

## 環境振動設計の考え方

東京都市大学 濱本卓司

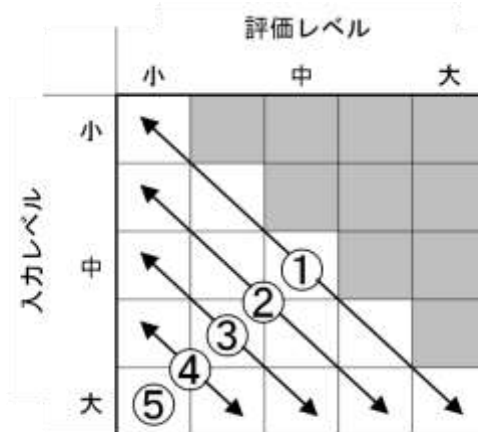
### 1. はじめに

現在、環境振動運営委員会では居住性能評価指針の改定作業を進めている。改訂作業の進捗状況は、環境振動シンポジウムの第31回（2012年度）から第34回（2015年度）までと今年度（2016年度）の建築学会大会環境工学部門パネルディスカッションにおいて逐次公表してきた。改訂作業の軸となっているのは、①評価と設計の分離、②作用時間効果の導入（非定常性の影響）、③体感指標の導入（知覚確率の見直し）の3点である。今後、この改定のもとで環境振動設計はどのように変化するのかを考えてみたい。

### 2. 環境振動性能マトリクス：性能ランクの決定

環境振動設計は従来から性能設計の文脈で考えられてきた。耐震設計のように建築基準法という法律により最低基準が規定されているわけではない。あくまで建築主の判断に基づき環境振動の要求性能は決定されてきた。この要求性能を建築主が設計者との合意形成を通じて設定するために、図1に示すような環境振動性能マトリクス（以下、性能マトリクス）が用いられる。なお、要求性能の決定にあたっては、建物の敷地周辺における事前情報（地形・地盤柱状図、道路・鉄道的位置、風向・風速の年間分布など）と敷地における環境振動の事前計測データを準備しておく必要がある。

性能マトリクスは、縦軸（列）に入力レベル、横軸（行）に設計クライテリアとしての評価レベルをとる。ここでは、縦軸の上から下に向けて入力レベルが大きくなるように、横軸の左から右に向けて評価レベルが大きくなるように取られている。このとき、要求性能のランク（以下、性能ランク）は、性能マトリクスにおける斜めのライン①～⑤として表現される。性能ランクのどれを選択するかが決まれば、性能マトリクスの縦軸の入力レベルと横軸の評価レベルは一意的に関係づけられる。その結果、設計における目標性能が設定されることになる。



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

建物用途による要求性能の違いは性能ランクを上下にシフトさせることにより対応できる。用途として住居系とオフィス系を考えるとすると、たとえば住居系はオフィス系よりも性能ランクを一つ上げて評価するといったことが可能になる。性能ランクの数は、このような自由度を与えられるように設定することが好ましい。

### 3. 振動源のグループ化：自然振動源—内部人工振動源—外部人工振動源

環境振動における最大の特徴は振動源の多様性である。振動源の多様性に対処するために、振動源の種類ごとに設計方針を変えていたのではあまりに煩雑すぎる。そこで、これまでの居住性能評価指針の流れを維持しつつ、図2に示すように、振動源を自然振動源、内部人工振動源、外部人工振動源の3グループに分類する。

自然振動源はこれまでの指針では風振動のみしか扱ってこなかったが、新しい指針では長周期地震動に対する高層建物や免震建物の機能性・居住性を扱うことを考えている。風および長周期地震動に対する応答では1次モードが主に励起され、長時間にわたり定常的な正弦波振動が持続する。このため、作用時間効果を無視しても評価はほとんど変わらない。

