ランダム地震入力を受ける連結制震ダンパーを有する 2 棟免震構造物の性能指定型設計について

PERFORMANCE BASED DESIGN OF TWO BASE ISOLATED BUILDINGS USING LINKED PASSIVE DAMPER UNDER RANDOM EARTHQUAKE EXCITATION

中川 肇*
Hajime NAKAGAWA

This paper presents the performance based parameter analysis of two base isolated buildings with linked non-linear viscous damper under severe random earthquake excitation. From two viewpoints of preservation of seismic safety and improvement of structural comfort, the optimum parameter on the non-linear viscous damper is determined in such a way that the responses of two base isolated structural systems with linked damper agree with the performance-based responses of the base isolated system without damper. The optimality of the parameter is discussed for the yield strength and initial stiffness of the isolation interface, some random earthquake excitation models and the fundamental period of two base isolated buildings or upper structures.

Keywords: Performance based design, Random earthquake excitation, Linked non-linear viscous damper, Optimum parameter
Seismic safety, Structural comfort

性能指定型設計, ランダム地震入力, 連結非線形粘性ダンパー, 最適パラメータ, 耐震安全性, 居住性

1. 序

1995 年の兵庫県南部地震以後、2003 年の三陸南、宮城県北部及び十勝沖地震など頻繁に内陸型活断層ならびにプレート境界型地震が発生し、建築・土木構造物に甚大な被害を齎している。大地震時の構造物の損傷・被害軽減と倒壊回避を目指して、免震・制震構造の適用の必要性が益々増大している。これは、建築物に対する要求が大地震時の人命の保護に留まらず機能保持や財産保護にまでに高まってきたことに加え、想定した以上の過大地震入力（以下、過大入力）に対する耐震安全性の確保にまで至っており、建築物の要求性能に変容を齎している。

現今の基礎免震構造は、通常想定される地震動に対する応答を考慮して、水平方向へのクリアランスを 0.6m 程度に設定することが多いが、断層近傍強震動特に、その断層直交成分は大きな破壊力をもつことが指摘されている¹⁾。想定外の地震入力を免震構造が受けた場合、クリアランスを超える変形を経験する可能性は否定できず、免震構造周辺の擁壁に衝突すると考えられる。既往の研究では、過大入力時の免震構造の挙動及び上部構造物に及ぼす影響を検討した事例は極めて少なく、例えば、文献 2) で過大地震下における免震建物の応答と損傷について解析的に検討されている。現今の免震構

造が経験したことがない過大入力を受けた場合の構造物の挙動及び免震装置の過大変形を制御する方法について検討を加えることは現段階での重要な研究課題である。

本論では、過大入力は、現今の免震構造評定で採用している「極めて稀に発生する地震動」の約 1.25 倍つまり、最大速度 100cm/s（以下、レベル 4）と定義し、過大入力時の免震構造群として応答制御できる一手段として、連結非線形粘性ダンパー³⁾（以下、LNV ダンパー）を有する免震構造システム（以下、連結複合免・制震系）を採用し、レベル 4 で規定される過大入力を受ける連結複合免・制震系の確率論的 2 次モーメント応答に基づく性能指定型パラメータ解析を展開する。連結制震系に関する既往の研究は、例えば、文献 4) では、高層棟と低層棟の 2 棟を同時に中間層免震した構造物に連結制震ダンパーを適用し、応答低減効果を検討されているが、本論の様な 2 棟の免震階を粘性ダンパーで連結し、2 棟同時に応答制御する方法は全くない。また、耐震安全性と居住性の性能を満足する LNV ダンパーの最適減衰量は対象となる建築物群の構造特性や入力地震動特性の影響により容易に決定することは難しく、一般的なシミュレーション解析では、その最適減衰量に必ずばらつきが生じる。この点を克服すべく浅野は、かつて地震動のランダム性を考慮した

* 明石工業高等専門学校建築学科 助手・博士(工学)

Research Assoc., Dept. of Architecture, Akashi National College of Technology, Dr. Eng.

非定常地震入力モデル^{5),6)}を構築し、ランダム地震入力下の弾塑性履歴系の統計的2次モーメント応答に関する常微分方程式⁶⁾を導き、地震動の強震部分を定常過程と仮定することにより、微分方程式の解を時間軸上で求める代わりに、簡単な連立方程式を解くことで平均的な意味での応答量が計算できるランダム地震応答解析法⁷⁾を開発した。本論もこの手法に依拠しており、この点が既往の解法と全く異なる。ここでの検討は、免震・制震複合構造の性能指定型設計に供する基礎的資料を得るための必須の要件であり、筆者が一貫して展開している確率論的地震応答解析に新たな展望を与えるものと考えられる。

2. 解析モデル

本論の地震入力モデルは、確率論的地震入力（以下、ランダム地震入力）を想定し、図1に示す基盤へのホワイトノイズ過程 $\ddot{w}$ に表層地盤の増幅特性を考慮し地震動の卓越振動数 ω_g 、形状係数 h_g で規定させる線形フィルターの通過過程で得られるノンホワイトランダム過程⁸⁾である。

