同調粘性マスダンパーを適用した超高層鉄骨造建物の応答制御効果

RESPONSE CONTROL EFFECT OF HIGH-RISED STEEL BUILDING STRUCTURE USING TUNED VISCOUS MASS DAMPERS

杉村義文 — * 1 後藤 航 — * 1
谷沢弘容 — * 2 永作智也 — * 3
斎藤堅二郎 — * 4 二宮利文 — * 5
斎藤賢二 — * 6

Yoshifumi SUGIMURA — * 1 Wataru GOTO — * 1
Hirokazu TANIZAWA — * 2 Tomoya NAGASAKU — * 3
Kenjiro SAITO — * 4 Toshifumi NINOMIYA — * 5
Kenji SAITO — * 6

キーワード：
同調粘性マスダンパー, パッシブ制振, 地震応答, 応答制御効果

Keywords:
Tuned viscous mass damper, Passive response control, Seismic response, Response control effect

Response control using inertial mass element which gets inertial force due to the relative acceleration is recently studied by many researchers. The authors have proposed a new seismic response control system, the tuned viscous mass damper (TVMD), composed of arranging viscous damping element and inertial mass element which has an apparent mass amplifying mechanism to obtain a large supplemental mass effect in parallel and connecting spring element in series. This paper shows the application of TVMD to a high-rised steel building structure and response control effect of this system.

1. はじめに

建築構造物の耐震設計では、地震時の建物の応答低減や構造骨組の損傷低減を目的として様々な制振装置が利用されている。従来から広く利用されている装置として金属材料や粘性体あるいは粘弾性体を利用したものが存在するが、これらと異なり要素間の相対加速度に応じて慣性力を発揮する質量要素を利用した応答制御に関する研究が近年盛んに行われている。石丸・古橋ら^{1,2)}は、運動方程式の質量項に着目し、加速度差に応じて慣性力を発揮するこのような要素を慣性接続要素と呼び、多質点系構造物のモード制御法を提案している。また、磯田・半澤ら³⁾は慣性接続要素（論文中では回転慣性質量と呼称）と粘性減衰要素および支持部材要素を複数のパターンで組み合わせた振動系の応答制御効果について検討を行っている。一方、筆者らは粘性減衰要素に慣性接続要素を並列に配置し、柔支持部材要素を直列に接続して構成される制振システム（図1、同調粘性マスダンパー制振システム）を用いた振動応答制御について解析的、実験的な検討を行っている^{4~11)}。これは慣性接続要素と柔支持部材要素により同調付加振動系を構成し、それにより粘性減衰要素の変位を増幅させることで大きなエネルギー吸収効果を得る新しい制振システムである。ここで、一般的に建物の地震応答を同

図2 回転増幅機構付き粘性マスダンパーの機構模式図

調質量ダンパー(TMD)等の質量要素により制御しようとする場合、制御対象となる振動モードの有効質量が非常に大きくなるため付加すべき質量もそれに依りて大きくなり非現実的となり得る。しかし、図2に示すような直線運動を高速な回転運動に変換するボールねじの機構を利用して質量効果を大幅に増幅することが可能である制振装置が開発され、これを用いて同調粘性マスダンパーを構成することによって、従来と同程度の寸法および重量の制振装置でより高い制振効果を得られる可能性が生まれている。本システムの有効性については、鉄骨造より複雑な鉄筋コンクリート造建物を対象として既に確認している¹¹⁾。また、本ダンパーの軸力制限機構を利用することで、従来の粘性系のダンパーよりも小さなダンパー力が必要とする応答制御効果を得ることが可能となることが示されている^{9,10)}。

本報告では、このようにして新たに開発された同調粘性マスダンパー制振システムの実施建物への適用とその応答制御効果、さらには本システムの設計上の利点について報告する。

図1 同調粘性マスダンパー制振システムの力学モデル

^{*1} (株)NTT ファシリティーズ研究開発本部
(〒170-0004 東京都豊島区北大塚2-13-1)
^{*2} (株)NTT ファシリティーズ東北支店
^{*3} NTT 都市開発(株)開発推進部
^{*4} (株)NTT ファシリティーズ東北サービス事業部
^{*5} (株)NTT ファシリティーズ建築事業本部
^{*6} (株)NTT ファシリティーズ建築事業本部 部長・博士(工学)

^{*1} Research and Development Headquarters, NTT FACILITIES, INC.
^{*2} Tohoku Branch, NTT FACILITIES, INC.
^{*3} Development Promotion Department, NTT Urban Development Co.
^{*4} Service Division, NTT FACILITIES TOHOKU, INC.
^{*5} Building Engineering Headquarters, NTT FACILITIES, INC.
^{*6} Sr. Manager, Building Engineering Headquarters, NTT FACILITIES, INC., Dr. Eng.

