

# リアルタイムハイブリッドシミュレーション における計測荷重の補償と 変位・速度・加速度の再現性について

三善 佑斗<sup>1</sup>・上田 知弥<sup>2</sup>・植村 佳大<sup>3</sup>・高橋 良和<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: miyoshi.yuuto.23r@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: ueda.tomoya.83a@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

大型構造物の性能評価を行う場合、実験・解析を高度に融合させるリアルタイムハイブリッドシミュレーション (RTHS) が有効だと考えられる。本研究では、動的実験で生じる治具の慣性力が結果に与える影響について検討するとともに、RTHS における変位・速度・加速度の再現性について検討した。検討の結果、治具の慣性力は計測荷重の 1/30 程度であっても、計測荷重の補正の有無で結果が大きく変化することが示された。また、本研究で提案した RTHS システムにおいて、解析部分の計算負荷が大きくない場合に限り、RTHS の実験部分における変位・速度・加速度の再現性が高いことが確認された。最後に、免震建物を模擬した解析モデルを用いて簡易的な RTHS を行い、構造物全体の応答が正確に表現されることを確認した。

**Key Words:** real time hybrid simulation, OpenFresco, dynamic experiment, dynamic analysis

## 1. 背景

産業競争力懇談会の2019年度プロジェクト「大型構造物の次世代評価法」報告書<sup>1)</sup>によると、大型構造物のシミュレーションの信頼性を高める具体的な方策として V&V、つまり解析の検証(Verification)と妥当性確認(Validation)が必要であると述べられている。そして、V&Vのためには実際の建設物の地震時や強風時の観測と記録、および構造部材、免震・制振部材など構成要素の実験データなどの客観的情報を充実させることが必要であり、シミュレーションによる検討を信頼度の高い実験・観測データとを照合することが重要であるとされている。特に、実物大・実速度を極力再現した実験データの取得により、内挿による部材評価、部材解析のV&Vを進める必要性が指摘されている。しかし、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、モデル化が困難な複数の部材を取り出して実験し、残りの構造に対して数値解析を行い、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。

そうした中、著者らはハイブリッドシミュレーションを地理的に分散した施設間で実施可能とする、マルチスケールハイブリッド地震応答システム(OpenFresco: Open-source Framework for Experimental Setup and Control)の開発とその適用を行っている<sup>2)</sup>。特に、実験を動的載荷で行い、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(図-1)。しかし、大型構造物に対し

RTHS が用いられた事例は少ない。

そこで、本研究では既往研究から RTHS システムに求められる性能を抽出し、OpenFresco を用いた RTHS システムを提案する。次に提案システムを用いた RTHS を行う。実験部材が大型となると、実験時に生じる治具の慣性力も大きくなり、実験部材の測定反力値に影響を与えると考えられる。そこで、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。また、実験供試体を非線形化させ、RTHS における変位・速度・加速度の再現性について確認する。最後に、実際の免震構造物を模擬した解析モデルを用いて RTHS を行う。

## 2. RTHS システムの現状

### (1) 近年の RTHS 適用事例の調査

大型構造物の動的性能評価に向けた RTHS システムの提案を行うにあたり、近年の RTHS システムの適用事例を調査する。調査対象は2010年以降に出版された主要な文献37編に加え、最新の取り組みとして2021年に開催された世界地震工学会議において発表されたプロシーディングス26編の計63編とした<sup>例えば3-5)</sup>。調査項目は、RTHS システムに用いられているハードウェア・ソフトウェアとした。

調査の結果、現在行われている RTHS では、制御装置・加振装置には MTS 社製のものが、通信機器には SCRAMNet-GT が多く用いられていることがわかった。SCRAMNet-GT は replicated shared memory とも呼ばれ、リアルタイムシミュレーションと異なる機器間のメモリを同期させるといふ、共有メモリと同様の性能を持っている。RTHS では、実

験部分と解析部分のデータ通信に要する時間を極力少なくするため、通信機器にこのような共有メモリが用いられることが多い。既往研究を見ると、RTHS で使用された制御装置・加振装置について明記されていない文献を除くと、MTS 社製のものを用いていた文献は27編中23編であり、その多くのシステムで、通信機器に SCRAMNet-GT が用いられていた。また、数値解析ソフトウェアには26編中24編が OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) を用いており、解析部分と実験部分を統合するミドルウェアには25編中20編が OpenFresco を用いている。つまり、使用されるソフトウェア・ミドルウェアにも大きな偏りがあることがわかる。

### (2) 大型構造物の動的評価に向けた RTHS の課題

本節では大型構造物の動的性能評価を RTHS で行う場合に、RTHS システムに要求される性能を挙げる。従来の MTS 社の RTHS システムは、ソフトウェア・ハードウェア・実験装置がすべてパッケージ化されており、通信機器には SCRAMNet-GT が用いられている。しかし、この SCRAMNet-GT は現在の日本では販売が停止されており、入手が非常に困難である。大型構造物の性能評価では、複数の実験部材を用いるため、実験機器の入手容易性が要求される。現在、SCRAMNet-GT は日本で入手が困難であることを踏まえ、SCRAMNet-GT に代わる新たな通信機器の実装が、大型構造物の動的性能評価に向けた RTHS には求められるといえる。

### (3) OpenFresco について

OpenFresco はハイブリッドシミュレーションを行う際のセットアップなどを定義するオブジェクト指向型ソフトウェアフレームワークである。ハイブリッドシミュレーションの環境構築は、図-2 に示すような4つのクラスで定義される。1つ目のクラス (Experimental Element) では、解析モデルの中において、実験部分と対応する要素を設定するクラスである。2つ目のクラス (Experimental Site) では、複数の部材を用いた分散ハイブリッドシミュレーションを行う際に、ソフトウェア間の通信を抽象化するクラスである。3つ目のクラス (Experimental Setup) では、実験施設に設置されている加振装置の個数や向きに応じた実験室機器のセッティングを抽象化するクラスである。4つ目のクラス (Experimental Control) では、解析用コンピュータと制御装置間の信号変換を行っているクラスであり、解析部分と外部機器のインターフェースの役割を果たす。ハイブリッドシミュレーションでは、加振装置、制御装置、解析用コンピュータ、通信機器など様々な機器が必要であり、実験の規模や、実験室にある試験機に応じて、多様な機器を実装することが可能なフレームワークが求められる。

