

広域不整形地盤における耐震設計への 地下構造探査手法の適用例

野上 雄太¹・坂井 公俊²・室野 剛隆³・高橋 千佳⁴・盛川 仁⁵

¹ (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:nogami@rtri.or.jp

² (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ksakai@rtri.or.jp

³ (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

⁴ 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:tchika@enveng.titech.ac.jp

⁵ 東京工業大学大学院 総合理工学研究科准教授 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:morika@enveng.titech.ac.jp

地盤の2次元または3次元動的解析では、基盤形状、基盤面の位置、地盤の層構造、土の物性値などが必要である。しかし、通常の設計で考慮されているボーリング調査では基盤の位置が特定できない事例があり、その場合、ボーリング調査に替わる何らかの方法で基盤深度を推定しなければならない。

本報告は、基盤面が特定できない箇所に対して、微動アレー観測および補助的に重力探査を適用して基盤深度を推定し、推定した基盤深度を用いた広域不整形地盤モデルにおける2次元動的FEM解析を耐震設計の実務において実施した事例を報告するものである。

Key Words : *microtremor, gravity survey, nonlinear dynamic FEM analysis, non-flat base*

1. はじめに

構造物の耐震設計において、構造物への入力地震動は基盤（ここでは、せん断弾性波速度 400m/s 程度以上の耐震設計上の基盤を指す）に入力された地震動から表層地盤の振動性状を評価して設定する必要がある。実務的には、地盤の固有周期によって硬質地盤から軟弱地盤まであらかじめ大別された地盤種別に応じた地表面設計地震動を構造物へ入力する手法^{例えば 1)2)}が適用されることが多い。ただし、これらは水平成層とみなせる地盤においてのみ適用される可能である。堆積層が厚い場合、不整形の影響を無視できない場合、特殊土が堆積している場合などでは、局所的に地震動が増幅したり³⁾、顕著な非線形性により地震動が長周期化したりすることが指摘されているので、表層地盤の振動性状を地盤の動的解析により詳細に検討する必要がある。そのためには、基盤の形状や位置、地盤の層構造、土の物性値（非線形特性等）が特定されていなければならない。しかし、地域に

よっては厚い堆積層に覆われ、通常の設計で考慮されているボーリング調査では基盤の位置や層構造が特定できない事例が見られる。その場合は、ボーリング調査に替わる何らかの方法で耐震設計上の基盤面や層構造を推定する必要がある。

ボーリング調査に替わる地下構造推定手法としては、大掛かりな装置を用いる反射法探査や屈折法探査、比較的安価で容易に探査可能な微動アレー探査や重力探査などがある。ただし、耐震設計の実務において、これらの地下構造探査手法を適用して基盤面の位置が特定できない領域の基盤深度を推定し、地盤の動的応答解析から地表面設計地震動を作成した事例はほとんど無い。

そこで、本報告では、微動アレー探査および重力探査を適用して基盤深度を推定した広域不整形地盤（シラス地盤）の地震応答解析を実施し、地表面設計地震動を算定したのでその事例を報告する。

