

氏 名	はやし こう いち 林 宏 一
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2878 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 資 源 工 学 専 攻
学位論文題目	Development of Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations (表面波探査の開発とその地質調査への適用)
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 岡 俊 文 教 授 石 田 毅 教 授 大 津 宏 康

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、人工振源を用いた二次元の表面波探査および高周波数の常時微動を用いた小規模な微動アレイ探査の開発と、それらの土木地質調査への適用について研究したものである。得られた結果の概要は以下の通りであって、6章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の動機と目的を述べ、土木地質調査における地震探査手法の現状についてまとめている。

第2章では、本研究の基礎となる表面波や位相速度解析の基礎理論について、下記のようにまとめている。

まず、表面波探査の基礎理論となる弾性波動方程式についてまとめ、波動方程式に基づいて一次元の水平成層構造における表面波の特性方程式を導出している。また、数値シミュレーションに用いる有限差分法の理論についても弾性波動方程式から導いて説明している。

次に、有限差分法を用いた二次元構造を伝わる表面波のシミュレーション結果についてまとめている。傾斜した二層構造のモデルを伝わる表面波のシミュレーションの結果、二次元構造であってもレイリー波の分散曲線は概ね受振点直下のS波速度構造を反映することが示されている。

さらに、観測された波形から表面波の位相速度を計算する手法として、人工振源を用いた場合のクロスコリレーション法や表面波多チャンネル解析、常時微動を用いた場合の空間自己相関関数法についてまとめている。

最後に、得られた分散曲線からS波速度構造モデルを求める手法として、拘束条件付の非線形最小二乗法についてまとめている。

第3章では、本論文の中心であるCMPクロスコリレーション法についてまとめている。

CMPクロスコリレーション法は、水平方向にS波速度が変化する地盤において表面波の測定・解析を行う手法として、多チャンネルの異なる起振の波形データをまとめて解析することができる手法である。既存の表面波の解析手法は、いずれも単独の起振波形から解析するものであり、異なる地点で起振したデータを一緒に扱うことができる本手法は画期的である。

同手法の有効性を検証するために、有限差分法を用いた数値シミュレーションと、レーザードップラー振動計を用いた室内モデル実験を行っている。二次元構造のモデルに対して有限差分法により理論波形を計算し、CMPクロスコリレーション法を適用して解析を行っている。その結果、構造の地盤であっても同手法を用いることにより精度よく地盤のS波速度構造を求めることが可能であることが示された。

受振器としてレーザードップラー振動計、振源として圧電素子を用いた表面波探査の室内モデル実験を行っている。二次元構造のモデルに対してデータを取得し、CMPクロスコリレーション法を用いて解析を行ったところ精度よく地盤構造をイメージすることを確認でき、開発された探査手法が有効であることが示された。

さらに、本解析手法を実際の地盤で測定したデータに適用している。調査地ではサウンディングにより概略の地盤構造がわかっているが、これらの地盤情報と表面波探査結果を比較した結果、既存の表面波探査の解析手法よりも精度よく地盤構

造が求まることが確認された。

第4章では、小規模な微動アレイ探査の実用化に向けた研究についてまとめている。

これまで微動アレイ探査は主として深度数100mから数kmの探査を対象として開発が行われており、深度数10mを対象とした小規模な探査についてはその適用性は明らかではなかった。そこで、小規模微動アレイ探査のデータ取得について基礎的な現場実験を行った。その結果、10分程度の測定により概ね精度良く位相速度を決定できることがわかった。また同じ調査地で、異なる形状のアレイで測定した分散曲線を比較した結果、アレイ形状による位相速度の違いは小さく、比較的自由にアレイ形状を選べる可能性があることを示している。

また、人工振源を用いた表面波探査と微動アレイ探査の整合性を確認するために、同じ調査地で両手法を実施してその分散曲線を比較した。その結果、両手法の分散曲線は概ね一致していること、低周波数領域では微動アレイ探査が有効であることが示されている。

第5章では、開発した手法の有効性を検証するために実際の土木地質調査へ適用した例について、下記のようにまとめている。

(1) 宅地の付均質性を評価するために、スウェーデン式サウンディング試験（SWS試験）と併用した宅地の評価手法を開発し、実際の宅地地盤調査に適用している。解析ではSWS試験の結果を参考に初期モデルを作成し、SWS試験と表面波探査を併用することにより二次元的なN値分布を把握する手法を開発した。SWS試験やボーリングの結果と比較したところ、表面波探査により宅地地盤の不均質性を簡便に評価できることがわかった。

(2) 表面波探査に、重力探査とボーリング結果を併用することにより、地盤の密度構造とS波速度構造を同時に推定した例が示されている。調査地では埋没谷に堆積している低密度の腐植土層が沈下の原因になると考えられていたが、表面波探査と重力探査により得られた密度構造とS波速度構造は、腐植土層の分布範囲を高い分解能で推定している。

(3) 表面波探査と小規模な微動アレイ探査を、歴史的な建築物のある調査地の地盤調査へ適用している。調査地では、環境を保護するために非破壊の調査手法が求められており、本論文で示した手法により非破壊で調査地の地盤の三次元的な不均質性を評価している。

(4) 表面波探査により求められたS波速度構造を用いて、地震時の地盤の液状化危険度評価を行うことを試みている。多くの実際の液状化被害を受けた地盤において調査を行なった結果、表面波探査から求められたS波速度を用いた地盤の液状化危険度評価手法の妥当性が確認された。

(5) 広い調査地を迅速に調査することを目的として、受振器を牽引しながら測定することが可能であるランドストリーマーを開発し、堤防調査や干潟の調査に適用している。実際の調査への適用の結果、通常地震計を設置することが困難な舗装された道路や干潟においても、ランドストリーマーを用いることにより高い品質のデータを迅速に取得できることが示されている。

(6) 平野部において沖積層の厚さの分布は地震被害を予測する上で大変重要である。埼玉県草加市において、沖積層の厚さを把握することを目的として、小規模微動アレイ探査を平面的に実施している。結果は、既存のボーリング資料から推定されている構造と概ね一致しており、本手法の有効性を示している。

これらの実際の調査への適用の結果、本論文に示されている手法により、短時間に効率的に広範囲の地盤のS波速度構造を把握することが可能であることが確認されている。また、得られた速度構造はボーリングやPS検層などと比較して概ね妥当であることが確認されている。これらの結果は、本手法の有効性を示すとともに土木地質調査の幅広い分野での今後の活躍の可能性を示している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめるとともに、今後必要な研究開発について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、人工振源を用いた二次元の表面波探査および高周波数の常時微動を用いた小規模な微動アレイ探査の開発と、それらの土木地質調査への適用について研究したものである。得られた結果の概要は以下の通りである。

1. 二次元差分法を用いた数値シミュレーションにより、二次元構造を伝播するレイリー波とその分散特性について研究を

行った。その結果、二次元構造であってもレイリー波の分散曲線は概ね受振点直下のS波速度構造を反映することがわかった。

2. 水平方向にS波速度が変化する地盤において表面波の測定・解析を行う手法として、多チャンネルの異なる起振のデータをまとめて解析することができるCMPクロスコリレーション法を開発した。既存の分散曲線の解析手法はいずれも一つの起振データから解析するものであり、異なる地点で起振したデータを一緒に扱うことができる本手法は画期的である。

3. 開発を行ったCMPクロスコリレーション法の有効性を検証するために、各種の数値シミュレーションを実施した。その結果、従来広く用いられた手法では分散曲線を求めることが困難であった複雑な地盤構造であっても、安定した分散曲線を計算できることが確認された。

4. 開発した手法の有効性を検証するために、受振器としてレーザードップラー振動計、振源として圧電素子を用いた表面波探査の室内モデル実験を行った。二次元構造のモデルに対してデータの取得・解析を行ったところ精度良く地盤構造をイメージすることを確認でき、開発された探査手法が有効であることが示された。

5. 高周波数の常時微動を用いた小規模な微動アレイ探査の適用性を検証するために、各種の地盤において測定実験を行った。その結果深度50m程度を対象とした場合、L字型のような非等方なアレイも使用可能であり、10分程度のデータを取得することにより概ね正しい分散曲線を取得できることがわかった。

6. 以上のような測定・解析手法を、住宅地盤調査、河川堤防調査、液状化危険度予測など多くの実際の地盤調査に適用した。その結果、短時間に効率的に広範囲の地盤のS波速度構造を把握することが可能であることが確認された。得られた速度構造はボーリングやPS検層などと比較して概ね妥当であることが確認された。これらの結果は、本手法の有効性を示すとともに土木地質調査の幅広い分野での今後の活躍の可能性を示した。

以上、本論文は、CMPクロスコリレーション法を用いた二次元の表面波探査手法を開発し、深度50m程度までの地盤のS波速度構造を地表から非破壊で簡便に求めることを可能にした。本手法は、土木・環境・防災のための地盤調査に多大に貢献することが期待される。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年1月31日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。