

スマートパッシブ制振ダンパを用いた 鉄道建築物の耐震性能評価

山田 聖治* 三木 広志* 清水 克将*

Seismic Performance Evaluation of Railway Buildings
with Smart Passive Damper

Seiji YAMADA Hiroshi MIKI Katsuyuki SHIMIZU

Since the mass ratio in the vertical direction is different, seismic response of the platform sheds of the elevated station increases in many cases. In this paper, with the purpose of reducing response of the platform sheds of the elevated station, we examined the applicability of the inertial mass damper to the elevated station. It was verified by using the lumped mass model that the seismic weight can be adjusted and the response of the platform sheds can be reduced by use of the inertial mass damper. However, under some conditions, there are cases where the response of the viaduct or sheds increases. Further, by analyzing the frame model, we confirmed that the reduction effect can be obtained by installing platform sheds of a knee brace type.

キーワード：高架駅，質量比，慣性質量ダンパ，振動台実験，慣性力制御，応答加速度低減

1. はじめに

制振ダンパを用いた鉄道建築物の耐震性能向上に関する研究として著者らは、まず橋上駅などの線路上空建築物を対象に、その主架構隅角部にパッシブ制振ダンパを配置した方杖型制振ダンパについて検討した¹⁾。4種類のパッシブ制振ダンパを対象に実験と解析を行い、効果の違いを明らかにするとともに、補強のできない下部構造への影響程度を検証している。また高架駅については、高架橋に比べて上家の重量が小さいことから、高架橋と上家の固有振動数が近い時に上家応答加速度や上家柱脚部せん断力が非常に大きくなる応答性状を示すことを明らかにし²⁾、方杖型制振ダンパによる耐震性能向上についても検討してきた³⁾。

一方近年では、従来のパッシブ制振ダンパに機械的な機構を組み込むことで、従来にない履歴形状を実現するスマートなパッシブ制振ダンパ（以下、スマートパッシブ制振ダンパ）の研究が盛んになされており、建築物における新たな耐震性能向上手法として期待されている。しかしながら、適用目的・設置位置に適合した制振ダンパの性能（履歴形状やエネルギー吸収機構など）の調整が重要である上に、鉄道建築物への検討事例はない状況にある。

以上を踏まえ本論文では、鉄道建築物に対するスマー

トパッシブ制振ダンパの適用性と効果の検証を目的に行った検討について報告する。具体的な検討対象は高架駅とし、鉛直方向の質量比を調整するために、慣性質量の付与が可能な制振ダンパ（以下、慣性質量ダンパ）^{例えは4) 5)}を適用することとした。そして、慣性質量ダンパの適用によって、高架上家の応答層せん断力係数や応答加速度の低減効果について評価したので、その結果について述べる。

2. 高架駅の応答性状

高架駅のように鉛直方向の質量比が異なる構造物の応答性状については文献2)が詳しく示しているが、3章以降との比較のためここで簡単に示す。

図1(a)、表1に示す質点モデルを用い、質量比（上家/高架橋）や固有振動数比（上家/高架橋）を変化させたときの上家の応答の違いについて解析した。解析モデルの諸元のうち、質量比は実際の高架駅を想定しているが、高架橋部分の質量については、3章で示す振動台実験で用いる試験体を想定して設定した。入力波はホワイトノイズとし、最大加速度を500galに基準化した波形を用いた。

得られた解析結果を図2, 3に示す。図2(a)では固有振動数比や質量比によって、最大応答層せん断力係数比（上家/高架橋）がどの程度変動するか示している。この図より、固有振動数比が1.0に近く、質量比が小さ

