

仮想質量を考慮した慣性力駆動型試験装置 によるダンパーの地震応答実験法

京都大学工学研究科 学生員 ○豊岡 亮洋
 京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和
 京都大学工学研究科 正会員 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⁾。本試験装置を用いて、すでに正弦波入力を想定した場合のダンパー装置の動的特性や地震動入力に対する制震性能の検証試験を実施しているが、さらに、種々の動特性を持つ実際の構造物に設置されたダンパー装置の地震動作用下における挙動の検証に適用できれば、より有効性の高いシステムとして機能すると期待される。本報告では、試験システムに仮想的な質量を想定して実際の地震動が作用した場合の動的挙動を再現する手法を検討した。また、実際のダンパー装置を用いた動的試験の結果についても報告する。

2. 加振装置制御手法

表-1 試験システム諸元

装置質量	26.853 [ton]
装置剛性	344.43 [kN/m]
装置減衰	6.32 [kN/m/sec]
固有振動数	0.57 [Hz]
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]

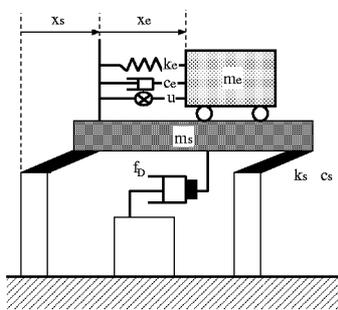


図-1 試験システム模式図

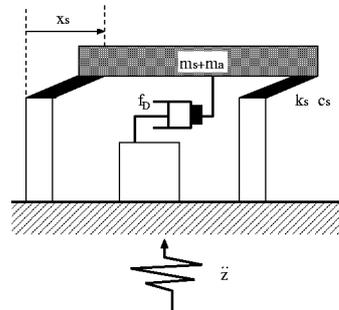


図-2 地震入力想定振動系

本試験システムの構成および諸元を図-1、表-1に示す。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。

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + f_D = -f(t) \\ m_e (\ddot{x}_s + \ddot{x}_e) = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、

m_s : 試験装置重量 c_s : 試験装置減衰 k_s : 試験装置剛性 x_s : 試験装置桁部変位
 m_e : 加振装置質量 c_e : 加振装置減衰 k_e : 加振装置剛性 x_e : 加振装置相対変位
 $f(t)$: 加振装置から桁に伝達される荷重 f_D : ダンパー装置による制御力

いま、図-2のように、剛性・減衰は試験装置と同じパラメータを有するが、質量は m_a (想定付加質量) だけ増加した系に対して地震動が入力することを想定する (想定一自由度系と称する)。このとき、運動方程式は次のようになる。

$$(m_s + m_a) \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + f_D = -(m_s + m_a) \ddot{z} \quad (2)$$

式(2)と(1)を比べると、想定一自由度系の挙動を再現するために加振装置が発揮すべき荷重は、離散時間系 (ステップ n) において $f_n(t) = m_a \ddot{x}_{s(n)} + (m_s + m_a) \ddot{z}_{(n)}$ と表される。これと加振装置の運動方程式より、以下が成立するように加振装置を制御すればよい。

$$m_e (\ddot{x}_{s(n)} + \ddot{x}_{e(n)}) = m_a \ddot{x}_{s(n)} + (m_s + m_a) \ddot{z}_{(n)} \quad (3)$$

加振装置は補助質量の相対速度を制御するため、相対速度指令値を求める。上式を $\ddot{x}_{e(n)}$ について解き、加速度を後退差分で表現すると、 n ステップにおける加振装置速度入力は次式のように決定できる。

$$\dot{x}_{e(n)} \simeq \dot{x}_{e(n-1)} + \left(\frac{m_a}{m_e} - 1 \right) \ddot{x}_{s(n-1)} \Delta t + \frac{(m_s + m_a)}{m_e} \ddot{z}_{(n)} \Delta t \quad (4)$$

3. 数値解析による検証

前節で述べた制御手法の有効性を確認するため、数値解析による検討を行った。想定入力地震動として El Centro NS 成分入力（最大加速度 30[gal]）を想定し、想定付加質量 m_a は 50 に設定した。すなわち、試験システムの質量および固有振動数は見かけ上それぞれ 76.85[tonf], 0.35[Hz] となる。

図-3 には、想定一自由度系の応答と、加振装置により再現した応答との比較を示す。図は上から変位、速度、加速度応答の比較である。このように、式 (4) に基づく手法により、想定する系の固有振動数が変化した場合においても良好に応答再現が可能であることが示された。なお、両者は完全には一致していないが、これは実験をより忠実に再現する目的で加振装置の動特性を解析に組み込んでいるため、その動特性の影響によるものである。図-4 には、このときの加振装置の相対応答を示す。図より、変位、速度、加速度とも加振装置の制約内に収まっていることが分かる。

