T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo 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			

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

構造一振動

正会員 〇 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_KI₁~_KI₄ 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 JI〜JL 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。





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。





図2 J2 棟の概要



震源地 [名称]	年月日	震源 深さ (km)	м	距離 (km)	MF最大加速度(cm/s ²) [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)	м	距離 (km)	MF最大加速度(cm/s ²) [発生時刻(sec)]		
千葉県北西部	05/7/23	73	6	61	16.1	14.6	9.9
[J=1]					[82.9]	[81.7]	[81.8]
伊豆半島東方沖	06/4/21	5/4/21 7	5.8	69	4.0	2.8	2.2
[J-2]	00/1/21				[64.3]	[65.1]	[55.9]
三陸沖	11/3/11	24	9	413	50.0	67.3	34.1
[J-3]					[147.3]	[145.5]	[154.0]
茨城県沖 [J-4] 11/3/11	43	77	172	21.3	26.0	13.4	
	11/3/11	وب	1.1	1/2	[108.2]	[106.0]	[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 $_{k}I_1 \sim_{k}I_4(NRB700)$ を(図 1(b))、J2棟では $_{J1} \sim_{J}I_4(NRB1200)$ 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 $_{xN_{max}}$, $_{zN_{max}}$ 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($_{x}$ I₃, $_{J}$ I₄, $_{J}$ I₃)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 $_{xN_{max}}$, $_{zN_{max}}$ 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



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自 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^の。

(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。



図 5(a)より, K-1 の $_{\kappa}I_{3}$ 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, $_{\kappa}I_{3}$ 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, $_{J_{3}}$ および $_{J_{4}}$ 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 カ 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。

$$N_{\rm max} = N_H + N_Z \tag{1}$$

$${}_{2}N_{\max} = \sqrt{N_{H}^{2} + N_{Z}^{2}}$$
(2)

$$_{3}N_{\max} = |N_{H}(t) + N_{Z}(t)|_{\max}$$
 (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







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。

$$_{4}N_{\max} = N_{\chi} + N_{\chi} + N_{\chi} \tag{4}$$

$${}_{5}N_{\max} = \sqrt{N_{\chi}^{2} + N_{\gamma}^{2}} + N_{Z}$$
 (5)

$${}_{6}N_{\rm max} = \sqrt{N_X^2 + N_y^2 + N_z^2}$$
 (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 Nmax 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 xNmax+yNmax+zNmaxは、最大引張軸力値Nmax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 xNmax, yNmax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 zNmaxの和は、最大引張軸力値 Nmax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 一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

*3 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

^{*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)