

## ◆ 報文 ◆

## 振動台を用いた実時間ハイブリッド振動実験に関する検討

小林 寛\* 田村敬一\*\*

## 1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震以降、従来の耐震設計では想定していなかった非常に強い地震動の構造物への影響を調べるために振動台、遠心力載荷装置等の大型実験装置が計画、建設されるようになった。建設省土木研究所では、平成9年に水平方向最大土2Gまで加振可能である三次元大型振動台を建設した。このように加振能力が大きい振動実験施設が整備されることにより、兵庫県南部地震で生じたような非常に強い地震動に対する構造物の耐震実験が可能になった。しかし、土木構造物は一般に大規模であるため、その全体を模型化して振動台上で振動実験を行う場合には、装置の制約上模型の縮尺が小さくなり、実物の細部まで精度よく再現することは困難である。

構造物全体のうち振動挙動を明らかにしたい部分のみを模型化して実験を行う手法としては、図-1に示すようなハイブリッド実験が提案されている（例えば<sup>1)</sup>）。本稿では、振動台を用いた最新の実験技術である実時間ハイブリッド振動実験の概念及び理論を紹介する。また、実時間ハイブリッド振動実験の制御技術を確立し、有効性を検証するために行った実験の概要及び結果について述べる。

## 2. 実時間ハイブリッド振動実験とは

地震工学の分野でハイブリッド実験とは、アク

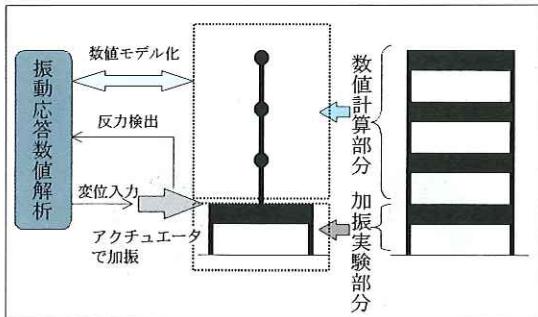


図-1 ハイブリッド実験のイメージ

Study of Real-Time Hybrid Vibration Experiment Using a Shaking Table

チュエータ（加振機）を用いた加振実験と振動応答数値解析を結びつけたものであり、振動台を用いたものは少なく、また、必ずしも実時間実験ではない。すなわち、図-2の分類Aに示されるように、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、実験の時間軸を実際の時間軸よりも伸長した実験が大部分であり、また、振動台を用いたハイブリッド実験の事例は、ほとんどない。それに対して、ここで紹介するハイブリッド振動実験装置を用いて行う実験は、図-2の分類Cに属するもので実時間かつ振動台を用いた極めて先導的なものであり、実時間ハイブリッド振動実験と呼んでいる。

実時間ハイブリッド振動実験の特長は、振動挙動を明らかにする必要がある部分のみを模型化すればよいため、大縮尺で精度の良い模型を作成することが可能になる。また、模型の作成に要するコストの低減を図ることが可能である。例えば、橋梁-地盤系の振動実験を行う場合には、振動挙動が複雑な橋脚基礎及び地盤のみを模型化し、橋脚及び上部構造については数値解析により振動挙動を再現し、両者を結びつけることが可能になる。さらに、振動台で供試体を加振することにより、供試体の慣性力等を考慮することができるとともに、液状化の発生等、振動台を用いない

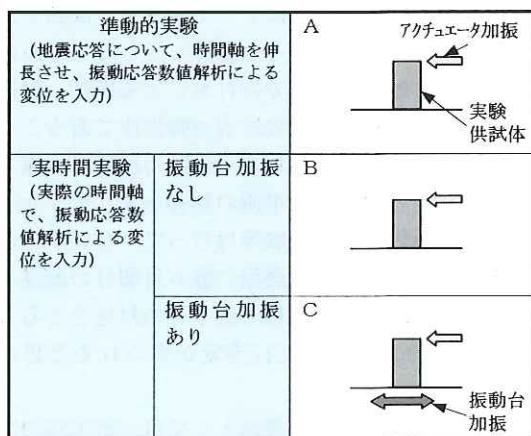


図-2 準動的ハイブリッド実験(A)と実時間ハイブリッド振動実験(C)の比較

従来のハイブリッド実験では考慮することができなかった現象の再現が可能である。なお、従来のハイブリッド実験よりも実験時間が短縮できるという(例えば、従来の実験では、時間軸を50倍に伸長する場合、30秒加振の実験に25分を要する。)メリットもある。

