T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	多点同時地震動観測記録に基づく積層ゴムの応答引張軸力の評価
Title	
著者(和文)	福田 優輝, 佐藤 大樹, 北村春幸
Authors	Yuuki Fukuda, daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 82, No. ,
Citation(English)	, Vol. 82, No. ,
発行日 / Pub. date	2012, 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/110009571505

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

Architectural Institute of Japan

2019

2011年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2012年3月

多点同時地震動観測記録に基づく積層ゴムの応答引張軸力の評価

構造ー振動

正会員 ○ 福田優輝[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
正会員　北村春幸[*3]

多点同時地震動観測　免震建物　アスペクト比
積層ゴム　引張軸力

1. はじめに

免震部材である積層ゴムの鉛直方向の圧縮剛性は，水平剛性に比べて 1000 倍以上も高く[1)]，上下地震動に対しては水平方向のような免震効果は発揮されない。また，引張剛性と許容引張面圧は，圧縮剛性や許容圧縮面圧に比べて 1/10 以下と小さく，かつ許容引張面圧を超えると非線形挙動を示す特性がある[1)]。従って，免震構造では，時刻歴応答解析などにより，常時荷重と水平地震動に加えて上下地震動により積層ゴムに作用する軸力が検討されてきた。

本報では，7 階建ての平面形状の比較的大きい中高層免震建物と，20 階建てのアスペクト比が大きい超高層免震建物を対象とし，積層ゴムに生じる引張軸力が，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

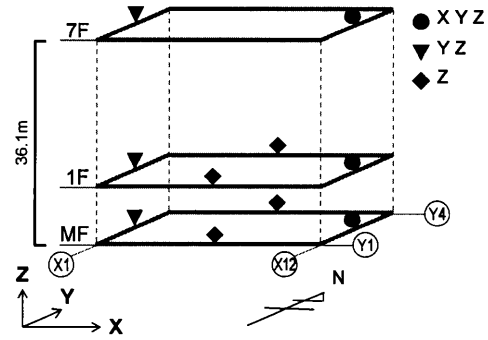
2.1 建物概要と観測概要

(1) 東京理科大学野田キャンパス講義棟

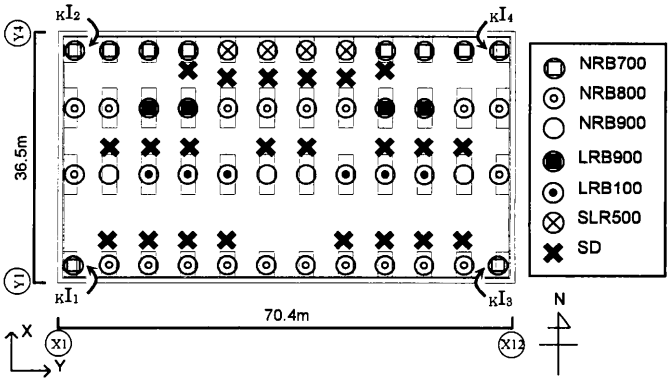
東京理科大学野田キャンパス講義棟（以後，講義棟）は，2003 年竣工の 7 階建て鉄筋コンクリート造中高層免震建物であり，高さ 36.1m，平面形状 36.5m×70.4m，短辺方向のアスペクト比が 1 と比較的平面形状の大きな建物である。加速度計設置位置，免震部材配置図を図 1(a), (b)に示す。また，1 階床下に免震層を設けた基礎免震構造であり，図 1(b)に示す通り，直径 700，800，900mm の天然ゴム系積層ゴム(NRB700，NRB800，NRB900)計 34 基，直径 900, 1000mm の鉛プラグ入り積層ゴム(LRB900, LRB1000)計 10 基，直径 500mm の弾性滑り支承(SLR500)4 基，鋼材ダンパー(SD)22 基から構成されている。図 1(b)中の $_{K}I_1$～$_{K}I_4$ は本論文で軸力の検討を行う積層ゴムの名称である。講義棟の観測についての詳細は文献 2) を参照されたい。

