T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	多層制振構造の振動台実験を再現する起振機を用いた実験手法
Title	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	Kohei Soeta, Takushi ISHIDA, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Kazuhiko SASAKI, Mitsuru MIYAZAKI, Yuichi Iwasaki
出典 / Citation	構造工学論文集, Vol. 57B, , pp. 301-309
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 57B, , pp. 301-309
発行日 / Pub. date	2011, 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/110009706451

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

Architectural Institute of Japan

構造工学論文集　Vol. 57B（2011年3月）　日本建築学会

多層制振構造の振動台実験を再現する起振機を用いた実験手法

EXPERIMENTAL METHOD OF PASSIVELY CONTROLLED MULTI STORY FRAME USING VIBRATION GENERATOR ON SIMULATING SHAKING TABLE TEST

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******

Kohei SOETA , Takushi ISHIDA , Daiki SATO , Haruyuki KITAMURA , Kazuhiko SASAKI
Mituru MIYAZAKI , Yuichi IWASAKI , Keisuke YOSHIE and Masato ISHII

Vibration generator tests have been often utilized to grasp the dynamic 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 time history of velocity floor response obtained from the shaking table tests. 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 presented methods, and these compared with the shaking table tests. The agreement of response between the vibration generator tests and the shaking table tests are confirmed.

Keywords : *Shaking Test, Dynamic Loading, Vibration test, Passively Controlled Structure, Viscous Damper, Hysteretic Damper*
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

1994年のノースリッジ地震，1995年の阪神淡路大震災を契機に，人命が保護されれば構造骨組の損傷を許容する考え方で発展してきた耐震設計に対して，地震後の機能保持や構造骨組の損傷回避が求められるようになってきた。構造骨組の損傷の低減と床加速度や層間変形など応答低減を同時に達成することができ，建物の挙動を動的応答解析により定量的に把握することが行われる応答制御構造は，このような目標を達成する最適な構造形式として積極的に採用されるようになった [1]。動的応答解析をする際に，履歴型や速度依存型のダンパーを設置した建物のモデル化は，部材単体実験に基付いた履歴モデルを架構モデルに組み込むことで作成される。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考えられる。

架構内に設置されたダンパーの制振効果を確認する加振実験の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，実験できる場所が限られていること，さらに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 [例えば 2]であり，地震応答の再現を試みた報告は僅かである [3)-5)]。

鈴木らは [5]，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。

本研究では，1台の起振機を用いて，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。文献6）で行った振動台実験と同じ試験体を用いて起振機実験を行い，振動台実験を再現できるかを，実験的に検証し，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 [6]，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。

* 東京理科大学大学院理工学研究科　大学院生　Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science
** 戸田建設（株）　修士（工学）　Toda Corporation, M. Eng.
（元　東京理科大学大学院理工学研究科　大学院生）　Former Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science
*** 東京理科大学理工学部建築学科　助教・博士（工学）　Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
**** 東京理科大学理工学部建築学科　教授・博士（工学）　Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
***** オイレス工業（株）　Oiles Corporation.
****** （株）日建設計構造設計室　博士（工学）　Nikken Sekkei Ltd, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

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 6）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 [6]。

制振ダンパーは，取り付け角度 $\theta = 37.8°$ 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 [6]。

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 3(a)），全層に履歴ダンパーを単独配置した HHH モデル（図 3(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 3(c)）の 3 タイプを用いた。各試験体の固有振動数を表 1 に示す。

表 1　固有振動数

	固有振動数(Hz)		
	VVV	HHH	HHV
1次	1.04	2.81	1.75
2次	2.83	7.62	4.60
3次	4.70	12.6	6.33
4次	6.28	16.9	8.70
5次	8.03	21.6	10.6
6次	9.27	24.9	13.8
7次	10.5	28.1	22.0
8次	11.2	30.0	28.8
9次	12.5	33.7	33.3
10次	14.3	38.8	38.8

2．2　振動台実験概要

文献 6）で行った振動台実験は，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の異なる 7 タイプのモデルを用いている（表 2）。その中で，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で制振効果の向上が確認されている [6]。

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 3 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 0.16 s とした模擬地震動とし，速度応答スペクトルを $Sv = 10$，20，40 cm/s の 3 つのレベルに設定した HACHI10，HACHI20，HACHI40，KOBE10，KOBE20，KOBE40，TO MA10，TOMA20，TOMA40 の計 9 波を用いた。表 4 に入力地震

