

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風力を受ける超高層アクティブ免震建築物に関する研究（その2. 風直交方向における最大制御力簡易予測手法の提案）
Title(English)	Research on A High-Rise Base-Isolated Structure with Active Control subjected to Wind Force (Part.2, Simple Prediction Method for Maximum Control Force)
著者(和文)	陳引力, 鎌野隆貴, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華
Authors(English)	Yinli Chen, Ryuki Kamano, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, , pp. 391-392
Citation(English)	, 構造II, , pp. 391-392
発行日 / Pub. date	2025, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

風力を受ける超高層アクティブ免震建築物に関する研究 (その 2. 風直交方向における最大制御力簡易予測手法の提案)

正会員 ○ 陳 引力*¹ 正会員 鎌野 隆貴*¹
 同 佐藤 大樹*¹ 同 宮本 皓*²
 同 余 錦華*³

アクティブ制御 LQR 制御 最大制御力予測
 超高層免震建築物 風直交方向風力

1. はじめに

本報その 1 では、超高層アクティブ免震建築物について複数の制御目標を設定し、風力を受ける際の制御目標ごとの最大応答を比較することで高い応答低減効果を発揮する制御目標について考察した。

本報その 2 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制御力予測を行う。既往研究として著者らは最大制御力の簡易予測手法に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) を提案した⁶⁾。しかし、この方法は最大制御力の予測で使用する制御力の標準偏差の算出方法が複雑であった。そこで本報その 2 では、ピークファクター方法をさらに簡易にした、二乗和平方根 (Square Root of Sum of Squares, SRSS) を用いた最大制御力の簡易予測手法を提案する。

2. モデルの設計

2.1. 等価モデルの設計

本節ではアクティブ制御を考慮した等価モデルを構築する。本報その 1 で、風力を受ける N 自由度系アクティブ免震建築物の振動方程式、および制御力は以下で与えた。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) - \mathbf{E}_u u(t) \quad (\text{本報 1-1})$$

$$u(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{z}(t) = \mathbf{K}_{PD} \mathbf{x}(t) + \mathbf{K}_{PV} \dot{\mathbf{x}}(t) \quad (\text{本報 1-17})$$

ここで、式(本報 1-1)に式(本報 1-17)を代入して整理すると、次式の等価モデルの振動方程式を得る。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}_{eq} \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}_{eq} \mathbf{x}(t) = \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{C}_{eq}$ 、 $\mathbf{K}_{eq}$:順に等価減衰マトリクス、等価剛性マトリクスであり、次式で定義する。

$$\mathbf{C}_{eq} = \mathbf{C} + \mathbf{E}_u \mathbf{K}_{PV}, \quad \mathbf{K}_{eq} = \mathbf{K} + \mathbf{E}_u \mathbf{K}_{PD} \quad (2, 3)$$

2.2. 1 次モードの抽出

風応答は 1 次モード卓越のため、等価モデルの 1 次モード応答を用いて、アクティブ制御系の応答を近似する。

$$\mathbf{x}(t) \approx \boldsymbol{\phi}_{m1} x_{m1}(t) \quad (4)$$

ここに、 $\boldsymbol{\phi}_{m1}$:1 次固有モードベクトル、 $x_{m1}(t)$:1 次一般化応答変位である。なお、等価モデルの固有値を算定する際、複素モード解析を行う必要があるが、設計を簡易にするために、本研究では次式に示す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。

$$\mathbf{K}_{eq} \boldsymbol{\Phi} = \omega^2 \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi} \quad (5)$$

次に、式(4)を式(本報 1-1)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_{m1} \ddot{x}_{m1}(t) + \mathbf{C} \boldsymbol{\phi}_{m1} \dot{x}_{m1}(t) + \mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_{m1} x_{m1}(t) \\ \approx \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) - \mathbf{E}_u u(t) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、左から $\boldsymbol{\phi}_{m1}^T$ を乗ずると等価 1 次モードの振動方程式を得られる。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_{m1} \ddot{x}_{m1}(t) + \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\phi}_{m1} \dot{x}_{m1}(t) + \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_{m1} x_{m1}(t) \\ \approx \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) - \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

