

表層地盤の地震動増幅率の評価式に関する研究

松本 俊輔¹・片岡 正次郎²・日下部 毅明³

¹国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 研究官 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: matsumoto-s92ri@nilim.go.jp

²国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 主任研究官 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: kataoka-s92rc@nilim.go.jp

³国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 室長 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: kusakabe-t88d8@nilim.go.jp

地表面における地震動強度を推定し耐震設計や震災予測に活用するためには、表層地盤による地震動の増幅率を求める簡易な評価式が必要である。Midorikawa et al.(1994)¹⁾は1987年千葉県東方沖地震の強震記録をもとに経験式を提案しているが、1つの地震のみを対象としており、地域も関東平野に限られている。

本研究では、表層地盤の卓越周期 T_g あるいは平均S波速度 V_{s30} を変数とし、複数の地震と地域を対象とした表層地盤の地震動増幅率の評価式を作成した。また、地震や地域の違いによる地震動増幅率の評価式への影響について考察した。

Key Words : average S-wave velocity , effects of subsurface layer , amplification factor

1. はじめに

地震ハザードマップの作成やリアルタイム被害予測等においては、表層地盤による地震動の増幅率を求める簡易な評価式が必要である。Midorikawa et al.(1994)¹⁾は1987年千葉県東方沖地震の強震記録をもとに経験式を提案しているが、1つの地震のみを対象としており、地域も関東平野に限られている。

本研究では、東北と西日本の地域で発生した10地震について、地震ごとに最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成し、各強震記録と距離減衰式との比と地盤の特性値との関係を回帰分析することにより強震記録のサイト特性に関する評価式を作成する。なお、回帰分析に用いる地盤の特性値としては、卓越周期、表層10mの平均S波速度、表層30mの平均S波速度を用いた。

次に、作成した評価式の適用性を検証するため、地震や地域の違いによる影響に対する評価を行った。

2. 解析対象データ

(1) 解析対象地震

独立行政法人防災科学技術研究所は、1995年の兵庫県南部地震以降の1996年より強震ネットワーク(K-NET)²⁾、1997年より基盤強震観測網(KiK-net)³⁾による強震観測を実施している。本研究では、1996年以降にK-NETおよびKiK-netで観測された強震記録を対象に以下の手順により解析対象地震を抽出した。

a) マグニチュード6以上の地震の抽出

マグニチュード6以上の地震については、1996～2000年の期間は気象庁年報より、2001～2003年の期間は地震・火山月報よりマグニチュード6以上の地震を抽出した。

b) マグニチュードが5以上6未満の地震の抽出

マグニチュードが5以上6未満の地震については、1997～2003年の期間は、KiK-netのみの観測記録が50記録以上となる地震を抽出した。

c) 解析対象地震の選定

上記の条件により解析対象候補として49地震を抽出した。この中から、震源距離が短い強震記録がKiK-netで多く観測された地震、かつ出来るだけ同じ観測地点での記録を用いることが出来る地震を選ぶ事として、表-1に示す10地震(西日本7地震、東北3地震)を抽出した。なお、表中の地震諸元は、2000年の地震は前述の年報に、2001,2002年は地震・火山月報による。

表-1 解析対象10地震の諸元

	発震時間					M	対象観測点での記録数			回帰分析に用いる記録数			備考	
	年	月	日	時	分		K-net	KiK-net	計	K-net	KiK-net	計		
1	2000	10	06	13	30	18	7.3	144	82	226	130	73	203	10gal以上
2	2000	10	08	13	17	55	5.5	60	73	133	60	62	122	2gal以上
3	2000	10	08	20	51	17	5.0	42	56	98	42	38	80	2gal以上
4	2001	01	12	08	00	00	5.4	79	71	150	79	53	132	2gal以上
5	2001	03	24	15	28	00	6.4	134	88	222	119	78	197	10gal以上
6	2001	03	26	05	40	00	5.0	74	71	145	74	67	141	1gal以上
7	2002	01	27	16	09	00	5.3	60	87	147	60	82	142	1gal以上
8	2002	05	06	17	12	00	5.0	46	74	120	46	68	114	1gal以上
9	2002	09	16	10	10	00	5.3	86	102	188	86	81	167	2gal以上
10	2002	11	03	12	37	00	6.1	85	101	186	82	84	166	3gal以上
計								810	805	1615	778	686	1464	

