

# 試験体の動特性の変動が振動台再現波形に 与える影響について

佐藤栄児<sup>1</sup>・梶原浩一<sup>2</sup>・山田哲<sup>3</sup>・清水信行<sup>4</sup>・  
田川泰敬<sup>5</sup>・高井茂光<sup>6</sup>・上田智士<sup>7</sup>

<sup>1</sup>工修 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>2</sup>工博 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>工博 東京工業大学助教授 建築物物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

<sup>4</sup>工博 いわき明星大学教授 理工学部 機械工学科 (〒970-8551 福島県いわき市中央台飯野5-5-1)

<sup>5</sup>工博 東京農工大学助教授 生産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>6</sup>工修 西松建設(株) 愛川衝撃振動研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4054)

<sup>7</sup>株式会社エーエス 開発技術部 (〒131-0034 東京都墨田区堤通1-18-26)

Reproducibility of excitation waves is an important factor in destructive experiments of large-scale structures with a shaking table. However, the effect of changes in dynamic characteristics or destruction of test models on the reproducibility has not been quantitatively clarified.

A model structure with bi-linear characteristics was prepared, and the effect of the changes in dynamic characteristics was examined using a medium-sized shaking table.

*Key Words : Shaking Table, Dynamic Interaction, Bi-linear Model*

## 1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では6400人余りの方々の方が亡くなり、数十万人の人々が家を失う被害が発生した。またちょうど1年前の1994年1月17日、アメリカのロサンゼルス近郊を震源としたノースリッジ地震でもビルの倒壊やライフライン施設に大きな被害が発生した。これらの地震では、現代都市機能と社会基盤施設のもろさを浮かび上がらせた。これらの地震被害の経験からそれまで安全だと考えられていた構造物の中にも安全でないものがあることがわかってきた。そこで地震による構造物の破壊過程を解明するため、防災科学技術研究所は、三次元地震動を再現する大型震動台を提案し、現在「実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)」の整備を進めている。

このE-ディフェンスでは、様々な形態の試験体を搭載し試験体が破壊してその特性を変化させていく中でも、地震動を正確に再現することが要求される。これまで大小さまざまな振動台が製作されてきているが、破壊実験を主目的とした大型の振動台は過去に例がない。そのため、今まで試験体が破壊しその特性を変化させていく中で震動台上の波形がどれくらいの精度で再現されるか検討されていない。試験体の破壊による振動台再現波形への影響を把握した上で、その影響を低減させるための加振制御手法な

どの新たな技術の検討が必要となってくる。

そこで、本件研究では、中型振動台用に破壊を模擬できる試験体を製作し中型振動台に搭載し試験体の破壊が振動台再現波形に与える影響を確認し、その影響を低減するために検討した加振制御手法の実証実験を行った。

本報告では、これらの実証実験うち、試験体の特性と再現波形への影響について報告する。

## 2. 実験装置

### (1) 振動台

実験に用いた振動台は西松建設(株)が所有する振動台であり、その仕様を表1に外観図を図1に示す。本振動台は3次元6自由度の動きが可能であり、駆動方式はE-ディフェンスと同じくアキュムレータ蓄圧式の油圧アクチュエータを用いている。振動台と油圧アクチュエータを結合する方法に関してはX, Z軸に関してはアクチュエータの前後に球面軸受けを用いたスイング方式で、Y軸に関しては、アクチュエータと振動台の間にリンク継ぎ手を用いたリンク継ぎ手方式である。本実験では、水平1方向のみの加振を想定しているため、最大変位が大きく、振動台と油圧アクチュエータの結合方式がE-ディフェンスと同じであるY軸方向で加振実験を実施す

表 1 振動台仕様

項目	緒元
振動台	5.5m×5.5m×1.5m, 40t
駆動方式	電気・油圧サーボ方式
試験体搭載質量	最大 65t, 定格 30t
最大変位	X: ±200mm Y: ±500mm Z: ±200mm
最大速度	X: ±100cm/s Y: ±150cm/s Z: ±100cm/s
最大加速度	X: ±2.0G Y: ±2.0G Z: ±2.0G
加振周波数	DC~50Hz
製作メーカー	三菱重工業

