

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムの開発と 振動制御デバイスの性能検証実験への適用

Development of substructure hybrid shake table test system
and its application to performance verification of vibration control devices

五十嵐 晃*, 家村 浩和**, 田中 創***
Akira Igarashi, Hirokazu Iemura, Hajime Tanaka

* Ph.D., 京都大学大学院助教授, 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)

** 工博, 京都大学大学院教授, 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)

*** 工修, 国土交通省関東地方整備局東京外かく環状道路調査事務所 (〒158-8580 世田谷区用賀 4-5-16 T Eビル 7F)

This paper describes a study on the substructure hybrid shake table test method based on the principle of the hybrid testing technique and the substructure technique in order to evaluate the real-time dynamic response of test structures and structural components. This test method consists of the shake table test for the experimental substructure that is a part of the structural system and numerical computation for the numerical substructure. In this study, the dynamic characteristics of the shaking table were compensated by using the displacement control and digital filters, thus improving the reliability and accuracy of the substructure hybrid shake table testing method. The capability of the test method is demonstrated by the application to the validation of a real-scale problem.

Key Words: : seismic response, dynamic response, real-time test, TMD

キーワード: 地震時応答, 動的応答, 実時間試験, TMD

1. はじめに

実験供試体の振動台加振と構造物の動的応答の数値計算を、オンラインで接続された振動台と計算機において同時に進行させることにより、実験対象を一部分として含む拡大された構造系の動的応答を実験的にリアルタイムで評価する手法が提案されている。対象となる構造系を振動台実験用の部分構造(サブストラクチャー)と計算用部分構造に分割して取り扱う試験法であることから、本論文ではこのような概念に基づく実験法を「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。実験対象となる構造要素を供試体として振動台加振を行い、動的挙動を検証するという点では従来の振動台実験と同様であるが、実験対象以外の構造部分との動的相互作用を考慮した、より現実的な加振条件を用いた加振実験が可能であることや、同時に全体系の実験が行えないような大規模な構造物や複雑な構造システムの動的応答の実験的検討を経済的に実現することができる、等の利点を有している。例えば付加質量を利用した振動制御デバイスが、制御対象構造物に設置された場合の振動制御性能の実験的検証を行う場合、極めて有効な実験法であるものと期待できる。

このサブストラクチャーハイブリッド振動台実験法の

概念は、著者ら¹⁾を含めて複数の分野において独立して提案され、各々の問題設定に応じて適用が図られてきた。堀内ら²⁾は主構造物に付加された二次構造物を実験供試体として振動台で加振する実時間ハイブリッド振動台実験手法を提案し、実験システムを用いての実験により実現可能性を示す一方で、実験の安定性・精度は主構造物と二次構造物の質量比が安定・不安定が変化することを指摘している。また、小長井ら³⁾は地盤・基礎と構造物の動的相互作用をアナログ電子回路で模擬し、これを振動台での模型実験に反映させる形式の振動台制御手法を提案し、基礎部のスウェイ・ロッキング自由度に関する振動実験を行っている。また、Igarashiら⁴⁾は実験誤差を考慮した実験系の伝達関数の導出に基づき安定性限界および精度を求め、計算部分と実験部分の質量比や固有振動数比が実験の信頼性に与える影響を検討している。またこの知見をもとにデジタルフィルタリングを利用した、信頼性の高いサブストラクチャーハイブリッド振動台実験を実現している⁵⁾。

本研究においては、特に構造物上に設置された制振装置の動的挙動や応答制御効果を実験的に確認するための試験法としてサブストラクチャーハイブリッド振動台実験法を確立することを目的として、その有効性を例証する実験を行ったものである。特に、このような実験手法の実現

にあたっては、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¹⁾。そこで、油圧式振動台を用いてサブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムを構築するにあたり、変位信号による振動台制御と、デジタルフィルタによる動特性補償の組み合わせを適用することにより、実験の信頼性ならびに汎用性の向上を図り、その信頼性を実験的に検証した。計算部分構造として非線形構造モデルを用いた場合においても、本手法に基づくサブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムは十分な精度で実験が可能であることを示す。さらに、実構造物スケールにおける構造物の震動問題の検証プロセスを想定した実験を行うことにより、本実験手法の工学的な適用性および汎用性を検証した。

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的一部分（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で行うことにより、構

