

同調粘性マスダンパーを用いた種々の全体曲げ応答制御手法の実現可能性評価

東京工業大学 池田 理央

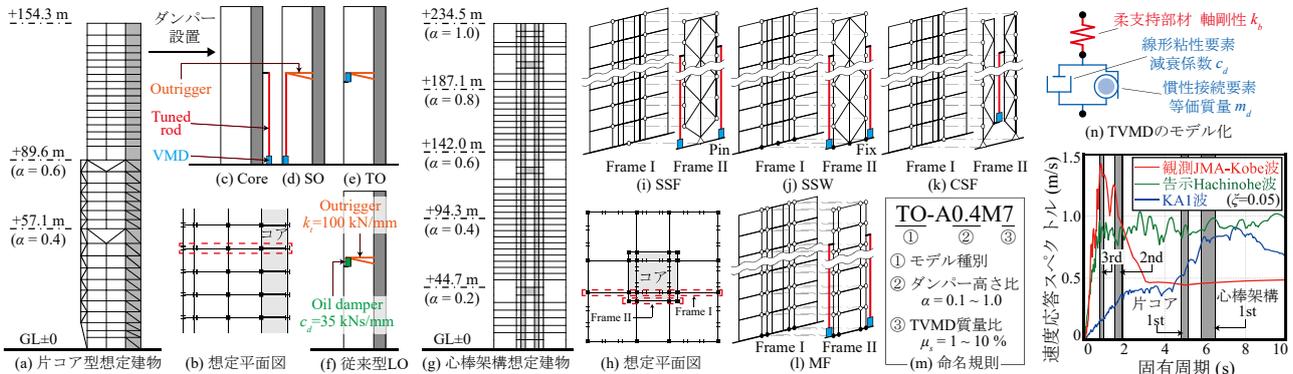


図1 想定建物と数値解析モデル

図2 速度応答スペクトル

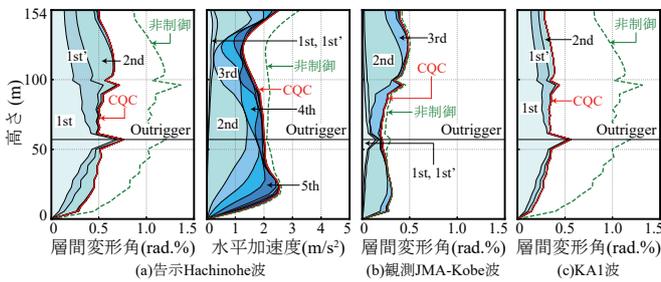


図3 各種応答に対するモード応答支配比率(TO-A0.4M7)

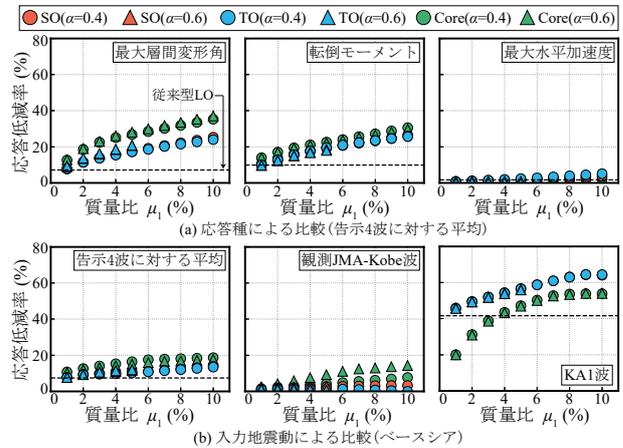


図4 TVMD設置によるピーク応答低減率(片コア型超高層建物)

1. 序

同調粘性マスダンパー(TVMD¹⁾)は減衰要素に並列する重錘の質量要素とそれらに接続される柔支持部材との同調効果により効率的に地震エネルギーを吸収する制振部材であり、フロアスパンが大きくアウトリガー剛性が小さくなりやすい日本の超高層建物の全体曲げ応答制御に適するが、その実現性は未だ不明な点が多い。本研究では同応答制御に関し、未だ実現性の検証がされていない片コア型超高層建物、心棒架構を有した中央コア型超高層建物に対して数値解析を行い、ダンパー周辺納まりや導入費用を考慮した実現性の高いダンパー位置、質量比を明らかにする。

