共振を考慮した人間の動作による床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察

OBSERVATION AND EVALUATION OF FLOOR RESONANCE VIBRATION CAUSED BY HUMAN ACTION AND APPLICATION OF NEW REDUCTION SYSTEM

横山 裕 —*1 井上竜太 —*2
西谷伸介 —*3 松下仁士 —*4
柴田昭彦 —*5 塚田幸一 —*5
小林裕明 —*5

Yutaka YOKOYAMA —*1 Ryota INOUE —*2
Shinsuke NISHITANI —*3 Hitoshi MATSUSHITA —*4
Akihiko SHIBATA —*5 Koichi TSUKADA —*5
Hiroaki KOBAYASHI —*5

キーワード:
床振動, 歩行, エアロビク, 動作のテンポ, 固有振動数, 共振

Keywords:
Floor vibration, Walking, Aerobic dance, Tempo of action, Natural frequency, Resonance

A full investigation including an influence of resonance of floor vibration caused by human action repeated at constant tempo (such as walking, aerobic dance, etc.) was done on actual floors where the natural frequency and damping were small. As a result, it was shown that the evaluation was greatly different by presence of resonance. And, the meanings of evaluation curves provided in the guideline of A.I.J. were clarified from the relations to resident's evaluation. Moreover, new analyzing methods of damping characteristic and resonance frequency were presented. Finally, the applicability of a new vibration reduction system for actual buildings, which is proposed by one of authors, was proved.

1. はじめに

歩行, 小走りやエアロビク, あるいはコンサート公演中のたのりなど, 一定のテンポで繰り返される人間の動作により発生する床振動について検討する際, 床の固有振動数や減衰が小さい場合には, 動作のテンポと床の固有振動数での振動(以降“固有振動”と記す)との共振の影響を考慮する必要があると考えられる。今回, このような条件に合致する床振動を測定, 評価する機会を得, 共振の影響に関する詳細な検討を含め, 興味深い結果が得られたので報告する。

本報の前半では, ある建築物(Hビル)の事務室床を対象に, 床上で執務者が歩行など日常的な動作をした時に発生する床振動について測定, 評価した経過, 結果を述べる。また, 後半では, エアロビクスタジオが設置されたある建築物(Tビル)を対象に, スタジオでエアロビクをした時に直上階に設置された事務室で発生する床振動について測定, 評価した経過, 結果を述べる。加えて, 後半では, 筆者らの一部らが提案した加振源における新しい振動低減対策技術¹⁾の適用性について検討した経過, 結果を述べる。

2. 歩行時に発生する床振動の測定, 評価

2.1 測定対象床

図-1に, 測定対象床であるHビル3階の事務室床の概要を示す。図に示す通り, 当該床は, X4~X14通りにかけてスパン15.3mの大梁(H-600×200×11×17)が桁行方向3.2m間隔で均等に配置され, 全体として約15.3×32mの無柱空間を構成している。この直下の2階も, 同様の無柱空間となっている。大梁間には, 小梁および振れ止めなどは設けられていない。床板は, デッキプレートスラブ(厚さ155mm)である。Y2通り, Y3通りおよびX14通りの部分には壁が設けられているが, X4通り側は吹き抜けとなっており, 手すりのみが設けられて

いる。このように, S造大スパンのため低剛性, 低減衰で, かつ同一の架構が連続するため比較的振動が伝搬しやすいと予想される構造となっている。なお, 床仕上げは, タイルカーペットとなっている。

このHビルの各階の床の設計時における目標性能は, 日本建築学会居住性能評価指針²⁾に規定された70%程度の人が振動を感じるV-70であり, 既往の手法にしたがった解析により歩行時の床応答を求め, 所定の性能が確保されていることを確認している。また, 竣工前に吹き抜けのない5階床において振動の測定を行い, おおむね設計時の解析結果と近似した結果が得られたことを確認している。しかし, 供用開始後, 吹き抜けのある3階事務室の執務者から「歩行による床振動を顕著に感じる」との苦情が相次いだことから, 床振動を再度測定, 評価することとなったものである。

2.2 測定概要

測定は, 以下の①~③に示す3項目実施した。

①固有振動数, 振動モード

図に●と▲で示すように, Y2通りとY3通りの中間(Y2.5通りと記す)上に19点, X8.5通り上に7点, 1点は重複するので計25点の測定点を十字状に設定するとともに, 床の中央から少しずれた位置に加振点×, 基準測定点○を設定した。加振点にランダム加振機を設置し, 1~50Hzでスウィープ加振した時の, 基準測定点から各測定点への振動伝達率(振幅比および位相差)を測定した。

