

コンサート公演時に発生する“タテノリ”振動への対応技術

Examples of Prediction and Countermeasures due to Human Rhythmic Action of Concert Audience

井上 竜太 Ryota Inoue*¹ 松永 裕樹 Hiroki Matsunaga*²

梗概

近年、ライブハウスやコンサート会場などで、数百～数万人の観客が曲に合わせて一斉に行う動作により周辺建物で振動が発生し、問題となる事例が増加している。このいわゆる“タテノリ”振動は、伝搬する範囲が広域に及ぶことに加え、竣工後に対策を施すことが極めて困難であることから、設計段階から慎重かつ適切な対応が求められる。コンサート用途での利用も見込まれるスタジアム、アリーナ施設の整備が国策として全国各地で進む中、本報では、“タテノリ”振動への対応を予測、合意形成、対策、検証の4ステップに分類した上で、事例を交えながら各ステップでの課題やポイントについて紹介する。

キーワード：タテノリ、ライブハウス、コンサート、環境振動、加振力

Summary

In recent years, it has become a problem that vibrations occur in surrounding buildings due to human rhythmic actions of concert audience. For this difficult problem, it is necessary to take appropriate measures from the initial stage.

This report introduces issues and points regarding this vibration in the four steps of (1) prediction, (2) consensus building, (3) countermeasures, and (4) verification.

Keywords: human rhythmic action, live house, concert, environmental vibration, excitation force

1 はじめに

近年、ライブハウスやコンサート会場などで、観客が曲に合わせて一斉に行う動作により周辺建物で振動が発生し、問題となる事例が増加している。この問題の振動源は、数百～数万人の観客による曲のテンポに合わせた同位相の加振動作であり、構造床や土間に加わる総合的な加振力は莫大なものとなる。その加振力により発生した振動は、同一建物内に留まらず地盤を介して広範囲に伝搬し、周辺建物において不快な体感振動となって顕在化する。

コンサート公演時の人の動作による振動の対応として、予測、合意形成、対策、検証の4ステップが重要であることは他の環境振動と共通しているが、この問題は影響が広範囲に及び、事後の対策も極めて困難となることから、設計段階からより慎重かつ適切な対応が求められることになる。本稿ではこのコンサート公演時の振動問題に焦点を絞る形で、ステップごとに対応の課題やポイント、事例について詳しく述べたい。

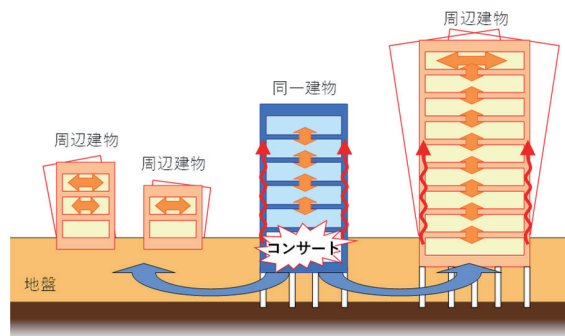


Fig. 1 コンサート振動の発生メカニズム
Mechanism of vibration caused by concert

*1 技術本部 技術戦略部 シニアチーフエキスパート 博士(工学) Senior Chief Expert, Technology Strategy, Technology Department, Dr. Eng.

*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

2 予測

2.1 加振力

コンサート公演時に発生する振動の予測には、数百～数万人の観客による莫大な加振力を適切に設定する必要がある。

設計者が加振力を設定する際に、まず拠り所となるのは建築物荷重指針・同解説¹⁾であろう。同指針には、加振の種類ごとにそれぞれ加振振動数 f と n 次倍調波成分の加振者の体重 W に対する加振力 F の割合を動荷重係数 $\alpha_n (=F/W)$ と定義し、 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ の値を示している。Table 1に、1人跳躍着地、多人数跳躍着地、多人数コンサートの $\alpha_1 \sim \alpha_3$ を指針から抜粋して示す。

続いて、跳躍着地、コンサート時の加振力に関する既往の研究についても紹介する。筆者らは、跳躍着地を含めたコンサート時の8種類の動作についてフォースプレートを用いた加振力の評価を行い、加振力の大きさや振動数特性の観点で動作を以下①～③に大別している²⁾。

