

免震建物のダンパー特性が限界アスペクト比に及ぼす影響

正会員 ○山田伸也*1 同 吉富信太*1 同 辻聖晃*1 同 竹脇出*1

2. 構造—2. 振動

免震建物, ダンパー特性, 限界アスペクト比, 頂部加速度

1. 序

1-1 研究の背景

1995年兵庫県南部地震以後、建物の安全性及び使用性を向上させる構造として免震構造が注目されている。免震建物は元来、硬質地盤上における中低層の建物を対象として設計されてきたが、近年では高層建築物への適用が広範囲に行われている。

免震建物が高層化すると、転倒モーメントの作用により建物の最外縁積層ゴムには引張応力が生じやすくなる。従って、引張応力に対してほとんど抵抗を示さない積層ゴムを用いた免震構造の設計において、アスペクト比（建物幅に対する建物高さの比）は重要なパラメータといえる。

1-2 研究の目的

日野ら（2008）^{1, 2)}は免震建物を簡略化したモデルを用いて、免震建物の設計用地震動に対する限界アスペクトを明らかにする手法を提案し、パラメトリックな解析を可能としたが、ダンパー特性とアスペクト比の関係については論じていない。

本論文の目的は次の3点である。

- (i) 免震層のダンパー量やダンパー種類の違いが限界アスペクト比に及ぼす影響を明らかにすること
- (ii) 建物頂部の応答加速度を限界アスペクト比の評価指標として加えることによって限界アスペクト比がどのように変化するかを明らかにすること
- (iii) 日野らにより提案された簡易モデルによる限界アスペクト比の評価法を改良することにより、一層現実的な限界値の解明を可能とすること

2. 限界アスペクト比

2-1 限界アスペクト比の定義

安全限界時の免震建物の応答と制約条件の関係から限界アスペクト比を定義する。

あるアスペクト比の免震建物モデルに対して安全

限界スペクトルを用いて免震層の水平変形を求めると、免震層の水平変形から応答としてのベースシア係数が求められる。各アスペクト比と応答ベースシア係数の関係を図1に点線で表す。

次に各制約条件（免震層の水平変形、積層ゴムの引張応力、建物頂部の応答加速度）に対するアスペクト比と限界ベースシア係数の関係を図1に実線で表す。図1の建物応答の曲線と制約条件の曲線の交点が安全限界スペクトルに対する建物応答の限界点となり、そのときのアスペクト比を各制約条件に対する限界アスペクト比と定義する。また建物応答の曲線が制約条件を超えていない範囲がアスペクト比の許容領域となる。

2-2 限界アスペクト比を求める意義

限界アスペクト比を求める意義は、アスペクト比—ベースシア係数関係の図から各制約条件の余裕度を容易に把握できる点にある。

図2の場合の積層ゴムの許容引張応力に関する限界アスペクト比に注目すると、そのアスペクト比において積層ゴムに作用する引張応力は限界に到達しているが、免震層の水平変形と頂部の加速度は限界に到達していないことが把握でき、余裕度を定量的に把握することが可能となる。

