

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

小林 寛¹・田村 敬一²

¹正会員 工修 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

実時間ハイブリッド振動実験とは、構造物全体のうち、実験により振動挙動を明らかにしたい部分のみを供試体として振動台上にセットする振動台実験とそれ以外の部分は数値モデルで設定する振動応答数値解析とを実時間で結びつけた新しい概念の実験である。本研究では、2次元3自由度の運動が可能なコイルバネ模型を用いて実時間ハイブリッド振動実験を行い、全体系振動実験結果との整合性を検証するとともに、実時間ハイブリッド振動実験の有効性を検証した。

Key Words: real-time hybrid vibration experiment, shaking table test, actuator delay compensation, coil spring

1. はじめに

本研究で用いているハイブリッド振動実験とは、デジタル計算機による振動応答数値解析と振動台による振動実験を結びつけた新しい概念の実験である。一般にハイブリッド実験とは、振動応答数値解析とアクチュエータを用いた加振実験を結びつけたものであり、必ずしも実時間実験ではない。すなわち、従来のハイブリッド実験は、装置の制約(計算機の能力、アクチュエータの遅れ補償等)上、実験の時間軸を実時間軸よりも伸長した準動的実験が大部分であり、また、振動台を用いたハイブリッド振動実験の事例は、ほとんどない。著者らは、一次元でせん断振動する積層ゴムを用いた2層系模型を対象として、全体模型の振動台実験と下層部の積層ゴム部のみを実模型として用い、その上の2層を数値モデルとした実時間ハイブリッド振動実験の比較について報告している¹⁾。本研究では、並進と回転の自由度を有するコイルバネを用いた供試体を対象に実時間ハイブリッド振動実験を行い、全体系振動実験との整合性を検証するとともに、実時間ハイブリッド振動実験の有効性の確認を行った。

2. ハイブリッド実験の概要

実時間ハイブリッド振動実験では、図-1に示すように、構造物全体のうち、実験により振動挙動を明らかにしたい部分のみを供試体として振動台上にセッ

トし、それ以外の部分は振動応答数値解析モデルとして設定する。振動応答数値解析モデルは、構造条件(質量、減衰、剛性マトリックス)、振動台からの外力(振動台の加速度から算出)及び供試体の反力より構成され、振動実験における振動台からの外力及び供試体の反力を取り込み、次ステップの供試体の変位を計算する。具体的には、振動台を加振することにより、振動台の加速度及び数値モデル化を行った構造物の構造条件(質量、減衰、剛性マトリックス)から供試体に

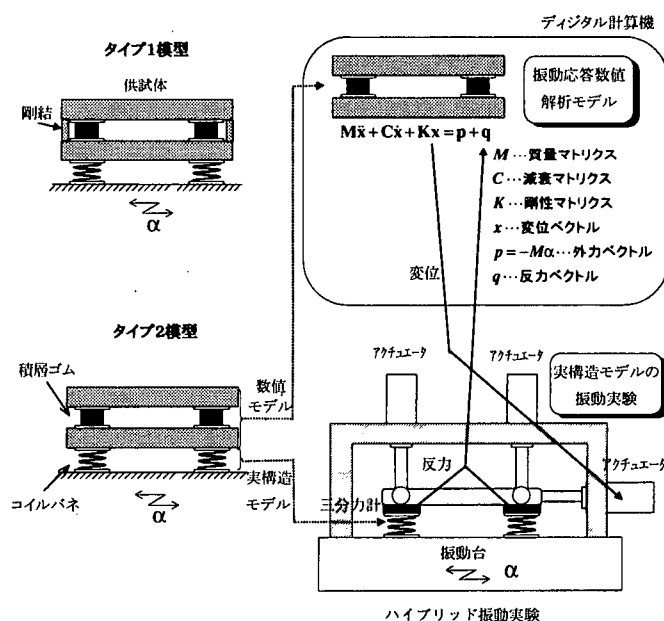


図-1 ハイブリッド振動実験の概要

与える変位を計算し、アクチュエータにより供試体に変位を作用させる。そこで、変位作用時に計測される供試体の反力を数値解析の中に取り込み、次ステップの変位を求め、アクチュエータで変位を作用させる。この処理を繰り返し行うことによって、地震時の構造物の応答を正確に再現することができる。

