

リアルタイムハイブリッドシミュレーションにおける加振機制御と治具慣性力の影響

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

土木構造物はスケールが数百メートルにわたるため、実大試験体を用いた実験は不可能である。また数値解析においては、構成部材の詳細な形状や複雑な材料非線形性を再現した上で全体構造をモデル化することが計算コストの観点で困難な場合がある。そうした中、対象構造物のうち、モデル化が困難である部材のみを取り出して実験を行い、残りの構造は数値解析を行い、両者を融合することで構造物全体の動的挙動を得る手法をハイブリッドシミュレーションといい、土木構造物の動的性能評価法として有効であると考えられる。特に、実験を動的載荷で行い、数値解析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要素が含まれている場合においても、対象構造物の正しい動的挙動を得ることができる。しかし、RTHS では数値解析の実時間性を損なわせる要因が存在し、これを考慮する必要がある。また部材実験を動的で行うため、実験治具に生じる慣性力が実験部材の測定反力に影響を与える。そこで本研究では、数値解析の実時間性を大きく損なわせる加振機の動特性に注目し、これを補償した RTHS を行う。また RTHS において、治具の慣性力が実験結果に与える影響について検討を行う。

2. 実験概要

(1) 実験・解析システムおよび実験供試体・解析モデル

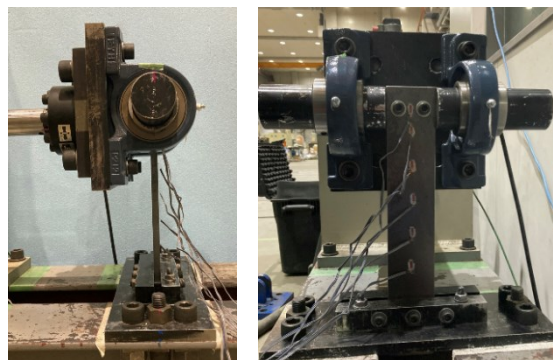
現在、多くの RTHS では、実験部分と解析部分のデータ通信に SCRAMNet-GT が用いられている^{例えば1)}。しかし、現在の日本では SCRAMNet-GT は入手困難であるため、本研究では機器間のメモリを同期させる 5565 Reflective Memory を採用する。また、実験と解析を結び付けるミドルウェアには、OpenFresco²⁾を採用する。機器間の通信ケーブルには、遠距離高速通信が可能な光ケーブルを採用した。数値解析ソフトウェアには OpenSees を、数値解析の実時間制御を行うリアルタイムシミュレータには Speedgoat 社製 Performance real-time 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 を用いた。また、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。

(2) 検討項目 1: 加振機の動特性補償

加振装置は入力信号に対して、実際に動き出すまでのラグにより位相遅れが発生する。RTHS では、この加振機の位相遅れが実験部分と解析部分のリアルタイム性を大きく損なわせる原因となる。正しい実験結果を得るためには、この加振機の位相遅れを考慮した RTHS を行う必要があり、本研究ではデジタルフィルターを用いて、加振機の位相遅れを補償する。

(3) 検討項目 2: 荷重計測誤差

RTHS では実験部分で測定された部材反力(復元力)を用いて数値解析を行うが、実験を動的載荷で行うため、測定反力には



(a) 側面図

(b) 正面図

図-1 実験装置

キーワード リアルタイムハイブリッドシミュレーション, 動的解析, 動的載荷実験, 信号処理

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-139 TEL 075-383-3246

実験治具の慣性力が混入する。そのため、この慣性力の影響を除去した RTHS を行う必要がある。そこで本研究では、実験治具に加速度計を取り付け、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。

3. 実験結果

(1) デジタルフィルターによる補償

加振機へ 0.1Hz から 5.0Hz の周波数成分を含むランダム波を入力し、ランダム波と加振機の実変位であるフィードバック変位から位相遅れを同定した。その結果を元に、位相遅れを補償するデジタルフィルターを作成した。入力信号に対して、デジタルフィルター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、入力信号とフィードバック変位の概形が概ね一致していることから、加振機の位相遅れが補償されていることがわかる。

(2) 慣性力補正

本検討では、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。なお本検討では、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 補正なしでは荷重-変位関係は概ね一致しているものの、変位時刻歴ではシミュレーションと比較して応答が小さくなっている。これは治具の慣性力が混入した測定反力を用いて数値解析を行ったため、実験部材の剛性が大きく見積もられ、応答が小さくなったものだと考えられる。それに対し、RTHS 補正ありでは、変位時刻歴の概形も概ね一致している。以上から、慣性力が測定反力に混入することにより実験部材の見かけの剛性に僅かな違いが生じ、実験結果が大きく変化することがわかる。

4. まとめ

RTHS では、数値解析の実時間性の確保が重要である。本研究では、実時間性を大きく損なわせる加振機の動特性をデジタルフィルターにより補償した。また、RTHS では動の実験を行うことから、実験治具に慣性力が生じる。そこで慣性力が実験結果に与える影響について検討を行った。その結果、測定反力に治具の慣性力が含まれることで、実験部材の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を確認した。

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.

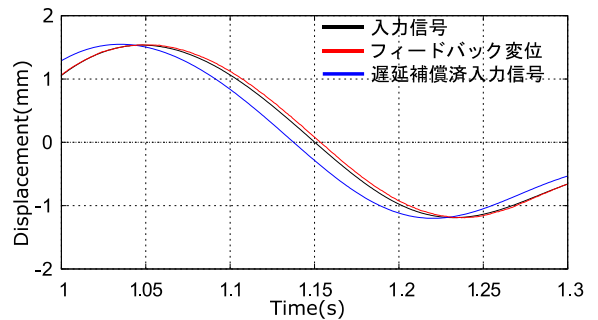
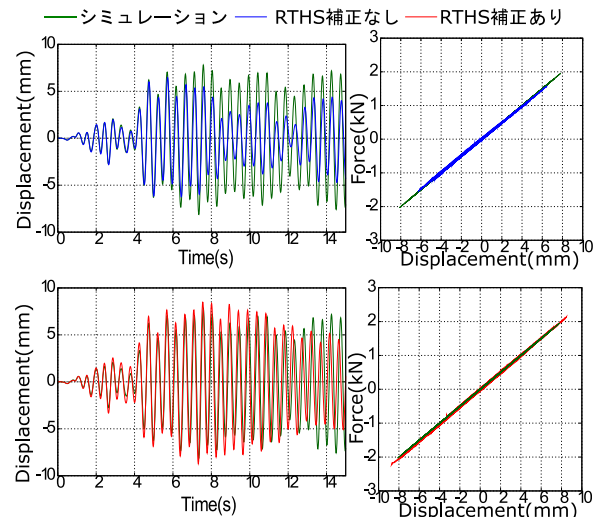


図-2 位相ずれの補償



(a) 変位時刻歴 (b) 荷重-変位関係

図-3 変位時刻歴と荷重-変位関係