

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1:免震周期による必要制御入力エネルギー・パワーの分析)
Title(English)	Controller design for vibration control of high-rise building using combination of active control and passive-base isolation (Part 1:Analysis of relationship between base-isolation period and control energy and control power)
著者(和文)	陳引力, 宮本皓, 佐藤大樹, 余錦華
Authors(English)	Yinli Chen, 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. 695-696
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 695-696
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1: 免震周期による必要制御入力エネルギー・パワーの分析)

免震構造	アクティブ制御	最適制御	正会員	○陳 引力*	正会員	宮本 皓*
応答制御	エネルギー	LQR	正会員	佐藤 大樹**	正会員	余 錦華***

1.はじめに

地震時に建物が崩壊することを防ぐことのみならず、損傷を最小限にすることを目的として、現在では多くの建物が免震を採用している。近年では、パッシブ免震とアクティブ制御を併用したハイブリッド制御により、更なる制御性能を引き出す研究も報告されている(例えば[1]~[3])。しかし、これらの研究は、免震層を設計する際にアクティブ制御を併用することは考慮されていない。制御対象によって「制御のしやすさ」が異なるため、免震の設計によって、望まれる応答制御性能が得られない可能性もある。このことに注目し、筆者らはアクティブ制御とパッシブ免震を併用する際の、免震周期の設定に着目をし、研究を行ってきた([4])。その結果、免震周期が長くなることにより、建築物の層間変形角や層せん断力係数などの応答を抑えることができるものの、必要となる制御入力が大きくなることがわかった。

本報その1では、免震周期を変化させることによる、制御入力エネルギー、制御入力パワー(単位時間でのエネルギー)と免震層の減衰力エネルギーの比率について考察を行い、その2では、免震周期ごとの、制御系設計のための重み関数設定方法や、それによる制御性能の考察を行い、パッシブ免震とアクティブ制御を併用する際の、免震周期の設定方法の検討をさらに深め、超高層建築構造物の免震構造の実現を目的とする。

2.対象モデルと検討用地震

本報では、平面形を $B \times D = 40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 、高さを $H = 200\text{ m}$ 、建物密度を $\rho_f = 1715\text{ N/m}^3$ 、1次固有周期を $T_u = 5.0\text{ s}$ とする建築構造物を10質点系のせん断型モデルを用いてモデリングするものを用いる。

剛性については文献[5]と同様の方法で与えられ、粘性は減衰定数が $h_u = 0.02$ とする際の剛性比例型とする。

上記の10質点の上部構造モデルの下に免震層を設置し、11質点のモデルとして免震モデルの解析を行う。免震層の密度を 2551 kg/m^3 と仮定し、建物の平面形状 ($40\text{ m} \times 40\text{ m}$) から免震層の質量 m_b を計算する。免震周期に対する減衰率を $h_b = 0.05$ とする。本報では天然ゴム系積層ゴムと粘性系ダンパーによる免震層を想定する。免震層の剛性 k_b と粘性係数 c_b は上部構造を剛体と仮定する場合の周期 T_b (以下免震周期) を用いて以下の式により算出する。

$$k_b = \frac{T_b^2}{4\pi^2 (\sum m_s + m_b)} \quad (1)$$

$$c_b = 2h_b \sqrt{(\sum m_s + m_b) k_b} \quad (2)$$

ここで、 $\sum m_s$ を上部構造の全質量、 m_b を免震層の質量を表

す。また、検討用地震動は、コーナー周期 $T_c = 0.64\text{ s}$ 以降の領域で、擬似速度応答スペクトル $\rho S_V = 100\text{ cm/s}$ ($h = 5\%$) となる模擬地震動波形 Art Hachinohe (位相特性: Hachinohe 1968 EW) を用いる(図1)。