(2) 東京工業大学すずかけ台キャンパス総合研究棟 J2 棟

東京工業大学すずかけ台キャンパス総合研究棟 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。加速度計設置位置，免震部材配置図を図 2(a), (b)に示す。また，2 階床下に免震層を設けた中間層免震構造であり，図 2(b)に示す通り，直径 1100，1200mm の天然ゴム系積層ゴム(NRB1100，NRB1200)計 16 基，鋼製ダンパー(SD)2 基，オイルダンパー(OD)2 基から構成される。そのうち直径 1100mm のものは，鋼製ダンパーと一体型の積層ゴムとして用いられている。図 2(b)中の $_{J}I_1$～$_{J}I_4$ は本論文で軸力の検討を行う積層ゴムの名称である。J2 棟の観測の詳細については文献 3) を参照されたい。



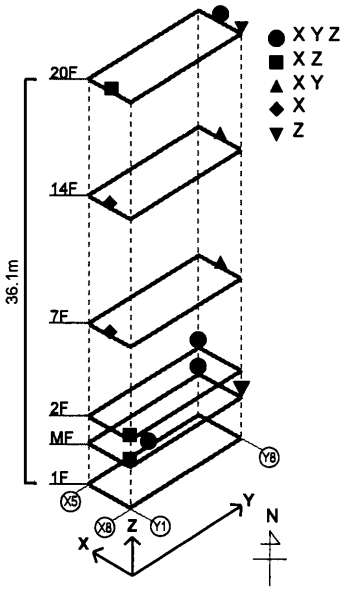
(a) 加速度計設置位置



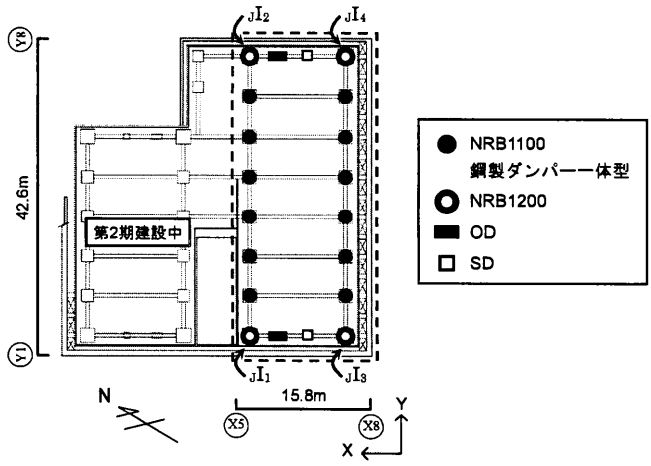
(b) 免震装置の配置図（平面）

図 1　講義棟の概要

NII-Electronic Library Service



(a) 加速度計設置位置



(b) 免震装置の配置図（平面）

図 2　J2 棟の概要

2. 2　使用地震動

講義棟および J2 棟の観測記録の中で，本論文で用いる地震動を表 2(a), (b)に示す。表中の K は講義棟の，J は J2 棟の観測記録を示している。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，K-2 および J-1，J-2），比較的遠方で発生したもの（K-3，K-4 および J-3，J-4）を，4 地震動ずつ選定した。表中の M はマグニチュードを，距離は震央距離を示す。

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/s²) [発生時刻(sec)]		
茨城県南部 [K-1]	11/3/24	52	4.8	25	80.8 [36.9]	64.7 [36.8]	30.2 [29.4]
茨城県南部 [K-2]	11/4/16	79	5.9	25	65.9 [41.7]	59.7 [40.7]	26.9 [41.6]
福島県浜通り [K-3]	11/4/11	6	7	134	36.3 [59.6]	50.6 [49.6]	25.1 [54.5]
宮城県沖 [K-4]	11/4/7	66	7.1	314	18.3 [64.1]	17.9 [71.0]	10.5 [70.4]

(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/s²) [発生時刻(sec)]		
千葉県北西部 [J-1]	05/7/23	73	6	61	16.1 [82.9]	14.6 [81.7]	9.9 [81.8]
伊豆半島東方沖 [J-2]	06/4/21	7	5.8	69	4.0 [64.3]	2.8 [65.1]	2.2 [55.9]
三陸沖 [J-3]	11/3/11	24	9	413	50.0 [147.3]	67.3 [145.5]	34.1 [154.0]
茨城県沖 [J-4]	11/3/11	43	7.7	172	21.3 [108.2]	26.0 [106.0]	13.4 [104.1]

