

## 3変数制御器及び4変数制御器を用いた 中型振動台の加振制御性能について

渡辺紗綾香<sup>1</sup>・梶原浩一<sup>2</sup>・佐藤栄児<sup>2</sup>・光田真旅<sup>1</sup>・田川泰敬<sup>1</sup>・高井茂光<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京農工大学 生物システム応用科学研究科 (〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16)

<sup>2</sup>防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

<sup>3</sup>西松建設(株)技術研究所 建築技術研究課 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4054)

The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) is now conducting for constructing a three-dimensional full scale earthquake testing facility (E-defense). The shaking table in this facility will be equipped basic controller designed by Three Variable Control (TVC) technique. However the Procedure to determine the control gain has been entrusted to the experience of the person who adjusts the gain. Therefore the procedure has not been clarified. In the previous study we proposed three variable control technique by which the controller gain is determined. This study shows the experimental results of the TVC control system with middle class shaking table.

**Key Words :** *Shaking Table, Acceleration control, Three-Variable-Control  
Vibration control, Feed back control, Four-Variable-Control*

### 1. はじめに

地震による構造物の破壊過程を解明するために、現在、実大三次元震動破壊実験装置（以下「E-ディフェンス」）が建設中である<sup>1)</sup>。この震動台は、完成すれば震動台質量750ton、搭載面積20m×15m、最大搭載質量1200tonの世界最大規模となる。

振動台を用いた耐震実験では、地震動を忠実に再現することが要求される。そのため、これまでに多くの振動台の制御に関する研究が行われている<sup>2)</sup>。このE-ディフェンスでは、地震動を再現するために3変数制御手法による制御器が実装される。今後、さらに高度な制御アルゴリズムの開発、適用の必要性が述べられており<sup>2)</sup>、それらの検討を行うためには、この制御手法の性能を十分に把握する必要がある。しかし、この3変数制御手法のゲイン決定方法は調整者の経験に委ねられる部分が大きく、一般には明らかとなっていない。そこで、先の研究では、制御系の構成を検討し論理的な筋道でゲインを決定する3変数制御器設計方法、またそれを拡張した4変数制御手法を提案した<sup>3)</sup>。

本研究では、3変数制御手法および4変数制御手法によって設計された制御器を、実際の加振実験に使用している建設会社所有の振動台

（以下「中型振動台」）に実装し、制御系の安定性と波形追従性を加振実験により検討した。

### 2. 実験装置

本研究では、中型振動台において加振実験を行った。図1に試験体を搭載している状態の中型振動台の写真、図2に試験体の図面を示す。また、表1に中型振動台の仕様、表2に試験体の仕様を示す。

中型振動台は質量が40tonであり、加振機がx方向に2本、y方向に2本、z方向に4本の計8本からなる。y方向加振機にはリンク継手方式、xおよびz方向加振機にはスイングアクチュエータ方式がそれぞれ用いられている。

また、試験体は高さ7m、質量41tonの3層フレーム構造からなり、4隅の足の部分に設置された積層ゴムで支えられている。試験体の質量41tonのうち20tonがおもりとして2階部分に固定されており、これにより大きく転倒モーメントを発生させる構造となっている。また、試験体の1階部分から上に約1.5mのところ試験体と振動台を弾塑性部材で連結している。この弾塑性部材はx方向には拘束されておらず、y方向にのみ働く。

