

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	地震動観測記録を用いた免震建物の積層ゴムの応答変動引張軸力の評価
Title	
著者(和文)	本郷貴之, 佐藤大樹, 福田優輝, 北村春幸
Authors	daiki sato, Yuuki Fukuda, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2049
Citation(English)	, Vol. 83, , 2049
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769795

地震動観測記録を用いた免震建物の
積層ゴムの応答変動引張軸力の評価

構造—振動

正会員 ○ 本郷貴之^{*1}
〃 福田優輝^{*2}正会員 佐藤大樹^{*1}
〃 北村春幸^{*1}

免震建物 多点同時地震動観測

アスペクト比 積層ゴム 変動引張軸力

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るようになった。さらに、2011年東日本大震災により、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かかわらず、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¹⁾、震災後も免震構造の採用が増え続けている。免震建物における免震部材の引き抜きの検討方法は、応答転倒モーメントによって生じる変動軸力や上下地震動による変動軸力の組み合わせに対して、引き抜き力を評価することが一般的である²⁾。また、水平動と上下動による応答値の時刻歴上での組み合わせには、水平動と同時に観測された上下動の位相を用いることが、水平動との整合性に関して有効とされている³⁾。

本報では、観測記録を精度良く評価できる立体架構解析モデル⁴⁾を用いて、地震動による積層ゴムの実挙動の把握を目的としている。まず、対象建物における積層ゴムに作用する引張軸力について、水平動と上下動入力時のどちらにより強く影響を受けるかを比較する。その際、建物形状の違いに注目し、引張軸力の性状に及ぼす影響を検討する。さらに、引張軸力の評価について、時刻歴上での足し合わせによる評価と各方向解析時の最大引張軸力を用いた評価を比較し、観測記録に基づく引張軸力の評価と設計で用いる引張軸力の評価の関係性を示す。

2. 対象建物および計測の概要

2.1 建物概要と観測概要

東京理科大学講義棟（以後、講義棟）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と比較的平面形状の大きな建物である。東京工業大学J2棟（以後、J2棟）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×46.2m、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。講義棟とJ2棟の外観および免震部材配置図を図1(a)、(b)に示す。なお、図1(a)(ii)中の K_1 ～ K_4 、(b)(ii)中の J_1 ～ J_4 は、本報で軸力の検討を行う積層

