

想定南海トラフ地震を受ける Hybrid 制震構造物の 応答低減効果について

中川 肇*

Response Reduction Effect of Hybrid Passive Controlled Buildings Under Simulated Nankai Trough Earthquake

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

The severe earthquakes such as the 2003 Tokachi offshore, the 2004 Kii peninsula southeast offshore and the 2011 off Pacific coast of Tohoku earthquakes are happened after the 1995 southern of Hyogo prefecture earthquake. The predominant periods of these long period earthquake ground motions are from 3 sec to 11 sec. As you can see, the probability of Nankai Trough earthquake which is occurred from 2030 to 2035 is about 70 %. It's said to be in resonance with the natural period of passive controlled buildings or base isolated buildings and the predominant period of this earthquake.

As a way of avoiding the resonance phenomenon, we'd like to discuss the seismic response reduction effect of Hybrid passive controlled building under the simulated Nankai Trough earthquake. The simulated earthquake waves assume the Hoei or Ansei-Tokai earthquake fault models. Hybrid passive dampers of this paper assume elasto-plastic damper and viscous damper

According to an analytical result, as a distribution coefficient of two passive controlled dampers, if this coefficient is given 0.4 or 0.6 respectively, the maximum displacement response of Hybrid passive controlled model become less than about 2cm of 1/200 (so-called inter-story deformation angle) and the acceleration response is as almost same as the unit passive controlled model with viscous damper.

KEY WORDS: Hybrid passive controlled buildings, Simulated Nankai trough earthquake, Tokachi offshore earthquake, Elasto-plastic damper, Viscous damper

1. はじめに

2003年の十勝沖地震以後、2004年の紀伊半島南東沖地震、2011年の東北地方太平洋沖地震では、長周期地震動が観測されている¹⁾。制震・免震構造物に長周期地震動が入力された場合、制震ダンパーによる主体構造物の応答低減効果があまり得られず、また免震装置に過大変形が生じる可能性がある。

既往の研究として、大川等が、南海トラフ連動地震に対する「超高層建築物への長周期地震動の影響に対する検討」²⁾を実施している。

単体制震ダンパー及び複合制震ダンパーに関する研究は、これまで数多くなされている^{3)~8)}。

例えば、文献4)では、谷らが、国土交通省告示

波 (El Centro, Taft, Hachinohe) を受ける建物の1次固有周期1.5秒、1.8秒、2.1秒の高層建物に対し履歴系及び粘性ダンパーを併用した場合における最適ダンパーの組み合わせを解析的に検討している。解析結果より層間変形角に対する最適な組合せが存在するが、1次固有周期の違いによって、最適な組合せが異なることを示している。

文献5)では、添田らが、超高層鋼構造建物に対し履歴ダンパーと粘性ダンパーを直列連層配置した場合の各ダンパーによる応答低減効果について検討している。入力地震動を人工地震波ART (HACHINOHE, KOBE, TOMAKOMAI)としている。

解析結果より、直列配置するために履歴ダンパーと粘性ダンパーの境界において、層間変位応答にギャップ(ずれ)が生じる。粘性ダンパーによる変位

*建築学科

応答低減効果は履歴ダンパーのそれより低いことを指摘している。既往の研究において、南海トラフ模擬地震及び十勝沖地震などの長周期地震動を受ける複合制震ダンパーを有する超高層構造物の応答低減効果について、検討している事例は少ない。

本論では、南海トラフ地震を想定した模擬地震動及び十勝沖地震 K-NET 苫小牧 NS 波 (2003) を受ける Hybrid 制震構造物の応答低減効果について検討する。また、長周期地震動に対し、粘性ダンパーによる応答低減効果が実際にあるのかを検証する。さらに 2 種類の制震ダンパーを複合することで、Hybrid 制震ダンパーの有効性を示したいと考えている。

