地震時における建物機能維持を目的とした 振動制御の二次形式評価関数の設計法

DESIGN METHOD OF A QUADRATIC COST FUNCTION FOR VIBRATION CONTROL TO MAINTAIN FUNCTIONS OF A BUILDING DURING AN EARTHQUAKE

三浦 奈々子*, 小檜山 雅之**

Nanako MIURA and Masayuki KOHIYAMA

It is important to maintain functions of a building such as providing medical services, performing production operations, and dwelling during and after an earthquake. Until now, vibration control devices have been devised and installed in many buildings. To maximize the control effects under the limited capacity of a control force, a method for constructing an evaluation function on the basis of the prescribed control objectives is proposed, in which the control objectives are expressed as dimensionless numbers using the required performance levels. The effectiveness of the proposed method is verified by a time-history analysis.

Keywords : *Vibration control, Seismic response, Functional Sustainability, Isolation System for Equipment, Medical*

Equipment, Medical Facility

振動制御, 地震応答, 機能維持, 機器免震, 医療設備, 医療施設

1. 序論

大地震時には多くの負傷者が出る恐れがあり, 地震直後にも病院の診療機能を確保することが社会的に強く求められている。建物に損傷がなくとも, 主要な設備機器が使用不能となった場合, 建物機能は大きく低下してしまう。病院の診療機能を低下させる原因として, 施設・設備の損傷が挙げられる¹⁾。例えば, CT スキャナーやMRI等の重量機器は通常設置床面にアンカーボルト等で固定されているが, 地震による損傷が報告されている^{2), 3)}。また, 精密機器は振動により故障が発生しうるため, 医療機器への振動入力を低減することが望まれる。そのため, 機器の固定に加えて, 機器への振動入力低減対策が重要といえる。

振動入力低減対策として, 建物を免震構造とする方法が挙げられる。これについては佐藤ら⁴⁾により実大震動台実験による検証が行われている。免震構造に対して短周期地震動を入力した場合, 免震効果により非常に高い機能保持性能が実現できることが示されている。また, 長周期地震動を入力した場合には, 地震動の卓越周期と免震建物の固有周期が近接しているとキャスター機器の大きな移動等が発生し, それによって周囲の機器などに衝突し損傷する状況が多数確認されている。一方, 耐震構造では, 長周期地震動を入力した場合はそれほどの被害は発生しないが, 短周期地震動を入力した場合は, 過去の震災での甚大な被害と同様に, 機器の移動, 転倒や落下等が確認されている。

また現在, 建物全体ではなく, 機器類(サーバー等の精密機器)や文化財等に対して機器免震装置が導入されてきている。機器免震については, 免震台が可動範囲の限界値まで変位し, 台が可動部の端部に衝突した衝撃で台上のサーバーラックが転倒した事例が報告されている⁵⁾。

一方, 免震以外の対策として建物への制振装置の導入が考えられる。小檜山・馬場⁶⁾は建物の制振装置の制御用評価関数を工夫し, 建物内設備(エレベーター)の機能維持のために活用する手法を提案している。制御に用いる評価関数については, 姜・吉田⁷⁾が評価関数と制御特性の関係について報告している。またその設定については, Tyler and Tuteur⁸⁾や Rynaski⁹⁾により評価関数内の重み係数と最適系の特性根の関係を求め, 最適な特性根の値から逆に重み係数を決める提案がなされている。また, 重み係数を状態量と制御入力の許容レベルから設定する方法¹⁰⁾や, 状態方程式と出力方程式の係数行列から初期値を与え, 試行錯誤を繰り返して決定する方法^{11), 12)}等も提案されている。しかし, 建物と設備機器といった複数のシステムの機能を維持させようとする複数の制御目的が存在する場合において, 評価関数内でのそれらの次元(制御目的に設定した物理量の数。制御目的がベクトル表記されている場合はその要素数)について定量的に取り扱った既往研究はない。

このような背景から本研究では, 建物の構造的安全性を保ちつつ, 建物内設備の損傷を防ぐ制御を行うための評価関数の設定方法につ

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科 大学院生・工修

** 慶應義塾大学理工学部 准教授・博士(情報学)

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Keio University, M. Eng.
Assoc. Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Informatics

