

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

古本 吉倫¹・杉戸 真太²・能島 暢呂³・八代 和幸⁴

¹ 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

² 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

³ 正会員 博士 (工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁴ 学生会員 岐阜大学大学院 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

工学的基盤面上で想定地震に対応する地震応答スペクトルが与えられたとき、比較的容易に得られる地盤パラメータによって、堆積地盤での地震応答スペクトルを簡便に推定する方法を提案する。まず、地盤構造が得られているわが国における強震観測点を選定し、種々の入力レベルの地震動による地盤の地震応答解析結果に基づき、地盤への入力レベルに依存する応答スペクトルの増幅率の非線形性を考察した。次に、堆積地盤での地震応答スペクトルを工学基盤での地震応答スペクトルから簡単な演算によって求められるように変換係数をモデル化した。

Key Words: Conversion factor, seismic response spectrum, ground motion amplification, Bedrock and soil surface motion, Nonlinear amplification effect

1. はじめに

一般に、地震動は沖・洪積地盤において増幅し、その特性はごく表層付近の地盤特性に大きく依存することから、想定される基盤地震動から堆積地盤面における地震動を推定するためには、等価線形化手法を用いた表層地盤に関する地盤震動解析が必要である。しかし、地域地震防災計画に必要とされる広域における細密な地震動分布を求めるためには、表層地盤に関する大量のデータを必要とし、その計算量も膨大となる。このような場合、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により、基盤レベルでの地震動を地表での地震動に変換する手法¹⁾は、数値計算を行うよりはるかに簡単であるため利便性が高いと考えられる。

同様に、工学的基盤面において設計スペクトルが与えられる場合にも、変換係数を掛けることにより、堆積地盤面における加速度応答スペクトルを推定する手法は、工学的基盤面での地震動波形を必要としないため有用であると考えられる。

具体的には、変換係数 β により、工学的基盤で与えられる地震動強度を Y_r から、対応する堆積地盤での地震動強度を Y_s を推定するモデルを考える。

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

本研究では、文献¹⁾の方法に従い、種々の入力レベルの地震動による地盤震動解析の結果に基づき、表層地盤に関するパラメータおよび地震入力強度 Y_r の関数としてモ

デル化する。ただし、解析対象とした地盤種類を大幅に増やした上、周波数依存型等価線形化手法 (FDEL)²⁾を用いることにより地盤震動解析の精度の向上を図った。

著者らは既に最大加速度、最大速度、計測震度の変換係数を提案している³⁾。本報ではこれらの周波数特性に着目し加速度応答スペクトルの変換係数を求めることを主目的としているが、今回特に神戸市域における地盤資料を追加し、地盤モデルの見直しを行なったので最大加速度、最大速度、計測震度の変換係数についても再検討を行なった。

2. 地盤パラメータ

表層地盤に関するパラメータとして、 N 値分布から連続量として定義される地盤の軟弱さの指標 S_n ⁴⁾ や工学的基盤までの深さ d_p をとりあげ、変換係数の推定法に取り入れることを考える。

地盤の軟弱さの指標 S_n は、地表面下 15~20m 程度までの軟弱さを連続量で表現したもので、以下のように N 値により与えられる。

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

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。また、せん断波速度が 400~600 (m/sec) 程度のいわゆる工学的基盤までの深さを d_p とする。ごく表層付近の地盤を S_n で、さらに深部の概

表-1 強震観測点の地盤パラメータ

サイト名	S_n	d_p		サイト名	S_n	d_p		サイト名	S_n	d_p	
予野	0.801	41.00	E	神戸市域 B23	0.230	40.20	D	名古屋	-0.023	16.40	C
品川 S	0.726	28.90	A	細島 S	0.171	51.00	A	釧路事 S	-0.034	52.00	A
越中島	0.699	100.00	E	高砂発電所	0.168	100.00	E	横川	-0.047	12.00	C
阿久根	0.603	17.80	C	海南港変電所	0.150	66.50	E	八戸 S	-0.048	75.00	A
青山	0.569	21.50	E	寒川	0.128	100.00	E	神戸市域 B27	-0.056	56.50	D
板島橋	0.511	16.50	B	豊田	0.121	16.60	C	神戸市域 B22	-0.113	13.50	D
下鶴間	0.459	100.00	E	神戸市域 B04	0.109	32.50	D	宮古 S	-0.129	11.60	A
山下変 S	0.418	35.00	A	蒲郡	0.099	19.00	C	神戸市域 B26	-0.159	16.60	D
知多	0.347	15.20	C	山下第 6S	0.085	20.22	A	小名浜事 S	-0.221	8.30	A
神戸市域 B20	0.342	42.10	D	宮崎 M	0.044	15.90	A	津和野	-0.296	9.80	C
作手	0.322	11.00	C	十勝 M	0.016	16.20	A	出水	-0.418	6.40	C
神戸市域 B48	0.269	23.80	D	室蘭 S	0.011	14.50	A	長篠	-0.430	12.00	C
神戸市域 B06	0.260	46.05	D	大分 S	-0.007	12.50	A	藤岡	-0.456	4.35	C
総合技術研究所	0.252	97.00	E	豊橋	-0.014	13.35	C	宮之城	-0.653	10.80	C