構造物モデルは、最下層に積層ゴムと鋼棒ダンパーを設置する免震層と上部構造として弾性剛性 $r_i k_{i+1}, r'_i k'_{i+1}$ 、塑性剛性 $(1-r_i)k_i, (1-r'_i)k'_i$ 及び粘性減衰係数 c_{i+1}, c'_{i+1} で規定される弾塑性フレームを持つ2棟免震構造物を非線形粘性ダンパーで連結した多層構造物モデルである。連結構造物モデルの概念図を図1に示す。図中の m_i, u_i, c^* は夫々Aモデルの任意i層のフレームの質量、層間変位及びLNVダンパーの粘性減衰係数で、 m'_i, u'_i はAモデルに対応するBモデルのそれらである。また、 y_i, y'_i はBi-linear型履歴特性を構成するクーロン素子の層間変位である。

図1 連結複合免・制震系モデル

3. ランダム地震応答解析に基づく連結複合免・制震系の性能指定型パラメータ解析の展開

3.1 連結非線形粘性ダンパーの定式化³⁾と統計的等価線形化法

図2には、LNVダンパーの荷重・変形関係が描かれている。ここで、 $\tilde{u}_1 (= \dot{u}_1 - \dot{u}'_1)$, $\dot{u}_{cr}$ は夫々粘性ダンパーの速度応答、速度応答の閾値である。LNVダンパーの減衰力 F は、次式のように表現できる。

$$F = c^* \phi(\tilde{u}_1) \quad (1)$$

$$\phi(\tilde{u}_1) = \begin{cases} \tilde{u}_1 & : |\tilde{u}_1| \leq \dot{u}_{cr} \\ \dot{u}_{cr} & : \tilde{u}_1 > \dot{u}_{cr} \\ -\dot{u}_{cr} & : \tilde{u}_1 < -\dot{u}_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\phi(\tilde{u}_1)$ はダッシュポット要素の速度に関する非線形関数を表す。(2)式を単位階段関数 $s(\cdot)$ で表現すると次式となる。

$$\phi(\tilde{u}_1) = \tilde{u}_1 \{s(\tilde{u}_1 + \dot{u}_{cr}) - s(\tilde{u}_1 - \dot{u}_{cr})\} + \dot{u}_{cr} \{s(\tilde{u}_1 - \dot{u}_{cr}) - s(-\tilde{u}_1 - \dot{u}_{cr})\} \quad (3)$$

(3)式に $\tilde{u}_1$ の分布の正規性を前提とする統計的等価線形化法⁹⁾を適用すれば次式のように表現できる。

$$\phi(\tilde{u}_1) \cong c_d \tilde{u}_1 \quad ; \quad c_d = E \left[\frac{\partial \phi}{\partial \tilde{u}_1} \right] = \text{erf} \left(\frac{\dot{u}_{cr}}{\sqrt{2} \sigma_{\tilde{u}_1}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $c_d, \sigma_{\tilde{u}_1}$ は夫々ダンパーの等価線形化係数、速度応答のr.m.s.値である。

図2 LNVダンパーの荷重・変形関係

3.2 連結複合免・制震系モデルの基礎運動方程式の誘導

ランダム地震入力を受ける連結複合免・制震系モデル（以下、全体系）の任意i層及び免震層の運動方程式は、図1を参考にとすると次式のように与えられる。

i層：

$$\left. \begin{aligned} m_i(\ddot{u}_1 + \dots + \ddot{u}_i) + c_i \dot{u}_i - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} + r_i k_i u_i - r_{i+1} k_{i+1} u_{i+1} \\ + (1-r_i) k_i g_{1i} - (1-r_{i+1}) k_{i+1} g_{1i+1} = -m_i f \\ m'_i(\ddot{u}'_1 + \dots + \ddot{u}'_i) + c'_i \dot{u}'_i - c'_{i+1} \dot{u}'_{i+1} + r'_i k'_i u'_i - r'_{i+1} k'_{i+1} u'_{i+1} \\ + (1-r'_i) k'_i g'_{1i} - (1-r'_{i+1}) k'_{i+1} g'_{1i+1} = -m'_i f \\ \dot{y}_i = g_{2i}, \quad \dot{y}'_i = g'_{2i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

免震層：

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + r_1 k_1 u_1 - r_2 k_2 u_2 + (1-r_1) k_1 g_{11} - (1-r_2) k_2 g_{12} \\ + c^*(\dot{u}_1 - \dot{u}'_1) = -m_1 f \\ m'_1 \ddot{u}'_1 - c'_2 \dot{u}'_2 + r'_1 k'_1 u'_1 - r'_2 k'_2 u'_2 + (1-r'_1) k'_1 g'_{11} - (1-r'_2) k'_2 g'_{12} \\ - c^*(\dot{u}_1 - \dot{u}'_1) = -m'_1 f \\ \dot{y}_1 = g_{21}, \quad \dot{y}'_1 = g'_{21} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$f = \ddot{z} + \ddot{w} \quad ; \quad \ddot{z} + 2h_g \omega_g \dot{z} + \omega_g^2 z = -\ddot{w} \quad (7)$$