いて提案し、その有効性の検証を行うことを目的とする。建物構造が被害を受けうる強震時には、建物の振動制御が優先して行われるべきであり、このような事例に対しては、時変制御により制御を建物の振動抑制を重視したものに切り替える対応が考えられる。入力地震動の強さや建物の応答量に応じて制御を切り替える時変制御による制御目的が複数ある場合の制御についてはすでに著者らの研究グループにより行われている^{9),13)}。実際に構造物の制御に適用する際にはこのような時変制御を組み込む必要があるが、本論では評価関数の設定に焦点を当て、簡単のため時不変制御のモデルを用い、建物は線形弾性応答を仮定する。

2. 無次元化評価関数の提案

線形二次レギュレータ (LQR) の評価関数は通常、状態ベクトル $\mathbf{x}_{ss}$ および制御力ベクトル $\mathbf{u}$ を用いて次のような 2 次形式で表される。

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}_{ss}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_{ss} + 2\mathbf{x}_{ss}^T \mathbf{S} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (1)$$

ここで重み係数 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{S}$ は半正定条件, $\mathbf{R}$ は正定条件のもと自由に設計することができる。本研究ではこの評価関数を建物の機能維持の観点から設定する方法について述べる。

まず、建物や設備機器に求める性能目標 p_i ($i = 1, 2, \dots, N_c$) (例えば、層間変形や加速度) を設定する。また、想定する地震動に対する非制御状態での振動解析を行い、性能目標を設定した物理量の最大応答を算出し、その結果をもとに、応答低減を重視する程度に応じて大きな係数で最大応答を除し参照最大応答 r_i ($i = 1, 2, \dots, N_c$) を設定する。

次に、性能目標を設定した物理量 (制御目的, 制御量) を出力方程式の形で記述する。

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{D}_i \mathbf{u} \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (2)$$

本研究では制御力は LQR 理論で決定する。LQR の評価関数 (式(1)) においては、制御目的にとる複数の物理量について各項のオーダーが異なると、物理量それぞれに対する制御効果が大きく異なりうる。そこで、性能目標 p_i および参照最大応答 r_i に基づき、制御量 $\mathbf{z}_i$ に対し以下の無次元化操作を行う。

$$\tilde{\mathbf{z}}_i = \mathbf{z}_i / \min(p_i, r_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (3)$$

続いて、制御力についても同様の無次元化操作を行う。

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u} / u_{\max} \quad (4)$$

ここで $u_{\max}$ は制振装置の最大出力である。

上記の無次元化量を用い、制御量項と制御力項のそれぞれを 2 次形式として評価関数を設定する。ここで、2 次形式の各項はベクトルの次元で除し、各項の最大値のオーダーが揃うようにする。また、制御量項が複数存在する場合は、各制御量項を制御量項の個数 N_c で除し、制御量と制御力のバランスを図る。ただし、振動制御においては、応答 $\mathbf{z}_i$ については小さくすることを目的としているが、制御力 $\mathbf{u}$ については能力を十分に発揮するため、応答中は全時間において上限値 $u_{\max}$ 近傍となることが望ましい。LQR の評価関数は制御量項と制御力項両者の和を最小とする制御ゲインを与える。そのため、例えば応答制御量が性能目標 p_i あるいは非制御状態での参照最大応答 r_i の 50 % に抑えられるとき、制御力も最大出力の 50 % と

なるような制御が行われることとなる。そこで補正係数 γ を導入し、評価関数を次のように与える。

$$J = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\tilde{\mathbf{z}}_i^T \tilde{\mathbf{z}}_i}{D(\tilde{\mathbf{z}}_i)} + \gamma \frac{\tilde{\mathbf{u}}^T \tilde{\mathbf{u}}}{D(\tilde{\mathbf{u}})} \right) dt \quad (5)$$