A:港湾技術研究所, B:土木研究所, C:K-net, D:神戸 JIBANKUN, E:その他

略的な特性は d_p で表わされるので、この2つのパラメータにより異なる周期の地盤震動の特徴を把握できるものと考えられる。表-1 に解析対象とした地盤モデル (42 地点) の地盤パラメータを示した。

3. 工学的基盤での強震動シミュレーションと地震応答解析

沖・洪積地盤とその直下の工学的基盤面での強震記録は、比較的大きな地震による記録は非常に少ないのが現状である。そこで、工学的基盤面での地震動データに基づく非定常地震動予測モデル (EMPR)⁵⁾ を用いて、基盤面でのシミュレーション地震動を算出した。図-1 に示すマグニチュード M と震源距離 R に対応する基盤地震動を算出した。これらは、 $M=5.0\sim 8.0$ 、 $R=10\sim 300\text{km}$ の範囲で 56 組あり、各組み合わせに対し、一様乱数で与えられる非定常スペクトルの初期位相角の組み合わせを変化させた 7 成分ずつ合計 392 成分のサンプル波を得た。算出した基盤地震動を、表-1 に示すそれぞれの地盤への入力地震動とし、周波数依存型等価線形化手法 (FDEL)²⁾ により、地表での地震動波形を算出した。

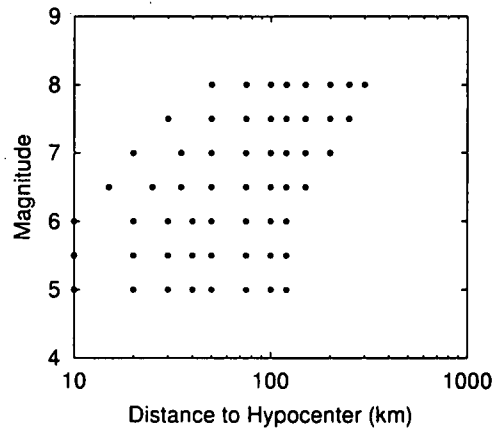
図-2 には、最大加速度と最大速度について工学的基盤での値に対する堆積地盤での値の比を示した。各図の横軸は、解放基盤での地震動強度を表している。基盤での地震動強度のレベルが高くなるに従い堆積地盤への増幅率 (ここでは変換係数) が低下することがわかる。このような増幅率の低下は、軟弱な地盤においてより顕著になる。

4. 変換係数のモデル化

(1) 最大地動の変換係数

以上のシミュレーション結果に基づき式 (1) に示す変換係数 β を以下の手順によりモデル化した。

Generation of rock surface earthquake motion

図-1 地震動シミュレーションの M と R の分布

(i) 各地点毎に得られる地震動強度 (最大加速度, 最大速度, 実効加速度) の増幅率は地盤条件によって異なる。そこで、図-2 の各図中に示されるように、地点毎にまた地震動強度毎に増幅率を地震動強度の 1 次関数として最小二乗法により直線で近似する。したがって、各地点毎、さらに各地震動強度毎に増幅率の直線近似式が得られる。

(ii) このようにして得られた回帰直線の定数項および傾きを、さらに地盤パラメータ S_n および d_p により重回帰分析することによってモデル化した。最大加速度, 最大速度, 実効加速度の変換係数を表-2 に示す。なお、堆積地盤面における気象庁計測震度 I_s は、基盤での計測震度 I_r と実効加速度の変換係数 β_{ae} より、次式で与えられる。

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

(2) 加速度応答スペクトルの変換係数

加速度応答スペクトルの変換係数を前節と同様にモデル化した。ただし、減衰定数 $h=0.05$ とし、固有周期 0.1 ~ 7 秒の 20 の周期について加速度応答スペクトルの算出を行なったのち、3 次曲線で平滑化したものを扱うことに

