Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00288

Received date : 16 September, 2021

Accepted date : 19 January, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 26 January, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

ビルディングマスダンパのモデル規範型予測制御

富吉 雄太^{*1}, 高橋 正樹^{*2}, 小槻 祥江^{*3}, 吉田 直人^{*4}, 森川 和彦^{*3}, 神原 浩^{*3}, 福喜多 輝^{*4}

Model reference predictive control for building mass damper

Yuta TOMIYOSHI^{*1}, Masaki TAKAHASHI^{*2}, Sachie KOTSUKI^{*3}, Naoto YOSHIDA^{*4},
Kazuhiko MORIKAWA^{*3}, Hiroshi KAMBARA^{*3} and Akira FUKUKITA^{*4}

^{*1} Graduate School of Science and Technology, Keio University

3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8522, Japan

^{*2} Faculty of Science and Technology, Keio University

3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8522, Japan

^{*3,4} Institute of Technology, Shimizu Corporation

3-4-17 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8530, Japan

Abstract

Building mass dampers (BMDs) are structures designed to mitigate the responses of super tall buildings to earthquakes. These BMDs contain a soft layer at relatively high points in such buildings, and the component above the soft layer acts as a tuned mass damper (TMD). Given that BMDs utilize a part of the buildings as the tuned mass, a large mass ratio can be yielded even in the case of super tall buildings. Therefore, BMDs are expected to demonstrate very good seismic performance against large earthquakes. However, for BMDs to be applicable to these buildings, the initial stiffness of the soft layer must be increased from the optimum level, such that excessive displacement of the layer owing to strong winds can be prevented. This stiffness is larger than the optimum stiffness applicable in the case of small and medium earthquakes. Therefore, a problem arises in that the seismic performance of these BMDs is reduced against small and medium earthquakes that occur more frequently than the large ones. From this standpoint, we installed an active mass damper (AMD) on top of a non-optimal BMD, in which the soft layer's stiffness and damping were increased above the optimal levels. We also designed this AMD such that the seismic performance of the non-optimal BMD was close to that of the optimal BMD, and the habitability during small and medium earthquakes was improved, while explicitly considering the constraints of the AMD through model-referenced predictive control. Ultimately, to demonstrate the effectiveness of the proposed method, we conducted a numerical analysis using input waves with various frequency components.

Keywords : Building mass damper, Active mass damper, Model reference control, Vibration control, Active control, Model predictive control

1. 緒 言

ビルディングマスダンパ (BMD) は、高層建物の比較的上部の中間層に他層と比べて水平剛性の小さい柔層を設け、柔層よりも上部の構造がチューンドマスダンパ (TMD) となるように設計し、地震に対する建物応答の低減を図る構造である (Wang et al., 2018), (Chang et al., 2012). 大きな地震応答に対しても TMD の制震効果を発揮させるためにはより大きな補助質量が要求されるが、超高層建物では補助質量を設置する空間や許容積載重量の制約から、補助質量として用いることができる質量が建物全体の数%にも満たない。一方、BMD では建物の一部を

No.21-00288 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00288]

^{*1} 正員, 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 (現 清水建設 (株)) (〒223-8522 神奈川県港北区日吉 3-14-1)

^{*2} 正員, 慶應義塾大学 理工学部

^{*3} 清水建設 (株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

^{*4} 正員, 清水建設 (株) 技術研究所

E-mail of corresponding author: kotommy0423@keio.jp

補助質量として用いるため、超高層建物でも大きな質量比を実現することが可能であり、大地震に対しても大きな制震効果が期待できる (廣谷, 秦, 2018), (矢口, 栗野, 2017, 2021). しかし, BMD や中間層免震のように中間層に柔層や免震層を設ける高層建物では, 風による過大な層間変位により, 柔層を貫通するエレベーターの運行に影響して建物機能を低下させる恐れがあるため, 建物に BMD を適用するためには柔層の初期剛性や初期減衰を TMD としての最適値よりも大きく設計することで, 柔層の変位を低減したり, 一定の風荷重までは柔層変位が生じないようにロック機構 (阿波野他, 2011) を適用したりするなどの対策が必要となる. また, 大地震で柔層の変形限界を超えないようにするために柔層の剛性・減衰を最適値よりも大きく設計する必要がある場合がある. このような理由から, 建物に BMD を適用する場合, 柔層の剛性・減衰は TMD としての最適値よりも大きく設計する必要があるが, 最適同調から外れ, BMD の制震効果が低下する恐れがある.

一般に, 大地震に対しては, 柔層の変形限界を超える応答による建物の損傷などの安全性が問題になり, 中小地震に対しては発生頻度が高いことや揺れが長時間継続するので居住性が問題となる. 本研究では, 柔層の剛性・減衰を TMD としての最適値よりも大きく設計し, 柔層の変形を低減することで大地震時の安全性を確保した結果, 最適同調から外れた非最適 BMD の頂部にアクティブマスダンパ (AMD) を設置する. この AMD により, 中小地震時の柔層よりも下部構造の応答を最適な BMD を持つ建物の下部構造の応答に近づけることで, BMD の低下した制震効果を補い, 中小地震時の建物の居住性能向上を図る.

AMD の設計指針として, 非最適 BMD の変位, 速度, 加速度を最適 BMD に近づけることが考えられるが, 柔層の特性が最適 BMD と非最適 BMD では異なるため, 仮に非最適 BMD の挙動を最適 BMD に一致させたとしても, 下部構造の応答は最適 BMD の場合に一致しない. また, 変位, 速度, 加速度などをどのように動作させれば下部構造の応答が最適 BMD に近づくかは不明瞭である. そこで, 本研究では, 非最適 BMD の挙動ではなく, BMD から下部構造に伝わる力を最適 BMD から下部構造に伝わる力に近づけるように AMD を設計する手法を提案する. 具体的には, 最適な柔層特性を持つ最適 BMD の 1 質点モデルを規範モデルとして設計し, 毎制御周期でその規範モデルに柔層直下階の加速度応答を入力し, 有限時間未来までの最適 BMD から下部構造に伝わる力, すなわち柔層で生じる力を予測する. そして, 予測した柔層で生じる力を実現するように, 非最適 BMD の挙動を AMD によって制御する. これにより, 建物の下部構造が非最適 BMD から受ける力が最適 BMD の場合と一致するため, BMD の制震効果が最適 BMD に近づき, 下部構造の地震応答の低減が期待される.

