

表面波探査法に基づく地盤応答予測の精度向上に関する研究

Prediction of Ground Vibration Responses Based on Soil Properties Estimated by Using Surface Wave Method

田 中 彩 峯 村 敦 雄 石 橋 敏 久
岩 本 賢 治 桜 庭 和 子

要 約

建設工事や車両走行などから発生した振動が地盤を介して周辺に伝播し問題となることがある。このような地盤振動は地表近くを伝播する表面波が支配的である。本研究では、地盤応答解析に用いる表層の地盤特性を簡易な方法で精度良く把握することを目的として、実地盤での測定結果に表面波探査法を適用し、表層地盤の伝播速度の推定を行った。その結果、この方法で得られた表層の伝播速度を使った地盤応答解析は、N値と土質種別から推定した伝播速度を使った解析よりも実測と良好に対応すること、起振機に比べ可搬性の良い加振源を用いた測定でも、表面波が支配的となる高い振動数領域では起振機と同等の精度で表層の伝播速度が推定できることが明らかになった。また、二層地盤モデルでの解析検討により、1次ピーク振動数と表層の伝播速度から求める波長との関係から表層厚が推定できることが示され、過去の実測データからも確認できた。

目 次

- I. はじめに
- II. 地表面加振による地盤応答波形の特性
- III. 起振機加振による表層地盤の伝播速度の推定
- IV. 簡易加振による表層地盤の伝播速度の推定
- V. 表面波探査法による表層厚推定の可能性
- VI. おわりに

I. はじめに

建設工事あるいは大型車や鉄道などの走行により発生する振動が地盤を介して周辺へ伝播し問題となることがある。振動が及ぼす影響を精度良く予測するためにはまず、加振源、地盤、評価対象を適切にモデル化したうえで振動解析を行い、地盤の伝播特性を把握する必要がある。解析に用いる地盤モデルの物性値、例えばせん断波速度 (V_s) などは地盤調査結果に基づき推定することが多いが、この物性値が予測解析の精度に大きく影響することから、実地盤の物性値をいかに正確に評価できるかが課題となる。

ここで対象とする振動は、地盤の鉛直方向に作用し地表近くを伝播することから、表面波 (Rayleigh 波) が支配的となる¹⁾。そのため、地盤の伝播特性を適切に評価するためには表面波の特性を正確に把握することが重要となる。表面波は、その波長に依存して伝播速度が変化する分散性を有するため、波長の短い、すなわち振動数の高い波に着目すれば、浅い地盤の伝播速度 (表面波速度) に関する情報が得られる。

表面波速度を実測から求める方法として、表面波探査法が利用されることが多い。表面波探査法は、地盤の振動特性を把握する目的でこれまでに数々の手法が提案されている。主なものに、掛矢や重錘落下などの衝撃力によって励起された表面波を測線上の多数の受振器で測定する方法²⁾ や、起振機の鉛直加振により励起された正弦波を2個の受振器で測定する方法³⁾ などがある。

著者らは、地盤応答解析に用いる表層の地盤特性を簡易な方法で精度良く把握することを目的に、表面波探査法を実地盤での測定に適用し、表層地盤の伝播速度や層厚の推定精度について検討を行ってきた^{4)~6)}。本報ではその検討結果をまとめて示すとともに、表面波探査で得られた表層の伝播速度と層厚を用いた地盤応答解析結果と実測結果を比較し、地盤の伝播特性の予測精度について論じる。

II. 地表面加振による地盤応答波形の特性

鉛直加振時の地表面応答は実際に表面波が支配的となっていることを確認するため、地表面鉛直加振時の地盤応答の測定結果 (IV章参照) から、伝播する波の特性について検討を行った。加振位置から5m点における1次ピーク振動数8Hzでの波の伝播方向(X方向)および鉛直方向(Z方向)の応答波形1周期分を用いて作成したX-ZのOrbitをFig.1に示す。Orbitは鉛直方向に長い楕円形で伝播方向に対して逆回転の軌道を描いていることから、地表面での応答には表面波であるRayleigh波の特性が表れていることが分かる。