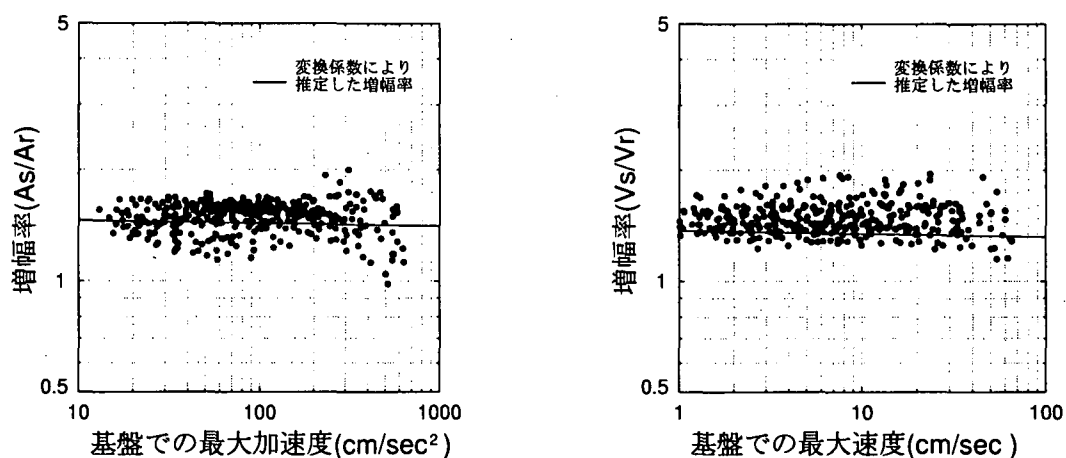


図-2 基盤での地震動強度に対する堆積地盤での地震動強度の比の分布
(神戸市域 B20 地点, $S_n=0.23$ $d_p=40.2$)

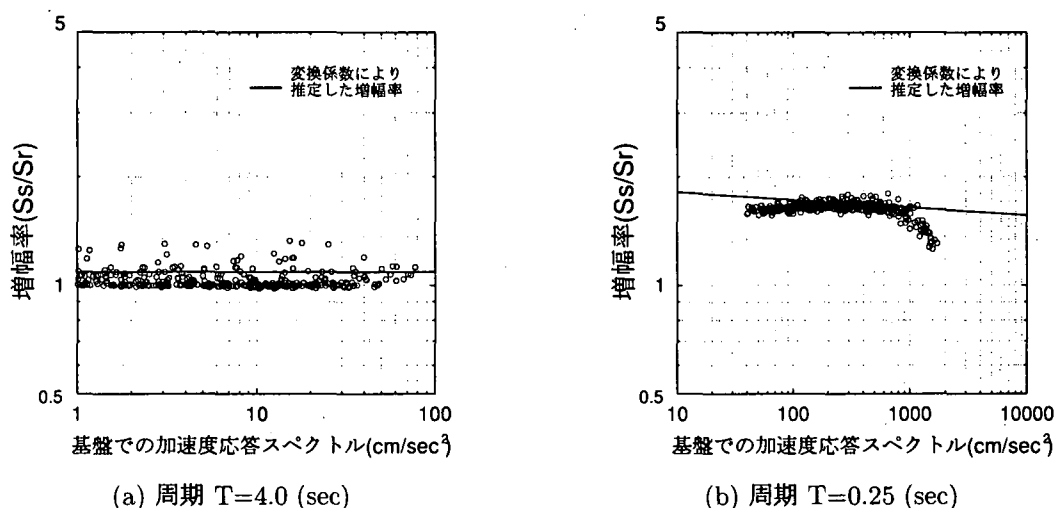


図-3 基盤での加速度応答スペクトルに対する堆積地盤での加速度応答スペクトルの比の分布
(神戸市域 B20 地点, $S_n=0.23$ $d_p=40.2$)

