

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

Study on simulation of earthquake response of structure using exciter

家村 浩和*・五十嵐 晃**・豊岡 亮洋***

Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI and Akihiro TOYOOKA

*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)

**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)

***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)

For structural control experiment with full-scale structure, it is necessary to simulate the seismic response of the structure by using a shaking device installed on the structure. Therefore, it is necessary to determine the appropriate input signal to the shaking device by taking properties of the structure and device into account. This paper shows a method to simulate structural response under earthquake ground motions by using excitation devices, and errors between the simulated response and seismic response are analyzed. The results of vibration experiments executed at Kyoto University are also reported.

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

1. はじめに

実大構造物を用いて地震時応答の制御などの実験を行う場合、任意の地震動が作用したときの構造物の応答を再現することがまず必要となってくる。しかし、実物大構造物の特性上、振動台のように直接入力地動を作用させることは難しく、可能であるとしても極めて不経済である。そのため、構造物に取り付けた加振装置を振動させ、そのマスの慣性力によって構造物を振動させることにより、地震時の応答を再現する手法が用いられている²⁾。その際、加振装置への入力は、想定している入力地震動や加振装置の設置位置、加振装置や構造物の諸元などにより異なってくるため、適切な入力値を与えられた载荷条件やパラメータから決定し、それらを実際の実験システムへ適用していく必要がある。

本研究においては、モデルケースとして宇治防災研究所内に設置されている5層、3層併設実大構造実験施設のフレーム構造を想定し、まず3層フレームについて任意の地震動が作用したときの構造物の応答を、設置している加振装置により再現するための理論的手法について検討し、つづいて制振実験を想定して、5層と3層をジョイントダンパーで結合した構造系についても同様の手法を適用することを検討する。また、これらの手法により得られた再現応答と実際の応答との誤差の解析を行った。なお、ジョイントダンパーで結合した構造系を考える際は、ダンパーがモード形状に及ぼす影響は無視できると仮定し、それぞれを独立と考慮してモード解析を行ったが、その仮定の妥当性は、複素モード解析によりダンパーの影響が入った状態での厳密なモード形状を計算することで別途検証した。最後

に、実際に加振実験を行うための応答計測・加振装置制御装置や解析システム等の整備を行うとともに、実際に地震波加振実験を行うことで、従来の研究により得られている手法、およびこれまでに行った解析の妥当性を検証した。

2. モデル構造物の概要

本研究で想定している実大構造実験施設の外観を写真-1に、地震時応答の再現を行うための加振装置(3層フレーム3階に設置)を写真-2に示す。このうち、5層フレーム構造物は、鈴木ら²⁾の研究において、単独の実大構造物の制振実験を行う際に用いられたものである。この構造物に隣接して、新規に3層のフレーム構造物を設置している。この実験施設は、2つの構造物をダンパーやアクチュエーターなどで接続し、ダンパーの粘性減衰力やアクチュエーターの発生力を構造物応答の計測に基づいてリアルタイムに制御することで応答の低減を図る、アクティブ/セミアクティブの制振実験を想定している。なお3層フレームの構造物パラメータは、一ツ町¹⁾によるモード形状、質量マトリクスの同定結果を基本とし、固有振動数、減衰定数の同定を行い、これらより剛性マトリクス・減衰マトリクスを求めた。3層フレームの質量、剛性、モードマトリクス、減衰定数、固有振動数をまとめて表-1に示す。

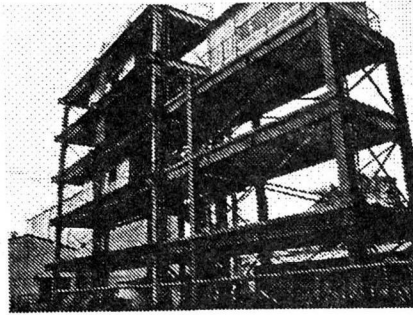


写真-1 実大構造実験施設

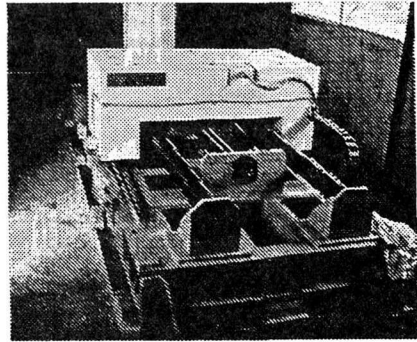


写真-2 3層3階部設置の加振装置

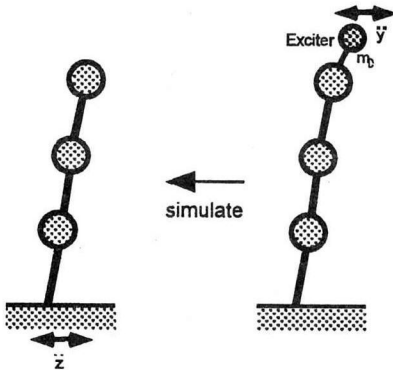


図-1 3層フレーム構造のモデル
(a): 地震波作用時 (b): 加振装置による加振時

表-1 3層フレーム構造の諸元

$$[M] = \begin{bmatrix} 19.25 & 0 & 0 \\ 0 & 19.10 & 0 \\ 0 & 0 & 22.82 \end{bmatrix} \text{ (ton)}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 82449 & -45772 & 7410 \\ -54176 & 70009 & -33478 \\ 8227 & -33037 & 29179 \end{bmatrix} \text{ (kN/m)}$$