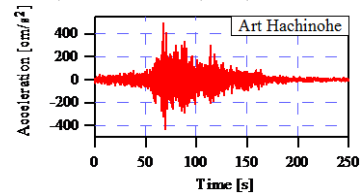


図1. Art Hachinohe 波の加速度波形

3.制御系の設計について

本報では以下のLQR(Linear Quadratic Regulator)評価関数を用いてコントローラの設計を行う。

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

ここで、 $X = [x^T \quad \dot{x}^T]^T$ とし、 x は各階の相対変位ベクトル、 u は制御入力、 Q と R はそれぞれ X と u に対応する重み係数を表し、本報では以下の重み関数を用いる：

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

4.時刻歴応答解析結果

本報は上部構造の固有周期が $T_u = 5.0\text{ s}$ のモデルに対して免震周期が $T_b = 6.0\text{ s}, 8.0\text{ s}, 10.0\text{ s}, 12.0\text{ s}, 14.0\text{ s}, 16.0\text{ s}, 18.0\text{ s}, 20.0\text{ s}$ である免震層を設置するモデルを用いて解析を行う。本報では、コントローラの設計は、Art Hachinohe 波入力時に免震層の最大変位が 60 cm 程度になるように設計する。また、本報では、最も振動応答の差が大きい $T_b = 6.0\text{ s}$ と 20.0 s モデルのみの応答を示す。

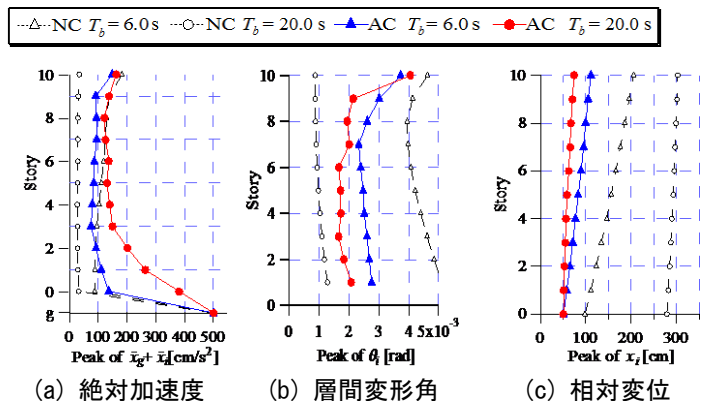


図2. 各モデルの応答

Controller design for vibration control of high-rise building using combination of active control and passive-base isolation (Part 1: Analysis of relationship between base-isolation period and control energy and control power)

Chen Yinli, Kou Miyamoto, Daiki Sato, Jinhua She

図2中において、NC (No Control)はアクティブ制御なしの結果を表し、AC (Active Control) はアクティブ制御の結果を表す。また、図の縦軸において、0は免震層を表し、gは地面を表す。本報の結果より、免震周期が長くなると層間変形角の応答は10層目を除き小さくなる傾向があり、免震周期が短い免震層を用いると絶対加速度の応答を抑えられることが確認された。

また、免震周期と最大制御入力を図3に表す

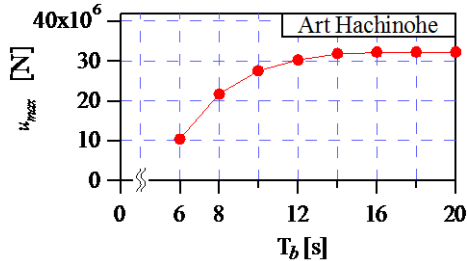


図3. 免震周期と最大制御入力との関係

図3より免震周期 T_b を長くすることにより最大制御入力 (u_{max}) が大きくなることが確認された。

また、図4に免震周期と制御に必要なエネルギー (W_u) との関係を示し、図5に免震周期と制御入力の最大の制御入力パワー (単位時間のエネルギー) との関係を示す。特に、 $T_b = 6.0$ s と 20.0 s の制御入力パワーの時刻歴応答