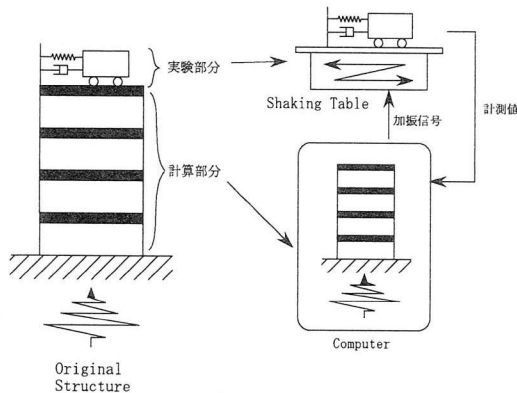


図-1 サブストラクチャーハイブリッド振動台実験

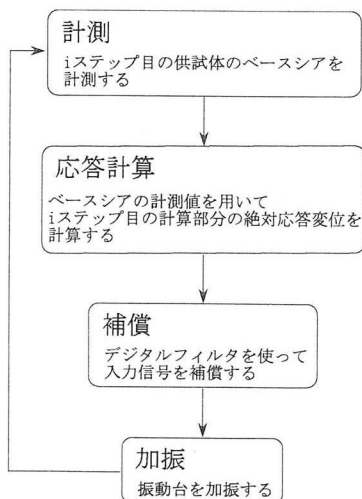


図-2 サブストラクチャーハイブリッド振動台実験の制御アルゴリズムの流れ

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。ここで、振動台の入力電圧信号と加振出力の間の動特性、特に位相遅れを可能な限り補償することがサブストラクチャーハイブリッド実験の信頼性を確保する上で重要である。本研究における振動台の入力-加振動特性の補償には、DSPシステムで構成される制御系に実装されることを前提として、デジタルフィルタによる振動台制御信号処理を行うこととした。

実験アルゴリズムは次の通りである（図-2）： 各時間ステップ*i*において (1) 実験部分のベースシア計測値を測定する。(2) 計測値と指定された入力加速度を元に、逐次数値積分を用いて計算部分の応答を算出する。(3) 得られた数値部分応答のうち、実験部分との結合点の変位応答値を振動台動特性補償用のデジタルフィルタに通過させ、その出力を得る。(4) これを振動台への変位入力信号として与え、振動台を加振する。(5) $i+1 \rightarrow i$ として(1)に戻る。

本研究では、特にステップ(3)で用いるデジタルフィルタの設定が重要となる。これについては後に詳しく述べる。

3. 実験システム

3.1 概要

本研究では、水平1成分電気油圧サーボ式振動台をベースにサブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムを構築した。振動台の外観を写真-1に、また緒元を表-1に示す。

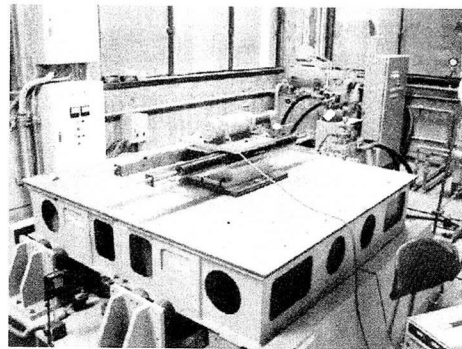


写真-1 振動台と試験供試体

表-1 振動台の緒元

テーブル寸法	1.5m × 1.5m
最大積載重量	2.0 tf
最大加振力	29.4 kN
加振方向	水平1方向
最大テーブル変位	±100mm
振動数範囲	～30 Hz
駆動方式	電気油圧サーボ式

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムの構築には、この油圧式振動台を制御する DSP (デジタルシグナルプロセッサ) システムを組み合わせ、A/D および D/A インターフェースを通じて計測信号を元に振動台への入力信号をリアルタイムで算出している。実験の安定性の向上を図るため計算時間刻みは 1msec とし、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。

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験における実験部分の供試体のベースシアの計測には、振動台と供試体の間に設置した荷重動力計を用いた。同時に供試体加速度も加速度計により計測している。また、振動台の変位および供試体の変位を、レーザー変位センサーにより計測している。実験システムの構成図を図-3 に示す。

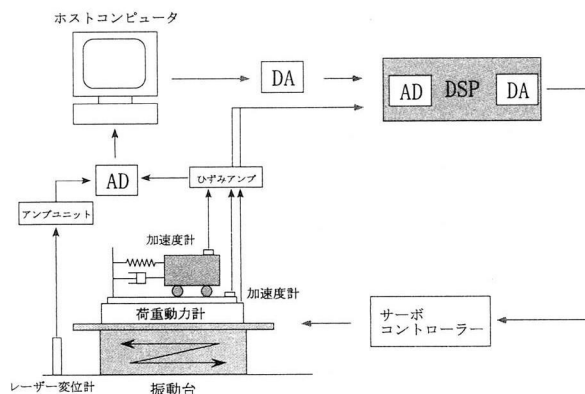


図-3 実験システムの構成

3.2 振動台動特性のデジタルフィルタ補償

振動台の入出力動特性を補償するためのデジタルフィルタは、その入出力周波数伝達特性が、振動台の動特性を表す入力信号から振動台出力への伝達関数の逆数に等しい場合が理想的であり、このとき、出力遅れを含む振動台動特性を完全に打ち消すことができることになる。しかしながら、計測された伝達特性に基づいてこのようなフィルタを得るのは、実際には困難である。

本研究では補償用デジタルフィルタの設計を目的としていることから、振動台に対して 0.1~5Hz の周波数成分を含むランダム波を入力変位信号として加振計測を行うことで、振動台の伝達関数を求めた。また、最初に振動台の変位入力電圧と応答変位に関する伝達関数を次数を制限した有理関数と仮定し、フィッティングにより係数の決定を行うこととする。ここで用いた振動台は、変位制御における入出力伝達関数特性が 4 次 FIR フィルタにより良好に補償できる周波数特性が見られたことから、補償フィルタとしては FIR フィルタを採用することに決定した。これは位相遅れを補償するフィルタであるため、位相進み特性を持った FIR フィルタとなるが、一般にこのような FIR フィルタは高振動数領域における振幅ゲインに増幅傾向が現れる性質があることが知られており、実験システムを不安定にすることになる。そこで、ローパスフィルタとしての特性を持つ IIR デジタルフィルタを入力信号に適用し

