

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01324

研究課題名（和文）断層近傍の深部地盤の不整形性の同定手法の開発

研究課題名（英文）Research on inversion of irregular structure of deep sediments near fault

研究代表者

山中 浩明（Yamanaka, Hiroaki）

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：00212291

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：堆積平野端部では、地下構造が急変することが多く、その周辺では地震動の空間変動も大きくなる。この研究では、断層近傍や平野端部などでの中小地震の記録のラブ波成分から深部地盤の2次元S波速度構造モデルを同定する波形逆解析方法を開発した。提案手法では、前処理として、地震記録の水平面の粒子軌跡の主軸解析から、逆解析に用いる観測点を周期毎に選んでいる。提案手法の妥当性を数値実験で確認した後、関東平野西部の複数の測線での地震記録にも適用し、深部地盤の2次元モデルを推定した。これらの結果から、既存の3次元モデルを修正し、地震動シミュレーションによって地震動の説明能力が向上したことを明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

堆積平野の地震動は、地下のS波速度構造の影響を強く受けており、その予測には、信頼性の高いS波速度構造の情報が必要である。とくに、長周期地震動は、地震基盤に至るまでの深部地盤の影響が大きいことが知られている。本研究によって提案した方法を用いて、堆積平野の地震記録から精度の高い深部地盤モデルを推定でき、それらを超高層建物や長大橋などの長周期構造物の耐震設計のための地震動評価などで活用することができる。さらに、本手法を全国の主要な堆積平野の深部地盤構造のモデル化に適用することによって、各地域の地震被害想定や地震動予測マップなどの信頼性の向上にも寄与できると期待される。

研究成果の概要（英文）：We have proposed an inversion methods of Love wave in earthquake records to a 2D S-wave profile of deep sedimentary layers including basin edge shapes. The inversion method consists of a preprocessing of earthquake records and a waveform inversion. We applied a principle-axis analysis to horizontal motions of earthquake records to select stations at every period for the waveform inversion. We conducted numerical tests with synthetic earthquake records generated using a 3D calculation. After the validation of the method in the tests, we applied the method to actual long-period earthquake records observed in the western part of Kanto basin. The inverted 2D profiles including basin edges along several lines are used to improve an existing 3D basin model. The revised model shows a higher performance to estimate features of earthquake ground motions than the original one. The proposed method is capable to deduce a S-wave velocity model suitable for predicting earthquake ground motion.

研究分野：地震工学

キーワード：波形逆解析 堆積層 S波速度 長周期地震動 ラブ波 地震波干渉法 2次元速度構造 深部地盤

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震では、堆積平野端部にある活断層近傍の深部地盤の段差構造（不整形性的一种）による地震波の増幅的な干渉によって被害が集中した。これは、震災の帯として広く知られ、社会的関心も高くなった。その結果、地震調査研究推進本部（以下、地震本部）によって、主要な堆積平野での深部地盤構造の調査が実施され、地震探査や微動探査などの結果から深部地盤のS波速度構造モデルが明らかにされた。さらに、深部地盤の不整形性のモデル化には、反射法地震探査が有効であることがわかった。しかしながら、地震探査の適用には多額な費用が必要となり、深部地盤の調査は限られた地域でしか行われていない。一方、微動探査は、低コストな深部地盤のS波速度のモデル化手法として多くの実績が積み上げられてきた。これらの地盤情報の蓄積を踏まえて、地震本部では、日本全国を対象にした深部地盤の速度構造のモデル化を行い、それらを公開している。この3次元深部地盤構造モデルは、地震本部の地震動予測マップ作成などのように、最近の研究や実務での強震動評価で活用されており、強震動評価において非常に有益な基盤的データとなっている。しかし、この3次元モデルは、日本全国での周期数秒の長周期地震動を評価することを目的としたものであり、上述のような活断層近傍や平野端部で深部地盤が急変するような不整形性は、十分な精度で地下構造モデルに含まれていない。こうした3次元深部地盤モデルの新しい高度化には、活断層や平野端部での急変する地盤不整形性の同定方法の開発が不可欠であり、地震本部での強震動関係の委員会などにおいて活断層近傍の地盤構造のモデル化は、重要な検討課題のひとつになっている。

