

床振動の予測解析と対策技術

（株）大林組技術研究所構造技術研究部 石川 理都子

1. はじめに

近年、事務所ビルの大スパン化や ICT 環境の充実に伴う着席率の増加、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関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も増加傾向にある。

本稿では、予測解析における基本的な留意事項と、解析条件の中でも評価が困難な減衰定数を構造諸元から精度よく推定する手法、および振動低減対策のひとつとして開発中の低コスト型 TMD（同調質量型制振装置）について紹介する。

2. 床振動の予測解析

設計段階で床振動の予測を行う場合、図-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^{1,2)}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でないと、解析精度が著しく損なわれる場合がある。

構造物の振動特性は、質量、剛性、減衰をパラメータとした運動方程式で表現される。地震応答の場合、質量に比例する慣性力が外力となるため、運動方程式を質量で基準化して固有振動数と減衰定数で振動特性を評価することができる。

一方、歩行や設備機器などの内部加振源の場合には、加振力が外力として直接作用するため、固有振動数と減衰定数が同じでも、重くて固いほど揺れにくいという特徴があり、剛性または質量を正確に把握することが重要である。

質量と剛性に関しては、実情に即した積載荷重、梁とスラブの偏心による合成梁効果を考慮し、評価点を含むスパンの周囲1スパンと、少なくとも上下1層分の柱をモデル化することで、概ね実測に近い固有振動数を得ることができる。

一方、減衰定数については、櫛田³⁾によるスパン長との回帰式がほぼ唯一の拠り所となっているが、データのバラツキが大きく、設計段階では安全側の設定と

せざるを得ない。さらに、加振実験による自由減衰波形から求められた減衰定数には、隣接スパンや上下階への逸散効果が含まれており、立体モデルの内部減衰としてそのまま用いると逸散効果を二重評価する恐れもある。

一例として、構造形式の異なるモデルに一律2%のモード減衰定数を与えて、加振実験のシミュレーション解析を行った結果を図-2に示す。

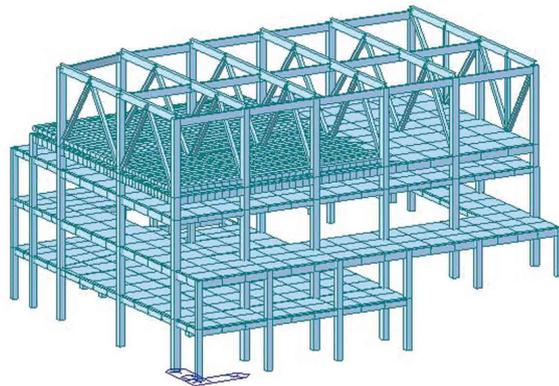


図-1 立体解析モデルの例

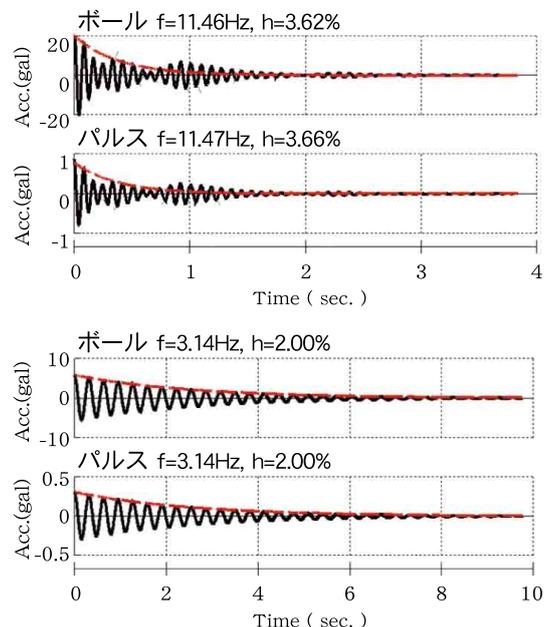
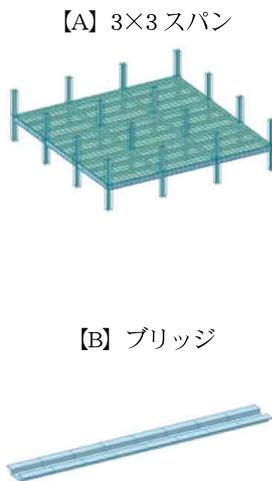


