

実地震記録を用いた表層地盤の地震増幅率の推定式の検証

野上雄太¹・坂井公俊²・室野剛隆³・盛川仁⁴

¹正会員 工修 ジェイアール東日本コンサルタンツ（〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-11-1）
²正会員 工修 鉄道総合技術研究所 耐震構造（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
³正会員 工博 鉄道総合技術研究所 耐震構造（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
⁴正会員 工博 東京工業大学大学院（〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-G3）

1. はじめに

地震時の被害予測において、広範な地域の危険箇所を抽出する一次スクリーニングを目的として、著者らは地震時の表層地盤の増幅率の推定式を提案している¹⁾。具体的には、地盤の1次固有周期 T_g だけでなく、入力地震動の卓越周期 T_b も考慮した増幅率であり、工学的基盤の最大加速度 PBA 、最大速度 PBV および表層地盤の固有周期 T_g から求められる。なお、本研究で対象としている表層地盤は、せん断弾性波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 程度の工学的基盤以浅である。本推定式は、解析的検討により導かれているため、実地震動記録による検証が十分実施されているわけではない。そこで、本研究は、実地震動記録を用いて、推定式の妥当性を検証することを目的とする。

2. 提案している表層地盤の増幅率の推定式

著者らが提案している表層地盤の増幅率の推定式を式(1)～(4)に示す。

$$\left\{ \begin{matrix} Z_v \\ Z_A \end{matrix} \right\} = \sqrt{\frac{1 + 4h^2 \left\{ \alpha \left(T_g / T_b \right)^\beta \right\}^2}{1 - \left\{ \alpha \left(T_g / T_b \right)^\beta \right\}^2 + 4h^2 \left\{ \alpha \left(T_g / T_b \right)^\beta \right\}^2}} \quad (1)$$

$$\alpha = c_1 \cdot \left\{ \frac{PBV}{PBA} \right\} + c_2 \quad (2)$$

$$\beta = c_3 \cdot \left\{ 1 - \exp \left(-c_4 \cdot \left\{ \frac{PBV}{PBA} \right\} \right) \right\} + c_5 \quad (3)$$

$$h = c_6 \cdot \left\{ \frac{PBV^{c_7}}{PBA^{c_7}} \right\} \quad (4)$$

表1 速度増幅率に対する式(2)～(4)のパラメータ値

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
μ	0.0109	0.68	0.24	0.071	0.30	0.26	0.25
$\mu+1\sigma$	0.0053	0.76	0.14	0.088	0.24	0.21	0.23
$\mu+2\sigma$	0.0031	0.81	0.10	0.147	0.18	0.18	0.21

(注)表中の μ は平均値、 σ は標準偏差を示す。

表2 加速度増幅率に対する式(2)～(4)のパラメータ値

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
μ	0.0026	0.85	0.52	0.003	0.26	0.12	0.31
$\mu+1\sigma$	0.0011	0.89	0.52	0.002	0.18	0.10	0.30
$\mu+2\sigma$	0.0006	0.91	0.33	0.002	0.14	0.10	0.24

(注)表中の μ は平均値、 σ は標準偏差を示す。

ここに、 Z_v は速度増幅率、 Z_A は加速度増幅率、 T_g は地盤の1次固有周期[s]、 T_b は工学的基盤への入力波の卓越周期[s]、 PBV は入力波の最大速度[kine]、 PBA は入力波の最大加速度[gal]、 α 、 β 、 h 、 $c_1 \sim c_7$ は係数を示す。 $c_1 \sim c_7$ の数値は、速度増幅率に対して表1を、加速度増幅率に対して表2を適用する。表1、2は、「平均値 μ 」、「平均値 μ +標準偏差 σ 」、「平均値 μ +2×標準偏差 σ 」の数値を示している。 T_b は、被害予測に用いることを念頭において、式(5)により算出することになっている²⁾。

