工事振動への経験的予測手法の適用性に関する検討

INVESTIGATION ON THE APPLICABILITY OF THE EMPIRICAL PREDICTION METHOD
TO CONSTRUCTION VIBRATIONS津野 靖士^{*1}, 野 寄 真 徳^{*2}, 横 山 秀 史^{*3}

Seiji TSUNO, Masanori NOYORI and Hidefumi YOKOYAMA

To simply and accurately evaluate construction vibrations, we investigated on the applicability of the empirical prediction method to construction vibrations, using velocity of subsurface layer. We performed measurements for construction vibrations and subsurface structural surveys at a site. Applying the wave propagation equation to construction vibrations, we found that Rayleigh waves affected by subsurface layer were significantly dominated in construction vibrations. Finally, we well reproduced construction vibrations against distances from construction sources by the empirical prediction method based on the theory of wave propagation, focusing on the dominant frequency with phase velocity of surface waves in a subsurface layer.

Keywords : Empirical prediction, Construction vibration, Subsurface layer, Rayleigh waves, Surface wave exploration, Array microtremor observation

経験的予測, 工事振動, 表層地盤, レイリー波, 表面波探査, アレー微動観測

1. はじめに

環境振動の予測分野では、振動源から放射された媒質を伝播する波の対象地点での振動値を予測するために、波動伝播理論や伝達関数を利用した理論的手法や測定データを利用した経験的手法、あるいはそれらを併用した手法が用いられている¹⁾。一方で、環境振動の影響評価では、人の生理的な反応や心理的な反応に基づいて補正された周波数特性を考慮して、環境振動が人に影響に与える評価^{例え}ば、²⁾を行っている。人の振動に対する感覚はその周波数や方向によって異なり、数 Hz 以下の振動では水平動に感度が高く、数 Hz 以上の振動では鉛直動に感度が高いこと³⁾が知られている。JIS C 1510³⁾のJIS規格においても、水平動と鉛直動で異なった周波数の補正特性が与えられており、数 Hz 以上の高周波数帯に対して鉛直動の補正係数は水平動のそれよりも相対レスポンスが 10dB 程度高く設定されている。環境振動の大半が数 Hz 以上の振動が大きい周波数特性を有しているため、環境振動を予測する上では、その鉛直動の加速度値に対する正確な予測がより重要な課題である。

環境振動の予測では、原理的に半無限媒質を伝播する波動伝播理論^{1), 4)}を利用している事例が多い^{例え}ば、⁵⁾。その中でも、現地調査の実測データに基づいた振動予測手法として、ある地点の振幅を参照した Bornitz による経験的予測式⁶⁾やそれを簡略化した実用式⁷⁾が一般的に広く利用されている^{1), 7)}。しかし、それら理論式や実用式の

重要なパラメーターである媒質の速度について、現地調査などの測定データから取得した事例は少なく、それら実用式の適用範囲が明確に示されていないのが現状である。一方で、近年、表層地盤調査として、加速度計などのセンサーをアレー状に多数点配置することで、表層地盤の S 波速度構造を評価することができる表面波探査⁸⁾やアレー微動観測^{10), 11)}が実務で広く適用されている。

本研究では、実測データに基づき、環境振動の一種である工事振動を簡易にかつ正確に評価することを目的に、直線状に配置した多数のセンサーにより地表面加振から励起された工事振動を測定し、工事振動の波動伝播特性について検討した。調査地の工事振動が伝播する地盤の速度を取得するために、表面波探査¹²⁾とアレー微動観測¹³⁾を実施した。また、表層地盤構造調査の結果と測定した工事振動を波動伝播理論に適用することで、地表面加振から励起された工事振動の波動成分を識別し、表面波の理論から工事振動に与える地盤深さの影響を検討した。最後に、工事振動の卓越する周波数を評価することで、波動伝播理論に基づいた経験的手法の工事振動への適用性を実証的に検討した。

2. 工事振動の測定調査

現地調査地として、多様な建設重機の使用が予定されていた工事現場(平塚市内)を選定した。その工事現場において、2015 年 12 月

^{*1} (公財)鉄道総合技術研究所 副主任研究員・博士(工学)^{*2} (公財)鉄道総合技術研究所 研究員・修士(工学)^{*3} (公財)鉄道総合技術研究所 主任研究員・博士(工学)

Assist. Senior Researcher, Railway Technical Research Institute, Dr.Eng.

