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5報, 加振機遅れ補償手法の改良)

堀内 敏彦^{*1}, 今野 隆雄^{*2}

Development of Real-Time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation (5th Report, Improvement of Methods for Compensating Actuator Delay)

Toshihiko HORIUCHI^{*3} and Takao KONNO^{*3} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu-machi, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300 0013 Japan

We developed an on-line experimental system for conducting hybrid experiments in real time. This system combines a computer for simulating vibration and generating a control signal with an actuator for vibrating a structure according to the control signal. And the system compensates for actuator delay, so that experiments can be carried out in real time. In this report, we discuss the stability criterion with respect to the mass of the structure under excitation in conducting real-time hybrid experiments, and propose a new method for compensating actuator delay so the experiments are more stable. This method increases the stability criterion (the allowable ratio of the mass of the structure under excitation to that of the numerical model) by about three times compared with that of the conventional method.

Key Words: Forced Vibration, Seismic Motion, Nonlinear Vibration, Hydraulic Actuator, Hybrid Experiment, Computer-Aided Test

1. 緒 言

構造物の耐震性評価は振動台による加振実験で行われることが多い。しかし、大形構造物では振動台の容量などの制限で実験実施が困難な場合がある。そこで、耐震評価上重要な部分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を組合せる実験手法が伯野らにより提案され⁽¹⁾、その後種々の研究が行われている。これらについては家村⁽²⁾, Takanashi ら⁽³⁾, Mahin ら⁽⁴⁾の論文に詳しい。この手法をここでは数値計算と加振実験の混合手法として「ハイブリッド実験」と呼ぶことにする。

ハイブリッド実験は、構造物の振動挙動が速度や加速度にも大きく依存するときは計算と実験を同じ時間軸で実施する「実時間化」が必要である。実時間化の試みは、アナログ計算機を用いた伯野らの研究⁽¹⁾, 粘性ダンパを対象としデジタルサーボ機構を用いた Nakashima らの研究⁽⁵⁾ などがある。

著者らは適用範囲を拡大した実時間ハイブリッド実験システムの開発の一段階として、油圧加振機と並列処理計算機を用いたシステムを開発し、また、それが粘性減衰の大きい構造物の振動実験に有効であることを示した⁽⁶⁾。この中で、加振機応答遅れが実時間ハイブリッド実験では振動系へのエネルギーの供給と等価となることもわかったので、加振機応答遅れを補償する手法を開発し⁽⁷⁾、構造物へ適用した場合の結果を示した^{(7)~(11)}。この手法は、いくつかの実時間ハイブリッド実験に適用されている^{(12)~(15)}。

これまで本手法は、供試体である部分構造物の質量が比較的小さく、計測される荷重として慣性力が無視できる条件で検討してきた。しかし、供試体の質量と数値モデルの中で供試体が連結されている節点の質量の比率がある限界値を超えると、振動計算が発散することがわかった。そこで本報告では、この限界値を明確にし、さらに、この限界を拡大して広範囲で実時間ハイブリッド実験が実施できるような新しい補償アルゴリズムを提案する。

2. 実時間ハイブリッド実験の概要

実時間ハイブリッド実験については、既報⁽⁷⁾で詳細に述べているが、ここではその概要を述べる。

* 原稿受付 2000年4月5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)日立製作所産業機械システム事業部(☎300-0013 土浦市神立町603)。

E-mail: thori@gm.merl.hitachi.co.jp

Fig. 1 Conceptual view of hybrid experiment

ハイブリッド実験の概念を図1に示す。実験対象構造物の一部を実物モデルとし加振機による振動実験を行い、他の部分は数値モデルとして計算機に入力する。 M 、 C 、 K をそれぞれ数値モデルの質量、減衰、剛性マトリックスとし、 x を数値モデルの基礎に対する相対変位ベクトル、 f を地震などによる外力ベクトル、 q を数値モデルと実物モデルの境界点に発生する力(以下、反力と呼ぶ)のベクトルとすると数値モデルの運動方程式は

