

ダンパーの導入費用対効果に着目した
制振スリット付ブレースチューブ構造の最適地震応答制御OPTIMAL SEISMIC RESPONSE CONTROL OF DAMPED BRACED TUBE SYSTEM
WITH FOCUS ON COST PERFORMANCE OF INTRODUCING ENERGY-DISSIPATION DEVICES

寺澤友貴*1, 田中陽樹*2, 竹内 徹*3

Yuki TERAZAWA, Haruki TANAKA and Toru TAKEUCHI

This paper presents design recommendations for optimal seismic response control of damped braced tube system with focus on cost performance of introducing energy-dissipation devices. According to the results, 1) braced tube structure should be designed so that coupled-shear-wall-like vibration modes are predominant to obtain highly damping ratio and better cost performance of dampers, 2) oil damper should be introduced to obtain highly damping ratio, 3) BRB has good cost performance about seismic response reduction and can be used to reduce damper costs.

Keywords: Damped Braced Tube, Optimal Design, Oil Damper, Elasto-plastic Damper, Complex Eigenvalue Analysis, Response Spectrum Analysis

制振スリット付ブレースチューブ構造, 最適設計, オイルダンパー, 弾塑性ダンパー, 複素固有値解析, 応答スペクトル解析

1. 序

近年の超高層建築の世界的需要の高騰を受け^{1), 2)}, 深刻な地震国である日本でも 400m 級超高層建築(Supertall building)の計画が継続している³⁾。風・地震地域の Supertall building には, (a)周期を短くする(剛性付与), (b)減衰比を高める(風・地震応答を低減し早期に収束させる), (c)地震応答が設計クライテリアを満たす, 応答制御構造が求められ²⁾, 制振スリット付ブレースチューブ構造(Damped braced tube)が石橋ら^{3), 4)}により提案され, 寺澤ら⁵⁾⁻⁷⁾が同構造の一般的な耐震性能および最適設計の基礎情報を整備している。

Fig.1 に Damped braced tube³⁾⁻⁷⁾の概念図を示す。Damped braced tube とは, ブレースチューブ構造⁸⁾(Braced tube)に対して, 立面の弾性メガブレースを除去することで, 鉛直方向に部分的な切り欠き(スリット)を設け, 隙間に制振部材(ダンパー)を挿入する地震応答制御構造である。同構造では, 鉛直スリットを挟む Brace tube 立面に Coupled shear wall⁸⁾の様な曲げ応答変位差が生じ, ダンパーによる振動エネルギー吸収に利用する。

超高層建築では全体曲げ応答が卓越するため, 層間のせん断応答に効く制振部材をコア部に集中配置する従来の地震応答制御構造²⁾は上述の要求性能(a)-(c)を満たすことが難しい。また, 日本では, コア部-外柱スパンを避難計画の限界まで大きくしてレントブル比を最大化する計画が好まれるため, コア部と外柱をダンパーとメガトラスで連結して曲げ応答に抵抗するダンパー付アウトリガー構造⁹⁾も応答低減効果に直結する十分なトラス剛性を確保することが難しい¹⁰⁾⁻¹⁵⁾。これに対して Damped braced tube は, 鉛直スリットが誘発する全体曲げ応答を地震エネルギー吸収に活用し, さらに応答制御

機構を立面に集約して平面計画から分離できるため, 大きな無柱のオフィス空間に重きを置く日本の超高層建築の文化^{3), 5)}に適する。

一方, 実際の設計では, 建設費用の観点から, 要求性能(a)-(c)を満たしつつダンパーの導入費用を出来るだけ削減する, 即ちダンパーの導入費用対効果を最大化する計画が好まれることが少なくない。しかし, Damped braced tube の知見は, オイルダンパーを適用する報告³⁾⁻⁷⁾に限られ, ダンパーの導入費用対効果に着目した最適設計の基礎的知見は整備されていない。Damped braced tube では, ダンパーの接合部に相当する主架構の設計が付加減衰効果やダンパーの導入費用対効果の向上に重要であるが, その影響は不明である。また,

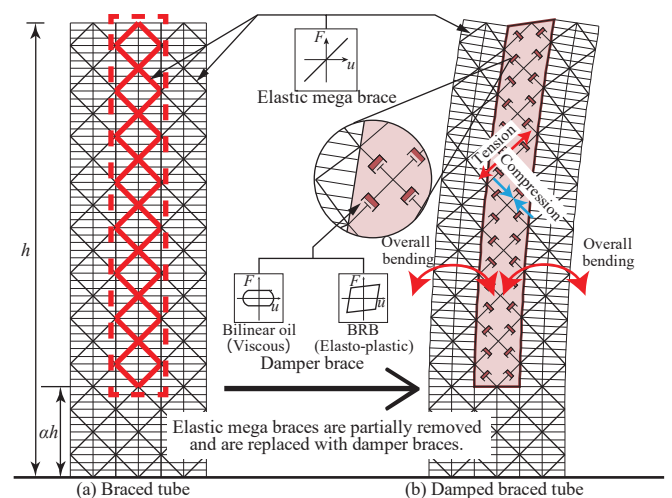


Fig. 1 Schematic diagram of damped braced tube

*1 東京工業大学建築学系 助教・博士 (工学)

*2 元 東京工業大学大学院生 修士 (工学)

*3 東京工業大学建築学系 教授・博士 (工学)

Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

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

Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

屈座拘束ブレース(BRB)は、超高層建築に対する付加減衰効果が粘性系ダンパーより劣る点が知られる¹⁵⁾が、比較的安価であり、Damped braced tube が普及する上で今後需要が高まると予想される。しかし、BRBの導入費用対効果や、要求性能(a)~(c)を満たしかつ費用も削減できる粘性系ダンパーとの組合せも不明である。

そこで本研究は、ダンパーの導入費用対効果に着目した Damped braced tube の最適設計の知見拡充を目的に、広範な動的応答特性評価を行う。まず2~3章では、想定建物と数値解析概要を述べる。次の4章では、主架構設計タイプ、全体曲げせん断比、スリット配置、ダンパー容量分布、ダンパー種類が Damped braced tube の動的応答特性(固有振動特性と地震応答低減効果)とダンパー導入費用対効果に与える影響を分析する。最後の5章では、ダンパーを特殊階に集約配置する場合の総当り検討と、連続一様配置する場合の数値最適化より、仮定した動的応答特性の制約を満たしダンパー導入費用を最小化する BRB とオイルダンパーの最適組合せの探索を試みる。

2. 数値解析概要

2.1 想定建物の主架構

Fig.2 に想定建物を示す。想定建物は、文献3)を本研究用により一般化した一辺 97.2m の隅切りの正方形平面(Fig.2(a))を有する軒高さ 396m の超高層建築(階高 4m, 全重量 5.99GN)とする。本研究では、曲げ応答が卓越するように弾性メガブレースに大型断面(Fig.2(c))を割当てた Type B(Bending, Fig.2(d1)~(d3)), せん断応答が卓越するようにブレース付きラーメン構造として設計した Type S (Shear, Fig.2(d7)~(d9)), Type B と Type S の中間の応答性状を示すように設計した Type M (Middle, Fig.2(d4)~(d6))の3種類の主架構を用いる。

Table 1 に部材諸元を示す。Type B の部材諸元は基本計画時の実物件⁴⁾と同等であり、Type M と Type S の部材諸元は Type B を基準に3章に詳述するスリット底高さ比 $\alpha=1.0$ の1次固有周期が概ね等価(6.3s~6.5s)かつ幅広い全体曲げせん断比 r_{BS} (2.2節参照)が検討できる

断面を選択した。柱梁部材はレベル1の地震荷重、弾性メガブレースは、Fig.4に示す極稀地震用の設計用スペクトルの1.5倍の地震荷重に対して弾性を維持できるよう設計した⁵⁾。なお、次節で述べる3種類のスリット配置を検討するため、弾性メガブレース配置は実際の計画に基づく Corner スリット用(Fig.2(b1))と Center または Center & Corner スリット用(Fig.2(b2))の2種類を用意し、両者の弾性メガブレース本数が同数かつ固有周期や地震応答が同等であることを確認している。本検討は、以上の主架構の立面をダンパー付きスリットに一部置換した Damped braced tube の動的応答特性を調査する。

2.2 Damped braced tube の検討パラメータ

本研究の検討パラメータは、(a)主架構設計タイプ(2.1節参照)、(b)主架構の全体曲げせん断比 r_{BS} 、(c)スリット配置、(d)スリット内のダンパー容量分布、(e)ダンパー種類である。

(b) 全体曲げせん断比 r_{BS}

全体曲げせん断比 r_{BS} は、曲げ応答またはせん断応答の卓越を意図して設計した主架構(Type B~S)について、架構全体の曲げ応答に対するせん断応答の影響度の定量化を試みた指標であり、せん断変形が動的応答特性やダンパーの導入費用対効果に与える影響の分析に用いる。 r_{BS} は重層建物を G.L.から支持された片持ち柱と見做し、建物全体が倒れ込む1次モード応答時の曲げによる頂部水平変位 δ_B とせん断による頂部水平変位 δ_S の比 δ_S/δ_B として計算する。 δ_B と δ_S は、400m 級超高層建築の骨組モデルを等価曲げせん断モデルに置換する手法¹⁶⁾に基づき、単位外力に対する各層の曲げとせん断の水

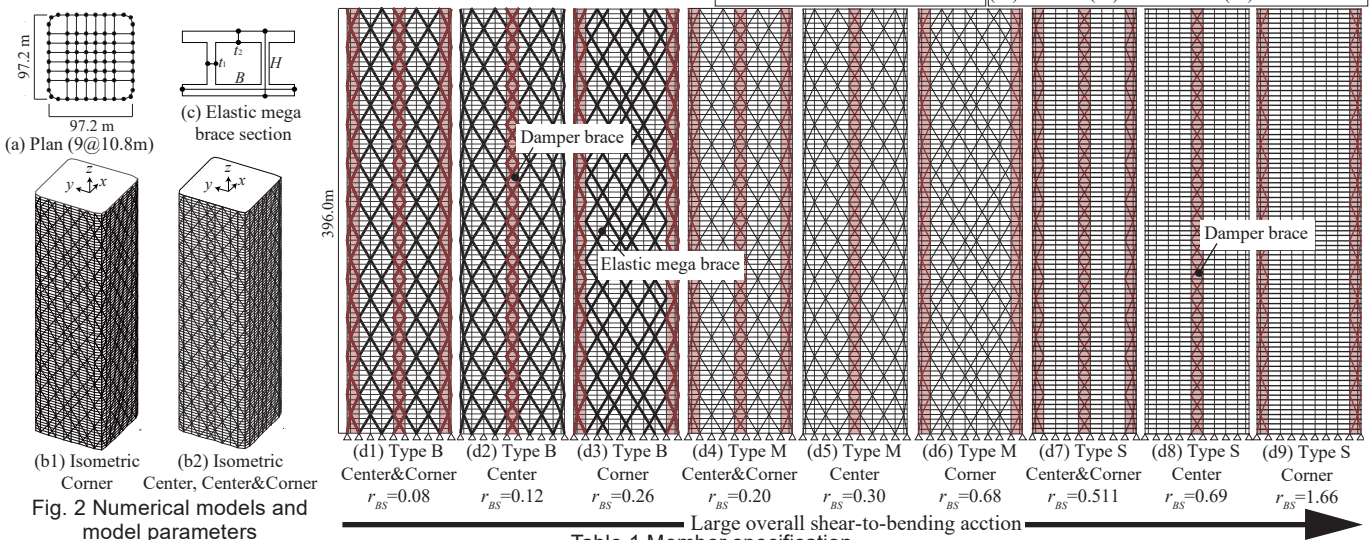


Table 1 Member specification

Floor	Column (CFT, Built box section)			Girder (Built wide flange section)			Floor	Elastic mega brace (Built section, $H \times B \times t_1 \times t_2$)		
	Type B	Type M	Type S	Type B	Type M	Type S		Type B	Type M	Type S
74~88	900×25	1100×40	1350×50	1000×250×16×22	1400×500×25×40	1800×600×30×50	73~89	400×900×16×36	200×450×14×30	N/A
61~73	1000×28	1200×40	1500×56	1000×300×16×22			57~73	400×1000×16×50	200×500×14×40	
51~60	1100×36	1300×55	1650×72	1000×300×16×25			41~57	400×1200×16×60	200×600×14×50	
38~50	1200×36	1400×55	1800×72	1000×400×16×25			33~41	400×1300×16×65	200×650×14×55	
25~37	1200×45	1400×70	1800×90	1000×400×16×28			9~33	400×1400×16×65	200×700×14×55	
14~24	1300×45	1600×70	1950×90				1~9	400×1500×16×65	200×750×14×55	
1~13	1400×50	1700×75	2100×100							

平変位を集計して計算する。Fig.2(d1)~Fig.2(d9)に示すように、本検討の r_{BS} は主架構諸元とスリット配置により 0.08~1.66 に分布し、同じ主架構諸元でもスリット数に比例して残りの連層耐震架構のアスペクト比が上昇し、曲げ応答が卓越しやすくなる ($r_{BS} \rightarrow$ 小)。

(d) スリット配置

Fig.2(d1)~(d9)に示すように、スリット配置⁴⁾は立面の角部(Corner)、中央部(Center)および中央部+角部(Center & Corner)の3種類を検討し、Fig.1に示す軒高 h に対するスリット底高さ比 α の影響を調査する。ただし、文献4)では、鉛直スリットが深い程に減衰性能が高まる一方、基礎部との取まりの都合などで鉛直スリットを G.L.まで下げることが実際上難しい点も判明しており、本研究も同知見を考慮して $\alpha=0.22$ ⁴⁾ (G.L.から数えて5本の弾性メガブレースが残る状態)を重点的に分析する。

(e) スリット内のダンパー容量分布

ダンパー容量分布は、同一容量 F のダンパーをスリット内に連続一様配置する場合(Uniform, Fig.2(e1)), ピーク層間変形角を最小化するようにダンパーをスリット内に非一様配置する場合(Non-uniform, Fig.2(e2)), 実物と同様に特殊階にダンパーを集約配置する場合(Centralized, Fig.2(e3))の3種類を検討する。特に連続一様配置と集約配置はダンパー総容量 ΣF の影響を調査する。Table 2に $\alpha=0.22$ の時のブレース1本または特殊階の一区画あたりのダンパー容量(オイルダンパーではリリーフ荷重 F_r , BRBは降伏軸力 F_y)を示す。本研究では、同表と一般に流通する製品ラインナップを考慮し、 ΣF は実現可能と考えられる1200MNまで検討範囲とする。なお、例えば同表 Centralized の列に示す 6000×4 は、6000kN級ダンパー4本を束ねて1本のブレースとして使うことを示している。

(f) ダンパー種類とモデル化

Fig.3にダンパーの荷重変形関係を示す。ダンパーは、粘性係数が Bilinear型に低減するオイルダンパー(Oil)と、履歴系の座屈拘束ブレース(BRB)を対象とする。オイルダンパーは標準的なリリーフ速度 $v_r=30\text{mm/s}$, 2次粘性係数比 $p_d=0.012$ を用いる。BRBの芯材は大軸力に対応した SN490-UBB(降伏歪 $\epsilon_y=0.196\%$)を用いる⁶⁾。BRBの軸剛性 $k_d=\{(L_p/L_0)+2(L_e/L_0)(A_p/A_e)\}(EA_p/L_0)$ は、芯材の弾性部と塑性化部の断面積比 A_p/A_e と全長と塑性化部の長さ比 L_p/L_0 より、塑性化部断面積のみで計算される軸剛性の約2倍まで調整できる反面、塑性化部の歪も増大する点が知られる。本検討は BRB が重層建物に導入される際に接合部との納まりからよく用いられる $L_p/L_0=0.2$ と、意図的に塑性化部を長くした $L_p/L_0=0.5$ を比較する。 A_p/A_e は 0.5 とする。

2.3 ダンパーの導入費用と導入費用対効果 CP 値の計算方法

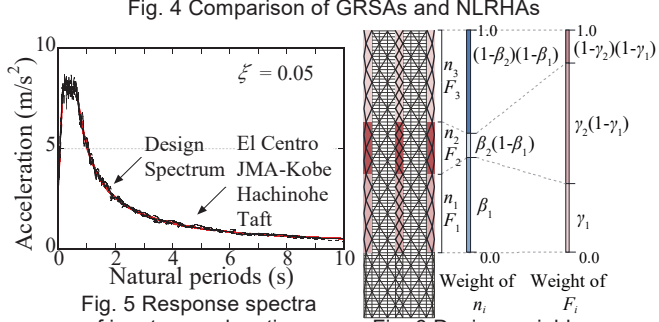
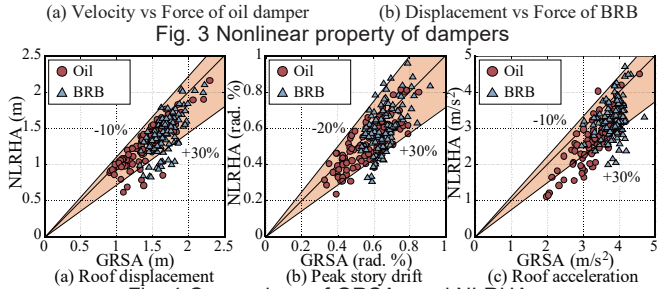
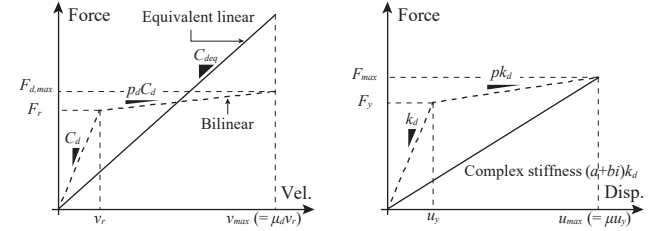
本研究のダンパー導入費用は容量に対してオイルダンパー130万円/MN, BRB 30万円/MN で計算する。同単価は各メーカーへのヒアリング結果を平均化した2021年関東地域の設計価格の目安である。ダンパー総容量 ΣF (オイルダンパーではリリーフ荷重 F_r , BRBは降伏軸力 F_y の合計)を導入した際の費用対効果 CP (Cost performance) は式(1)で計算する。獲得性能は付加減衰比(%), スリットだけの状態からの周期低減率(%)または地震応答低減率(%)とする。CP値は単位獲得性能あたりの必要ダンパー導入費用であり、値が小さいほど費用対効果が高いこと(安価にその性能が獲得可能)を示す指標とする。

$$CP = \text{ダンパー導入費用} / \text{獲得性能} \quad [\text{円}/\%] \quad (1)$$

2.4 数値解析モデル

Table 2 Total and unit damper force relationships ($\alpha=0.22$)

ΣF (MN)	Uniform ※F per brace			Centralized ※F per braces
	Center&Corner (kN)	Center (kN)	Corner (kN)	Center&Corner (kN)
300	1103	2206		6250 ($\approx 3000 \times 2$)
600	2206	4412		12500 ($\approx 3000 \times 4$)
900	3309	6618		18750 ($\approx 4500 \times 4$)
1200	4412	8824		25000 ($\approx 6000 \times 4$)



想定建物は立体骨組にモデル化する。柱梁部材は梁要素、弾性メガブレースはトラス要素でモデル化して対応する断面諸元を設定する。CFT柱は鋼管と充填コンクリートに着目した等価な断面積と断面二次モーメントを設定する。オイルダンパーは単純ダッシュポット、BRBはリンク要素でモデル化する。各層は面内剛床を設定する。節点には建物重量の質量を設定する。主架構部材は全て弾性とする。

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法(GRSA¹⁷⁾⁻¹⁹)と時刻歴応答解析(NLRHA)を用いる。比例減衰行列は初期の剛性行列と質量行列に基づく Rayleigh型とし、1次と2次の減衰比は2%とする。

GRSAは最大応答時に対応する Damped braced tube の動的応答特性評価に用いる。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した一連の数値解析群であり、ダンパー部材の非線形性は等価線形化の収斂計算によって模擬され、地震応答は等価線形化された要素を含む振動系の複素固有値と修正 CQC法²⁰⁾によって評価される。オイルダンパーは最大速度時の吸収エネルギー量の等価性に基づく式(2)によって等価線形粘性減衰 C_{deq} ²¹⁾を有する等価線形粘性要素に置換され、BRBは最大点剛性法¹⁷⁾に基づき等価剛性 a と振幅依存型減衰 b を評価した複素剛性要素(式(3))に置換されて GRSAに適用される。その他の詳細は文献17)~19)に示す。

$$C_{deq} = \{(p_d \mu_d - p_d + 1)^2 + p_d - 1\} C_d / (p_d \mu_d)^2 \quad (2)$$

$$(a + ib \operatorname{sgn} \omega_e)k_d \quad (3)$$

NLRHA は GRSA の精度検証に用い、増分変位の計算は Newmark β 法 ($\beta = 1/4$) を用いる。NLRHA は座標移動による大変形と付加軸力による部材の幾何剛性を考慮する。

2.6 入力地震動特性と GRSA の精度

Fig.4 に GRSA と NLRHA の比較を、Fig.5 に入力地震動の加速度応答スペクトルを示す。既報⁹⁾において、長周期地震動よりスペクトル適合波の方が高次モードにより地震時最大応答が大きくなるのが判明しており、本検討では、建設省告示第 1457 号²²⁾の設計用スペクトルに適合した模擬地震動 4 波 (El Centro, Taft, Hachinohe, JMA-Kobe, 以降は告示波と称する。)を用いる。Fig.4 は Corner, Center, Center&Corner のスリット配置 ($\alpha=0.0, 0.22, 0.50, 0.78$) に、 $\Sigma F = 300, 600, 1200\text{MN}$ のダンパーを連続一様配置した結果を比較している。GRSA は NLRHA を約 -10%~+30% の誤差範囲でやや安全側に捉えることを確認しており、以降は GRSA の解析結果 (平均地震応答) を分析する。なお、誤差精度はダンパー総容量 ΣF が少ない方が良好であるものの、スリット深さや位相特性の影響は殆ど無い。

2.7 4.2 節の非一様配置に適用する最適化問題の定義

4.2 節では、スリットの深さを $\alpha=0.22$ で固定し、ダンパー総容量を制約条件としてスリット内のダンパーの本数と総容量を独立して 5 分割し、ピーク最大層間変形角を最小化する非一様配置の容量分布を数値最適化により探索する。Fig.6 に最適化問題 (式(4)~(6)) の設計変数の概要を示す。スリット底部から数えた区間 i には容量 F_i のダンパーが n_i 本配置される。設計空間は仕切りを用いた重複組合せ問題として表現し、設計変数は区間 i のダンパーの本数の重み $\beta_i (0 \leq \beta_i \leq 1)$ と容量の重み $\gamma_i (0 \leq \gamma_i \leq 1)$ とする。例えばダンパー総本数 17 ($\alpha=0.22$)、総容量 37.5MN の 1 スリット内を 3 分割する場合は、ダンパー本数は $n_1=\beta_1 17$, $n_2=\beta_2 \{(1-\beta_1)17\}$, $n_3=(1-\beta_2)\{(1-\beta_1)17\}$ 、容量は $F_1=[\gamma_1 37.5]/n_1$, $F_2=[\gamma_2 \{(1-\gamma_1)37.5\}]/n_2$, $F_3=[(1-\gamma_2)(1-\gamma_1)37.5]/n_3$ となる。最適化問題は PSO 法²³⁾で解く。

$$\text{Optimize } \{n_i(\beta_i)\} \text{ and } \{F_i(\beta_i, \gamma_i)\}, 1 \leq i \leq 5 \quad (4)$$

$$\text{Minimize Peak Story Drift Ratio} \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \Sigma F = 600\text{MN} \quad (6)$$

この他に 5 章では、動的応答特性を制約としダンパー導入費用を最小化する各種ダンパーの組合せ最適化問題を検討する。対象はスリット内にオイルダンパーを連続一様配置したモデルとし、設計変数を各オイルダンパーの交換または除去の有無と定義して単純 GA²³⁾を用いて最適化問題を解く。制約等の詳細は 5 章で詳述する。

3. ダンパー無しモデルの動的応答特性

まず 3 章では、ダンパーの無い鉛直スリット付き Braced tube の基本的な固有振動特性と地震応答を解説し、Damped braced tube の最適設計において注意すべき構造特性を分析・議論する。

Table 3 に Braced tube の 1 次モード固有周期と地震応答値 (ピーク層間変形角 Peak SDR, ピークせん断変形角 Peak Panel θ , 頂部加速度 Roof Acc.) を、Fig.7 にモード次数毎に表示倍率を揃えた卓越振動モード形状と地震応答の高さ方向分布の代表例 (スリット底高さ比 $\alpha=0.0$) を示す。Table 3 の Peak Panel θ は、X 字配置された弾性メガブレースを囲む柱梁の外枠をパネルゾーンに見立てたせん断変形角 (水平と鉛直方向の変形角の和) のピーク値である。Fig.7(f)~(h) は CQC 応答値に占める各モードの寄与度¹⁵⁾も重ねて示す。

Fig.7(a)~(e) に示すように、2.1 節で述べた主架構設計の意図通り、

Table 3 Summary of initial response of no damper models

	α	Type B			Type M			Type S	
		Center & Corner	Center	Corner	Center & Corner	Center	Corner	Center & Corner	Center
T_1 (s)	1.00	6.43	6.36	6.56	6.44	6.44	6.53	6.45	6.48
	0.22	9.12	7.81	7.56	7.22	6.85	6.67	6.61	6.52
	0.00	10.35	8.63	8.03	7.78	7.43	7.15	6.82	6.64
Peak SDR (rad.%)	1.00	0.66	0.65	0.53	0.53	0.56	0.56	0.56	0.55
	0.22	0.90	0.80	0.77	0.62	0.59	0.56	0.56	0.55
	0.00	0.82	0.76	0.72	0.57	0.59	0.56	0.55	0.54
Peak Panel θ (rad.%)	1.00	1.03	0.90	0.90	0.79	0.79	1.05	0.97	0.89
	0.22	1.23	1.30	1.36	0.71	0.82	0.73	0.95	0.97
	0.00	1.14	1.31	1.29	0.66	0.82	0.74	0.81	0.79
Roof Acc. (m/s ²)	1.00	4.39	4.57	4.01	4.05	4.05	4.17	4.13	4.13
	0.22	4.23	4.20	4.45	4.10	3.97	3.97	4.07	3.95
	0.00	3.64	3.96	4.21	3.55	3.67	3.78	3.63	3.84

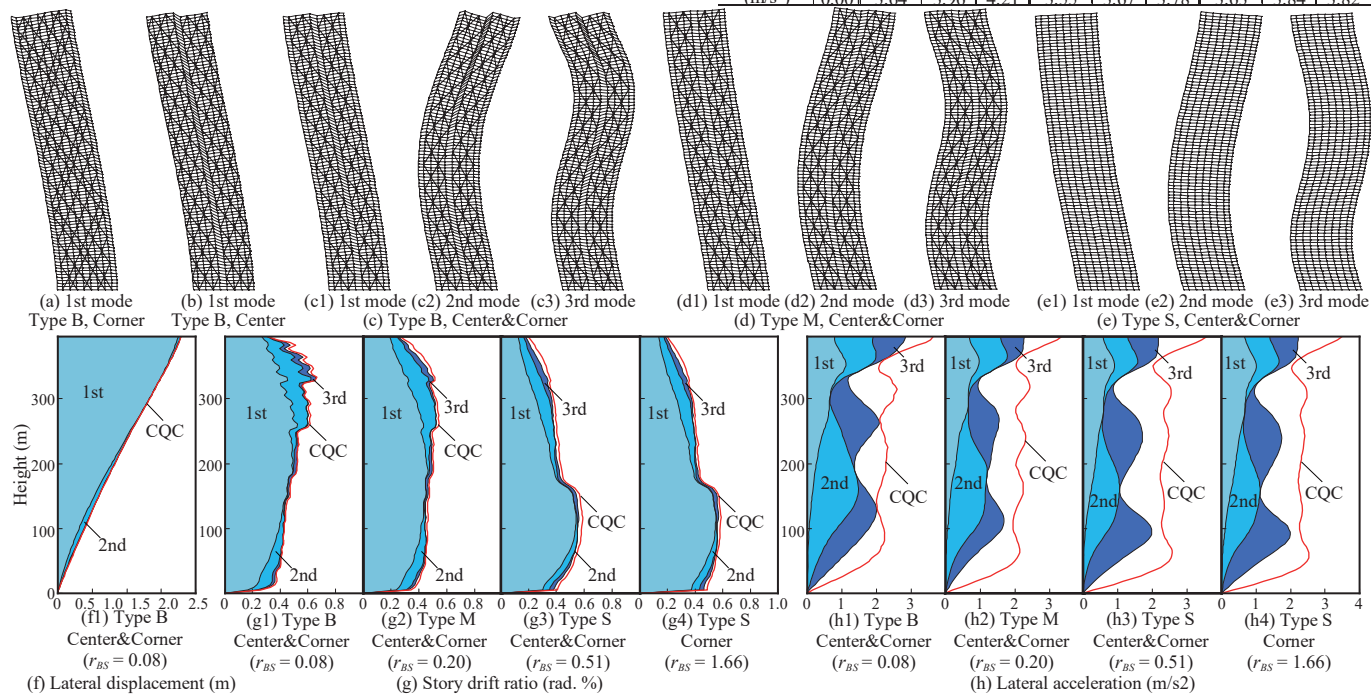
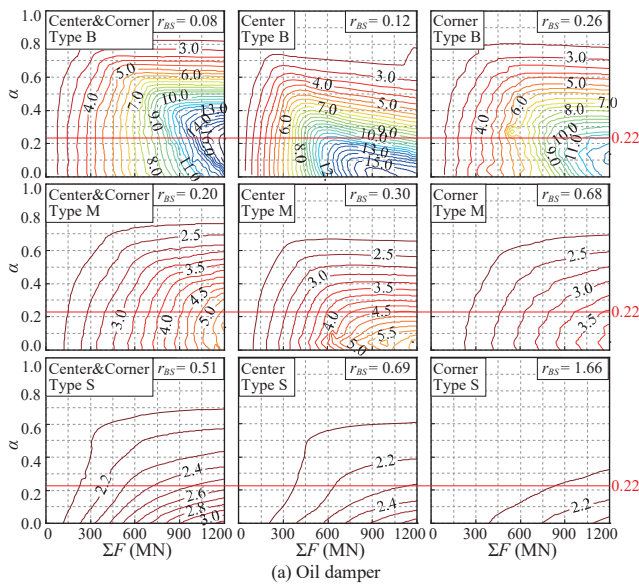
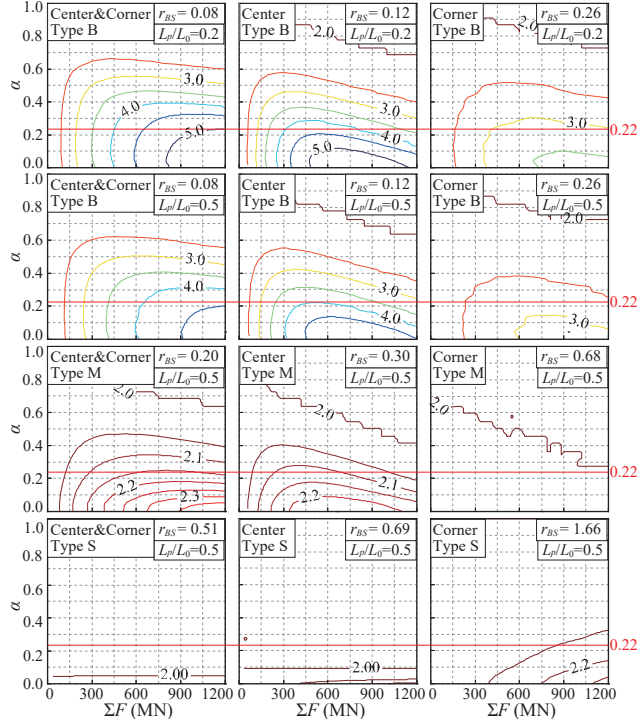


Fig. 7 Mode shapes and seismic response distribution of no damper models ($\alpha=0.0$, full slit)



(a) Oil damper



(b) BRB

Fig. 8 Contour plots of 1st mode damping ratio

スリット配置に拠らず Type B は曲げ応答, Type S はせん断応答が卓越し, Type M は両者の中間的な振動性状を示す。Fig.7(f)~(h)に示すように, 変位応答は1次モードが卓越する。加速度応答は高次モードが卓越し頂部で最大となる。また, 曲げ応答が卓越する場合 (Fig.7(g1)(g2))では上層で, せん断応答が卓越する場合 (Fig.7(g3)(g4))では下層で層間変形角が大きくなる傾向にある。なお, ダンパーのない状態であれば, Peak SDR はスリットが深く固有周期が長いほど増大するものの, その発生箇所はスリット位置によって上述の傾向から殆ど変化しないことを確認している。

Braced tube は, 建物外周の弾性メガブレースによって効率的な水平剛性付与と短周期化を容易に達成できる点が従来から知られる⁸⁾。Table 3 に示すように, スリットの無い純粋な Braced tube (Type B や Type M の $\alpha=1.0$) が最も一次固有周期 T_1 が短く, ピーク層間変形角

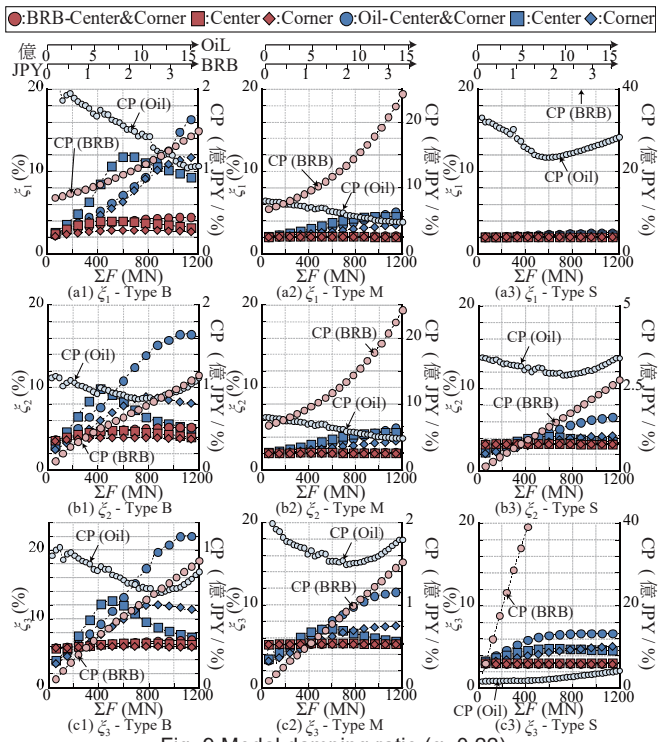


Fig. 9 Modal damping ratio ($\alpha=0.22$)

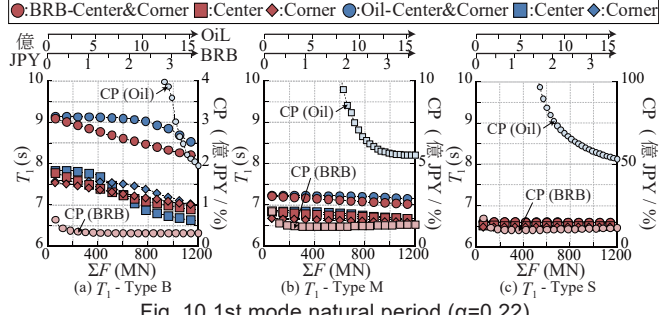


Fig. 10 1st mode natural period ($\alpha=0.22$)

も $1/150 \sim 1/200 \text{ rad}$ に納まる。しかし, Braced tube のみでは風・地震荷重に対する付加減衰比を獲得できない。序論で述べたように, これに対して Damped braced tube は, ダンパー付き鉛直スリットによって効率的に付加減衰比を獲得できるもの³⁾⁻⁷⁾, その代償として Braced tube が本来持つ高い水平剛性を一部破棄するため, T_1 が長周期化し変位応答は却って増大する。この傾向はより大型断面の弾性メガブレースを配置した Type B や, スリット配置に比例して全体曲げせん断比 r_{BS} が小さくなる場合に顕著となる。さらに, Fig.7(a)~(d) に示すように, スリット部に Coupled shear wall のような鉛直せん断変形モードが誘発され, ピークせん断変形角はカーテンウォールの脱落限界 ($1/100 \text{ rad}$) を超え, スリット部の梁端部の損傷が危惧される段階 ($1/88 \sim 1/77 \text{ rad}$) に達する。一方, 頂部加速度は長周期化により低減する場合と, 位相特性のばらつきにより増大する場合がある。以上に述べたように, Damped braced tube は付加減衰の獲得と剛性・周期・変位応答の間にトレードオフ関係があり, ダンパーの導入費用対効果に着目した最適設計でもこれらの調整が必要となる。

4. Damped braced tube の動的応答特性とダンパーの費用対効果

次に4章では, スリット内のダンパー容量分布, 主架構タイプ, スリット配置, 全体曲げせん断比 r_{BS} , ダンパー種類が Damped braced tube の動的応答特性とダンパーの導入費用対効果に与える影響を

範に比較・分析し、その最適設計のための基礎的情報を整理する。

4.1 ダンパーをスリット内部に連続一様配置する場合

4.1.1 固有振動特性への影響

Fig.8 にスリット底高さ比 α とダンパー総容量 ΣF を縦横軸にとった 1 次モード減衰比 ξ_1 (比例減衰含む) の等値線図を、Fig.9 と Fig.10 に $\alpha=0.22$ で固定した 1~3 次モード減衰比 $\xi_1 \sim \xi_3$ または 1 次モード固有周期 T_1 とダンパー導入費用対効果 CP 値を、主架構設計タイプ、スリット配置、全体曲げせん断比 r_{BS} 、ダンパー種類で整理して示す。Fig.9~10 の左軸は減衰比または周期、右軸は対応する応答の CP 値、欄外の上軸はダンパーの導入費用対効果とは独立した費用総額を示し、CP 値は Center&Corner を代表として示す。また、Fig.9~10 のマ

ーカーの種類はスリット配置 (○ : Center&Corner, □ : Center, ◇ : Corner), マーカーの色は導入ダンパー種類 (赤 : BRB, 青 : オイルダンパー), 色の薄いマーカーは対応する CP 値を表す。

Fig.8 と Fig.9 に示すように、それぞれの主架構設計タイプでは、スリット配置数が多く全体曲げせん断比 r_{BS} が小さい程、または鉛直スリットが深い程 (α が小), 獲得減衰比のピーク値は大きくなる。

Fig.7(a)~(e) の振動モード図と Fig.8 に示すように、 r_{BS} やダンパー種類に拠らず、全体曲げ応答が卓越するように建物外周部に柱梁より大型の弾性メガブレースを配置して十分剛に設計した主架構の方 (Type B) が、スリット部の鉛直せん断変形モードがより顕著に卓越し、ダンパーが受ける変形が増えるため、ダンパー付き鉛直スリットによる付加減衰効果は向上する。また、同様の振動モードの卓越の観点 (Fig.7(a)~(c) の比較) では、Fig.8 と Fig.9 に示すように、スリット配置数が少なく全体曲げせん断比 r_{BS} が大きい Center スリットの方が、Center&Corner スリットより少ないダンパー総容量 ΣF (より少ないダンパー導入費用) でピーク減衰比を獲得可能な場合もある。ただし、Type B のような主架構を設計し、本検討の範囲ではダンパー総容量 $\Sigma F = 600\text{MN}$ 程度を導入すれば、オイルダンパーではどのスリット配置を選択しても、超高層建物において比較的高い減衰性能を有すると考えられる約 6% 以上の減衰比を獲得できる。一方、スリット部の鉛直せん断変形モードの卓越が緩慢になる主架構設計 (Type M, Fig.7(d)) は付加減衰効果を鈍らせ、架構全体の水平せん断応答が卓越する主架構設計 (Type S, Fig.7(e)) は殆ど付加減衰を獲得できなくなる。例えば Fig.9 の $\alpha=0.22$ のオイルダンパー導入時では、ピーク 1 次モード減衰比は 12~16% (Type B) \rightarrow 3~5% (Type M) \rightarrow 2~2.5% (Type S), 対応する CP 値は 1 億円/% (Type B) \rightarrow 5 億円/% (Type M) \rightarrow 12 億円/% (Type S) となり、ダンパーの導入費用対効果も顕著に悪化する。Fig.10 に示すように、同傾向は固有周期低減についても

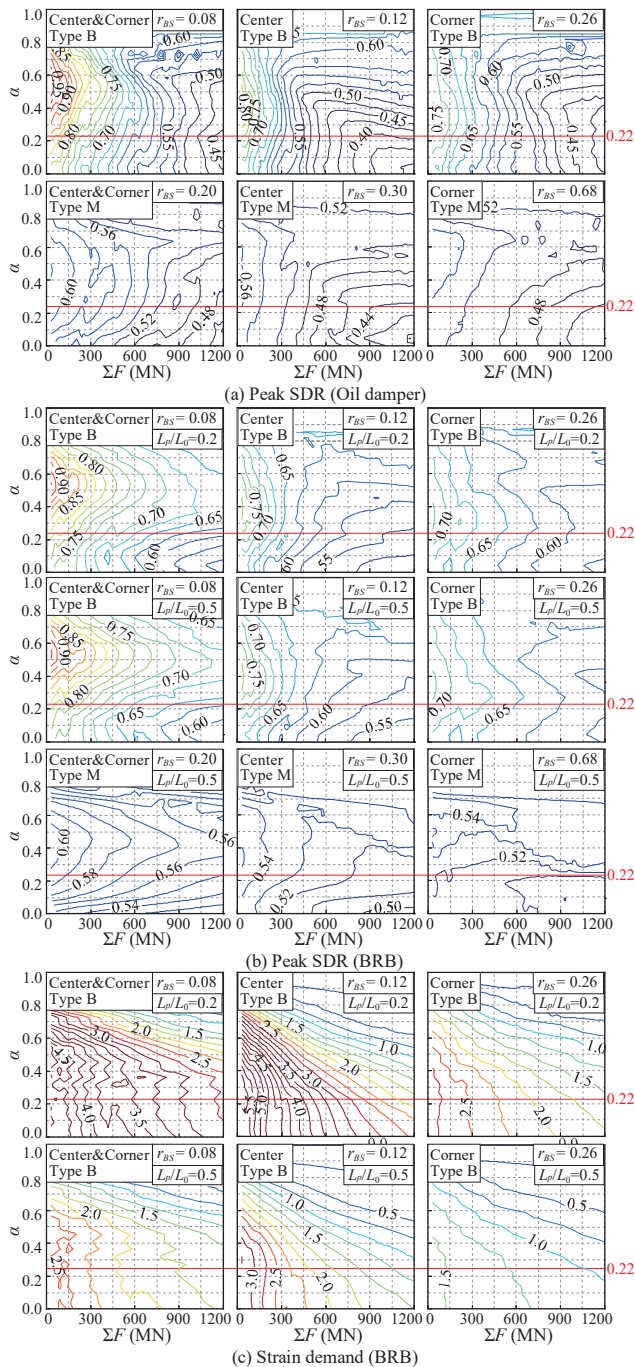


Fig. 11 Contour plots of seismic response

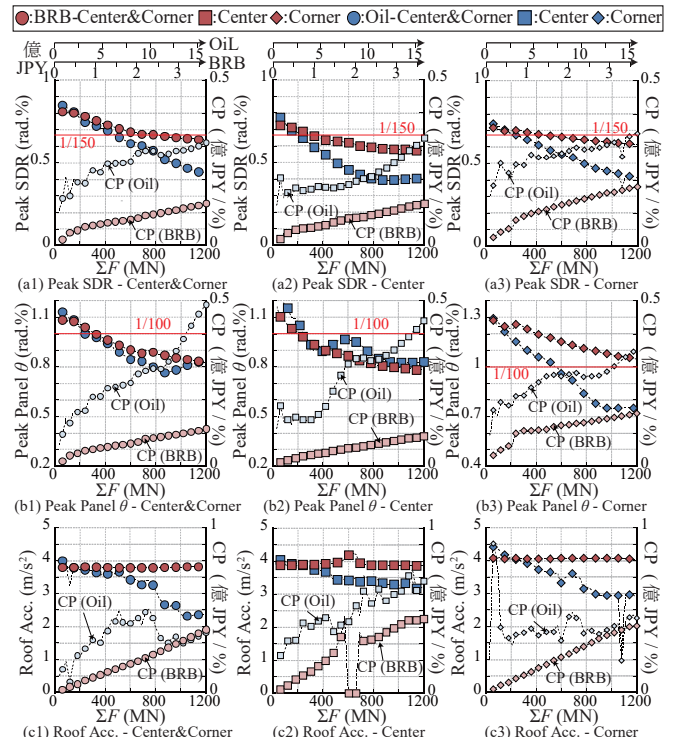


Fig. 12 Seismic responses ($\alpha=0.22$, Type B)

同様である。この結果はスリット部の鉛直せん断モードが卓越するように主架構を設計することが、減衰比に関するダンパーの導入費用対効果に着目した最適設計にとって重要であることを示している。

Fig.10(a)の例に示すように、オイルダンパーと比べてBRBの方が、鉛直スリットによって伸びた1次固有周期の低減に貢献し、その導入費用対効果CP値も4倍以上の差がある。しかし、Fig.8~9に示すように、Type Sを除く獲得減衰比のCP値もBRBが優秀であるものの、減衰比自身はType Bの $\alpha=0.22$ でBRBが約4%、オイルダンパーが約12~16%であり、付加減衰効果はオイルダンパーの方が優秀である。この結果は地震応答だけでなく風応答時においても十分な減衰比を実現するというSupertall buildingの要求性能の点²⁾では、BRBのみでDamped braced tubeを構成することは難しく、オイルダンパー(または粘性系ダンパー)の導入は必須であることを示す。

4.1.2 地震応答低減効果への影響

Fig.11にスリット底高さ α とダンパー総容量 ΣF を縦横軸にとったピーク層間変形角とBRB塑性化部歪の等値線図を、Fig.12に $\alpha=0.22$ で固定したType Bのピーク層間変形角、ピークせん断変形角、頂部加速度ならびに対応するダンパー導入費用対効果CP値を、主架構設計タイプ、スリット配置、全体曲げせん断比 r_{BS} 、ダンパー種類で整理して示す。なお、4.1.1節の検討から、付加減衰を殆ど獲得できないType Sの結果は省略する。また、加速度応答などで低減率が負(応答増大)の場合は、CP値を0として表示している。

Fig.11(a)(b)とFig.12(a1)~(b3)に示すように、全てのパラメータにおいて、鉛直スリットの導入によって増大した変位応答は、導入ダンパー総容量に逆比例して低減され、その応答低減効果は付加減衰効果と同様にオイルダンパーの方がBRBより優れる。一方で、地震応答をある設計クライテリア以下に抑えるという要求性能の観点で言えば、BRBでオイルダンパーと同じ応答低減効果を得るためには、より大きな ΣF が必要であるものの、ダンパー導入費用やダンパー導入費用対効果CP値は顕著に低減できる。例えば付加減衰効果の観点で優秀なType BのCenter&Cornerスリットでは、Fig.12(a)に示すように、主架構がほぼ無損傷に抑えられるピーク層間変形角1/150 rad.以下、カーテンウォールが脱落しないピークせん断変形角1/100 rad.以下を満たすためには、オイルダンパーが ΣF =約500MN、BRBが ΣF =約700MN必要であり、導入ダンパー総容量は約1.4倍になる。それにも関わらず、ダンパー導入費用は約1/3、対応するCP値は約1/2に抑えることができる。なお、Fig.12(c1)~(c3)に示すように、BRBのみ導入した場合の加速度応答低減効果は殆どない一方で、オイルダンパーを約800MN導入した場合は約1m/s²低減した。

一方、Fig.8(b)とFig.11(b)の1~2段目の比較に示すように、BRBの

芯材塑性化部長さを短く($L_p/L_0=0.5 \rightarrow 0.2$)し、弾性軸剛性 k_d を高めることで1次モードの獲得減衰比は最大約1%、変位応答の低減効果もやや向上する。しかし、Fig.11(c)に示すように、芯材塑性化部の歪は最大約2倍まで増大し、レベル2地震動時で一般的なBRBの性能保証限界値3%を超える場合がある。この結果はDamped braced tubeに導入するBRBの塑性化部長さは、歪集中の緩和を考慮して少なくとも $L_p/L_0=0.5$ 程度以上長く設計する必要性を示唆している。

4.2 ダンパーをスリット内部に非一様配置する場合

あるダンパー総容量 ΣF の下で地震応答を最小化するダンパー非一様配置を分析する。同検討は、ダンパー導入費用が固定されている状態と同義であり、その最適解は連続一様配置時のダンパー導入費用対効果をさらに向上させるダンパー容量分布(非一様配置)となる。本節では、前節の検討を参考に、 ΣF はType B、 $\alpha=0.22$ 、実物件と同様のCenter&Cornerスリットにオイルダンパーを導入する時の1次モード減衰比が約6%以上となる最低値600MNとし、最小化する地震応答(最大化される費用対効果)は主架構全体の損傷に影響するピーク層間変形角応答とする。

Fig.13に最適化されたダンパー容量分布を、Table 4に得られた最適解の動的応答特性を連続一様配置時と比較して示す。Fig.13(b)の○マーカーはBRBの塑性化部軸歪分布を重ねて示す。Fig.13に示すように、ダンパーの種類に拘らず、建物上層部に偏った容量分布が

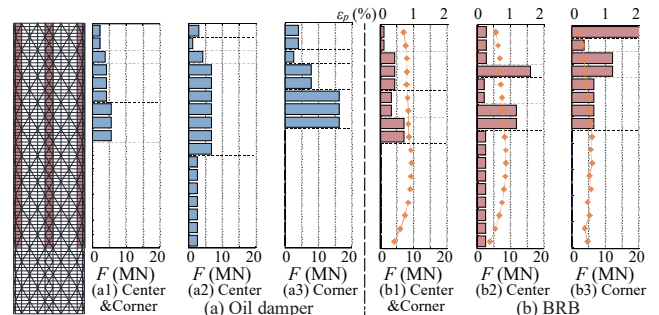


Fig. 13 Optimized damper distribution ($\alpha=0.22$, Type B, $\Sigma F=600$ MN)

Table 4 Comparison of uniform and non-uniform distributions

		Uniform			Non-uniform (optimized)		
		Center & Corner	Center	Corner	Center & Corner	Center	Corner
T_1 (s)	Bare slit	9.12	7.81	7.56	-	-	-
	Oil	9.09	7.25	7.51	8.92	7.14	7.33
	BRB	8.61	7.23	7.26	8.53	7.24	7.29
ζ_1 (%)	Bare slit	2.0					
	Oil	7.11	11.77	6.29	8.77	10.69	7.68
	BRB	3.90	3.91	2.91	3.60	3.79	2.44
Peak SDR (rad.%)	Bare slit	0.90	0.80	0.77	-	-	-
	Oil	0.62	0.46	0.55	0.58	0.43	0.53
	BRB	0.73	0.64	0.70	0.68	0.60	0.66
Peak Panel θ (rad.%)	Bare slit	1.23	1.30	1.36	-	-	-
	Oil	0.84	0.97	0.96	0.80	0.96	0.92
	BRB	0.96	0.84	1.18	0.94	0.80	1.08
Roof Acc. (m/s ²)	Bare slit	4.23	4.20	4.45	-	-	-
	Oil	3.43	3.44	3.33	3.66	3.55	3.92
	BRB	3.83	4.2	4.07	3.8	3.94	3.95

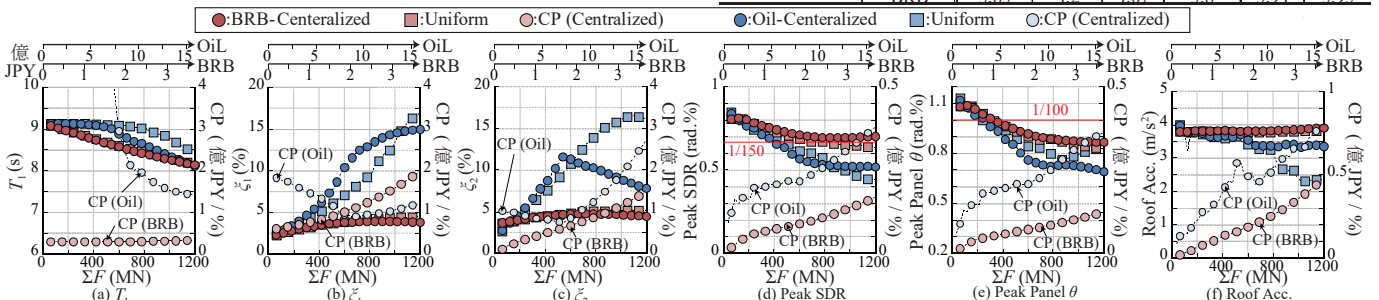


Fig. 14 Dynamic response characteristics of centralized distribution in damped slit (Type B, Center & Corner models, $\alpha=0.22$)

最適解に選ばれた。Fig.7(g)に示すように、この容量分布はダンパー導入前の層間変形角応答分布と対応している。Table 4 に示すように、最適化された非一様配置では、ダンパーの種類に拘らず連続一様配置の結果と比べて、1次モード固有周期と変位応答はより低減された。これはダンパーの導入費用対効果の向上と同義である。なお、今回の検討範囲では、Peak SDR の最小化によって頂部加速度(Roof ACC.)など他の地震応答が顕著に悪化する事例も確認されなかった。一方、1次モード減衰比は必ずしも増大するとは限らず、0.3%~1.0%程度減少することもある。以上の結果は、ダンパー総容量が制限される Damped braced tube の設計状況下では、鉛直スリットのみによる層間変形角応答分布を基に大凡のダンパー配分を手動で決めても、ダンパーの導入費用対効果は概ね向上する設計が可能であることを示唆していると考えられる。

4.3 ダンパーをスリット内部の特殊階に集約配置する場合

建築計画等の都合でダンパーをスリット内部の特殊階に集約配置する場合の動的応答特性と費用対効果を分析する。Fig.14 にダンパー総容量を横軸にとった各種動的応答特性と対応するダンパー導入費用対効果 CP 値を示す。本節は既往研究³⁾⁷⁾と同様に $\alpha=0.22$, Type B, Center&Corner スリットとし、同図は連続一様配置の結果を重ねて示す。Fig.14 に示すように、建物外周部が十分に設計され、スリット部の鉛直せん断変形モードが卓越する Type B では、連続一様配置時と比べて特殊階集中配置の方が、特にオイルダンパー導入時の1次モードの固有周期低減効果、1次モードの獲得減衰比、変位応答低減効果は向上しており、対応する CP 値も向上する。一方で大きな総容量を導入した時の加速度応答低減効果は緩慢となる。BRB 導入時の動的応答特性や CP 値は連続一様配置から殆ど変化しない。4.1~4.3 節の検討より、要求性能を満足するという観点では、ダンパーの導入費用対効果に着目した最適設計においても、ダンパー容量分布は柔軟に選択して良いと考えられる。

5. BRB を部分的に採用するダンパー導入費用削減の可能性検討

4章より Damped braced tube では、減衰比獲得という要求性能の

点で粘性系ダンパーの導入が必須である一方、地震応答をある設計クライテリアに納めるという点で BRB の導入費用対効果が高いことが示された。最後の5章では、スリット部に鉛直せん断変形モード(Fig.7)が卓越する主架構が設計されていることを前提として、仮定した設計クライテリア(動的応答特性の制約)を満足しつつダンパー導入費用を削減できるダンパーの組合せの可能性を探索する。

5.1 特殊階集約配置を対象とした総当り検討

まずダンパーの組合せ総数が少ない特殊階集約配置を例に総当り検討を行い、ダンパー導入費用削減の可否を議論する。対象建物は4.3節と同じ Type B, $\alpha=0.22$, Center&Corner スリットとする。

Fig.15 にダンパー配置立面図と動的応答特性ならびにダンパー導入費用を示す。本検討では建物の対称性に基づき、フロア単位(Fig.15(a)(c))またはスリット単位(Fig.15(b))で導入するダンパーの種類を操作し、全体のダンパー総容量に対してオイルダンパーが多い場合(Fig.15(a)(b1))または BRB が多い場合(Fig.15(b2)(c))の合計 8 種類を検討する。Fig.15 にはオイルダンパーまたは BRB のみを導入した場合の結果も併記する。次節の連続一様配置の検討と条件を揃えるため、本検討では $\Sigma F=600\text{MN}$ とする。

Fig.15(a)~(c)に示すように、オイルダンパーと BRB を組合せた地震応答は、オイルダンパーのみを導入する場合(Fig.15 の Fully Oils)より性能は劣るものの、ピーク層間変形角応答が $1/150\text{rad}$ 以下、ピークせん断変形角応答が $1/100\text{rad}$ 以下を満足しつつ、ダンパー導入費用を Fully Oils より削減する設計が可能であることが分かる。特にこの特殊階集約配置の例題検討では、ダンパー導入費用は最低約 25%以上削減できた。また、BRB の導入量が多い程 1次モード減衰比 ξ_1 は低下する(この例では 10.7%から 5.2%)が、オイルダンパーを適切なフロア(Fig.15(c2)(c3))やスリット(Fig.15(b2))に配置することで約 6%以上の ξ_1 を獲得可能である。

5.2 連続一様配置でダンパー導入費用を最小化する最適組合せ

次に仮定した設計クライテリア(動的応答特性の制約)を満たし、ダンパー導入費用を最小化するダンパーの最適組合せを探索する。対象建物は、スリット部の鉛直せん断変形モードが卓越する Type B

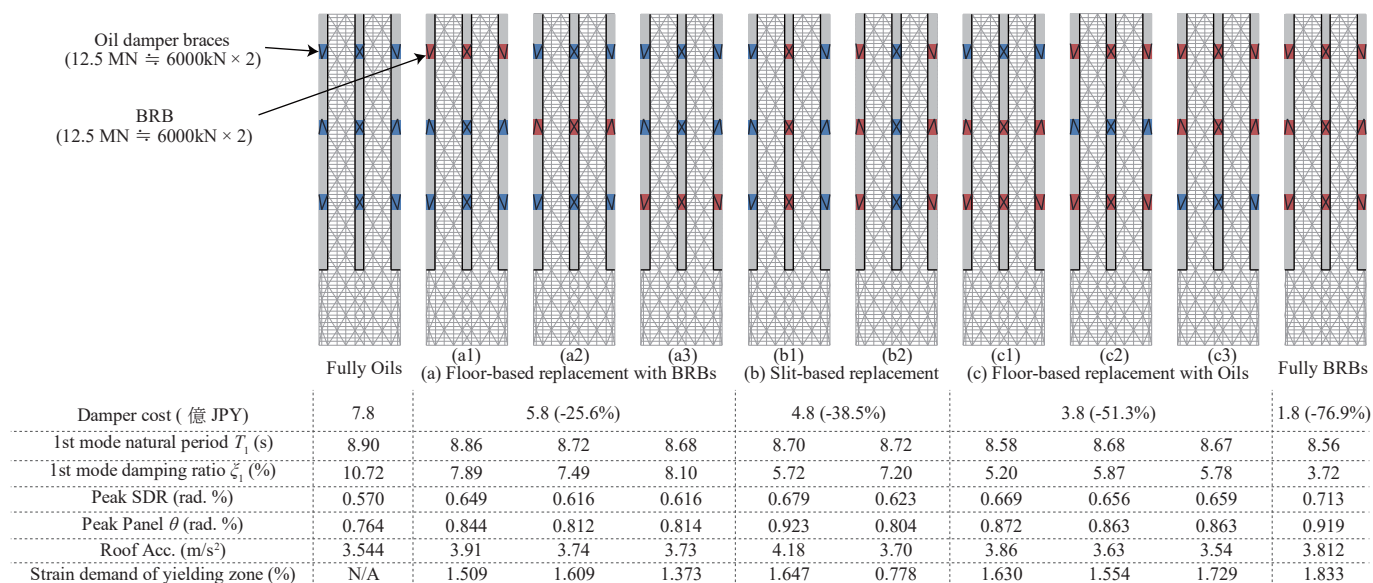


Fig. 15 Comparison of reduced damper cost and dynamic response characteristics (Type B, Center & Corner, $\Sigma F=600\text{MN}$)

と Type M の主架構に、 $\alpha=0.22$ の鉛直スリットを Center または Center&Corner に設けた実物件に近い Damped braced tube とする。ダンパー総容量 ΣF は Type B で 6%以上の 1 次モード減衰比 ζ_1 が獲得できる最低値 600MN とする。事前検討(5.1 節)に基づき、数値最適化の制約条件は、ピーク層間変形角 $1/150\text{rad}$.以下(主架構がほぼ無損傷)、ピークせん断変形角 $1/100\text{rad}$.以下(カーテンウォールの脱落限界)、1 次モード減衰比 5.0%以上または 7.0%以上とする。減衰比の制約は 4 章と実行可能解の有無に基づき決定した。設計変数はオイルダンパーブレースの除去または BRB 置換とする。また、同等の地震応答低減効果を獲得するためには、BRB はオイルダンパーより大きな容量が必要であるという 4 章の見解に基づき、オイルダンパー 1 本の 2 倍の容量に BRB を置換する場合も検討する。数値最適化は単純 GA²³⁾を用い、選択はトーナメント法(3 個体)、交差は一様交差

(交差率 60%)、突然変異は転座(変異率 1%)とする。

Fig.16 と Fig.17 に各スリットモデルの最適ダンパー配置と動的応答特性ならびにダンパー導入費用を示す。同図からはオイルダンパーまたは BRB だけを連続一様配置した場合の結果も併記している。

オイルダンパーを BRB に置換する場合には、Fig.16(B)(C)の比較に示すように、1 次モード減衰比の制約が易しいほど、最適配置における BRB の導入量が増え、ダンパー導入費用も削減される。この時オイルダンパー 1 本を 2 倍の容量の BRB に置換する場合 (Fig.16(b3)(c3), Fig.17(b3)(e3))では、ダンパー導入費用の削減効果は半減する場合もあるものの、同等の動的応答特性のまま芯材塑性化部歪の負担を減らすことが可能である。

その一方で、Fig.16(b1)(c1)と Fig.17(b1)(e1)に示すように、一定の減衰比を獲得し設計クライテリアを満たすという制約条件(要求性

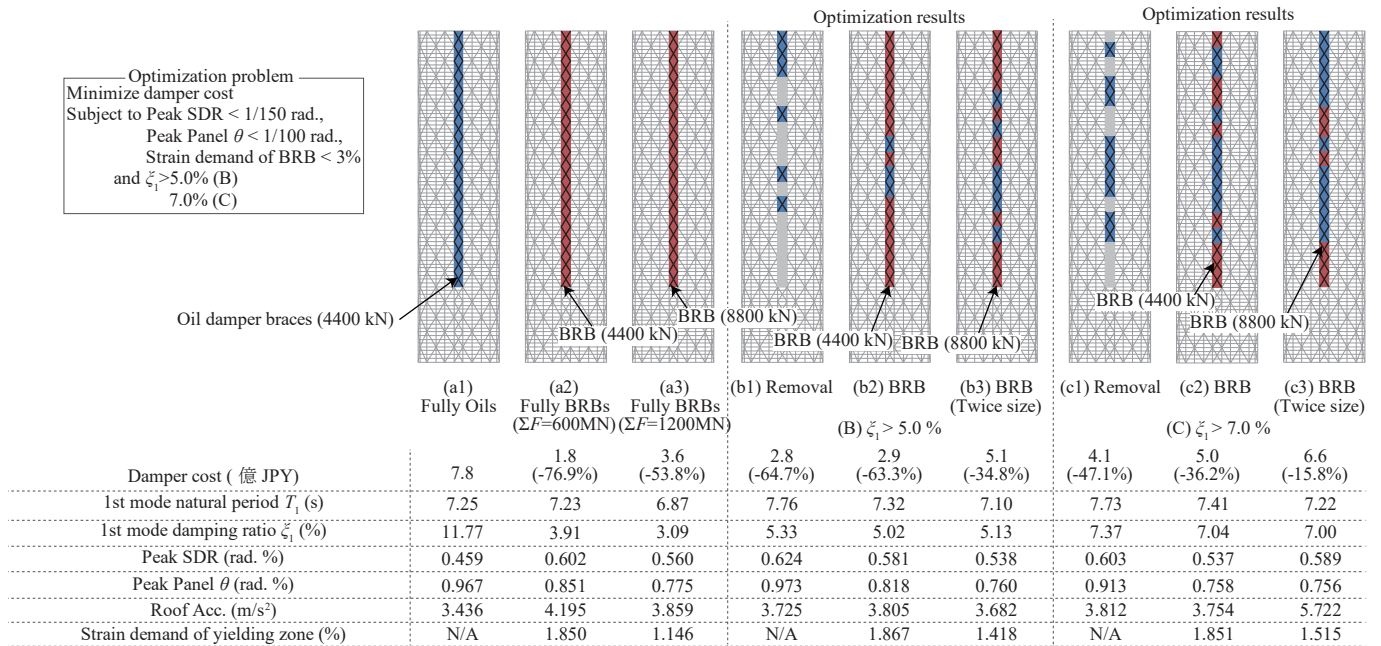


Fig. 16 Optimization results (Type B, Center, uniform-distributions)

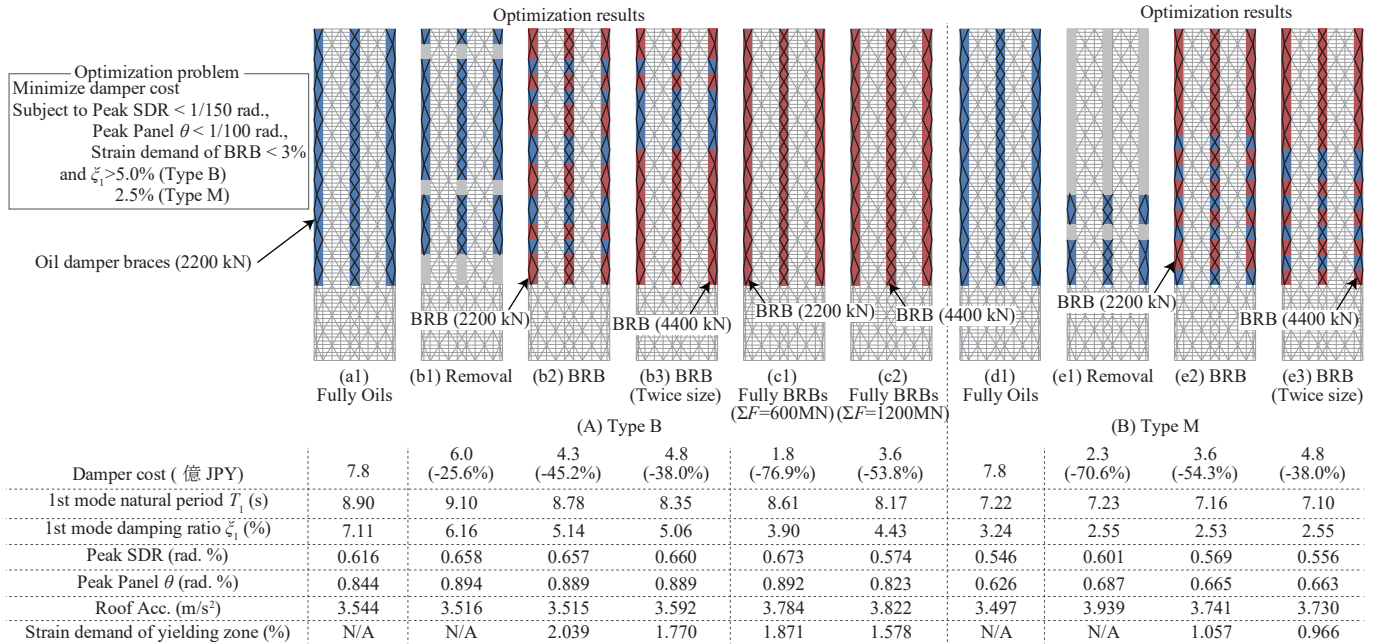


Fig. 17 Optimization results (Center & Corner, uniform-distributions)

能)の観点では、必ずしも BRB の導入は必須ではなく、特に Center& Corner スリットより付加減衰効果が優れる本研究の Center スリット (Fig.16(b1)(e1))では、オイルダンパーの除去のみでもダンパー導入費用は BRB 置換と同程度まで削減できることも分かる。

また、Fig.17(A)(B)の比較に示すように、付加減衰効果が元々低い Type M では、制約条件を満たしダンパー導入費用が最小化されても、オイルダンパーの除去または BRB 置換によって付加減衰効果は殆ど失われる。この結果はダンパー導入費用対効果の向上の観点においても、Damped braced tube の主架構は、スリット部に鉛直せん断変形の振動モードが卓越するように建物外周部を十分剛に設計する必要があることを示唆していると考えられる。

なお、本検討の範囲では、例えば隣接する BRB とオイルダンパーが 1 本入れ替わった程度の配置変動であれば、ダンパー導入費用や地震応答が殆ど変わらない設計解も存在しており、BRB とオイルダンパーを組合せる場合のダンパー導入費用を最小化する最適配置位置について一般的な傾向は言及できない。ただし、特に Center & Corner スリットでは、1~2 層毎の入れ違い配置 (Fig.17(b2)(e2)(e3)) または大きな層間変形角応答が分布する上層 (Fig.17(g1)(g2)) にオイルダンパーが集中する配置 (Fig.17(b1)) が繰返し発見された。

また、スリットに入れるダンパーと弾性メガプレースの取り合いによって接合箇所部材に大きな部材力が発生する場合がありますと考えられる。本節の範囲内では、境界部は十分な強度のある部材が配置されることを前提として多様な部材配置を許容した最適化検討を行っているが、選択した解を具体化する段階においては、ダンパー部の納まりについて別途検討が必要である。

6. 結

本研究はダンパーの導入費用対効果に着目した Damped braced tube の最適設計の知見拡充を目的に、主架構タイプ、全体曲げせん断比、スリット配置、ダンパー容量分布、ダンパー種類が動的応答特性とダンパーの導入費用対効果に与える影響を広範な数値解析検討で調査し、さらにダンパーを組合せてダンパー導入費用削減の可能性を探索した。本論の検討範囲で得られた結論を以下に示す。

- 1) 高い減衰比の獲得とダンパー導入費用対効果の向上の観点では、Damped braced tube の主架構は、スリット部に鉛直せん断変形の振動モードが卓越するように、建物外周部に柱梁断面と比べて大型の弾性メガプレースを配置する必要がある。同振動モードの卓越が鈍い場合または架構全体の水平せん断変形モードが卓越する場合は、付加減衰比は殆ど得られず、対応するダンパー導入費用対効果も顕著に悪化する。一方、同一主架構の範囲内では、スリット配置数が多く、全体曲げせん断比が小さいほど獲得付加減衰比のピーク値は高くなる。ただし、上述の通り主架構が適切に設計されていれば、実現可能なオイルダンパー総容量の範囲内で最低でも約 6% 以上の 1 次モード減衰比が実現できるため、スリット配置やダンパー容量分布は柔軟に選択可能である。
- 2) 減衰比獲得や地震応答低減効果の観点では、オイルダンパーが BRB より優れる。特に約 6% 以上の減衰比が必要な場合は、オイルダンパーの導入は必須である。一方、地震応答をある設計クライテリア以下に納めるという観点では、オイルダンパーより BRB の導入費用対効果が高く、2021 年関東地域の設計価格に基づ

いて算出した CP 値は半分程度以下に抑えられる。ただし、BRB のみの導入時では応答加速度の大きな低減効果は期待できない。

- 3) Damped braced tube に BRB を導入する場合は、部材全長に対する芯材塑性化部長さを $L_p/L_0=0.5 \rightarrow 0.2$ 程度まで短くすることで、弾性軸剛性を増大させ、獲得付加減衰比 (最大約 1.0%) や地震応答低減効果をやや上昇できる。しかし、レベル 2 地震動下で塑性化部軸歪が一般的な BRB の変形性能保証限界値 3.0% を超えるため、塑性化部は約 $L_p/L_0=0.5$ 以上に設計することが推奨される。
- 4) Damped braced tube へのダンパー導入量 (導入費用) が制限される場合は、ダンパーの無いスリットだけの状態の層間変形角応答分布に比例するように非一様なダンパー容量分布を設計すると、スリット内部にダンパーを連続様に配置した場合より、固有周期や変位応答は低減でき、ダンパー導入費用対効果も向上する。
- 5) Damped braced tube では、上述のような適切な主架構設計が求められるもの、オイルダンパーの除去または BRB への置換を組合せることで、仮定した獲得減衰比や変位地震応答の設計クライテリアを満たし、ダンパー導入費用を最小化する設計が可能である。特に減衰比の要求性能が必要ダンパー導入量 (費用) の削減に影響するもの、最低でも約 25% 以上の費用削減効果を期待できる。

本検討では、実物件と同等の架構規模を有する Damped braced tube の一般的な有効性を明らかにすることができたが、アスペクト比が異なる場合などの統計情報整備は今後の課題とする。

謝辞

本研究は JSSI 2019 年度「免震・制振構造に関わる研究助成」および JSPS (No. 21K14288) の助成を戴きました。複数のデバイスメーカー様にダンパーの価格情報をご提供いただきました。本研究は東京工業大学の TSUBAME3.0 の計算結果です。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) CTBUH Tall Building Database: <https://www.skyscrapercenter.com/> (accessed 2021.10.14)
- 2) Lago A., Trabucco, D. and Wood, A.: Damping Technologies for Tall Buildings Theory, Design Guidance and Case Studies, CTBUH, Elsevier Inc., 2019.
- 3) Ishibashi, Y.: The structural design of 400m height Damped Diagrid – TOKYO TORCH Torch Tower –, The Steel Structural Technology Magazine, pp.78-79, 2020.10. (In Japanese)
石橋洋二: 外殻制振構造を用いた 400m 級超高層建築の検討 – TOKYO TORCE (東京駅前常盤橋プロジェクト) Torch Tower (B 棟), 鉄鋼技術, pp.78-79, 2020.10.
- 4) Ishibashi et al.: Applicability of damped diagrid structures for 400m-height buildings (Part 1 to Part 5), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 2018.7 to 2020.7 (in Japanese)
石橋洋二ほか: 400m 級の超高層ビルに対する外郭制振構造の適用 その 1~その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018.7~2020.7
- 5) 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> (accessed 2022.2.16)
- 6) Takeuchi, T. and Terazawa, Y.: Recent trends and advances of optimal structural design approach of steel braced frames with dampers The Steel Structural Technology Magazine, pp.44-47 2020.10. (In Japanese)
竹内徹, 寺澤友貴: プレース材・制振部材を用いた耐震設計の考え方と最新の設計アプローチ, 鉄構鋼技術, pp.78-79, 2020.10.
- 7) Terazawa, Y.: Study of optimal layout and distribution of oil dampers on both

- of 400m-height damped outrigger systems and damped braced tube systems, Report of 2019 research grant of JSSI for seismic isolated structures and structures with dampers, MENSIN, No.109, 2020.7 (in Japanese)
寺澤友貴：400m 級アウトリガー構造および外殻構造のオイルダンパー最適配置・容量分布に関する研究，2019 年度（11 回）免震構造・制震構造に関する研究助成の成果報告，MENSIN, No.109, 2020.7
- 8) Smith, S. and Coull, A.: Tall Building Structures: Analysis and Design, Chapter 14, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
 - 9) 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. <https://doi.org/10.1002/tal.413>
 - 10) Huang, B. and Takeuchi, T.: Dynamic Response Evaluation of Damped-Outrigger Systems with Various Heights, Earthquake Spectra, Vol. 33, No. 2, pp. 665-685, 2017. <http://dx.doi.org/10.1193/051816EQS082M>
 - 11) 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, Volume 47, No. 12, pages 2343-2365, 2018. <https://doi.org/10.1002/eqe.3072>
 - 12) 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) https://doi.org/10.3130/aijs.71.111_2
 - 13) 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/aijs.85.1067>
 - 14) Asai, T., Terazawa, Y., Miyazaki, T., Lin, PC. 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/10.1016/j.engstruct.2021.113229>
 - 15) 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/aijs.87.149>
 - 16) Kasai, K., Watai, K., Maeda, S., Sato, D. and Suzuki, Y.: Equivalent mass-spring modeling method for super-tall buildings of increasing height (Part 1): overview of past and proposed methods for bending-shear model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.772, pp.791-801, 2020.6 (in Japanese) <https://doi.org/10.3130/aijs.85.791>
 - 17) 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)
 - 18) 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> (accessed 2020.12.1) (参照日：2020.12.01)
 - 19) 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>
 - 20) 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>
 - 21) 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：パッシブ制震構造設計施工マニュアル第3版, 2013
 - 22) Notification No. 1457 of the Ministry of Construction, 2000.5 (in Japanese)
建設省告示第1457号, 2000.5
 - 23) DEAP 1.1.0: <https://github.com/DEAP/deap>

(2022年3月5日原稿受理, 2022年5月30日採用決定)