



地盤の平均S波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良

山口亮¹⁾、翠川三郎²⁾

1) 正会員 損害保険料率算出機構リスク業務室、主査 修士 (工学)

e-mail : makoto_yamaguchi@nliro.or.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

地盤増幅率の簡便な推定手法の精度向上を目的として、強震記録から得られた地盤増幅率と深さ30mまでの地盤の平均S波速度 ($AVS30$) との関係について検討した。従来の地盤増幅率の推定式において $AVS30$ に対する係数は一定値とされていたが、その係数が短周期では $AVS30$ の大きさによって大きく変化することを確認し、その変化を考慮した推定式を提案した。提案した推定式は、従来の方法に比べて、軟弱な地盤ほど卓越周期が長くなるという特性をより正確に再現でき、短周期成分の推定精度が向上することを示した。

キーワード： 地盤増幅率、平均S波速度、周期特性、強震記録

1. はじめに

地震動評価において表層地盤の増幅特性を適切に考慮することは重要である。そのための解析的手法が提案されている^{例えば1),2)}などが、対象地点における地盤のS波速度構造モデルが必要となり、広域を対象として多数の地点で地震動評価を行う際には実用的な問題が伴う。そこで、比較的容易に入手することができる地盤の地質区分や地形分類、地盤種別などの情報に基づいて、地盤の増幅特性を簡便に評価しようとする試みがなされてきた³⁾⁻⁵⁾。しかし、これらの地盤分類は定性的で客観性に弱い面があることも指摘されている⁶⁾。そこで、より定量的かつ簡便に地盤の増幅特性を評価するために、Borcherdt et al.は、地表から深さ30mまでの地盤のS波速度の平均値 ($AVS30$) を用いた方法を提案した⁷⁾。その後、多くの研究者が $AVS30$ をパラメータとした各種地震動指標の地盤増幅率の推定式を提案し⁸⁾⁻¹⁴⁾、今日では地震動予測に広く利用されている。

しかし、これらの $AVS30$ をパラメータとする推定式から得られる地盤増幅率は、例えば応答スペクトルの地盤増幅率に関しては、 $AVS30$ に応じて増幅度が単調に増減するだけで、その形状は相似に近く、大きな変化は示さない。一方、既往の多くの研究では、軟弱な地盤ほど地盤の卓越周期が長くなる傾向が指摘されており、 $AVS30$ の低下とともに地盤増幅率の卓越周期は長くなるものと予想される。したがって、既往の $AVS30$ による推定式では、地盤の周期特性の変化を十分には表現できていないものと考えられる。先名らは、地形区分に加え、地震動評価地点における常時微動測定結果を利用することで、より定量的かつ高精度に地盤増幅率を推定する手法を提案した¹⁵⁾が、常時微動の測定を行う必要があることから、解析的手法と同様、面的な展開には困難を伴う。

そもそも複雑な地盤のS波速度構造を平均化した指標である $AVS30$ のみで、詳細に地盤の周期特性を評

価することは困難であるが、表層地盤の増幅特性を広域で評価するためには、いまのところAVS30を地盤のパラメータとするのが最も現実的な手段と考えられる。そこで、本研究では、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netに代表される、強震観測網によって観測、蓄積されている多数の強震記録から地盤の増幅特性を抽出し、その周期特性の変化を、AVS30をパラメータとしてより正確に定式化することにより、地盤増幅率の推定精度の改善を検討する。なお本研究では、地盤の非線形性の影響を無視できる小振幅時の地盤増幅率を対象としている。

2. 既往の研究とその問題点

Borcherdt et al.がAVS30をパラメータとした推定式を提案した後⁷⁾、多くの研究者がさまざまな地震動指標に関してAVS30による地盤増幅率の推定式を提案している。例えば翠川ら^{8),9)}は、1987年千葉県東方沖地震の観測記録により第三紀以前の地盤を基準とした距離減衰式を作成し、その距離減衰式に基づく最大地動加速度 (PGA) や最大地動速度 (PGV) 、応答スペクトルの値と観測記録によるそれら地震動指標の比を地盤増幅率 (AF) と定義して、AVS30と地盤増幅率との関係を地震動指標毎および応答スペクトルの周期毎に(1)式で近似した。 b は回帰係数、 $V_{s,ref}$ は地盤増幅率の基準となる地盤 (基準地盤) のS波速度である。

$$AF = (AVS30 / V_{s,ref})^b \quad (1)$$

他の類似の研究¹⁰⁾⁻¹⁴⁾でも、(1)式の形式で地盤増幅率の推定式が提案され、係数 b は地震動指標毎に一定値で与えられている。地盤増幅率 AF は基準地盤の地震動振幅 A_{ref} と地表の地震動振幅 A_s の比であるから、(1)式は、図1に示すように縦軸を地盤増幅率、横軸をS波速度とする両対数軸のグラフにおいては傾き b の直線として表現される。したがって、(1)式で地盤増幅率を推定する場合、AVS30の値に応じて、傾きが係数 b の直線上に地盤増幅率が推定されることになる。

これを応答スペクトルの地盤増幅率に拡張したものが図2(a)である。応答スペクトルの評価対象地点が2地点あり、それぞれ地点1 (AVS_1)、地点2 (AVS_2) とすると、基準地盤に対する各周期の地盤増幅率は、図1と同様に、基準地盤を原点とする傾き b の直線上に推定される。この場合、図2(a)に示したとおり、任意の地点1および地点2において、周期 T_a 、 T_b 、 T_c における地盤増幅率の相対的な関係が変化することはない。つまり(1)式によって推定される応答スペクトルの地盤増幅率は、対象地点のAVS30と基準地盤のS波速度との相対的な関係により、対数軸上で線形に増幅度が増減するだけであり、AVS30によって周期特性はあまり変化しない。しかし、軟弱な地盤ほど卓越周期が長く、堅固な地盤ほど短くなるというのが地盤の増幅特性の一般的な傾向であり、一定値で近似された係数 b を用いた既往の推定式ではこの傾向を十分には表現することができない。

図2(b)は、係数 b がAVS30に応じて変化するとした場合の基準地盤に対する地点1および地点2の地盤増幅率を模擬的に示したものである。地盤増幅率の傾きである係数 b が変化するため、地盤増幅率の変化が曲線的となり、AVS30が減ることによる地盤増幅率の増大は単調的ではなく、周期 T_a 、 T_b 、 T_c の各成分の振幅の相対的な関係が変化する。本研究では、このような係数 b を(1)式に導入することで、AVS30に依存して変化する地盤の平均的な周期特性をより正確に表現し、それによって地盤増幅率の推定精度を向上させることを目指す。

また、強震記録から地盤特性を抽出する手法に着目すると、既往の研究では、距離減衰式を介して推定した地震動と強震記録との比により地盤特性を抽出する手法^{8)-10),13)}と、近接する2地点の観測記録の比により抽出する手法^{11),12),14)}の2通りがある。距離減衰式を介した地盤特性の抽出手法では、放射特性やディレクティブティー効果などの震源特性や不均質なQ値構造に起因する異常震域などの伝播経路特性と地盤特性とを完全に分離することができず、抽出する地盤増幅率に、地盤特性以外の要因による影響が含まれる可能性がある。そこで本研究では、十分に近接して震源特性や伝播経路特性が等しいとみなせる2地点の観測記録による地震動指標の比をとることで、震源特性や伝播経路特性を除去するという藤本・翠川¹²⁾の手法により、強震記録から地盤特性のみを抽出して地盤増幅率を求め