た後、その出力に対してさらに動特性補償用 FIR フィルタを用いる、2 段階のデジタルフィルタを用いることとした。

前段の IIR フィルタとして、パスバンド 10Hz、ストップバンド 50Hz で作成したバタワース型 3 次 IIR フィルタを用いた。得られたデジタルフィルタは次式の通りである。

$$y_n - 2.79987y_{n-1} + 2.61928y_{n-2} - 0.81849y_{n-3} = 10^{-3} \cdot (0.114x_n + 0.341x_{n-1} + 0.341x_{n-2} + 0.114x_{n-3}) \quad (1)$$

ここに、 n (整数) は離散時間ステップ (刻み $\Delta t=1(\text{ms})$)、 x_n はフィルタへの入力、 y_n はフィルタ出力である。

後段の位相補償用の FIR フィルタは、次の方法で求めた。まずデジタルフィルタを次式のように表す。

$$H(z) = \frac{b(z)}{a(z)} \quad (2)$$

ここに、

$$\begin{aligned} b(z) &= b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m} \\ a(z) &= a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n} \end{aligned} \quad (3)$$

また、 z^{-1} は 1 ステップ分の遅れを表す離散時間演算子であり、

$$z^{-1} = e^{-i\omega\Delta t} \quad (4)$$

である。

振動台の動特性を完全に補償する理想デジタルフィルタの周波数応答 $H(\omega)$ は、加振試験における入力変位信号ベクトル $x(n)$ と、応答変位信号ベクトル $y(n)$ から推定することができる。 $y(n)$ のパワースペクトル推定値 $\hat{P}_{yy}(\omega)$ と、 $x(n)$ と $y(n)$ のクロススペクトル推定値 $\hat{P}_{xy}(\omega)$ を $x(n)$ 、 $y(n)$ から求め、次式により推定値 $\hat{H}(\omega)$ を求める。

$$\hat{H}(\omega) = \frac{\hat{P}_{xy}(\omega)}{\hat{P}_{yy}(\omega)} \quad (5)$$

この推定値 $\hat{H}(\omega)$ と、式(1)における $b(z)$ 、 $a(z)$ の離散フーリエ変換 $B(\omega)$ 、 $A(\omega)$ から、

$$\left| \hat{H}(\omega) - \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \right|^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

なる最小化基準を満たす最適な多項式 $b(z)$ 、 $a(z)$ を、減衰付き Gauss-Newton 法による繰り返し探索を行い求める⁴⁵⁾。この時、全ての周波数領域において一致するデジタルフィルタを作成する必要はなく、加振する周波数領域でのみ振動台の動特性を打ち消すようなデジタルフィルタを作成すればよいので、 $\hat{H}(\omega)$ のうち、加振する周波数領域のデータを使用して探索計算を行った。

上記の算定法に基づき得られた、後段の FIR フィルタの計算式は次式の通りである。

$$y_n = 10^5 \cdot (0.33571x_n - 1.32145x_{n-1} + 1.95403x_{n-2} - 1.28640x_{n-3} + 0.31816x_{n-4}) \quad (7)$$

図-4 に油圧式振動台の動特性を実線で、作成したデジ

タルフィルタの周波数特性を点線で示す。本研究での変位信号制御の場合、図-4のように5Hzまでの振動数領域全体で、振幅特性はほぼ一定であり、さらに位相特性も直線位相を示すという比較的安定した動特性を有している。得られたデジタルフィルタも良好な補償が可能であることが期待できる。

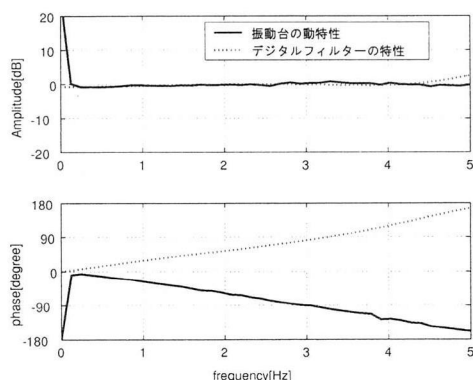


図-4 振動台とデジタルフィルタの周波数特性

さらに、作成したデジタルフィルタの動特性補償効果を検証する実験を行った。0.1～5 Hzの周波数成分を持つランダム波に対して、作成したデジタルフィルタを通過させて生成した信号を入力して振動台を加振し、その変位応答を計測した。

このときの入力および出力の間の関係を図-5に示す。ここで、上図は振幅特性、下図は位相特性である。これより、作成したデジタルフィルタにより、5Hz以下の振動数領域全体において、振動台の動特性補償は極めて良好であることがわかる。作成したデジタルフィルタにより振幅、位相差ともほぼ完全に補償され、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験を行う上で支障のない制御系を確保したものと考えられる。

