

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	振動台実験を模擬する起振機を用いた多層制振フレームの簡易実験手法の提案：その5 逆伝達関数を用いた実験手法の提案および実験的検証(構造)
Title	
著者(和文)	石田琢志, 佐藤 大樹, 北村春幸, 佐々木和彦, 宮崎充, 岩崎 雄一, 吉江慶祐, 石井正人
Authors	Takushi ISHIDA, daiki sato, Haruyuki Kitamura, Kazuhiko Sasaki, Mitsuru MIYAZAKI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 80, , pp. 369-372
Citation(English)	, Vol. 80, , pp. 369-372
発行日 / Pub. date	2010, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008729976

振動台実験を模擬する起振機を用いた多層制振フレームの簡易振動実験手法の提案

その5 逆伝達関数を用いた実験手法の提案および実験的検証

構造—振動

正会員 ○ 石田琢志^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1} 正会員 北村春幸^{*1}
 " 佐々木和彦^{*2} " 宮崎充^{*2} " 岩崎雄一^{*2}
 " 吉江慶祐^{*3} " 石井正人^{*3}

制振構造 速度依存型ダンパー 振動実験

逆伝達関数 慣性質量装置 起振機

1. はじめに

本報その3, 4では, 振動台加振時に得た速度応答波形を加振力として, その振幅を変化させることで強震下の動的挙動を再現する実験手法の解析的な提案および実験的な検証を行った。しかし, 提案した手法には, 最適加振力の算出が容易でないことや, 応答波形を用いるために共振成分を多く含み, 応答振幅が増大するといった問題点も報告されている¹⁾。そこで, 本報では, これらの問題点を包括する実験手法として, 逆伝達関数を用いた起振力の算出手法を提案する。同時に, その有効性を実験的に検証した結果についても報告する。

2 実験手法のアルゴリズム

2.1 実験手法の概念

線形・比例減衰型のシステムについて, 振動台加振時(添え字: s)と起振機加振時(添え字: v)の振動方程式をモード分解すると, 各層の相対変位応答 $\{x\}$ は, 各次数の刺激係数 ${}_j\beta$ と固有ベクトル $\{u\}$, モード応答 ${}_jq$ の積の総和により算出される(式(1))。

$$\{x_s\} = \sum_{j=1}^N {}_j\beta_s \{u\} {}_jq_s, \{x_v\} = \sum_{j=1}^N {}_j\beta_v \{u\} {}_jq_v \quad (1a-b)$$

ただし,

$${}_j\beta_s = \frac{\{u\}^T [M] \{f\}}{\{u\}^T [M] \{u\}}, {}_j\beta_v = \frac{\{u\}^T \{\tilde{f}^{(k)}\}}{\{u\}^T [M] \{u\}}, \{\tilde{f}^{(k)}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2a-c)$$

$[M]$: 質量行列である。ここで, 式(1)を1次モードについてのみ考える(図1)。図1より, 振動台加振時における任意の層の応答を再現しようとした場合, 起振機加振時のモード応答は, 各加振時の刺激係数の比率を振動台加振時のモード応答に乗じて求めることができる。この時, 固有ベクトルは加振方法により変化しないため, 再現した層以外の応答も振動台加振時の応答と一致することがわかる。このことから, 1次モードの成分が支配的な振動応答であれば, 外力項が1つでも振動台で加振した際の応答をある程度再現