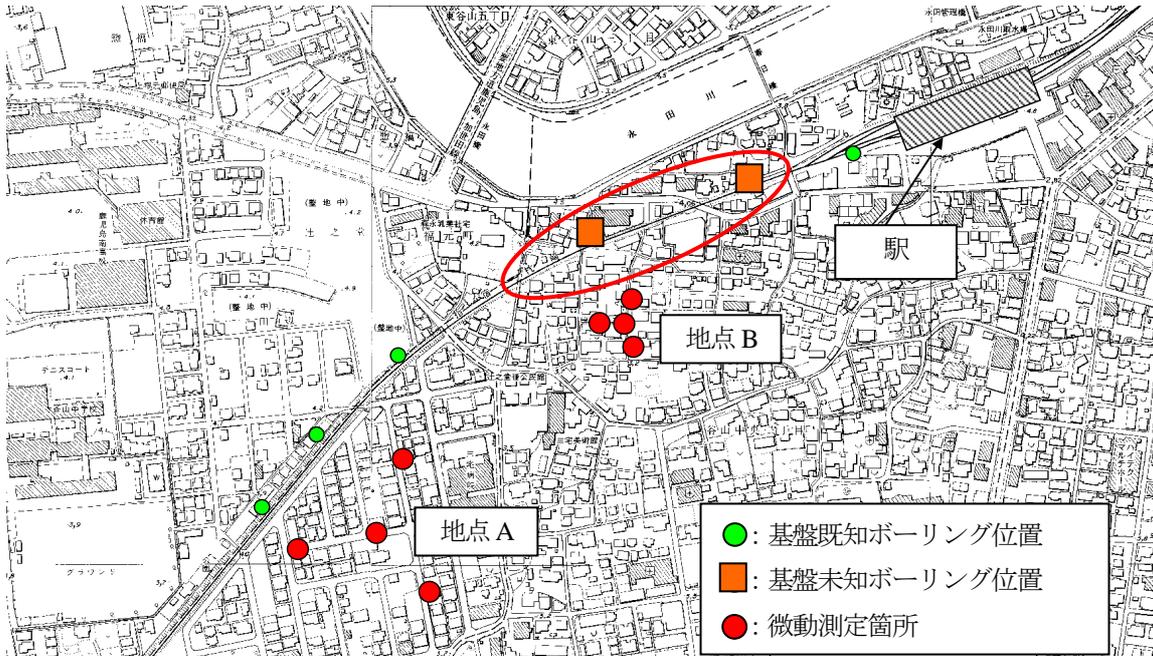


図-1 ボーリング調査位置、微動アレー探査位置

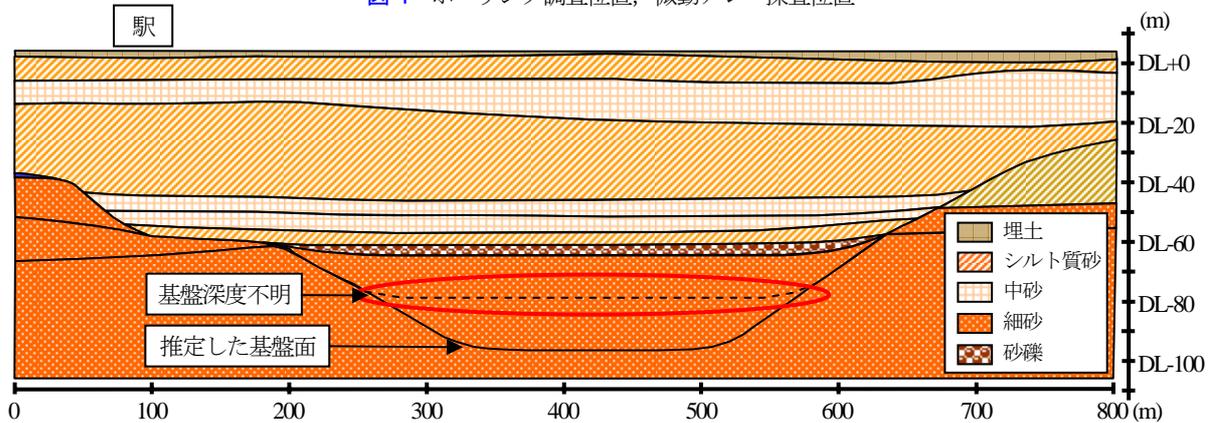


図-2 対象地域の地質縦断面図

2. 対象地域の概要

解析対象地域の既往のボーリング調査位置、後述する微動アレー探査箇所を図-1に、地質縦断面図を図-2に示す。図-2には、後述する推定した基盤面も併記している。検討対象地域は延長約800mと広範囲であり、約100m間隔で支持層の把握、土の物性値把握のためのボーリング調査が実施されている。調査の結果、土層構成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）から成っている。沖積層はN値10前後の層が深く堆積した埋れ谷が存在し、複雑な地盤構造を呈している。なかでも、図中の丸印で囲った地点は、深度約80mのボーリング調査を実施してもN値10程度の層が連続しており、耐震設計上の基盤面が把握できなかった。

