

集客施設で生じるたてのり振動の制御及び人体の動的応答を考慮した不快感の評価に関する研究

名古屋大学 工学部 環境土木・建築学科
建築学コース 福和研究室 小澤摩納

1. はじめに

コンサートホール、ライブハウス等の大規模集客施設において、観客はミュージシャンの演奏に合わせて「たてのり」を行う。「たてのり」とは、『つま先立ち→踵着地→軽い屈伸→つま先立ち』の繰り返しからなる動作のことである¹⁾。多くの観客がたてのりすることにより、構造物床に生じた低振動数の鉛直振動が周辺の地盤に伝播し、その過程で水平成分が増大して、固有振動数の近い建築物の振動を大きく励起するという現象が発生する。そこで現在、たてのり振動の伝播を低減し、同時に観客の快適性を確保するための防振床の開発がなされている。本研究では、防振床の特許技術を持つ日建設計に協力していただき、たてのり振動制御の理論を明らかにすることを目的とする。さらに、防振床の実現に向けて、床の鉛直振動に対して覚える不快感について人体の動的応答を考慮した評価を試みる。

2. たてのり振動制御の理論

たてのり振動を制御するために、建物と床を切り離し、床で生じた振動に対し床独自の振動特性で応答するようにする。厳密に床の応答を計算する際は基礎と地盤との動的相互作用や上部構造の影響等を考慮するが、防振床が基礎直上に設置されるとき、床支持部材の剛性が十分に小さい(理論は後述する)ことから、基礎と地盤との動的相互作用や上部構造の影響は小さいと考えられる。そこで、防振床の検討における第一段階として、これらを考慮せず単純な1自由度系でモデル化する。以上の概念を図1に示す。

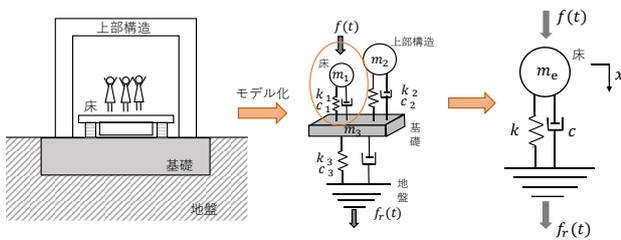


図1 防振床のモデル化

質量 m_e の質点が剛性 k のばねと粘性減衰係数 c のダッシュポットで支えられている1自由度系の倒立振り子モデルについて、質点が鉛直方向に $f(t)$ という外力を受けている時、鉛直方向変位 $x(t)$ が生じている状態を考える。この1自由度系の運動方程式は式(1)で表される。

$$m_e \ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

1自由度系の基本特性から、固有円振動数 ω_e 、減衰定数 h を用いて式(1)を書き換えると、

$$m_e \ddot{x}(t) + 2m_e h \omega_e \dot{x}(t) + m_e \omega_e^2 x(t) = f(t) \quad (2)$$

さらにフーリエ変換し、たてのり振動による加振力を $F(\omega)$ とすると、

$$-\omega^2 X(\omega) + 2h\omega_e i \omega X(\omega) + \omega_e^2 X(\omega) = \frac{1}{m_e} F(\omega) \quad (3)$$

ここから系の応答変位 $X(\omega)$ を求め、2階微分することで次式のように円振動数 ω のたてのり振動による系の応答加速度を得ることができる。

$$-\omega^2 X(\omega) = \frac{-\frac{1}{m_e} \omega^2}{-\omega^2 + 2h\omega_e i \omega + \omega_e^2} F(\omega) \quad (4)$$

次に、たてのり振動による鉛直方向外力 $f(t)$ がどれだけ地盤に伝わるのかを考える。式(1)は次式のように書き替えることができる。

$$m_e \ddot{x}(t) = f(t) - \{c\dot{x}(t) + kx(t)\} \quad (5)$$

運動の第2法則より、右辺は系が受ける外力を示す。 $c\dot{x}(t) + kx(t)$ については負の外力であり、逆に系が地盤に与える力であると考えられることができるので、この2項が地盤に与える力 $f_r(t)$ である。 $f_r(t)$ についてフーリエ変換し、式(3)から求めた $X(\omega)$ を代入することで、系が地盤に与える力 $F_r(\omega)$ を得ることができる。

$$F_r(\omega) = \frac{2h\omega_e i \omega + \omega_e^2}{-\omega^2 + 2h\omega_e i \omega + \omega_e^2} F(\omega) \quad (6)$$