* 構造物技術研究部 建築研究室

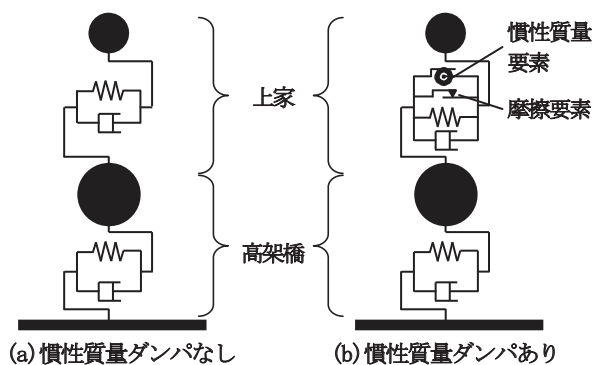
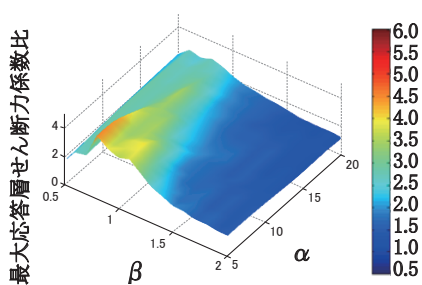


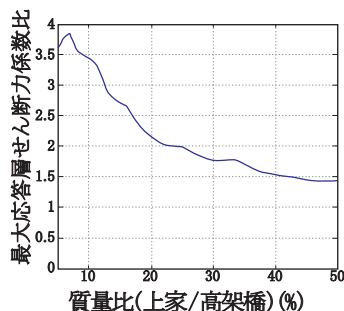
図1 質点モデル

表1 解析パラメータ

上家	
質量 (t)	高架橋の 5 ~ 20%
固有振動数 (Hz)	高架橋の 0.5 ~ 2.0 倍
減衰定数 (%)	3
摩擦力 (kN) (ダンパありのみ)	2.2
高架橋	
質量 (t)	20
固有振動数 (Hz)	2.55
減衰定数 (%)	5



(a) パラメータ:固有振動数比および質量比



(b) パラメータ:質量比のみ
固有振動数比=1.0に固定

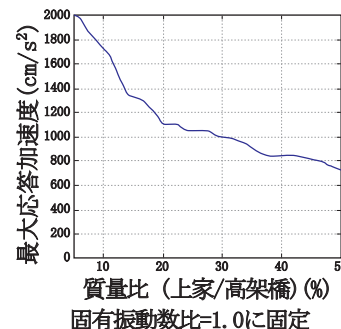


図3 上家の最大応答加速度

図2 最大応答層せん断力係数比 (上家/高架橋)

(α : 上家/高架橋の質量比 (%), β : 上家/高架橋の固有振動数比)

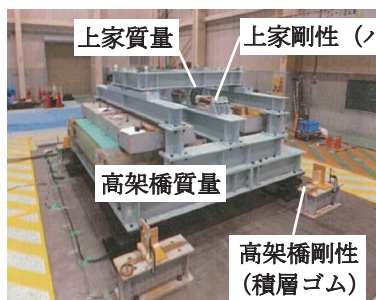
い時に非常に大きく増幅していることがわかる。また、通常共振が心配される固有振動数比 1.0 の場合について示した結果が図 2 (b) と図 3 であり、最大応答層せん断力係数比、最大応答加速度の両方において、質量比が小さい場合に増幅がより大きくなる傾向があることがわかる。一般的な高架駅の質量比は概ね 5 ~ 10% 程度であるから、これらの応答増幅について考慮しておくことが望ましいと言える。一方で、質量比がある程度大きくなると、応答増幅が急激に小さくなることもわかる。つまり、慣性質量ダンパによって地震時の慣性力に影響を与える重量 (以下、地震時重量) の調整が可能であれば、応答増幅を抑制することが期待される。

3. 鉛直方向に質量比が異なる二層構造物の振動台実験

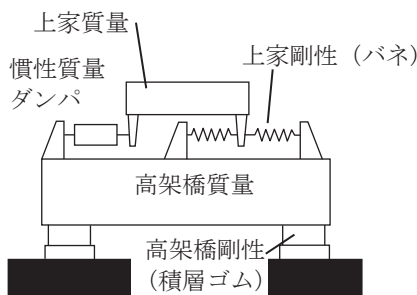
高架駅の応答性状を再現する大型模型を用いた振動台実験を行い、慣性質量ダンパの効果を実験的に検証した後、質点モデルによる解析的検証を実施した。