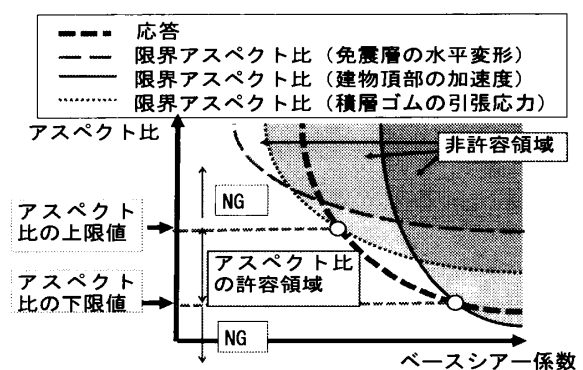


図1 限界アスペクト比の定義

BOUND OF ASPECT RATIO OF BASE-ISOLATED BUILDING
CONSIDERING VARIATION OF DAMPER PHYSICAL PARAMETER

YAMADA Shinya, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

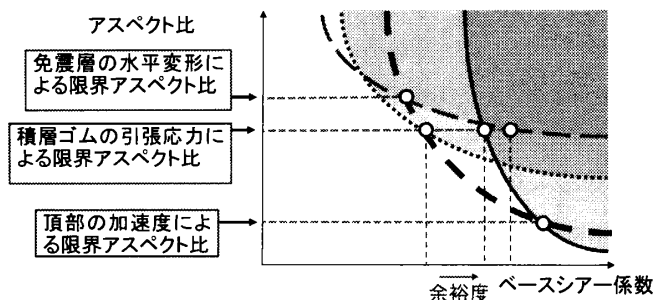


図2 限界アスペクト比の意義

3. 限界アスペクト比を規定する建物の応答と種々の制約条件の評価法

3-1 建物の応答の評価法

本研究では複素固有値解析を用いた応答スペクトル法の1つである拡張CQC法を用いて建物の応答を評価する。応答スペクトルとして前述の安全限界スペクトルを用いる。加速度応答スペクトル S_A 、変位応答スペクトル S_D を用いると第 k 層の最大応答加速度 $a_{(k)\max}$ と最大応答変位 $u_{(k)\max}$ は次式で表わされる。

$$a_{(k)\max} = \sqrt{\sum_r \sum_s S_A^r S_A^s (\rho_{SS}^{(r,s)} a_k^{(r)} a_k^{(s)} + 2\rho_{SC}^{(r,s)} a_k^{(r)} b_k^{(s)} + \rho_{CC}^{(r,s)} b_k^{(r)} b_k^{(s)})} \quad (1)$$

$$u_{(k)\max} = \sqrt{\sum_r \sum_s S_D^r S_D^s (\rho_{SS}^{(r,s)} a_k^{(r)} a_k^{(s)} + 2\rho_{SC}^{(r,s)} a_k^{(r)} b_k^{(s)} + \rho_{CC}^{(r,s)} b_k^{(r)} b_k^{(s)})} \quad (2)$$

ここで $\rho_{SS}^{(r,s)}$, $\rho_{SC}^{(r,s)}$, $\rho_{CC}^{(r,s)}$: 第 s 次モードと第 r 次モード間の相関係数、 a_k, b_k : 刺激関数を表す。

(2)式より応答ベースシア係数 C_B は次式で表せる。

$$C_B = k_0 u_{(0)\max} / Mg \quad (3)$$

k_0 : 免震層の水平剛性、 Mg : 建物の総重量。

(3)式より図1,2の「安全限界時の免震建物のアスペクト比—応答ベースシア係数関係」が求まる。

3-2 限界アスペクト比を規定する種々の制約条件の評価法

3-2-1 建物頂部の応答加速度による限界

限界アスペクト比の評価指標として建物頂部の加速度応答による限界を導入することは本研究の特徴の1つである。建物内部の安全性、使用性を考慮するために導入したものであり、0.25gを建物頂部の許容加速度とする。

まず地震動入力レベルと建物頂部の応答加速度が比例関係にあることに注目する。図3のように地震時の建物頂部の応答加速度を a^T 、入力レベルを L とし、建物頂部の許容加速度を a_{\max}^T 、その時の入力レベルを

L^* とすると次式が得られる。

$$a^T / a_{\max}^T = L / L^* \quad (4)$$

また応答ベースシア係数も地震動入力レベルと比例関係にあるため、建物頂部の加速度が限界となる時のベースシア係数を C_{Ba} とすると次式が得られる。

$$C_B / C_{Ba} = L / L^* \quad (5)$$

(4),(5)式より次の(6)式が得られる。

$$C_{Ba} = C_B L^* / L = C_B a_{\max}^T / a^T \quad (6)$$

(6)式から図1,2の「建物頂部の応答加速度に関するアスペクト比—限界ベースシア係数関係」が得られる。

3-2-2 免震層の水平変形による限界

制約条件の1つである免震層の許容水平変形は積層ゴムのゴム総厚の3倍(せん断ひずみ300%)として決定する。(6)式と同様に免震層の許容水平変形 $d_{0\max}$ 、応答水平変位 $u_0 = u_{(0)\max}$ を用いて免震層の水平変形が限界となる時のベースシア係数 C_{Bd} を次式で表す。

