

微動観測による地盤構造の推定とそれに基づく地震動評価に関する研究

石垣 諒

1. はじめに

日本は世界有数の地震国であり、1995年兵庫県南部地震では莫大な被害が生じた。その中でも、幅約1km、長さ約20kmの「震災の帯」と呼ばれる狭い地域に建物の大破・全壊といった大きな被害が集中しており、比較的軟らかい層を持つ平野部では隣接する2地点であっても、地盤条件により地震動強度に大きな差異が生じることがある。よって、より詳細な地震被害想定を行う必要があるが、地震被害の中でも、建物被害が大きな割合を占めており、建物被害を推定するためには建物に入力する地震動特性を明らかにする必要がある。そして、その地震動特性を正確に把握するために、地盤モデルを作成する必要があるが、建物の被害に最も影響を与えるのがS波であることから、地盤のS波速度構造が重要となる。

そこで本研究では、約3km程度の距離にも関わらず、強震観測網¹⁾ K-NET 防府と KiK-net 防府の2地点で観測された地震記録が全く異なる山口県防府市内の平野部にて、微動アレー観測および単点微動観測を行い、観測点直下のS波速度構造を推定し、それに基づく地震動の評価を試みた。

2. 防府市における微動アレー観測

2.1 観測概要

表1に各観測点の諸元を、図1に各観測点の所在を示す。本研究では、青年科学館、防府市消防署、西浦小学校の計3カ所で微動アレー観測を行った。

表1 各観測点の諸元

地域	アレー	半径[m]	測定時間[分]	サンプリング[Hz]
青年科学館 (KiK-net防府)	X	40	20	100
	L	20	20	100
	M	10	15	100
	S	5	15	100
	P	2	15	100
防府市消防署 (K-NET防府)	L	20	20	100
	M	10	20	100
	S	5	15	100
	P	2	15	100
西浦小学校	X	40	20	100
	L	20	20	100
	M	10	15	100
	P	2	15	100

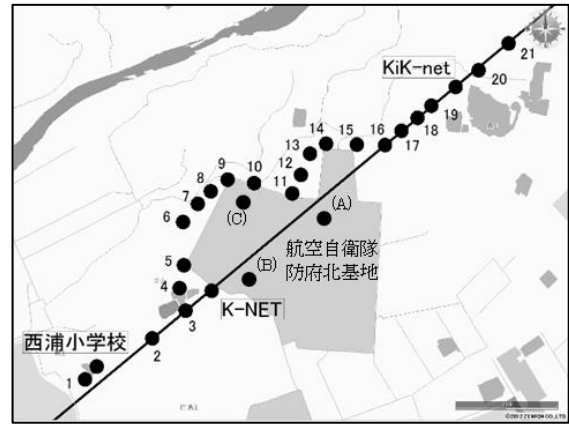


図1 各観測点の所在

2.2 解析結果

本研究では空間自己相関法 (SPAC法)²⁾の前処理として、微動の加速度記録に解析対象の周波数帯に応じたバンドパスフィルターを掛けて積分することで、速度に変換し、その速度記録をアレーサイズに応じたいくつかの解析区間に分け、微動計ごとのフーリエスペクトルを求める。そして、時間的、空間的に安定している部分を解析対象区間とした。選別した解析対象区間に対してSPAC法を適用し、アレー半径ごとに位相速度を求めた。さらに、抽出された位相速度を1つの曲線となるよう1本に統合し、観測点ごとの分散曲線を求めた。(図2)

次に抽出された分散曲線を満たすS波速度構造を試行錯誤的に推定し、これを初期モデルとしてGA(遺伝的アルゴリズム)³⁾によって逆解析を行った。なお、初期モデルの作成に当たっては、工学的基盤以浅の表層は1~3層程度を想定し、S波速度と層厚を自由に設定したが、それ以深については藤原・他(2009)⁴⁾とPS検層結果を考慮し、層厚のみを自由に变化させた。

GAによる解析では、初期モデルの値を中心に探索範囲を設定した。本研究ではパラメータを6bitで離散化し、1世代あたりの個体数は40、世代数は1000世代とした。乱数の初期値を変え、5回試行し、誤差の最も小さいものをその段階における解とした。さらにその解を中心に再度GAによる逆解析を行う。これを数回繰り返して、観測によって得られた分散曲線を満たすS波速度構造を推定した。推定したS波速度構造とPS