$$T_b = 2\pi \cdot \frac{PBV}{PBA} \quad (5)$$

ここに、式中の記号は式(1)～(4)と同様である。

表 3 検討に用いた観測点および地震動記録諸元

観測点名	T_g (sec)	地震動諸元 (年月日, マグニチュード, 震央距離)	工学的基盤位置での地震動			
			PBA (gal)	PBV (kine)	T_b (sec)	成分
FKSH04 (会津高田)	0.46	2011/03/11 14 : 46 M9.0 278km	101.8 144.2	12.2 14.3	0.75 0.62	EW NS
FKSH11 (矢吹)	0.56	2011/03/11 14 : 46 M9.0 244km	400.0 328.1	49.9 33.9	0.78 0.65	EW NS
FKSH14 (いわき東)	0.82	2011/03/11 14 : 46 M9.0 205km	571.7 320.1	36.5 30.3	0.40 0.59	EW NS
FKSH18 (三春)	0.26	2011/03/11 14 : 46 M9.0 216km	514.1 543.3	19.1 19.6	0.25 0.14	EW NS
FKSH19 (都路)	0.31	2011/03/11 14 : 46 M9.0 201km	601.9 867.3	23.9 18.9	0.25 0.14	EW NS
MYGH09 (白石)	0.25	2011/03/11 14 : 46 M9.0 198km	452.0 510.6	31.2 43.2	0.43 0.53	EW NS
TCGH11 (山元)	0.24	2011/03/11 14 : 46 M9.0 314km	288.2 237.3	9.7 12.9	0.21 0.34	EW NS
IWTH08 (久慈北)	0.34	2011/03/11 14 : 46 M9.0 258km	75.8	4.5	0.37	NS
NIGH06 (加茂)	0.25	2003/02/04 13 : 35 M3.1 005km	81.7 110.3	1.7 2.3	0.13 0.13	EW NS
		2004/10/23 17 : 56 M6.8 044km	435.4 395.8	21.6 27.7	0.31 0.44	EW NS
		2004/10/23 18 : 03 M6.3 034km	147.0 156.7	8.0 11.9	0.34 0.48	EW NS
		2004/10/23 18 : 12 M6.0 049km	156.8	12.4	0.50	NS
		2004/10/23 18 : 34 M6.5 040km	159.4 144.9	8.6 6.7	0.34 0.29	EW NS
		2004/10/25 06 : 05 M5.8 037km	101.7 81.7	7.4 5.4	0.46 0.42	EW NS
		2004/10/27 10 : 40 M6.1 040km	88.1 111.0	6.9 6.1	0.49 0.34	EW NS
		2004/11/08 11 : 16 M5.9 029km	97.2	6.2	0.40	NS
		2007/07/16 10 : 13 M6.8 042km	95.2 125.3	7.2 8.9	0.48 0.45	EW NS
		2010/05/01 18 : 20 M4.9 015km	80.3	2.8	0.22	NS
NMRH04 (別海東)	2.27	2000/12/22 19 : 13 M6.5 217km	72.3	8.2	0.71	EW
		2003/09/26 04 : 50 M8.0 199km	270.0 243.6	23.0 20.5	0.54 0.53	EW NS
		2004/11/29 03 : 32 M7.1 052km	152.1 127.0	17.1 14.4	0.71 0.71	EW NS
		2004/12/06 23 : 15 M6.9 064km	105.0 89.4	12.3 5.9	0.74 0.42	EW NS
		2005/01/18 23 : 09 M6.4 059km	85.4 110.8	8.63 14.0	0.64 0.80	EW NS
SZOH42 (修善寺)	0.79	2006/04/21 02 : 50 M5.8 026km	94.7 105.8	8.91 5.31	0.59 0.32	EW NS
		2006/05/02 18 : 24 M5.1 039km	101.0 105.7	2.1 3.2	0.13 0.19	EW NS
		2009/08/11 05 : 07 M6.5 043km	267.2 232.7	30.0 19.8	0.70 0.53	EW NS

3. 検証方法

(1) 検討手順

増幅率の推定式の検証は、実地震動記録と推定結果を比較することで行なった。実地震動記録には、地中と地表の両者での記録が得られる防災科学技術研究所の KiK-net の記録を用いた。なお、本研究では、工学的基盤 ($V_s=400\text{m/s}$) から地表面までの増幅率を対象としている。しかしながら、KiK-net 観

測点の地中の地震計設置位置は、 $V_s=400\text{m/s}$ とは限らず、それよりも硬いことが多い。よって、地中の地震計設置位置の記録を用いて、動的解析により工学的基盤相当の地盤での地震動を算出した。その後、算出した工学的基盤の波形と観測された地表面波形の最大値の比として増幅率を定義した。解析の手順を以下に示す。また、検討イメージ図を図 1 に示す。

①工学的基盤から地表面までの固有周期を基に、

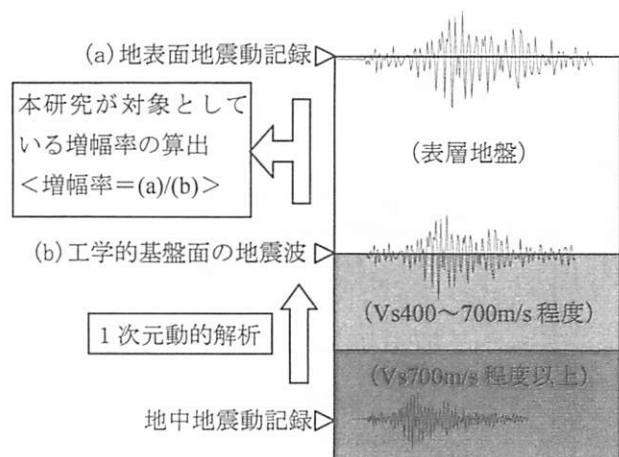


図1 検討方法のイメージ図

様々な固有周期を有する観測点を選択する。KiK-net 観測点は、硬い地盤が多いため、極力表層地盤が厚く堆積している観測点を選定した。検討に用いた観測点一覧を表3に示す。