### 3. 実時間ハイブリッド振動実験の概要

実時間ハイブリッド振動実験では、図-3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三分力計により計測された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)から供試体に与える変位を計算する。次に、計算された変位をアクチュエータにより供試体に作用させる。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。

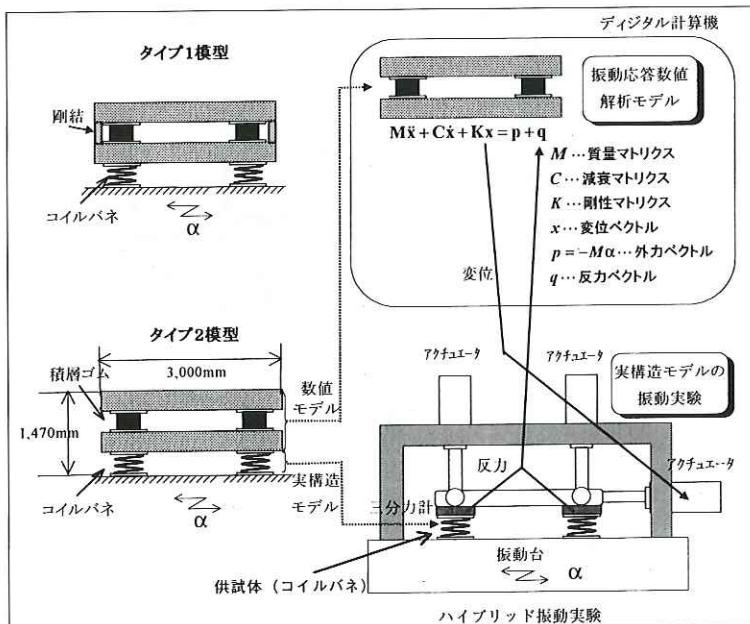


図-3 実時間ハイブリッド振動実験の概要

振動応答数値解析に用いる数値モデルの質量、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される。

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

振動応答数値解析では式(1)に基づいて、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  $\Delta t$  後の振動応答(変位ベクトル  $x$ )を計算する。

### 4. 実時間ハイブリッド振動実験の制御

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、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次ステップの変位信号を出力するまでの時間間隔  $\Delta t$  を  $2.08\text{ms}^2$  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振動実験では、アクチュエータ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され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。つまり、振動応答数値解析によつて求めた実現すべき変位(計算変位  $x$ )とアクチュエータにより実現される変位(実現変位  $x''$ )が一致しない。そこで、図-4に示すように、過去の計算変位からアクチュエータの遅れ時間分だけ先の変位(予測変位  $x'$ )を予測し、予測変位を指令値として出力する。その予測式は図-5に示すように、応答遅れ時間  $\delta t$  刻みの過去の計算変位から時間の  $n$  次関数を求め、外挿する