②減衰特性

①の結果より, 代表的な測定点として図に●で示す4点を設定し, それぞれの点近傍で1名の加振者がヒールインパクトした時に発生する減衰振動を測定した。

③歩行, 小走り時の床応答

図に示す歩行路A, Bを, 1~2名の加振者が所定の歩調で歩行ある

*1 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 助教授・工博
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
*2 ㈱竹中工務店技術研究所 修士(工学)
(東京工業大学大学院博士後期課程 社会人大学院プログラム)
*3 当時 東京工業大学大学院 修士(工学)
*4 東京工業大学大学院
*5 ㈱梓設計設計本部構造部

*1 Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Graduate School of Science and Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*2 Research and Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng. (Graduate School, Tokyo Institute of Technology)
*3 Graduate School, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
*4 Graduate School, Tokyo Institute of Technology
*5 Azusa Sekkei Co., Ltd.

いは小走りした時に発生する床振動を、②で設定した測定点●で測定した。加振者は、1人歩行、小走りの場合年齢26歳、身長175cm、体重83kgの男子とし、2人歩行の場合この男子と年齢28歳、身長171cm、体重80kgの男子とした。

以上であるが、床振動の測定は、基準測定点、測定点のタイルカーペット上に加速度ピックアップ(リオン社製VM-52)を設置して行った。

2.3 測定結果および考察

①固有振動数、振動モード

測定の結果、6.5Hz、7.5Hz、8.125Hzの3種の固有振動数が抽出された。図-2に、各振動数における振動モードを示す。図は、基準測定点に対する各測定点での振幅比を示したものであり、+/-は位相差に基づいて決定している。図より、6.5Hzでは測定対象床全体が同位相で振動するモード、7.5Hzでは梁間方向に2個(X6~6.5とX9~9.5)の振動の節を有するモード、8.125Hzでは同様に3個(X5~5.5、X7~7.5とX9.5~10)の節を有するモードが現れていることがわかる。すなわち、高次まで1方向のみに節が出現しており、梁間方向と桁行方向で剛性の異なる異方性の強い床の特徴が明瞭に現れている。ここで、7.5Hzと8.125Hzのモードでは、吹き抜け側のX4が振動の腹となっている点が、特徴として挙げられる。

②減衰特性

①の結果より、7.5Hzと8.125Hzの振動モードで腹となっているX4、8.125Hzで腹となっておりかつ6.5Hzでも腹近傍となっているX8.5、6.5Hzで腹となっているX9.5、および7.5Hzと8.125Hzで腹となっているX10.5(いずれもY2.5)の4点を代表的な測定点として選定し、このうち1つの点近傍でヒールインパクトした時に発生する減衰振動を、各測定点で測定した。

図-3に、減衰振動の測定結果の例として、X9.5近傍でヒールイン

図-1 Hビル3階事務室床の概要

図-2 Hビル3階事務室床の振動モードの測定結果

表-1 A_t/A_0 の測定結果

加振点	測定点	振動数*	$A_{6.5}/A_0$	$A_{7.5}/A_0$	$A_{8.125}/A_0$	$A_{8.125}/A_0$
X4近傍	X4	8.13Hz	0.183	0.144	0.134	0.053
X8.5近傍		8.02Hz	0.767	0.492	0.213	0.178
X9.5近傍		8.11Hz	0.192	0.109	0.160	0.101
X10.5近傍		7.95Hz	0.948	0.458	0.066	0.209
X4近傍	X8.5	7.97Hz	0.675	0.392	0.129	0.158
X8.5近傍		6.98Hz	0.366	0.195	0.078	0.130
X9.5近傍		6.71Hz	0.511	0.245	0.234	0.191
X10.5近傍		6.91Hz	0.583	0.386	0.435	0.163
X4近傍	X9.5	7.87Hz	0.231	0.092	0.113	0.082
X8.5近傍		6.56Hz	0.523	0.247	0.274	0.167
X9.5近傍		6.59Hz	0.301	0.264	0.136	0.132
X10.5近傍		6.60Hz	0.440	0.313	0.112	0.127
X4近傍	X10.5	7.84Hz	0.875	0.467	0.067	0.181
X8.5近傍		6.96Hz	0.487	0.405	0.432	0.105
X9.5近傍		6.50Hz	0.536	0.304	0.103	0.104
X10.5近傍		6.64Hz	0.325	0.287	0.073	0.072