この式から 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定義される。

$$u_{m1}(t) = \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u u(t) \quad (8)$$

また、式(本報 1-17)は 1 次モード近似により、

$$u(t) \approx \mathbf{K}_{PD} \boldsymbol{\phi}_{m1} x_{m1}(t) + \mathbf{K}_{PV} \boldsymbol{\phi}_{m1} \dot{x}_{m1}(t) \quad (9)$$

これを式(8)に代入して 1 次一般化制御力を導く。

$$u_{m1}(t) \approx \mathbf{K}_{PD,m1} x_{m1}(t) + \mathbf{K}_{PV,m1} \dot{x}_{m1}(t) \quad (10)$$

ただし、

$$\mathbf{K}_{PD,m1} = \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u \mathbf{K}_{PD} \boldsymbol{\phi}_{m1} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_{PV,m1} = \boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u \mathbf{K}_{PV} \boldsymbol{\phi}_{m1} \quad (12)$$

3. 最大制御力の簡易予測手法

3.1. ピークファクター方法

最大制御力は 1 次モード近似を用いて次式で表される。

$$u_{\max} \approx \frac{\sigma_{u,m1}}{\boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u} g_{u,m1} \quad (13)$$

ここに、 $\sigma_{u,m1}$:1 次一般化制御力の標準偏差、 $g_{u,m1}$:1 次一般化制御力のピークファクターである。

1 次一般化制御力の標準偏差は以下の式で与える⁶⁾。

$$\sigma_{u,m1} = \sqrt{\int_0^\infty |H_{u,m1}(n)|^2 S_{m1}(n) dn} \quad (14)$$

ここに、 n :振動数、 $H_{u,m1}(n)$: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り、1 次一般化制御力の伝達関数は次式で与える。

$$H_{u,m1}(n) = \mathbf{K}_{PD,m1} H_{D,m1}(n) + \mathbf{K}_{PV,m1} H_{V,m1}(n) \quad (15)$$

ここで、 $H_{D,m1}(n)$ 、 $H_{V,m1}(n)$:順に 1 次一般化応答変位、1 次一般化応答速度の伝達関数であり、次式で与える⁷⁾。

$$H_{D,m1}(n) = \frac{1}{k_{m1} \left[1 - \left(\frac{n}{n_{m1}} \right)^2 + i \cdot 2\zeta_{m1} \left(\frac{n}{n_{m1}} \right) \right]} \quad (16)$$

$$H_{V,m1}(n) = H_{D,m1}(n) \cdot 2\pi n i \quad (17)$$

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。

次に、1 次一般化制御力のピークファクターは荷重指針⁸⁾の風直交方向振動のピークファクターを用いて以下の式により与える。

$$g_L = \sqrt{2 \ln(600 n_{m1}) + 1.2} \quad (18)$$

3.2. 二乗和平方根 (SRSS)

本節では、式(13)で示したピークファクター方法による最大制御力の算定式を変形することで、二乗和平方根による最大制御力の算定式を導出する。

制御力の標準偏差 σ_u は 1 次一般化制御力の標準偏差 $\sigma_{u,m1}$ を用いて近似的に以下の式で表される。

$$\sigma_u \approx \frac{\sigma_{u,m1}}{\boldsymbol{\phi}_{m1}^T \mathbf{E}_u} \quad (19)$$

さらに式(14)より制御力の標準偏差は1次一般化制御力の伝達関数を用いて以下の式で表される。

$$\sigma_u \approx \frac{1}{\Phi_{m1}^T \mathbf{E}_u} \sqrt{\int_0^\infty |H_{u,m1}(n)|^2 S_{m1}(n) dn} \quad (20)$$

