

調和振動荷重による P - S V 波の地盤振動・波動伝播特性を用いた地盤構造と物性値の推定

齊藤 将司¹・原田 隆典²・森 源次³・王 宏沢⁴・山下 典彦⁵

¹宮崎大学大学院学生 システム工学専攻 (〒889 - 2192宮崎市学園木花台西1 - 1)

E-mail:saitoh@civil.miyazaki-u.ac.jp

²宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889 - 2192宮崎市学園木花台西1 - 1)

E-mail:harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

³古野電気株式会社 航空・防衛事業部システム開発課, 主幹技師 (〒662-8580兵庫県西宮市芦原町9-52)

E-mail: genji.mori@furuno.co.jp

⁴(株)地震工学研究開発センター - (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1 - 1, 宮崎大学産学連携センター -)

E-mail: wang@eerc.co.jp

⁵神戸市立工業高等専門学校助教授, 都市工学科 (〒651 - 2194 神戸市西区学園東町8-3)

E-mail: yamasita@kobe-kosen.ac.jp

地表面に鉛直方向の調和振動荷重を作用させたときに地表面の2地点間で観測される位相速度の振動数依存性と地盤の卓越振動数の情報から表層地盤構造と地盤物性値を推定する方法を示す。この方法の実データによる検証の前段階として、半無限弾性地盤上にのる1層と3層の水平成層地盤の2つのケースを想定した数値実験により本推定法の検証を示す。これらの数値実験データに基づく本推定法の検証を通して、いずれのケースにおいても地盤の卓越振動数がほぼ等しい地盤構造と地盤物性値の初期地盤を用い、かつ位相速度の振動数依存性を合わせる方法によって、仮定した地盤構造と地盤物性値を探索できることを確認した。

Key Words : *estimation of layered soil deposit, vertical harmonic loading, wave propagation, phase velocity, dynamic response of soil deposit, non destructive testing*

1. はじめに

地盤の地表面に動的荷重を作用させた時に生じる弾性波は、地盤の弾性定数とそれらの深さ方向の分布を決めるための有用な情報を与えてくれる。このような弾性波を使った地盤構造(弾性定数とその分布特性)の推定方法は数多く提案され実務に利用されている¹⁾。

これらの中で、地表面の1地点に鉛直方向の衝撃荷重または調和振動荷重を作用させ、地表面上に設置した2つの観測点から計測される弾性波の位相速度並びに、レイリー波の分散曲線と地盤構造の理論的關係を使って地盤構造を推定する方法は、表面波のスペクトル解析法またはレイリー波法と呼ばれ、1960年代に開発された方法である²⁾。その後、1980年代に表面波のスペクトル解析法の理論的精緻化や実測データの解釈を通じ、この方法による地盤構造の推定精度向上に関する研究が活発化する^{3),4)}。

しかしこれらの研究では、地表面の観測波形をレイリー波モードの重ね合わせによって解釈しているため、加振点から遠くの観測点を利用するという制約が課せられ、観測ノイズと加振力の増大や観測点数の増加をもたらし、簡便で高精度な地盤構造推定に関して課題が残されている。

以上のような視点から著者ら⁵⁾は、地盤構造の簡便かつ的確な推定法の確立を目的に、地表面に調和振動荷重を作用させたときに地表面の2地点間で観測される位相速度や地盤振動特性がどのような特性を持っているのかという基礎的事項を理論的な数値計算によって調べ、観測される位相速度並びに、レイリー波の分散曲線と地盤構造の理論的關係を明らかにしてきた。

そこで、本論文では、著者らの論文⁵⁾で得られている、地表面の2地点間で観測される位相速度と地盤振動特性に関する基礎的事項の応用問題への展開の1つとして、地表面に鉛直方向の調和振動荷重を作用させたときに地

表面の2地点間で観測される位相速度の振動数依存性と地盤の卓越振動数の情報から表層地盤構造と地盤物性値を推定する方法を提案する。この方法を表層数十メートル程度の浅部地盤の実地盤での計測データに適用して実地盤への適用性を調べる前段階として、本論文では、半無限弾性地盤上にのる1層と3層の水平成層地盤の2つのケースを想定した数値実験により本推定法の妥当性を検証するものとする。位相速度等の数値計算には、原田ら^{6), 7)}が開発した剛性マトリクスによる水平成層地盤の波動場解析法を用いる。この解析法はP-SV波問題における波動場を厳密に再現するものである。

2. 波動場の数値計算法の概要と地盤構造と地盤物性値の推定方法

(1) 波動場の数値計算法の概要^{6), 7)}

ここでは、P-SV波問題を対象に図-1に示すような半無限地盤を含む n 層から成る水平成層地盤(簡単のため4層とする)の地表面に鉛直方向の外力が作用するときの2次元直交座標系($x-z$)における定式化を示す。