- ①跳躍着地：足裏が地面から浮く跳躍着地動作
- ②たてのり：「つま先立ち→かかと着地→軽い屈伸→つま先立ち」の繰り返し動作
- ③屈伸：かかとを浮かせず膝の曲げ伸ばしによってリズムをとる屈伸動作

Fig. 2に、3種類の動作のうち最も加振力が大きい動作①と最も加振力が小さい動作③について、1人動作時の加振力を示す。図より、1人跳躍着地の結果が荷重指針の結果とよく一致することと、動作や曲のテンポによって加振力が変化していることがわかる。

加振人数が増えた場合の加振力について公表されている研究例としては、田口らの研究例が挙げられる³⁾。実在建物の床で加振実験を行い、置換法によって1人～48人のジャンプ動作の加振力を求めた上で、250人の加振力を動荷重係数 $\alpha_1: 0.84$, $\alpha_2: 0.28$, $\alpha_3: 0.04$, $\alpha_4: 0.01$, $\alpha_5: 0.007$, $\alpha_6: 0.006$ と高次まで加振力を推定している。Table 1と比較すると、 α_1 では0.25が0.84, α_2 では0.1が0.28, α_3 では0.025が0.04となっており、250人程度の加振力として荷重指針の多人数コンサートの値を用いると、加振力を過小評価してしまう危険性をこの研究は示唆している。

筆者らも、1人～16人の跳躍着地による加振力の $\alpha_1 \sim \alpha_6$ について浮き床を用いて直接的に求め、人数と α_n の関係を詳細に求めている⁴⁾。

一方で、数千人～数万人の加振力を同定した結果については公表された例が見受けられず、設計者が上述の研究結果や独自の経験などを頼りに、安全率なども見込んだ上で予測解析に用いる加振力を設定しているのが現状であり、加振力の設定は設計者の腕の見せ所になっている。

なお、プロジェクトの機密性などの事情からデータを公表することはできないが、筆者らは長年にわたりこの多人数による莫大な加振力の究明に取り組み、その精度を高めてきた。具体的には、Photo 1に示す最大20kN級の加振力を有する地盤加振用HMD

Table 1 跳躍着地やコンサート時の動荷重係数¹⁾

Dynamic load coefficient due to human rhythmic action

	f (Hz)	α_1	α_2	α_3
1人跳躍着地	2.0～3.0	1.07～1.9	0.44～0.69	0.087～0.31
多人数跳躍着地	1.5～3.0	0.7～1.5	0.25～0.6	0.087～0.15
多人数コンサート	1.5～3.0	0.25	0.1	0.025

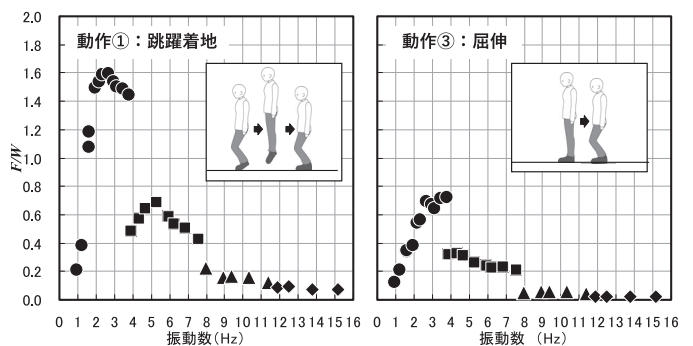


Fig. 2 跳躍着地と屈伸の F/W と振動数の関係
Relationship between F/W and frequency of jumping landing & bending



Photo 1 地盤加振用ハイブリッドマスダンパー (HMD)
Hybrid mass damper for shaking the ground

(Hybrid Mass Damper) などを用いて、数Hzの振動数領域における振動特性を詳細に把握した地盤や建物において、多人数加振試験や実コンサート時に発生する振動を測定することで同定した加振力のデータを蓄積している。この取り組みを今後も継続し、整備が進むスタジアム、アリーナ施設の設計に反映していきたい。

2.2 予測解析

設計者のもう一つの腕の見せ所として、予測のシミュレーション解析が挙げられる。歩行振動であれば解析モデルの範囲はあるエリアの床1層で事足りる場合が多いが、広範囲に影響が及ぶコンサート公演時の振動の場合には、より大きな解析モデルを作成する必要がある。

