



近接観測点ペアの強震記録に基づく 地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係

藤本一雄¹⁾、翠川三郎²⁾

- 1) 正会員 千葉科学大学危機管理システム学科、講師 博士(工学)
e-mail : kfujimoto@cis.ac.jp
- 2) 正会員 東京工業大学人間環境システム専攻、教授 工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

要 約

地盤の平均S波速度と地盤増幅度の関係を、同一の地震において近接する観測点ペアの地震記録のみから直接計算する手法を提案した。本手法を大振幅の記録を含む複数の地震での記録に適用して求めた両者の関係を、表層地盤の有効ひずみごとに整理して地盤の非線形性の影響について検討した。この結果を踏まえて、地盤の非線形性の影響を考慮した地盤増幅度を推定するための関係式を提案した。

キーワード：地盤増幅度、近接観測点ペア、平均S波速度、地盤の非線形性、最大加速度、最大速度

1. はじめに

近年、東海地震、東南海地震、南海地震といった M8 クラスの地震の発生が懸念されている。これらの地震に対して建築物・土木構造物の耐震設計や耐震補強をはじめとする地震防災対策を立案する上で、入力となる地震動強さの分布を適切に評価しておくことは重要である。このような背景から、内閣府では東海地震や東南海・南海地震に対する被害想定¹⁾を行い、地震調査研究推進本部では「全国を概観した地震動予測地図」²⁾を作成するなど、全国各地の地震動強さの分布が推定されている。

広域での地震動強さの分布を計算する際、各地の表層地盤の増幅度については、国土数値情報の地形分類・標高データ等から経験的に地盤の平均S波速度を推定し、さらに平均S波速度と地盤増幅度の関係に対する経験式を用いて評価される場合が多い。このうち、国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度推定法³⁾は、関東地方のデータに基づくものであり、その他の地域への適用性については十分な検討がなされていなかった。そこで、著者らは日本全国のデータに基づいて国土数値情報の地形分類と地盤の平均S波速度の関係を評価し、地域性の影響を考慮した地盤の平均S波速度推定法を提案し、これにより既往の手法に比べてより精度良く全国各地の地盤の平均S波速度を推定できることを示した⁴⁾。

一方、地盤の平均S波速度から地盤増幅度を推定する経験式⁵⁾は、1987年千葉県東方沖地震での地震記録に基づく第三紀の地盤での距離減衰式の予測値に対する観測値の比を地盤増幅度と定義し、最大加速度および最大速度に対して計算された地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係から求められた

ものである。片岡・山本⁶⁾は、文献5)と同様の手法を青森県東方沖で発生した2地震での記録に適用し、最大加速度に対する地盤増幅度と平均S波速度の関係式を求めている。また、田村・他⁷⁾は94地震によるK-NET観測点での地震記録に基づく距離減衰式から最大加速度および最大速度に対する地盤増幅度を計算し、これと地盤の平均S波速度の関係に対する経験式を求めている。

これらの研究での地盤増幅度は、地震動強さの距離減衰式を介して抽出されているが、各地の地震動強さに影響を及ぼす要因として、地震波の方位依存性⁸⁾や上部マントルの減衰構造の違いによる異常震域⁹⁾などの影響が指摘されている。このため、文献5)では方位依存性の影響について、文献6)では異常震域の影響についてそれぞれ別途検討している。このように距離減衰式を介して抽出される地盤増幅度には地盤特性以外の要因の影響が含まれている可能性がある。また、これらの研究で使用されている地震記録は振幅レベルの比較的に小さいものの割合が多い。近年、大振幅の記録の解析から、強震時の地盤特性には地盤の非線形性の影響を無視できない場合があるとの指摘¹⁰⁾がある。したがって、より精度の高い地震動強さの分布を予測するには、地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係に対する経験式の大振幅レベルへの適用性を検討しておくことが重要であると考えられる。

本研究では、地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係を、距離減衰式を導出することなく、同一の地震において近接する2つの観測点で得られた記録のみから直接的に求める手法を提案する。本手法を大振幅の記録を含む複数の地震での記録に適用して地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係を求め、この関係を表層地盤の有効ひずみごとに整理することで地盤の非線形性の影響について検討する。この結果を踏まえて、地盤の平均S波速度に基づくより信頼性の高い地盤増幅度の推定手法を提案することを目的としている。

2. 解析手法と使用したデータ

2.1 解析手法

翠川・他⁵⁾は1987年千葉県東方沖地震($M_j 6.7$)での強震記録に基づく第三紀の地盤での距離減衰式からの予測値に対する観測値の比を地盤増幅度(AF)と定義し、これと地表から深さ d (m)までの地盤の平均S波速度 $AVS(d)$ (m/s)の関係について検討している。その結果、最大加速度に対する地盤増幅度(AF_{PGA})は $AVS(10)$ の場合に最も相関が良く、最大速度に対する地盤増幅度(AF_{PGV})は $AVS(30)$ の場合に相関が高く、これらの関係に対して以下の回帰式を求めている。

$$\log AF = a + b \cdot \log AVS(d) \quad (1)$$

ここで、 a および b は回帰係数であり、 AF_{PGA} と $AVS(10)$ の関係に対して $a=1.11$ 、 $b=-0.42$ 、 AF_{PGV} と $AVS(30)$ の関係に対して $a=1.98$ 、 $b=-0.71$ が求められている。このように距離減衰式を介して抽出された地盤増幅度には、地盤特性だけでなく震源特性や伝播経路特性の影響が含まれていることが予想される。本研究では、観測記録からできる限り地盤特性のみを抽出することを目指して、(1)式の回帰係数に相当する値を、距離減衰式を導出することなく、同一の地震において近接する2つの観測点での記録のみから直接求める手法を提案する。