深さ z 、水平距離 x 点の時刻 t における変位は、式(1)のような波数 κ と振動数 ω に関する2重フーリエ積分によって求められる。

$$u(x, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(\kappa, z, \omega) e^{i[\kappa x - \omega t]} d\kappa d\omega \quad (1)$$

ここに、 $x-z$ 軸方向の変位 u, w をまとめて、変位ベクトル \mathbf{u} として表現している。

上式の振動数-波数領域での変位ベクトル $\mathbf{u}(\kappa, z, \omega)$ は、次式の剛性方程式(連立1次方程式)を解いて求めることができる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{q}(z_0) \\ \mathbf{q}(z_1) \\ \mathbf{q}(z_2) \\ \mathbf{q}(z_3) \end{pmatrix} = \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_{11}^{(1)} & \mathbf{K}_{12}^{(1)} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{21}^{(1)} & \mathbf{K}_{22}^{(1)} + \mathbf{K}_{11}^{(2)} & \mathbf{K}_{12}^{(2)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{21}^{(2)} & \mathbf{K}_{22}^{(2)} + \mathbf{K}_{11}^{(3)} & \mathbf{K}_{12}^{(3)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_{21}^{(3)} & \mathbf{K}_{22}^{(3)} + \mathbf{K}_{Half} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}(z_0) \\ \mathbf{u}(z_1) \\ \mathbf{u}(z_2) \\ \mathbf{u}(z_3) \end{pmatrix}$$

ここに、 $\mathbf{u}(z) = \mathbf{u}(\kappa, z, \omega)$ と簡略化して表現している。 $\mathbf{K}_{ij}^{(n)}$ と \mathbf{K}_{Half} は第 n 層と半無限地盤の剛性マトリクスを表す。上式の右辺第1項が図-1のような全体系の剛

性マトリクスを表しているが、これは第 n 層の剛性マトリクスを重ね合わせの原理に従って組み立てることにより求められる。また、上式左辺は振動数-波数領域での外力項で、 $\mathbf{q}(z_n)$ は、深さ z_n の層境界に作用する単位面積あたりの外力(応力)ベクトルを表す。

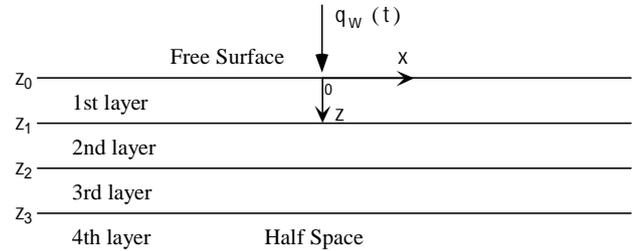


図-1 P-SV波問題における半無限地盤を含む4層水平成層地盤モデル

図-1のように地表面 z_0 上の $x=0$ の点に鉛直方向のみに振動数 ω_0 の調和振動外力が作用する場合には、外力項は次式のように与えられる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(z_1) &= \mathbf{q}(z_2) = \mathbf{q}(z_3) = \mathbf{0} \\ \mathbf{q}(z_0) &= \left(\mathbf{0}, iq_0\delta(\omega - \omega_0) \right)^T \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 i は虚数単位を、 q_0 は地表面の単位面積あたりに作用する鉛直方向の外力(応力)の振幅を、 δ はデルタ関数を表す。

調和振動荷重による地表面の任意点 x における変位の時刻歴波形 $\mathbf{u}(x, t) = \mathbf{u}(x, z_0 = 0, t)$ は、次式のように変位の振動数-波数スペクトル $\mathbf{u}(z_0 = 0) = \mathbf{u}(\kappa, \omega)$ のフーリエ積分から求められる地表面変位の伝達関数 $\mathbf{u}(x, \omega)$ に調和振動外力を掛けて求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(x, t) &= q_0 e^{-i\omega t} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}(\kappa, \omega) e^{i\kappa x} d\kappa \\ &= q_0 e^{-i\omega t} \mathbf{u}(x, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

本論文の数値計算では、地表面に鉛直方向の外力 q_w のみ作用させているため、ここでは主に、鉛直方向の地表面変位 $w(x, t)$ を対象に考察することとする。

式(4)から得られる鉛直方向の地盤の伝達関数 $w(x, \omega)$ は複素数(実数部 R と虚数部 I)であるので、式(5)のように表現することができる。

$$w(x, \omega) = R[w(x, \omega)] + iI[w(x, \omega)] = |w(x, \omega)| e^{i\theta(x, \omega)} \quad (5a)$$

ここに,

$$|w(x, \omega)| = \sqrt{R^2 [w(x, \omega)] + I^2 [w(x, \omega)]} \quad (5b)$$

$$\theta(x, \omega) = \tan^{-1} \left(\frac{I[w(x, \omega)]}{R[w(x, \omega)]} \right)$$

したがって, 地表面の鉛直方向変位 $w(x, t)$ は, 式(5)を式(4)に代入して次式のように表すことができる.