ここで、関数 $D(\mathbf{z})$ はベクトル $\mathbf{z}$ の要素数を表す。

重み係数 (式(1)の $\mathbf{R}$) は通常、繰り返し計算により求められる。例えば、吉田ら¹⁴⁾は一定の飽和時間 (60 秒の地震動に対して 10 秒間) となるような $\mathbf{R}$ の値を繰り返し計算から求めている。本研究において γ は、非制御時の制御対象の応答と制御装置の装置能力から以下のように設定するものとする。

$$\gamma = \left(1 - \frac{u_{\max}}{m\bar{a}} \right) \beta \quad (6)$$

ここで m は制御対象の 1 自由度に相当する平均質量, $\bar{a}$ はその非制御時における加速度応答の最大値である。式(6)により、応答の大きさに対して制御力に余裕があるほど γ は小さな値となる。したがって、評価関数 J (式(5)) における制御力に対するペナルティが弱くなり、大きな制御力が与えられるようになる。実装時にはこの値を基準とし、地震動の強さや建物の応答量に応じて制御を切り換える可変制御¹³⁾を行う。簡単のため時不変制御としている本論では、式(6)中にパラメータ β を導入することにより、制御力重みに自由度を持たせる。なお β は既往研究¹³⁾におけるパラメータ β に相当する役割を果たしている。

評価関数の設定方法について以下にまとめる。なお、Step 5~7 の操作は、制御量および制御力の二乗項を最大で 1 となる値に基準化することを目的としている。

- Step 1.** 性能目標 p_i を設定する。
- Step 2.** 想定する地震動に対する非制御状態での振動解析により、性能目標を設定した物理量の参照最大応答 r_i を算出する。
- Step 3.** 非制御状態での振動解析の結果より補正係数 γ を算出する。
- Step 4.** 性能目標 p_i を設定した物理量である制御量 $\mathbf{z}_i$ を出力方程式の形で記述する。
- Step 5.** 制御量 $\mathbf{z}_i$ の成分の和を、性能目標 p_i と参照最大応答 r_i のうち小さい方で除し、無次元化する。
- Step 6.** 制御力 $\mathbf{u}$ の成分の和を制振装置の最大出力 $u_{\max}$ で除し、無次元化する。
- Step 7.** 評価関数 J 内の制御量項を、無次元化した制御量 $\tilde{\mathbf{z}}_i$ の各成分の二乗和を $\tilde{\mathbf{z}}_i$ の要素数で除したものとして記述し、その項数 N_c で和の各項を除す。また、評価関数 J 内の制御力項を、無次元化した制御力 $\tilde{\mathbf{u}}$ の成分の二乗和を $\tilde{\mathbf{u}}$ の要素数で除したものとして記述し、補正係数 γ を乗ずる。

3. 検証解析

3.1 解析対象

提案する無次元化評価関数が建物機能維持を目的とした制御に有効であることを、基礎部にアクティブ免震装置を有する病院建物のシミュレーション解析により検証する。解析対象は図 1 に示すような建物の j 層に医療設備 (CT スキャナーを想定) を設置した N 層

免震病院建物（免震周期 4.0 s, 上部構造の固有周期 1.2 s）とする。
解析モデルのパラメータを表 1 に示す。免震層に制振装置（制御力 u_b ）を設置した系の運動方程式は次のようになる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g + \mathbf{f}u_b \tag{7}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{b0} & & & \mathbf{O} \\ & m_{b1} & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{O} & & & m_{bN} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_i + c_{b1} & -c_{b1} & & & \mathbf{O} \\ -c_{b1} & c_{b1} + c_{b2} & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & c_{b(N-1)} + c_{bN} & -c_{bN} & \\ \mathbf{O} & & & -c_{bN} & c_{bN} \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_i + k_{b1} & -k_{b1} & & & \mathbf{O} \\ -k_{b1} & k_{b1} + k_{b2} & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & k_{b(N-1)} + k_{bN} & -k_{bN} & \\ \mathbf{O} & & & -k_{bN} & k_{bN} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\mathbf{x} = \{x_i \quad x_{b1} \quad \cdots \quad x_{bN}\}^T \tag{11}$$

$$\mathbf{f} = \{1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0\}^T \tag{12}$$

