

線形粘性ダンパー付並列連層耐震架構を用いた超高層建物の最適地震応答制御 Optimal Seismic Response Control for Tall Building Using Damped Shear Wall with Linear Viscous Dampers

東京工業大学 田中瑞希

1. 序

全体曲げ応答が卓越する超高層建物では、Damped shear wall¹⁾や Damped braced tube²⁾, Damped outrigger¹⁾³⁾などの構造形式により地震応答制御が行われる。本研究では、同構造を並列連層耐震架構(Shear wall)間に生じる曲げ応答変位差をダンパーの地震エネルギー吸収に利用するダンパー付並列連層耐震架構の一種と捉えて同一モデル化し、各種設計変数が動的応答特性に与える影響をパラメトリックに分析する。また、特定の地震応答低減を意図した簡易な最適ダンパー設計法を提案する。

2. 数値解析概要

図 1 にダンパー付並列連層耐震架構の想定建物と各要素を簡易的に集約した解析モデルを示す。3 種類の平面を 1 次モード固有周期 T_1 が 5 s(200 m), 6 s(300 m), 7 s(400 m) となる曲げ剛性 EI を有する理想的な連層壁に置換し、せん断剛性と曲げ剛性が等価な平面骨組にモデル化する。図 2 と表 1 に示すように、設計変数は連層壁の軒高 H , アスペクト比 H/B , せん断により生じる頂部変位を曲げにより生じる頂部変位で除した値である全体曲げせん断比 r_{BS} , ダンパー取付角 θ , ダンパーギャップ高 h_d , ダンパー総容量 ΣC_d , ダンパー層数 n とする。ダンパーを挿入するスリットの幅 w はギャップ高 h_d と取付角 θ から計算される。本検討では、ダンパーを建物全体に配置する一様連続配置、軒高に対して均等に配置する一様集中配置、軒高に対して不均等に配置する非一様集中配置、容量の異なるダンパーを全体に配置する非一様連続配置の 4 種類の配置における動的応答特性を分析する。入力地震動は Level 2 告示 3 波(図 3)とし、動的応答特性は一般化応答スペクトル解析(GRSA⁴⁾)で評価する。図 4 に示すように、GRSA と時刻歴応答解析の誤差が 20% 以下であることを確認している。

3. ダンパーを一様連続配置する時の動的応答特性

3.1 $\theta = 90^\circ$ の時の固有振動特性

図 5 と図 6 に取付角を $\theta = 90^\circ$ として、ダンパーに曲げ鉛直応答を加える場合の固有振動特性を示す。図 5 に示すように、ダンパー総容量の増加に伴い、モード固有周期は 1 次、モード減衰比 ξ は 1~3 次モードが敏

感に変化するが、 ξ には制御効果が最大化される最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$ が存在し、 ξ_1 の $(\Sigma C_d)_{opt}$ で全ての ξ が概ね最大化される。図 6 に示すように、軒高 H は建物重量が変化するため $(\Sigma C_d)_{opt}$ に影響するが、制御効果には影響を与えない。アスペクト比 H/B が小さいほど、連層壁の幅に比例してダンパーの受ける速度が増加するため、少ない $(\Sigma C_d)_{opt}$ で高い制御効果を発揮するが、

