水平地震動を受ける高層免震建物の積層ゴムの 最大面圧予測に関する基礎的研究

PREDICTION OF MAXIMUM PRESSURES DURING UPLIFT ACTING ON LAMINATED RUBBER BEARINGS SUPPORTING BASE ISOLATED HIGH-RISE BUILDINGS SUBJECT TO HORIZONTAL SEISMIC GROUND MOTION

栗田 哲^{*1}, 谷沢弘容^{*2}, 諸菱亮太^{*3}, 杉村義広^{*4}
Satoshi KURITA, Hirokazu TANIZAWA, Ryota MOROBISHI
and Yoshihiro SUGIMURA

We discussed characteristics of pressures and external forces acting on laminated rubber bearings supporting slender buildings subject to seismic horizontal ground motions by numerical simulations. A prediction method of maximum pressures acting on the rubber bearing during uplift caused by the horizontal ground motions was proposed from the above discussion and the sway-rocking model of which the rubber bearing does not degrade vertical stiffness under tension. The accuracy of the proposed method was examined with numerical simulations. It is found from the results that the proposed method predicts the maximum negative pressure and the maximum positive pressure with enough accuracy.

Keywords: base isolated building, uplift, prediction, horizontal seismic ground motion, vertical response, overturning moment

免震建物、浮き上がり、予測、水平地震動、鉛直応答、転倒モーメント

1 はじめに

近年、アスペクト比の大きい免震建物が建設されるようになり、地震時における上部構造の浮き上がりに伴う積層ゴムの引張性状が重要な問題となってきた。積層ゴムの引張試験や地震応答解析により検討が行われ、引張特性は明らかにされつつある。本論文に関連する応答解析に基づく研究としては、和田¹⁾の先見的な研究を始めとして、文献2)～13)が挙げられる。剛体モデルを用いた積層ゴムの最大面圧の簡易予測法が免震構造設計指針¹⁴⁾で紹介されているが、より精度の高い簡易予測法の開発が試みられている^{15)～17)}。しかし、それに関する研究は数値解析的研究と比べると極めて少なく、積層ゴムの最大引張面圧の予測に関しては殆どない。本研究は、高層免震集合住宅のような細長い免震建物が水平入力動を受けた場合の積層ゴムの最大引張面圧及び最大圧縮面圧を予測する簡易手法の開発を目的としている。水平動単独で積層ゴムに引張変位が生じる可能性は高くないが、可能性があるケースとしては、例えば、免震層最大水平変位が50cmを超えるような水平動を受けた高層免震集合住宅¹³⁾が挙げられる。そのようなケースが予測対象となる。

はじめに、上部構造の鉛直方向の振動も考慮した多質点系スウェイ・ロッキングモデルを用いた理論的考察と応答解析結果から、積層ゴムの圧縮状態から引張状態への移行に伴う軸剛性の低下により免震

層直上階の鉛直方向の剛性が移動し、免震層直上階に鉛直方向の偏心が起り、その偏心に起因した上部構造の鉛直加速度が積層ゴムの最大引張面圧に及ぼす影響は無視できないことを示す。また、積層ゴムの最大面圧や最大軸変形、最大引張面圧と最大圧縮面圧の生起時刻、上部構造の鉛直加速度と転倒モーメントについて引張剛性低下の度合いと関連付けて考察を行う。その考察から、水平動を受けた場合の積層ゴムの最大引張面圧と最大圧縮面圧の予測法を提案し、最後にその予測精度について検討を行う。

2 地震応答解析手法と免震建物モデル

2.1 応答解析手法の概要

本論文が対象とする免震建物は免震層(積層ゴムが配置された層)が最下層となる建物である。その建物の時刻歴応答解析モデルを図2-1に示す。上部構造の水平方向及び鉛直方向の剛性は各階の水平剛性と鉛直剛性で表す。上部構造の水平方向と鉛直方向間の振動の連成は考慮しない。x方向(建物の短辺方向)に関して同一の積層ゴムが2個配置されているとする。全ての質点は建物の幅Bの中央上にあるとする。鉛直方向の座標をzで表す。xz座標系の原点は免震層直上階の重心(質点位置)とする。正の回転方向は時計回りとする。上部構造は弾性とし、免震層の復元力は図2-2に示す通りである。ダンパーを

^{*1} 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教授・工博

^{*2} NTT ファシリティーズ(元東北大学 大学院生) 修士

^{*3} 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生

^{*4} 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku Univ., Dr. Eng.

NTT Power and Building Facilities Inc., M. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku Univ.

Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku Univ., Dr. Eng.

