

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	吸収エネルギーに着目した超高層建物の制振性能評価手法の検討 - ダンパー配置の違いが制振効果に与える影響 - 形の簡易評価
Title	
著者(和文)	古谷慶, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Mitsuru MIYAZAKI, Kazuhiko Sasaki, IWASAKI Yuichi
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2041
Citation(English)	, Vol. 83, , 2041
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769787

吸収エネルギーに着目した超高層建物の制振性能評価手法の検討 — ダンパー配置の違いが制振効果に与える影響 —

構造—振動

正会員 ○ 古谷慶^{*1} 同 佐藤大樹^{*1} 同 北村春幸^{*1}
同 石井正人^{*2} 同 吉江慶祐^{*2} 同 宮崎充^{*3}
同 佐々木和彦^{*3} 同 岩崎雄一^{*}

制振構造 履歴ダンパー エネルギーの釣合

吸収エネルギー 層せん断力係数 ダンパー配置

1. はじめに

超高層建物は、曲げ変形が卓越しやすいため、ダンパーを有効に稼働させるせん断変形が小さくなり、制振効果が低下する。筆者ら¹⁾は、層間変形に対するせん断変形の比（以後、実効変形比）に着目した検討を行い、実効変形比がダンパー配置やダンパー量により変動し、制振効果の優劣に影響することを確認した。また、実効変形比の予測式を提案し、部材レベルモデルによる時刻歴応答解析を用いずに、有効なダンパー配置の判断が出来ることを示した。しかし、実効変形比のみでは層間変形角や層せん断力、ダンパーのエネルギー吸収効率にどの程度の差があるのかを捉えることが難しい。

本報では、石井・笠井²⁾により報告された骨組特性値を用いた簡易モデルに対し、エネルギーの釣合に基づく応答予測法^{3,4)}を適用した制振効果の評価手法を提案し、ダンパー配置の違いによる応答値の差異を捉える。また、30階鋼構造建物¹⁾を用いた検証を行う。

2. 目標層間変形に対する評価指標の概要

本評価手法は、骨組特性値²⁾を用いたせん断モデルに対し、設定した層間変形（以後、目標層間変形）を与えた際の建物が吸収し得るエネルギー量および層せん断力を用い、制振効果の傾向を捉えるものである。

2.1 骨組特性値²⁾を用いたせん断モデルの作成

評価指標の算出に用いるせん断モデルは、骨組特性値を用いた手法²⁾を用い作成する。図1に示すように主架構を表す擬似フレームと付加系部を表す擬似ダンパーおよび擬似ブレースで構成される。骨組特性値 α_N および K_{dR} は、主架構のみの弾性部材モデル（状態Nモデル）と制振部材設置位置に剛性が極端に大きい弾性バネを挿入した（状態Rモデル）2ケースの静的解析結果を用いた次式から得られる²⁾。静的解析時の荷重分布はAi分布に基づくものとする。

$$\alpha_N = \frac{\delta_{dN}}{\delta_{Ni}}, K_{dR} = \frac{F_{dR}}{\delta_R}, K_{bs} = \alpha_N \cdot K_{dR} \quad (1a,b,c)$$

ここで、 δ_d ：制振部材設置箇所の相対変形の水平成分、 δ ：層間変形、 F_d ：の制振部材設置箇所の弾性バネが負担する軸力の水平成分である。また、右下の添え字NおよびRは、状態Nモデルおよび

状態Rモデルによる計算値であることを示す。

図1より、部材レベルモデルとせん断モデルとの対応関係を示す。式(2)より、 α_N を用いて、部材レベルモデルのダンパーの軸変形の水平成分 δ_d 、軸力の水平成分 F_d および剛性の水平成分 K_d を、せん断モデルのダンパーの変位 δ_s 、軸力 F_s および剛性 K_s に変換出来る。添え字のsはせん断モデルの諸元および応答値を示す。

$$\delta_d = \alpha_N \cdot \delta_s, F_d = \frac{F_{ds}}{\alpha_N}, K_d = \frac{K_{ds}}{\alpha_N^2} \quad (2a,b,c)$$

以上より、部材レベルモデルからせん断モデルを作成する。

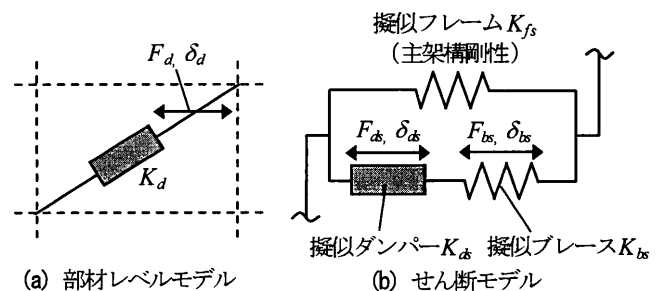


図1 部材レベルモデルとせん断モデルの対応関係

2.2 評価指標の算出フローの概要

評価指標の算出フローの概要を以下に示す。

与条件：目標最大層間変形およびダンパー量を設定する。

- 1) 主架構モデル（弾性モデル）に対して、外力分布をAi分布と仮定した層せん断力を作用させ、層間変形の高さ方向分布を算出する。
- 2) 1)の層間変形の高さ方向分布において、最大値を取る層の層間変形を設定した目標最大層間変形となるようにし、分布形状に沿うように他層の目標層間変形を算出する。
- 3) 目標層間変形に対する評価指標（2.3, 2.4節）を算出する。

2.3 建物が吸収し得るエネルギー量

弾性挙動を仮定した際の制振構造に適用されるエネルギーの釣合式^{3,4)}は次式で表される。

$${}_f W_{es} + {}_a W_{es} + {}_a W_{ps} = E_s - {}_f W_{ds} = E_{Ds} \quad (3)$$

ここで、 ${}_f W_{es}$ ：主架構が蓄える弾性振動エネルギー、 ${}_a W_{es}$ ：付加系が蓄える弾性振動エネルギー、 ${}_a W_{ps}$ ：付加系が消費する累積塑性

歪みエネルギー、 E_s : 入力された総エネルギー量、 fW_{α} : 主架構の減衰により消費するエネルギー、 E_{Ds} : 損傷に寄与するエネルギー入力量である。擬似ダンパーと擬似ブレースを合わせた部分を付加系と呼び、添え字を a とする。

また、累積値に係わるエネルギーの釣合式は、地震終了時刻に弾性振動エネルギーが $fW_{\alpha} = aW_{\alpha} = 0$ となることから次式で表される。

$$aW_{ps} = E_{Ds} \quad (4)$$

E_{Ds} は、次式で求められる。

$$E_{Ds} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{Ds}^2 \quad (5)$$

ここで、 M : 架構の総質量、 V_{Ds} : E_{Ds} の速度換算値である。

一方で、建物が吸収し得るエネルギー W_{Ds} は、式(4)より、次式のような形で表すことが出来る。

$$W_{Ds} = aW_{ps} \quad (6)$$

aW_{ps} は次式で与えられる。

$$aW_{ps} = \sum_{i=1}^N aW_{psi} = \sum_{i=1}^N \left\{ 4 \cdot a n_{eq} \cdot a Q_{ysi} \cdot (\delta_{si} - a \delta_{ysi}) \right\} \quad (7)$$

ここで、

$$a Q_{ysi} = \alpha_{Ni} \cdot d Q_{ysi}, \quad a \delta_{ysi} = a Q_{ysi} / K_{asi} \quad (8a,b)$$

$$K_{asi} = \frac{1}{1/(\alpha_{Ni}^2 \cdot K_{dsi}) + 1/K_{bsi}} = \frac{\alpha_{Ni}^2 \cdot K_{dsi} \cdot K_{bsi}}{\alpha_{Ni}^2 \cdot K_{dsi} + K_{bsi}} \quad (8c)$$

ここに、 aW_{psi} : i 層の付加系の累積塑性歪みエネルギー、 n_{eq} : 付加系の等価繰返し数 (地震終了時刻)、 $a Q_{ysi}$: i 層の付加系の降伏せん断力、 δ_{si} : i 層の目標層間変形、 $a \delta_{ysi}$: i 層の付加系の降伏変形、 K_{asi} : i 層の付加系剛性、 K_{dsi} : i 層のダンパーの水平剛性である。

aW_{psi} は、式(8a,b,c)より α_{Ni} および K_{dsi} を用いると次式となる。

$$aW_{psi} = 4 \cdot a n_{eq} \cdot \alpha_{Ni} \cdot d Q_{yi} \cdot \left\{ \delta_{si} - d Q_{yi} \cdot \left(\frac{1}{K_{dsi}} + \frac{1}{\alpha_{Ni} \cdot K_{di}} \right) \right\} \quad (9)$$

また、 W_{Ds} の速度換算値 V_{Ds} を次式のように定義する。

$$V_{Ds} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{Ds}}{M}} \quad (10)$$

目標層間変形および付加系の等価繰返し数を設定すると、その建物が吸収し得るエネルギー量の速度換算値 V_{Ds} が定まる。例えば、入力地震動の V_{Ds} に対して、 V_{Ds} が上回る場合は、そのダンパー配置およびダンパー量で目標層間変形以下に抑えられることを表す。

2.4 標準せん断力係数相当に基準化した層せん断力係数

層せん断力を表す評価指標としては、次式のように第1層の層せん断力係数 α_{s1} に弾性1次固有周期 T_1 を乗じることで標準せん断力係数相当に基準化したものを用いる。

$$\alpha'_{s1} = \frac{Q_{s1}}{M \cdot g} T_1 \quad (11)$$

ここで、 Q_{s1} : 第1層の層せん断力、 g : 重力加速度である。

3. 検証に用いる検討対象建物概要

検証には、図2に示す30階鋼構造建物¹⁾を用いる。部材断面は標準せん断力係数 $C_0=0.2$ の設計用地震力に対して許容応力度設計を行い決定した。架構の弾性1次固有周期 T_1 は4.47secである。解析はX方向のみを対象とし、剛床を仮定した部材レベルモデルで行う。なお、主架構は弾性状態を保つものとし、構造減衰は主架構の T_1 に対して2%となる剛性比例型とする。

ダンパーには、LY225材 (降伏応力度225N/mm²) からなる座屈拘束型ブレースを用いる。ダンパーの履歴性状は完全弾塑性型とする。検討に用いるダンパー配置には、図2に示す10種類を用いる。

各層のダンパーの降伏せん断力は、第1層のダンパー降伏せん断力 $d Q_{y1}$ を基準とし、Ai分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに6層毎の5段階とした。 $d Q_{y1}$ と第1層のダンパーの降伏せん断力係数 α_{y1} の関係は次式で表され、検討には $\alpha_{y1}=0.015$ を用いる。

$$d Q_{y1} = d \alpha_{y1} \cdot \sum_{i=1}^{30} m_i \cdot g \quad (12)$$

ここで、 m_i : i 層の質量である。

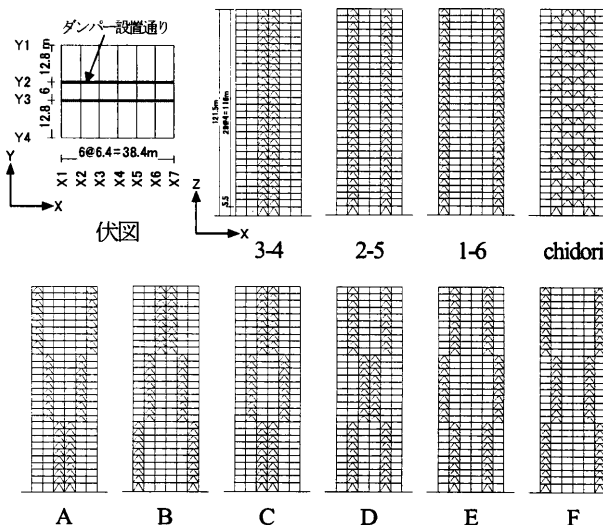


図2 検討対象建物の伏図、軸組図、ダンパー配置

検討用入力地震動には、長周期領域で擬似速度応答スペクトル S_{pv} ($h=5\%$) が0.8m/sで基準化された模擬波を用い、位相特性として、HACHINOHE 1968 EW, JMAKOBE 1995 NS, TOMAKOMAI EW および東北地方太平洋沖地震で観測された1波 (以後、ART HACHI, ART KOBE, ART TOMA, ART SHIN) を採用する。なお、検討には、入力倍率として0.75, 1.0, 1.5倍を用いる。

4. 本評価手法の設定条件に関する検討

本評価手法では、評価手法の簡便性を考慮し、①目標層間変形角の高さ方向分布の統一 (2.2節)、②エネルギー集中を無視し、各層

のダンパーが理想的にエネルギー吸収を行うもの (2.3 節) としている。本章では、それらの設定条件について妥当性を確認する。なお、検討用入力地震動は、ART HACHI および ART TOMA とする。

4.1 目標層間変形角と応答値との比較

目標層間変形角の高さ方向分布は、主架構のみにおける分布形状を仮定しているため、ダンパー配置などが異なる場合でも同一の分布形状となる。本節では、その分布に対して、ダンパーを設置した架構における時刻歴応答解析結果から得た分布と比較する。図3に、図2に示したダンパー配置における応答値の層間変形角 R と目標層間変形角 R_s との比較結果を示す。図3より、各入力倍率における全ダンパー配置の最大層間変形角が概ね $1/170 \text{ rad}$, $1/135 \text{ rad}$, $1/100 \text{ rad}$ となることから、目標最大層間変形角も $1/170 \text{ rad}$, $1/135 \text{ rad}$, $1/100 \text{ rad}$ とする。図3(a)より、ART HACHI では全ダンパー配置の応答値の平均値 (点線) と目標層間変形角 (黒実線) が概ね一致している。しかし、図3(b)より、ART TOMA では、入力倍率1.5倍で両者の分布形状に差が見られる。この原因は、ART TOMA における層せん断力の高さ方向の分布形状が本評価手法における A_i 分布に基づく分布形状と異なっているためである。以上より、層せん断力の分布形状が A_i 分布に基づく層せん断力の分布形状と大きく異なわなければ、本評価手法で設定した層間変形角の分布形状で応答値の層間変形角の分布形状を模擬することが出来ると考える。

4.2 付加系の損傷分布と応答値との比較

本評価方法では、各層のダンパーが理想的にエネルギー吸収を行

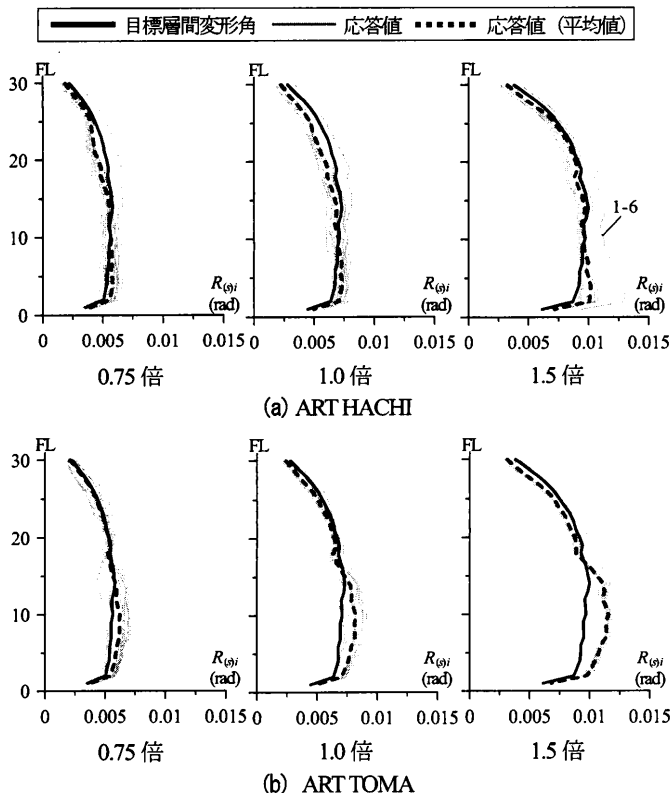


図3 層間変形角の比較 ($\alpha_{y1}=0.015$)

うものとして、エネルギー法のように損傷集中を考慮していない。そこで、部材レベルモデルの時刻歴応答解析から得たダンパーの損傷分布 aW_{pi}/aW_p (以後、損傷分布 (時刻歴)) と本評価方法によるもの aW_{psi}/aW_{ps} (以後、損傷分布 (本手法)) の比較を図4に示す。各損傷分布は全ダンパー配置の平均値とする。図4より、両者から上層部よりも下層部で損傷することが分かり、上層部においては両者の分布形状が似た傾向を示す。しかし、損傷分布 (本手法) には、損傷分布 (時刻歴) のように下層部で損傷集中する傾向が見られない。以上より、本評価手法において、1~10層の下層部のみでエネルギー吸収するような場合には大きく精度が落ちることが考えられる。このような場合を除けば、ある程度の精度を持って評価することが出来ると考え、次章以降の検討を進めていく。