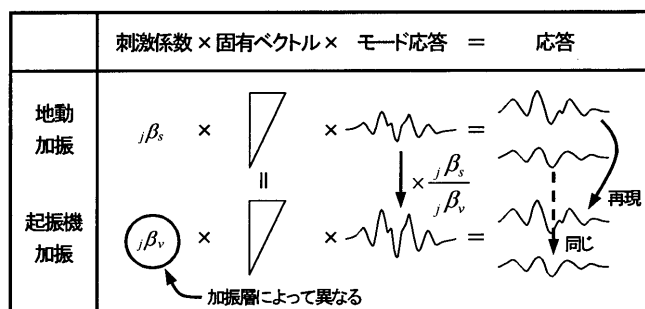


図2 実験手法の概念

することは可能であると推察できる。しかし, 高次モードの影響は各層によって異なるため, 加振層によってはその再現性にはばらつきが生じることが考えられる。

そこで, 本報ではまず, 任意の層の相対変位応答を模擬できる加振力の算定手法について論じる。次に, 振動台加振時の最大相対変位応答分布を最も精度良く再現できる加振層(最適加振層)の推定手法について述べる。その後, 算出した加振力を用いた時刻歴応答解析を行い, 最適加振層の推定手法の妥当性を検証する。その際, k 層加振時における目標応答との誤差は, 式(3)の残差平方和 $r^{(k)}$ により評価する。そして, 算定した最適加振層で加振した際の応答と振動台加振時での応答の比較から, その再現性を把握し, 提案した実験手法の有効性を検証する。

$$r^{(k)} = \sum_{i=1}^N (x_{v,i} - x_{s,i})^2 \quad (3)$$

2.2 加振力の算定

振動台加振時における任意の層の応答を目標応答とし, この目標応答に含まれる高次モードまで精度良く再現できる加振力を算定する手法として, 逆伝達関数を採用する。解析モデルは, 本報その3で用いたせん断10質点モデルである。振動台加振波は位相特性 Hachinohe 1968 EW (ART-Hachi), JMA Kobe 1995 NS (ART-Kobe), Tomakomai 2003 NS (ART-Toma) の告示波3波の時間軸を1/4に圧縮し, コーナー周期を0.16sとした模擬地震動とし, 目標の応答レベルが層間変形角 $R=1/400$ (Case-1) と $1/200$ (Case-2) 程度になる

ようそれぞれの地震波を比例倍している。なお、本報では、全層に速度依存型ダンパーを配置したモデルのみを対象とする。ダンパーのモデル化は、事前に実施した部材実験結果から、ダッシュポットとばねを直列に配列した Maxwell モデルとして作成した。

逆伝達関数は重ね合わせの理が成立する線形モデルにのみ適用できる。Maxwell モデルは振動数により内部剛性と粘性係数が時々刻々変化するため、等価な線形モデルに置換する必要がある。そこで、Caughey の等価線形化法²⁾に従い算出した等価粘性定数と、振動数を 1 Hz、振幅を 2 mm に制御した正弦波加振時に得られる等価剛性から Kelvin モデルに置換し、加振力 $F(t)$ の算定を行う。算出式を以下に示す。式 (4) をラプラス変換することで、入力から出力までの伝達関数 T は式 (6) に導かれる³⁾。なお、式中の s はラプラス演算子である。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BF \\ y = Cx \end{cases} \quad (4a-b)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\tilde{f}^{(k)} \end{bmatrix}, C = [I \quad 0] \quad (5a-c)$$

$$y(s) = T(s)F(s), T(s) = C[sI - A]^{-1}B \quad (6a-b)$$

ここで、 A : システム行列、 B : 入力行列、 C : 出力行列、 M : 質量行列、 K : 剛性行列、 D : 減衰行列、 I : 単位行列、 x : 状態ベクトル、 y : 出力ベクトルである。ただし、アクチュエータと治具部の質量の半分 m_a を試験体が負担すると考え、

$$M = M_f + \text{diag}(\tilde{f}^{(k)} \cdot m_a) \quad (7)$$

とする。なお、 M_f : 試験体質量行列である。これより、 k 層の応答 y_k を再現する加振力は、 k 層の逆伝達関数 T_k^{-1} を用いて下式により求めることができる。

$$F(s) = T_k^{-1}(s) \cdot y_k(s) \quad (8)$$

式 (8) は周波数領域での表現であるため、これを逆ラプラス変換することで、時間領域での加振力 $F(t)$ を算出することができる。なお、本報では加振層と応答を再現する層は同じとして検討を行う。