3. 積層ゴムに生じる引張軸力の検討

講義棟と J2 棟について，上下応答解析と水平応答解析を行い，それらの解析結果を用いて，積層ゴムに生じる引張軸力についての検討を行う。解析モデルは，設計図書に基づいて立体架構モデルを作成し，その後，観測記録の加速度時刻歴および伝達関数を再現するよう設定を加えた。設定の詳細は，講義棟については文献 4)を，J2 棟については文献 5)を参照されたい。引張軸力の検討は，それぞれの建物の四隅に設置されている 4 基の積層ゴム，講義棟では ${}_{K}I_1$～${}_{K}I_4$(NRB700)を（図 1(b)），J2 棟では ${}_{J}I_1$～${}_{J}I_4$(NRB1200)を対象とする（図 2(b)）。なお，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一方向入力の応答解析を行った。

(1) 入力方向ごとの積層ゴム軸力の時刻歴波形の比較

X，Y，Z の一方向入力時の応答解析から得られた積層ゴムに生じる軸力（積層ゴム軸力）の引張側最大値をそれぞれ ${}_{X}N_{max}$，${}_{Y}N_{max}$，${}_{Z}N_{max}$ とし，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）の引張側最大値を最大引張軸力 N_{max} とする。ここでは，特徴的な応答性状を示す 3 つの地震動（K-1，J-1，J-3）について，積層ゴム軸力(${}_{K}I_3$，${}_{J}I_4$，${}_{J}I_3$)の時刻歴波形を図 3(a)～(c)にそれぞれ示す。なお，図の縦軸は，正値が引張，負値が圧縮を示す。図 3(a)～(c)の共通点として，それぞれの方向を単独入力した結果である ${}_{X}N_{max}$，${}_{Y}N_{max}$，${}_{Z}N_{max}$ 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。また，水平動入力時に比べて上下動入力時の積層ゴム軸力は短周期で変動しており，最大引張軸力 N_{max} の発生する時刻に上下動入力時の軸力は概ね極大値を示す。

図 3(a)の K-1 の結果を見ると，N_{max} の発生する時刻に，Z 方向入力時および X 方向入力時の軸力は極大値を示す

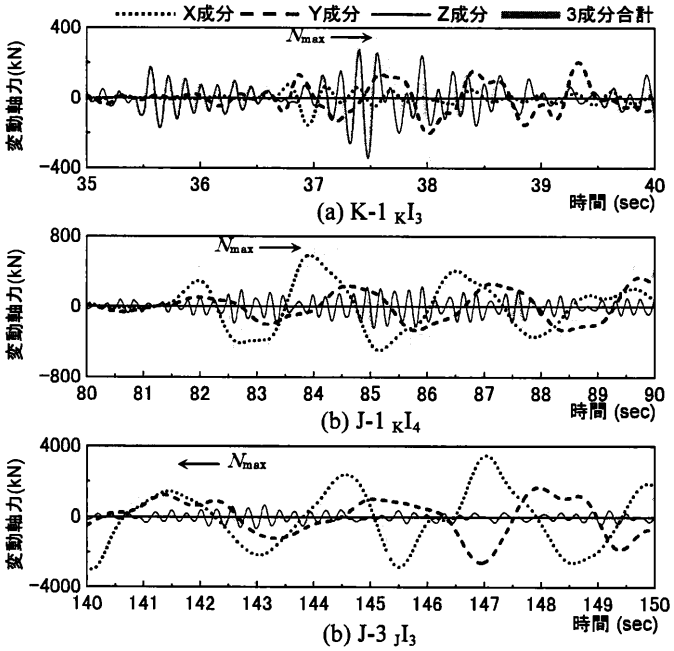


図 3　変動軸力時刻歴

NII-Electronic Library Service

が，Y 方向入力時の軸力は 0 に近い負の値をとり，圧縮側に作用している。図 3(b)の J-1 も，N_{max} と X 方向入力時における最大値の発生時刻はほぼ一致しているが，Y 方向入力時の軸力は 0 に近く，圧縮側に作用している。図 3(c)J-3 では，147 秒に X 方向入力時の軸力が最大値（約 3800kN）を取るが，ほぼ同時刻に Y 方向入力時の軸力が圧縮側の最大値となっており，総和軸力は最大値に至っていない。N_{max} は，全ての一方向入力時の軸力が極大値付近となる 141 秒に発生している。なお，J2 棟では，上下動入力時の軸力は水平動入力時に比べて極めて小さな値であり（図 3(b)，(c)），総和軸力の最大値にほとんど影響を与えていないことが分かる。

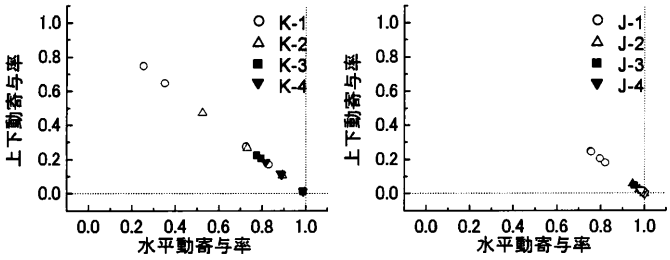
(2) 引張軸力に対する水平動寄与率および上下動寄与率

N_{max} の発生時刻に着目し，N_{max} が水平動入力時と上下動入力時のどちらに強く影響を受けているかを検討する。X，Y の一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 $|{}_XN(t)+{}_YN(t)|$ を N_{max} で除した値を「水平動寄与率」，上下動入力時の軸力を N_{max} で除した値を「上下動寄与率」と呼ぶ[6]。

水平動寄与率を横軸に，上下動寄与率を縦軸に取り，地震動毎に講義棟と J2 棟について四隅部の積層ゴムで求めた値をプロットした結果を，図 4(a),(b)にそれぞれ示す。それぞれの図において，建物近傍で発生した地震動を白抜き，比較的遠方で発生したものを黒塗りで示している。図 4(a)より，積層ゴムの位置によりばらつきはあるが，K-1 では上下動寄与率の最大値が約 0.7，K-2 では約 0.6 となっている。一方，K-3，K-4 では，どちらも上下動寄与率の最大値は約 0.2 である。図 4(b)では，J-1 のみ上下動寄与率が 0.2 付近を取り，その他の 3 地震動では上下動寄与率が 0 付近に集中している。講義棟では上下動寄与率が大きな値を取ることがあるが，J2 棟では，水平動入力時の引張軸力が支配的となっている。これは，2 棟のアスペクト比の違いによるものと考えられる[6]。

(3) 3 成分の引張軸力最大値と免震層変位の関係

四隅部の積層ゴムの最大引張軸力 N_{max} の発生時刻における変位を，それぞれ免震層変位のオービットにプロットし，N_{max} 発生時の免震層の状態を検討する。講義棟（K-1，K-3）と J2 棟（J-1，J-3）の結果を図 5 に示す。



(a) 講義棟　(b) J2 棟

図 4　積層ゴムに生じる引き抜き力の水平動寄与率及び上下動寄与率

図 5(a)より，K-1 の ${}_KI_3$ の積層ゴムは，N_{max} 発生時に，ほとんど変形が生じていないことが確認できる。これは，${}_KI_3$ 積層ゴムの上下動寄与率が約 0.7 であることに起因しており（図 4(a)），N_{max} 発生時に上下動入力時の引張軸力が水平動入力時に比べて卓越している（図 3(a)）ためである。図 5(b)では，全てのプロットが変形の大きな位置にある。これは，上下動寄与率が 0.2 程度であること（図 4(a)）に起因している。図 5(c)では，${}_JI_3$ および ${}_JI_4$ の積層ゴムは Y 方向にほとんど変形していない。これは，図 3(b)の軸力時刻歴において，N_{max} 発生時に Y 方向入力時の引張軸力がほぼ 0 となっているためである。図 5(d)では，全てのプロットが変形の大きな位置に存在している。

(4) 引張軸力最大値の評価法による検討

ここでは，${}_XN_{max}$，${}_YN_{max}$，${}_ZN_{max}$ を用いて，最大引張軸力 N_{max} を推定する方法を検討する。

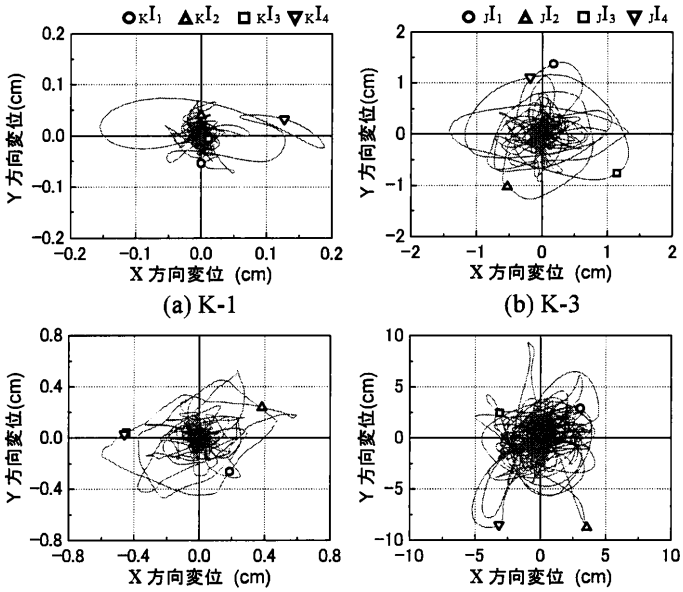
まず，X，Y 方向の水平動入力時の最大引張軸力のうち大きい方の値 ${}_HN_{max}$ と ${}_ZN_{max}$ を用いた推定式を検討する。最大軸力の組み合わせとして以下の 3 式を対象とする。

$$ {}_1N_{max} = N_H + N_Z \tag{1} $$

$$ {}_2N_{max} = \sqrt{N_H{}^2 + N_Z{}^2} \tag{2} $$

$$ {}_3N_{max} = \left| N_H(t) + N_Z(t) \right|_{max} \tag{3} $$

図 6(a)に(1)～(3)式より求めた ${}_iN_{max}$ と最大引張軸力 N_{max} の比較を示す。なお，図 6 にはそれぞれの建物の 4 基の積層ゴムのうち，${}_iN_{max}$ が最大となる積層ゴムの値を示している。(1)～(3)式は，講義棟では，幾つかの地震動で 1.0 を上回ることがあるが，J2 棟では，全ての推定式，全ての地震動で 1.0 を下回る。従って，上下動入力時の最大引張軸力値と応答が大きい方の水平一方向入力時の最大引

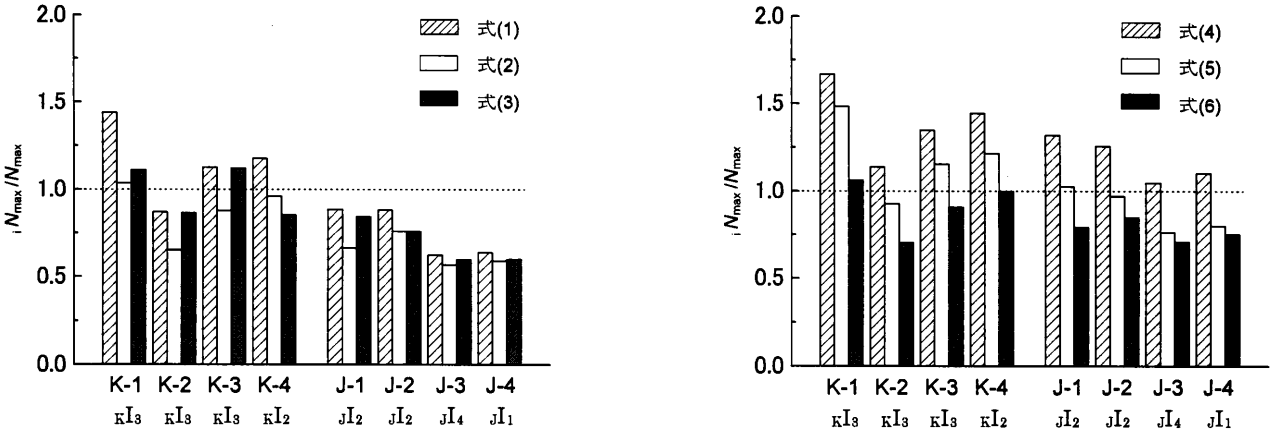


(a) K-1　(b) K-3　(c) J-1　(d) J-3

図 5　引張軸力最大値と免震層変位の関係

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan



(a) 2 成分を用いる評価　　(b) 3 成分を用いる評価

図 6　引張軸力の評価法による検討

張軸力値を使った推定式では，両建物とも，危険側の評価になることが分かった。

次に，3 つの最大引張軸力 $_XN_{max}$，$_YN_{max}$，$_ZN_{max}$ を用いた推定式を検討する。最大軸力の組み合わせとして以下の 3 式を対象とする。

$$_4N_{max} = N_X + N_Y + N_Z \tag{4}$$

$$_5N_{max} = \sqrt{N_X{}^2 + N_Y{}^2} + N_Z \tag{5}$$

$$_6N_{max} = \sqrt{N_X{}^2 + N_Y{}^2 + N_Z{}^2} \tag{6}$$

図 6(b)に，(4)～(6)式より求めた $_iN_{max}$ と最大引張軸力 N_{max} の比較を示す。(4)式は，各成分の引張軸力の最大値が同時に発生すると考える評価であり，全ての地震動で 1.0 を上回り，安全側の評価式となる。また，値も概ね 1.5 に収まっており，過大とは言えない値に留まっている。(5)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考える評価であり，半分の地震動で 1.0 を下回るが，最も最大引張軸力 N_{max} に近い値を示す推定式と言える。(6)式は，3 つの引張軸力の最大値が同時に発生しないと考える評価であり，ほとんどの地震動で 1.0 を下回り，危険側の評価となる。以上の結果は，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，および水平動入力時に比べ，短周期で振動する上下動入力時の軸力が，最大引張軸力発生時刻に引張軸力の極大値に近い値になることに起因している。

以上の検討から，最大引張軸力の推定式としては，(4)式が望ましい。(5)式を用いるときは，推定精度は高いが，危険側の評価になることもあることを念頭において使うべきである。

4. おわりに

本報では，多点同時地震観測を実施している平面形状の大きい中高層免震建物とアスペクト比の大きい超高層免震建物を対象に，積層ゴムに生じる引張軸力の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 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。また，水平動入力時に比べ，短周期で振動する上下動入力時の軸力が，最大引張軸力発生時刻に引張軸力の極大値に近い値になる。

(2) 最大引張軸力の推定方法として，地震動の 3 成分をそれぞれ入力して求まる引張軸力の最大値の総和 $_XN_{max}+_YN_{max}+_ZN_{max}$ は，最大引張軸力値 N_{max} を上回り，かつ 1.5 倍程度以下のばらつきに留まった。水平動の一方向入力時のそれぞれの引張軸力 $_XN_{max}$，$_YN_{max}$ の最大値の 2 乗和の平方根と上下動入力時の引張軸力の最大値 $_ZN_{max}$ の和は，最大引張軸力値 N_{max} に対する推定精度は高いが，危険側の評価になることもあることを念頭において使うべきである。

謝辞
本研究は，東京工業大学グローバル COE プログラム「震災メガ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。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。厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 日本建築学会 ：免震構造設計指針(第 3 版)，技報堂，2001.9
2) 森清宣貴，金澤健司，北村春幸 :免震建物を対象とした強震ー振動モニタリングシステム，日本建築学会技術報告集，pp 133-138, 2005.12
3) 大木洋司他 :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，pp 73-77, 2005.6
4) 福田優輝，佐藤大樹，北村春幸 :多点同時地震動観測記録に基づく免震建物の 3 次元応答解析手法に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集 B-2, pp.257-258, 2010.8
5) 福田優輝，佐藤大樹，北村春幸 :地震動観測記録に基づく超高層免震建物の積層ゴムに生じる引き抜き力に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（関東）B-2, pp.587-588, 2011.8
6) 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 東京理科大学大学院
*2 東京理科大学理工学部建築学科　助教・博士(工学)
*3 東京理科大学理工学部建築学科　教授・博士(工学)

NII-Electronic Library Service