

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	振動台実験を再現する起振機を用いた多層制振フレームの実験手法
Title(English)	EXPERIMENTAL METHOD OF PASSIVELY CONTROLLED MULTI STORY FRAME USING VIBRATION GENERATOR ON SIMULATING SHAKING TABLE TEST
著者(和文)	添田幸平, 石田琢志, 佐藤大樹, 北村春幸, 佐々木和彦, 宮崎充, 岩崎雄一, 吉江慶祐, 石井正人
Authors(English)	Kohei Soeta, Takushi ISHIDA, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Kazuhiko Sasaki, Mitsuru MIYAZAKI, Yuichi Iwasaki
出典(和文)	第13回日本地震工学シンポジウム論文集, , pp. 1269-1276
Citation(English)	, , pp. 1269-1276
発行日 / Pub. date	2010, 11

振動台実験を再現する起振機を用いた多層制振フレームの実験手法
EXPERIMENTAL METHOD OF PASSIVELY CONTROLLED MULTI
STORY FRAME USING VIBRATION GENERATOR ON SIMULATING
SHAKING TABLE TEST

添田 幸平¹⁾, 石田 琢志²⁾, 佐藤 大樹¹⁾, 北村 春幸¹⁾, 佐々木 和彦³⁾
宮崎 充³⁾, 岩崎 雄一³⁾, 吉江 慶祐⁴⁾, 石井 正人⁴⁾
Kohei SOETA¹⁾, Takushi ISHIDA²⁾, Daiki SATO¹⁾
Haruyuki KITAMURA¹⁾, Kazuhiko SASAKI³⁾, Mituru MIYAZAKI³⁾
Yuichi IWASAKI³⁾, Keisuke YOSHIE⁴⁾, Masato ISHII⁴⁾

1) 東京理科大学

¹ Tokyo University of Science

2) 戸田建設 (元東京理科大学)

² Toda Corporation

3) オイレス工業

³ Oiles Corporation

4) 日建設計

⁴ Nikken Sekkei

ABSTRACT: Vibration generator tests are often utilized to grasp the vibration characteristics of building, and to check the performances of passive control devices. This paper proposes an experimental method which can simulate the shaking table test, using only one vibration generator. In this method, the vibration force is calculated by using the floor response time history data obtained from the shaking table test. This paper shows the control method of the vibration generator to get the force which is calculated with the method to simulate the shaking table test. Vibration generator tests are conducted with proposal methods, and these compared with the shaking table tests which were carried out in 2007. The agreement of response between the vibration generator tests and the shaking table tests is confirmed.

キーワード: 振動実験, 動的加振, 起振機, 制振構造, 粘性ダンパー, 履歴ダンパー

1. はじめに

本格的な性能設計時代を迎え、実建物の耐震性能把握を目的とした加振実験の実施に対する要求が高まりつつある¹⁾。履歴型や速度依存型のダンパーを設置した建物の耐震性能は、部材単体実験に基づき作成された履歴モデルを架構モデルに組み込んだ数値解析により概ね評価できる。しかし、実際に架構内に設置されたダンパーの変形は、取り付け部材等の剛性の影響を受けるため、設計時に想定した制振効果が得られない場合もある。

加振実験の1つとして、実際に地震動を構造物に入力する振動台実験が挙げられる。振動台実験は、ダンパーによる制振効果を確認するためには、最も有効な手段であるが、実施に多大な費用や労力を要

する。これに対し、建物の振動特性の把握および制振装置の性能確認を目的として、簡易的に実施できる起振機を用いた加振実験が行われている。その多くが正弦波による定常加振^{2),3)}であり、地震応答の再現を試みた報告は僅かである⁴⁾⁻⁶⁾。

鈴木らは⁶⁾、構造物に取り付けた2台の起振機を用いて、地震応答を再現するための加振システムを開発している。更に、各モードの外力項を等しくするという考えに基づき、地動加速度と建物の固有値から加振力を作成する方法を提案している。提案した加振システムのシミュレーション解析および加振実験の双方において加振時応答が、地震応答解析結果を再現していることを示している。

それに対し、本研究では、1つの起振機で、多層制振構造物の振動台加振時応答を再現することを試みた。本論文では、最大層間変位応答を等しくすることに主眼を置き、振動台加振時の応答波形から加振力を作成する方法を提案する。実際に起振機加振実験を行い、起振機加振実験結果と振動台加振実験結果⁷⁾の比較について述べ、提案する本実験手法の有効性を示す。

以下に、本論文の構成を述べる。2章では、試験体、振動台加振実験⁷⁾、起振機実験概要および計測システムを述べる。3章では、振動台加振時応答を再現する加振力作成手法、加振力を再現するアクチュエータ変位の算出方法について述べる。4章では、起振機加振時と振動台加振時の応答比較について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験に用いる試験体は、図1に示す文献⁷⁾と同じ10層鋼構造架構を用いる。試験体（ダンパー非設置時）の総重量は43.6 kN、各階の平面構成は1000 mm×500 mm、階高は380 mmである。柱材は1~3, 4~6, 7~10層で板厚の異なる3種類の板ばねを用い、床材については各階に厚さ100 mmの鋼板を用いている⁷⁾。

制振ダンパーは取り付け角度 $\theta = 37.8^\circ$ の勾配でブレース形式に交互に配置し、容器と可動板の隙間に生じる粘性体せん断抗力を減衰力とした粘性ダンパー（図2(a)）と、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（図2(b)）を使用する⁷⁾。

10層試験体の全層に粘性ダンパーを単独配置したVVVモデル（図1(a)）、全層に履歴ダンパーを単独配置したHHHモデル（図1(b)）、さらに1~6層に履歴ダンパーを配置し、7~10層に粘性ダンパーを配置したHHVモデル（図1(c)）の3タイプを用いた。

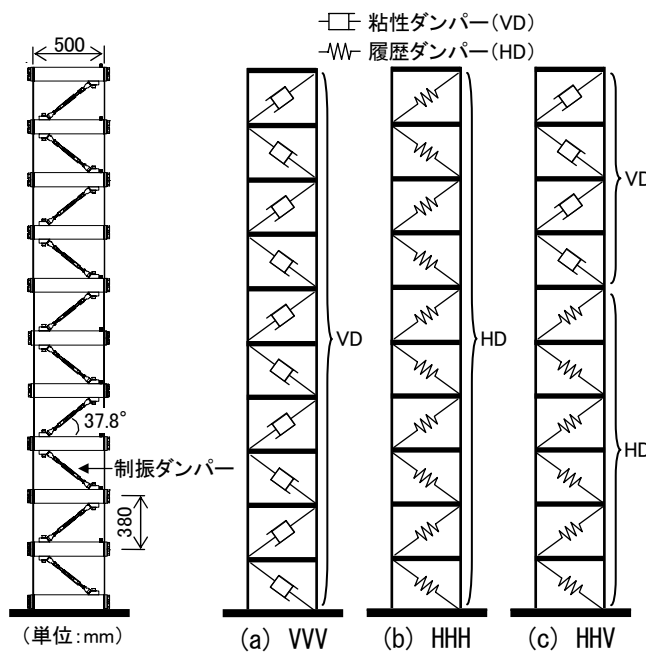


図1 試験体概要およびダンパー配置

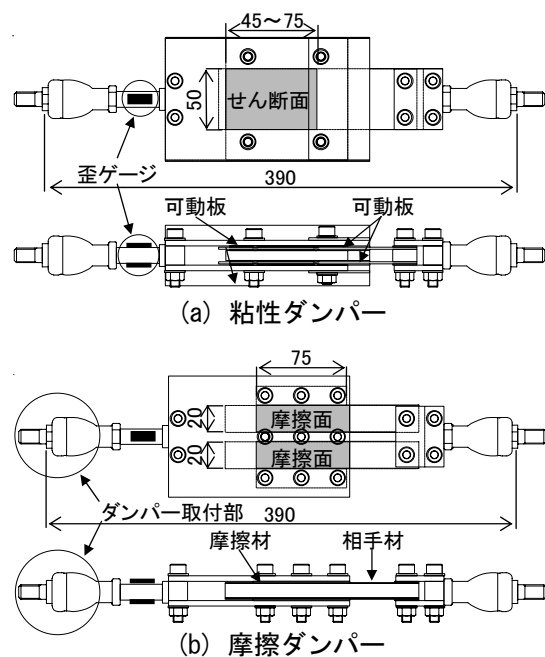


図2 制振ダンパー概要（単位：mm）

2.2 振動台実験概要⁷⁾

振動台実験⁷⁾は、高さ方向に履歴型、粘性型ダンパーを併用設置したモデルの制振効果の向上を確認することを目的としている。実験には、履歴型および粘性型ダンパーの設置パターン異なる7タイプのモデルを用いている(表1)。上層に粘性ダンパー、下層に履歴ダンパーを設置したモデルの制振効果の向上を確認している。

振動台実験の計測システム(計測項目、計測機器および計測場所)を表2に示す。変位計は、振動台上、3層、6層、10層にのみ設置しているため、全層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。

振動台実験に用いた入力地震波は、位相特性 Hachinohe 1968 EW, JMA Kobe 1995 NS, Tomakomai 2003 NS の告示波3波の時間軸を1/4に圧縮し、コーナー周期 T_c を0.16secとした模擬地震動とし、速度応答スペクトルを $S_v=10, 20, 40$ cm/s の3つのレベルに設定した HACHI10, HACHI20, HACHI40, KOBE10, KOBE20, KOBE40, TOMA10, TOMA20, TOMA40 の計9波を用いた。表3に入力地震波の諸元を示す。また、図3に $S_v=20$ cm/s に設定した速度応答スペクトル ($h=5\%$) を示す。

本実験(起振機実験)で対象とした入力地震波は $S_v=10, 20$ cm/s の2つのレベルに設定した HACHI10, HACHI20, KOBE10, KOBE20, TOMA10, TOMA20 の計6波である。

表1 ダンパー設置層とモデル名称

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

VD:粘性ダンパー, HD:履歴ダンパー

表2 計測システム

計測項目	計測機器	計測場所
絶対加速度	サーボ型加速度計	1~10層
絶対変位	インダクタンス式変位計	振動台上, 3, 6, 10層
ダンパー変位	インダクタンス式変位計	1~10層
ダンパー荷重	ロードセル	1~10層

表3 入力地震波の諸元

位相特性	S_v (cm/s)	加振波名称	最大加速度 (cm/s^2)	継続時間 (sec)
HACHINOHE 1986 (EW)	10	HACHI10	153.58	25.74
	20	HACHI20	307.15	
	40	HACHI40	614.3	
JMA KOBE 1995 (NS)	10	KOBE10	195.56	4.64
	20	KOBE20	391.12	
	40	KOBE40	782.24	
TOMAKOMAI 2003 (NS)	10	TOMA10	182.31	27.44
	20	TOMA20	364.62	
	40	TOMA40	729.24	

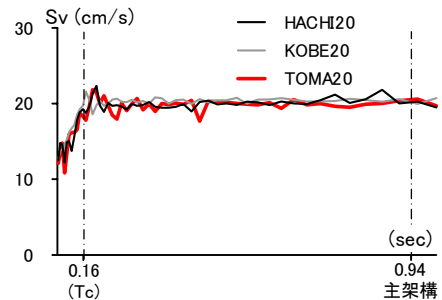


図3 入力地震波の速度応答スペクトル ($S_v=20, h=5\%$)

2.3 起振機実験概要

図4に示すように実験装置は、試験体、油圧で駆動する変位制御アクチュエータ、加振力である慣性力を生み出す錘 ($M_m=$ 約4.3 ton)を直列に配列することで構成する。本来、起振機は試験体内に設置するのが一般的であるが、所望の加振力を再現するために必要な錘が大きいため、試験体外に設置する方法を採用した。

起振機は自重を支持できる機構を持ち、水平力のみ試験体に伝達する機能が求められる。本実験では、錘をローラーにより支持する方式を採用した。ローラーに生じる摩擦力 F_m の影響を確認する。試験体の7層と反力壁との間に固定用の治具を挟み、アクチュエータを変位制御することで、錘を移動させる。载荷条件は、錘に慣性力が生じないように、振動数 0.01Hz、振幅は±30 mm の正弦波とした。摩擦力 F_m は、試験体とアクチュエータの間に設置したロードセルで計測した。摩擦力 F_m - 変位 x_m 関係を図5に示す。図5より、0.1~0.2kNの変動する摩擦力が生じているのが確認できる。

試験体と起振機はロードセルとアクチュエータを介して両端を球面軸受で接合し、錘の慣性力を試験体に伝達する。下層加振では、上層加振と比べ、所望の応答を再現するために大きな加振力を必要とする⁸⁾。本実験での起振機設置層は、アクチュエータの性能限界より、所望の応答を再現するためには、7層以上の層に設置する必要があるため、7層と10層を選定した。図6に示す、試験体(ダンパー非設置時)の固有モード u からわかるように、7層は2次モードの節であり、10層は全モードの腹の位置を示している。

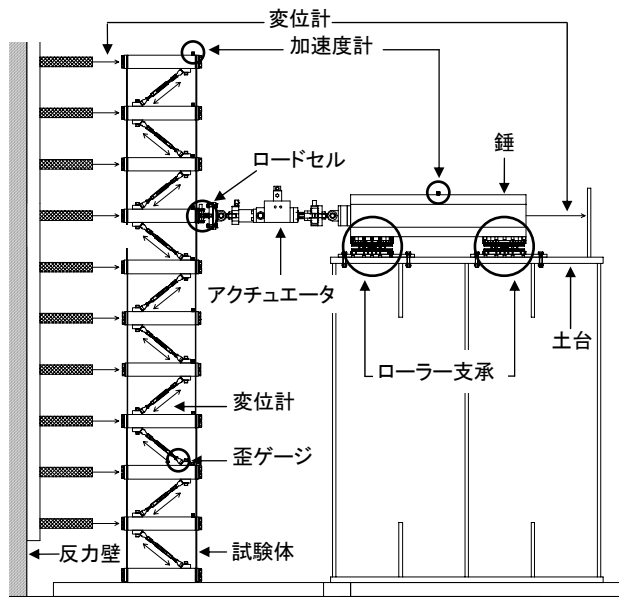


図4 実験装置の概要

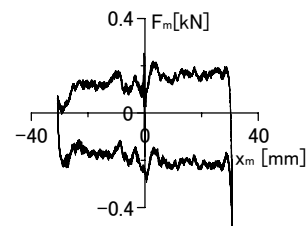


図5 摩擦力測定結果

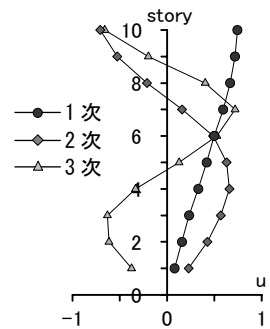


図6 主架構の固有モード u

2.4 計測システム

本実験装置における計測システム(計測項目, 計測機器および計測場所)を表4に示す。図4に示すように, 試験体の各層および錘の上部に設置した加速度計で絶対加速度を計測する。反力壁の側面および土台上に設置した変位計により, それぞれ, 試験体および錘の絶対変位を計測する。図2に示す位置に設置した歪ゲージでダンパー荷重を計測し, ダンパーと並列に設置した変位計でダンパー変位を計測する。試験体とアクチュエータの間に設置したロードセルでアクチュエータの加振力を計測する。これらのデータのサンプリング周波数は1000 Hzとし, 実験後0.1~20 Hzの範囲でバンドパスフィルタをかけノイズ除去を行った。

表4 計測システム

計測項目	計測機器	計測場所
絶対加速度	サーボ型速度計	1~10層
絶対変位	接触型変位計	1~10層
ダンパー変位	接触型変位計	1~10層
ダンパー荷重	歪ゲージ	1~10層
錘絶対加速度	歪ゲージ式加速度計	錘
錘絶対変位	接触型変位計	錘
加振力	ロードセル	試験体-アクチュエータ接合部

3. 起振機加振力の設定

3.1 加振力の作成手法

本論文では, 振動台加振時の応答波形を加振力として用いる。各層の最大層間変位に注目した加振力の作成手法を, 図7を用いて説明する。

試験体を置換した解析モデルに地震波を入力した際の, i 層(起振機設置層)の相対速度時刻歴波形 ${}_s \dot{x}_i(t)$ を起振機加振力波形として用いる。起振機加振による振動台加振応答の再現性を示す指標として, 式(1)より算出される再現性評価値 R を用いる。加振力の最大値は, R が1.0になるまで ${}_s \dot{x}_i(t)$ に倍率 α を乗じて修正を行う。

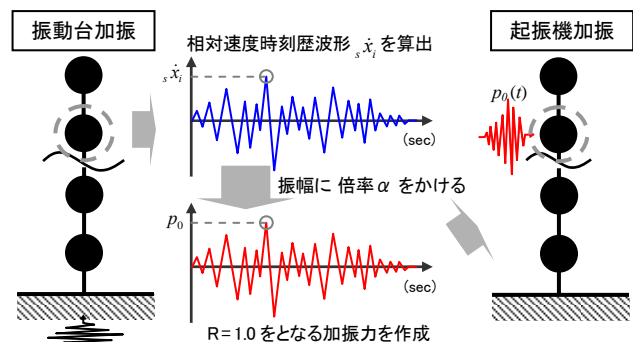


図7 起振機加振力作成の概要

$$R = \sum_{i=1}^N R'_i \cdot \gamma_i \quad (1)$$

$$R'_i = \frac{v \delta_i}{s \delta_i}, \quad \gamma_i = \frac{s \delta_i}{\sum_{i=1}^N s \delta_i} \quad (2a, b)$$

ここで、 $s \delta_i, v \delta_i$ はそれぞれ振動台、起振機加振時の i 層の最大層間変位応答である。振動台加振時に算出される最大層間変位分布率 γ_i を R'_i に乗ずることで、応答が大きくなる階に重みを置いた評価が可能となる。再現性評価値 $R=1.0$ となる加振力を目標加振力 $p_0(t)$ として加振実験に用いる。なお、 $p_0(t)$ は、定常時の応答倍率理論式を適用して求めることができる。詳細は文献 9) を参照されたい。

3.2 目標加振力を再現するアクチュエータ変位の算出

目標加振力 $p_0(t)$ を実験で再現するためのアクチュエータ変位 $x_A(t)$ の算出方法を、図 8 を用いて説明する。まず、アクチュエータ変位 $x_A^{(1)}(t)$ は錘の動きだけでなく試験体の動きも考慮する必要があり、次式に示すように錘の絶対変位 $x_m(t)$ と加振層の絶対変位 $x_i(t)$ との差分から算出する。ここで、右上の添え字 (1) は収れん計算回数である。

$$x_A^{(1)}(t) = x_m(t) - x_i(t), \quad x_m(t) = \iint (p_0(t) / M_m) dt dt \quad (3a, b)$$

ここで、 $x_m(t)$ および $x_i(t)$ は、試験体を置換したせん断 10 質点モデルに目標加振力 $p_0(t)$ を入力することにより、算出できる。しかし、 $x_A^{(1)}(t)$ を用いて加振実験を行っても、式(3)では、錘を支えるローラーに生じる摩擦、さらに試験体と錘との相互作用を考慮していないため、目標加振力を再現することはできない。そこで、次の操作を行うことでこれらの影響を取り除き、目標加振力を再現するアクチュエータ変位を算出する。

$x_A^{(1)}(t)$ での加振実験から得られた加振力を計測加振力 $p^{(1)}(t)$ とする。 $p^{(1)}(t)$ のフーリエスペクトル $P^{(1)}(\omega)$ と、 $x_A^{(1)}(t)$ のフーリエスペクトル $X_A^{(1)}(\omega)$ から伝達関数 $H(\omega)$ を算出する (式(4))。次に、 $p_0(t)$ をフーリエ変換した $P_0(\omega)$ に、 $H^{(1)}(\omega)$ を乗じて $x_A^{(2)}(\omega)$ を算出する。 $x_A^{(2)}(\omega)$ を逆フーリエ変換することで、アクチュエータ変位 $x_A^{(2)}(t)$ が得られる。アクチュエータの追従性能は 20 Hz が限界のため、式(5)の再現誤差 Er は 0~20 Hz (0~125.7 rad/sec) の間で評価した。この作業を再現誤差 $Er^{(10)}$ が 20% 未満になるまで収れん作業を行った。

$$H^{(i)}(\omega) = \frac{x_A^{(i)}(\omega)}{P^{(i)}(\omega)} \quad (4)$$

$$Er = \frac{\int_{\omega_s}^{\omega_e} (P^{(i)}(\omega) - P_0(\omega))^2 d\omega}{\int_{\omega_s}^{\omega_e} P_0^2(\omega) d\omega} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 $\omega_s = 0 \text{ rad/sec}$, $\omega_e = 125.7 \text{ rad/sec}$ (=20 Hz)

図 9(a), (b) に収れん後のフーリエスペクトルおよび時刻歴波形を、計測加振力と目標加振力を重ねて示す。加振条件は、7 層加振の加振波 HACHI20 である。収れん後における計測加振力は、フーリエスペクトル (図 9(a)) および時刻歴波形 (図 9(b)) とともに、精度良く目標加振力を再現できていることが確認できる。本手法で算出したアクチュエータ変位を用いることで、全ての実験において、十分な精度で目標加振力を再現できた。また、収れん回数は、平均で 3 回であった。

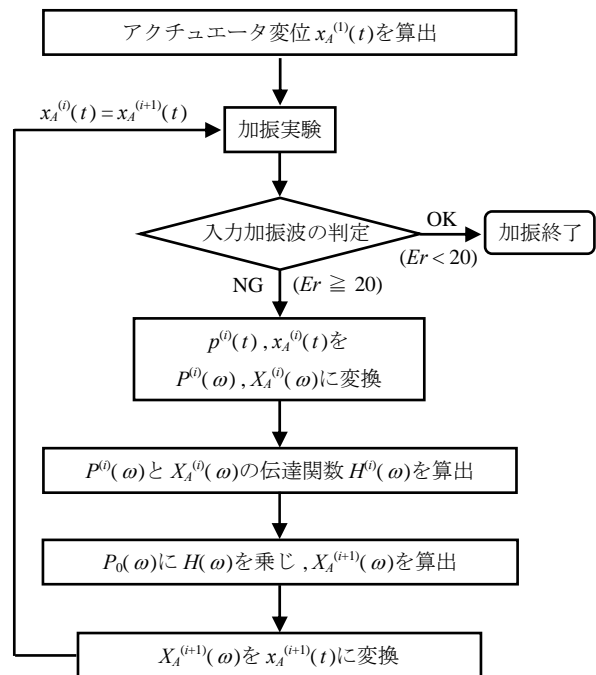


図 8 アクチュエータ変位の決定フロー

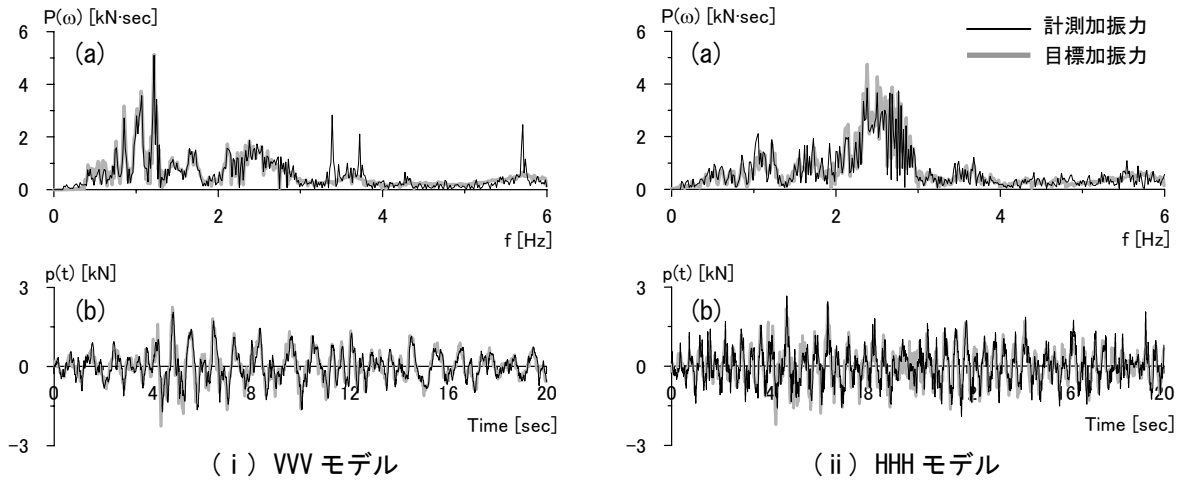


図9 収録後の入力加振力の比較(7層加振, 加振波:HACHI20)
(a)フーリエスペクトル, (b)時刻歴波形

4. 起振機加振時と振動台加振時の応答比較

4.1 高さ方向における最大値応答

図10(a), (b)に, 加振波 HACHI20 での, 各層の最大層間変位 δ およびダンパーのエネルギー吸収量 W_d を示す。それぞれの図において, 7層加振, 10層加振および振動台加振時の結果を重ねて示している。ダンパーのエネルギー吸収量 W_d は, 各層で計測されたダンパー変位とダンパー荷重の履歴曲線が囲む面積から算出した。図10(a)の最大層間変位より, 全モデルにおいて, 加振層付近の起振機加振時応答は, 振動台加振時応答を概ね再現できているが, 中・下層では, 起振機加振時応答が振動台加振時応答を下回っていることが確認できる。図10(b)のダンパーのエネルギー吸収量においても, 加振層付近の起振機加振時応答は, 振動台加振時応答を再現しているが, 下層部分では, 起振機加振時応答が振動台加振時応答を下回っている。

図11に式(1)を用いて算出した再現性評価値 R を示す。縦軸に R , 横軸に加振波を示す。また, 左に7層加振, 右に10層加振を並べて示す。図11より, VVVモデルにおいて, R は加振条件に関わらず, 1.0に近い値を示していることがわかる。一方, HHHモデルおよびHHVモデルでは加振条件によってばらつきがあり, 下層における起振機加振時応答と振動台加振時応答との誤差が影響していることが確認できる。

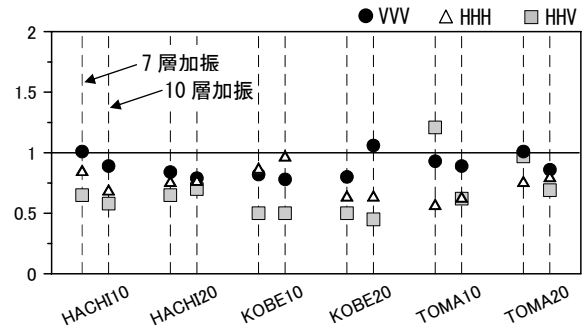


図11 再現性評価値 R
(各地震波において左から7層加振, 10層加振)

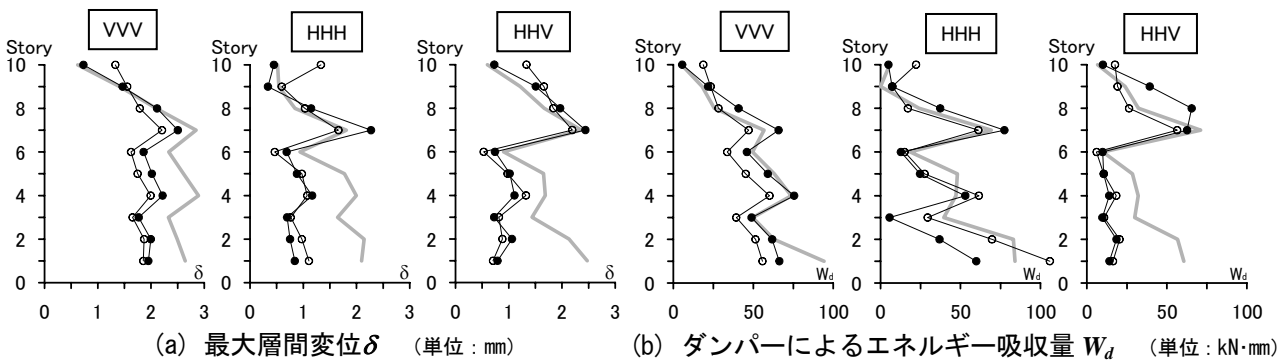


図10 高さ方向の最大応答比較(加振波:HACHI20) \circ -7層加振 \bullet -10層加振 振動台

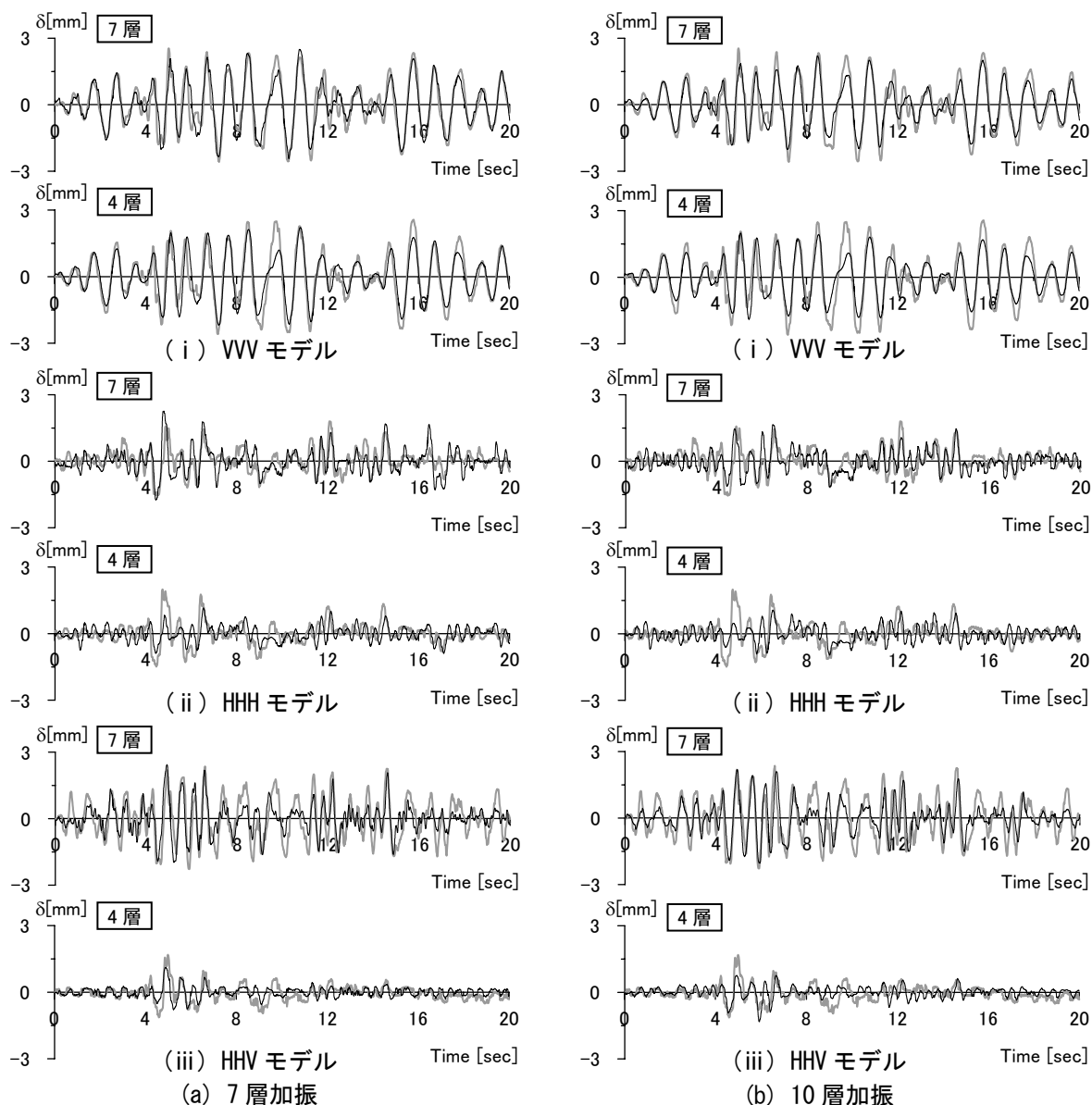


図 12 層間変位時刻歴波形（加振波:HACHI20）—— 起振機 —— 振動台

4.2 層間変位時刻歴波形

図 12(a), (b)に、加振波 HACHI20 での、7 層加振および 10 層加振における層間変位時刻歴波形を示す。7 層および 4 層の応答波形を起振機加振時と振動台加振時の結果を重ねて示す。時間軸は主要動部分を含む 0~20 sec とする。

図 12(a), (b)に示すように、7 層加振および 10 層加振共に起振機加振時応答と振動台加振時応答で各サイクルの振幅にばらつきが見られるが、概ね一致していることが確認できる。HACHI20 以外の加振波でも同様、起振機加振時応答と振動台加振時応答が、概ね一致していることが確認できた。

5. まとめ

1 つの起振機を用いて、振動台加振時応答を再現する本実験手法を提案した。また、起振機加振実験結果と振動台加振実験結果⁷⁾との比較をし、本実験手法の有効性を示した。得られた知見は以下の通りである。

(1) 目標加振力を再現するアクチュエータ変位を、アクチュエータ変位と計測加振力との伝達関数より求

める手法を提案した。いずれのモデル（粘性ダンパー配置モデル，履歴ダンパー配置モデル，および履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用位置したモデル）においても，計測加振力は目標加振力を十分な精度で再現できた。さらに7，10層の両加振層においても，HACHI20以外の加振波においても同様に目標加振力を十分な精度で再現できた。

- (2) 各層の最大応答値を起振機加振時と振動台加振時で比較すると，層間変位およびダンパーのエネルギー吸収量共に，起振機加振時は，加振層付近で振動台加振時を再現し，下層では，振動台加振時を下回る傾向を示した。
- (3) ダンパーの性能を評価する上で重要となる層間変位時刻歴波形を，起振機加振時と振動台加振時で比較すると，概ね一致していることが確認できた。

謝辞

本研究は，オイレス工業，日建設計，東京理科大学北村研究室による共同研究の成果の一部を用いたものです。

参考文献

- 1) 奥田浩文，蔭山満，勝俣英雄：超高層建物を対象とした簡易加振装置の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp175-176，2008.9
- 2) 浅野清昭，伊藤嘉朗：粘弾性体を利用した制振構法に関する研究（その7），日本建築学会大会学術講演梗概集，B，p.p.631-632，1993.9
- 3) 高減衰オイルダンパによる高層建物の制震（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B，p.p.853-854，1996.9
- 4) 山崎真司，永田敬雄，阿比留久徳，澤田昇次，原田秀秋，溜正俊：横浜ランドマークタワーに設置した制振装置（TAD）の性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，p.p.956-957，1994.9
- 5) 西村功，小堀鐸二，Masri，S.F：テンドンを用いたアクティブコントロールの実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，p.p.1051-1052，1991.9
- 6) 鈴木祥之，山本雅史：実大構造物の地震応答加振システムに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.514，pp105-110，1998.12
- 7) 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：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，構造工学論文集 Vol.55B，pp507-515，2009.3
- 8) 石田琢志，佐藤大樹，佐々木和彦，宮澤和也，北村春幸，宮崎充，吉江慶祐，石井正人，藤田隆史：振動台実験を模擬する起振機を用いた多層制振フレーム簡易振動実験手法の提案（その1-その2），日本建築学会関東支部研究報告集 I，p.p.445-452，2009.3
- 9) 石田琢志，佐藤大樹，佐々木和彦，宮澤和也，北村春幸，宮崎充，吉江慶祐，石井正人，藤田隆史：起振機を用いた多層制振フレームの簡易振動実験手法の提案（その1-その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B，p.p.633-636，2009.8
- 10) 梶原浩一，佐藤栄児，田川泰敬：実大三次元震動破壊実験装置（E-ディフェンス）の加振性能と活用について，運動と振動の制御シンポジウム講演論文集，No.9，pp313-316，2005