3.1 実験概要

試験体の全体写真と概要図を図 4 に示す。試験体は高架駅の高架橋と上家の挙動を模擬した 2 層試験体である。高架橋に相当する第 1 層は質量を 21.785t (実測値) で一定とし、4 基の積層ゴムで支持した。積層ゴムの水平剛性の合計は、メーカーによる単体試験結果で 5.207kN/mm (88mm 変形, $\gamma=175\%$ 時), 等価減衰定数は平均 9.2%



(a) 全体写真



(b) 概要図

図4 振動台実験概要



図5 慣性質量ダンパ設置状況

である。上家に相当する第2層は、実駅での上家/高架橋の質量比が概ね5~10%程度で、重い場合でも20%程度の事例しかないことを考慮し、上家部分のみの質量で0.97, 1.88, 3.71t(以下、それぞれ5%試験体, 10%試験体, 20%試験体)に設定した。また上家剛性は鋼製スプリングを用い、上家/高架橋の固有振動数比を任意に調整できるようにした。

慣性質量ダンパは、図4(b)および図5に示すように、上家と高架橋の間に上家剛性と並列に配置した。慣性質量は、高架橋相当のおよそ20tである。なお本実験では、直線運動を回転運動に変えて慣性質量効果を発揮する慣性質量ダンパで市場に流通しているものをベースとしている。ただし、本実験の目的である慣性質量効果を純粋に検証することを目的としているため、流通品に封入されている粘性体はあえて封入していない。そのため、メーカーによる単体試験結果では静止摩擦力が1.7kNとなり、同タイプの慣性質量ダンパに比べて小さめの値となっている。

入力地震動には、八戸EW波、神戸NS波、建築告示波(ランダム位相)を採用した。なお、試験体設置後に高架橋剛性を同定した結果、せん断ひずみが大さくない範囲での使用のためおよそ8.0~9.0kN/mmとなってお

り、試験体の固有振動数と入力地震動の卓越振動数が大きくずれる可能性があった。そのため、八戸EWと神戸NS波については2倍速で入力した。また入力の大きさは、上家/高架橋の質量比10%の試験体における高架橋と上家の相対変形が、15, 30, 45mmとなるように調整した(以下、それぞれレベル小, 中, 大)。計測項目は、各層の変位、加速度、せん断力(高架橋は積層ゴム直下の三分力計、上家は慣性質量ダンパおよびバネに設置したロードセル)である。

3.2 実験結果

3.2.1 慣性質量ダンパのダンパカー軸加速度関係

実験から得られた慣性質量ダンパのダンパカー軸加速度関係の一例として、20%試験体に八戸波を入力したときの結果を図6に示す。慣性質量ダンパは、軸加速度

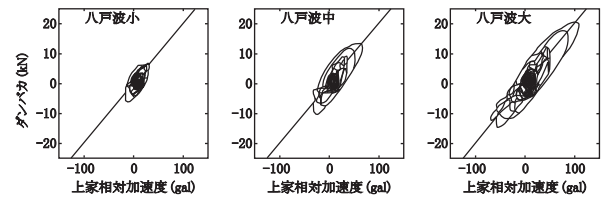


図6 ダンパカー軸加速度関係(質量比0.20時)

