

K-NET 地震記録を用いた地盤増幅度と平均 S 波速度の関係

The Relationship between Site Amplification and Average S-Wave Velocity Using K-NET Records

田 村 勇*・山 崎 文 雄*・ホスロウ T シャベスタリ**

Isamu TAMURA, Fumio YAMAZAKI and Khosrow T. SHABESTARI

1. は じ め に

地震被害推定および早期被害世推定システムなどにおいては、広域の地震動分布を知ることが重要である。その際に地盤のゆれの増幅特性（地盤増幅度）を考慮する必要がある。これを一般に入手可能なデータに基づいて簡便に推定する手法が望まれる。地盤の増幅特性を簡便に推定する手法としては、日本全国を 1 km メッシュでカバーしている国土数値情報に含まれる地形・地質条件を用いる研究が最近いくつか行われている^{1,2)}。

表層地盤の S 波速度 (V_s) をパラメータとして地盤の増幅特性を推定する手法に関する研究もいくつか行われている^{4,5)} が、全国規模で PS 検層が行われている例が少ない。しかし、全国をカバーしているデータベースとして科学技術庁の設置した K-NET は地震記録と同時に、各地点で土質分類、PS 検層など、データが非常に豊富である。そこで、本研究では K-NET のデータをもとにして、表層地盤の平均 S 波速度 (AVS) をパラメータとして地盤増幅度の推定を行う方法について検討を行う。

2. 地 盤 増 幅 度

地震時のある地点におけるゆれの大きさは主に 1) 地震の規模、2) 震源からの最短距離、3) 震源の深さ、4) 地盤特性、によって決定される。距離減衰は 1) ~ 3) の要因について回帰分析を行い、ある地点のゆれの推定を行うこと目的としたものである。距離減衰式の関数型は

$$\log_{10} y = b_0 + b_1 M + b_2 r - \log_{10} r + b_4 h + c \dots \dots (1)$$

で表される。ここに、 y は地震強度指標の値、 M は気象庁マグニチュード、 r は断層面への最短距離、 h は震源深さ、

b_0, b_1, b_2, b_4 は各地震動指標は回帰分析により求める係数、 c は各指標の地点係数である。地点係数は回帰分析における観測地に対する補正項であり、全地点の平均値は 0 となる。地点係数が正であれば平均よりもゆれやすく、負であればゆれにくいということになる。地盤増幅度を AR とすると、 $AR = 10^c$ となり、これを平均地盤に対する地盤増幅度と定義する。

Khorow and Yamazaki³⁾ は K-NET 95 型地震計で、全国 1003 箇所のうち、1996 年 5 月から 1998 年 12 月にかけて観測された 94 地震で 2 つ以上の記録が取れた 823 地点について水平上下 3 成分 6017 組の記録を用いて、最大加速度 (PGA)、最大速度 (PGV)、SI 値、応答スペクトル、計

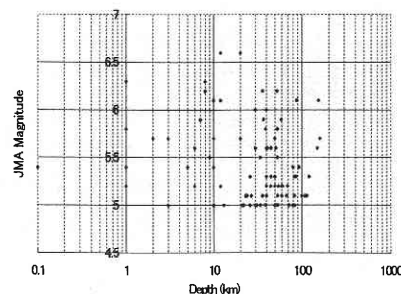


図 1 震源深さとマグニチュードの関係

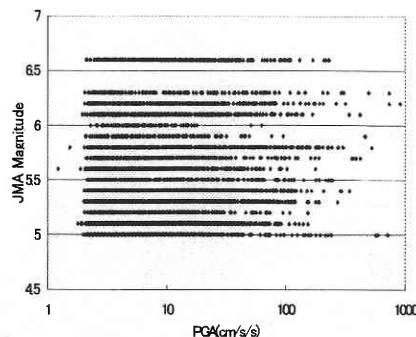


図 2 最大加速度とマグニチュードの関係

*東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門

**理化学研究所地震防災フロンティアセンター

測震度の距離減衰式を構築した。これに用いた地震の特性は図 1, 2 に示す。図 1 は震源距離とマグニチュードの関係、図 2 は最大加速度とマグニチュードの関係を示す。

