

同調粘性マスダンパー付アウトリガー構造を用いた 中央コア型超高層建物の地震応答制御と実現可能性評価

FEASIBILITY STUDY OF SEISMIC RESPONSE CONTROL OF A CENTER CORE TYPE TALL BUILDING BY A NOVEL DAMPED OUTRIGGER SYSTEM WITH TUNED VISCOUS MASS DAMPERS

寺澤 友貴^{*1}, 宇田川 貴章^{*2}, 池田 理央^{*3}, 榎本 信隆^{*2}, 竹内 徹^{*4}

*Yuki TERAZAWA, Takaaki UDAGAWA, Rio IKEDA,
Nobutaka KASHIMOTO and Toru TAKEUCHI*

This paper proposed a novel damped outrigger system with tuned viscous mass dampers (TVMDs) for a Japanese tall building where the outrigger span was relatively larger than that of a typical tall building in the world. A series of generalized response spectrum analysis and nonlinear response history analysis for a typical Japanese tall building with a center core was performed to investigate the seismic response reduction effect. Moreover, the structural detail was designed to estimate the cost and cost performance index, and the feasibility of the TVMD damped outrigger system was strictly discussed.

Keywords: Tall Building, Tuned Viscous Mass Damper, Damped Outrigger System, Long Period and Long Duration Earthquake, Complex Eigenvalue Analysis

超高層建物, 同調粘性マスダンパー, ダンパー付アウトリガー構造, 長周期・長時間地震動, 複素固有値解析

1. 序

国際 NPO「高層ビル・都市居住協議会」の統計資料¹⁾に示されるように, 超高層建物の世界的需要が高騰が続いている。形状的に片持ちの棒と見做せる超高層建物では, せん断より曲げによる水平・鉛直応答(全体曲げ応答)が卓越するため, 地震地域においては, この全体曲げ応答を活用する応答制御構造^{2)~24)}が広く提案されている。

海外の超高層建物では, 簡単に高い付加減衰効果を得られ, 建築計画上の制約も少ないダンパー付アウトリガー構造³⁾が普及している。アウトリガー構造とは, 剛強な中央コアと建物外周柱(側柱)がアウトリガーを介して連結される構造形式であり, ダンパー付アウトリガー構造^{4)~7)}とは, このアウトリガーと側柱に生じる全体曲げ応答の鉛直変位差をダンパーの地震エネルギー吸収に利用する応答制御構造である。しかし, レンタブル比の都合で中央コア-側柱スパン 16m~20m が好まれる日本の超高層建物では, アウトリガーの曲げ剛性は同スパン 12m が標準の海外より最大約 20%まで劣化し⁸⁾, ダンパーの接合部として十分な剛性を確保できないため, 同構造は国内では殆ど普及していない。代わりに RC 造のハットトラスを活用する曲げ変形制御型制震構造⁹⁾, 剛強な大断面ブレース立面を活用する制振スリット付ブレースチューブ構造^{9)~11)}, コア部にダンパーを集中配置する従来型の応答制御構造の応用²⁾が利用されている。

これに対して, 近年, 石井ら¹²⁾の提案する同調粘性マスダンパー (Tuned Viscous Mass Damper, TVMD)を超高層建物の鉛直方向に配置する全体曲げ応答制御構造が注目を集め, 宇田川ら¹³⁾の制振改修へ

の適用, 堀ら¹⁴⁾・大田ら¹⁵⁾による応答制御効果の検証が進められている。TVMD とは, 見かけの質量効果を利用するダイナミックマスダンパー¹⁶⁾の一種であり, 粘性ダンパーと慣性接続要素を並列した粘性マスダンパー(VMD)に柔支持部材が接続され, 両者の付加振動系の同調効果によって卓抜した地震エネルギー吸収性能を発揮する。実際の TVMD は, 回転増幅機構を有する減衰コマの外筒に錘を付加した部材として斉藤・井上・五十子ら^{17)~18)}により実用化され, 井上・五十子ら^{19)~20)}, 池永ら^{21)~22)}により簡易設計法が検討されている。

一方, エネルギー吸収効果を自己増幅できる TVMD は, 曲げ剛性の確保が難しい日本のダンパー付アウトリガー構造においても抜本的な解決策になると考えられるが, 先行研究は Asai ら^{23)~24)}や Jia ら²⁵⁾によるアウトリガー剛性を無視した簡易振動系による応答制御の実演に限られており, その実現可能性は未だ不明な点が多い。特に TVMD は, 従来の粘性ダンパーより高価かつ同調効果による過大な部材力・変形が生じる性質があり, その実現可能性の評価においては, 単純な応答制御効果に留まらない具体的な TVMD 周辺の納まりや導入費用については費用対効果の検証が実用上不可欠である。

本研究では, 典型的な日本の中央コア型超高層建物を対象に, TVMD 付アウトリガー構造の実現可能性を検証する。まず 2 章と 3 章では数値解析概要と日本の超高層建物の典型的な動的応答特性を要約する。次の 4 章では様々な質量比と配置を有する TVMD の応答制御効果を比較する。最後の 5 章では現実的なケースを対象に具体的な納まりを設計し, 導入費用を試算して実現可能性を評価する。

^{*1} 東京科学大学 建築学系 准教授・博士 (工学)

^{*2} (株) 日建設計 修士 (工学)

^{*3} 元東京科学大学 大学院生・修士 (工学)

^{*4} 東京科学大学 名誉教授・博士 (工学)

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Institute of Science Tokyo, Dr.Eng. NIKKEN SEKKEI LTD., M.Eng.

Former Grad. Student, Institute of Science Tokyo, M.Eng.

Prof. Emeritus, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng.

2. 数値解析概要

2.1 検討対象の想定建物

Fig.1 に想定建物と数値解析モデルの概要を、Table 1 に主要部材諸元を示す。想定建物は、国内の既存建物を参考に設定した一辺 51.2m の正方形平面(中央コア-側柱スパン 16m)を有する軒高 235m(階高は 1 層 7.2m, 基準階 4~5m, アウトリガー階 8~11m)の超高層建物であり、主要な水平抵抗システムに 3 層アウトリガー構造が採用され、中央コアは内側をビルド H 形鋼の柱梁部材+鋼板耐震壁の井桁架構により補剛されている。アウトリガー階はアウトリガー高さ比 $\alpha=0.2, 0.6, 0.9$ の位置に設けられている。Fig.1(a) と Table 1 に示すように、側柱とセンターコア外周の柱部材には溶接箱型断面 CFT, 大梁にはビルド H 形鋼が採用され、アウトリガートラスにはビルド H 形鋼が弱軸使いで採用されている。本研究では、Fig.1(b) の赤枠で示す平面骨組を抽出し、TVMD を用いた応答制御構造の応答低減効果と実現可能性を比較分析する。ただし、この都合によりアウトリガートラスと側柱を切り離した状態を非制御状態と定義する。

2.2 TVMD を用いた応答制御構造の検討パラメータ

検討パラメータは、①TVMD 応答制御構造、②VMD 設置位置、③制御対象モード、④VMD 質量比 μ_s 、⑤アウトリガー曲げ剛性 k_t とし、それぞれが応答低減効果と実現可能性に与える影響を分析する。

①TVMD 応答制御構造は、(1)宇田川らの制振改修¹³⁾と同じ柱梁骨組の一部と地上を TVMD で接続すると Core TVMD 構造(Core, Fig.1(c)), (2)アウトリガートラス端部と地上を TVMD で接続する TVMD 付アウトリガー構造(SO, Fig.1(d1)(d2)), (3)アウトリガートラス端部と隣接する側柱を TVMD で接続しアウトリガー階で TVMD を納める TVMD 付アウトリガー構造(TO, Fig.1(e))を検討対象とする。なお、従来型のダンパー付アウトリガー構造(LO, Fig.1(f))として、現状の 3 層アウトリガー構造に線形粘性ダンパーを設置し

した場合も検討する。なお、Core TVMD 構造と SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の柔支持部材は各階を貫通させている。

②VMD 設置位置は、(1)Core TVMD 構造では軒高($\alpha=1.0$)または 3 層目($\alpha=0.9$)のアウトリガー階付近に集約設置した場合、(2)SO 型 TVMD 付アウトリガー構造では 2 層目($\alpha=0.6$)または 3 層目($\alpha=0.9$)のアウトリガー階に集約設置した場合、(3)TO 型 TVMD 付アウトリガー構造では 2 層目($\alpha=0.6$)のアウトリガー階に集約設置した場合と 1~3 層に分散設置した場合を検討する。

③制御対象モードは、1 次(Core TVMD, SO 型または TO 型 TVMD 付アウトリガー構造)、1 次+2 次(SO 型 TVMD 付アウトリガー構造)、3 次(TO 型 TVMD 付アウトリガー構造)を検討する。特に 1 次+2 次モード制御を検討する SO 型 TVMD 付アウトリガー構造(Fig.1(d2))では、各モード制御に適したアウトリガー高さに関する筆者らの知見⁹⁾と 3 章の議論に基づき、2 層目($\alpha=0.6$)のアウトリガー階の VMD は 1 次、3 層目($\alpha=0.9$)のアウトリガー階の VMD は 2 次を制御対象モードとする。なお、手元の検討では、この他の高次モード制御も試みたが、4 章にて後述する通り、特筆すべき有効性が確認されなかったため、本文では掲載を省略している。

この他に④VMD 質量比 μ_s は 8%までを検討する。また、⑤アウトリガー曲げ剛性 k_t は実物(Fig.1(a))通りの場合($k_t=80\text{kN/mm}$)を標準とし、1 次モード制御の SO 型 TVMD 付アウトリガー構造のみアウトリガー曲げ剛性が十分に剛な場合($k_t=1000\text{kN/mm}$)も検討する。

2.3 数値解析モデル

柱、大梁、アウトリガートラス、鋼板耐震壁は対応する断面諸元を設定した弾性梁要素でモデル化する。CFT 柱は鋼管と充填コンクリートを考慮した等価な断面積と断面二次モーメントを設定する。大梁はスラブの補剛効果を考慮する。Fig.1(j)に示すように、鋼板耐震壁は壁エレメント法によりモデル化する。Fig.1(i)に示すように、

