

(9) 地盤の非線形増幅特性を考慮した地震動の変換係数

——工学的基盤面と地表における地震動の変換——

京都大学工学部 杉戸真太 亀田弘行 後藤尚男

京都大学学生 ○廣瀬憲嗣

1. はじめに

一般に、地震動のレベルが大きいか場合には表層地盤を構成する土が非線形特性を示すことにより、基盤に入射される地震動強度と地表の地震動の比が変化する。このような土の非線形特性や、表層地盤の周波数特性による地震動の不確定性を減少させ、地震動予測における推定精度を高めることを目的として、著者らは工学的基盤面での地震動データに基づく非正常地震動の予測モデル(EMP-IB, IIB)を提案した。^{1,2)}

さて、一般の沖・洪積地盤における地震動予測において最大地動のような地震動の基本的なパラメータを多数の地点で推定する場合、文献1,2)で提案した非正常地震動の予測モデルにより各点での基盤レベルでの地震動を算出し、重複反射理論等により地表地震動を計算することはたいへん煩雑である。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て、基盤レベルでの最大地動を、簡単に地表での最大地動に変換する手法が有効である。本報ではこのような地震動強度の変換係数を最大地動、応答スペクトルについて提案した。ここでは、沖・洪積地盤上と解放基盤面での最大加速度、最大速度および応答スペクトルの比を変換係数 β と定義し、たとえば沖・洪積地盤での最大加速度 A_s を、工学的基盤面での最大加速度 A_r 、および変換係数 β により $A_s = \beta \cdot A_r$ の形で推定するモデルとした。変換係数 β は地盤のN値分布より得られる軟弱さの指標 S_n ³⁾、基盤面までの深さ d_p ⁴⁾および基盤面での地震動強度の関数(応答スペクトルの場合は、固有周期も考慮)としてモデル化した。

2. 最大加速度および最大速度の変換係数 β_a, β_v ⁵⁾

基盤上に表層が存在する一般の沖・洪積地盤上での最大加速度 A_s 、最大速度 V_s を、工学的基盤面での最大加速度 A_r 、最大速度 V_r から次式により推定するものとする。

$$A_s = \beta_a \cdot A_r(M, \Delta), V_s = \beta_v \cdot V_r(M, \Delta)$$

ここに、 $A_r(M, \Delta), V_r(M, \Delta)$ は工学的基盤面での最大加速度、最大速度の推定値を表し、 β_a, β_v をそれぞれ最大加速度、最大速度の変換係数と呼ぶ。

表-1に示す工学的基盤面までの地盤条件の得られているわが国での12の強震観測地点⁷⁾において、図-1に示す56の M, Δ の組合せに対するEMP-IBによるシミュレーション地震動を各7成分づつ算出し、地表面での地震動を算出した。数値計算には、等価線形化手法による重複反射理論を用いた。これらの結果をもとに、地盤の非線形特性も含めた最大地動の変換係数と地盤条件との関係を検討した。

得られたデータについて、以下の手順に従って数値解析を行いモデルを作成した。

①最大地動の非線形増幅特性を検討するため、図-2に相当するものを各地点について得た。横軸は工学的基盤面における最大加速度 A_r 、最大速度 V_r であり、縦軸は対応する沖・洪積地盤上の最大加速度より $\beta_a = A_s / A_r, \beta_v = V_s / V_r$ により算出した変換係数 β_a, β_v である。

表-1 強震観測地点の地盤パラメータ S_n, d_p ^{3,4)}

| 地点名 | S_n | d_p (m) |
|---------|--------|-----------|
| 室蘭-S | 0.081 | 14.500 |
| 八戸-S | 0.119 | 180.000 |
| 細島-S | 0.124 | 51.000 |
| 青森-S | 0.430 | 115.050 |
| 品川-S | 0.837 | 28.900 |
| 板島 BRG. | 0.587 | 18.500 |
| 塩釜工場-S | 0.529 | 16.750 |
| 小名浜-事-S | -0.419 | 8.300 |
| 山下変-S | 0.515 | 35.000 |
| 仙台-M | -0.077 | 11.800 |
| 釜石-M | -1.191 | 2.700 |
| 開北 BRG. | -0.589 | 5.000 |

