

実時間ハイブリッド実験概念による振動台実験

○堀内敏彦¹・井上雅彦²・今野隆雄³

¹工博 日立製作所 機械研究所 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町 502)

²工修 日立製作所 機械研究所 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町 502)

³日立製作所 産業機械システム事業部 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町 603)

A hybrid experimental method, in which an actuator-excited vibration experiment and a response analysis using a computer are combined on-line and conducted simultaneously, is being developed for investigating structural systems. In this report, a method using a shaking table as the actuator is proposed so that the hybrid experimental method can be applied to a secondary structural system attached to a primary structural system. A response analysis algorithm is proposed for this experimental method and the feasibility of this method was demonstrated by using a small shaking table and a digital signal processor.

Key Words : *hybrid experiment, seismic motion, computer aided test, forced vibration, stability, shaking table*

1. はじめに

構造物の耐震性評価の一手法として、その部分構造的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み合わせる実験手法が伯野らにより提案され¹⁾、その後様々な研究が行われている^{2), 3)}。この実験手法はいろいろな呼び方がされているが、ここでは計算機と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。

従来のハイブリッド実験手法では、実験対象の相対変形を計算し加振機で載荷する。ところが、主構造物に付加される二次構造物（例えば、建物制振用マスダンパー）はその応答が加振される加速度で決まるので、この手法の適用が困難である。筆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を提案し基礎検討を行った⁴⁾。また、Igarashi et al.⁵⁾、小長井ら⁶⁾も同様の概念の実験手法を検討している。

本報告では、振動台を用いたハイブリッド実験に必要な計算機内処理を提案し、実験システムの安定性と精度を理論解析により検討した結果を述べる。さらに、小型の振

動台と DSP (Digital Signal Processor) からなる実験システムを試作して検証実験を実施し、本実験手法の実現性を実証したことについても述べる。

2. 振動台ハイブリッド実験の概念

本章では、振動台を用いたハイブリッド実験手法(以下、振動台ハイブリッド実験と呼ぶ)の目的と特徴をまとめる。ここで、図-1 に示すような、主構造物に二次構造物が付加されている構造物を考える。このような構造物の耐震性評価を振動台実験で行うときは、次のいずれかの方法を用いることが多い。一つは、主構造物を含む全体を加振する方法であり、もう一つは、主構造物の応答加速度のうち二次構造物が接続されている部分を入力加速度として、二次構造物のみを振動台に載せて加振する方法である。前者では、主構造物が大きい場合には、実物大の加振実験はテーブル容量の制限から難しい。また、後者が適用できるのは、主構造物と二次構造物の連成が無視できるという条件が満たされている場合に限られる。これに対して、振動台ハイ

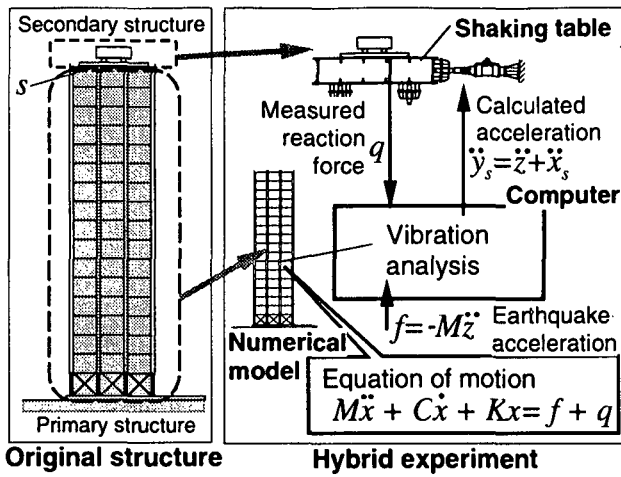


図-1 振動台ハイブリッド実験の概念図

ブリッド実験は、主構造物が二次構造物と強く連成するような構造物の耐震実験に使用できることが特徴である。

図-1 に示すように、主構造物を次の運動方程式によって数値モデル化する。

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

ここで、 M 、 C 、 K はそれぞれ数値モデルの質量、減衰、剛性マトリクスであり、 x は相対変位ベクトル、 f は外力ベクトル、 q は実モデルと数値モデルの境界に働く反力ベクトル、 \cdot は時間に関する微分である。

一方、二次構造物の振動台による加振加速度波形は次のように求める。主構造物の地震応答を、地震による慣性力 f と計測された二次構造物の反力 q を外力と考えて、式(1)を解くことで算出する。なお、計測反力 q は、接続点 s の絶対加速度 \ddot{y}_s に依存するので、次のステップを繰り返し行うことにより、構造物全体の地震応答を評価する。