5. 本評価手法の精度検証結果

全4波入力時の10種類のダンパー配置において、本評価手法で算出した指標 (以後、評価値) と部材レベルモデルの応答値とを比較し、本評価手法の精度を確認する。評価値を算出するに当たり、目標最大層間変形角および m_{eq} を設定する。目標最大層間変形角は、4.1節の設定と同様なものとする。 m_{eq} は、まず応答値から各ダンパー配置ごとに各層の m_{eq} を算出し、全層の平均値を算出する。さらに、全ダンパー配置で平均値をとったものとする。

図5に、評価値と応答値との比較結果を示す。図には全120ケースを示す。また、評価値と応答値が一致する実線とそれに対して

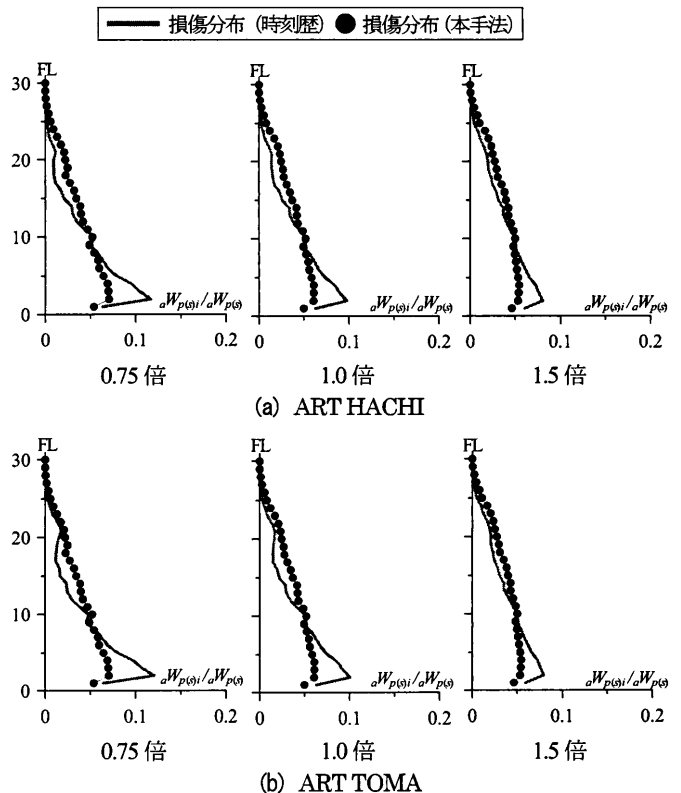


図4 付加系の損傷分布の比較 ($\alpha_{y1}=0.015$)

±15%の誤差を点線で示す。図5(a)より、 $V_{D'(g)}$ は、ART TOMA でばらつきが大きく、精度が劣るが、他の3波では概ね誤差±15%以内に収まる。ART TOMA のばらつく原因は次章に示す。図5(b)より、 $\alpha_{(g)}$ は、1.5倍で精度が劣るプロット(1-6)が存在するが、概ね誤差±15%以内に収まる。以上より、評価値は、概ね誤差±15%以内で応答値を捉えられることが分かった。ただし、この精度は目標最大層間変形角および $d\alpha_{y1}$ を応答値から定めた場合がある。

6. ダンパー配置の違いによる制振効果の評価

図6には、評価値および応答値を用いた10種類のダンパー配置の違いによるART HACHI, ART TOMA 入力時の応答比較結果を示す。評価値の算出に用いる目標最大層間変形角および $d\alpha_{y1}$ は、前章と同様の設定とする。図6(a), (b)の $V_{D'(g)}$ より、評価値に着目すると、AとB, CとD, EとFがほぼ同等の値をとり、全てを含めると、1-6 < 2-5 < EとF < 3-4 < AとB < CとD < chidori の順に大きくなる。このダンパー配置の違いによる傾向は、応答値でも概ね同様の傾向を示すことを確認することが出来る。しかし、ART TOMA の0.75倍, 1.0倍の応答値では、共振現象により1-6, 2-5, E, Fの入力エネルギーが他の配置よりも大きくなり、ダンパー配置の違いによる $V_{D'(g)}$ ($dW_{p(g)}$)の大小関係が評価値と大きく異なる。図6(a), (b)の $\alpha_{(g)}$ より、評価値に着目すると、1-6 < 2-5 < EとF < 3-4 < AとB < CとD < chidori の順に小さくなっている。ART HACHI では、入力倍率1.5倍で評価値と応答値のプロットに大きな差があるが、全ての入力倍率においてダンパー配置の違いによる優劣を概ね捉えることが出来る。ART TOMA では、評価値と応答値のプロットの傾向が良く似ている。なお、図示していないが、他の2波においても、評価値は応答値の傾向を十分に捉えていることを確認した。

