

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	モーダルアナリシス法による長周期地震に対する超高層建物の地震応答
Title(English)	Seismic Response of High-rise Building under Long Period Ground Motion by Mode Superposition Method
著者(和文)	劉錫媛, 佐藤大樹
Authors(English)	Xiyuan Liu, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 301-304
Citation(English)	, , , pp. 301-304
発行日 / Pub. date	2021, 3

モーダルアナリシス法による長周期地震に対する超高層建物の地震応答

構造—振動

正会員 ○ 劉錫媛<sup>\*1</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>

モーダルアナリシス法 地震応答 長周期地震動  
超高層建物

1. はじめに

モーダルアナリシス法による地震応答に関する研究，特に最大相対変位に着目した研究が多い<sup>[1-2]</sup>。一方，長周期地震動を受けた場合，超高層建物において最大絶対加速度，最大層間変形，最大層せん断力および最大層間速度に関する研究は少ない。それらのパラメータを略算することは制振建物の設計と解析に対して，非常に必要なことである。本報では，長周期地震動を受けた場合，モーダルアナリシス法による超高層建物の最大絶対加速度，最大層間変形，最大層せん断力および最大層間速度を検討する。

2. 解析パラメータ

2.1 建物概要

検討に用いる建物は各層の質量  $m_i$  を  $1 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$  とし，1次固有周期  $T_f$  は  $4\text{s}$  である。剛性分布とは最上層が最下層の  $1/2$  となる台形分布とする<sup>[3]</sup>。剛性  $k_i$  は式(1)~(3)で求められる<sup>[4]</sup>。Fig.1 に固有値解析より得られた1次~3次モード ( $1\phi_i, 2\phi_i, 3\phi_i$ ) を示す。

$${}_f k_N = \frac{{}_1\omega^2 m_N {}_1\phi_N}{{}_1\phi_N - {}_1\phi_{N-1}} \tag{1}$$

$${}_f k_i = \frac{{}_1\omega^2 m_i {}_1\phi_i + {}_f k_{i+1} ({}_1\phi_{i+1} - {}_1\phi_i)}{{}_1\phi_i - {}_1\phi_{i-1}} \tag{2}$$

$${}_f k_1 = \frac{{}_1\omega^2 m_1 {}_1\phi_1 + {}_f k_2 ({}_1\phi_2 - {}_1\phi_1)}{{}_1\phi_1} \tag{3}$$

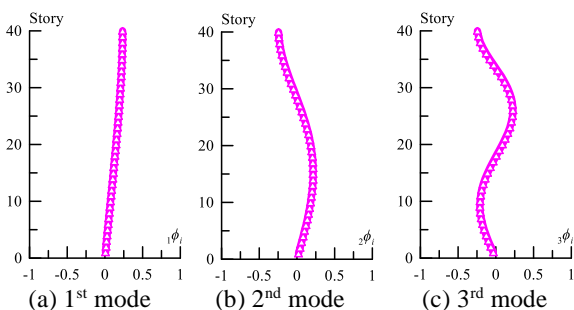


Fig.1 Eigen mode

1次モードの減衰定数  $h$  を  $2\%$  とし，剛性比例とする。剛性比例減衰の係数は  $\alpha_k$  は式(4)で算出できる<sup>[5]</sup>。本報では， $\alpha_k$  は  $0.02547$  である。

$$\alpha_k = 2_1 h / {}_1\omega \tag{4}$$

2.2 地震動

本論では，コーナー周期  $T_c = 0.64\text{s}$  以降の領域で，速度応答スペクトル  $S_v = 100\text{cm/s}$  ( $h = 5\%$ ) となるレベル2相当の模擬地震動 Art-Hachi (位相特性：HACHINOHE 1968 EW) および長周期地震動 CH1<sup>[6]</sup> と OS1<sup>[6]</sup> を採用する。Fig.2 に各地震動の時刻歴波形を示す。