ここで x_{bn} , x_i はそれぞれ建物 n 層および免震層の建物基礎部に対する相対変位, x_g は建物基礎部の絶対変位である。建物 n 層の層剛性 k_{bn} の分布は A_i 分布により与え, 線形弾性を仮定する。また, 建物上部構造の減衰は剛性比例型とし, 建物 n 層の減衰係数 c_{bn} は建物上部構造の 1 次固有周期 T_b と減衰定数 ζ_b を用いて式(13)で与える。なお, 免震層の剛性 k_i は式(14)で決定する。

$$c_{bn} = (\zeta_b T_b / \pi) k_{bn} \tag{13}$$

$$k_i = (2\pi / T_i)^2 \sum_{n=0}^N m_{bn} \tag{14}$$

系の固有周期と減衰定数を表 2 に示す。

表 1 解析モデルのパラメータ

物理量	変数	値
階高	h	4 m
建物上部構造の層数	N	10
免震周期	T_i	4.0 s
建物上部構造の 1 次固有周期	T_b	1.2 s
建物の減衰定数	ζ_b	0.02
免震層の減衰係数	c_i	$4.3 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
建物各層の質量	m_{bn}	$1 \times 10^6 \text{ kg}$
免震層の質量	m_{b0}	$1 \times 10^6 \text{ kg}$
設備の設置層	j	4
アクティブ制振装置の最大出力	$u_{b\max}$	1000 kN

表 2 系の固有周期と減衰定数

モード	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
固有周期 [s]	4.13	0.68	0.37	0.25	0.20	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09
固有振動数 [Hz]	0.24	1.47	2.72	3.93	5.09	6.20	7.28	8.33	9.37	10.40	11.44
減衰定数	0.11	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28

3.2 評価関数

2 章で示した評価関数の設定方法に従い, 評価関数を設定する。

Step 1.

まず, 建物や設備機器に求める性能目標を設定する。本研究では当該建物の敷地において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さをもつ地震動（以降, レベル 2 の地震動）に対して, 表 3 に示す値を性能目標に設定する。なお, これらの数値は以下のように設定している。

建物

- ・ 層間変形角応答：免震建築物の技術基準¹⁵⁾では上部構造の各階の層間変形角が 1/300 rad 以下であることとしている。
- ・ 免震層変位：免震層の必要クリアランスより設定。

設備

- ・ 絶対加速度応答：サーバーラック機器について通常業務可能とされる数値¹⁶⁾を参考に設定。

表 3 性能目標

対象	応答	性能目標を表す変数	目標値
建物	層間変形角	p_{bd}	1/300 rad
	免震層変位	p_{id}	0.5 m
設備	絶対加速度	p_{ea}	1.0 m/s ²

Step 2.

次に, 想定する地震動に対する非制御の振動解析を行い, 表 3 に示した物理量の参照最大応答を算出する。レベル 2 の模擬地震動, ここでは平成 12 年建設省告示第 1461 号の極めて稀に起こる地震動の加速度応答スペクトルをもつ地震動（以下, 告示波と呼ぶ）10 波に対する最大応答の平均と設定した参照最大応答を表 4 に示す。

図 1 解析モデル

表 4 非制御時の最大応答と参照最大応答

対象	応答	応答値 (レベル 2 の模擬地震動 10 波の平均)	参照最大応答を表す変数	参照最大応答
建物	層間変形角	0.00156 rad	r_{bd}	0.00156 rad
	免震層変位	0.348 m	r_{id}	0.348 m
設備	絶対加速度	1.05 m/s ²	r_{ea}	1.05/10 m/s ²

Step 3.

式(6)より

$$\gamma = \left\{ 1 - \frac{u_{b \max}}{\left(\sum_{n=1}^N m_{bn} \max |\ddot{x}_{bn}(t)| \right) / N} \right\} \beta = 0.158 \beta \quad (15)$$

Step 4.

ここでは、性能目標を設定した物理量（制御量）を出力方程式の形で記述する。建物の層間変形角 $\mathbf{z}_{bd}$ および免震層の相対変位 $\mathbf{z}_{id}$ は状態ベクトル $\mathbf{x}_{ss} = \{\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T\}^T$ を用いて次のように表される。

$$\mathbf{z}_{bd} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} -1 & 1 & \mathbf{O} & \mathbf{O}_{N \times (N+1)} \\ & \ddots & \ddots & \\ \mathbf{O} & & -1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{ss} \quad (16)$$

$$\mathbf{z}_{id} = \{1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (2N+1)}\} \mathbf{x}_{ss} \quad (17)$$

また、系全体の絶対加速度は次式で表される。

$$\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{1} \ddot{x}_g = [-\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \quad -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}] \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f} u_b \quad (18)$$

したがって、設備（設備設置階）の絶対加速度 $\mathbf{z}_{ea}$ は式(19)となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_{ea} &= \{\mathbf{0}_{1 \times j} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (N-j)}\} (\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{1} \ddot{x}_g) \\ &= \{\mathbf{0}_{1 \times j} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (N-j)}\} [-\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \quad -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}] \mathbf{x}_{ss} \\ &\quad + \{\mathbf{0}_{1 \times j} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (N-j)}\} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f} u_b \end{aligned} \quad (19)$$

Step 5.

