

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超高層アクティブ免震建築物の最大応答・最大制御力予測手法の提案
Title(English)	A Simple Prediction Method of Maximum Response and Maximum Control Force for High-Rise Active Base-Isolated Structure in Across-Wind Direction
著者(和文)	鎌野隆貴, 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華
Authors(English)	Ryuki Kamano, Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua She
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 461-464
Citation(English)	, , , pp. 461-464
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

超高層アクティブ免震建築物の最大応答・最大制御力予測手法の提案

構造—振動

正会員 ○ 鎌野隆貴 *1 正会員 陳引力 *1

〃 佐藤大樹 *1 〃 宮本皓 *2

〃 余錦華 *3

超高層免震建築物 アクティブ制御 LQR 制御
 応答予測 標準偏差 ピークファクター

1. はじめに

近年、免震層にアクティブ制振を併用したアクティブ免震が提案された。アクティブ免震の設計では、建築物の最大応答や最大制御力のような相互に影響し合うパラメータが存在しており、従来はこれらのパラメータ決定のためには時刻歴応答解析が必要である。さらに、耐風設計の場合、複数波のアンサンブル平均で評価する必要があるため、アクティブ免震のパラメータを決定するのに莫大な時間を費やしてしまう。

一方で、パッシブ設計では風方向風力を受ける場合はガストファクターを、風直交方向風力を受ける場合はピークファクターを用いることで、時刻歴応答解析を行わない簡易な設計法が提案されている²⁾。

$$x_{\max} = \sigma g_L \tag{1}$$

ここに、 x_{\max} : 最大応答、 σ : 標準偏差、 g_L : ピークファクターである。

さらに、風方向風力を受けるアクティブ免震の場合、陳らによって従来のパッシブ設計を拡張して、最大応答および最大制御力を予測する簡易な設計法が提案されている³⁾。しかし、風直交方向風力を受けるアクティブ免震の場合の簡易な設計法は提案されていない。

本研究では、パッシブ設計で用いられるピークファクターを用いた方法（以降、ピークファクター方法）をアクティブ免震に拡張し、超高層アクティブ免震建築物のための最大応答および最大制御力の簡易な設計法を提案する。

2. モデルの設計

2.1. 力学モデルおよび制御系の設計

風力を受ける多自由度系アクティブ免震の振動方程式は以下で表される。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = E_f \mathbf{f}(t) - E_u \mathbf{u}(t) \tag{2}$$

ここで、 $\mathbf{x}(t)$: 応答変位ベクトル、 M : 質量マトリクス、 C : 減衰マトリクス、 K : 剛性マトリクス、 $\mathbf{f}(t)$: 風外乱ベクトル、 E_f : $\mathbf{f}(t)$ の入力マトリクス、 $\mathbf{u}(t)$: 制御力、 E_u : $\mathbf{u}(t)$ の入力マトリクスである。

次に制御系を構築するために、式(2)の状態方程式を示す。

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_f \mathbf{f}(t) - \mathbf{B}_u \mathbf{u}(t) \tag{3}$$

ここに、 $\mathbf{z}(t)$: 状態変数ベクトル、 \mathbf{A} : システムマトリクス、 \mathbf{B}_f : 風力入力ゲイン、 \mathbf{B}_u : 制御力入力ゲインであり、それぞれ次式で定義される。

$$\mathbf{z}(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \dot{\mathbf{x}}^T(t)]^T \tag{4}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{B}_f = [\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_f)^T]^T \tag{6}$$

$$\mathbf{B}_u = [\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_u)^T]^T \tag{7}$$

本研究における制御系のブロック線図を図1に示す。

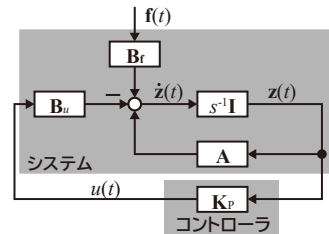


図1 ブロック線図

本研究では、以下の制御則のフィードバック制御を行う。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{z}(t) = \mathbf{K}_{pD} \mathbf{x}(t) + \mathbf{K}_{pV} \dot{\mathbf{x}}(t) \tag{8}$$

ここに、 \mathbf{K}_p : 状態フィードバックゲイン、 \mathbf{K}_{pD} : 応答変位の状態フィードバックゲイン、 \mathbf{K}_{pV} : 応答速度の状態フィードバックゲインである。