2.3 最適加振層の推定

2.1 節で述べたように、加振層によって刺激係数が変化するため、高次モードの影響は各層によって異なる。そのため、振動台加振時応答の再現性は、加振層によりばらつきが生じると考えられる。2.2 節で算出した加振力を用いて時刻歴応答解析を行い、振動台加振時応答の誤差を式 (3) により評価すれば、最も再現性が高くなる加振層（最適加振層）を算定することは可能であるが、その場合、加振

する全層についての応答解析を行う必要があり煩雑である。そこで、本節では、時刻歴応答解析を行わずに最適加振層の推定を試みる。

ここで、対象モデルは非比例減衰系システムであるため、本来ならば複素固有値解析を行うのが妥当であるが、利便性を考え、本報では、質量と等価線形化により算出した等価剛性を用いた実数固有値解析により最適加振層を推定する。

今、 k 層加振時における各層の最大相対変位応答の推定について考える。各次の応答の最大値は同時に生じないと考え、最大応答の近似値を、各次応答成分の 2 乗和平方 (SRSS)²⁾ を用いれば、次式により示すことができる。

$$|x_{\max}| = \sqrt{\sum_{j=1}^N |\beta_j \{u\}_j q_{\max}|^2} \quad (9a)$$

$${}_j q_{\max} = {}_j \alpha \cdot y \quad (9b)$$

一般に、モーダルアナリシスを行う場合は応答スペクトルから ${}_j q_{\max}$ を算出するが、本研究では、再現する応答が与えられているため、目標応答である k 層の相対変位フーリエスペクトルから各次の応答比率 ${}_j \alpha$ を直接求める。ただし、 ${}_j \alpha$ はスペクトルの起伏に大きく依存するため、等価線形化の精度やダンパーの内部剛性による周期変動を考慮する必要がある。そこで、1 次の固有振動数から $\pm 10\%$ に相当する範囲のデータ数を算出し、各固有振動数でのフーリエスペクトル値は、このデータ数間の平均値を用いることとした。

次に、応答を再現する k 層の最大値が同じとなるように応答量 y (>0) を式 (10) より定める。

$$y = \frac{|x_{\max,k}|}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |\beta_j \cdot {}_j u_k \cdot {}_j \alpha|^2}} \quad (10)$$

応答量 y が求めれば、式 (10) より k 層加振時における最大相対変位分布を推定できる。これを全層について行い、算出した最大相対変位分布と目標応答との誤差を式 (3) により評価し、最適加振層を推定する。図 2 に、Case-2 における推定式から予測した目標応答との誤差分布を示す。また、全層について時刻歴応答解析を行い算出した誤差分布（精解）も合わせて併記する。なお、図 2 の横軸は、推定・精解値とも、それぞれの誤差の最大値により基準化した $r^{(4)}$ である。また、図中の○印は推定値から導いた最適加振層を、×印は精解値から導いた最適加振層をそれぞれ示し、○印は最適加振層を除き、推定値の誤差が最も小さかった上位 2 つを表している。図 2 より、いずれの地震波においても、推定値と精解値の誤差分布は似た傾向を示すことから、提案した本手法は概ね有効であると判断できる。推定した最適加振層と、精解の最適加振層は異なるが、本検

討範囲においては各地震波とも○印の上限値と下限値の間に×印が存在するため（図中の点線範囲）、この範囲の加振層についてのみ時刻歴応答解析を行えば最適加振層の算定が可能である。しかし、この結果は解析モデルや地動加振波に依存するものと考えられるため、これらの影響については今後検証を行っていく必要がある。

以上により、最適加振層の推定法を提案した。本手法は等価線形化の精度にも依存するため、精確な最適加振層の推定は難しく、最終的には時刻歴応答解析を行う必要があるものの、その加振層の選定範囲を限定できる可能性を示すことができた。

