

集客施設におけるたてのり振動の制御に関する多面的研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
福和研究室 博士課程前期課程 2 年 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、観客がミュージシャンの演奏に合わせて「たてのり」を行うと、そこで発生した振動が地盤を伝わり、周辺建築物の振動を大きく励起することがある。このような振動問題に対して、現在明確な対策はなく、解決が急がれる問題の 1 つである。そこで本研究では、たてのり振動問題の解決を目的として、①たてのり振動を制御する防振架構、②観客が感じる不快感、③たてのり加振力の同定、④たてのり振動の地盤伝播、の 4 つの視点から検討を行った。

2. たてのり振動を制御する防振架構

2.1) 防振架構モデル

著者ららは、防振床を 1 質点系のモデルで近似することで、周辺への影響を低減しつつ床自体の応答も小さく抑える振動制御法を提案した。また、構造物内の鉛直振動を抑制するには、加振振動数に対して固有振動数が十分小さく、かつ質量の大きい床が有効であることを示した。さらに、これらの条件を満たす具体的な構造として、単純梁を用いた防振架構の実現性が高いことを確認している。本研究では、単純梁を用いた防振架構を FEM (有限要素法) でモデル化し、その振動特性について分析した結果を報告するとともに、既報りににおける 1 質点近似の妥当性についても検討した。図 1 に、本研究で検証対象とする、2 本の単純梁とおもりからなる防振架構を示す。スパン 11 m の H 型鋼梁を 2 本用い、2 本を繋ぐ直交梁におもりを吊り下げること、大質量・低剛性の防振梁組を実現する。FEM におけるモデルでは、1 本の梁を 22 個の要素に分割し、梁組の減衰定数は振動数によらず 1%、10%、20% で与えた。

2.2) FEM 解析の結果

たてのり振動を想定し、梁を鉛直方向に加振するものとして解析を行った。また、人間が梁全体に分布し同調して動作することを想定し、加振力は梁全体に同位相で与えた。架構の振動制御性能を測る指標として、①振動伝達率、②アクセラランスを定義した。①振動伝達率は、地盤に伝わる力の加振力に対する比で、振動数領域で (支点反力) ÷ (加振力) として算出している。②アクセラランスは加振力に対する梁組の応答の程度を示し、振動数領域で (梁組の中心位置での応答加速度) ÷ (加振力) として算出している。

図 2 と図 3 に、FEM 解析で得た防振架構の振動伝達率とアクセラランスの結果を示す。それぞれ、防振床を減衰定数 10% の 1 質点系に近似して求めた「1 質点近似値」と防振架構の固有振動数を 1 次から 5 次まで重ねて示している。実現現象の中で支配的である 1 次モードの振動特性が、既報で示した 1 質点系のモデルで十分に再現されており、その

妥当性が示された。また図 2 と図 3 を見比べてみると、振動伝達率の結果においては、モードの山と山の間に「反共振」と呼ばれる振動伝達率の谷が存在することがわかる。反共振振動数は、異なる固有モード同士が互いに逆位相で打ち消しあう振動の不動点であり、測定点の応答が極小となる²⁾。つまり、梁組全体が同位相で加振された際に、その振動が外に伝わりにくい特定の振動数が存在する可能性がある。

さらに、反共振振動数が梁組の加振位置や測定位置によって異なることがわかっている。たてのり動作をする人間が偏在している場合には、反共振振動数が変化することを考慮したうえで、今後の検討を進めていく必要がある。

