

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	任意指定ダンパー量を考慮したオイルダンパー制振設計手法の検討 －パラメータが設計値に与える影響－
Title(English)	Study of seismic design using oil dampers considering arbitrary damper quantity - Effects of parameters on design values -
著者(和文)	満田悠斗, 佐藤大樹, Alex Shegay
Authors(English)	Yuto Mitsuta, Daiki Sato, Alex Shegay
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 513-516
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 513-516
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

任意指定ダンパー量を考慮したオイルダンパー制振設計手法の検討 —パラメータが設計値に与える影響—

構造—振動

正会員 ○ 満田悠斗^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 Alex Shegay^{*3}

制振構造 オイルダンパー 大振幅地震動

1. はじめに

近年、南海トラフ地震による長周期地震動¹⁾や直下型地震動など、これまでの設計レベルを大きく上回る地震動（大振幅地震動²⁾）の発生が予測されている。そのため、超高層建物においても、より高い耐震性が求められる。その対策の1つとして、オイルダンパーを用いた制振設計が挙げられるが、対象となる建物によっては、建築計画上、層間変形角を目標値以内に収めるという十分な制振効果が得られるダンパー量を設置できない場合がある。笠井らは、オイルダンパーによる制振設計として、等価剛性調節法による層剛性非比例分配を提案した³⁾。この手法による多質点系への分配は、設計用外力分布と建物剛性の差が大きな層に対し、より大きなダンパー量を分配できるため、様々な地震動に対して有効なダンパー配置を設計することが可能となる。また、上野らは、上記で述べた層剛性非比例分配に、設計者が必要ダンパー量に対して任意に指定できるダンパー量（以降、任意指定ダンパー量）の導入を考えた設計手法を提案した⁴⁾。この手法により、任意指定ダンパー量として各層の制限を設けながらも建物の構造特性に従うダンパー分配を行うことが可能となる。しかし、検討数が少ない。

そこで、本報ではまず、上野らが提案した設計手法を用いて制振設計を行う。その際に、様々なパラメータを変化させ、比較することで、そのパラメータが設計値に与える影響について確認することを目的とする。

2. 建物モデルおよび入力地震動概要

2.1 非制振モデル概要

本報で用いる建物モデルは、文献 4) で用いたモデルと同様である。本報では、このダンパーが設置されていない建物モデルを非制振モデルと呼ぶこととする。以下に非制振モデルの概要を記す。図 1 に非制振モデルの軸組図と基準階平面図を示す。建物モデルは、地上 37 階、建物高さ 146.1m で、平面プランは各階同一の片コア形式である。長辺方向を X 方向、短辺方向を Y 方向としており、本報では、X 方向を検討対象とする。図 1 に示すように、Y3 構面の X4~X7 スパンの高さ方向のみにダンパーが設

置可能であると仮定する。梁断面は H-850×350×19×32~H-700×250×12×19、柱断面は、□-700×700×65×65~□-700×700×25×25 である。また、柱梁の鋼種は SM490 である。なお、非制振モデルの X 方向の固有周期は、1 次 4.87 s、2 次 1.69 s、3 次 1.00 s である。

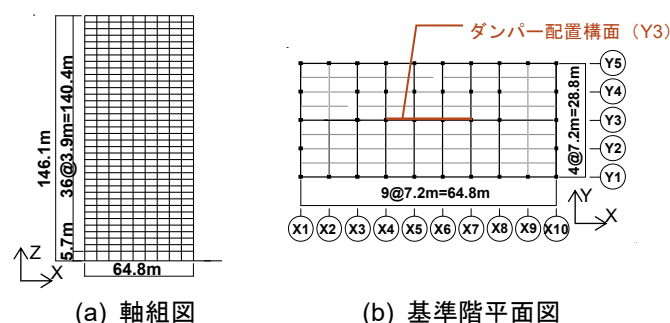


図 1 非制振モデルの軸組図と基準階平面図

2.2 入力地震動概要

本報では、コーナー周期 0.64s 以降で減衰定数 5% における擬似速度応答スペクトル ρS_v が 80cm/s で一定となる告示波 ART HACHI（位相特性：HACHINOHE 1968 EW）、および大阪地方の基盤促波である OS2 の 2 種類の地震動

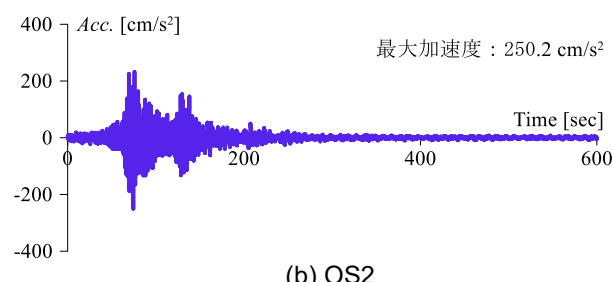
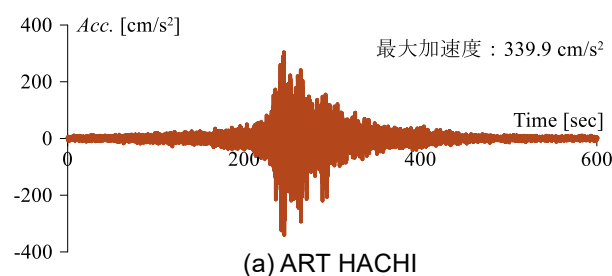


図 2 加速度波形

Study of seismic design using oil dampers considering arbitrary damper quantity
MITSUTA Yuto, SATO Daiki, Alex SHEGAY,
- Effects of parameters on design values -

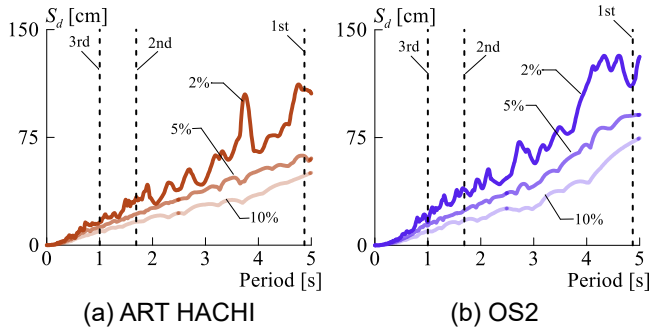


図 3 変位応答スペクトル

で検討を行う。図 2 に加速度波形を、図 3 に減衰定数が 2, 5, 10% の変位応答スペクトルを示す。また、図 3 には非制振モデルの X 方向の 1~3 次の固有周期を併記する。なお、解析は構造計算プログラムの RESP-D を用いて行い、積分時間間隔は 0.001 秒で出力間隔は 0.01 秒で行う。また、本報では主架構弾性で解析を行う。

3. オイルダンパーを用いた制振設計手順

以下に任意指定ダンパー量 $K_{di,op}''$ を考慮したオイルダンパー制振設計手順を示す。

STEP1. 検討対象建物の諸元及び設計用地震動の設定

建物モデルの質量 M_i 、主架構剛性 K_{fi} 、層高 h_i 、1 次固有周期 T_f 、初期減衰定数 h_0 を設定する。また、1 次固有周期 T_f における設計用地震動の変位応答スペクトル $S_d(T_f, h_0)$ を設定する。

STEP2. 設計時に必要なパラメータの設定

リリース率 μ_d (リリース時のダンパーの変形に対するダンパーの最大変形)、2 次粘性比 p 、内部剛性係数 β 、取付け部材剛性比 K_b/K_f を設定する。

STEP3. 層間変形角 θ_f の算定⁵⁾

$$\theta_f = \frac{S_d(T_f, h_0)}{H_{eff}} \quad (1)$$

ここで、 H_{eff} は有効高さ⁵⁾を示す。

STEP4. 目標層間変形角 θ_{max} の設定

制振構造での目標層間変形角 θ_{max} を設定する。

STEP5. 1 質点系での必要ダンパー量の算定⁵⁾

STEP3 で算定した層間変形角 θ_f から STEP4 で定めた目標層間変形角 θ_{max} に低減させるための必要ダンパー量 (1 次損失剛性比 K_d''/K_f) を性能曲線 (図 4)⁵⁾ より算定する。図 4 中の R_a はせん断力低減率、 R_d は変位低減率を表す。

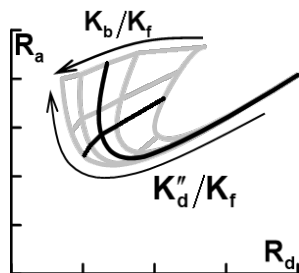


図 4 性能曲線

その際、減衰効果係数 D_h は次式より算出する。

$$D_h = \sqrt{\frac{(1 + ah_0)}{(1 + ah_{eq})}} \quad (2)$$

ここで、 h_{eq} は等価減衰定数⁵⁾である。定数 α は地震動によって変化する。

STEP6. ダンパーの内部剛性比 K_d/K_f の算定⁵⁾

$$\frac{K_d}{K_f} = \frac{K_d''}{K_f} \cdot \frac{\beta}{\omega_f} \quad (3)$$

ここで、 ω_f は主架構の固有円振動数である。

STEP7. 等価支持材剛性比 K_b^*/K_f の算定⁵⁾

$$\frac{K_b^*}{K_f} = \frac{1}{K_f/K_b + K_f/K_d} \quad (4)$$

STEP8. 等価支持材変形比の算定⁵⁾

STEP5 より得られた K_d''/K_f と STEP7 より得られた K_b^*/K_f より等価支持材変形比 λ が得られる。

$$\lambda = \frac{K_d''}{K_f} \cdot \frac{K_f}{K_b^*} \quad (5)$$

STEP9. 多質点系への必要ダンパー量の分配⁴⁾

全層に対して必要ダンパー量 K_{di}'' を次式より算定する ($\Sigma_A = 0$)。

$$K_{di}'' = \frac{Q_i}{h_i \Sigma_B Q_j h_j} \left\{ \frac{K_{di}''}{K_f} \sum_{i=1}^N (K_{fi} h_i^2) - \Sigma_A (K_{di,op}'' h_i^2) + A \Sigma_B (K_{fi} h_i^2) \right\} - A \quad (6)$$

ここで

$$A = \lambda + \frac{1}{\lambda \{f(p, \mu_d)\}^2} \quad (7)$$

$$f(p, \mu_d) = p + \frac{2(1-p)}{\mu_d} - \frac{1-p}{\mu_d^2} \quad (8)$$

ここに、 Q_i は層せん断力を表す。

STEP10. $K_{di}'' < 0$ がある場合、当該層を $K_{di}'' = K_{di,op}'' = 0$ とし、式(6)~(8)を用いて、他層の K_{di}'' を再計算する⁴⁾。

STEP11. 設置可能な K_{di}'' を超える層がある場合、当該層を $K_{di}'' = K_{di,op}''$ とし、最も大きな値が算出された層に対し、 $K_{di,op}'' = K_{di,max}''$ を与えて、式(6)~(8)を用いて、他層の K_{di}'' を再計算する。このとき、 $K_{di,op}''$ は次式で得られる⁴⁾。

$$K_{di,op}'' = \frac{F_{dyi} \cos \theta N_{di}}{\dot{u}_{dyi} / \omega_f} \quad (9)$$

ここで、 F_{dyi} はリリース荷重、 N_{di} は設置ダンパー数、 $\dot{u}_{dyi}$ はリリース速度である。なお、 $K_{di,max}''$ は設置上限ダンパー量を表す。

STEP12. $K_{di}'' \leq K_{di,op}''$ となるまで、STEP10 を繰り返し、最終的なダンパー配置を得る⁴⁾。

STEP13. 各層のダンパー諸元の決定

STEP12 より求めた必要ダンパー量よりオイルダンパーの種類と本数を選定する。

4. 各種パラメータが設計値に及ぼす影響

3.1 節で示した設計手順を用いて制振設計を行う。その際に、様々なパラメータを変化させ、比較することでそのパラメータが及ぼす影響について確認する。

4.1 設計時に必要なパラメータ

本章では、設計用地震動の変位応答スペクトル $S_d(T_f, h_0)$ を ART HACHI, OS2 においてそれぞれ 108.18, 111.75 とし、リリーフ率 $\mu_d = 2.0$ 、取付け部材剛性比 $K_b/K_f = 2.0$ として制振設計を行う。また、STEP11 で設定する $K''_{di, max}$ については、各層に 2000 kN 級のオイルダンパーを 6 基としたときの $K''_{di, op}$ とする。よって、リリーフ荷重 $F_{dyi} = 1800$ kN、リリーフ速度 $\dot{u}_{dyi} = 1.5$ cm/s とし、その他の諸元を式(9)に代入し、 $K''_{di, op} = K''_{di, max} = 6500$ kN/cm を得る。加えて、STEP13 でダンパーの選定を行う際に、ダンパーのリリーフ荷重 F_{dyi} は要求値 F'_{dyi} を用いて以下の範囲内になるように選定した。

$$0.8F'_{dyi} \leq F_{dyi} \leq 1.2F'_{dyi} \quad (10)$$

さらに、STEP13 でダンパーを選定する際に使用するダンパーの諸元を表 1 に示す。

表 1 ダンパー諸元

ダンパー名称	1500kN	2000kN
$\dot{u}_{dy}$ (cm/s)	1.5	
p	0.0123	
β	4.5	
C_d (kN・s/cm)	90000	120000
F_{dy} (kN)	1350	1800

4.2 α による影響

本節は、式(2)中の $\alpha = 25, 75$ の 2 種類で検討する。また、目標層間変形角 $\theta_{max} = 1/125$ rad とし、STEP9 で用いる層せん断力分布として、モデル A, B には非制振モデルに ART HACHI を、モデル C, D には OS2 を入力したときの最大層せん断力を用いる。設計用地震動として層せん断力分布と同じ地震動を用いる。図 5 に設計された制振モデルを示す。その際に、モデル A, C は $\alpha = 75$ とし、モデル B, D は $\alpha = 25$ として設計を行う。また、表 2 に各モデルの等価減衰定数 h_{eq} とダンパー数を示す。等価減衰定数に着目すると、モデル A に比べてモデル B では約 44% 増加し、モデル C に比べてモデル D では約 45% 増加していることが分かる。それに伴い、ダンパー本数も増加しており、モデル B では 1500 kN 級が 30 本、2000 kN 級が 20 本、合計で 50 本増加し、モデル D では 1500 kN 級が 38 本、2000 kN 級が 22 本、合計で 60 本増加していることが分かる。これより、 $\alpha = 75$ から 25 に変化させると、等価減衰定数は 45% 程度増加し、2 倍程度のダンパー本数が必要であることが分かる。次に、各モデルに設計用地震動を入力し、時刻歴応答解析を行う。その解析結果より得られた各層の最大層間変形角を図 6 に示す。設計用地震動を ART HACHI としたモデル A, B においては、全層で目標層間変形角以内に収まっていることが分かる。それに対し、設計用地震動を OS2 としたモデル C, D においては、モデル

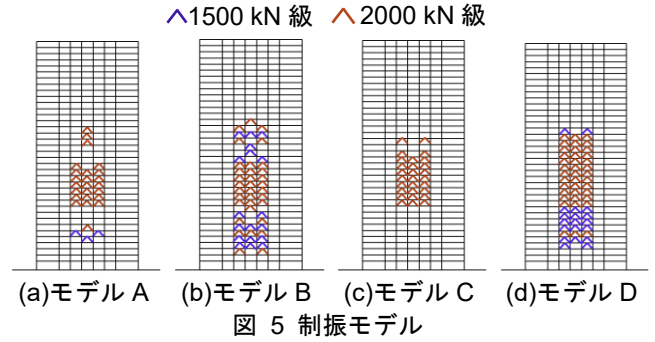


図 5 制振モデル

表 2 等価減衰定数とダンパー本数

建物モデル	A	B	C	D
設計用地震動	ART HACHI	ART HACHI	OS2	OS2
α	75	25	75	25
h_{eq}	0.0502	0.0722	0.0544	0.0791
1500kN[本]	6	36	0	38
2000kN[本]	48	68	56	78

