

# 堆積地盤の非線形性を考慮した地震動変換係数について

岐阜大学 正会員 ○古本 吉倫, 杉戸 真太, 能島 暢呂  
 岐阜大学大学院 学生会員 八代 和幸  
 航空自衛隊 杉尾 真司

## 1. はじめに

工学的基盤面における強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, 工学的基盤の強震動を堆積地盤表面での強震動に変換する手法は, 等価線形化手法等による地盤震動解析を行うよりはるかに簡単で利便性が高い。

筆者らは模擬地震動波形を用いた地盤震動解析に基づき, 既に加速度応答スペクトルの変換係数を提案している<sup>1)</sup>が, 本報では, 種々の地盤特性を有する鉛直アレー観測地点を選定し, 実際の観測記録を用いて変換係数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加速度応答スペクトルの変換係数の概要<sup>1)</sup>

工学的基盤で与えられる加速度応答スペクトルを  $S_r$  とし, 地表での加速度応答スペクトル  $S_s$  を次式によって推定する時の係数  $\beta_s$  を変換係数と定義する。

$$S_s = \beta_s \cdot S_r \quad (1)$$

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(解放基盤波形)を得て, さらに種々の地盤条件においてFDEL<sup>3)</sup>による地盤震動解析を行い, 加速度応答スペクトルの変換係数  $\beta_s$  を得た。

ついで,  $N$  値から式(2)より与えられる  $S_n$  と, 工学的基盤(ここでは  $V_s=400\sim 600$ [m/sec]相当)までの深さ  $d_p$  をパラメータとして重回帰分析を行い, 表-1(a),(b)に示すように変換係数をモデル化した。

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

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。

## 3. 観測記録に基づく変換係数の妥当性の検証

### 3.1 鉛直アレー観測点の選定

震災予防協会データベースや最近の強震記録の中から, 最大加速度 100gal 以上の記録を含む鉛直アレー観測地点(11地点・24地震)を選定し, 解析の対象とした(表-2)。

### 3.2 加速度応答スペクトルの比較

図-1に, 式(1)と表-1に基づき変換係数により求めた地表での加速度応答スペクトルの推定値(○印)と地表の観測記録より求めた加速度応答スペクトル(実線)の比較

を示す。なお, 図中の点線は工学的基盤面(解放基盤相当)における加速度応答スペクトルである。

軟弱な地盤(a)における加速度応答スペクトルに着目すると, 0.25秒以上の中長周期領域においてよく一致しているものの, 0.2秒程度以下の短周期領域で観測記録を下回っている。

一方, 非常に軟弱な地盤(b)における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。

### 3.3 スペクトル増幅率の比較

図-2は観測記録によるスペクトル増幅率(点)と変換係数(実線・破線)を比較したものである。

(a)の長周期領域(3.0秒)での変換係数は, 倍率1に近い定数である。これに対し, 観測記録による増幅率はばらつきはあるものの,  $S_n$  に依存せず線形的である。

一方, (b)の短周期領域(0.35秒)での観測記録による増幅率は入力地震動強度に依存して低下する, 地盤の非線形性の効果が表れている。特に地盤が軟弱であるほどその効果は顕著であり, 増幅率も大きい。これに対し, 変換係数による推定値は観測記録と同様の傾向が見られる。

## 4. まとめ

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。変換係数は入力地震動に応じた地盤による非線形性の効果をよく表す。

**謝辞:** 本研究で用いた強震記録と地盤資料は東京大学生産技術研究所, 広島市および震災予防協会データベースによるものである。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

キーワード: 変換係数, 堆積地盤, 非線形増幅, 地震応答スペクトル

連絡先: 〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 TEL: 058-293-2427

表-1(a) 加速度応答スペクトルの変換係数

$$S_s(T) = \beta_s(T) \cdot S_r(T)$$

$$\beta_s(T) = 10^{\gamma_0} \cdot S_r^{\gamma_1} \quad ; \quad \gamma_1 \leq 0$$

$$\beta_s(T) = 10^{\gamma_0} \quad ; \quad \gamma_1 > 0$$

$$\gamma_0(T) = \gamma_{00}(T) + \gamma_{01}(T) \cdot S_n + \gamma_{02}(T) \cdot \log_{10} d_p$$

$$\gamma_1(T) = \gamma_{10}(T) + \gamma_{11}(T) \cdot S_n + \gamma_{12}(T) \cdot \log_{10} d_p$$

$\beta_s$ : 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-1(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)

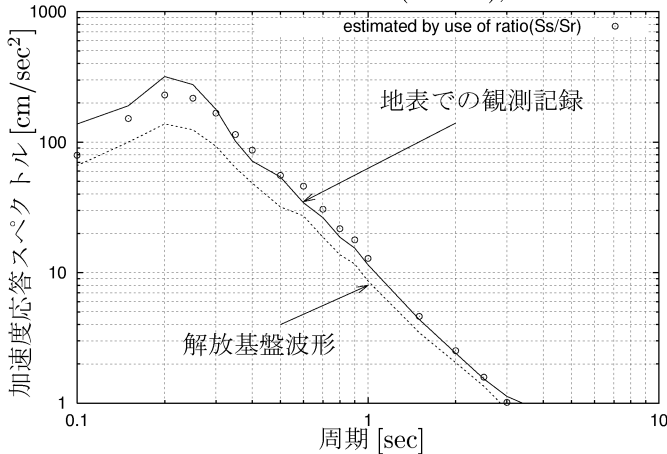
| T(sec) | $\gamma_{00}$ | $\gamma_{01}$ | $\gamma_{02}$ | $\gamma_{10}$ | $\gamma_{11}$ | $\gamma_{12}$ |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 7.000  | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 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         |