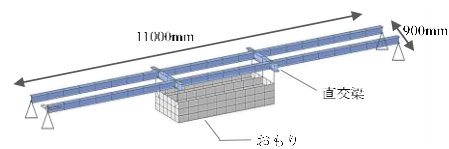


図 1 防振床のモデル化

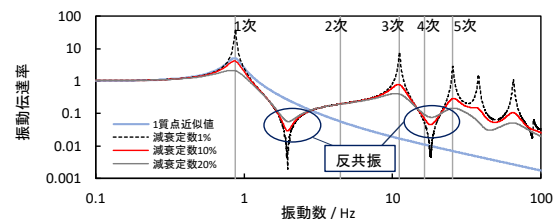


図 2 振動伝達率

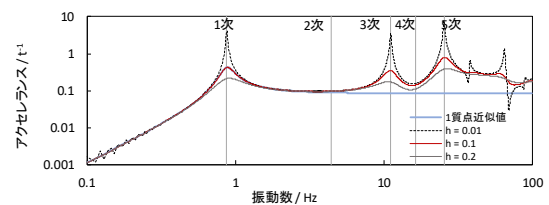


図 3 アクセラランス

3. 観客が感じる不快感

3.1) 試験の概要

床の鉛直振動と観客の不快感の関係を把握するために、鉛直振動体感試験を行った (写真 1)。被験者に、振動台の上で、20 gal (=cm/s²)、30 gal、50 gal の正弦波加振による鉛直振動を体感し、音楽施設の床に対する振動限度と不快レベル (表 1) に対するアンケートに回答してもらった。床振動の振動数は 2.3 Hz とし、試験中は床振動と同じテンポの曲を流してコンサート会場の環境を再現した。被験者は全 33 名で、試験は被験者自身のたてのり動作の有無による比較も行った。なお被験者には加速度の大きさは事前に伝えず、順不同で試験を行った。



写真 1

表 1 不快レベル

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	: ほとんど不快ではない
2	: まったく不快ではない
1	: 揺れを感じない

3.2) アンケート結果

図 4 に、直立姿勢で床振動を受けた際に「音楽施設の床としてどの程度の振動まで許容できるか」という質問に対する回答を示す。20 gal と答えた人が 14 名、30 gal が 11 名、50 gal が 8 名という結果となった。図 5 では、図 4 に示した回答の年齢別内訳を示す。20 gal まで許容できると答えた 14 人のうち 26 歳以上の被験者が 5 人いるのに対し、50 gal まで許容できると答えた 8 人のうち 26 歳以上は 1 人という結果になった。つまり、25 歳以下の比較的若い被験者の方が床振動に対してより寛容であると言える。

図 6 には、直立姿勢で振動を受けた場合と、被験者自身もたてのり動作を行いながら振動を受けた場合について、30 gal の床振動に対する不快感の違いを示す。直立姿勢で受けた場合に対し、たてのり動作をしながら受けた場合の不快感が小さくなっている。このことから、コンサートの観客が自身も音楽にのって体を動かしている場合には床振動に対して寛容になる傾向があることがわかる。図では 30 gal で加振した場合の結果を例として示しているが 20 gal、50 gal で加振した場合にも同様の傾向が見られた。

床振動をどこまで低減するかは判断は設計者とクライアントでの協議によって決定される。本試験で得られた知見は、そういった床振動低減の目標値を決定する際に役立つと考えられる。

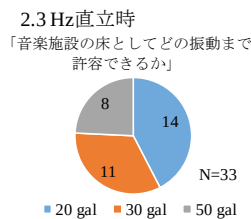


図 4 振動限度

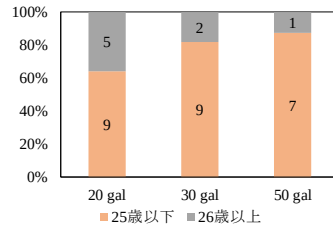


図 5 限度の年齢内訳

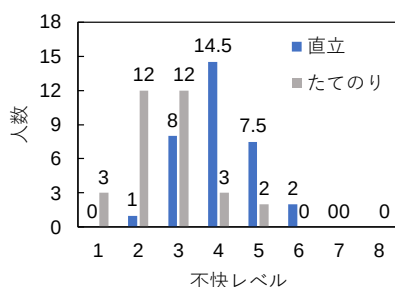


図 6 たてのり動作の有無による不快レベルの差

4. たてのり振動加振力の同定

建築物荷重指針・同解説³⁾では、たてのり振動によって生じる加振力波形は楽曲のテンポを基本として、その倍調波成分の正弦波を重ね合わせた以下の式で見積もることとされている。

$$F(t) = W \left\{ 1 + \sum_{n=1}^k \alpha_n \sin(2\pi f t + \phi_n) \right\} \quad (1)$$