本研究では、最適レギュレータ（以降、LQR 制御）を用いる⁴⁾。LQR 評価関数を次式に示す。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{z}^T(t)\mathbf{Q}_n\mathbf{z}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)]dt \tag{9}$$

ここに、 \mathbf{Q}_n : 状態変数の重み行列、 \mathbf{R} : 制御力の重みである。

2.2. 等価パッシブモデルの構築

本章ではアクティブ制御を考慮した等価パッシブモデルを構築することで、アクティブ制御系の応答および固有値、固有モード等を評価する。

式(2)の振動方程式に式(8)を代入して整理すると、アクティブ制御系の等価パッシブモデルが得られる。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C_{eq}\dot{\mathbf{x}}(t) + K_{eq}\mathbf{x}(t) = E_f \mathbf{f}(t) \tag{10}$$

ここに、 C_{eq} : 等価減衰マトリクス、 K_{eq} : 等価剛性マトリクスであり、次式で定義する。

$$C_{eq} = C + E_u \mathbf{K}_{pV} \tag{11}$$

$$K_{eq} = K + E_u \mathbf{K}_{pD} \tag{12}$$

ここで、等価モデルの固有値を算定する際、 K_{eq} は非対称マトリクスになるため、複素モード解析を行う必要がある。しかし、設計を簡易にするために、本研究では実数固有値解析によって固有値および固有モードを算定することとする。

3. 最大応答および最大制御力の予測手法

3.1.1 次モードの抽出

風応答では1次モードが卓越するため、等価モデルの1次モードの応答を用いて、アクティブ制御系の応答を近似する。

$$\mathbf{x}(t) \approx \boldsymbol{\Phi}_{m1} x_{m1}(t) \quad (13)$$

ここに、 $\boldsymbol{\Phi}_{m1}$: 1次固有ベクトル、 $x_{m1}(t)$: 1次一般化応答変位である。式(13)を式(2)に代入すると次式を得る。

$$\mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}_{m1}\ddot{x}_{m1}(t) + \mathbf{C}\boldsymbol{\Phi}_{m1}\dot{x}_{m1}(t) + \mathbf{K}\boldsymbol{\Phi}_{m1}x_{m1}(t) \approx \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) - \mathbf{E}_u u(t) \quad (14)$$

ここに、左から $\boldsymbol{\Phi}_{m1}^T$ を乗ずると、

$$\boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}_{m1} \ddot{x}_{m1}(t) + \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\Phi}_{m1} \dot{x}_{m1}(t) + \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}_{m1} x_{m1}(t) \approx \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) - \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u u(t) \quad (15)$$

したがって、1次一般化制御力 $u_{m1}(t)$ は制御力 $u(t)$ を用いて以下のように近似される。

$$u_{m1}(t) \approx \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u u(t) \quad (16)$$

また、式(8)は1次モード近似により、

$$u(t) \approx \mathbf{K}_{PD} \boldsymbol{\Phi}_{m1} x_{m1}(t) + \mathbf{K}_{PV} \boldsymbol{\Phi}_{m1} \dot{x}_{m1}(t) \quad (17)$$

これを式(16)に代入することで $u_{m1}(t)$ が導かれる。

$$u_{m1}(t) \approx K_{PD,m1} x_{m1}(t) + K_{PV,m1} \dot{x}_{m1}(t) \quad (18)$$

ここに、

$$K_{PD,m1} = \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u \mathbf{K}_{PD} \boldsymbol{\Phi}_{m1} \quad (19)$$

$$K_{PV,m1} = \boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u \mathbf{K}_{PV} \boldsymbol{\Phi}_{m1} \quad (20)$$

3.2. ピークファクター方法

最大応答および最大制御力は以下のように近似される。

$$\mathbf{x}_{\max} \approx \boldsymbol{\Phi}_{m1} x_{\max,m1} = \boldsymbol{\Phi}_{m1} \sigma_{D,m1} g_{D,m1} \quad (21)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{\max} \approx \boldsymbol{\Phi}_{m1} \dot{x}_{\max,m1} = \boldsymbol{\Phi}_{m1} \sigma_{V,m1} g_{V,m1} \quad (22)$$

$$u_{\max} \approx \frac{u_{\max,m1}}{\boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u} = \frac{\sigma_{u,m1}}{\boldsymbol{\Phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u} g_{u,m1} \quad (23)$$

