

サブストラクチャーハイブリッド振動台システム による振動制御デバイスの実験的検証

五十嵐晃¹・家村浩和²・阪部真悟³

¹正会員 Ph.D. 京都大学助教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工修 日揮株式会社 (〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1)

リアルタイムで構造物や振動制御デバイスの動的応答を評価する手法として、振動台実験と計算機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。振動台の動特性による加振振幅・位相のずれが、実験結果の精度を大幅に劣化させる要因であるため、デジタルフィルタを導入してこの問題を改善するサブストラクチャーハイブリッド振動台実験の方法論を検討した。さらに、振動台とDSPを用いた実験システムを構築し、同調質量ダンパを例に制御デバイスの振動制御効果を検討する実験の結果を示した。

Key Words : *shake table test, vibration control, real-time test, substructuring technique, seismic control*

1. はじめに

リアルタイムで構造物の動的応答を実験的に評価する手法として、想定構造系より一部分（サブストラクチャー）を取り出した実験供試体に対する振動台加振と、構造系の残りの部分の応答を求めるための数値計算をオンラインで接続された振動台実験と計算機により同時に進行させる手法が提案されている¹⁾²⁾³⁾。ここではこの方法をサブストラクチャーハイブリッド振動台実験と呼ぶこととする。実験部分の供試体として複雑な弾塑性挙動を示す部分、計算モデル化が困難な部分、あるいはその振動挙動が時間依存性を持つような部分を、振動台の性能上の限界を満足するよう選ぶことにより、対象とする供試体に対してより現実的な加振条件を用いた加振実験を可能とするとともに、供試体が大規模な構造システムの一部として挙動した場合の、他の要素との動的相互作用を含めた構造全体系の応答を実験的に検討することができる手法である。

このような実験法を用いることにより、振動制御デバイスの制振制御性能の実験的検証が極めて効果的かつ経済的に行うことが可能であると考えられる。そこで本報告では、同調質量ダンパー（TMD）の

模型を実験部分構造、制御対象構造物を計算部分構造として本手法を適用することにより、振動制御デバイスの性能の検証が可能であることを示そうとするものである。実験システムの開発にあたっては、従来の研究⁴⁾により、振動台の動特性による加振振幅・位相のずれが、実験結果の精度を大幅に劣化させる要因であることが知られていることから、この問題を解決するためにデジタルフィルタを導入したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験アルゴリズムを採用した。さらに、振動台とDSPを用いて構築した実験システムにより行ったTMDデバイスの模型の実験結果に基づき、本手法による振動制御デバイスの性能評価の妥当性を検証した。

2. デジタルフィルタを導入したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験アルゴリズム

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法は、図-1に示すように想定構造系より一部分（サブストラクチャー）を取り出した実験供試体に対する振動台加振と、構造系の残りの部分の応答を求めるための数値計算を同時に進行させることにより、より現実に近い動的荷重下での構造要素の動的特性を調べる実験手法である。この実験手法においては、

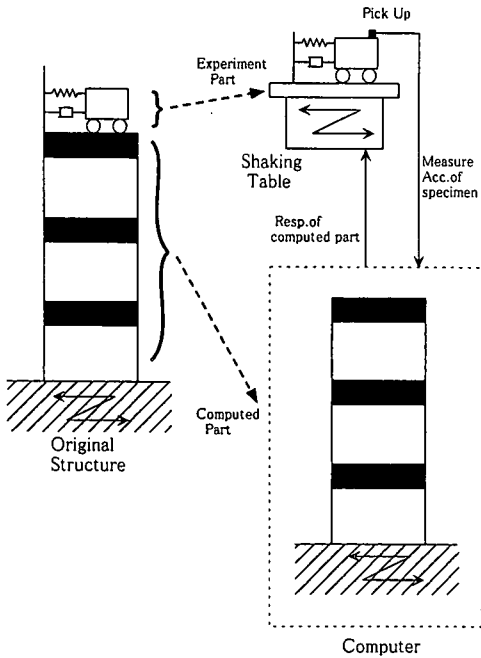


図-1 実験概念図

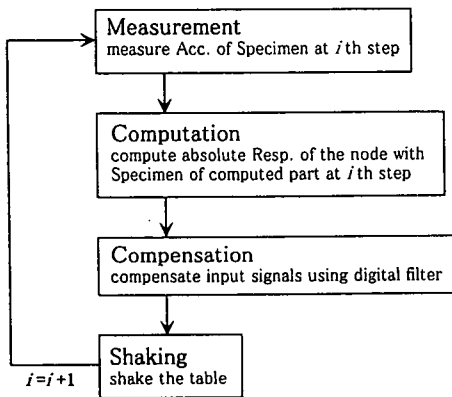


図-2 実験アルゴリズム

振動台の加振出力とりわけ位相特性が実験過程の安定性や精度に非常に敏感に影響することが明らかにされており、精度の高い実験結果を得るためには振動台の動特性を考慮したアルゴリズムを採用する必要がある。