解析手法の概念図を図1に示す。まず、近接する2つの観測点で同一の地震による記録が得られているとき、より硬質な地盤上の観測点(以下、岩盤観測点)で得られた地震動の最大振幅値を PGM_r 、もう一方の観測点(以下、地盤観測点)での最大振幅値を PGM_s とする(図1a参照)。岩盤観測点および地盤観測点までの震源距離がそれぞれ X_r および X_s のとき、幾何減衰の補正をした岩盤観測点に対する地盤観測点の相対的な地盤増幅度(AF')は(2)式で表される。

$$AF' = (PGM_s / PGM_r) \cdot (X_s / X_r) \quad (2)$$

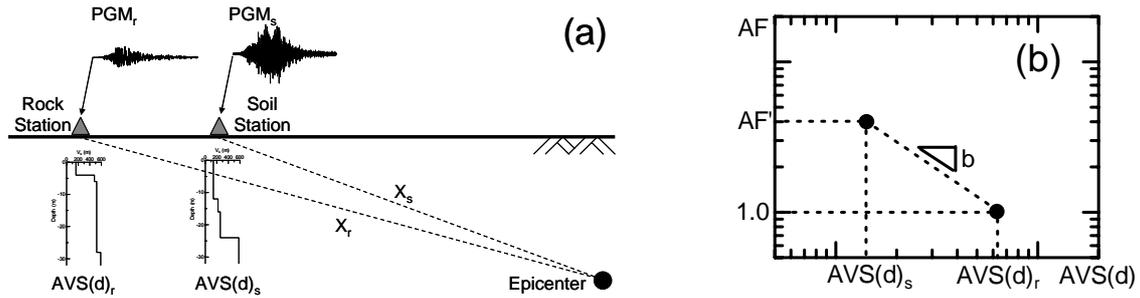


図1 解析手法の概念図

なお、前述した地盤増幅度(AF)は、どの地盤を基準とするかにより値が変化し、(2)式での岩盤観測点を基準地盤とした場合、岩盤観測点および地盤観測点での AF は、それぞれ1.0および AF' となる。

つぎに、地盤観測点および岩盤観測点での地表から深さ d (m)までの平均S波速度をそれぞれ $AVS(d)_s$ および $AVS(d)_r$ とする(ただし、 $AVS(d)_r > AVS(d)_s$)。既往の研究⁵⁾を参考にして、 AF の対数が $AVS(d)$ の対数とともに単調減少すると仮定すれば(図1b参照)、(1)式の回帰係数 b (勾配)に相当する値は、(3)式から求められる。

$$b = -\log AF' / \log(AVS(d)_r / AVS(d)_s) \quad (3)$$

一方、回帰係数 a (切片)に相当する値は、基準とする地盤(AF が1.0)での平均S波速度($AVS(d)_{ref}$)により変化する相対的な値であり、(1)式において $AF = 1.0$ 、 $AVS(d) = AVS(d)_{ref}$ を代入することにより求められる。

$$a = -b \cdot \log AVS(d)_{ref} \quad (4)$$

ここで、(4)式の切片 a を(1)式に代入し、勾配 b で整理すると(5)式が得られる。

$$\log AF = b \cdot \log(AVS(d) / AVS(d)_{ref}) \quad (5)$$

このように、(1)式で示した地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係式は、(5)式に書き換えることができる。つまり、この関係式は、同一の地震において近接する2つの観測点(以下、観測点ペア)での相対的な地盤増幅度(AF')と観測点ペアでの地盤の平均S波速度($AVS(d)_s$ および $AVS(d)_r$)を(3)式に代入し、勾配 b に相当する値を直接求めることにより得られることがわかる。

2.2 使用したデータ

K-NET および KiK-net の観測点を対象として、2000年鳥取県西部地震(M_w 6.6)、2001年芸予地震(M_w 6.8)、2003年宮城県沖地震(M_w 7.0)、2003年宮城県北部地震(M_w 6.1)、2003年十勝沖地震(M_w 7.9)での地震記録を収集した。このうち解析に用いた記録は、観測点間の距離が30km以内、かつ震源距離が300km以内といった条件を満足する観測点ペアである。本解析法では、観測点間の距離が小さいデータを用いるのが望ましい。しかしながら、距離が小さいもののみを用いると十分なデータ数が確保できない。そこで、Borcherdt^{11), 12)}が、近接する2地点の観測記録から地盤特性のみを抽出するため、震源特性および伝播経路特性の影響を除去する際、観測点間の距離が25kmまでのデータを用いた検討により良好な結果を得ていることを参考にして、観測点間の距離が30kmまでのデータを用いた。なお、観測点ペア間の距離が25km未満のデータと25km以上30km未満のデータからそれぞれ勾配 b を計算したところ、両者の差が小さいことを確認している。

表 1 AVS(d)ごとの観測点ペア数・震源距離比

	AVS(05)	AVS(10)	AVS(15)	AVS(20)	AVS(25)	AVS(30)
Number of Station Pairs	2494 (448)	2500 (393)	1433 (255)	1367 (259)	947 (143)	948 (142)
Hypocentral Distance Ratio (X_s/X_r)	1.009 ± 0.122 (1.010 ± 0.148)	1.009 ± 0.121 (1.010 ± 0.132)	1.005 ± 0.112 (0.999 ± 0.139)	1.004 ± 0.113 (1.004 ± 0.132)	1.000 ± 0.104 (1.007 ± 0.093)	0.999 ± 0.104 (1.005 ± 0.095)

