

洪積丘陵地における表層地盤構造と地盤振動特性の評価に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 環境・安全マネジメント講座

飛田研究室 M2 鈴木章弘

1. 序論

わが国の地盤は一般に、洪積層の上を比較的やわらかい表層地盤である沖積層が覆っている。そしてこの表層地盤は自然地形自体によるものや人工的な改変により、幾何学的に特異な形状や状態にある不整形地盤であることが多い。そしてこの不整形性が構造物の地震時の挙動に大きな影響を与えると考えられている。しかし、地盤状況を把握する方法は、必要なデータを得るまでに費用や時間、手間がかかるため詳細な調査を行うことは容易ではない。また様々な研究がなされているが、ケーススタディ的なものが多く、更なる事例の蓄積が必要である。

以上のような背景から、本論では地形の起伏に富んでおり、なおかつボーリングや PS 検層などの地盤データが大量に得られている名古屋大学東山キャンパスを対象として以下のような検討を行うこととした。

- 1) 既存データの整理を行い、東山キャンパスの現状を把握する
- 2) 表層レイリー波探査・微動アレイによる観測によって、東山キャンパス内の表層地盤 S 波速度構造の推定・検討を行う。
- 3) 2)で得られた S 波速度構造に既存の地盤データや都市計画基本図などを併せて、東山キャンパス内の詳細な 3 次元表層地盤構造モデルの作成および修正を行う。
- 4) 3)で作成した 3 次元モデルを用いて、差分法によるシミュレーションを行い、任意の地点における振動性状について検討を行う。

2. 既存データに基づく表層地盤構造

および振動特性の把握

本章では、まず対象となる名古屋大学東山キャンパスの地形概要を濃尾平野・名古屋市の地形と併せて説明し、続いて東山キャンパスに存在する多数のボーリングデータに基づいて東山キャンパスの表層地盤データを明らか

にし、最後に東山キャンパス内における高密度強震観測システムの概要とともに、東山キャンパス内の地盤振動特性の特徴について検討を行っている。

図 1 は、1939 年の当時の地形と現在の地形とを比較した図である。図中の赤線は東山キャンパスの敷地を示している。これによると、尾根部は削られ、谷部は埋め立てられるなどその地形変化は大きく、表層地盤構造がより複雑になっていることが分かる。

図 2 には東山キャンパス内に設けられた強震観測地点が記されている。これらの全 14 地点の観測地点における強震観測記録を基に、局所的な地形効果による影響について検討を行った。図 2 は愛知県近傍で起こった地震による各観測点の 10~15Hz の加速度波形による水平オービットである。この水平オービットによると、観測地点によっては強い偏向性が見られる地点が存在する。図 1 の地形分布と比較すると、この強い偏向性が見られる地点およびその揺れは、谷を埋め立てた地点における谷筋に水平な方向、もしくは尾根になっている地点における尾根筋に対して直行方向であると考えられる。

3. 表層地盤 S 波速度構造推定に関する検討

2. で述べたように名古屋大学東山キャンパスでは、観測地点によって強震時の揺れに大きな違いが見られる。しかし、この強震動時の振動特性と地盤構造に関する検討を行うことは、東山キャンパス内に豊富に存在する既存のボーリングデータを利用しても容易ではなく、詳細な 3 次元の地盤構造モデルが必要となってくる。そこで本章では、表層レイリー波探査と微動アレイ探査を併用して東山キャンパス内の表層地盤 S 波速度構造の推定を行い、得られた S 波速度構造データと複数の既存データを併用することによって 3 次元モデルの作成および修正を行った。

