

地表面の鉛直方向調和振動荷重による地盤の層厚・弾性定数の推定方法と その数値実験による検証

A Method of Estimation of Subsurface Ground Structure and Elastic Soil Properties
Using Vertical Harmonic Loading on Ground Surface and Its Numerical Verification

齊藤 将司*・原田 隆典**・王 宏沢***・森 源次****・山下 典彦*****
Shouji Saitoh, Takanori Harada, Hongze Wang, Genji Mori, and Norihiko Yamashita

*工修 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)

** 工博 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)

***博士(工) (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)

****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)

*****工博 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)

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 fields caused in the surface of an elastic multi-layered half space by the vertical harmonic point load applied also on the soil surface. To demonstrate the capability of the proposed method, the two numerical examples are presented, for the estimation of S wave velocity, P wave velocity and thickness of each soil layer, using a three-layered half space and a five-layered half space. In the numerical examples, the stiffness matrix method is used for an accurate simulation of all P-SV wave fields.

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

1. まえがき

地表面下の地盤構造やその弾性定数は、最も基礎的な地盤情報として、土木・建築分野の基礎・構造物の設計や耐震設計、あるいは地震対策において使われる。これらの地盤情報は、ボーリング孔からの土のサンプリング試験やP-S 検層等の結果に、地質学・土質工学的知見を組み合わせ評価されている。しかし一方で、従来のボーリング調査による地盤情報の取得方法には、コストがかかるという欠点があるため、安価でかつ精度の高い地下探査技術の開発が望まれ、数多くの方法が開発され、また、実際に利用されてきている¹⁾。

これらの探査技術の中で、地表面上に動的荷重(調和振動荷重または衝撃荷重)を作用させて弾性波の伝播特性を観察し、これらの伝播特性から地下の地盤構造や土の弾性定数を推定しようとする弾性波探査法^{2,3,4)}は、原理的には古い。最近では、複雑な地盤内での弾性波の伝播に関する新しい計算技術の発展とともに波動場の特性に関する詳細な解析^{5,6,7)}、さらにこれらに現地地盤での新しい計測技術を取り入れることにより、例えば、表面波スペクトル探査法(SASW)は実用段階にある。しかし、既往の弾性波探査法における推定精度の改良と更なる

低コスト化を目指した新たな研究開発も必要であろう。

著者ら⁸⁾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。この研究から、従来のレイリー波の分散曲線に基づく地盤構造の推定方法においては、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、この観測ノイズを減らすために加振力や観測波形の数を増大させなければならぬことや、精度を上げるために観測点数の増加が必要なことなど、簡便で高精度な地盤構造の推定に関して、未だ多くの課題が残されていることがわかった。

本論文では、著者らの論文⁸⁾で得られている、地表面上の鉛直方向調和振動荷重によって発生する荷重点近傍の地表面の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を利用して、荷重点近傍直下の表層地盤構造と地盤物性値を推定する方法を提案する。この方法の最大の利点は、荷重点近傍の地表面の2地点間で観測される位相速度と地盤振動特性を利用するために、従来の方法の有する、加振力の増大、観測ノ

イズ、観測点数の増加等の弱点が克服できる点にある。

この方法を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、半無限弾性体地盤上にのる3層と5層の水平成層地盤を想定した2つの地盤モデルによる数値実験により、本推定方法の妥当性や精度について調べるものとする。位相速度等の数値計算には、原田ら^{9, 10)}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・地盤物性値の推定方法とその手順

2.1 波動場の数値計算法の概要

本論文で用いる数値計算法の詳しい内容や検証は、論文^{9, 10)}に記述されているが、ここでは、後で述べる地盤構造と地盤物性値の推定方法とその手順を説明するために必要な計算法の概要を記述する。

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上に横たわる n 層の水平成層地盤(簡単のため3層とする)の地表面上に鉛直方向の外力が作用するときの2次元直交座標系 $(x-z)$ における定式化の概要を示す。

