

計測による性能確認

東京都市大学 名誉教授 濱本卓司

1. はじめに

環境振動設計における設計フローの最後に位置づけられているのが振動計測による性能確認である¹⁾。環境振動は居住性にかかわる振動であり、強風と長周期地震動を含む自然振動源を除けば発生頻度が高く、振動計測による性能確認を行いやすい。これは、大きな地震が発生しない限り建物の耐震性能を確認できない耐震設計との大きな違いである。このため、環境振動設計においては、設計者として目標性能の達成を確認するとともに、施主に要求性能の実現を説明するために、竣工後検査として振動計測を取り入れることを推奨している。計測方法は加振や打撃などの強制振動を利用する評価のための振動計測とは異なり、建物に日常的に発生している周囲振動(ambient vibration)のパッシブ計測を中心に据えている。

環境振動設計の立場から必要となる振動計測は、評価のための振動計測とは異なる。評価のための振動計測が建物の応答を対象とするのに対し、設計のための振動計測は環境振動の伝搬特性を把握することを目的としている²⁾。すなわち、振動計測に基づき入力と応答を関係づける伝達関数を求め、伝達関数から共振現象を支配する固有振動数と減衰比の2つの設計パラメータを推定する。計測により推定された固有振動数と減衰比を設計で設定した固有振動数と減衰比と比べ、両者の対応関係に基づいて目標性能の達成と要求性能の実現を確認する。

ここでは、環境振動設計の流れの中で必要となる性能確認のための計測方法の概要と計測例を紹介する。

2. 設計のための振動計測

環境振動設計の目的は、建物内において居住性を損なうような振動の発生を回避することである。このための対策として、建物への入力を低減する方法と建物内での振動の増幅を回避する方法がある。建物への入力を低減する方法は建設費の大幅な引き上げにつながるが多いため、一般には建物内での振動の増幅を回避する方法が用いられる。建物内での振動の増幅は建物架構の全体振動あるいは部位・部材の局部振動の共振現象によって引き起こされる。このため、建物内で生じる全体振動と局部振動の共振現象をいかに回避すべきかが環境振動設計の良し悪しを決定することになる。建物内の振動を発生させる原因は数多いが、環境振動設計では、これを自然振動源、内部人工振動源、外部人工振動源の3つの振動源グループに分類して考えている。

2.1 自然振動源

自然振動源には強風と長周期地震動が含まれる。これらの入力に対して環境振動リスクが高い建物は高層建築物、中低層ペンシルビル、木造3階建てなどである。このとき建物内に発生する振動は、主に架構全体の長周期水平振動となるので、床の水平振動により居住性が阻害されることを回避する必要がある。自然振動源に対する環境振動設計の対象領域は建物の全体架構になる。したがって、自然振動源に対する設計のための振動計測は、全体架構の伝搬特性を把握することが目的になる。

2.2 内部人工振動源

内部人工振動源には歩行，走行，跳躍などの人間活動と建物内に設置された設備機器から発生する振動が含まれる。これらの入力に対して環境振動リスクが高い構造種別は木造と鉄骨造であり，鉄筋コンクリート造のリスクは相対的に低い。しかし，建物の大スパン化に伴い最近では鉄筋コンクリート造でも問題になることがある。建物内に発生する振動は，振動発生源から近い範囲の床・梁の局部振動となることが多いので，床の鉛直振動により居住性が阻害されることを回避する必要がある。内部人工振動源に対する環境振動設計の対象領域は，振動発生源から応答評価点までの建物内の一部の領域になる。したがって，内部人工振動に対する設計のための振動計測は，通常，加振源近傍の局部的な伝搬特性を把握することが目的となる。

2.3 外部人工振動源

外部人工振動源には道路交通振動，鉄道振動，工場振動が含まれる。これらの振動源が引き起こす振動の特徴は，地盤振動が建物架構の全体振動と部位・部材の局部振動に大きな影響を与えるという点である。このため，建物と地盤とを連成系として捉える視点が必要になる。振動源から対象建物までの伝搬経路には広大な地盤領域が広がっているが，環境振動設計が引き受けるのは当該建物の敷地内に限定される。敷地境界から建物近傍地盤までの伝搬経路は敷地内距離減衰として評価し，建物近傍地盤から建物基礎あるいは1階までの伝搬経路は **kinematic interaction** としての入力損失と **dynamic interaction** としての地盤ばねに分けて評価する。

地盤振動には鉛直成分と水平成分が含まれており，建物の応答も鉛直振動と水平振動の両者を考慮する必要がある。水平振動に関しては，自然振動源と同様に架構全体の振動伝搬に着目すればよいが，鉛直振動に関しては架構全体の振動伝搬に加え，内部人工振動源と同様に床・梁の局部的な振動伝搬の把握も必要になる。外部人工振動源に対する環境振動設計の対象領域は敷地地盤，建物の全体架構，および部位・部材になる。したがって，外部人工振動源に対する設計のための振動計測は，敷地内の地盤振動，建物の全体振動，および部位・部材の局部振動に関する広範な伝搬特性を把握することが目的となる。