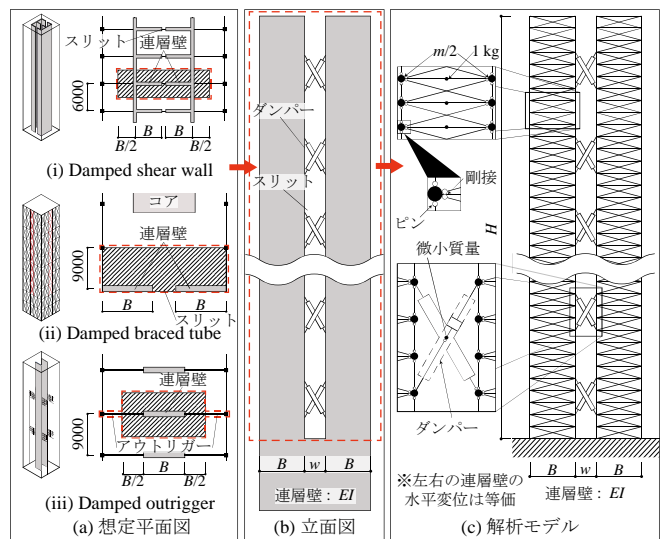


図 1 ダンパー付並列連層耐震架構モデル

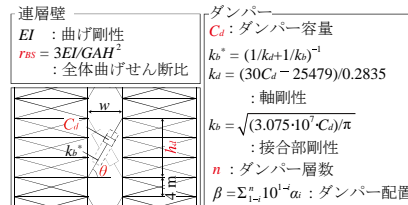


表 1 設計変数検討範囲

H (m)	200	300	400
H/B	10	~	30
r_{BS}	0.3	~	1.0
h_d (m)	8	~	16
θ ($^\circ$)	30	~	90
ΣC_d (MN/mm)	0.012	0.018	0.025
	2.4	3.6	5.0

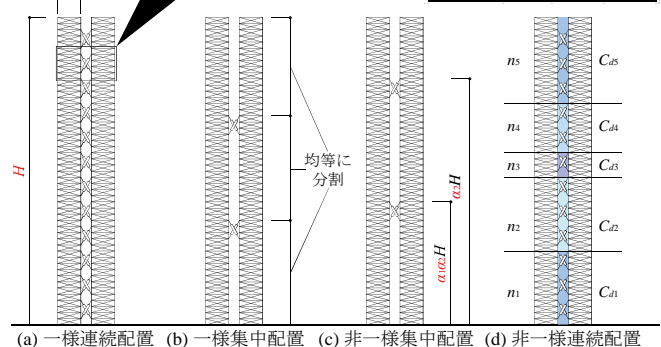


図 2 ダンパーの配置と設計変数の定義(赤字: 主要操作変数)

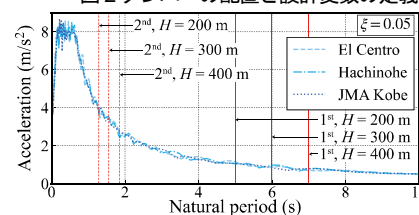


図 3 入力地震動の応答スペクトル ($\xi=5\%$)

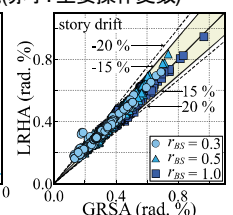


図 4 GRSA vs LRHA

制御効果には影響を与えない。全体曲げせん断比 r_{BS} が大きくなるほど、ダンパーに曲げ鉛直応答が加わりづらくなるため、制御効果が減少するが、 $(\Sigma C_d)_{opt}$ には影響を与えない。

3.2 $\theta < 90^\circ$ の時の固有振動特性

図7に取付角 θ が固有振動特性に与える影響を示す。 θ が小さくなるほどモード固有周期は低減される。これは、ダンパーに全体曲げ応答の鉛直成分だけでなく、水平成分も加わることでダンパーによる減衰力が増し、かつ水平剛性が高まったためである。同様の理由から、 θ が小さいほどモード減衰比 ξ が増加する。 ξ_1 を最大化する $(\Sigma C_d)_{opt}$ で ξ_2, ξ_3 も概ね最大化される(同図中の●)。

図8に最大 ξ_1 と最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$ を示す。同図(a)に示すように、 ξ_1 は r_{BS} に反比例し、 θ が小さくなるにつれて、 H/B 及びギャップ高 h_d に比例して増加する。同図(b)に示すように、 $(\Sigma C_d)_{opt}$ は H/B に比例、 r_{BS}, h_d に反比例し、 θ に対しては複雑に変化する。

3.3 一様連続配置の地震応答低減効果

図9に一様連続配置における地震応答低減率(非制震時から応答低減した割合)を示す。地震応答は層間変形角:SDR, 頂部加速度:RA, ベースシア:BSの3種類を検討する。同図に示すように、地震応答低減率はダンパー総容量に対して極大値を取るような最適ダンパー総容量を持つ。

4. ダンパーを一様集中配置する時の動的応答特性

構造計画等の制約を考慮し、ダンパー層数 n を1~4本として、一様集中配置する時の動的応答特性を分析する。

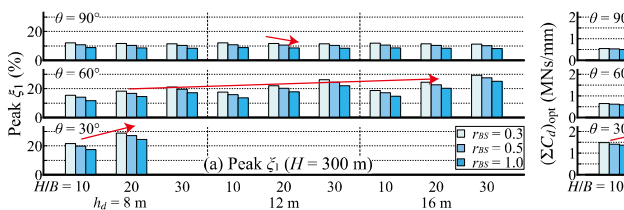


図8 最大1次モード減衰比と最適ダンパー総容量

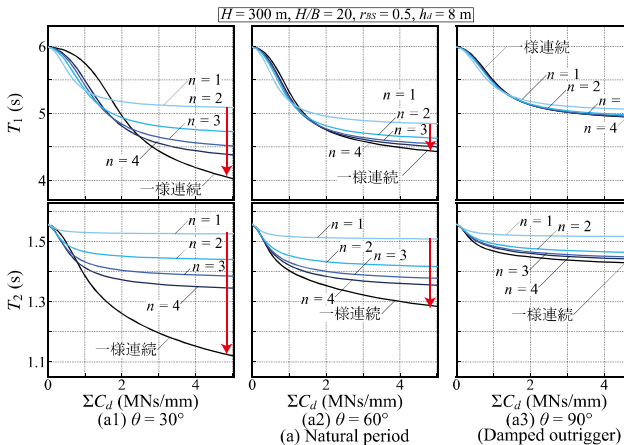


図10 ダンパー層数が固有振動特性に与える影響

図10と図11に軒高に対し均等にダンパーを配置した際、ダンパー層数 n が固有振動特性に与える影響を取付角 θ ごとに示す。図10(a)に示すように、 n に反比例してモード固有周期は低減し、低次モードほど敏感に変化するが、Damped outriggerを想定した $\theta = 90^\circ$ のモデルが受ける影響は僅かである。図10(b)及び図11に示すように、モード減衰比 ξ 、最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$

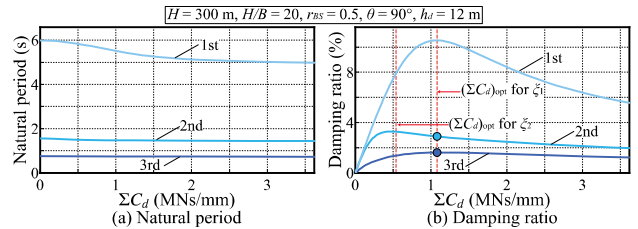


図5 ダンパー総容量と固有振動特性の関係

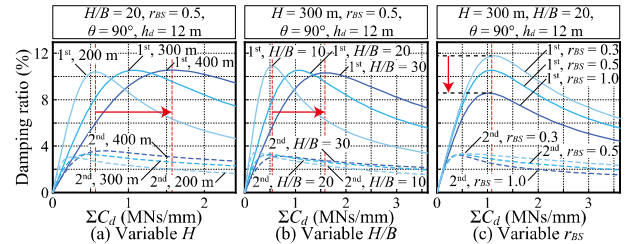


図6 設計変数がダンパー総容量とモード減衰比の関係に与える影響

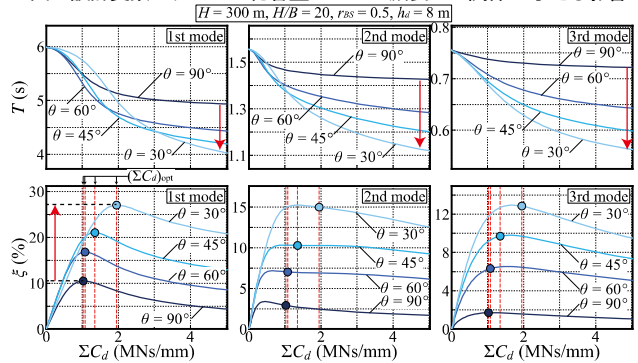


図7 取付角が固有振動特性に与える影響

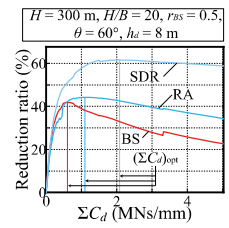


図9 ダンパー総容量と地震応答低減率

は n に比例して増加するが、Damped outrigger では増加に頭打ちの傾向が見られる。 ξ_1 は一様連続配置とは異なり、 $(\Sigma C_d)_{opt}$ では最大化されず、ダンパーを1層のみ配置する場合には、一様連続配置の獲得値より大幅に減少する。以上から、一様集中配置では、高次モード減衰比の獲得に際し、ダンパーを複数層に配置する必要がある。

5. ダンパーを非一様配置する時の動的応答特性

5.1 ダンパーを非一様集中配置する時の動的応答特性

図12にダンパーの配置を変化させた非一様集中配置における動的応答特性(例: $H = 300$ m, $H/B = 20$, $r_{BS} = 0.5$, $\theta = 60^\circ$, $h_d = 8$ m)と最適配置を示す。入力ダンパー総容量は一様連続配置の最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$ とする。ダンパー層数 n ごとにモード減衰比 ξ 、応答低減率を最大化する配置が存在し、 n に比例して制御効果が上昇するが、一様連続配置時の応答が概ね上限となる。 ξ_1 は中層に均等にダンパーを配置するものが最適となる。SDR の低減には、モード固有周期の低減が有効であるため、 ξ_1 の最適配置より全体的にやや高い位置にダンパーを配置するものが最適となるが、BS の低減には、軒高の6,7割ほどの位置と低層にダンパーを配置するものが最適であり、各地震応答で最適配置が異なる。

5.2 ダンパーを非一様連続配置する時の動的応答特性

一様連続配置の最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$ より少ない ΣC_d で ξ_1 を最大化することを意図して、ダンパーを非一様連続配置する時の動的応答特性(例: $H = 300$ m,

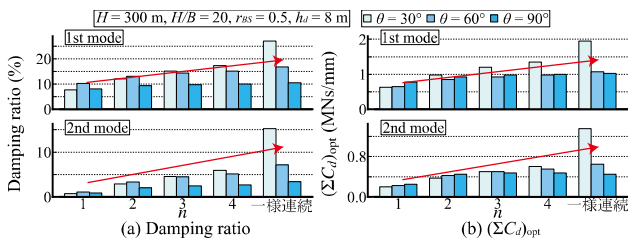


図11 最大獲得減衰比と最適ダンパー総容量

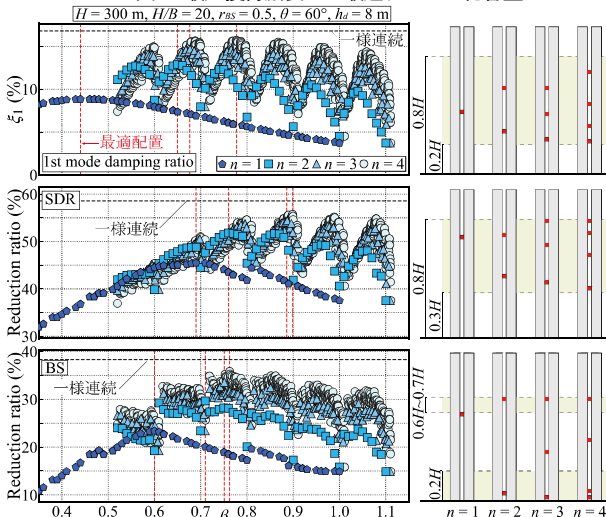


図12 非一様集中配置の動的応答特性と最適配置

$H/B = 20$, $r_{BS} = 0.5$, $\theta = 60^\circ$, $h_d = 8$ m)を分析する。図13と図14に示すように、 ΣC_d が小さい時は一様連続配置より1次モード固有周期が低減され、 ξ_1 を獲得できるため、SDR はよく低減されるが、高次モード減衰比は一様連続配置の獲得値以下であるため、RA, BS の地震応答低減率は一様連続配置並に留まる。最適容量分布は軒高の6割の位置に最適ダンパー容量 $(\Sigma C_d)_{opt}/n$ のダンパーが配置されるように頂部から容量を徐々に増やす分布であり、 ΣC_d に依らない。

6. ダンパー付超高層建物の最適ダンパー設計

6.1 地震応答低減の条件

図15に一様配置におけるダンパー総容量とモード減衰比及び地震応答低減率の関係を示す(例: $H = 300$ m, $H/B = 20$, $r_{BS} = 0.5$, $\theta = 60^\circ$, $h_d = 8$ m)。同図に示すように、SDR と RA は ξ_1 の最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$ を、BS は半分の $0.5(\Sigma C_d)_{opt}$ を配置したときに概ね最小化され、この傾向は設計変数によらない(図16)。以上から、 ξ_1 の $(\Sigma C_d)_{opt}$ を求めることで、効果的な地震応答低減が可能となる。 $(\Sigma C_d)_{opt}$ は、剛性比として回帰分析より式(1)と表2を用いて15%の誤差で精解を評価できる(図17)。

$$\frac{(\Sigma C_d)_{opt} \omega}{3EI/H^3} = C_1 \times (H/B)^{C_2} \times r_{BS}^{C_3} \times (n \cdot h_d/H)^{C_4} \quad (1)$$

6.2 最適ダンパー設計法の提案

図18に全体曲げを受けるダンパーが配置された超高層建物に対し、特定の地震応答の低減を目的とした最適ダンパー設計法のフローを示す。Damped shear wall, Damped braced tube, Damped outrigger を対象とし、 ξ_1 の $(\Sigma C_d)_{opt}$ 及び $0.5(\Sigma C_d)_{opt}$ のダンパーを配置することで地震応答の低減を行う。構造計画上の制約から、ダンパーを軒高に対して均等に配置できない場合や、導入できるダンパー総容量に制限がある場合を想定し、非一様配置の提案も行う。