振動応答数値解析に用いた数値モデルの質量、減衰、剛性マトリックスを M 、 C 、 K 、相対変位ベクトルを x 、外力ベクトルを p 、数値モデルと実構造モデルの境界に発生する反力のベクトルを q とすると、数値モデルで用いる運動方程式は次式のように表せる。

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

上記式(1)に基づき、ハイブリッド振動実験により計測された反力ベクトル q と、与えられた外力ベクトル p から中央差分法を用いて微小時間 Δt 後の振動応答 (変位ベクトル x) を計算する。

3. 実時間ハイブリッド振動実験の制御の特徴

本実験で用いた実時間ハイブリッド振動実験の制御に関する特徴は以下のとおりである。

(1) 振動応答計算 (中央差分法)

本実験では中央差分法を用いて、微小時間内に次ステップの変位を計算している。なお、本実験では、三分力計で計測された反力の入力からアクチュエータへの次ステップの変位信号出力までの時間間隔 Δt を 2.08ms^2)としている。

(2) アクチュエータの遅れ補償

実時間ハイブリッド実験では、加振機の応答遅れがあると、数値計算の中で計算誤差が発生し実験を発散させるような悪影響を及ぼす。しかし、油圧式アクチュエータでは、油圧の性質上、指令値を出した時刻に対して指令した変位をアクチュエータが実現する時刻は遅れることになる。そこで本研究では、アクチュエータの遅れ補償³⁾を行っている。

(3) 2次元3自由度制御システム

従来のハイブリッド実験では、1軸制御がほとんどであった。それに対して、本研究では、2次元3自由度 (水平: x 軸、鉛直: z 軸、回転: y 軸回りの回転 θ) 加振制御システムを採用した⁴⁾。まず、図-2に示すように、供試体より計測した反力 $Q(q_x, q_z, q_\theta)$ から振動応答解析を行い、加振伝達プレート中央位置における次ステップの変位 $X(x, z, \theta)$ を計算する。次に、この変位から図-2に示す式より、各アクチュエータに指令する変位指令値 l_1 、 l_2 、 l_3 を算出し、2次元3自由度の動きを再現する。

(3) 連動実験

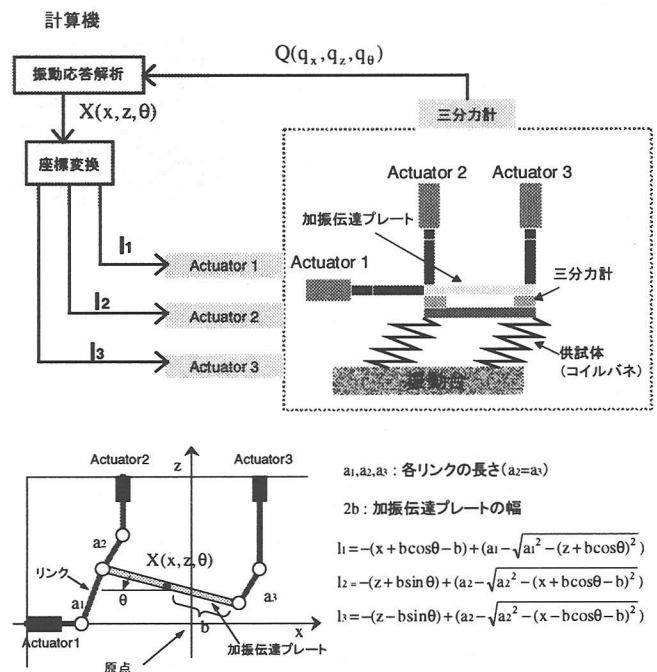


図-2 2次元3自由度制御システムの概要

ハイブリッド実験と振動台実験を連動させる上で、従来は、振動台の実測加速度を直接ハイブリッド実験の数値計算部に挿入して実験を行っていたが、振動台上に設置されたハイブリッド実験装置の振動のため振動台が励振され、実験が発散するケースが生じていた。そこで、本実験では、振動台に入力する指令値を数値計算に直接挿入し、振動台が励振を起こしても数値計算に入力される振動台加速度は影響を受けず、発散現象を起こさないようにした。

