

S波速度の構造が非線形地盤の地震動強度に及ぼす影響

THE INFLUENCE OF S-WAVE VELOCITY ON THE INTENSITIES
OF SURFACE GROUND MOTION WITH NONLINEAR PROPERTIES

沢田 勉* 永江 正広** 平尾 潔***

By Tsutomu SAWADA, Masahiro NAGAE and Kiyoshi HIRAO

In this study, we investigate how the vertical distribution of initial S-wave velocity has effects on the intensities (rms acceleration, velocity and displacement) of surface ground motion under considering nonlinear properties of the ground. Assuming that the incident acceleration consists of SH wave with band limited white noise, the effective coefficients for the intensities of surface ground motion with nonlinear properties are defined regarding to initial S-wave velocity of a layer. The effective coefficients are calculated to several ground models. It is concluded from the results that initial S-wave velocities of intermediate layers near base rock have larger influence on the acceleration and velocity of nonlinear ground than those of linear ground. The influences of the vertical distribution of initial S-wave velocities on the displacement of nonlinear ground are almost same as that of linear ground.

1. 緒言

本研究は、地盤のS波速度の構造が土の非線形性を考慮したときの地表地震動の強度特性にどのような影響を及ぼすかを検討し、若干の考察を加えたものである。

地表で観測される地震動は震源特性、伝播経路、地盤条件等の影響をうけて複雑に変化するが、特に地盤条件は地表地震動の強度特性に特殊な影響を及ぼす。地表付近の地盤構造と地震動強度との関係を定性的あるいは、定量的に明らかにしようとした研究はこれまでにいくつかなされている。井上・伯野¹⁾は、水平多層構造の波動インピーダンスの鉛直分布と地震動加速度との一般的関係を検討し、地表地震動加速度が基盤と最上層地盤の波動インピーダンスの比ではほぼ決定されることを明らかにした。沢田・平尾^{2), 3)}は、地盤のS波速度と地震動強度の関係を検討し、地震動加速度が、最上層と基盤のS波速度以外にも、比較的S波速度が小さくかつ層厚の大きい中間層のS波速度の影響をうけること、また、速度および変位が深部に位置する卓越周期の長い中間層の影響をうけること等を指摘した。以上の研究においては、地盤を線形として解析しているが、強震時には地盤は非線形挙動を示すため、地表地震動強度の予測においては、土の非線形性を考慮することが必要になる。土岐・戸早⁴⁾は、大阪の多数の地盤を対象にして、土の非線形性を考慮した

* 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島2丁目1番地)

** 徳島大学大学院 (〒770 徳島市南常三島2丁目1番地)

*** 工博 徳島大学教授 工業短期大学部 (〒770 徳島市南常三島2丁目1番地)

地盤の震動解析を行い、その結果を数量化理論により整理して、最大加速度および最大速度と地盤パラメータの関係を調べた。そして、地動加速度および速度の予測式において最も影響が大きいのは入射波の最大加速度であること、またそれ以外で最も支配的な要因は最小のS波速度をもつ層の出現深度であることを示した。杉戸・亀田・広瀬⁵⁾は、工学的基盤での非定常地震動予測モデルから作成した多数のシミュレーション地震動を用いて地盤の非線形応答解析を行い、加速度、速度、および応答スペクトルの工学的基盤面に対する地表面の変換係数を提案した。そして、表層付近のN値分布より定義される軟弱さの指標、工学的基盤面までの深さ、および入射波の振幅を用いてそれら変換係数の予測式を求めた。

このような研究により、地表地震動の強度特性を少数の地盤パラメータと入射波振幅を用いて予測することが可能になりつつある。しかしながら、線形地盤のS波速度の構造が地表地震動特性に複雑に関連していることを考えると、各層のS波速度が地盤の非線形応答にどのような影響を及ぼすかを詳細に検討することも必要である。地盤のS波速度の構造と非線形地盤の地震動強度の関係を明らかにすることは次のような観点からも重要である。

- (1) 地盤のS波速度と地表地震動の関係が、地盤を線形としたときと非線形としたときでどの程度異なるかを知ることは、地盤の応答解析を行う上で必要である。
- (2) 地盤のS波速度はPS検層や弾性波探査等より推定されるが、その推定精度が地表地震動特性にどのような影響を及ぼすかを知ることは、地震動の予測精度を評価する上で有用である。
- (3) 地盤を構成する層のうちどの層が地表地震動に支配的な影響を及ぼすかを明らかにすることは、耐震設計用の入力地震動を設定するための基礎資料となる。
- (4) 強震記録より地盤パラメータを推定するいわゆる逆問題においては、地盤のS波速度と地表地震動特性の関係が基本となる。