現在、強震動評価のためによく用いられている深部地盤のモデル化手法の多くは、1次元S波速度構造を推定するものである。最もよく用いられている微動探査も長周期表面波の位相速度を用いているので、1次元モデルの推定に限定され、段差構造などの急変する地盤の不整形性の同定には不向きである。さらに、地震記録のレシーバー関数や鉛直アレイのスペクトル比などの解析においても1次元モデルが仮定されている。地震記録から、2、3次元地盤モデルを逆解析する試みもあるが（Iwaki and Iwata, 2011; 引間・瀧澤, 2010）、長周期表面波を用いた堆積盆地の大局的な地震基盤上面の形状などの推定に限られており、断層近傍や平野端部の不整形性のモデル化へ適用した例は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、堆積平野の断層近傍や平野端部を含めて数地点での中小地震の記録から深部地盤の不整形性を同定する方法を開発する。中小地震の地震動のスペクトルや振幅の変化だけでなく、位相情報を含めた地震記録の波形形状の変化に注目する波形逆解析法を適用することによって、地下構造急変部の深部地盤の2次元S波速度構造モデルの推定を試みる。開発した同定方法を過去の被害地震の被害地域へも適用し、既存の深部地盤構造モデルの改良も試みる。さらに、改良前後の深部地盤構造モデルを用いた強震動シミュレーションを行い、計算される強震動特性の比較を行い、提案する手法による地下構造モデルの地震動評価における有効性も明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、地震記録の周期1秒以上の長周期ラブ波に着目して、その波形逆解析によって地下構造モデルを推定することを考える。地震記録を用いているために、波形逆解析の前に、いくつかの前処理を行う。十分に長い周期（例えば、周期10秒）では、ラブ波が平野端部から直線的に平野内を伝播している（伝播の2次元性）と考えられる。一方、短周期ラブ波、平野端部から離れると、地下構造の3次元的な影響で、伝播経路も直線的でなくなると考えられる。そこで、本研究では、まず、地震記録の水平面での粒子軌跡の主軸解析を行い、ラブ波が2次元伝播していると仮定できる周期範囲と波形の区間を観測点毎に推定する。周期10秒の成分との主軸のずれと楕円率の積によって粒子軌跡のトランスバース方向への卓越性を示す指標を導入し、2次元伝播を仮定できる範囲を定量的に評価する。この粒子軌跡の指標が一定値よりも小さい部分（周期と波形区間）に対して、2次元性を仮定できるとして波形逆解析に用いる地震データとして採用する。さらに、地震データの前処理として、平野端部の岩盤サイトでの地震記録を用いて平野内部の観測点での地震波形にデコンボリューション処理を周期領域で行い、震源特性を取り除いた後に、時間領域に戻すことによって、波形逆解析に適用するラブ波の観測波形を得る。

以上の前処理に基づいて、観測点毎に決めた周期と波形区間のラブ波に対して、最小2乗法に基づく波形逆解析を適用する。波形逆解析では、Aoi et al. (1993)を参考にして、不整形な境界面を有する均質な複数の地層によって、地下構造モデルを表現する。これらの境界面形状を示す基底関数の係数をラブ波の観測波形が理論波形と一致するように決定する。逆解析では、隣り合う係数がスムーズに変化するという拘束条件を導入し、計算の安定化させる。理論波形の計算には、2.5次元差分法を用いて、速度波形を計算して、観測速度波形と比較することになる。

4. 研究成果

1) 数値実験

本手法では、ラブ波伝播に2次元性を仮定して2次元地盤モデルを推定している。そこで、波形逆解析でのラブ波伝播の2次元性の仮定が地盤モデルの推定結果に及ぼす影響を数値実験で

検討した。数値実験では、関東平野の既存の3次元深部地盤モデルを用いて、3次元差分法によって、関東平野の西方で発生した中程度の規模の浅い地震を想定し、周期1秒以上の速度波形を計算した。盆地端部から平野中心部に向う直線状の地点での計算地震記録に対して本手法の前処理を行い、2次元性を仮定できるラブ波の周期と区間を選定した。具体的には、各地点では、周期10秒から1秒までの間で周期1秒ごとにバンドパスフィルター処理を行い、フィルター波形を抽出し、それらの波形の主軸解析から得られる粒子軌跡指標によって2次元性を仮定できる区間を決めた。図1に示すように、ラブ波の伝播の2次元性は、長周期では平野端部からより遠い範囲まで成立している。しかし、短周期では、2次元性が成立する範囲が短く、平野端部に限られることが明らかとなった。例えば、周期8秒と1秒のラブ波成分では、平野端部から35kmと6kmの範囲で2次元性が仮定できることがわかった。

