

片持ち柱支持した同調粘性マスダンパーの実大振動実験

Full-Scale Shaking Tests for Tuned Viscous Mass Damper Supported by Cantilever Columns

石田 琢志^{*1}, 桑素彦^{*2}, 今泉 祐樹^{*2}, 川又 哲也^{*2}, 本多 仁^{*2}

Takushi ISHIDA, Motohiko KUWA, Yuuki IMAIZUMI, Tetuya KAWAMATA and Jin HONDA

Passively controlled structure is one of the effective means to achieve the building performance required to earthquakes and winds. However, because of installation space of dampers to be limited from a reason of design or the utilization efficiency of the building, efficient damper arrangement is important problems on the structure design.

In this paper, aiming to reduction in number of dampers and space saving of them installation, Full-Scale shaking tests for Tuned Viscous Mass Damper skipped the story and supported by cantilever columns are discussed.

Keywords : Tuned Viscous Mass Damped, Cantilever Columns, Skip the Story, Full-Scale Shaking Tests, Space Saving
同調粘性マスダンパー, 片持ち柱, 層飛ばし, 実大振動実験, 省スペース

1. はじめに

建物用途によっては、発生頻度の高い L1 地震における高い耐震性能（非損傷性）および暴風時における居住性能の向上が要求される。要求性能を満足させるための有効な手段の 1 つに制振構造の採用が挙げられるが、建物の利用効率やデザイン上等の理由から制振装置（以下、ダンパー）の設置スペースが限られることも多く、効率的なダンパー配置が設計上の重要な課題となる。

一方、同調粘性マスダンパー¹⁾²⁾は、その支持部材剛性とボールねじ機構により実質量の数千倍に増幅される等価質量から構成される付加系を、建物（主系）周期と同調させることで高い制振効果が期待できるとともに、ダンパー支持部材を従来よりもスレンダーにできるといった利点がある。また、荻野ら³⁾は、その等価質量が刺激関数の層間成分の二乗に比例して制振効果を発揮する点に着目し、多層に跨って同調粘性マスダンパーを配置することでダンパー基数の削減と制振効果の両立を可能にした設計例を報告している。本稿では、ダンパー基数の削減とさらに設置の省スペース化を目指し、層飛ばしで片持ち柱支持した同調粘性マスダンパーの有効性を実大振動実験により検証した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験建物

試験体の建物は、高さが約 18.9m、平面が約 8m×

8m、総重量が約 5200kN の実大 6 層鉄骨造(写真 - 1)であり、加振装置は、R 階に設置されたアクティブマスダンパー（以下、AMD）である。第 1 層と第 3 層は免震層となっており、実験に応じて固定／非固定を選択できる。本実験では、小振幅から比較的大きい振幅での応答性状を確認するため、第 3 層は免震化した状態とし（第 1 層免震層は固定）、後述するダンパーの支持部材（以下、単に支持部材）を第 3 層の免震層を跨ぐように 2 階と 5 階にかけて設置する計画とした（写真 - 1、図 - 1）。加振は 1 方向としたが、支持部材の面外方向への振動を防止するため、その先端に面外拘束装置を設置した。面外拘束装置は、写真 - 2 に示すダンパーの軸方向と鉛直方向および回転の 3 自由度をもつ装置である。

