

## 三次元地震振動台の高機能制御

○前川明寛<sup>1</sup>・安田千秋<sup>2</sup>・広江隆治<sup>3</sup>・井手和成<sup>4</sup>・作野 誠<sup>5</sup>

<sup>1</sup>三菱重工業 高砂研究所 制御システム研究室 工博 (〒676-8686兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1)

<sup>2</sup>三菱重工業 高砂研究所 振動騒音研究室 工博 (〒676-8686兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1)

<sup>3</sup>三菱重工業 高砂研究所 制御システム研究室 (〒676-8686兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1)

<sup>4</sup>三菱重工業 長崎研究所 制御システム研究室 (〒851-0392長崎市深堀町5-717-1)

<sup>5</sup>三菱重工業 下関造船所 機械部 電気・制御グループ (〒750-8505下関市東大和町2-16-1)

Crash tests using a seismic shaking table are frequently required for general structures and laminar shear soil boxes to apply the ultimate strength dynamic design concept. This report describes advanced shaking table control technology. We propose various control technologies must be prepared for the advanced shaking table controller system, and the most suitable control technique should be selected according to the test specimen or the earthquake wave form. In the laminar shear soil box test, for example, a robust controller is selected to work well at a frequency of less than 10Hz. Even though not perfect, fast adaptive inverse transfer function control is effective in a crush test. Adaptive harmonic control reduces sine wave distortion due to the higher harmonic component in a swept sine test.

**Key Words :** *crash tests, wave form control, fast adaptive inverse transfer function control, adaptive harmonic control, seismic shaking table.*

### 1. まえがき

我が国は有数の地震国であるため、建築・土木構造物や機械プラントに対し厳しい耐震安全性基準が課せられている。

耐震強度実験や破壊試験では通常、電気油圧式アクチュエータにより駆動される地震振動台上に、実物やスケールモデルの試験体を搭載し、過去に観測された地震波などを用いて加振実験を行い、試験体の耐震性を検証する。したがって、地震振動台では、実際の地震加速度波形を高精度に再現することが要求される。図-1に当社高砂研究所の大型三次元振動台を示す。

近年ではとくに土層などの加振試験や、実構造物の破壊試験への要求が高まっている。

これに対応すべく、試験体の特性変動を受けにくい制御系設計及び試験体の特性変動に応じてコントローラの制御定数も変動させる制御系設計の両面よりアプローチを行っている。前者はロバスト制御、後者は適応型制御である。以下に、それら制御の特徴について述べる。

### 2. 地震振動台の技術課題

電気油圧式振動台に対する要求性能として、基本的には以下の4項目がある。

#### 1) 载荷性能

振動台上に载荷可能な試験体の最大重量・最大寸法であり、ともに益々大きいものが要求される。

特に、阪神・淡路大震災以降は、実物大試験の重要性がクローズアップされている。

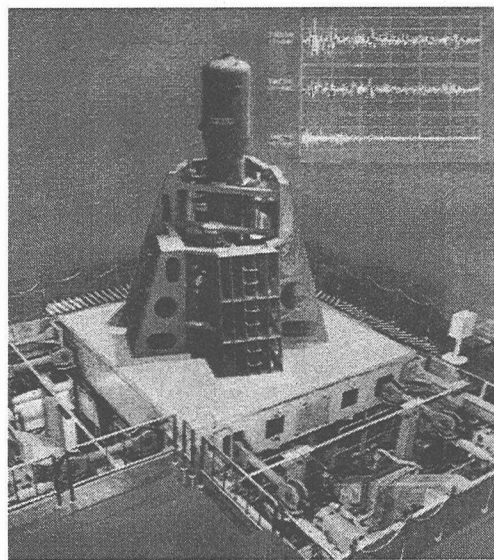


図-1 高砂研究所三次元振動台

#### 2) 加振性能

振幅、速度、加速度に関しては大きいものが、周波数特性に関しては広帯域で平坦な特性のものが要求される。

阪神・淡路大震災以降は、最大速度性能が重視され、それに伴い振幅も長ストローク化している。

#### 3) 波形再現性能

電気油圧式振動台では、表-1に示す波形ひずみ要因が存在する。したがって、この波形ひずみをいかに補償するかが性能上重要である。

表-1 電気油圧式振動台の波形ひずみの要因

課題	現象	原因
加速度波形ひずみ	振動台構造系—制御系に内在する非線形性による高調波ひずみ	各種非線形性 ・スプール弁流量特性 ・各部の固体摩擦 ・ジョイント部のがた
周波数特性	振動台の周波数特性が平坦でないことによる周波数波形ひずみ	・各部の周波数特性
試験体干渉	・周波数再現性の凹凸 ・大振幅加振時には試験体非線形性の影響を受け制御系全体の周波数特性が変化	・試験体重量/振動台負荷重量 ・試験体の振動特性と制御系の連成 ・試験体の非線形性
制御軸間の干渉	加振軸間の干渉により、余分な運動が試験体に印加される	・幾何学的連成 ・動的連成