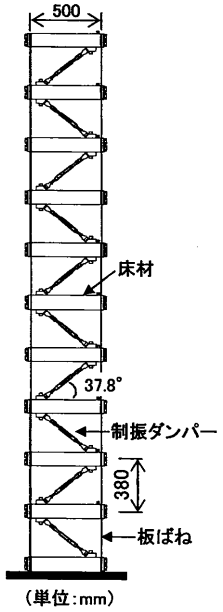


図 1　試験体概要

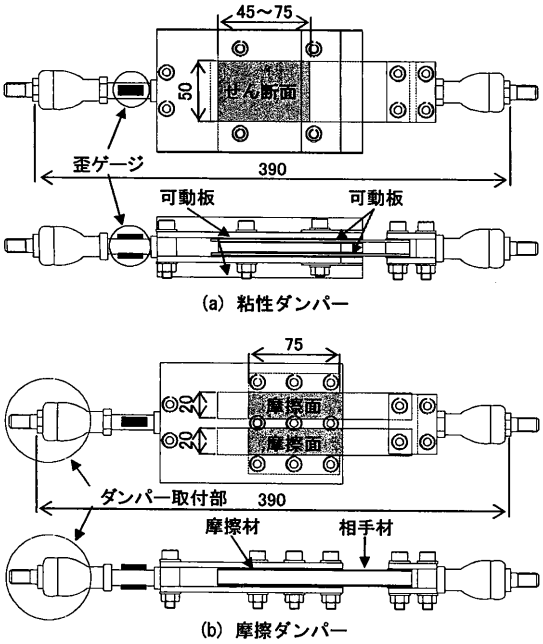


図 2　制振ダンパー概要　（単位：mm）

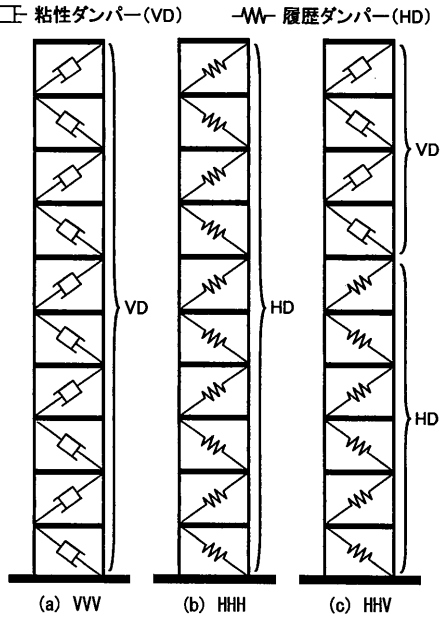


図 3　ダンパー配置

表 2　ダンパー設置層とモデル名称

story	HHH	HH0	HHV	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

HD:履歴ダンパー，VD:粘性ダンパー

表 3　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 4　入力地震波の諸元

位相特性	Sv (cm/s)	加振波名称	最大加速度 (cm/s²)	継続時間 (s)
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	

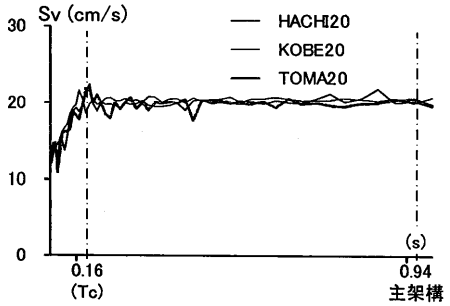


図 4　入力地震波の速度応答スペクトル（h=5%）

NII-Electronic Library Service

波の諸元を示す。また，図 4 に Sv=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 Sv=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。

2．3　起振機実験概要

図 5 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。ここで，ローラーに生じる摩擦力 F_m が目標加振力（3.1 節，後述）に及ぼす影響を確認する。試験体の 7 層と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。載荷条件は，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 6 に示す。図 6 より，0.1~0.2 kN の変動する摩擦力が生じているのが確認できる。加振の際，摩擦力は目標加振力（3.1 節，後述）に影響を及ぼすため 3.2 節で補正を行う。

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

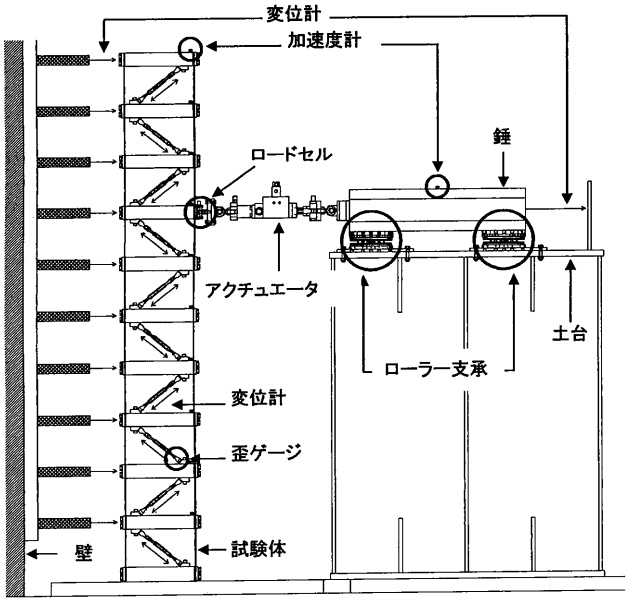


図 5　実験装置の概要

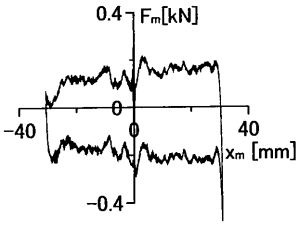


図 6　摩擦力測定結果

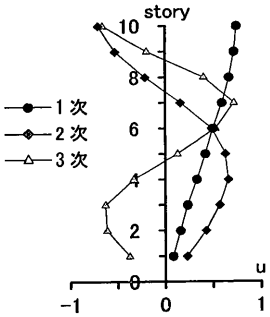


図 7　主架構の固有モード u

とする [7]。本実験での起振機設置層は，アクチュエータの性能限界間で，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ったため，7 層と 10 層を選定した。図 7 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。

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 5 に示す。図 5 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。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 0.1～30 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 5　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　目標加振力の作成手法

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。以下に各層の最大層間変位に注目した加振力の作成手法を示す（図 8)。

試験体を設計値に基づき作成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時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 になるよう ${}_s\dot{x}_i(t)$ に倍率αを乗じる。なお，倍率αは試行錯誤的に決定した。

$$R=\sum_{i=1}^{N} R_i' \cdot \gamma_i \tag{1}$$

$$R_i'=\frac{{}_v\delta_i}{{}_s\delta_i}\ ,\quad \gamma_i=\frac{{}_s\delta_i}{\sum_{i=1}^{N}{}_s\delta_i} \tag{2a, b}$$

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

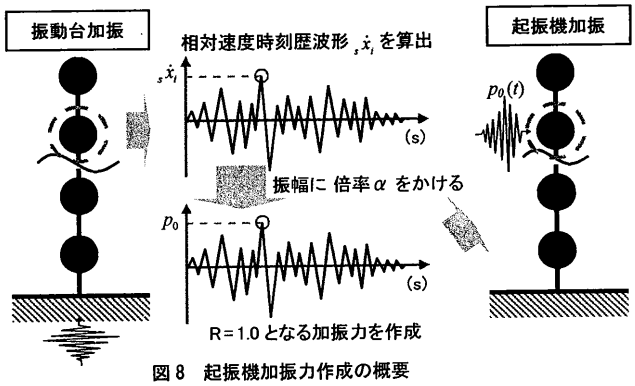


図 8　起振機加振力作成の概要

NII-Electronic Library Service

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。

本実験に用いた解析モデルは，設計値をもとに作成し，自由振動および振動台加振実験より減衰および剛性を調整している。また，ダンパーは，事前に実施した部材単体試験結果からモデル化した[6),8)]。

