# 可変減衰機構を用いたトラス鉄塔のセミアクティブ制振 SEMI-ACTIVE VIBRATION CONTROL OF TRUSS TOWER

WITH VARIABLE DAMPING MECHANISM

箕輪健 $-^{*1}$ 、柴田恵実 $^{*2}$ 、松井良太 $^{*3}$ ,竹内 徹<sup>\*4</sup>. 小河利行<sup>\*5</sup> Ken'ichi MINOWA, Megumi SHIBATA, Ryota MATSUI, Toru TAKEUCHI and Toshiyuki OGAWA

Application of energy dissipation devices for the passive vibration control of truss towers has been recently researched, because these towers were generally designed to resist wind load. However, as the earthquake load requirements increases, these towers are possibly to be damaged by large earthquakes. On the other hand, researchers have developed semi-active control device that produces any adjustable control force using variable dampers. This paper describes an investigation of applying semi-active control system to truss towers using variable dampers. First, hysteresis of variable dampers is examined using DDOF system. Second, the semi-active control system is applied to the truss towers to confirm the seismic response reduction compared with the passive vibration control.

Keywords: Truss tower, Semi-active vibration control, Variable damping mechanism, Maxwell model, Optimal arrangement トラス鉄塔、セミアクティブ制振、可変減衰機構、マックスウェルモデル、最適配置

#### 1. 序

鉄塔構造物は、通信・送電施設、観測施設等に広く使われ、社会 基盤として情報通信やエネルギー供給を支えている。その多くは風 荷重を支配荷重とした設計がなされており、近い将来に発生が予測 される大規模地震に対し、耐震性能の向上が急がれている。

文献1)では、想定される地震に対し、地盤および下部建物によ る増幅効果により建屋付設型鉄塔に過大な加速度応答が生じ、鉄塔 斜材の一部が座屈し倒壊する危険性があることが報告されている。 また, 文献 2) では, 地上自立鉄塔においても地震時に斜材が座屈 後破断に至った事例が報告されている。このような被害に対し、竹 内,小河,加藤ら<sup>3),4)</sup>は,部材座屈を生じる危険性がある部材を座 屈拘束ブレースに交換することで被害を回避させる耐震改修構法に 関する研究を行い,実際に行った制振改修を報告している。また, 竹内,小河ら5)は、地震応答の低減効果を大きく左右する制振部 材の配置方法を最適化手法を用いて探索・検証し、経験則による最 適配置計画手法の適応度を分析している。また,石丸,真下ら<sup>6,7)</sup>は, 斜材へ導入するトグル制振装置や, 主柱材へ導入するパンタグラフ 式 D.M. 同調システムなどの様々な制振デバイスについて、数値解 析および実験によって鉄塔構造物への適用を検討し, 簡易設計手法 とその有効性を示している。このように、鉄塔構造物にパッシブ制 振手法を適用し地震応答を低減する試みは多数行われ、その技術的 知見が蓄積されている。

一方、近年では、可変減衰機構を用いたセミアクティブ制振手法 の構造物への適用も検討されている。セミアクティブ制振では、き わめて少ないエネルギー供給で、通常のパッシブ制振では実現でき ない減衰性能を構造物に付加できる。なおかつ、制御力を発揮する 機構がパッシブ制振と変わらないため、制御による励振の危険性が 少なく、制御装置に不調がある場合もパッシブ制振と同等な制御効 果が期待できるという利点もある<sup>8)</sup>。重層構造物への適用を検討し た例としては、減衰係数の切り替えを行う可変オリフィスダンパー の適用を検討した研究 9-12) や, MR ダンパーを用いた免震構造の研 究が挙げられる<sup>13),14)</sup>。これを受けて著者らは、固有周期が近接す る複数のモードを励起する特性を有するシェル・空間構造物の一種 である二層円筒ラチスシェルに対して、セミアクティブ制振の適用 を検討している<sup>15)</sup>。ここでは、ダンパー履歴が1質点系の制御の 場合 11) とは異なり蝶型になることや、有効質量比の大きなモード を複数選択することで地震応答を低減できることを確認している。

鉄塔構造物に対しても,減衰を変化させて応答制御を行うセミア クティブ制振は有効であると考えられる。そこで本研究では、地震 応答低減を目的に可変減衰機構を用いたセミアクティブ制振のトラ ス鉄塔への適用を時刻歴応答解析により検討する。まず、文献15) に見られたダンパー履歴の特徴の要因を明らかにし、セミアクティ

- \*3 東京工業大学建築学系 助教・博士(工学) \*4 東京工業大学建築学系 教授・博士(工学)
- \*5 東京工業大学 名誉教授・工博

Assist Prof Dept of Architecture Nippon Institute of Technology Dr Eng Former Grad. Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology Assist. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Prof. Emeritus, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

日本工業大学工学部建築学科 助教・博士(工学) \* 2

元 東京工業大学建築学専攻 大学院生

ブ制振を適用した鉄塔構造物の応答特性に関する分析の端緒とする ために,理論的考察が困難な二層円筒ラチスシェルやトラス鉄塔で はなく振動性状の単純な2質点系モデルを対象とすることで,セミ アクティブ制振時のダンパーの履歴に見られる特徴を明らかにす る。そして,セミアクティブ制振を適用した鉄塔構造物を対象に, パッシブ制振手法との比較を行いながら,二層円筒ラチスシェルの セミアクティブ制振時に得られた知見<sup>15)</sup>をもとに,制御する固有 振動モードの選択やダンパーの数,配置,および減衰係数が応答低 減効果に与える影響を分析する。