内部人工振動源はこれまでの指針と同じく人間活動と設備機器の振動を対象とするが、新しい指針では体感振動に与える作用時間効果を明示的に評価できるようにする。内部人工振動源の中でも、人間活動による振動は歩行、走行、跳躍など人間の動きによって発生し移動振動源になることが多い。これに対し、設備機器の振動は設置場所で持続的に発生する固定振動源であることが多い。このため、人間活動に伴う振動は作用時間効果が大きくなるが、設備機器から発生する振動の作用時間効果はあまり期待できない。なお、内部振動源に関しては、大梁に囲まれた同一スラブ内で発生する振動の入力—応答関係だけでなく、階段や廊下などで発生する振動のように、異なるスパン・異なる階から伝搬する振動も扱えるようにする。

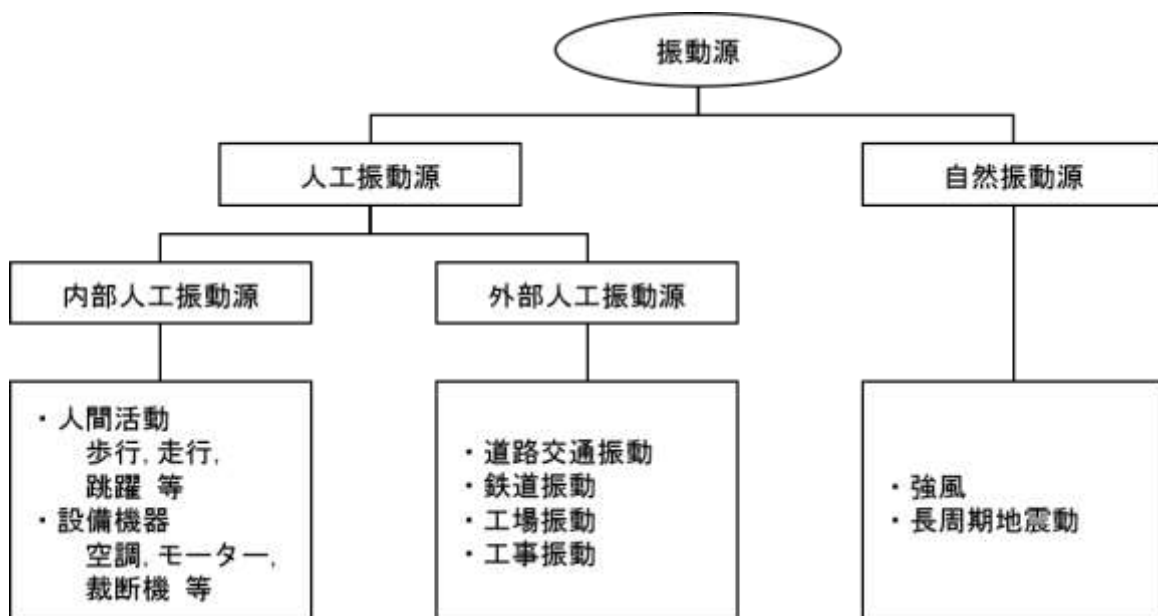


図2 環境振動のグループ化

外部人工振動源に関しては、これまでの指針では交通振動のみが取り上げられてきた。今回の新しい指針では工場や工事現場から発生する振動も視野に入れている。交通振動と一口に言っても、道路交通振動は大小さまざまな車両が不規則に走行して変動性が大きくなるのに対し、鉄道振動はほぼダイヤ通りに特定の車両が定時に通過するなど変動性は小さい。工事振動は工程の進捗とともに発生する振動が変化するため変動性が大きくなるのに対し、工場振動は日々の生産工程が決まっており発生する振動の変動性は小さい。このように、外部人工振動源の中でも違いはあるが、設計段階において建物だけでなく周辺地盤の影響を考慮しなければならないという点は共通である。場合によっては地盤改良を含めて設計方針を決定することもある。地盤振動は水平・鉛直の両成分を有しており、地盤振動の性質と建物の増幅特性に応じて卓越する振動成分が水平・鉛直のどちらになるかはわからない。このため、これまでの指針でも交通振動は水平・鉛直両成分に関する評価曲線が示されている。作用時間効果が大きくなるのは移動振動源となる交通振動であり、固定振動源である工場・工事振動の作用時間効果はあまり問題にならない。このため、今回の指針改定においては、交通振動における水平・鉛直両成分に対して体感振動に与える作用時間効果を明示的に評価することを目指している。