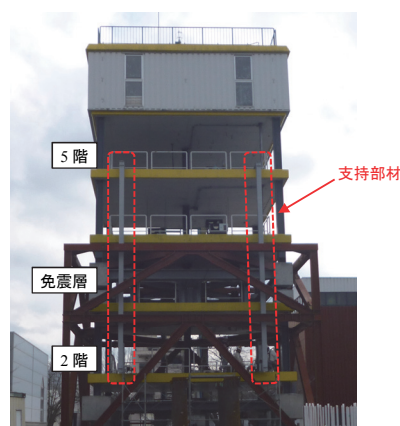


写真 - 1 試験体全景

*1 戸田建設(株)技術開発センター 修士（工学）

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

*2 戸田建設(株)構造設計部 修士（工学）

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

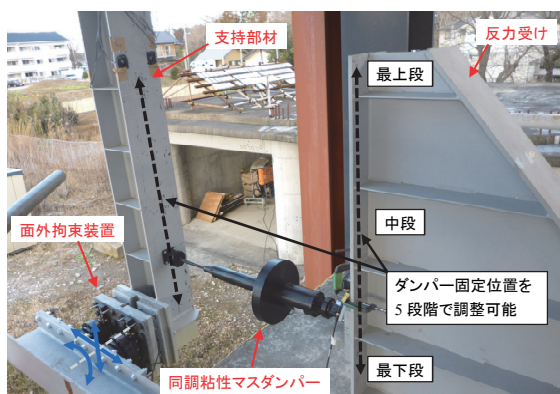
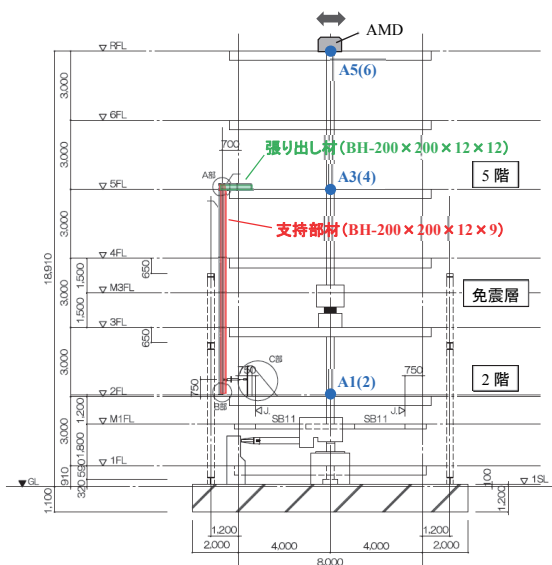
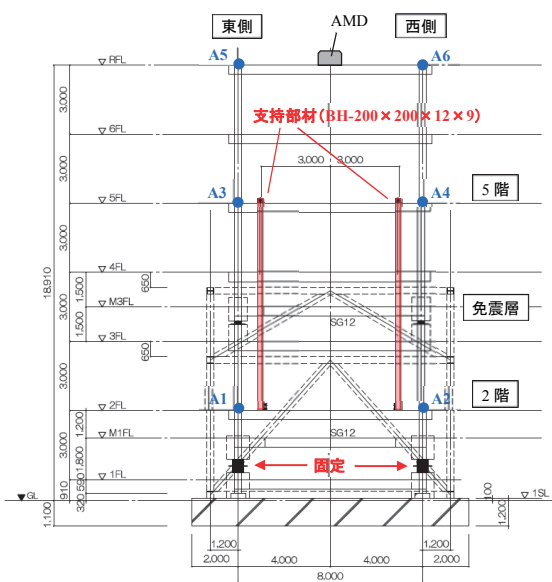


写真-2 同調粘性マスダンパーと支持部材, 面外拘束装置



(a) 加振方向



(b) 加振直交方向

図-1 試験体建物断面図

2.2 同調粘性マスダンパーとその支持部材

先に述べた通り、本実験での支持部材は片持ち柱形式とした。片持ち柱支持にすることで、例えば PS や EPS 等の空間の一部を有効利用し、計画自由度の向上に寄与しながら高い耐震性能も確保することを

意図している。ただし、片持ち柱支持の場合、その剛性が支持長さの 3 乗に反比例して低下するため、質量比を大きくすると支持部材の必要剛性の確保が難しいといった問題点がある。一方、質量比を小さくすると付加系と主系の周期ずれが生じた場合のロバスト性（同調性）の低下が懸念される。そこで、本実験では、質量比を極端に小さい 2% に設定し、ダンパー固定位置、すなわち支持部材剛性を 5 段階で調整できる仕様にし（写真-2）、それを変化させた場合の制振効果を実験的に検証する。なお、同調粘性マスダンパーは、ねじれを考慮し 2 基設置する計画とした。

