

加振装置を用いた隣接構造物の 地震時応答の再現実験

家村 浩和¹・五十嵐 晃²・豊岡 亮洋³

¹フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

構造物の振動制御手法の一つとして、振動性状の異なる2つの構造物をジョイントダンパーで接続し、その応答性状の違いを利用してエネルギー吸収を図る手法が提案されている。現在、実験レベルでこの制御手法の有効性を検証するため、実物大構造物を用いた実験システムによる検証を進めている。本報告では、ダンパーが装填された状態において任意の地震動が作用した時の、構造物の応答を再現する手法を検討するとともに、本手法を用いて行った実大隣接構造物の加振実験について報告する。

Key Words : full-scale structure, exciter, modal analysis, error analysis, complex modal analysis, full-scale experiment

1. はじめに

近年、構造物の地震時の応答を低減する目的で、多くの装置、およびそれらの制御手法が研究、開発されている。振動低減装置としては、TMD、AMD、ATMD、ダンパー装置、各種免震装置などが挙げられ、制御手法もLQ制御、 H^∞ 制御、適応型制御など、数多く提案されている。しかし、大地震動に対するこれらの装置・手法の実際の構造物における使用条件の下での実証的な検討は、特にセミアクティブ、アクティブ制御手法については、まだ十分になされているとは言えない状況にある。

こうした背景を踏まえて、現在、京都大学において3層および5層の実大フレーム構造、および加振装置、制御装置、計測機器など、実物大実験を行うための施設を整備している。この実験施設で検証可能な振動制御手法の一つとして、3層と5層構造物をダンパーなどで接続し、2つの構造物の振動性状の違いを利用してエネルギー吸収を図り、応答を低減する方式を想定している。これは一般に、ジョイントダンパーシステム(JDS)と呼ばれている。

本報告では、この実物大施設を用いた振動実験を行うための準備段階として、ダンパーで連結された構造物に任意の地震動が作用した時の構造物応答を加振装置を用いて再現することを想定し、実験上妥当と考えられる精度での再現応答を得るための加振装置の制御手法を、理論および数値シミュレーションの両面より検討した。また、実物大構造実験施設の詳細、および

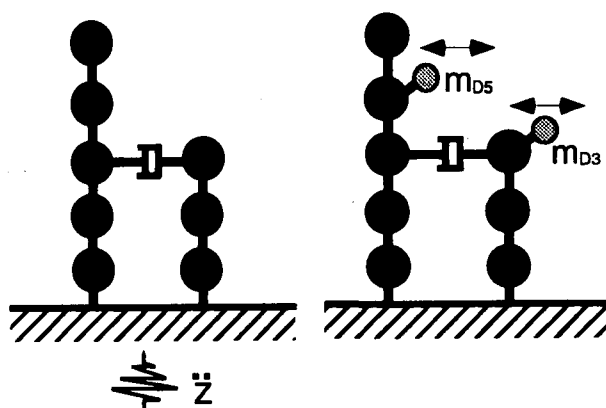


図-1 5層-3層連結モデル

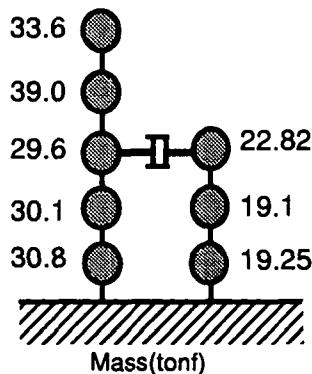
((a): 地震波作用時 (b): 加振装置による加振時)

本手法を用いてこれまでに行った実物大レベルでの振動実験結果についても報告する。

2. 構造物のモデル化と再現手法の概要

(1) 構造物のモデル化

実験を想定している2つのフレーム構造のモデル図を図-1に示す。この図のように、3層3階部と5層3階部との間をダンパーなどで連結することとする。5層、3層構造物の諸元については藤原ら¹⁾により同定されている。それらの値を図-2に示す。また、地震時応答の再現のための加振装置としては、3層3階部設置(2t)および5層4階部設置(5t)の2台を同時に用いることとする。