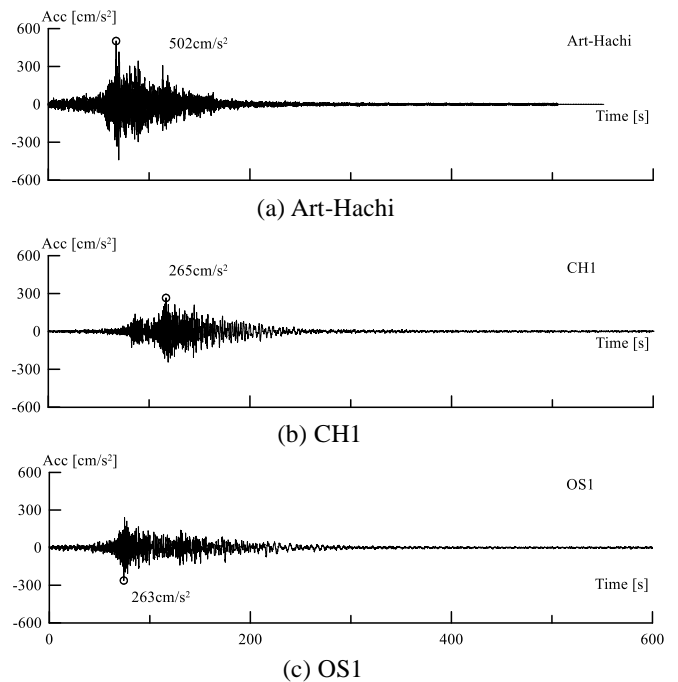


Fig.2 Acceleration of earthquake

3 モーダルアナリシス法に関する検討

3.1 モーダルアナリシス

応答スペクトルを用いて各次の応答の最大値をもとめ，これに基づいて多質点系の最大応答を概略することが行

われる。この方法は、応答スペクトルによるモーダルアナリシスと呼ぶ。各次の応答の最大値は、各次成分の最大応答の絶対値和(後、ABS法と呼ぶ)で表される(式(5))<sup>[5]</sup>。また、各次の応答の最大値は各次応答成分の2乗和平方(後、SRSS法と呼ぶ)で表す(式(6))<sup>[5]</sup>。ABS法とSRSS法の平均値(後、AVG法と呼ぶ)も良い近似を与えるとされている(式(7))<sup>[5]</sup>。

$$|\delta|_{\max, ABS} \leq \sum_{s=1}^N |(\phi_i - \phi_{i-1}) \cdot {}_s\beta \cdot {}_sS_D| \quad (5a)$$

$$|Vel|_{\max, ABS} \leq \sum_{s=1}^N |(\phi_i - \phi_{i-1}) \cdot {}_s\beta \cdot {}_sS_V| \quad (5b)$$

$$|Acc|_{\max, ABS} \leq \sum_{s=1}^N |\phi_i \cdot {}_s\beta \cdot {}_sS_A| \quad (5c)$$

$$|\delta|_{\max, SRSS} \approx \sqrt{\sum_{s=1}^N |(\phi_i - \phi_{i-1}) \cdot {}_s\beta \cdot {}_sS_D|^2} \quad (6a)$$

$$|Vel|_{\max, SRSS} \approx \sqrt{\sum_{s=1}^N |(\phi_i - \phi_{i-1}) \cdot {}_s\beta \cdot {}_sS_V|^2} \quad (6b)$$

$$|Acc|_{\max, SRSS} \approx \sqrt{\sum_{s=1}^N |\phi_i \cdot {}_s\beta \cdot {}_sS_A|^2} \quad (6c)$$

$$|\delta|_{\max, AVG} \approx \frac{1}{2} (|\delta|_{\max, ABS} + |\delta|_{\max, SRSS}) \quad (7a)$$

$$|Vel|_{\max, AVG} \approx \frac{1}{2} (|Vel|_{\max, ABS} + |Vel|_{\max, SRSS}) \quad (7b)$$

$$|Acc|_{\max, AVG} \approx \frac{1}{2} (|Acc|_{\max, ABS} + |Acc|_{\max, SRSS}) \quad (7c)$$

ここで、 $\delta$  は層間変位、 $Vel$  は層間速度、 $Acc$  は絶対加速度、 $a_0$  は入力加速度、 $\beta$  は  $s$  次の刺激係数、 ${}_sS_D$  は地震波の変位応答スペクトルから求める  $s$  次の変位、 ${}_sS_V$  は地震波の変位速度スペクトルから求める  $s$  次の速度、 ${}_sS_A$  は地震波の加速度応答スペクトルから求める  $s$  次の加速度である。本論では、3次程度まで考えている。

### 3.2 地震波の応答スペクトル

剛性比例の場合、 $s$  次モードの減衰定数を式(8)で定義する<sup>[5]</sup>。応答スペクトルの減衰は1次、2次、3次でそれぞれ2%、5.6%、9.3%である。地震波 Art-Hachi の変位、速度、

