

震動台の地震波再現性能の改善に関する研究

～2次元3自由度小型震動台を用いた制御実験～

鈴木拓¹・掛川智義¹・佐藤栄治²・梶原浩一²・田川泰敬¹・高井茂光³

¹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)

²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)

³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 Hyogo-ken Nanbu(Kobe) Earthquake occurred on January 17, 1995. Almost 6300 citizens of Kobe and surrounding region lost their lives. In the Northridge Earthquake of the US, just a year before the Kobe event, the same kinds of damage scene, including collapse of buildings and highway viaducts, were observed. These earthquakes pointed out the vulnerability of our modern cities and our infrastructure. Some structures are not safe by these earthquakes. There is necessity to observe the buildings affected by earthquake on real scale. 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility is now under construction. The object of this study is to develop control algorithm for 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility.

Key Words : DMM, Acceleration control, Robust control

1. 緒言

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、6400人あまりの命が奪われ、数十万人の人々が家を失った。そのちょうど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においても、ビルや高速道路高架橋が倒壊し、水道やガスなどのライフライン施設にも大きな被害が生じた。これらの地震は、これまでの多くの地震災害以上に、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。

兵庫県南部地震の経験から、それまで安全だと考え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(図1)。そこで、その破壊過程を追う実験を実大規模の構造物で行う必要があるとの認識から、現在、実大3次元震動破壊実験装置(図2)の建設が進められている。実大3次元震動破壊実験装置は完成すると、震動台質量750ton、搭載面積20m×15m、最大搭載質量1200ton、であり3次元6自由度での加振が可能である。

しかし、本装置は、震動台質量750tonに対し、想定される非加振体の質量が1200tonと通常の震動台と比較してかなり大きい上に、非加振体は破壊によ

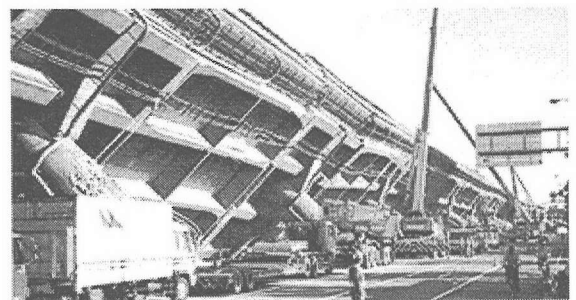


図1 倒壊した高速道路高架橋

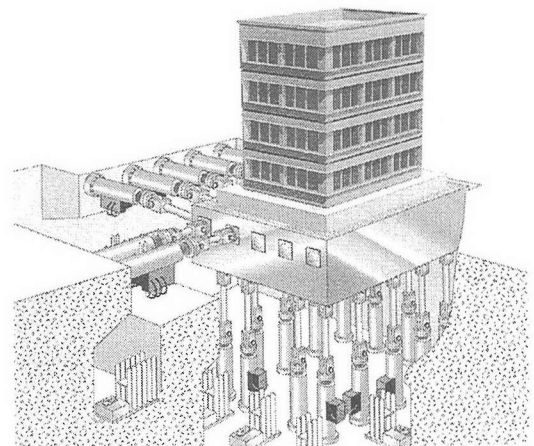
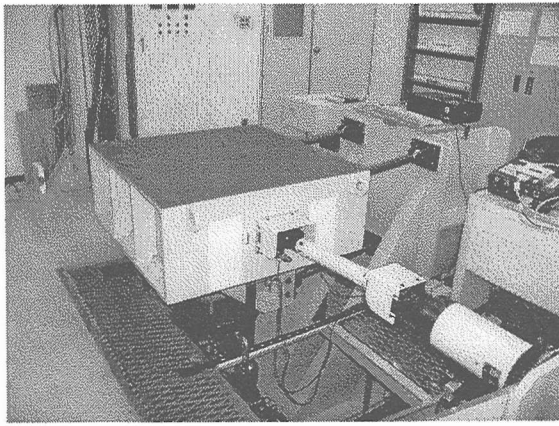
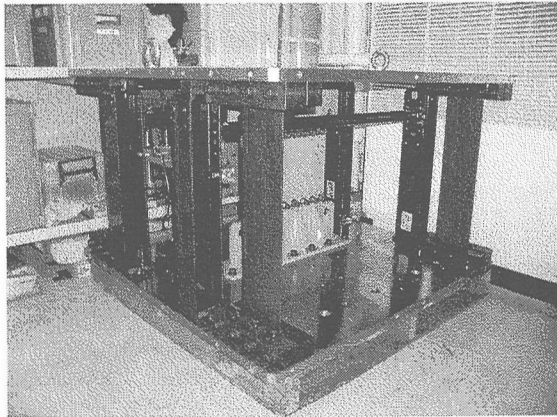


