

第I部門 リアルタイムハイブリッドシミュレーションにおける制御・荷重計測誤差の影響

京都大学工学部 学生員 ○三善 佑斗

京都大学大学院工学研究科 正会員 植村 佳大

京都大学大学院工学研究科 正会員 高橋 良和

1. 背景・目的

土木構造物はそのスケールが数百メートルにわたるため、動的性能評価に向けた実大実験を行うことは不可能である。また数値解析では、構成部材の詳細な形状や、複雑な材料非線形性をモデル化した上で構造全体を解析することが、計算コストの観点で困難となる。そこで対象構造物のうち、モデル化が困難な部材だけを実験し、残りの構造は数値解析を行い、両者を融合するハイブリッドシミュレーションが土木構造物の評価法として有効であると考えられる。特に、実験を動的载荷で行い、シミュレーションの数値積分を実時間間隔で行うリアルタイムハイブリッドシミュレーション(以下 RTHS と呼ぶ)を用いることで、実験部材に速度依存性のある部材が含まれる場合でも、対象構造の正確な動的挙動が把握可能となる。しかし、RTHS では解析の実時間性を損なわせる要因がいくつか存在する。また、実験部材が大型となると、実験時に生じる慣性力が実験部の部材の測定反力値に影響を与える。そこで本研究では、加振装置の動特性に注目し、動特性を補償した RTHS を行うとともに、実験で生じる慣性力が実験結果に与える影響について検討する。

2. 実験概要

(1) 実験システム

現在、多くの RTHS システムでは、実験部分と解析部分のデータ共有には SCRAMNet-GT が用いられている(例えば¹⁾)。しかし、現在の日本では SCRAMNet-GT は入手困難であるため、本研究では機器間のメモリを同期させる 5565 Reflective Memory を採用する。また、実験と解析を結び付けるミドルウェアには、ハイブリッドシミュレーションで一般的に広く用いられている OpenFresco²⁾を採用する。機器間の通信ケーブルには、遠距離高速通信が可能な光ケーブルを採用した。また数値解析ソフトウェアには OpenSees を、数値解析の時間制御を行うリアルタイムシミュレータには Speedgoat

社製 Performance real-time target machine を用い、リアルタイムシミュレータの実験制御プログラムの作成は Math Work 社製 Matlab/Simulink を用いて行った。

(2) 実験供試体および解析モデル

実験部材には初期剛性 250000N/m、曲げ降伏荷重 2200N の鋼板を用い、治具により片持ち梁の拘束条件を再現している(図-1)。また解析モデルは、弾塑性バネ 1 自由度系であり、固有周期が 0.5s となるように、質点質量を設定している。

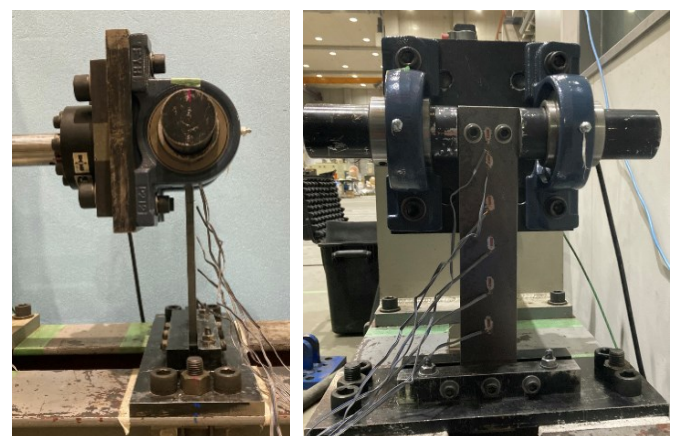
(3) 検討項目

a) 加振装置の動特性補償

解析部分と実験部分でのリアルタイム性を大きく損なわせる原因として、加振機の位相遅れが挙げられる。加振機に命令信号を送り、実際に加振機が動き始めるまでタイムラグが存在する。RTHS では測定荷重をリアルタイムで用いるため、正しい実験結果を得るには、加振機の動特性を考慮する必要がある。そこで、加振機の位相遅れを補償するデジタルフィルターを作成する。

b) 荷重計測誤差

ハイブリッドシミュレーションでは、実験部分で測定された反力(復元力)を用いて、解析部分での数値計算を行っている。しかし、RTHS では実験を動的に行うた



(a) 側面図

(b) 正面図

図-1 実験装置

Yuuto MIYOSHI, Keita UEMURA, Yoshikazu TAKAHASHI

Miyoshi.yuuto.23r@st.kyoto-u.ac.jp

め、測定反力に治具や実験部材の慣性力が混入してしまう。そこで、治具に加速度計を取り付けることで、実験時に生じる慣性力をリアルタイムに計測し、測定反力から慣性力の影響を除去する。

