

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656539

研究課題名(和文) 波形逆解析による表層地盤の不均質性の同定方法の開発

研究課題名(英文) Development of waveform inversion method for 2D shallow soil profiling

研究代表者

山中 浩明 (YAMANAKA, HIROAKI)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：00212291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：表層地盤の不均質性は、地震動の空間的な分布に影響し、局所的な地震被害を生じる。また、堤防等の土構造物においても剛性分布は安全性の評価に不可欠な情報である。本研究では、人工加振による波形から S 波速度構造の不均質性を同定する手法を差分法による波動計算とハイブリッド逆解析法に基づいて開発した。不規則境界を有した地盤モデルと堤防を模したモデルを用いて数値実験を行った。さらに、実地盤での観測データに適用し、深さ数mまでの地盤の2次元モデルを得た。以上の結果から、観測点数が少ない場合でも本手法が表層地盤の不均質性の同定手法として有効であるとわかった。

研究成果の概要(英文)：We proposed a waveform inversion to deduce a 2D S-wave velocity profile for shallow soil from P-SV wave obtained in a refraction survey. The method is based on finite difference modeling of wave propagation and hybrid heuristic algorithm. Preprocessing of vertical records is included in the method to eliminate source effects with deconvolution. The misfit function is defined as differences between calculated and observed waveforms. We conducted numerical experiments using synthetic data in two models. One model has an irregular interface and the other model has an irregular surface topography similar to embankment. The inversions of the synthetic data could reconstruct the true models well indicating a validity of the method. We applied the method to actual data at two sites in Yokohama and Tsukidate. The obtained 2D profile is similar to that from previous studies. It is concluded that the proposed method is effective to deduce a 2D inhomogeneous soil model with small number of data.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：地盤工学 地震工学 物理探査 防災 地球観測

1. 研究開始当初の背景

地盤のS波速度は、地震動評価だけでなく、地震時の盛土、斜面、堤防などの安全性の評価にも不可欠な物理量である。一般的に地盤のS波速度分布は、検層や物理探査などの手法によって推定されている。検層では、精度の高いS波速度分布が得られるが、1次元モデルであり、しかも多くの地点で調査を実施することは難しい。近年、表面波探査によって、表層地盤の2次元モデルを推定する手法が多く使われている。この手法は、地表面での鉛直加振による振動波形の表面波部分を用いて位相速度の分散曲線を求め、その1次元逆解析を密に行い、それらを繋いで2次元断面を得るものである。この手法は、地盤での増幅特性の評価、堤防の健全性評価などの実務や研究で用いられている。しかしながら、基本的に1次元成層モデルにおける表面波の基本モードの仮定、地表は平坦である仮定などがあり、適用する条件が限られる場合も多い。さらに、表面波探査では、数多くのセンサーが必要となり、簡便に探査できるわけでもない。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが試行的に開発しているSH波の波形逆解析による地盤の不均質性の推定方法(山中・山内, 2010)を鉛直加振によるP-SV波に適用し、観測時の作業がより簡便な手法に拡張し、さらに、地表面の凹凸を順計算に組み入れ、平坦でない地形への適用も可能にすることを目的としている。開発した探査手法を実地盤の不均質性の推定や堤防の横断方向の断面推定への適用可能性も検討する。

3. 研究の方法

(1) 波形逆解析プログラムの作成

本研究は、鉛直加振によるP-SV波の波形逆解析プログラムを作成した。まず、順解析に上下加振によるP-SV波による2.5次元波動場(2次元モデルでの3次元幾何減衰を持った波動場)を計算する差分法によるアルゴリズムを用いた。波動場の支配方程式の差分近似は、空間4次、時間2次の食い違い格子に基づいて行った。この順解析プログラムをハイブリッドヒューリスティック法(山中, 2007)に基づく逆解析プログラムに組み込んだ。逆解析では、時間 $t_j$ で観測された波形 $D_j^o(t_i)$ と計算波形 $D_j^c(t_i)$ の誤差の2乗和、 $E$ 、

$$E = \frac{1}{M} \sum_{j=2}^M \frac{\sum_{i=1}^N [D_j^o(t_i) - D_j^c(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [D_j^o(t_i)]^2}$$

を小さくするようにモデルパラメータを決めた。ここで、 $N$ と $M$ は、波形の時間刻み数と観測点数である。この式では、観測値によって振幅が正規化されているので、順解析では減衰の影響を考慮していない。上の式では、1加振による波形データを用いているが、両端での加振がある場合には、それぞれの誤差の2乗和を加えた

