

居住性をふまえた構造物のロバスト振動制御

Robust Vibration Control of Building Model with Consideration for Livability

平原 宣光 (長岡技科大) 大牧 仁志 (長岡技科大)
正 佐藤 拓史 (長岡技科大)

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

This paper deals with robust vibration control of building model with consideration for livability. In the vibration control of Middle/High structures, many researches that used the low dimensional model as the design model are reported. The controller which have a high control performance and which does not cause spillover of the disregarded higher-order vibration mode is designed. However, uncertainties of the parameter are not examined enough. And the examination about the livability is insufficient. In this research, we design the robustness controller which considered the disregarded higher-order vibration mode and uncertainties of the parameter. We use \mathcal{H}_∞ mixed sensitivity problem to design the controller and achieve the control system that satisfies the livability. The experimental results show enough livability even if uncertainties of the parameter exist.

Key Words: Robust vibration control, ISO vibration evaluation, Building model, Pendulum type active mass damper, Traffic vibration

1 はじめに

構造物の振動制御における研究は従来から数多く報告されており、多くは同調型マスダンパ (TMD) やアクティブマスダンパ (AMD)、もしくはそれらを組み合わせたハイブリッドマスダンパ (HMD) を用いた研究が行われている。特に中・高層構造物に対しては、AMD や HMD を用いた制振が有効であることから実用化が進められている¹⁾。

構造物に対する制御系設計は、一般的に低次振動モードの振動低減が要求されることから、制御対象を低次元化した設計モデルを用いて制御系を構成する。その際、無視した高次振動モードの励起により発生するスピルオーバー現象を回避するため、ロバスト制御系を構成した研究報告は数多い^{2),3)}。しかし、構造物のパラメータは既知の場合を扱っており、パラメータ推定値の誤差や経年変化などにより設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が生じるような場合についての検討が十分とは言えない。こうしたパラメータ変動やモデル誤差に対しては、 μ 設計を用いて良好な結果を示した報告がある^{4),5)}。

一方、近年では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、絶え間なく入力させる振動源であり、場合によっては居住性に悪影響を及ぼす。しかし、構造物の制振を題材とした研究では、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不十分である。

本研究では、中・高層の建物を想定した5層構造物モデルに対して、居住性をふまえ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導出し、低次元化で無視した高次振動モードと構造物のパラメータ誤差や経年変化などによるパラメータ変動を不確かさとして扱い、スピルオーバー現象を回避する。また、ISO 振動評価により構造物の居住性を評価し、各層において居住性を満足する制御系を構成する。コントローラ設計には \mathcal{H}_∞ 混合感度問題を用いて、コントローラ設計時のパラメータと実プラントのパラメータに誤差がある場合においても居住性を満足する制御系を構成する。そして、制御実

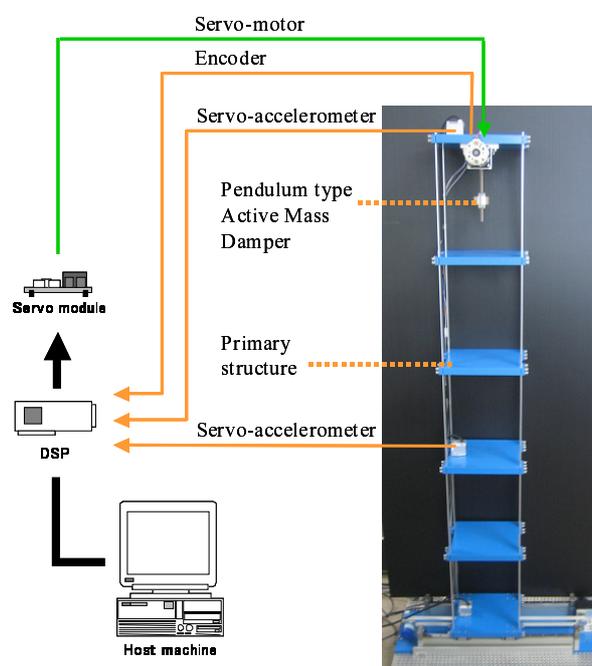


Fig. 1: Experimental building model

験により設計したコントローラの有効性を示す。

2 実験装置

Fig.1 に実験装置の写真を示す。最上層に振り型の制振装置が設置してあり、水平横軸方向のみの運動を考えた構造となっている。基礎部に加振力を加えることにより、構造物に振動を与えることが出来る。振り型制振装置と基礎部には DC サーボモータを用い、速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動する。主構造物の加速度はサーボ型加速度計により測定し、振子の回転角と基礎部の移動距離はエンコーダにより測定する。