2. 数値解析概要

図1に検討概要を示す。検討対象は片コア型超高層建物、心棒架構付超高層建物とし、それらを一般化した平面骨組にTVMDを設置して数値解析を行い、ダンパー位置や質量比、入力地震動特性が応答低減効果に与える影響を分析する。片コア型はアウトリガー構造²⁾の検証に用い、TVMD配置は、地上とコア頂部を接続するCore配置、地上とアウトリガー端を接続するSO配置、ダンパー付アウトリガー構造を粘性マスダンパー(VMD)に置換したTO配置を検討し、従来の線形粘

性ダンパー付アウトリガー構造(LO)と比較する。心棒架構は中央コア型を想定し、主に地震荷重を負担するコアフレーム(Frame I)に付属する周辺フレーム(Frame II)を制御型スパイン架構³⁾としたSSF、SSFの柱脚を固定したSSW、スリットを設けエネルギー吸収効率を高めた並列心棒架構⁴⁾(CSF)へVMD、Tuned rodを設置することを検討し、Frame IIを井桁架構とした場合(MF)と比較する。VMDと柔支持部材は1次モードを制御対象とし、その諸元は伝達関数ピーク値を最小化するように決定する。図2の入力地震動特性に示すように、入力1次モード成分が卓越する告示HachinoheとKA1、1次モード成分が卓越しない観測JMA-Kobeとし、地震応答は時刻歴応答解析で評価する。

3. 片コア型超高層建物に適用した場合の動的応答特性

図3に代表的なモデルの各種応答に対するモード応答支配比率を、図4に応答低減率の比較を示す。1次モードが支配的な告示波に対する層間変形角、転倒モーメント、層せん断力はTVMDの設置により効果的に低

減される。一方で、高次モードが支配的となる水平加速度応答や1次モード成分が卓越しない観測 JMA-Kobe に対する応答は低減されないが、1次モード応答が励起されないことにより建物の耐震性能への影響は小さいと考えられる。また TVMD による応答低減率は質量比に比例し、ダンパー位置は影響しない。各種応答の低減率は従来型ダンパー付アウトリガー構造より大きく、TVMD を用いた全体曲げ応答制御が日本の片コア型超高層建物に適していることがわかる。

図5に KA1 に対する杭基礎軸力を示す。TVMD を用いた曲げ応答制御構造では、鉛直方向に設置された TVMD の力が杭基礎に影響を及ぼすことが懸念されるが、杭基礎軸力の TVMD 成分と主架構成分には位相差が生じるため、TVMD 成分が杭基礎軸力最大値に影響を及ぼすことは無い。これより杭基礎軸力は TVMD の減衰効果により効果的に低減されることがわかる。

4. 片コア型超高層建物に適した場合の実現可能性

各ダンパー位置、質量比に対して実現可否を判定し、実現可能なモデルの TVMD 周辺を試設計し、ダンパーの費用対効果 CP 値(=費用/平均応答低減率)を分析する。

図6に実現可否のまとめを示す。実現可否の判定指標は、VMD 必要台数 n_d 、Tuned rod 断面積 A_{rod} 、アウトリガー剛性 k_i 、VMD 最大変形、Tuned rod 最大応力である。各指標の基準は同図中に示している。なお、VMD1 台当たりの軸力制限値を 1.2 MN と想定し、 n_d は $n_d \times 1.2 \text{ MN} > \text{VMD 最大軸力} \times 0.5$ となるように設定する¹⁾。軸力制限が応答低減効果に大きな影響を与えないことは確認済みである。 n_d 、 A_{rod} 、 k_i は質量比が高い場合、VMD 最大変形、Tuned rod 最大応力は質量比が低い場合に基準を超過するため、各ダンパー位置には実現可能な質量比帯が存在し、エネルギー吸収効率の高い SO、TO 配置の方がその質量比帯は高くなる。

図7に TVMD 周辺の納まり試設計例を示す。アウトリガートラスは床梁との間に適切なクリアランスを設け、TVMD 同調時に干渉しないようにする。またアウトリガースパンは 17 m とするが、TO-A0.4M4 のように k_i が小さい場合は、トラスを短くし先端から VMD 取り付け部へ H 形鋼を片持支持することで k_i を調整する。

図8に各モデルの TVMD 導入費用を図9に CP 値を示す。導入費用はアウトリガートラス、Tuned rod、座屈補剛機構を 90~150 万円/ton(加工費含む)、TVMD を 2000kN 級オイルダンパー3 台分として算出する。同じダンパー位置で比較した場合、基本的に質量比に比例して導入費用は増大し CP 値も悪化するが、アウトリガ