以上より、ダンパー配置の違いによる制振効果の優劣は、応答値に代わり評価値により捉えられると考える。また、応答値では、ダンパー配置の違いにより共振現象を起こし、制振効果の優劣の判断が難しいものがあつた。これを踏まえても、静的解析のみを用いる本評価手法は、応答値の妥当性を確認する一つの判断材料として有効であると考えられる。

7. おわりに

本報では、骨組特性値を用いたせん断モデルに対し、エネルギーの釣合に基づく応答予測法を適用した制振効果の評価手法を提案し、ダンパー配置の違いによる制振効果の優劣を捉えられることを示した。また、30階鋼構造建物に本評価手法を適用し、部材レベルモデルの応答値との比較することで精度を確認した。

本評価手法では、最大層間変形角および付加系の等価繰り返し数を設定することで、あるダンパー量で建物が吸収し得るエネルギー

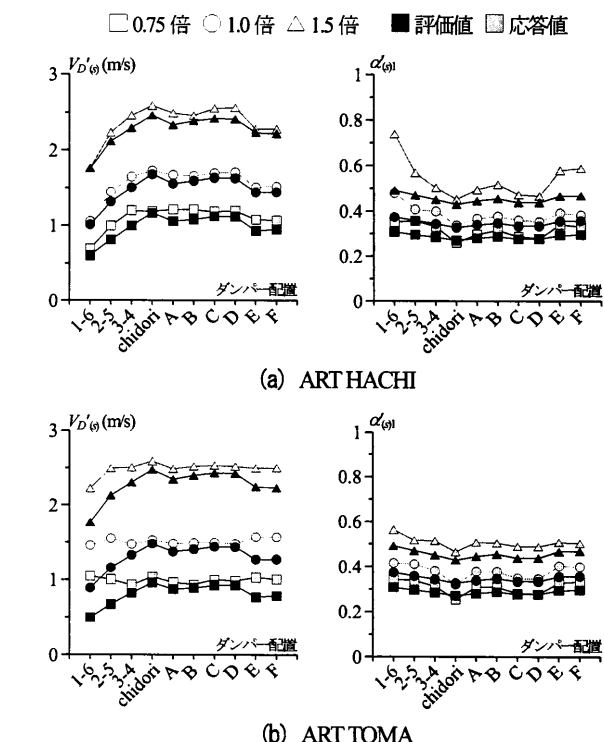
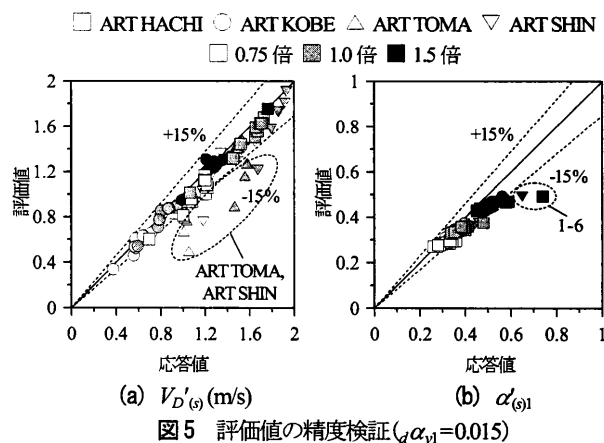


図6 ダンパー配置の違いによる評価($V_{D'(g)}$, $\alpha_{(g)}$, $d\alpha_{y1}=0.015$)

を評価することが出来る。今後、検討を重ね、ある入力地震動に対する概略設計としての活用方法を目指す。

参考文献

- 1) 古谷慶, 添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一, 履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価, 構造工学論文集, pp197-208, 2012.3
- 2) 石井正人, 笠井和彦: 多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp103-112, 2010.1
- 3) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1997
- 4) 北村春幸: 性能設計のための建築振動解析入門 第二版, 彰国社, 2009.4

謝辞

本研究は、日建設計, オイレス工業, 東京理科大学北村研究室による共同研究の成果の一部を用いたものです。

*1 東京理科大学 *2 (株) 日建設計 *3 オイレス工業 (株)