完全弾塑性ダンパーとして、免震層の水平方向の復元力を図2-2の(a)に示すバイリニア型でモデル化する。積層ゴムの鉛直剛性は、図2-2の(b)に示す非線型弾性2直線でモデル化し、引張降伏を考慮しない。圧縮剛性 k_c に対する引張剛性 k_t の比を軸剛性比と呼び記号 α で表す。

2.2 免震層直上階の鉛直方向の剛心

後章の数値解析に先立ち、積層ゴムの軸剛性低下に起因した免震層直上階における鉛直方向の剛心の移動と剛心に作用する力について前節の振動モデルを用いて理論的考察を行う。

水平動単独入力した場合、免震層直上階の質点、すなわち、重心 C の振動方程式から、鉛直方向と水平方向の力の釣合は次式となる(図2-3の(a)参照)。

$$\begin{bmatrix} k^{zz} & -k^{zx} \\ -k^{zx} & k^{xx} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_C^z \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^z \\ -I_t \ddot{\theta} + M_C \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -m_t g \\ 0 \end{Bmatrix} \dots (2.1)$$

上式では減衰項を省略した。 F^z は鉛直方向の慣性力である。

$$F^z = -m_0 \ddot{u}_C^z + F_s^z \dots (2.2)$$

u_C^z と θ は C の鉛直変位と回転角度である。 m_0 、 m_t 、 I_t は、それぞれ、免震層直上階の質量、上部構造の総質量、各階の回転慣性の総和である。 g は重力加速度である。 F_s^z と M_C は免震層直上階を除く上部構造の鉛直方向の慣性力の和と転倒モーメントである。式(2.1)の左辺の 2×2 のマトリックスは免震層の剛性マトリックスであり、その成分は、重心= x 座標の原点であるとしているので、以下の通りである。

$$k^{zz} = k_1^z + k_2^z \quad k^{zx} = -k_1^z \frac{B}{2} + k_2^z \frac{B}{2} \quad k^{xx} = k^z \frac{B^2}{4} \dots (2.3)$$

k_1^z と k_2^z は、図2-1に示す積層ゴムBI-1とBI-2の鉛直剛性であり、それぞれの鉛直変位 u_i^z ($i=1,2$)を用いて次のように表すことができる。

$$k_i^z = \begin{cases} nk_t & \text{for } u_i^z > 0 \\ nk_c & \text{for } u_i^z \leq 0 \end{cases} \quad k_t = \alpha k_c \dots (2.4)$$

n は図2-1の面外方向に配置されている積層ゴムの個数である。 $\alpha < 1$ の場合、積層ゴムに引張変位が生じると $k^{zx} \neq 0$ となり、重心にあった免震層直上階の鉛直方向の剛心は移動する。移動した時の免震層直上階の鉛直方向の剛心 S の x 座標値 e_x は式(2.1)から求められ、それに式(2.3)と式(2.4)を代入すると

$$e_x = \frac{k^{zx}}{k^{zz}} \quad |e_x| = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \frac{B}{2} \dots (2.5)$$

となる。重心を原点とした座標系を使用しているので、 e_x は鉛直方向の偏心を表す。積層ゴムに引張変位が生じると、上部構造は移動した鉛直方向の剛心まわりにロッキング振動をする。この剛心における転倒モーメント M_s は以下のように表すことができる(図2-3の(b)参照)。

$$M_s = M_C + F^z e_x \dots (2.6)$$

例えば、軸剛性比1/20で引張変位が生じた場合、 $|e_x| \approx 0.45B$ となり、鉛直方向の剛心が圧縮側の積層ゴムに極めて近いと

図2-1 多質点系スウェイ・ロッキングモデル

ころに移る。引張変位が生じる以前と比べると、引張側の積層ゴムは上部構造のロッキング振動による鉛直変位の影響をより受け易くなり、逆に、圧縮側の積層ゴムは影響を受け難くなる。このように偏心が大きい場合、剛心の転倒モーメントは鉛直方向の慣性力の影響を受けやすくなる。よって、後章では剛心の転倒モーメントについても検討を行う。本論文は鉛直方向の偏心だけを検討対象とするので、以後、鉛直方向の剛心と鉛直方向の偏心を単に剛心と偏心と呼ぶことにする。

2.3 免震建物モデル

菊池等¹¹⁾の18階建ての高層免震集合住宅モデルを参考に、アスペクト比やアイソレータの特性が異なる5種類の免震建物モデルを作成した。モデルの諸元を表2-1に示す。

上部構造の平面形状と高さ、各階の重量、及び、1次固有周期(水平及び鉛直)は文献11)と同一である。各階の重量分布を図2-4の(a)に示す。図中の19階は屋上階を表す。横軸は各階の重量を2階の重量で除した重量比である。図中の記号a4とa5はアスペクト比4とアスペクト比5を表す。水平方向の各階の剛性は、A i 分布から層せん断力を求め、そのせん断力による層間変位が全層で同一で、且つ、与えられた1次固有周期を満たすように固有値解析を用いて定めた。上部構造の水平剛性分布を図2-4の(b)に示す。横軸は1階の剛性で除した値である。上部構造の鉛直剛性は実設計された13階建て免震集合住宅の剛性分布を参考に図2-4の(c)に示す剛性分布を設定し、与えられた1次固有周期を満たすように定めた。参考にした建物の鉛直剛性は部材の伸縮だけを考慮して柱及び耐震壁の断面面積と階高を用いて算出されたものである。

積層ゴムの水平剛性は、表2-1に示す水平免震周期(上部構造を剛体とした時の周期)から算出した。ダンパーの降伏変位は3cm、降伏せん断力係数は5%である。積層ゴムの圧縮剛性は、水平剛性と同様に、表2-1に示す免震層の鉛直固有周期から定めた。積層ゴムの鉛直剛性が面圧に及ぼす影響を検討するために2種類の鉛直固有周期0.07秒と0.15秒を設定した。両周期は、文献13)を参照した値であり、それぞれ、地盤-建物連成系を考慮しない場合と考慮した場合の固有周期である。考慮した場合の鉛直剛性は、実際の鉛直剛性でなく、見かけの積層ゴムの鉛直剛性であることに注意を要する。各モデルの積層ゴム