防振床の設計では、まず周辺への影響を低減するために式(6)で与えられる地盤に与える力を小さくすることを優先する。その後、系自身の応答加速度を低減し、観客の快適性を確保することを考える。

2.1) たてのり振動伝播の低減

式(6)から入力 $F(\omega)$ に対する出力 $F_r(\omega)$ の比を増幅率 $R(\omega)$ と呼び、 $\bar{\omega} = \omega/\omega_e$ で基準化すると、次式ようになる。図2に、 $\bar{\omega}$ による増幅率の変化を示す。

$$R(\bar{\omega}) = \frac{2h\bar{\omega}i + 1}{-\bar{\omega}^2 + 2h\bar{\omega}i + 1} \quad (7)$$

式(7)から、増幅率は系の質量には依存しない。また、図2からたてのりの振動数に対して床の固有振動数を小さくすることで、周辺地盤に伝わるたてのり振動を低減することができる。現在提案されている防振床では、たてのりが生じやすい2~3 Hzに対して、床の固有振動数を1 Hz以下に設定している。 $\bar{\omega} = 1$ で系の固有振動数とたてのりの振動数が一致したときには、増幅率の低減に対し減衰が効くが、 $\bar{\omega}$ が2~3となる範囲では減衰定数によって増幅率は大きく変わらない。以上のことから、周辺地盤に伝播するたてのり振動の低減において、系の固有振動数が支配的な要素であることがわかる。

2.2) 系の応答加速度

式(4)において、たてのり振動による加振力に対する応答加速度の比を加速度応答倍率とする。加速度応答倍率から質量の要素を除いた周波数応答関数 $A'(\bar{\omega})$ を考える。次式のように表される $A'(\bar{\omega})$ と $\bar{\omega}$ の関係について図3に示す。

$$A'(\bar{\omega}) = \frac{-\bar{\omega}^2}{-\bar{\omega}^2 + 2h\bar{\omega}i + 1} \quad (8)$$

$A'(\bar{\omega})$ は $\bar{\omega}$ が大きくなると1に近づき、 $\bar{\omega} = 2\sim 3$ で0.8~0.9となる。また、減衰定数による大きな違いも見られない。系の加速度応答倍率は $A'(\bar{\omega})$ に $1/m_e$ を乗じたものである。系の固有振動数を小さくしつつ、系の応答加速度を小さくするには系の質量を大きくすることが有効である。

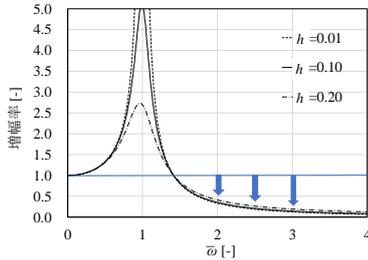


図2 たてのり振動伝播の増幅率

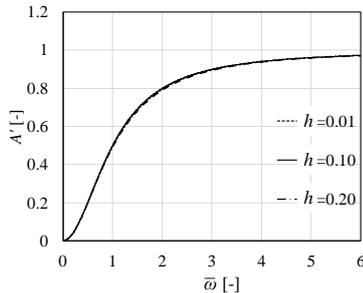


図3 周波数応答関数 $A'(\bar{\omega})$

3. 床鉛直振動に対する不快感

床がどの程度揺れるとき、観客が不快に感じるのかを把握するために、鉛直振動体感試験を行った。試験では、振動台に乗った被験者に 20 gal, 30 gal, 50 gal の床鉛直振動を受けてもらった (写真 1)。振動数は 1.17 Hz, 2.3 Hz, 3.5 Hz の 3 種類とした。被験者には音楽施設の床に対する振動限度とともに、各振動に対する不快感について 8 つの不快感レベル (表 1) からあてはまるものを回答してもらう。被験者は全 33 名で、そのうち 17 名は目隠しをした状態で試験を行い、残る 16 名はヘッドマウントディスプレイを装着し、VR 空間でコンサートを体験しながら試験を行った。