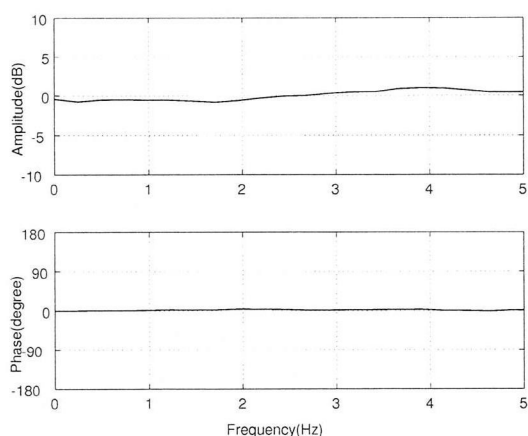


図-5 デジタルフィルタによる位相補償の効果

4. 予備検証実験

構築した実験システムにより得られる実験結果の信頼

性を確認するためのサブストラクチャーハイブリッド振動台実験を行った。ここでは、計算部分の構造物モデルに単純な線形モデルを採用してその基本的な試験性能を確認した後、さらに計算部分構造として非線形モデルを用いた場合についても十分な信頼性が得られるかどうかを検討した。

4.1 試験供試体

供試体として、電磁ダンパーを用いた質量ダンパー（以下、電磁マスダンパーと呼ぶ）を使用した。直線ベアリングで支持された電磁石部が水平1方向に運動できるようになっており、台座部分との間に取り付けられたばねが剛性を、また固定された銅パイプ部と電磁石部で構成する電磁ダンパーにより粘性減衰力を発生させると同時に、電磁石部の質量を含め1自由度振動系を構成している。この電磁マスダンパーの可動質量は35.40kgであり、ばねの剛性は固有振動数が2.03Hzとなるような値に設定されている。電磁ダンパーに入力する電流により減衰比は0.5～8%の範囲内で変更可能であり、十分理想的な線形弾性1自由度系と見なすことができることを確認している。

図-6に電磁マスダンパーの概要図を、また写真-2に外観を示す。

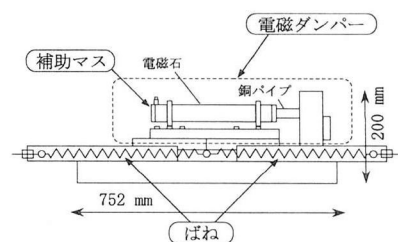


図-6 電磁マスダンパーの概要

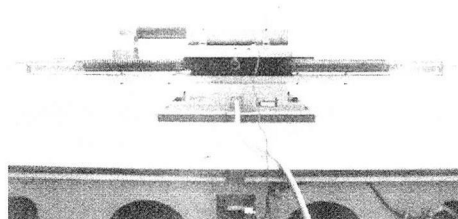


写真-2 電磁マスダンパー供試体

4.2 計算部分を線形構造物とした場合

実験対象構造系モデルは、図-7に示すような2自由度系であり、実験部分の計算部分に対する質量比が10%、1%（計算部分の質量が354kg、3540kg）の2ケース、固有振動数比を1.0（計算部分単独の固有振動数を2.04Hz）としたものである。計算部分の減衰比は2%を用いている。外部入力波形として、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分の最大加速度を74galにスケールしたものをを用いた。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

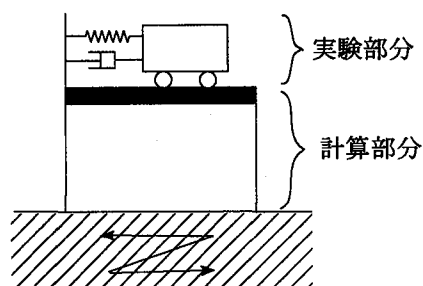
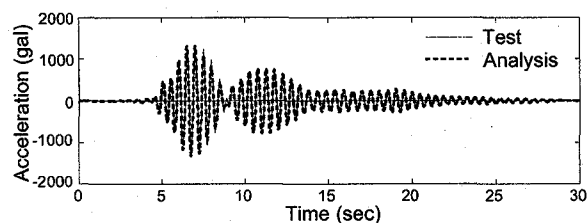


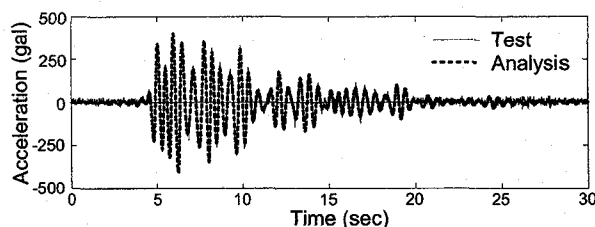
図-7 2自由度モデル

結果と比較した。いずれも実験部分の絶対加速度であり、実線が応答計算結果、点線が実験結果である。

上で述べた各実験ケースに対する実験結果（電磁マスターの減衰=5%の場合）を図-8に示す。ここで、上の図は質量比1%、下の図は質量比10%のものである。それぞれピークでの誤差がそれぞれ3.8%、-5.9%と小さく、波形もほぼ一致しているため、いずれの場合も高い精度の実