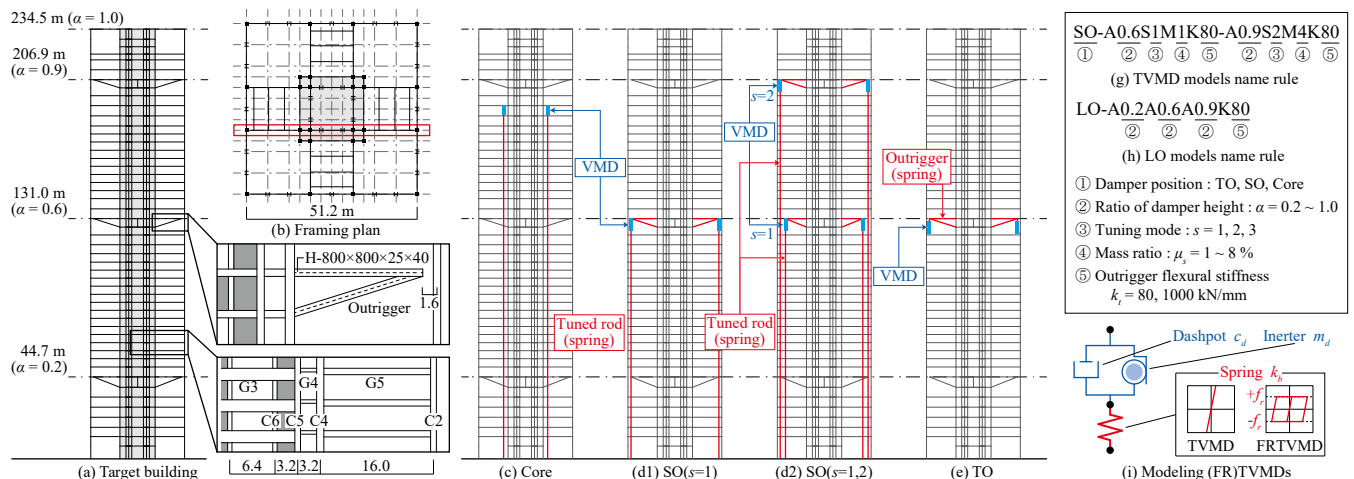


Fig.1 Numerical models

Table 1 Building specifications

Floor	Column (CFT)		Column (WH)	Girder(WH)			Steel wall
	C2A, C4A	C5A	C6	G5	G4	G3	
41	800×800×32×32	800×800×25×25	600×300×12×19	900×300×16×28	900×300×9×19	1700×300×9×19	12
~45	~800×800×40×40	~800×800×36×36	~600×300×12×19	~1400×500×19×40	~1400×300×9×19	~1700×350×12×36	
31	800×800×40×40	800×800×25×25	600×300×12×19	900×500×16×32	500×300×12×19	1700×300×9×19	12
~40	~800×800×50×50	~800×800×28×28	~600×300×12×25	~900×500×16×40	~900×300×9×19	~1700×300×9×25	
21	800×800×50×50	800×800×28×28	600×300×12×25	900×500×16×40	500×300×12×19	1700×300×9×25	12
~30	~800×800×60×60	~800×800×40×40	~600×400×12×36	~900×500×16×40	~900×300×12×25	~1700×400×16×36	
11	800×800×50×50	800×800×40×40	600×400×12×36	900×500×16×40	500×300×16×25	1700×400×16×36	12
~20	~800×800×80×80	~800×800×50×50	~600×400×12×36	~900×500×16×40	~500×300×16×25	~1700×400×16×36	
1	800×800×50×50	800×800×50×50	600×400×12×36	900×500×16×40	500×300×16×25	1700×400×16×36	12
~10	~1000×1000×100×100	~800×800×50×50	~600×400×16×40	~1400×500×16×40	~1400×400×19×32	~4200×400×16×40	~19

VMD は慣性コマを模擬する慣性接続要素、減衰コマを模擬する線形粘性要素でモデル化し、柔支持部材はリンク要素でモデル化する。5 章で後述するように、この柔支持部材は座屈補剛または初期張力導入により圧縮と引張どちらも弾性応答を維持するものとする。軸力制限機構付 TVMD(FRTVMD)を検証する場合(4.4 節)では、このリンク要素に剛塑性型の復元力特性を与えて軸力制限機構を模擬する。従来型のダンパー付アウトリガー構造の線形粘性ダンパーはダッシュポットでモデル化する。また、各層は面内剛床を設定する。

2.4 TVMD および線形粘性ダンパーの諸元の算定方法

本検討の TVMD は、設計実務の現場で行われている方法に従って諸元を算定する。初めに VMD の等価質量 m_d 、粘性減衰係数 c_d 、柔支持部材剛性 k_b の初期値を主系の減衰を無視した変位応答倍率最適調整条件¹⁹⁾より式(1)~式(5)で決定する。次に主系の減衰の影響を考慮するためインパルス入力に対する伝達関数を時刻歴応答解析より求め k_b 、 c_d を調整する。具体的には伝達関数が必ず 2 点を通る定点理論に基づき、まず c_d 固定で定点の高さが等価になる k_b を探索し、その後 k_b 固定で伝達関数のピークが最小となる c_d を探索する。

$$\beta_{opt} = \omega / \omega_s = (1 - \sqrt{1 - 4\mu_s}) / 2\mu_s \quad (1)$$

$$h_{d,opt} = c_d / 2m_d \omega = \sqrt{3(1 - \sqrt{1 - 4\mu_s})} / 4 \quad (2)$$

$$m_d = \mu_s M_{fs} / (s u_l - s u_r)^2 \quad (3)$$

$$c_d = 2h_{d,opt} \cdot m_d \cdot \beta_{opt} \cdot \omega_s \quad (4)$$

$$k_b = m_d \cdot \beta_{opt}^2 \cdot \omega_s^2 \quad (5)$$

ここに M_{fs} と ω_s は主系の s 次広義質量と固有円振動数、 $s u_l$ と $s u_r$ は TVMD を設置する 2 節点の鉛直方向の s 次刺激関数、 ω は付加系の固有円振動数、 β_{opt} は最適同調振動数比、 $h_{d,opt}$ は最適減衰定数である。

ダンパー付アウトリガー構造の線形粘性ダンパーの減衰係数 C_{dj} は筆者ら⁶⁾が提案する最適ダンパー剛性比 R_{dbj} 推定式より決定する

$$R_{dbj} = c_{dj} \cdot \omega / k_{bj} = C1 \times \alpha_1^{C2} \times \alpha_2^{C3} \times \alpha_3^{C4} \times S_{bc1}^{C5} \times S_{bc2}^{C6} \times S_{bc3}^{C7} + C8 \quad (6)$$

ここに j は下から数えたアウトリガー番号、 k_b はアウトリガー曲げ剛性と側柱軸剛性によるダンパー接合部剛性、 S_{bc} はコア部-接合部剛性比、C1~C8 は回帰係数である。詳細は文献 6) に示す。同式より C_{dj} は 41.0 kNs/mm (1 層目)、34 kNs/mm (2 層目)、26 kNs/mm (3 層目) を設定する。これらはリリース速度 30mm/s とすると 1240kN (1 層目)、1030kN (2 層目)、790kN (3 層目) のオイルダンパーに相当する。

2.5 数値解析手法

数値解析手法は一般化応答スペクトル解析^{27)~31)}(GRSA)と時刻歴応答解析(RHA)を用いる。比例減衰行列は初期剛性比例型とし、1 次モードの初期減衰比を 2% とする。

GRSA は複素固有値解析と応答スペクトル法の収斂計算を中核とする数値解析群であり、最大地震応答に対する各モードの寄与の分析に用いる。最大応答値は非比例減衰系用の修正 CQC 法³¹⁾より算出し、主要な減衰比 ξ_0 の応答スペクトル値は外部ファイルから事前に与え、任意減衰比 ξ の応答スペクトル値は、減衰比の近い上記の応答スペクトル値に応答低減効果係数 $D_h^{28)}$ を乗じて換算する。

$$R_{occ} = \sqrt{\sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n B_s B_r S_s(\omega_s, \xi_s) S_r(\omega_r, \xi_r) \cos(\theta_s - \theta_r) \rho_r} \quad (7)$$

ここに s と r はモード番号、 ξ はモード減衰比、 ρ は各種モード相関係数、 ω は固有円振動数、 S は応答スペクトル値、 $B = \text{Re}(\lambda^* \beta \phi) / \sin \theta$ 、 $\theta = \tan^{-1}(-\text{Re}(\lambda^* \beta \phi) / \text{Re}(\beta \phi))$ 、 λ は複素固有値、 β は複素刺激係数、 ϕ は

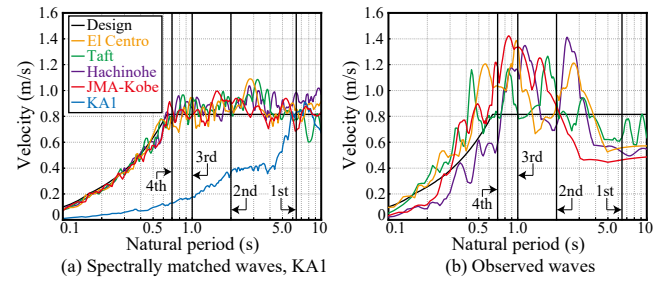


Fig.2 Response spectra of input ground motions

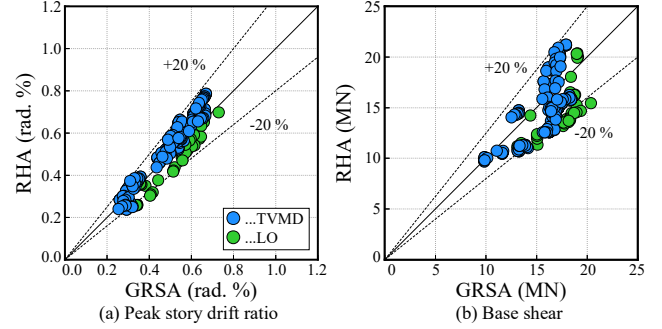


Fig.3 Comparison of GRSA vs RHA

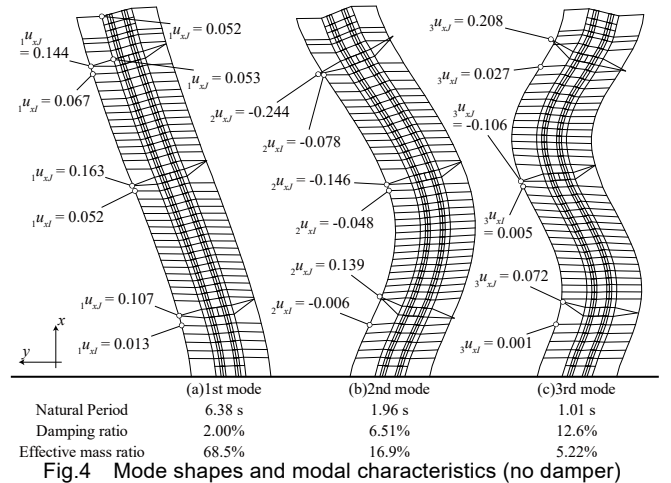


Fig.4 Mode shapes and modal characteristics (no damper)