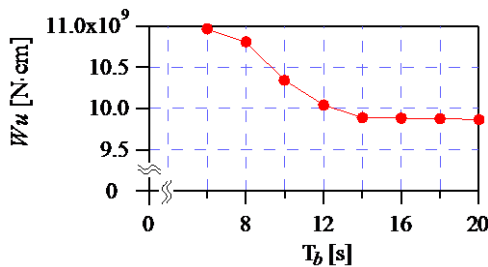


図4. 各周期の制御入力のエネルギー

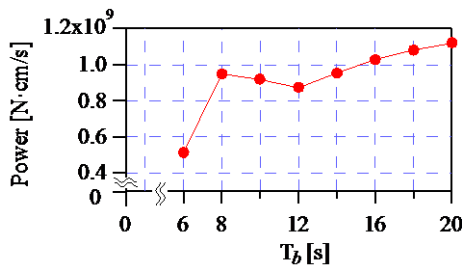
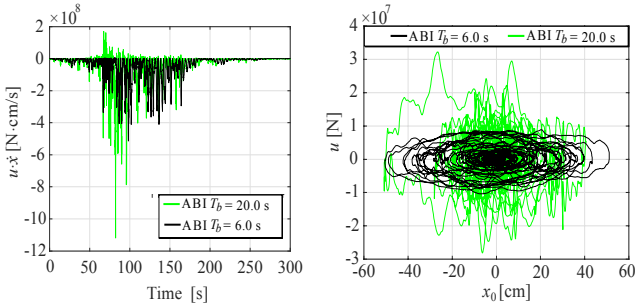


図5. 周期と制御入力の最大制御パワーとの関係



(a) 制御パワー時の時刻歴応答図 (b) 制御入力と免震層変位との関係

図6. $T_b = 6.0$ s と 20.0 s の制御入力

と、制御入力と免震層変位を図6(a)と図6(b)に示す。

図3より、免震周期が長くなると最大制御入力が大きくなる。これは、免震周期が長くなるにつれて、免震層の最大変位が大きくなり、許容変位範囲内に抑えるにはより大きい制御入力が必要であることが考えられる。

また、図4より、免震周期が長くなれば、制御入力のエネルギーは小さくなるが、図5から、免震周期が長くなると制御入力のパワーは大きくなることが分かる。

これは、 $T_b = 6.0$ s は制御入力やそのパワーの最大値は $T_b = 20.0$ s と比較して小さいものの、制震時は常に最大に近いパワーを用いていることが考えられる。一方、 $T_b = 20.0$ s は、ある瞬間のみ大きいパワーを用いているが、その他の時間は $T_b = 6.0$ s よりも小さいパワーを用いていることから、合計の使用エネルギーが $T_b = 6.0$ s よりも少なくなったことが考えられる。

図6(a)に $T_b = 6.0$ s と 20.0 s のパワーの時刻歴応答を示し、(b)に制御入力と免震層変位を示す。(a)の結果より、実際に、 $T_b = 20.0$ s のモデルでは、70 s 時に非常に大きいパワーを必要とするが、100 s 以降のパワーは $T_b = 6.0$ s のモデルよりも少ない。一方、 $T_b = 6.0$ s のモデルでは、最大パワーは $T_b = 20.0$ s モデルよりも少ないものの、全体にわたって最大値に近いパワーで制御を行っている。

5.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する際の周期) が長くなれば、アクティブ制御に必要な最大制御入力は大きくなり、制御入力の最大パワー (制御入力と速度の積、単位時間の使用エネルギー) も大きくなる。
- 2) 一方、制御に用いたエネルギーは免震周期が長くなることにつれ、小さくなる傾向にある。
- 3) 免震周期 $T_b = 6.0$ s の建物モデルでは、振動制御時は常に最大値に近い制御入力とパワーを必要とするが、一方で $T_b = 20.0$ s の建物ではある瞬間のみ大きい制御入力とパワーを必要とし、それ以外の時刻において、必要な制御入力とパワーが小さくなる傾向にある。

参考文献

- [1] 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. 7.
- [2] 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. 1.
- [3] 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震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. 1.
- [4] 宮本皓, 佐藤大樹, 林岑蔚, 余錦華: 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), 日本建築学会関東支部研究報告集, 2017. 2.
- [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震構造物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. 5.

*東京工業大学, 環境・社会理工学院建築学系

**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

** Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

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