#### 2. 制御手法の概要と解析方法

本研究ではセミアクティブ制振の装置として、可変オリフィスダ ンパー<sup>9-12)</sup>を用いることを想定する。ここで、可変減衰ダンパー は Maxwell モデルによりモデル化する。このダンパーの減衰係数  $C_d$ は、最小値 $C_d^{\min}$ から最大値 $C_a^{\max}$ の間で線形的に切り替わるものと する。この減衰係数の切り替えは、著者らが二層円筒ラチスシェル に適用したセミアクティブ制振手法<sup>15)</sup>と同様に、制御力指令値ベ クトル $\mathbf{u}_d^{com}$ (= $\{u_d^{com}\}$ )に基づいて行う。この制御力指令値の算出にあ たり、まずセンサによりトラス鉄塔の応答を計測する。次にこの応 答量とフィードバック行列 G を掛け合わせ、制御力指令値を算出 する。そして、ダンパーの減衰係数の可変範囲より定まるダンパー の発揮し得る減衰力を制御力の上下限値として設けた上で、制御力 指令値に基づきダンパーの減衰係数 $C_d$ を制することで、次式に示 す制御力 $u_d$ をダンパーに発揮させセミアクティブ制振を行う<sup>11)</sup>。

	$C_d^{\max} \dot{x}_d(t)$	$: (u_d^{com}(t) \ge C_d^{\max} \dot{x}_d(t))$					
$u_d(t) = $	$C_d(t)\dot{x}_d(t)\Big(=u_d^{com}(t)\Big)$	$: (C_d^{\min} \dot{x}_d(t) < u_d^{com}(t) < C_d^{\max} \dot{x}_d(t))$	(1)				
	$C_d^{\min} \dot{x}_d(t)$	$: (u_d^{com}(t) \le C_d^{\min} \dot{x}_d(t))$					

ここに、x<sub>d</sub>はダンパー変位であり、変数上部の・は時間微分を表す。 本研究において制御力指令値ベクトルu<sup>com</sup>は、構造物の応答を主 要モードのみの応答に近似するモード制御手法を用いた上で、最 適制御理論により定めたフィードバック行列Gより算出する<sup>16,17)</sup>。 この際、フィードバック行列Gは、式(2)に示す評価関数が最小と なるように定められ、Riccatiの行列方程式の解より得られる。

## $J = \int_{0}^{\infty} \{ \mathbf{\eta}^{T} \mathbf{Q} \mathbf{\eta} + \mathbf{u}^{T} \mathbf{R} \mathbf{u} \} dt$

ここに、**1** はモード座標系における速度,変位からなる状態変数 ベクトルである。また、**Q**,**R** は応答低減効果と制御力の大きさと のバランスを決める重み行列であり、本研究では、算出した制御 力指令値に従って減衰係数が最大値と最小値の2段階で切り替わる ように、重み行列**Q** は単位行列、重み行列**R** は各対角成分の値を 10<sup>-15</sup> として十分に小さい値とする。

なお,モード制御手法の適用にあたりモードセンサの適用が考え られる。この際,センサの配置位置は,制御系の安定性および制御 効果に与える。しかし著者らが二層円筒ラチスシェルを対象に検討 したセンサの最適配置<sup>17)</sup>を用いることで,全状態量(全節点の全 自由度の変位と速度)をフィードバックする制御と同等の制御効果 を得られると考えられる。そこで本研究では,研究の端緒として全 状態量をフィードバックする制御を行う。

また本研究では、セミアクティブ制振の応答低減効果を分析する ために、パッシブ制振時の結果との比較も行う。ここで、パッシブ



制振に用いるダンパーの剛性および配置位置は、セミアクティブ制 振の条件と等しいものとする。なお、パッシブ制振には、対象モデ ルの*i*次モードに対する最適減衰係数*C<sup>i</sup>*<sub>dopt</sub>を有する Maxwell 型の粘 弾性ダンパーを用いる。ここで、最適減衰係数*C<sup>i</sup>*<sub>dopt</sub>は、1 質点系モ デルを対象とした文献 11)で示された最適減衰係数を参考に、ダン パーの減衰のみにより構成された減衰行列を架構のみのモデルの モード行列により座標変換して得られる行列の(*i*, *i*)成分が、次 式で表される最適モード減衰係数*C<sup>i</sup>*<sub>dopt</sub>となるように算出する。

 $c_{dopt}^{i} = k_{d}^{i} / \omega_{i} \sqrt{(2 + \alpha_{i})/(2(1 + \alpha_{i})^{2})}$  (3) ここに $\omega_{i}$ は対象モデルの固有角振動数, $k_{d}^{i}$ はダンパーのモード剛 性 (ダンパー剛性のみにより構成される剛性行列を座標変換して得 られる行列の(*i*, *i*)成分), $\alpha_{i}$ は架構のみのモデルにおけるモー ド剛性に対するダンパーのモード剛性の比である。

解析モデルは弾性とし、時刻歴応答解析の数値積分は Newmark-  $\beta$ 法( $\beta$  = 1/4)を用いる。ここで時間刻みは、対象モデルの固有 周期を考慮して 0.002 秒とする。また、Maxwell 型のダンパーの減 衰力は、Runge kutta の 4 次公式により算出し<sup>18</sup>)、その時間刻みは、 Newmark- $\beta$ 法の時間刻みの 1/10 とする。

# 3. 質点系モデルを対象としたセミアクティブ制振

## 3.1. 制御対象モデルの設定

(2)