複素固有ベクトル成分、*は複素共役である。

RHA は TVMD の調整および最大地震応答の収集に用いる。増分変位の計算はモード法³²⁾(TVMD 調整)と Newmark β 法($\beta = 1/4$)を用いる。特に Newmark β 法を用いる場合は、座標移動による大変形と軸力変動による幾何剛性は考慮する。なお、後述する Table 3 に示すように、今回検討した TVMD 最大軸力は数千 kN オーダーであり、超高層建物の柱軸力比の変動に与える影響は微小であった。

2.6 入力地震動と GRSA の精度

Fig. 2 に入力地震動の応答スペクトルを示す。同図はダンパー設置前の固有周期を重ねて示している。本研究では、実務設計の慣習に従い、PGV を 50cm/s で基準化した観測波 4 種(観測 El Centro, 観測 Taft, 観測 Hachinohe, 観測 JMA-Kobe)、建設省告示第 1457 号³³⁾の第 2 種地盤の設計用スペクトルに適合した告示波 4 種(告示 El Centro, 告示 Taft, 告示 Hachinohe, 告示 JMA-Kobe)、長周期・長時間地震動の例として南海トラフの海溝型巨大地震を想定する人工地震波³⁴⁾(関東圏 KA1)の合計 9 波を入力地震動とする。ただし、観測波では卓越振動モードが励起されない入力の変位値は小さく、告示波では最大応答がほぼ変わらないことが結果的に判明したため、本

論文内では、高次モードが励起される観測 JMA-Kobe、告示波の中で応答が最も大きい場合が多い告示 Hachinohe、1 次モードのみが励起される KA1 波を代表的な入力地震動として議論の対象とする。

Fig. 3 に GRSA と RHA の最大応答値の比較を示す。ベースシアでやや誤差が大きくなるものの、GRSA は RHA を概ね 20 % 以内の誤差で捉えることを確認している。

3. 日本の中央コア型超高層建物の典型的な動的応答特性

TVMD を用いた応答制御構造の分析に先立ち、ダンパーを導入する前のモデルを用いて日本の中央コア型超高層建物の動的応答特性を整理し、地震応答低減に効果的な制御対象モードを分析する。

Fig.4 に非制御モデルの卓越振動モードのモード形状、固有周期、有効質量、モード減衰比を示す。同図には TVMD の設計に利用する鉛直方向刺激関数値 ${}_s u_{xj}$ と ${}_s u_{xj}$ も併記している。同図(a)~(c)に示すように、ダンパーが受ける相対刺激関数値 ${}_s u_{xj} \rightarrow u_{xj}$ はアウトリガー先端と地上を接続する SO 型、アウトリガー階で完結する TO 型に依らず、1 次モードでアウトリガー高さ比 $\alpha=0.6$ 、2~3 次モードで $\alpha=0.9$ の場合が最も大きくなる。この結果は各モード制御に適したダンパー付アウトリガーの高さに関する筆者らの知見⁹⁾と対応しており、超高層建物の全体曲げ応答制御では、TVMD でも同様の位置に設置すると効率的であることが分かる。

Fig.5 に地震応答の高さ方向分布の代表例を、Table 2 も地震応答

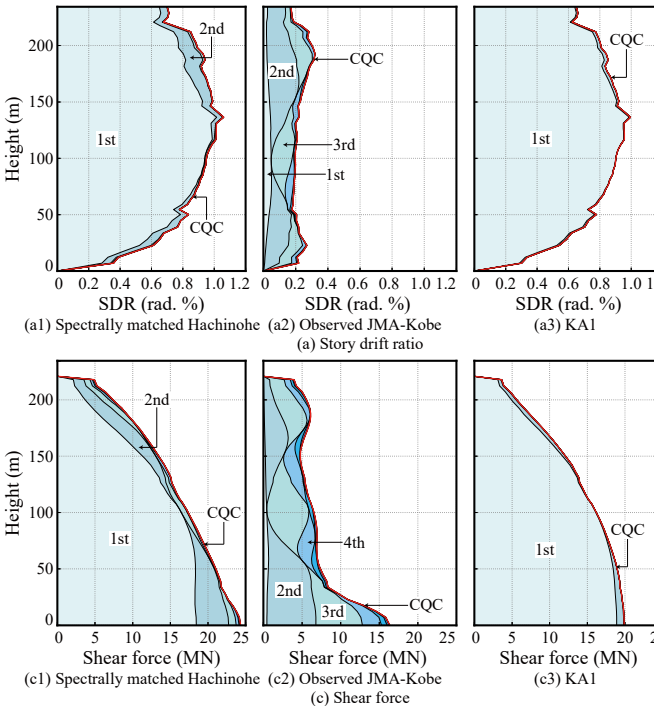


Fig.5 Modal contribution in seismic response (no damper)

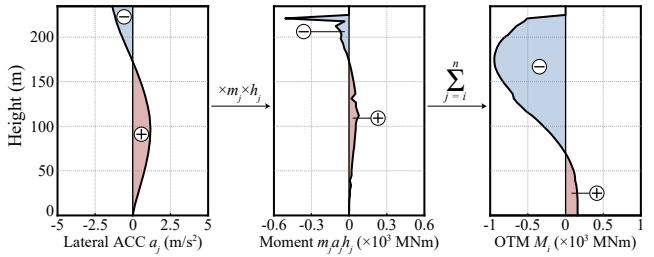


Fig.6 2nd mode response (no damper, Observed JMA-Kobe)

ピーク値のまとめを示す。Fig.2 と Fig.5(a)(b)に示すように、層間変形角と転倒モーメントは告示波や KA1 波など 1 次モードが励起されるときに応答が大きくなり、250m 級の超高層建物であっても高次モードの影響は 2 次までに限られ、1 次モード支配型の地震応答と言える。Fig.5(a2)(b2)に示すように、観測 JMA-Kobe など 1 次モードが励起されない入力では、高次モード応答が支配的となるものの、全体的に応答値が小さく設計上致命的とはならない。なお、Fig.5(b1)(b2)に示すように、高次モードの転倒モーメントは基部に向かって小さくなる傾向にある。Fig.4(b) と Fig.6 の 2 次モード応答の高さ方向分布に示すように、これは高次モードの水平加速度に符号が反転する層が混在することで、各層モーメントの総和として計算される転倒モーメントが上層から下層に向かって相殺されるためである。

Fig.5(c1)(c3)の比較に示すように、層せん断力も 1 次モードが励起されるときに応答が大きくなる傾向にあるものの、1 次モードだけが励起される場合(KA1)より、高次モードも励起される場合(告示波)の方がベースシアは大きくなり、その約 20%を 2 次モードが占めるなど 1~2 次モード支配型の地震応答と言える。Fig.5(c2)に示すように、1 次モードが励起されない場合(観測 JMA-Kobe)のベースシアは、3 次モード以上の影響も無視できなくなるが、1 次モードが励起される場合より小さく特に基礎設計において致命的とは言えない。

Fig.5(d)に示すように、水平加速度は高次モードが励起されるときに応答が大きくなり、高次モード支配型の地震応答と言える。

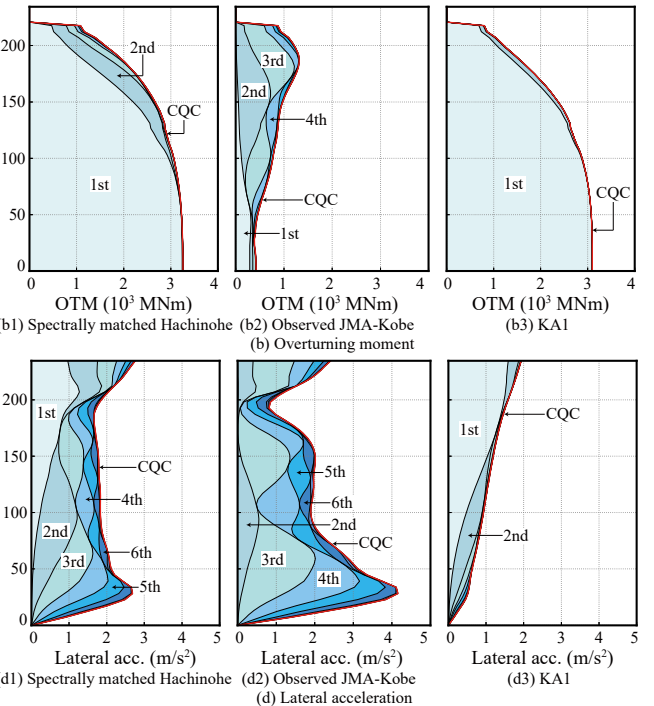


Table 2 Summary of peak seismic response (no damper)

		Peak SDR (rad. %)	OTM ($\times 10^3$ MNm)	Base shear (MN)	Lateral acc. (m/s^2)
Observed	Hachinohe	0.392	0.87	11.4	2.27
	JMA-Kobe	0.278	0.42	12.6	4.00
	El centro	0.495	1.51	14.9	4.18
	Taft	0.614	2.05	16.2	3.38
	KA1	0.984	3.06	19.1	1.79
Spectrally matched	Hachinohe	1.003	3.23	21.9	2.20
	JMA-Kobe	0.731	2.08	21.5	3.16
	El centro	0.914	2.83	17.5	2.92
	Taft	0.787	2.55	21.9	3.07
	KA1	0.984	3.06	19.1	1.79