上記の対象地域を微動アレー探査および重力探査を適用して基盤深度を推定し、2次元動的FEM解析を実施し

た内容について以下に述べる。

3. 耐震設計上の基盤深度の推定

図-1に示した範囲において微動アレー探査および高密度の重力探査を実施し、基盤深度を推定した。

(1) 微動アレー探査

a) 微動アレー観測

微動アレー観測は、図-1に示す2地点（地点A、地点B）で実施した。地点Aはボーリング調査で基盤深度が特定できた地点付近で、地点Bは特定できなかった地点付近である。アレー半径は、地点Aが66m、40m、20m、地点Bが20m、10m、5mとし、アレーの中心点およびアレー半径上の正三角形の4点同時観測を行った。

使用した計測機器は、換振器として固有周期1秒の動

表-1 GAの探索範囲 (地点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	∞

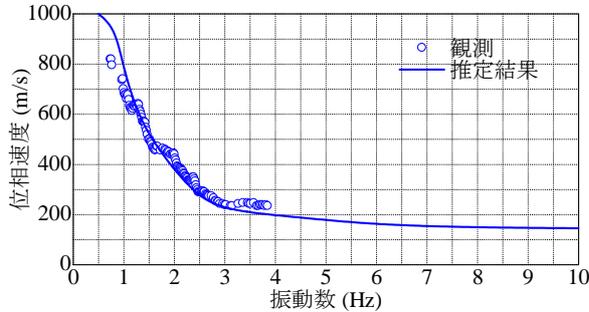


図-3 観測および推定位相速度 (地点A)

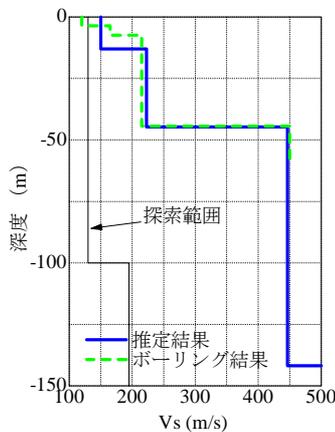


図-5 推定された地盤構造 (地点A)

表-2 GAの探索範囲 (地点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	∞

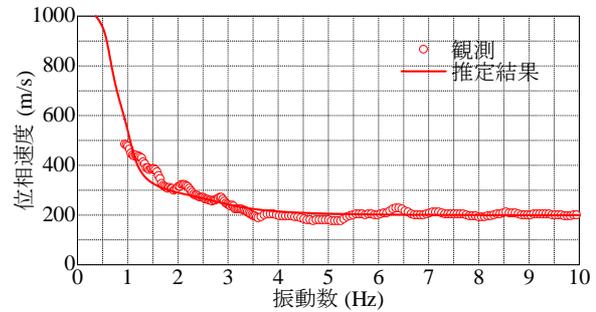


図-4 観測および推定位相速度 (地点B)

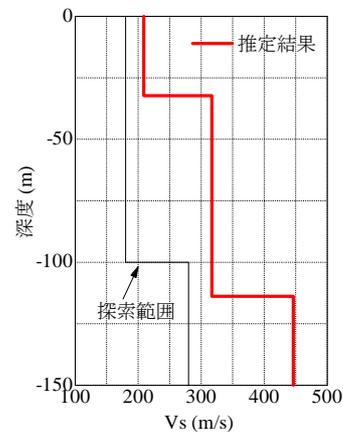


図-6 推定された地盤構造 (地点B)

