

居住性を考慮した超高層建物のアクティブ振動制御の検討

鹿児島大学 学生会員 赤坂 諒貴
鹿児島大学 正会員 三浦 奈々子

1. 序論

近年、首都圏から地方まで超高層建物の建造が増加している。そして東北地方太平洋沖地震の発生により首都圏にある超高層建物が激しく揺れ、室内では家具や什器などの転倒や移動が発生した。また地震動が収束しても建物自体は共振によって長時間揺れ続け、居住者に恐怖感や船酔いのような気持ち悪くなる症状が発生したことが報告されている^[1]。したがって地震対策としては建物の構造的安全性確保だけでなく居住性を考慮する必要があると考えられる。そのため建物の変位応答や絶対加速度応答の最大値のほかに、居住性に影響する人間が特に振動に対して敏感であるとされる 2 Hz 以下^[2]の建物加速度の周波数成分の低減が重要と考えられる。

本研究では地震時における超高層建物のアクティブ振動制御において構造的安全性と居住性向上を目的とした制御系設計法について検討する。

2. 解析対象

解析対象として図 1 に示す層数 60 (= n)、階高 4 m、制御装置を最上層に設置した超高層建物を考える。

運動方程式は式(1)のように表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\{1\}\ddot{x}_g + \mathbf{f}u \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ は質量行列、 $\mathbf{C}$ は減衰行列、 $\mathbf{K}$ は剛性行列、 $\mathbf{x}$ は建物基礎部に対する相対変位ベクトル、 x_g は基礎部の絶対変位、 $\mathbf{f}$ は制御力の分配ベクトル、 u は制御力である。

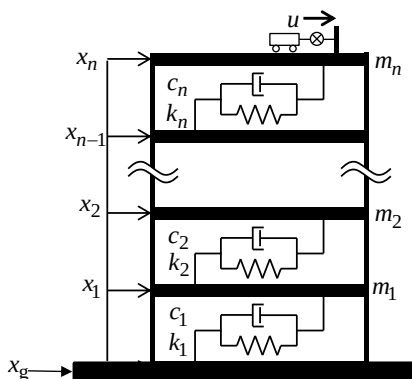


図 1 解析モデル

3. 制御系設計

本研究では式(2)で表される最適レギュレータの評価関数 J の制御量項の設計から建物の居住性向上を達成する。

$$J = \int_0^\infty \{ \sum (\text{制御量})^2 + (\text{制御力})^2 \} dt \quad (2)$$

式(2)は展開して整理することにより最適レギュレータの一般式として、状態ベクトル $\mathbf{x}_{ss} = \{\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T\}^T$ および制御力ベクトル $\mathbf{u}$ を用いて次のような 2 次形式で表される。

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}_{ss}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_{ss} + 2\mathbf{x}_{ss}^T \mathbf{S} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (3)$$

ここで重み行列 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{S}$ は半正定条件、 $\mathbf{R}$ は正定条件のもと自由に設計することができる。式(3)を最小とする最適制御入力 は次式で与えられる。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{F}\mathbf{x}_{ss} \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{S}^T + \mathbf{B}^T \mathbf{P}) \quad (5)$$

ここで $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ はシステムを状態空間表現した際の係数行列である。 $\mathbf{P}$ は以下の Riccati 方程式から一意に決定される。

$$\begin{aligned} &\mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{S}^T) + (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{S}^T)^T \mathbf{P} \\ &- \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} - \mathbf{S}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{S}^T = \mathbf{O} \end{aligned} \quad (6)$$

制御により抑える建物応答（制御量）として絶対加速度、速度、変位、層間変形角などが考えられる。それぞれ絶対加速度や速度は室内の家具や什器などの転倒や移動、人の感じる恐怖感、変位や層間変形角は建物の構造的損傷に関係する。そのため制御量として絶対加速度、速度、変位、層間変形角を表 1 のように設定し、それぞれのケースについて比較検討を行う。

4. 検証結果

本研究では超高層ビルに被害が発生した事例を参考に、25 cm/s に正規化した 2011 年東北地方太平洋沖地震 KiK-net 大阪地表観測記録 NS 成分を入力した。ここで周波数応答（絶対加速度）を他のケースと比べて最も低

減することができたケース 2 について結果を示す。

横軸をそれぞれ最大変位，最大絶対加速度とし縦軸を階数としたグラフを図 2 および図 3 に，横軸を振動数，縦軸を周波数応答としたグラフを図 4 に示す．図 4 は非制御時，制御時ともに 1～60 層の周波数応答を示している．なお非制御時は黒で，制御時には 1 層の周波数応答を青色，60 層の周波数応答を赤色で表し，青色から赤色に変化させることで 1～60 層の周波数応答を表した．

制御により各層の変位をおよそ 1/3 に抑えることができた．

絶対加速度については非制御時に最上層でおよそ 1.15 m/s^2 で，制御時には最上層でおよそ 0.5 m/s^2 と低減できた．また，図 4 の周波数応答については非制御時と，制御時を比べると，1 次，2 次，3 次固有振動数での値を大幅に低減することができていることが分かる．すなわち制御により人間が特に振動に対して敏感であるとされる 2 Hz 以下の周波数帯域を確実に低減できることが分かった．

5. 結論

本研究では地震時における超高層建物のアクティブ振動制御において構造的安全性と居住性向上を目的とした制御系設計法について検討した．1～60 層の層間変形角と 1～60 層の絶対加速度を制御することで，変位と絶対加速度を十分に抑えることができた．また，居住性に関係する 2 Hz 以下の振動数を減らすことができた．

今後の課題として，地震動の特性が制御性能に与える影響についての検討が挙げられる．

謝辞

本研究の解析には防災科学技術研究所 KiK-net の地震観測記録を用いた．記して謝意を表する．

参考文献

- [1] 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料，No. 674，建築研究資料，No. 136, 2012.3
- [2] 菅原能生：最新の車両の振動制御，日本機械学会誌，Vol. 117, No. 1152, pp. 728-731, 2014.11

表 1 検討ケース

	加速度	速度	変位	層間変形角
ケース 1	60	×	×	1～60
ケース 2	1～60	×	×	1～60
ケース 3	1～60	60	×	×
ケース 4	1～60	×	60	×

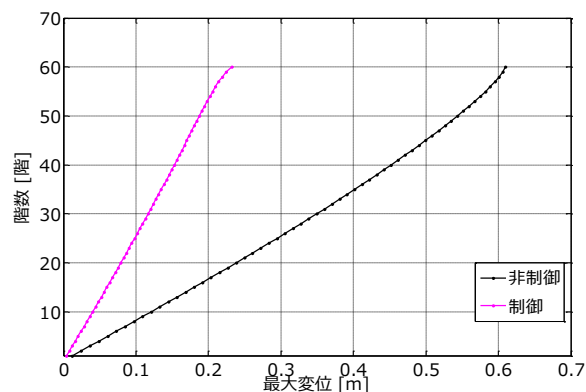


図 2 最大変位応答

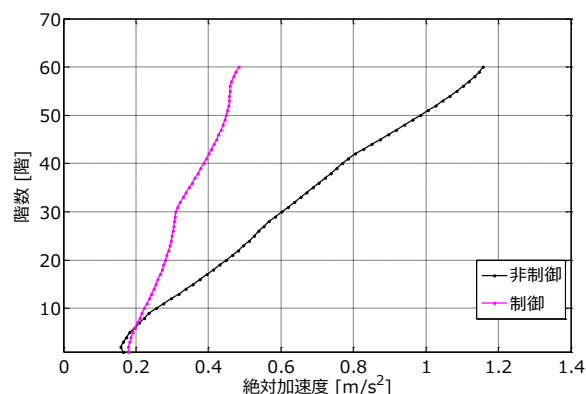


図 3 最大絶対加速度応答

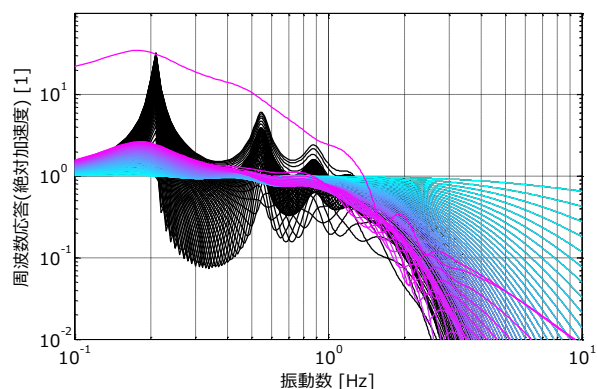


図 4 周波数応答