※：ゼロクロス法により算出

パクトした時にX8.5で測定された加速度・時間曲線を示す。図に示すように、測定対象床の振動の減衰は非常に小さく、かつ桁行方向への伝搬、反射に起因すると思われる途中からの増幅(揺れ戻し)もみられることがわかる。ここで、この種の振動の減衰特性を単に減衰定数などで評価するのは困難と考え、種々検討の結果、加振から所定の時間 t 経過後の最初の最大振幅の割合 A_t/A_0 を減衰特性の指標として求めることとした。

表-1に、加振点と測定点の組合せ16種ごとに求めた、 $t=0.5s$ (1歩の歩調にほぼ該当)~2.0s(同4歩に該当)での A_t/A_0 を示す。表より、1歩の加振により発生した振動の振幅がその4歩後でも1/5程度までしか減衰しない場合があることがわかる。この結果は、歩調やその倍調波振動数が床の固有振動数と合致した場合、共振により大きな振動が発生する可能性があることを示唆するものである。なお、加速度・時間曲線から任意の2つのピークを選定し、その割合とその間の振動の回数から見かけの減衰定数を算出したところ、おおむね1~2%であった。

また、表には、加速度・時間曲線よりゼロクロス法により求めた振動数も示した。表に示す通り、測定点がX4の場合のみでなく、他の測定点でも加振点がX4近傍の場合、7.5~8.125Hzで A_t/A_0 が比較的大きな振動が発生している。このことから、吹き抜けの影響でX4通り近傍の剛性が相対的に小さくなっており、この部分を加振した時にこの部分が腹となるモードの振動が大きく励起され、歩行時の床振動を大きくする一因となっている様子がうかがえる。

③歩行、小走り時の床応答

①、②の結果を参考に、2種の歩行路上を表-2に示す条件で歩行、小走りした時の床振動を測定した。その結果、表に網掛けで示した1人小走りや2人歩行の場合は、比較的大きな振動は発生しなかった。これは、これらの動作では1人歩行と比較して動作の(特に歩調の)安定性が低く、そのため加振力に含まれる倍調波成分が大きくなること

によるものと推察できる。本報では、以降、1人歩行での結果について考察する。

表-2 歩行、小走り時の床応答の測定概要

動作	歩調	歩行路	備考
1人歩行	1.75Hz	○	○
	1.88Hz	○	○
	2.03Hz	○	○
	2.16Hz	○	○
	2.30Hz	○	○
2人歩行	2.16Hz	○	○
1人小走り	2.16Hz	○	○

○：実験を実施した組み合わせ

図-3 減衰振動の測定結果の例

図-4 歩行時の加速度・時間曲線の測定結果の例

図-4に、床応答の測定結果の例として、歩行路A歩行時にX8.5で測定された加速度・時間曲線を示す。図には、8.125Hzの1/4に該当する2.03Hz、および6.5Hzの1/3に該当する2.16Hzでの歩行時と、比較の目的で倍調波振動数が床の固有振動数と合致しない1.75Hzでの歩行時の結果を示した。図より、1.75Hzでは1歩1歩の着地ごとに振幅が大きくなっては減衰する波形が繰り返されているのに対し、2.16Hzでは歩数を重ねるごとに振幅が増幅してゆく共振現象発生時の典型的な波形が得られており、振幅の変動が少ない正弦波に近似した振動が比較的時間(十数歩分)継続していることがわかる。また、2.03Hzでの波形からも共振現象の発生が読み取れるが、今回、8Hzより高い振動数での4倍調波との共振現象が見られたことは、注目に値する。

つぎに、図-5に、加速度・時間曲線の測定結果を1/3オクターブバンド分析し、時定数10msでの各帯域ごとの振動加速度レベルの最大値(0-p)を求め、対応する加速度振幅を学会指針と照合した結果を示す。図には、例として、比較的大きな振動が測定された歩行路A歩行時のX8.5、および歩行路B歩行時のX4での結果を、歩調ごとに示した。図より、歩調により床振動の評価結果に大きな差が生じること、当該測定点が振動の腹となるモードの固有振動数と歩調の倍調波振動数が一致した場合その振動数を含む帯域の振幅が著しく増大し評価が低下することがわかる。具体的には、歩行路A歩行時のX8.5では歩調2.16Hzの場合、歩行路B歩行時のX4では歩調1.88Hzおよび2.03Hzの場合、振幅が特に大きくなっており、V-90かそれを上回る程度となっている。同じ歩行路、測定点でも歩調によってはV-50程度の振動しか発生していないことと比較すると、共振の要因を考慮することの重要性が理解できる。