(a) 質量比1%の場合



(a) 質量比10%の場合

図-8 実験結果：線形モデル

験結果が得られていると言える。

4.2 計算部分を非線形構造物とした場合

時間刻み、サンプリング時間、積分法は線形構造物の場合と同様であり、実験対象モデルは実験部分の計算部分に対する質量比を10%、1%とし、また、実験部分の復元力

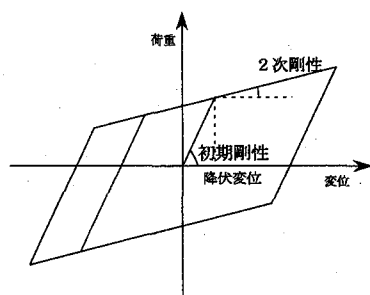
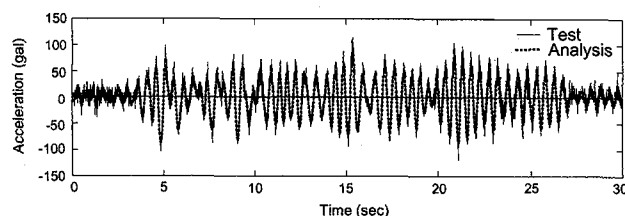


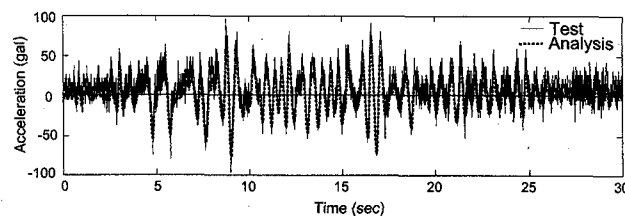
図-9 バイリニア構造物復元力モデル

特性を図-9に示すバイリニア型履歴モデルとしている。このとき、バイリニア型履歴モデルの形状を決定するパラメータのうち、初期剛性は弾性域での固有振動数が2.03Hzとなるように取り、2次剛性比は0.05、降伏変位は1mmとしている。また、計算部分の減衰比が2%のモデルである。入力には、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分の最大加速度を74galにスケールしたものをを用いた。

上で述べた各実験ケースに対する実験結果を図-10および図-11に示す。図-10は、実験部分の絶対加速度時刻歴を示す。図-10(a)の質量比1%のケースでも、またそれより条件の厳しい質量比10%のケース（図-10(b)）でも応答計算結果と実験結果は良好な一致を示している。これらの実験ケースでは実験部分の応答振幅が小さくなる結果となったため、20gal程度の振幅の短周期ノイズ成分がグラフにおいて相対的に目立つものの、この短周期ノイズ成分の振幅は前述の線形の場合と比べ変化しているわけではない。図-11はそれぞれの質量比のケースにおける構造物の変位-復元力履歴ループを示したものである。応答波形、ピーク値、および履歴形状について、得られる実験結果は十分な信頼性を持つことを確認した。

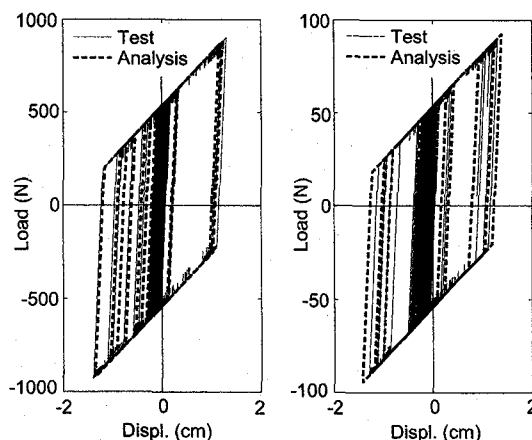


(a) 質量比1%の場合



(b) 質量比10%の場合

図-10 実験結果：非線形構造物の時刻歴応答



(a) 質量比1%

(b) 質量比10%

図-11 実験結果：非線形構造物の履歴復元力

5. 制振装置の実験的検証を想定したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験

サブストラクチャーハイブリッド振動台実験の適用のケーススタディとして、実際の構造物に設置する制振装置の性能の検証を想定した実験を行った。

想定する実験対象モデルとして、施工中の高橋脚に風振動対策としてその頂部に TMD を設置したものを考え(図-12)、この状態で強震動が作用した場合の TMD および橋脚の応答の検証を想定する。橋脚の高さは 65.0m、断面寸法は 5.5m×6.0m であり、柱下端より上方 5.0m 区間を除いて、壁厚が 1.0m の中空断面となっているものを仮定した。橋脚の有効質量は 3262t であり、1 次モード固有振動数は 0.445Hz である。設置した TMD の重錘の質量は、橋脚の有効質量に対して 1% のもの(すなわち質量比 $\mu=0.01$) を用いるものとし、また同調条件は、橋脚の一次固有振動モードのみを対象として定常不規則強制振動条件に対応する振動数比

$$\gamma = \frac{\sqrt{1+\frac{\mu}{2}}}{1+\mu} = 0.9926$$

および減衰定数

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu \left(1 + \frac{3}{4}\mu\right)}{1 + \frac{3}{2}\mu}} = 0.0498$$

を採用するものとする。ここでは、橋軸方向に対して実験を行うものとし、橋脚部分を解析部分、TMD を実験部分として検証用の装置を用意し、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験を行うものとする。