1自由度モデルにおいて Maxwell 型の可変減衰ダンパーを用いた セミアクティブ制振では、理論的には Fig. 1(a) に示すような菱形の 履歴を描く時に、最大のエネルギー吸収量となる<sup>11)</sup>。一方、二層 円筒ラチスシェルを対象としてセミアクティブ制振を適用した既往 の研究15)では、減衰係数が最大値と最小値の2段階に切り替わる 制御を行った時,同図(b)のような蝶形の履歴を描くことが示され ている。そこで、トラス鉄塔にセミアクティブ制振を適用する検 討を行う前に、可変減衰ダンパーを組み込んだ2質点系モデルを対 象として履歴やエネルギー吸収量の分析を行う。ここで、架構の 各剛性は K<sub>f</sub>の一定とし、1 次モードの減衰定数は1% とする。検討 パラメータは、無次元化により、架構の剛性に対するダンパーの剛 性比α,固定端側の質点 M1 に対する自由端側の質点 M2 の質量比  $\beta(=M_{1}/M_{1})$ とする。なお、ダンパーの最大減衰係数 $C^{\max}$ には同モ デルにおけるパッシブ制振の1次モードに対する最適減衰係数Cland を用いる。入力は周期をモデルの1次固有周期とした振幅の大きさ がAである正弦波(以降, sinel 波)とする。

## 3.2. ダンパー応答の履歴ループおよびエネルギー吸収量の分析

まず、架構の剛性  $K_f$ に対するダンパーの剛性比 $\alpha$ が 1.0 となるようにダンパーの剛性を設定し、ダンパー配置および質量比 $\beta$ が履歴ループに与える影響を分析する。Fig. 2 に応答の振幅が一定となっ



た定常状態における変位 - ダンパー反力関係の履歴ループを無次元 化して示す。比較のため、パッシブ制振の履歴もあわせて示す。な お、パッシブ制振に用いるダンパーの剛性  $K_d$ はセミアクティブ制 振と同じ値とし、減衰係数  $C_d$ は1次モードに対する最適減衰係数  $C^1_{dopt}$ とする。ダンパーを固定端側に設けた配置の場合((a-1), (b-1), (c-1)) では、質量比βによらず履歴形状は菱形に近い楕円形となる。 一方、ダンパーを自由端側に設けた配置の場合((a-2), (b-2), (c-2)) では、質量比βが 0.5 および 1.0 のモデルで、ダンパー反力 $F_d$ が 0 のまま変位が変化しており、先述のような蝶形の履歴となる。ただ し、質量比βが 2.0 のモデルでは履歴ループは菱形に近い形状とな る。なお、図中に履歴ループの面積より得たダンパー1ストローク 分のエネルギー吸収量を併せて示している。蝶形の履歴となる場合 にも、菱形の履歴の場合と同様に、パッシブ制振と比較してセミア クティブ制振ではエネルギー吸収量が増加することがわかる。



次に、制御点を自由端側に設け、質量比βを0.5とし、ダンパーの剛性が履歴ループに与える影響を分析する。Fig.3に定常状態における変位-ダンパー反力関係の履歴ループを無次元化して示す。 架構の剛性 K<sub>f</sub>に対するダンパーの剛性比αが0.5となるようにダンパーの剛性を設定する場合は、履歴ループは菱形に近い形状となる。一方、剛性比αが2.0となるようにダンパーの剛性を設定する 場合は、Fig.2(a-2)に示した剛性比αが1.0の場合よりもさらに蝶形 に近い履歴ループとなる。これらのことから、剛性比が大きく、また制御点の位置や質量比により構造物の全質量に対して小さな質量 を制御しようとする場合に蝶形の履歴となることがわかる。

Fig. 4 に、制御点を自由端側に設けた場合の 2 質点の変位とダン パー反力の時刻歴を示す。架構の剛性 K<sub>f</sub>に対するダンパーの剛性 比αを 2.0、質量比βを 0.5 とした場合には、ダンパーの減衰力によ り 2 質点の間に位相のずれが生じることがわかる。その結果、ダン パーの変形と逆向きに力を加えて制御しようとするため、ダンパー 反力が 0 となる時間が長くなり、履歴ループが蝶形となる。文献 15) に示される二層円筒ラチスシェルにおけるセミアクティブ制振 においても、制御対象とする構造物の全質量に対して直接制御する 質量が小さい可変減衰ダンパーでは、両端の節点の位相がずれたた め蝶形の履歴となったと考えられる。

### 4. トラス鉄塔を対象としたセミアクティブ制振

#### 4.1. 解析モデルと入力波

対象構造物は文献4), 5) で取り扱った Fig. 5 に示す建屋付設型通 信鉄塔とする。建屋は鉄骨鉄筋コンクリート造5 階建て,鉄塔は高 さ53.75 m 全 15 節である。構造減衰は文献4), 5) と同様に剛性比 例型とし,建屋では建屋の1次モードの減衰定数を3%,鉄塔では 鉄塔の1次モードの減衰定数を1% とする。Table1 に主たるダンパー



配置対象部材である主柱材の諸元を示す。部材は全て円形鋼管であ り、ヤング率は 2.06×105 N/mm<sup>2</sup> とする。鉄塔部分の卓越固有モー ドを Fig. 6 に示す。架構全体が倒れ込む 1 次モード,鉄塔中腹で反 曲点を有する4次,7次モードの3つの全体モードが支配的となる。 対象構造物のモデル化は、文献4)、5)と同様に鉄塔部分のみ 行う。そこで、建屋付設型の鉄塔モデルを想定した入力波とし て, 平成 12 年建設省告示第 1461 号にならい, HACHINOHE-EW, JMAKOBE-NS 及び RANDOM 波の位相特性を極稀地震動スペクト ルに適合させた模擬地震動3波から地盤増幅を考慮した表層面位置 の波形を別途作成した建屋鉄塔連成モデルに入力して得る(以降, 告示波 1R ~ 3R)。また比較のため、地上自立型鉄塔を想定した場 合の入力波として、これらの表層面位置の波形(以降、告示波1G ~ 3G)も用いる。Fig.7に各入力波の加速度応答スペクトルを示す。 地上自立型の場合、1次モードが励起されやすいが、建屋付設型の 場合,建屋の卓越固有周期である約0.2 s 付近にあたる4 次モード が励起される。



