

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 7 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04575

研究課題名（和文）常時微動の6成分展開アレイ観測に基づく地下構造推定の高度化と若狭地方への適用

研究課題名（英文）Advanced Subsurface Structure Estimation Based on 6-Component Deployment Array Observations of Microtremors

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、並進3成分に回転3成分を加えた6成分震動観測情報の活用法を提案した。これにより、従来の並進成分では不可欠であった複数の振動ピックアップによる同時観測が不要となり、観測の機動性と精度の向上が期待できる。本手法は、6成分観測情報から、振動の到来方向、表面波の成分ごとの振幅ならびに伝播速度などが評価可能である。提案手法を実務に適用するため、最新の3成分回転速度計の性能を検証し、その有用性を確認した。また、加振機を用いた現場実験および強震の6成分観測に提案手法を適用し、Rayleigh波位相速度を精度良く推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の振動計測による地下構造探査法では、多数のピックアップを一列あるいは同一円周上に配置した同時観測を多重に行うことが求められ、その時間・人的・金銭的コストが高いことから、実施地点が限られ、結果として、信頼性の低い地下構造モデルによる地震被害予測などが行われることに繋がっていた。本研究では、従来の並進3成分に、三軸周りの回転成分を同時に観測し、その分析を行うことにより、信頼性と精度の高い表面波伝播特性および地下構造の推定を実現する。福井県各地の平野域で精密な観測と分析を実施し、従来のデータベースとあわせることにより、信頼性の高い地下構造モデルを提示することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a method of utilizing six-component vibration observation information by adding three rotational components to three translational components. This method eliminates the need for simultaneous observation by multiple vibration pickups, which is indispensable for conventional translational component observation. The proposed method can evaluate the direction of arrival, the amplitude of each component of the surface wave, and the propagation velocity of the surface wave from the six-component observation information. In order to apply the proposed method in practice, the performance of a newly developed three-component rotational velocity sensor has been checked and its usefulness confirmed. In addition, we applied the proposed method to field experiments using a shaker and strong-motion observation data. The results show that the phase velocity of Rayleigh waves can be estimated with high accuracy.

研究分野：地震防災

キーワード：地盤震動 並進・回転成分 表面波 位相速度 地下構造 逆解析

1. 研究開始当初の背景

近年、常時微動観測に基づいて地盤の震動特性や、地下構造を推定しようとする試みが研究され、一部は実用化されつつある。その多くは単点3成分観測による H/V スペクトルや、アレイ観測に空間自己相関法などを適用して求められる Rayleigh 波位相速度などを利用している。従来のアレイ観測では、Rayleigh 波のみに依存する上下動が利用されることが多く、Rayleigh 波と Love 波の両者に依存する水平動については、その利用が限定的であった。たとえば、両表面波の速度とパワー比の関数として誘導された3成分空間自己相関関係を利用し、上下動成分から Rayleigh 波速度を確定した後に、Love 波速度とパワー比の最適化問題として定式化し、実際の微動観測データへの適用が試みられているが、並進成分のみから、Love 波速度や両表面波のパワー比などを、解析的に求める方法は現在のところ提案されていない。

一方、従来の強震・微動観測の対象とされてきた並進3成分に加えて、回転成分を観測することにより、地盤の振動特性の情報量が飛躍的に増加することが指摘されており、水平軸周りの回転成分は Rayleigh 波のみ、鉛直軸周りの回転成分は Love 波のみに依存する。したがって、回転成分を並進成分と組み合わせることによって、波の伝播方向や Love 波速度を確定できる可能性がある。しかしながら、十分な精度で観測できる機器が開発されていなかったこともあり、放置されていたような状況であった。そのような中で2000年代に入り、大型のリングレーザ型回転計のみならず、運搬も可能な小型の回転成分の観測機器が開発され、強震動を対象とした観測が試みられてきた。さらに近年では、 $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{rad/s}$ 程度の精度を有する小型の製品が商品化され、回転成分を利用した観測・解析の環境が整いつつあり、いくつかの研究成果も公表されている。6成分観測情報を利用すれば、1点での観測から地下構造探査が可能となるため、多くのセンサーの運搬が困難な小惑星の探査手段としても有望視されている。

2. 研究の目的

従来の地表面での振動計測による地下構造探査法では、多数の振動ピックアップを一直列あるいは同一円周上に配置した同時観測を多重に行うことが求められ、その時間・人・金銭的成本が高価なことから、実施地点が限られ、結果として、信頼性の低い地下構造モデルによる地震被害予測などが行われることに繋がっていた。本研究では、従来の並進3成分に、三軸周りの回転成分を同時に観測し、その分析を行うことにより、信頼性と精度の高い表面波伝播特性を明らかにし、その逆解析を行うことにより、地下構造モデルを推定する方法を提案し、福井県各地の平野域で詳細な同時観測を行い、本研究室で並進成分を対象として継続して実施してきた観測データによる H/V スペクトルや Rayleigh 波位相速度情報のデータベースと、あわせることにより、信頼性の高い地下構造モデルを提示することを目的としている。

3. 研究の方法

ひとつの観測点で、並進速度3成分と、回転速度3成分が同時に観測されると仮定する。本研究では、並進観測は rennartz 社の Le3D-Lite 型速度計、回転観測は、eentech 社製 R2 型回転速度計を用い、白山工業の LS-8800 地震観測データロガーと組み合わせた観測を行っている。また、並進計を 0.2~2m 程度の間隔で、3台を L 字型、または5台を十字型に配置し、その空間微分により、回転成分を算出し、中心に設置した回転速度計による直接観測データとの比較を行い、観測精度の検証を実施した。

地震および微動には表面波が卓越し、Rayleigh 波および Love 波が平面波として伝播し、鉛直道は Rayleigh 波のみ、水平動は Rayleigh 波と Love 波の重ねあわせで構成されると仮定する。表面波の各成分が三角関数の重ねあわせで表現できるとすると、Love 波による水平軸周りの回転成分ならびに Rayleigh 波による鉛直軸周りの回転速度成分はゼロとなる。以上の仮定に基づいて、以下のような計算手順で、表面波の伝播特性ならびにそれに基づく地下構造評価を行う。

- 1) 水平軸周りの回転速度振幅の比のアークトアンジェントをとることにより到来方向を求める。
- 2) 水平二軸で観測された成分の座標変換を行うことにより、伝播方向と接線方向の並進成分と、その軸周りの回転速度を算出する。
- 3) 算出された伝播および接線方向成分と鉛直成分のフーリエ変換を行うことにより、周波数

ごとの Rayleigh 波の鉛直・水平振幅と, Love 波の振幅を算出する.

4) 速度振幅に角速度を乗じて並進加速度振幅を求め, 回転速度振幅で除すことにより, Rayleigh 波および Love 波の位相速度を算出する.

5) 波長ごとの Rayleigh 波速度と深さごとの平均 S 波速度の相関を利用し, 深さごとの S 波速度構造を設定し, それに基づいて初期 S 波速度構造を設定する.

6) 各層の深さと S 波速度を対象とし, 6 成分観測から決定した Rayleigh 波および Love 波をターゲットとする最適化問題を, 遺伝的アルゴリズムにより最適化し, 地下構造モデルを決定する.

4. 研究成果

新しく開発された eentech 社製 R2 型回転速度計は, 10^{-7} Rad/s 程度の微小な回転速度を検出できることを確認した. 地震および微動観測において, 従来の並進 3 成分に, 各軸周りの回転成分を観測対象とすることで, 単点での観測により, 表面波の伝播特性を評価できる可能性があることを示した. 観測される振動は, 平面波として同一方向から伝播する Rayleigh 波と Love 波であることを仮定し, 6 成分の観測情報から, 表面波の伝播方向, 成分ごとの振幅および両表面波の伝播速度の算出方法を示した. 平面波として伝播する Rayleigh 波と Love 波によるシミュレーションデータを作成し, 提案手法による解析を行った. その分析を通して, ノイズの混入のない場合には, 6 成分データの分析から, 表面波の伝播方向, 成分ごとの振幅ならびに伝播速度が精度良く推定されることを確認した. ノイズを付加することにより, 推定精度は低下するが, その傾向は, 振幅の小さい周波数帯と低周波数領域ほど顕著であることを示した.

福井大学文京キャンパスで 6 成分の常時観測システムを構成した. 取得された地震動データを対象とし, 提案法の適用を試みた. 表面波が多く含まれると思われる後続波部分から算出された Rayleigh 波位相速度は, PS 検層などに基づく理論値と概ね対応することが確認された. 一方, Love 波については, 妥当な値が得られたのは狭い周波数帯域に限られていた. 現時点では, 観測が建物内であること, 強震動データが少なく, 普遍的な検証が不十分であると認識しており, 今後, 建物の影響のない場所での強震観測を行い, 地震動の蓄積を待って検証を進めていく必要があると考えている.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小嶋 啓介, 国谷 努, 伊藤 雅基, 山本 博文, 大堀 道広, 奥山 大嗣	4. 巻 61/2
2. 論文標題 常時微動観測に基づく勝山盆地の地下構造の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用地質	6. 最初と最後の頁 50-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5110/jjseg.61.50	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 伊藤 雅基, 小嶋 啓介	4. 巻 20/1
2. 論文標題 常時微動観測に基づく小浜平野の地盤構造の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 147-156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.20.1_147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 伊藤 雅基, 小嶋 啓介	4. 巻 20(1)
2. 論文標題 常時微動観測に基づく小浜平野の地盤構造の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 147-156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.20.1_147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小嶋 啓介, 伊藤 雅基, 水野 智洋	4. 巻 19(5)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 12-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.19.5_12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤雅基, 小嶋啓介	4. 巻 38(3)
2. 論文標題 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事例研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 自然災害科学	6. 最初と最後の頁 389-405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ITO Masaki, KOJIMA Keisuke, MIZUNO Tomohiro	4. 巻 21
2. 論文標題 ESTIMATION OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF KUZURYU RIVER BANK AND SUBSURFACE STRUCTURES BASED ON MICROTREMOR OBSERVATIONS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 3_16 ~ 3_27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.21.3_16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 小嶋啓介, 中嶋明伸, 伊藤雅基
2. 発表標題 常時微動観測に基づく福井県高浜町の地下構造の推定
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 国谷 努, 小嶋啓介, 伊藤雅基
2. 発表標題 微動H/Vの方位依存性を考慮した三方断層周辺の地下構造の推定
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小嶋啓介, 国谷 努, Keijia PENG
2. 発表標題 2007年能登半島地震で被災した門前町走出地区における常時微動観測
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------