

稠密微動アレイ探査による岩手県陸前高田市の造成地における S 波速度構造の推定*

岩手大学理工学部 齋藤早紀, 山本英和, 齋藤剛

1. はじめに

平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波により、岩手県陸前高田市の海岸平野部では壊滅的な被害を受けた。再びこのような被害を受けないようにするために、陸前高田市は被害が集中した市中心部を大規模におよび広範囲に嵩上げした。盛土の最大高さは約 12m に達する。本研究では、嵩上げされた市の中心部の造成地において微動アレイ探査を実施し、S 波速度構造を推定することで、造成地の地盤の強度を把握することを目的とする。また、当該地域は震災直後、山本ほか (2014) により微動アレイ探査による S 波速度構造が把握されている。本研究と既往の研究を比較し、造成による影響を検討することも目的のひとつである。

2. 極小アレイと道路幅アレイによる微動観測

微動観測は 2019 年 8 月 19 日、21 日および 26 日に岩手県陸前高田市高田地区造成地で実施した。図 1 に観測地点を示す。高田地区中心部商業施設アバッセ高田付近の 22 地点で 100m~150m 間隔という集中的に微動観測を実施した。微動観測には白山工業株式会社製の微動計 JU310 を 4 台および JU410 を 4 台用いた。サンプリング周波数波 200Hz, 1 ケ所の測定時間は 15 分である。図 2 にアレイ配置を示す。4 台の JU310 を用いて中心に 1 台、半径 60cm の円周上に 3 台配置する極小アレイと、4 台の JU410 を用いた、道路幅を高さとする平行四辺形型(菱形)のアレイで同時に微動を測定した。道路の形状に注目し、最適な幅を利用し、自動的に辺長を決め観測した。そのおかげで測量時間を短縮することができた。半径 60 cm の極小アレイ微動探査では、観測の機動性は高いが、地震防災上有益な波長 40m 程度の位相速度の情報を得ることができない事例が過去の調査では多かった。今回、地震計間隔 10m から 20m 程度の道



図1 観測地点と拡大図

* Estimation of S-wave velocity structures in the creation land of central Rikuzentakata City, Iwate Prefecture by using dense microtremor array surveys by S. Saito, H. Yamamoto and T. Saito

路幅を基準としたアレイを同時に測定することで、短時間、多地点で稠密な測定をし、極浅部～深度30m程度までのS波速度構造を1回の測定で調査可能にした。

3. H/Vスペクトル比のピーク周期 (道路幅アレイ)

観測された微動記録を40.98秒の区間に分割し、FFTによりスペクトル解析を行った。図3に微動の水平動上下動スペクトル(H/V)のピーク周期分布図を示す。ピーク周期は盛土が薄いと予想される山側では最小で0.24秒を示し、盛土の厚い海側では最大で0.46秒を示している。

