

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震建築物の応答を用いた等価入力外乱による平均成分を含む風方向風力の推定
Title(English)	Estimation of along-wind force of base isolated building with equivalent input-disturbance approach
著者(和文)	宮本皓, 佐藤大樹, 陳引力, 余錦華
Authors(English)	Kou Miyamoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Jinhu She
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 325-328
Citation(English)	, , , pp. 325-328
発行日 / Pub. date	2022, 3

免震建築物の応答を用いた等価入力外乱による平均成分を含む風方向風力の推定

構造—振動

正会員 ○ 宮本 皓^{*1}
" 陳 引力^{*3}正会員 佐藤 大樹^{*2}
" 余 錦華^{*4}等価入力外乱 外乱推定 風方向風力
風外力 現代制御理論

1. はじめに

近年、建築物の高層化に伴い、地震のみならず建築物にもたらす風力も増大し、地震荷重ならず風荷重も重要な設計外力となっている。風外力による建築物の応答を適切に評価するために、風洞実験や実測値から作用した風力を推定し、これを用いて応答を評価する試みがある。風外力の推定方法は、丸田・神田らにより、構造物の運動方程式を時間領域において逆算することにより計算する手法が提案された[1]。他方、佐藤・Razelleらにより、運動方程式をフーリエ変換した周波数領域にて、各モードに作用する風力を計算する手法が検討された[2]。本手法は平均成分を含む変位が直接観測できる条件下で、平均成分を含む風力を推定する手法である。

一方で、近年では、現代制御理論の一手法であるカルマンフィルターを用いる方法が Hwang および Li らを中心に行われている[3-5]。また Amiri ら[6]および Law ら[7]により、Tikhonov らにより提案された不良設定問題の手法を用いた手法の検討がなされた。これらの手法は減衰係数行列が実数で対角化されることを前提としていることから、非比例減衰への応用は限定されることが課題であった。

制御工学における外乱推定の手法として、制御対象となるモデルの伝達関数の逆システムを用いる外乱オブザーバによる手法が大西らにより提案され、多くのシステムに適用された[8,9]。しかし、外乱オブザーバは、制御対象となる伝達関数が正方行列に限られることや、伝達関数に不安定な零点（伝達関数の分子の根のうち、正であるもの）を持たない系に限られていた。この問題を解決するために、余らにより、等価入力外乱手法が提案された[10]。等価入力外乱手法は、直接制御対象となるモデルの逆関数を用いることがないことから、幅広いシステムへの適用が可能となり、筆者らにより建築物のアクティブ制御への検討もなされている[11,12]。

本研究は、アクティブ制御に用いられる等価入力外乱手法を建築物に入力する風方向風力の推定への応用を試みる。等価入力外乱手法は、制御対象の減衰係数がレーリ一型の減衰である必要がないことから、幅広い建築物において平均成分を持ち合わせる風方向風力の推定が可能であることが期待される。

2. 等価入力外乱

本報では、以下の式(1)および図1に示す免震建築物を

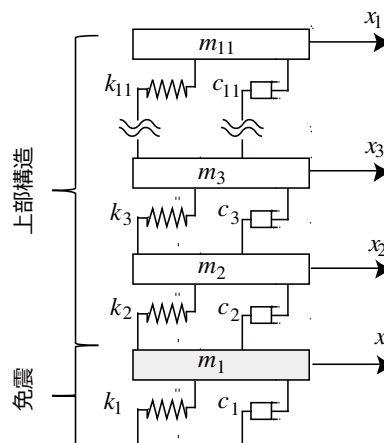


図1 免震建築物のモデル

対象とする。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = E_d F(t) + E_u u(t) \quad (1)$$

上式において、 M : 質量行列、 C : 減衰係数行列、 K : 剛性行列、 E_d : 風外力の入力行列、 F : 各層へ入力する風外力、 x : 地面に対する各層の相対変位のベクトルを示す。また、本モデルは、アクティブ制御を使用していないが、等価入力外乱を適用するために、仮想的な制御入力 $u(t)$ および、制御入力が入力される場所を表す行列 E_u を導入する。式(1)の状態方程式は式(2)により表される。

$$\dot{z}(t) = Az(t) + B_d d(t) + Bu(t) \quad (2)$$

ここで、上式において

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} & B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ E_d \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ E_u \end{bmatrix} & z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \\ d(t) = F(t) \end{cases} \quad (3)$$