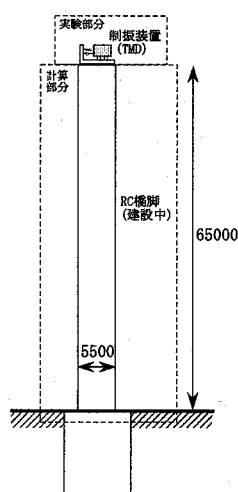


図-12 想定事例：実大橋脚へのTMDの適用の検証

5.1 構造モデルの運動方程式

ここで、振動台への入力変位は以下のように算出している。橋脚基礎は地盤に固定された状態で、橋脚では曲げ変

形が卓越するものとして、橋脚を下端固定条件の変断面の曲げ構造としてモデル化することができる。ここでは、離散モデル化した橋脚の運動方程式が、次式で表されるものとする。

$$\mathbf{M}\{\ddot{u}\} + \mathbf{C}\{\dot{u}\} + \{r\} = -\mathbf{M}\{1\}\ddot{z}_g - \{f\}F_{TMD} \quad (8)$$

ここに、 $\{u\}$ は変位ベクトル、 $\{r\}$ は復元力ベクトル、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ はそれぞれ質量、減衰マトリクス、 z_g は入力地動、 F_{TMD} は設置された TMD から橋脚に作用する荷重であり、 $\{1\}$ および $\{f\}$ はその作用位置の要素で 1 の値を取る荷重作用ベクトルである。弾性領域においては、復元力項は剛性マトリクス $\mathbf{K}$ を用いて $\{r\} = \mathbf{K}\{u\}$ と表され、この橋脚において発生する振動は、固有振動数は 0.445Hz の 1 次モードのみが卓越するものとし、それ以外のモードは無視する。この時、橋脚の 1 次固有モード座標 $q_1(t)$ は、次式の運動方程式で記述することができる。

$$\ddot{q}_1 + 2h_1\omega_1\dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\beta_1\ddot{z}_g - \gamma_1 F_{TMD} \quad (9)$$

ここに、 ω_1 、 h_1 はそれぞれ一次モード固有円振動数および一次モード減衰定数、 $\{\phi_1\}$ は一次モードベクトルであり、また

$$\beta_1 = \frac{\{\phi_1\}^T \mathbf{M} \{1\}}{\{\phi_1\}^T \mathbf{M} \{\phi_1\}}, \quad \gamma_1 = \frac{\{\phi_1\}^T \{f\}}{\{\phi_1\}^T \mathbf{M} \{\phi_1\}}$$

である。従って、橋脚の応答は $\{u\} = \{\phi_1\}q_1$ と表されることを仮定している。したがって、橋脚最上部の変位 $u_{top}(t)$ (振動台に入力すべき変位) は、橋脚の 1 次モード形 ϕ_1 および 1 次モード変位 $q_1(t)$ を算出しておくことにより、 $u_{top} = \phi_{1top} q_1(t)$ で求めることができる。非弾性応答領域においても同様に、橋脚の変位応答の基底として卓越する 1 次モード形のみを扱うため、運動方程式は $\omega_1^2 q_1$ の項を 1 次モード形に対応する一般化復元力 r_1 に置き換えた、次式で表される。

$$\ddot{q}_1 + 2h_1\omega_1\dot{q}_1 + r_1 = -\beta_1\ddot{z}_g - \gamma_1 F_{TMD}$$

復元力 r_1 については、橋脚を 5 質点系モデルとして固有値計算を行い 1 自由度の運動方程式を得た後、橋脚の検討において得られている初期剛性および天端における降伏変位の値 66.1cm および 2 次剛性比 5% を仮定したバイリニアモデルを用いた。

5.2 相似則

実験部分では、想定する構造モデルと同一スケールの実大実験を行うことが理想的であることは言うまでもない。しかしながら、振動台性能や容量の制限のために縮小モデルを供試体として実験を行う必要に迫られることがしばしばあることから、このような制約内において本実験手法を適用するために、ここでは相似則を用いて実験スケールの設定を行うこととした。

まず、時間の相似率を S_t 、長さの相似率を S_x とする。すなわち、

$$t = S_t t_m, \quad x = S_x x_m \quad (10)$$

ここに、 t は実大スケール問題における時間、 t_m は模型実験における時間、 x は実大スケール問題における長さ（および変位）、 x_m は実験模型での長さ（および変位）を表す。この2つの相似率を用いて実大スケール問題と実験模型における相似関係を整理すれば、時間 t 、荷重 F 、変位 x 、速度 $\dot{x}$ 、加速度 $\ddot{x}$ 、質量 M 、減衰係数 C 、剛性 K については次式の関係が容易に導かれる。

$$\begin{aligned} t_m &= \frac{1}{S_t} t, \quad F_m = \frac{1}{S_x^2} F \\ x_m &= \frac{1}{S_x} x, \quad \dot{x}_m = \frac{S_t}{S_x} \dot{x}, \quad \ddot{x}_m = \frac{S_t^2}{S_x} \ddot{x} \\ K_m &= \frac{1}{S_x} K, \quad C_m = \frac{1}{S_x S_t} C, \quad M_m = \frac{1}{S_x S_t^2} M \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、添字 m は実験模型における量であり、添字のない記号は実大スケール問題における量であることを表す。実験設備や供試体寸法などに応じて、実験可能となるような供試体のスケールや振動数特性を選ぶことにより時間・寸法の各々の相似率の値を独立に選ぶことができる。ここで、 $S_t = 4.59$ 、 $S_x = 26.47$ とした場合を想定すると、実験部分となるTMDの縮尺モデルの固有振動数は 2.03Hz、質量は 35.40kg のものを用意すれば良いことになる。これまで実験供試体として用いてきた電磁式マスダンパーが、検証事例に即してこの相似率を満たすよう用意された縮