図3に本実験装置における信号の流れを示す。図のように、本装置にはアナログコントローラ

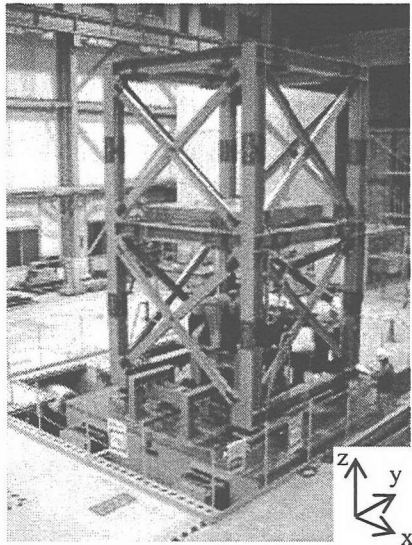


図1 試験体搭載時の中型振動台

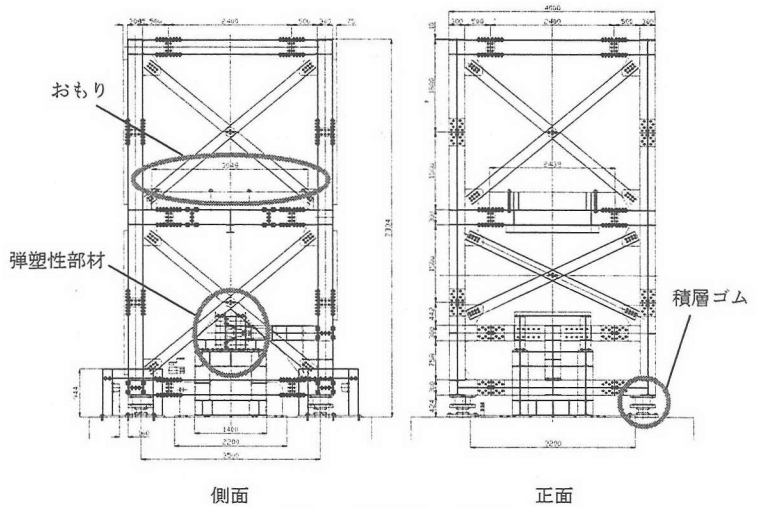


図2 試験体の図面

表1 中型振動台の仕様

所有機関	西松建設株式会社
テーブルサイズ (m×m×m)	5.5×5.5×1.5
テーブル質量 (ton)	40
試験体搭載重量 (ton)	最大:65 定格:35
最大変位 (mm)	X:±200 Y:±500 Z:±200
最大速度 (cm/s)	X:±100 Y:±150 Z:±100
最大加速度 (G)	X:±2.0 Y:±2.0 Z:±2.0
駆動方式	電気油圧式サーボ
加振周波数	DC~50[Hz]
製作メーカー	三菱重工業

表2 試験体の仕様

フレーム質量 (ton)	約15	
おもり (ton)	20 (2階床に設置)	
高さ (mm)	1階柱長	3000
	2階柱長	3000
柱 (mm×mm)	300×300 (H鋼) 4本	
ブレース (mm×mm)	C200×80	

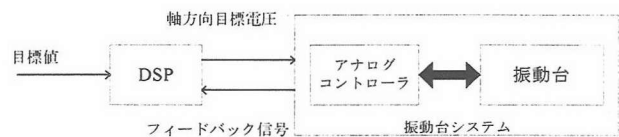


図3 信号の流れ

がすでに装備されている。アナログコントローラ内では振動台表面中心の変位目標値（以下「軸方向目標電圧」）を各加振機（油圧アクチュエータ）の変位目標値（以下「加振機目標電圧」）に変換し、その加振機目標電圧が各加振機（8本）の変位比例制御系に入力されるしくみになっている。振動台表面中心の軸方向目標電圧から加振機目標電圧への変換は基本的には幾何学的に求めている。また、変位比例制御も基本的には変位信号をフィードバックして加振

機目標電圧との偏差をとっているが、単純な変位のみでの制御ではなく、他に加振機の差圧信号も用いていると考えられる。しかし、これらの詳細は公開されていない。

また、本実験装置は、加振機を含めた振動台内の種々の信号を外部信号として取り出すことができ、本研究ではこれらの信号を用いて加速度フィードバック制御を行った。

実験では、図3において、設計した3変数制御器（Three Variable Controller; 以下「TVC」）および4変数制御器（Four Variable