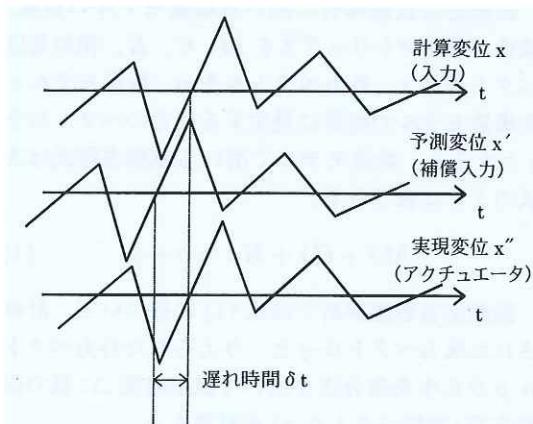


図-4 遅れ補償における変位予測

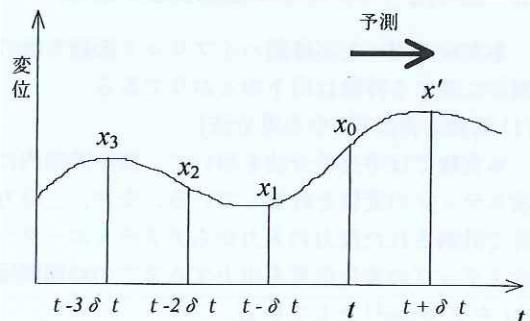


図-5 予測変位の計算方法

式であり、 $\delta t$  間隔の  $n+1$  個の既知のデータ点を通るような  $n$  次関数を定め、 $\delta t$  先の値を予測する。次に、実現変位  $x''$  と計算変位  $x$  を比較し、随時その値が等しくなるように予測変位  $x'$  を修正する<sup>3)</sup>。本実験では変位予測に要する計算時間と予測精度を勘案し、式(2)に示す三次関数を用いている。

$$x' = \sum_{j=0}^3 a_j x_j \quad (2)$$

ただし、係数  $a_0 = 4$ ,  $a_1 = -6$ ,  $a_2 = 4$ ,  $a_3 = -1$

### (3) 二次元三自由度制御システム

従来のハイブリッド実験では、一軸制御がほとんどであった。それに対して、本実験では、二次元三自由度（水平： $x$  軸、鉛直： $z$  軸、回転： $y$  軸回りの回転  $\theta$ ）加振制御システムを採用した<sup>4)</sup>。まず、図-6 に示すように、供試体より計測した反力  $Q(q_x, q_z, q_\theta)$  から振動応答数値解析

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-6 に示す式により、各アクチュエータに対する変位指令値  $l_1, l_2, l_3$  を算出し、二次元三自由度の運動を再現する。

### (4) 連動実験

実時間ハイブリッド振動実験では、従来のハイブリッド実験と振動台加振による振動台実験を連動させる必要がある。ハイブリッド実験と振動台実験を連動させる上で、当初は、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、実験が発散する場合が生じた。そこで、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。

### (5) 惯性力補正

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

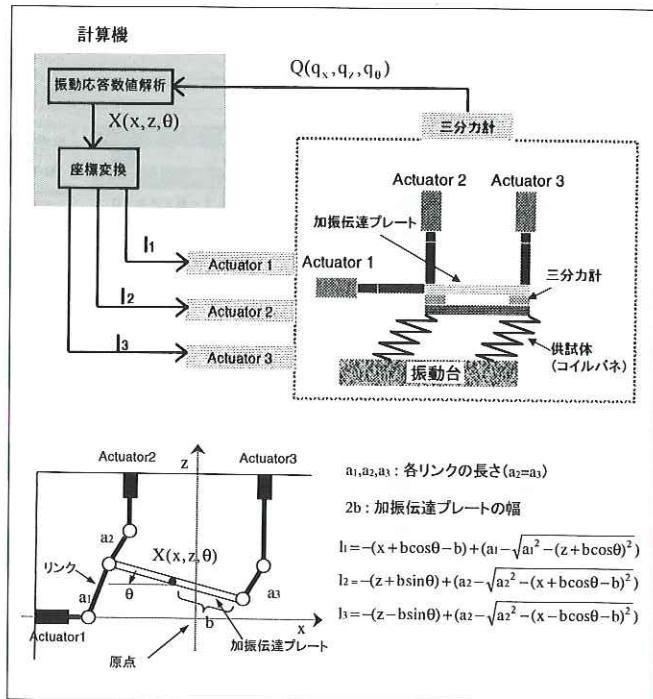


図-6 遅れ補償における変位予測

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。

$$\begin{aligned} f'_{sx} &= f_{sx} - M \times A_{sx} \\ f'_{sz} &= f_{sz} - M \times A_{sz} \end{aligned} \quad (3)$$