る。その結果を(1)式へ当てはめ、係数 b の $AVS30$ への依存性を確認、評価するとともに、それを定式化して地盤増幅率の推定式へ導入することを検討する。

3. 観測記録と地盤データの整理

3.1 観測記録

本研究では、 $AVS30$ を地盤の指標として利用するため、S波速度構造が公開されているK-NET、KiK-net、

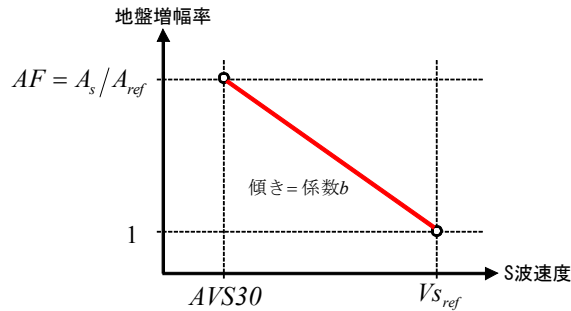
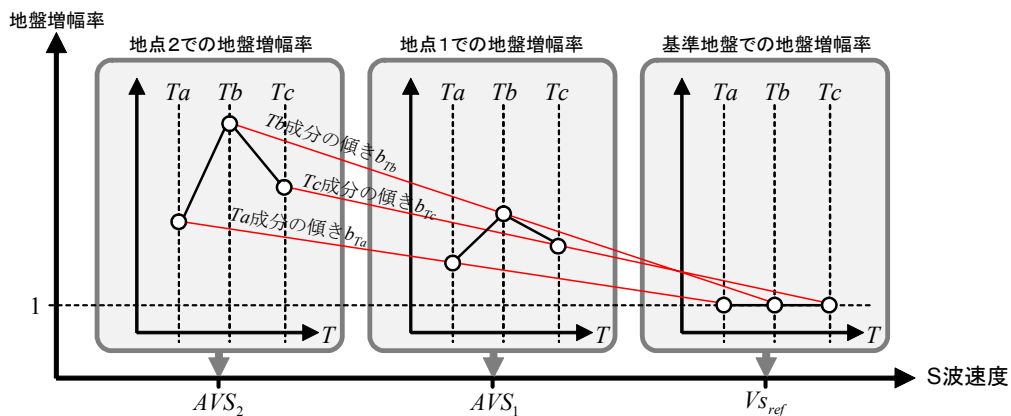
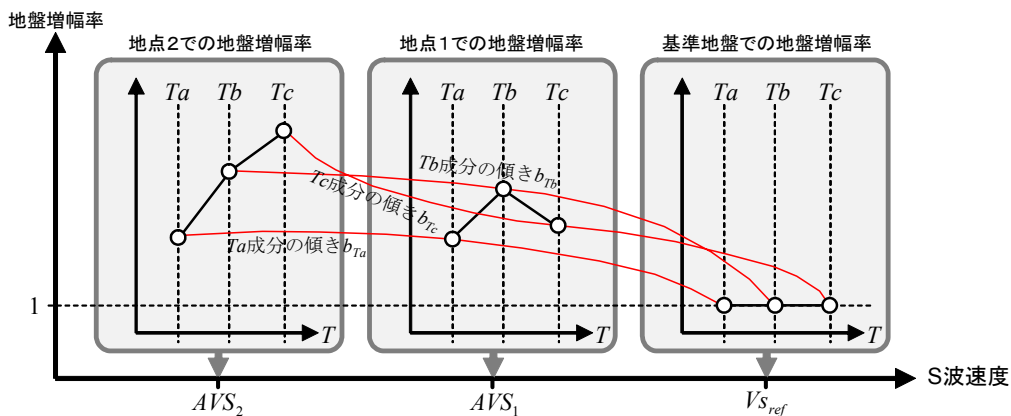


図1 地盤増幅率 ($AF=A_s/A_{ref}$) と S 波速度 ($AVS30, V_{Sref}$) の関係 (グラフは両対数軸)



(a) 一定値の係数 b による応答スペクトルの地盤増幅率



(b) S 波速度に依存する係数 b による応答スペクトルの地盤増幅率

図2 一定値の係数 b と S 波速度に依存する係数 b による応答スペクトルの増幅の違い

表1 使用した地震記録の基準

| マグニチュード | 震源距離 |
|----------------------|----------|
| $6.9 \leq M_w$ | 300km 以内 |
| $6.5 \leq M_w < 6.8$ | 250km 以内 |
| $6.0 \leq M_w < 6.4$ | 200km 以内 |
| $5.4 \leq M_w < 5.9$ | 150km 以内 |
| $5.0 \leq M_w < 5.3$ | 100km 以内 |

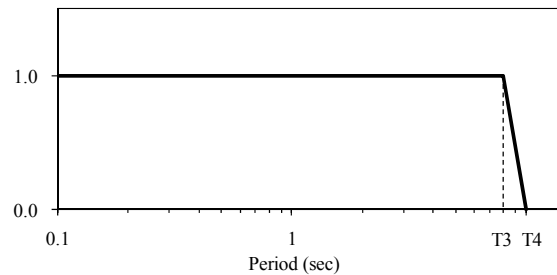


図3 フィルター形状

港湾地域強震観測システムおよび横浜市高密度強震計ネットワークの観測記録を利用した。対象とする観測記録は、1997年2月から2008年8月までに発生したMw5.0以上の地震によるものである。ここで、Mwは防災科学技術研究所のF-netのメカニズム情報によっている。多くの観測記録のS波の到達時刻は、記録開始から30秒後以降となっており、記録時間が短いものの場合、主要動の途中で波形が切れているものが多くみられたため、少なくとも90秒間以上のデータがある観測記録のみ利用することとした。

ノイズの影響を軽減するため、表1に示すMwと震源距離による基準内の強震記録のうち、PGAが5gal以上の記録のみを分析対象とし、さらに長周期のノイズの影響を除去するため、前述の基準により収集した加速度波形のフーリエスペクトルを計算し、周期軸に対して単調増加を始める周期を機械的に読み取った。その値をT3とし、 $T4=1.25 \times T3$ として、それよりも長周期側の成分を図3に示すハイパスフィルターにより除去した。また、長周期成分を除去することによるPGV等への影響を考慮し、T4が周期4秒未満の記録を分析対象から除外した。

また本研究では、地盤の非線形の影響が小さい記録のみを分析対象とするため、Tokimatsu et al.¹⁶⁾を参考にして(2)式により疑似有効ひずみ γ'_{eff} を算出し、(2)式の条件を満たさない観測記録を除外した。

$$\gamma'_{eff} = 0.4 \cdot PGV / AVS30 \leq 3 \times 10^{-4} \quad (2)$$

さらに、本研究ではS波主要動の増幅率を検討対象としているため、表面波が卓越している波形を目視によって除外した。その方法は、加速度波形を用いて、最大振幅の1/5程度に振幅が収束するのを目安として、S波到達時刻からのS波主要動部分の継続時間を定め、その継続時間内の最大速度振幅 V_1 と、継続時間後に到達する後続波による最大速度振幅 V_2 を目視で比較し、 V_2 が V_1 の半分以上となった波形を表面波が卓越していると判断するものである。また、加速度や速度の最大振幅がP波で生じている波形は分析対象から除外した。

3.2 地震動指標

応答スペクトルは、Boore et al.¹⁷⁾による地震計の設置方向に依存しない絶対加速度応答スペクトルのGMRotD50とした。GMRotD50は、地震計の設置方向の影響を除去するため、水平2成分の応答スペク

トル ($h=0.05$) の幾何平均について、1度ずつ水平2成分を回転させて計算することで、応答加速度の幾何平均値の分布を求め、周期ごとにその中央値をとったものである。なお、応答スペクトルの周期は、0.1秒から10秒までを対数軸上で等間隔に40分割した41点で算出することとし、長周期側は前述のT3秒までを利用した。また、PGAおよびPGVについては水平2成分の合成値とした。

3.3 地盤の平均S波速度

各観測点のPS検層結果に基づき、(3)式によりAVS30を算出した。

$$AVS30 = \frac{30}{\sum t(i)/V_s(i)} \quad (3)$$

ここで $t(i)$ および $V_s(i)$ は、第 i 層の層厚 (m) およびS波速度 (m/s) を示す。この際、深さ30mまでのPS検層データに欠損がある場合には、松岡ほか¹⁸⁾の基準に基づいてS波速度データの欠損を補う。具体的には、①表層部分のS波速度データに欠損がある場合には、表2上段の基準を満たす場合は最上層のS波速度を地表にまで延長する。②PS検層が深さ30mに達していない観測点については、表2下段の基準を満たす場合は最下層のS波速度を深さ30mにまで延長する。これらが適用できない観測点については、分析対象から除外した。また、KiK-net観測点では、100m以上の深さまでのPS検層が行われている一方で、深さ方向のS波速度構造の変化が乏しい観測点が見られ、S波速度の測定間隔が広く正確な速度分布が得られていない恐れがあるため、本研究では、深さ30mまでにS波速度の異なる層が3層以上存在する観測点のみを分析対象とした。

4. 観測記録による係数 b の算出

4.1 算出方法

藤本・翠川¹²⁾の方法と同様、2地点間の距離が30km以内の観測点でペアを作成し、観測記録から地震毎の観測点ペア毎の AF_i (i は地震毎、観測点ペア毎のインデックス) を(4)式により地震動指標毎に求めた。

$$AF_i = (A_{s,i} / A_{r,i}) \cdot (X_{s,i} / X_{r,i}) \quad (4)$$

次に、(4)式で求めた AF_i が、(5)式のように観測点ペア間のAVS30比の b_i 乗で表されると仮定し、(5')式により各地震動指標の係数 b_i を算出した。

$$AF_i = (AVS30_{s,i} / AVS30_{r,i})^{b_i} \quad (5)$$

$$b_i = \frac{\log AF_i}{\log AVS30_{s,i} - \log AVS30_{r,i}} \quad (5')$$

ここで、 A は各地震動指標の振幅、 X は震源距離 (文献19~32による断層モデルおよびF-netによる震源位置を利用して計算) を表し、添え字の s は観測点ペアのうち、相対的にAVS30が小さい観測点、 r は相対的にAVS30が大きい観測点を表す。なお、 M_w が大きく、震源距離が小さい場合には、断層破壊のディレクティブィティー効果の影響が含まれる可能性がある。そこで、データを調べ、 $M_w 6.0$ 以上地震で、震源距離が25km以内の観測点を含む観測点ペアがデータセットの中にほとんど含まれていないことを確認している。

