

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	2077 振動台実験を模擬する起振機を用いた多層フレーム簡易振動実験手法の提案：その1 正弦波加振時の線形モデルに対する検討(構造)
Title	
著者(和文)	石田琢志, 佐藤 大樹, 佐々木和彦, 宮澤 和也, 北村春幸, 宮崎充, 吉江慶祐, 石井正人, 藤田隆史
Authors	Takushi ISHIDA, daiki sato, Kazuhiko Sasaki, Haruyuki Kitamura, Mitsuru MIYAZAKI, Takafumi FUJITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453930">http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453930</a>

# 振動台実験を模擬する起振機を用いた多層フレーム簡易振動実験手法の提案

## その1 正弦波加振時の線形モデルに対する検討

構造—振動  
 起振機実験 振動台実験 定常理論  
 制振構造 履歴ダンパー 粘性ダンパー

正会員 ○ 石田琢志<sup>\*1</sup> 同 佐藤大樹<sup>\*1</sup> 同 佐々木和彦<sup>\*2</sup>  
 準会員 宮澤和也<sup>\*1</sup> 同 北村春幸<sup>\*1</sup> 同 宮崎充<sup>\*2</sup>  
 同 吉江慶祐<sup>\*3</sup> 同 石井正人<sup>\*3</sup> 同 藤田隆史<sup>\*4</sup>

### 1. はじめに

建築構造物の強震下における動的挙動を把握し、耐震性能を評価するための1つの方法として、振動台を利用して実際に地震動を構造物に入力する振動台実験が挙げられる<sup>1)</sup>。振動台実験は、構造物の動的挙動を把握するために極めて有効な手段であるが、実施に多大な経費や労力を要することや、振動台の容量制限により実施できる施設が限られてしまうといった問題点も存在する。一方、振動台と同じく構造物に強制外力を与える振動装置として起振機が挙げられる。起振機を用いた実験では、正弦波加振により構造物の振動特性を評価する研究が数多く行われているが<sup>例(2)</sup>、地震外乱下での構造物の動的挙動の再現を試みた報告はされていない。そこで、本報では、パッシブ型の制振構造物を対象として、振動台加振により得られる強震下での構造物の動的挙動を、1つの起振機を用いて再現する簡易振動実験手法の提案を行う。

以下に本報の構成を述べる。本報その1では、解析モデルの概要および評価方法について述べる。また、線形モデル、正弦波加振時を対象とした際の、調和振動に対する定常応答の変位応答倍率の理論式<sup>3)</sup>(以下、理論式と称す)から起振力の簡易算出手法を提案し、理論解により得られる最大値応答の比較により、振動台加振時挙動の再現性を検証する。本報その2では、線形・非線形モデル、ランダム波加振時を対象とした際の起振力を本報その1で提案した手法の応用によって算出し、時刻歴解析によりその再現性を検証する。

### 2. 解析概要

#### 2.1 解析モデルの概要

本解析には、ダンパー付与を想定し、主架構の構造減衰を剛性比例型減衰で $\gamma h_1 = 10\%$ としたLinerモデル(線形モデル)、全層に履歴ダンパーを付与したHDモデル、および全層に粘性ダンパーを付与したVDモデルの全3モデルを用いる。なお、HD、VDモデルに関しては主架構の構造減衰 $\gamma h = 0\%$ とする。主架構のモデル化は、文献4の10層(11F)フレーム試験体<sup>4)</sup>に従い、質量を等分布、剛性は3段階分布(図1)とし、せん断バネは弾性領域となる10質点系等価せん断型として作成した。一方、ダンパー付与モデ

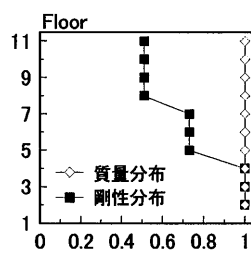


図1. 質量・剛性分布

表1. 1次固有周期

	Liner	HD	VD
$T_1$	1.07	0.36	0.97

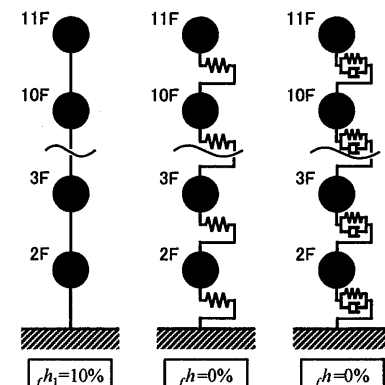


図2. 解析モデル概略図

ルは、取付角度=37.2°の勾配で、ブレース形式に交互に制振部材を配置することを想定してモデル化を行った。図2に各解析モデルの概略図を、表1に各モデルの弾性1次固有周期 $T_1$ をそれぞれ示す。