ここで、表層レイリー波探査とは、図 4 のようにごく表層部の S 波速度構造を 2 次元的に推定する手法である。

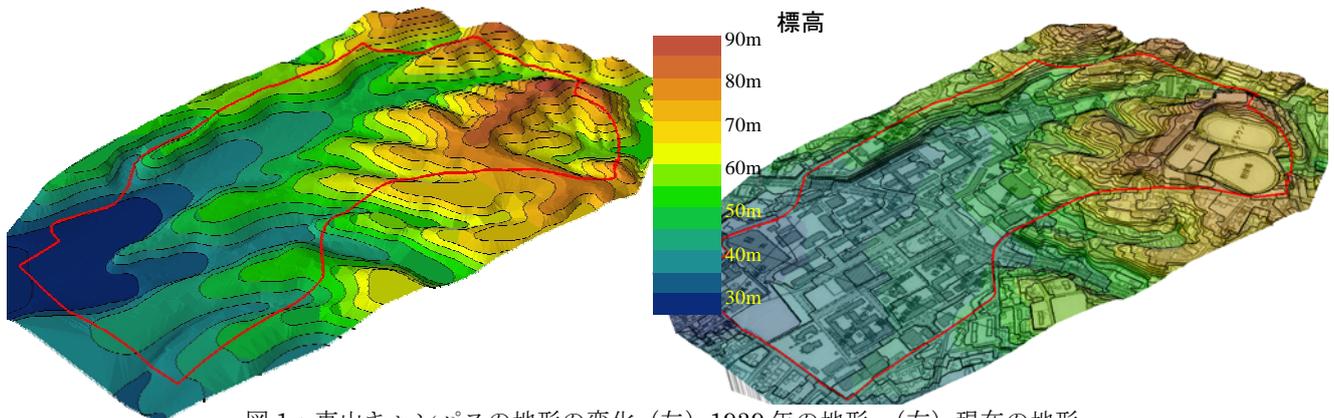


図 1：東山キャンパスの地形の変化（左）1939 年の地形、（右）現在の地形

また、東山キャンパス内での微動アレイによる表層地盤 S 波速度構造の推定には、L 字型微動アレイを利用した。それは、一般的な正三角形微動アレイを行うには十分な空間が必要であり、多くの建物が存在している東山キャンパスでは展開する地点が限られてしまうためである。そこで L 字型アレイの利用に際して、同一地点において正三角形微動アレイと L 字型微動アレイとで比較計測を行った（図 5）。分散曲線の比較では、約 5 Hz 以上の振動数範囲で位相速度が得られており、S 波速度構造の比較においてもほぼ同程度の大きさの速度が得られていた。このことから、L 字型アレイは正三角形アレイとはよい対応が見られたため、観測地点の自由度がより高い L 字型微動アレイを選択した。

計測地点については、東山キャンパスを約 50m 四方のグリッドに分割し、そのグリッド内でアレイが展開できる地点を代表点として、図 1 に示した約 30 地点において計測を行った。その結果各地点において、図 6 のような表層地盤の S 波速度構造が得られた。この結果から作成した S 波速度構造断面図が図 7 である。これを見ると、まだずいぶん荒い構造しか得られていないことが分かる。

続いて、東山キャンパス内における微動アレイ探査で得られた表層地盤 S 波速度構造と、既存のボーリング・PS 検層データ、国土地理院より頒布されている都市計画基本図や空中写真などのデータを組み合わせて、東山キャンパスにおける詳細な 3 次元表層地盤構造データの作成を行った。

具体的に行った作業は以下のとおりである。

- 1) 東山キャンパスで行われた地形改変前後の地表面の標高値を知るために、最近の情報については都市計画基本図を、また過去の情報については空中写真による写真測量を利用することにより、地形の情報や切土・盛り土の分布を得る。
- 2) 既存のボーリングデータを分析し、地質年代および平均 N 値に基づいて表層地盤の層構造を求め、地形情報と組み合わせることにより、3 次元表層地盤構造モデルの作成を行う。
- 3) 東山キャンパス内の各地点に得られている、微動アレイによる S 波速度構造データや分散曲線、強震観測記録による地盤増幅度などを用いて、これらの情報とより良い対応が得られるように 2) で作成した表層地盤構造モデルに修正を加える。

4. 差分法を用いた表面波伝播特性に関する検討

本章では、まず弾性波動方程式の基礎および差分法による解析手法を説明している。次に、東山キャンパス内の 3 次元表層地盤構造モデルに対して、差分法を用いてシミュレーション解析を行い、地表面における振動特性などについて検討を行った。差分法の利点としては、弾性波動方程式に見られるような微分方程式を直接解くことなく計算を行えるという点が挙げられる。