ここに、 $\sigma_{D,m1}$ 、 $\sigma_{V,m1}$ 、 $\sigma_{u,m1}$: 1次一般化応答変位、1次一般化応答速度および1次一般化制御力の標準偏差、

$g_{D,m1}$ 、 $g_{V,m1}$ 、 $g_{u,m1}$: 1次一般化応答変位、1次一般化応答速度および1次一般化制御力のピークファクターであり、荷重指数 α を用いて以下の式により与える。

$$g_L = \sqrt{2 \ln(600 n_{m1}) + 1.2} \quad (24)$$

3.3. 標準偏差

1次モード応答の標準偏差は以下の式により算出する¹⁾。

$$\sigma_{D,m1} = \sqrt{\int_0^\infty |H_{D,m1}(n)|^2 S_{m1}(n) dn} \quad (25)$$

$$\sigma_{V,m1} = \sqrt{\int_0^\infty |H_{V,m1}(n)|^2 S_{m1}(n) dn} \quad (26)$$

$$\sigma_{u,m1} = \sqrt{\int_0^\infty |H_{u,m1}(n)|^2 S_{m1}(n) dn} \quad (27)$$

ここに、 n : 振動数、 $H_{D,m1}(n)$ 、 $H_{V,m1}(n)$ 、 $H_{u,m1}(n)$: 1次一般化応答変位、1次一般化応答速度および1次一般化制御力の伝達関数、 $S_{m1}(n)$: 1次一般化風力のパワースペクトル密度である。

$H_{D,m1}(n)$ 、 $H_{V,m1}(n)$ 、 $H_{u,m1}(n)$ は以下の式で算定する。

$$H_{D,m1}(n) = \frac{1}{k_{m1} \left[1 - \left(\frac{n}{n_{m1}} \right)^2 + 2\zeta_{m1} \left(\frac{n}{n_{m1}} \right) \times i \right]} \quad (28)$$

$$H_{V,m1}(n) = 2\pi n i \times H_{D,m1}(n) \quad (29)$$

$$H_{u,m1}(n) = K_{PD,m1} H_{D,m1}(n) + K_{PV,m1} H_{V,m1}(n) \quad (30)$$

ここに、 k_{m1} : 1次一般化剛性、 n_{m1} : 1次一般化固有振動数、 ζ_{m1} : 1次一般化減衰定数、 i : 虚数単位である。

4. 検証用のモデルと風力の概要

4.1. 建築物の概要

図3に構造物のモデルを、表1にモデルの諸元、表2に各層のパラメータを示す。水平剛性の算出方法は文献⁵⁾を参考にし、減衰は剛性比例型とする。また、上部構造の1次固有モードは直線型モード分布とする。

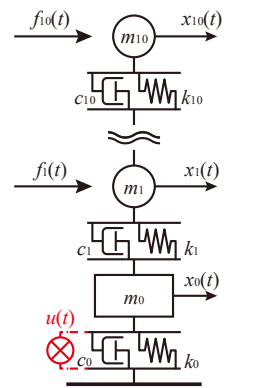


図2 カ学モデル

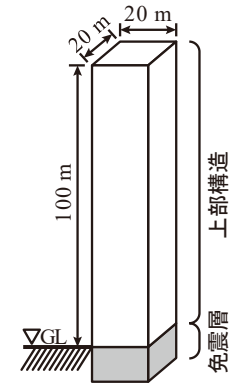


図3 構造物のモデル

表1 モデルの諸元

パラメータ	記号	数値
構造種別	-	鉄骨造
高さ	H	100 m
上部構造幅	B	20 m
上部構造奥行き	D	20 m
上部構造密度	ρ	0.2 t/m ³
1次固有周期	$T_{s,m1}$	2 s
1次減衰定数	$\zeta_{s,m1}$	2 %
免震層幅	B_0	20 m
免震層奥行き	D_0	20 m
免震層面密度	ρ_0	3 t/m ²
免震層周期	T_0	4 s
免震層減衰比	ζ_0	20 %

表2 各層パラメータ

質点	質量	減衰係数	剛性
i	m_i [t]	c_i [kN·s/m]	k_i [kN·m]
10	800	1,005	78,957
9	800	1,910	150,018
8	800	2,714	213,183
7	800	3,418	268,453
6	800	4,021	315,827
5	800	4,524	355,306
4	800	4,926	386,888
3	800	5,228	410,576
2	800	5,429	426,367
1	800	5,529	434,263
0	1,200	5,781	22,700

