

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実現に向けた基礎的研究(その2: アクティブ制御設置時の免震周期設定に関する検討)
Title(English)	
著者(和文)	宮本皓, 佐藤大樹, 林 岑蔚, 余 錦華
Authors(English)	Kou Miyamoto, Daiki Sato, Tsenwei Lin, Jinhua SHE
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 437-440
Citation(English)	, , , pp. 437-440
発行日 / Pub. date	2017, 3

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実現に向けた基礎的研究 (その2: アクティブ制御設置時の免震周期設定に関する検討)

構造—振動

正会員 ○宮本 皓^{*3}

正会員 佐藤 大樹^{*2}

正会員 林 岑蔚^{*1}

正会員 余 錦華^{*4}

免震構造, アクティブ制御, ハイブリッド制御
最適制御, 応答制御

1. 初めに

その1では免震構造を取り付けた際の、上部構造、免震周期の比率の関係が応答性状に表す影響について確認を行った。その2では、その1で用いたモデルの免震層にアクティブ制御装置を設置し、免震構造とアクティブ制御を併用し、その際の免震周期の影響を検討する。

アクティブ制御による建築構造物の振動制御は1980年代に積極的に研究がおこなわれ、日本では1981年に世界初の実大スケールのアクティブ制御装置が取り付けられた京橋センタービルが建設された。その後様々な構造物にアクティブ制御が取り入れられ、2002年の段階で、世界中で30棟以上のビルにアクティブ制御が搭載されている⁶⁾。近年では、免震構造とアクティブ制御を併用した研究も数多くあり、アクティブ制御を併用することにより、よりよい振動制御性能が得られていることも報告されている^{例え(ば)3)-5)}。しかし、これらの研究では、免震層設計の際にアクティブ制御が取り付けられることは考慮されていない。制御対象の動特性により、「制御のしやすさ」が異なるため、制御に必要なエネルギーの大きさも異なる。近年では、制御理論分野では、原らの研究により、 H_2 制御を用いた際に、制御対象の零点・極の位置により、単位パルス波を入力した際の制御に必要な最低な入力(性能限界)の評価方法に関する結果がある^{例え(ば)7),8)}。そのため、適切な免震周期を選ぶことにより、より少ない制御入力でよりよい振動制御性能を得られることが期待される。本報では、その1に引き続き、アクティブ制御と併用する場合の免震周期設定方法に着目し、アクティブ制御を併用する場合に用いる免震周期の設定について検討を行う。

2. アクティブ制御系の設計方法

本章では免震層に取り付けられるアクティブ制御に用いるコントローラの設計方法について述べる。具体的に建築構造物のアクティブ制御で最も用いられているLQR制御を用いて制御を行う。

2.1. LQRによるコントローラ設計

アクティブ制御により与えられる制御入力に加わった際のせん断型モデルの運動方程式は以下の式により与えられる。

$$M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) + u(t) \quad (1)$$

ここで、 M : 質量マトリックス、 D : 粘性マトリックス、 K : 剛性マトリックス、 $x(t)$: 各層の相対変位ベクトル、 $\ddot{x}_g(t)$: 地面の加速度、 $u(t)$: 制御入力をそれぞれ表す。

式(1)の運動方程式を以下の状態方程式に書き直す。

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + B_d\ddot{x}_g(t)\{1\}, \\ y(t) = Cz(t) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、ここで、

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}E_u \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -E \end{bmatrix}, \quad C = I_n,$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad E_u = \begin{bmatrix} e_1 & -e_2 & & 0 \\ 0 & e_2 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & & -e_n \\ 0 & 0 & & e_n \end{bmatrix}.$$

$$e_i = \begin{cases} 0, & \text{the } i\text{th floor does not have an actuator} \\ 1, & \text{the } i\text{th floor have an actuator} \\ -1, & \text{the reaction force of control input of } i\text{th floor} \end{cases}$$

上の式において、 I_n は $n \times n$ の単位行列を表す。行列 B_d は外乱入力行列であり、外乱(本報の場合は地震)が入力される場所を表す。行列 C はセンサーの位置を示し、全ての状態 $z(t)$ が観測できる場合は単位行列になる。行列 E において、 e_i はアクティブ制御装置の有無を表し、制御装置のある層では1、その真下の層では制御入力の反力として-1とする。

