

弾塑性・非線形粘性並列型ダンパーを有する 複合制震構造の最適設計について

中川 肇*

Optimum Design of the Multi Passively Controlled Structure with EP and NV Parallel Dampers

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

This paper presents the optimum distribution design of the passively controlled structures with elasto-plastic (EP) and non-linear viscous (NV) parallel dampers under some random earthquake excitations based on the seismic observation systems K-NET.

From the viewpoint of preservation of seismic safety, the optimum distribution design of the multi passive controlled dampers is discussed for the 1995 South of Hyogo Prefecture type, the 2004 Mid-Niigata Prefecture type, the 2005 West offshore of Fukuoka Prefecture type, the 2007 Noto peninsula type random earthquake excitations. The optimum parameters of the multi passive dampers are the yield strength of EP damper and the viscous damping coefficients of NV damper.

KEY WORDS: K-NET, ep and nv parallel dampers, multi passively controlled systems, optimum distribution design, random earthquake input models

1. 序

1995年の兵庫県南部地震以後、日本の地震観測網が整備され、地震発生後、即座に地震動を入手することができ、研究面、実施設計面で大いに活用されている。前報¹⁾では、地震観測システム K-NET を用いて、内陸型、やや長周期成分を有する地震動に対し、S.P.Lai、浅野の手法により、非定常ランダム入力モデルを構築した。

一方、兵庫県南部地震以後、高層建築物を中心に免震、制震構造が積極的に採用されている。制震構造では、単独ダンパーから直列型²⁾、並列型³⁾の複合ダンパーに関する研究が数多くなされている。

既往の研究では、確定論的地震応答解析に基づくダンパーの最適分布³⁾が検討されているが、入力地震動の特性により、その分布にばらつきが生じている。

本論では、中層 S 造建築物を対象に、前報¹⁾で構築した内陸型ランダム入力モデルを受ける複合制震構造の最適配分設計について、確率論的地震応答解析の立場から論じる。ここで、本論の複合ダンパーは、弾塑性ダンパー（以下、EPD）と非線形

粘性ダンパー（以下、NVD）の並列型ダンパーである。

2. EPNVD を有する複合制震構造の最適配分設計法

2・1 解析モデル

2・1・1 地震入力モデル

地震入力モデルは非定常ランダム入力モデルをとし、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^{4)~6)}である。

2・1・2 構造物モデル

構造物モデルは、弾性剛性 $r_i k_i$ 、塑性剛性 $(1-r_i)k_i$ 及び粘性減衰係数 c_i で規定される弾塑性フレーム内に、並列配置される図 1(a)に示す EP ダンパー、図 1(b)に示す NV ダンパーを有する複合制震系モデルである。図 2 は、任意 i 層のせん断系バネ、ダッシュポットで表現した複合系モデルである。ここで、 $k_i, c_i, k'_{d_i}, c'_{d_i}$ は夫々フレームの剛性と粘性減衰係数、EP ダンパーの初期剛性、NV ダンパーの粘性減衰係数を表している。