建物に適用される代表的なアクティブ制振装置である AMD は, 可動範囲や動作速度, 推力に上下制限があるため, その範囲内で動作するように制御器を設計する必要がある. 制約を考慮した AMD の制御方法に関して

Fig. 1 Overview of the proposed method, model reference predictive control. From the five-layer acceleration $\ddot{x}_5 + \ddot{x}_g$, the force f_M in the soft layer of the reference model is calculated, and the control input u is determined such that the force f in the soft layer of the building model is close to f_M .

は多くの先行研究がある．例えば，制御器をファジィ領域分割によりゲインスケジューリングして入力制約を考慮した可変制御を実現したり (藤田他, 1998), AMD にハードニング型の非線形ばねを与えることで制約条件を定式化し, 制御対象を線形パラメータ依存モデルへ変形し, 線形行列不等式に基づくゲインスケジュールド制御を適用することで制約を考慮したり (西村他, 2000) する研究などがある．また, 制約を陽に考慮した制御手法として各制御周期で制約付き最適化問題を解くことで制御入力を得るモデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) が挙げられる (Eunji 他, 2019), (大平, 島田, 2017). この MPC は AMD の変位や速度, 入力となる推力などの上下限制約を陽に考慮しながら, 評価関数の形を工夫することで設計者の設計意図を容易に制御系に反映することが可能である (Maciejowski, 2005). 本研究では, AMD の制約の範囲内で, 可能な限り BMD の柔層で生じる力を規範モデルである最適 BMD の柔層で生じる力に近づけるように AMD を制御するため, 各種制約を陽に考慮しながら設計者の設計意図を容易に制御系に反映することが可能な MPC を制御測として採用した.

図 1 に提案手法の概要を示す. 提案手法ではまず制御対象の建物モデルの柔層直下階の絶対加速度を, TMD として最適な剛性・減衰を持つ 1 質点の規範モデルに入力し, 規範モデルの柔層で生じる力 f_M を予測する. そして非最適 BMD の柔層で生じる力 f の予測値と f_M の予測値の差の 2 乗を評価関数に含め, AMD の変位, 速度, 推力の仕様上の最大値を制約とした制約付き最適化問題を各制御周期で繰返し解くことで AMD の制御入力を得る. この提案手法をモデル規範型予測制御 (MRPC: Model Reference Predictive Control) と呼ぶ.

次章以降では制御対象となる建物モデルや規範モデルを設計し, 離散時間状態方程式を導出する. 次に提案手法の MRPC に基づき AMD を設計する. その後提案手法により設計した AMD により, 下部構造だけでなく, BMD 部分も含めた建物全体の地震応答がどのように変化するかを数値解析により確認する.

2. モデリング

本章では, はじめに建物モデルおよび規範モデルのパラメータや AMD のパラメータや仕様を示す. 次に, 建物モデルと規範モデルのそれぞれについて離散時間状態方程式を導出する. 本研究では, 建物モデルのうち柔層よりも下部を MB (Main Building) 部とする.

2・1 規範モデルおよび建物モデル

本研究で対象とする建物モデルは図 1 に示すような高層建物を模擬し, 最上層を BMD とした 6 層せん断モデルであり, BMD の質量比は 0.2 程度である. また, BMD の頂部には AMD を設置している. AMD は BMD とガイドレールで接続されているものとし, AMD と BMD の間にばね要素やダンパ要素は存在しないものとした. 表 1 に本研究で用いた AMD の仕様を示す.

本研究では規範モデルの柔層の剛性, 減衰の最適設計値を得るために定点理論 (Den Hartog, 1956) を用いた. 定点理論は主系に動吸振器が接続された 2 自由度系に対して, 主系にかかる強制外力から主系の変位応答までの伝達関数のゲインの最大値を最小化するように動吸振器の剛性, 減衰を決定するが, 本研究では地震時の MB 部の加速度の低減を目的にしている. しかし, 動吸振器の質量比が十分に小さい場合, これらの問題設定の違いによる最適解の差異は小さいとされているため, 便宜的に定点理論による最適値が用いられることが多い (金子, 2015). また, 定点理論は本来 2 自由度系を対象とした理論であるが, 質量比に BMD の質量を, MB 部の質量に頂部の刺激関数で重みづけした有効質量で除したものを採用することで本研究のような多自由度系にも適用可能

Table 1 AMD specifications.

Parameters	Value
Mass	175 kg
Maximum displacement x_{AMD}^{MAX}	50 cm
Maximum velocity $\dot{x}_{AMD}^{MAX}$	100 cm/s
Maximum force u^{MAX}	1000 N

Table 2 Natural period of building model.

Order	non opt BMD	opt BMD
1 st	2.33 s	2.61 s
2 nd	1.16 s	1.38 s
3 rd	0.63 s	0.65 s

である (金子, 2015). また, 動吸振器により 2 自由度系の最大振幅倍率を最小化する設計問題では, 質量比が 1 程度以下の場合, 厳密解と従来の定点理論設計の結果の誤差が微小である (西原, 松久, 1997). 以上のことから本研究でも BMD の質量比が定点理論を適用可能な大きさであるとし, 定点理論に基づいて規範モデルの柔層の最適剛性 k_{opt} , 最適減衰 c_{opt} を次式で決定した.

$$k_{opt} = m_{BMD} \omega_1^2 \left(\frac{1}{1 + \mu_{BMD}} \right) \quad (1)$$

$$c_{opt} = 2m_{BMD} \omega_1 \sqrt{\frac{3\mu_{BMD}}{8(1 + \mu_{BMD})^3}} \quad (2)$$

ただし, m_{BMD} は BMD の質量, ω_1 は MB 部の 1 次固有円振動数であり, μ_{BMD} は BMD の質量を MB 部の有効質量で除した有効質量比である.

表 2 に制御対象となる建物モデルと, 最適 BMD を持つ建物モデルの固有周期を示し, 表 3 に制御対象となる建物モデルと, 規範モデルとなる 1 質点の最適 BMD の質量, 減衰, 剛性を示す. ここで, MB 部の剛性は第 1 層と最上層の比が 3:1 となる台形分布とし, 減衰は, 減衰定数を 0.02 とした剛性比例型で与えた. また, 制御対象とする非最適 BMD を持つ建物モデルの柔層の剛性, 減衰は大地震に対して柔層変位が設計クライテリアを満足するために, 剛性は最適値の 2 倍, 減衰は最適値の 1.25 倍が必要であると仮定して設定した.