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

とかけ、反力 q は境界点 b の変位 x_b を用いて形式的に

$$q = q(x_b, \dot{x}_b, \ddot{x}_b, \dots) \quad (2)$$

となる。加振実験により計測した反力 q を用い、式(1)により微小時間 Δt 後の振動応答を計算し、境界点の変位 x_b を加振機により実物モデルに加え、この変形に対する反力 q を計測する。以上を繰返し実施することにより、構造物全体の振動応答が評価できる。この実験手法では、既知の部分を数値計算に置き換えるので経済的な実験が可能となり、また、数値モデル化が困難な部材について実物を一つの有限要素として取扱うことができ高精度な計算が可能となる。式(2)からわかるように、反力の速度・加速度に依存する成分が無視できないときには、実験の精度を保つために数値計算と加振の時間軸が一致していること(実時間)が必要となる。

3. 現状の実験アルゴリズムとその課題

ここでは、2章で述べた実時間ハイブリッド実験を実現するために必要な、計算機における処理(振動応答解析、加振機指令信号の生成など)、供試体の加振方法などを総称して「実験アルゴリズム」と呼ぶ。現状の実験アルゴリズムを概説し、その課題を述べる。

3.1 振動応答解析手法 図1中の計算機で式

Fig. 2 Real-time hybrid experiment for a single-degree-of-freedom system

(1)の運動方程式を解くために現状の実験アルゴリズムでは、中央差分法⁽³⁾を用いている。

式(1)はある時刻 t_i において次式となる。また、添字 i は時刻 t_i の値であることを示す。

$$M\ddot{x}_i + C\dot{x}_i + Kx_i = f_i + q_i \quad (3)$$

中央差分法では、時間刻み Δt ごとの振動応答を算出する。そのために、時刻 $t_{i-1} = t_i - \Delta t$ から時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ の間で加速度が一定であると仮定する。この仮定の下では、時刻 t_i の加速度、および、速度は次式のとおりである。

$$\ddot{x}_i = (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}) / \Delta t^2 \quad (4)$$

$$\dot{x}_i = (x_{i+1} - x_{i-1}) / (2\Delta t) \quad (5)$$

式(4)、(5)を式(3)に代入し x_{i+1} について解くと次式が得られる。

$$x_{i+1} = \left(M + \frac{\Delta t}{2} C \right)^{-1} \left\{ M(2x_i - x_{i-1}) + \frac{\Delta t}{2} Cx_{i-1} - \Delta t^2 (Kx_i - f_i - q_i) \right\} \quad (6)$$

式(6)からわかるように、時刻 t_i において既知のデータから時刻 t_{i+1} の変位を算出できるのが、本手法の特長である。荷重 q_i を計測しながら振動計算をし、加振機を制御しなければならない実時間ハイブリッド実験に有効な手法である。反面、時刻 t_i の加速度、速度の算出には式(4)、(5)を用いるので、時刻 t_{i+1} の変位を求めた後に初めて値が定まる。すなわち、加速度・速度の算出は1ステップ遅れることになる。

3.2 油圧加振機動特性の影響とその補償方法

3.2.1 油圧加振機の動特性 ここでは大形構造物の耐震試験に適用するために加振力の大きい油圧加振機を使用するものとする。油圧加振機の動特性は地震応答評価上に必要な振動数範囲ではほぼむだ時間要素として考えることができるが、その応答遅れ時間は振動数・振幅などにより多少変化する⁽⁷⁾。油圧加振機を用いた実時間ハイブリッド実験装置は、この特徴を考慮して構成する必要がある。

加振機応答遅れの影響を考えるために、図2に示す一自由度系の実時間ハイブリッド実験を考える。図2

中の x は計算機で計算された応答変位(計算値), x' は後述する手法により予測された応答変位(予測値), x'' は加振機により実際に構造物に負荷された変位(実現値), をそれぞれ表す。以下, 同様の記号で, これらの値を示す。ここでは簡単のため, $m=0$ とし, 実験対象のばね定数が k であり加振機の応答遅れが δt の場合は, そのばねに次式で示す負の減衰係数 c_{eq} が加わったものと等価となる⁽⁷⁾。

$$c_{eq} = -k\delta t \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって, 実時間の実験を行うためには, 何らかの方法でこの負の減衰を除去する必要がある。

