モード連成作用を考慮した中間層免震構造の各部地震応答予測

中間層免震構造の地震応答予測と耐震性能 その2

THE PREDICTION METHOD OF EARTHQUAKE RESPONSES ON MID-STORY
ISOLATED SYSTEM CONSIDERING MODAL COUPLING EFFECTEarthquake response prediction and aseismic performance
of mid-story isolated system Part 2小林正人*¹, 井澤保一*², 洪 忠憲*³

Masahito KOBAYASHI, Yasukazu IZAWA and Tadaki KOH

The distribution of the lateral earthquake response on the mid-story isolated system is strongly influenced by the position of isolated story and the damper. In some cases, the seismic response on the upper structure of isolated story is amplified greatly in comparison with the base isolation. In this study, by sweeping the modal response with free-free mode-shape vectors, it is clarified that the response amplification on the upper structure of isolated story is caused by modal coupling between modes of vibration on upper and lower structure. Based on the analytical study, the prediction method of the lateral earthquake response distribution on the mid-story isolated system is proposed.

Keywords : Mid-story isolation, Base isolation, Free-free modes, Mode-sweeping, Modal coupling,
Response prediction method

中間層免震, 基礎免震, 両端自由振動モード, モード掃引法, モード連成作用, 応答予測法

1. はじめに

筆者ら¹⁾²⁾および村上, 北村ら³⁾は, 中間層免震構造の振動特性の分析を踏まえて, これを等価な2質点系モデルで表現し, 秋山のエネルギー法⁴⁾を応用した応答予測式(免震層および第1層)を提案してきている。特に筆者らの予測式は, 基礎免震構造の応答予測式⁵⁾にそのまま連続し, 免震層位置に無関係に成立するところに特徴がある。また, 免震層下部構造部の減衰の影響をも考慮することができるとなっている。これらの提案されている応答予測式によれば, 基礎免震構造と同様, 中間層免震構造も時刻歴応答解析によらない地震応答評価・耐震性能評価が十分に可能である。

なお, 基礎免震構造では, 免震層上部構造の応答分布に関する研究^{6)~11)}などがなされており, T.Andrionoらのせん断力分布式¹⁰⁾, 免震建築物告示(告示2009号)のせん断力係数¹²⁾, 免震構造設計指針(以下, 指針)の応答分布予測式⁹⁾など, 応答の高さ方向分布の予測式・設計式も提案されており, 既に設計にも活用されている。

しかし, 中間層免震構造では, その応答分布に関する研究は少なく, 上部構造の応答増幅が免震層設置位置に, また, 応答せん断力係数が免震層のダンパーの最大塑性率応答に, それぞれ関連性が指摘されてはいるが¹³⁾¹⁴⁾, そのメカニズムの分析や応答の定量的評価には至っていないのが現状である。

本論文では, 中間層免震構造の応答分布に与える免震層位置およびダンパーの影響を定性的・定量的に評価し, 上部構造の応答増幅のメカニズムを解明する。特に, 本研究では, R.I.Skinnerらが基礎免震構造の応答構造の分析のために用いた両端自由振動モードによるモード掃引法¹⁵⁾を応用し, この応答増幅が下部構造部と上部構造部の振動モード間の連成作用により引き起こされることを示す。さらに, これらの分析結果を踏まえ, 既に提案している筆者らの中間層免震構造の応答予測式⁹⁾を用いて, 中間層免震構造の高さ方向の応答予測式を基礎免震構造のそれと連続性を持たせた形で誘導する。

2. 中間層免震構造の振動モードと応答構造の分析

2.1 中間層免震構造の振動モードとモード掃引法

R.I.Skinnerらは, 免震構造物の応答を適切に表す振動モード形の1つとして両端自由振動モード(免震層の剛性をゼロとした場合に得られる振動モード)を採用し, モード掃引法により, せん断力, 絶対加速度応答への高次振動モードの寄与を明らかにしている¹⁵⁾。本研究では同様の考え方を中間層免震構造に適用する。

中間層免震構造において, 免震層の剛性をゼロとした剛性行列 $\mathbf{K}_0$ に対する振動モード $\mathbf{u}_0$ と固有振動数 ω_0 は次式のようになる。

$$\mathbf{K}_0 \mathbf{u}_0 = \omega_0^2 \mathbf{M} \mathbf{u}_0 \quad (1)$$

*¹ 明治大学大学院理工学研究科建築学専攻
大学院博士後期課程・工修

*² 明治大学大学院理工学研究科建築学専攻
大学院博士前期課程

*³ 明治大学理工学部建築学科 教授・工博

Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ., M. Eng.

Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

Prof., Dept. of Architecture, Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

免震層の剛性がゼロであるため、(1) 式から得られる振動方程式は、次の2式となる。

$$\det[\mathbf{u}\mathbf{K}_0 - \omega_0^2 \mathbf{u}\mathbf{M}] = 0 \quad (2a) \quad \det[\mathbf{l}\mathbf{K} - \omega_0^2 \mathbf{l}\mathbf{M}] = 0 \quad (2b)$$

ここに、 $\mathbf{u}\mathbf{M}$, $\mathbf{u}\mathbf{K}_0$: 上部構造部のみの質量および剛性行列

$\mathbf{l}\mathbf{M}$, $\mathbf{l}\mathbf{K}$: 下部構造部のみの質量および剛性行列

(2a) 式より上部構造には両端自由振動モード、(2b) 式より下部構造には下部構造のみの振動モードが得られる。モードマトリクス $\mathbf{U}$ を上部、下部構造部で整理して次式で表すこととする。

$$\mathbf{U} = [\mathbf{s}\mathbf{u}_0] = \begin{bmatrix} \mathbf{l}\mathbf{u}_{FF} & \mathbf{l}\mathbf{u}_{FF} & \mathbf{l}\mathbf{u}_{FF} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{l}\mathbf{u} & \mathbf{l}\mathbf{u} & \mathbf{l}\mathbf{u} & \dots \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\mathbf{l}\mathbf{u}_{FF}$: (2a) 式による*i*次モードベクトル (両端自由振動モード)

$\mathbf{l}\mathbf{u}$: (2b) 式による*j*次モードベクトル

$\mathbf{s}\mathbf{u}_0$ (以下、*s* 次基本モードベクトルと呼ぶ) は、質量行列 $\mathbf{M}$ に直交するため、モード掃引法に用いることができる。すなわち、線形、非線形系によらず、次式により各次振動モードの応答ベクトル (相対変位、絶対加速度など) を時刻歴応答解析等により算出された全応答ベクトルから求めることができる¹³⁾。

$$\mathbf{s}\mathbf{a}(t) = \mathbf{s}\mathbf{u}_0(\mathbf{s}\mathbf{u}_0^T \mathbf{M}\mathbf{a}(t) / \mathbf{s}\mathbf{u}_0^T \mathbf{M}\mathbf{s}\mathbf{u}_0) \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{s}\mathbf{a}(t)$: *s* 次モードの応答ベクトル, $\mathbf{a}(t)$: 全応答ベクトル

ここで、基本モードベクトル $\mathbf{s}\mathbf{u}_0$ によって展開されるモード応答の基本的性質を振動方程式から考察する。

2.2 振動方程式

免震層上部、下部構造の質点数をそれぞれ*p*, *q*とする。相対変位ベクトル $\mathbf{y}$ についての振動方程式は $\mathbf{K}_0$ を用いると次式となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_0\mathbf{y} + \{\mathbf{0}_{p-1} \quad f_b \quad -f_b \quad \mathbf{0}_{q-1}\}^T = -\mathbf{M}\mathbf{l}\ddot{y}_g \quad (5)$$

ここに、 $\mathbf{C}$: 減衰マトリクス, f_b : 免震層の抵抗力

$\mathbf{0}_n$: *n* 次のゼロベクトル, $\ddot{y}_g$: 地動加速度

(5) 式を基本モードベクトル $\mathbf{s}\mathbf{u}_0$ を用いて展開すると、*s* 次の振動方程式は次式となる。ただし、減衰項は振動モード間で連成するが、連成項は一般に無視できるため、近似的に次式とする。

$$\mathbf{s}\ddot{\mathbf{y}} + 2\mathbf{s}\zeta\omega_0\mathbf{s}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{s}\omega_0^2\mathbf{s}\mathbf{y} + \mathbf{s}\mathbf{u}_0 \frac{(\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q+1} - \mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q})f_b}{\mathbf{s}\mathbf{u}_0^T \mathbf{M}\mathbf{s}\mathbf{u}_0} = -\mathbf{s}\Gamma\mathbf{s}\mathbf{u}_0\ddot{y}_g \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{s}\zeta$: モード減衰定数, $\mathbf{s}\Gamma$: 刺激係数

$\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q}$, $\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q+1}$: $\mathbf{s}\mathbf{u}_0$ の *q* (免震層直下), *q* + 1 (免震層直上) 成分

免震層のアイソレータ及びダンパーの特性 (免震周期、減衰力等) は、免震層の抵抗力 f_b の時刻歴の変化により間接的に評価される。

・(2a) 式で決定する振動方程式 (*i* 次モード: 上部構造部のみ振動)

i = 1 (*s* = 1) の場合、 $\omega_0 = 0$, (3) 式より $\mathbf{l}\mathbf{u}_{0,q+1} = \mathbf{l}\mathbf{u}_{FF,1}$, $\mathbf{l}\mathbf{u}_{0,q} = 0$, $\mathbf{l}\Gamma\mathbf{l}\mathbf{u}_{FF} = 1$ となり、(6) 式は次式となる。

$$\mathbf{l}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{l}\ddot{y}_g = -\mathbf{l}f_b/m_u \quad (7)$$

ここに、 m_u : 上部構造部の総質量

$2 \leq i \leq p$ の場合、 $\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q+1} = \mathbf{l}\mathbf{u}_{FF,1}$, $\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q} = 0$, $\mathbf{s}\Gamma = 0$ となり、

$$\mathbf{s}\ddot{\mathbf{y}} + 2\mathbf{s}\zeta\omega_0\mathbf{s}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{s}\omega_0^2\mathbf{s}\mathbf{y} = -\mathbf{l}\mathbf{u}_{FF}(\mathbf{l}\mathbf{u}_{FF,1}f_b/\mathbf{s}\mathbf{u}_0^T \mathbf{M}\mathbf{s}\mathbf{u}_0) \quad (8)$$

ここに、 $\mathbf{l}\mathbf{u}_{FF,1}$: $\mathbf{l}\mathbf{u}_{FF}$ の 1 (免震層直上) 成分

・(2b) 式で決定する振動方程式 (*j* 次モード: 下部構造部のみ振動)

j 次モード ($1 \leq j \leq q$) の場合、(3) 式より $\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q+1} = 0$, $\mathbf{s}\mathbf{u}_{0,q} = \mathbf{l}\mathbf{u}_q$ となり、(6) 式は次式となる。

$$\mathbf{s}\ddot{\mathbf{y}} + 2\mathbf{s}\zeta\omega_0\mathbf{s}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{s}\omega_0^2\mathbf{s}\mathbf{y} = \mathbf{l}\mathbf{u}_q(\mathbf{l}\mathbf{u}_qf_b/\mathbf{s}\mathbf{u}_0^T \mathbf{M}\mathbf{s}\mathbf{u}_0 - \mathbf{s}\Gamma\ddot{y}_g) \quad (9)$$

ここに、 $\mathbf{l}\mathbf{u}_q$: $\mathbf{l}\mathbf{u}$ の *q* (免震層直下) 成分

(7) 式より、上部構造部の1次振動モード (*i* = 1: 剛体モード) の絶対加速度は、免震層のせん断力を上部構造部の総質量 m_u で除したものに相当することがわかる。また、(8) 式より、高次モード応答 ($2 \leq i \leq p$) は、(7) 式の関係から、1次モードの絶対加速度応答による加振で生じる。一方、(9) 式より、下部構造のモード応答 ($1 \leq j \leq q$) は、上部構造部の1次振動モードの絶対加速度応答と地動加速度 $\ddot{y}_g$ の合成波による加振で生じることになる。

次節以降、(2a) 式による上部構造部の*i*次振動モードを上部*i*次、(2b) 式による下部構造部の*j*次振動モードを下部*j*次と略記する。

2.3 解析モデル

固有周期1秒程度の中高層建物を対象とした基本モデル (免震を施さないモデル) を設定し⁴⁾、その任意の層を免震層とした免震モデルを設定する (図1)。

基本モデルは16質点せん断型モデルとし、1次固有周期を1秒に設定する。各層の階高は4m、質量は980 tonとし、*Ai* 分布のせん断力に比例する剛性分布とする。復元力は弾性とする。免震モデルは、免震層以外は、質量、剛性とも基本モデルと同様とする。また、免震層を除く上部および下部構造部には、それぞれの1次固有周期に対して、減衰定数2%の剛性比例型減衰を内部減衰として用いる。

免震層はアイソレータを弾性とし、ダンパーは鋼材ダンパー等を想定した完全弾塑性型 (2次剛性なし) の履歴特性を有するものとし、降伏せん断力係数を α_s とする。よって免震層全体の復元力特性は典型的な *Normal Bi-linear* 型となる。本研究では(5) ~ (9) 式における免震層の抵抗力 f_b は、この *Normal Bi-linear* 型の履歴特性によって評価されるものが対象となる。アイソレータおよびダンパーの弾性剛性 k_f , k_s は、次式で定義される剛性比 b_f , b_s により与える⁹⁾。

$$b_f = k/k_f, \quad b_s = k/k_s \quad (10)$$

ここに、*k*: 基本モデルにおける免震層位置の剛性

解析では $b_f = 200$ (免震周期 $T_f (= 2\pi\sqrt{m_u/k_f})$ は基礎、5, 8, 13層免震モデルでそれぞれ、3.4, 3.1, 2.9, 2.5sec となる) とし、 α_s は応答予測式⁴⁾による最適値 (ベースシヤアを最小にする量) を与える。入力地震動は最大速度を50 cm/secに基準化する。

図1 解析モデル

2.4 中間層免震構造の応答構造の分析

モード掃引法に用いる基本モードベクトル ($\mathbf{s}\mathbf{u}_0^T \mathbf{M}\mathbf{s}\mathbf{u}_0 = 1$ に基準

図2 基本モードベクトル

a) せん断係数分布

b) 絶対加速度応答分布

図3 各免震層位置に対する各層最大応答値とモード最大応答 ($b_s = 20, b_f = 200$)

a) せん断係数分布

b) 絶対加速度応答分布

図4 ダンパー剛性比 b_s に対する各層最大応答値とモード最大応答 (8層免震, $b_f = 200, \alpha_s = 0.06$)

