

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月19日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06464

研究課題名(和文) 常時微動の測線展開アレイ観測情報の多重活用に基づく地下構造推定法の開発・応用

研究課題名(英文) Development and application of inversion procedure of subsurface structure based on multiple utilization of observed microtremor on deployed traverse array measurement

研究代表者

小嶋 啓介 (Kojima, Keisuke)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：40205381

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)：従来の、常時微動アレイ観測は正三角形や同心円上での同時観測を基本としているため、観測地点が限られることに加え機器や熟練者の配置が障害となる問題あった。本研究では、2点空間自己相関法の仮定を取り入れ、震動ピックアップ間の距離を等比数列的に配置する測線展開アレイ観測法を提案している。これにより、上記の問題を解決しながら、安定的に表面波位相速度が算出できることを確認した。さらに、Rayleigh波分散曲線とH/Vスペクトルを同時にターゲットとし、S波速度と層厚の逆解析を行う方法を提案した。本手法を若狭地域ならびに勝山盆地に適用し、対象地域の詳細で信頼性の高い地下構造を推定し公表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震被害軽減のためには、詳細で信頼性の高い地下構造モデルに基づく予測が不可欠である。しかしながら、福井県のような地方では地下構造探査情報が少なく、微地形などに基づく概略的モデルを用いた地震被害予測が行われている現状がある。本研究で提案する微動観測法は、計器配置の自由度が高く、拡張SPAC法への適用性に優れている。このため、段丘のような逆転層がある地域においても、安定的にRayleigh波位相速度が算出でき、H/Vスペクトルの情報と併せることによって、信頼性の高い地下構造モデルが算出できることを確認した。また、本手法を若狭地域や勝山市に適用し、3次元地下構造モデルを提案し、一部を公表した。

研究成果の概要(英文)：The conventional spatial SPAC method requires at least four sets of simultaneous recording on concentric circles, so instrumental and personal resources have to be provided for the observations. To avoid this problem, I proposed a deploying traverse array observation procedure based on the assumption used in the two-sites SPAC method that wave fields are spatially and temporally stationary. By evaluating various information from the array observation simultaneously, the proposed procedure can estimate reliable underground structure with higher resolution. The proposed array observations were conducted in the Wakasa region and the Katsuyama basin to know S-wave structures of shallow and deep sedimentary layers down to the Mesozoic base rock. The validity of the estimated 3D-structures from the microtremor observations were confirmed by comparing with the density structure and with the existing seismic-reflection survey results.

研究分野：地震工学

キーワード：常時微動 アレイ観測 拡張SPAC法 地下構造モデル 逆解析 若狭地域 勝山盆地

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震は、原子力発電所の安全基準の根底からの見直しと、原発立地および周辺自治体住民の安全確保に多大な課題を突きつけた。また、地殻内地震の活動度が高く、南海トラフ周辺でのプレート境界型の地震の発生が確実視されており、地域の地震被害低減は最優先事項といえる。特に、福井県若狭地方は、15基の原子炉を有し、活断層も密に分布しており、軟弱地盤も密に分布するという、地震防災上の危険度が高い地域であるが、原発周辺の活断層を除いて、住民の安全に直結する平野域の詳細な地下構造の解明は十分とはいえず、地震防災計画の基礎となる地震被害予測の信頼性は高いとはいえない。