検層結果の比較とそのS波速度構造における理論的な分散曲線を図2に示す。各層のS波速度はPS検層を参考に設定し、表層の層厚はPS検層結果と概ね一致している。

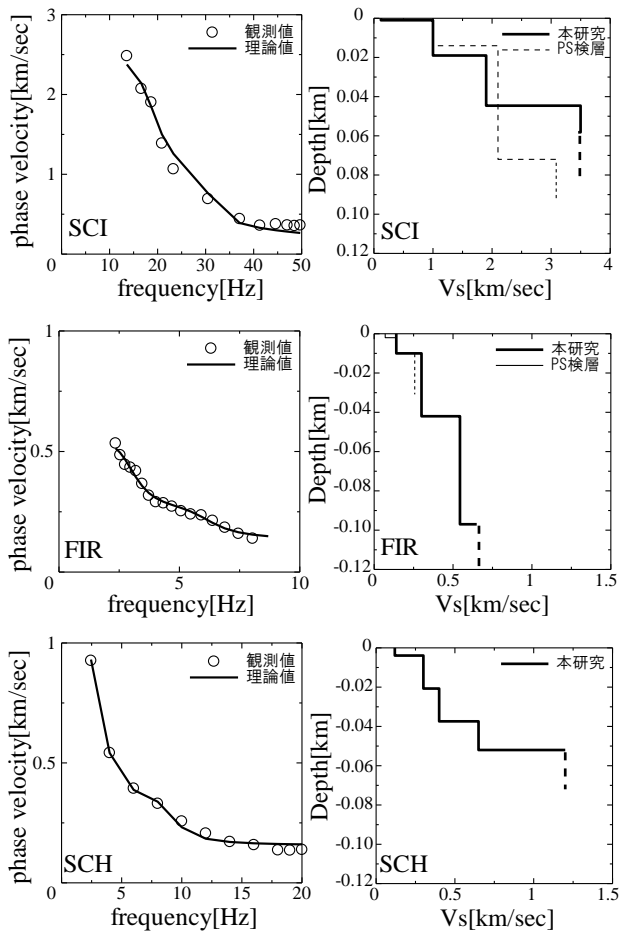


図2 分散曲線とS波速度構造

3. 単点微動観測

3.1 測定概要

山口県防府市内においてK-NET防府とKiK-net防府を通るラインに沿って、全24地点で単点微動観測を行った。各観測点の所在を図1に示す。中央に航空自衛隊防府北基地があり、一部直線から離れた観測点が存在する。観測点間隔は200mを基本とし、測定時間は10分とした。

3.2 解析結果

観測した記録は20.48秒を1サンプルとし、10.24秒ずつずらしながら、測定時間20分では115サンプル、15分では85サンプル、10分では58サンプルに分割した。そして全サンプルからフーリエスペクトルを求め、バンド幅0.7HzのParzen windowで平滑化した。次に平滑化した各成分のフーリエスペクトルから、(3.1)式でH/Vスペクトルを算出した。

$$H/V = \sqrt{(NS)^2 + (EW)^2} / UD \quad (3.1)$$

算出した全H/Vスペクトルの平均との差が最も大きいH/Vスペクトルを除外する。次に除外したH/Vスペクトルを除く全H/Vスペクトルの平均と差が最も大きいH/Vスペクトルを除外する。これを10サンプルになるまで繰り返す。残った10サンプルの平均を各地点のH/Vスペクトルとした。算出したH/Vスペクトルから求めた各測定点における卓越周期分布を図3に示す。平野部ではほとんどの地点で卓越周期が0.6秒以上と比較的長く、K-NET防府より以南と、KiK-net防府より以北では西浦小付近を除き0.3秒以下と短くなった。