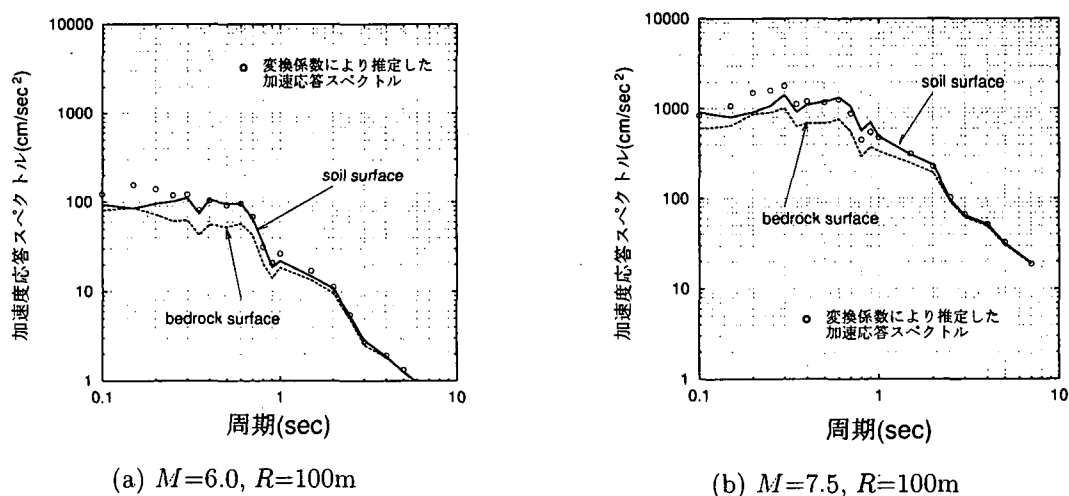


図-4 地表での応答スペクトルと基盤から β_s より推定された応答スペクトルの比較
(神戸市域 B20 地点, $S_n=0.23$ $d_p=40.2$)

表 2-最大地動の変換係数

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

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, β_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, β_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, β_{ae} : 実効加速度の変換係数

表-3(a) 加速度応答スペクトルの変換係数

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

β_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)

Sn : 表層地盤の軟弱さを定量的に表す指標

dp : 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-3(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)	γ_{00}	γ_{01}	γ_{02}	γ_{10}	γ_{11}	γ_{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

した。このようにして得られた変換係数 β の算出に関する式と係数を表-3(a),(b)に示した。図-3にやや軟弱な地盤を例に取り、周期 $T=4.0, 0.25$ 秒におけるシミュレーションデータの増幅率を示した。長周期域では地盤の非線形性が現れないのに対し、地震動の卓越する中程度以上の周期域において入力地震動強度に依存した地盤の非線形性が現れる。すなわち、基盤入力地震動のレベルが大きくなるにしたがって、変換係数 β が小さくなる。図-4は、 M と R を変化させ、基盤面と地表でのシミュレーション地震動と、基盤面での加速度応答スペクトルに変換係数 β_s を掛けて得られた加速度応答スペクトルの推定値をプロットしたものである。地盤パラメータのばらつき等を考慮すれば、 Sn, dp という単純な地盤パラメータを用いているにも関わらず、入力地震動に応じた地盤による非線形性の効果が十分に取り入れられている。

5. まとめ

周波数依存型等価線形化手法を用いて地震応答解析を行い、与えられた基盤加速度応答スペクトルに対応する一般の沖・洪積地盤表面での最大地動および加速度応答スペクトルを地盤パラメータ Sn, dp により推定するモデルを提案した。今後、種々の地盤特性を有する観測地点

における基盤と地表とでの同一地震による実記録との比較を行い、提案した変換係数の妥当性を検討する。

謝辞: 本研究で用いた地盤モデルは運輸省港湾技術研究所、建設省土木研究所、関西電力、東京電力、神戸市開発局、北海道開発局、K-net、阪神高速道路公団、神戸 JIBANKUN ならびに震災予防協会データベースに基づいたものである。記して深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 杉戸真太・亀田弘行・後藤尚男・広瀬憲嗣: 工学基盤と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数-表層地盤の非線形性を考慮した最大値動・応答スペクトル・非定常スペクトルの推定モデル、京都大学防災研究所年報、第 27 号、B-2, pp41-58, 1976.4
- 2) 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.493/III-27, pp,49-58, 1994.4.6
- 3) 古本吉倫・杉戸真太・能島暢呂・鈴木貴詞: 変換係数による堆積地盤での計測震度の推定法、第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.57-60, 1999.
- 4) 杉戸真太・亀田弘行: 地震動予測における地盤条件の影響について、土木学会第 38 回年次学術講演会、I-428, 1983.
- 5) M.Sugito, Y.Furumoto, T.Sugiyama: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12WCEE, Auckland, New Zealand (CD-ROM)