深さ z 、水平距離 x の点の時刻 t における地盤の変位は、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。

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

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。

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

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

ここに、 $\mathbf{u}(z) = \mathbf{u}(\kappa, z, \omega)$ と簡略化して表現している。

$K_{ij}^{(n)}$ と 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、 $q(z_n)$ は、深さ z_n の層境界に作用する単位面積当たりの外力ベクトルを表す。

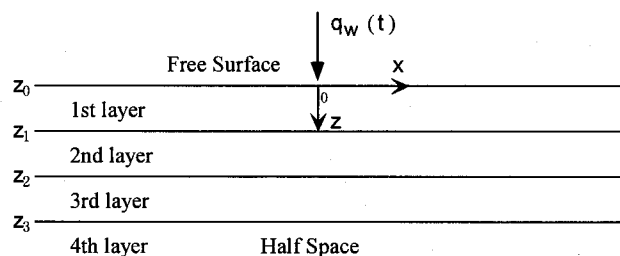


図-1 P-SV波問題における半無限地盤上に横たわる3層の水平成層地盤モデルとその地表面上の鉛直荷重とその記号

本論文では、地表面上の1地点に鉛直方向に調和振動荷重が作用する場合を想定し、図-1に示すように地表面上に座標の原点をとり、ここに調和振動外力が作用するものとする。この場合には、外力項は次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} q(z_1) &= q(z_2) = q(z_3) = 0 \\ q(z_0) &= \begin{pmatrix} 0, i q_0 \delta(\omega - \omega_0) \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 ω_0 は調和振動荷重の振動数を、 i は虚数単位を、 q_0 は地表面の単位面積当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、式(2)の連立1次方程式の解として求められる変位の振動数-波数スペクトル $\mathbf{u}(z_0 = 0) = \mathbf{u}(\kappa, \omega)$ を波数に関してフーリエ積分することで求められる地表面変位のフーリエスペクトル $\mathbf{u}(x, \omega)$ に、調和振動荷重をかきすることにより、次式のように求められる。

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

本論文の数値計算では、地表面上に鉛直方向のみに外力 q_w を作用させているため、以下では主に、鉛直方向の地表面変位 $w(x, t)$ のみを対象に説明する。

式(4)から求められる鉛直方向の地表面変位のフーリエスペ

クトル $w(x, \omega)$ 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。

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

ここに、 $|w(x, \omega)|$ ($\text{m}/(\text{N}/\text{m}^2)$)は単位加振力(応力)当たりの鉛直変位振幅特性である。

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、

$$\omega t - \theta(x, \omega) = \text{一定値} \quad (7)$$

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のようにになる。

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

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。

なお、式(9)からわかるように、位相速度は位相角の場所 x に関する微分で与えられるため、2地点間距離 Δx の選定に関して注意が必要である。本論文の試算例では、2地点間距離 Δx として1(m)を利用している。なお、後で示す試算例(振動数1(Hz)間隔で1~99(Hz)までの計算結果)で得られる図-4、8、11、15、18に示す位相速度が大きく変化している振動数付近では、図-3、7、10、14、17に示す単位加振力(応力)当たりの地表面鉛直変位振幅の振動数特性(以後、鉛直変位振幅特性と呼ぶ)

Z0	H=2.0m	Cs=80.0m/s	Cp=294.0m/s	$\rho=1800\text{kg/m}^3$	Q=25
Z1					
Z2	H=4.0m	Cs=120.0m/s	Cp=857.0m/s	$\rho=1800\text{kg/m}^3$	Q=25
Z3	H=8.0m	Cs=180.0m/s	Cp=1285.5m/s	$\rho=1800\text{kg/m}^3$	Q=25
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

