第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

高精度荷重計測機構を有するE-IsolationにおけるΦ1200免震支承を用いる2層建物のハイブリッドシミュレーション

上田　知弥[1]・植村　佳大[2]・高橋　良和[3]

[1]学生会員　工修　京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都西京区京都大学桂）
[2]正会員　工博　京都大学助教　工学研究科（〒615-8540 京都西京区京都大学桂）
[3]正会員　工博　京都大学教授　工学研究科（〒615-8540 京都西京区京都大学桂）

1. 背景

1995年の兵庫県南部地震以降，構造物の地震被害低減を目的として免震構造が急速に広まっている．また，建設技術の高度化に伴い，構造物の大型化が進行している．このような大型免震構造物の動的性能評価には，構造実験や数値解析が用いられる．しかしながら，どちらも**表-1**に示すように，利点と欠点があるため，実験単体または数値解析単体で構造物の動的性能評価を行うには限界が存在する．そこで，構造実験と数値解析を組み合わせたハイブリッドシミュレーション（Hybrid Simulation）が提案されている[1)]．構造物の一部を実験部分の供試体として取り出し，残りを解析モデルとして構築する（**図-1**）．構造実験と数値解析を同期させることにより，実験部分の複雑な挙動が反映させた構造物全体の応答を得られる手法である．構造実験での載荷方式により，静的載荷を行う場合を仮動的ハイブリッドシミュレーション，動的載荷を行う場合を実時間ハイブリッドシミュレーション（Real-time Hybrid Simulation: RTHS）と呼ぶ．

ハイブリッドシミュレーションは，構造実験で測定された荷重（計測荷重）を数値計算に取り込むため，計測荷重に摩擦力や慣性力が混入する場合は正しい結果が得られない．摩擦力，慣性力が計測荷重に混入する試験機を用いたハイブリッドシミュレーションの既往研究[2)]では，摩擦モデルを用いて計測荷重を補正する手法が提案されているが，摩擦力は向きや大きさが時々刻々変化するため，完全に対応しきれているとは言い難い．ここで，戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において「高精度荷重計測機構を有する動的試験機を活用した解析法の開発」が採択され，実大免震試験機（以下E-Isolation）が2023年に兵庫県三木市に建設された[3) 4)]．この試験機は，これまでの日本の免震試験機では載荷できなかった大鉛直・高速度・大変形の載荷が可能な上，諸外国の大型免震試験機で課題となっている計測荷重への摩擦力，慣性力の混入を防ぐ高精度荷重計測機構を有している．E-Isolationは供試体反力のみを計測できることから，ハイブリッドシミュレーションへの適用性が非常に高い試験機といえる．

そこで，本研究ではE-Isolationを用いて，実大免震支承を試験部材としたハイブリッドシミュレーションを実施し，E-Isolationが有する高精度荷重計測機構を用いる荷重計測手法がハイブリッドシミュレーションの試験精度に与える影響を検証する．

表-1　構造物の動的応答評価法の比較

	長所	短所
数値解析	・構造物全体の応答を得られる	・モデル化が困難な部材がある場合，精度が低下する
構造実験	・部材の実挙動を得られる	・試験体サイズに制約がある ・構造物全体の応答が得られない