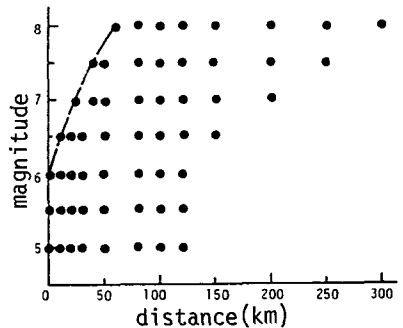


図-1 EMP-IB^{1,2)}によるシミュレーション地震動の M, Δ の分布

②非線形効果の現れる点（折れ曲がる点）の最大加速度 A_r^{\ddagger} 、最大速度 V_r^{\ddagger} を各地点について読みとり、最小二乗法により地盤パラメータ S_n との関係式（式(8),(9))を得た。

③各図において、式(8),(9)により決定された A_r^{\ddagger} 、 V_r^{\ddagger} より右側、すなわち非線形特性の現れる領域について β と A_r 、 V_r との関係を回帰分析により求め、その直線を決定する定数項 Γ_{0a} 、 Γ_{0v} 、傾き Γ_{1a} 、 Γ_{1v} を算出した（式(4),(5)）。さらに Γ_{0a} 、 Γ_{0v} と地盤条件（ S_n, dp ）との関係を回帰分析により求めた（式(10)）。

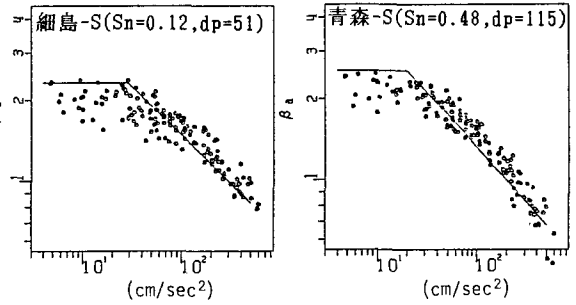
④ A_r^{\ddagger} 、 V_r^{\ddagger} より左側、すなわち比較的レベルの小さい領域については、モデル化された β_a 、 β_v の推定式（非線形領域）と A_r^{\ddagger} 、 V_r^{\ddagger} との交点における値で、一定とした（式(6),(7)）。

このようにして得られた変換係数の推定値を図-2(a),(b)中に直線で示した。このように、地盤の非線形増幅特性の効果が、 S_n, dp という簡単な地盤パラメータからでも良く表現できると言える。

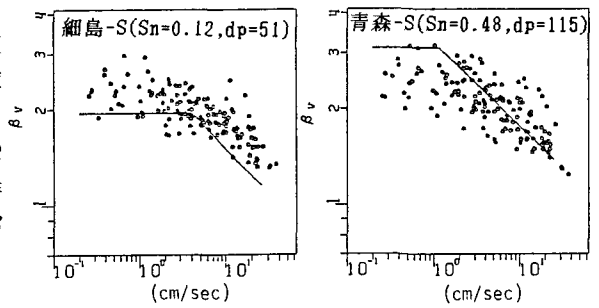
図-3に、工学的基盤面での最大地動の推定式¹²⁾による推定値（実線）、沖・洪積地盤上での記録に基づく推定式⁹⁾による推定値（破線）を示した。さらに、基盤での最大地動から上記の解析でとりあげた12地点での最大地動を算出し、それらの相乗平均を○印で示した。破線で示される値と比較してよく一致していることより、これらの最大地動の推定法において整合性がとれていることがわかる。

3. 加速度応答スペクトルの変換係数 β_r

加速度応答スペクトルについても最大加速度、最大速度とほぼ同様の解析を行った。図-4に、基盤面と地表での加速度応答スペクトルの一例を細い破線および一点鎖線で示した。固有周期0.1~7.0(sec)の20種に対して、減衰定数5%の最大応答を求めた。地表での応答スペクトルには地盤の周波数特性が強く現れており、このような個々の周波数特性を含めた応答スペクトルを推定するには、基盤の応答スペクトルに地盤の伝達関数を乗ずる方法があげられる。ここでは、 S_n 、 dp という簡単なパラメータを使っ