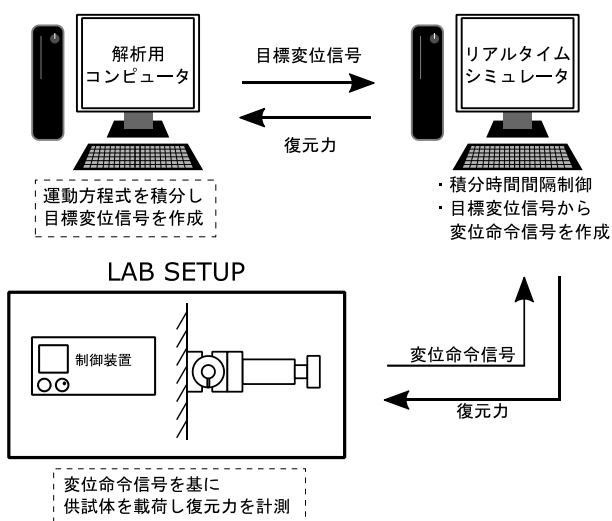


図-1 RTHS システムの概略図

OpenFrescoではそれぞれのシステムをクラスとして設定することができるため、多種多様な装置を柔軟に結びつけることが可能となる。特に、解析用コンピュータと実験装置のインターフェイスとなるExperimental Controlは、用いる機器に応じたクラスを作成することで、新たな外部機器の実装が可能となる。

### 3. 提案する RTHS システム

#### (1) 提案 RTHS システムの概要

図-3に本研究で提案するRTHSシステムの概略図を示す。数値解析ソフトウェアにはOpenSeesを用い、またOpenSees内でOpenFrescoのパッケージを呼び出すことで、RTHSの環境構築を定義している。数値計算の計算間隔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を用いることとし、リアルタイムシミュレータの実験制御プログラム作成にはMarth Work社製MATLAB/SIMULINKを採用している。このソフトウェアは、従来のテキスト形式のプログラミン

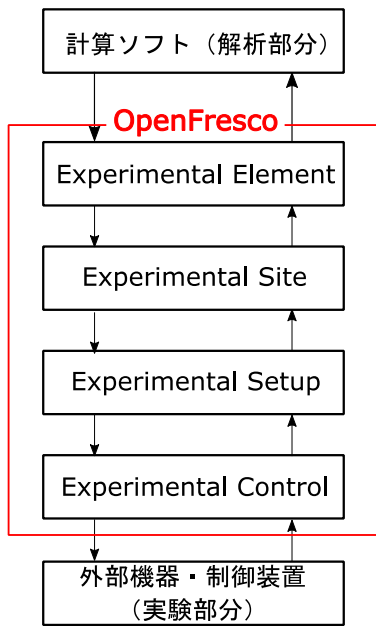


図-2 OpenFresco

グ言語と異なり、様々な処理を示すアイコンをブロック線図で接続するグラフィカルプログラミング言語が採用されている。また、リアルタイムシミュレータと制御装置のI/Oモジュールには、アナログ入出力を行うSpeedgoat社製IO130を用いた。

そして本研究では、SCRAMNet-GTに代わる新たな通信機器としてGeneral Electric社5565 Reflective Memory (以下GE5565と呼ぶ)の実装を行った。具体的なGE5565のスペックは表-1に示す。GE5565は日本で容易に入手可能であり、複数の実験部材を用いるRTHSに対しても要求性能を満たしている。GE5565ではSCRAMNet-GTと同様、シリアルバスで通信を行い、異なる機器のメモリを同期させている。GE5565の接続端子は、多くの最新機器に対して実装可能なPCIeであるため、大型構造物の性能評価システムに適しているといえる。

#### (2) GE5565の実装に向けたOpenFrescoの改良

RTHSシステムにおける実験部分、解析部分のインターフェイスの設定はOpenFrescoのExperimental Controlで行われる。そのため、GE5565のシステムへの実装には、新たなExperimental Controlの作成が必要となる。そこで、本研究ではGE5565に対応した新たなExperimental Controlのソースコードの作成を行った。なお、前述のようにOpenFrescoはオブジェクト指向型フレームワークであるため、どのRTHSシステムにおいても、このExperimental Controlを用いることが容易である。大型構造物の動的性能評価におけるRTHSでは複数の部材実験が伴うため、実験システムの制約があり、未だに研究数が少ない。しかし、入手が容易なGE5565を用いたRTHSシステムの構

表-1 GE5565のスペック

	GE5565	SCRAMNet-GT
通信速度	170Mbyte/s	210Mbyte/s
通信可能距離	10km	10km
接続端子	PCIe	PCI
流通状況	容易に入手可能	販売停止

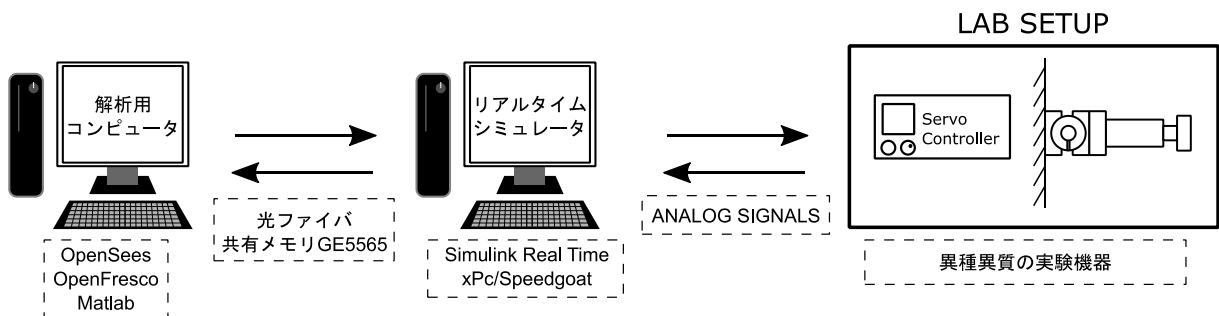


図-3 提案システム

築が可能となれば、今後、大型構造物の評価にRTHSを積極的に用いることが可能になると考えられる。

#### 4. 検証実験概要

##### (1) 実験システム

本研究では、加振装置に島津製作所製連結型アクティブ振動制御装置を用いた。制御法として変位制御と荷重制御が可能であり、本実験では変位制御を用いている。解析用コンピュータとして、CPUがCore i9-11900K。メモリが64GBのものを用いる。また数値解析の時間刻みを0.01(s)とし、数値積分法には無条件安定な陽的ニューマークβ法 ( $\beta = 1/4$ ) を用いた。解析ソフトウェアやリアルタイムシミュレーター、通信機器には表-1記述したGE5565を用いている (図-4)。