構成した5自由度構造物は、高さ 1.65[m]、1層の大きさ 0.2×0.2[m]、層間 0.275[m] である。実験装置の総重量は 35.4[kg] であり、振子の質量比は 1[%] に設定した。主構造物の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。

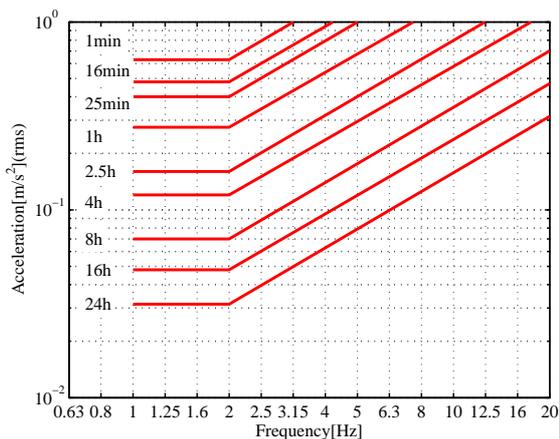


Fig. 2: ISO vibration evaluation (Horizontal direction)

3 居住性評価

居住性の評価として、著者らは振動が人体へ及ぼす影響を評価指針とした。振動が人体へ及ぼす影響の物理的因子としては、振動の強さ、周波数、振動の方向、持続時間という4因子が最も重要と考えられ、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⁶⁾。

3.1 ISO 評価指針 ISO2631 では、振動が人間に及ぼす影響を評価してその限界を定めており、振動の評価に対して3つの区分が設けられている。

1. 作業能率の保持 (疲労・能率減退境界)
2. 健康や安全の保持 (暴露限界)
3. 快適性の保持 (快感減退境界)

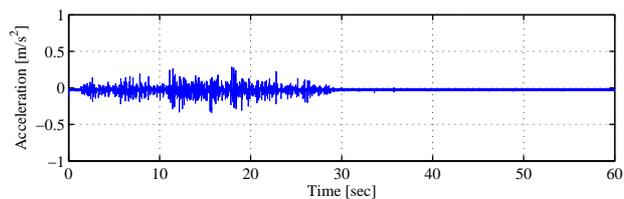
本研究ではこのうち3. 快適性の保持 (快感減退境界) を用いて居住性を評価する。その評価指針を Fig.2 に示す。

縦軸は振動加速度実効値 (rms) を表し横軸は周波数を示す。図の中の曲線は許容持続時間を表しており、振動加速度実効値 (rms) が大きくなるほど、許容持続時間が短くなることを示している。特に、水平方向では1~2[Hz] が最も揺れを感じやすく、周波数が高くなるにつれ感じにくくなることを示している。

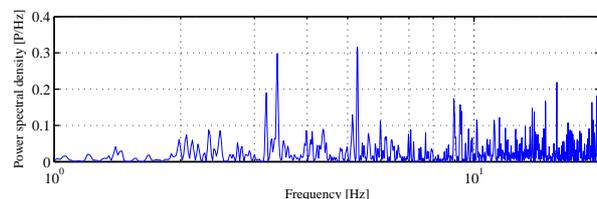
この評価法では振動の周波数分析を1/3 オクターブ分析あるいはそれ以下の狭帯域フィルタを使用することになっている⁷⁾。そのため、本研究では低次数で急峻性の高いチェビチーフ特性を有するバンドパスフィルタを用いて周波数分析を行う。

3.2 擬似交通振動の設定 本研究では、交通振動を模した地盤振動を用いて居住性の評価を行う。ここでは、構造物の固有振動数を包含する1[Hz]~30[Hz]の周波数範囲の振動とする⁷⁾。

交通振動には様々なものが考えられるが、高架道路の周辺地盤上では2~4[Hz]程度に卓越した振動数が生ずることが認知されている^{8),9)}。そこで、本研究では Fig.3(a) に示すような擬似交通振動を設定した。±0.1[m/s²]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。Fig.3(b)より、設定した擬似交通振動は3.3[Hz]、5.1[Hz]付近に卓越した振動数が確認でき、高架道路周辺の交通振動と考えることが出来る。