図-5 歩行時の床振動の評価例

2.4 まとめ

低剛性、低減衰で、かつ比較的大きな振動が伝搬しやすい特性を有する床を対象に、歩行など人間の動作時に発生する床振動について測定した。その結果、この種の床では歩調やその倍調波と床の固有振動との共振現象が発生し、著しく大きな振動が発生するので、床振動の評価にあたっては、固有振動数や振動モードを精度よく把握し、応答を測定する点を適切に設定するとともに、歩調を床の固有振動と共振するように設定する必要があることが明らかとなった。今回、設計時の解析や竣工前の測定結果と執務者の評価とが必ずしも一致しなかった原因の1つとして、X4通り側の吹き抜けの影響とともに、このような共振の要因が十分に考慮されていなかったことが考えられる。また、この種の床での減衰特性の把握方法の一例として、共振現象の発生度合との関係の観点からより直接的と思われる、加振から所定の時間経過後の振幅の割合を用いる方法を提案した。さらに、歩行時に比較的正弦波に近似した振動が発生することをふまえ、学会指針と照合した結果を提示し、冒頭に述べたこの床振動に対する執務者の評価との関係から、指針に規定され評価曲線の位置付けの一端を明らかにした。

3. エアロビック時に発生する床振動の測定、評価

3.1 測定対象建築物および測定対象床

測定対象建築物であるTビルでは、4階に設置されたスポーツクラブ内のエアロビクススタジオでの教室開催中に、上階の5階にある事務室で床振動が発生するとの指摘があった。図-6に、測定対象建築物の5階平面図と事務室の拡大図を示す。また、図-7に、4階平面図と加振源であるエアロビクススタジオの拡大図を示す。当該建築物は、築後32年が経過したSRC造である。3階より上部は、X5～X9およびY1～Y7の間が34.8×39.6mの無柱空間となっている。4階の床は、Y2～Y6通りにX方向に架けられた5本の大梁(スパン34.8m、中央部はH-1700×350×16×32、端部はこのH形鋼を内包する550×1,940mmのSRC)で支持されている。Y方向には、大梁間に2,175mm間隔で小梁が設けられている。一方、5階の床は、Y3、Y4通りにX方向に架けられた2本の大梁(スパン34.8m)で支持されている。この大梁は、5階から6階にかけて2層分の成を有する550×4,590mmの壁梁で、上部と下部にH-900×300×16×28が内包されている。測定対象の事務室があるY1からY3通りにかけては、X6～X8通りに3本の小梁(600×800～1,000mmのSRC)が設けられている。床板は、4

階、5階ともに厚さ120mmの通常のコンクリートスラブである。なお、5階事務室の床仕上げは、フリーアクセスフロアにタイルカーペットとなっている。

3.2 測定概要

測定は、以下の①～③に示す3項目実施した。

①5階スウィープ加振

図-6に示すように、5階事務室床上にメッシュ状に測定点●、▲を設定した。各測定点は、以降、図に示すA1～9、B1～8の記号を用いて表示する。また、図に示すように、床の中央から少しずれた位置に加振点×を設定し、加振点近傍に基準測定点○を設定した。加振点にランダム加振器を設置し、1～20Hzの範囲でスウィープ加振した時の、基準測定点から各測定点への振動伝達率(振幅比、位相差)を測定した。

②4階正弦波加振

①の結果、5.1Hz近傍および7.0Hz近傍に固有振動数があることが明らかとなったことから、この振動数範囲を対象に、4階から5階への伝搬の要因も考慮し、より詳細な測定を行った。具体的には、①で求めた振動モードより比較的大きな振動が発生すると推定された図-6に●で示すA5B3、A5B5、A5B7、A7B5の4点を代表的な測定点として選定するとともに、図-7に示すように4階エアロビクススタジオ

内に加振点×と基準測定点○を設定し、加振点にランダム加振器を設置して正弦波加振した時の、基準測定点から各測定点への振動伝達率を測定した。測定は、加振振動数4.85Hzから開始し、0.05～0.2Hz間隔で徐々に増加させ、最終的に7.15Hzまで実施した。