キーワード: 環境振動, 表面波探査法, 地盤応答解析, 起振機加振, 簡易加振源, 表面波速度, 表層厚, ピーク振動数

Keywords: environmental vibration, surface wave method, analysis of ground vibration, vibration generator, impact sources, surface wave velocity, subsurface layer thickness, peak frequency

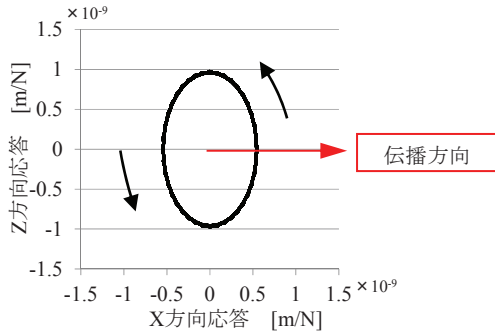


Fig.1 Orbit の一例
(Example of Particle Orbit)

Ⅲ. 起振機加振による表層地盤の伝播速度の推定

起振機加振による地盤応答の実測結果から表面波探査法により求めた表面波速度を使って表層地盤の伝播速度を推定した。

本実測では、Photo 1 に示す最大 490N の加振力を有する鉛直型起振機を用いて、5Hz から 0.5Hz 刻みで 30Hz まで定常加振し、Fig.2 に示す 5 点で鉛直方向の地表面加速度応答を同時測定した。測定データは、起振機の入力信号と応答の相互相関関数を用いて S/N 比を向上させる MIK システム⁷⁾ を利用し、加振振動数ごとに単位加振力あたりの加速度および起振機に対する位相遅れを求めた。加速度については、角速度を用いて単位加振力あたりの上下変位に変換した。Fig.3 に各測定点の共振・位相曲線を示す。加振点から離れるほど距離減衰の影響により変位振幅が減少し、位相遅れも大きくなっている。位相曲線は、地盤の不均質性や不整形性と考えられるバラつきは見られるものの、加振位置から最も離れた 5m 点でも連続的に変化しており、精度の高いデータが得られていることが分かる。



Photo 1 鉛直型起振機
(Vibration Generator)

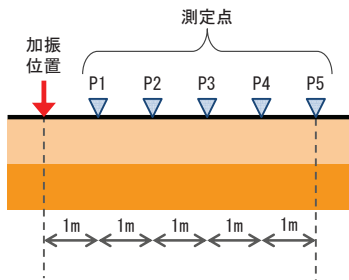


Fig.2 加振位置と測定点の位置
(Excitation and Measurement Points)

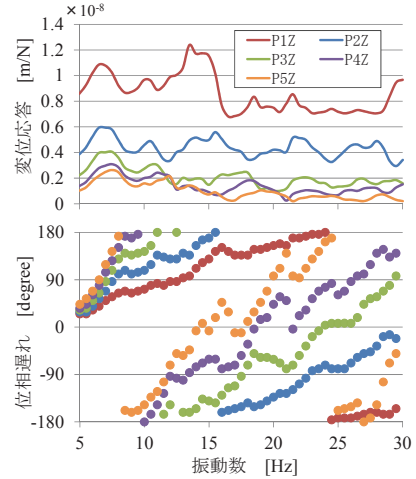


Fig.3 各測定点での共振・位相曲線
(Resonance and Phase Lag Curve)

各測定点での起振機に対する位相遅れから任意の 2 点間の位相差を求め、これを周期との関係から時間差に換算し 2 点間の距離で除すことで、2 点間における波の伝播速度を求めた。

Fig.4 に伝播速度の算出結果の一例を示す。2 点間の距離を長くすると、モードの影響を受けにくくなり伝播速度のばらつきが減るため、本報では P1-P5 間の 4m 間隔の結果を取り扱うこととする。表面波が持つ分散性に従い、表面波を表す高い振動数領域に着目すると、8Hz 以上において地盤状態に起因すると考えられる速度のばらつきは見られるものの、平均的にはこの地盤における表面波の伝播速度 (表面波速度) は 100 m/s 程度であると推察される。