地震応答解析に必要な地下構造の推定手法として、常時微動のアレイ観測から求めた Rayleigh 波位相速度に基づいて、S 波速度構造を逆解析によって推定しようとする一連の研究がある。申請者も、福井平野、鯖江盆地、敦賀平野などで常時微動アレイ観測を高密度で実施し、空間自己相関法 (SPAC 法) を適用して Rayleigh 波位相速度を求め、各地の地下構造モデルの推定を試みてきた。しかしながら従来の方法では、数台の微動計測器を同心円上に配置した観測を複数回実施する必要があること、表層から深部に向かって S 波速度が単調に増加する地点では、比較的安定して S 波速度構造を求めることが可能であるが、扇状地や台地などのように表層が硬質で S 波速度の逆転構造があるケースでは、Rayleigh 波位相速度が安定的に求められない場合がある。またこれらの地点では、3 成分観測による H/V スペクトルの形状が複雑で卓越周期が不明瞭となり、H/V スペクトルをターゲットする最適化計算によって S 波速度構造を求めることも難しくなる傾向にあり、地盤構造モデルの精度と信頼性を確保する際の障害となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、はじめに微動アレイ観測の機動性と適用地点を拡張するとともに、表面波位相速度の算出精度の向上を可能とする新しい微動観測方法を提案する。提案手法では、微動計測器を任意の線上に、基準点からの距離を等比数列的に配置することにより、偏りのない広い観測点間距離ごとの空間自己相関係数が収集できる。本手法で収集した情報を拡張 SPAC 法に適用することにより、段丘や扇状地のように S 波速度の逆転がある場所においても、従来法に比較して安定的に Rayleigh 波位相速度の算出が可能となる。また、同時に算出される H/V スペクトルなどの情報も最大限に活用し、観測点直下の S 波速度構造を高い信頼性と解像度で推定できる方法を提案する。多数の原子力発電所を有し、活断層も集中している若狭地方の、小浜市及び若狭町周辺や、段丘が発達する勝山盆地の地下構造を解明することを目的とし、多数の常時微動展開アレイ観測と、それを補間する単点 3 成分観測を実施する。各観測点に提案する S 波速度構造推定法を適用して、深さ方向の地盤構造を推定し、結果をデータベース化する。これに地盤統計手法を適用し、若狭地域や勝山盆地周辺の基盤岩にいたる 3 次元地盤モデルを作成する。得られたモデルを反射法弾性波探査や重力異常構造と比較し、その信頼性の検証を行う。これらの成果が地震応答解析で使用される地盤モデルの修正につながることで、地域の地震被害予測の精度が向上し、住民の安全性確保に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的のため、以下の一連の研究を実施した。

(1) 不整形地盤モデルによる遠方からのランダム加振による微動シミュレーション波形を対象とし、従来の円形アレイと提案する線状展開アレイ観測を想定し、それぞれに拡張 SPAC 法を適用し、位相速度推定の可否と精度の検証を行った。

(2) 同手法の実地盤に対する適用地点として、河川堤防ならびに谷埋め盛土造成地を選定し、常時微動の線状展開アレイならびに単点 3 成分微動観測を実施した。堤防においては複数の微動計を縦断方向に列状に並べる同時観測を複数回行うことにより、2 台の微動計間隔として 1m~100m 程度までまんべんなく設定でき、堤体および基礎地盤に起因する Rayleigh 波位相速度が算出できることを確認した。また、谷埋め盛土造成地では、谷埋め部と切土部に対応する道路上で同様の観測を行い、位相速度の算出を試みた。

(3) 堤防における単点 3 成分観測では、水平成分のフーリエスペクトルを鉛直成分で基準化して得られる H/V スペクトルから、盛土の固有周期と、基礎地盤の軟弱層および第四紀層に起因する卓越周期が判読できることを示した。盛土の固有周期は 0.1~0.2 秒程度の間に分布しており、築堤材料や施工品質を反映している可能性があることを示した。堤防の平均 S 波速度と、基礎地盤の軟弱層と第四紀層を未知数として、微動の H/V スペクトルに基づいて、それらを推定する逆解析法を定式化し、観測値に適用した。その結果、軟弱層は、九頭竜川の河口で厚く、上流に向かって単調に浅くなること、第四紀層厚は平野中央部で厚く、福井地震断層より西の上流側で急激に薄くなることなどが明らかとなった。今後は、福井地震による堤防被害の程度と推定構造との因果関係等を解明し、改修の優先順序などを決定する方法の開発を目標に研究を行う予定である。

(4) 福井県原発立地・隣接自治体である敦賀市、小浜市、美浜・若狭町は、それぞれ敦賀・野坂断層、熊川断層、三方・日向断層が市街地周辺を横切り、その活動による地震被害想定と減災対策を綿密に行う必要がある。上記断層に直交し平野を横断するアレイ観測を詳細に実行し、断層直交方向の地下構造を決定すると共に、過去に実施した単点微動観測に基づく推定構造を

統合し、Co-Kriging などによる空間補間を行い、詳細で信頼性の高い3次元S波速度構造モデルを構築するとともに、断層の食い違い構造や活動履歴の検証を行った。

(5)福井県勝山盆地をフィールドとした「微動の会」による合同微動観測に参加し、単点3成分観測を行った。微動の会による計測と併せ、100カ所でH/Vスペクトルを算出し卓越周期を判読した。その結果、勝山盆地を構成する段丘および扇状地性の硬質な砂礫層を反映し、卓越周期は0.2から0.4秒程度と短いことを確認した。また独自に、盆地周辺の8カ所で測線展開アレイ観測を行った。提案している測線展開アレイ観測は、アレイ配置の制約が小さく、少ない微動計と人数により観測が可能であること、拡張SPAC法を適用することにより、安定的にRayleigh波位相速度が算出できることを確認した。