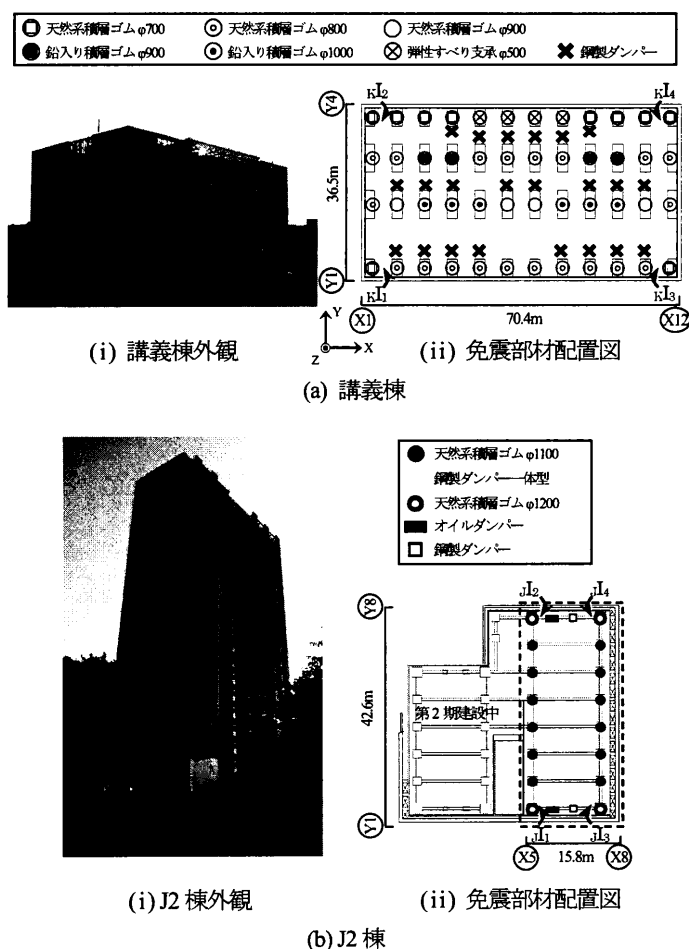


図1 対象建物の概要

ゴムの名称である。

2.2 使用地震動

講義棟の観測記録の中で、本報で用いる地震動を表1(a)、(b)に、対象建物と震源位置の関係を図2(a)、(b)に示す。採用地震動は、それぞれの対象建物の近傍で発生した地震動(K-1~3 および J-1~3)、比較的遠方で発生したもの(K-4~6 および J-4~6)を、6地震動ずつ選定した。本報では、観測記録の最大水平速度を50cm/sに基準化したレベル2相当の地震動（以後、レベル2）も用いて検討を行う。使用地震動の例として、K-4 および J-4（表1）について、水平動と上下動の速度応答スペクトル $S_v(h=5\%)$

表 1 採用観測記録一覧
(a) 講義棟

震源地 [名称]	年月日	震源深さ (km)	M	距離 (km)	MF 最大加速度(cm/s^2)		
					$xA_{\max}$	$yA_{\max}$	$zA_{\max}$
茨城県南部 [K-1]	11/3/24	52	4.8	31	80.8	64.7	30.2
茨城県南部 [K-2]	11/4/16	79	5.9	47	65.9	59.7	26.9
千葉県北東部 [K-3]	12/6/1	44	5.1	13	111.2	138.5	36.6
福島県浜通り [K-4]	11/4/11	6	7	134	36.3	50.6	25.1
宮城県沖 [K-5]	11/4/7	66	7.1	314	18.3	17.9	10.5
新潟県中越沖 [K-6]	07/7/16	17	6.8	216	20.4	14.9	10.0

(b) J2 棟

震源地 [名称]	年月日	震源深さ (km)	M	距離 (km)	MF 最大加速度(cm/s^2)		
					$xA_{\max}$	$yA_{\max}$	$zA_{\max}$
千葉県北西部 [J-1]	05/7/23	73	6	61	16.1	14.6	9.9
伊豆半島東方沖 [J-2]	06/4/21	7	5.8	69	4.0	2.8	2.2
駿河湾沖 [J-3]	09/8/11	23	6.5	121	12.5	6.7	5.1
三陸沖 [J-4]	11/3/11	24	9	413	50.0	67.3	34.1
茨城県沖 [J-5]	11/3/11	43	7.7	172	21.3	26.0	13.4
福島県浜通り [J-6]	11/4/11	6	7	191	8.9	7.0	5.4

をそれぞれ図 3(a), (b)に、観測原波およびレベル 2 で比較して示す。図 3 の(a)水平方向および(b)上下方向より、K-4 では短周期成分が、J-4 では長周期成分が卓越した地震動であることが確認でき、(ii)レベル 2 では 1 秒から 3 秒付近の周期帯で概ね同程度の S_v を示している。

2.3 解析モデル概要

本報では、文献 4)で提案されている講義棟および J2 棟の観測記録を精度良く表現できる立体架構解析モデルを用いて検討を行う。よって本報では、解析結果のみを述べるものとし、モデル化の詳細、観測記録と解析結果の整合性については、文献 4)を参照されたい。また、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う。

3. 積層ゴムに加わる応答引張軸力の検討

3.1 積層ゴムに作用する変動軸力時刻歴の比較

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において、引張側最大値をそれぞれ $xN_{\max}$, $yN_{\max}$, $zN_{\max}$ とし、各方向入力時の変動軸力を時刻歴上で足し合わせた軸力（総和軸力）の引張側最大値を最大引張軸力 $sN_{\max}$ とする。ここでは、比較的遠方で発生した 2 つの地震動 (K-4, J-4) について、観測原波およびレベル 2 相当を入力地震動とした際の積層ゴムに作用する変動軸力時刻歴を図 4(a), (b)にそれぞれ示し、入力レベルの違いによる応答値の比較をしている。図 4 に示