(5')式より、係数 b_i は図4の左側の実線で示したように観測点ペアからなる2点間を結ぶ直線の傾きとして表される。しかし、第2章で述べたように、係数 b は、図4の左側の破線で示すように、AVS30に依

表2 松岡ら¹⁸⁾のPS検層データの基準

| | | |
|--------------------|------|------|
| PS 検層の最表層までの深さ (m) | ~2.0 | ~5.0 |
| 最表層の S 波速度 (m/s) | — | <200 |

| | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| PS 検層の最下層までの深さ (m) | 10.0~ | 15.0~ | 17.5~ | 20.0~ |
| 最下層の S 波速度 (m/s) | ≥1000 | ≥500 | ≥400 | — |

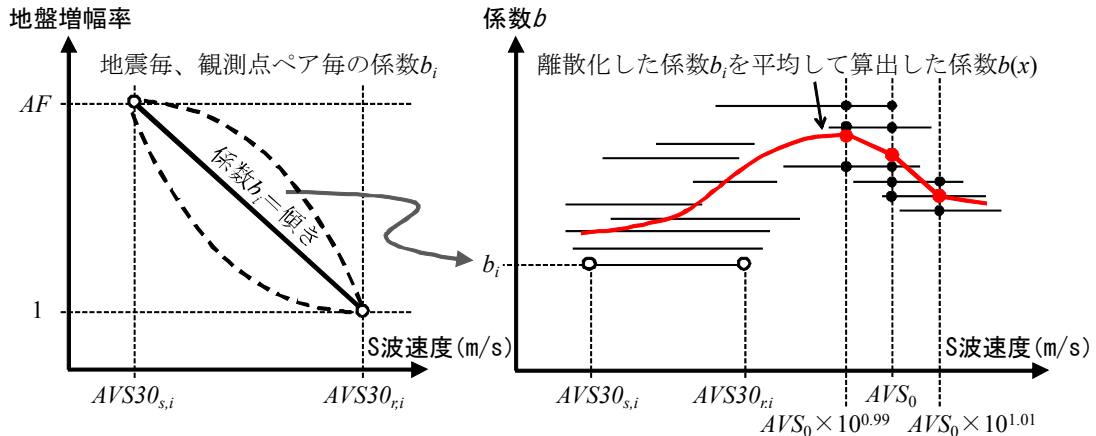


図4 係数 $b(x)$ の算出イメージ

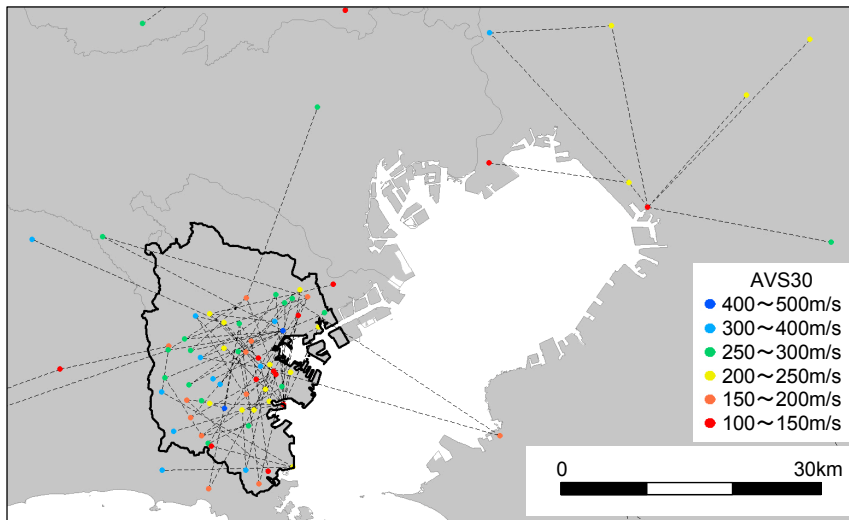


図5 観測点ペア（基準値は1/1.5）の作成例（2000年6月3日千葉県北東部の地震）
（太線は横浜市、○印は観測点とAVS30の大きさ、破線は観測点ペアの組を示す。）

存して変化する可能性がある。その変化を評価するため、図4の右側のように観測点ペアから算出した係数 b_i を、区間 $[AVS30_{s,i}, AVS30_{r,i}]$ を結ぶ線分で表す。次に、この線分を対数軸で1/100刻みで図4右側の黒丸のように離散化する（図中 $AVS_0 \times 10^{0.99}$ 、 AVS_0 、 $AVS_0 \times 10^{1.01}$ ）。これをすべての係数 b_i の線分について行くと、ある x (AVS30) において離散化された係数 b_i の点が複数求まる。これらの平均値を求めて、それをその x における係数 $b(x)$ とする。もし係数 b にAVS30の依存性がなければ係数 $b(x)$ は x によらず一定値となるが、依存性がある場合には図4の右側に示したような曲線的变化が見られるはずである。

(5')式から推察されるように、観測点ペア毎の係数 b_i は $\log AVS30_{r,i} - \log AVS30_{s,i}$ が大きいほど ($AVS30_{s,i} / AVS30_{r,i}$ が小さいほど) 安定し、小さいほどバラツキが大きくなる。藤本・翠川¹²⁾は、安定した結果を

得るため、 $AVS30_{s,i}/AVS30_{r,i} \leq 1/2$ という基準を設定し、その基準を満たす観測点ペアのみから係数 b_i を算出している。一方(5')式は、 $AVS30$ の区間 $[AVS30_{s,i}, AVS30_{r,i}]$ における係数 b_i の平均値を求める式であるから、その区間が狭いほど係数 b の変化を忠実に評価することができる。本研究でも、観測点ペアの作成あたり、観測点間の距離が30km以内かつ $AVS30_{s,i}/AVS30_{r,i}$ がある基準値以下とする条件(条件①)を設けており、その基準値の具体的な値は、次節での検討を踏まえて1/1.5とした。また条件①のみでは横浜市のように地震計の設置密度が極端に高い地域において膨大な量の観測点ペアが作成され、係数 $b(x)$ の評価結果に横浜市の地盤特性によるバイアスが生じてしまうことが予想されるため、1つの観測点から見て条件①を満たす観測点ペアの相手となる観測点が複数存在する場合は、そのうち最も $AVS30_{s,i}/AVS30_{r,i}$ が大きくなるように(さらにそのような観測点が複数存在する場合には、そのうち最も近接する観測点で)ペアを作成した(条件②)。

図5には横浜市高密度強震計ネットワークを含む関東地方南部の観測点を図示しており、破線は条件①②に基づいて作成した観測点ペアを表している。横浜市高密度強震計ネットワークにおける観測点

表3 分析に用いた観測点ペア数と地震数(基準値は1/1.5)

| Mw | 観測点ペア数 | 地震数 |
|----------|---------------|-----|
| 5.0~5.4 | 2271 | 120 |
| 5.5~5.9 | 2614 | 81 |
| 6.0~6.4 | 905 | 34 |
| 6.5~6.9 | 783 | 17 |
| 7.0~7.4 | 298 | 5 |
| 7.5~7.9 | 39 | 2 |
| 計 (*) | 6910 (23%) | 259 |

* 括弧内は横浜市高密度強震計ネットワークの観測点を含む観測点ペアの割合

観測点ペア(データ数)

- 10以上
- 5 - 9
- 2 - 4
- 1

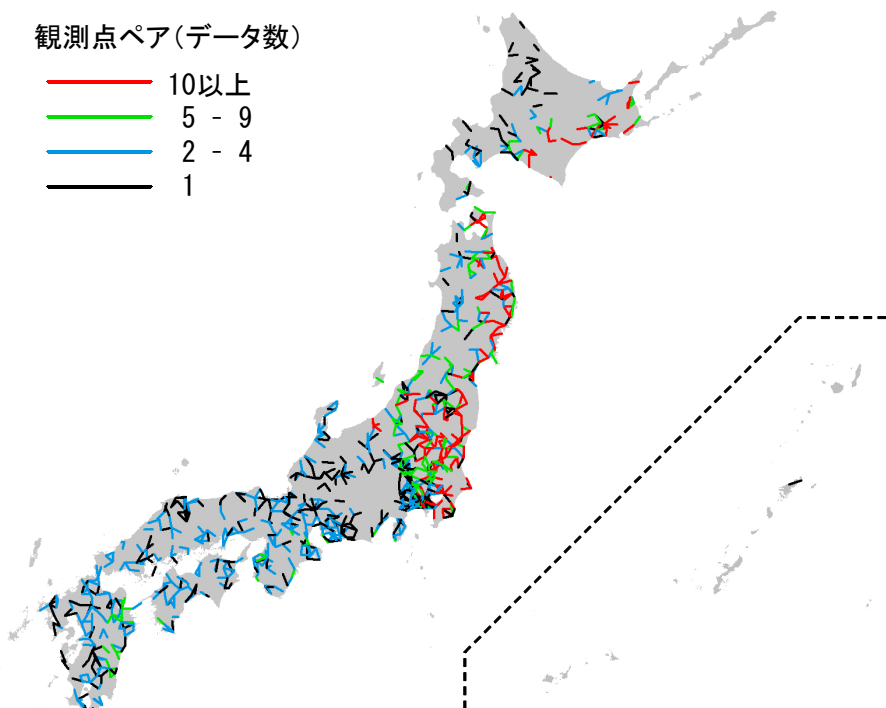


図6 観測点ペア(基準値は1/1.5)の分布とデータ数

間の距離は1km程度であるため、条件①のみでは1つの観測点から無数に観測点ペアが作成されることになるが、条件②により高密度に観測点が設置されている横浜市においても1つの観測点を起点として作成される観測点ペアが制限されている。