Fig. 8 Damper locations of optimal models (SOP1-16)

Table 2 Damper material properties of optimal models

(a) 501 1													
The number of da		16											
Input wave			1R	1G	2R	20	3	3R	3G				
Damper stiffness $K_d (\times 10^3 \text{ kN/m})$			30.9	223.8	230.9	223	3.8 2	44.8	223.8				
Optimal damping coefficient $C^{1}_{dopt}$ (kNs/mm)			8.08	17.52	18.08	3 17.	52 1	9.17	17.52				
(b) SOP2													
The number of damper	8 16 24		24	48									
Input wave	All	All	All	1R	1G	2R	2G	3R	3G				
$K_d (\times 10^3 \mathrm{kN/m})$	610.6	505.6	455.0	385.5	376.5	385.5	376.5	385.5	385.5				
$C^{1}_{dopt}$ (kNs/mm)	47.81	39.59	35.62	30.19	29.48	30.19	29.48	30.19	30.19				

#### 4.2. パッシブ制振におけるダンパー最適配置

本研究では、セミアクティブ制振における可変減衰ダンパーの配置にあたり、近年、形状最適化<sup>例えば20)</sup>とならんで積極的に研究が行われている、パッシブ制振における最適配置を参照する。そこで本節では、文献5)で提案されているパッシブ制振における粘弾性ダンパー配置の最適化手法に基づいた最適配置を示す。

最適化手法としては単純遺伝的アルゴリズム SGA<sup>19)</sup>を用い,目 的関数の算定には,固有値解析に基づき,応答スペクトル法と等価 線形化法を応用した評価法を用いる。粘弾性ダンパーは配置対象部 材ごとに弾性要素の断面を定め,粘性減衰係数は全て一定とした。

鉄塔の主柱材,斜材,水平材,構面材の4通りをダンパー配置対象とし,頂部中央節点の水平応答変位(以降,頂部応答変位)の 最小化を目的関数とする最適化問題SOP1を設定する。ダンパー数 は4,8,16,24,48本の5種類とする。また,斜材のみを配置対 象とし,頂部応答変位最小化を目的関数とする最適化問題SOP2を 設定する。ダンパー数は8,16,24,48本の4種類とする。なお, どちらの最適化問題も,地震波入力方向はx方向とする。また,ダ ンパーは鉄塔の中心を原点としたx-z平面およびy-z平面について 面対称に配置するものとして,各節における4本の部材ごとにダン パー設置の有無を判断するものとする。以降,最適化問題の名称と してSOP1-4のようにダンパー数を添えて表す。

Fig. 8 に得られた最適解の例を示す。なお、いずれの場合も3回の最適化の試行に対して全て同一の最適解を得ることを確認している。SOP1-16 最適配置は、告示波 IR および2R に対して、1G, 2G および3G に対してそれぞれ同一の配置となる。また、SOP2-8, SOP2-16 およびSOP2-24 の最適配置は、それぞれ全地震波に対して同一の配置となる。Table2 に、1 次モードにおける架構に対するダンパーの剛性比 a1を0.5 とした場合のダンパー剛性および1 次モードに対するパッシブ制振の最適減衰係数の例を示す。ダンパー本数が多いほど、ダンパー剛性および最適減衰係数は小さい。また、同じダンパー数でも SOP1 最適配置のダンパー剛性や最適減衰係数は SOP2 最適配置よりも小さい。主柱材は斜材よりも軸力負担が大きく、剛性比に寄与する割合が高いため、主に主柱材にダンパーを配

置する SOP1 最適配置ではダンパー剛性が小さい。以降では、ダン パー剛性および最大減衰係数にこの値を用いる。また、最小減衰係 数はリリーフ弁のついたオイルダンパーの減衰係数の可変範囲を参 照し<sup>21)</sup>、0.02 kNs/mm とする。

#### 4.3. 制御対象モードの選択が応答低減効果に与える影響

モード制御手法を用いたセミアクティブ制振では、制御の対象と するモード(以降、制御対象モード)の選択が応答低減効果に大き く影響すると考えられる。そこで、SOP1-16 最適配置を対象に、有 効質量比の大きな1次、4次、7次モードから一つを制御対象モー ドとする場合(1m(1st), 1m(4th), 1m(7th))と、3つ全てを制御対象モー ドとする場合(3m)を比較する。ダンパーの剛性および最大減衰 係数は、Table2に示した α<sub>1</sub>を0.5とする場合のダンパー剛性と1次 モードに対するパッシブ制振の最適減衰係数とする。

Fig. 9 に非制御時における頂部応答変位の最大値に対する,各制 御手法における頂部応答変位の最大値の比(以降,最大応答変位 比)を示す。また,Fig. 10 に告示波 1R入力時の最大応答変位の高 さ方向分布を示す。地震波によらず 1m(1st)の場合には,他のセミ アクティブ制振よりも応答が大きく低減する傾向にあり,パッシブ 制振以上の応答低減効果を示す。一方,1m(4th)の場合には,屋上 応答波 Rの加速度応答スペクトルが鉄塔モデルの4次固有周期付 近で卓越しているため,地表面波Gよりも屋上応答波 Rに対して 大きく応答が低減する傾向にある。しかし,最大応答変位比は地震 波によらず大きく,1次モードの最適減衰係数を有するパッシブ制





