

早期地震警報手法に対する工事振動の影響評価

津野 靖士* 野寄 真徳**

Evaluation on Influence of Construction Vibrations to the Earthquake Early Warning Systems

Seiji TSUNO Masanori NOYORI

In case where construction work is commencing with its vibrations induced near seismic stations along railways, railway operators stop the Earthquake Early Warning systems (EEWs) for the target railways to prevent the malfunctions of the EEWs. To secure traveling trains during earthquakes, it is important to evaluate the influence of construction vibrations to the EEWs and to investigate measures against construction vibrations to be taken at seismic stations. At the beginning, we performed linear array measurement of various construction vibrations to understand the characteristics of their sources and the propagation. Finally, we proposed the flow chart for the handling of seismic stations near construction sites, including a concept of limit distance between the construction source and the seismic station.

キーワード：早期地震警報，地震計設置限界距離，工事振動，伝播特性，予測式

1. はじめに

地震検知点近傍で大きな振動を生じる工事が予定されている場合、鉄道事業者は警報システムの誤動作を防止するために、工事近傍の検知点データを用いた鉄道の地震警報システムを停止しているのが実状である。これらは経験に基づき判断されており、合理的な取り扱い方は示されていない。したがって、検知点近傍の工事中においても地震警報システムを継続して稼働させ、地震時の列車の走行安全性を確保するため、工事振動と地震動の識別処理手法を開発することは重要である。本報告では、実測データを利用した工事振動の予測法に基づき、工事振動による地震計の誤動作の直接的な防止に繋がる、地震とノイズの識別処理手法について検討した。最後に、工事振動が地震計の動作に及ぼす影響を把握し、地震計近傍における工事に対する地震計の取扱方を提案した。

2. 振動測定調査

現地調査地として、鉄道の地震検知点近傍で工事が実施される地点を選定し、その工事現場において、2015年12月22日と2016年1月14日の深夜に工事の振動測定を行った。測定には、リオン(株)製の振動レベル計 (VM-52/53とPV-83)8～10台とティアック(株)製のデータレコーダ LX-110 を使用し、合計 24～30 チャンネルで 3 成分の工事振動を収録した。センサーは直線上に 5m 間隔で 8～10 台配置し、サンプリング周波数は 3kHz とした。対象とした工事は、大型の建設重機による整地作業と土

留め作業などであり、バックホウ（地面叩きと土落とし）やブルドーザー、サイレントパイラーによる異なる 4 種類の振動源による工事振動を測定した。表 1 に、工事振動の測定概要を示す。なお、本文中記載の記号 P-1 と P-2 はバックホウによる地面叩きと土落とし、B はブルドーザー、S はサイレントパイラーによる振動である。

振動源から最も近い (2m) 地点と 20m 離れた地点に設置したセンサーで収録された各種工事振動の上下動加速度波形を図 1 に示す。また、それら上下動加速度波形のフーリエ・スペクトルを図 2 に示す。振動源から 2m 以内の地点では加速度で 100cm/s^2 を超える上下振幅を記録し (図 1 左)、振動源から 20m 離れた地点では、加速度で 10cm/s^2 を超える上下振幅を記録した (図 1 右)。それら周波数特性について、振動源から 2m 以内の地点では 4～40Hz で卓越し (図 2 左)、振動源から 20m 離れた地点では 4～10Hz が卓越している (図 2 右)。このことは、工事振動の上下動成分は、距離減衰とともに振幅が低下し、高周波成分ほど減衰が大きいことを示している。また、バックホウやブルドーザー、サイレントパイラーの異なる振動源 (表 1 の P-1・P-2・B・S) による工事振動については、バックホウでは 5Hz 付近が卓越し、ブルドーザーでは 12Hz 付近が卓越するなど、建設重機により励起される周波数帯が異なることが分かる。なお、水平動は上下動と同程度の振幅値また同様のスペクトル特性が見られたため、本検討では、以後、上下動を対象に展開する。

3. 表層地盤構造調査

振動測定を行った工事現場における表層地盤の S 波速度構造を把握することを目的に、表面波探査とアレー

* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

** 防災技術研究部 地質研究室

表1 工事振動の測定概要

工事振動	測定配置 (m)	サンプリング周波数	センサー
バックホウ (地面叩き) : P-1	直線アレー : 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3 kHz	PV-83 (加速度計)
バックホウ (土落とし) : P-2	直線アレー : 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3 kHz	PV-83 (加速度計)
ブルドーザー : B	直線アレー : 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3 kHz	PV-83 (加速度計)
サイレントパイラー : S	直線アレー : 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	3 kHz	PV-83 (加速度計)

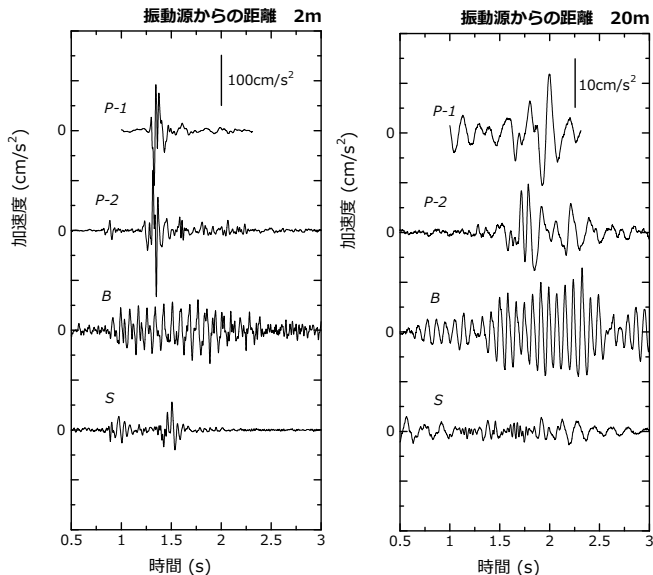


図1 工事振動源から2m離れた地点と20m離れた地点の上下動加速度波形

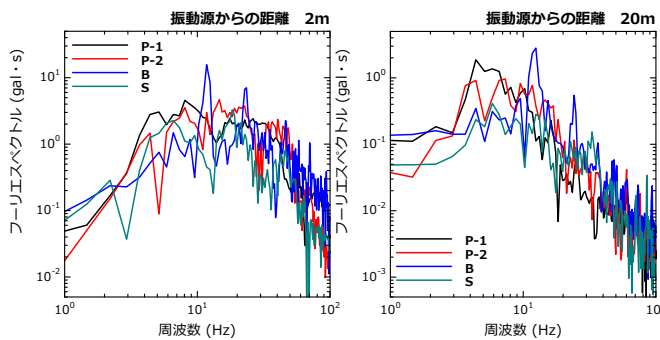


図2 工事振動源から2m離れた地点と20m離れた地点の上下動加速度波形(図1)に対するフーリエ・スペクトル

微動探査を実施した。実施した表層地盤構造調査の概要を表2に示す。表面波探査は、工事振動測定と同一の測線において、2015年12月23日の早朝に行った。表面波探査の測定には、Geometrics社製のGeodeと4.5Hzのピックアップ速度計(GS-11D)を使用し、24チャンネルでハンマー(オフセット距離は2m)より励起された表面波の上下動成分を収録した。センサーは直線上に2m間隔で24台配置し、サンプリング周波数は1kHzとした。アレー微動探査は、工事振動の測定箇所近傍で、2016年1月14日深夜と15日早朝に行った。アレー微動探査の測定では、正三角形とその重心点にミットヨ社

