T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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)			
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		
「			

(5)

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

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、Hω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。

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

ここで

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

であり、x(t)を各層の相対変位、u(t)を制御入力、 $I_n \ge n \times n$ 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:

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)

$$J = \int_0^\infty \left(X^T Q X + u^T R u \right) dt \tag{3}$$

ここで,
$$X = \begin{bmatrix} x^T & x^T \end{bmatrix}^T$$
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, $Q \ge R$ 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

$$Q = \begin{bmatrix} K \times 10^{\alpha} & \\ & M \times 10^{\beta} \end{bmatrix}, \quad R = 10$$
(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(jw)の H_∞ノルム $\left\|G\right\|_{\infty} = \max_{0 \le \omega \le +\infty} \sigma_{\max}(G(j\omega))$

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||。 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。: Ga: 地震入力から各層の絶対加速度

G:: 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||_∞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||₀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, Tb = 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 $T_b = 20.0 \text{ s}$ の際は、 $\alpha \ge \beta$ の値を 15 にしてもその $1/||G||_{\infty}$ 値

Kou Miyamoto, Yinli Chen, Daiki Sato, Jinhua She



免震層変位に対すると H。ノルムとの関係 図 4.

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 が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 り、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。

- 免震周期(上部構造を剛体と仮定した際の周期)を 1)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。
- 層間変位と免震層の相対変位に対する制御性能は, 2) 免震周期の長さに強く依存し、免震周期が短くなる
- *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)

ほど,制御性能が向上する。

絶対加速度に対する制御性能を高めるには質量に対 3) 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. Ecperimental verification of building control using active bracing system. EArthquake 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 semiactive floor isolation system. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 43, pp. 1256-1284, 2014. 8

*Tokyo Institute of Technology, Ms. Eng.

** Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

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