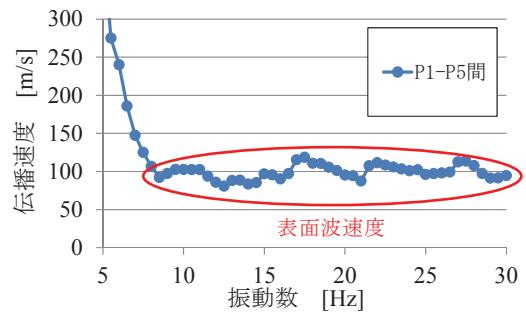


Fig.4 表面波探査法の実測結果から求めた伝播速度
(Propagation Velocity Calculated by Measuring Results of Surface Wave Method)

実測現場の地盤調査結果から設定した地盤の物性値 (層厚、せん断波速度 V_s 、単位体積重量 γ 、ポアソン比 ν) を N 値モデルとして Table1(a) に示す。この中で、 V_s については N 値と土質種別による回帰式⁸⁾ を用いて推定した。一方、物性値を調整しながらシミュレーション解析を実施し、実測結果と対応する結果が得られた時の物性値を Table1(b) に示す。表層の V_s を 100 m/s に設定したが、この値は Fig.4 の表面波速度から求めた V_s とほぼ一致している。この 2 種類の物性値を用いて薄層要素法による地盤応答解析を行い、共振・位相曲線を求め実測結果と比較した。加振位置から 5m 点の結果を Fig.5 に示す。

地盤調査結果から作成したモデルの解析結果は、実測結果に対し振幅と位相遅れがともに小さくなっており、実測結果と対応していない。これは、伝播速度を求める回帰式の相関係数が低く、同じN値に対する伝播速度の分布のパラつきが大きいことや、地盤調査を行った時期と測定の実施時期が離れているため、その間に表層の地盤状況が変化したことによる可能性が考えられる。

一方で、シミュレーション解析結果では7Hz近傍でのピーク振動数と振幅がほぼ一致する結果が得られている。また、15Hz以上の振動数領域で解析結果は実測結果よりも大きな応答となっているが、この原因は不明である。位相特性については、5~30Hzの全体に亘って変化の傾向が概ね捉えられている。なお、実測に見られる10Hz以上の細かいピークは、前述のように地盤の不均質性や不整形性の影響と考えられるが、解析では均質成層地盤として取り扱っているため表現できていない。また、Fig.5の位相特性から求めたP1-P5間の伝播速度をFig.6に示す。シミュレーション解析結果から求めた伝播速度が実測結果とよく対応していることが改めて確認できる。

Table 1 地盤モデル

(Soil Properties)

(a) N値モデル				(b) シミュレーション解析時			
(m)	Vs(m/s)	$\gamma(t/m^3)$	v	(m)	Vs(m/s)	$\gamma(t/m^3)$	v
2.0	130	1.5	0.40	2.0	100	1.5	0.40
4.8	160	1.5	0.49	4.8	100	1.5	0.49
2.7	200	1.6	0.49	2.7	200	1.6	0.49
2.5	280	2.0	0.49	2.5	280	2.0	0.49

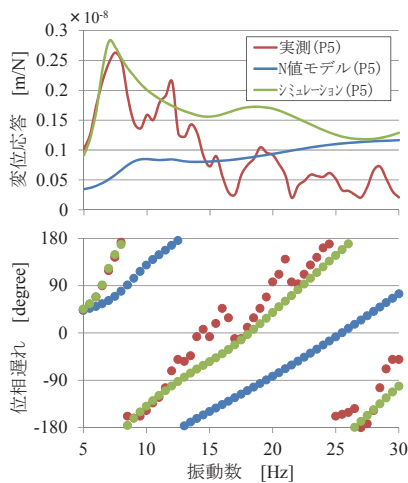


Fig.5 実測および解析の共振・位相曲線
(Resonance and Phase Lag Curve)

