

地盤非線形性を考慮した振幅依存型のサイト増幅度

藤川 智
(技術研究所)

Amplitude-dependent Site Factor with Consideration of soil nonlinearity

by Satoshi Fujikawa

Abstract

A new simple method for estimating the amplitude-dependent site amplification factor (that takes soil nonlinearity into account) is developed with the objective of precisely predicting ground motions for seismic hazard analysis. The ground motion indexes for the amplification factor are PGA, PGV, and 5%-damped acceleration response spectra. The proposed method leads to a reduction of the variability of the observed records compared to the conventional method that does not incorporate amplitude dependency.

概要

地震ハザード評価の高精度化を目指して、主として地盤非線形化に起因する地震動振幅依存型のサイト増幅度の評価手法を提案した。増幅度の対象とする地震動指標として、最大加速度、最大速度、5%減衰の加速度応答スペクトルとした。構築した手法による増幅度の予測値に対する観測記録のばらつきは、振幅依存性を考慮しない従来手法による場合と比較すると、地盤が軟弱で地震動振幅が大きいほど低減することを示した。

§ 1. はじめに

様々な地震を対象とする地震ハザード評価では、設定した超過確率に対応する地震動強度の期待値とそのばらつき(標準偏差)を考慮するために、距離減衰式を用いた経験的手法(簡便法¹⁾とも呼ばれる)で地震動予測が行われることが多い。この手法では、距離減衰式により基盤(基準)地震動を評価し、サイト補正係数としての増幅度をかけることで、地表地震動を予測する。簡便法による地震動評価の精度は、距離減衰式による基準地震動のばらつきに加え、対象サイトの増幅度のばらつきに依存する。したがって、予測地震動の高精度化には、増幅度の高精度化(ばらつきの低減²⁾)が重要な因子となる。

初期の研究では、地盤種別などの定性的な地盤指標を用いて増幅度が評価されていたが、その後、表層の平均S波速度など、より物理的な地盤指標の関数として増幅度が評価されている。近年では、これらの地盤指標を用いて、地盤の非線形化を考慮した増幅度の評価手法が提案され、強震時の高精度化が試みられている^{3),4),5),6),7)}。

増幅度評価手法の構築方法を分類すると、地震応答解析の結果を利用するもの^{3),4)}と、観測記録の分析によるものに分類できる。前者は、等価線形解析な

どによりモデル地盤に対する応答解析を多く実施し、その結果を用いて、増幅度の回帰式を構築する方法である。これらの数値解析に基づく方法は、大振幅領域のデータ不足を補うのに有効な方法であるが、別途観測記録の取得を待って検証を行う必要がある。これに対し、観測記録の分析に基づく方法^{6),7)}は、記録が得られた地盤条件と地震動振幅の範囲では、そのまま有効なものである。

上述の分類では、本研究は観測記録を用いた手法であり、さらに、距離減衰式による地震動を基準地震動として用いている。同様の検討はChoi *et al.*⁷⁾が実施しているが、それとの違いと特徴は、まず、国内観測記録のみを用いたことと、加速度応答スペクトル(Sa(T))以外に、最大加速度(PGA)と最大速度(PGV)について検討したことである。さらに、後述の統計的分析において、震源から見たサイト位置における距離減衰式からの乖離の傾向をランダムな変数としてモデル化したことにある。これにより、ばらつきの要因を細かく分離した。

増幅度の評価手法の高度化においては、地震動予測の簡便さを失わないように、できる限り単純な評価式が要求される。さらに、従来手法に比べ高度化した手法により、地震動記録のばらつきが低減されることが望まれる。しかし、既往の研究では、新し

い評価式によるばらつきは必ずしも低減していないか、そもそも言及されていないものもある。ばらつきが低減されない理由は、評価式が複雑になり、新たなばらつきの要因が増大することにあると考えられる²⁾。

本研究では、地震ハザード評価などに用いる増幅度の適用範囲拡大と高精度化のため、既存の距離減衰式から得られる地震動を基準とし、振幅依存性を考慮した増幅度の簡易な評価手法の新たな提案を行った。

以下、まず増幅度の振幅依存性を、近傍に位置する2つのサイトの地震観測記録から例示する。この事例による示唆から、国内の様々な地震で全国で得られた観測記録を基に、増幅度の評価手法を構築した。

§ 2. 増幅度の振幅依存性の事例

本章では、表層地盤の硬軟が異なる近傍2地点の強震観測記録を基に、増幅度の振幅依存性を例示する。対象とする観測点は、防災科学技術研究所のK-NET輪島(ISK003、以下本章ではK-NET)と、気象庁の輪島市鳳至町(以下本章ではJMA)の2地点である。これらは東西に1km程度しか離れていないが、2007年能登半島地震では、地表地震動に明らかに差が見られた。K-NETサイトは硬質地盤であり、表層20mの平均S波速度は約480m/sである。それに対し、JMAサイトは、N値が10以下のシルト質層が20m以上ある軟弱地盤である。このような表層地盤の差異が地震動増幅に影響したことが推察される。