4.2. 風力の概要

本研究では風洞実験⁶⁾(Wind Tunnel Experience, WTE)により得られた風直交方向風力を用いる。表3に風力の諸元を示す。また、数値解析結果は30ケースのアンサンブル平均で評価し、ばらつきを30ケースの標準偏差で評価する。

また、図4に風洞実験から得られる風直交方向風力の1次モードパワースペクトル密度と、荷重指数(Recommendation for Loads on Buildings, RLB)による風直交方向風力のパワースペクトル密度の比較を示す。

表 3 風力の諸元

風外乱方向	風直交方向
ケース数	30
計画地	東京
粗度区分	III
再現期間	500 年
基本風速	36 m
500 年風速	40 m
設計風速	50.41 m/s
速度圧	1,550 N/m ²

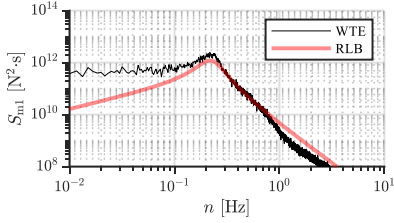


図 4 風力のパワースペクトル密度

4.3. LQR 制御目標の設定

式(9)の状態変数の重み行列を以下のように設定する。

$$Q_1 = 10^\beta \text{diag}[1 \ 0 \ \dots \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (31)$$

$$Q_2 = 10^\beta \text{diag}[1 \ 1 \ \dots \ 1 \ ; \ 1 \ 1 \ \dots \ 1] \quad (32)$$

$$Q_3 = 10^\beta \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$Q_4 = 10^\beta \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix} \quad (34)$$

ここに、 β : LQR 重み指数, \mathbf{I} : 単位行列, \mathbf{W} : 変換行列であり、本研究では変位-層間変形変換行列とする。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

また、制御力の重みは次のように定める。

$$R = 1 \quad (36)$$

表 3 に、状態変数の重み行列の意味についてまとめる。

表 3 LQR 制御目標

ケース	Q_n	制御目標
Case1	Q_1	免震層応答変位
Case2	Q_2	全層変位&全層速度
Case3	Q_3	層間変形
Case4	Q_4	層間変形&層間速度

5. 数値解析結果

本章では、3章で示した最大応答および最大制御力の予測値と時刻歴応答解析を行った数値解析結果を比較する。

なお、Sim.は数値解析結果を、Pre.は予測値を表す。

5.1. 標準偏差

図 4、図 5、図 6 にそれぞれ免震層応答変位、免震層応答速度および制御力の標準偏差の数値解析値と予測値の比較を示す。なお、制御力の標準偏差は建築物全重量で基準化する。図 4、図 5 より免震層応答変位および免震層応

答速度の標準偏差の数値解析値と予測値は、一部ケースを除いて概ね一致している。また、制御力の標準偏差について図 6 より Case3 以外で概ね精度よく予測できた。

5.2. ピークファクター

図 7、図 8、図 9 にそれぞれ免震層応答変位、免震層応答速度および制御力のピークファクターの数値解析値と予測値の比較を示す。図 7、図 8、図 9 より各制御ケースの数値解析値と予測値は非常に精度よく一致している。

5.3. 最大応答および最大制御力

図 10、図 11、図 12 にそれぞれ免震層最大変位、免震層最大速度および最大制御力の数値解析値と予測値の比較を示す。なお、最大制御力は建築物全重量で基準化する。図 10、図 11 より免震層最大変位および免震層最大速度の数値解析値と予測値は、一部ケースを除いて概ね一致していると考えられる。また、最大制御力について図 12 より Case3 以外で概ね精度よく予測できた。

6. まとめ

本研究では、風直交方向風力を受ける超高層アクティブ免震建築物の最大応答および最大制御力を、荷重指針で提案されている風直交方向振動のピークファクターと標準偏差を用いて予測する方法を提案した。