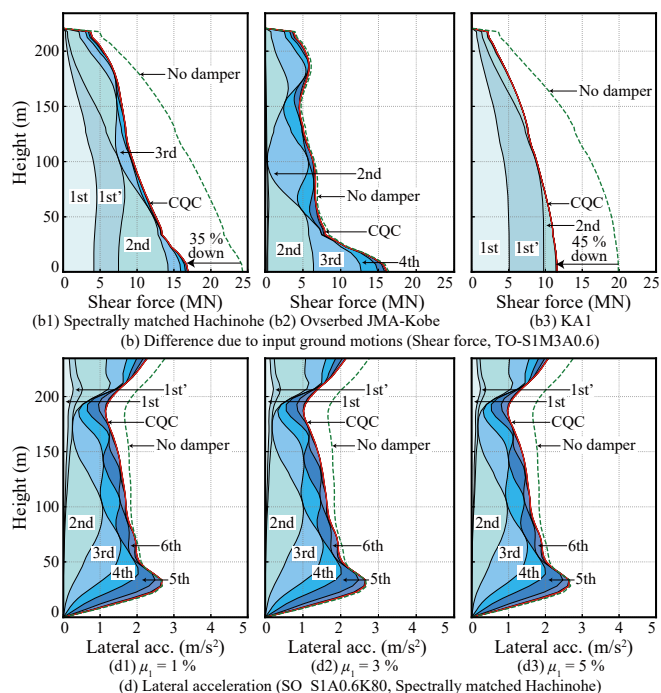
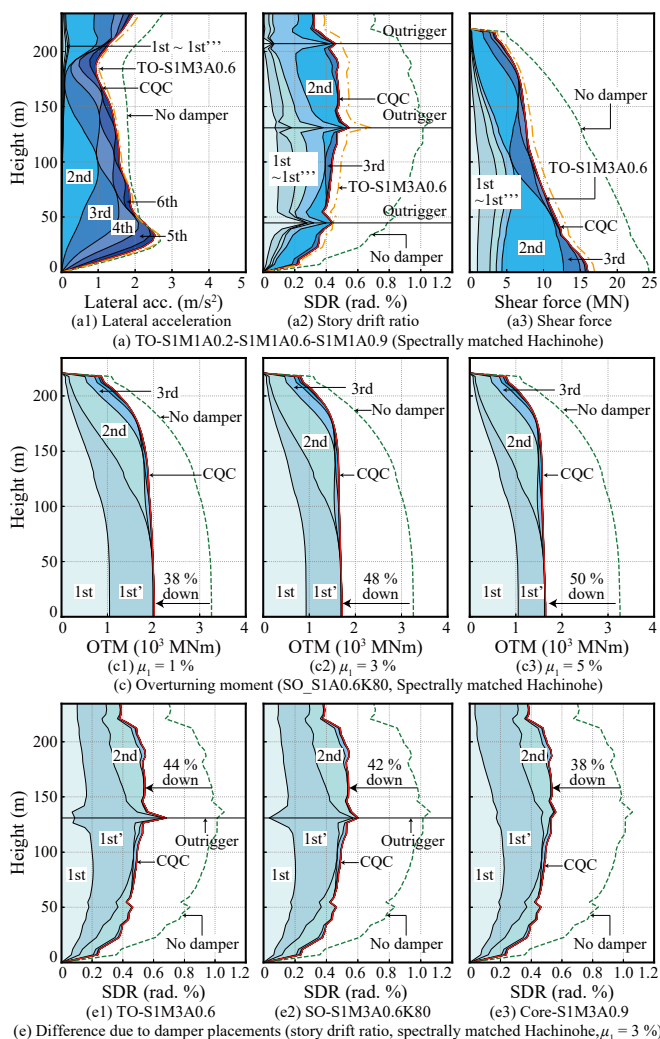


Fig.7 Modal contribution in seismic response (1st mode control)

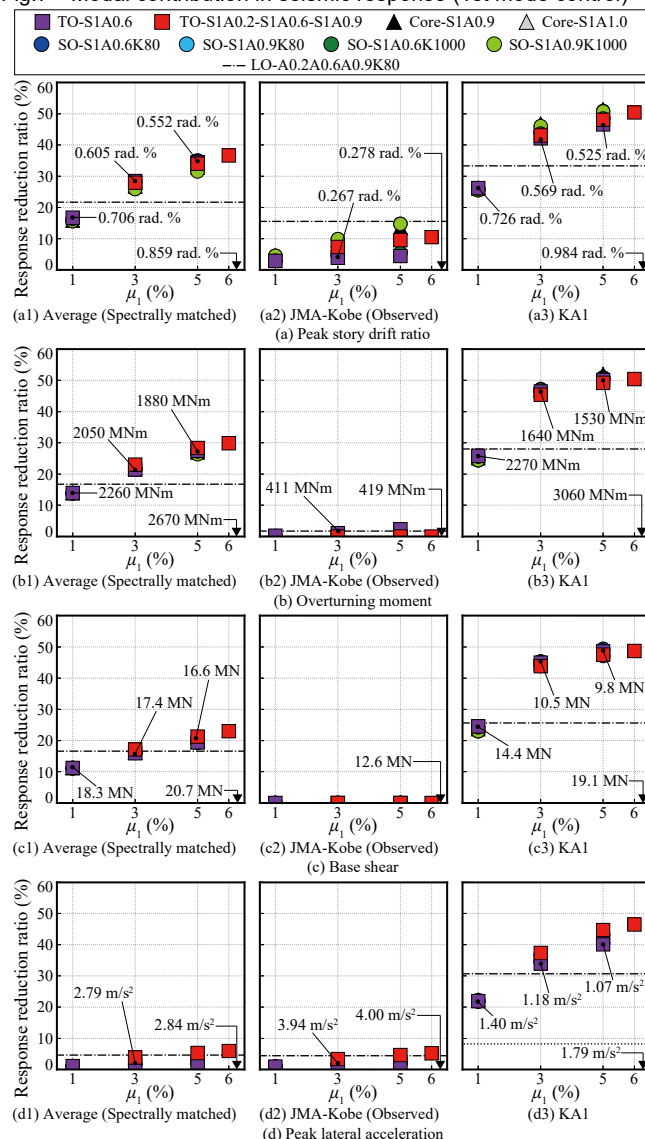


Fig.8 Response reduction ratios (1st mode control)

Table 2 と以上の議論に示すように、日本の中央コア型超高層建物では、水平加速度を除いて告示波入力時の地震応答が設計上致命的となる傾向にあり、層間変形角、転倒モーメント、ベースシアを包括的に低減するためには、TVMD を用いた応答制御構造においても、筆者らがダンパー付アウトリガー構造について提唱している知見⁶⁾と同様に、1 次モードを主な制御対象モードとすることが望ましいと考えられる。

4. TVMD を用いた応答制御構造の地震応答低減効果

4.1 1 次モードを制御対象とした場合の地震応答低減効果

まず、3 章の結論に基づき、1 次モードを制御対象とする TVMD を用いた応答制御構造の地震応答低減効果を分析する。Fig.7 に各種地震応答の高さ方向分布の代表例を、Fig.8 に質量比-地震応答低減効果関係を、Fig.9 に伝達関数の代表例を示す。Fig.8 の地震応答低減効果は非制御時に対する制御時の地震応答ピーク値の比、Average は告示適合 4 波の平均応答、黒一点鎖線は従来型の線形粘性ダンパー付アウトリガー構造(LO)の応答低減効果を示す。また、Fig.9(a)(b)に示すように、制御対象モードの伝達関数は TVMD の同調効果によりピークが複数に別れ、例えば TVMD を一箇所にのみ設置する場合(Core, SO, TO)では 2 山、三箇所に設置する場合(TO)では 4 山に分かれ、Fig.7 などに示す 1st, 1st', 1st''...はそれらの山の位置の振動モードに対応し、実際には全て非制御時の 1 次モードに相当する。

なお、TVMD 配置で多少の差はあるものの、1 次モード制御時の 1 次モード減衰率は、約 4.0~4.5%(質量比 1%)、約 6.0~7.0%(質量比 3%)、約 7.5~9.5%(質量比 5%)であり専ら質量比依存の傾向が確認された。

Fig.7(a)の TO 型 TVMD 付 3 層アウトリガー構造の比較に示すように、制御対象の 1 次モード成分が支配的な応答(層間変形角、転倒モーメント、層せん断力)は、同構造により応答が顕著に低減する。一方、水平応答加速度では、1 次モード成分が卓越する上層(Fig.5(d1))の応答は低減されるが、高次モードが支配的な下層のピーク位置の応答は殆ど低減しない。また、Fig.7(b)の比較に示すように、制御対象モードの応答が励起されない入力の場合(Fig.5(c2)と Fig.7(b2))では、同構造による応答低減効果は殆ど期待できない。なお、Fig.7(a2)に例示するように、TVMD は慣性質量の同調効果により地震エネルギー吸収能力を自己増幅する機構であるため、特に TVMD が接続するアウトリガートラス層の層間変形角が励起される現象も確認された。層間変形角に対して層せん断力は励起されないことから、層間変形角の励起は、中央コアの大梁や鋼板耐震壁に由来するアウトリガートラス脚部架構(中央コア)のせん断剛性不足が原因と考えられる。

Fig.7(c)(d)と Fig.8 に示すように、制御対象モード成分が支配的な地震応答(1 次モードなら層間変形角、転倒モーメント、層せん断力)では、応答低減効果は質量比に比例して向上し、制御対象モードが支配的でない地震応答(1 次モードなら水平加速度)では、質量比を増大させても応答低減効果は殆ど変わらない。ただし、Fig.5(d3)と Fig.8(d3)に例示するように、この理屈が成立する範囲においては、水平応答加速度であっても制御対象モード成分のみが励起される特殊な入力の場合に高い応答低減効果が獲得できる現象が生じる。一方、Fig.7(e)と Fig.8 に示すように、木田ら³⁶⁾の指摘通り TVMD を多重化した場合(3 層に分散した TO 型 TVMD 付アウトリガー構造)に応答低減効果が若干向上する傾向が確認されたものの、250m 級の中央コア型超高層建物に対する TVMD を用いた応答制御構造の地震応答低減効果は、専ら質量比のみに依存し、VMD 設置位置やアウトリガートラスの曲げ剛性の影響は微小であることが分かる。

Fig.8 に示すように、TVMD を用いた応答制御構造は、従来型のダンパー付アウトリガー構造より概ね高い応答低減効果を示し、アウトリガートラスの曲げ剛性の確保が難しい日本の超高層建物の地震応答制御に適している一方で、制御対象モードが励起されない入力に対する地震応答低減効果は、従来型のダンパー付アウトリガー構造より劣る場合があることも確認された。

