

床振動の予測解析と対策技術

Simulation Analysis and Countermeasure Technology for Floor Vibration

石川 理都子 Ritsuko Ishikawa
 三輪田 吾郎 Goro Miwada
 (本社設計本部)
 青山 優也 Yuya Aoyama
 吉田 治 Osamu Yoshida

1. はじめに

近年、事務所ビルの大スパン化や、フィットネススタジオなどの振動源と居住空間や医療機器などの嫌振機器が共存する複合施設の増加などにより、日常的な振動環境に対する関心が高まっている。

こうした状況の中、新築建物では従来よりも高い居住性能が要求される傾向があり、設計段階で日常的な床振動を予測し、対策を検討するケースが増えてきている。

一方、既存の事務所ビルでは、歩行等による振動が気になるという入居者からの指摘を受けて調査・対策を実施する事例が増加傾向にある。

本報では、2000年代半ばから予測解析の高精度化を目指して進めてきた研究の概要と、振動低減対策のひとつとして開発中の低コスト型TMDについて紹介する。

2. 床振動の解析技術

2.1 予測解析の現状と課題

設計段階で床振動の予測を行う場合、Fig. 1のように柱・梁を線材、床スラブを板要素でモデル化した立体解析を行うことが一般的になりつつある。

市販解析ソフトのユーザーインターフェース機能の向上により、容易に立体モデルの解析ができるようになってはきたが、モデル化の範囲や境界条件、各種解析条件や加振力の設定が適切に行われないと、解析精度が著しく損なわれる場合がある。

特に大スパン構造や精密機械工場では、耐震性能よりも居住性能や機器許容値によって部材断面等が決まるケースもあり、予測解析の精度向上はますます重要になってきている。

解析結果を左右する要因は、解析モデルの精度、加振力の設定、解析条件の3つに大きく分けられる。各要因についての研究成果の概要を以下に示す。

2.2 解析モデルの精度

解析モデルの精度向上のため、筆者らは鉄骨造を中心とした各種建物において、測定結果のシミュレーション解析により適切なモデル化条件を検討してきた^{1)~3)}。検討にあたっては、動荷重計を内蔵したインパルスハンマーによる加振試験を行い、応答加速度を加振力で基準化したアクセラランスを解析対象とすることで、加振力の特性や大小によらず、構造物そのものの特性を評価でき

る方法をとっている。

例えば Fig. 2 では下階の内壁をモデル化することで、Fig. 3 では柱を下階だけでなく評価階の柱頭までモデル化することで精度が向上した事例であり、まだ課題はあるものの、着実に精度向上のためのノウハウを蓄積しつつある。