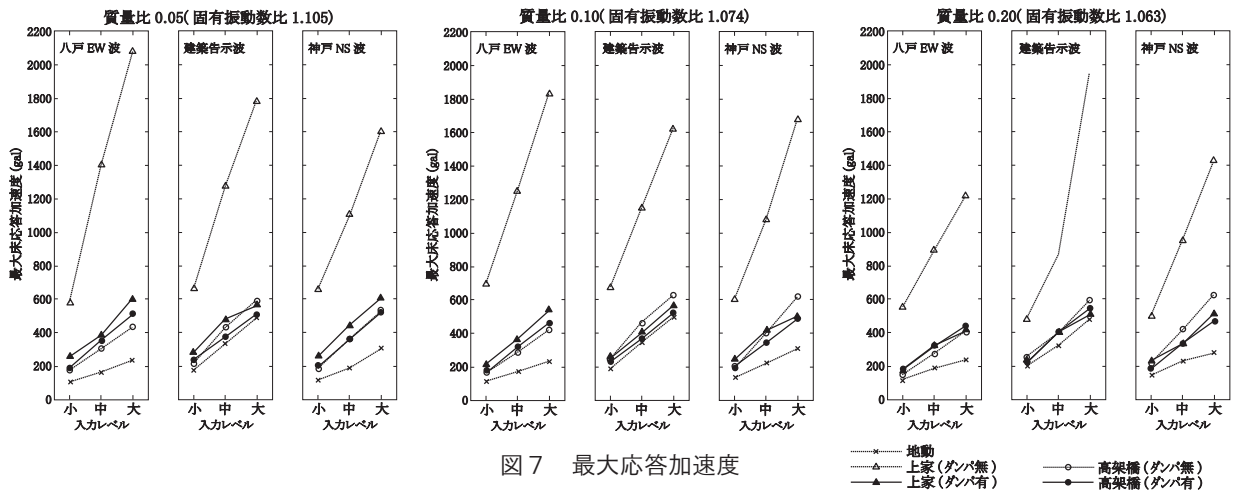


図7 最大応答加速度

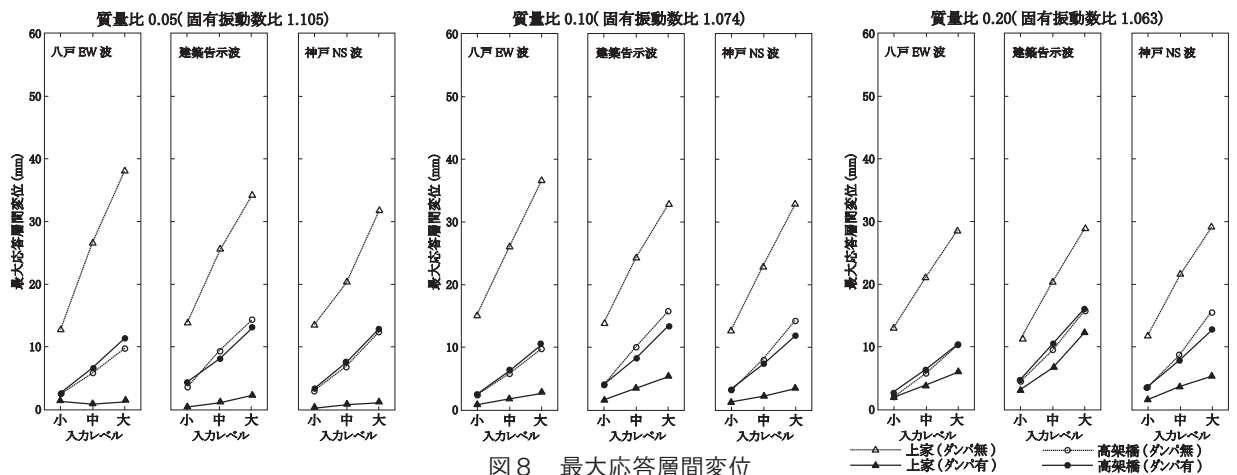


図8 最大応答層間変位

特集：構造物技術

(本実験では高架橋と上家の相対加速度)に比例してダンパ力を発揮することになる。そのため、比較のために図6中に慣性質量ダンパの設計値(0.20kN/(cm/s²))を用いた比例関係を直線で示すと、概ね設計値通りの比例関係が得られていることが確認でき、慣性質量ダンパの性能が発揮されていることが確認できた。

