

工学的基盤面と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数

——表層地盤の非線形性を考慮した最大地動，応答
スペクトル，非定常スペクトルの推定モデル——

杉戸 真太・亀田 弘行
後藤 尚男・廣瀬 憲嗣

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

*Masata SUGITO, Hiroyuki KAMEDA, Hisao GOTO, and
Kenji HIROSE*

Synopsis

A simple method is developed for conversion between soil surface and rock surface earthquake motion 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, β , between soil surface and rock surface motion is proposed for peak acceleration, peak velocity, response spectra, and intensity parameter of evolutionary power spectrum. The conversion factor, β , 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. 序 論

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-IB, IIB) を提案した¹⁻³⁾。

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変動に変換する手法が有効である。

基盤から地表への地震動の変化を把握することは、地震動予測において基本的かつ最も重要な課題であり、これまでに基盤～地表の地震動の同時観測が各方面で行われている⁴⁻⁶⁾。太田・丹羽⁷⁾は、種々の表層を有する地点での基盤～地表同時記録より、最大加速度や応答スペクトルの増幅率を地点毎に求め、地盤条件とこれらの地震動パラメータの増幅率との関係を検討している。しかしながら、これまで得られている同時記録はその多くが最大加速度で数 10 gal 程度のものであり、比較的大きな地震動記録はきわめて少ないのが

現状である。最大加速度，最大速度のような地震動パラメータは，1～数 Hz 程度の振動数域の地盤振動に影響され，このような振動数域では，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。すなわち，地震動の増幅率を，地盤条件に加えて入力地震動の強度の関数として扱うことが重要となる。つまり，上記の最大地震動の変換係数を地盤の非線形性を考慮したものとすることが地震動予測の観点からは不可欠の要件である。

本報では，このような地震動強度の変換係数を最大地震動，応答スペクトル，および非常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，応答スペクトル，および非常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 $S_n^{(7)}$ ，基盤面までの深さ $d_p^{(8)}$ および基盤面での地震動強度の関数としてモデル化した。

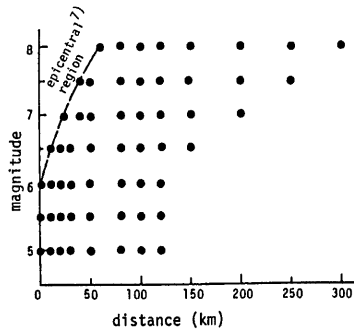


Fig. 1 Distribution of magnitude and distance for generation of rock surface earthquake motion.

2. 非常地震動のシミュレーションと地盤パラメータ $S_n d_p$

2.1 EMP-IB⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 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。

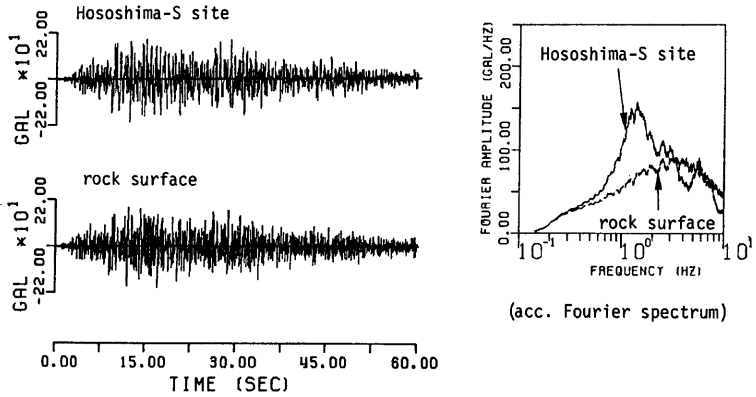
Fig. 1 に，基盤地震動を算出するマグニチュード M ，震央距離 Δ の組み合わせを示した。 $M=5.0\sim 8.0$ ， $\Delta=0\sim 300$ km の範囲で56組あり，各組み合わせごとに7成分ずつ合計392成分のサンプル波を得た。Fig. 1 における破線は，文献(7)で示された震央域の境界を表すものであり，震央域内では地震動強度は震央距離によらず一定としている。したがって，地震動のシミュレーションを行う M ， Δ の組み合わせもこの震央域外とした。

Fig. 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 (a) $M=8.0$ ， $\Delta=120$ km および (b) $M=8.0$ ， $\Delta=61$ 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⁽⁹⁾ のモデルを用いた。文献(9)では，ひずみレベルに応じたせん断剛性 G および減衰定数 h を推定する式を，種々の土質の種々の拘束圧下でのせん断試験結果に基づいて次式のように与えている。

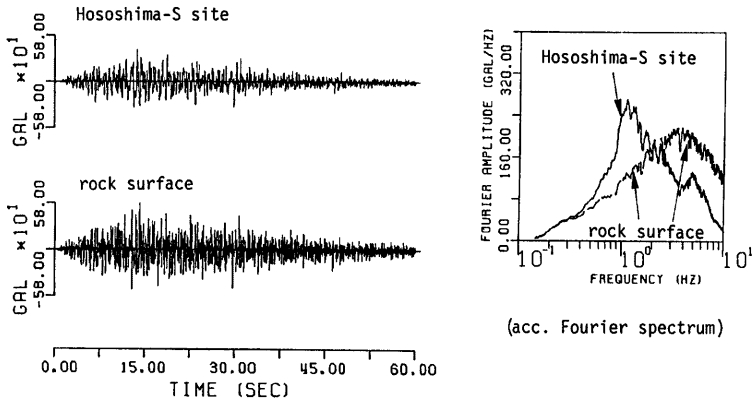
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{h}{h_{max}} = \frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \gamma/\gamma_r} \dots\dots\dots(2)$$

ここに， G_{max} =初期せん断剛性， h_{max} =最大減衰定数 (=30.3%)， γ =せん断ひずみ， γ_r =せん断ひずみの特性値 (reference strain) である。 γ_r は Fig. 3 に示すように平均有効応力の関数であり各土質毎に与えられ



(a) M=8.0, Δ=120 km



(b) M=8.0, Δ=61 km

Fig. 2 Simulated rock surface motion and corresponding soil surface motion.