(a) 最大加速度



(b) 最大速度

図-2 シミュレーション地震動と変換係数 β の関係

表-2 最大地動の変換係数 β に関する式

| | |
|-----------------------------|---|
| 地盤1107)より $S_n^{9)}$ | $S_n = 0.246 S_e - 0.833$ $S_e = \int_0^{d_s} \exp\{-0.04 \cdot N(x)\} \cdot \exp(-0.14) dx$... (1) |
| 変換係数 β による 最大地動の変換 | $\bar{A}_s = \beta_a \cdot \bar{A}_r(M, \Delta)$... (2) |
| | $\bar{V}_s = \beta_v \cdot \bar{V}_r(M, \Delta)$... (3) |
| 変換係数 β | $\beta_a = 10^{\Gamma_{0a}} \cdot A_r^{\ddagger}$; $A_r \geq A_r^{\ddagger}$... (4) |
| | $\beta_v = 10^{\Gamma_{0v}} \cdot V_r^{\ddagger}$; $V_r \geq V_r^{\ddagger}$... (5) |
| | $\beta_a = 10^{\Gamma_{0a} + \Gamma_{1a} \cdot (1.508 - 0.42 \cdot S_n)}$; $A_r < A_r^{\ddagger}$... (6) |
| | $\beta_v = 10^{\Gamma_{0v} + \Gamma_{1v} \cdot (0.793 - 1.52 \cdot S_n)}$; $V_r < V_r^{\ddagger}$... (7) |
| 変換係数を 分ける基盤の 最大地動 | $A_r^{\ddagger} = 10^{(1.508 - 0.42 \cdot S_n)}$... (8) |
| | $V_r^{\ddagger} = 10^{(0.793 - 1.52 \cdot S_n)}$... (9) |
| 変換係数 β の係数 | $\Gamma_{0a} = 0.855 + 0.155 \cdot S_n + 0.00749 \cdot \log dp$ $\Gamma_{1a} = -0.295 - 0.124 \cdot S_n - 0.0285 \cdot \log dp$ $\Gamma_{0v} = 0.423 + 0.125 \cdot S_n + 0.0129 \cdot \log dp$ $\Gamma_{1v} = -0.0390 + 0.0623 \cdot \log dp$... (10) |

てのモデル化を考えているため、地表での応答スペクトルを最小二乗法により $\log T$ の3次曲線でモデル化したデータ（太い実線）を用いて平均的な増幅を抜いて変換係数を求める。この場合にも固い地盤では短周期側に、軟らかい地盤では長周期側に応答スペクトルのピークが現れやすい傾向は含まれており、 $S_n, \Delta p$ によりこの程度の地盤特性は表現できると考えられる。

上記のモデル化されたデータを用いて、以下の手順で数値解析を行った。
 ① 応答スペクトルの非線形増幅特性を検討するため、図-5に相当するものを地盤別、周期別に作成した。
 ② 非線形特性の現れる折れ曲がり点 S_r^\ddagger は、長周期では無いものが多い。したがって、折れ曲がっていると認められるのを読みとり、そのデータに基づいて S_r^\ddagger を S_n で推定する式を得た。（式(14)~(16)）

③ S_r^\ddagger より右側（非線形領域）に対して回帰直線を引いた。ただし、 $S_r \geq S_r^\ddagger$ の領域にデータが無い、もしくはほとんど無い（10個未満）ものは、 S_r^\ddagger より左側（線形領域）での平均値を定数項とし、傾きを0として扱った。さらに得られた直線の傾きと定数項を、固有周期ごとに地盤条件（ $S_n, \Delta p$ ）に対して回帰分析した。（式(12)）
 ④ 上記③で得られた回帰式の係数 $r_{00}, r_{01}, r_{02}, r_{10}, r_{11}, r_{12}$ は周期に対して単調な傾向を示さないことから $\log T$ の関数としてさらにモデル化することは避け、表-4のように与えた。
 ⑤ 変換係数 β_r は、 $S_r \geq S_r^\ddagger$ の領域では、モデル化された回帰直線の値とし、 $S_r < S_r^\ddagger$ の領域では $S_r = S_r^\ddagger$ における β の値をとって一定とした。

作成された β_s のモデルを図-5上に直線で示した。

参考文献

- 1) 後藤・杉戸・亀田・斉藤・大滝：工学的基盤における地震動予測モデル，京都大学防災研究年報，第27号 B-2別刷，昭.59.4.
- 2) Kameda, Sugito, "Prediction of Strong Earthquake Motions on Rock Surface Using Evolutionary Process Model," Conf. on Str. Analysis and Design of Nuclear Power