$$C_{Bd} = C_B d_{0\max} / u_0 \quad (7)$$

(7)式より図1,2の「免震層の水平変形によるアスペクト比—限界ベースシア係数関係」が得られる。

3-2-3 積層ゴムの引張応力による限界

実際の免震建物では、積層ゴムに 1 N/mm^2 程度の引張応力が生じる時を積層ゴムの引張限界とする場合が多い。しかしながら、積層ゴムの軸方向剛性は圧縮と引張で大きく異なり、その解析には複雑な扱いを要する。そのため本論文では、日野による基礎梁を考慮した簡易解析法を採用し、引張応力が生じた時点を限界とする。(6)式と同様に積層ゴムに作用する引張応力が限界となる時のベースシア係数 C_{By} を建物の応答による積層ゴムの浮き上がり量 $y + \Delta y_1$ 、沈下量 y_g を用いて次式で表す。

$$C_{By} = C_B L^* / L = C_B y_g / (y + \Delta y_1) \quad (8)$$

(8)式から図1,2の「積層ゴムの引張応力に関するアスペクト比—限界ベースシア係数関係」が得られる。

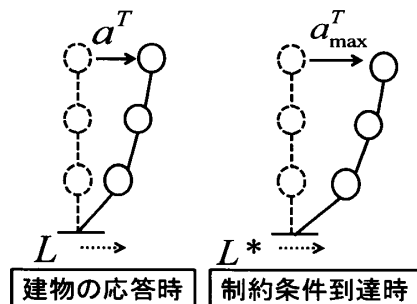


図3 建物頂部の加速度と入力レベル

4. ダンパー特性が限界アスペクト比に及ぼす影響

次に、ダンパー特性が限界アスペクト比に及ぼす影響について述べる。ダンパー特性としてダンパー量とダンパーの種類を考慮し、種類としてはオイルダンパーと履歴ダンパーを採用する。

4-1 建物モデルの概要

N階建 RC 造免震建物を考える。表 1 に建物詳細を示す。また図 4 に示すように建物高さに応じて積層ゴムのサイズを変化させる。

4-2 履歴ダンパーの設定法

免震層にオイルダンパーを設置した場合と履歴ダンパーを設置した場合の限界アスペクト比の比較を行う。比較に際し、上部剛体モデルにおいて、履歴ダンパー設置モデルの最大変形時の等価減衰係数が、オイルダンパー設置モデルの減衰定数と等しくなるように設定する。

図 5 のように履歴ダンパーがバイリニア型の復元力特性を有する場合、免震層の水平剛性 k_s 、履歴ダンパーの初期剛性 k_d 、ダンパー最大水平変位量 δ_{max} および降伏変位 δ_y を与えたときの等価減衰定数 h_{eq} は次式で評価できる。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_H}{W_H} = \frac{1}{4\pi} \frac{8k_d\delta_y(\delta_{max} - \delta_y)}{\delta_{max}(k_d\delta_y/\delta_{max} + k_s)} \quad (9)$$

(9)式を降伏変位 δ_y について解いて次式を得る。

$$\delta_y = \frac{-k_d\delta_{max}(h_{eq} - 2/\pi) \pm \sqrt{\{k_d\delta_{max}(h_{eq} - 2/\pi)\}^2 - 8k_dk_s h_{eq}\delta_{max}^2/\pi}}{4k_d/\pi} \quad (10)$$

(10)式より、 k_0 、 k_d 、 δ_{max} を与えれば、上部剛体時の減衰定数が指定した h_{eq} となるような履歴ダンパーの降伏変位 δ_y を求めることができる。

履歴ダンパーの量を増やす場合は、降伏変位 δ_y は変えずに初期剛性 k_d のみを増やすものとする。

4-3 最大応答の評価法

履歴ダンパーを設置した免震建物の最大応答評価においては収束計算が必要となる。本論文においては、 $k_d=4k_0$ 、 h_{eq} は上部剛体時の減衰定数(=0.1)とする。また、最大変位の初期値として積層ゴム水平変形限界を与える。