図2 実大3次元震動破壊実験装置



(a) 小型震動台



(b) 試験体

図3 小型震動台、試験体の写真

り加振実験中にその特性が大きく変動する。したがって、これらの問題に対処するため、より高度な制御系設計手法が必要になってくるものと思われる。

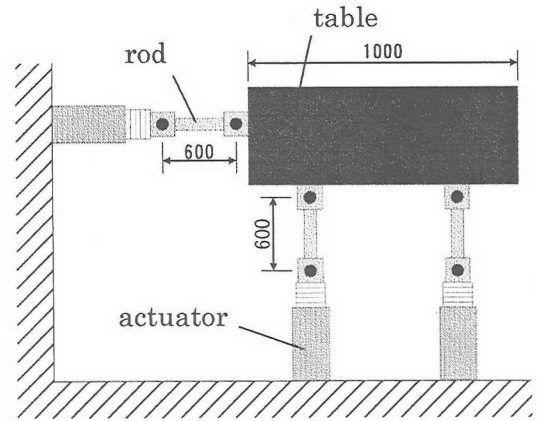
一方、実際の地震波のデータは加速度で計測されており、地震波を忠実に再現するためには加速度追従性能が重要となる。しかし従来用いられてきた変位比例制御やTV C(3変数制御)は基本的に加速度を2階積分し、変位を目標値として制御を行う手法であるため忠実な地震波を再現できる保証はない。

そこで、本研究では加速度制御を前提として、震動台上で地震波(加速度)を忠実に再現し、かつロバスタ性を考慮した制御手法を提案する。また、提案した制御手法を既存の2次元3自由度小型震動台(以下小型震動台)を用いて、制御実験を行い、その有効性を検証する。

