

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震のためのコントローラ設計方法(その2: 免震周期ごとの制御系設計について)
Title(English)	Controller design for vibration control of high-rise building using combination of active control and passive-base isolation (Part 2 :Control performance of different base-isolation periods)
著者(和文)	宮本皓, 佐藤大樹, 余錦華
Authors(English)	Kou Miyamoto, Daiki Sato, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 697-698
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 697-698
発行日 / Pub. date	2017, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震のためのコントローラ設計方法 (その2：免震周期ごとの制御系設計について)

免震構造 アクティブ制御 最適制御 正会員
応答制御 エネルギー LQR 正会員

○宮本 皓* 正会員 佐藤 大樹**
余 錦華*** 正会員

1.はじめに

本報その1では免震周期ごとのアクティブ制御に必要なエネルギー、パワーや制御入力と免震層変位の解析を行った。本報その2では、免震周期ごとのコントローラの設計方法とその制御性能の特性について述べる。

その1では免震層の最大変位が Art Hachinohe 波入力時に 60 cm 程度になるように重み関数を選択してコントローラ設計を行った。一方、様々な要望に合わせたコントローラ設計方法や免震周期の選択方法を提案することにより、さらに設計の見通しがよくなることが期待される。

本報その2では、 H_∞ ノルムを評価関数として用いて数値解析を行い、LQRにより設計されたコントローラの性能評価を行う。 H_∞ ノルムによる評価は、最悪状態を引き起こす外乱に対する応答を表し、 H_∞ 制御やロバスト制御を中心に用いられている[1]。本報では、この H_∞ ノルムの逆数を制御系の性能評価として用いて分析を行う。

2.制御系の設計について

本報その1と同様に、免震層にアクティブ制御装置を設置して振動制御を行う。本報では、状態フィードバック制御に基づく制御系を構築するために、建物の運動方程式を以下の状態方程式にする。

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = A\zeta(t) + B_d u(t) + B_d \ddot{x}_g(t), \\ y(t) = C\zeta(t) \end{cases} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{cases} \zeta(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \\ A = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}, \quad C = [I_n \quad 0] \\ B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_u \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -E \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

であり、 $x(t)$ を各層の相対変位、 $u(t)$ を制御入力、 I_n を $n \times n$ の単位行列を表す。制御系のブロック線図は図1に示す。

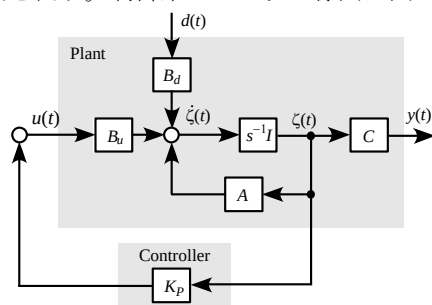


図1. 状態フィードバックによる制震制御系

本報では免震層にアクティブ制御装置を設置して振動制御を行う。制御系のコントローラは以下の LQR (Linear Quadratic Regulator) 評価関数を用いて設計を行う：

$$J = \int_0^\infty (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (3)$$

ここで、 $X = \begin{bmatrix} x^T & \dot{x}^T \end{bmatrix}^T$ とし、 x は各階の相対変位を表す。

また、 u は制御入力を表し、 Q と R はそれぞれ X と u に対応する重み関数を表す。

LQR によりコントローラを設計する際、 Q と R の選択方法は様々な物が提案されている([1]～[4])。本報では構造物の運動エネルギーと弾性エネルギーを評価する

$$Q = \begin{bmatrix} K \times 10^\alpha & \\ & M \times 10^\beta \end{bmatrix}, \quad R = 10 \quad (4)$$

で表されるものを用いてコントローラを設計する。

本論文では制御系の性能を伝達関数 $G(j\omega)$ の H_∞ ノルム

$$\|G\|_\infty = \max_{0 \leq \omega \leq +\infty} \sigma_{\max}(G(j\omega)) \quad (5)$$

の逆数を用いて評価を行う。ただし、ここで $\sigma_{\max}(\cdot)$ は周波数応答関数行列の最大特異値である。明らかに $1/\|G\|_\infty$ が大きくなることは制御性能が良くなることを表す。本報では以下の3つの伝達関数を評価対象として用いる：