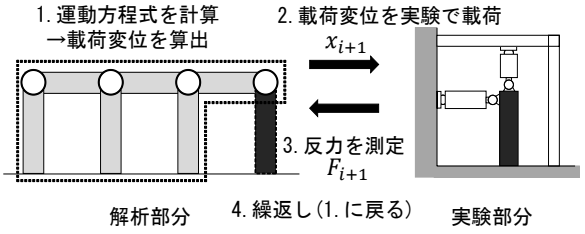


図-1 ハイブリッド実験の概略図

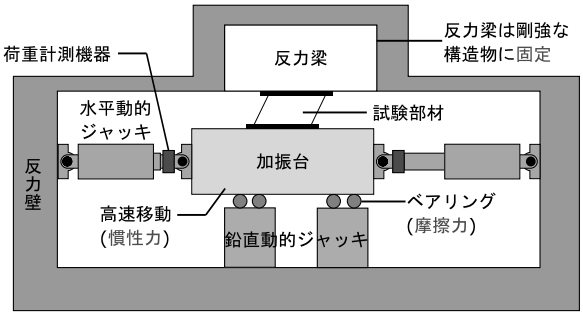


図-2 従来システムの荷重計測機構

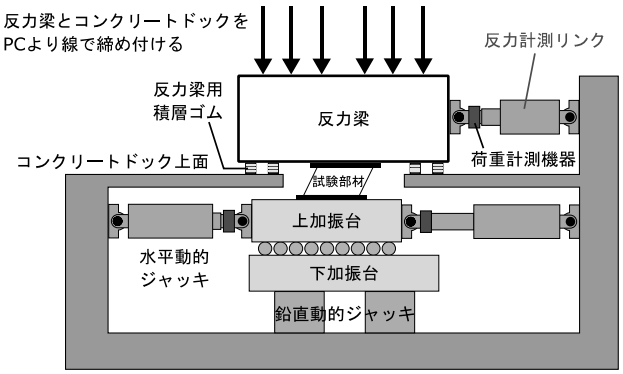
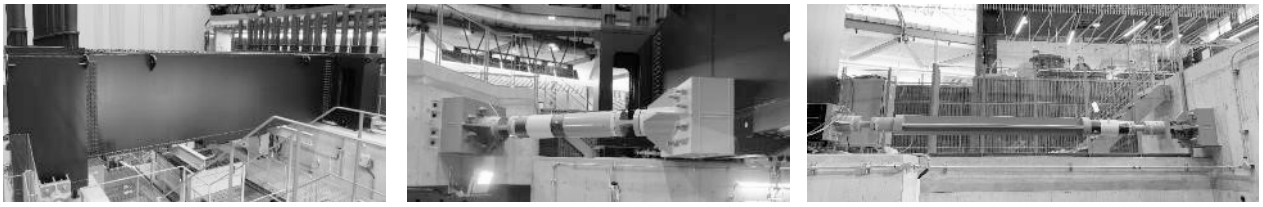


図-3 E-Isolation の高精度荷重計測機構



(a)反力梁　(b)反力計測リンク　(c)回転拘束荷重計測リンク

図-4 E-Isolation の様子

2. 摩擦力・慣性力の混入を防ぐ高精度荷重計測機構

(1) 従来システムの荷重計測機構

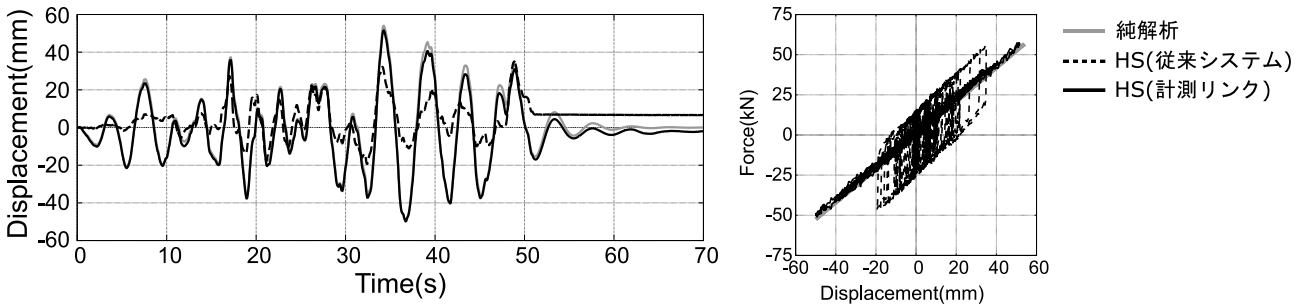
これまで，米国や中国を中心に実大免震支承を試験するための実大免震試験機が建設・運用されてきた．それらの荷重計測機構を**図-2**に示す．従来システムでは，水平動的ジャッキの荷重計測機器で荷重計測を行っている．試験時は鉛直荷重が載荷された状態で加振台を左右に動かすため，加振台底面のベアリングに摩擦力が発生する．この摩擦力の低減を目指して，ベアリングやスライダーを検討することで摩擦係数を極力小さくする手法がとられている．しかし，実大免震支承を供試体とする場合，大鉛直荷重が作用するため摩擦係数を小さくした場合でも摩擦力が大きくなり無視できない．また，大きな質量をもつ加振台を動かすため，動的載荷時には加振台に慣性力が発生する．これら摩擦力，慣性力の混入が従来システムの課題である．

通常の載荷試験の場合は，試験後に補正を行い摩擦力・慣性力の影響を除去することでこの課題を解決している．しかし，慣性力は質量と加速度の積から推定可能だが，摩擦力は想定する摩擦モデルの精度に依存する．また，ハイブリッドシミュレーションでは，都度計測荷重を数値計算に取り込む必要があり，逐次補正を行うことが困難である．計算時間に制約が存在する実時間ハイブリッドシミュレーションでは特にその影響が大きい．そこで，供試体反力を直接計測可能な免震試験機が求められている．

(2) E-Isolationが有する高精度荷重計測機構

E-Isolationの高精度荷重計測機構を**図-3**に示す．E-Isolationでは，反力梁（**図-4(a)**）に接合された反力計測リンク（**図-4(b)**）で荷重を計測する．反力梁はスライダーを有さないため摩擦力が発生せず，高速移動をしないため慣性力も発生しない．これにより，反力計測リンクで測定する荷重への，摩擦力・慣性力混入防止を目指した．反力梁に接続した反力計測リンクで荷重を計測するためには，反力梁は水平方向に移動できる，柔な構造であることが求められる．一方で，鉛直方向は鉛直荷重を支持する必要があるため，剛な構造にしなければならない．この条件を満足させるため，反力梁を天然ゴム系積層ゴム支承（以下，反力梁用積層ゴム）で支持している．反力梁を支持するために積層ゴム支承を採用した理由は，スライダーや油膜ベアリングと異なり，積層ゴム支承の荷重－変位関係が線形で得られるためである．載荷に伴い反力梁が変位するため，反力梁用積層ゴムもわずかに荷重を負担する．この分担荷重を正確に測定することを可能にするため，積層ゴム支承を採用した．なお，反力梁用積層ゴムで支持した上，反力梁とコンクリートドックをPCより線で締め付けることにより，鉛直方向に剛な構造を実現した．