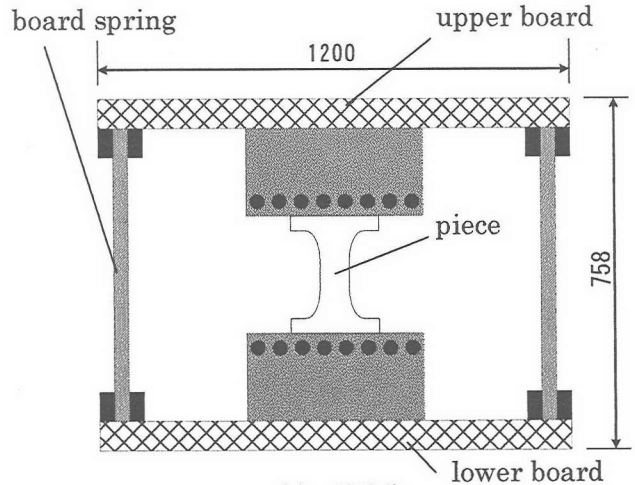
2. 実験装置

図3(a)に小型震動台、図3(b)に震動台に搭載する試験体の写真を、また図4(a)に小型震動台、図4(b)に試験体の平面図をそれぞれ示す。

小型震動台は総重量 660kg、搭載面積 1000×



(a) 小型震動台



(b) 試験体

図4 小型震動台、試験体の平面図

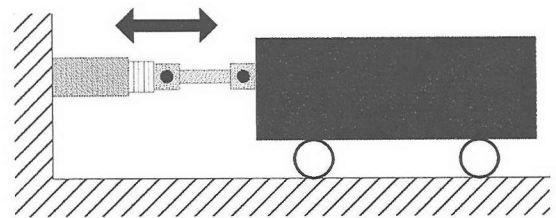


図5 1自由度線形モデル

1000mm、水平方向に1本、垂直方向に2本の加振機が取り付けられており、2次元平面内で水平、垂直、回転の3自由度の加振が可能である。

試験体は総重量 900kg、寸法 1200×1200×758mm、上板、下板、板ばね、ピースから構成されており、上板を板ばねで支えている。上板と下板の間にピースを取り付けることができ、これを交換することにより試験体を剛体、弾性体、弾塑性体とすることができる。

3. モデリング

モデリングは継ぎ手の幾何学的非線形性の影響などはないと考え、図5のように1自由度線形モデル

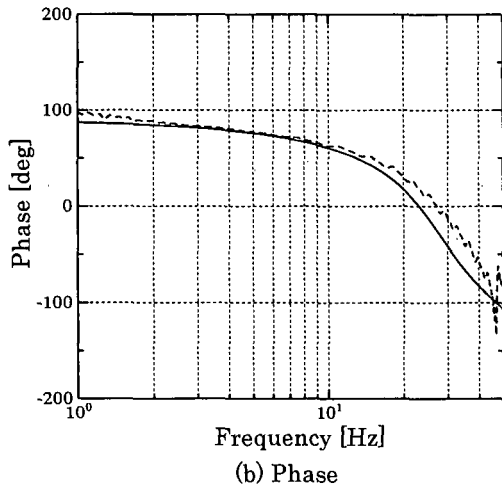
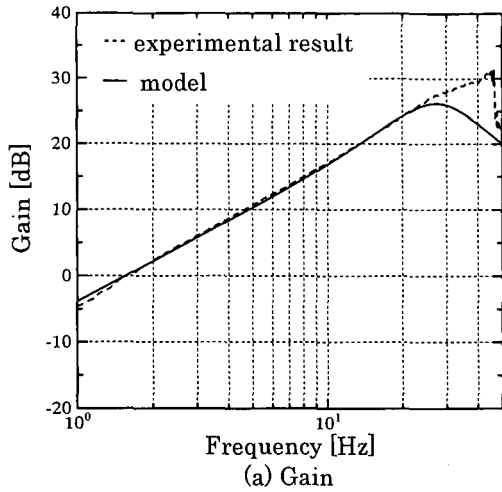


図6 プラントの周波数特性

として扱うことにより水平、垂直方向とも以下に示す数学モデルで表現できる。

まず、加振機への入力電圧 u から作動油流量 Q_{sa} までの関係は、 K_s をサーボアンプゲイン、 K_{ac} を変位流量変換係数とすると、次式のようになる。

$$\frac{Q_{sa}(s)}{u(s)} = \frac{K_s \omega_s^2 K_{ac}}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \quad (3-1)$$

また、作動油流量 Q_{sa} と差圧 P_{am} との関係は、 C_{al} を流量損失係数、 A_a をピストン受圧面積、 k_a 駆動形の剛性を表す係数とすると

$$\begin{aligned} Q_a &= Q_{sa} - C_{al} P_{am} \\ Q_a &= A_a \dot{x} + k_a \dot{P}_{am} \end{aligned} \quad (3-2)$$

となる。

そして、震動台の運動方程式は M を震動台質量、 c を作動油粘性抵抗、 n を加振機の本数とすると

$$M\ddot{x} = n(A_a P_{am} - c\dot{x}) \quad (3-3)$$

と表されるので、これら(3-1)(3-2)(3-3)式より入

力電圧から震動台加速度までの伝達関数は

$$\frac{\ddot{X}(s)}{u(s)} = \frac{K_s \omega_s^2 K_{ac}}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \frac{nK_n s}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-4)$$