2. Hybrid 制震構造物の地震応答解析法

2.1 解析モデルと入力地震動モデル

本論では、鉄骨造 40 階建ての事務所ビル (床面積 2,268m²) において、各階に弾塑性ダンパーと粘性ダンパー (以下、EP ダンパー、V ダンパー) の複合ダンパーを設置し、Hybrid 制震構造物を考える。EP ダンパーの荷重・変形関係は、完全弾塑性型、V ダンパーの荷重・速度関係は線形とする。

図 1 には、任意 i 層の Hybrid 制震構造モデル (等価せん断型モデル) を示している。図中の $m_i, k_i, c_i, k_{di}, C_{di}$ は夫々、 i 層の質量、主体構造フレームの剛性と粘性減衰係数、EP ダンパーの初期剛性、V ダンパーの粘性減衰係数である。

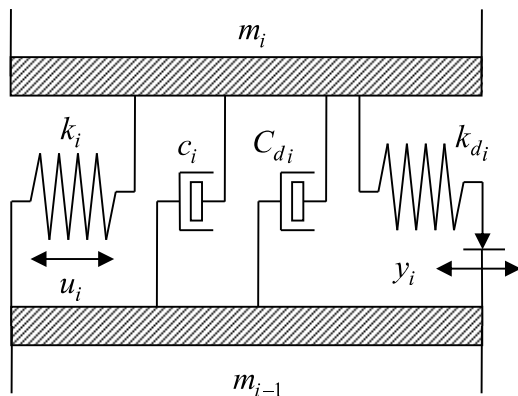


図 1 Hybrid 制震構造モデル(任意 i 層)

入力地震動モデルは、長周期地震動の観測波として、十勝沖地震 K-NET 苫小牧波 NS 成分、模擬地震動として、参考文献 2)、9)により作成した南海トラフ型模擬地震動 (以下、宝永南海地震、安政東海地

震) とする。宝永南海地震、安政東海地震は、夫々大阪市此花区、静岡県浜松市で作成された模擬波である。此花区、浜松市を選択した理由は、文献 9) において引用されている観測地であり、本論でも同様に選択した。また、夫々の地震動の最大速度を 75cm/s に基準化し、解析で用いる。入力地震動の最大速度 75cm/s としている理由は、国土交通省告示 1461 号の入力地震動に示されている「極めて稀に発生する地震動」の同程度と考え、解析に用いるためである。表 1 に、解析に用いる入力地震動の諸元を示す。

表 1 入力地震動の諸元

地震名	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	75cm/s 入力 (cm/s ²)
安政東海(浜松)	660.83	41.81	1185.42
宝永南海(此花)	63.75	38.99	122.63
十勝沖(苫小牧)	86.74	32.55	199.86

図 2 には、安政東海地震、宝永南海地震、十勝沖地震の速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を示している。図 2 より、安政東海地震の卓越周期は、2.5 ~ 3 秒、4 秒に現れ、宝永南海地震の卓越周期は 6 ~ 7 秒で、十勝沖地震 K-NET 苫小牧波の卓越周期は、3.5 秒、5.2 秒、7.2 秒である。安政東海地震、宝永南海地震、十勝沖地震は、長周期地震動であることが分かる。また宝永南海、安政東海地震は、十勝沖地震より、速度応答スペクトルの最大値が大きいのが特徴である。