これら2つの条件に基づき、条件①については基準値を1/1.5として作成した観測点ペアの数および地震数を表3に示す。全観測点ペアに対する横浜市高密度強震計ネットワークの観測点を含む観測点ペアの割合は2割程度であり、他の地震観測点によるペア数に比べて極端に多い数にはなっていない。全観測点ペアの分布を図6に示す。ほぼ全国にわたり観測点ペアが分布している。また、北海道から関東にかけての太平洋側と新潟付近では、そのほかの地域よりもデータ数が多い分布となっている。

4.2 係数 $b(x)$ の算出

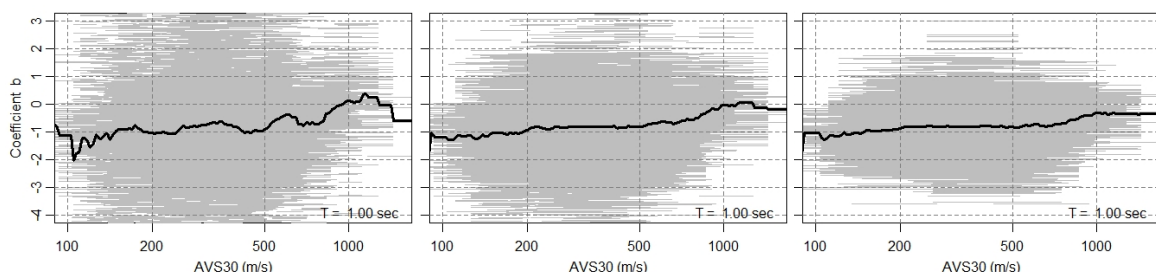
条件①について、1/1.2、1/1.5、1/2.0の3通りの基準値で観測点ペアを作成し、係数 $b(x)$ を算出した。

例として、3通りの基準値で計算した周期1.0秒の応答スペクトルに関する係数 $b(x)$ を図7(a)から(c)に示す。図中の太い実線は係数 $b(x)$ 、細い灰色の実線は係数 b_i を示す。1/1.2を基準値とした場合、係数 b_i のバラツキは非常に大きい。係数 $b(x)$ の $AVS30$ による変化も滑らかでない。基準値を1/1.5や1/2.0へと小さくするほど、係数 b_i の値は狭い範囲に収束し、係数 $b(x)$ の推移が滑らかなものとなって、その変化幅も狭くなる。

応答スペクトルの各周期成分について、 $AVS30$ に対する係数 $b(x)$ の分布を1/1.2、1/1.5、1/2.0の3通りの基準値で求め、図8(a)から(c)に示す。どの基準値で求めた係数 $b(x)$ の分布にも、-1.0前後の値を示す帯状の領域があり（特徴A）、その領域よりも短周期側かつ x が300m/s程度以下の範囲に正值を示す領域が広がっている（特徴B）などの共通した傾向がある。特徴Aは、この帯の領域において、他の領域よりも地震動が大きく増幅することを意味しており、 $AVS30$ が低下するに従って地盤の卓越周期が延び、 $AVS30$ が200m/s程度以下では、それが1秒強の値となることを示唆している。また特徴Bは、既往の研究³³⁾で指摘されているように、S波速度が遅い軟弱層が厚くなると地盤の粘性減衰により、短周期成分の地盤増幅率が小さく抑えられることで、係数 b が正の値をとるとも解釈できる。このように、2つの特徴はともに合理的な解釈が可能であり、データセットの偶然性に起因するものではなく、係数 $b(x)$ の $AVS30$ への依存性を示すものと推察される。

前節でも述べたように、基準値を大きく設定し、 $AVS30$ の区間 $[AVS30_{s,i}, AVS30_{r,i}]$ を狭くする方が、係数 b の変化を忠実に評価することができることから、本研究の目的に照らして望ましいと考えられる。したがって基準値は、1/2.0よりも1/1.5の方が望ましく、1/1.5よりも1/1.2とする方がより望ましい。しかしながら、基準値を1/1.2として求めた係数 $b(x)$ は、図7や図8に示したように、 $AVS30$ による変化が滑らかでなくなり、周期1.0秒、 $AVS30=100$ m/s付近で係数 $b(x)$ が-2程度の値をとる。地盤増幅率は地盤のインピーダンス比の逆数に近い値となるはずであり、係数 b の値は-1程度となることが期待され、-1を大きく下回って-2まで低下するとは考えにくい。基準値を1/1.5としたときにはそのような極端に小さい値は見られない。そこで以下では基準値を1/1.5として検討を進めた。

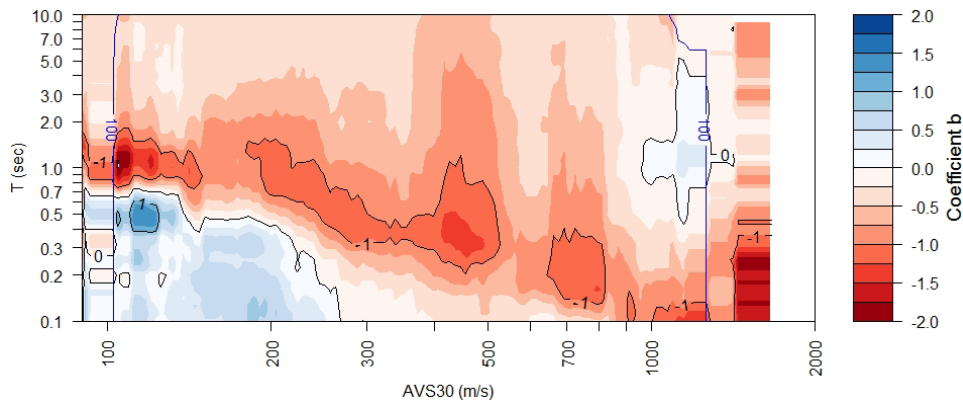
基準値を1/1.5として算出した PGA 、 PGV 、応答スペクトルの各周期成分の係数 $b(x)$ の例を図9に示す。



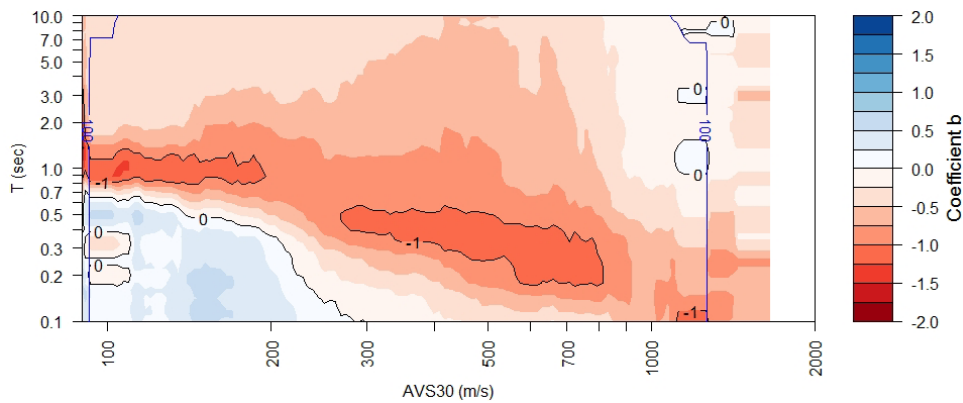
(a) 基準値を1/1.2とした例 (b) 基準値を1/1.5とした例 (c) 基準値を1/2.0とした例

