

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴型・粘性型ダンパーをハイブリッドに配置した10層フレームの振動台実験
Title	SHAKING TABLE TESTS OF 10TH STORY STEEL MODEL USING COMBINATIONS OF HYSTERETIC AND VISCOUS DAMPERS
著者(和文)	石田 琢志, 佐藤 大樹, 北村春幸, 佐々木和彦, 宮崎 充, 吉江慶祐, 藤田 隆史
Authors	Takushi ISHIDA, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Kazuhiko Sasaki, Mitsuru MIYAZAKI, Takafumi FUJITA
出典 / Citation	構造工学論文集, Vol. 55B, , pp. 507-515
Citation(English)	Journal of structural engineering, Vol. 55B, , pp. 507-515
発行日 / Pub. date	2009, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706247

履歴型・粘性型ダンパーをハイブリッドに配置した 10層フレームの振動台実験

SHAKING TABLE TESTS OF 10TH STORY STEEL MODEL USING COMBINATIONS OF HYSTERETIC AND VISCOUS DAMPERS

石田 琢志*, 佐藤 大樹**, 北村 春幸***, 佐々木 和彦****, 宮崎 充****,
吉江 慶祐*****, 石井 正人*****, 藤田 隆史*****

Takushi ISHIDA, Daiki SATO, Haruyuki KITAMURA, Kazuhiko SASAKI, Mitsuru MIYAZAKI
Keisuke YOSHIE, Masato ISHII and Takafumi FUJITA

The energy absorbing system in the passive control structure dissipates the energy through the deformation and the velocity of the story caused by the earthquake. It is divided into the two kinds which are the hysteretic and viscous dampers. It has been recognized that these passive control devices are effective to the shear deformation of structure. However, in case of high aspect ratio structures, it is thought that these ones cannot function effectively in the upper floor when bending deformation occurs predominant. As an effective technique of the vibration control, a hybrid passive control structure, which is the hysteretic and viscous dampers are using together in a vertical direction has been proposed in the past study. In that study, the combination-effects by used the hysteretic and viscous dampers together is admitted by numerical analysis for the 40th story steel structural building. In this study, the shaking table tests of 10th story steel model are carried out to show the combination-effects. Moreover, the change in the response characteristic by the difference of the arrangement pattern of the passive control devices is investigated.

Keywords: Energy Absorbing System, Hysteretic Damper, Viscous Damper, Hybrid Passive Control Structure, Shaking Table Tests
エネルギー吸収機構, 履歴型ダンパー, 粘性型ダンパー, ハイブリッド制振構造, 振動台実験

1. 序

1995年の兵庫県南部地震を契機として、極降伏点鋼や鉛等の金属系材料を用いた履歴型ダンパーや、シリコン系の粘性材料を利用した粘性型ダンパーを用いて地震動による応答を低減させようとする、パッシブ系制振構造の一部であるエネルギー吸収機構の開発が性能設計の切り札として、普及、拡大するようになった¹⁾。エネルギー吸収機構は構造骨組に生ずる層間変形を利用して、制振デバイスに変位や速度を与えて地震エネルギーの吸収を図るもので、変位依存型である履歴型ダンパーと、速度依存型である粘性型ダンパーの2種に大別することができる。

近年開発の進む超高層建物において、これらエネルギー吸収機構に対する需要・要求は高い。実際に、日本建築センター等で評定を取得した超高層鉄骨造(CFT造を含む)では制振デバイスを組み込んだものが年々増加し、平成11年度にはその割合が90%を超えている²⁾。しかしながら、これらの制振デバイスは、構造骨組に生じるせん断変形に対しては有効であるが、アスペクト比の高い高層建物では、全体曲げ変形の影響により実効変形比(最大層間変位に対

するダンパー水平方向の最大値の比率)が低下し、高い制振効果が発揮できないと考えられている。渥美、北村ら³⁾は、高さ方向に履歴型、粘性型ダンパーの併用配置(ハイブリッド配置)した、40階鋼構造建物を対象とした数値解析から、両制振ダンパー併用による制振効果が向上(併用効果)することを報告している³⁾。この要因として、両制振ダンパーが異なる時刻に最大減衰力に達することで、架構の全体曲げ変形が抑制されダンパーの実効変形比が増加することが考えられるが、明確な検証はなされていない。

そこで、本研究では、せん断型試験体を用いた振動台実験を行い、曲げ型構造物で確認された併用効果が、せん断型構造物においても同様であるかを実験的に検証、および併用効果のメカニズムを解明することを目的とする。本論文では、実験により得られた併用効果、および制振デバイスの配置パターンの違いによる応答特性の変化について報告する。また、併用効果の理論的解明のために、実験をシミュレートする解析モデルの作成を行い、その精度を検証する。その際、メカニズム解明のための基礎データを得るために、実験では計測できなかった項目における併用効果の検討も行う。

* 東京理科大学大学院理工学研究科 大学院生

** 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

*** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

**** オイレス工業(株)

***** (株)日建設計

***** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Oiles Corporation Co. Ltd.

Nikken Sekkei Co. Ltd.

Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

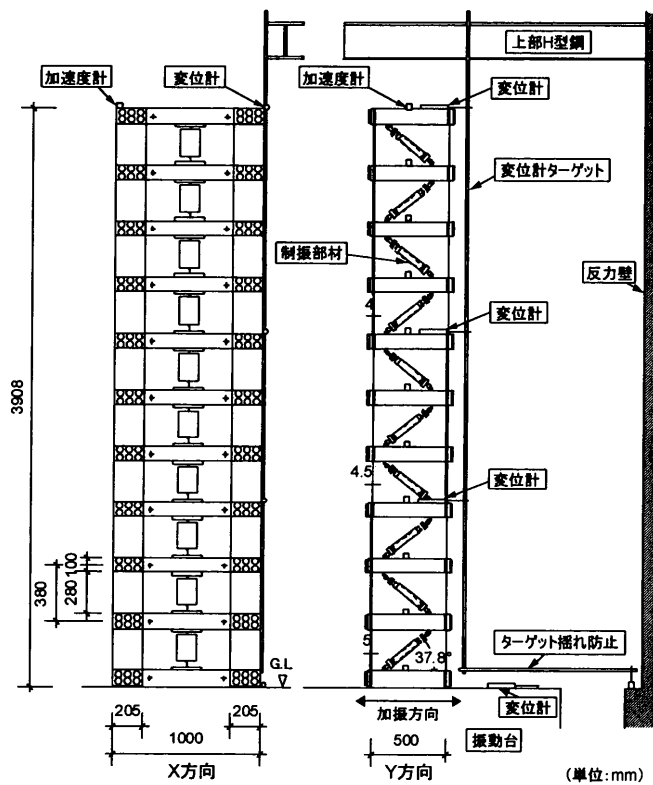


図1. 試験体概要

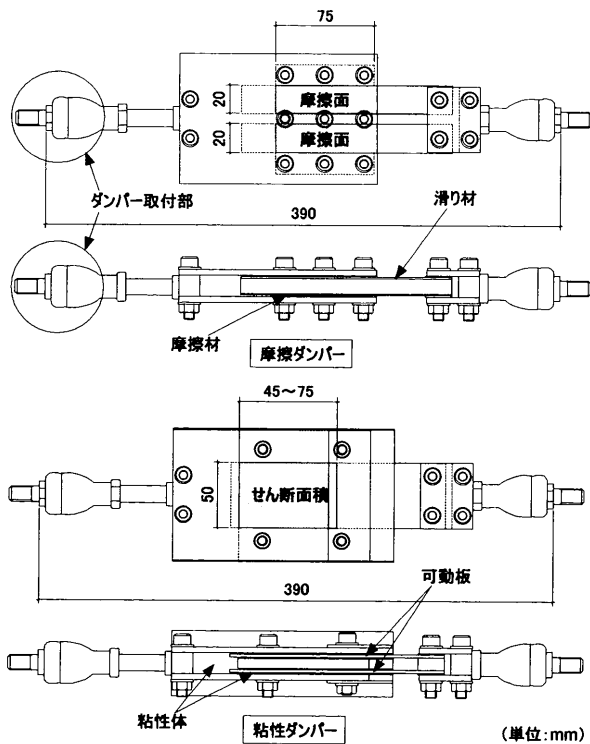


図2. 制振デバイス概要

2. 試験体および実験概要

10層フレーム試験体の概要を図1に示す。主架構（ダンパー非設置時）の総重量は43.6kN、各階の平面構成は1000mm×500mm、階高は380mmである。柱材は1~3, 4~6, 7~11階で板厚の異なる3種類の板バネを用い、床板については全階に厚さ100mmの鋼板を用いる。制振デバイスは取付角度 $\theta=37.8^\circ$ の勾配でブレース形式に交互に配置し、鋼板間に金属系摩擦材と滑り材を設置し、ボルト締め付けによる面圧力で得られる摩擦力を減衰力とした摩擦ダンパー

と、方形の容器に高粘度粘性体と可動板を設置し、容器と可動板の隙間に生じる粘性せん断抗力を減衰力とした粘性ダンパーをそれぞれ使用する（図2）。制振デバイスの配置パターンが異なる全7モデルに対し振動台実験を行う。表1に実験に使用したモデルの名称を示す。また、振動台は東京大学生産技術研究所のものを使用した。

計測機器は、加速度計を全階に、変位計を1, 4, 7, 11階に設置し、それぞれ絶対加速度、絶対変位の測定を行う。サンプリング間隔は、計測装置の性能上 $\Delta t = 0.01s$ で行う。その実験精度に関しては、各実験モデルにおける弾性1次固有周期は、最も短いHHHモデルにおいても0.27秒であるため、本サンプリング間隔で十分であると判断した。ダンパー荷重およびダンパー変位は、全層の制振デバイスに設置したロードセルおよび変位計によりそれぞれ測定する。

実験に用いる入力地震波は、位相特性 HACHINOHE EW, JMA KOBE NS および TOMAKOMAI NS の位相特性をもつ告示波3波について、いずれの実験ケースにおいても試験体の1次固有周期が速度応答スペクトルの一定の領域に入るようそれぞれの時間軸を1/4に圧縮し、コーナー周期 $T_c = 0.16s$ とした模擬地震動を用いる。作成された3波の模擬地震動の速度応答スペクトルを $S_v = 10, 20, 40cm/s$ の3つのレベルに設定し、計9波の地震波により振動台実験を行う。表2に入力地震波の諸元を示す。なお、表中の t_0 は文献4)の手法により求めた継続時間評価値である。また、例として入力地震波 $S_v = 20cm/s$ における加速度の速度応答スペクトル（減衰定数 $h = 0.05$ ）および時刻歴波形を図3, 4に示す。

表1. モデル名称

Floor	HHH	HH0	HHV	HVV	VVV	VVH	VHH
7~10F	HD	—	VD	VD	VD	VD	VD
4~6F	HD	HD	HD	VD	VD	VD	HD
1~3F	HD	HD	HD	HD	VD	HD	HD

HD: 履歴型ダンパー, VD: 粘性型ダンパー

表2. 入力地震波の諸元

位相特性	S_v (cm/s)	入力波名	継続時間 t_0 (s)	最大加速度 (cm/s ²)
HACHINOHE EW (1968)	10	HACHI10	25.74	153.58
	20	HACHI20		307.15
	40	HACHI40		614.30
JMA KOBE NS (1995)	10	KOBE10	4.64	195.56
	20	KOBE20		391.12
	40	KOBE40		782.24
TOMAKOMAI NS (2003)	10	TOMA10	27.44	182.31
	20	TOMA20		364.62
	40	TOMA40		729.24

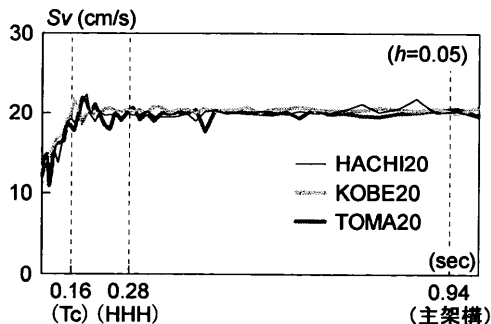


図3. 入力地震波の速度応答スペクトル($S_v=20$)

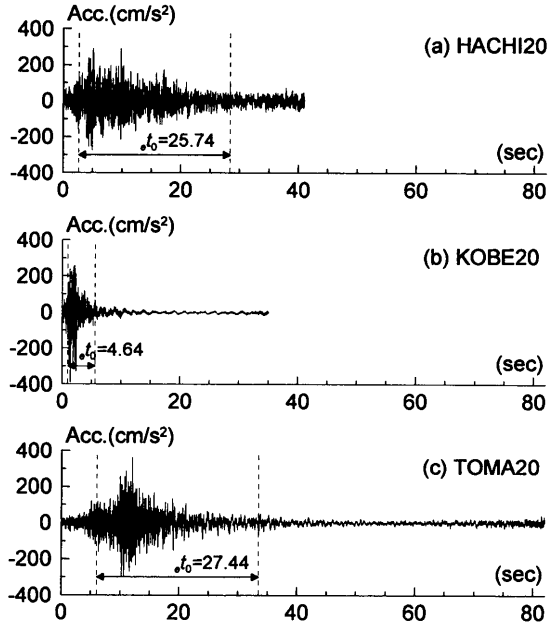


図4. 入力地震波の加速度時刻歴波形(Sv=20 cm/s)

3. 制振デバイス諸元の検討

主架構および制振デバイスをモデル化して時刻歴解析を行うことにより、実験で用いるダンパー量の検討を行う。入力波はHACHI20とし、部材レベルモデル（平面）で解析を行う。その際、制振デバイスの性能評価のため、主架構の減衰定数 $h=0\%$ としている。各層のダンパー量は

は板バネの剛性分布に合わせた3段階分布とし（図5）、 A_i 分布に基づく設計用層せん断力 Q_i を第1層で基準化した比率（最適分布）に各制振デバイスの第1層ダンパー量を乗じて求める。

3.1 履歴型ダンパーのモデル化

履歴型ダンパーのモデル化は、第1層ダンパーにおいて、ダンパーの水平剛性 ${}_H K_{D1}$ を主架構の水平剛性 ${}_H K_{F1}$ の10倍とし、2次剛性を持たない完全弾塑性モデルとして行った。これより、第1層ダンパーの軸剛性 ${}_B K_{D1}$ は次式により表すことができる。

$${}_B K_{D1} = \frac{{}_H K_{D1}}{\cos^2 \theta} = \frac{10 {}_H K_{F1}}{\cos^2 \theta} \quad (1)$$

ただし、 θ はダンパーの取り付け角度である。また、第1層ダンパーの断面積 A_1 は、ヤング係数 E ($2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)、第1層ダンパーの軸剛性 ${}_B K_{D1}$ 、およびダンパー長さ L を用いて以下の式で示される。

$$A_1 = \frac{{}_B K_{D1} \cdot L}{E} \quad (2)$$

以上より、第1層の降伏応力度 σ_{y1} は、第1層ダンパーの降伏せん断力係数 ${}_s \alpha_{y1}$ をパラメータとする次式で表すことができる。

$$\sigma_{y1} = \frac{{}_s Q_{y1}}{\cos \theta} \cdot \frac{1}{A_1} = \frac{Mg \cdot E \cdot \cos \theta}{10 {}_H K_{F1} \cdot L} \cdot {}_s \alpha_{y1} \quad (3)$$

