振動台を用いた実時間ハイブリッド実験システムの開発*

(第2報, 二次構造物が自由度をもつ場合の成立性の検討)

井 上 雅 彦^{*1}, 堀 内 敏 彦^{*1}
今 野 隆 雄^{*2}, 山 岸 渡^{*2}

Development of Real-Time Hybrid Experimental System using a Shaking Table

(2nd Report, Feasibility Study with a Single-Degree-of-Freedom Secondary System)

Masahiko INOUE, Toshihiko HORIUCHI,
Takao KONNO and Wataru YAMAGISHI

A hybrid experimental method, in which a vibration experiment using an actuator and a vibration analysis using a computer are simultaneously conducted by exchanging information with each other, is being developed as a new seismic experimental method for structural systems. We have proposed using a shaking table as the actuator so that the hybrid experimental method can be applied to a secondary structural system attached to a primary structural system, and we have made an experimental system consisting of a small shaking table and a digital signal processor. In the work described in this report, this experimental system was applied to a single-degree-of-freedom secondary structural system attached to a primary structural system, the feasibility of this seismic experiment was demonstrated by comparing the results obtained from the hybrid experiment with those obtained from analysis of the whole structural system.

Key Words: Seismic Motion, Coupled Vibration, Computer Aided Test, Hybrid Experiment, Shaking Table

1. 緒 言

構造物の耐震性評価の一手法として, その部分構造の動的加振機による加振実験と計算機による振動応答計算とを組合せる実験手法が伯野らにより提案され⁽¹⁾, その後さまざまな研究が行われている⁽²⁾⁽³⁾. 本手法では, 部分構造物の加振実験で全体構造物の評価ができるので経済的な実験が可能となる. この実験手法はさまざまな呼び方がされているが, ここでは計算と実験の混合手法として「ハイブリッド実験」とよぶことにする. 著者らも加振対象構造物の実際の挙動を再現し正確な耐震評価を行うため, 計算と実験を同じ時間軸で実施する「実時間」ハイブリッド実験システムの開発を行っている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾.

上記の従来のハイブリッド実験手法は, 実験対象部材の相対変形を計算して加振機で載荷するものであるが, 主構造物に付加される二次構造物(例えば, 建物の制振に用いられるマスダンパ)は, その応答が加速度による励振で決まるので, この手法の適用が困難であ

る. 著者らは, このような構造物へのハイブリッド実験の拡張を目的とし, 加振装置として振動台を用いた実験手法(以下, 振動台型ハイブリッド実験と呼ぶ)を提案し基礎検討を行った⁽⁷⁾⁽⁸⁾. また, 諏訪ら⁽⁹⁾, 小長井⁽¹⁰⁾, 佐藤ら⁽¹¹⁾によっても同様の概念の実験手法の検討が行われている.

前報⁽⁸⁾では, 振動台型ハイブリッド実験に必要な計算機内処理の提案およびシステムとしての安定性の検討を行い, さらに小型の一軸振動台とDSP(Digital Signal Processor)からなる振動台型ハイブリッド実験システムを試作し, 二次構造物が剛体である場合について検証実験を行った. 本報では, さらに, 本システムを用いて1自由度モデルを供試体とした実験を実施し, 主構造物に付加される二次構造物が自由度をもつ場合について成立性の検討を行ったので, その結果について報告する.

2. 振動台型ハイブリッド実験の概要

振動台型ハイブリッド実験の概要について図1, 2を用いて説明する.

図1に示すような主構造物と二次構造物からなる構造物の振動を考える. この二次構造物の耐震実験を行う場合には, 主構造物を含めた構造物全体を振動台で

* 原稿受付 1998年3月24日.

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町502).