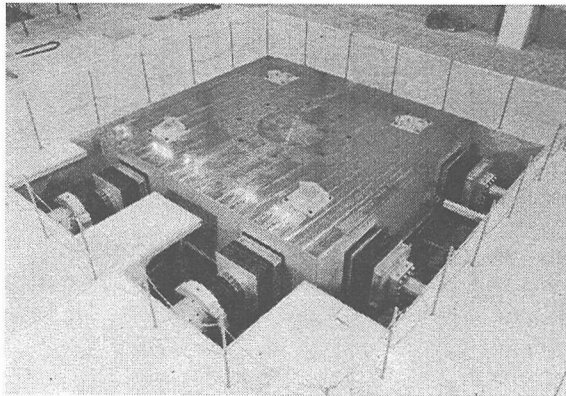


図 1 振動台外観図

ることとした。

本振動台に実装されている制御方式としては、数回の試加振を行い、その応答波形を基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り選択可能である。しかし、これらの入力補償は各種のサーボ制御手法に対して適用可能であるため、今回の実験では用いず、基本的なサーボ制御として振動台に実装されている変位信号によるフィードバック制御（PID制御）を用いて実施した。

## (2) 試験体

今回の実験の目的は、試験体の破壊が振動台再現波形へ与える影響の調査と、その影響を低減化するために検討した加振制御手法の実証実験を行い、その手法の有効性について確認することである。そのため、試験体は破壊現象を示しかつ各実験において同じ特性を示す必要がある。それには同じ形状の試験体を複数製作し、実際に破壊実験をそのつど実施する方法が考えられる。しかし、この方法では、実験効率が非常に悪い。

そこで、今回は破壊現象の代表的な特性であるバイリニア特性を模擬しかつ同じ特性で繰り返し使用

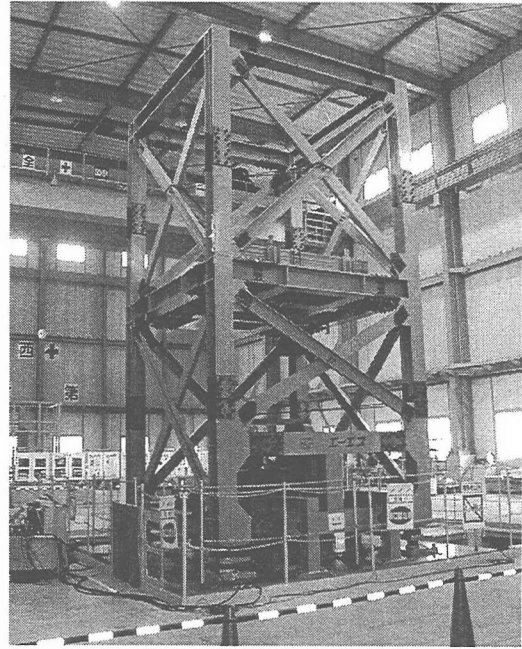


図 2 試験体搭載図

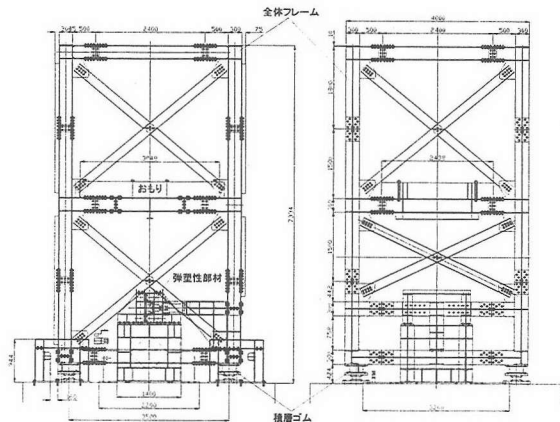


図 3 試験体図面

可能である試験体を検討した<sup>1)</sup>。試験体は、主に全体フレーム、おもり、弾塑性部材、積層ゴムから構成され、免震構造に近い構造となっている。これらのうち弾塑性部材を振動実験により塑性化させることにより、構造物の破壊現象を再現させる。また、その弾塑性部材を交換することにより繰り返しの使用が可能となる。試験体の全体写真を図 2 に、試験体の図面を図 3 に示す。

