

振幅依存型の地盤増幅度の評価法

藤川 智¹・杉戸 真太²

¹正会員 清水建設技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

E-mail: s.fujikawa@shimz.co.jp

²正会員 岐阜大学流域圏科学研究センター (〒501-1112 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

E-mail: sugito@gifu-u.ac.jp

地震ハザード評価などにおいて、距離減衰式と共に用いる地盤増幅度の高精度化のため、主として地盤非線形化に起因する振幅依存型の増幅度の評価手法を提案した。本手法では、表層地盤から得られる1つの地盤情報のみから振幅依存型の増幅度が簡易に得られることに特徴がある。地盤情報として、表層の平均S波速度、またはN値分布から得られる地盤パラメータを用い、最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトルの増幅度について検討した。予測値に対する観測記録のばらつきを、地震動振幅に依存しない従来手法の場合と比較すると、地盤が軟弱で地震動振幅が大きいほどばらつきが低減することを示した。提案する手法は、硬軟さまざなサイトで大振幅領域まで適用でき、地震ハザード評価や簡便な地震動評価の精度向上につながる可能性がある。

Key Words : site amplification factor, soil nonlinearity, average shear wave velocity, SPT N-value, attenuation relation

1. はじめに

地震学や地震工学の発展により、高度な強震動予測手法¹⁾が研究・開発され、想定された地震に対する現実的な地震動波形の予測が可能となっている。一方で、サイト周辺の様々な地震を対象とする地震ハザード評価では、設定され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(地震動波形を評価する詳細法に対して、簡便法²⁾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地盤増幅度(以下、増幅度)をかけることで地表地震動を予測する。最近では、緊急地震速報を利用した地震動予測にも、即時的な予測結果の公表のため、これと同様の手法が用いられている³⁾。

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、対象サイトの地盤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⁴⁾)が重要な因子となる。

距離減衰式と共に用いる増幅度の評価手法に関する研究は多くある。初期の研究では、表層地盤の軟弱さで分類した地盤種別などに対して、地震動の平均的な

増幅度が評価されていた。その後、表層地盤の軟弱さを表す、より物理的な指標として、N値分布から得られる指標(S_n 値⁵⁾)や、表層地盤の平均S波速度などを地盤指標として、平均的な増幅度を評価する方法⁶⁾が提案されている。近年では、これらの定量的な地盤指標を用いて、地盤の非線形化に起因する振幅依存性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。

これらの増幅度評価手法の構築方法を分類すると、まず、数値解析によるものと観測記録の分析によるものに分類できる。数値解析によるものは、モデル地盤に対する等価線形解析などを多く実施し、基盤からの増幅度を算定して、この結果を地盤パラメータなどから予測する回帰式を構築する方法である。杉戸ほか⁷⁾は、N値分布から得られる S_n 値⁵⁾を地盤パラメータとして、基盤から軟弱な地盤への地震動の変換係数(増幅度に相当)の評価式を提案している。これは、増幅度に地盤非線形性を取り入れた先駆的な研究であり、最大加速度、最大速度、および加速度応答スペクトルを対象とし、増幅度の評価式構築には等価線形解析の結果を用いている。その後、ボアホールレー記録を基にした検証⁸⁾を行っているが、大振幅領域のデータ量はほとんどなく、強震時の精度は必ずしも検証されていない。最近では、等価線形解析による同様の検討を

Walling *et al.*⁹⁾が実施しており、地盤指標に表層 30m の平均 S 波速度¹⁰⁾ (AVS30)を用いた増幅度評価式を提案している。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意味からは有効な方法と言えるが、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は、観測記録の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。この方法は、基準とする地震動の定め方によって、2つの手法に分類できる。一つは、対象地点以外の他地点の地震動を基準とする方法(リファレンス-サイト-アプローチ¹¹⁾)と、距離減衰式により評価される地震動を基準とする方法(ノン-リファレンス-サイト-アプローチ¹¹⁾)がある。前者の一つとして、藤本・翠川¹²⁾は、複数の近傍2地点間で得られた地震動の相対的な差異を増幅度として定義し、これらの統計的分析から、最大地動の増幅度を評価している。AVS30と地表最大速度から既往の経験式を用いて地盤の基準ひずみを算定し、その値に応じて最大加速度の増幅度を低減させる方法を提案した。一方、後者の方法として、Choi and Stewart¹³⁾は、既往の距離減衰式を基準とし、AVS30を地盤パラメータとして地盤非線形性を考慮した増幅度の評価式を示した。対象は、加速度応答スペクトルの増幅度である。ノン-リファレンス-サイト-アプローチは、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¹¹⁾という点で適用性が高い。

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⁴⁾。

本研究では、地震ハザード評価などに用いる地盤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、地盤非線形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。本研究は上述の分類では、観測記録を用いたノン-リファレンス-サイト-アプローチに分類される。同様の検討はChoi and Stewart¹³⁾が実施しているが、それとの違いと特徴は以下になる。まず、国内観測記録のみを用い、加速度応答スペクトル($S_a(T)$)以外に、最大加速度(PGA)と最大速度(PGV)について検討した。また、地盤指標としてはAVS30だけでなく、 S_n 値での検討を行った。さらに、後述の統計的分析において、震源と

サイトの相対的位置関係によ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。これにより、全ばらつきから地震間のばらつき¹⁴⁾を除いた、残差に対応するばらつき(地震内のばらつき)を、伝播特性に関するばらつきとその他のばらつきに分離して評価した。また、増幅度の予測値に対する観測記録のばらつきへの影響を、振幅依存性を考慮しない従来手法の場合と比較し定量的に示した。

以下には、観測記録と観測点、記録の分析と増幅度評価式の構築、さらに本手法によるばらつきの評価について示す。

2. 地震観測記録と観測点の地盤情報

本研究で提案する増幅度評価手法は、地震観測記録の分析に基づいて構築する。強震時まで適用可能なものとするため、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-NET¹⁵⁾とKiK-net¹⁶⁾で観測記録が得られた55地震を対象とした。表-1に対象地震の緒元を示す。