- ②選択した観測点で得られた地震動記録（地表と地中）を準備する。前述のとおり、工学的基盤位置での地震動を解析的に評価した上で、増幅率を算出する。そのため、解析しないと工学的基盤位置での地震動強さが分からない。よって、比較的大きな地震動を選定した。最終的に検討に用いた地震動記録一覧を表3に示す。
- ③観測点のボーリングデータを参考にして、地震計設置位置から工学的基盤面までを1次元にモデル化する。
- ④地中の地震動記録を入力波とする1次元時刻歴動的解析を実施する。
- ⑤上記④で得られた工学的基盤面の地震波と上記②で準備した地表の地震動記録を用いて、表層地盤の増幅率と周期比の関係を算定する。

(2) 解析条件

a) 入力地震波

入力地震波は地中で得られた地震動記録のため、モデル化した最下端層にE+F波として入力した。

b) 土の構成則

地震計位置から工学的基盤までは、線形に近い挙動を示すと考えられるが、 $V_s = 400\text{m/s} \sim 700\text{m/s}$ 程度までの土層は、非線形性を考慮した。用いたモデルは、増幅率の推定式の検討にも採用したGHE-Sモデル³⁾とした。このモデルに必要なパラメータは、多数の繰返し載荷試験から決定された標準値を用いた^{4) 5)}。一方、 $V_s = 700\text{m/s}$ 程度以上の土層は線形で挙動すると仮定した。

c) 粘性減衰

減衰は、硬い土層の地盤応答解析であることを勘案して、固有値解析の結果より、1次と3次のモードで2%となるようなレイリー減衰を用いた。

4. 検証結果

3章で示した方法により算定した地震動記録の増幅率と推定式から算出した増幅率を図2、3に示す。各図(a)は、比較的小さな地震動を、各図(b)は検討した中で大きな地震動（以降、比較的大きな地震動）を例として描いている。図中には「平均値 μ + 標準偏差 σ 」「平均値 $\mu + 2 \times$ 標準偏差 σ 」の推定値および推定式を導くのに用いた解析値を併記している。これらの図より、推定式を導くのに用いた解析値の範囲にほぼ収まっていることから判断すると、よい推定結果を与えていると考えられる。しかしながら、 $\mu + 2\sigma$ を超えるような地震記録もあれば、平均値付近の地震記録もあり、精度よく増幅率を推定できているのか否かは明確でない。様々な地盤、地震動を用いていること、工学的基盤の地震動の評価に様々な仮定が含まれていることなど、理由はいくつも考えられる。そこで、本研究では、平均値と分布形について、統計的検定を実施して妥当性を検証した。

検定手法は、データが少ないことを勘案してノンパラメトリック検定を採用した。具体的には、平均値に対してWilcoxon検定、分布形に対してKolmogorov-Smirnov検定を採用した。検定は、地震記録のプロットの範囲を、ある周期比帯で分割し、5%、10%有意確率を基準に行なった。5%有意確率を満足する場合は「○」、10%有意確率を満足する場合は「△」、いずれも満足しない場合は「×」として整理した。なお、判定が周期比帯毎に異なる場合もある。この場合には、有意確率を総合的に判断して判定している。判定結果を表4に示す。例えば、図2(b)のように、周期比が1.0周辺の判定では平均値は「○」と判定されるのに対し、周期比が2.0周辺の判定では平均値は「×」と判定されることがある。データ数が少ないため、今後検討の余地があると思われるが、総合的には「△」と判定した。表4より、平均値は、統計的に概ね良好に増幅率を推定できるものと考えられる。また、分布形は、比較的小さな地震動($PBA=150\text{gal}$, $PBV=15\text{kine}$)では、判定が「△」であるが、比較的大きな地震($PBA=550\text{gal}$, $PBV=35\text{kine}$)では、「○」となってい

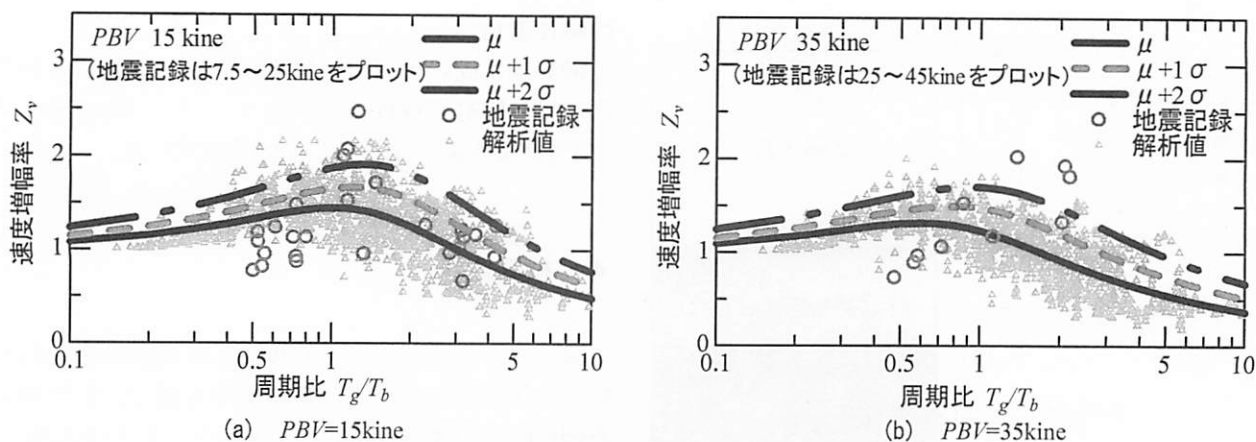


図2 速度増幅率 Z_v の推定値と地震記録の比較

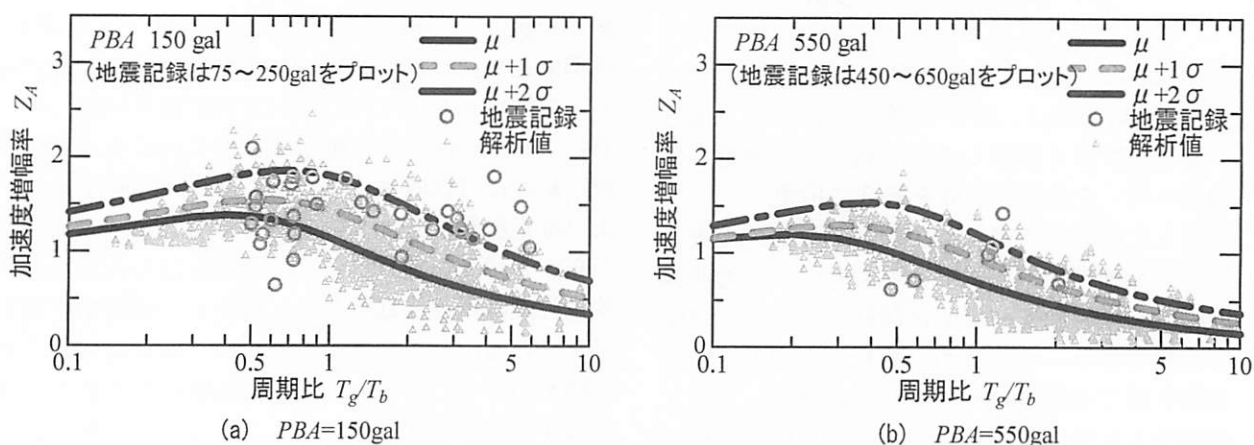


図3 加速度増幅率 Z_a の推定値と実測値の比較

表4 検定の判定結果

	加速度増幅率 Z_a		速度増幅率 Z_v	
入力の大きさ	150gal	550gal	15kine	35kine
平均値の判定	△	○	△	△
分布形の判定	△	○	△	○

る。比較的大きな地震では、構造物の安全性に関わるため、分布形も重要である。比較的小さな地震動では、構造物が降伏に達しない程度の領域であるため分布形はそれほど問題にはならないことを勘案すると、分布形についても、本推定式は統計的に十分な精度で推定できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、著者らが提案した地盤及び入力波の周期特性を考慮した表層地盤の地震時増幅率の推定式を、実地震記録を用いて検証した。その結果、平均値は地震の大小に関わらず統計的に概ね妥当な推定が可能であることが検証された。また、分布形が重要となる大きな地震では、分布形についても妥当

な結果を与えることが示された。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所のKiK-netの地震動記録を使わ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) 野上雄太, 坂井公俊, 室野剛隆: 表層地盤と入力波の周期特性を考慮した増幅率の評価, 第13回日本地震工学シンポジウム, pp.141-146, 2010.
- 2) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010.
- 3) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 0097, pp.494-497, 2006.
- 4) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2-0014, 2009.
- 5) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱度土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.