

# 三次元振動台の紹介 その2 Tri - Axial Shaking Table (part 2)

大林組技術研究所 三次元振動台グループ  
Shaking Table Group

## 1. はじめに

構造物設計体系の性能規定化に伴い、構造技術者には構造物の安全性に対する説明責任が求められている。耐震性能に関しても単に検証するだけでなく、その結果をエンドユーザーにわかりやすく提示することが重要になる。その際、振動台実験は地震時の実現象を文字通り目の前で再現できるので、性能検証および説明資料取得に有力な手法である。大林組では1999年9月に構造物の耐震安全性能を十分に検証し得る大容量かつ高精度な三次元振動台施設を技術研究所台ダイナミクス研究センターに導入した。振動台実験にもいくつかの課題があり、波形再現性の向上はその一つである。この三次元振動台においてはこのような入力波の補償に、従来からの「逆伝達関数による補償」の他に新しく「リアルタイム制御」による補償を採用した。導入後約半年間の調整期間を経て、2000年2月から本格的な実用運転に入り現在に至っている。ここでは三次元振動台施設の概要およびこれまでの利用状況と主な実験事例を、新しい加振制御システム<sup>1)</sup>による事例も含めて紹介する。

## 2. 三次元振動台施設の概要

Fig 1 に振動台ハードウェアの概要を示す。本施設の特徴は、大容量の加振能力、高精度な加振性能、最新の加振制御システム、充実した実験支援設備、環境への配慮、などである。以下に主要設備の概要を列記する。  
振動テーブル（5m角、定格積載質量50ton、表面処理サンドブラスト処理）、加振機（電気油圧サーボ制御方式、水平各2台、鉛直2台、水平最大出力1.52MN、静圧軸受方式）、油源装置（主油圧ポンプ6台（吐出圧力2.45KN/cm<sup>2</sup>、最大1400KW）、アキュムレータ（160L）35台（最高チャージ圧力3.5KN/cm<sup>2</sup>））、浮基

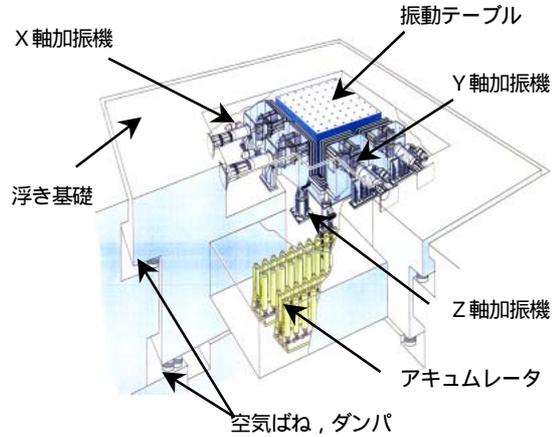


Fig. 1 三次元振動台の構成  
Outline of Facilities

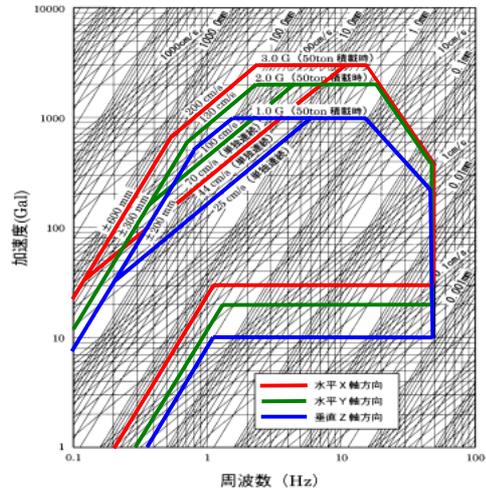


Fig. 2 加振限界線図  
Shaking Limit Diagram

Table 1 加振性能  
Specification of Shaking Table

最大積載質量	50 ton		
テーブル寸法	5 m × 5 m		
定 格	X 方向	Y 方向	Z 方向
最大変位(mm)	± 600	± 300	± 200
最大速度(kine)	200	130	100
最大加速度(G)	3	2	1
加振周波数	DC ~ 50 Hz		