3. 計測方法

設計のための振動計測では，環境振動設計にかかわる多様な振動源に対する敷地の地盤振動，建物架構の全体振動，および床・梁の局部振動の把握が必要になる。特定の振動源に対する振動計測であれば，評価のための振動計測として利用されている加振や打撃による各種の強制振動による方法も有効である。しかし，環境振動設計における性能確認のための振動計測では，振動源ごとに強制振動を個別に実施するとなると煩雑過ぎて現実的ではない。特定の振動源ではなく，環境振動にかかわる多様な振動源に対する性能確認を行うための有効かつ効率的な方法は，強制振動ではなく，建物に日常的に発生している周囲振動 (**ambient vibration**) のパッシブ計測である。

設計のための振動計測として，日常的に発生している周囲振動の計測を採用する理由は，振動計測の目的が特定の振動源に対する応答の評価ではなく，多様な振動源に対する地盤，建物架構，および部位・部材の伝搬特性の把握を短時間で効率的に行う

ためである。建物の振動性能は入力と応答の間の伝達関数として表現できる。したがって、建物内の複数点で振動を計測すれば、入力と応答の因果関係に着目して設計対象領域の増幅特性あるいは減衰特性を把握することができる。この伝達関数を端的に表現しうる設計パラメーターが固有振動数と減衰比である。

多様な振動源から伝搬する環境振動を計測する一般的な物理量としては加速度が適している。入力と応答の加速度を計測して伝達関数を求め、その伝達関数から設計パラメーターの固有振動数と減衰比が推定できるのであれば、計測に用いるセンサは加速度計、振動レベル計、速度計、レーザー変位計などどれを用いてもかまわない。多様な振動源を対象とする環境振動設計においては、設置位置を自由に移動でき、多点計測が可能な可搬型 3 成分加速度センサが威力を発揮する。可搬型加速度センサを適切な位置に複数設置してセンサネットワークを構築することにより、伝達関数の入力と応答を同期させて計測することができる。

環境振動設計においては、単一の振動源だけに着目する場合もあれば、複数の振動源を同時に対象とする場合もある。複数の振動源を対象とする場合は、すべての振動源に対してまとめて伝達関数を効率的に求めることができるように総合的な観点からセンサの配置計画を行うことが好ましい。

4. 固有振動数と減衰比の推定

性能確認のための振動計測では、設計対象領域の境界および内部において、入力点と応答評価点となる位置にセンサを設置し、入力点と応答評価点との間の伝達関数を求め、設計対象領域の固有振動数と減衰比を推定する。竣工後の性能確認のために実施する振動計測における基本方針を振動源グループごとに図 1 に示し、計測に基づく固有振動数と減衰比の推定方法の概略を記す。

4.1 自然振動源

自然振動源に関しては、地震動は 1 階か地階での水平加速度（2 成分）を入力とし

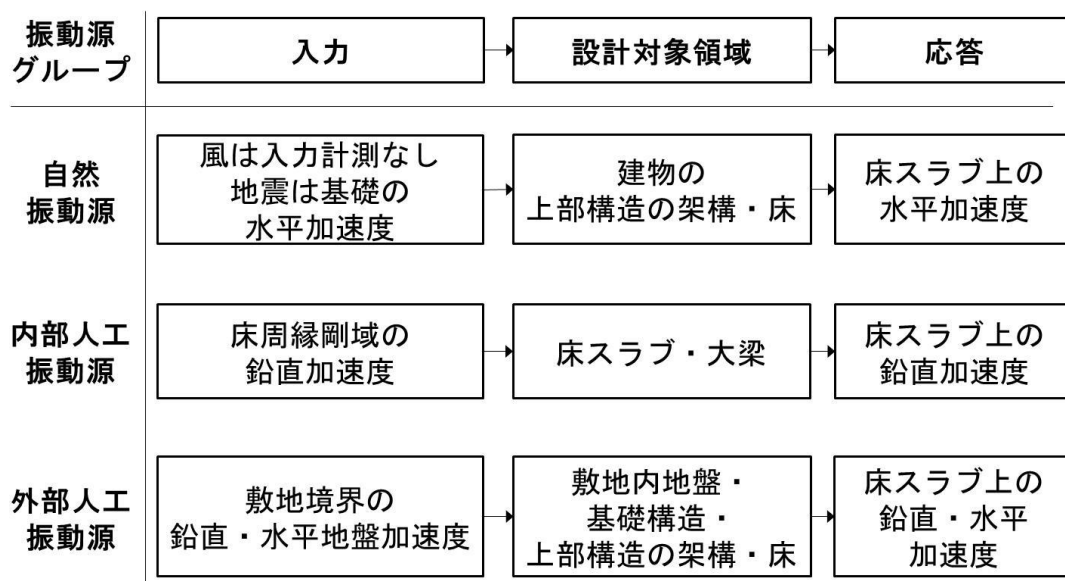


図 1 性能確認のための振動計測の方針

て、複数の床応答評価点での水平加速度（2成分）を出力としてそれぞれ計測し、フーリエ変換により架構の伝達関数を求め、伝達関数から架構の固有振動数と減衰比を推定する。風は入力加速度として計測することは難しいので、複数の応答評価点における水平加速度（2成分）を同時に計測し、伝達関数を用いずに架構の固有振動数と減衰比を推定する。

4.2 内部人工振動源

内部人工振動源に関しては、床スラブ周辺の剛域の鉛直加速度（1成分）を入力として、床スラブの最大応答点の鉛直加速度（1成分）を出力としてそれぞれ計測し、フーリエ変換により床スラブの伝達関数を求め、床スラブの固有振動数と減衰比を推定する。ただし、異なるスパン・階からの影響を考えるときは伝搬経路を含めた設計対象領域の伝達関数を求め、関連する部位・部材の固有振動数と減衰比を推定する。

4.3 外部人工振動源

外部人工振動源に関しては、建物の敷地境界における地盤加速度（水平2成分・鉛直1成分）を入力として、複数の床応答評価点での応答加速度（水平2成分・鉛直1成分）を出力としてそれぞれ計測し、フーリエ変換により敷地境界—架構—床スラブの系の伝達関数を求め、架構と部位・部材の固有振動数と減衰比を推定する。

5. 計測例

5.1 自然振動源のための計測例

自然振動源に対する性能確認のための計測例として、鉄道振動および道路交通振動が頻繁に作用する振動環境に建つ鉄筋コンクリート造8階建て地下1階のオフィスビルを可搬型常時微動計（速度計）により計測した。常時微動計のセンサは1成分しか測れないため、図2に示すように、センサを地下1階、4階、8階の建物中央に水平加速度2成分を同時計測できるように2台ずつ設置した。地震動に対する伝搬特性を把握するために、フーリエ変換により地下1階に対する4階と8階の水平加速度2成分の伝達関数をそれぞれ求め図3に示す。長辺方向（x方向）も短辺方向（y方向）も1～3次の固有振動数のピークが明瞭に立ち上がっている。風に対する伝搬特性を把握するために、特異値分解により水平加速度2成分の最大特異値を同時に求め図4に示す。

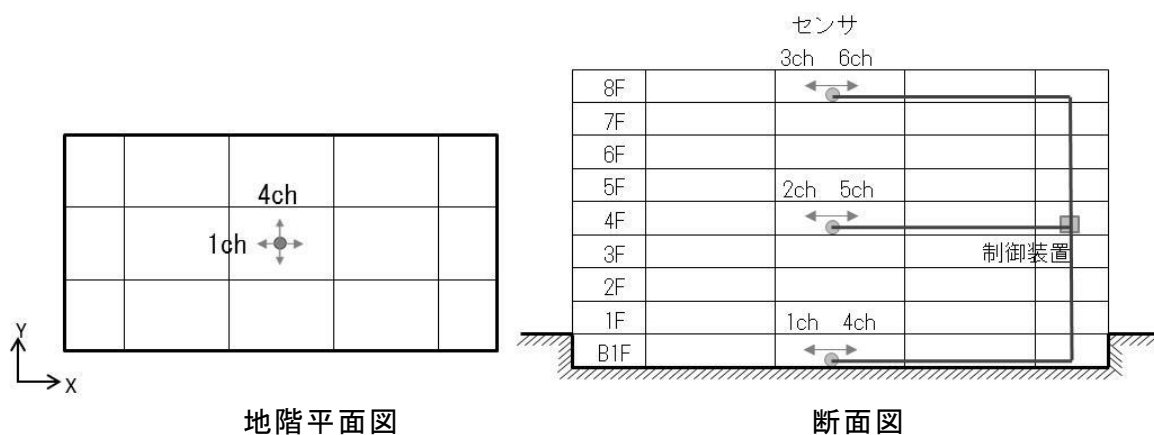


図2 全体架構の計測のためのセンサ配置（常時微動計）

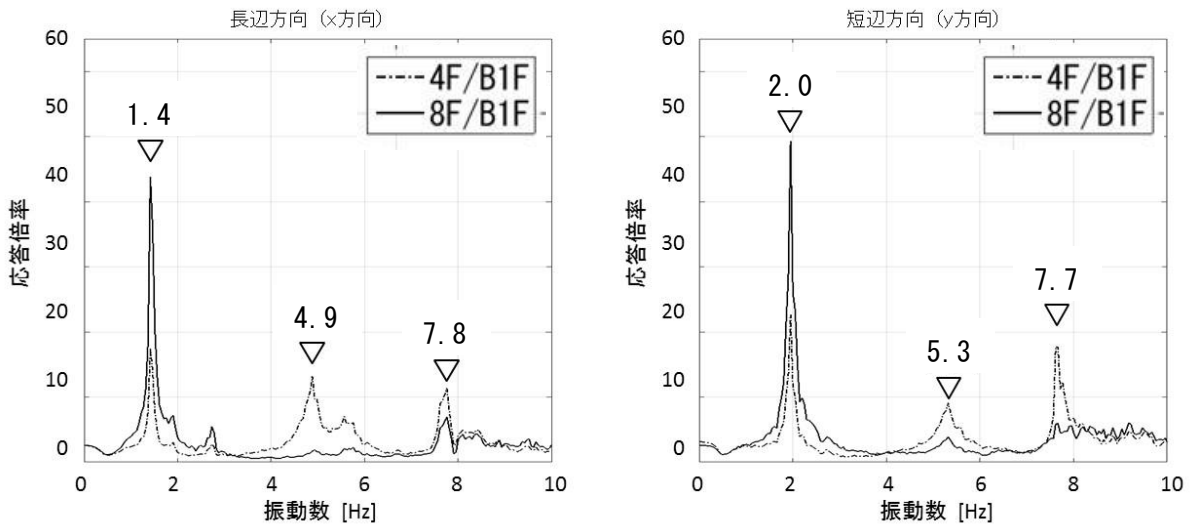


図3 地下1階に対する4階と8階の水平加速度の伝達関数

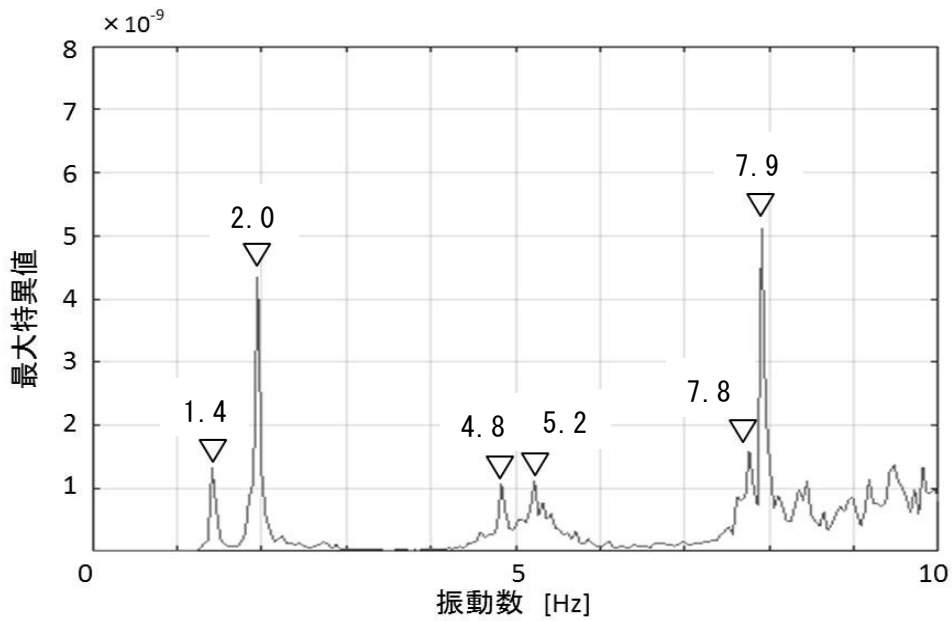


図4 特異値分解による最大特異値の推定

表1 伝達関数と特異値分解による1~3次固有振動数の推定

		1次固有振動数 [Hz]	2次固有振動数 [Hz]	3次固有振動数 [Hz]
伝達関数	x (長辺方向)	4F/B1F	1.4	4.9
		8F/B1F		
	y (短辺方向)	4F/B1F	2.0	5.3
		8F/B1F		
特異値分解		1.4	4.8	7.9
		2.0	5.2	7.8

表 2 1次減衰比

			減衰比 [%]
伝達関数	x (長辺方向)	4F/B1F	3.0
		8F/B1F	3.1
	y (短辺方向)	4F/B1F	1.7
		8F/B1F	1.6

長辺方向と短辺方向の1～3次の固有振動数のピークがともに立ち上がっている。伝達関数と特異値分解により1～3次の固有振動数を推定した結果を表1に、伝達関数から1次の減衰比を $1/\sqrt{2}$ 法により推定した結果を表2に示す。

5.2 内部人工振動源のための計測例

内部人工振動源に対する性能確認のための計測例として、鉄骨造7階建てのオフィスビルを3成分同時計測できる可搬型MEMS加速度センサにより計測した。図5に示すように、対象とする床の中央(4ch)と周縁に4台設置した。周縁は柱梁接合部に近い剛域(1ch)、長辺方向大梁中央(2ch)、および短辺方向大梁中央(3ch)である。人間活動あるいは設備機器に対する伝搬特性を把握するために鉛直加速度を計測し、1ch→4chの伝達関数、1ch→2chと1ch→3chの伝達関数、2ch→4chと3ch→4chの伝達関数、および(1ch→2ch)×(2ch→4ch)と(1ch→3ch)×(3ch→4ch)の伝達関数をそれぞれフーリエ変換により求め図6に示す。1ch→4chの伝達関数は(1ch→2ch)×(2ch→4ch)と(1ch→3ch)×(3ch→4ch)の伝達関数と一致していることが確認できる。これらの伝達関数から、床中央の揺れは長辺方向大梁の揺れに支配されており、床スラブそのものの揺れは相対的に小さいことがわかる。伝達関数より推定した大梁と床スラブそれぞれに関する1次の固有振動数と減衰比を表3に示す。

5.3 外部人工振動源のための計測例

外部人工振動源に対する性能確認のための計測例として、鉄骨造7階建てのオフィスビルを可搬型MEMS加速度センサにより計測した。図7に示すように、道路に面する建物の敷地境界、建物近傍地盤、および建物1階床の3か所にセンサを設置して、敷地境界から近傍地盤までの伝搬経路における敷地内距離減衰と近傍地盤から1階床までの伝搬経路における入力損失を調べた。敷地境界(3ch)と近傍地盤(2ch)における鉛直加速度のフーリエスペクトルを重ね書きして図8に示す。全周波数領域にわたり、近傍地盤のスペクトル振幅は敷地境界のスペクトル振幅に比べて大幅に低減していることがわかる。近傍地盤(2ch)と1階床(1ch)の鉛直加速度のフーリエスペクトルを重ね書きして図9に示す。入力損失効果により15Hz以上の高周波領域が低減していることがわかる。

外部人工振動源に対する地盤ばねの影響を調べた別の計測例を示す。対象建物は図10に示すような枠組壁工法の木造6階建てである。建物1階と6階の中央部に常時微動計(4ch, 5ch)、1階の3隅に可搬型MEMS加速度センサ(1ch～3ch)を設置した。1階と6階における水平加速度のフーリエスペクトルを図11に示す。x方向は3.9Hz、y方向は3.5Hzにそれぞれ鋭いピークがあり、建物全体がこれらの振動数で揺れている。

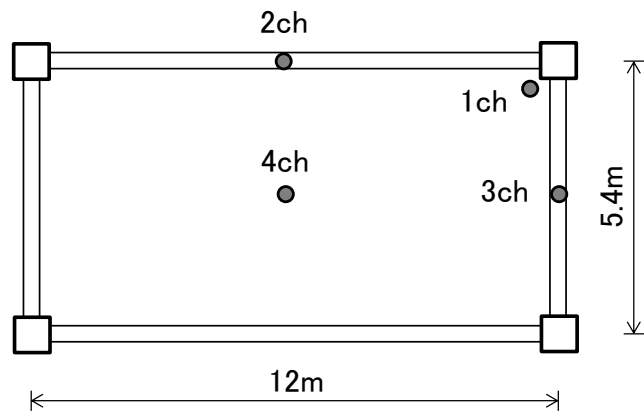


図5 床振動測定のためのセンサ配置 (MEMS 加速度センサ)

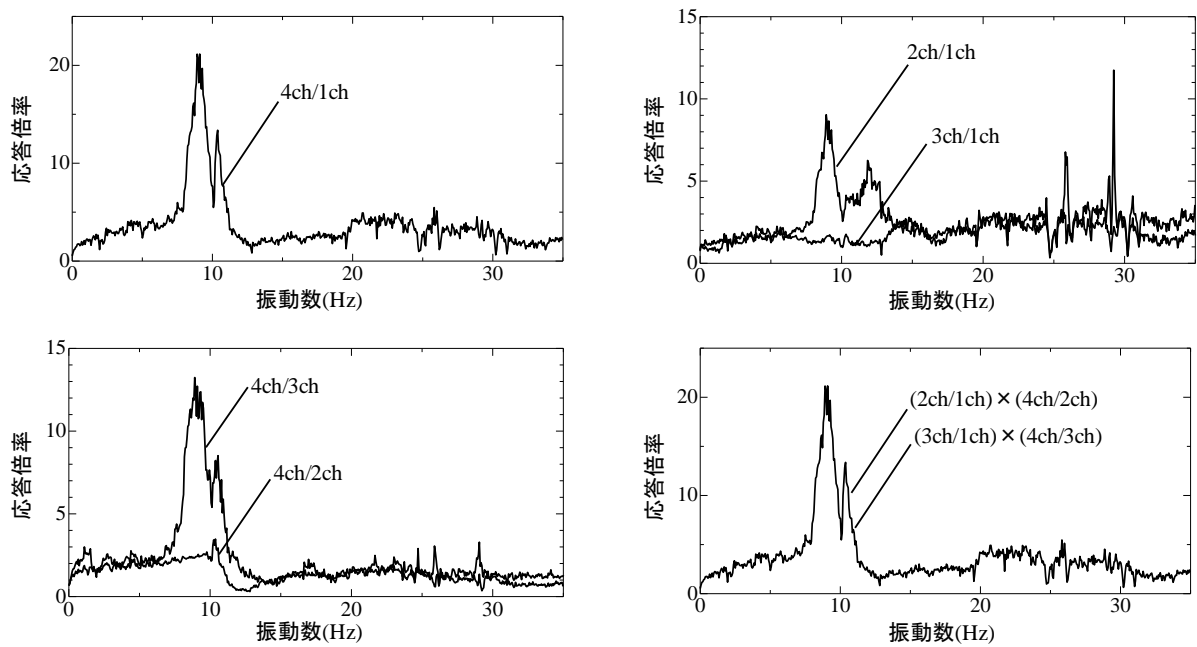


図6 床と梁の鉛直加速度の伝達関数

表3 伝達関数による梁と床の固有振動数と減衰比の推定

	固有振動数(Hz)	減衰比(%)
梁:2ch/1ch	8.9	4.0
床:4ch/1ch	10.4	2.0

ることがわかる。1階に対する6階の水平加速度2成分の伝達関数を図12に示す。1～3次の固有振動数のピークが立ち上がっているが、どのピークもフーリエスペクトルのピークとは一致していない。1階に設置したMEMS加速度センサの鉛直

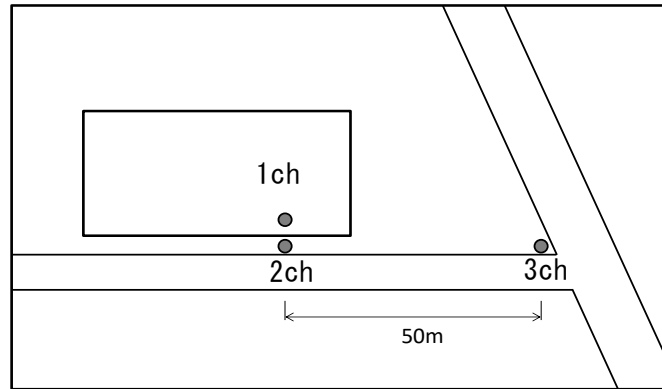


図7 交通振動におけるセンサの設置位置

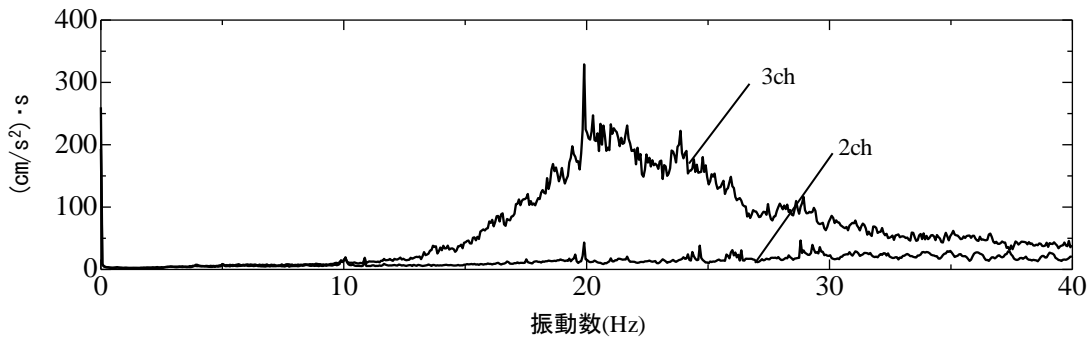


図8 敷地地盤内距離減衰に関する鉛直加速度フーリエスペクトル

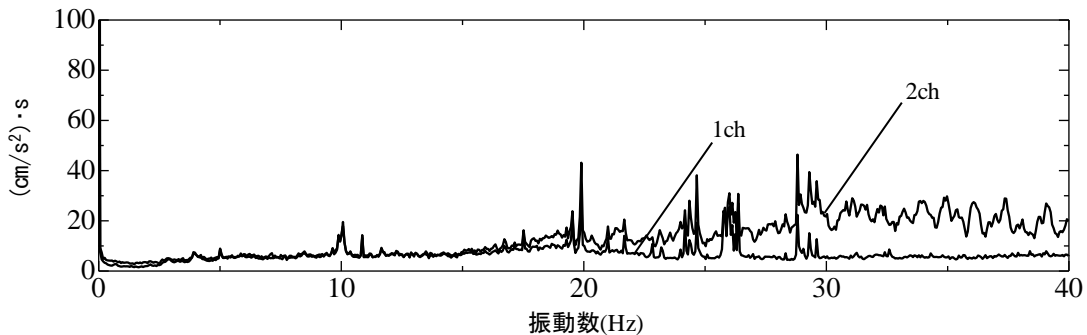


図9 基礎入力損失に関する鉛直加速度フーリエスペクトル

加速度から x 方向と y 方向のロッキングを計測した結果を図13に示す。 x 方向のロッキングは2chと3chの鉛直加速度の差分から、 y 方向のロッキングは1chと2chの鉛直加速度の差分からそれぞれ求めることができる。 x 方向と y 方向のロッキングのピーク振動数はそれぞれ3.9Hzと3.5Hzであり、これは図11のフーリエスペクトルのピークと一致している。すなわち、この建物はほとんど剛体的なロッキングで揺れており、建物の変形による揺れの寄与は極めて小さいことがわかる。このような場合は地盤ばねの推定が不可欠になる。この建物の基礎は杭基礎と記録されているが、ロッキングが大きいことから摩擦杭と考えられる。

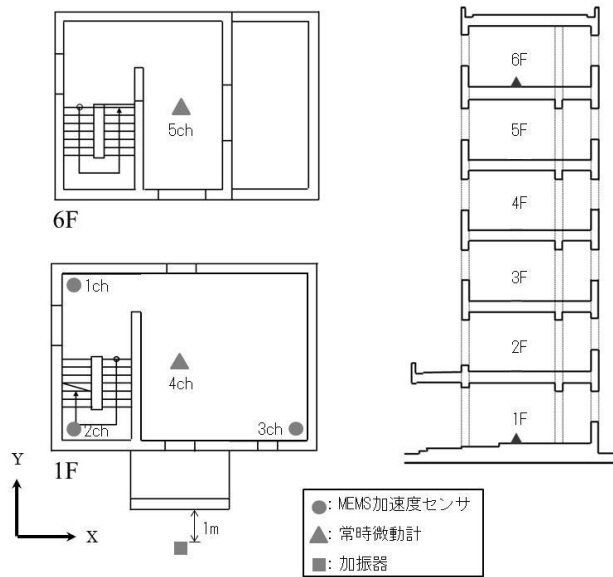


図 10 地盤ばね推定のためのセンサ配置（常時微動計と MEMS 加速度センサの併用）

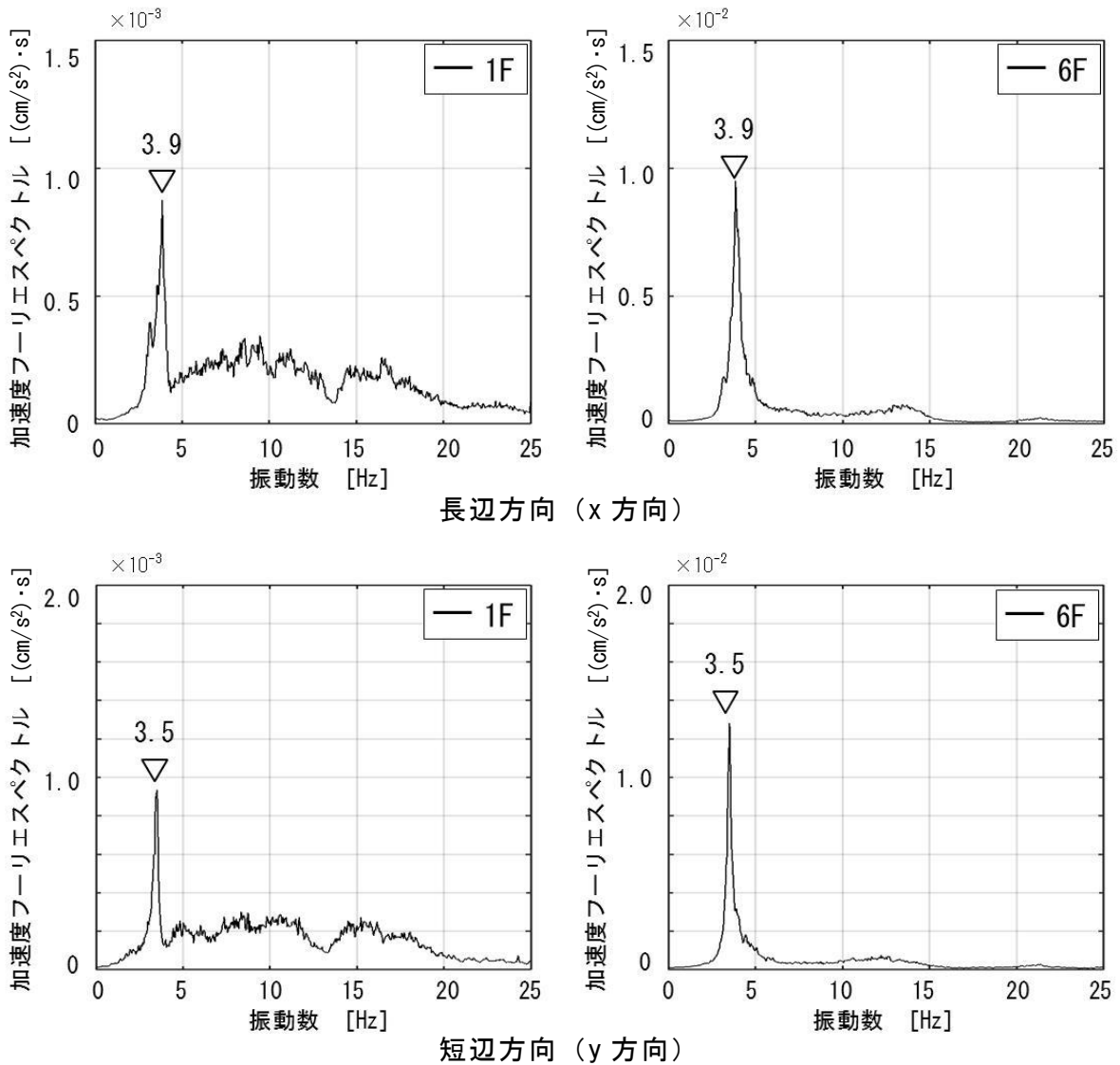


図 11 建物 1 階と 6 階の水平加速度のフーリエスペクトル

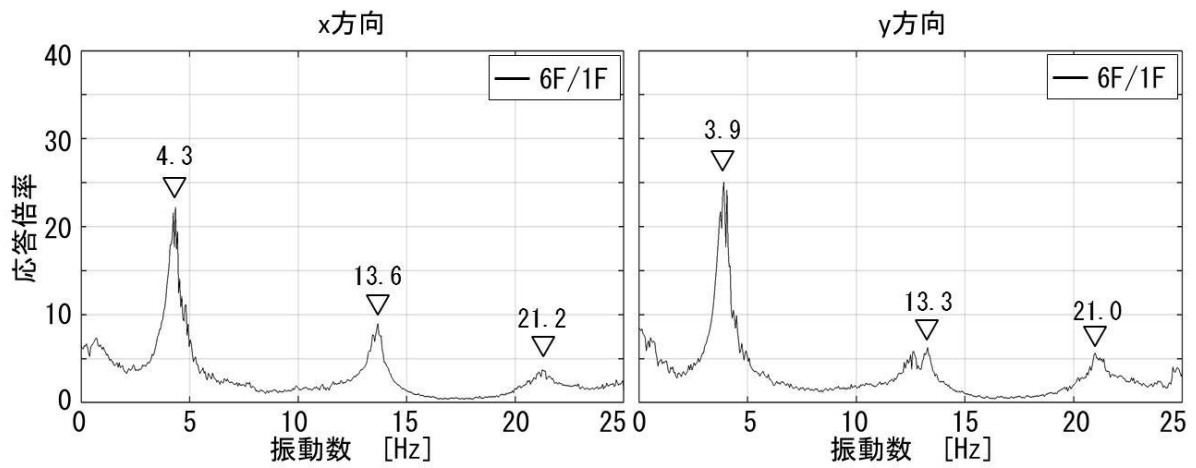


図 12 建物架構の 1 階に対する 6 階の水平加速度の伝達関数

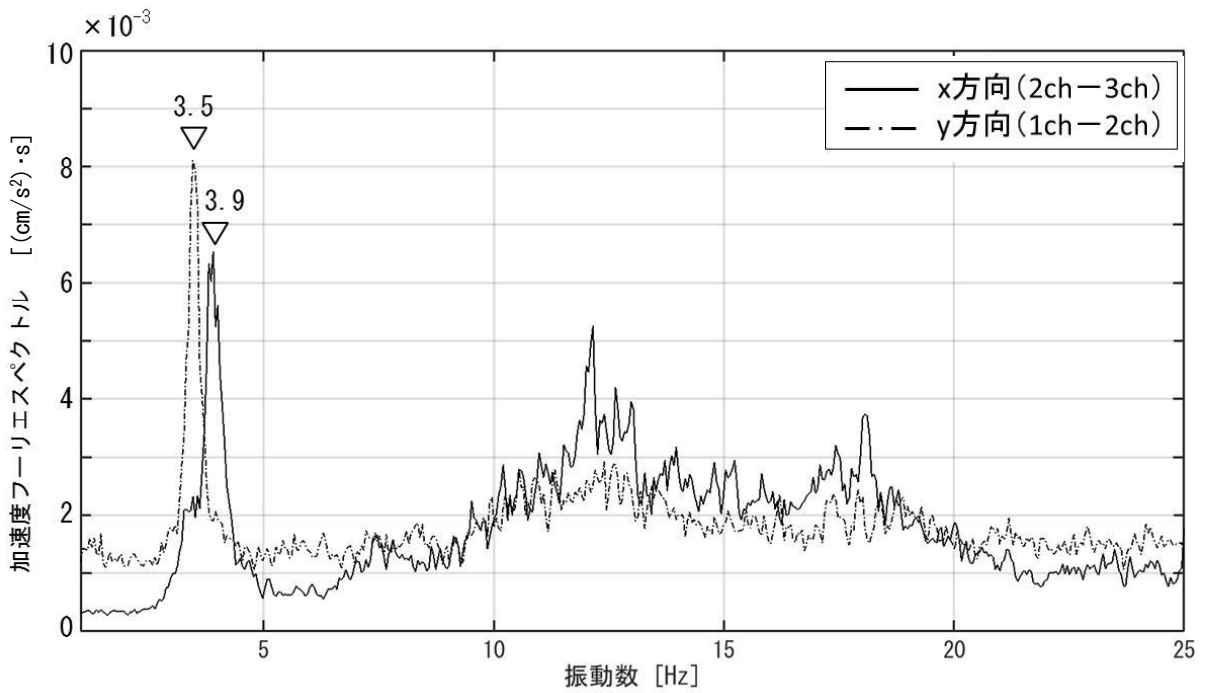


図 13 建物長辺方向と短辺方向のロッキング振動数の推定

表 4 伝達関数による 1~3 次固有振動数と 1 次減衰比の推定

	1 次固有振動数 [Hz]	2 次固有振動数 [Hz]	3 次固有振動数 [Hz]	1 次減衰比 [%]
x 方向	4.3	13.6	21.2	1.6
y 方向	3.9	13.3	21.0	1.6

6. おわりに

環境振動設計における設計フローの最後に位置づけられている性能確認のための計測の概要と実施例を紹介した。性能確認のための計測の目的は、設計者にとっての目標性能達成の確認と施主への要求性能実現の説明を兼ねている。計測の手順としては、対象とする環境振動の伝搬特性を把握するためのセンサ配置計画を行った後、多様な環境振動の振動源に対して地盤振動、架構の全体振動、部位・部材の局部振動の伝搬特性を広く把握することのできる周辺振動を計測し、センサ間の伝達関数を求め、伝達関数から主要な設計パラメータとなる固有振動数と減衰を推定する流れが基本になる。計測例を通して、多様な振動源に対する環境振動の伝搬特性を周辺振動の計測により統一的に検討できることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：第 35 回環境振動シンポジウム「性能マトリクスを用いた環境振動設計」，2017
- 2) 日本建築学会：環境振動測定分析に関する公開研究会「建築空間内の環境振動測定の現状と課題」，2017