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} 3.483 & 6.733 & -6.332 \\ 6.045 & 3.416 & 7.153 \\ 7.164 & -6.156 & -2.957 \end{bmatrix} (\times 10^{-1})$$

$$[h] = [0.055 \quad 0.04 \quad 0.045]$$

$$[f] = [2.31 \quad 7.38 \quad 12.63] (Hz)$$

3. 応答再現手法の理論的検討

3.1 単一フレームの応答再現

ここでは、まず単一フレーム構造の加振法の検討のため、図-1のようにモデル化した3層フレームを例と

表-2 加振装置の性能

重錘重量	1960kg
ストローク	±50cm
駆動モーター	AC Servo 11kw
最大制御力	1600kgf
ばね定数	20kgf/cm
装置重量	3200kg
外形寸法	3000L×1200W×1000H

して取り上げる。図-1(a)のように構造物に地震波が作用した状態を、(b)は構造物に取り付けられた加振装置により加振して再現することを想定していることから、この(b)図が本3層フレームの直接のモデル化となる。加振装置は付加質量、サーボモーター、およびボールネジ機構を用いて水平方向へ駆動させ、その慣性力により地震波が作用したとき((a)図の状態)の応答を再現するものである。この加振装置の性能を表-2に示す。以下では、まずこの単独フレーム構造について応答の再現手法を検討する。

(1) 運動方程式のモード分解

ここでモデルケースとして取り上げる3自由度構造物モデルの応答に関する運動方程式を、地震入力、加振装置による外力作用時それぞれの場合について導出する。地盤面より作用する地震動加速度を \ddot{z} とすれば、地動入力の場合の運動方程式は、相対変位応答を $\{\bar{x}\}$ とするととき、

$$[M]\{\ddot{\bar{x}}\} + [C]\{\dot{\bar{x}}\} + [K]\{\bar{x}\} = -[M]\{1\}\ddot{z} \quad (1)$$

となる。ここに、

$[M]$: 質量マトリクス

$[K]$: 剛性マトリクス

- [C] : 減衰マトリクス
 {1} : 慣性力の作用成分を表すベクトル
 (= [1 1 1]^T)
 z̈ : 入力地震動の加速度

同様に、この応答を再現するため3階部加振装置が発揮すべきマスの加速度を \ddot{y} とし、その時の変位応答を $\{\hat{x}\}$ とすれば、加振装置による加振の場合の運動方程式は

$$[M]\{\hat{x}\} + [C]\{\dot{\hat{x}}\} + [K]\{\hat{x}\} = [0 \ 0 \ -m_D]^T \ddot{y} \quad (2)$$

となる。ここに、 m_D は加振装置補助質量の値である。なお、[C] マトリクスについては、Rayleigh 減衰を仮定する。

ここで、応答変位はモードマトリクスとモード変位の積

$$\{x\} = \Phi \{q\} \quad (3)$$

により表現できる。(3)を(1),(2)に代入し、左から Φ^T を乗じると、地震動入力時のモード変位を $\{\bar{q}\}$ 、加振装置加振時のモード変位を $\{\hat{q}\}$ とすれば、 i 次モードについての運動方程式は、 Φ が正規化されているとき、それぞれ

$$\ddot{\bar{q}}_i + 2h_i \omega_i \dot{\bar{q}}_i + \omega_i^2 \bar{q}_i = -\phi_i^T [M] \{1\} \ddot{z} \quad (4)$$

$$\ddot{\hat{q}}_i + 2h_i \omega_i \dot{\hat{q}}_i + \omega_i^2 \hat{q}_i = -3\phi_i m_D \ddot{y} \quad (5)$$

と書ける。ただし、 $3\phi_i$ は、 i 次モードベクトルの加振装置を設置した質点 (node3) に関する成分を表す。

(2) フィルタ操作による加振装置加速度の決定

いま、地震動入力と強制外力とは各モードへの寄与の比が異なり、すべてのモード i について応答を同時に等しくすることはできない。したがって、(4),(5)の両辺をそのまま等置とすることはできない。

いま、(4),(5)の両辺に Fourier 変換を適用すると、 i 次モード座標の Fourier 変換はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{Q}_i(\omega) = \frac{-\phi_i^T [M] \{1\} \ddot{Z}(i\omega)}{(\omega_i^2 - \omega^2) + 2h_i \omega \omega_i} \quad (6)$$

$$\hat{Q}_i(\omega) = \frac{-3\phi_i m_D \ddot{Y}(i\omega)}{(\omega_i^2 - \omega^2) + 2h_i \omega \omega_i} \quad (7)$$