図7 3通りの基準値で求めた周期1.0秒の応答スペクトルの係数 $b(x)$

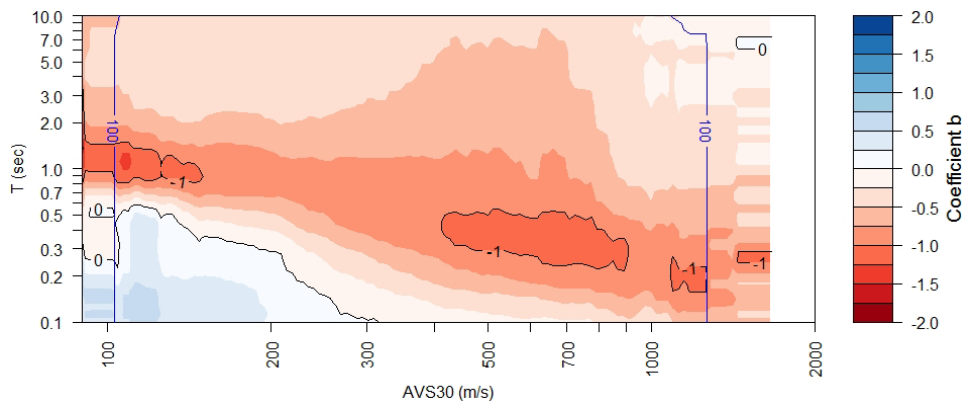
(太線は係数 $b(x)$ 、細い灰色の線は係数 b_i を示す。)



(a) 基準値を1/1.2とした場合



(b) 基準値を1/1.5とした場合



(c) 基準値を1/2.0とした場合

図8 応答スペクトルの係数 $b(x)$ の分布
(青いコンターは観測点ペア数が100以上の範囲 (内側))

なお、図8において、係数 $b(x)$ を求めるための観測点ペア数が100未満の $AVS30$ の範囲で、係数 $b(x)$ が不安定となる傾向が見られたため、ここでは観測点ペア数が100以上の $AVS30$ の範囲で係数 $b(x)$ を算出した。図9から分かるように、特に PGA や周期0.5秒程度以下の応答スペクトルの係数 $b(x)$ は変化幅が大きく、特徴Bによって $AVS30$ が200から300m/s程度以下の領域で係数 $b(x)$ が正の値をとる。この領域内では、S波速度が大きい地盤から小さい地盤に地震動が伝播する際に増幅せずに減衰する。 PGV や周期2秒程度以上の応答スペクトルの係数 $b(x)$ の $AVS30$ による変化幅は比較的小さい。

5. 係数 $b(x)$ の定式化と地盤増幅率の評価

5.1 係数 $b(x)$ の定式化

図8および図9に示した係数 $b(x)$ を定式化する。定式化に際しては、結果の平滑化および利便性の向上を目的として、PGA、PGV、応答スペクトルの各周期の係数 $b(x)$ を(6)式のような n 次式で近似した。

$$b(x) = \sum_{k=0}^n a_k \cdot (\log x)^k \quad (6)$$

最小二乗法により3次、4次、5次式での近似を試したところ、3次式では元の係数 $b(x)$ との乖離が大きい場合があること、5次式では端部において不自然な形状で近似されるケースが見られたことから、4次式により近似を行い、係数 $b(x)$ を定式化した。係数 $b(x)$ のグラフの例を図10に示す。また、係数 $b(x)$ の回帰係数 a_k を表4に示す。なお回帰は観測点ペアが100以上の範囲に対して行っており、表4にはその範囲を本回帰式の適用範囲として示している。

図10には、既往研究と同様に一定値に近似した場合の係数 b_{AVE} を併せて示した。係数 b_{AVE} は、観測点ペアから求めた係数 b_i を係数 b_i の線分の長さ（AVS30比の常用対数をとった値）をウェイトとした加重平均で求めている。係数 $b(x)$ と係数 b_{AVE} は、多くの場合、 $200\text{m/s} \leq \text{AVS30} \leq 500\text{m/s}$ 程度の範囲で交差しており、それ以外の範囲では両者の差が大きくなる場合がある。特に周期0.5秒程度以下では係数 $b(x)$ の変化幅が大きく、係数 b_{AVE} との乖離が顕著である。一方、周期2秒程度以上では係数 $b(x)$ の変化幅が小さ

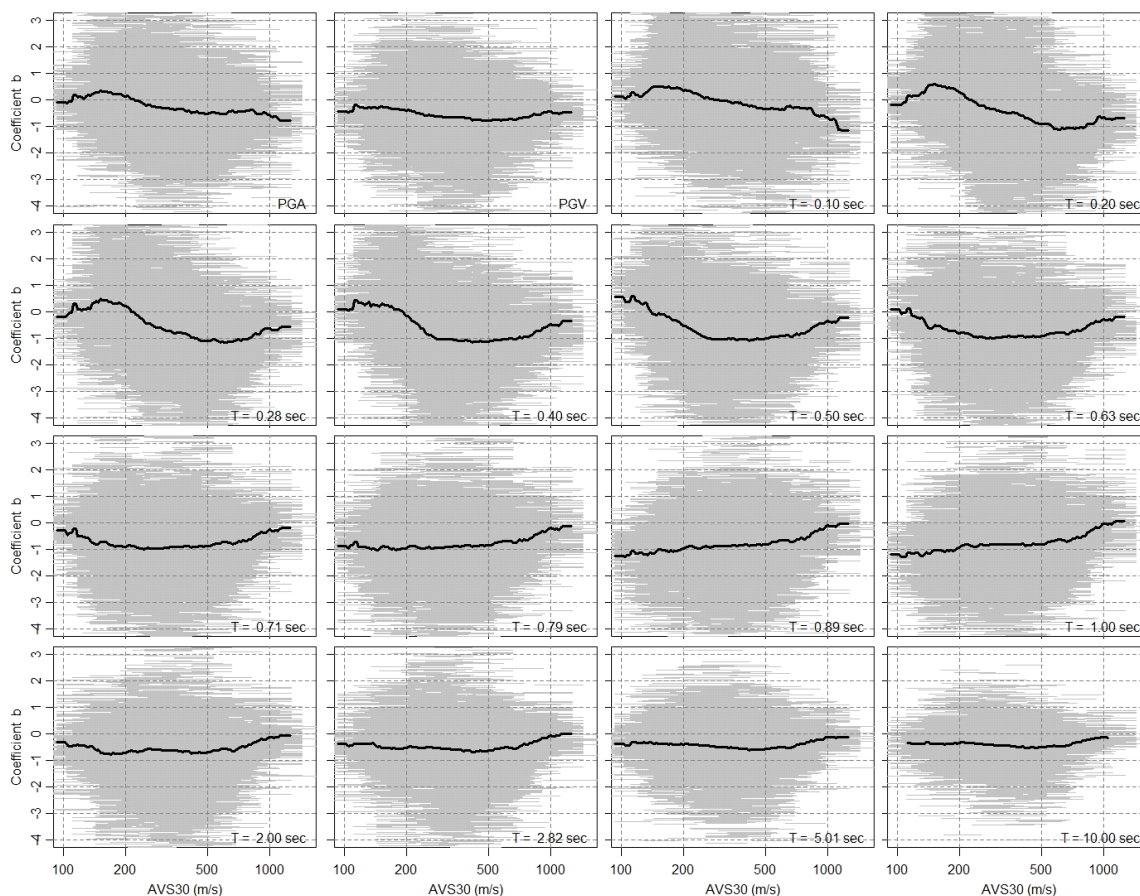


図9 算出した係数 $b(x)$

いため、係数 b_{AVE} との乖離が全体的に小さい。

5.2 地盤増幅率の評価

(6)式で定式化した係数 $b(x)$ による AF の推定式を導出する。いま、 $AVS30$ が x である基準地盤での地震

表4 $b(x)$ の回帰係数 a_k

| | $k=0$ | $k=1$ | $k=2$ | $k=3$ | $k=4$ | 適用範囲(m/s) |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| PGA | -5.856908e+2 | 9.301584e+2 | -5.489620e+2 | 1.428057e+2 | -1.383260e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| PGV | -2.734621e+2 | 4.282294e+2 | -2.484973e+2 | 6.324708e+1 | -5.962172e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| 応答スペクトル | | | | | | |
| T=0.10 sec | -5.832980e+2 | 9.300826e+2 | -5.519199e+2 | 1.446561e+2 | -1.414914e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.11 sec | -5.154290e+2 | 8.127883e+2 | -4.762700e+2 | 1.231175e+2 | -1.186934e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.13 sec | -3.963793e+2 | 6.157433e+2 | -3.545985e+2 | 8.990497e+1 | -8.489276e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.14 sec | -2.319650e+2 | 3.452258e+2 | -1.886626e+2 | 4.493561e+1 | -3.947916e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.16 sec | -2.111564e+2 | 3.060141e+2 | -1.611207e+2 | 3.643747e+1 | -2.980486e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.18 sec | -4.128262e+2 | 6.169084e+2 | -3.391693e+2 | 8.132586e+1 | -7.185070e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.20 sec | -5.307951e+2 | 8.010332e+2 | -4.459607e+2 | 1.085886e+2 | -9.769772e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.22 sec | -5.040302e+2 | 7.668158e+2 | -4.302692e+2 | 1.055728e+2 | -9.571155e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.25 sec | -4.835903e+2 | 7.402272e+2 | -4.176743e+2 | 1.029940e+2 | -9.378344e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.28 sec | -6.868859e+2 | 1.058108e+3 | -6.025958e+2 | 1.504048e+2 | -1.389777e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.32 sec | -9.342630e+2 | 1.453191e+3 | -8.372734e+2 | 2.118256e+2 | -1.987391e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.35 sec | -9.660672e+2 | 1.515322e+3 | -8.804358e+2 | 2.246161e+2 | -2.124901e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.40 sec | -7.823679e+2 | 1.243542e+3 | -7.311596e+2 | 1.885066e+2 | -1.800018e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.45 sec | -5.261583e+2 | 8.540940e+2 | -5.109987e+2 | 1.336022e+2 | -1.289946e+1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.50 sec | -2.963616e+2 | 4.986381e+2 | -3.067049e+2 | 8.184918e+1 | -8.019028e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.56 sec | -1.253477e+2 | 2.257749e+2 | -1.455696e+2 | 4.004684e+1 | -3.993720e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.63 sec | 1.480540e+1 | -2.127965e+0 | -8.758405e+0 | 4.033531e+0 | -4.798012e-1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.71 sec | 6.272486e+1 | -8.624803e+1 | 4.449106e+1 | -1.051409e+1 | 9.767495e-1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.79 sec | 3.275242e+1 | -5.430806e+1 | 3.351960e+1 | -9.423650e+0 | 1.020000e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=0.89 sec | 1.586903e+1 | -4.059224e+1 | 3.232633e+1 | -1.073961e+1 | 1.292611e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=1.00 sec | 7.813656e+1 | -1.442707e+2 | 9.654163e+1 | -2.827130e+1 | 3.073396e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=1.12 sec | 1.182946e+2 | -2.075507e+2 | 1.339297e+2 | -3.807208e+1 | 4.034162e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=1.26 sec | 1.407532e+2 | -2.396473e+2 | 1.510553e+2 | -4.210488e+1 | 4.387177e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=1.41 sec | 8.245821e+1 | -1.406806e+2 | 8.905594e+1 | -2.506452e+1 | 2.649849e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=1.58 sec | 1.181434e+2 | -1.913363e+2 | 1.157978e+2 | -3.126544e+1 | 3.180693e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=1.78 sec | 1.296478e+2 | -2.078974e+2 | 1.247194e+2 | -3.337984e+1 | 3.365264e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=2.00 sec | 1.427543e+2 | -2.265981e+2 | 1.347655e+2 | -3.578021e+1 | 3.580116e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=2.24 sec | 1.003567e+2 | -1.608276e+2 | 9.695238e+1 | -2.621836e+1 | 2.682156e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=2.51 sec | 4.802871e+1 | -7.899216e+1 | 4.936711e+1 | -1.400874e+1 | 1.514733e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=2.82 sec | -3.509010e+1 | 5.043622e+1 | -2.569188e+1 | 5.215193e+0 | -3.204488e-1 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=3.16 sec | -6.832776e+1 | 1.030719e+2 | -5.666725e+1 | 1.325386e+1 | -1.097291e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=3.55 sec | -6.922929e+1 | 1.069228e+2 | -6.041088e+1 | 1.463133e+1 | -1.272183e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=3.98 sec | -9.379027e+1 | 1.428575e+2 | -7.992778e+1 | 1.929886e+1 | -1.687045e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=4.47 sec | -1.050831e+2 | 1.618713e+2 | -9.182490e+1 | 2.258407e+1 | -2.025121e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=5.01 sec | -1.473759e+2 | 2.282980e+2 | -1.307778e+2 | 3.270459e+1 | -3.009118e+0 | $94 \leq x \leq 1258$ |
| T=5.62 sec | -1.032488e+2 | 1.561493e+2 | -8.681279e+1 | 2.087651e+1 | -1.823936e+0 | $94 \leq x \leq 1148$ |
| T=6.31 sec | -1.210855e+2 | 1.815265e+2 | -1.001422e+2 | 2.393928e+1 | -2.083266e+0 | $105 \leq x \leq 1122$ |
| T=7.08 sec | -5.835044e+1 | 7.714437e+1 | -3.550599e+1 | 6.283135e+0 | -2.875083e-1 | $105 \leq x \leq 1096$ |
| T=7.94 sec | 4.688153e+1 | -9.205321e+1 | 6.574188e+1 | -2.045347e+1 | 2.342821e+0 | $108 \leq x \leq 1071$ |
| T=8.91 sec | 3.224113e+1 | -6.635328e+1 | 4.883849e+1 | -1.553359e+1 | 1.809474e+0 | $108 \leq x \leq 1071$ |
| T=10.0 sec | -5.376744e+1 | 7.011872e+1 | -3.171727e+1 | 5.437557e+0 | -2.227753e-1 | $113 \leq x \leq 1047$ |

・適用範囲は、観測点ペア数が100以上の範囲

動振幅を $A(x)$ とし、わずかな $AVS30$ の差 (Δx) に対応する地震動振幅の増分を ΔA とすると、(1)式および(6)式より、 Δx による地盤増幅率を表す(7)式が成り立つ。

$$\frac{A(x) + \Delta A}{A(x)} = \left(\frac{x - \Delta x}{x} \right)^{b(x)} \quad (7)$$

ここで(7)式の常用対数を取り、 $\Delta \log A(x) = \log(A(x) + \Delta A) - \log A(x)$ 、 $-\Delta \log(x) = \log(x - \Delta x) - \log(x)$ とおけば、(7)式は(8)式のように変換することができ、この両辺を積分することで(9)式が得られる。 $g(x)$ は $b(x)$ の不定積分で(10)式の通りである。

$$\Delta \log A(x) = -b(x) \cdot \Delta \log x \quad (8)$$

$$[\log A(x)] = -\int b(x) \cdot d \log x = -[g(x)] \quad (9)$$

$$g(x) = \sum_{k=0}^4 \frac{1}{k+1} a_k \cdot (\log x)^{k+1} \quad (10)$$

(9)式の $[\log A(x)]$ は、2地点の地震動振幅 $A(x)$ の比、すなわち地盤増幅率 AF の常用対数をとった値に等しいことから、基準地盤 $x_r = AVS30_r$ に対する $x_s = AVS30_s$ までの地盤増幅率 AF は、 $g(x)$ を用いて(11)式で表