となり、 $z(t)$ は変位と速度から構成されるシステムの状態である。さらに、ここで、式(4)によって表される出力方程式を導入する。

$$y(t) = Cz(t) \quad (4)$$

ここで、 $y(t)$ は観測する状態を表し、 C は出力行列である。 C 行列は、物理的にはセンサーの位置や種類を表す。例えば、 C が単位行列の際は、全層に速度系および変位計がついていることを示す。なお、本報において、 (A, B) は可

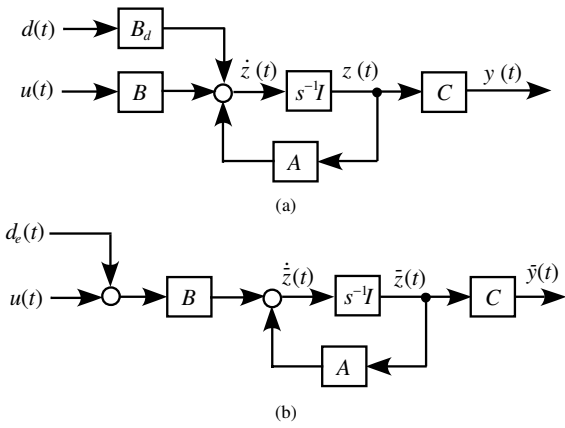


図2 等価入力外乱の模式図 (a)オリジナルの制御系 (b) 等価入力外乱入力時の制御系

制御, (A, C)は可観測であるとする。

図2(a)に、式(3)および(4)のブロック線図を示す。一方で、図2(b)は、系に外乱 $d(t)$ ではなく、等価入力外乱 $d_e(t)$ が入力した際の図を示す。この時、等価入力外乱が入力した制御対象の状態を $\tilde{z}(t)$ とし、出力を $\tilde{y}(t)$ とする。ここで、 $\tilde{y}(t) = y(t)$ が成り立つとき、 $d_e(t)$ を $d(t)$ の等価入力外乱と呼ぶ。すなわち、等価入力外乱とは、制御力が入力する場所 B における、オリジナルの外乱と同じ出力を与えるような信号のことを示す。アクティブ制御において、等価入力外乱を推定し、その逆位相の信号を制御に用いることで、外乱による応答を抑制することが可能となり、筆者らにより、建築構造物の振動制御において適用が検討されている(例えば[10,11])。本報では、等価入力外乱の推定系を、オリジナルの外乱を推定する用途に用いる。このとき、図2(a)および(b)において $u(t) = 0$ とし、また、図2(b)において $B = B_d$ とすることにより、外乱 $d(t)$ が推定される。

次章では、等価入力外乱を用いた、風外力の推定アルゴリズムの説明を行う。

3. 等価入力外乱による風外力の推定方法

本章では、等価入力外乱手法を用いた風外力の推定手法を述べる。3.1章では、全層の変位および速度が直接観測可能であることを仮定して推定を行い、3.2章では、速度のみが観測可能であり、さらに、観測ノイズが含まれていることも仮定した外乱推定を行う。

3.1 全状態が観測可能なケースでの外乱推定

以下より、等価入力外乱の推定プロセスの説明を行う。

図3中の同一次元オブザーバの状態方程式は

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = A\hat{z}(t) + LC[z(t) - \hat{z}(t)] \\ \hat{y}(t) = C\hat{z}(t) \end{cases} \quad (5)$$