^{*2} (株)日立製作所土浦工場 (〒300-0013 土浦市神立町603).
E-mail: minoue @ merl.hitachi.co.jp

Fig. 1 An object for experiment

Fig. 2 Conceptual view of hybrid experiment using a shaking table

加振するのが一般的な方法である。しかし、構造全体が大形になると振動台による加振が困難になるため、主構造物のみの応答を解析により求めた後、それを二次構造物への入力として振動台実験を行うというように、2段階で応答を評価する方法がとられる。ただし、この場合には主構造物の振動に対して二次構造物の振動の影響は無視できるという条件が必要であり、それらの間の相互作用を考慮しなければならない場合にはこの方法は不可能である。

そこで、このような場合でも連成振動としての評価を可能にする方法が、主構造物の振動解析と二次構造物の振動台による加振実験とをオンラインで結合して同時進行させる振動台型ハイブリッド実験であり、その概念を図2に示す。

主構造物は数値モデルとして、質量マトリックス M 、減衰マトリックス C 、剛性マトリックス K の形であらかじめデジタル計算機に入力し、二次構造物は構造モデルとして反力計測装置を介して振動台上に設置しておく。地震による加速度入力を z 、反力計測装置から得られる二次構造物の反力を q とすると、主構造物である数値モデルの運動方程式は変位ベクトル x を用いて次式で表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{z} + q \quad \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 3 Schematic of shaking table

Fig. 4 Dynamic characteristics of the shaking table

ただし、入力加速度ベクトル z は地震加速度 $\ddot{z}$ を成分とし、反力ベクトル q は二次構造物との結合点にあたる成分にのみ反力 q をもつ。式(1)より数値モデルの振動応答解析を行い、二次構造物との結合点における絶対加速度 $(\ddot{x} + \ddot{z})$ を求め振動台へ入力する。

振動台により二次構造物が励振され、主構造物との結合点である支持部に生ずる反力 q を反力計測装置で測定し、デジタル計算機に入力する。デジタル計算機では次ステップの地震入力と計測した反力とから、再び数値モデルの応答を計算する。以上の過程を繰り返すことによって、二次構造物はその動的応答が主構造物に反映された形で励振されるため、主構造物に据え付けられた状態と同等の加振実験が行える。

3. 実験方法

3・1 実験装置 試作した実験装置の一軸振動台の概観を図3に示す。この振動台は小型の油圧アクチュエータにより水平一方向に加振可能で、その最大加振力は 15 kN、ストロークは ± 100 mm であり、加振軸の先端にリニアガイドで水平に支持されたテーブルが接続されている。振動台の動特性を目標加速度に対

する計測加速度の伝達関数として図4に示す。周波数の増加につれて多少ゲインが増大し、位相が遅れる傾向がある。

また、テーブル上には図5に示す反力計測装置を取付けてある。これは、供試体を乗せるベースプレートを積層ゴムで垂直方向に支持し、水平加振方向の荷重をすべてベースプレートと振動テーブルとの間に設置したロードセルで受ける構造である。これにより、主構造物に加わる二次構造物からの反力を測定する。

また、数値モデルの振動応答計算とそれに基づいた加振信号の作成を行うデジタル計算機にはDSPを用いており、そのサンプリング周期は0.5 msである。ここで、実時間ハイブリッド実験では系に含まれる遅れ時間が問題となるが、加振信号の作成において、図4から得られる振動台の応答遅れと直結実験⁽⁸⁾で確認した計算上の遅れに対して二次予測⁽⁸⁾により補償を行っている。DSP内の数値計算アルゴリズムの詳細については前報⁽⁸⁾を参照されたい。

3.2 実験方法 実験の方法について図6を用いて説明する。(1)波形発振器から出力される入力地震波と反力計測装置のロードセルで計測される構造モデルからの反力とをデジタル計算機に入力する。(2)主構造物である数値モデルの振動応答解析を行い、数値モデルと構造モデルの結合点における絶対加速度を計算する。(3)算出した加速度信号を加振機の制御装