図-2 加振実験のシミュレーション解析結果

加振力は、JIS A1418-2の標準重量衝撃源（衝撃力特性2）に準拠するインパクトボールを模擬したものと、周波数領域で一定となるパルス波の2種類とした。

解析結果から求めた減衰定数⁴⁾は、単純梁に近いブリッジの場合はモード減衰と同じ2.0%だが、3×3スパンのモデルでは3.6～3.7%となっており、この差はモデル内の隣接スパンへの逸散や近接モードによるピーク分散などによるものと考えられる。

そこで次章では、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について示す^{5,6)}。

3. 振動解析に用いる減衰定数の評価手法

まず、表-1に示すS造8物件28か所において測定したアクセラランス（加振力で基準化した応答加速度）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することとした。

複数ピークが近接しているケースではピーク高さの比較が難しいことなどを勘案し、実測結果との比較対象は1次卓越振動数付近における振動エネルギー（アクセラランスの二乗和）とした。

具体的には1次卓越振動数付近で幅2Hzに含まれるエネルギーが最大となる周波数帯域を求め、実測と解析でエネルギーが等しくなる減衰定数を図-3

のように線形補間により求めて「実測減衰定数」と定義した。

(1) 目的変数の設定

減衰定数評価の目的は応答振幅を精度よく再現することであり、また、人体感覚は加速度振幅の対数に比例的であると考えられている。そこで、「実測減衰定数の逆数の対数」を回帰分析の目的変数にすることとした。

(2) 説明変数の設定

回帰分析のパラメータとなる説明変数の設定にあたり、まず構造諸元や簡易な計算により導かれる値の中から減衰に影響を与える可能性のあるものとして表-2に示す24種類のパラメータを候補として選定した。表中には目的変数に対する単相関係数を合わせて示すが、全般的に単独での相関係数は低い。

この中から、重回帰式により予測した減衰定数と「実測減衰定数」との相関がよい組み合わせを探索する方法として以下の3通りを検討した。

①パラメータ削減方式

まず全パラメータを説明変数とした重回帰式を作成し、相関係数への影響が小さいパラメータを順次削減して残った5種類を説明変数とした。

②パラメータ追加方式

最も単相関係数の高い「減衰評価階-1」と階数関係以外で次点の「大梁の断面2次モーメント」の2変数による回帰式に対し、相関係数を上昇させる効果が最も大きいパラメータを順次3種類追加

表-1 対象建物の概要

建物	No.	長辺	短辺	小梁	評価階	実測減衰
A	1	13.2m	7.2m	4本	5/9階	1.97%
	2	13.2m	7.2m	4本	6/9階	2.05%
	3	13.2m	7.2m	4本	7/9階	2.41%
B	4	15.6m	5.4m	5本	5/7階	3.46%
	5	15.6m	5.4m	5本	5/7階	4.95%
C	6	10.8m	10.8m	3本	5/6階	2.58%
D	7	13.8m	7.2m	4本	5/7階	2.42%
	8	13.8m	7.2m	4本	5/7階	2.51%
	9	13.8m	7.2m	4本	5/7階	2.55%
	10	13.8m	7.2m	4本	7/7階	5.06%
	11	13.8m	7.2m	4本	7/7階	4.62%
	12	13.8m	7.2m	4本	7/7階	4.80%
E	13	17.3m	6.4m	6本	5/13階	3.68%
	14	17.3m	6.4m	6本	6/13階	5.46%
	15	17.3m	6.4m	6本	7/13階	4.72%
	16	17.3m	6.4m	6本	8/13階	4.34%
	17	17.3m	6.4m	6本	9/13階	5.76%
	18	17.3m	6.4m	6本	10/13階	6.45%
	19	17.3m	6.4m	6本	11/13階	6.09%
	20	17.3m	6.4m	6本	12/13階	4.77%
	21	17.3m	6.4m	6本	13/13階	6.32%
F	22	8.5m	8.35m	2本	7/10階	4.15%
	23	8.5m	8.35m	2本	8/10階	6.30%
G	24	9.0m	9.0m	2本	3/5階	4.27%
	25	12.0m	9.0m	2本	4/5階	4.66%
	26	12.0m	9.0m	3本	4/5階	3.46%
H	27	16.7m	7.2m	6本	2/4階	1.36%
	28	16.7m	7.2m	6本	2/4階	1.32%