本研究の目的は、地盤を線形としたときの既往の研究²⁾を非線形地盤に拡張し、地盤を構成する各層の初期S波速度の分布が土の非線形性を考慮したときの地表地震動強度のどのような影響を及ぼすかを明らかにすることである。手法的には、従来の研究が主に時間領域の地盤応答解析を多数行い、その結果を統計的に整理したのに対し、本研究ではこの問題を周波数領域で定式化した。具体的には、地表地震動強度として加速度、速度、変位の rms 値を考え、地盤各層の初期S波速度に対するそれらの偏微分係数を数値計算より求め、特定の層のS波速度が地表地震動強度にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。基盤入射波としては鉛直下方から基盤に入射する有帯域ホワイトノイズからなるSH波を考え、等価線形化法による重複反射法が適用できるものと仮定した。

2. 地盤の非線形応答解析と地表地震動強度の影響度係数

本節では、等価線形化法による地盤の非線形応答解析の周波数領域における定式化について述べた後、地盤各層の初期S波速度が地表地震動の rms 値にどのような影響を及ぼすかを表す係数、すなわち影響度係数を定義する。

(1) 等価線形化法による地盤の非線形応答解析⁶⁾

Fig.1 に示すような水平なn層からなる成層地盤において、第m層の層厚、S波速度、密度、およびQ値をそれぞれ H_m 、 V_{m0} 、 ρ_m 、 Q_{m0} とし、各層の上面に座標原点をとる。ただし、 V_{m0} および Q_{m0} は微小振動時の値であり、初期S波速度および初期のQ値である。以下では、

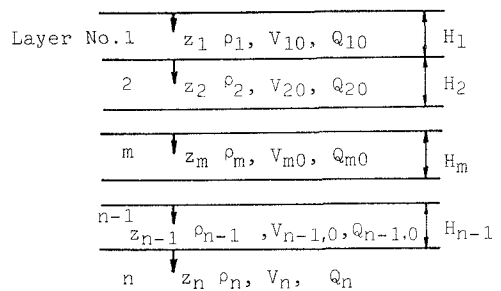


Fig.1 Structure of S-Wave Velocity

等価線形化法による重複反射法を用いて地盤の非線形応答解析を周波数領域で定式化するが、その際には等価なS波速度およびQ値を V_m および Q_m で表す。

いま、地盤が非線形挙動をする場合にそれと等価な線形地盤を考えると、第 m 層の上面のせん断変位 $u_m(0)$ およびせん断応力 $\tau_m(0)$ と下面におけるそれら $u_m(H_m)$ 、 $\tau_m(H_m)$ の間には次の関係が成立する。

$$\begin{bmatrix} u_m(H_m) \\ \tau_m(H_m) \end{bmatrix} = [S_m] \begin{bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $[S_m]$ は 2×2 の行列であり、その成分は以下のようになる。

$$\begin{aligned} S_{m,11} &= [\exp(ia_m\omega) + \exp(-ia_m\omega)] / 2 \\ S_{m,12} &= i [-\exp(ia_m\omega) + \exp(-ia_m\omega)] / 2b_m\omega \\ S_{m,21} &= ib_m\omega [\exp(ia_m\omega) - \exp(-ia_m\omega)] / 2 \\ S_{m,22} &= S_{m,11} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 ω は角振動数、 i は虚数単位であり、係数 a_m 、 b_m は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} a_m &= H_m / (V_m \sqrt{1+i/Q_m}) \\ b_m &= \rho_m V_m \sqrt{1+i/Q_m} \end{aligned} \quad (3)$$

次に、行列 $[S_m]$ を各層について求め、次式の行列の積 $[R_{n-1}]$ を計算する。

$$[R_{n-1}] = [S_{n-1}] \cdots \cdots [S_1] \quad (4)$$

この行列の第1行第1列および第2行第1列成分 $R_{n-1}(1,1)$ 、 $R_{n-1}(2,1)$ を用いると、角振動数 ω の入射波に対する地表面での増幅率(地盤伝達関数) $U(\omega)$ が次のように求められる。

$$U(\omega) = \frac{2}{[R_{n-1}(1,1) - iR_{n-1}(2,1) / (\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n})]} \quad (5)$$