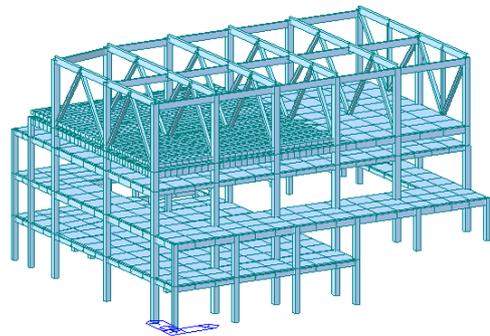


Fig. 1 立体解析モデルの例
Three-dimensional Analytical Model

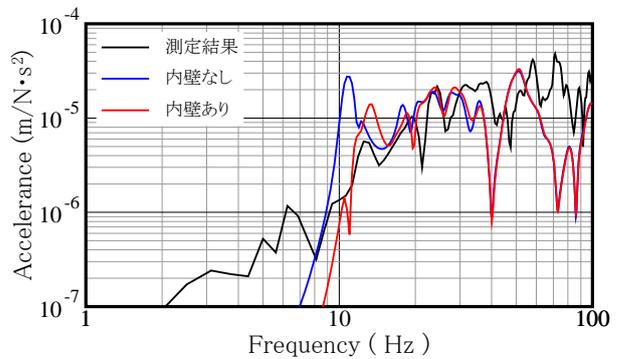


Fig. 2 内壁のモデル化検討事例²⁾
Case Study on Modeling of Inner Wall

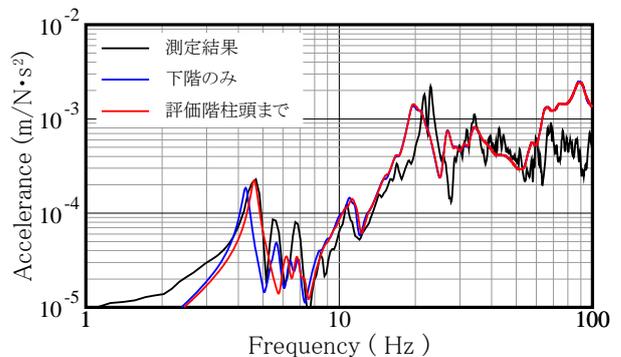


Fig. 3 柱モデル化範囲の検討事例³⁾
Case Study on Modeling Range of Pillars

2.3 加振力の設定

日常的な床振動を発生させる原因は、人の動作、設備機器、生産機械、さらには建物外部からの交通振動など様々であるが、人の動作はばらつきが大きく、機器類は種類が千差万別である。

そのため、あくまでも「平均的な」あるいは「代表的な」ものにはなるが、需要の多いものについては加振力の定量化を試みてきた (Fig. 4~6参照)。

人の動作としてフィットネス⁴⁾、歩行⁵⁾、ライブハウスのたてのり⁶⁾、設備機器としては実測を元に評価した不特定多数の設備機器による等価加振力⁷⁾や、個別の出力

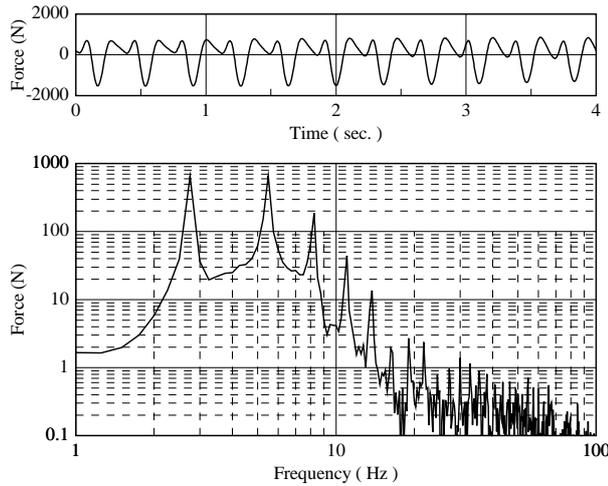


Fig. 4 フィットネス運動による加振力⁴⁾
Exciting Force by Fitness Exercise

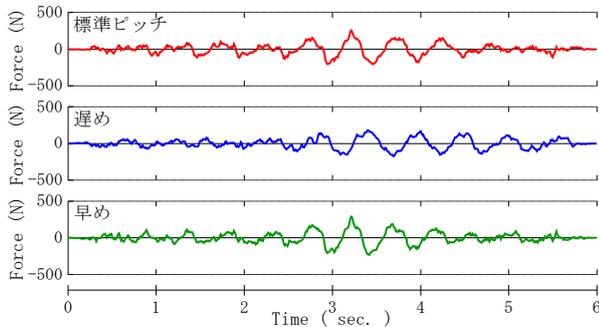


Fig. 5 歩行による加振力⁵⁾
Exciting Force by Walking

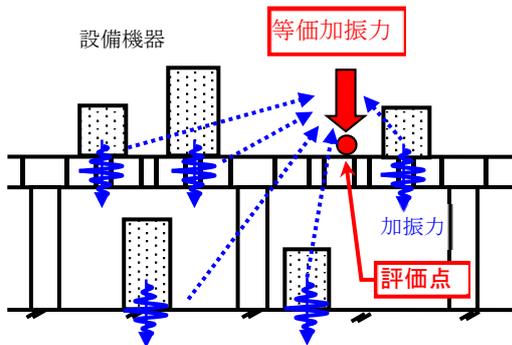


Fig. 6 設備機器の等価加振力の基本概念⁷⁾
Basic Concept of Equivalent Excitation Force

と回転数から空調機等の加振力を推定する近似式⁸⁾、さらに事務室が併設される生産施設、4Dシネマの可動椅子による振動などについても検討を進めている。

2.4 減衰定数の評価

振動解析において、振動の収まりやすさを表す減衰定数は、解析結果に及ぼす影響が最も大きい。減衰定数の評価としては、現在のところ、楢田によるスパン長と減衰定数との回帰式⁹⁾がほぼ唯一の拠り所となっている。しかし、回帰式の推定に用いられたデータのバラツキが大きい上に、隣接スパンや上下階への逸散効果も含まれていることから、設計段階では安全側の設定とせざるを得なかった。