図2-2 免震層の復元力モデル

図2-3 免震層直上階における重心と鉛直方向の剛心とその外力(軸剛性比が α であるモデル)

の引張剛性は軸剛性比 α を用いてそれぞれの圧縮剛性から定めた。引張剛性低下の影響を調べるために、5種類の軸剛性比(1, 1/5, 1/10, 1/20, 1/30)を使用した。但し、解析結果の図にはその逆数 $\beta = 1/\alpha$ で表示する。積層ゴムは上部構造の重量による面圧が100kgf/cm²となるように設計されたものとした。この面圧から算出される積層ゴムの直径を表2-1の免震層の鉛直固有周期0.07秒のモデルの欄に示す。

上部構造の減衰は剛性比例型減衰として、表2-1に示す上部構造の1次固有周期で水平方向と鉛直方向の減衰定数が、それぞれ、2%と3%となるように設定した。免震層の水平方向の減衰は零とし、鉛直方向の減衰は剛性比例型減衰として表2-1に示す免震層の鉛直固有周期で減衰定数が3%となるように設定した。

上部構造の総重量 W と転倒モーメントが免震層直上階の重心に作用している状態を考え、積層ゴムの鉛直変位がゼロ(すなわち、面圧=0)となる時の転倒モーメント M_{cr} を静的な力の釣合いから求めると、 M_{cr} は次式となる。

$$M_{cr} = W \cdot B / 2 \quad \dots (2.7)$$

この M_{cr} を限界転倒モーメントと呼ぶことにする。各モデルの M_{cr} の値も表2-1に表記した。

使用した入力地震動は兵庫県南部地震でJR 鷹取駅で観測された水平動である。ただし、その水平動は文献13)と同様に、長周期成分が卓越する方向に水平2方向の地震動をベクトル合成した波である。

この地震動を5種類の免震建物モデルに入力して応答解析を行った結果、免震層最大水平変位は約60cmであった。モデルa4-3は最大転倒モーメントが M_{cr} に極めて近い値であったが、僅かな差で積層ゴムに引張変位が生じなかった。引張変位が生じないため、モデルa4-3は後章の数値解析及び予測で使用しなかった。

表2-1 免震建物モデルの諸元

モデル名		a4-1	a4-2	a4-3	a4-4	a5-1	a5-2
上部構造物	高さH(m)	54				54	
	短辺方向の幅B(m)	13.5				10.8	
	アスペクト比	4				5	
	階数	18				18	
	階高(m)	3				3	
	水平1次固有周期(s)	1.08				1.08	
	鉛直1次固有周期(s)	0.125				0.1	
免震層	水平免震周期(s)	3.5	3.5	4	4	4	4
	鉛直固有周期(s)	0.07	0.15	0.07	0.15	0.07	0.15
	積層ゴムの直径D(cm)	111	111	111	103	103	103
	降伏せん断力係数	0.05				0.05	
	降伏変位(cm)	3				3	
	建物総重量W(t)	13491				11661	
限界転倒モーメント M_{cr} (t・m)		91064				62969

図2-4 上部構造の特性

3 水平動を受けたときの積層ゴムと上部構造の鉛直応答

モデルa4-2に水平動を入力して応答解析を行った結果から、積層ゴムに引張変位が生じた場合の積層ゴムの面圧と鉛直変位や上部構造の転倒モーメントと鉛直加速度について考察を行う。その考察から積層ゴムの最大圧縮面圧の予測法を示す。最大引張面圧の予測については本章の結果を踏まえて次章で検討する。

3.1 積層ゴムの面圧と鉛直変位

積層ゴムの面圧の時刻歴波形の例として、軸剛性比が1と1/20の場合の波形を図3-1に示す。5種類の全ての軸剛性比で、6.5～7秒の区間と7.5～8秒の区間で引張面圧が生じた。それぞれの時間区間を浮き上がり1と浮き上がり2と呼ぶことにする。浮き上がり1と浮き上がり2のそれぞれ時間区間について積層ゴムの引張面圧の最大値とその最大値生起時刻の圧縮側の積層ゴムの面圧を求め、それぞれを引張面圧と圧縮面圧として図3-2の(a)と(b)の縦軸に示す。図中の記号■と●は浮き上がり1と浮き上がり2の面圧を表す。図3-2の(b)には全時間における最大圧縮面圧を記号▲で示す。浮き上がり2の積層ゴムの引張変位の最大値を図3-2の(c)に示す。図中に示した太い水平線は引張剛性を零とした場合の結果を表す。図の縦軸は鉛直変位率である。鉛直変位率とは上部構造の重量による積層ゴムの圧縮変位で鉛直変位を除いて基準化した値である。本論文は鉛直変位率を用いて積層ゴムの鉛直変位を図に表す。軸剛性比が小さくなる、すなわち、引張剛性が小さくなるにつれて引張面圧は減少し、引張変位は逆に単調増大する。しかし、引張剛性が零になっても引張変位が有限な値であることから、積層ゴムが引張力に対して無抵抗になったとしても、引張力を受けようとする瞬間に建物が転倒することがない。引張面圧と比較すると、圧縮面圧は軸剛性比が1の面圧に対する減少の度合いが小さい。特に最大圧縮面圧はこの減少の度合いが極めて小さいことから、軸剛性比に対してほぼ一定と見なせる。軸剛性比が1で無い場合、引張面圧の最大値生起時刻の圧縮面圧が最大圧縮面圧とならないことから、最大引張面圧と最大圧縮面圧は同時に起こらない。図3-1に矢印で示した軸剛性比1/20の最大引張面圧及び最大圧縮面圧の生起時刻を見ると、最大圧縮面圧は最大引張面圧より先に生じている。浮き上がり1と浮き上がり2のそれぞれの区間について最大引張面圧と最大圧縮面圧の生起時刻を調べ、その結果を図3-3に示す。軸剛性比が1でない場合、いずれの浮き上がりについても最大圧縮面圧が最大引張面圧より先行して生じていることから、最大引張面圧と最大圧縮面圧の同時性は成り立たない。