近年、コンピュータの性能が飛躍的に向上したこともあり、コンサート会場を含む複合建物全体をモデル化して3次元FEM解析を実施できるようになってきた。ここでは地下3階に1,746人収容（スタンディング時）のコンサート会場を有する地上17階の複合建物について解析例を紹介する。なお、本事例の詳細については既報⁵⁾を参照されたい。

Fig. 3に、事例建物の外観パースと解析モデルを示す。5階～17階が事務用途の高層棟は13mの跳出し構造となっており、設計当初からコンサート公演時に発生する振動の高層棟への伝搬が懸念されていた。そのため、跳出し部分直上階のトラス化による剛性補強や、剛性の高い場所打ちRC杭の採用などの振動対策が計画された。解析モデルは建物全体を対象とし、これらの対策の他、地盤や杭の剛性なども鉛直バネとしてモデル化している。1,746人の跳躍着地動作の加振力として、過去の経験などを基に加振振動数成分：686.5kN、2倍調波成分：88.3kN、3倍調波成分：9.8kNを地下3階のコンサート会場の床に入力した。

固有値解析によって高層棟の鉛直、水平の振動モードを10Hzまで確認した結果、Fig. 4にモード形状を示した3.8Hzの振動モードで最大 2.2cm/s^2 (0-P)の鉛直振動が発生することが予想された。この予測値に対して講じた対策については、4.2にて後述する。

なお、固有振動数とモード形状については、建物の躯体完成時に測定により確認している。固有振動数は予測、実測ともに3.8Hzと一致した。モード形状についても、Fig. 4に示したように、モード振幅が最大となる階の値を1として標準化した振幅が実測、予測で略一致した。

この事例のように予測解析の結果が実測と一致するまでには、数多く実測と予測を比較、検証した実績による、加振力の設定、モデル化の手法、減衰定数の設定や、問題を見落とさない振動モードの確認方法など、一朝一夕では成し得ないノウハウの蓄積があったことを記しておく。

今回は同一建物に及ぼす振動の影響についての解析例を紹介したが、周辺建物への影響については、地盤をモデル化したFEM解析などにより周辺建物の位置で発生する地盤振動を求め、建物への入力損失や建物内での共振増幅などを加味して予測する手法が取られることもある。

Fig. 5に、筆者らが実施した地盤振動解析の例として、振動数と振動源からの距離の関係を示す。図は、前節で述

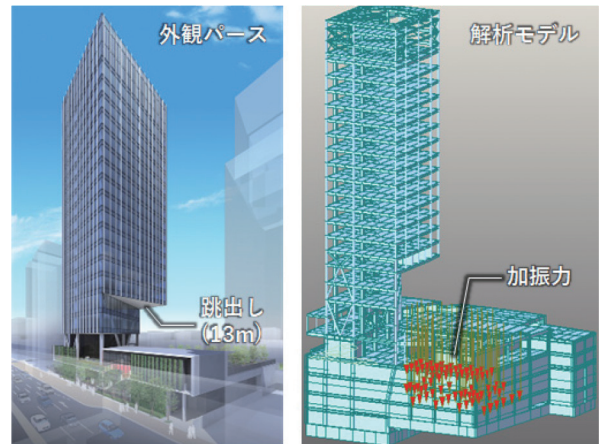


Fig. 3 事例建物の外観パースと解析モデル
Exterior perspective and analytical model of the case building

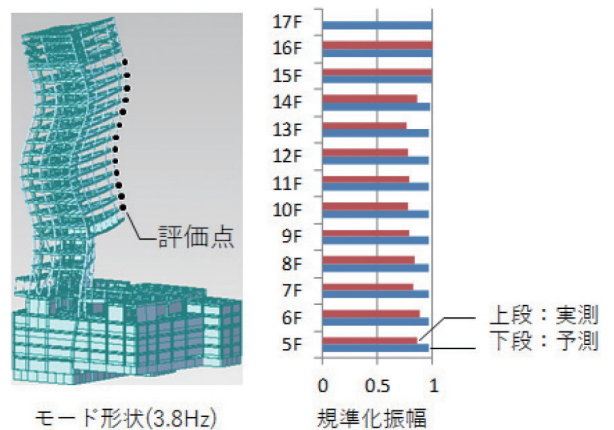


Fig. 4 解析結果（モード形状と標準化振幅）
Analysis result (mode shape and standardized amplitude)