3・2・2 現状の補償方法 前報⁽⁷⁾では上述の加振機の応答遅れの影響を解決するための補償手法を提案した。これは, 図3に模式的に示すが, 遅れ相当時間先の変位を予測する部分と, 予測のためのパラメータを振動条件に合わせて修正する部分とからなる。予測部分は, 振動応答計算によって求めたその時刻に実現すべき変位値(計算値)と過去の計算値から遅れ時間だけ先の変位値(予測値)を予測し, 加振機の入力信号とするものである。これにより, 予測された時間だけ加振機で応答が遅れるので実現したい時刻に実現したい変位が実現できる。現状では, 予測式として, 過去の変位計算値に n 次関数をあてはめ加振機応答遅れ時間先の変位値を外挿して求める次式を用いている(図4参照)。

Fig. 3 Schematic of the compensation method

Fig. 4 Schematic of the prediction method

$$x' = \sum_{j=0}^n a_j x_j \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお, x' は予測値, n は予測の次数, x_0 は現時刻の計算値, x_j は, 現時刻よりも $(\delta t \times j)$ 前の計算値であり, δt は加振機応答遅れ時間, a_j は予測次数により定まる定数で表1にその値を示す。

3・2・3 供試体のばね特性の影響 ハイブリッド振動実験の供試体がばね定数 k であり, 振動応答の計算値が円振動数 ω の正弦波の場合を考える。図2のように加振機を δt のむだ時間要素と考えると計測され振動応答解析に使用される反力 q は, 予測の誤差により加振機で実現される変位 x'' と計算変位 x の間に位相差と振幅の変動が発生するために本来の $-kx$ とは異なり, 次式となる。

$$q = -(k^*x + c^*\dot{x}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし, k^* , c^* はそれぞれ見かけ上のばね定数, 減衰係数であり, 無次元量 $\omega\delta t$ の関数で次式のとおりである⁽⁷⁾。

$$k^*/k = \sum_{j=0}^n a_j \cos\{(j+1) \times \omega\delta t\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$c^*\omega/k = -\sum_{j=0}^n a_j \sin\{(j+1) \times \omega\delta t\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

c^* は $\omega\delta t$ がある限界値を越えると負となり振動計算が発散するので, これが現状の補償手法の適用限界の一つとなっている。適用限界がある程度大きいことなどの理由から, 三次関数を用いた予測(3次予測)を用いており⁽⁷⁾, ω を見かけ上のばね定数の変動を考慮して算出される構造物の最大固有円振動数とすると, $\omega\delta t=1.571$ が限界値である。3次予測の場合の (k^*/k) と $(c^*\omega/k)$ を図5に示す。以下, この限界を

Table 1 Coefficients for prediction a_j

Order	a_0	a_1	a_2	a_3
1	2	-1	—	—
2	3	-3	1	—
3	4	-6	4	-1

Fig. 5 Apparent stiffness and damping under the conventional prediction method

Fig. 6 Block diagram of hybrid experiment considering mass of structure

「剛性に関する限界」と呼ぶ。

3・2・4 供試体の質量の影響 供試体の質量に関するハイブリッド実験の安定性・精度についても検討する必要がある。図2において $k=0$ とすると、取扱う運動方程式は次式となる。

$$M\ddot{x} = f + q = f - m\ddot{x} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ラプラス変換して表すと次式となる。ただし、 s はラプラス変換子、大文字は小文字のラプラス変換である。

$$MXs^2 = F - mX''s^2 = F - mHXs^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 X'' は X に遅れ補償処理をしその結果として加振機により実現される変位なので、これらの処理の伝達関数を H とし、 $X'' = HX$ と表した。以上の関係は図6に示すブロック線図で示すことができる。このシステムが安定であるためには、一巡伝達関数 Δ のゲインが1未満であることが必要である。 Δ は、

$$\Delta = \frac{m}{M} H \quad \dots\dots\dots (14)$$

とかけるから、

$$\frac{m}{M} < \frac{1}{|H|} \quad \dots\dots\dots (15)$$

がその条件となる。すなわち、数値モデルの質量 M に対する供試体のもつ質量 m の比(以下、質量比 μ と呼ぶ)がある値を超えると試験処理が不安定になる。補償処理によるゲインの増幅がない理想的な場合、すなわち、 $|H|=1$ のときには、その限界値は1である。また、式(8)の予測式を用いた場合、加振機をむだ時間系と考えると、 $|H|$ の最大値は係数 a_i の絶対値の総和となるので、現状の3次予測補償では表1より $1/15$ となる。したがって、現状の手法では供試体の質量を小さくする工夫が必要である。なお、この結果は数値モデル、補償処理 H によって決まるものであり数値解析のアルゴリズムには左右されない。以下、この限界を「質量に関する限界」と呼ぶ。