3.2 積層ゴムの最大圧縮面圧の予測

最大圧縮面圧と最大引張面圧の非同時性により、最大圧縮面圧と最大引張面圧の予測を個別に取り扱うこととし、本節では最大圧縮面圧の予測について考える。最大圧縮面圧は軸剛性比に対してほぼ一定と見なせることが他のモデルについても成り立てば、軸剛性比1のモデルから最大圧縮面圧の予測が可能となる。この成立性について表2-1のモデルを用いて検討を行い、その結果を図3-4に示す。圧縮剛性が小さいために上部構造のロッキング振動が起り易いモデルa4-2とa5-2は、軸剛性比1とそうでない場合の最大圧縮面圧の差が他のモデルより大きい、それでも最大5%程度の差しかない。よって、最大圧縮面圧は軸剛性比に依らずほぼ一定と見なせる。以上の結果から本論文では、水平動を受けた場合の積層ゴムの最大圧縮面圧が引張剛性を圧縮剛性と等しいとしたモデルの最大圧縮面圧であるとする予測法を

提案する。常時面圧を 100kgf/cm^2 としているので、最大圧縮面圧は常時面圧の2.1～2.3倍である。常時面圧の2倍を最大圧縮面圧とする最も単純な予測法も考えられる。

3.3 免震層直上階の重心の鉛直変位と鉛直加速度

積層ゴムの鉛直変位波形と免震層直上階の重心の鉛直変位波形を、それぞれ、図3-5と図3-6に示す。引張変位が生じると、引張側の積層ゴムの鉛直変位はほぼ単調増大し、最大値に達した後も単調的に減少する。その増減は正弦関数的な変化である。免震層直上階の重心の鉛直変位波形に、この正弦関数的な変化が顕著に認められる。引張変位がなくなった後も、重心の鉛直変位は周期的な変動を繰り返すが、その周期は上部構造の鉛直1次固有周期に近い値であることをFFTを用いたスペクトル分析により確認した。浮き上がり1と浮き上がり2の免震層直上階の重心の鉛直加速度波形を図3-7に示す。対比検討を行うために、符号を逆にした重心の鉛直変位波形の動的成分(上部構造の重量による鉛直変位を除いたもの)も同図に示す。図の縦軸は

図3-1 積層ゴムの面圧の時刻歴波形(a4-2)

図3-2 積層ゴムの面圧と鉛直変位(a4-2)

図3-3 最大面圧発生時刻(a4-2)

加速度である。鉛直変位については縦軸の意味は無いが、波形の位相関係について分かり易いように、鉛直変位は縦軸の範囲を超えない程度に拡大した。引張変位が生じ始めた直後(浮き上がり1は6.6秒付近、浮き上がり2は7.7秒付近)では正の加速度であるが、引張変位の増大に伴い加速度が負となる。正の加速度は上部構造の鉛直方向の慣性力が積層ゴスを圧縮する力として作用していることを意味し、負の加速度は引張力として作用することを意味する。よって、引張変位が生じた直後で圧縮面圧が最大になる時、鉛直方向の慣性力は積層ゴスを押し、引張変位が増大して引張面圧が最大になる時には積層ゴスを引張る力として作用していることが分かる。

以上の結果から、引張変位の発生時刻から引張面圧が最大となるまでの積層ゴムの面圧発生メカニズムは以下のように推察される。引張

図3-4 最大圧縮応力

図3-5 積層ゴムの鉛直変位の時刻歴波形(a4-2)

図3-6 免震層直上階重心の鉛直変位の時刻歴波形(a4-2)

図3-7 免震層直上階重心の鉛直加速度と鉛直変位の比較(a4-2, $\beta=20$)

変位の発生直後では、上部構造のロッキング振動により圧縮側の積層ゴムの圧縮変位は増大し続けて、圧縮面圧が最大値に達する。その後、重心の浮き上がり変位の増大に伴い鉛直方向の慣性力がさらに増大するため、圧縮側の積層ゴムでは上部構造のロッキング振動による沈み込み変位成分より鉛直方向の慣性力による浮き上がり変位成分の方が大きくなる。それが原因で、圧縮側の鉛直変位は減少する。引張側の積層ゴムはロッキング振動による引張変位だけでなく慣性力による引張変位も受け、引張変位はより増大して引張面圧が最大となる。このように、圧縮側の積層ゴムが鉛直方向の慣性力による浮き上がり変位に影響され易い原因は、2.2節で述べたように剛心が圧縮側の積層ゴムに近づくので、ロッキング振動による鉛直変位成分が引張側の積層ゴムに比べると小さくなるためである。