振よりも応答は低減しない。1m(7th)の場合も同様に、パッシブ制 振よりも応答は低減しない。このように、1次モードと7次モード では有効質量比は同程度ではあるものの(Fig. 6), 1m(1st)の方が 1m(7th)と比較して大きく応答が低減する結果となる。これは、非 制御時の最大応答変位比の高さ方向分布からもわかるように鉄塔の 変形においては1次応答が支配的であるためと考えられる。また, 3mの場合には、応答は概ねよく低減しているものの、屋上応答波 Rに対してはパッシブ制振時よりも応答は低減せず、地震波によら ず最大応答変位は 1m(1st) よりも大きい。ここで、この理由を分析 するために, Fig. 11 に入力地震波 1R における 1 節主柱材のダンパー の応答を示す。3mの場合には、ダンパー反力が0の状態での変形 が大きい。また、制御対象モードに固有周期の短い4次や7次を含 めたことで、減衰係数指令値の周期も短くなり、減衰係数が最大値 と最小値に頻繁に切り替わるため、図中に示すように 3m の場合に は1m(1st)よりもエネルギー吸収量が少なくなり、応答は1m(1st)よ りも低減しない。以上から、次節以降では制御対象モードを1次モー ドのみとして検討する。なお、図には示していないが、他の告示波 入力時も最大応答変位は同様の分布となることから、セミアクティ ブ制振の制御効果は地震波の位相特性によらないと考えられる。

Fig. 12 に告示波 1G および 1R 入力時の最大応答加速度を示す。 1R に対する非制御時の最大応答加速度は、4 次モードが励起され るために 45 m 付近より上部で急激に大きくなる。パッシブ制振時 は、地震波によらず分布形状を保ったまま鉄塔全体で応答加速度は 低減する。一方、セミアクティブ制振時は、制御タイプ 1m(1st) や 3m の場合に、鉄塔頂部の最大応答加速度はパッシブ制振と同程度 まで低減するものの、鉄塔下部の最大応答加速度は非制御時やパッ シブ制振時よりも増幅する。ここで、Fig. 13 に告示波 1G 入力時の 1 節上部節点の応答加速度および 1 節斜材に配置したダンパーの減 衰係数の時刻歴を示す。セミアクティブ制振時は、減衰係数が最小 値に切り替わった瞬間に節点の応答加速度が増幅する。これは、ダ



ンパー反力が0の状態で瞬間的に大きく変形したためである。この ように、セミアクティブ制振では、ダンパー配置の周辺で応答加速 度が増幅する可能性がある。

Fig. 14 に告示波 1R 入力時の主架構の最大軸応力を示す。なお, 縦軸は部材の中点の高さとする。応答変位同様,全ての制御手法で 最大軸応力は非制御時よりも低減する。1m(1st)では,主柱材,斜 材ともに,概ね全ての節でパッシブ制振時よりも軸応力は小さい。

## 4.4. ダンパー配置が応答低減効果に与える影響

本節では、SOP1 および SOP2 最適配置の応答と、最適配置とダ



ンパー数は等しいもののダンパー配置が異なる場合の応答を比較す ることで、ダンパー配置が応答低減効果に与える影響を分析する。

Fig. 15 に、比較する同ダンパー数のモデルの一部と、告示波 1G に対する最適配置および比較するモデルの最大応答変位比の比較を示す。全てのダンパー配置で、セミアクティブ制振時はパッシブ制振時よりも最大応答変位が小さい。また、全てのダンパー数において、パッシブ制振の最適配置でセミアクティブ制振を行う時に最大応答変位が最も小さい。つまり、パッシブ制振の最適配置はセミアクティブ制振においても効果を得やすいダンパー配置であると言える。また、B8-2、B8-3、B8-4 のように、パッシブ制振時に応答低減効果が得られないダンパー配置では、セミアクティブ制振においても効果を得ることはできない。

Fig. 16 にパッシブ制振時およびセミアクティブ制振時における頂 部応答変位の最大応答変位比の差の比較を示す。この図では、パッ シブ制振時の最大応答変位比の差を縦軸にとり、全地震波に対す る最適配置およびその他の配置のモデルにおける比較を示す。パッ シブ制振時に最も応答低減効果のある SOP1-48 最適配置において も、セミアクティブ制振によりパッシブ制振よりも 3% 程度応答変 位を抑えることができる。また、ダンパー数によらず、パッシブ 制振時の最大応答変位比が 60% 以下である場合には、パッシブ制





振時に応答低減効果を得にくいダンパー配置であるほど、セミアク ティブ制振を行った場合にパッシブ制振時と比較して大きく最大応 答変位が下がる傾向がある。しかし、モデルBに見られるようなパッ シブ制振時の最大応答変位比が80%以上である場合には、セミア クティブ制振を適用しても大きな応答低減効果は得にくい。

## 4.5. ダンパー数が応答低減効果に与える影響

Fig. 17 に各ダンパー数の最適配置における,告示波 1R 入力時の 頂部応答変位の最大応答変位比を示す。本研究で検討した4本か ら48本の範囲では、ダンパー数が多いほどパッシブ制振時、セミ アクティブ制振時ともに最大応答変位比は小さくなる傾向がある。 そして,本数が少ないほどパッシブ制振時とセミアクティブ制振時 の最大応答変位比の差は大きくなる。詳細にみると、斜材のみにダ ンパーを配置する SOP2 最適配置におけるセミアクティブ制振時に は、ダンパー数16本で最大応答変位は頭打ちになるものの、主に 主柱材にダンパーを配置する SOP1 最適配置においては本数を多く するに伴い最大応答変位を小さくできることがわかる。また、最適 減衰係数を有するダンパーを最適に配置する場合,パッシブ制振時 には、ダンパー数が少ないほど、Table2 に示したように個々のダン パーの剛性や減衰係数は大きいが,最大応答変位比は大きい。一方, セミアクティブ制振時には、ダンパー数が少ない場合にもパッシブ 制振時のダンパー数が多い場合と同程度の応答低減効果を発揮する ことができる。