表 3 の性能目標および表 4 の参照最大応答に基づき、制御量に対し以下の無次元化操作を行う。

$$\tilde{\mathbf{z}}_{bd} = \mathbf{z}_{bd} / \min(p_{bd}, r_{bd}) \quad (20)$$

$$\tilde{z}_{id} = z_{id} / \min(p_{id}, r_{id}) \quad (21)$$

$$\tilde{z}_{ea} = z_{ea} / \min(p_{ea}, r_{ea}) \quad (22)$$

建物応答については層ごとに異なる重みを与えることも可能であるが、ここでは 1 層から N 層まで同じ重みを与えている。表 3, 4 の値から、ここでは次のようになる

$$\tilde{\mathbf{z}}_{bd} = \mathbf{z}_{bd} / r_{bd} \quad (23)$$

$$\tilde{z}_{id} = z_{id} / r_{id} \quad (24)$$

$$\tilde{z}_{ea} = z_{ea} / r_{ea} \quad (25)$$

Step 6.

続いて、制御力の無次元化を行う。

$$\tilde{u}_b = u_b / u_{b \max} \quad (26)$$

Step 7.

制御量項と制御力項のそれぞれを 2 次形式とし、次のように評価関数を設定する。

・建物と設備の応答低減を目的とした制御（以下、建物-設備制御）の評価関数

$$J_{be} = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{3} \left(\frac{\tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd}}{D(\tilde{\mathbf{z}}_{bd})} + \tilde{z}_{id}^2 + \tilde{z}_{ea}^2 \right) + \gamma \tilde{u}_b^2 \right\} dt \quad (27)$$

・建物の応答低減のみを目的とした制御（以下、建物制御）の評価関数

$$J_b = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd}}{D(\tilde{\mathbf{z}}_{bd})} + \tilde{z}_{id}^2 \right) + \gamma \tilde{u}_b^2 \right\} dt \quad (28)$$

なお、式(15)について時刻歴応答解析の結果から、本論では建物-設備制御では $\beta = 12.0$ 、建物制御では $\beta = 0.316$ とした。

4. 解析結果と考察

4.1 解析概要

建物-設備制御、建物制御および非制御状態について時刻歴応答解析を行った。本研究では入力には告示波 100 波を用いた。告示波は解放工学的基盤におけるものとし、位相スペクトルはランダムとした。なお、これらの地震動は非制御時の建物応答で最大層間変形角が 1/200 rad を超過しないことから線形弾性応答の仮定に問題がないことを確認している。また、装置能力の限界を考慮し、解析において制御入力を以下のように与えた。

$$u_b = \begin{cases} u_b & |u_b| \leq u_{b \max} \\ u_{b \max} \operatorname{sgn}(u_b) & |u_b| > u_{b \max} \end{cases} \quad (29)$$

表 4 に示した参照最大応答に対する最大応答の比を表 5 に、表 3 に示した性能目標に対する最大応答の比を表 6 に示す。ここで、建物の応答については次式のように建物全層の中の最大応答値について比の算出を行っている。

$$(\text{参照最大応答 } r \text{ に対する最大応答の比}) = \frac{1}{r} \max_k (\max_t |z_k(t)|) \quad (30)$$

$$(\text{性能目標 } p \text{ に対する最大応答の比}) = \frac{1}{p} \max_k (\max_t |z_k(t)|) \quad (31)$$

また、RMS 値の比較を表 7 に示す。

$$(\text{参照最大応答 } r \text{ に対する RMS 値}) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{1}{NT} \sum_{k=1}^N \int_0^T z_k^2(t) dt} \quad (32)$$