図 2 に地盤加速度から MB 部最上層である 5 層の絶対加速度までのゲイン線図を示す. 図 2 より最適 BMD の建物に比べて非最適 BMD の建物のゲインの最大値が大きくなっていることが確認できる. これは制御対象の建物では柔層の剛性・減衰を最適値よりも大きくとったことで BMD の制震性能が低下したことを意味する. また, 図 2 より最適 BMD の共振曲線の 1 次と 2 次の共振点の高さがよく一致している. このことから, 本研究の建物モデルで, 最適 BMD の剛性・減衰を定点理論に基づいて決定することは妥当であると言える.

Table 3 Parameters of building model.

Floor	m [t]	c [kNs/m]		k [kN/m]	
		non opt BMD	opt BMD	non opt BMD	opt BMD
6 (BMD)	2.3	4.77	3.81	40.90	20.45
5	2.5	1.92	-	180	-
4	2.1	2.88	-	270	-
3	2.2	3.83	-	360	-
2	2.2	4.79	-	450	-
1	2.0	5.75	-	540	-

Fig. 2 Gain diagram from ground acceleration to top layer of MB acceleration. Non-optimal BMD case and optimal BMD case are plotted as dotted (black) and solid (blue) curves, respectively. As the waves show, the maximum gain of the non-optimal BMD case is higher than that of the optimal BMD case.

2・2 状態方程式

本節では MRPC に必要となる建物モデルと規範モデルについて離散時間状態方程式を導出する.

2・2・1 建物モデル

制御対象の建物の運動方程式は以下のようになる.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{g}_1\ddot{x}_g(t) + \mathbf{g}_2u(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad \cdots \quad x_{BMD} \quad x_{AMD}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}([m_1 \quad \cdots \quad m_5 \quad m_{BMD} + m_{AMD} \quad m_{AMD}]) \quad (5)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & 0 \\ -c_2 & \ddots & \ddots & & \\ & \ddots & c_5 + c_{BMD} & -c_{BMD} & \\ & & -c_{BMD} & c_{BMD} & 0 \\ 0 & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & 0 \\ -k_2 & \ddots & \ddots & & \\ & \ddots & k_5 + k_{BMD} & -k_{BMD} & \\ & & -k_{BMD} & k_{BMD} & 0 \\ 0 & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{g}_1 = [-m_1 \quad \cdots \quad -m_5 \quad -(m_{BMD} + m_{AMD}) \quad 0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{g}_2 = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad -1 \quad 1]^T \quad (9)$$

ここで, x_i は建物第 i 層の地面に対する相対変位であり, x_{AMD} は AMD の BMD 層に対する相対変位, m_i, c_i, k_i はそれぞれ建物第 i 層の質量, 減衰, 剛性であり, $\ddot{x}_g$ は地盤加速度, u は AMD の推力である.

また, 建物モデルの柔層で生じる力 f は次式で表される.

$$f(t) = -k_{BMD}(x_{BMD}(t) - x_5(t)) - c_{BMD}(\dot{x}_{BMD}(t) - \dot{x}_5(t)) \quad (10)$$

式 (3) と式 (10) から, 観測出力 y が f となるように連続時間の状態方程式, 観測方程式を次式のように導出した. ただし, $\mathbf{I}$ は単位行列である.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c\mathbf{x}(t) + [\mathbf{b}_c \quad \mathbf{g}_c] \begin{bmatrix} u(t) \\ \ddot{x}_g(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_c\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c\mathbf{v}(t) \quad (11)$$

$$y(t) = \mathbf{c}_c\mathbf{x}(t) \quad (12)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{X}^T \quad \dot{\mathbf{X}}^T]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{7 \times 7} & \mathbf{I}_7 \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}_c & \mathbf{g}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{7 \times 1} & \mathbf{0}_{7 \times 1} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{g}_2 & \mathbf{M}^{-1} \mathbf{g}_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{c}_c = [\mathbf{0}_{1 \times 4} \quad k_{BMD} \quad -k_{BMD} \quad 0 \quad \mathbf{0}_{1 \times 4} \quad c_{BMD} \quad -c_{BMD} \quad 0] \quad (16)$$

その後離散化することで以下の離散時間状態方程式が得られる。ただし、サンプル時間は 0.01 s とし、ゼロ次ホールドで離散化した。\$\mathbf{v}\$ は AMD の制御力と地盤加速度からなるベクトルである。ここで、\$k\$ は離散時間状態方程式におけるタイムステップである。

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \begin{bmatrix} \mathbf{b} & \mathbf{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u[k] \\ \ddot{x}_g[k] \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\mathbf{v}[k] \quad (17)$$

$$y[k] = \mathbf{c}\mathbf{x}[k] \quad (18)$$

2・2・2 規範モデル

規範モデルとなる最適 BMD の運動方程式は MB 部最上層である 5 層の絶対加速度を \$\ddot{x}_{MB}^{ABS}\$，最適 BMD の柔層の層間変位を \$x_{opt}\$ とし、次式で与えられる。

$$m_{BMD} \ddot{x}_{opt}(t) + c_{opt} \dot{x}_{opt}(t) + k_{opt} x_{opt}(t) = -m_{BMD} \ddot{x}_{MB}^{ABS}(t) \quad (19)$$

また、規範モデルの最適 BMD の柔層で生じる力 \$f_M\$ は次式で与えられる。

$$f_M(t) = -k_{opt} x_{opt}(t) - c_{opt} \dot{x}_{opt}(t) \quad (20)$$

ここで、\$\ddot{x}_{MB}^{ABS}\$ をシステムの入力とみなし、式 (19) と式 (20) から、観測出力 \$y_M\$ が \$f_M\$ となるように状態方程式、観測方程式を導出し、その後離散化することで以下のように規範モデルの離散状態方程式が得られる。ただしサンプル時間は 0.01 s とし、ゼロ次ホールドで離散化した。

$$\mathbf{x}_M[k+1] = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M[k] + \mathbf{b}_M \ddot{x}_{MB}^{ABS}[k] \quad (21)$$

$$y_M[k] = \mathbf{c}_M \mathbf{x}_M[k] \quad (22)$$

$$\mathbf{x}_M = \begin{bmatrix} x_{opt} & \dot{x}_{opt} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

$$\mathbf{c}_M = \begin{bmatrix} -k_{opt} & -c_{opt} \end{bmatrix} \quad (24)$$

3. 制御系設計

3・1 モデル規範型予測制御

モデル規範型予測制御 (MRPC: Model Reference Predictive Control) は各時刻において制御対象と規範モデルの有限時間未来までの応答を予測し、それらの差を評価関数として最適化することで、制御対象を規範モデルの動特性に追従させる手法である。また、状態量や入力量に関する制約を考慮した最適化が可能である。本研究では二次計画法を用いて評価関数と状態方程式から得られる制約付き最適化問題を解くことによって制御入力を導出する。以下では、二次計画法に基づく線形時不変システムに対するモデル規範型予測制御について述べる。