軟弱なJMAの最大加速度(PGA)と最大速度(PGV)の増幅度と計測震度の増分を、硬質なK-NETを基準にして評価した。つまり、PGAとPGVの増幅度を、JMAの地表地震動とK-NETの地表地震動の比で定義する。また、計測震度増分は2地点の計測震度の差分として定義する。

図-1には、2007年能登半島地震や2007年新潟県中越沖地震などを含む、両サイトで同時に得られた24地震の観測記録を基に、増幅度または震度増分と入力地震動(K-NETの地震動)との関係を示す。ここで、PGAとPGVの増幅度は水平動を成分ごとに算出している。また、計測震度は水平2成分のみから算出した。K-NETサイトに対するJMAサイトの増幅度は、1~5倍程度の値を示している。また、震度増分は0.5~1.5程度であり、硬質なK-NETサイトに対して、軟弱なJMAサイトがよく揺れることを表している。

ここで特徴的なのは、入力地震動レベルが大きくなるに従い、増幅度や震度増分が低減する振幅依存性が見られることである。特に、加速度増幅度と震

度増分はそれが顕著である。

2地点の観測波形のフーリエスペクトル比を図-2に示す。K-NETの計測震度の大きさに分類して示した。計測震度が大きくなるほど、短周期成分が低減し、卓越周期が長周期化する傾向が見える。これより、PGA増幅度や震度増分の振幅依存性は、主として表層地盤の非線形化の影響と考えられる。

以上の事例より、PGAなどの地震動の増幅度には、振幅依存性があり、この効果を取り込むことが、簡便法による地震動予測の高精度化につながるものと考えられる。

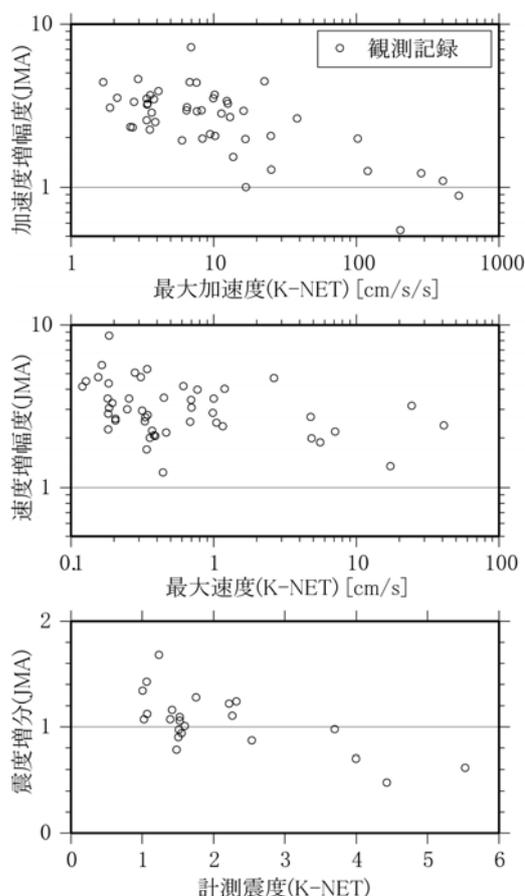


図-1 PGA、PGVの増幅度と震度増分

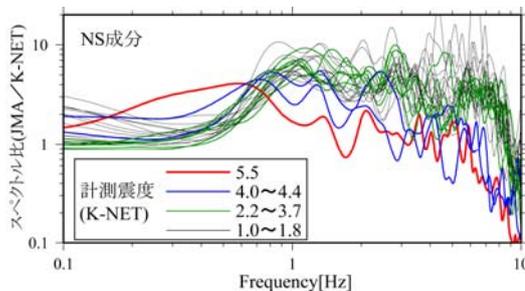


図-2 2サイトのフーリエスペクトル比

§ 3. 増幅度の分析に用いるデータ

本研究では、地震観測記録の分析に基づいて増幅度評価手法を構築する。前章で示したように、あるサイトの近傍に硬質地盤のサイトが存在する場合には、そのサイトの地震動を基盤地震動とみなして、増幅度の振幅依存性を検討できる(Reference site approach⁸⁾)。しかし、そのようなサイトは全国で見ても限られており、様々な地盤条件のサイトの増幅度を分析することは不可能である。

それに対し本研究では、各観測点における増幅度を、既存の距離減衰式を基に観測記録から算出する(Non-reference site approach⁸⁾)。この方法は、既往の距離減衰式に、観測記録の分析から得られた増幅度の期待値とそのばらつきを容易に組み込める⁸⁾という点で適用性が高い。

用いるデータは、同時に多くの地点で記録が取得され、小振幅から大振幅までの地震動が含まれている地震記録を用いることが望まれる。ここでは、1997年3月から2008年9月までに、防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netで観測記録が得られた55地震を対象とした。これらは、モーメントマグニチュード M_w が5.5以上、震源深さが100km以内、観測された最大震度が5弱以上の地震を基本とし、最大震度4の地震も一部含めた。図-3に地震の震央位置と観測点位置を示す。

図-4に、地震の規模、深さ、サイトの震源距離の関係を示した。 M_w 7.9の2003年十勝沖地震だけは、図-3に示す断層面の大きさ^{9),10)}を考慮し、断層最短距離を用いた。他の地震は点震源として震源距離を求めた。

観測点は、表層30mの平均S波速度(AVS30)が600m/s以下で、震央距離が300km以内を対象とした。対象とする観測点数は1380(K-NETは908、KiK-netは472)である。観測記録の総数(延べの観測点数)は12785となる。K-NET地点は深さ20mまでしか情報が与えられていないため、Kanno *et al.*¹¹⁾による、AVS30と表層20mの平均S波速度(AVS20)の関係式を用いて、AVS20からAVS30を推定した。20m未満のS波速度しかない場合には、最も深い位置のS波速度が深度20mまで続くと仮定してAVS20を設定した。平均S波速度の算出は、層厚を伝播時間の総和で割った値と定義した。図-5に観測点のAVS30のヒストグラムを示した。

観測記録はすべて公開されている時刻歴波形を用い、0.1Hzのハイパスフィルター処理を一律に実施した。地震動の指標として、最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)、および5%減衰の加速度応答スペクトル $S_a(T)$ (周期 $T=0.1s, 1s$)を対象とし、PGAとPGVは、水平二成分の観測波形から水平面内の最大値を

求めた。また、加速度応答スペクトル $S_a(T)$ は、水平二成分それぞれの応答波形から、水平面内で合成したときの最大応答値を算出した。

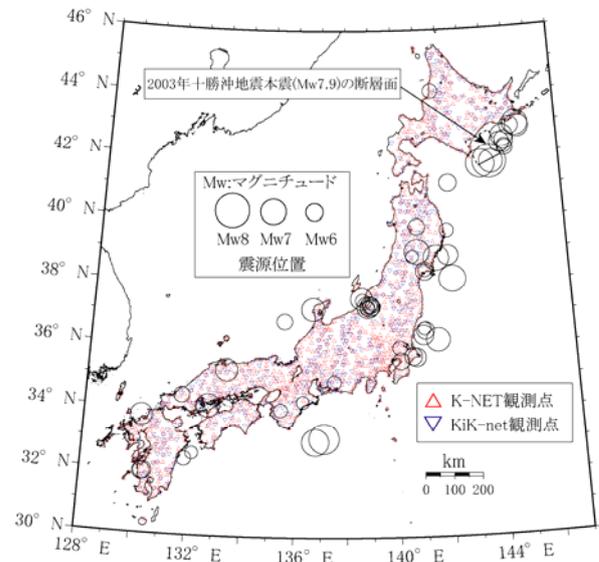


図-3 対象とする地震の震央位置と観測点位置

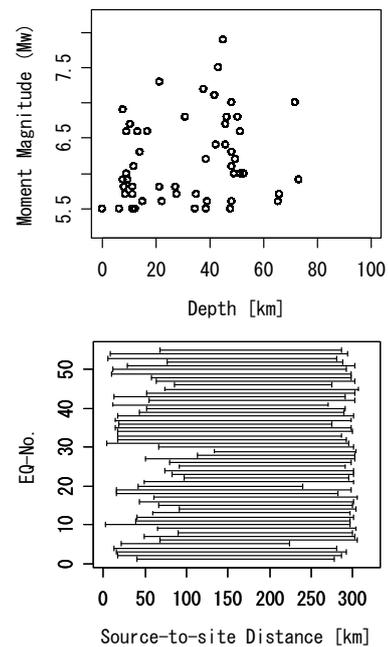


図-4 対象地震の規模、震源深さ、震源距離

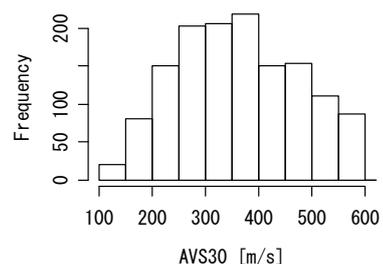


図-5 観測地点のAVS30の分布

§ 4. 増幅度の分析

各観測点における増幅度は、既存の距離減衰式を基に観測記録から算出した。本研究では、Kanno *et al.*¹¹⁾による距離減衰式を用いた。これは、国内記録を中心に比較的新しいデータが用いられていることと、基準とする地盤が AVS30 で定量的に与えられていることを考慮したためである。Kanno *et al.*に基づき、AVS30=400m/s 相当の地盤を基準地盤とした。