となる。ここで、 L はオブザーバゲインを示す。

式(3)から式(5)を減ずることで、以下の式を得る。

$$\Delta\dot{z}(t) = (A - LC)\Delta z(t) + B_d d(t) \quad (6)$$

ここで、 $\Delta z(t)$ はシステムの状態 $z(t)$ とオブザーバの状態 $\hat{z}(t)$ との差であり、

$$\Delta z(t) = z(t) - \hat{z}(t) \quad (7)$$

として定義する。一方で、可制御性の仮定より、

$$\Delta\dot{z}(t) = A\Delta z(t) + B\Delta d(t) \quad (8)$$

を満たす $\Delta d(t)$ が存在する。式(8)を式(6)に代入することで以下の式を得る。

$$\hat{\Delta d}_e = B_d^+ LC \Delta z(t) \quad (9)$$

ここで $\hat{\Delta d}_e$ は以下の式(10)により定義される風外力の推定値である。

$$\hat{\Delta d}_e(t) = d_e(t) - \Delta d(t) \quad (10)$$

また、 B_d^+ は外乱入力行列 B_d のムーア-ペンローズによる擬似逆行列であり、

$$B_d^+ = (B_d^T B_d)^{-1} B_d^T \quad (11)$$

により与えられる。

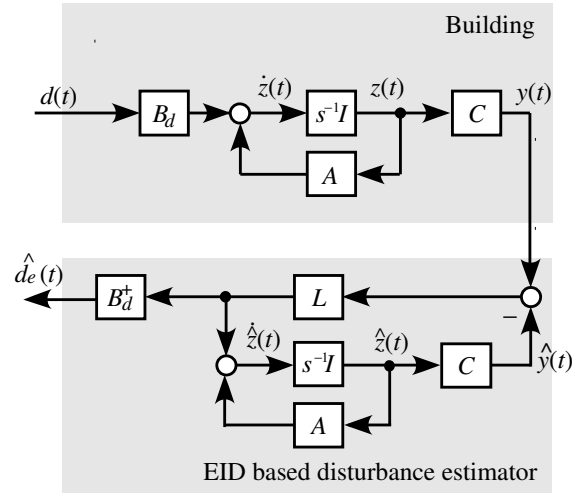


図3. 全状態観測可能時の外乱推定系

3.2 全状態が観測可能なケースでの外乱推定

次に、速度のみが観測可能な時の外乱推定のアルゴリズムを述べる。特に、本節では、観測した速度(図中 $y(t)$) にノイズ $w(t)$ が含まれている場合における推定アルゴリズムを述べる。このときの外乱推定系は図4により示される。図4はノイズ除去のための線形1次のローパスフィルター ($F_v(s)$ および $F_d(s)$) と、変位を推定するための積分器が含まれた系となっている。図において、

ここで、積分器およびローパスフィルターを含めた拡大系を式(12)のように定義する。

$$\begin{cases} \dot{z}_p(t) = A_p z_p(t) + B_p d(t) + B_w w(t) \\ y_p(t) = C_p z_p(t) \end{cases} \quad (12)$$

ここで

$$\begin{cases} A_p = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_d} & -\frac{1}{T_d} & 0 \\ \frac{1}{T_v} C & 0 & 0 & -\frac{1}{T_v} \end{bmatrix} & B_p = \begin{bmatrix} B_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} & B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ I \\ 0 \end{bmatrix} \\ z_p(t) = \begin{bmatrix} z(t) \\ x_I(t) \\ \hat{x}_I(t) \\ \hat{x}_V(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

上式において、 T_d および T_v は変位および速度に対して用いるローパスフィルター $F_v(s)$ および $F_d(s)$ のカットオフ周波数(rad/s)を示す。ローパスフィルターおよび積分器を含む拡大系(12)に対して同一次元オブザーバを(14)のように設定する。

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_p(t) = A_p \hat{z}_p(t) + L_p C_p [z_p(t) - \hat{z}_p(t)] \\ \hat{y}_p(t) = C_p \hat{z}_p(t) \end{cases} \quad (14)$$