Researcher, Railway Technical Research Institute, M.Eng.

Chief Researcher, Railway Technical Research Institute, Dr.Eng.

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・VM-53)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 台配置した。環境振動では 60Hz 以上の高周波数帯も対象領域であるため、それら周波数帯域の波形がトレースできるように、サンプリング周波数を 3kHz とした。対象とした工事は、大型の建設重機(例えば、20t 級のパワーショベルやブルドーザー)による整地作業と土留め作業などであり、パワーショベル(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の異なる 4 種類の振動源による工事振動を測定した。Fig.1 に、配置したセンサーと工事振動源の位置関係を示す。Table1 に、工事振動の測定概要を示す。パワーショベル(地面叩きと土落とし)とサイレントパイラーの測定では、振動源から 2m の距離に最も近接の測定点(Fig.1 では、本測定点を $x=0, y=0$ の原点とした)を配置した。ただし、Fig.1(■: $-5 \leq x \leq 5, y=5$)に示すようにブルドーザーによる加振はセンサーを配置した直線アレーに平行な往復動作であり、近接の 2 つのセンサーに対しては振動源から 5m の距離であった。なお、P-1 と P-2 はパワーショベル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。

工事振動源から最も近い 2m 地点と 22m 離れた地点(ただし、それら地点は、ブルドーザーの振動源から 5m と 15.8m が最短距離となる)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 Fig.2 に示す。振動源から 2m の地点では最大加速度で

100cm/s²を超える上下振幅を記録し、振動源から 22m 離れた地点では、最大加速度で 10cm/s²を超える上下振幅を記録した(Fig.2)。Fig.2 に示した工事振動源から最も近い 2m 地点と 22m 離れた地点における上下動加速度波形のフーリエ・振幅スペクトルを Fig.3 に示す。その上下動成分の周波数特性については、振動源から 2m の地点では周波数 4~40Hz で卓越し、振動源から 22m 離れた地点では周波数 4~10Hz が卓越していることが分かる。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の効果が強いことを示唆している。また、パワーショベルやブルドーザー、サイレントパイラーの異なる振動源(Table1 の P-1・P-2・B・S)による工事振動については、パワーショベルでは周波数 5Hz 付近が卓越し、ブルドーザーでは周波数 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。

Fig.4 に、振動源から最も近い 2m 地点と 22m 離れた地点におけるパワーショベルの地面叩き(P-1)による水平動(Radial 成分と Transverse 成分)と上下動加速度波形のフーリエ・振幅スペクトルを示す。最も近い 2m 地点では Transverse 成分が大きく、22m 離れた地点では上下動成分が大きいなど、水平動と上下動の波動伝播特性が異なることが示唆される。しかし、環境振動では上下動成分の評価がより重要であるため、本論文では上下動成分に焦点を絞り、その波動伝播特性を検討する。なお、直線上に配置したセンサーで収録された上下動のアレー加速度波形を Fig.5 に示しているが、異なる振動源による工事振動は距離とともに減衰しながら伝播している様子が見られる。

Fig.1 Configuration of measurements and surveys in this study

Fig.2 Vertical accelerations at points of 2m (left) and 22m (right) from construction sources

Table1 Details of measurements of construction vibrations

Construction source	Configuration of an array (m)	Sampling frequency	Sensor
Power Shovel (g.s.): P-1	Linear array: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3 kHz	PV-83 (Accelerometer)
Power Shovel (s.d.): P-2	Linear array: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3 kHz	PV-83 (Accelerometer)
Bulldozer: B	Linear array: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	3 kHz	PV-83 (Accelerometer)
Silent Piler: S	Linear array: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	3 kHz	PV-83 (Accelerometer)

* g.s.: ground slap, s.d.: soil drop

Fig.3 Fourier spectra, using vertical accelerations at points of 2m (left) and 22m (right) from construction sources

Fig.4 Fourier spectra, using accelerations of vertical, radial and transverse components at points of 2m (left) and 22m (right) from a construction source of P-1