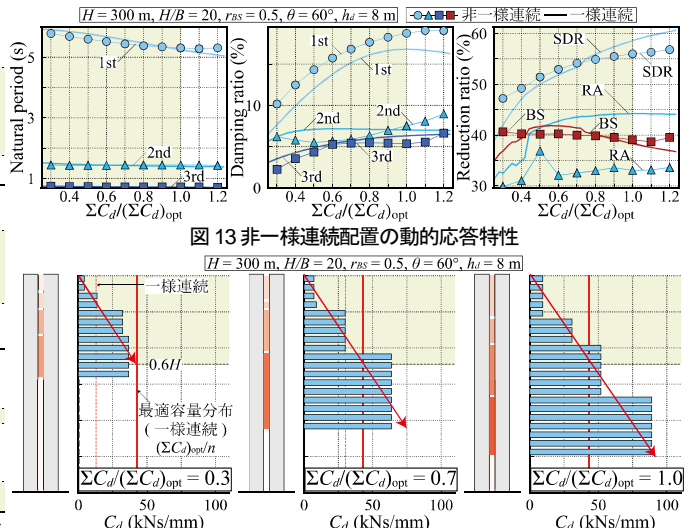


図13 非一様連続配置の動的応答特性

$H = 300$ m, $H/B = 20$, $r_{BS} = 0.5$, $\theta = 60^\circ$, $h_d = 8$ m

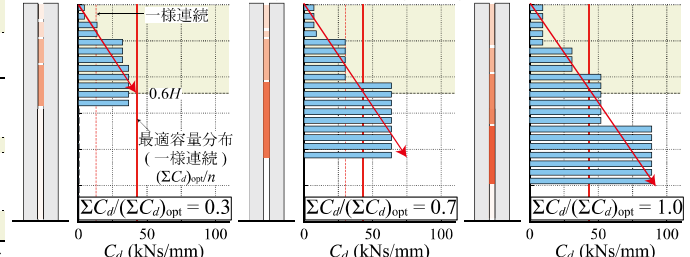


図14 非一様連続配置の最適容量分布

6.3 設計例

表3と図19と図20に Damped shear wall 及び Damped outrigger を想定した最適ダンパー設計例を示す。図20に示すように、推定した $(\Sigma C_d)_{opt}$ でSDR, RAが概ね最小化される。また、 $0.5(\Sigma C_d)_{opt}$ でBSを概ね最小化される。

以上より提案設計法は、Damped shear wall, Damped braced tube, Damped outrigger に対して有効であり、同構造らをダンパー付並列連層耐震架構として設計できる。

7. 結

- 1) ダンパー付並列連層耐震架構では、主に軒高 H 、アスペクト比 H/B が最適ダンパー総容量 $(\Sigma C_d)_{opt}$ に、全体曲げせん断比 r_{BS} 、ギャップ高 h_d が応答制御効果、取付角 θ 、ダンパー層数 n が双方に影響を与える。特にダンパーを全体曲げ応答の鉛直・水平成分に効かせる時($\theta < 90^\circ$)には、鉛直成分のみを効かせる時($\theta = 90^\circ$)より制御効果が大幅に上昇する。
- 2) 一様配置では1次モード減衰比 ξ_1 を最大化する $(\Sigma C_d)_{opt}$ でSDR, RAを、 $0.5(\Sigma C_d)_{opt}$ でBSを概ね最小化できる。また、高次モード減衰比の獲得にはダンパーを複数層配置することが不可欠である。
- 3) 非一様配置ではモード減衰比を最大化する配置、容量分布が存在するが、地震応答低減効果の上限は一様連続配置を超えない。
- 4) ξ_1 を最大化する $(\Sigma C_d)_{opt}$ を用いた提案ダンパー設計法は、任意の地震応答をよく低減し、Damped shear wall, Damped braced tube, Damped outrigger をダンパー付並列連層耐震架構と見なすことで包括的に設計できる。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 寺澤友貴, 田中陽樹, 竹内徹: 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, 日本建築学会構造系論文集 第87巻 第801号, pp 1082-1092, 2022.11
- 3) 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粘性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, pp 1067-1077, 2020.8
- 4) Terazawa, Y. and Takeuchi, T.: Generalized Response Spectrum Analysis for Structures with Dampers, Earthquake Spectra, 34(3), pp 1459-1479, 2018

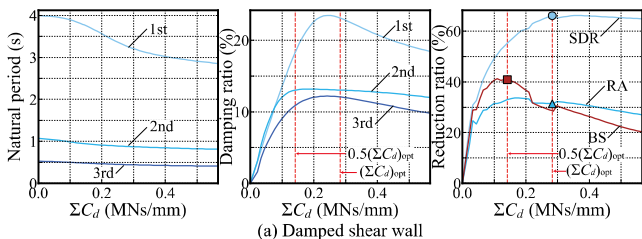


図20 最適ダンパー設計における動的応答特性

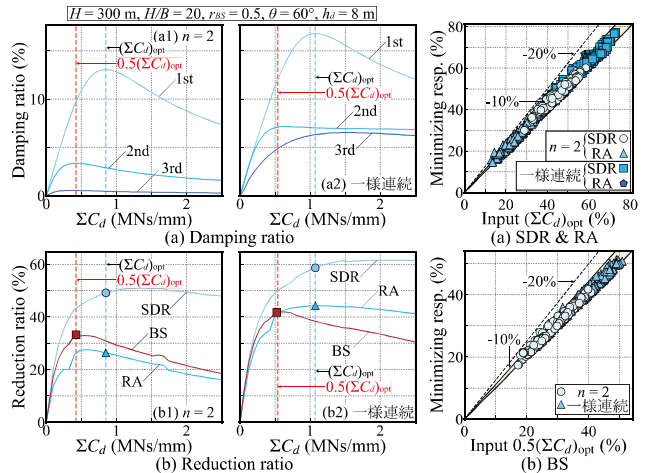


図15 モード減衰比と応答低減率の関係

図16 応答低減率の比較
表2 推定式の係数

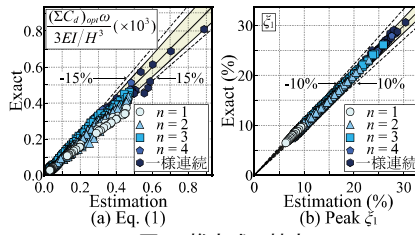


図17 推定式の精度

	θ (°)			
	30	45	60	90
C1	1.151	0.688	0.398	0.338
C2	1.835	1.817	1.816	1.865
C3	2.017	2.017	2.017	2.017
C4	-0.454	-0.435	-0.393	-0.355
	0.031	0.031	0.031	0.031
	0.426	0.482	0.528	0.589

目的

任意の地震応答 (SDR, RA, BS) を低減するダンパー配置・容量を提案
対象: H, B, w, EI, T_1, GA が既知の Damped shear wall, Damped braced tube, Damped outrigger

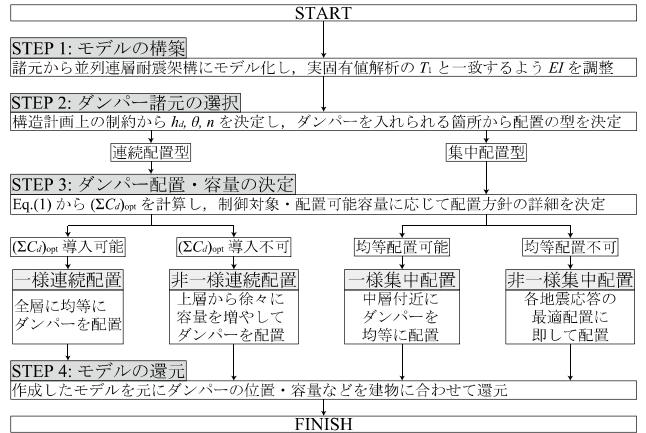


図18 最適ダンパー設計法のフロー

表3 Damped shear wall と Damped outrigger モデルの諸元

Model	H (m)	B (m)	w (m)	H/B	r_{BS}	EI ($\times 10^{13}$ Nm ²)	θ (°)	h_d (m)	n	$n \cdot h_d / H$	T_1 (s)	T_2 (s)
Damped shear wall	136	9.0	6.6	15.1	0.7	0.391	50.5	8	11	0.65	4.0	1.1
Damped outrigger	392	26.6	0.0	14.7	0.3	13.3	90.0	16	2	0.08	7.8	1.9

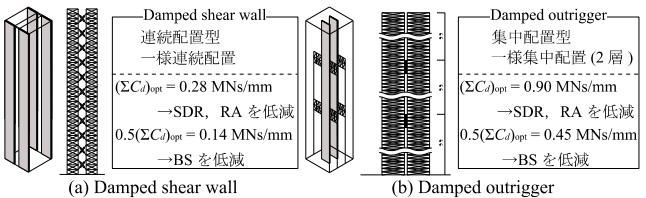


図19 Damped shear wall と Damped outrigger モデルの概要