4) 操作性能

電気油圧式振動台は油圧で駆動されるので多数の機器を制御する必要がある。さらに、三次元振動台では各機器が3系統存在し複雑である。したがって、操作性が良く監視機能の高い制御装置が必要である。

3. ロバスト制御の三次元振動台への応用

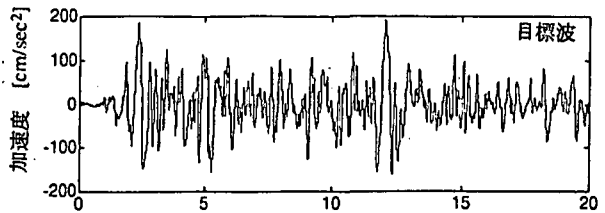
(1) 原理と理論

ロバストは頑健という意味であり、ロバスト制御とは、制御対象の特性変動の影響を受けにくい制御である。振動台では、加振中に試験体の特性変動が生じることがあり、この特性変動の影響を受けにくいようにコントローラの制御定数を設定する。具体的には、1) 試験体の重量、2) X、Y、Z各軸回りの慣性モーメントの加振前の値と加振後の予想値、3) 試験体の重心位置の加振前の値と加振後の予想値に基づいて、制御系の安定性を損なわない範囲でコントローラの制御定数(ゲイン)が最大となるように設定<sup>[3][4]</sup>する。その結果、フィードバック制御により、特性変動の影響最小化と周波数応答特性改善が同時に実現できる。

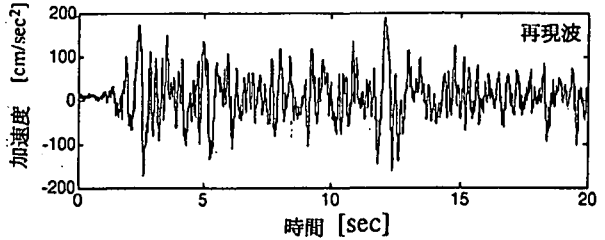
(2) 試験結果及び考察

試験体として19tonの慣性負荷を搭載し、エルセントロ地震波形を用いた加振を行った。図-2 (a), (b)に地震波目標波と再現波を示す。また、図-3に、このときの目標波(破線)と再現波(実線)の応答スペクトルを示す。加振試験を通じて、地震波の主要成分が集中している周期0.1秒以上で、地震波形が十分に再現できることを確認した。

以上より、ロバスト制御は試加振の困難な土層などに対しては、優れた効果がある。しかし、フィードバック制御の有効周波数範囲は油柱共振周波数の1/3~1/5以下であるため、構造物などで、その共振周波数が上記有効周波数以上の場合は、ロバスト性が期待できない。そこで、構造物を対象とした破壊試験に対しては、次章で述べる試験体の特性変動に応じてコントローラの制御定数をオンラインで変化させる適応型制御にて対応するのが妥当である。