* 括弧内の数値は、AVS比が2以上の場合

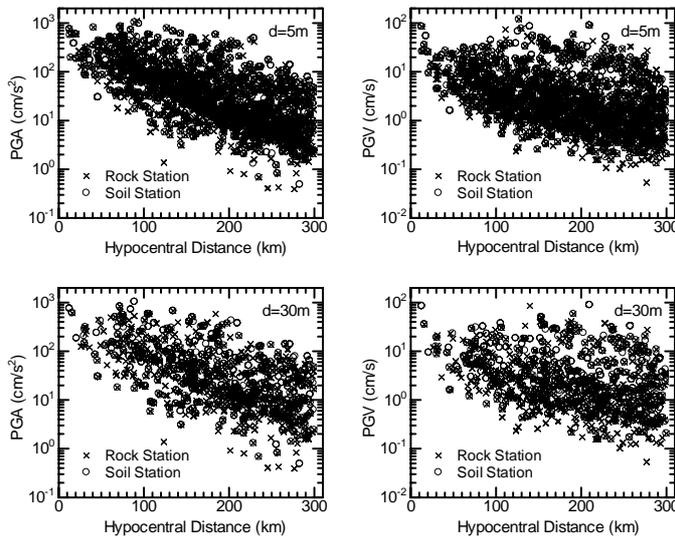


図 2 震源距離と最大振幅の関係

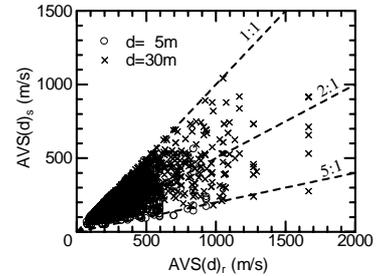


図 3 観測点ペアの平均 S 波速度の関係

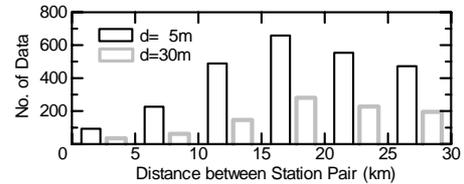
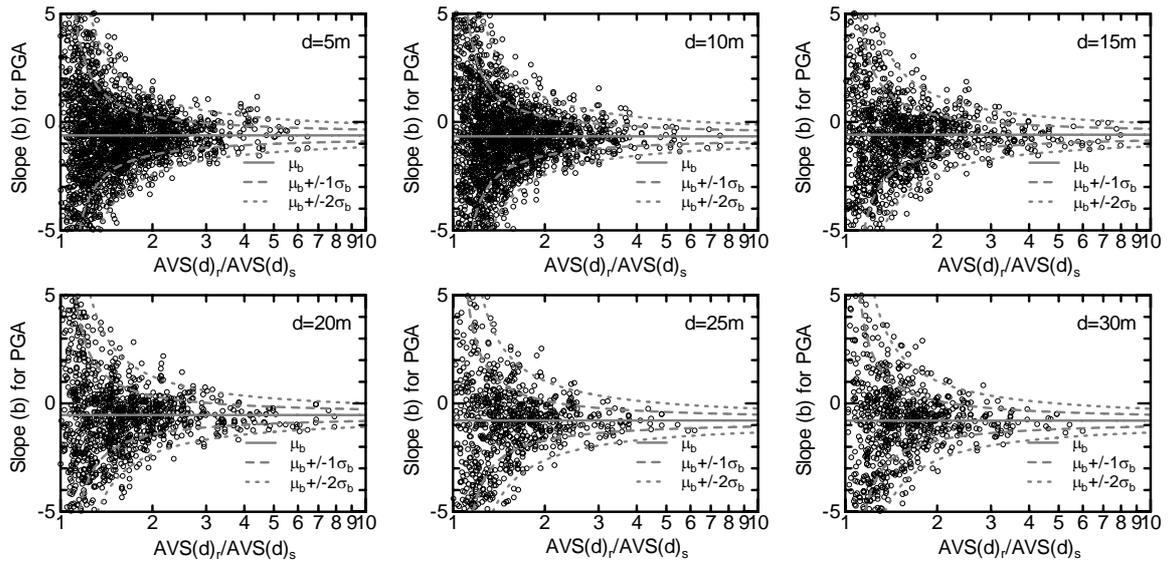


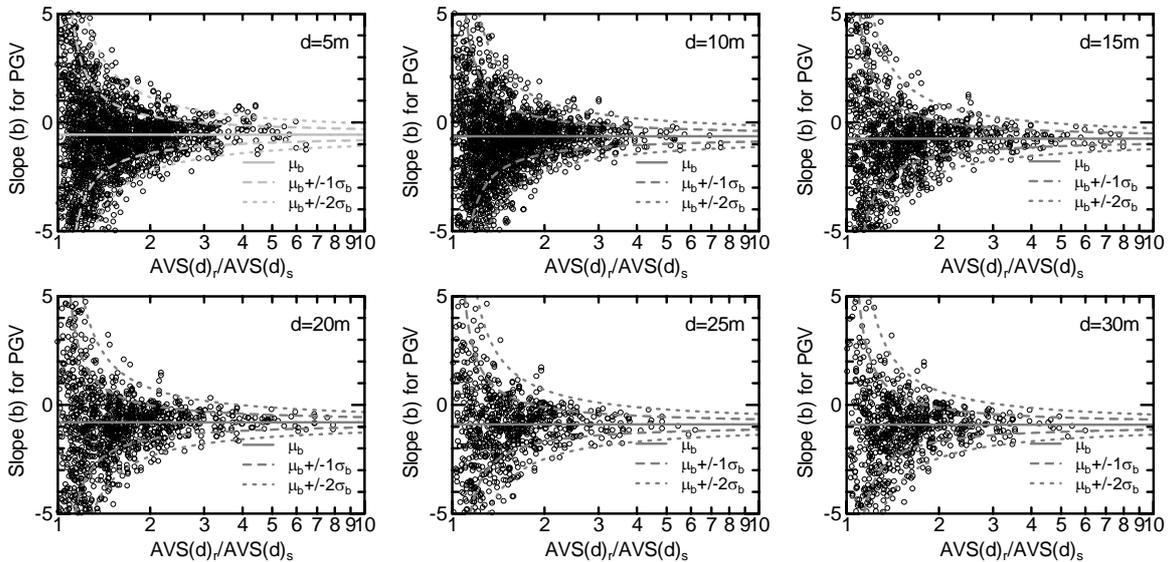
図 4 観測点ペア間の距離の度数分布

相対的な地盤増幅度(AF')は、加速度波形および速度波形の最大値を読み取り、水平 2 成分に対して (2)式よりそれぞれ AF' を計算し、そのうち大きい方の値を使用した。なお、速度波形としては、加速度波形にローカットフィルタ(カットオフ周波数 0.05Hz)を施して積分したものを使用した。また、勾配 b に対する $AVS(d)$ の深さ(d)の影響について検討するため、各観測点での地盤データから $AVS(d)$ を d が 5~30m の範囲について 5m 毎に求めた。なお、K-NET 観測点での地盤データの調査深度は最大でも深さ 20m までであるため、最下層までの深さと最下層での S 波速度が文献 4) の表 1 の基準を満たした場合は、最下層の S 波速度が深さ 30m まで続くものとして $AVS(d)$ を計算した。これらの条件を満たした観測点ペア数を表 1 上段に示す。 $AVS(d)$ の深さ(d)が大きくなるほど一般的に観測点ペア数が少なくなっているが、これは主として d が大きくなるほど使用できる $AVS(d)$ データの数が少なくなるためである。