2. 建物および構造計画概要

同調粘性マスダンパー (Tuned Viscous Mass Damper、以下「TVMD」と呼ぶ) を適用した建物は、地上 14 階、地下 1 階、軒高 G.L+63.20m、最高部高さ G.L+75.00m で、事務室他複数の用途を有する建物である。地上階は、柱にコンクリート充填鋼管柱(CFT 柱)を使用した鉄骨造の純ラーメン構造で、図 3 の伏図に示すように力学的に明快なようフレームを計画している。X 方向 (桁行方向) のスパンは 7.2m を基本とし、Y 方向 (梁間方向) スパンは 5~14 階無柱部分を 16.8m、コア部分を 10.2m、1~4 階部分を 8.4m としている。本設計では建物および収容物の耐震安全性を向上させるために、制振装置を設置している。軸組図を図 4 に示す。X 方向については下層階に従来の粘性ダンパー (速度-減衰力の関係は非線形、最大減衰力約 2,000kN) を、上層階に TVMD を採用している。Y 方向下層階には、壁連結制振システムを採用している¹²⁾。

図 3 伏図

図 4 軸組図

3. 同調粘性マスダンパー制振システムと設計法

3.1 システムの概要

TVMD は、図 1 に示すように粘性減衰要素に慣性接続要素を並列に配置し支持部材要素を直列に接続して構成され、建物の運動にダンパーの運動を同調させるように設計する。このことにより、同調させたモード付近において従来の粘性系のダンパーよりも効率的なエネルギー吸収が可能となり、高い制振効果を得ることができる。図 2 に示した回転増幅機構付き粘性マスダンパーは慣性接続要素として大きな質量を得ることができ、さらに粘性減衰要素の機能も併せ持つ。この粘性マスダンパーを鋼材やゴム材料など適切なばね定数を持つ支持部材要素を介して建物との間に設置することにより同調粘性マスダンパーシステムは形成される。

3.2 定点理論に基づく最適応答制御法

ここでは、定点理論に基づく最適応答制御法による本システムの設計法を示す^{4,11)}。以下、TVMD を有する多自由度振動系を考え、 m_{sk} は第 k 層の主体構造の質量を、 $i m_{rk}$ 、 $i c_{dk}$ 、 $i k_{bk}$ は第 k 層の i 次のダンパーの慣性接続要素質量、減衰係数、支持部材剛性を、 x_{sk} は第 k 層の主体構造の地盤からの相対変位を、 n は主体構造の層数を表すものとする。

- 1) 応答低減の目標に応じて第 k 層の i 次の慣性接続要素質量 $i m_{rk}$ を与える (同調モード i はダンパー毎にあらかじめ指定する)。
- 2) 主体構造のみの固有値解析より等価質量 $i \bar{M}$ および等価節点間質量 $i \bar{M}_r$ を求める。

$$i \bar{M} = \sum_{k=1}^n \{ m_{sk} \cdot (i \beta \cdot i u_{sk})^2 \} \quad (1)$$

$$i \bar{M}_r = i m_{r1} \cdot (i \beta \cdot i u_{s1})^2 + \sum_{k=2}^n \{ i m_{rk} \cdot [i \beta \cdot (i u_{sk} - i u_{s(k-1)})]^2 \} \quad (2)$$

$i u_{sk}$ は主体構造のみの固有値解析における i 次の固有ベクトルの第 k 層成分 (x_{sk} に対応) を、 $i \beta$ は i 次の刺激係数を表す。