3.2.2 応答結果

5% 試験体, 10% 試験体, 20% 試験体それぞれにおいて、共振しやすい条件(上家/高架橋の固有振動数比をほぼ1.0)になるように設定した場合の、上家および高架橋の最大応答加速度と最大応答層間変位の結果を図7, 8に示す。慣性質量ダンパなしの場合、どちらの結果においても上家の応答値は高架橋の応答値に比べて大きく増幅している。また、増幅の程度については、全体的な傾向として上家質量が小さいほど大きくなっており、高架橋の応答にほとんど影響はない。これらの傾向は、2章および文献2)などでの解析的検討結果と同様であり、実験に用いた試験体によって、実高架駅の応答性状が模擬できてきていることがわかる。そして、慣性質量ダンパの有無で比較すると、慣性質量ダンパによって大きく応答低減されており、本実験の結果では、上家の応答加速度はおよそ半分程度まで低減できている。また、上家の層間変位については、最も効果のない場合でも4割程度まで低減している。一方、高架橋の応答は、どちらの応答値も慣性質量ダンパなしの場合と比べてあまり変動は見られず、若干であるものの応答値が上昇する場合も見られた。

3.3 解析的検証の追加

3.3.1 パラメータスタディ

実験では、高架橋と同程度の慣性質量を与える慣性質量ダンパを用いた。ここでは、より少ない慣性質量による効果を検証するために、図1(a)に慣性質量ダンパを追加した質点モデル図1(b)を用いてパラメータスタディを実施した。この際、実験時に実測された実験治具と慣性質量ダンパの静止摩擦力の合計2.2kNをモデル化している。また入力波は、2章と同様に500galに基準化したホワイトノイズを用いた。

慣性質量ダンパありの場合の上家/高架橋の最大応答層せん断力係数比について、慣性質量を変化させた場合の結果を図9に示す。固有振動数比が1.0の近くでは、慣性質量ダンパなしと比較して値が小さくなっており、慣性質量ダンパの効果が確認できる。また、慣性質量が大きいほどより効果が高い。一方、固有振動数比が1.0より大きい場合において、値が大きくなる場合もあることがわかる。これは、慣性質量によって上家固有振動数の低下が生じ、結果として高架橋と共振するからである。ただし、慣性質量が増えるにつれて、地震時重量の比が大きくなるため、共振時の最大応答層せん断力係数比の増大はそれほど大きくはならない。

次に、慣性質量ダンパの有無による上家の最大応答絶対加速度の変化率について比較した結果を図10に示す。せん断力係数と同様の傾向があり、固有振動数比1.0近くや1.0より小さい場合では応答低減し、慣性質量が大きい方が効果的な傾向が見られる。また、固有振動数比

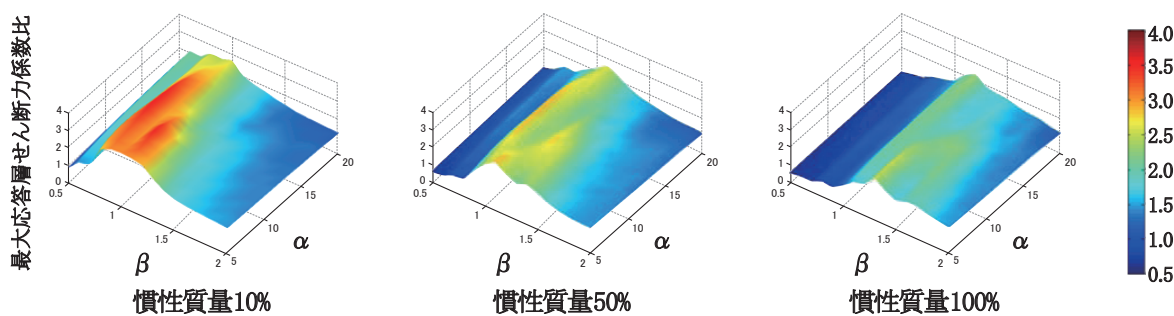


図9 最大応答層せん断力係数比(上家/高架橋)