ここで、 $\ddot{Z}(i\omega)$ は \ddot{z} の、 $\ddot{Y}(i\omega)$ は \ddot{y} の Fourier 変換を表す。いま、(6),(7)の入力に対する応答倍率に相当する

$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2h_i \omega \omega_i)^2}} \quad (8)$$

なる関数は、 $\omega = \omega_i$ 付近で大きなピークが現れるものである。それゆえ、(6),(7)より、加振装置加振時の i 次モードの応答は、地動入力の i 次固有振動数 ω_i 付近の振動数成分のみが卓越したものであると解釈することができる。

ω_i 付近以外の振動数成分の影響は工学上無視することができるとして、 \ddot{y}_i が入力 \ddot{z} の ω_i 付近での周波数特性を十分に再現している加速度波形であると仮定すれば、地動入力と加振装置入力の場合のモード変位の値はほぼ一致するとみなすことができる。この仮定を満たすための \ddot{y}_i は、2つのモード外力を等置することにより、次のように求められる。

$$\ddot{y}_i = \frac{\phi_i^T [M] \{1\}}{3\phi_i m_D} \ddot{z}_i \quad (9)$$

ここに、 \ddot{z}_i は、 \ddot{z} の i 次固有振動数 ω_i 付近の成分を持つ入力波であり、入力地震動 \ddot{z} に対して、 i 次モード付近以外の他のモードの影響を打ち消すためのフィルタを周波数領域で作用させ、逆 Fourier 変換により時間領域に変換した入力波を表す。

この式が、系の自由度の数だけ (この場合は3個) 得られる。ここで、(9)の \ddot{z}_i が ω_i 付近のみの周波数成分を持つこと、および構造物は i 次固有振動数成分の卓越した周波数特性を持つ入力を受けると、 i 次固有振動モードに近い応答を示すことから、 \ddot{y}_i は、 \ddot{z} による応答の i 次モード成分を再現するため加振装置が発揮すべき加速度であることが分かる。実際の応答は、互いに直交する固有ベクトルの線形結合により、(3)式のように表すことができるので、実際に \ddot{z} の入力による構造物の応答を再現するために、加振装置が発揮すべき加速度は次式で与えられる。

$$\ddot{y} = \sum_{i=1}^3 \frac{\phi_i^T [M] \{1\}}{3\phi_i m_D} \ddot{z}_i \quad (10)$$

すなわち、(9)式の各モードごとの和をとれば求めるべき加振装置の加速度となる。この手法は鈴木ら²⁾の研究においても用いられており、完全に地震動入力を再現しているわけではないものの、制震実験には十分な精度で応答が再現できたことが報告されている。以上の手順を模式的に表したものを図-2に示す。

3.2 応答再現のシミュレーション

ここで、前節の手法に基づいて、地震応答再現のためのシミュレーションを数値計算により行う。地震動入力として El Centro NS 成分波を最大振幅 100gal にスケールしたものをを用いる。構造物パラメータは、表-1に示したものをを用いた。いま、(10)式に従い、実際に加振装置への加速度時刻歴を作成し、それを外力として3階部に作用させた場合の応答と、地震波を作

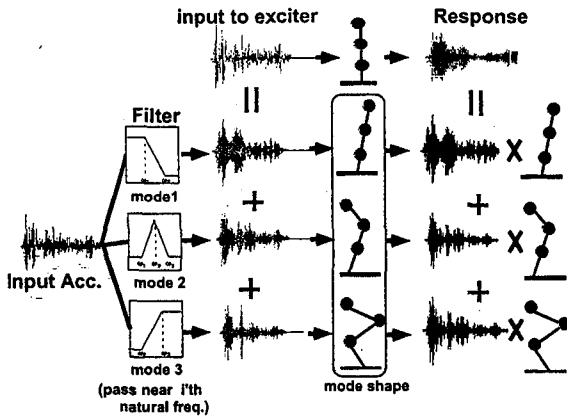


図-2 応答再現手法の概念図

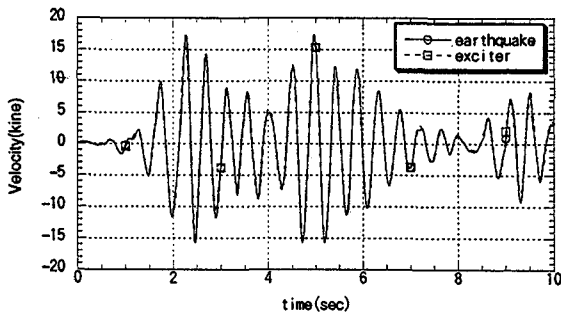


図-3 3階相対速度応答の比較

用させたときの応答とを比較する。図-3には、3階相対速度応答について、これら2つの場合の応答を重ねたものを示す。この図より、(10)式に従って作成された加振入力により、かなり正確に応答の再現が達成できることが分かる。構造物のモデルパラメータが正確に得られている場合には、この手法により相当正確に応答再現ができるものと考えられる。

3.3 連結構造物の応答再現

次に、5層、3層両フレーム構造物をダンパーで連結した状態を想定し、この構造システムに地表から地震動が作用したときの応答を加振装置を用いて再現することを考える。モデルを図-4に示す。この構造システムは、5層フレームの3階部と3層フレームの3階部とを連結機構（粘性ダンパー）で接続し、接続部の粘性減衰係数を適切に設定することで制振効果を得ることを意図したものである。加振装置については、3層の方はこれまでと同じ状態であるが、5層フレームには4階部に加振装置が設置されており、これら2つの加振装置を同時に作動させることにより応答を再現する。

地動入力の場合の運動方程式は、3層のみの場合と同様である。また加振装置による加振の場合は、加振機設置位置に注意すると、5層用の加振機の補助マス

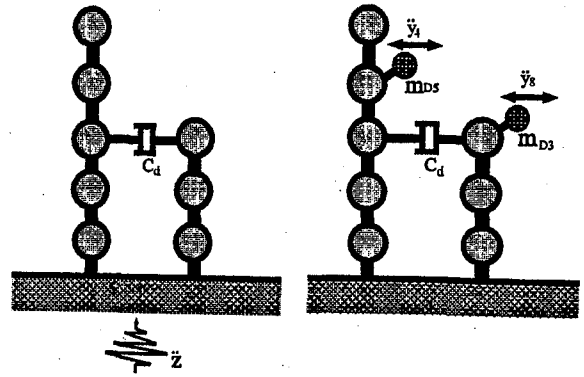


図-4 5層-3層連結モデル

(a): 地震波作用時 (b): 加振装置による加振時

の質量を $m_{D,5}$ 、3層用を $m_{D,3}$ とおけば、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [F] \quad (11)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -m_{D,5}\ddot{y}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -m_{D,3}\ddot{y}_3 \end{bmatrix}^T$$

と書ける。ここに、マトリクスは

$$[M] = \begin{bmatrix} [M_5] & 0 \\ 0 & [M_3] \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} [K_5] & 0 \\ 0 & [K_3] \end{bmatrix}$$

のように、5層の質量、剛性マトリクス、3層の質量、剛性マトリクスを 8×8 マトリクスに組み込んだものとなる。減衰マトリクスについても、基本的には同様に作成するが、構造物の内部減衰の他に、ダンパーの粘性係数 c_d による減衰力は、減衰マトリクス中の該当部分に組み込むことにより考慮する。この時、この構造システムは一般には非比例減衰となる。

ここで、応答再現のための入力を計算する過程の簡略化のため、Joint Damper による減衰付加時の各々の構造物の各次モードの特性変化および連成の効果は無視できるものと仮定する⁴⁾。すなわち、減衰付加のない場合の固有モード形ベクトルをそのまま用いることにより、前節までの議論に従って5層用、3層用の加振装置加速度を別々に作成し、それを同時に入力することにより応答の再現を図ることとする。この仮定については、以降の節で複素モード解析により別途検討する。3層構造物用の入力は(10)式を用いる。5層用については、加振機設置位置が4階部分なので、

$$\ddot{y}_5 = \sum_{i=1}^5 \frac{\phi_i^T [M] \{1\}}{4\phi_i m_{D,5}} \ddot{z}_i \quad (12)$$

となる。

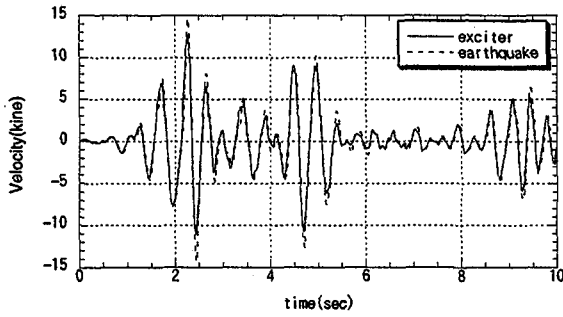


図-5 3階相対速度応答の比較 (cd=250(kN/m/sec))

図-5に、ダンパーの粘性減衰係数を 250(kN/m/sec) とした場合の3層3階部相対速度応答について、上記の方法による再現応答と地震波作用時の応答との比較を示す。入力地震動は El-Centro NS を最大 100(gal) にスケールしたものをを用いた。この図に示すように、概略的には十分な精度で応答が再現されているが、減衰が非比例形となるため、応答振幅の大きくなる 2.44(sec) 付近で特に大きな誤差が生じている。

4. 応答誤差の解析

以上によって得られた加振装置による応答再現手法を用いて得られる応答の再現精度を、地震波作用時の応答 (Newmark β 法 ($\beta = 1/4$) によって計算したもの、真値とみる) と比較することで検証する。本研究は、実験への適用を前提としているため、特に5層-3層連結構造物に対して、ジョイント部の粘性減衰係数を変化させたときの応答の再現性との関係を検討することとする。以下での応答計算、および誤差解析では、入力地震動として El-Centro 地震波を最大 100gal にスケールしたものをを用いた。

