

|              |      |        |
|--------------|------|--------|
| 京都大学大学院工学研究科 | フェロー | 家村 浩和  |
| 京都大学大学院工学研究科 | 正会員  | 五十嵐 晃  |
| 京都大学大学院工学研究科 | 学生員  | ○阪部 真悟 |

### 1.はじめに

リアルタイムで構造物の動的応答を評価する手法として、振動台実験とコンピューターをオンラインで接続して行うサブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法が提案されている。従来の研究<sup>1)</sup>では振動台の動特性による振幅・位相のずれが実験結果に大きく影響を及ぼすことが明らかになっている。そこで本研究では電磁式振動台と油圧式振動台の2台と DSP を用いて、振動台の動特性を補償するためにデジタルフィルターを導入した実験システムを構築し、本実験システムの妥当性を特に精度に着目して検証した。

### 2.サブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法の概念図を図 1 に示す。本実験手法は構造物の一部分（サブストラクチャー）を取り出した供試体に対して振動台実験を行い、同時に残りの部分の応答計算を実験部分の計測データを取り込んでコンピューターで行うことにより、構造物全体の応答を求める手法である。従来のハイブリッド実験では、供試体にその振動挙動が速度に依存する構造物、例えば摩擦ダンパーや粘性ダンパー等には適用できないが、本実験手法では振動台によりリアルタイムでの加振が可能であり、このような構造物に対してもその振動挙動を表すことができる。実験アルゴリズムは次の通りである。i 番目のステップにおいて(1)実験部分の計測値を測定。(2)計測値と入力波形、前ステップまでに得られた計算値を用いて実験部分と隣接する節点の相対応答を求め、これに入力波形を加えて絶対応答を計算する。(3)上で求めた絶対応答にデジタルフィルターをかけ、振動台の動特性による振幅・位相のずれを補償し、これを振動台への入力信号とする。(4)振動台を加振する。(5) $i+1=i$ として(1)に戻る。

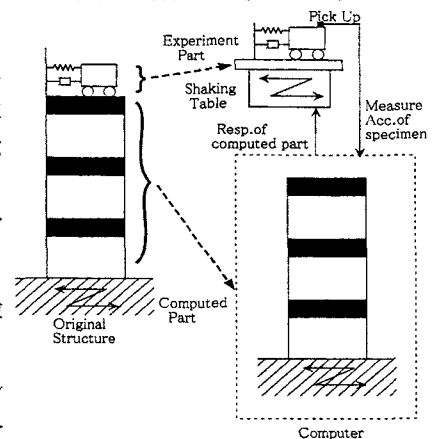


図 1 実験概念図

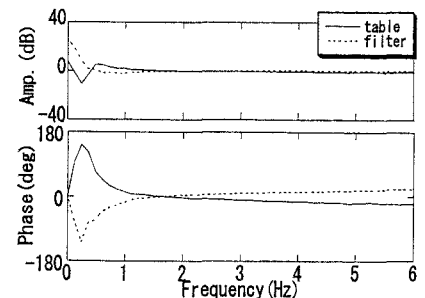


図 2 電磁式振動台

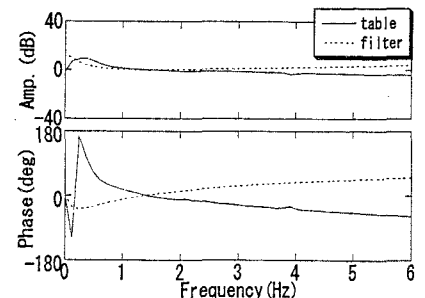


図 3 油圧式振動台

### 3.振動台の動特性に基づくデジタルフィルターの設計

使用する2台の振動台の周波数応答より振動台の動特性を補償するデジタルフィルターを設計する。デジタルフィルターには入力信号の位相をずらす性質があり、本研究ではその点に着目して導入を試みた。振動台への出力に対する入力の伝達関数の周波数応答が振動台の動特性を完全に打ち消す理想の周波数応答であり、この周波数応答から最小二乗法により作成するデジタルフィルターの伝達関数を求める。理想の周波数応答を  $h(\omega)$  とし、作成するデジタルフィルターの伝達関数を  $H(z)=b(z)/a(z)$  とする。 $B(\omega), A(\omega)$  を  $b(z), a(z)$  のフーリエ変換とすると、 $|h(\omega)-B(\omega)/A(\omega)|^2$  を最小にする  $b(z), a(z)$  を求めることにより、理想により近いデジタルフィルターの伝達関数を求めることができる。図2に電磁式振動台の動特性を実線で、作成したデジタルフィルターの特性を破線で示す。

Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI, Shingo SAKABE

また、図3に油圧式振動台の動特性を実線で、作成したデジタルフィルターの特性を破線で示す。使用する2台の振動台の動特性はいずれも1.5Hz以下で位相が進み、それ以上では位相が遅れる特性を持っている。従って、加振信号通りに振動台が作動せず、本実験手法のように1ステップごとのフィードバックがある実験では誤差の累積が実験結果に大きく影響する。作成したデジタルフィルターの効果を検証する予備実験を行ったところ、電磁式振動台で1~8Hz、油圧式振動台で1.5~4Hzの範囲で補償可能であることがわかった。

#### 4. 検証実験

検証実験はいずれも計算時間刻み 1ms、計算部分の数値積分法に計算量の少ない後退 Euler 法を用いている。計算時間刻みを 1ms と非常に細かくすることにより安定性の向上を図り、また、この時間刻み内で応答計算を可能とするため、高速演算処理可能な DSP を用いている。実験対象モデルは計算部分の実験部分に対する質量比が 0.1, 0.01、固有振動数比が 1、減衰比が 2% のモデルであり、図4に示す。外部入力波形はランダム波である。実験結果は実験供試体をモデル化し、全体系を実験と同じ後退 Euler 法で直接数値積分して求めた応答計算結果と比較した。いずれも実線が応答計算結果であり、破線が実験結果である。

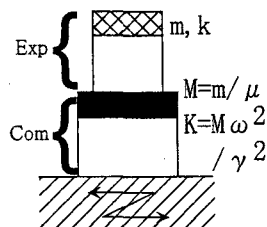


図4 実験対象モデル

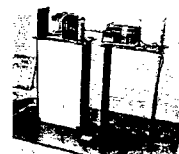


図5 実験供試体(電磁式振動台)

##### 電磁式振動台

実験供試体は小型電磁ダンパーを取り付けた1自由度フレームモデルで図5に示す。電磁ダンパーはコイル部と磁石部の間に摩擦が働き、粘摩擦ダンパーとして働く。質量比 0.1 の時を図6に、0.01 の時の実験結果を図7に示す。実験結果より、質量比を小さくすればするほど精度が良くなることが分かる。しかし、粘摩擦ダンパーのモデル化は困難であり、応答計算結果が精解であるとは言えない。従って、本実験システムを用いたサブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法の精度の評価は十分ではない。

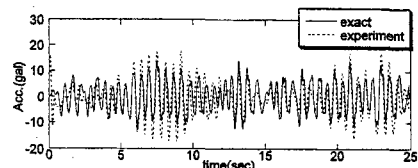


図6 電磁式振動台実験結果(質量比 0.1)

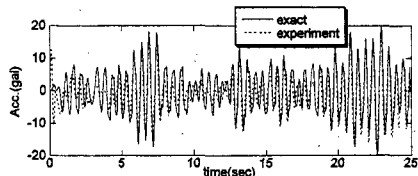


図7 電磁式振動台実験結果(質量比 0.01)



図8 実験供試体(油圧式振動台)

##### 油圧式振動台

実験供試体は図8に示す電磁式マスダンパーで、軸受けにボールベアリングを使用しており、摩擦は少なく粘性ダンパーとして働く。質量比 0.1 の時を図9に、0.01 の時の実験結果を図10に示す。実験結果より、電磁式同様、質量比を小さくすればするほど精度は良くなる。また、電磁式の場合より精度は良い。

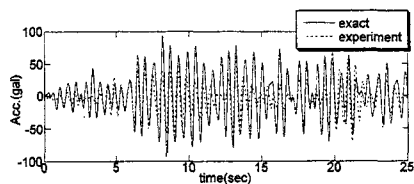


図9 油圧式振動台実験結果(質量比 0.1)

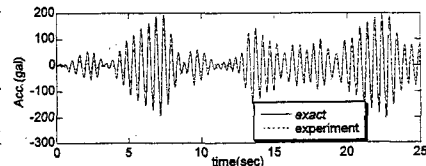


図10 油圧式振動台実験結果(質量比 0.01)

#### 5. 結論

従来のサブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法の大きな問題点であった振幅・位相のずれを補償するために、デジタルフィルターを導入した。そしてデジタルフィルターによる補償を組み込んだ実験アルゴリズムに基づき、電磁式振動台、油圧式振動台の2台と DSP からなる実験システムを構築した。検証実験の結果、電磁式、油圧式とも良好な精度が得られ、本実験システムによりサブストラクチャーハイブリッド振動台実験が精度良く行うことが可能であることを示せた。

**参考文献** 1) 家村・五十嵐・諏訪：サブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法の基礎的アルゴリズムの提案、土木学会第 51 回年次学術講演概要集 I-B341, 1996 年 7 月