(α : 上家/高架橋の質量比(%), β : 上家/高架橋の固有振動数比)

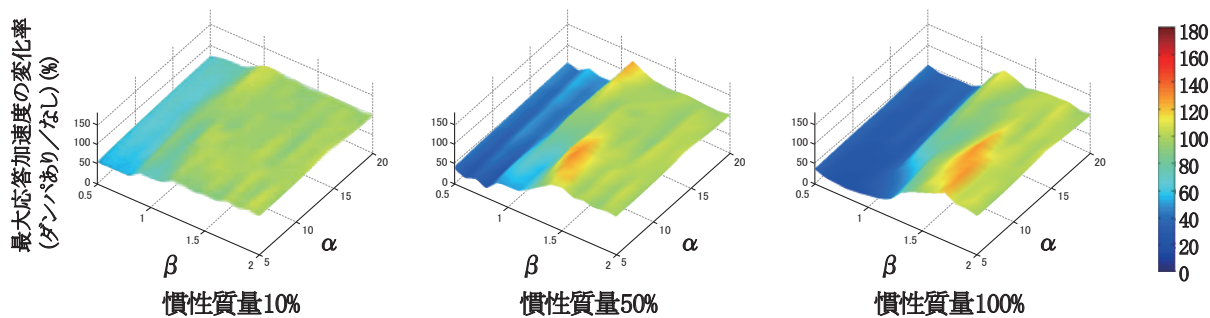


図10 上家の最大応答加速度の変化率

(α : 上家/高架橋の質量比(%), β : 上家/高架橋の固有振動数比)

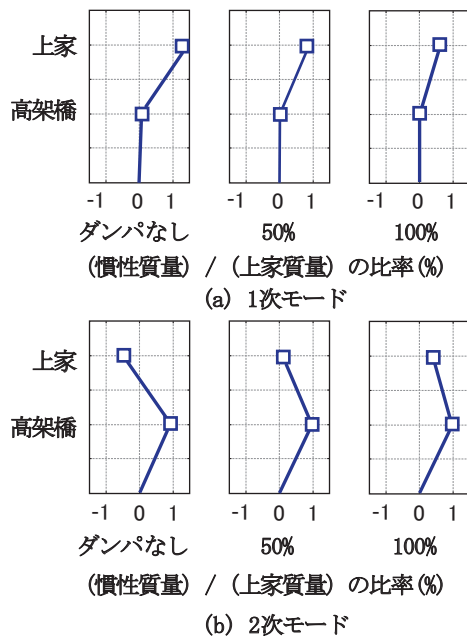


図11 慣性質量ダンパ設置時の刺激関数

が1.0より大きい時に応答増幅するケースが見られる。

3.3.2 刺激関数

ここまでで実験および解析で検証した結果について、刺激関数を導出して確認する。まず、慣性質量ダンパを層間に設置した2層構造物の自由振動時の運動方程式は、減衰項と摩擦による影響を無視すると(1)式となる。

$$\begin{bmatrix} m_1 + m_d & -m_d \\ -m_d & m_2 + m_d \end{bmatrix} \{\ddot{y}\} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \{y\} = \{0\} \quad (1)$$

ここで、 m_1, m_2 : 第1, 2層の質量, k_1, k_2 : 第1, 2層の層剛性, m_d : 慣性質量, y : 層変形である。

(1)式を用い、図1(b)に示す質点モデルにおいて、上家質量を2.0t(質量比10%)とした場合を例として、慣性質量の量を変化させた時の刺激関数を図11に示す。慣性質量を大きくしていくことで、1次モードへの刺激関数が小さくなり、2次モードでは高架橋の応答が若干大きくなるものの、上家と高架橋の層間応答が刺激されなくなっていくことが読み取れる。この結果から、慣性質量ダンパによって高架橋の上家の応答が低減していくことが確認できる。