次に、第 m 層のひずみ $\epsilon_m(z_m)$ の伝達関数について考える。第 m 層における z_m での変位振幅 $u_m(z_m)$ およびせん断応力 $\tau_m(z_m)$ は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} u_m(z_m) \\ \tau_m(z_m) \end{bmatrix} = [T_m] \begin{bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、行列 $[T_m]$ の各要素 $T_{m,11} \sim T_{m,22}$ は式(2)、(3)における H_m を z_m で置換えたものである。第 m 層の任意点におけるひずみ $\epsilon_m(z_m)$ は式(6)の $u_m(z_m)$ の z_m に関する微分より次のように得られる。

$$\epsilon_m(z_m) = \frac{\partial T_{m,11}}{\partial z_m} u_m(0) + \frac{\partial T_{m,12}}{\partial z_m} \tau_m(0) \quad (7)$$

他方、第 m 層の上面での $u_m(0)$ 、 $\tau_m(0)$ と地表面での変位 $u_1(0)$ の間には次の関係がある。

$$\begin{bmatrix} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{bmatrix} = [R_{m-1}] \begin{bmatrix} u_1(0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)を式(7)に代入すると

$$\epsilon_m(z_m) = \left[\frac{\partial T_{m,11}}{\partial z_m} R_{m-1}(1,1) + \frac{\partial T_{m,12}}{\partial z_m} R_{m-1}(2,1) \right] u_1(0) \quad (9)$$

したがって、第 m 層のひずみの伝達関数 $E_m(\omega)$ が次のように得られる。

$$E_m(\omega) = \left[\frac{\partial T_{m,11}}{\partial z_m} R_{m-1}(1,1) + \frac{\partial T_{m,12}}{\partial z_m} R_{m-1}(2,1) \right] U(\omega) \quad (10)$$

上式のひずみの伝達関数 $E_m(\omega)$ を用いると、第 m 層の任意点におけるひずみのrms値 $\gamma_{m,rms}$ が次のように得られる。いま、基盤入射波の変位のパワースペクトルを $S_d(\omega)$ とすると、第 m 層のひずみのパワース

ベクトル $\Gamma_m(\omega)$ は次のようになる。

$$\Gamma_m(\omega) = |E(\omega)|^2 S_d(\omega) \quad (11)$$

したがって、ひずみの rms値 $\gamma_{m, rms}$ が次のように得られる。

$$\gamma_{m, rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_m(\omega) d\omega \right]^{1/2} \quad (12)$$

等価線形化法による重複反射法を用いて地盤の非線形応答解析を行うには、地盤各層の等価な剛性および減衰定数をひずみの関数として表すことが必要となる。ここでは、この関係を次のHardin・Drnevichモデルを用いて表す。^{7), 8)}

$$\frac{G_m}{G_{m, max}} = \frac{1}{1 + \gamma_m / \gamma_{mh}} \quad (13)$$

$$\frac{D_m}{D_{m, max}} = \frac{\gamma_m / \gamma_{mh}}{1 + \gamma_m / \gamma_{mh}} \quad (14)$$

$$\gamma_{mh} = \tau_{m, max} / G_{m, max} \quad (15)$$

ここで、 G_m は等価剛性、 D_m は等価減衰定数、 $G_{m, max}$ は初期剛性、 $D_{m, max}$ は減衰定数の最大値、 γ_m は有効ひずみ、 γ_{mh} は規準ひずみ、 $\tau_{m, max}$ は最大せん断応力である。以下、これら諸係数について簡単に述べる。初期剛性 $G_{m, max}$ と初期S波速度 V_{m0} の間には次の関係がある。

$$G_{m, max} = \rho_m V_{m0}^2 \quad (16)$$

有効ひずみ γ_m は、Hardin・Drnevichモデル⁷⁾が正弦波入力について定義されていることから、式(12)のrmsひずみを振幅 γ_m の正弦波の実効値と等置して次のように求められる。⁶⁾

$$\gamma_m = \sqrt{2} \gamma_{m, rms} \quad (17)$$

土の最大せん断応力 $\tau_{m, max}$ はモール・クーロンの破壊規準より

$$\tau_{m, max} = \left[\left(\frac{1+K_0}{2} \sigma_v \sin \phi + c \cdot \cos \phi \right)^2 - \left(\frac{1-K_0}{2} \sigma_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