本研究で使用するデータの特徴を $AVS(5)$ と $AVS(30)$ の場合について述べる。図 2 は震源距離と最大振幅値の関係を示している。最大加速度は約 $1 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ の範囲に、最大速度は約 $0.1 \sim 100 \text{ cm/s}$ の範囲にそれぞれ分布しており、当然ながら近距離で最大振幅の小さいデータや遠距離で最大振幅の大きいデータの数は少ない。図 3 は岩盤観測点と地盤観測点での平均 S 波速度の関係である。地盤観測点に対する岩盤観測点での平均 S 波速度の比($AVS(d)_r / AVS(d)_s$) (以下、AVS 比)は 1~5 倍程度の範囲に分布している。図 4 には観測点ペア間の距離の度数分布を示す。本研究では K-NET と KiK-net のデータを使用しているため、観測点ペア間の距離は、K-NET の平均的な観測点間隔(約 25km)よりやや短い 15~20km 程度のデータの占める割合が高くなっている。



(a) 最大加速度



(b) 最大速度

図5 AVS比と勾配bの関係(上段：最大加速度、下段：最大速度)

3. 地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係

3.1 解析結果

前述のデータを用いて最大加速度(*PGA*)および最大速度(*PGV*)に対する勾配*b*を求め、これと*AVS*比の関係を図5に○印で示す。図5より、勾配*b*は*AVS*比が1程度るとき大きくばらつくが、*AVS*比が大きくなるにつれてバラツキは小さくなり、-0.5~ -1.0程度の範囲に収束するように見える。以下では、*AVS*比とともに勾配*b*のバラツキが変化する理由について考えてみることにする。地盤の平均S波速度(*AVS(d)*)は、深さ*d* (m)までの地盤各層のS波速度と層厚を用いて、*d*をS波の伝播時間で除した値として計算されることから、S波速度構造が異なる地点であっても*AVS(d)*が同じ値を示す場合が

表 2 勾配 b の平均値(μ_b)と標準偏差(σ_{PGM})

μ_b	AVS(05)	AVS(10)	AVS(15)	AVS(20)	AVS(25)	AVS(30)*
PGA	-0.618	-0.656	-0.585	-0.538	-0.787	-0.791 (-0.774)
PGV	-0.558	-0.632	-0.745	-0.794	-0.894	-0.904 (-0.852)

σ_{PGM}	AVS(05)	AVS(10)	AVS(15)	AVS(20)	AVS(25)	AVS(30)*
PGA	0.192	0.191	0.191	0.191	0.195	0.194 (0.200)
PGV	0.182	0.174	0.170	0.167	0.169	0.164 (0.166)

* 括弧内の数値は、千葉県東方沖地震、Loma Prieta地震、Northridge地震、芸予地震の広島市での記録を含めた結果

ある。このような地点に同一の地震動が入射しても、S波速度構造の違いのために地表面で観測される地震動の最大振幅(PGM)にはバラツキが生じると考えられる。そこで、 PGM を確率変数と考えて、これが既往の研究¹³⁾を参考にして対数正規分布 $N(\mu_{PGM}, \sigma_{PGM}^2)$ に従っていると仮定する。ここで μ_{PGM} および σ_{PGM}^2 は、それぞれ PGM の対数の平均および分散である(σ_{PGM} は標準偏差)。確率変数が X のときの分散(σ^2)を $V(X)$ として表記する場合、最大振幅の分散(σ_{PGM}^2)は(6-1)式のように表現できる。

$$\sigma_{PGM}^2 = V(\log PGM) \quad (6-1)$$

観測点ペア間の相対的な地盤増幅度(AF')の分散($\sigma_{AF'}^2$)については、まず(2)式において PGM_s および PGM_r が独立であると考ええる。つぎに、表 1 下段から(2)式における観測点ペア間の震源距離の比(X_s/X_r)がほぼ 1 であるとみなせることから、分散の加法性を用いて、

$$\sigma_{AF'}^2 = V(\log AF') = V(\log PGM_s - \log PGM_r) = V(\log PGM) + V(\log PGM) = 2\sigma_{PGM}^2 \quad (6-2)$$

と求まる。このとき、勾配 b の分散(σ_b^2)は、

$$\begin{aligned} \sigma_b^2 &= V(b) = V\{-\log AF' / \log(AVS(d)_r / AVS(d)_s)\} \\ &= \{-1 / \log(AVS(d)_r / AVS(d)_s)\}^2 \cdot V(\log AF') = 2\sigma_{PGM}^2 / \{\log(AVS(d)_r / AVS(d)_s)\}^2 \end{aligned} \quad (6-3)$$

となるため、勾配 b の標準偏差(σ_b)は $\sqrt{2}\sigma_{PGM} / \log(AVS(d)_r / AVS(d)_s)$ になることがわかる。

平均が μ 、標準偏差が σ の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ を仮定した場合、全標本数に対して $\mu \pm \sigma$ の範囲に含まれる標本数の割合は 68.3%となる¹⁴⁾。したがって、図 5 のデータから σ_b を求めるには、まず勾配 b の平均(μ_b)を計算し、つぎに σ_{PGM} を変化させて $\mu_b \pm \sigma_b$ の範囲に含まれるデータ数が全体の 68.3%になる時の値を求めればよいことがわかる。このとき、AVS比が 1 程度のデータを用いると勾配 b の値が不安定となるため(3)式参照)、 μ_b の見積もりに大きく影響する。一方、AVS比の大きなデータを用いた場合、安定した勾配 b の値は得られるものの、信頼性のある μ_b を求めるために必要となるデータ数を確保することが困難となる。これらのことを勘案して、安定した勾配 b の値を得ることができ、かつ十分なデータ数を確保するという条件を満たすには、今回使用しているデータの場合にはAVS比が 2 程度以上のデータを用いることが適切であると判断した。そこで、AVS比が 2 以上のデータを用いて μ_b を計算し、 $\mu_b \pm \sigma_b$ の範囲内のデータの割合が 68.3%となる時の σ_{PGM} とともに表 2 に示す。図 5 には、 μ_b (実線)、 $\mu_b \pm \sigma_b$ (破線)、 $\mu_b \pm 2\sigma_b$ (点線)の範囲をそれぞれ示す。