4. 予測補償方法の改良

現状の手法では、質量比 μ が $1/15$ と質量に関する

Fig. 7 Stability criterion with respect to mass under the improved prediction method

Fig. 8 Apparent stiffness and damping under the improved prediction method ($\alpha=1.5$)

限界がかなり小さい。本章ではこの限界を拡大する手法について検討する。

4・1 従来手法の改良 上述のように質量に関する安定限界を拡大するためには、予測式の係数の絶対和を小さくする必要がある。そのための一手段が、式(8)による予測に使用するデータ x_j の時間間隔を遅れ時間 δt よりも大きくすることである。すなわち現時刻から $(\alpha \times \delta t) \times j$ だけさかのぼった計算値 x_j を用いて δt あとの変位 x' を予測する(以下、これを「改良手法」と呼び、また、 α を「予測時間比」と呼ぶ)。3次予測の場合、予測式は次式となる。

$$\begin{aligned} x' = & x_0 \left\{ \left(\frac{1}{6} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(2 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(3 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \\ & + x_1 \left\{ \left(-\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(2 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(3 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \\ & + x_2 \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(3 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \\ & + x_3 \left\{ \left(-\frac{1}{6} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(2 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

したがって、ゲインの最大値 $|H|_{\max}$ は次式で表される。

$$|H|_{\max} = \frac{1}{6} \left\{ 8 \left(\frac{1}{\alpha} \right)^3 + 36 \left(\frac{1}{\alpha} \right)^2 + 40 \left(\frac{1}{\alpha} \right) + 6 \right\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

安定限界である質量比 $\mu_{cr} = 1/|H|_{\max}$ を図示すると図

Fig. 9 Stability criterion with respect to stiffness under the improved prediction method

Fig. 10 Relation between the criteria with respect to stiffness and mass

7となり、予測時間比 α を大きくすると μ_{cr} が大きくなり質量に関する限界が拡大し、 $\alpha \rightarrow \infty$ では理想の状態である $\mu_{cr}=1$ となることがわかる。図7中の実験結果については、後述する。

しかし、 $\alpha > 1$ とすることは、現状手法よりさらに過去のデータを用いて予測することになるので剛性に関する限界が悪化する。式(16)による予測補償についても式(9)と同様に見かけ上の付加減衰 c^* と剛性の変動 k^* を求めてみる。一例として $\alpha=1.5$ の場合を従来式である $\alpha=1$ と比較したものが、図8である。 c^* が負となる $\omega\delta t$ 、(以下、 $(\omega\delta t)_{cr}$ と記述する) が安定限界であるが、 $(\omega\delta t)_{cr}$ が小さくなり剛性に関する安定限界が悪化している。剛性に関する安定限界 $(\omega\delta t)_{cr}$ に対する予測時間比 α の影響をまとめると、図9となる。なお、補償の誤差によって、剛性の変動も生じ $\omega\delta t$ が大きい領域では、みかけ上現れる固有振動数が本来の固有振動数より高くなる。安定限界を考える場合にはこの現象も考慮する必要がある。この影響をもっとも受けるのは、一自由度系においてばねがすべて供試体となっている場合で、みかけ上の固有振動数は剛性の平方根に比例する。この影響も加味した限界 $(\omega\delta t)_{cr}'$ についても図9に合せて示す。図中の実験結果については、5章で説明する。

このように、剛性に関する限界と、質量に関する限

界は相反する関係にあることがわかった。図7と9から得られる μ_{cr} と $(\omega\delta t)_{cr}'$ の関係を図10に実線で示す。なお、「提案手法」、および、実験結果については後述する。