(1)振動台加振の結果発生した反力 q を計測する、(2)計測反力 q と事前に定められた外力 f を用いて主構造物の相対応答加速度 \ddot{x}_s を算出する、(3) \ddot{x}_s と地動加速度 \ddot{z} を加えて、絶対応答加速度 \ddot{y}_s を算出する、(4) 計算した絶対応答加速度 \ddot{y}_s で二次構造物を振動台加振する。

二次構造物とその応答の影響を反映した加速度で加振されるので、主構造物に付加された二次構造物の地震応答は上記の方法で評価できる。なお、本手法は、振動台による加速度加振を行うので、実時間の実験が不可欠である。

3. 数値計算手法と指令信号の生成

ハイブリッド実験には、計算機による振動応答解析と、

その計算結果に基づいた加振装置の指令信号生成が必要である。従来の相対変位を加振機で供試体に負荷するハイブリッド実験では、「中央差分法」と呼ばれるアルゴリズムが式(1)の時間積分に用いられることが多い³⁾。ある時刻で既知の情報を用いて微小時間刻み Δt 後の変位応答が計算できるからである。しかし、このアルゴリズムでは、振動台加振に必要な微小時間刻み Δt 後の加速度が算出できないので、振動台ハイブリッド実験には不適切である。そこで、「線形加速度法」を基礎にした手法を開発した。

(1)数値計算手法

線形加速度法を式(1)の運動方程式に適用すると、次の式が得られる。

$$\ddot{x}_{i+1} = \left\{ M + \frac{\Delta t}{2} C + \frac{\Delta t^2}{6} K \right\}^{-1} \left\{ f_{i+1} + q_{i+1} - C \left(\dot{x}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}_i \right) - K \left(x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{\Delta t^2}{3} \ddot{x}_i \right) \right\} \quad (2)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \Delta t \frac{\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1}}{2} \quad (3)$$

$$x_{i+1} = x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{\Delta t^2}{3} \ddot{x}_i + \frac{\Delta t^2}{6} \ddot{x}_{i+1} \quad (4)$$

ここで、 Δt は計算時間刻みであり、添え字 i は時刻 t_i の値であることを示し、 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ である。したがって、線形加速度法、すなわち式(2)~(4)を用いることにより、時刻 t_i の変位、速度、加速度と時刻 t_{i+1} における外力 $f_{i+1} + q_{i+1}$ を用いて時刻 t_{i+1} の加速度応答を求めることができる。しかし、これらの式は直接振動台ハイブリッド実験に適用することはできない。なぜなら、 q_{i+1} は時刻 t_{i+1} における接続点 s の絶対加速度応答 $\ddot{y}_{s,i+1} = \ddot{x}_{s,i+1} + \ddot{z}_{i+1}$ の関数であり、したがって、式(2)の両辺に $\ddot{x}_{s,i+1}$ の関数が現れるからである。また、計算された加速度で供試体を正確に加振するためには、振動台の動特性も加味して実験を行う必要がある。通常、振動台には電気油圧式サーボ制御加振機が用いられるが、これらは応答遅れを持つのが一般的である。すなわち、指令信号が入力された時刻よりもわずかに遅れて対応する加速度が振動台により生み出される。したがって、指令信号を、加速度 $\ddot{y}_{s,i+1}$ 時刻 t_{i+1} に近似的に得られるように生成する必要がある。最も簡単に接続点 s の加速度 $\ddot{y}_{s,i+1}$ の近似値を振動台で得る方法は、指令信号生成に時刻 t_i の計算値 \ddot{x}_s を用いることである。このとき、加速度計算値は 1 ステップ遅れて振動台で生み出される。また、振動台の動特性もさらに遅れの原因となる。したが