表-3 応答スペクトルの変換係数 β に関する式

| | | | |
|-----------------------------|--|-------------------------|------|
| 変換係数 β とおける応答スペクトルの変換 | $S_s = \beta_s \cdot S_r(M, \Delta, T, \rho)$ | ... | (11) |
| 変換係数 β | $\beta_s = 10^{r_{0s}} \cdot S_r^{r_{1s}}$ | $S_r \geq S_r^\ddagger$ | ... |
| | $\beta_s = 10^{r_{0s}(S_r^\ddagger)^{r_{1s}}}$ | $S_r < S_r^\ddagger$ | ... |
| 変換係数を分ける基盤の加速履歴 | $S_r^\ddagger = 10^{(l_{0s} + l_{1s} \cdot S_n)}$ | | ... |
| | $l_{0s} = 2.670 + 0.007 \cdot \log T - 0.809 \cdot (\log T)^2$ | | ... |
| | $l_{1s} = -0.485 + 0.291 \cdot \log T - 2.359 \cdot (\log T)^2 - 2.408 \cdot (\log T)^3$ | | ... |
| 変換係数 β の係数 | $r_{0s}(T) = r_{00}(T) + r_{01}(T) \cdot S_n + r_{02}(T) \cdot \log \Delta p$ | | ... |
| | $r_{1s}(T) = r_{10}(T) + r_{11}(T) \cdot S_n + r_{12}(T) \cdot \log \Delta p$ | | ... |

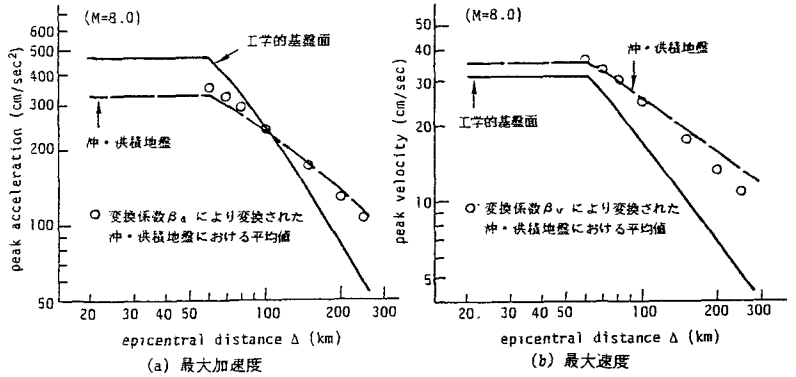


図-3 最大地動のアテニュエーション特性

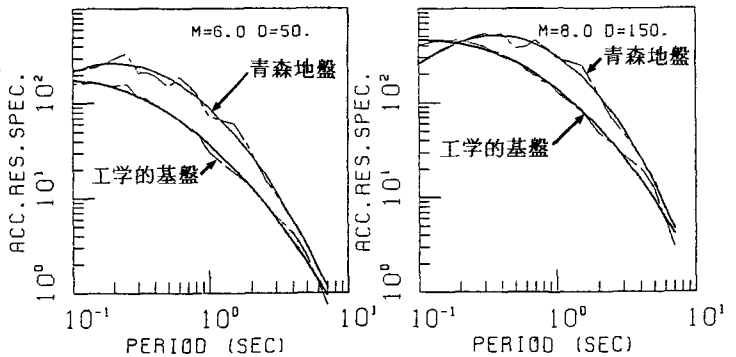


図-4 工学的基盤面と沖・洪積地盤（青森-S）での加速度応答スペクトル

Plants, Port Alegre-RS, Oct. 1984.

3) Kameda, Sugito, and Goto, "Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions, Proc. 3rd Int. Earthq. Microz. Conf. Vol. II, June 1982.

4) 杉戸・亀田：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-418, 昭.58.9.

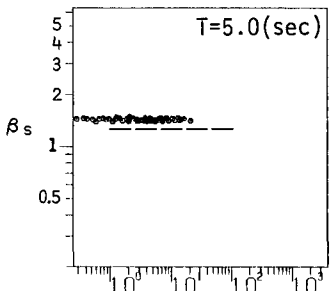
5) 廣瀬憲嗣：地盤の非線形性を考慮した地震動増幅率の予測モデル，京都大学卒業論文，第4113号，1985.3.

6) Kameda, Sugito, "Earthquake Motion Uncertainty as Compared between Soil Surface and Rock Surface Motions" 8th Int. Conf. on Str. Mech. in Reactor Technology, Brussels, Belgium, 19-23 1985.