図 5 より、勾配 b (○)の分布は、ほぼ全てのデータ(全標本数の約 95%)を含むと考えられる $\mu_b \pm 2\sigma_b$ の範囲(点線)と良好な対応を示している。このことは、勾配 b のバラツキの原因が、AVS(d)が同一の地点であっても地盤のS波速度構造が異なることにより生じる地表面での地震動強さのバラツキに起因するという前述の仮定を支持するものと考えられる。以上の結果を踏まえて、次節以降ではAVS比が

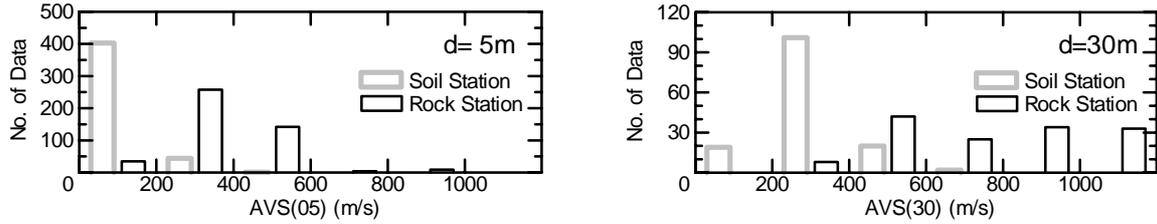


図6 観測点ペア(AVS比2以上)の平均S波速度の度数分布(左: AVS(5)、右: AVS(30))

2以上のデータから得られた μ_b および σ_{PGM} に基づいて検討を行うこととした。表1にAVS比が2以上の観測点ペア数を括弧書きで示しておく。また、AVS比が2以上の観測点ペアの $AVS(d)_s$ および $AVS(d)_r$ の度数分布を図6に示す。図6右をみると、地盤観測点での平均S波速度($AVS(30)_s$)は200~400m/s程度が大部分を占めている。これに対して、岩盤観測点での平均S波速度($AVS(30)_r$)は400m/s以上がほとんどであることから、岩盤観測点については工学的基盤ないしそれ以上の地盤に相当していると考えられる。

3.2 地盤の非線形性の影響

ある地点での表層地盤の有効ひずみ(γ_{eff})は、最大地動速度(PGV)と表層のS波速度(V_{so})を用いて以下の式¹⁵⁾からおおむね推定できる。

$$\gamma_{eff} = 0.4 \cdot PGV / V_{so} \quad (7)$$

後述するように、本研究では $AVS(30)$ を指標として地盤増幅度の関係式を提案するので、地盤定数として $AVS(30)$ のみがわかれば地盤の非線形性の影響も考慮した関係式が構築できるよう、 V_{so} を $AVS(30)$ で代用することとした。このため、本節で地盤の非線形性の影響を検討する際には、(7)'式で表される擬似的な有効ひずみ(γ'_{eff})(以下、擬似有効ひずみ)を用いることとした。

$$\gamma'_{eff} = 0.4 \cdot PGV / AVS(30) \quad (7)'$$

(7)'式からすべての観測点ペアの γ'_{eff} を計算したところ $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-3}$ 程度の範囲に分布していたが、このうち既往の研究において地盤の非線形性の影響が現れ始めるとされているひずみレベル(約 3×10^{-4})¹⁶⁾を越えるデータの割合がやや少なかった。そこで、大きなひずみレベルのデータを補うために、1987年千葉県東方沖地震($M_j 6.7$)の記録⁵⁾、1989年Loma Prieta地震($M_w 6.9$)の記録¹¹⁾、1994年Northridge地震($M_w 6.7$)の記録¹²⁾、2001年芸予地震($M_w 6.8$)の広島市での記録¹⁷⁾から計19組の観測点ペアの記録(γ'_{eff} は $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-4}$)を追加した。これらの記録の中には岩盤観測点での γ'_{eff} が 3×10^{-4} を越えているデータ(3組)が含まれていた。これらのデータについては、地盤の非線形性の影響により岩盤観測点での最大振幅(PGM_r)が低下し、観測点ペア間の相対的な地盤増幅度(AF^r)を過大評価する可能性が考えられたため、除外することとした。

図7に地盤観測点での擬似有効ひずみ(γ'_{eff})と勾配 b の平均値の関係を示す。同図には平均値を求める際の γ'_{eff} の範囲ごとのデータ数が10以上の結果のみが示されている。表2には、図7のデータから計算した勾配 b の平均(μ_b)および標準偏差(σ_{PGM})を括弧書きで示しておく。図7より、最大加速度に対する勾配 b (●)は、 γ'_{eff} が 3×10^{-4} 程度までは約-0.6~-0.9の範囲に分布しているが、 γ'_{eff} が 1×10^{-3} に近づくと-0.4程度となる。この理由として、地盤の非線形化に伴う地盤の減衰の増大により、地盤観測点での最大振幅が低下し、観測点ペア間の相対的な地盤増幅度が1.0に近づいたことが考えられる。これに対して、最大速度に対する勾配 b (●)は、 γ'_{eff} によらず-0.7~-1.0程度の範囲に分布している。

勾配 b に対する地盤の非線形性の影響を確認するため、図7に示した擬似有効ひずみ(γ'_{eff})と勾配 b の関係に対する回帰式を求め、その回帰係数の傾き(β)を用いて、帰無仮説： $\beta = 0$ に対する

