

# 堆積地盤の非線形性を考慮した地震動変換係数の適用性について

岐阜大学大学院 学生会員 〇八代 和幸

岐阜大学工学部 杉尾 真司

岐阜大学工学部 正会員 杉戸 真太, 古本 吉倫, 能島 暢呂

## 1. はじめに

工学的基盤面で地震動が与えられる場合, 比較的容易に得られる表層の地盤特性を考慮した変換係数を掛けることで, 工学的基盤の地震動を堆積地盤表面での地震動に変換する手法<sup>1)</sup>は, 等価線形化手法を用いた応答解析を行うよりはるかに簡単である。

筆者らは既に最大地動(最大加速度, 最大速度, 実効加速度), 加速度応答スペクトルの変換係数をそれぞれ提案している。本報では提案した変換係数の妥当性を検討するため, 種々の地盤特性を有する鉛直アレー観測地点を選定し, 観測記録を用いて堆積地盤表面における地震動推定結果の検証を行った結果を報告する。

## 2. 堆積地盤の非線形性を考慮した地震動変換係数

工学的基盤で与えられる地震動強度  $Y_r$  とし, 地表での地震動強度  $Y_s$  を次式によって推定する時の係数  $\beta$  を変換係数と呼ぶ。

$$Y_s = \beta \cdot Y_r \quad (1)$$

筆者らは工学的基盤における非定常地震動予測モデル(EMPR)<sup>2)</sup>により種々の模擬地震動波形を得て, さらに種々の地盤条件により地震応答解析(FDEL)<sup>3)</sup>を使用を行い, それぞれに対応する変換係数  $\beta$  を得た。

ついで, 地盤条件による変換係数  $\beta$  の変化をモデル化するため, 式(2)より  $N$  値から与えられる  $S_n$  と, 工学的基盤(ここでは  $V_s=400\sim 600$ [m/sec] 相当)までの深さ  $d_p$  を用いて, 重回帰分析を行った。結果を表-1, 表-2(a),(b)に示す。

$$S_n = 0.264 \int_0^{d_s} e^{-0.04N(x)-0.14x} dx - 0.885 \quad (2)$$

ここで,  $N(x)$ :深さ  $x$ (m)における  $N$  値,  $d_s$ :ボーリング資料の深さである。

以上の変換係数の推定式により,  $S_n, d_p$  という簡単な地盤パラメータにより地表の地震動強度を工学的基盤の地震動強度から容易に推定することができる。

なお, 地表での気象庁計測震度  $I_s$  は, 工学的基盤面での計測震度と表-1によって計算される実効加速度の変換係数  $\beta_{ae}$  より次式により推定される。

$$I_s = I_r + 2 \log \beta_{ae} \quad (3)$$

## 3. 観測記録に基づく変換係数の妥当性の検証

図-1は, 変換係数により工学的基盤での地震動強度から地表での最大地動, 計測震度および加速度応答スペクトルを推定し, 地表での値と比較したものである。

(a)に比較的良好な地盤の関西電力(株)総合技術研究所( $S_n=0.25$ )で観測された1995年兵庫県南部地震

( $M=7.2$ ), (b)に非常に軟弱な地盤の広島市消防航空隊基地( $S_n=0.74$ )で観測された2001年芸予地震( $M=5.0$ )を示す。

図中の実線が地表, 点線が工学的基盤面(解放基盤相当), それぞれの観測記録による加速度応答スペクトルである。また, 工学的基盤面の加速度応答スペクトルに変換係数  $\beta_s$  を掛けた加速度応答スペクトルの推定値(〇印)を示した。

(a)の加速度応答スペクトルに着目すると, 周期1秒以上の長周期領域でよく一致していたものの, 0.8秒程度以下の短周期領域で推定値が観測記録を上回る。この傾向は, 最大速度や実効加速度, 計測震度では比較的観測値に近い値が推定されているが, 最大加速度では観測記録に対し過大評価となっていることにも表れている。

一方, (b)の加速度応答スペクトルに着目すると, 0.8秒程度以下の短周期領域で推定値と観測記録がほぼ一致しているものの, 1~2秒あたりで推定値が観測記録を下回っている。また, 3秒程度以上の長周期領域では地表と工学的基盤面での値に大きな隔たがりがあり, 特に工学的基盤面での記録に長周期ノイズが含まれていることも考えられる。これらの結果は, 最大加速度では比較的観測値を良く推定できているのに対し, 最大速度や実効加速度では観測記録と差異が生じていることと対応している。

## 4. おわりに

堆積地盤の非線形性を考慮した地震動変換係数に関して, 詳細な地盤調査が行われているアレー観測点での強震記録を用いて, その妥当性を検討した。近年, 強震観測が各方面でさかに行われ, 種々の地盤特性を有する観測地点における工学的基盤と地表での同一地震による記録が徐々に蓄積されつつある。今後このようなデータを収集し, 提案した変換係数の妥当性をさらに検討する予定である。