また，反力梁の水平面の回転を拘束するため，回転拘束荷重計測リンク（**図-4(c)**）が反力計測リンク取付面と逆側の面に取り付けられている．この回転拘束荷重計測リンクも荷重を分担している．高精度荷重計測機構で測定する計測リンク水平合成荷重



(a) 変位時刻歴　　(b) 荷重－変位関係

図-5 Φ800mm の仮動的ハイブリッドシミュレーション結果 [4)]

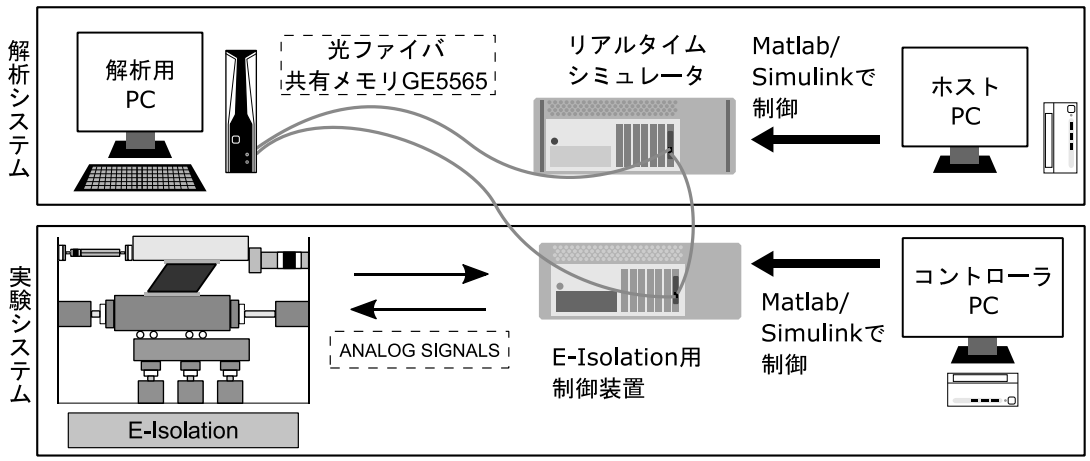


図-6 ハイブリッドシミュレーションのセットアップ

は以下の式から算出する．

$$F_{Link} = \sum_{i=1}^{2} F_{link}^{i} \cdot \cos\theta_{link} + \sum_{i=1}^{2} F_{rot}^{i} + \sum_{i=1}^{12} \frac{x^{i}}{12} \cdot K_{isolator} \quad (1)$$

ここに，F_{Link}: 計測リンク水平合成荷重
F_{link}^{i}: 荷重計測リンクiの計測荷重
θ_{link}: 荷重計測リンクの取付角度(31.43˚)
F_{rot}^{i}: 回転拘束荷重計測リンクiの計測荷重
x^{i}: 反力梁用積層ゴムiの変位
$K_{isolator}$: 反力梁用積層ゴムの剛性

著者らの既往研究 [4)]により，この高精度荷重計測機構が摩擦力・慣性力の混入を防ぐことを確認している．また，この検討では，E-Isolation でΦ800mm 免震支承の載荷実験を行う仮動的ハイブリッドシミュレーションを実施した（**図-5**）．従来システムの計測による荷重を計算に用いた場合は摩擦力が混入して理論値と全く異なる応答をしているのに対し，高精度荷重計測機構の計測による荷重を計算に用いた場合は摩擦力の混入を防ぐことで理論値の応答に追随することを確認した．従来システムでの計測における摩擦力混入と，高精度荷重計測機構での計測における摩擦力混入防止は，**図-5 (b)** の荷重－変位関係からも見て取れる．以上より，計測リンクを用いることで計測荷重への摩擦力混入を防ぐことに成功しており，この結果仮動的ハイブリッドシミュレーションの精度が向上したといえる．

3. 試験概要

(1) 本試験の目的

本研究は，高精度荷重計測機構を有するE-Isolationを用いて実大免震支承を試験体とした仮動的ハイブリッドシミュレーションおよび実時間ハイブリッドシミュレーションを実施する．そして，摩擦力・慣性力の影響を受けないハイブリッドシミュレーションの実現可能性を検証することを目的としている．