となる。ただし、

$$\omega_n = \sqrt{(cC_{al} + A_a^2) / Mk_a}$$

$$K_n = A_a / Mk_a$$

$$2\zeta_n \omega_n = (MC_{al} + ck_a) / Mk_a$$

である。

次に、実機を用いた特性実験を行い伝達特性を求め、得られた伝達特性とモデリングによって求めた数学モデルの周波数特性を比較する。

水平加振機に1~50Hzのスweepサイン波を入力したときの入力電圧から水平方向震動台加速度までの周波数特性を図6に示す。

図6より、3. で求めた数学モデルが実機とよく一致していることがわかる。

4. デュアルモデルマッチング法による制御器設計

(1) デュアルモデルマッチング法

デュアルモデルマッチング法とは、制御系設計時に望みの閉ループ伝達特性を設定し、設定どおり、またはこれに非常に近い閉ループ伝達特性を実現する制御器を設計する手法である。

この手法の利点は、周波数帯域において全系の閉ループ伝達関数のパラメータを決定する事により決定した伝達特性を実現する制御器を算出するため、制御器の設計に際して見通しがよいこと、制御器が制御対象の伝達関数と全系の閉ループ伝達関数のパラメータ(極、零点)を陽に含んだ形で代数式により表現できるため、制御対象の変化および望みの閉ループ伝達関数の変化に対応した制御器を容易に求められることなどである。

図7に一般的な制御系のブロック図を示す。

図より次式が得られる。

$$y = P_{uy} C_{ru} r + P_{uy} C_{yu} y + P_{uy} C_{yu} v + P_{dy} d \quad (4-1)$$

ここで、添え字は入力から出力を表す。この式を変形すると

$$y = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} (P_{uy} C_{ru} r + P_{uy} C_{yu} v + P_{dy} d) \quad (4-2)$$

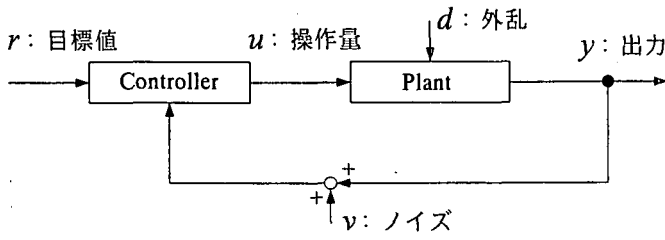
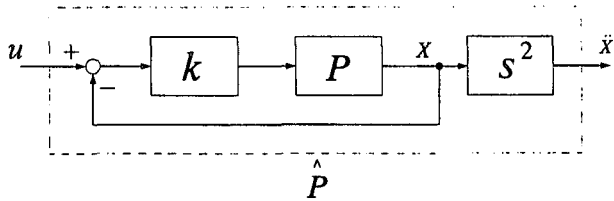


図7 制御系ブロック図



k : 比例ゲイン
 P : プラント
 \hat{P} : 新しいプラント

図8 新たなプラント

が得られる。ここで、それぞれの入出力関係に着目することによって全系の伝達関数は次式によって与えられる。

$$W_{ry} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} P_{uy} C_{ru} \quad (4-3)$$

$$W_{vy} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} P_{uy} C_{yu} \quad (4-4)$$

$$W_{dy} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} P_{dy} \quad (4-5)$$

ここで、 W_{ry} は r から y までの閉ループ伝達関数、 W_{dy} は d から y までの閉ループ伝達関数、 W_{vy} は v から y までの閉ループ伝達関数を表す。 W_{ry} は制御量が目標値にどれだけ追従しているかを表す伝達関数(目標値追従特性の指標)、 W_{dy} は外乱が制御量に与える影響を表す伝達関数(低感度特性の指標)、 W_{vy} は観測ノイズが制御量に与える影響を表す伝達関数(ロバスト安定性の指標)である。