ものを逆解析での基準とした。

地盤のパラメータは、図1に示すように地盤の境界面深度の係数 $P_k$ と地層内の小ブロックのS波速度 $V_s$ とした(山中・山内, 2010)。さらに、加振源の加振波形の影響を取り除くために、参照点を設けて、そこでの観測波によって基準化する操作を前処理としてプログラムに加えた。

上記の方法を地表面に起伏がある場合への適用を可能にするために、地表面を真空として取り扱う差分近似法(Zeng et al., 2012)によって順解析部分のプログラムを改良し、本手法の適用範囲を広げた。

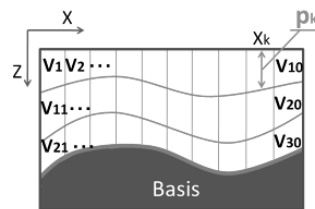


図1：地盤モデル化。境界面形状を表す係数 $P_k$ と各ブロックのS波速度 $V_s$ がパラメータ。

(2) 数値実験

表層地盤の複数のモデルに対して擬似的な観測速度波形データを数値的に作成し、上述の逆解析プログラムの性能を調べた。地盤モデルとしては、不規則境界面を有したモデル、速度逆転層を有したモデルなどを考えた。さらに、地表面に起伏があるモデルとして堤防横方向の断面を想定したモデルも数値実験で用いた。

(3) 実地盤での試行実験

不均質性が低いと考えられる地表面が平坦な地盤において加振実験を行い、作成した逆解析プログラムを用いて、地盤のS波速度の2次元モデルを同定した。同じ地点で微動観測やP-S検層なども実施されており、得られたモデルの妥当性を検討した。さらに、東北地方太平洋沖地震の際に大加速度記録が観測された宮城県築館市の強震観測点(K-NETのMYG004)付近でも加振実験を実施し、表層地盤の2次元付近不均質モデルの同定を行った。

4. 研究成果

(1) プログラムの検証結果

均質な成層構造を持つ表層地盤のモデルでの擬似観測波形データの逆解析を行った。15地点での観測データから深さ数m程度までの表層構造を問題なく推定できることを確認した。本方法では、特別な初期モデルを必要とせず、初期モデル依存性が低く、ロバスト性も高いと考えられる。しかし、2千回以上の順解析が必要であり、計算量では最小2乗法などよりも大きくなる点が特徴である。数十mの測線での100Hz程度までの周波数帯域の加振波形を対象とするのであれば、

通常の WS でも数時間の計算量であり、実用的な問題への適用には大きな問題はないと判断した。

## (2) 数値実験

数字実験で用いた表層地盤モデルの例は、図2に示すごとくである。図の上は不規則境界を有する表層地盤モデルである（以下、不規則境界モデル）。また、下は堤防の横断方向の断面を模擬した地盤モデルである（以下、堤防モデル）。なお、2つのモデルの各層のS波速度は均質であると仮定した。各モデルの\*印を加振点として速度波形を計算し、それらにランダムのノイズを加えて、疑似的な観測波形を得た。逆解析では、各境界面を表す係数とブロックのS波速度の探索範囲を与えた。ただし、最下層のS波速度には、正解値を与えた。

図2の上のモデルの擬似波形の逆解析結果は、図3に示されている。表層のS波速度も境界面もほぼ正しく再構成されている。観測波形と理論波形にはほとんど差異がないことがわかる。本研究では、乱数の初期値を変えて10回の逆解析を実施して、それらの結果の変動によって各パラメータの安定性を評価した。この逆解析での標準偏差は図3cのように十分に小さく、安定した逆解析結果であると考えられる。

図2の下の堤防のモデルでの数値実験の結果が図4に示されている。表層の低速度層の厚さとS波速度は、よく再構成されている。しかし、2層目のS波速度がやや低めになっている。観測波形と計算波形の比較も図には示されている。両者は、後続するレイリー波の部分(B)ではよく一致しているが、堤体内部を伝播するS波部分(A)には、多少の系統的な不一致が認められる。これが2層目の速度低下の原因である。図には、各パラメータの標準偏差も示されている。やはり2層目のばらつきが多少大きくなっており、相対的にこの部分についての感度は低いと考えられる。

