

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	鋼材ダンパーを有する超高層制振建物の地震応答評価 その1 ダンパー量および入力波の違いによる応答値の比較検討
Title(English)	Seismic Response Evaluation of Super High-Rise Building with Steel Dampers (Part1) Comparative Study of Responses Based on Differences in Damper Shear Coefficient and Input Waves
著者(和文)	宮本滉大, 佐藤大樹, 陳引力, 田中英之, 曾根孝行, 今野大輔, 渡井一樹
Authors(English)	Kodai Miyamoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Hideyuki Tanaka, Takayuki Sone, Daisuke Konno, Kazuki Watai
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 397-400
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 397-400
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

鋼材ダンパーを有する超高層制振建物の地震応答評価

その1 ダンパー量および入力波の違いによる応答値の比較検討

構造—振動

超高層建物 制振構造 鋼構造物
時刻歴応答解析 履歴型ダンパー

正会員 ○ 宮本滉大 *1
〃 陳引力 *3
〃 曾根孝行 *4
〃 渡井一樹 *4

正会員 佐藤大樹 *2
〃 田中英之 *4
〃 今野大輔 *4

1. はじめに

地震時における超高層建物の損傷制御や応答制御を目的として、建物に履歴型ダンパーなどの制振部材を付加する制振構造は広く普及している¹⁾。履歴型ダンパーを組み込む場合、低降伏点鋼材などを用いて、できる限り小さな荷重で早期にダンパーを塑性化させることで、高いエネルギー吸収効果が期待できる。ただし、超高層建物に履歴型ダンパーを付加した制振構造を設計する場合、長周期・長時間地震動、さらには台風などに伴う強風によって発生する多数の繰返し変形によるダンパーの累積疲労損傷を評価する必要がある。

そこで、本研究では履歴型ダンパーを有する超高層制振建物を対象として、地震動を入力した際のダンパーに生じる累積疲労損傷を評価することを目的とする。本報その1では、立体モデルを用いた時刻歴応答解析を行い、ダンパー量および入力波の種類と応答値の関係について分析し、最適なダンパー量を検討する。

2. 解析概要

2.1 建物概要およびダンパー概要

検討建物モデルは、地上45階建ての鉄骨造モデルである。階高は第1層5.7m、第2～45層4mである。本モデルの立面図を図1に、平面図を図2に、建物諸元を表1に示す。なお、各図には赤実線で履歴型ダンパーとして用いた座屈拘束ブレースの設置箇所を示している。柱部材は両端ファイバー梁要素としてモデル化し、梁部材は両端に剛塑性回転バネを有する線材としてモデル化する²⁾。本検討ではフレームを弾性とし、構造減衰はフレームに対して2%の剛性比例型とする。

建物高さ方向のダンパー配置は図1に示すように連続配置とし、平面配置位置は図2に示す位置に設定する。ダンパーである座屈拘束ブレースは、図3のように塑性化部と弾性部で構成される。ダンパー長さ L_{di} に対して塑性化部長さ $L_{dpi} = L_{di}/3$ とし、塑性化部断面積 A_{dpi} に対して弾性部断面積 $A_{dei} = 2A_{dpi}$ とする。塑性化部にはLY225材（降伏応力度 $\sigma_{dy} = 225 \text{ N/mm}^2$ ）を用い、ダンパーの履歴

性状は完全弾塑性型とする。各層のダンパー降伏層せん断力 Q_{dyi} は、第1層のダンパー降伏層せん断力 Q_{dy1} を基準とし、地震層せん断力係数の高さ方向分布（ A_i 分布）に基づく設計用層せん断力分布をもとに図4のように4段階とする³⁾。 Q_{dy1} と第1層のダンパーの降伏層せん断力係数 α_{dy1} の関係は次式で示される。

$$Q_{dy1} = \alpha_{dy1} \sum_{i=1}^N m_i g \tag{1}$$

ここで、 N : 層数、 m_i : i 層の質量、 g : 重力加速度である。本報では、 α_{dy1} をダンパー量と呼び、 $\alpha_{dy1} = 0$ の非制振モデルおよび $\alpha_{dy1} = 0.005 \sim 0.030$ の制振モデルの検討を行う。