#### 2.2 解析地震波の概要

本報その2のランダム波加振時に用いる地震波は、位相特性JMA KOBE NS, HACHINOHE EW および TOMAKOMAI NS の告示波3波について、いずれのモデルにおいても弾性1次固有周期が速度応答スペクトルの一定の領域に入るようそれぞれの時間軸を1/4に圧縮し、コーナー周期 $T_c = 0.16s$ とした模擬地震波とする。作成した3波の模擬地震波の速度応答スペクトルを $S_v = 10, 20, 40 \text{ cm/s}$ の3つのレベルに設定し、計9波の模擬地震波により解析を行う<sup>4)</sup>。表2に解析地震波の諸元を示す。なお、表中の $t_0$ は文献5の手法により求めた実効継続時間である。また、例として解析地震波 $S_v = 20 \text{ cm/s}$ における加速度の時刻歴波形を図3に示す。

表2. 解析地震波の諸元

位相特性	$S_v$ (cm/s)	加振波名称	実効継続時間 $t_0$ (s)	最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )
JMA KOBE NS	10	KOBE10	9.78	165.32
	20	KOBE20		330.64
	40	KOBE40		661.28
HACHINOHE EW	10	HACHI10	21.36	139.99
	20	HACHI20		279.98
	40	HACHI40		559.96
TOMAKOMAI NS	10	TOMA10	27.24	177.23
	20	TOMA20		354.45
	40	TOMA40		708.90

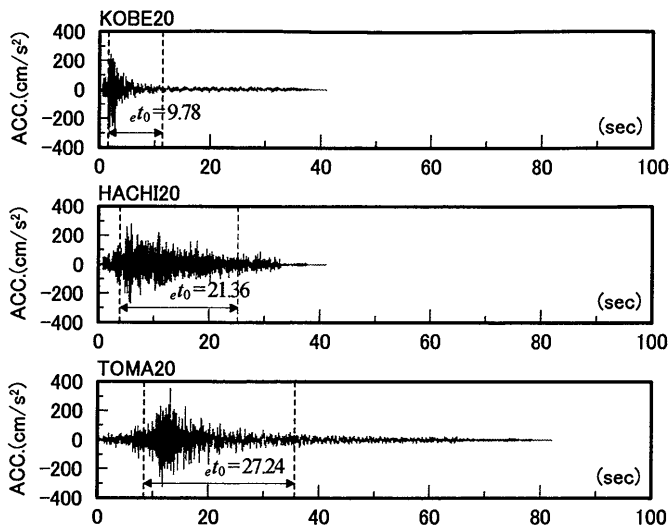


図3. 加速度時刻歴波形

2.3 制振部材の概要

各層におけるダンパー量分布は、 $A_i$  分布に基づく各層の最適層せん断力を第1層で基準化した比率(最適分布)を用いて、せん断パネの剛性分布と同様、1~3, 4~6, 7~10層で異なる値をとる3段階分布とし、図4に示す。

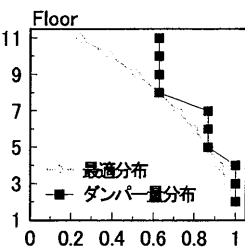


図4. ダンパー量分布

履歴ダンパーのモデル化は、第1層ダンパーにおいて、ダンパーの水平剛性 ${}_h K_{D1}$ を主架構の弾性水平剛性 ${}_h K_{F1}$ の10倍とし、2次剛性を持たない完全弾塑性型として行う。これより、第1層ダンパーの軸剛性 ${}_b K_{D1}$ は次式で表すことができる。

$${}_b K_{D1} = \frac{{}_h K_{D1}}{\cos^2 \theta} = \frac{10 {}_h K_{F1}}{\cos^2 \theta} \quad (1)$$