*建築学科

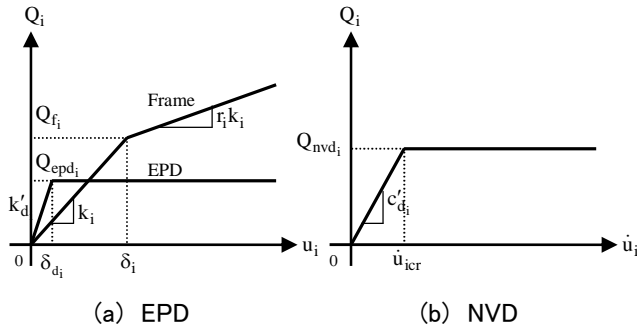


図 1 EPD, NVD の荷重変形関係

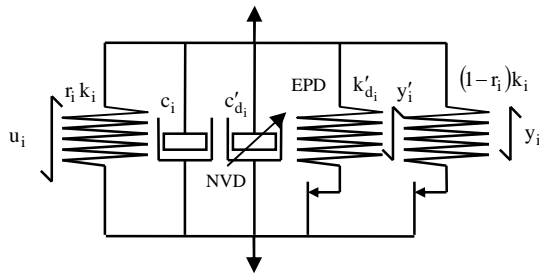


図 2 複合制震系モデル

2-2 複合制震系モデルの運動方程式の誘導

本節では、EP ダンパーの降伏耐力、NV ダンパーの減衰力に関する統計的等価線形化法、高さ方向の分布式及び複合制震系モデルの運動方程式について説明する。

図 1 を参考にすると、EP ダンパーの降伏耐力 Q_{epdi} 及び NV ダンパーの減衰力 Q_{nvd_i} は次式のように与えられる。

$$Q_{epdi} = D_i \cdot \alpha \sum_{j=1}^n w_j = D_i \cdot k'_{di} g'_{li} \quad (1)$$

$$Q_{nvd_i} = (1 - D_i) \cdot c'_{di} \phi_i \quad (2)$$

(2)式中の NV ダンパーの速度 \dot{u}_i に関する非線形関数 ϕ_i は、図 2 より単位階段関数 $s(\cdot)$ で表現すると次式となる。

$$\phi_i = \dot{u}_i \{s(\dot{u}_i + \dot{u}_{icer}) - s(\dot{u}_i - \dot{u}_{icer})\} + \dot{u}_{icer} \{s(\dot{u}_i - \dot{u}_{icer}) - s(-\dot{u}_i - \dot{u}_{icer})\} \quad (3)$$

ここで、 $D_i, 1 - D_i$ は各ダンパーに与える配分係数で、 $w_j, \alpha, g'_{li}, \phi_i, \dot{u}_{icer}$ は夫々任意 i 層のフレームの重量、EP ダンパーの降伏耐力レベルと各ダンパーの非線形関数、NV ダンパーのリリーフ速度である。

(1)、(2)式中の非線形関数 g'_{li}, ϕ_i の分布の正規性を前提とする統計的等価線形化法⁷⁾を適用すれば、(1)、(2)式は次のように線形近似される。

$$Q_{epdi} \cong D_i \cdot k'_{di} (c'_{1i} \dot{u}_i + c'_{2i} y'_i) \quad (4)$$

$$Q_{nvd_i} \cong (1 - D_i) \cdot c'_{di} \operatorname{erf} \left(\frac{\dot{u}_{icer}}{\sqrt{2}\sigma_{\dot{u}_i}} \right) \cdot \dot{u}_i = (1 - D_i) \cdot c'_{di} c_{5i} \cdot \dot{u}_i \quad (5)$$

ここで、 c'_{1i}, c'_{2i}, c_{5i} は等価線形化係数である。

一方、EP、NV ダンパーの高さ方向の分布式は、フレームの各層の層間変位応答の一様性を仮定し、次式のように表現する。

$$k'_{di} = \bar{k}'_d A_i \lambda_i = \beta k_1 A_i \lambda_i \quad (6)$$

$$c'_{di} = \bar{c}'_d A_i \lambda_i \quad (7)$$

ここで、 $\bar{k}'_d, \bar{c}'_d, A_i, \lambda_i, k_1, \beta$ は夫々、EP、NV ダンパーの第 1 層目の剛性、粘性減衰係数、新耐震規準に基づく A_i 分布、重量比 ($= \sum_{j=1}^n w_j / \sum_{j=1}^n w_j$)、フレームの第 1 層目の剛性、フレームの剛性に対する EP ダンパーの剛性比を表す。