試験体の 1 次モードの初期剛性は、積層ゴムの剛性と弾塑性部材の初期剛性から形成され、今回の実験では、低層の構造物の固有振動数を想定し約 3 ~ 4 Hz となるよう検討した。また、約 1cm 程度の変位で弾塑性部材が降伏し 2 次剛性に変化するよう検討した。更に、試験体の転倒による振動台再現波形への影響（転倒モーメントによる影響）を調査するため、比較的重心位置を上部に配置した。試験体の基本的な仕様を表 2 に示す。

表2 試験体仕様

項目		仕様
質量		41t
おもり		20t (2階床に固定)
高さ	全長	約7300mm
	1階柱長	3000mm
	2階柱長	3000mm
柱		300×300 (H鋼)
積層ゴム (4本) 剛性		$4.9 \times 10^6 \text{ N/m}$
弾塑性部材	塑性前	$14.8 \times 10^6 \text{ N/m}$
	塑性後	$5.2 \times 10^6 \text{ N/m}$
降伏点		10mm
固有値 (全体, 計算値)	1次	約3.5Hz
	2次	約46.5Hz
	3次	約54.6Hz

表3 積層ゴム仕様

項目	仕様
積層ゴム外径	φ300mm
フランジ外径	φ430mm
高さ	152.2mm
内部ゴム 厚さ×層数	t2.5mm×22
内部鋼板 厚さ×層数	t1.2mm×21
ゴム材質	天然ゴム G1.0
水平剛性	$1.23 \times 10^6 \text{ N/m}$
鉛直剛性	$1.61 \times 10^9 \text{ N/m}$

a) 全体フレーム

全体フレームは、2層の鉄骨構造で2階の床又は2階天井におもりを設置でき、試験体の重心位置を変更できる。今回の実験では重心位置を比較的高い位置に配置することと実験の安全性を考慮し、2階床におもりを設置した。これにより重心位置の高さは約3.7mとなる。本試験体は、弾塑性部材のみ塑性化し破壊現象を模擬するのでフレーム自体は塑性化する必要はない。そのためフレーム自体が振動試験中に塑性化（破壊）するのを防ぐため柱及び梁に300mmのH鋼を用いかつブレース等を付加しただけ固有周波数を上げ強固な構造となる工夫を施した。これにより全体フレームの1次モードの振動数は約18Hzとなった。

b) 積層ゴム

積層ゴムはフレームと振動台との間に4台設置した。試験体の構造としては免震構造と近いものであるが、一般的な免震構造と比べ固有振動数が高く応答加速度が大きくなるため、試験体の転倒による引き抜け力について十分注意する必要がある。今回用いた積層ゴム1台の仕様を表3に示す。なお、弾塑性部材を設置せず積層ゴムのみによる試験体の1次モードの振動数は約1.75Hzとなる。