4.2 加速度を利用した予測手法の提案

4.1節で述べた手法は質量に関する限界を拡大させるが、剛性に関する安定限界を悪化させる。そこで、より広範囲で安定な新しい予測手法を提案する。以下、これを「提案手法」と呼ぶ。

従来の手法では変位を三次式で外挿し予測しているが、これは加速度の時間変化が1次であると仮定していることと同じである。加速度を1次で予測し、その結果を使って変位を予測することを考える。

加速度の変化が1次という条件下では、予測変位 x' は次式で書ける。ただし、 $\ddot{x}'$ は Δt 後の予測加速度である。

$$x' = x_0 + \delta t \ddot{x}_0 + \frac{\delta t^2}{3} \ddot{x}_0 + \frac{\delta t^2}{6} \ddot{x}' \quad (18)$$

予測加速度は、式(8)と同様に考えると、次式となる。

$$\ddot{x}' = 2\ddot{x}_0 - \ddot{x}_1 \quad (19)$$

本手法の質量に関する限界を検討するため、むだ時間系に対して式(18)を施したときの伝達関数 H を求める。

$$H(s) = (X''/X) = 1 + (\delta t s) + \frac{1}{6} (\delta t s)^2 (4 - \exp(-\delta t s)) \quad (20)$$

$s = j\omega$ (j は虚数単位) を代入し周波数伝達関数を求める。

$$H(j\omega) = 1 + j(\omega\delta t) - \frac{1}{6} (\omega\delta t)^2 (4 - \exp(-j\omega\delta t)) \quad (21)$$

よって、この伝達関数のゲインは $(\omega\delta t)^2$ のオーダーで増幅する。そこで、 $(\omega\delta t)$ の増大に伴うゲインの増加を抑えるため、速度には1次のローパスフィルタ、加速度には2次のローパスフィルタを付加することを考える。このとき、 $H(s)$ は次のとおりとなる。

$$H(s) = 1 + \frac{\delta t s}{1 + (s/\omega_1)} + \frac{1}{6} \frac{(\delta t s)^2 (4 - \exp(-\delta t s))}{1 + 2\zeta_2(s/\omega_2) + (s/\omega_2)^2} \quad (22)$$

ただし、 ω_1 、 ω_2 はそれぞれのフィルタのカットオフ周波数、 ζ_2 は減衰比である。

したがって、 $|H|_{\max}$ は次式で表され、質量に関する安定性を確保できる。

$$|H|_{\max} \approx 1 + (\omega_1 \delta t) + \frac{5}{6} (\omega_2 \delta t)^2 \quad (23)$$

フィルタのパラメータ ω_1 、 ω_2 、 ζ は次のように定め

Fig. 11 Stability criterion with respect to mass under the proposed prediction method

Fig. 12 Apparent stiffness and damping under the proposed prediction method

Fig. 13 Stability criterion with respect to stiffness under the proposed method

る。式(22)に $s=j\omega$ を代入して周波数伝達関数の形にし、 $\omega\delta t=0$ 近傍で展開すると、

$$H(\omega) = \left(1 + \frac{1}{\omega_1 \delta t} (\omega \delta t)^2 + O[(\omega \delta t)^4] \right) + j \left(\left\{ \frac{\zeta_2}{\omega_2 \delta t} - \left(\frac{1}{(\omega_1 \delta t)^2} + \frac{1}{\omega_1 \delta t} \right) \right\} (\omega \delta t)^3 + O[(\omega \delta t)^5] \right) \quad (24)$$

となる。ここで $O[\varepsilon]$ は ε のオーダーの微小量を表す。従来の予測補償(変位の三次関数による外挿)の場合と同様に示すと、

$$H(\omega) = (1 + O[(\omega \delta t)^4]) + jO[(\omega \delta t)^5] \quad (25)$$

であるから、提案手法により $\omega\delta t=0$ 近傍で従来手法と同様の精度を確保するためには、

$$\frac{\zeta_2}{\omega_2 \delta t} - \left(\frac{1}{(\omega_1 \delta t)^2} + \frac{1}{\omega_1 \delta t} \right) = 0 \quad (26)$$

