

設計から見た振動計測の重要性

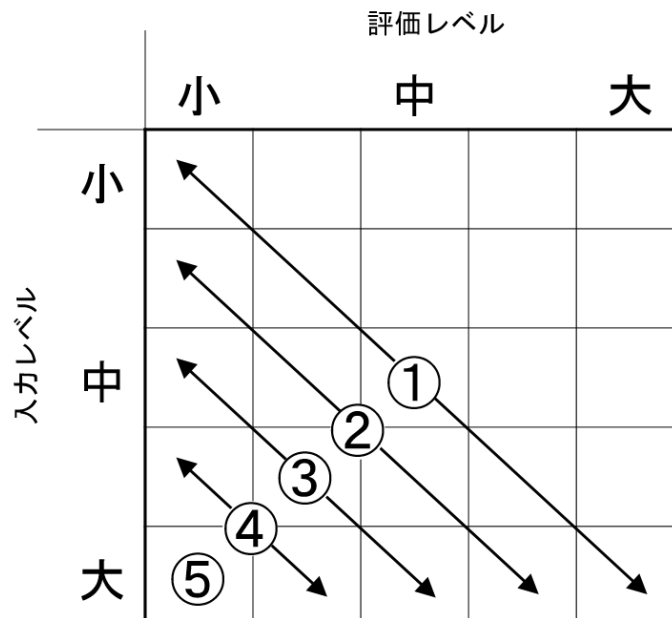
東京都市大学 名誉教授 濱本卓司

1. はじめに

環境振動設計において、振動計測は設計に先立つ事前調査¹⁾と竣工後の性能確認²⁾のために用いられる。環境振動設計は、施主との合意形成に基づき、建物内部の振動環境に関する要求性能レベル（性能ランク）を決定したのち、目標性能を具体的に設定して、その要求性能を満足する建物を実現するための設計行為である³⁾。事前調査は、性能マトリクスにおける多段階の入力レベルを設定するための基礎情報として用いられる。性能確認は、性能マトリクスを用いて決定された多段階の要求性能が設計行為を通じて実現されていることを施主に説明するために行われる。

2. 性能マトリクスを用いた環境振動設計

性能マトリクスは環境振動設計の要に位置づけられる。性能マトリクスの列方向は入力レベル、行方向は評価レベルになっており、マトリクスの各要素は入力レベルと評価レベルの組み合わせを表している。性能マトリクスの例を図1に示す。性能ランクは斜めのライン①～⑤として表現される⁴⁾。性能ランクのどれを選択するかが決まれば、入力レベルと評価レベルは一意的に関係づけられて要求性能が決定する。入力レベルは通常の構造設計の荷重と同様に発生頻度によって表すものとする。要求性能を定量的に表現することにより設計者の目標性能も設定される。



性能ランク：①必要最低限 ②やや容認 ③ほぼ容認 ④かなり容認 ⑤十分容認

図 1 環境振動性能マトリクス

3. 振動の発生頻度と評価レベルの関係

振動の発生頻度と評価レベルは図 2 に示すような関係がある。横軸に発生頻度，縦軸に評価レベルをとる。たとえば，発生頻度として，「めったに発生しない」，「あまり発生しない」，「ときどき発生する」，「しばしば発生する」の 4 段階，評価レベルとして「ほとんど気にならない」，「少し気になる」，「かなり気になる」，「耐えられない」の 4 段階を考える。発生頻度の「めったに発生しない」は日常的な環境振動では扱わない領域であり，評価レベルの「耐えられない」は恕限度を超えた振動になるので，これらに関連した領域はここでは対象外とする。残りの 3×3 の領域を，発生頻度と評価レベルの組み合わせに着目して，たとえば「高リスク」，「中リスク」，「低リスク」の 3 つの振動リスクに分類する。発生頻度も評価レベルも小さければ「低リスク」，発生頻度も評価レベルも大きければ「高リスク」である。この振動リスクの考え方を建物敷地の分類に利用すると，図 3 に示すような振動環境マップが得られる。この図の場合，鉄道沿線や自動車道路の近くが「高リスク」，そこから離れると「中リスク」，「低リスク」と静かな振動環境になることを示しており，環境振動設計の対象となる建物敷地がどのような振動環境に置かれているかを事前に把握することができる。

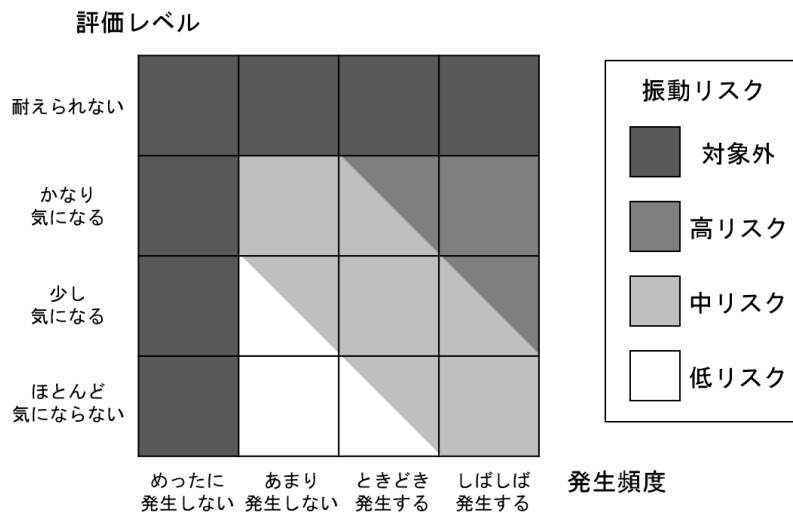


図 2 発生頻度と評価レベルの関係

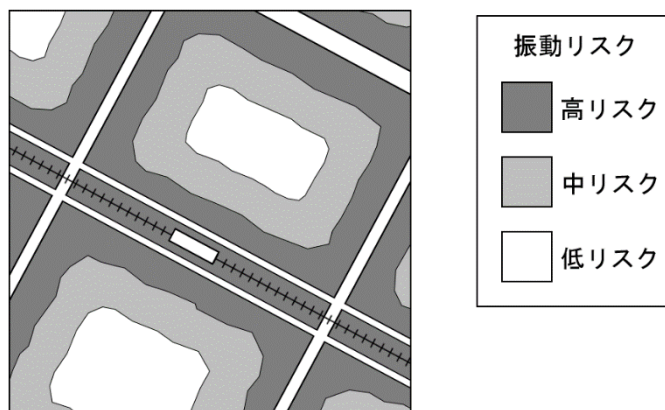


図 3 建物敷地の振動環境マップの例

4. 振動源のグループ化

環境振動で扱う振動源は多様である。環境振動設計においては、図 4 に示すように、多様な振動源を自然振動源、内部人工振動源、および外部人工振動源の 3 グループに分けて考える⁴⁾。自然振動源には強風、地震動、波浪などが含まれる。内部人工振動源には歩行、走行、跳躍などの人間活動と様々な設備機器から発生する振動が含まれる。外部人工振動源には道路交通振動、鉄道振動、工場振動、工事振動などが含まれる。

5. 設計前の事前調査

設計前に行われる振動計測の目的は、建物の竣工後に予想される入力レベルの事前調査である。まだ建物はないので内部人工振動源は計測できない。計測できるのはフリーフィールドでの自然振動源と外部人工振動源である。計測できない内部人工振動源の入力レベルは、建物の敷地には関係なく、建物の用途、規模、構造から推定することができる⁵⁾。計測できる自然振動源は環境振動の中では比較的再現期間が長く、短期間の振動計測では合理的な入力レベルの設定はむつかしい。このような場合、建築物荷重指針などの中長期計測によるデータベースに基づき建物の敷地における入力レベルを推定する⁶⁾。