## 5. 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模型）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模型）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固有振動数に合致する正弦波（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。

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-7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、残りの部分は振動応答数値解析モデルに置き換え、実時間ハイブリッド振動実験を行った。

## 6. 実時間ハイブリッド振動実験における振動応答数値解析モデル

実時間ハイブリッド振動実験における振動応答数値解析モデルは式(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、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) を求め、質量マトリックスを作成した。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<sup>5)</sup>の荷重-変位関係より求めた。

## 7. 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-8, 9 に示す。ここで、タイプ1模型についてはスラブ部の、タ

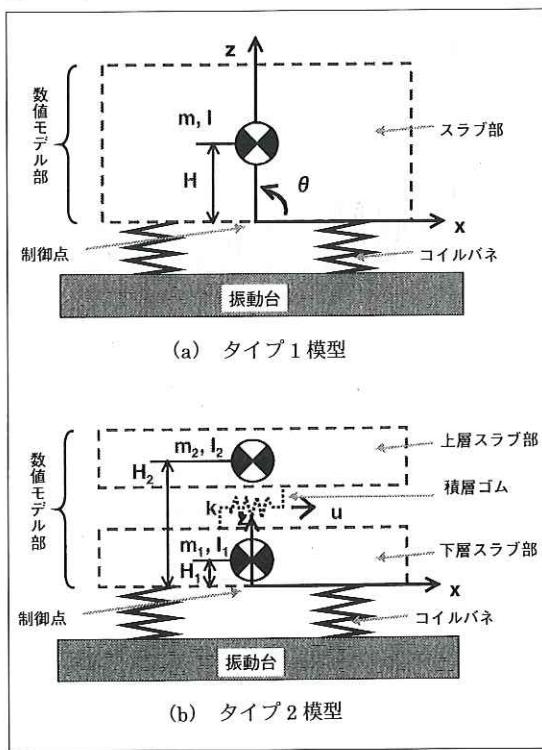


図-7 実験対象物

イブ 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、検出される荷重は三分力計の定格測定荷重に対して数%オーダーにすぎず、荷重検出に誤差が生じたと考えられる。

(2) 拘束条件の違い：全体系振動実験では 3 次元

6 自由度の運動が可能なのに対し、実時間ハイブリッド振動実験では、運動は 2 次元 3 自由度 ( $x$  軸  $z$  軸、 $y$  軸回りの回転) に限定され、 $y$  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。

## 8. 結論

本実験では、コイルバネ及び積層ゴムで支持された 1 質点 3 自由度系模型及 2 質点 4 自由度系模型を対象として、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