本報は式(4)の制御則により与えられる状態フィードバック制御を用いて制御系を構築する(図1)

$$u(t) = K_p z(t) \quad (4)$$

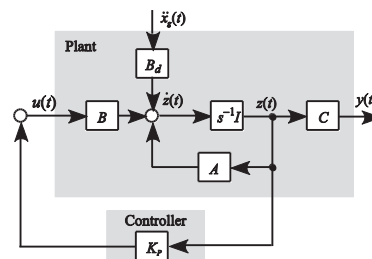


図1. 制御系のブロック線図

本報では、絶対加速度・層間変位を同時に評価する以下の評価関数 J_3 を用いる。

$$J_3 = J_1 + J_2 \quad (5)$$

$$J_1 = \int_0^{\infty} \left\{ \Delta \dot{x}^T(t) \quad \Delta \dot{x}(t) \right\} Q_d \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}(t) \\ \Delta \dot{x}(t) \end{bmatrix} + u(t)^T R_d u(t) \right\} dt \quad (6)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} \left\{ \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) \right\}^T Q_g \left\{ \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) \right\} + u^T(t) R_g u(t) \right\} dt \quad (7)$$

ただし、式(6)において、 $\Delta x(t)$ は層間変位であり、

$$\Delta x(t) = [\Delta x_1(t) \quad \Delta x_2(t) \quad \dots \quad \Delta x_{10}(t)]^T \quad (8)$$

$$\Delta x_i(t) = \begin{cases} x_1(t), & i=1, \\ x_i(t) - x_{i-1}(t), & i=2, \dots, 10. \end{cases}$$

により与えられる。

本報では、式(5)の評価関数を最小化するようなコントローラを用いて建築構造物の振動制御を行い、絶対加速度と層間変位を抑制するように制御する。

3. 数値例

3.1. 用いた地震波について

本報その2では、その1で示したART HachinoheとART Kobe波の2つを用いて解析を行う。その2では、ART Hachinohe波の解析結果についても示す。

3.2. 制御対象のモデルについて

解析にはその1で示したモデルのうち、 $T_u=5.0$ s, $T_f=6.0$ s, 8.0 s, 10.0 s, 12.0 s, 14.0 s, 16.0 s, 18.0 s, 20.0 sを使用する。本報では、免震層の許容変位を60 cmとする。安全率を考え、アクティブ制御を設置し、Art Hachinohe波を入力する際に免震層の相対変位が50 cm程度になるように制御系を設計し、免震層に設置をする(図2)。なお、用いた重み関数は式(9)の通りである。

$$Q_g = 10^\alpha I_{11}, \quad Q_r = 10^\beta \times \text{diag}\{q_1 \quad q_2\}, \quad R_d = R_g = I_{11} \quad (9)$$

ここで、式中の α , β , q_1 と q_2 は制御対象の上部構造の固有周期と免震周期にあわせて以下に示すものを用いた。

$T_u = 5.0$ s, $T_f = 6.0$ sのモデル

$$\alpha = 6.3, \quad \beta = 10.1$$

$$q_1 = \text{diag}\{10^{0.5} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5}\}$$

$$q_2 = \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5}\}$$

$T_u = 5.0$ s, $T_f = 8.0$ sのモデル

$$\alpha = 11.5, \quad \beta = 10.1$$

$$q_1 = \text{diag}\{10^{0.5} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5}\}$$

$$q_2 = \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5}\}$$

$T_u = 5.0$ s, $T_f = 10.0$ s~20.0 sのモデル

$$\alpha = 11.7, \quad \beta = 10.1$$

$$q_1 = \text{diag}\{10^{0.5} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5}\}$$

$$q_2 = \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5} \quad 10^{1.5}\}$$

図3, 4に免震周期と最大制御入力の関係図を示す。図5はArt Hachinoheを入力する際の $T_f=6.0$ sと20.0 sの制御入力の波形であり、図6は図5に示した制御入力の高速フーリエ変換(以下、FFT)により得られたフーリエ振幅である。

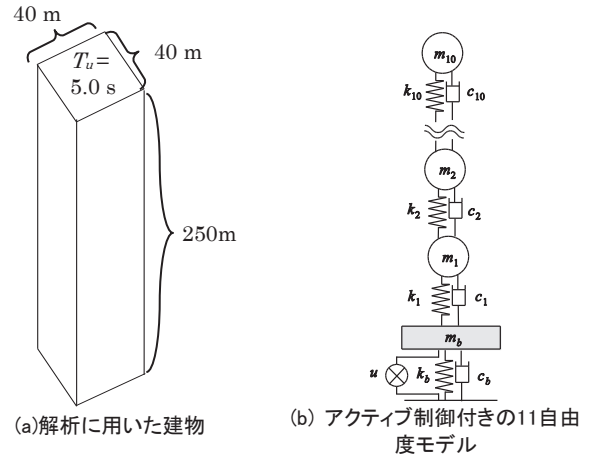


図2. 解析に用いた3種類のモデル

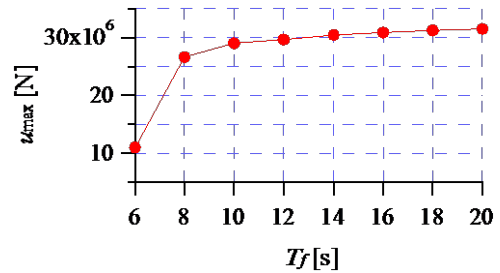


図3. 免震周期長さと最大制御入力(ART Hachinohe波入力時)

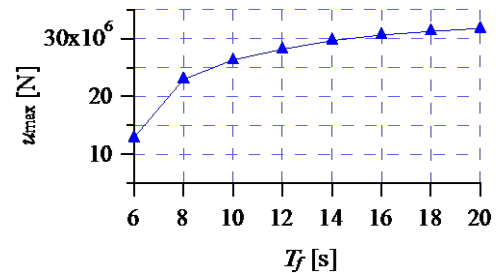


図4. 免震周期長さと最大制御入力(ART Kobe波入力時)

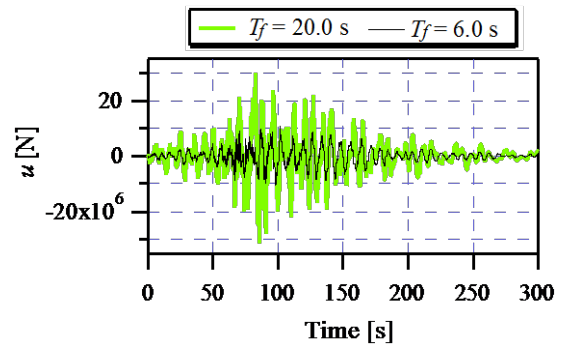


図5. 制御入力の大きさと免震周期長さ(ART Kobe波入力時)

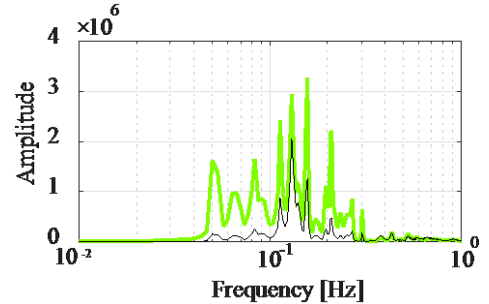


図6. 制御入力のFFT解析結果

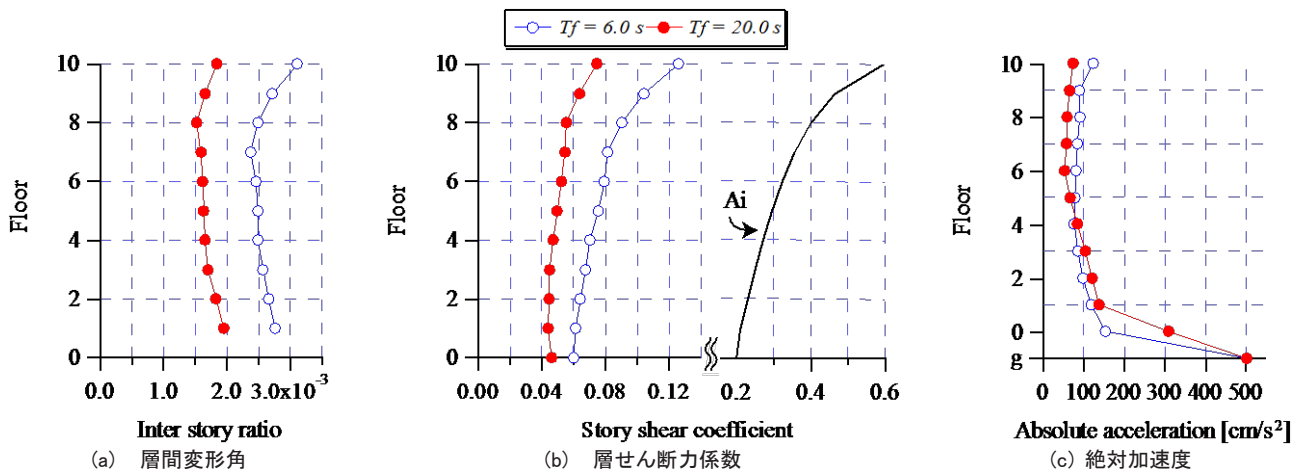


図7. Art Hachinohe波入力時の応答

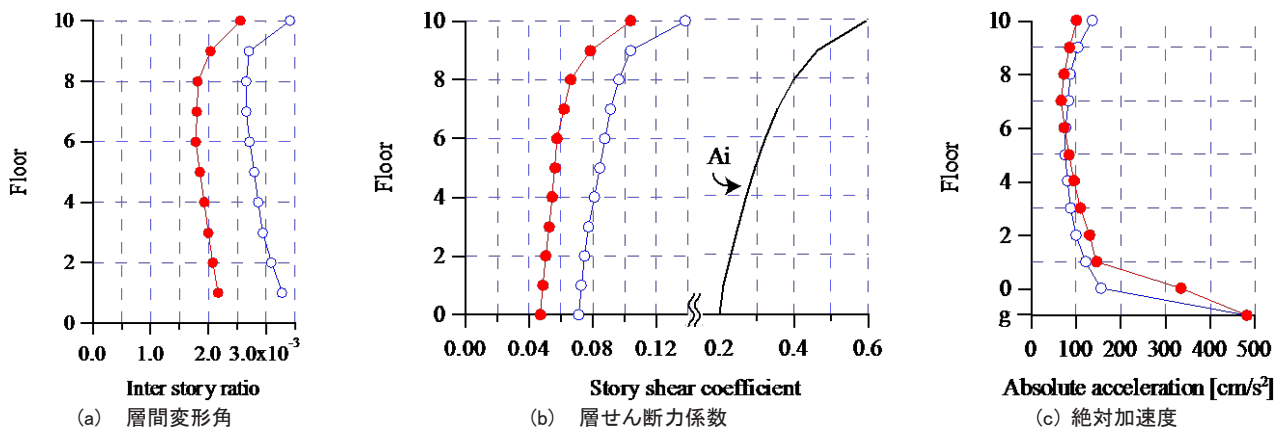


図8. Art Kobe波入力時の応答

表1. Art Hachinohe波入力時の免震層の最大変位

T_f [s]	6.0	20.0
x_{0max} [cm]	50.3	48.9

図3, 4の解析結果より, いずれの地震波を入力する際も免震周期が長くなるに従い必要な制御力も大きくなる傾向にあり, 特に $T_f=6.0$ sと8.0 sでは大きな差があることがわかる。また, 図5より, $T_f=6.0$ sモデルに対して $T_f=20.0$ sモデルの制御入力の大きさは全体的に大きくなる。さらに図6のFFT解析結果より, 両制御入力を含む周波数成分は概ね等しいが, $T_f=20.0$ sモデルの制御入力はフーリエ振幅が大きいことが分かる。

また, 図7と8にArt Hachinohe波とArt Kobe波を入力する際の $T_f=6.0$ sと $T_f=20.0$ sの最大層間変形角, 最大層せん断力係数, 最大絶対加速度の層方向のプロットを, 表1にArt Hachinohe波を入力した際の免震層の最大変位 x_{0max} を表した。解析結果より, アクティブ制御を行うことにより, 免震層の最大変位を50 cm程度にできることが確認される。なお, $T_f=8.0$ sより免震周期の長いモデルの応答値は, $T_f=8.0$ sとの差が5%以内であったことから, 代表として $T_f=20.0$ sを選び, これをプロットする。

図7と8(b)中の A_i は1層目のせん断力係数を0.2とする A_i 分布(式(10))より求めたせん断力係数分布である。

$$A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T_u}{1 + 3T_u} \quad (10)$$

また, 本報その1と同様に, 図のy軸において, 0は免震層を表し, gは地面を表す。解析結果より, 免震周期が長くなるほど, 層間変形角は減少するが, 制御入力(図3, 図4)と絶対加速度(図7(c), 図8(c))は大きくなる。これは, 免震周期が長くなることにより, 上部構造が免震層に比較して, 十分に高い剛性になり, 建物全体の变形が免震層に集中することから, 上部構造の層間変形角は小さくなる。しかし, その一方で, 免震周期が長くなるにつれて免震層の変位が大きくなり, これを50 cm程度の変位に抑えるためには, より大きな制御入力が必要である。これにより, 下層の絶対加速度は大きくなる。しかし, 層せん断力係数は設計用の層せん断力係数 A_i を下回っているため, 制御入力そのものにより構造体を損傷する危険性はないことがわかる。

以上より, 下層の絶対加速度を抑え, 少ない制御入力が必要となる場合は免震層の免震周期を短く設定する。下層部よりも, 上層部の絶対加速度が重要になる場合は, 免震周期を長く設定することが良いこと分かる。

4. まとめ

本報では異なる免震周期の免震構造を持つ超高層建築物モデルを対象としてアクティブ制御系を設計して振動制御を行った。その結果, 以下の知見を得た。

- (1) 免震周期を長くすることにより，免震層の変位が大きくなることから，免震周期が長いモデルの免震層変位を許容範囲以内に抑えるためには，より大きい制御入力が必要である。免震周期が短いモデルの制御入力は，免震周期が長いモデルの制御入力と比較をすると，制御入力に含まれる周波数は殆ど同じであるものの，免震周期が短いモデルに対する制御入力は，免震周期が長いモデルに対して全体的に小さい値となった。なお，免震周期が長いモデルにおいても，最大層せん断力係数は標準層せん断力係数以下に抑えることが可能であったことから，制御入力そのものが過大になり，構造体を損傷させる危険性はなかった。
- (2) 免震周期が短いモデルでは，モデル全体の固有周期が短いことから，最大層間変形角や層せん断力係数は大きくなるものの，免震層の最大相対変位は小さくなる。そのため，少ない制御入力で免震層の最大変位を許容以内に抑えることが可能であり，また下層の絶対加速度の応答を抑えることもできる。
- (3) 以上のことから，用いることができる制御入力に限られ，下層部分の絶対加速度を抑える必要がある際は，免震周期が短いものを用いることが適切であり，建物全体の層間変形角や層せん断力係数を抑える必要がある場合は，免震周期を長くすることがアクティブ制御と併用する際に適切な免震周期の設定であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 笠井和彦，シムアンバン・サラン，松田和浩：免震建物の上部構造周期を考慮した免震性能曲線の提案，日本建築学会構造系論文集，第 81 巻，第 720 号，pp. 239-249, 2012 年
- 2) Kim Hyun-Su, Roschke N. Paul: GA-fuzzy control of smart base isolated benchmark building using supervisory control technique. *Advance in Engineering Software*, Vol.38, pp. 453-465, 2007.
- 3) 吉岡宏和，スペンサー Jr., B.F. : MR ダンパを用いたスマート免震構造の振動台実験，理論応用力学講演会公演論文集，65, 2001 年
- 4) 北村春幸，財津和廉，馬谷原伴恵：主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価，日本建築学会構造系論文集，第 599 号，pp. 71-78, 2006 年
- 5) 佐藤大輔，北村春幸，佐藤大樹，佐藤利昭，山口路夫，脇田直弥，綿貫雄太：履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第 699 号，pp. 631-640, 2014 年
- 6) Spencer Jr B. F., Nagarajaiah S. : State of the Art of Structural control, *ASCE Structural Engineering*, Vol. 129, pp. 845-856, 2007.
- 7) 原 辰次，Toni Bakhtiar : 1 入力多出力線形離散時間系の

H_2 制御性能限界，システム制御情報学会論文誌，第 19 号，pp. 391-399, 2006

- 8) Toni Bakhtiar, Shinji Hara: H_2 regulation performance limitations for SIMO linear time-invariant feedback control systems. *Automatic*, Vol. 44, pp. 659-370, 2008.

*1 国立中央大学(台湾)，土木工学科(東京工業大学交換留学生)

*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 環境・社会理工学院建築学系 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)