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

表-1 対象地震

地震 No.	発生日時 年/月/日/時:分	最大震度	震央位置		震源深さ [km]	地震規模 Mw
			北緯 [度]	東経 [度]		
1	1997/03/16/14:51	5+	34.928	137.525	39.1	5.6
2	1997/03/26/17:31	5+	31.973	130.359	11.9	6.1
3	1997/05/13/14:38	6-	31.948	130.303	9.2	6.0
4	1997/06/25/18:50	5+	34.441	131.666	8.3	5.8
5	1998/09/03/16:58	6-	39.806	140.901	7.9	5.9
6	1999/08/21/05:33	5-	34.031	135.471	65.8	5.6
7	2000/06/03/17:54	5-	35.690	140.746	48.1	6.1
8	2000/06/07/06:16	5-	36.826	135.563	21.3	5.8
9	2000/07/21/03:39	5-	36.529	141.119	49.4	6.0
10	2000/10/06/13:30	6+	35.274	133.349	9.0	6.6
11	2000/10/31/01:43	5-	34.299	136.321	38.7	5.5
12	2001/03/24/15:28	6-	34.132	132.694	46.5	6.8
13	2002/02/12/22:44	5+	36.590	141.083	47.8	5.5
14	2002/10/14/23:12	5-	41.152	142.281	52.7	6.0
15	2002/11/03/12:37	5-	38.896	142.139	45.8	6.4
16	2002/11/04/13:36	5-	32.413	131.869	35.2	5.7
17	2003/05/26/18:24	6-	38.821	141.651	72.0	7.0
18	2003/07/26/00:13	6-	38.434	141.164	11.6	5.5
19	2003/07/26/07:13	6+	38.405	141.171	11.9	6.1
20	2003/09/26/04:50	6-	41.779	144.079	45.1	7.9
21	2003/09/26/06:08	6-	41.710	143.691	21.4	7.3
22	2003/09/26/15:27	4	42.189	144.776	27.3	5.8
23	2003/09/29/11:37	4	42.360	144.553	42.5	6.4
24	2003/10/08/18:07	4	42.565	144.670	51.4	6.6
25	2003/10/09/08:15	4	42.253	144.761	27.7	5.7
26	2003/12/29/10:31	4	42.419	144.756	38.9	6.2
27	2004/08/10/15:13	5-	39.674	142.132	48.1	5.6
28	2004/09/05/19:07	5-	33.033	136.798	37.6	7.2
29	2004/09/05/23:57	5-	33.138	137.141	43.5	7.5
30	2004/10/06/23:40	5-	35.989	140.090	66.0	5.7
31	2004/10/23/17:56	7	37.293	138.867	13.1	6.6
32	2004/10/23/18:03	5+	37.354	138.983	9.4	5.9
33	2004/10/23/18:11	6+	37.253	138.829	11.5	5.7
34	2004/10/23/18:34	6+	37.306	138.930	14.2	6.3
35	2004/10/23/19:45	6-	37.296	138.876	12.4	5.5
36	2004/10/25/06:04	5+	37.330	138.947	15.2	5.6
37	2004/10/27/10:40	6-	37.292	139.033	11.6	5.8
38	2004/11/08/11:15	5+	37.396	139.032	0.0	5.5
39	2005/10/19/20:44	5-	42.946	145.276	48.2	7.0
40	2004/12/06/23:15	5+	42.848	145.343	45.8	6.7
41	2004/12/14/14:56	5+	44.077	141.699	8.6	5.7
42	2005/01/18/23:09	5+	42.876	145.007	49.8	6.2
43	2005/03/20/10:53	6-	33.739	130.176	9.2	6.6
44	2005/04/11/07:22	5+	35.727	140.621	51.5	6.0
45	2005/07/23/16:34	5+	35.582	140.139	73.1	5.9
46	2005/08/16/11:46	6-	38.149	142.278	42.0	7.1
47	2005/10/19/20:44	5-	36.382	141.043	48.3	6.3
48	2006/03/27/11:50	6-	32.602	132.157	34.8	5.5
49	2007/03/25/09:42	6+	37.221	136.686	10.7	6.7
50	2007/07/16/10:13	6+	37.557	138.609	16.8	6.6
51	2007/07/16/15:37	6-	37.504	138.644	22.5	5.6
52	2008/05/08/01:45	5-	36.228	141.608	50.6	6.8
53	2008/06/14/08:43	6+	39.030	140.881	7.8	6.9
54	2008/06/14/09:20	5-	38.882	140.678	6.4	5.5
55	2008/09/11/09:20	5-	41.776	144.152	30.9	6.8

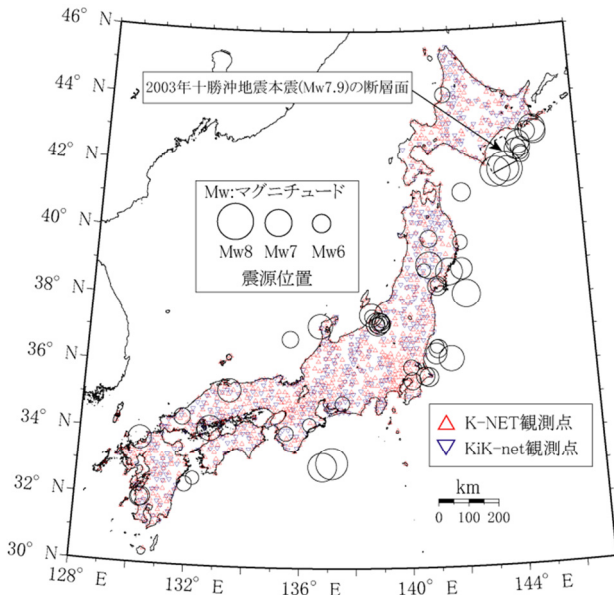


図-1 対象とする地震の震央位置と観測点位置

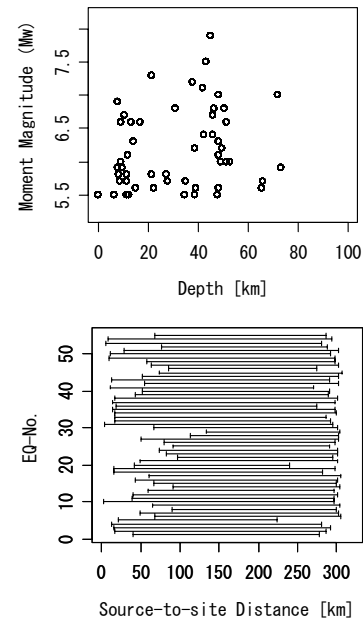


図-2 対象地震の規模 M_w , 震源深さ, 震源距離

上の地震を基本とし、最大震度 4 の地震も一部含めた。データには、一部の地震の余震も含めた。これは、限られた国内記録の中から、広域で同時観測記録が得られた地震を多く用いるためである。地震数で見ると、2003 年十勝沖地震は本震と余震で 7 地震、同様に 2004 年新潟県中越地震は 8 地震である。これらの震源域のデータがやや多いが、2つの地震は地域が異なり、2003 年十勝沖地震の本震と余震はある程度広い範囲に震源域がある。また、個々の地震は、地震規模が異なるため、特定の地震動レベルのデータが多いとは言えない。これらより、極端な地域性の取り込みはないと考えた。