ただし、入力地震動の継続時間 $T = 60$ s としている。告示波 100 波中の 1 波に対する各制御手法での時刻歴応答を図 2, 3 に示す。

表 5 参照最大応答に対する最大応答の比の平均

	建物		設備
	層間変形角	免震層変位	絶対加速度
非制御	1.02	1.02	10.2
建物-設備制御	0.857	0.857	8.92
建物制御	0.806	0.774	9.40

表 6 性能目標に対する最大応答の比の平均

	建物		設備
	層間変形角	免震層変位	絶対加速度
非制御	0.475	0.712	1.07
建物-設備制御	0.401	0.597	0.937
建物制御	0.377	0.539	0.987

表 7 参照最大応答に対する RMS 値の平均

	建物		設備
	層間変形角	免震層変位	絶対加速度
非制御	0.281	0.373	3.27
建物-設備制御	0.236	0.304	2.70
建物制御	0.231	0.268	3.02

4.2 制御特性

設備の最大絶対加速度応答の低減については、表 5～7 より、建物-設備制御で建物制御よりも応答低減率が大いことが確認できる。一方、建物の層間変形角応答と免震層の変位応答では、建物-設備制御で建物制御よりも応答低減率が小さい。

図 2, 3 の時刻歴応答を比較すると、(b)建物の最大絶対加速度で建物制御が建物-設備制御に比べて応答が小さいことが確認できる。建物の絶対加速度応答は非制御時に最大応答（告示波 100 波平均）で 1.24 m/s^2 であり、建物制御でその 1.00 倍、建物-設備制御で 1.13 倍となった。建物-設備制御では、建物（設備設置階以外）の絶対加速度応答の増大を伴って、設備の絶対加速度応答を低減していることが確認できる。ただし、建物の絶対加速度応答は建物内の人が行動（たとえば避難行動）をとれる絶対加速度¹⁷⁾から考えると十分余裕があるので、建物制御に比べて応答は増大しているが許容される。

本論で設定した制御量については以下のことがいえる。

- ① 各応答の性能目標の要求水準（表 3）は同等ではない。
- ② 物理量は独立に制御できない。

①については、表 6 の非制御時の各項目の比較から説明できる。もし、全ての性能目標が同程度の達成難度であるならば、非制御時において各項目の値は同程度となる。しかし、表 6 ではそのようになっていない。

②については、設備の最大絶対加速度応答を抑えるために建物の絶対加速度応答の増大が生じていることから分かる（図 2(b), 3(b)）。このことについて、2 つの制御における周波数応答を図 4～7 に示す。図 4, 5 では非制御時の周波数応答は 1 層と 10 層のみを示している。設備の絶対加速度応答については、建物-設備制御は建物制御と比較して、応答が小さい（図 6）。また、免震層の変位応答については 9 Hz 以下の帯域で僅かに建物-設備制御の応答が大きい（図 7）。一方、建物-設備制御は建物の周波数応答（図 4）においては、建物制御での周波数応答（図 5）に比べ 1～2 次の振動モード（表 2）の帯域（0.2～1.5 Hz）で絶対加速度応答に微小な増加が見られる。

したがって今後、評価関数の改良として、制御対象の振動特性や、

建物の敷地で想定される地震動の特性を考慮し、性能目標を周波数領域で設定¹⁸⁾することが考えられる。また、制御力に関する重み係数 $\mathbf{R}$ （本研究においては γ ）は地震動の強さの変化に応じて変更されることが望ましい¹³⁾。より効果的な制御を行うためには補正係数 γ の設計において本論で用いた値を初期値としてゲインスケジューリングを行う対応¹³⁾が考えられる。

(a) 建物の最大層間変形角

(b) 建物の最大絶対加速度

(c) 免震層の変位応答の絶対値

(d) 設備の絶対加速度応答の絶対値

(e) 制御入力

図 2 建物-設備制御での時刻歴応答

(a) 建物の最大層間変形角

(b) 建物の最大絶対加速度

(c) 免震層の変位応答の絶対値

(d) 設備の絶対加速度応答の絶対値

(e) 制御入力

図 3 建物制御での時刻歴応答

(a) 絶対加速度

(b) 層間変形角

図 4 建物-設備制御での建物の周波数応答

(a) 絶対加速度

(b) 層間変形角

図 5 建物制御での建物の周波数応答

図6 設備の周波数応答 (絶対加速度)