ただし、上式右辺では複雑さをさけるため、添字mは省略した。上式において、 K_0 は静止土圧係数、 σ_v は鉛直有効応力、 ϕ は土の内部摩擦角、 c は粘着力である。式(13)~(18)より、第m層の等価剛性 G_m および等価減衰定数 D_m は $G_{m, max}$ 、 $D_{m, max}$ 、 K_0 、 σ_v 、 ϕ 、 c の関数となるが、これらのうちで、初期剛性 $G_{m, max}$ は式(13)~(15)の関係式において大きな役割をしている。本研究では、式(16)の初期S波速度 V_{m0} が非線形地盤の地表地震動強度にどのような影響を及ぼすかに焦点をあてるため、 $G_{m, max}$ 以外の諸係数については次のように仮定した。^{10)~13)}

$$K_0 = 0.5, \quad c = 0, \quad \phi = 30^\circ (\text{clay}), \quad \phi = 40^\circ (\text{sand}), \quad D_{m, max} = 0.3$$

$$\sigma_v = \sum_{j=1}^{n-1} (\rho_j - w) H_j + \frac{1}{2} (\rho_n - w) H_n \quad (19)$$

ここで、 w は水の密度である。

地盤の非線形応答解析では、まず初期地盤の線形応答解析より各層のひずみを求め、式(13)~(19)より等価剛性および等価減衰定数を得、それらを用いて再び線形応答解析を行うという過程をくり返す。

(2) 地表地震動強度の影響度係数

地表地震動強度として加速度、速度、変位の rms値を考え、これらが特定の層の初期S波速度 V_{m0} にどのように影響されるかを表す影響度係数を定義する。基盤に入射する加速度波をFig.2 に示すようなスペクトル振幅をもつ有帯域ホワイトノイズからなるSH波と仮定する。ただし、Fig.2 は角振動数 ω の正領域について図示している。図における上・下限振動数は、文献(14)の強震記録の補正フィルターを参考にして次のように決めた。

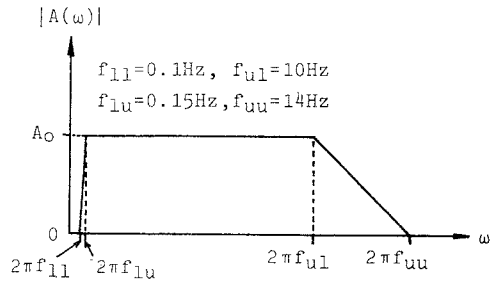


Fig. 2 Spectral Amplitude of Band Limited White Noise

$$f_{l1}=0.1\text{Hz}, f_{lu}=0.15\text{Hz}, f_{u1}=10\text{Hz}, f_{uu}=14\text{Hz}$$

このようにした理由は、工学的に重要な地震動の周波数成分が、0.1~10Hzの間にあること、また、地震動の速度および変位には低振動数成分の寄与が大きいので、この影響を緩和するため、 $f_{l1}=0.1\text{Hz} \sim f_{lu}=0.15\text{Hz}$ 間のスペクトル振幅を直線的に変化させたこと等である。有帯域ホワイトノイズのフーリエスペクトルを $A(\omega)$ とすると、地表地震動の加速度、速度、変位の両側パワースペクトル $S_a(\omega)$ 、 $S_v(\omega)$ 、 $S_d(\omega)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} S_a(\omega) &= \frac{2\pi}{T} U^2(\omega) |A(\omega)|^2 \\ S_v(\omega) &= \frac{2\pi}{\omega^2 T} U^2(\omega) |A(\omega)|^2 \\ S_d(\omega) &= \frac{2\pi}{\omega^4 T} U^2(\omega) |A(\omega)|^2 \end{aligned} \tag{20}$$

ここで、 T は継続時間であり、本研究では強震動の継続時間が数10秒であると考え、 $T=40.96\text{sec}$ を用いた。これらパワースペクトルを用いると、地表地震動の加速度、速度、変位の rms振幅値 a_{rms} 、 v_{rms} 、 d_{rms} が次のように得られる。

$$\begin{aligned} a_{rms} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_a(\omega) d\omega \right]^{1/2} \\ v_{rms} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_v(\omega) d\omega \right]^{1/2} \\ d_{rms} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_d(\omega) d\omega \right]^{1/2} \end{aligned} \tag{21}$$

