

第I部門 振動台アクチュエータ同時制御型ハイブリッド実験手法の検討

京都大学工学研究科 学生員 ○ 菊池 圭記
 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃
 京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和

1 概要 構造要素の実験とコンピュータによる構造全体系の数値応答解析を実時間で連動して実行する実時間ハイブリッド実験手法を、より複雑な構造物に適用するため、振動台とアクチュエータを同時に用いる実時間ハイブリッド実験手法を提案する。免震液体貯蔵タンクを対象に実験システムを構築するとともに、実験装置の載荷位相遅れが実験システムに与える影響を検討することで、その実現に必要な条件を安定性解析により明らかにした。得られた実時間ハイブリッド実験の結果がシミュレーションとの比較により妥当なものであることを実証する。

2 実時間ハイブリッド実験手法 対象構造物は減衰装置として粘性ダンパーを用いた免震液体貯蔵タンク（図1）とし、タンク内の液体を振動台実験部分、ダンパーをアクチュエータ実験部分とした（図2）。残りの部分はタンク及びタンク支持底板部の弾性変形は無視できるものと仮定すると、線形1自由度系モデルで表される。 i 番目の計算ステップにおいて測定される液体のベースシアーを $f_{t,i}$ 、ダンパーの減衰力を $f_{d,i}$ 、さらに地表加速度を $\ddot{x}_{g,i}$ とすると、この時成立する運動方程式は次式で表される。

$$m_{1,base}\ddot{x}_{1,i} + c_1\dot{x}_{1,i} + k_1x_{1,i} = -m_{1,base}\ddot{x}_{g,i} + f_{t,i} + f_{d,i} \quad (1)$$

この運動方程式の解として得られた絶対変位を振動台へ、相対変位をアクチュエータへそれぞれ次計算ステップの制御信号として与え、次ステップで測定値を得る。こうして計算ステップを実時間で実行し、供試体の時間依存性の挙動を考慮した構造物全体の応答を得ることができる。この計算は浮動小数点 DSP を用いてステップ幅 1ms で実行する。

3 実時間ハイブリッド実験システムの安定性 実時間ハイブリッド実験手法における問題点として、実験装置の動特性による位相遅れがある。実験システムにはフィードバック系が形成されており、この中に位相遅れがあるとシステムに負の減衰が発生し、実験精度の悪化や、応答の発散などが生じる。

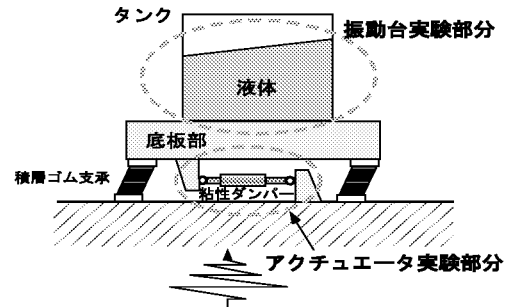


図1 免震液体貯蔵タンク

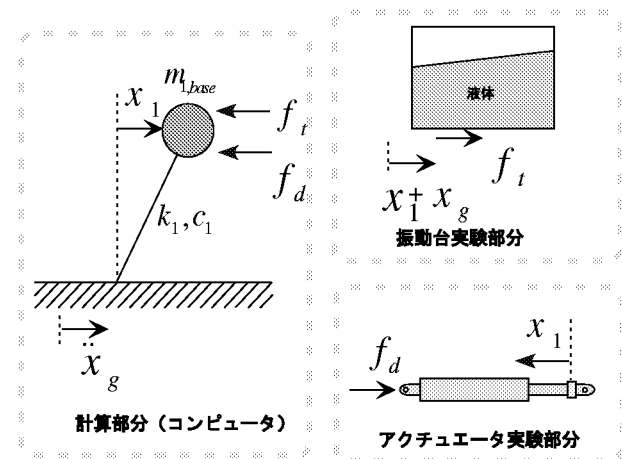


図2 実時間ハイブリッド実験の概念図

そこで、実験システムの信頼性を判定するために、構造物を線形モデル化したものに実験装置の位相遅れを組み込み、ハイブリッド実験システムの応答に関する伝達関数を求め、その特性を検討した。液体のスロッシングに注目して、図3のように全体構造系を線形2自由度系にモデル化した。これより、実験システムの地盤加速度に対する計算部分相対加速度応答の伝達関数は次式で表される。

$$G_{sys} = \frac{G_C \{G_{shk}(m_2 G_t + m_{1liq}) + m_{1base}\}}{-1 - G_C \{G_d G_{act} + G_{shk}(m_2 G_t + m_{1liq})\}} \quad (2)$$

ここに、 G_C ：計算部分の外力に対する相対加速度応答の伝達関数、 G_t ：スロッシング自由水モデルの絶対加速度に対する絶対加速度応答の伝達関数、 G_d ：ダンパーの相対加速度に対する減衰力応答の伝達関数、 G_{shk} , G_{act} ：振動台、アクチュエータの位相遅れ要

素である。この伝達関数の極を調べることで、システムの安定性が判定できる。

図4に計算部分質量を478.5kg、固有周期を1.25sec、減衰を10%とした場合に、振動台とアクチュエータの加振遅れ時間を変化させたときのシステムの安定領域（影付き）を示す。これより、どちらも位相遅れが大きい範囲では不安定となることがわかる。また、位相遅れが0.1sec以内の範囲ではアクチュエータに比べ振動台の加振遅れが実験システムの安定性に大きく影響する。このことから、このような実験システムの実現には、特に振動台の位相補償が必要であることが分かる。

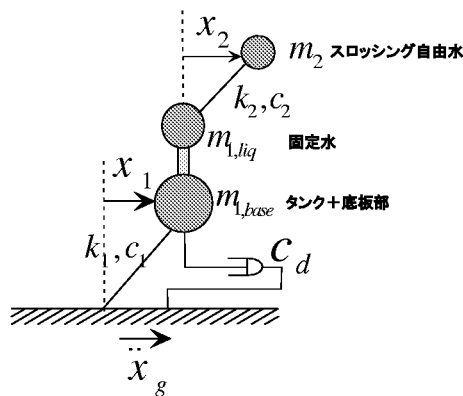


図3 構造物の線形簡略モデル

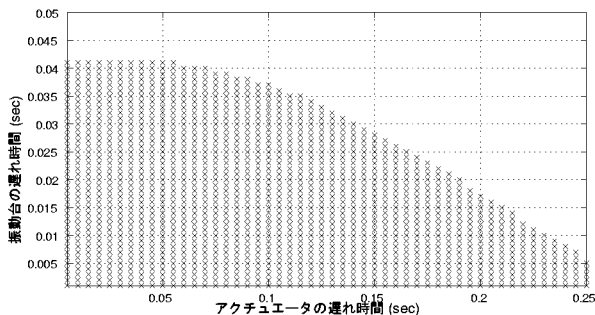


図4 安定領域

4 デジタルフィルタを用いた動特性の補償 本研究では実験装置の加振遅れを補償するために、動特性補償用の3次FIRフィルタとノイズ除去用3次IIRフィルタをカスケードしたデジタルフィルタを計算・制御系に組み込んだ^[1]。これにより、0.1～5Hzの周波数範囲で良好な動特性補償が行われている。図5,6に補償前後の実験装置位相特性を示す。

5 実時間ハイブリッド実験 前述の安定性解析で用いたモデルを用いて、実時間ハイブリッド実験を行った。水槽供試体には直径58.8cm、水深20cm、スロッシング周期0.875secのものを用い、オイルダンパー供試体で得られる減衰力は係数を乗じて計算部分に取り込んだ。そして、液体挙動が線形近似できる範囲内

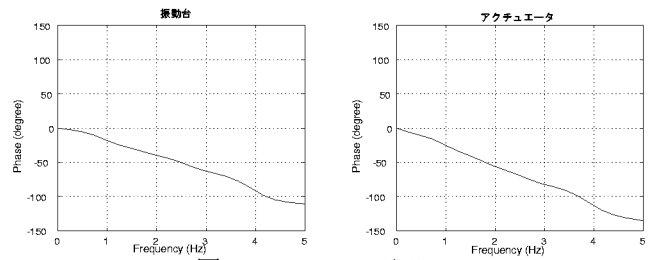


図5 位相特性（補償前）

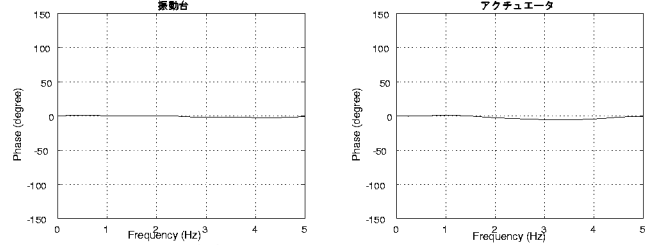


図6 位相特性（補償前）

で実験を行った。図7にシミュレーションと比較して示す。両者は概ね一致しており、実験結果の信頼性が確保されていることが示されている。

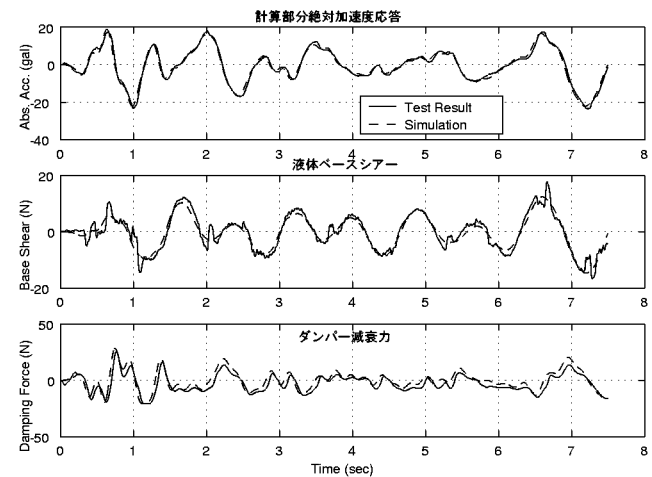


図7 実験結果と線形シミュレーションの比較

6 結論 本研究では、振動台及びアクチュエータの2種類の実験装置を併用した実時間ハイブリッド実験システムを提案し、実験装置の位相遅れがシステムに与える影響を伝達関数を用いて検討するとともに、実験結果をシミュレーションと比較することで実験の信頼性を確認した。本研究手法は、さらに大型の実験装置を用いた場合にも適用できると考えられ、多様な構造物への応用が実現すれば有用性が高い。

参考文献

- [1] 五十嵐晃・家村浩和・田中創、サブストラクチャーハイブリッド振動台実験システムの開発と振動制御デバイスの性能検証実験への適用、構造工学論文集 Vol1.49A、pp.281-288、2003