ただし、 $\theta$ はダンパー取付角度(37.2°)である。また、第1層ダンパーの断面積 $A_1$ は、ヤング係数 $E$ ( $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ )、第1層ダンパーの軸剛性 ${}_b K_{D1}$ 、およびダンパー長さ $L$ を用いて以下の式で示される。

$$A_1 = \frac{{}_b K_{D1} \cdot L}{E} \quad (2)$$

以上より、第1層の降伏応力度 $\sigma_1$ は、第1層ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_{H1}$ をパラメータとする次式を用いて算出することができる。

$$\sigma_1 = \frac{Q_1}{\cos \theta} \cdot \frac{1}{A_1} = \frac{Mg \cdot E \cdot \cos \theta}{10 {}_h K_{F1} \cdot L} \alpha_{H1} \quad (3)$$

ここで、 $Q_1$ は第1層ダンパーの降伏せん断力、 $Mg$ は主架構の総重量である。本論文では、既往の研究<sup>4)</sup>から降伏せん断力係数を $\alpha_{H1} = 0.04$ と定め、解析を行う。

粘性ダンパーのモデル化は、線形粘性、線形剛性をもつ Kelvin

モデルとして行う。第1層ダンパーの粘性係数 $C_{D1}$ は、ダンパーの貯蔵剛性 $K_{D1}$ をパラメータとする次式によって表すことができる。

$$C_{D1} = K_{D1} \cdot \alpha_V \quad (4)$$

既往の研究<sup>4)</sup>から、貯蔵剛性 $K_{D1}$ はダンパー単体試験により実測された値を用いることとする。また、貯蔵剛性 $K_{D1}$ に乗ずる係数 $\alpha_V$ については、既往の研究<sup>4)</sup>より算出された2次の粘性係数と同程度となるよう $\alpha_V = 0.05 \text{ s}$ と定め、解析を行う。

3. 起振力算出手法の提案および最大値応答による検証

Linear モデル、正弦波加振時を対象とした際の、理論式<sup>3)</sup>に基づく起振力の簡易算出方法を提案する。また、最も再現性の高くなる起振機設置階の算定方法についても併記し、理論解により得られる最大値応答の比較により、振動台加振時挙動の再現性を検証する。

3.1 調和振動に対する定常応答の応答倍率理論式

地動に調和外力が作用する際の運動方程式から、振動台加振時における各層の最大相対変位 $\{x_s\}$ 、最大相対速度 $\{\dot{x}_s\}$ 、および最大相対加速度 $\{\ddot{x}_s\}$ は以下の式により算出することができる。

$$\{x_s\} = \sum_{s=1}^{10} {}_s \beta \{u_s\} \left[ \frac{1}{s \omega^2 - p^2 + i 2 {}_s h_s \omega \cdot p} \right] a p^2 \quad (5)$$

$$\{\dot{x}_s\} = \{x_s\} \cdot i p \quad (6)$$

$$\{\ddot{x}_s\} = \{x_s\} \cdot (-p^2) \quad (7)$$

ここで、 ${}_s \beta$ :  $s$  次の刺激係数、 $\{u_s\}$ :  $s$  次の固有ベクトル  
 $\omega$ : 建物の  $s$  次の固有円振動数、 $p$ : 正弦波の円振動数  
 ${}_s h$ :  $s$  次のモード減衰定数、 $a$ : 正弦波の最大変位

また、ある質点だけに調和外力が作用する際の運動方程式から、起振機加振時における各層の最大相対変位 $\{x_v\}$ 、最大相対速度 $\{\dot{x}_v\}$ 、および最大相対加速度 $\{\ddot{x}_v\}$ は次式で求められる。

$$\{x_v\} = \sum_{s=1}^{10} \{u_s\} \left[ \frac{1}{s \omega^2 - p^2 + i 2 {}_s h_s \omega \cdot p} \cdot \frac{{}_s u_r}{{}_s m} \right] F \quad (8)$$

$${}_s u_r = \{u_s\}^T \cdot \{f\} \quad (9)$$

$$\{\dot{x}_v\} = \{x_v\} \cdot i p \quad (10)$$

$$\{\ddot{x}_v\} = \{x_v\} \cdot (-p^2) \quad (11)$$

ここで、 ${}_s m$ :  $s$  次の広義質量、 $F$ : 正弦波の最大起振力  
 $\{f\}$ : 起振機設置階ベクトル

式(5)、(8)に用いる ${}_s \omega$ 、 ${}_s \beta$ 、 ${}_s m$ 、 ${}_s h$ 、 $\{u_s\}$ は固有値解析より算出される値を用いることとし、例として、1~3次の ${}_s \omega$ 、 ${}_s \beta$ 、 ${}_s m$ 、 ${}_s h$ 、および $\{u_s\}$ を、表3および図5にそれぞれ示す。起振機設置階ベ