G_a ：地震入力から各層の絶対加速度

G_i ：地震入力から各層の層間変位

G_d ：地震入力から免震層の相対変位

図2～4に解析結果を示す。本報は $T_b = 6.0$ s, 10.0 s, 20.0 s での G_a , G_i , G_d の H_∞ ノルムプロットを示す。それぞれの図において、 α は剛性 (弾性エネルギー)、 β は質量 (運動エネルギー) に対する重み関数を表す。図の z 軸はそれぞれの伝達関数の H_∞ ノルムの逆数 $1/\|G\|_\infty$ を表す。図2に絶対加速度に対するプロットを示す。解析結果より、絶対加速度に対する制御性能は免震周期による影響は少なく、 $1/\|G\|_\infty$ の最大値は免震周期により大きく変化しない。免震周期を長くして、建物の固有周期を伸ばすことは、加速度応答を下げることを表すが、本報の結果では、いずれの免震周期を用いても加速度に対する制御性能に大きな違いは見られないことがわかった。これは、制御系設計の際に絶対加速度を評価関数に含めていないことが理由の1つとして考えられる。図3は層間変位に関する結果を示す。免震周期の違いは層間変位の制御性能に大きな影響を与えており、免震周期を短くすることにより、最大の層間変位がより低く抑えることが可能であり、 $T_b = 6.0$ s と $T_b = 20.0$ s では最大の層間変位に大きな違いが出ていることが分かる。

さらに、図4に免震周期と免震層の相対変位に関する制御性能を示した。図4より、免震層変位に対する制御性能も免震周期に大きく依存することが分かる。免震周期が $T_b = 20.0$ s の際は、 α と β の値を 15 にしてもその $1/\|G\|_\infty$ 値は $T_b = 6.0$ s の α と β の値が 7 の値程度にしかならず、