③エアロビクスの振動応答の測定

図-8に示すように、4階エアロビクススタジオ内に加振点×を10点設定し、各加振点に加振者1名を配置した。10名の加振者は、年齢21～41歳、身長150～180cm、体重45～83kgの健康な成人男女(男子7名、女子3名)である。加振者の加振点への配置にあたっては、おもに体重の分布が出来る限り均等になるよう留意した。10名の加振者にメトロノームで合図を送りながら、テンポに合わせてエアロビクスの種々の動作のうち加振力の観点から代表的とみなせる³⁾連続跳躍動作を行わせ、この時に発生する床振動を5階の測定点●で測定した。動作のテンポの設定にあたっては、5階事務室床の固有振動数5.1Hzの1/2の2.55Hz、および7.0Hzの1/3の2.33Hzを含むよう留意し、さらに一般的なエアロビクスのテンポの範囲(2～3Hz)も考慮した。

続いて、筆者らの一部らが提案した加振源における新しい振動低減対策技術⁴⁾である、エアロビクススタジオ床の半分にばね一質点系を設置することにより半数の加振者の加振力の位相を逆転させ、全体としての加振力を低減する対策手法の適用性を確認する目的で、加振者を5名ずつ2グループに分割し、互いのグループでテンポを半分ずらして動作する測定を行った。以降、この動作を“分割跳躍”と記す。分割跳躍は、上記の測定で最も大きい振動応答が得られた2.55Hzのテンポで実施した。加振者のグループ分けにあたっては、おもに体重の配分が出来る限り均等になるよう留意した。分割跳躍の際の加振者グループの配置は、床に設置するばね一質点系の配置の影響について検討する目的で、図-8に示すパターンAとBの2種とした。

測定は、いずれも動作を開始し加振者全員のテンポが揃ったとみなせる時点から、30秒程度経過するまで行った。これを1試技とし、各テンポごとに3回の試技を行った。

以上であるが、床振動の測定は、5階事務室ではタイルカーペット上、4階エアロビクススタジオでは床仕上げ材を除去したコンクリートスラブ上に加速度ピックアップ(リオン社製VM-52)を設置して行った。

3.3 測定結果および考察

①5階スウィープ加振

測定の結果、5階事務室床の主要な固有振動数として、5.1Hzと7.0Hzの2種が抽出された。そこで、振動数ごとに基準測定点に対する各測定点での

振幅比を求め、位相差を考慮して+/-の符号を決定したうえで、振動モード図を作成した。図-9に、各振動数における振動モー

図-6 Tビル5階平面図と事務室拡大図

×：加振点 ○：基準測定点
エアロビクススタジオ 拡大図

図-7 Tビル4階平面図とエアロビクススタジオ拡大図

図-8 エアロビクスの加振点の概要

表-3 エアロビクスの床応答の測定概要

動作	テンポ	備考
通常跳躍	2.22Hz	
	2.33Hz	7.0Hz×1/3
	2.44Hz	
	2.55Hz	5.1Hz×1/2
	2.66Hz	
分割跳躍	2.55Hz	5.1Hz×1/2
	2.77Hz	
	2.88Hz	
分割跳躍時の加振者グループの配置はパターンA、Bの2種		

振幅比を求め、位相差を考慮して+/-の符号を決定したうえで、振動モード図を作成した。図-9に、各振動数における振動モー

ドを示す。図は、各測定点における振幅比を等高線で表示したものである。

図より、5.1Hzの振動モードでは、間仕切り壁近傍のA1通りや、2層にまたがる壁梁近傍のB1通りでも比較的振幅が大きくなっており、壁に囲まれた床板(小梁を含む)のみの振動モードではないことがわかる。特に、B1通りに着目すると、事務室のX方向の中心に近いA5B1ではなく、X5～X9に架けられた壁梁の中心であるX7上のA3B1で振幅が最大となっていることがわかる。

すなわち、この振動モードには、Y3通りに架けられた壁梁の1次振動が大きく寄与していることがわかる。一方、7.0Hzの振動モードでは、間仕切り壁近傍のA1通りや、壁梁近傍のB1通りの振幅が比較的小さくなっており、かつ壁に囲まれた床板の中央近傍(A4B5)の振幅が最大となっていることがわかる。すなわち、この振動モードには、床板の壁に囲まれた部分の1次振動が大きく寄与していることがわかる。