クトル $\{x\}$ については、最上階の11F、中間階の6F、最下階の2F、および高さ2/3Hに相当する8Fの4ケースを選定する。また、振動台と起振機に加振時に用いる正弦波の円振動数 $p$ は、共振状態となるようLinerモデルの1次固有円振動数 $\omega_1$ と同値となる $p = 5.88$  rad/sとしたCase-1と、非共振状態となる地震波加振時を想定し、地震波KOBEの卓越円振動数と同値となる $p = 3.74$  rad/sとしたCase-2の2ケースを用い、いずれのケースにおいても振動台加振波の最大加速度 $ap^2 = 200$  cm/s<sup>2</sup>とする。

表3. 1~3次の $s\omega, s\beta, sm, sh$

Mode	1	2	3
$s\omega$	5.88	15.95	26.45
$s\beta$	1.79	0.70	-0.42
$sm$	1.00	1.00	1.00
$sh$	0.10	0.27	0.45

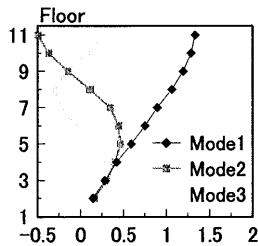


図5. 1~3次の固有ベクトル

### 3.2 評価方法

起振機加振による振動台加振時応答の再現性の評価は、最大相対変位の再現度に主眼を置くこととし、以下に示す式を用いて検証を行う。

$$R = \sum_{i=1}^{10} [R'(i) \cdot \gamma(i)] \quad (12)$$

$$R'(i) = \frac{x_v(i)}{x_s(i)}, \quad \gamma(i) = \frac{x_s(i)}{\sum_{i=1}^{10} x_s(i)} \quad (13a,b)$$

ここで、 $x_s(i), x_v(i)$  はそれぞれ $i$ 層の振動台、起振機加振時の最大相対変位である。振動台加振時に算出される最大変位分布率 $\gamma(i)$ を $R'(i)$ に乘ずることで、応答が大きくなる階に重点を置いた評価が可能となる。これより、再現性評価値 $R=1.0$ となる最大起振力（以後、最適起振力と称す）を、式(8)および線形則を利用して算出することとし、その詳細については3.3節で述べる。

次に、最も再現性の高くなる起振機設置階（以後、最適起振機設置階と称す）を、 $R=1.0$ となる際の $R'(i)$ の標準偏差（式(14)）を用いて検討を行う。

$$R_{S.D.} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} [R'(i) - 1.0]^2} \quad (14)$$

