

# 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

伊藤 雅基<sup>1</sup>・小嶋 啓介<sup>2</sup>

## A Case Study on Estimation of Subsurface Structure of Artificially Filled Ground Based on Microtremor Observation

Masaki ITO<sup>1</sup> and Keisuke KOJIMA<sup>2</sup>

### Abstract

In recent years, seismic damages have occurred in residential areas which are artificially filled grounds. In this study, ground vibration characteristics and subsurface structures of artificially filled grounds were estimated based on microtremor observations. We conducted several linear microtremor array measurements and a large number of three-component observations at two residential development areas in Fukui prefecture. The phase velocities of Rayleigh waves were calculated by using the extended SPAC method on linear array observations. The thickness of soil layers were back-analyzed based on H/V spectra. The 3D subsurface structures of the ground were modeled using space interpolation based on each estimated structure beneath the observation points. By comparing with existing elevation data, the validity of the estimated structures were confirmed.

キーワード：盛土造成地，常時微動観測，H/V スペクトル，S 波速度構造

Key words: artificially filled ground, microtremor observation, H/V-spectrum, S-wave velocity structure

### 1. はじめに

21世紀に入り新潟，東北地方，北海道などで甚大な被害を伴う地震が相次いで発生しており，ゲリラ豪雨などの頻度も増加し，地震動や地下水の上昇に起因した地盤構造物の被害が頻発してい

る。特に高度成長期以降，山麓地域や丘陵地の斜面の谷埋め盛土造成地が相次いで開発され，その地震被害が懸念されている。2011年の東北地方太平洋沖地震の被害調査<sup>1-3)</sup>によれば，谷埋め盛土造成地の盛土部や切り盛り境界部において，地す

<sup>1</sup> 福井大学工学部技術部  
Technical Division, The University of Fukui

<sup>2</sup> 福井大学大学院工学研究科  
Faculty of Engineering, The University of Fukui

本論文に対する討議は2020年5月末日まで受け付ける。

べりや地盤の隆起・沈下に伴う建物の倒壊やライフラインの損傷、道路・擁壁等の亀裂や崩落などの被害が数多く発生し、切土部に比べて被害が甚大であることが報告されている。このように、盛土部および切り盛り境界部で被害が大きくなるのは、谷埋め部分のS波速度が切土部に比較して小さく地震動の増幅が起りやすいこと、谷部には造成後も水が集まりやすく、排水設備が不十分な場合には、地下水位の上昇に伴う有効応力の低下による強度低下が起こることなどに起因していると考えられている。

このような背景の中で盛土造成地の危険性の把握や被害軽減のために、国土交通省では平成18年度に宅地耐震化推進事業を開始し、地方自治体によって大規模盛土造成地の変動予測調査と崩落予防対策が進められることとなった。変動予測調査では、国土交通省のガイドライン<sup>4)</sup>に従い、標準貫入試験によるN値の測定、室内土質試験や弾性波探査等のデータを基に地盤構造を推定し、安全率を算定することとしている。しかしながら、これらの方法は手間やコストがかかり、造成地全体の信頼性の高い評価を行うことは難しい。また古い造成地では、地盤情報や施工記録が失われていたり、地盤特性自体が変化したりして、変動予測調査が進んでおらず、危険性を抱えたまま放置されているケースも多いと考えられる。

このような現状を考慮し盛土造成地の安全性を評価するためには、簡便な方法を用いて造成地全体の切り盛り層厚、剛性、強度等の3次元分布を評価できることが望ましい。そこで本研究では、対象地点の網羅的な調査が可能な方法として、加振を必要とせず、地表での短時間計測が可能な常時微動観測を用いて、盛土造成地全体の地下構造を推定する方法について検討する。適用対象地点としては、福井県内の1960年代に造成された二箇所の谷埋め盛土造成地を選定している。観測で得られた常時微動観測情報から造成地の振動特性を把握するとともに、盛土厚ならびにそれより下層の地下構造の推定を行う。さらに詳細に実施した微動観測点の深度方向の推定地下構造の空間補間により、造成地全体の地下構造を求め、既存の標

高データとの比較・検証した結果を報告する。

## 2. 宅地造成地の地形及び開発状況

本研究における常時微動観測対象地は、福井市南部に位置する山麓の宅地造成に伴う地形改変が著しいA団地およびS団地を選んだ。写真1は、A団地およびS団地における造成前と造成後(平成29年現在)の空中写真をそれぞれ示す。

A団地は、昭和40年代半ばに尾根筋と谷筋を横切るように整形されたひな壇状の造成地で2本の谷と2本の尾根の上に宅地造成を行っており、福井平野上の孤立丘である城山の南側斜面に位置する。対象地の地質は、福井県地質図2010年版<sup>5)</sup>によれば糸生層の凝灰質砂岩、シルト岩、泥岩からなり、造成以前の地形図<sup>6)</sup>から同地域は谷部の奥深くまで湿田として利用されていたことが確認されている。

S団地は、昭和30年代後半から昭和40年代にかけて広範囲にわたる谷部を埋めた造成地であり、福井平野南部の孤立丘である経ヶ岳の東側に位置し、北西部と南西部が山地部で北東部と南東部は中位段丘であった。対象地の地質<sup>5)</sup>は、鯖武台地の段丘で礫、砂、泥からなり、山地部では糸生層の凝灰質砂岩、シルト岩、泥岩からなる。また、谷底平野部は周辺で行われたボーリングデータから、盛土(砂質土)、シルト、有機質土、シルト、砂質(風化岩)による成層構造が確認されている。さらに造成前の地形図<sup>7)</sup>から、谷埋め部はA団地と同様に湿田として利用されていたことが確認されている。これらのことから、谷埋め盛土部のほとんどには軟弱層が存在し、小高い山や丘に囲まれた集水地形であることから、造成地周辺地盤の災害危険度が高いことが予想される。

## 3. GISによる宅地造成地の切土・盛土の判定

図1および図2は、A団地とS団地のGIS(地理情報システム、ArcGISソフトESRI社製)を用いて作成した造成前と造成後の切り盛り分布を示す。切り盛り分布の作成方法は下記の通りである。1) 造成前の地形図をスキャナで読み取りデ

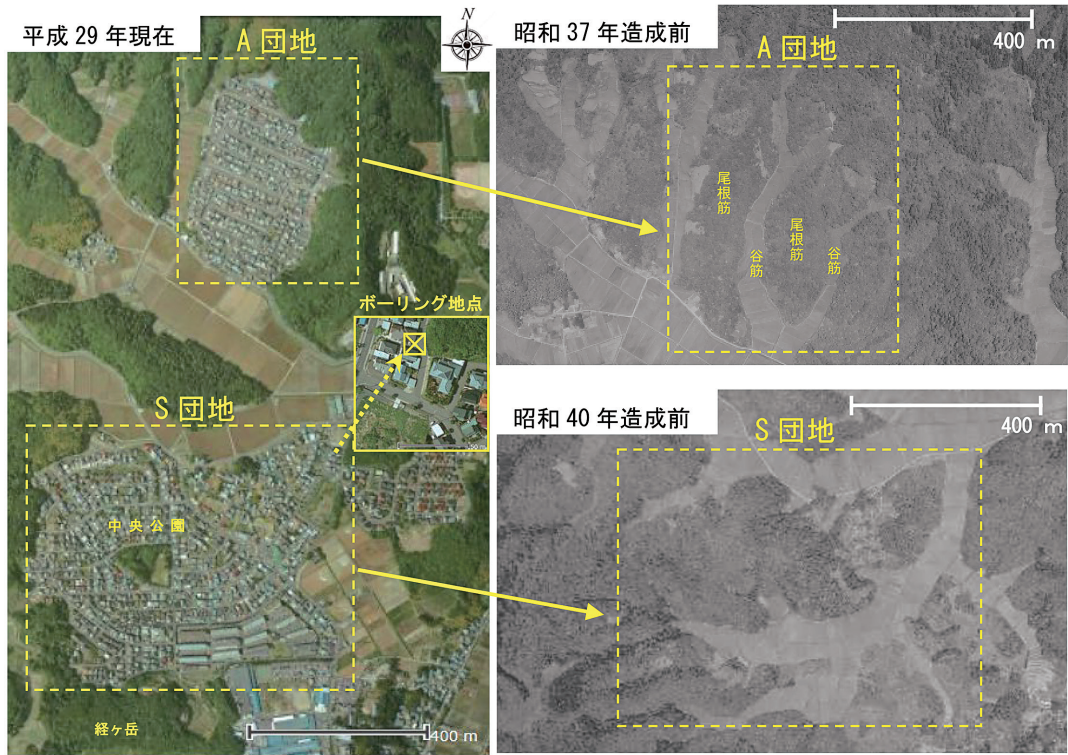


写真1 A 団地および S 団地の航空写真

デジタル化する。2) 画像編集ソフトを使って不要な線を削除して等高線のみのデータとする。3) 作成した造成前の等高線データを GIS 上に緯度・経度の座標を入力して現在の地形図の位置に合わせる。4) 等高線データをベクター形式 (ポリゴンデータ) で表示させ、各等高線に標高値を入力してポイントデータ化し、さらにスプライン手法による内挿処理を行い、ラスター化して造成前の標高分布図を作成する。5) ラスター化した造成前の標高分布図を 5m メッシュ毎にポイントデータ化し、造成前標高データを生成する。6) 造成前と現在の標高データの差から改変量を算出する。7) テンションスプライン関数<sup>8,9)</sup>を用いた空間補間を行い、ラスター化して切り盛り分布図を作成する。なお、造成前の標高データの作成には、A 団地で昭和36年の国土地理院 2万5千分の1の地形図<sup>6)</sup>を、S 団地で昭和33年と昭和36年の国土地理院 2万5千分の1の地形図<sup>6,7)</sup>を使用し、現

在の標高データの作成には、国土地理院が公表している 5m メッシュの数値標高モデル<sup>10)</sup>を使用した。

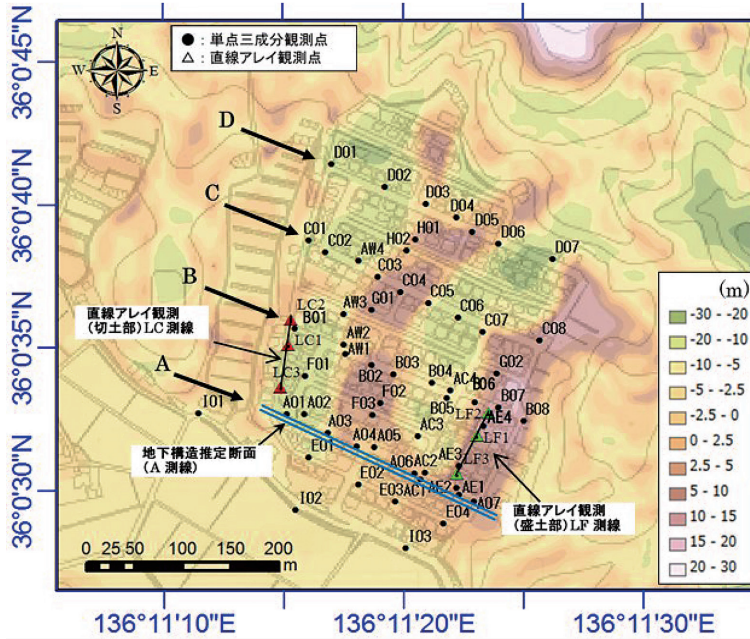
図1のA 団地では、造成前写真に見られる2組の尾根筋と谷筋に沿って、切土部と盛土部を明瞭に見て取ることができる。図2のS 団地では、中央部を東西に走る道路 (A 測線) より南側の大部分が比較的厚い谷埋め盛土部分であると判定された。また、中央公園西側の最も高い山地部分で切土、南側の沢部で盛土が行われ、盛土層が厚い領域を形成していることが確認できる。

## 4. 常時微動観測

### 4.1 観測概要

図1 (a) および図2 (a) の●印は、常時微動の単点三成分観測点 (A 団地56地点, S 団地53地点) を、△印は直線アレイ観測地点 (A 団地6地点, S 団地9地点) を示す。単点三成分観測点は、造成

(a) 切り盛り分布と観測点



(b) 切り盛り分布と卓越周期分布

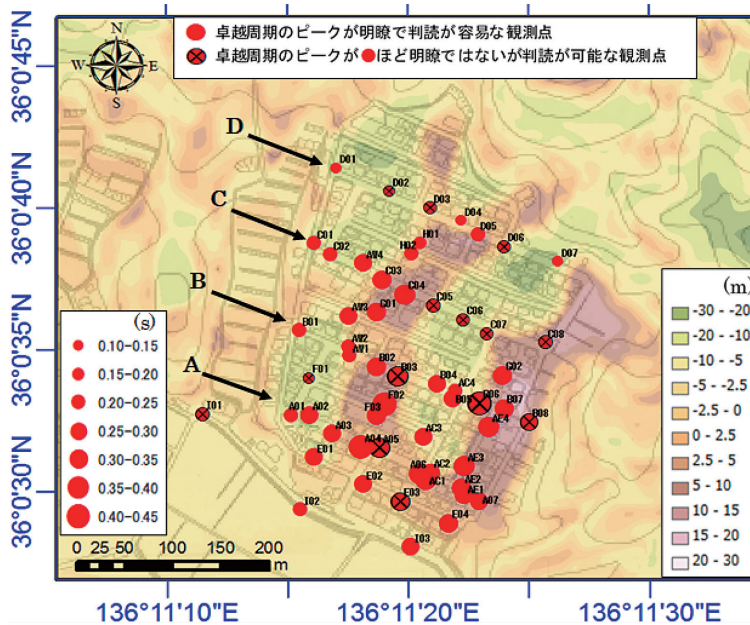
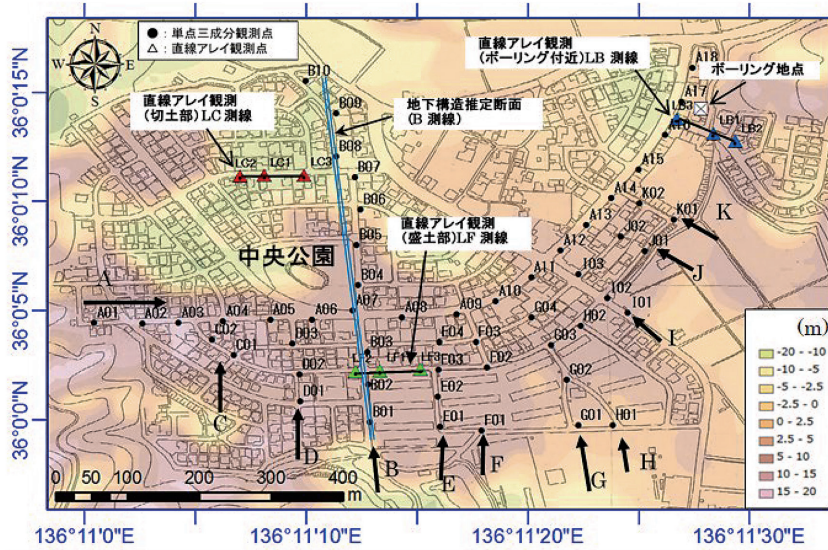


図1 A団地における観測点と切り盛り分布・卓越周期分布

(a) 切り盛り分布と観測点



(b) 切り盛り分布と卓越周期分布

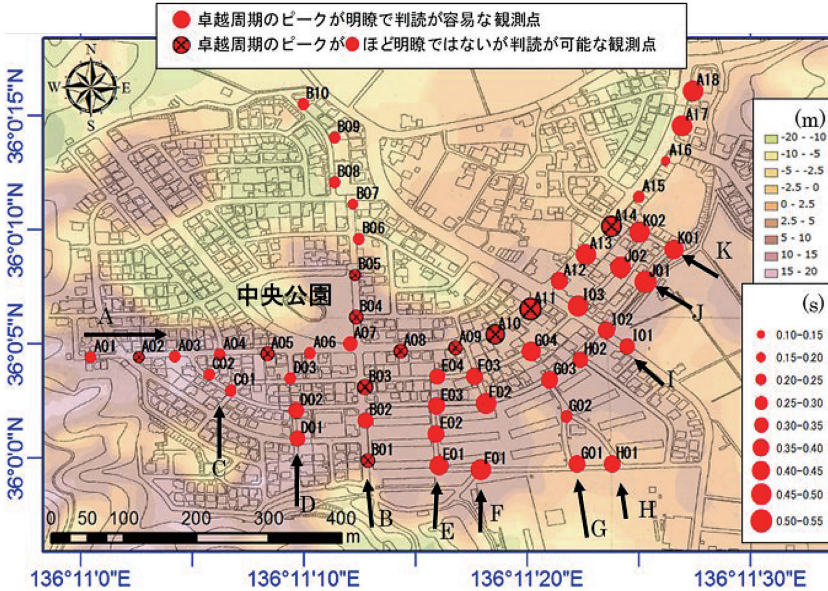


図2 S 団地における観測点と切り盛り分布・卓越周期分布

部を縦／横断する道路に沿って配置した。A 団地では、図 1 (a) に示す通り東西方向にほぼ平行に通る 4 本の道路を南から A 測線、B 測線、C 測線、D 測線とし、測線ごとに 7～8 個所の観測点を配置した。また A～D 測線に直交し、尾根筋又は谷筋の縦断方向にも測点を配置した。S 団地では、図 2 (a) に示す通り公園の南側に面し東西に走る道路に沿って A 測線を取り、A 測線の東側に面する南北に走る道路を B 測線として観測点をほぼ等間隔に配置した。さらに A 測線と直交し、谷筋を横切る方向に C から K の測線を配置した。

微動観測には速度計 (Lennartz 社 LE-3Dlite Mk II, 固有周期 1 秒) とデータロガー (白山工業 LS-8800) を用いた。サンプリング間隔は 0.005 秒で、一地点当たり 10 分程度計測し、比較的ノイズの少ない 20.48 秒の区間を、5 区間以上取り出し、フーリエスペクトルを作成し、Parzen ウィンドウ (0.1 Hz) による平滑化を行った。さらに周期ごとに NS 方向、EW 方向にそれぞれのフーリエ振幅の二乗平均を UD 方向のフーリエ振幅で除すことにより H/V スペクトル比を求めた。

次に A 団地および S 団地の切土・盛土部分における Rayleigh 波位相速度を求めるために直線アレイ観測を行った。表面波を対象としたアレイ観測の前提として、地盤が水平方向に均一な成層地盤である必要がある。造成地盤でこの条件の成立は難しいと思われるが、ここでは、横断方向に比べて地下構造の不連続性が小さいと考えられる谷筋と尾根筋方向では、微動計間隔 (アレイ半径) を小さく設定し、近似的に成層地盤と同様の表面波が伝播していると仮定し、アレイ観測点を展開した。観測用地が限られている場合には、長ら<sup>11)</sup>の極小アレイの採用も考えられるが、複数の観測点間距離で空間自己相関係数と Bessel 関数の適合度を評価でき、位相速度を周波数ごとに一義的に決定できる拡張 SPAC 法への適用を重視し、線状配置アレイを採用した。微動が等方あるいは 1 方向から伝播している場合には、盛川ら<sup>12)</sup>、小嶋ら<sup>13)</sup>の 2 点 SPAC 法の考え方に基づいた線状配置により円形配置と同等の位相速度が求められることを確認している。直線アレイ観測は、A 団地

では、西側尾根筋の切土部分の LC 測線と東側谷筋の盛土部分の LF 測線で、S 団地では、北側の切土部分の LC 測線と南側の盛土部分の LF 測線、ならびにボーリング地点付近の LB 測線で実施した。直線アレイ観測は 5.1 で詳述するが、4 台の速度計を使用し、地点ごとに 3 回の同時観測を行った。

## 4.2 宅地造成地の H/V スペクトル比特性

図 3 は、A 団地および S 団地における常時微動観測から得られた代表的な切土・盛土地点の水平・鉛直成分スペクトルおよび H/V スペクトル比である。盛土部の H/V スペクトル比には、周期 0.2～1.0 秒程度に振幅の大きな明確なピークが認められる。一方、切土部のピーク周期は 0.1～0.5 秒程度と短く、H/V の振幅も小さい傾向が認められた。

図 4 は、図 1 (b) および図 2 (b) における GIS より推定した切り盛り厚さと卓越周期の関係である。図 4 の▲印は、A 団地 C 測線および S 団地 B 測線における単点 3 成分観測点の卓越周期を示している。また□印は、造成前後の等高線・標高地図から GIS より推定した切り盛り厚さの分布を示している。

A 団地では、盛土部で卓越周期が長く、切土部で短くなる傾向が認められ、そのような傾向は A、B、D 測線においても同様に認められた。但し一部、山側の造成境界部にあたる C08 のように、盛土厚さが大きいにも関わらず卓越周期が短い地点も見られた。S 団地では、南側の盛土部 (B01～B05) と北側の切土部 (B06～B10) に分かれており、卓越周期は、盛土部分で長く、切土部分で短くなる傾向が認められる。但し、A 団地と比較すると、切り盛り変化量に比べて卓越周期の変動量は小さく、切り盛り境界部での卓越周期と切り盛り変化量の対応は不明瞭である。

図 5 は、両団地のすべての単点 3 成分観測点に対して求めた GIS による推定切り盛り厚さと H/V スペクトル比から求めた卓越周期の関係である。卓越周期は、盛土が厚くなるほど長く、切土地点では短くなる傾向になると予想されるが図 5

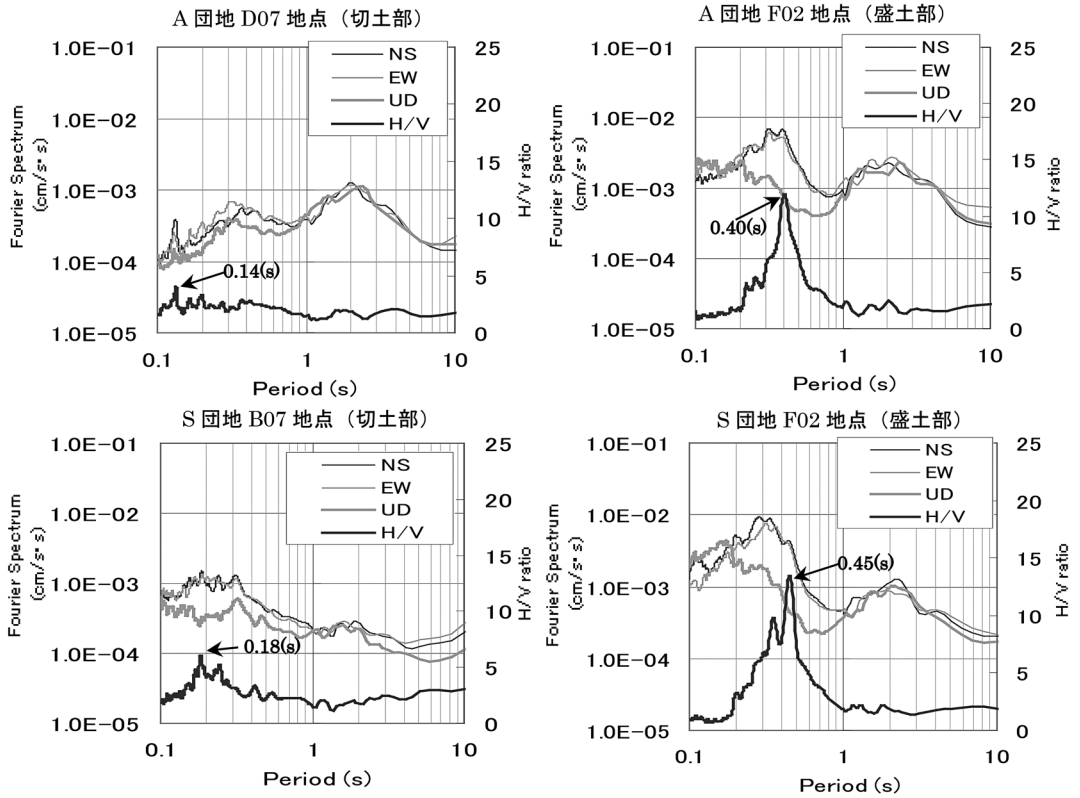


図3 切土・盛土地点のフーリエスペクトルとH/Vスペクトル比

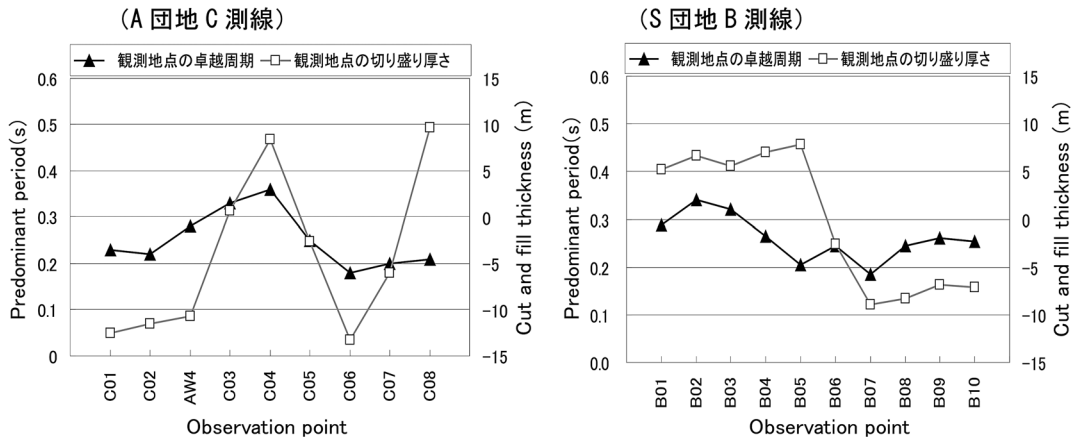


図4 観測地点におけるGISより推定した切り盛り厚さと卓越周期

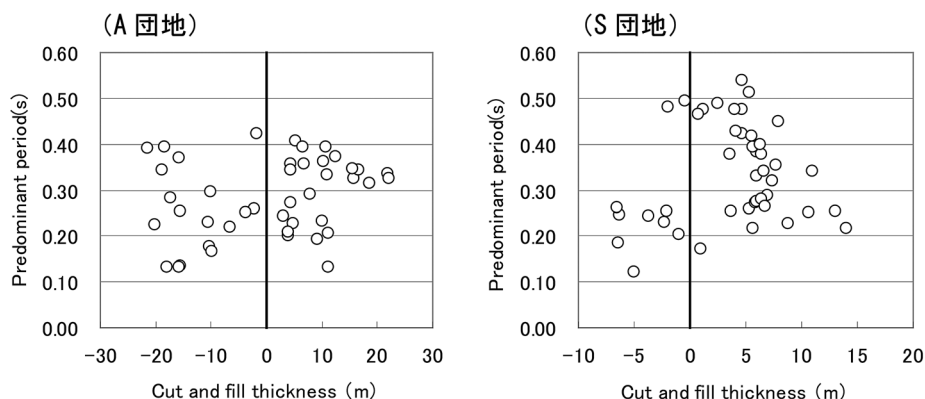


図5 GISによる推定切り盛り厚さと卓越周期の関係

を見ると、微動のピーク周期と切り盛り厚さの関係はバラツキが大きく、単純に盛土厚さが厚くなるほど卓越周期が長くなるとはいえない結果が得られた。

以上の結果より、各観測点の微動卓越周期は、切土部で短く盛土部で長い傾向が概ね認められるものの、盛土厚さとの単純な線形関係で表すことはできないようであり、盛土材の特性や締め固め方法、盛土・切土部分より深部のS波速度構造の影響などを加味した検討が必要であることを意味していると考えられる。

## 5. 常時微動に基づくS波速度構造の推定

### 5.1 直線アレイ観測によるRayleigh波位相速度の算出

本節では、常時微動が高次モードを含むRayleigh波およびLove波であると仮定し、位相速度やH/Vスペクトルの理論値の算出には、1次元水平成層モデルの仮定を前提とした計算手法を用いている。しかし、本研究対象が山麓の谷埋め盛土造成地であるため、地表の不陸の存在や各層の水平方向の連続性の問題などにより、造成地全体を対象とする場合は上述の仮定は完全には成立しないと考えられる。この問題に対し本研究では、微動観測に際して比較的平坦な地点を選定し、アレイサイズを小さくし、対象周期を1秒程度より短く設定することにより、観測点付近の狭い範囲で水平成層の近似ができると仮定する。さらに

単点観測とH/Vスペクトルをターゲットとする観測点直下の地下構造推定を詳細に実施し、造成地全体に順次連結していくことにより、緩やかに変動する1次元構造の組みあわせとして、不連続な山麓造成地の切り盛り分布や地下構造の推定ができると仮定している。

Rayleigh波位相速度は、直線アレイ観測によって収集された、上下動成分に拡張空間自己相関法(eSPAC法)<sup>14)</sup>を適用し、算出した。上下動成分の周波数 $f$ の空間自己相関係数 $\rho$ は、微動計間隔 $r$ ごとに次式の関係がある。

$$\rho(f, r) = J_0 \left( \frac{2\pi fr}{c(f)} \right) \quad (1)$$

ただし、 $J_0$ は第1種0次のBessel関数、 $c(f)$ はRayleigh波位相速度である。eSPAC法では、周波数 $f$ を固定し、多様な微動計間隔 $r$ に対して上式を満足するように、位相速度 $c(f)$ の最適値を算出する。本研究では、4台という少ない微動計による直線アレイ観測により、偏りなく広い微動計間隔 $r$ が得られるように次の配置法を採用した。1) 第1の微動計を原点とし、道路の縦断方向に $r$ 軸をとり、第2の微動計までの距離R1を1mとし、第3、第4の微動計までの距離は公比 $-\sqrt{3}$ の等比数列的に $-\sqrt{3}$  m, 3 mとして同時観測を行う。2) 2回目の観測は、第2から第4の微動計までの距離を同様に広げて、 $-27\sqrt{3} \approx -46.8$ mまでの配置として観測を行う。以上によ



り、 $3 \times {}_4C_2 = 12$ 通りで、1 m ~ 73.8 m まで重複が少なく偏りのない微動計間隔  $r$  で式 (1) の評価が可能となる。なお、式 (1) の評価において、Rayleigh 波の波長  $\lambda$  が微動計間隔  $r$  の 2 倍から 10 倍の範囲を有効として評価した。

### 5.2 S 波速度構造の推定法

S 波速度構造の推定に際しての目的関数  $J$  としては、微動アレイ観測から求められた観測位相速度を用いた次の評価関数を最小化することにより、S 波速度構造の推定を行った。

$$J = \frac{1}{F} = \left( \frac{C_o - C_c}{C_c} \right) \rightarrow \text{minimize} \quad (2)$$

ここに、 $F$ : 適応度関数、 $C_o$ : 観測位相速度、 $C_c$ :  $C_o$  に対応する理論位相速度である。地盤特性のうち、S 波速度および層厚を推定対象とし、各層の密度は固定した。式 (2) の最少化には、遺伝的アルゴリズム<sup>15)</sup>を採用した。その際、遺伝子は 6 ビット、個体数は 20、世代数は 80、交叉確率 0.4、突然変異確率を 0.05 と設定した。

図 6 は A 団地と S 団地における切土部と盛土部および既存ボーリング地点付近で行った直線アレイ観測結果から求めた観測位相速度と理論位相速度を示す。○で示す直線アレイ観測から求められた位相速度は、両団地とも周波数の増加とともに、位相速度が減少する正の分散特性を有し、比較的滑らかな分散曲線であることが確認できる。表層の S 波速度を反映していると思われる高周波数領域の位相速度に着目すると、A 団地では切土部で 270 m/s 程度であるに対し、盛土部では 140 m/s と明らかに小さい。一方の S 団地では、6 Hz 付近では切土部で 600 m/s、盛土部で 350 m/s と速度差が大きい、15 Hz 以上の高い周波数領域で速度差が小さく、切り盛り条件が直接反映されない結果となった。図 6 の破線は、後述する初期 S 波速度モデルによる初期位相速度曲線を示し、実線は、式 (2) を最少化する S 波速度を、後述する遺伝的アルゴリズムを用いて最適化した S 波速度モデルによる理論位相速度曲線を示しており、アレイ観測から求められた観測位相速度を良好に

再現していることが確認できる。

図 7 は図 6 の位相速度を、横軸を波長として表示したものである。位相速度のバラツキに起因して、同じ波長に対して 2 個以上の位相速度が現れているところも見受けられるが、前後の連続性を考慮すると、ほぼ一義的な速度構造を特定できると思われる。長尾・紺野<sup>16)</sup>は PS 検層が実施されている多数の地点で波長  $\lambda$  の Rayleigh 波位相速度と深さ  $Z$  までの走時および層厚平均 S 波速度には良好な相関があることを明らかにしている。小嶋・本<sup>17)</sup>は長尾らの成果を利用し、Rayleigh 波位相速度に基づいて、表層から深さ方向の S 波速度を求める方法を提案している。それによれば、層厚平均 S 波速度を利用する方法は、相関性はやや劣るものの、深度ごとの S 波速度の推定値が安定的に得られること、次式で示す深さ  $Z$  までの層厚平均 S 波速度  $\bar{V}_{sZ}$  は、波長  $\lambda \approx 2.2Z$  の Rayleigh 波位相速度で近似できることを示している。

$$\bar{V}_{sZ} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i V_{s_i}}{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} H_i V_{s_i} + H_n V_{s_n}}{Z} \quad (3)$$

ここに、 $H_i$ 、 $V_{s_i}$ : 層  $i$  の層厚および S 波速度である。この関係を図 7 の位相速度曲線に適用し、図 8 のプロットで示す深さごとの S 波速度分布を求めた。小嶋ら<sup>18)</sup>と同様に、図 8 で速度が急変する深さを参考に層境界を設定し、盛土層、沖積軟弱層、洪積層、風化層および基盤の 5 層からなる初期 S 波速度モデルを設定した。ここで、盛土層と沖積軟弱層の層境界は、速度コントラストが小さく、厳密に層境界を決められないが、造成前の写真や地形図より湿地帯からなる軟弱層の存在が確認できるため、2 層に区分した。なお、基盤層の S 波速度は、対象地域の山体を構成する糸生層の PS 検層結果<sup>17)</sup>を参考に 1800 m/s に固定した。図 9 は、A 団地および S 団地のアレイ観測地点における、図 8 の層境界より設定した初期 S 波速度を基に、最適化した S 波速度構造である。A 団地の切土部の表層の S 波速度は、盛土部の 3、4 層に一致しており、この層は地山に相当すると

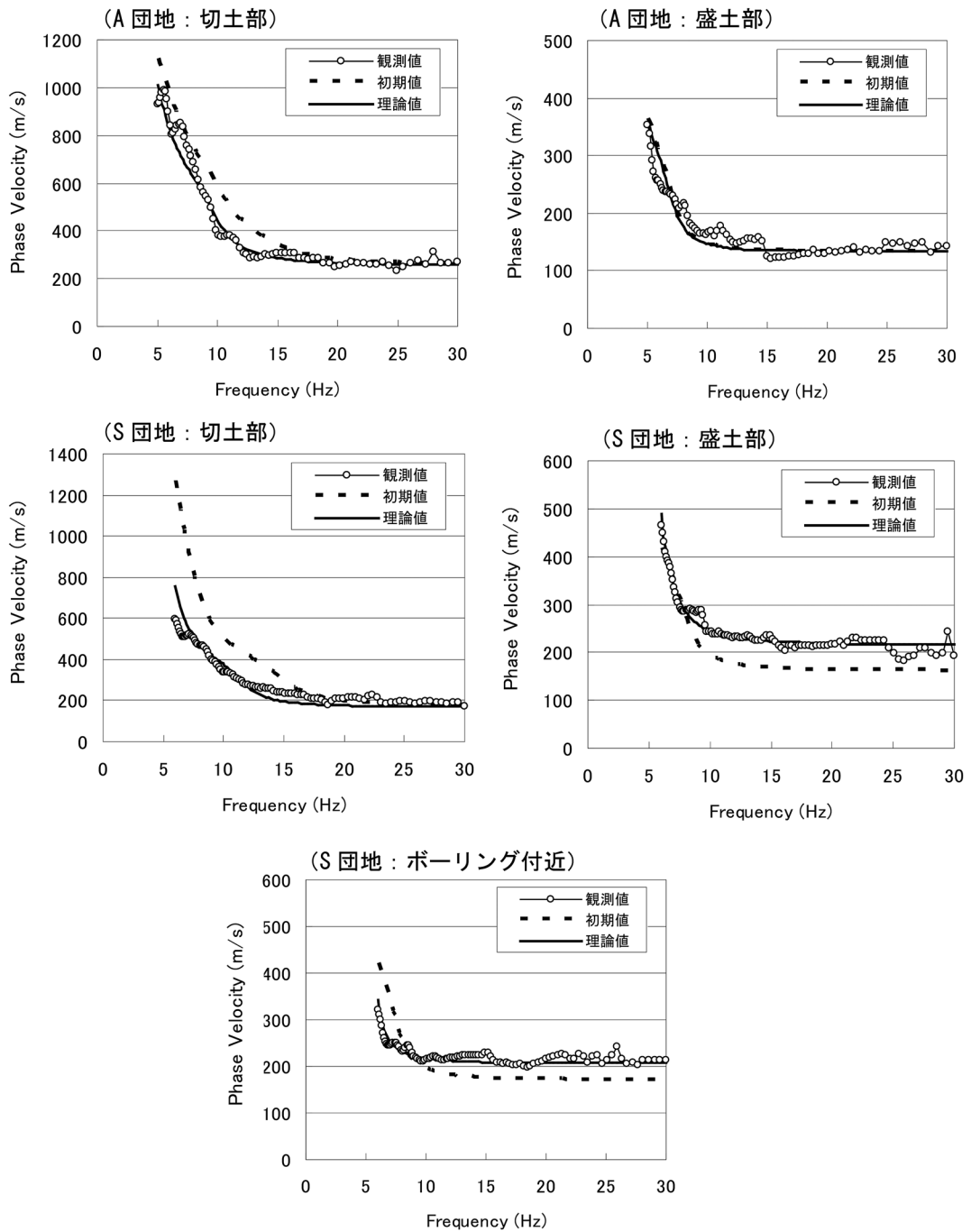


図6 アレイ観測から求めた位相速度と理論位相速度

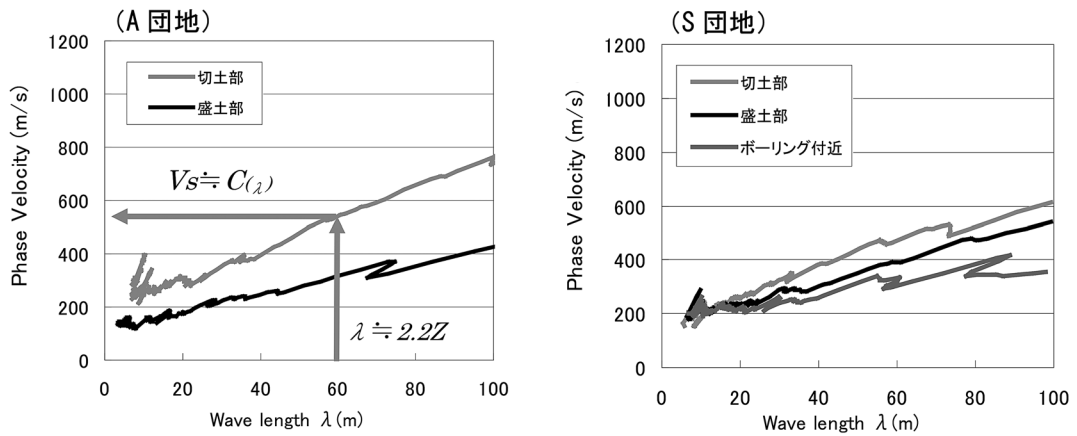


図7 波長ごとの Rayleigh 波位相速度

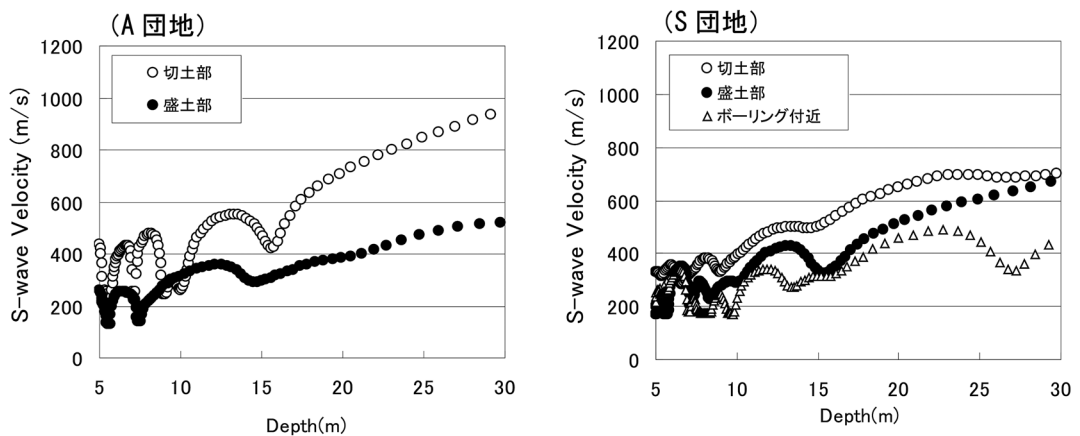


図8 深さごとの S 波速度分布

解釈できる。S 団地では、図 2 (a) に示す通り北東端部付近の図印でボーリング調査が実施されている。図 9 における S 団地の○印は、既存ボーリング情報に道路橋示方書<sup>19)</sup>の方法を適用して推定した S 波速度を示している。N 値から推定した S 波速度は、表層部においてアレイ観測 (ボーリング付近) より推定した結果と概ね対応しているが、10 m 以深では、増加の傾向は一致しているものの絶対値は小さい。最適モデルは図 6 で示した観測位相速度を良好に再現していることから、上記の結果は、地盤の傾斜、ボーリング地点と微動観測点の位置のずれ、N 値による回帰式等の限界な

どの影響によるものと思われるが、これらを分離することは現状では難しい。

### 5.3 H/V スペクトルの逆解析による地盤構造の推定法

ここでは常時微動の H/V スペクトルに基づいて、観測点の地盤構造を推定する方法<sup>20)</sup>を検討する。時松・新井<sup>21)</sup>によれば、常時微動の H/V スペクトル比は、表面波である Rayleigh 波と Love 波からなり、両者の高次モードまで考慮することにより、卓越周期のみならず振幅特性も再現できることを示している。本研究では、彼らの考え方

に基づき、H/V スペクトルの振幅と増減を考慮する次式で示す目的関数を最少化する、地盤各層の層厚およびS波速度の初期値からの修正率を推定することにより、観測地点直下の一次元地盤構造の推定を行う。

$$J = \frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_N} \left( \frac{\log_{10}(H/V_f^O) - \log_{10}(H/V_f^C)}{\log_{10}(\sigma_{H/V,f}^O)} \right)^2 + \frac{1}{N-1} \sum_{f=f_1}^{f_{N-1}} \left( \frac{G_f^O - G_f^C}{2} \right)^2 \quad (4)$$

ここに、 $H/V_f^O, H/V_f^C$ : 周波数 $f$  (10Hz ~ 0.3Hz) の観測および理論 H/V スペクトル比,  $\sigma_{H/V,f}^O$ : 周波数 $f$ での H/V スペクトル比の標準偏差,  $G_f^O, G_f^C$ :

周波数 $f$ と $f+df$ 間の H/V の傾きが正なら 1、負なら -1 に 2 値化した傾きである。Rayleigh 波と Love 波を考慮した理論 H/V スペクトルの算出には斎藤・柁沢<sup>22)</sup>による Compound Matrix 法を用い、Love 波のパワー比は0.7に固定し、2次モードまでを考慮した。式(4)の最少化には、前節と同様の遺伝的アルゴリズムを用いた。

表1は、A 団地およびS 団地における初期地盤モデルである。初期地盤モデルは、前節の直線アレイから推定したS波速度構造モデルを参考に、盛土層、軟弱層、洪積層、風化層および基盤からなる5層モデルとする。なお、第5層の基盤は、深部地盤を考慮することで、表面波の再現精度が向上するという時松・新井<sup>21)</sup>の理論に従って付加

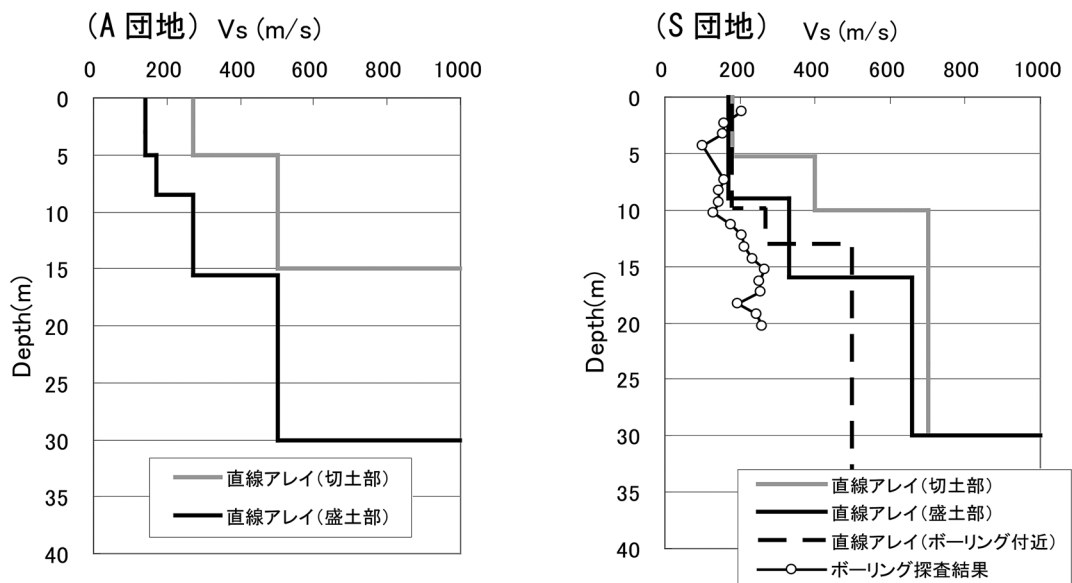


図9 Rayleigh 波位相速度から求めた S 波速度構造

表1 初期地盤モデル

地盤構造	層厚 H(m)		S 波速度 Vs(m/s)		密度 ρ (t/m³)	層厚の修正率
	A 団地	S 団地	A 団地	S 団地		
第1層/盛土層	5	5	140	160	1.8	0.3
第2層/軟弱層	3.5	6	170	150	1.8	0.3
第3層/洪積層	7.5	10	270	230	2.1	0.3
第4層/風化層	14.4	10	500	600	2.1	0
第5層/新第三紀基盤	0	0	1800	1800	2.4	0

した。また、各層のS波速度は前節の位相速度曲線に基づく逆解析結果である図9の値を参考に設定し、上部3層の層厚を未知とし、その修正率を、遺伝的アルゴリズムを用いて探索した。

対象地域全体のS波速度構造の評価は、アレク観測点から最適化を開始し、推定された構造を隣接観測点の初期モデルとして最適化を行うことを繰り返すことによって行った。推定開始地点は、A団地はAE4地点とS団地はA17地点である。なお、上記の手順で推定したモデルによる理論H/Vが観測H/Vを十分再現していないと判断された少数の地点では、観測H/Vスペクトルのピーク周期等を参考にして、初期地盤モデルの層厚を調整することも併せて行った。

#### 5.4 推定地盤構造

図10は、A団地の切土部および盛土部における、観測H/Vスペクトル(Observed)と、最適地盤モデルによる理論H/Vスペクトル(Optimized)の比較の例である。両者を比較すると、振幅の絶対値の再現性は十分とはいえないが、ピーク周期が概ね再現されるとともに、短周期側の小さな山谷が対応していると判断できる。なお、紙面の都合でここでは示さないが、ピーク周期はインピーダンス比の大きな第3層下面までの深さに依存し、

ピーク周期より短周期側の山谷の位置は1、2層の層厚で変化する傾向にあることを確認している。

図11は、図1(a)および図2(a)の二重線で示したA団地A測線およびS団地B測線の推定断面構造を示す。図の縦軸は現在の地盤面を基準としたときの深さを表しており、棒グラフは推定された盛土層、軟弱層および洪積層の厚さを示したものである。折れ線は等高線・標高地図を基にGISによって求められた造成前後の盛土高を参考値として示している。H/Vスペクトルの逆解析から推定された盛土層厚は、全体的にGISの等高線・標高地図から求めた値に対応しているが、S団地のB05地点のように小さく見積もられている地点も見受けられた。このように切り盛り境界付近での不一致は他の調査断面でも同様に認められた。この要因としては、理論H/Vスペクトルの算出に際して設定している水平堆積構造の仮定が、切り盛り境界付近で成り立たないこと、GISで用いた古い地図の縮尺が2万5千分の1と大きく、盛土厚さの推定精度が低いことなどを挙げることができる。

図12はすべての単点3成分観測点の最適構造について、表層から洪積層までの推定層厚の合計と、H/Vスペクトルの卓越周期との相関である。図5

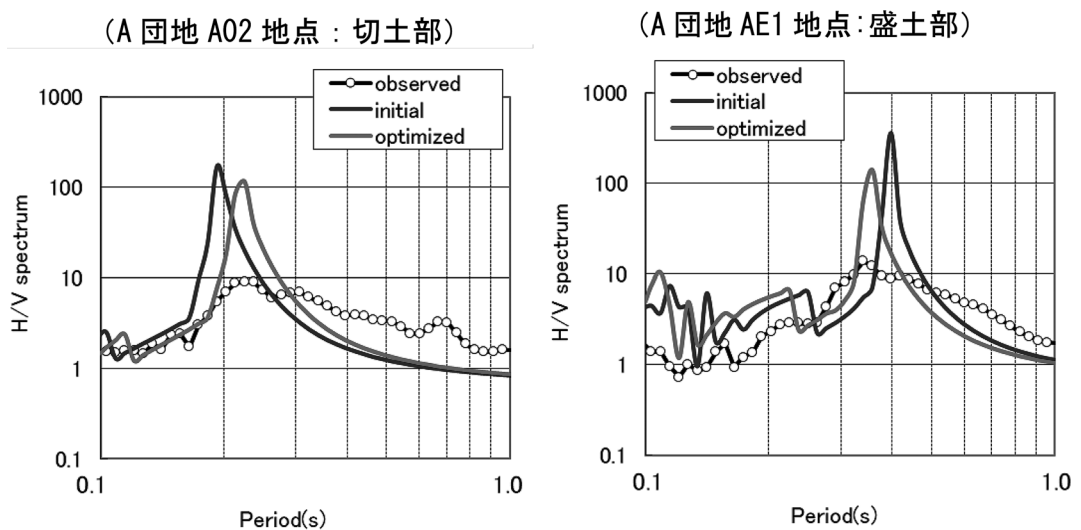


図10 H/V スペクトルの最適化例

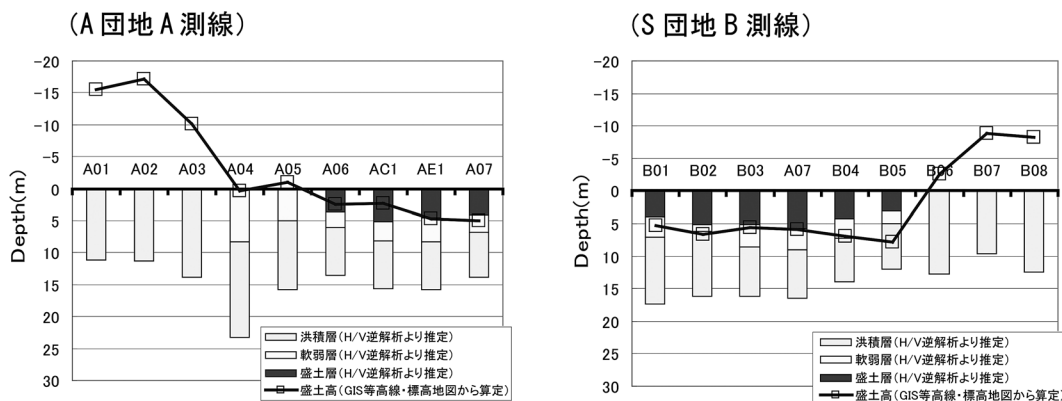


図11 推定した層厚分布

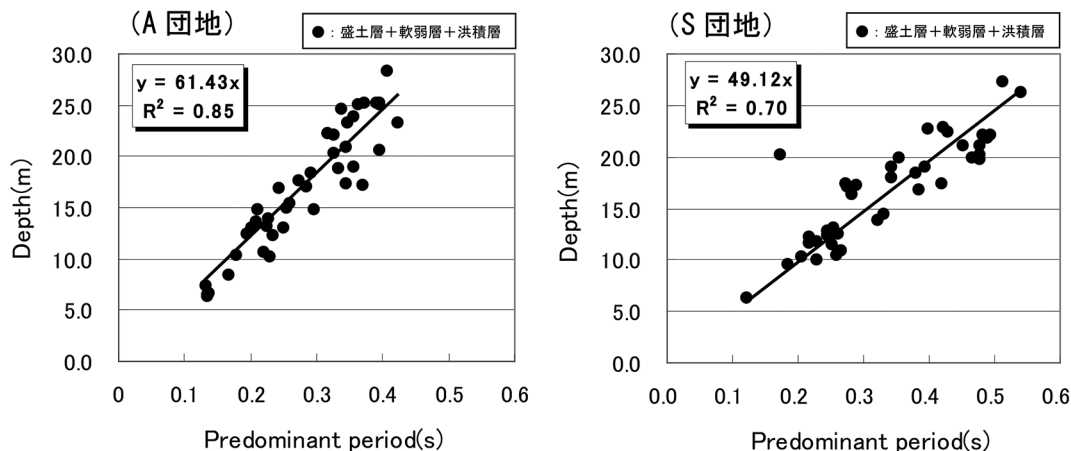


図12 洪積層までの深さと卓越周期の関係

に示した GIS から求めた切り盛り厚さと卓越周期の関係と比較して、明らかに高い相関が認められる。図5と図12の結果から、切り盛り造成地の卓越周期は、切り盛り厚さのみならず、造成前の軟弱層や洪積層の影響に依存していること、図12の近似式に4分の1波長則を適用し、平均S波速度を想定すれば、硬質地盤（ここでは風化岩層）までの深さの概略値が得られることを示唆していると考えられる。

次に H/V スペクトルに基づく推定構造の空間補間を行い、対象地域全体の3次元地盤構造を求めた。図13は、A団地におけるGISの空間補間により求めた盛土分布であり、図13(a)は造成前後

の等高線・標高地図から算出した盛土分布を、図13(b)は微動観測結果を用いて逆解析により推定した盛土分布を示す。両者の比較において、細部の輪郭は一致度が低い部分が認められるものの、谷筋を造成した2組の長い盛土分布を概ね再現しており、全体傾向は類似していると判断できる。

## 6. おわりに

本研究では、福井県内の谷埋め盛土造成地の盛土部と切土部を対象に、機動性の高い常時微動観測を実施し、分析対象を短周期（短波長）領域に限定してアレイサイズを小さくするとともに、得られたS波速度構造を、詳細に実施した単点観