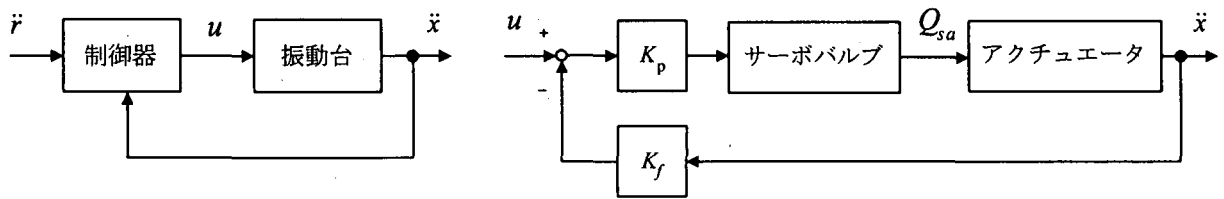
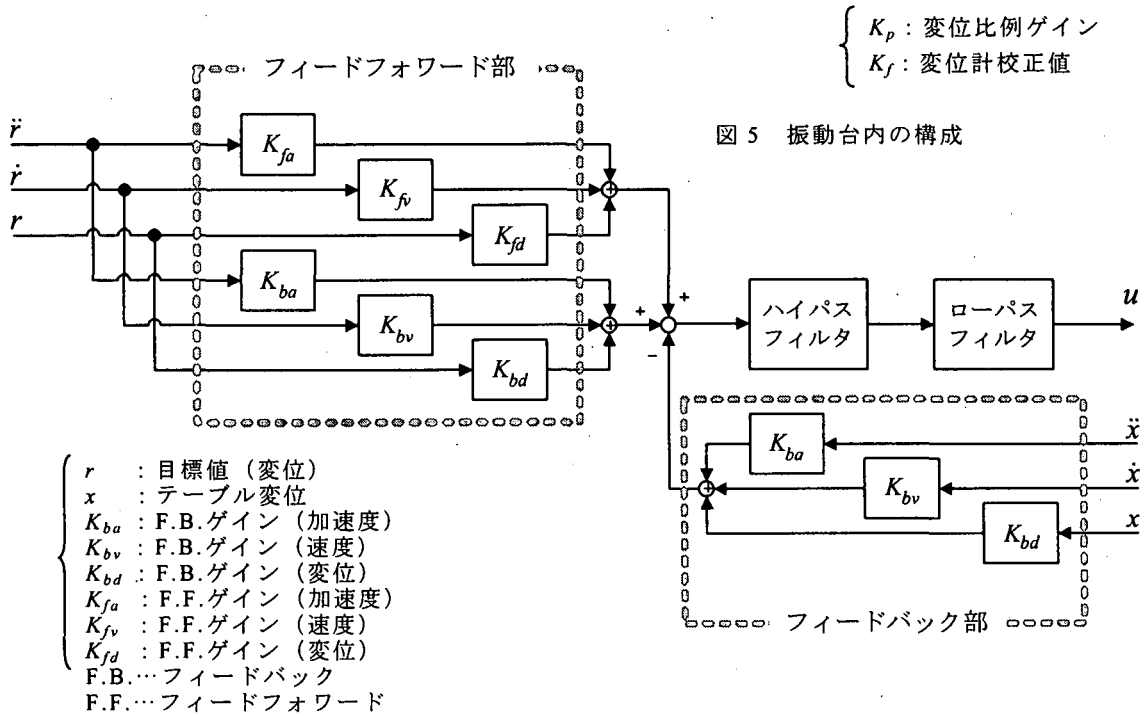


図4 制御系全体図



- $r$  : 目標値 (変位)
- $x$  : テーブル変位
- $K_{ba}$  : F.B.ゲイン (加速度)
- $K_{bv}$  : F.B.ゲイン (速度)
- $K_{bd}$  : F.B.ゲイン (変位)
- $K_{fa}$  : F.F.ゲイン (加速度)
- $K_{fv}$  : F.F.ゲイン (速度)
- $K_{fd}$  : F.F.ゲイン (変位)
- F.B. … フィードバック
- F.F. … フィードフォワード

図6 制御器内の構成

Controller;以下「FVC」)をDSPに組み込み、フィードバック信号を用いてDSP内で演算を行い、DSPからの出力を軸方向目標電圧として振動台システムに入力するしくみとなっている。

### 3. 制御系の構成

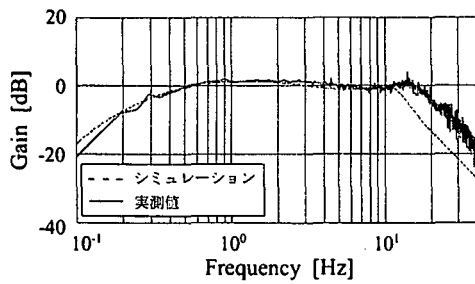
図4に本研究で用いた制御系の構成を示す。制御系は、振動台のプラント、設計したTVC制御器で構成されている。ここで、 $\ddot{r}$ は目標値(加速度)、 $u$ は操作電圧、 $\ddot{x}$ は振動台のテーブル加速度である。

また、図5に図4における振動台プラント内のモデルの構成を示す。この中型振動台には基本の制御系として、あらかじめ変位比例制御が振動台システムの一部として内蔵されている。そこで本研究で用いた数学モデルにも、この変位比例制御を考慮したものを使用した<sup>4)</sup>。ここで、 $Q_{sa}$ はサーボ弁出力流量(作動油流量)であり、これが油圧アクチュエータの動作シリン

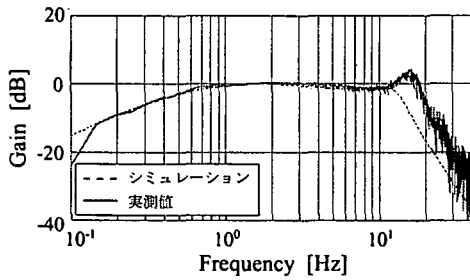
ダを経てアクチュエータ加速度へと変換される。

さらに、図6に図4における制御器内の構成を示す。制御器はTVCと、入力電圧のオフセットを除去するハイパスフィルタ、モデルの有効周波数帯域を定めるローパスフィルタによって構成されている。TVCは目標値を制御対象の状態量の変位、速度、加速度の3つそれぞれの偏差にフィードバックゲインを乗算して制御対象に戻すフィードバック部と、目標値の変位、速度、加速度それぞれにフィードフォワードゲインを乗算し制御対象に入力するフィードフォワード部により構成される。

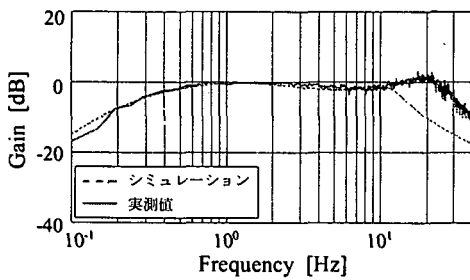
また、FVCはTVCが変位、速度、加速度の3つの状態量を用いているのに対して、さらに加加速度を加えた4つの状態量を用いることで、制御帯域を拡大することを目的としている。TVCとFVCでは、その制御器の動作に共通の部分が多く、全く同じ手段で設計を行うことが可能である。



(a) TVC\_PIANE

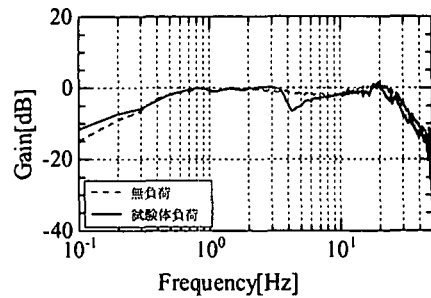


(b) TVC\_FOLTE

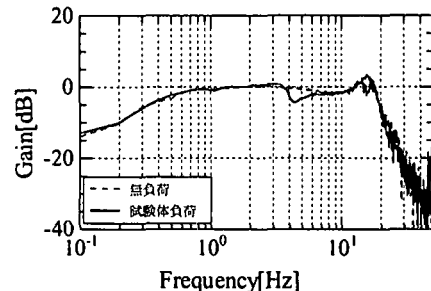


(c) FVC

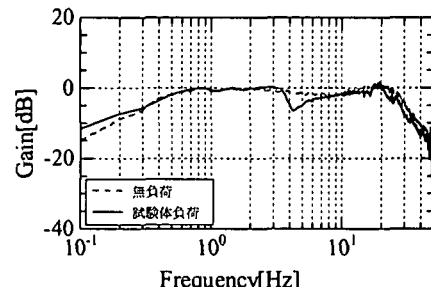
図7 シミュレーション結果と実験結果の周波数応答の比較（無負荷）



(a) TVC\_PIANE



(b) TVC\_FOLTE



(c) FVC

図8 試験体の有無による周波数応答の比較

表3 制御器の種類

制御器	性質の重点
TVC_PIANE	制御系安定性能
TVC_FOLTE	波形再現性能
FVC	制御系安定性能

制御器を設計する際の6つのパラメータ ( $K_{ba}$ ,  $K_{bv}$ ,  $K_{bd}$ ,  $K_{fa}$ ,  $K_{fv}$ ,  $K_{fd}$ ) の決定方法の詳細は、先の研究を参照とする<sup>3)</sup>。

#### 4. 実験結果

表3に本研究で用いた制御器を示す。制御器はTVCとFVCの2種類である。さらに、TVCにおいては、制御系安定性能と波形再現性能にそれぞれ重点をおいたものを2種類設計し、FVCにおいては、制御系安定性能に重点をおいたも

のを設計した。これら計3種類の制御器を用いて実験をおこなった。

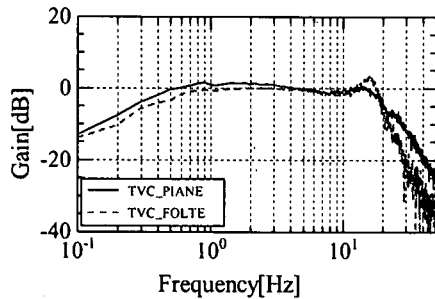
加振実験はy方向にランダム波（周波数：0.1～40Hz，最大加速度：4m/s<sup>2</sup>），および神戸海洋気象台観測波（1997,1,兵庫県南部地震）NS加速度成分を目標値として入力し，y，z， $\theta_x$ の3軸方向を制御することとした。

ここでは、紙面の関係から並進y方向の性能について述べる。

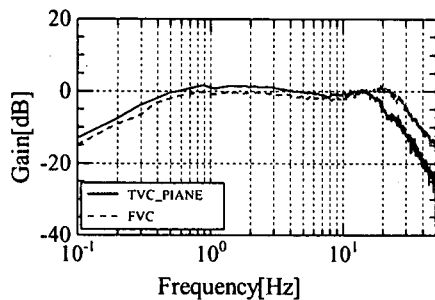
##### (1) ランダム波加振

###### a) シミュレーション結果と実験結果の比較

図7に表3で示した3種類の制御器に対して、試験体無負荷の状態での、シミュレーション結果と実験結果の周波数応答の比較を示す。10Hzまではほぼシミュレーションと同じ結果となっているが、10Hz以上では実験値の方が、高周波帯域まで追従した結果となっている。これはシミュレーションモデルの高周波帯の位相が実プラントと一致していないためと考えられる。今



(a) TVC\_PIANE と TVC\_FOLTE



(b) TVC\_PIANE と FVC

図9 各制御器の比較 (無負荷)

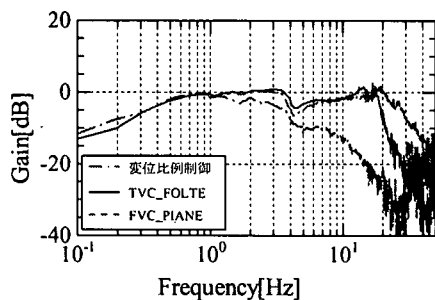
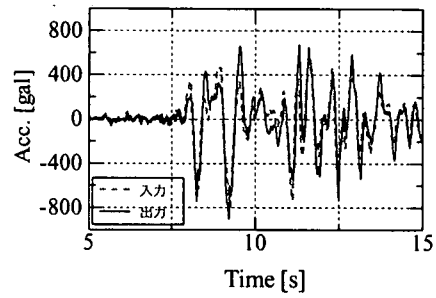
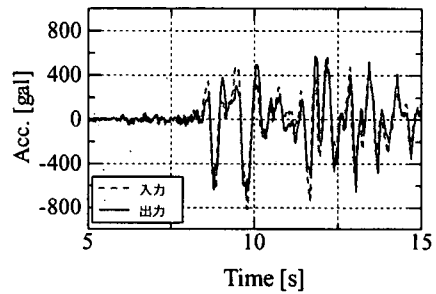


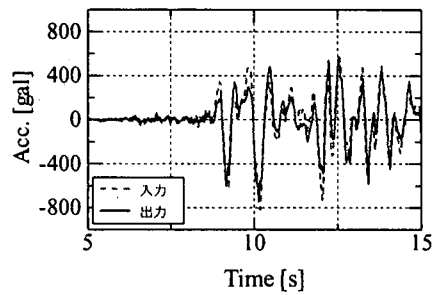
図10 変位比例制御との比較  
(試験体負荷)



(a) TVC\_PIANE



(b) TVC\_FOLTE



(c) FVC

図11 JMA 神戸地震波の時系列 (無負荷)

後の検討課題である。

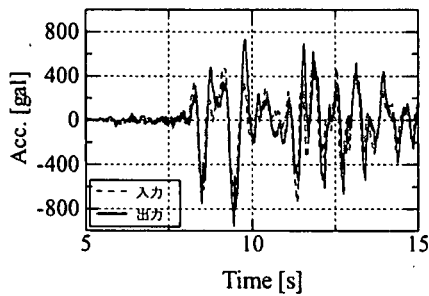
**b) 試験体有無の比較** 図8にそれぞれの制御器について、試験体の有無による周波数応答の比較を示す。図より、試験体の有無に関わらずTVCでは約15Hzまで、FVCでは約20Hzまでの周波数追従性能が安定に見られた。試験体負荷による影響が、約4.2Hz近傍に見られるが、その大きさは同じTVCであってもフィードバックゲインを大きめに設計した(b)の方が小さい。ただし、15Hz近傍のゲイン増幅もまわっている。

**c) 各制御器の比較** 図9に試験体無負荷の状態での各制御器の周波数応答の比較を示す。(a)より、TVCのフィードバックゲインの強弱について比較すると、追従周波数帯域はほぼ同等であるが、フィードバックゲインが大きいTVC\_FOLTEの方が若干15Hz近傍のゲインを増幅している。また、(b)のTVCとFVCの比較

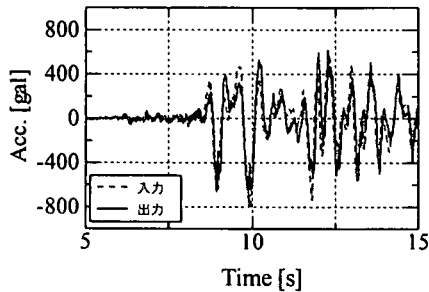
では、先に述べたが、TVCでは約15Hz、FVCでは約20Hzまでの周波数追従特性がみられる。

**d) 変位比例制御との比較** 本実験で使用した中型振動台のシステムには、あらかじめ変位比例制御が内蔵されている。そこで、この変位比例制御のみと、それにTVCおよびFVCを付加したものとを比較する。図10に変位比例制御とTVCおよびFVCを付加したものの周波数応答の比較を示す。図より、4.2Hz近傍の試験体の影響も含め、TVC、FVCでは大きく性能が向上しているのがわかる。

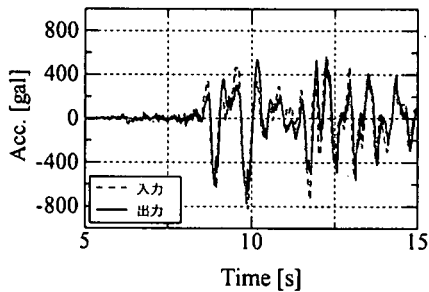
本振動台に実装されている制御方式には、本実験の前に数回の試加振を行い、その応答波形を基本にオフラインで入力波形に補償を加える、反復入力補償などがある。これらにより、高い加振性能を確保しているが、ここで検討するTVC制御手法にも付加的に適用できるため、今回の比較には、基本的なサーボ制御として、



(a) TVC\_PIANE



(b) TVC\_FOLTE



(c) FVC

図12 JMA神戸地震波の時系列  
(試験体負荷)

振動台に実装されている，単純な変位信号による変位フィードバック制御（1自由度PID制御）を用いた。

(2) **JMA神戸地震波加振** 各制御器において，それぞれ無負荷時と試験体負荷時に神戸海洋気象台観測波（1997,1,兵庫県南部地震）NS加速度成分を入力波として，加振実験を行った。図11，図12にJMA神戸地震波NS成分（加速度）の入力と，振動台のテーブルの加速度の出力をそれぞれ時系列で示す。図11，図12の加速度とも，若干高周波成分の落ち込みが見られるが，良好な追従を示していると考えられる。図12の負荷の影響であるが，入力波成分に4.2Hz近傍の成分が少ないため，図11と比較しても顕著な差はみられなかった。

## 5. 結論

本研究では，3変数制御手法および4変数制

御手法によって設計された制御器を中型震動台に実装し，振動台質量とほぼ同等の試験体負荷と無負荷のそれぞれの状態で，制御系の安定性と波形追従性を加振実験により検討した。また，3変数制御から4変数制御に拡張することで，制御帯域の拡大，制御系の安定性と波形追従性について調べた。

その結果，3変数制御では15Hz，4変数制御では20Hzまでの安定した追従性能がみられ，3変数制御手法および4変数制御手法の設計法の有効性と，それぞれの方法により設計された制御器の本実験での性能を確認した。

謝辞：本研究は，科学技術振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関する研究」の一環として行われたものである。主査のいわき明星大学・清水信行教授には適切なお指導，ご助言を頂いた。また，いわき明星大学の大学院生の篠原雄一郎氏および研究室の皆様には，他手法を含む研究討議に参加いただき，本研究を成果あるものにした。ここに厚くお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) T.Katayama,K.Otani, et al.,第10回地震工学シンポジウム論文集,(1998),2221.
- 2) 松崎・平井,機論,42-353,(1976),135
- 3) 梶原・佐藤ほか, 振動台加振制御を目的とした加速度フィードバックによる3変数制御器設計方法,第4回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポ. ジウム論文集,(2003),投稿中
- 4) 掛川・鈴木ほか,実大3次元震動破壊実験装置の線形化モデル,第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポ. ジウム論文集,(2002),47.