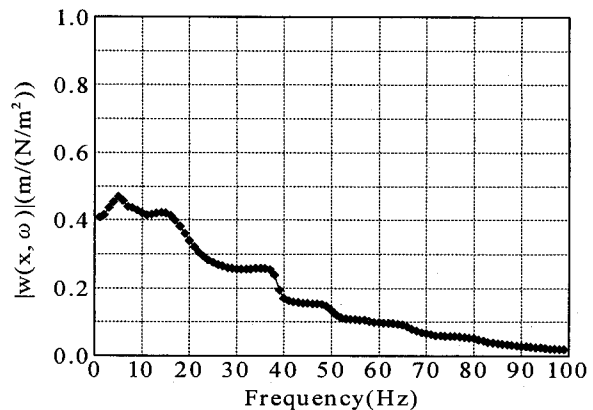


図-3 計算された鉛直変位振幅特性 (1(m)地点)

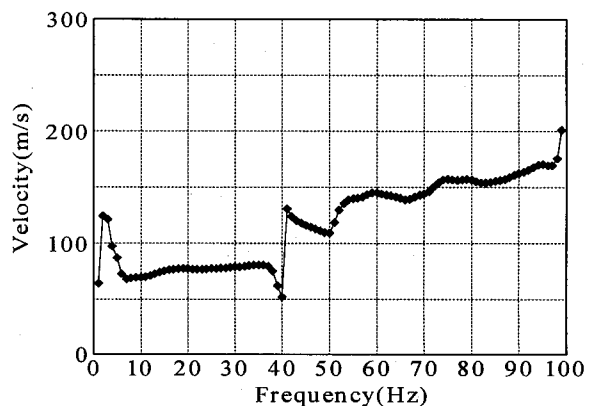


図-4 計算された位相速度 (1(m)地点)

が大きく変化している。このような位相速度と鉛直変位振幅特性の関係に関する物理的意味について十分に説明できるまでには至っていないが、位相速度が大きく変化している振動数付近では、位相の異なる波が重なっているものと思われる。

2.2 位相速度と地表面近傍地盤の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)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変位振幅特性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)離れた地点の鉛直変位振幅と位相速度を振動数毎にプロットしたものである。

図-3に示すように鉛直変位振幅特性のピーク値を与える振動数を本論文では地盤の卓越振動数と呼ぶこととする。図-3より地盤の卓越振動数が $5(\text{Hz})$ 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 $3(\text{Hz})$ において、図-4に示すように位相速度にピークが現れている。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 $41(\text{Hz})$ 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 $38(\text{Hz})$ までの比較的一定な位相速度の値は、最大で約 $80(\text{m/s})$ 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($80(\text{m/s})$)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、地表面近傍の地盤の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⁹⁾や斎藤の論文¹⁰⁾から予測されるものであるが、理論的に明解・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の地盤の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。

2.3 地盤構造と地盤物性値の推定方法

以上のような鉛直変位振幅と位相速度の振動数特性や地表面近傍の地盤の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、この地盤の鉛直変位振幅特性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、1~3(m))の2地点間の位相速度と鉛直変位振幅特性を測定できるものと仮定する。したがって、この測定される位相速度と鉛直変位振幅特性が、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鉛直変位振幅特性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、半無限地盤と n 層の水平成層地盤の密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、S波速度 $C_s(\text{m/s})$ 、P波速度 $C_p(\text{m/s})$ もしくはポアソン比、材料減衰定数 Q と各層の層厚 H である。本論文で示す試算例では、密度と材料減衰定数を推定すべき変数とせず、真値として固定した結果を示す。

推定方法の手順を示すと、以下のようになる。

- (1) 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、地表面近傍の地盤のS波速度に等しいので(2.2節参照)、この値を参照して初期地盤の地表面近傍の地盤のS波速度を与える。
- (2) これらの初期地盤において、地表面の鉛直変位振幅特性を計算し、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。補足的に鉛直変位振幅特性も計算する。
- (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の地盤での位相速度の振動数特性に関する誤差が十分に小さくなるように最小2乗法に基づいて初期地盤の層厚と物性値(S波速度、P波速度)を改良する。