#### 4. 縦軸の設定：発生頻度と入力レベル

環境振動設計は通常、構造設計と同様に図3に示すような手順で進められる。最初に必要になるのが設計用入力である。設計用入力として必要な情報は、設計対象領域における入力の位置と入力物理量である。たとえば、風振動であれば入力の位置は建物の外壁面、入力物理量は風圧分布の時間変動になる。交通振動であれば入力の位置は建物の敷地境界、入力物理量は地盤加速度になる。入力を与えられたら設計対象領域の振動の増幅・減衰特性を考慮して複数の応答評価点における応答量を求める。3つの振動源グループの実際の入力の位置と入力物理量、それに対応する応答評価点の位置と応答物理量を図4に示す。

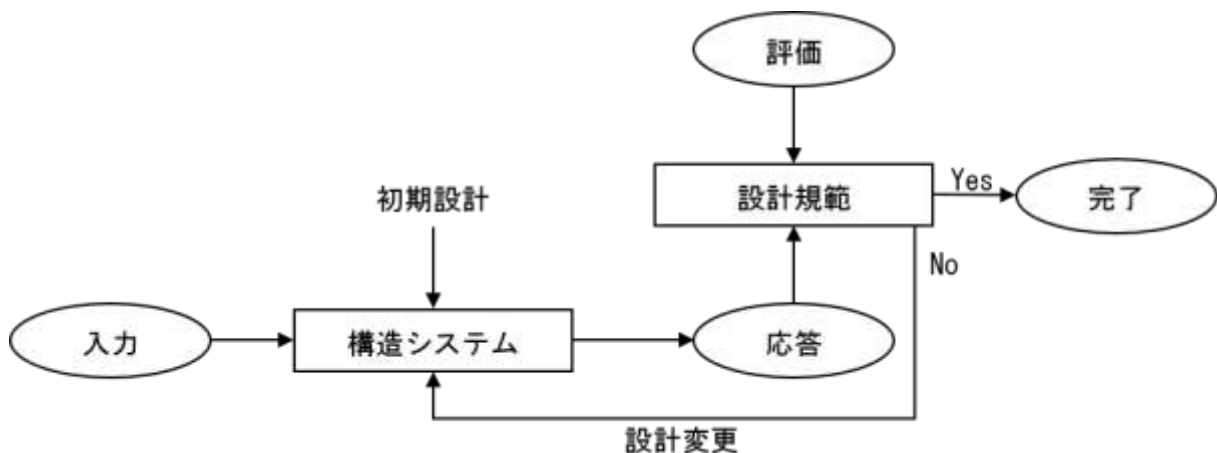


図3 構造設計における環境振動評価

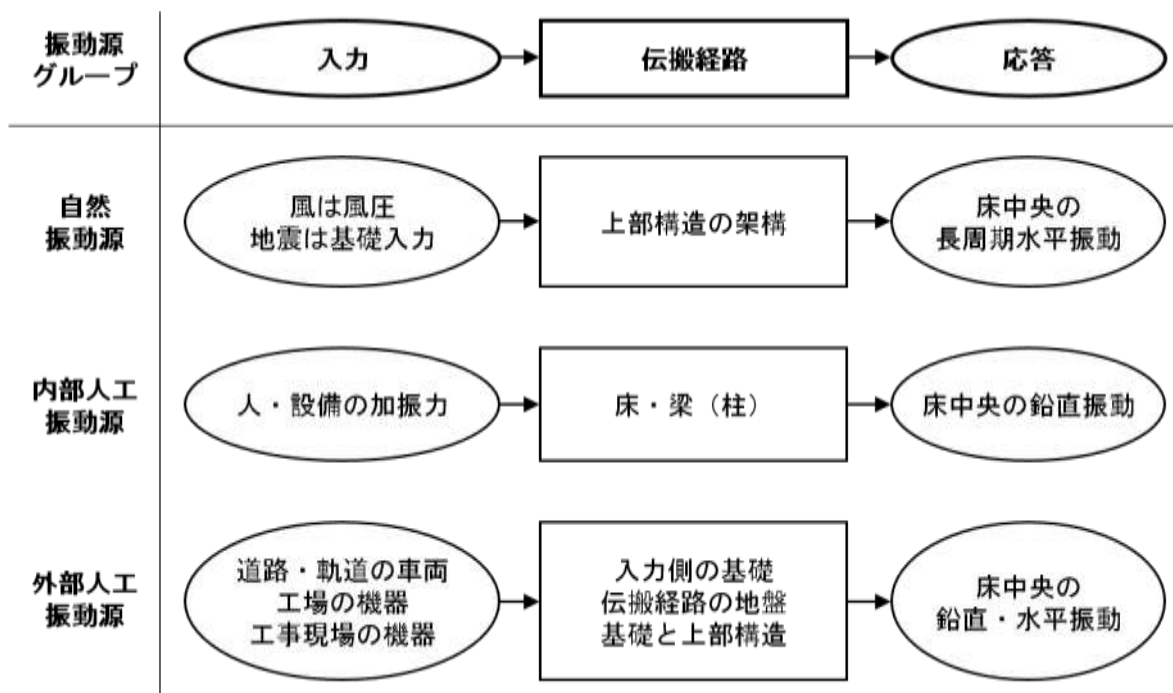


図4 物理量としての入力-応答関係

対象とする振動源により入力の位置と入力物理量は異なる。しかし、環境振動が対象とする様々な種類の振動源の設計用入力に関する全体の見通しをよくするために、共通概念として発生頻度を考えることにする。耐震設計や耐風設計では、設計用入力を決定するために再現期間という概念が一般的に用いられる。再現期間は年間超過確率の逆数であり、ある値を超過する年間確率に着目している。自然振動源に関しては、環境振動設計でも耐震設計や耐風設計に合わせて年を単位とする再現期間をそのまま用いることにする。一方、内部人工振動源と外部人工振動源は自然の繰り返しを表現する再現期間という概念には馴染まないため、超過確率の概念に基づいて発生頻度を表現する。ただし、人工振動源は自然振動源に比べて一般に発生頻度が高くなるので、年間超過確率ではなく日間超過確率、週間超過確率、月間超過確率など、より短期間の変動を表現できる概念を導入する。応答物理量と発生頻度を関係づける概念を図5に示す。