(2) セットアップ概要

ハイブリッドシミュレーションのセットアップは大きく解析部分と実験部分に分けられる（**図-6**）．以下，それぞれの詳細について述べる．

a) 解析部分

解析用PCでは数値解析ソフトOpenSeesを使って数値モデルによる解析を行う．リアルタイムシミュレ

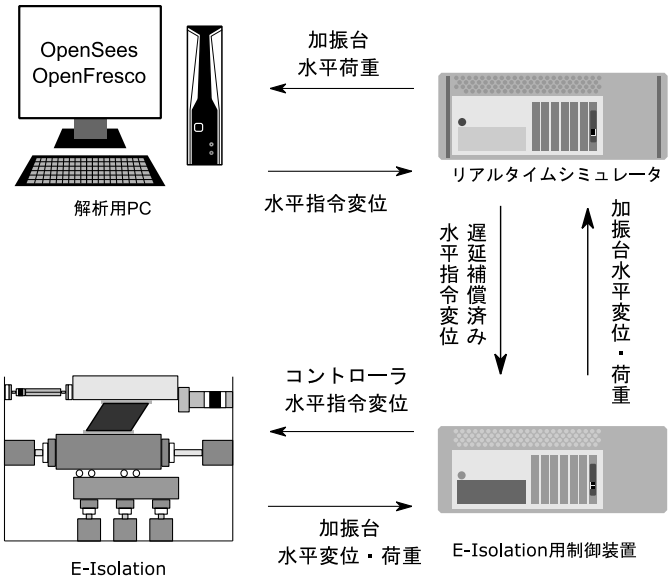


図-7 信号の流れ



図-8 Φ1200mm 免震支承

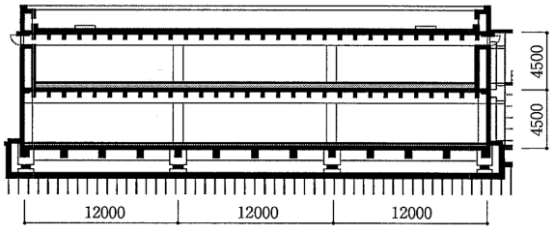


図-9 対象構造物図面 [unit:mm]

表-2 Φ1200mm 免震支承の性能

ゴム直径	1200mm
全ゴム層厚	200mm(8.0mm×25)
1次形状係数	35.8
2次形状係数	6
鉛直剛性	5420 kN/mm
水平剛性	2.21 kN/mm

ータは，解析用PCとE-Isolation用制御装置間でデータを受け渡す際の信号処理を行う（図-7）．解析PCから制御装置へ送信する際は，指令信号に内挿・外挿処理を行って滑らかな変位命令信号を生成する．内挿関数は2次ラグランジュ多項式，外挿関数は2次多項式近似を用いた．

また，制御装置へ送る変位命令信号とそれに対する試験機変位の間には通信遅延および制御遅延が存在する．これは，荷重－変位関係において左回りのループとなり，ハイブリッドシミュレーションの応答が発散する要因となるため，適切に遅延を補償する必要がある．ここでは，遅延補償法として，時々刻々の遅延変化に対応可能なAdaptive Time Series（以下，ATS）[5]を採用した．以上の信号処理は実時間ハイブリッドシミュレーションのときのみ実行している．

制御装置から解析用PCへデータを送信する際は，式(1)に基づき反力計測リンクおよび回転拘束荷重計測リンクの値から計測リンク水平合成荷重を算出する処理を行う．ただし，予備検討で反力梁用積層ゴムの荷重分担率が全体の0.5%であること，試験時は反力梁用積層ゴムの変位計が未設置で反力梁用積層ゴム変位が計測できなかったことから，本検討では反力梁用積層ゴムの分担荷重は0kNとした．リアルタイムシミュレータでの荷重計算の信号処理は仮動的ハイブリッドシミュレーション，実時間ハイブリッドシミュレーションともに実行している．なお，リアルタイムシミュレータは1000Hzで駆動しており，信号処理は0.001s刻みで実行されている．

b) 実験部分

実験部分ではE-Isolation用制御装置でE-Isolationを制御し実大免震支承の載荷試験を行う．本研究ではBRIDGESTONE製Φ1200mm免震支承を用いた（図-8）．免震支承の性能を表-2に示す．なお，仮動的ハイブリッドシミュレーションと実時間ハイブリッドシミュレーションで同一供試体を使用している．

c) 解析部分と実験部分をつなぐミドルウェア

解析用PC，リアルタイムシミュレータ，E-Isolation用制御装置はそれぞれGeneral Electric社製共有メモリGE5565を採用しており[6]，光ファイバケーブルで接続してデータ通信を行う．これにより，高速通信を実現した．解析部分と実験部分の通信を行うミドルウェアは，オープンソースフレームワークであるOpenFresco（Open-source Framework for Experimental Setup and Control）[7]を採用した．OpenFrescoは実験機器に応じたクラスを作成することで，容易にハイブリッドシミュレーション環境を構築できるソフトウェアであり，GE5565に対応したクラスを作成してハイブリッドシミュレーションを実施した．