加速度の応答スペクトルは Fig.3 に示す。Fig.3(a)より、変位において、1次固有周期に対する  $S_D$  が高次モードを比較すると、大きいことがわかる。そのため、高次モードの影響は少ないことが確認できる。Fig.3(b)より、速度において、1次固有周期に対する  $S_V$  が高次モードを比較すると、小さいことがわかる。そのため、高次モードの影響があることが確認できる。Fig.3(c)より、加速度において、1次固有周期に対する  $S_A$  が高次モードを比較すると、小さいことがわかる。そのため、高次モードになるにつれて、高次モードの影響が高くなることが確認できる。1次~3次固有周期に対する地震波のスペクトルを Table1 に示す。Table1より、Fig.3と同様な傾向が見られる。よって、長周期地震動を受けた場合、層間変位において、高次モードは変位に与える影響は少ない、加速度に与える影響は影響が高いことが確認できる。

$${}_s h = \alpha_k \cdot {}_s \omega / 2 \quad (8)$$

Table 1 Parameters of mode analysis ( ${}_1 h = 2\%$ )

	Art_Hachi			CHI			OS1		
	$S_D$ [cm]	$S_V$ [cm/s]	$S_A$ [cm/s <sup>2</sup> ]	$S_D$ [cm]	$S_V$ [cm/s]	$S_A$ [cm/s <sup>2</sup> ]	$S_D$ [cm]	$S_V$ [cm/s]	$S_A$ [cm/s <sup>2</sup> ]
1 <sup>st</sup>	89.64	139.79	221.41	120.34	186.54	297.19	112.43	178.08	277.66
2 <sup>nd</sup>	21.72	107.44	428.12	34.56	144.65	680.96	23.83	111.65	469.34
3 <sup>rd</sup>	10.76	89.10	586.67	10.10	70.96	546.20	8.64	58.69	467.93

### 4 モーダルアナリシス法と時刻歴解析の比較

本節では、モーダルアナリシス法と時刻歴解析(THA)から得られた結果を比較する。最大層間変位( $\delta$ )、最大層せん断力( $Q$ )、最大層間速度( $Vel$ )および最大絶対加速度( $Acc$ )を Fig.4 に示す。Fig.4(a)(i)より、Fig.3と同様に、高次モードの影響が少ないため、モーダルアナリシス法より算出された層間変位と時刻歴結果の違いが少ない。また、時刻歴結果とSRSS法の結果はほぼ同様になることが確認できる。Fig.4(a)より、地震波にかかわらず、Fig.4(a)(i)と同様な傾向が見られる。Fig.4(b)より、高次モードの影響が少ないため、Fig.4(a)と同様な傾向が見られる。Fig.4(c)(i)より、モーダルアナリシス法より算出された層間変位と時刻歴結果の違いが大きいことがわかる。また、時刻歴結果とSRSS法の結果の差異が一番小さいことが確認できる。Fig.4(c)(i)とFig.4(a)(i)を比較すると、高次モードの影響が大きくなるため、モーダルアナリシス法と時刻歴結果の差異が大きくなることを確認できる。Fig.4(c)より、地震波にかかわらず、