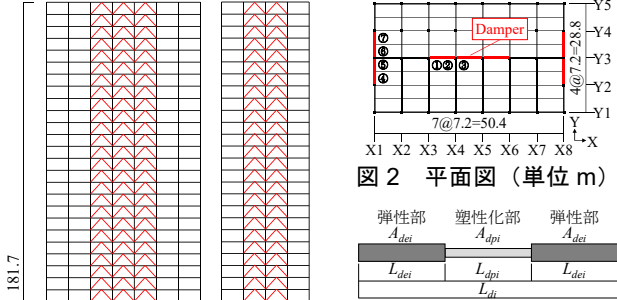


図2 平面図（単位 m）

図3 ダンパー概要

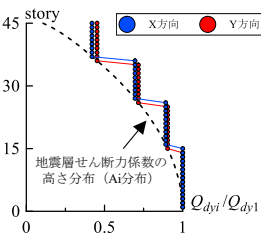


図4 ダンパー降伏層せん断力比

(a) X 方向 (b) Y 方向

図1 立面図（単位 m）

表1 建物諸元

柱寸法 [mm]	□700×700×25×25	—	□700×700×50×50
	B□700×700×55×55	—	B□700×700×65×65
梁寸法 [mm]	H700×250×12×19	—	H850×350×19×32
1次固有周期 [s]	X 方向 : 5.94 Y 方向 : 5.88		
建物重量 [kN]	476,455		

2.2 ダンパー量と水平剛性および降伏変形角の関係

図 5, 6 にダンパー量をパラメータとするダンパーの設置を考慮した i 層水平剛性 K_i の高さ方向分布および i 層ダンパーの降伏変形角 R_{dvi} の高さ方向分布をそれぞれ示す。なお、 K_i および R_{dvi} は、 A_i 分布に基づく静的荷重作用時の静的増分解析により得られた値を用いる。図 5 より、X 方向、Y 方向ともに、低層部のほうが高層部に比べてダンパーの設置に伴い、 K_i は大きくなる傾向がある。ただし、Y 方向の中～高層部に着目すると、ダンパー量の値によらず K_i はほぼ変化しない。これは、ダンパーによる剛性付加が小さいためであり、これらの層に設置したダンパーの効果は低いと考えられる。図 6 より、X 方向、Y 方向ともに、上層ほど R_{dvi} は大きくなる傾向がみられる。また、ダンパー量の増大に伴い R_{dvi} も大きくなることが確認できる。X 方向に比べて Y 方向のほうが、 R_{dvi} は大きくなる傾向がみられる。この傾向は、第 1 層では小さいが、上層になるほど大きくなることが確認できる。

2.3 入力地震動概要

入力地震動は、告示波である ART HACHI（位相特性：Hachinohe 1968 NS）および基整促波である OS1 を選定した。なお、ART HACHI は最大加速度 396 cm/s^2 、OS1 は最大加速度 263 cm/s^2 の加速度データである。図 7 に ART HACHI および OS1 の疑似速度応答スペクトル pS_v ($h=5\%$) およびエネルギースペクトル V_E ($h=10\%$) を示す。なお、両図には N-Model の X 方向および Y 方向の弾性 1 次固有周期 T_{1X} および T_{1Y} を示す。

3. 解析結果

3.1 固有周期評価

表 2 にダンパー無の非制振モデル（以降、N-Model と呼称）およびダンパー量をパラメータとする制振モデル（以降、D-Model と呼称）の弾性 1～3 次固有周期（ $T_1 \sim T_3$ ）を示す。X 方向、Y 方向ともにダンパー量の増加に伴い各次固有周期は短くなる傾向を示した。また、ダンパー量の増加に伴い、固有周期の低減率は緩やかになっていく傾向がみられる。これは 2.2 節で述べたように、ダンパー量の増加に対してダンパーによる付加剛性が小さくなっていることが要因である。

3.2 高さ方向分布による制振効果の検討

図 8, 9 に、ART HACHI および OS1 入力時における各層の最大層間変形角の分布 $R_{i,max}$ を、図 10, 11 に、ダンパーのエネルギー吸収率分布 W_{di}/E をそれぞれ示す。それぞれの図において (a) は X 方向、(b) は Y 方向である。図 8, 9 より各層の $R_{i,max}$ は、入力波の種類およびその入力方向によらず、N-Model に比べるとダンパー設置による変形抑制効果は確認できるものの、ダンパー量の増大に伴い、この効果は小さくなる傾向がみられる。図 10, 11 より、入力波の種類およびその入力方向によらず、低層部のダンパーのほうが高層部よりもエネルギー吸収率が高くな