(3) 対象構造物

ハイブリッドシミュレーションの対象構造物は実在する2層免震建物[8]とした（図-9）．この免震建物を3質点系せん断ばねモデル（図-10）でモデル化し

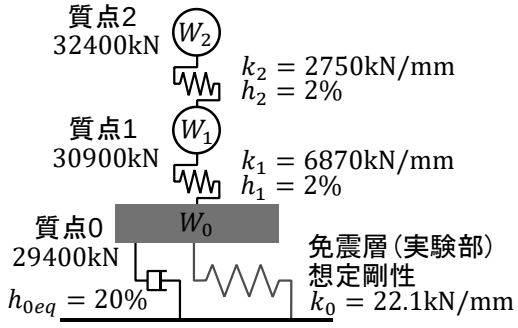


図-10 解析モデル

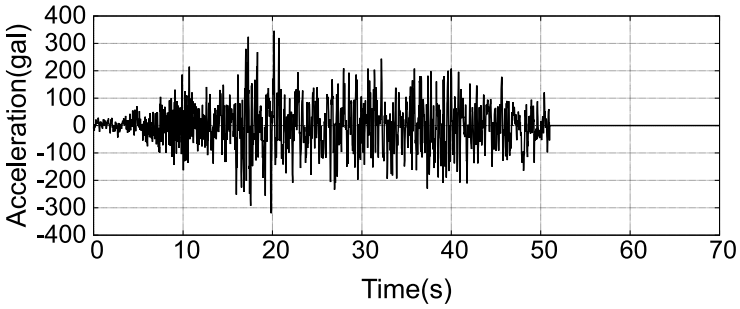
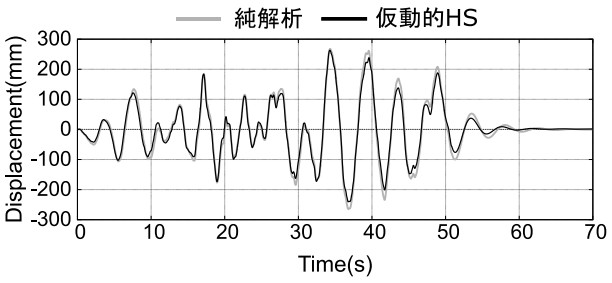
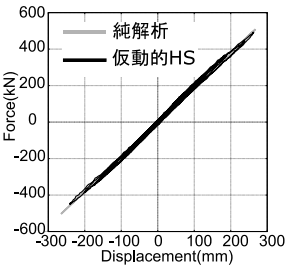


図-11 入力地震動（Level2）



(a)変位時刻歴



(b)計測荷重－指令変位関係

図-12 仮動的ハイブリッドシミュレーション（解析結果）

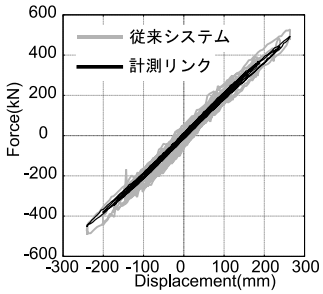


図-13 計測手法による試験体荷重－変位関係の違い

た．その諸元を**表-2**に示す．解析モデルの免震層にはΦ1200mm支承が10個設置されていると仮定した．そのため，免震支承1個が分担する鉛直荷重は9270kNとなり，この鉛直荷重を試験体に載荷した状態で試験を実施している．試験体は実大免震支承であるため，解析モデルと実験部分の変位倍率は1.0倍，解析モデルには試験供試体が10個設置されている想定により，解析モデルと実験部分の荷重倍率は10.0倍とした．

(4) 入力地震動

入力地震動は平成12年建設省告示1461号に告示適合した1968年十勝沖地震の八戸港湾観測地震波（Hachinohe EW）とした（**図-11**）．51sまで地震動を入力し，その後振動を収束させるため70sまで入力を0としている．仮動的ハイブリッドシミュレーションではLevel2地震動を，実時間ハイブリッドシミュレーションではLevel1地震動（Level2地震動の0.2倍）を入力した．解析用PCの積分時間刻みは0.02sとし，陽的なNewmark法で数値解析を実施した．

4. 仮動的ハイブリッドシミュレーション結果

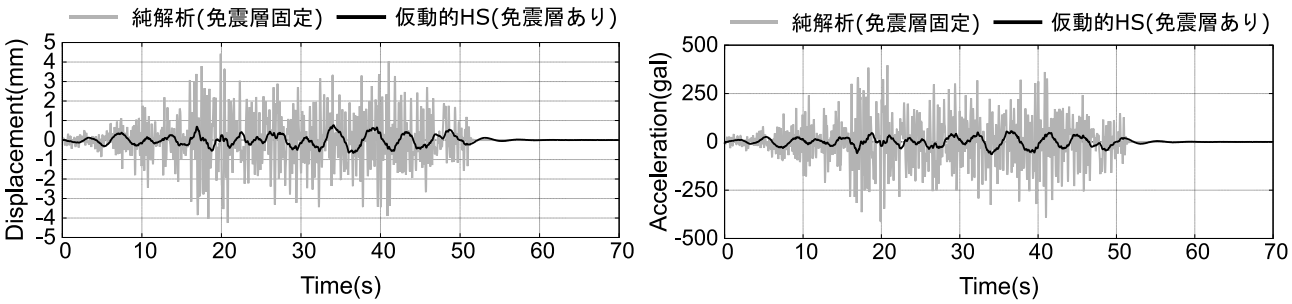
(1) 免震層応答

仮動的ハイブリッドシミュレーションにおいて，数値解析ソフトから得られた，免震層の変位時刻歴および計測荷重－指令変位関係を**図-12**に示す．ここで，実験結果から得られた荷重－変位関係にフィッティングした剛性を用いて行った数値解析結果を純解析とする．これは，理想的な線形挙動をした際の応答であり，この結果とハイブリッドシミュレーション結果を比較して検討を行う．

図-12(a)を見ると，仮動的ハイブリッドシミュレーションの結果が，純解析に十分追随できていることが分かる．これは，**図-12(b)**の計測荷重－指令変位関係がほぼ線形になっていることに起因している．続いて，**図-13**に制御装置で計測した試験体の荷重－変位関係を示す．水平動的ジャッキで計測した荷重を従来システムとしている．両者を比較すると，従来システムでは摩擦力が混入していることが分かる．よって，計測リンクを用いることで計測荷重への摩擦力混入を防ぐことに成功しており，この結果仮動的ハイブリッドシミュレーションの精度が向上したといえる．

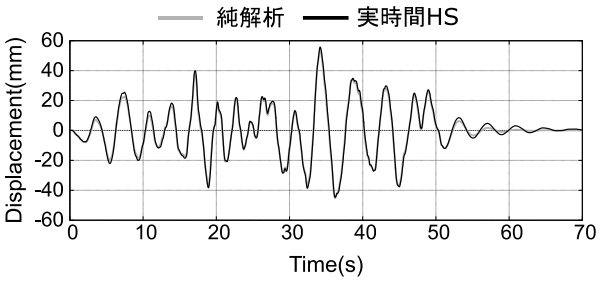
(2) 構造物上部応答

次に，対象の2層建物への免震層導入の効果を検証する．**図-10**において免震層を固定したモデルの数値解析結果を純解析とし，免震層未導入の建物応答とする．純解析と仮動的ハイブリッドシミュレーションにおける，建物頂部の応答性状の比較を**図-14**に示す．**図-14(a)**，**図-14(b)**より免震層の導入により建物上部の応答が低減し，かつ長周期化してい

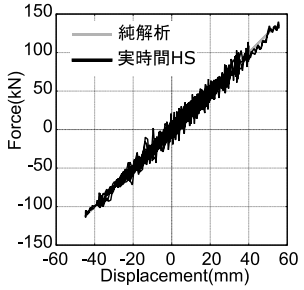


(a) 頂部部材層間変形の時刻歴　　(b) 頂部ノード絶対加速度応答の時刻歴

図-14 免震層導入による建物頂部の応答性状の比較



(a) 変位時刻歴



(b) 計測荷重－指令変位関係

図-15 実時間ハイブリッドシミュレーション（解析結果）

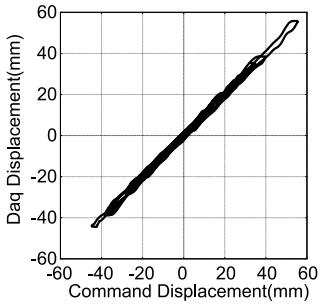


図-16 計測変位－指令変位関係

ることが見て取れる．

本試験では，免震層に設置されている免震支承1つのみを載荷している．しかし，ハイブリッドシミュレーションを活用したことにより，免震支承の挙動（免震層の挙動）が反映された構造物全体の応答を得ることに成功している．1. で述べたように構造物全体を試験対象として実験することは非常に困難であり，免震層を有する構造物の応答評価にハイブリッドシミュレーションを活用することは有効であるといえる．

5. 実時間ハイブリッドシミュレーション結果

(1) 免震層応答

数値解析ソフトから得られた実時間ハイブリッドシミュレーションの結果を**図-15**に示す．4. (1) 同様に実験結果にフィッティングした剛性を用いた数値解析を純解析としており，こちらと実時間ハイブリッドシミュレーションの結果を比較する．**図-15**(a) を見ると，実時間ハイブリッドシミュレーションの結果は純解析に十分追随できていることが分かる．これは4. (1) 同様，実時間ハイブリッドシミュレーションで得られた計測荷重－指令変位関係が概ね線形であることに起因する（**図-15**(b)）．なお，実時間ハイブリッドシミュレーションの荷重－変位関係に一部振動が見られるが，これは慣性力の混入とは異なることを確認している．この点については，次節にて述べる．

続いて，横軸に指令変位，縦軸に計測変位をプロットした計測変位－指令変位関係を**図-16**に示す．**図-16**を見ると，概ね線形関係となっていることからATSによる遅延補償が適切に作動していることが分かる．また，入力変位に対して出力変位が遅れると，エネルギーが投入され応答が大きくなる．この遅延によるアンダーシュートの影響は，自由振動の際に応答の増大と位相遅れという形で顕著に表れる．しかし，**図-15**(a) において自由振動となる51s以降を見ると，実時間ハイブリッドシミュレーションによる変位応答が純解析とほぼ同じであり，ここからも遅延補償が適切に作動していることが分かる．

(2) 計測荷重と慣性力混入の影響

リアルタイムシミュレータで計測した計測リンク水平合成荷重の時刻歴を**図-17**に示す．また，上加振台で計測した加速度の時刻歴を**図-18**に示す．なお，加速度波形は基線補正を行っている．慣性力は加速度に上加振台質量を乗じた値である．よって，**図-17**に**図-18**の加速度時刻歴と同形状の波形が見られないことから，慣性力の混入が除去できているといえる．