以上の結果を踏まえて、図1に示す周期毎に観測点を変えて、計算波形のラブ波成分の波形逆解析を実施し、正解である2次元モデルを再現することができた。一方、前処理の結果を無視し、すべての周期ですべての範囲を使った波形逆解析では、正解モデルと推定モデルに乖離が生じた。これらの結果は、本研究で検討している波形逆解析方法では、2次元性の確認が非常に重要であることを明らかにした。

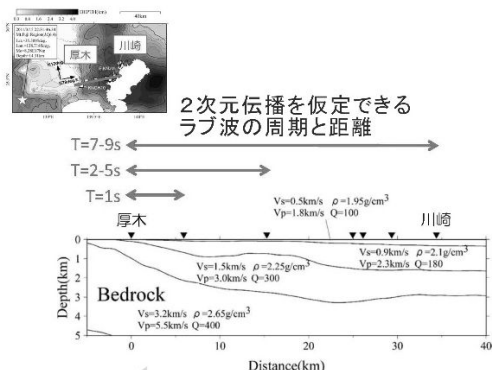


図1：波形逆解析に用いる周期と観測点を決める前処理に関する数値実験

2) 関東平野での地震記録への適用

つぎに、関東平野の西方で発生した浅い地震による、図2に示す測線1上の8地点で地震記録を選び、本手法を適用して、同測線での2次元深部地盤構造を推定することを試みた。数値計算の場合と同様にして、逆解析に用いるラブ波成分の抽出を行った。前処理の結果から、波形逆解析には、平野中心部の観測点の記録では長周期のみのラブ波を用いて、平野端部の観測点での記録では長周期だけでなく、より短周期までのラブ波を用いることとした。また、デコンボリューション処理によって震源の影響を除去した観測データ(図2に示す波形)に対して、波形逆解析法を適用し、平野端部から平野中心部までの深部地盤のS波速度構造モデル(図2の下)を同定した。その結果、地震基盤上面の深度分布だけでなく、深部地盤内部のS波速度境界面の形状も推定することができた。推定した2次元深部地盤構造モデルを既往の探査結果や最新の調査研究(地震本部、2012)による深部地盤のモデルなどと比較して、より矛盾の少ないモデルであることを示した。本研究の前処理と波形逆解析によって、地震記録のラブ波から平野端部の深部地盤の詳細なS波速度構造モデルの同定に使用できることがわかった。

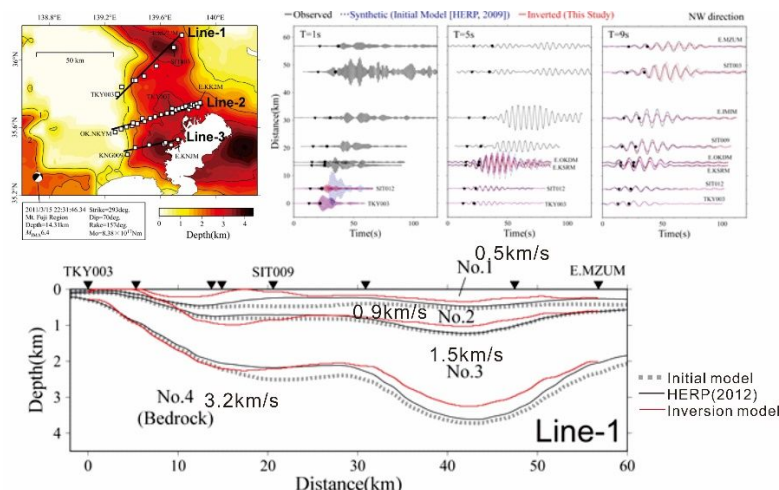


図2：関東平野での地震記録への波形逆解析の適用結果

同様に、波形逆解析法を関東平野西部の平野端部を含んだ複数の測線(図2の測線2,3)の観測点(1測線に6から20観測点)で得られている強震記録に適用し、平野端部から各方位に伸びる各測線下の深部地盤の2次元S波速度構造モデルを推定した。各測線で推定されたモデルと既存の3次元モデルと比較した結果、両者の差異が著しい測線もあることがわかった。

つぎに、各測線での波形逆解析から推定した2次元S波速度構造モデルを用いて、既存の3次元深部地盤モデルの平野端部の形状を含めた修正を行い、新しい3次元モデルを構築することを試みた。波形逆解析に用いていない深い地震を対象として、新しい深部地盤の3次元モデルを用いた地震動シミュレーションを行い、既往の3次元深部地盤モデルでの計算結果に比べて、修正モデルでは、観測された強震動のS波部分だけでなく、後続位相の特徴もよりよく説明することができた。深い地震による後続する表面波は、平野端部で生成する表面波が主体であり、平野端部の形状の影響を強く受けていることから、本手法によって地震動説明能力が高い平野端部の深部地盤のモデル化が可能であると考えられる。