本実験では，試験体を設計値に基づき作成した解析モデルに地震波を入力した際の応答波形を起振機加振力として用いた。そのため，$R=1.0$ であっても，入力波形には試験体およびダンパー等のモデル化の誤差が含まれている。

3．2　目標加振力を再現するアクチュエータ変位の算出

次に，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 $x_A(t)$ の算出方法を示す。図 9 に算出フローを示す。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。

$$x_A^{(1)}(t)=x_m(t)-x_i(t) \tag{3a}$$

$$x_m(t)=\iint(p_0(t)/M_m)dtdt \tag{3b}$$

ここで，M_m は錘の質量を示す。$x_m(t)$および $x_i(t)$ は，試験体を模擬したせん断 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（2.3 節），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。

$x_A^{(n)}(t)$ での加振実験から得られた加振力を計測加振力 $p^{(n)}(t)$とする。$p^{(n)}(t)$ のフーリエスペクトル $P^{(n)}(\omega)$と，$x_A^{(n)}(t)$ のフーリエスペクトル $X_A^{(n)}(\omega)$から伝達関数 $H^{(n)}(\omega)$ を算出する（式(4a)）。次に，$p_0(t)$ をフーリエ変換した $P_0(\omega)$ に，$H^{(n)}(\omega)$を乗じて $X_A^{(n+1)}(\omega)$ を算出する（式(4b)）。$X_A^{(n+1)}(\omega)$ を逆フーリエ変換することで，アクチュエータ変位 $x_A^{(n+1)}(t)$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 E_rは 0～20 Hz（0～125.7 rad/s）の間で評価した。この作業を再現誤差 E_r[9)]が 20％未満になるまで収れん作業を行った。

$$H^{(n)}(\omega)=\frac{X_A^{(n)}(\omega)}{P^{(n)}(\omega)},\quad X^{(n+1)}(\omega)=P_0(\omega)\cdot H^{(n)}(\omega) \tag{4a,b}$$

$$Er=\frac{\int_{\omega_s}^{\omega_e}\left(P^{(n)}(\omega)-P_0(\omega)\right)^2 d\omega}{\int_{\omega_s}^{\omega_e}P_0^2(\omega)\,d\omega}\times 100 \tag{5}$$

ここで，$\omega_s=0$ rad/s, $\omega_e=125.7$ rad/s（=20 Hz）

図 10(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 10(a)）および時刻歴波形（図 10(b)）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。

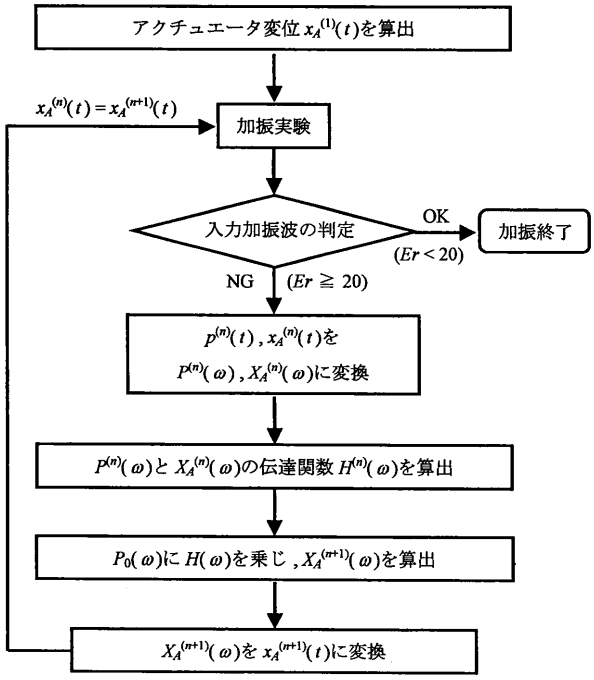
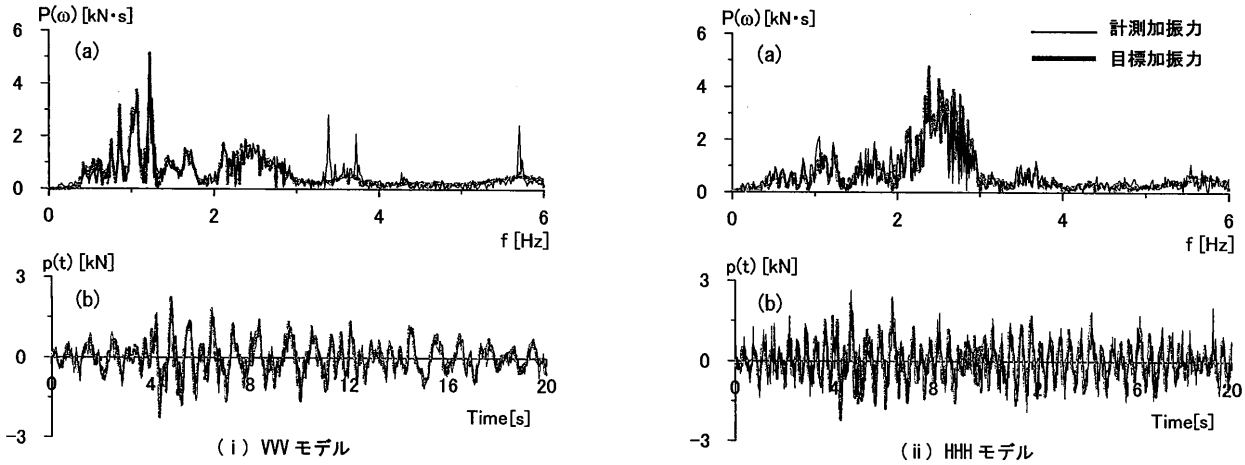


図 9　アクチュエータ変位の決定フロー



（i）WW モデル　　（ii）HHH モデル

図 10　収れん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

NII-Electronic Library Service

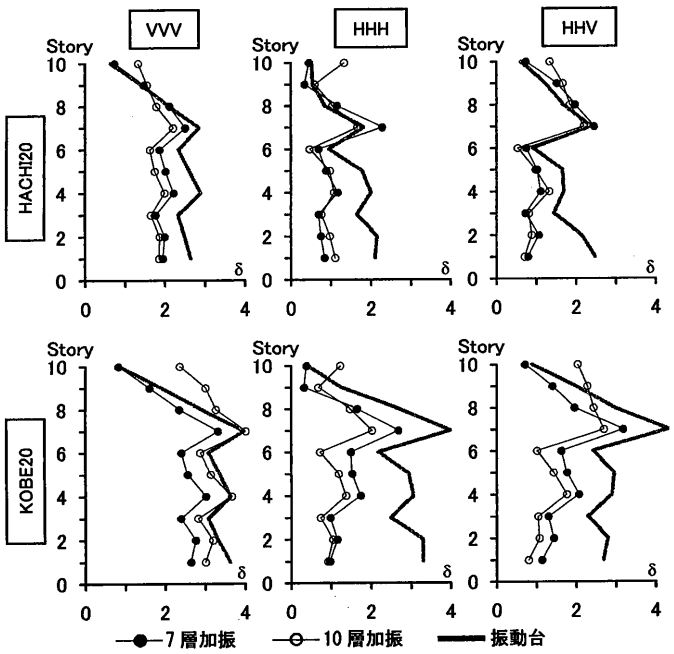


図 11　最大層間変位応答の高さ方向分布（単位：mm）

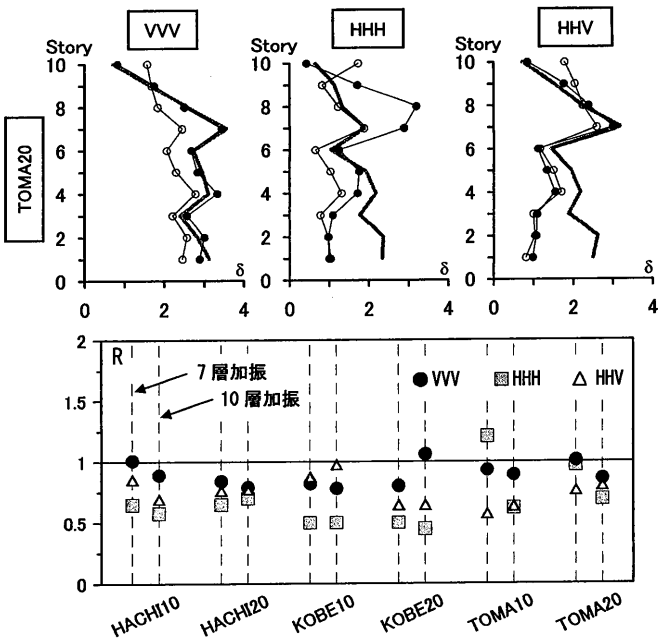
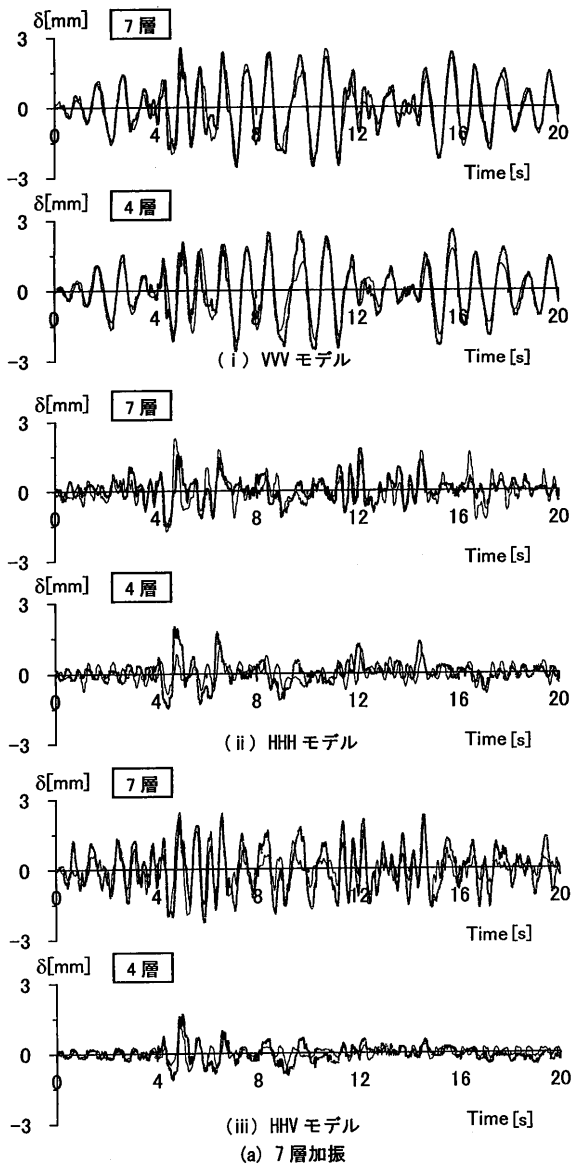
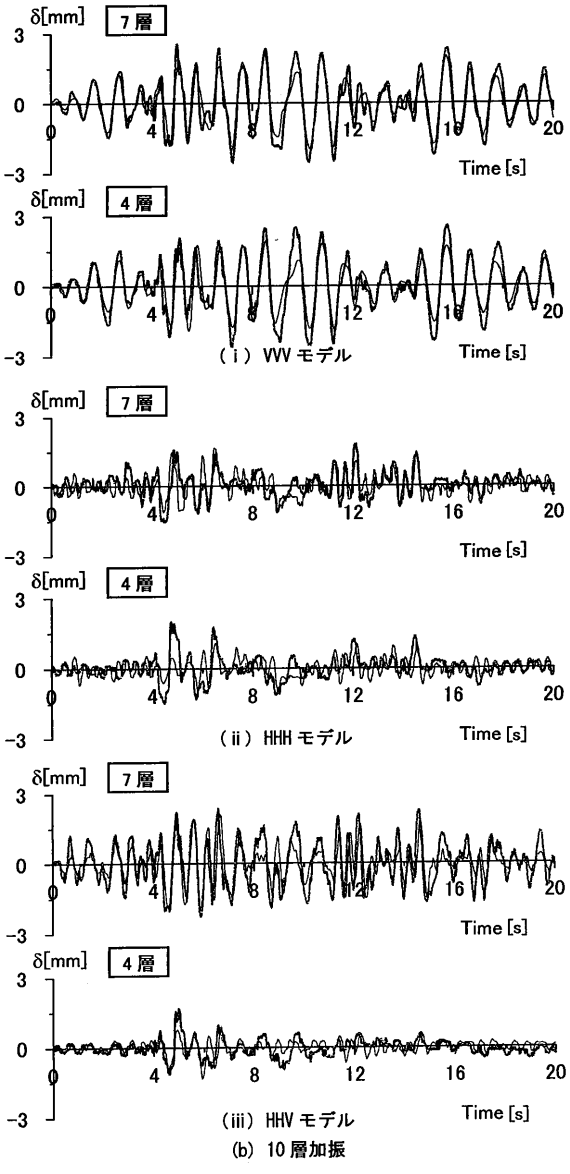


