

構造物の振動制御における居住性を考慮した制御系設計

Controller Design with Considering Livability for Vibration Control of Building Model

○ 平原 宣光 (長岡技科大院)

正 佐藤 拓史 (長岡技科大)

Nobumitsu HIRAHARA, Nagaoka University of Technology, 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka, Niigata
Hiroshi SATOH, Nagaoka University of Technology

Key Words: Livability, Building model, Vibration control, Traffic vibration

1. はじめに

近年, 都市部における構造物の高層化や軽量化が急速に目立つようになり, 地震動や風のような微振動, 道路や鉄道からの路面振動による構造物への影響が問題視されている. 特に路面振動のような交通振動は, 環境振動のなかで日常的に発生しやすい振動であり, 場合によっては居住性に悪影響を及ぼす. しかし, 構造物の制振¹⁾を題材とした研究^{2), 3)}では, 制振性能の有効性については検討されているが, 居住性に関しての検討が十分とはいえない.

本研究では, 中・高層の建物を想定した5層構造モデルに対して, 居住性を考慮した制御系を構成する. 実プラントに対して低次元化したモデルを用い, 各層において居住性を満足する制御系を構成する. その際, ボード線図の周波数特性と居住性評価を関連付けることにより, 居住性を満足するために必要となる振動低減量を見積もった設計指針を提案する. 提案する設計指針が制御則によらず適応可能であることを, H_{∞} 混合感度問題と最適レギュレータ法を用いて示す.

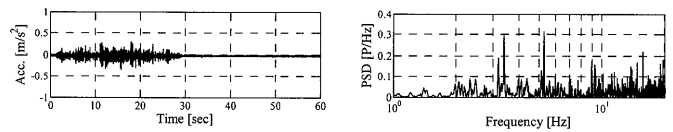
2. 居住性評価

人体への影響の評価指針として, 全身振動暴露の評価に関する指針(ISO 2631)が定められている⁴⁾. 本研究では, このうちの快適性の保持(快感減退境界)を居住性評価指針に採用する.

居住性評価を行うための擬似交通振動をFig. 1(a)のように設定する. $\pm 0.1[m/s^2]$ 程度の大きさの振動が30[sec]間入力され, その後の30[sec]間は振動のないデータである. この振動は高架下の交通振動を想定したものであり, その周波数分析結果をFig. 1(b)に示す. この擬似交通振動が構造物へ加えられた場合の居住性評価をFig. 2に示す. (b)の最上層では1次振動モード(1.47[Hz])が8時間の許容持続時間に達しており, 2次振動モード(4.55[Hz])は16時間の許容持続時間を若干下回る. 一方, (a)の中間層では1次, 2次振動モードとも16時間の許容持続時間に達しており, 中間層では最上層よりも2次振動モードの影響が大きく表れる.

3. 設計指針の提案

居住性を評価することは, 制御性能を評価することと等価である. しかし, 居住性は入力される振動によってその評価も異なってしまう. したがって通常は, 何度も設計を繰り返して, 評価指針を満たすことを確認しなければならない. その繰り返し作業を軽減させるために, ボード線図の周波数特性と居住性評価を関連付けることを考えた. ここでは居住性を満足させるための制御系設計指針を提案する. 地盤入力から最上層までの周波数応答とランダムノイズで作成した振動を入力した際の居住性評価結果をFig. 3に示す.



(a) Acceleration response

(b) Power spectral density

Fig. 1 Traffic vibration

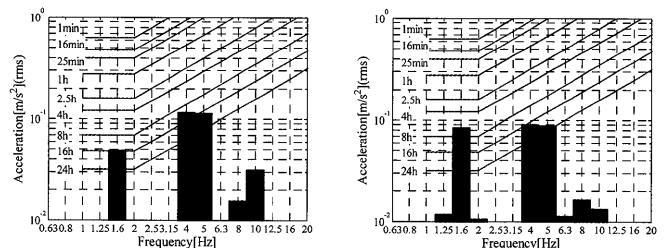
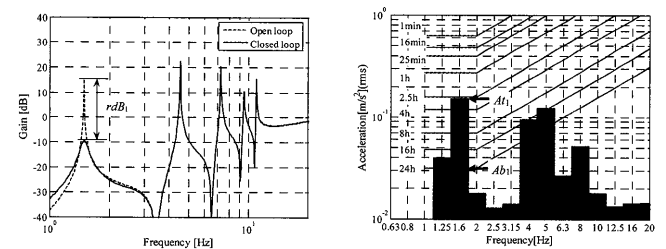
(a) 2nd-floor(b) 5th-floor

Fig. 2 Livability without control



(a) Frequency response

(b) Livability

Fig. 3 5th-floor

ここでは, 1次振動モードを例に説明する. 1次振動モードは最上層で最も大きく現れるので, 最上層のボード線図と居住性評価に着目する. ここで, 入力振動による居住性評価を At_1 とし, 満足させたい居住性評価を Ab_1 とする. このとき居住性が Ab_1 となるために必要なボード線図上のデシベル低減量を rdB_1 とする. この三者の間に成り立つ関係式が式(1)として求めた. 式(1)の係数は実験的に求めた値である.

$$rdB_1 = 2.2Ap_1 - 0.5 \quad (Ap_1 = 20 \log_{10}(At_1/Ab_1)) \quad (1)$$

また, 2次振動モードに対しては, 中間層で卓越するため, 中間層におけるボード線図と居住性評価を同様に対応させると, 式(2)のように求めた.

$$rdB_2 = 1.6Ap_2 - 0.2 \quad (Ap_2 = 20 \log_{10}(At_2/Ab_2)) \quad (2)$$

居住性にはFig. 2の結果から, 1次, 2次振動モードが悪影響を及ぼしているため, この振動モードが顕著に表れる層に対してデシベル低減量を設定すれば良い.

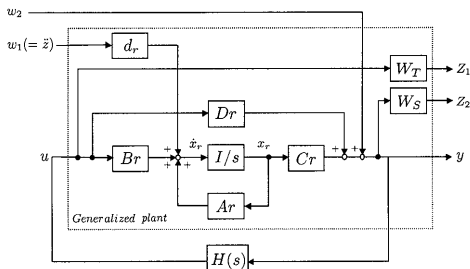


Fig. 4 Generalized plant

4. 制御系設計

4.1 モデリング

5層構造物モデルのモデリングに際しては、以下の仮定を設ける。

1. 構造物の運動は水平 x 方向のみに限定する。
2. 構造物の相対変位, 振子型制振装置の回転角は微小である。
3. 振子型制振装置の駆動用モータは速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動される。
4. 線形化において2次以降の微小項は無視する。

上記の仮定のもと運動方程式を導出する。また、物理パラメータは同定実験により求めた。詳細については文献5)を参照されたい。同定実験の結果より、主構造物モデルの1次~5次振動モードの固有振動数はそれぞれ1.47, 4.55, 7.27, 9.47, 11.49 [Hz]である。得られた5層構造物モデルを、居住性評価結果や従来研究⁶⁾を参考に3次振動モードまで低次元化する。低次元化にはモード打ち切り法を用いた。

4.2 設計指針

本研究では居住性評価で最も厳しい基準である24時間の許容持続時間を満足することを目的とする。この目的を達成するためには、式(1), (2)により、1次振動モードで20[dB], 2次振動モードで13[dB]低減させることが必要となる。

4.3 H_∞ 混合感度問題

構造物に加わる交通振動を外乱 ω_1 と定義し、観測量に重みづけした被制御量 z_1 を定義する。また、低次元化モデルの導出で無視した高次振動モードを加法的な不確かさとして捉え、外乱 ω_2 を定義する。操作量を抑えるために、操作量に重みづけした被制御量 z_2 を定義する。一般化プラントをFig. 4のように構成した。 W_S は感度関数に関する重み、 W_T は相補感度関数に関する重みとなる。ここで、 A_r, B_r, C_r, D_r と d_r は低次元化された制御対象の係数行列と地盤入力を定める行列であり、 $H(s)$ は H_∞ 補償器である。

ここで、不確かさを包含するように重み関数 $W_T(s)$ を以下のように設定する。

$$W_T(s) = \frac{s^2 + 12s + 120}{s^2 + 75s + 3500} \times 30 \quad (3)$$

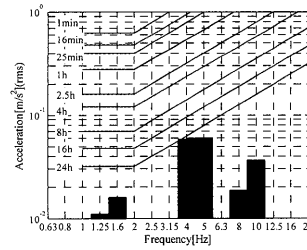
感度関数に関する重み関数 $W_S(s)$ は設計指針を満たすように式(4)のように設定した。 W_{S1}, W_{S2} は中間層, 最上層の絶対加速度 $(\ddot{x}_2 + \ddot{z}), (\ddot{x}_5 + \ddot{z})$ を抑制するための重み関数で、 W_{S3} は振子の回転角 θ を抑制するための重み関数である。

$$W_S(s) = \text{diag}(W_{S1} \ W_{S2} \ W_{S3}) \quad (4)$$

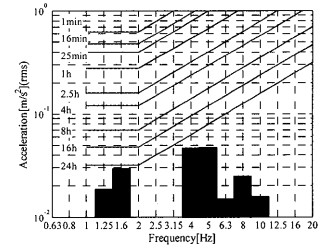
$$W_{S1} = \frac{38}{s^2 + s + 850.25}, \quad W_{S2} = \frac{6.5}{s^2 + s + 90.25}, \quad W_{S3} = \frac{10}{s + 1}$$

4.4 最適レギュレータ法

最適レギュレータ法を適用した場合、速度項に対する重みを大きく設定することで、ダンピング効果を得られることが知られている。そこで、状態量に関する重み $Q \geq 0$, 制御力に

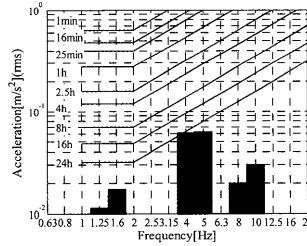


(a) 2nd-floor

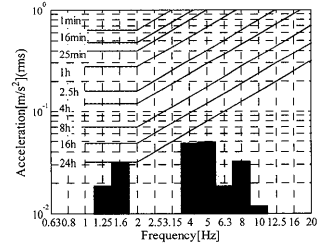


(b) 5th-floor

Fig. 5 Livability with H_∞ controller



(a) 2nd-floor



(b) 5th-floor

Fig. 6 Livability with LQ controller

関する重み $R > 0$ をそれぞれ次式のように設定した。

$$Q = \text{diag}(0 \ 0 \ 0 \ 100 \ 750 \ 110 \ 0 \ 1), \quad R = 1 \quad (5)$$

また、極配置法を用いて同一次元オブザーバを設計した。オブザーバの極はレギュレータの極に対し実部のみを安定側へ移動させた。ここでは1~3次振動モードの極をそれぞれ7倍, 5.5倍, 3.5倍し、振子型制振装置の極を-1移動させた。

6. 制御実験

設計した H_∞ コントローラとLQコントローラを用いたときの居住性評価をFig. 5, 6に示す。各グラフの(a)が中間層, (b)が最上層の居住性評価結果である。

各コントローラとも、24時間の許容持続時間を満足していることが確認できる。ここで提案する設計指針を用いれば、異なる交通振動に対しても居住性を満足する制御系を構成出来ることを確認している。

7. おわりに

本研究では、居住性を満足させるための制御系設計指針をボード線図と居住性評価を関係付けることで提案した。提案する設計指針が制御則や入力振動の違いによらず居住性を満足する制御系設計が可能であることを制御実験により確認した。

参考文献

- 1) 背戸一登, 構造物の振動制御, (2006), コロナ社
- 2) 藤田隆史, 田中清ら, リニアモータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換型マスダンパの大型モデル実験, 日本機械学会論文集C編, Vol.62, No.594(1996), pp100-105
- 3) 安達和彦, 山下博史, 岩壺卓三, 閉ループ系再設計手法を用いた多自由度系に対する制御機構の最適設計, 日本機械学会論文集C編, Vol.67, No.653(2001), pp118-124
- 4) 産業環境管理協会, 新・公害防止の技術と法規 2006[騒音・振動編], (2006), 社団法人産業環境管理協会
- 5) 平原宣光, 大牧仁志, 佐藤拓史, 居住性をふまえた構造物のロバスト振動制御, 第50回自動制御連合講演会論文集, No.07-255(2007), pp31-36
- 6) 尾家直樹, 西村秀和, 下平試司, アクチュエータの制約を考慮に入れたアクティブ動吸振器による構造物の振動制御(多自由度構造物に対する実験的検証), 日本機械学会論文集C編, Vol.68, No.665(2002), pp52-59