ここで、
 W : 加振者の体重
 α_n : n 次倍調波成分の加振者の体重に対する振幅比
 f : 加振振動数
 ϕ_n : n 次倍調波成分の 1 次倍調波成分に対する位相差
 n : 倍調波の次数
 k : 対象とする倍調波の次数の上限

本研究では、より詳細にその楽曲にふさわしい加振力を評価し、適切な防振床の設計に資することを目的とし、「音楽」→人間の「振動」→「加振力」の変換を試みる。それぞれを繋ぐシステムを同定し、楽曲中の振動数変化や楽曲の抑揚などをとらえた加振力を作成することを目指す。

4.1) 「音楽」→「振動」

振動台試験でも用いた 2.3 Hz の楽曲を用いて、音楽と人間の振動の関係について検討した。まず、CD から音圧データを取り出し、対称的フーリエ解析⁴⁾を応用することで時刻歴の包絡形を求めた (図 7)。この際、楽曲中の振動変化を確認するため、「イントロ」、「サビ以外 (メロディーはあるサビ以外の部分)」、「サビ」の 3 つの部分に分けた。

さらに、この曲に合わせて動作する人間の振動を腹部に付けた小型加速度計で計測した。被験者は 2 名で、①ジャンプ動作 ②たてのり動作の 2 つの動作をしたときの腹部の加速度を計測した。図 8 に被験者 2 人の腹部加速度を示す。図 7、図 8 より、腹部加速度は楽曲のサビの部分で大きくなるのに対して、音圧波形からは楽曲中の抑揚をとらえることはできない。よって、楽曲中の振動の変化を表現するには、まず音楽の抑揚を把握する必要がある。こういった音楽理解技術は情報分野で研究がなされており、他分野の技術を積極的に取り入れていく必要がある。

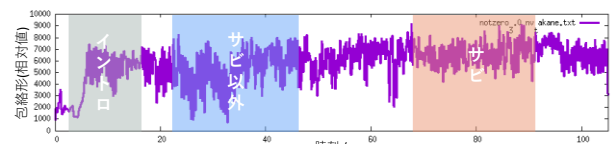


図 7 楽曲の音圧波形の包絡形

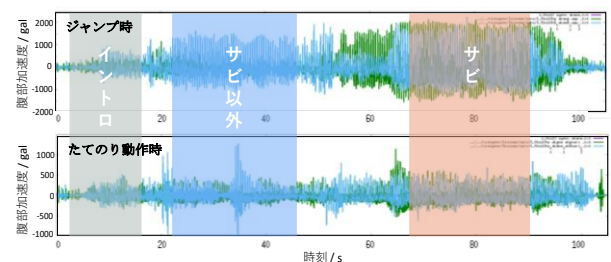


図 8 楽曲に合わせて動作する人間の腹部加速度

4.2) 「振動」→「荷重」

(加振力) = (質量) × (加速度) であると仮定して、被験者 2 人の加速度時系列から、式(1)の α_n を算出した。この際、1 次モード、2 次モード、3 次モードに波形を分解し、それぞれの振幅を求める。さらに田口ら⁹⁾の報告をもとに、1 人の加振力を 250 人の加振力に換算し、動作のばらつきを考慮した結果を表 2 に示す。表 3 に示した建築物荷重指針・同解説の値と比較すると、指針に示されるような加振力は、本研究で用いた楽曲においては、サビの間でのみ生じるもので、楽曲中続くものではないということが明らかになった。振動に対する不快感を評価する際に、このような振動の継続時間は重要な指標の 1 つとなり得る。

表2 振動試験から得た各倍調波成分の振幅比

		1倍調	2倍調	3倍調
イントロ	たてのり	0.14	0.07	0.03
	ジャンプ	0.31	0.27	0.05
サビ以外	たてのり	0.13	0.08	0.04
	ジャンプ	0.37	0.32	0.09
サビ	たてのり	0.25	0.11	0.04
	ジャンプ	1.44	0.47	0.14