ここで、1次一般化制御力の伝達関数 $H_{u,m1}(n)$ は複素数であるため以下の式が成立する。

$$|H_{u,m1}(n)|^2 = H_{u,m1}(n) \bar{H}_{u,m1}(n) \quad (21)$$

ここに、 $\bar{H}_{u,m1}(n):H_{u,m1}(n)$ の共役複素数である。上式に式(15)を代入し整理すると、以下の式を得られる。

$$|H_{u,m1}(n)|^2 = K_{PD,m1}^2 |H_{D,m1}(n)|^2 + K_{PV,m1}^2 |H_{V,m1}(n)|^2 + K_{PD,m1} K_{PV,m1} \{H_{D,m1}(n) \bar{H}_{V,m1}(n) + \bar{H}_{D,m1}(n) H_{V,m1}(n)\} \quad (22)$$

ここで、式(17)と共役複素数の関係より

$$H_{D,m1}(n) \bar{H}_{V,m1}(n) = |H_{D,m1}(n)|^2 \cdot (-2\pi ni) \quad (23)$$

$$\bar{H}_{D,m1}(n) H_{V,m1}(n) = |H_{D,m1}(n)|^2 \cdot 2\pi ni \quad (24)$$

これらは打ち消し合い、式(22)は次のようになる。

$$|H_{u,m1}(n)|^2 = K_{PD,m1}^2 |H_{D,m1}(n)|^2 + K_{PV,m1}^2 |H_{V,m1}(n)|^2 \quad (25)$$

式(20)に式(25)を代入し、さらに式(18)を乗ずることで以下に示す二乗和平方根による最大制御力予測式を得る。

$$\sigma_u g_L = u_{\max} \approx \sqrt{(\mathbf{K}_{PD} \mathbf{x}_{\max})^2 + (\mathbf{K}_{PV} \dot{\mathbf{x}}_{\max})^2} \quad (26)$$

ここに、 $\mathbf{K}_{PD}$ 、 $\mathbf{K}_{PV}$:順に応答変位の状態フィードバックゲイン、応答速度のフィードバックゲインである。また、 $\mathbf{x}_{\max}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}_{\max}$:順にピークファクター方法による最大変位予測値、最大速度予測値であり、次式で定義する。

$$\mathbf{x}_{\max} = \Phi_{m1} \sigma_{D,m1} g_L, \quad \dot{\mathbf{x}}_{\max} = \Phi_{m1} \sigma_{V,m1} g_L \quad (27, 28)$$

以上の式変形より、二乗和平方根による最大制御力予測式はピークファクター方法による予測式(式(13))と厳密に一致することを意味している。

4. 数値解析用のモデル、風力および制御目標の概要

数値解析用の構造物のモデル、風力および制御目標は本報その1と同じである。なお、対象風力は風直交方向風力とする。詳細は本報その1を参照。

5. 数値解析結果

図1に制御力係数の数値解析値、ピークファクター方法(Peak Factor Method, PFM)による予測値および二乗和平方根(SRSS)による予測値の比較を示す。なお、制御力係数については本報その1を参照。また、数値解析値は30ケースのアンサンブル平均を示し、30ケースの標準偏差をエラーバーとして示す。

図1よりPFMとSRSSの予測値は一致することが確認できる。また、制御力係数の予測精度は概ね良いが、予測が大きく外れるケースが存在することも確認できる。

6. まとめ

本報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における最大制御力の簡易予測手法として二乗和平方根(SRSS)を提案した。これはピークファクター方法と厳密に一致することを示した。また、制御力係数の数値解析値と予測値の比較の結果、一部の制御目標を除いてSRSSを用いて概ね予測できることを確認した。

謝辞

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

参考文献(本報その1とまとめて示す)

- 1) 日本免震構造協会：免震建築物等の計画推移，2024.6
- 2) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針(2023)，2023.3
- 3) 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
- 4) 森泰親：わかりやすい現代制御理論，森北出版，2013.4
- 5) 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
- 6) 鎌野隆貴，陳引力，佐藤大樹，宮本皓，余錦華：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，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.461-464，2025.3
- 7) 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
- 8) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015)，丸善出版，2015.2