表-2 鉛直アレー観測地点の地盤パラメータ

| 観測地点       | $S_n$ | $d_p$ | 観測地点    | $S_n$ | $d_p$ | 観測地点   | $S_n$  | $d_p$ |
|------------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|
| 藤沢         | 0.853 | 35.0  | 千葉実験場   | 0.371 | 40.0  | 海南港変電所 | 0.150  | 100.0 |
| 広島市消防航空隊基地 | 0.740 | 33.9  | 筑波研究所   | 0.278 | 50.0  | 寒川     | 0.128  | 55.0  |
| 筑波 (戸田建設)  | 0.428 | 91.0  | 総合技術研究所 | 0.250 | 97.0  | 釧路-G   | -0.340 | 77.0  |
| 神戸ポートアイランド | 0.415 | 83.0  | 高砂発電所   | 0.168 | 100.0 |        |        |       |

(a) 千葉実験場 ( $S_n=0.371, d_p=40.0$  m)

1988年伊豆半島東方沖群発地震 (M=5.2), NS成分



(b) 広島市消防航空隊基地 ( $S_n=0.74, d_p=33.9$  m)

2001年芸予地震 (M=5.0), NS成分

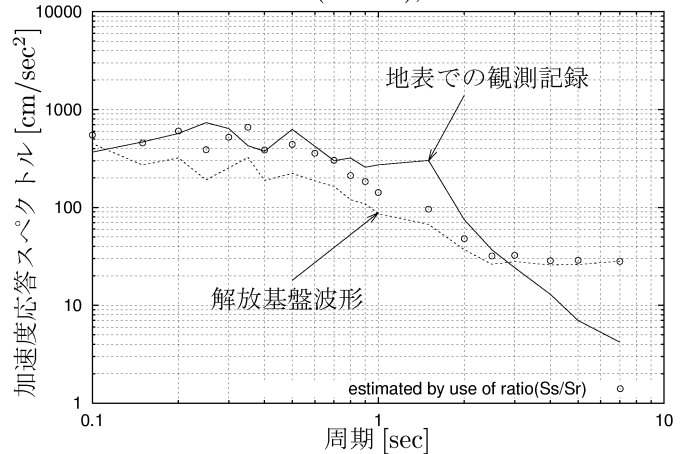
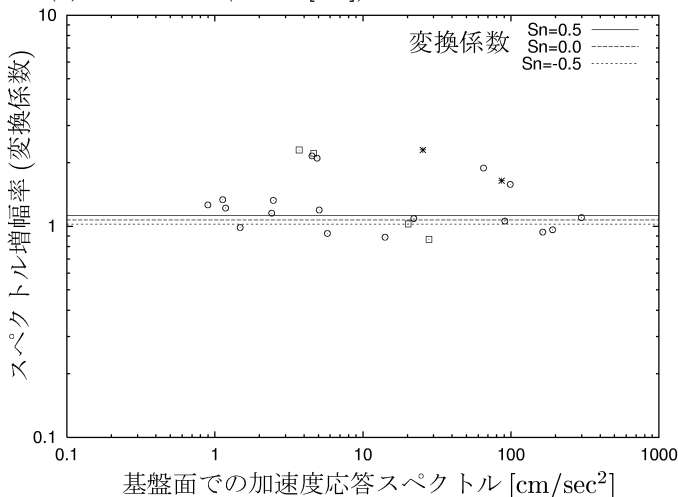
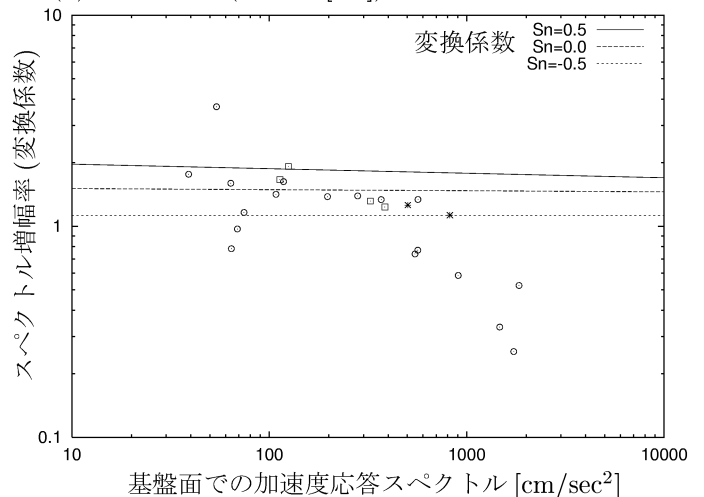


図-1 地震動強度における観測記録と変換係数による推定値との比較

(a) 長周期領域 (T=3.0[sec])



(b) 短周期領域 (T=0.35[sec])



観測記録 \* :  $-0.5 \leq S_n < 0.0$  ,  $O: 0.0 \leq S_n < 0.5$  ,  $\square: 0.5 \leq S_n$

図-2 観測記録に基づく増幅率と変換係数の比較