(a) 目標波



(b) 再現波

図-2 ロバスト制御による地震波加振試験時間応答

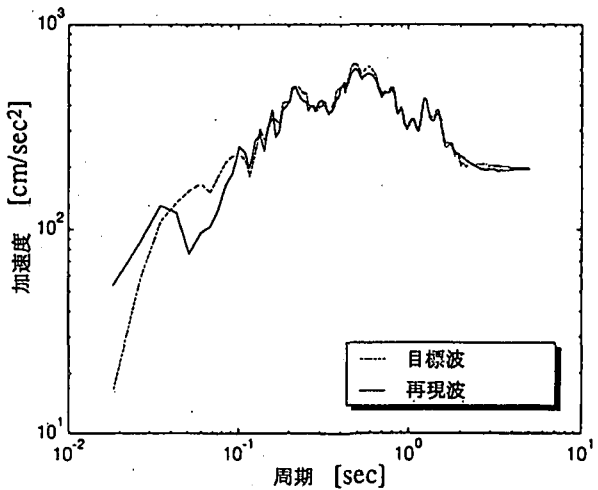


図-3 ロバスト制御による地震波加振試験応答スペクトル

4. オンライン適応型制御の振動台への適用可能性検討

(1) 地震波加振

a) 原理と理論

実際の地震波の加速度レベルに近い値までランダム波加振による特性把握が可能な場合は、高速適応型逆伝達補償が適用できる。高速適応型逆伝達補償<sup>[5][6]</sup>の構成を図-4に示す。その動作は以下の通りである。まず、加振波にローパスフィルタ及び時間遅れを通した信号を教師信号 $d_k$ とする。また、再現波 $X$ に適応フィルタを通した信号を生徒信号 $y_k$ とする。教師信号 $d_k$ と生徒信号 $y_k$ の差は誤差としてLMS (Least Mean Square) アルゴリズムに入力され、これら信号を一致させるべく、最急降下法にて適応フィルタ係数 $W$ を更新していく。 $\mu$ は加速係数である。同時に、前置コントローラの特徴が適応フィルタの伝達特性と同一になるように更新していく。誤差信号 $\varepsilon_k$ が0に収束した場合は、教師信号 $d_k$ と生徒信号 $y_k$ が一致したことになるので、適応フィルタの伝達特性は、下位制御装置及び振動台の特性から

決まる伝達特性の逆特性となる。前置コントローラにも伝達特性の逆特性がコピーされるので結果として、再現波を目標波と一致させることができる。

さらに、教師信号 $d_k$ 生成時にローパスフィルタを挿入し、帯域制限することで、収束の高速化を図っている。

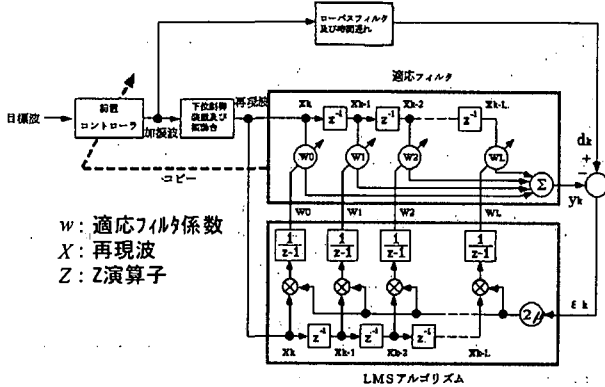
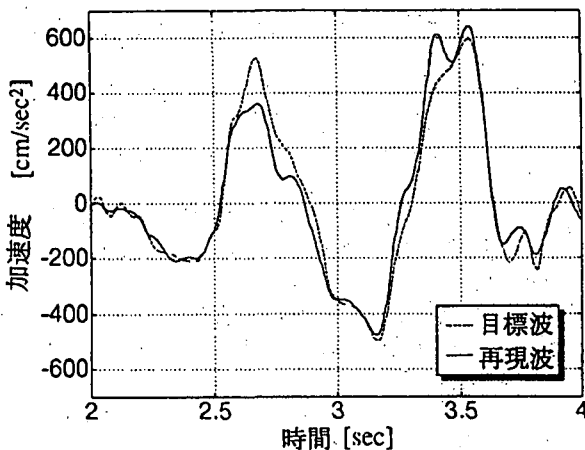


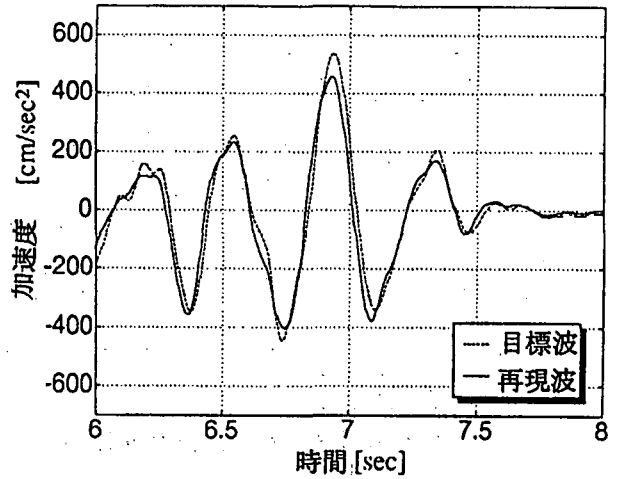
図-4 高速適応型逆伝達補償の構成

b) シミュレーション結果

振動台に共振周波数10Hzの構造物が搭載された状態で試加振による特性把握を行い、適応フィルタ係数を収束させる。適応フィルタ係数が収束した後、共振周波数8Hzの構造物を地震波加振した場合の加速度の時間応答を図-5に示す。共振周波数を10Hzより8Hzに変化させ、構造物が弾性変形域より塑性変形域に入り共振周波数が低下する現象を概略的に模擬している。図-5の結果より高速適応型逆伝達補償は地震波加振には有効であるが、高速化の工夫を施したといえども地震波加振中にオンラインで前置コントローラの特性を完全に更新するまでには至っておらず、目標波と再現波間にある程度のずれが残る。一方、完全にずれがなくなるまでに要する時間を調べたところ、約5minを要した。高精度に対応可能な制御手法開発を推進中である。