Fig. 5 Schematic of Reaction-force measuring system

Fig. 6 Schematic of experimental system

置に入力し、加振機を制御信号によって制御する。(4)振動テーブルが動作して構造モデルが励振され、ロードセルに加わる反力を計測する。(5)ロードセルで計測された構造モデルからの反力を、波形発振器から出力される次ステップの入力信号とともにデジタル計算機に入力し、数値モデルの振動解析を行う。以上の過程を0.5 msの周期で繰返し行う。

なお、ロードセルで計測される反力 q_L には必然的に構造モデルからの反力のほか、反力計測装置のベースプレート質量 m_b による慣性力も含まれるため、ベースプレート部分の加速度 $\ddot{x}_b$ を加速度計により計測してデジタル計算機に入力し、構造モデルに依存した反力 q を次式により求めている。

$$q = q_L - m_b \ddot{x}_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

実験データは入力加速度および構造モデル上端での応答加速度を測定し、FFT(First Fourier Transform)アナライザにより記録した。

3.3 実験モデル 前報⁽⁸⁾では実験の第1段階として、構造モデルに最も単純な剛体を用いた。構造モデルが剛体である場合には得られる反力は加速度に比例した慣性力であるが、実際の構造物は自由度をもち共振を生じるため周波数に依存して反力が大きく変動する。本報ではこのような自由度をもった構造モデルを対象として、振動台型ハイブリッド実験の成立性を検証する。

実験モデルの全体は簡単のため図7に示すような2自由度系とする。この下側の1自由度系を数値モデルとし、上側の1自由度系を構造モデルとして振動台型ハイブリッド実験を行う。

製作した構造モデル(図3参照)の固有振動数は5.6 Hzにあり、1自由度系としての質量は6.1 kg、剛性は7600 N/m、減衰は0.8 Ns/mである。これに対し、数値モデルは、その固有振動数が構造モデルよりも低い場合(Case 1: 3.0 Hz)、等しい場合(Case 2: 5.6 Hz)、高い場合(Case 3: 8.0 Hz)の3ケースを用意した。数値モデルの質量は50 kgとし、剛性はケースごとに上記固有値になるように設定し、また、あらかじめ

Fig. 7 2-degree-of-freedom model

め1自由度系としての減衰比が1%となるように減衰を与えた。数値モデルの諸元を表1にまとめ、構造モデルおよび数値モデルそれぞれの1自由度系としての加速度伝達特性を図8に示す。

図7に示したように主構造物、二次構造物ともに1自由度系の場合には、おのおのの基礎に対する相対変位を x_1, x_2 とし、地震加速度を $\ddot{z}$ とすると2自由度系としての運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

で表される。ここで、座標変換、

$$\begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

により二次構造物の変位を主構造物からの相対変位で表して、式(2)を整理すると、

$$\begin{cases} M\ddot{a} + c_1\dot{a} + k_1a = -M\ddot{z} + (c_2\dot{b} + k_2b) \\ m\ddot{b} + c_2\dot{b} + k_2b = -m(\ddot{z} + \ddot{a}) \end{cases} \quad (4)$$

が得られる。式(4)の上式が数値モデルに関する運動方程式であり、右辺の $(c_2\dot{b} + k_2b)$ が構造モデルからの反力を表す。また、式(4)の下式が構造モデルに関する運動方程式であり、右辺の $(\ddot{z} + \ddot{a}) = (\ddot{z} + \ddot{x}_1)$ が振動台への入力加速度である。

以上のようなモデル化および運動方程式に従って、

Table 1 Cases of numerical model

	Case1	Case2	Case3
Eigen frequency	3.0 Hz (lower than f_0)	5.6 Hz (equal to f_0)	8.0 Hz (higher than f_0)
Mass	50 kg	50 kg	50 kg
Stiffness	1.78×10^4 N/m	6.25×10^4 N/m	1.26×10^5 N/m
Damping	18.8 Ns/m	35.3 Ns/m	50.3 Ns/m

f_0 = eigen frequency of structural model (5.6 Hz)