礎（質量約5000ton、空気ばね110台とオイルダンパ80台併用、浮上高さ30mm、浮上所要時間2時間、固有周期（水平1Hz、鉛直0.85Hz））、計測システム（DCストレインアンプ160ch、ACストレインアンプ32ch、レーザ変位計アンプ20ch、サーボ加速度計アンプ20ch、A/Dコンバータ256ch）、実験ビデオ収録設備（固定カメラ3台、移動カメラ3台、CCDカメラ2台、20インチモニタ2台、デジタルビデオデッキ4台）、反力床機能（振動テーブル周辺の浮基礎床を反力床として使用可能）。

Table 1 に加振性能を、Fig 2 に加振限界線図をそれぞれ示す。神戸海洋波（1995 年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録）2 倍の大きさの加振が可能である。また、Table 1 に示した最大加速度の 1% という低加振レベルにおいても波形ひずみ率が 5% 以下で、高い波形精度を有している。

### 3. 実験事例

#### 3.1 使用状況の概要

本格運転から現在に至る 2 年半の間に約 30 件の振動台実験を実施しており、振動台稼働率は 80% 程度である。実験内容の分類結果を Fig.3 に示す。この振動台は、大速度の面から制振や振動破壊実験、大変位を利用して免震や減衰素材の特性試験、また大加速度から住宅や設備機器などの耐震試験などに主に利用されている。