なお、本節で述べた定性的な傾向は、本研究が対象とする全ての TVMD を用いた応答制御構造で同様であることを確認している。

4.2 高次モードを制御対象とした場合の地震応答低減効果

次に高次モードを制御対象とする TVMD を用いた応答制御構造の地震応答低減効果を分析する。ここで Fig.9(c)(d)に示すように、SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の 1 次+2 次モード制御では、2 次モード制御の応答低減効果を検証するため 2 次モードの質量比のみを増やした検証を行う。また、TO 型 TVMD 付アウトリガー構造の 3 次モード制御では、後述するとおり殆ど応答低減効果を確認できなかったため、質量比は 3%を代表として示す。

Fig.10 に 1 次+2 次モード制御時または 3 次モード制御時の各種地震応答の高さ方向分布の代表例を、Fig.11 に質量比-地震応答低減効

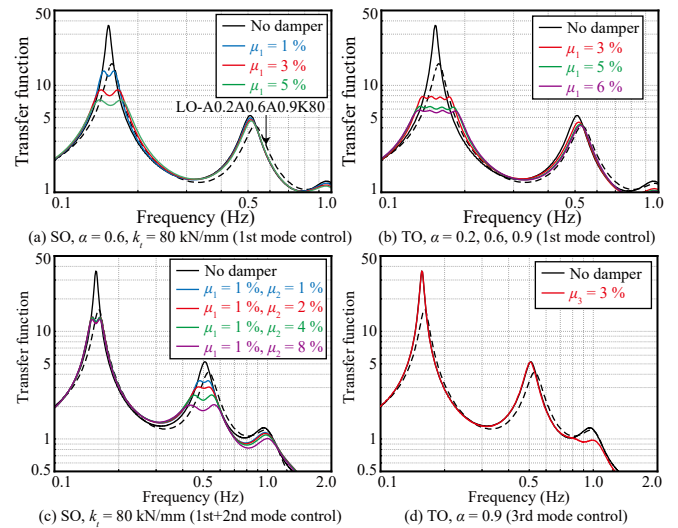


Fig.9 Transfer function

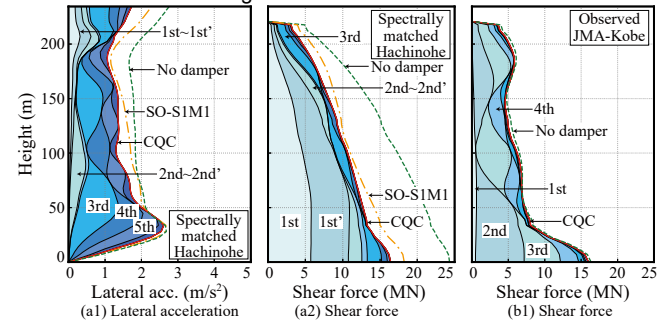


Fig.10 Modal contribution in seismic response (Higher mode control)

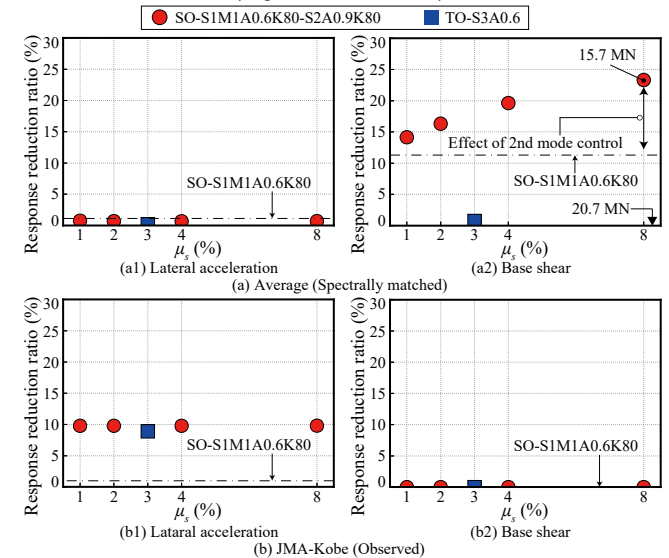


Fig.11 Peak seismic response (Higher mode control)

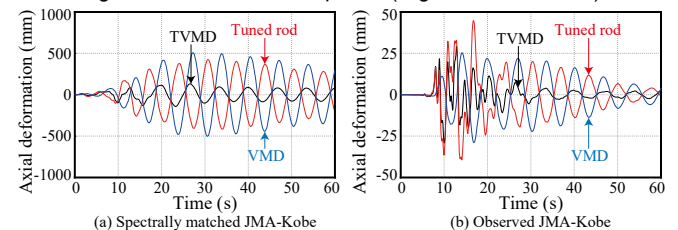


Fig.12 Axial deformation in TVMD (SO-S1M1A0.6K80)

果関係を示す。Fig.11 の横点線は非制御時と 1 次モード制御時(質量比 1%)の SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の応答値を示す。Fig.10(a)

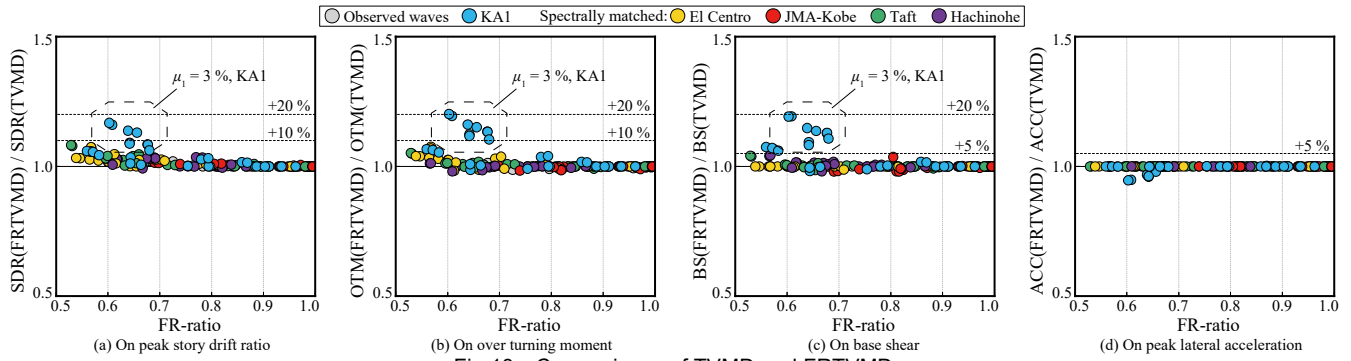


Fig.13 Comparisons of TVMD and FRTVMD

と Fig.11 に示すように、2 次モードを制御対象とすることで各種地震応答の 2 次モード成分は低減される傾向にあり、1 次モード制御時から水平応答加速度は約 10%、ベースシアは約 20%の応答低減効果となる。また、Fig.9(d)に示すように、3 次モード制御では、実務で使われる設計手順に従っても、伝達関数のピークが複数に分かれるように TVMD を調整したものの、Fig.10(b)と Fig.11 に示すように、一部の例外(Fig.11(b1))を除いて応答加速度とベースシアは殆ど低減されない結果となった。これらの結果は、TVMD を用いた応答制御構造の高次モード制御は 2 次が限界であり、採用する場合ではベースシアの応答低減効果の向上を期待した 1 次+2 次モード制御が現実的であることを示唆する。

4.3 TVMD の軸力制限値と地震応答低減効果の劣化

続いて Fig.12 に代表的な柔支持部材(Tuned rod), 慣性接続要素(VMD), 部材全体(TVMD)の軸変形応答時刻歴を示す。前節までに示すように、TVMD を用いた応答制御構造は制御対象モードの応答が励起される入力に対して高い応答低減効果が確認される一方、同図の比較に示すように、その際の VMD および周辺支持部材には同調効果によりそれぞれ過大な応力および変形が生じるため、実際の計画では、VMD に軸力制限機構を設けて荷重を解放し、過大な変形を同機構内に吸収してこれらの部材の応答を抑制する必要がある。この軸力制限値は、ある規格の製品を複数並列使用して調整可能であり、軸力制限比 0.5 以上の範囲では線形時と同等の地震応答低減効果を得られるという知見¹⁹⁾が得られている。本検討では、一般に流通するリリーフ荷重 1.2MN の製品を複数使用して軸力制限値を全 9 波入力のピーク最大軸力の約 0.5 倍(他の入力では 0.5 以上 1.0 以下になる)に設定し、同知見に基づく設計の妥当性を検証する。軸力制限機構付き同調粘性マスダンパーは FRTVMD と呼ぶ。

Fig.13 に実効の軸力制限比(FR-ratio)に対する各種応答の増幅率を、Table3 に VMD 最大応答のまとめを示す。同表の n_d はリリーフ荷重 1.2MN の FRTVMD の導入台数である。Fig.13 に示すように、殆どの入力地震動と実効の軸力制限比に対して地震応答低減効果は線形時と概ね同等であり、軸力制限比を約 0.5 とする設計の妥当性が確認できる。ただし、KA1 波のように特定モードの成分だけが特に励起される入力では、線形応答時からピーク層間変形角で約 10%、ベースシアと基部の転倒モーメントで約 20%特異的に増幅する場合もあるため、同様な現象を避けることを意図する場合では、TVMD 周辺の部材設計へ影響するものの、より線形に近い軸力制限比が推奨される。一方、Table 3 の赤枠に示すように、TVMD 一箇所あたりの質量比を過小に設計すると、同調に必要な柔支持部材の断面積が