化)を図2に示す。(3)式のとおり上部構造部は両端自由振動モード、下部構造部は下部構造部のみの振動モードとなる。5層免震では下部1次($j=1$)と上部3次($i=3$)、8層免震では下部1次($j=1$)と上部2次($i=2$)の固有周期に近い値となる。

図3、図4に免震層位置およびダンパー剛性比 b_s に対する各最大応答値(El Centro NS 入力)を示す。図中の全応答とは時刻歴応答解析により算出された最大応答値であり、上部・下部各次応答とは時刻歴応答解析による応答値を全時刻歴に渡り(4)式によって分解して得られた各次モード応答の最大値である。なお、時刻歴上の全次数の各次モード応答の総和は時刻歴応答解析による応答値と完全に一致するものとなる。また、RSSとは各次モード応答の最大値を全次数考慮してRSS(root sum squares)法によって評価した最大応答値であり、簡易評価とは上部構造部に対して、低次モード応答の最大値から簡略に評価した最大応答値である。せん断力係数に関しては上部1次と上部2次応答の単純和を、絶対加速度応答では上部1次応答に上部2次と上部3次応答のRSSを加えたものである。

全応答に対してRSSは若干、過小評価となる傾向にあるが、その対応は良好である。このことは基本モードベクトル(図2)を用いて(4)式により評価した各次モード応答が、応答構造を効果的に捉えていることを示しており、本解析法の適用性を示すものである。

図3より、上部構造部の応答は、基礎免震と比較すると、8層免震では上部2次応答の全応答への寄与が特に大きくなっており、免震化されているにもかかわらず、せん断力係数、絶対加速度応答共にかなり大きな値となっている(上部構造部の応答増幅)。また、5層免震では上部3次応答の全応答への寄与が大きくなっており、8層免震ほどの応答の増幅はないが、応答の分布形状が他の免震層位置とは異なったものとなる。その傾向は、高次振動の影響を受けやすい絶対加速度応答で顕著である。

下部構造部の応答は、免震層位置が上層になるほど、下部2次応答の影響が大きくなるが、下部1次応答が支配的であり、応答分布は上部構造部ほど免震層位置の影響を受けないことがわかる。

図4より、上部構造部の応答は、 $b_s=5$ のとき、上部1次応答に対して上部2次、上部3次応答の全応答への寄与が大きく、また応答値も大きい。 b_s が大きいく(k_s が小さく)なるに従って、上部1次応答はあまり変化しないが、上部2次、上部3次応答は徐々に減少し、全応答も減少する。 b_s の変化は、応答分布の形状に多少の影響を及ぼしているが、免震層位置の影響ほど強くはない。

下部構造部の応答は、 b_s が大きくなるに従って増加するが、その分布形状は、下部1次応答が支配的であるため比較的安定している。

以上の各次固有周期・モードベクトルおよび各次モード応答の検討から、中間層免震構造の応答分布に及ぼす免震層位置の影響(上部構造部の応答分布形状の変化および応答増幅)は、下部構造部と上部構造部の振動モード間の連成作用によるものであることがわかる。中間層免震構造の応答分布の定量的把握には、上部構造部と下部構造部の固有周期比およびダンパー剛性比 b_s に応じた各次モード応答の全応答への寄与率の把握が重要となる。なお、上部構造部の応答評価には、上記の簡易評価が有効であり、次章からの応答予測式の誘導はこの簡易評価に基づいて行われる。

3. 応答予測式の誘導

前報⁹⁾で提示した中間層免震構造の応答予測式(免震層および第1層の最大せん断力係数)を用いた、高さ方向の応答予測式を新たに誘導する。以下、せん断力係数、応答加速度(絶対加速度)とは特に断りの無い限り、それぞれの最大値を意味するものとする。

3.1 上部構造部のせん断力係数

図3、4に示したように、上部構造部のせん断力係数を簡易評価すると次式となる。

$${}_u\alpha_i \approx {}_u^1\alpha_i + {}_u^2\alpha_i = (\alpha_f + \alpha_s) + {}_u^2\alpha_i \quad (11)$$

ここに、 ${}_u\alpha_i$: 上部構造部 i 層のせん断力係数

(ただし、 $i=1 \sim Nu$, 1は免震層, Nu は最上層)

${}_u^s\alpha_i$: 上部構造部 i 層の上部 s 次のせん断力係数($s=1, 2$)

α_f : アイソレータのせん断力係数

α_s : ダンパーの降伏せん断力係数

指針では、基礎免震構造のせん断力係数は次式で表されている⁹⁾。

$$\alpha_i = \alpha_f + a_i \bar{\alpha}_i \alpha_s \quad (12)$$

ここに、 α_i : i 層のせん断力係数(図5)

$\bar{\alpha}_i$: 最適降伏せん断力係数分布³⁾⁶⁾

$$a_i = \left(\frac{\bar{a}-1}{N-1} \right) i + \frac{N-\bar{a}}{N-1} \quad (13)$$

N : 上部構造部層数

$\bar{a}$ は、 b_s に対して次式で与えられている。

$$\begin{aligned} 1 \leq b_s < 10 & \quad \bar{a} = 3.1238 - 0.1238 b_s \\ 10 \leq b_s < 80 & \quad \bar{a} = 2.0127 - 0.0127 b_s \\ 80 \leq b_s & \quad \bar{a} = 1.0 \end{aligned} \quad (14)$$

中間層免震構造の上部構造部の $\bar{a}$ は、基礎免震と対比させて考えれば、(11)式と(12)式の関係から次式となる。

$$\bar{a} = ave(a_i) \approx ave(1/\bar{\alpha}_i + {}_u^2\alpha_i/\bar{\alpha}_i \alpha_s) \quad (15)$$

$\bar{a}$ の基礎免震構造に対する増幅率 r_a を次式で定義する。

$$r_a = \bar{a}/\bar{a}_B \quad (16)$$

ここに、 $\bar{a}_B$: (14)式による基礎免震構造の $\bar{a}$

次式による2次周期比 β_2 に対する r_a の計算結果を図6に示す。

$$\beta_2 = {}_u^2T/T \quad (17)$$

ここに、 ${}_u^2T$: 上部2次(両端自由振動モード)の固有周期

T : 下部1次の固有周期

図6より、 r_a は $\beta_2=1$ の近傍で増加する。前章で述べたように、下部構造部と上部構造部の振動モード間の連成作用として捉えることができる。計算結果を包絡するように、 r_a を β_2 と b_s に対して表1

図6 r_a と β_2 の関係

で与えれば、上部構造部のせん断力係数の予測式は次式となる。

$$u_{a_i} = \alpha_f + a_i \bar{\alpha}_i \alpha_s \quad (18)$$

$$\text{ここに, } a_i = \left(\frac{r_a \cdot \bar{a}_B - 1}{Nu - 1} \right) i + \frac{Nu - r_a \cdot \bar{a}_B}{Nu - 1} \quad (19)$$

表1: r_a と β_2 の関係

r_a	$0 < \beta_2 < 0.5$	$0.5 \leq \beta_2 < 1$	$1 \leq \beta_2 < 1.5$	$1.5 \leq \beta_2 < 4$
$1 \leq b_s < 10$	1	$2\beta_2$	$-1.5\beta_2 + 3.5$	$-0.1\beta_2 + 1.4$
$10 \leq b_s$	$\beta_2 + 1$	$3\beta_2$	$-2\beta_2 + 5$	$-0.4\beta_2 + 2.6$

ただし、 $\beta_2 \geq 4$ では $r_a = 1$ とする。

また、(18) 式を用いて、最大応答せん断力から簡易に免震層床位置の最大転倒モーメント OTM を評価すれば次式となる。

$$OTM = \sum_{i=1}^{Nu} W_i u_{a_i} H_i \quad (20)$$

ここに、 W_i : i 層以上の総重量、 H_i : i 層の階高

3.2 上部構造部の応答加速度

指針では、基礎免震構造の応答加速度は次式で表されている。

$$A_i/g = \alpha_f + (c_i + d_i) \alpha_s \quad (21)$$

ここに、 A_i : i 層 ($i+1$ 層床位置) の応答加速度、 g : 重力加速度

c_i 、 d_i : ダンパーによる 1 次および 2 次モード形状の加速度分布を与える係数

しかし、本解析モデル (基本モデルで周期 1 秒) のように比較的、

周期が長い場合、図 7 に示す (21) 式の構成では、加速度応答を適切に表現できない場合がある (4 章図 13 参照)。本論文では、上部構造部の最上層、中間層及び免震層の応答加速度を基に、新たな基礎免震構造の予測式を定式化する。また、さらに、それを用いた中間層免震構造の予測式を誘導する。以下、 i 層の加速度応答とは、 $i+1$ 層床位置の応答加速度を示すものとする。

図 7 A_i の構成

図 3、4 に示したように、上部構造部の応答加速度を簡易評価すると次式となる。

$$u_{A_i} \approx u_{A_i} + \sqrt{u_{A_i}^2 + u_{A_i}^2} = (\alpha_f + \alpha_s)g + \sqrt{u_{A_i}^2 + u_{A_i}^2} \quad (22)$$

ここに、 u_{A_i} : 上部構造部の i 層の加速度応答

$u_{A_i}^s$: 上部構造部 i 層の上部 s 次の加速度応答 ($s = 1 \sim 3$)