実際に建物の敷地における振動計測は交通振動か工場振動のような外部人工振動源に関して行われる⁷⁾。事前調査に基づき、図 5 に示すように、建物の敷地における外部人工振動源の入力レベルの発生頻度と物理量との関係を推定し、要求性能の発生頻度を目標性能の物理量に変換する。発生頻度と物理量との関係を推定するために、最短で 1 日、最長で 1 年程度継続的に計測することが望ましい。

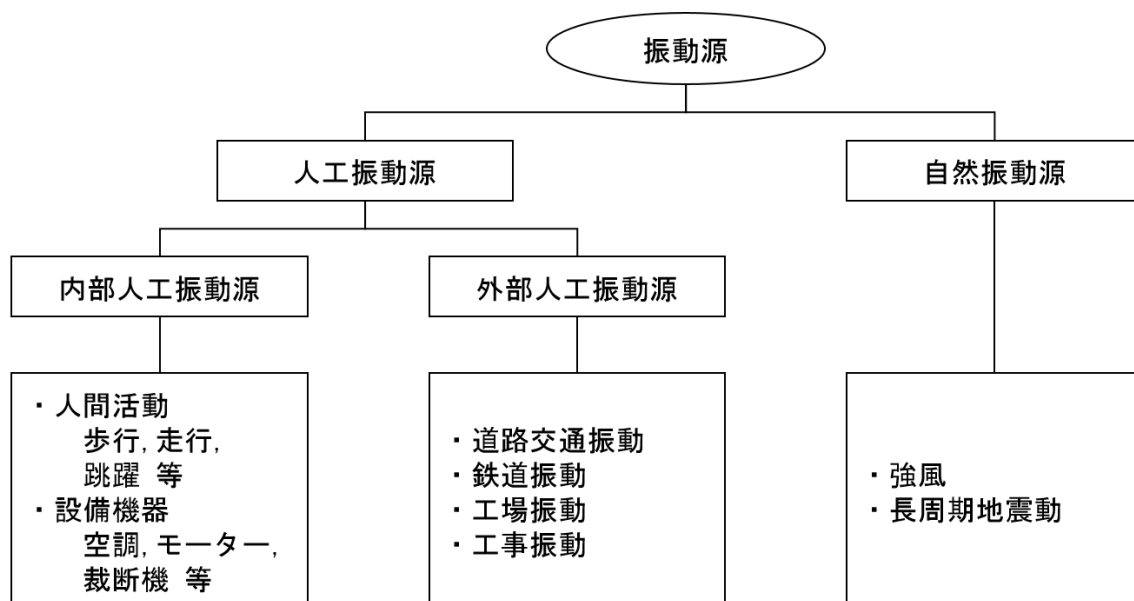


図 4 環境振動のグループ化

物理量

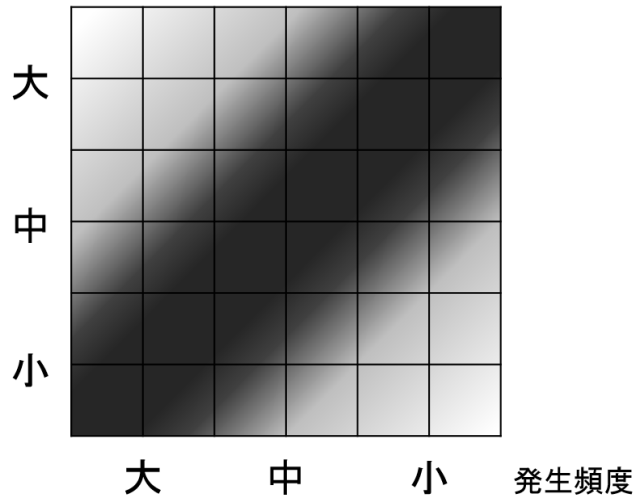


図 5 入力レベルの発生頻度と物理量の関係

振動源グループごとの発生頻度と物理量との関係を表 1 に示す。発生頻度に関しては、風や地震動のような自然振動源では、一定の強さの自然現象が再び発生するまでの年数として再現期間の概念がよく用いられる。確率論的には再現期間は年間超過確率の逆数である。しかし、直接的・間接的に人間活動が引き起こす内部人工振動源と外部人工振動源には再現期間という概念はふさわしくない。さらに、発生頻度は年という単位よりも短期間の日、週、月を単位にとる方が現象を記述する上で適している。そこで、ここでは確率論的に日間超過確率の逆数、週間超過確率の逆数、あるいは月間超過確率の逆数を「対象期間」として定義し、年間超過確率の逆数の再現期間もこれに含めている。対象期間の数値は考え方の例として示したものである。

表 1 入力レベルの発生頻度と物理量の関係

振動源グループ	加振源	物理量	対象期間
自然振動源	風 地震動	風圧 (N/m ²) 地盤加速度 (cm/sec ²)	1年, 3年, 10年, 50年
内部人工振動源	人間活動 設備機器	加振力 (kN)	1日, 3日, 7日, 28日
外部人工振動源	車輛 (道路・鉄道) 工場・建設機器	地盤加速度 (cm/sec ²)	1週, 4週, 12週, 52週

6. 竣工後の性能確認

環境振動は日常的な振動を対象としており、いつでも振動計測が可能である。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。竣工した建物において要求性能が実現していることを施主に説明するために、振動源の特徴に応じた振動計測を行い、環境振動に関する性能確認を行う⁸⁾。

振動計測の範囲は設計対象領域の境界あるいは内部とする。設計対象領域は、自然振動源では架構全体、内部人工振動源では床スラブ（異なるスパン・階からの影響を考えると伝搬経路を含める）、外部人工振動源では敷地地盤（地盤改良も選択肢のひとつと考える）を含む架構全体になる。設計対象領域の入力と出力を測定し、入出力関係を表す周波数領域の伝達関数から増幅・減衰特性を評価する。

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。計測機器としては、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好ましい。可搬型加速度センサネットワークを構築して設計対象領域の伝達関数の入力と応答を計測する。

7. 設計対象領域の測定方法

竣工後の性能確認のために現段階で考えている振動計測の方法を図6に示す。建物の振動性能は入出力関係としての伝達関数（建物内部及び周辺における振動の増幅・減衰特性）により表現される。ただし、施主への説明には、入力条件を変えて伝達関数を乗じ、床応答が許容性能を満足していることを提示する必要がある。

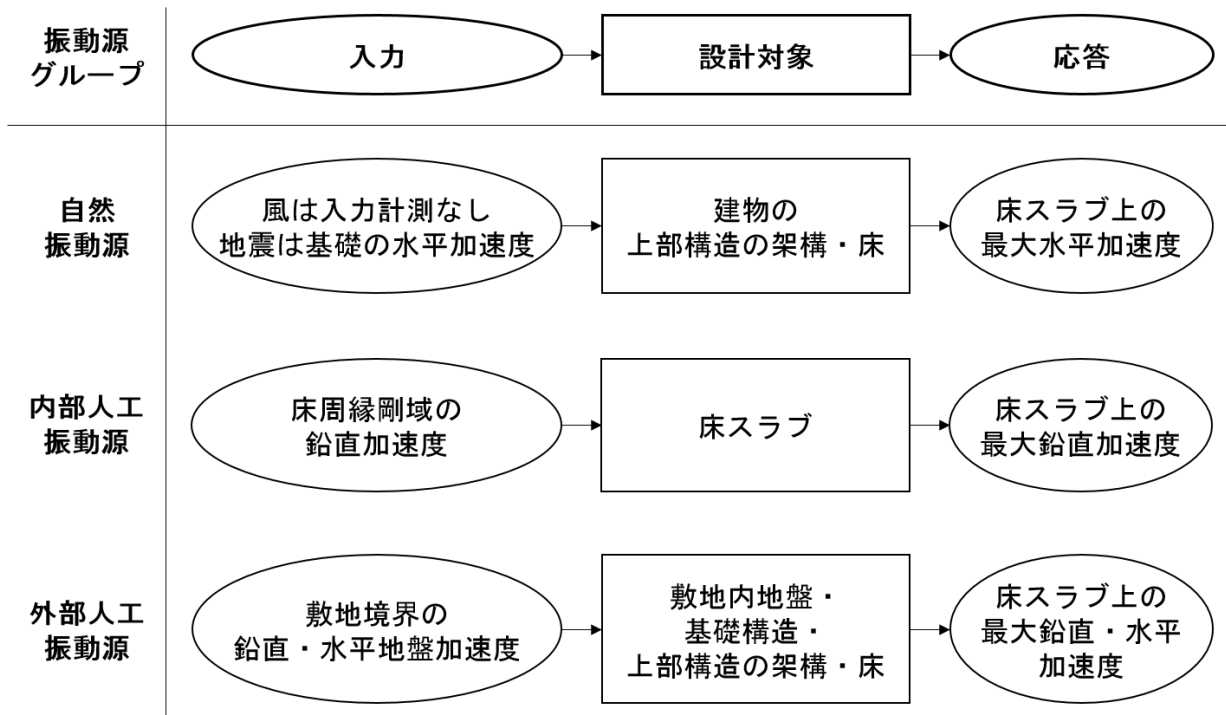


図6 性能確認のための環境振動計測

自然振動源に関しては、地震動の場合は地表面（あるいは1階か地階）での水平地盤加速度（2成分）を入力として、複数の床応答評価点での水平応答加速度（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る。風の場合は入力を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）を計測し、各センサのパワースペクトルとクロススペクトルの特異値分解などを利用して架構の振動特性を求める。

内部人工振動源に関しては、床スラブ周辺の境界梁の鉛直加速度（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る。ただし、異なるスパン・階からの影響を考えると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る。

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る。

8. 結び

環境振動設計における振動計測の役割を、環境振動設計の要と位置付けられる性能マトリクスとの関係性に着目して述べた。振動計測は設計前と竣工後の2つの場面で重要な役割を演じる。第1段階は設計前の事前調査の段階での振動計測であり、性能マトリクスの入力レベルを設定する事前情報として利用される。第2段階は竣工後の性能確認として実施され、施主に要求性能が実現されていることを説明するために利用される。従来の設計行為は机上計算だけで行われてきた。振動計測を設計行為に導入することにより、設計者と施主との間のリスクコミュニケーションが円滑になり、設計だけでなく維持管理の合理的な対策にも活用できる。

参考文献：

- 1) 濱本卓司：建物を取り巻く振動環境の把握，第31回環境振動シンポジウム資料，pp.3-10，2013.1
- 2) 濱本卓司：設計の観点から見た評価指針と設計指針の全体の枠組，2016年度日本建築学会大会（九州），環境工学部門パネルディスカッション資料，pp.5-10，2016.8
- 3) 濱本卓司：居住性能設計指針の枠組み，第32回環境振動シンポジウム資料，pp.28-35，2014.1
- 4) 濱本卓司：居住性能評価と設計のつながり，第33回環境振動シンポジウム資料，pp.3-10，2015.1
- 5) 片岡達也：外力軸と設計の概要（歩行振動），第35回環境振動シンポジウム資料，pp.39-44，2017.1
- 6) 小田島暢之：外力軸と設計の概要（風振動），第35回環境振動シンポジウム資料，pp.33-38，2017.1
- 7) 東田豊彦：外力軸と設計の概要（交通振動），第35回環境振動シンポジウム資料，pp.45-50，2017.1
- 8) 濱本卓司：環境振動設計の考え方，第35回環境振動シンポジウム資料，pp.5-14，2017.1