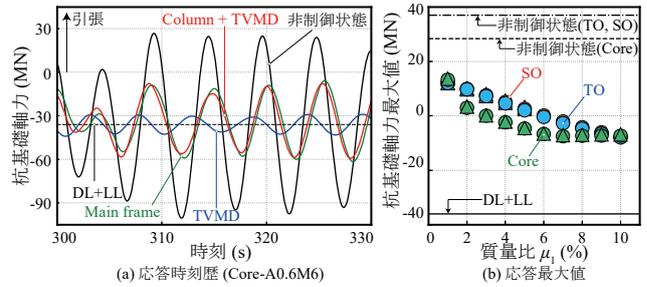


図5 杭基礎軸力 (KA1)

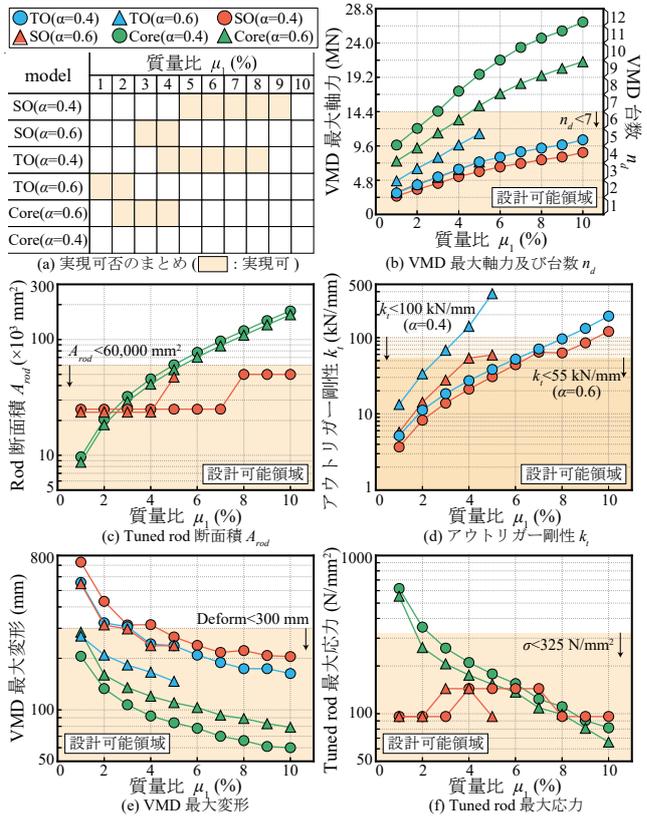


図6 実現可否のまとめ (片コア型超高層建物)

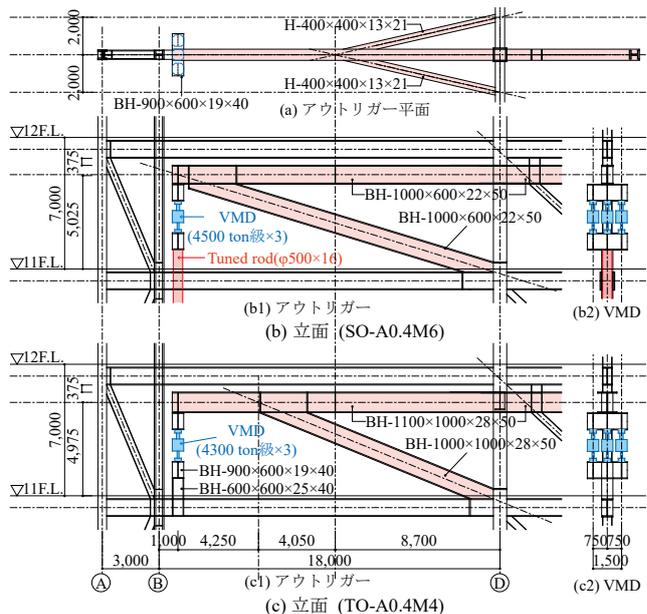


図7 TVMD 周辺納まり例 (片コア型超高層建物)

ートラスの諸元次第では導入費用が低下し、CP値が改善する場合もある。SO、TO配置では質量比6%で最も費用対効果が小さくなり、Core配置や従来型ダンパー付アウトリガー構造以上の費用対効果で大きな応答低減効果を得られるため、実現可能性が高いとわかる。

5. 心棒架構に適用した場合の動的応答特性

図10にダンパー設置前の各心棒架構の心棒効果の比較を示す。SSFはMFと比べFrame IIのせん断剛性を高めたことにより、層間変形角が低減されるとともに建物上部では層間変形角の均一化がされている。心棒架構端部の鉛直変位は低層部に集約されないがFrame IIの曲げ剛性を小さくしたことによりダンパー設置部の鉛直方向刺激関数は大きくなる。SSWのダンパー設置部刺激関数はSSFと比べて柱脚を固定支持としたことにより低層部では大きくなるが、 $\alpha=0.4$ 以上では等しくなる。CSFはFrame IIにスリットを設けたことにより層間変形角は低減されないが、鉛直変位が低層部に集約される。

図11に代表的なモデルの各種応答に対するモード応答支配比率を、図12に応答低減率の比較を示す。同図らに示すように、TVMDを用いた全体曲げ応答制御が軒高の大きい心棒架構でも大きな応答低減効果を発揮する。片コア型での検討と同様に、1次モード応答が支配的となる層間変形角、転倒モーメント、層せん断力はTVMDの設置により効果的に低減されるが、高次モード応答が支配的となる水平加速度応答や1次モード成分が卓越しない観測JMA-Kobe波に対する応答は低減されない。また、応答低減率は質量比に比例し、ダンパー高さは影響しない。なお、心棒架構による応答低減率の比較は、心棒架構種によって非制御状態の応答値に差があることに注意する必要がある。

6. 心棒架構に適用した場合の実現可能性

図13に各判定指標に関する実現可否のまとめを示す。片コア型超高層建物での検討と同様に n_d 、 A_{rod} は質量比が高い場合、VMD最大変形、Tuned rod最大応力は低い場合に基準を超過し、MFでは質量比1%までが実現可能な範囲であるのに対し、SSF、SSW、CSFでは質量比3%まで可能である。また、SSF、SSWでは $\alpha=0.4$ 、0.6がCSFでは $\alpha=0.2$ が最も実現可能性の高いダンパー高さとなったが、これは A_{rod} がSSF、SSWでは $\alpha=0.4$ 、0.6で極小となり、CSFでは α が低いほど小さくなるためである。

実現可能なモデルの内、質量比の高いSSF-A0.6M3、SSW-A0.6M3、CSF-A0.2M3、MF-A0.6M1について

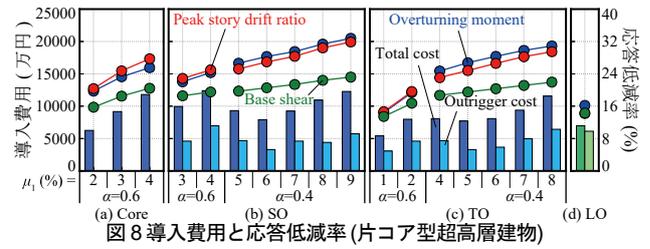


図8 導入費用と応答低減率(片コア型超高層建物)

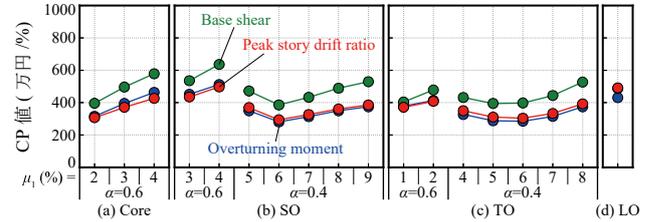


図9 費用対効果CP値(片コア型超高層建物)

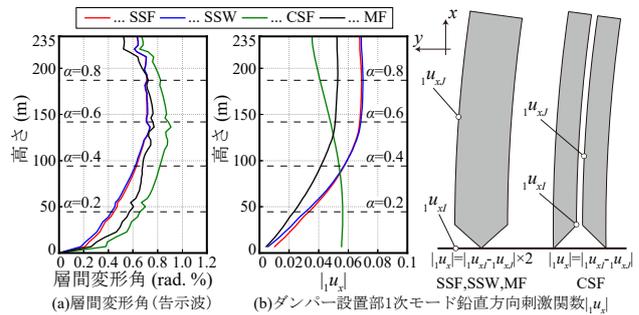


図10 心棒効果の比較(非制御状態)

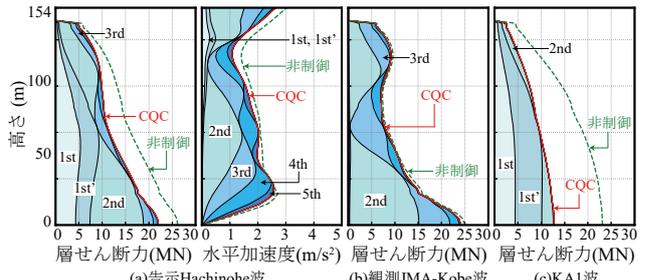
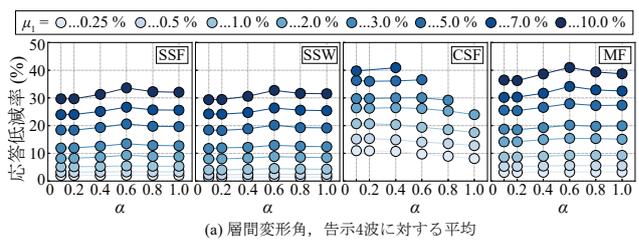
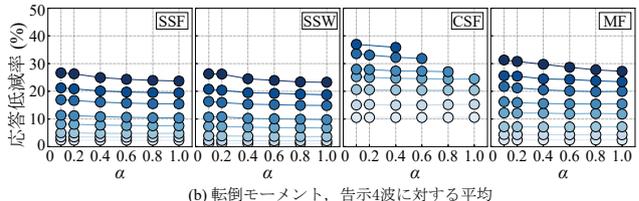


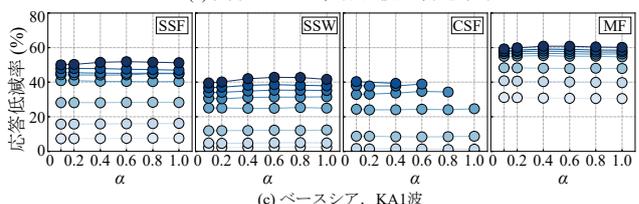
図11 各種応答に対するモード応答支配比率(SSF-A0.6M3)



(a) 層間変形角、告示4波に対する平均



(b) 転倒モーメント、告示4波に対する平均



(c) ベースシア、KA1波

図12 TVMD設置によるピーク応答低減率の比較(心棒架構モデル)

TVMD周辺の納まりを試設計し、CP値を分析する。図14にTVMD周辺の納まり試設計例を示す。SSW(SSF)では心棒架構端部にVMDとTuned rodをL字に設置する。CSFでは12台のVMDを2階と4階に分けて設置する。表1に導入費用およびCP値を示す。SSFとSSWは応答と導入費用が同程度であり、心棒架構柱脚支持方法の差の影響が小さいことがわかる。SSFとSSWは最大層間変形角が最も小さく、転倒モーメントとベースシアもMFより低減され、導入費用も現実的な範囲に収まっている。CSFはいずれの応答もMFより低減され、導入費用も最も安いので、実現可能性は高い。以上よりSSF、SSWでは架構のせん断剛性を高くする代わりに全体曲げ剛性を下げることで、CSFではスリットを設けることでエネルギー吸収効率を高めることの有効性が検証された。

7. 結

- 1) TVMDを用いた全体曲げ応答制御はアウトリガー剛性の小さい日本の片コア型超高層建物や軒高の大きい心棒架構でも高い応答制御効果を発揮する。
- 2) TVMDは1次モード成分が支配的な層間変形角、転倒モーメント、層せん断力の制御効果が高い一方、高次モードが支配的な水平加速度応答や1次モードが卓越しない地震波に対する制御効果は殆ど無い。
- 3) TVMDによる力は杭基礎軸力に直接影響せず、減衰効果により地震時の杭基礎最大軸力は低減される。
- 4) TVMDを用いた全体曲げ応答制御では、ダンパー位置や心棒架構種によって実現可能な質量比帯が存在し、エネルギー吸収効率の高いダンパー位置、心棒架構種の方が得られる質量比は大きくなる。また、ダンパー高さ α に関して、Tuned rodの省スペース性の観点からSSF、SSWでは $\alpha=0.4, 0.6$ でCSFでは $\alpha=0.2$ で実現可能性が高くなる。
- 5) 応答制御の点では応答低減効果はTVMD質量比のみに依存するためダンパー位置は柔軟に選択できるが、ダンパー周辺納まりや費用対効果を考慮すると、エネルギー吸収効率の高いSO配置、TO配置やSSF、SSW、CSFの方が実現可能性は高くなる。
- 6) 軒高の大きい制御型スパイン架構にTVMDを用いた全体曲げ応答制御を施す場合は柱脚の支持方法はピン支持、固定支持で効果に差は見られない。

【参考文献】

- 1) 井上範夫, 五十子幸樹: 建築物の変位制御設計, 丸善出版, 2012.