振動源グループ	物理量		発生頻度	
	加振源	大きさの単位	超過確率	対象期間
自然振動源	風 地震動	風圧 (Pa) 地盤加速度 (gal)	年間 超過確率	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)	日間 超過確率	1日, 3日, 7日, 30日, ...
外部人工振動源	車輛 <small>(道路)</small> 工場・建設機器	地盤加速度 (gal)	週間 超過確率	1週, 4週, 12週, 52週, ...

図5 設計用入力の大きさの考え方

## 5. 横軸の設定：評価レベルと作用時間効果

環境振動において最後に必要になるのが設計クライテリアとして使用する評価レベルである。これまでの居住性能評価指針では振動を無感振動と有感振動の境界である知覚限界のみを使って評価レベルを設定してきた。しかし、建築主が知りたいのは建物内で揺れの異なる有感振動をどのように感じるのか(不快になる, 気分が悪くなる, 耐えられなくなるなど), あるいはその振動に対して人間はどのように反応するのかという問題である。こうした疑問に直接的に答えるには現在の知覚確率による表現よりも体感振動レベルによる表現の方が適している。このため、設計指針では評価振動レベルの設定に体感レベルによる表現を採用する。

今回の改定において、設計方法として最も大きく変化する部分は作用時間効果の導入である。現在の居住性評価指針で提示されている評価曲線は、正弦波の連続入力を受けたときの人間反応に関する室内被験者実験に基づいている。このため衝撃的振動や間欠振動など作用時間が短い振動に対しては居住性を過剰評価してしまう可能性が大きい。今回の新しい評価指針では、作用時間が短いと体感振動レベルが低減することが定量的に示されている。

設計指針では、この作用時間効果を設計過程で評価することにより合理的な環境振動設計を行うことを目指している。そのために、内部・外部の人工振動源に対しては、振動の作用時間を推定したのち、その影響度を設計に反映できる方法を提示することにした。具体的には、評価指針における作用時間効果の考え方にに基づき、図6に示すように、横軸に振動の作用時間、縦軸に低減係数をとることにより作用時間効果を定量化する。設計者は評価点における応答加速度を算定した後、振動の作用時間に応じた低減係数を乗じて有効応答加速度に変換する。この有効応答加速度を新しい評価曲線上にプロットすることにより要求性能が充足されるかどうかを判定する。

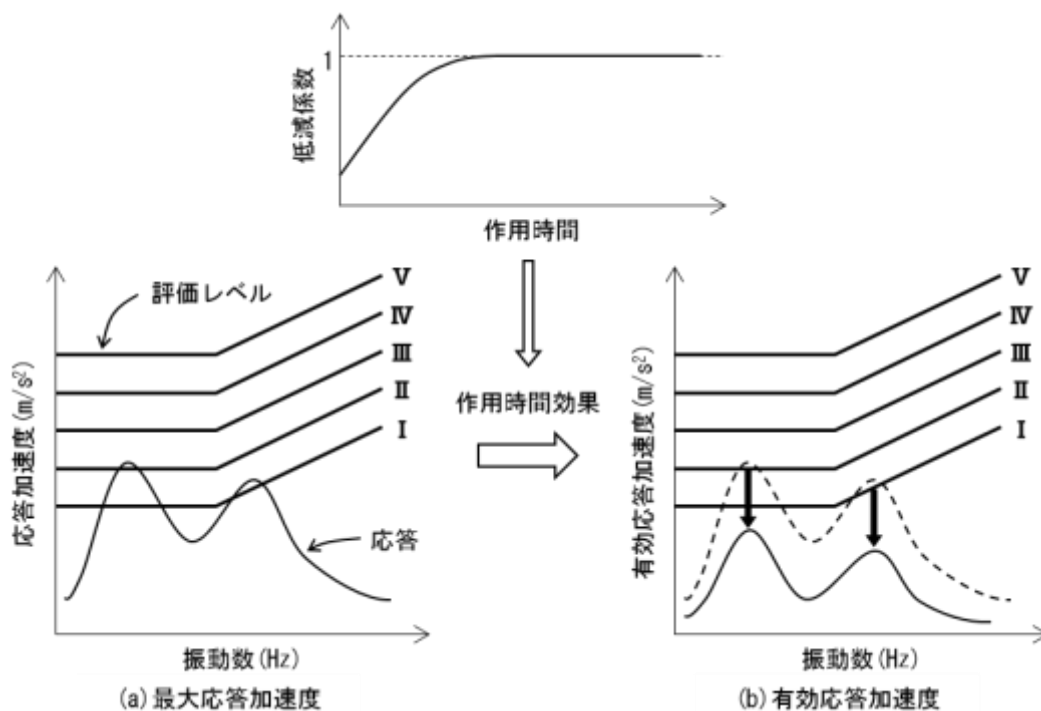


図6 作用時間効果の導入

## 6. 基本的な設計フロー

環境振動設計の基本的な設計フローを図7に示す。設計は、建築主の要求性能の決定に始まり、計測による実建物の性能確認で終了する。具体的には以下の手順で行う。

- ①性能マトリクスを用いて建築主の要求性能に見合った性能ランクを決定する。
- ②性能ランクに対応する入力レベルと評価レベルの組み合わせを目標性能として設定する。
- ③複数の入力レベルに対応する応答加速度を予測する。
- ④応答加速度に作用時間効果を考慮した低減係数を乗じ有効応答加速度に変換する。
- ⑤入力レベルごとに有効応答加速度を周波数領域の評価曲線上に設定された評価レベルと比較する。
- ⑥すべての入力レベルに対して要求性能が満足されていることを確認する。満足されていない場合は設計変更を行う。
- ⑦竣工後、振動計測により実建物が要求性能を満足していることを確認する。

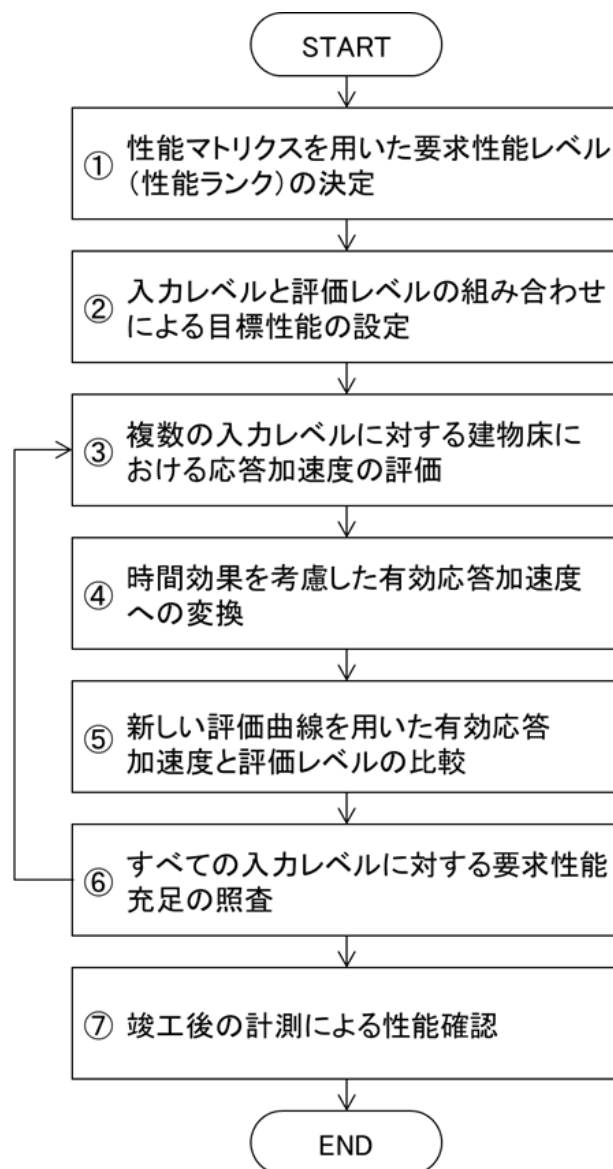


図7 基本的な設計フロー

## 7. 風振動の環境振動設計：自然振動源の例

自然振動源に対する環境振動設計の一例として風振動を考える。風振動に対する設計対象は全体架構であり，応答評価は床の水平加速度に関して行う。建物がないフリーフィールドにおける平均風速を設計入力のパラメータとし，入力レベルは再現期間（年間超過確率）に基づき，たとえば1年，2年，5年，10年などを考える。風振動で考えられている性能マトリクスを図8に示す。応答量の予測にあたっては，床振動の水平加速度の作用時間効果は小さいと考えられるので設計フローにおける④を省略する。

## 8. 歩行振動の環境振動設計：内部人工振動源の例

内部人工振動源に対する環境振動設計の一例として歩行振動を考える。歩行振動に対する設計対象は床スラブであり，応答評価は床の鉛直振動に関して行う。歩行に伴う床加振力を設計入力のパラメータとし，入力レベルは生活空間・作業空間としての行動範囲（面積）を考慮して，たとえば日間超過確率に基づき1日，3日，7日，30日などを考える。歩行振動で考えられている性能マトリクスを図9に示す。応答量の予測にあたっては，床振動の鉛直加速度の作用時間効果を考える。

評価レベル 入力レベル 再現期間	評価Ⅰ	評価Ⅱ	評価Ⅲ	評価Ⅳ	評価Ⅴ
1年					
2年	ランク5	ランク4	ランク3	ランク2	ランク1
5年					
10年					

図8 風振動の性能マトリクスの例

評価レベル 入力レベル 再現期間	~P	P~A	A~C	C~E	E~
日常 (1時間数回)					
1日数回	ランク5	ランク4	ランク3	ランク2	ランク1
1日					
7日					

図9 歩行振動の性能マトリクスの例

### 9. 交通振動の環境振動設計：外部人工振動源の例

外部人工振動源に対する環境振動設計の一例として交通振動を考える。交通振動に対する設計対象は敷地内地盤を含む全体架構であり，応答評価は床の水平加速度と鉛直加速度の両方で行う。建物の敷地境界における地盤加速度（水平・鉛直成分）を設計入力の物理量とし，地盤加速度の入力レベルは日々の交通量と道路・軌道の劣化・変形を考慮して，たとえば週間超過確率に基づき1週間，4週間，12週間，52週間などを考える。交通振動で考えられている性能マトリクスの例を図10に示す。応答量の予測にあたっては，床振動の水平・鉛直加速度の作用時間効果を考える。

### 10. 性能確認のための環境振動計測

建築主が決定した性能ランクが実際に設計・施工を通じて実現されていることを確認するために，建物の竣工後に環境振動計測を行う。計測範囲は設計対象領域とし，自然振動源は架構全体，内部人工振動源は床スラブ（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る），外部人工振動源は敷地地盤を含む架構全体とする。

評価レベル 入力レベル 再現期間	評価Ⅰ	評価Ⅱ	評価Ⅲ	評価Ⅳ	評価Ⅴ
1日					
1週間	ランク5	ランク4	ランク3	ランク2	ランク1
1ヵ月					
1年					

(a) 水平振動

評価レベル 入力レベル 再現期間	~P	P~A	A~C	C~E	E~
1日					
1週間	ランク5	ランク4	ランク3	ランク2	ランク1
1ヵ月					
1年					

(b) 鉛直振動

図10 交通振動の性能マトリクスの例



設計対象領域で入力と応答を測定し，入出力関係としての伝達関数から設計対象領域の増幅・減衰特性を評価することにより，環境振動に関する建物の要求性能が満たされているかどうかを評価する。このためには，振動計測における入力点と応答点の位置，および計測する物理量を決める必要がある。多様な振動源から伝搬する環境振動を計測するには物理量として加速度が適しており，計測機器としては設置位置を自由に移動でき多点計測（面的計測）が可能な振動センサが有効である。この振動センサを用いて，図 11 に示すように設計対象領域の伝達関数の入力と出力に対応する加速度を計測する。

自然振動源に関しては，設計対象領域である全体架構の伝達関数を求めるために，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）を入力として計測し，複数の床応答評価点での水平応答加速度（2成分）を出力として計測する。風の場合は入力を加速度として計測することは難しいため，複数の応答評価点における水平加速度（2成分）を計測することにより伝達関数を推定する。

内部人工振動源に関しては，設計対象領域である床スラブの伝達関数を求めるために，床スラブ周辺の境界梁の鉛直加速度（1成分）を入力として計測し，床スラブの最大応答点（通常は床スラブの中央点）の鉛直加速度（1成分）を出力として計測する。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必要がある。

外部人工振動源に関しては，敷地地盤—架構—床スラブの系が設計対象領域となるので，その伝達関数を求めるために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）を入力として計測し，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）を出力として計測する。