謝辞: 本研究で用いた強震記録と地盤資料は関西電力, 広島市のシステムデータに基づいたものである。記して深謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 古本吉倫・杉戸真太・能島暢呂・八代和幸: 堆積地盤の非線形性を考慮した地震応答スペクトルの変換係数, 第26回地震工学研究発表会, 講演論文集, pp389-392, 2001.8
- 2) M.Sugito, Y.Furumoto, T.Sugiyama: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12WCEE, Auckland, New Zealand (CD-ROM)
- 3) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫: 周波数特性を考慮した等価線形ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集 No.III-27, pp, 49-58, 1994.4.6

表-1 最大地動の変換係数

$A_s = \beta_a \cdot A_r$	$\beta_a = 10^{\gamma_0} \cdot A_r^{\gamma_1}$ ; $\gamma_1 \leq 0$ $\beta_a = 10^{\gamma_0}$ ; $\gamma_1 > 0$	$\gamma_{0a} = 0.294 + 0.066 \cdot S_n - 0.089 \cdot \log_{10} d_p$ $\gamma_{1a} = -0.039 - 0.008 \cdot S_n + 0.021 \cdot \log_{10} d_p$
$V_s = \beta_v \cdot V_r$	$\beta_v = 10^{\gamma_0} \cdot V_r^{\gamma_1}$ ; $\gamma_1 \leq 0$ $\beta_v = 10^{\gamma_0}$ ; $\gamma_1 > 0$	$\gamma_{0v} = 0.177 + 0.082 \cdot S_n - 0.042 \cdot \log_{10} d_p$ $\gamma_{1v} = -0.034 - 0.010 \cdot S_n + 0.018 \cdot \log_{10} d_p$
$A_{es} = \beta_{ae} \cdot A_{er}$	$\beta_{ae} = 10^{\gamma_0} \cdot A_{er}^{\gamma_1}$ ; $\gamma_1 \leq 0$ $\beta_{ae} = 10^{\gamma_0}$ ; $\gamma_1 > 0$	$\gamma_{0ae} = 0.265 + 0.097 \cdot S_n - 0.073 \cdot \log_{10} d_p$ $\gamma_{1ae} = -0.047 - 0.004 \cdot S_n + 0.023 \cdot \log_{10} d_p$

$A_s$ :堆積地盤での最大加速度,  $A_r$ :工学的基盤での最大加速度,  $\beta_a$ :最大加速度の変換係数,  
 $V_s$ :堆積地盤での最大速度,  $V_r$ :工学的基盤での最大速度,  $\beta_v$ :最大速度の変換係数,  
 $A_{es}$ :堆積地盤での実効加速度,  $A_{er}$ :工学的基盤での実効加速度,  $\beta_{ae}$ :実効加速度の変換係数

表-2(a) 加速度応答スペクトルの変換係数

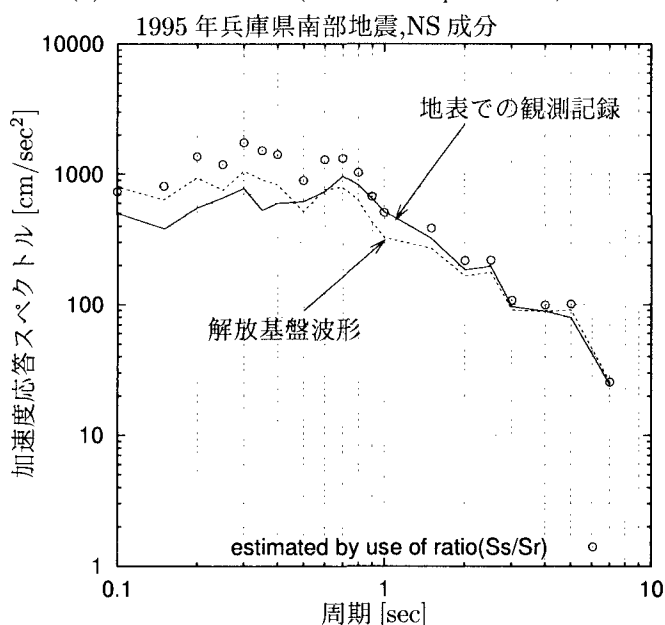
$S_s(T) = \beta_s(T) \cdot S_r(T)$
$\beta_s(T) = 10^{\gamma_0} \cdot S_r^{\gamma_1}$ ; $\gamma_1 \leq 0$ $\beta_s(T) = 10^{\gamma_0}$ ; $\gamma_1 > 0$
$\gamma_0(T) = \gamma_{00}(T) + \gamma_{01}(T) \cdot S_n + \gamma_{02}(T) \cdot \log_{10} d_p$ $\gamma_1(T) = \gamma_{10}(T) + \gamma_{11}(T) \cdot S_n + \gamma_{12}(T) \cdot \log_{10} d_p$