24 応答比較

2.3 節で算定した最適加振層での応答と振動台加振時応答との比較から、その再現性を把握し、本実験手法の有効性を検証する。地動加振波ART-KobeのCase-2における振動台と起振機加振時応答の比較を図3に示す。なお、加振層は9層である。最大相対変位分布を再現することに主眼を置いている今回のケースでは、全体応答に寄与する相対変位・速度応答において、振動台加振時と精度の良い一致を示す結果を得ることができ、提案した実験手法の妥当性を示すことができた。しかし、層間変位に寄与する層せん断力・層間変位・速度応答およびエネルギー吸収量では、概ね傾向は捉えているものの、特に上層において振動台応答を上回る結果を示した。

ここで、層間変位応答における目標応答との誤差分布を式(3)より算出し、図4に示す。また、図2に示した相対変位応答の誤差分布についても合わせて併記している。なお、ここで用いた応答は、いずれも時刻歴応答解析より算出したものであり、図2と同様、それぞれの誤差の最大値により基準化した $r^{(k)}$ である。図4より、各地震波とも、相対変位応答の誤差が小さくなるのは概ね5層より上層を加振した時であるのに対し、層間変位応答では、3層近傍を加振した時に誤差が小さくなる傾向にある。固有ベクトルが異なる相対変位応答と層間変位応答では、最適加振層もそれに付随し変化することが確認できる。このことは、全体応答に寄与する応答と層間変位に寄与する応答の両者を同時に精度良く再現することは難しいことを示している。そのため、本実験手法を用いた場合には、再現したい応答に応じた加振層を選択する必要がある。

図5に、再現目標層である9層と最下層である1層の相対変位時刻歴波形を示す。9層では、逆伝達関数を用いることで応答を精度良く再現することができている。1層では、若干ではあるが、振動台応答との位相ずれを確認することができるが、波形の傾向は良く捉えている。これより、最大値応答だけでなく、時刻歴波形からも本実験手法の有効性を確認することができる。