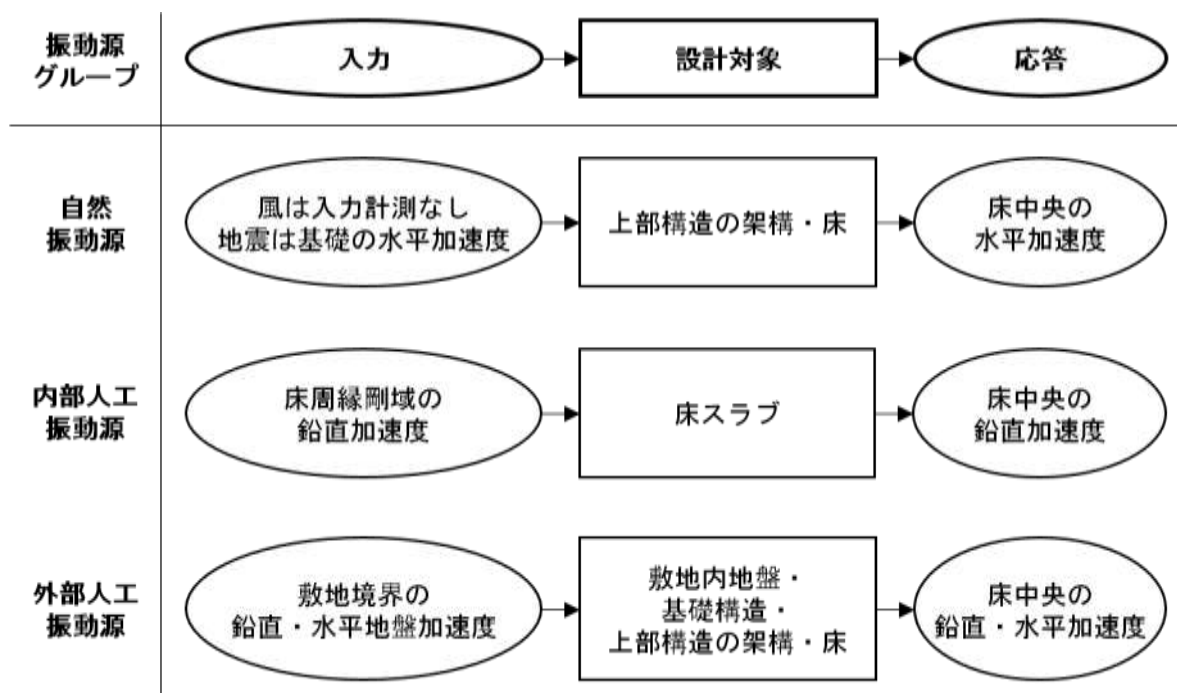


図 11 性能確認のための環境振動計測

## 11. おわりに

現在、進められている設計指針の策定作業において、性能マトリクスは設計プロセスを通じて要の位置を担わされている。性能マトリクスは、建築主と設計者の合意形成を構築するために用いられ、建築主の要求性能が決定されると同時に、設計者にとっては入力レベルと評価レベルを結びつける目標性能が具体的に設定されることになる。目標性能が設定された後の設計プロセスは通常の構造設計と大きな違いはない。多段階の入力レベルとそれに応じた多段階の評価レベルが設定され、対象とするすべての入力条件に対して要求性能を満足するように設計は進められる。環境振動設計は性能設計をベースにしているため、各入力レベルに対する応答の予測手法の選択は設計者に委ねられている。しかし、竣工した建物において建築主の要求性能が実現されていることを保証する必要があるため、最終段階として振動源の特徴に応じた振動計測を実施し、環境振動に関する性能確認を行う。これは、環境振動がごく日常的な振動を対象としているため、いつでも計測が可能であるという環境を生かしたものであり、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違いといえる。この段階で、再び性能マトリクスを用いて建築主への性能確認の結果説明がなされる。性能マトリクスは、設計プロセスの始まりと終わりの段階における建築主と設計者とのコミュニケーション・ツールとして大きな役割を演じることになる。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：建物の振動に関する居住性評価指針同解説（初版），1991
- 2) 日本建築学会：建物の振動に関する居住性評価指針同解説（改訂版），2004
- 3) 日本建築学会：第31回環境振動シンポジウム「住まいに入り込む環境振動」，2013
- 4) 日本建築学会：第32回環境振動シンポジウム「居住性能評価指針の新たな方向性－評価と設計の分離－」，2014
- 5) 日本建築学会：第33回環境振動シンポジウム「居住性能評価に応じた設計の枠組み」，2015
- 6) 日本建築学会：第34回環境振動シンポジウム「建築振動に関する安全性と居住性」，2016
- 7) 日本建築学会 2016 年度大会パネルディスカッション「建築物の振動に関する居住性能評価指針の改定に向けて」，2016
- 8) 後藤剛史・濱本卓司：わかりやすい環境振動の知識，鹿島出版会，2013