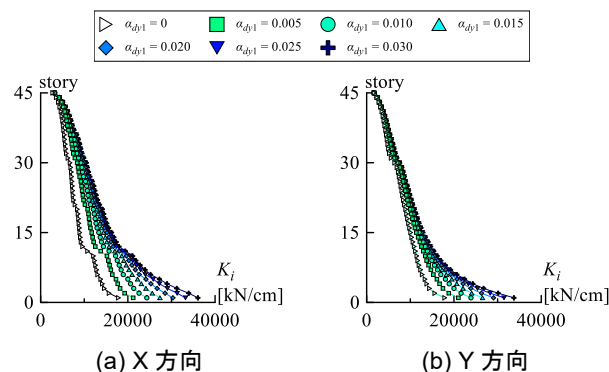


図 5 各層水平剛性高さ方向分布

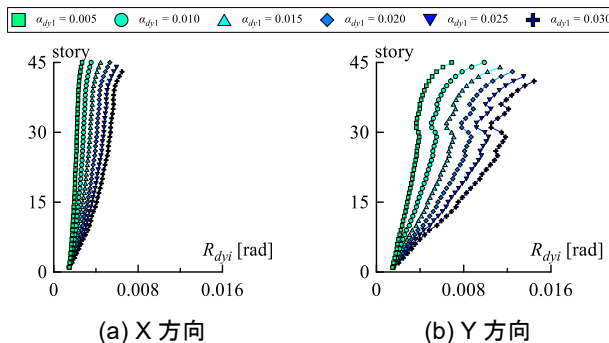
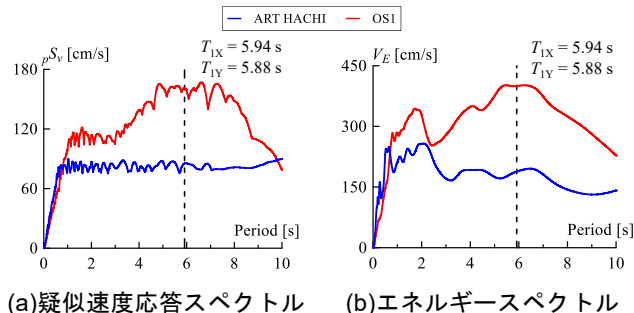


図 6 各層ダンパーの降伏変形角高さ方向分布



(a) 疑似速度応答スペクトル (b) エネルギースペクトル

図 7 疑似速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

表 2 固有周期

モデル	α_{dy1}	固有周期 [s]					
		T_1		T_2		T_3	
		X	Y	X	Y	X	Y
N-Model	0	5.94	5.88	2.07	2.00	1.21	1.08
D-Model	0.005	5.28	5.52	1.84	1.85	1.07	0.991
	0.010	4.97	5.36	1.72	1.76	0.988	0.935
	0.015	4.79	5.27	1.64	1.70	0.931	0.897
	0.020	4.67	5.21	1.58	1.66	0.889	0.870
	0.025	4.58	5.16	1.53	1.63	0.857	0.849
	0.030	4.52	5.13	1.50	1.61	0.831	0.832

る傾向がみられる。また、Y 方向入力時には、低～中層部よりも上層でエネルギー吸収率が顕著に小さくなっており、X 方向入力時と比べると、ダンパー設置により得られるエネルギー吸収効果は小さいと考える。これは、長方形平面を有する建物モデル（図 2）の特性上、Y 方向入力時には層の変形に占める曲げ変形成分がより支配的になり、せん断変形の占める割合が低減したことによるものだと考える。曲げ変形成分の割合の増大は、入力方向によらず

上層ほどエネルギー吸収率が小さくなっている要因でもあると考える。また、低層部ではダンパー量の増大に伴いエネルギー吸収率が大きくなる傾向がみられる。

3.3 実効変形比による制振効果の検討

X および Y 方向入力時におけるダンパー塑性化部歪の最大値 $|\hat{\epsilon}_{dpj}|_{max}$ が最大となる傾向がみられたダンパーにおける実効変形比 α_{ej} の高さ方向分布を図 12, 13 にそれぞれ示す。ここで、実効変形比とは、各層の層間変形量の最大値を $\delta_{i,max}$ 、ダンパーの水平変形量の最大値を $\bar{u}_{dij,max}$ として次式で示される。

$$\alpha_{ej} = \bar{u}_{dij,max} / \delta_{i,max} \quad (2)$$

本節では、X 方向入力時には $j=③$ のダンパーを、Y 方向入力時には $j=④$ のダンパー (図 2) を対象とする。図 12, 13 より入力波およびその入力方向によらず、上層ほど実効変形比は概ね低減している。特に、Y 方向入力時には中層部よりも上層で実効変形比が顕著に小さくなっており、低層部に比べるとダンパー設置により得られる上層部の制振効果は小さい。

3.4 最適ダンパー量の検討

本節では、ダンパー量および入力波の違いが応答低減効果および最大応答値に及ぼす影響について、時刻歴応答解析結果より検討する。

図 14, 15 に N-Model および D-Model に ART HACHI および OS1 を X 方向と Y 方向に入力し、時刻歴応答解析により得られた最大応答値である (a) 層間変形角 R_{max} , (b) ベースシア係数 C_b , (c) 絶対加速度 A_{max} , (d) ダンパーのエネルギー吸収率 W_d/E (E : 入力エネルギー, W_d : ダンパーの吸収エネルギーの総和) を示す。図 14(a), 15(a) の層間変形角より、N-Model と比較した場合、ART HACHI および OS1 とともに、その入力方向によらずダンパー量を増やすほど層間変形角は低減するか横ばいとなる傾向がみられる。この低減の程度は OS1 入力時の方が大きい。ただし、OS1 の Y 方向入力時のみ、低減の程度が鈍くなった後増大していることが確認できる。図 14(b), 15(b) のベースシア係数より、ART HACHI 入力時は、ダンパー量の変化に伴うベースシア係数の変動はほぼ見られない。一方で、OS1 入力時はある程度のダンパー量まではベー

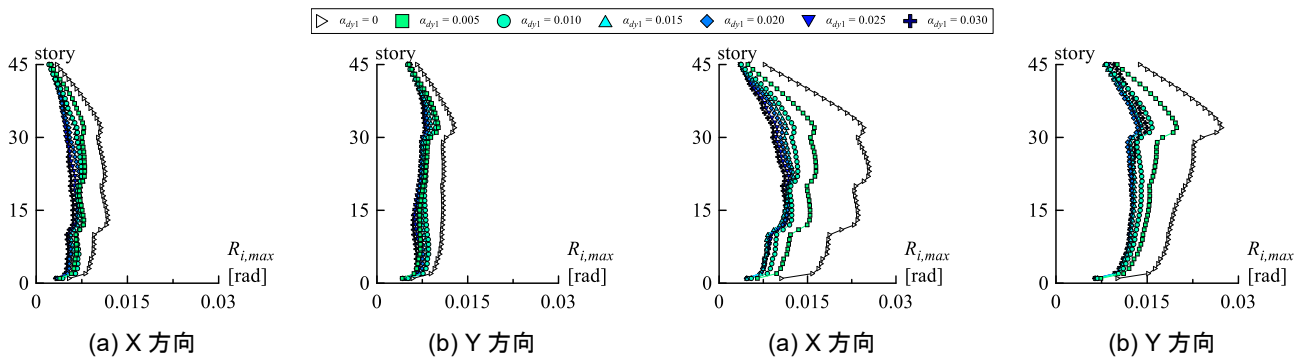


図 8 層間変形角高さ分布 (ART HACHI)

図 9 層間変形角高さ分布 (OS1)

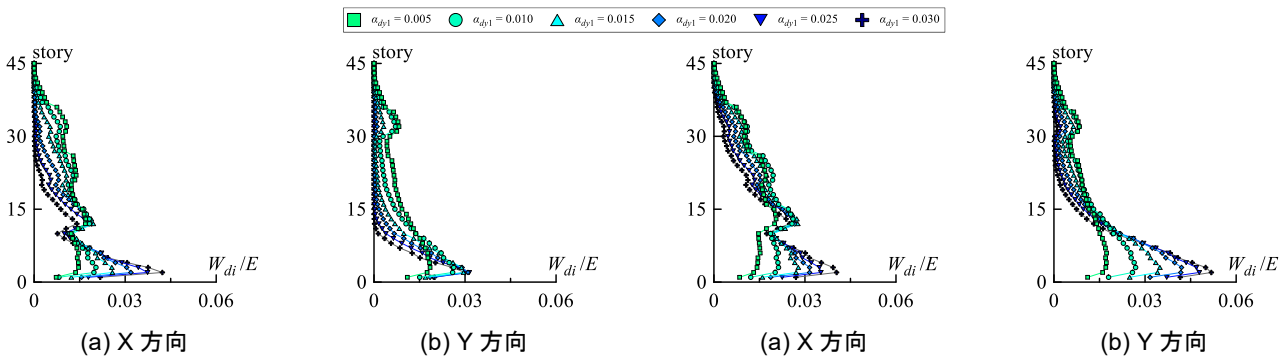


図 10 エネルギー吸収率高さ分布 (ART HACHI)