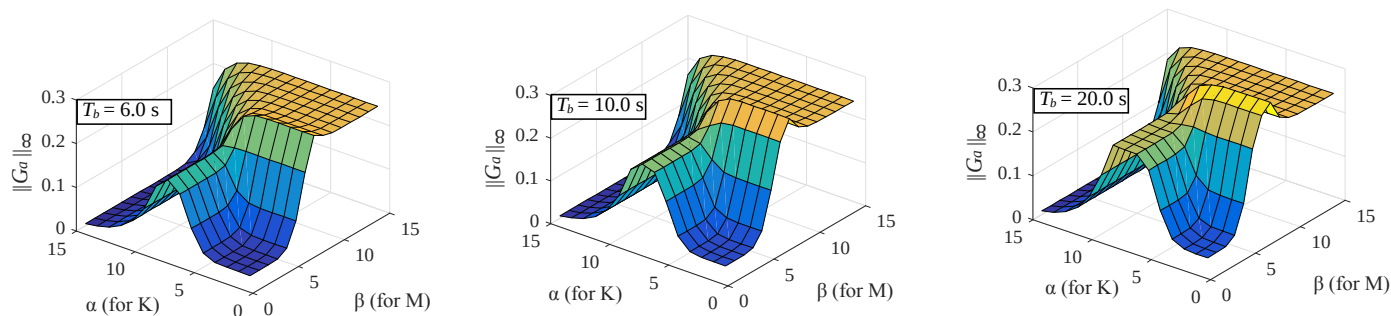


図 2. 加速度と H_∞ ノルムとの関係

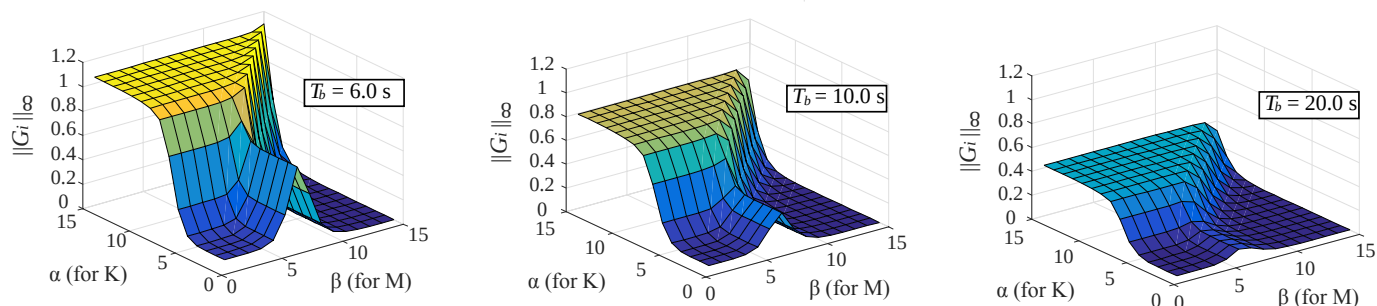


図 3. 層間変位と H_∞ ノルムとの関係

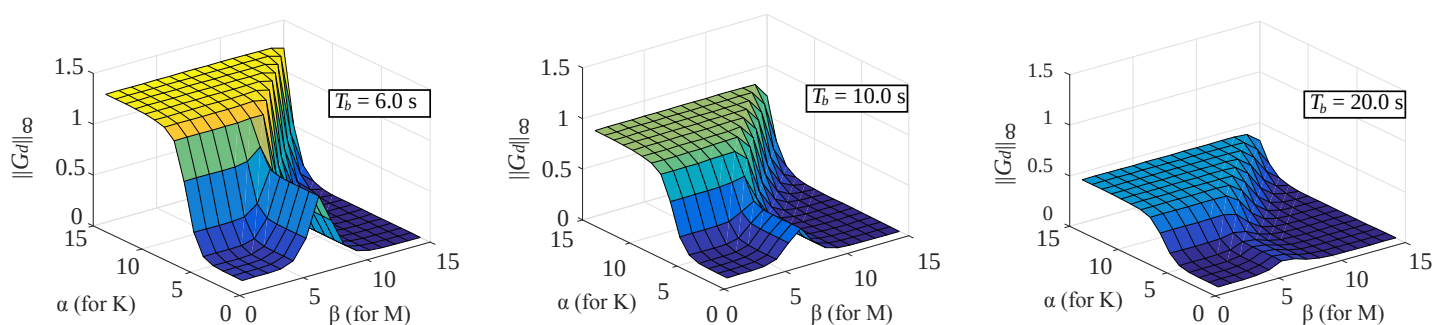


図 4. 免震層変位に対する H_∞ ノルムとの関係

免震層に対する制御性能に大きな違いがあることがわかる。免震周期を長くすることにより、絶対加速度を抑制することが可能になり、建築物には望ましい結果を得られるが、相対・層間変位に対する制御性能は低下することが分かった。これは、その 1 の応答結果からもわかるように、10 層目の層間変位の応答が特に大きくなることの原因であると考えられる。

また、図 2～4 より、絶対加速度に関する制御性能を高めるには、質量に対する重み関数を大きくする必要がある。層間変位と免震層変位に対する制御性能を高めるには剛性に対する重み関数を大きくする必要がある。そのため、目的に合わせて重み関数を適切に選ぶ必要がある。

3. まとめ

本報で得られた知見を以下に示す。

- 1) 免震周期（上部構造を剛体と仮定した際の周期）を長くしても絶対加速度に対する制御性能に違いは顕著に表れず、いずれのモデルでも最大の制御性能に対して大きな変化は見られない。
- 2) 層間変位と免震層の相対変位に対する制御性能は、免震周期の長さに強く依存し、免震周期が短くなる

ほど、制御性能が向上する。

- 3) 絶対加速度に対する制御性能を高めるには質量に対する重み関数を大きくする必要があり、層間変位および免震層の相対変位に対する制御性能を高めるには剛性に対する重み関数を大きくすることが必要であり、目的によって調整する重み関数が異なる。

参考文献

- [1] 美田 勉 : H_∞ 制御, 昭晃堂, 1994. 4.
- [2] Loh C, Lin P, Chung N. Experimental verification of building control using active bracing system. EEarthquake engineering and structural dynamics :1099-1119. 1999. 9.
- [3] Sadek F, Mohraz B. Semiactive control algorithms for structures with variable dampers. J. Eng. Mech. Vol. 124(9) :pp. 981-990 1998. 9.
- [4] She Y, Becker T. C, Furukawa S, Sato E, Nakashima M. LQR control with frequency-dependent scheduled gain for a semi-active floor isolation system. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 43, pp. 1256-1284, 2014. 8.

*東京工業大学, 環境・社会理工学院建築学系, 修士(工学)

**東京工業大学, 未来産業技術研究所, 准教授, 博士(工学)

***東京工科大学, 工学部機械工学科, 教授, 博士(工学)

*Tokyo Institute of Technology, Ms. Eng.

** Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

*** Tokyo University of Technology, Dr. Eng.