Fig.5 Vertical accelerations for construction vibrations in a linear array at a site in Hiratsuka (P-1: Ground slap by Power Shovel, P-2: Soil drop by Power Shovel, B: Bulldozer, S: Silent Piler)

3. 表層地盤構造調査

振動測定を行った平塚市の工事現場における表層地盤のレイリー波位相速度と S 波速度構造を把握することを目的に、表面波探査例えば、12)とアレー微動観測例えば、13)を実施した。実施した表層地盤構造調査の概要を Table2 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 台配置した。表面波探査ではおおよそ 40Hz 以下の周波数帯が対象領域であるため、それら周波数帯域の波形がトレースできるように、サンプリング周波数を 1kHz とした。アレー微動観測は、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。アレー微動観測の測定では、二重正三角形とその重心点にミットヨ社製の加速度計 JEP-6A3-10(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 (Table2)。

表面波探査データに High-Resolution(HR)法を用いた F-K 解析¹⁴⁾を適用し、表層のレイリー波位相速度を算出した。表面波探査によるアレー・速度データとそれを用いた F-K 解析の結果(見かけの位相速度)を Fig.6 に示す。図より、7.5Hz 以上の高周波帯域で約 50m/s の低速度層による位相速度が得られていることが分かる。また、アレー微動観測による加速度データに SPatial-Auto-Correlation (SPAC)法^{10), 11)}を適用し、表層の基本モード・レイリー波位相速度を算出した。Fig.7 に、表面波探査とアレー微動観測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観測から推定した周波数 5Hz 付近のレイリー波位相速度は良く調

Table2 Details of surveys for estimating subsurface velocity and its structure

Survey	Configuration of an array (m)	Sampling frequency	Sensor
Surface wave exploration	Linear array: interval of 2m for an array of 46m	1 kHz	4.5Hz (Velocimeter)
Array microtremor observation	Double triangles: side length = (2, 6), (20, 60)	100 Hz	Jep-6A3-10 (Accelerometer)

和しており、レイリー波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観測では、表面波探査から短周期側、アレー微動観測から長周期側の位相速度が推定される。なお、アレー微動観測では、アレー半径が大きくなるほど、長波長の(あるいは長周期の)表面波を捉えることができる。

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)¹⁵⁾を適用し、表層のS波速度構造を推定した。Fig.7には、Haskell-Matrix から計算した理論解¹⁶⁾によるレイリー波位相速度を併せて示す。理論による位相速度は測定から得られた周波数1.8~20Hzの位相速度と整合性が高く、その周波数帯に影響を及ぼす表層のS波速度構造が精度良く推定されている。Fig.7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。

4. 工事振動の予測手法

(1) 工事振動のスペクトル予測式

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⁴⁾。

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

ここで、 $P(f)$ は予測地点の振動スペクトル、 $S(f)$ は加振力のスペクトル、 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。

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

A地点をリファレンスとし、加振源からの距離が r である任意地点に対する振動のスペクトル予測式は、式(2)を用いて、式(3)で表すことができる。

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

ここで、ある卓越する周波数 f に対して、A地点をリファレンスとした加振源距離 r の任意地点に対する振動スペクトルを予測する場合は、媒質の地盤速度 V と内部減衰 Q 値である2つのパラメーターが未知数となる。ただし、一般的には V の方が Q 値より値が大きいた

Fig.7 Phase velocity of Rayleigh waves (left) and the estimated S-wave velocity structure (right) at a site in Hiratsuka

Fig.6 Array velocities by the surface wave exploration (left) and the F-K power spectra (right) at a site in Hiratsuka

め、 V は Q 値よりも式(1)～(3)に与える影響が大きい。そのため、本検討では、 V については実測データを利用し、 Q 値については経験的な値を利用している。