東北地方(宮城県沖・岩手県沖)を震源

西日本(鳥取県西部・安芸灘・兵庫県北部)を震源とする地震

(2) 解析対象観測点

K-NET,KiK-netの全国の観測点数は1652地点(K-NET 1034地点,KiK-net: 618地点,2003年2月現在)である。このうち、以下の手順で対象観測点を抽出する。

a) 観測地域

表-1で対象とした地震の震源域を考慮し、以下の府県の観測点を対象とする。

東北地方： 青森,岩手,秋田,宮城,山形,福島

西日本(近畿・中国・四国)： 京都,兵庫,岡山,鳥取,広島,島根,山口,香川,徳島,愛媛,高知

b) 地盤情報

個々の地盤情報により、サイト特性値が得られない観測点を除外する。

以上の結果、対象とする観測地点数は488地点(K-NET:256地点,KiK-net:232地点)となった。

(3) 解析記録の整理

(1),(2)によって抽出した対象記録に対して、地震ごとに観測記録の整理を行った。回帰に用いる最大速度は、加速度時刻歴を積分して算出している。ここで用いたフィルタは、0.1Hzから0.2Hzの間をcos関数で立ち上がるハイパスフィルタである。

また、対象とした観測点の震源距離が概ね300km程度以下であることから、300km程度より遠い観測点の記録が抽出作業によって削除されている事を考慮し、最大加速度の下限值を設定した。各地震ごとに震源距離に対する最大加速度分布図を作成し、おおむね300km程度に相当する最大加速度値を下限值とした。(表-1の備考参照)

以上の解析記録の整理を行った結果、表-1に示すとおり回帰に用いる記録の数は1464記録(K-NET:778記録,KiK-net:686記録)となった。

3. 距離減衰式の作成

(1) 回帰モデル⁴⁾

表-1に示す10地震について、地震ごとの最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成する。加速度応答スペクトルは、減衰定数を5%とし、0.05~10.0秒まで対数軸上で等間隔に115点の周期に対して算出した。