本研究では、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験アルゴリズムにおいて振動台加振値を得た後にIIRフィルタによる処理を追加することにより、実験精度を改善する方法を検討した。実験アルゴリズムの概略を図-2に示す。

3. 振動台の動特性に基づくデジタルフィルタの設計

実験アルゴリズムに用いるIIRフィルタは、使用する振動台の動特性を可能な限り補償するような伝達関数を持つように設計することが基本的な考え方で

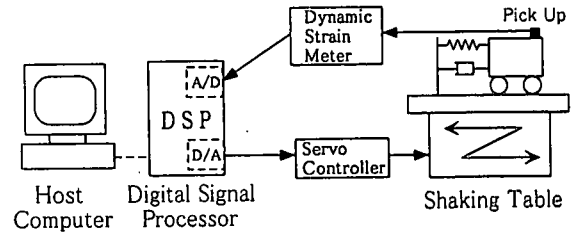


図-3 サブストラクチャーハイブリッド振動台実験システム

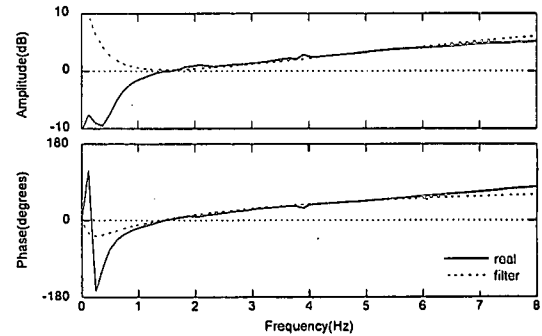


図-4 振動台とフィルタの周波数特性

あるが、補償周波数範囲とアルゴリズム全体の信頼性の条件を同時に満足し、かつ一般性を持つ設計手順とするため、次のような方法を採用した。まず振動台への入力を $x(t)$ 、振動台応答を $y(t)$ とし、次式により目標周波数応答関数 $H(\omega)$ を求める。

$$H(\omega) = \frac{\hat{P}_{xy}(\omega)}{\hat{P}_{yy}(\omega)} \quad (1)$$

ここに、 $\hat{P}_{xy}(\omega)$ 、 $\hat{P}_{yy}(\omega)$ はそれぞれ入出力のクロススペクトルおよび出力のパワースペクトルである。ここで作成するIIRフィルタの伝達関数を $b(z)/a(z)$ と置く。ここに、 M をフィルタ次数を決定する整数とし、

$$\begin{aligned} a(z) &= \prod_{k=1}^M (a_{k0} + a_{k1}z^{-1} + a_{k2}z^{-2}) \\ b(z) &= \prod_{k=1}^M (b_{k0} + b_{k1}z^{-1} + b_{k2}z^{-2}) \end{aligned} \quad (2)$$

$A(\omega)$ 、 $B(\omega)$ をそれぞれ $a(z)$ 、 $b(z)$ の周波数領域表示とし、次の最小2乗問題を解くことにより $a(z)$ 、 $b(z)$ に含まれる係数を全て決定する。

$$\left| H(\omega) - \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \right|^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

