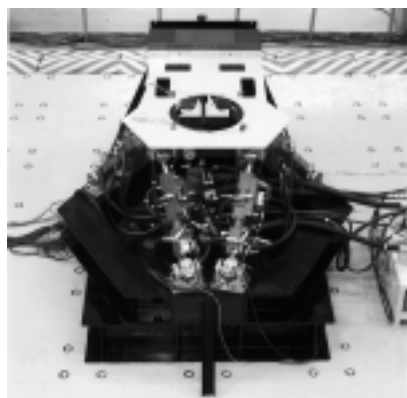


部分仮想モデルを用いた複合耐震実験システム

Seismic Tests Combined with Real Time Numerical Simulator

梶井 紳一郎 安田 千秋
 広江 隆治 山下 敏夫



大型構造物の耐震実験を行う場合、一般に高縮尺比の模型を製作した上で実施する。しかし、破壊などの現象を試験する場合には、高縮尺比のモデルでは現象再現が困難な場合があり、試験が大規模化する傾向にある。これを補う手法として部分仮想モデルと組み合わせた複合耐震実験技術を開発した。本手法は、構造物の振動台試験において、評価対象以外の構造物を数値モデル（仮想モデル）に置き換え、その動的挙動を加振機と計算機で模擬するもので、本報ではこの複合耐震実験技術の原理と、実験による検証結果について紹介し、本技術の有効性を示す。

1. はじめに

地震応答解析の精度向上により、構造物の弾性挙動については、数値解析で評価できる場合が増えてきたが、構造物の破壊、大変形などの挙動解明には現在でも実験に頼らざるを得ない部分が多い。

このような構造物の耐震実験では、対象となる構造物全体を振動台に搭載して実験することが一般的であり、対象となる構造物が振動台を超える規模の場合には、相似縮尺模型を用いることにより対応してきた。

しかし、破壊・大変形などの挙動解明には材料の寸法効果や模型製作精度の観点から縮尺比には制約がある。

このような場合に対して、部分構造法によるオンライン耐震実験が提案され、主として建築、土木分野で活用されてきた。本手法は、静的加力試験で地震応答をシミュレートするオンライン耐震実験の一部として行われてきた。

しかし、配管などの複雑な三次元構造物の場合には、地震による慣性力を加振機による静的加力で模擬することは難しく、振動台試験が必要となる。そこで、当社では振動台試験の機能を拡張する技術として、複合耐震実験技術を開発した。

本技術は、対象となる構造物全体を搭載した振動台試験ではなく、評価対象以外の構造の一部を数値モデル化し、境界での動的な荷重・変位の相互作用を振動台上で模擬することで、近似的に全体系の地震応答を求める手法である（図1）。

このような部分仮想モデルと組み合わせた耐震実験では、評価対象以外の構造物を仮想モデルとすることにより、設備・費用の制約下で評価対象となる構造物を大型化することができるため、高精度の試験が可能となる。本手法は、今後の計算機処理能力向上及びシミュレーションソフトウェアの進歩とともに発展すると考えられる。

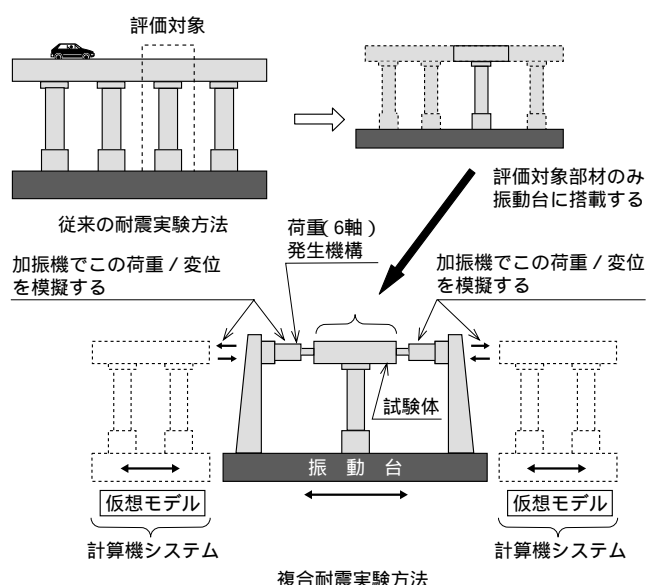


図1 従来の耐震実験方法との違い 非線形試験体の模型化は難しいが、構造物の一部を試験体とし、その他は仮想モデルに置き換える耐震実験手法。

本報では、6自由度の数値モデルの動きを再現できる多軸システムを試作し、複合耐震実験手法を実験検証した結果について述べる。

2. 手法の概要

2.1 実機構造物との等価性

部分仮想モデルを用いた実験構成と実機構造物の等価性を確認することは重要である。

試験体と部分仮想モデルは本来一体であるので、オリジナルの構造物と等価であるための必要条件は、図2に示すように境界での内力の和がゼロになる条件に加え、試験体と仮想モデルとの相対変位がゼロとなる2つの境界条件を満たすこ

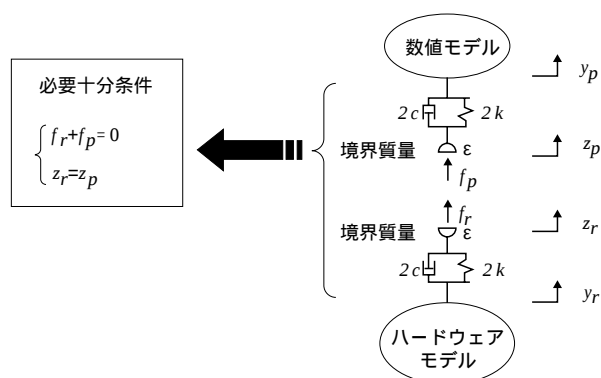


図2 オリジナル構造物との等価性 仮想モデルと試験体との境界面では、荷重の和がゼロでかつ両者の相対変位をゼロとする必要十分条件を満足する必要がある。

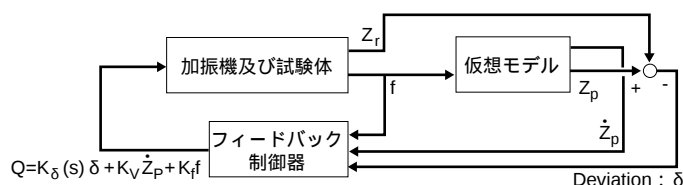


図3 フィードバックシステムの構成 仮想モデルと試験体相対変位のフィードバックに加え、仮想モデルの速度や境界に作用する荷重を補助的にフィードバックすることにより、安定性が増す。

とである。

2.2 制御方式

本技術の制御方式は等価条件として満たすべき変位の境界条件、すなわち試験体と仮想モデルとの相対変位量（ $=\delta$ ）を制御量、油圧サーボ弁の開度指令 Q を制御入力とみなすところに特徴がある。そして、図3に示すような δ についてのフィードバック制御系を設計する。図3において z_p は補助的なフィードバックであり、従来法のように相殺型のフィードフォワード補償は行わない。

相対変位量 δ が小さければ実機構造物との等価条件が成立するので、より広い周波数領域にわたって δ を抑制する制御器が、より良い制御器となる。フィードバック制御系に関する一般的な性質に従うと、一巡伝達関数の交差周波数以下では δ は近似的にゼロとなるので、交差周波数が制御設計の指標であり、これが大きくなるように制御器を設計すればよい。従来の制御方式では相殺型の補償のみに頼っていたが、提案法では図3に示すように部分仮想モデルの速度や境界面に作用する荷重などの補助的なフィードバックにより位相補償による安定余裕の改善等が可能である。

本システムではフィードバック制御則を採用し、実験によりその効果を検証する。

3. 実験による性能検証

3.1 多軸境界模擬装置及び試験体

部分仮想モデルと試験体との境界面には、6成分の荷重（並進荷重3成分、モーメント3成分）が生じる。部分仮想モデルを用いた実験構成と実機構造物の等価性を保持するためには、これらの荷重を正確に再現しておく必要がある。

このような6成分の荷重の再現には、パラレルリンク機構

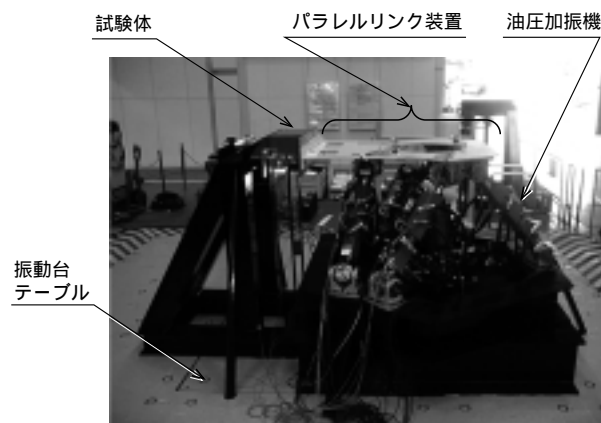


図4 多軸境界模擬装置 6本の油圧加振機で構成したパラレルリンク機構により、部分仮想モデルの動きを再現した。

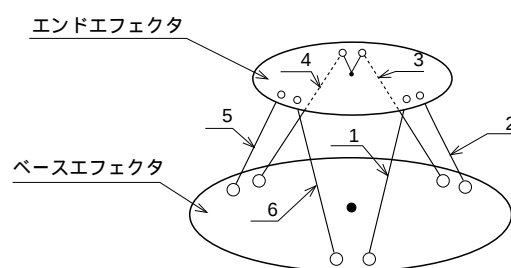


図5 多軸境界装置の概念 本装置は ± 70 程度の変位及び20kN程度の荷重が再現可能である。

の一つである Stewart Platform を6基の油圧加振機で構成し、多軸境界模擬装置として適用した。多軸境界模擬装置の写真を図4に示す。本多軸境界模擬装置は、図5の主要寸法図のとおり、エフェクタの直径がベース側では約2000mm、エンド側が約1000mmの諸元である。

試験体とした構造物は、頂部にH型鋼を載せた片持ち梁（高さ1500mmのI型鋼）とした。試験体の減衰比は、頂部のH型鋼を架構から防振ゴムで支持することにより付加し、調整可能な構成とした。

なお、試験体として考慮した自由度は水平並進2自由度（ X, Y ）である。また、多軸境界模擬装置のエンドエフェクタは試験体頂部のH型鋼にボルト結合することによって部分仮想モデルの水平並進2自由度の応答を模擬する装置構成とした。

3.2 制御装置

(1) 演算構成

部分仮想モデルを用いた複合耐震実験システムの構成概念を図6に示す。本システムでは、試験体との境界面で作用する多軸荷重を再現するために油圧加振機6基で構成した多軸境界模擬装置を適用しており、各油圧加振機への指令信号は、制御装置である2つのサブシステムを経て演算する構成とした。

各サブシステムの演算概要を以下に示す。

(a) 制御系演算サブシステム

ここでは2種類の運動演算が必要になる。1つは逆運

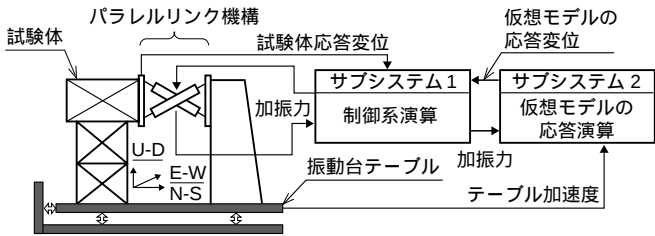


図6 部分仮想モデルを用いた複合耐震実験の構成 部分仮想モデルの動きを、加振機と制御装置を組み合わせで実現する。

動演算と呼ばれ、試験体側へ作用する所定の荷重／モーメントを実現するために、パラレルリンクを構成する6本の加振機の荷重目標値を算出する演算である。もう1つは順運動演算と呼ばれ、パラレルリンクを構成する各加振機の加振力から試験体側で実現される荷重の6軸成分を算出する演算である。上記2種類の演算は、具体的にはパラレルリンクの幾何学配置で定義されるヤコビ行列の転置行列を用い、荷重の座標変換を行うものである。

本システムでは、図7に示すとおり以下の2種類のフィードバック制御系で構成される。

荷重フィードバックループ

本フィードバックループでは、加振機への荷重指令信号を受けて、荷重目標値に加振機が正確に追従するようにサーボ演算を行う。この時、結果的にフィードバックゲイン値（以後FBゲイン値と呼ぶ）によっては、試験体負荷特性によって生じる油柱共振振動数のピークを抑えることが可能となる。

変位フィードバックループ

ここでは、仮想モデルの応答変位と試験体応答変位との相対変位に、仮想ばねに相当するFBゲインを掛けた荷重信号がフィードバックされる。つまり、制御量を相対変位とするフィードバック制御系であるため、仮想ばねに相当するゲインを適切に設定することによって、所定の制御帯域を確保することができる。

(b) 地震応答演算サブシステム

仮想モデルには、基礎側からの地震加速度入力に加え、試験体との取付け点からの作用力とを合わせた2つの入力が同時に作用する。したがって、仮想モデルの応答は外力として基礎側からの入力加速度及び試験体取付け点からの作用力とした仮想モデルの運動方程式を解くことにより求めることができる。

基礎側入力に対する仮想モデルの振動特性を図8に示す。

仮想モデルは道路橋橋脚を想定しており、X方向に1自由度、Y方向には2自由度で構成し、固有値は2～6 Hz、減衰比は約3%に設定した。

本図は、制御装置の1つであるサブシステム2の基礎側入力に対する仮想モデルの応答変位を表している。また、同一緒元でMATLABソフトウェアにより実施したシミュレーション結果を合わせて示している。両者は良

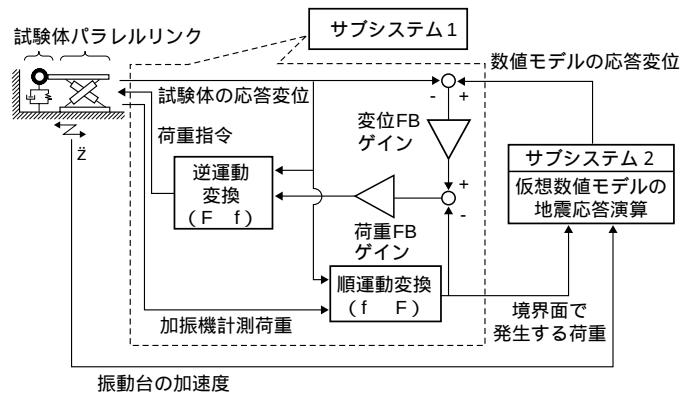


図7 制御システム概念 試験体と仮想モデルとの境界条件を満足させるために、境界面での内力及び試験体変位をフィードバックしている。

く一致しており、本サブシステムでの演算結果は妥当であることが分かる。

(2) 装置構成

制御装置を構成する各サブシステムでは、6自由度方向の制御信号処理及び荷重の運動変換演算をリアルタイムで行う必要がある。

また地震応答演算サブシステムでは、多自由度運動方程式の数値積分をリアルタイムで行う必要から32ビット浮動小数点DSP (Digital Signal Processor) を適用し、それらを組み合わせた並列演算処理を実施した。さらに、各サブシステムの演算タイミングを同期させたシステム構成化を図ることにより、サンプリング振動数1 kHz以上での高速演算処理を可能とした。

3.3 実験結果

(1) 荷重目標値から相対変位応答までの開ループ特性

試験体と仮想モデルとの結合部に相当する仮想ばね、すなわち変位FBゲイン定数の設定は、実用面を考慮し次のように実施した。多軸境界模擬装置への荷重指令(X, Y方向)を入力とし、試験体と仮想モデルとの相対変位を応答とした一巡伝達特性を求めた上で、古典制御理論を適用し、サーボ制御で十分な位相余有、ゲイン余有が得られるように設定した。

図9に各X, Y方向の一巡伝達特性計測結果を示す。本結果から、X方向は交差周波数10 Hz、位相余有約30°、ゲイン余有-5 dB、またY方向については交差周波数約9 Hz、位相余有30°、ゲイン余有約-10 dBに設定した。

(2) 地震波入力による性能検証

試験体及び多軸境界模擬装置を振動台に搭載し、振動台テーブルに地震波を入力した加振を行い、本複合耐震実験システムの性能を検証した。入力した地震波はEl-Centro波を用い、水平2軸同時加振を行った。

図10に地震波入力時の試験体の変位応答結果を示す。本図には、試験体及び仮想モデルから成るオリジナル構造系モデルの地震応答解析結果も破線で示した。本地震応答解析は、実験で得られた振動台の観測加速度を入力波としたものである。本図より、複合耐震実験手法で得られた実

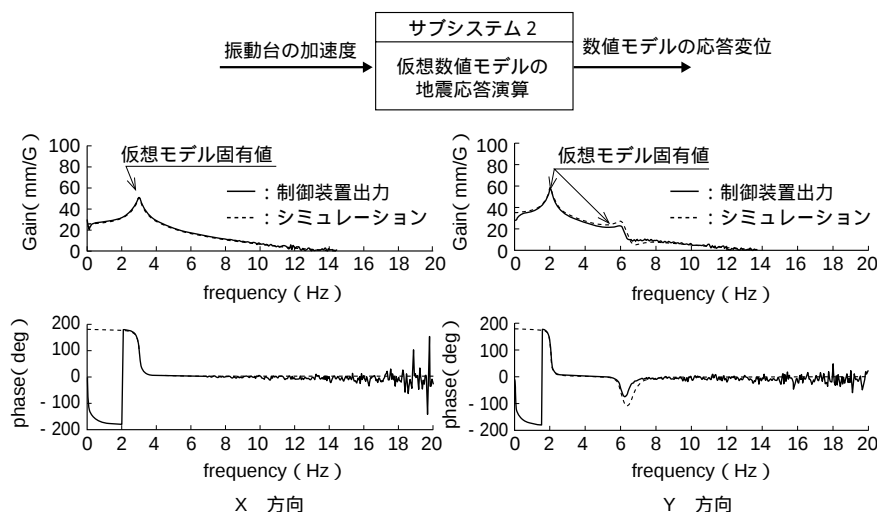


図8 仮想モデルの振動特性 仮想モデルは、X方向に1自由度でY方向には2自由度で構成しており、固有値は2～6 Hz、減衰比は約3%である。

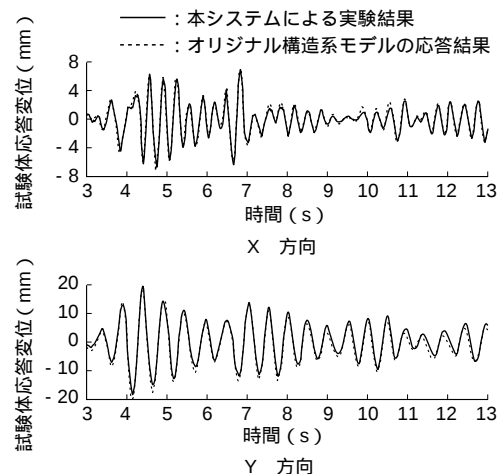


図10 地震波入力時の試験体の応答変位波形 El-Centro波による水平2軸同時加振の試験体応答変位は、オリジナル構造系モデルでの応答結果に良く一致した。

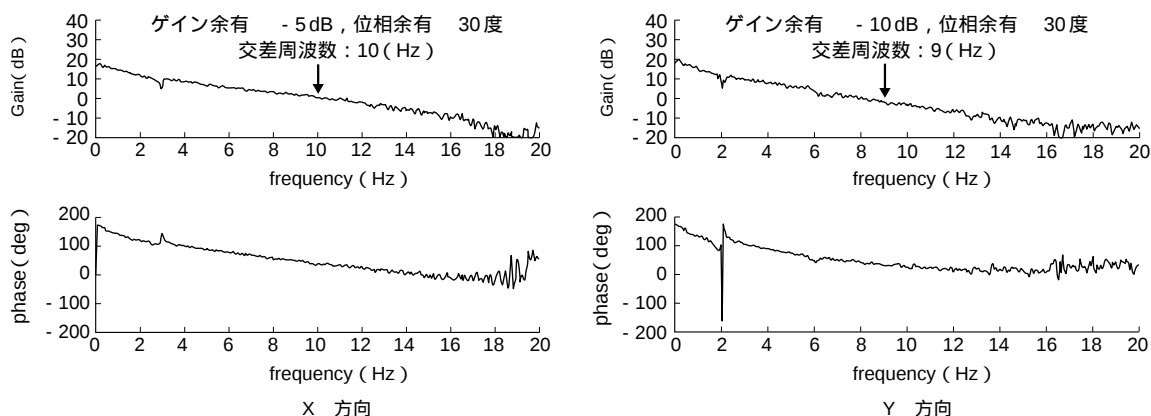


図9 荷重目標値から相対変位応答までの開ループ特性で10Hz、Y方向で9 Hzとなる開ループ伝達特性となる。

フィードバックゲイン調整により、交差周波数はX方向

験結果とオリジナル構造系モデルの解析結果の両者は良く一致している。これより、本システムの性能を確認することができた。

4. ま と め

本報で紹介した部分仮想モデルを用いた複合耐震実験手法は、部分仮想モデルの多軸応答に対応できるため、評価対象とする試験体の塑性変形や破壊現象などの非線形応答を近似的に再現することが可能となる。

したがって、相似縮尺全体模型を用いた従来手法に比べ、高精度な試験が可能となる。

本手法は、耐震実験の効率化及び高精度化に貢献できるものと確信する。

参 考 文 献

- (1) 広江ほか、実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験における制御設計の検討、JSME D&D '99 講演論文集 Vol.A (1999) p.471 - 474
- (2) 梶井ほか、実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験における制御設計の検討 (その2: 多軸システム)、JSME D&D '99 講演論文集 Vol.B (1999) p.63 - 66

- (3) 梶井ほか、実時間数値シミュレーションを組合せた耐震実験、第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集 (2000) p.55 - 58
- (4) 小菅ほか、Stewart Platform型パラレルリンクマニピュレータのForward Kinematics計算アルゴリズム、日本ロボット学会誌、Vol.11 No. 6, p.849 - 855
- (5) Fujita et al., Proving test on the performance of a multiple-excitation simulator, PVP-Vol.312, Seismic Eng., Book-No.H00975-1995



梶井紳一郎
技術本部
高砂研究所
振動騒音研究室



安田千秋
技術本部
高砂研究所
主幹 工博



広江隆治
技術本部
高砂研究所
制御システム研究室



山下敏夫
下関造船所
機械部 主席