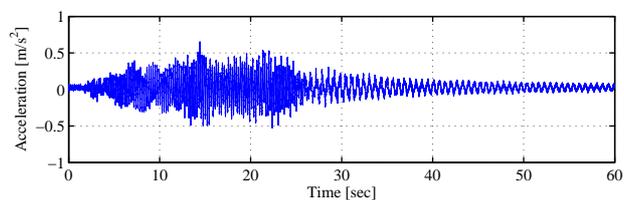


(a) Acceleration response

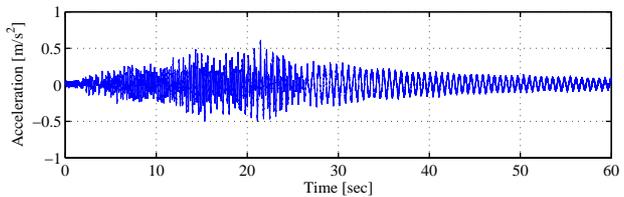


(b) Power Spectral Density

Fig. 3: Traffic vibration

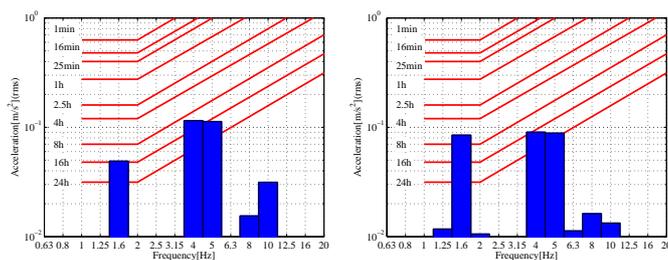


(a) 2nd-floor



(b) 5th-floor

Fig. 4: Acceleration responses without control



(a) 2nd-floor

(b) 5th-floor

Fig. 5: ISO evaluations without control

3.3 制御対象の居住性評価 Fig.3(a)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行う。Fig.4に中間層(第2層)と最上層の加速度応答を示す。(a)が第2層、(b)が最上層の応答結果である。最上層では最大加速度応答が±0.5[m/s²]程度を示している。また、入力がなくなる30[sec]以降は周期的な振動が残りつづけ、60[sec]以降まで振動が持続している。

この時の居住性評価を Fig.5 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

続時間に達している．一方，(a)の第2層では1次振動モード，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，第2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．

4 モデリング

4.1 力学モデル 制御対象とする5自由度振動系の力学モデルを Fig.6 に示す．実験装置のパラメータは同定実験により求め，その値を Table 1 に示す． m_i, k_i, c_i はそれぞれ i 層の質量，剛性，粘性減衰定数である． x_i は基礎部と i 層の相対変位を表し，基礎部から加速度外乱 \ddot{z} が作用する．

最上層に設置した振子型制振装置の回転中心からの距離を l ，鉛直方向下向きからの角度を θ とする．

ここで，モデリングに際し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．

以上の仮定のもとで，構造物の運動方程式は以下のように表される．

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [F]\{u\} + [M]\{e\}\{\ddot{z}\} \quad (1)$$

となる．ここで， $[M], [C], [K]$ はそれぞれ質量行列，減衰行列，剛性行列であり， $\{e\}$ は外乱ベクトル， \ddot{z} は外乱入力， $\{u\}$ は制御力ベクトルである．また， $[F]$ は最上層に働く制御力 f を含む行列である．制御力 f は振子によって与えられる慣性力であり，振子の質量を m_p とすると次式で表される．

$$f = m_p \ddot{x}_p \quad (2)$$

ここで， x_p は振子型制振装置と最上層との相対変位である．仮定より， $x_p = l\theta$ と表されるので，式(2)は

$$f = m_p l \ddot{\theta} \quad (3)$$

となる．また，振子型制振装置は速度制御系が構成されたサーボアンプによって駆動されると仮定しているので，運動方程式は

$$\dot{\theta} = -\alpha\theta + \beta u \quad (4)$$

となる¹⁰⁾．ここで α, β はモータ系の物理パラメータであり， u はモータに加える入力電圧である．

以下に，式(1)で用いた変数の詳細を示す．

$$x = \begin{bmatrix} x_d & \theta \end{bmatrix}^T, \quad x_d = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{bmatrix}^T, \\ M = \begin{bmatrix} M_d & 0 \\ 0 & m_p \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_d & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_d & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix},$$