(2) 波動成分に関する検討

Fig.2とFig.3に示す測定データ(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22m離れた地点Bの振幅比 $P_b(\theta)/P_a(\theta)$ をFig.8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、周波数20Hz以上の振幅比は揺動していることが分かる。これは、表面波探索結果(Fig.6)から推察することができ、周波数20Hzまではレイリー波の基本モードが卓越($V=50\text{m/s}$ 程度)、周波数20Hz以上は高次モードが卓越($V=100\text{m/s}$ 程度)していることが一因である。つまり、表面波が伝播する場合は、速度が周波数によって変化するためである。ただし、測定した4つの工事振動に対する伝播特性に多少の差異が表れている(Fig.8)が、建設重機の規模や動作による加振点(あるいは加振面)のひろがり、加振点の若干のずれなど、建設重機を加振する環境に依存していると考えられる。

Fig.8には、予測式(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併せて示している。 V は表層地盤構造調査の結果(Fig.6とFig.7)を参照して50m/s、 Q 値は経験的に10とした。この図から明らかなように、 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調和している。したがって、地表面に加振力を与えた工事振動は、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、式(1)～(3)の地盤速度 V には表面波の位相速度を与えるべきであることが分かる。本検討では、上下動成分の工事振動データを対象としていることから、式(1)～(3)の地盤速度 V として、対象サイトのレイリー波位相速度を与えれば良い。

(3) 表層地盤に関する検討

次に、 n を0.5(表面波)に固定し、予測式(2)において、 V を50m/s、100m/sとした場合の2ケースによる結果をFig.9に示す。周波数20Hzまではレイリー波の基本モードが卓越($V=50\text{m/s}$ 程度)しているため、20Hzまでの周波数に対しては $V=50\text{m/s}$ の予測式の方が $V=100\text{m/s}$ の予測式よりも観測結果と調和している。一方で、周波数20Hz以上は高次モードが卓越($V=100\text{m/s}$ 程度)しているため、20Hz以上の周波数に対しては $V=100\text{m/s}$ の予測式の方が $V=50\text{m/s}$ の予測式よりも観測結果と調和していることが分かる。ただし、Fig.3に示すように、加振源から最も近い2m地点と22m離れた地点で、周波数10Hz付近が卓越しているため、それらに対応する本調査地のレイリー波位相速度(Fig.6)を考慮して、地盤速度を一定値である $V=50\text{m/s}$ として問題はない。

以上、表面波を仮定し(式(1)～(3)において $n=0.5$)、サイトのレイリー波位相速度を振動スペクトルの予測式(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的に示した。

5. 対象地点に対する工事振動の最大加速度の予測

ここでは、予測式(3)を用いて、工事振動源から最も近い2m地点(パワーショベルとサイレントパイラーの場合)と5m地点(ブルドー

Fig.8 Spectral ratios of construction vibrations at 22m from a source to those at 2m. Also, prediction equation for surface waves ($n=0.5$) and body waves ($n=1$) are shown.

Fig.9 Spectral ratios of construction vibrations at 22m from a source to those at 2m. Also, prediction equation for $V=50\text{m/s}$ and $V=100\text{m/s}$ are shown.

ザーの場合)をリファレンスとした加振源距離 r の任意地点に対する最大加速度(PGA)を予測した。その際、測定データより周波数4～10Hzの工事振動が卓越していたこと(Fig.3)から、周波数5Hzと周波数10Hzに対する各種工事振動を予測した。なお、調査地の表層地盤構造調査の結果(Fig.6とFig.7)を参考に、地盤速度(レイリー波位相速度) V は50m/s、内部減衰 Q は10とした。

工事振動の直線アレー測定データによる最大加速度(PGA)と予測式(3)を用いた予測結果をFig.10(図中、P-1とP-2はパワーショベル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)に示す。図より、4種類すべての工事振動に対して、周波数5Hzに対する予測結果よりも、周波数10Hzに対する予測結果の方が、アレー測定データによる最大加速度(PGA)を正確に予測していることが分かる。このことは、予測式(3)において、リファレンスとした工事振動源から2m地点と5m地点の $P_a(\theta)$ は周波数5Hzよりも周波数10Hzが優勢であること(Fig.3)、また周波数5Hzの地盤速度(レイリー波位相速度)は80m/s程度であるものの周波数10Hzの地盤速度は50m/s程度であり(Fig.6)、周波数10Hzの地盤速度の方が予測式に利用した地盤速度 $V=50\text{m/s}$ と調和することが理由である。

