

不快な床振動を発生させている地盤上加振源位置の推定方法

中山 昌 尚

概 要

不快な床振動を引き起こす地表上の加振源の位置を特定する簡単な方法が述べられている。この方法は基本的に次の前提にたっている。1)加振源および対象建物とも均質性質の地盤上にある。2)加振源は一つで、しかも地表面上にある。この条件の下で、比較的強い地盤振動の加振源位置を簡易な計測により精度よく特定できる。その方法とは、測定された所謂振動レベルの経験的距離減衰式への適合時の残差を最小化することである。実測データによりこの方法の有効性を示した。

An Identification Method of the Location of Ground Excitation Source causing unwanted Floor Vibration

Abstract

A simple method to identify the location of excitation source on the ground, which causes unwanted floor vibrations, is described.

This method is applicable where:

- 1) Mechanical characteristics of the ground are spatially uniform.
- 2) There is a single excitation source located on the surface of the ground.

This method is fundamentally based on an empirical distance attenuation relationship of so-called vertical vibration level (VL). The targeted location of excitation source is determined by minimizing square sum of deviation of measured VL from the empirical formula of distance attenuation of VL. The validity of this method is clearly shown by a field measurement.

キーワード: 地盤振動, 振動レベル, 加振源 振動測定

§1. はじめに

地盤振動に特異な振動数成分を含んでいてある対象建物に不快な床振動を発生させる場合がある。また、その加振源を特定しようとしても 敷地外にあり特定し難い場合がある。本報では こうした状況下で、対象建物近傍での地盤振動の計測による加振源位置の推定方法および推定結果を報告する。推定方法は方法1: 振動の大きさの距離減衰特性を利用した方法、方法2: 振動の位相差を利用する方法である。なお、両方法の適用にあたって 次の前提を設けている。

- ・加振源、対象建物とも均質性質の地盤上にある。
- ・加振源は一つで、しかも地表面上にある。

結果として 方法1による方法が整合性があり加振源位置の絞り込みができた。

§2. 問題とする状況と現象

古くからの工業団地内の事務所ビルで不快な床振動が間欠的に発生している。その床・地盤振動性状については文献 1) に詳しく記述されているが、この現象の要点は“床の固有振動数付近に卓越振動数を持つ地盤振動が発生し”、床が強制振動状態になっていると言うことである。対象建屋は敷地境界付近にあり敷地外に発生源を想定せざるを得ない状況である。床振動の大きさとしては、日本建築学会建築物の居住性能評価指針(1991 年版)で V-3 レベルが長時間発生している。

図1に対象建物と計測点位置の関係を示す。図上 上側は幅約 6m 道路を隔てて他社の工場になっている。

図2は 問題となる現象が発生している時の地盤加速度波形例である。8Hz 程度で 2gal におよぶ加速度が発生している。図3は 加速度のフーリエ振幅スペクトル例(周波数分解能 0.122Hz)である。7.5Hz、8.9Hz、10Hz に鋭いピークが見られる。この周波数成分について図1の jx ライン上の点の相関性(ルートコヒーレンス、基準点 Jx6)を図4に示した。いずれの振動数成分も極めて相関性が高いことを意味し ひとつの加振源があることを類推させる。

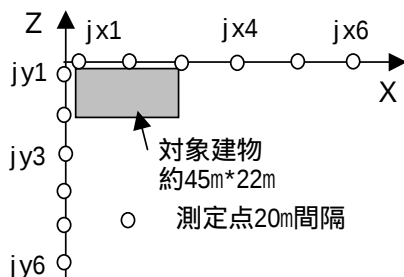


図1 状況図

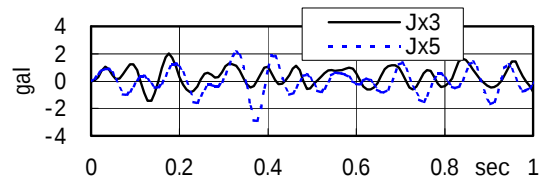


図2 地盤加速度(上下)波形例 位置 Jx3, Jx5

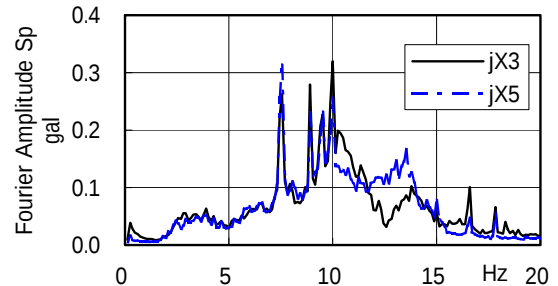


図3 地盤加速度(上下)のフーリエ振幅スペクトル

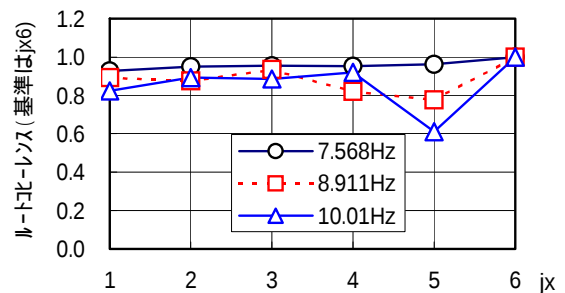


図4 地盤加速度(上下)の卓越振動数成分のルートコヒーレンス例 基準点 jx6

§3. 加振源位置の推定方法

二つの方法を考えた。

方法1 振動の大きさに基づく方法

加振源からの距離が増えることにより受振点の振動の大きさが小さくなることを利用する。代表的な振動の大きさの指標として“振動レベル”を採用すると 経験的距離減衰式(図5)は例えば次である。

$$V_L(r) = V_L(r_0) - 20n \log_{10}(r/r_0) - 8.68\alpha(r - r_0) \quad \text{Eq.(1)}$$

$V_L(r)$: 加振源からの距離 r での振動レベル r_0 : 基準距離 n : 幾何減衰定数 通常 0.83 α : 土質減衰係数 dB/m 通常 0.0035 (0 ~ 0.01)

振動レベルに関する距離減衰式はいくつか提案文 2-4) されているが、概略 Eq.(1) で実測値との適合が採れることを確認している。

上式は 要するに r の関数であり 次の形になっている。

$$V_L(r) = C - 20n \log_{10}(r) - 8.68\alpha \cdot r \quad \text{Eq.(2)}$$

加振点座標、 n および α を既知とし、複数点の振動レベルの測定値があれば、測定値が Eq.(2) に最も適合する

ように C の値を決めることができる。ここでは C を定めるのに最小二乗法を採用する。その際当て嵌まった式と測定値(dB)の残差の rms (二乗平均の平方根: dB) を最小にする点をもって推定加振点座標とする。

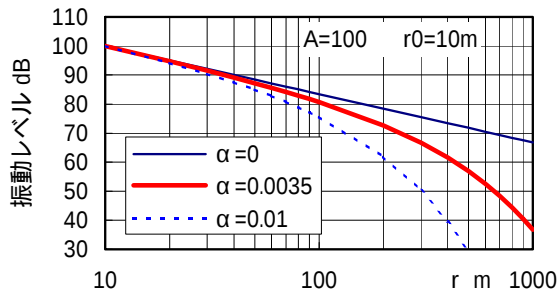


図5 振動レベルの距離減衰概念図
土質減衰係数 α 影響

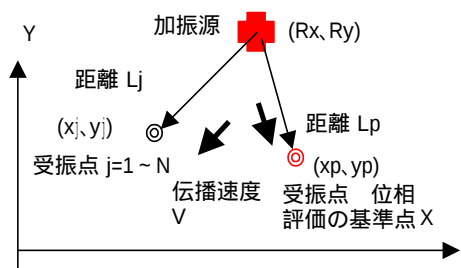


図6 加振点、受振点の状況

方法2 振動の位相差に基づく方法

加振点と受振点間の距離により位相差が生じることを利用する方法である。図6参照。基準点と受振点jの位相差は次となる。

$$\xi_{jp} = \frac{2\pi f}{V} (L_j - L_p) \quad \text{Eq.(3)}$$

ξ_{jp} : 基準点と受振点jの位相差 f : 位相差を特定する振動数、 V : 振動伝播速度 L_j , L_p : 加振点と受振点j、加振点と基準点p間の距離

さて、測定された振動波形から基準点p受振点jの位相差: β_{jp} は周波数分析から $(-\pi, +\pi)$ の範囲で求まる。仮定した加振点座標、複数点測定点座標、基準点に対する位相差、利用する振動数、振動伝播速度が既知とすれば、次の ε を最小にするものを仮定した加振点位置の最良の推定値とみなすことができる。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{ (\cos \xi_{jp} - \cos \beta_{jp})^2 + (\sin \xi_{jp} - \sin \beta_{jp})^2 \}} \quad \text{Eq.(4)}$$

ところで ε は次のようにも書けるから $\xi_{jp} - \beta_{jp}$ の値に $2\pi \cdot \text{整数倍}$ (ないしは $L_j - L_p$ に波長・整数倍) の不定性があることになる。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{j=1}^N (1 - \cos(\xi_{jp} - \beta_{jp}))} \quad \text{Eq.(5)}$$

このことは、加振点の絞り込みには致命的な弱点とも言えなくもない。

§4. 加振源位置、整合性検討に必要な緒量の算定

伝播速度 図1のXラインないしYライン上に6台の加速度計を配して、各計測点近傍を木槌で上下に打撃して伝播に要する時間差を測定した。両ライン上で多少のバラツキはあるものの表1に示す伝播速度の結果を得た。ここでは、X Line、Y Line 上で伝播速度に大きな差はなく約 100m/sとみなした。

表1 地盤の波動の伝播速度の計測結果

	Xライン	Yライン
平均	99.9	103.8
標準偏差	10.8	14.9
最大	117.6	120.5
最小	82.1	87.0

振動レベル

X Line、YLine に沿った微動加速度波より振動レベルを計算し位置による変化を図7.1 図7.2 に示す。図中にその概略傾向も示した。X Line 上では $j_x=4$ 付近が強い傾向が見えつまりX 60m 付近が最も加振源に近いと考えられる。Y ライン上では $j_y=1$ 側が大きい傾向が見え、図1のY>0 側に加振源があると推定できる。

なお、図は割愛するが、図3で示したフーリエスペクトルの卓越振動数成分についてもその位置とフーリエ振幅の関係は図7.1 図7.2 と同一の傾向を示した。

この傾向から 加振源の探索範囲は 図1の $X > 0$ かつ $Y > 0$ の第1象限に絞ってよいと判断される。

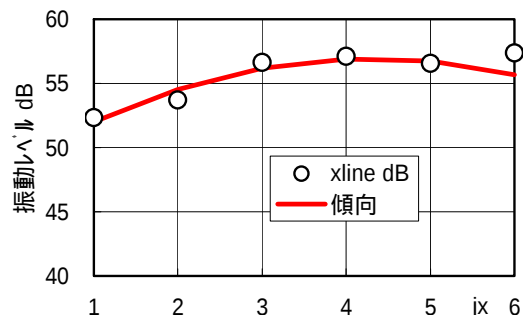


図7.1 振動レベル(上下)の分布 Xライン上

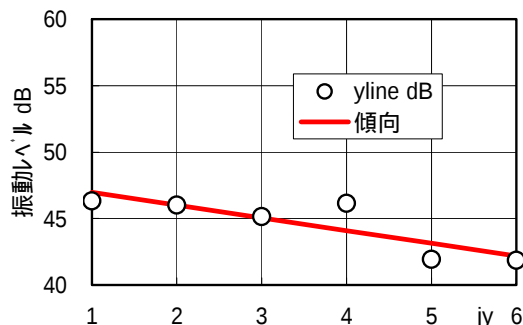


図7.2 振動レベル(上下)の分布 Yライン上

§ 5 . 加振源位置の推定結果

5.1 距離減衰による方法

実際の適用に当たっては次のように行った。探索域は § 4 での考察から 図1の第1象限の原点から1辺 700m の正方形領域とし、5m グリッド点ごとに加振源を仮定して当て嵌め式との rms 残差(dB)を算定した。

検討ケース名とパラメーター設定内容、推定された加振源位置を表2に示す。ケース名で、X,Y,XY は、Xライン上単独の、Y ライン上単独の振動レベルを用いた場合、X および Y ライン上の全計測値を用いた場合を意味する。a40,a00 は暗振動 40dB を考慮した場合、しない場合を、 α 35, α 00 は土質粘性係数 0.0035 および 0 を意味する。

図 8.1 から図 8.3 に rms 残差の分布例を示す。示している領域は 700mx700m の範囲である。rms 残差の分布は滑らかであり、明確に 残差最小位置が特定できているといえる。X ライン上のデータおよびYライン上のデータのみを用いた場合の差も小さい。図は割愛するが、他の検討ケースでも同様な rms 残差の分布傾向を示した。図9には 検討した各ケースから求めた加振源推定位置を示す。検討した各9ケースとも、暗振動の除去の有無、土質粘性係数の値の影響も少なく、概ねまとまった領域に集中していることがわかる。これらの9ケースの 加振点の X,Y 座標の最大最小値を除いて平均をとると、加振点の推定位置として(48.3m、70.0m)を得図中に示した。

図10は XY-a40-c35 の場合について、rms 残差最小の場合の 振動レベルの回帰式との適合の程度を見たものである。概ね 良い対応が採れていると言えよう。

図 11.1、図 11.2 は 加振点の推定位置を(48.3m、70.0m)として、予想される各ライン上の測定点の例である。対象とした振動数は、地盤振動の卓越振動数である。計測結果は(- π 、+ π)の範囲でしか求まらないので 2 π の整数倍を適時加えて比較した。Xライン、Yライン上とも 計算値との対応がとれているとみなし得る。

表 2 距離減衰に基づく方法のケース名と結果

Case名	暗振動 dB	n	幾何減 衰係数	土質減衰 係数 α (1/m)	推定加振 位置 X m	推定加振 位置 Y m	当て嵌め 残差の rms dB	Cの当て 嵌め値 dB
xy-a40- α 35	40.0	0.83	0.0035	25.0	75.0	2.06	82.3	
x-a40- α 35	40.0	0.83	0.0035	60.0	85.0	0.61	88.4	
y-a40- α 35	40.0	0.83	0.0035	35.0	5.0	1.70	75.3	
xy-a00- α 35	0.0	0.83	0.0035	40.0	80.0	1.25	85.1	
x-a00- α 35	0.0	0.83	0.0035	60.0	80.0	0.60	88.5	
y-a00- α 35	0.0	0.83	0.0035	85.0	75.0	0.97	86.0	
xy-a00- α 00	0.0	0.83	0.0000	25.0	75.0	1.73	80.9	
x-a00- α 00	0.0	0.83	0.0000	50.0	85.0	0.66	85.4	
y-a00- α 00	0.0	0.83	0.0000	45.0	35.0	1.00	77.6	

