

# 地盤の振動計測方法

## Measuring Method of Ground Vibration

関 谷 堅 二 (せきや けんじ)

基礎地盤コンサルタンツ(株)東京支社技術部計測課

### 1. はじめに

一般的に地盤の振動現象は、地震などの特別な場合を除けば総じてデリケートであり、振動媒体としての地盤とその構造および振源の性質に左右されるので複雑である。このため地盤の振動計測は、目的とする振動現象に応じて測定機器が使い分けられ、測定データの整理方法や着目点、評価方法なども異なる。

地盤の振動計測方法を形態別に分類すると、①地震観測、②公害振動測定、③地盤調査手段としての振動計測、④そのほかなどに分けられる。①の地震観測は耐震工学上の外力としての慣性力が求められ、強震計によって地盤の加速度を測定している。②の公害振動測定は、工場・事業場振動、道路交通振動、鉄道振動、建設作業振動など振動の発生源別に細分されるが、市民生活に何らかの支障を来す恐れのある振動を対象とし、通常は公害振動計を用い振動レベルで評価される。③の地盤調査手段としての振動計測は、多くは人工振源による微弱振動を対象とするため特殊な機器が用いられ、主に振動の到達時間から地盤の振動伝達速度を求めて地盤構造などを検討し評価している。

本報文においては、建設事業に最も関連の深い公害振動測定を中心に述べるものとする。

### 2. 振動量の単位

#### (1) 基本的な単位

振動の強さあるいは大きさは、変位、速度、加速度で表現され、その単位として変位は cm、速度は cm/s (カイン)、加速度は cm/s<sup>2</sup> (ガル) などが用いられる。扱う振動の大きさによって便宜上表一に示される各種の単位も使われる。

表一 振動量の単位

| 種 別   | 基本的な単位            | そのほかの単位   |
|-------|-------------------|---|
| 変 位   | cm                | $\mu = 10^{-3}\text{mm} = 10^{-4}\text{cm}$<br>$\text{mm} = 10^{-1}\text{cm}$<br>$\text{m} = 10^2\text{cm}$                         |
| 速 度   | cm/s              | $\text{mm/s} = 10^{-1}\text{cm/s}$<br>$\text{kine(カイン)} = 1\text{cm/s}$<br>$\text{m/s} = 10^2\text{cm/s}$                           |
| 加 速 度 | cm/s <sup>2</sup> | $\text{gal(ガル)} = 1\text{cm/s}^2$<br>$\text{G(ジー)} = 980\text{cm/s}^2 \approx 1000\text{gal}$<br>$\text{m/s}^2 = 10^2\text{cm/s}^2$ |

#### (2) 加速度レベル VAL

基本的な単位系は、直線尺度で数字としてはわかりやすいが、人間の感覚に関係する量は、その量が2倍になっても人間の感覚度合いは2倍になるわけではなく、ウェバー・フェヒナーの法則によって等差級数的(対数尺度)に対応する。このような考えから、公害振動においては、dBが公式に採用されている。

加速度レベルは、振動加速度を dB 単位で表したものであり、次式で定義される。

$$\text{加速度レベル VAL} = 20 \log_{10} \frac{A}{A_0} \text{ (dB)} \quad \dots\dots (1)$$

A: 測定値の加速度値 (m/s<sup>2</sup>)

A<sub>0</sub>: 基準値 (10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>)

ここで、加速度レベルは対数表示であるから、加速度が2倍になっても加速度レベルは2倍とはならず、加速度レベルは  $20 \log_{10} 2 \approx 6 \text{ dB}$  だけ増加することになる。

#### (3) 振動レベル VL

式(1)で定義される加速度レベルは、人体感覚などには関係のない物理量の表示であるが、振動の人体あるいは建物等に及ぼす影響は振幅と振動数に依存し、また鉛直振動と水平振動とでは感じ方が異なることが知られている。それで、ISO(国際標準化機構)の人体の振動に対する振動暴露基準に基づいて、前記の加速度レベルに周波数による人間の振動感覚の補正を加えたものが振動レベル(補正加速度レベル)といわれるものである。