Table 3 Summary of peak response in TVMD and FRTVMD

Model	α	TVMD			n_d	FRTVMD			
		VMD axial force (kN)				Tuned Rod stress (N/mm ²)	VMD deform. (mm)		
		Observed JMA-Kobe	KA1	Max			Observed JMA-Kobe	KA1	Max
TO-SIM1A0.6		220	4,080	4,080	2		20	425	430
TO-SIM3A0.6		660	5,100	5,700	3		17	235	235
TO-SIM5A0.6		1,030	5,730	6,400	3		4	104	104
TO-SIM1A0.2	0.2	460	3,270	3,290	2		14	313	315
-SIM1A0.6	0.6	310	2,720	2,720	2		26	334	371
-SIM1A0.9	0.9	480	3,380	3,390	2		9	223	228
TO-SIM1.7A0.2	0.2	770	3,770	3,960	2		13	205	205
-SIM1.7A0.6	0.6	540	3,010	3,290	2		25	207	245
-SIM1.7A0.9	0.9	740	3,880	3,990	2		8	144	155
TO-SIM2A0.2	0.2	920	3,930	4,140	2		12	178	178
-SIM2A0.6	0.6	670	3,110	3,640	2		24	179	211
-SIM2A0.9	0.9	860	3,980	4,180	2		7	126	136
SO-SIM1A0.6K80		150	2,700	2,700	2	1,138	29	847	847
SO-SIM3A0.6K80		450	3,520	3,960	2	282	25	342	342
SO-SIM5A0.6K80		770	4,040	4,710	2	115	23	270	285
SO-SIM1A0.9K80		280	3,000	3,000	2	528	26	681	681
SO-SIM3A0.9K80		840	3,920	4,290	2	113	23	279	279
SO-SIM5A0.9K80		1,370	4,490	5,200	3	45	21	230	236
SO-SIM1A0.6K1000		150	2,690	2,690	2	1,174	29	842	842
SO-SIM3A0.6K1000		450	3,510	3,940	2	345	25	341	341
SO-SIM5A0.6K1000		780	3,970	4,590	2	177	23	264	282
SO-SIM1A0.9K1000		280	3,010	3,010	2	566	26	679	679
SO-SIM3A0.9K1000		830	3,960	4,350	2	154	23	279	279
SO-SIM5A0.9K1000		1,370	4,400	5,090	3	105	21	227	232
Core-SIM1A0.9		640	8,370	8,370	4	162	9	197	197
Core-SIM3A0.9		1,940	10,900	12,170	6	74	8	110	110
Core-SIM5A0.9		3,270	12,820	15,030	7	46	8	81	81
Core-SIM1A1.0		680	8,550	8,550	4	134	9	190	190
Core-SIM3A1.0		2,050	11,210	12,540	6	58	8	107	107
Core-SIM5A1.0		3,430	12,780	14,900	7	34	8	78	78

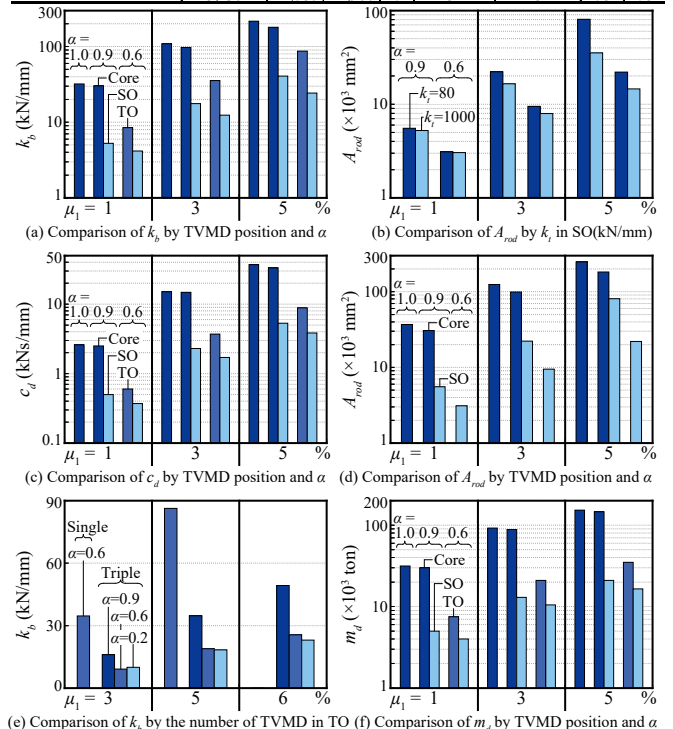


Fig.14 Comparisons of TVMD specifications (1st mode control)

小さくなり軸応力が過大となる場合や、小さい質量比に対して十分

な同調効果を発揮するために VMD 最大軸変形が一般的な許容ストローク 300mm を超える場合があり、軸力制限による TVMD の過大応答の回避は適切な質量比の設計が前提条件となる。

4.4 TVMD 諸元に基づく効率的な VMD 設置位置

さらに Fig.14 に質量比を横軸にとった 1 次モードを制御対象とする代表的な TVMD 諸元の比較を示す。同図縦軸の m_d , c_d , k_b は TVMD の等価質量, 粘性減衰係数, 柔支持部材剛性であり, A_{rod} は各モデルの柔支持部材の長さから計算される等価な鉄骨部材の断面積である。Fig.14 の比較と Fig.4 に示すように, Core TVMD 構造よりも SO 型・TO 型 TVMD 付アウトリガー構造の方(Fig.14(a)(c)(f))が, TVMD 付アウトリガー構造でもアウトリガー高さ比 α は 0.9 より 0.6 の方(Fig.14(b))が, アウトリガートラスの曲げ剛性は高い方(Fig.14(b))が, TVMD 付アウトリガーは分散した方(Fig.14(e))が, TVMD 諸元を低く抑えることができ経済的であることが分かる。この結果は, 地震応答低減効果の観点(4.1 節)で言えば同応答制御構造の性能は質量比のみに依存し, TVMD は建築計画上の制約により様々な位置に設置して良いことになるが, 実際には TVMD は地震エネルギーを効率よく吸収できる位置に設置し, 適切な質量比と軸力制限を設定して過大な応答にも対処する設計(4.3 節)が現実的であることを示唆する。特に日本の中央コア型超高層建物に TVMD 付アウトリガー構造を採用する場合は, 従来型のダンパー付アウトリガー構造より高効率で運用するための TVMD 質量比は 3%~5%以上が推奨される。

5. TVMD を用いた応答制御構造の納まり試設計と実現可能性評価

5.1 対象モデル

最後に代表的なモデルの TVMD 周辺を試設計し, 新築物件を想定した導入費用と費用対効果指標 CP 値を試算し, 4 章までの知見に加えて納まりや経済的な観点から TVMD を用いた応答制御構造の実現可能性を評価する。Table 4 に対象モデルの一覧を示す。本章では, 4 章までの知見より, (1)1 次モードを制御対象とすること, (2)地震応答低減効果が同等で費用対効果を明確に比較できること, (3)それぞれの応答制御構造の中でもより高効率な VMD 配置であること, (4)TVMD 周辺に過大な応答が生じない質量比であることを基準に, 質量比 3%の Core TVMD 構造(Core-S1M3A0.9)と SO 型または TO 型の TVMD 付アウトリガー構造(SO-S1M3A0.6K80, TO-S1M3A0.6K80)を主要な評価対象とし, さらに質量比 1%の Core TVMD 構造(Core-S1M1A0.9)と質量比 5%の SO 型 TVMD 付アウトリガー構造(SO-S1M5A0.6K80)を加えた合計 5 種類で質量比の影響を分析する。また, 従来型との比較を目的に線形粘性ダンパー付単層アウトリガー構造(LO-A0.6K80)と同三層アウトリガー構造(LO-A0.2A0.6A0.9K80)の導入費用も試算する。これらのモデルの全 9 波中の地震応答ピーク値のまとめは次々項の Table 5 に示す通りである。なお, SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の VMD 最大変形は一般的なストローク値 300 mm を超過する場合(Table 3)があるが, (2)の比較を目的に将来より高性能な製品が流通すると仮定して SO-S1M3A0.6K80 を試設計し, より現実的なケースとして SO-S1M5A0.6K80 も採用した。なお, 本検討の TVMD は全て FRTVMD であり, 4.3 節と同様に軸力制限値を全入力ピーク最大軸力の約 0.5 倍(他の入力では 0.5 以上 1.0 以下になる)に設定している。

5.2 Core TVMD 構造の TVMD 周辺の納まり試設計

Table 4 Target model specifications for the trial TVMD design

Model ID	VMD		Tuned rod				Outtrigger
	m_d (ton)	n_d	Bracing method	Area (mm ²)	Section	Length (m)	
Core-S1M1A0.9	58,200	8	Stiffener	55,100	4φ267×16	192.7	
Core-S1M3A0.9	175,000	12	Stiffener	182,000	4φ400×40	192.7	
SO-S1M3A0.6K80	18,500	4	Stiffener	16,900	4BRB(1250kN)	131	80.0
			Pre-tension①		Coil spring		
			Pre-tension②		Cantilever		
SO-S1M5A0.6K80	30,900	4	Stiffener	41,900	2φ267×28	131	80.0
			Pre-tension①		Coil spring		
			Pre-tension②		Cantilever		
TO-S1M3A0.6	40,000	6					34.7
Model ID	Relief force (VD)			k_r (kN/mm)			
	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.9$	
LO-A0.2A0.6A0.9K80	2 × 1.2 MN	2 × 1.0 MN	2 × 0.8 MN	80.0	80.0	80.0	
LO-A0.6K80		2 × 1.5 MN			80.0		

Table 5 Summary of peak seismic response

Model ID	Peak response (Response reduction ratio)				Tuned rod	VMD
	Lateral acc. (m/s ²)	SDR (rad. %)	OTM (×10 ³ MNm)	Base shear (MN)	Stress (N/mm ²)	Max deform (mm)
Core-S1M1A0.9	2.69(1.3%)	0.71(15.8%)	2.26(13.9%)	18.4(11.2%)	162	197
Core-S1M3A0.9	2.67(2.1%)	0.63(25.5%)	2.06(21.1%)	17.4(15.9%)	74	110
SO-S1M3A0.6K80	2.67(2.2%)	0.62(27.3%)	2.05(21.3%)	17.3(16.0%)	282	342
SO-S1M5A0.6K80	2.66(2.6%)	0.55(34.4%)	1.89(27.3%)	16.6(19.3%)	115	285
TO-S1M3A0.6	2.67(2.1%)	0.61(27.7%)	2.05(21.3%)	17.3(16.0%)		235
LO-A0.2A0.6A0.9K80	2.71(0.7%)	0.67(21.7%)	2.18(16.7%)	17.2(16.6%)		
LO-A0.6K80	2.84(0.0%)	0.74(13.4%)	2.42(8.2%)	19.3(6.3%)		