(4) 慣性力補正

供試体をハイブリッド実験装置に取り付ける際、供試体と荷重を検出する三分力計の間に取り付け治具が必要になる。しかし、本実験では、三分力計で検出した荷重を数値モデルに取り込むことより、三分力計で検出される荷重には、治具の質量に起因する慣性力が含まれる。このため、実験対象物ではない治具の慣性力による影響を取り除く必要がある。三分力計で検出される荷重を f_{sx} 、 f_{sz} 、三分力計直下に取り付けた加速度計で計測される加速度を A_{sx} 、 A_{sz} 、治具の質量を M とすると、補正した荷重 f'_{sx} 、 f'_{sz} は次式で求められる。

$$\begin{aligned} f'_{sx} &= f_{sx} - M \times A_{sx} \\ f'_{sz} &= f_{sz} - M \times A_{sz} \end{aligned} \quad \dots(2)$$

4. コイルバネを用いた実時間ハイブリッド振動実験

2層のコンクリートスラブを接続治具で剛結し、その下にコイルバネを設置した1質点3自由度系模型（タイプ1）と2層のコンクリートスラブ間に積層ゴムをはさみ、下層のスラブの下にコイルバネを設置した2質点4自由度模型（タイプ2）を実験対象構造物とした。

まず、実験供試体の固有振動数を求めるため、2層模型全体を振動台に設置し、振動台により水平方向及び上下方向にそれぞれランダム加振を行った。これによると、タイプ1模型の固有振動数は、水平方向1.32Hz、上下方向2.10Hz、タイプ2模型の固有振動数は水平方向1.17Hz、上下方向2.05Hzとなった。実験の入力波としては水平、鉛直方向それぞれの共振正弦波、及び実際に観測された地震波の振幅を調整したものを選定した。表-1に実験ケースの一覧を示す。

本研究では、実時間ハイブリッド振動実験の有効性を検証するため、2種類の実験を行った。まず、模型全体の振動挙動を明らかにするため、タイプ1模型及びタイプ2模型それぞれの模型全体に対して振動台実験（全体系振動実験）を行った。次に、全体系振動実験との整合性を検証するため、図-3に示すように、コイルバネのみを供試体として振動台に設置し、残りの部分は数値モデルに置き換え、実時間ハイブリッド振動実験を行った。

表-1 実験ケース

	入力波形	入力レベル
ケース1	水平方向正弦波 5 サイクル 1.32Hz (1)、1.17Hz (2)	40gal (1) 30gal (2)
ケース2	鉛直方向正弦波 5 サイクル 1.32Hz (1)、2.05Hz (2)	50gal (1) 40gal (2)
ケース3	神戸海洋気象台観測記録 (NS 成分+UD 成分)	150gal (1) 100gal (2)
ケース4	ポートアイランド観測記録 (NS 成分+UD 成分)	120gal (1) 100gal (2)
ケース5	エルセントロ観測記録 (NS 成分+UD 成分)	120gal (1) 100gal (2)

(注) 図中の(1)、(2)はそれぞれタイプ1模型、

タイプ2模型の場合を示す。

5. ハイブリッド振動実験における数値モデル

ハイブリッド振動実験における数値モデルは式(1)に示すような運動方程式から成り立っており、具体的には対象構造物の質量マトリックス、減衰マトリックス及び剛性マトリックスを決定する必要がある。まず、質量マトリックスについては、模型の設計図より構造物の質量 m 、重心高さ H 、加振点回りの慣性モーメント $J (=mH^2+I, I$ は重心回りの慣性モーメント)を測定し、作成した。次に、減衰マトリックスについては、タイプ1模型では数値モデル部（スラブ部）の減衰が極めて小さいと考えら