3. 平均 S 波速度 (AVS)

(1) AVS の定義

AVS には 2 つの定義式が与えられている。定義式を以下に示す。

$$AVS_L(d) = \sum h_i V_{si} / d \dots\dots\dots (2)$$

$$AVS_T(d) = \sum d / (\sum h_i / V_{si}) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 d は AVS を計算する層の深さである。式 (2) は V_s を層厚によって重み付けを行ったもの、式 (3) は V_s を走時によって重み付けを行ったものである。(3) の定義による AVS が一般的によく使われている。

それぞれの式の意味としては (2) の定義は V_s を地盤の固さの指標としたものであると考えられる。(3) 式は平均速度の定義にしたがったものである。

(2) AVS の物理的意味

地盤増幅度は主に表層の S 波速度によって決定されるということが既往の研究より得られている。ここでは AVS の物理的意味を地盤モデルの解析によって検証する。

1次元重複反射理論によってある 3 層系地盤の伝達関数の 1 次卓越周期および増幅度を求め、それらが一致するような 2 層系地盤モデルを求める (図 2)。3 層系地盤の伝達関数の 1 次固有周期を T_1 としたとき、1/4 波長則に基づいて S 波速度の走時が一致するような深さを H_{opt} としたとき、卓越周期と各層の層厚と S 波速度の関係は、

$$H_1/V_1 + (H_{opt} - H_1)/V_2 = T_1/4 \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに、 H_i, V_i はそれぞれ 3 層系の各層の層厚と S 波速度である。これより求まる H_{opt} を 2 層系地盤の表層の層厚とした場合、3 層系の卓越周期と一致させると

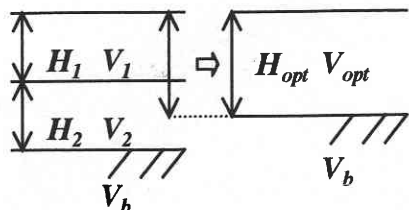


図 3 3 層系地盤の卓越周期とそこにおける増幅度を等しくする 2 層系地盤の関係

き、以下の式が成り立つ。

$$T_1/4 = H_{opt} / V_{opt} \dots\dots\dots (5)$$

ここに V_{opt} は 2 層系地盤の表層の S 波速度である、式 (4)、(5) を V_{opt} について整理すると、

$$V_{opt} = H_{opt} / (H_1/V_1 + (H_{opt} - H_1)/V_2) = AVS_T(d) \dots\dots\dots (6)$$

が成り立つ。すなわち $AVS_T(H_{opt})$ の定義式が導かれる。以下で例題を 2 つ用いて 3 層系および 2 層系の卓越周期、および増幅率が一致することを確認する。表 1 に各地盤パラメータおよび H_{opt}, V_{opt} を示す。また図 4, 5 にそれぞれ

表 1 例題のパラメータおよび計算された H_{opt}, V_{opt}

	ケース 1	ケース 2
V_1 (m/s)	200	200
H_1 (m)	10	10
V_2 (m/s)	400	100
H_2 (m)	10	10
V_b (m/s)	600	
T_1 (s)	0.23	0.76
V_{opt} (m/s)	126	227
H_{opt} (m)	13.2	24.0