3) 地震波干渉法によるラブ波への適用

本研究で提案する手法を適用するためには、1つの測線上の数点以上の観測点での地震記録が必要である。関東平野など大都市圏では、非常に多くの地震観測点が存在しているので、本手法の適用に大きな障害はないと考えられる。一方、それ以外の地域では、地震観測点の密度は高くなく、本手法の適用性が難しい場合も想定される。そこで、地震波干渉法を適用し、微動観測記録からラブ波成分を得ることを試みた。

地震波干渉法によれば、2地点での微動の長期間連続記録から、2地点の相互相関関数を求めると、それが2点間のグリーン関数(インパルス応答)に対応すると考えることができる。グリーン関数には、レイリー波やラブ波なども含まれており、一方の観測点を震源と考えれば、他方の観測点での相互相関関数からラブ波を得ることができ、地震記録を用いなくても本逆解析手法を適用できると考えられる。

本研究では、新潟県小千谷市中心部を対象として検討を行った。この地域は、小規模な堆積盆地であり、深さ数kmの堆積層が存在すると考えられている(Yamanaka et al., 2006)。さらに、2004年の中越地震の震源断層に近く、強震動特性には、表層だけでなく、深部地盤の影響を考慮する必要があると考えられる。この地域で図3に示す約5kmの測線上の7地点で微動の連続観測を4日間実施した。2点間の測線に直交する微動記録に対して、相互相関関数を求めた。相互相関関数には、分散性を有した周期0.5~2秒の成分が認められ、ラブ波であると考えられる。このラブ波に対して、本手法を適用し、図3のような小千谷市の中心部で深さ300m程度までの2次元S波速度構造モデルを推定することができた。こうした検討を複数の測線で実施することによって、3次元モデルの推定も可能になると期待される。さらに、この結果は、地震記録の少ない地域へも本手法が適用可能であることを示しており、多くの地域において本手法を適用できると期待される。

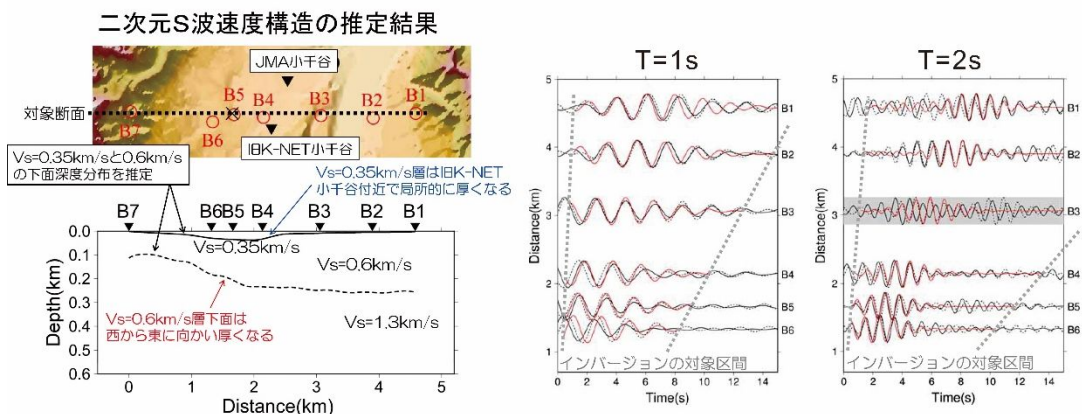


図3：小千谷市での波形逆解析の適用結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 笠松健太郎, 山中浩明
2. 発表標題 波形インバージョンによる深部地盤のS波速度構造推定結果に及ぼす2次元仮定の影響
3. 学会等名 物理探査学会第139回(平成30年度秋季)学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 地元孝輔, 笠松健太郎, 山中浩明
2. 発表標題 新潟県小千谷市における微動アレイと連続微動観測によるS波速度構造モデルの推定
3. 学会等名 物理探査学会第138回(平成30年度春季)学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笠松健太郎, 地元孝輔, 山中浩明
2. 発表標題 :地震波干渉法で得られた相互相関関数を用いた波形インバージョンによる二次元S波速度構造推定 - 新潟県小千谷市を対象とした検討 - ,
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠松健太郎, 山中浩明, 酒井慎一:
2. 発表標題 地震観測記録を用いた波形インバージョンによる関東平野の深部地盤の二次元S波速度構造推定,
3. 学会等名 日本地震工学会・大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----