また、図-1 に地震の震央位置と観測点位置を示す。観測点は、AVS30 が 600m/s 以下で、震央距離が 300km 以内を対象とした。全観測点は 1380 点(K-NET は 908 点、KiK-net は 472 点)である。観測記録の総数(延べの観測点数)は 12785 となる。後述のように、地盤パラメータとして S_n 値を用いる場合には、 S_n 値が -0.5 以上の観測点を対象とし、そのとき全観測点数は 797、観測記録の総数は 7231 となる。

図-2 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(No.20)では、図-1 に示す断層面の大きさ^{17),18)}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。

観測時刻歴波形には、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は、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 (周期 $T=0.1s, 0.3s, 1s, 3s$)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 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。

地盤のパラメータとしては、AVS30 と S_n 値を用いた。AVS30 を用いる理由は、既往の研究から地盤の増幅度と相関が高い¹⁰⁾ことが示されており、既往の距離減衰式も AVS30 を地盤パラメータとして基準地盤を設定していることが多いためである。また、 S_n 値を用いた理由は、既存の柱状図に示されることが多い N 値分布から容易に得られるため、地盤情報としての適用性が高いと考えられるためである。 S_n 値は、表層 20m 程度の地盤の軟弱さを表す指標であり、次式で表される⁹⁾。

$$S_n = 0.264 \cdot \int_0^{d_s} \exp(-0.04N(x) - 0.14x) dx - 0.883 \quad (1)$$

上式で、 $N(x)$ は深さ x [m] の N 値、 d_s [m] は地盤資料の深さを表す。 S_n 値は -0.8 ~ 0.8 程度の値を示し、軟弱地盤ほど値が大きい。

K-NET 地点は深さ 20m までしか情報が与えられていないが、Kanno *et al.*¹⁹⁾による、AVS30 と AVS20 の関係式 ($AVS30=19.5+1.13 \times AVS20$)を用いて、AVS20 から AVS30 を推定した。K-NET で 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。 S_n 値を用いる場合は、N 値分布が公開されている K-NET 地点のみを対象とした。図-3 に観測点の AVS30 と S_n 値のヒストグラムを示した。このとき純粋な観測点数を(a)に、観測記録数を(b)に示した。図-4 には用いる地表観測地震動(PGA, PGV, S_a)の分布を示した。

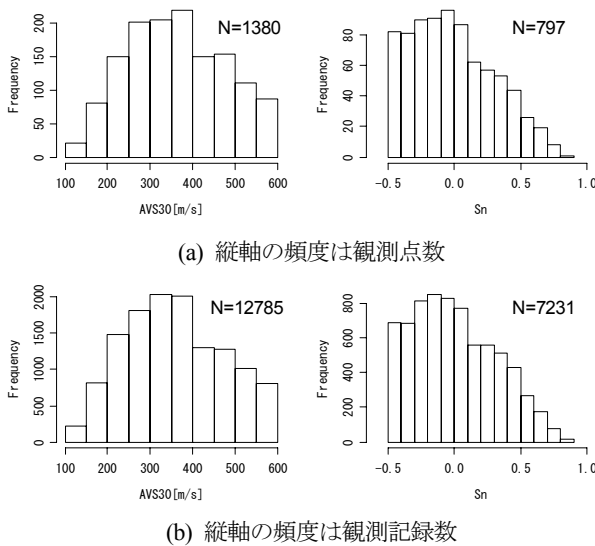


図-3 観測点の AVS30 と S_n 値の分布

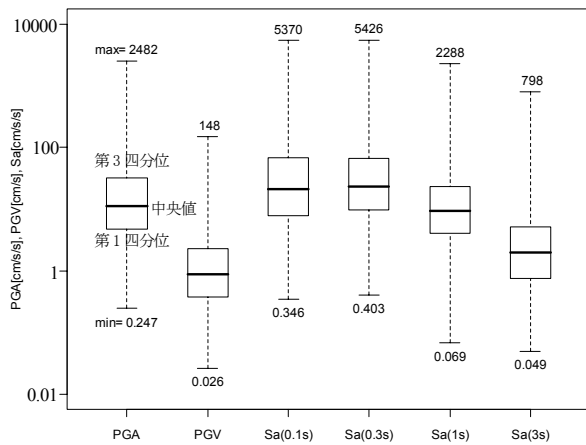


図-4 用いる地表観測地震動の範囲

3. 観測記録の分析

各観測点における増幅度は、既存の距離減衰式を基準に観測記録から算出した。本研究では、距離減衰式として、Kanno *et al.*¹⁹⁾による式を用いた。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.*¹⁹⁾に基づき、AVS30=400m/s 相当の地盤を基準地盤とした。

距離減衰式を基準とした見かけの増幅度に対して、表層地盤の硬軟を考慮するための AVS30 に関する補正と、地震イベントごとの距離減衰式からの系統的な乖離(イベント項)、さらに震源距離と震源からサイトの方位に応じて距離減衰式から乖離する傾向(サイト位置の項)を考慮し、主として表層地盤の影響を含んだ地盤増幅度を算出する。単純に距離減衰式を基準とする見かけの増幅度 F_0 を式(2)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²⁰⁾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^{21),22)}、イベント項をランダムな因子としてモデル化することが多い。

$$\begin{aligned} \log F_{0ij} &= \log(Sg_{ij} / Sr_{0ij}) \\ &= \alpha + \beta \cdot \log(AVS30_j / 400) + \eta_i + \delta_{ik} + \varepsilon_{ijk} \end{aligned} \quad (2)$$

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¹⁰⁾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(2)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。統計処理の過程では、まずイベント項を導出し、それらを考慮した後の残差に対して、サイト位置の項を導出している。このため、用いたデータにおいてイベント項とサイト位置の項は一意に決まり、それらの間にトレードオフはない。

本研究では、地震イベント項は震源周辺に様に影響する応力降下量などの震源特性の効果と考えた。一方、サイト位置の項は、地震波の放射特性や方位依存性など震源からサイトの方角に依存する伝播特性や、地域の距離減衰特性など地震動の伝播特性に起因する効果と考えた。これらの中に相関はないと考え、互いに独立と仮定した。

サイト位置の項 δ_{ik} を評価するための領域分割を図-5に示す。震源を原点とし、半径方向を 50km おきに、円周方向を 79km(震源から遠い方の幅)に分割した。 δ_{ik} はこれらの領域ごとに評価した。これは、後述のように、式(2)の分析において、軟弱地盤サイトを除いて評価することから、それらのサイトの 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} は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²³⁾ことを参考に分割幅を設定した。この参考とした文献のデータは台湾集集地震によるものである。日本国内の広域の観測データでの同様の検討は見当たらないため、今後、国内記録を用いた空間相関に関する分析が

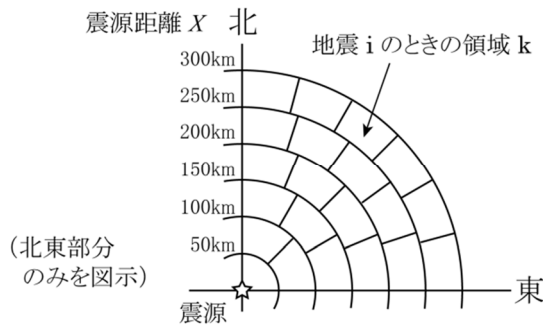


図-5 サイト位置による変量効果を考慮するため、震源距離と方角で分割した領域

課題と考えられる。

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²⁴⁾。このため、第一段階として式(2)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、第二段階として、得られた式(2)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。

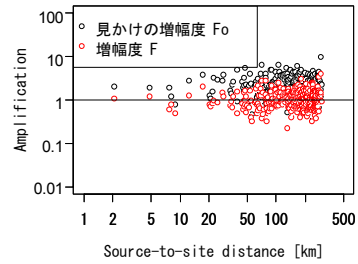
$$\begin{cases} \log F_{ij} = \log F_{0ij} - (\mu + \eta_i + \delta_{ik}) \\ \log Sr_{ij} = \log Sr_{0ij} + \mu + \eta_i + \delta_{ik} \end{cases} \quad (3)$$

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。

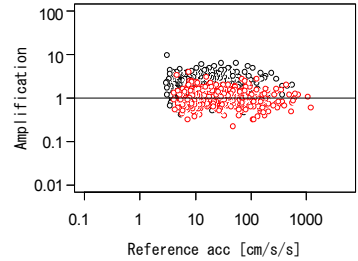
第一段階で用いるデータの AVS30 の範囲(300~550m/s)は、式(2)で基準地震動を AVS30=400m/s 相当の地盤で定義しているため、データ数のバランスを考慮して、これを中心とする範囲を設定した。また、後述する増幅度と基準地震動の関係の分析段階において、あらためて地盤パラメータの影響を取り込むため、第二段階では、増幅度 F には、AVS30 の効果を含めないようにした。このため、式(3)では、式(2)の第1項と第2項の和の平均値、すなわち見かけの増幅度 F_0 の全平均値を用いて、増幅度を修正した。

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-6 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(3)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。同時に、同図の下段の横軸を表す基準地震動も修正されていることがわかる。

また、図-7 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。各段の左図は、震源距離と増幅度の関係を表し、右図

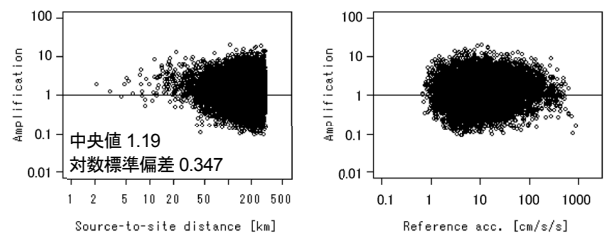


(a) 震源距離と増幅度の関係

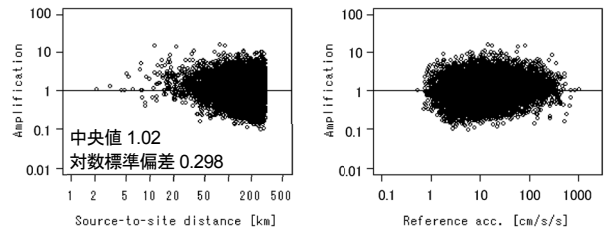


(b) 基準地震動と増幅度の関係

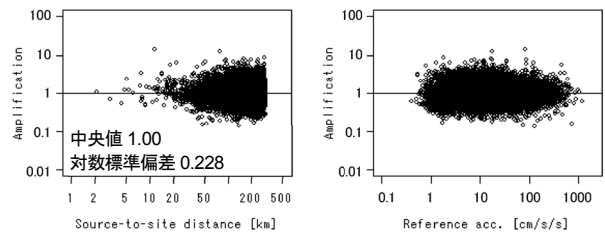
図-6 PGA の増幅度(地震 No.10 の場合)



(a) 見かけの増幅度



(b) イベント項を除いた増幅度



(c) イベント項とサイト位置の項を除いた増幅度

図-7 変量効果の影響(PGA の場合)

は基準地震動と増幅度の関係を表す。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、各段の右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²⁵⁾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ないものと考えられる。

4. 振幅依存型の増幅度の評価手法

(1) AVS30 を用いた増幅度評価式

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-8 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。

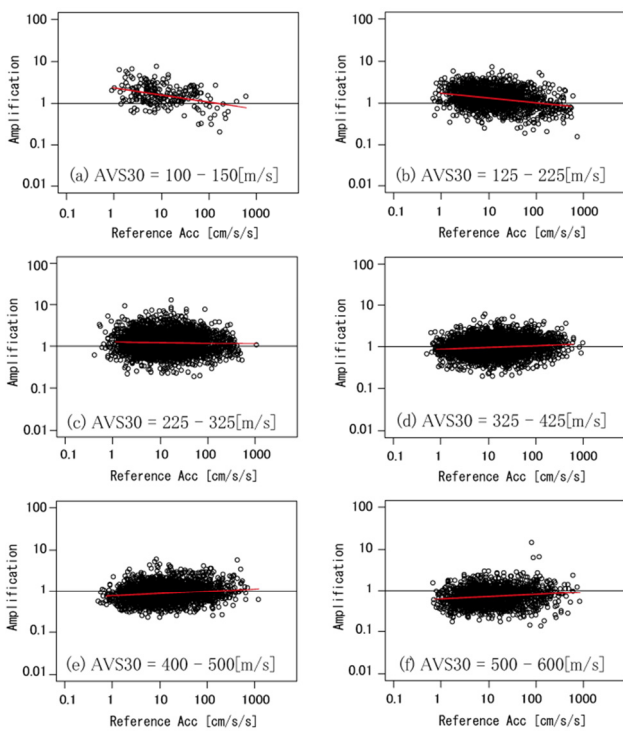


図-8 増幅度と基準地震動の関係の例 (PGA の場合)

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、例えば、比較的硬質な地盤上に薄い軟弱層が存在する構造において、表層の非線形化により地震動が減衰する効果よりも、地盤インピーダンス比が増大することに伴い地震動の増幅が上回るような効果²⁶⁾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-9 に示

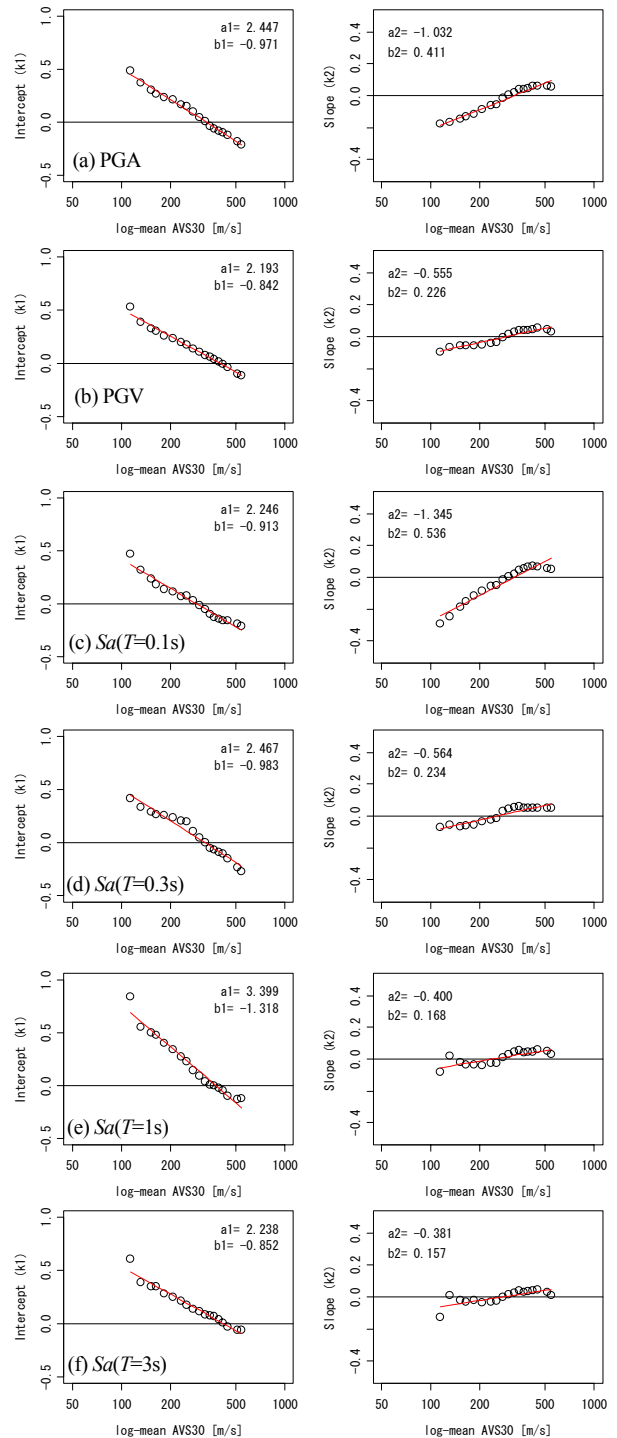


図-9 増幅度～基準地震動関係の切片または勾配と AVS30 の関係

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。

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

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-9中に示した。 ε_{ij} は残差を表す。

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。

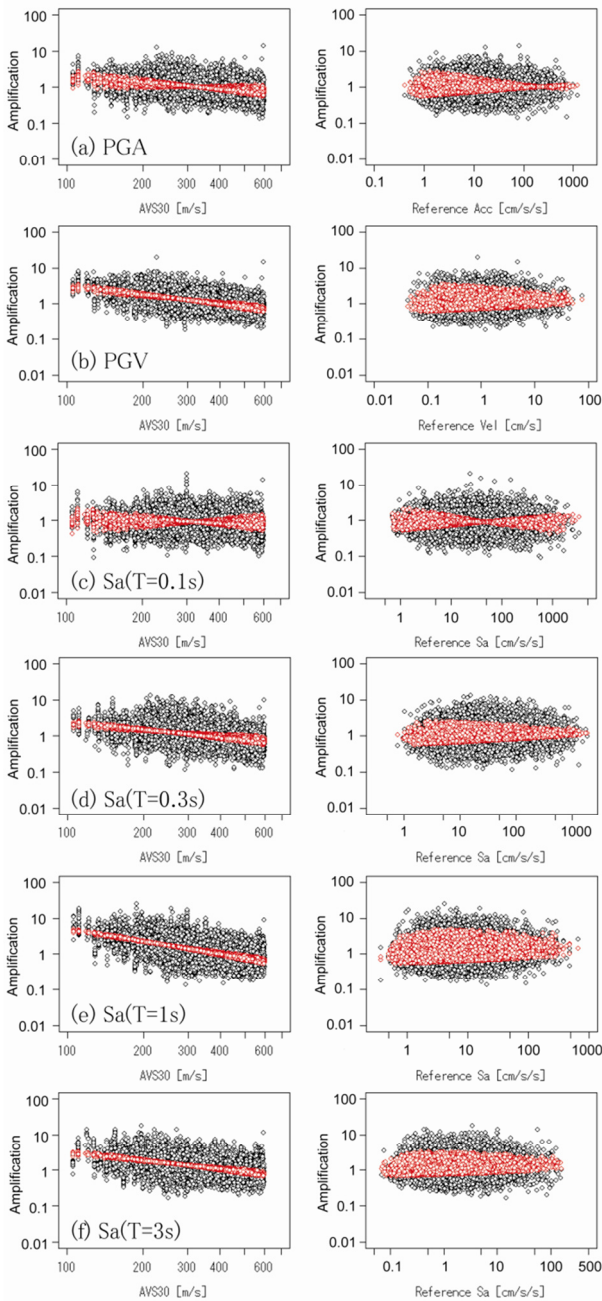


図-10 増幅度の観測記録(黒丸)と AVS30 を用いて予測した計算値(赤丸)

図-10には、増幅度の観測値と式(4)による計算値の比較を示す。同図の各段で、左図は AVS30 と増幅度の関係を表し、右図は基準地震動と増幅度の関係を表す。 $S_d(T=0.1s)$ の右図の場合、計算値が中央部分でくびれたような分布になっている。これは、増幅度と基準地震動の関係を両対数軸上で直線関係を仮定しているためである。つまり、 $S_d(T=0.1s)$ の場合には、軟弱地盤(AVS30が小さい)では、振幅レベルが大きくなるに従い、増幅度が小さくなる傾向を示す。一方、硬い地盤(AVS30が大きい)では、振幅レベルが小さい間は増幅度が小さく、振幅レベルが大きくなるとやや増幅度が大きくなる傾向を示す。このため、軟弱地盤と硬質地盤の増幅度が、基準地震動が 50cm/s 程度でクロスし、くびれたような分布になっている。

(2) S_n 値を用いた増幅度評価式

前節の AVS30 を地盤パラメータとした場合と同様に、K-NET サイトを対象に、N 値から得られる S_n 値を地盤パラメータとした検討を実施した。式(3)から得られた増幅度 F を用い、この増幅度と基準地震動 Sr の関係を S_n 値をパラメータとしてモデル化した。

地盤増幅度 F の振幅依存性について検討する。観測点の S_n 値の大きさにより区分し、区分ごとに基準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。図示は省略するが、AVS30 と同様に、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見られた。一方、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い。

S_n 値の区分ごとの平均と、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-11に示す。 S_n 値と勾配または切片の関係はほぼ直線関係にあることがわかる。これより、増幅度と基準地震動の関係を次式でモデル化する。

$$\begin{cases} \log F_{ij} = k_{1j} + k_{2j} \cdot \log Sr_{ij} + \varepsilon_{ij} \\ k_{1j} = a_1 + b_1 \cdot S_{nj} \\ k_{2j} = a_2 + b_2 \cdot S_{nj} \end{cases} \quad (5)$$

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-11に示した。 S_{nj} はサイト j の S_n 値を、 ε_{ij} は残差を表す。

(3) 既往研究による増幅度との比較

式(4)、式(5)による増幅度と、既往研究による増幅度の比較例を示す。図-12(a)は、地盤パラメータに AVS30 を用いた場合の $S_d(T=0.1s)$ の増幅度を示す。既往研究として、Choi and Stewart¹³⁾による増幅度を示し

た. このとき, 本研究と比較しやすいように, AVS30=400m/s を基準とする増幅度に修正した. 地震動レベルを広い範囲で見たとときの平均的な増幅度は同程度と思われる. 本研究と比べると, Choi and Stewart¹³⁾ の増幅度は振幅依存の勾配の絶対値がやや大きい.

また, 図-12(b)は, 地盤パラメータに S_n 値を用いた場合の PGA の増幅度を示す. 既往研究として杉戸ほか⁷⁾ による増幅度を示す. 基準地盤の整合を図るため,

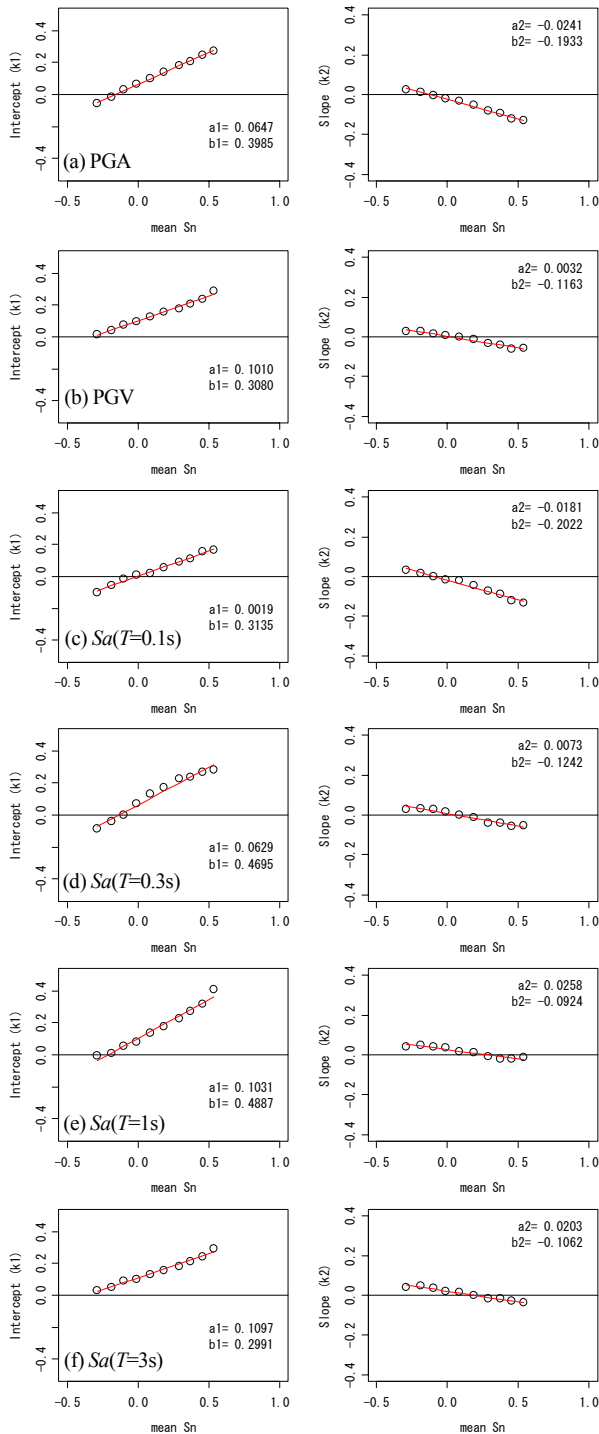


図-11 増幅度～基準地震動関係の切片または勾配と S_n 値の関係

本研究の増幅度を AVS30=600m/s を基準とする増幅度に修正した. 修正する際には, 式(2)の第一項と第二項を用いた. 平均的に見ると, 本研究と杉戸ほか⁷⁾ の増幅度の対応はよい. 杉戸ほか⁷⁾ の増幅度は, 地震動レベルが大きい範囲で, 振幅依存性の勾配の絶対値が大きくなっている.

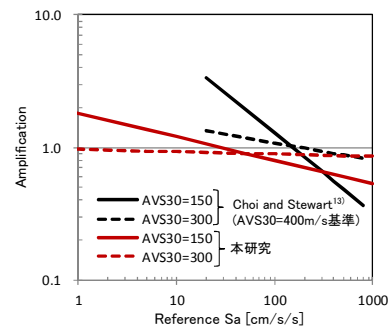
以上より, 本研究による増幅度は, 広い地震動レベルで平均的にみると, 既往の研究との対応はよいと言える. しかし, 地震動レベルを限定すると, 既往研究と必ずしも対応がよくない. これは, 本研究では広い地震動レベルで, 振幅依存の増幅度の勾配を平均的に決めているためである. 今後, 物理的な増幅のメカニズムを考慮して, 地震動レベルに応じて, 振幅依存の増幅度の勾配を変えるようなモデル化方法も検討課題の一つと考えられる.

5. 増幅度のばらつき

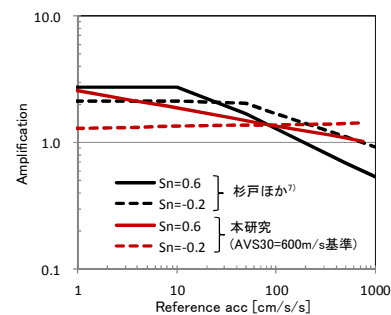
式(2)で変量効果としてモデル化したイベント項, サイト位置の項, および残差を, それぞれ独立と考えると, それらに対応するばらつきは次の関係式で表される.

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_E^2 + \sigma_S^2 + \sigma_R^2 \quad (6)$$

ここで, σ_{total} は距離減衰式に対する全ばらつき, σ_E はイベント項に対応する地震間のばらつき, σ_S はサイト位置の項に対応するばらつき, σ_R は残差に対応するば



(a) AVS30を用いたSa(0.1s)の増幅度比較



(b) S_n 値を用いたPGAの増幅度比較

図-12 既往研究による増幅度との比較

らつきを表す。表-2には、これらのばらつきの値を示す。

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。

次に、式(4)と式(5)で地盤パラメータを考慮した後の残差に対応するばらつきを表-3に示す。前章で構築した振幅依存型の増幅度との比較のため、振幅依存性を考慮しない線形モデル(AVS30 と増幅度を両対数軸上において線形関係でモデル化した増幅度、または S_n 値と増幅度の対数を線形関係でモデル化した増幅度)のばらつきも示した。振幅依存性を考慮する場合を σ_{R-N} 、考慮しない場合を σ_{R-L} として示した。

奥村ほか²⁷⁾は、震源域が大きく異なる複数の地震を対象に、複数サイトで得られた観測記録から PGV の増幅度を直接評価し、それらを基に、サイト増幅特性を除いたばらつきを評価している。このばらつきは、震源域がある程度狭い範囲内に限られているため、震源特性と伝播経路特性の影響もある程度取り除かれていると考えられる。表-3に示す PGV の残差に対応するばらつきは約 0.2 であるが、これは奥村ほかによる評価結果(約 0.2)とほぼ同じ値を示しており、妥当な結果を与えているものと考えられる。

また、 S_n 値を用いた場合は、AVS30 の場合にくらべ、短周期が卓越する PGA や $S_a(T=0.1s)$ のばらつきがやや小さくなっている。逆に、PGV や $S_a(T \geq 0.3s)$ では、

表-2 観測値のばらつき

	σ_{total}	σ_E	σ_S	σ_R
PGA	0.347	0.177	0.192	0.228
PGV	0.316	0.121	0.172	0.236
$S_a(T=0.1s)$	0.412	0.243	0.224	0.246
$S_a(T=0.3s)$	0.376	0.165	0.192	0.278
$S_a(T=1s)$	0.378	0.140	0.187	0.296
$S_a(T=3s)$	0.367	0.155	0.199	0.267

表-3 地盤パラメータを用いた増幅度計算値に対する観測値のばらつき

	AVS30の場合		S_n 値の場合	
	振幅依存あり	振幅依存なし	振幅依存あり	振幅依存なし
	σ_{R-N}	σ_{R-L}	σ_{R-N}	σ_{R-L}
PGA	0.209	0.211	0.207	0.209
PGV	0.198	0.199	0.213	0.214
$S_a(T=0.1s)$	0.241	0.243	0.233	0.235
$S_a(T=0.3s)$	0.248	0.248	0.253	0.253
$S_a(T=1s)$	0.256	0.255	0.280	0.280
$S_a(T=3s)$	0.243	0.243	0.262	0.263

AVS30 よりばらつきがやや大きくなっている。 S_n 値は N 値を深さ方向に重みをつけて積分した値であり、AVS30 より浅い地盤の影響を反映する地盤パラメータである。このため、地震動の短周期成分の増幅度のモデル化に適した地盤パラメータであることを示しているものと考えられる。

表-3は全データを対象としているため、基準地震動の振幅に依存した増幅度のばらつきは、振幅依存を考えない場合に比べて、同程度かやや小さくなっているだけで大きな差は見られない。これは、振幅依存性が大きい軟弱な地盤のデータが相対的に少ないためである。

図-13は、振幅依存型の増幅度を考慮した後の残差のばらつき σ_{R-N} と、振幅に依存しない増幅度を考慮した後の残差のばらつき 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。比較的短周期成分を反映する PGA と $S_a(T=0.1s)$ 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。

同様に、 S_n 値の場合を図-14に示す。AVS30 と同様に、比較的短周期成分を反映する PGA と、 $S_a(T=0.1s)$ および $0.3s)$ の場合には、 S_n 値が大きい軟弱地盤で基準地震動が大きいほど、ばらつきの低減効果が大きいことが分かる。AVS30 の場合と比較すると、ばらつきの低減効果はやや大きくなっており、増幅度評価のための地盤パラメータとして、 S_n 値の有効性を示すものと考えられる。

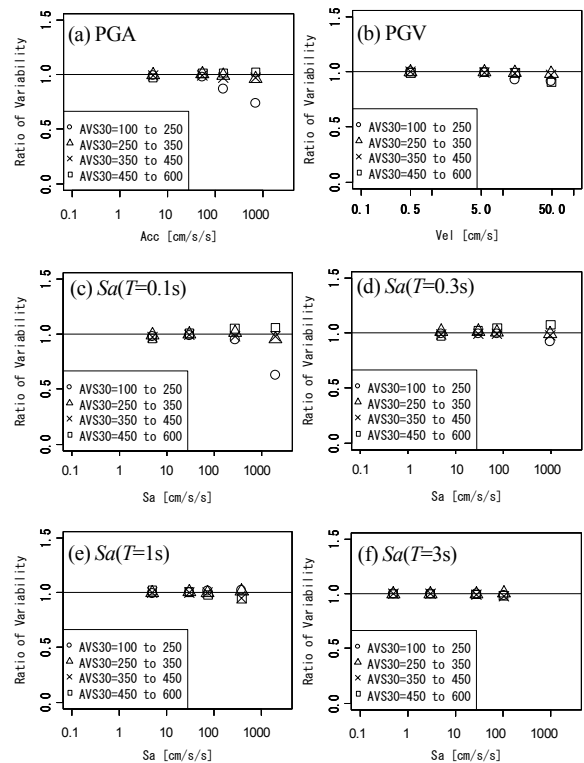


図-13 ばらつきの比 $\sigma_{R-N}/\sigma_{R-L}$ (AVS30 の場合)

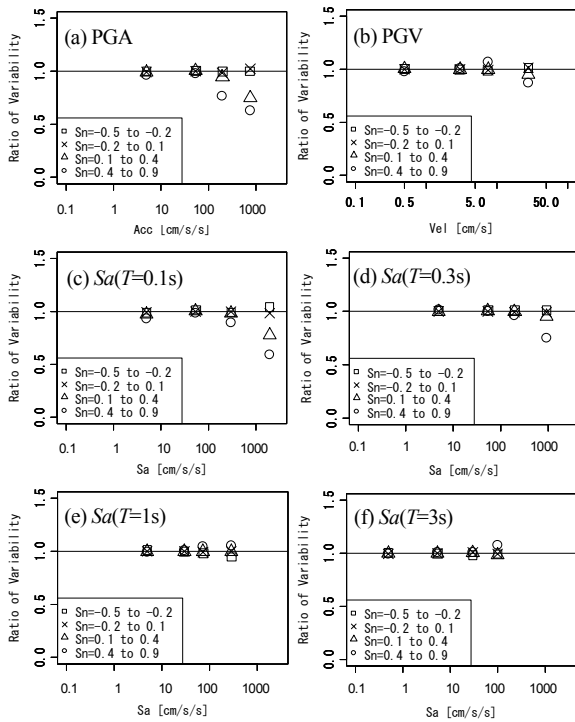


図-14 ばらつきの比 $\sigma_{R-N}/\sigma_{R-L}$ (S_n 値の場合)

本研究による基準地震動と増幅度の算出に用いた距離減衰式は Kanno *et al.*¹⁹⁾によるものである。他の距離減衰式を用いた場合には結果が異なる可能性があるが、式(2)により各項の影響を考慮し、その効果を取り除いているため、増幅度の平均値や基準地震動には大きな差異は出ないと考えられる。

6. まとめ

本研究では、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、基準地盤での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による基準地震動から、統計的手法を用いて増幅度を抽出した。このとき、地盤増幅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 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、基準地震動と地盤パラメータから、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) 増幅度の予測値に対する観測記録のばらつき(地

震イベント項とサイト位置の項を除いた後の残差に対応するばらつき)は、増幅度の振幅依存性を考慮した場合には、それを考慮しない場合と比較して、AVS30=100~250m/sの比較的軟弱な地盤の地震動振幅が大きな領域で、20~30%程度低減することを示した。

- (4) S_n 値を用いた場合には、PGA など短周期成分の影響が大きい地震動指標では、AVS30 でモデル化した場合より、ややばらつきの低減効果が大きい傾向が見られ、 S_n 値を用いることの有効性が伺えた。ただし、より長周期成分の影響が大きい地震動指標では、AVS30 の方が適用性は高いと考えられる。
- (5) 本研究では基準地震動と増幅度の算出に、Kanno *et al.*¹⁹⁾による距離減衰式を用いた。地震イベント項やサイト位置の項の効果を取り除いているため、大きな差異は出ないと考えられるが、他の距離減衰式を用いた検討は今後の課題である。また、サイト位置の項を算出する際の領域分割の大きさの影響の確認も今後の課題と考えられる。

謝辞： (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、清水建設 奥村俊彦博士、同 佐藤智美博士には、有益なご意見をいただきました。本研究における統計解析には、統計ソフト R²⁸⁾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) 例えば、日本建築学会: 最新の地盤地震動研究を活かした強震波形の作成法, 丸善, 2009.
- 2) 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.
- 3) 気象庁地震火山部: 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料, 2008.
- 4) Strasser, F., Abrahamson, N. and Bommer, J.: Sigma: Issues, Insights, and Challenges, *Seismological Research Letters*, Vol.80, No.1, pp.40-56, 2009.
- 5) Kameda, H., Sugito, M. and Goto, H.: Microzonation and simulation of spatially correlated earthquake motions, *3rd International Microzonation Conference, Seattle*, Vol.III, pp.1463-1474, 1982.
- 6) Joyner, W. B. and Fumal, T. E.: Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion, *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.II, pp.777-783, 1984.
- 7) 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.
- 8) Sugito, M. and Kameda, H.: Nonlinear soil amplification model with verification by vertical strong motion array records, *Proceedings of 4th National Conference on*

- Earthquake Engineering*, pp.555-564, 1990.
- 9) Walling, M., Silva, W. and Abrahamson, N.: Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models, *Earthquake Spectra*, Vol.24, No.1, pp.243-255, 2008.
 - 10) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, *9th Japanese Earthquake Engineering Symposium*, pp.E085-E090, 1994.
 - 11) Stewart, J., Liu, A. and Choi, Y.: Amplification factors for spectral acceleration in tectonically active regions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, No.1, pp.332-352, 2003.
 - 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, 第6巻, 第1号, pp.11-22, 2006.
 - 13) Choi, Y. and Stewart, J.: Nonlinear site amplification as function of 30m shear wave velocity, *Earthquake Spectra*, Vol.21, No.1, pp.1-30, 2005.
 - 14) Joyner, W. B. and Boore, D. M.: Methods for regression analysis of strong-motion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.83, No.2, pp.469-487, 1993.
 - 15) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol.69, pp.309-332, 1998.
 - 16) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, Y.: New strong-motion observation network: KiK-net, *Eos Trans. AGU*, Vol.81, No.48, Fall Meet. Suppl., Abstract S71A-05, 2000.
 - 17) 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*, Vol.56, pp.317-322, 2004.
 - 18) 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.
 - 19) 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, pp. 879-897, 2006.
 - 20) Pinheiro, J. and Bates, D.: *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*, Springer, New York, NY, 528 pp., 2000.
 - 21) Brillinger, D. and Preisler, H.: An exploratory analysis of the Joyner-Boore attenuation data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.74, pp.1441-1450, 1984.
 - 22) Abrahamson, N. A. and Youngs, R. R.: A stable algorithm for regression analyses using the random effects model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.82, pp.505-510, 1992.
 - 23) 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.
 - 24) 大野晋: 震源の広がりを経験的地震動評価に関する研究, 東北大学博士論文, 1999.
 - 25) Abrahamson, N. A. and Somerville, P. G.: Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.86, pp.S93-S99, 1996.
 - 26) 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.
 - 27) 奥村俊彦, 渡辺基史, 藤原広行: 2003年十勝沖地震の本震・余震記録に基づく最大速度のばらつきの検討, 日本地震学会大会 2004年度秋季大会講演予稿集, B025, 2004.
 - 28) 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.

(2010.6.3 受付)

SIMPLE METHOD FOR ESTIMATING AMPLITUDE-DEPENDENT SITE AMPLIFICATION FACTOR

Satoshi FUJIKAWA and Masata SUGITO

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. Amplitude-dependent amplification factor is simply calculated from one ground parameter, AVS30 or S_n -value obtained from SPT N-value, and the ground motions on reference bedrock derived from existing attenuation relationship. 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.