ここで、 Mg は主架構の総重量、 ${}_s Q_{y1}$ は第1層ダンパーの降伏せん断

力である。なお、本研究では、摩擦ダンパーを用いているため、ダンパーの降伏せん断力とは滑り荷重を意味する。降伏せん断力係数 ${}_s \alpha_{y1}$ をダンパー量としてケーススタディを行い、解析パラメータである降伏応力度 σ_{y1} を算出する。

3.2 粘性型ダンパーのモデル化

粘性型ダンパーには、線形剛性、非線形粘性をもつ Kelvin-Voigt モデルを用いる。第1層ダンパーにおいて、粘性抵抗力 F_{D1} は、1次の粘性係数 ${}_1 C_{D1}$ 、2次の粘性係数 ${}_2 C_{D1}$ およびダンパーの変形速度 V_{D1} を用いて以下のように示される⁶⁾。

$$F_{D1} = {}_1 C_{D1} \cdot V_{D1}^{1.0} \quad \left[\frac{V_{D1}}{d} < 1 \right] \quad (4)$$

$$F_{D1} = {}_2 C_{D1} \cdot V_{D1}^{0.59} \quad \left[\frac{V_{D1}}{d} \geq 1 \right] \quad (5)$$

d はせん断すき間であり、ここでは $d=0.1 \text{ cm}$ と定める。第1層ダンパーの粘性係数 ${}_1 C_{D1}$ 、 ${}_2 C_{D1}$ は次式によりそれぞれ表される⁶⁾。

$${}_1 C_{D1} = \frac{4.12 \exp(-0.043 \cdot t)}{d^{1.0}} S_1 \quad (6)$$

$${}_2 C_{D1} = \frac{4.12 \exp(-0.043 \cdot t)}{d^{0.59}} S_1 \quad (7)$$

ここで、 t は粘性体温度であり、 $t=20^\circ \text{C}$ として解析を行う。式(4)~(7)より、粘性抵抗力 F_{D1} はせん断面積 S_1 をパラメータとして決定される値であり、これより、第1層ダンパーのせん断面積 S_1 をダンパー量と定めケーススタディを行う。ダンパーの貯蔵剛性 K_D については文献(6)の3層フレーム加振試験により得られた値を用いる。

3.3 最適ダンパー量の検討

本論文は、履歴型、粘性型ダンパーのハイブリッド配置による併用効果の実験的検証を主眼としている。そのため、各制振デバイスのダンパー量は互いに等価な量ではなく、併用効果をより顕著に確認できる量を採用することとする。図6,7にHHH, VVVモデルにおける、 ${}_s \alpha_{y1}$, S_1 をそれぞれパラメータとした際の層せん断力応答および実効変形比（最大層間変位に対する、ダンパー水平方向変位の最大値の比率）の変化を示す。

図6(a)より、HHHモデルでは、層せん断力応答において、応答が頭打ちとなる量（最適値）が存在することがわかる。また、図7(a)の実効変形比では、本誌検体のようなせん断型モデルにおいても、特に上層部で実効変形比が低下することが確認できる。一方、VVVモデルでは、図7(b)より、実効変形比はほぼ一定の応答を示す。このことから、併用効果を実験的に明らかにするという本研究の目的を達成しうる試験体とするためには、履歴型ダンパー量は実効変形比の低下率が大きい量を選択する必要があると判断した。これより、履歴型ダンパー量は ${}_s \alpha_{y1} = 0.02, 0.04$ の2つを選定する。VVVモデルにおいては、図6(b)より、最適値が存在しないため、既往の研究⁶⁾から履歴型ダンパー量に対し適当と思われる $S_1 = 75, 100, 150, 200 \text{ cm}^2$ の4つを類推した。以上により選定された各ダンパー量をHHVモデルに投入し、最も併用効果の見られるダンパー量の組み合わせを決定する。その結果、下層部での層間変位の応答低減や、上層部における加速度応答低減、および実効変形比の最も高い増加を示した履歴型ダンパー量 ${}_s \alpha_{y1} = 0.04$ 、粘性型ダンパー量 $S_1 = 150 \text{ cm}^2$ の組み合わせがもっと最適であると判断した（図8）。表3に決定した各層のダンパー投入量をそれぞれ示す。

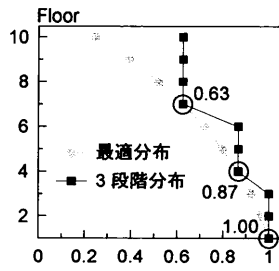


図5. 各層のダンパー量比率

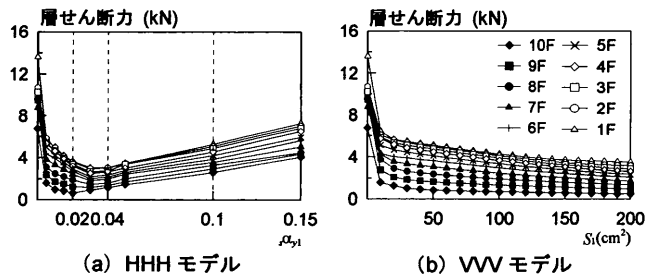


図6. α_{01}, S_1 変化時の層せん断力応答の変化

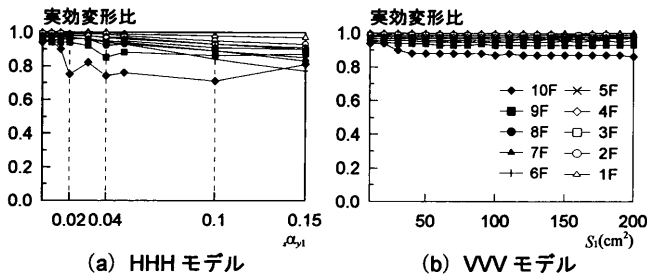


図7. α_{01}, S_1 変化時の実効変形比の変化

4. ダンパー単体試験

制振デバイスの性能を把握するため、振動台実験に先立ちダンパー単体試験を行った。

履歴型ダンパーは、降伏せん断力係数 $\alpha_{01} = 0.04$ に設定した第1層ダンパーについてのみ、最大振幅を 1, 2, 4 mm の3種類、振動数を 0.1, 0.5, 1.0 Hz の3種類に制御した正弦波の計9種類を入力し単体試験を行った。

粘性型ダンパーは、粘性体温度 $t = 20^\circ\text{C}$ 、せん断すき間 $d = 0.1$ cm と設定した全10層に配置するダンパーについて、振動数を 1.0 Hz、最大振幅を 2, 4 mm の2種類に変位制御した正弦波を入力し、計20通りの単体試験を行った。表4に最大振幅を 2mm に制御した単体試験における粘性型ダンパーの諸元を示す。各層のせん断面積 S については、単体試験から得られた最大減衰力と設計値 $S_1 = 150$ cm^2 から求まる最大減衰力の比率により算出した。

表4. 粘性型ダンパーの諸元 (最大振幅: 2mm)

Floor	せん断面積 S (cm^2)	せん断すき間 d (cm)	粘性体温度 t ($^\circ\text{C}$)	貯蔵剛性 K_D (kN/m)
10	95.3	0.1	22.8	137.2
9	95.3	0.1	22.8	134.9
8	103.7	0.1	24.6	132.6
7	105.5	0.1	24.8	133.9
6	131.1	0.1	24.0	179.2
5	133.7	0.1	23.0	205.7
4	140.2	0.1	23.2	204.1
3	153.0	0.1	23.0	233.6
2	166.5	0.1	23.3	243.6
1	171.0	0.1	25.2	217.3