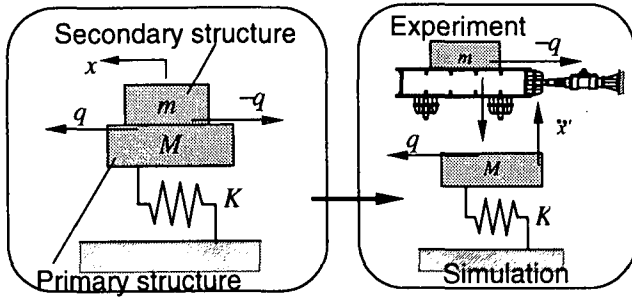


図-2 一自由度系の振動台ハイブリッド実験

って、振動台で得られる加速度は、二つの要因による遅れを合わせた時間だけ前の計算値に対応した値である。

この遅れが実験誤差に与える影響を考える。図-2 に示す構造物(主構造物が質量 M 、ばね定数 K の一自由度系であり、二次構造物が質量 m の剛体)の自由振動を想定する。自由振動を考えるので $\ddot{z}=0$ であり、したがって $\ddot{y}=\ddot{x}$ なので、主構造物の運動方程式は次式となる。

$$M\ddot{x} + Kx = q = -m\ddot{x}' \quad (5)$$

ここで、 \ddot{x}' は振動台で得られる実際の加速度である。自由振動であるから応答を正弦波と仮定し次式を得る。

$$\begin{aligned} x &= A \sin \omega(t - \delta) \\ &= \cos \omega \delta (A \sin \omega t) + \omega \sin \omega \delta (-A \sin \omega t / \omega) \\ &\approx \ddot{x} + \omega^2 \delta \dot{x} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで δ は入力された指令信号に対応する加速度が得られるまでの遅れ時間であり、また、 $\ddot{x} = A \sin \omega t$ ($\omega^2 = K/(M+m)$, $\omega \delta \ll 1$) である。

この式を式(5)に代入すると次の式が得られる。

$$(M+m)\ddot{x} + (m\omega^2 \delta)\dot{x} + Kx = 0 \quad (7)$$

したがって、遅れは付加減衰の形で現れることがわかる。これは、実験誤差の要因となるので、取り除く必要がある。

(2) 指令信号の生成

ここでは、加速度計算値から想定する遅れ時間だけ先の加速度を予測し、この予測値を用いて振動台に与える指令信号を生成する。予測値 \tilde{x} は $k \times \delta$ だけ先に計算されている計算値 $\ddot{x}^{(k)}$ を用いて、次式によって計算する。この式は、 n 次の多項式を仮定し、外挿するものである。

$$\tilde{x} = \sum_{k=0}^n a_k \ddot{x}^{(k)} \quad (8)$$

ここで、 n は予測の次数、 a_k は表-1 に示す予測次数に依存する定数である。ただし、0 次とは予測なしで時刻 t_i の計算値により時刻 t_{i+1} の指令値を計算することを意味する。

表-1 予測計算のための係数

Order n	a_0	a_1	a_2
0	1	-	-
1	2	-1	-
2	3	-3	1

表-2 振動台ハイブリッド実験の安定限界

Prediction order	0th	1st	2nd
Stability criterion	$\mu < 1$	$\mu < \frac{1}{3}$	$\mu < \frac{1}{7}$

この指令信号により振動台が駆動され、加振加速度に対する反力が計測される。これは、 \mathbf{q}_{i+1} の近似値であるから、時刻 t_{i+1} の振動応答が式(2)~(4)によって計算できる。なお、式(8)に用いられる値は式(2)の結果である。この計算手順は、非線形振動解析における収束演算を一度だけ実施することに相当する。

(3) 実験の安定性と誤差

耐震実験にハイブリッド実験を応用することを考え、上述した数値計算の安定性と誤差を評価する。この結果は、別報⁷⁾に詳述しているので、結果のみを簡単に示す。

主構造物が質量 M の一自由度系であり、二次構造物が質量 m の剛体である構造物を考える。上述の数値計算手法と振動台加振を組み合わせたハイブリッド実験は主構造物の質量 M に対する二次構造物の質量 m の比 $\mu (= m/M)$ についての安定限界がある。この限界は表-2 に示すように予測次数に依存する。表からわかるように高次の予測ほど安定限界が小さい。

n 次の予測では数値計算誤差は、計算時間刻み Δt の $(n+1)$ 乗に比例する。したがって、高次の予測の方が正確な計算結果が得られる。 Δt はここでは予測時間に相当する。したがって、ここで考えた数値計算手法は、予測時間が十分小さければ線形加速度法と等価な精度が得られる。