るものである。

応答解析における各層の等価剛性、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¹⁾。

$$\gamma_e = 0.6 \left(\frac{T_d}{T_m} \right)^{0.1} \gamma_{max} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 γ_{max} = 最大せん断ひずみ、 γ_e = 有効せん断ひずみ、 T_d = 地震動継続時間¹⁰⁾ ($T_d = 7.5 P_t / A_p^2$, 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¹⁾。式(3)により γ_e は継続時間 T_d により 0.5~0.7 γ_{max} 程度の値となる。Fig. 2 において、細島-S地盤と工学的基盤での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。この傾向は、地震動レベルのより大きな (b) の方より顕著である。また、地盤の卓越振動数とみられる 1.5 Hz 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 4000 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 β を提案する。

2.2 地盤モデルと地盤パラメータ S_n ⁷⁾, d_p ⁸⁾

わが国における主な強震観測点のうち、 $v_s=600\sim 700$ m/sec 程度の工学的基盤面¹⁴⁾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 β 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 d_p 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 15~20 m 程度の軟弱さを表す指標で、次式により得られる。

$$S_n = 0.264 \int_0^{d_s} \exp\{-0.04 N(x)\} \exp\{-0.14 x\} dx - 0.885 \dots\dots\dots(4)$$

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 d_p 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。**Table 1** に、対象とした10観測点¹⁵⁾の2つの地盤パラメータを示した。

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¹²⁾

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 β を提案する。沖・洪積地盤での最大加速度 A_s 、最大速度 V_s を、対応する工学的基盤での A_r 、 V_r から次式により変換するものとする。

$$\left. \begin{aligned} A_s &= \beta_a \cdot A_r \\ V_s &= \beta_v \cdot V_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 β_a , β_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 , d_p および基盤での最大加速度、速度の関数である。すなわち、 $\beta_a = \beta_a(S_n, d_p, A_r)$, $\beta_v = \beta_v(S_n, d_p, V_r)$ 。

変換係数 β_a , β_v のモデルを以下の手順に従って求めた。なお、変換係数 β_a , β_v の算出に関する式を、**Table 2** に一括して示した。

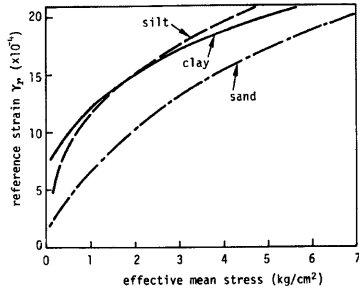


Fig. 3 Relation between reference strain and effective mean stress.

Table 1 Soil parameters for Japanese strong motion observation stations.

Site	S_n	d_p (m)
Muroran-S	0.03	14.5
Hachinohe-S	-0.01	180.0
Hososhima-S	-0.06	51.0
Aomori-S	0.37	115.1
Shinagawa-S	0.71	28.9
Itajima brg.	0.48	18.5
Shiogama-kojyo-S	0.52	16.8
Onahama-ji-S	-0.22	8.3
Yamashita-hen-S	0.39	35.0
Sendai-M	-0.07	11.6

Table 2 Estimation formulas for conversion factor β_a and β_v .

definition of conversion factor β_a and β_v	$\beta_a = 10^{r_{0a}} \cdot A_r^{r_{1a}}; A_r \geq A_r^l$	...(6)
	$\beta_v = 10^{r_{0v}} \cdot V_r^{r_{1v}}; V_r \geq V_r^l$	...(7)
	$\beta_a = 10^{r_{0a}} \cdot (A_r^l)^{r_{1a}}; A_r < A_r^l$	...(8)
	$\beta_v = 10^{r_{0v}} \cdot (V_r^l)^{r_{1v}}; V_r < V_r^l$	...(9)
definition of specific value A_r^l and V_r^l	$A_r^l = 10^{(1.498 - 0.589 \cdot S_n)}$	...(10)
	$V_r^l = 10^{(0.742 - 1.768 \cdot S_n)}$	...(11)
coefficients appearing in Eqs. (6)-(9)	$\left. \begin{aligned} r_{0a} &= 0.705 + 0.167 \cdot S_n + 0.0513 \cdot \log d_p \\ r_{1a} &= -0.193 - 0.157 \cdot S_n - 0.066 \cdot \log d_p \\ r_{0v} &= 0.454 - 0.020 \cdot S_n - 0.038 \cdot \log d_p \\ r_{1v} &= -0.400 + 0.120 \cdot S_n + 0.108 \cdot \log d_p \end{aligned} \right\}$	...(12)

- ① 最大地動の非線形増幅特性を検討するため、Fig. 4 に相当するものを最大加速度、最大速度について10のモデル地盤で得た。Fig. 4 は (a) 細島-S 地盤および (b) 品川-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 Fig. 4 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^l 、最大速度 V_r^l 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^l 、 V_r^l は地盤パラメータ S_n に大きく存在していることから、最小二乗法によりこれらの関係式を得た。Fig. 5 に、 S_n と A_r^l 、 V_r^l の関係および関係式を示した。
- ③ 各地点ごとに得られる β_a 、 β_v と A_r 、 V_r との関係の図において、式(10)、(11)により決定される A_r^l 、 V_r^l 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 β_a 、 β_v と A_r 、 V_r との関係は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 、 d_p に対して回帰分析し、式(12)を得た。
- ④ A_r^l 、 V_r^l より右側、すなわち非線形性が現れない領域については、③で得られた非線形特性でモデル

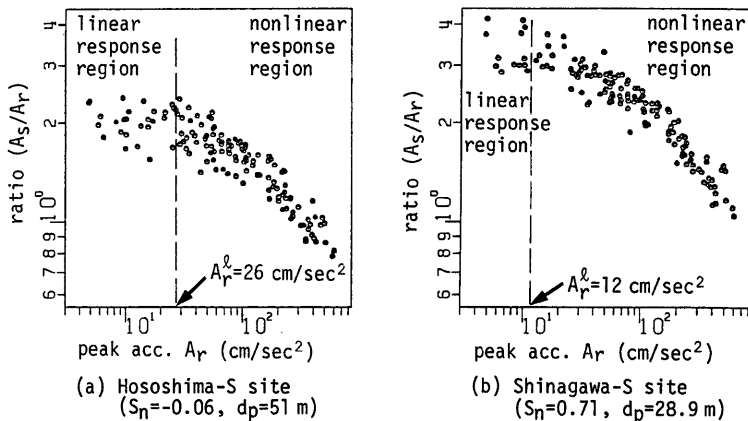


Fig. 4 Nonlinear amplification characteristic of peak acceleration.