そこで、実測応答を立体モデルで精度よく再現できる減衰定数を、床の各種諸元を用いて統計的に推定する手法を考案した。それについて概説する^{10)~12)}。

次に、人体感覚が加速度振幅の対数に比例的であると考えられていることから、「実測減衰定数の逆数の対数」を目的変数とした回帰分析を実施した。

まず、S造8物件28箇所において測定したアクセラランスを対象に、立体モデルにより減衰定数をパラメータとしたシミュレーション解析を行い、実測結果に最も合致する減衰定数を推定し、「実測減衰定数」と定義した。

回帰分析のパラメータとなる説明変数については、構造諸元や簡易な計算で導かれる値の中からTable 1に示す24種類を候補として選定した。

表中の単相関係数は各パラメータと目的変数との相関の高さであり、正の場合はパラメータの値が大きいほ

分類	パラメータ	単相関	採用
スパン	長辺	-0.09	
	短辺	0.20	
	長辺/短辺	-0.19	●
	面積	0.18	
	自由辺長	0.04	
	自由辺長/周長	0.03	
	小梁本数	-0.04	
高さ	評価階の階高	0.05	
	減衰評価階-1	-0.68	
	総階数	-0.58	●
	(評価階-1)/総階数	-0.58	●
スラブ	フラット部	-0.04	
	総厚	-0.31	
	有効厚	-0.12	
合成梁 (大梁)	有効幅	-0.05	
	単位長さ質量	0.09	
	断面2次モーメント	0.31	●
	固有振動数(f_c) ¹²⁾	0.09	
合成梁 (小梁)	有効幅	0.05	
	単位長さ質量	-0.06	
	断面2次モーメント	0.16	
	固有振動数(f_b) ¹²⁾	0.01	
合成梁	固有振動数比(f_c/f_b)	0.05	●
	固有振動数差(f_c-f_b)	0.07	
	重相関係数	0.98	0.91