得られた $a(z)$ および $b(z)$ によりフィルターを構成する。

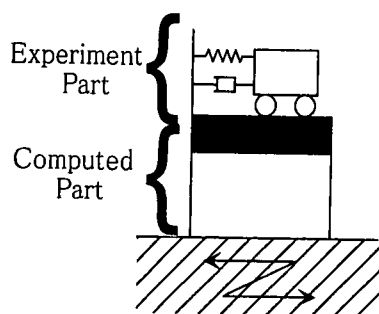


図-5 構造系モデル

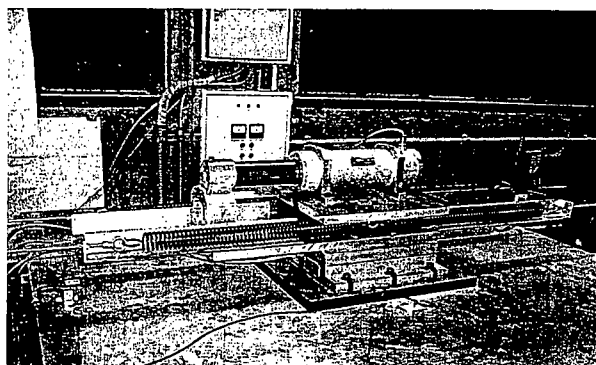


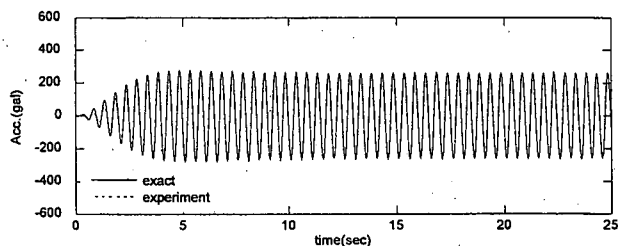
図-6 実験供試体 (質量ダンパ)

4. 実験による検証

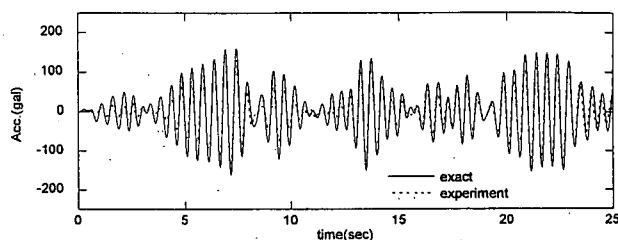
油圧式振動台とDSPシステムを図-3に示すように構成して実験システムを製作し、実験供試体を用いて実際にフィルタの設計および実証のための加振実験を行った。検証実験はいずれのケースにおいても計算時間刻み1msを用いている。

図-4に振動台の動特性と上記の方法で作成したデジタルフィルタの特性を比較したものを、それぞれ実線と破線で示した。本実験システムの場合、上記のフィルタ次数を決定するパラメータ M を1として、1.5~4Hzの範囲で良好な補償結果が得られている。

想定全体構造モデルは、図-5に示すような線形1自由度構造物上に同調質量ダンパー(TMD)を設置した2自由度系とし、TMD部分を実験部分とした。供試体として用いた質量ダンパー装置模型を図-6に示す。質量ダンパーは、摩擦の小さい直線ベアリングで支持した筒状の電磁石が1方向に移動する機構になっており、鋼バネにより復元力を与えると同時に、電磁石の内部に発生させた磁界中を真鍮製の円筒が移動する時に発生する渦電流損失により速度比例型の粘性減衰を付加している。固有振動数 $f_0=2.01\text{Hz}$ の線形1自由度系に近い挙動を示す。実験においては、



(a) 正弦波加振実験



(b) ランダム波加振実験

図-7 マスダンパ付加質量の加速度

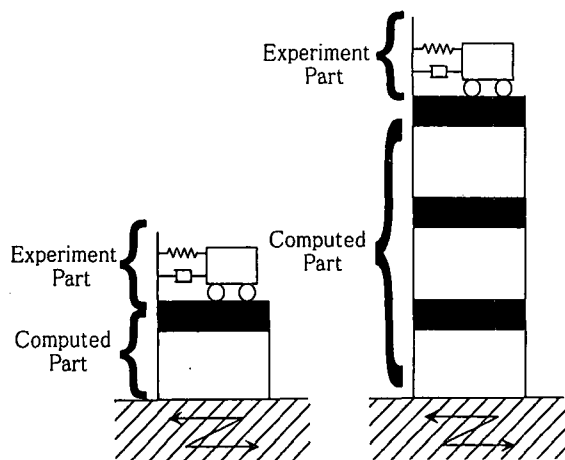
質量ダンパーの減衰定数を0.07に設定し、正弦波加振および不規則加振のそれぞれに対してTuningしたケースについて検討するため、計算部分の実験部分に対する質量比 μ として1.3%、2.0%の2種類のパラメータを用いた。計算構造物はどちらについても固有振動数約2.02Hz、減衰比は2%としている。

正弦波入力の場合の実験結果を図-7(a)に、ランダム波入力の場合を図-7(b)に示す。いずれも、対応する全体構造モデルの応答計算を行った結果と対比して示している。ランダム波加振の場合において若干の差が認められる以外は、数値計算と実験結果は非常に良好な一致を示しており、構築されたシステムにより高い精度の実験が可能であることを示している。