一方で，**図-15**(b) の荷重－変位関係において荷重に振動が見られる．荷重時刻歴を拡大すると高周波で振動しており（**図-19**），これが荷重－変位関係

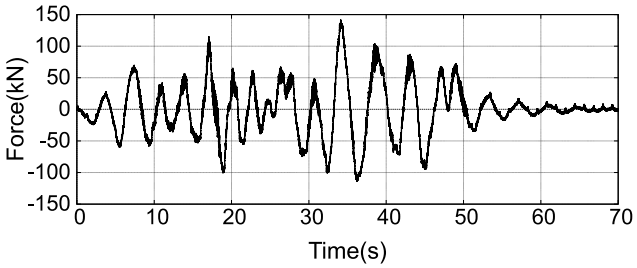


図-17 計測リンク水平合成荷重の時刻歴

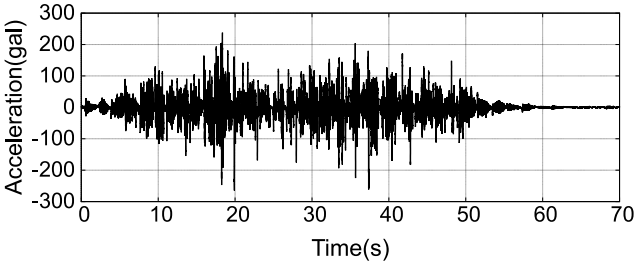


図-18 加振台の加速度時刻歴

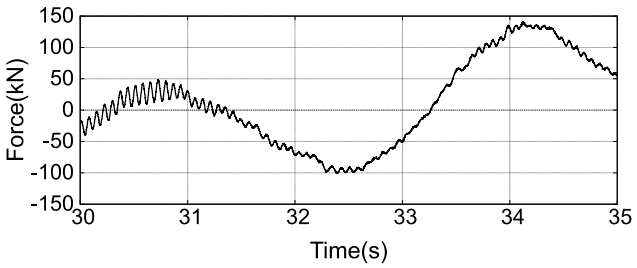


図-19 計測リンク水平合成荷重の時刻歴（拡大）

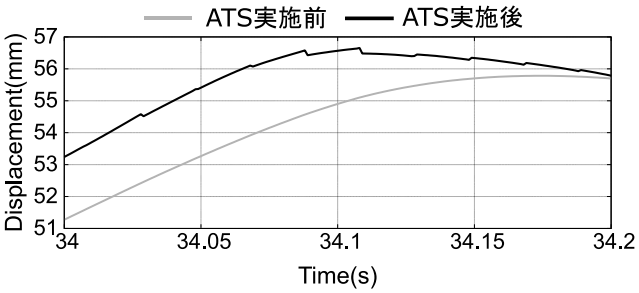


図-20 ATS による信号の変化

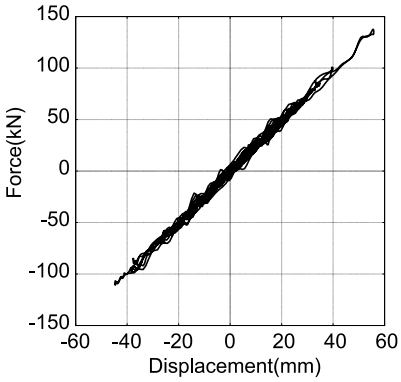


図-21 振動分を除去した荷重－変位関係

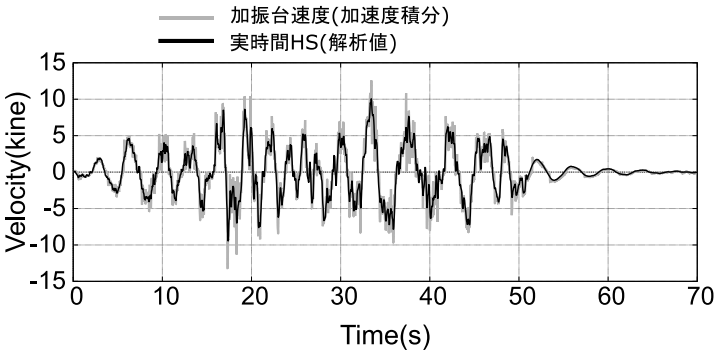


図-22 加振台の速度時刻歴と免震層の相対速度応答の比較

に反映されている．この高周波の振動発生は，ATSによる信号補正が原因であると考えられる．**図-20**にリアルタイムシミュレータにおけるATS実施前とATS実施後の信号の比較を示す．リアルタイムシミュレータでATSによる遅延補償を行うことにより，遅延分を見越して指令が早まっていることが分かる．それとともに，ATS実施後の信号はATS実施前の信号には含まれないひずみが見られる．このひずんだ信号に対して試験機が追随しようとするため，本来の応答とは異なる振動が試験体に入力され，その結果として計測荷重の振動が見られたと考えられる．なお，実時間ハイブリッドシミュレーション結果は構造物の応答を評価しているものであり，今回の荷重振動は構造物の振動を励起する周波数ではなかったため，構造物の応答に影響は出ていない．

