

慣性力駆動型試験装置によるリアルタイム サブストラクチャハイブリッド試験システムの構築

京都大学工学研究科 正会員
京都大学工学研究科 フェロー
京都大学工学研究科 正会員

豊岡 亮洋
家村 浩和
五十嵐 晃

1. はじめに

実大のダンパー装置を対象とした動的応答実験手法の一つとして、慣性力駆動型試験装置が提案されている¹⁾。本報告では、仮想構造系にダンパーが設置された状態を想定し、その地震時応答を慣性力駆動型試験装置を用いて再現する、リアルタイムサブストラクチャハイブリッド試験システム (Real Time SubStructure Hybrid System, 以下 RTSSH システムと表記) を構築するとともに、その有効性を実験を通して検証した。

2. 想定する実験システム

慣性力駆動型試験システムとは、コンクリートスラブ、支承、および加振装置から構成されるダンパー試験装置であり、加振装置の慣性力によりスラブに振動を発生させダンパーを載荷するものである。ここで構築する試験システムは、想定構造物に試験対象ダンパーを設置した状態を想定し、この構造物の地震時応答を、載荷試験と数値計算とを結合することでリアルタイムに求めようとするものである。試験は次のような流れに従うとする。

1. 運動方程式を解き、ダンパー設置位置の応答を求める。このときダンパーの荷重は載荷実験により得られた反力を用いる。
2. 計算された応答を再現させるように加振装置を駆動する
3. ダンパーの反力を計測し、この反力を次のステップの応答計算に用いる

この一連のシステムを図-1 に示す。

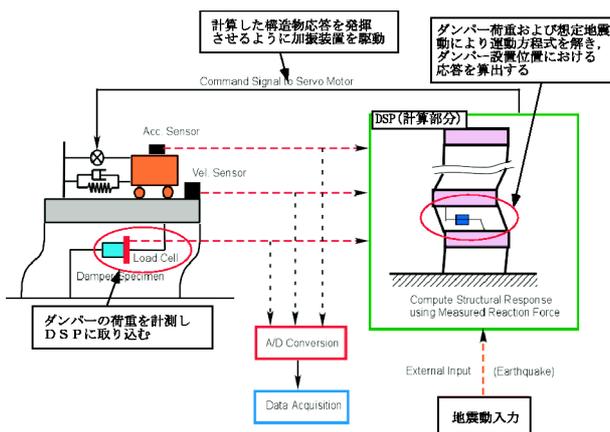


図-1: RTSSH システムの概要

3. 加振装置制御手法

ここでは、RTSSHシステムを実現するための加振装置の制御手法を提案する。試験対象として、図-2 に示されるように、質量 m_a 、減衰 c_a 、剛性 k_a なる一自由度構造物に、試験装置に装着したものと同一ダンパーが設置されたこと

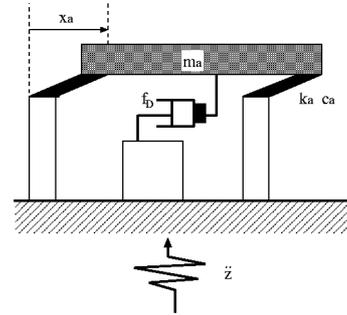


図-2: 地震入力想定振動系

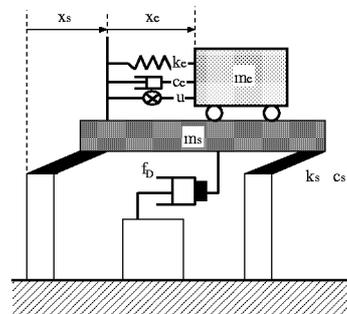


図-3: 試験システムのモデル

表-1: 試験システム諸元

装置質量	24.853 ton
固有振動数	0.55 Hz
等価減衰定数	3.86%
装置変位制約	±10 cm
加振装置制御力	0.75 G
加振装置最大変位	±50 cm
加振装置最大速度	150 kine

を想定する。この系について、地震動 \ddot{z} 作用下における運動方程式は

$$m_a \ddot{x}_a + c_a \dot{x}_a + k_a x_a + f_D = -m_a \ddot{z} \quad (1)$$

である。一方、図-3 に示されるように、試験装置に試験対象ダンパーを設置した場合の、システムおよび加振装置に関する運動方程式は次式のように表される。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + f_D = -f(t) \\ m_e (\ddot{x}_s + \ddot{x}_e) = f(t) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 m_s 、 c_s 、 k_s は試験装置の質量、減衰、剛性であり、 f_D はダンパー装置による制御力である。また、 m_e 、 \ddot{x}_e 、 $f(t)$ は、加振装置の補助質量、相対加速度、および桁に伝達される慣性力である。これらの諸元を表-1 に示す。

ここで、RTSSHシステムを実現するためには、想定構造系の変位・速度・加速度 ($x_a, \dot{x}_a, \ddot{x}_a$) を計測されたダンパー反力を用いて時々刻々求め、これと試験装置により発揮される応答 ($x_s, \dot{x}_s, \ddot{x}_s$) とが等しくなるように加振装置を制御すればよいことになる。このためには、式(1)と(2)の比較から、加振装置の慣性力を式(3)のように与えればよい。

$$f(t) = -m_s \ddot{x}_a - c_s \dot{x}_a - k_s x_a - f_D \quad (3)$$

実際の実験においては、補助質量の相対速度を制御するため、式(2)を用いて相対速度表現に変換したものを指令値として与える。また、ノイズおよびマスドリフトを抑制するためのデジタルフィルタ、および指令値に実現値を追従させるためのPID制御を導入している。

4. 検証実験

提案手法の有効性を検証するための実大実験の結果について述べる。実験対象構造としては、図-4のような一自由度系を設定した。構造系のパラメータは、質量 248.53 ton、固有振動数 1 Hz、減衰定数 2%と設定した。また、試験対象ダンパーとしては、電流を印可しないMRダンパーを用いた。この構造物の地震時の挙動を構築した実験システムにより再現するとともに、実験で得られた応答をダンパーの数値モデルを用いた応答計算の結果と比較することで、実験システムの成立性を検討した。想定する地震動入力として、ここでは El Centro NS 成分波を最大 30 gal にスケールしたものを設定した。

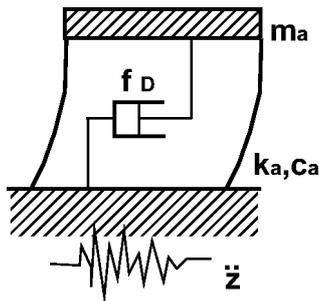


図-4: 想定構造物

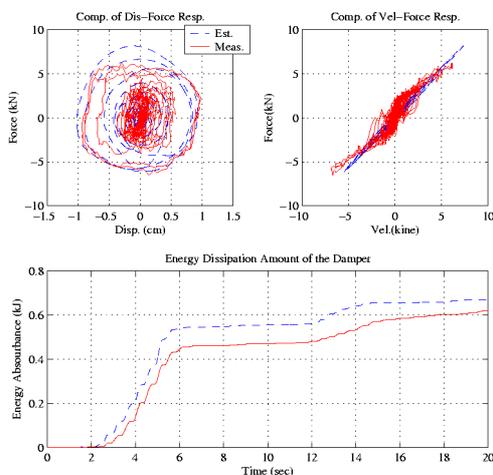


図-5: ダンパー履歴応答・エネルギー吸収時刻歴

図-5 には、ダンパーの変位・荷重、速度・荷重履歴およびエネルギー吸収時刻歴を、解析値と比較して示す。最大

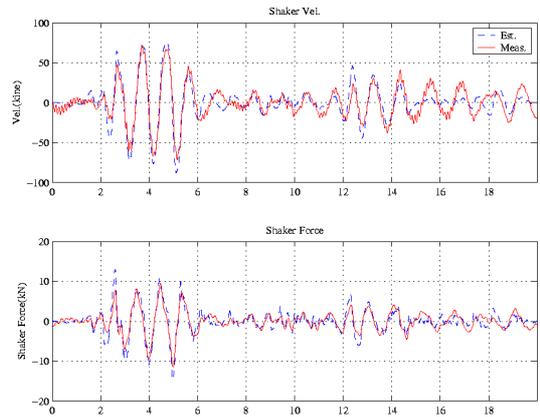


図-6: 加振装置速度・慣性力

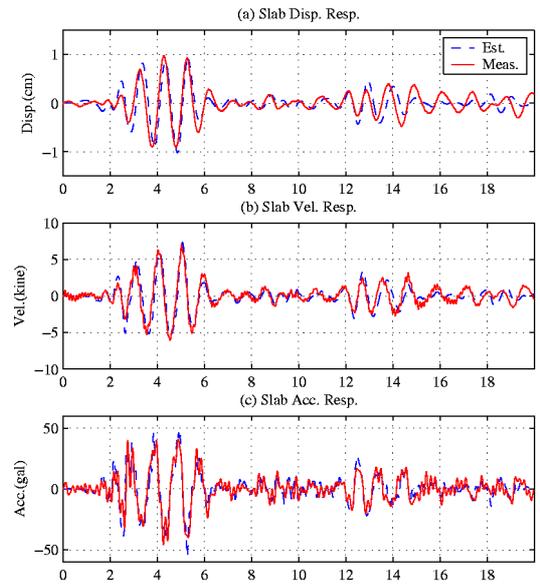


図-7: 試験装置桁応答の比較

応答における誤差はそれぞれ 3.7%、4.4%、7.4%であった。このように、変位、速度、荷重およびエネルギー吸収ともに、ダンパーのモデルは実際の挙動を良好に再現しており、解析値を真値と仮定して実験システムの成立性を検討することが可能であると考えられる。

図-6 には、加振装置の相対速度応答、及び加速度応答から逆算した桁への伝達慣性力の時刻歴を解析と比較して示す。図より、実現値は指令値を良好に再現しており、構築した実験システムおよび制御の有効性が確認された。

また、図-7 には、試験装置の桁変位・速度・加速度応答の比較を示す。このように、全体的な応答の増減傾向が精度良く再現されている。これらの結果から、提案した加振装置制御手法及び構築した試験システムを用いて RTSSH システムが実現可能であることが示された。

参考文献

1) Akihiro TOYOOKA, "Development of the Inertia Force Driven Loading System and Pseudo-Negative Stiffness Control for a MR Damper", 京都大学博士論文, 2003 年