Fig. 18 にセミアクティブ制振時の告示波 1R および 1G に対する 最大応答加速度分布を示す。地震波によらず、ダンパー数が少ない ほど最大応答加速度は大きく、鉄塔下部における応答加速度は増幅 する。Fig. 19 に、告示波 1R 入力時の SOP1-4 最適配置および SOP1-48 最適配置において1節主柱材に設置したダンパーのセミアクティ ブ制振時の履歴ループを示す。SOP1-4 最適配置では、ダンパー反 力の最大値およびダンパー反力0 の間の瞬間的な変形は SOP1-48 最 適配置よりも大きい。このように、少ないダンパー数で制御を行う





場合,各ダンパーの反力が大きくなることに加え,より蝶形の履歴 を示すことでダンパーの瞬間的な変形が大きくなり,応答加速度が 増幅すると考えられる。

#### 4.6. 最大減衰係数が応答低減効果に与える影響

実設計では様々な制約から必ずしも最適減衰係数を最大減衰係数 とする可変減衰ダンパーを用いることができるとは限らない。そこ で,パッシブ制振の最適減衰係数を基準にパッシブ制振では減衰係 数を,セミアクティブ制振では最大減衰係数を変化させ,応答低減 効果に与える影響を分析する。

パッシブ制振の1次モードに対する最適減衰係数C<sup>1</sup><sub>dopt</sub>を基準に, 1/4倍,1/2倍,1倍,2倍,4倍とした場合の最大応答変位比をFig. 20に示す。パッシブ制振では、ダンパー数によらず、最適減衰係 数を用いた時に最大応答変位比が最も小さい。一方、セミアクティ ブ制振では、最大減衰係数を大きくするに伴い最大応答変位比は小 さくなる。このため、パッシブ制振時とセミアクティブ制振時で は、最大減衰係数が大きいほど応答低減効果の差は大きくなる。な お、図は告示波3Rのものであるが、他の地震波に対しても同様の 結果が得られる。一方、変位とは逆に、Fig.21に示すように最大応 答加速度は最大減衰係数が大きいほど小さい。これは、少ないダン パー数で制御する場合と同様に、最大減衰係数が大きいほど、ダン パー反力が大きくなることに加え、ダンパー反力0での瞬間的なダ ンパーの変形が大きくなるために起こると考えられる。

#### 5. 結

本研究では、まず、可変減衰機構を組み込んだ2質点系モデルよ りセミアクティブ制振システムの応答特性を把握した。次に、鉄塔 構造物の地震応答低減を目的にセミアクティブ制振のトラス鉄塔へ の適用を検討した。そして、制御する固有振動モードの選択や可変 減衰機構の数,配置および減衰係数がセミアクティブ制振の応答低 減効果に与える影響を分析するとともに、パッシブ制振手法との制 御効果の比較を行った。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- 1)構造物の全質量に対して直接制御する質量が小さい場合やダンパーの剛性が大きい場合は、セミアクティブ制振時の可変減衰 ダンパーの履歴が蝶形となる場合がある。この場合も、セミア クティブ制振時のエネルギー吸収量はパッシブ制振時を上回り、 パッシブ制振時よりも大きな応答低減効果を得ることができる。
- 2)トラス鉄塔へセミアクティブ制振を適用する場合、制御対象モードを有効質量比で選ぶのではなく、鉄塔の応答変位について支配的な1次モードのみを選択することで最大応答変位は最も小さくなり、その応答変位を低減する効果は同ダンパー配置によるパッシブ制振時よりも大きい。しかし、可変減衰ダンパーの減衰係数の切り替えの影響により、応答加速度は鉄塔下部で増幅する。
- 3) パッシブ制振における粘弾性ダンパーの最適配置では、可変減 衰ダンパーを配置してセミアクティブ制振を行う場合にも、他の ダンパー配置と比較して大きな応答低減効果が得られる。また、 パッシブ制振により地震応答を非制振時に比べ 60% 程度以下に 低減することが可能なダンパー配置の場合には、パッシブ制振時 の応答低減効果が小さいときほど、パッシブ制振時に比較してセ ミアクティブ制振により得られる応答低減効果は大きい。
- 4) 最適減衰係数を有するダンパーを最適に配置してパッシブ制振 を行うとき、ダンパー数が少ない場合には多い場合よりも応答低 減効果は小さいものの、同じ減衰係数かつ同じ配置でセミアク ティブ制振を行うとき、ダンパー数が少ない場合においてもパッ シブ制振におけるダンパーの多い場合と同程度の応答低減効果 を得ることができる。
- 5) ダンパーの剛性を一定とした場合、パッシブ制振では最適減衰 係数を有するダンパーを用いた場合に応答変位が最も小さいが、 セミアクティブ制振では最大減衰係数を大きくするに伴い応答 変位を小さくすることが可能となる。ただしこの際、最大減衰係 数を大きくするに伴い鉄塔下部の応答加速度は大きくなる。

本研究により,同じトラス構造においても二層円筒ラチスシェル とトラス鉄塔では,制御対象モードの選択方法などによって,その 制御効果が異なることが確認された。このため今後,様々な構造形 式のトラス構造に対してセミアクティブ制振を適用する検討を行 い,共通に成り立つ特性と個別に成り立つ特性を明らかにしていく 必要があると考えられる。