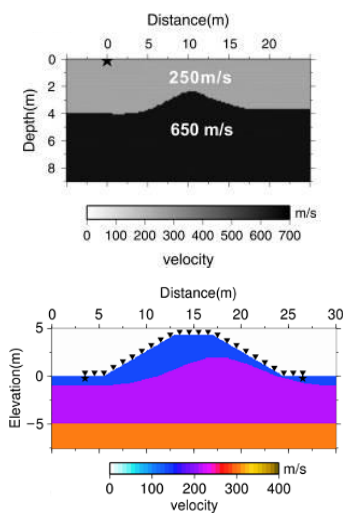


図2：数値実験での地盤モデル。上は不規則境界モデル、下は堤防モデル。図の▼は観測点、\*は加振点を示す。

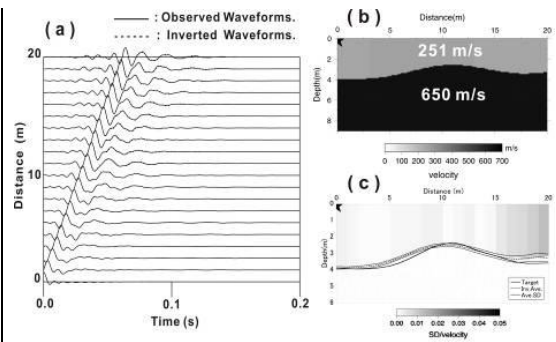


図3：不規則境界モデルの逆解析結果。左は観測と計算波形の比較、右上は逆解析モデル、右下はパラメータの標準偏差を示す。

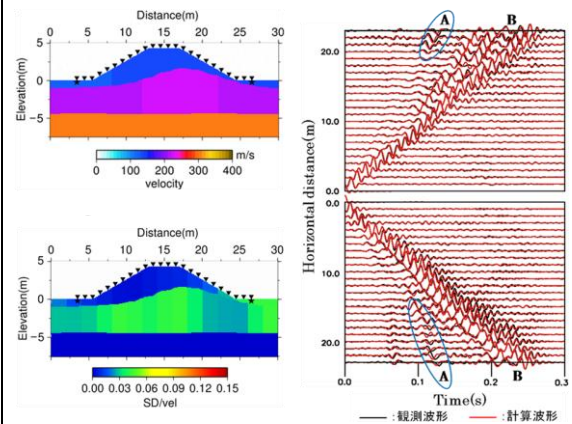


図4：堤防モデルの逆解析結果。右は観測と計算波形の比較、左上は逆解析モデル、左下はパラメータの標準偏差を示す。

## (3) 実データへの適用例1

実際の表層地盤での人工加振の観測波形データに逆解析プログラムを適用し、地下数mまでの表層地盤の不均質2次元モデルを同定した。一つ目のサイトは、横浜市北部に位置し、測線付近にボーリングによるS波検層結果がある地点である。観測地点の様子は、図5に示されている。測線の両端を加振点として、上下加振による速度波形の観測が15点で行われた。

観測波形と逆解析結果は、図6にまとめられている。第1層のS波速度は平均的にみて250m/s程度であるが、右側の数mの部分でやや速度が大きい部分がある。2層目は、測線の中心部で速度がやや大きい。地層境界面は、ほぼ平坦である。波形の一致の程度は、すべての地点で高くなっている。図5の検層の位置付近で逆解析断面から抽出した1次元モデルと検層結果が図7に比較されている。深さ1mのごく表層部分を除いて、両者はよく一致している。S波検層調査後に、ごく表層部分が舗装されている（図5）。一方、逆解析の結果にはその影響が含まれているため