- 3) 質量比 $i \mu$ を求める。

$$i \mu = i \bar{M}_r / i \bar{M} \quad (3)$$

- 4) 最適同調振動数比 $i \beta_{opt}$ および最適減衰定数 $i \zeta_{opt}$ を求める (次式は変位応答倍率最適調整条件の場合である)。

$$i \beta_{opt} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 i \mu}}{2 i \mu} \quad i \zeta_{opt} = \frac{\sqrt{3(1 - \sqrt{1 - 4 i \mu})}}{4} \quad (4, 5)$$

- 5) 第 k 層の支持部材剛性 $i k_{bk}$ 、粘性係数 $i c_{dk}$ を求める。

$$i k_{bk} = i m_{rk} \cdot (i \beta_{opt} \cdot i \omega_n)^2 \quad i c_{dk} = 2 \cdot i \zeta_{opt} \cdot i m_{rk} \cdot i \beta_{opt} \cdot i \omega_n \quad (6, 7)$$

$i \omega_n$ は主体構造のみの i 次の固有円振動数を表す。

4. 同調粘性マスダンパーの設計

4.1 設計用入力地震動

設計用入力地震動は表 1 に示す 6 波としている。レベル 2 地震動の速度応答スペクトルを図 5 に示す。

4.2 耐震設計目標

本建物の耐震設計目標を表 2 に示す。本設計ではエネルギー吸収性能を付与することにより、レベル 2 の入力地震動に対して建物構造躯体に損傷を生じさせないことを基本的な設計目標としている。

表1 設計用入力地震動

設計用入力地震動	最大加速度 (cm/s ²)	
	レベル 1	レベル 2
1 EL CENTRO-NS (1940)	255.4	510.8
2 TAFT-EW (1952)	248.4	496.8
3 HACHINOHE-NS (1968)	167.1	334.1
4 KOKUJI-R (乱数位相)	66.3	331.7
5 KOKUJI-K (JMA 神戸位相)	71.2	355.9
6 KOKUJI-H (八戸位相)	66.6	332.9

図5 速度応答スペクトル (h=0.05)

表2 耐震設計目標

評価項目	レベル 1	レベル 2
応答層せん断力	≦設計用層せん断力	≦弾性限耐力 ^{*1}
応答層間変形角	$R \leq 1/250$	$R \leq 1/125$
層塑性率 ^{*2}	$\mu \leq 1.0$	$\mu \leq 1.0$

*1 弾性限耐力はその層のいずれかの部材が全塑性モーメントに達する時の層せん断力とする

*2 層塑性率 μ は応答層せん断力の弾性限耐力時に対する比として算出

4.3 同調粘性マスダンパーの設計値

TVMDの設計は最適応答制御法に基づいて行った。図4に示す通り、5階から上の全層に2構面、1構面あたりダンパーを2基設置し、地震応答に支配的な建物の1次モードに対して同調させることとした。ダンパー1基あたりの慣性接続要素質量は全基共通で $5,400 \times 10^3 \text{kg}$ (=5,400ton)とした。設計値を表3に示す。(3)式による質量比 μ は0.071相当となる。ここで、最適応答制御法(定点理論)は制御対象構造物が無減衰の場合に対する理論解である。そこで、本設計では主体構造の内部粘性減衰の存在や粘性ダンパーの影響を考慮して、振動数特性を確認しつつ、慣性質量と粘性減衰係数、支持部材剛性の関係を微調整した。具体的には、最適応答制御法による設計値の慣性質量を約0.9倍に調整し(短周期側)、後述する層間変形応答倍率(図8)の1次モードのピークがほぼ最小となるようにした。なお、本設計では建物下層階に従来型の粘性ダンパーを配置しているが、これは下層階が一般的な事務室ではなく用途的にTVMDの配置が困難であったためである。

表3 同調粘性マスダンパー設計値(ダンパー1基あたり)

慣性質量	粘性減衰係数	支持部材剛性	制限軸力
$5,400 \times 10^3 \text{kg}$	7,300kN/(m/s)	68,600kN/m	1,200kN

4.4 同調粘性マスダンパーの設置方法

上記設計値を実現するために、図6に示すように本システムを構成した。支持部材については、ゴム部材をダンパー周期調整用部材とし、鉄骨プレースを介して設置する計画とした。ゴム部材の材質