ど目的変数が大きく(実測減衰定数が小さく)、負の場合は逆に目的変数が小さく(実測減衰定数が大きく)なる傾向があることを示している。

この中から複数のパラメータを組み合わせた重回帰式の作成を試みたが、単相関係数の大きいパラメータの組み合わせが最適とは限らないことがわかった。

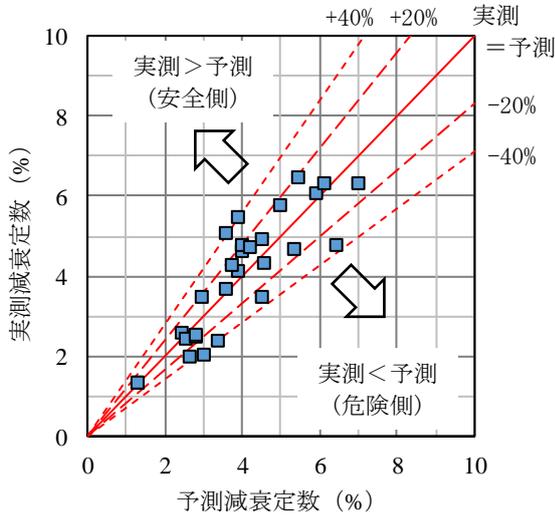


Fig. 7 予測減衰定数と実測減衰定数の比較¹¹⁾
Comparison of Predicted and Measured Damping Ratio

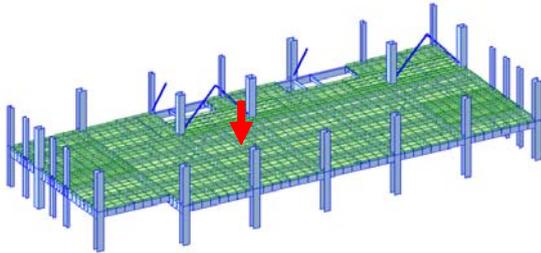


Fig. 8 解析モデル
Analytical Model

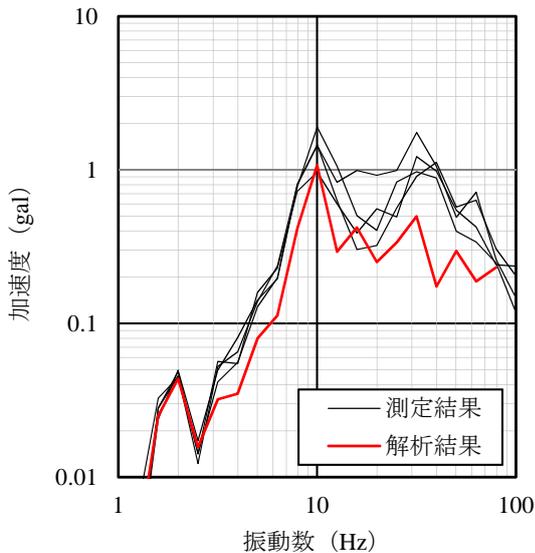


Fig. 9 予測減衰による解析結果
Analytical Result by Predicted Damping Ratio

そこで、この中から5種類を選ぶ ${}_{24}C_5=42504$ 通りの組み合わせについて重回帰式を作成し、重相関係数が最も高いパラメータの組み合わせを説明変数とした。その結果、5変数による重相関係数は0.91で、全変数を用いた場合の0.98にかなり近い結果となった。

こうして得られた重回帰式を用いて求めた予測減衰定数と実測減衰定数との関係を

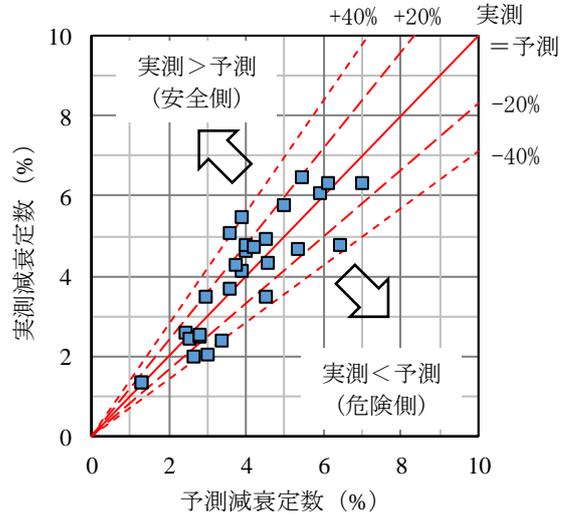


Fig. 7に示す。実測値と予測値の誤差は、28点中20点が $\pm 20\%$ 以内、24点が $\pm 40\%$ 以内に収まっており、非常に高い精度で実際の減衰定数を予測できている。

2.5 歩行振動のシミュレーション解析事例

Fig. 8に示す解析モデルのスパン中央における歩行振動を対象として、前節までの成果に基づく解析結果を、測定結果と比較してFig. 9に示す。対象建物は一般的な事務所ビルの貸室エリアで、測定結果は水平2方向に2回ずつ1人歩行試験を実施した結果をまとめて示した。

床剛性と加振力の影響が支配的な歩行ピッチの2Hz付近は、測定結果と解析結果がよく対応している。減衰の影響が支配的な10Hz付近は、解析結果がやや小さめではあるが、測定結果のばらつきの範囲内に収まっている。

3. 低コスト型TMD

3.1 開発の経緯

必要な居住性能を架構性能のみで確保できない場合や既存の建物で床振動が大きい場合の対策として、同調質量型制振装置(TMD)が使われることが多い。

TMDは、バネ支持した錘(床質量の1~5%程度)を床の固有振動数に同調させてエネルギーを吸収する仕組みとなっている。防振対策専門のメーカー数社が商品化しているが、価格に占める材料費の割合が小さく、既存建物に適用しやすいOA床下設置タイプは1台あたりの錘質量が小さいため非常に割高となる。

そこで、大幅なコストダウンをめざし、市販の材料を利用して現場で簡単に組み立てられるTMDを開発した。

3.2 低コスト型TMDの基本構成

開発したTMDは、支持材として量産品のバネと市販の減衰材を用い、錘は穴開け加工した鉄板を積層することで、手作業で容易に組み立てられるとともに、バネの種類によって剛性を、鉄板の枚数によって質量を微調整し