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を用い，各観測点の記録と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．

b) 位相速度の算出

微動観測で得られたデータから，位相速度を推定する．本検討では位相速度を推定する方法として，空間自己相関法 (SPAC法)⁴⁾を用いた．SPAC法は，微動のような複雑な波動現象を時間，空間に関する定常確率過程であると考え，円形アレーでの微動観測データについて空間自己相関係数を定義し，それが，伝播性の波，すなわち表面波の位相速度を与えることを理論的に導いたもので

ある．

SPAC法を用いて観測点毎に得られた位相速度を図-3，図-4の○印で示す．

c) 基盤深度の推定

b)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求める．逆解析の手法としては，遺伝的アルゴリズム (GA)⁵⁾を用いた．

まず，本手法の妥当性を確認するために，ボーリング調査によって基盤深度が得られている地点Aにおいて，観測より得られた位相速度から地盤構造の推定を行い，ボーリング結果と比較する．その後，基盤深度が特定できていない地点Bにおいて同様の手法を用いて基盤深度の推定を行う．

地点Aで観測から得られた位相速度を満足する地盤構造を推定する．層構成としては，計算の都合上，耐震設計上の基盤以浅，以深をそれぞれ2層に分けた合計4層構造を仮定している．GAの探索範囲を表-1に示す．

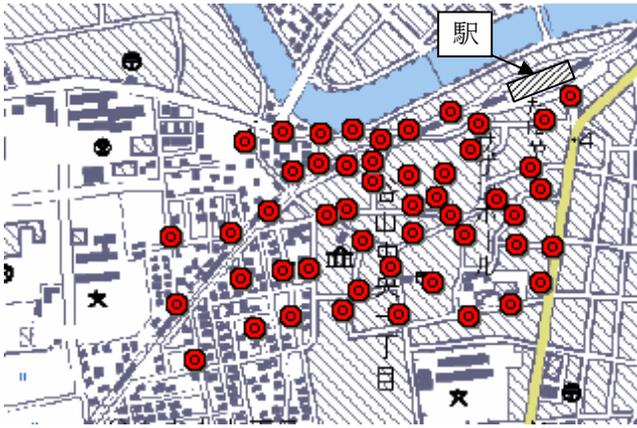


図-7 重力観測点

ここで、S波速度の探索範囲は、PS検層データ等を参考に決定している。最終的に推定した地盤構造をボーリングデータとともに図-5に、推定した地盤構造から理論的に計算した位相速度を図-3の実線で示す。図-5より、推定した基盤深度は45mであり、ボーリング調査で得られた基盤深度44.4mと同じ深度であることが分かる。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。以上より、本手法による基盤深度の推定方法が妥当であることが確認された。

続いて、地点Aと同様の方法を用いて地点Bにおける基盤深度を推定する。GAの探索範囲を表-2に示す。逆解析の結果得られた構造を図-6に、推定した地盤構造から理論的に計算した位相速度を図-4に実線で示す。図-4を見ると、推定した構造は観測位相速度をよく満足しており、地点Bでの基盤深度は、図-6から110mであると推定された。

(2) 重力探査

a) 重力の測定

重力測定は、ZLS社製 Buris自動重力計を使用した。観測した測点数は図-7に示す合計45点であり、対象地域周辺を高密度に約100m間隔で測定した。

b) 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地形補正等の種々の補正を行ない、グリッド間隔を100mとしてブーゲー異常(観測重力と正規重力の差から、ジオイドより上の影響を除去したもの)を求めた。その際、基盤の仮定密度(仮定密度:物理的には基盤の密度と考えてよい)は $21\text{kN/m}^3(2.1\text{t/m}^3)$ 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-ROM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点で行った。得られたブーゲー異常図を図-8に示す。なお、広範囲の重力のトレンドを除去するために、解析は広範囲で行っているが、実際に密な観測を行い、有意な結果