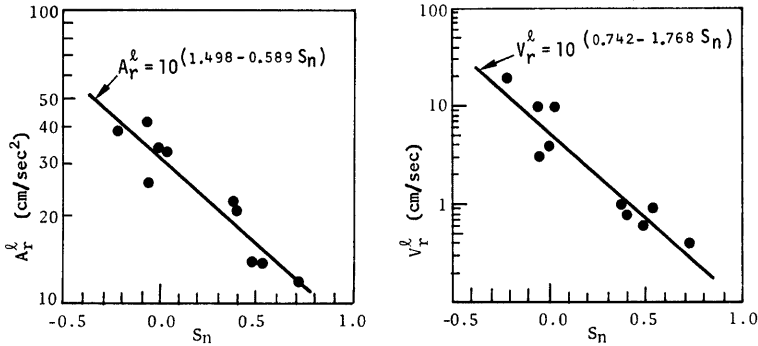


Fig. 5 Relation between soil parameter S_n and specific peak ground motion A_r and V_r .

化された β_a, β_v の推定式の A_r^0, V_r^0 における値で一定とした。(式(8), (9))。

以上のようにして得られた β_a, β_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 Fig. 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ので β_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。

Fig. 7 に、種々の S_n, d_p による変換係数 β_a, β_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 β_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、最大速度の場合には、基盤地震動のレベルにかかわらず、 β_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。

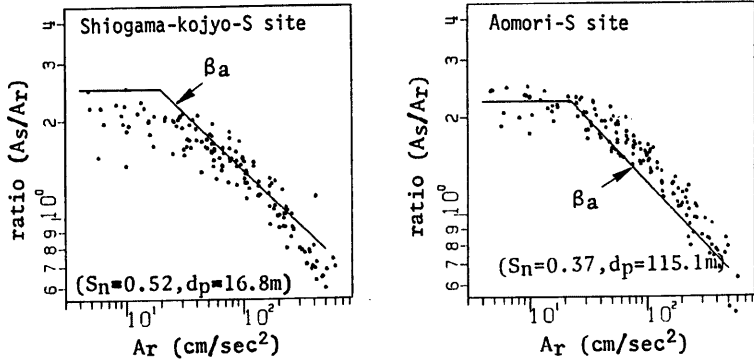
Fig. 7 の結果から、地震動のレベルが大きい場合には、最大加速度は軟弱な地盤の方が堅固な地盤より小さくなるが、最大速度は軟弱な地盤ほど大きいことを表している。このことは、地震の破壊力が加速度よりも速度とよく対応すること、軟弱な地盤ほど震害が大きいという過去の経験的事実ともよく調和しているものと考えられる。

3.2 加速度応答スペクトルの変換係数¹²⁾

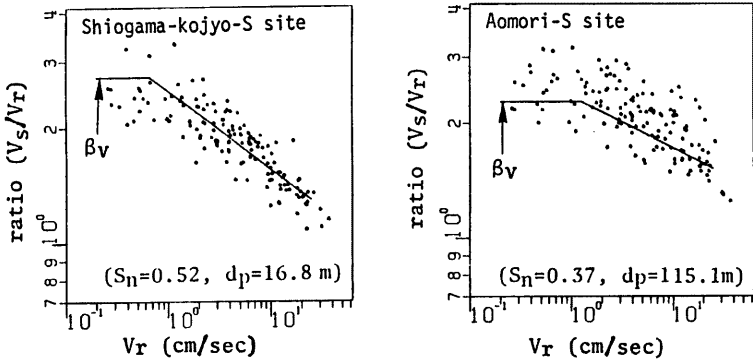
加速度応答スペクトルについての変換係数を、前節における最大加速度、最大速度の場合と同様の方法により提案する。

Fig. 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。Fig. 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0.1~7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モデル化したものである。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。

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



(a) peak acceleration



(b) peak velocity

Fig. 6 Nonlinear amplification characteristic of peak ground motion and modeled conversion factors β_a and β_v .

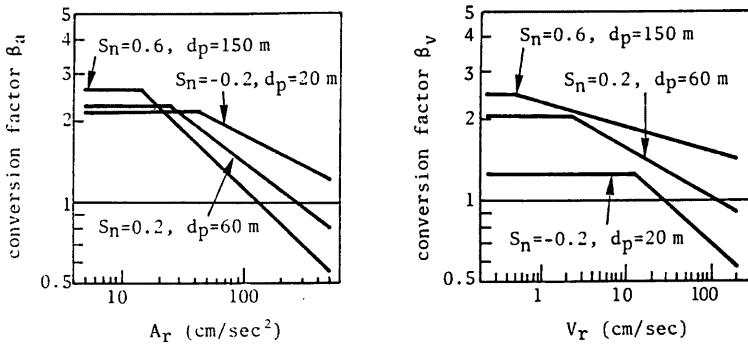


Fig. 7 Conversion factors β_a and β_v for typical site conditions.

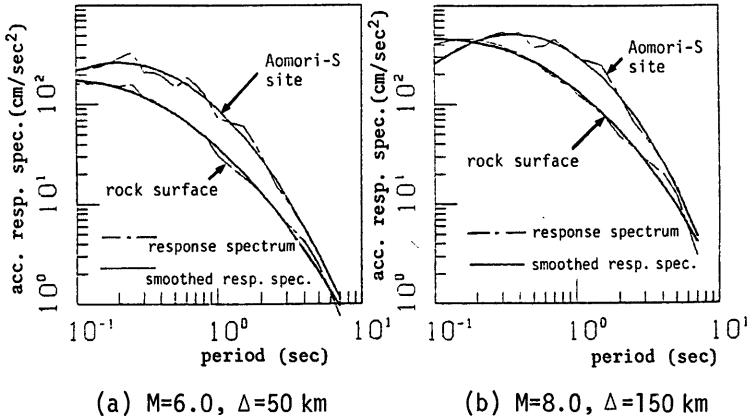


Fig. 8 Acceleration response spectra for rock surface and soil surface.

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, d_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 β_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 Fig. 4 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_r' 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ものを読みとり、そのデータに基づいて S_r' を S_n で推定する式を得た。(Table 3) (式(17)~(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、 $S_r \geq S_r'$ 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' 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1sec程度以上の周期である。つぎに、

Table 3 Estimation formulas for conversion factor β_s .

conversion formula	$S_s = \beta_s \cdot S_r (M, \Delta, T, h)$	...(13)
definition of conversion factor β_s	$T < 1.0(\text{sec});$ $\beta_s = 10^{r_{0s} \cdot S_r'^{1.5}} ; S_r \geq S_r'$	...(14)
	$\beta_s = 10^{r_{0s} \cdot (S_r')^{1.5}} ; S_r < S_r'$	...(15)
	$T \geq 1.0(\text{sec});$ $\beta_s = 10^{r_{0s}}$	...(16)
definition of specific value S_r' ($T < 1.0 \text{ sec}$)	$S_r' = 10^{(l_{0s} + l_{1s} \cdot S_n)}$	...(17)
	$l_{0s} = 2.618 + 0.219 \cdot \log T + 0.732 \cdot (\log T)^2 + 1.505 \cdot (\log T)^3$	...(18)
	$l_{1s} = -0.499 + 0.369 \cdot \log T - 2.268 \cdot (\log T)^2 - 3.050 \cdot (\log T)^3$	...(19)
coefficients appearing in Eqs. (14)-(16)	$r_{0s}(T) = r_{00}(T) + r_{01}(T) \cdot S_n + r_{02}(T) \cdot \log d_p$	...(20)
	$r_{1s}(T) = r_{10}(T) + r_{11}(T) \cdot S_n + r_{12}(T) \cdot \log d_p$	...(21)

Table 4 Coefficients for estimation of conversion factor β_s (eqs. (20) and (21)).

period (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

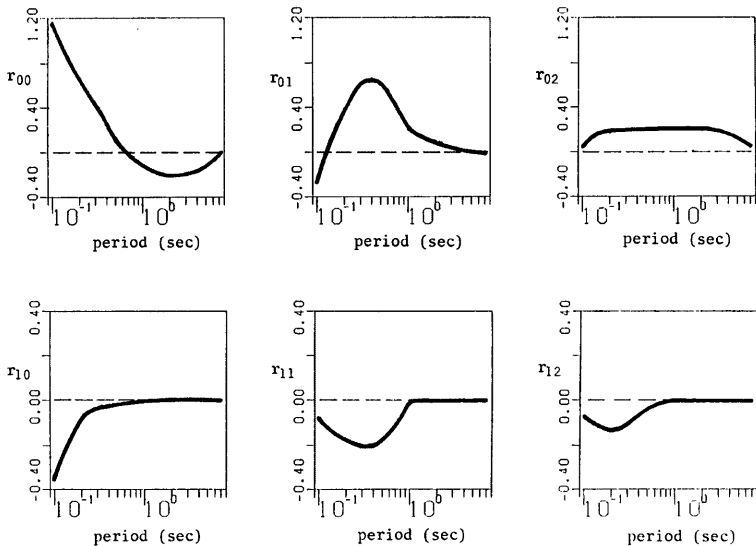


Fig. 9 Values of coefficients for estimation of conversion factor β_s (eqs (21) and (22)).

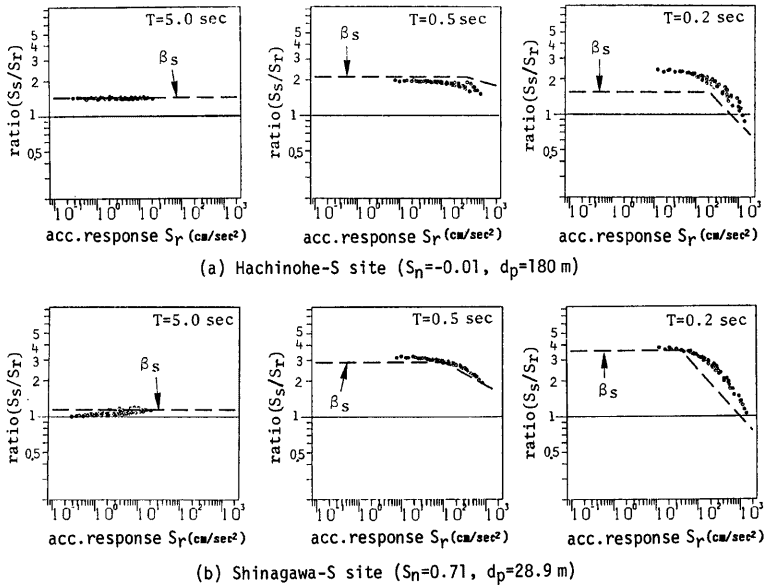


Fig. 10 Relation between acceleration response S_r on rock surface and ratio S_s/S_r .

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、Table 4 のように与えた。
- ⑤ 変換係数 β_s は $S_r \geq S_r'$ の領域ではモデル化された回帰直線の値とし、 $S_r < S_r'$ の領域では $S_r = S_r'$ における β_s の値をとって一定とした。また非線形特性の現れない 1 sec 程度以上の領域では、 β_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。

Fig. 9 に、Table 4 で与えた係数を横軸を周期にだって示した。 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 β_s には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 β_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。

Fig. 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 β_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。

Fig. 11 に、山下変-S 地盤を例にとり、 $M = 8.0$, $\Delta = 61$ km, および $M = 6.0$, $\Delta = 120$ 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 β_s に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。

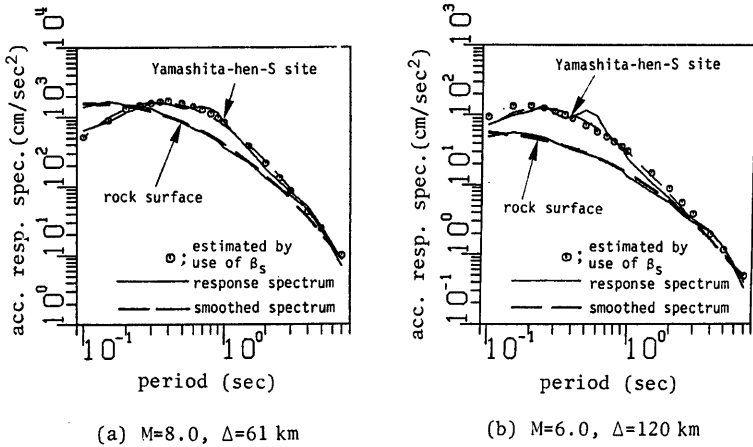


Fig. 11 Acceleration response spectra on rock and soil surface, and estimated value by use of β_s .

Fig. 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 β_s の変化を示した。Fig. 12(a) は $S_n=0.0$, $d_p=30$ m で比較的良好な地盤, (b) は $S_n=0.6$, $d_p=150$ 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, d : 大) には β_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 β_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 β_s が大きい。これらの結果は、先の最大加速度、最大加速度の変換係数 β_a , β_v の特性と調和的である。

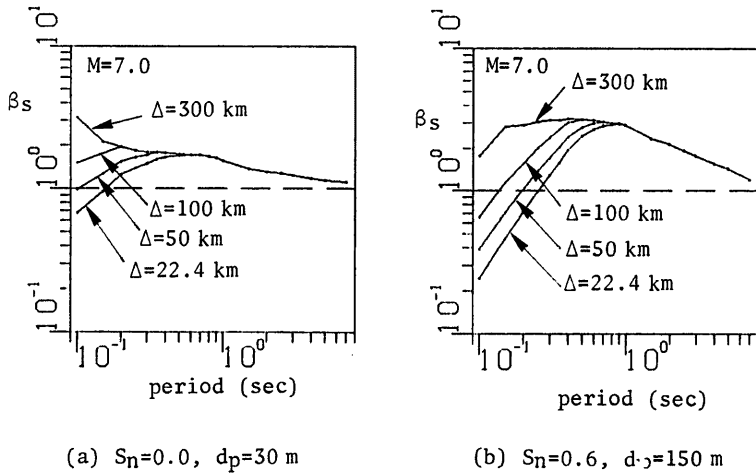


Fig. 12 Conversion factor β_s for several earthquake levels.

3.3 非定常スペクトルの変換係数

最大地動，応答スペクトルに対して提案した変換係数を，非定常スペクトルについて提案する。ここでは，文献1)~3)の工学的基礎での非定常地震動予測モデル (EMP-IB, IIB) の非定常スペクトルのモデル関数 (Fig. 13) の強度パラメータ $\alpha_m(f)$ を，地盤パラメータ S_n, d_p および基礎での $\alpha_{mr}(f)$ より沖洪積地盤での $\alpha_{ms}(f)$ に変換する変換係数 $\beta_\alpha(f)$ を開発する。すなわち，

$$\alpha_{ms}(f) = \beta_\alpha(f) \cdot \alpha_{mr}(f) \dots\dots\dots (22)$$

Fig. 13 に示す非定常スペクトルのモデル関数は，立ち上り時刻 $t_s(f)$ ，継続時間の長短を表す $t_p(f)$ ，および強度 $\alpha_m(f)$ の3つのパラメータにより規定される。上記の $\alpha_m(f)$ に関する補正法は，ここで扱っている工学的基礎より上の局所的な地盤条件は強度 $\alpha_m(f)$ に大きく影響し，他の2つの時間パラメータ $t_s(f)$ ， $t_p(f)$ にはほとんど影響しないとの仮定に基づくものである。Fig. 14 に，工学的基礎面でのシミュレーション地震動およびそれを基礎での入力とした場合の青森-S地盤でのシミュレーション地震動を示した。同図(c)は，基礎および青森-S地盤での非定常スペクトルと，基礎での非定常スペクトルの2つの時間パラメータ $t_{sr}(f)$ ， $t_{pr}(f)$ を用いて青森-Sの非定常スペクトルをモデル化したモデル関数を示したものである。この場合，非定常スペクトルの強度パラメータ $\alpha_{ms}(f)$ は次式により与えられる。

$$\alpha_{ms} = \frac{n}{e} \left\{ \frac{n}{\Gamma(n+1)} \cdot \frac{A_{0s}(f)}{t_{pr}(f)} \right\}^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (23)$$

ただし， n は非定常スペクトルの最大値近傍でのモデル関数の形状を決めるパラメータであり $n=4$ を用いた。また， $A_{0s}(f)$ は非定常スペクトルの時間軸方向での面積であり次式で与えられる。

$$A_{0s}(f) = \int_0^\infty G_y(t, 2\pi f) \cdot dt \dots\dots\dots (24)$$

Fig. 14 の結果より，基礎での非定常スペクトルを与える3つのモデルパラメータのうち，強度 $\alpha_m(f)$ のみを地盤条件および基礎での $\alpha_{mr}(f)$ に応じて変換し，他の2つの時間パラメータは基礎での値 $t_{sr}(f)$ ，

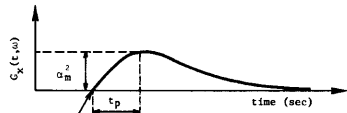


Fig. 13 Model function for evolutionary power spectrum.

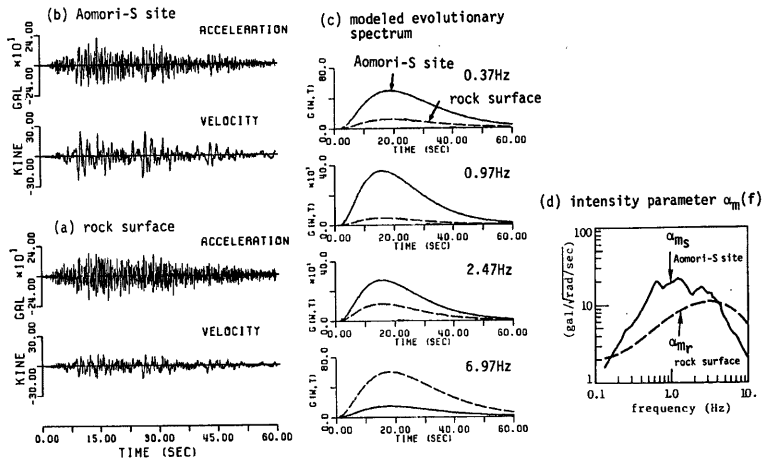


Fig. 14 Simulated rock surface and soil surface motion.

$t_{pr}(f)$ を代用することで問題ないものと考えられる。

さて、先に用いた3920成分の沖・洪積地盤でのシミュレーション地震動より上記の方法で強度パラメータ $\alpha_{ms}(f)$ を得た。Fig. 15 に、八戸-S地盤での $\alpha_{ms}(f)$ と対応する基盤面での $\alpha_{mr}(f)$ の一例を示した。変換係数 $\beta_a(f)$ のモデル化にあたっては、応答スペクトルの場合と同様 $\alpha_{ms}(f)$ を振動数軸方向で3次曲線により平滑化した値を用いた。Fig. 15 における破線は、平滑化した $\alpha_{ms}(f)$ を表している。応答スペクトルの変換係数 $\beta_s(f)$ とほぼ同様の手順により変換係数 $\beta_a(f)$ を得た。以下にその概要を示す。

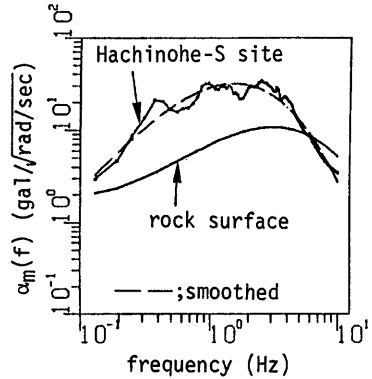


Fig. 15 Intensity parameter $\alpha_m(f)$ for rock and soil surface.

Fig. 16 に、基盤面での強度パラメータ $\alpha_{mr}(f)$ と沖・洪積地盤での平滑化された $\alpha_{ms}(f)$ との比の関係を示した。これらを、地盤別・振動数別に求め、非線形性の影響の現れる折れ曲がり点 $\alpha_{mr}^l(f)$ を定めた。

ただし、 $f < 1.0$ Hz の低振動数域においては応答スペクトルと同様非線形性の影響が現れないため、 $\alpha_{mr}^l(f)$ は $f \geq 1.0$ Hz の領域で得られた。この強度パラメータの特性値 $\alpha_{mr}^l(f)$ を地盤パラメータ S_n から次式により推定することとし、その係数を最小自乗法により得た。

$$\log \alpha_{mr}^l(f) = l_{0a}(f) + l_{1a}(f) \cdot S_n \quad \dots \dots \dots (25)$$

Fig. 17 に、式(25)の係数 $l_{0a}(f)$, $l_{1a}(f)$ を示した。同図にみられるように各係数は振動数軸方向に傾角を持って変動していることから、これらを次に示すように振動数の関数としてモデル化した。

$$\left. \begin{aligned} l_{0a}(f) &= 1.135 - 0.643 \cdot \log f + 2.256 \cdot (\log f)^2 - 2.913 \cdot (\log f)^3 \\ l_{1a}(f) &= -0.350 + 0.286 \cdot \log f - 4.960 \cdot (\log f)^2 + 4.888 \cdot (\log f)^3 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (26)$$

$; f \geq 1.0 \text{ Hz}$

式(26)の関数を Fig. 17 に実線で示した。

次に、Fig. 16 において、式(25)より得られる特性値 $\alpha_{mr}^l(f)$ より大きな領域のデータを用いて、倍率 $\alpha_{ms}(f)/\alpha_{mr}(f)$ を $\beta_a(f)$ とし、これと $\alpha_{mr}(f)$ との関係を対数軸上で次式に示す直線で回帰分析により得た。

$$\log \beta_a(f) = u_0(f) + u_1(f) \cdot \alpha_{mr}(f) \quad \dots \dots \dots (27)$$

ただし、 $u_0(f)$, $u_1(f)$ は係数であり、応答スペクトルの場合と同様これらを地盤パラメータ S_n , d_p より次式により推定することとした。

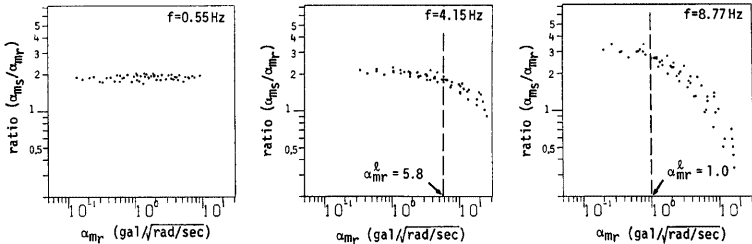


Fig. 16 Relation between intensity parameter α_{mr} and ration α_{ms}/α_{mr} .

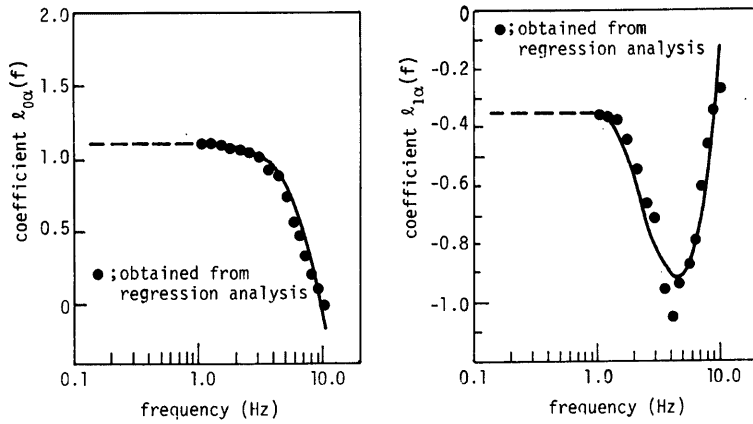


Fig. 17 Regression coefficients $l_{0\alpha}$ and $l_{1\alpha}$, and their modeled curve.

$$\left. \begin{aligned} u_0(f) &= u_{00}(f) + u_{01}(f) \cdot S_n + u_{02}(f) \cdot \log d_p \\ u_1(f) &= u_{10}(f) + u_{11}(f) \cdot S_n + u_{12}(f) \cdot \log d_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

ただし、非線形性の影響の現れない $f < 1.0$ Hz の振動数域においては、式(27)における $u_1(f)$ を $u_1(f) \equiv 0$ とし、平均的な倍率 $(\alpha_{ms}(f)/\alpha_{mr}(f))$ を $u_0(f)$ として式(28)により推定式を得た。