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²⁾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うものとした。

3. 水平成層地盤の試算例(3層の場合)

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3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-1 真値地盤のパラメータ

H (m)	C_p (m/s)	C_s (m/s)	ν	ρ (kg/m^3)	Q
2.5	484.7	180.0	0.42	1800.0	25
4.0	588.7	250.0	0.39	1800.0	25
3.5	748.5	340.0	0.37	1800.0	25
∞	898.0	480.0	0.30	2000.0	50

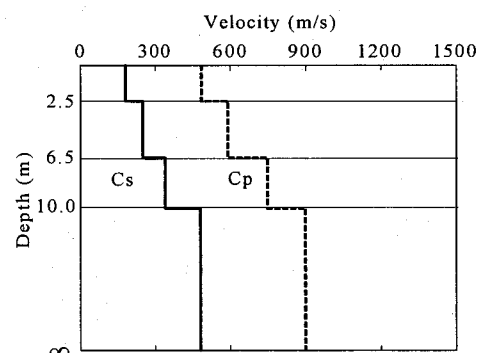


図-5 真値地盤モデル

表-2 初期値地盤のパラメータ

H (m)	Cp (m/s)	Cs (m/s)	ν	ρ (kg/m ³)	Q
1.6	357.3	180.0	0.33	1800.0	25
5.0	414.3	188.2	0.37	1800.0	25
2.5	780.8	393.3	0.33	1800.0	25
∞	1367.5	580.7	0.39	2000.0	50

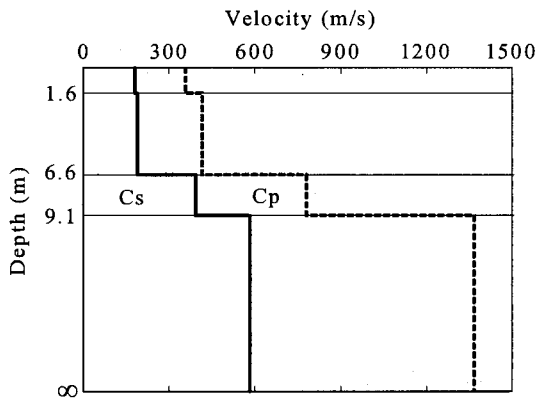


図-6 初期値地盤モデル

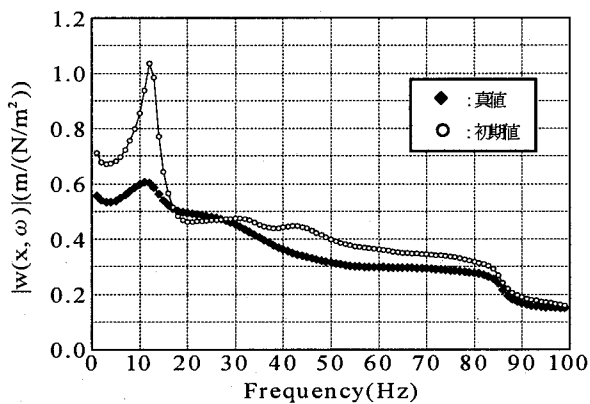


図-7 真値と初期値の鉛直変位振動数特性の比較

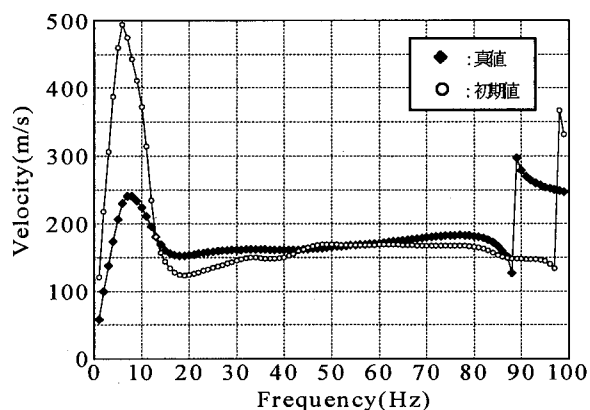


図-8 真値と初期値の位相速度の比較

表-3 推定値地盤のパラメータ

H (m)	Cp (m/s)	Cs (m/s)	ν	ρ (kg/m ³)	Q
2.5	484.7	180.0	0.42	1800.0	25
4.0	588.7	250.0	0.39	1800.0	25
3.5	748.5	340.0	0.37	1800.0	25
∞	898.0	480.0	0.30	2000.0	50