図 12　層間変形の再現性評価値
（各地震波において左から 7 層加振，10 層加振）



(a) 7 層加振



(b) 10 層加振

図 13　層間変位時刻歴波形（加振波：HACHI20）　　起振機　振動台

NII-Electronic Library Service

4．起振機加振時と振動台加振時の応答比較

4．1　層間変位

図 11 に，加振波 HACHI20，KOBE20，TOMA20 での，各層の最大層間変位 δ_i 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。図 11 より，HHH モデルおよび HHV モデルにおいて，中・下層で起振機加振時応答が振動台加振時応答を下回っているが，全モデルにおいて，加振層付近の起振機加振時応答は，振動台加振時応答と良い対応を示していることが確認できる。また，HHV モデルの応答を見ると，7 層加振および 10 層加振のいずれに対して，履歴ダンパーと粘性ダンパーの配置の境界である 6 層および 7 層で，振動台加振時応答を再現していることが確認できる。HHH モデルの全層および HHV モデルの中・下層で，VVV モデルに比べ誤差が大きい結果となった。これは，履歴ダンパーを設置した層で，ダンパーの降伏変位を境に層の剛性が大きく変化し，加振力の振幅の大小が層間変形に大きく影響するためである。10 層加振において，10 層の層間変位応答が，振動台加振時応答を上回っていることが確認できる。これは，本実験手法により加振力を作成する際，応答が大きくなる階に重みを置いた評価 R を用い，層間変位応答の小さい 10 層の再現が低下するためである。加振力を作成する際，応答の小さい層での加振は注意が必要である。

図 12 に式 (1) を用いて算出した最大層間変位の再現性評価値 R を示す。縦軸は R，横軸は加振波であり，各地震波について，左に 7 層加振，右に 10 層加振を並べて示している。図 12 より，VVV モデルにおいて，R は加振波に関わらず，7 層および 10 層加振のいずれに対して，25％以内の誤差に留まっていることが確認できる。一方，HHH モデルおよび HHV モデルでは加振波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分かる。また，3.1 節でも述べたように起振力として解析モデルの床応答速度波形を用いているため，モデル化の誤差 [8] が応答に影響していることも考えられる。

起振機加振による振動台加振応答の再現性を，7 層加振と 10 層加振で比較すると，各層の最大層間変位の分布（図 11）は似た形状を示し，再現性評価値 R（図 12）においても大きな違いは見られない。

図 13(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 s とする。図 13(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，波形の傾向を捉えていることが確認できる。HACHI20 以外の加振波でも，起振機加振時応答と振動台加振時応答が，良い対応関係を示していることを確認している。

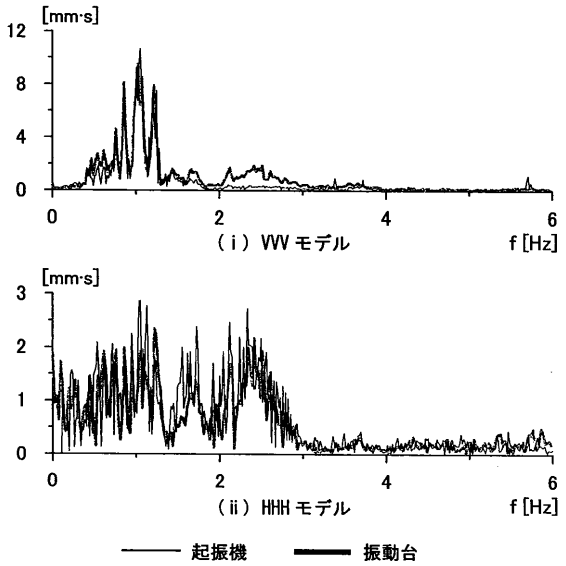


図 14　7 層における層間変位フーリエスペクトル
（7 層加振，加振波：HACHI20）

層間変位応答に含まれる周波数成分を比較するために，7 層のフーリエスペクトルを起振機加振時と振動台加振時の結果を重ねて図 14 に示す。加振条件は，7 層加振 HACHI20 である。VVV モデルにおいて，2 次固有振動数（=2.83 Hz）付近で再現性が低いが，VVV モデルおよび HHH モデルともに起振機加振時応答が振動台加振時応答のスペクトル形状を捉えている。

4．2　層せん断力

図 15 に，加振波 HACHI20，KOBE20，TOMA20 での，各層の最大層せん断力 Q_i 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。図 15 より，VVV モデルにおいて，下層で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。HHH モデルおよび HHV モデルにおいては，中・下層で起振機加振時応答が振動台加振時応答を下回り再現性が低いことが確認できる。7 層加振と 10 層加振で比較すると，7 層加振では，7 層付近で膨らむ形状を示し，10 層加振では，10 層付近で膨らむ形状を示すが，大きな違いは見られない。

