T2R2東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech 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	佘 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×D=40 m×40 m、高さを H=200 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/m²と仮定し、建物の平面形状 (40m ×40m)から免震層の質量mbを計算する。免震周期に対す る減衰率をhb=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 性なと粘性係数な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。

$$k_{b} = \frac{T_{b}^{2}}{4\pi^{2}(\sum m_{s} + m_{b})}$$
(1)

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

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)

○陳	引力*	正会員	宮本 皓*
佐菔	፟ 大樹∗	* 正会員	佘 錦華***

す。また、検討用地震動は、コーナー周期 T_c = 0.64 s 以 降の領域で、擬似速度応答スペクトル $_pS_V = 100 \text{ cm/s}$ (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)。



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。

$$J = \int_{0}^{\infty} \left(X^{T} Q X + u^{T} R u \right) dt$$
(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:

$$Q = \begin{bmatrix} K \times 10^{\alpha} & \\ & M \times 10^{\beta} \end{bmatrix}, \quad R = 10$$
(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 s のモデルに対し て免震周期が T_b=6.0 s, 8.0 s, 10.0 s, 12.0 s, 14.0 s, 16.0 s, 18.0 s, 20.0 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 $T_b = 6.0 \text{ s} \ge 20.0 \text{ s} = \mathcal{F} \mathcal{V}$ のみの応答を示す。



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より免震周期 T_b を長くすることにより最大制御入 $f(u_{max})$ 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, $T_b = 6.0 \text{ s} \ge 20.0 \text{ s}$ の制御入力パワーの時刻歴応答



^{*}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)

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、 $T_b = 6.0 \text{ s}$ は制御入力やそのパワーの最大値は $T_b = 20.0 \text{ s}$ 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 $T_b = 6.0 \text{ s}$ 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 $T_b = 6.0 \text{ s}$ よりも少な くなったことが考えられる。

図 6(a)に $T_b = 6.0 \text{ s} \geq 20.0 \text{ s}$ 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、 $T_b = 20.0 \text{ s}$ 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 $T_b = 6.0 \text{ s}$ の モデルよりも少ない。一方、 $T_b = 6.0 \text{ s}$ のモデルでは、最 大パワーは $T_b = 20.0 \text{ s}$ 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。

- 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。
- 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

- 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,佘錦華: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.

*Tokyo Institute of Technology

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

^{***}東京工科大学,工学部機械工学科,教授,博士(工学)