に高速度になっていると考えられる。

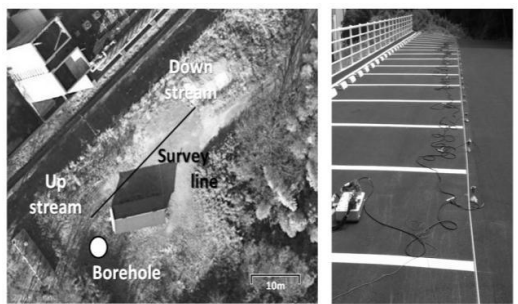


図5：観測地点（横浜市北部）

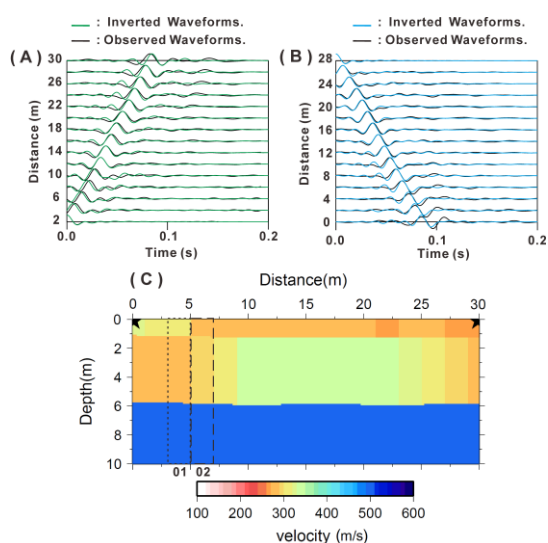


図6：横浜市北部での逆解析結果。上は観測と計算波形の比較，下は逆解析モデル。

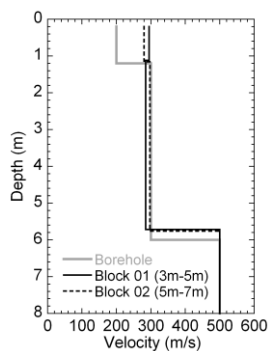


図7：逆解析結果（図6）とS波検層の比較

#### (4) 実データへの適用例2

もうひとつの実測サイトは、宮城県築館市の強震観測点（MYG004）である。この強震観測点では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に、計測震度7、最大加速度2.7Gという大振幅の記録が観測されている。しかし、この強震観測点周辺では、木造家屋の倒壊などの重大な被害がほとんど認められなかった。Yamanaka (2012) は、この強震観測点近傍では短周期地震動の空間変

動が大きい可能性を指摘している。

観測は、図1のように、MYG004近傍で20m程度の測線で実施された。測線の両端での加振による上下成分の速度波形を取得した。加振実験による波形の逆解析を実施した結果は、図9に示されている。地盤モデルでは、厚さ数mの第1層のS波速度に130~160m/sの横方向の変化があることがわかった。観測記録は、図に示すように、よく逆解析モデルによって再現されている。

測線上では、小規模な微動アレイ観測も実施されており、レイリー波の位相速度からS波速度構造を推定した。図9のT5とT7がアレイ観測点の位置に対応している。微動アレイ観測の結果と波形逆解析の結果が図10と比較されている。深さ4mまでは両者は同じであるが、最下層の深度には差異がある。本研究による方法では、波形で卓越する短周期表面波を主に用いているので、低周波数成分が小さいと、深い部分については精度が低下している可能性がある。