実験に用いる同調粘性マスダンパーの付加減衰係数 c_d およびその支持部材剛性 k_b は、定点理論^{1),2)}から下式により求めた。

$$\beta^{opt} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\mu}}{2\mu} \quad (1)$$

$$h_d^{opt} = \sqrt{\frac{3(1 - \sqrt{1 - 4\mu})}{4}} \quad (2)$$

$$c_d = 2h_d^{opt} \sqrt{m_d k_b} \quad (3)$$

$$k_b = (\beta^{opt} \cdot \omega)^2 \cdot m_d \quad (4)$$

ここで、 μ は質量比であり、1 基あたり約 0.01（等価質量 $m_d=5\text{ton}$ ）とした。 ω は試験体の 1 次固有円振動数である。

式(1)~(4)より、ダンパー 1 基あたりの付加系減衰係数 $c_d=1.7\text{kNs/m}$ 、支持部材剛性 $k_b=33.6\text{kN/m}$ を求め、この c_d を最適減衰、 k_b を最適剛性とここでは呼ぶ。支持部材の断面は、後述する FEM から、中段位置での剛性が最適剛性とほぼ等しくなるように BH-200×200×12×9 を選定した。

2.3 加振波

加振波は、0.1~1.0Hz までの Sweep 波と、試験体 1 次固有振動の Sin 波、建築研究所で観測された東北地方太平洋沖地震の NS 成分について、AMD の加振性能内で極力大きな変形を再現できるよう試験体の 1 次固有振動数帯を取り出した t0311 の 3 波とした。Sin 波と t0311 は加振力を小さい順に Lv1,2,3 の 3 段階に設定した。

2.4 測定点

代表的な測定点として、加速度の測定点を図-1 に併記する。ねじれの影響を確認するため、加速度計は 2,5,R 階の床スラブ端-端に設置した。また、上記以外では、同調粘性マスダンパーの減衰力と変位、支持部材の曲げひずみを測定した。サンプリング周波数は 200Hz とした。

3. 支持部材の剛性測定

3.1 測定概要

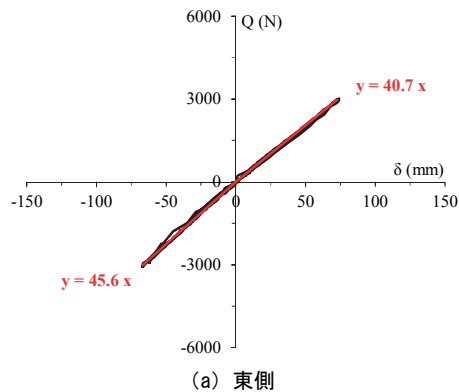
加振実験に先立ち、油圧ジャッキにより支持部材を押し引きした際の荷重-変位関係の傾きから、各ダンパー固定位置での支持部材剛性を求めた。測定状況を写真-3に示す。



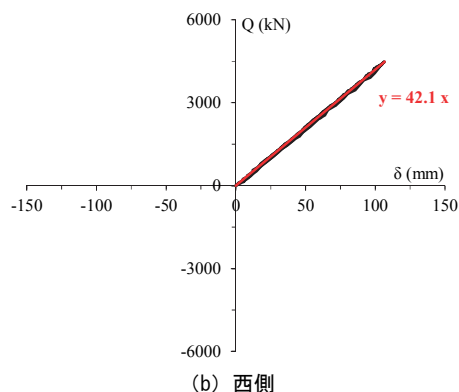
写真-3 支持部材剛性測定状況（最上段）

3.2 測定結果

測定結果の一例として、最上段を固定位置とした場合の東側と西側（図-1）支持部材の荷重-変位関係を図-2に示す。西側は実験の都合上、押しのみを行った。油圧ジャッキで支持部材を押した場合（ダンパー引張側、以下、引張側）では、5F床スラブからの張り出し材はコンクリートの支圧を受けるのに対し、引いた場合（ダンパー圧縮側、以下、圧縮側）では、張り出し材には主にボルトの引張しか作用しないため、圧縮側は引張側に比べ剛性が10%程度低下する結果となった。また、圧縮側のみではあるが、東側と西側の支持部材剛性を比較すると、施工誤差によると思われる若干の違いが見られた。



(a) 東側



(b) 西側

図-2 支持部材剛性の荷重-変位関係（最上段固定時）

測定結果をFEMおよび仮想仕事法から求めた剛性と比較する。

FEMは、支持部材のBH-200×200×12×9を梁要素、5階床から張り出したBH-200×200×12×12を板要素としてモデル化し、圧縮力はコンクリートが、引張力とせん断力はボルトが負担するモデル化とした。FEMの解析モデルを図-3に示す。