距離減衰式の回帰モデルについては、地震強度(最大加速度、最大速度、各周期の加速度応答値)を A 、震源距離 X とし、以下のモデルを用いた。

$$\log A = a - \log X - bX \quad (1)$$

(2) 回帰分析結果

一例として、図-1に本解析で対象とする最大規模の地震(2000年10月6日のM7.3の地震)の最大加速度分布および、回帰によって求めた距離減衰式を示す。

図-2に、各回帰分析結果の標準偏差を示す。これから次のような傾向が見られる。

a) 地震規模の小さい地震において、距離減衰式の相関がかなり低い地震がみられる。

b) 加速度応答スペクトルの距離減衰式は、全体

として長周期側の相関が低い傾向がある。

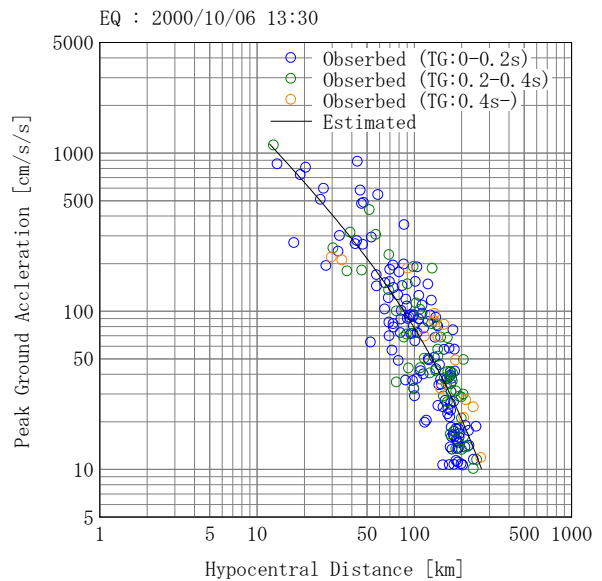


図-1 2000年10月6日の地震(M7.3)の最大加速度(PGA)の距離減衰特性

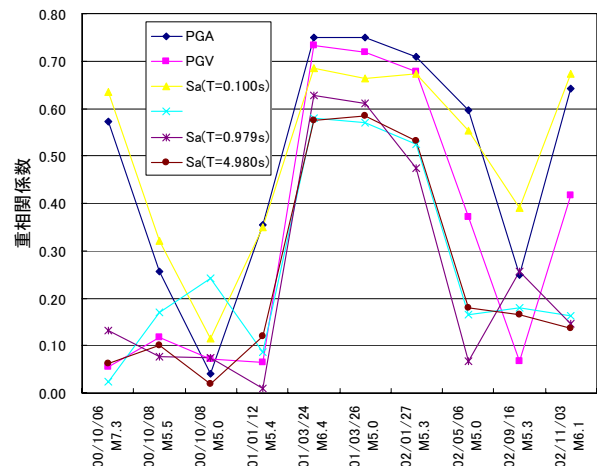


図-2 距離減衰式の重相関係数

3. 強震記録のサイト特性

各強震記録の最大加速度、最大速度および加速度応答スペクトルについて、作成した地震ごとの距離減衰式との比を算出するとともに、地盤の特性値との関係を回帰分析することにより、強震記録のサイト特性に関する関係式を作成する。

(1) 地盤構造データの整理

サイト特性値としては、以下の3つの指標を用いる。

- ・地盤卓越周期 (TG)
- ・表層10mのせん断波速度 (V_{s10})
- ・表層30mのせん断波速度 (V_{s30})

なお、K-NET観測点におけるボーリングデータは、最長で20mまでしか存在しないが、表層30mのせん断波速度 V_{s30} は、司・翠川(1999)の方法を参考に、下記の要領で求めている。以下、サイト特性値算出

の際に用いた判断基準を示す。

(a) K-NET観測点

- ・ 1mごとのS波速度データを用いる。
(N値とS波速度の経験的な関係式から求まるS波速度は用いない)
- ・ N値のデータは、基盤を決定する参考にする(固有周期、表層S波速度を求めるため)。
- ・ ボーリングデータが20mまでしかないため、以下のように30m平均S波速度を求める。

a) 最下層が岩盤の場合

最下層が30mまで続くと仮定。ただし、ボーリングデータが10mまでしかなく、最下層S波速度が200m/s未満でN値が50を超える層がない場合、この観測点は除外する。

b) 最下層が岩盤以外の場合

最下層の深さと最下層S波速度が次の関係を満たす場合、最下層が30mまで続くと仮定し、それ以外は除外する。

10m : 600m/s以上

15m : 400m/s以上 (司・翠川(1999)では450m/s)

20m : 300m/s以上 (司・翠川(1999)では350m/s)

(b) KiK-net観測点

- ・ 層ごとのS波速度データを用いる。
- ・ N値の情報が無いため、S波速度が300m/s以上となる層を基盤とする。

(2) サイト特性に関する回帰結果

サイト特性値(TG, Vs10, Vs30)に対する観測値と距離減衰式による推定値との比(以降、増幅率)を地震ごとに整理する。

整理の方法は以下に示す通りである。

(a) 増幅率を α 、サイト特性値(TG, Vs10, Vs30)を β とし、 α と β の関係をプロットする。

(b) 以下の回帰モデルを用いて際と特性の回帰式を算出する。ここで、サイト特性値が地盤卓越周期TGの場合には、 $TG \geq 0.1[s]$ の範囲で回帰分析を行う。

$$\log \alpha = c + d \cdot \log \beta \quad (2)$$

(3) 強震記録のサイト特性の整理結果

地震ごとのサイト特性について整理を行った後、全地震のデータを用いたサイト特性の比較・整理を以下の方法により行う。

(a) 表層のせん断波速度Vs10

- ・ Vs10の基準値をVs10s=200m/sとする。
- ・ 地震ごとに作成した回帰式を用いて、地震ごとの基準値における増幅率 α (Vs10s)を算出する。
- ・ 個々の地震で求めた増幅率 α を、地震ごとの基準値での増幅率 α (Vs10s)で除す。

$$\alpha \text{ (Vs10)} = \alpha / \alpha \text{ (Vs10s)} \quad (3)$$

- ・ 得られた増幅率 α (Vs10)を、Vs10を横軸として、全ての地震記録について1つの図にプロットする。
- ・ 上記データより、基準値Vs10sで増幅率 α (Vs10) = 1となる回帰式を算出する。

(b) 表層30mのせん断波速度Vs30

- ・ Vs30の基準値をVs30s=300m/sとする。
- ・ 以下Vs10と同様

(c) 地盤卓越周期TG

- ・ 上記で得られた増幅率 α (Vs30)を α (TG)とし、TGとの関係を全ての地震記録について1つの図にプロットする。
- ・ 上記データの内、 $TG \geq 0.1$ のデータから回帰式を算出する。

4. 解析結果・まとめ

上記(a)~(c)のサイト特性値に対する地盤の増幅率について回帰を行った結果のうち、最大加速度PGAの回帰結果を図-3(a)、最大速度のPGV回帰結果を図-3(b)に示す。図-3(a)は、観測地域による増幅率の差を確認するため、プロットを東北地方と西日本で区別し、図-3(b)は地震の震源深さによる差を確認するため30km以浅と以深で区別した。

最大加速度と最大速度以外の回帰結果については、回帰係数一覧を表-2に示し、同時にグラフにて回帰係数c,dや重相関係数のサイト特性値との関係を図-4(a), (b), (c)に示す。ただし、加速度応答スペクトルについては、115点の周期のうち4点の周期のみ示している。

本解析の結果から、以下の事がいえる。

- ・ 増幅率とサイト特性値との関係は、TGでは長周期になるほど、Vs10, Vs30では速度が小さくなるほど、増幅率が大きくなる(推定値より観測値が大きくなる)傾向がある。
- ・ 強震記録の地域性(東北と西日本)や、対象地震の震源深さによる傾向の差異は図-3(a)、(b)からは明瞭に見られない。
- ・ 増幅率とサイト特性値との関係は、Vs10よりTGあるいはVs30のほうが比較的相関が高い傾向がある。
- ・ 加速度応答スペクトルについては、0.1秒付近の短周期において相関が低い。また、TGの回帰で係数dの正負が逆転するなど他の周期と比較して回帰係数が大きく異なっているが信頼性は低い。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの観測記録と各観測点の地盤情報を利用させて頂いた。関係者各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) MIDORIKAWA, S. MATSUOKA, M. and SAKUGAWA, K. (1994): Site Effects on Strong Motion Records Observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthquake, Proc. Ninth Japan Earthquake Engineering Symposium, 3, 85-90.
- 2) 防災科学技術研究所:強震ネットワーク (K-net), <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 3) 防災科学技術研究所:基盤強震観測網 (KiK-net), <http://www.kik.bosai.go.jp/>
- 4) 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, 第523号, pp.63-70, 1999.9

(2003.10.10 受付)

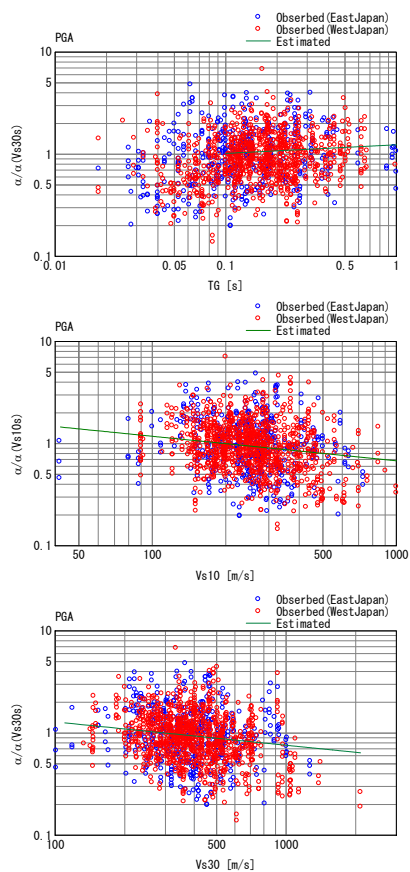


図-3(a) 最大加速度増幅率PGAの回帰式(地域別)

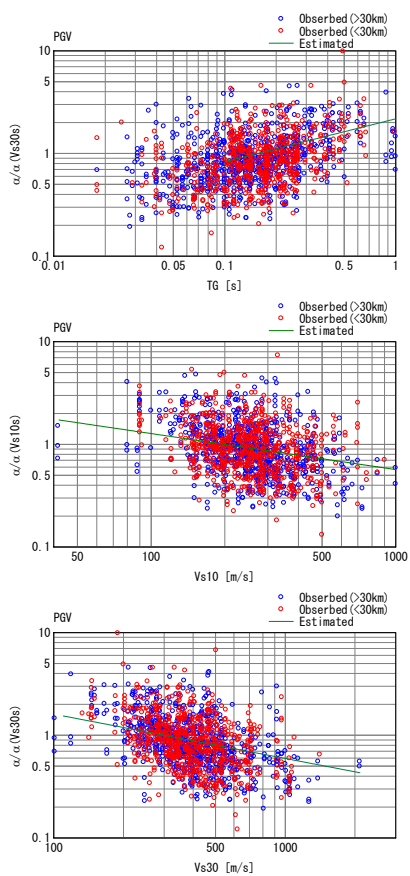


図-3(b) 最大速度増幅率PGVの回帰式(震源深さ別)

表-2 回帰係数一覧

地震強度	サイト特性値	c	d	重相関係数	標準偏差
PGA	TG	0.092	0.084	0.077	0.018
	Vs10	0.552	-0.240	0.172	0.043
	Vs30	0.566	-0.229	0.162	0.041
PGV	TG	0.338	0.417	0.359	0.087
	Vs10	0.807	-0.351	0.251	0.063
	Vs30	1.069	-0.432	0.305	0.077
Sa (T=0.100s)	TG	-0.018	-0.058	0.045	0.012
	Vs10	0.396	-0.172	0.103	0.031
	Vs30	0.270	-0.109	0.065	0.019
Sa (T=0.511s)	TG	0.535	0.688	0.439	0.143
	Vs10	0.996	-0.433	0.243	0.078
	Vs30	1.485	-0.599	0.333	0.106
Sa (T=0.979s)	TG	0.500	0.658	0.426	0.137
	Vs10	0.834	-0.362	0.210	0.065
	Vs30	1.254	-0.506	0.290	0.090
Sa (T=4.980s)	TG	0.233	0.300	0.268	0.062
	Vs10	0.453	-0.197	0.152	0.035
	Vs30	0.641	-0.259	0.197	0.046

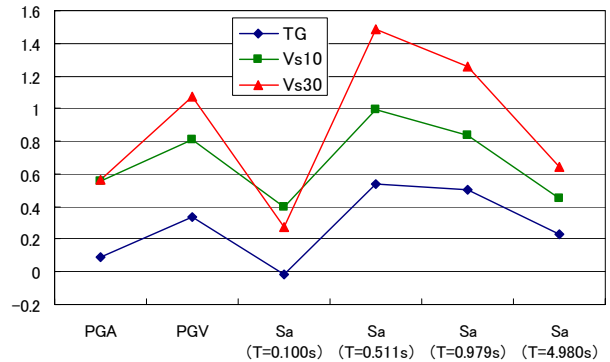


図-4(a) 回帰係数 c

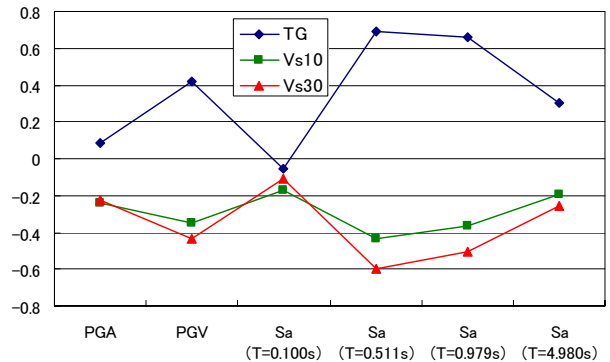


図-4(b) 回帰係数 d

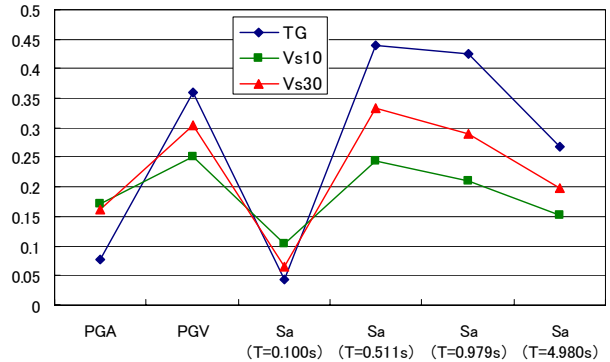


図-4(c) 重相関係数