次に、ランダム地震入力 f を受ける複合制震系の任意 i 層において、等価線形化された運動方程式は、図 2 を参考にすると次式のように与えられる。

i 層：

$$\left. \begin{aligned} m_i(\ddot{u}_i + \dots + \ddot{u}_i) + c_i \dot{u}_i - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} + (1 - D_i) \cdot c'_{di} \phi_i - (1 - D_{i+1}) k'_{d_{i+1}} \phi_{i+1} \\ + r_1 k_i u_i - r_{i+1} k_{i+1} u_{i+1} + (1 - r_1) k_i g_{li} - (1 - r_{i+1}) k_{i+1} g_{li+1} \\ + D_i \cdot k'_{di} g'_{li} - D_{i+1} \cdot k'_{d_{i+1}} g'_{li+1} = -m_i f \\ \dot{y}_i = g_{2i} = c_{3i} \dot{u}_i + c_{4i} y_i, \quad y'_i = g'_{2i} = c'_{3i} \dot{u}_i + c'_{4i} y'_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$f = \ddot{z} + \ddot{w} : \ddot{z} + 2h_g \omega_g \dot{z} + \omega_g^2 z = -\ddot{w} \quad (9)$$

(8)、(9)式を一般的なマトリクス形式で表現すると次式となる。

$$\begin{aligned} \{\ddot{u}\} + [\tilde{c}] + [\tilde{c}'_d][c_5] + [\tilde{k}][c_1] + [\tilde{k}'_d][c'_1] \{\dot{u}\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}']\{c_2\}\{y\} \\ + [\tilde{k}'_d][c'_2]\{y'\} = -\{f\} \end{aligned}$$

$$\{\dot{y}\} = [c_3]\{\dot{u}\} + [c_4]\{y\}$$

$$\{\dot{y}'\} = [c'_3]\{\dot{u}\} + [c'_4]\{y'\}$$

(10)

ここで、 $\{u\}, \{y\}, \{y'\}$ は、フレームの層間変位及びフレーム、EP ダンパーの非線形バネの層間変位ベクトルで、 $[\tilde{c}], [\tilde{k}]$ はフレームの粘性減衰、剛性に関するマトリクスである。 $[\tilde{k}'], [\tilde{k}'_d], [\tilde{c}'_d]$ はフレーム、EP ダンパーの塑性剛性と NV ダンパーの非線形粘性減衰に関するマトリクスで、また、 $[c_i], [c'_i] (i=1 \sim 4)$ は、フレーム、EP ダンパーに関する等価線形化係数、 $\{1\}$ 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。

状態変数として、 $\{U\}^T = \{\{u\}, \{\dot{u}\}, \{y\}, \{y'\}, z, \dot{z}\}^T$ を選ぶと、(9)、(10)の運動方程式は次の 1 階常微分方程式で書換えられる。

$$\frac{d}{dt} \{U\} = [a]\{U\} + \{b\}\ddot{w} \Leftrightarrow \dot{U}_j = \sum_{i=1}^{\tilde{n}} a_{ji} U_i + b_j \ddot{w} \quad (11)$$

ここで、 $\tilde{n} (= 4n + 2)$ 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、

系の剛性、粘性減衰及び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。

(11)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、次の常微分方程式の解として与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{ij} &= \sum_{l=1}^{\tilde{n}} (a_{il} m_{lj} + a_{jl} m_{li}); i=1 \sim \tilde{n}-1, j=i \sim \tilde{n} \\ m_{\tilde{n}\tilde{n}} &= \left(\sigma_f^2 - 4h_g \omega_g^3 m_{\tilde{n}-1\tilde{n}} - \omega_g^4 m_{\tilde{n}-1\tilde{n}-1} \right) / 4h_g^2 \omega_g^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

また、定常確率過程の場合、 $\dot{m}_{ij} = 0$ となり、 $m_{ij} = M_j$ 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。

$$[A]\{M\} = \{B\}\sigma_f^2 \quad (13)$$

ここで、助変数: $J = (i-1)(\tilde{n}-i/2) + j$, $N = (\tilde{n}-1)(\tilde{n}-2)/2$ であり、(13)式中の $[A]$ は(12)式の $[a]$ マトリクスで書き表され、 $\{B\}$ ベクトルは、(12)式中の $m_{\tilde{n}\tilde{n}}$ に関連するランダム入力パラメータ (ω_g, h_g) によって書き表される。