仮想仕事法は、図-4に示すモデルに対し曲げ変形によるたわみδを式(5)により求め、式(6)から剛性 K_b を評価した。

$$\delta = \int_0^L \frac{Px \cdot x}{EI_1} dx + \int_0^a \frac{PL \cdot L}{EI_2} dy \quad (5)$$

$$= \left[\frac{Px^3}{3EI_1} \right]_0^L + \left[\frac{PL^2 y}{EI_2} \right]_0^a = P \left(\frac{L^3}{3EI_1} + \frac{aL^2}{EI_2} \right)$$

$$K_b = \frac{P}{\delta} = \frac{I_2 \cdot L^3 + 3I_1 \cdot aL^2}{3EI_1 I_2} \quad (6)$$

ここで E は鋼材のヤング率であり、 $E=205000\text{N/mm}^2$ である。 a は張り出し材の長さであり、ここでは支持部材芯からスラブ端側のボルト位置までの $a=400\text{mm}$ として計算した。 L は加力点 P までの支持部材長さであり、固定位置に応じて $L=7850 \sim 8850\text{mm}@250\text{mm}$ の値となる。

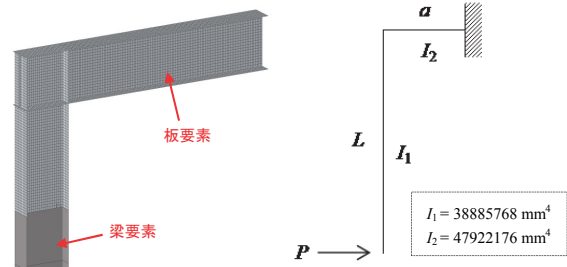


図-3 FEMモデル

図-4 仮想仕事法モデル

各計算結果と測定結果の剛性値を表-1に示す。なお、同表中の測定結果には東側と西側の平均値を示しているが、上述の通り、西側は圧縮側の試験を実施していないため、圧縮側の平均値は東側のみの結果を用いている。

同表より、FEMは引張側では測定結果と同程度であるが、圧縮側では測定結果との差異が大きい傾向にある。引張側と圧縮側の平均値では、測定結果よりも10%程度低い結果を示した。一方、仮想仕事法では、引張側では測定結果よりも5%程度高く、反対に圧縮側では測定結果よりも5%程度低い。引張側と圧縮側の平均値では、測定結果と同程度の結果を示した。これより、本実験のような片側から張り出した支持部材に関しても、曲げ変形のための仮想仕事法により剛性の概算が可能と考えられる。

表 - 1 支持部材剛性

単位 (N/mm ²)	引張側					圧縮側					引張側と圧縮側の平均		
	計算		測定			計算		測定			計算		測定
上から	FEM	仮想 仕事法	東側	西側	平均	FEM	仮想 仕事法	東側	西側	平均	FEM	仮想 仕事法	平均
1 段	39.4	44.0	40.7	42.1	41.4	40.5	44.0	45.6	-	45.6	40.0	44.0	43.5
2 段	36.1	40.2	38.1	36.6	37.3	37.0	40.2	42.4	-	42.4	36.6	40.2	39.9
3 段	33.2	36.8	35.2	34.0	34.6	34.0	36.8	40.0	-	40.0	33.6	36.8	37.3
4 段	30.5	33.8	32.1	31.4	31.8	31.3	33.8	36.1	-	36.1	30.9	33.8	34.0
5 段	28.2	31.1	30.2	29.0	29.6	28.8	31.1	33.7	-	33.7	28.5	31.1	31.6

4. 加振実験結果

実験結果を以下に示す。測定点は、図 - 1 を参照されたい。各階の加速度は、2 階は A1 と A2、5 階は A3 と A4、R 階は A5 と A6 の平均から求めた並進成分を示している。また、「制振 3 ケース」とは、同調粘性マスダンパーの固定位置をそれぞれ、最下段、中段、最上段とした場合を指す。

4.1 SWEEP 波

Sweep 波加振により非制振と制振の振動特性を把握する。AMD の加振力を入力とした R 階アクセラランスを、非制振と制振 3 ケースで比較して図 - 5 に示す。また、非制振と制振それぞれについて、AMD の加振力を入力、2、5、R 階加速度を出力とした部分空間法によるシステム同定結果として、1 次の固有振動数および減衰定数を表 - 2 に示す。同表には、最適剛性 (33.6kN/m) に対する、各ダンパー固定位置での支持部材剛性の測定値 (東側と西側の平均) の比を併せて示している。

図 - 5 および表 - 2 より、非制振での試験体 1 次固有振動数は 0.44Hz、減衰定数は 3.86%であった。非制振での減衰は一般的な値よりも高く、この要因として第 3 層に設置している積層ゴムの影響等が考えられる。制振では、図 - 5 より、ダンパー固定位置が高い、すなわち支持部材剛性が高いほどピークの振動数は非制振よりも高振動数側にシフトしていき、その高さ (増幅率) も低下していく。減衰定数は、表 - 2 からダンパー最上段固定時が 5.67%と最も高く、本検討では最適剛性に対する支持部材剛性比が高いほど、付加減衰が大きくなる結果となった。

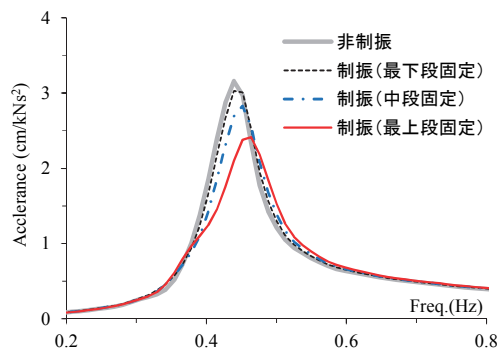


図 - 5 R 階アクセラランス

表 - 2 1 次の固有振動数と減衰定数

1 次モード	非制振	制振		
		最下段固定	中段固定	最上段固定
支持部材剛性 (N/mm ²)	-	31.6	37.3	43.5
支持部材剛性 ／最適剛性	-	0.94	1.11	1.30
固有振動数 (Hz)	0.44	0.44	0.45	0.46
減衰定数 (%)	3.86	4.12	4.58	5.67

4.2 Sin 波および t0311 波

Sin_Lv3 波および t0311_Lv3 波加振時における高さ方向の加速度最大値分布を、非制振と制振 3 ケースで比較して図 - 6 に示す。先の Sweep 波と同様、支持部材剛性が高いほど制振効果が高く、ダンパー最上段固定時の Sin_Lv3 波では約 30%、t0311_Lv3 波では約 40%の低減効果を示した。t0311_Lv3 波における、最上段固定時のダンパーの履歴曲線を図 - 7 に示す。東側では約 2.7kN、西側では約 3.3kN の最大減衰力を確認できた。両方で最大減衰力が異なるのは、上述したように東側と西側で支持部材剛性が異なるためと考えられる。ただし、この最大減衰力の差によるねじれはほとんど生じていないことを A6 と A7 の差分から確認している。