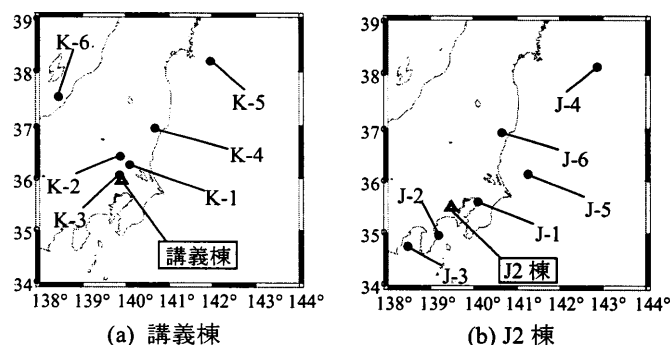


図 2 対象建物と震源位置

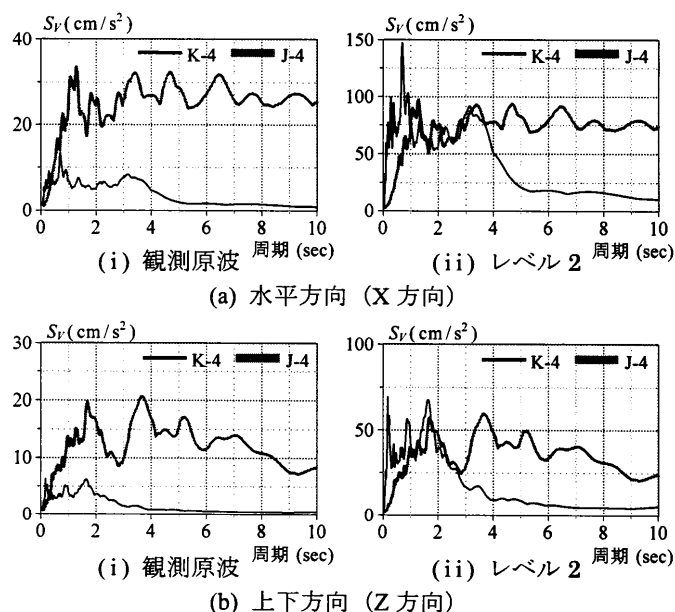


図 3 速度応答スペクトル S_v ($h=5\%$)

す軸力の時刻歴波形は偶各部アイソレータの内、観測原波を入力した際に $sN_{\max}$ が最大となる積層ゴムを選定している (図 1)。なお、図の縦軸は正值が引張を表す。講義棟では最大引張軸力付近の 10 秒間を、J2 棟では 20 秒間を示している。図 4 より、講義棟と J2 棟の応答の共通点として、Z 方向入力の変動軸力が水平方向の変動軸力と比較して、短周期成分で振動していることが確認できる。また、地震動の 3 成分をそれぞれ入力して求まる最大引張軸力は必ずしも同じ時刻に発生するわけではないことが分かる。図 4(a)講義棟の(i)観測原波では、 $sN_{\max}$ について、Y 方向（短辺方向）入力による引張軸力が支配的である。対して、(ii)レベル 2 では、Z 方向入力による変動軸力が増加していることが分かる。一方、J2 棟がアスペクト比 5 とスレンダーな形状をしていることに起因して、図 4(b)J2 棟では、(i)観測原波と(ii)レベル 2 とともに水平動による変動軸力が支配的となっている。

3.2 引張軸力に対する上下動寄与率

$sN_{\max}$ の発生時刻に着目して、 $sN_{\max}$ に占める上下動の割合について検討する。 $sN_{\max}$ を $sN_{\max}$ の発生時刻の上下動引張軸力の応答値で除した値を「上下動寄与率」と呼ぶ⁵⁾。上下動寄与率を縦軸に、対象建物からの震央距離(表