##### (2) 実験供試体・実験装置

実験供試体には SS400 の鋼板 (初期曲げ剛性 0.2277kN/mm) を使用している。鋼板の下端はボルトによって底板に固定し、上端はピローブロックに取り付けた丸棒に固定することで、片持ち梁の拘束条件を再現している (図-4)。以後、治具はピローブロック、丸棒のことを指す。なお、本実験で使用する治具の質量は 40.61kg であった。

##### (3) 解析モデル

本検討で用いた解析モデルは、弾塑性バネが接続された 1 質点系モデルである。下端は固定端とし、解析モデルの固有周期が 0.5s となるように質点質量を定めた。な

お RTHS では、実験部分で測定された部材反力を、解析部分の弾塑性バネによる復元力として数値解析を行う。

##### (4) 入力波

本実験で用いた入力波は、JR西日本鷹取駅 (Ⅱ種地盤) に基づく、道路橋示方書設計用地震動Level2地震動Type2とした。なお、線形領域内の応答検証には入力波を0.0004倍にしたものを、非線形領域の応答検証には入力波を0.0025倍したものを用いた。

##### (5) 内挿・外挿を行った変位命令信号の作成

RTHS では、解析用コンピュータが積分計算を行っている間は、加振装置への信号が更新されないため、加振装置は一時的に停止した状態となり、速度依存性のある部材の正確な挙動を得ることはできない。そこでリアルタイムシミュレーターでは、数値積分で得られた目標変位信号を基に内挿・外挿を行い、実際に加振装置に送る滑らかな変位命令信号の作成を行う。リアルタイムシミュレーターの時間刻みは 0.001(s)であるため、数値積分を一回行うごとに 10 回の内挿信号、または外挿信号が生成される。本研究では、内挿計算には 3 次ラグランジュ多項式、外挿計算には 3 次多項式近似を用いた。

##### (6) 加振装置の動特性補償

加振装置の一般的な特徴として、制御装置に送られる入力信号と、実際に加振装置で再現される動きの間に位相の遅れが含まれることが知られており、この位相遅れは加振装置の動特性と呼ばれる。RTHSでは部材の測定反力を数値計算でリアルタイムに用いるため、正しい実験結果を得るには、加振装置の動特性を考慮する必要

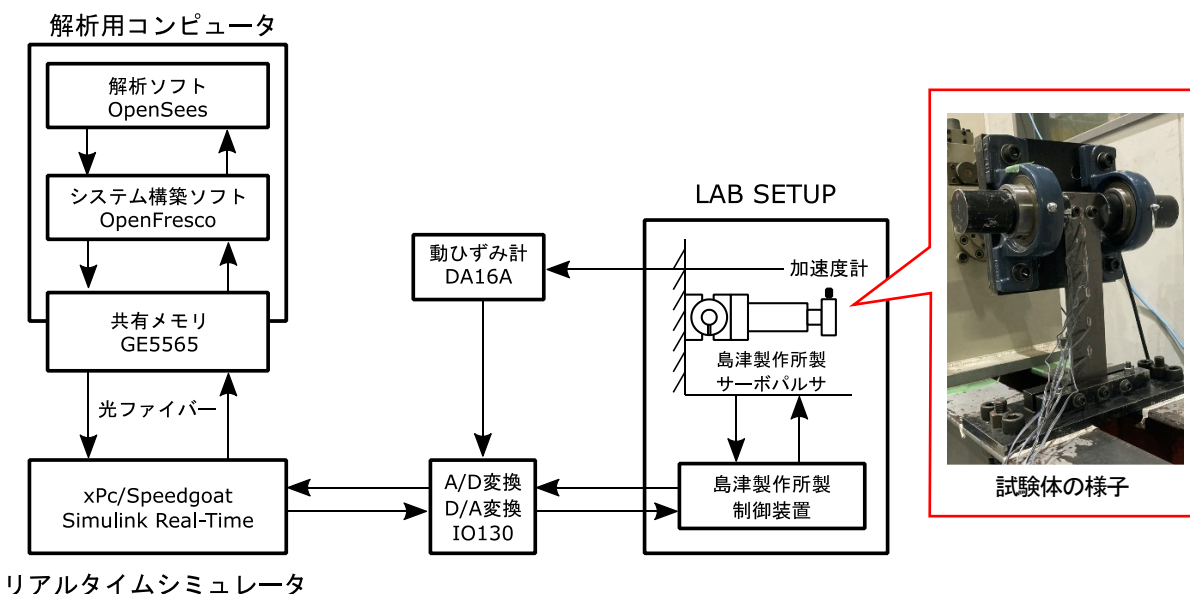


図-4 本研究で用いた RTHS システム

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<sup>9)</sup>。

まず動特性補償用デジタルフィルターの作成にあたり、アクチュエータの動特性を同定する。本実験で使用する加振装置に0.1Hzから5Hzまでの周波数成分を含むランダム波を入力する。加振装置への入力信号と、加振装置からのフィードバック信号から、加振装置の入出力間の周波数応答を算出し、加振装置の動特性を求めた。この周波数特性（位相遅れ）を基に、入力信号を加振装置の位相遅れ分だけ進めるデジタルフィルターを作成する。しかし、上述した位相を進める動特性補償用デジタルフィルターを作成すると、結果的に高周波成分が増幅する特性が伴うことが知られており、このフィルターをそのまま適用すると、実験に支障をきたす恐れがある。そこで本実験では、動特性補償用デジタルフィルターにより増幅され得る高周波ノイズを除去するための、ローパスフィルターを実装する。このローパスフィルター（バターワース型3次IIR）は、パスバンド10Hz、ストップバンド50Hzで作成したものである。ローパスフィルターの伝達関数を以下に示す。

$$H(\omega) = 10^{-4} \frac{1.137 + 3.412Z^{-1} + 3.412Z^{-2} + 1.137Z^{-3}}{1 - 2.800Z^{-1} + 2.619Z^{-2} - 0.816Z^{-3}} \quad (1a)$$