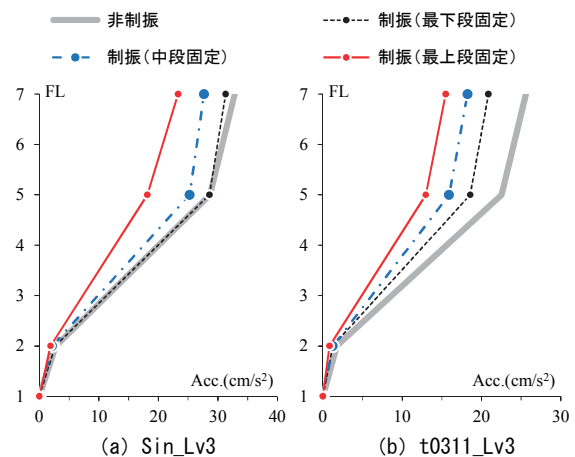


図 - 6 高さ方向の加速度最大値分布比較

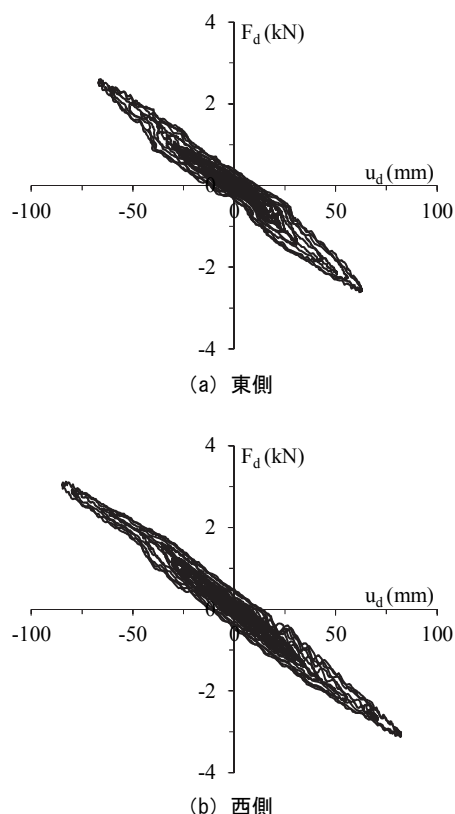
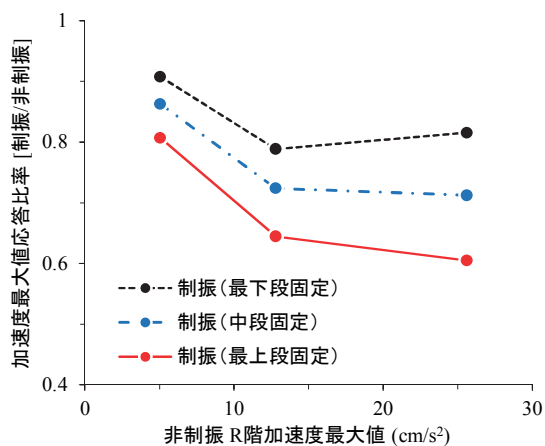
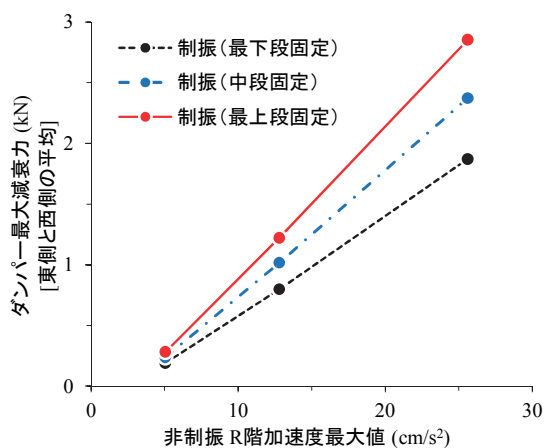


図 - 7 同調粘性マスダンパーの履歴曲線（最上段固定時）



(a) R 階加速度最大値応答比率



(b) ダンパー減衰力

図 - 8 振幅レベルによる加速度比率とダンパー減衰力

振幅レベルによる同調粘性マスダンパーの性能を検証するため、t0311 波を対象とし、非制振での R 階加速度最大値を横軸に、非制振に対する制振 3 ケースでの R 階加速度最大値の応答比率およびダンパーの最大減衰力（東側と西側の平均）を縦軸にプロットして図-8 にそれぞれ示す。

同図 (a) より、非制振での R 階加速度最大値が 10cm/s^2 を超えたあたりから、応答比率はほぼ一定の傾向を示すが、それ以下の 5cm/s^2 程度においても 10~20% の低減効果が確認できる。また、同図 (b) より、ダンパーの最大減衰力と R 階加速度最大値はほぼ線形関係にあり、上述の 5cm/s^2 程度の振幅においてもダンパーが有効に作用していると考えられる。質量比を小さくした場合、粘性体を封入する部分のシールによる摩擦抵抗も小さくなるため、例えば風のような微小振動でも制振効果が期待できるものと考えられる。