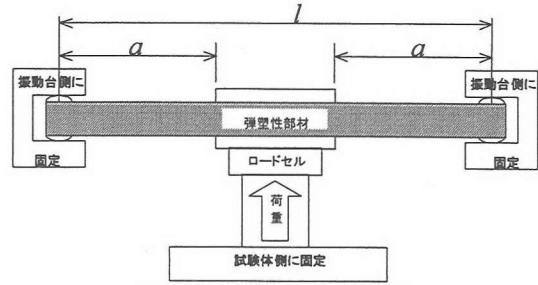


図4 弾塑性部材拘束方法

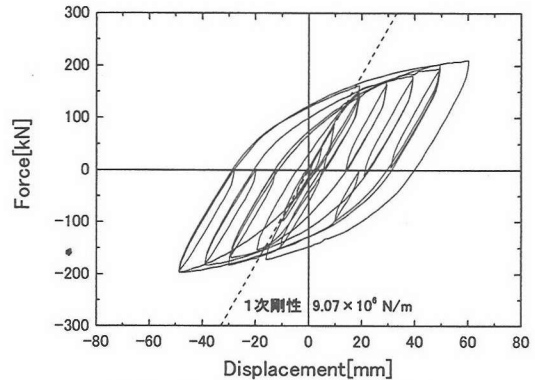


図5 弾塑性部材単体実験結果

c) 弾塑性部材

弾塑性部材の設置位置は、振動台から設置台座を設け全体フレームの1階層の中間部と結合した。これにより、回転モーメントは作用させつつ試験体の転倒を防ぐことができる。弾塑性部材の初期剛性は、積層ゴムの剛性と試験体の1次モードの初期剛性から、約  $15 \times 10^6 \text{ N/m}$  程度となる。また、約1cm程度で降伏する様に設計を行った。

弾塑性部材の拘束方法を図4に示す。弾塑性部材の両端は、振動台に設置台座を通じて結合されており反力を振動台に伝える構造となっている。弾塑性部材の両端の自由度をすべて拘束すると、中央部に荷重がかかり部材が曲がるのと同時に伸び方向に力が働き、単純な曲げ挙動とはならず複雑な履歴特性となる。そこで弾塑性部材の伸び及び回転の自由度を拘束しないため、弾塑性部材の両端の表裏面に蒲鉾形のジグを取付け、単純な曲げ挙動を実現させる。また、中央部はフレーム側に結合されておりフレームからの荷重が作用する。拘束方法としては、弾塑性部材を拘束ジグではさみ、すべての自由度を完全に拘束する構造を想定した。フレームと部材の間にロードセルを設置し、部材にかかる荷重を計測する。

振動台を用いた振動実験を実施する前に、弾塑性部材の特性を把握する目的で、単体の特性実験を実施した。部材の拘束方法は、振動実験で行うのと同じ方法で実施した。50tonのアムスラで弾塑性部材の中央部を静的に載荷し、そのときの変位と荷重を計測した。特性試験による履歴特性を図5に示す。

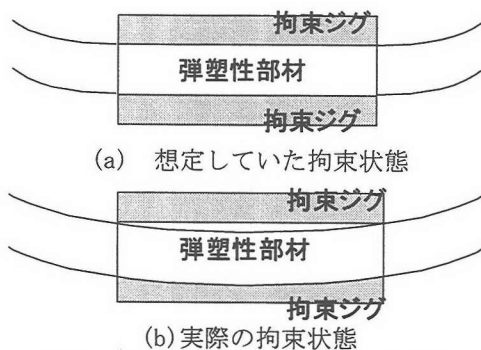


図6 弾塑性部材中央部の拘束状態

当初、弾塑性部材の1次剛性は、約 $15 \times 10^6 \text{N/m}$ を想定していたが、履歴特性から解るように1次剛性は、約1/2程度となっている。この原因は、部材の加力点の拘束状態が、すべての自由度を拘束し図6(a)の様になると想定していたが、実際には拘束ジグの剛性およびガタにより完全な拘束ができず図6(b)の様な拘束状態となった。この拘束状態における部材の剛性を計算したところ以下のように求まった。

$$K = \frac{48EI}{a(3l^2 - 4a^2)} = \frac{48 \cdot 210 \cdot (220 \cdot 60^3 / 12)}{670(3 \cdot 1670^2 - 4 \cdot 670^2)}$$

$$= 9.07 \text{ kN/mm} = 9.07 \times 10^6 \text{ N/m} \quad (1)$$

ここで  $l$ : 部材全体長さ、1670[mm]

$a$ : 有効部長さ、670[mm]

この計算結果を図5に破線で示した。これより計算値と実験値とほぼ一致していることが解る。よって振動実験では、図6(b)の様な拘束方法となると予想されるので、弾塑性部材の剛性を約  $15 \times 10^6 \text{N/m}$  にするため部材の寸法を以下のように修正した。

$l$ : 部材全体長さ、1670[mm]