上述のように安定性と誤差は予測次数に関して相反する関係にあるため、予測次数はこれらのバランスを考えて選ぶ必要がある。

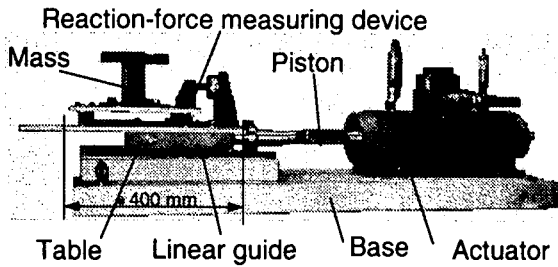


図-3 実験装置

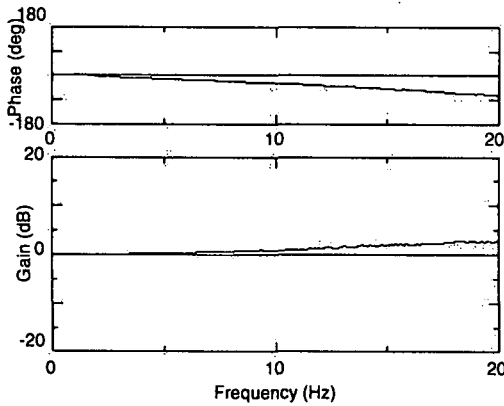


図-4 振動台の動特性

4. 検証実験

(1) 実験の目的と方法

振動台ハイブリッド実験手法の成立性を検証するために実験を行った。実験装置は、図-3 に示すように計算機、振動台、反力計測装置から構成される。この装置で振動台駆動、反力計測、数値計算、指令信号生成の一連の手順を実施し、実験手法の成立性を検討する。加振される二次構造物として、剛体、一自由度系の二つの構造物を考える。

(2) 実験装置

a) 制御計算機

数値計算と指令信号生成のための制御計算機として、DSP (TMS320C30) を用いた。この DSP は、それぞれの時間刻みごとに数値計算を行なうとともに、D/A 変換器より加振装置へ指令信号を出力し、また、A/D 変換器より反力を入力する。この実験では、制御と数値計算には同じ時間刻み(0.5 ms)を用いた。なお、使用した DSP では計算した結果を指令信号として出力するのに一時間刻みが必要であり、これは振動台が入力信号に応じた加速度を発生させる時の遅れと等価な効果をもつ。

b) 振動台

大型構造物の耐震試験に使用するには、振動台は少なくとも数トンの容量を持つ必要がある。しかし、ここでは、実験手法の実現性を示すことが実験目的なので、図-3 に示す小型の振動台を使用した。テーブルをリニアガイドで支持し、加振力が 15 kN、ストロークが ± 100 mm の加振機で駆動する。この振動台の動特性を指令信号から実現加速度の伝達関数の形で図-4 に示す。ゲインが 0 ~ 20 Hz ではほぼ平坦であり、位相がしだいに遅れる様子がわかる。

c) 反力計測装置

反力計測装置は供試体の自重を支えるとともに、供試体の運動により発生する反力を正確に計測する必要がある。そこで、この実験で用いた反力計測装置では、図-3、-5 に示したように、ベースを免震ゴムで支持し、反力を計測するためにロードセルをテーブルとベースの間に配置した。この反力計測装置の機能を次のようにして確認した。3.25 kg の剛体質量をベース(3.75 kg)質量上に固定し、ベースの加速度と計測荷重を比較した。その伝達関数を図-6 に示す。0 Hz から 20 Hz の間では、計測装置の運動質量 7.0 kg が正確に計測されており、また、位相の遅れも微小である。したがって、本装置により振動台ハイブリッド実験に必要な反力計測が可能であることが確認できた。

(3) 二次構造物が剛体の場合の結果

質量とばねからなる主構造物に剛体質量である二次構造物が付加された一自由度系を対象にして実験を行なった。主構造物の質量は 50 kg であり、ばね定数は 17.8 kN/m である。また、二次構造物の質量は 3.75 kg である。全体構造物の固有振動数は 3.75 Hz となる。主構造物の数値モデルに 18.8 Ns/m の減衰係数を付加し、減衰比は 0.01 とした。

振動台を使用して実験を行なう場合、数値計算に伴う遅れとともに、振動台の動特性に起因する遅れも補償する必要がある。この実験では、全体構造物の固有振動数における遅れが図-4 に示す伝達関数から求められる。この遅れ (4.5 ms) と計算機に関する遅れ (1 ms) の和を式(8)に示す予測(二次)により補償する。また、数値計算に用いた反力 q は、次式により計測荷重 q' からベースの加速度 a_B を用いてベース質量 m_B の慣性力の効果を除去した値である。

$$q = q' - m_B a_B \quad (9)$$

基礎ランダム加振に相当する条件で得られた加速度伝達関数を図-7 に示す。本図には比較のため解析解も示した。ノイズの影響による誤差が見られるものの、実験結果(実線)は解析解(破線)とほぼ一致している。さらに、3.5 Hz の正弦波 3 周期で加振した時の時刻歴応答を図-8 に示す。本図にも、解析解を比較のために示した。両者は実験ノイズを除きよく一致している。したがって、本手法により振動応答が正確に評価できることがわかった。