(5), (6)式を一般的なマトリクス形式で表現すると次式となる。

$$\left\{ \begin{aligned} \{\ddot{u}\} + [\tilde{c}] \{\dot{u}\} + [\tilde{k}] \{u\} + [\tilde{k}'_A] \{g_1\} + [\tilde{c}^*] \{\phi\} &= -\{f\} \\ \{\ddot{u}'\} + [\tilde{c}^*] \{\dot{u}'\} + [\tilde{k}'_B] \{u'\} + [\tilde{k}'_B] \{g'_1\} - [\tilde{c}^*] \{\phi\} &= -\{f\} \\ \{\dot{y}\} &= \{g_2\} \\ \{y\} &= \{g'_2\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 $\{u\}, \{y\}$ は A モデルのフレームの層間変位及びクーロン素子の層間変位ベクトルで、 $\{u'\}, \{y'\}$ は A モデルに対応する B モデルのそれら、 $[\tilde{c}] = [J]^{-1} [m]^{-1} [c]$ 、 $[\tilde{k}] = [J]^{-1} [m]^{-1} [k]$ は A モデルの粘性減衰、剛性に関するマトリクスで、 $[J]^{-1}$ は、(9)式に示す相対座標系を層間座標系に変換する $[J]$ の逆マトリクスである。これ以降に示す要素マトリクス $[\tilde{*}]$ は、 $[\tilde{*}]$ に $[J]^{-1} [m]^{-1}$ を左乗したマトリクスである。 $[\tilde{c}^*] [\tilde{k}']$ は B モデルの粘性減衰、剛性に関するマトリクス、 $[\tilde{k}'_A] [\tilde{k}'_B]$ は夫々、A、B モデルの Bi-linear 型履歴特性を示す塑性剛性に関するマトリクスで、 $[\tilde{c}^*] \{\phi\}$ は夫々 LNV ダンパーの粘性減衰係数に関するマトリクスと非線形関数ベクトルである。

$$[J] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 1 & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}, [J]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

また、 $\{g_1\}, \{g_2\}$ 及び $\{g'_1\}, \{g'_2\}$ は夫々の免震層及びフレームの Bi-linear 型履歴要素を構成するクーロン素子の変位と速度に関する非線形関数ベクトル、 $\{f\}$ は最下段エレメントのみが 1、その他は 0 のベクトルで、 $f, z, \ddot{w}$ は夫々構造物への地震入力、表層地盤の相対変位、基盤へ入力されるホワイトノイズである。

それらの非線形関数 $\{g_1\}, \{g_2\}$ 、 $\{g'_1\}, \{g'_2\}$ の分布の正規性を前提とする統計的等価線形化法を適用すれば、次式のように線形近似される。

$$\left\{ \begin{aligned} \{g_1\} &\equiv [c_1] \{\dot{u}\} + [c_2] \{y\} \\ \{g_2\} &\equiv [c_3] \{\dot{u}\} + [c_4] \{y\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \{g'_1\} &\equiv [c'_1] \{\dot{u}'\} + [c'_2] \{y'\} \\ \{g'_2\} &\equiv [c'_3] \{\dot{u}'\} + [c'_4] \{y'\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで、 $[c_1] \sim [c_4]$ 及び $[c'_1] \sim [c'_4]$ は等価線形化係数に関するマトリクスで、その係数は文献 9) を参照されたい。

(4)、(10)、(11)式を(8)式に代入すると、全体系の運動方程式は最終的に次式となる。

$$\left\{ \begin{aligned} \{\ddot{u}\} + [\tilde{c}] + [\tilde{k}_A] [c_1] + [\tilde{c}^*] [c_5] \{\dot{u}\} + [\tilde{k}] \{u\} + [\tilde{k}_A] [c_2] \{y\} - [\tilde{c}^*] [c_5] \{\dot{u}'\} &= -\{f\} \\ \{\ddot{u}'\} + [\tilde{c}^*] + [\tilde{k}_B] [c'_1] + [\tilde{c}^*] [c'_5] \{\dot{u}'\} + [\tilde{k}'] \{u'\} + [\tilde{k}_B] [c'_2] \{y'\} - [\tilde{c}^*] [c'_5] \{\dot{u}\} &= -\{f\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで、 $[c_5]$ は LNV ダンパーの等価線形化係数に関するマトリクスで、最下層は c_d 、その他は全て 0 の要素を示す。

3.3 連結非線形粘性ダンパーの性能指定型最適パラメータの評価

状態変数として、 $\{U\}^T = \{\{u\}, \{u'\}, \{\dot{u}\}, \{\dot{u}'\}, \{y\}, \{y'\}, z, \dot{z}\}^T$ を選ぶと、(12)式の運動方程式は次の 1 階常微分方程式で書換えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \{U\} &= [a] \{U\} + \{b\} \ddot{w} \\ \Leftrightarrow \dot{U}_j &= \sum_{i=1}^{\tilde{n}} a_{ji} U_i + b_j \ddot{w} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $\tilde{n} (= 6n + 2)$ は系の運動を規定するのに必要な状態変数の数の最大値、 n は質点数、 a_{ji}, b_j は夫々、全体系の剛性、粘性減衰と