本報 1-表 3 制御目標ベクトル $\mathbf{T}_n$ と制御目標

	$[x_0 \ x_1 \ \cdots \ x_{10} : \dot{x}_0 \ \dot{x}_1 \ \cdots \ \dot{x}_{10}]$	制御目標
Case1	$[1 \ 0 \ \cdots \ 0 : 0 \ 0 \ \cdots \ 0]$	免震層変位
Case2	$[1 \ 1 \ \cdots \ 1 : 0 \ 0 \ \cdots \ 0]$	全層変位
Case3	$[1 \ 1 \ \cdots \ 1 : 1 \ 0 \ \cdots \ 0]$	全層変位&免震層速度
Case4	$[1 \ 1 \ \cdots \ 1 : 0 \ 0 \ \cdots \ 1]$	全層変位&頂部速度
Case5	$[0 \ 0 \ \cdots \ 0 : 1 \ 1 \ \cdots \ 1]$	全層速度
Case6	$[1 \ 0 \ \cdots \ 0 : 1 \ 1 \ \cdots \ 1]$	免震層変位&全層速度
Case7	$[0 \ 0 \ \cdots \ 1 : 1 \ 1 \ \cdots \ 1]$	頂部変位 &全層速度
Case8	$[1 \ 1 \ \cdots \ 1 : 1 \ 1 \ \cdots \ 1]$	全層変位 &全層速度

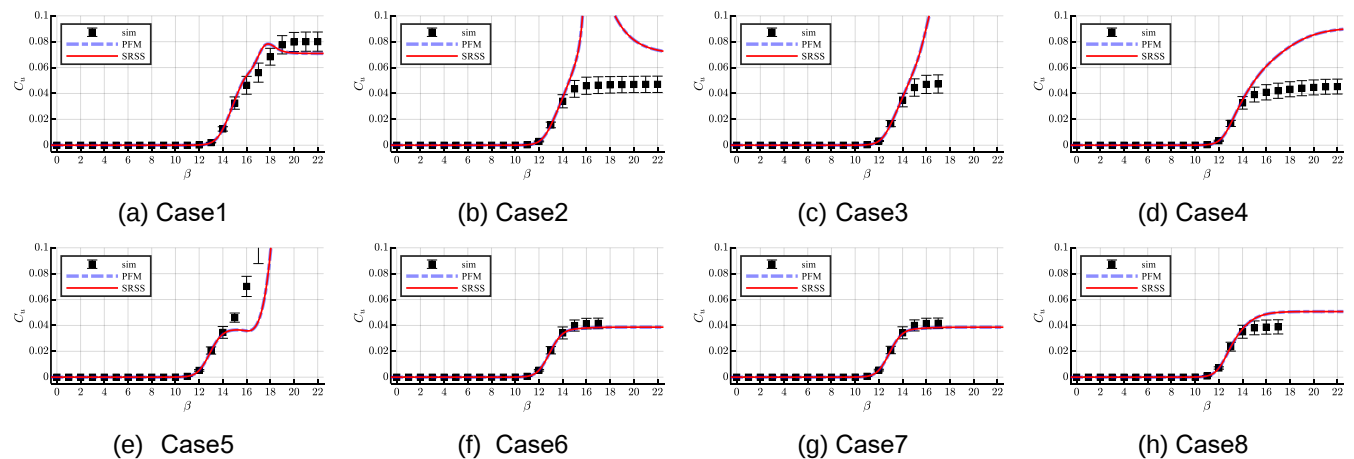


図1 制御力係数の数値解析値と予測値の比較

*1 東京科学大学
*2 清水建設
*3 東京工科大学

*1 Institute of Science Tokyo
*2 Shimizu Corporation
*3 Tokyo University of Technology