$a$ : 有効部長さ、670[mm]

$$K = \frac{48EI}{a(3l^2 - 4a^2)} = \frac{48 \cdot 210 \cdot (152 \cdot 60^3 / 12)}{470(3 \cdot 1270^2 - 4 \cdot 470^2)}$$

$$= 14.8 \text{ kN/mm} = 14.8 \times 10^6 \text{ N/m} \quad (2)$$

また、降伏荷重については、別途部材の引っ張り試験を実施した結果、降伏点が239MPaであったので全塑性耐力は

$$W = \frac{bh^2}{4} \sigma_y = \frac{0.152 \cdot 0.06^2 \cdot 239 \times 10^6}{4}$$

$$= 32.7 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

となる。これを加力点での荷重になおすと139.1kNとなり、約1cm程度の変位で降伏することとなる。

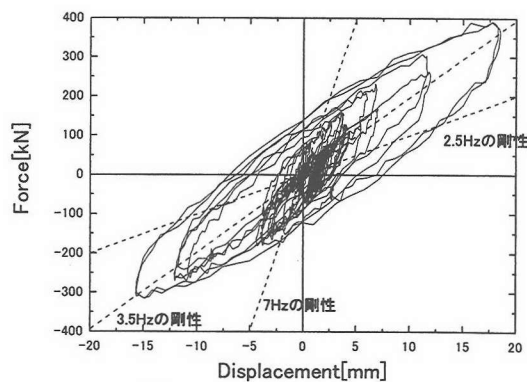


図7 試験体履歴特性

### 3. 振動実験

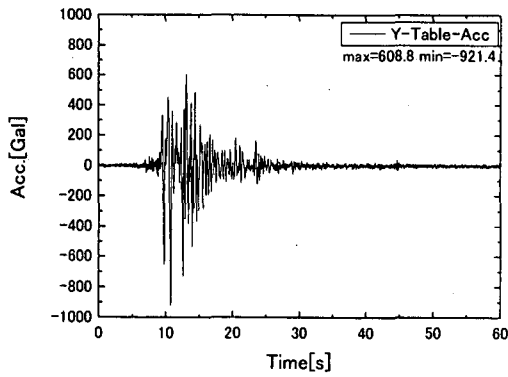
製作した試験体を振動台に搭載し、振動実験を行った。実験では、正弦波、正弦掃引波、地震波などの入力波形を用いた。ここでは、目標波として神戸海洋気象台観測波(1997.1, 兵庫県南部地震)を用いた実験結果について紹介する。実験で用いた制御手法としては変位信号によるPID制御である。計測項目としては、振動台の加速度、変位、試験体の応答加速度、振動台-試験体の相対変位、各積層ゴムにかかる荷重および弾塑性部材にかかる荷重を中心に計測した。振動実験による試験体の履歴特性を図7に示す。この結果より、本来想定していた1次剛性である3.5Hzより硬い剛性が存在していることが解る。これは、弾塑性部材の特性実験では目立たなかったが、弾塑性部材の両端を支持している蒲鉾型支持部品が回転し、その接触部で生じる摩擦と回転バネによる影響と考えられる。また、弾塑性部材の中央部の拘束ジグからの荷重が集中荷重となり、荷重点での局所的な変形モードによる剛性の影響と考えられる。

また、履歴図より約1cm程度の変位で弾塑性部材が、本来想定していた曲げ変形により塑性化していることが確認できる。

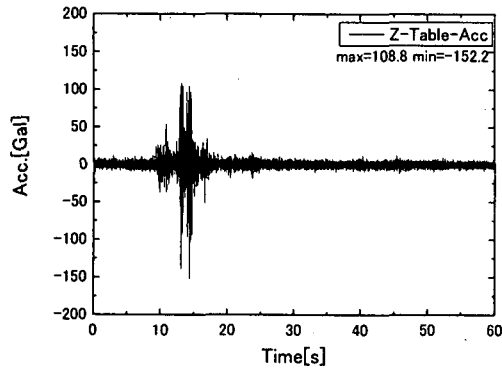
以上のことを考慮すると、本試験体はバイリニア特性よりは、むしろトリリニア特性に近い復元力特性を示している<sup>2)</sup>。