図 11 エネルギー吸収率高さ分布 (OS1)

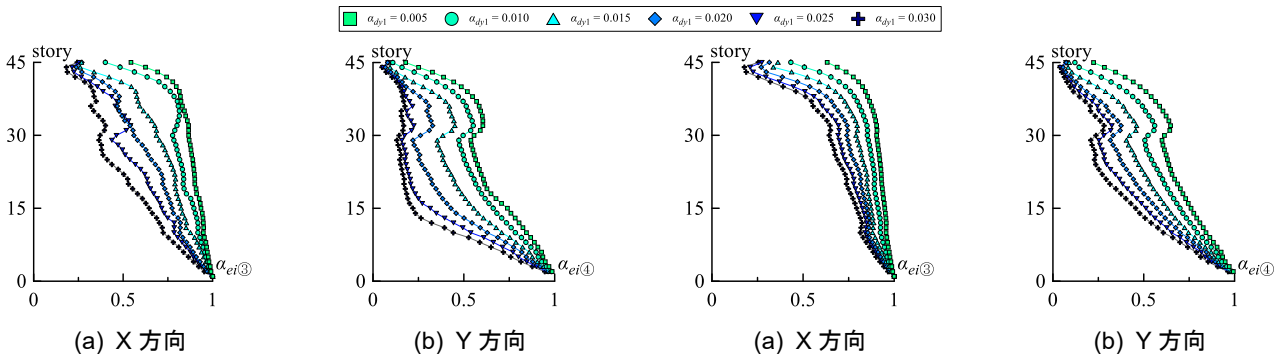


図 12 実効変形比の高さ方向分布 (ART HACHI)

図 13 実効変形比の高さ方向分布 (OS1)

スシア係数は低減するか横ばいになる傾向があるが、Y方向入力時には、低減の程度が鈍くなった後、わずかに増大していることが確認できる。この傾向は、図14(c)、15(c)の絶対加速度においても同様に確認できる。図14(d)、15(d)のエネルギー吸収率より、入力方向によらずART HACHI 入力時に比べてOS1の方が大きなエネルギー吸収率が確認できる。また、ART HACHI 入力時は、ダンパー量を増やすほどエネルギー吸収率は低減するが、OS1は、X方向、Y方向入力時ともに $\alpha_{dy1}=0.010\sim0.020$ で最大となった後、ダンパー量の増大に伴い低減することが確認できる。以上より、①層間変形角はダンパー量の増大とともに概ね低減する。ただし、OS1のY方向入力時には、 $\alpha_{dy1}=0.020$ で最小となり、その後は増大する。②ベースシア係数および絶対加速度は、 $\alpha_{dy1}=0.015\sim0.020$ までダンパー量を増やすほど低減し、それ以降は横ばいとなるかわずかに増大する。③ダンパーのエネルギー吸収率は、ARTHACHIに比べて最大応答値が大きくなる傾向があるOS1入力時に、 $\alpha_{dy1}=0.010\sim0.020$ で最大となる。この3点を踏まえて、本検討における最適ダンパー量は $\alpha_{dy1}=0.020$ であると考えられる。この値は文献3)で示されている基準化降伏層せん断力係数 $\alpha'_{dy1}=\alpha_{dy1}\cdot T_1$ で表すと0.119程度であり、同文献で示されている最適ダンパー量(0.05~0.12)の範囲に含まれている。ダンパー量が0.020を超過するとベースシア係数および絶対加速度は増大し、エネ

ルギー吸収率は低減することから、この α'_{dy1} が本報における上限値であると考えられる。

4. まとめ

本報その1では、履歴型ダンパーを有する超高層制振建物モデルに地震動を入力して時刻歴応答解析を行い、各建物モデルの応答値の違いより、ダンパー量および入力波の種類と応答値の関係について分析し、最適なダンパー量を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) ダンパーのエネルギー吸収率の高さ方向分布より、低層部のダンパーのほうが高層部よりもエネルギー吸収率が高くなる傾向がみられた。
- (2) 実効変形比の高さ方向分布より、上層ほど実効変形比は概ね低減することが確認できた。
- (3) 各種最大応答値より、本検討における最適ダンパー量 α'_{dy1} は、既往研究で示されている値と同程度となることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本免振構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第3版、2013.11
- 2) 構造計画研究所：建築構造物の構造解析・振動解析プログラム RESP-D 利用者マニュアル（計算編）
- 3) 戸張涼太、佐藤大樹、古谷慶、北村春幸、石井正人、吉江慶祐、宮崎充、佐々木和彦、岩崎雄一：骨組特性値を用いた履歴型ダンパーを有する建物の制振性能評価、構造工学論文集、Vol.59B, pp.321-327, 2013.3

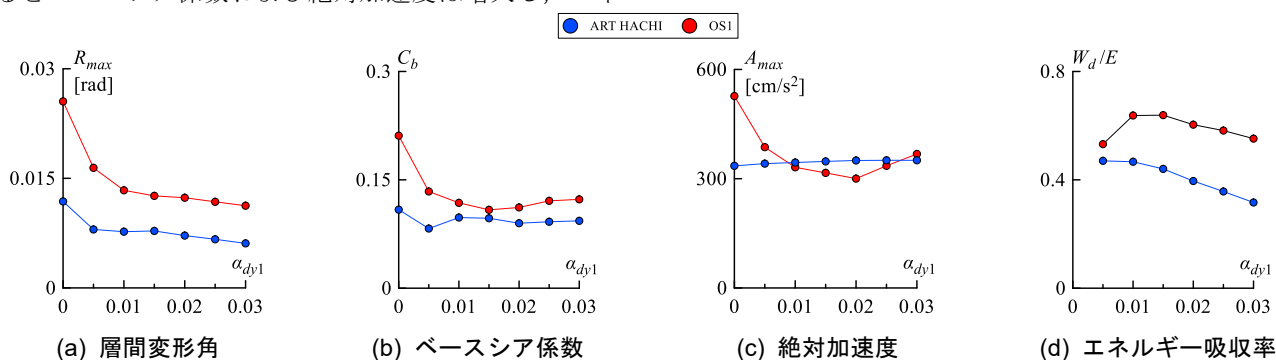


図14 ダンパー量と最大応答値の関係 (X方向)

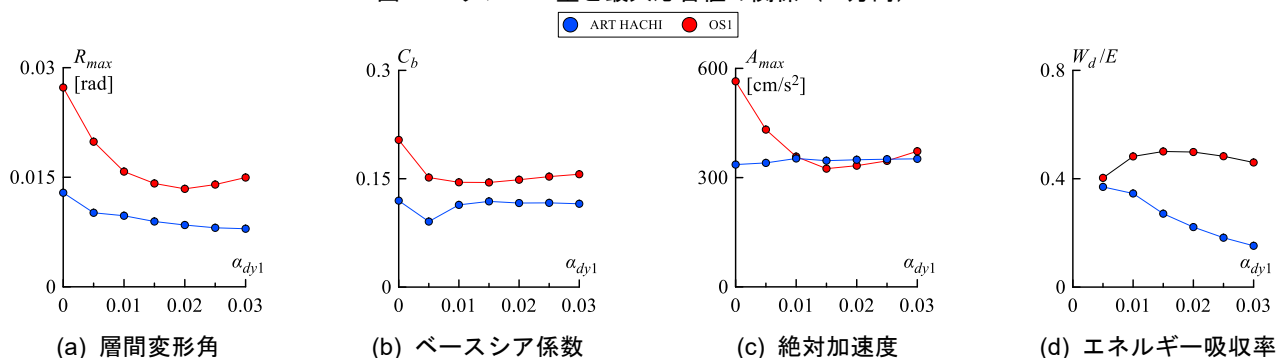


図15 ダンパー量と最大応答値の関係 (Y方向)

*1 東京科学大学 大学院生

*2 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士 (工学)

*3 東京科学大学 総合研究院 助教・博士 (学術)

*4 株式会社竹中工務店 技術研究所

Graduated Student, Institute of Science Tokyo*1

Associate Prof., IIR, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng.*2

Assistant Prof., IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.*3

Research & Development Institute, Takenaka Corporation*4