Fig. 8 Acceleration transfer function of models

検証実験を行った。

4. 実験結果

4.1 伝達関数 それぞれのケースについて周波数特性を調べるためにランダム波を加速度信号として入力し、構造モデルの応答を測定した。図9~11はそれぞれ Case 1~Case 3 の場合について、入力加速度に対する構造モデル上端での応答加速度の伝達特性を表している。図中に太線で示したものがハイブリッド実験の結果であり、細線で示したものは構造モデルおよび数値モデルの各パラメータから2自由度系としての伝達関数を解析によって求めたものである。おのおののグラフの横軸にかっこ付きで示した値は2自由度系としての固有振動数の解析結果である。

ここで、試作した振動台はアクチュエータの変位量をフィードバックして制御しており、高周波側の共振点から離れたところでは振動台の変位振幅が微小となるため動特性が低下してしまい、実験値と解析値との間に差異が見られる。しかし、供試体の固有振動数については、Case 1(図9)の場合、数値モデルのみの固有振動数は3.0 Hz、構造モデルのみの固有振動数は5.6 Hzであるが、実験結果では両者が連成した結果、固有振動数は2.8 Hzと6.1 Hzになっている。また、Case 2(図10)の場合は、数値モデルの固有振動数は構造モデルに等しく5.6 Hzであるが、実験では連成により5.6 Hzを挟んで4.7 Hzと6.7 Hzに2つの固有振動数が現れる。また、Case 3(図11)では数値モデルのみの固有振動数を構造モデルよりも高い8.0 Hzに設定したが、実験結果では5.3 Hzと8.4 Hzに連成した固有振動数が生じている。

いずれの場合も固有振動数は2自由度系としての解析結果に等しく、おのおの1自由度系である数値モデルと構造モデルとが振動台型ハイブリッド実験で結合されることによって、加振対象として本来あるべき連成した2自由度系として応答していることが示され、自由度をもった二次構造物に対しても実験が成立することが確認できた。

4.2 過渡応答 次に応答波形の評価のため、共振正弦波と実地震波を入力として加振を行い、構造モデルの応答波形を記録した。

正弦波の入力では、表1に示した3ケースの数値モデルに対し、それぞれの場合について伝達関数(図9~11)に示した1次共振周波数の正弦波を3周期分連続して与えた。まず、Case 1の場合について、入力した加速度波形(周波数2.8 Hz、最大振幅 0.25 m/s^2)とそれに対する構造モデル上端での応答加速度波形を図

Fig. 9 Acceleration transfer function (Case 1)

(a) Input acceleration (2.8 Hz)

(b) Response acceleration

Fig. 12 Time history for sinusoidal wave (Case 1)

Fig. 10 Acceleration transfer function (Case 2)

(a) Input acceleration (4.7 Hz)

(b) Response acceleration

Fig. 13 Time history for sinusoidal wave (Case 2)

Fig. 11 Acceleration transfer function (Case 3)

12に示す。応答波形のうち、太線で示したものが本実験結果であり、細線で示したものは2自由度系としての解析結果である。ただし、ここに示す図は0.02秒の時間刻みで記録した波形である。

次にCase 2の場合について、その共振周波数4.7 Hzの入力正弦波形とそれに対する構造モデルの加速度応答を図13に示す。さらに、図14は数値モデルがCase 3の場合について、入力波形(周波数5.3 Hz)とその応答波形である。いずれのケースにおいても実験結果は解析結果にほぼ一致し、構造モデルと数値モデルとが連成したことによる2自由度系としての共振波形が得られた。

(a) Input acceleration (5.3 Hz)

(b) Response acceleration

Fig. 14 Time history for sinusoidal wave (Case 3)

(a) Input acceleration

(b) Response acceleration

Fig. 16 Time history for seismic wave (Case 2)