次に、特定の層の初期S波速度 V_{m0} が微小量 ΔV_{m0} だけ変化したときの a_{rms} の変化量 $\Delta a_{rms}^{(m)}$ について考える。文献(2)では、偏微分係数より $\Delta a_{rms}^{(m)}$ を解析的に求めたが、本研究のように地盤の非線形性を考慮した場合には、地盤各層のS波速度がひずみに依存するため、 $\Delta a_{rms}^{(m)}$ を陽な形で求められない。そこで、数値微分より $\Delta a_{rms}^{(m)}$ を求める。いま、初期S波速度 V_{m0} ($m=1 \sim n$) をもつ地盤を非線形応答解析して得られる加速度の rms値を $a_{rms}^{(0)}$ とする。次に、特定の第 m 層の初期S波速度 V_{m0} を ΔV_{m0} だけ増加させて rms加速度を計算しそれを $a_{rms}^{(m)}$ とする。このとき、 $a_{rms}^{(0)}$ の変化量 $\Delta a_{rms}^{(m)}$ は

$$\Delta a_{rms}^{(m)} = \frac{\partial a_{rms}^{(0)}}{\partial V_{m0}} \Delta V_{m0} = a_{rms}^{(m)} - a_{rms}^{(0)} \tag{22}$$

より求められる。初期S波速度の変化量としては次の値を用いる。

$$\Delta V_{m0} = \beta V_{m0} \tag{23}$$

ここで、 β は微小な正值であり、例えば、 $\beta=0.01$ である。式(22)の $\Delta a_{rms}^{(m)}$ と $a_{rms}^{(0)}$ の比をとると、 V_{m0} が $\Delta V_{m0}=\beta V_{m0}$ だけ変化したときの a_{rms} の変化率が得られる。これより文献(2)と同様に、次に示す影響度係数 r_{avm} が定義される。

$$r_{avm} = \frac{\Delta a_{rms}^{(m)}}{\beta a_{rms}^{(0)}} \quad (24)$$

上式は、第 m 層の初期S波速度が単位量だけ変化したときの a_{rms} の変化を示す係数であり、これを定量的に表す指標となる。上と同様にして、 v_{rms} と d_{rms} に対する影響度係数 r_{vvm} 、 r_{dvm} を次のように定義することができる。

$$r_{vvm} = \frac{\Delta v_{rms}^{(m)}}{\beta v_{rms}^{(0)}} \quad (25)$$

$$r_{dvm} = \frac{\Delta d_{rms}^{(m)}}{\beta d_{rms}^{(0)}} \quad (26)$$

3. 数値計算例および考察

前節で定義した影響度係数を用いて、地盤各層の初期S波速度が地表地震動のrms値にどのような影響を及ぼすかを検討する。解析に用いた地盤モデルの諸定数 ρ_m 、 H_m 、 V_{m0} 、 Q_{m0} をTable 1に、初期S波速度の鉛直分布および、それに対応する地盤伝達関数をそれぞれFig.3および4に示す。

Table 1 Soil Layer Profiles of Model Ground 1),15)

Layer No.	Model A				Model HA				Model KU				Model MI			
	H	V	ρ	Q	H	V	ρ	Q	H	V	ρ	Q	H	V	ρ	Q
1	10	100	1.8	10	2	100	1.8	14	2	50	1.6	19	2.2	164	1.7	10
2	10	200	1.8	10	2	160	1.8	13	5	70	1.7	17	7.5	300	1.9	7
3	10	300	1.8	10	6	195	1.9	12	13	400	2.0	5	1.9	164	1.7	10
4	10	400	1.8	10	2	380	2.0	9	22	150	1.8	11	200	800	2.0	100
5	10	500	1.8	10	1	200	2.0	7	10	250	2.0	8	—	1500	2.2	100
6	—	600	2.0	100	4	375	2.0	7	33	500	2.0	100	—	—	—	—
7	—	—	—	—	1	200	1.6	7	—	1400	2.3	100	—	—	—	—
8	—	—	—	—	10	430	1.6	100	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	8	270	1.7	7	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	144	370	1.9	9	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	180	650	2.0	100	—	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	1500	2.1	100	—	—	—	—	—	—	—	—