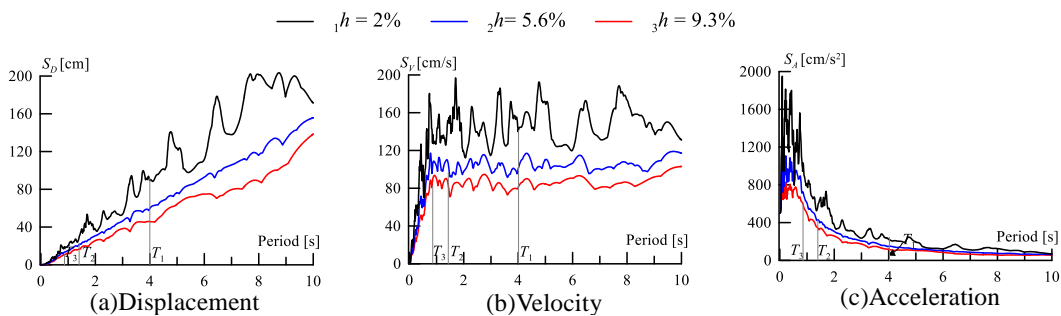
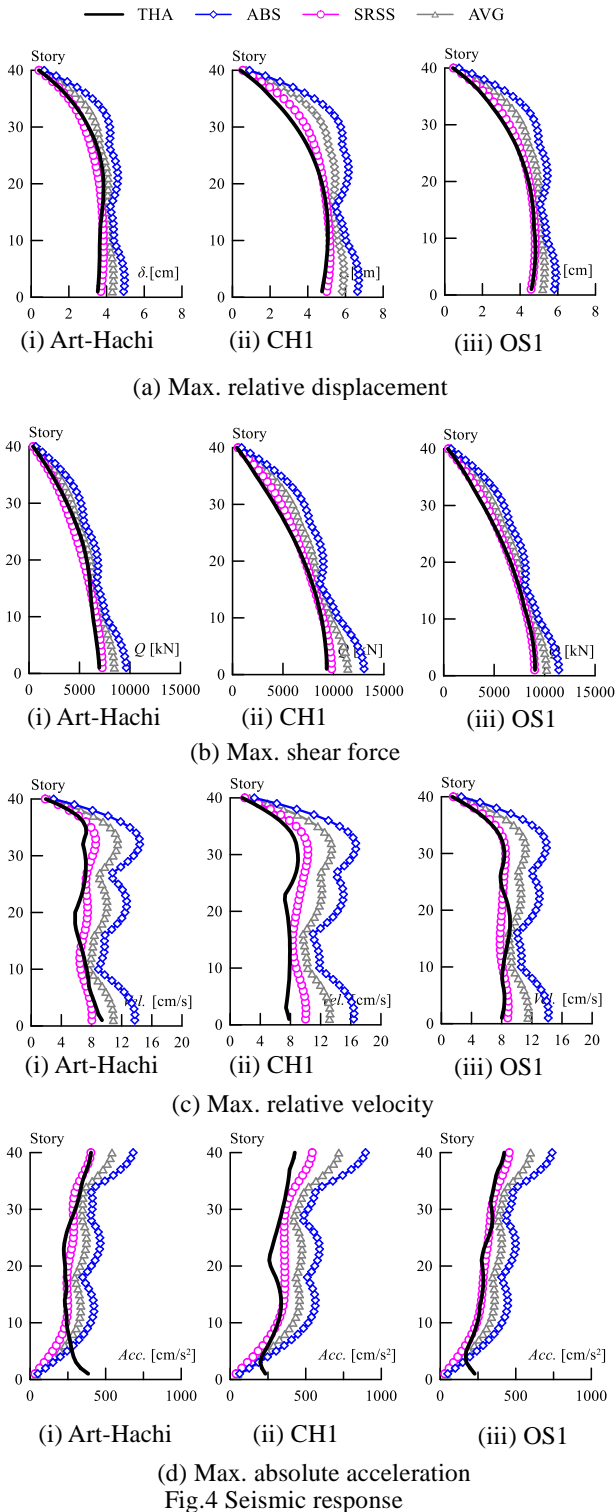


Fig.3 Response spectrum ( ${}_1 h = 2\%$ )

Fig.4(c)(i)と同様な傾向が見られる。Fig.4(d)より、中間層および上層において、差異が小さいだが、下層の場合、モーダルアナリシス法と時刻歴結果の差異が大きい。その原因は後で説明する。



## 5 モーダルアナリシス法の差異変化

本章では、最大層間変位および最大絶対加速度における差異を考察する。

### 5.1 モーダルアナリシス法の分析方法

4章では、SRSS法より算出した地震応答と時刻歴結果の

差異が一番小さいことが確認できた。しかし、SRSS法の差異が小さい原因がまだ明らかでないため、本節では、3つのモーダルアナリシス法による地震応答と時刻歴結果の差異が生じる原因を検討する。

ABS法、SRSS法、AVG法でそれぞれの1次～3次 $S_D, S_V, S_A$ の寄与率( $1p_i, 2p_i, 3p_i$ )を式(9)~(11)で定義する。Fig.4より、OS1を受けた場合、モーダルアナリシス法による地震応答と時刻歴結果の差異がArt-Hachi、CH1より小さいため、本節ではOS1のみの寄与率を示す。

$${}_s P_{i,\delta,ABS} = \frac{|({}_s \phi_i - {}_s \phi_{i-1}) \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_D|}{\sum_{s=1}^N |({}_s \phi_i - {}_s \phi_{i-1}) \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_D|} \quad (9a)$$

$${}_s P_{i,acc,ABS} = \frac{|{}_s \phi_i \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_A|}{\sum_{s=1}^N |{}_s \phi_i \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_A|} \quad (9b)$$

$${}_s P_{i,\delta,SRSS} = \frac{|({}_s \phi_i - {}_s \phi_{i-1}) \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_D|^2}{\sum_{s=1}^N |({}_s \phi_i - {}_s \phi_{i-1}) \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_D|^2} \quad (10a)$$

$${}_s P_{i,acc,SRSS} = \frac{|{}_s \phi_i \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_A|^2}{\sum_{s=1}^N |{}_s \phi_i \cdot {}_s \beta \cdot {}_s S_A|^2} \quad (10b)$$

$${}_s P_{i,\delta,AVG} = \frac{1}{2} ({}_s P_{i,\delta,ABS} + {}_s P_{i,\delta,SRSS}) \quad (11a)$$

$${}_s P_{i,acc,AVG} = \frac{1}{2} ({}_s P_{i,acc,ABS} + {}_s P_{i,acc,SRSS}) \quad (11b)$$

OS1を受けた場合、1次～3次地震応答の寄与率をFig.5に示す。Fig.5(a)(i)より、層間変位において、SRSS法で算出した1次モードの寄与率はABS法、AVG法を比較すると大きい。Fig.5(a)(ii)と(a)(iii)より、SRSS法で算出した2次および3次モードの寄与率が一番小さい。Fig.5(a)より、SRSS法による層間変位の差異が一番小さい。また、1次モードの寄与率は70%以上、3次モードの寄与率は20%以下のため、Fig.4(a)と同様に、モーダルアナリシス法による層間変位と時刻歴結果の差異が小さいことが確認できる。

Fig.5(b)より、絶対加速度において、SRSS法で算出した1次モードの寄与率はABS法、AVG法を比較すると大きく、2次および3次モードの寄与率が一番小さい。そのため、SRSS法による絶対加速度の差異が一番小さい。また、上層および中間層の場合、1次モードの寄与率は50%以上のため、Fig.4(d)と同様に、モーダルアナリシス法による絶対加速度と時刻歴結果の差異が小さい。下層（特に1層2層）の場合、2次モードの寄与率は40%程度であり、3次高次モードの寄与率も40%程度であり、高次モードの影響が大きいことがわかる。そのため、Fig.4(d)と同様に、下層の場合、モーダルアナリシス法による絶対加速度と時刻歴結果の差異が大きいことが確認できる。

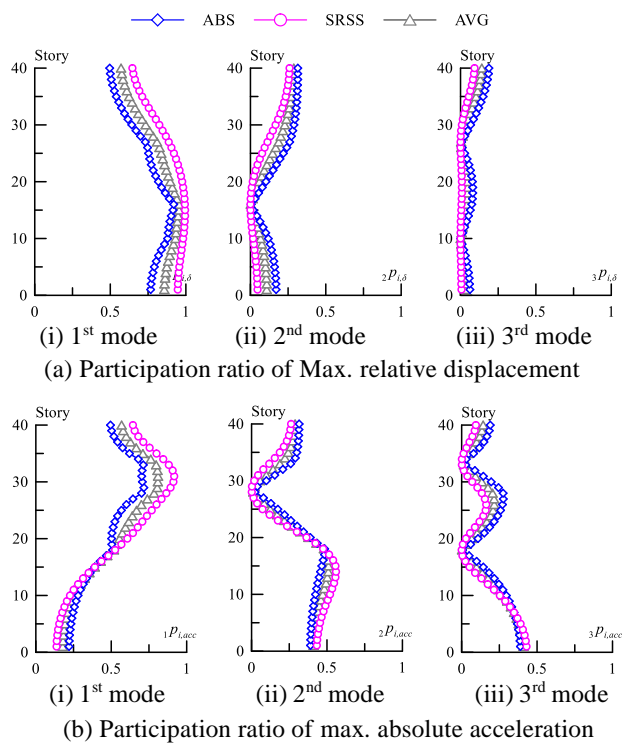


Fig.5 Participation ratio of mode analysis (OS1)