$$w(x, t) = q_0 |w(x, \omega)| e^{-i\omega \left[t - \frac{\theta(x, \omega)}{\omega} \right]} \quad (6)$$

ここで, 式(6)の位相角が一定である点の移動する速さは位相速度 $c(x, \omega)$ と呼ばれる. すなわち,

$$\omega t - \theta(x, \omega) = \text{constant} \quad (7)$$

式(7)の両辺を t について微分すると, 次式が得られる.

$$\omega - \frac{d\theta(x, \omega)}{dx} \frac{dx}{dt} = 0 \quad (8)$$

式(8)より, 次式のように位相速度が求められる.

$$\frac{dx}{dt} = c(x, \omega) = \frac{\omega}{\frac{d\theta(x, \omega)}{dx}} \quad (9a)$$

上式の位相速度は, 中央差分で表すと次式ようになる.

$$c(x, \omega) = \frac{2\Delta x \cdot \omega}{\theta(x + \Delta x, \omega) - \theta(x - \Delta x, \omega)} \quad (9b)$$

本論文の数値計算では, 式(9b)から位相速度を求めるものとする.

(2) 位相速度と地表面近傍の地層のS波速度の関係

ここでは, 数値計算例を用いて位相速度と地表面近傍地盤のS波速度の関係を説明する.

数値計算では, 図-2に示すような水平成層地盤構造(層厚H)とその地盤物性値(S波速度, P波速度, 密度, 材料減衰定数)が与えられた半無限地盤上に横たわる3層の水平成層地盤モデルにおいて, 地表面の1地点に鉛直方向の単位振幅の調和振動荷重を作用させ, 式(5)に従い地表面鉛直方向の地盤の伝達関数と位相角を計算した. この位相角と式(9b)から位相速度を計算した.

図-3と図-4は, 調和振動荷重点から1(m)離れた地点における伝達関数と位相速度を振動数毎にプロットしたものである.

Z_0	H=2.0m	Cs= 80.0m/s	Cp= 294.0m/s	$\rho=1800\text{kg/m}^3$	Q=25
Z_1	H=4.0m	Cs=120.0m/s	Cp= 857.0m/s	$\rho=1800\text{kg/m}^3$	Q=25
Z_2	H=8.0m	Cs=180.0m/s	Cp=1285.5m/s	$\rho=1800\text{kg/m}^3$	Q=25
Z_3	Half Space	Cs=360.0m/s	Cp=1322.7m/s	$\rho=2000\text{kg/m}^3$	Q=50

図-2 計算に用いた地盤モデルと物性値

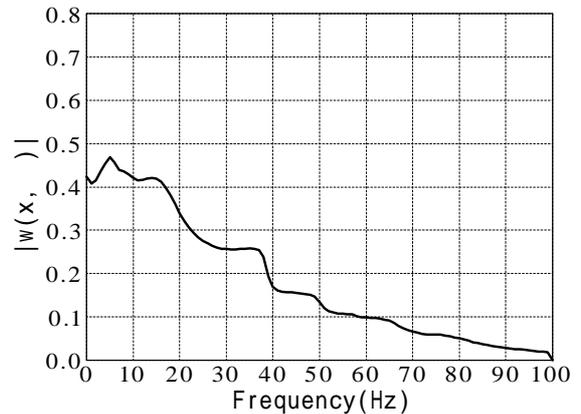


図-3 計算された伝達関数(1(m)地点)

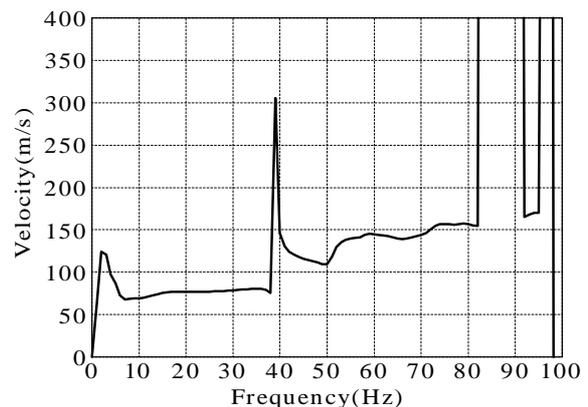


図-4 計算された位相速度(1(m)地点)

図-3に示すように地盤の伝達関数のピーク値から, 地盤の卓越振動数(地盤の1次固有振動数)が約5(Hz)であることがわかる. また, この地盤の卓越振動数より若干小さい2~3(Hz)において, 図-4に示すように位相速度がピークとなっていることがわかる. この振動数より高い振動数領域では, 位相速度が比較的一定な値を取り, 約38(Hz)で位相速度が極端に大きくなっている. 地盤の卓越振動数付近から約38(Hz)までの比較的一定な位相速度の値は, 最大で約80(m/s)であることが読み取れる.

