

3軸起震装置の紹介

有 坂 尚

1 はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災による甚大な被害は記憶に新しい。この地震による被害は、建物の損壊や倒壊に加え、倉庫内で多段積層式の棚が倒れたり、保管している物が崩れたりする被害も多く発生した。このような被害を受けたことで、産業界における地震対策の意識は、従来に比べ更に強化された。

平時において、こうした倒壊の様子を再現し、安全性の向上を図ることは重要で、その手法として地震動を発生する装置に試験品を搭載して実験することが効果的である。

実験を実施する場合、例えば独立行政法人が運営する超大型加振装置などはあるが、計画書の提出から実施可否の判定まで敷居が高く、かつ費用も高額であることから、建物などと比較して倉庫内の棚など小規模な試験品の検証に適しているとはいえない。

こうしたことから、製品の地震に対する安全性検証を行うため、地震動を再現できる起震装置を購入したいというニーズがでてきた。

2 3軸起震装置製品化の背景

お客様である(株)ワコーパレット社殿は、倉庫内で使用する組立式積層棚や運搬用パレットなどを製造している。同社は地震により製品である多段積層棚が倒壊しないか、あるいは棚に保管された荷物が崩れないか検証するために、地震動を再現する装置の購入を検討していた。

カヤバシステムマシナリー(株)は地震体験車を製品化しており、この技術を応用した地震動再現加振テーブルの製作について開発依頼があった。

きっかけは地震体験車であったが、地震動を再現するための全く新しい装置を新規に設計、製作する必要があるため、新たな3軸起震装置を提案し、製品化することになった。

3 主な要求仕様

3軸起震装置の主な仕様は下記のとおりである。

- (1)加振テーブルを上下(Z)方向、南北(Y)方向、東西(X)方向に3軸同時加振できること(以下Z軸、Y軸、X軸と記述)。
 - (2)再現地震動の種類
 - ①東日本大震災における宮城県桶屋町新町の気象庁観測地震動
 - ②東日本大震災における宮城県大崎市吉川三日町の気象庁観測地震動
 - ③阪神淡路大震災における神戸海洋管区気象台観測地震動
 - (3)加振テーブルへの試験品最大搭載質量6,000kg
 - (4)加振テーブルサイズ3,000mm×1,600mm
- なお、3種類の地震動データは加速度信号であり、気象庁ホームページ¹⁾からダウンロードできる。
また、上記以外の地震動波形も再現可能とした。

4 詳細仕様検討

3種類の地震動の加速度データから、3軸の速度、変位を算出した。地震動データのノイズ部分を処理した結果、再現地震動の周波数帯は0.01~20Hzとした。地震動の加速度データを時間で1階積分して速度に、2階積分で変位に換算できる。この結果から得られた加速度、速度、変位の最大値を表1に示す。

表1 最大加速度・速度・変位一覧

	Z軸	X・Y軸
最大加速度	350cm/s ²	780cm/s ²
最大速度	32cm/s	93cm/s
最大変位	±69mm	169.5mm

起震装置本体は、加振テーブルと搭載質量の合計を負荷として駆動するものとなる。この際、合計質量を加振するための推力は(1)式のFで求める。

$$F = m\alpha \quad (1)$$

ここで、 m ：加振部分合計質量、 α ：加速度である。一般的に省エネや省スペースの観点から、装置はコンパクトであることが望ましい。このために、加振テーブルをアルミ製（鋼と比較して比重約1/3）とし、加振質量 m の軽量化を図り、必要推力 F を小さくできた。装置としての主な仕様を表2に示す。

表2 起震装置主仕様

加振テーブル質量	3,000kg (アルミ合金製)
試験品最大搭載質量	6,000kg
合計最大加振質量：m	9,000kg
Z軸シリンダ推力：F（ストローク）	141kN（±75mm）
X・Y軸シリンダ推力：F（ストローク）	95kN（±200mm）

5 起震装置本体の課題と設計

本体設計の際、最も重視したのがZ軸加振機構である。要求する動きは垂直方向のみと単純であるが、装置をコンパクトにすることや、剛性及び強度の確保が求められる。これらを総合的に勘案してZ軸加振機構に平行リンク方式を採用した。

平行リンク方式は、Z軸アクチュエータを加振テーブル中心に1本の配置とし、四角形のテーブル4辺に平行リンクを配置することで、要求する機能を満足できるが、この機構は製作実績が無いことから、十分な検証をする必要があった。

設計の初期段階から必要な機能を総合的に検証するために、起震装置本体を3Dモデルで作成し、全ての動作パターンを検討するとともに、有限要素法を使ったモーダル解析^{注1)}と応力解析を実施した。起震装置の3Dモデルを図1に、試験品である多段積層棚も含めた3Dモデルを図2(a)、モーダル解析例を図2(b)に示す。

注1) 構造物の共振周波数を数値解析で求める方法。

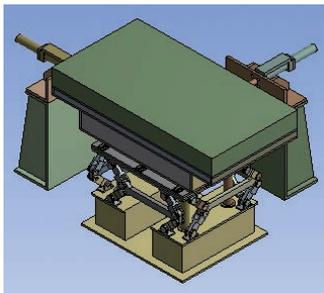


図1 装置の3Dモデル

これらの検証を行った結果、平行リンク機構は有効に機能し、最大負荷積載状態でも性能を確保できることが確認できた。図面化した本体概要を図3に示す。

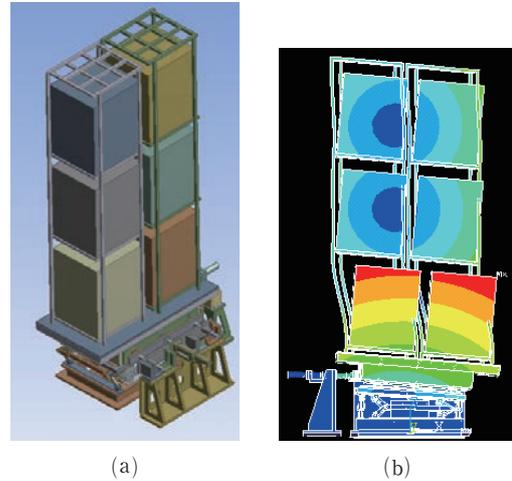


図2 試験品搭載状態モデル

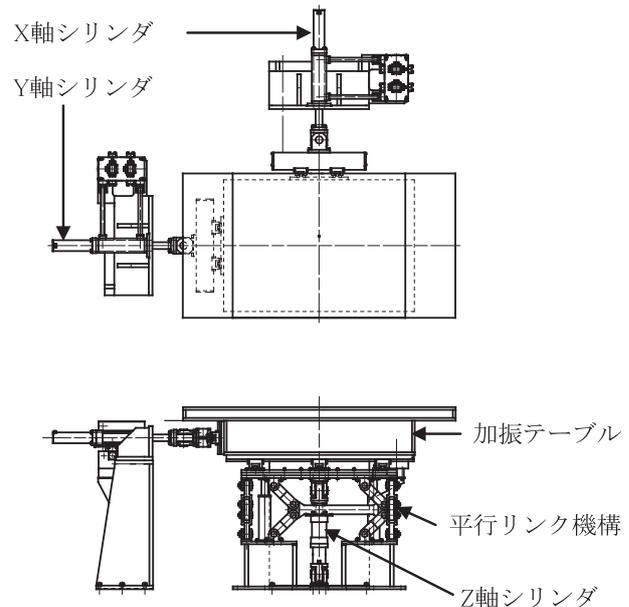


図3 起震装置本体概要図

本体は客先にて床を掘ったピット内に格納するため、定期的に給油が必要なベアリング部に自動給油装置を取付けるなどの工夫も行っている。

6 制御系の設計

前述したとおり、気象庁提供の地震動データは加速度であり、システムとしてはこの加速度データの再現が要求される。

油圧シリンダを駆動するためには、シリンダのス

トロークを変位として入力する必要があるため、加速度を適切な変位に変換しなければならない。そこで、当社製制御ソフトのWave Modification System(以下WMS)を採用した。WMSの主な機能は、制御対象が目標加速度信号で加振できるようシリンダに対する変位信号を修正するものであり、多軸制御も可能なことから、本装置の制御に最適である。WMSの一連の操作と信号の流れの概要を図4に示す。

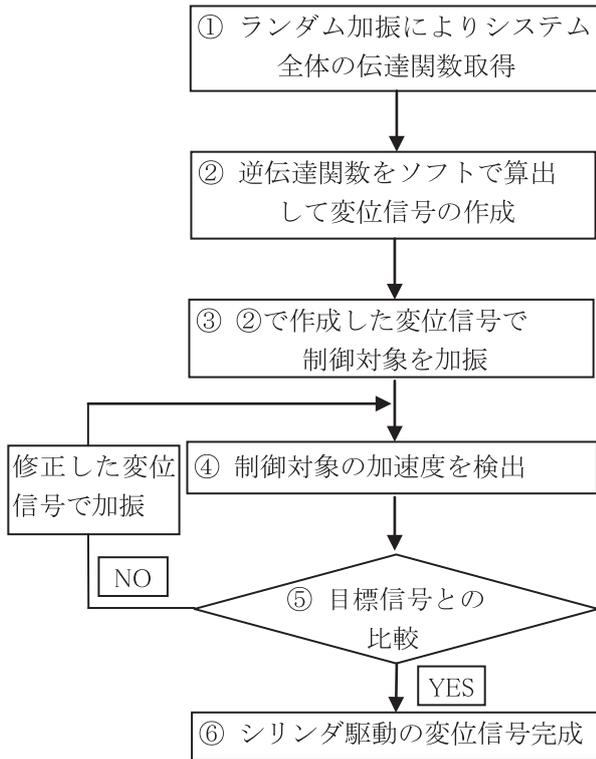


図4 WMSによる目標信号生成の流れ

この他に制御性を向上させる手段として差圧フィードバックを適用した。差圧とは、シリンダの押し側、引き側の油圧圧力差である。この差圧をフィードバックとして制御ループに取り入れることで慣性負荷加振での制御性を安定させる効果がある。差圧フィードバックを適用した2軸慣性負荷制御装置などで有効性が実証されており、本装置の制御系にも採用した。差圧フィードバックの概要を図5のブロック図に示す。

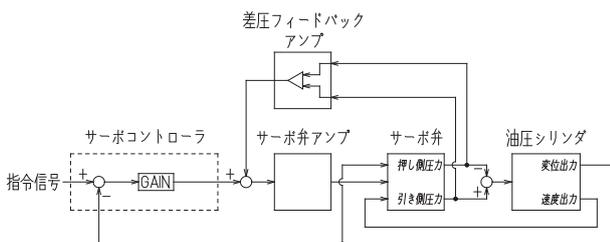


図5 差圧フィードバックブロック図

7 油圧系の設計

まず油圧シリンダを駆動するために必要な油の最大流量を算出するが、再現する地震動の最初から最後まで最大流量が必要なわけではない。再現地震動のデータから、地震発生初期に最大速度域があり、ここで最大流量が必要となる。地震動の後半になると、周波数帯は高いものの速度は小さくなり、必要流量は減少する。再現地震動の一例である阪神淡路大震災のデータを図6に示す。図中の丸で囲った部分が油圧系として必要流量最大の領域である。

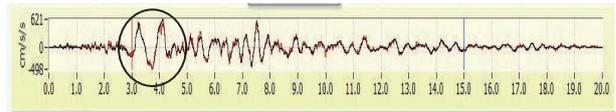


図6 阪神淡路大震災地震波形

上記のことを総合すると、常に油圧源から最大流量を供給し続けるのはエネルギーの無駄であり、必要ときだけ最大流量を確保したほうが効率的である。このためにアキュムレータを用意し、最大速度発生域ではアキュムレータからの蓄圧油を利用したことで、油圧源容量を小さくした。油圧系装置の概要を図7に示す。図中の矢印は供給油の流れを示す。

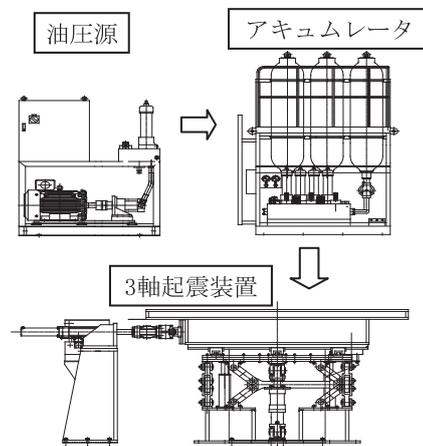


図7 油圧系装置概要図

8 完成品

3軸起震装置本体の完成品写真を写真1に示す。これはお客様で装置をピット内に設置したもので、奥に配置されているのが起震装置本体、左下に配置されているのがアキュムレータである。

お客様ではこの後加振テーブル上面を残してピット上部に鉄製のカバーを設け、装置全体を覆っており、起震装置を動かす場合は、加振テーブル周辺のみ隙

間ができるようになっている。また、装置周辺に立ち入り制限柵を設けるなど安全性も配慮している。

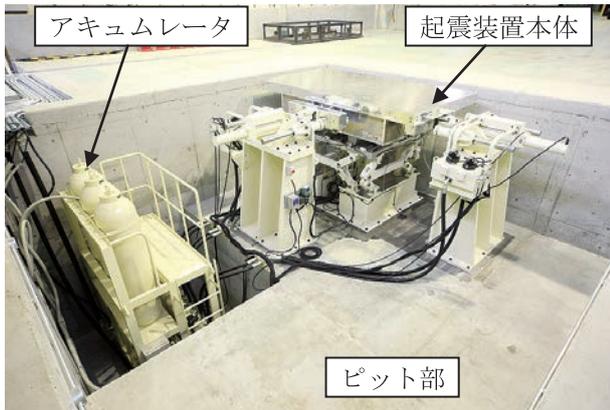


写真1 装置の設置写真

加振テーブルに最大負荷6,000kgを搭載して、地震動の再現を行った結果を図8に示す。地震動データは赤で、加振テーブルの計測加速度は黒で示される。つまり、黒の波形が赤に重なって見えるほど地震動の再現性が高いことになり、画面からほぼ正確に地震動を再現できたといえる。

お客様では、この装置を使って製品の加振試験による検証を行い、地震によって棚に積載した荷物が崩れる様子を観察するモーションキャプチャを用いた動画検証も実施している。また、地域の防災意識啓蒙のため、地震動再現による棚や荷物の崩壊をデモンストレーションしており、社会貢献の一環としても活用している。更に、3軸起震装置を積極的に広報活動に活用しており、地元マスコミの取材を受けるなど好評を得ている。

9 おわりに

当社において3軸で慣性負荷を加振する試験装置としては初めての製品であったが、高い客先満足度

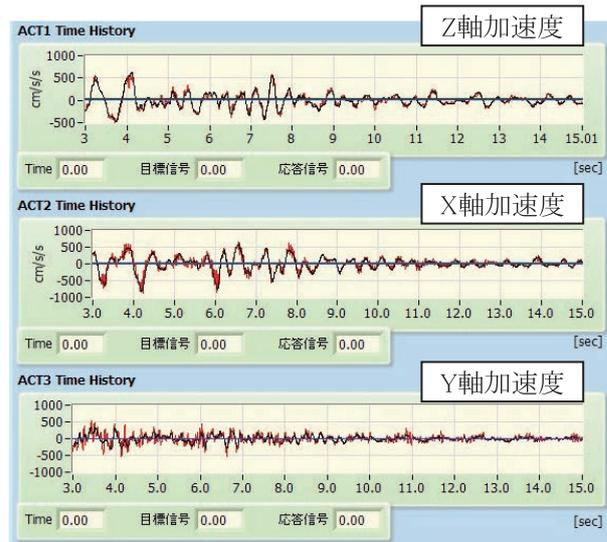


図8 地震動再現画面

を得られた。平行リンクを用いた機構設計など新規要素が多く苦労も多かったが、負荷が最大となっても地震波形の再現性は損なわれず、安定した制御が可能であることも実証できた。本装置の平行リンク機構については本報執筆時点で特許申請中である。

3軸起震装置が作動している動画は当社ホームページ²⁾で公開されている。

この製品は引き合い段階からお客様も含めて多くの方の知見と協力を得て完成したものであり、関係諸氏に改めて謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ、地震動検索データベースアドレス <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>
- 2) 当社ホームページ、アドレス <http://www.kyb-ksm.co.jp/showcase/news-201405300028.html>

著者



有坂 尚

2008年入社。カヤバシステムマシナリー(株)三重工場技術部。シミュレータ製品の設計に従事。