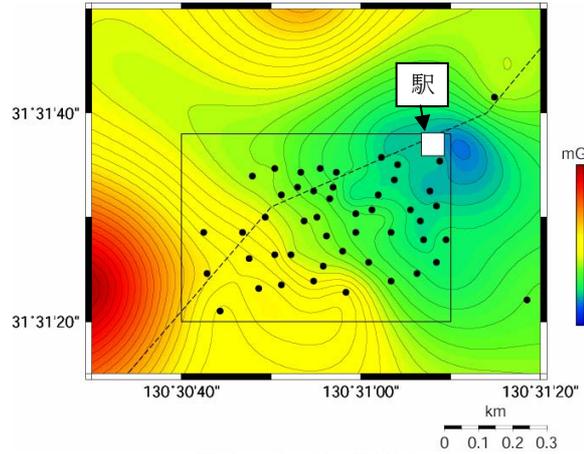


図-8 ブーゲー異常図

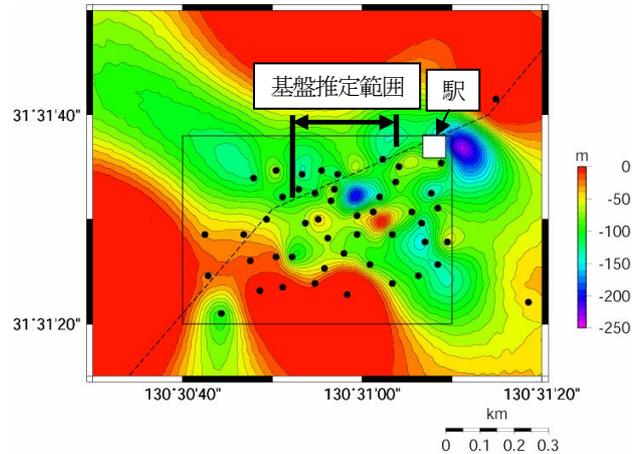


図-9 推定された基盤構造

を得ていると考えられるのは、図-8の四角で囲まれた地域である。よって、以降は図中の四角の範囲内に絞って議論を進める。得られたブーゲー異常図を見ると、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。また、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、東に進むに従い堆積層が厚くなっていること、この地域では基盤構造が複雑になっていることが予想される。

c) 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定量解析によって求める。定量解析には、地下構造のモデルから重力異常を計算し、観測重力値にマッチングさせる間接法を用いた。本解析では、間接法のうち、最も単純な二次元定量解析⁶⁾を用いた。この時、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。なお、出来る限り正しい解析結果を得るために、ボーリング調査で基盤深度が分かっている4点をコントロールポイントとして与えた。また、堆積層の密度は $18\text{kN/m}^3(1.8\text{t/m}^3)$ とした。

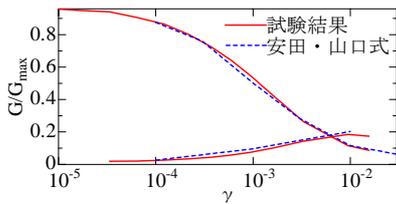


図-10 G~γ関係

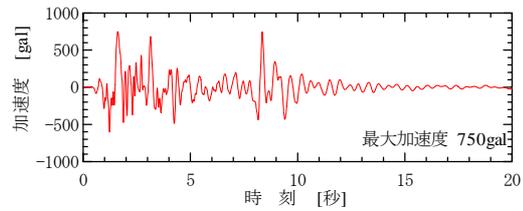


図-11 基盤入力地震動

二次元定量解析を用いて得られた基盤深度図を図-9に示す。ブーゲー異常図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構造は非常に複雑である。特にボーリング調査での基盤未到達点付近では、基盤深度が100~130mの範囲で急激に変化している。ここで地盤の面的な変化を表現する際に有効な重力探査の性質を考慮すると、今回のように、ある1地点での基盤深度を求めた場合の精度は決して高いとは言えない。こういった現状を勘案し、結果にある程度幅を持たせて考えると、この周辺での基盤は100~130mの深度にあると推定される。