図6 ダンパー設置方法

表4 ダンパー支持部材各部の剛性(ダンパー1基分)

ゴム部材の剛性(ゴム4枚分)	96,000 (kN/m)
取付プレースの剛性(水平方向)	226,000 (kN/m)
直列系としての剛性	67,379 (kN/m)

はG6天然ゴムとし、形状は400mm×400mm、厚さ4mm、TVMD1基あたり4枚使用するものとした。このゴムのせん断剛性と取付プレースの剛性の直列ばねによる剛性がTVMDの目標とする支持部材剛性(表3の値)とほぼ等しくなるように設計している。表4にダンパー1基あたりの各部の剛性と直列系としての剛性を示す。ここで、本システムでは剛性の管理が重要となるが、ゴム部材を取付プレースよりも柔らかめにし、直列ばね剛性に与えるゴム部材の影響を支配的にしておくことで、剛性の管理を容易にすることを考えた。厳密には、大梁やダンパー支持材の剛性も直列ばねの剛性に影響するが、これらはその剛性を上記に比べて十分に大きく設計することで影響を小さくすることができる。一方、慣性質量5,400tonは装置の質量増幅効果により直径600mm、長さ約800mm、おもり部の実質量は560kgのダンパーにて実現される。また、粘性減衰係数は材料の特性上、実際には速度-減衰力の関係が非線形となるため、減衰力 F_c (kN)と速度 V (m/s)の関係を(8)式のように定めた。これは、同調振動数とダンパー変形量より振動数0.5Hz、変位振幅30mm(速度振幅95mm/s相当)定常入力時の履歴ループ面積が目標の線形粘性減衰係数の場合(表3の値)と等価となるようにしたものである⁵⁾。

$$F_c = C \cdot V^\alpha = 2203 \cdot V^{0.533} \quad (8)$$

このようにTVMDを構成することにより、地震時においては、鉄骨プレースからプレース交差部の中央プレート、ゴム、外側プレートを通じ、さらにダンパー、ダンパー支持材、大梁を介して建物の地震力を負担する。ダンパー交差部の中央プレートの下部にある2つの部材は面外変形に対する振れ止めの役割である。ここで、ダンパー支持材から作用するダンパー力は、大梁に偏心曲げを生じさせるため、大梁の断面設計および主体構造の弾性限耐力を算出する際には

このダンパー力による曲げを考慮している。また、本設計ではレベル2入力地震動に対しても柱、大梁に塑性ヒンジが形成されないよう断面を決定しているが、それを超える入力に対し、大梁には鉛直ハンチに加えて梁端部0.5Hの範囲(Hは端部梁せい)に水平ハンチを設けることで、局部的に応力が大きい梁端部では塑性化させず、鉛直ハンチ始端にて塑性化領域が形成されるように設計している。さらに、ダンパーの取り付けている大梁については制振効果を確実に発揮できるように他の大梁に塑性ヒンジが形成されるまでは弾性を保つように十分な余力を持たせている。

5. モード減衰および振動数特性

5.1 固有周期とモード減衰

ここでは、TVMD 設置による建物全体振動系の固有周期および減衰定数の変化を確認する。本検討では、図7のように、建物主体構造を単純に等価せん断モデルにモデル化し、同調粘性マスダンパーおよび線形に置換した粘性ダンパーを考慮した場合の複素固有値解析結果を示す。検討の対象は建物地上部とし、PH部の重量は最上階の重量に含め、各階水平剛性は立体フレーム解析モデルの水平荷重用時の層間変形と層せん断力の関係より算出した。解析に用いた諸元は表5の通りである。建物の内部粘性減衰は剛性比例型とし、1次モードに対して2%の減衰を与えている。固有周期と減衰定数を表6、表7に示す。比較のために、全てのダンパーを設置した場合に加えて、非制振の場合、下層階の粘性ダンパーのみを設置した場合を示す。同調粘性マスダンパーを設置することで、全体振動系の固有モード全次数は14次から24次が増えるが、表6より1次から11次に固有周期の近接したモードが生じることが分かる。これらは、TVMD非設置時の1次モードに対応し、TVMD設置時の12次以上にはTVMD非設置時の2次以上が対応する。また、表7より、TVMD設置時の1次、11次モードの減衰定数が14%となっており、TVMD非設置時

図7 検討モデル

表5 主体構造およびダンパーの諸元

層	主体構造			ダンパー		
	質量 ton(=×10 ³ kg)	粘性係数 kN/(m/s)	剛性 kN/m	質量 ton(=×10 ³ kg)	粘性係数 kN/(m/s)	剛性 kN/m
14	3747	16479	1272000	21600	29200	269510
13	1876	16997	1312000	21600	29200	269510
12	1661	17515	1352000	21600	29200	269510
11	1649	17917	1383000	21600	29200	269510
10	1682	18241	1408000	21600	29200	269510
9	1668	18772	1449000	21600	29200	269510
8	1687	19083	1473000	21600	29200	269510
7	1672	19692	1520000	21600	29200	269510
6	1695	21052	1625000	21600	29200	269510
5	1724	25120	1939000	21600	29200	269510
4	4222	24900	1922000	0	116660	1848500
3	3432	21363	1649000	0	116660	1848500
2	3468	22905	1768000	0	116660	1848500
1	3899	28553	2204000	0	116660	895500

における1次モードの減衰定数6%よりも大幅に増加していること、TVMD設置時の12次モード以上の減衰定数とTVMD非設置時における2次モード以上の減衰定数が同程度であることが分かる⁷⁾。

表6 固有周期の比較

非制振		粘性ダンパー (下層)		粘性ダンパー (下層) + 同調粘性マスダンパー (上層)	
次数	周期(sec)	次数	周期(sec)	次数	周期(sec)
1次	2.03	1次	2.00	1次	2.20
				2次	1.96
				3次	1.96
				4次	1.95
				5次	1.95
				6次	1.94
				7次	1.94
				8次	1.93
				9次	1.93
				10次	1.90
				11次	1.69
2次	0.79	2次	0.75	12次	0.71
3次	0.47	3次	0.46	13次	0.42
4次	0.32	4次	0.31	14次	0.28
5次	0.27	5次	0.23	15次	0.22

表7 減衰定数の比較

非制振		粘性ダンパー (下層)		粘性ダンパー (下層) + 同調粘性マスダンパー (上層)	
次数	減衰定数	次数	減衰定数	次数	減衰定数
1次	0.02	1次	0.06	1次	0.14
				2次	0.21
				3次	0.21
				4次	0.21
				5次	0.21
				6次	0.21
				7次	0.21
				8次	0.21
				9次	0.21
				10次	0.21
				11次	0.14
2次	0.05	2次	0.12	12次	0.12
3次	0.09	3次	0.11	13次	0.10
4次	0.13	4次	0.14	14次	0.13
5次	0.15	5次	0.18	15次	0.18

5.2 振動数特性

次に、調和地動入力時の建物各層の層間変形の応答倍率を図8に示す。粘性ダンパーを考慮すると、非制振時に比べ幅広い周期帯の応答倍率を一様に低減していることがわかる。一方、TVMDを考慮すると、同調させたモード（本設計では1次モード）の応答倍率を効果的に低減しており、それ以外のモードの応答倍率には変化がない

図8 応答倍率の比較

ことがわかる。このように TVMD は同調させたモードの応答を選択的に低減する特徴を持つ。言い換えれば、特定のモードの減衰を集中的に上昇させることが可能である。設計的にどのモードをどの程度低減させるのがよいかについては、建物と地震動の周期特性の影響を受けるため一概には言えないが、本設計では下層階に設定した粘性ダンパーにより高次モードの応答は低減できていると考え、TVMD は地震応答への影響が最も大きい 1 次モードの応答を重点的に制御することとした。

6. 地震応答制御効果

6.1 解析モデル

地震応答解析用の立体フレーム解析モデルを図 9 に示す。粘性ダンパーについてはマックスウェル要素にてモデル化し、取付部材の剛性は解析モデル内で別途考慮されるため、本要素のばね部はダンパー自体の剛性を考慮して設定した。TVMD については、ブレースおよび周期調整用のゴム部材を介して建物に取り付けているため、ブレースは解析モデル内にてそのまま入力し、ゴム部材はばね要素としてモデル化した。図 9 の最下段の左図は実際の同調粘性マスダンパー（軸力制限機構付き粘性マスダンパーとゴム部材）を表しており、解析では右図に示すように完全弾塑性ばねとして機能する軸力制限機構とリニアばね要素をひとつにして 2 次勾配を小さくしたバイリニア要素としてモデル化している。なお、ダンパーの一端を柱梁の交点に直接結んでおり、大梁やダンパー支持材の変形の影響を無視してモデル化しているが、これはそれらの剛性が TVMD 直列系としての剛性の 15 倍程度の大きな値であり影響が小さいためである。

図 9 振動解析モデル

6.2 設計用入力地震動に対する最大応答

本設計では XY それぞれの方向に設計用入力地震動を入力してい

る。X 方向に対する本体建物の最大応答を図 10 に示す。軸力制限機構付き同調粘性マスダンパーおよび粘性ダンパー双方の効果により、いずれの応答も耐震設計目標を満足している。

図 10 設計用入力地震動に対する最大応答

6.3 本システムの設計上の利点

TVMD は、同程度の応答低減効果を持たせた際、ダンパー力が他の粘性系のダンパーに比べて大きくなる場合がある。このような課題に対して、ダンパーに軸力制限機構を設けることで、応答低減効果を大きく損なわずに最大ダンパー力を低減できることが示されている^{9,10)}。図 11 には全入力地震動の内、応答の比較的大きい TAFT-EW L2 波入力時における軸力制限の有無による応答の違いを示す。制限軸力はダンパー 1 基あたり 1,200kN であり、軸力制限比（軸力制限を導入しない場合の最大ダンパー力に対する制限軸力の比）0.5～1.0 倍程度としている。ここではさらに、比較のために TVMD を下層階に設置しているものと同じ粘性ダンパーに交換した場合の応答を示す。図より TVMD は、軸力制限によって応答が若干増加しているもののダンパー力を大幅に低減できていること、軸力制限を設けた

図 11 ダンパーの違いによる最大応答の比較(TAFT-EW L2)

TVMD は、粘性ダンパーに比べて小さいダンパー力で同等の応答低減効果を発揮できていることがわかる。本設計の場合、TVMD の粘性ダンパーに対する最大ダンパー力の比は 0.7 倍程度となっている。続いて、図 12 にはダンパーが取り付けられているフレームの 5 階の柱の TAFT-EW L2 波入力時の軸力の時刻歴を示す。軸力制限を設けた TVMD の場合と粘性ダンパーの場合のものを比較すると、両者ともダンパーからの力の作用により大きな変動軸力が発生しているが、TVMD の場合は粘性ダンパーの場合に比べてその変動幅が 0.8 倍程度と小さく、ダンパー力を小さく制限したことによる設置フレームへの負担軽減という TVMD の設計上の利点を確認できる。なお、軸力制限機構を設けることで、地震動によるエネルギーは粘性減衰のみならず履歴減衰として吸収され、入力レベルが大きいほど履歴減衰による吸収の割合が増える。表 8 には TAFT-EW L2 波入力時の代表的な 9 階のダンパーのエネルギー吸収量の比較を示す。表より、軸力制限がある場合の粘性減衰と履歴減衰の合計エネルギー吸収量は軸力制限がない場合の粘性減衰のエネルギー吸収量と同等であり、これが軸力制限を設けても応答低減効果が大きく損なわれない理由と考えられる。また、ここでは両者の割合はほぼ同等となっている。

図 12 ダンパーの違いによる柱変動軸力の比較(TAFT-EW L2)

表 8 ダンパーエネルギー吸収量の比較(TAFT-EW L2)

	粘性減衰	履歴減衰
同調粘性マスダンパー軸力制限なし	207kN・m	-
同調粘性マスダンパー軸力制限あり	116kN・m	94kN・m

7. まとめ

本報告では、新たな制振システムである同調粘性マスダンパーの超高層鉄骨造建物への適用の実施例について示した。ダンパーの設計、設置方法を示し、本建物の応答制御効果について、固有周期・減衰定数、振動数特性、地震応答の観点から示した。最後に本システムの設計上の利点について示した。以下、本報告の検討範囲における結論である。

- (1) 同調粘性マスダンパー制振システムを用いることで、従来と同程度の重量のダンパーにより大きな質量効果が得ることができ。本建物では、回転増幅機構付き粘性マスダンパーの質量増幅効果によって生み出される 1 基あたり 5,400ton の質量を複数用いることにより、建物全体で約 0.07 の質量比が実現できた。
- (2) 同調粘性マスダンパーの効果により、任意のモードの減衰を集中的に上昇させることが可能であり、本建物では地震応答に支配的である建物 1 次モードの減衰を効果的に上昇させることができ、複素固有値解析による評価で 14%程度の減衰定数を得ることができた。

- (3) 特定のモードの減衰を集中的に上昇させることが可能である同調粘性マスダンパーを従来型の粘性ダンパーと組み合わせることで、目標とする耐震性能を満足する十分な地震応答制御効果が得られた。
- (4) 同調粘性マスダンパーの軸力制限を利用することにより、応答低減効果を大きく損なわずに最大ダンパー力を低減でき、本建物では、従来型の粘性ダンパーを使用した場合に比べて、ダンパー力を 0.7 倍程度に低減、ダンパーが取り付け柱の軸力変動を 0.8 倍程度に軽減できる。

今後の課題として、ダンパー取付方法のさらなる工夫、高次モードも含めた複数モード応答制御への展開などがあげられる。また、本建物の地震応答観測を行い、実測による応答制御効果について報告する予定である。

最後に、同調粘性マスダンパー制振システムの開発から本建物への適用の実現までにご指導、ご協力頂きました多くの方々に心より謝意を表します。

参考文献

1)古橋, 石丸: 慣性接続要素によるモード分離 慣性接続要素による応答制御に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第576号, pp. 55-62, 2004. 2

2)石丸, 三上, 秦, 古橋: D.M. 同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第652号, pp. 1105-1112, 2010. 6

3)磯田, 半澤, 田村: 回転慣性質量ダンパーを組合せた応答低減機構による 1 質点系振動モデルの応答特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 642 号, pp. 1469-1476, 2009. 8

4)齊藤, 栗田, 井上: 慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御と Kelvin モデル化手法に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 53B, pp. 53-66, 2007. 3

5)齊藤, 井上: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーをもつ制振構造の最適応答制御に関する一考察 ―最適設計システムにおける線形粘性要素の等価非線形粘性要素への置換法―, 日本建築学会技術報告集, 第 26 号, pp. 457-462, 2007. 12

6)荒井, 油川, 五十子, 堀, 井上: 同調粘性マスダンパーの有効性の検証と弾塑性構造物への適用性, 日本建築学会構造系論文集, 第 645 号, pp. 1993-2002, 2009. 11

7)杉村, 齊藤, 五十子, 井上: 同調粘性マスダンパーを用いた多層建築構造物の応答制御に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 56B, pp. 153-161, 2010. 3

8) K. Ikago, Y. Sugimura, K. Saito, N. Inoue : Optimum Seismic Response Control of Multiple Degree of Freedom Structures using Tuned Viscous Mass Dampers, Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Structures Technology, paper164(CD-ROM), 2010.9

9)墨山, 荒井, 池永, 五十子, 井上: 同調粘性マスダンパー制振システムを組み込んだ構造物に関する研究 その 1 リリーフ機構の有効性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 449-450, 2010. 9

10)木田, 渡邊, 中南, 田中, 杉村, 齊藤, 五十子, 井上: 軸力制限機構付き同調粘性マスダンパーの実大加振実験とその解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 665 号, pp. 1271-1280, 2011. 7

11)杉村, 五十子, 後藤, 齊藤, 井上: 同調粘性マスダンパーの鉄筋コンクリート造建物への有効性の検討, 日本建築学会技術報告集, 第 37 号, pp. 841-846, 2011. 10

12) (財)日本建築センター: (仮称) Aビル 高効率な制振システムを採用した複合通信ビル, ビルディングレター, 第 547 号, pp. 1-11, 2011. 7

[2011 年 10 月 12 日原稿受理 2011 年 11 月 30 日採用決定]