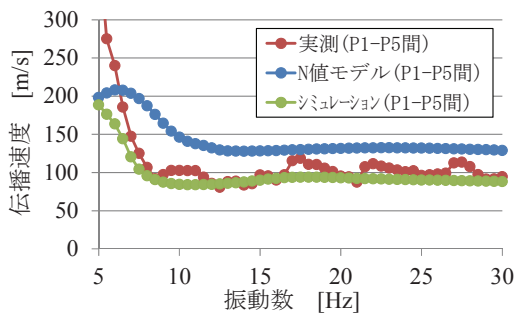


Fig.6 表面波探査法から求めた実測および解析の伝播速度
(Propagation Velocity Calculated by Surface Wave Method)

IV. 簡易加振による表層地盤の伝播速度の推定

起振機加振結果から表面波探査法で求めた表面波速度を表層のせん断波速度に反映させることで、地盤の応答を精度よく評価できることが分かった。しかし、起振機加振を行うには、機材の搬入や測定に時間を要し、現場で行うことは容易ではない。そこで、主に建物内での測定で使われる加振源を用いて起振機加振と同様に精度の高い地盤応答が評価できるか検討を行った。

測定は技術研究所西調布実験場内(広さ6m×14m)において実施した。加振源は起振機加振のほか、簡易な加振源として(a)バングマシン、(b)インパクトハンマー(PCB 206M06)、(c)インパクトボール(RION YI-01)の3種類を用いた。これらは、主に建物内の床衝撃音や振動応答の性能把握に用いられており、衝撃力特性も既知である。測定位置はFig.7に示す5点で、水平および鉛直方向の地表面応答を同時測定した。(a)~(c)の簡易加振源は、加振位置に300mm×300mm×60mmのコンクリート製定盤を敷きその上で落下や打撃を行った。なお、(c)については1mの高さから落下させた。それぞれの加振源での測定状況をPhoto2に示す。

起振機加振はIII章と同条件で測定および分析を行った。簡易加振源の加振回数は10回以上とし、(b)と(c)については5~10秒間隔で加振を行った。全時間の測定記録を用いて1フレーム2秒、ラップ1秒とした合計150フレーム程度のアンサンブル平均を行い、2点間のクロススペクトルの平均値を基準点のパワースペクトルの平均値で除すことにより応答比と位相曲線を求めた。

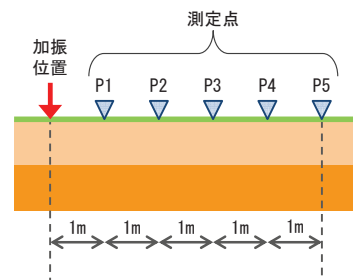


Fig.7 加振位置と測定点の位置
(Excitation and Measurement Points)

Table 2 地盤条件
(Soil Properties)

(m)	Vs(m/s)	$\gamma(t/m^3)$	v
4.0	140	1.5	0.49
5.0	140	1.5	0.49
5.0	350	1.95	0.33
7.0	200	1.7	0.46



(a) バングマシン (b) インパクトハンマー (c) インパクトボール

Photo 2 簡易加振源の測定状況
(Various Impact Sources)

Fig.8に加振源ごとのP1に対するP5の応答比と位相曲線を示す。どの加振源についても、ピーク特性や位相遅れは15Hz以上で起振機加振の結果と概ね一致している。

Fig.9に5~30HzまでのP1のパワースペクトルおよびP1-P5間のコヒーレンスを示す。パワースペクトルはバングマシンに比べインパクトハンマーやインパクトボールが非常に小さい。そのため、Fig.8の15Hz以下における位相のばらつきは、加振力が小さいことに起因するものと考えられる。また、コヒーレンスは20Hz以上でどの加振源でも1に近い値であることから、加振に対する応答が離れた5m点まで伝播していることが分かる。