(3) 設計に用いる基盤深度

本章では、ボーリング調査では基盤深度が特定できなかった地点における基盤深度を推定するために微動アレー観測および重力観測を行った。重力観測から推定された基盤深度はGL-100~130 m程度である。微動アレー観測から推定された基盤深度はGL-110 m程度であり、両者は調和的な結果を得ている。ここで、基盤面があると考えられる100~130m付近で着目している波長は地盤の固有周期や位相速度を勘案すると200~300mのオーダーであり、10m単位の議論をする精度があるとは言い難い。以上より、総合的に判断して基盤深度をGL-100mと推定した。

4. 地震応答解析

3章で推定した基盤深度および地質縦断図を基に地盤をモデル化し、構造物への入力地震動としての地表面設計地震動を算定するために2次元動的非線形FEM解析を実施した。

(1) 解析対象地盤

a) 解析モデル

解析対象地盤は図-2に示したとおりである。解析領域は幅800m×深さ110mとした。解析メッシュは、計算機およびプログラムの制約上、深さ2m×水平方向4mを基本とした。このメッシュサイズは、4~5Hz程度までの信頼性は確保でき、通常の構造物に影響を与える周波数

帯域は充分含まれている。側方境界は等変位境界、底面境界は粘性境界とした。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%を満足するレイリー減衰を考慮した。

b) 地盤モデル

地盤は非線形性を考慮し構成則として修正ROモデル⁷⁾を用いた。このモデルの骨格曲線は(1)式で表され、履歴則にMasing則を適用して、履歴減衰は(2)式のように表現される。 τ_f は、 $\tau_f = G_{max} \cdot \gamma_f$ で定義し、規準ひずみ γ_f は $G/G_{max} = 0.5$ となるときのひずみとして定義する。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{max}} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right\} \quad (1)$$

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left(1 - \frac{G}{G_{max}} \right) \quad (2)$$

ここで、

- γ : せん断ひずみ
- τ : せん断応力
- G_{max} : 初期せん断弾性係数
- α, β, τ_f : 修正ROモデルのパラメータ
- h : 減衰定数
- G : せん断弾性係数

ここで、繰り返し三軸試験によって得られている沖積シラスのG/G_{max}~γ, h~γ関係を図-10に示す。この図には既往の安田・山口⁸⁾による推定式も併記している。図-10より、沖積シラスのG/G_{max}~γ, h~γ関係は、安田・山口の式によく一致していることが分かる。また、既往の文献⁹⁾でも同様の指摘をしている。このことから、G/G_{max}~γ, h~γ関係の試験値が得られている土層は、試験値を採用して修正ROモデルにフィッティングさせることとし、実験値が得られていない土層は、安田・山口による推定式を参考にフィッティングした。

(2) 基盤入力地震動

モデル下端への入力地震動を図-11に示す。これは、鉄道構造物等設計標準(耐震設計)²⁾によるL2地震動スペクトルIIの弾性加速度応答スペクトル適合波(G1地盤用)である。

