

物理探査手法を用いた不整形基盤位置の推定と地震動評価

坂井 公俊* 野上 雄太*
室野 剛隆* 佐藤 勉* 高橋 千佳** 盛川 仁**

Estimation of Engineering Bedrock Using Some Geophysical Exploration to Evaluate Earthquake Ground Motion

Kimitoshi SAKAI Yuta NOGAMI
Yoshitaka MURONO Tsutomu SATO Chika TAKAHASHI Hitoshi MORIKAWA

Earthquake ground motions are adversely affected by shallow ground structure with shear wave velocity of less than 400 m/sec. In seismic design for road or railway facilities, it is essential to investigate the subsurface structure in detail. In order to estimate the ground structure, the boring exploration is mainly used. The boring exploration, however, may have much difficulty when the ground condition is poor and the engineering bedrock is very deep. In this study, the authors presented another estimation method using microtremor and gravity survey. Moreover, we clarified the importance of structure estimation by calculating the ground motions based on the estimated subsurface structure.

キーワード：工学的基盤，微動探査，重力探査，2次元動的FEM解析，地表面地震動

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計¹⁾では、耐震設計上の基盤面（工学的基盤面）と呼ばれるせん断波速度が400m/sec程度の地盤において標準地震動が設定されており、工学的基盤以浅の影響はサイト毎に適切に評価を行うこととしている。これは地表面地震動が工学的基盤以浅の影響を特に強く受けることに配慮したものである。よって構造物を設計する際には設計地点ごとに正確な浅部地下構造を求める必要があるが、この際の地下構造推定手法としては一般的にボーリング探査が用いられる。しかし地盤条件が悪い地域等では工学的基盤が深いために通常のボーリング探査では工学的基盤位置の推定が困難な場合がある。こういった場合にはボーリング探査に代わる他の手法によって地盤構造を推定する必要がある。

ボーリング探査以外の地盤構造推定手法としては、人工地震探査法²⁾、微動探査法³⁾、重力探査法⁴⁾など種々の物理探査手法が提案され、利用されてきた。しかしこれらの手法は主に地殻や地震基盤（せん断波速度2.5～3.5km/sec程度）といった非常に深い地盤形状を推定することを目的として用いられることがほとんどであり、耐震設計の実務において用いられた例はほとんどない。

今回、深度80mまでボーリング探査を行ったにも関わらず、工学的基盤まで到達していない地域において、工

学的基盤を推定する機会を与えられ、良好な結果が得られたので、その事例について報告する。さらに得られた地盤構造を用いて地震応答解析を実施することにより、正確な地盤構造を推定することの重要性についても考察を行う。

2. 対象地域の概要

解析対象地域の既往のボーリング探査位置、後述する微動観測点を図1に、地質縦断面図を図2に示す。対象地域では約100m間隔で工学的基盤深度、土の物性値把握のためのボーリング探査が実施されている。その結果、この地域の土層は大きく分けて埋土、沖積シラス層（シルト質砂、細砂、中砂、砂礫）、洪積層（シルト質砂、細砂）で構成されていることが分かる。またこの地域の工学的基盤面は傾斜しており、図2に点線で示したエリアは、深度約80mのボーリング探査を実施しても、工学的基盤に到達していない。

この地域において地表面地震動を正しく評価するためには、基盤構造を正確に把握しておく必要がある。さらに基盤が傾斜しているために、波動伝播が単なる1次元解析結果では説明できない可能性がある。よってボーリングに代わる手法によって基盤形状を推定した後に、得られた地盤構造を用いて2次元地震応答解析を実施し、地表面地震動を評価する。