表3 荷重指針に示された各倍調波成分の振幅比

	1倍調	2倍調	3倍調
多人数コンサート	0.25	0.1	0.025
多人数跳躍着地	0.7~1.5	0.25~0.6	0.087~0.15

5. たてのり振動の地盤伝播

本検討では、たてのり振動が地盤を伝播しやすい条件を把握することを目的として、動的相互作用の解析を行った。計算には、文⁹⁾が開発した薄層要素法と有限要素法を組み合わせたハイブリッド 3 次元解析ツールを用いた。

5.1) 解析の概要

建物基礎に調和加振力： $\{P_x, P_y, P_z\} \exp(i\omega t)$ を作用させ、基礎の条件や地盤の条件による周辺地盤の応答： $\{u_x, u_y, u_z\} \exp(i\omega t)$ の変化を確認することで、各条件が周辺地盤の振動に与える影響を評価した。今回検討するのは①加振源となる基礎の形状、②一様地盤と 2 層地盤の違いである。本解析では、たてのり振動加振力を想定し、鉛直方向の調和加振： $P_x = P_y = 0, P_z = 1 \text{ kN}$ とした。観測点は加振点から距離 r 離れた地表面の点とし、応答変位の動径方向成分を出力した。これは、たてのり振動によって周辺建物が揺れる場合には、建物の水平振動が問題となるためである。図 9 に解析の概要を示す。

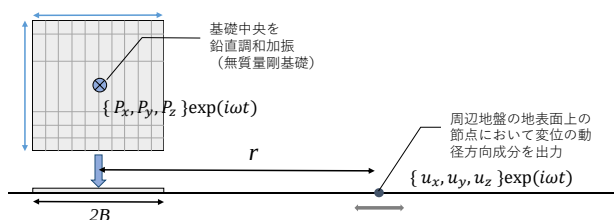


図9 動的相互作用を考慮した解析の概要

5.2) 基礎平面の大きさの影響・一様地盤

まず、加振源となる基礎の形状が振動伝播に与える影響を評価する。地盤は一様で、せん断波速度 $V_s = 300 \text{ m/s}$ 、ポアソン比 $\nu = 1/3$ 、密度 $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$ 、減衰定数 $h = 0$ とした。基礎は根入れがなく、無質量剛基礎であると仮定する。図 10 に、基礎の平面形状を $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 、 $45 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ 、 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ としたときの周辺地盤への振動伝播の様子を示す。縦軸は応答変位の振幅スペクトル、横軸は振動数、奥行きは加振-観測点間の距離 r と基礎の半幅 B との比 r/B である。図には、各基礎形状での周辺地盤の応答を $r = 2B$ から $r = 34B$ まで示している。一様地盤において、地盤の応答は、特定の振動数でピークをとることなく、 r/B の値によってピークの振動数が円弧を描くように変化していることがわかる。

ここで、基礎平面の大きさが周辺地盤の応答に与える影響を明確にするため、無次元化を行う。図 11 に各基礎を加振したときの $r = 3B$ での応答を示す。これに対し、図 12 には無次元化を行った結果を示しており、横軸に無次元化振動数 $\alpha_0 = B\omega/V_s$ をとり、縦軸には応答変位の振幅スペクトルの値に基礎の半幅 B をかけた値 $U' = BU$ をとっている。無次元化をすると、基礎の大きさに関わらず、地盤の応答が一致する。つまり、加振-観測点間の距離と基礎幅の比（ここでは $r/B = 3$ ）が同じであれば、基礎が小さいほど一様地盤における周辺地盤の応答は大きくなる。これは同じ加振力が小さな基礎に集中するためであると考えられる。

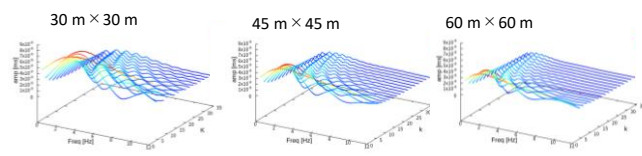


図10 振動伝播の様子 ($r = 2B \sim r = 34B$)