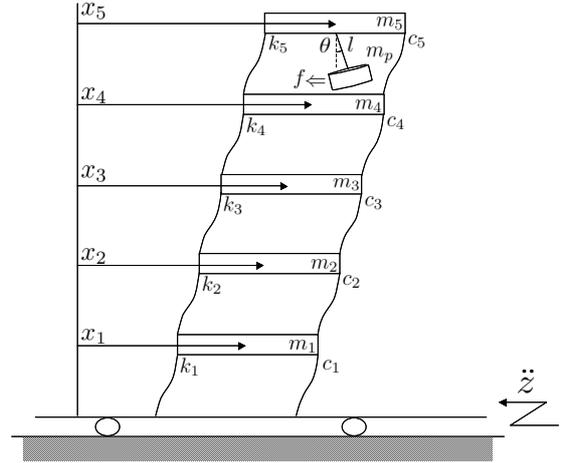


Fig. 6: Dynamical model

Table 1: Parameters of experimental building model

Mass [kg]	Stiffness [N/m]	Damping [N·s/m]
$m_1 = 6.8$	$k_1 = 7000$	$c_1 = 1.8$
$m_2 = 6.8$	$k_2 = 8100$	$c_2 = 1.5$
$m_3 = 6.8$	$k_3 = 8200$	$c_3 = 0.9$
$m_4 = 6.8$	$k_4 = 9200$	$c_4 = 0.3$
$m_5 = 8.15$	$k_5 = 9950$	$c_5 = 0.1$
$m_p = 0.4$		
Shaft length[m]		
$l = 0.105$	Motor system's parameters	
	$\alpha = 1500$	$\beta = 1800$

$$F = \begin{bmatrix} O_{1 \times 4} & m_p l \beta & \beta \end{bmatrix}^T, \quad e = \begin{bmatrix} I_{1 \times 5} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$M_d = \text{diag}(m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4 \ m_5),$$

$$C_d = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 \end{bmatrix},$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m_p l \alpha \end{bmatrix}^T, \quad C_{21} = \begin{bmatrix} O_{1 \times 6} \end{bmatrix},$$

$$C_{22} = -\alpha,$$

$$K_d = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix},$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} O_{1 \times 6} \end{bmatrix}^T, \quad K_{21} = \begin{bmatrix} O_{1 \times 6} \end{bmatrix}, \quad K_{22} = 0$$

式(1)を状態方程式に書き換えると

$$\dot{x}_s = Ax_s + d\ddot{z} + Bu \quad (5)$$

となる．ここで，

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} x & \dot{x} \end{bmatrix}^T, \quad A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} O_{1 \times 6} & F^T \end{bmatrix}^T, \quad d = \begin{bmatrix} O_{1 \times 6} & e \end{bmatrix}^T$$

である．

4.2 低次元化モデルの導出 多層構造物の制振を題材とした研究では、フルオーダーモデルではなく、いくつかの低次振動モードまでを考えた低次元化モデルを用いることが通例となっているため、本研究でも同様に低次元化モデルを導出する。

Fig.5の居住性評価より、本実験では2次振動モードまでが居住性に影響することが確認できる。また、従来研究^{2),3)}では7[Hz]程度までの低次元化モデルを用いることから、本研究では3次振動モードまでを考えた低次元化を行う。

モデルの低次元化は、式(1)にモード座標 η を導入し、 n 次の独立な運動方程式に変換することで行う。モード座標 η を用いると行列 x_r はモード行列 Φ を用いて次のように表すことができる。

$$\{x_s\} = [\Phi]\{\eta\} \quad (6)$$

式(6)を式(1)に代入し、両辺に左から $[\Phi]^T$ を掛けて固有ベクトルの直交性を考慮すると n 次の独立な式に分離することができる。

ここで、 $\Phi^T M \Phi = I$ を満たすように正規化したモード行列 Φ を用いることによりフルオーダーモデルの状態方程式は以下のように表される。

$$\dot{x}_f = A_f x_f + d_f \ddot{z} + B_f u \quad (7)$$

ここでのモード座標系 x_f は

$$x_f = [\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \eta_4 \ \eta_5 \ \eta_\theta \ \dot{\eta}_1 \ \dot{\eta}_2 \ \dot{\eta}_3 \ \dot{\eta}_4 \ \dot{\eta}_5 \ \dot{\eta}_\theta]^T \quad (8)$$