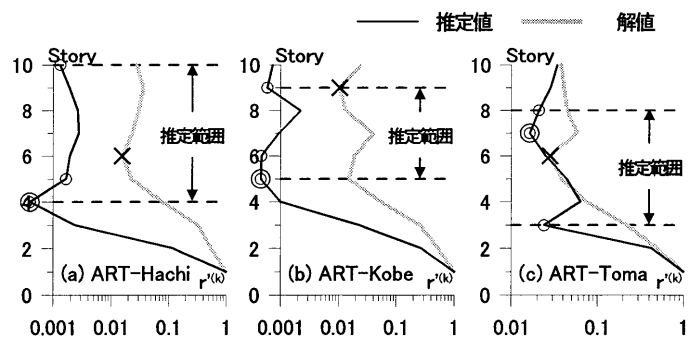


図2 推定値と精解値の誤差分布

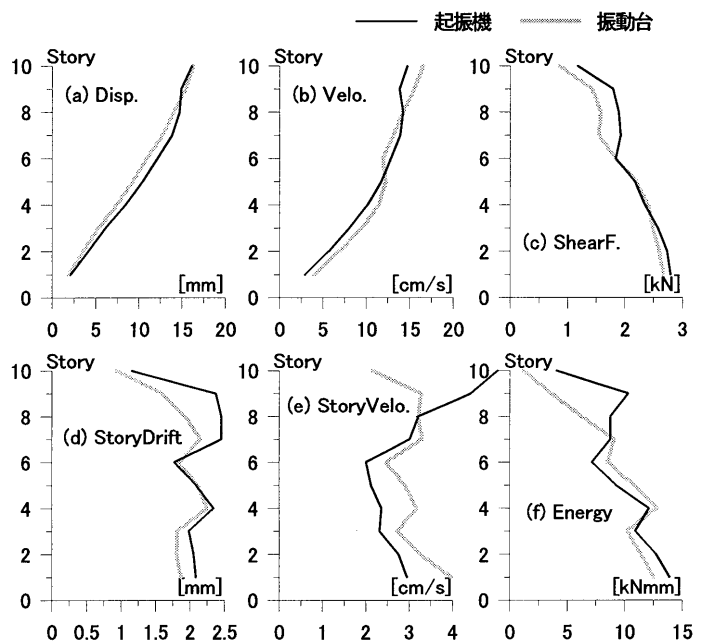


図3 高さ方向の応答比較

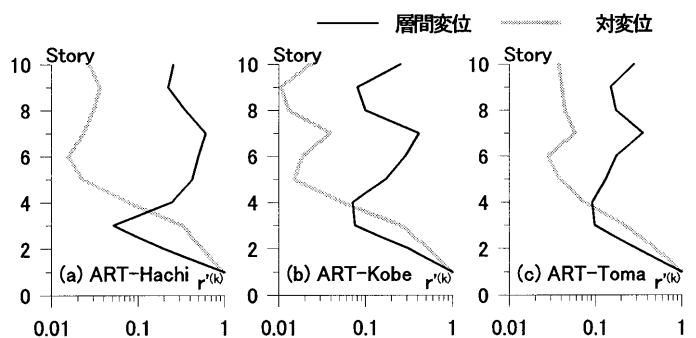


図4 目標応答との誤差分布

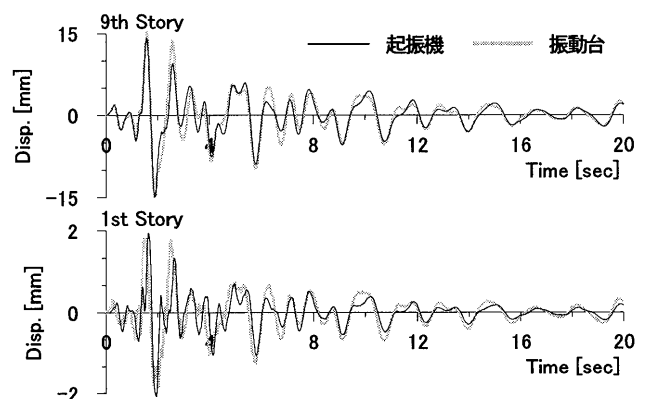


図5 相対変位時刻歴応答の比較

3. 加振実験結果

提案した実験手法の有効性について解析的に示すことができたため、本報その4と同様の加振実験を行い、本手法の有用性を実現象において検証する。評価は、本報その4と同様、7層と10層加振時の時刻歴応答解析結果との対応により行う。地動加振波ART-KobeのCase-2における実験結果として、図6、7に高さ方向の応答比較を示す。なお、全ての応答に対し、0.1~20 Hzでバンドパスフィルタをかけている。10層加振においては、絶対変位・速度応答、エネルギー吸収量ともに解析値との応答差が見られるが、いずれも分布形状の傾向は捉えており、評価できるものである。7層加振では、絶対変位・速度応答において精度の良い一致を示す。エネルギー吸収量においては、下層で若干の差異が確認できるが、概ね良い対応を示している。

図8に示した第1層ダンパーの履歴曲線から、荷重が0となるところでのスリップが見られ、図6(f)のエネルギー吸収量の差異は、取付部のがたの影響と判断できる。スリップが起きることで、第2、4象限でのエネルギー吸収量が少なくなり、実験値は解析値よりも低い値を示す結果となった。

図9に10層の層間変形時刻歴応答(10~30s)を示す。解析値に比べ、明らかに高次モードの影響を受けていることがわかる。この要因として、錘の質量が考えられる。本実験システムでは質量の大きい錘を使用しているため、アクチュエータは短いストロークで加振力を発生させることができる反面、微小振幅ではその小刻みな振動の影響が相対的に大きくなり、振動現象として顕在化したと推察できる。この問題を解消するためには、錘の質量を軽くし、アクチュエータのストロークを大きくする必要があると考えられる。

以上により、加振実験結果の考察を行った。取付部のがたや錘の相互作用による影響が見られたものの、7、10層加振とも実験結果は解析と良好な精度であることが確認できた。そのため、最適加振層での加振であれば、振動台加振時応答を再現することは可能であると判断できる。

4. まとめ

本報その3、4で用いた実験手法の問題点を包括する新たな実験手法として、逆伝達関数を用いた加振力の算出手法を提案した。提案した実験手法は、振動台加振時の全体応答を精度良く再現できることを解析的に検証した。また、縮小模型を用いた加振実験を行い、解析結果と実験結果の対応関係から、本実験手法の有効性を実験的に検証することができた。

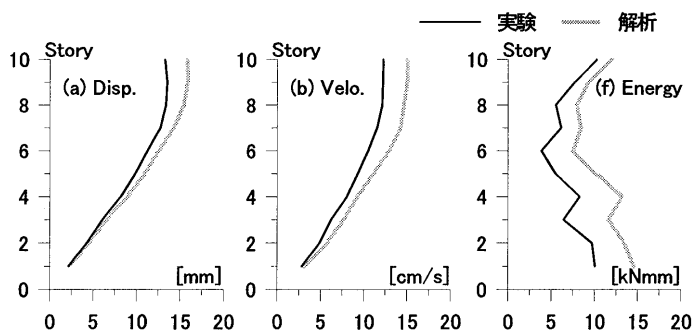


図6 10層加振時の応答比較

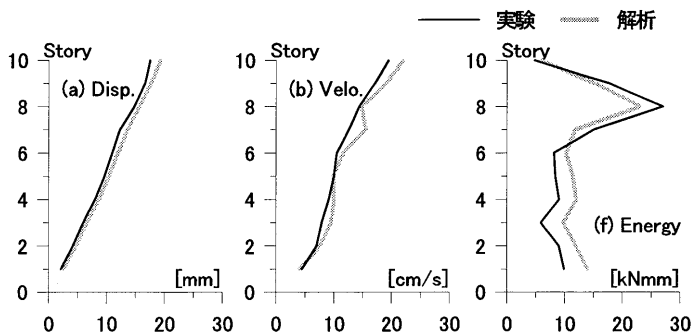


図7 7層加振時の応答比較

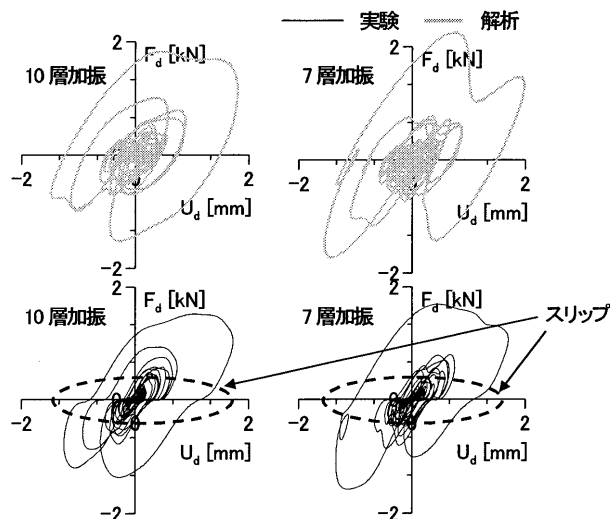


図8 各加振層における第1ダンパーの履歴曲線

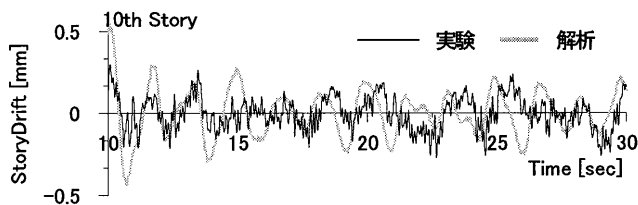


図9 層間変位時刻歴応答の比較

参考文献

- 1) 宮沢和也, 石田琢志, 佐藤大樹, 佐々木和彦, 北村春幸, 宮崎充, 吉江慶祐, 石井正人, 藤田隆文: 起振機を用いた多層制振フレームの簡易振動実験手法の提案 その2, 学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.635-636, 2008
- 2) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, 2006
- 3) 榎田竜太, 梶原浩一, 長江拓也, 紀曉東, 中島正愛: 超高層建物の地震応答を再現する振動台実験手法の開発, 日本建築学会構造系論文集 No.634, pp.2111-2117, 2008.12

*1 東京理科大学 *2 オイレス工業(株) *3 (株) 日建設計