

第 I 部門

慣性力載荷試験装置を用いたハイブリッド実験システムの構築及び検証実験

京都大学工学研究科 学生員 ○小林孝安

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

京都大学工学研究科 正会員 豊岡亮洋

1. 序論

本研究では、ダンパーを設置した構造物を想定し、ダンパーを実験部分として慣性力載荷試験装置で試験し、同時に実験部分よりダンパー荷重やダンパー設置部の応答をコンピュータに取り込み、残りの構造物の応答解析を行うことで、構造物全体の応答を再現できるリアルタイムハイブリッド実験システムを構築した。また、このハイブリッド実験システムを用いて、ダンパーを設置しない 1 自由度系の構造物を想定した動的实验を行い、解析との比較から開発したシステムの妥当性を確認した。さらに、実際にダンパーを設置し、1 自由度系想定モデルにおけるハイブリッド実験を行い、ダンパー荷重を取り込んだ場合でのシステムの妥当性を確認した。最後に、擬似負剛性制御を実装した場合のバリアブルダンパーの有効性を実験により検証した。

2. 慣性力載荷試験装置の概要

慣性力載荷試験装置は 1 自由度振動系の上に質量駆動型の加振装置を設置した構成となっており、試験対象ダンパーは、桁と床(固定点)との間に設置されている。この装置は、加振装置のマスを運動させ、これに伴って生じる慣性力により、実地震動が入力したときと同様な振動を桁及び試験対象のダンパーに発生させることが可能であり、装置の固有周期付近では小さな加振装置の運動、すなわち加振エネルギーに対して大変形を与えられるという特徴を有している。装置の緒元を表 1 に示す。

また、実験対象の制震装置として採用したバリアブルダンパーは、粘性流体を封入したシリンダーの間にピストンがあり、隔てられたシリンダー間をバイパス管で結合している。そのバイパス管には、外部指令に基づいて開度を調整するバルブが設置してあり、このバルブ開度を変化させることにより、任意の制御力を発生させることができる。慣性力載荷試験装置及びバリアブルダンパーの概観を写真 1 に示す。

表 1 慣性力載荷試験装置の緒元

桁の質量	21.76[ton]	水平剛性	408.6[kN/m]
マスの質量	2.0[ton]	減衰係数	7.49[kN・s/m]
最大変位	±10[cm]	固有振動数	0.66[Hz]

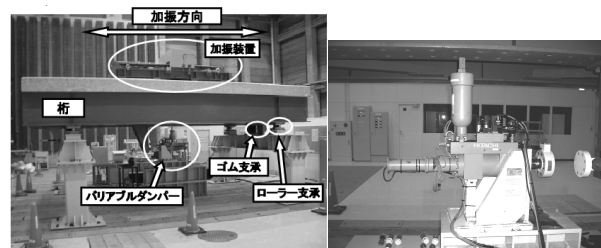


写真 1 慣性力載荷試験装置及びバリアブルダンパー

3. ハイブリッド実験システム

図 1 (a) のように試験対象ダンパーを設置した状態で地震動を受ける任意の構造物の応答を、図 1 (b) の慣性力載荷試験装置を用いて再現することを考えると、桁の応答再現のための加振信号作成方法として、図 1 に示す想定モデルと慣性力載荷試験装置の運動方程式を比較することによって (式 1) が得られる。

$$\ddot{x}_e(n) = -\ddot{x}_s(n-1) - \frac{m_s}{m_e} \left(\ddot{x}_a(n) + 2h_s \omega_s \dot{x}_a(n) + \omega_s^2 x_a(n) - \frac{f_d(n-1)}{m_s} \right) \quad (\text{式 1})$$

実験では、加振装置への入力速度制御で行うため、(式 1) によって求めたマスのステップ n における相対加速度を、前進オイラー法を用いて積分した値を加振信号として入力した。

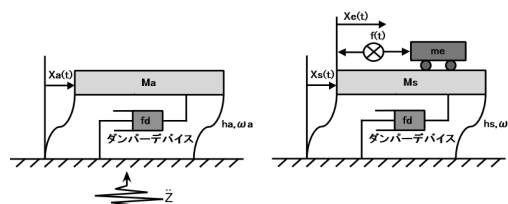


図 1 想定モデルと慣性力載荷試験装置の比較

慣性力載荷試験装置を用いたハイブリッド実験システムの流れについてまとめると以下ようになる。

- ダンパー設置部である桁の応答、加振装置のマスの速度、ダンパー荷重が計測され、動ひずみアンプ、A/D 変換器を通してコンピュータに送られる。

- 計測されたダンパー荷重と入力波に対して想定モデルの応答計算を行い、ダンパー設置部の応答を求める。
- 計算により得られた応答値と、計測された桁の加速度及びダンパー荷重を用い、提案した加振信号作成方法により、次ステップでのマスの目標相対速度を求める。
- この目標相対速度と計測されたマスの相対速度との偏差を用いて PID 制御を行い、入力電圧を決定する。
- 得られた入力電圧に対して、デジタルフィルタを通した後、D/A 変換器を通して出力する。
- 出力に対して、マスの一方向へ移動する不安定現象を防ぐために導入したマルチファンクションフィルタを通した後に、加振装置へ入力する。
- 入力により加振装置のマスが運動し、それに伴って生じる慣性力により桁が振動し、桁に固定されたダンパーを載荷することができる。