次に、振動実験による時刻波形を図8に示す。比較のために同じ制御手法を用いて振動台上に試験体を搭載しない無負荷状態での結果も図9に示す。図は、上からY軸およびZ軸の加速度、X軸周りの回転加速度(振動台両端の差分加速度)、X軸周りの回転角度を示す。これより、高重心の試験体であるため試験体の転倒モーメントが大きく回転運動が発生していることが解る。回転角度としては約 $0.1^\circ$ 程度であるが、無負荷状態の約10倍の回転角度となっている。また負荷状態で、Z方向の並進加速度は約150Galとなり、無負荷状態の約7倍となっている。

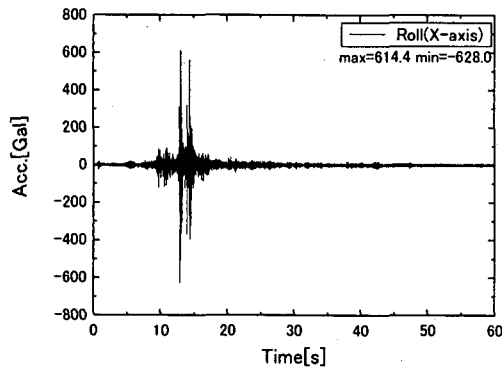
次に、負荷状態におけるY方向の加速度応答スペ



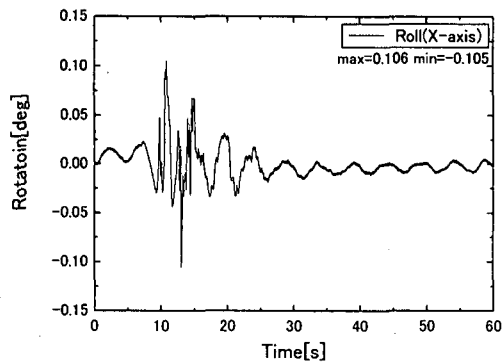
(a) Y軸振動台加速度



(b) Z軸振動台加速度

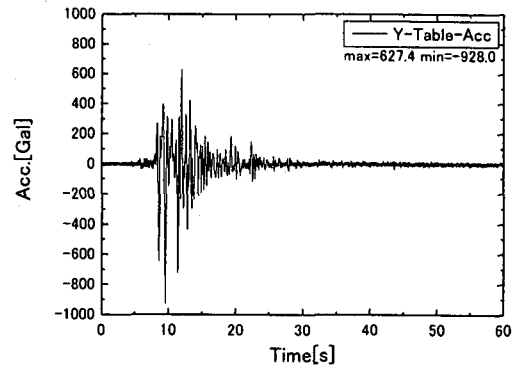


(c) X軸周り回転加速度

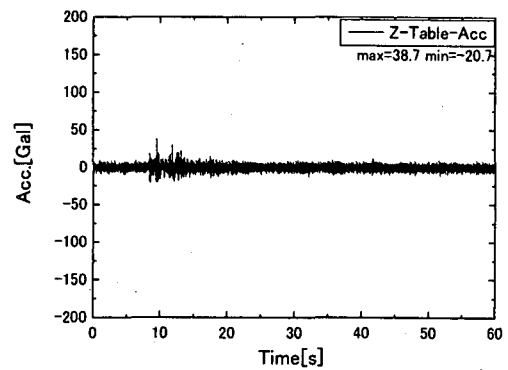


(d) X軸周り回転角

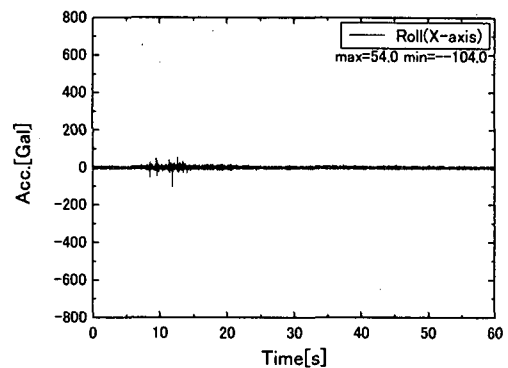
図8 負荷状態における時刻歴波形



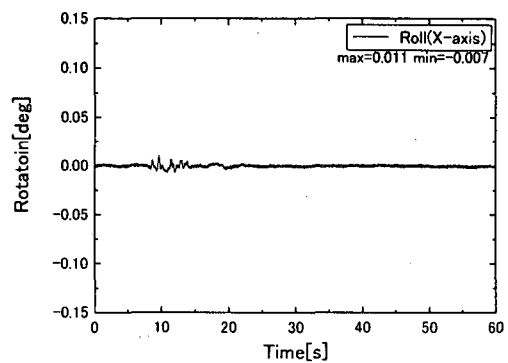
(a) Y軸振動台加速度



(b) Z軸振動台加速度



(c) X軸周り回転加速度



(d) X軸周り回転角

図9 無負荷状態における時刻歴波形

クトルを図10に、無負荷状態を図11に示す。それぞれの図に目標波の加速度応答スペクトルも示している。負荷状態と無負荷状態と比較すると、約2.5Hzから約7Hzの範囲で違いが見られる。この周波数範囲はちょうど試験体の固有振動数の変動範囲と

一致しており、試験体の剛性変動が振動台再現波形に影響しているものと考えられる。また、負荷状態と無負荷状態では加速度応答スペクトル値は最大値付近で約20%程度の誤差がみられ、目標入力波と負荷状態では約30%程度の誤差がみられた。

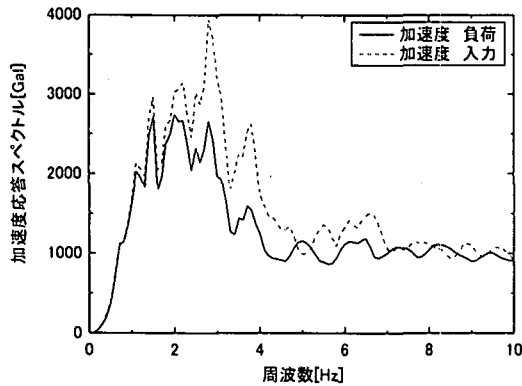


図10 負荷状態における  
加速度応答スペクトル

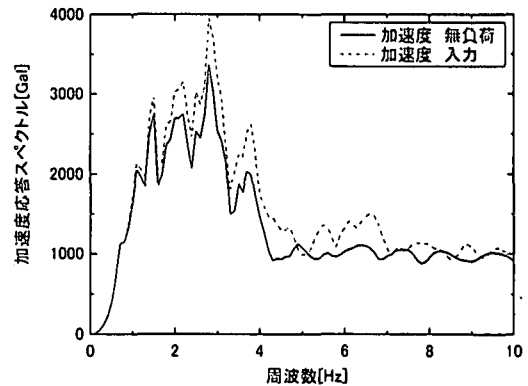


図11 無負荷状態における  
加速度応答スペクトル

#### 4. まとめ

今回の実験において用いた変位信号によるフィードバック制御のみでは、試験体が塑性化し剛性の変動が発生した場合、振動台上の再現波形に試験体の変動周波数帯で影響がみられることが確認できた。

また、今回のように水平1方向のみの加振においては、他の自由度にかなり影響する現象が見られ、特に重心位置が高い試験体においては回転による影響が発生していることが解る。試験体や実験目的によっては、1方向のみの加振が十分に考えられ、他自由度の励振が実験結果に好ましくない影響を及ぼすことも予想させる。

今回は、実験結果の紹介程度であったが、今後、

実験で得られたデータをより詳細に解析し検討する必要がある。それらの解析結果をもとに、加振手法の高度化の研究では、試験体の破壊現象のみでなく加振方向以外の自由度についての励振の抑制も含め検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 清水信行, 小川信行, 佐藤栄児, 野波健蔵: 振動台加手法研究用の非弾性挙動実現模型の製作, 第1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, pp. 29-pp. 34, 2000
- 2) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 森下出版株式会社, 2001.