図 16(a)，(b)に，加振波 HACHI20 での，7 層加振および 10 層加振における層せん断力時刻歴波形を示す。図 13 同様，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し，

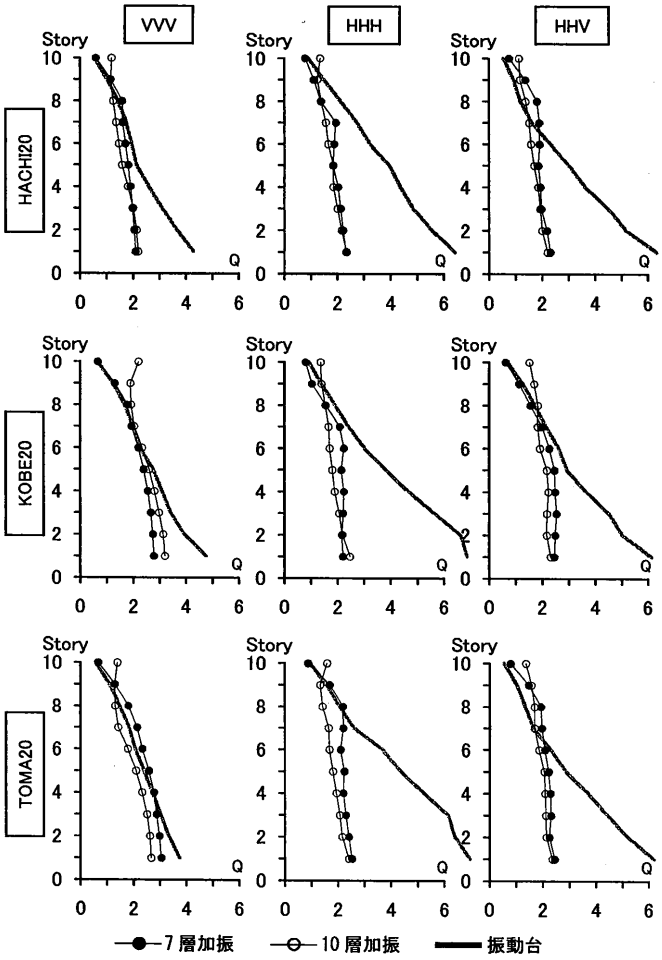


図 15　層せん断力の高さ方向分布（単位：kN）

NII-Electronic Library Service

時間軸は主要動部分を含む0~20sとする。図16(a), (b)に示すように，VVVモデルは7層加振および10層加振共に起振機加振時応答は振動台加振時応答と良い対応を示していることが確認できる。しかし，高振動数成分の再現はできていない。また，HHHモデルおよびHHVモデルの起振機加振時応答は，7層加振および10層加振共に振動台加振時応答の再現性は低いことが確認できる。

図17に，7層の層せん断力応答のフーリエスペクトルを起振機加振時と振動台加振時の結果を重ねて示す。加振条件は，7層加振HACHI20である。VVVモデルおよびHHHモデルともに，1次固有振動数付近で起振機加振時応答が振動台加振時応答を大きく上回っているがスペクトル形状を捉えていることが確認できる。

起振力として床応答速度波形を用いているため（3.1節），高次モード成分を小さくしてしまい，本実験手法により作成した加振力では，高次モードまで応答を再現することはできない。

4．3　ダンパーによるエネルギー吸収量

ダンパーによるエネルギー吸収量 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18に，加振波HACHI20，KOBE20，TOMA20での，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。VVVモデルにおいて起振機加振時応答は，

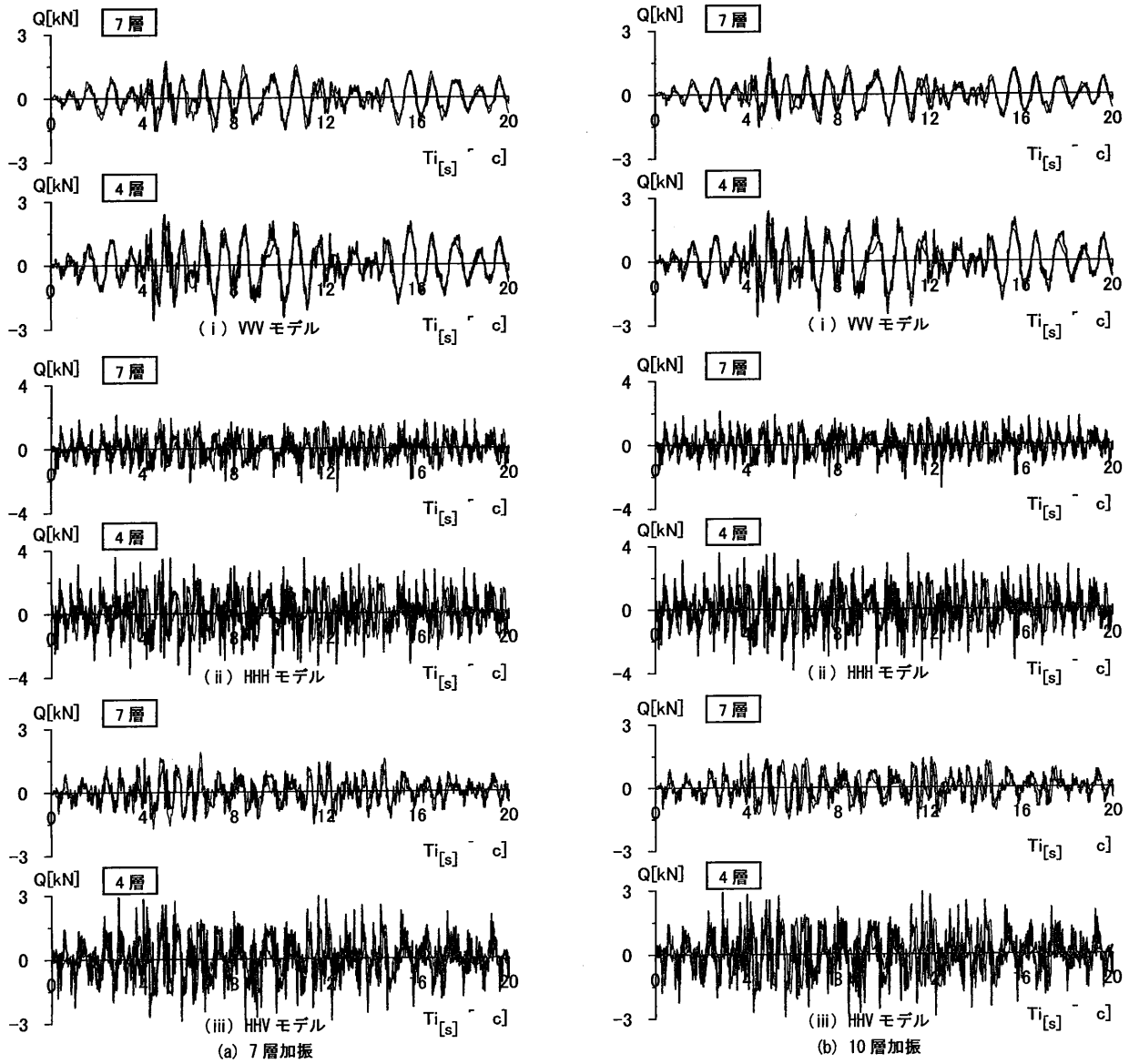


図16　層せん断力時刻歴波形（加振波:HACHI20）

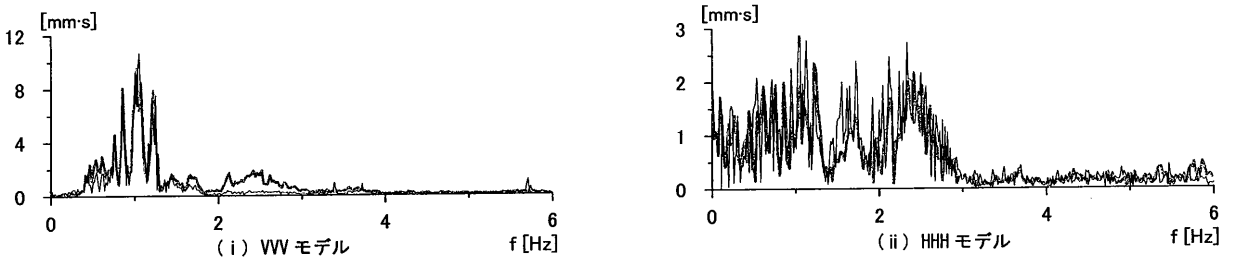


図17　7層における層間変位フーリエスペクトル（7層加振，加振波:HACHI20）　——— 起振機　━━━ 振動台

NII-Electronic Library Service

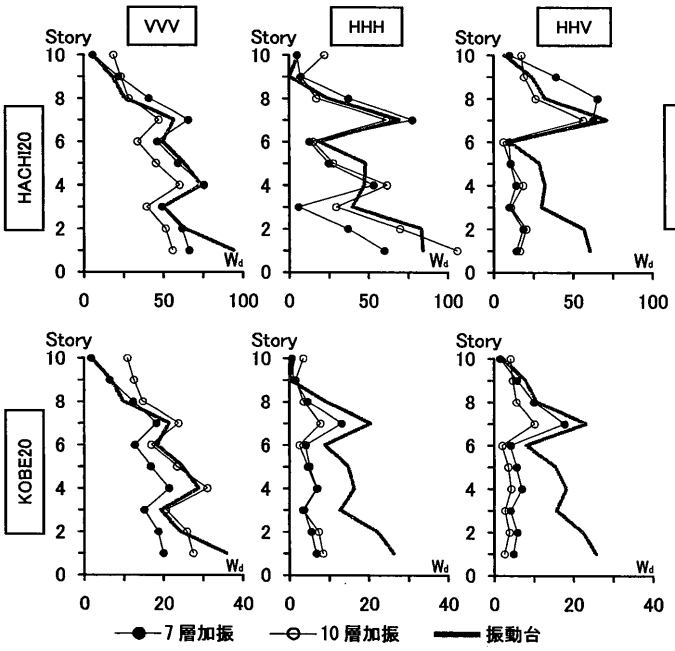


図 18　ダンパーによるエネルギー吸収量の高さ方向分布（単位：kN·mm）

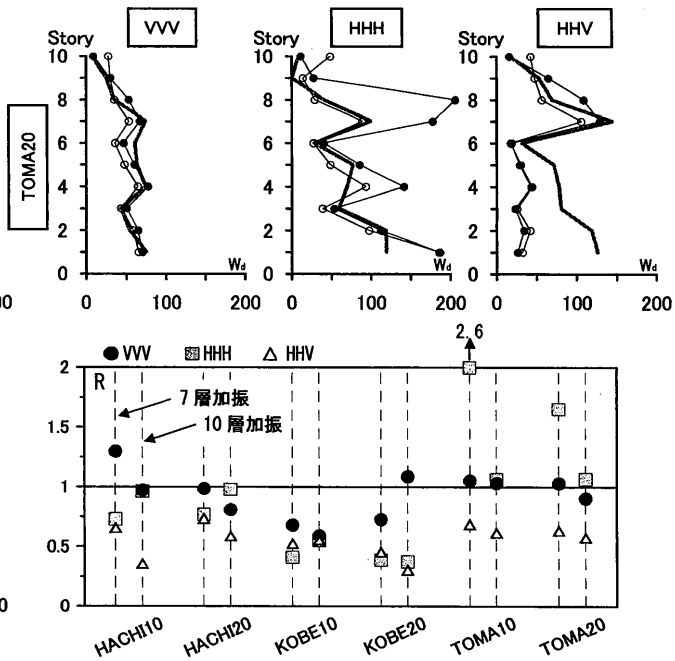


図 19　ダンパーによるエネルギー吸収量の再現性評価値
（各地震波において左から 7 層加振，10 層加振）

全層で振動台加振時応答の形状を概ね捉えていることが確認できる。HHH モデルおよび HHV モデルにおいて，起振機加振時応答は，加振層付近で振動台加振時応答を概ね良い対応関係を示している。4.1 節でも述べたように，履歴ダンパーを設置した層では，ダンパーの降伏変位を境に層の剛性が大きく変化し，加振力の振幅の大小がダンパー変形に大きく影響する。そのため，加振波 HACHI20 において，変形の小さい HHH モデルの 7 層および 8 層で起振機加振時応答が振動台加振時応答を上回っている。同様の理由で，HHV モデルの中・下層で起振機加振時応答が振動台加振時応答を下回っている。HHV モデルの応答を見ると，7 層加振および 10 層加振のいずれに対して，履歴ダンパーと粘性ダンパーの配置の境界である 6 層および 7 層で，振動台加振時応答を再現していることが確認できる。

図 19 に式 (1)を用いて算出したダンパーによるエネルギー吸収量の再現性評価値 R を示す。図 19 より，VVV モデルは，加振波 KOBE10 以外で 30 %以内の誤差に留まる。HHH モデルおよび HHV モデルでは加振波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。

起振機加振による振動台加振応答の再現性を，7 層加振と 10 層加振で比較すると，VVV モデルにおいて，各層の W_d の分布（図 18）および再現性評価値 R（図 19）で，7 層加振時応答と 10 層加振時応答で大きな違いは見られない。HHH モデルは，加振波 HACHI および TOMA で，10 層加振の方が振動台加振時応答の再現性が高いことが再現性評価値 R から確認できる。一方，HHV モデルにおいて，7 層加振で若干再現性が高いことが再現性評価値 R から確認できる。

図 20 に，加振波 HACHI20 での，7 層加振および 10 層加振における W_d の時刻歴波形を示す。7 層および 4 層の応答波形において，7 層加振，10 層加振時と振動台加振時の結果を重ねて示す。図 20 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は振動台加振時の増加傾向を概ね傾向を捉えていることが確認できる。また，加振層付近である上層において，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，加振層から離れる下層で，再現性が低下することが確認できる。

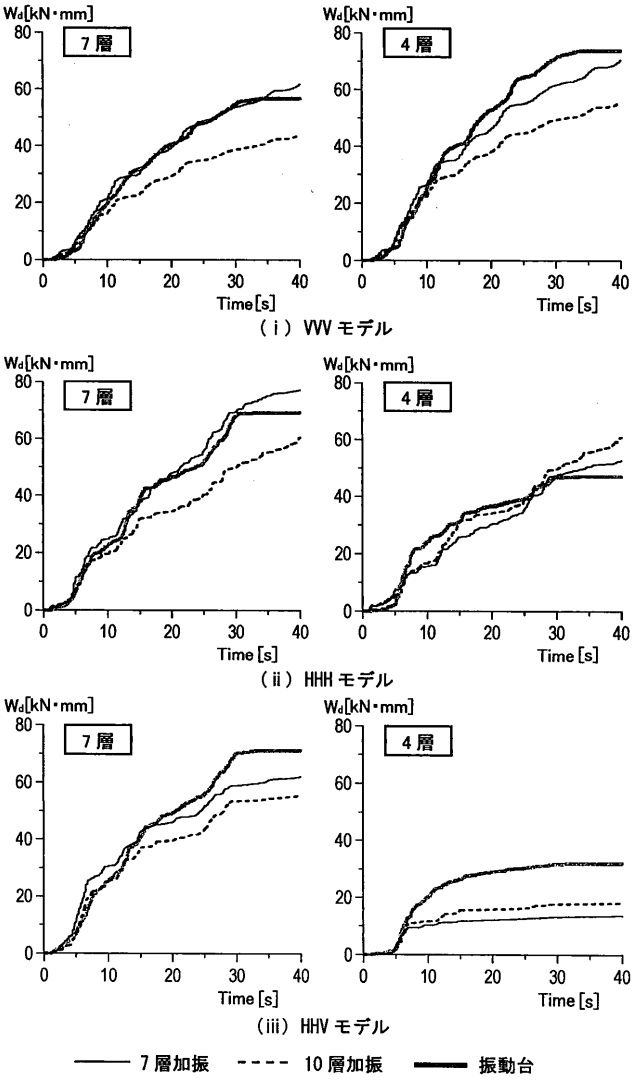


図 20　ダンパーによるエネルギー吸収量の時刻歴波形
（加振波：HACHI20）

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

5．おわりに

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配置したモデルを対象として，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 [6]の比較を行うことで，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。全加振波において，計測加振力が目標加振力を十分な精度で再現していることが確認できた。

(2) 各層の最大層間変位応答を，起振機加振時と振動台加振時で比較すると，起振機の加振層付近では振動台加振時を良く再現し，下層では，振動台加振時を下回り再現性が低いことを示した。また，層間変位時刻歴波形については，振幅にばらつきが見られるが，波形や周波数の特性を捉えていることが確認できた。

(3) 層せん断力について，起振機加振時と振動台加振時で比較すると，起振機加振による振動台加振応答の再現性は低いことが確認できた。

(4) ダンパーによるエネルギー吸収量について，起振機加振時と振動台加振時で比較すると，7 層加振および 10 層加振のいずれに対して，起振機加振時応答は振動台加振時の増加傾向を概ね再現していることが確認できた。ただし，加振層から離れる層の再現は低下する。

(5) 7 層加振と 10 層加振で振動台加振応答の再現性について比較すると，本実験において，7 層加振と 10 層加振に大きな差異は確認できなかった。

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) 日本建築技術者協会：応答制御構造設計法，彰国社
2) 例えば，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) 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
4) 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
5) 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
6) 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
7) 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
8) 岩崎雄一，添田幸平，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：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3－その5），日本建築学会大会学術講演梗概集，B－2，p.p.95-100，2010.9
9) 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

NII-Electronic Library Service