5. シミュレーション解析

本実験での加振は、AMD による試験体 R 階への強制外力とし、また AMD の加振性能から試験体の 1 次固有振動数を主成分とした波を用いた。しかしながら、実際の地震は地盤から伝達され、ランダム成分を多く含む。そこで、実験結果を模擬するシミュレーション解析モデルを作成し、同モデルにより地震に対する制振効果を外挿して評価する。

5.1 解析概要

解析モデルは 6 質点系等価せん断型とし、直列に配置した同調粘性マスダンパーと支持部材によって 2 階と 5 階を繋ぎモデル化した。解析モデルを図 - 9 に示す。支持部材は、せん断ばねでモデル化した。上述の通り、支持部材のばね剛性は引張側と圧縮側で異なるが、本検討では簡単の為に両者の平均値を用い、圧縮側と引張側で同じ値とした。また、ダンパー内部のシールによる摩擦抵抗および面外拘束装置の摩擦の影響は、それぞれ剛塑性ばねをダンパーと並列に設けることでモデル化した。構造減衰は、Sweep 波加振時の部分空間法による同定結果から、1 次が 3.86%、2 次が 1.11% のレーリー減衰とした。

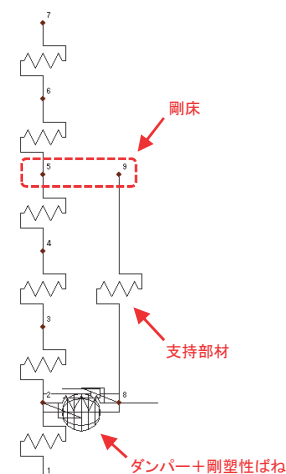


図-9 解析モデル

5.2 実験結果との比較

ダンパー最上段固定での、Sweep 波加振時の R 階加速度時刻歴波形と加速度フーリエスペクトル、加速度最大値分布、ダンパーの履歴曲線を実験と解析で比較して図 - 10 に示す。同図 (b) より、3 次以降の高次では実験と解析の対応は良くないが、1 次と 2 次については良好な対応を示している。また、加速度時刻歴、最大値分布、ダンパーの履歴曲線のいずれも、解析は実験を良好な精度で再現しており、本解析モデルは妥当性のあるものと判断した。

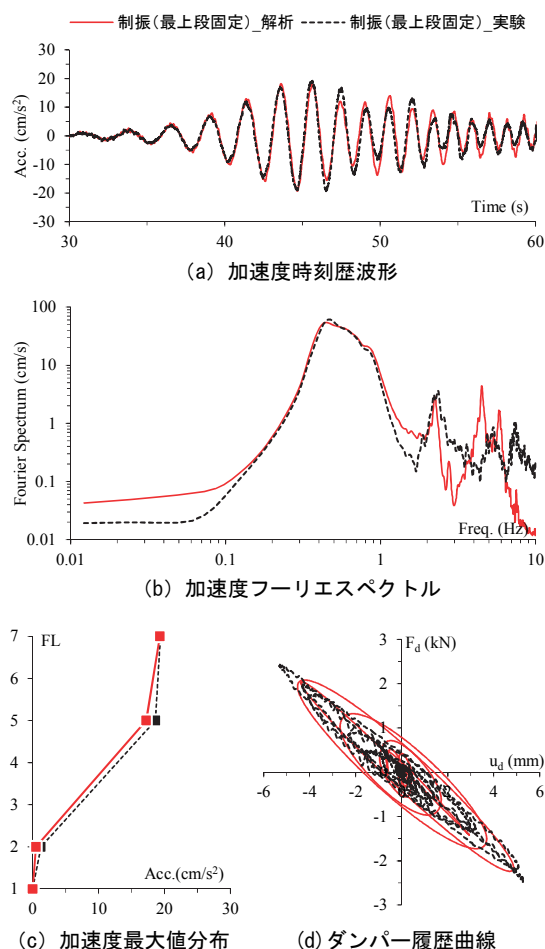


図 - 10 実験と解析の比較

5.3 地震波入力時の応答比較

入力地震波は、ElcentroNS 観測波（以下、ElcenNS）および東北地方太平洋沖地震での JMA 大手町観測波（以下、JMA-OTEMACHI）とした。実験に用いた同調粘性マスダンパーの減衰係数は、ダンパー速度 $V_d=20\text{cm/s}$ で最適減衰と等価になるように設定したことから、本解析においても V_d がそれと同程度となるよう地震波の倍率を調整することとした。倍率調整後の最大加速度は、ElcenNS が約 35cm/s^2 、JMA-OTEMACHI が約 80cm/s^2 である。各入力地震波の疑似速度応答スペクトルを図 - 11 に示す。ElcenNS は 0.6~1 秒付近が卓越する波であるのに対し、JMA-OTEMACHI は 0.2~6 秒付近までフラットであり、長周期成分に比較的大きなエネルギーをもった波であることがわかる。

解析結果として、各地震波での高さ方向の相対変位最大値を図 - 12 に示す。同図より、実験ほど明瞭な差は見られないものの、やはり支持部材剛性が高いほど低減効果が高い傾向が確認できた。ElcenNS では最大約 10%、JMA-OTEMACHI では最大約 25% の低減効果が見られ、長周期成分のエネルギーが大きい JMA-OTEMACHI での制振効果が高かった。

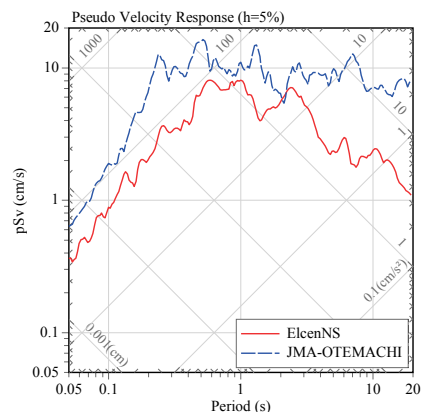


図 - 11 入力地震波の疑似速度応答スペクトル

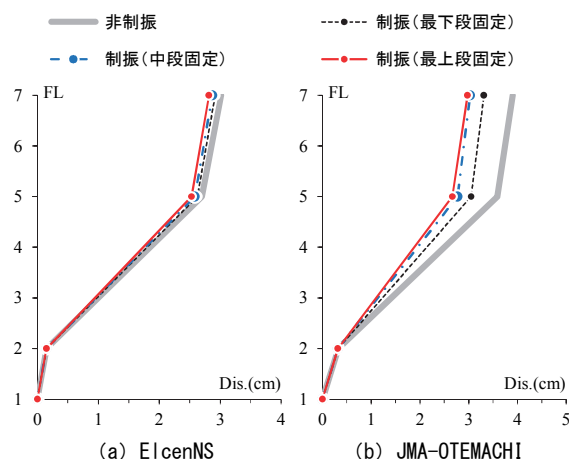


図 - 12 高さ方向の相対変位最大値分布比較

6. まとめ

層飛ばしによるダンパー基数の削減および設置の省スペース化を目的とし、片持ち柱支持した同調粘性マスダンパーの実大振動実験を行い、その有効性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 加振実験に先立ち、ダンパー支持部材の剛性測定を行った。本検討で対象とした片側から張り出した片持ち柱においてもその剛性を曲げ変形のための仮想仕事法により概算可能であることを確認した。
- 2) 本加振実験では、支持部材剛性が高いほどダンパーによる低減効果が高かった。
- 3) 小振幅レベルの加振実験においても、ダンパーによる低減効果が確認できた。質量比を小さくすることでシールによる摩擦抵抗が小さくなるため、例えば風のような微小振動においても制振効果が期待できるものと考えられる。

- 4) 実験を模擬した解析モデルを作成し、実験結果を精度良くシミュレートできることを示した。
- 5) 解析モデルによる地震応答解析から、質量比 2% でも十分な制振効果を確認でき、特に長周期成分のエネルギーが大きい地震での低減効果が高かった。また、実験と同様、支持部材剛性が高いほど制振効果が高い結果となった。

参考文献

- 1) 斉藤 他 「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, Vol53.B, pp.53-66, 2007.3
- 2) 井上 他 「建築物の変位制御設計-地震に対する免震・長周期建物の設計法-」, 丸善出版, 2012.12
- 3) 荻野 他 「同調粘性マスダンパーを 3 層にわたって配置した超高層建築物の設計その 1~3」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造Ⅱ, pp.771-776, 2014.9