以上、1地点の測定データとその卓越周波数を参照し、調査地の表層のレイリー波位相速度を利用することにより、加振源距離 r の任意地点に対する工事振動の上下動成分に対する最大加速度(PGA)

Fig.10 Predictions of PGA against a distance from a construction source at frequencies of 5 and 10Hz, using the equation (3) with PGA at a point of 2m or 5m nearby construction sources. The observed PGAs for 4 construction vibrations also are shown. (P-1: Ground slap by Power Shovel, P-2: Soil drop by Power Shovel, B: Bulldozer, S: Silent Piler)

を適切に予測することができることを明らかにした。一方で、工事振動の水平動成分を予測する際には、表層のラブ波位相速度も考慮する必要があり、その場合には水平動の Transvers 成分と Radial 成分の波動伝播に影響を与える表面波(ラブ波とレイリー波)の位相

速度を把握する必要がある。なお、本研究で実施した小規模のアレー微動観測や表面波探査を実施することで、表層の表面波位相速度を簡易に把握することができる。

6. 工事振動に与える地盤深さの影響

工事振動の波動成分に関する検討結果(Fig.8)より、工事振動は主として表面波が卓越していることが示された。表面波は、地盤表面の伝播方向に対しては、式(1)~(3)に示すように加振源からの距離 r の平方根(式(1)~(3)において $n=0.5$)に比例した幾何減衰を有している。一方で、深度方向については、地表から指数関数的に振幅が小さくなるという特性を有している¹⁷⁾。その表面波の鉛直方向に対する特性を考慮して、本調査地の表層地盤速度構造がレイリー波である工事振動の上下動成分に与える影響を評価した。

現地調査を行った平塚市の工事現場では、表面波探査とアレー微動観測より表層の S 波速度構造(Fig.7)が推定されているため、その推定構造に対する基本モード・レイリー波の地中振幅分布(固有関数)を計算した。工事振動の測定結果では、振動源から最も近い 2m 地点と 22m 離れた地点で、周波数 4~10Hz が共通して卓越していたため(Fig.3)、それら帯域中における周波数 5Hz と 10Hz の地中振幅分布を Fig.11 に示す。この図から、周波数 5Hz では深さ 10m 程度の表層構造、周波数 10Hz では深さ 3m 程度の表層構造の影響を強く受けていることが分かる。このことは、周波数 10Hz の表面波の方が、周波数 5Hz の表面波よりも波長 λ (=位相速度/周波数)が短いことを示している。調査地の表層地盤構造に依存するものの、周波数 10Hz 付近が卓越している本工事振動では表層から 3m 程度以浅の構造が振動評価に特に重要である。したがって、コストのあまりかからない規模の小さなアレー微動観測や表面波探査などの浅層構造調査を実施することにより、サイトに固有する工事振動の伝播や対象地点での工事振動の大きさを予測することができる。

Fig.11 Distributions of amplitudes of the fundamental mode Rayleigh waves for 5Hz and 10Hz against a depth at the site (Normalized for an amplitude of vertical motion on the surface)

7. まとめ

本研究では、工事振動を簡易にかつ正確に評価することを目的に、実測データに基づき、工事振動への経験的予測手法の適用性について検討した。その結果、対象サイトの表層の地盤速度(レイリー波位相速度)とリファレンスとした工事振動の卓越周波数を適切に評価することで、波動伝播理論に基づいた経験的予測式から、任意地点の工事振動を正確に予測することが可能であることを実証的に示した。