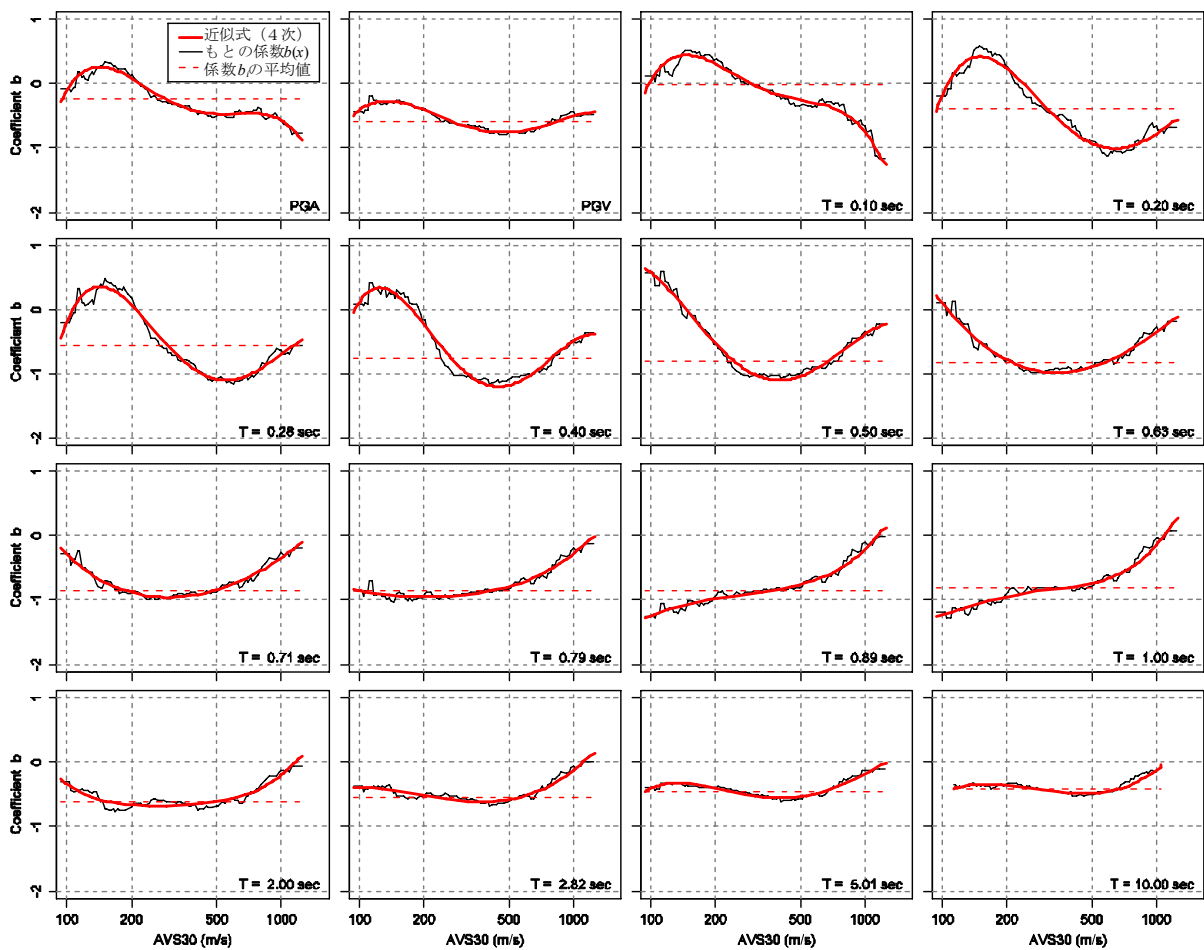


図10 4次式による $b(x)$ の近似

される。

$$AF = 10^{(g(x_s) - g(x_r))} \quad (11)$$

基準地盤を $x_r=1000\text{m/s}$ 、 600m/s 、 400m/s の3通りとした地盤増幅率を図11に示す。図中にはS波速度比($AVS30_s/AVS30_r$)が1/4、2/4、3/4、4/4となる4つのケースを示している。図11(a)は、基準地盤を $x_r=1000\text{m/s}$ とした例である。S波速度比が小さくなるにつれ、徐々に地盤増幅率が大きくなるとともに卓越周期が長周期側に移動している。次に、図11(a)~(c)の比較において、同じS波速度比であっても、 $AVS30_s$ の大きさに依存して地盤増幅率の周期特性が変化し、 $AVS30_s$ が小さい軟弱な地盤ほど卓越周期が長くなっている。これは4.2節に述べた特徴Aによるものに対応するものであり、軟弱な地盤ほど卓越周期が長くなるという一般的な傾向と調和的である。また、図11(b)(c)では、 $AVS30_s < 200\text{m/s}$ 程度の地盤において、S波速度比の減少とともに短周期の地盤増幅率が小さくなっている。これは特徴Bに対応するものである。

図11(c)から、卓越周期とそのときの地盤増幅率を読み取ると、 $AVS30_s$ が 300m/s のとき卓越周期は 0.4 秒で地盤増幅率は 1.4 であり、 200m/s のときはそれぞれ 0.7 秒と 1.9 、 100m/s のときは 0.9 秒と 4.0 である。ここで、基盤と 30m の層厚を有する表層地盤からなる2層地盤を仮定し、地盤の密度の違いを無視して $1/4$ 波長則により表層地盤の1次固有周期および地盤増幅率を求めると、基盤のS波速度が 400m/s 、表層のS波速度が 300m/s では、周期は 0.4 秒で地盤増幅率が 1.3 となる。表層のS波速度が 200m/s では周期は 0.6 秒で地盤増幅率が 2.0 、 100m/s では周期は 1.2 秒で地盤増幅率が 4.0 となり、図11(c)から読み取った卓越周

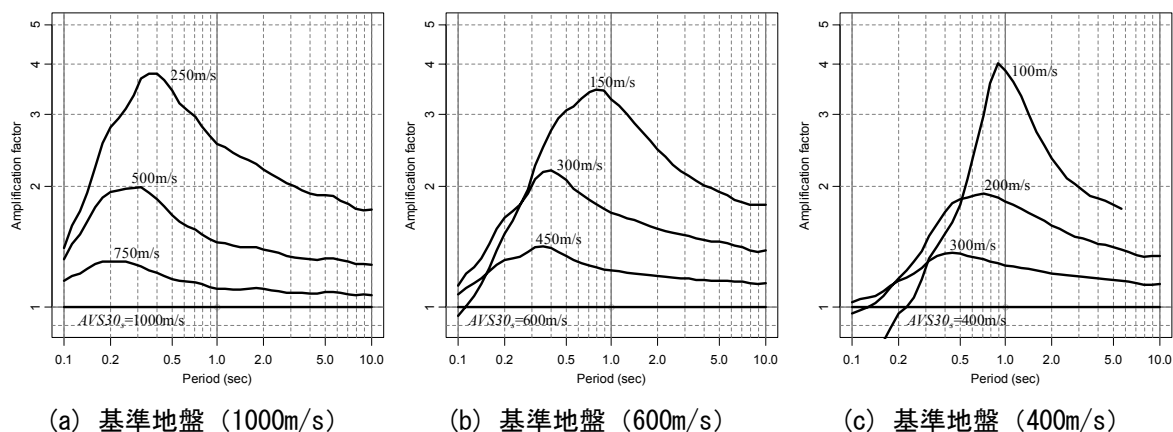


図11 定式化した係数 $b(x)$ により求めた応答スペクトルの地盤増幅率

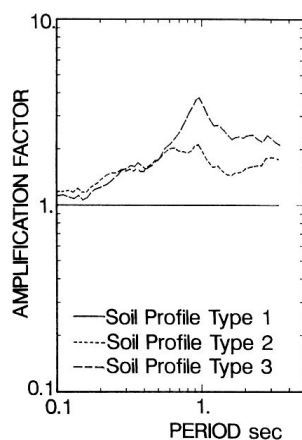


図12 1987年千葉県東方沖地震の観測記録に基づく地盤種別ごとの地盤増幅率⁹⁾

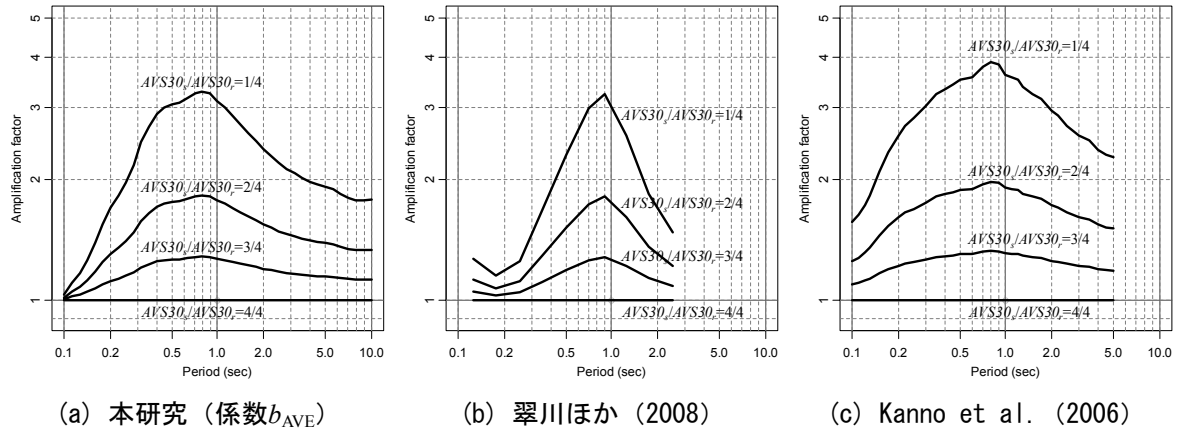


図13 一定値の係数 b を用いた応答スペクトルの地盤増幅率（本研究と既往研究）

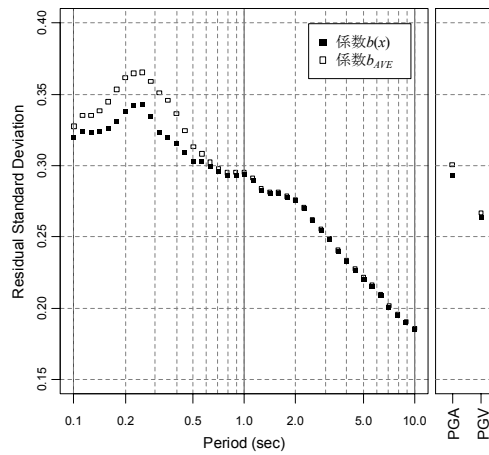


図14 観測記録に基づく地盤増幅率との残差の標準偏差

期および地盤増幅率とおおむね整合している。

図12は、1987年千葉県東方沖地震の観測記録から求めた、建築基準法施行令に基づく第1種地盤に対する各地盤種別の平均的な地盤増幅率である⁹⁾。第1種地盤はS波速度が400m/sないしそれ以上のものに相当するので、この結果を基準地盤400m/sに対する図11(c)の結果と比べると、第2種地盤の結果と $AVS30_s=200\text{m/s}$ の結果が、第3種地盤の結果と $AVS30_s=100\text{m/s}$ の結果がよく対応し、本研究での結果の妥当性を支持している。