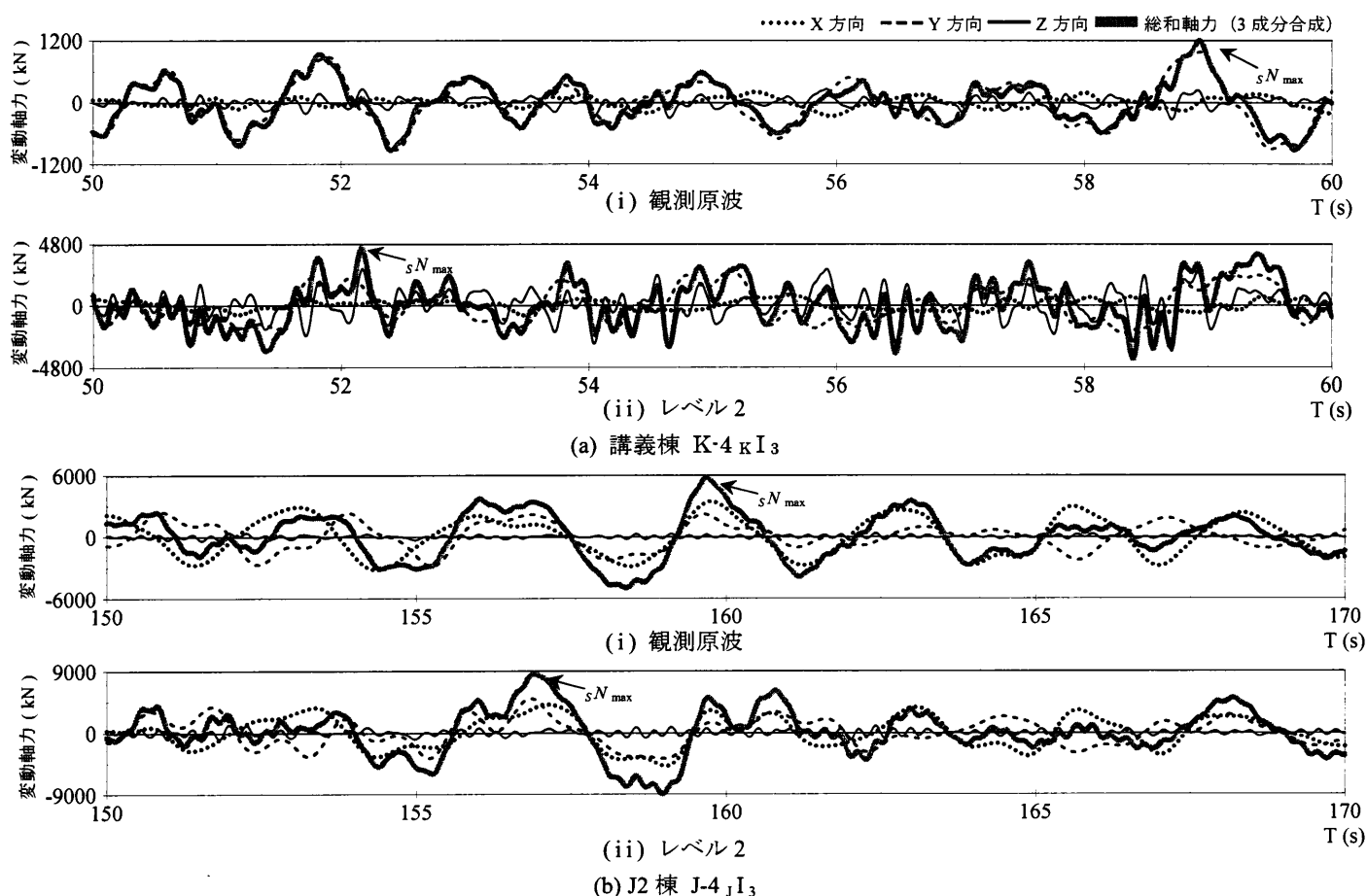


図4 変動軸力時刻歴

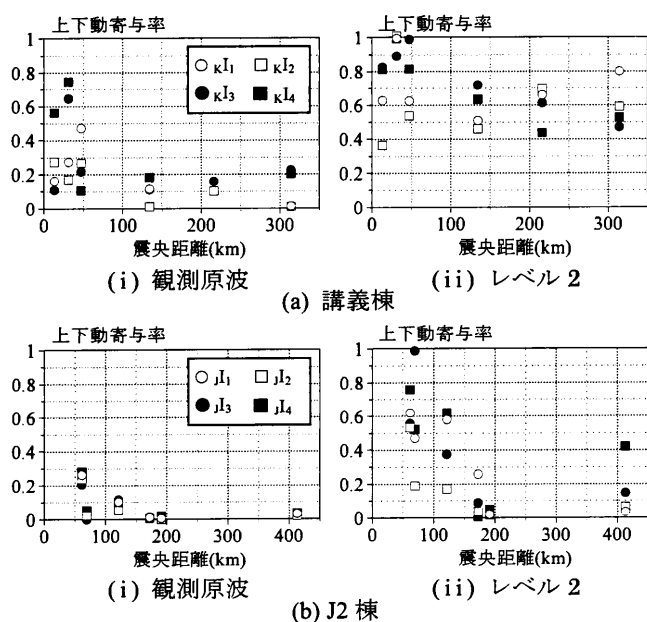


図5 上下動寄与率と震央距離の関係

1) を縦軸に取り、講義棟と J2 棟について観測原波とレベル 2 入力時の偶各部アイソレータ毎の応答値を図 5(a), (b)にそれぞれ示す。図 5(a)講義棟(i)観測原波において、積層ゴムの位置によりばらつきはあるが、講義棟からの震央距離が 100km 以下の地震動では上下動寄与率が高く、震央距離が遠くなるほど上下動寄与率が低下しているこ

とが分かる。対して、(ii)レベル 2 では震央距離に関わらず上下動寄与率が高い値を示している(図 4(a))。図 5(b)J2 棟では、(i)観測原波の近傍で発生した地震動においても上下動寄与率が低い値を示しており、 sN_{max} において水平動が支配的であることが分かる(図 4(b))。また、(ii)レベル 2 では、震央距離が 100km 付近の地震動における上下動寄与率が高い値を示しているが、講義棟と異なり、遠方地震の上下動寄与率は増加していない。なお、講義棟と J2 棟において、レベル 2 入力時に上下動寄与率が増加した原因として、入力地震動が増幅され、免震層における水平方向に作用する免震部材が塑性化したことで、水平応答による変動軸力が低下したと考えられる(図 5)。

3.3 最大引張軸力の評価法

ここでは、X、Y、Z の 3 方向にそれぞれ単独に入力する 1 方向入力時の応答解析から求まる 3 つの最大引張軸力 xN_{max} 、 yN_{max} 、 zN_{max} を用いて、 sN_{max} を推定する方法を検討する。最大軸力の組み合わせとして以下の 3 式を対象とする。

$${}_1N_{max} = xN_{max} + yN_{max} + zN_{max} \quad (1)$$