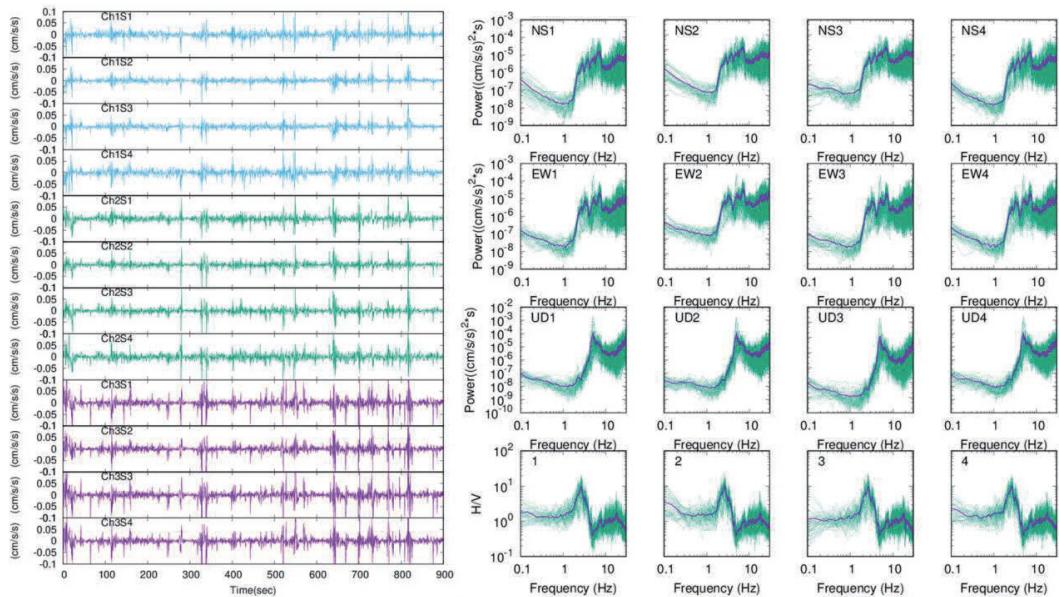


図3 微動の加速度波形記録と微動のスペクトル, H/V

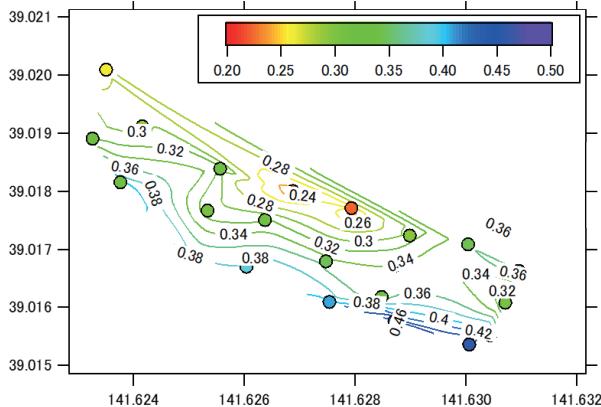


図4 H/Vスペクトル比の
ピーク周期分布(単位:秒)

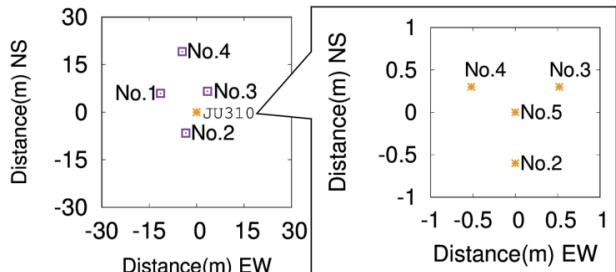


図2 A7におけるアレイ配置図

4. 極小アレイと道路幅アレイの解析

Aki(1957)による空間自己相関（SPAC）法により、位相速度分散曲線を計算した。観測された上下動微動を 20.48 秒区間ごとに分割し、クロススペクトルを算出し、方位平均をとり、空間自己相関係数を算定した。観測された SPAC 係数を第 1 種 0 次のベッセル関数に適合し、位相速度を得た。図 5 に得られた SPAC 係数と位相速度の例を示す。極小アレイだけの場合、周波数 6Hz から 20Hz の範囲でしか位相速度は得られないが、道路幅アレイを同時に測定することで、周波数 3.5Hz までの位相速度を得ることができた。

Ballard(1964)の方法により、得られた位相速度から波長の 3 分の 1 を深さ、位相速度の 1.1 倍を S 波速度とした疑似 S 波速度構造を計算した。その例を図 5 の右側に示す。深さ 50m 程度まで S 波速度が得られていることがわかる。地表付近の S 波速度は約 250m/s であるが、深さ 45m で約 600m/s を示し、比較的高い値を示していることがわかる。