とする必要がある。すなわち、加振機の遅れ δt に対して、ある ω_1 を決めれば、式(26)を満たす $\zeta_2/(\omega_2 \delta t)$ を決めることができる。質量に関する限界の観点からは、 $|H|_{\max}$ が式(23)で表されているので、 ω_2 はできるだけ小さくしたい。しかし、それに伴い ζ_2 も小さくする必要がある。しかし、 ζ_2 を小さくすると2次のローパスフィルタが ω_2 でピークをもつことになり不都合である。そこで、ここでは、 $\zeta_2=0.5$ という値に固定する。すると、ある ω_1 に対して ω_2 が一意に決まる。

以上のようにして決めた $\omega_1 \delta t$ と $\mu_{cr}=1/|H|_{\max}$ の関係を図11に示す。 $\omega_1 \delta t$ を小さくするほど μ_{cr} が大きくなり質量に関する限界が拡大することがわかる。実験結果は5章で述べる。

次に、この予測式の剛性に関する限界について検討する。一例として、従来の予測式と同様に $\mu_{cr}=1/15$ となる $\omega_1 \delta t=6.76$, $\omega_2 \delta t=2.94$ について c^* , k^* を図12に示す。本手法では、現状に比べて c^* が負となる $\omega\delta t$ が高くなり、また、剛性の変動も小さくなっていることがわかる。前節と同様に剛性に関する安定限界に対する $\omega_1 \delta t$ の影響をまとめて図13に示す。 $\omega_1 \delta t$ を小さくすると剛性に関する限界が悪化しており、ここでも、質量に関する限界と剛性に関する限界は相反することがわかる。なお、実験結果は5章で述べる。

みかけ上の剛性の変動により構造物の固有振動数が変動することを考え、一自由度系を想定し、本来の固有振動数で表した $(\omega\delta t)'$ についても示す。また、 μ_{cr} と $(\omega\delta t)_{cr}'$ の関係を図10に破線で図示する。これより、本手法により質量・剛性に関する限界を拡大できることがわかった。従来実施してきた予測補償(改良手法において $\alpha=1.0$)に対して μ_{cr} を同じにした場合には $(\omega\delta t)_{cr}'$ を約40%大きくでき、 $(\omega\delta t)_{cr}$ を同じにした場合には μ_{cr} を約3倍にできる。なお、本予測手法を最適な状態にするには加振機の遅れ δt をある程度正確に知る必要があることに注意する必要がある。

式(18)で変位を予測するためには、少なくとも現時刻の変位・速度・加速度が必要である。また、式(19)で加速度を外挿で予測するためにも、現時刻の加速度が必要である。中央差分法では、式(4)、(5)により変位が計算された1ステップ前の速度、加速度を計算することができる。そこで、予測の初期値を、この点とすることで式(18)の変位予測が可能となる。なお、予測の初期時刻が1ステップだけ過去にさかのぼるので、予測時間は従来の δt から $\delta t + \Delta t$ となることに注

意する必要がある。

4.3 まとめ 質量に対する限界を拡大する観点から二つの予測補償方法を検討した。いずれの場合にも質量に関する限界と剛性に関する限界は相反していることがわかった。二つの限界のバランスを考え補償のパラメータを決定する必要がある。また、二つの方法を比較すると、ここで提案した加速度・速度とフィルタを利用した予測方法(提案手法)では従来の方法において予測に使用するデータの時間間隔を変える手法(改良手法)より安定限界が広くできることがわかった。

5. 仮想ハードウェアを用いた実験による検証

5.1 目的 供試体・加振機などのハードウェアを仮想的に構成し実際の実時間ハイブリッド実験と等価な条件で実験を実施し、上述の予測補償手法における質量、および、剛性に関する安定限界を求める。そして、その結果を解析から得られた結果と比較し解析の妥当性を検討する。

5.2 実験手法 供試体のパラメータをさまざまに変更して実験することは、実際に構造物を加振した実験では困難である。そこで、加振機および供試体の特性を数値モデル化し、これを Digital Signal Processor (以下、DSP) に組込んだシミュレータにより仮想的にハードウェアを構成し、実時間ハイブリッド実験を行う計算機から見た指令値、反力の入出力を実験の実験と等価にして実験を行った。本実験では、実時間ハイブリッド実験を行う計算機も DSP を使用したので、二つの DSP を区別するため、ハイブリッド実験用制御計算機を DSP 1、加振機・供試体のシミュレータを DSP 2 と呼ぶことにする。