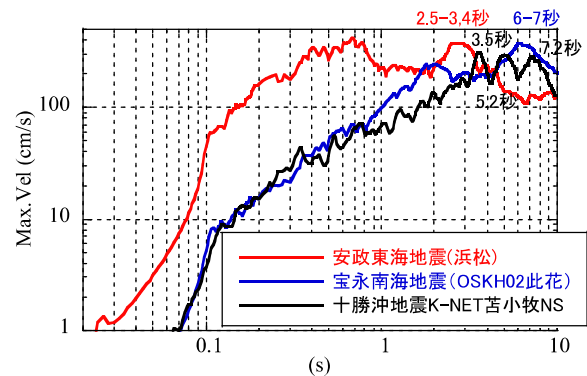


図 2 速度応答スペクトル

2.2 運動方程式と状態方程式の誘導

Hybrid 制震系モデルにおいて、図 1 を参考にし、任意 i 層の層間座標系の運動方程式は、次式のように表現できる。

$$\begin{aligned}
 m_i(\ddot{u}_i + \dots + \ddot{u}_i + \ddot{x}_g) + c_i\dot{u}_i - c_{i+1}\dot{u}_{i+1} + k_i u_i - k_{i+1}u_{i+1} \\
 k_{di}y_{i+1} - k_{d_{i+1}}y_{i+1} + C_{di}\dot{u}_i - C_{d_{i+1}}\dot{u}_{i+1} = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで、 $m_i, u_i, y_i, \ddot{x}_g$ は夫々*i*層の質量、層間変位、EPダンパーを構成するクーロン素子の層間変位、系の基盤に入力される加速度である。 k_{di}, C_{di} は夫々EPダンパーの初期剛性、Vダンパーの粘性減衰係数である。

また、EPダンパーに関連するクーロン素子の層間速度応答 \dot{y}_i は、次式のように表現できる。

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \operatorname{sgn}(y_i + \delta_i) - \operatorname{sgn}(y_i - \delta_i) - \operatorname{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{\operatorname{sgn}(y_i + \delta_i) + \operatorname{sgn}(y_i - \delta_i)\}] \quad (2)$$

(1)、(2)式をマトリクス形式で表現すると次式となる。

$\{\ddot{u}\} + [\tilde{c}] + [\tilde{C}_d]\{\dot{u}\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}_d]\{y\} = -\{1'\}\ddot{x}_g$ (3)
 ここで、 $\{u\}$ は層間変位応答ベクトル、 $[\tilde{c}][\tilde{k}][\tilde{k}_d][\tilde{C}_d]$ は夫々主体フレームの粘性減衰、剛性に関するマトリクス、EPダンパーの剛性マトリクス、Vダンパーの粘性減衰のマトリクス、 $\{1'\}$ は最下段エレメントのみが1、その他は0のベクトルである。

(2)、(3)式より、状態ベクトルとして、 $\{U\} = \{\{u\}, \{\dot{u}\}, \{y\}\}^T$ とおくと、Hybrid制震系モデルの状態方程式は、次式のように表現できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] & [0] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] - [\tilde{C}_d] & -[\tilde{k}_d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{1'\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (4)$$

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \operatorname{sgn}(y_i + \delta_i) - \operatorname{sgn}(y_i - \delta_i) - \operatorname{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{\operatorname{sgn}(y_i + \delta_i) + \operatorname{sgn}(y_i - \delta_i)\}] \quad (5)$$

なお、本論では、Hybrid制震系モデルの応答低減効果を検証するために、弾塑性ダンパー単体モデル、粘性ダンパー単体モデルの状態方程式は次式となる。

弾塑性ダンパー単体モデル：

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] - [\tilde{C}_d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{1'\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (6)$$

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \operatorname{sgn}(y_i + \delta_i) - \operatorname{sgn}(y_i - \delta_i) - \operatorname{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{\operatorname{sgn}(y_i + \delta_i) + \operatorname{sgn}(y_i - \delta_i)\}] \quad (7)$$

粘性ダンパー単体モデル：

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] - [\tilde{C}_d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{1'\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (8)$$

3. 解析結果

本論では、等価せん断系40質点の主体構造フレームの1次固有周期 T_1 、1次粘性減衰定数 h_1 を夫々4.0秒、0.02、Hybrid制震ダンパーを構成するEPダンパーの降伏変位 δ_i 、Vダンパーの粘性減衰係数 C_{di} は、夫々次式のように定義する。ただし、各階の重量 W_i は一定で、12,474kNとする。

$$\delta_i = \frac{\rho \cdot \alpha_{ep} \sum W_j}{k_{di}}, \quad C_{di} = (1 - \rho) \cdot C_{d1} \cdot A_i \alpha_i \quad (9)$$

