

京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃
 京都大学工学研究科 フェロー会員 家村 浩和
 (株)日本総合研究所 正会員 ○諏訪 高典

1. はじめに 振動台実験においては、振動台の性能により供試体のスケールの制約を受けるため、大規模な構造物の実大あるいはそれに近いスケールでの実験は困難である。リアルタイムで構造物の動的応答を評価できる利点を損なわずにこの問題を解決するための方法論の一つとして、著者ら¹⁾は構造物の一部に対して振動台実験を行うと同時に、残りの部分は計算機で数値積分により応答を求めるサブストラクチャーハイブリッド振動台実験のアルゴリズムによる実験手法を提案している。本稿では、振動台の位相特性及び実験モデルの動特性が実験結果に与える影響を検討し、これに基づいてサブストラクチャーハイブリッド振動台実験の適用のために望ましいと考えられる実験モデルの動特性について述べる。

2. 実験アルゴリズムと実験システム 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。これを実現するための具体的なアルゴリズムの概要は次の通りである¹⁾。i 番目ステップにおいて (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計算部分の相対応答を計算する。(3)上で求めた計算部分の相対応答から、実験部分と隣接する節点の相対応答を取り出し、これに入力波形を加えて絶対応答を計算する。(4)上で求めた絶対応答を振動台に送って加振する。(5) $i+1 \rightarrow i$ として(1)に戻る。

本アルゴリズムを実装した振動台実験システムによる試験を行ったところ、得られる応答が不安定となり、発散するなどの事例が報告されている¹⁾。この原因として、計算部分のモデル化による誤差、数値積分の安定性と精度、実験誤差、位相のずれ、構造物の非線形性など種々の要因が考えられるが、ここでは特に位相のずれと実験誤差の問題に着目して検討を行う。

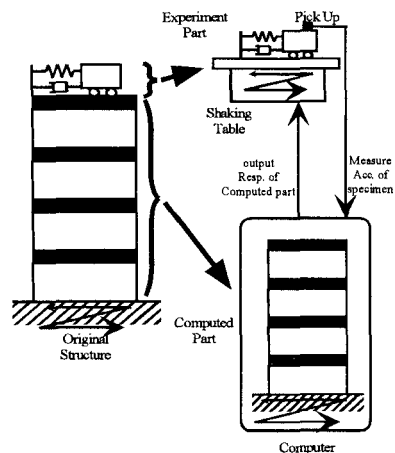


図1: 実験概念図

3. 安定性解析 実験誤差や位相のずれが安定性や精度に及ぼす影響を、振動数領域での伝達関数を導くことにより解析した。数値積分に Newmark β 法を用いたサブストラクチャー振動台実験アルゴリズムおよび実験供試体を考慮したシステム全体の動特性を、z 変換により伝達関数として導いた。次のような形で表される地盤入力から構造物モデル応答への伝達関数が

$$G(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} \quad (\text{ここに } z = e^{s\Delta t}, s, z: \text{複素数})$$

で表される構造モデル-実験システム系において、特性方程式 $P(z) = 0$ の全ての根 z (極) が $|z| < 1$ (又は $\text{Re}(s) < 0$) のとき、全体系は安定である。この安定判別法を利用して、実験供試体・構造モデルの動特性や振動台装置の入力に対する位相のずれ、計測・制御系の系統的誤差の安定性への影響を検討した。全体系が各層の質量、減衰、剛性が等しい 4 層フレームで上 1 層のみを実験部分とし、全体の剛性(各層の固有周期 T)を変化させたとき、それぞれの T に対して各次モードに相当する極 s の実部の値を示したものが図2である。 T が小さい、すなわち固有周期 0.8 秒以下の剛性の高い領域では高次モードの極(特に 3 次モード、次いで4次モード)が $\text{Re}(s) > 0$ となり、不安定となるのがわかる。すな

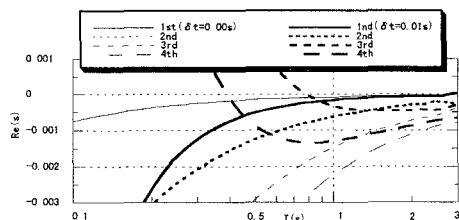


図2: 位相のずれを考慮した安定性判別の例

Akira IGARASHI, Hirokazu IEMURA, Takanori SUWA

わち、構造物モデルの剛性は全体としてはできるだけ低くした方が位相のずれに対する安定性が高まることを示している。一般に、計算部分の質量に対する実験部分の質量の比は小さくし、減衰比を大きくした方が安定性限界を与える固有周期が短くなり、安定性が高くなることを示すことができる。