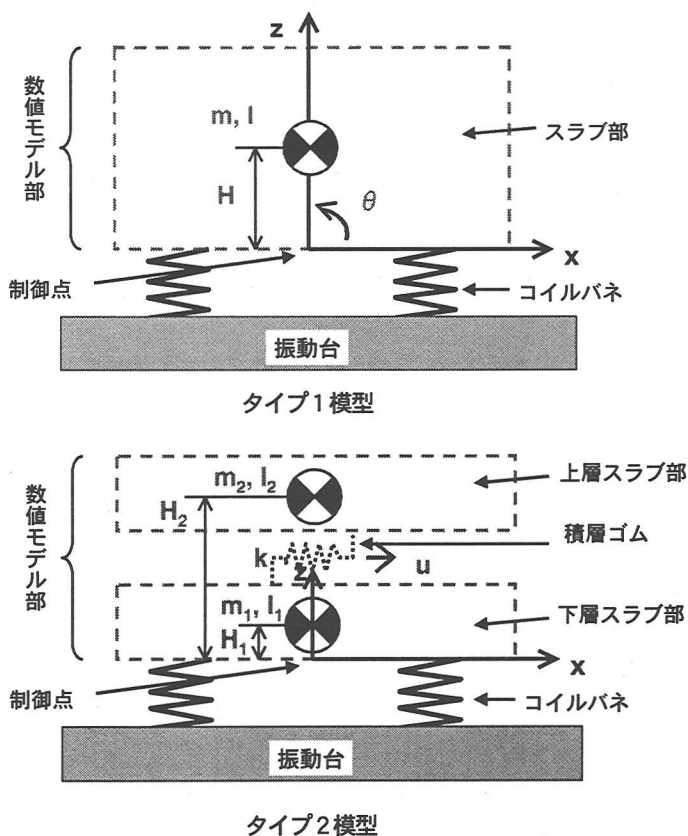


図-3 数値モデル

れることより0とした。またタイプ2模型では、積層ゴム部の減衰を自由減衰振動から算出し、減衰マトリックスを作成した。最後に、剛性マトリックスについては、質量マトリックスと同様に、数値モデル部の構造物の質量 m 、重心高さ H から作成した。タイプ2模型では積層ゴムの剛性を加振試験¹⁾の荷重-変位の関係より求めた。

6. 実験結果

結果の一例として、タイプ1模型及びタイプ2模型のそれぞれについて、正弦波水平、鉛直及び兵庫県南部地震ポートアイランド観測記録を入力した場合の全体系振動実験と実時間ハイブリッド振動実験の加速度時刻歴の比較を図-4に示す。ここでタイプ1模型についてはスラブ部の、タイプ2模型については下層スラブ部の加速度時刻歴を比較した。正弦波入力に関しては、全体系振動実験と実時間ハイブリッド振動実験を比較すると振幅及び位相ともよく一致している。また、地震波入力については、正弦波入力に比べ、多少応答波形が異なっているものの、位相及び振幅の定性的な傾向は概ね一致している。

若干のずれは、以下の理由によるものと考えられる。

(1) 三分力計の検出誤差：本実験では、バネ部の剛性が小さいため、三分力計の定格測定荷重に対して数%オーダーの荷重しか検出されず、荷重検出に誤差が生じたと考え

えられる。

(2)拘束条件の違い:全体系振動実験では3次元6自由度の振動が可能なのに対し、ハイブリッド実験では、2次元3自由度(x 軸、 z 軸、 y 軸回りの回転)の動きでしか振動できず、 y 軸、 x 軸及び z 軸回りの回転運動は拘束される。例えば、全体系振動実験では z 軸回りの回転挙動が微小ながら生じており、実験に影響を及ぼしたことが考えられる。

7. 結論

本研究では、自由度の高いコイルバネ及び積層ゴムを用いて、実時間ハイブリッド振動実験を行い、全体系振動実験との整合性を検証した。その結果、両者はよく一致しており、実時間ハイブリッド振動実験の有効性が確