4.1 誤差のモード分解

まず、誤差の最大値が生じた時刻での誤差の形状をモードに分解することで、各モードの誤差への寄与を見ることとする。ここで、誤差の最大値が生じる時刻は、8質点すべてについて、目標値と再現応答値との差をとり、その残差ベクトルのノルムが最大になる点として決めている。各モードに分解した誤差ベクトルのノルムの、誤差ベクトルのノルムに対する割合を求めることで、誤差への各モードの寄与率を求めた。このうち相対速度の誤差についての寄与率を図-6、図-7に示す。この図によると、3層、5層いずれにおいても、誤差が最大になる時刻においては1次モードの影響が卓越している。さらに、粘性ダンパーの減衰係数が大きくなっても誤差に占める1次モードの割合はほとんど変化していないことから、高次モードの影響は1次モードに比べれば無視できる程度であることが分かる。

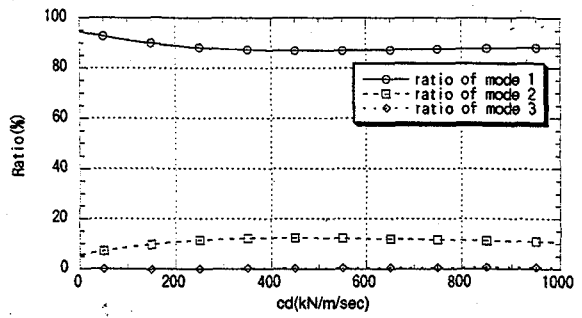


図-6 誤差に占める各モードの割合 (3層相対速度)

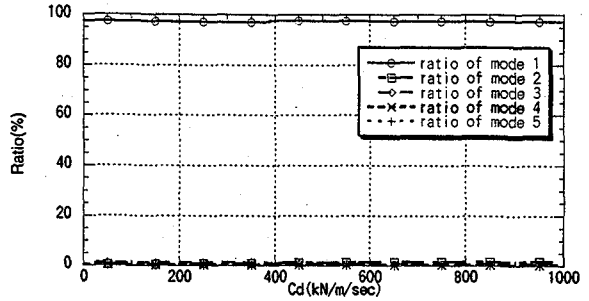


図-7 誤差に占める各モードの割合 (5層相対速度)

なお、1次モードが誤差に大きく影響していることから、特に5層フレームでは、上階になるほど誤差は広がる傾向にあると考えられる。

4.2 ベースシアによる誤差性状の把握

次に、構造物の第1層にかかるせん断力 (ベースシア) に着目し、ダンパーの減衰係数による変化や、その誤差に及ぼす影響について検証することとする。N自由度の構造物において、ノード i での加速度が $\ddot{\alpha}_i$ 、質量が m_i とすれば、この構造物のベースシアは、

$$V_{base} = \sum_{i=1}^N m_i \ddot{\alpha}_i \quad (13)$$

と表せられる。いま、5層フレーム、3層フレームそれぞれについて、加振装置による再現応答の場合と、地震波作用時の応答 (目標値) の場合とでベースシアのノルムの時刻歴を求め、その時間平均を比較することで、全体としてのベースシア応答の大きさの目安とした。

このグラフを図-8に示す。これを見れば加振装置による再現応答のほうが常にベースシアは小さく、また、ダンパーの減衰減衰係数増加に対する応答値の変化 (300(kN/m/sec) 付近で極小となった後に増加に転じている) も、加振装置使用時の応答は地動入力時と同じような性状を示している。また、ダンパーの減衰が大きくなるとモード形状も減衰の影響を受けて変化してくるため、目標値とのベースシアの値の開きは大きくなる傾向が生じると考えられるが、この傾向も予想通りに得られている。このことから、全体系の応答再現

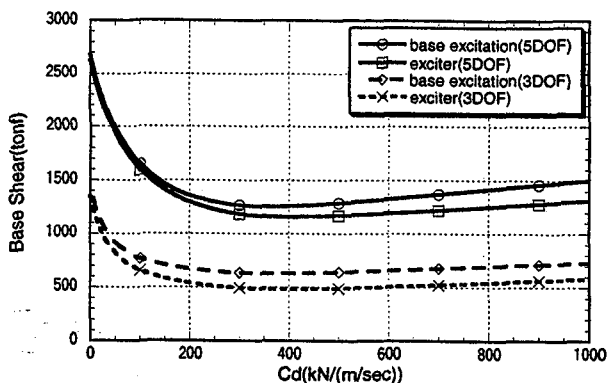


図-8 ベースシアの推移 (5層・3層)

性という意味において、本論文で提案した応答再現手法は、少なくとも c_D の付加による応答の増減傾向に関する限りでは目標値の応答特性を再現できていると見ることができ。実際の実験では、このベースシアの誤差の、目標値に対する割合を制御パラメータとして与える減衰係数に対して計算しておけば、実験により得られた応答に含まれる誤差を推測するための指標の一つになるものと考えられる。