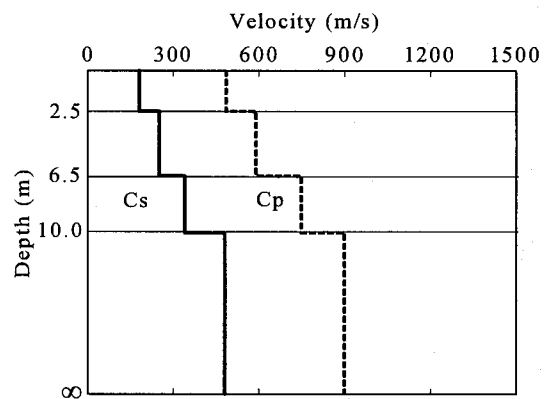


図-9 推定値地盤モデル

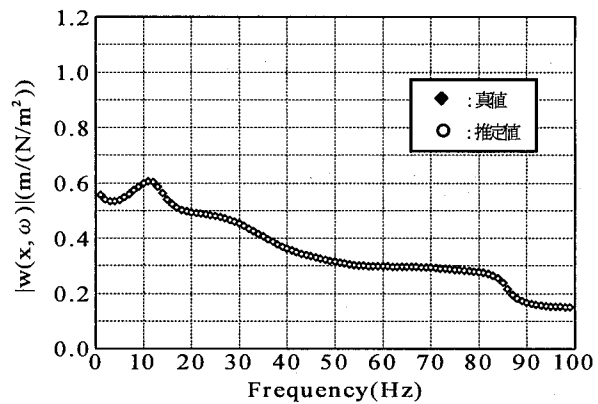


図-10 真値と推定値の鉛直変位振動数特性の比較

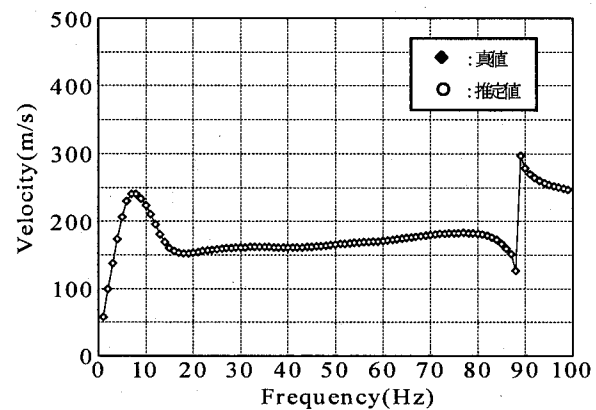


図-11 真値と推定値の位相速度の比較

表-2と図-6は、2.3節の手順(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を示す(初期地盤)。

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、かなり違うことがわかる。

また、図-7と図-8に白丸印で示されているように、この初

初期地盤の鉛直変位振幅特性と位相速度は、黒四角印で示す真値地盤の鉛直変位振幅特性と位相速度とは大きく違っている。しかし、両者の地盤の卓越振動数は、2.3節の手順(2)のように卓越振動数の等しい地盤モデルを抽出しているので、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波速度とほぼ同じ値となっている。