5. 振動台実験結果

振動台実験結果より、ハイブリッド配置による併用効果の実証および配置パターンの違い (表1) による応答特性の変化を考察する。

5.1 評価方法

評価は絶対加速度、相対変位、エネルギー分担率の3項目について行う。ここで、エネルギー分担率とは、制振デバイスによる各層

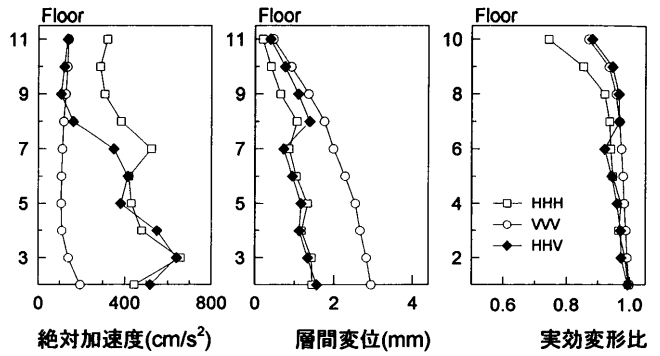


図8. 応答比較 ($\alpha_{01} = 0.04, S_1 = 150\text{cm}^2$)

表3. 各層のダンパー投入量

Floor	履歴型ダンパー σ_y (N/mm^2)	粘性型ダンパー S (cm^2)
7~10F	3.74	93.9
4~6F	5.18	129.9
1~3F	5.98	150.0

のエネルギー吸収量を全層のエネルギー吸収量の合計で除した値である。なお、最大値による評価は応答のばらつきが大きく、各モデルの応答特性を明確に把握できないため、絶対加速度、相対変位についてはRMS (二乗平均平方根) を用いて評価する。また、変位計は1, 4, 7, 11階にのみ設置しているため、全階の相対変位は加速度計より得られた計測値を周波数領域で二階積分して求めた。その際に0.2~30Hzのバンドパスフィルタをかけている。積分値の精度に関しては、変位計より得られた計測値との検証から、良好な精度であることを確認している (図9)。また、エネルギー吸収量に関しては、各層の制振デバイスから得られる履歴曲線の台形積分により算出した。

ここで、併用による効果を定量化するため、加速度、変位の両項目を包括した評価指標として併用効果評価値 R_y (y : モデル名称) を定義する。 $A R_y, D R_y$ は、各ケースの応答絶対加速度、相対変位において、併用モデルと同種のダンパーを全層に単独配置している HHH, VVV モデル各層の応答を基準として算出される応答倍率を平均化した値であり、 R_y は $A R_y, D R_y$ 両者の平均値として求められる。併用モデルと単独配置モデルの個々の制振デバイスの性能を相対的に評価することで、ハイブリッド配置による併用効果の検証を行う。これより、 R_y が基準値 1.0 を下回るものを併用効果があると判断する。例として、HHV モデルにおける R_{HHV} の算出方法を示す。 $A x_{HHV}(i), D x_{HHV}(i)$ を、HHV モデルにおける i 層の応答加速度および変位の RMS 値とすると、 R_{HHV} は、 $A R_{HHV}, D R_{HHV}$ から次式により表される。

$$A R_{HHV} = \frac{\sum_{i=1}^6 A x_{HHV}(i) + \sum_{i=7}^{10} A x_{HHV}(i)}{10 A x_{HHH}(i)} \quad (8)$$

$$D R_{HHV} = \frac{\sum_{i=1}^6 D x_{HHV}(i) + \sum_{i=7}^{10} D x_{HHV}(i)}{10 D x_{HHH}(i)} \quad (9)$$

$$R_{HHV} = \frac{A R_{HHV} + D R_{HHV}}{2} \quad (10)$$

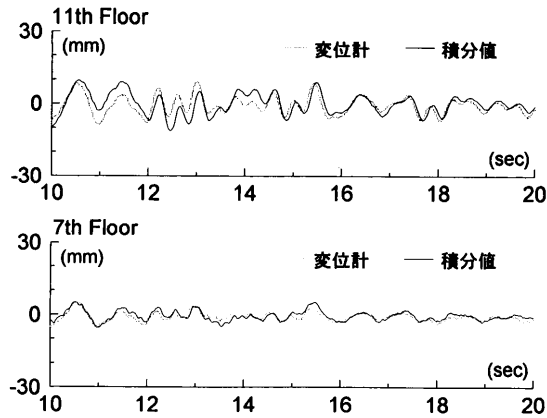


図 9. 積分精度誤差

5. 2 HHH, VVV, HHV モデルの応答比較

TOMA20 入力時における HHH, VVV, HHV の 3 モデルの絶対加速度, 相対変位, エネルギー分担率の高さ方向分布を図 10 に, 各モデルの 1, 4, 7, 10 層における制振デバイスの履歴曲線を図 11 にそれぞれ示す。図 10 より, 履歴型ダンパーを単独配置した HHH モデルは変位, 粘性型ダンパーを単独配置した VVV モデルは加速度に対してそれぞれ高い制振効果をもつが, 単独配置した場合には加速度, 変位一方の応答低減効果は低く, 両者に対して高い制振効果を同時に発揮することは困難であると言える。併用 HHV モデルでは, 加速度において VVV モデルに近接するように上層部での低減効果が見られ, 変位における応答は最も小さくなる。また, 上層部におけるエネルギー分担率の増大から, HHH モデルに比べ HHV モデルは, 粘性型ダンパーの配置により全層にわたり効率良くエネルギー吸収を行う構造となることが確認できる。以上のように HHV モデルの応答特性を把握した。履歴型, 粘性型ダンパーを単独配置したモデルはそれぞれ加速度, 変位の一方にのみ高い制振効果をもつが, 他方の応答を低減しにくいという特性をもつ。しかし, HHV モデルは, 加速度と変位の両者に対して高い制振効果を同時に発揮するという特性をもつことが確認された。

実験から得られた HHV モデルの加速度, 変位の両者に対する併用効果を, 併用効果評価値 R_{HHV} を用いた応答評価法により定量的に把握する。表 5 に各地震波入力時における $A_{R_{HHV}}, D_{R_{HHV}}, R_{HHV}$ の値を示す。なお, 表中に示した Ave10, 20, 40 は, 入力した 3 波の地震波における応答評価値を, 入力レベル $S_v = 10, 20, 40 \text{ cm/s}$ 毎に平均化した値である。表 5 より, R_{HHV} が基準値 1.0 を上回るのは KOBE10, TOMA10 の 2 ケースのみであり, 他のケースおよび 3 波の地震波の平均値である Ave20, 40 においては, 基準値 1.0 を下回ることが確認できる。これより, HHV モデルには地震波の種類によらず併用効果があると考えられる。また, この併用効果は変位の応答低減に対して高い性能をもつことが $D_{R_{HHV}}$ の値から確認できる。一方で, 基準値 1.0 を上回った 2 ケースはいずれも入力レベルが $S_v = 10 \text{ cm/s}$ 時であった。そのため, HHV モデルはどの入力レベルにおいても併用効果を発揮するのではなく, 入力レベルの小さい地震波に対しては, 小振幅時においても高い減衰力をもつ粘性型ダンパーを単独配置した VVV モデルの方が有効であると考えられる。また, $A_{R_{HHV}}, D_{R_{HHV}}$ の比較において, 入力レベルが $S_v = 10 \text{ cm/s}$ 時の両者の応答差は大きいですが, 入力レベルが $S_v = 40 \text{ cm/s}$ 時においては, 両者間の差は小さくなり, 併用モデルと単独配置モデルの個々のダンパー性能に差が生じないことが確認できる。これは, $S_v = 40 \text{ cm/s}$ の地震動レベルに対し

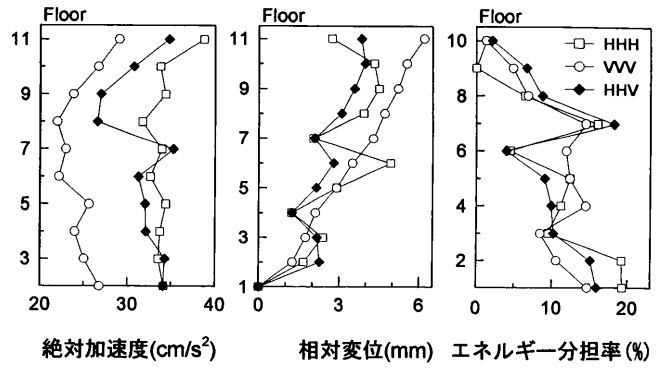
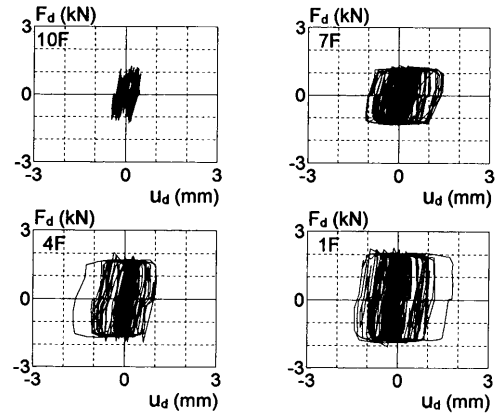
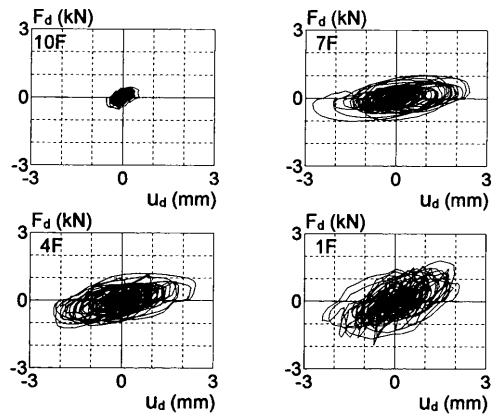


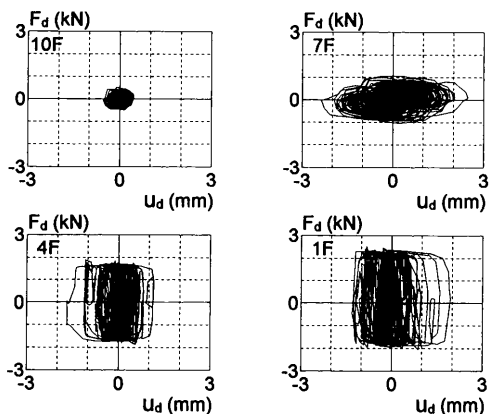
図 10. HHH, VVV, HHV モデルの応答比較



(a) HHH モデル



(b) VVV モデル



(c) HHV モデル

図 11. HHH, VVV, HHV モデルの履歴曲線

て、投入したダンパー量が少なかったためと考えられる。このことは、効果的な併用効果を望むためには、想定する地震動レベルに対して適切なダンパー量を投入する必要があることを示している。

表 5. $A R_{HHV}$, $D R_{HHV}$, R_{HHV} の比較

入力地震波	加速度 $A R_{HHV}$	相対変位 $D R_{HHV}$	併用効果評価値 R_{HHV}
HACHI10	1.06	0.75	0.91
KOBE10	1.23	0.95	1.09
TOMA10	1.20	0.85	1.03
Ave10	1.16	0.85	1.01
HACHI20	1.01	0.70	0.85
KOBE20	0.97	0.85	0.91
TOMA20	1.06	0.83	0.94
Ave20	1.01	0.79	0.90
HACHI40	0.88	1.08	0.98
KOBE40	0.96	0.90	0.93
TOMA40	0.96	0.94	0.95
Ave40	0.93	0.97	0.95

5. 3 粘性型ダンパー投入フロア数の違いによる応答比較

TOMA20 入力時における HHH, VVV, HHV, HVV の 4 モデルの絶対加速度, 相対変位, エネルギー分担率の高さ方向分布を図 12 に, HVV モデルの 1, 4, 7, 10 層における制振デバイスの履歴曲線を図 13 にそれぞれ示す。図 12 より, HVV モデルも, HHV モデルと同様に, 加速度, 変位の両者に対し高い制振効果を同時に発揮することが確認できる。しかし, HHV モデルと比べ HVV モデルは, 粘性型ダンパーを配置した中層部からの加速度の応答低減が確認でき, 上層部で変位応答が増大する傾向をもつことが確認できる。エネルギーについては, 上層部での分担率の増加を, HHV モデル同様に確認することができる。しかし, 粘性型ダンパーを配置した上, 中層にエネルギーが集中するため, 下層部における分担率は HHV モデルよりも低減することがわかる。

表 6 に各地震波入力時における併用効果評価値 R_{HHV} の値を示す。表 6 より, KOBE10 および TOMA40 を除いた他のケースにおいて, R_{HHV} は基準値 1.0 を下回ることから, HVV モデルにおいても併用効果は生じるものと判断できる。これより, 下層部に履歴型ダンパー, 上層部に粘性型ダンパーをそれぞれ配置する併用モデルの有効性が確認された。

表 6. $A R_{HHV}$, $D R_{HHV}$, R_{HHV} の比較

入力地震波	加速度 $A R_{HHV}$	相対変位 $D R_{HHV}$	併用効果評価値 R_{HHV}
HACHI10	1.06	0.83	0.95
KOBE10	1.29	0.96	1.12
TOMA10	1.11	0.79	0.95
Ave10	1.15	0.86	1.01
HACHI20	1.01	0.66	0.83
KOBE20	0.97	0.82	0.90
TOMA20	1.05	0.87	0.96
Ave20	1.01	0.78	0.90
HACHI40	0.94	0.88	0.91
KOBE40	0.96	0.92	0.94
TOMA40	0.95	1.06	1.01
Ave40	0.95	0.95	0.95

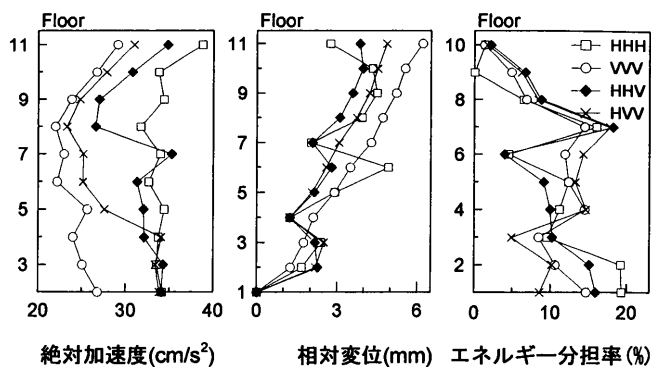


図 12. HHH, VVV, HHV, HVV モデルの応答比較

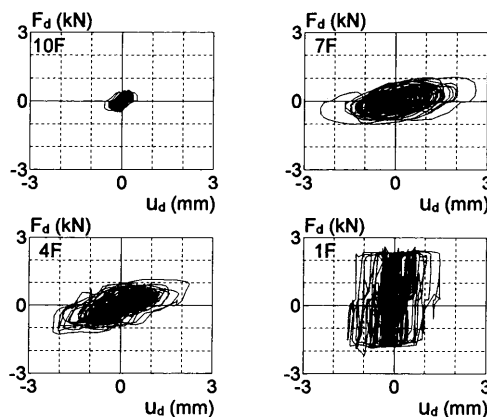


図 13. HVV モデルの履歴曲線

5. 4 下層部粘性型ダンパー配置モデルとの応答比較

TOMA20 入力時における HHH, VVV, HHV, VHH の 4 モデルの絶対加速度, 相対変位, エネルギー分担率の高さ方向分布を図 13 に, VHH モデルの 1, 4, 7, 10 層における制振デバイスの履歴曲線を図 14 にそれぞれ示す。図 14 より, VHH モデルの加速度応答は, 下層部で低減効果を示し, 上層部では増加傾向にあることが確認でき, HHV モデルとは逆の傾向を有することがわかる。相対変位では, ほぼ VVV モデルと同程度の応答を示し, 併用による低減効果を確認することはできない。また, 上層部におけるエネルギー分担率は低く, 剛性の低い下層部にエネルギーが集中することが確認できる。これより, 下層部に粘性型ダンパー, 上層部に履歴型ダンパーを配置した VHH モデルは, エネルギー吸収率が低い構造となることがわかる。

表 7 に各地震波入力時における併用効果評価値 R_{VHH} の値を示す。なお, 下層部粘性型ダンパー配置モデルでは, 下層部の変形が増大するため, $S_v=40\text{cm/s}$ での実験は行わなかった。そのため, 評価は実験を行った入力レベル $S_v=10, 20\text{cm/s}$ の 3 波, 計 6 種類の地震動入力時についてのみ行っている。表 7 より, R_{VHH} は入力地震波 HACHI 時のみ基準値 1.0 を下回り, 他の 4 ケースにおいては基準値 1.0 を上回ることが確認できる。加速度, 変位の評価値 $A R_{VHH}$, $D R_{VHH}$ のそれぞれの比較から, 加速度では併用による応答低減をある程度確認できるが, 変位においては明らかに応答が増大することがわかる。この傾向は特に TOMA 入力時において顕著である。これより, 下層部に粘性型, 上層部に履歴型ダンパーを配置した VHH モデルは, 変位の応答が増大しやすい構造となり, 併用効果が生じにくいと考えられる。

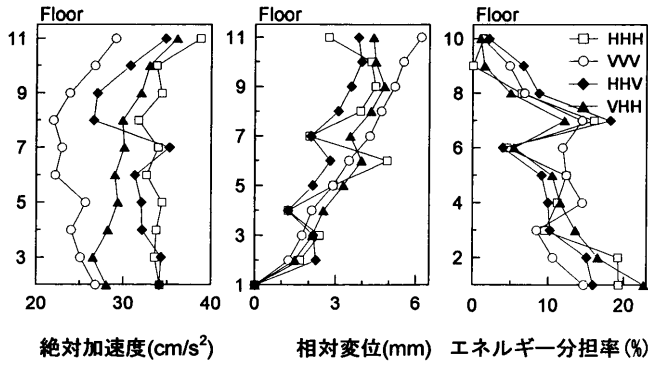


図 14. HHH, VVV, HHV, VHH モデルの応答比較

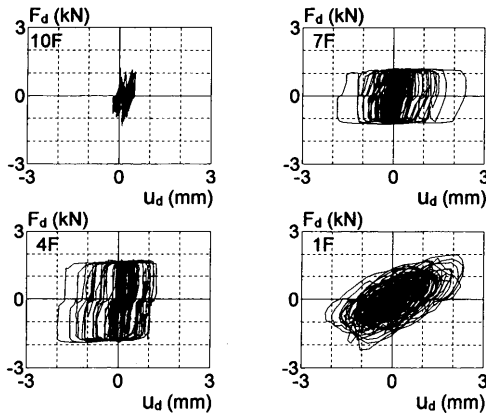


図 15. HHV モデルの履歴曲線

表 7. $A R_{VHH}, D R_{VHH}, R_{VHH}$ の比較

入力地震波	加速度	相対変位	併用効果評価値
	$A R_{VHH}$	$D R_{VHH}$	
HACHI10	0.81	0.93	0.87
KOBE10	0.99	1.16	1.07
TOMA10	0.96	1.27	1.11
Ave10	0.92	1.12	1.02
HACHI20	0.85	1.02	0.94
KOBE20	0.95	1.08	1.01
TOMA20	0.97	1.21	1.09
Ave20	0.92	1.10	1.01

6. 実験のシミュレーション

本章では、併用効果のメカニズムの解明のため、実験を精度良くシミュレートする解析モデルを再作成し、その精度について検証する。また、メカニズム解明の基礎データとして、実験結果の精度が懸念される計測項目をシミュレーション解析から検討する。

シミュレーション解析は振動台実験を行った全7モデルについて行う。入力地震動は実験同様全9波とし、これらは振動台の特性を考慮に入れ、実験で計測された各モデルにおける振動台加速度記録を採用する。

6.1 主架構のモデル化

各階の平面構成は試験体同様、1000mm×500mm、階高380mmとし、柱、床材についても同様の板バネ、鋼板をそれぞれ用いる。ただし、解析上の節点数増加を避けるため、ダンパーは梁の中心軸を利用し取り付けられた。そのため、ダンパーの取付角度は、 $\theta=37.2^\circ$ となるが、その影響は小さいと判断した。

減衰は主架構の自由振動試験および WhiteNoise 加振試験から算

出した。図16に自由振動試験より得られた頂部変形の減衰曲線を示す。図16において、振動が1次モードに収束したと思われる点より対数減衰率を用いて同定した主架構の1次の減衰定数は1.1%であった。また、減衰マトリクスは、図17に示す WhiteNoise 加振試験より得られた1階と11階の加速度の伝達関数から、1次の固有振動数に対し減衰定数1.1%、2次の固有振動数に対し減衰定数2.4%の Reyleigh 型減衰と定めた。柱の剛域は、実験と解析の固有振動数を合わせるために、梁芯部から板バネの上下に各40mmとした。表8に伝達関数から得られた実験と解析の固有振動数の比較を示す。解析値は実験値と精度の良い一致を示しており、本解析モデルは試験体を精度良く再現できていると考える。

表 8. 固有振動数の比較

振動モード	実験値 (Hz)	解析値 (Hz)
1次	0.93	0.93
2次	2.56	2.53
3次	4.30	4.21

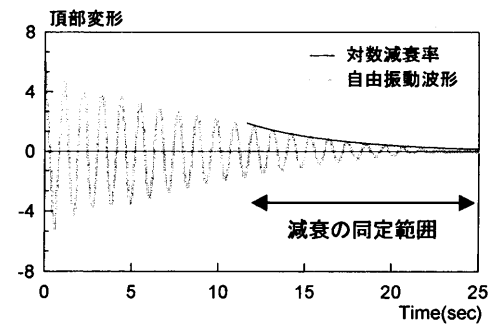


図 16. 減衰曲線

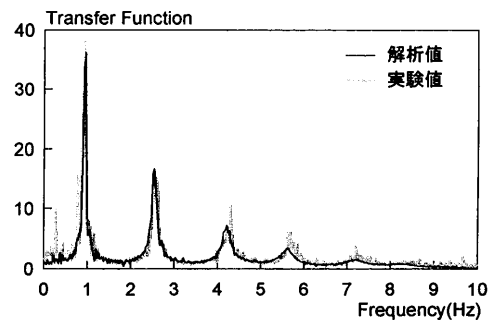


図 17. 伝達曲線

6.2 制振デバイスのモデル化

振動台実験あるいはダンパー単体試験により得られた結果を用いて制振デバイスのパラメータを決定する。履歴型ダンパーの解析パラメータである i 層の降伏応力度 σ_{yi} は、降伏耐力 F_{yi} 、ダンパー断面積 A_i および式(2)を用いて次式により表される。

$$\sigma_{yi} = \frac{F_{yi}}{A_i} = \frac{F_{yi} \cdot E}{B K_{Di} \cdot L} \quad (11)$$

式(11)より、引張および圧縮側降伏応力度 $i\sigma_{ys}, c\sigma_{yi}$ を実験から得られたダンパーの引張および圧縮側降伏耐力 iF_{ys}, cF_{yi} を用いてそれぞれ算出する。ダンパーの軸剛性 $B K_{Di}$ は、 $H K_{Fi}$ に対する $B K_{Di}$ の倍数をパラメトリックに変化させ実験値と解析値を比較した結果から8倍と定めた。例として、TOMA20入力時における HHH モデルの解析諸元を表9に示す。

粘性型ダンパーにおける解析パラメータは、1,2次の粘性係数 $iC_{D1}, 2C_{D2}$ および貯蔵剛性 K_D であり、 i 層の粘性係数 $1C_{D1}, 2C_{D2}$ を式(4)~(7)を用いて算出する。実験値と解析値の対応から、 i 層の粘性体温度 i_t およびせん断面積 S_i は第4章の表4に示したダンパー単体試験時

の値を用いる。また、式(6)、(7)より、せん断すき間 d の粘性係数に及ぼす影響は小さいため、全層で一様に $d = 0.1\text{cm}$ とした。 i 層の貯蔵剛性 K_{Di} は、 $S_v = 10, 20\text{cm/s}$ の入力地震波を用いる時は単体試験で正弦波の振幅を 2mm に、 $S_v = 40\text{cm/s}$ の入力地震波を用いる時は正弦波の振幅を 4mm に制御した時に得られた値をそれぞれ使用することとした。例として、TOMA20入力時における VVV モデルの解析諸元を表 10 に示す。

表 9. 履歴型ダンパーの諸元 (TOMA20, HHH モデル)

Floor	$B K_{Di}$ (kN/m)	A_i (cm^2)	$i F_{yi}$ (kN)	$c F_{yi}$ (kN)	$i \sigma_{yi}$ (kN/m^2)	$c \sigma_{yi}$ (kN/m^2)
10	5048	0.15	1.21	-1.25	78549	-81146
9	5048	0.15	0.77	-1.20	50245	-77900
8	5048	0.15	0.91	-0.89	59334	-57971
7	5048	0.15	1.25	-1.27	81146	-82444
6	7188	0.22	1.73	-1.67	78876	-76140
5	7188	0.22	1.59	-1.49	72493	-67934
4	7188	0.22	1.73	-1.70	78876	-77508
3	9859	0.30	1.57	-1.52	52183	-50521
2	9859	0.30	1.53	-1.36	50853	-45203
1	9859	0.30	2.12	-1.89	70463	-62819

表 10. 粘性型ダンパーの諸元 (TOMA20, HHH モデル)

Floor	S_i (cm^2)	d (cm)	t_i ($^{\circ}\text{C}$)	$1 C_{Di}$ ($\text{kN}(\text{s/m})^{1.0}$)	$2 C_{Di}$ ($\text{kN}(\text{s/m})^{0.59}$)	K_{Di} (kN/m)
10	95.3	0.1	22.8	147.3	8.67	137.2
9	95.3	0.1	22.8	147.3	8.67	134.9
8	103.7	0.1	24.6	148.3	8.73	132.6
7	105.5	0.1	24.8	149.7	8.81	133.9
6	131.1	0.1	24.0	192.4	11.33	179.2
5	133.7	0.1	23.0	204.9	12.06	205.7
4	140.2	0.1	23.2	213.0	12.54	204.1
3	153.0	0.1	23.0	234.5	13.81	233.6
2	166.5	0.1	23.3	251.9	14.83	243.6
1	171.0	0.1	25.2	238.4	14.04	217.3

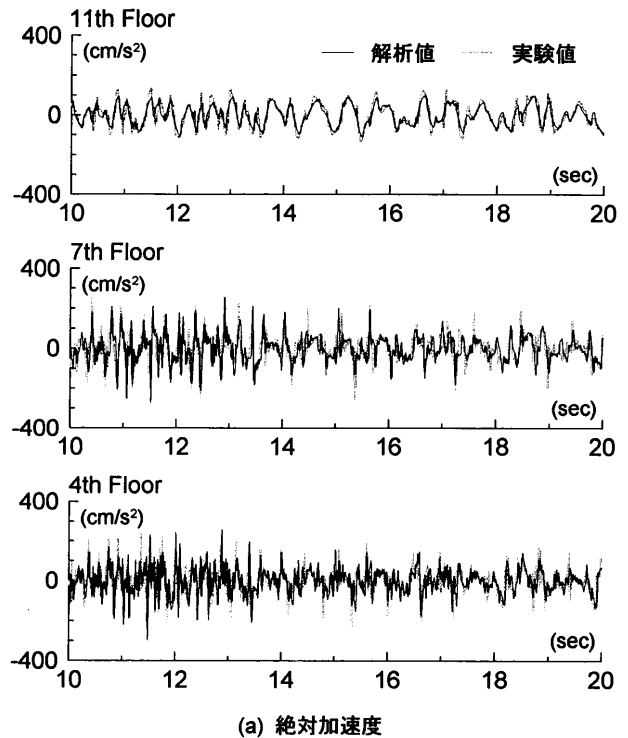
6. 3 実験結果との応答比較

TOMA20のHHVモデルにおける実験値と解析値の応答を比較し、解析モデルの妥当性の検証を行う。例として、図18に4, 7, 11階における絶対加速度および相対変位の時刻歴波形の主要動部分をそれぞれ示す。履歴型ダンパーを配置した4, 7階、粘性型ダンパーを配置した11階とともに実験結果と解析結果は概ね一致することが確認できる。これより、シミュレーション解析の精度は良好であると判断できる。また、他の入力波、他のモデルにおいても同様であることを確認している。

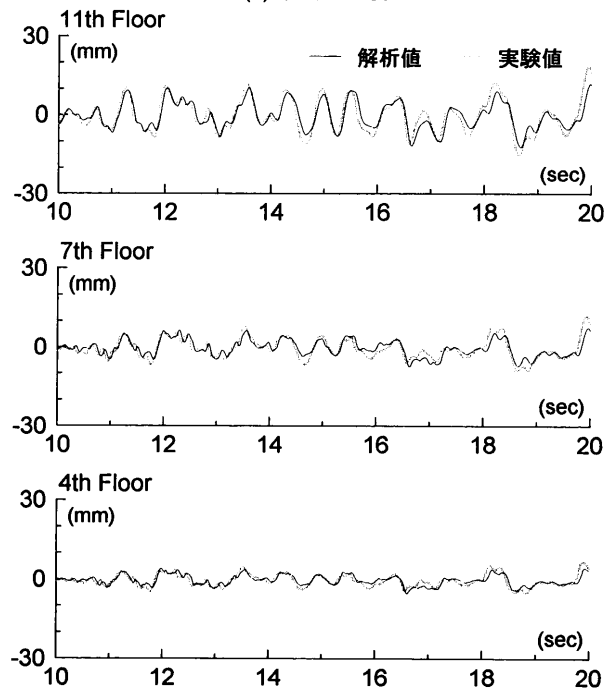
6. 4 シミュレーション解析による併用効果の検討

本実験では、両制振ダンパー併用による効果が顕著に見える紙絵検体としているため、ダンパー量の多いシステムとなっている。そのため、層間変形等は微小応答となり、その計測精度が懸念される。本節では、今後の併用効果メカニズム解明に向けた基礎データとして、精度が不十分と思われる計測項目をシミュレーション解析により検討する。

図19に入力地震波 TOMA20 の HHH, VVV, HHV の 3 モデルにおける解析結果の応答比較を示す。比較項目は、最大相対速度、最大層間変形、最大層せん断力、実効変形比、等価繰返し数⁷⁾ およびエ



(a) 絶対加速度



(b) 相対変位

図 18. 実験値と解析値の応答比較

間変形、最大層せん断力、実効変形比、等価繰返し数⁷⁾ およびエネルギー吸収率であり、ここで、エネルギー吸収率とは、各層で制振デバイスが吸収するエネルギーを入力エネルギーで除した値である。なお、制振デバイスのエネルギー吸収量に主架構の内部減衰エネルギーは含まれていない。

相対速度に関しては、HHVモデルとHHHモデルとはほぼ同程度の応答低減効果を示すことがわかる。層間変位では、2, 8階を除いた全層で最も低い応答であることが確認できる。粘性型ダンパーを配置した上層部においても、HHVモデルが最も低い応答低減を示すことから、ハイブリッド配置による併用効果を確認することができ

る。HHV モデルの層せん断力においては、HHH モデルにおける上層部の応答増大が、粘性型を配置することで低減されていることがわかる。また、HHV モデルの上層部において、実効変形比の改善や、等価繰返し数およびエネルギー吸収率の増加から、上層部においても制振デバイスが有効に機能していることが確認できる。実験により確認された併用効果は、これらの事象に起因するものと考えられる。しかし、上層部における等価繰返し数やエネルギー吸収率の増大のメカニズムは理論的に未解明である。この解明を今後の課題としたい。また、以上に述べた傾向は、他の入力波においても同様に確認することができた。

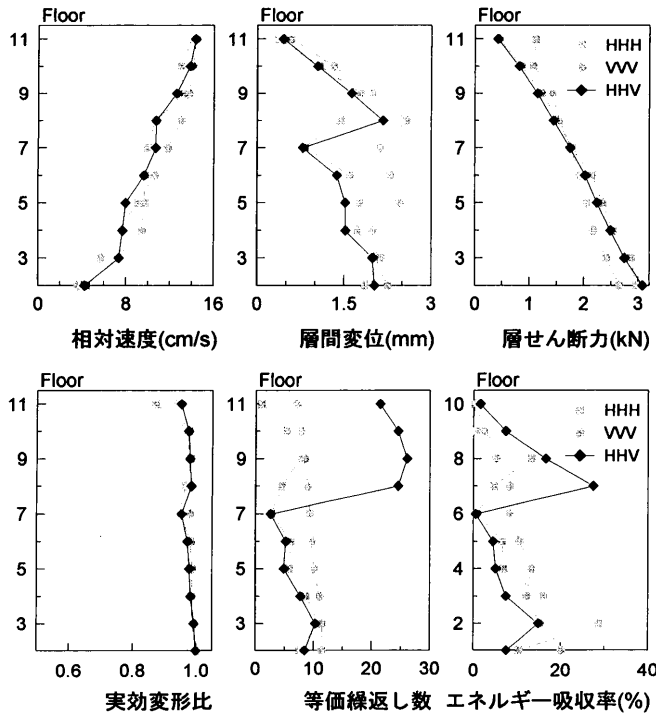


図 19. 解析結果の応答比較

7. 結び

本論文では、上層部に粘性型ダンパー、下層階に履歴型ダンパーを併用配置するハイブリッド制振構造の制振効果の向上を振動台実験により実証し、同時に、その配置パターンの違いによる応答特性を把握した。また、併用メカニズム解明のための解析モデルを作成し、その精度を検証するとともに、実験では精度の不十分だった計測項目における併用効果の検討をシミュレーション解析により行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 下6層履歴型、上4層粘性型ダンパーを配置した HHV モデルの加速度、変位の振動台実験結果から、せん断型試験体における併用効果を明らかにした。詳細には、履歴型、粘性型ダンパーをそれぞれ単独した HHH, VVV モデルでは、加速度、変位を同時に低減させることは難しいが、ハイブリッド配置した HHV モデルでは、加速度と変位の両者を同時に低減させることが可能であることが確認できた。また、この併用効果は変位に対し、高い性能を有することがわかった。上層部において実効変形比の低下が改善され、制振デバイスのエネルギー吸収率や等価繰返し数が増加することがシミュレーション解析から確認できた。実験結果より認められた併用効果はこれに起因するものと考えられる。
- (2) 下3層履歴型、上7層粘性型ダンパーを配置した HVV モデル

においても、HHV モデル同様、併用効果を実験により確認できた。紙幅の都合上図示していないが、HHV モデル同様、上層部での実効変形比の低下が改善されることをシミュレーション解析により確認している。上述した併用効果は、これに起因するものと考えられる。一方で、粘性型ダンパーの投入数の多いこのモデルでは、上、中層部にエネルギーが集中し、下層部における分担率が低下することを確認した。

- (3) 下層部に粘性型ダンパーを配した VHH モデルでは、ハイブリッド配置による併用効果は見られなかった。紙幅の都合上図示していないが、VHH モデルでは、上層部における実効変形の改善についても確認できなかった。上層部におけるダンパーが有効に機能しないため、エネルギー吸収は上層部でほぼ見られず、下層部で卓越することを確認した。このことから、下層部に粘性型、上層部に履歴型をハイブリッド配置したモデルはエネルギー吸収効率の悪い構造となることがわかった。
- (4) 投入したダンパー量に対し、地震動の入力レベルが大きい場合には、HHH, VVV, HHV モデルの加速度、変位の応答は、どのモデルにおいても同程度の応答低減率を示すことが確認できた。そのため、効果的な併用効果を望むには、想定する地震動レベルに対し、適切なダンパー量を投入する必要があることがわかった。

本実験に基づき作成されたシミュレーション解析モデルは、実験結果を精度良く再現できるものであった。併用効果をもたらす要因は理論的に未解明であるため、この解析モデルを用いてのメカニズムの解明を今後の課題としたい。

謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所藤田研究室、(株)日建設計、オイレス工業(株)、東京理科大学北村研究室による共同研究の一部を用いたものです。本実験は東京大学生産技術研究所、オイレス工業(株)の実験所を使用しました。また、東京大学生産技術研究所の嶋崎守氏には多大な協力をいただきました。東京理科大学北村研究室の渥美孝紘氏・小川薫氏・江口隼吾氏には多大な協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 倉本洋, 中坂亮, 松本和行: 多層制振建築物に対する限界耐力計算, パッシブ制振シンポジウム 2004, pp.119-127
- 2) 多賀謙蔵, 常木康弘: パッシブ制振構造の要求性能と構造計画, 建築技術, 2005. 8, No.667, pp.108-115
- 3) 渥美孝紘, 北村春幸, 石井正人, 浦本弥樹: 鋼構造超高層建物における履歴減衰型・粘性減衰型制振部材の高さ方向併用配置の提案 その1-2, 履歴減衰型・粘性減衰型制振部材の単独配置による制振効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, 2006, pp.763-765
- 4) Trifunac, M.D. and Brady, A.G.: A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, June 1975
- 5) 社団法人日本鋼構造協会: わかりやすい鉄骨の構造設計, 技報堂出版, 2006
- 6) 渥美孝紘, 小川薫, 北村春幸, 藤田隆史, 吉江慶祐, 石井正人, 佐々木和彦, 宮崎充: 3層フレーム加振試験による履歴減衰型・粘性減衰型制振ダンパー併用時の制振効果 その1-2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, 2007, pp.841-844
- 7) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1997