以上より、7.0Hzの振動は、5階事務室の中央近傍などに間仕切り壁やついたてなどを設けることにより低減できる可能性が高いが、5.1Hzの振動は、Y3通りに架けられた壁梁の振動を制御しないと低減困難であることが推察できる。

②4階正弦波加振

図-10に、測定の結果得られた、4階基準測定点に対する各測定点での振幅比と、加振振動数の関係を示す。図より、いずれの測定点でも共通の傾向が明確に現れており、5階事務室の床の主要な固有振動数を5.1Hzと7.0Hzに特定してかまわないことが確認できる。

また、①の結果と比較する目的で、図より5.1Hzと7.0Hzにおける各測定点での振幅比を求め、図-9に示した等高線上にプロットして示す。等高線で示した5階基準測定点に対する振幅比とプロットで示した4階基準測定点に対する振幅比の絶対値は直接比較できないが、プロットで示した振幅比の序列がおおむね等高線と整合していることが確認できる。

さらに、4階基準測定点に対する振幅比そのものについて考察すると、5.1Hzでの振幅比は、7.0Hzの振動モードの腹に近いA5B5を含め、いずれの測定点でも7.0Hzより大きくなっていることがわかる。特に、5.1Hzでの振幅比は測定点によっては15程度に達している点が、注目に値する。

③エアロビック時の振動応答

図-11に、5階事務室床で測定された加速度・時間曲線の例を示す。図には、例として、②の結果5.1Hzおよび7.0Hzでの4階基準測定点に対する振幅比がともに比較的大きかったA5B5での結果を示した(以降同様)。図より、振動の大きさを動作のテンポで比較すると、2.55Hzが最も大きくなっており、それよりテンポが速くても遅くても、2.55Hzから離れるにしたがって振動は小さくなっていることがわかる。ここで、2.55Hzの波形に着目すると、おおむね振幅の変動が小さい正弦波に近似した波形が得られていることがわかる。これは、5階床で共振現象が発生していることを示唆するものである。また、2.55Hzの通常跳躍と分割跳躍を比較すると、パターンA、Bのいずれでも、分割跳躍の方が明らかに振動が小さくなっていることが確認できる。

図-9 Tビル5階事務室床の振動モードの測定結果

図-10 正弦波加振による振幅比と加振振動数の関係

図-11 エアロビック時の加速度・時間曲線の測定結果の例

つぎに、図-12に、通常跳躍での加速度・時間曲線の測定結果を1/3オクターブバンド分析し、時定数10msでの各帯域ごとの振動加速度レベルの最大値(0-p)を求め、対応する加速度振幅を学会指針と照合した結果の例を示す。図には、3回の試技の結果の算術平均を示した(以降同様)。図より、最も振幅が大きい振動数帯域は動作のテンポの2倍調波振動数に該当する5Hzまたは6.3Hz帯域であり、テンポに応じて変化していることがわかる。また、この帯域の振幅は、動作のテンポが2.55Hzの場合に最も大きくなっており、それよりテンポが速くても遅くても、2.55Hzから離れるにしたがって小さくなっている。この結果は、図-11で述べた考察結果と一致する。特に、動作のテンポが7.0Hzの1/3にあたる2.33Hzの場合でも、7.0Hzの振動は大きくは発生していない。これは、3倍調波の場合2倍調波と比較して加振力成分

が小さいためと思われる。

以上より、対象とする振動を動作のテンポの2倍調波と5階事務室床の5.1 Hzでの固有振動との共振に絞り込んで、以下に示す要領でより詳細な分析を行った。

・動作のテンポの2倍の振動数前後の2つの1/3オクターブバンドにおける振動加速度レベルのエネルギー和を求める。例えば、動作のテンポが2.55 Hzの場合は、2倍が5.1 Hzであるから5 Hzと6.3 Hzの2つの帯域の振動加速度レベルのエネルギー和を求める。

・求めた振動加速度レベル(0-p)に対応する加速度振幅を縦軸、動作のテンポの2倍の振動数を横軸として、学会指針にプロットする。

以上の方法で分析して得られた、動作のテンポの2倍の振動数とその振動数での振幅の関係を、図-13に示す。図より、動作のテンポが2.55 Hzに近づくにしたがって事務室床の5.1 Hzでの固有振動との共振現象が発生し、大きな振動が発生するメカニズムが明確に把握できる。ちなみに、この時の振幅はV-90を上回る程度となっている。