Fig. 14 Experimental setup

Fig. 15 Single-degree-of-freedom system

ユレータを DSP 2 と呼ぶことにする。

加振機・供試体シミュレータの内容を以下に示す。加振機は、二次遅れ系とむだ時間系の積で表す。すなわち、加振機の指令値に対する変位出力の伝達関数を H_{act} とすると、

$$H_{act} = \frac{\exp(-\delta t_{act}s)}{1 + 2\zeta_{act}s/(2\pi f_{act}) + s^2/(2\pi f_{act})^2} \quad \dots (27)$$

ただし、 f_{act} は二次遅れ系の固有振動数、 ζ_{act} は二次遅れ系の減衰比、 δt_{act} はむだ時間である。そして、加振機の変位出力に対する供試体反力の伝達関数 H_{model} を

$$H_{model} = K_{model} + C_{model}s + M_{model}s^2 \dots \dots \dots (28)$$

とする。上記の処理を DSP 2 で実施する。

DSP 1 は指令値 X を DSP 2 に与え、DSP 2 から出力される $H_{act}X$ を加振機の実変位として入力し、また、同様に DSP 2 から出力される $H_{model}H_{act}X$ を反力として入力する。これらの状況を図 14 に示す。

ここでは、DSP 1 および DSP 2 の処理は制御周波数 2 000 Hz (処理時間刻み 0.5 ms) で実施した。なお、時間刻み 0.5 ms は十分小さく数値計算の誤差は無視できると考えられる⁽¹⁶⁾。また、4 章の解析は加振機をむだ時間系としているので、その条件に近づけるため、ここでは、 $f_{act}=100$ Hz、 $\zeta_{act}=0.5$ とした。これは比較的低い振動数領域では、ほぼ 1.6 ms のむだ時間系に相当する。また、 $\delta t_{act}=6$ ms とした。DSP 1 および DSP 2 はそれぞれ処理の遅れが 2~3 ステップあるので、総合してほぼ 10 ms のむだ時間系が構成された。

安定限界を求める実験では、対象構造物として一自由度系を考えた(図 15 参照)。質点や固有振動数が一つに限定されるため評価が容易であるからである。

5.3 実験結果

5.3.1 質量に関する安定限界

図 15 において供

Fig. 16 Example of experimental results for stability with respect to mass

Fig. 17 Example of experimental results for stability with respect to stiffness

試体として質量 M_{model} を考え ($C_{\text{model}}=0$, $K_{\text{model}}=0$), 数値モデルとして $K=(2\pi)^2$, $C=0$, $M=1-M_{\text{model}}$ とし, 固有振動数 1 Hz の振動系を構成した. さまざまな M_{model} と M の比率 μ に対し初期速度を与え自由振動をさせ, 試験が安定に実施されるかを調べた.

まず, 「改良手法」の結果について述べる. 実験結果の一例を図 16 に示す. 予測に使用するデータの時間刻みの遅れ時間に対する比, α を 1.0 とし, $\mu=0.070$ の場合, 加速度がしだいに増幅し安定な実験ができなくなっているのに対して, $\mu=0.055$ の場合には安定に実験が実施されている. このように, μ をわずかに変えるだけで安定・不安定が変化する. この境界を安定限界とする. α を数種類とり, それぞれについて安定限界 μ_{cr} を求めた. その結果を図 7 に合せて示す. 実験結果は理論値とおおむね一致しており, 解析の妥当性を示している.

次に, 「提案手法」の結果について述べる. 上記と同様の方法で数種類の $(\omega_1 \delta t)$ について安定限界を求めた結果を図 11 に合せて示す. ここでも実験結果は理論値とおおむね一致している.

5.3.2 剛性に関する安定限界 図 15 において数値モデルを $K=C=0$, $M=1$ と設定した. そして, ばね要素のみを供試体と考えて一自由度系を構成した. すなわち, $M_{\text{model}}=C_{\text{model}}=0$ である. K_{model} の値をさまざまにかえ, 初期速度を与え自由振動をさせ, 試験が安定に実施されるかを検討した.