である。ここで、3次振動モードまで低次元化を行うと、状態ベクトル $x_r = [\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \eta_\theta \ \dot{\eta}_1 \ \dot{\eta}_2 \ \dot{\eta}_3 \ \dot{\eta}_\theta]^T$ を用いて状態方程式は次式となる。

$$\dot{x}_r = A_r x_r + d_r \ddot{z} + B_r u \quad (9)$$

また、Fig.5より、1次振動モードと2次振動モードが顕著に表れる最上層と第2層の加速度 $(\dot{x}_5 + \ddot{z})$, $(\dot{x}_2 + \ddot{z})$ と振り型制振装置の回転角 θ が観測できるものとする、出力方程式は

$$y = C_r x_r + d_r u \quad (10)$$

となる。

5 制御系設計

コントローラの設計には3次振動モードまでを低次元化したモデルを用いるが、この際、設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在しない場合(設計モデルA)と誤差が存在する場合(設計モデルB)について設計を行う。近年の構造解析ソフトでは、より正確に実プラントのパラメータを得ることが可能となってきているが¹¹⁾、設計時や施工時、または経年変化などによりパラメータに変動が生じてしまう可能性がある。そこで、本研究では各パラメータに対し $\pm 5[\%]$ の変動を考える。

5.1 設計仕様 交通振動が入力された後の後揺れを素早く収束させることは当然であるが、各層において居住性を確保する制御系を構成する。

Fig.5より、非制御時には最上層の1次振動モードで8[h]の許容持続時間を超えている。本研究では、8時間

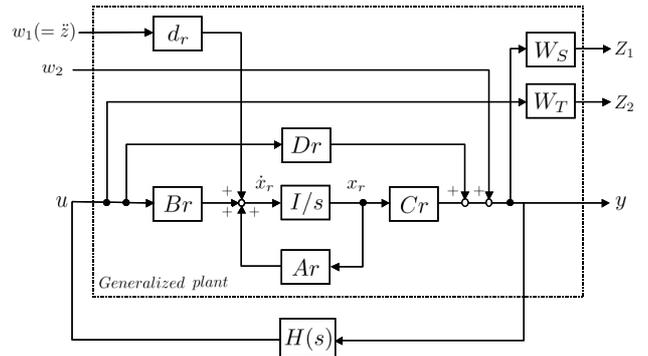


Fig. 7: Generalized plant

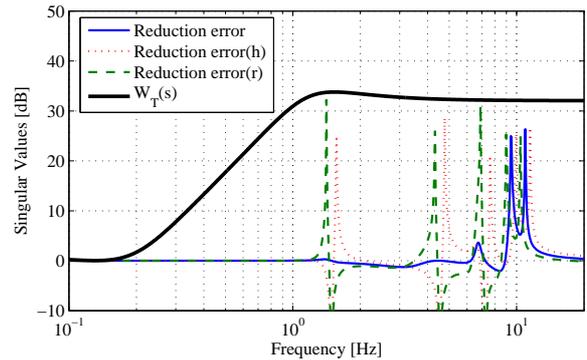


Fig. 8: Additive uncertainties

の許容持続時間は私生活において最低限確保すべきラインであると考えられる。しかし、近年の交通量の増加に伴い、交通振動に対してはより許容持続時間を確保させる必要があると考えた。

そこで、本研究では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制御系を設計する。

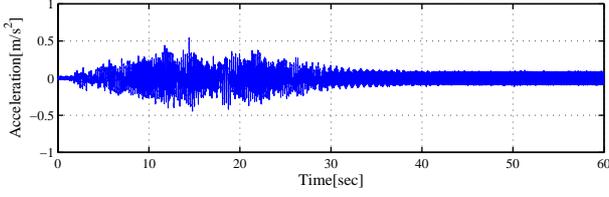
5.2 H_∞ 混合感度問題 制御の目的は交通振動に対して居住性を満足させることにあるので、構造物に加わる交通振動を外乱 ω_1 と定義し、観測量に重みづけした被制御量 z_1 を定義する。また、低次元化モデルの導出で無視した高次振動モードとパラメータの変動によるモデル化誤差をまとめて加法的な不確かさとして捉え、外乱 ω_2 を定義する。操作量を抑えるために、操作量に重みづけした被制御量 z_2 を定義する。

制御対象と重み行列をまとめて一般化プラントをFig.7のように構成した。この様に一般化プラントを構成すると 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。