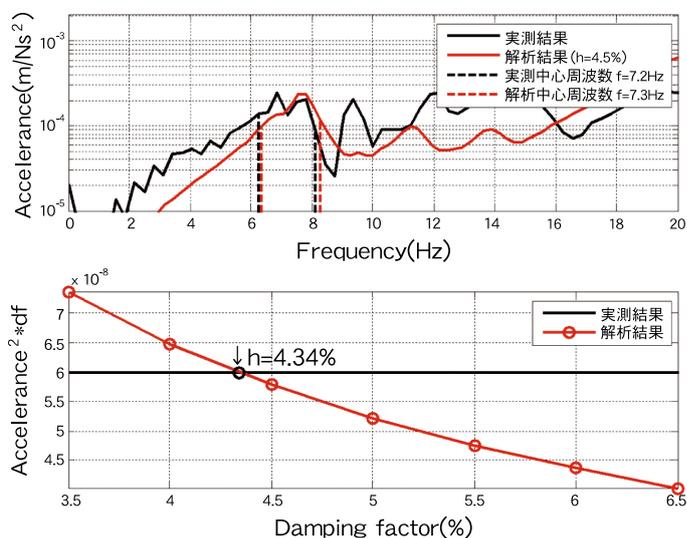


図-3 実測減衰定数の評価例

して計5種類を説明変数とした。

③総当たり方式

24種類の全パラメータから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、最も相関係数の高いパラメータの組み合わせを説明変数とした。

(3)減衰定数の推定結果

各方式による説明変数の選定結果と、重回帰式による予測減衰と実測減衰との重相関係数を表-2に示す。全ての変数を用いた回帰式による重相関係数0.98に対し、削減方式は0.69、追加方式は0.78、総当たり方式は0.91となった。

総当たり方式により決定した重回帰式を用いて求めた予測減衰と実測減衰との関係を図-4に示す。実測値と予測値の誤差は、28点中20点が±20%以内、

24点が±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る式となっている。

(4)精度の検証

図-5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た解析結果

を測定結果と比較して図-6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。

解析に用いた減衰定数は総当たり方式による重回帰式で評価し、加振力は振動

表-2 説明変数と相関係数

分類	パラメータ	単相関	(a) 削減	(b) 追加	(c) 総当
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		●	●
合成梁 (小梁)	固有振動数(f_G) ⁷⁾	0.09			
	有効幅	0.05		●	
	単位長さ質量	-0.06			
	断面2次モーメント	0.16			
合成梁	固有振動数(f_B) ⁷⁾	0.01			
	固有振動数比(f_G/f_B)	0.05			●
	固有振動数差(f_G-f_B)	0.07			
	重相関係数	0.98	0.69	0.78	0.91

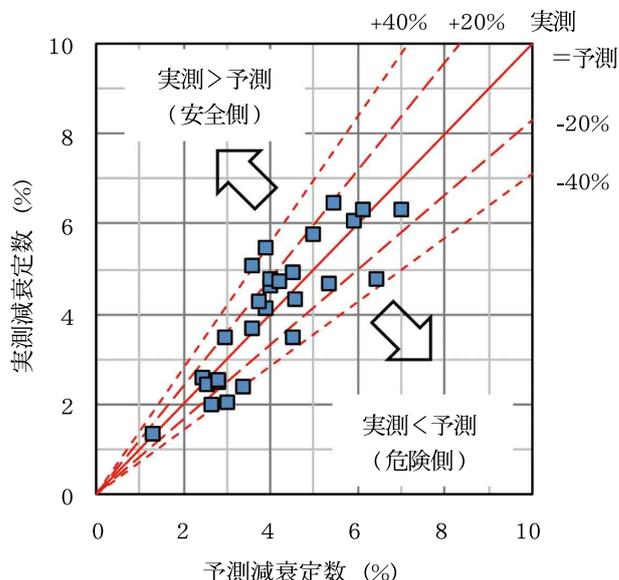


図-4 予測減衰定数と実測減衰定数の比較

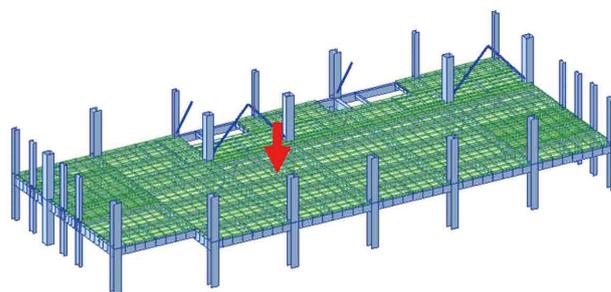


図-5 検証用解析モデル

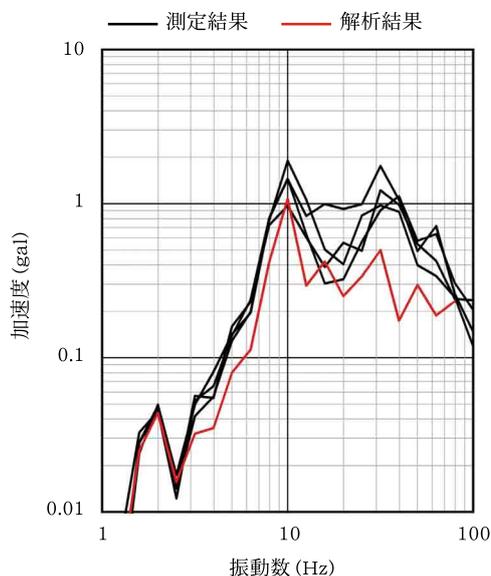


図-6 予測減衰による解析結果

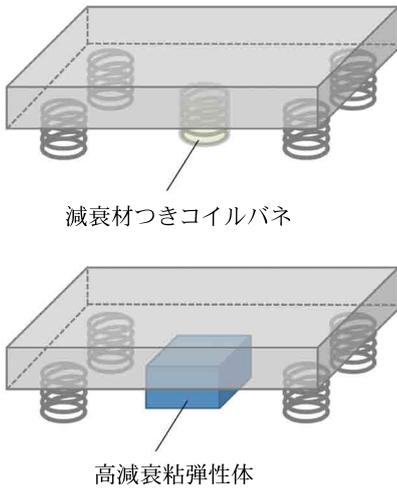


図-7 低コスト型TMDの基本構成

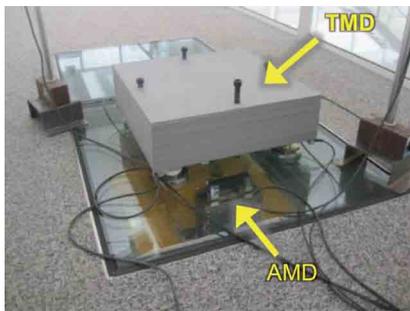


写真-1 低コスト型TMDの試作品

測定結果から逆算した平均的な歩行加振力⁸⁾とした。

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。

4. 低コスト型TMD

(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、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0A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。

表-3 実験ケース

	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

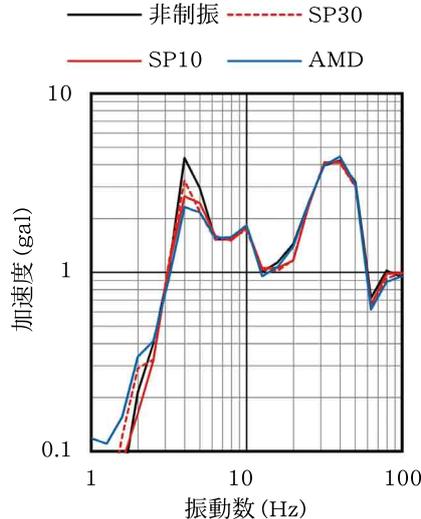


図-8 TMDの性能確認結果

(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、図-7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種類を検討した。

(3) 調整機能の検証と実証実験

200mm程度の0A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、(株)大林組技術研究所本館テクノステーションのブリッジ⁹⁾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写真-1、実験ケースを表-3、実験結果を図-8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。

5. おわりに

建物内で発生する床振動に関して、予測解析における基本的な留意点、解析に用いる減衰定数を精度よく推定する手法、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。

【参考文献】

- 1) 三輪田, 石川, 中村: 防振浮床における動剛性のFEM解析, 建築学会大会学術講演梗概集D-1, pp. 431~432, 2008年
- 2) 石川, 田中, 松田: TMDによるライブハウスの振動対策, 建築学会大会学術講演梗概集D-1, pp. 371~372, 2013年
- 3) 榎田裕: 環境振動工学入門, 1997年
- 4) 石川, 吉田, 関: 流体式制振装置の減衰特性に関する検討, 建築学会大会学術講演梗概集B-2, pp. 149~150, 2004年
- 5) 石川, 三輪田, 中村: 床振動解析に用いる減衰定数の統計的評価手法, 建築学会大会学術講演梗概集D-1, pp. 447~448, 2016年
- 6) 石川, 三輪田, 中村: 床振動の予測解析と検証実験, STRUCTURE No. 140, pp. 22~25, 2016年
- 7) 石川: 床上下振動の簡易予測手法に関する研究, 建築学会大会学術講演梗概集D-1, pp. 473~474, 2008年
- 8) 石川, 三輪田, 中村: 実測データに基づく歩行加振力評価手法の提案, 建築学会大会学術講演梗概集D-1, pp. 391~392, 2011年
- 9) 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年
- 10) 石川, 三輪田, 青山, 吉田: 床振動の予測解析と対策技術, 大林組技術研究所報, No. 81, 2017年