5. TMDデバイスの性能の検証例

前節のマスダンパー装置を実験供試体として、計算部分の制振装置として動作させた場合の性能評価を行った。制御対象対象構造物のモデルとして、前節と同様の1自由度系(SDOFモデル)、および図-8に示すような3自由度系(3-DOFモデル)の2つの場合について実験を行った。制御対象構造物(計算部分構造)の各層の質量は2692kgである。固有振動数(1次)はいずれのケースにおいても約2.02Hzである。ランダム波を入力として実験を行っている。

実験結果を図-9に示す。質量ダンパー(TMD)を作動させた場合と、付加質量部をロックすること



(a) SDOFモデル

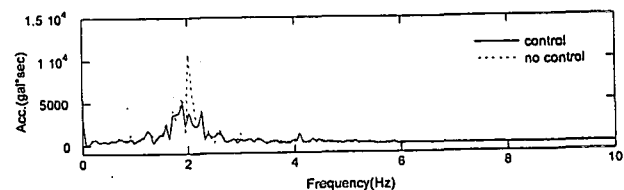
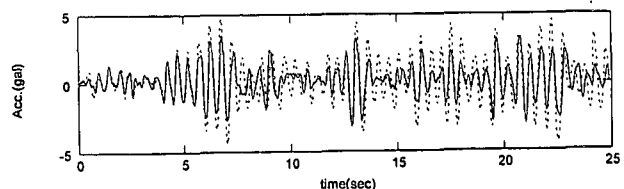
(b) 3-DOFモデル

図-8 制振性能検証実験における
制御対象構造物のモデル

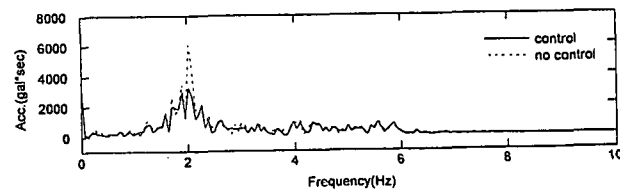
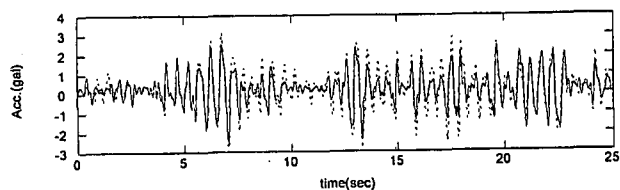
により非動作状態とした場合について、それぞれ計算部分の最上部（振動台テーブル）の応答加速度時刻歴およびフーリエスペクトルを示している。実線がTMDを作動させた場合、破線はロックして非動作状態とした場合を示している。いずれのモデルでもTMDを作動させたときの応答の低減を示しており、制振効果が得られていることがわかる。フーリエスペクトルを見ると、外部入力波がランダム波の時ではピークが約50%低減されていることがわかる。SDOFモデルの時に比べ、3-DOFモデルの場合、質量比がやや小さくなることにより制振効果がやや劣る傾向も実験により再現されている。

5. 結論

現実性の高い加振条件のもとで振動制御デバイスの性能を実験的に検証するために、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法を適用した実験について述べた。これまで問題点であった振動台の振幅・位相のずれを補償するため、デジタルフィルターを導入した実験アルゴリズムを開発するとともに、実験アルゴリズムを、油圧式振動台とDSPから成るシステムに実装し、精度の高いサブストラクチャーハイブリッド振動台実験を行うことができるシステムを構築した。検証実験の結果、良好な実験精度が得られることが示され、これを用いて振動制御装置の制振性能試験の調査が可能であることを示した。



(a) SDOFモデル



(b) 3-DOFモデル

図-9 制御対象構造物（振動台）応答加速度

参考文献

- 1) 諏訪高典・家村浩和・五十嵐晃：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。
- 2) 堀内敏彦・中川正紀・笠井洋昭：振動台を用いた実時間ハイブリッド実験の基礎検討，日本機械学会，機械力学・計測制御講演論文集，No.940-26I，Vol.A，pp.433～436，1994年。
- 3) 小長井一男・野上仁昭・勝川藤太・鈴木猛康・三神厚：構造物とその基礎の相互作用を反映させる振動台の制御，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.203～210，1998年。
- 4) 諏訪高典・五十嵐晃・家村浩和：サブストラクチャーハイブリッド振動台実験手法の安定性と精度に関する検討，土木学会第51回年次学術講演概要集，I-B243，1998年。