そして, この値は図-2の地盤モデルから地表面近傍の地盤のS波速度(80(m/s))と同じであることがわかる.

すなわち、位相速度において地盤の卓越振動数付近のピーク値から極端に大きい第2のピーク値までの振動数領域での位相速度は、地表面近傍地盤のS波速度と同じであることを表しているのである。このような関係は、著者らの論文⁵⁾ から予測されるものであるが、理論的かつ明解に説明できるまでには至っていない。しかし、ここで示した数値計算例以外の地盤モデルでも、また、3章と4章で示す地盤モデルでも観察されるため、一般的な特性であると考えられる。

このような位相速度と地表面近傍地盤のS波速度の関係は、位相速度の観測値と地盤の卓越振動数の情報から荷重点近傍直下の地盤構造とその地盤物性値を推定する際の1つの手がかりとして使うことができる。

(3) 地盤構造と地盤物性値の推定方法

以上のような伝達関数と位相速度の振動数特性や地表面近傍地盤のS波速度との関係を基に、ここでは、位相速度の振動数特性と地盤の卓越振動数の情報のみを使って地盤構造と地盤の物性値を推定する方法を説明する。

まず、図-1や図-2のように地盤モデルを与えて、この地盤の伝達関数と位相速度を計算し、これを真値と呼ぶものとする。現実の地盤構造の推定問題としては、地表面の1地点に鉛直方向の調和振動荷重を作用させて、荷重点近傍（例えば、1m）の2地点間の位相速度と振動数伝達関数を測定できるものと仮定すると、この測定される位相速度と振動数伝達関数が、本論文の数値実験における真値に対応するものである。ただし、現実の測定において振動数伝達関数を正確に測定するのではなく、そのピーク値から地盤の卓越振動数が測定できるものとして、本論文の数値実験による地盤構造と地盤物性値の推定問題を設定する。

本論文で推定する地盤構造と地盤物性値は、半無限地盤の密度、S波速度、P波速度、材料減衰定数と、その上に横たわる n 層の水平成層地盤の厚さ、密度、S波速度、P波速度、材料減衰定数である。本論文で示す試算例では、密度と材料減衰定数が位相速度や伝達関数のピーク振動数（鉛直加重による地盤の卓越振動数）に与える影響は小さいので、これらは推定すべき変数とせず、真値として固定した結果を示す。また、真値地盤の層数に比べ初期地盤の層数が等しいか多い場合、真値地盤が推定できるが、ここでは、層数が等しい場合を示す。

推定方法の手順を示すと、以下ようになる。

- (1) 浅部地盤構造の経験的推定値とともに一様乱数を用いて、適当な層厚とそれらの物性値（S波速度、P波速度）を抽出し、初期地盤を設定する。ただし、真値の位相速度において地盤の卓越振動数付近のピーク値から極端に大きい第2のピー

ク値までの振動数領域の位相速度は、地表面近傍地盤のS波速度に等しいので、この値を参照して初期地盤の地表面近傍地盤のS波速度を与える。

- (2) これらの初期地盤において、地表面の伝達関数を計算し、最大のピーク値を与える振動数を抽出し、真値の地盤の卓越振動数とほぼ等しい地盤モデルを改めて初期地盤として抽出する。
- (3) この初期地盤から鉛直方向の調和振動の荷重点近傍（本数値計算では、1(m)離れた地点）の1地点の位相速度の振動数特性を計算する。補足的に振動数伝達関数も計算する。
- (4) この初期地盤から求められた位相速度の振動数特性と真値地盤の位相速度の振動数特性の誤差が十分に小さくなるように初期地盤の層厚と物性値（S波とP波速度）を変えて上記(3)に戻り繰り返し計算をする（最小2乗法に基づく修正）。

本論文の試算例では、2乗誤差の最小値を探索する方法として既往のマルカート法⁶⁾を使用し、P波速度の代わりにポアソン比を変数として計算を行なった。

3. 単層の水平成層地盤の試算例

ここでは、表-1と図-5に示すような半無限地盤上に横たわる単層の水平成層地盤を真値の地盤モデルとして用いて、上記の推定法の妥当性を説明する。

表-2と図-6には、2章(3)の手順(2)によって抽出された、真値の地盤の卓越振動数とほぼ等しい地盤モデルとその地盤物性値を示す（初期地盤と呼ぶ）。

表-1 真値地盤のパラメータ

H	Cp	Cs			Q
6.0	372.3	152.0	0.40	1.8E+03	25
	632.8	304.0	0.35	2.0E+03	25

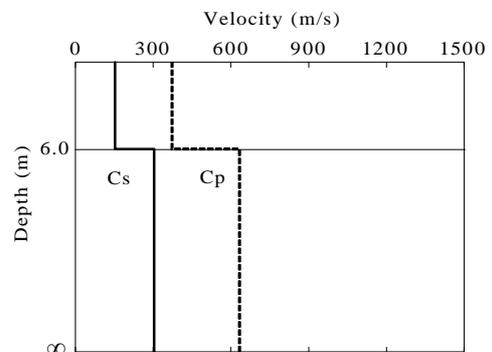


図-5 真値の地盤モデル

表 - 2 初期地盤のパラメータ

H	Cp	Cs			Q
6.4	320.7	150.0	0.36	1.8E+03	25
	906.1	475.5	0.31	2.0E+03	25

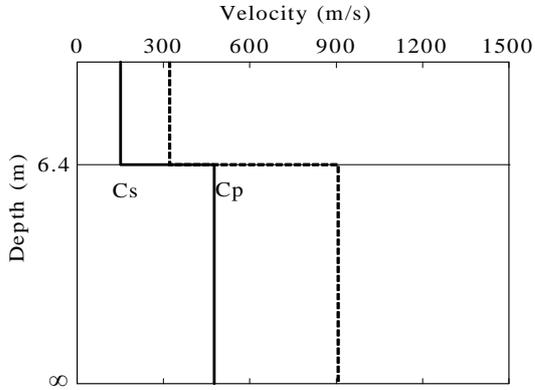


図 - 6 初期地盤モデル

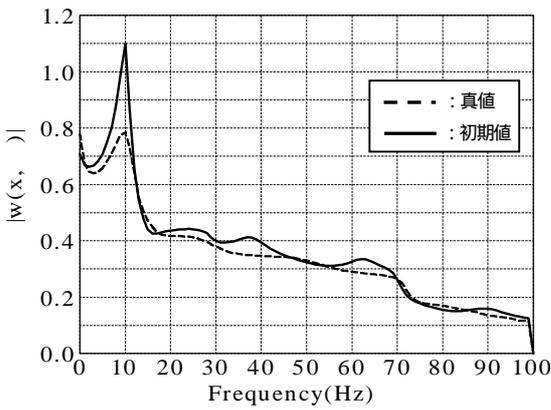


図 - 7 真値と初期値の伝達関数の比較

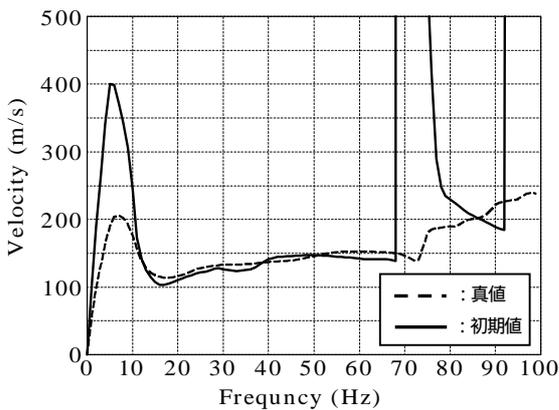


図 - 8 真値と初期値の位相速度の比較

表 - 1と図 - 5に示す真値の地盤モデルと比較すると、表 - 2と図 - 6の初期地盤モデルは、層厚および、半無限地盤と表層地盤のS波速度、ポアソン比(P波速度)が