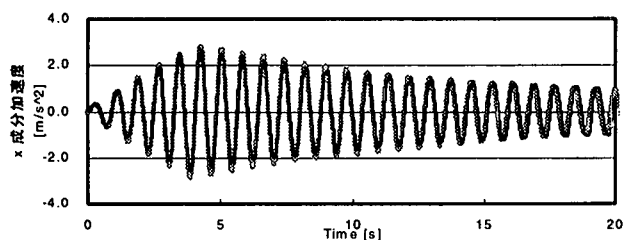
認できた。

参考文献 1) 小林、田村, 2層系模型を対象とした実時間ハイブリッド振動実験, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998.11

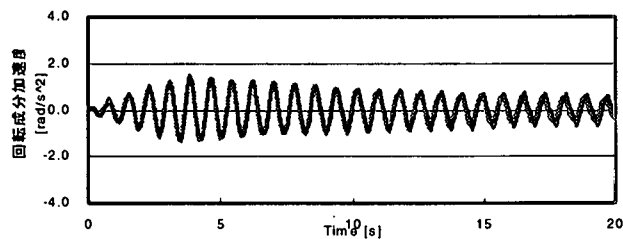
2) 梅北ほか, 平面3自由度加振型実時間ハイブリッド耐震試験装置向けスーパーリアルタイムコントローラ(SRC)用C言語ライブラリの開発, 第40回自動制御連合講演会, 1997

3) 堀内ほか, 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, 補償方法と1自由度系の実験への適用), 日本機械学会論文集(C編), 1995.4

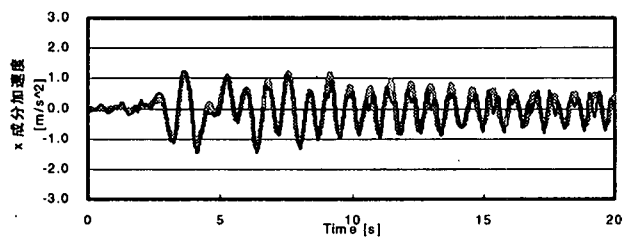
4) 桃井ほか, 多自由度加振型実時間ハイブリッド耐震試験装置の開発(供試体シミュレータによる実時間実験の検証), 第5回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 1997.11



(a) ケース 1

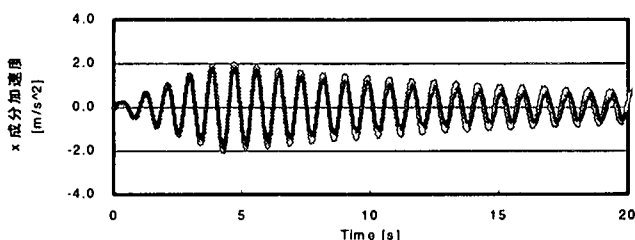


(b) ケース 2

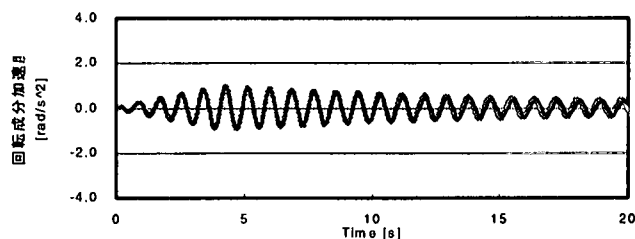


(c) ケース 3

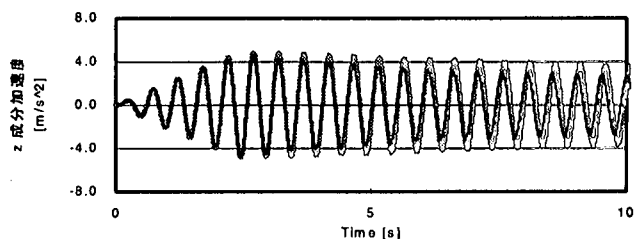
——— 実時間ハイブリッド振動実験



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

——— 実時間ハイブリッド振動実験

図-4 スラブ部の加速度時刻歴の比較 (タイプ1 模型)

図-5 下層スラブ部の加速度時刻歴の比較 (タイプ2 模型)