min}} \quad (5)$$

図 9 に講義棟および J2 棟の式 (5) より求めた  $\bar{\sigma}_{eff max}$  と有効面積を考慮した最大圧縮面圧  $\sigma_{eff max}$  (表 3) の比をそれぞれ示している。図 9 より (a) 講義棟では全ての地震動で、(b) J2 棟では J-6 の  $J_1 I_3$  以外の地震動で精解である  $\sigma_{eff max}$  より大きい値を示す。3.3 節で述べたように、講義棟と J2 棟に共通して、免震層の応答変位は大きい、最大圧縮面圧  $\sigma_{eff max}$  発生時にほとんど変形がない場合、式 (5) を用いた評価値は精解である  $\sigma_{eff max}$  に対して過大に安全側となる。なお、J-6 の  $J_1 I_3$  が危険側となる理由として、軸力の評価式で危険側 (図 8)、かつ有効面積が最小となる付近で最大圧縮面圧  $\sigma_{eff max}$  が発生したこと (図 7) が原因である。

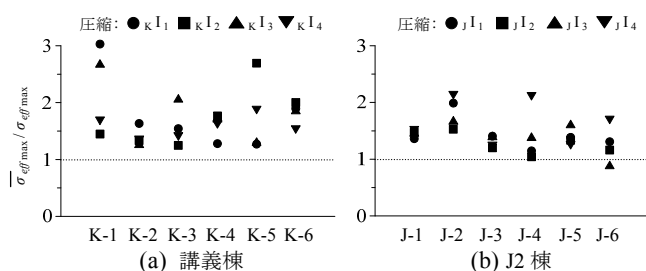


図 9 有効面積を考慮した評価式

#### 5. まとめ

本報では建物形状・規模の異なる 2 棟の免震建物の水平・上下応答の観測記録を精度良く評価できる立体架構解析モデルを用いて、両建物で実際に観測された地震動による積層ゴムに作用する軸力の評価検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) アスペクト比が小さく比較的平面規模の大きい講義棟の積層ゴムに生じる軸力は、水平動による影響は小さく上下動によって作用する応答軸力が支配的である。特に近傍で発生した地震動の場合に顕著である。

- (2) アスペクト比の大きい J2 棟の積層ゴムに生じる最大引張軸力は、水平動による影響が支配的であり、地震動によっては上下動による影響も確認できた。最大圧縮軸力はほとんどの地震動で水平動による影響が強いことが確認された。
- (3) 積層ゴムの最大圧縮面圧は、通常、全断面積を用いて算出されているが、大変形時に積層ゴムに生じる高圧縮面圧範囲を評価した有効支持面積から計算した最大圧縮面圧は、通常の値に比べて数倍の値を示すことから、積層ゴムを支持する上下基礎の設計に注意が必要である。
- (4) 設計で用いられている水平方向入力時の最大軸力が同時に発生しないと仮定した軸力の評価式の検証では、各方向の最大軸力から 3 成分を重ね合わせた応答軸力の最大値を概ね評価できることを確認した。J2 棟のようにアスペクト比が高い免震建物では、上下動寄与率が小さい遠方で発生した地震動によって評価値が危険側となる可能性があり、評価式を用いる際に注意する必要がある。
- (5) 有効面積を考慮した圧縮面圧の評価式では、最大圧縮面圧に対して概ね安全側の評価となる。ただし、免震層の応答変形が大きく、最大圧縮面圧発生時にほとんど変形がない場合、評価値は過大に安全側となる。また、軸力の評価式で危険側、かつ有効面積が最小となる付近で最大値が発生する場合は、最大圧縮面圧を小さく評価する可能性がある。

#### 謝辞

本研究は、東京工業大学グローバル COE プログラム「震災メカニクス軽減の都市地震工学国際拠点」と共同で行われたものであります。特に、東京工業大学 笠井和彦教授には多大なご協力を賜りました。また、本報には元東京理科大学大学院生 福田優輝氏の修士論文の一部を用いております。本報を作成するにあたり、東京理科大学北村研究室助教の佐藤利昭博士には貴重な意見を頂きました。ここに記して、皆様には深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査報告書, 2012.1
- 2) 池田雄一, 長橋純男：日本における想定被害地震を対象とした高層免震建物の地震応答性状とアスペクト比効果に関する一考察 強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究 その 3, 日本建築学会構造系論文集, 第 660 号, pp.281-290, 2011.2
- 3) 日本建築学会：免震構造設計指針 第 4 版, 2013.10
- 4) 池田雄一, 長橋純男：耐震壁および床スラブの曲げ剛性を考慮した高層免震建物の地震応答解析 強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 620 号, pp.17-26, 2007.10
- 5) 佐藤大樹, 福田優輝, 北村春幸：多点同時地震動観測記録に基づく免震建物の上下応答解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 682 号, pp.1853-1862, 2012.12
- 6) 森清宣貴, 金澤健司, 北村春幸：免震建物を対象とした強震一振動モニタリングシステム, 日本建築学会技術報告集, 第 22 号, pp.133-138, 2005.12
- 7) 大木洋司, 山下忠道, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章：超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み, 日本建築学会技術報告集, 第 21 号, pp.73-77, 2005.6
- 8) 日本免震構造協会：免震部材標準リスト 2009, 大應, pp.44, 2009.10
- 9) 高山峰夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能, 日本建築学会技術報告集, 第 1 号, pp.160-165, 1995.12

[2014 年 2 月 19 日原稿受理 2014 年 4 月 24 日採用決定]