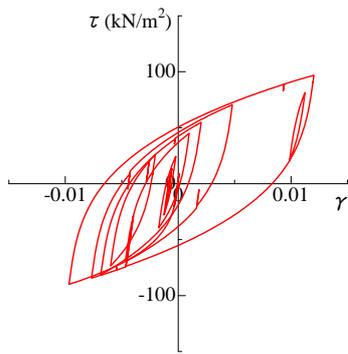


図-12 沖積シルスの $\tau \sim \gamma$

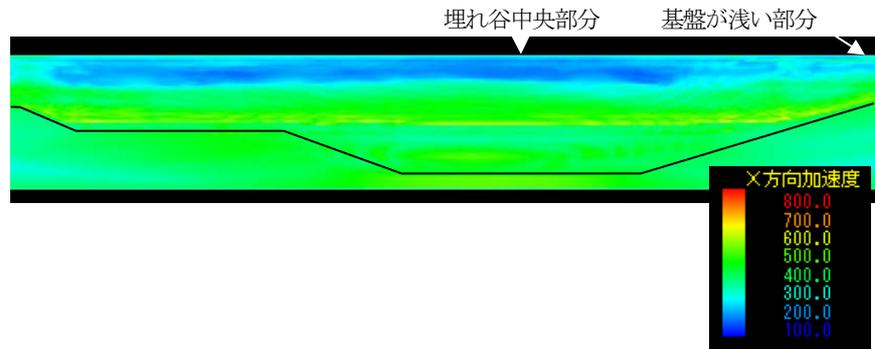
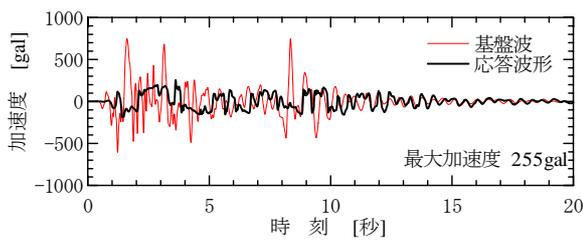
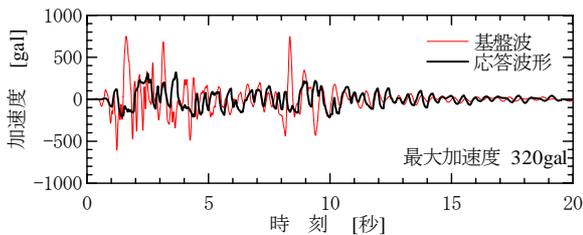
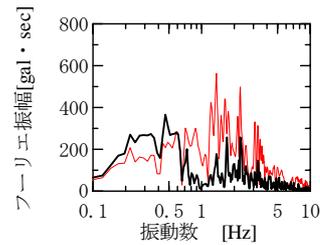


図-13 最大加速度コンター図



(a) 埋れ谷中央部



(b) 耐震設計上の基盤面が浅い部分

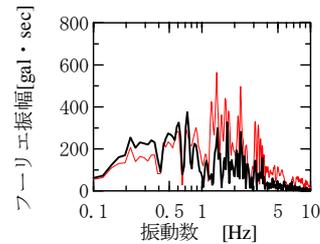


図-14 地表面加速度応答波形とフーリエ振幅スペクトル

(3) 応答解析結果

図-12 に軟弱な沖積シルスのせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ の履歴曲線を示す。ひずみは 1% を超える大きな値を示しており、土が非線形化して地盤の剛性が低下していることが分かる。図-13 の最大加速度コンター図を見ると、地表から約 30m までの最大加速度は 100～300gal 程度となっており、基盤入力地震動の最大加速度 750gal より大きく減衰している。これは、図-12 で示したように、土の非線形化が著しい軟弱層が厚く堆積していることによって減衰したものである。図-13 には耐震設計上の基盤面を併記しているが、一般には、このような不整形地盤においては、2 次的に生成された波による局所的な増幅が大きいことが言われているが、本地点の場合には、2 次的な波による目立った増幅は見られない。これは、本検討で対象としている地震動が非常に大きいため、軟弱層が厚く堆積していることによる土の非線形化が支配的であるためと考えられる。

図-13 に示している埋れ谷中央部分および耐震設計上の基盤面が浅い地点の地表面加速度波形およびフーリエスペクトルを図-14 に示す。図中には基盤入力地震動波

形およびフーリエスペクトルも併記している。

図-14(a)(b) の波形を比較すると、両者ともに土の非線形化によって長周期成分が卓越している。フーリエスペクトルを見ても高振動数成分が減衰し、振動数 0.5Hz 以下（周期 2.0 秒以上）の成分が基盤入力地震動よりも卓越していることから、地震動が長周期化していることが確認できる。両者の最大加速度を見ると、埋れ谷中央では 255gal であるのに対し、耐震設計上の基盤面が浅い地点では 320gal となっている。また、振動数 0.5Hz 以下のフーリエ振幅を見ると、埋れ谷中央のほうが低振動数（長周期）成分が卓越していることが分かる。耐震設計上の基盤までの深さが異なると、地表面における比較的近い地点においても増幅あるいは減衰効果も地点によって異なっており、耐震設計において留意すべき点であることが確認された。