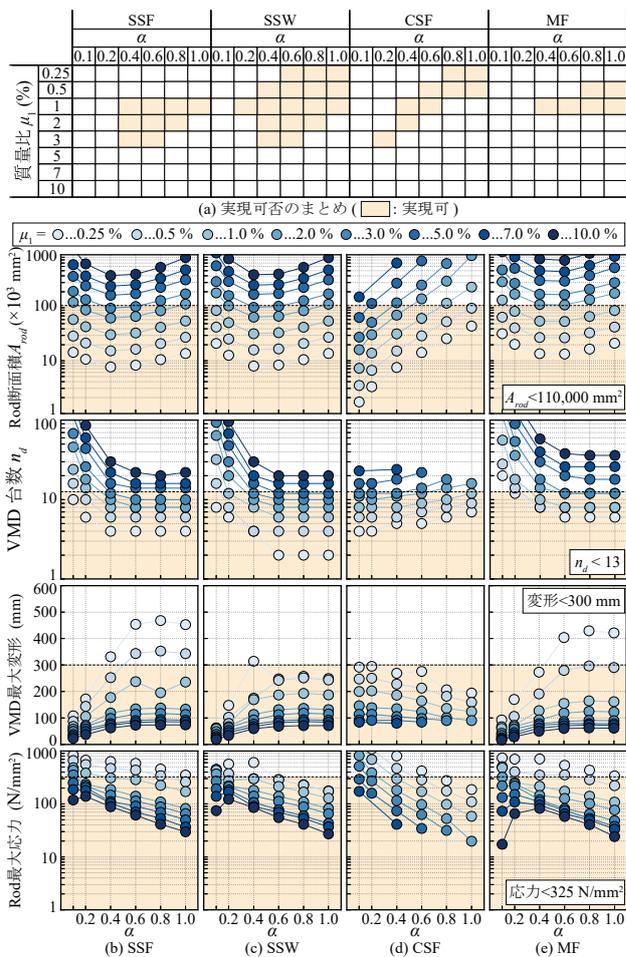


図13 実現可否のまとめ(心棒架構モデル)

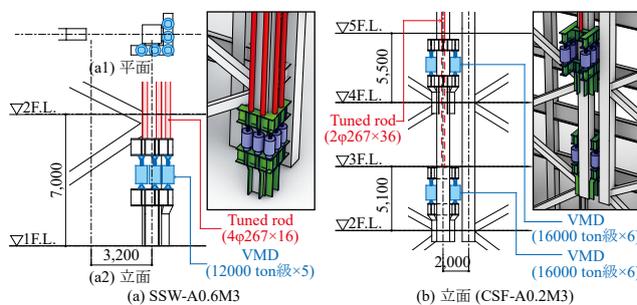


図14 TVMD周辺納まり例(心棒架構モデル)

表1 導入費用と応答低減率及び費用対効果CP値(心棒架構モデル)

	μ_1 (%)	α	導入費用 (万円)	層間変形角			転倒モーメント			ベースシア		
				応答値 (rad.%)	低減率 (%)	CP値 (万円%)	応答値 (MNm)	低減率 (%)	CP値 (万円%)	応答値 (MN)	低減率 (%)	CP値 (万円%)
SSF	3	0.6	28,528	0.617	18.5	1,539	2,521	16.0	1,781	20.2	12.6	2,261
SSW	3	0.6	28,660	0.626	15.5	1,851	2,598	12.8	2,248	20.6	11.9	2,399
CSF	3	0.2	19,192	0.635	28.5	673	2,150	27.3	704	17.1	20.4	943
MF	1	0.6	18,015	0.691	15.1	1,191	2,841	13.3	1,351	21.8	13.4	1,349

- 2) 寺澤友貴, 浅井智樹, 石橋洋二, 竹内徹: 種々の設計変数が線形オイルダンパー付単層アウトリガー構造の動的応答特性に与える影響, 日本建築学会構造系論文集 第85巻 第744号, 2020.8
- 3) 竹内徹, 陳星辰, 松井良太: 種々のエネルギー吸収部材付き心棒架構の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集 第79巻 第706号, 2014.12
- 4) 篠崎洋三, 小室努, 藤野宏道, 河本慎一郎, 細澤治: エネルギー吸收集約型制振システムの開発と建築物への適用, 日本建築学会技術報告集, 第14巻, 第28号, pp. 453-458, 2008.10