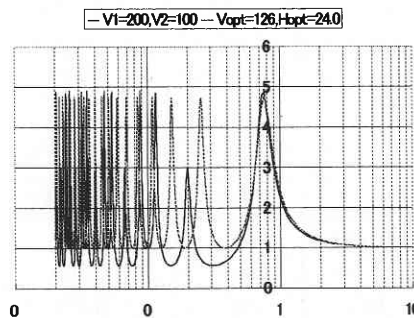


図 4 ケース 1 の露頭基盤に対する伝達関数

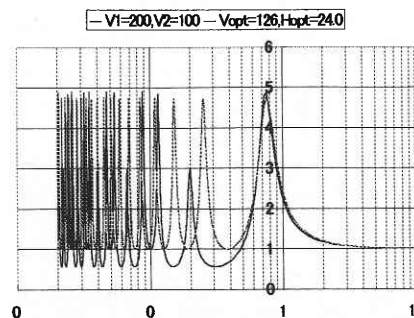


図 5 ケース 2 の露頭基盤に対する伝達関数

研 究 速 報

のケースで伝達関数を比較したものを示す。3層系と2層系における一次卓越周期の増幅度が一致していることが分かる。これにより、 $AVS_T(d)$ が地盤増幅特性の推定のためのパラメータとして有効であることが示された。以下では、 $AVS_T(d)$ を入力として用いて議論を進める。このようにして多層系地盤の卓越周期と増幅度を一致させるような2層系を作れるのだが、 H_{opt} の値が地盤ごとに変化しているため、簡便のためにある深さに固定した AVS を入力パラメータとして用いることになる。

3. AVSと地盤増幅度

(1) 深さの決定

翠川⁵⁾ は地盤増幅度の推定のためのパラメータとして、 $AVS_T(30)$ を提案している。本研究で用いる K-NET データは表層より 20 m までの S 波速度が 1 m ピッチで得られているため、ここでは表層より 1 m ピッチで増幅度と AVS の相関を求め、どの深さにおける AVS を地盤増幅度推定のパラメータとして用いるかを考察する。

図5に AVS と地盤増幅度 (PGA, PGV, SI 値) の相関を 1 m ピッチで計算したものを示す。 AVS の計算の際には深さ 20 m まで PS 検層のデータがない場合は最下層のデータが 20 m まで続いていると仮定した。ここでは、相関の程度の指標として決定係数 (R^2) を用いる。表2に相関が最大となる深さおよび決定係数を示す。図6より、 AVS と PGV, SI 増幅度 (AR_{PGV}, AR_{SI}) との間には PGA 増幅度 (AR_{PGA}) と比較して良い相関があることが認められる。表2からも分かるように決定係数の値は 0.36 前後 (相関係数

表2 相関が最大となる深さと決定係数

	深さ	決定係数
AR_{PGA}	8m	0.128
AR_{PGV}	20m	0.368
AR_{SI}	20m	0.378

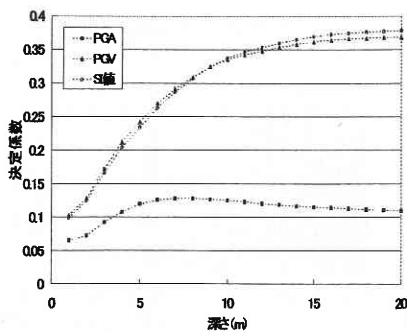


図6 AVSと増幅度の相関の変化

≈ 0.6) で、決して高い値であるとはいえない。この理由の一つとしては2. (2)で示したように、1次卓越周期における増幅度を一致させるような2層系の厚さは地盤によって異なることが考えられる。また、本研究では地形・地質条件を考慮しておらず、これもばらつきを大きくしている原因の一つであると考えられる。

AR_{PGV}, AR_{SI} については $AVS_T(20)$ との相関が最大となるという結果となったが、グラフの形状からより深い部分において相関が最大となる可能性が示唆されている。

(2) AVSと地盤増幅度の関係

ここでは決定係数は最大となる深さにおいて AVS と地盤増幅度の関係のプロットを行う。回帰も行い、 AVS を入力とした地盤増幅度の推定式を提案する。地点係数は先に述べたように多重回帰式の補正項であるため「平均」に対する増幅度という表現となっている。地盤増幅度の推定を行う際には基準を明確にする必要があると思われる。翠川⁵⁾ は $V_s = 600$ m/s を基準とすることを提案している。したがって、本研究では $V_s = 600$ m/s を基準 (増幅度 = 1.0) として地盤増幅度の推定を行う。