まず、水平加速度オービットに見られた、谷筋に平行

方向に強い偏向性をもつ振動特性について検討を行うため、図 8 に示す谷部埋め立てモデル(底部長さ 20m、地表面の長さ 40m、深さ 10m、 $V_s=300\text{m/s}$ の谷地形部に $V_s150\text{m/s}$ の盛り土をしたもの) に対して、P-SV 波(断面内振動波)および SH 波(断面直交振動波)を入力し、地表面での揺れの違いについて検討を行った。

この結果、P-SV 波入力時(谷筋に直交方向)に比べ、SH 波入力時(谷筋に平行方向)における盛り土部での揺れの継続時間が延びていることが分かる。このことから、固い地盤で拘束された谷部に直行方向の動きより、軟弱な地盤が続く谷筋に平行方向の動きのほうがより振動しやすいという結果が得られた。

続いて、図 9 に示すように東山キャンパス内の 3 次元表層地盤構造モデルから切り出した、地盤構造の不整形性を考慮したモデル(normal model)および、normal model と同一断面であり、地表部の地形はそのまま地盤構造は均一 (V_s は工学的基盤と同様) としたモデル(homo model)を作成し、両モデルに P-SV 波を入力し、地表面における振動性状の違いについての検討を行った。ここで、両モデルの表示距離は 1700m、表示高さは 200m である。

その結果、homo model には直達波以外の波はほとんど観測されていない。これに対して、normal model では homo model と異なり、直達波以外にも地表面において波が観測されており、レイリー波が励起されていると考えられる。さらに、レイリー波が励起されている範囲に注目すると、これらの範囲は埋立てが行われた地点などの特に S 波速度が遅い地点とよく対応している。

以上の考察から、地表面における振動は、地形の不整形性に比べて地盤構造の不整形性による影響のほうが大きいと考えられる。また、東山キャンパス内に見られるような比較的範囲の狭い盛り土部であっても、地表面における振動には大きな影響を与えることが分かった。

5. まとめ

本研究では、東山キャンパス内の表層地盤構造や振動特性について検討を行うため、まず東山キャンパスを約 50m 程度のグリッドに区切り、各グリッドにおいて L 字型微動アレイを行うことにより、東山キャンパス内の S 波速度構造データを得た。そして、多点における S 波速度構造データと既存の地盤データを組み合わせることにより、東山キャンパスの詳細な 3 次元表層地盤構造モデルを作成した。

最後に、キャンパス内の強震観測地点において振動に強い偏向性が見られる地点に対してモデルを作成し、差分法による解析シミュレーションを行うことにより谷を埋め立てた地点における特異な振動方向についての関係を明らかにした。また東山キャンパスの 3 次元表層地盤構造モデルの解析を行うことにより、地表面の揺れに対する影響は地形の不整形性よりも地盤構造の不整形性によるもののほうが大きいことなどを明らかにした。

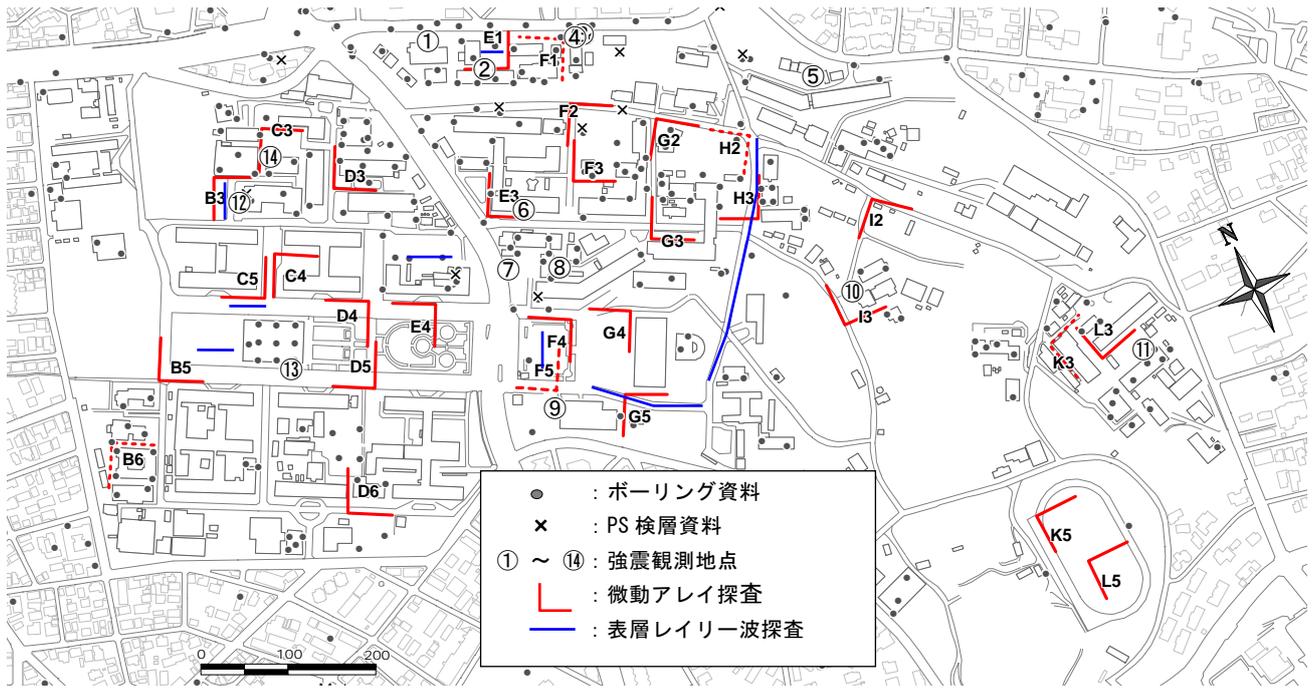


図 2 : 東山キャンパス内におけるボーリング・PS 検層地点、強震観測点、微動アレイ探査・表層レイリー波探査地点

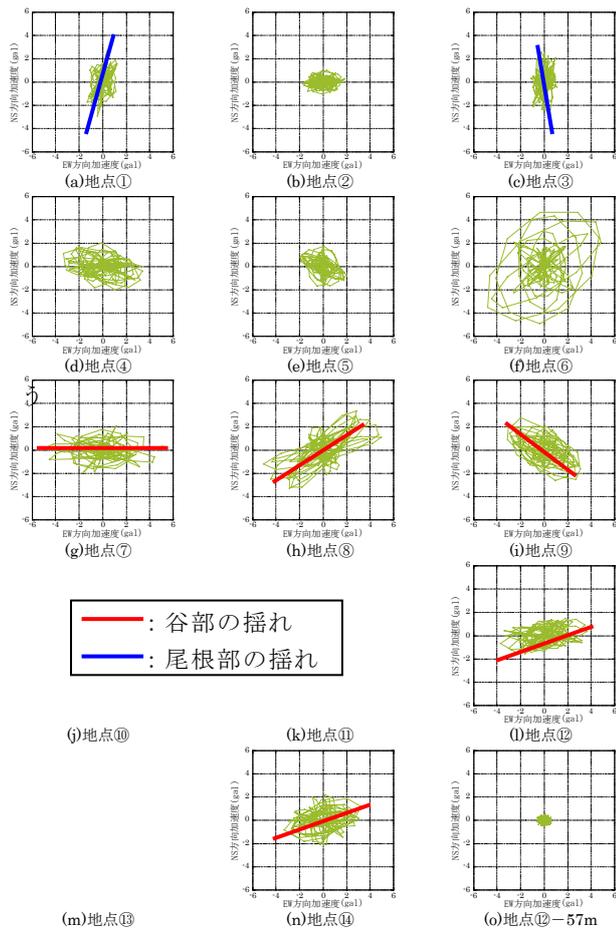


図 3 : 10~15Hz の加速度水平オービット

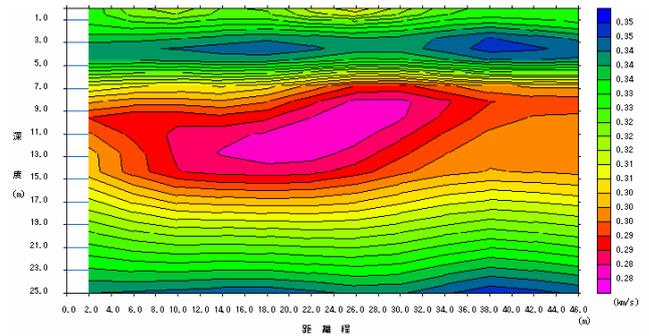


図 4 : 表層レイリー波探査による S 波速度推定結果の例

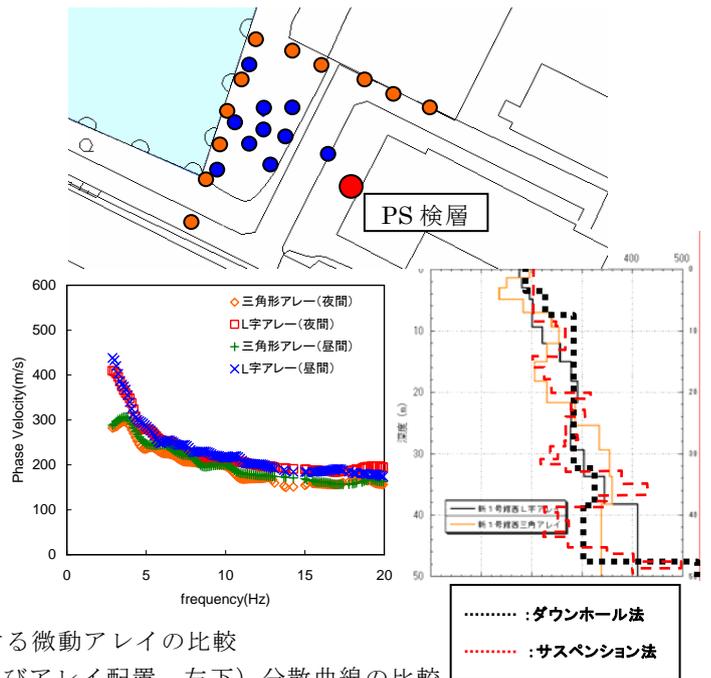


図 5 : 同一地点における微動アレイの比較
 上) 観測地点およびアレイ配置 左下) 分散曲線の比較
 右下) S 波速度構造と PS 検層の比較

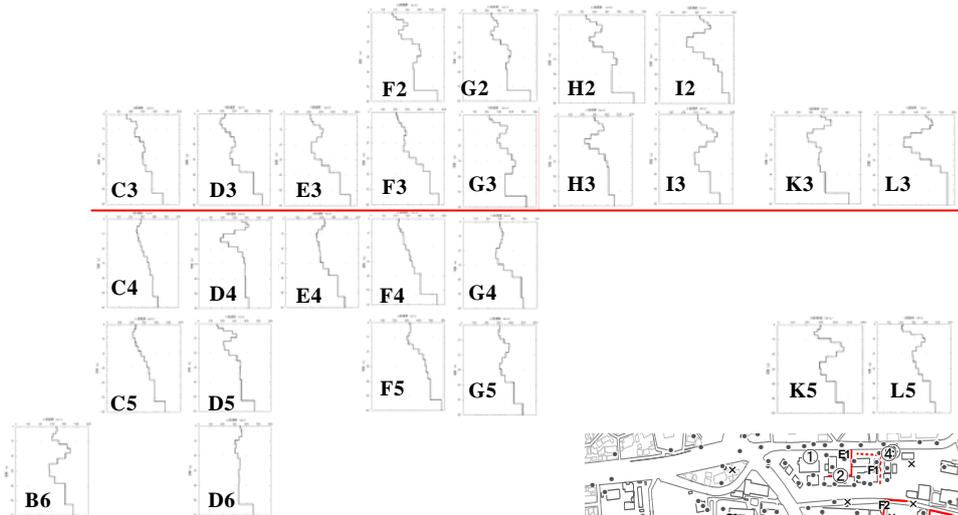


図 6 : 各観測点における推定 S 波速度構造(上)
および観測地点(右)

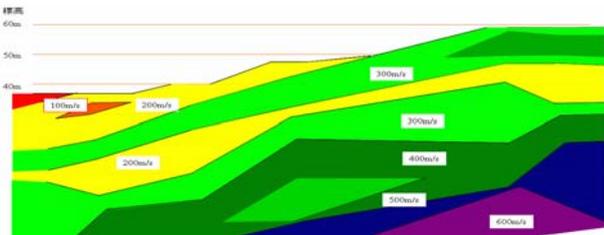
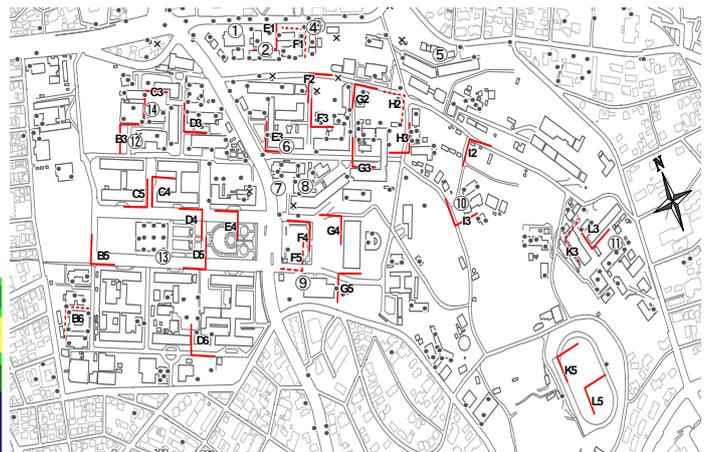
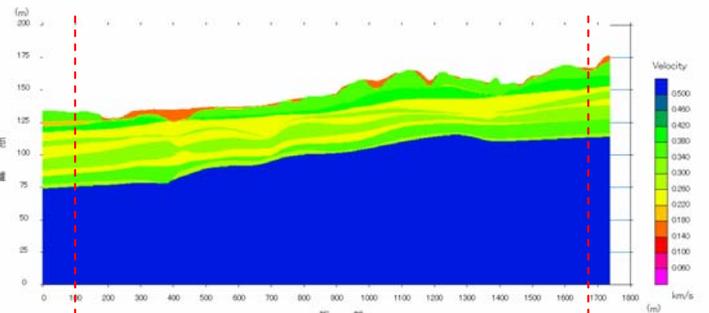
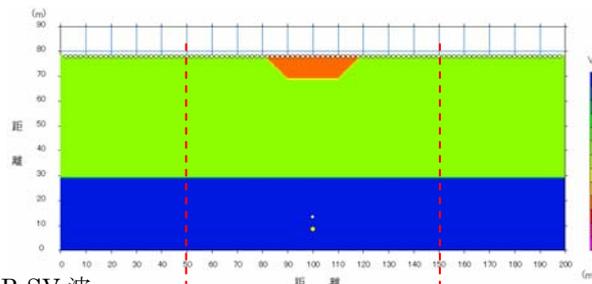
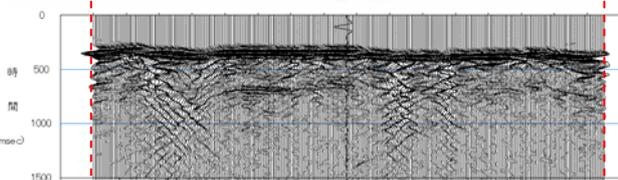
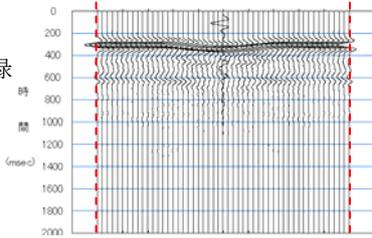


図 7 : 推定 S 波速度構造 (図 6) のみから
作成した S 波速度構造断面図の例



P-SV 波

入力時
波形記録



SH 波

入力時
波形記録

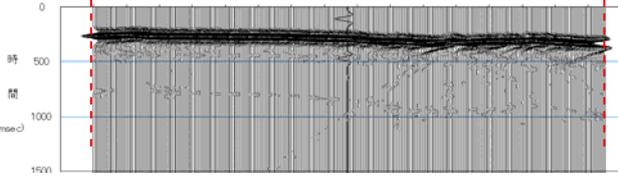
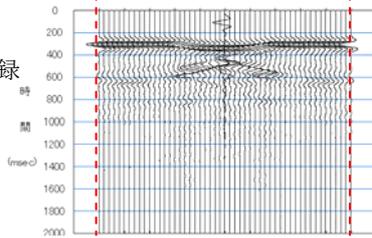


図 8 : 3 次元表層地盤構造モデルによる震動比較

上) normal model の S 波速度構造モデル

中) normal model における波形記録

下) homo model における波形記録

図 7 : 谷部埋立てモデルによる震動比較