地震入力の卓越振動数 ω_g 、スペクトルの形状係数 h_g により規定される係数ならびに地震入力強度に関する係数である。 $[a], [b]$ の要素は、(14)、(15)式のように表され、 $[E]$ は単位行列である。

$$[a] = \begin{bmatrix} [0] & [0] & [E] & [0] & [0] & [0] & \{0\}^T & \{0\}^T \\ [0] & [0] & [0] & [E] & [0] & [0] & \{0\}^T & \{0\}^T \\ -[\tilde{k}] & [0] & [a_{33}] & [a_{34}] & [a_{35}] & [0] & \{1'\} \omega_g^2 & \{1'\} 2h_g \omega_g \\ [0] & -[\tilde{k}'] & [a_{43}] & [a_{44}] & [0] & [a_{46}] & \{1'\} \omega_g^2 & \{1'\} 2h_g \omega_g \\ [0] & [0] & [c_3] & [0] & [c_4] & [0] & \{0\}^T & \{0\}^T \\ [0] & [0] & [0] & [c'_3] & [0] & [c'_4] & \{0\}^T & \{0\}^T \\ \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & 0 & 1 \\ \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T & -\omega_g^2 & -2h_g \omega_g \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} [a_{33}] &= -[\tilde{c}] - [\tilde{k}_A] [c_1] - [\tilde{c}^*] [c_5], [a_{34}] = [\tilde{c}^*] [c_5], [a_{35}] = -[\tilde{k}_A] [c_2] \\ [a_{43}] &= [\tilde{c}^*] [c_5], [a_{44}] = -[\tilde{c}'] - [\tilde{k}_B] [c'_1] - [\tilde{c}^*] [c'_5], [a_{46}] = -[\tilde{k}_B] [c'_2] \end{aligned} \right\}$$

$$\{b\} = \{\{0\} \quad \{0\} \quad \{0\} \quad \{0\} \quad \{0\} \quad \{0\} \quad 0 \quad -1\}^T \quad (15)$$

(13)式より、 $E[\cdot]$ を平均演算子として、系の統計的 2 次モーメント応答 $E[U_i U_j] = m_{ij}$ は、非定常確率過程の場合、(16)式の常微分方程式の解として与えられる。

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{m}_{ij} &= \sum_{l=1}^{\tilde{n}} (a_{il} m_{lj} + a_{jl} m_{li}), i=1 \sim \tilde{n}-1, j=i \sim \tilde{n} \\ m_{\tilde{n}\tilde{n}} &= (\sigma_f^2 - 4h_g \omega_g^3 m_{\tilde{n}-1\tilde{n}} - \omega_g^4 m_{\tilde{n}-1\tilde{n}-1}) / 4h_g^2 \omega_g^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

また、定常確率過程の場合、 $\dot{m}_{ij} = 0$ となり、 $m_{ij} = M_j$ ($j=1 \sim N$) と表記すると、最終的に次式の連立方程式の解として与えられる。

$$[A][M] = \{B\} \sigma_f^2 \quad (17)$$

ここで、2 次モーメント応答 M の助変数 $J = (i-1)(\tilde{n}-i/2)$ 、 $N = (\tilde{n}-1)(\tilde{n}+2)/2$ である。

本論では、レベル 4 入力時の全体系の応答を非連結免震系モデルの応答に耐震安全性と居住性に関する性能要求係数 ρ を乗じた応答に一致させる LNV ダンパーの最適パラメータを推定するために、次式のような 2 種類の目的関数を定義する。

$$J_s = w_1 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{u_i} / \rho \sigma_{\bar{u}_i} - 1)^2 + w_2 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{u'_i} / \rho \sigma_{\bar{u}'_i} - 1)^2 \quad (18)$$

$$J_c = w_1 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{\alpha_i} / \rho \sigma_{\bar{\alpha}_i} - 1)^2 + w_2 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{\alpha'_i} / \rho \sigma_{\bar{\alpha}'_i} - 1)^2 \quad (19)$$

ここで、 $\sigma_{u_i}, \sigma_{\alpha_i}, \sigma_{\bar{u}_i}, \sigma_{\bar{\alpha}_i}$ は夫々レベル 4 入力時の全体系モデル内の A モデルでの任意 i 層の層間変位応答と絶対加速度応答の r.m.s 値と、非連結免震系のそれらであり、 $\sigma_{u'_i}, \sigma_{\alpha'_i}, \sigma_{\bar{u}'_i}, \sigma_{\bar{\alpha}'_i}$ は $\sigma_{u_i}, \sigma_{\alpha_i}, \sigma_{\bar{u}_i}, \sigma_{\bar{\alpha}_i}$ に対応する B モデルのそれらである。また、 ρ は耐震安全性及び居住性に関する性能要求係数、 w_1, w_2 は目的関数を構成する重み係数である。(18)、(19)式の各応答の r.m.s 値は、(17)式の 2 次モーメント応答により求める。

LNV ダンパーの最適パラメータは、(18)、(19)式の目的関数 J_s, J_c を最小にする一変数極値問題に帰着し、挟撃法¹⁰⁾を用いて求める。

目的関数 J_s, J_c の制御変数 X_k に関する 1 階偏導関数 $\partial J_s / \partial X_k$ 、

$\partial J_c / \partial X_k$ は、次式のように与えられる。

$$\frac{\partial J_s}{\partial X_k} = 2w_1 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{u_i} / \rho \sigma_{\bar{u}_i} - 1) \cdot \frac{\partial \sigma_{u_i}}{\partial X_k} + 2w_2 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{u'_i} / \rho \sigma_{\bar{u}'_i} - 1) \cdot \frac{\partial \sigma_{u'_i}}{\partial X_k} \quad (20)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial X_k} = 2w_1 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{\alpha_i} / \rho \sigma_{\bar{\alpha}_i} - 1) \cdot \frac{\partial \sigma_{\alpha_i}}{\partial X_k} + 2w_2 \sum_{i=1}^{\tilde{n}} (\sigma_{\alpha'_i} / \rho \sigma_{\bar{\alpha}'_i} - 1) \cdot \frac{\partial \sigma_{\alpha'_i}}{\partial X_k} \quad (21)$$