(a) 加振開始後2~4 S



(b) 加振開始後6~8 S

図-5 高速適応型逆伝達補償による地震波加振シミュレーション

(2) 正弦波加振

a) 原理と理論

耐久試験のように正弦波等の繰返し型の目標波による試験では連続的な加振が必要であり、加振試験中にオンラインで補償波を修正する手法が望まれている。

本節では正弦波のような繰返し型の目標波を前提とした制御方式として適応型高調波ひずみ補償<sup>[7]</sup>について述べる。

高調波ひずみは、目標波の奇数倍の周波数で発生するので、補償波はあらかじめ定めた離散的な周波数について求めれば良い。一般的には、低次側から10個程度の高調波を補償すれば実用上十分である。動作は以下の通りである。観測した高調波ひずみをフーリエ変換し、高調波を複素数で表現する。すなわち、高調波ひずみ $D(t)$ の周波数 $k\omega$  ( $k=1, 3, 5, \dots$ )成分 $d(jk\omega)$ の実数部 $a(k\omega)$ と虚数部 $b(k\omega)$ を求める。

$$a(k\omega) + jb(k\omega) = d(jk\omega) \dots\dots\dots (1)$$

周波数が予めわかっているので、 $a(k\omega)$ と $b(k\omega)$ は以下のベクトルフィルタ式(2)を使ってオンライン計算で求めることができる。

$$a(k\omega) = \frac{\pi}{\omega} \int_{-\frac{\omega}{2}}^{\frac{\omega}{2}} D(\tau) \cos(k\omega\tau) d\tau$$

$$b(k\omega) = \frac{\pi}{\omega} \int_{-\frac{\omega}{2}}^{\frac{\omega}{2}} D(\tau) \sin(k\omega\tau) d\tau \dots\dots\dots (2)$$

高調波ひずみを除去するためには、このフーリエ係数 $a$ 、 $b$ を共に0にすればよい。そこで、フーリエ係数 $a$ 、 $b$ を制御量と見なして、図-6のフィードバック制御により $a$ 、 $b$ を0にする。

図-6において、フーリエ変換器では振動台の再現波と目標波の差の時系列データをベクトルフィルタでオンラインフーリエ変換し、高調波ひずみのフーリエ係数 $a$ 、 $b$ を求めた後、フーリエ係数が0となるような補償波のフーリエ係数 $a_n$ 、 $b_n$ を式(3)で求める。

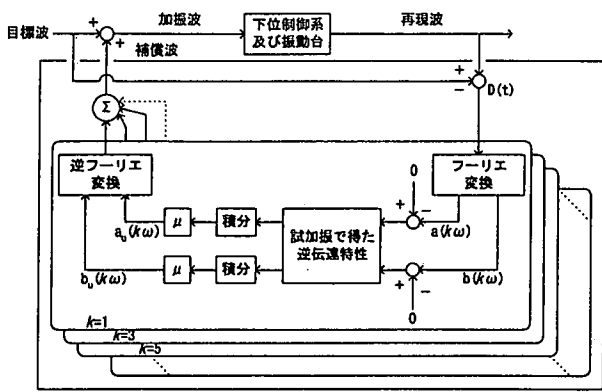


図-6 適応型高調波ひずみ補償の構成

$$\begin{bmatrix} a_u(k\omega) \\ b_u(k\omega) \end{bmatrix} = \mu \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \text{Re}G(kj\omega) & -\text{Im}G(kj\omega) \\ \text{Im}G(kj\omega) & \text{Re}G(kj\omega) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a(k\omega) \\ b(k\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$\mu$  : 加速係数  
 $G(kj\omega)$  : 試加振で得た下位制御装置及び振動台の特性から決まる伝達特性  
 $s$  : ラプラス演算子

逆フーリエ変換器は制御器が出力した補償波のフーリエ係数に基づき、補償波の時系列データを式(4)で計算し出力する。

$$U = \sum_k \{ a_u(k\omega) \sin k\omega t + b_u(k\omega) \cos k\omega t \} \dots (4)$$

### b) 試験結果

無負荷1軸加振試験による検証試験を行った。摩擦やバックラッシュに起因する高調波ひずみは奇数次に現われるので、試験では1次から19次までの奇数次の高調波を補償する。目標波を振幅500cm/s<sup>2</sup>、周波数5Hzの正弦波とした結果を図-7に示す。

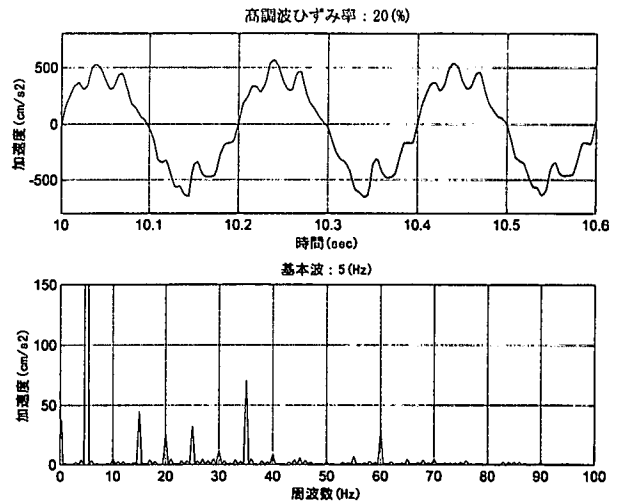
図-7(a)は補償前の加速度の再現波とスペクトルである。3次と5次、7次の高調波が現れている。ひずみ率は20%である。

図-7(b)は補償開始から10sec経過後の加速度の再現波とスペクトルである。補償の対象とした奇数次の高調波とスペクトルは消滅している。ひずみ率は10%に低減しており、有効性を確かめることができた。なお、奇数次及び偶数次高調波の同時低減も可能である。

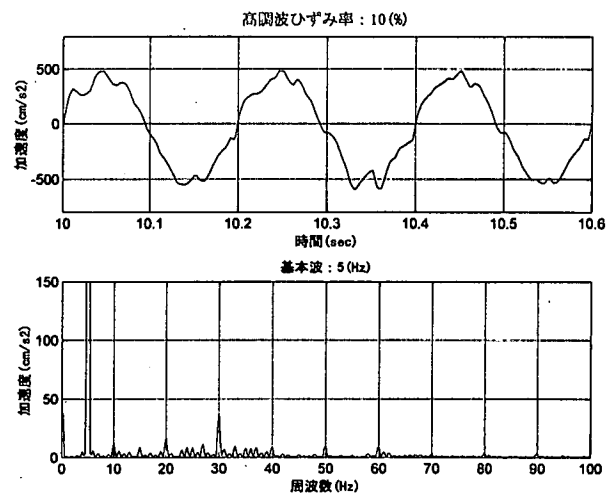
### 5. むずび

地震振動台に適用し加速度再現精度を向上させる最新の補償制御方法の一例を紹介した。一つの補償方法で任意の試験体の加振は極めて困難なので、試験体や目標波に応じて補償方法をきめ細かく対応させている。試加振が行えない土層等にはロバスト制御、構造物を対象とした地震波による破壊試験に対しては高速適応型逆伝達補償、構造物の正弦波加振に対しては適応型高調波ひずみ補償である。

今後の課題は、高速適応型逆伝達補償における適応時間の更なる高速化である。



(a) 加振前



(b) 加振開始10 s 後

図-7 適応型高調波ひずみ補償による加振試験結果

### 参考文献

- (1) 安田ほか、電気油圧式振動台の加速度波形制御(第1報デジタル反復入力補償の収束性)、日本機械学会論文集C Vol. 57 No.536(1991) p. 1213-1220
- (2) 安田ほか、電気油圧式振動台の加速度波形制御(第2報デジタル反復入力補償の適用)、日本機械学会論文集C Vol. 57 No.536(1991) p. 1221-1227
- (3) 前川ほか、H $\infty$ 制御の3次元振動台への応用、計測自動制御学会論文集 Vol. 29 No.9(1993) p. 1094-1103
- (4) 井手ほか、電気油圧式地震振動台の波形制御—分散型H $\infty$ 制御の適用—日本機械学会D & D '99講演論文集B(1999) p. 67-70
- (5) B. Widrow et al., Adaptive Inverse Control, Prentice Hall, (1996)
- (6) 井手ほか、電気油圧式地震振動台の波形制御—Adaptive Inverse Controlの適用—、日本機械学会D & D '99講演論文集B(1999) p. 15-18
- (7) 広江ほか、繰り返し型目標波に対する高調波ひずみ補償の検討、日本機械学会D & D '99講演論文集B(1999) p. 19-22