3.4 上部構造の鉛直加速度と転倒モーメント

浮き上がり1と浮き上がり2の各区間における引張面圧の最大値生起時刻の免震層直上階の重心の鉛直加速度、転倒モーメント及び剛心の転倒モーメントを図3-8に示す。転倒モーメントはその絶対値を限界転倒モーメントで除して基準化した値を転倒モーメント率として示す。剛心と重心の両転倒モーメントは軸剛性比が小さくなるにつれて減少するが、剛心の転倒モーメントは重心の転倒モーメントより大きい。剛心と重心の転倒モーメントの差は、軸剛性比が小さくなるにつれて、鉛直加速度が増大するため更に大きくなる。このことから、鉛直加速度が剛心の転倒モーメントに及ぼす影響は少なくないと言える。

浮き上がり1と浮き上がり2の各時間区間における引張面圧の最大値生起時刻における上部構造の鉛直加速度分布を軸剛性比1/5と1/20

図3-8 最大引張面圧時の免震層直上階重心の鉛直加速度と転倒モーメント

図3-9 最大引張面圧時の上部構造の鉛直加速度分布と平均増幅率

について求め、その結果を図3-9の(a)と(b)に示す。図の横軸は各階の鉛直加速度を免震層直上階の鉛直加速度で除した値である。浮き上がり1の鉛直加速度の増幅は極めて小さく、また、浮き上がり2でも軸剛性比1/5に若干の増幅が認められる程度である。免震層直上階に作用する鉛直方向の慣性力を上部構造の総重量で除した値を平均鉛直加速度とし、平均鉛直加速度を免震層直上階の重心の鉛直加速度で除した値を平均増幅率として図3-9の(c)に示す。軸剛性比が1/10以下では、平均増幅率は概ね1～1.1である。以上の結果から、積層ゴムに引張変位が生じている間の鉛直方向の運動に関しては上部構造を剛体と見なしても問題が無いと思われる。

4 積層ゴムの最大引張面圧の予測

式(2.1)で回転慣性モーメントを無視した力の釣り合い式

$$\begin{bmatrix} k^z & -k^x \\ -k^x & k^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c^z \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^z \\ M_c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -m_s g \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots (4.1)$$

を用いて、積層ゴムの引張剛性が圧縮剛性と等しいモデル(軸剛性比1のモデル)の応答から引張剛性だけが異なるモデル(軸剛性比 α のモデル)の積層ゴムの最大引張面圧を予測する方法について考える。

4.1 転倒モーメントの近似

軸剛性比1のモデルの転倒モーメントから軸剛性比 α のモデルの免震層直上階の重心の転倒モーメントを求める近似式を導出する。軸剛性比 α のモデルと軸剛性比1のモデルの免震層直上階の剛心Sに作用する力を図4-1の(a)と(b)に示す。図中の記号Cは免震層直上階の重心である。また、 $M_s(\alpha)$ と $M_c(\alpha)$ は軸剛性比が α であるモデルの免震層直上階の剛心と重心の転倒モーメントであり、 $F^z(\alpha)$ は免震層直上階に作用する鉛直方向の慣性力である。引張変位が初めて生じた時刻で、軸剛性比 α のモデルは剛心が e_x に移動するが、 $F^z(\alpha) = 0$ であり、剛心の転倒モーメントが軸剛性比1のモデルと同一である。

$$M_s(\alpha) = M_s(1) \quad \dots (4.2)$$

その後、軸剛性比 α のモデルは $F^z(\alpha)$ が生じ、最大引張面圧の生起時刻では、前章の結果から、

$$|M_s(\alpha)| \leq |M_s(1)| \quad \dots (4.3)$$

となる。図4.1の(a)と(b)を見て分かるように、 $M_s(\alpha)$ が $M_s(1)$ より小さくなる原因として軸剛性比1のモデルに $F^z(\alpha)$ がないことが考えられる。そこで、軸剛性比1のモデルに $F^z(\alpha)$ を外力として e_x に作用させた等価モデル(図4-1の(c))を考える。等価モデルの剛心Sのモーメントは次式で与えられる。

$$\bar{M}_s(1) = M_s(1) - F^z(\alpha)e_x \quad \dots (4.4)$$

軸剛性比 α のモデルと等価モデルは剛心におけるモーメントが等しい、すなわち、 $M_s(\alpha) = \bar{M}_s(1)$ と仮定すると、式(2.6)と(4.4)から次式が得られる。

$$M_c(\alpha) = M_s(1) - 2F^z(\alpha)e_x = M_c(1) - 2F^z(\alpha)e_x \quad \dots (4.5)$$

上式は $M_c(1)$ から $M_c(\alpha)$ を求める近似式であり、引張変位が初めて生じた時刻では $F^z(\alpha) = 0$ であるから式(4.2)を満たす。