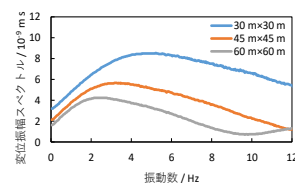


図11 周辺地盤の応答 ($r = 3B$)

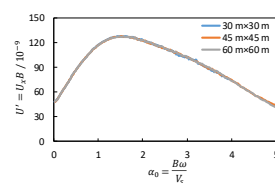


図12 無次元化した周辺地盤の応答 ($r = 3B$)

5.3) 一様地盤と 2 層地盤の違い

5.3.1) 基礎直下での振動増幅機構

2 層地盤の場合と一様地盤の場合とで周辺地盤の応答の違いを見る。地盤条件は表 4 に示す通りで、1 層目の層厚は 30 m である。図 13 に、基礎の平面形状を $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 、 $45 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ 、 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ としたときの周辺への振動伝播の様子を示す。各軸の意味は図 10 と同様である。一様地盤の場合と同じく基礎が小さいほど周辺地盤の応答が大きくなっているが、特定の振動数で周辺地盤の応答が卓越していることがわかる。すべての基礎形状において 2 Hz 付近で応答のピークが存在するが、 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ の基礎を加振したときには 10 Hz を過ぎたあたりにも明確なピークが存在する。周

辺地盤の応答が卓越するこれらの振動数について、深さ方向の変位分布 $U(z, \omega)$ に注目する。さらに、ある地点における地盤内の振動の卓越具合を表す指標として、2乗積分値 $I(\omega)$ を以下の式で定義する。

$$2 \text{ 乗積分値 } I(\omega) = \int U^*(z, \omega) U(z, \omega) dz \quad (2)$$

式(2)を用いて加振基礎直下 ($r = 30 \text{ m}$) における振動を I_0 、周辺地盤 ($r = 90 \text{ m}$) における振動を I_r で評価し、地盤の中での振動の伝わりやすさを I_r / I_0 で評価する。図 14 に $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 基礎を加振したときの I_0 と I_r の結果を振動数ごとに重ねて示す。周辺地盤で振動が卓越する 2.0 Hz 、 10.4 Hz において基礎直下でも振動が卓越していることがわかる。 $45 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ 基礎の場合には 2.0 Hz でのみ基礎直下における顕著な振動の卓越が見られた。図 15 に 2.0 Hz と 10.4 Hz における基礎直下での深さ方向の変位分布を示す。2つの振動数では、上下とも固定端となる振動が卓越している。このような振動数においては、基礎と地盤の物性値境界面で弾性波動が反射を繰り返すことで、基礎の下で振動が増幅されている可能性がある。解析結果から、このような基礎直下での振動増幅機構は、基礎幅が大きい場合に、基本モードだけでなく、高次モードにおいても生じやすいことがわかった。しかし、増幅機構が生じる振動数やその増幅率といった現象の解明にはさらなる検討が必要である。

5.3.2) 振動の伝播しやすい地盤条件

本解析で用いた地盤におけるレイリー波の固有モード形と周辺地盤での変位分布形状との比較を行う。任意の振動数におけるレイリー波の各固有モード形と周辺地盤の変位分布との内積の絶対値を算出し、その値がもっとも大きい固有モードを支配モードと呼ぶ。本研究ではレイリー波の基本モードから10次モードまでを用いて支配モードを特定した。図 16 に支配モード形と変位分布との内積の絶対値と、その振動数における I_r / I_0 との関係を示す。内積の絶対値と I_r / I_0 には正の相関があることがわかる。つまり、レイリー波の固有モード形と類似する変位分布となる振動数では振動が伝播しやすい。