(4) 二次構造物が一自由度系である場合の結果

主構造物と二次構造物がともに一自由度系である条件で実験を行なった。二次構造物は質量が 6.1 kg、ばね定数が 7600 N/m であり、したがって、固有振動数が 5.6 Hz である。他の条件は前節で述べたものと同じである。

基礎ランダム加振に相当する条件で得られた加速度伝達関数を図-9 に示す。本図には、解析解である二自由度系の応答も比較のため示した。ノイズの影響による誤差が見られるが、実験結果(実線)は解析解(破線)とほぼ一致している。さらに、地震波加振した場合の時刻歴応答を図-10 に示す。解析解も比較のために示したが、両者はほぼ一致している。したがって、本手法により振動応答が正確に評価できることがわかった。なお、実験結果では入力加速度が 0 であるにもかかわらず、ある程度の応答が出ている。これは、反力計測値にノイズが含まれており、これが数値モデルの加振力となるためと考えられる。この影響は応答が大きくノイズの影響が小さい範囲では無視できる。

(5) 実大規模耐震実験適用への課題

前節までに示したように、本実験手法の成立性は確認できた。しかし、この手法を大型振動台に適用し実大規模構造物の耐震実験に応用するためには、いくつかの課題があると考えられる。以下に、開発課題をまとめる。

一つは、本実験手法を成立させるために必須である荷重計測をどのようにして実施するか、という課題である。ここで述べた反力計測装置は、図-6 に示したように本検証実験に対しては十分な精度で反力を計測できた。しかし、積層ゴムでは転倒モーメントを支持することが難しいため、本装置を大型構造物用に大型化することは難しい。供試体である二次構造物をテーブルに剛に結合し、かつ、正確に反力を計測できる装置が必要となる。

二つめは、振動台による加速度再現精度である。振動台では、供試体反力などの外乱の影響を受け、指令信号がそのまま加速度として再現されず、結果として計測反力に影響が及ぶ場合がある。したがって、実験精度を確保するには、正確に加速度を実現する手法、例えば、供試体反力の実時間補償⁹⁾などの採用を検討する必要がある。

5. まとめ

主構造物に付加された二次構造物の耐震実験のために、振動台ハイブリッド実験手法とそのための数値計算アルゴリズムを提案した。小型振動台と DSP により実証実験を実施した。これらの結果をまとめると次の通りである。

本手法には主構造物と二次構造物の質量比に依存する安定限界がある。この安定限界は予測回数にも依存し、高次の予測では安定限界が小さくなる。一方、数値計算誤差は高次の予測の方が小さい。したがって、予測回数は安定限界と計算誤差のバランスを考えて決定する必要がある。

手法の実証試験を行い、実験結果が解析解とよく一致することを示し、本手法の実現性を実証できた。

本実験手法を実大規模構造物の耐震実験へ適用するための課題をまとめた。反力計測と、振動台による加速度再現性の精度が重要な課題である。

参考文献

- 1) 伯野元彦ほか: 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, No.171, pp 1-9, 1969.
- 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, No.356, pp 1-10, 1985.
- 3) Takanashi, K. and Nakashima, M.: Japanese activities on on-line testing, *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol.113, No.7, pp 1014-1032, 1987.
- 4) Horiuchi, T. et al.: Development of real-time hybrid experimental system using a shaking table, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 843, 2000.
- 5) Igarashi, A. et al.: Development of substructured shaking table test method, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1775, 2000.
- 6) 小長井一男ほか: 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, pp.203-210, 1998.
- 7) 堀内敏彦ほか: 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), 日本機械学会論文集(C編), Vol.64, No.622, pp.1949-1956, 1998.
- 8) 堂園美礼ほか: 非線形反力の実時間補償による振動台制御, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム, 発表予定, 2001.