降伏変位 δ_y を用いて、ダンパー負担荷重 Q より履歴ダンパーを含む免震層の等価剛性 k_e を求める。切片

荷重 Q は次のように与えられる。

$$Q = k_e\delta_{max} = k_d\delta_y + k_s\delta_{max} \quad (11)$$

また塑性率を $\mu = \delta_{max}/\delta_y$ とすると、(11)式より等価剛性 k_e は次式で表される。

$$k_e = k_s + k_d/\mu \quad (12)$$

次に履歴ダンパーとオイルダンパーの 1 サイクルの消費エネルギーが等しいと仮定し、等価減衰係数 c_e を求める。1 次固有円振動数 ω_0 を用いると履歴ダンパーの等価減衰係数 c_e は次式で表される。

$$c_e = 4k_d\delta_y(\delta_{max} - \delta_y)/\pi\omega_0\delta_{max}^2 \quad (13)$$

(12)、(13)式で得られる剛性、減衰係数を用いて複素固有値解析を行う。履歴ダンパーの剛性と減衰は履歴ダンパーの降伏時と未降伏時で異なるため、次のような場合分けを行う。

(i) ダンパー最大水平変位 $\delta_{max} \geq$ 降伏変位 δ_y

$$k_0 = k_e = k_s + k_d/\mu \quad (14)$$

$$c_0 = c_e = 4k_d\delta_y(\delta_{max} - \delta_y)/\pi\omega_0\delta_{max}^2 \quad (15)$$

(ii) ダンパー降伏変位 $\delta_y >$ 最大水平変位 δ_{max}

$$k_0 = k_s \quad (16)$$

$$c_0 = 0 \quad (17)$$

表 1 建物諸元

免震建物モデル詳細			
床面積	20m×5m		
階高	免震層	2m	上部構造 4m
床質量	免震層	2400kg/m ²	上部構造 800kg/m ²
免震層固定時の1次固有周期	上部構造の高さに比例 T=0.02H		
剛性	免震層	剛性を上部構造の層数(高さ)の平方根に比例させて決定	
	上部構造	免震層固定時の1次固有モードが直線形になると仮定して決定	
減衰係数	免震層	上部構造を剛体としたときの減衰定数を0.1とする	
	上部構造	剛性比例減衰であり、1次減衰定数を0.05とする	
免震層の許容変形	積層ゴムのゴム総厚の3倍(せん断ひずみの300%)とする		
建物頂部の許容加速度	0.25G (1G=9.8m/s ²)		
積層ゴムの許容引張応力	積層ゴムに作用する引張応力が生じた時点を限界とする		

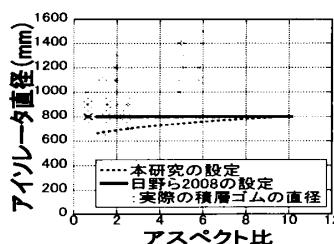


図 4 アイソレータ直径と建物層数の関係

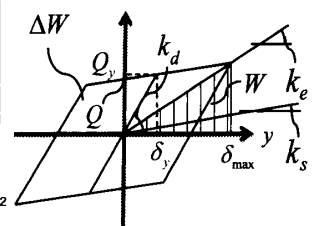


図 5 履歴ダンパーの復元力特性

複素固有値解析より求めた 1 次の固有円振動数 $\omega^{(1)}$ 及び拡張 CQC 法により求めた免震層の水平変形 $u_{(0)\max}$ を(10), (13)式の ω_0, δ_{\max} に代入して繰り返し計算を行い、収束した値を履歴ダンパー設置時の 1 次固有円振動数 ω 、最大水平変位 $u_{(k)\max}$ とする。

4-4 ダンパー特性の違いが限界アスペクト比に及ぼす影響

図 6 に基準量のオイルダンパーを設置した時のアスペクト比—ベースシア係数関係、限界アスペクト比、複素固有値解析による 1 次減衰定数を示す。この図の曲線の交点の高さが各条件に対する限界アスペクト比を表す。建物高さに応じてモード形が変化するため、各交点の 1 次減衰定数は異なり、上部剛体時に仮定した 0.1 よりも小さくなっている。

図 7 にダンパー量を変化させたときの各制約条件に対する限界アスペクト比の変化を示す。横軸は複素固有値解析による 1 次減衰定数とし、減衰定数が大きくなるほど、ダンパー量が増加することを意味する。図 7 よりオイルダンパー設置時、履歴ダンパー設置時ともにダンパー量が増加するほど、免震層の水平変位と積層ゴムの引張応力は低減するため、アスペクト比の上限値を大きくすることができる。一方、ダンパー量の増加に伴い建物頂部の応答加速度は増大するためアスペクト比の下限値が小さくなる。またオイルダンパー設置時と比べると、履歴ダンパー設置時には免震層の剛性増加により免震層変形は小さくなり、転倒モーメントによる積層ゴムの引張応力と応答加速度は大きくなるため、アスペクト比の許容領域が小さくなる。図 7 よりオイルダンパー設置時、履歴ダンパー設置時ともにダンパー量が増加するほど、免震層の水平変位と積層ゴムの引張応力は低減するため、アスペクト比の上限値を大きくすることができる。一方、ダンパー量の増加に伴い建物頂部の応答加速度は増大するためアスペクト比の下限値が小さくなる。またオイルダンパー設置時と比べると、履歴ダンパー設置時には免震層の剛性増加により免震層変形は小さくなり、転倒モーメントによる積層ゴムの引張応力と応答加速度は大きくなるため、アスペクト比の許容領域が小さくなる。

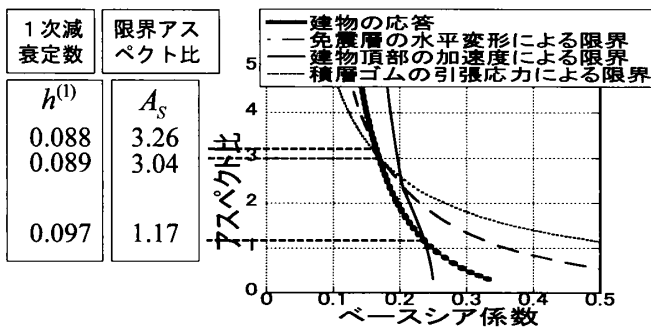
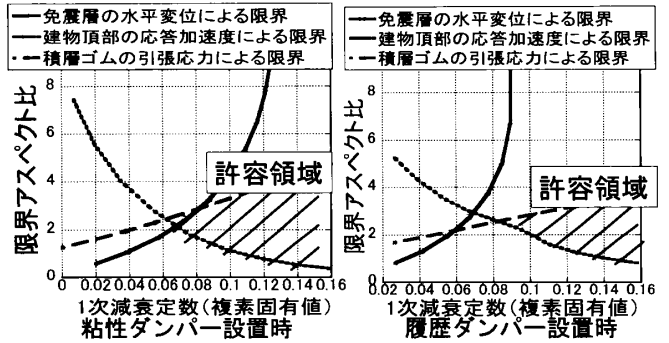


図 6 アスペクト比とベースシア係数の関係



(a) オイルダンパー設置時 (b)履歴ダンパー設置時
図 7 1 次減衰定数と限界アスペクト比の関係

5. 結論

- (1) 免震建物の限界アスペクト比を求める既往の研究では考慮していない頂部の加速度による限界を評価指標に加えることにより許容アスペクト比の下限値が定まることを明らかにした。既往の研究では建物モデルを 2 質点モデルに置換し解析していたが、本研究では頂部加速度を精度良く評価するために、多層モデルでの解析を可能とした。
- (2) 免震層に設置するダンパーがオイルダンパーと履歴ダンパーのいずれであっても、ダンパー量を増加させることにより、アスペクト比の許容領域が広がることを明らかにした。また免震層のダンパー量を過度に減少させるとアスペクト比の許容領域が存在しなくなることを明らかにした。
- (3) 免震層に設置するダンパーの種類をオイルダンパーから履歴ダンパーに変更することによりアスペクト比の許容領域が小さくなることを明らかにした。

参考文献

- 1) 日野惇、吉富信太、辻聖晃、竹脇出、免震建物の限界アスペクト比の解析その 1：漸化式型線形解析に基づく積層ゴムの軸方向変形簡易解析法、日本建築学会構造工学論文集、Vol.54B、pp591-598、2008.4
- 2) 日野惇、竹脇出、免震建物の限界アスペクト比の解析その 2：積層ゴムの引張域における非線形特性を考慮した簡易解析、日本建築学会構造工学論文集、Vol.55B、pp.497-506、2009.3