Mass(tonf)

$$K5 = \begin{bmatrix} 244.64 & -145.93 & 24.72 & -0.13 & -0.96 \\ -145.93 & 209.29 & -113.11 & 21.14 & -2.01 \\ 24.72 & -113.11 & 180.61 & -109.96 & 19.86 \\ -0.13 & 21.14 & -109.96 & 176.59 & -86.15 \\ -0.96 & -2.01 & 19.86 & -86.15 & 68.94 \end{bmatrix}$$

$$K3 = \begin{bmatrix} 74.93 & -56.04 & 9.87 \\ -56.04 & 89.40 & -42.24 \\ 9.87 & -42.24 & 36.29 \end{bmatrix}$$

..

Damping factor(%)

$$h3 = [3.5 \ 4.5 \ 5.5] \quad h5 = [2.0 \ 1.2 \ 0.8 \ 0.9 \ 1.1]$$

図-2 実大フレーム構造の諸元

(2) 応答再現手法の概要

いま、図-2に示した2台の加振装置を用いて地震時の応答の再現を図るにあたり、簡略化のため次のような仮定を設ける。すなわち、連結部分のダンパーによる減衰付加時の、2つの構造物の各次振動モード特性の変化、および連成の効果は無視できるものとする²⁾。このように仮定することにより、2つの構造物が独立と考えて、それぞれについて応答再現を行えばよいこととなる。

単独の構造物の地震時の応答再現手法については、鈴木ら³⁾の研究によれば、この構造物の場合、5層4階部設置の加振装置が発揮すべき加速度は次式で与えられる。

$$\ddot{y}_5 = \sum_{i=1}^5 \frac{\phi_{5,i}^T [M_5] \{1\}}{4\phi_{5,i} m_{Ds}} \ddot{z}_i \quad (1)$$

ここに、

$\ddot{y}_5$: 5層設置の加振装置の発揮すべき加速度

$\phi_{5,i}$: 5層*i*次モードベクトル

$[M_5]$: 5層質量マトリクス

$4\phi_{5,i}$: 5層*i*次モードベクトルの加振装置設置位置

(4F)における成分

m_{Ds} : 5層4階部加振装置質量 (= 5t)

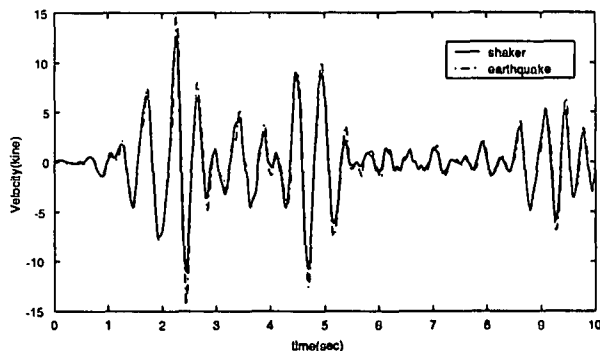


図-3 3層 3F 相対速度応答の比較

$\ddot{z}$: 再現すべき任意の地震動の時刻歴

$\ddot{z}_i$: 上記地震動時刻歴に*i*次固有振動数付近のみを通すフィルタ処理をしたもの

同様に、3層3階部設置の加振装置が発揮すべき加速度は、加振装置の設置位置が3Fであることに注意すると、次のようになる。

$$\ddot{y}_3 = \sum_{i=1}^3 \frac{\phi_{3,i}^T [M_3] \{1\}}{3\phi_{3,i} m_{Ds}} \ddot{z}_i \quad (2)$$