4.2 免震層直上階の重心の鉛直方向の変位と慣性力の近似

3.3節の結果に基づき、引張変位が生じている間の免震層直上階の重心の鉛直変位 u_c^z を正弦波で近似する。

$$u_c^z(t) \approx u_0^z + \Delta u_c^{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \dots (4.6)$$

u_0^z は上部構造の重量による鉛直変位であり、 $\Delta u_c^{\max}$ は最大引張面圧の生起時刻の動的鉛直変位成分である。 t は引張変位が生じ始める時刻を原点とする時間である。 T は引張変位が生じている時間区間、すなわち、 $u_c^z \neq u_0^z$ となる時刻から $u_c^z = u_0^z$ となる時刻までの時間区間(浮き上がり時間と以後呼ぶ)を2倍した値である。最大引張面圧の生起時刻の重心の変位と加速度は式(4.6)から次式のようになる。

$$u_c^z = u_0^z(\Delta t_{\max}) = u_0^z + \Delta u_c^{\max} \dots (4.7)$$

$$\ddot{u}_c^z = \ddot{u}_c^z(\Delta t_{\max}) = -\Delta u_c^{\max} \frac{4\pi^2}{T^2}$$

3.4節の結果に基づき上部構造が鉛直方向に関して剛体的に運動すると見なして、式(4.7)から上部構造の鉛直方向の慣性力を次式で表す。

$$F^z(\alpha) \approx -m_i \ddot{u}_c^z = \frac{4\pi^2}{T^2} m_i \Delta u_c^{\max} \dots (4.8)$$

4.3 予測法

式(4.8)の $F^z(\alpha)$ とそれを式(4.5)に代入して得られた $M_c(\alpha)$ を式(4.1)に代入すると、最大引張面圧の生起時刻における免震層直上階の重心の力の釣合いは次式となる。

$$\begin{bmatrix} k^z & -k^x \\ -k^x & k^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c^z \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{4\pi^2}{T^2} m_i \Delta u_c^{\max} \\ M_c(1) - \frac{8\pi^2}{T^2} m_i \Delta u_c^{\max} e_x \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -m_i g \\ 0 \end{Bmatrix} \dots (4.9)$$

ここに、

$$u_c^z = u_0^z + \Delta u_c^{\max} \quad \theta = \theta_0 + \Delta \theta^{\max} \dots (4.10)$$

θ_0 は引張変位が生じ始める時刻の回転角度であり、 $\Delta \theta^{\max}$ は最大引張面圧時の回転角度の増分である。次に、引張変位が生じ始める時刻の力の釣り合いを考える。この時刻の免震層直上階の重心の転倒モーメントは限界転倒モーメントであるから、力の釣り合い式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} k^z & -k^x \\ -k^x & k^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0^z \\ \theta_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -m_i g \\ M_{crit} \end{Bmatrix} \dots (4.11)$$

図4-1 軸剛性 α と軸剛性比 1のモデルの免震層直上階の剛心に作用する動的外力と等価モデル

式(4.10)を考慮して式(4.9)から式(4.11)を引くと、変形増分を算出する式を得る。

$$\begin{bmatrix} k^z - \frac{4\pi^2}{T^2} m_i & -k^x \\ \frac{8\pi^2}{T^2} m_i e_x - k^x & k^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_c^{\max} \\ \Delta \theta^{\max} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \Delta M_c(1) \end{Bmatrix} \dots (4.12)$$

ここに、

$$\Delta M_c(1) = M_c(1) - M_{crit} \dots (4.13)$$

本論文で提案する最大引張面圧時の積層ゴムの面圧の予測は以下の通りである。始めに、軸剛性比 1のモデルの応答解析を行い、引張変位が生じている時間区間の長さとその時間区間での最大転倒モーメント $M_c(1)$ を求める。その時間区間の長さを浮き上がり時間として、それを2倍した T と式(4.13)から求めた転倒モーメントの増分を式(4.12)に代入して、軸剛性比 α のモデルの免震直上階の重心の変形増分を求める。その変形増分を次式に代入して、積層ゴムの鉛直変位を予測する。

$$u_1^z = u_0^z + \Delta u_c^{\max} + \frac{B}{2} \Delta \theta^{\max} \quad u_2^z = u_0^z + \Delta u_c^{\max} - \frac{B}{2} \Delta \theta^{\max} \dots (4.14)$$

この予測変位を次式に代入して最大引張面圧時の積層ゴムの面圧が求められる。

$$\sigma_1^z = k_1^z u_1^z / S \quad \sigma_2^z = k_2^z u_2^z / S \dots (4.15)$$

S は積層ゴムの断面積である。4.2節で定義した通りに引張変位が生じている時間区間から浮き上がり時間を求めるより、軸剛性比 1の転倒モーメントが限界転倒モーメントを超過している時間を浮き上がり時間として最大転倒モーメントと一緒に求めた方が簡単である。また、転倒モーメントから求めた浮き上がり時間と引張変位が生じている時間区間の差は小さいので、予測では転倒モーメントから求める浮き上がり時間を用いる。

回転慣性モーメントが無視できない場合には、それを考慮した変形増分の予測式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} k^z - \frac{4\pi^2}{T^2} m_i & -k^x \\ \frac{8\pi^2}{T^2} m_i e_x - k^x & k^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_c^{\max} \\ \Delta \theta^{\max} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \Delta M_c(1) - I_i \ddot{\theta}(1) \end{Bmatrix} \dots (4.16)$$