(4) 非線形応答スペクトルの作成

最後に、地盤の動的解析から得られた地表面地震動波形より、非線形応答スペクトルを算出した。非線形応答スペクトルとは、1 自由度系の固有周期をパラメータと

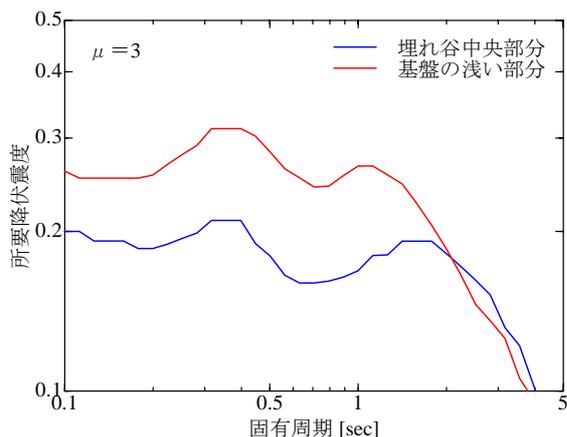


図-15 所要降伏震度スペクトル

して、系の非線形応答を求め、応答スペクトルとして表現するものである。本検討では、縦軸に系の降伏震度、横軸に系の固有周期をとった所要降伏震度スペクトル²⁾として表現する。

例として図-14(a)(b)の2地点の地表面地震動から算出した塑性率 μ が3の時の所要降伏震度スペクトルを図-15に示す。例えば、固有周期0.4秒、 $\mu=3$ の構造物を考えると、埋れ谷中央では構造物に必要な降伏震度は約0.2である。一方、基盤の浅い部分において必要な降伏震度は約0.3であり、降伏震度として1.5倍程度異なることが分かる。このことから、不整形地盤では比較的近い地点においても地表面の地震動レベルが基盤深度によって大きく異なることが分かる。

5. まとめ

本報告では、まず、耐震設計上の基盤深度が特定できない箇所に対して、微動アレー探査および重力探査を適用して基盤深度を推定した。続いて、推定した基盤面を用いた広域不整形地盤の応答解析を実施し、構造物の応答値を算出するための地表面設計地震動および非線形応答スペクトルを作成した。

解析結果を総合すると、軟弱地盤が厚く堆積しているため、土の非線形化の影響によって地表面における応答波形は加速度レベルが下がり、長周期化する結果を得た。さらに不整形地盤であることから、比較的近傍の2地点においても基盤までの深度に大きな差があり、基盤までの深度が浅い地点の地表面地震動は大きくなる結果を得た。

このように、耐震設計の実務において微動アレー探査などの地下構造探査手法を適用した事例はほとんど無く、今後、これらの手法による地盤構造の推定方法を耐震設

計の実務に適用するための貴重な資料になると考えられる。

謝辞：本報告は、鹿児島市の受託業務で得た成果を使用させていただきました。記して謝意を表します。

また、現地における微動観測および重力観測は、東京工業大学の学生、伊東慎一さん、鈴木優斗さん、小島康弘さんに協力していただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)，2002.
- 2) (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.
- 3) 室野剛隆，西村昭彦，室谷耕輔：地震動に与える表層地盤の局所的变化の影響と耐震設計への適用性に関する提案，土木学会ローカルサイト・エフェクト・シンポジウム論文集，pp.183-188，1998.
- 4) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremor, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, pp.415-456, 1957
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 安田進，山口勇：種々の不攪乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会，pp.539-542，1985.
- 9) 永瀬英生，田上裕，廣岡明彦，持永修史，宮下義幸：九州における数種類の特殊土の動的変形・強度特性，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1439-1444，1998.

(2007.06.29受付)