これを1ステップとして、DSP を用いた応答計算と載荷実験を同時に行うことで構造物全体の応答を求める。ハイブリッド実験システムの概略図を図2に示す。

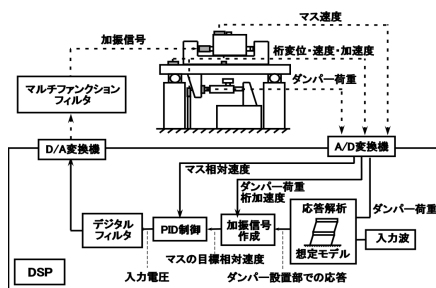


図2 ハイブリッド実験システム

4. ハイブリッド実験システムの検証実験

ダンパーを設置しない場合でのハイブリッド実験システムの検証実験を行った。入力波には EL Centro NS、JMA 神戸 NS、正弦波の周波数 2.0、1.0、0.66Hz を用い、想定モデルには図3に示すモデルを用いた。model 1-1 を対象とした実験結果を図4に示す。実験結果より、時刻歴、周波数領域において良い一致が得られ、ハイブリッド実験システムの妥当性を確認した。

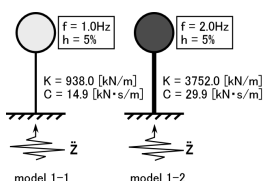


図3 想定モデル

5. バリアブルダンパーを実装したハイブリッド実験

実際にダンパーを設置し、パッシブダンパーとして用いた場合の応答結果を解析結果と比較して図5に示す。これより、ダンパー荷重を取り込んだ場合においてもハ

イブリッド実験が良好な精度で実施可能であることが分かる。また、ダンパーを設置することで固有周期付近において大幅に応答を低減できることを確認した。また、擬似負剛性制御を行った場合の結果を図6に示す。バリアブルダンパーに擬似負剛性制御を行うことで、想定モデルの応答を低減しつつ、同時にベースシアを小さく抑えることを確認した。

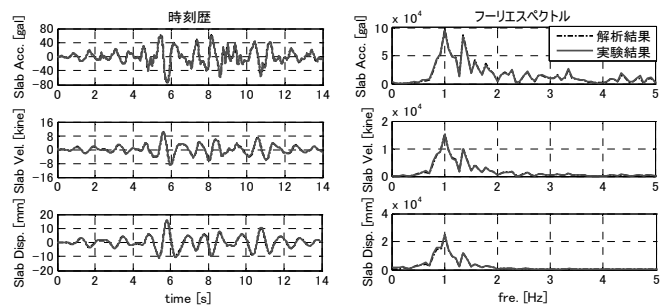


図4 応答比較(model 1-1 入力 JMA 神戸 NS max40gal)

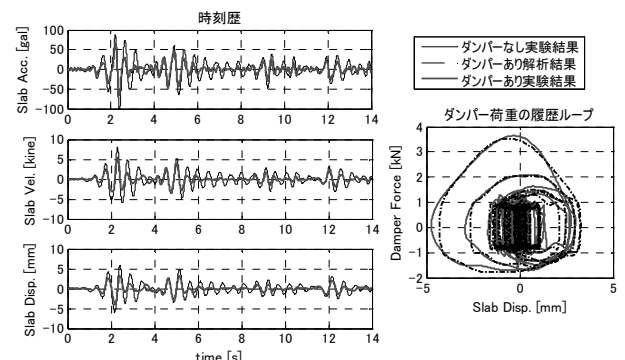


図5 パッシブダンパーによる想定モデルの応答比較

(model 1-2, 入力 El Centro NS max40gal)

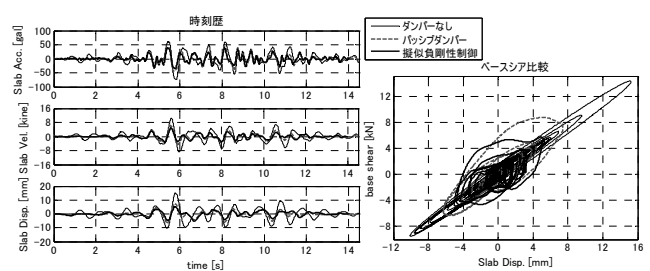


図6 擬似負剛性制御による実験結果の比較

(model 1-1, 入力 JMA 神戸 NS max40gal)

6. 結論

本研究では、慣性力載荷試験装置を用いたハイブリッド実験システムを構築し、ダンパーを設置しない状態での実験システムの検証を行い、システムの妥当性を確認した。また、実際にパッシブダンパーを設置し、ダンパー荷重を取り込んだ場合でのハイブリッド実験システムの成立性を確認し、ダンパーによる応答低減効果を確認した。また、擬似負剛性制御を実装したバリアブルダンパーの有効性を示した。