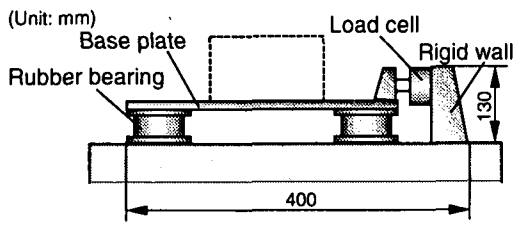


図-5 反力計測装置の概略図

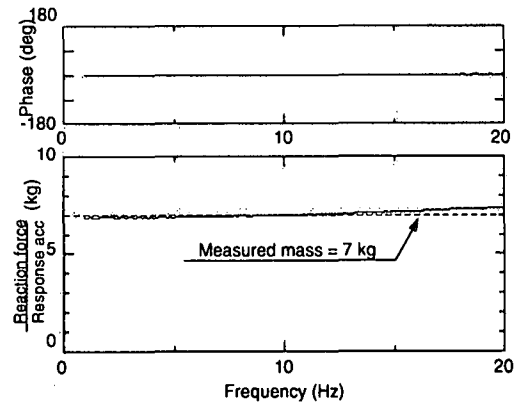


図-6 反力計測装置による反力計測の動特性

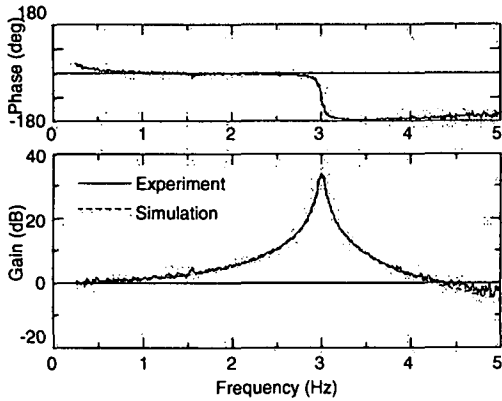


図-7 二次構造物が剛体の場合の加速度伝達関数

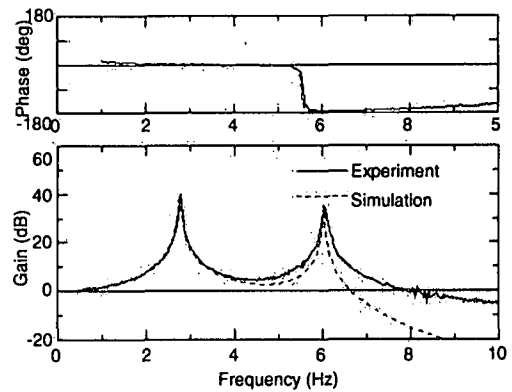
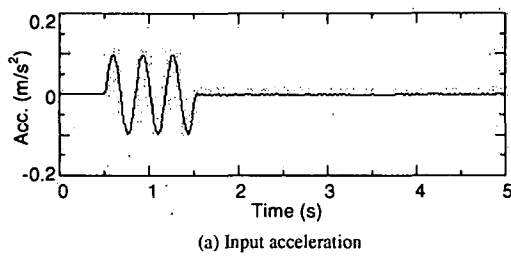
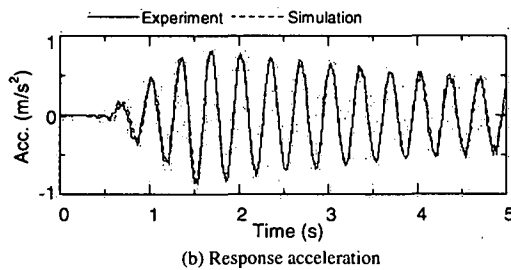


図-9 二次構造物が一自由度系の場合の加速度伝達関数

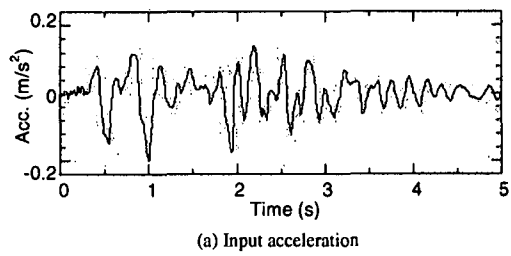


(a) Input acceleration

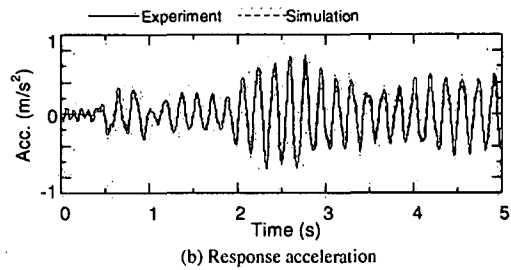


(b) Response acceleration

図-8 二次構造物が剛体の場合の時刻歴応答



(a) Input acceleration



(b) Response acceleration

図-10 二次構造物が一自由度系の場合の時刻歴応答