(6)山本らが地形および火山ガラスの含有率等から判定した勝山盆地の段丘・扇状地の区分ごとに、Rayleigh波位相速度とH/Vスペクトルをターゲットとして、観測点のS波速度構造の推定を行った。推定されたS波速度と堆積層深さの空間補間を行い、勝山盆地全体の3次元的地下構造モデルを提案した。

4. 研究成果

2層モデル地盤における微動シミュレーション波情報に、提案する測線展開アレイ観測を適用した結果、柔軟な観測条件を設定できる線状展開アレイ観測によっても円形アレイと同等の推定精度が得られることを確認した。また、同手法の適用地点として、切り盛り宅地造成地ならびに九頭竜川堤防を対象とした観測を行った。求められたRayleigh波位相速度、H/Vスペクトルなどに基づき、観測点直下の地下構造の逆解析を行った。その結果、盛土厚さと既往地盤のS波速度と厚さの概略値が算出できること、堤防上での展開アレイ観測により、堤体の固有周期と基礎地盤の卓越周期が求められること、Rayleigh波位相速度とH/Vから、堤体から基礎地盤までの地下構造が推定できることを示した。

提案手法を、若狭地域および勝山盆地に適用し、観測地点ごとにH/Vスペクトルから地盤震動特性ならびにS波速度構造モデルの同定を行った。これにより、平野域での軟弱層厚さ、基盤深度ならびにVs30の分布特性を推定し、その空間補間から、小浜市、若狭町および勝山盆地の地下構造モデルを算出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- 1) 小嶋啓介、伊藤雅基、水野智洋：常時微動観測に基づく九頭竜川堤防の振動特性と地下構造の推定、日本地震工学論文集、掲載決定、査読有。
- 2) 伊藤雅基、小嶋啓介：常時微動観測に基づく盛土造成地の地盤構造の推定に関する基礎的研究、自然災害科学、Vol. 3, No.3, (2019年11月末発行予定)、査読有。
- 3) 伊藤雅基、小嶋啓介：常時微動観測に基づく小浜平野の地盤構造の推定、日本地震工学シンポジウム論文集、pp.232-239, 2018, 査読有。
- 4) 辻 慎一郎、久保 哲也、小嶋 啓介、伊藤 雅基：両面盛土形式の二重壁構造を持つジオテキスタイル補強土壁の耐震性評価、ジオシンセティックス論文集、第33巻、pp.105-110, 2018年、査読有。
- 5) 小嶋啓介、伊藤雅基、水野智洋：常時微動観測に基づく九頭竜川堤防の振動特性と地下構造の推定、日本地震工学シンポジウム論文集、pp.240-247, 2018, 査読有。
- 6) 伊藤雅基、小嶋啓介：常時微動観測に基づく小浜平野の地盤構造の推定、日本地震工学シンポジウム論文集、pp.232-239, 2018, 査読有。
- 7) 山田雅行、大堀道広、小嶋啓介、微動の会：福井県勝山盆地における微動観測、日本地震工学学会論文集、17巻、4号、pp.170-181, 2017, 査読有。

〔学会発表〕(計6件)

- 1) 大堀道広、小嶋啓介ら：微動を用いた速度構造推定のベンチマークテスト その2 大阪堆積盆地モデルを用いた位相速度推定、建築学会大会、615-616, 2018。
- 2) 上林宏敏、小嶋啓介ら：微動を用いた速度構造推定のベンチマークテスト その1 大阪堆積盆地モデルを用いた速度構造推定、建築学会大会、613-614, 2018。
- 3) 小嶋啓介、伊藤雅基、水野智洋：福井地震による九頭竜川堤防被害と微動特性について、土木学会第72回年次学術講演会、2017。
- 4) 伊藤雅基、小嶋啓介、吉田清夏：常時微動観測を用いた盛土造成地における地盤構造の推定と地震時の安定性評価、土木学会第72回年次学術講演会、2017。
- 5) 小嶋啓介：線状アレイ観測によるRayleigh波位相速度推定法に関する研究、土木学会第71回年時学術講演会講演概要集、pp.307-308, 2016。
- 6) 小嶋啓介：Rayleigh波位相速度を用いたS波速度構造の直接推定法の検討、第35回日本自然災害学会学術講演会、pp.177-178, 2016。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者 該当なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。