最後に、図-14に、分割跳躍の場合の1/3オクターブバンド分析結果を、図-12と同様の形式で示す。図より、当該事務室床で問題となっている5 Hz帯域の振幅に着目すると、通常跳躍の5.0 cm/s²程度に対し分割跳躍では3.5 cm/s²程度となっており、30%程度の低減効果があることがわかる。また、パターンAとBでは、結果に大きな差はみられない。なお、今回の測定では、加振者グループごとの位相の反転を加振者の動作能力に委ねており、非常に難易度の高い試技となったため、測定結果のばらつきが比較的大きくなった。そこで、振動加速度レベルの最大値だけでなく等価値や80%レンジ上端値に基づいた比較も行った結果、5 Hz帯域の振幅は、等価値では3.0 cm/s²程度から1.7 cm/s²程度に、80%レンジ上端値では4.5 cm/s²程度から2.8 cm/s²程度に減少しており、それぞれ43%、38%程度の低減効果が確認できた。

3.4 まとめ

複雑な大スパン構造を有する建築物を対象に、4階に設置されたエアロビックスタジオでエアロビクスした時に直上階の事務室で発生する床振動を測定した。その結果、当該事務室床では5.1 Hzと7.0 Hzの2つの固有振動数、振動モードが抽出された。このうち、前者には、制御が困難な大スパンかつ大質量の壁梁の振動が大きく寄与しているが、エアロビクス時の振動にはこの振動が関与しているため、伝搬経路や受振側での対策の選択肢は限られることが予想された。また、エアロビクスのテンポの倍調波と床の固有振動との共振により大きな振動が発生するメカニズムを詳細に把握した。さらに、この種の振動を評価する場合、振動数について1/3オクターブバンドより細かい分析が必要となる可能性があることを示唆し、その際の1つの方法を例示した。最後に、筆者らの一部らが提案した加振源における新しい振動低減対策技術について、実在建築物において基礎的検討を行い、その適用性を確認した。すなわち、本技術は、解析的検討や規模に制約のある実験室実験の

図-12 通常跳躍時の床振動の評価例

図-13 2倍調波振動数と振幅の関係例

図-14 通常跳躍時と分割跳躍時の床振動の評価例

結果有効性が確認されているが、今回、加振者が面的に分布しかつ振動が広範囲に伝搬する実在建築物においても、その有効性が確認できた。

4. おわりに

本報では、2つの建築物の固有振動数や減衰が比較的小さい床を対象に、歩行およびエアロビクス時に発生する振動について測定、評価した経過、結果を述べた。いずれの建築物でも、はじめに当該床の固有振動数や振動モードなどを詳細に把握し、動作時に大きな振動が発生すると予想される測定点や、共振現象が発生すると思われる動作のテンポなどを設定した。続いて、動作のテンポを微妙に変化させながら発生する振動を測定し、床の固有振動との共振により大きな振動が発生するメカニズムを明らかにした。また、発生する振動を学会指針と照合し、共振現象が発生している場合としていない場合とでは評価が大きく異なる可能性があることを示すとともに、当該建築物使用者の床振動に対する評価との関係から、指針に規定された曲線のこの種の振動に対する位置付けの一端を明らかにした。すなわち、床振動を評価する際に共振の要因を考慮することの重要性を明らかにするとともに、そのための手法を具体的に例示した。さらに、共振現象の発生度合の観点からより直接的と思われる減衰特性の把握方法や、共振現象について詳細に分析する場合の振動数の取り扱い方法など、この種の床振動を評価する際有効と思われるいくつかの方法を提案した。最後に、筆者らの一部らが提案した加振源における新しい振動低減対策技術について、加振者が面的に分布しかつ振動が広範囲に伝搬する実在建築物において基礎的検討を行い、共振現象が発生する振動数帯域の振幅が30%程度低減するなど、十分な適用性を有することを確認した。

謝辞

Tビルでの床振動測定にあたり種々御配慮、御協力いただいた、国際航業株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 井上竜太, 横山 裕: パッシブ手法による相殺型加振力低減技術の理論的検討, 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(その1), 日本建築学会環境系論文集, 第599号, pp.17-22, 2006.1
- 2) 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, 2004.5
- 3) 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, 2006.6

[2006年4月20日原稿受理 2006年7月27日採用決定]