ここで、(20)、(21)式中の $\partial \sigma_{u_i} / \partial X_k, \partial \sigma_{\alpha_i} / \partial X_k$ 等は、次式に示す(17)

式の 2 次モーメント応答 $\{M\}$ の制御変数 X_k に関する 1 階偏導関数 $\{\partial M / \partial X_k\}$ により求められる。

$$\left\{ \frac{\partial M}{\partial X_k} \right\} = -[A]^{-1} \left[\frac{\partial A}{\partial X_k} \right] \{M\} \quad (22)$$

ここで、 $[\partial A / \partial X_k]$ は、免震層、上部構造物及び LNV ダンパーの非線形特性の等価線形化係数の 1 階偏導関数マトリクスである。

以上より、 $\partial J_s / \partial X_k = 0$, $\partial J_c / \partial X_k = 0$ となる X_k が耐震安全性及び居住性に関して指定した要求性能を満足する、夫々の最適解となる。

4. 解析パラメータ

4.1 地震入力モデル

ランダム地震入力モデルに関するパラメータを表 1 に示す。表 1 は El Centro 地震 NS 成分、兵庫県南部地震（以下、神戸地震）NS 成分、Taft 地震 EW 成分及び八戸地震 NS 成分の最大速度を 100(cm/s) とし、その強震部分を基に計算したランダム地震入力の非定常パラメータ⁶⁾の平均値を示している。

表 1 ランダム地震入力モデル

	El Centro 型	神戸型	Taft 型	八戸型
σ_f (cm/s ²)	1022/3	906/3	992/3	660/3
ω_g (rad/s)	17.00	12.90	13.13	7.78
h_g	0.47	0.30	0.68	0.85

4.2 構造物モデル

構造物モデルは夫々、11 質点免震系モデルを LNV ダンパーで連結したモデルを想定しており、その全体系モデルに関する標準パラメータを次のように設定する。

①上部構造物は、表 2 に示す 10 質点系モデルで、1 次固有周期 T_1 は 1.0 秒、1 次減衰定数 h_1 は 2% の初期剛性比例型、Bi-linear 型履歴特性の第 2 分枝勾配は $r_2 = r'_2 = 0.1$ とする。階高、質量は夫々 400(cm)、12.5(kN · s²/cm) で各層一様とする。弾性剛性分布は耐震規準に基づき、各層の層間変位応答分布が一様になる様に決定した。②各モデルの免震層は、図 3 に示すような積層ゴムと鋼棒ダンパーで構成され、復元力特性は Bi-linear 型を示すが、免震層にはオイルダンパーなどの粘性減衰は全くなく、履歴減衰のみとする。A、B モデルの 1 次固有周期は夫々 3.0 秒と 5.0 秒とし、鋼棒ダンパーの初期剛性 k_d 、降伏強度 αQ_1 は夫々積層ゴムの剛性 k_I の 5~15 倍、免震層上部の構造物重量の 5~10% とする。

表 2 上部構造物

階	層剛性(kN/cm)
10	6785.2
9	10819.7
8	14177.5
7	17055.7
6	19529.9
5	21641.3
4	23411.4
3	24855.9
2	25985.7
1	26807.6

図 3 免震層の荷重・変形関係

③LNV ダンパーの粘性減衰係数 c^* は 5~1000 (kN · s/cm) とし、速度応答の閾値 $\dot{u}_{cr}$ は次式のように定義する。

$$\dot{u}_{cr} = \gamma \cdot |\bar{u}'_{1\max} - \bar{u}'_{1\max}| \quad (23)$$

ここで、 $\gamma, \bar{u}'_{1\max}, \bar{u}'_{1\max}$ は夫々速度応答の閾値レベルで $\gamma = 0.5, 1.0, 2.0$ とし、非連結免震系における A、B モデルの免震層での最大層間速度応答である。④目的関数の重み係数は $w_1 = w_2 = 0.5$ とする。

5. 数値解析例

5.1 免震層の設計

本論では、A、B モデルの 1 次固有周期を夫々 3.0 秒と 5.0 秒になるように固有値解析を実施し収束計算により各積層ゴムの剛性を決定する。その結果を表 3、4 に、免震層が 20、60、100cm 変形した場合の等価固有周期及び等価剛性を表 5 に示す。ここでの鋼棒ダンパーの降伏強度レベル及び初期剛性比は夫々 $\alpha = 0.05, \beta = 10$ である。

表 3 免震層の設計

	初期剛性 (kN/cm)	2 次剛性 (kN/cm)	αQ (kN)	δ (cm)
A モデル	7254.1	659.5	6726.5	1.02
B モデル	2464.0	224.0	6742.3	3.01

表 4 非連結免震系モデルの固有値解析結果 単位: s

固有周期	A モデル	B モデル
1 次	3.000	5.000
2 次	0.564	0.575
3 次	0.307	0.309
4 次	0.212	0.213
5 次	0.164	0.164

表 5 非連結免震系モデルの等価固有周期と等価剛性

変形量	A モデル		B モデル	
	等価周期 (s)	等価剛性 (kN · s/cm)	等価周期 (s)	等価剛性 (kN · s/cm)
20cm	2.49	996.6	3.23	561.1
60cm	2.79	771.8	4.11	336.4
100cm	2.87	726.8	4.40	291.4

5.2 連結非線形粘性ダンパーの最適パラメータの推定

レベル 4 入力時の全体系の応答を非連結免震系の応答に性能要求係数 ρ を乗じたそれに一致させる LNV ダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* は $c^* = 5 \sim 1000$ (kN · s/cm) まで 5 (kN · s/cm) 刻みに変動させ、(18)、(19) 式の目的関数 J_s, J_c を最小とするように求める。

まず、図 4 には、入力地震動を El Centro 型ランダム入力とし、性能要求係数 $\rho = 0.6 \sim 0.8$ 及びダンパーの閾値レベル $\gamma = 0.5, 1.0, 2.0$ とした場合のダンパーの粘性減衰係数 c^* に対する目的関数 J_s, J_c が描かれている。図 4 より、目的関数 J_s, J_c は、ダンパーの粘性減衰係数 c^* の変動に対して鋭敏であり、目的関数 J_s, J_c を最小にする最適粘性減衰係数 c_{opt}^* が夫々存在し、ダンパーの速度応答の閾値 γ が大きくなるにつれて、最適粘性減衰係数 c_{opt}^* は小さくなる傾向にある。しかしながら、耐震安全性及び居住性に関する性能要求係数が $\rho = 0.6$ の場合、目的関数 J_s, J_c の最小値は 0.5 程度であり、性能要求を満足するレベルまで応答を低減することは難しいと言えよう。筆者がかつて、報告した各種パッシブ制震構造の最適パラメータ評

価^{3),11),12)}では、一般に変位応答は指定された性能レベルに一致させることは可能であるが、加速度応答はダンパーの減衰量のみで指定されたそれに完全一致させることは難しいことを指摘している。しかし、本論の様な連結複合免・制震構造では、 $\rho=0.6$ の結果を除けば、2棟を同時に、夫々の変位及び加速度応答を指定された性能レベルに留めることは可能で、連結複合系の最大の利点であると言える。

図4 LNVダンパーの粘性減衰係数に対する目的関数

次に、図4のパラメトリック・サーベイによる結果と比較するために、3.1節の3)項で示した挟撃法を用いた一変数最適化問題に帰着させ、その最適パラメータを推定する。両手法の比較結果を表6に示す。ここでは、一例として、ダンパーの閾値レベル $\gamma=1.0$ の場合の結果を示している。表6より、性能要求係数 ρ に関係なく、両手法の最適値の比つまり誤差は最大で2%以内であり、両手法とも良い一致を示し、挟撃法では、任意に与えた初期値から最適値を探索するまでの収束計算が10~15回程度で演算時間が極めて短く、最適パラメータを推定するのに非常に優れた手法であると言える。なお、表6に示した以外の閾値レベル $\gamma=0.5, 2.0$ においても非常に良い一致を示していることを確認している。本論で得られた結果は、連結複合免・制震構造物の性能指定型設計でのLNVダンパーの粘性減衰量に関する参考値になると言えよう。

表 6-1 LNVダンパーの最適パラメータ評価の比較 (Js) 単位(kN・s/cm)

性能要求係数 ρ	パラメトリック・サーベイ	挟撃法
0.60	360.0	366.602
0.65	350.0	355.000
0.70	325.0	324.141
0.75	280.0	282.656
0.80	205.0	207.969

表 6-2 LNVダンパーの最適パラメータ評価の比較 (Jc) 単位(kN・s/cm)

性能要求係数 ρ	パラメトリック・サーベイ	挟撃法
0.60	345.0	348.728
0.65	335.0	332.684
0.70	315.0	314.603
0.75	275.0	274.486
0.80	205.0	204.336

5.3 最適粘性減衰量以外の粘性減衰量が全体系の応答低減効果に及ぼす影響

5.2節で推定したLNVダンパーの最適値以外の粘性減衰量の場合、全体系の応答低減効果にどの程度影響を及ぼすかを論じるために、ここでは、表6に示した性能要求係数 $\rho=0.7$ 、速度の閾値レベル $\gamma=1.0$ の場合に得られた最適値を標準値とし、その標準値の25, 50, 75, 100, 125, 150%の粘性減衰量を与えた場合のランダム地震応答解析を実施する。図5にA、Bモデルの最大層間変位⁶⁾及び絶対加速度応答の結果が描かれている。

図5 最適値以外での応答比較

図5より、層間変位及び絶対加速度応答とも、非連結免震系のそれらに比べ、ダンパーを付加することで応答が低減していることが判る。また、Aモデルの層間変位に関しては、標準値を境界にダンパーをさらに付加しても、応答は逆に大きくなり、Bモデルの絶対加速度応答に関しては、ダンパーで連結することで、Bモデルの固有周期が5.0秒より短くなるために、標準値以上のダンパー量を付加した場合、逆に加速度応答が大きくなること判る。以上の結果より、最適値近傍の粘性減衰係数でダンパーを設計することが望ましいと言える。

5.4 免震層を構成するパラメータが LNV ダンパーの最適粘性減衰係数に及ぼす影響

本節では、免震層のパラメータつまり降伏強度及び初期剛性の変動がダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* に対して、どの程度影響するかを検討する。図6には、入力地震動モデルは El Centro 型ランダム入力、免震層の降伏強度レベルを $\alpha = 0.05, 0.07, 0.1$ とし、5.2 節と同様に実施した性能指定型パラメータ解析（挾撃法）で得られた最適粘性減衰係数 c_{opt}^* が性能要求係数 ρ に対して描かれている。パラメータの変動が最適値に及ぼす影響を比較検討するために、速度応答の閾値 $\dot{u}_{cr}$ は一定とし、10 cm/s とする。図6より、性能要求係数 ρ が小さくなるに連れて、必要とするダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* は大きくなること判り、また、免震層の降伏強度レベルの選択によって、ダンパーの最適値はかなりばらつきが見られ、特に居住性を対象にする目的関数 J_c の場合に、その傾向は顕著である。これは、降伏強度レベルが増加するにつれて、非連結免震系モデルでは、履歴減衰効果により、免震層の最大変形量は小さくなり、性能レベルに一致するための粘性減衰量が小さくなったと推察される。表7には、最適 LNV ダンパーでの免震層の最大応答量が鋼棒ダンパーの降伏強度レベル α をパラメータとして示されている。ここでの性能要求係数 ρ は 0.7 である。表7より、鋼棒ダンパーの降伏強度が増加するにつれて、免震層の変形量は小さくなること判る。

図6 免震層の降伏強度レベルをパラメータとする LNV ダンパーの最適粘性減衰係数

$\rho \backslash \alpha$		0.05		0.07		0.10	
		Dis.	Acc.	Dis.	Acc.	Dis.	Acc.
0.70	A-model	62.1	491.9	52.2	427.6	40.9	382.7
	B-model	72.5	359.5	62.8	321.9	51.8	287.4
非連結	A-model	75.6	680.8	67.3	538.4	54.9	459.3
	B-model	98.8	432.5	89.4	358.2	75.4	334.5

また、図7には、図6と同様に、鋼棒ダンパーの初期剛性比 $\beta (= k_d/k_f)$ をパラメータとした場合の最適粘性減衰係数 c_{opt}^* が描かれている。

図7より、免震層の初期剛性の変動がダンパーの最適値に及ぼす影響は少ないことが判る。以上の結果より、免震層の降伏強度の変動が、LNV ダンパーの最適粘性減衰係数及び免震層の最大応答に及ぼす影響は大きいといえる。

図7 免震層の初期剛性比をパラメータとする LNV ダンパーの最適粘性減衰係数

5.5 入力地震動特性が LNV ダンパーの最適粘性減衰係数に及ぼす影響

本節では、入力地震動特性がダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* に対して、どの程度影響するかを検討する。入力地震動モデルは、El Centro 型モデルに加えて、神戸型、Taft 型、八戸型ランダム入力とする。図8には、挾撃法で得られた最適粘性減衰係数 c_{opt}^* が性能要求係数 ρ に対して描かれている。ここでの速度応答の閾値 $\dot{u}_{cr}$ 及び免震層の降伏強度レベル α 、初期剛性比 β は、5.4 節と同様に 10 cm/s、0.05、10 とする。図8より、性能要求係数が $\rho = 0.75, 0.8$ 、Taft 型ランダム入力の場合、 c_{opt}^* は他の入力での結果と若干異なるが、それ以外の要求係数では入力地震動の差異は殆どないことが判る。つまり、一般的なシミュレーション解析に基づく最適パラメータを推定した場合、そのパラメータにばらつきが生じ、一義的に決定できないが、ランダム地震動解析では、そのばらつきはあまり見られない。

図8 入力地震動特性の差異に対する LNV ダンパーの最適粘性減衰係数

5.6 各免震系モデルの固有周期が LNV ダンパーの最適粘性減衰係数に及ぼす影響

本節では、各免震系モデルの固有周期がダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* に対して、どの程度影響するかを検討する。図9には、入力地震動モデルは、El Centro 型ランダム入力、各免震系モデルの1

次固有周期 $(T_A, T_B) = (2.0, 4.0), (2.0, 5.0), (3.0, 4.0), (3.0, 5.0)$ の 4 ケースとし、挾撃法で得られた最適粘性減衰係数 c_{opt}^* が性能要求係数 ρ に対して描かれている。免震系モデルの固有周期が変動すると、免震層に経験する各速度応答は異なると予想されるが、固有周期の変動に対するダンパーの最適パラメータを比較検討するために、ダンパーの速度応答の閾値は一定とし、 $\dot{u}_{cr} = 10 \text{ cm/s}$, $\alpha = 0.05$, $\beta = 10$ とする。図 9 より、各免震系モデルの固有周期が異なると、性能要求係数 ρ に対する最適粘性減衰係数 c_{opt}^* は異なることが判る。これは、非連結免震系モデルにおける最大変位及び加速度応答が異なるため、その性能レベルに一致させる粘性減衰量に違いが生じたものと推察される。以上の結果より、連結複合免・制震系では、夫々のモデルの固有周期がダンパーの最適パラメータに及ぼす影響が大きく、ダンパーの設計には十分な配慮が必要であると言える。

図 9 各免震系モデルの固有周期をパラメータとする
LNV ダンパーの最適粘性減衰係数

5.7 上部構造の固有周期が LNV ダンパーの最適粘性減衰係数に及ぼす影響

本節では、上部構造の固有周期がダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* に対して、どの程度影響するかを検討する。図 10 には、入力地震動モデルは、El Centro 型ランダム入力、図 8 の結果に加えて、上部構造物 5 質点系つまり 1 次固有周期 $T_{UA} = 0.5$ 秒と 10 質点系 $T_{UB} = 1.0$ 秒の連結系及び、10 質点系 $T_{UA} = 1.0$ 秒と 15 質点系 $T_{UB} = 1.5$ 秒のそれの 3 ケースとし、挾撃法で得られた最適粘性減衰係数 c_{opt}^* が性能要求係数 ρ に対して描かれている。固有周期の変動に対するダンパーの最適パラメータを比較検討するために、 $\dot{u}_{cr} = 10 \text{ cm/s}$, $\alpha = 0.05$, $\beta = 10$ とし、各免震系モデルの 1 次固有周期は $(T_A, T_B) = (3.0, 5.0)$ とする。

図 10 上部構造の固有周期をパラメータとする
LNV ダンパーの最適粘性減衰係数

図 10 より、上部構造物モデルの質点数及び固有周期が異なっても、全体系の固有周期が変動しない限り、ダンパーの最適値に及ぼす影響は少ないことが判る。

6. 結語

本論では、過大入力時の免震構造物群として応答制御できる手段として、連結非線形粘性ダンパーを有する免震構造システムを採用し、最大速度 100 cm/s で規定される過大入力を受ける連結複合免・制震系の確率論的 2 次モーメント応答に基づく性能指定型設計法を開発した。数値解析例において、レベル 4 入力時の全体系の応答を非連結免震系の応答に耐震安全性と居住性に関する性能要求係数を乗じた応答に一致させる LNV ダンパーの最適パラメータを推定した。本論の解析結果から連結複合免・制震構造の性能指定型設計について軽々に結論を述べることはできないが、それらが示す幾つかの工学的に重要な知見を纏めると以下の通りである。

- (1) LNV ダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* は、性能要求係数 ρ 、速度応答の閾値 γ 及び地震動の入力レベルに対して異なる値を示す。
- (2) 免震層の降伏強度及び各免震系モデルの固有周期の変動が LNV ダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* に及ぼす影響は大きい。
- (3) 本論の様な地震動のランダム性を考慮した確率論的地震応答解析に基づき LNV ダンパーの最適性を論じる限り、入力地震動特性がダンパーの最適粘性減衰係数 c_{opt}^* に及ぼす影響は極めて少ない。

なお、本論では、2 棟連結免震構造物の性能指定型設計法を提案したが、本手法を拡張すれば、過大地震入力時の免震構造物群の 2 次元空間での応答を制御することは可能であり、稿を改めて論じたいと思う。

謝辞

本論文の執筆にあたり、関西大学工学部建築学科 浅野幸一郎教授には貴重なご助言を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Hall, J.F., et al.: Near-Source ground Motion and its Effects on Flexible Buildings, Earthquake Spectra, Vol.11, No.4, pp.569~605.
- 2) 中安誠明、中島正愛：過大地震下における免震建物の応答と損傷、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 43 号・構造系、pp.205~208、2003.6
- 3) 中川肇、浅野幸一郎：Maxwell 型非線形粘性ダンパーを有する構造物の最適地震応答制御について、日本建築学会構造系論文集、第 542 号、pp.83~89、2001.4
- 4) 西村章、東野雅彦ほか：連結制震の高層免震構造物への適用（実施設計と性能確認実験）日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.715~716、2003.9
- 5) Lai, S.P.: Statistical characterization of strong ground motions using power spectral density function, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.72, No.1, pp.259~274, 1982.2
- 6) 浅野幸一郎：地震入力パラメータの変動を考慮した構造物の動的応答、日本建築学会構造系論文集、第 400 号、pp.123~130、1989.6
- 7) 浅野幸一郎、津田憲昭：弾性構造物の最適地震信頼性設計、日本建築学会構造系論文集、第 431 号、pp.33~36、1992.1
- 8) Tajimi, H.: A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake, Proc. of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol.11, pp.781~797, 1960
- 9) 浅野幸一郎：履歴系の統計的等価線形化法、日本建築学会構造系論文集、第 335 号、pp.10~14、1984.1
- 10) 町田東一、小島紀男：FORTRAN 応用数値計算、東海大学出版会、pp.142~158、1986.6
- 11) 中川肇、浅野幸一郎：Poly-linear 型履歴ダンパーを用いた多層構造物の最適地震応答制御について、日本建築学会構造系論文集、第 506 号、pp.93~99、1998.4
- 12) 中川肇、浅野幸一郎：Poly-linear 型履歴ダンパーを用いた多層構造物の最適地震応答制御について ~Poly-linear 型履歴ダンパーの最適剛性分布の評価~、日本建築学会構造系論文集、第 530 号、pp.45~51、2000.4

(2003年12月1日原稿受理、2004年7月30日採用決定)