#### 参考文献

- S.Kato, S.Nakazawa, T.Sugiyama, N.Matsui, T.Yoshida: On An Efficient Method To Improve The Earthquake Resistant Capacity of Steel Tele Communication Towers, Proc. IASS-APCS 2003 Taipei, 2003.10
- Architectural Institute of Japan: Structural Design Recommendation for Chimneys, 2007 (in Japanese)

日本建築学会:煙突構造設計指針,2007

3) Takeuchi T., Uchiyama T., Suzuki K., Ookouchi Y., Ogawa T. and Kato S.: Seismic Retrofit of Truss Tower Structures Using Buckling Restrained Braces -Cyclic tests on real-size mock-up frames-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 589, pp.129-136, 2005.3 (in Japanese) 竹内徹, 内山智晴, 鈴木一弁, 大河内靖雄, 小河利行, 加藤史郎:座屈拘束 ブレースによるトラス鉄塔の耐震補強: 実大架構繰返し実験, 日本建築学

会構造系論文集,第 589 号, pp.129-136, 2005.3
4) Ookouchi Y., Takeuchi T., Kato S. and Suzuki K.: Seismic Retrofit of Existing Telecommunication Tower Using Buckling Restrained Brace, AIJ Journal of Technology and Design, No. 22, pp.179-184, 2005.12 (in Japanese) 大河内靖雄,竹内徹,加藤史郎,鈴木一弁:座屈拘束プレースを用いた既存 通信鉄塔の耐震補強工事,日本建築学会技術報告集,第 22 号, pp.179-184,

2005.12
5) Takeuchi T., Kinouchi Y., Matsui R. and Ogawa T.: Optimum Arrangement of Energy Dissipation Devices for Seismic Retrofit of Truss Tower Structures, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 79, No. 700, pp.791-799, 2014.6 (in Japanese)

竹内徹,木内佑輔,松井良太,小河利行:トラス鉄塔の耐震改修における 制振部材の最適配置,日本建築学会構造系論文集,第79巻,第700号, pp.791-799,2014.6

- 6) Ishimaru S., Mashimo M. and 7 others, Research on Response Control Systems for Steel Tower Structures Part1-5, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, pp.611-620, 2010.7 (in Japanese) 石丸辰治,真下貢ほか7名:鉄塔構造物に適用する制震工法の研究:その 1. ~その5,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊,構造II, pp.611-620, 2010.7
- 7) Ishimaru S., Mashimo M. and 8 others, Research on Response Control Systems for Steel Tower Structures Part6~7, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, pp.733-736, 2011.7 (in Japanese) 石丸辰治,真下貢ほか8名:鉄塔構造物に適用する制震工法の研究:その 6. ~その7, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, 構造II, pp.733-736, 2011.7
- Architectural Institute of Japan: Active and Semiactive Control for Buildings State of the Art-, 2006 (in Japanese)
   日本建築学会:アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状,日本建
- 9) N. Kurata, T. Kobori, M. Takahashi, N.Niwa and H. Midorikawa: Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-active Damper System, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 28(11), pp.1427-1447, 1999

築学会,2006

- 10) Yoshida K. and Fujio T.: Bilinear Optimal Control Theory and its Application to Semi-Active Vibration Isolation Control, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol. 67, No. 656, pp.922-998, 2001.4 (in Japanese) 吉田和夫,藤尾忠洋: 双線形最適制御理論とセミアクティブ免震制御への 応用,日本機械学会論文集(C編),67巻 656号, pp.992-998, 2001.4
- Kurino H.: Fundamental Study of Structural Control Capacity of Maxwell Type Semi-active Damper, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 564, pp.63-70, 2003.2 (in Japanese) 栗野治彦: Maxwell 型セミアクティブダンパの振動制御能力に関する基礎 的考察,日本建築学会構造系論文集,第 564 号, pp.63-70, 2003.2
- 12) Nagashima I., Shinozaki Y., Maseki R., Sanui Y. and Kitagawa Y.: Sliding Mode Control of Base-isolation System Using Semi-active Hydraulic Damper, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 649, pp.511-519, 2010.3 (in Japanese)

長島一郎, 篠崎洋三, 欄木龍大, 讃井洋一, 北川良和: 可変減衰オイルダン パーを用いた免震構造物のスライディングモード制御, 日本建築学会構造 系論文集, 第 649 号, pp.511-519, 2010.3

13) Fujitani H., Hiwatashi T., Shiozaki Y. and Soda S.: Shaking Table Tests on Sky-

hook Control of a Base-isolation System Using an MR Damper, Journal of Structural Engineering, Vol. 49B, pp.105-110, 2003.3

藤谷秀雄, 樋渡健, 塩崎洋一, 曽田五月也: MR ダンパーによる免震構造の スカイフック制御実験,構造工学論文集, Vol.49B, pp.105-110, 2003.3

14) Hiwatari T., Shiozaki Y., Fujitani H. and Soda S.: Semi-active Base-isolation System by MR Damper Utilizing Optimal RegulatorTheory, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 567, pp.47-54, 2003.5 (in Japanese)

樋渡健、塩崎洋一,藤谷秀雄,曽田五月也:最適レギュレータ理論を用いた MRダンパーによるセミアクティブ免震,日本建築学会構造系論文集,第 567号,pp.47-54,2003.5

15) Minowa K., Shiiki D. and Ogawa T.: Semi-active Vibration Control of Doublelayer Cylindrical Lattice Shell with Vibration Damping Mechanism, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 721, pp.575-583, 2016.3 (in Japanese)