距離減衰式を基にした見かけの増幅度に対して、次のようなばらつきの要因を考慮して、正味の増幅度を評価する。表層地盤の硬軟を考慮するための AVS30 に関する補正と、地震ごとの距離減衰式からの系統的な乖離(イベント項)、さらに地震動の方位依存性や伝播経路特性などにより、震源距離と震源からサイトの方位により距離減衰式から乖離する傾向(サイト位置の項)を考慮した。距離減衰式を基準とする見かけの増幅度 F_0 を式(1)でモデル化する。統計的な処理には、最尤法に基づいた線形混合モデル¹²⁾を適用する。線形混合モデルでは、固定値として表す因子(固定効果)と、確率分布を仮定したランダムな因子(変量効果)の線形結合でモデル化される。線形混合モデルの利点は、固定効果のみの分散分析と異なり、因子のグループのデータ数に粗密がある場合でも適用可能であることである。地震学や地震工学の分野では、距離減衰式の導出において適用例が多くあり^{13),14)}、イベント項と残差をランダムな変数としてモデル化することが多い。

$$\begin{aligned} \log F_{0ij} &= \log(Sg_{ij} / Sr_{0ij}) \\ &= \alpha + \beta \cdot \log(AVS30_j / 400) + \eta_i + \delta_{ik} + \varepsilon_{ijk} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 F_{0ij} は距離減衰式を基準とする見かけの増幅度、 Sg_{ij} は地表地震動(観測記録)、 Sr_0 は距離減衰式による基準地震動(AVS30=400m/s を基準)、 α は定数(固定効果)、 β は AVS30 と増幅度を両対数軸上で直線関係と仮定⁵⁾した場合の勾配(固定効果)、AVS30_j はサイト j の表層 30m の平均 S 波速度[m/s]、 η_i は地震 i のイベント項(変量効果)、 δ_{ik} は地震 i の領域 k のサイト位置の項(変量効果)、 ε_{ijk} は残差、 \log は常用対数(\log_{10})を表す。また、 η_i 、 δ_{ik} 、 ε_{ijk} は互いに独立で対数正規分布に従うと仮定する。式(1)の残差 ε が各項の影響を取り除いたあとの増幅度を表す。

サイト位置の項 δ_{ik} を評価するための領域分割を図-6に示す。震源を原点とし、半径方向(震源距離)を 50km おきに、円周方向(震央から遠い方の幅)に分割した。 δ_{ik} はサイトごとに評価することも可能であるが、領域ごとの評価とした。これは、後述のように、式(1)の分析において、軟弱地盤サイトを

を除いて評価することから、除かれたサイトの δ_{ik} を周辺のその他のサイトから評価できるようにするためである。ここでは、 δ_{ik} をすべて互いに独立と仮定している。地震動の空間的な相関に関する既往の研究によると、観測点間の距離が 50km 程度離れるとほぼ相関はなくなる¹⁶⁾ことを参考に分割幅を設定した。

本研究では、最終的には増幅度の振幅依存性を分析する。このため、AVS30 が広範囲のデータを対象とすると、特に軟弱な地盤では非線形化の影響を含む場合があり、分析結果に影響することが考えられる。このため、第一段階として式(1)の分析は、AVS30 が 300~550m/s の範囲のデータのみで行った。その後、得られた式(1)の各項の係数を考慮して、次式からすべてのデータに対して増幅度 F と基準地震動 Sr を再評価した。この段階では、増幅度 F には、AVS30 の効果を含めていない。

$$\begin{cases} \log F_{ij} = \log F_{0ij} - (\mu + \eta_i + \delta_{ik}) \\ \log Sr_{ij} = \log Sr_{0ij} + \mu + \eta_i + \delta_{ik} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 F は修正した増幅度、 Sr は修正した基準地震動、 μ は見かけの増幅度 F_0 の全平均値を表す。

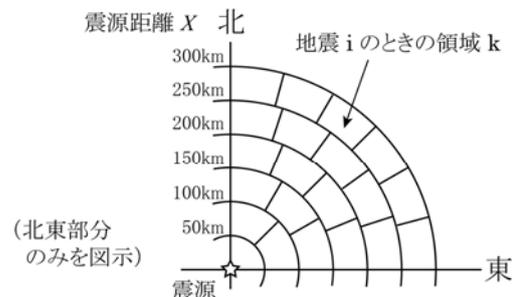


図-6 サイト位置の項を考慮するための領域分割

PGA の場合の、見かけの増幅度 F_0 と修正した増幅度 F の比較例を図-7に示す。距離減衰式を基準とする見かけの増幅度は全体的に増幅度が 1 より大きい傾向を示すが、式(2)による再評価で、平均的には増幅度が 1 程度にばらつくように修正されている。

また、図-8には、PGA の場合のすべてのデータを対象に、各変量効果を考慮する前後の増幅度を示す。各変量効果を考慮することで、対応するばらつきが分離され、同図の最下段に示す最終的な増幅度のばらつきは小さくなっている。同時に、右列の図の横軸が示す基準地震動も修正されていることが分かる。しかし、震源距離が小さいデータや基準地震動が大きい領域では、平均的に増幅度 1 からのずれが大きくなっている部分がある。これらのデータに

は、震源近傍の断層上盤効果や指向性効果などが含まれている可能性がある。本研究ではこのような震源近傍の現象を物理的にモデル化していない。変量効果としてサイト位置の項を導入しているが、震源近傍では相対的にデータが少ないため、ばらつきが除ききれていないものと考えられる。

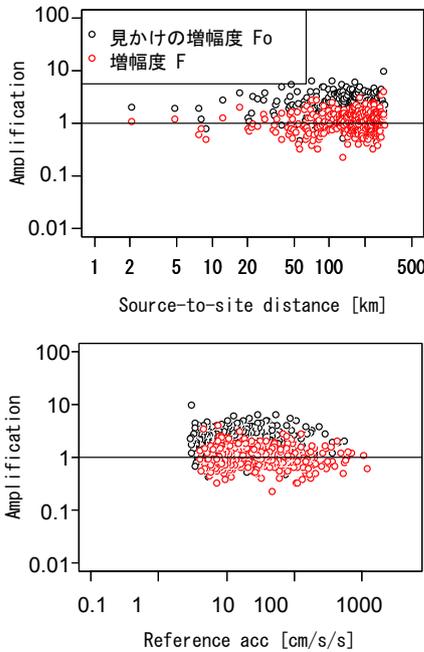


図-7 PGAの増幅度(2000年鳥取県西部地震の例)

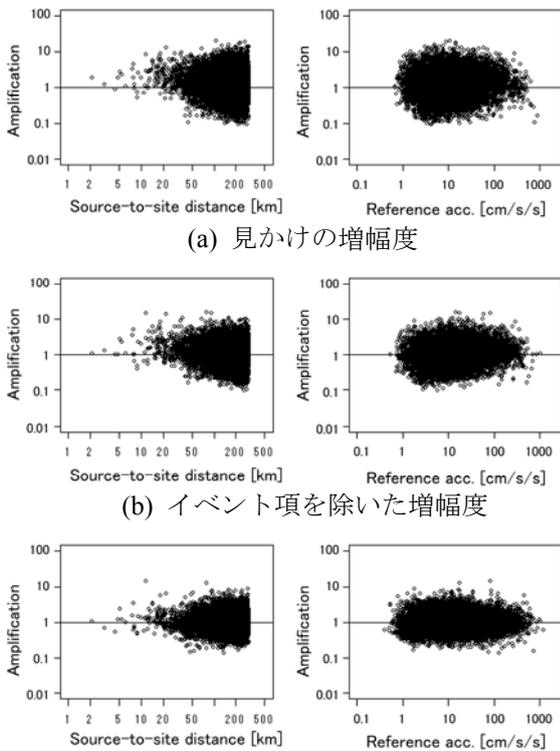


図-8 変量効果の影響(PGAの場合)

式(1)で変量効果としてモデル化したイベント項とサイト位置の項に対応する増幅度のばらつきは、それぞれ独立と考えているため、次の関係式で表される。

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_E^2 + \sigma_S^2 + \sigma_R^2 \quad (3)$$

ここで、 σ_E はイベント項に対応する「地震間のばらつき」¹⁵⁾を、 σ_S はサイト位置の項に対応する伝播特性に関するばらつきを、 σ_R は残差に対応するばらつきを示す。表-1には、これらのばらつきの値を示す。

表-1 観測値のばらつき

| | σ_E | σ_S | σ_R |
|------------|------------|------------|------------|
| PGA | 0.177 | 0.192 | 0.228 |
| PGV | 0.121 | 0.172 | 0.236 |
| Sa(T=0.1s) | 0.243 | 0.224 | 0.246 |
| Sa(T=1s) | 0.140 | 0.187 | 0.296 |

地震動指標の種類により、ばらつきの大きさはやや異なる。サイト位置の項に対応するばらつき σ_S は比較的大きく、これは認識論的不確定性に分類されると考えられる。地震動の伝播の物理的なモデル化や伝播経路特性の地域性を考慮することで、このばらつきを低減することが将来的な課題と考えられる。

§ 5. 振幅依存型の増幅度の評価手法

前章で得られた増幅度 F の基準地震動 S_r に対する振幅依存性について検討する。まず、観測点のAVS30の大きさにより区分し、区分ごとに地震動と増幅度が両対数軸上で直線関係と仮定して、その勾配と切片を評価した。図-9には、PGAの場合の、AVS30の大きさで区分したグループ(ある幅をもち重なりを許した移動平均)ごとに、増幅度と基準地震動の関係の一部を示した。同図には増幅度と基準地震動の回帰直線も示した。比較的軟弱な地盤のグループでは、増幅度が全体的に大きく、さらに基準地震動の増大に伴い、増幅度が低減する傾向が明瞭に見られる。地盤が硬質になるにつれて、増幅度が全体的に小さくなり、基準地震動の増大に伴う増幅度の低減傾向は見られなくなる。一方、AVS30が400m/s以上のグループでは、むしろ基準地震動の増大に伴い、やや増幅度が大きくなる傾向が見られる。詳細な原因は不明であるが、AVS30が比較的大きな地盤で表層に薄い軟弱層が存在する場合の増幅効果や、薄い表層が非線形化し地盤インピーダンス比が増大する

ことに伴う増幅度の増大効果¹⁷⁾などが考えられる。

AVS30 の区分ごとの対数平均と、増幅度と基準地震動関係の回帰式の勾配または切片の関係を図-10 に示す。AVS30 の対数と勾配または切片はほぼ直線関係にある。これより、増幅度と基準地震動の関係を次式の単純な式でモデル化する。

$$\begin{aligned} \log F_{ij} &= k_{1j} + k_{2j} \cdot \log Sr_{ij} + \varepsilon_{ij} \\ k_{1j} &= a_1 + b_1 \cdot \log AVS30_j \\ k_{2j} &= a_2 + b_2 \cdot \log AVS30_j \end{aligned} \quad (4)$$

上式の a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 は回帰分析から評価し、その値は図-10 中に示した。 ε_{ij} は残差を表す。

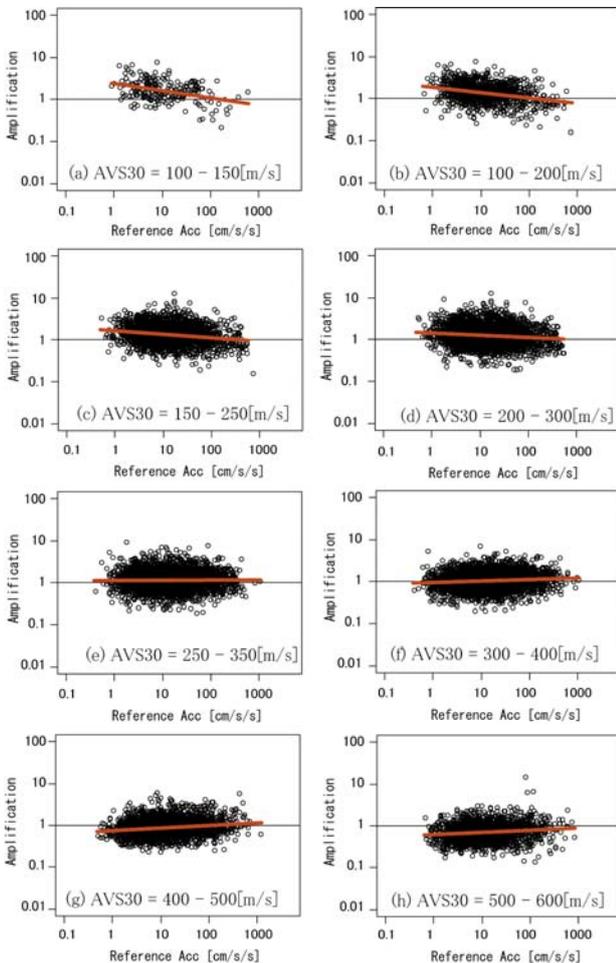


図-9 AVS30 の区分ごとの増幅度と基準地震動の関係の例 (PGA の場合)

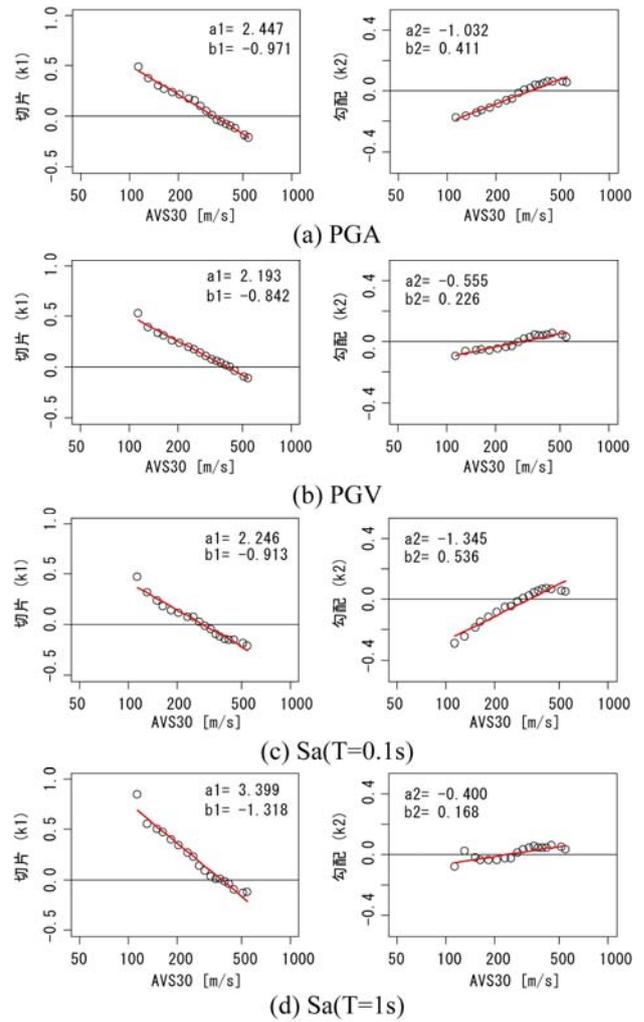


図-10 増幅度～基準地震動関係の回帰直線の切片または勾配と AVS30 の関係

以上より、対象サイトの AVS30 のみから、基準地震動に対する地盤増幅度を評価することができる。図-11 には、増幅度の観測値と式(4)による計算値の比較を示す。

図-12 は、構築した手法による振幅依存型の増幅度を考慮した後のばらつき σ_{R-N} と、振幅に依存しない増幅度の場合のばらつき σ_{R-L} の比を、基準地震動と AVS30 の区分ごとに示したものである。振幅に依存しない増幅度は、AVS30 と増幅度を両対数軸上で直線関係でモデル化した増幅度を表す。比較的短周期成分を反映する PGA と Sa(T=0.1s) の場合には、AVS30 が小さく基準地震動が大きいほど、振幅依存型モデルによるばらつきの低減効果が大きいことが分かる。AVS30=100-250m/s の地盤では、最大で20%~30%のばらつきの低減が見られる。

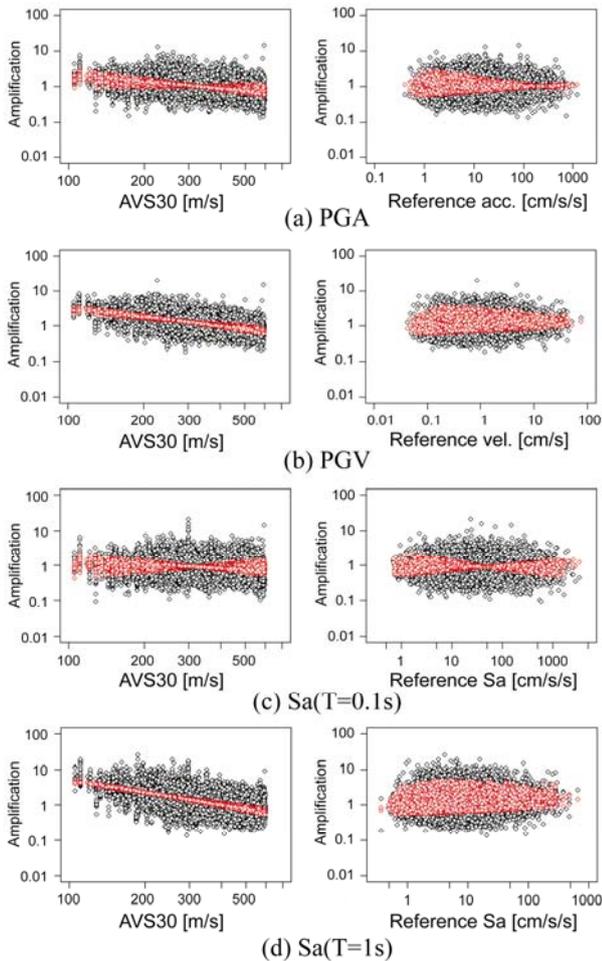


図-11 観測記録に基づく増幅度(黒丸○)と予測した増幅度(赤丸○)

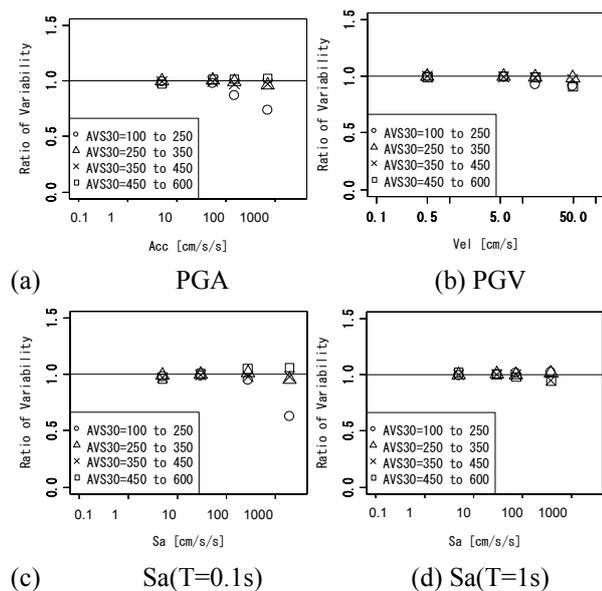


図-12 ばらつき比 $\sigma_{R-N} / \sigma_{R-L}$

§ 6. まとめ

本研究では、簡便法による地震ハザード評価などに用いる地盤増幅度の高精度化のため、地震動振幅に依存する増幅度の簡易な評価手法の提案を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 地表観測地震動と距離減衰式を基にした見かけの増幅度から、統計的手法を用いて、主として地盤増幅度に起因すると考えられる増幅度を抽出した。このとき、地盤増幅度以外のばらつきの因子として、地震ごとのイベント項に加え、地震動の方位依存性や伝播経路特性など影響を考慮したことに特徴がある。
- (2) 比較的短周期の地震動成分を反映するPGAの増幅度と、 $S_a(T=0.1s)$ の増幅度には、地盤非線形化に起因すると考えられる振幅依存性が明瞭に見られた。これらを基に、増幅度と基準地震動の関係をモデル化し、基準地震動と地盤パラメータ(AVS30)から、振幅依存型の増幅度を簡易に評価できる手法を構築した。
- (3) 構築した手法による増幅度の予測値に対する観測記録のばらつきと、振幅依存性を考慮しない増幅度に対する観測記録のばらつきの比較を行った。振幅依存性を考慮した場合には、 $AVS30=100-250m/s$ の比較的軟弱な地盤では、地震動振幅が大きな領域で、20%~30%程度ばらつきが低減することを示した。

謝辞

本研究の推進においては、岐阜大学流域圏科学研究センター杉戸真太教授にご指導いただきました。地震観測データは、気象庁(気象業務支援センター：95型強震計波形データ)による観測記録、および(独)防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測記録を利用させていただきました。また、統計解析には、統計ソフト R¹⁸⁾を使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 防災科学技術研究所: 地震動予測地図の工学利用—地震ハザードの共通情報基盤を目指して—, 防災科学技術研究所資料, No. 258, 2004.
- 2) Strasser, F., N. Abrahamson, and J. Bommer: Sigma: Issues, Insights, and Challenges, *Seismological Research Letters*, Vol.80, No.1, pp.40–56, 2009.
- 3) 杉戸真太, 亀田弘行, 廣瀬憲嗣: 工学的基盤面と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数, *土木学会構造工学論文集*, Vol.32A, pp.789–799, 1986.
- 4) Walling, M., W. Silva, and N. Abrahamson: Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models, *Earthquake Spectra*, Vol 24, No.1, pp.243–255, 2008.
- 5) Midorikawa, S., M. Matsuoka, and K. Sakugawa: Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chi ba-ken-toho-oki, Japan earthquake, 9th Japanese earthquake engineering symposium, pp.E085–E090, 1994.
- 6) 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*, 第6巻, 第1号, pp.11–22, 2006.
- 7) Choi, Y., and J. Stewart: Nonlinear site amplification as function of 30m shear wave velocity, *Earthquake Spectra*, Vol.21, No.1, pp 1–30, 2005.
- 8) Stewart, J., A. Liu, and Y. Choi: Amplification factors for spectral acceleration in tectonically active regions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, No.1, pp.332–352, 2003.
- 9) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi, and H. Fujiwara: 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, pp.317–322, 2004.
- 10) 渡辺基史, 藤原広行, 佐藤俊明, 早川崇, 石井透: 断層破壊過程の複雑さの度合いが長周期地震動予測結果に及ぼす影響に関する検討, *地震学会秋季大会*, B037, 2004.
- 11) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp. 879–897, 2006.
- 12) Pinheiro, J., and D. Bates: *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*, Springer, New York, NY, 528 pp, 2000.
- 13) Brillinger, D., and H. Preisler: An exploratory analysis of the Joyner-Boore attenuation data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74, pp.1441–1450, 1984.
- 14) Abrahamson, N. A., and R. R. Youngs: A stable algorithm for regression analyses using the random effects model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, pp.505–510, 1992.
- 15) Joyner, W. B., and D. M. Boore: Methods for regression analysis of strong-motion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, No 2, pp.469–487, 1993.
- 16) 高田毅士, 下村哲人: 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, *日本建築学会構造系論文集*, 第565号, pp. 41–48, 2003.
- 17) 佐藤智美, 川瀬博: 堆積層による地震動の増幅, *地震2*, 第61巻特集号, p.S461, 2009.
- 18) R Development Core Team: *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>, 2005.