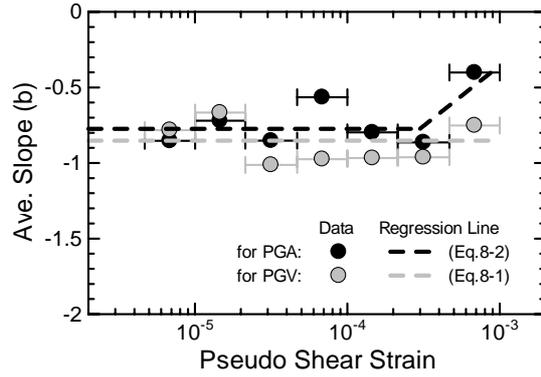


図7 擬似有効ひずみと勾配 b の関係

統計的仮説検定¹⁸⁾を行った。その結果、有意水準 5%で最大加速度の場合には帰無仮説が棄却 ($\beta \neq 0$)され、最大速度の場合には帰無仮説が採択 ($\beta = 0$)された。このことは、最大加速度の勾配 b は γ'_{eff} とともに変化するが、最大速度の勾配 b は γ'_{eff} によらず一定であることを意味している。以上より、最大加速度の勾配 b は、地盤の非線形性の影響により表層地盤の有効ひずみが増加するとその絶対値は小さくなるが、最大速度の勾配 b は、有効ひずみが 1×10^{-3} 程度までは地盤の非線形性の影響がほとんどみられず、これらの結果は既往の研究¹⁷⁾での指摘とも調和的である。

3.3 地盤増幅度推定法の提案

本研究の結果に基づいて、地盤の平均 S 波速度 ($AVS(d)$) から地盤増幅度 (AF) を推定するための関係式を提案する。前述したように、(5)式で表される関係式は 2 つのパラメータ (勾配 b と基準地盤での平均 S 波速度 $AVS(d)_{ref}$) を与えれば決定される。表 2 をみると、最大速度の σ_{PGM} は d の増大とともに小さくなり 30m のとき最小となることから、最大速度の勾配 b は $AVS(30)$ と最も良好な相関を示すと考えられる。そこで、最大速度に対する地盤増幅度 (AF_{PGV}) の関係式を求めるため、まず、(5)式の勾配 b に表 2 の $AVS(30)$ での勾配 b の平均 (μ_b) を代入する。つぎに $AVS(30)_{ref}$ に関しては、 $AVS(30)_r$ の範囲内 (約 400~1500m/s) の値を (5)式に代入する限りにおいては同程度の精度を持った関係式が得られると考えられる。本研究では、距離減衰式からの基準地盤での最大振幅を地表での最大振幅に換算する経験式を提案することを主たる目的としていることから、既往の距離減衰式¹⁹⁾が基準地盤としている 600m/s を (5)式の $AVS(30)_{ref}$ に代入することにより、以下の関係式が得られる。

$$\log AF_{PGV} = -0.852 \cdot \log(AVS(30)/600) = 2.367 - 0.852 \cdot \log AVS(30) \pm 0.166 \quad (8-1)$$

この地盤増幅度 (AF) の関係式では、標準偏差として表 2 における σ_{PGM} の値が示されている。この理由は、本研究や後述する既往の研究の関係式における地盤増幅度 (AF) は、基準地盤での地震動強さの予測値ないし平均値 (バラツキなし) に対する地表面での地震動強さの観測値 (バラツキは σ_{PGM}) の比として定義されており、地表面での観測値のバラツキのみが影響するため、その標準偏差 (σ_{AF}) が σ_{PGM} と求められることによる。ちなみに、本研究での観測点ペア間の相対的な地盤増幅度 (AF') の場合は、岩盤観測点で観測される地震動強さ (バラツキは σ_{PGM}) に対する地盤観測点での地震動強さの観測値 (バラツキは σ_{PGM}) の比であるため、その標準偏差 ($\sigma_{AF'}$) は観測値同士のバラツキの影響により $\sqrt{2} \cdot \sigma_{PGM}$ となる ((6-2)式参照)。

つぎに、最大加速度に対する地盤増幅度 (AF_{PGA}) の関係式を求めるのだが、最大加速度の勾配 b には地盤の非線形性の影響がみられたことから、この影響を考慮する必要がある。前述したように、最大加速度の勾配 b は、擬似有効ひずみ (γ'_{eff}) が約 3×10^{-4} まではほぼ一定であるが、 γ'_{eff} が 1×10^{-3} に近づくとその絶対値は小さくなる (図 7 参照)。そこで、 AF_{PGA} の関係式については、既往の研究¹⁶⁾も参考にして地盤の非線形性の影響が現れ始める γ'_{eff} の閾値を 3×10^{-4} に設定し、閾値までは勾配 b は一定であ

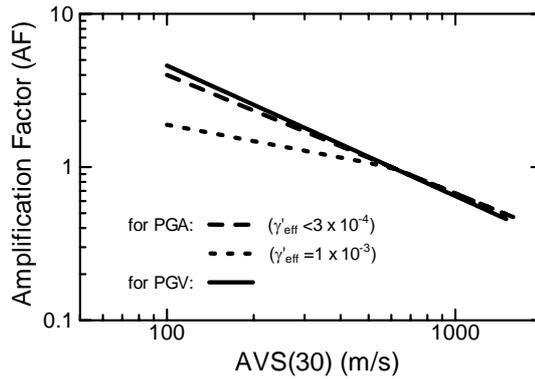


図8 本研究で提案する地盤増幅度の関係式

るが、それ以上では γ'_{eff} とともに勾配 b の絶対値が低下するよう定式化することとした。具体的には図7のデータを用いて、 γ'_{eff} が閾値未満のデータから勾配 b の平均を求め、閾値以上のデータについては γ'_{eff} と勾配 b の関係に対する回帰式を求めた。これにより、 AF_{PGA} の関係式として以下の式が得られた。

$$\log AF_{PGA} = b \cdot \log(AVS(30)/AVS(30)_{ref}) = b \cdot \log(AVS(30)/600) \pm 0.200 \quad (8-2)$$

$$b = \begin{cases} -0.773 & (\gamma'_{eff} < 3 \times 10^{-4}) \\ 2.042 + 0.799 \cdot \log \gamma'_{eff} & (\gamma'_{eff} \geq 3 \times 10^{-4}) \end{cases}$$