まず, 「改良手法」の結果について述べる. 実験結果の一例を図 17 に示す. α を 1.0 とし, $K_{\text{model}}=4800$ の場合, 変位がしだいに増幅し安定な実験ができなくなっているのに対して, $K_{\text{model}}=4700$ の場合には安定に実験が実施されている. このように, K_{model} についても値をわずかに変えるだけで安定・不安定が変化する境界がある. これを安定限界の剛性 K_{cr} とする. α

を数種類とり, それぞれについて安定限界 $f_{cr}=2\pi\sqrt{K_{cr}/M}$ を求めた. その結果を図 9 に合せて示す. 実験結果は理論値にほぼ一致しており, 解析の妥当性を示している.

次に, 「提案手法」の結果について述べる. 上記と同様の方法で数種類の $(\omega_1 \delta t)$ について安定限界を求めた結果を図 13 に合せて示す. ここでも実験結果は理論値とおおむね一致している.

また, 質量と剛性の安定限界の関係について実験から得た結果を図 10 に合せて示す. 実験結果は理論値とよく一致している.

6. 結 言

本報告では, 実時間ハイブリッド実験システムにおいて, 供試体質量に関する試験可能範囲を明確化し, さらにこれを拡大するための新しい遅れ補償アルゴリズムを提案した. 得られた結論は以下のとおりである.

(1) 剛性に関する安定限界との関連を明らかにし, 二つの安定限界を明確化した. 質量と剛性に関する安定限界は相反する関係にあることがわかった.

(2) 安定限界を拡大するため, 速度・加速度を利用する新しい予測補償方法を提案した. 剛性に関する限界は限界振動数, 質量に関する限界を限界質量比で表すことができるが, 現状の変位の 3 次予測に比べ, 限界振動数を同等にしたとき限界質量比は, 約 3 倍に増大でき, 限界質量比を同等にしたとき限界振動数は, 約 40% 増大できる.

(3) 解析結果により導かれた安定限界を仮想ハードウェアを用いた実験により確認した.

なお, 本報告では一自由度系である供試体を対象にした検討を行っているが, 多自由度系に対する検討は別報にて報告予定である⁽¹⁷⁾.

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, 土木学会論文報告集, **356** (1985), 1-10.
- (3) Takanashi, K. and Nakashima, M., Japanese Activities on On-Line Testing, *J. Engrg. Mech., ASCE*, **113-7** (1987), 1014-1032.
- (4) Mahin, S. A., ほか 3 名, Pseudodynamic Test Method-Current Status and Future Direction, *J. Engrg. Mech., ASCE*, **115-8** (1989), 2113-2128.
- (5) Nakashima, M., ほか 2 名, Development of Real-Time Pseudo Dynamic Testing, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **21** (1992), 79-92.
- (6) 中川正紀・ほか 3 名, 実時間オンライン部分構造合成振動試験システムの開発, 機論, **60-570, C** (1994), 412-417.

- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Horiuchi, T., ほか3名, Real-time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation and Its Application to A Piping System with Energy Absorber, *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **28** (1999), 1121-1141.
- (11) 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4報), 機論, **66**-650, C (2000).
- (12) 品部裕児・ほか4名, せん断降伏型耐震要素の実時間仮動的実験に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), (1996).
- (13) Nakashima, M. and Masaoka, N., Real-time On-line Test for MDOF systems, *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **28** (1999), 393-420.
- (14) 小林寛・田村敬一, 2次元3自由度系モデルを対象とした実時間ハイブリッド振動実験, 土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集 (1999), 913-916.
- (15) Darby, A. P., ほか2名, Real-time Substructure Tests Using Hydraulic Actuator, *J. Engrg. Mech., ASCE*, **125**-10, (1999), 1133-1139.
- (16) 中島正愛, 仮動的実験における積分時間刻みと応答変位・速度・加速度の関係(仮動的実験応答の安定と精度), 日本建築学会構造系論文報告集, 358, (1985), 35-42.
- (17) Horiuchi, T. and Konno, T., A New Method for Compensating Actuator Delay in Real-time Hybrid Experiments, *Philosophical Trans. Royal Soc.*, To be appeared.