Fig.15 に Core TVMD 構造の片側 TVMD 周辺納まり設計案を示す。同設計案は宇田川ら¹³⁾の実物件を踏襲し, 複数並列した VMD(軸力制限値 1.2MN, 慣性質量は質量比に応じて設定)をその合計反力に対して許容応力度設計したビルド H 形鋼 WH-900×200×19×50 で挟んで束ね, 必要剛性を満たす 2 本のシームレス鋼管を組み合わせた柔支持部材(Tuned rod)を接続して TVMD とする。Fig.15 に示す範囲の TVMD 部は隅肉溶接で中央コアに反力を伝達する。この柔支持部材は床スラブの貫通孔を介して地上に接続し, 同調時の圧縮による座屈を防止するため, 約 7m 間隔で横補剛機構を設ける¹³⁾。

5.3 SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の TVMD 周辺の納まり試設計

Fig.16 と Fig.17 に SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の片側 TVMD 周辺納まり設計案を示す。同図らは Fig.16(a)に示すアウトリガー階の平面図の強調部分を拡大して示している。同構造の VMD 部は Core TVMD 構造の場合と同様であり, 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, Fig.16(b)と Fig.17(a)に示すように, この VMD 部の上部受け梁は先端で又別れたアウトリガートラスに溶接する。

一方, Table 5 に示すように, 同構造では, 同調時の柔支持部材に生じる応力が許容応力度を超えて横補剛機構では不十分な場合があり, この対策として(a)VMD 反力に対して弾性を維持する座屈拘束ブレースを直列で繋いで柔支持部材とする方法(Fig.16(d)), および(b)VMD 反力相当の初期張力導入した PC 鋼棒を柔支持部材とする方法が考えられる。また, (b)の初期張力の導入・維持は, (b1)コイルばねを用いる場合(Fig.16(e)), (b2)アウトリガートラスから片持ちで出した鋼梁の曲げ剛性を用いる場合(Fig.17)の 2 種類の方法を検討する。木田・宇田川らの定理論解³⁵⁾より, 初期張力導入時の質量比=初期張力導入無しの質量比/{1+(初期張力導入材剛性 k_d /柔支持部材剛性 k_b)²}という関係があり, 本検討では出来るだけ質量比が想定から変わらないよう初期張力導入材を設計する。

(b1)コイルばねを用いる場合(SO-S1M3A0.6K80, Fig.16(e))

初期張力導入材と VMD 部が階高に納まることや, 初期張力+VMD

Table 6 Summary of cost and cost performance estimation

Model ID	Bracing method	Detailed cost ($\times 10^4$ JPY)							Total cost ($\times 10^4$ JPY)	Cost performance index CP ($\times 10^4$ JPY / %)			
		Outrigger truss	VMD	Tuned rod	Stiffener	Pre-tension	BRB	Oil damper		Lateral acc.	SDR	OTM	Base shear
Core-S1M1A0.9	Stiffener		9,617	7,757	3,854				21,228	15,808	1,340	1,525	1,892
Core-S1M3A0.9	Stiffener		15,527	25,575	3,854				44,956	21,322	1,760	2,129	2,822
SO-S1M3A0.6K80	Stiffener	11,160	4,074		2,620		8,788		26,642	12,341	976	1,250	1,668
	Pre-tension (coil spring)	11,160	4,074	1,621		3,820			20,674	9,577	758	970	1,295
	Pre-tension (cantilever)	11,160	4,074	1,621		3,587			20,442	9,469	749	959	1,280
SO-S1M5A0.6K80	Stiffener	11,160	4,808	4,011	2,620				22,600	8,589	657	829	1,172
	Pre-tension (coil spring)	11,160	4,808	4,011		3,820			23,800	9,045	692	873	1,235
	Pre-tension (cantilever)	11,160	4,808	4,011		3,587			23,567	9,432	721	910	1,287
TO-S1M3A0.6		9,114	7,213						16,327	7,638	589	765	1,019
LO-A0.2A0.6A0.9K80		33,480						1,023	34,503	46,386	1,591	2,066	2,078
LO-A0.6K80		11,160						486	11,646	Inf.	871	1,427	1,847

Fig.16 と Fig.17 の比較に示すように、この納まり(b2)の方がコイルばね(b1)より簡易かつ調整は容易である。

5.4 TO型 TVMD 付アウトリガー構造の TVMD 周辺の納まり試設計

Fig.18 に TO 型 TVMD 付アウトリガー構造の片側 TVMD 周辺納まり設計案を示す。同図に示すように、ビルド H 形鋼で束ねた VMD 部は側柱に接して床梁に接続し、アウトリガートラスおよび VMD 部への取り付け部は両者を合わせた剛性が柔支持部材剛性と等価となるように許容応力度設計した。この剛性を調整する都合でアウトリガートラスはスパンを約 12m に変更し、VMD 部への取り付け部にはビルド Box-500×828×50×32 を 3m 片持支持する納まりとした。Fig.17 と Fig.18 の比較に示すように、TO 型 TVMD 付アウトリガー構造は片持ちの鋼梁を初期張力導入材に用いる SO 型 TVMD 付アウトリガー構造と同等以上に簡潔な納まりとなる。

5.5 新築物件を想定した導入費用と費用対効果指標 CP 値の試算

5.2 節～5.4 節で述べた TVMD を用いた応答制御構造の導入費用と費用対効果指標 CP 値を試算する。導入費用は新築物件を想定し、材料費、加工費、デバイス費の総和から算出する。本研究では、情報提供元の要請に従って詳細は伏せるものの、2024 年の関東地域の市場相場に基づき、アウトリガートラスや柔支持部材などの鋼材費(材料費、加工費含む)は 93 万円/ton、柔支持部材の座屈防止に用いる横補剛機構¹³⁾(材料費、加工費含む)は 155 万円/ton、VMD は 1020～1290 万円/ton (慣性質量により価格変動する)、オイルダンパーは 167 万円/MN、降伏軸力 1250kN の座屈拘束ブレースは 55.8 万円/本として費用算出した。また、費用対効果指標 CP 値¹⁰⁾は告示波 4 波の平均応答低減率に対する導入費用として計算し、値が小さいほど費用対効果が高いこと(安価に応答低減が可能)を示す。Table 6 に導入費用と費用対効果指標 CP 値のまとめを示す。Outrigger truss はアウトリガートラス費用、VMD は VMD 費用、Tuned rod は柔支持部材費用、Stiffener は座屈防止の横補剛材費用、Pre-tension は初期張力導入材費用、BRB は座屈拘束ブレース費用、Oil damper はオイルダンパー費用であり、各項目の総和が Total cost の列に、Total cost を応答低減率で除した値が CP 値の列にまとめられている。

4.1 節で述べたように、地震応答低減効果の観点で言えば TVMD を用いた応答制御構造の性能は質量比のみに依存し、その配置は任意に選択して良いことになるが、4.4 節と Table 6 の質量比 3%の結果に示すように、実際には TVMD を効かせやすい位置に設置した方

が安価であり、経済性や費用対効果の観点でコア部の全体曲げ応答を利用する Core TVMD が実際に採用される可能性は低く、SO 型または TO 型 TVMD 付アウトリガー構造の方が実現可能性は高い。最終設計案の選択は単純な合理性のみで決まるとは限らないものの、特に TO 型は導入費用が最安かつ費用対効果も高く、アウトリガー階で地震応答制御システムを完結できるという点も含めて極めて有望と考えられる。また、5.3 節と Table 6 に示すように、SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の周辺納まりが導入費用や費用対効果に与える影響は軽微であり、同構造が検討される場合では、最も簡潔な鋼梁の曲げ剛性を初期張力導入材に利用する(b2)の実現可能性が高い。

Table 6 の Core TVMD の結果に示すように、導入費用は VMD 質量比に比例して増大する一方、同表の SO 型 TVMD 付アウトリガー構造の結果に示すように、費用対効果は向上する場合がある。また、Table 6 の LO-A0.6K80 に示すように、1 層に集約する従来型のダンパー付アウトリガー構造の導入費用は全体で最安であるが、費用対効果は SO 型や TO 型 TVMD 付アウトリガー構造には及ばない。この結果は超高層建物に適用する地震応答制御構造を議論する際は、構造性能や経済性どちらかの尺度だけでなく、両者を複合した費用対効果の尺度も判断基準として重要であることを示している。

6. 結

本研究の範囲で得られた結論は以下の通りである。

- 1)TVMD を用いた日本の 250m 級中央コア型超高層建物の地震応答低減効果は、TVMD を分散設置した場合に若干の改善が見られるものの、全体的に専ら質量比依存であり、VMD 設置位置やアウトリガートラスの曲げ剛性の影響は微小である。TVMD の制御対象モードが支配的な地震応答は質量比に比例して顕著に低減される一方、制御対象モードが支配的でない応答や同モードが励起されない入力の場合では同構造による応答低減効果は殆ど期待できない。特に水平加速度は制御対象モードに依らず応答低減効果を期待できない。
- 2)日本の中央コア型超高層建物の層間変形角、転倒モーメントは 1 次モード、ベースシアは 1 次と 2 次モード、水平加速度は 1 次～高次モード支配型の地震応答であり、地震応答の包括的低減という観点で TVMD は 1 次モード制御が推奨される。一方、高次モード制御は 2 次が限界であり、採用する場合ではベースシアの応答低

減効果の向上を期待して 1 次+2 次モード制御が現実的である。

- 3)TVMD を用いた応答制御構造は、従来型のダンパー付アウトリガー構造より高い応答低減効果を示し、アウトリガートラスの曲げ剛性の確保が難しい日本の超高層建物の地震応答制御に適している。一方、制御対象モードが励起されない入力に対する地震応答低減効果は従来型より劣る場合がある。1 層に集約する従来型のダンパー付アウトリガー構造の導入費用は最安であるが、費用対効果は SO 型・TO 型 TVMD 付アウトリガー構造に及ばない。
- 4)地震応答低減効果の観点では TVMD は任意位置に設置して良いが、実際には地震エネルギーを効率よく吸収できる位置(TVMD 付アウトリガー構造ではアウトリガー高さ比 0.6 推奨)に設置し、適切な質量比(3%~5%以上推奨、過小な質量比は同調に必要な柔支持部材断面に過大軸応力を生じたり、十分な同調効果を得るために VMD の軸変形がストロークを大幅に超過する)と軸力制限比(0.5 以上推奨)を設定する設計が現実的かつ安価であり費用対効果も高い。この点でコア部の全体曲げ応答を利用する Core TVMD が実際に採用される可能性は低く、SO 型と TO 型 TVMD 付アウトリガー構造の方が実現可能性は高い。TO 型は費用対効果が最も高く、アウトリガー階で地震応答制御システムを完結できるという点も含めて極めて有望と考えられる。SO 型は周辺納まりが導入費用や費用対効果に与える影響は軽微であり、最も簡潔な鋼梁の曲げ剛性を初期張力導入材に用いる納まりが有望である。
- 5)TVMD を用いた応答制御構造の導入費用は、VMD 質量比に比例して増大する一方、費用対効果が向上する場合もあり、超高層建物に適用する地震応答制御構造を議論する際は、構造性能や経済性どちらかの尺度だけでなく、両者を複合した費用対効果の尺度も判断基準として重要である。