4. 実験シミュレーション 構築した実験システムを用いて実験を行った場合に生じる実験誤差や位相のずれが応答結果に及ぼす影響を検証するために実験シミュレーションを行った。シミュレーションのための構造モデルとして 1) 構造系は 4 層フレームモデルであり、そのうち最上層のみを実験部分とした場合 (Model 1: 1 次モード減衰 0.45%) 2) 4 層フレームの最上層部に TMD を取り付けけたモデルとし、TMD のみを実験部分とした場合 (Model 2: 1 次モード減衰 6.2%) の 2 種類を用いた。入力波形として El Centro 地震波 NS 成分を用い、構造物全体系を直接数値積分で求めた応答結果 (精解) とシミュレーション結果を比較した。振動台の入力からテーブル応答への位相遅れ時間を 0.01 秒としたところ、図 3 のように Model 1 では応答が発散していくのが見られる。そこで、あるステップでの計測値として、その前までのステップの計測値も用いて線形補外により予測した値を用いたところ、図 4 のようにほぼ精解と一致した結果が得られる。一方、Model 2 の応答は位相の遅れ時間を 0.05 秒と過大に設定しても図 5 のようにあまり誤差はみられず、精度、安定性ともに良好であった。安定性解析を参考にすると、Model 1 が位相のずれに対して不安定なのは構造物全体系で剛性が高くかつ減衰が小さいフレームモデルであるためであり、逆に Model 2 のように主構造物に対して TMD を取り付け、TMD のみを実験部分としたモデルで位相のずれに対する影響が少ないのは、実験部分である TMD の質量が計算部分に比べて小さく、また TMD を付加することによって構造物全体系の減衰が大きくなるためと考えられる。

5. 検証実験 上記の安定性解析や実験シミュレーションを参考にして、本実験手法の妥当性を確かめるための検証実験を行った。検証実験モデルとして 1 層フレームの上部に動吸振器をつけた 2 自由度構造物を全体系とし、動吸振器のみを実験部分として振動台に設置するモデルを用いた。本研究で用いた振動台は 2Hz 以下の低振動数領域で進み位相が発生しており、広い振動数成分を持つ El Centro 記録を入力として用いた場合には応答の発散が見られた。これに対し、入力波形として位相差の少ない振動数 2Hz の正弦波を用いた場合には、図 6 に示すように多少振幅誤差が生じているものの、振幅、位相ともにほぼ一致しており、良好な結果が得られている。

6. 結論 サブストラクチャーハイブリッド振動台実験における位相のずれによる誤差の影響は構造物モデルの動特性によって大きく異なり、減衰が大きく実験部分の計算部分に対する質量比が小さい場合には位相のずれに対して安定性の高く、より実験に適したモデルであることがわかった。また、検証実験の結果、振動台応答の位相特性の影響が小さい場合には、本実験手法により十分信頼性のある結果が得られることが示された。

参考文献 1) 中野、五十嵐、家村、多自由度構造物の動的応答評価のためのサブストラクチャー振動台実験手法の開発、第 24 回地震工学研究発表会講演論文集 C9-4 pp.809-812, 1997 年 7 月 2) P.B.Shing et.al., "Experimental Error Propagation in Pseudodynamic Testing", Report NO.EERC-83/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983

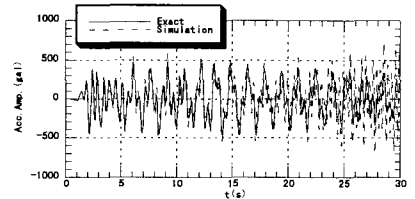


図3 4層モデルの応答 (計測値予測なし)

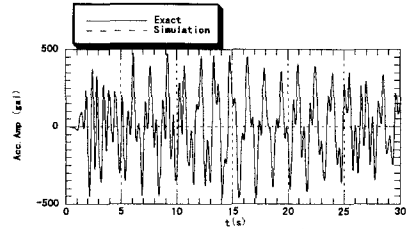


図4 4層モデルの応答 (計測値予測あり)

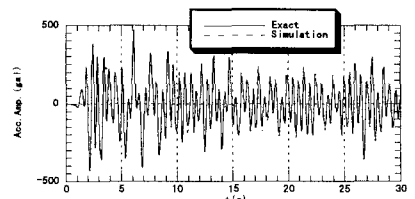


図5 TMD付4層モデルの応答 (計測値予測なし)

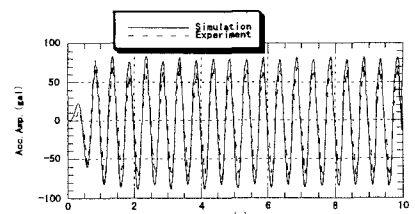


図6 検証実験結果