線形系に対するモデル規範型予測制御では時刻 \$k\$ における評価関数と制約条件は以下のように定式化される。

$$J[k] = \sum_{i=1}^{H_p} \varepsilon^T[k+i|k] \mathbf{Q} \varepsilon[k+i|k] + \sum_{i=0}^{H_u-1} \hat{u}^T[k+i|k] \mathbf{R} \hat{u}[k+i|k] \quad (25)$$

$$\text{subject to } \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{U}[k] \\ 1 \end{bmatrix} \leq \mathbf{0}, \mathbf{G} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}[k] \\ 1 \end{bmatrix} \leq \mathbf{0} \quad (26)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}[k+i|k] = \hat{\mathbf{y}}[k+i|k] - \hat{\mathbf{y}}_M[k+i|k] \quad (27)$$

$$\mathbf{U}[k] = [\hat{u}[k|k] \quad \cdots \quad \hat{u}[k+H_u-1|k]]^T \quad (28)$$

$$\mathbf{Y}[k] = [\hat{y}[k|k] \quad \cdots \quad \hat{y}[k+H_u-1|k]]^T \quad (29)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{y}}[k+i|k]$, $\hat{\mathbf{y}}_M[k+i|k]$, $\hat{u}[k+i|k]$ はそれぞれ各予測ステップにおける制御対象の出力である非最適 BMD の柔層で生じる力、規範モデルの出力である最適 BMD の柔層で生じる力、最適入力量であり、 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ は重み行列である。また、 H_u は制御ホライズン、 H_p は予測ホライズンである。 $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$ はそれぞれ制約条件を表現する適切な行列である。 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は各予測ステップにおける制御対象の出力の予測値と規範モデルの出力の予測値の差分であり、この重みづけされた二乗和を評価関数に含めることで、制御対象を規範モデルの動特性に追従させることが可能となる。なお、制御対象の出力の一部を規範モデルの出力でなく、0 に近づけたい場合には、 $\hat{\mathbf{y}}_M[k+i|k]$ のうち、該当する成分を 0 と置くこともできる。

制御対象が式 (17) のような線形時不変システムである場合、予測状態量 $\hat{\mathbf{x}}[k+i|k]$ は時刻 k における状態量 $\mathbf{x}[k]$ および制御ホライズン区間における入力を用いて次式のように表される。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}[k+1|k] &= \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k|k] \\ \hat{\mathbf{x}}[k+2|k] &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}[k+1|k] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+1|k] \\ &= \mathbf{A}^2\mathbf{x}[k] + \mathbf{A}\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k|k] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+1|k] \\ &\vdots \\ \hat{\mathbf{x}}[k+H_u|k] &= \mathbf{A}^{H_u}\mathbf{x}[k] + \mathbf{A}^{H_u-1}\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k|k] + \cdots + \mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+H_u-1|k] \\ &\vdots \\ \hat{\mathbf{x}}[k+H_u+1|k] &= \mathbf{A}^{H_u+1}\mathbf{x}[k] + \mathbf{A}^{H_u}\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k|k] + \cdots + \mathbf{A}^2\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+H_u-2|k] + (\mathbf{A} + \mathbf{I})\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+H_u-1|k] \\ &\vdots \\ \hat{\mathbf{x}}[k+H_p|k] &= \mathbf{A}^{H_p}\mathbf{x}[k] + \mathbf{A}^{H_p-1}\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k|k] + \cdots + \mathbf{A}^{H_p-H_u+1}\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+H_u-2|k] \\ &\quad + (\mathbf{A}^{H_p-H_u} + \cdots + \mathbf{A} + \mathbf{I})\mathbf{B}\hat{\mathbf{v}}[k+H_u-1|k] \end{aligned} \quad (30)$$

したがって、非最適 BMD の柔層で生じる力の予測値 $\hat{\mathbf{y}}$ は式 (17)、式 (18)、式 (30) と適切な行列 $\boldsymbol{\Psi}$, $\boldsymbol{\Theta}_1$, $\boldsymbol{\Theta}_2$ を用いて次式で表される。

$$[\hat{\mathbf{y}}[k+1|k] \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{y}}[k+H_p|k]]^T = \boldsymbol{\Psi}\mathbf{x}[k] + \boldsymbol{\Theta}_1\mathbf{U}[k] + \boldsymbol{\Theta}_2\mathbf{X}_g[k] \quad (31)$$

$$\mathbf{X}_g[k] = [\ddot{\mathbf{x}}_g[k] \quad \cdots \quad \ddot{\mathbf{x}}_g[k+H_u-1]]^T \quad (32)$$

また、同様の議論より、最適 BMD の柔層で生じる力の予測値 $\hat{\mathbf{y}}_M$ は式 (21)、式 (22) と適切な行列 $\boldsymbol{\Psi}_M$, $\boldsymbol{\Theta}_M$ を用いて次式で表される。

$$[\hat{\mathbf{y}}_M[k+1|k] \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{y}}_M[k+H_p|k]]^T = \boldsymbol{\Psi}_M\mathbf{x}_M[k] + \boldsymbol{\Theta}_M\mathbf{Y}[k] \quad (33)$$

$$\mathbf{Y}[k] = [\ddot{\mathbf{x}}_{MB}^{ABS}[k] \quad \cdots \quad \ddot{\mathbf{x}}_{MB}^{ABS}[k+H_u-1]]^T \quad (34)$$

このように表現された予測値である式 (31)、(33) を式 (25) に代入することで評価関数は以下のように変形することができる。

$$J[k] = \mathbf{K}^T[k] \mathbf{Q} \mathbf{K}[k] + 2\mathbf{K}^T[k] \mathbf{Q} \mathbf{\Theta}_1 \mathbf{U}[k] + \mathbf{U}^T[k] (\mathbf{\Theta}_1^T \mathbf{Q} \mathbf{\Theta}_1 + \mathbf{R}) \mathbf{U}[k] \quad (35)$$

$$\mathbf{K}[k] = \mathbf{\Psi} \mathbf{x}[k] + \mathbf{\Theta}_2 \mathbf{X}_g[k] - \mathbf{\Psi}_M \mathbf{x}_M[k] - \mathbf{\Theta}_M \mathbf{Y}[k] \quad (36)$$

