

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実証

東海旅客鉄道 正会員 ○ 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. はじめに

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の拡張として、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とともに、その特性を検討する。具体的な適用例として、免震液体貯蔵タンクを対象とした実験システムを構築し、得られた実験結果について述べる。

2. 実時間ハイブリッド実験システムの構築

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。タンク及び質量 $m_{1,base}$ のタンク支持底板部の弾性変形は無視できるものとし、積層ゴム支承の剛性 k_1 、減衰係数 c_1 の線形挙動を示すと仮定すると、数値モデル化される計算部分構造は1自由度系モデルで表される（図2）。 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、次ステップでの測定値を得る。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

本実験手法に関する検討項目として、実験装置の載荷位相遅れの問題が挙げられる。この実験システムには一種のフィードバック系が形成されており、それを構成する要素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、実験の信頼性が損なわれる原因となる。実験システムの信頼性を判定するための指標として、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、安定性限界を検討した。液体のスロッシングに注目すると、図3のように全体構造系を線形2自由度系にモデル化できる。このように、線形モデル化された構造物に実験装置の位相遅れ特性を組み込み、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を算出する。これを用いて、図4のような実験装置の位相遅れ時間に対する安定領域（影付き）が得られた。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

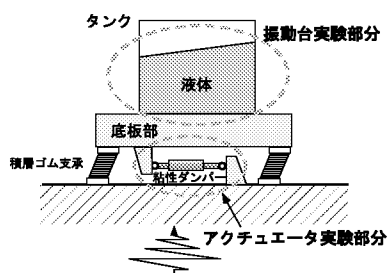


図1: 免震液体貯蔵タンク

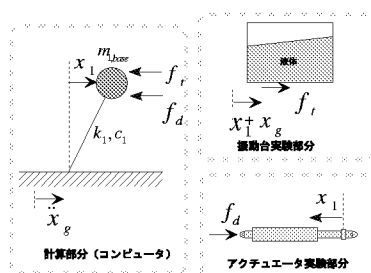


図2: 実時間ハイブリッド実験の概念図

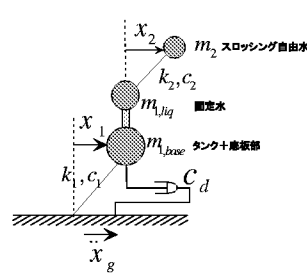


図3: 全体構造系線形簡略モデル

キーワード: 実時間ハイブリッド実験, 振動台, アクチュエータ,

連絡先 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 Tel : (075)753-5088 / Fax : (075)753-5926

の位相遅れが実験システムの安定性に大きく影響することが明らかとなった。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。

4. 実験装置動特性の補償

本研究では実験装置の位相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. 検証実験

構築したシステム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のものを用いた。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。図7に計算部分質量 $m_{1,base} = 479kg$ 、固有周期 $T_1 = 1.25sec$ 、減衰10%としたモデルで液体挙動が線形近似できる範囲で行った実験結果を線形シミュレーション（図3のモデル使用）と比較して示す。両者はほぼ一致しており、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。

モデルを $m_{1,base} = 179kg$ 、 $T_1 = 0.5sec$ とし、液体振動が短周期で非線形な挙動を示したときの結果を図8に示す。ここでは計算部分質量を小さくしたことで、実験部分の挙動が全体構造系に及ぼす影響が大きくなっている。計算部分加速度応答とシミュレーションに差異が生じており、供試体の非線形性を反映した実験結果が得られていると考えられる。

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した。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するとともに、供試体の非線形性が反映できていることが分かった。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。

- 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 Vol.149A, pp.281-288, 2003

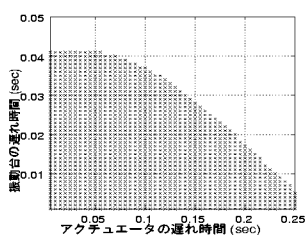


図4: システムの安定領域

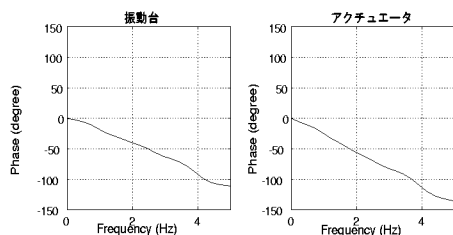


図5: 位相特性（補償前）

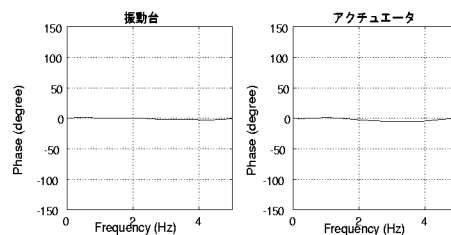


図6: 位相特性（補償後）

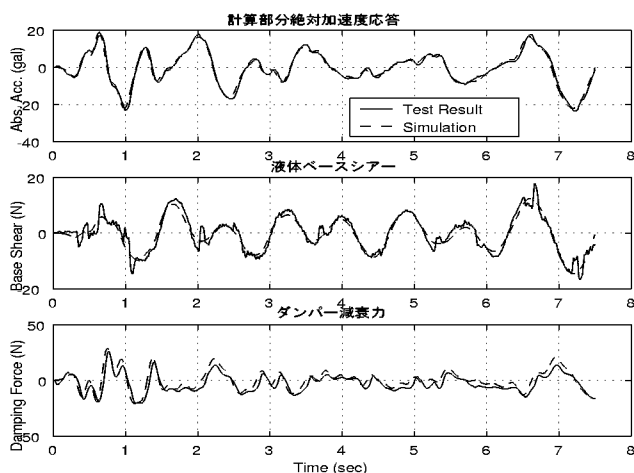


図7: 線形領域での実験結果

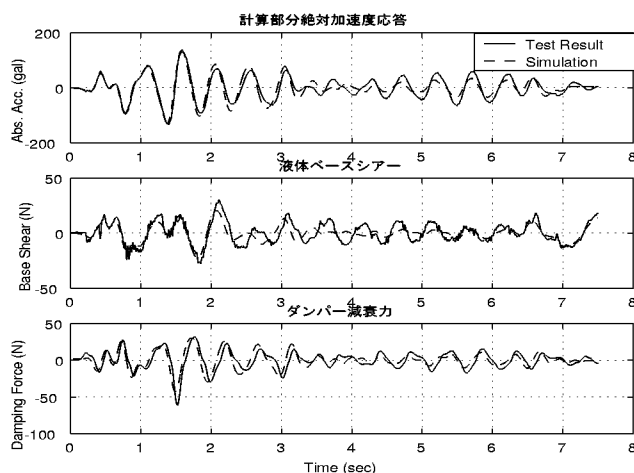


図8: 非線形領域での実験結果