尺モデルであると想定することが可能である。以下においては、このような仮定の基で実験を行うこととした。

5.3 実験結果

時間刻み、サンプリング時間、数値積分法を検証実験と同一のものを用いて、実験を行った。入力として、El Centro NS成分を用いた場合の結果を図-13に、また兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分を用いた場合の結果を図-14に示す。全体系を直接数値積分して求めた応答も併せて表示している。これらの結果は、縮尺模型スケールにおける値、すなわち実験計測値で表示されている。

実験スケールにおいて、橋脚降伏時変位は 2.497cm である。図-13の El Centro 入力時については、応答は全て弾性範囲内である。解析による予測値と実験値は良好な一致を示しており、特に橋脚変位についてはピークでの誤差も 0.1%に収まっている。図-14の神戸 NS 成分入力時についても弾性範囲内である。ここでも解析との一致は全般に良好である。

図-15には、さらに神戸 NS 成分を 1.3 倍にスケールして入力した場合の結果を示した。この場合は、振動台変位が 1.8 秒付近で降伏変位を超えており、非線形領域に及ぶ応答が発生している。ただし、それほど長時間ではなく、TMD の同調のずれ等の効果が顕著に現れるほどではない。図-15によれば、この場合においても解析による予測と実験の一致はやはり良好であることが示されている。ピークの誤差は、約 6.0%となっている。

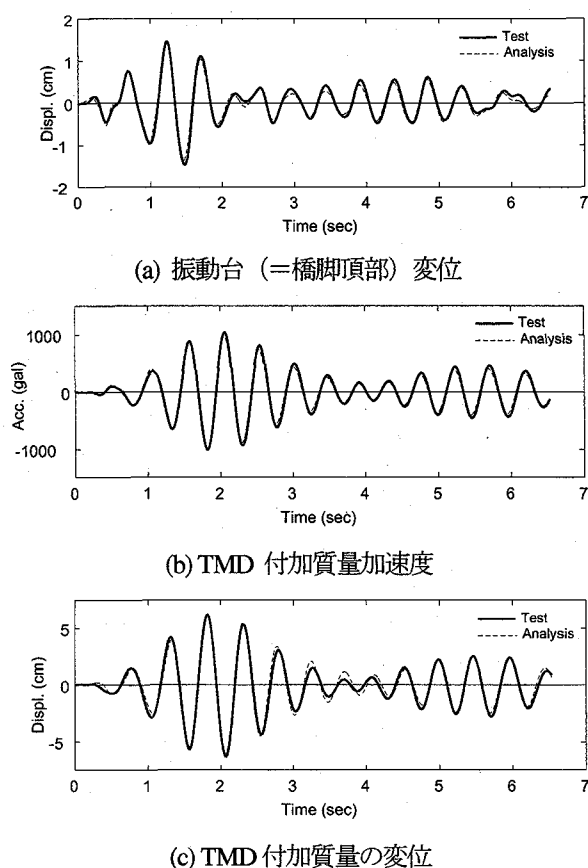


図-13 実験結果 (El Centro - NS 成分入力の場合)

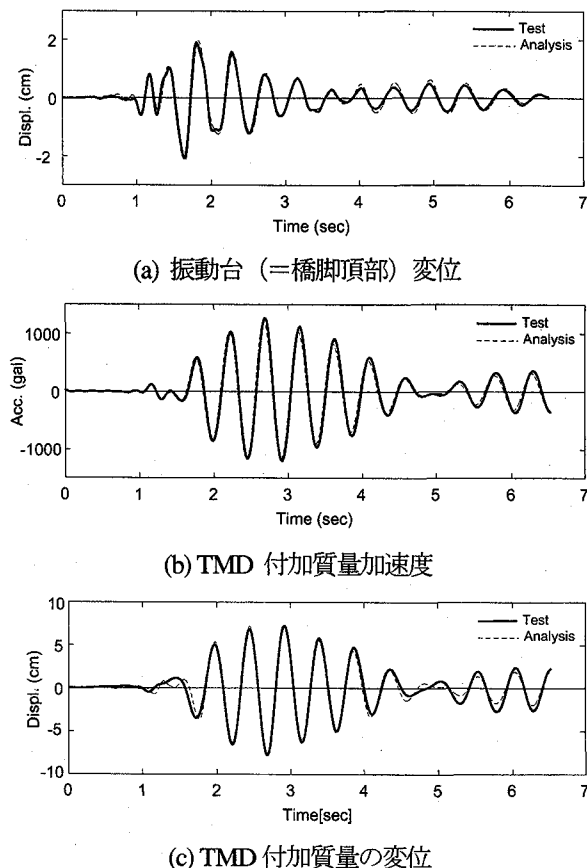
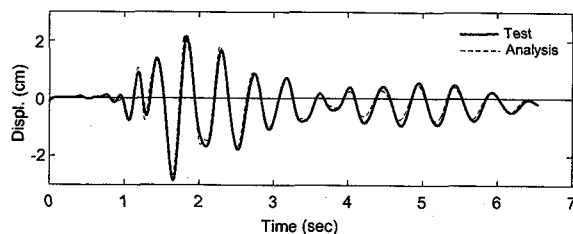
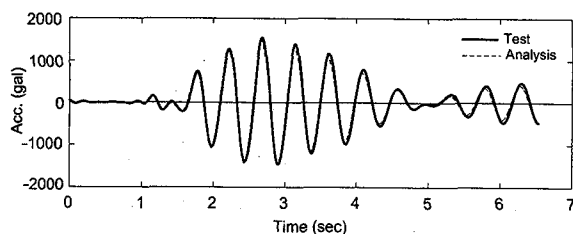