4. 骨組モデルを用いた地震応答解析

前章まででは、高架駅のように鉛直方向の質量比が異なる構造物を模擬した2質点モデルを対象に検討を行い、質量の軽い2層目の応答を、慣性質量ダンパによって抑制できることを示してきた。しかしながら、実際の高架駅に設置する場合には、鉄道運行や旅客流動のために層間に設置できず、方杖型に設置する可能性が高い。そこで以下では、実駅を想定した2次元骨組モデルを用

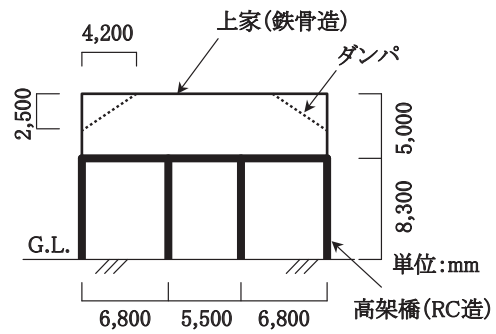


図12 解析モデル

表2 固有周期(単位:s)

モード	上家のみ	高架橋のみ	連成モデル
			無補強
1次	0.55	0.33	0.56
2次	—	—	0.33

表3 慣性質量ダンパの仕様

慣性質量 (kN/(cm/s ²))	0.5
粘性減衰 (kN/(cm/s))	0.233
取付部剛性 (kN/cm)	1.37
制限荷重 (kN)	150

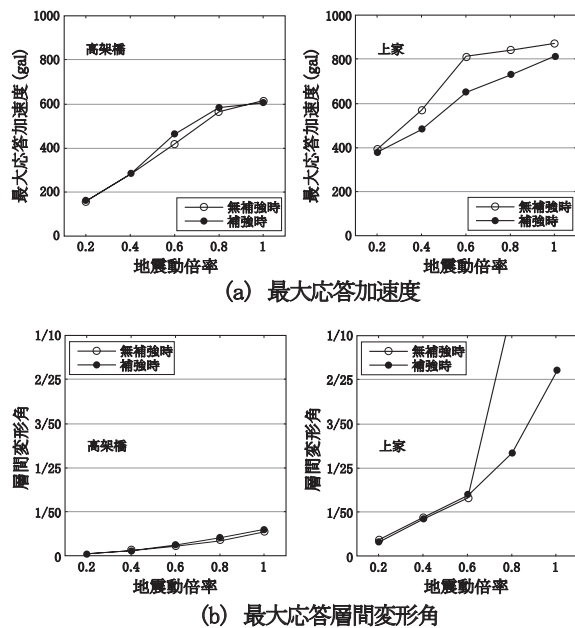


図13 最大応答値

いて、慣性質量ダンパを方杖型に設置した場合の解析を行い、その効果を確認する。

4.1 解析モデル

解析対象は、図12および表2に示すように全覆い型上家を有する高架駅とした。解析モデルは2次元骨組モデルであり、高架橋柱脚で地盤に固定、上家柱脚と高架橋の接合部は半固定(ベースプレートとアンカーボルトによる回転バネを考慮)とした。高架橋は1999年版鉄

特集：構造物技術

道土木設計標準⁶⁾に準拠した1層の鉄筋コンクリート造とした。上家は鉄骨造とし、上家だけのモデルに対して層せん断力係数0.25の水平力作用時に部材が許容応力度以下、かつ層間変形角が概ね1/200になるように設定した。高架橋に対する上家の質量比は5.4%である。減衰条件はひずみエネルギー比例型として、部材別に設定(高架橋3%、上家2%)した。

解析パラメータは地震動倍率とし、入力地震動は建築告示波(極稀)の第2種地盤の増幅を考慮した地表波に対して、地震動倍率を0.2~1.0とした。

4.2 慣性質量ダンパ

慣性質量ダンパ単体の仕様は表3に示すものとし、前述のように、旅客や鉄道運行の支障にならない上家隅角部に方杖型に設置している。また、3章までの検証とは異なり、慣性質量ダンパには150kNで作用する軸力制限機構を設定している。これは、慣性質量ダンパによるダンパ軸力によって、反力を受ける構造物(上家の梁・柱)が損傷しないための設定である。