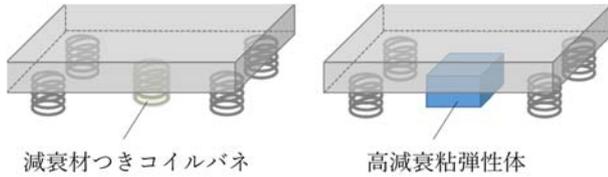


Fig. 10 低コスト型TMDの基本構成
Basic Configuration of Low Cost Type TMD



Photo 1 低コスト型TMDの実証実験
Experiment of Low Cost Type TMD

Table 2 実験ケース
Experimental Case

	AMD(既設)	TMD(試作品)
非制振	停止	なし
SP30	停止	減衰材 SP30
SP10	停止	減衰材 SP10
AMD	稼働	なし

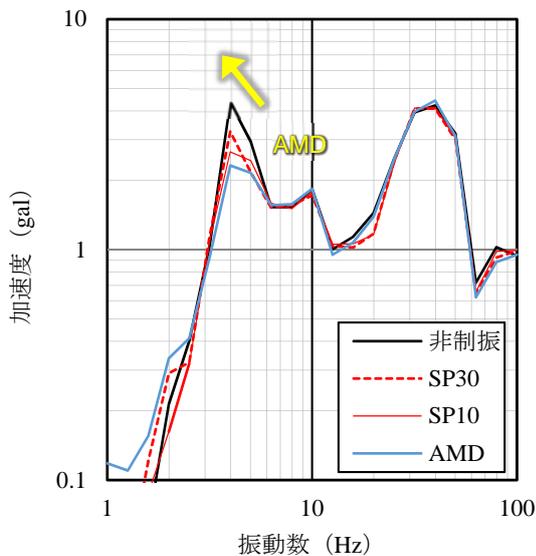


Fig. 11 低コスト型 TMD の性能確認結果
Damping Performance of Low Cost Type TMD

て固有振動数を目標に合わせることが可能となっている。

減衰材としては、Fig. 10のように、内側に粘弾性体を挿入したコイルバネと、高減衰粘弾性体の2種類を検討している。

3.3 固有振動数調整機能の検証と実証実験

200mm程度のOA床下に収まるタイプの試作品による自由振動実験を行い、固有振動数の調整が可能であることを確認した上で、大林組技術研究所本館テクノステーションのブリッジ¹³⁾において、一定の加振力を与えられるインパクトボールを用いた加振実験を行った。

ブリッジにおける実験状況をPhoto 1、実験ケースをTable 2、実験結果をFig. 11に示す。ブリッジには元々アクティブマスダンパー(AMD)が設置されているが、非制振モードへの切替が可能となっている。これを利用して、非制振、試作品のみ、アクティブ制振(AMD)の3通りの実験を実施した。

その結果、ブリッジの固有振動数4Hzに対してほぼ最適に調整できた状態(SP10)でAMDよりやや大きめ、若干ずれたSP30でも非制振とアクティブの中間程度の応答となり、TMDとして十分な効果があることを確認できた。

4. まとめ

設計段階における日常的な床振動の予測精度を向上するための取り組みと、振動低減対策のひとつとして開発中の低コスト型TMDについて紹介した。

低コスト型TMDは、容易に入手可能な部品のみを用いてTMDとして十分な性能を発揮することを確認できた。本TMDは既に実際の建物の床にも適用されている。今後は100mm程度のOA床下に収まるタイプの開発も行う予定である。

参考文献

- 1) 三輪田, 他: 防振浮床における動剛性のFEM解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 431-432, 2008.7
- 2) 三輪田, 他: 内壁が微振動の水平方向への伝搬に及ぼす影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 383-384, 2009.7
- 3) 石川, 他: 大スパン格子梁床を対象とした振動解析モデルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 341-342, 2012.9
- 4) 石川, 他: フィットネス運動による逆算加振力の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 339-340, 2007.7
- 5) 石川, 他: 実測データに基づく歩行加振力評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 391-392, 2011.7
- 6) 石川, 他: 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, D-1, pp. 371-372, 2013.8
- 7) 吉田, 他: 精密生産工場の設備機器を対象とした一般

- 化等価加振力の策定手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 255-256, 2005.7
- 8) 石川: 設備機器による床振動の簡易評価手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 343-344, 2014.9
- 9) 榎田裕: 統計的手法に基づく床振動評価に関する研究, 日本建築学会計画計論文報告集, 第407号, pp. 57-67, 1990.1
- 10) 石川, 他: 床振動解析に用いる減衰定数の統計的評価手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 447-448, 2016.8
- 11) 石川, 他: 床振動の予測と検証実験, STRUCTURE No.140, pp. 22-25, 2016.10
- 12) 石川: 床上下振動の簡易予測手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp. 473-474, 2008.7
- 13) 武田, 他: 常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート®」の屋内ブリッジへの適用, 大林組技術研究所報, No. 74, 2010.12