

氏 名	馬 赫
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第 243 号
学位授与の日付	2019 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文の題目	極小アレイ微動探査法（nc-CCA）を用いた表層地盤構造の評価による サイスミックマイクロゾーニングへの適用に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 神奈川大学 教授 荏 本 孝 久
	副査 神奈川大学 教授 島 崎 和 司
	副査 神奈川大学 教授 趙 衍 剛
	副査 神奈川大学 教授 藤 田 正 則
	副査 首都大学東京 准教授 小 田 義 也

## 【論文内容の要旨】

本論文は、第 1 章「研究背景」、第 2 章「研究目的」、第 3 章「極小アレイ微動観測を用いて推定した地盤構造の精確性の検討」、第 4 章「相模平野を対象として、地盤構造の推定」、第 5 章「熊本地震後の微動アレイ調査分析及び地震動シミュレーション」、第 6 章「極小アレイ微動観測結果による地盤物性評価と建物地震応答解析」、第 7 章「結論」という、7 章構成となっている。

第 1 章「研究背景」では、近年、首都直下、南海トラフや相模トラフ沿いに巨大地震の発生可能性が指摘されており、日本だけではなく近隣の中国東南沿岸地域においても同様である。地震による被害を極小化するには地震発生前に特定な地域の地盤状況を広域的に短時間で簡便に把握することが有効であるという本論文の背景と位置づけを示している。

第 2 章「研究目的」では、普遍的な微動の伝搬特性に着目して地盤構造を分析する手法であるアレイ微動探査法を用いて観測地点の 1 次元の地盤構造（S 波速度構造）を推定する方法を述べ、近年開発された極小アレイ微動探査法（nc-CCA 法）により、半径 0.6m の円周上と中心点にセンサーを配置する 4 点の極小アレイ観測に 2 点の不規則アレイ観測を併用した 6 点のアレイ観測を実施し、nc-CCA 法と CCA 法を併用して、表面波の位相分散性を算定し、逆解析による理論分散曲線との整合性から表層地盤の S 波速度構造を算出する方法により、従来不可能であった浅部表層地盤の S 波速度構造を推定する手法として、1 次元および 2 次元の地盤構造の評価と地震時の災害リスクを軽減するためのサイスミックマイクロゾーニングへの適用性を確認することを目的とすることを述べている。

第 3 章「極小アレイ微動観測を用いて推定した地盤構造の精確性の検討～標準貫入試験と PS 検層との比較～」では、極小アレイ微動探査法は、簡便で安価な方法であり、従来不可能であった表層地盤の S 波速度構造の推定に適用できる利点が期待できるが、その精度に関して十分な検討が実施

されているとは言えない。本章では、従来用いられる標準貫入試験および PS 検層調査による地盤調査を実施した場所において極小微動アレイ観測を同時に行い、得られた S 波速度構造と地盤調査の結果と比較検討し、極小アレイ微動探査結果から得られた地盤構造の推定精度について考察した。観測地点は、地盤調査データが得られている埼玉県鴻巣市、宮城県仙台市、神奈川県横浜市、合計 3 つの異なる地盤構造をもつ場所である。比較・検討結果から、本探査法の結果は通常的地盤調査に用いられている調査法結果と比較して、やや差異も存在するが速度構造および基盤—地表面間の伝達関数、地盤の一次固有周期について一定程度の整合性が確認できることを示した。

第 4 章「相模平野を対象として、地盤構造の推定」では、1923 年関東大地震時の被災地を含む神奈川県中央部の相模川流域に発達した相模平野兩岸の地域を対象とし、極小アレイ微動探査法を用いて同地域の広域的な地盤構造の推定を行った。極小アレイ微動探査は、相模原市から茅ヶ崎市、平塚市まで、相模川に沿って実施して、相模川兩岸部の東西方向に約 5km 範囲内を対象とした。南北方向については約 30km の範囲を観測対象とした。観測は東西方向、南北方向とも約 1km 間隔で合計 322 地点の観測を実施した。これらの観測結果に基づいて地盤の 1 次元および 2 次元 S 波速度構造を推定した。また同時に、各観測地点における H/V スペクトル比の算定も行い、表層地盤の卓越周期も算定した。解析結果により、各観測地点において約 30~40m の地盤の S 波速度構造が推定でき、任意の測線に沿って複数の 1 次元構造を連続して分析することにより、2 次元の地下構造を推定した。その結果は、既往の相模平野の地質断面図や卓越周期分布との整合性も確認でき、相模平野の広域的な地盤構造推定結果は、地震災害に対するリスク評価となるサイスミックマイクロゾーニングへの適用が可能であることを示した。

第 5 章「熊本地震後の微動アレイ調査分析及び地震動シミュレーション」では、2016 年に発生した熊本地震において、被害が発生した熊本市内、特に大きな被害が発生した益城町周辺の地域を対象として単点微動観測および極小アレイ微動探査を用いて地盤調査を行なった。その結果、地盤の卓越周期の分布と 2 次元 S 波速度構造の推定結果が得られ、被災地域の地盤構造の推定が可能となった。さらに、本研究で推定した 2 次元地盤構造を用いた地盤構造モデルを用いて、益城町で観測された地震観測記録により地震動シミュレーションを行なった。解析結果と被害分布の調査結果は良好な整合性を示し、特に等価線形化法による強震時の非線形シミュレーション結果では、益城町における被害集中地域の地震動特性を良く説明できることを示した。以上の結果、極小アレイ微動探査法を利用して熊本地震の被災地における広域的な地盤構造の推定と地盤の地震応答解析への適用について、その有用性を確認した。

第 6 章「極小アレイ微動観測結果による地盤物性評価と建物地震応答解析」～動的相互作用ばねを設けた建物挙動の確認～では、神奈川大学横浜キャンパス 3 号館を対象とし、周辺の表層地盤を極小アレイ微動探査法による解析結果を用いて、建物の 3 次元振動解析モデルに動的相互作用ばねを推定して建物の地震応答シミュレーションを行って、本探査法の有用性を検討した。解析モデルについては、建物本体は立体骨組モデルを使用し、建物と地盤の動的相互作用を考慮するうえで地盤のインピーダンスをスウェイ・ロッキングバネ (SR バネ) とした。SR バネの算定に必要な  $V_s$  の値を極小アレイ微動観測により評価した。地震応答シミュレーションでは、2015 年 5 月 25 日に 3 号館で記録された観測記録を用い、地震動は上述の相互作用地盤ばねを介して建物に入力した。最上階(4 階)での主要動を含む応答加速度の比較結果では、建物周辺地盤の相互作用バネを付加した建物モデルによるシミュレーションの結果は、観測記録に良好に一致する結果を

示し、極小アレイ微動探査法による周辺地盤の地盤構造の評価は建物周辺地盤の相互作用ばねの評価においても有効であることを示した。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

## 【論文審査の結果の要旨】

地盤構造の解明は、地震工学や耐震工学の分野において極めて重要な課題の一つであり、種々の検討が試みられている。本研究は、極小アレイ微動探査法という新しい手法を用いて地盤構造を推定することにより、地震災害リスク低減のために必要なサイスミックマイクロゾーニングへの適用の可能性について検討を行った。

まず、極小アレイ微動探査法による地盤構造の推定精度について、既往の地盤調査によるボーリング資料、PS 検層探査法による推定結果との比較から、場所の地形・地質や地盤の条件によって多少変動するが、S 波速度構造および地盤の周波数伝達関数について、ほぼ同等の結果が得られることが確認できた。そして、極小微動アレイ観測結果を利用して、特定な地域の広域的な防災・減災対策を目的の地盤構造のリスク評価が可能となるサイスミックマイクロゾーニングへ適用について、神奈川県中央部の相模平野を対象として S 波速度構造の推定を行った結果、既往の調査結果との整合性が確認でき、その適用が可能であることを示した。また、2016 年に発生した熊本地震の被災地域の地盤構造を単点微動観測と極小アレイ微動探査法を用いて多数の地点で観測した結果に基づいて推定することによって、地盤震動特性と建物被害との関連性を明らかにするとともに、極小アレイ微動探査法に基づいて作成した 2 次元地盤構造モデルによる地震動シミュレーションは、被害の発生要因を説明できることを示すことができた。一方、建物周辺に適切なボーリング調査や弾性波探査 (PS 検層) 結果のない場合にも、極小アレイ微動探査法により地盤構造を推定し、建物周辺地盤の地盤ばねや減衰定数などの相互作用地盤物性値に関する情報についても、極小アレイ微動探査結果から推定することが可能で、良好な建物の地震応答解析を行うことが可能となることを示した。

以上のように、本論文において用いた極小アレイ微動探査法が、これまで不十分であった地盤構造の推定に極めて有用であり、簡便で安価で効率的な方法としてサイスミックマイクロゾーニングへの適用が十分可能であることを示したものであり、博士論文として十分な内容を示すものと評価できる。