2-3 EPNV ダンパーの最適配分係数の評価

75cm/s 入力時において、EPNV ダンパー付きフレームの各階の最大層間変形角応答 $\theta_{i\max}$ を構造設計者が指定する応答量 ($\rho \cdot \bar{\theta}_{i\max}$) に一致させる EP ダンパーの最適降伏耐力レベル、NV ダンパーの最適粘性減衰係数及び夫々の最適配分量を推定するために、次のような目的関数 J_s を定義する。

$$J_s = \sum_{i=1}^n (\theta_{i\max} / \rho \cdot \bar{\theta}_{i\max} - 1)^2 \quad (14)$$

ここで、(14)式の $\bar{\theta}_{i\max} \cdot \rho$ は、夫々 75cm/s 入力時のフレームのみの各層の最大層間変形角応答、性能要求係数を表し、 $\theta_{i\max}$ は(13)式に示す定常確率過程での 2 次モーメント応答 m_{ij} を用いて近似的に算出する。本論では、地震入力の最大速度として 75cm/s を採用している。これは、国土交通省告示 1461 号に該当する「極めて稀に発生する地震動」である。

次に、その最大層間変形角応答 $\theta_{i\max}$ の算出方法を簡単に説明する。

$\theta_{i\max}$ は次式の様定義される。

$$\theta_{i\max} = u_{i\max} / H_i \quad (15)$$

ここで、 $u_{i\max}$, H_i は任意 i 層の最大層間変位応答、構造階高である。

非定常変位応答過程の超過確率分布が Poisson 分布で、また変位、速度応答の同時確率分布が 2 次元の Gaussian 分布で近似できると仮定すれば、地震動の継続時間中に閾値 $u_{i\max}$ を超える確率 $P_i(t_d)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} P_i(t_d) &= 2 \int_0^{t_d} v_{u_{i\max}}^+(t) dt = 1.0 \\ v_{u_{i\max}}^+ &= v_0^+(t) \exp\left(-\frac{u_{i\max}^2}{2\sigma_{u_i}^2}\right) \cdot \left[\exp(-\gamma_i^2) + \gamma_i \sqrt{\pi} \{1 + \text{erf}(\gamma_i)\} \right] \\ v_0^+ &= \frac{\sigma_{\dot{u}_i}}{2\pi\sigma_{u_i}} \sqrt{1-\rho_i^2}, \gamma = \frac{u_{i\max} \cdot \rho_i}{\sigma_{u_i} \sqrt{2(1-\rho_i^2)}}, \rho_i = \frac{\sigma_{u_i} \dot{u}_i}{\sigma_{u_i} \sigma_{\dot{u}_i}} \end{aligned} \quad (16)$$

一方、定常確率過程下では、(16)式中の $\rho_i = \gamma_i = 0$ となり、複合制震系の任意 i 層の最大変位応答 $u_{i\max}$ は、(16)式より次式のようになる。

$$u_{i\max} \cong \sigma_{u_i} \sqrt{2 \log_e \left(\frac{t_d \sigma_{\dot{u}_i}}{\pi \sigma_{u_i}} \right)} \quad (17)$$

ここで、 σ_{u_i} , $\sigma_{\dot{u}_i}$, t_d は複合制震系の i 層の変位、速度応答の標準偏差とランダム入力の継続時間である。

3. 解析パラメータ

3-1 地震入力モデル

地震入力モデルは、前報 1) に示した内陸型ランダム地震入力モデルの 3 種類のパラメータである。表 1 は、その 3 種類のパラメータ (σ_f, ω_g, h_g) の平均値を示している。ただし、地震入力の振幅包絡線関数 σ_f の平均値は、最大速度 75cm/s に基準化した値で算出している。

表 1 非定常ランダム入力モデルの平均値

地震動名	σ_f (cm/s ²)	ω_g (rad/s)	h_g	継続時間 t_d (s)
神戸型	679.5/3	12.90	0.300	15.0
新潟県中越型	880.2/3	16.24	0.400	23.4
福岡県西方型	344.9/3	15.41	0.468	14.9
能登半島型	1435.7/3	33.66	0.491	14.6

3-2 構造物モデル

構造物モデルは夫々、12 質点系モデルを想定し、複合制震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主体構造物(以下、フレーム)は、12 質点系モデルで、1 次固有周期 T_1 は、表 1 に示す 1995 年の兵庫県南部地震、2004 年の新潟県中越地震での卓越周期を考慮して 1.2 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 $r_1 = 0.5$ とする。構造階高、質

表 2 フレームの剛性

階	層剛性 (kN/cm)
12	6041.2
11	9578.2
10	12544.4
9	15123.5
8	17386.5
7	19370.0
6	21095.7
5	22577.6
4	23825.6
3	24846.8
2	25646.6
1	26229.2

量は夫々400(cm)、1250(t)で各層一様とする。表2は、フレームの層剛性を示している。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複合制震部材である EP ダンパーの降伏耐力レベル α の初期値は0.15、とし、EP ダンパーの剛性比 β は、既往の研究⁸⁾及び配分係数Dを考慮し5.0とする。NVダンパーの粘性減衰係数 c'_{dl} の初期値は800 kNs/cmとし、ダンパーのリリーフ速度 \dot{u}_{icr} は10cm/sとする。また、各ダンパーに与える配分係数Dは0.0~1.0とする。

4. 解析結果

4-1 EPNV ダンパーの最適配分係数の評価

筆者は、既往の研究⁸⁾、⁹⁾において、直列型制震ダンパーを有する構造物及び免震層に鉛入り積層ゴムと非線形粘性ダンパーを有する構造物の最適設計について、定常ランダム応答解析に基づき論じている。一般に、地震動のランダム性を考慮し非定常応答解析による構造物の最適設計を論じることが望ましいが、文献⁹⁾において、非定常過程と定常過程で得られた鋼棒ダンパーと非線形粘性ダンパーの最適解に殆ど差異がないことを確認している。以上より、本論では、EPNV ダンパーの最適配分設計を定常ランダム応答解析に基づいて論じたいと思う。

図3には、入力地震動を表1に示した神戸型、中越型ランダム入力モデルとし、75cm/s入力時のフレームのみのランダム地震応答解析を実施し、各層の最大層間変形角が描かれている。

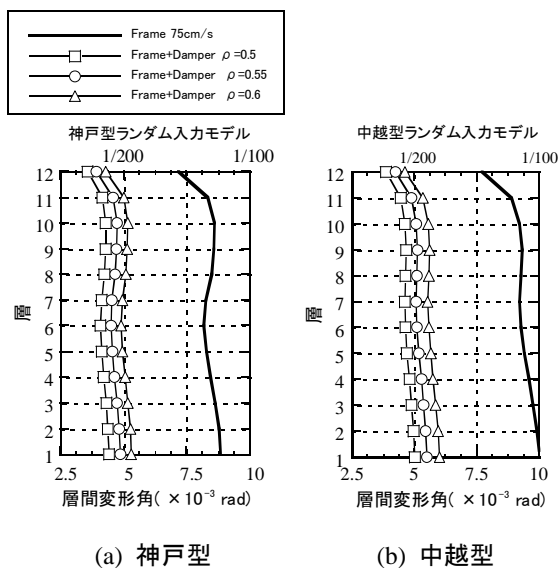


図3 75cm/s 時の性能要求応答値

図中には、その最大層間変形角応答に(14)式に示した性能要求係数 $\rho=0.5, 0.55, 0.6$ を乗じた性能要求応答値が描かれている。ここで、 $\rho=0.5, 0.55, 0.6$ は夫々37.5、41.25、45cm/s時相当の応答値に一致させる要求係数である。

図4には、EPダンパーの降伏耐力レベルの初期値 α を0.15、NVダンパーの粘性減衰係数の初期値 c'_{dl} を800 kNs/cmとした場合において、各要素への配分係数Dを0.0~1.0まで0.02刻みに変動させ、図2に示した性能要求係数 $\rho=0.5, 0.55, 0.6$ の最大層間変形角分布に一致させるように、(14)式で計算した目的関数 J_s が描かれている。ここで図中の横軸はEPD、NVDへの配分係数を示しているが、D=0の場合はNVD付きフレーム、D=1.0の場合はEPD付きフレームを意味する。

図4より、目的関数 J_s はDの変動に対して鋭敏であり、 J_s を最小にする最適配分係数 D_{opt} が存在し、性能要求係数 $\rho=0.5\sim 0.6$ に移行するにつれて、EPダンパーの最適配分係数 D_{opt} は低下することが判る。これは、系全体の応答を弾性域($\rho=0.5, 0.55$)に留める場合、EPダンパーの履歴減衰の占める割合が高く、最適配分係数で0.48~0.72となっているが、性能要求係数が $\rho=0.6$ の場合は、NVダンパーの粘性減衰の占める割合が高いと思われる。

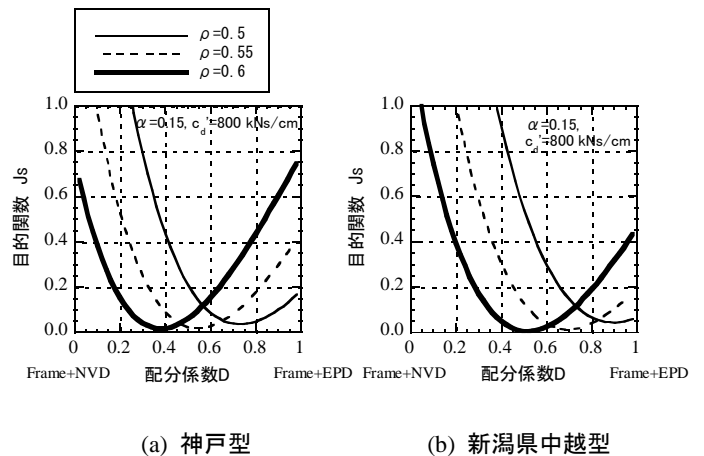


図4 EPD,NVDへの配分係数に対する目的関数

次に、表3、図5には、図4の解析結果を基に性能要求係数 ρ に対するEPダンパーの最適降伏耐力レベル α'_{opt} 、NVダンパーの最適粘性減衰係数 c'_{dopt} を示している。表3、図5より、性能要求係数 ρ が0.5~0.6に移行するにつれて、EPダンパーの実降伏耐力は減少し、NVダンパーの実粘性減衰力は増加することが判る。また、中越型での最適配分係数は、神戸型のそれより、やや大きくなると言える。

表 3 最適配分係数と各ダンパーの最適解

ρ	神戸型			中越型		
	D_{opt}	α'_{opt}	c'_{dopt}	D_{opt}	α'_{opt}	c'_{dopt}
0.50	0.72	0.108	224	0.90	0.135	80
0.55	0.54	0.081	368	0.70	0.105	240
0.60	0.38	0.057	496	0.52	0.078	384

c'_{dopt} の単位: (kNs/cm)

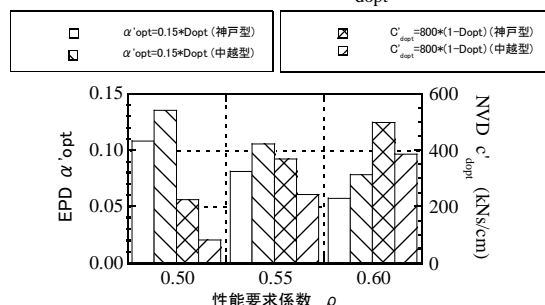


図 5 EPNVD の最適降伏耐力と最適粘性減衰係数

4-2 ランダム入力モデルの違いが複合制震系の最大変位応答角分布に及ぼす影響

制震構造物を実際に設計する場合、1章で述べたように入力地震動特性の影響により、構造物の応答にばらつきが生じる。確率論的地震応答解析の場合、地震動特性による応答のバラツキは確定論的のそれに比べ小さいことが既往の研究^{5),9)}で明らかになっている。本節では、神戸型ランダム入力モデルで得られた最適解を他の3つのランダム入力モデルに適用した場合の各層の最大変位応答が図3に示す性能要求応答値に一致することを確認する。

図6には、表3に示した $\rho=0.5$ の場合のEPDの最適降伏耐力レベルを $\alpha_{opt}=0.108$ 、NVDの最適粘性減衰係数を $c'_{dopt}=224$ kNs/cm (最適配分係数 $D_{opt}=0.72$)とし、神戸型以外の表1に示した3種類の内陸型ランダム入力モデルを入力した場合の系全体の最大層間変形角が描かれている。

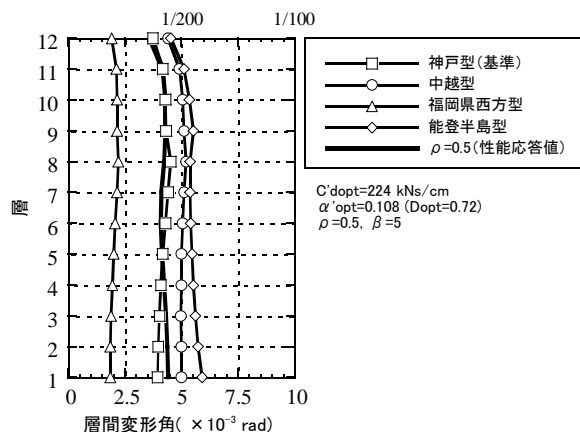


図 6 神戸型を基準とした場合の各ランダム入力モデルでの応答比較

図6より、神戸型の各層の層間変形角は性能要求係数の場合のそれにほぼ一致しており、また、中越型、能登半島型の場合、神戸型より若干大きくなっているが、最大層間変形角は1/200程度に留まっていることが判る。神戸型ランダム入力モデルで得られた最適パラメータを基準として、他のランダム入力に適用しているために、福岡県西方型入力では、各層の最大層間変形角が小さくなっていることが判る。

5. 結語

本論では、弾塑性・非線形粘性並列型ダンパーを有する複合制震構造物の最適配分設計について確率論的応答解析の立場から論じた。本論の解析結果から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) EPダンパーの降伏耐力、NVダンパーの粘性減衰係数の初期値に任意に配分係数を与えることにより、構造設計者が規定する性能要求性能に一致させる最適配分係数 D_{opt} を決定することができる。
- (2) 神戸型、中越型ランダム入力モデルに対するEPダンパーの最適配分係数 D_{opt} は性能要求係数 ρ によって異なるが、 $\rho=0.5$ の場合、0.72~0.9程度、 $\rho=0.6$ の場合、0.38~0.52程度である。 $\rho=0.5$ の場合、つまり地震動の最大速度37.5cm/sの応答値に一致させる場合は、EPダンパーに負担する割合が高く、 $\rho=0.6$ の場合、つまり、その最大速度45cm/sの応答値に一致させる場合は、NVダンパーに負担される割合が高い。

なお、対象となる構造物の層数(固有周期)の変動、長周期ランダム入力モデルに対する複合制震ダンパーの最適配分設計については、稿を改めて論じたいと思う。

謝辞

本論で採用しました新潟県中越、福岡県西方沖、能登半島地震での観測記録は、独立行政法人防災科学技術研究所(K-NET)より使用させて頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川肇: K-NETを用いた地震観測記録に基づく非定常ランダムモデルの構築、明石高専研究紀要、第51号、pp.39~44、(2008)

- 2) 笠井和彦ほか：粘弾性体と弾塑性体の直列結合からなるパッシブ制振装置の挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、pp.51～58、(2002)
- 3) 仁平瑛士、北嶋圭二、安達洋ほか：遺伝子アルゴリズムに基づくパッシブエネルギー吸収部材の最適配置に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) B-2、pp.1063～1064、(2005)
- 4) 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)
- 5) 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報告集、第 400 号、pp.123～130、(1989)
- 6) 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.II, pp.781～797 (1960)
- 7) 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報告集、第 335 号、pp.10～14、(1984)
- 8) 中川肇：弾塑性・粘弾性直列型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、構造工学論文集、第 50B、pp.617～625、(2004)
- 9) 中川肇、浅野幸一郎：地震信頼性解析に基づく非線形粘性ダンパーを有する免震構造物の性能設計について、日本建築学会構造系論文集、第 601 号、pp.61～67、(2006)