4. 実験結果

(1) デジタルフィルタによる補償

加振機の動特性を把握するため、加振機に 0.1Hz から 5.0Hz の周波数成分を含むランダム波を入力し、入力信号と、加振機からのフィードバック変位から、位相遅れを同定した。これより、位相を早めるデジタルフィルタを作成した。入力信号に対してデジタルフィルタを作用させたものを遅延補償済入力信号として、加振機に入力する。図-2 より、加振装置の位相遅れが補償されていることが確認できる。

(2) 慣性力補正

慣性力補正の効果を検討するため、慣性力補正を行わない RTHS (RTHS 補正なし)、慣性力補正を行う RTHS (RTHS 補正あり) の 2 通りで検討を行った。また結果の妥当性を確認するため、条件を合わせた数値シミュレーションを併せて実施した。本検討では、実験部材が線形領域で応答する外部入力波を採用している。図-3 より、RTHS 補正なしでは、線形領域内において荷重-変位関係は変わらないものの、変位時刻歴は大きく異なっている。これは、治具の慣性力が含まれた反力を用いて解析部分の計算を行っているため、実験部材の剛性が大きく見積もられ、結果として実験部材の応答が小さくなったものだと考えられる。一方、RTHS 補正ありの結果を見ると、慣性力補正を行うことで変位時刻歴が概ね一致することが確認できる。よって、本検討により、治具の慣性力による実験部材の見かけの剛性の僅かな違いにより、実験結果が大きく異なることが確認

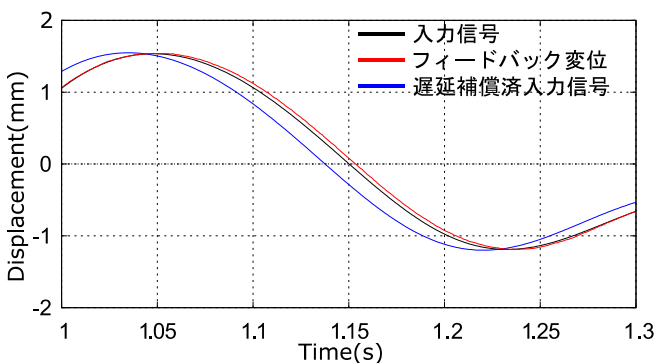


図-2 位相ずれの補償

された。実験部材が大型になると、生じる慣性力も大きくなるため、大型部材を用いて RTHS を行う際には、慣性力の影響が大きく表れることが考えられる。

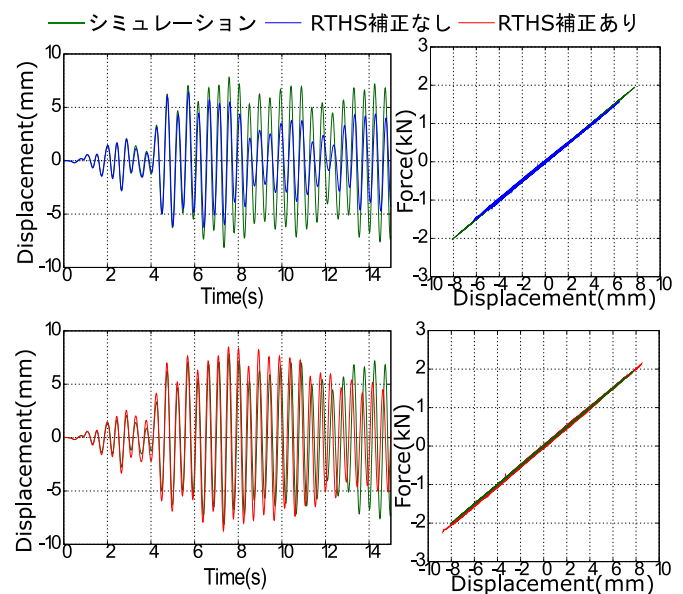
5. まとめ

RTHS では解析計算のリアルタイム性を確保するため、加振機の位相遅れを考慮する必要がある。そこで、デジタルフィルタを作成し、位相遅れを補償した。また、実験時に生じる慣性力が実験結果に与える影響について検討を行った。測定反力に慣性力が含まれることで、見かけの剛性が僅かに変化し、実験結果に大きな影響を与えることが確認された。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574 と科学研究費補助金若手研究21K14231 の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) A.Sarebanha, H.Schellenberg, J.Schoettler, G.Mosqueda, A.Mahin: Real-Time Hybrid Simulation of Seismically Isolated Structures with Full-Scale Bearings and Large Computational Models, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol.120, No.3, pp.693-717, 2019.
- 2) Yoshikazu Takahashi, Gregory L.Fenves: Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol.35, No.3, 2005.



(a) 変位時刻
図-3 変位時刻歴と荷重-変位関係