この高周波をローパスフィルタで取り除いた場合の荷重－変位関係は**図-21**に示すとおりであり，振動を除去すると綺麗な線形関係が得られていることが分かる．しかしながら，ローパスフィルタは位相遅れを発生させるため，遅れに対して敏感な実時間ハイブリッドシミュレーションでは試験中の適用が難しい．遅延補償によって励起される振動が計測荷重に影響を与えていることから，振動励起を防ぐ遅延補償法の検討が今後必要であるといえる．

(3) 実時間ハイブリッドシミュレーションにおける実時間性の確保

最後に，実時間ハイブリッドシミュレーションにおける載荷が実時間性を担保できているかどうかを検証する．加振台の速度応答と実時間ハイブリッドシミュレーションで得られた速度応答の比較を**図-22**に示す．加振台の速度応答は，**図-18**の実測した加速度時刻歴を線形加速度法により直接積分することで求めた．実時間ハイブリッドシミュレーションで得られた速度応答は，数値解析における免震層の速度応答である．図より加振台の速度は，解析モデルにおける免震層の応答と十分に一致しているといえる．すなわち，実時間ハイブリッドシミュレーションにおいて，解析モデル内の速度応答が実験部分で再現できており，実時間性が確保されていること

が分かった．試験機への指令は変位で与えており，速度を試験機制御の変数に用いていないにもかかわらず速度が再現されていることは特筆すべき点である．本試験体は応答に速度依存性が見られなかったが，今後オイルダンパーや鉛プラグ入り積層ゴム支承など速度依存性のある部材を試験対象とする際は，本ハイブリッドシミュレーション環境を用いることで速度依存性も含めた応答を評価することができる．

6. 結論

本研究では，高精度荷重計測機構を有する実大免震試験機E-Isolationを用いて，Φ1200mm実大免震支承を試験体とした仮動的ハイブリッドシミュレーションおよび実時間ハイブリッドシミュレーションを実施した．以下が得られた知見である．

- 仮動的ハイブリッドシミュレーション結果から，高精度荷重計測機構により測定した荷重を用いることで，ハイブリッドシミュレーション結果の精度向上が確認された．
- 仮動的ハイブリッドシミュレーション時のデータより，従来システムで課題となっていた計測荷重への摩擦力混入が，高精度荷重計測機構では防げていることを確認した．
- ハイブリッドシミュレーションを活用することにより，載荷試験は免震支承のみながら免震層導入による構造物全体の応答性状の変化を検討できることを確認した．これにより，免震支承導入の効果検証が容易になることが期待される．
- E-Isolationにおいて実時間ハイブリッドシミュレーションが実施できることを確認した．また，高精度荷重計測機構により，動的載荷時の計測荷重への慣性力の混入が防げていることが分かった．
- 実時間ハイブリッドシミュレーションにおいて，計測した加速度時刻歴を積分して算出した速度が純解析と十分に一致することを確認した．これにより，実時間で載荷が行われていることが分かり，地震時挙動が実験部分の試験体で再現できていることが明らかになった．

以下に，今後の課題を示す．

- 実時間ハイブリッドシミュレーション実施時，計測荷重に本来の応答と異なる荷重の振動が見られた．この振動は遅延補償の信号処理に起因すると考えられ，この振動を抑制することができる遅延補償法の検討が必要である．
- 今回の試験では，速度依存性のない試験体を用いてハイブリッドシミュレーションを実施した．今後，速度依存性のある部材を試験体とした実時間ハイブリッドシミュレーションを実施し，実時間性の確保に関する検証を更に行う必要がある．

謝辞：本研究は，戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「Ⅸ．実大部材地震挙動解析システム開発」および科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成を受けて実施した．ここに謝意を表します．

参考文献

1) 伯野元彦，四俵正俊，原司：計算機により制御された，はりの動的破壊実験，土木学会論文集，No.171，pp.1-9，1969.
2) Sarebanha, A., Schellenberg, A. H.,Schoettler, M. J., Mosqueda, G., and Mahin, S. A.: Real-Time Hybrid Simulation of Seismically Isolated Structures with Full-Scale Bearings and Large Computational Models, Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol.120, No.3, pp.693-717, 2019.
3) Takahashi Y, et al: E-Isolation: High-performance Dynamic Testing Installation for Seisic Isolation Bearings and Damping Devices, International Journal of High-Rise Buildings, Vol.12, No.1, pp.93-105, 2023.
4) 高橋良和ほか：高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現「その1」～「その17」，日本建築学会大会学術講演梗概集，2023.
5) Chae Y., Kazemibidokthi K., and Ricles M.: Adaptive time series compensator for delay compensation of servo-hydraulic actuator systems for real-time hybrid simulation, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.42, pp. 1697-1715, 2013.
6) Abaco systems, “Reflective Memory”, https://www.abaco.com/products/reflective-memory, (参照 2023.06.16)
7) Takahashi Y. and G L, Fenves.: Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 35, pp. 267-291, 2006.
8) 日本建築学会関東支部：免震・制振構造の設計，第3版，2017.