図7に(8)式による擬似有効ひずみ(γ'_{eff})と勾配 b の関係を破線で示しておく。図8に本研究で提案する地盤増幅度の関係式(8)式を示す。図8より、最大速度の地盤増幅度(AF_{PGV})は、 $AVS(30)$ が100m/sのとき約4.5であり、 $AVS(30)$ が1,500m/sのとき約0.5となる。これに対して、最大加速度の地盤増幅度(AF_{PGA})は、 $AVS(30)$ が100m/sのとき、 γ'_{eff} が 3×10^{-4} 未満では約4であるが、 γ'_{eff} が 1×10^{-3} になると2程度まで低下することとなる。なお、本研究の関係式の適用範囲は、使用したデータの範囲から γ'_{eff} は 1×10^{-3} 程度まで、 $AVS(30)$ は約100~1500m/sと考えられる。

3.4 既往の経験式との比較

本研究で提案した関係式を既往の研究における経験式と比較する。前述したように翠川・他⁵⁾、片岡・山本⁶⁾、田村・他⁷⁾は、距離減衰式から抽出された地盤増幅度と平均S波速度の関係に対してそれぞれ経験式を求めている。その他として、川瀬・松尾²⁰⁾はK-NETおよびKiK-net観測点での地震記録に対するインバージョンから得られた地盤増幅度と平均S波速度の関係に対して経験式を求めている。また、Borcherdt¹²⁾は1994年Northridge地震での記録から計算した短周期領域(0.1~0.5秒)および中周期領域(0.5~1.5秒)における地盤増幅率と平均S波速度の関係に対する経験式を求めている。同様に、川上・他²¹⁾は関東平野周辺で発生した17地震によるK-NETおよびSK-net観測点での地震記録に基づく短周期領域および中周期領域での地盤増幅率と平均S波速度の関係に対して経験式を求めている。これらの経験式は、本研究と同様に、地盤の平均S波速度に対する地盤増幅度の増減の割合(本研究での勾配 b に相当)と基準地盤での平均S波速度($AVS(d)_{ref}$)の2つのパラメータを用いて(5)式の形式で表現できる。このうち $AVS(d)_{ref}$ は任意に設定できるパラメータであり、その大小を比較することに意味はないことから、勾配 b の大きさを比較することとした。

図9には、本研究による勾配 b (●)とともに、既往の研究からの値として、翠川・他⁵⁾(○)、片岡・山本⁶⁾(△)、田村・他⁷⁾(□)、川瀬・松尾²⁰⁾(◇)、Borcherdt¹²⁾(×)、川上・他²¹⁾(▽)による結果を示す。同図では、Borcherdt¹²⁾および川上・他²¹⁾での短周期領域(0.1~0.5秒)および中周期領域(0.5~1.5秒)の地盤増幅率に対する勾配 b は、それぞれ最大加速度および最大速度に対する値とみなして²²⁾表示されている。また、Borcherdt¹²⁾の経験式は、地盤増幅度に対する地盤の非線形性の影響を考慮して、基

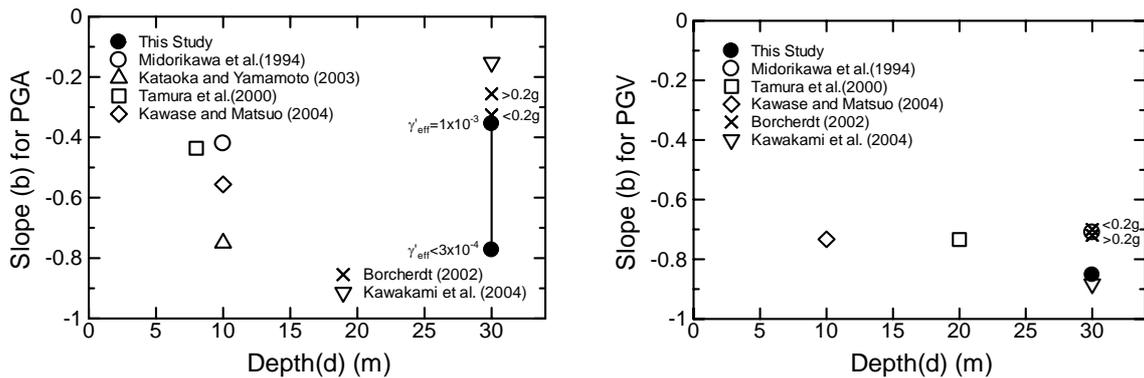


図9 本研究と既往の研究による勾配bの比較(左：最大加速度、右：最大速度)

表3 本研究と既往の研究による経験式の標準偏差(σ_{AF})

σ_{AF}	This Study	Midorikawa et al.(1994)	Tamura et al.(2000)	Kawase and Matsuo(2004)
PGA	0.200	0.17	-	0.158
PGV	0.166	0.15	0.217	0.149

準地盤に入力される地震動強さのレベルが 0.2g 以上と 0.2g 未満の場合それぞれに対して求められているため、図9には対応する2つの勾配bの値がプロットされている。図9より、最大速度の勾配bはいずれの研究においても-0.8前後の値が得られている。これに対して、最大加速度の勾配bは研究により値がばらついており、-0.2~-0.8程度の範囲に分布している。なお、これらの結果が生じた理由について現在のところ十分な解釈を得ることができておらず今後の課題としたい。

つぎに、各経験式の標準偏差(σ_{AF})を表3に示す。本研究の σ_{AF} は、田村・他⁷⁾の値より小さいが、翠川・他⁵⁾や川瀬・松尾²⁰⁾の値に比べるとやや大きい。ただし、翠川・他⁵⁾の標準偏差は、1地震での記録に基づくものであるために、本研究やその他の研究のように複数の地震での記録から計算されたものに比べて小さめの値となる可能性が高い。また、川瀬・松尾²⁰⁾は、地震記録から求めた地盤増幅率のインバージョンから推定した地盤データを用いており、地盤増幅率と地盤データは完全には独立でない。これに対して、その他の研究の標準偏差は、地盤増幅率とは独立の実測の地盤構造に基づく値であるため、川瀬・松尾²⁰⁾に比べて高めの値になっていることがひとつの可能性として考えられる。これらのことを踏まえると、本研究の関係式は、既往の経験式と同程度の精度を保持しており、最大加速度および最大速度に対する地盤増幅度を、それぞれ約0.6~1.6倍($10^{0.200}$)および約0.7~1.5倍($10^{0.161}$)の精度で推定できるものと考えられる。