* 構造物技術研究部（耐震構造）

** 東京工業大学大学院

特集：構造物の耐震技術

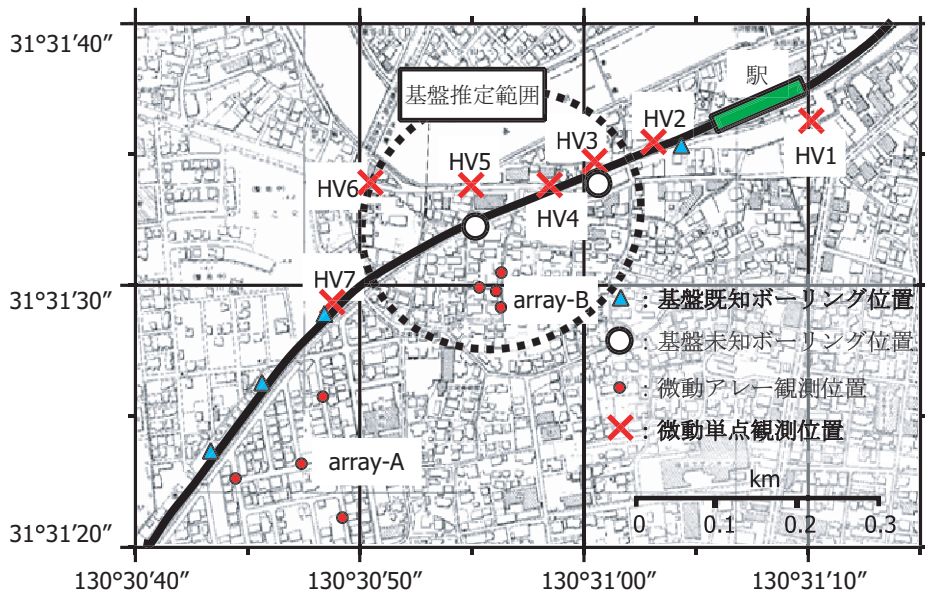


図1 ボーリング探査, 微動探査位置

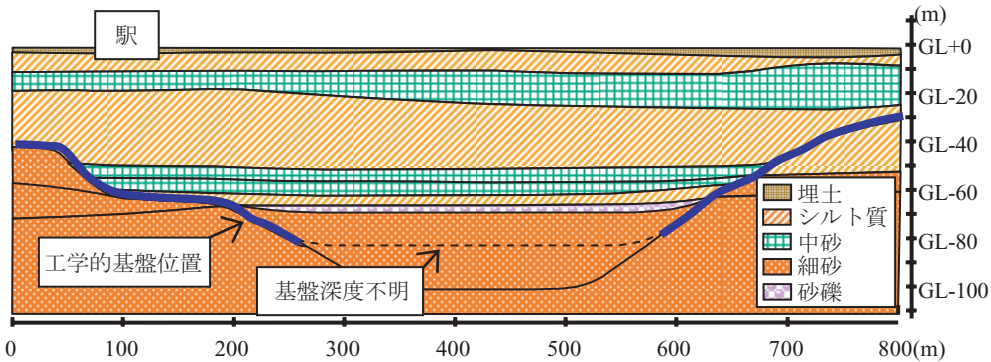


図2 対象地域の地質縦断面図

3. 工学的基盤の推定

3.1 微動探査

微動探査法は、自然に豊富に存在しその観測も容易な常時微動に含まれる表面波を利用した地下構造探査法である。地表面に展開したアレー観測網によって微動を観測し、アレー直下の地下構造を反映した表面波の位相速度の分散特性を検出し、その分散特性の成因となる地下構造を推定する手法であり、数多くの適用事例がある⁵⁾。また、微動の三成分単点観測によって得られた水平成分と鉛直成分のスペクトル比（以下H/V）に関する研究も数多く行なわれており、得られたH/Vから地盤構造を推定する手法もいくつか提案されている⁶⁾。

3.1.1 微動アレー観測

微動アレー観測は、図1に示す2地点（array-A, array-B）で実施した。array-A付近ではボーリング探査によって基盤深度が44m程度と推定されているが、array-B付近では深度80mまでのボーリング探査によっても基盤まで到達していない。使用した計測機器は、換振器として固有周期1秒の動コイル型速度計、ローパスフィルタ付

きの増幅器、記録器として16bitデジタルレコーダーであり、各観測点の同期をとれるようGPS時計が出力するスローコードを記録するシステムとした。各観測点での記録の同時性に関する誤差はサンプリング周波数以下である。増幅器のローパスフィルタは全ての機器で同一なものを使用している。また、外気温の影響を受け観測中に計測器の特性が変化してしまうことを危惧し、観測の合間に地震計の設置状況を確認し、適宜調整を行うことで、記録の精度を確保した。観測は交通振動などの雑音が比較的少ない深夜に実施した。アレー半径は、array-Aで66m, 40m, 20m, array-Bで20m, 10m, 5mとした。

3.1.2 位相速度の算出

微動観測で得られた上下動記録から、空間自己相関法（Spatial Auto-correlation Method; SPAC法）⁷⁾を用いてRayleigh波のファンダメンタルモードの位相速度を推定した。得られた位相速度を図3、図4に丸印で示す。

3.1.3 基盤深度の推定

前項で得られた位相速度を満足する地盤構造を逆解析によって推定する。逆解析の手法としては遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm; GA）⁸⁾を用いた。なお、本

表1 探索範囲 (array-A)

層番号	S波速度 (m/s)	層厚 (m)
1	130-170	1-100
2	195-235	1-100
3	440-460	1-100
4	1130-1150	∞

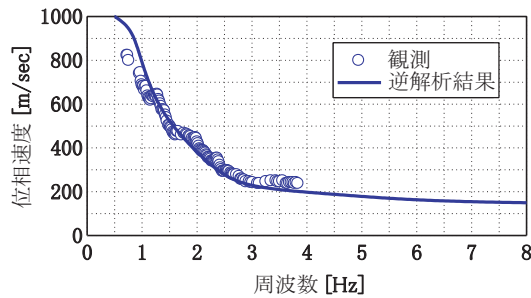


図3 観測および推定位相速度 (array-A)

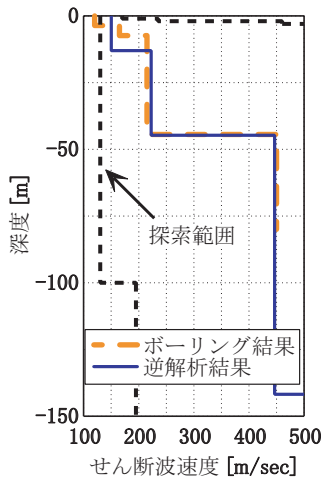


図5 推定された地盤構造 (array-A)

検討では解析対象としていない極表層、深部地盤に解が左右されることの無いよう、速度をある程度固定して、層厚の推定を行っている。GAのパラメータは個体数20、交差確率70%、世代数100とした。目的関数としては、

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [C_{obs}(f_i) - C_{cal}(f_i)]^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

とする V_s, H を求める。ここで V_s は地盤のせん断波速度、 H は層厚、 f_i は位相速度を与える i 番目の振動数、 K は観測によって得られた位相速度を与える振動数の個数、 $C_{obs}(f_i), C_{cal}(f_i)$ はそれぞれ位相速度の観測値、及び地盤モデルから計算される理論値である。この操作を初期乱数を変えてそれぞれ独立に10回繰り返し、最終的に得られた10個の構造から、各適応度に対する加重平均を取り、最終的な構造とした。

まず基盤深度が既知の array-A に対して本手法を適用し、手法の妥当性を確認する。GAによる解の探索範囲を表1に示す。推定された地盤構造とボーリング探査結

表2 探索範囲 (array-B)

層番号	S波速度 (m/s)	層厚 (m)
1	180-220	1-100
2	280-320	1-100
3	440-460	1-100
4	1130-1150	∞

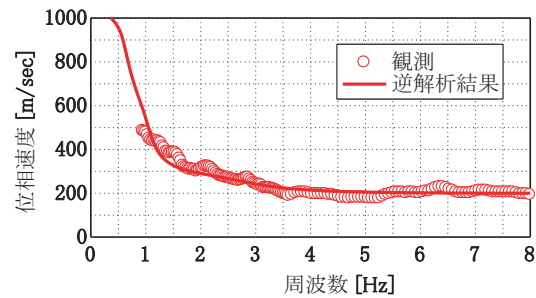


図4 観測および推定位相速度 (array-B)

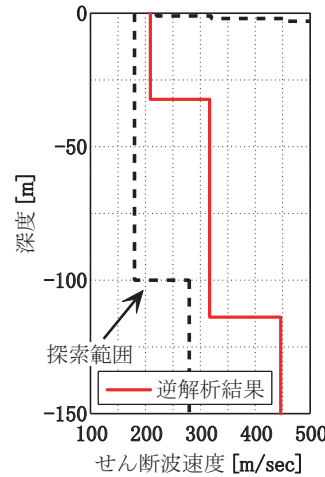


図6 推定された地盤構造 (array-B)

果を重ねたものを図5に、推定した地盤構造から得られる位相速度と観測記録の比較を図3に示す。図5を見ると、推定した基盤深度は45mであり、ボーリング探査で得られた基盤深度(44m)とほぼ一致している。また図3より、得られた構造は観測された位相速度をよく満足している。

続いて、array-Aと同様の手法を用いてarray-B(基盤深度未知点)での基盤深度を推定する。探索範囲を表-2に示す。逆解析の結果得られた地盤構造を図6に、得られた構造から計算される位相速度と観測記録の比較を図4に示す。推定した構造は観測記録をよく満足しており、array-Bでの基盤深度は110mであると推定された。

3.1.4 H/Vによる検討

検討対象地域周辺で微動の三成分単点観測も実施している(図1中のHV1~HV7)。H/Vは単点観測によって得られるため、アレー観測と比較して容易に実施可能という利点がある。しかしH/Vは位相速度と比較して非常

特集：構造物の耐震技術

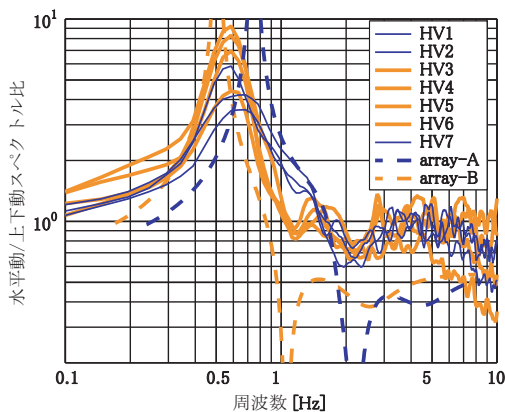


図7 観測および推定 H/V

に多くの分岐が存在し、それだけで精緻な構造を得ることは難しい。よって本検討ではH/Vから構造を推定するのではなく、位相速度によって推定された構造について妥当性の確認を行うとともに、基盤深度の空間分布についても議論を行う。

各観測点で得られたH/Vを図7にまとめて描く。さらにこの図にはarray-A, Bにおいて推定された構造より計算されるH/Vも重ねて描いてある。0.5Hz辺りのピークは非常に深い構造を反映したものである。今回は1Hzよりも高周波数に限定して議論する。HV1, 2, 7(図7中青色細線)では2.1Hzあたりにディップ, 3~4Hzあたりにピークが存在する。この傾向はarray-Aにおける結果と調和的である。また, HV3~6(図7中黄色太線)における1.2Hzあたりのディップ, 1.7Hzあたりのピークはarray-Bにおける結果と概ね一致している。これらの山や谷は工学的基盤の浅深によるものと考えられるが, この結果より対象範囲の中心部(HV3~6)では基盤が急激に深くなっており, その他の地域では基盤が浅くなっていると想定される。この傾向はボーリング探査, 微動アレー探査の結果とほぼ一致している。

3.2 重力探査

ニュートンの万有引力の法則に従って, 2質点間には重力が働く。重力は直下の影響を最も強く受けるため, 地下の密度構造が空間的に変化するような地域では, 重力もそれに合わせて変化する。この重力の空間的な変化を測定することによって, 地下の不均質構造を推定する手法が重力探査である。重力探査からは地盤の密度構造しか得られない, 多層構造の推定が困難である等の短所があるものの, 反射法, 屈折法, 微動アレーなどと比較すると, 機材の可搬性が高く, 容易に観測可能であるという利点を持っているため, 広域での概略的な地盤の3次元構造を推定する際に, 有効な手法のひとつである。

3.2.1 重力観測

重力測定はZLS社製 Burriss自動重力計を使用した。観

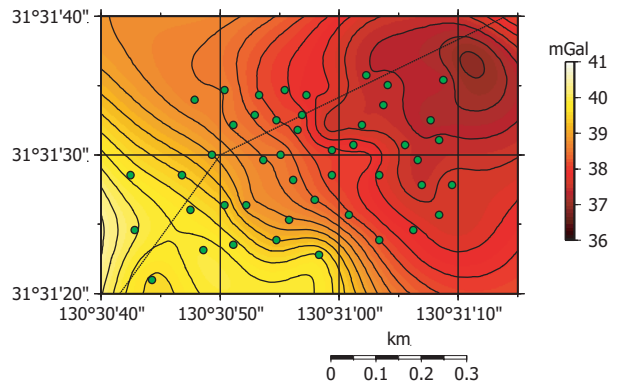


図8 重力観測点およびブーゲー異常分布 (コンター間隔 0.2mGal, ○印は重力観測位置)

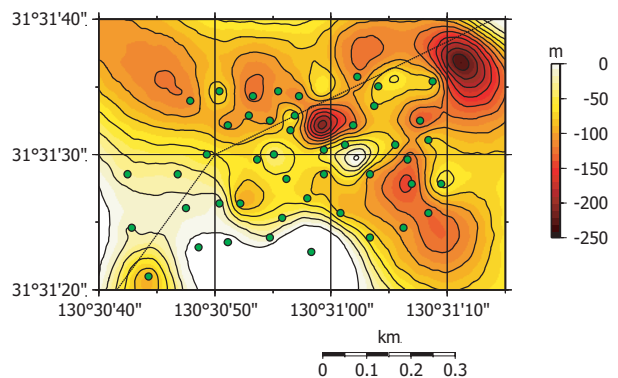


図9 基盤深度分布 (コンター間隔 20m)

測した測点数は図8に丸印で示す45点であり, 対象地域周辺を約100m間隔で測定した。また重力探査では測定点の位置, 特に標高を正確に決定する必要があり, そのためにGPS受信器(Ashtech ProMark2)をディファレンシャルモードで使用した。これにより位置を水平方向で10cm程度, 標高で1m以内の精度で決定することができる。

3.2.2 ブーゲー異常の算出

重力観測によって得られたデータに種々の補正を施し, ブーゲー異常を求めた⁴⁾。基盤の仮定密度は21kN/m³ (2.1t/m³)とした。解析は観測された45点での重力値に加えて, 重力CD-ROM⁹⁾に収められているデータから対象地域周辺のデータを6点選択し, 計51点で行っている。得られたブーゲー異常分布を図8に示す。図8より, 北東から南西方向にブーゲー異常値が大きくなる傾向を示していることが分かる。さらに解析領域の中心部では, ブーゲー異常が複雑に変化しており, 東に進むに従い基盤が深くなっていること, この地域では基盤形状が複雑になっていることが予想される。また, 線路直角方向(北西~南東方向)ではブーゲー異常の変化は小さいため, 対象地域における基盤形状の変化は線路方向のみを考慮すればよいと考えられる。

3.2.3 基盤深度の推定

重力観測によって得られたブーゲー異常を満足する構造を推定する。逆解析手法としては二次元定常解析⁴⁾を

用いた。このとき、0～300mの上方接続法によるフィルターをかけて表層の構造の影響のみを抽出して解析している。出来る限り正確な解析結果を得るために、ボーリング探査で基盤深度が既知である4点をコントロールポイントとして与えた。堆積層の密度は 18kN/m^3 (1.8t/m^3)とした。得られた基盤深度分布を図9に示す。ブーゲー異常分布から予想されるとおり、東に進むに従い基盤が深く沈み込んでいることが分かる。さらにこの地域の地盤形状は非常に複雑である。ボーリング探査における基盤未到達点付近では、基盤深度が100～130mの範囲で分布していることが分かる。この結果は微動による推定結果と調和的である。

4. 地表面地震動の推定

4.1 解析モデル

以上の検討により、対象地域の地盤構造が推定された。本節では地震応答解析を実施することで、地表面設計用地震動の算定を行うとともに、今回行った工学的基盤推定結果が地表面地震動を評価する際にどのような影響を与えるのかについて考察を行う。

解析手法としては2次元FEM動的解析を用いる。解析領域は幅 800m ×深さ 110m とした(図2の縦断面図に示した領域)。メッシュサイズは深さ方向 2m ×水平方向 4m を基本とし、 5Hz 程度までの信頼性を確保した。側方境界は等変位境界、底面境界は粘性境界とする。減衰は固有値解析による地盤の1次モード(0.75Hz)と 5Hz において3%となるようにレイリー減衰で設定した。

4.2 地表面設計地震動の算定

鉄道構造物の設計標準に従い、地表面の設計用地震動を算定する。地盤は非線形性を考慮し、構成則として修正ROモデル¹⁰⁾を用いた。地盤構造は、ボーリング探査による結果からモデル化を行い、ボーリング探査による工学的基盤深度未知地点については、物理探査の結果を用いた。入力地震波は鉄道構造物等設計標準(耐震設計)¹⁾によるL2地震動スペクトルII適合波(G1地盤)を用いる(最大加速度 $749[\text{cm}/\text{sec}^2]$)。

基盤最深地点(基盤深度 100m 、図2の距離 400m の位置)と基盤の浅い地点(基盤深度 30m 、図2の距離 750m の位置)における地表面時刻歴応答波形、フーリエ振幅スペクトル、応答塑性率4の場合の非線形応答スペクトルを図10に示す。両地点ともに地盤の非線形化によって長周期成分が卓越しており、 0.5Hz 以上の高振動数成分が小さくなっている。特に基盤の深い地点ではその影響が顕著となっており、基盤の浅い地点と比較して、高振動数側で応答が大幅に小さくなっている。逆に低振動数側では基盤が深い地域では浅い地域よりも大きく応答し

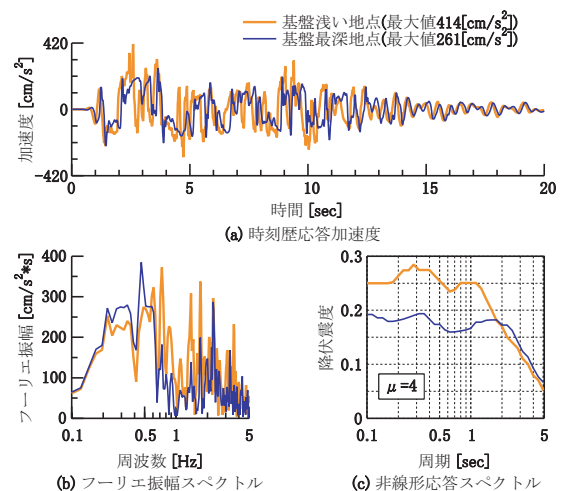


図10 地表面応答値の比較

ている。最大加速度を見ると、基盤が浅い地点では深い地点の1.6倍程度大きくなっていることが分かる。また、非線形応答スペクトルについても同様の傾向が見られ、周期 0.4 秒程度、応答塑性率4の構造物に要求される降伏震度は、基盤の浅い地域では深い地域の1.5倍程度大きくなる。以上より、基盤深度が大きく傾斜しているような地域においては、比較的近い地点においても地表面の地震動レベルが大きく変化する可能性があることが分かる。

4.3 基盤深度の推定精度が地震動に与える影響

ボーリング探査によって工学的基盤深度が推定できない場合には、ボーリング最深到達点を工学的基盤位置として設定してしまう可能性がある。そこで本節では基盤深度の推定精度が地表面の地震動評価にどのような影響を及ぼすのかについて検討を行う。基盤深度としては、ボーリングの掘削深度(約 80m)と物理探査を用いて推定された結果(約 100m)の2ケースを設定し、両者の結果を比較する。なお本検討では、基盤深度の違いが結果に及ぼす影響を知ることが目的としているため、地盤は全て線形であるとした。両ケースの基盤深度分布を図11に示す。

両地盤において地震応答解析を実施した結果、得られた各地点における地表面最大加速度、最大変位分布を図12に示す。基盤が傾斜している影響により、最大加速度、変位の分布が非常に複雑な結果となっている。また、物理探査手法を用いて推定された基盤を与えた結果と、ボーリング掘削長を基盤深度とした結果では大きな違いが見られる。今回の検討では基盤を正しく推定することにより加速度が小さくなったが、実地盤は非線形挙動をすること等を考えると、常にこのような傾向となるわけではない。実設計を行う際に基盤位置が非常に深く、ボーリングによって基盤深度が得られない場合などは、

特集：構造物の耐震技術

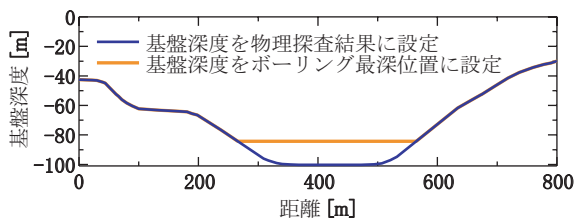


図 11 解析に用いた基盤深度分布

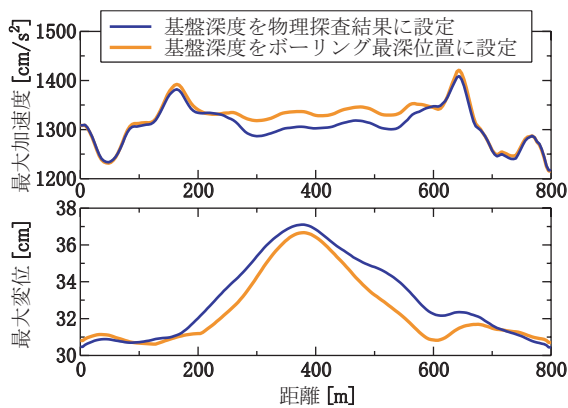


図 12 最大加速度，最大変位分布

今回のような物理探査手法を用いて正確な基盤位置を推定する必要がある。

5. まとめ

本論文では、構造物を設計する際に必要な工学的基盤推定手法として、ボーリング探査に代わる手法の適用性を確認した。具体的には、ボーリング探査によって工学的基盤位置が特定できない地域に対して、微動探査および重力探査を適用して基盤深度を推定した。さらに得られた地盤に対して地震応答解析を実施することで、基盤深度推定の重要性を確認した。その結果、以下の知見が得られた。

- 基盤深度既知点 (array-A) において微動アレー観測による位相速度から基盤深度を推定したところ、ほぼ等しい結果を得た。これにより本手法の妥当性が確認された。
- 基盤深度未知点 (array-B) における微動アレー観測結果を用いて基盤深度を推定したところ、深さ約 110m の位置に基盤が存在することが分かった。
- アレー観測によって推定された地盤構造と微動の H/V の結果を比較したところ、ほぼ調和的な結果を得た。さらに複数観測点の H/V から、この地域の基盤構造の空間的な広がりを推定出来た。
- 重力観測による結果から、対象地域の 3 次元基盤形状が推定された。この結果は微動の結果と概ね一致していた。

- 得られた結果を用いて地表面地震動を算出したところ、基盤を誤って推定したものと比較して応答値に大きな違いが見られた。

上記の結果より、微動探査、重力探査は設計の際の工学的基盤位置推定に有意な情報を与えることが示された。また地表面地震動の評価に当たっては基盤位置の推定が非常に重要であることも示唆された。実設計において、軟弱層が厚く堆積し、ボーリング探査において基盤深度を推定できない場合については、各種物理探査手法を用いて基盤位置を推定することが望ましいと考えられる。

謝 辞

本報告は、鹿児島市の受託業務の一環で得た成果を使用させていただきました。また重力観測、微動観測は東京工業大学大学院生、伊藤慎一氏、鈴木優斗氏、小島康弘氏に協力していただきました。記して厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，1999。
- 2) 佐々宏一，芦田譲，菅野強：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版，1993。
- 3) Okada, H., The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series, No. 12, translated by K. Suto, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA, 2003.
- 4) 駒澤正夫：重力探査，物理探査ハンドブック，物理探査学会，pp. 433-468，1998。
- 5) Horike, M., Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in Urbanized area, J. Phys. Earth, 33, pp. 59-56. 1985.
- 6) 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，511，pp.69-75，1998。
- 7) Aki, K., Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremor, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, pp. 415-456, 1957.
- 8) 山中浩明，石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，468，pp. 9-17，1995。
- 9) 地質調査所(編)：日本重力 CD-ROM，数値地質図 P-2，地質調査所，2000。
- 10) 龍岡文夫，福島伸二：砂のランダム繰り返し入力に対する応力～歪関係のモデル化について(1)，生産研究 30 巻 9 号，pp. 356-359，1978。