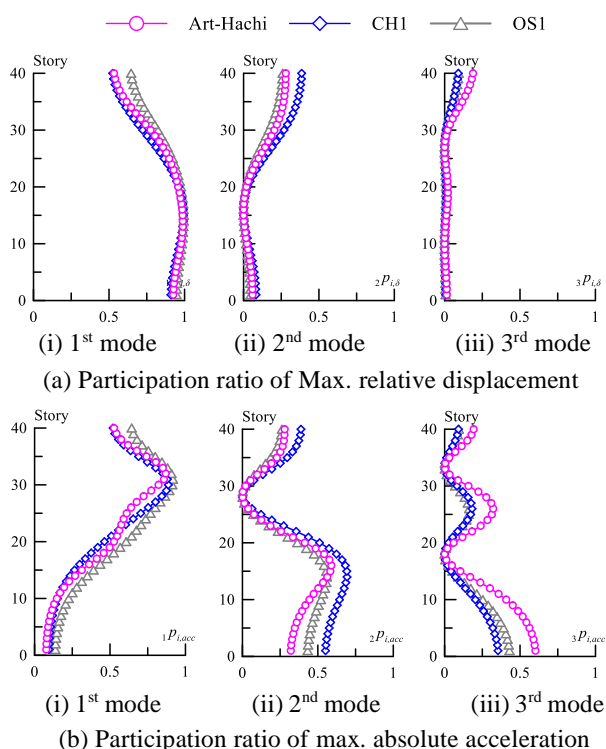


Fig.6 Participation ratio of mode analysis (SRSS)

## 5. 2 地震波の影響

4章では、SRSS法より算出した地震応答と時刻歴結果の差異が一番小さいことが確認できた。本節では、SRSS法を用いて、地震波による地震応答の差異が生じる原因を検討する。SRSS法を用いて、1次～3次地震応答の寄与率をFig.6に示す。Fig.6(a)より、層間変位において、OS1で算出した1次モードの寄与率は大きい、2次および3次モードの寄与率は一番小さいため、OS1による層間変位と時刻歴結果の差異が一番小さい。Fig.6(b)より、Fig.6(a)と同様な傾向が見られる。

## 6. まとめ

本論では、長周期地震動を受けた場合、超高層建物を対象とし、モーダルアナリシス法の適用性を明らかにすることを目的として、3つのモーダルアナリシス法による地震応答と時刻歴解析結果を比較し、モーダルアナリシス法の精度を検討した。以下に得られた知見を示す。

(1) 長周期地震動を受けた場合、地震波にかかわらず、高次モードの影響が少ないため、モーダルアナリシス法による層間変位、層せん断力と時刻歴解析結果の差異が小さい。高次モードの影響が大きいため、モーダルアナリシス法による層間速度および絶対加速度と時刻歴解析結果の差異が大きいことが確認できた。

- (2) 3つのモーダルアナリシス法の中に、SRSS法で算出した1次モードの寄与率は大きい、2次および3次モードの寄与率は一番小さい地震応答と時刻歴解析から得られた結果の差異が一番小さいことがわかった。
- (3) 長周期地震動OS1を受けた場合、1次モードの寄与率は大きい、2次および3次モードの寄与率は一番小さいため、モーダルアナリシス法による地震応答と時刻歴解析から得られた結果の差異が一番小さいことが確認できた。

## 謝辞

本研究の一部は、JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。

## 参考文献

- [1] 亀井功, 佐藤浩太郎, 林康裕: モーダル解析によるパルス波地動に対する多自由度系の層間変形応答特性, 日本建築学会構造系論文集, 第649号, pp.567-575, 2010.3
- [2] 安井雅明, 西影武知, 見上知広, 亀井功, 鈴木恭平, 林康裕: パルス波入力に対する1自由度系最大応答理論解と応答特性, 日本建築学会構造系論文集, 第650号, pp.731-739, 2010.4
- [3] 原田幸博, 秋山宏: エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第472号, pp.57-66, 1995.6
- [4] 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, pp.75-82, 2009.1
- [5] 柴田明徳: 最新 耐震構造解析, 第2版, 森北出版株式会社, 2003.3
- [6] 建築研究所: 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ, <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html> (2017.6.30)

\*1 東京工業大学大学院 大学院生

\*2 東京工業大学大学院 准教授・博士(工学)

\* Graduate Student, Tokyo Institute of Technology \*1

\* Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. \*2