また、式 (31) を式 (26) に代入することで制約式も以下のように変形できる。

$$\text{subject to } \mathbf{W} \mathbf{U}(k) \leq \mathbf{w}, \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Theta}_1 \mathbf{U}(k) \leq -\mathbf{\Gamma} \mathbf{\Psi} \mathbf{x}[k] - \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Theta}_2 \mathbf{X}_g[k] - \mathbf{g} \quad (37)$$

ただし、 $\mathbf{W}, \mathbf{w}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{g}$ はそれぞれ制約条件を表現する適切な行列である。

式 (35), 式 (37) の $\mathbf{U}[k]$ に関する制約付き最適化問題は二次計画問題であり、標準的なアルゴリズムによって高速に解くことが可能である。提案手法では各制御周期でこの二次計画問題を解き、得られた解のうち、 $\hat{u}[k|k]$ を制御入力として用いる。

3・2 制御系設計

本節では MRPC に基づいて AMD の制御系を設計する。本研究では各制御周期で解かれる制約付き最適化問題を次式のように定式化した。

$$\min_{\hat{u}[k|k]} \left(q_1 (y[k+1|k] - y_M[k+1|k])^2 + \sum_{i=1}^{H_p} (q_2 x_{AMD}[k+i|k]^2 + q_3 \dot{x}_{AMD}[k+i|k]^2) + r\sigma \right) \quad (38)$$

$$\text{subject to } |x_{AMD}| \leq x_{AMD}^{\text{MAX}}, |\dot{x}_{AMD}| \leq \dot{x}_{AMD}^{\text{MAX}}, |u| \leq u^{\text{MAX}} + \sigma, 0 \leq \sigma \quad (39)$$

ここで、第 1 項は非最適 BMD の柔層で生じる力を最適 BMD の柔層で生じる力に近づける項である。このとき、1 ステップ分のみを評価関数としているが、これは式 (32), 式 (34) に地盤加速度や MB 部の絶対加速度が含まれているためである。このため本研究の場合、2 ステップ以上の予測をしようとする、未来の地盤加速度の情報が become 必要になる。しかし、未来の地盤加速度を予測することは難しく、2 ステップ以上の予測は困難である。それに伴い、制御ホライズン H_u は 1 とした。また、第 2 項、第 3 項は AMD の変位と速度の絶対値を小さくするための項である。このとき、AMD は建物頂部とアクチュエータのみで接続されているため、その応答は地盤加速度の影響を受けず、アクチュエータの推力のみで決まる。したがって、2 ステップ以上の予測が可能である。予測ホライズン H_p は試行錯誤的に 30 と決定した。サンプリングタイム ΔT は 0.01 s であるため、これは 0.3 s 分の予測となる。制約については表 1 に示す AMD の仕様に基づいて決定している。 σ は緩和変数であり、最適化問題が解けずに実行不可能となることを防ぐために、制約を緩和することなく実行可能な解が存在しない場合に AMD の推力制約を緩和するように設けた (Maciejowski, 2005)。ここで、本研究で想定する AMD の推力の上限値 1000 N は長時間安定して AMD を動作させるための制約であり、瞬間的には 1000 N を超える推力を発揮することができると仮定して、本研究では制御力を緩和可能な制約として選んだ。 σ にかかる重み r を他の重みよりも大きく設定することで、制約を緩和することなく実行可能な解が存在しない場合のみ σ が 0 より大きくなり、制約が緩和される。各重みは試行錯誤的に決定した。表 4 に制御系の設計結果を示す。式 (38), 式 (39) の制約付き最適化問題を各制御周期で解き、得られた解 $\hat{u}[k|k]$ を各制御周期での制御入力とする。

4. 提案手法の有効性検証

本章では中小地震を想定した地震動を入力とした数値解析を実施し、提案手法により設計した AMD が制約条件の範囲内で柔層剛性、柔層減衰が最適値から増大した建物モデルの柔層で生じる力を規範モデルに近づけることを確認する。また、その結果として建物全体の応答を低減し、中小地震時の居住性能を向上していることを確認する。

4・1 解析条件

様々な周波数成分を持つ地震動に対して提案手法の有効性を検証するために、周期特性や継続時間の異なる 7 種類の地震動を解析で用いた。各地震動の最大加速度、継続時間、中小地震の地震動とするための振幅の補正係数を表 5 に示し、減衰定数 $h=0.05$ の速度応答スペクトルを図 3 に示す。図 3 から分かるように、KA1 (国土交通省, 2021) と 2011 年東北地方太平洋沖地震時における、東京都内建物のグランドレベルでの観測波であり、長周期成分の多い 70 秒間を抽出して解析用の地震動として用いた 0311 は比較的長周期成分を多く含む地震動であり、他は短周期成分が卓越する地震動である。

比較手法として、BMD を適用した建物において加速度応答が増大しやすい柔層直下階である 5 層の加速度応答を低減することを目的としたモデル予測制御則によって AMD を設計した。比較手法 (MPC) の各制御周期で解かれる制約付き最適化問題を次式のように定式化した。

$$\min_{\hat{u}[k|k]} \left(q_1 \ddot{x}_5^2[k+1|k] + \sum_{i=1}^{H_p} \left(q_2 x_{AMD}[k+i|k]^2 + q_3 \dot{x}_{AMD}[k+i|k]^2 \right) + r\sigma \right) \quad (40)$$

$$\text{subject to } |x_{AMD}| \leq x_{AMD}^{\text{MAX}}, |\dot{x}_{AMD}| \leq \dot{x}_{AMD}^{\text{MAX}}, |u| \leq u^{\text{MAX}} + \sigma, 0 \leq \sigma \quad (41)$$

ただし、制御ホライズン、予測ホライズン、サンプリングタイムなどの条件は表 4 の提案手法と同一とし、各重みは試行錯誤的に決定した。式 (40)、式 (41) の制約付き最適化問題を各制御周期で解き、得られた解 $\hat{u}[k|k]$ を各制御周期での制御入力とした。

4・2 解析結果

本節では表 5 に示す地震動のうち、K-R1 に対する時刻歴応答解析を行い、非最適 BMD を持つ非制御の建物 (non opt BMD) と、最適 BMD を持つ非制御の建物 (opt BMD) と提案手法により設計した AMD を適用した建物 (MRPC) を比較して、提案手法により設計した AMD が制約条件の範囲内で柔層剛性、柔層減衰が最適値から増大した建物モデルの柔層で生じる力を規範モデルのそれに近づけていることを確認する。その後表 5 に示すすべての地震動に対する建物の柔層直下階となる 5 層と BMD 層の応答の最大値と RMS 値を比較し、最後に K-R1 に

Table 4 Parameters of controller.