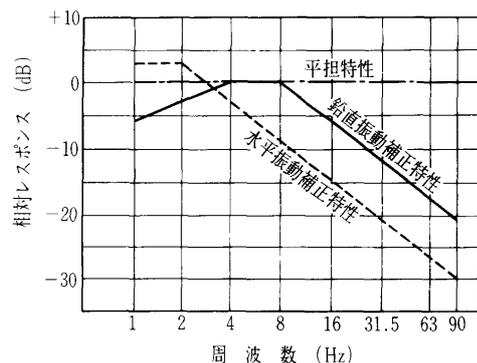
鉛直方向について振動レベルを定義すると、式(1)における A<sub>0</sub> を次のように周波数帯域ごとに補正したものとなる。

$$1 \leq f \leq 4 \quad A_0 = 2 \times 10^{-5} \times f^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$4 \leq f \leq 8 \quad A_0 = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

$$8 \leq f \leq 90 \quad A_0 = 0.125 \times 10^{-5} \times f \text{ m/s}^2 \quad \dots\dots (2)$$

図一は、人体の振動感覚補正特性を示したものである。



図一 人体の振動感覚補正特性 (鉛直振動)

表-2 各種ピックアップ比較対照表

|             | 動電形  | 金属抵抗線形                                    |  | 圧電形                               | サーボ形   | 差動トランス形                                       |
|-------------|--|---|--|-----------------------------------|--|---|
|             |  | 抵抗線ひずみゲージ                                 | 半導体ゲージ                                 |                                   |  |   |
| 原理          | コイルが磁束を切る時に生じる速度に比例した誘起電圧を利用する。                        | ばねのひずみをゲージで電気変換する。したがって、ばね特性そのものの電気変換となる。 | 同左                                     | チタン酸バリウム、ジルコチタン酸鉛等のピエゾ効果を利用する。    | ばねの変位を検出し、それと、逆向きの力を加えばねの変位を常にゼロの状態に保つに要する力を加えるに要した電流を検出する。基本的には加速度計である。 | 差動トランスによってばねの変位量を計測する。したがって、ばね特性そのものの電気変換となる。 |
| 利点          | 古くから用いられているオーソドックスな変換方式。出力電力が大きく、直接ガルバノメータを撮ることが可能である。 | 小型の変換器が作れる。動ひずみ測定器で測定することができる。            | 非常に小型の変換器が作れる抵抗線ひずみゲージと比較し感度が約100倍である。 | 小型の変換器が作れる。出力電圧が大きい。高周波域の変換器が作れる。 | ばねの非直線性が補償されるため、高精度である。  | 変位そのものを電気変換するため、構造が単純である。低周波域では高感度のものが作りやすい。  |
| 欠点          | 機器が大型となる。  | 高周波域高感度のものは作り難い。                          | 抵抗線ひずみゲージの欠点を補っているが、耐衝撃性が劣る。           | 低周波域の変換が困難。                       | 比較的高価である。  | 高周波域の変換が困難。                                   |
| 安定性<br>温度特性 | 安定   | 温度補償が必要                                   | 同左                                     | 安定                                | 特に安定   | 安定  |
| コードの影響      | 非常に小さい   | 長尺の場合考慮を要する                               | 小さい                                    | 長尺の場合考慮を要する                       | 非常に小さい   | 非常に小さい  |
| 直線性         | 良  | 良   | 良                                      | 良                                 | 特に良い   | 良   |

### 3. 地盤振動の測定

#### 3.1 振動測定機器

一般に振動測定は図-2の測定系で行われる。すなわち、感知した振動をピックアップにより電気的に変換・増幅し、記録器にて記録する。また必要に応じて解析器、またはコンピューターで記録波形を解析・処理する。



図-2 振動の測定系

一般的に「振動計」と呼ばれているのは、ピックアップと増幅器を組合わせた部分である。

##### (1) ピックアップ

ピックアップは「振動を検出する装置」のことであり、一般には、ばねと錘から成る振動系（ばね・ます系）とそこで検出した相対運動を電気量に変換する変換部とで構成される。

ピックアップを分類すると、「変換方法」によって、①動電形、②圧電形、③そのほかに分けられる。表-2は、変換方法により分類し、それぞれの特徴を整理したものである。

ピックアップの性能は、①分解能と、②周波数特性とで表される。分解能は、所定の精度で測定できる最小の振動の大きさで表す。周波数特性とは、ある周波数の振動に対するピックアップの出力を比で表したものであり、周波数特性が100%で平坦な曲線を示す周波数帯域の振動に対して、そのピックアップは使用できる。図-3にその1例を示す。

したがって、測定にあたっては対象となる振動がどの程度の大きさであるか、またどのような周波数成分が含まれているかをあらかじめ調査し、所定の分解能・周波

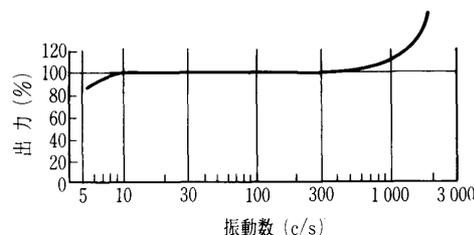


図-3 ピックアップの周波数特性の1例

数特性を持ったピックアップを選択する必要がある。

##### (2) 増幅器

ピックアップからの電気出力は一般に小さいので、記録器を直接的に作動させることはできないため、この微小な電気信号を増幅するのが増幅器である。最近ではフィルター機能や記録器への出力容量を調整する機能を備えたシグナルコンディショナーが普及している。

##### (3) 記録器

記録器の種類を大別すると、記録紙上に波形を描き出すペンオシログラフ、電磁オシログラフ、ブラウン管上に波形を写し出すシンクロスコープ、メモリスコープおよび原波形を直接磁気テープに記録するデータレコーダーなどに分けられる。最近では、データレコーダーもアナログ方式ではなくコンピューターと同じデジタル方式の高性能なものも使用されるほか、直接コンピューターに取込む方法も用いられている。

##### (4) 振動レベル計

公害振動測定においては、振動レベル計を用いる。振動レベル計はピックアップと本体部より成っている。本体部には、加速度レベルを測定するための平坦特性（1～90 Hz）と振動レベルを測定するための人体感覚補正特性（鉛直振動では4～8 Hz、水平振動では1～2 Hzが平坦特性である）を含み、また加速度の大きさを実効値に直し、メーターによりそのdB値が指示される。

##### (5) レベルレコーダー

一般の振動測定では、振動波形そのものを記録するが、公害振動ではこのレベルレコーダーを用いて振動の大きさ（実効値）の時間的変化を記録紙に記録することが多い。ペンの応答特性は、振動レベル計規格による動特性のほか、騒音計規格による「FAST」、「SLOW」にも変換できるようになっている。

### 3.2 公害振動の測定方法

#### (1) 測定場所

公害振動の測定場所をまとめると次のとおりである。

工場、事業場：工場、事業場の敷地の境界線

建設作業：建設作業の場所の敷地の境界線

道路交通：道路の敷地の境界線

以上はいずれも振動規制法に定められたものであり、「原則として」の測定場所である。新幹線については、環境庁勧告の中では特に定められていないが、「対象となる建物等より1m程度離れた地盤上で、対象となる建物の存する地域の振動を代表すると認められる地点」を標準として選定している。

#### (2) ピックアップの設置方法

ピックアップを地表面に置いた場合、地盤とピックアップとで振動系が形成される。すなわち、ピックアップという質点を地盤のばねが支持している振動系である。この系の共振周波数が測定周波数範囲内に現れると測定誤差を生ずる。したがって、ピックアップは原則として、緩衝物がなく十分踏固めが行われている固い場所かつ傾斜あるいは凹凸のない場所で水平面を十分確保できる場所に設置するのが望ましい。

また、ピックアップは、温度・風・電気・磁気等の周囲の条件の影響を受けることがあり、また接続ケーブルにノイズが侵入する場合もあるので、適切に防護することが重要である。

### 4. 公害振動の評価方法

レベルレコーダーに記録された振動レベルの変動状況を分類して示すと図-4のようになり、この変動の仕方によって評価方法が異なる。

#### (1) 変動の少ない振動

送風機・コンプレッサー等の定常運転時の振動は、図

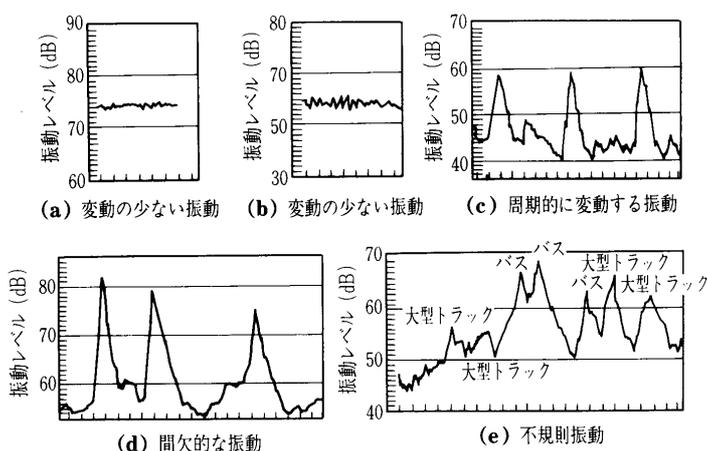


図-4 振動レベルの変動の分類

4(a)に示したようなレベル変動の少ないものとなる。このような場合には、指示値そのものが振動レベルである。振動規制法に付随する政令等では工場振動と建設振動について変動しないか、または変動が少ない場合は、その指示値を振動レベルとして決定することになっている。

しかし、一般に定常といわれる振動でも若干の変動幅がある。したがって、図-4(b)のように変動幅がある場合には、変動ごとの最大値の平均を読み取れば良い。

#### (2) 周期的または間欠的に変動する振動

杭打ちやプレス機などで得られる振動レベルのパターンは、図-4(c)に示すように、ほぼ等間隔の周期的な振動として観測される。また、型打ち鍛造や鋼材破壊のような場合は、必ずしも周期的にならない間欠的な振動となる(図-4(d))。これらのレベルの決定方法について振動規制法等では、工場振動や建設作業振動が周期的または間欠的に変動する場合は、最大値10個の算術平均値を振動レベルとすることになっている。

#### (3) 不規則に変動する振動

振動レベルも発生時間間隔も不規則にかつ大幅に変動する例としては、道路交通振動等がある(図-4(e))。このような場合には発生する振動の最大値に着目して、①ある時間幅の間に読み取れる最大値の統計値を読み取る方法と②ランダムな事象として、ある時間間隔ごとの瞬時値を読み取って統計的な数値を引出す方法がある。振動規制法等では②の方法を選んでおり、原則として5秒間隔で100回の瞬時値測定をし、その変動幅の80%レンジの上端の数値を評価値として採る。

この条件を満たすためには、交通流があまり途絶えることのない場合でなければならない。しかし、間欠的な振動でも不規則変動するものは、ある程度の振動の継続時間がある場合には、不規則に変動する振動として評価すべきである。このようなことから環境庁では、振動規制法に伴って通達で次のように定めている。

#### (ア) 工場および建設作業振動

原則として5秒間隔で100個の測定値を得るように測定すること。これができない場合には、少なくとも50個の測定値が得られるような測定時間間隔(少なくとも1秒間隔)で測定すること。

#### (イ) 道路交通振動

5秒間隔で連続して測定して得た値を100個得ること。ただし、当該測定点での交通量が200台/時間未満である場合において、自動車が当該測定点を20秒以上通過しないときには、自動車が当該測定点を通過した時点の前後5秒以内に測定して得た値以外は採用しないものとする。

#### (4) 鉄道振動

鉄道振動における振動レベルの記録例を図-5に示す。鉄道振動に関しては、環境庁勧告で新幹線鉄道振動についてのみ次のように定められている。

① 測定は、原則として、上りおよび下りを問

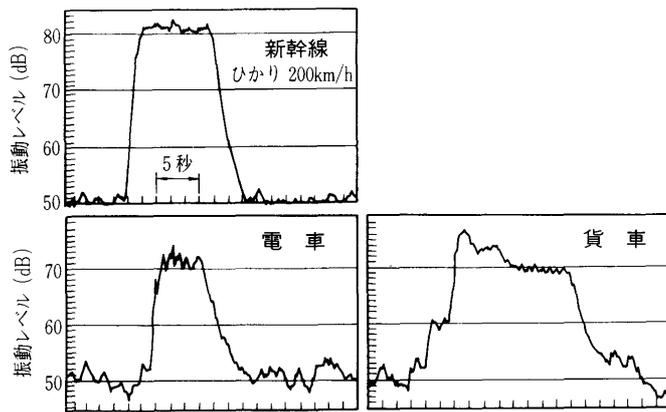


図-5 各種列車の振動レベル測定例

わず連続して通過する20本の列車について、当該通過列車ごとのピークレベルを読み取って行う。なお、測定時期は、列車速度が通常時より低いと認められる時期を避ける。

② 評価は、①のピークレベルのうち大きさが上位半数のものを算術平均して行う。

なお、在来の鉄道などについての評価方法は、公的に定められたものはないが、現在のところは新幹線に準じてレベルを決定する場合が多い。

(5) 暗振動による補正

特定の振動源からの振動だけを測定する場合には、暗振動の影響に対する注意が必要である。暗振動とは、ある場所において特定の振動を対象とする場合に、対象の振動がない時のその場所における振動のことである。

暗振動の補正は、対象の振動があるときの振動レベルが、暗振動のみのときより10dB以上高いならば、その

表-3 暗振動の影響に対する指示の補正

|                         |    |    |   |   |   |    |   |
|-------------------------|----|----|---|---|---|----|---|
| 対象の振動がある時とない時の指示の差 (dB) | 3  | 4  | 5 | 6 | 7 | 8  | 9 |
| 補正值                     | -3 | -2 |   |   |   | -1 |   |

表-4 1/3オクターブフィルターの中心周波数と帯域値

| 中心周波数 (Hz) | 帯域幅 (Hz) |      | 中心周波数 (Hz) | 帯域幅 (Hz) |      | 中心周波数 (Hz) | 帯域幅 (Hz) |       |
|------------|----------|------|------------|----------|------|------------|----------|-------|
|            | 下限       | 上限   |            | 下限       | 上限   |            | 下限       | 上限    |
| 1*         | 0.9      | 1.12 | 31.5*      | 28       | 35.5 | 1000*      | 900      | 1120  |
| 1.25       | 1.12     | 1.4  | 40         | 35.5     | 45   | 1250       | 1120     | 1400  |
| 1.6        | 1.4      | 1.8  | 50         | 45       | 56   | 1600       | 1400     | 1800  |
| 2*         | 1.8      | 2.24 | 63*        | 56       | 71   | 2000*      | 1800     | 2240  |
| 2.5        | 2.24     | 2.8  | 80         | 71       | 90   | 2500       | 2240     | 2800  |
| 3.15       | 2.8      | 3.55 | 100        | 90       | 112  | 3150       | 2800     | 3550  |
| 4*         | 3.55     | 4.5  | 125*       | 112      | 140  | 4000*      | 3550     | 4500  |
| 5          | 4.5      | 5.6  | 160        | 140      | 180  | 5000       | 4500     | 5600  |
| 6.3        | 5.6      | 7.1  | 200        | 180      | 224  | 6300       | 5600     | 7100  |
| 8*         | 7.1      | 9    | 250*       | 224      | 280  | 8000*      | 7100     | 9000  |
| 10         | 9        | 11.2 | 315        | 280      | 355  | 10000      | 9000     | 11200 |
| 12.5       | 11.2     | 14   | 400        | 355      | 450  | 12500      | 11200    | 14000 |
| 16*        | 14       | 18   | 500*       | 450      | 560  | 16000*     | 14000    | 18000 |
| 20         | 18       | 22.4 | 630        | 560      | 710  |            |          |       |
| 25         | 22.4     | 28   | 800        | 710      | 900  |            |          |       |

\* オクターブフィルターの中心周波数

値を対象の振動のレベルとすることができる。しかし、その差が10dB未満のときは、表-3によって補正して大体の振動レベルを推定することになる。

例えば、暗振動が65dBの場所である機械を運転して70dBの指示を得たとすれば、指示の差が5dBであるから、その機械だけの振動レベルは、表-3から補正值を-2dBと読んで70-2=68dBと推定される。

(6) 周波数分析

振動現象のうち前述までの記述は振幅の大きさや平均値など時系列で表現される基本量であるが、振動のもう一つの重要な表現方法として、どのような周波数成分で構成されているのかを示す必要がある。この時間領域から周波数領域へ変換して分析するのが周波数分析である。コンピューターが普及するまでは専用の周波数分析器が用いられていたが、近年ではデジタルデータの高周波フーリエ変換 (FFT) による周波数分析も多く用いられている。

振動現象の周波数成分表示は、その振動がいろいろな周波数によって構成されていることを表したもので、最大値を示す周波数が卓越振動数である。したがって、全くランダムな振動では、卓越振動数は見出せない。

この周波数分析の中心を成す周波数変換 (FFT) 手法は、この逆の周波数領域から時間領域への変換 (IFT) 手法とともに、波形処理手法として、各種フィルター処理や波形の生成、周波数応答、2波形の相互関係などの解析に利用されている。

公害振動の分野では周波数軸をオクターブまたは1/3オクターブバンド幅の周波数バンドに分け、各バンドの中心周波数ごとにそのバンド内の加速度レベルを求めている。表-4に中心周波数と帯域幅の関係を示す。

人体が振動を感じる場合、各バンドの振動を一つずつ別々に感じるのではなく、それらが合成された全体を一つの振動として感じている。この合成された全体の振動の加速度レベルをオーバーオールレベル (OAレベルまたは全域レベル) という。一般に示される加速度レベルはオーバーオールレベルのことである。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査法, pp. 585~586, 1995.
- 2) 土質工学会：建設工事に伴う公害とその対策, pp. 149~169, 1983.
- 3) 日本道路協会：道路環境整備マニュアル, pp. 141~169, 1995.
- 4) 江島 淳：地盤振動と対策, 集文社, 1979.
- 5) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 1991.
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.

(原稿受理 1996.6.19)