アクティブ制御目標を複数設定して検証した結果、免震層最大変位と免震層最大速度は、Case2 および Case4 を除いて概ね精度よく予測することができた。最大制御力も Case3 を除いて概ね精度よく予測できた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K17342 の助成を受けたものです。ここに、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針を活かす設計指針 2・建築物の風応答・風荷重評価/CFD ガイド、丸善出版、2017.2
- 2) 日本建築学会，建築物荷重指針・同解説（2015），丸善出版，2015.2
- 3) Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua She, Osamu Takahashi: Gust Factor Approach for Estimating Maximum Response and Control Force in High-Rise Base-Isolated Buildings with Active Structural Control, Structural Control and Health Monitoring, 9995641, 2024.3
- 4) 森泰親：わかりやすい現代制御理論，森北出版，2013.4
- 5) 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，Vol.74, No.635, pp.75-82, 2009.1
- 6) 丸川比佐夫，大熊武司，北村春幸，吉江慶祐，鶴見俊雄，佐藤大樹：風洞実験に基づく高層建築物の多層風力によるエネルギー入力性状（その2）矩形高層建築物に作用する層風力特性，日本建築学会学術講演梗概集，Vol.B-1, pp.193-194, 2010.7

ただし、(a) : Case1, (b) : Case2, (c) : Case3, (d) : Case4

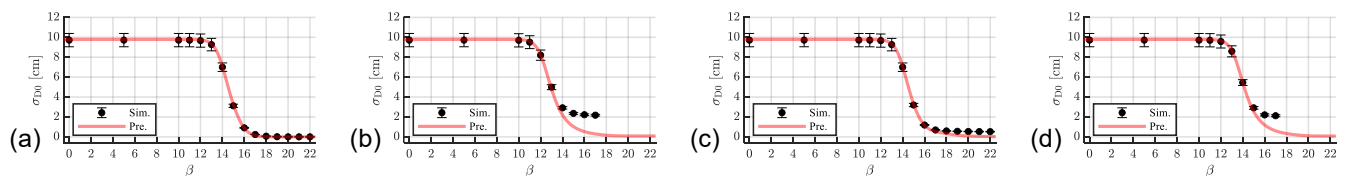


図 4 免震層応答変位の標準偏差

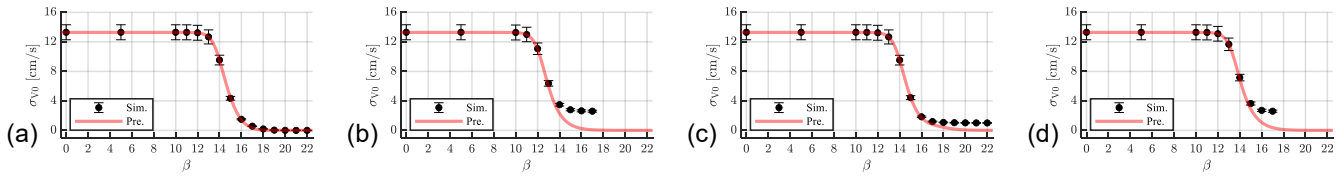


図5 免震層応答速度の標準偏差

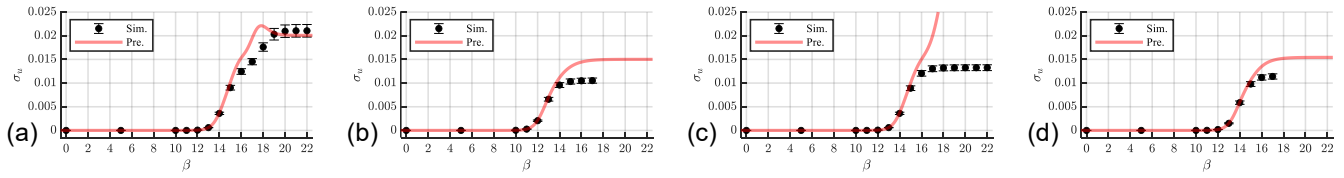


図6 制御力の標準偏差

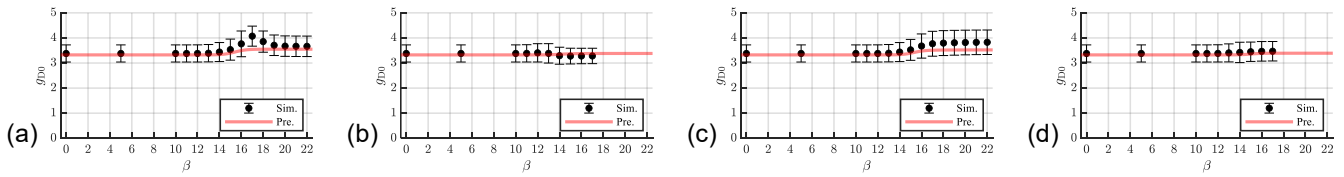


図7 免震層応答変位のピークファクター

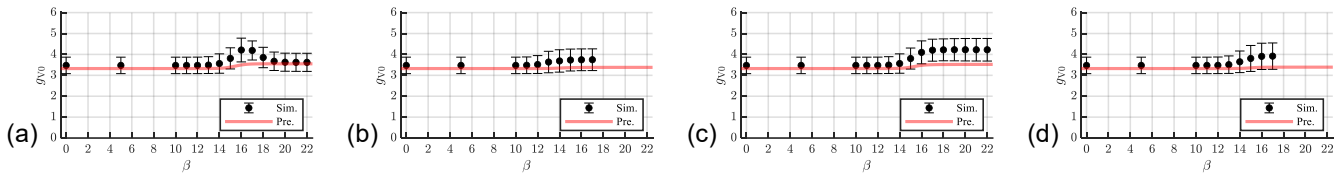


図8 免震層応答速度のピークファクター

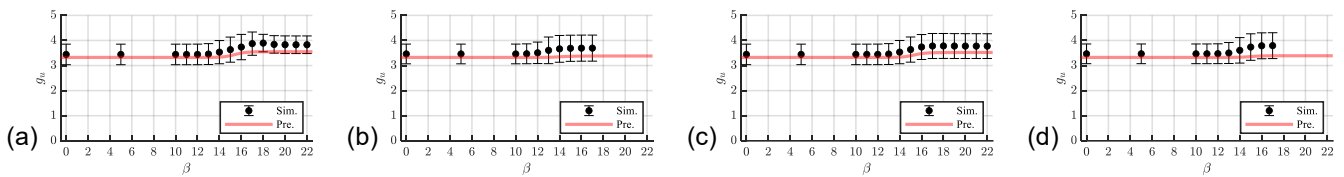


図9 制御力のピークファクター

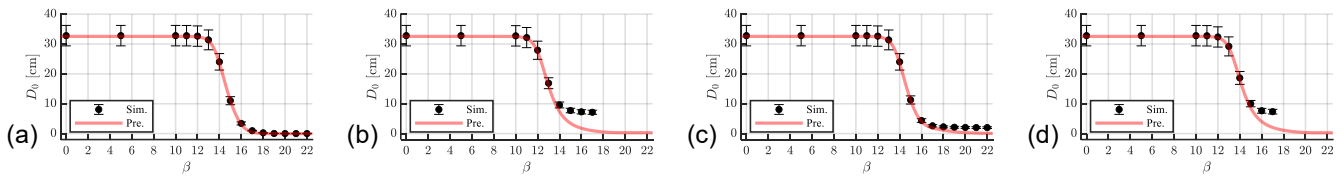


図10 免震層最大変位

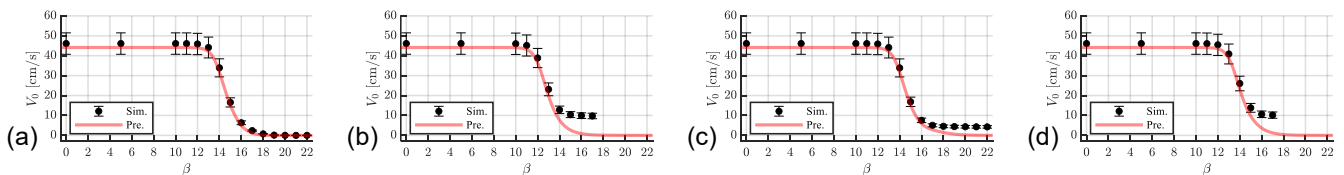


図11 免震層最大速度

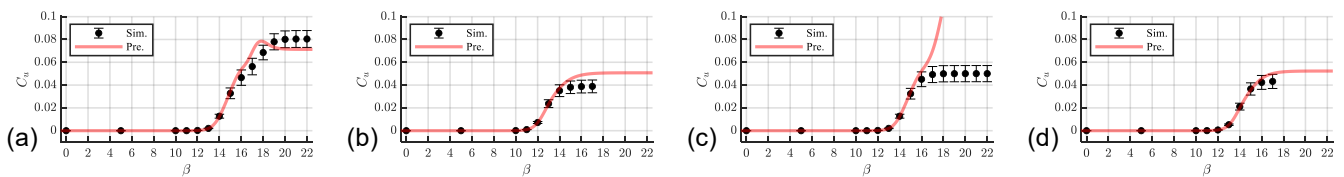


図12 最大制御力

*1 東京科学大学
*2 清水建設
*3 東京工科大学