また、鉛直方向の慣性力及び回転慣性モーメントを考慮しない変形増分の予測式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} k^z & -k^x \\ -k^x & k^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_c^{\max} \\ \Delta \theta^{\max} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \Delta M_c(1) \end{Bmatrix} \dots (4.17)$$

上式を用いた予測は、スウェイ・ロッキングモデルの転倒モーメントを用いることを除けば、文献16)の静的非線型増分解析を用いた予測法と同一である。

本論文の予測法の基本式である式(4.12)は、建物の短辺方向に積層ゴムが3個以上配置されている場合にも適用可能である。その場合、式(4.12)の k^z, k^x, k^r, e_x は次式で与えられる。

$$k^z = \sum_{i=1}^m k_i^z \quad k^x = \sum_{i=1}^m k_i^x x_i \quad k^r = \sum_{i=1}^m k_i^r x_i^2 \quad e_x = k^x / k^z \dots (4.18)$$

m は建物の短辺方向に配置された積層ゴムの個数であり、 x_i は原点を重心とする x 座標系における積層ゴム i の x 座標値である。2章のモデルで短辺方向に軸剛性比1/20の積層ゴムが3個均等に配置されている場合、剛性は

$$|e_x| = \frac{1-\alpha}{2+\alpha} \frac{B}{2} \approx 0.23B$$

となる。このことから分かるように、積層ゴムの個数が多くなると鉛直方向の偏心が小さくなるため、この偏心が積層ゴムの鉛直方向の

図4-2 積層ゴムの鉛直変位予測

図4-3 積層ゴムの引張面圧と同時刻の圧縮面圧の予測

変形や面圧に及ぼす影響は小さくなる。

4. 4 予測精度の検討

3章で使用したモデルa4-2の浮き上がり1と浮き上がり2のそれぞれの時間区間について、最大引張面圧時の軸応答予測を行った結果を図4-2と図4-3に示す。図4-2は積層ゴムの鉛直変位の予測結果であり、図4-3は面圧の予測結果である。予測1は上部構造の回転慣性モーメントと鉛直方向の慣性力の両方を無視した式(4.17)に基づく予測である。また予測2は鉛直方向の慣性力のみを考慮した式(4.12)の予測であり、予測3は両方を考慮した式(4.16)の予測である。精算解は軸剛性比を考慮した時刻歴応答解析によって得られた値である。予測1の引張変位は軸剛性比の逆数に対して線形関係が成り立つので、最大引張面圧は軸剛性比と関係なく一定となる。圧縮変位は軸剛性比に関係なく一定となるため、圧縮面圧も一定となる。そのために、予測1は軸剛性比が小さくなるに連れて予測誤差が大きくなる。鉛直方向の慣性力を考慮した予測2と予測3は、浮き上がり1では、鉛直変位及び面圧とも精算解との差は極めて小さい。浮き上がり2については、予測2と予測3は軸剛性比が小さくなるにつれて最大引張面圧の予測誤差が大きくなる傾向にあるが、それでも予測1と比較するとその誤差は小さい。以上のことから、最大引張面圧を予測するためには、鉛直方向の慣性力を考慮する必要があることが分かる。また、予測2と予

図4-4 積層ゴムの引張面圧予測

測3の差異が極めて小さいことから、回転慣性モーメントの影響を無視しても問題がないと思われる。

表2-1に示す他の免震建物モデルの最大引張面圧を予測1と予測2の手法を用いて予測を行った結果を図4-4に示す。モデルa4-1とa4-4は1回だけ積層ゴムに引張変位が生じる浮き上がりが起きたが、モデルa5-1とa5-2はモデルa4-2のように引張変位が生じる浮き上がりが複数回起きた。このような浮き上がりが複数回起こる場合、最初の浮き上がりの最大引張面圧を図の(c-1)と(d-1)に示し、全ての浮き上がりの中で引張面圧の最大値を図の(c-2)と(d-2)に示す。1回しか起こらない場合も含み最初の浮き上がりについては、予測2は十分な精度を有しているといえる。ただし、引張変位が生じる浮き上がりが複数回起きる場合、予測2の最大引張面圧は精算値の2倍になることもあり、やや問題がある。しかし、予測1と比べる精度が良い。

引張変位が生じる浮き上がりが複数回起こり、且つ、最大引張面圧が最初の浮き上がり以外で生じる場合、それ以前に起きた浮き上がりにより上部構造が鉛直振動しているため、最大引張面圧が起こる浮き上がりの開始時刻で鉛直加速度がゼロとなることは殆どない(図3-7の(b)参照)。しかるに、予測に使用する免震層の鉛直加速度の近似式(4.7)は、浮き上がり開始時の鉛直加速度がゼロであることを前提としている。浮き上がりが複数回起こる場合に最大引張面圧の予測精度が低くなる原因として、この前提が成り立たないことが挙げられる。