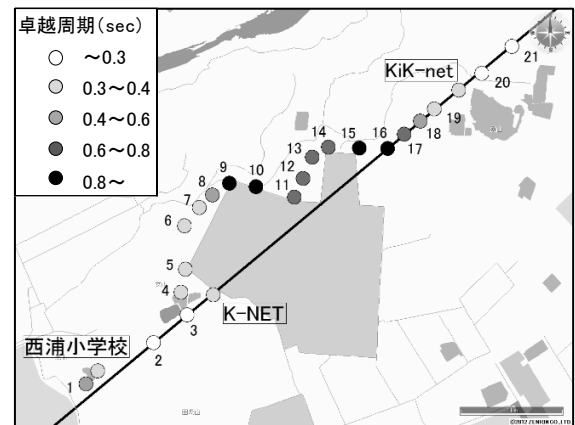


図3 卓越周期分布

4. 2次元S波速度構造

微動H/Vスペクトルとレイリー波基本モードの理論H/Vスペクトルの周期特性がよく対応していると既往の研究により指摘されている^{5) 6)}。本研究では微動H/Vスペクトルはレイリー波基本モードの理論H/Vスペクトルで近似できると考え、S波速度構造を推定する。レイリー波基本モードの理論H/Vスペクトルの周期特性を求めるには、各層の層厚、S波速度、P波速度、密度の4つの物性値を含む地盤モデルを作成する必要がある。本研究では地盤モデルを作成する際、ボーリングデータ及びPS検層結果を基に、浅部から最上部層(Um層)、上部砂礫層(US層)、下部砂礫層(LS層)、最下部層(LM層)、基盤岩類(B層)に分割した。各層の層厚とS波速度は3章で推定したS波速度構造とPS検層データを参考にし、PS検層によりP波速度が求められていない層については狐崎らによるP波速度 V_p とS波速度 V_s (km/s)の関係式⁷⁾を用いて算出した。

$$V_p = 1.29 + 1.11V_s \quad (4.1)$$

また、密度 ρ (g/cm³)は以下に示す太田らによる密度とS波速度との関係式⁸⁾を用いて算出した。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (4.2)$$

作成した地盤モデルにおけるレイリー波基本モードの理論 H/V スペクトルを微動 H/V スペクトルに一致するよう各層の S 波速度を固定した状態で、層厚を試行錯誤的に変化させ、各地点の S 波速度構造を推定した。なお、層厚を決定する際、表層の 3 層と深層の 4 層に区別し、表層の 3 層は各層を比例的に変化させ、深層の 4 層は自由に変化させた。推定した S 波速度構造とその理論 H/V スペクトルの一例を図 4 に、逆解析地に使用した地盤物性値を表 2 に示す。なお、本研究の逆解析では、観測と理論計算による H/V スペクトルのピークとトラフとなる周波数を一致させることのみを対象としており、その他の周期特性や振幅は考慮していない。

各地点の地盤モデルを線形的につなげることで推定した 2 次元地盤モデルを図 5 に示す。防府市内にある図 1 の (A)、(B)、(C) の 3 地点のボーリングデータによると、Lm 層までの深度は約 10m から 20m であり、本研究で推定した地盤モデルとよく対応している。

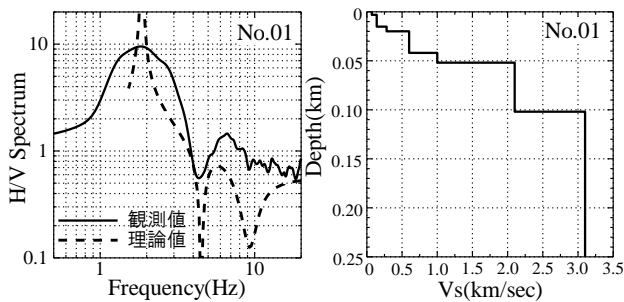


図 4 理論 H/V スペクトルと S 波速度構造

表 2 地盤物性値

地盤地質区分	Vs[m/s]	Vp[m/s]	ρ [g/cm ³]
最上部層(Um)	70	620	1.49
上部砂レキ層(US)	140	1410	1.65
下部砂レキ層(LS)	280	1410	1.72
最下部層(Lm)	600	1650	1.91
基盤岩類1(B1)	1000	1800	2.07
基盤岩類2(B2)	2100	4800	2.37
基盤岩類3(B3)	3100	5500	2.58

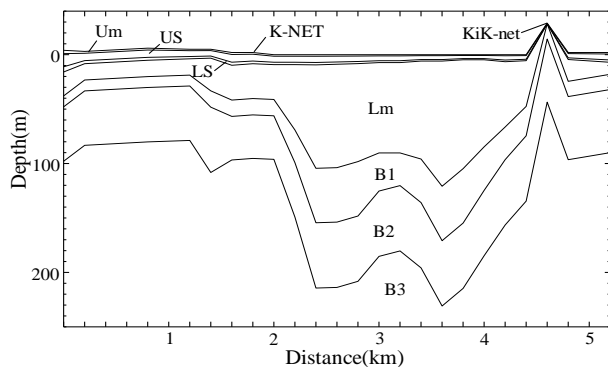


図 5 推定 2 次元地盤モデル

5. 増幅特性

5.1 解析概要

地盤特性を検討するため、地震基盤に対する地表面の伝達関数を 1 次元解析 (SHAKE)⁹⁾ によって算出した。本解析に必要な地盤物性値は 4 章で使用、推定した各層の層厚、S 波速度、密度を使用し、減衰定数 (Q 値) については、表層の 3 層で S 波速度 (m/s) の 1/10~1/5 程度、Lm 層以深では 100 とした。

1 次元解析によって算出した各地点の伝達関数を、基盤岩類 1 (B1 層) が地表に露頭している KiK-net 防府の伝達関数で除すことで、工学的基盤である最下部層 (Lm 層) に対する地表面の伝達関数を算出した。

5.2 解析結果

図 6 に K-NET 防府の Lm 層に対する地表面の伝達関数と、KiK-net 防府の地震記録に対する K-NET 防府の地震記録のスペクトル比を示す。スペクトル比の算出については、K-NET 防府と KiK-net 防府の両観測点で観測された 72 の地震記録の NS、EW 成分を使用し、各地震記録のスペクトル比を平均した。

1 次元解析によって算出された伝達関数と地震記録のスペクトル比を比較すると、EW 成分では、0.4 秒よりも長周期では観測記録と概ね一致している。0.4 秒よりも短周期では、伝達関数の谷の部分と観測記録で差異が生じているが、K-NET 防府で観測された EW 方向の地震記録では 1 次元的な地盤構造の影響が支配的であると考える。一方、NS 成分では、地震スペクトル比が、周期 0.2 秒から 0.4 秒付近と、周期 2.0 秒付近で大きくなっており、1 次元解析では説明できていない。K-NET 防府で記録された加速度記録は、EW 成分よりも、NS 成分が大きくなる傾向があると思われる。K-NET 防府と KiK-net 防府で観測された地震記録の一例として 2001 年芸予地震時の NS、EW 方向の加速度記録を図 7 に示す。KiK-net 防府で観測された NS 方向と EW 方向の記録はほぼ振幅が等しいのに対し、K-NET で観測された NS 方向の記録は、EW 方向に比べて振幅が 2 倍以上大きくなっている。これは NS 方向の加速度記録