製の加速度計JEP-6A3(10Volt/Gravity)を配置し、サンプリング周波数100Hzで微動の上下動成分を収録した。

表面波探査データにHigh-Resolution(HR)法を用いたF-K解析¹⁾を適用し、表層のレイリー波位相速度を算出した。表面波探査データを用いたF-K解析の結果を図3に示す。7.5Hz以上の高周波数帯域で低速度層に起因する約50m/sのレイリー波位相速度が得られていることが分かる。また、アレー微動探査データにSPatial-Auto-Correlation(SPAC)法²⁾³⁾を適用し、表層のレイリー波位相速度を算出した。図4(左図)に、表面波探査とアレー微動探査から算出した基本モード・レイリー波位相速度を示す。表面波探査とアレー微動探査から推定した周波数5Hz付近の位相速度は良く整合しており、位相速度が精度良く算出されていることが分かる。この図が示唆しているように、測線長が同程度の表面波探査とアレー微動探査では、表面波探査により短周期側、アレー微動探査により長周期側の位相速度が推定される。

次に、得られた基本モード・レイリー波位相速度に遺伝的アルゴリズム(GA)⁴⁾を適用し、表層のS波速度構造を推定した。図4(左図)は、Haskell-Matrixから計算した理論解によるレイリー波位相速度を併せて示しているが、測定から得られた位相速度を良く説明していることが分かる。図4(右図)に示した表層のS波速度構造から、本調査地では、Vs 50m/s程度の最表層が約3.5m、Vs 100m/s程度の層が約10m堆積していることが分かる。

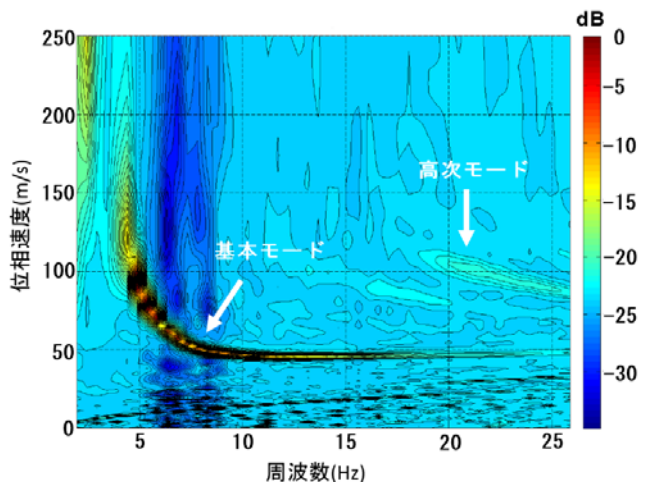


図3 表面波探査データを用いたF-K解析結果(パワースペクトルの最大値で標準化した位相速度)

表2 表層地盤構造調査の測定概要

表層地盤構造調査	測定配置 (m)	サンプリング周波数	センサー
表面波探査	直線アレー：0-46の2m間隔	1 kHz	GS-11D (速度計：4.5Hz)
アレー微動探査	正三角形とその重心点：L (辺長) = 2, 6, 20, 60	100 Hz	JEP-6A3 (加速度計)

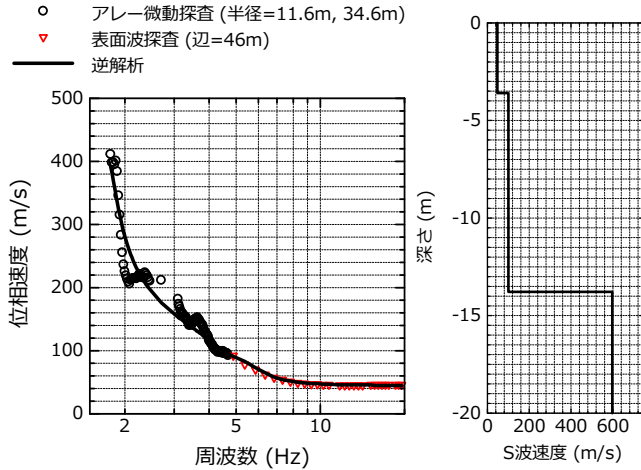


図4 観測されたレイリー波位相速度 (左図) と推定された表層地盤の S 波速度構造 (右図)

4. 工事振動の予測法

ある点に加振力がかかったのち、励起された振動が半無限媒質を伝播する際の振動スペクトルは理論的に式 (1) で表現される⁵⁾。

$$P(f) = S(f) * \frac{1}{r^n} \exp\left(-\frac{\pi f r}{VQ}\right) \quad (1)$$

ここで、 $P(f)$ は予測地点の振動、 $S(f)$ は加振力、 r は加振源からの距離、 f は周波数、 V と Q は媒質の地盤速度と内部減衰である。幾何減衰 ($1/r^n$) については、実体波の場合 n は 1、表面波の場合 n は 0.5 である。

加振源からの距離が r_a の A 地点に対する加振源からの距離が r_b の B 地点の振幅比 $P_b(f)/P_a(f)$ は、式 (1) を用いて、式 (2) で表すことができる。

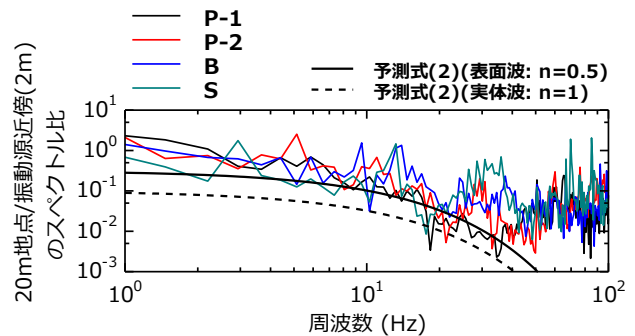
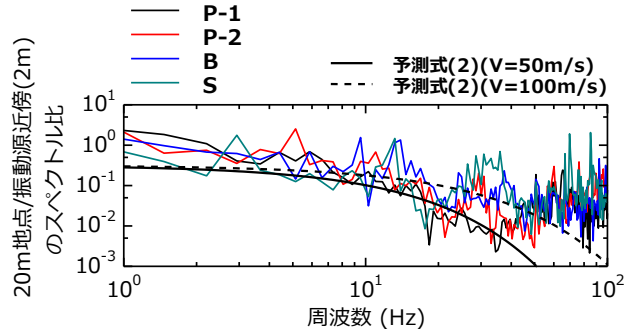
$$P_b(f)/P_a(f) = \frac{r_a^n}{r_b^n} \exp\left(-\frac{\pi f (r_b - r_a)}{VQ}\right) \quad (2)$$

図1と図2に示す観測データ (上下動成分) を利用して、振動源から 2m 離れた地点 A に対する振動源から 20m 離れた地点 B の振幅比 $P_b(f)/P_a(f)$ を図5に示す。周波数 20Hz までの振幅比は、周波数が高くなるにつれて減衰しているが、20Hz 以上の振幅比は変動が大きいことが分かる。これは、図3で示した表面波探査の解析結果から、20Hz まではレイリー波の基本モードが卓越 (V 50m/s 程度) しているのに対して、20Hz 以上は高次モードが卓越 (V 100m/s 程度) していることが一因である。つまり、表面波の伝播において、速度が周波数によって変化するためである。

図5には、式(2)において、 n を 0.5 とした場合 (表面波)、

n を 1 とした場合 (実体波) の 2 ケースによる結果を示している。 V は表層地盤調査の結果 (図4 右) より 50m/s、 Q 値は経験的に 10 とした。この図から明かなように、 n を 1 とした場合 (実体波) の予測式は観測結果を過小評価しているが、 n を 0.5 とした場合 (表面波) の予測式は観測結果と整合している。したがって、重機により地表面に加振力を与えた時の工事振動は、表面波成分が卓越し、地盤を伝播していると結論付けられる。

次に、 n を 0.5 (表面波) に固定し、 V を 50m/s、100m/s とした場合の 2 ケースによる結果を図6に示す。20Hz まではレイリー波の基本モードが卓越 (V 50m/s 程度) しているため、20Hz までの周波数に対しては V 50m/s の予測式の方が V 100m/s の予測式よりも観測結果と整合している。一方で、20Hz 以上は高次モードが卓越 (V 100m/s 程度) しているため、20Hz 以上の周波数に対しては V 100m/s の予測式の方が V 50m/s の予測式よりも観測結果と整合していることが分かる。ただし、図2に示すように、加振

図5 振動源から 2m 離れた地点に対する振動源から 20m 地点の振幅比 (表面波を仮定し n を 0.5 とした場合と実体波を仮定し n を 1 とした場合の 2 ケース)図6 振動源から 2m 離れた地点に対する振動源から 20m 地点の振幅比 (V を 50m/s と V を 100m/s とした場合の 2 ケース)

特集：防災技術

源から最も近い（2m）箇所と 20m 離れた箇所で、10Hz と 5Hz が各々卓越しているため、本調査地では、地盤速度を一定値（ $V=50\text{m/s}$ ）として問題はない。

以上、表面波を仮定し、サイトの表層地盤構造を式 (1) あるいは式 (2) に与えることにより、工事振動を適切に予測できることを実証した。

5. 地震計動作シミュレーション

5.1 P 波警報の精度に関する検討

地震発生時に工事振動が混合した際に、P 波による早期地震警報手法（B- Δ 法）⁶⁾ の精度に与える影響について、検討した。具体的には、400 程度の地震動と収録した工事振動の合成波形データを P 波警報手法に適用し、工事振動が含まれた地震データに対する P 波警報の精度を検証した。合成に使用した地震データは、2016 年熊本地震の震源近傍域に位置する益城町（KiK-net KMMH16）で収録されている前震（Mj 6.5）と本震（Mj 7.3）を含む一連の地震データのうち、最大加速度が $100 \sim 1500\text{cm/s}^2$ 程度の 12 地震の加速度データである。

その結果、異なる工事振動や振動源からの距離により P 波警報結果に与える影響の程度が多少異なった。しかし、図 7 に示す工事振動のケース（P-1：バックホウによる地面叩き）のように、工事振動源から 10m 程度以上の離隔があれば、震央距離推定結果に大きな影響は見られない結果が大半であった。したがって、本検討の限られたケースの検討ではあるが、数 100cm/s^2 を超えるような地震データに本測定で取得した工事振動（ $\sim 100\text{cm/s}^2$ 程度）が混入した場合には、P 波警報の精度に与える影響は大きくないと言える。

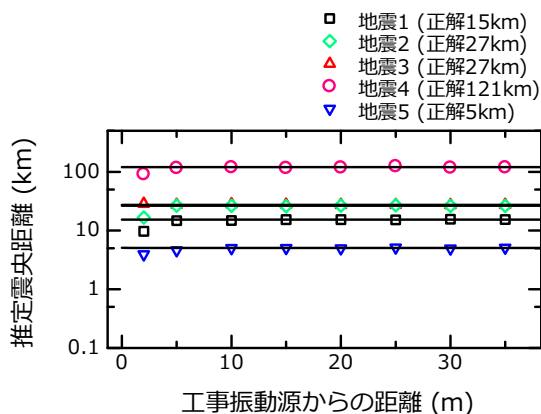


図 7 工事振動（P-1: バックホウによる地面叩き）源からの距離に対する推定震央距離

5.2 誤警報に関する検討

工事振動の測定データを P 波による早期地震警報手法（B- Δ 法）⁶⁾ に適用し、工事振動がどのように P 波警報に影響を与えるかについて検討した。4 つの工事振動測

定データを P 波警報手法に適用した結果を図 8 に示す。ここでは、ノイズ判定手法⁷⁾ を利用しなかった場合のマグニチュード推定結果を示している。図 8 から、適用した 4 種類の工事振動データによりマグニチュード 5 程度の地震が発生したと判定されることが分かった。工事振動データは振動源からの距離とともに急激に減衰する傾向を有するが、本検討結果では距離に対してマグニチュード推定結果はさほど変化していない。つまり、工事振動源が約 40m 程度以内にある検知点では、P 波警報を作動させることは適切ではないと言える。

一方、ノイズ判定手法⁷⁾ を利用した場合は、P-1（バックホウによる地面叩き）の 25m 地点のデータ以外は工事振動データをノイズと判定している（表 3）。しかし、仮にノイズ判定が適切にできなかった際は、地震計がマグニチュード 5 程度の地震が発生したと判断され、P 波による誤警報を出力する可能性がある。したがって、誤警報を防止する上で、地震計近傍の工事中においては、P 波警報を作動させることは好ましくないと言える。

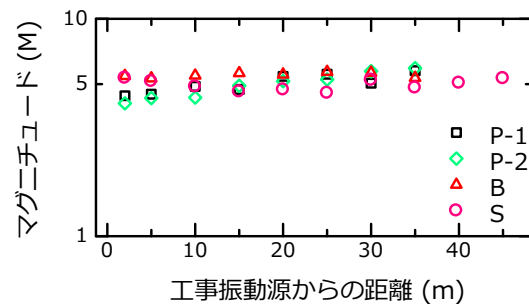


図 8 振動源からの距離に対するマグニチュード

表 3 ノイズ判定結果（P-1: バックホウによる地面叩き）

振動源距離	距離 (km)	M	ノイズ判定
P-1: 2m	5.46538	4.425602	ノイズ
P-1: 5m	7.693393	4.495446	ノイズ
P-1: 10m	13.10013	4.885773	ノイズ
P-1: 15m	16.94019	4.730383	ノイズ
P-1: 20m	27.83944	5.434364	ノイズ
P-1: 25m	33.3363	5.558797	地震
P-1: 30m	32.70578	5.056887	ノイズ
P-1: 35m	38.85861	5.770415	ノイズ

6. 加振源からの地震計設置限界距離

前節の検討から、地震検知点近傍で工事が行われている際は、P 波による早期地震警報を作動させることが難しいことが分かった。ここでは、規定値超過手法による地震警報を対象に、最大加速度（PGA）による閾値を設け、閾値以上の工事振動が入力されることを防止するために、加振源からの地震計設置限界距離 R を提案する。

加振源からの距離が r の振幅 $P(r)$ は、ある周波数 f に対して、式 (2) より式 (3) となる。

$$P(r) = \frac{r_a''}{r^n} \exp\left(-\frac{\pi f(r-r_a)}{VQ}\right) \times P_a \quad (3)$$

測定データより、周波数 5Hz 以上の振動が卓越していたこと（図 2）から、周波数 $f = 5\text{Hz}$ と $f = 10\text{Hz}$ の工事振動源 P-1（バックホウによる地面叩き）に対する式 (3) の結果を図 9 に示す。参照する地点（A）として、加振源から 2m (r_a) 地点のデータを式 (3) の P_a に与えている。その結果、工事振動が卓越する周波数を適切（ここでは、5Hz の結果よりも 10Hz の結果が観測結果と整合する）に把握することで、距離に対しても工事振動の最大値を予測することができる。本検討では、閾値を 10cm/s^2 とすると、提案する地震計設置限界距離 R は 20m となり、工事振動源から検知点を最低 20m 離隔することで、 10cm/s^2 以上の地震データに対しては規定値超過による地震警報を作動させることが可能となる。

7. 地震計近傍の工事に対する地震計の取扱い方

本検討から得られた知見をもとに、地震計近傍の工事に対する地震計の取扱い方フロー（図 10）を提案した。なお、誤警報を防止する上で、地震計近傍の工事中においては、P 波警報を作動させることは好ましくないため、以下の地震警報は規定値超過による地震警報を指すこととする。

地震計近傍の表面波探査やアレー微動探査などによる表層地盤構造調査を実施し、現地の表層の地盤速度あるいは地盤速度構造を把握する。次に、得られた地盤速度と取得している工事種別による振動データを利用して、工事振動の予測式（式 (3)）に当てはめることで、加振源からの地震計設置限界距離 R を設定する。ただし、工事種別による振動データがない場合は、工事振動データを取得する必要がある。最後に、地震計ー加振源の距離

と設定した地震計設置限界距離 R を比較し、地震計ー加振源の距離が地震計設置限界距離 R よりも大きい場合は、地震警報を継続して使用する。一方で、地震計ー加振源の距離が地震計設置限界距離 R よりも小さい場合は、地震警報を停止あるいは移設（地震計を加振源から地震計設置限界距離 R 以上に離隔する）を検討することが必要である。

このように、表層地盤構造調査や工事振動測定の現地測定調査を実施することで、地震計近傍の工事に対して、規定値超過手法による地震警報を継続使用あるいは停止するのかが、決定することができる。工事振動測定のデータを蓄積していくことにより、図 10 に提示した地震計近傍の工事に対する地震計の取扱い方も逐次省力化していくことが可能である。

8. まとめ

本報告では、検知点近傍の工事中においても地震時の列車の走行安全性を確保することを目的に、工事振動測定と表層地盤構造調査の現地調査を通じて、地震とノイズの識別処理手法と地震計設置方法について検討した。

以下に、本検討から得た知見をまとめた。

- (1) 工事現場において、異なる 4 種類の振動源による工事振動を測定し、周波数 4 ～ 10Hz が特に卓越していることが分かった。
- (2) 表面波探査とアレー微動探査による表層地盤構造調査を実施し、調査地の詳細な地盤情報を取得することができた。
- (3) 工事振動測定データと理論的な予測式から、重機により地表面に加振力を与えた時の工事振動は、表面波成分が卓越し、地盤を伝播していると結論付けられた。また、上記調査による表層地盤構造を与えることにより、予測式から、工事振動を適切に予測できることを明らかにした。

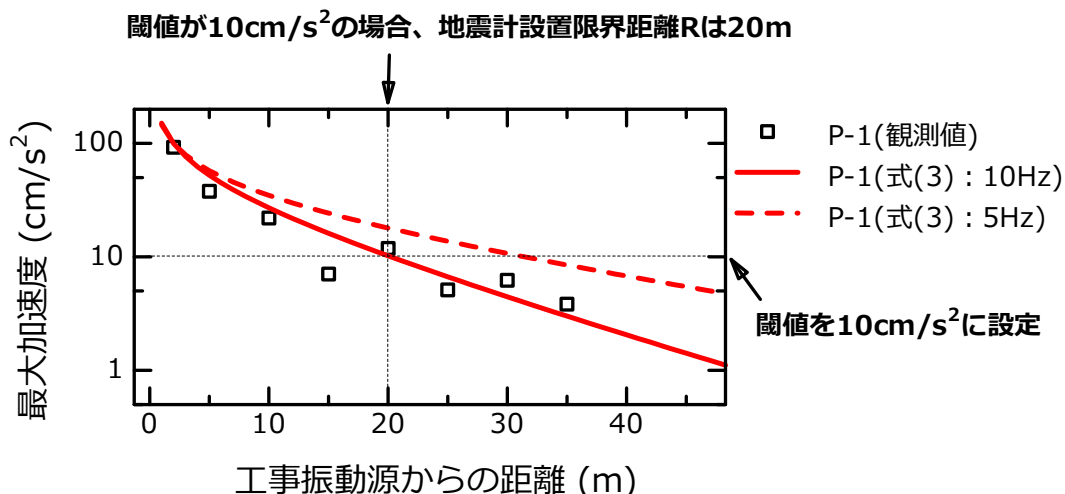
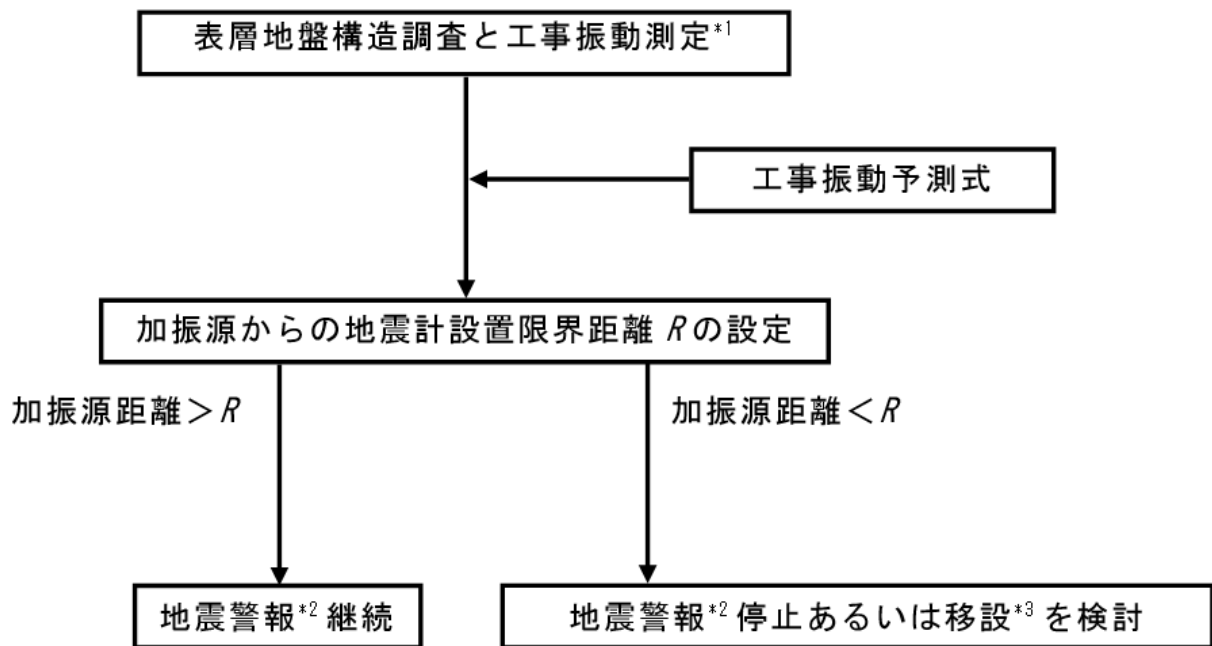


図9 工事振動源からの距離に対する P-1（バックホウによる地面叩き）の最大加速度（PGA）と予測式



*1 工事種別による振動データがない場合

*2 規定値超過による地震警報

*3 加振源から地震計設置限界距離 R 以上に離隔する

図 10 地震計近傍の工事に対する地震計の取扱方フロー

- (4) 4 種類の工事振動データを P 波による早期地震警報手法 (B-Δ 法) に適用した結果、マグニチュード 5 程度の地震が発生したと判定されることが分かり、誤警報を防止する上で、地震計近傍の工事中においては、P 波警報を作動させることは好ましくないことが示された。
- (5) 最大加速度値による閾値を設け、閾値以上の工事振動が入力されることを防止するために、加振源からの地震計設置限界距離 R を提案した。地震計ー加振源の距離を設定した地震計設置限界距離 R 以上に離隔することにより、規定値超過による地震警報を作動させることが可能である。
- (6) 最後に、上記検討結果を通じて、地震計近傍の工事に対する地震計の取扱方を提案し、そのフロー図を作成した。

謝 辞

工事振動の測定では、鹿島建設株式会社の現場担当者に便宜を図って頂いた。また、工事振動の測定調査や表面波探査・アレー微動探査の表層地盤構造調査では、多くの方々のご協力を得ました。記して、感謝いたします。

文 献

- 1) Capon, J., "High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis," Proc. IEEE 57, pp.1408-1418, 1969.
- 2) Aki, K., "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors," Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.35, pp.415-456, 1957.
- 3) Okada, H., "The Microtremor Survey Method," Geophysical Monograph Series, 12, Society of Exploration Geophysicists, 2003.
- 4) 山中浩明, 石田寛: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.60, No.468, pp.9-17, 1995
- 5) 理論地震動研究会: 地震動 その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994
- 6) Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K., and Nozaka, D., "A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, pp.526-532, 2003.
- 7) 佐藤新二, 中村洋光: 早期地震検知手法の汎用的な評価システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.17-20, 2005