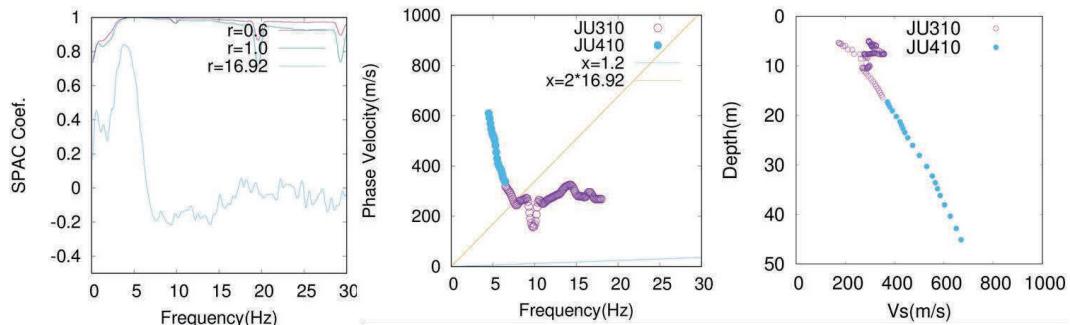


図5 解析より得られたSPAC係数(左), 位相速度(中), 疑似S波速度構造(右)の例

5. S 波速度構造モデルの推定

得られたレイリー波位相速度と H/V を満足する S 波速度構造モデルを求める。まず基本モードのレイリー波を仮定し、位相速度と楕円率の理論値を計算し、観測値に合うように S 波速度構造モデルの修正を行った。図 6 は計算値と観測値の位相速度分散曲線の例である。紫と水色がそれぞれ極小アレイと道路幅アレイの観測結果、オレンジ色の実線が推定した計算値の結果を示している。図 7 は計算値と観測値の H/V のグラフを示している。緑、紫はそれぞれ極小アレイ観測、道路幅アレイ観測の結果、赤が推定された計算値の結果を示した。このように観測値と計算値が合うようにモデルを何度も修正し、S 波速度構造を得た。

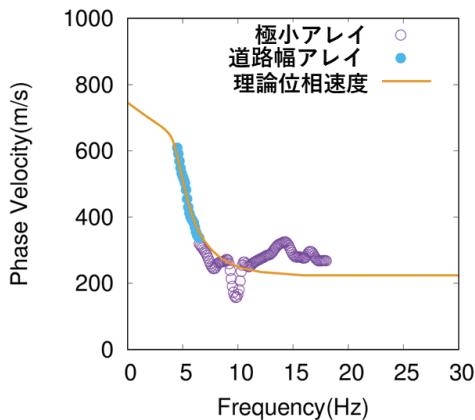


図6 計算値と観測値の位相速度分散曲線

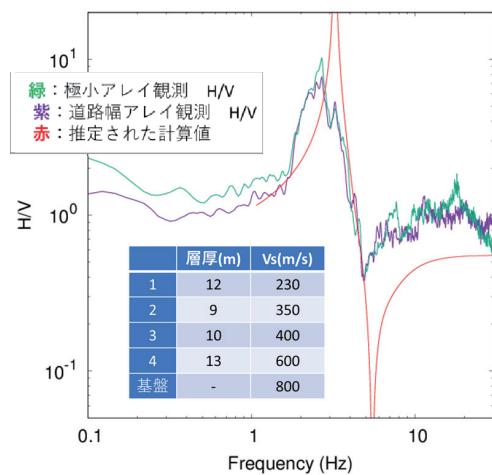


図7 計算値と観測値のH/V

その計算値から推定された S 波速度構造の結果を図 8 に示す。縦軸下方向に深さ、横軸に S 波速度を取る。S 波速度 230m/s の層が 12m, 350, 400, 600m/s の層がそれぞれ 9, 10, 13m の厚さで堆積しており、以下 800m/s の層構造となつた。造成前に微動探査を行った時の表層付近の速度は 150m/s だったのに対し、今回は 230m/s と大きな値を示している。

6. S 波速度構造の比較

図 9 に今回使用した測線①～⑦の配置を示す。図 10 に推定した S 波速度構造を示す。黄緑の矢印で示した測線①～④はほとんどが山側から海側にかけて S 波速度が大きい層が深い位置にあることが分かった。特に測線②, ③は山側に比べ海側では Vs=600, 800m/s の層は約 20m 深い結果になった。図 4 で示したピーク周期分布の傾向と一致することが分かった。水色の矢印で示した測線⑤～⑦は、大体同じ地盤の構造をした箇所を並べているので測線⑤, ⑥は東西方向でほぼ同じ結果である。しかし測線⑦は山に一番近い C3 が固い地盤の影響を受けているのか浅いところで速い速度が出ている。

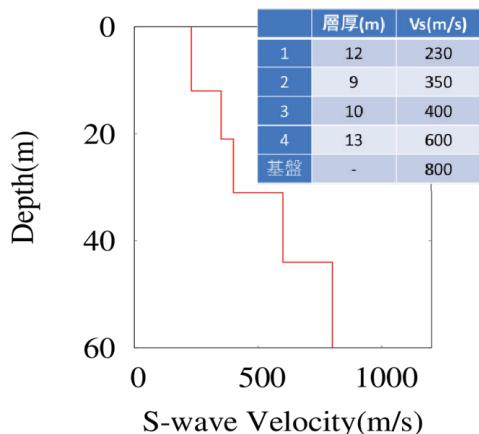


図8 推定されたS波速度構造

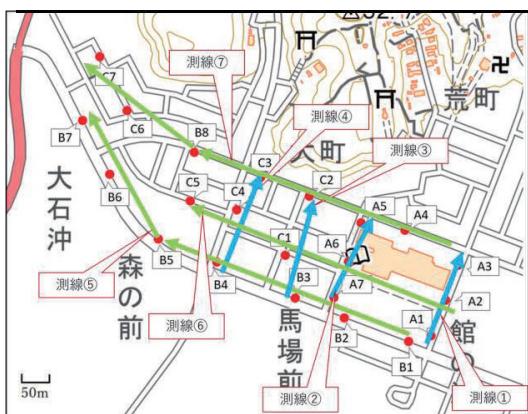


図9 測線①～⑦の配置

もっと見やすくするために色で現したものを図11に示す。測線①～④のほとんどは山側に行くにつれ、表層地盤が固くなりつつあり、 $V_s=800\sim 1000\text{m/s}$ の層が浅いところまで出てきている。やはり、山に近いC2, C3は20～30mほどで V_s が800～1000m/sに達していることが分かる。測線⑤～⑦はそれぞれ海側、中央、山側と分けること変化が分かりやすくなる(図12)。表層は赤の約200m/sからオレンジ色の約300m/sへ、深部も青の約800m/sから紫の約1000m/sへと変化しており、山の影響だと考えられる。造成前の表層地盤が150m/s程度だったのに対し、今回の調査地域では200～300m/sと造成後の地盤としては比較的速い結果になった。

