

アクティブ制御を併用した超高層免震建物の風応答予測

東京工業大学 ○佐藤大樹 1*
東京工科大学 余 錦華 2**

アクティブ制御 超高層免震建物 風応答予測
風方向風力 平均変位 制御力

研究の目的

2011年に発生した東日本大震災では免震建物の高い耐震性能が一般に知られるようになり、益々免震構造を採用した建物が増えることが予想される。免震構造は比較的剛性の高い上部構造の下に、相対的に剛性の低い免震層を設置することで地震入力を低減するシステムである。そのため、1995年当初は、剛性の高い低層の建物のみに免震構造が採用されていた。しかし、社会の耐震安全性に対する関心の高まりとともに、超高層建物に免震構造を採用することが求められてきている。超高層建物に免震構造を採用すると、免震層の剛性をさらに低下させる必要がある。さらに加えて、免震建物の高層化は建物の作用する風力の増大をも引き起こすため、台風などの強風時には長時間大きな振動が発生するなどの問題点がある。そこで本研究目的は、アクティブ制御を用いた超高層免震建物の（簡易）風応答予測手法の確立である。

研究の内容

現在のアクティブ制御の設計は、要求される性能を満足するように試行錯誤で複数のパラメータを変更しながら行っている。しかし、アクティブ制御のアルゴリズムがブラックボックスとなっている点が多いため、一般の構造設計者にとって応答性状を把握することが困難となっている。そこで本研究ではアクティブ制御においても等価剛性（周期）や等価減衰といった、これまでの耐震設計で用いられていた性能評価手法を導入^{1),2)}することで、設計者がアクティブ制御を用いた免震建物の耐風性能を把握できる手法を提案する。これにより、時刻歴応答解析による試行錯誤を繰り返してきた従来の方法を脱却し、最適な応答を得るためのパラメータ設定が容易になるだけでなく、アクティブ制御を用いない従来のパッシブタイプの免震建物との耐風性能評価の比較を同じ土俵で行うことができるようになる。

研究の成果、新発見

<設計方法と設計例>

- Step 1. 風力の再現期間、上部構造の諸元と免震層の諸元を決める。
- Step 2. 最大変位と最大制御力の制限値を決める。設計

例としては最大制御力の制限値と免震層最大限変位の制限値をそれぞれ 1×10^7 N 及び 40 cm にする。

- Step 3. 文献 1)より、モデルの平均変位と平均制御力を予測する。予測された免震層の平均変位と平均制御力を Fig. 1 に示す。

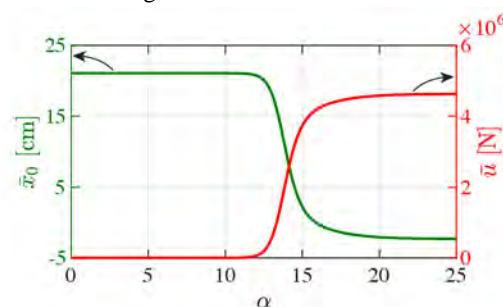


Fig. 1 Mean displacement and mean control force

- Step 4. 式(1)と式(2)を用いて変位と制御力のガストファクター G_D を計算する。計算された変位と制御力のガストファクター G_D, G_u を Fig. 2 に示す。

$$G_D = 1 + g_D \frac{C_g'}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D} \quad (1)$$

$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}(\max X - \bar{X})\omega_1}{K_{PD}\bar{X}} \quad (2)$$

$$= G_D + \frac{K_{PV}(G_D\bar{X} - \bar{X})\omega_1}{K_{PD}\bar{X}}$$

記号については文献 2)を参照のこと。

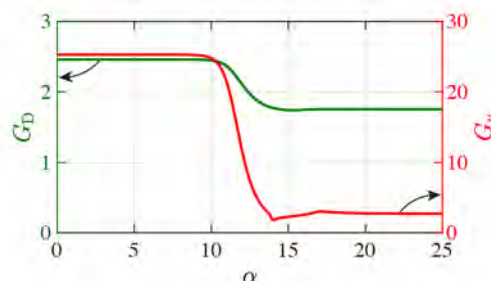


Fig. 2 Gust factors for displacement and control force

- Step 5. Step 3 で得られた平均変位・平均制御力と Step 4 で得られたガストファクターを用いて、最大変

位・最大制御力を予測する。Fig.1 と Fig.2 を用いて、予測された最大変位 x_0 と最大制御力 u を Fig. 3 に示す。

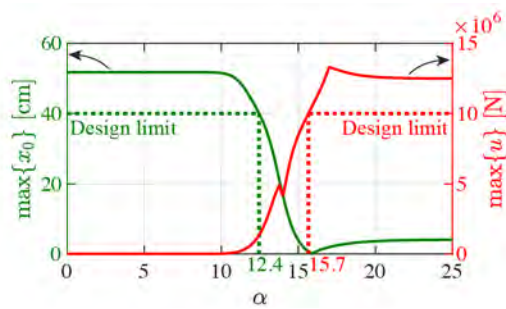


Fig. 3 Maximum displacement and mean control force

Step 6. Step 5 で予測された最大変位と最大制御力が Step 2 の制限値を全て満たす場合は、その重み関数 α を選択し、次の Step に進む。満たさない場合は Step 1 に戻り、免震層の設計値を見直す。Fig. 3 より $12.4 < \alpha < 15.7$ の場合、設計の制約条件 (Design limit) を満たすことがわかる。