ここで、次式を定義する。次式の e_i は、(21) 式の $c_i + d_i$ に相当する。

$$e_i = 1 + \sqrt{u_{A_i}^2 + u_{A_i}^2} / \alpha_s g \quad (23)$$

上部構造部の中間層 (Nmu 層) においては、上部 2 次応答はほぼ無視でき (図 3、4 参照)、(23) 式より次式を得る。

$$em = 1 + u_{A_{Nmu}}^3 / \alpha_s g \quad (24)$$

ここに、 em : 上部構造部の中間層における e_i の値

上部構造部の最上層 (Nu 層) および免震層 (1 層) においては、(23) 式より次式を得る。

$$et = 1 + \sqrt{u_{A_{Nu}}^2 + u_{A_{Nu}}^2} / \alpha_s g \quad (25)$$

$$eb = 1 + \sqrt{u_{A_1}^2 + u_{A_1}^2} / \alpha_s g \quad (26)$$

図 8 基礎免震構造の et 、 em 、 eb と b_s の関係

図 9 加速度応答の増幅率と各次周期比の関係

ここに、 et, eb : 最上層および免震層における e_i の値

図 8 に、基礎免震構造の地震応答解析結果から、(25)、(24) および (26) 式を用いて得られる et, em, eb を b_s に対して示す。これより、 et, em, eb の平均的な評価として次式を与える。

$$et = \begin{cases} 10.211 - 0.2110b_s & (1 \leq b_s < 20) \\ 7.0000 - 0.0500b_s & (20 \leq b_s < 80) \end{cases} \quad (27)$$

$$em = \begin{cases} 3 & (80 \leq b_s) \\ 5.1579 - 0.1579b_s & (1 \leq b_s < 20) \\ 2.1660 - 0.0083b_s & (20 \leq b_s < 80) \end{cases} \quad (28)$$

$$eb = \begin{cases} 1.5 & (80 \leq b_s) \\ 7.1579 - 0.1579b_s & (1 \leq b_s < 20) \\ 4.6660 - 0.0333b_s & (20 \leq b_s < 80) \end{cases} \quad (29)$$

中間層免震構造の上部構造においては、(25)、(24) および (26) 式を用いて得られる et, em, eb の、基礎免震構造に対するそれぞれの増幅率 r_{et}, r_{em}, r_{eb} を次式で定義する。

$$r_{et} = et/et_B \quad (30), \quad r_{em} = em/em_B \quad (31), \quad r_{eb} = eb/eb_B \quad (32)$$

et_B, em_B, eb_B : (27) ~ (29) 式による基礎免震構造の et, em, eb

図 9 に、2 次および 3 次周期比 β_2, β_3 に対するそれぞれの r_{et}, r_{eb} および r_{em} を示す。 β_3 は次式で定義する。

$$\beta_3 = {}_uT_3/{}_lT \quad (33)$$

ここに、 ${}_uT_3$: 上部 3 次 (両端自由振動モード) の固有周期

em は、(24) 式より上部 3 次応答によるため、 $\beta_3 = 1$ の近傍で増加している。一方、 r_{et}, r_{eb} は $\beta_2 = 1$ の近傍で増加し上部 2 次応答による影響が大きい。平均的な評価として、 r_{em} を β_3 と b_s に、 r_{et} および r_{eb} を β_2 と b_s に対して表 2、表 3 で与える。

最上層 et 、中間層 em 、免震層 eb をそれぞれ直線補間して e_i とすれば、(22)、(23) 式より、基礎免震および中間層免震構造の上部構造部の応答加速度は次式となる。また、その構成は図 10 となる。

$${}_uA_i/g = \alpha_f + e_i\alpha_s \quad (34)$$

ここに、

図 10 ${}_uA_i$ の構成

$$e_i = \begin{cases} \left(\frac{et-em}{Nu-Nmu} \right) i + \frac{em \cdot Nu - et \cdot Nmu}{Nu-Nmu} & (Nmu < i \leq Nu) \\ \left(\frac{em-eb}{Nmu-1} \right) i + \frac{eb \cdot Nmu - em}{Nmu-1} & (1 \leq i < Nmu) \end{cases} \quad (35)$$

3.3 下部構造部のせん断力係数

図 3、4 に示すように、下部構造部のせん断力係数は、 A_i 分布などとは異なる特殊な分布形状となるが、下部 1 次応答が支配的であることにはかわりはない。したがって、下部構造部のせん断力は下部構造部のみで定義されるせん断力係数として、次式のように評価するほうが適切であり明解になる。

$${}_l\alpha_i' = \rho_i / \sum_{j=1}^{Nl} m_j g \quad (36)$$

ここに、 ${}_l\alpha_i'$: 下部構造部のみで定義される i 層のせん断力係数

(ただし、 $i = 1 \sim Nl$, 1 は第 1 層, Nl は下部構造部最上層)

ρ_i : 下部構造部 i 層のせん断力, m_i : i 層の質量

表 2: r_{em} と β_3 の関係

r_{em}	$0 < \beta_3 < 0.75$	$0.75 \leq \beta_3 < 1$	$1 \leq \beta_3 < 1.25$	$1.25 \leq \beta_3 < 4$
$1 \leq b_s < 20$	$0.33\beta_3 + 1$	$\beta_3 + 0.5$	$-2\beta_3 + 3.5$	1
$20 \leq b_s < 80$	$1.33\beta_3 + 1$	$4\beta_3 - 1$	$-6\beta_3 + 9$	$-0.18\beta_3 + 1.73$

ただし、 $\beta_3 \geq 4$ では $r_{em} = 1$ とする。

表 3: r_{et}, r_{eb} と β_2 の関係

r_{et}, r_{eb}	$0 < \beta_2 < 0.5$	$0.5 \leq \beta_2 < 1$	$1 \leq \beta_2 < 2$	$2 \leq \beta_2$
$1 \leq b_s < 20$	1	$1.5\beta_2 + 0.25$	$-0.75\beta_2 + 2.5$	1
$20 \leq b_s < 80$	1	$3\beta_2 - 0.5$	$-1.5\beta_2 + 4$	1
$80 \leq b_s$	1	$4\beta_2 - 1$	$-2\beta_2 + 5$	1

a) El Centro ns

b) Hachinohe ns

図 11 下部構造部のみで定義されるせん断力係数分布

図 11 に (36) 式より得られるせん断力係数分布 ${}_l\alpha_i' / {}_l\alpha_1'$ を示す。 ${}_l\alpha_1'$ の高さ方向分布は、 b_s による多少のばらつきはあるが、最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ (図中、太線) によって包絡的な評価が可能である。従って次式を採用する。

$${}_l\alpha_i' / {}_l\alpha_1' = \bar{\alpha}_i \quad (37)$$

(36) 式を系全体のせん断力係数へ置換すると次式となる。

$${}_l\alpha_i = {}_l\alpha_1 \cdot \bar{\alpha}_i \cdot (M/m_l) \cdot \left(\sum_{j=1}^{Nl} m_j / \sum_{j=1}^N m_j \right) \quad (38)$$

ここに、 ${}_l\alpha_1$: 中間層免震構造の下部構造部 i 層のせん断力係数

M : 総質量, m_l : 下部構造部総質量, N : 総層数

図 4 に示すように下部構造部のせん断力係数は、 b_s によっても変化するが、分布形状の変化よりも応答全体の一様な変化のほうが顕著である。前報で誘導した応答予測式によりベースシヤ係数 ${}_l\alpha_1$ を算定する場合、 b_s の影響は考慮しないため、比較的応答の安定している $b_s \leq 40$ 程度が適用範囲となる。

3.4 下部構造部の応答加速度

図3, 4より, 下部構造部の応答加速度は下部1次応答が支配的であり, 分布形状も比較的安定している。そこで, 均一せん断棒のベースシヤ係数と加速度応答の関係を用いて下部構造部の加速度分布の予測式を誘導する。

均一せん断棒の高さ*i*の*j*次モード応答加速度 A_i は次式となる。

$$A_i = \beta^j u(x) S_a \quad (39)$$

ここに, β^j : *j*次の刺激係数($= 4/(2j-1)\pi$)

$u(x)$: 高さ*x*の*j*次の振動モード($= \sin\{(2j-1)\pi x/2\}$)

x: 基礎からの高さ*i*を全長*l*で除した基準化高さ($= i/l$)

S_a : *j*次固有周期に対応する加速度応答スペクトル

RSS(Root Sum Squares) 法により最大値 A_i を推定すると

$$A_i = \frac{4S_a}{\pi} \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{(2j-1)^2} \sin^2 \frac{(2j-1)\pi x}{2}} = \sqrt{2} x S_a \quad (40)$$

ただし, 加速度応答スペクトルは一定($S_a = S_a$)としている。

また, ベースシヤ係数*C*と加速度応答スペクトル S_a の関係¹⁶⁾は,

$$C = \sqrt{2/3} \cdot S_a/g \quad (41)$$

(40), (41)式から最大加速度 A_i とベースシヤ係数*C*の関係を得る。

A_i を下部構造部の加速度応答 A_i とみなし, 上部構造部の重量を考慮したベースシヤ係数 α_1 を用いれば, 中間層免震構造の下部構造部の応答加速度分布式は, 次式となる。

$$A_i = \sqrt{3} x C g = \sqrt{3} x \frac{M}{m_1} \alpha_1 g \quad (42)$$

4. 応答予測式の検証

これまでに誘導した応答予測式を, 時刻歴応答解析結果との比較により検証する。応答予測に用いる免震層のアイソレータの最大せん断力係数 α_f および第1層の最大せん断力係数 α_1 は, 前報の応答予測式から算定される値を用いる。ただし, 総入力エネルギーの速度換算値 $V_E = 1.5$ (m/s)として得られる予測値である。

・上部構造部のせん断力係数 (図12)

(18)式による応答予測は, 応答増幅の著しい8層免震では, やや危険側の評価となるが, 上部構造部と下部構造部の振動モード間の連成作用を取り入れたことで, 免震層位置で変化する応答増幅の傾

図12 上部構造部のせん断力係数予測

図13 免震層床位置の最大転倒モーメント

図14 上部構造部の加速度応答予測

図 15 下部構造部のせん断力係数予測

図 16 下部構造部の加速度応答予測

向、応答値ならびにその分布形状がよく表現できている。

・免震層の最大転倒モーメント (図 13)

(20) 式による応答予測は、ダンパー剛性比 b_s に対する変化を概ね捉えることができ、応答値を包絡的に評価している。

・上部構造部の応答加速度 (図 14)

(35) 式による応答予測は、基礎免震では、指針式と比較して広範囲の b_s に対して応答を包絡的に評価できている。中間層免震では、モード間の連成作用を取り入れたことで免震層位置で変化する応答増幅をよく表現でき、応答の包絡的な評価となる。

・下部構造部のせん断力係数 (図 15) および応答加速度 (図 16)

(38) および (42) 式による応答予測は、応答の分布形状をよく表現し、応答値を平均的ないし包絡的に評価している。この結果により、

3.3, 3.4 の応答分布に関する考察の妥当性が示されたことになる。

5. まとめ

本研究では、中間層免震構造の応答分布に与える免震層位置およびダンパーの影響を、応答構造を分析することで評価し、その分析結果を踏まえた中間層免震構造の応答分布予測式を誘導した。本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 両端自由振動モードを用いたモード掃引法により、中間層免震構造の上部構造部の応答増幅は、下部構造部と上部構造部それぞれの振動モード間の連成作用によるものであることを明らかにした。
- 2) 上部構造部には振動モード間の連成作用を、下部構造部には下部構造部のみの振動モードの卓越性を考慮した中間層免震構造の応答分布予測式を提案した。特に、上部構造部の予測式は、指針に示されている基礎免震構造の予測式に連続した形で提案されている。
- 3) 本予測式は、前報の応答予測式を踏まえて定式化されており、前、本報の応答予測式を総合して、基礎免震構造と同様に中間層免震構造の耐震性能評価が可能となる。
- 4) 本研究は、固有周期 1 秒程度の中高層建物の免震化を想定し、その免震周期が 3 秒程度のものが対象となっている。他の周期帯のモデルについては、さらに検討、考察を要するが、本研究で提示した応答評価法は十分に応用、展開が可能であると考えられる。

謝辞

本研究は、平成 10 年～14 年度の文部省学術フロンティア推進事業の重点研究費：「激震動をうける建築構造物および構造物内機器装置の耐震性能の向上化に関する研究」(研究代表者：洪 忠意) および平成 12 年度よりの文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 A)：「直下地震に対する部材、架構の耐震性能向上に関する研究」(研究代表者：野口弘行) によった。

参考文献

- 1) 小林正人, 中澤 悟, 洪 忠意：中間層免震構造の耐震性能評価－(その 1) エネルギーの釣合に基づく中間層免震構造の定式化－, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.671-672, 2001.
- 2) 中澤 悟, 小林正人, 洪 忠意：中間層免震構造の耐震性能評価－(その 2) エネルギーの釣合に基づく中間層免震構造の耐震性能－, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.673-674, 2001.
- 3) 村上勝英, 北村春幸, 松島 豊：2 質点系中間層免震構造モデルの地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集, No.549, pp.51-58, 2001.11
- 4) 小林正人, 洪 忠意：中間層免震構造の地震応答予測と耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.109-116, 2002.8
- 5) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂, 1999.
- 6) 日本建築学会：免震構造設計指針, 第 3 版, pp.74-93, 2001.
- 7) 千馬一哉, 小幡 学, 大杉文哉, 内田富久, 東 武史, 田中欣章, 藤森 智：大規模免震建物の設計例 (その 2. 応答予測と応答解析結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.575-576, 1995.
- 8) 嶺脇重雄, 加藤 勉：免震構造上部架構せん断力係数分布－エルセントロ波入力の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.801-802, 1996.
- 9) 嶺脇重雄, 加藤 勉：免震構造上部架構せん断力係数分布－ダンパー要素のモデル化による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.659-660, 1997.
- 10) 安田高明, 高山孝夫, 森田慶子：免震構造におけるダンパーのモデル化が加速度応答に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.635-636, 1999.
- 11) Takim Andriano & Athol J. Carr：Reduction and Distribution of Lateral Seismic Inertia Forces on Base Isolated Multistorey Structures. Bulletin of The New Zealand National Society for Earthquake Engineering, pp.225-pp.237, Vol. 24, No. 3 September 1991.
- 12) 国土交通省住宅局指導課など編：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説, 2001.5
- 13) 小倉圭治, 高山正春, 辻田 修, 木村雄一, 和田章：中間層免震建物の地震応答, 日本建築学会構造系論文集, No.516, pp.99-104, 1999.2
- 14) 向井洋一, 山下忠道, 井上 豊：中間層免震構造の最大層せん断力係数の分布に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.921-922, 1999.
- 15) R. Ivan Skinner, William H. Robinson and Graeme H. McVerry：An Introduction to Seismic Isolation, Wiley, pp.33-48, pp.171-199, 1993.
- 16) 石山祐二：応答スペクトル法によるベースシャーク係数について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.621-622, 1987.

(2003 年 4 月 2 日原稿受理, 2003 年 7 月 25 日採用決定)