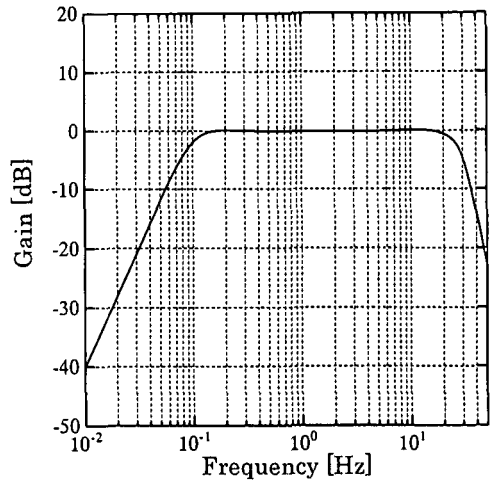
次に、式(4-4)を変形すると、

$$1 + W_{vy} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} \quad (4-6)$$

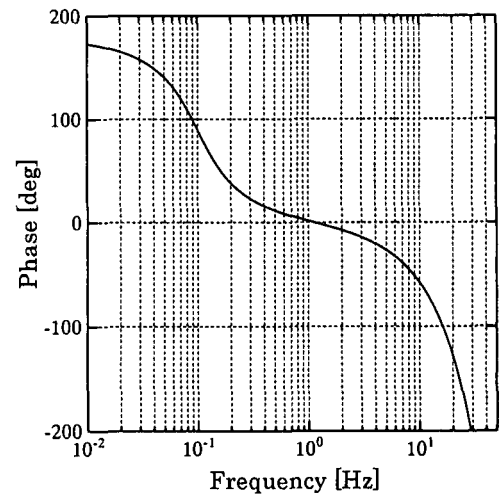
が得られる。したがって C_{ru} 、 C_{yu} と W_{dy} は、式(4-3)、(4-4)と(4-5)から

$$C_{yu} = P_{uy}^{-1} W_{vy} (1 + W_{vy})^{-1} \quad (4-7)$$

$$C_{ru} = P_{uy}^{-1} W_{ry} (1 + W_{vy})^{-1} \quad (4-8)$$



(a) Gain



(a) Phase

図9 目標値追従特性

$$W_{dy} = (1 + W_{vy}) P_{dy} \quad (4-9)$$

として求まり、望みの閉ループ伝達特性を実現する制御器が算出される。

(2) 制御系設計

本研究では、加速度制御を目的とするが加速度情報のみで制御を行うと加速度計のオフセット成分などによりドリフトが起り、中立位置から離れていってしまう。そこで、図8のようにプラントに変位比例制御を行ったものを新たなプラントとし、その新たなプラントに対しデュアルモデルマッチング法を用いて加速度制御を行う。水平、垂直それぞれこの方法で設計を行う。

設計された水平方向の制御器(試験体搭載時)の目標値追従特性 W_{ry} の周波数応答を図9に示す。地震波を震動台上で再現するためには 0.1~10Hz の目標加速度追従性能が必要となる。そこで、図9に示す

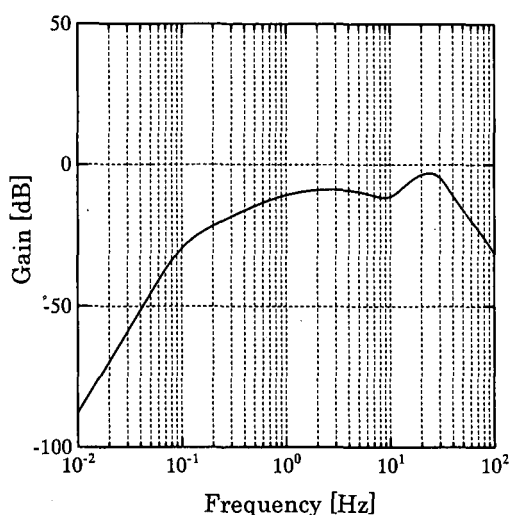


図 10 ロバスト安定性の指標

ように 0.1~10Hz の周波数帯域をカバーするようなバンドパス特性を持たせる。

図 10 にロバスト安定性の指標 W_w を示す。図 10 においてゲインがなるべく低くなるように設計することで、パラメータ変動を大きく許容できるロバスト安定な制御器が設計されるため、パラメータの決定にあたり W_w を描き、ロバスト性を考慮に入れる。