次に、上記のような初期地盤を基に、2.3節の手順(4)に従って、振動数毎における真値地盤と推定地盤の位相速度の差の2乗和誤差 ε (振動数1(Hz)毎の1~80(Hz) までの2乗和誤差) が最小に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-3と図-9に示す。また、推定された地盤の鉛直変位振幅特性と位相速度を図-10と図-11に示す。この推定では、初期地盤での2乗和誤差 $\varepsilon = 2.45 \times 10^5 \text{ ((m/s)}^2)$ が12回の繰り返し計算によって、最終的な推定地盤モデルでは、 $\varepsilon = 3.19 \times 10^{-14} \text{ ((m/s)}^2)$ とほぼ零となっている。

表-1と図-5に示す真値の地盤モデルと、表-3と図-9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地盤モデルが推定できることが確認できる。

4. 水平成層地盤の試算例(5層の場合)

5層の水平成層地盤の試算例を示す。表-4と図-12に使用した真値地盤モデルと地盤物性値を示す。表-5と図-13には、2.3節の手順(2)によって抽出された、真値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3層の場合と同じように、5層の場合においても、表-4と図-12に示す真値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。

また、図-14と図-15に白丸印で示されているように、この初期地盤の鉛直変位振幅特性と位相速度は黒四角印で示す真値地盤の鉛直変位振幅特性と位相速度とは大きく違っている。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65(Hz)の値から150(m/s)と決めており、この値は真値地盤の表層のS波速度とほぼ同じ値となっている。

次に、3層の場合と同様に、上記のような初期地盤を基に、2.3節の手順(4)に従って、位相速度の振動数特性の2乗和誤差 ε (振動数1(Hz)毎の1~65(Hz) までの2乗和誤差) が最小に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、推定地盤の鉛直変位振幅特性と位相速度を図-17と図-18に示す。この推定では、初期地盤での $\varepsilon = 2.39 \times 10^4 \text{ ((m/s)}^2)$ が22回の繰り返し計算によって、最終的な推定地盤モデルでは、

表-4 真値地盤のパラメータ

H (m)	Cp (m/s)	Cs (m/s)	ν	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Q
2.0	497.5	150.0	0.45	1700.0	25
2.5	473.7	185.0	0.41	1800.0	25
5.0	522.8	230.0	0.38	1700.0	25
4.0	705.6	330.0	0.36	1800.0	25
3.5	832.7	400.0	0.35	2000.0	25
∞	935.4	500.0	0.30	2200.0	50

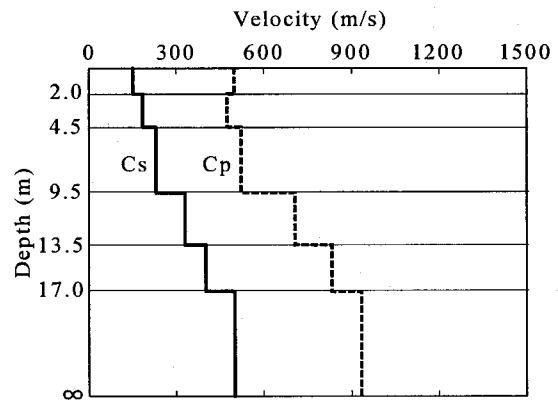


図-12 真値地盤モデル

表-5 初期推定地盤のパラメータ

H (m)	Cp (m/s)	Cs (m/s)	ν	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Q
2.5	367.4	150.0	0.40	1700.0	25
3.0	471.0	200.0	0.39	1800.0	25
4.5	624.5	300.0	0.35	1700.0	25
4.8	738.6	380.0	0.32	1800.0	25
4.0	841.9	450.0	0.30	2000.0	25
∞	1122.5	600.0	0.30	2200.0	50

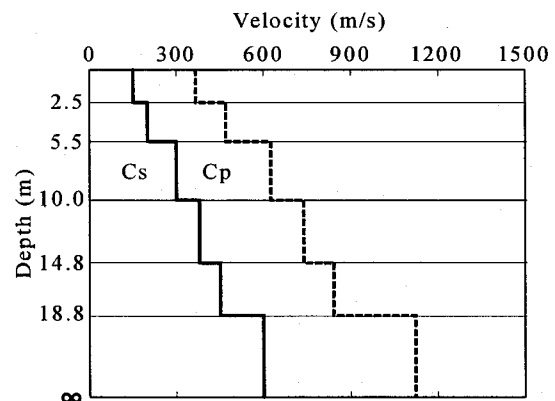


図-13 初期推定地盤モデル

$\varepsilon = 5.37 \times 10^{-13} \text{ ((m/s)}^2)$ とほぼ零となっている。

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、各層の層厚では、小数点以

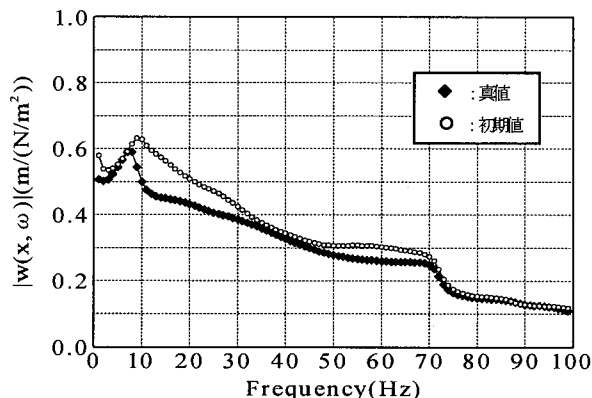


図-14 真値と初期値の鉛直変位振幅特性の比較

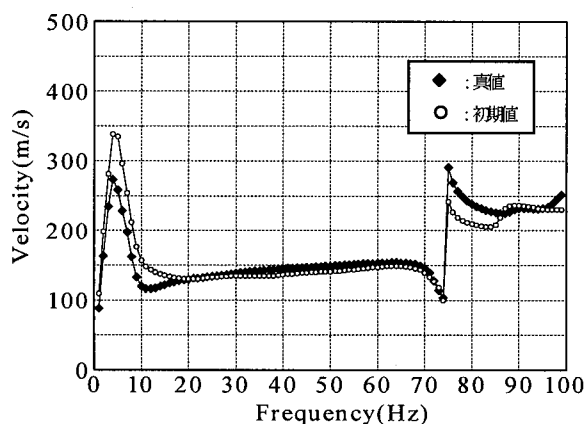


図-15 真値と初期値の位相速度の比較

下1桁, ポアソン比では, 小数点以下2桁の精度で真値の地盤モデルが推定されている. S波速度においても, 小数点以下1桁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, 推定方法の手順を提案した. この方法を実地盤における計測データに適用する前段階として, 半無限弾性地盤上にのる3層と5層の2つの水平成層地盤モデルを想定し, 数値実験により本推定方法の適用性と妥当性を調べた. 得られた成果をまとめると, 以下ようになる.

- (1) 地表面上の1地点に鉛直方向の調和振動荷重を作用させて, その近傍 (例えば1~3(m)) の2地点間で計測される位相速度の振動数依存特性と, 地盤の卓越振動数 (鉛直地盤変位振幅特性のピーク値の振動数) のみの情報から, 調和振動荷重点近傍の直下の地盤構造 (層厚) と地盤の弾性定数

表-6 推定値地盤のパラメータ

H (m)	Cp (m/s)	Cs (m/s)	ν	ρ (kg/m ³)	Q
2.0	497.5	150.0	0.45	1700.0	25
2.5	473.7	185.0	0.41	1800.0	25
5.0	522.8	230.0	0.38	1700.0	25
4.0	705.6	330.0	0.36	1800.0	25
3.5	832.7	400.0	0.35	2000.0	25
∞	935.4	500.0	0.30	2200.0	50

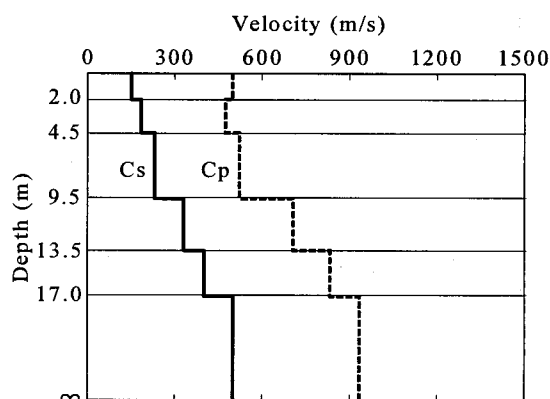


図-16 推定値地盤モデル

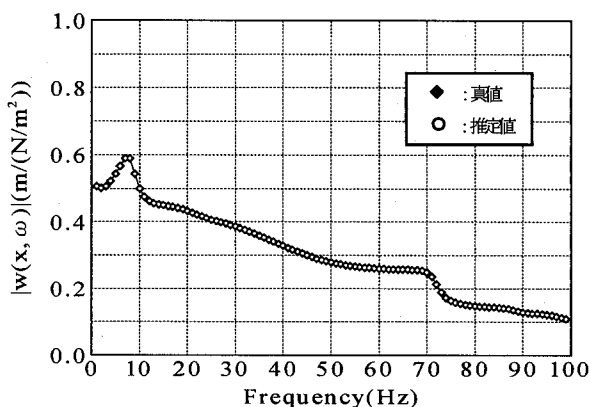


図-17 真値と推定値の鉛直変位振幅特性の比較

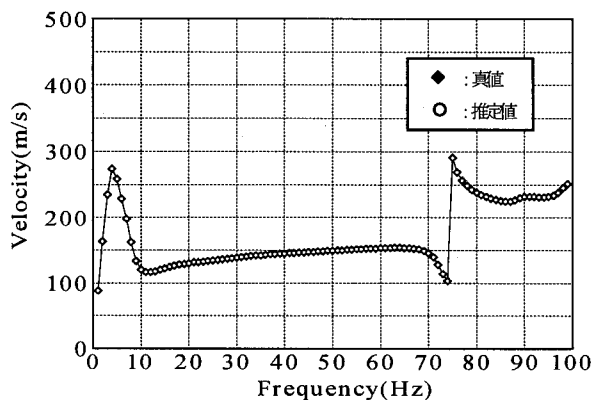


図-18 真値と推定値の位相速度の比較

(S波速度, P波速度)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この3層と5層の2つの水平成層地盤モデルを想定し、数値実験により、本提案の方法の妥当性を検証した。本論文で提案した推定方法の手順に従うと、繰り返し計算により、各層の層厚、S波速度、P波速度に関して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増やして(たとえば10層)、2,3の手順(1)に述べたような一様乱数を用いた適当な地盤モデル(10層の初期地盤モデル)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かに関する試算例を示す予定である。また、中間層などに軟弱な地層または、硬質な地層が存在するような地盤モデルなど多様な地盤モデルに対する試算例を示す必要がある。さらに、本論文では2次元波動場における地下構造推定方法の検討を行ったが、2次元波動場と3次元波動場における位相速度特性の違い等を検討する必要がある。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に関する検討を行う予定である。

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) 時松孝次, 田村修次, 3次元多層地盤における地表面鉛直点加振の応答変位に対するレイリー波と実体波の寄与, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.95-101, 1995.
- 6) Zywicki, D.J., Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves, Ph.D. Dissertation, The Georgia Institute of Technology, 1999.
- 7) Foinquinos, R. and Roësset, J.M., Elastic layered half-spaces subjected to dynamic surface loads, *Wave Motion in Earthquake Engineering*, Edited by Kausel, E. and Manolis, G., WIT Press, pp.142-213, 2000.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 斉藤正徳, Lambの問題に対する分岐積分の寄与, *物理探査*, 第46巻, 第5号, pp.372-380, 1993.
- 12) 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12日 受付)