$${}_2N_{max} = \sqrt{xN_{max}^2 + yN_{max}^2} + zN_{max} \quad (2)$$

$${}_3N_{max} = \sqrt{xN_{max}^2 + yN_{max}^2 + zN_{max}^2} \quad (3)$$

図6に(1)～(3)式より求めた iN_{max} と最大引張軸力 sN_{max} の比を示す。図6(a)は講義棟、(b)はJ2棟において、 sN_{max} が最大となる隅角部アイソレータの算出結果であり、(i)観測原波および(ii)レベル2をそれぞれ示している。

(1)式は、各成分の引張軸力の最大値が同時に発生すると仮定する評価であり、講義棟、J2棟ともに全ての地震動で1.0を上回り sN_{max} に対して安全側の評価式になる。(2)式は、水平動入力時の引張軸力の最大値は同時に発生しないと仮定する評価であり、(a)講義棟では、全ての地震動において1.0を上回っているが、(1)式より小さい値を示しており、 sN_{max} に近い値を示している。(b)J2棟でも概ね講義棟と同様の傾向を示しており、特に(i)観測原波では、多少のばらつきが生じているが推定精度が高いと言える。(3)式は、3つの引張軸力の最大値が同時に発生しないと仮定する評価であり、(a)講義棟では(i)観測原波におけるK-3～6について、若干危険側となるが sN_{max} に近い値を示している。(b)J2棟においても sN_{max} に対して近い値とは言えないが、多少のばらつきを容認すると(ii)レベル2における(3)式が sN_{max} に対して概ね1.0に近い値を示している。従って、講義棟では(1)、(2)式では概ね sN_{max} に対して安全側、(3)式では観測原波において sN_{max} に近い値を示す。J2棟においても講義棟と同様の傾向を示しているが、多少のばらつきを容認するのであれば、(a)観測原波では(2)式、(b)レベル2では(3)式が sN_{max} に対して概ね1.0に近い値を示している。