なお、この両ケース間の差異は、加振装置の入力を構造物の絶対加速度応答を一致させるように定式化をすれば減少するものと考えられる。しかし、その場合には変位や速度応答の誤差が広がることを予想されるため、行う制御実験の目的に応じて適宜入力を選択する必要があると思われる。本研究の想定しているジョイントダンパーを用いた実験においては、層間の速度差に比例した減衰力を発生することが必要になるため、相対変位、速度を一致させることが適切と考えられる。

5. 複素モード解析による検討

これまでに行った解析では、計算の簡略化を図るという目的から、近似的に Joint Damper がモード形状に及ぼす影響は無視できるという仮定を置いていた。この仮定に基づき、2つの構造物に対して、それぞれが独立な場合の地震時応答を再現するための加振装置の加速度時刻歴を作っておき、それを同時に作用させることで、連結時の地震時応答の再現やモード解析ができるとした。ここで、この仮定の妥当性を別途検討しておく必要がある。そのため、前節のような手順で複素固有ベクトルを求め、独立な場合の5層のモードマトリクス、3層のモードマトリクスと比較し、減衰付加による2つのベクトルのずれの度合いを検証する。なお、独立ととらえた場合は5自由度系+3自由度系となり、連結状態の8自由度系の場合とで次数の整合がとれなくなるため、独立とした場合においても、2つの構造物を非常に剛性の小さいバネで連結したと仮定し、仮想的に8自由度系として取り扱う。

5.1 モード形状

いま、連結部の減衰係数を $0(\text{kN/m/sec})$ 、および $200(\text{kN/m/sec})$ としたときの1次から3次までのモードベクトルの実部と虚部をプロットしたものを図-9、図-10に示す。これらの図を描くにおいては、5層の5階に相当する部分のモードベクトルの値を1にするように正規化している。これらの図に示されているように、ダンパーによる連成が生じている場合 ($c_D=200(\text{kN/m/sec})$) の場合3層構造と5層構造のあいだに相対的な位相差を伴う複素モード形状が生じる。しかしながら、各構造個々のモード形状について見れば、自由度間の位相角は十分無視できるオーダーであり、提案手法の適用にはほとんど問題はないと考えられる。

5.2 モードベクトルの相違の評価

次に、より直接的な差異の把握手法として、5+3層構造および5層-3層連結構造の場合の2つの場合について、各固有振動次数に対応するベクトルの内積を、それぞれの大きさで割ったものを指標としてとることを考える。すなわち、2棟が独立としたときの i 次固有振動モードベクトルを $\{\phi_i\}_{53}$ 、連結構造物の i 次複素固有振動モードベクトルを $\{\phi_i\}_8$ とするとき、次式を指標とする。

$$S_i = \frac{\|(\{\phi_i\}_{53}, \{\phi_i\}_8)\|}{\|\{\phi_i\}_{53}\| \cdot \|\{\phi_i\}_8\|} \quad (14)$$

ここで、分子の (a, b) という表記は、ベクトル a, b の内積を表す。

S_i の存在範囲は $0 \sim 1$ であり、2つのベクトルの間に相関が大きいくほど S_i は1に近づき、逆に相関が小さい (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プロットしたものを図-11に示す。なお、連結剛性が無い場合の最適粘性減衰係数が $223(\text{kN/m/sec})$ であることを考慮すれば、 $600(\text{kN/m/sec})$ を上限としたプロットで十分ではないかと考えられる。

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0.5-1%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判断できる。

6. 実験への適用

最後に、これまでの手法を実際の加振実験に適用した実験を行った。

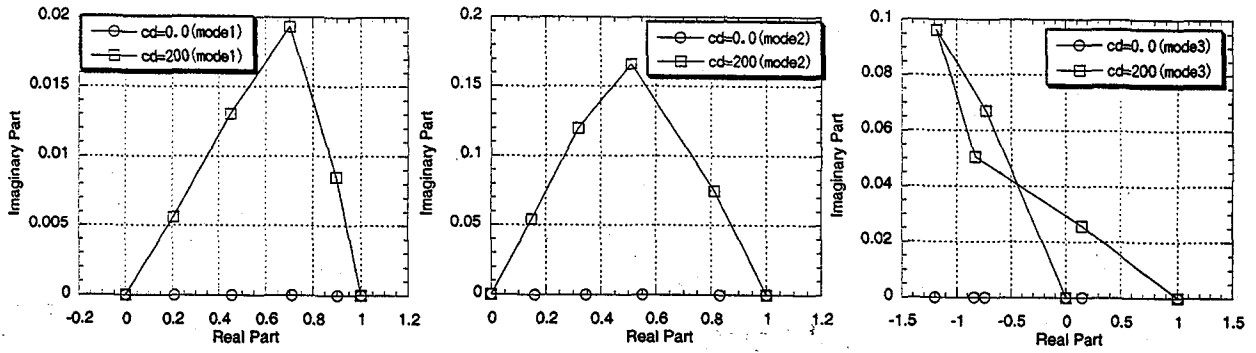


図-9 $C_d = 0.0(kN/m/sec)$ および $C_d = 200.0(kN/m/sec)$ でのモード形状の比較 (5層)