ここで、 $\rho, \alpha_{ep}, k_{di}, A_i, \alpha_i$ はHybridダンパーの配分係数、EPダンパーの降伏強度レベルと初期剛性、主体構造フレームの剛性に関する高さ方向の分布係数、重量比である。

3.1 安政東海地震を受ける単体制震系モデルの応答低減効果

図3には、入力地震動として安政東海地震（浜松波）を選択し、EPダンパー或はVダンパーを有する単体制震系モデルに対し、夫々EPダンパーの降伏強度レベル α_{ep} を0.02~0.1、Vダンパーの粘性減衰係数 C_{di} を200~1000kNs/cmまで変動させた時に得られた各層の最大層間変位応答 $u_{i\max}$ が描かれている。図3より、EPダンパー単独モデルの場合、ダンパーの降伏強度レベル α_{ep} が0.06以上になると概ね層間変形角1/200（2cm程度）つまり弾性域内に留めることが可能である。一方、Vダンパー単独モデルの場合、安政東海地震モデルでは、層間変位応答の応答低減効果が見られない。

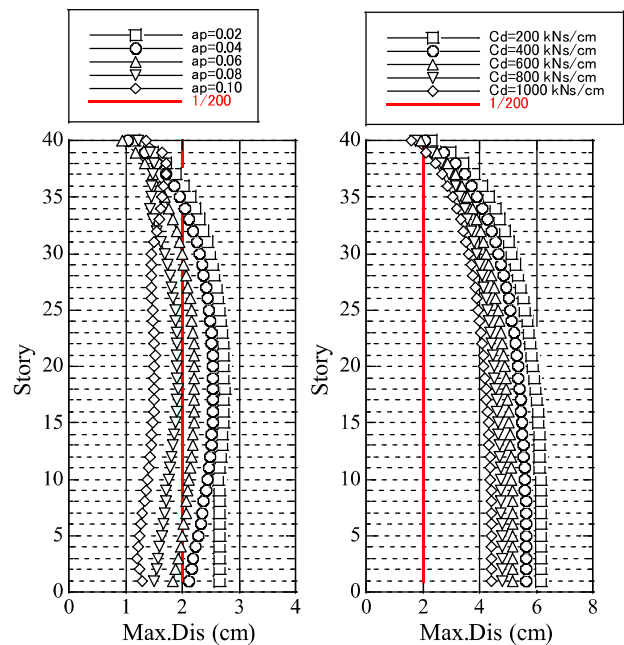


図3 単体制震系モデルの地震応答特性

この原因として、一般に粘性ダンパーが速度依存性の大きいダンパーの一つで、長周期地震動のようにゆっくり振動する地震動では、その効果はあまり得られないと考えている。

3・2 安政東海地震を受ける Hybrid 制震系モデルの応答低減効果

本節では、図3の結果を参考にし、Hybridダンパーの初期値として、EPダンパーの降伏強度レベル α_{ep} を0.08、Vダンパーの粘性減衰係数 C_{d1} を800kNs/cmとする。図4には、EPダンパー、Vダンパー単独系モデル、夫々の配分係数 ρ を0.2~0.8のHybrid制震系モデルの任意i層の最大層間変位応答 $u_{i,max}$ 、絶対加速度応答 $\alpha_{i,max}$ が描かれている。

図4より、Hybrid制震系モデルの配分係数 ρ を0.2~0.8に増加させるつまりEPダンパーの配分を増加させることにより、層間変位応答を低減させることができる。概ね、配分係数 ρ が0.4以上で概ね層間変形角1/200(2cm程度)となる。一方、絶対加速度応答の結果を見ると、EPダンパー単独の場合、層間変位応答は低減できるが、加速度応答が逆に大きくなるのが分かる。しかし、Hybrid制震系モデル系を適用することで、配分係数 ρ が0.4或は0.6以上でVダンパー単独系モデルの絶対加速度応答と同等となるのが分かる。