以下に主な実験事例を、従来からの入力補償制御の他に今回導入した新しい加振制御システムを用いた事例も含

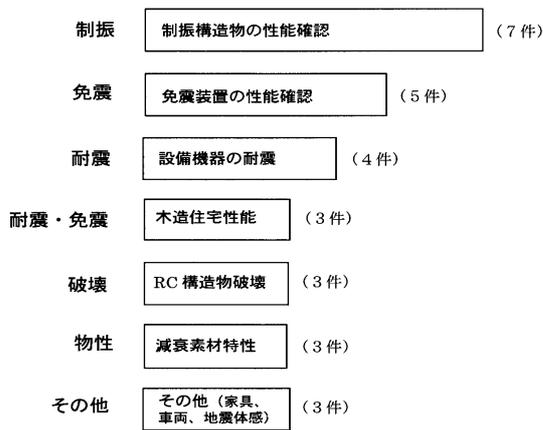


Fig.3 実験内容の分類

Contents of Vibration Tests

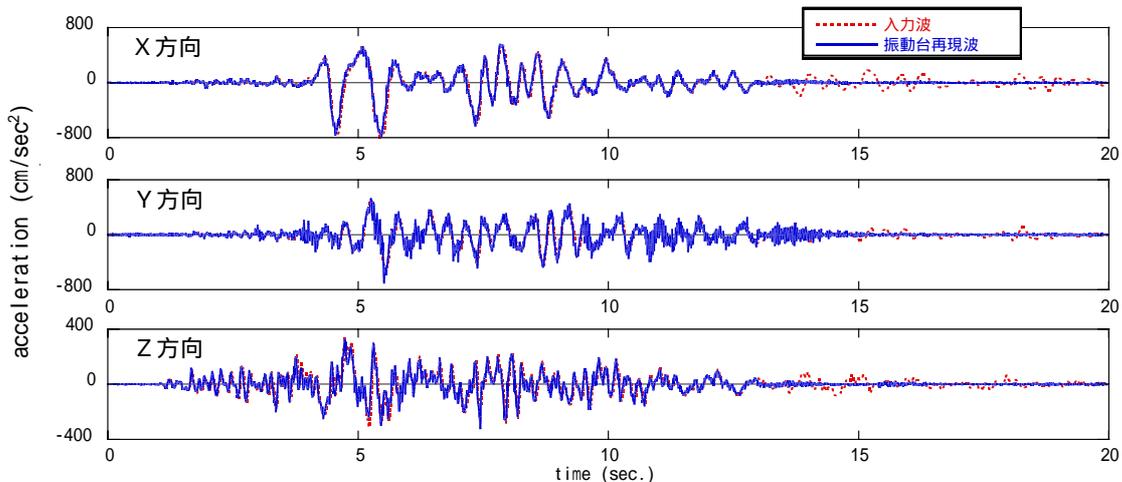


Fig.4 1995 年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台加速度波形

Acceleration record of the 1995 Hyogo-Ken-Nambu Earthquake at JMA Kobe Station

めてその概要を紹介する。なお、新加振システムであるリアルタイム制御の詳細は本報に前掲<sup>1)</sup>した。

#### 3.2 剛体の加振実験

試験体の質量が振動台の質量に比して大きい場合には試験体反力によって振動台が動かされ、振動台の加振波形の乱れが起きる。従来の入力補償では、振動台・試験体連成系の特性（伝達関数）を把握し、逆伝達関数をかけた波形の試加振を繰返して目標波に合わせる方法が取られている。この入力補償を適用した実験例として最大積載質量 50ton（剛体）搭載時の神戸海洋波（主要動 13 秒間）の目標波と応答波を Fig.4 に示す。目標と再現波は非常に良く一致している。

#### 3.3 リアルタイム制御を利用した加振実験<sup>2)</sup>

従来の入力補償では試験体が繰り返し加振に耐えられることや加振中に特性に変化のない弾性体であることなどの制約がある。従って、RC 構造物、履歴型の制振装置の破壊実験、弾塑性実験などには不向きであり、このような場合に、リアルタイム制御システムが利用される。この振動台で採用した制御方法を簡単に紹介する。

##### 3.3.1 反力補償

反力をフィードバックし、反力分を加算し動かす方法で、文字どおりフィードバック型の補償機構である。この制御方法は現状では 10Hz までが制御できる範囲である。10Hz 以上に対しては次の適応フィルタを用いる。

##### 3.3.2 適応フィルタ

反力の影響を打ち消すフィルタ（特性が動的に動く）を振動台入力部に付ける方法で、フィードフォワード型の補償機構である。反力補償より、高い振動数に対応できる。現状は 10 ~ 35Hz である。

リアルタイム制御システムを利用した実験例を以下に

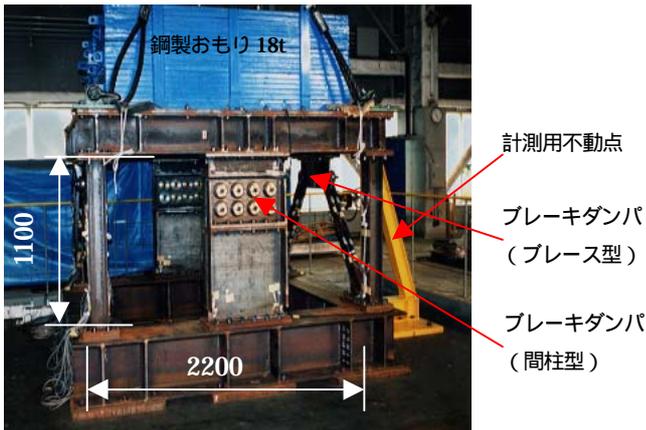


Photo 1 試験体

Experimental Model on Shaking Table

概説する。試験体を Photo 1 に示す。反力補償検証実験に対しては剛性は低い、ある程度の耐力を持つS造純フレーム (Photo 1 の架構から、間柱とブレースを取り去ったもの) とし、適応フィルタ検証実験には高い剛性と耐力があって、同時に安定した塑性変形能力と履歴性状を有するものとしてS造純フレームにブレーキダンパー (間柱型: X方向, ブレース型: Y方向) を装着した。加振波形は人工地震波とし、ある振動数範囲で速度応答スペクトルが一定で位相はランダムとする。振動台に試験体が載ると、その固有振動数近傍の振動数で振動台の加振力が低下するが、入力補償をかけることによって、固有振動数近傍の加振力の落ち込みは打ち消される。しかし、試験体が塑性範囲に入り、固有振動数が移動するとこの固有振動数近傍においては、補償をかけていないので加振力が落ち込む。逆に、移動前の固有振動数の近傍では補償をかけていたので、加振力が持ち上がる。

リアルタイム制御をかけると、加振中の特性変化に応じて補償範囲と補償量が「動的に」変わり、加振力を持ち上げたり、押さえたりする。Fig. 5 は振動数 10Hz までを対象とした反力補償制御による実験結果であり、Fig. 6 は 10Hz 以上対象の適応フィルタ制御の結果である。

入力補償では、弾性振動数領域での持ち上がりが顕著であるが、リアルタイム補償をかけると、入力補償より改善される。なお、このリアルタイム制御では、反力補償と適応フィルタの使分けは自動処理される。また、リアルタイム制御は選択使用となっており、実験内容により、従来の逆伝達関数による入力補償制御だけを使用することも当然可能である。

### 3.4 木造住宅耐震実証試験

従来に入力補償による実験例として 2×4 構法の 2 階建の実大住宅の耐震実証試験の一例を示す。Photo 2 に示すように鉄骨架台を介して住宅を振動台上に固定し、神戸波 (Fig.4 参照) の 2 倍までの揺れを三次元で再現させ

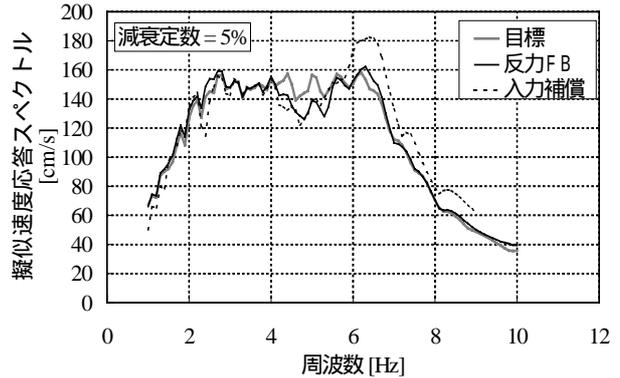


Fig.5 リアルタイム制御 (反力補償)

Test Result (Feedback Control)

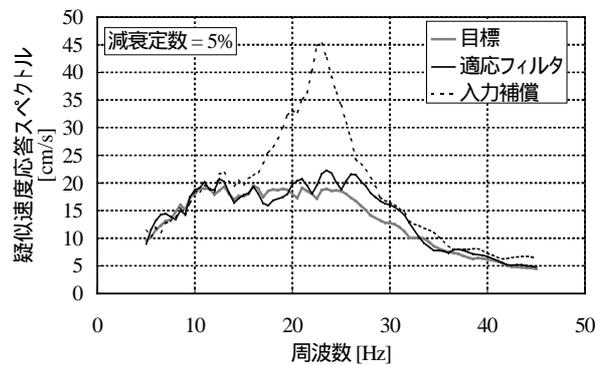


Fig.6 リアルタイム制御 (適応フィルタ)

Test Result (Adaptive Filter Compensation)



Photo 2 実大木造住宅耐震実証試験

Vibration Test of Full-scale Wooden House

て耐震性を実証した。Photo 2 は標準仕様タイプの実験終了後に、研究目的のために構造変更を行ったケースである。

### 3.5 反力床を使用した大変形加力試験

この三次元振動台の大きな特徴の一つである大ストローク加振を利用した実験例を示す。Fig.7 に反力床を利用した大変形加力試験の概念図を示す。振動台周囲の浮基礎コンクリート面に均等配置されているアンカーボルト孔に反力用治具を固定し、加振時の振動台と反力用治具

との相対変位を利用して、試験体の大変形加力試験を行うものである。実機の免震デバイスや各種実大部材等の試験体に対して、加振周期 20 秒程度で加振する静的加力試験や、Table 2 に一例を示すような所要の周期に対する動的復元力試験などを実施している。また、類似の事例として、免震建物における地盤と建物との大きな相対変位に追従する非構造部材の耐震安全性能確認試験がある。Photo3 は免震配管の性能実証試験例である。応答解析による免震建物と地盤との相対変位（最大 25cm 程度）を水平 2 方向同時に振動台に入力して加振実験を行い、試験体に損傷のないことを確認した。

4. おわりに

1999 年 9 月に導入した三次元振動台は、半年間の調整試運転ののち、本格的な実用運転に供してしてきた。その大容量かつ新しく採用した加振制御システムによる高精度な加振により、振動台の年間稼働率が 80%程度となっており、社外からの依頼実験も過半数を占めているなど幅広い分野に利用されている。ここでは、主な事例について紹介したが、これ以外にも長時間加振が必要とされる耐久試験、繰返し加振のできない土構造物、天井などの非構造部材の耐震、建物内の設備機器や什器等の転倒試験、地震体験など地震防災の観点など多岐にわた

る利用法が想定される。

最後に、この三次元振動台は、三次元振動台施設管理委員会および同運用委員会が維持管理および運用にあたり、実験の実施は主として建築振動制御研究室、建築構造研究室、土木構造・材料研究室およびプロジェクト部が実験内容に応じてそれぞれ担当している。これら関係者を総称して「三次元振動台グループ」と呼び、グループを代表して此上典文（プロジェクト部）が執筆した。

参考文献

- 1) 勝俣英雄：技術紹介 三次元振動台の紹介 その 1，大林組技術研究所報，vol.66，2003
- 2) 安井譲ほか：紹介 大林組の振動台，財団法人 震災予防協会 地震工学ニュース，No.180,Sep.2001

Table 2 反力床利用の加振パターンの一例  
Exciting Type

正弦波加振例

振幅 (cm) 周期 (sec)	2.5	5.0	15.0	35.0	55.0
0.25					
0.33					
0.55					
1.00					



Photo 3 免震配管性能実証試験の一例  
Vibration Test of Isolation Equipment

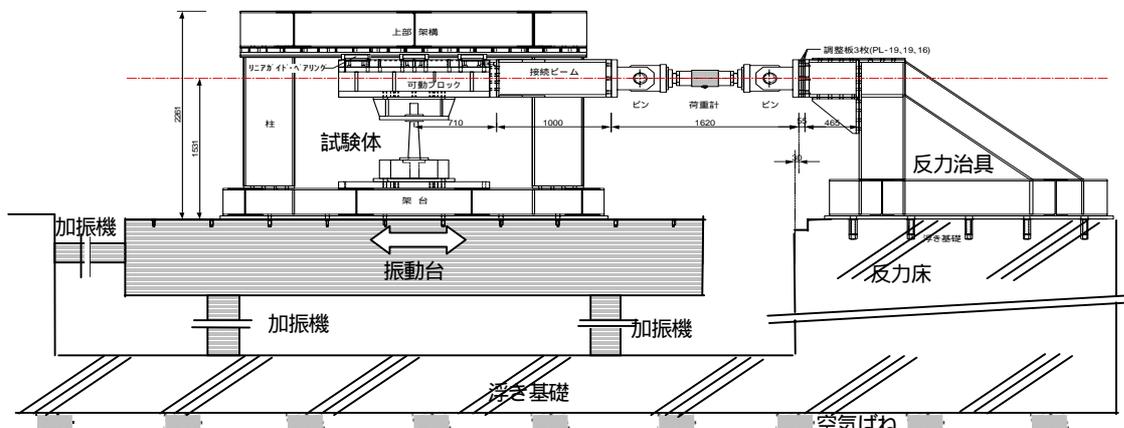


Fig. 7 反力床を利用した大変形加力試験概念図  
Example of the Particular Use for Shaking Table