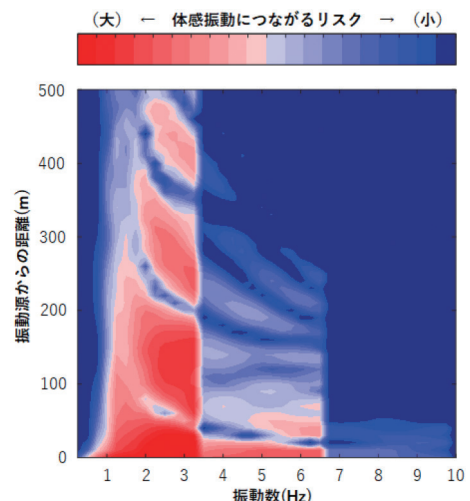


Fig. 5 地盤振動の解析例
Example of ground vibration analysis

べた加振力データをFEM解析モデルに入力し、共振増幅も考慮した上で体感振動につながるリスクを可視化したものである。このような図を基に、プロジェクトの初期段階から“タテノリ”振動により想定されるリスクを関係者間で共有し、立地やレイアウトの検討や対策立案などに活用するソリューションを展開している。

筆者らは、実測結果との比較による解析精度の向上にも日々取り組んでいるが、竣工後のコンサート公演時には様々な制約から周辺の地盤や建物で振動を実測することが難しい場合も多い。予測精度の向上のために、実測と予測を比較できる形でのデータの収集、蓄積の機会を逃さないよう今後も心掛けたい。

3 合意形成

3.1 設計目標値

設計の初期段階で特に重要なのが、目標値の設定と、その値についてのプロジェクト関係者における合意形成であり、案件によっては予測よりも先に行う場合もある。まず目標値の設定に関して留意すべき点について述べる。

Fig. 6に、コンサート公演時にある場所で測定した振動レベル波形を示す。この波形は、長さが約4分半の曲の演奏時に測定したものであるが、曲の中盤には約30秒間、終盤には60秒間以上、振動レベルが高い値を維持している時間帯があることがわかる。継続時間は演奏される曲などによって異なるが、コンサート公演時に発生する振動は、歩行振動などに比べて継続時間が長いという特徴を持っている。

この“タテノリ”振動の特徴に対して、筆者らは継続時間が人の感覚や評価に及ぼす影響について10年以上前から着目し、官能試験による研究を重ねてきた^{6)~9)}。これらの研究成果が日本建築学会環境基準として反映されたのが、2018年に改定された「建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説¹⁰⁾」であり、筆者も執筆者の一人として名を連ねている。

この居住性能評価規準に照らし合わせると、継続時間が1秒以下の場合に比べて10秒以上の場合には振動を+5dB(1.78倍)大きく感じ、認知しやすくなることになる。“タテノリ”振動に対しては、事務所や商業施設などにおける歩行振動の目標値に比べて、同じ用途の場合でも5dB厳しい値に、そしてより揺れない環境が求められる用途ではさらに厳しい値に、目標値を設定する必要がある点に十分注意する必要があるといえる。

従来、学会指針などを基に、加速度などの振幅の最大値に基づき居住性能の設計目標値の設定や評価を行ってきたが、この継続時間による5dBの感覚の差が“タテノリ”振動においては致命的な問題となるケースもあった。継続時間の要素が考慮された日本建築学会環境基準が、広く活用されることを切に願う。

3.2 体感による合意形成

人の振動感覚は、加速度の大きさだけではなく、その振動数や継続時間によって大きく異なることは、前節で述べた通りである。加速度振幅の cm/s^2 や、居住性能評価規準¹⁰⁾のV-Oといった数値だけで実際の振動感覚をイメージできる人は極めて稀であるといっても過言ではない。

そこで、筆者らがコンサート公演時の振動が懸念されるプロジェクトに対応する場合には、建築主、設計者、施工者など関係者を集め、Photo 2に示す振動体感システムを用いた合意形成プロセスを必ず組み込むようにしている。

プロジェクトの初期段階において問題意識を関係者全員で共有するこの合意形成手法は、“タテノリ”振動が懸念される案件において欠かすことのできないプロセスの1つであると考えている。

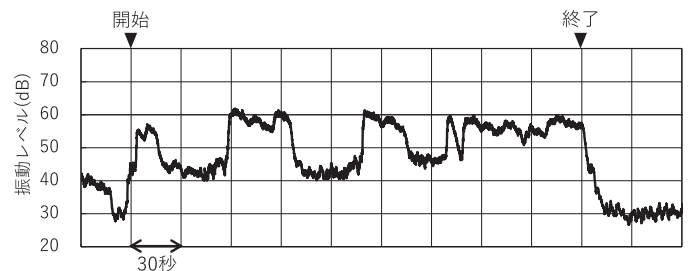


Fig. 6 コンサート公演時の振動レベル波形例
Example of vibration level waveform during concert



Photo 2 振動体感システム
Vibration experience system

4 対策

4.1 振動源側での対策例

本報冒頭でも述べたように、コンサート公演時に発生する振動は、伝搬範囲が非常に広いことから、周辺の地盤や広域の建物に対策を施すことは現実的には不可能で、振動源における対策が望まれてきた現象である。本節では最新動向として、一昨年に竣工したイベントホールに導入した振動制御システムについて紹介する。

この事例は、イベントホールにホテルと商業施設が隣接する複合施設となっており、地上部分はExp.Jにより分離されているものの、地下および1階の一部については3棟が一体となる形となっている。イベントホールはロックコンサート用途を主とする7,000人収容の施設で、最大3,000人収容のスタンディングフロアを有している。周辺にも建物が点在していることから、受振側の対策を各建物に施すことは困難であると考え、振動源側において3種類の対策を行うこととした。Fig. 7に、振動対策の概要を示す。

まず1つ目の対策として、スタンディングフロア下部の基礎を鉛直剛性の高い場所打ちコンクリート杭とし、杭先端を非常に剛性の高いN値60以上の支持地盤まで延伸させることで、周辺建物への振動伝搬の低減を図った。次に、スタンディングフロアのある2階床から下の構造形式を、鉄骨造ではなく鉄骨鉄筋コンクリート造とすることで重量と剛性を高め、イベントホール本体の振幅低減を狙っている。そして最後に、スタンディングフロアを固有振動数1Hzの超低振動数防振床とし、下部構造体に加わる加振力の大幅低減を図っている。

Table 2に超低振動数防振床の諸元を、Fig. 8に平面構成を示す。防振床は、スラブ厚1,200mmのコンクリートを44基のコイルバネユニットで支持し、16基の粘性ダンパーにより減衰を付加している。

施工については、Photo 3に示す防振床のモックアップにて説明する。コイルバネをプレロードした状態でセットし、型枠兼用のPC版（厚さ200mm）を設置した後、厚さ900mmのコンクリートを2回に分けて打設している。その後、バネのプレロードを開放し、床レベルを調整しながら厚さ100mmのコンクリートを打設した。

超低振動数防振床は、コンクリートにより重量を確保するとともに、粘性ダンパーにより10%超の減衰を設定し、さらに人の動作の加振力が小さい振動数領域（Fig. 2参照）である1Hzに固有振動数を設定することでコンサート供用時に防振床に生じる振動を抑制している。これにより、床上の観客が感じる“ふわふわ感”を軽減するとともに、防振床と構造体の間に生じる段差も抑え、観客が躓くりスクも回避している。

モックアップによる振動低減効果の検証については、既報^{11)~14)}にて詳細を述べているが、従来は対策が困難だった2Hz以上の振動数帯域において振動を約1/2~1/3に低減することに成功している。

なお、本複合施設には計8か所にセンサーを設置し、コンサート公演時の振動をモニタリングしているが、竣工から2年以上が経過した現時点でも、設定した設計目標値を満足していることを確認している。

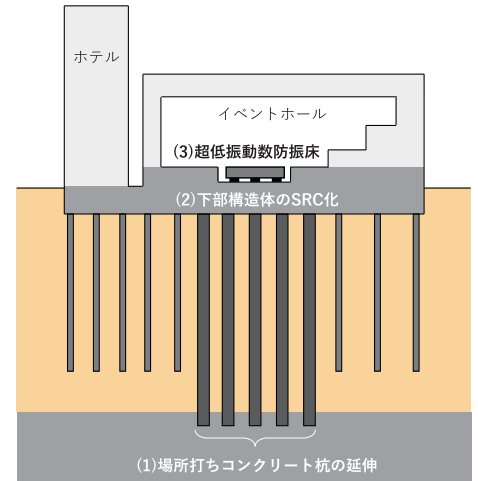
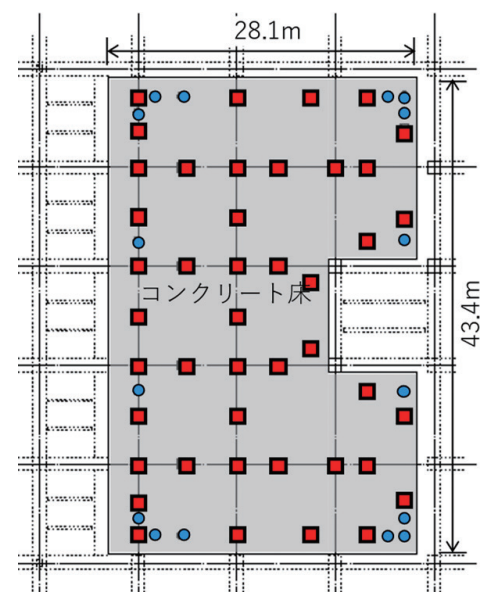


Fig. 7 振動対策の概要
Overview of vibration countermeasures

Table 2 防振床の仕様
Specifications of anti-vibration floor

	実計画
浮床面積	1137.6m ²
スラブ厚さ	1,200mm
スラブ重量	31,834kN
想定観客人数	3,000人
観客重量	1,764kN
浮床合計重量	33,598kN
観客重量／スラブ重量	6%
コイルバネユニットの鉛直剛性	3.39kN/mm
コイルバネのユニット数	44ユニット
合計鉛直剛性	149.16kN/mm
浮床の固有振動数	1.0Hz
動的外力／浮床重量	0.10%



- コイルばねユニット : 44基
- 粘性ダンパー : 16基

Fig. 8 防振床の構成（平面）
Configuration of anti-vibration floor (plan view)

4.2 受振側での対策例

体感振動が発生する場所が予測などで限定できる場合には、受振側での対策も有効な手段となり得る。

例えば、2.2にて予測事例を紹介した建物では、Fig. 4に示した3.8Hzの振動モードだけが体感振動に影響することがシミュレーションにより予めわかっていた。そこで対策として、振動モードの腹となる（最も対策効果が見込める）箇所に、HMD（Hybrid Mass Damper）を設置する対策を講じることとした。Photo 4に、HMDの外観を示す。HMDとして、振動質量500kgを固有振動数3.8Hzに調整し、最大推力1,100Nのサーボモーター（アクチュエータ）で加振できるようにしたもの2台設置している。

HMDを用いた加振試験により、高層棟に発生する振動を1/3まで低減できる振動を発生させることができることを確認し、設計目標値 1.5cm/s^2 （0-P）以下に振動を抑えられることを確認し、本建物は竣工を迎えている。

受振側での対策としては、その他にTMD（Tuned Mass Damper）なども挙げられるが¹⁵⁾、いずれの対策についても導入の可否を判断するためには、的確な予測と、その予測結果に基づく合意形成が欠かせない。

5 検証

多くの人が実際にコンサート会場で動作した場合に、どの程度の振動が発生するかの検証は、性能確認という意味でも、予測や対策の妥当性の確認という意味でも重要である。筆者らがこれまでの経験から感じた検証のメリットや留意点を、実施のタイミングごとに述べておきたい。

最初の検証のタイミングとしては、躯体完成時が挙げられる。実運用時に見込まれる加振人数を集めることが難しく、仕上げ荷重なども建物に全てかかっていない段階であることが多いが、予測解析で想定した振動モードが励起されるか否かや、発生する振動がどの程度かを竣工前に概ね確認することができる。制振装置などの対策の可否をこの段階で判断することができる場合もあるだろう。

Photo 5に、コンサート会場の床上に数百名の作業員を集めて実施した検証（加振試験）の実施状況を示す。躯体完成時のタイミングで行う加振試験の最大のメリットは、会場に流す音や曲によって加振のテンポを任意に調節できる点である。筆者は、加振試験の直前に、予測解析などで揺れが懸念される場所の固有振動数を測定し、その振動数と共振するテンポで加振メニューを組むようにしている。これは、2.0Hz、2.5Hz、3.0Hzといったキリの良い振動数刻みの加振だけでは共振現象を捉えきれず、リスクを見逃す可能性があることに基づいている。

次の検証のタイミングとしては、竣工時が挙げられる。この時点になると検証結果次第で対策の方針を変更することは難しいため、目標値を満足できたか否かを確認することが主目的となる。作業員による模擬的な加振よりも、竣工後の実際のコンサートの方が性能検証として適しているとの判断からも竣工直前での実施が見送られることも多い。

最後の検証のタイミングは、竣工後に開催されるコンサート公演時である。ただ、アーティストや曲目によって発生する振動は異なるため、1回の測定で目標値を満足することが確認できたからといって安心することはできず、



Photo 3 防振床のモックアップ
Mockup of anti-vibration floor



Photo 4 受振側の建物内にHMDを設置した例
Example of HMD installed in the building on the receiving side



Photo 5 検証試験の実施状況
Example of HMD installed in the building on the receiving side

検証が月単位や年単位の長期間に及ぶケースも見受けられる。設計段階から検証の予算を見込むなどの計画性も必要となってくる。

上記は、多岐にわたる“タテノリ”振動の検証作業の一例に過ぎず、“抜け”や“漏れ”がなく確実に問題の芽を摘み取るためには、数々の実施例を通じたノウハウの蓄積と不断的努力が求められる。

6 おわりに

コンサート公演時の人の動作による振動の対応として、予測、合意形成、対策、検証の4ステップに分類し、ステップごとに対応の課題やポイント、事例について述べた。

現在、スタジアム、アリーナの新設、建替構想が国策として進められており、オリンピック、パラリンピック後も全国各地で施設整備が進む予定である。スタジアム、アリーナは地域活性化の中核を担っており、スポーツ以外にもコンサートなど多目的な用途で利用されることから、今後、人の動作による“タテノリ”振動についての対応が求められる機会がますます増加すると見込まれている。本稿が、これらのプロジェクトの企画、設計などの参考となり、社会発展の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004年9月
- 2) 井上竜太，横山裕：コンサート公演時の曲に合わせて行う人間の動作による加振力に関する検討，日本建築学会環境系論文集 第604号，pp.9～14，2006年6月
- 3) 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（40171），pp.363～364，2017年8月
- 4) 松永裕樹，井上竜太，山本耕司：低振動数防振床を用いた人間の動作による加振力の研究，日本建築学会技術報告集 第67巻，pp.1321～1326，2021年10月
- 5) 松永裕樹，井上竜太，犬飼伴幸，吉岡宏和，伊藤利明：コンサートタテノリ振動の予測・対策事例，日本建築学会大会学術講演梗概集（40175），pp.369～370，2014年9月
- 6) 井上竜太，吉岡宏和：可搬型振動体感装置の開発と振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究，竹中技術研究報告，No.67，2011年
- 7) 井上竜太，横山裕，松下仁士：振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（40179），pp.377～378，2014年9月
- 8) 松下仁士，井上竜太，長沼俊介，吉岡宏和，黒田瑛一，横山裕：種々の加振源による振動に適用できる性能値に関する検討 その1 鉛直振動を対象とした検討概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（40176），pp.375～376，2015年9月
- 9) 長沼俊介，井上竜太，松下仁士，吉岡宏和，黒田瑛一，横山裕：種々の加振源による振動に適用できる性能値に関する検討 その2 鉛直振動を対象とした検討結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（40177），pp.377～378，2015年9月
- 10) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能規準・同解説，2018年11月
- 11) 山本耕司，井上竜太，松永裕樹，金子修平：低振動数防振床を用いた人間の動作による加振力の研究 その1.試験体の設計と施工，日本建築学会大会学術講演梗概集（40201），pp.435～436，2019年7月
- 12) 松永裕樹，山本耕司，井上竜太，金子修平：低振動数防振床を用いた人間の動作による加振力の研究 その2.連続歩行動作の倍調波成分に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（40202），pp.437～438，2019年7月
- 13) 井上竜太，松永裕樹，山本耕司，金子修平：低振動数防振床を用いた人間の動作による加振力の研究 その3.跳躍着地による加振力に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（40203），pp.439～440，2019年7月
- 14) 井上竜太，松永裕樹，福田優輝，山本耕司：コンサート公演時の観客の動作による振動の低減に関する研究 モックアップを用いた低振動数防振床のモーションガイドに関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（40214），pp.437～438，2020年9月
- 15) 石川理都子，田中達彦，松田典子：TMDによるライブハウスの振動対策，日本建築学会大会学術講演梗概集（40178），pp.371～372，2013年8月