転倒モーメントの近似式(4.5)は、振動方程式から導いた理論的な近似式ではなく、振動方程式の慣性力を外力として力の釣合いの考察から導いた半経験的な近似式である。そのため、近似式の普遍性について問題があることは否定できない。しかし、特性が異なる4種類の免震建物モデルを用いた予測の精度が良好であったこと、免震建物モデル及び入力地震動が本論文と異なる数値解析を実施したが、その結果も本論文と同等の結果が得られた。よって、近似式(4.5)は概ね妥当なものと考えている。

5 結論

本論文は水平入力動を受けた建物の短辺方向に積層ゴムが2個配置された高層免震建物を対象に、積層ゴムの面圧に関連する事項について地震応答解析結果に基づき考察を行い、その結果に基づいて積層ゴムの引張剛性が圧縮剛性と等しいスウェイ・ロッキングモデルの応答から引張剛性が圧縮剛性より小さい場合の最大面圧を予測する手法を提案した。得られた知見の要約を以下に述べる。

1) 積層ゴムの引張剛性が圧縮剛性より小さい場合、積層ゴムの最大圧縮面圧は引張変位が生じた直後に起こり、その後、最大引張面圧が起こる。このように水平単独入力動を受けた場合でも、最大引張面圧と最大圧縮面圧の同時性が成立するとは限らない。成立しない原因は、浮き上がり変位に伴う上部構造の鉛直加速度が積層ゴムの面圧発生に寄与しているためである。

2) 積層ゴムの引張剛性が圧縮剛性より小さい場合の最大圧縮面圧の予測法として、引張剛性を圧縮剛性と等しいとしたモデルの最大圧縮面圧を予測値とした予測法を提案した。この予測法は十分な精度を持っていると考えているが、それとは別に予測精度を若干損なうが常時面圧の2倍を最大圧縮面圧とした最も単純な予測法も考えられることを示した。

3) 免震層直上階の鉛直方向の偏心及び上部構造の鉛直加速度を考

慮した本論文の最大引張面圧の予測法は、積層ゴムに引張変位が生じる浮き上がりが一回起るような場合、十分な予測精度がある。最大引張面圧の予測には、水平単独入力動であっても、上部構造の鉛直加速度を考慮する必要があり、それを考慮しないと予測値が過大評価になる。4.3節で述べた通り、本論文の予測法は短辺方向に3個以上の積層ゴムが配置された場合にも適用可能である。ただし、その方向に配置される積層ゴムの数が多くなるにつれて上部構造の鉛直加速度の影響は小さくなる。

本論文の最大面圧の予測法は、スウェイモデルを用いた予測法¹⁶⁾や剛体モデルを用いた予測法^{14), 15)}と比較すると簡易性が欠ける。予測精度を損なうことなく簡易性を高めることが本論文の予測法の今後の課題である。

本論文で使用したJ R 鷹取の強震記録は鉄道総合技術研究所により公開されたものである。

参考文献

- 1) Wada: Analytical modelling of base isolated structures, International workshop on recent development in base-isolation techniques for buildings, pp. 139-150, 1992
- 2) 藤波健剛他4名: 免震装置の引張特性に関する研究(その4) 引張特性を考慮した応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 587-588, 1997
- 3) 海野令他3名: 上下動を考慮した免震構造の動的挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 587-588, 1997
- 4) 谷沢弘容, 栗田哲, 杉村義広: 上部構造のロッキング振動と免震装置の軸変形の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 587-588, 1997
- 5) 谷沢弘容, 栗田哲, 杉村義広: 免震部材の水平・鉛直剛性が軸応答に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 629-632, 1998
- 6) 中山晶 夫他3名: 水平・上下2方向免震構造の応答特性に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 635-636, 1998
- 7) 諏訪仁, 野畑有秀, 関松太郎: 水平・上下同時入力を受ける積層ゴムの上下応答に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 637-638, 1998
- 8) 瓜生満他4名: 免震構造の上下動地震応答特性に関する研究(その2 免震構造の上下方向の等価減衰定数), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 641-642, 1998
- 9) 石原哲哉他4名: 積層ゴム支承の鉛直非線型性を考慮した一質点系解析(その1) パラメータの設定及び基本的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 643-644, 1998
- 10) 西尾浩治他4名: 積層ゴム支承の鉛直非線型性を考慮した一質点系解析(その2) 水平・上下方向同時入力による応答結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 645-646, 1998
- 11) 菊池優, 田村和夫, 北村佳久: 積層ゴムに引張力が生じる免震建物の地震応答解析, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 235-240, 1998
- 12) 海野令他3名: 大地震時の免震構造の動的挙動, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 2681-2686, 1998
- 13) 池田雄一, 長橋純男: 高層免震共同住宅を対象とした積層ゴムアイソレータの引き抜きに及ぼす地震動水平・上下両成分同時入力による影響, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp. 75-82, 1999
- 14) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 1993
- 15) 柳沢延房: 板状免震建物における積層ゴムの応答引張力に関する予測法, 構造工学論文集, Vol. 43B, pp. 135-142, 1997
- 16) 諏訪仁, 関松太郎, 寺村彰: 積層ゴムの剛性低下を考慮した高層免震構造物のロッキング振動, 構造工学論文集, Vol. 44B, pp. 231-235, 1998
- 17) 谷沢弘容, 栗田哲, 杉村義広: 免震建物の地震応答と積層ゴムの変動軸力, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 2911-2916, 1998

(1999年4月10日原稿受理, 1999年10月8日採用決定)