これより、 $R_{S.D.}$ が最も小さくなる時の設置階を、最適起振機設置階と定める。

以上の2つの評価式を用いることにより、振動台加振時挙動の再現性が最も高くなる起振力および設置階の検討を行う。

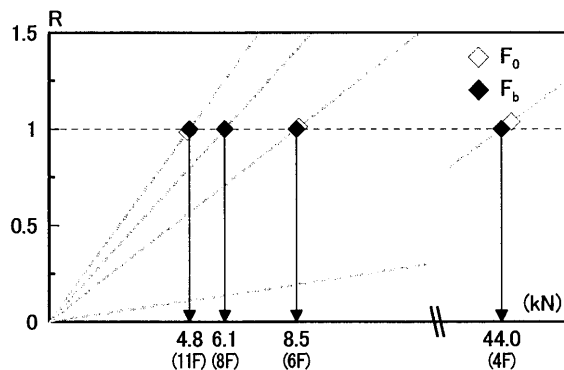
### 3.3 最適起振力の簡易算出手法の提案

Linerモデルにおける最適起振力の簡易算出手法を提案する。振動台、起振機加振時の最大相対変位 $x_s(11F)$ および $x_v(11F)$ が同値

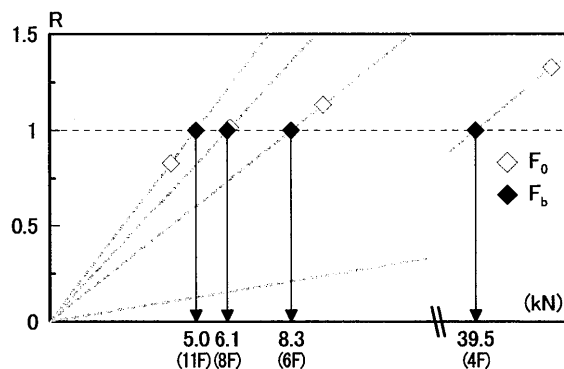
となる最大起振力 $F_0$ を、式(8)の逆算により求め、その起振力における各層の最大相対変位 $\{x_v\}$ を算出する。算出された $\{x_v\}$ と既知である $\{x_s\}$ から、再現性評価値 $R$ を式(12)により求める。今、検討対象モデルはLinerモデルであるため、その線形則を利用して、最適起振力 $F_b$ は次式により算出することができる。

$$F_b = \frac{F_0}{R} \quad (15)$$

Case-1, 2における、起振機加振波の最大起振力 $F$ と再現性評価値 $R$ の関係および式(15)により算出される最適起振力 $F_b$ を図6に併記する。図6より、最適起振力は、起振機を上層に設置するほど小さくなるのがわかる。



(a) Case-1



(b) Case-2

図6. 最大起振力 $F$ と再現性評価値 $R$ の関係

### 3.4 最適起振機設置階の算定

Case-1における、式(15)より算出された各最適起振力での $R'(i)$ の標準偏差 $R_{S.D.}$ の分布を図7に示す。図7より、 $R_{S.D.}$ は2Fで極大値をとり、設置階が上層に行くにつれ、その値も小さくなり、8Fで極小値となることがわかる。8Fに起振機を設置した時の誤差は1%未満であることから、振動台加振時の応答を非常に精度良く再現できていることが確認できる。これより、Case-1における最適起振機設置階を8Fとする。

Case-2における、式(15)より算出された各最適起振力での $R'(i)$ の標準偏差 $R_{S.D.}$ の分布を図8に示す。図11より、 $R_{S.D.}$ の分布は2Fで極大値を、8Fで極小値をとることから、Case-1と同様、最適起振機設置階を8Fと定める。しかし、地震波加振時を想定した

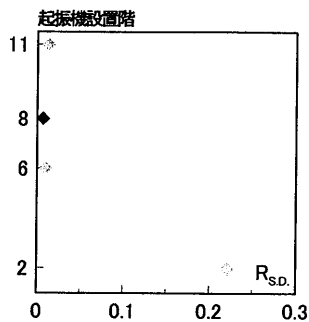
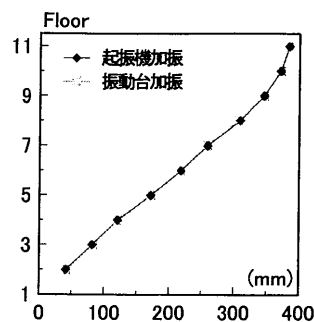
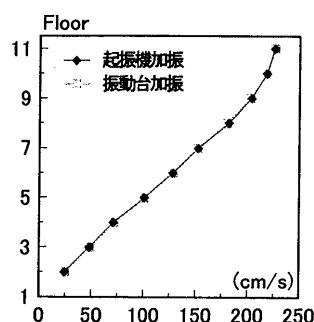


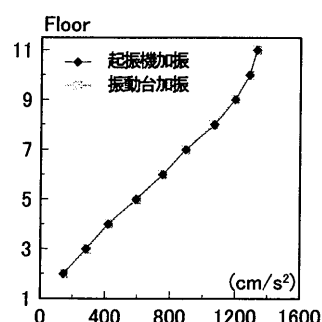
図7.  $R_{S,D}$  の分布 (Case-1)



(a) 最大相対変位



(b) 最大相対速度



(c) 最大相対加速度

図9. 最大応答値 (Case-1, 起振機8F設置時)

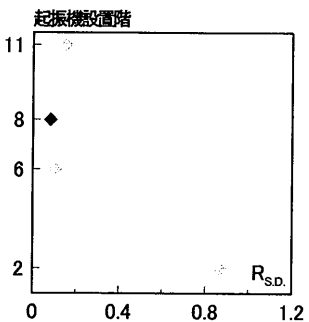
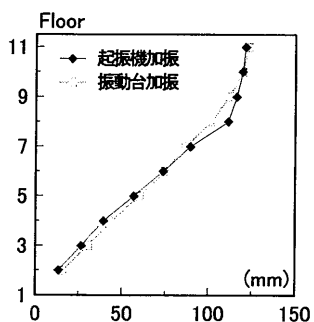
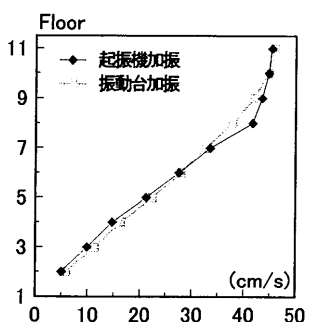


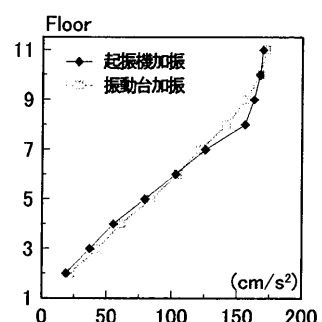
図8.  $R_{S,D}$  の分布 (Case-2)



(a) 最大相対変位



(b) 最大相対速度



(c) 最大相対加速度

図10. 最大応答値 (Case-2, 起振機8F設置時)

Case-2では、最適起振機設置階での振動台応答との誤差は8%程度となり、Case-1と比較すると多少増大する傾向にあることが確認できる。

以上により、最適起振機設置階の算定を行った。Case-1, Case-2ともに  $R_{S,D}$  が8Fで極小値となることから、正弦波加振時においては、共振・非共振状態に関わらず最適起振機設置階は8Fとなることを確認した。

### 3.5 応答比較

Case-1における、最適起振機設置階での高さ方向における相対変位・速度・加速度の最大値応答の分布を図9に示す。図9より、相対変位・速度・加速度のいずれにおいて、振動台加振時挙動と精度の良い一致を示すことが確認できる。

Case-2における、最適起振機設置階での高さ方向における相対変位・速度・加速度の最大値応答の分布を図10に示す。各層で若干の差異は見られるものの、変位・速度・加速度において、全体の傾向は捉えており、評価できるものと考えられる。

以上により、共振状態となるCase-1および地震波加振時を想定したCase-2における振動台加振時挙動の再現性を、最大応答値を用いて検証した。Case-1では、非常に高い精度で振動台加振時応答の再現が可能であることを確認した。Case-2では、Case-1に比べ、誤差は若干大きくなるが、その大きさが8%程度であることや、最大値分布の傾向を捉えていることから、ある程度の再現性を有しており、評価できるものであると判断できる。

### 4. おわりに

本報その1では、線形モデルを対象とした際の、振動台正弦波加振時挙動の再現性をもつような最適起振力の簡易算出手法および最適起振機設置階の算定方法について述べた。また、理論解による振動台・起振機加振時の最大応答値の比較を行った。共振状態となるCase-1では、非常に精度良く振動台加振時応答を再現できることを確認した。地震波加振想定時のCase-2では、Case-1よりも再現性の誤差は若干大きくなるが、十分な精度であると判断した。次報その2では、地震波を入力した時刻歴応答解析により、線形・非線形モデルにおける振動台加振時応答の再現性を検証する。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学笠井研究室の解析プログラムを使用しました。また、i2S2および日本大学理工学部対震構造研究室の複素固有値解析プログラムを使用しました。ここに記して感謝の意を示します。

### 参考文献

- 1) 境有紀, 徳井紀子, 真田靖士, 山内成人, 中埜良昭, 諏訪田晴彦, 福山洋: 超縮小模型を用いた鉄筋コンクリート構造の簡易振動実験手法の開発, 日本建築学会構造系論文集, NO.584, PP.147-152, 2004.10
- 2) 青木保夫, 菊地敏男, 文永奎, 沈堅貞, 山本俊雄, 荏本孝久: 小型起振機を用いた建造物の振動特性の推定に関する研究 その1-2, 学術講演梗概集, B-2分冊, PP.545-548, 2007
- 3) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, 2006
- 4) 小川薫, 佐藤大樹, 佐々木和彦, 官崎充, 北村春幸, 藤田隆史, 吉江慶祐, 石井正人: 10層フレーム加振試験による履歴減衰型・粘性減衰型制振部材併用時の応答特性に関する研究 その1-3, 研究報告集, NO.78, pp.137-148, 2008
- 5) Trifunac, M.D. and Brady, A.G.: A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, June 1975

\*1 東京理科大学

\*2 オイレス工業(株)

\*3 (株) 日建設計

\*4 東京大学生産技術研究所 教授