実験上は、(1),(2)により作成した、これら加振装置への指令を同時に与えることで、連結構造物の地震時の挙動を再現することとする。

図-3は、地震動としてEl-Centro NSを最大100(gal)にスケーリングしたものを想定し、ジョイント部の粘性減衰係数を250(kN/m/sec)と設定した時に、上記の再現手法を用いた場合の3層フレーム3F部における相対速度の再現応答と、Newmark- β 法で計算した応答(目標値と考える)との比較を示す。この図から、モード形状に関する仮定を設けても、概略的には十分な精度で応答再現がなされているが、応答振幅の大きくなる2.44(sec)付近においては比較的大きな誤差が生じていることが分かる。

(3) 仮定の検証

前節での手法は、ダンパーによるモードの連成を無視するとした仮定により導き出されたものであるため、その仮定の妥当性については別途検討する必要がある。そこで、ジョイント部の粘性減衰係数を様々に変化させたときの厳密なモード形状を複素固有値解析により計算し、それを2棟独立な場合(粘性減衰係数0の場合に相当)のモード形状と比較することとする。2つのベクトルの相違を表す指標としては、次式を用いる。

$$S_i = \frac{\|(\{\phi_i\}_{53}, \{\phi_i\}_8)\|}{\|\{\phi_i\}_{53}\| \cdot \|\{\phi_i\}_8\|} \quad (3)$$

S_i の存在範囲は0~1であり、2つのベクトルの間に相関が大きいほど S_i は1に近づき、逆に相関が小さ

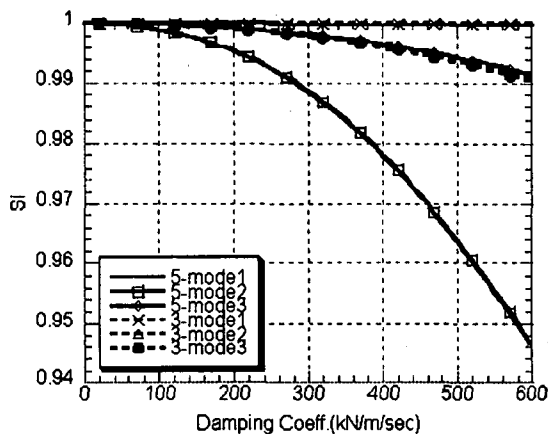


図-4 実モードと複素モードの誤差

く、2つのベクトルが直交に近くなるほど S_i は0に近づくことから、この指標によって2つのベクトルの相違を割合として把握することができる。この指標を、5層フレームのベクトルと3層フレームのベクトルの、それぞれ1-3次まで(独立時はバネにより連結したと考えたときの1-3次)について粘性減衰係数を変えながら計算した結果を図-4に示す。

この図から、5層2次モードの再現性が粘性減衰係数の増加に伴って若干悪くなっているものの、他のモード、特に1次モードについては誤差0.2%程度と小さく、減衰を付加しても主要なモード形状にはあまり影響がないと考えられ、仮定の妥当性を示すものと考えられる。

3. 実大実験の概要

次に、京都大学防災研究所構内に存する実大実験施設の構成と、これまでにを行った地震時応答再現実験の概要について述べる。

(1) 実大実験施設の構成

京都大学防災研究所構内の実大実験施設の概略を図-5及び以下に示す。

a) フレーム構造物

実大フレーム構造は、3層と5層が併設されており、互いの3階部分を連結する形で各種ダンパー等を設置することができる。その諸元は図-2に示したとおりである。

b) 加振装置

加振装置は、3層3階部と5層4階部にそれぞれ1台ずつ設置されている。加振装置重量は、それぞれ2(ton)、5(ton)である。これら加振装置への指令は、計測室のコンピュータのD/Aボード(サンプリング周波

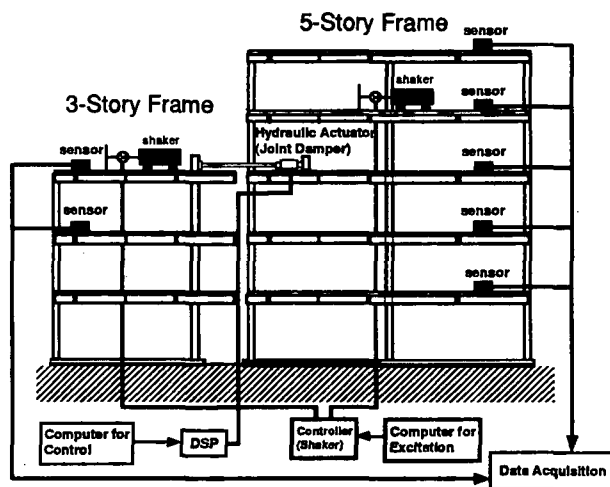


図-5 実大加振実験システムの概要

数100(Hz))を介して電圧信号として出力する。加振装置には、発生する力を制御するトルク制御モードと、補助質量の速度を制御する速度制御モードがあるが、本実験ではトルク制御モードを用いている。なお、加振装置の発生力(N)と電圧値(V)の間に成立する伝達関数は加振装置メーカーにより与えられており、実験時にはこれをもとに、発生力の時刻歴を電圧信号の時刻歴に変換して用いる。

c) 応答計測

計測項目としては、2台の加振装置の補助質量の絶対加速度、速度、ストロークの他、5層フレームについては全層の絶対加速度、速度、3層フレームについては23階部の絶対加速度、速度、変位を測定する。フレーム建設時期の違いから、現在のところ加振装置と5層フレームの応答計測については、制御室に設置のフィルターユニットを介して専用のパソコンで計測し、3層については別途A/Dを介して計測しているが、計測の簡略化のため、近く1系統に統一する予定である。

d) 動的アクチュエーター

3層フレームと5層フレームの3階部とを動的アクチュエーター(島津製作所製)で接続し、連結部での相対速度応答に定数フィードバックをかける制御を行うことで、任意の粘性減衰係数を有するダンパーデバイスを擬似的に再現した。アクチュエーターの載荷能力は静的には $\pm 7.5(\text{tf})$ 、動的には $\pm 5(\text{tf})$ であり、可動変位は $\pm 50(\text{mm})$ である。すなわち、この制約条件を満たす範囲で粘性ダンパーの挙動を再現することが可能である。

(2) 実験結果の概要

ダンパーで接続していない、それぞれ単独のフレームについて、応答再現実験を行った¹⁾。その結果を図-6、図-7に示す。入力地震動としては神戸海洋気象台NS成

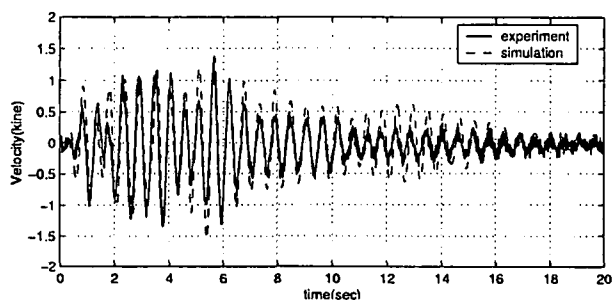


図-6 5 層 5 階相対速度応答比較

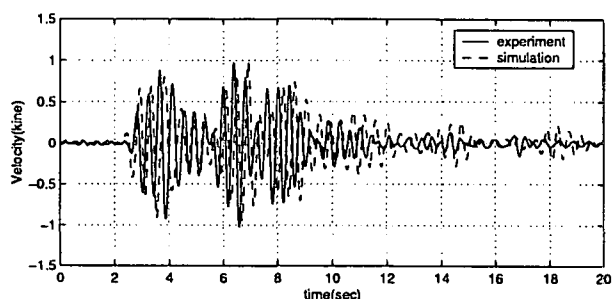


図-7 3 層 3 階相対速度応答比較

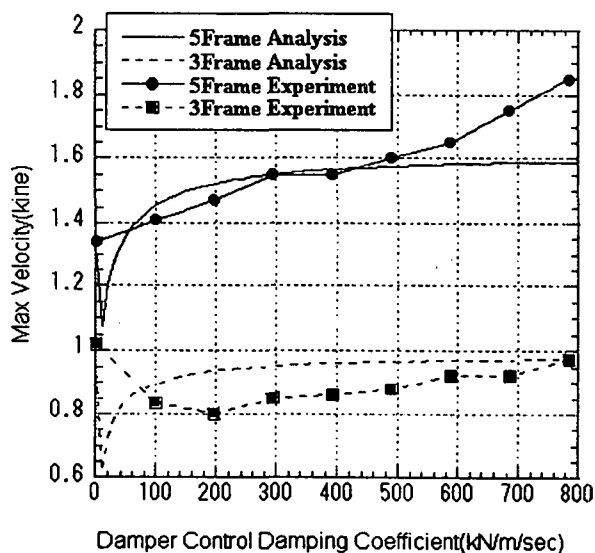


図-8 速度応答低減効果の比較

分記録を最大 5(gal) にスケーリングしたものを用いており、図-6 は 5 層フレーム 5 階部の相対速度応答を、図-7 は 3 層フレーム 3 階部の相対速度応答を比較したものである。

これらより、3 層フレーム、5 層フレームともに比較的良好な精度で応答再現が図られていることが見て取れる。誤差の要因としては、計測ノイズや加振装置の摩擦などによる誤差、及びモデル化誤差によるところが大きいと考えられる。また、5 層フレームについては、加振装置が 4 階部分、すなわち 2 次モードの節にあたる位置に設置されているため、2 次モードの再現性が低いことも誤差の一因になっていると考えられる。

次に、2 つの構造物をアクチュエーターで接続した実験を行った。粘性減衰係数（フィードバック定数）を 0 ～ 800(kN/m/sec) まで変化させ、その時の 5 層フレームと 3 層フレームそれぞれの屋上階における相対速度応答の時刻歴最大値を、解析値と比較したものを図-8 に示す。解析による予測値と比較すると、本手法による実験値は 500(kN/m/sec) 以下の粘性係数の範囲においては、ほぼ満足すべき再現性を示している。若干現れている誤差の要因としては、先述の原因の他、アクチュエーター自体の位相遅れ、摩擦要素などにより純粋な粘性要素が再現できていないことなどが考えられ、これらの点を改善することで、より正確な応答再現が図れるものと考えられる。

4. 結論

本報告では、実物大構造物及びジョイントダンパーシステムを用いた振動制御実験を行うため、ジョイントダンパーで接続された隣接構造物に地震動が作用した状態での構造物の応答を、加振装置を用いて再現する手法について述べた。周波数領域での構造物特性を考慮し、モード形状に関する仮定を導入することにより、加振用入力作成の簡略化を行い、またその手法および仮定に起因する誤差を、複素モード解析を用いて検討した。さらに、実物大構造物実験施設の概要、ジョイントダンパーの特性を示すと同時に、二つの構造物が非接続及び粘性ダンパーで接続された状態での振動応答再現を行った実験について述べ、提案する手法によりほぼ満足すべき再現性が得られることを示した。

参考文献

- 1) 家村浩和、五十嵐晃、藤原寅士良、ジョイントダンパーによる隣接構造物の震動制御と最大応答の評価、第 52 回年次学術講演会 I-B156、1997
- 2) 家村浩和、五十嵐晃、豊岡亮洋、加振装置による構造物の地震時挙動の再現に関する検討、構造工学論文集 Vol.45A pp719、1999
- 3) 鈴木祥之ら、鋼構造実大試験架橋を用いたアクティブ制震実験システム、日本建築学会近畿支部研究発表会、1997