図7-9に AVS と地盤増幅度の関係をプロットする。各地震動指標に対する AVS の回帰式は以下のとおりである。

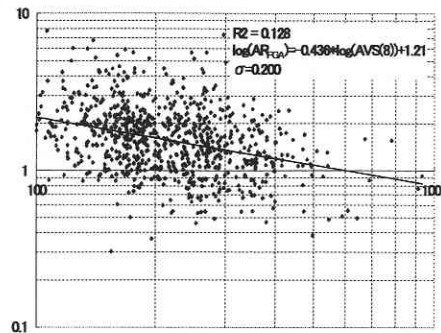


図7 $AVS_T(20)$ と AR_{PGA} の関係

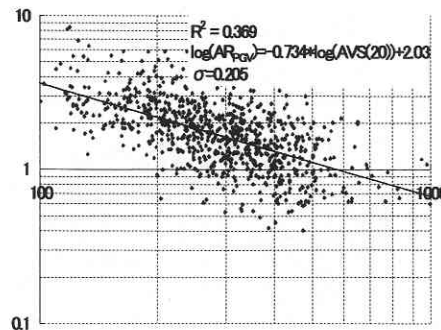
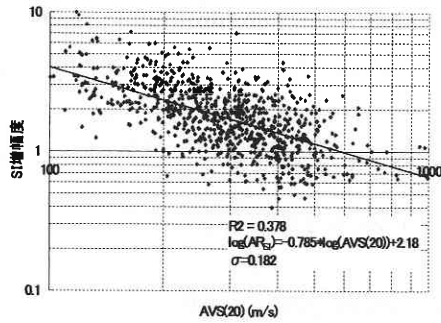


図8 $AVS_T(20)$ と AR_{PGV} の関係

図9 $AVS_T(20)$ と AR_{S_T} の関係

$$\log_{10}(AR_{PGA}) = -0.436 \log_{10}(AVS_T(8)) + 1.21 \cdots (7)$$

$$\log_{10}(AR_{PGV}) = -0.734 \log_{10}(AVS_T(20)) + 2.03 \cdots (8)$$

$$\log_{10}(AR_{S_T}) = -0.785 \log_{10}(AVS_T(20)) + 2.18 \cdots (9)$$

4. 結 論

本研究では AVS を入力として地盤増幅度を推定する方法について検討した。また地盤モデルを用いて AVS の物理的意味の考察を行った。この考察によって、多層系の伝達関数の1次卓越周期における増幅度を一致させるような2層系のS波速度が走時による AVS となることが明らかになった。

また、K-NET地震記録による距離減衰式から得られた

地盤増幅度と AVS の相関を1mピッチで調べて適当な深さの AVS に対して地盤増幅度との相関が高いことが示された。

今後はK-NET以外の地震記録(横浜市など)について同様の検討をする必要があると思われる。また、本研究では地形・地質条件などの考慮を行わなかったため、これらの条件もからめて AVS を入力とした地盤増幅度に関するより詳細な検討が必要であると思われる。

(2000年10月4日受理)

参 考 文 献

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第443号, pp. 65-71, 1993.
- 2) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木工学会論文集, No.626, pp. 79-91, 1999.
- 3) K. T. Shabestari and F. Yamazaki: Attenuation Relation of Response Spectra in Japan Considering Site-Specific Term, 12th WCEE ref. No. 1432, 2000.
- 4) 井上涼介, 伯野元彦: 地盤の鉛直剛性分布が地表地震動特性に及ぼす影響, 土木学会論文報告集, 第310号, 1981.
- 5) 翠川三郎: 地震断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度・最大速度分布の推定, 第8回地盤振動シンポジウム資料集, pp. 59-64, 1980.