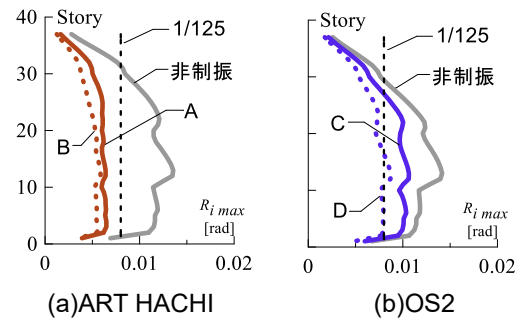


図 6 最大層間変形角

D では概ね全層で目標層間変形角以内に収まっているが、モデル C では収まっていないことが分かる。原因については今後の課題とする。

4.3 目標層間変形角 θ_{max} による影響

本節は、STEP4 にあたる目標層間変形角を変化させる。モデル A, C において目標層間変形角 $\theta_{max} = 1/150$ rad に変えたものをそれぞれモデル E, F とする。図 7 に設計された制振モデルを示す。また、表 3 に各モデルの等価減衰定数 h_{eq} とダンパー数を示す。等価減衰定数に着目すると、モデル A に比べてモデル E では約 53% 増加し、モデル C に比べてモデル F では約 52% 増加していることが分かる。それに伴い、ダンパー本数も増加しており、モデル E では 1500 kN 級が 14 本、2000 kN 級が 52 本、合計で 66 本増加し、モデル F では 1500 kN 級が 40 本、2000 kN 級が 16 本、合計で 56 本増加していることが分かる。これより、 $\theta_{max} = 1/125$ rad から $1/150$ rad に変化させると、等価減衰定数は 52% 程度増加し、2 倍程度のダンパー本数が必要であることが分かる。次に、4.2 節と同様に、各モデルに設計用地震動を入力し、時刻歴応答解析を行う。その解析結果より得られた各層の最大層間変形角を図 7 に示す。設計用地震動を ART HACHI としたモデル A, E においては、全層で目標層間変形角以内に収まっていることが分かる。それに対し、設計用地震動を OS2 としたモデル C, F において

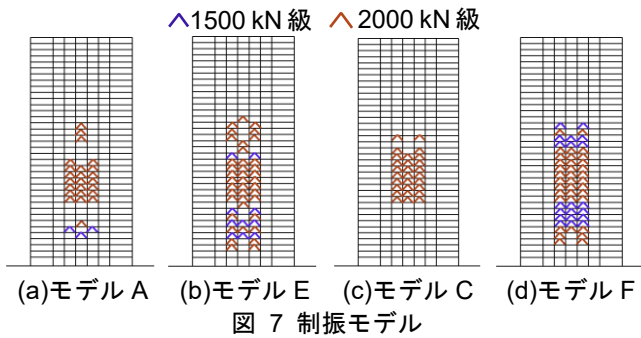
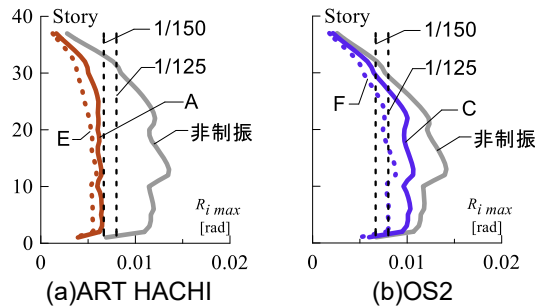


表 3 等価減衰定数とダンパー本数

建物モデル	A	E	C	F
設計用地震動	ART HACHI	ART HACHI	OS2	OS2
θ_{max} [rad]	1/125	1/150	1/125	1/150
h_{eq}	0.0502	0.0768	0.0544	0.0824
1500kN[本]	6	20	0	40
2000kN[本]	48	100	56	72