工事振動の測定調査と表層地盤構造調査の実測データを利用した本検討から得られた知見を、以下に纏めた。

- ・平塚市の工事現場において、異なる4種類の振動源による工事振動を多チャンネルの直線アレーで測定し、周波数4~10Hz、特に10Hz付近の周波数で工事振動が卓越していることが分かった。
- ・表面波探査とアレー微動観測による表層地盤構造調査を実施した結果、調査地の詳細な地盤情報を取得することができた。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った。
- ・工事振動測定データと理論的な振動スペクトルの予測式から、地表面に加振力を与えた建設重機による工事振動は、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のレイリー波位相速度を与えることにより、波動伝播理論に基づいた経験的手法の予測式から、工事振動を適切に予測できることを実証的に示した。
- ・1地点の測定データとその卓越周波数を参照し、対象サイトの表層の地盤速度(レイリー波位相速度)を利用することにより、加振源距離 r の任意地点に対する工事振動の最大加速度(PGA)を適切に予測することができることを明らかにした。
- ・本調査地の表層地盤速度構造から計算された基本モード・レイリー波の地中振幅分布により、周波数10Hz付近が卓越している本工事振動では表層から3m程度以下の構造が振動評価に特に重要であることを明らかにした。したがって、今後は、規模の小さなアレー微動観測や表面波探査などの浅層構造調査を実施することにより、サイトに固有する工事振動の伝播や対象地点での工事振動の大きさを予測することができる。

本論文では、環境振動の影響評価でより重要である上下動成分について検討を行ったが、建屋内を伝播する波の水平動は建物の共振現象より数Hz以下の振動成分において増幅することが考えられるため、今後は、工事振動を建物に入力することを前提として水平動成分に対する工事振動の予測についても検討する予定である。

謝辞

現地調査では、東海旅客鉄道株式会社・岩田裕一氏ならびに多くの方々のご協力を得ました。査読者から頂いた有益なコメントと助言は、本原稿の改善に大いに役立ちました。記して、感謝いたします。

参考文献

- 1) Institute of Noise Control Engineering: Regional Environmental Vibration, Gihodo Shuppan, 2001 (in Japanese)
社団法人日本騒音制御工学会：地域の環境振動，技報堂出版，2001
- 2) Miwa, T. and Yonekawa, Y.: Evaluation Methods for Sinusoidal Vibrations (Evaluation Methods for Vibration 1), Vol. 27, No. 1,

pp.11-20, 1971.1 (in Japanese)

- 三輪俊輔，米川善晴：正弦振動の評価法（振動の評価法1），日本音響学会誌，27巻，1号，pp.11-20, 1971.1
- 日本規格協会：振動レベル計，JIS C 1510, 1995
- 4) Society of Theoretical Earthquake Ground Motion: Earthquake Ground Motion, Kajima Institute Publishing, 1994 (in Japanese)
- 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
- 5) Katayama, T., Tobita, J., Fukuwa, N. and Wakayama, T.: Ground Vibration Caused by Construction of Subway Station Using Diaphragm Wall Method, Journal of Structural Engineering, Vol. 46B, pp.483-496, 2000.3 (in Japanese)
- 片山貴裕，飛田潤，福和伸夫，若山武彦：連続地中壁工法による地下鉄駅建設工事に伴う地盤振動の発生と伝播，構造工学論文集，第46B巻，pp.483-496, 2000.3
- 6) Bornitz, G.: Über die Ausbreitung der von Grosskolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, J. Springer, 1931
- 7) Shioda, M.: Prediction and Reduction for Environmental Vibration, Acoustical Society of Japan, Vol. 60, No. 9, pp.549-554, 2004.9 (in Japanese)
- 塩田正純：環境振動の予測と低減，日本音響学会誌，第60巻，第9号，pp.549-554, 2004.9
- 8) Park, C. B., Miller, R. D. and Xia, J.: Multichannel Analysis of Surface Waves, Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp.800-808, 1999.5
- 9) Hayashi, K. and Suzuki, H.: CMP Cross-Correlation Analysis of Multi-Channel Surface-Wave Data, Exploration Geophysics, Vol. 35, No. 1, pp.7-13, 2004.3
- 10) Aki, K.: Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 35, pp.415-456, 1957.1
- 11) Okada, H.: The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series, 12, Society of Exploration Geophysicists, 2003
- 12) Tsuno, S., Cornou, C. and Bard, P. Y.: Superficial S-wave Velocity and Damping Factor Model Determined by the MASW Measurement in the Grenoble Sedimentary Basin, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper P034, 2008.10
- 13) Tsuno, S. and Kudo, K.: Valuation for Practical Use of S-Wave Velocity Structure Determined by the Spatial Auto-Correlation Method Applied for Microtremors, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 596, pp.17-24, 2005.10 (in Japanese)
- 津野靖士，工藤一嘉：微動を用いた空間自己相関法によるS波速度構造の実務利用への評価，日本建築学会構造系論文集，第596号，pp.17-24, 2005.10
- 14) Capon, J.: High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Proc. IEEE, Vol. 57, No. 8, pp.1408-1418, 1969.8
- 15) Yamanaka, H. and Ishida, H.: Application of Genetic Algorithms to an Inversion of Surface-Wave Dispersion Data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No. 2, pp.436-444, 1996.4
- 16) Harkrider, D. G.: Surface Waves in Multilayered Elastic Media I, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 54, No. 2, pp.627-679, 1964.4
- 17) Utsu, T.: Seismology, Kyoritsu Shuppan, 1984 (in Japanese)
- 宇津徳治：地震学，共立出版，1984

INVESTIGATION ON THE APPLICABILITY OF THE EMPIRICAL PREDICTION METHOD TO CONSTRUCTION VIBRATIONS

Seiji TSUNO^{*1}, *Masanori NOYORI*^{*2} and *Hidefumi YOKOYAMA*^{*3}

^{*1} Assist. Senior Researcher, Railway Technical Research Institute, Dr.Eng.

^{*2} Researcher, Railway Technical Research Institute, M.Eng.

^{*3} Chief Researcher, Railway Technical Research Institute, Dr.Eng.

There are many reports applied the theory of wave propagation in an elastic half-space medium to predict environmental vibrations such as, traffic vibrations, railway-induced ground vibrations, factory vibrations and construction vibrations. In general, the empirical methods simplified the equation by Bornitz were practically used in the engineering fields; however, the applicability of those empirical methods were not clear enough, due to less usage of velocity of subsurface layer which is the most important key-parameter to predict environmental vibrations in a site. To simply and accurately evaluate construction vibrations in one of the environmental vibrations, therefore, we investigated on the applicability of the empirical prediction method based on the theory of wave propagation to construction vibrations, using velocity of subsurface layer.

At first, we performed linear array measurements for 4 types of construction vibrations at a site. We deployed 8 to 10 stations, which are composed of vibration level meters and data loggers, with an interval distance of 5m in a linear array. We recorded the vibrations induced by large-sized construction equipment such as a power shovel, a bulldozer and silent piler. The accelerations for 4 types of construction vibrations had the same tendency that the amplitudes were dominated in a frequency of 4 to 40Hz at a distance of 2m or 5m from construction sources, especially at a frequency of 10Hz in a linear array. Also, we performed a surface wave exploration and array microtremor observations to estimate phase velocity of Rayleigh waves and S-wave velocity structure at the site. As to the surface wave exploration, we deployed 24 stations with an interval distance of 2m in a linear array. As to array microtremor observations, we deployed 7 stations in a double equilateral triangle and its center with a side length of 2 to 60m. We applied the F-K method to data of surface wave exploration and the SPAC method to vertical data of array microtremor observations respectively, to obtain the phase velocity of Rayleigh waves in a broadband. We inverted S-wave velocity structures from the phase velocity in the inversion technique of the Genetic algorithm.

We applied the wave propagation equation to construction vibrations, to identify wave types of construction vibrations and investigate the validity of velocity of subsurface layer. In case of the identification of wave types, we found that construction vibrations were dominated by surface waves, especially Rayleigh waves in vertical components. In case of the validity of velocity of subsurface layer, we found that the phase velocity of surface waves in a subsurface layer was the most important key-parameter to accurately predict construction vibrations. We calculated the distributions of amplitudes of the fundamental mode Rayleigh waves against depth for frequencies of 5 and 10 Hz at the site and therefore; we found that the construction vibrations dominated at a frequency of 10Hz were significantly affected by the subsurface layer to a depth of 3 m. Finally, we evaluated the peak ground acceleration (PGA) of construction vibrations against distances from construction sources, by the empirical prediction method based on the theory of wave propagation. By properly substituting the frequency dominated in construction vibrations and the phase velocity of surface waves in a subsurface layer at the site to the equation of wave propagation, we could accurately reproduce construction vibrations against distances from construction sources.

(2018年5月1日原稿受理, 2018年10月1日採用決定)