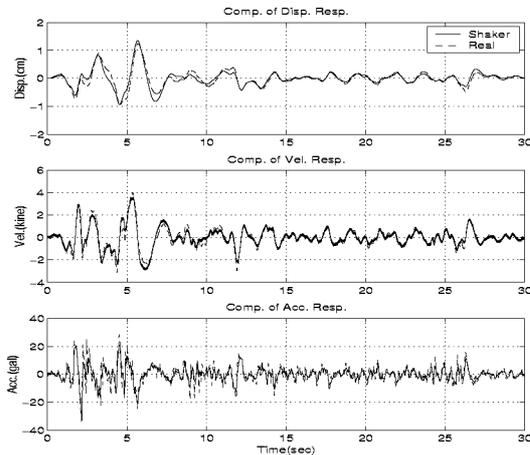


図-3 地震動入力応答と加振装置再現応答の比較

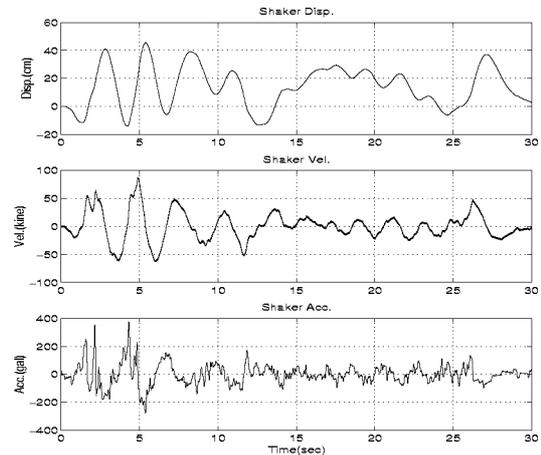


図-4 加振装置応答

4. 検証実験

試験対象ダンパー装置として、ピンガムダンパーを用い、本実験システムに El Centro NS 成分入力（最大加速度 30[gal]）が作用した場合の動的応答を再現する実験を行った。この実験は、実時間制御を含む実験システムの構築を行うことを目的としており、簡単のため想定付加質量 $m_a = 0$ と設定している。なお、加振装置のゲイン、位相を実時間で補償するため、DSP を用いたデジタルフィルタを適用している。

本システムに地震動が作用したときの応答を加振装置により再現するためには、計測した加振装置の加速度と地震動加速度の間に、試験装置の加速度を介した式 (3) が成立していればよい。 $m_a = 0$ においては、式 (3) の右辺は発揮すべき慣性力の指令値、左辺は加振装置による慣性力の実現値と解釈できるため、この 2 者を比較することで加振装置の制御精度を確認することが可能と考えられる。この比較を図-5 に示す。この図より両者はほぼ一致しており、良好に制御が行われていると考えられる。

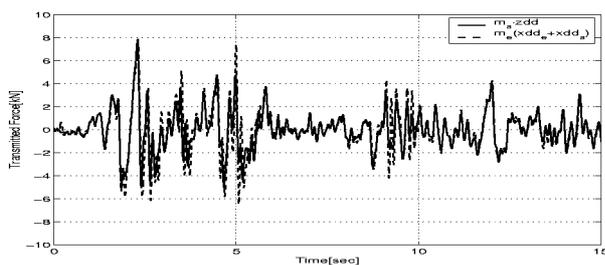


図-5 载荷慣性力の比較（析/加振装置）

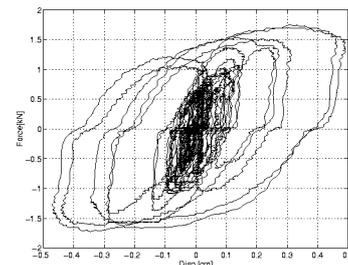


図-6 ダンパー履歴（実験）

図-6 には、実験により得られたダンパー装置の荷重-変位関係を示す。試験システムの固有振動数は実際の構造物に近くなるよう設定されているため、この実験結果をモデル化して動的解析に組み込むことで、等価線形化による解析に比べてより実際の挙動を把握することが可能であると考えられる。また、より複雑な装置を用いる場合においては、本システムを用いた実験と動的応答解析を実時間でリンクさせたハイブリッド実験を行うことで、モデルを作成することなく精度の良い動的応答解析が可能となるものと考えられる。このため今後は、この実験システムを、実際の構造システムの一部と想定した場合の、地震動作用下における応答を再現する手法について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI, Akihiro TOYOOKA, and Yosuke SUZUKI, Development of an innovative dynamic loading system for seismic energy absorbing devices, U.S.-Japan Cooperative Research in Urban Earthquake Disaster Mitigation, Aug. 15-16, 2001
- 2) Soong, T.T. and Dargush, G.F., Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, Wiley, 1997