ここで、Zは1ステップ分の遅れを表す離散時間演算子と呼ばれ、次のようなものである。

$$Z^{-1} = \exp(-i\omega t) \quad (1b)$$

ここに、 $i$ は虚数単位、 $\omega$ は振動数を表す変数、 $t$ は1ステップ当たりの時間間隔である。ローパスフィルターも周波数に応じて、位相を遅らせる性質があるため、動特性補償用デジタルフィルター同定時には、加振装置の位相遅れのみならず、ローパスフィルターの位相遅れも考慮する必要がある。そこで、一度ローパスフィルターを通過させた応答データを用いて、動特性補償用フィルターの同定を行った。作成したフィルターは0.1Hzから5Hzの間で設計された3次FIRデジタルフィルターである。動特性補償用デジタルフィルターの伝達関数を以下に示す。

$$H(\omega) = 10^3(6.161 - 17.993Z^{-1} + 17.540Z^{-2} - 5.706Z^{-3}) \quad (2)$$

## (7) 測定項目

実験部材の反力は加振装置端部に取り付けられたロードセルによって計測した。実験部材の変位は、加振装置の変位検出器によって計測した。最後に治具の絶対加速度の計測には、東京測器研究所製DA-16A動ひずみ計と、

東京測器研究所製高感度加速度計ARS-10Aを用いた。

## (8) 治具慣性力の影響

大型建造物の動的性能評価をRTHSで行う際には、実験器具の大型化に伴い、実験時に生じる慣性力が大きくなる。RTHSでは部材実験によって得られた部材反力を用いて、解析部分での数値解析を行う。そのため、実験時に生じる治具や実験部材の慣性力が測定反力に混入してしまうことで、実験結果に影響を与えられられる。本実験では、実験部分の反力を加振装置のロードセルによって測定するため、測定される反力には治具の慣性力が含まれる。そこで、治具に取り付けた加速度計により、実験時に生じる治具の慣性力をリアルタイムで測定する。そして、フィードバックされた反力から治具の慣性力を除いたものを、部材の復元力として解析部分の運動方程式に用いる。具体的には、測定された治具の加速度に対し、治具の質量を乗ずることで、実験時に生じる慣性力がリアルタイムで算出できる。この慣性力を加振機のロードセルで測定された反力値から差し引くことで、慣性力の踏まれていない部材の復元力を数値解析に用いることが可能となる（図-5）。

次に、治具の慣性力が実験結果に与える影響を検討するため、慣性力の影響を補正しないRTHS（RTHS補正なし）と、慣性力の影響を補正するRTHS（RTHS補正あり）、RTHSを模擬した数値シミュレーションを行い、これらと比較する。

## (9) RTHSでの変位・速度・加速度の再現性について

先述したように、RTHSでは実験部分で測定された部材反力が解析部分に送信され、その値が解析モデルにおける弾塑性バネの復元力となり数値解析が実施される。そして、その数値解析の結果得られた変位応答が実験部分の制御装置に送信され、その値が次のステップにおけるアクチュエータへの指令変位となる。RTHSでは、以上の流れがリアルタイムで進行する。

ここで、RTHSにおけるリアルタイム性が確保されている場合、RTHSの解析部分で算出された速度応答および加速応答と、実験部分における載荷速度・載荷加速度

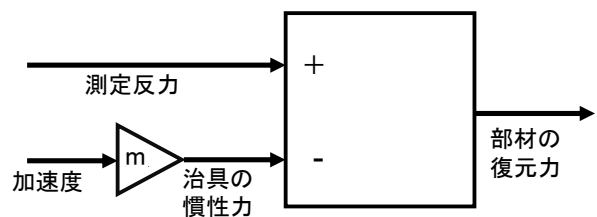


図-5 慣性力補正のブロック線図

が一致している必要がある。そこで本実験では、変位応答に加え、速度・加速度応答が実験部分で正しく再現されているかを検証する。

## (10) 実験結果

### a) 慣性力補正の影響

倍率0.0004倍の入力波を用いて、線形領域内での実験を行った。なお、本検討では線形領域内の実験であるため、供試体間での材料特性のばらつき等の影響を排除するため「RTHS補正なし」と「RTHS補正あり」とともに、同一の供試体を用いている。「RTHS補正なし」と「RTHS補正あり」、数値シミュレーションから得られた変位時刻歴、荷重-変位関係を図-6に示す。図-6を見ると、「RTHS補正なし」と数値シミュレーションの結果では、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とがわかる。これは、治具の慣性力が含まれた測定反力を用いて数値解析を行っているため、実験部材のみかけの剛性が大きく見積もられ、応答が小さくなったためだと考えられる。一方「RTHS補正あり」と数値シミュレーションの結果では、変位時刻歴、荷重-変位関係の概形が概ね一致することが確認

できる。

ここで、ロードセルで測定された反力と、治具による慣性力を図-7に示す。治具の慣性力は測定反力と比較して1/30程度であり、生じる慣性力は非常に小さいことがわかる。しかし、慣性力補正の有無で時刻歴応答が大きく変化することから、慣性力による僅かな見かけの剛性の変化が実験結果に大きな影響を与えることが確認された。

### b) 変位・速度・加速度の再現性について

RTHSの解析部分で算出された変位・速度・加速度の答と、実験部分における载荷変位・速度・加速度を比較することで、RTHSにおける変位・速度・加速度の再現性について検証する。なお本実験では、倍率0.0025倍の入力波を用いて、鋼板の非線形領域内での载荷実験を行った。RTHSで得られた変位時刻歴、荷重-変位関係を図-8に、解析部分と実験部分における速度・加速度の比較を図-9に示す。なお、実験部分における载荷変位はアクチュエータに内蔵された変位計の値を用い、载荷加速度は外付けした加速度計の値を用いた。また、速度データに関しては、解析部分・実験部分ともに、得られた加速度データを積分して算出した。

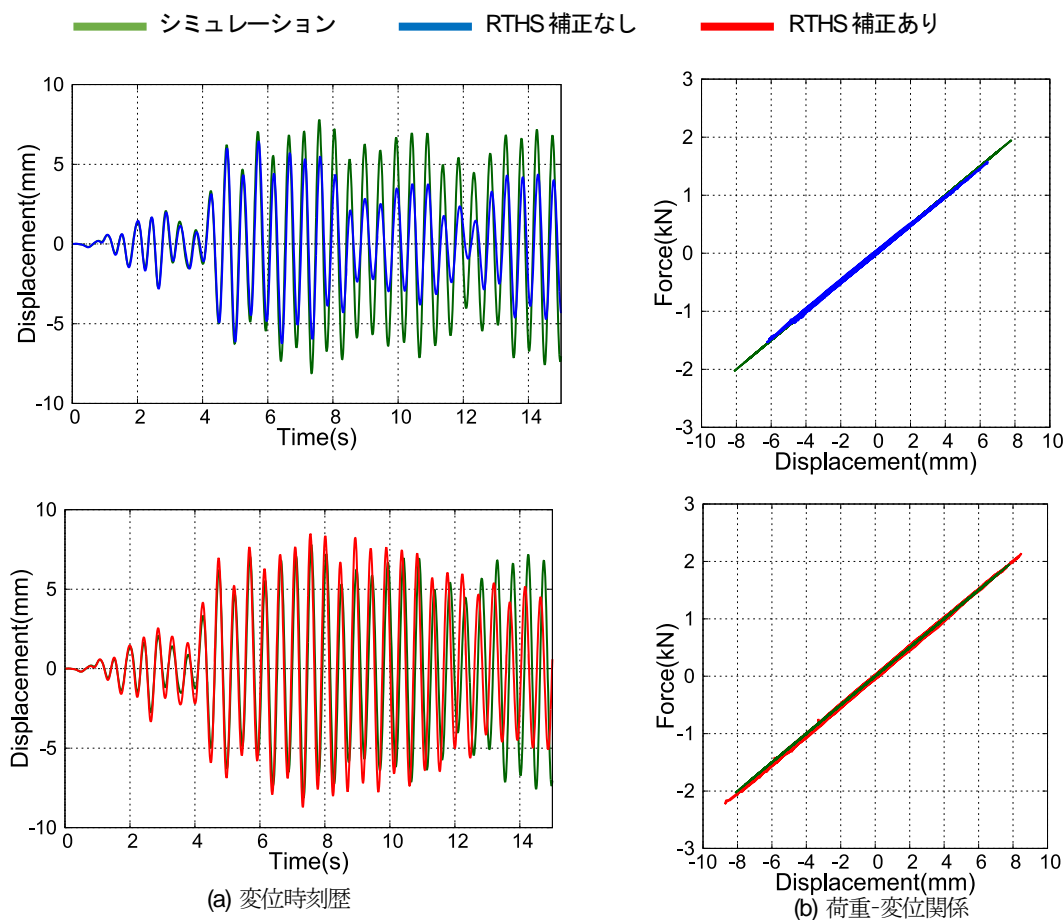


図-6 変位時刻歴と荷重-変位関係

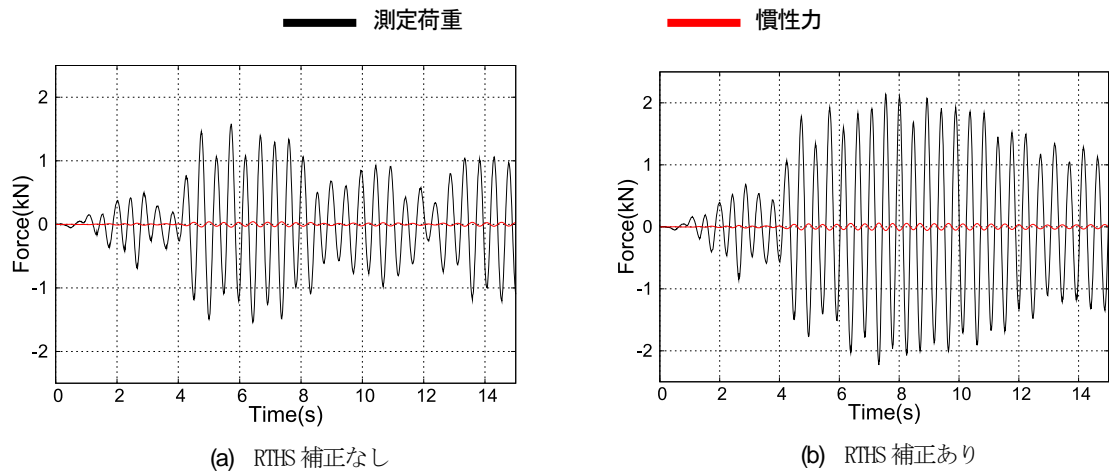


図-7 測定反力と治具に生じる慣性力の比較

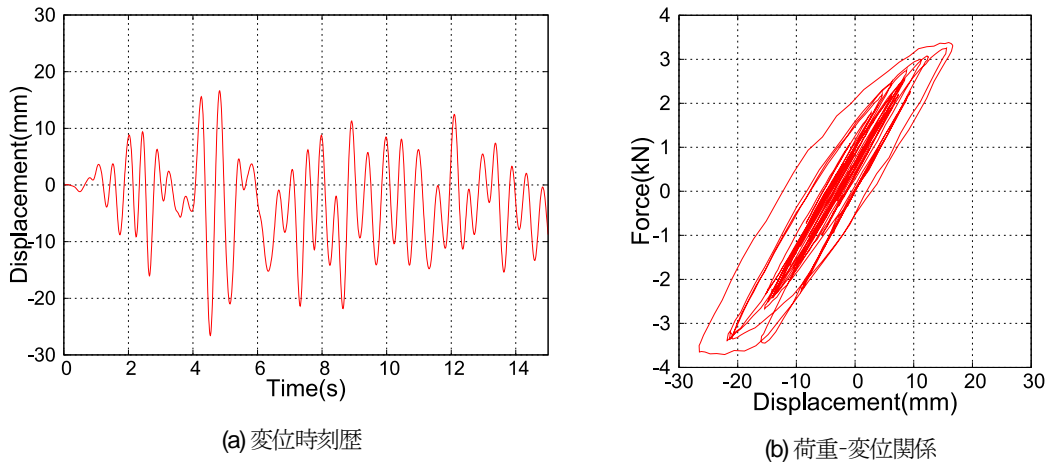


図-8 変位時刻歴と荷重-変位関係

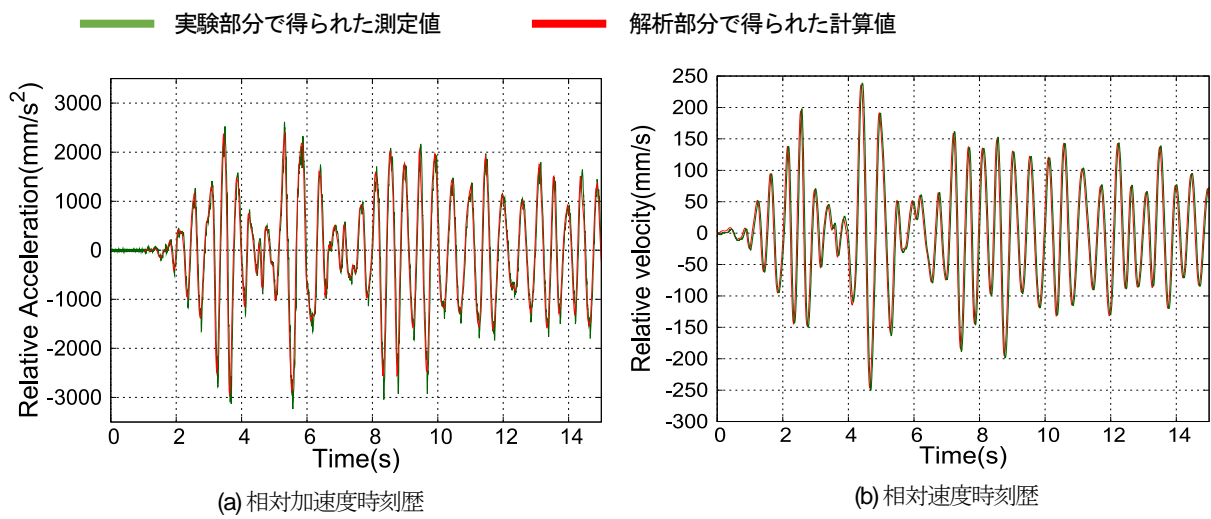


図-9 RIHSにおける解析部分と実験部分の比較

解析部分の応答変位と実験部分の載荷変位を比較すると(図-8(a)), 両者の値は一致していることがわかる. これは, 本RTHSにおいて, 数値解析の目標変位を基に内挿・外挿を行い, 載荷変位の信号を生成しているためである. 一方, 速度・加速度に関しては, 解析結果を基にした指令を実験部分には送信していないため, 本来, 載荷速度・加速度が解析結果と一致する保証ない. しかし, 解析部分の応答速度・加速度と実験部分の載荷速度・加速度の比較を見ると(図-9(a), (b)), 変位と同様に載荷速度・加速度についても解析結果と類似した傾向を示していることが確認できる. これは, 今回実施したRTHSの解析部分における計算負荷が小さかったことにより, 載荷変位の大部分が解析結果に対する内挿によって決定された結果であるといえる.

以上より, 本研究で実施したRTHSにおいて, 実時間性を確保しながら, 対象部材の性能照査が実施されていたことが示されたといえる. しかしその一方で, 解析部分の計算負荷が大きい場合, 外挿によって実験部分の変位が決定される載荷ステップが増加し, 解析部分における変位応答を実験部分で再現したとしても, 速度・加速度の再現性が低下してしまう可能性が考えられる. 既往の研究において, 解析部分の計算負荷の大きさが, 実験部部の制御対象ではない物理量(今回では速度・加速度)の再現性に与える影響について検討されている事例は見当たらず, 検討の余地が残されているといえる.

## 5. 実際の構造物を対象としたRTHSの例

### (1) 実験概要

本章では, 本研究で提案した RTHS システムを用いた実構造物の性能照査の例として, 免振建物を想定した RTHS を行う. 解析対象とする免振建物は, 2 階建て, 36m×63m の矩形の平面形状を有する, 鉄筋コンクリート造りの電算センターを想定している<sup>7)</sup>. 対象とする免振建物の免震層には, 免震支承と粘性ダンパーが設置されている. 本研究では, この免震支承(初期剛性 16kN/mm)を実験部分, その他の部分を解析部分として RTHS を行う. なお本実験は, レベル 1 相当の地震動に対する挙動把握を目的とし, 免震支承の線形応答領域内での検討を行う. また, 実験システムは検証実験と同様のものを用いる. ただし, 解析用コンピュータの時間刻みのみ 0.02(s)としている.

### (2) 実験供試体及び実験装置

実験供試体には初期剛性 0.2300kN/mm の鋼板を用い, 実験装置は検証実験と同様のものを用いる. 本来であれば, 実大の免震支承を用いるべきであるが, 本実験は免

震支承の線形応答領域内での検討を行うため, 検証実験で用いた鋼板を初期剛性 16kN/mm の免震支承として代替する. 具体的には, 実験・解析間でデータを受け渡す際に, 変位データと荷重データに係数をかけることで, 鋼板の復元力特性が免振支承の復元力特性と一致するよう補正を行った(図-10). その際, 変位の係数については, 鋼板の応答が線形領域内に収まるような倍率を採用し, 荷重の係数については, 鋼板の剛性と免振支承の剛性が一致する倍率を採用した.

### (3) 解析モデル

解析モデルは 3 自由度とし, 解析モデル図を図-11 に示す. 質点 1 と 2, 質点 2 と 3 は線形剛性バネで接続されている. また質点 1 と地表面は減衰定数 0.2 の粘性ダンパーと, 実験部分に相当する免震支承で接続されている. 実験部分で測定された鋼板の部材反力に係数をかけたものを, 解析部分の免震支承による復元力として数値解析を行う. 上部構造の構造減衰は合成比例型の内部粘性減衰とし, 減衰定数は免震層を固定としたときの上部固有周期に対して 2%とする.

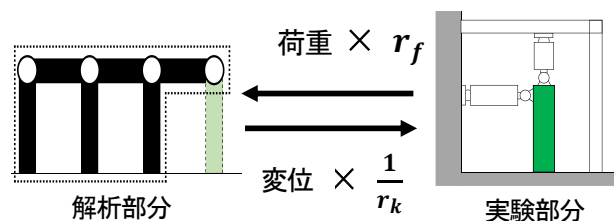


図-10 データ通信の概念

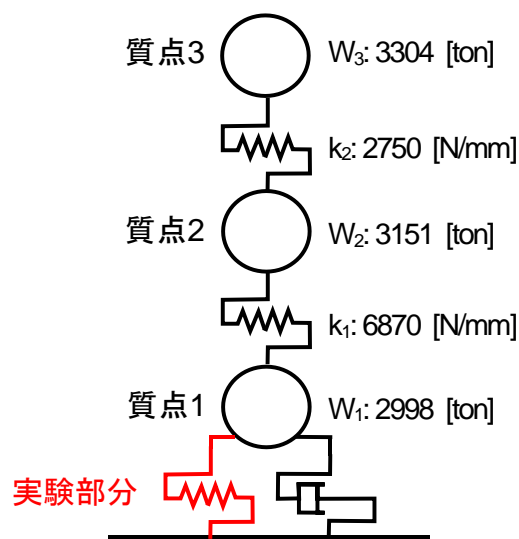


図-11 解析モデル図

#### (4) 入力波

建設省告示第 1461 号に規定されている応答スペクトルに適合する模擬地震動 (Hachinohe-NS) を採用した。免震支承の応答を鋼板の線形領域で再現するため、この模擬地震動を 0.2 倍したものを入力波として用いている。

#### (5) 検討結果

解析部分における、質点 1,2,3 の変位時刻歴を図-12 に、免震支承の荷重-変位関係を図-13 に示す。なお図中には、比較として実施した数値シミュレーションの結果を併せて示している。図より、本研究で行った RTHS の応答と数値シミュレーション結果の結果が概ね一致してい

ることがわかる。また図-12 より、質点 1,2,3 は一体となって動いていることが確認でき、対象構造物において免振層の応答が支配的であることがわかる。

次に数値シミュレーションと RTHS の実験部分の加速度時刻歴、速度時刻歴の比較を図-14 に示す。図より、実験部分の制御対象ではない加速度、速度についても、RTHS の実験結果と数値シミュレーションの結果が概ね一致しており、実時間性を担保できているといえる。

以上のように、構造物の応答評価に RTHS を用いることで、実験部分の部材に関しては部材の実挙動が得られ、その他の部分に関しては解析部分によって応答結果が得られることがわかる。