$\beta_s$ :加速度応答スペクトルの変換係数  
 $S_s$ :堆積地盤面での加速度応答スペクトル  
 $S_r$ :基盤面での加速度応答スペクトル  
 $T$ :周期 (sec)  
 $h$ :減衰定数 (=0.05)  
 $S_n$ :表層地盤の軟弱さを定量的に表す指標  
 $d_p$ :基盤面までの深さ (m)  
 $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_{00}, \gamma_{01}, \gamma_{02}, \gamma_{10}, \gamma_{11}, \gamma_{12}$ :回帰係数

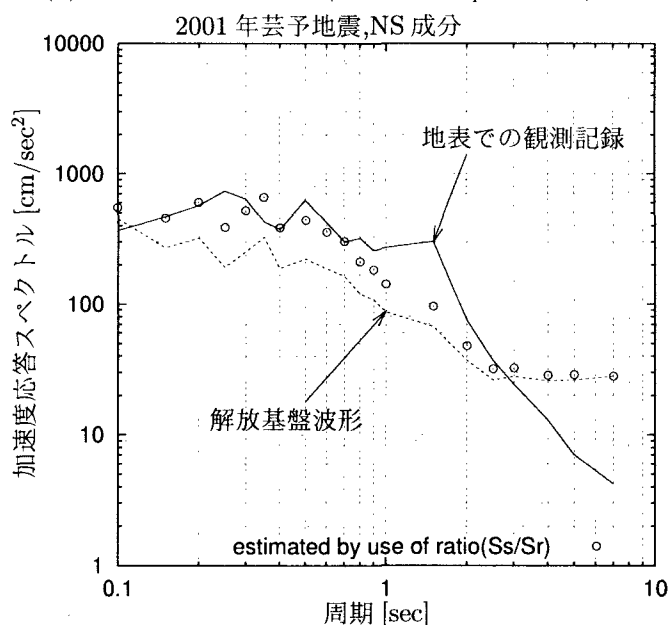
表-2(b) 加速度応答スペクトルの変換係数の算出に必要な回帰係数 (周期別)

T(sec)	$\gamma_{00}$	$\gamma_{01}$	$\gamma_{02}$	$\gamma_{10}$	$\gamma_{11}$	$\gamma_{12}$
7.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	-0.023	0.021	0.032	0.000	0.000	0.000
4.000	-0.050	0.025	0.048	0.000	0.000	0.000
3.000	-0.070	0.041	0.068	0.000	0.000	0.000
2.500	-0.079	0.055	0.080	0.000	0.000	0.000
2.000	-0.083	0.073	0.092	0.000	0.000	0.000
1.500	-0.077	0.101	0.103	0.000	0.000	0.000
1.000	-0.049	0.140	0.108	0.004	-0.003	-0.003
0.900	-0.038	0.150	0.107	0.004	-0.003	-0.004
0.800	-0.024	0.161	0.104	0.005	-0.004	-0.004
0.700	-0.004	0.174	0.099	0.005	-0.005	-0.004
0.600	0.024	0.191	0.087	0.003	-0.008	-0.003
0.500	0.064	0.216	0.069	-0.001	-0.016	-0.001
0.400	0.122	0.248	0.039	-0.007	-0.027	0.002
0.350	0.160	0.265	0.016	-0.011	-0.033	0.004
0.300	0.208	0.279	-0.013	-0.017	-0.040	0.008
0.250	0.266	0.285	-0.051	-0.024	-0.045	0.011
0.200	0.338	0.276	-0.104	-0.032	-0.049	0.016
0.150	0.437	0.229	-0.184	-0.043	-0.045	0.023
0.100	0.588	0.056	-0.303	-0.064	-0.009	0.027

(a) 総合技術研究所 ( $S_n=0.25, d_p=97.0$  m)



(b) 広島市消防空港基地 ( $S_n=0.74, d_p=33.9$  m)



	最大加速度 [cm/sec <sup>2</sup> ]	最大速度 [cm/sec]	実効加速度 [cm/sec <sup>2</sup> ]	計測 震度
基盤観測値*	379.9	33.0	183.0	5.2
地表観測値	298.6	37.1	241.0	5.5
推定値**	517.0	42.8	252.1	5.5

	最大加速度 [cm/sec <sup>2</sup> ]	最大速度 [cm/sec]	実効加速度 [cm/sec <sup>2</sup> ]	計測 震度
基盤観測値*	146.1	8.9	112.0	4.8
地表観測値	187.7	18.3	145.0	5.0
推定値**	220.6	12.9	175.6	5.2

\*解放基盤相当

\*\*変換係数による推定値

図-1 地震動強度における観測記録と変換係数による推定値との比較