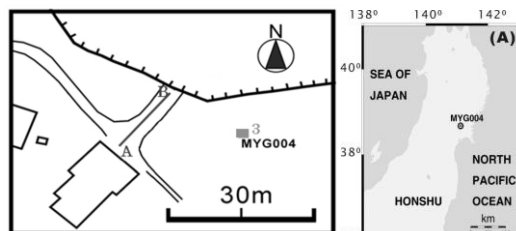


図8：K-NET 築館（MYG004）周辺での観測点位置（下）と観測の様子（上）

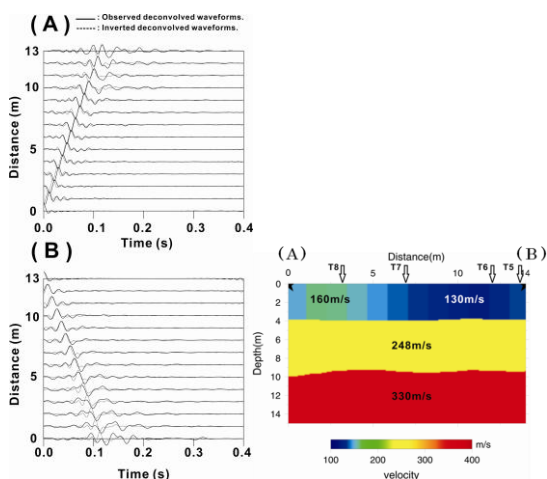


図9：MYG004での逆解析結果。左は、観測と計算波形の比較，右は逆解析モデルを示す。

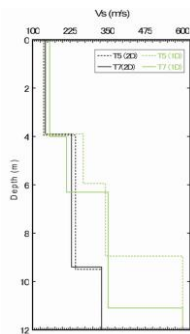


図 10 : T5 と T7 での微動アレイ観測による S 波速度構造と 2 次元波形逆解析結果の比較

#### (5) まとめ

以上のように、模擬的な観測波形データを用いた数値実験と実地盤での実測データへの適用から、本手法が表層地盤の 2 次元不均質性の同定手法として十分な可能性を有していると考えられる。さらに、プログラムの改良によって、階段状の地形を有した宅地造成地盤や河川堤防の横断断面での S 波速度分布の推定への適用可能性も高いことを示した。これは、従来の表面波探査法にはない利点であり、本手法がより広い応用範囲を有していることが分かった。さらに、本手法では、10 地点程度の観測点でも不均質な S 波速度構造の推定ができ、従来の方法に比べて観測が容易となる点が利点である。しかし、本手法では計算時間は大幅に増加する。数十 m の測線での逆解析に必要な計算時間は、現状の一般的な PC でも数時間であり、研究だけでなく、実務的にも十分に使用可能であると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hiroaki Yamanaka, Kosuke Chimoto, Seiji Tsuno, Yadab. P. Dhakal, Mohamed Amrouche, Nobuyuki Yamada, Shun'ichi Fukumoto, and Kiminobu Eto, Estimation of S-Wave Velocity Profiles and Site Amplification Around the K-NET Tsukidate Station, Miyagi Prefecture, with Reference to Large PGA During the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Japan, Journal of Disaster Research, 査読有, Vol.7, No.6, 682-692, 2012

[学会発表] (計 10 件)

- ① アムルーチュ・モハammad, 山中浩明, 地元孝輔, ヤダブ・ダカール, Ground response analysis of the two dimensional shallow at the vicinity of previous K-NET Tsukidate strong motion station MYG004, Miyagi prefecture,

Japan: An application to actual data, 物理探査学会第 130 回(平成 26 年度春季)学術講演会, 2014 年 5 月 28 日~5 月 30 日, 早稲田大学国際会議場

- ② 野上俊介, 山中浩明, 起伏を有する表層地盤での屈折法地震探査データの波形逆解析 (その 2), 物理探査学会第 130 回(平成 26 年度春季)学術講演会, 2014 年 5 月 28 日~5 月 30 日, 早稲田大学国際会議場
- ③ Mohamed Amrouche, Hiroaki Yamanaka, and Kosuke Chimoto, Two dimensional shallow soil investigations at the vicinity of the K-NET Tsukidate station in Miyagi Prefecture, 11 SEGJ International Symp, 2013 年 11 月 18~21 日, 新横浜プリンスホテル
- ④ 野上俊介, 山中浩明, 起伏を有する表層地盤での屈折法地震探査データの波形逆解析, 物理探査学会第 129 回(平成 24 年度秋季)学術講演会, 2013 年 10 月 22 日~24 日, 高知会館
- ⑤ 地元 孝輔・山中 浩明, 表層地盤改良効果の検討における物理探査手法の適用性, 物理探査学会第 128 回(平成 24 年度春季)学術講演会, 2013 年 6 月 3 日~5 日, 早稲田大学国際会議場
- ⑥ Mohamed Amrouche, Hiroaki Yamanaka, Application of wave form inversion to actual seismic refraction data for retrieving shallow 2D S-wave velocity profile, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013 年 3 月 1 日~2 日, 東京工業大学
- ⑦ アムルーチュ モハammad・山中 浩明, Two dimensional soil profiling using seismic refraction waves inversion: An application to actual data, 物理探査学会第 127 回(平成 24 年度秋季)学術講演会, 2012 年 11 月 29 日~12 月 1 日, とりぎん文化会館
- ⑧ 山中浩明, 地元孝輔, 加藤 圭, ヤダブ・ダカール, モハammad・アムルーチュ, 返町雄一, 野上俊介, 今井良治, 余震および微動観測に基づく K-NET 築館観測点周辺の地盤増幅特性の空間変動その 2. 極近傍での高密度微動観測, 日本地震工学会大会, 2012 年 11 月 8 日~11 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑨ Mohamed Amrouche, Hiroaki Yamanaka, Determination of 2D shallow S-wave velocity profile using waveform inversion of P-SV refraction data, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012 年 9 月 24 日~28 日, Lisbon, Portugal.
- ⑩ Mohamed Amrouche, Hiroaki Yamanaka, Determination of 2D shallow S-wave velocity profile using waveform inversion

of P-SV refraction data, 9th International  
Conference on Urban Earthquake Engineering  
& 4th Asian Conference on Earthquake  
Engineering, Tokyo, Japan. 2012年3月6日  
～8日, 東京工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山中 浩明 (YAMANAKA, HIROAKI)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号 : 00212291

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし