

工学的基盤面と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数

—— 表層地盤の非線形特性を考慮した推定モデル ——

CONVERSION FACTOR BETWEEN EARTHQUAKE MOTIONS ON SOIL SURFACE AND ROCK SURFACE  
WITH CONSIDERATION ON THE NONLINEARITY OF SOIL LAYERS

杉戸真太\*・亀田弘行\*\*・廣瀬憲嗣\*\*\*

by Masata SUGITO, Hiroyuki KAMEDA, Kenji HIROSE

A simple method is developed for conversion between soil surface and rock surface earthquake motions including nonlinear amplification/deamplification effects of soil layers overlying bedrock. Several simulated rock surface earthquake motions are generated for various combinations of magnitude and distance. The corresponding soil surface motions for these simulated earthquakes are calculated for typical soil layer models at Japanese strong motion observation stations. On this basis, a simple conversion factor,  $\beta$ , between soil surface and rock surface motion is proposed for peak acceleration, peak velocity, and response spectra. The conversion factor,  $\beta$ , is defined as a function of the soil parameter  $S_n$  which represents the softness of surface layers, the depth to bedrock  $d_p$ , and the earthquake motion intensity on rock surface.

1. まえがき

一般に、地震動のレベルが大きい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定常地震動の予測モデル(EMP-I B, II B)を提案した。<sup>1,2)</sup>

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、想定された基盤地震動から重複反射理論により地表地震動を個々の地点ごとに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。

この場合、扱う地震動強度は最大加速度、最大速度が主であり、1～数Hzの振動数域の地震動を主に対象としている。このような振動数域での地震動は、地震動のレベルに応じて表層地盤の非線形性の影響を大きく受けるものと考えられる。したがって地盤の非線形性まで考慮した変換係数とすることが重要である。

---

\* 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)  
 \*\* 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)  
 \*\*\* 京都大学工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

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 $\beta$ 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 $\beta$ 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 $\beta$ は地盤のN値分布より得られる軟弱さの指標 $S_n^{4)}$ ，基盤面までの深さ $dp^{5)}$ 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. 非正常地震動のシミュレーションと地盤パラメータ $S_n, dp$

### 2.1 EMP-IB<sup>1)</sup>モデルによる基盤地震動のシミュレーションと地表地震動の算出

沖・洪積地盤とその真下の基盤面での強震記録は，徐々に蓄積されつつあるが，比較的大きな地震による記録はきわめて少ないのが現状である。ここでは，文献1)~3)で提案した工学的基盤面での非正常地震動予測モデル(EMP-IB)を用いて，種々のレベルのシミュレーション地震動を算出し，それらを種々の地盤特性を有する沖・洪積地盤の基盤への入力とし，等価線形化手法により地表地震動を計算した。このようにして得られたシミュレーション地震動に基づき，変換係数を提案した。

図-1に，基盤地震動を算出するマグニチュード $M$ ，震央距離 $\Delta$ の組合わせを示した。 $M=5.0 \sim 8.0$ ， $\Delta=0 \sim 300\text{km}$ の範囲で56組あり，各組合わせごとに7成分ずつ合計392成分のサンプル波を得た。図-1における破線は，文献4)で示された震央域の境界を表すものであり，震央域内では地震動強度は震央距離によらず一定としている。したがって，地震動のシミュレーションを行う $M$ ， $\Delta$ の組合わせもこの震央域外とした。

図-2に，基盤面およびそれに対応する沖・洪積地盤面でのシミュレーション地震動の一例を示した。扱った地盤モデルは，次節で述べる細島-Sであり，地震動は $M=7.5$ ， $\Delta=100\text{km}$ に対するものである。EMP-IBにより算出されるシミュレーション地震動の振幅を1/2として対象とするモデル地盤での基盤面への入射波とし，等価線形化手法による重複反射理論により地表地震動を算出した。地盤各層でのひずみと剛性，減衰定数との関係にはHardin・Drnevich<sup>6)</sup>のモデルを用いた。その場合の等価剛性，等価減衰定数を与える有効ひずみは，地震動の継続時間による平均的な地盤剛性の低下の影響を考慮し，次式による値を用いた。<sup>1)</sup>

$$\gamma_e = 0.6(T_d/T_m)^{0.1} \gamma_{max} \quad \text{---(1)}$$

ただし， $\gamma_{max}$  = 最大せん断ひずみ， $\gamma_e$  = 有効せん断ひずみ， $T_d$  = 地震動継続時間<sup>7)</sup> ( $T_d = 7.7P_t / A_p^2$ ， $P_t$  : トータルパワー， $A_p$  : 最大加速度)である。 $T_m$ は平均的な継続時間であり $T_m = 6.9$ 秒と与えられている。<sup>1)</sup>式(1)により $\gamma_e$ は継続時間 $T_d$ により0.5~0.7 $\gamma_{max}$ 程度の値となる。図-2において，フーリエスペクトルを比較すると，高振動数域では地盤の非線形特性が大きく影響し基盤と地表での増幅率が1に近い小さくなっている。また，地盤の卓越振動数とみられる1.5Hzあたりでは大きく増幅している。さらに，低振動数域ではほとんど増幅していないことがわかる。これは，考慮してい

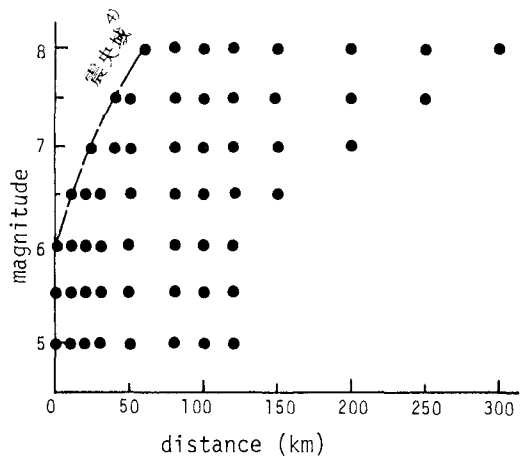


図-1 EMP-IB<sup>1)</sup>による地震動シミュレーションの $M$ ， $\Delta$ の分布

る地盤の深さに比較して長い波長の長周期成分は基盤より上での地盤の振動モードに合わないためにほとんど振幅が変化しないことを表している。このようにして得られる基盤での392成分、沖・洪積地盤での4700成分あまりのシミュレーション地震動を用いて、次章で変換係数 $\beta$ を提案する。

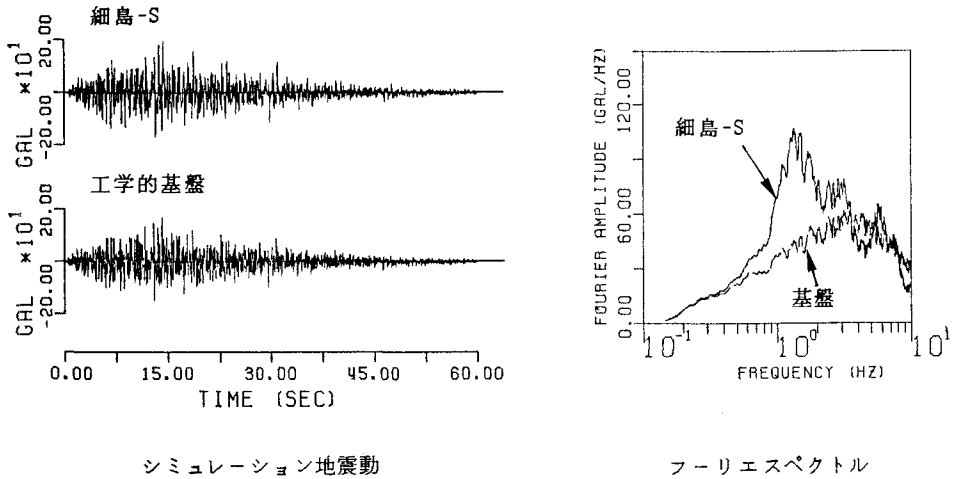


図-2 工学的基盤面と沖・洪積地盤面でのシミュレーション地震動  
( $M = 7.5, \Delta = 100\text{km}$ )

## 2.2 地盤モデルと地盤パラメータ $S_n^{4)}$ , $dp^{5)}$

わが国における主な強震観測点のうち、 $v_s = 800 \sim 700\text{m/sec}$ 程度の工学的基盤面<sup>1)</sup>までの地盤構造が得られている10地点を選び、2.1で述べた392成分の基盤地震動に対応する地表地震動を算出した。本研究で定義しようとする地震動の変換係数 $\beta$ は、比較的容易に得られる地盤条件より算出できることが重要である。ここでは、通常のボーリング調査で得られる $N$ 値より算出される $S_n$ と、基盤面までの深さ $dp$ を地盤パラメータとして用いることとした。地盤パラメータ $S_n$ は地表面下15~20m程度の軟弱さを表す指標で、次式により得られる。

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

ただし、 $N(x)$  = 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。ごく表層付近の地盤の状態は $S_n$ で、さらに深部のごく概略的な特性は $dp$ でそれぞれ表されることから、この2つのパラメータにより異なる振動数の地盤振動の特徴を把握できるものと考えられる。表-1に、対象とした10観測地点<sup>9)</sup>の2つの地盤パラメータを示した。

表-1 強震観測地点の地盤パラメータ $S_n, dp^{4)5)}$

地点名	$S_n$	$dp$ (m)
室蘭-S	0.03	14.5
八戸-S	-0.01	180.0
細島-S	-0.06	51.0
青森-S	0.37	115.1
品川-S	0.71	28.9
板島 BRG.	0.48	18.5
塩釜工場-S	0.52	16.8
小名浜-事-S	-0.22	8.3
山下変-S	0.39	35.0
仙台-M	-0.07	11.6

3. 工学的基盤面と沖・洪積地盤面での地震動の変換係数

3.1 最大加速度，最大速度の変換係数<sup>9, 10)</sup>

これまでの計算結果に基づき，工学的基盤面（解放基盤）と沖・洪積地盤面での最大加速度，最大速度の変換係数 $\beta$ を提案する。

沖・洪積地盤上での最大加速度 $A_s$ ，最大速度 $V_s$ を，対応する工学的基盤上での最大加速度 $A_r$ ，最大速度 $V_r$ から次式により変換するものとする。

$$\left. \begin{aligned} A_s &= \beta_a \cdot A_r \\ V_s &= \beta_v \cdot V_r \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (3)}$$

ここに， $\beta_a$ ， $\beta_v$ は最大加速度，最大速度の変換係数で，地盤パラメータ $S_n$ ， $dp$ および基盤での最大加速度，速度の関数である。すなわち， $\beta_a = \beta_a(S_n, dp, A_r)$ ， $\beta_v = \beta_v(S_n, dp, V_r)$ 。

変換係数 $\beta_a$ ， $\beta_v$ のモデルを以下の手順に従って求めた。

- 1 最大地動の非線形増幅特性を検討するため，図-3に相当するものを最大加速度，最大速度について1.0のモデル地盤で得た。図-3は細島-S地盤の例であり，横軸は，工学的基盤面での最大加速度，縦軸は最大加速度の沖・洪積地盤面と基盤面との比 $\beta_a (= A_s / A_r)$ である。
- 2 図-3において，基盤最大加速度がある程度までは増幅率はほぼ一定であるが，あるレベル以上になると地盤の非線形性の効果が現れ増幅率は低下してくる。このような非線形特性が表れる基盤地震動を最大加速度 $A_r^0$ ，最大速度 $V_r^0$ とし，これらの値を各観測点ごとに定めた。このような $A_r^0$ ， $V_r^0$ は地盤パラメータ $S_n$ に大きく依存していることから，最小二乗法によりこれらの関係式を得た。図-4，5に， $S_n$ と $A_r^0$ ， $V_r^0$ の関係および関係式を示した。
- 3 各地点ごとに得られる $\beta_a$ ， $\beta_v$ と $A_r$ ， $V_r$ との関係の図において，式(8)，(9)により決定される $A_r^0$ ， $V_r^0$ より右側，すなわち非線形性の効果があらわれる領域において $\beta_a$ ， $\beta_v$ と $A_r$ ， $V_r$ との関係を最小二乗法により各地点ごとに求め，その直線を決定する定数項 $r_{0a}$ （加速度）， $r_{0v}$ （速度）および傾き $r_{1a}$ （加速度）， $r_{1v}$ （速度）を得た。各地点ごとに得られた係数 $r_{0a}$ ， $r_{1a}$ ， $r_{0v}$ ， $r_{1v}$ を地盤パラメータ $S_n$ ， $dp$ に対して回帰分析し，式(10)を得た。
- 4  $A_r^0$ ， $V_r^0$ より左側，すなわち非線形性が現れない領域については， $\beta$ で得られた非線形特性でモデル化された。

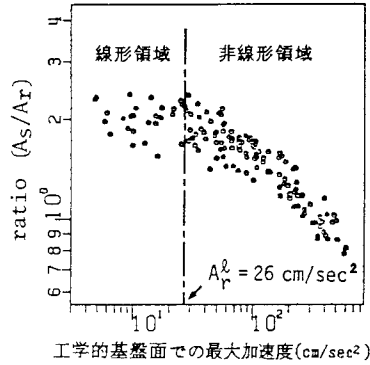


図-3 工学的基盤面と沖・洪積地盤面での最大加速度の関係

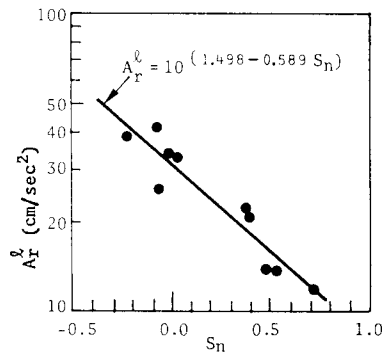


図-4 地盤パラメータ $S_n$ と $A_r^0$ との関係

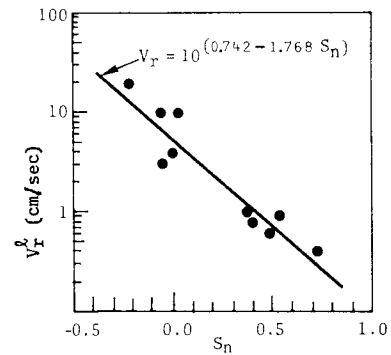


図-5 地盤パラメータ $S_n$ と $V_r^0$ との関係

た  $\beta_a, \beta_v$  の推定式の  $A_r^\dagger, V_r^\dagger$  における値で一定とした。(式(6),(7))。

以上のようにして得られた  $\beta_a, \beta_v$  の推定式を塩釜工場-S, 青森-S地盤でのシミュレーションデータとともに図-6に示した。とくに最大加速度の場合において  $S_n, d_p$  という2つの単純な地盤パラメータのみより地盤の非線形性の最大地動に及ぼす影響が比較的良く推定できるものと考えられる。最大速度の場合には, 一般に増幅倍率のばらつきが大きいため  $\beta_v$  の推定値も最大加速度ほどにはシミュレーションデータと一致しない。

図-7に, 種々の  $S_n, d_p$  による変換係数  $\beta_a, \beta_v$  の推定値を示した。基盤地震動が特に大きくなると最大加速度では  $S_n, d_p$  が大きい軟弱な地盤ほど  $\beta_a$  が小さくなる。すなわち短周期成分の地震動には表層付近の地盤の非線形特性の効果が大きく影響することを表している。一方,

表-2 最大加速度, 最大速度の変換係数  $\beta_a, \beta_v$  に関する式

変換係数 $\beta$	$\beta_a = 10^{r_{0a}} \cdot A_r^{r_{1a}} ; A_r \geq A_r^\dagger \dots (4)$
	$\beta_v = 10^{r_{0v}} \cdot V_r^{r_{1v}} ; V_r \geq V_r^\dagger \dots (5)$
	$\beta_a = 10^{r_{0a}} \cdot (A_r^\dagger)^{r_{1a}} ; A_r < A_r^\dagger \dots (6)$
	$\beta_v = 10^{r_{0v}} \cdot (V_r^\dagger)^{r_{1v}} ; V_r < V_r^\dagger \dots (7)$
変換係数を分ける基盤の最大地動	$A_r^\dagger = 10^{(1.498-0.589 \cdot S_n)} \dots (8)$
	$V_r^\dagger = 10^{(0.742-1.768 \cdot S_n)} \dots (9)$
変換係数 $\beta$ の係数	$\left. \begin{aligned} r_{0a} &= 0.705 + 0.167 \cdot S_n + 0.0513 \cdot \log d_p \\ r_{1a} &= -0.193 - 0.157 \cdot S_n - 0.088 \cdot \log d_p \\ r_{0v} &= 0.454 - 0.020 \cdot S_n - 0.038 \cdot \log d_p \\ r_{1v} &= -0.400 + 0.120 \cdot S_n + 0.108 \cdot \log d_p \end{aligned} \right\} \dots (10)$

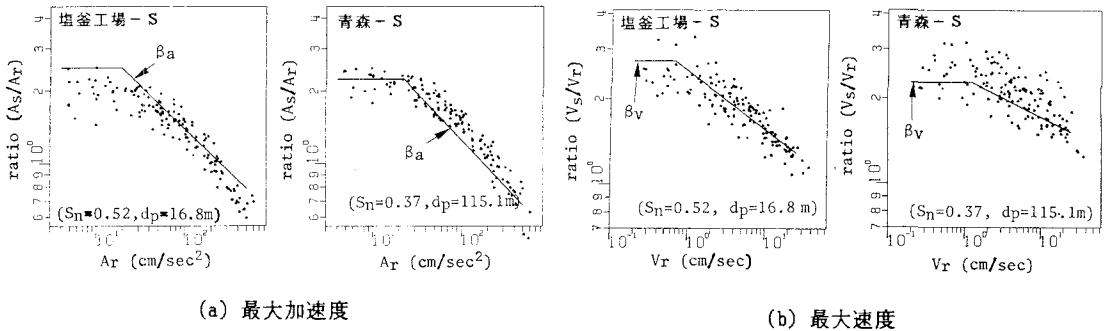


図-6 工学的基盤面と沖・洪積地盤面での最大地動の関係と変換係数  $\beta_a, \beta_v$

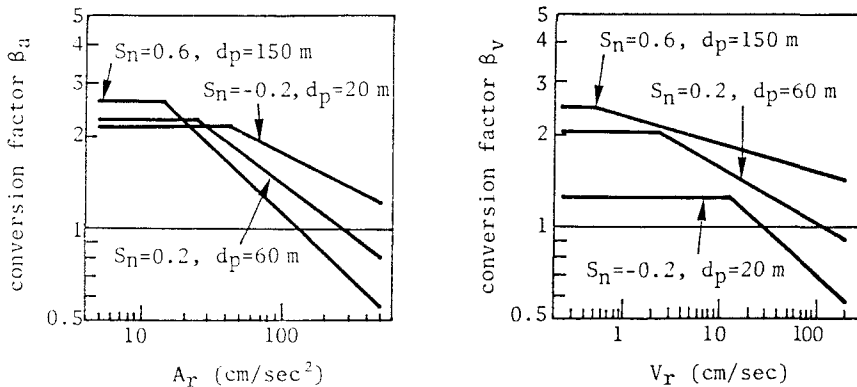


図-7 変換係数  $\beta_a, \beta_v$  と  $A_r, V_r$  の関係

最大速度の場合には、基盤地震動のレベルにかかわらず、 $\beta_v$  は  $S_n$ 、 $d_p$  が大きいほど大きな値となっていることがわかる。

図-7の結果から、地震動のレベルが大きい場合には、最大加速度は軟弱な地盤の方が堅固な地盤より小さくなるが、最大速度は軟弱な地盤ほど大きいことを表している。このことは、地震の破壊力が加速度よりも速度とよく対応すること、軟弱な地盤ほど震害が大きいという過去の経験的事実ともよく調和しているものと考えられる。

### 3.2 加速度応答スペクトルの変換係数<sup>19</sup>

加速度応答スペクトルについての変換係数を、前節における最大加速度、最大速度の場合と同様の方法により提案する。

図-8に、基盤面での加速度応答スペクトル、およびその基盤のシミュレーション地震動を入射波とする青森-S地盤上での地震動による加速度応答スペクトルの例を示した。図-8(a)は比較的地震動のレベルの小さい  $M=6.0, \Delta=50\text{km}$  に相当するもの、(b)は地震動レベルの大きい  $M=8.0, \Delta=150\text{km}$  に相当するものである。これらは固有周期  $0.1 \sim 7$  秒の20の周期、減衰定数  $h=0.05$  に対して算出したものであり、一点鎖線で示されている。図中の実線は、得られた加速度応答スペクトルを3次曲線で最小二乗法により平滑化したものである。地表での応答スペクトルには地盤の振動数特性が現れており、このような個々の振動数特性を含めた応答スペクトルを推定するには地盤の層構造の情報から伝達関数を算出する必要がある。ここでは、 $S_n$ 、 $d_p$  という簡単な地盤パラメータを使っての応答スペクトルの推定を目的としているため、このような詳細な振動数特性を振動数軸上で平滑化したものを扱うこととした。

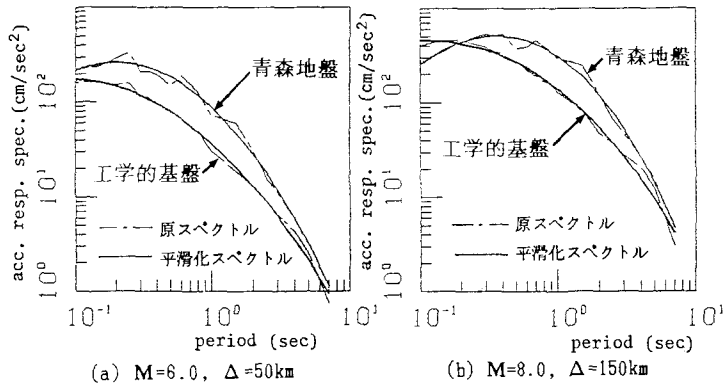


図-8 工学的基盤面と沖・洪積地盤面での加速度応答スペクトル (青森-S地盤)

表-3 加速度応答スペクトルの変換係数 $\beta_s$ に関する式

変換係数 $\beta_s$ による 応答スペクトルの変換	$S_s = \beta_s \cdot S_r(M, \Delta, T, h)$ ... (11)
変換係数 $\beta_s$	$T < 1.0(\text{sec})$ ; $\beta_s = 10^{r_{05}} \cdot S_r^{r_{15}}$ ; $S_r \geq S_{\ddagger}$ ... (12)
	$\beta_s = 10^{r_{05}} \cdot (S_{\ddagger}^{\ddagger})^{r_{15}}$ ; $S_r < S_{\ddagger}$ ... (13)
	$T \geq 1.0(\text{sec})$ ; $\beta_s = 10^{r_{05}}$ ... (14)
変換係数を分ける 基盤の加速度応答 ( $T < 1.0(\text{sec})$ )	$S_{\ddagger}^{\ddagger} = 10^{(\lambda_{05} + \lambda_{15} \cdot S_n)}$ ... (15)
	$\lambda_{05} = 2.618 + 0.219 \cdot \log T + 0.732 \cdot (\log T)^2 + 1.505 \cdot (\log T)^3$ ... (16)
	$\lambda_{15} = -0.499 + 0.369 \cdot \log T - 2.268 \cdot (\log T)^2 - 3.050 \cdot (\log T)^3$ ... (17)
変換係数 $\beta_s$ 算出のための係数	$r_{05}(T) = r_{00}(T) + r_{01}(T) \cdot S_n + r_{02}(T) \cdot \log d_p$ ... (18)
	$r_{15}(T) = r_{10}(T) + r_{11}(T) \cdot S_n + r_{12}(T) \cdot \log d_p$ ... (19)

したがって、基盤でのシミュレーション地震動による応答スペクトルも同様に3次曲線で平滑化したものをデータとして使用した。このような平滑化を行った応答スペクトルを扱ってはいるが、たとえば、堅固な地盤では短周期側に軟弱な地盤では長周期側にそのピークが現れる傾向等は十分に表現されており、 $S_n$ ,  $\alpha_p$ によってこの程度の地盤特性は良く説明できると考えられる。

上記の方法により得られたデータに基づき、以下の手順で変換係数 $\beta_s$ を得た。

- ① 加速度応答スペクトルの非線形増幅特性を検討するため、各地盤別、周期別に図-3に相当する図を作成した。
- ② 非線形性の影響の現れる折れ曲がり点 $S\ddagger$ は、長周期では無いものが多い。したがって、折れ曲がりしていると認められるものを読みとり、そのデータに基づいて $S\ddagger$ を $S_n$ で推定する式を得た。(表-3, 式(15)~(17))

表-4 変換係数 $\beta_s$ 推定のための各係数 (表-3, 式(18), (19))

周期(sec)	$r_{00}$	$r_{01}$	$r_{02}$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$
7.00	-0.020	0.002	0.045	0.0	0.0	0.0
5.00	-0.135	0.005	0.131	0.0	0.0	0.0
4.00	-0.171	0.010	0.163	0.0	0.0	0.0
3.00	-0.193	0.035	0.193	0.0	0.0	0.0
2.50	-0.202	0.059	0.208	0.0	0.0	0.0
2.00	-0.203	0.099	0.217	0.0	0.0	0.0
1.50	-0.184	0.138	0.218	0.0	0.0	0.0
1.00	-0.120	0.198	0.213	0.0	0.0	0.0
0.90	-0.075	0.280	0.213	-0.003	-0.038	-0.004
0.80	-0.040	0.370	0.212	-0.005	-0.079	-0.009
0.70	-0.005	0.453	0.212	-0.007	-0.115	-0.014
0.60	0.050	0.550	0.211	-0.013	-0.151	-0.024
0.50	0.120	0.615	0.210	-0.017	-0.180	-0.038
0.40	0.260	0.660	0.208	-0.020	-0.201	-0.070
0.35	0.358	0.645	0.206	-0.028	-0.210	-0.090
0.30	0.441	0.615	0.203	-0.040	-0.210	-0.105
0.25	0.544	0.540	0.196	-0.052	-0.200	-0.123
0.20	0.655	0.388	0.180	-0.076	-0.180	-0.133
0.15	0.835	0.164	0.168	-0.184	-0.150	-0.119
0.10	1.163	-0.270	0.043	-0.339	-0.080	-0.073

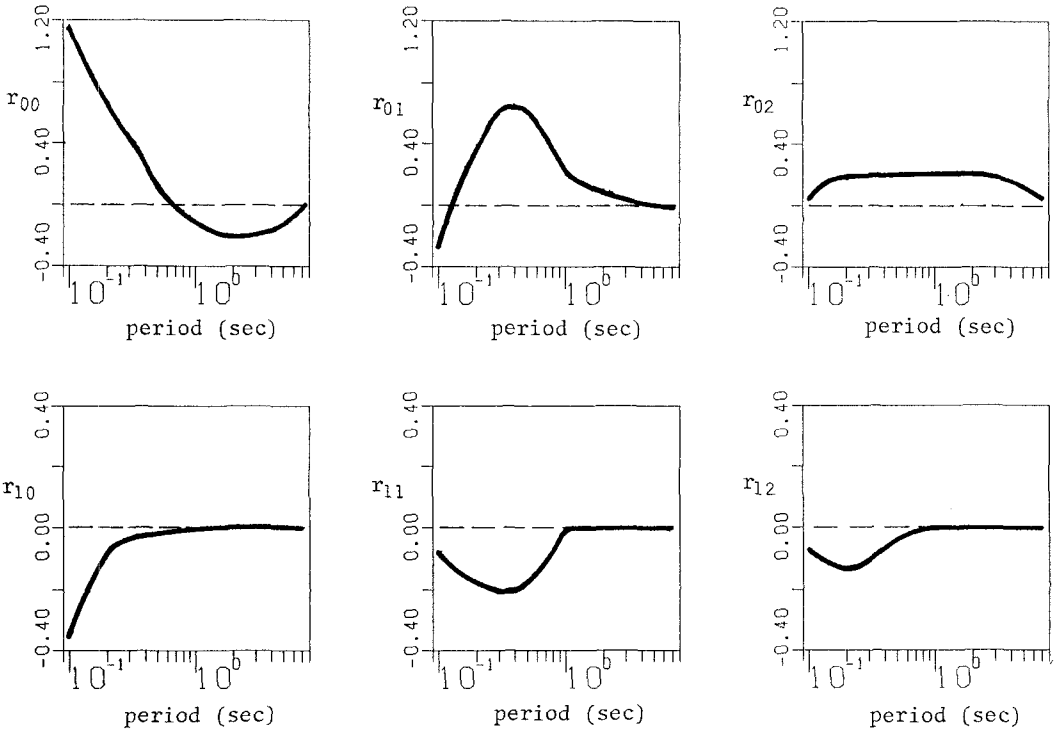
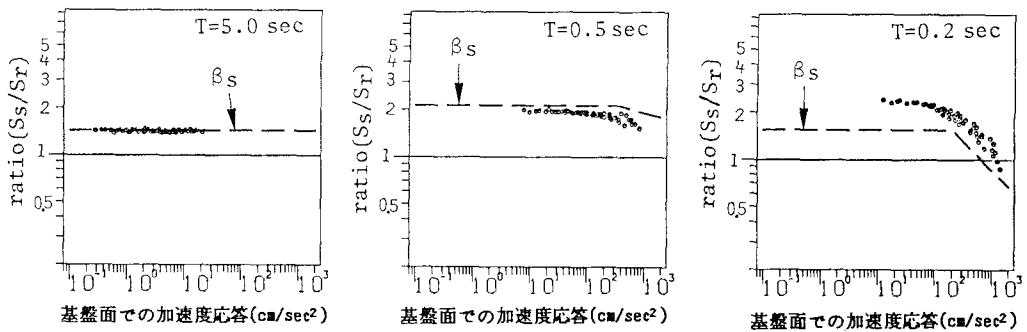


図-9 変換係数 $\beta_s$ 推定のための各係数 (表-3, 式(18), (19))

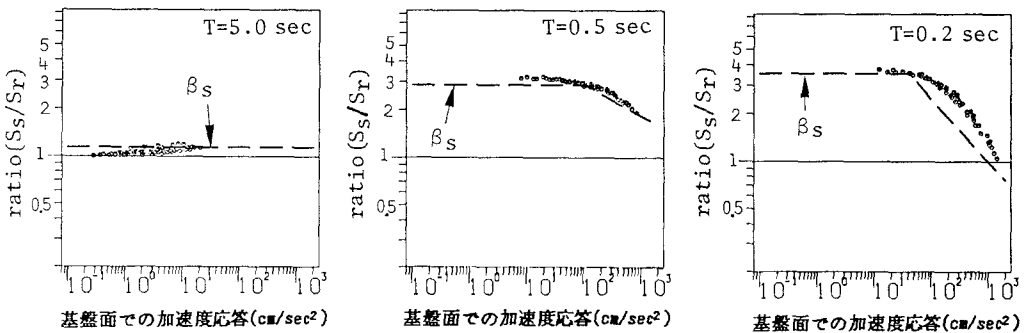
- 3  $S_r$  より右側（非線形領域）に対して回帰直線を引いた。ただし、 $S_r \geq S_r^{\ddagger}$  の領域にデータが無い、もしくはほとんどない。（10個未満）ものは、 $S_r^{\ddagger}$  より左側（線形領域）での平均値を定数項とし、傾きを0として扱った。このような非線形特性の効果が現れない領域はほぼ1秒程度以上の周期である。つぎに、得られた直線の傾きと定数項を固有周期ごとに地盤パラメータ（ $S_n$ ,  $d_p$ ）に対して回帰分析した。
- 4 上記3で得られた回帰式の係数  $r_{00}$ ,  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ ,  $r_{10}$ ,  $r_{11}$ ,  $r_{12}$  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  $\beta_s$  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  $\beta_s$  の値をとって一定とした。また非線形特性の現れない1sec程度以上の領域では、 $\beta_s$  は地震動のレベルによらず、 $S_n$ ,  $d_p$  のみから得られる一定値とした。

図-9に、表-4で与えた係数を横軸を周期にとって示した。 $S_n$  の係数  $r_{01}$ ,  $r_{11}$  を見ると、周期1秒以上の領域では、 $S_n$  は  $\beta_s$  にほとんど影響を与えない。つまり、ごく表層付近の軟弱さは、固有周期1秒程度以上の地震動強度にはほとんど関与しないことを表している。また、 $d_p$  の係数  $r_{02}$ ,  $r_{12}$  をみると定数項  $r_{02}$  においてのみ、周期1秒以上でも値を有している。このことは、周期1秒程度以上の領域では一般に表層地盤の非線形性の影響がほとんど現れないこと、さらに、線形な増幅特性には  $d_p$  が影響することを表している。一方、周期1秒程度以下の短周期成分では、 $S_n$ ,  $d_p$  ともに  $\beta_s$  に影響するが、相対的に  $S_n$  の方が大きく関与することがわかる。

図-10に、(a) 八戸-S地盤、(b) 品川-S地盤を例にとり、周期  $T=5.0, 0.5, 0.2$  秒におけるシミュレーションデータの増幅倍率と、上記のようにして得られた変換係数  $\beta_s$  の推定値を示した。 $T=5.0$  秒の場合には、地盤の非線形性の影響は現れないのに対し、 $T=0.2$  秒の場合には、 $S_n$  が大きく軟弱な品川-S地盤でとくに顕著である。



(a) 八戸-S地盤 ( $S_n=-0.01$ ,  $d_p=180$  m)



(b) 品川-S地盤 ( $S_n=0.71$ ,  $d_p=28.9$  m)

図-10 工学的基盤面と沖・洪積地盤面でのシミュレーション地震動による加速度応答スペクトルの比と変換係数  $\beta_s$  の関係



図-11には、山下変-S地盤を例にとり、 $M=8.0, \Delta=61\text{km}$ 、および $M=6.0, \Delta=120\text{km}$ に対する基盤と地表でのシミュレーション地震動による応答スペクトルと、基盤での応答スペクトルに $\beta_s$ を乗じて得られる地表での応答スペクトル（●印）を示した。 $S_n$ 、 $d_p$ という単純な地盤パラメータのみを用いているにもかかわらず、入力地震動のレベルに応じた地盤の非線形性の効果を十分取り入れているものと考えられる。

図-12に、2組のモデル地盤における種々の地震動レベルに対する $\beta_s$ の変化を示した。図-12(a)は $S_n=0.0, d_p=30\text{m}$ で比較的良好な地盤、(b)は $S_n=0.6, d_p=150\text{m}$ で軟弱な地盤の例である。同図より、軟弱な地盤では地震動のレベルが小さい場合（ $M$ ：小、 $\Delta$ ：大）には $\beta_s$ は大きな値となるが地震動のレベルが大きくなるに従い高振動数領域での $\beta_s$ の減少が著しいことがわかる。また、1 Hz付近の振動数域では地震動のレベルによらず軟弱地盤の方が $\beta_s$ が大きい。これらの結果は、先の最大加速度、最大速度の変換係数 $\beta_a, \beta_v$ の特性と調和的である。

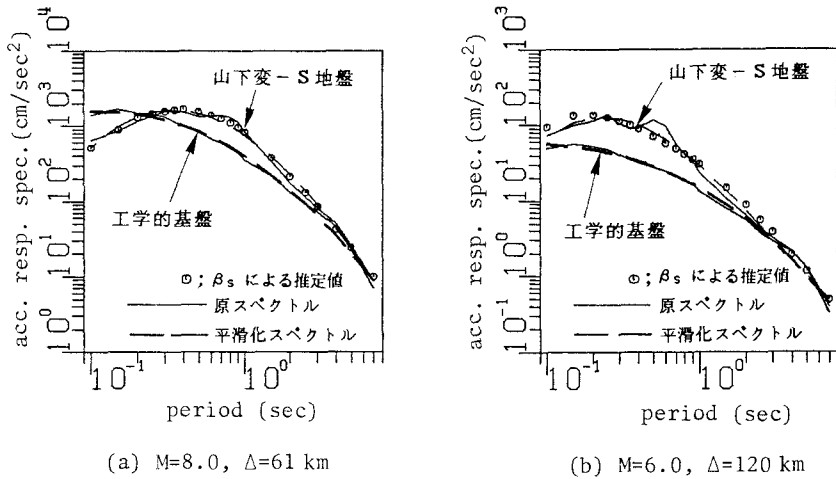


図-11 工学的基盤面と沖・洪積地盤面でのシミュレーション地震動による加速度応答スペクトルと変換係数 $\beta_s$ により推定される加速度応答スペクトルとの比較

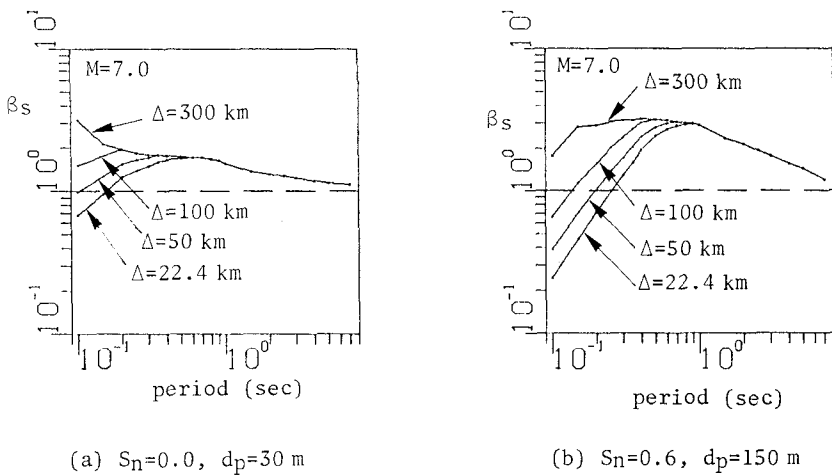


図-12 地震動レベルに対する変換係数 $\beta_s$ の変化

#### 4. 結 論

本研究は、比較的容易に得られる地盤パラメータを用いて、表層地盤の非線形性の影響を考慮した基盤地震動と沖・洪積地盤の地震動の変換を容易に行う変換係数を提案することを目的としたものである。得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 著者らにより提案された工学的基盤面での非正常地震動予測モデル(EMP-IB)を用いて、 $M=5\sim 8$ 、 $\Delta=0\sim 300\text{km}$ の範囲の56組に対するシミュレーション地震動392成分を算出した。これらを、わが国における強震観測地点で工学的基盤( $V_s=600\sim 700\text{m/sec}$ 程度)までの地盤構造が得られている10地点での基盤への入射波とし、等価線形化手法により地表地震動を算出し、地震動強度を得るための基礎データとした。
- (2) 地盤パラメータとして、N値分布より定義される表層付近の軟弱さを表す指標 $S_n$ および工学的基盤までの深さ $d_p$ をとり挙げ、上記(1)の基礎データから得られる最大加速度、最大速度の増幅率とこれらの地盤パラメータとの関係を検討した。これより、沖・洪積地盤と工学的基盤面での最大加速度、最大速度の比 $\beta_a$ 、 $\beta_v$ を $S_n$ 、 $d_p$ および基盤面での最大加速度、速度の関数としてモデル化し、地盤の非線形特性を考慮した変換係数として提案した。
- (3) 周期0.1~7秒、減衰定数5%の加速度応答スペクトルを(1)のシミュレーション地震動について算出し、(2)と同様の手法により、応答スペクトルの変換係数 $\beta_s$ を提案した。

上述のように、本研究では、工学的基盤面での与えられた最大加速度、速度、応答スペクトルから、対応する沖・洪積地盤でのそれらの地震動強度を推定する場合に、比較的容易に得られる2つの地盤パラメータを使って簡単に基盤から沖・洪積地盤レベルに変換する方法を提案した。対象とする地震動強度がこのように基本的なものであり必要とする地盤条件も通常容易に得られるものであることから、バランスのとれた地震動予測の一手法と考えている。

周知のように、一般の沖・洪積地盤では表層付近の地盤特性によって地震動が大きく影響を受け、その地盤固有のスペクトル特性を有する地震動となることが多い。このような詳細なスペクトル特性まで含めたレベルの地震動予測が必要な場合には、当然それに見合うような地盤構造および基盤への入力地震動に関する詳細な情報が必要である。一方、ある都市域のマイクロゾーニングのように広範な地域での地震動の分布を推定するような場合には、対象とする地震動強度は本研究で扱った最大加速度、速度といった基本的なパラメータであり、また広範な地域の詳細な地盤特性を得ることは一般に困難である。このような場合には、本研究で提案した手法が有効に利用できるものと考えられる。

本研究で提案したモデルの妥当性の検討には、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の同一地震による記録が、種々の地震動のレベルに対して必要である。強震観測が各方面でさかんに行なわれておりこのようなデータが徐々に蓄積されつつあることからこのような実データを収集して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

本研究で用いた地盤モデルは、運輸省港湾技術研究所<sup>8)</sup> および建設省土木研究所より提供して頂いた強震観測地点での地盤資料に基づいたものである。また、一部の地点のやや深部の地盤モデルについては、北大酒井良男名誉教授、太田裕教授、弘前大岩井武彦教授、東北大北村信教授に有益な御指摘を得た。記して深謝の意を表する次第である。さらに、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(自然災害(2)60025025)により行われ、数値計算には京都大学大型計算機センターの FACOM M382/VP100 システムを使用したことを付記する。

## 参考文献

- 1) 後藤尚男・杉戸真太・亀田弘行・斉藤宏・大滝健：工学的基盤における非定常地震動予測モデル，京大防災研究所年報，第27号B-2，昭59.4.
- 2) Kameda,H. and Sugito,M. "Prediction of Strong Earthquake Motions on Rock Surface," Conference on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants, Port Alegre-RS, Oct. 1984, pp.161-188.
- 3) Sugito,M. and Kameda,H."Prediction of Nonstationary Earthquake Motions on Rock Surface," Proc. of JSCE, Structural Engineering / Earthquake Engineering, Vol.2, No.2, Oct. 1985
- 4) Kameda,H., Sugito,M.,and Goto,H., "Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions",Proc.Third International Microzonation Conference, Seattle, June 28- July 1, 1982, Vol.III, pp.1463-1474.
- 5) 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，1-418,昭.58.9.
- 6) Hardin,B.O. and Drnevich,V.P., "Shear Modulus and Damping in Soils,"Proc. ACSC, Vol.98, SM8,7, 1972.2.
- 7) Vanmarcke.E.H and Shih-Sheng.P.Lai, "Strong Motion Duration and RMS Amplitude of Earthquake Records", BSSA, Vol.70, No.4, 1980.8, pp1293-1307
- 8) 土田肇・倉田栄一・山田遥一郎・須藤克子・横山淑子・石坂徳三：港湾地域強震観測点資料，その1～5，港湾技研資料，1967-1980.
- 9) Kameda,H. and Sugito,M."Earthquake Motion Uncertainty as Compared between Soil Surface and Rock Surface Motions" Proc. of 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Brussels, Belgium. Vol.M1, Aug. 1985, pp.297-302.
- 10) 杉戸真太・亀田弘行・後藤尚男・廣瀬憲嗣：表層地盤の非線形特性を考慮した地震動の変換係数，第4回自然災害科学会学術講演会，昭和60.10, pp.27-30.

(1985年10月18日提出)