写真 1

表 1 不快感レベル

8:	きわめて不快である
7:	たいへん不快である
6:	かなり不快である
5:	ほどほど不快である
4:	やや不快である
3:	ほとんど不快でない
2:	まったく不快ではない
1:	揺れを感じない

3.1) アンケート結果

たてのりの最も生じやすい振動数帯である 2.3 Hz の振動に対して直立姿勢で試験を行ったとき「音楽施設の床としてどの振動まで許容できるか」という質問に対する回答は、20gal が 14 名, 30gal が 11 名, 50 gal が 8 名という結果となった。この質問に対して、20 gal の振動に対しても許容できないと回答した被験者はいなかった。また、図 4 に VR の有無による不快感の違いを示す。音楽や映像といった条件が加わることで不快感が低減された。図 5 には、直立姿勢で振動を受けたときと、自分もたてのりをした状態で振動を受

けたときの不快感の違いについて示す。たてのりをするによっても、不快感は大幅に低減されている。図 4, 図 5 についてはどちらも 30 gal で加振した場合の結果を例として示している。

3.2) 人体の動的応答と不快感の関係

試験中被験者の腹部に小型加速度計を取り付け、アンケート調査と同時に床振動に対する人体の応答を計測した。床の鉛直振動に対する腹部の振動増幅率を表 2 に示す。人体の鉛直振動に対する振動増幅率は加速度の大きさによらず、振動数のみに依存する。振動増幅率に加振加速度を乗じることで、腹部加速度の平均値を概算し、腹部加速度と不快感の関係について図 6 に示す。スイープ加振試験から床鉛直振動に対する人体での振動増幅率は 5 Hz 付近がピークであることを確認している。既往の研究²⁾においても、鉛直振動に対する人体の頭部・腎部の共振点は 3~6 Hz にあると示されている。床振動の振動数が人体との共振点に近づくほど振動増幅率は大きくなり、腹部加速度が大きくなる。さらに図 6 から、腹部加速度が大きくなると、感じる不快レベルが大きくなるのがわかる。

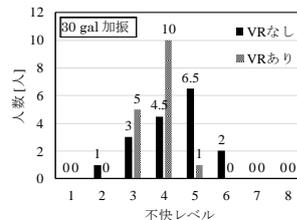


図 4 VR の有無と不快感

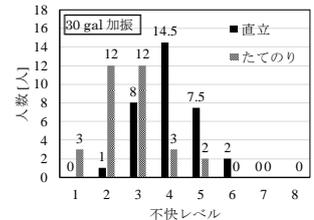


図 5 たてのり時と直立時での不快感

表 2 腹部の振動増幅率

	20gal	30gal	50gal
1.17Hz	0.98	0.91	0.99
2.3Hz	1.11	1.17	1.14
3.5Hz	1.47	1.53	1.57

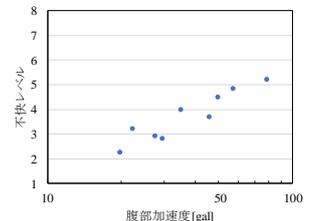


図 6 腹部加速度と不快感レベル

4 まとめ

1 自由度系の運動方程式から、たてのり振動制御の理論を明らかにした結果、周辺地盤に伝播するたてのり振動を低減し、かつ床の応答加速度を小さくするには、系の固有振動数を小さくし、質量を大きくすることが効果的であった。また、床の鉛直振動に対して、人体では 5 Hz 付近をピークに振動を増幅させており、腹部加速度と不快感の大きさには正の相関があった。すなわち床の鉛直振動について、その振動数が人体との共振点に近く、加速度が大きいほど、人体の応答加速度が大きくなるので不快感を大きく覚える。アンケート結果はある程度の指標になるが、人によって覚える不快感の大きさにはばらつきがあるので、実際に防振床を設計する際は様々な要素を考慮し系の応答をどこまで小さくするか判断する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重設計指針・同解説, 2004 年
- 2) 小堀為雄, 梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法, 土木学会論文報告集, 第 230 号, pp.23~31, 1974 年 10 月