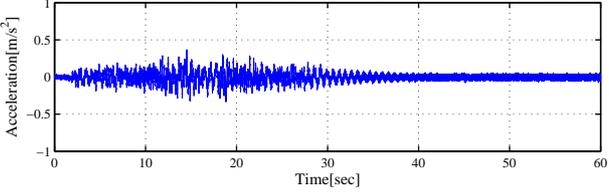
ここで、設定した加法的な不確かさは、Fig.8のように求まる。この不確かさを包絡するように重み関数 $W_T(s)$ を次式のように設定した。

$$W_T(s) = \frac{s^2 + 1.27s + 1.49}{s^2 + 6.7s + 53.29} \quad (11)$$

ここで設定した重み関数が不確かさを包含していることは、Fig.8の通りである。図中のerror(h), error(r)はそれぞれ高周波側と低周波側へのパラメータの変動を仮定した不確かさを表す。パラメータの変動を考えているので、1次~3次振動モード付近の周波数にも不確かさが生じている。

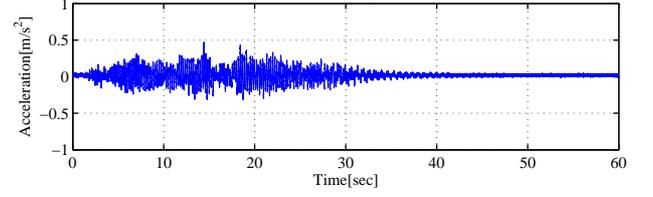


(a) 2nd-floor

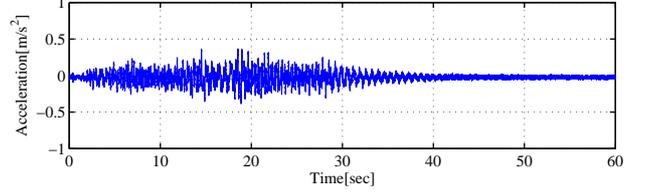


(b) 5th-floor

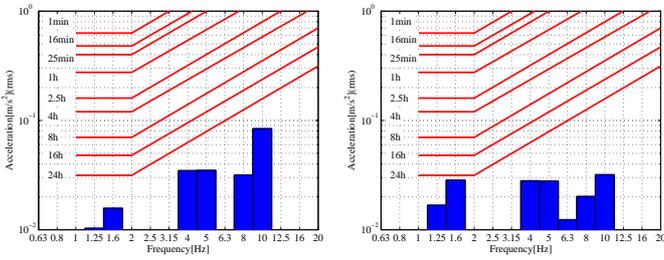
Fig. 9: Acceleration responses with LQ controller for designed model A



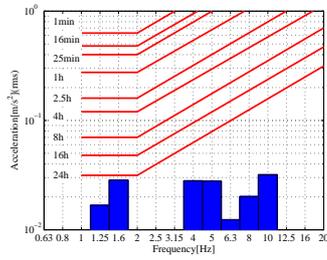
(a) 2nd-floor



(b) 5th-floor

Fig. 11: Acceleration responses with \mathcal{H}_∞ controller for designed model A

(a) 2nd-floor



(b) 5th-floor

Fig. 10: ISO evaluations with LQ controller for designed model A

感度関数に関する重み関数 $W_S(s)$ は式 (12) のように設定した。 W_{s1} , W_{s2} は第 2 層, 最上層の相対加速度 ($\ddot{x}_2 + \ddot{z}$), ($\ddot{x}_5 + \ddot{z}$) 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。

$$W_S(s) = \text{diag}(W_{s1} \ W_{s2} \ W_{s3})$$

$$W_{s1} = W_{s2} = \frac{20}{0.08s + 0.5}, \quad W_{s3} = \frac{20}{0.3s + 1} \quad (12)$$

以上のように決定した周波数重み関数により \mathcal{H}_∞ 補償器 $H(s)$ を設計する。

5.3 最適レギュレータ 最適レギュレータ法は, 次式の評価関数 J を最小にする操作量 u を求めるものであり, 構造物の制振ではよく用いられる設計法である。

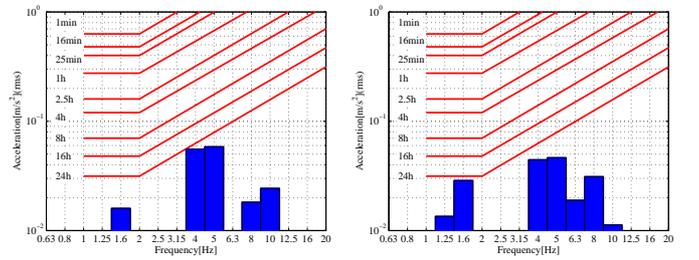
$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (13)$$