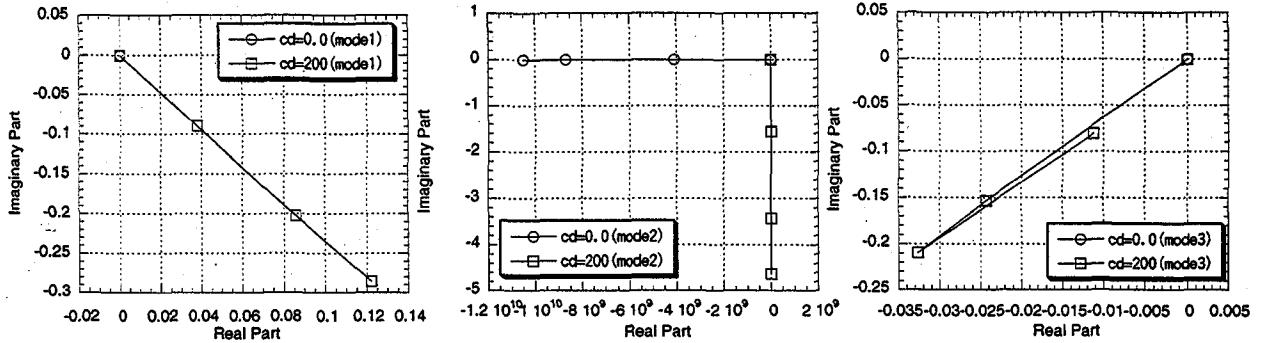


図-10 $C_d = 0.0(kN/m/sec)$ および $C_d = 200.0(kN/m/sec)$ でのモード形状の比較 (3層)

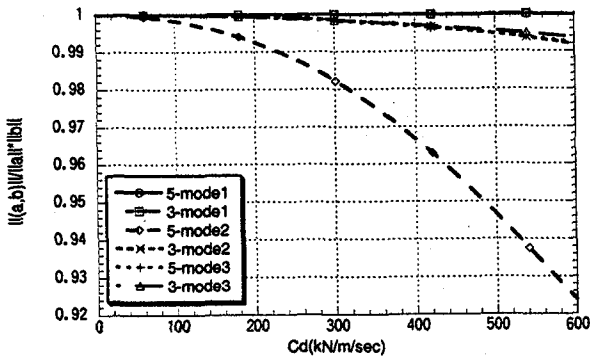


図-11 実モードと複素モードの誤差

6.1 実験システムの概要

実験は、京都大学防災研究所構内に設置されている実大構造試験施設のうち、3層フレーム構造について行った。すなわち、このフレームに対して地震波が作用したときの構造物応答を、3階部設置の加振装置により再現する実験を行った。実験施設の概要を図-12に示す。構造物には3階と2階に速度センサー(東京測振製・最大測定範囲 $\pm 100kine$ 、分解能 $300\mu kine$ 、測定周波数域 $0.1\sim 70Hz$)が設置されており、A/Dコンバータ(日本シンクネット製・分解能16bit)を介して計測する。計測はサンプリング周波数 $200(Hz)$ で行った。加振装置への指令は、コンピュータによるものと外部信号入力の2つの方法で与えることができる。なお、加振装置には、慣性力を目標値に追従させるトルク制御モードと、マスの速度を目標値に追従させる速度制御

モードがあるが、本研究の手法は3階部に強制外力を与える状態を想定しているため、実験にはトルク制御モードを使用した。すなわち、得られた加速度時刻歴に加振装置の質量を乗じたものを入力信号として与える。入力信号はすべて電圧信号で入力する必要があるが、電圧と発生力との関係は伝達関数の形で与えられており、与えるべき強制外力の時刻歴がわかれば、そこから容易に電圧信号の時刻歴に換算できる。トルク制御時の加振装置のボード線図(発生力(N)/入力電圧(V)と入力周波数(rad/sec)の関係)を図-13に示す。

いま、加振実験に用いる入力地震動を、El-Centro NS波の最大振幅を5galにスケールしたものとすると、この地震動による応答を再現するため加振機に入力すべき電圧信号は図-15のように得られる。この入力電圧を、コンピュータのD/A出力を介して加振機に入力し、実際に加振実験を行った。

このとき、3階相対速度応答の計測値と計算値の比較をを図-16に示す。

これらと比較すると、全体的な応答性状はほぼ再現できているが、ピークが大きさが計算値よりやや小さく出ていることがわかる。加振装置への入力を作成する際に、各モードの3階部にあたるモード変位の値を用いていることから、モード性状として用いたパラメータの再検討などを行うことにより、再現精度は向上する可能性があると考えられる。

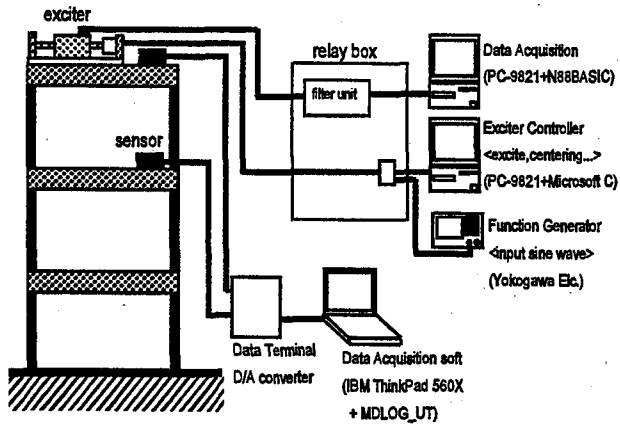


図-12 実大加振実験システムの概要

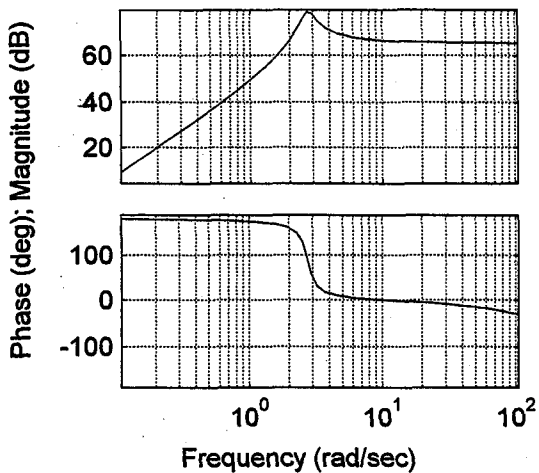


図-13 加振装置ボード線図(トルク制御)

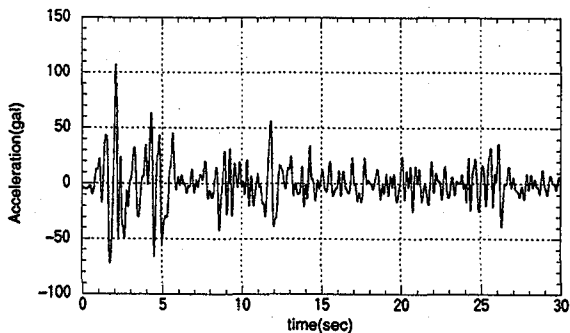


図-14 加振装置が発揮すべき加速度

7. 結論

本研究では、実大構造物の地震時応答を加振装置により再現する手法について、その理論展開と一部実験による検証を行った。本研究により得られた結果を次に示す。

- 実大構造物の地震時応答を、構造物の周波数特性を考慮することで加振装置により再現する手法について検討し、その手法により得られた再現応答と実際の応答との間の誤差について解析した。この手法により、十分な精度で地震応答の再現が可能

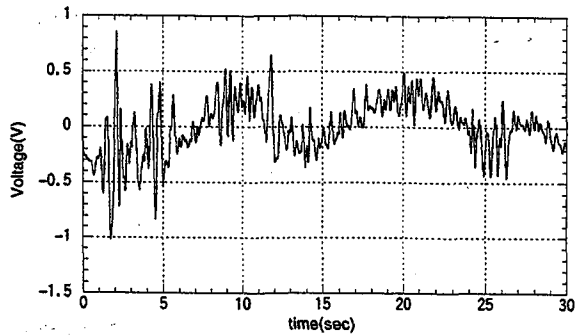


図-15 電圧信号に変換された入力信号

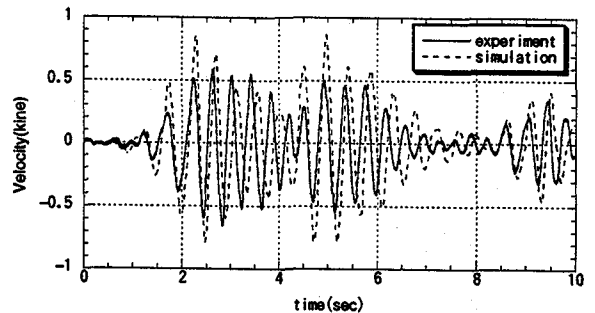


図-16 3層3階相対速度応答の比較

能であることを示した。

- ジョイントダンパーにより連結された構造物については、ダンパーがモード形状に及ぼす影響は無視できると仮定し、それぞれ独立と考えて加振機入力を算出する方法を提案した。この仮定に起因する誤差を、複素固有値解析により検証し、本手法の妥当性を示した。
- また、3層構造物については実際に地震波加振実験を行い、この方法論による加振の再現性を検証した。

謝辞： 本研究は、日本学術振興会の平成9,10年度未来開拓学術研究推進事業「大地震対応のインテリジェント制震構造の開発」(代表者：家村浩和)の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 一ツ町展也、ジョイントダンパを用いた隣接構造物の制震システムに関する研究、修士論文、京都大学、1998
- 2) 鈴木祥之・玉木利裕・山本雅史・加賀谷博昭・起煥・荒木時彦、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
- 3) 家村浩和、五十嵐晃、藤原寅士、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
- 4) 家村浩和、五十嵐晃、豊岡亮洋、加振機による実物大構造物の地震時挙動のシミュレーションに関する研究、第53回年次学術講演会 I-B244、1998 (予定)

(1998年9月18日受付)