4.3 解析結果

最大応答加速度と最大応答層間変形角を図13に示す。

まず上家に関しては、無補強時では、地震動倍率を大きくするにつれて層間変形角が非常に大きくなり、応答加速度も上昇していることがわかる。その一方慣性質量ダンパ補強時では、地震動倍率0.6倍までは層間変形角はあまり変化がなく、応答加速度の低減効果が少しずつ大きくなっている。地震動倍率0.8倍と1.0倍においても低減効果はあるものの0.6倍の時に比べると相対的に効果が低下している。これは、0.8倍と1.0倍では慣性質量ダンパの軸力制限の範囲に入るため、入力地震動の大ききに対する慣性質量ダンパ力としては不足するためであると考えられる。

次に高架橋については、層間変形角についてはほぼ変化がなく、応答加速度については、慣性質量ダンパがもつとも効果的に作用した地震動倍率0.6倍の時には1.2倍程度まで上昇している。また0.8倍と1.0倍時には、慣性質量効果が減少したために、応答加速度の差が少なくなったものと考えられる。

以上の解析結果より、慣性質量ダンパによる効果は方杖型設置の場合でも発揮されることが確認された。

5. まとめ

鉄道建築物に対するスマートパッシブ制振ダンパの適用性と効果の検証の一つとして、鉛直方向に質量比が大

きく異なる高架駅上家の応答低減を対象に、慣性質量ダンパの適用性を検討し、以下の知見を得た。

- ・ 振動台実験による検討では、慣性質量ダンパの慣性質量が上家質量に対して非常に大きい条件ではあるが、慣性質量ダンパによる上家の応答低減効果を確認し、その際、高架橋の応答が若干上昇する場面があることを確認した。
- ・ 上記実験を補完した解析検討では、より軽量の慣性質量ダンパでも鉛直方向の地震時重量が調整され、上家の応答を低減できることを確認した。ただし、対象構造物と慣性質量ダンパの条件によっては、上家および高架橋の応答が上昇する場面があることを確認した。
- ・ 2次元フレーム解析によって、方杖型制振ダンパとして適用性を検証し、幾何学的変形の小さい方杖型でも効果が発揮できることを確認した。ただし、軸力制限機構によって慣性質量効果が相対的に減少する場合もある。

今後引き続き検証を続け、検討内容の深度化を実施していく予定としている。

本研究は国土交通省による補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 山田聖治, 清水克将, 武居泰: 方杖型制振ダンパによる線路上空建築物の耐震補強効果, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.29-34, 2011
- 2) 山田聖治, 武居泰, 清水克将: 高架橋旅客上家の地震応答特性と耐震設計法の提案, 鉄道総研報告, Vol.22, No.10, pp.23-28, 2008
- 3) 清水克将, 山田聖治, 武居泰: 高架橋-旅客上家間の相互作用を考慮した応答性状に関する研究(その3) 上家の構造特性が連成挙動に与える影響, 日本建築学会(東北)学術講演梗概集, B-2, pp.739-740, 2009
- 4) 杉村義文, 五十子幸樹, 齊藤賢二, 井上範夫: 同調粘性マス制振ダンパを有する多層建築構造物の地震時における最適応答制御設計: 複数のモード応答を制御対象とした設計, 日本建築学会(関東)学術講演梗概集, B-1, pp. 285-286, 2011
- 5) 古橋剛, 石丸辰治: 慣性接続要素による多質点振動系の応答制御: 慣性接続要素による応答制御に関する研究 その2, 日本建築学会構造系論文集, 第601号, pp.83-90, 2006
- 6) 鉄道総合技術研究所編集: 鉄道構造物等設計標準・解説 耐震設計, 1999