表 - 3 推定地盤のパラメータ

H	Cp	Cs			Q
6.0	372.3	152.0	0.40	1.8E+03	25
	632.8	304.0	0.35	2.0E+03	25

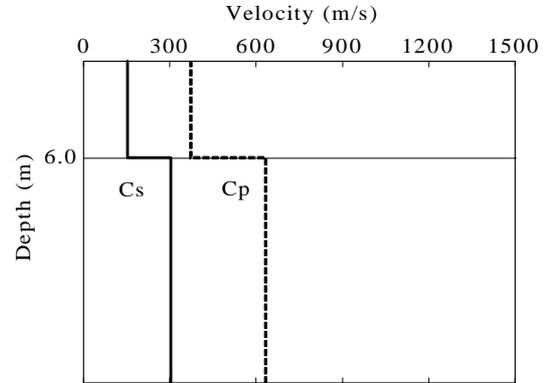


図-9 推定地盤モデル

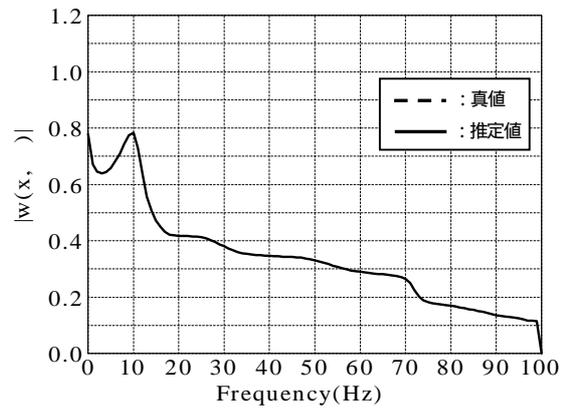


図-10 真値と推定値の伝達関数の比較

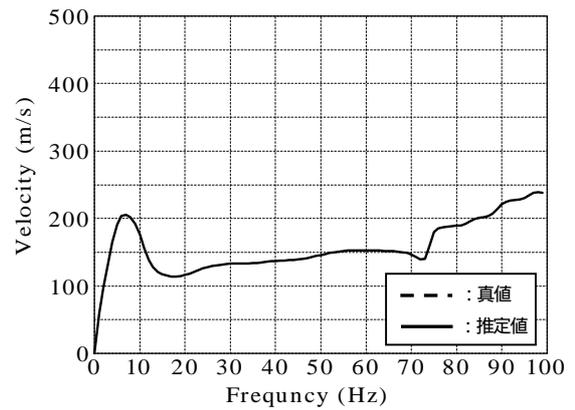


図-11 真値と推定値の位相速度の比較

違っていることがわかる。ただし、図 - 7と図 - 8の実線で示すように、この初期地盤の伝達関数と位相速度は点線で示す真値の地盤の伝達関数と位相速度とは大

大きく異なっているものの、両者の地盤の卓越振動数はほぼ等しい。また、手順(1)に従って地表面近傍地盤のS波速度を真値の位相速度の60(Hz)の値から150(m/s)と決めており、この値は真値の地盤モデルにおける表層のS波速度152(m/s)とほぼ同じ値である。なお、図-7と図-8の伝達関数と位相速度は、鉛直方向の調和振動の荷重点近傍(1(m)離れた地点)の1地点の鉛直方向変位の伝達関数と位相速度の振動数特性をプロットしたものである。

次に、2章(3)の手順(4)に従って、位相速度の振動数特性のみの誤差が十分に小さくなるように初期地盤モデルを改良した。その結果、最終的に推定された地盤モデルを表-3と図-9に、また、推定された地盤の伝達関数と位相速度を図-10と図-11に示すが、これらは真値の地盤モデルとまったく同じものであることがわかる。

この計算では、10回の繰り返しによって収束値が得られ、鉛直方向の調和振動の荷重点近傍の1地点の鉛直方向変位の位相速度の振動数特性と地盤の卓越振動数の情報のみから地盤構造とその物性値が精度良く推定できることが確認できた。

4. 3層の水平成層地盤の試算例

ここでは、3層の水平成層地盤の試算例を示す。表-4と図-12に使用した真値の地盤モデルとその地盤物性値を示す。表-5と図-13には、2章(3)の手順(2)によって抽出された、真値の地盤の卓越振動数とほぼ等しい地盤モデルとその地盤物性値を示す(初期地盤)。

3章で説明した単層の場合と同じように、3層の場合においても、表-4と図-12に示す真値の地盤モデルと比較すると、表-5と図-13の初期地盤モデルの層厚および、半無限地盤と表層地盤のS波速度、ポアソン比(P波速度)は、かなり違っている。

ただし、図-14と図-15に実線で示されているように、この初期地盤の伝達関数と位相速度は点線で示す真値の地盤の伝達関数と位相速度とは大きく異なっている。しかし、両者の地盤の卓越振動数はほぼ等しい。また、手順(1)に従って地表面近傍地盤のS波速度を真値の位相速度の75(Hz)の値から180(m/s)と決めており、この値は真値地盤の表層のS波速度と同じ値となっている。

次に、上記のような初期地盤を基に、2章(3)の手順(4)に従って、位相速度の振動数特性のみの誤差が十分に小さくなるように初期地盤モデルを改良した。

最終的に推定された地盤モデルを表-6と図-16に示す。また、推定された地盤の伝達関数と位相速度を図-17と図-18に示す。これらの推定では、比較的少ない12

表-4 真値地盤のパラメータ

H	Cp	Cs			Q
2.5	484.7	180.0	0.42	1.8E+03	25
4.0	588.7	250.0	0.39	1.8E+03	25
3.5	748.5	340.0	0.37	1.8E+03	25
	898.0	480.0	0.30	2.0E+03	50

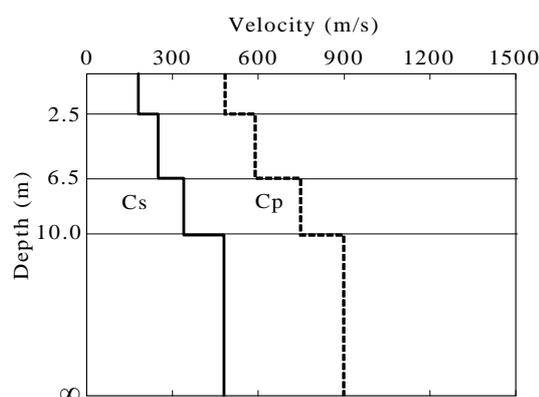


図-12 真値地盤モデル

表-5 初期地盤のパラメータ

H	Cp	Cs			Q
1.6	357.3	180.0	0.33	1.8E+03	25
5.0	414.3	188.2	0.37	1.8E+03	25
2.5	780.8	393.3	0.33	1.8E+03	25
	1367.5	580.7	0.39	2.0E+03	50

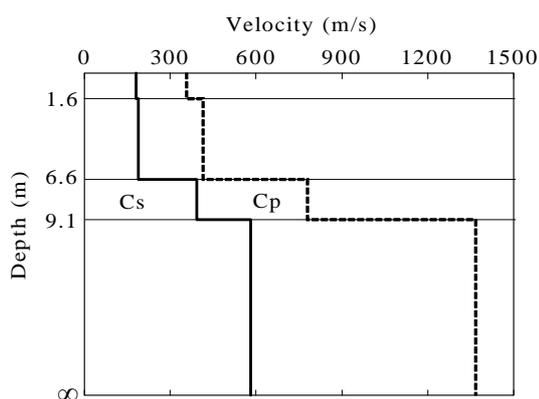


図-13 初期地盤モデル

回の繰り返し計算によって最終的な推定地盤モデルを得ることができた。

単層の場合と同様に、3層の水平成層地盤においても、

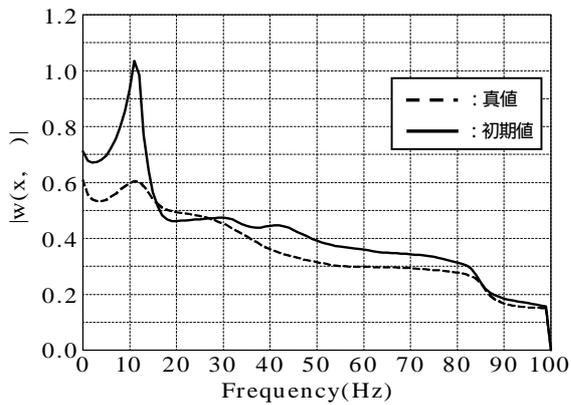


図 - 14 真値と初期値の伝達関数の比較

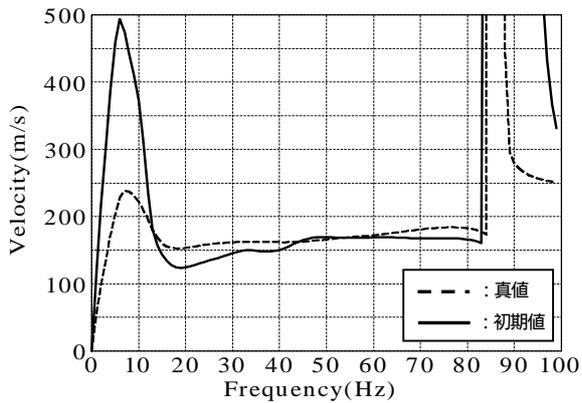


図 - 15 真値と初期値の位相速度の比較

表 - 4と図 - 12に示す真値の地盤モデルと、表 - 6と図 - 16に示す推定地盤モデルを比較すると、各層の層厚、S波速度、P波速度では、小数点以下1桁、ポアソン比では、小数点以下2桁までの精度で完全に真値の地盤モデルが推定できることが確認できる。

5. まとめと課題

本論文では、地表面に鉛直方向の調和振動荷重を作用させたときに地表面の2地点間で観測される位相速度の振動数依存性と地盤の卓越振動数のみの情報から、調和振動荷重点近傍の直下の地盤構造と地盤物性値を推定する方法を確立することを目的に、推定方法の手順を整理した。この方法の実地盤における計測データによる適用性の検討を行なう前段階として、半無限弾性地盤上における1層と3層の水平成層地盤の2つのケースを想定した数値実験により本推定方法の妥当性を調べた。得られた成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 地表面に鉛直方向の調和振動荷重を作用させて、その近傍(試算例では1m)の2地点間で計測される

表 - 6 推定地盤のパラメータ

H	Cp	Cs			Q
2.5	484.7	180.0	0.42	1.8E+03	25
4.0	588.7	250.0	0.39	1.8E+03	25
3.5	748.5	340.0	0.37	1.8E+03	25
	898.0	480.0	0.30	2.0E+03	50

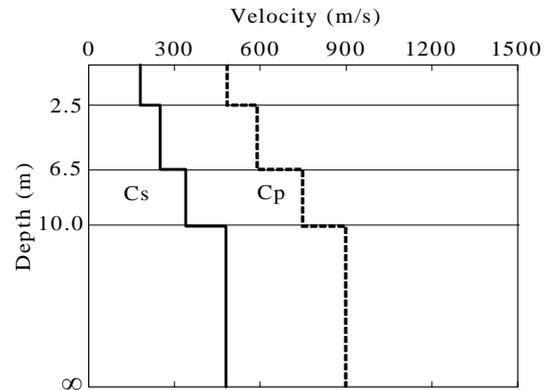


図 - 16 推定地盤モデル

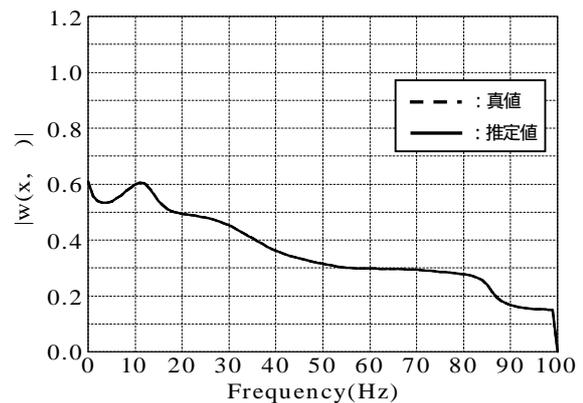


図 - 17 真値と推定値の伝達関数の比較

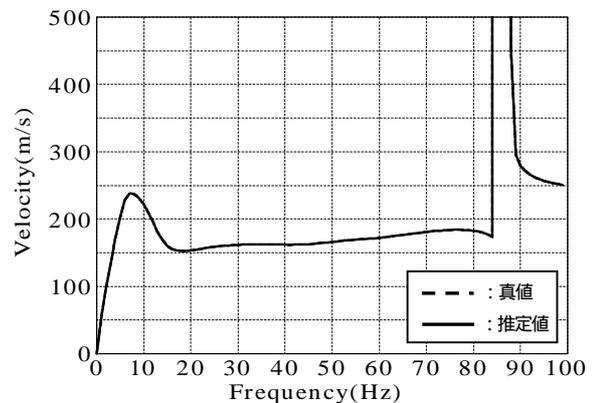


図 - 18 真値と推定値の位相速度の比較

位相速度の振動数依存特性と、地盤の卓越振動数のみの情報から、調和振動荷重点近傍の直下の地

- 盤構造と地盤物性値を推定する方法の手順を提案した。
- (2) この手順に従って、半無限弾性地盤上における1層と3層の水平成層地盤の2つのケースを想定した数値実験により本提案の方法の妥当性を示した。本論文で提案した推定方法の手順に従うと、各層の層厚、S波速度、P波速度では小数点以下1桁、ポアソン比では小数点以下2桁までの精度で完全に真値の地盤モデルが推定できていることが確認できた。

今後は、水平成層地盤における層数を例えば10層程度に仮定して、手順(1)に述べたような一様乱数を用いた適当な地盤モデルを設定し、本論文の推定方法の手順から、1層地盤や3層地盤などの層数の少ない地盤モデルが推定できるという試算例を示す予定である。このような基礎的な数値実験の試算例を蓄積しながら、実地盤での計測データへの適用性の検討を行なう予定である。

参考文献

- 1) 物理探査学会編，物理探査ハンドブック，第1章 - 第4章，物理探査学会，1998年
- 2) Fry, Z. B., A procedure for determining elastic moduli of soils by field vibratory technique, *U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station, Miscellaneous Paper 4*, 1963.
- 3) Heisey J.S., Stokoe II K.H., Hudson W.R., Meyer A.H. Determination of in situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves, Research Report No. 256-2, *Center for Transportation Research, The University of Texas*, 1982.
- 4) Nazarian S., Stokoe II K.H., In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves, *Proc. of the 8th Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Vol. 3, pp.38-45, 1984.
- 5) 原田隆典，王宏沢，斉藤将司，山下典彦，森源次，調和振動荷重による P-SV 波の地盤振動・波動伝播特性，*応用力学論文集*，Vol.8, pp.685-692, 2005.
- 6) 原田隆典，王宏沢，剛性マトリックスによる水平成層地盤の波動解析，*地震*，第57巻，pp. 387-392，2005.
- 7) 原田隆典，大角恒雄，奥倉英世，3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用，*土木学会論文集*，No. 612/I-46, pp. 99-108, 1999.
- 8) 中川徹，小柳義夫，最小二乗法による実験データ解析，*東京大学出版会*，1982。

(2007年4月6日 受付)

A METHOD OF ESTIMATION OF ELASTIC PROPERTIES OF LAYERED SOILS USING P-SV WAVES BY HARMONIC POINT LOAD ON GROUND SURFACE

Shouji SAITOH, Takanori HARADA, Genji MORI, Hongze WANG,
and Norihiko YAMASHITA

This paper presents a method of estimating the elastic properties of the soils and their variation with depth using the characteristics of P-SV wave propagation in layered media and their dynamic response due to the vertical harmonic point load applied on the soil surface. To demonstrate the capability of the presented method, the two numerical examples are presented, for the estimation of the S wave velocity, P wave velocity and thickness of each soil layer using a single layered medium and the three-layered media overlying on a half space medium. In the numerical examples, a stiffness matrix method for accurately calculating wave field is used.