5. 加振実験

水平 1 軸方向にスイープサイン波および、兵庫県南部地震波(加速度)を目標加速度として与えたときの実験結果を示す。

(1) スイープサイン波加振実験

水平方向に目標値としてスイープサイン波 1~50Hz を入力したとき、水平、垂直方向とも変位比例制御のみを用いた場合の目標値追従特性の周波数応答を図 11(a)に、水平、垂直ともデュアルモデルマッチング法を付加し、加速度制御を行った場合を図 11(b)に示す。

変位比例制御では、高い周波数まで目標値追従させることは難しく、また試験体(剛体)を搭載すると性能が大きく劣化する(図 11(a))。

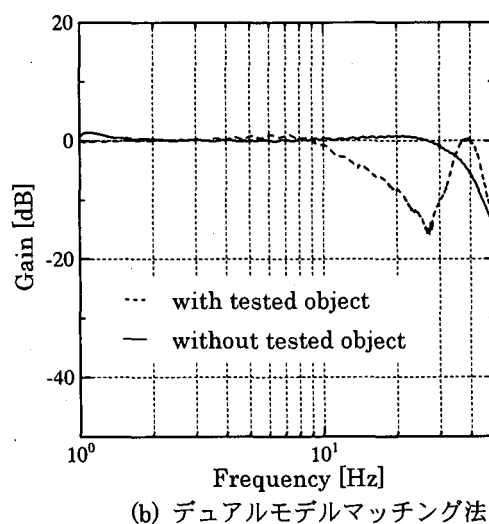
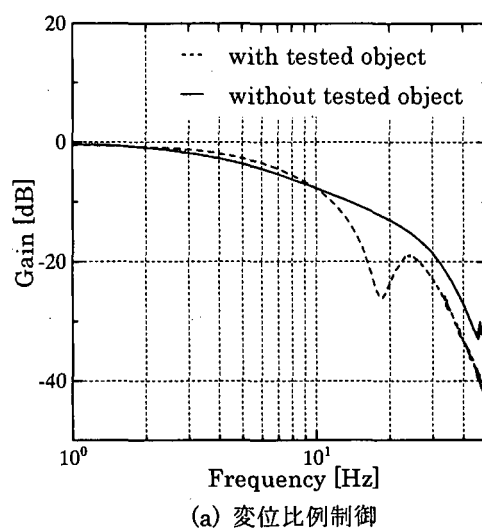


図 11 周波数特性

変位比例制御のみの場合と比べてデュアルモデルマッチング法を付加することによって、加速度目標値追従特性を 30Hz 付近まで高めることが可能となった(図 11(b))。

また、デュアルモデルマッチング法では制御対象のパラメータ変動に対して制御器の再設計が容易であるので、試験体(剛体)を搭載した場合、試験体の質量を考慮し再設計することによって、地震波を再現するために必要な 10Hz までの目標値追従特性を得ることができた(図 11(b))。

(2) 地震波加振実験

試験体(剛体)を搭載した状態でデュアルモデルマッチング法を付加した制御器に兵庫県南部地震波(加速度)を目標値として入力した結果を図12に示す。図12(a)に入力した地震波の時系列波形を、図12(b)に震動台の加速度の時系列波形を、図12(c)に入力した地震波と震動台の加速度を重ね合わせた図を示す。なお震動台が小型であるため地震波はスケールを20%に絞り入力した。

図12(c)より試験体を搭載した場合でもかなり良い精度で地震波を震動台上で再現できていることがわかる。

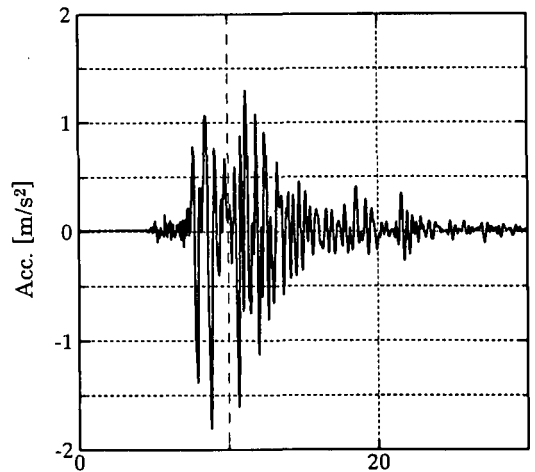
6. 結言

本研究では、2次元3自由度小型震動台の制御則として、デュアルモデルマッチング法をベースとした加速度制御手法を提案するとともに、この手法を用いた加速度制御実験を行い、目標値追従特性、ロバスト性などに関して良好な制御結果が得られることを確認した。

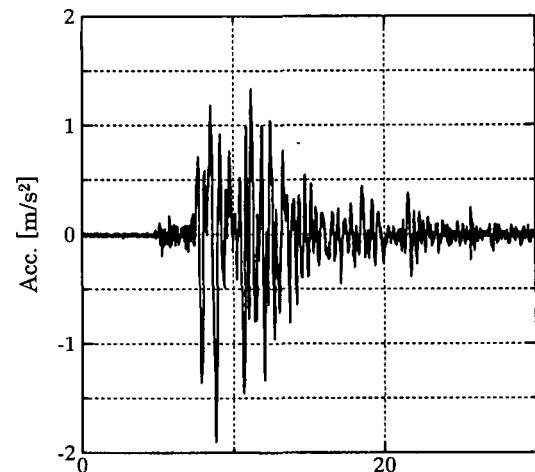
しかし、試験体を搭載したときの制御性能の劣化がかなり大きいことも確認した。これは試験体の搭載によって重心が変化し、その影響で回転が起きていると思われる。今回の小型震動台では地震波を再現するための目標値追従特性は確保できたが、実大3次元震動破壊実験装置では目標値追従性能を確保できる保証はない。今後、垂直加振機も含めた3自由度制御を行う予定である。

7. 参考文献

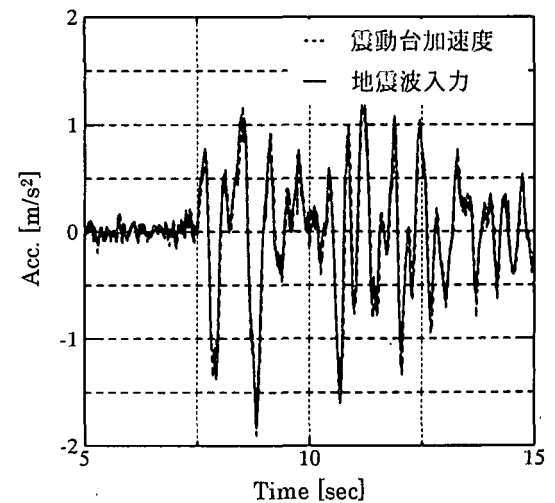
1. 岡本峯基: アクティブマスダンパを用いた床震動制御に関する研究, 東京農工大学博士論文, 2001.
2. 小波倭文朗, 西海孝夫: 油圧システム, 東京電機大学出版局, 1999.
3. 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森下出版株式会社, 2001.
4. 野波健蔵, 西村秀和, 平田光男: 制御系設計, 東京電機大学出版, 1999.



(a) 地震波入力



(b) 震動台加速度



(c) 地震波入力・震動台加速度

図12 地震波加振