よって、本論で取り扱う長周期模擬地震動に対し、Hybrid制震系モデルでは、層間変位応答、絶対加速度応答を効果的に低減することができる。

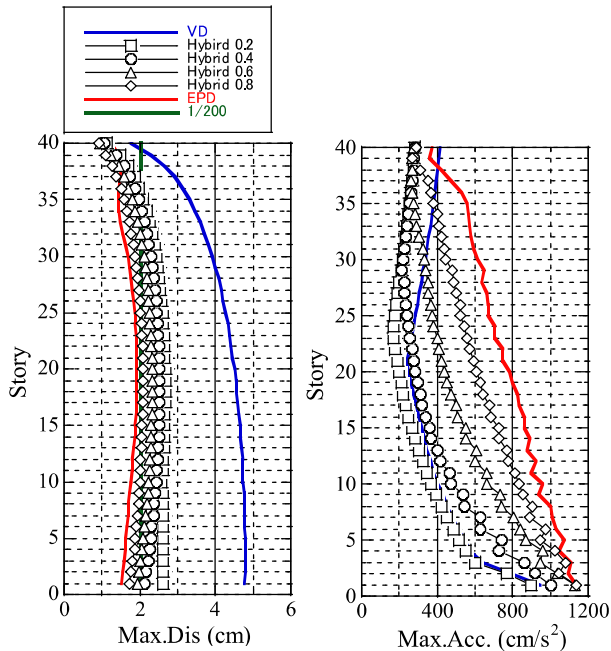


図4 単独制震系 (EPD, VD)、Hybrid制震系モデルの地震応答特性

3・3 宝永南海地震及び十勝沖地震を受ける Hybrid 制震系モデルの応答低減効果の検証

本節では、前節で得られた Hybrid 制震系モデルにおいて、他の2つの長周期地震動に対し、応答低減効果が得られるかを検証する。

図5、6には、図4で得られた配分係数 $\rho=0.4$ の場合、宝永南海地震(此花波)及び十勝沖地(K-Net 苫小牧波 NS)に対する任意i層の最大層間変位応答 $u_{i,max}$ 及び絶対加速度 $\alpha_{i,max}$ 応答が描かれている。