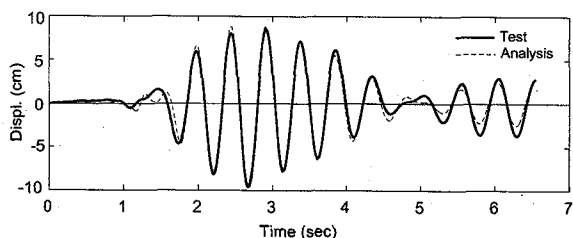
図-14 実験結果 (神戸 NS 成分入力の場合)



(a) 振動台 (=橋脚頂部) 変位



(b) TMD 付加質量加速度



(c) TMD 付加質量の変位

図-15 実験結果 (神戸 NS 成分×1.3 倍スケール入力の場合)

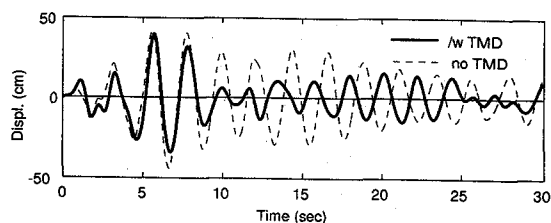
5.4 TMD 設置時の地震応答

得られた実験結果を実構造物スケールに変換して表示した変位時刻歴を図-16に示す。TMDを設置しない場合と比較して示している。入力直後に生じる最大変位に関してはTMDの有無はあまり影響しないが、それに続く後続部分の応答に大きな応答低減が見られる。これは、質量比1%程度のTMDを設置した場合に予測される挙動であり、本実験法によりこうした装置の動的挙動の実験的な評価が可能であることを示している。

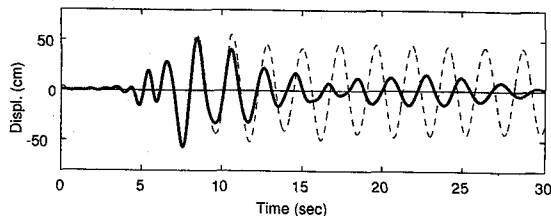
7. 結論

本研究では、変位入力信号のデジタルフィルター処理により振動台動特性の補償を行う、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムを構築した。計算部分に線形モデルおよび非線形モデルを適用したサブストラクチャーハイブリッド振動台実験を行い、実験結果の信頼性が十分確保できることを確認した。実構造物にTMDを設置した場合の動的挙動の検証試験を想定した実験を行った。TMDの縮尺模型を用いて実験的な検証を行う具体的な手順を示し、実験結果の信頼性を確認した。

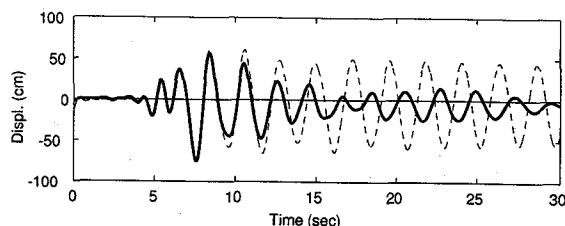
実的な問題への適用に対して良好な結果が得られたことから、種々の振動制御デバイスの検証への応用についても本実験法の汎用性および有効性を検討していく予定である。



(a) El Centro NS 成分入力の場合



(b) 神戸 NS 成分入力の場合



(c) 神戸 NS 成分×1.3 倍スケール入力の場合

図-16 TMDによる橋脚天端の変位応答の低減 (実大スケール表示)

謝辞

実験の実施にあたりご協力いただいた中西伸二 (技術専門官) および豊岡亮洋 (大学院生) の両氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 家村浩和, 五十嵐晃, 諏訪高典: サブストラクチャー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.
- 2) Horiuchi, T., M. Inoue, and T. Konno: Development of a Real-Time Hybrid Experimental System Using a Shaking Table, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.0843, 2000.
- 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.
- 4) Igarashi, A., H. Iemura, and T. Suwa: Development of Substructured Shake Table Test Method, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1775, 2000.
- 5) 五十嵐晃, 家村浩和, 阪部真悟: 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, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.917-920, 1999.
- 6) 中村尚五: ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電機大学出版局, 1989.

(2002年9月13日受付)