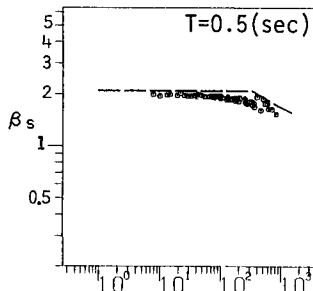
7) 土田・倉田・山田・須藤・横山・石坂：港湾地域強震観測点資料，その1～5，港湾技研資料 1967-1980.

表-4 回帰係数 Γ_{00} , Γ_{01} , Γ_{02} , Γ_{10} , Γ_{11} , Γ_{12}

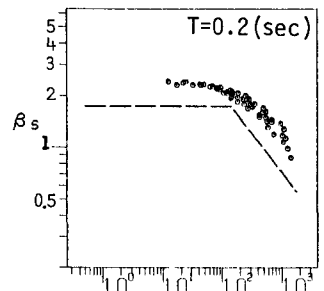
| 周期(sec) | Γ_{00} | Γ_{01} | Γ_{02} | Γ_{10} | Γ_{11} | Γ_{12} |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 7.0 | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5.0 | 0.000 | 0.000 | 0.045 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4.0 | 0.000 | 0.000 | 0.080 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3.0 | 0.000 | 0.000 | 0.070 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.5 | 0.000 | 0.000 | 0.080 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.0 | 0.000 | 0.014 | 0.095 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1.5 | 0.000 | 0.051 | 0.110 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1.0 | 0.000 | 0.142 | 0.130 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.9 | 0.046 | 0.170 | 0.140 | -0.018 | -0.007 | -0.005 |
| 0.8 | 0.097 | 0.199 | 0.150 | -0.039 | -0.015 | -0.010 |
| 0.7 | 0.155 | 0.285 | 0.160 | -0.062 | -0.023 | -0.016 |
| 0.6 | 0.222 | 0.350 | 0.170 | -0.089 | -0.033 | -0.022 |
| 0.5 | 0.301 | 0.444 | 0.200 | -0.120 | -0.045 | -0.030 |
| 0.4 | 0.398 | 0.490 | 0.233 | -0.159 | -0.060 | -0.040 |
| 0.35 | 0.456 | 0.507 | 0.225 | -0.182 | -0.068 | -0.046 |
| 0.3 | 0.523 | 0.520 | 0.220 | -0.209 | -0.078 | -0.052 |
| 2.5 | 0.602 | 0.508 | 0.211 | -0.241 | -0.090 | -0.060 |
| 2.0 | 0.699 | 0.479 | 0.201 | -0.280 | -0.105 | -0.070 |
| 0.15 | 0.824 | 0.225 | 0.190 | -0.330 | -0.124 | -0.082 |
| 0.1 | 1.000 | 0.055 | 0.160 | -0.400 | -0.150 | -0.100 |



基礎面での加速度応答 (cm/sec^2)

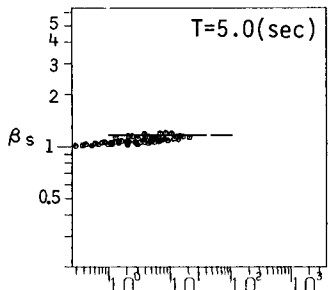


基礎面での加速度応答 (cm/sec^2)

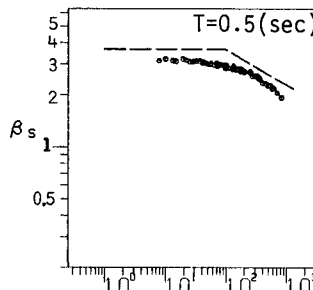


基礎面での加速度応答 (cm/sec^2)

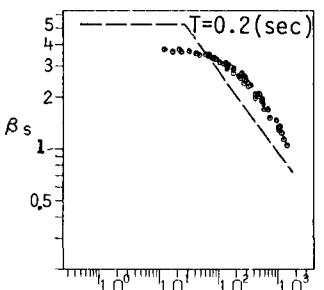
(a) 八戸-S ($S_n=0.12$, $d_p=180.0(\text{m})$)



基礎面での加速度応答 (cm/sec^2)



基礎面での加速度応答 (cm/sec^2)



基礎面での加速度応答 (cm/sec^2)

(b) 品川-S ($S_n=0.84$, $d_p=28.9(\text{m})$)

図-5 基礎面での加速度応答スペクトルと変換係数 β の関係