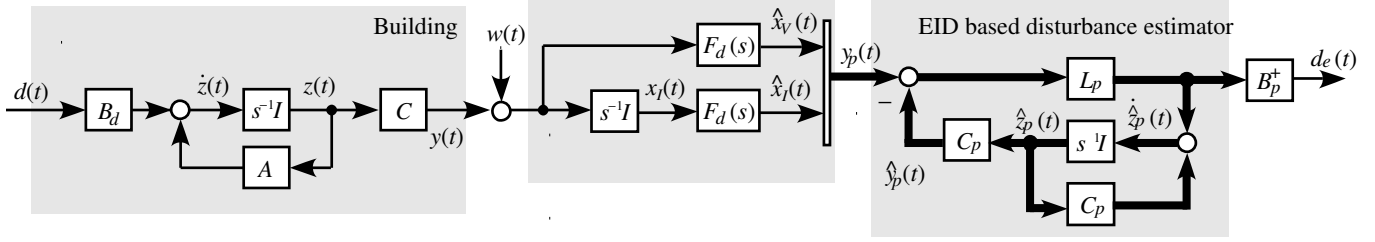


図4. 速度のみ観測可能時の外乱推定系

以下、3.1章と同様に、式(12)および(14)のオブザーバを用いることで、風外力の推定値 \hat{d}_e は式(15)により与えられる。

$$\hat{d}_e = B_p^+ L_p C_p \Delta z_p(t) \quad (15)$$

上式において

$$\begin{cases} B_p^+ = (B_p^T B_p)^{-1} B_p^T \\ \Delta z_p(t) = \Delta z(t) - \hat{\Delta z}(t) \end{cases} \quad (16)$$

を示す。

次章では、解析により3.2章で示した系を用いた手法の妥当性を示す。

5. 数値例

本報では、前述の図1に示した、11層の免震建築物のモデルを用いて、提案手法の検証を行う。本報で用いる建築物モデルは奥行き(B)および幅(D)がいずれも25mとし、高さは100mとする。上部構造の1層当たりの高さ h は10mとし、上部構造の i 層の質量は

$$m_i = B \times D \times \rho_s \times h \quad \{i = 2 \dots 11\} \quad (17)$$

により与えられる。ここで ρ_s は上部構造の密度(kg/m^3)を表し、本報では、 175kg/m^3 とした。また、免震層の質量は面積当たりの質量 ρ_b (kg/m^2)を導入し以下の式により与える。

$$m_1 = B \times D \times \rho_b \quad (18)$$

また、本報で用いる免震建築物の免震周期 T_b は4.0sとし、免震周期に対する減衰定数 ξ を20%とする。なお、免震層の剛性および減衰係数は以下の式(17)により与えるものとする。

$$k_1 = \frac{2\pi \sum m_i}{T_b} \quad (19a)$$

$$c_1 = 2\xi \sqrt{k_1 \sum m_i} \quad (19b)$$

また、上部構造の1次モードの剛性は文献[13]により、以下の式により与えられ、1次モードの固有周期は1.0sとした。

$$k_2 = \frac{\omega^2 \cdot m_2 \cdot \varphi_2 + k_2(\varphi_3 - \varphi_2)}{\varphi_2} \quad (20a)$$

$$k_i = \frac{\omega^2 \cdot m_i \cdot \varphi_i + k_{i+1}(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{\varphi_i - \varphi_{i-1}} \quad (20b)$$

$$k_{11} = \frac{\omega^2 \cdot m_{11} \cdot \varphi_{11}}{\varphi_{11} - \varphi_{10}} \quad (20c)$$

ここで、1次固有モード φ は以下に示すように、本論文では直線モードとして選択する：

$$\varphi_i = i - 1 \quad \{i = 2 \sim 11\} \quad (21)$$

なお、上部構造の減衰係数は剛性比例型として、固有周期に対して2%の減衰定数を与えるものとする。

モデルに作用する風外力は、文献[14]を用いる。実験気流は、建築物荷重指針・同解説[15]の地表面粗度区分IIIの気流を目標に作成されたものである。本報で用いる風外力は平均成分と変動成分の両方を含む風方向風力と、風向角は0度とする。頂部風速は53.0m/sとし、再現期間は500年である。各風外力は解析開始時の過渡応答の影響を避けるために、先頭及び終了50sにエンベロープを設けた。図5に11層目における風外力を、図6に11層目の変動成分のパワースペクトル密度を示す。

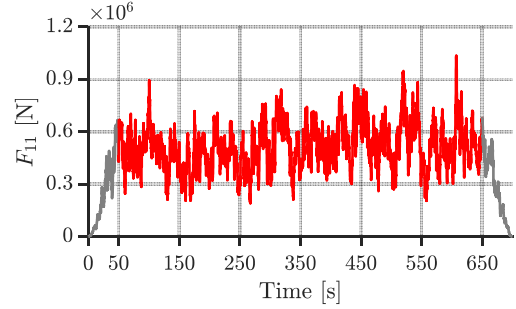


図5. 11層目に作用する風外力

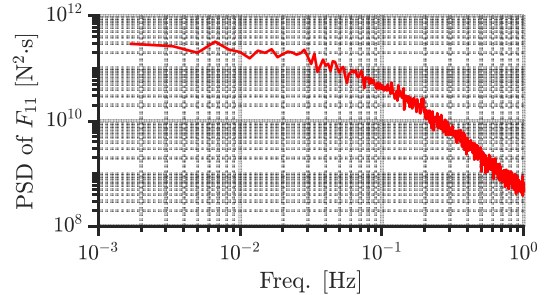


図6. 11層目風力におけるパワースペクトル密度

なお、等価入力外乱に用いるオブザーバゲイン L_p は双対システムと最適制御を用いて、以下の評価関数を最小化するように設計した。

$$J = \int_0^\infty \{z_p^T(t) Q z_p(t) + u^T(t) R u(t)\} dt \quad (22)$$

ここで、 Q および R は以下のリカッチ代数方程式を満たす正定行列である。

$$AX + XA^T + Q - XC^T R^{-1} C X = 0. \quad (23)$$

本報では、 Q および R を以下のように設定した。

$$Q = \text{diag}\{10^{-15} I_{11} \quad 10^{15} I_{33} \quad 10^{-15} I_{11}\} \quad (24a)$$

$$R = 10^{15} I_{55} \quad (24b)$$

上式において I_n は $n \times n$ の単位行列を示す。

なお、オブザーバゲイン L_p は以下の式により与えられる。

$$L_p = -XC^T R^{-T} \quad (25)$$

また、ローパスフィルターのカットオフ周波数は $T_d = 0.01$ および $T_v = 0.05$ とした。またノイズは SN 比率 5% 程度のものを用いた。

以下、図 7 に等価入力外乱を用いた推定結果と、実際に入力した風外力の比較結果を示す。本報では、代表として、2 層目、6 層目、および 11 層目の推定結果との比較を示す。解析の結果、等価入力外乱を用いることにより、免震建築物に入力する平均風力について、SN 比 5% 程度のノイズが含まれていても、平均成分も含めて精度よく推定できることが示された。

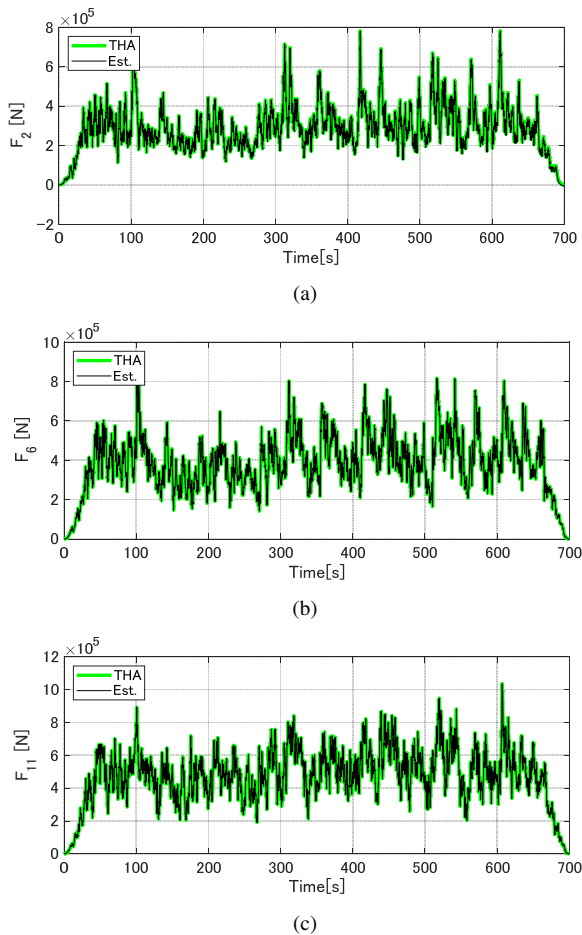


図 7. 実風力と推定風力の比較 : (a) 2 層目、(b) 6 層目、(c) 11 層目

6. まとめ

本報では、等価入力外乱を用いて、免震建築物に入力する、平均成分を有する風方向風力の推定手法の提案を行った。本報では、

- 1) 変位および速度を直接観測できるケース
- 2) 速度のみが直接観測でき、さらに、観測した速度にノイズが含まれるケース

を対象として、等価入力外乱手法を応用した風外力の推定手法を提案した。数値解析の結果、本報で提案した手法を用いることにより、免震建築物に入力する風力について、平均成分も含めて精度よく推定できることが示された。

参考文献

- 1) 青木聡, 稲葉大輔, 神田亮, 丸田栄蔵, 構造物の振動パラメータ及び風外力の推定法に関する研究 : その1. 推定法の理論, 日本建築学会学術講演梗概集, 1999; 259-260.
- 2) Razelle Soriano, Sato Daiki, and Osavel M Dave, WIND LOAD ESTIMATION ON A HIGH-RISE BUILDING BY MODAL ANALYSIS Part 2: Effect of Natural Frequency and Damping Ratio on First Mode Wind Force, 日本建築学会日本建築学会関東支部研究報告集, 2020, pp. 249-252.
- 3) Hwang Jae-seung, Kareem Ahsan, and Kim Wha-jung, Estimation of modal loads using structural response, Journal of Sound and Vibration, 2009; 326, pp. 522-539.
- 4) Hwang Jae-Seung, Kareem Ahsan, and Kim Hongjin, Wind load identification using wind tunnel test data by inverse analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99, pp. 18-26.
- 5) Zhi Lunhai, Yu Pan, Li Qiu-Sheng, Chen Bo, and Fang Mingxin, Identification of wind loads on super-tall buildings by Kalman filter, Computers and Structures, 2018, 208, pp. 105-117.
- 6) Amiri A. Kazemi and Bucher C, Wind load identification of guyed mast inversely from full-scale response measurement, Journal of Physics: Conference Series, 2-16, 744, pp1-12,
- 7) Law S. S., Bu J. Q., and Zhu X. Q., Time-varying wind load identification from structural response, Engineering Structures, 2005, 27, pp. 1586-1589.
- 8) 大西公平, 外乱オブザーバによるロボラスト・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, 1993, 11, pp. 486-493
- 9) 島田明, 外乱オブザーバ, コロナ社, 2021
- 10) 余錦華, 大山恭弘, 小林裕之, 忻欣, 等価入力外乱推定による外乱除去性能の向上, 計測自動制御学会論文集, 2005, 41, pp. 797-802.
- 11) 宮本皓, 佐藤大樹, 余錦華, 建築構造物のアクティブ制御に適した等価入力外乱手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 2019, 757, 361-371
- 12) Miyamoto Kou, Sato Daiki, She Jinhua, Chen Yinli, and Han Qing-Long, New spectra of responses and control force for design of equivalent-input-disturbance-based active structural control of base-isolated buildings, Journal of Sound and Vibration, 2021, 507
- 13) 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, 2009, 635, pp. 75-82
- 14) 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), 日本建築学会講演梗概集, 2010, pp.193-194.
- 15) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 2015

-
- *1 清水建設(株) 技術研究所 研究員・博士(工学)
 - *2 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)
 - *3 東京工業大学建築学系 博士課程・修士(工学)
 - *4 東京工科大学工学部機械工学科 教授・博士(工学)