4. 結論

地盤の平均S波速度と地盤増幅度の関係における回帰係数の勾配bに相当する値を、同一地震において近接する岩盤および地盤上の観測点ペアの地震記録のみから直接計算する手法を提案した。本手法を大振幅の記録を含む複数の地震での記録に適用して勾配bを求め、これを表層地盤の有効ひずみごとに整理した。その結果、最大加速度の勾配bは、地盤の非線形性の影響により表層地盤の有効ひずみが増加するとその絶対値は小さくなるが、最大速度の勾配bは、有効ひずみが 1×10^{-3} 程度までは地盤の非線形性の影響がほぼみられないことを確認した。この結果を踏まえて、地盤の非線形性の影響を考慮した最大加速度および最大速度に対する地盤増幅度を推定する関係式を提案し、これにより地盤増幅度を比較的良好な精度で推定できることを示した。なお、本研究の遂行中に2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震などによる多数の記録が得られているため、今後、これらの記録を

用いて本手法の有効性ならびに提案した関係式の精度についてさらに検証を進めていく必要がある。

謝 辞

本研究では、防災科学技術研究所 K-NET および KiK-net による地震記録および地盤データを使用させて頂いた。地震防災フロンティア研究センターの松岡昌志博士には千葉県東方沖地震のデータについてご教示を頂いた。弘前大学の片岡俊一助教授には文献 6) に関連する情報をご提供頂いた。3 名の査読者より有益な助言を頂いた。本研究の一部は、科学技術振興費「大都市大震災軽減化特別プロジェクト I. 地震動(強い揺れ)の予測」によった。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会報告(平成 13 年 12 月 11 日公表)、2001.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書(平成 17 年 3 月 23 日公表)、2005.
- 3) 翠川三郎・松岡昌志：国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価、物理探査、Vol.48、No.6、1995、pp.519-529.
- 4) 藤本一雄・翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定、日本地震工学会論文集、Vol.3、No.3、2003、pp.13-27.
- 5) 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一：1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価、日本建築学会構造系論文報告集、No.442、1992、pp.71-78.
- 6) 片岡俊一・山本博昭：青森県周辺における地震動指標の距離減衰特性とサイト増幅特性、第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集、2002、pp.35-38.
- 7) 田村 勇・山崎文雄・K.T. Shabestari：K-NET 地震記録を用いた平均 S 波速度による地盤増幅度の推定、土木学会第 55 回年次学術講演会梗概集、2000、pp.714-715.
- 8) Campbell, K.W.: An empirical analysis of peak horizontal acceleration for the Loma Prieta, California, earthquake of 18 October 1989, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.81, No.5, 1991, pp.1838-1858.
- 9) 宇津徳治：地震学 第 3 版、共立出版、2001、376p.
- 10) Aki, K.: Local site effects on weak and strong ground motion, Tectonophysics, No.218, 1993, pp.93-111.
- 11) Borchardt, R.D. and G. Glassmoyer: On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.82, No.2, 1992, pp.603-641.
- 12) Borchardt, R.D.: Empirical evidence for acceleration-dependent amplification factors, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.92, No.2, 2002, pp.761-782.
- 13) Abrahamson, N.A.: Statistical properties of peak ground accelerations recorded by the SMART 1 array, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.78, No.1, 1988, pp.26-41.
- 14) 加藤 晃・竹内伝史：土木計画学のためのデータ解析法、共立出版、1981、397p.
- 15) Tokimatsu, K., S. Midorikawa, and Y. Yoshimi: Dynamic soil properties obtained from strong motion records, Proc. of the 12th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, 1989, pp.2015-2018.
- 16) 翠川三郎：強震時にみられる地盤特性の非線形性、地震、第 2 輯、Vol.46、1993、pp.207-216.
- 17) 藤本一雄・翠川三郎：2001 年芸予地震の強震記録に基づく地盤増幅度に対する地盤の非線形性の影響、日本地震工学会論文集、Vol.3、No.1、2003、pp.47-58.
- 18) Edwards, A.L.：相関と回帰—多変量解析への第一歩—、現代数学社、1993、226p.
- 19) 司宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No.523、1999、pp.63-70.
- 20) 川瀬 博・松尾秀典：K-NET、KiK-net、JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応、日本地震工学会論文集、Vol.4、No.4、2004、pp.126-145.
- 21) 川上洋介・瀧澤一樹・久田嘉章：地震観測記録より推定した関東平野におけるサイト特性と地形分

類との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、2004、pp.687-688.

- 22) 小林啓美・長橋純男：重層建築物の耐震設計を対象とした地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅、日本建築学会構造系論文報告集、No.210、1973、pp.11-22.

(受理：2005 年 5 月 10 日)

(掲載決定：2005 年11月22日)

Relationship between Average Shear-Wave Velocity and Site Amplification Inferred from Strong Motion Records at Nearby Station Pairs

FUJIMOTO Kazuo¹⁾ and MIDORIKAWA Saburoh²⁾

1) Lecturer, Department of Risk and Crisis Management System, Chiba Institute of Science, Dr. Eng.

2) Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluate the relationship between average shear-wave velocity of the ground (*AVS*) and the site amplification factor (*AF*). A method for computing the relation by using the peak ground motions recorded at nearby station pairs is proposed. The method is applied to the strong motion records during several large earthquakes such as the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake and the 2001 Geiyo earthquake. In terms of shear strain in surface soils, the effect of nonlinearity on the relation is examined. On the basis of the results, an empirical equation for predicting the *AF* in terms of *AVS*, which considers the nonlinear effect of the ground, is proposed.

Key Words: Site Amplification Factor, Nearby Station Pairs, Average Shear-Wave Velocity, Nonlinearly, Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity