

常時微動アレイ探査と単点三成分観測を併用した建設敷地内の浅層構造推定

ESTIMATION OF SUBSURFACE VELOCITY STRUCTURES IN A CONSTRUCTION SITE USING MICROTREMOR ARRAY EXPLORATION AND SINGLE-POINT THREE-COMPONENT OBSERVATION

小 阪 宏 之*¹
Hiroyuki KOSAKA

The physical properties of the soil in the construction site, especially the depth of bearing stratum and the shear wave velocity structures, are crucial indices for the structural design and cost estimation of the foundation. Considering the cost, investigation period, and the influence on the surrounding environment (noise, vibration, etc.), though direct explorations by the excavation investigation are the mainstream at present, nondestructive geophysical explorations are reasonable to be examined as an alternative method. Therefore, the authors have been collecting soil property data using nondestructive geophysical explorations and proceeding the investigation of its applicability to the ground investigation.

In this paper, we present an example of estimating the subsurface velocity structures in a construction site where the underground inclination is feared using microtremor array exploration and single point three-component observation, which are more convenient nondestructive geophysical explorations methods, and report the points of attention when we carry out the velocity structures identification using microtremor.

Keywords: *Microtremor Array Exploration, Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio, Inclined Bedrock*
常時微動アレイ探査, 微動水平上下スペクトル比, 傾斜基盤

1. はじめに

建設敷地内の地盤物性値、とりわけ支持層深度やせん断波速度構造は基礎の構造設計及び積算を行うにあたって非常に重要な指標である。現在も掘削調査による直接的な探査が主流であるが、コストの面や、調査期間、周辺環境への影響（騒音や振動等）を鑑みるに非破壊の物理探査を用いた手法を代替手法として検討することは理にかなった選択である。また、PS 検層を実施しないサイトにおいては、地震応答解析を行う上で、標準貫入試験で得られた N 値分布から経験的な手法¹⁾²⁾などでせん断波速度構造を算定するよりも、このような物理探査手法による波動論を用いて算定された速度構造や増幅率を用いる方が物理的に適切であると考えられることから、技術開発センターでは非破壊の物理探査を用いた地盤データの収集及び適用性の検討を続けている³⁾⁴⁾。

非破壊の物理探査を用いた手法としては屈折法や反射法等が代表的なもので、特に建設敷地内地下の不整形構造推定という目的には、MASW（多点表面波探査）⁵⁾などが主に使用されるが、地表面加振が必要となり、掘削調査に比べると簡易な手法であることは確かであるが、人的リソースの問題から、広く展開することは容易ではない。そのため、少ない観測点で済み、かつ地表面加振が不要である常時微動を用いた探査が計測の簡便性からよく使用される。常時微動による物理探査には、常時微動アレイ探査や単点三成分観測が挙げられる。

常時微動アレイ探査は主に Capon によって提案された F-K 法⁶⁾と、Aki によって提案された SPAC 法⁷⁾に大別される。特に後者に

ついては、1980 年代になってから SPAC 法が岡田ら⁸⁾⁹⁾によって一般化され、2000 年代になると長らによる SPAC 法の系統に分類される CCA 法の発明¹⁰⁾及び解析コードの公開¹¹⁾なども相まって近年広く用いられるようになってきた。これらは、従来は強震動予測等に用いられてきた手法であり、掘削不可能な深度の地下速度構造を求める目的で大規模平野の地下速度構造推定等に用いられてきた¹²⁾¹³⁾などが、近年になって極小アレイを用いた探査の適用例も増加しており、一般的な建築工事で必要となる工学的基盤程度の深度を対象として用いられるようになってきている¹⁴⁾¹⁵⁾。常時微動アレイ探査の概要については、昨年度成田ら¹⁶⁾でも報告しているので参照されたい。

単点三成分観測による地下速度構造推定については、微動水平上下スペクトル比（Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio, MHVR）を用いるのが一般的であり、経時変化が少なく、安定的に地盤特性を得られるといった特徴がある。MHVR の物理的解釈としては、長らく中村ら¹⁷⁾に代表される表層地盤の S 波増幅特性を反映しているとする解釈、時松・新井¹⁸⁾に代表されるような表面波の水平成分と鉛直成分の振幅比を反映しているとする解釈の相反する二つの解釈がなされてきたが、2000 年代後半になって、拡散波動場理論に基づいた MHVR の解釈¹⁹⁾が提唱された。この解釈は、表面波だけではなく、全波動場を解かなければならないという性質から、計算コストが大きいという欠点があるが、逆説的に表面波と実体波の双方を考慮可能な解釈であり、近年では留数定理を導入した

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士（工学）

高速解法を用いたインバージョンコードも公開され²⁰⁾、こちらについても普及が進んでいる^{21),22)}など。

これらの手法の理論は全て水平成層構造が前提となっているが、近年では傾斜構造への適用性が精力的に検討されており、検討する周波数帯や傾斜の程度が軽微であれば適用可能であるということ^{23),24)}などや、逆に傾斜構造上で得られたデータの性質や、水平成層構造上で得られる特性との違いによって傾斜方向や2次元、3次元的な地形構造を把握する試み^{25),26)}なども進められている。

常時微動アレイ探査や単点三成分観測は、観測点直下の構造を反映するものであり、2次元、3次元的な地形構造を把握するためには多数の盛替えを行い、複数の地点での1次元的な構造を求めて、最後に重ね合わせるという操作を行う。常時微動アレイ探査を用いたケースでは測線上で多数の常時微動アレイ測定を実施するチェーンアレイ探査^{27),28)}などが用いられることもあるが、計測点の墨出しや盛替えに人的リソースが必要となるため、これについても広く展開するにはハードルが高い。

そこで、本稿では、計測に必要な人的リソースが少なくてもよい少数の常時微動アレイ観測と、多点単点三成分観測の組み合わせによる浅層構造推定の実施例と、それによって得られた結果の紹介といった部分に焦点を当てながら、筆者が常時微動を用いた地盤構造同定を行う際の留意点等をお示しする。従って数学的、物理学的に新たな知見が得られる、といった類のものではない事についてはご了承ください。

2. 検討対象サイト概要と測定概要

2.1 検討対象サイトの概要

本稿で検討対象としたサイトの概要を図1に示す。図1中の等高線で示す通り、周辺敷地状況より建設敷地は山肌を切盛して造成し

たとえられ、地下に傾斜構造の存在が懸念されるサイトである。本サイトでは、既存建物解体後に同位置に新築建物を建設する計画となっており、基礎の基本設計及び積算を行うにあたって、既存建物解体前におおよその支持層深度等の地盤物性値を知っておく必要があったが、既存建物施工時の地盤調査記録が残っておらず、近隣の調査データも乏しいことに加えて、敷地境界と既存建物の間が非常に狭いということ、建設敷地内の地表面傾斜が激しいことから、機器の搬入の制限上、敷地内の一部で既存建物解体前の掘削調査を実施することが出来なかった。本サイトにおける標準貫入試験実施予定位置は図1中の丸で示す点である。その中の赤丸で示す点は、標準貫入試験を実施出来た地点、図中青丸で示す点は、標準貫入試験を上述の理由につき実施出来ていない地点である。本測定では、事前に掘削調査を行う事が出来なかった青丸で示す地点(No.1~No.5)の浅層構造を推定することを目的とする。

2.2 測定概要

本測定では図1中に示すarray1、およびarray2測定点で常時微動アレイ観測を行い、標準貫入試験実施地点及び実施予定地点直上の計14点において単点三成分測定を行った。測定は2020年5月29日の日中の晴天下で行った。本測定で使用したアレイ形状を図2に示す。図2に示す通り、中心点を有する正三角形形状のアレイ形状にセンサを配置し、半径の異なる2ケース(1-array, s-arrayとする)の測定を実施した。各ケースは機器の個数の制約上、同時計測ではなく、個別に行った。図3に常時微動アレイ測定状況を、図4に単点三成分測定状況を示す。全ての測定は最低20分間以上、特に標準貫入試験未実施地点では40分間以上の測定を実施し、サンプリング周波数は200Hz、倍率は50倍とした。測定にはセンサローガー一体型可搬型三成分サーボ型加速度計JU410(白山工業製)を用い、

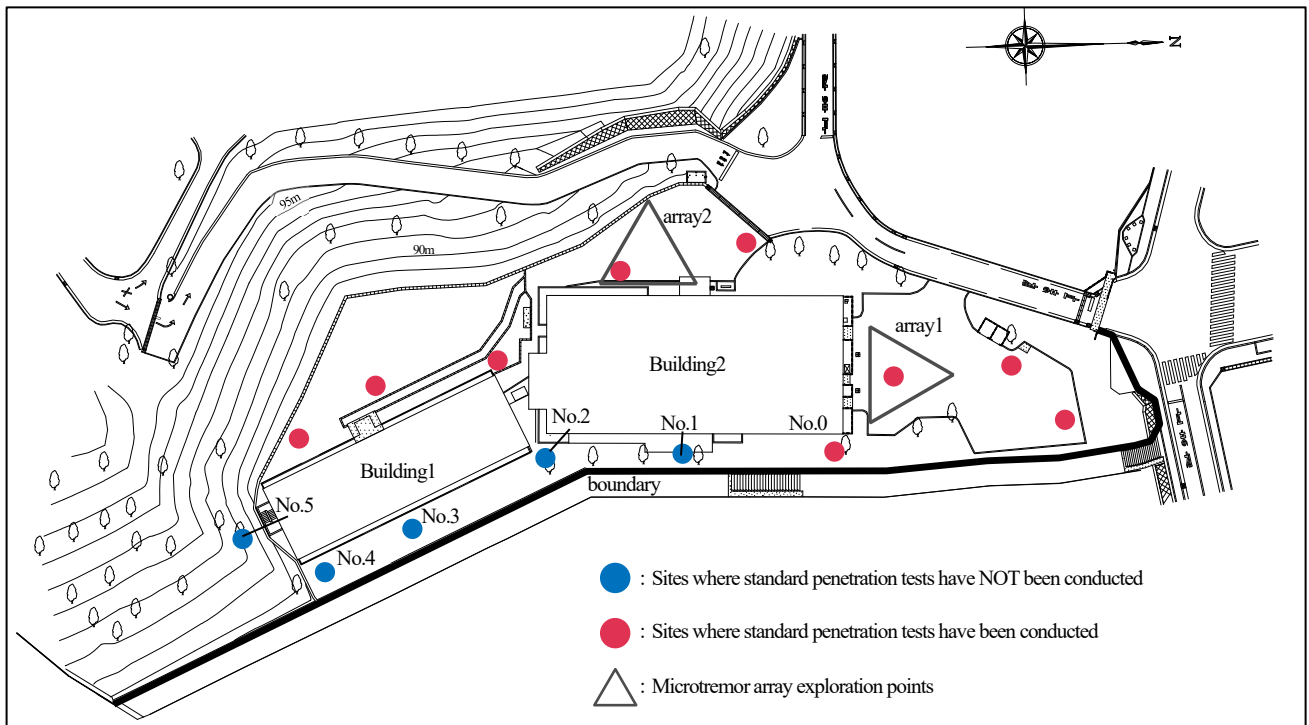


図1 検討対象サイトの概要

機器に内蔵している GPS により時刻校正を行った。常時微動アレイ観測実施時及び単点三分観測実施時には、方位磁針を用いて目視で東西方向 (EW 方向)、南北方向 (NS 方向) を合わせて測定を行った。

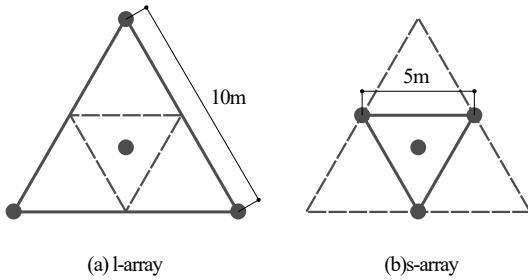


図2 常時微動アレイ配置図



図3 常時微動アレイ測定実施状況



図4 単点三分測定実施状況

3. 浅層構造推定の解析手順

3.1 解析手順概要

本稿では、以下の過程で浅層構造の推定を行う。

1. 半径 10m 程度の微動アレイを組むことが可能で、かつ標準貫入試験を実施している地点において、常時微動アレイ計測および単点三分観測を実施する (2 章に記載)。
2. 浅層構造を推定したい地点で単点三分観測を実施する (2 章に記載)。
3. 常時微動アレイを実施した地点で Rayleigh 波位相速度を算定する。
4. 算定した Rayleigh 波位相速度をターゲットとしてインバージョンを試行し、同地点の H/V スペクトル比の理論解との整合性を加味しながら基準とするせん断波速度構造を同定する。
5. 得られた基準点のせん断波速度構造を参照して、敷地内の各

層のせん断波速度は一定で、層厚のみが変化すると仮定して試行錯誤的に検討対象地点直下のせん断波速度構造を同定する。

上記の解析工程の 2 章に記載していない部分の詳細については次節で説明する。

3.2 解析手順詳細

(1) 位相速度曲線の算定

敷地内で実施した常時微動アレイ観測より、測定点直下のせん断波速度構造を推定する手順について述べる。微動アレイ観測から位相速度曲線を求める手法としては、前述の通り、主に F-K 法⁶⁾、SPAC 法⁷⁾、CCA 法¹⁰⁾や ncCCA 法²⁹⁾が挙げられる。既報¹⁶⁾で建設敷地の支持層や工学的基盤の推定のように浅層部を対象とした常時微動アレイ探査を実施する場合は、同時多入力波動場が想定されるという観点から、波動の到来方向を算定できる F-K 法が頑健であると考えられることを示したが、長波長域に対しては、F-K 法では観測点数はなるべく多くとった方が望ましい点 (岡田ら⁹⁾によると最低 7 点は必要であるとされている) と、本測定では観測機材数の制約上、中心有三角形配置で観測を行った点を踏まえて、上記の全ての手法により位相速度曲線を算定して、比較検討を行う事とした。

array1 において各手法で算定した位相速度の比較を図 5 に示す。各手法共に 1 セグメントを 40.96 秒間 (8192 離散点) として切り出

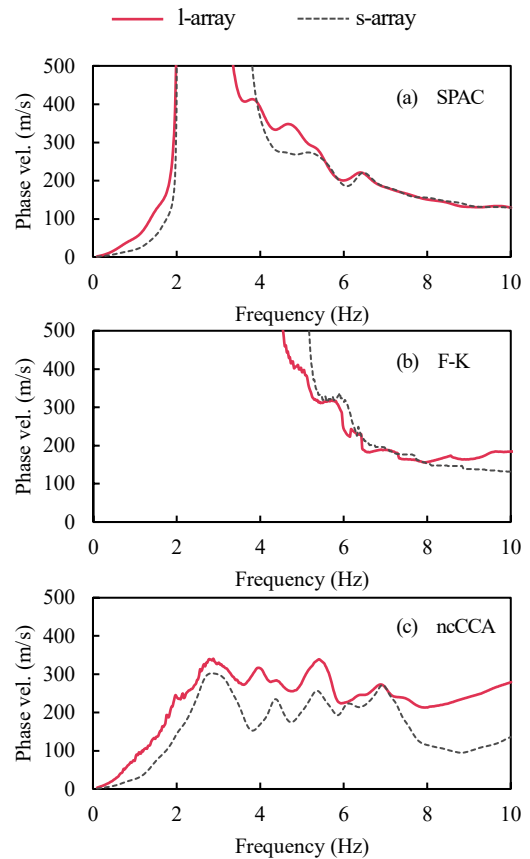


図5 各手法によって算定した位相速度。赤実線は l-array から、黒点線は s-array から算定した位相速度。

し、振幅の RMS 平均が測定した加速度時刻歴波形全体の RMS 平均を上回らないセグメントを選び、位相速度を算定した。SPAC 法では l-array と s-array の位相速度曲線は 5Hz 以降の帯域でよく一致しており、F-K 法で求めた位相速度とも比較的良好な対応を示しているが、ncCCA 法で算定した位相速度のみ傾向が異なる結果となっている。ここでは、傾向が異なる ncCCA 法を除いた双方の位相速度をターゲットとしてその後の分析を進め、後述する MHVR の理論解の再現性の良いモデルを選択することとした。なお、三成分加速度計を使用しているため、三成分の記録が得られているが、今回は Rayleigh 波のみを対象としたため、解析には上下成分記録のみを使用している。

(2) 速度構造のインバージョン

得られた位相速度曲線から直下のせん断波速度構造を推定する。位相速度からせん断波速度構造を求める手法としては、Ballard の手法³⁰⁾や、紺野・片岡による手法³¹⁾等、直接求める手法も多数提案されているが、本稿では観測値を再現できるモデルを、発見的手法を用いたインバージョンによって算定した。発見的手法を用いる利点としては、ニュートン法といった手法と比べて局所解に陥る可能性を軽減できる点と、探索範囲の設定以外では解が初期モデルに依存しないという点が挙げられる。

本稿では、初期モデルとして、array1 測定点 (以降、基準点とする) 直下で得られている N 値柱状図から太田・後藤式²⁾で算定したせん断波速度構造を 4 層置換したモデルを使用した。基準点の標準貫入試験結果と、初期モデルを図 6 に示す。インバージョンには遺伝的アルゴリズム (GA) と焼きなまし法 (SA) のハイブリッドである、ハイブリッドヒューリスティック法³²⁾ (HHS) を使用した。HHS の諸元としては、GA 部分については個体数を 50 個体、世代

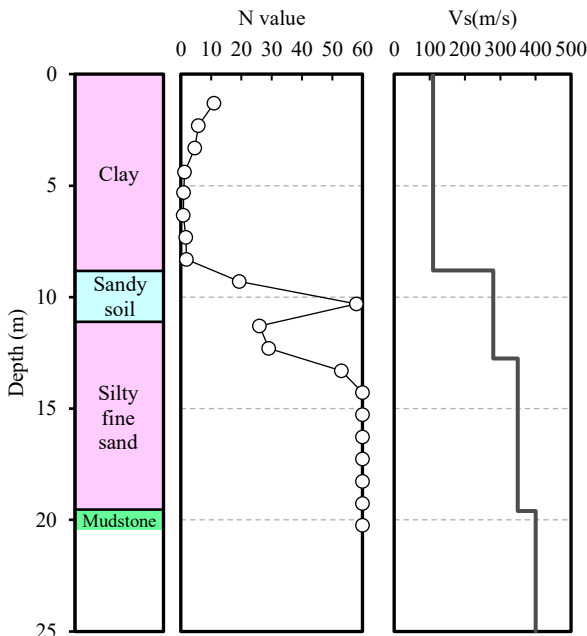


図 6 基準点直下の土質柱状図とせん断波速度構造初期モデル

数を 200 世代、交差率を 0.7、突然変異率を 0.1 とし、エリート保存を実施、SA 部分については 10 世代毎に温度が指数的に低下していくモデルとした。せん断波速度は土質柱状図に従うという仮定の元、層厚は固定とし、せん断波速度構造のみ初期モデルからの変動を 0.7 倍-1.3 倍で許容した。粗密波速度については、Ludwig *et al.*³³⁾に従って都度せん断波速度から算定し、土質密度については、大崎³⁴⁾に従って土質に合わせた値を設定し、固定とした。インバージョンは Rayleigh 波の基本モードのみを対象とし、上述の SPAC 法および F-K 法で算定した位相速度の中で、逆分散を示していない周波数範囲 (SPAC 法の場合は 6.5Hz-10Hz、F-K 法の場合は 5.2Hz-10Hz) をターゲット位相速度として、式(1)で示す misfit が最小となる構造を探索した。なお、インバージョンにおいて逆転層は許容するが、最下層の速度構造が最大になるような拘束をかけた。理論 Rayleigh 波の分散曲線の計算には Hisada³⁵⁾の解析コードを使用した。

$$misfit = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} [C_{obs}(f) - C_{the}(f)]^2 \quad (1)$$

ここで、 C_{obs} 、 C_{the} は観測と理論 Rayleigh 波位相速度、 f は周波数、 f_{max} 及び f_{min} は探索範囲の上限周波数と下限周波数である。

(3) MHVR の算定

ここでは、MHVR の算定手順を述べる。単点三成分測定実施点で得られた加速度時刻歴波形から、線形トレンドを除去した後、50% オーバーラップさせながら、1 セグメントを 40.96 秒 (8192 離散点) として抽出する。各区間の時刻歴波形に前後 1 秒のコサインテーパを掛け、EW 成分、NS 成分、UD 成分それぞれについて、パワースペクトルを算定し、バンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウで平滑化してから、比を取った物の平方根を各区間の MHVR として定義する。経時変化が少ないスペクトル特性がこの地点の普遍的な特性であると仮定し、これらの各区間の MHVR からばらつきが少ない 50 区間を遺伝的アルゴリズムで選定し、選定した 50 区間のアンサンブル平均を取ったものを MHVR とした。遺伝的アルゴリズムの諸元は個体数を 100 個体、世代数を 100 世代とし、交差率 0.7、突然変異率 0.1 として、目的関数としては 50 区間の MHVR の式(2)で示される variance が最小となる組み合わせを探索した。

$$NSV\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NSV(i, f) - \overline{NSV(f)})^2}$$

$$EWV\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EWV(i, f) - \overline{EWV(f)})^2} \quad (2)$$

$$variance = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{NSV\sigma + EWV\sigma}{f}$$

ここで、 n は選択する区間数、NSV は NS 成分に対する UD 成分の区間 MHVR、EWV は EW 成分に対する UD 成分の区間 MHVR である。

(4) MHVR 記録を元にした浅層構造の推定

前項で算定した各地点の MHVR を再現できる速度構造モデルを推定する。前述の通り、拡散波動場理論に基づいた MHVR の算定は計算コストが大きいという欠点があるため、ここではインバージョンを行わずに試行錯誤的に MHVR を再現できる構造を求める。基準点直下の構造を基準モデルとして、建設敷地内ではせん断波速度は変化せず、層厚のみが変化するという仮定の元、表層の層厚を変化させながら、検討対象地点の MHVR の再現性が良いモデルを決定する。

4. 結果および考察

4.1 基準点直下の速度構造の同定結果

図 7 に、SPAC 法及び F-K 法で得られた位相速度をターゲットとして求めた基準点直下のせん断波速度構造同定結果を、図 8 に得られたせん断波速度構造から推定した Rayleigh 波基本モードの位相速度を、図 9 に得られた速度構造から求めた拡散波動場理論に基づいた MHVR の理論値と観測値の比較を示す。図 7 に示す通り、どちらをターゲットとした場合も、2 層目まではよく一致しており、互いによく一致していた位相速度の高周波数帯成分についてはほぼ 2 層目までで決まっていると考えられる。逆に言えば、それより下層については算定手法によって位相速度が安定していない低周波数側の領域が反映されるものと考えられるため、常時微動アレイで得られた位相速度のみで浅層構造を決定する事が出来ない。ここでは、より深い構造を反映すると考えられる MHVR との整合性を鑑みることとし、図 8、9 に示す通り、SPAC 法で得られた位相速度を元に算定した基準点直下のせん断波速度構造の方が、インバージョンのターゲットとした範囲の位相速度と、MHVR を良く再現できるモデルとなっているため、こちらを選択することとした。

図 7 に示す通り、同定されたモデルでは基準点直下のせん断波速度構造には逆転層があることが推察される。こういったケースでは高次モードの影響が卓越する可能性が報告されており³⁶⁾、高次モードまで考慮してインバージョンを行う様式も存在している^{37)など}。ここでは、得られた構造の逆転層の影響が同定に及ぼす影響について検証する。同定した速度構造から算定した Rayleigh 波の 2 次モードまでのメディアムレスポンスを図 10 に、Tokimatsu *et al.*³⁶⁾に従って算定した高次モードまで考慮した見かけの Rayleigh 波位相速度の理論値と観測値の比較を図 11 に示す。図 10 及び図 11 に示す通り、同定された構造は 6Hz 以降についてはほぼ基本モードが卓越する構造となっており、今回ターゲットとした 6.5Hz 以降の周波数帯についてはおおよそ基本モードのみの同定で問題がないことが確認された。4.5Hz~5.5Hz 辺りの帯域については高次モードによる見かけ位相速度の影響が卓越しているという解釈を行うことも出来るが、その中間の領域の逆分散や手法によるばらつきについては現在の所、明確な答えを持ち合わせていない。これらについては、観測を行った時間の周辺の振動源の影響や、観測記録の SN 比、設定する層数、粗密波構造、土質密度の影響等様々な影響が考えられるため、同地点での再測定を実施し、今後明らかにしていく予定である。

こういった様々な要因により、同定結果にばらつきが生じる事については既に各所で報告されており、大堀ら³⁸⁾は、大阪堆積盆地モ

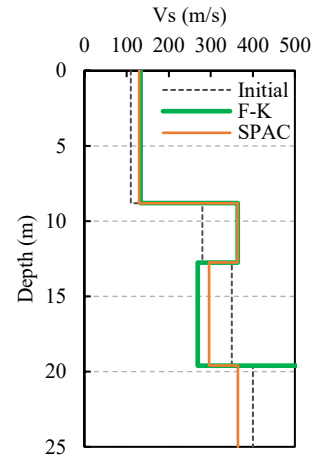
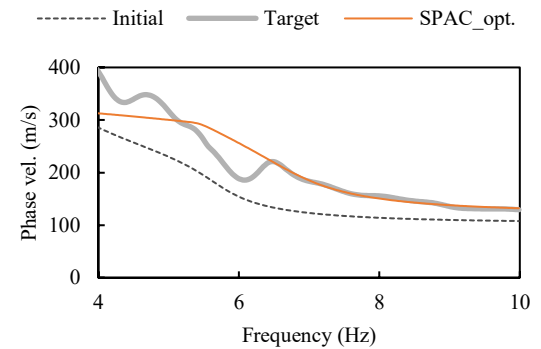
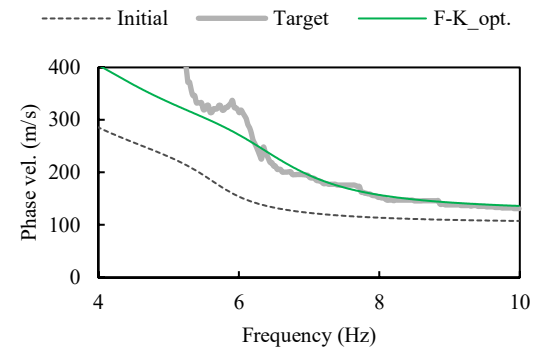


図 7 同定されたせん断波速度構造の比較



(a) SPAC 法で得られた観測値と最適モデルの理論値の比較



(b) F-K 法で得られた観測値と最適モデルの理論値の比較

図 8 各手法で得られた Rayleigh 波位相速度の理論値と解析値の比較

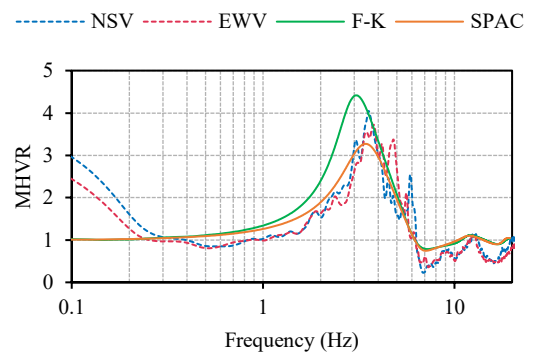


図 9 同定された速度構造から求めた MHVR の理論値と観測値の比較

デルの模擬微動波形を用いた傾斜地盤上の常時微動アレイ探査のブラインドテストを実施しており、位相速度の推定までは参加者間で大きな違いはないが、最終的に同定された構造については参加者間でも隔りがある事が示されている。地元による報告³⁹⁾でも同様のことが示されており、常時微動アレイ探査によるせん断波速度構造同定が一筋縄ではいかず、まだ途上である事が示唆される。余談であるが、本稿執筆時現在、実観測記録を用いた常時微動アレイ探査の blind prediction が実施されており⁴⁰⁾、筆者らも参加している。

興味深いことに、大堀らの報告では、参加者間の結果の平均を取れば正解の構造に近い結果となる事が示されており、異なる条件や様々な解釈で試行回数を重ねることが重要であることが示唆される。今回は、標準貫入試験で得られた土質構造、常時微動アレイ探査で得られた位相速度(これらについても、F-K法、SPAC法、ncCCA法で算定している)、単点三成分で得られたMHVRと、種々のサンプルから得られた指標を取り入れて構造の推定を行っている。このように、地下構造の推定を行う場合は、単一の調査結果をもってして一意に確定するのではなく(これは、本来であればPS検層も同様である⁴¹⁾)、様々な知見を導入しながら分析を行うのが望ましいと考えられる。

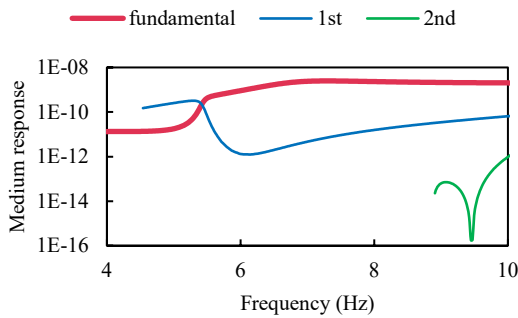


図10 最適構造から算定したRayleigh波のミディアムレスポンス

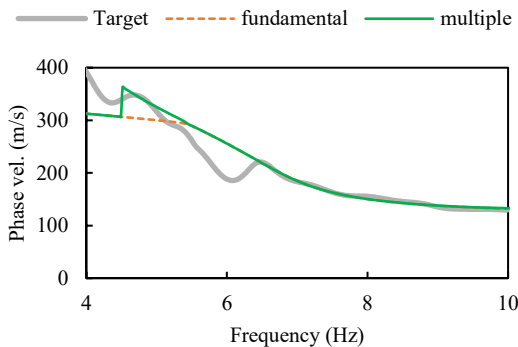


図11 高次モードまで考慮した場合の見かけのRayleigh波位相速度

4.2 標準貫入試験未実施地点直下のMHVR

図12に図1中に示す計測点位置のMHVRを示す。図12に示す通り、水平二成分と上下成分の比同士の卓越周波数位置に大きな違いは見られないが、いくつかの地点で振幅の大きさにやや違いが見られる。Matsushima *et al.*²⁵⁾やUebayashi *et al.*⁴²⁾によると、測定点直下

に傾斜構造がある場合については、水平二成分の各成分と上下成分の比同士に方位依存性が表れるとされており、本サイト内でも直下に傾斜構造が存在する事が推察される。

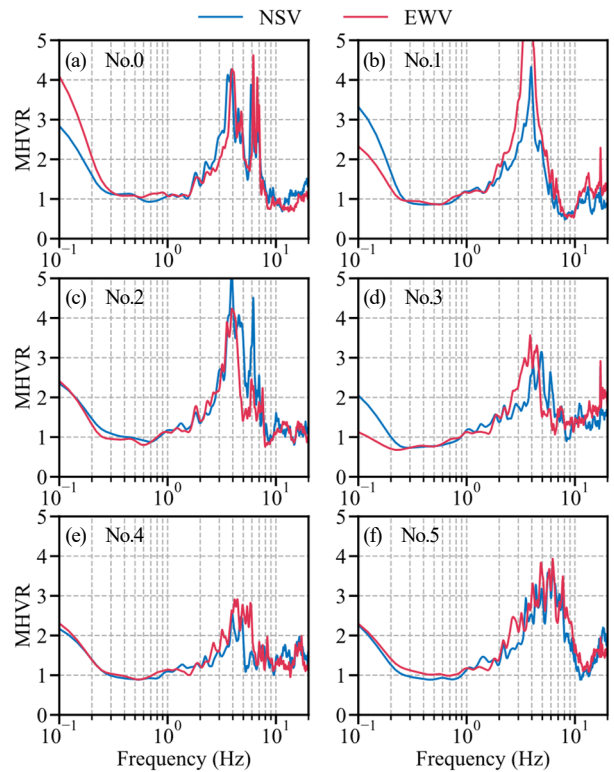


図12 対象地点で得られた水平各成分のMHVR

MHVRに方位依存性が見られるケースについては、NSV、EWWのどちらかをターゲットとするかによって推定される速度構造モデルが変わってきてしまう。そこで、方位依存性が見られる地点については、まずは仮想的な水平成層構造を反映したMHVRを算定する処理を加えることとした。得られた水平方向の時刻歴加速度記録を5度ずつ回転させて、前項で選択した50区間からMHVRを算定し、式(3)で与える水平各成分と上下成分の比同士の残差二乗和 γ を求める。 γ が最小となる回転ベクトルを与えた成分(NSV', EWW'とする)のMHVRをその地点の地下傾斜の影響を平均化した成分と見做し、仮想的な水平成層構造を反映したMHVRと仮定した。得られたMHVRの方位依存性が小さいケースでは直下の構造が水平成層構造であるとし、そのまま、得られたMHVRをその地点の特性とした。

$$\gamma = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} (NSV(f) - EWW(f))^2 \quad (3)$$

ここで、 f_{max} は0.1Hz、 f_{min} は20Hzとした。

4.3 標準貫入試験未実施地点の浅層構造推定結果

3.2節(4)項に示した方法で推定した標準貫入試験未実施地点のせん断波速度構造から算定したMHVRの理論解と観測値の比較を図

13 に示す。ここで示す MHVR の観測値は、前節に示した手法で算定した水平二方向と上下方向の比同士の残差が最小となる方向成分の観測値である。まずは、3.2 節(4)項の手法で各地点の浅層構造の推定を行う事が適切であるかどうか確かめるため、標準貫入試験を実施している No.0 地点で、得られている土質柱状図に合わせてせん断波速度構造を設定し、MHVR の再現が可能であることを確認してから、その他の地点で同様の手順で推定を行った。図 13 に示す通り、レファレンスとした No.0 を含めた全ての地点で MHVR の大きな山の位置や谷の位置は良く合わせられており、おおよそコントラストが大きい部分については適切に推定出来ていると考えられる。卓越が二山に分かれているケースの二つ目の山や、振幅特性についてはやや合っていない部分もあるが、これについては、2 つ理由が考えられる。一つは傾斜構造が影響しているということである。本稿では、2 方向の MHVR の残差が最も小さい回転成分記録を仮想的な水平成層構造を反映した MHVR と見做しているが、これはあくまで仮定であり、実際の地下構造としては 2 次元、3 次元の複雑な構造であることが想定されるため、その影響によるものであるということである。もう一つは、本稿では、地震応答解析等に用いるせん断波速度構造を求めるのではなく、建設時や設計時に検討対象となる範囲の深度を推定することを目的としているので、浅層構造のみで MHVR の理論解を算定している点である。Kawase *et al.*⁴³⁾によると、モデル化を行う深度によってスペクトル形状が異なってしまう事が示されている。例えば、地震基盤相当までモデル化を行うケースと工学的基盤相当程度までモデル化を行うケースでは、卓越周波数の山や谷の位置は大きく異ならないが、前

者の方がスペクトル形状がシャープになるとされており、この影響が含まれていることも示唆される。ただし、モデル化の層数が増えることはそれだけ計算コストが増加する事を意味しており、また、深部地盤モデルの選択等による影響も無視できない点から、本来の目的である浅層構造推定という観点から逸脱してしまうため、今回は標準貫入試験実施深度で浅くモデル化に留めた。今回のように卓越周波数の山や谷の位置を試行錯誤的に合わせ込むといった処理であれば大きな影響はないと思われるが、インバージョン等で残差を最小化するようなフィッティングを行う際は、モデル化深度にも注意が必要である。

4.4 敷地内の Sandy soil 層上端標高推定値分布

上記で求めた各地点の浅層構造を元として、明瞭な速度コントラストがあると考えられる Sandy soil 層（基盤層とする）上端の標高分布を算定した。図 14 に示す。深度分布ではなく標高分布としたのは、単純に地表面にも傾斜が見られるので、深度分布よりも標高分布の方が敷地全体の傾向が明瞭であるためである。標準貫入試験実施地点では掘削調査によって得られた基盤層上端標高を、標準貫入試験未実施地点では前節の結果で得られた基盤層上端標高を元に、Kriging 法⁴⁴⁾などで補間してプロットした。この結果から、標準貫入試験未実施である地点については、平地である array1 地点と比べると、やや基盤層上端標高は上がっていると考えられるが、掘削調査で得られている西側地点の基盤層上端標高とおおよそ同程度であることが分かる。また、Building1 の南端で基盤層上端標高が上がっている部分については、図中に示す通り、No.5 測定点は山肌の中腹の測定点であることから、地表面の地形に沿って基盤が上がっていると考えられる。既存建物が存在している部分に注目すると、Building2 の北端部を除いて、敷地内の既存建物が存在している部分の基盤層はおおよそフラットで、敷地内の北側端部については北側方向に向けて基盤層深度が下がっていると考えられる。これは、元々傾斜している地盤であったものを盛土によって造成した地盤であると推察される。なお、敷地境界よりも東側については、単点三成分測定を行った地点における推定値の補間であり、外挿であることに注意されたい。

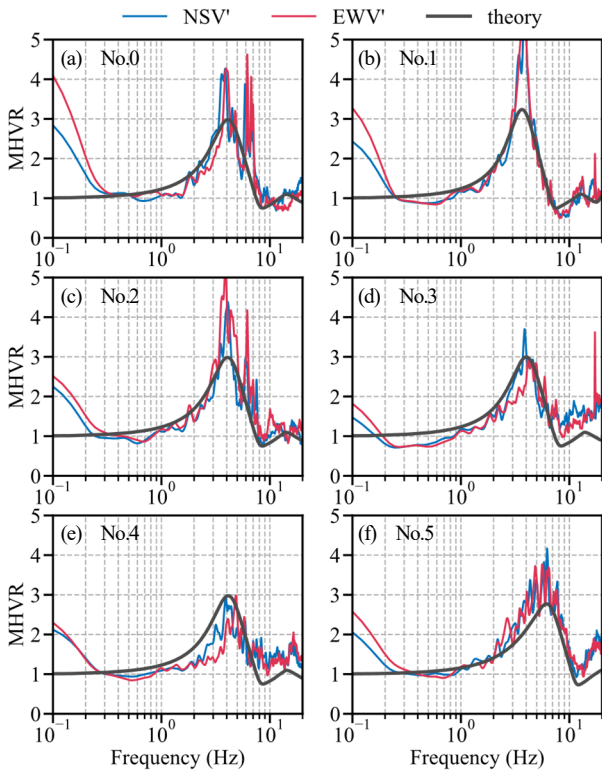


図 13 推定した速度構造から求めた MHVR の理論値と観測値の比較

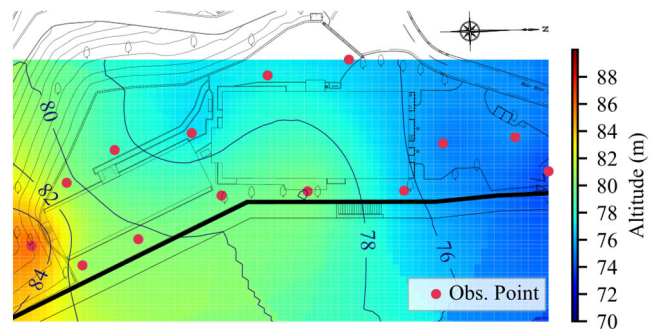


図 14 推定した建設敷地内の Sandy soil 層上端標高分布。図中赤丸で示す点は単点三成分計測を行った地点。

5. おわりに

本稿では、常時微動アレイ探査と単点三成分観測を併用した浅層

構造推定の実施例について報告し、建設敷地内では、地表面傾斜と同様の傾向で敷地内直下にも傾斜構造がある事が推定された。浅層構造推定は以下の手順に従って実施した。①常時微動アレイによって、基準点のせん断波速度構造モデルを同定する。②同定したせん断波速度構造モデルで基準点の MHVR を説明出来ることを確認し、検討対象地点の MHVR を再現可能なせん断波速度構造モデルを試行錯誤的に決定する。この際、敷地内ではせん断波速度は不変と仮定して、層厚のみが変動するモデルによって浅層構造を推定する。

今回は 2 点の常時微動アレイ探査と 14 点の単点三成分測定を行ったが、観測機材と人的リソースが許す限り、測定手法や測定点をなるべく増やすことが望ましい。例えば、今回のケースでは建物周辺については測定点を比較的多くとっているが、建物直下については建物解体までは調査を行う事が出来ないため、建物直下の構造については周辺の調査結果からの補間に過ぎない。当然ながら、既存建物解体後は建物直下でも掘削、非掘削問わず、調査を行う事が望ましい。前述の通り、サンプルや指標が多いに越したことはないからである。また、常時微動アレイ探査を行う際も同様であり、本測定では保有している機材数の関係で中心有三角形配置としたが、三角形アレイよりも五角形アレイを用いた方が位相速度の推定精度が良いことも報告されている⁴⁵⁾。

なお、1 章で省力化について述べていることから示しておくが、筆者含めて 2 名で半日の間に全ての測定を完了した事を最後に付け加えておく。

謝辞

現地における常時微動測定実施時は、戸田建設構造設計部石塚社員に計測協力をして頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 太田裕, 後藤典俊「S 波速度を他の土質の諸指標から推定する試み」, 物理探査, 第 29 巻, 第 4 号, p31-41, 1976.8
- 2) 成田修英, 保井美敏「土質区分の違いが標準貫入試験結果による S 波速度推定に与える影響」, 戸田建設技術研究報告, 第 37 号, 9-1-9-6, 2011
- 3) 保井美敏, 成田修英, 山本健史「常時微動による傾斜基盤地の H/V スペクトルと地盤応答特性に関する検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.145-146, 2011.8
- 4) 成田修英, 保井美敏, 小阪宏之「常時微動アレイ探査による傾斜基盤サイトの支持層推定」, 第 53 回地盤工学研究発表会梗概集, p.1967-1968, 2018
- 5) C. B. Park, D. M. Richard, and J. Xia “Multichannel Analysis of Surface Waves”, *Geophysics*, Vol.64, No.3, p.800-808, 1999
- 6) J. Capon “High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis”, *Proceedings of the IEEE*, Vol.57, No.8, p.1408-1418, 1969.8
- 7) K. Aki “Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors”, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol.35, p.415-456, 1957.5
- 8) 岡田廣, 松島健, 日高英治「長周期微動に含まれる表面波の位相速度推定法について: 空間自己相関法と周波数-波数法の比較」, 北海道大学地球物理学研究報告, No.49, p.53-62, 1987.3
- 9) 岡田廣, 松島健, 森谷武男, 笹谷努「広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法」, 物理探査, 第 43 巻, 第 6 号, p.402-417, 1990
- 10) I. Cho, T. Tada, and Y. Shinozaki “Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records”, *Journal of Geophysical Research*, Vol.111, B09315, 2006, doi: 10.1029/2005JB004235
- 11) T. Tada, I. Cho, and Y. Shinozaki “New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors”, *Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake*

Engineering, Tokyo Institute of Technology, p.2169, 2010

- 12) 関口春子, 吉見雅行, 堀川晴央, 吉田邦一, 国松直, 杉山長志, 馮少孔, 徳丸哲義「高田平野北東部における微動アレイ探査」, 活断層・古地震研究報告, No.6, p.21-37, 2006
- 13) 吉見雅行, 吉田邦一, 関口春子, 堀川晴央, 竿本英貴, 松浦旅人「微動アレイ探査で推定した大分平野の S 波速度構造」, 活断層・古地震研究報告, No.8, p.295-315, 2008
- 14) 長郁夫, 先名茂樹「極小微動アレイによる浅部構造探査システム」, シンセオロジー, 第 9 巻, 第 2 号, p.86-96, 2016.5
- 15) 地元孝輔, 佐口浩一郎, 山中浩明「微動アレイ探査による立川断層帯周辺における表層地盤の S 波速度構造モデルの推定」, 日本地震工学会論文集, 第 15 巻, 第 1 号, p.81-100, 2015
- 16) 成田修英, 保井美敏, 小阪宏之「微動アレイ探査における波の位相速度推定手法の概説」, 戸田建設技術研究報告, 第 45 号, 9-1-9-12, 2019.11
- 17) 中村豊, 上野真「地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み」, 第 7 回日本地震工学シンポジウム, p.265-270, 1986
- 18) 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, p.69-75, 1998.9
- 19) F. J. Sánchez-Sesma, M. Rodríguez, U. Iturrarán-Viveros, F. Luzón, M. Campillo, L. MARGERIN, A. García-Jerez, M. Suarez, M. A. Santoyo, and A. Rodríguez-Castellanos “A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium”, *Geophysical Journal International*, Vol. 186, p.211-225, 2011, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x
- 20) A. García-Jerez, J. Piña-Flores, F. J. Sánchez-Sesma, F. Luzón, and M. Perton “A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption”, *Computers & Geosciences*, vol.97, p.67-78, 2016, doi: 10.1016/j.cageo.2016.06.016
- 21) 小阪宏之, 松島信一, 長嶋史明, 川瀬博「微動と地震動観測記録及び MASW 手法に基づいた港湾地域強震観測網仙台観測点における S 波速度構造推定」, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻, 第 4 号(特集号), p.167-183, 2016
- 22) 藤田秀隆, 三浦弘之「ミャンマー・マンダレーにおける微動を用いた S 波速度構造モデルとそれに基づく地盤増幅特性の推定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.523-524, 2019.9
- 23) 上林宏敏, 川辺秀憲, 釜江克宏, 宮腰研, 堀家正則「傾斜基盤構造推定における微動 H/V スペクトルの頑健性とそれを用いた大阪平野南部域の盆地構造モデルの改良」, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 642 号, p.1453-1460, 2009.8
- 24) 元木健太郎, 渡辺哲史, 加藤研一, 武居幸次郎, 山中浩明, 飯場正紀, 小山信「微動アレイ計測に基づく傾斜基盤構造の推定」, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 688 号, p.1081-1088, 2013.6
- 25) S. Matsushima, H. Kosaka, and H. Kawase “Directionally dependent horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors at Onahama, Fukushima, Japan”, *Earth, Planet and Space*, Vol.69, No.96, 2017, doi: 10.1186/s40623-017-0680-9
- 26) 萩原由訓, 野畑有秀「単点常時微動観測を用いた基盤の傾斜方向推定に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.307-308, 2017.8
- 27) 今井博, 青木智幸, 石井裕泰「微動チェーンアレイによる浅部探査」, 大成建設技術センター報, 第 46 号, 26-1-26-7, 2013
- 28) 五十嵐治人, 伊藤仁「微動チェーンアレイ探査による支持地盤の推定」, 銭高組技報, p.17-22, 2016
- 29) T. Tada, I. Cho, and Y. Shinozaki “Beyond the SPAC Method: Exploiting the Wealth of Circular-Array Methods for Microtremor Exploration”, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.97, No.6, p.2080-2095, 2007.12, doi: 10.1785/012070058
- 30) R. F. Ballard “Determination of Soil Shear Moduli at Depths by In-situ Vibratory Techniques”, *U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, 1964.12
- 31) 細野克昭, 片岡俊一「レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案」, 土木学会論文集, No.647, I -51, p.415-423, 2000.4
- 32) 山中浩明「ハイブリットヒューリスティック探索による位相速度の逆解析」, 物理探査, 第 60 巻, 第 3 号, p.265-275, 2007
- 33) W. J. Ludwig, J. E. Nafe, and C. L. Drake “Seismic Refraction”, *The Sea*, Vol.4,

- Part 1, p.53-84, 1970
- 34) 大崎順彦「基礎構造」, コロナ社, 1966
- 35) Y. Hisada “An Efficient Method for Computing Green's Functions for a Layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths (Part 2)”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.85, No.4, p.1080-1093, 1995.8
- 36) K. Tokimatsu, S. Tamura, and H. Kojima “Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion Characteristics”, *American Society of Civil Engineers*, Vol.118, No.10, p.1529-1543, 1992
- 37) 池田達紀, 松岡俊文, 辻健, 林宏一「SPAC 法における異なる相関距離を考慮したマルチモード解析」, 物理探査, 第 64 巻, 第 2 号, p.127-138, 2011
- 38) 大堀道広, 上林宏敏, 長郁夫, 新井洋, 吉田邦一, 鈴木晴彦, 高橋広人, 萩原由訓, 野畑有秀, 早川崇, 林田拓己, 横井俊明, 岸俊甫, 関口徹, 小嶋啓介, 凌甦群, 元木健太郎, 中川博人, 野口竜也, 土田琴世, 永野正行「地盤構造評価に向けた微動アレイ解析の概要と成果」, 第 46 回地盤震動シンポジウム, p.3-14, 2018
- 39) 地元孝輔「益城町の強震観測点における微動アレイ探査による S 波速度構造モデルの推定」, 平成 28 年(2016 年)熊本地震と ESG 研究シンポジウム発表資料, p.21-36, 2019
- 40) ESG6 Home Page < <http://www.esg6.jp/index.html> >, 6th IASPEI/IAEE, *International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Kyoto, Japan*
- 41) 川瀬博「地盤構造と地震動増幅 —我々はどこから始めてどこまで掘り進んだのか?—」, 第 46 回地盤震動シンポジウム, p.63-76, 2018
- 42) H. Uebayashi, H. Kawabe, and K. Kamae “Reproduction of microseism H/V spectral features using a three-dimensional complex topographical model of the sediment-bedrock interface in the Osaka sedimentary basin”, *Geophysical Journal International*, Vol.189, p.1060-1074, 2012, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05408.x
- 43) H. Kawase, F. Nagashima, and Y. Mori “Studies on the deep basin site effects based on the observed strong ground motions and microtremors”, 5th IASPEI/IAEE, *International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, Taiwan*, 2016.8
- 44) 高阪宏行「クリギングとその地理的応用」, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No.34, p.27-35, 1999
- 45) 岸俊甫, 関口徹, 上林宏敏, 長郁夫, 大堀道広「数値解析に基づくアレイ形状が微動から推定される分散曲線へ与える影響の検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.343-344, 2017.8