Fig.8の位相遅れから、III章と同じ方法でP1-P5間の伝播速度を算出し、Fig.10に各加振源の結果を重ねて示す。いずれの加振源でも15Hz以上で起振機加振から求めた伝播速度と良く一致している。この結果から、簡易な加振源による実測結果を用いても起振機加振と同等の精度で表面波速度が求められることが分かった。

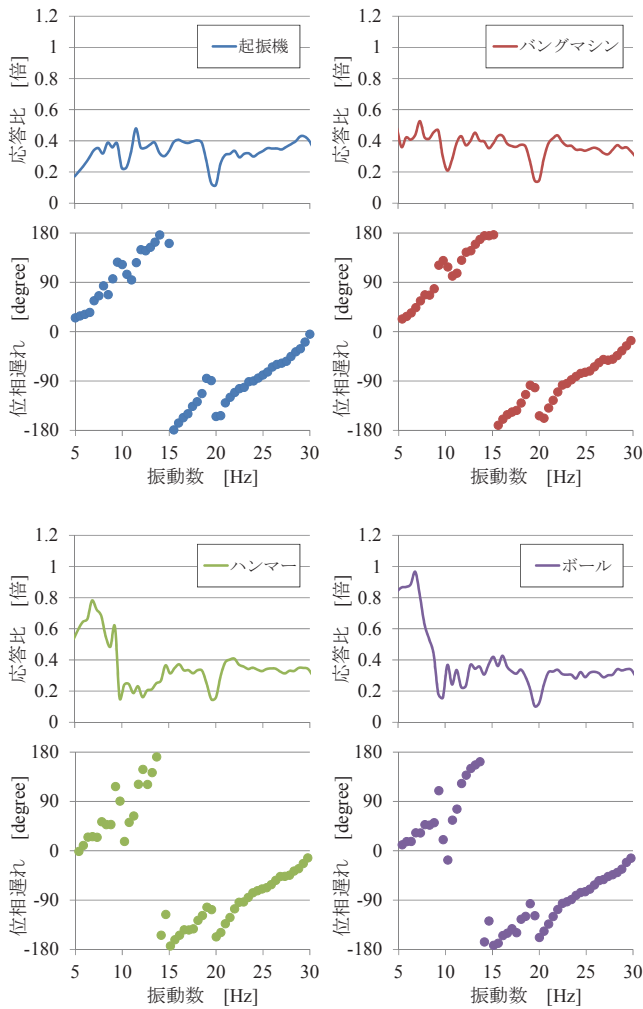


Fig.8 P1に対するP5の応答比と位相曲線
(Response Ratios of P1 to P5 and Phase Lag Curves)

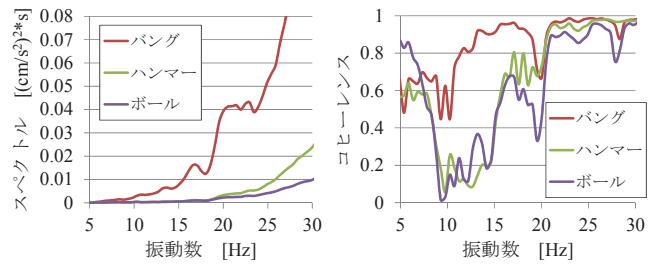


Fig.9 P1のパワースペクトルとP1-P5間のコヒーレンス
(Power Spectrum and Coherence)

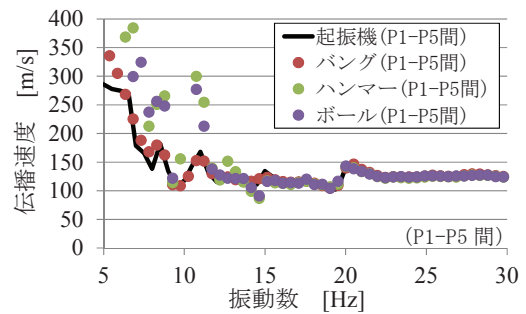


Fig.10 表面波探査法から求めた実測結果の伝播速度
(Calculated Propagation Velocity by Surface Wave Method using Measured Values)

V. 表面波探査法による表層厚推定の可能性

実測結果をもとに表面波探査法により求めた表面波速度を表層のせん断波速度として適用することで、精度の高い応答予測が可能になることが分かった。実際に地盤モデルを決定するためには、地盤物性と共に層厚の情報が必要となる。そこで、表面波探査法によって表層の地盤速度だけではなく層厚の推定も可能であるかを検討するため、二層地盤モデルを用いた解析を行った。

1. 二層地盤モデルによる解析検討

Fig.11に解析を行った二層地盤モデルとその物性値および加振位置と評価点を示す。検討のパラメータは二層目のせん断波速度 (V_{S2}) および表層厚 (H) で、 V_{S2} は150, 200, 300, 500 m/sの4ケース、Hは1, 3, 5, 10 mの4ケースを設定し、これらの組み合わせで計16ケースの解析を実施した。各検討ケースについて1Hzから0.5Hz刻みで100Hzまでを対象に薄層要素法を用いて周波数応答解析を行い、地表面を1Nで鉛直加振した時の鉛直変位および加振位置に対する位相遅れを求めた。

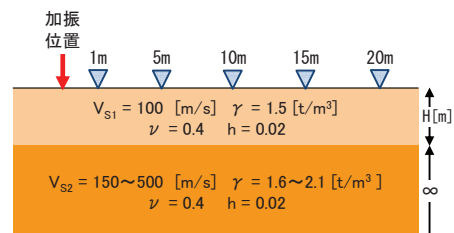
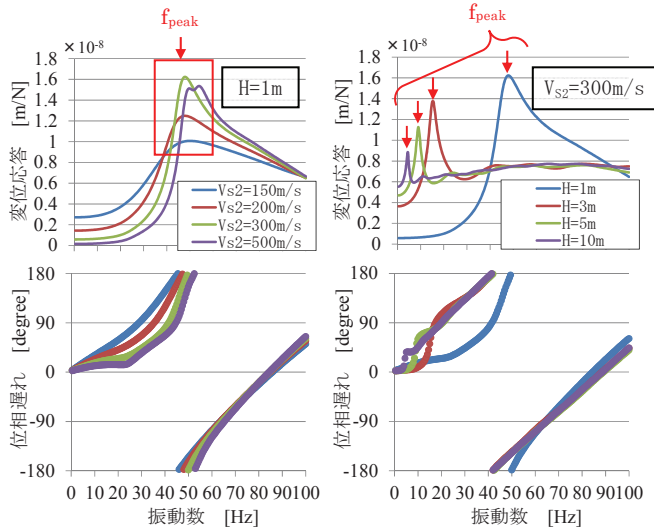


Fig.11 二層地盤モデルの物性値および加振位置と評価点の関係
(Analysis Condition)

Fig.12(a)に表層厚を $H=1\text{ m}$ で一定とし二層目のせん断波速度 (V_{S2}) を変化させた場合、(b)に V_{S2} を 300 m/s で一定とし H を変化させた場合の、加振位置から 1 m 点における共振・位相曲線をそれぞれ示す。(a)では V_{S2} の影響は比較的小さく、1次ピーク振動数 (f_{peak}) は概ね 50 Hz 付近に表れている。一方、(b)では同じ V_{S2} でも H が厚くなるほど f_{peak} は低い振動数へとシフトしている。位相曲線については、 f_{peak} 付近で傾きが変化し、それより高い振動数では H によらず傾きがほぼ一定になっている。



(a) 表層厚一定の場合 (b) 二層目せん断波速度一定の場合

Fig.12 1m 点の共振・位相曲線
(Resonance and Phase Lag Curve at P1)

合の、異なる H から伝播速度をそれぞれ求めた結果を示す。高い振動数領域では H によらず伝播速度が 100 m/s 程度に収束しており、2点間距離の違いによる差も見られない。この伝播速度は表面波速度と推察でき、この結果を表層のせん断波速度に換算すると、設定した一層目のせん断波速度 $V_{S1}=100\text{ m/s}$ に合致する。一方で、 H が異なると伝播速度が収束し始める振動数に違いが表れ、 H が厚いほど低い振動数から収束する傾向を示す。さらに、この収束し始める振動数は図中に示した f_{peak} にほぼ対応していることが分かる。なお、解析を行ったすべてのケースで同様の傾向となっていることを確認している。

全解析ケースについて、設定した V_{S1} と共振曲線から推定した f_{peak} より波長 λ を $\lambda = V_{S1} / f_{\text{peak}}$ で求め、解析で設定した表層厚 H と λ の関係をプロットし Fig.14 に示す。結果は、図中に示した $H = \lambda / 2$ の直線にほぼ重なっており、表層厚は V_{S1} と f_{peak} の関係で表せることが分かる。なお、この関係はこれまでに数々行われてきた表面波探査の実績から経験的に求められた結果⁹⁾とも一致する。

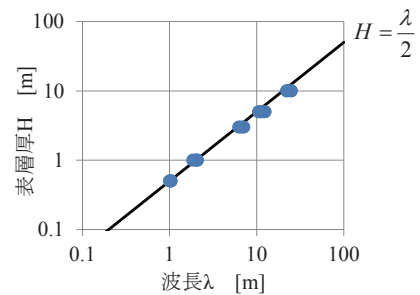


Fig.14 波長と表層厚の関係 (解析結果)

(Relationship between Wave Length and Subsurface Layer Thickness)

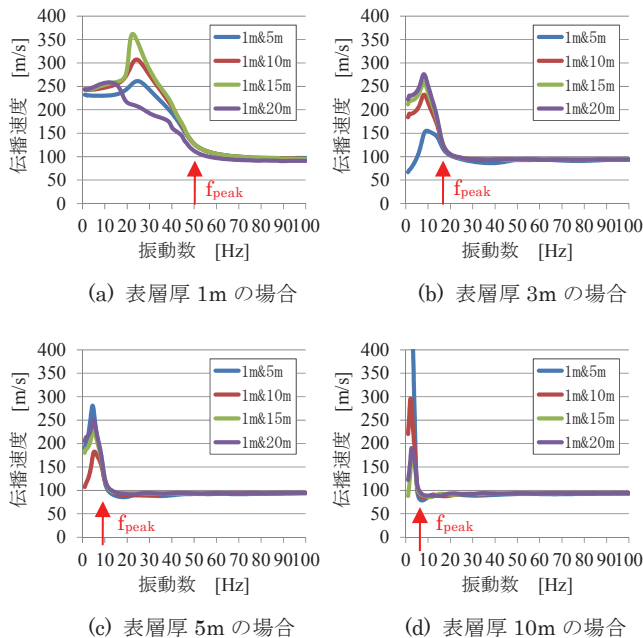


Fig.13 伝播速度の算出結果 ($V_{S2}=300\text{ m/s}$)

(Propagation Velocity)

加振位置から 1 m 点に対する各測定点での位相差から表面波探査法を用いて伝播速度を求めた。Fig.13(a)~(d)に $V_{S2}=300\text{ m/s}$ の場

2. 実測結果による検証

表層厚推定に関して、解析結果から示された $H = \lambda / 2$ の関係が、実測結果からも説明できるかを確認するため、III章およびIV章で扱った実測結果を用いて検討を行った。実測結果の f_{peak} と解析モデルの V_{S1} から求めた波長 λ および V_{S1} の層厚 H との関係のプロットし Fig.15 に示す。現場Aでは $\lambda \approx 13.3\text{ m}$ に対し $H=6.8\text{ m}$ 、西調布実験場では $\lambda=18.6\text{ m}$ に対し $H=9.0\text{ m}$ となり、実測結果は $H = \lambda / 2$ の直線に重なることが分かる。以上より、波長から表層厚が推定できることが著者らの行った実測結果からも示すことができた。

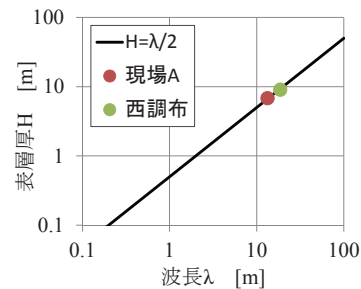


Fig.15 波長と表層厚の関係 (実測結果との対応)

(Relationships between Wavelength and Subsurface Layer Thickness)

VI. おわりに

地盤を介して伝播する振動が及ぼす影響を精度良く予測するためには、まず地盤応答解析を行って地盤の伝播特性を正確に推定する必要がある。本報では、地盤応答解析に用いる表層の地盤物性を簡易な方法で精度良く把握することを目的として、実測結果に表面波探査法を適用し得られた表層の地盤物性についての推定精度の検討を行った。その結果をまとめて以下に示す。

①起振機による実測結果に表面波探査法を適用し得られた伝播速度を使って地盤応答解析を行った結果、地盤調査のN値と土質種別から求めた伝播速度を用いた解析結果に比べ実測結果とよく対応することが分かった。

②可搬性の良い簡易な加振源を用いた測定から伝播速度を求めた結果、表面波が支配的な高い振動数領域では起振機と同等の精度で表層の伝播速度が推定できることが分かった。簡易加振源で測定が行えることで、測定時間短縮などにつながりメリットが大きい。

③表層厚のパラメータ解析を行った結果、表層厚は1次ピーク振動数と表層の伝播速度から求まる波長を使って定式化が可能であることが分かった。本関係式は実測結果とも対応することが確認された。

以上より、対象となる現場で事前に簡易な方法で地盤応答を測定し表層のせん断波速度と層厚を求めておけば、地盤応答を精度良く予測できることが示された。

今後は、PS 検層結果との比較などから、表面波探査法により得られた物性値の実状との整合性を検証するとともに、表面波探査法の適用範囲拡大に向け、実測結果を基に引き続き検討を進めていく

予定である。

謝 辞

2 現場での測定に関しては(株)アルテスの比嘉・佐藤両氏、ならびに現場事務所の方々にご協力いただいた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本騒音制御工学会；地域の環境振動，技報堂出版，2001.
- 2) 鈴木ほか；洪積丘陵地における短周期表面波探査の適用性の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，2003.9，pp.225-226.
- 3) 時松孝次；表面波探査，土と基礎 41(2)，1993.2，pp.43-44.
- 4) 田中ほか；表面波探査法に基づく地盤応答解析の精度検討（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，2014.9，pp.313-314.
- 5) 峯村ほか；表面波探査法に基づく地盤応答解析の精度検討（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，2014.9，pp.315-316.
- 6) 田中ほか；表面波探査法に基づく地盤応答解析の精度検討（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，2015.9，pp.297-298.
- 7) KaTRI リーフレット；2010-07 MIK システム振動計測車
- 8) 日本建築学会；入門・建物と地盤との動的相互作用，(社)日本建築学会，1996.
- 9) (社)地盤工学会；地盤調査の方法と解説，丸善，2004

Prediction of Ground Vibration Responses Based on Soil Properties Estimated by Using Surface Wave Method

Aya Tanaka, Atsuo Minemura, Toshihisa Ishibashi, Kenji Iwamoto, and Kazuko Sakuraba

Ground vibration generated by construction processes or vehicle traffics sometimes induces vibration problem around the vibration source. The surface wave has the most dominant impact in the ground vibration components. In this paper, the authors aimed to precisely figure out the ground characteristics of subsurface layers by a simple method. The surface wave method was applied to the estimation of propagation velocity in subsurface layers. As a result, the analytical results of ground vibration response obtained from the propagation velocity by using the proposed method agreed with the measurement results better than the results by using the regression curve with regard to soil property and N value. The propagation velocity estimated from measurement by using the portable impact sources reasonably agreed with the propagation velocity by the vibration generator from 15 to 30 Hz frequency range. Furthermore, the analytical study using two-layer model showed that a thickness of the surface layer was predictable by analyzing a relationship between first peak frequency and the wavelength calculated from propagation velocity. This relationship was also found in the previous measurement results.