箕輪健一,椎木大介,小河利行:可変減衰機構を用いた二層円筒ラチスシェ ルのセミアクティブ制振,日本建築学会構造系論文集,第721号,pp.575-583,2016.3

16) Minowa K., Kumagai T. and Ogawa T.: Active Response Control of Arch Structures Using Modal Control Method, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 687, pp.939-948, 2013.5 (in Japanese)

箕輪健一,熊谷知彦,小河利行:モード制御手法を用いたアーチ構造物のアクティブ制振,日本建築学会構造系論文集,第687号,pp.939-948,2013.5

17) Minowa K., Kumagai T. and Ogawa T.: Active Vibration Control of Double-layser Cylindrical Lattice Shell Using Modal Control Method, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 701, pp.951-959, 2014.7 (in Japanese)

箕輪健一,熊谷知彦,小河利行:モード制御手法を用いた二層円筒ラチス シェルのアクティブ制振,日本建築学会構造系論文集,第701号,pp.951-959,2014.7

18) Soda S., Wada J., Hirata Y. and Yamanaka H.: Visco-elastic Damper: Cyclic Loading Test to Construct Mechanical Model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 457, pp.29-36, 1994.3 (in Japanese)

曽田五月也,和田純一,平田裕一,山中久幸:繰返加力実験にもとづく粘 弾性ダンパーの力学モデルの構築,日本建築学会構造系論文集,第457号, pp.29-36,1994.3

- John H. Holland: Adaptation in Natural and Artificial System, Ann Arbor, The Uv niv. of Michigan Press, 1975
- 20) Ogawa T., Ohsaki M. and Tateishi R.: Shape Optimization of Single-layer Latticed Shells for Maximum Linear Buckling Loads and Uniform Member Lengths, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 68, No. 570, pp.129-136, 2003.8 (in Japanese)

小河利行,大崎純,立石理恵:線形座屈荷重最大化と部材長一様化を目的とした単層ラチスシェルの形状最適化,日本建築学会構造系論文集,第68巻, 第570号,pp.129-136,2003.8

 Architectural Institute of Japan: Design of Seismic Isolation and Vibration Contrl Structure, Morikita Publiching Co., 2007

日本建築学会関東支部:免震・制振構造の設計 ー学びやすい構造設計-, 森北出版,2007

## SEMI-ACTIVE VIBRATION CONTROL OF TRUSS TOWER WITH VARIABLE DAMPING MECHANISM

## Ken'ichi MINOWA<sup>\*1</sup>, Megumi SHIBATA<sup>\*2</sup>, Ryota MATSUI<sup>\*3</sup>, Toru TAKEUCHI<sup>\*4</sup> and Toshiyuki OGAWA<sup>\*5</sup>

\*1 Assist. Prof., Dept. of Architecture, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.
 \*2 Former Grad. Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology,
 \*3 Assist. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
 \*4 Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
 \*5 Prof. Emeritus, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

## 1. Introduction

Application of energy dissipation devices for the passive vibration control of truss towers has been recently researched, because these towers were generally designed to resist wind load. However, as the earthquake load requirements increases, these towers are possibly to be damaged by large earthquakes. On the other hand, researchers have developed semi-active control device that produces any adjustable control force using variable dampers. This paper describes an investigation of applying semi-active control system to truss towers using variable dampers. First, hysteresis of variable dampers is examined using DDOF system. Second, the semi-active control system is applied to the truss towers to confirm the seismic response reduction compared with the passive vibration control.

### 2. Overviews of control method and analysis method

In this study the Maxwell model is used to exhibit variable dampers. Modal control and optimal control theory are introduced to calculate command forces. For variable dampers, the damping coefficient can be adjusted between upper and lower limits to achieve the command forces. Optimal damping coefficients for passive dampers are applied for the upper limit of variable dampers.

## 3. Semi-active control of DDOF system

The hysteresis curves of variable and passive dampers are compared using DDOF system. The shape of a theoretical hysteresis of semi-active controlled SDOF is a rhombus by adjusting damping coefficients of variable dampers. In DDOF system, when the variable dampers are placed at a location close to free end, or mass at fixed end is larger than that at free end, the shape of hysteresis similar to a butterfly. However, variable dampers can dissipate larger amounts of energy than passive dampers.

### 4. Semi-active control of truss tower structure

A truss tower numerical model is created based on an actual telecommunication truss tower consisting of 15 layers. The damper arrangement of variable dampers is basically defined by the optimal locations of passive dampers. The effects of choosing control mode, damper arrangement, the number of dampers and value of maximum damping coefficient on response reduction effect are discussed using the numerical model.

#### 5. Conclusions

As a conclusion, the following results are obtained.

- 1) In DDOF system, when the variable dampers are placed at a location close to free end, or mass at free end is smaller than that at fixed end, the shape of hysteresis similar to a butterfly. However, variable dampers can dissipate larger amounts of energy than passive dampers.
- 2) In the case of truss tower, peak displacement of semi-active control is less than passive control by using only 1st mode as the control mode. However, then peak acceleration of semi-active control is higher than that of passive control at lower layers, because of adjusting damping coefficients of variable dampers.
- 3) When the variable dampers are installed at the optimal locations of passive dampers, the displacement response of the semi-active control is smaller than that of passive control. The effect of semi-active control on the displacement reduction increases, as that of passive control decreases.
- The effect of semi-active control on response reduction is more significant compared to passive control as the number of dampers decreases.
- 5) The optimal damping coefficient of passive dampers provides the least displacement response in passive control. On the other hand, for semi-active control, the displacement response becomes smaller as the upper limit of damping coefficient of variable dampers increases.