比較のため、係数 b が一定と仮定して解析した場合の結果として、本研究で求めた各 $AVS30$ での係数 b_i の値の平均値 b_{AVE} を求めて、これによる地盤増幅率を図13(a)に、既往の推定式による結果の比較を図13(b)(c)に示す。これらの結果では、図11のような周期特性の変化は見られず、S波速度比の減少とともに単にその振幅が増大するのみである。なお、本研究の係数 b_{AVE} で求めた地盤増幅率（図13(a)）と既往の研究の係数 b による地盤増幅率（図13(b)(c)）は、ピーク周期や形状、振幅などの特徴がほぼ一致しており、用いたデータセットの違いによる大きな差はない。

(11)式による AF と、係数 $b(x)$ を算出するのに用いた観測記録に基づく AF とを比較し、地盤増幅率の推定に関する残差の標準偏差を算出した。係数 b_{AVE} による残差の標準偏差とあわせて図14に示す。なお、残差は、 AF の推定値と観測記録に基づく AF の比の常用対数をとって計算した値である。係数 $b(x)$ により推定した AF の残差の標準偏差は、係数 b_{AVE} によるものよりも1秒程度より短い周期帯域で小さく、本研究で提案した係数 $b(x)$ を用いることによって、地盤増幅率の推定精度が改善されたことを示している。特に周期0.5秒程度以下では両者の差が大きく、改善の効果が顕著である。これは、周期0.5秒程度以下

の帯域では、係数 $b(x)$ と係数 b_{AVE} との乖離が大きいと考えられる。また、 PGA および PGV についても、わずかではあるが残差の標準偏差の低下が見られる。

6. 結論

地盤増幅率の簡便な推定手法の向上を目的として、S波速度構造が公開されているK-NET、KiK-net、港湾地域強震観測システムおよび横浜市高密度強震計ネットワークの観測記録を利用し、近接する2つの観測点における地震動振幅の比から求めた地盤増幅率 AF と地盤の平均S波速度 $AVS30$ との関係について分析し、下記の結論を得た。

- (1) 従来の地盤増幅率の推定式 $AF=(AVS30_s/AVS30_r)^b$ において一定値で近似されていた係数 b には、 $AVS30$ への依存性が短周期で顕著にみられることを確認し、それを考慮した推定式を提案した。
- (2) 提案式から得られた結果により、軟弱な地盤ほど卓越周期が長くなるという特性をより正確に再現できることを示した。
- (3) 提案した推定式は、従来の方法による結果に比べ、短周期で観測値に対する誤差が小さくなり、特に周期0.5秒以下でかなりの改善がみられることを示した。

謝 辞

本研究は地震保険調査研究費による調査研究事業の一環として実施した。本研究で用いた強震記録および地盤資料は防災科学技術研究所、横浜市安全管理局危機管理室および港湾技術研究所から提供されたものである。株式会社構造計画研究所の司宏俊博士、高浜勉博士からは有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Haskel, N.A. : Crustal reflection of plane SH waves, J. Geophys. Res., Vol.65, 1960, pp.4147-4150.
- 2) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC 72-12, 1972.
- 3) Duke, C.M., Eguchi, R.T., Campbell, K.W. and Chow, A.W. : Effects of Site on Ground Motion in the San Fernando Earthquake, Proceedings of the 6th World Conference on Earthq. Eng., Vol.1, 1977, pp.423-431.
- Seed, H.B., Ugas, C. and Lysmer, J. : Site-dependent spectra for earthquake-resistant design, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.66, 1976, pp.221-243.
- 4) 太田外気晴、安藤治彦：地盤種別と地震動の平均的特性、第5回地盤震動シンポジウム資料集、1977、pp.27-34.
- 5) 嶋悦三：東京都23区の予想震度分布、第5回地盤震動シンポジウム資料集、1977、pp.61-65.
- 6) Yoshida, N. and Iai, S. : Nonlinear site response and its evaluation and prediction, Proceedings of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology of Seismic Motion, Vol. 1, 1998, pp.71-90.
- 7) Borcherdt, R. D., Gibbs, J. F., and Fumal, T. E. : Progress on ground motion predictions for the San Francisco Bay region, California, U.S. Geol. Survey Cir. 807, 1979, pp.13-25.
- 8) 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、第442号、1992、pp.71-78.
- 9) 翠川三郎、作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の地震動応答スペクトル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、第447号、1993、pp.31-37.
- 10) Boore, D. M., Joyner, W. B., and Fumal, T. E. : Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: An interim report, Part 2, U.S.Geological Survey Open-File Report 94-127, 1994, 40pp.
- 11) Borcherdt, R. D. : Estimation of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification), Earthquake Spectra, Vol. 10, No. 4, 1994, pp.617-653.

- 12) 藤本一雄、翠川三郎：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、日本地震工学会論文集、Vol.6、No.1、2006、pp.11-22.
- 13) Kanno T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., and Fukushima, Y. : A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, 2006, pp.879 -897.
- 14) 翠川三郎、駒澤真人、三浦弘之：横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係、日本地震工学会論文集、第8号、第3巻、2008、pp.19-30.
- 15) 先名重樹、翠川三郎、若松加寿江：常時微動のH/Vスペクトル比と地形・地盤分類を用いたスペクトル増幅率の推定、日本地震工学会論文集、第8巻、第4号、2008、pp.1-15.
- 16) Tokimatsu, K., Midorikawa, S. and Yoshimi, Y. : Dynamic soil properties obtained from strong motion records, Proceedings of the 12th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, 1989, pp.2015-2018.
- 17) Boore, D. M., Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N. A. : Orientation-Independent Measures of Ground Motion, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, 2006, pp.1502-1511.
- 18) 松岡昌志、若松加寿江、藤本一雄、翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定、土木学会論文集、No.794/I-72、2005、pp.239-251.
- 19) 鷺谷威、西村卓也、畑中雄樹、福山英一、Ellsworth, W. L. : 2000年鳥取県西部地震に伴う地殻変動と断層モデル、地震2、54、2002、pp.523-534.
- 20) 国土地理院：中国・四国・九州地方の地殻変動、地震予知連絡会会報、66、2001、pp.523-534.
- 21) 国土地理院：平成15年4月～5月の地殻変動について、
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003-0606.html>
- 22) Honda, R., Aoi, S., Morikawa, N., Sekiguchi, H., Kunugi, T. and Fujiwara, H. : Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, 56, 2004, pp.317-322.
- 23) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：紀伊半島南東沖の地震活動の評価、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_kiihantou/index.htm
- 24) Honda, R., Aoi, S., Morikawa, N., Sekiguchi, H., Kunugi, T. and Fujiwara, H. : Ground motion and rupture process of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, 57, 2005, pp.527-532.
- 25) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：釧路沖の地震活動の評価、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04nov_kushiro/index.htm
- 26) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：2004年12月の地震活動の評価、
<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05jan/index.htm>
- 27) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：2005年3月20日福岡県西方沖の地震の評価、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_fukuoka/index.htm
- 28) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：2005年8月16日宮城県沖の地震の評価、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05aug_miyagi/index.htm
- 29) 国土地理院：平成19年(2007年)能登半島地震に伴う地殻変動(第2報)、
<http://www.gsi.go.jp/cais/HENDOOU-hendou27.html>
- 30) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成19年(2007年)新潟県中越沖地震の評価(主に断層面に関する評価)、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jan_chuetsu_oki/index.htm
- 31) 国土地理院：平成20年5月8日茨城県沖の地震活動に伴う地殻変動、
<http://www.gsi.go.jp/cais/HENDOOU-hendou33.html>
- 32) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の評価、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jun_iwate_miyagi2/index.htm
- 33) Takemura, M., Kato, K., Ikeura, T. and Shima, E. : Site amplification of S-wave from strong motion records in special relation to surface geology, J. Phys. Earth, 39, 1991, pp.537-552.

(受理：2011年4月15日)
(掲載決定：2011年6月29日)

Improvement of Method for Estimation of Site Amplification Factor Based on Average Shear-wave Velocity of Ground

YAMAGUCHI Makoto ¹⁾ and MIDORIKAWA Saburoh ²⁾

1) Member, Assistant Manager, Risk Evaluation Dept., Non-Life Insurance Rating Organization of Japan, M. Eng.

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

ABSTRACT

The empirical equation for estimating the site amplification factor of ground motion by the average shear-wave velocity of ground (AVS) is examined. In the existing equations, the coefficient on dependence of the amplification factor on the AVS was treated as constant. The analysis showed that the coefficient varies with change of the AVS for short periods. A new estimation equation was proposed considering the dependence on the AVS. The new equation can represent soil characteristics that the softer soil has the longer predominant period, and can make better estimations for short periods than the existing method.

Key Words: Site Amplification Factor; Average Shear-wave Velocity; Frequency Characteristics; Strong-motion Records