ここでは重み $Q \geq 0, R > 0$ をそれぞれ次式のように設定した。

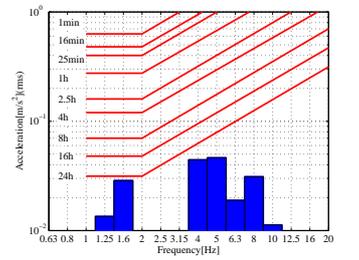
$$Q = \text{diag}(1 \ 1 \ 1 \ 50 \ 2000 \ 1000 \ 100 \ 50) \quad (14)$$

$$R = 1 \quad (15)$$

最適レギュレータ法を用いた制御系では全状態量が必要であるが, 本研究ではその一部しか得ることが出来ないため, オブザーバを設計する。ここでは同一次元オブザーバを設計する。設計には極配置法を用い, オブザー



(a) 2nd-floor



(b) 5th-floor

Fig. 12: ISO evaluations with \mathcal{H}_∞ controller for designed model A

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 次, 2 次, 3 次振動モードの極をそれぞれ 7 倍, 3.5 倍, 2 倍し, 振子型制振装置の極を -1 だけ安定側へ移動させた。

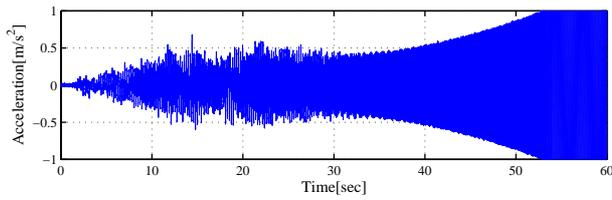
6 制御実験

設計したコントローラを用いて, 3.2 節で設定した擬似交通振動を外乱として与えた場合について実験を行う。

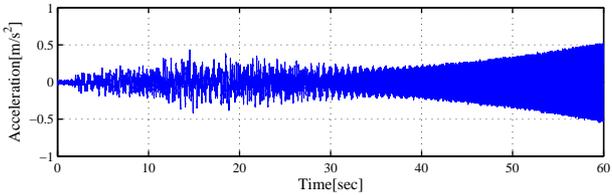
設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在しない場合には, 設計した 2 つのコントローラとも居住性を満足した。しかし, 設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在する場合, LQ コントローラでは設計で無視した 4 次振動モードが励振し, 居住性が満足されない。一方, \mathcal{H}_∞ コントローラでは居住性を満足しており, その有効性が実証できた。

6.1 設計モデル A による実験 設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在しない場合の LQ コントローラと \mathcal{H}_∞ コントローラを用いたときの加速度応答波形を Fig.9, 11 に示す。このときの居住性評価を Fig.10, 12 に示す。各グラフの (a) が第 2 層の実験結果であり, (b) が最上層の実験結果である。

加速度応答波形より, 2 つのコントローラとも制振しており, 設定した居住性も満足していることが確認できる。LQ コントローラではやや 4 次振動モードの悪化が確認できるが居住性は十分満足しているため, 本研究では問題ではないと判断した。

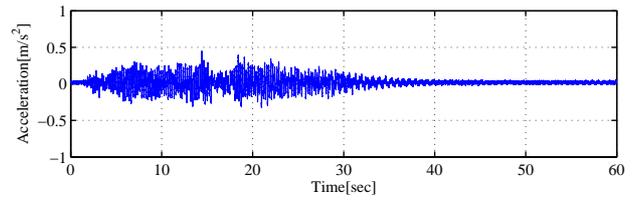


(a) 2nd-floor

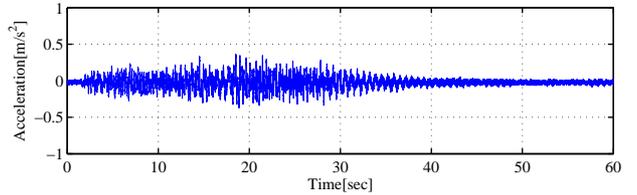


(b) 5th-floor

Fig. 13: Acceleration responses with LQ controller for designed model B

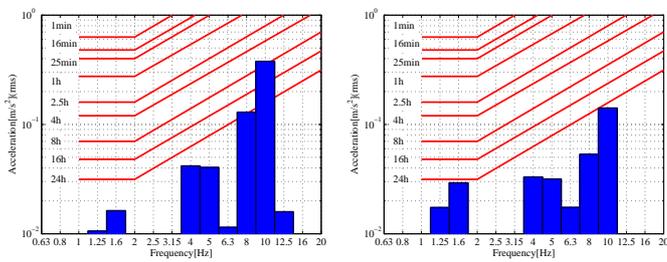


(a) 2nd-floor



(b) 5th-floor

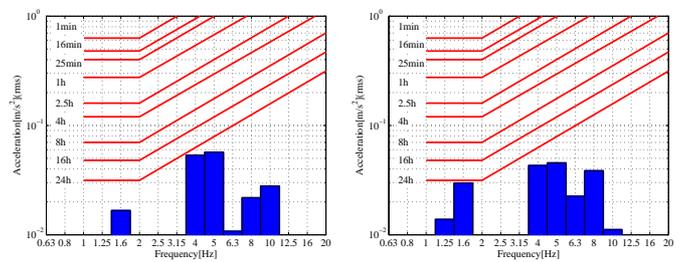
Fig. 15: Acceleration responses with \mathcal{H}_∞ controller for designed model B



(a) 2nd-floor

(b) 5th-floor

Fig. 14: ISO evaluations with LQ controller for designed model B



(a) 2nd-floor

(b) 5th-floor

Fig. 16: ISO evaluations with \mathcal{H}_∞ controller for designed model B

6.2 設計モデル B による実験 設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在したときの LQ コントローラと \mathcal{H}_∞ コントローラを用いたときの加速度応答波形を Fig.13, 15 に示し、このときの居住性評価を Fig.14, 16 に示す。

LQ コントローラでは、設計モデルで無視した 4 次振動モードが悪化し、スピルオーバー現象が発生している。最上層での居住性評価では仕様が満たされているが、これは評価時間が 60[sec] であるためであり、更に評価時間を長くすれば居住性の仕様は満たされなくなることを確認している。一方、 \mathcal{H}_∞ コントローラでは、LQ コントローラのように 4 次振動モードを励起させることなく設計モデル A と同等な制振性能を有していることが確認できる。

この結果より、設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在する場合には、モデルの不確かさを考慮した \mathcal{H}_∞ コントローラは非常に有効であることが実証できた。

7 おわりに

本研究では、5 自由度構造物モデルに対して振子型制振装置を用いた制御系を構成した。実プラントに対して 3 次振動モードまでを考慮した低次元化モデルを導出し、擬似交通振動に対して ISO 振動評価による居住性を満足するコントローラを設計した。 \mathcal{H}_∞ を用いて制御実験により、設計モデルと実プラントのパラメータに誤差が存在

しても、同等の制振性能を有することを確認した。その結果、居住性を満足するロバストな制御系が構成できた。

文献

- [1] 背戸一登, 構造物の振動制御, コロナ社, 2006
- [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・パッシブ切替型マスダンパの大型モデル実験, 日本機械学会論文集, 62-594, C(1996)
- [3] 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, 68-665, C(2002)
- [4] 渡辺亨・吉田和夫, パラメータ変動と非制御モードのモデル誤差を考慮する柔軟構造物のロバスト振動制御, 計測自動制御学会論文集, 32-7 1001/1010(1996)
- [5] 長瀬賢二・早川義一, 制振モードの変動を考慮した μ 設計による主塔模型のアクティブ制振制御, 日本機械学会論文集, 63-607 C(1997)
- [6] 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
- [7] 日本建築学会, 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004
- [8] 中田信治・福和伸夫, 微小振動領域における鉄骨住宅の振動特性と交通振動対策, 日本建築学会構造系論文集, 563, 75-82, 2003
- [9] 石川孝重・野田千津子, 広振動数範囲を対象とした水平振動感覚の評価に関する検討, 日本建築学会計画系論文集, 506, 9-16, 1998
- [10] 片山徹, フィードバック制御の基礎, 朝倉書店, 1997
- [11] 吉田和夫・野波健蔵ら, 機械工学最前線 1 運動と振動の制御の最前線, 共立出版株式会社, 2007