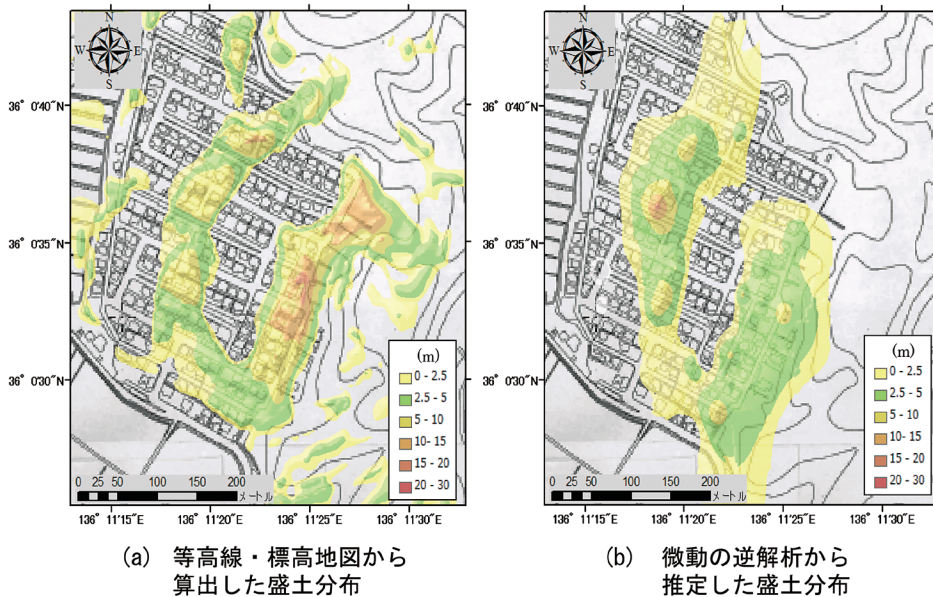


図13 盛土分布の比較 (A 団地)

測点の地盤構造に順次連結することで不連続な山麓造成地の切り盛り分布や地下構造を推定する方法を提案した。本提案を用いた単点三成分観測と直線アレイ観測結果から、造成地の振動特性、盛土層厚およびS波速度構造を推定し、標高データとの比較からその妥当性を検証した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期は、切土部で短く盛土部で長い傾向が認められたが、盛土厚さと単純な線形関係で表すことはできないようであり、盛土地盤下部のS波速度構造の影響を加味する検討が必要であることが確認された。
- 2) 提案する直線アレイ観測法に拡張空間自己相関法を適用した結果、両団地とも周波数の増加とともに、位相速度が減少する正の分散特性を有し、最適化されたS波速度構造による理論値と観測結果を良好に再現していることが確認できた。
- 3) すべての単点三成分観測点に対し、H/V スペクトル比をターゲットとする逆解析を行い、谷埋め盛土全体のS波速度構造の推定を試みた

結果、標高データに基づく切り盛り分布と概ね近い構造が推定できる可能性がある。

- 4) 卓越周期の微動特性は、盛土層のみを対象とした場合、卓越周期と盛土厚との明瞭な関係は認められなかったが、基準深さを洪積層下部とすることによって、卓越周期と推定地盤の明瞭な線形関係が確認できた。

本論文で示した微動観測法は、比較的短時間で観測が可能であるため、広い範囲で精密な観測に対応できる長所を有している。一方、微動から求められる卓越周期やS波速度情報は、3次元構造の影響が避けられず厳密なものではないが、切り盛り条件と大きな矛盾がないことが確認できた。以上の得失から、本提案手法は、厳密な地盤調査を行う地点の選別、評価結果の補間などに活用し、地盤変動予測調査の経済性や信頼性の向上に資する可能性があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 古関潤一・若井明彦・三辻和弥：東北地方太平洋沖地震災害調査報告(速報)宮城県内陸部の被害，地盤工学会誌，Vol.59, No.6, pp.40-43,

- 2011.
- 2) 釜井俊孝：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震によって発生した造成地盤の地すべり，自然災害科学，Vol.30，No.2，pp.193-197，2011.
  - 3) 森 友宏・風間基樹：2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市泉区の谷埋め盛土造成宅地の被害調査，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.163-173，2012.
  - 4) 国土交通省：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説，[http://www.mlit.go.jp/crd/web/topic/pdf/guideline\\_ver.3.pdf](http://www.mlit.go.jp/crd/web/topic/pdf/guideline_ver.3.pdf)，2018年4月23日.
  - 5) 福井県建設技術公社：福井県地質図2010年版，2010.
  - 6) 国土地理院：2万5千分の1地形図 福井，1962.
  - 7) 国土地理院：2万5千分の1地形図 鯖江，1964.
  - 8) L. Mitas and H. Mitasova: General Variational Approach to the Interpolation Problem, Computer and Mathematics with Applications, Vol. 16. No. 12. pp.983-992, 1988.
  - 9) Esri 社，ArcGIS Pro，<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm>，2017年10月20日.
  - 10) 国土地理院，基盤地図情報サイト，<http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>，2016年11月2日.
  - 11) 長 郁夫・多田 卓・篠崎祐三：極小アレイによる新しい微動探査法：浅部地盤平均S波速度の簡便推定，物理探査，61巻，6号，pp.457-468，2008.
  - 12) 盛川 仁・大堀道広・飯山かほり：微動の2点同時観測から求められる空間自己相関係数と位相速度に関する一考察，地震工学会論文集，10巻，2号，pp.89-106，2010.
  - 13) 小嶋啓介・森谷嘉文：線状アレイ観測による Rayleigh 波位相速度推定法に関する考察，土木学会第71回年時学術講演会講演概要集，pp.307-308，2016.
  - 14) 凌 魁群・岡田 廣：微動探査法における空間自己相関法の拡張，物理探査学会第89回学術講演会論文集，pp.45-48，1993.
  - 15) 石田良平・村瀬治比古・小山修平：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用，森北出版，1997.
  - 16) 長尾 毅・紺野克昭：常時微動のアレイ観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究，土木学会論文集，No. 696/I-58，pp.225-235，2002.
  - 17) 小嶋啓介・本耕 大：常時微動アレイ観測に基づく福井平野のS波速度構造の推定，土木学会論文集，A1，68，pp.98-109，2012.
  - 18) 小嶋啓介・辻森卓実，苗加一典：常時微動観測に基づく福井平野東西断面のS波速度構造の推定，応用力学論文集，Vol. 7，pp. 119-128，2007.
  - 19) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，日本道路協会，pp.25-26，2002.
  - 20) 小嶋啓介・安井 譲：常時微動観測に基づく福井平野の深部地盤構造の推定，自然災害科学，Vol.33，No.4，pp.359-374，2015.
  - 21) 時松孝次・新井 洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第511号，pp.69-75，1998.
  - 22) 斎藤正徳・柁沢宏之：成層構造に対する反射率，表面波分散曲線の計算II. レイリー波の計算，物理探査学会誌，Vol.46，No.4，pp.283-298，1993.
- (投稿受理：平成30年8月7日  
訂正稿受理：平成31年3月17日)

## 要 旨

近年，盛土造成地の地震被害が顕在化している。本研究では，常時微動の直線アレイ観測と単点3成分観測に基づき，盛土造成地全体の地下構造を推定する方法を提案し，福井県内の2個所の谷埋め盛土造成地に適用した。その結果，造成地の微動卓越周期は，盛土層厚と単純な線形関係で表すことができず，盛土層下部のS波速度構造の影響を加味する必要があることを確認した。また，直線アレイ観測から地盤条件と矛盾のない Rayleigh 波位相速度が算出され，その位相速度を基にS波速度構造を求めた。さらに，微動観測点から得られた H/V スペクトル



をターゲットとする逆解析により、盛土層厚ならびにそれより下層の地下構造の推定を行った。最後に、各観測点で得られた地下構造を空間補間することによって、造成地全体の地下構造を推定した。推定地下構造を既存の標高データと比較し、その妥当性を検証した結果、本提案手法は、盛土造成地全体の地下構造を概ね推定できることが示された。