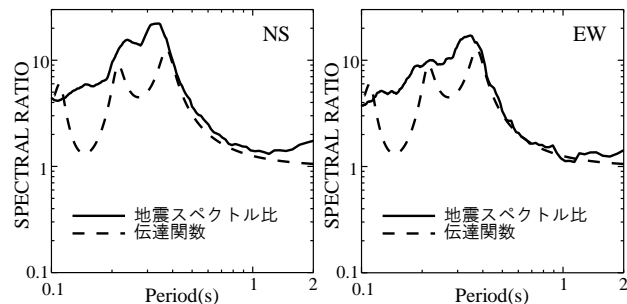


図 6 伝達関数と地震スペクトル比

が、K-NET 防府付近の 2 次元及び 3 次元的な地下構造の影響を受けていると考えられ、検討が必要である。

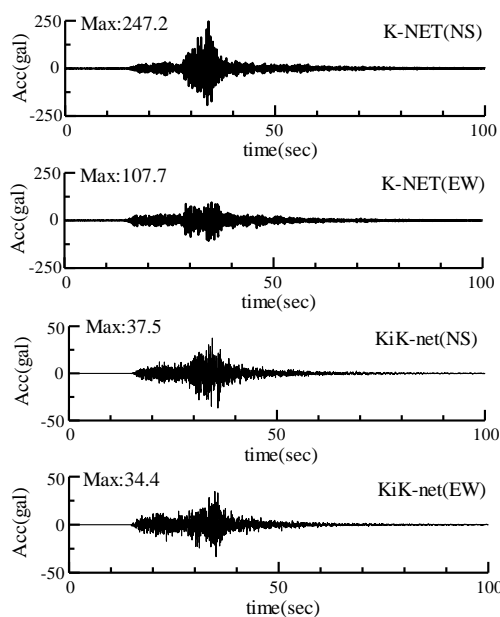


図 7 芸予地震時の加速度波形

6 計測震度の算出

1次元解析により、KiK-net 防府で観測された 2001 年芸予地震の記録から、B3 層以浅の層の影響を取り除いた地震基盤波を作成し、この地震基盤波を各地点の B2 層へ鉛直に入力した時の地表での計測震度を算出した。地震基盤波及び地表波を算出する際の地盤物性値は、水平成分 (NS、EW 方向) では前章と同じであるが、鉛直成分 (UD 方向) では、P 波速度を用い、P 波の Q 値は前章で定めた S 波の Q 値の 1/1.5 とした。計測震度の算出は、気象庁が公表している算出方法に従って行った。各地点の推定計測震度を表 3 に示す。なお、実際に K-NET 防府で観測された芸予地震時の計測震度は 4.9 であり、推定した計測震度と若干異なるため、今回は各地点の相対評価を行うことにした。表層の 3 層が比較的厚い No. 01、No. 06、K-NET 防府では、KiK-net 防府より推定計測震度が 1.4 程度大きくなった。逆に、表層が薄い KiK-net 防府周辺では計測震度

表 3 各地点の推定計測震度

地点番号	計測震度	震度階	地点番号	計測震度	震度階
No.01	4.6	5弱	No.11	4.3	4
西浦小	4.2	4	No.12	4.2	4
No.02	4.1	4	No.13	4.2	4
No.03	4.1	4	No.14	4.2	4
No.04	4.3	4	No.15	4.0	4
No.05	4.3	4	No.16	4.0	4
K-NET	4.6	5弱	No.17	4.0	4
No.06	4.5	5弱	No.18	4.3	4
No.07	4.3	4	No.19	4.3	4
No.08	4.2	4	KiK-net	3.2	3
No.09	4.3	4	No.20	4.0	4
No.10	4.3	4	No.21	4.1	4

が小さくなっており、Lm 層が厚い No. 15 付近でも同様に小さくなっている。さらに、表層の厚い No. 01 に近づくにつれて計測震度が大きくなっていることから、計測震度は Lm 層以深の深層よりも、表層地盤と相関があると考えられる。

7. まとめ

- ・微動アレー観測及び単点微動観測を行い、防府市内の S 波速度構造を推定した。
- ・推定された地下構造を基に、1次元解析を行った結果、K-NET 防府で観測された地震動は 2 次元的な地下構造の影響が考えられ、今後検討が必要である。
- ・2001 年芸予地震時における各地点の推定計測震度を算出した結果、芸予地震時の推定計測震度と表層地盤の層厚との相関が見られた。

[参考文献]

- 1) 防災科学研究所：K-NET、KiK-net
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) Aki, K: Space and time spectra of stationary stochastic wave with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, pp. 415-456, 1957w
- 3) 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、日本建築学会構造論文集、第 468 号、pp. 9-17、1995
- 4) 藤原広行、河合伸一、青井真、森川信之、先名重樹、工藤暢章、大井昌弘、はお憲生、早川讓、遠山信彦、松山尚典、岩本鋼司、鈴木晴彦、劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討、防災科学技術研究所資料、第 337 号、pp. 272、2009
- 5) 塩野計司、太田裕、工藤一嘉：やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (6) -微動に含まれる Rayleigh 波成分-、地震第 2 輯、第 32 巻、pp. 59-122、1991
- 6) 時松孝次、宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第 439 号、pp. 81-87、1992
- 7) 狐崎長琅、後藤典俊、小林芳正、井川猛、堀家正則、斉藤徳美、黒田徹、山根一修、奥田宏一：地震動予測のための深層地盤 P、S 波速度の推定、自然災害科学、vol. 9、No3、pp. 1-17、1990
- 8) 太田外氣晴、江守勝彦、河西良幸：耐震・振動・制御、共立出版、pp. 339、2001
- 9) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975