Parameters	Value	Parameters	Value
q_1	1	dT	0.01 s
q_2	1000	H_u	1
q_3	1000	H_p	30
r	10^9		

Table 5 Input waves.

Earthquake	Case	Scale	Max. acceleration	Duration
Notification wave (random phase) L1	K-R1	200%	150.6 cm/s ²	120.0 s
Notification wave (Hachinohe phase) L1	K-H1	200%	151.5 cm/s ²	234.0 s
Notification wave (Kobe phase) L1	K-K1	200%	155.6 cm/s ²	120.0 s
Long-period simulated earthquake	KA1	100%	45.5 cm/s ²	206.1 s
Great East Japan Earthquake 2011	0311	300%	45.1 cm/s ²	70.0 s
El Centro 1940 NS 25 cm/s	EL1	75%	191.3 cm/s ²	53.8 s
Taft 1968 EW 25 cm/s	TAFT1	75%	186.0 cm/s ²	54.4 s

対する建物全層の加速度，地面に対する相対変位の最大値と RMS 値を比較することで，提案手法により設計した AMD が建物全体の地震応答を低減し，中小地震時の居住性能が向上していることを検証する．

まず，時刻歴応答解析により提案手法の有効性を検証する．図 4 に K-R1 に対する柔層で生じる力と AMD の応答の時刻歴を示す．ここで，図 4 (b), (c), (d) の青が制約の範囲である．図 4 (b), (d) の 25 s から 40 s に着目すると，AMD の速度制約が活性化しており，それに伴って制約が破られないように AMD の制御力が決定されていることが確認できる．このことから，提案手法によって設計した AMD が変位制約，速度制約，推力制約の範囲内で動作することが確認された．次に，図 4 (a) の AMD の制約が活性化していない 40 s から 60 s に着目すると，提案手法である MRPC の場合の柔層で生じる力と，opt BMD の場合の柔層で生じる力の差が最大でも 100 N 程度となり，提案手法により非最適 BMD の柔層で生じる力が最適 BMD の柔層で生じる力に非常によく追従していることが確認できる．一方，図 4 (a) の AMD の制約が活性化している 25 s から 40 s に着目すると MRPC の場合と opt BMD の場合の柔層で生じる力の差が最大 1000 N ほどとなっている．この差は AMD の装置能力の

Fig. 3 Velocity response spectra of input waves.

Fig. 4 Time history of force generated in the soft layer and AMD response under K-R1. Non-optimal case, optimal case and Proposed method case are plotted as dotted (black), solid (blue) and dot-dashed (red) curves, respectively. Also, hatched areas in (b), (c), and (d) indicate AMD's constraints. As the curves show, AMD designed by the proposed method works within the constraints and makes the force generated in the soft layer close to that of the optimal BMD.

Fig. 5 Time history of building response under K-R1. Non-optimal case, optimal case and Proposed method case are plotted as dotted (black), solid (blue) and dot-dashed (red) curves, respectively. As the curves show, AMD designed by the proposed method makes the response of the Main Building closer to that of the optimal BMD building, and AMD does not increase the response of the BMD layer.

制約に起因する。しかし、MRPC の場合の波形は、常に non opt BMD の場合と opt BMD の場合の間をとっており、提案手法の AMD により、AMD の装置の制約が活性化するような大きな地震に対しても、制約の範囲内で可能な限り柔層で生じる力を opt BMD の場合に近づけることが確認できる。これらのことから、提案手法により設計した AMD は制約が活性化しない時には柔層で生じる力を opt BMD の場合に精度よく追従させ、制約が活性化する時は制約の範囲内で可能な限り柔層で生じる力を opt BMD の場合に近づけていることが確認された。

図 5 に K-R1 に対する柔層直下階である 5 層と BMD 層の絶対加速度、地面に対する相対変位の時刻歴応答のうち、主要動の部分抜き出したものをそれぞれ示す。図 5(a),(c) に着目すると、提案手法により、柔層直下階の

Fig. 6 Maximum and RMS seismic response of building. Non-optimal case, optimal case, proposed method case and comparison method case are shown as black bar, blue bar, red bar, and green bar, respectively.

加速度、地面に対する相対変位はともに **opt BMD** の場合によく一致しており、その結果、多くの応答のピークで非制御時よりも低減されていることが確認できる。これは柔層で生じる力を **opt BMD** の場合に追従させた結果、柔層以下の応答が **opt BMD** の場合に近づいたことに起因する。また、提案手法は柔層で生じる力を最適 **BMD** に追従させているので **BMD** 層の応答は **opt BMD** の場合に一致しないが、図 5 (b), (d) に着目すると、**BMD** 層の加速度、地面に対する相対変位はともに提案手法により非制御時よりも多くのピークで低減されていることが確認できる。これらのことから提案手法により柔層直下階と **BMD** の地震応答が低減されることが確認された。また、図 5 (b) の 28 s から 35 s に着目すると **BMD** 層の加速度に急峻な変化が確認される。これは図 4 (b) に示すように、**AMD** の制約の活性化により **AMD** の推力が急峻に変化していることが原因である。しかし、この急峻な加速度の変化は最大応答加速度の増大にはつながらないため問題にはならない。もし **BMD** 層の加速度の急峻な変化が問題になる場合は提案の評価関数に **AMD** の推力の変化量の項を加えるか、制約条件に前ステップからの推力の変化量を加えることで対処可能である。

次に様々な周波数成分を持つ入力地震動に対する建物の応答の最大値と **RMS** 値を比較し、提案手法の有効性を確認する。図 6 に表 5 に示した全ての入力地震動に対して、柔層直下階である 5 層と **BMD** 層の絶対加速度、地面に対する相対変位、**BMD** の **MB** 部最上層に対する相対変位の最大値と **RMS** 値をそれぞれ示す。まず、5 層の変位、加速度に着目すると、提案手法、比較手法ともに多くの地震動で応答が低減できていることが確認できる。しかし、5 層の加速度では提案手法では **K-K1**, **TAFT1**、比較手法では **K-K1**, **EL1**, **TAFT1** のような比較的短周期成分を多く含む入力地震動については最大加速度が増大していることが確認できる。この原因として、提案手法ではこれらの地震では **non-opt BMD** の場合よりも **opt BMD** の場合で最大加速度が増大していることから、図 2 のゲイン線図の約 0.6 Hz から約 1 Hz で最適 **BMD** の場合のゲインが非最適 **BMD** のそれよりも上回っていることに起因すると考えられる。あらゆる地震動に対して建物全体の応答が低減するように **AMD** を制御するためには、すべての周波数帯で **MB** 部の最大応答を低減できる規範モデルが必要であるが、そのような規範モデルの設計は今後の課題である。また、比較手法では、評価関数が 1 ステップ先のみの 5 層加速度となっており、予測時間が十分に長くおらず十分な性能が発揮できなかったことが比較手法による 5 層最大加速度の増大の原因として考えられる。ただし、2 ステップ以上の予測には未来の地面の加速度の情報が必要となるため 2 ステップ以上先の建物加速度を評価関数に含めることは困難である。次に **BMD** の応答に着目すると、変位応答については両手法ですべての地震動に対して非制御時よりも応答が低減されている。一方提案手法ではすべての地震動に対して最大加速度が低減されているが、比較手法では **K-R1**, **K-H1**, **K-K1**, **TAFT1** などの地震動では最大加速度が増大している。また、**BMD** の加速度の **RMS** 値はすべての地震動に対して提案手法の方が比較手法よりも大きく低減されていることが確認できる。これは、提案手法では **BMD** の性能を最適 **BMD** に近づけるように制御することで結果として建物全体の応答を低減できるが、比較手法では柔層直下階のみを低減するように制御しているため、評価関数に含まれない階層の応答が悪化する可能性があるためである。**BMD** 層も居住空間として使用されるため、中小地震時の居住性能向上のためには **BMD** 層の応答低減も重要である。最後に **BMD** の **MB** 部最上層に対

Fig. 7 Maximum and RMS seismic response of building. Non-optimal case, optimal case, proposed method case and compared method case are plotted as dotted (black), solid (blue), dot-dashed (red) and dashed (green) curves, respectively.

する相対変位, つまり BMD のストロークに着目すると, 両手法ですべての地震動に対して非制御時よりも増大することなく低減されていることが確認できる. また, opt BMD のストロークは, 制御対象の建物モデルに対して大幅に増大していることが確認できる. BMD のストロークが増大すると設計クライテリアを満足しなくなる恐れがあるため, 制御によって BMD のストロークが増大しないことは重要である. ここで, 提案手法と opt BMD で BMD のストロークが大幅に異なるが, 提案手法は BMD が MB 部に与える力, つまり柔層で生じる力を opt BMD に近づけ, MB 部の応答を opt BMD に近づけるように AMD を制御しているが, 制御対象の建物モデルの柔層の剛性・減衰が opt BMD よりも大きいため, 柔層の変位, つまり BMD のストロークは opt BMD よりも小さくなることが原因であると考えられる.

最後に, K-R1 に対する建物全層の加速度, 地面に対する相対変位の最大値と RMS 値を比較し, 提案手法の有効性を確認する. 図 7 に K-R1 に対する建物全層の加速度, 地面に対する相対変位の最大値と RMS 値を示す. 図 7 より, 提案手法によって, 最大値においても, RMS においても, MB 部全層の応答が opt BMD に近づき, 応答が非制御時よりも全体的に低減されていることが確認できる. 図 7(a)に着目すると, 提案手法によって 2 層の最大加速度が非制御時よりも増大しているが, 提案手法では BMD を持つ建物で最も加速度が増大しやすい柔層直下階の加速度が低減されており, 建物全体としても応答が低減されていることが確認できる. また, 比較手法でも MB 部の応答が全体的に低減されていることが確認できるが, 図 7(a), (b) に着目すると, 加速度の最大値, 実効値ともに BMD となる第 6 層で提案手法よりも大きくなっており, 最大値では非制御時より増大している. BMD も居住空間として使用されるため, 中小地震時の居住性能向上のためには BMD 層の応答低減も重要である. また, 図 7(a), (b) の波形から, 変位応答については低次のモードが支配的であるが, 加速度については変位よりも高次モードの影響が大きいことがわかる. 本研究の提案手法や比較手法の MPC のような時間領域の制御手法では応答が大きい低次モードの低減効果が支配的になり, 高次モードの応答低減効果が得られにくい. このことが図 6(a) で提案手法でも比較手法でも K-K1, EL1, TAFT1 のような比較的短周期成分を含む地震動に対しては 5 層の最大加速度の低減効果が小さい, あるいは無いことの原因として考えられる. 比較的短周期成分を含む地震動に対して有効な AMD の設計は今後の課題である.

以上の数値解析結果より, 提案手法で設計した AMD が制約条件の範囲内で柔層剛性, 柔層減衰が最適値から増大した建物モデルの BMD が MB 部に与える力を規範モデルに近づけることで MB 部の応答を opt BMD に近づけ, 地震時の MB 部の応答を低減すること, また, その結果として BMD を含めた建物全体の応答を低減し, 中小地震時の居住性能が向上することを確認できた.

5. 結 言

本研究では, 過大な柔層変形を抑制するために柔層の剛性や減衰を TMD としての最適値より大きくした BMD を, AMD により剛性や減衰が最適な BMD と同等の制震効果に近づけるための AMD の制御測の設計方法を提案した. 具体的には制御対象の建物モデルの柔層直下階の絶対加速度を, TMD として最適な剛性・減衰を持つ 1 質点の規範モデルに入力し, 規範モデルの柔層で生じる力 f_m を予測し, そして非最適 BMD の柔層で生じる力 f の予測値と f_m の予測値の差の 2 乗を評価関数に含め, AMD の変位, 速度, 推力の仕様上の最大値を制約とした制約付き最適化問題を各制御周期で繰返し解くことで AMD の制御入力を得るモデル規範型予測制御 (Model Reference Predictive Control: MRPC) に基づき AMD を設計した. 数値解析を実施し, 提案手法で設計した AMD が様々な周波数成分を持つ地震動に対して AMD の制約の範囲内でできるだけ地震時に柔層で生じる力を規範モデルに追従させ, その結果として建物全体の地震応答を低減していることを確認した. 提案する AMD を用いることで, 中小地震に対しては AMD の制約の範囲で柔層の剛性, 減衰が TMD としての最適値よりも増大した BMD の制震効果を最適な BMD に近づけ, 居住性能の向上が可能となる. この AMD を, 大地震を対象とした BMD と組み合わせることで, 中小地震から大地震まで対応可能な制振システムとなることが期待される.

今後の展望として, 振動台などを用いた加振実験による提案手法の検証を実施し, センサノイズや摩擦などの非線形要素が存在する中での提案手法の有効性を検討することや, すべての地震に対して MB 部の最大加速度応答を低減できるように地震動に応じて制御則を切り替えるようにすること, 本手法では設計時に考慮されていない BMD 自体の応答を考慮した制御則への拡張などが考えられる.

文 献

- 阿波野 昌幸, 吉田 聡, 多賀 謙蔵, 多田 元英, 超高層中間階免震建物の免震層に設置する耐風シアピンの開発 : (その 1) 耐風シアピンの設計概要とセット時の地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊 (2011), pp. 583-584.
- Chang, K. C., Hwang, J. S., Wang, S. J., Lee, B. H. and Chen, Y. H., Seismic behavior of structures with building mass damper design, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (2012).
- Den Hartog, J. P., Mechanical Vibration 4th ed., McGraw Hill. (1956).
- Eunji HONG, 種村 昌也, 熊田 賢, 千田 有一, 入力極性に制約を有する系のモデル予測制御と空圧式除振台への応用, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 876 (2019), DOI:10.1299/transjsme.18-00471.
- 藤田 隆史, 別所 智彦, 洞 宏一, 田中 清, 中村 佳也, リニアモータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの制御手法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.620 (1998), pp. 1154-1161.
- 廣谷 直也, 秦 一平, 中間層免震を用いた BMD システムに関する研究 ―応答性能図表を用いた設計手法―, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.753 (2018), pp. 1573-1582.
- 金子 健作, 下部構造の変位低減に着目した中間層免震構造の多目的地震応答制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 718 (2015), pp. 1869-1879.
- Maciejowski, J. 著, 足立修一, 管野正明 訳, モデル予測制御 制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出版局 (2005).
- 国土交通省, 長周期地震動を考慮すべき主な地点と地震動の考え方, available from <<https://www.mlit.go.jp/common/001113880.pdf>>, (参照日 2021 年 7 月 26 日) .
- 西原 修, 松久 寛, 動吸振器の最大振幅倍率最小化設計 : 代数的な厳密解の導出, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 614 (1997), pp. 3438-3445.
- 西村 秀和, 尾家 直樹, 高木 清志, アクチュエータの制約を考慮に入れたアクティブ動吸振器による構造物の振動制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 641 (2000), pp. 53-59.
- 大平 峻, 島田 明, 時変制約条件を考慮したモデル予測制御に基づく車輪型倒立振子ロボットの移動制御, 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.8 (2017), pp. 629-636.
- Wang, S. J., Lee, B. H., Chuang, W. C. and Chang, K. C., Optimum dynamic characteristic control approach for building mass damper design. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 47, No. 4 (2018), pp.872-888.
- 矢口 友貴, 栗野 治彦, 動吸振器効果を狙った大重量副振動系を有する制震架構におけるストローク制御法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 738 (2017), pp. 1201-1211.
- 矢口 友貴, 栗野 治彦, 動吸振器効果を狙った大重量副振動系を有する制震架構の地震入力に対する汎用的な応答評価手法に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.779 (2021), pp. 33-42.

References

- Awano, M., Yoshida, S., Taga, K. and Tada, M., Development of wind-load resisting shear pins for a high rise mid-height seismic isolation building (part 1) Abstraction of a shear pin and seismic response analysis, Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, B-2 (2011), pp. 583-584 (in Japanese).
- Chang, K. C., Hwang, J. S., Wang, S. J., Lee, B. H. and Chen, Y. H., Seismic behavior of structures with building mass damper design, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (2012).
- Den Hartog, J. P., Mechanical Vibration 4th ed., McGraw Hill. (1956).
- Eunji, H., Tanemura, M., Kumada, K. and Chida, Y., Model predictive control method for a system with constraints on the polarity of control inputs and application to a pneumatic isolation table, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 85, No. 876 (2019), DOI:10.1299/transjsme.18-00471.
- Fujita, T., Bessho, T., Hora, H., Tanaka, K. and Nakamura, Y., Control methods for active mass damper using linear motor for vibration control of tall buildings, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 64, No.620 (1998), pp. 1154-1161 (in Japanese).
- Hirofumi, N. and Hata, I., A study on building mass damper system using mid-story isolated system -A design method using the performance based design diagrams-, Journal of structural and construction engineering (Transactions of AIJ), Vol. 83, No. 753 (2018), pp. 1573-1582 (in Japanese).
- Kaneko, K., Multipurpose passive control of mid - story isolation buildings designed to mitigate seismic response in substructure, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.718 (2015), pp. 1869-

1879 (in Japanese).

Maciejowski, J., Translated by Adachi, S. and Kanno, M., Predictive Control with Constraints, Tokyo Denki University Press (2005) (in Japanese).

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Main points to consider for long-period ground motion and the concept of ground motion, available from <<https://www.mlit.go.jp/common/001113880.pdf>>, (accessed on 26 July, 2021).

Nishihara, O. and Matsuhisa, H., Design of a dynamic vibration absorber for minimization of maximum amplitude magnification factor (Derivation of algebraic exact solution), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 63, No. 614 (1997), pp. 3438-3445 (in Japanese).

Nishimura, H., Oie, N. and Takagi, K., Vibration control of a structure by using of an active dynamic vibration absorber taking account of actuator constraints, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.66, No.641 (2000), pp.53–59 (in Japanese).

Ohhira, T. and Shimada, A., Movement control for two-wheeled inverted pendulum type robot based on model predictive control considering time-varying constraints, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 35, No. 8 (2017), pp. 629-636 (in Japanese).

Wang, S. J., Lee, B. H., Chuang, W. C. and Chang, K. C., Optimum dynamic characteristic control approach for building mass damper design. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 47, No. 4 (2018), pp.872–888.

Yaguchi, T. and Kurino H., Study on stroke control strategy of seismic control structure utilizing large-weight sub-system as dynamic mass damper, Journal of structural and construction engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 738 (2017), pp. 1201-1211 (in Japanese).

Yaguchi, T. and Kurino H., Response evaluation methodology of seismic control structure utilizing large-weight sub-system as dynamic mass damper, Journal of structural and construction engineering (Transactions of AIJ), Vol. 86, No. 779 (2021), pp. 33-42 (in Japanese).