Fig. 18 および Table 5 に、式(28)における係数の値を示した。これらは、回帰分析により得られる値を振動数軸方向で平滑化したものである。Table 6 に、 $\beta_\alpha(f)$ 推定のための式を一括して示した。Table 6

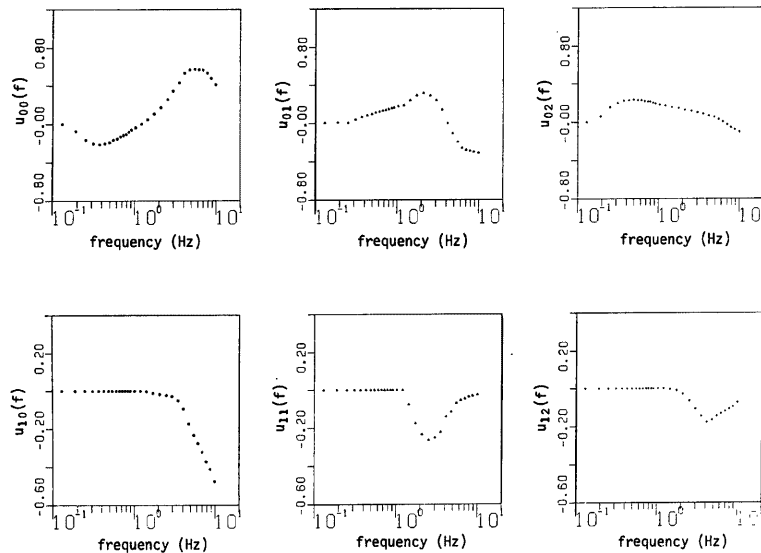


Fig. 18 Values of coefficients for estimation of conversion factor β_α .

Table 5 Coefficients for estimation of conversion factor β_α (Eq. (27)).

f (Hz)	u_{00}	u_{01}	u_{02}	u_{10}	u_{11}	u_{12}
0.13	0.0	0.006	0.0	0.0	0.0	0.0
0.19	-0.073	0.007	0.071	0.0	0.0	0.0
0.25	-0.169	0.008	0.156	0.0	0.0	0.0
0.31	-0.201	0.040	0.198	0.0	0.0	0.0
0.37	-0.212	0.069	0.222	0.0	0.0	0.0
0.43	-0.202	0.083	0.231	0.0	0.0	0.0
0.49	-0.192	0.098	0.236	0.0	0.0	0.0
0.55	-0.168	0.110	0.230	0.0	0.0	0.0
0.61	-0.151	0.121	0.227	0.0	0.0	0.0
0.67	-0.130	0.135	0.218	0.0	0.0	0.0
0.73	-0.115	0.139	0.216	0.0	0.0	0.0
0.79	-0.104	0.149	0.212	0.0	0.0	0.0
0.85	-0.083	0.156	0.203	0.0	0.0	0.0
0.91	-0.061	0.162	0.194	0.0	0.0	0.0
1.03	-0.035	0.178	0.184	0.0	0.0	0.0
1.21	0.0	0.195	0.171	-0.002	-0.010	-0.002
1.45	0.032	0.256	0.160	-0.004	-0.103	-0.004
1.75	0.087	0.322	0.148	-0.010	-0.206	-0.019
2.11	0.158	0.348	0.130	-0.015	-0.262	-0.048
2.53	0.236	0.330	0.118	-0.023	-0.283	-0.086
3.01	0.318	0.254	0.104	-0.035	-0.266	-0.125
3.55	0.389	0.150	0.087	-0.055	-0.228	-0.155
4.15	0.452	0.0	0.067	-0.089	-0.152	-0.176
4.81	0.482	-0.128	0.054	-0.155	-0.114	-0.164
5.53	0.507	-0.218	0.031	-0.239	-0.072	-0.144
6.25	0.527	-0.284	0.002	-0.295	-0.053	-0.130
7.03	0.540	-0.342	-0.026	-0.350	-0.040	-0.119
7.87	0.559	-0.401	-0.054	-0.401	-0.030	-0.105
8.77	0.560	-0.468	-0.075	-0.441	-0.024	-0.095
10.03	0.552	-0.555	-0.100	-0.500	-0.020	-0.072

において、式(28)、(29)により変換係数 β_α が得られる。

Fig. 19 には2種の地盤での種々の地震動レベルに対する $\beta_\alpha(f)$ の値を示した。3 Hz 程度以上の高振動数域においては、地盤が軟弱など非線形性の影響が大きい。また、中振動数域以下の領域では入力地震動のレベルによらず地盤が軟弱な方が $\beta_\alpha(f)$ が大きくなることからわかる。

Fig. 20 に、(a) 基盤での強度パラメータ $\alpha_{m_r}(f)$ 、(b) 変換係数 $\beta_\alpha(f)$ により変換された $\alpha_{m_s}(f)$ 、および (c) 基盤での地震動より地震応答解析により得られた地表での地震動より式(23)を用いて得られた $\alpha'_{m_s}(f)$ 、を比較して示した。 $\alpha'_{m_s}(f)$ は、地盤に関する詳細な情報から地盤の非線形性を考慮して得られたものであるのに対し、 $\alpha_{m_s}(f)$ は地盤パラメータ S_n 、 d_p と $\alpha_{m_r}(f)$ から $\beta_\alpha(f)$ により推定されたものである。地盤の詳細な振動数特性までは現せないことは当然ではあるが、振動数軸方向の全般的な増幅特性は $\beta_\alpha(f)$ により十分に取り入れられるものと考えられる。

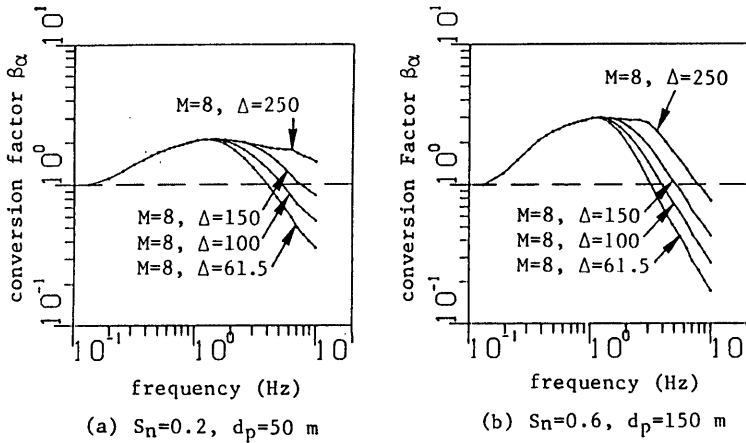


Fig. 19 Conversion factor β_α for several earthquake levels.

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) 著者らはより提案された工学的基盤面での非定常地震動予測モデル (EMP-1B) を用いて、 $M=5\sim 8$, $\Delta=0\sim 300$ 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 ($v_s=600\sim 700$ 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

Table 6 Estimation formulas for conversion factor β_α .

conversion formula	$\alpha_{ms}(f) = \beta_\alpha(f) \alpha_{mr}(f)$... (22)
definition of conversion factor β_α	$f > 1.0$ (Hz); $\begin{cases} \beta_\alpha = 10^{r_{0\alpha}} \alpha_{mr}^{r_{1\alpha}} & \alpha_{mr} \geq \alpha_{mr}^l \\ \beta_\alpha = 10^{r_{0\alpha}} (\alpha_{mr}^l)^{r_{1\alpha}} & \alpha_{mr} < \alpha_{mr}^l \end{cases}$... (28)
	$f \leq 1.0$ (Hz); $\beta_\alpha = 10^{r_{0\alpha}}$... (29)
definition of specific value α_{mr}^l ($f > 1.0$ Hz)	$\alpha_{mr}^l = 10^{(u_{01} + r_{1\alpha} S_n)}$... (25) $\begin{cases} l_{0\alpha} = 1.135 - 0.643 \log f + 2.256 (\log f)^2 - 2.913 (\log f)^3 \\ l_{1\alpha} = -0.350 + 0.286 \log f - 4.960 (\log f)^2 + 4.888 (\log f)^3 \end{cases}$... (26)
coefficients appearing in Eqs. (28), (29)	$\begin{cases} r_{0\alpha}(f) = u_{00}(f) + u_{01}(f) S_n + u_{02}(f) \log d_p \\ r_{1\alpha}(f) = u_{10}(f) + u_{11}(f) S_n + u_{12}(f) \log d_p \end{cases}$... (27)

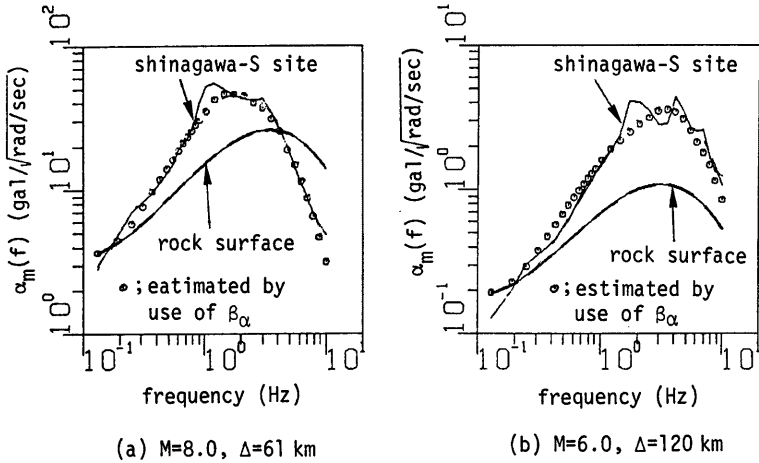


Fig. 20 Intensity parameter on rock and soil surface, and estimated value by use of β_α .

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 β_s, β_v を S_m, 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対して算出し、(2)と同様の手法により応答スペクトルの変換係数 $\beta_s(T)$ を提案した。 $\beta_s(T)$ は周期 T の関数でもあり、地盤の非線形性の影響は $T < 1 \text{ sec}$ の周期領域において β_s に現れることが示された。
- (4) (3)と同様の手順により、地震動の非定常スペクトルの強度を変換する係数 $\beta_\alpha(f)$ を提案した。これにより、基盤で与えられる地震動より地盤の応答解析をすることなく沖・洪積地盤での非定常スペクトルを求め、それより波形を得ることができる。

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、応答スペクトル等から、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¹¹⁾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(自然災害特別研究(1), 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 M 382/VP 200 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-2，1984。
- 2) Kameda, H. and M. Sugito: "Prediction of Strong Earthquake Motions on Rock Surface", Conference on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants, Port Alegre-RS, Oct. 1984, pp. 161-186.
- 3) Sugito, M. and H. Kameda: "Prediction of Nonstationary Earthquake Motions on Rock Surface", Proc. of JSCE, Structural Engineering/Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 2, Oct. 1985.
- 4) 太田外気晴・丹羽正徳：記録地震波に基づく表層地盤の増幅率とスペクトル特性，鹿島建設技術研究所年報，第26号，1977，pp. 231-236。
- 5) 沢田義博・花田和史・矢島 浩・岩楯敏広・松井家孝：JPDR（動力試験炉）を対象とした構造物—地盤系の動特性，電力中央研究所研究報告，No. 383029，1983。
- 6) Abe, Y., M. Sugimoto, N. Ohki, Y. Suzuki, J. Jido, Y. Hayamizu and T. Hiromatsu: "Dynamic Behavior of Pile Foundation During Earthquakes", Proc. 8WCEE, Vol. III, 1984, pp. 585-592.
- 7) Kameda, H., M. Sugito and H. Goto: "Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions", Proc. Third International Microzonation Conference, Seattle, June 28-July 1, 1982, Vol. III, pp. 1463-1474.
- 8) 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。
- 9) Hardin, B. O. and V. P. Drnevich: "Shear Modulus and Damping in Soils", Proc. ACSC, Vol. 98, SM 6, 7, 1972. 2.
- 10) Vanmarcke, E. H. and P. Lai. Shil-Sheng: "Strong Motion Duration and RMS Amplitude of Earthquake Records", BSSA, Vol. 70, No. 4, 1980. 8, pp. 1293-1307.
- 11) 土田 肇・倉田栄一・山田通一郎・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。
- 12) 杉戸真太・亀田弘行・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，構造工学論文集，Vol. 32A, 1986, pp. 789-799。