謝辞

本研究は一部に JSPS 基盤研究(B)(No.24K01022)の助成を戴きました。また、実現可能性評価にあたり複数のメーカー様に価格情報をご提供いただきました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) CTBUH Tall Building Database: <https://www.skyscrapercenter.com/> (accessed 2023.5.14)
- 2) Lago, A., Trabucco, D. and Wood, A.: Damping Technologies for Tall Buildings Theory, Design Guidance and Case Studies, CTBUH, Elsevier Inc., 2019.
- 3) Smith, R. and Willford, M.: The damped outrigger concept for tall buildings, The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 16(4), pp. 501-517, 2007.
- 4) Lin, P.-C., Takeuchi, T. and Matsui, R.: Seismic performance evaluation of single damped-outrigger system incorporating buckling-restrained braces, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 47(12), pp. 2343-2365, 2018. <https://doi.org/10.1002/eqe.3072>
- 5) Terazawa, Y., Asai, T., Ishibashi, Y. and Takeuchi, T.: Effect of design parameters on dynamic response characteristic of single damped outrigger system incorporating linear viscous dampers, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.85, No.774, pp.1067-1077, 2020.8 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aajs.85.1067>
- 6) Asai, T., Terazawa, Y., Miyazaki, T., Lin, P.C. and Takeuchi, T.: First mode damping ratio oriented optimal design procedure for damped outrigger systems with additional linear viscous dampers, Engineering Structures, Vol.247, 2021.11. <https://doi.org/10.3130/aajs.85.1067>
- 7) Terazawa, Y., Ishibashi, S., Omura, H., Asai, T. and Takeuchi, T.: Non-linear dynamic response characteristic of single-damped outrigger systems with oil dampers or elasto-plastic dampers considering design earthquake levels, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.87, No.791, pp.149-165, 2022.1 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aajs.87.149>
- 8) Omika Y., Yamamoto Y., Kawano K. and Fukuda Y.: Study on the structural principle of the flexural deformation response control system, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.602, pp.111-118, 2006.4 (in Japanese)
- 9) Ishibashi, Y., Terazawa, Y., Tanaka, H., Yokoyama, R., Mizuno, H. and Takeuchi, T.: A novel damped braced tube system for tall buildings in high seismic zones, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2022, e1926, <https://doi.org/10.1002/tal.1926>
- 10) Terazawa, Y., Tanaka, H. and Takeuchi, T.: Optimal seismic response control of damped braced tube system with focus on cost performance of introducing energy-dissipation devices, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.87, No.801, pp. 1082-1092, 2022.11 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aajs.87.1082>
- 11) Terazawa, Y., Ishibashi, Y., Tanaka, H., Yokoyama, R., Mizuno, H. and Takeuchi, T.: Numerical investigation of dynamic response characteristic of damped braced tube system with different damped slit configuration, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.87, No.802, pp. 1247-1256, 2022.12 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aajs.87.1247>
- 12) Murakami, K., Ishii, M., Miyazaki, K. and Tsuneki, Y.: Proposal for an efficient damping system for high-rise buildings in major earthquakes, Journal of Disaster Research, Vol. 11, pp. 106-117, 2016. <https://doi.org/10.20965/jdr.2016.p0106>
- 13) Yoshie, K., Udagawa, T. and Giron, N.: Seismic retrofit of Shinjuku Sumitomo Building by using tuned viscous mass dampers, The Steel Structural Technology Magazine, pp.36-37 2021.4. (in Japanese)
吉江慶佑, 宇田川貴章, ジロン・ニコラ: 新宿住友ビル製の振改修-全体曲げ変形を制御する新たな制振構造-, 鉄構技術, pp.36-37, 2021.4
- 14) Hori, N. et al.: Control of building behavior of high-rise building by tuned viscous mass dampers installed in the vertical direction by support members with nonlinear stiffness properties, Part 1~4, Summaries of Technical Papers Annual Meeting, AIJ, Structures II, pp. 837-844, 2020. (in Japanese)
堀・五十子ほか: 正負非対称剛性部材で鉛直方向設置した同調粘性マスマダンパーによる高層建物の全体曲げ変形制御 その 1~4, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 837~844, 2020.
- 15) Ota, R. et al.: Flexural deformation response control of high rise RC buildings by tuned viscous mass dampers installed in the vertical direction, Part 1~2, Summaries of Technical Papers Annual Meeting, AIJ, Structures II, pp. 487-490, 2022. (in Japanese)
大田・五十子ほか: 同調粘性マスマダンパーによる高層 RC 建造物の全体曲げ変形制御に関する基礎的検討 その 1~2, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 487~490, 2022.
- 16) Furuhashi, T. and Ishimaru, S.: Mode Isolation by Inertial Mass Study on Response Control by Inertial Mass No.1, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 69, No. 576, pp. 55-62, 2004. 2 (in Japanese)
- 17) Saito, K., Kurita, S. and Inoue, N.: Optimum response control of 1-DOF system using linear viscous damper with inertial mass and Kelvin-type modeling, Journal of Structural Engineering, Vol. 53B, pp.53-66, 2007.3 (in Japanese)
- 18) Ikago, K., Saito, K. and Inoue, N.: Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 41(3), pp.453-474, 2012. <https://doi.org/10.1002/eqe.1138>
- 19) Inoue, N. and Ikago, K.: Displacement-based response control of buildings, Maruzen Publishing Co.,Ltd., 2012. (in Japanese)
井上範夫, 五十子幸樹: 建築物の変位制御設計, 丸善出版, 2012.
- 20) Sugimura, Y., Saito, K., Ikago, K. and Inoue, N.: A study on response control of multi-story building structure using tuned viscous mass dampers, Journal of Structural Engineering, Vol. 56B, pp.153-161, 2007.3 (in Japanese)
- 21) Nakata, S. and Ikenaga, M.: Optimum design for force-restricted tuned viscous mass damper based on energy response, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.86, No.790, pp.1589-1596, 2021.12 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aajs.86.1589>
- 22) Fujise, W. and Ikenaga, M.: Design method of tuned viscous mass damper for multi-degree-of-freedom structures considering the overall bending

- deformation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.88, No.803, pp.71-80, 2023.1 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aijs.88.71>
- 23) Asai, T., Ikago, K. and Araki, Y.: Outrigger tuned viscous mass damping system for high-rise buildings subject to earthquake loadings, Proceeding of 6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, 2015.
 - 24) Asai, T. and Watanabe, Y.: Outrigger tuned inertial mass electromagnetic transducers for high-rise buildings subject to long period earthquakes, Engineering Structures, Vol. 153, pp. 404-410, 2017. 12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.040>
 - 25) Jia, R., Ji, X., Yuhao, C., Ikago, K.: Seismic response control of core wall structures using tuned viscous mass damper (TVMD) outriggers, Engineering Structures, Vol. 292, 2023. 10. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116546>
 - 26) J. P. Den Hartog: Mechanical Vibrations, 4th ed., Dover, New York, 1985.
 - 27) Terazawa, Y. and Takeuchi, T.: Generalized Response Spectrum Analysis for Structures with Dampers, Earthquake Spectra, EERI, 2018.5., DOI: <https://doi.org/10.1193/092217EQS188M> (accessed 2020.12.1)
 - 28) The Japan Society of Seismic Isolation: Manual for Design and Construction of Passively-Controlled Buildings 3rd Edition, Daioh Co., Ltd, 2013 (in Japanese) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計施工マニュアル第3版, 2013
 - 29) Terazawa, Y. and Takeuchi, T.: Optimal damper design strategy for braced structures based on generalized response spectrum analysis., Jpn Archit Rev., 2019:00:1-17., <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12122>
 - 30) Terazawa, Y., Sano, W. and Takeuchi, T.: Design method of seismically isolated structures based on generalized response spectrum analysis, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.85, No.775, pp.1187-1197, 2020.9 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aijs.85.1187>
 - 31) Sinha, R. and Igusa, T.: CQC and SRSS methods for non-classically damped structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 615-619, 1995. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290240410>
 - 32) Igusa, T., Kiureghian, A.D. and Sackman, J.L.: Modal decomposition method for stationary response of non-classically damped systems. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.12, pp.121-136, 1984, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290120109>
 - 33) Notification No. 1457 of the Ministry of Construction, 2000.5 (in Japanese) 建設省告示第1457号, 2000.5
 - 34) The task committee of steel structures in AIJ: The state of art of Japanese seismic design of steel structures against large subduction zone earthquakes and large inland earthquakes, Document for the panel discussion of 2015 AIJ annual meeting, 2015.9 (in Japanese) 日本建築学会構造委員会鋼構造運営委員会: 巨大海溝型地震・内陸地震に対する鋼構造の取り組み, 2015年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料, 2015
 - 35) Kida, H. et al.: Seismic Control Effects of High-Rise Buildings by Installing Hydraulic Motor Type Rotary Inertial Mass Dampers using Pretension in the Vertical Direction Part 1, Summaries of Technical Papers Annual Meeting, AIJ, Structures II, pp. 519-520, 2022. (in Japanese) 木田・宇田川ほか: プレテンションを利用した油圧モータ型回転慣性質量ダンパーの鉛直方向設置による高層建物の制振効果 その1, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, pp. 519-520, 2022.
 - 36) Kida, H., Nakaminami, S., Saito, K., Ikago, K. and Inoue, N.: A seismic control system with multi-tuning viscous mass damper, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.74, No.643, pp.1575-1583, 2009.9 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aijs.74.1575>

(2025年1月8日原稿受理, 2025年4月21日採用決定)