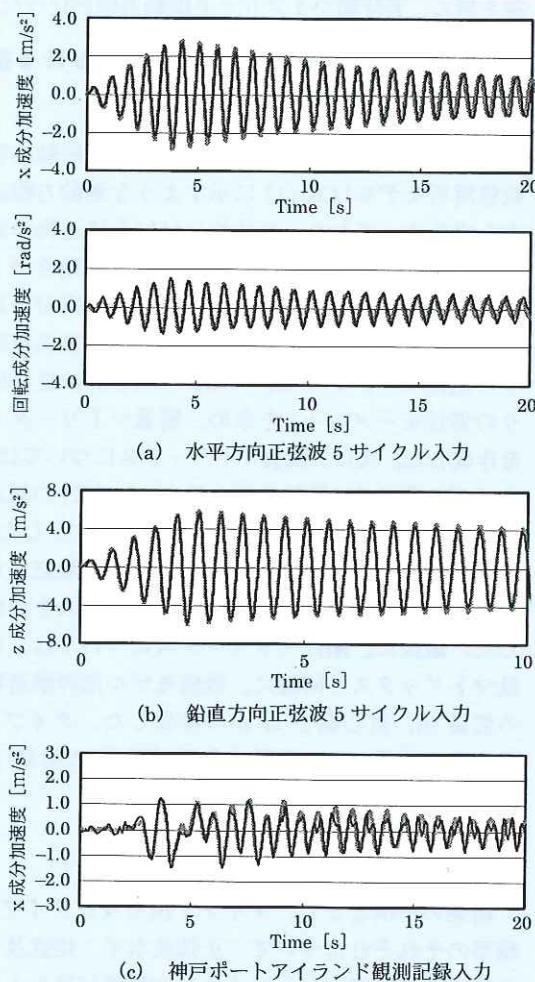


図-8 スラブ部の加速度時刻歴の比較 (タイプ 1 模型)

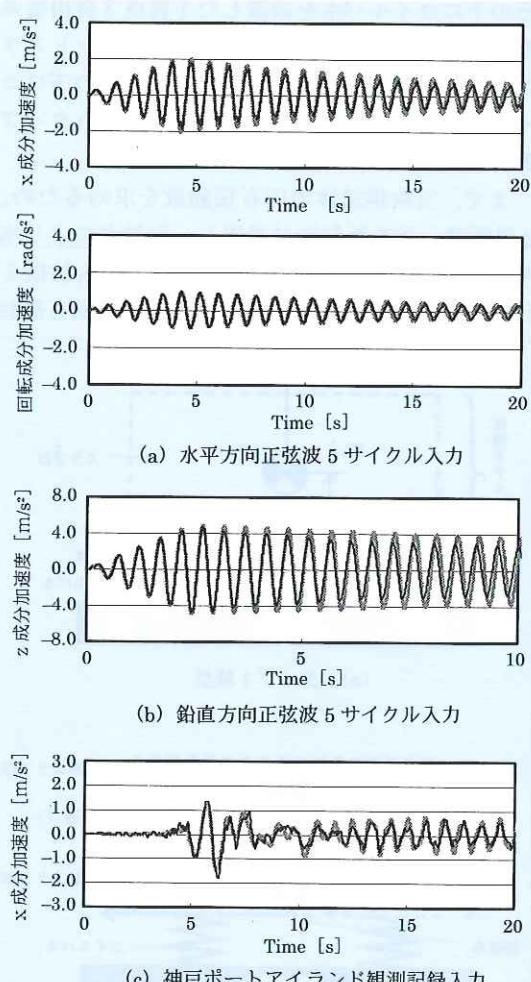


図-9 下層スラブ部の加速度時刻歴の比較 (タイプ 2 模型)

リッド振動実験の有効性が確認された。

## 9. 将来の利用例

実時間ハイブリッド振動実験の長所は、数値解析による振動挙動の再現が困難な部分を実験供試体として取り出し、他の部分は振動応答数値解析モデルとして実験を行えることから、土木分野においては地盤・橋梁系全体を想定した地盤・基礎系の実験(液状化を含む)、橋梁全体の振動挙動を考慮した支承部分のみの実験、構造系の一部に地震時挙動が未知である新材料を使用した場合に、その部分のみを取り出し、構造物系全体の挙動を再現する実験等への適用が期待される。

## 参考文献

- 1) 伯野元彦、四俵正俊、原司：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, 1969.11
- 2) 梅北和弘、亀谷雅嗣、桃井康行、堀内敏彦、井上雅彦、菅野正治、今野隆雄、多田野有司、山岸渡：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, pp.393-396, 1997.11
- 3) 堀内敏彦、中川正紀、菅野正治、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)61巻 584号, pp.64-72, 1995.4
- 4) 桃井康行、堀内敏彦、梅北和弘、井上雅彦、菅野正治：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, pp.415-418, 1997.11
- 5) 小林寛、田村敬一：2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, pp.2189-2194, 1998.11

小林 寛\*



建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
振動研究室研究員  
Hiroshi KOBAYASHI

田村敬一\*\*



同 振動研究室長、工博  
Dr.Keichi TAMURA