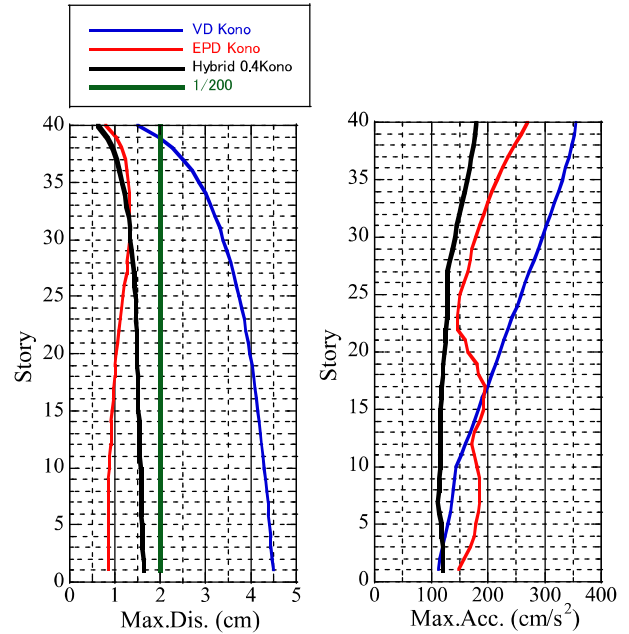


図5 宝永南海地震に対する検証結果

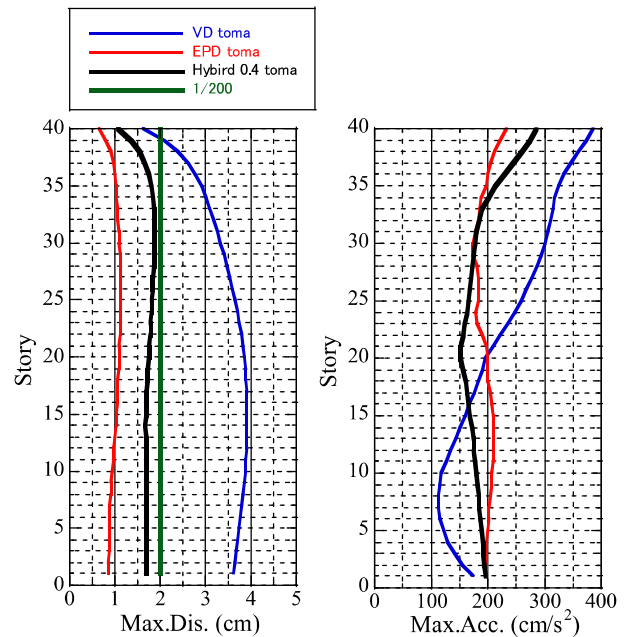


図6 十勝沖地震に対する検証結果

図 5、6 より、Hybrid 制震構造を適用することで層間変位応答では、概ね層間変形角 1/200 以内、絶対加速度応答は単独制震系モデルと同等かそれ以下となっていることが分かる。しかし、図 6 の右図において、十勝沖地震における粘性ダンパー単体系の絶対加速度応答は、14 層まで Hybrid 制震系モデルより低減していることが分かる。これについては、今後、さらに検討を続けたい。

4. まとめ

1995 年の兵庫県南部地震以後、日本は地震活動期に入り、2003 年の十勝沖地震以後、日本各地で長周期地震動が観測されている。

本論では、想定南海トラフ模擬地震動及び十勝沖地震動を受ける Hybrid 制震構造物の応答低減効果及び複合ダンパーの適合性について論じた。

解析結果から得られた工学的な知見は以下の通りである。

- (1) 40 層等価せん断系モデルにおいて、弾塑性ダンパー、粘性ダンパーのみの構造物において、弾塑性ダンパーは、層間変位応答の低減効果を示すが、絶対加速度応答の低減に効果を示さない。一方、粘性ダンパーは、弾塑性ダンパーの逆の効果を示した。
- (2) 弾塑性・粘性ダンパーを複合させた Hybrid 系ダンパーにおいて、夫々のダンパーの初期値を $\alpha_{ep}=0.08$ 、 $C_{d1}=800$ kNs/cm とし、配分係数 $\rho=0.4$ とすると最大層間変位応答は、全層に亘り 2cm (層間変形角 1/200) 程度、絶対加速度応答は粘性ダンパーのみの結果とほぼ一致した。Hybrid 制震ダンパー系モデルは、長周期地震に適用可能である。
- (3) 宝永南海模擬地震モデル及び十勝沖地震に対し、(2)で得られた Hybrid 制震ダンパー系モデルは、その有効性を十分に発揮している。

参考文献

- 1) (独) 防災科学研究所：地震観測システム K-NET、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin>
- 2) 大川出ほか：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討、建築研究所-研究資料 No.144、147、(2013)
- 3) 平川雅章ほか：各種ダンパーを用いた制振構造の応答性状に関する研究その 1～3、日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国)、565～570 頁、(2008)
- 4) 谷翼ほか：高層建物における履歴系・粘性系ダンパーの最適組合せに関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)、573～574 頁、(2010)
- 5) 添田幸平：履歴ダンパーと粘性ダンパーを直列連層配置した超高層鋼構造建物の応答予測、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海)、909～910 頁、(2012)
- 6) 岩崎雄一：粘性制震壁の配置位置及び設置タイプを考慮した超高層建物の性能評価その 1～2、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海)、911～914 頁、(2012)
- 7) 和田大典ほか：粘性系ダンパーを有する超高層建物の動的応答性能、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)、903～904 頁、(2013)
- 8) 加藤翼ほか：下層部分配置した履歴型・粘性型ダンパーの実効変形比・等価繰返し数に着目したエネルギー吸収能力の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)、781～782 頁、(2015)
- 9) ㈱構造計画研究所：模擬・長周期地震波作成プログラム ARTEQ for Windows Ver. 6.1、ARTEQ-LP for Windows Ver.2.1