図 17 に、任意の振動数での支配モードの群速度と、その振動数での I_r / I_0 との関係を示す。群速度と I_r / I_0 には負の相関がある。群速度が小さい振動数にはエネルギーが集中しやすく、振動が高いエネルギー密度を保持しながら伝播する。 I_r / I_0 の大きい 2.0 Hz においては、支配モード形と変位分布の内積の絶対値が 0.91 と大きく、一方で群速度は 69 m/s と小さな値を取っている。

6. まとめ

本研究では、たてのり振動問題について多面的に検討を行うことで、問題を解決するための技術開発に資するいくつかの知見を得ることができた。今後、たてのり振動問題の全貌を把握するには、たてのり振動が周辺建物へ与える影響についても検討していく必要がある。

表4 2層地盤の地盤条件

	1層目 (30 m)	2層目
せん断波速度	$V_s = 120 \text{ m/s}$	$V_s = 2700 \text{ m/s}$
密度	$\rho = 1.4 \text{ t/m}^3$	$\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$
ポアソン比	$\nu = 0.33$	$\nu = 0.39$
減衰	$h = 0.01$	$h = 0.01$

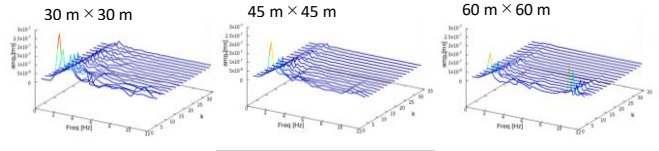


図 13 変位伝達の様子 ($r = 2B \sim r = 34B$)

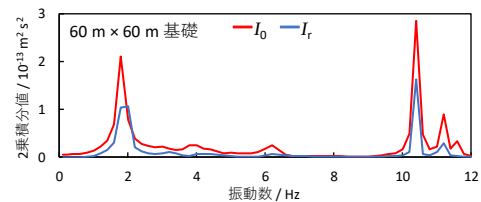


図 14 2乗積分値 (I_r, I_0)

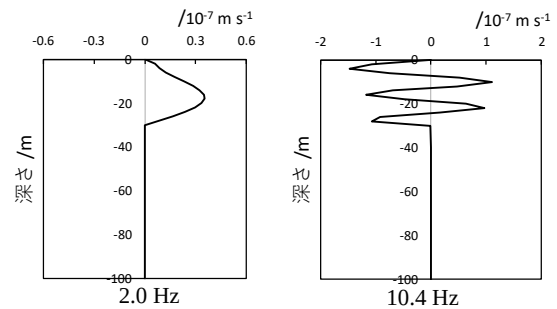


図 15 基礎直下の変位分布

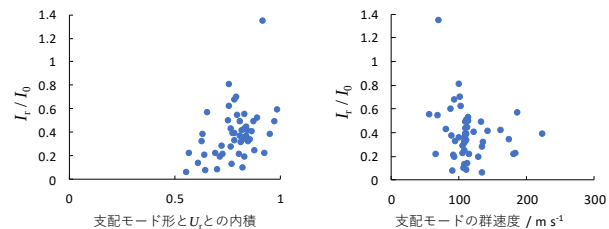


図 16 支配モード形との内積と I_r / I_0

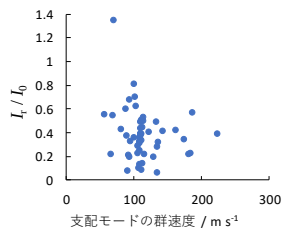


図 17 支配モードの群速度と I_r / I_0

参考文献

- 1) 小澤摩納, 朝日智生, 福和伸夫, 駒澤真人: 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, 日本建築学会学術講演梗概集 (環境工学), pp.439-440, 2020
- 2) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 2009
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重設計指針・同解説, 2004
- 4) T. Hirai and N. Fukuwa, Synthesis of Earthquake-Like Sound Using Seismic Ground-Motion Records, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.104, pp. 1777-1784, 2014
- 5) 田口典生, 早部安弘, 岡山真之介, 今村公威, 土屋隆: コンサート時のたてのり動作に対する設計用加振力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp363~364, 2017
- 6) 文学章: 地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究, 名古屋大学博士論文, 2005