Step 7. Step 1 で設計された免震周期・免震層減衰比と Step 6 で得られた重み関数を用いて、制御系を設計する。式(3)を用いて、フィードバックゲインを計算し、制御系を設計する。詳細は文献 1～3)を参照のこと

$$A^T P + PA - PB_u R^{-1} B_u^T P + Q = 0 \quad (3)$$

Fig. 4 に時刻歴応答解析の結果より得られた各層の最大変位 ($\max X$), 最大速度 ($\max \dot{X}$), 最大加速度 ($\max \ddot{X}$) と最大層間変位 ($\max \Delta X$) を示す。Fig.4 より、本手法で設計されたアクティブ制御を用いることで免震層の変形を 40 cm 以

下となっていることが確認でき、本手法の妥当性が確認された

今後の予定

本研究では風方向入力に対する静的な力の釣合を用いることで、時刻歴応答解析を用いた試行錯誤なしに適切な免震層やアクティブ制御のパラメータを設計する手法を示した。今後は風直交方向も考慮した設計手法に拡張する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京工業大学博士課程の陳引力氏に多大なる協力を得た。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華, アクティブ制御を併用した超高層免震建築物の風方向風力に対する制御系の設計方法, 構造工学論文集, vol. 64B, pp. 199-206, 2018.3
- 2) 陳引力, 佐藤大樹, 余錦華, 宮本皓: アクティブ制御を併用した超高層建物の風方向応答の予測, 風工学シンポジウム講演梗概集, No.26, pp.114-119, 2020.11
- 3) Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto and Jinhua She : Estimating the maximum response and maximum control force for high-rise base-isolated buildings with active structural control in along-wind direction, Engineering Structures, Vol.216, 110712, 2020.8

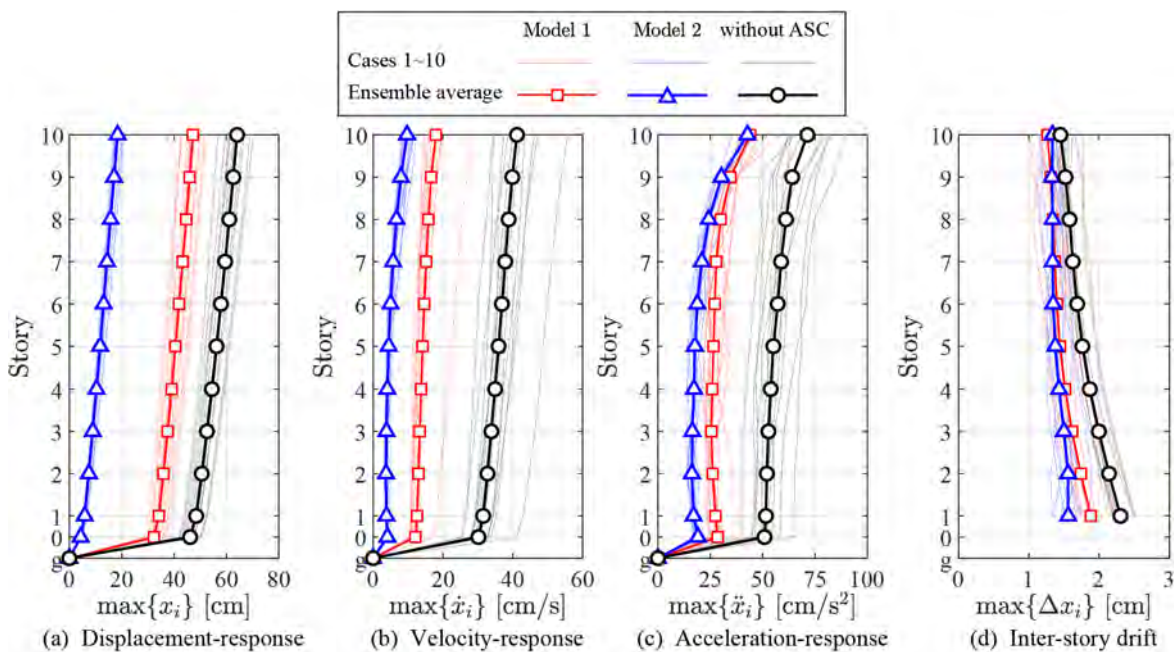


Fig. 4 Simulation results

*東京工業大学・准教授

**東京工科大学・教授

* Tokyo Institute of Technology

** Tokyo University of Technology