4.まとめ

本報では、観測記録の水平・上下応答性状を精度良く再現できる立体架構解析モデルを用いて、建物形状の違いに着目し、対象建物における積層ゴムに作用する引張軸力について、水平動入力時と上下動入力時のどちらにより強く影響を受けるかの検討を行った。次に、水平2成分および上下動の合計3成分単独入力で時刻歴応答解析を行い、各方向入力時の積層ゴム軸力を時刻歴上で足し合わせた軸力(総和軸力)の引張側最大値 sN_{max} を推定する方法を検討した。なお、時刻歴応答解析では、観測記録原波と観測原波をレベル2相当(50cm/s)に基準化した地震動を入力した。以下に得られた知見を示す。

(1)変動軸力の時刻歴波形および最大引張軸力に占める上下動の割合についての検討では、平面規模が比較的大きい講義棟では観測原波で短辺方向入力時に作用する変動引張軸力が支配的となった。また、レベル2相当の入力地震動では、上下方向入力による変動軸力が増加していることが分かる。対して、アスペクト比5とスレンダーな形状をしていることに起因して、J2棟では観測原波とレベル2において水平方向入力が支配的となった。しかし、レベル2における震央距離が100km付近の地震動では、上下動による影響も大きい傾向を示す。講義棟とJ2棟に共通して、レベル2入

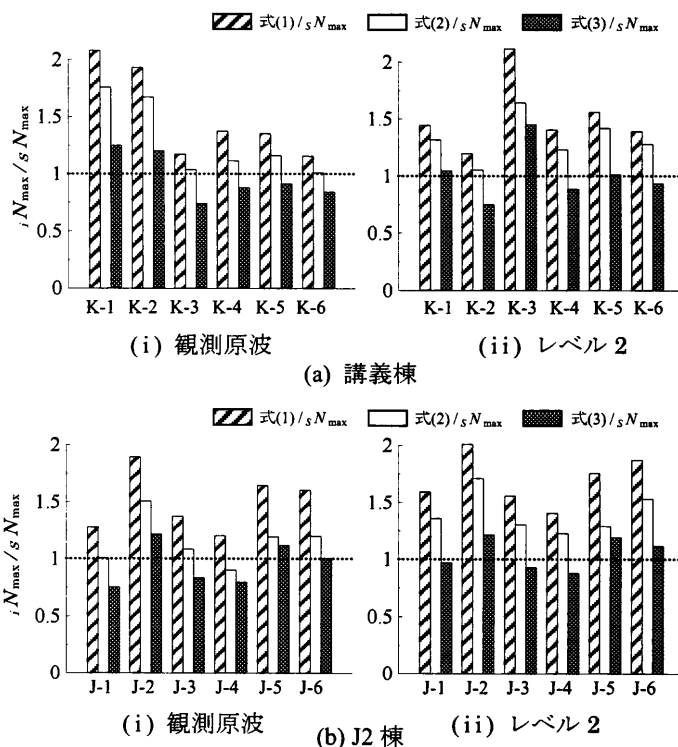


図6 3成分を用いる引張軸力の評価法

力時に上下動による影響が大きくなる原因として、入力地震動が増幅され、免震層における水平方向に作用する免震部材が塑性化したことで、水平応答による変動軸力が低下したことが考えられる。

(2)最大変動引張軸力を推定する式の検証として、講義棟について、水平動入力時の引張軸力の最大値は同時に発生しないと仮定する式では、概ね sN_{max} に対して安全側であるが、 sN_{max} に近い値を示す。J2棟においても、講義棟と同様の傾向を示しているが、多少のばらつきを容認するのであれば、レベル2における3つの引張軸力の最大値が同時に発生しないと仮定する評価が sN_{max} に対して概ね1.0に近い値を示している。

謝辞

本研究は、東京工業大学グローバルCOEプログラム「震災メカリスク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。記して謝意を表します。

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) 日本免震構造協会：免震建築物の耐震性能評価表示指針及び性能評価例、pp.E-1-E-5、2005.11
- 3) 日本免震構造協会：免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン、pp.15-17、2005.11
- 4) 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.2853-1862、2012.12
- 5) 池田雄一、長橋純男：セットバック立面形状を有する高層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに関わる地震応答性状 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2、日本建築学会構造系論文集第651号、pp.913-922、2010.5

*1 東京理科大学

*2 元 東京理科大学