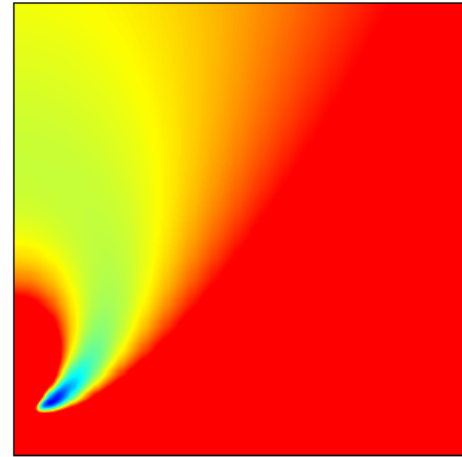


図 8.1 rms 残差(dB)の分布 ケース:x-a40- α 35
表示範囲は 700mx700m

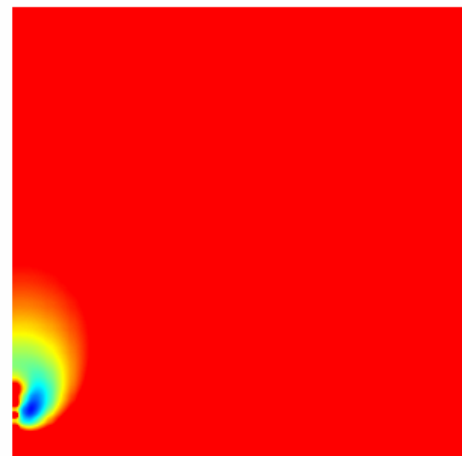


図 8.2 rms 残差(dB)の分布 ケース:y-a40- α 35

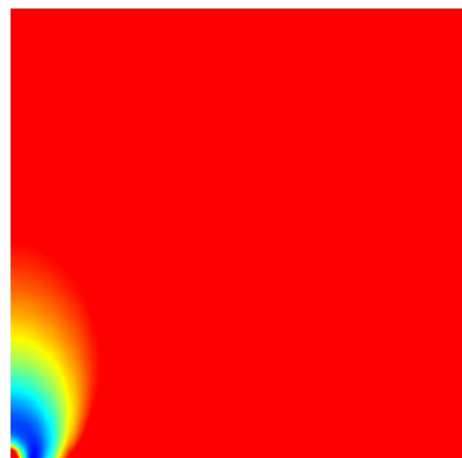


図 8.3 rms 残差(dB)の分布 xy- a40- α 35

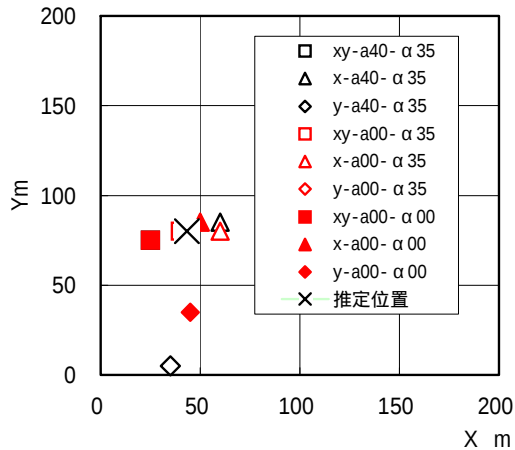


図9 各ケースで求めた加振源位置

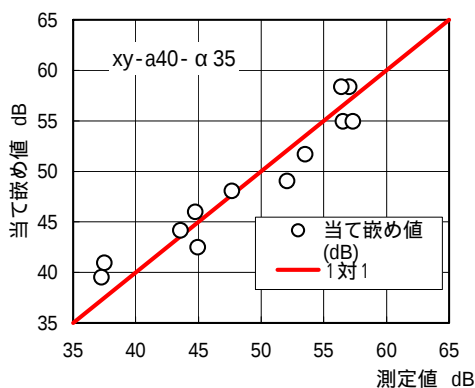


図10 振動レベルの距離減衰式との対応状況

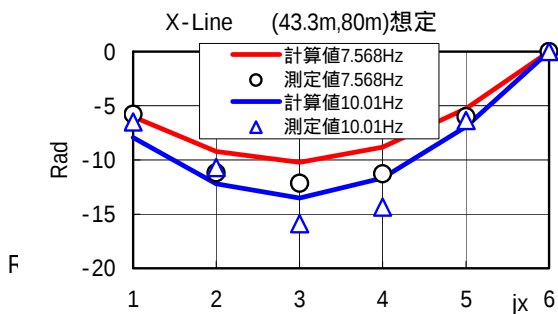


図11.1 推定した加振源位置の位相差による整合性の検討 Xライン上データについて

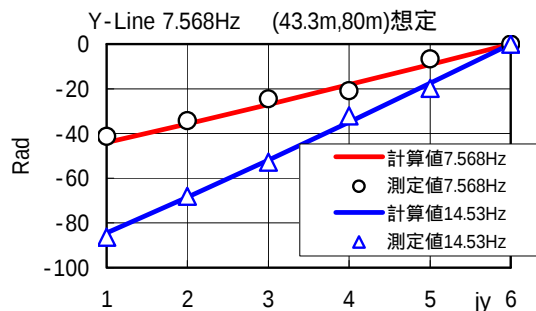


図11.2 推定した加振源位置の位相差による整合性の検討 Yライン上データについて

5.2 位相差による方法の推定結果

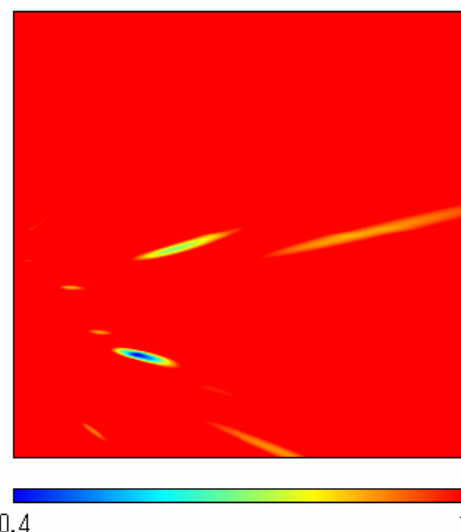
表3に検討ケースと推定結果を示した。ケース名は次のシステムとしている。Ph は位相差によることを意味し、x、y は X ライン、Yライン上の測定データを使用していること、次の三桁の数値は位相差を検討した対象振動数、all は 3 成分の残差の和を対象にしたことを意味する。最後の 700 ないし 200 は探索領域の1辺の長さが 700m、200m であることを意味している。

rms 残差の代表的な分布例(但し表示範囲は 200mx200m の領域)を図 12.1～図 12.3 に示す。

この位相差に基づく方法での ms 残差分布で特徴的なことは、既に見た距離減衰に基づく方法に比べて、縞状の等値線が走る傾向がある、および、非常に急峻な変化をする傾向があることである。このことは § 2 で触れているように、位相差に 2π の整数倍(あるいは、距離差に波長の整数倍)の不定性があることにより生じていると考えられる。図 13 には、各ケースで求めた推定加振位置を示したものである。既に表示した距離減衰による結果(図 9)に比べて大きなバラツキを示している。しかしながら、加振源位置が対象建物から約 139mx130m の範囲に絞られている。

表3 計算ケースと推定結果

ケース名	対象周波数 Hz	探索範囲 m*m	グリッド サイズ m	最小残差 (rms)	推定加振 位置 Xm Ym
Ph-x-7.5-700	7.568	700*700	5	0.4636	60 45
Ph-x-7.5-200	7.568	200*200	2	0.3904	54 46
Ph-x-8.9-200	8.911	200*200	2	0.463	20 90
Ph-x-10-200	10.01	200*200	2	0.676	42 122
Ph-x-all-700	3成分合成	200*200	2	0.9577	72 38
Ph-y-7.6-700	7.568	700*700	5	0.6034	74 0
Ph-y-7.6-200	7.568	200*200	2	0.6207	75 0
Ph-y-8.5-700	8.545	200*200	2	0.914	162 112
Ph-y-14.5-700	14.53	200*200	2	0.415	120 34
Ph-y-all-700	3成分合成	200*200	2	0.9138	76 0

図12.1 最小残差の分布例 ケース：Ph-x-7.5-200
200mx200m の範囲を表示

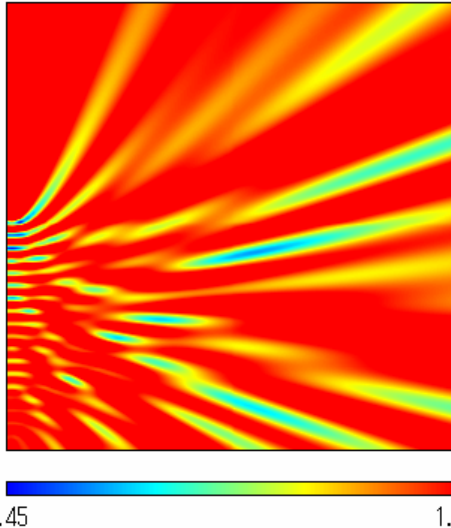


図 12.2 最小残差の分布例 ケース：Ph-x-all-700
200mx200m の範囲を表示

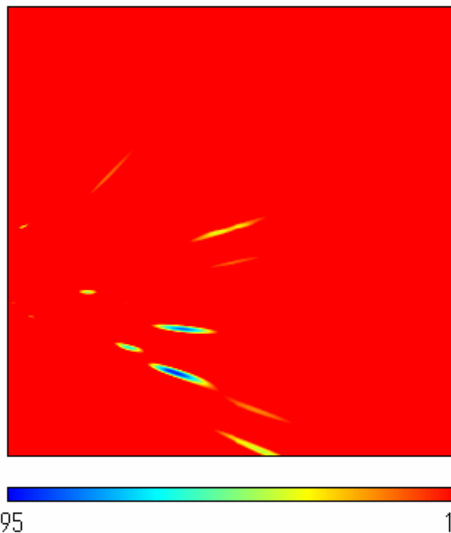


図 12.3 最小残差の分布例 ケース：Ph-x-8.9-200.
200mx200m の範囲を表示

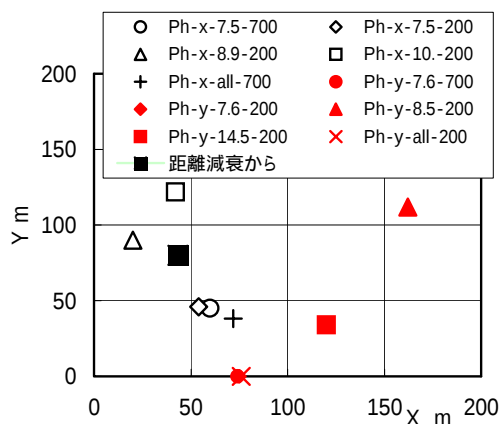


図 13 位相差による方法で求めた加振源位置

§ 6 まとめ

加振源、対象建物とも均質性質の地盤上にあり、かつ加振源は一つで、しかも地表面上にあるとの前提条件の下で 比較的強い地盤振動の加振源位置を簡易な計測により精度よく推定できる。その方法は、振動レベルの距離減衰式への適合残差を最小化することである。なお、当然のことではあるが、加振源との距離が大きい場合には、計測範囲を大きくとることが必要である。

参考文献

- 1) 中山昌尚、石黒康弘、石川一雄、工業団地内の事務所ビルに生じた不快な床振動の原因調査と対策、(株)フジタ技術研究報告、No.37、2001
- 2) 塩田正純、公害振動の予測方法、井上書店、1998.
- 3) 森村正直、時田保夫、防振制御ハンドブック、フジテクノシステム、1992
- 4) 佐藤弘史、井上純三、二川英夫、間淵利明、道路交通振動の予測式、土木技術資料、2000
- 5) 達下文一、鈴木清美、小林一雄、他、道路交通振動の予測に関する調査研究(その3)、都土木技研年報、1979

ひとこと



中山昌尚

加振源位置の推定作業は”探偵屋さん”になった気持ちで行えました。当初相互相関の時間差を検討しましたがうまくいかず結局本報の方法に落ち着きました。加振源が比較的近い位置にあったことが幸いしていたと思います。