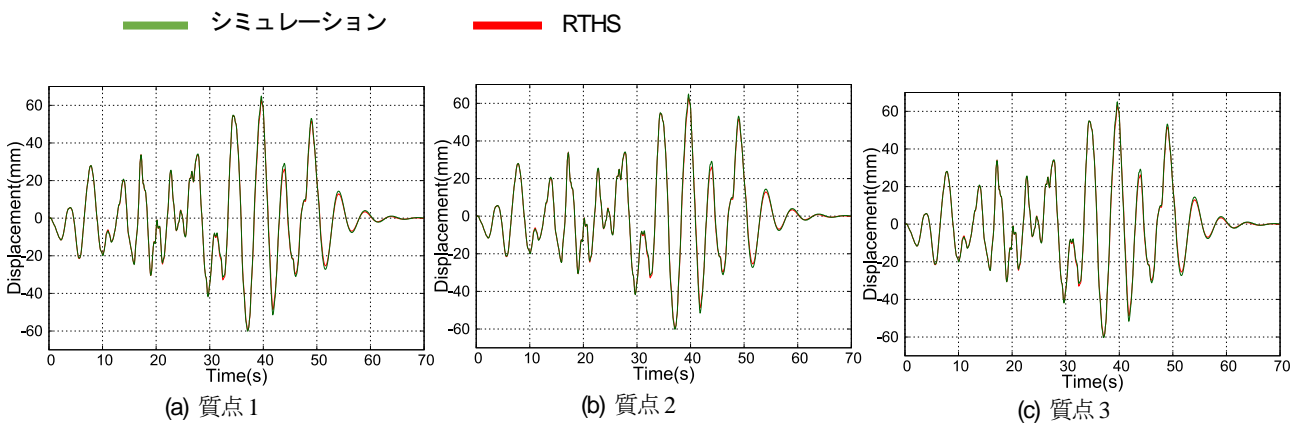


図-12 解析部分の各質点の応答

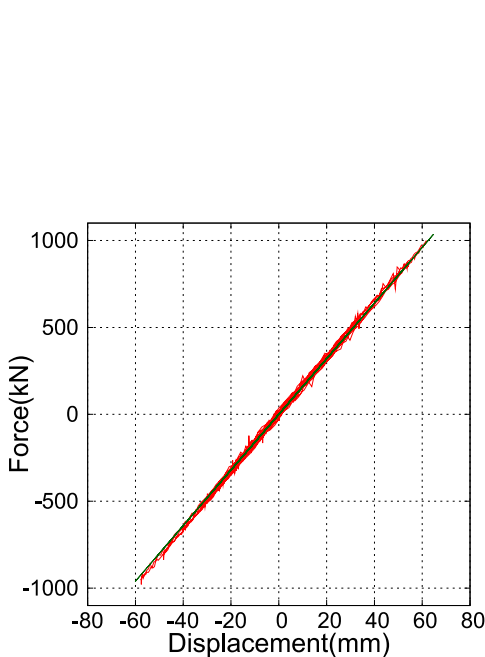


図-13 免震支承の荷重-変位関係

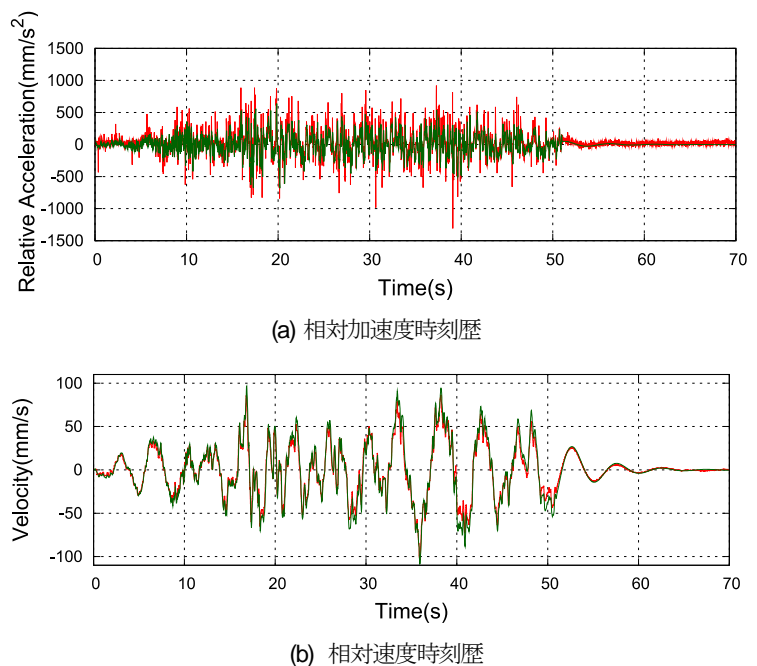


図-14 実験部分の応答比較

## 7. まとめ

本研究では、大型構造物の動的性能評価をRTHSを用いて行う際にシステムに求められる性能を調査し、その要求性能を有するRTHSシステムの提案を行った。次に提案システムを用いたRTHSを行い、実験治具がRTHSの実験結果に与える影響について検討するとともに、RTHSにおける変位・速度・加速度の再現性について検討した。最後に実際の免震建物を対象としたRTHSを行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 近年のRTHSシステムの適用事例を調査した結果、現在行われているRTHSでは、通信機器にSCRAMNet-GTが用いられている事例が多いことがわかった。しかしながら、SCRAMNet-GTは現在の日本では販売が停止されており、入手が非常に困難であるため、SCRAMNet-GTに代わる新たな通信機器の実装が求められるといえる。
- 日本で容易に入手可能なGeneral Electric社5565 Reflective Memory (以下GE5565と呼ぶ)の実装に向けて、GE5565に対応したExperimental Controlを作成することで、実験部分と解析部分を結び付ける通信機器に新たにGE5565の実装が可能となった。
- 実験時に生じる治具の慣性力が実験に与える影響について検討を行った。検討の結果、治具の慣性力が計測荷重の1/30程度であっても、測定荷重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。
- 実際の免震構造物を対象とし、多自由度の解析モデルを用いたRTHSを行った。その結果、変位・速度・加速度の実験データがシミュレーション結果と概ね一致し、本提案システムにおいてRTHSの実時間性が確認された。
- RTHSの解析部分で算出された変位・速度・加速応答と実験部分における載荷変位・速度・加速度を比較することで、本研究で実施したRTHSにおいて実時間性を保ちながら対象部材の性能照査が実施されていたことを確認した。しかし、解析部分の計算負荷が大きい場合、外挿によって実験部分の変位が決定される載荷ステップが増加し、解析部分における変位応答を実験部分で再現したとして

も、速度・加速度の再現性が低下してしまう可能性が考えられる。既往の研究において、解析部分の計算負荷の大きさが、実験部部の制御対象ではない物理量(今回では速度・加速度)の再現性に与える影響について検討されている事例は見当たらず、検討の余地が残されているといえる。

**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。

## REFERENCES

- 1) 産業競争力懇談会：大型構造物の次世代評価法，産業競争力懇談会2019年プロジェクト最終報告，2020。[Council on Competitiveness-Nippon: Next-generation evaluation method for large structures, 2019 Council on Competitiveness-Nippon project final report, 2020]
- 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.
- 3) 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.
- 4) J.Ricles, S.Al-Subaihawi, C.Kolay, T.Marullo, L.Cao, S.Quiel: MULTI-NATURAL HAZARD REAL-TIME HYBRID SIMULATION OF A TALL BUILDING WITH NONLINEAR VISCOUS DAMPERS, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, September 13th to 18th 2020.
- 5) Alireza Sarebanha, Andreas H.Schellenberg, Matthew J.Schoettler, Gilberto Mosqueda and Stephen A.Mahin: Real-Time Hybrid Simulation of Seismically Isolated Structures with Full-Scale Bearing and Large Computational Model, CMES, vol.120, No.3, pp.693-717, 2019.
- 6) The Math Works, Inc.: Signal Processing Toolbox User's Guide, サイバネットシステム株式会社, 1997. [The Math Works, Inc.: Signal Processing Toolbox User's Guide, Cybernet Systems Co., 1997.]
- 7) 日本建築学会関東支部：免震・制振構造の設計，pp.87-124, 2007。[Architectural Institute of Japan Kansai Branch: Design of seismic isolation and vibration control structures, pp.87-124, 2007.]

# Compensation of Measured Loads and Reproducibility of Displacement, Velocity, and Acceleration in Real-Time Hybrid Simulation

Yuto MIYOSHI, Tomoya UEDA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

The scale of large structures makes it impossible to conduct full-scale experiments to evaluate their performance. In addition, it is difficult to model complex material nonlinearities in numerical analysis, and there are limitations in evaluating the entire structure by using experiment methods and analysis methods independently. Therefore, Real-time hybrid simulation, which highly integrates experiment and analysis, is considered to be an effective evaluation method for large structures. In this study, the influence of the inertial force of the jig generated by dynamic experiment on the results was examined. As a result, it was confirmed that inertial force of the jig mixed with the measurement reaction force has a significant effect on the results. In addition, a simple real-time hybrid simulation was conducted using an analytical model simulating a seismically isolated building. The results were compared with those of numerical simulations, and it was confirmed that the response of the entire structure was accurately represented.