(a) Input acceleration

(b) Response acceleration

Fig. 15 Time history for seismic wave (Case 1)

(a) Input acceleration

(b) Response acceleration

Fig. 17 Time history for seismic wave (Case 3)

次に、実地震波を入力として加振を行った。入力地震波には兵庫県南部地震(1995年)における神戸海洋気象台での南北方向観測波を、最大振幅が 0.5 m/s^2 となるように規格化したものを用いた。

数値モデルがCase 1~Case 3のおおのの場合について加振を行い、構造モデルの加速度応答を測定した。数値モデルのケースごとに図15~17に結果を示す。それぞれ入力した加速度波形と構造モデル上端の応答加速度波形とを示したものである。正弦波の場合と同様、応答波形のうち太線はハイブリッド実験結果、細線は2自由度系の解析結果を表している。このように構造モデルは同一であるが、異なる数値モデルと組

合わせるによって、相異なる2自由度系を形成し、同じ入力に対してそれぞれ特徴をもった応答波形を示している。

以上のように正弦波加振および地震波加振のいずれの応答波形においても、実験結果と解析結果とではほぼ等しい結果が得られ、自由度をもった二次構造物を構造モデルとした場合の本ハイブリッド実験の妥当性が示された。

5. 結 言

主構造物に付加される自由度をもった二次構造物を対象とした振動台型ハイブリッド実験の成立性を検証

するために、小型の一軸振動台とDSPからなる実験装置を用いて実験を実施した。主構造物と二次構造物をともに1自由度系モデルとし、二次構造物の構造モデルと、相異なる固有振動数をもった主構造物の数値モデルとを組合せてハイブリッド実験を行い、伝達関数および過渡応答波形を求めた。これより以下に示す結果が得られ、自由度をもった二次構造物を対象とした本ハイブリッド実験の成立性が確認できた。

(1) 実験から得られた固有振動数は、主構造物と二次構造物とを合せた2自由度系としての解析結果に一致し、主構造物の数値モデルと二次構造物の構造モデルとが連成していることがわかる。

(2) 共振正弦波および実地震波に対する過渡応答は、2自由度系の解析結果と波形が一致しており、主構造物と二次構造物とが組合された2自由度系としての応答を示している。

文 献

- (1) 伯野元彦・ほか2名, 計算機により制御されたはりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, 171(1969), 1-9.
- (2) 家村浩和, ハイブリッド実験の発展と将来, 土木学会論文集, 356(1985), 1-10.
- (3) Takanashi, K. and Nakashima, M., Japanese Activities on On-Line Testing, *J. Eng. Mech., ASCE*, 113-7(1987), 1014-1032.
- (4) 堀内敏彦・ほか3名, 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第1報), 機論, 61-584, C (1995), 1328-1336.
- (5) 堀内敏彦・ほか3名, 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第2報), 機論, 62-599, C (1996), 2563-2570.
- (6) 堀内敏彦・今野隆雄, 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第3報), 機論, 64-617, C (1998), 7-14.
- (7) 堀内敏彦・ほか2名, 振動台を用いた実時間ハイブリッド実験の基礎検討, 機講論, No. 940-261(1994), 433-436.
- (8) 堀内敏彦・ほか3名, 振動台を用いた実時間ハイブリッド実験システムの開発(第1報), 機論, 64-622, C (1998), 1949-1956.
- (9) 諏訪高典・ほか2名, サブストラクチャー振動台実験法の基礎的アルゴリズムの提案, 土木学会第51回年次学術講演会(1996), 682-683.
- (10) 小長井一男, 基礎・地盤の相互作用効果を反映させる振動台の新制御手法, 土木学会第51回年次学術講演会(1996), 778-779.
- (11) 佐藤忠信・佐藤 誠, 実時間ハイブリッド震動制御シミュレーターの開発, 土木学会論文集, No. 577(1997), 257-267.