図7 免震層の周波数応答 (変位)

5. 結論

本研究では建物の構造的安全性を保ちつつ、建物内設備の損傷を防ぐ制御を行うための評価関数の設定方法について提案し、その有効性の検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・複数の制御量を持つ LQR 制御の評価関数を、性能目標あるいは非制御時の最大応答 (参照最大応答) を用いて無次元化した制御量の 2 乗和として記述する方法を提案した。
- ・医療設備を有する 10 層建物モデルを対象に模擬地震動を用いた時刻歴応答解析を行い、評価関数の無次元化操作が建物と設備の双方の応答低減に有効に機能していることを確認した。

今後の課題として、評価関数の改良に関して、制御対象の振動特性や、建物の敷地で想定される地震動の特性を考慮し、性能目標を周波数領域で設定すること、制御量間の相関を考慮し性能目標を設定することが挙げられる。そして、複数設備のシステムへの展開、非線形制御を含めた他の制御手法への応用等も挙げられる。

謝辞

本研究は特別研究員奨励費(23・3024)の助成を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 寛淳夫：阪神大震災で病院の建築・設備はどうなったか 建築の立場から-1, 病院設備, Vol. 38, No. 2, pp. 281-285, 1996.3
- 2) 兵庫県放射線技師会：兵庫県南部地震記録誌 1995 年 1 月 17 日午前 5 時 46 分 M7.2—この経験を今後に生かすために—, 兵庫県放射線技師会, pp. 99-111, 1996.1
- 3) 宮本唯男：放射線部門の地震対策ハンドブック, 医療科学社, 1995.11
- 4) 佐藤栄児・酒井久伸・福山國夫・古川幸・鎌田崇義・寛淳夫・小林健一・井上貴仁・中島正愛：医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験—震災時における都市施設の安全性・機能性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 650, pp. 771-780, 2010.4
- 5) 日本データセンター協会：東日本大震災を踏まえたデータセンター ファシリティ スタンドアードの検証と見直し (ダイジェスト版), 2012.2
- 6) 小檜山雅之, 馬場敏光：機能維持を目的とした建物・エレベータ連成系の周波数整形・可変ゲインフィードバック制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 670, pp. 2059-2067, 2011.12
- 7) 姜聲国・吉田和夫：アクティブ振動制御における評価関数と制御特性, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 58, No. 552, pp. 2373-2380, 1992.8
- 8) J. S. Tyler, Jr. and F. B. Tuteur: The Use of a Quadratic Performance Index to Design Multivariable Control Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-11, No. 1, pp. 84-92, 1966.1
- 9) E. G. Rynaski: Optimal Helicopter Station Keeping, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-11, No. 3, pp. 346-355, 1966.7
- 10) A. E. Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho: *Applied Optimal Control*, Taylor & Francis, 1975.
- 11) G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini: *Feedback Control of Dynamic Systems*, Prentice-Hall, 2002.
- 12) D. S. Naidu: *Optimal Control Systems*, CRC Press, 2002.
- 13) 三浦奈々子・小檜山雅之：地震動強度と応答レベルに順応する超高層建物・エレベータ連成系の可変ゲインフィードバック制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 670, pp. 2069-2076, 2011.12
- 14) 吉田美奈子・小檜山雅之・高橋正樹：線形 2 次レギュレータを用いた建物・エレベータロープの分散協調制御手法の比較, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 675, pp. 705-714, 2012.5
- 15) 国土交通省住宅局建築指導課・(独)建築研究所・日本建築行政会議・(社)日本免震構造協会・(財)日本建築センター：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説, 工学図書, 2001.5
- 16) 畑野信夫・前田昌孝：コンピューターシステム及び付帯設備 (地震防災と機器免震), 建築設備と配管工事, pp. 63-67, 2002.12
- 17) 高橋徹・貞弘雅晴・斉藤大樹・小豆畑達哉・森田高市・野口和也・箕輪親宏：長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 497-498, 2007.7
- 18) N. K. Gupta: Frequency-Shaped Cost Functionals: Extension of Linear-Quadratic-Gaussian Methods, *Journal of Guidance and Control*, Vol. 3, No. 6, pp. 529-535, 1980.

(2012 年 7 月 9 日原稿受理, 2013 年 1 月 30 日採用決定)