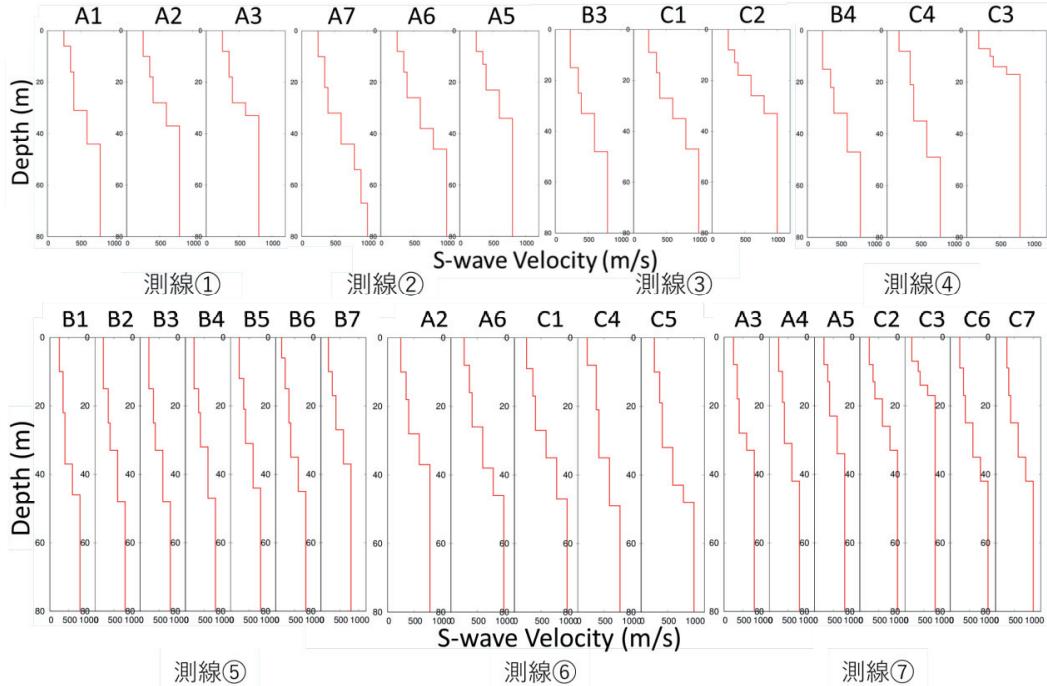


図10 測線①～⑦に沿った微動アレー観測により推定されたS波速度構造

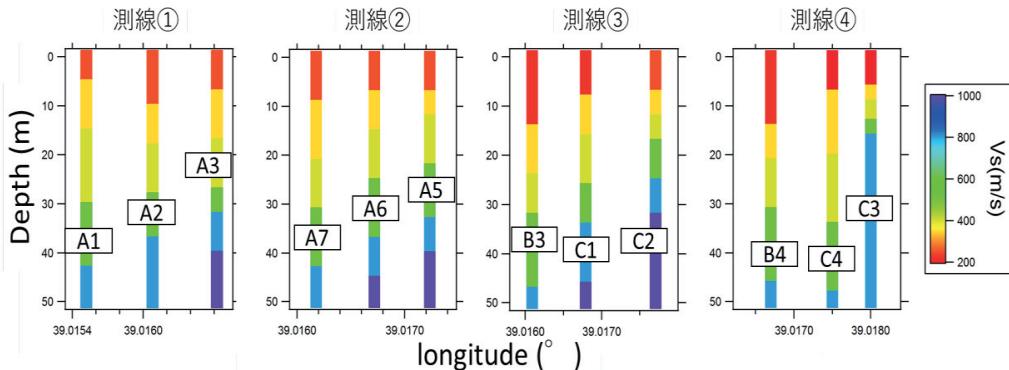


図11 色で示した測線①～④に沿った微動アレー観測により推定されたS波速度構造

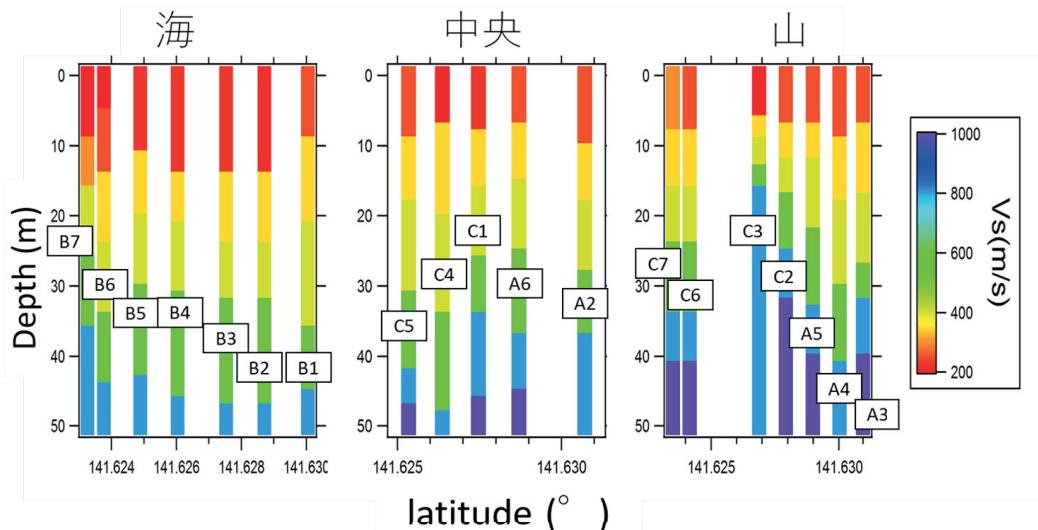


図12 色で示した測線⑤～⑦に沿った微動アレー観測により推定されたS波速度構造

7.まとめ

本研究では、陸前高田市の造成地において極小アレイ、道路幅アレイ微動観測を行い、S波速度構造を推定した。山側から海側にかけては基盤が次第に深くなり、東西方向ではほぼ同じS波速度構造であることが推測される。浅部のS波速度は200～350m/s, Vsが約800m/sの基盤と考えられる深さは30～50m 山側から海側にかけて深くなっていると推測される。山本ほか(2014)で得られた結果と比べ、今回の調査地域では表層地盤が50～150m/s速くなっている結果となった。この地域の造成はうまくいったのではないかと考えられる。今後は得られたS波速度構造から地盤增幅率を求め、地盤の揺れやすさハザードマップを作製する予定である。さらに基本モードだけでなく、高次モードによる影響がないかも検討する必要がある。

謝辞

微動観測には陸前高田市の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- Aki, K. (1957) Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Tokyo University, Bull. Earth. Res. Inst. 25, pp.415-457.
- Ballard, R.F., Jr, (1964) : Determination of Soil Shear Moduli at Depth by In Situ Vibratory Techniques, Miscellaneous Paper No. 4-691, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburgh, Mississippi.
- 山本英和, 朝田航, 齊藤剛 (2014) : 微動観測による陸前高田市の地盤のS波速度構造の推定
東北地域災害科学的研究, 第50巻, pp. 19 - 24.