は、目標層間変形角以内に収まっていないことが分かる。この原因については今後の課題とする。

4.4 地震動による影響

本節は、STEP9 にあたる層せん断力分布を変化させる。つまり、式(6)中の層せん断力 Q_i が変化する。モデル A, C において層せん断力分布を Ai 分布に変えたものをそれぞれモデル G, H とする。その際、Ai 分布は主架構の 1 次固有周期より算出するものとする。図 9 に作成した制振モデルを示す。また、表 4 に各モデルの等価減衰定数 h_{eq} とダンパー数を示す。等価減数定数に着目すると、モデル A と G および C と H では一致していることが分かる。ダンパー配置について、モデル G では、5~7 層のダンパーが少なくなり 19~22 層で増えているが、ダンパーの合計本数は同じであることが分かる。モデル H では、11 層のダンパーが少なくなり、20, 22 層で増えているが、ダンパーの合計本数は 2 本増え、ほとんど変化していないことが分かる。これより、層せん断力分布を変えても、ダンパー配置が少し変わるものの、等価減衰定数は変わらないため、ダンパーの必要本数はほとんど変化しないことが分かる。

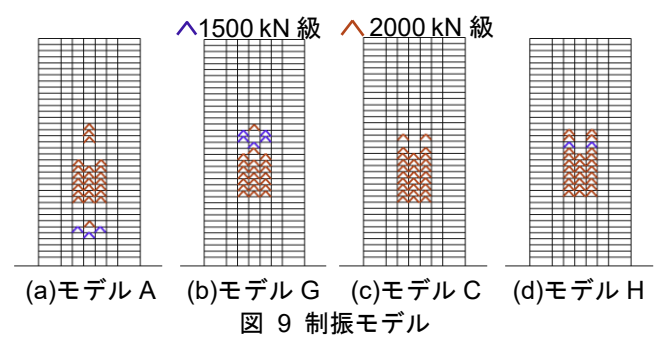


表 4 等価減衰定数とダンパー本数

建物モデル	A	G	C	H
設計用地震動	ART HACHI	ART HACHI	OS2	OS2
層せん断力分布	ART HACHI	Ai	OS2	Ai
h_{eq}	0.0502	0.0502	0.0544	0.0544
1500kN[本]	6	10	0	4
2000kN[本]	48	44	56	54

5. まとめ

本報では、上野らの提案手法⁴⁾を用いて制振設計を行って、その際に、 α 、目標層間変形角 θ_{max} 、層せん断力分布を変化させ、それぞれのパラメータが設計値に与える影響について確認した。以下に得られた知見を示す。

- ・ α を 75 から 25 に変化させると、等価減衰定数は 45% 程度増加し、2 倍程度のダンパー本数が必要になる。
- ・ 目標層間変形角 θ_{max} を 1/125 rad から 1/150 rad に変えると、等価減衰定数は 50% 程度増加し、2 倍程度のダンパー本数が必要になる。
- ・ 層せん断力分布を地震動から Ai 分布に変えると、ダンパー配置が少し変わるものの、等価減衰定数は変わらないため、ダンパーの必要数はほとんど変化しない。

今後の展望として、目標層間変形角以内に収まらなかった原因について明らかにする必要があると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について（技術的助言），2016.06
- 2) 日本建築学会：大振幅地震動と建築物の耐震性評価—巨大海溝型地震・内陸地震に備えて，2013.10
- 3) 笠井和彦，伊藤浩資，小椋崇之：オイルダンパーの等価剛性調節による制振構造の応答制御手法，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.630，pp.1281-1288，2008.08
- 4) 上野史也，渡井一樹，佐藤大樹，笠井和彦，佐分利和宏，前田達彦，増田寛之：オイルダンパーと変形制御機構を併用した大振幅地震動に対する既存超高層建物の制振改修設計法，構造工学論文集 vol.66B，pp.353-365，2020.03
- 5) 日本免震構造協会（JSSI）：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第 1 版，2003.10，第 2 版，2005.09，第 3 版，2013.11

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士（工学）

*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology^{*1}

Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng^{*2}

Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.^{*3}