H=thickness(m) V=S-wave velocity(m/sec) ρ =density(kg/m³) Q=Q value

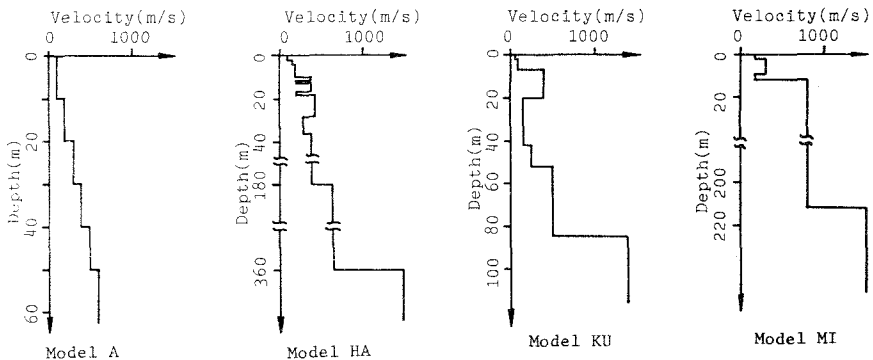


Fig.3 Structure of S-Wave Velocity of Model Ground

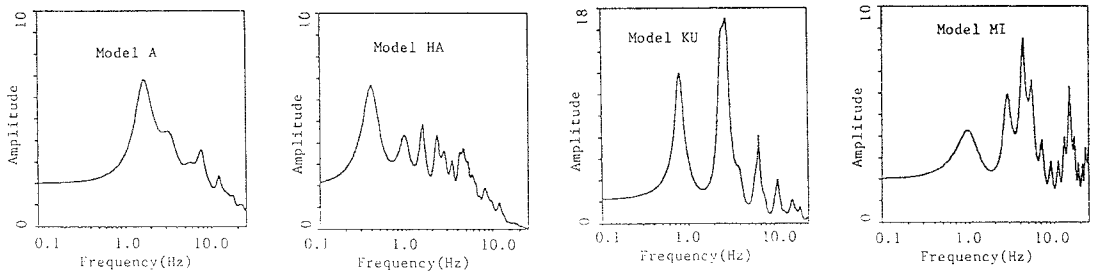


Fig.4 Transfer Function of Model Ground (Linear)

Fig.3の横軸は初期S波速度 (m/sec)、縦軸は深度 (m)であり、Fig.4の横軸は振動数(Hz)の対数である。これらのモデルのうち、Model HA、KU、MIはそれぞれ、八戸、釧路、宮古の実地盤をモデル化したものである。Model AはS波速度が深さ方向で単調増加する地盤、Model HAは基盤が深層にあり上層付近のS波速度が複雑に変化する地盤、Model KUは第3層目に比較的S波速度の大きい中間層をもちその下に軟弱層が存在する地盤、Model MIは地表から浅い所にインピーダンスの大きい中間層が存在する地盤である。Fig.4の地盤伝達関数には、これら各地盤の特徴が現れている。

以上の各地盤モデルに対して、前節で述べた影響度係数を算出するが、地盤の非線形応答解析では、入射波の振幅が地盤の応答に大きく影響する。したがって、入射波の振幅を規定する必要がある。ここでは、次に示す入射波のrms加速度振幅 $a_{rms,0}$ を用いて入射波振幅を表す。

$$a_{rms,0} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |A(\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2} \quad (27)$$

数値計算は、 $a_{rms,0}=0.1、5、20、40、80gal$ の各場合について解析を行った。また、解析にあたっては次の仮定を設けた。すなわち、深層に位置する初期S波速度の大きい層 (Table 1において、Model HAの第11層目、Model KUの第6層目、およびModel MIの第4層目)は線形挙動するものとする。これは、S波速度の大きい層は剛性が大きく、また地盤深部では鉛直有効応力 τ_{max} が大きいいため非線形化しにくいと考えたからである。

以下、計算結果について述べ、若干の考察を加える。まず、非線形応答解析を行うにあたっては、各層の等価剛性および等価減衰定数がひずみに依存するため、層を細分割してひずみを求める必要があるため、それについて検討しておく。地盤各層のひずみは、式(7)のように行列 $[T_m]$ の要素により表される。 $[T_m]$ の要素は、式(2)および(3)より $\omega H_m/V_m$ の関数であるから、第m層におけるひずみの変化量は H_m/V_m により決められる。ところが、変位の微分より得られるひずみでは、一般に低振動数成分が卓越するから、ひずみの計算精度、すなわち地盤の非線形応答解析の精度は H_m/V_m の大きさに支配される。

このような考えのもとに、非線形解析における層の細分割を検討した。Table 2は、Model AとHAのそれぞれについて、 H_m/V_{m0} を0.1以下、0.05以下、および0.02以下にして、地表地震動の加速度、速度、変位を求めた結果である。ただし、基盤入射波のrms加速度は80galとしている。強震時の地盤各層の V_m は土の非

Table 2 rms Intensities of Nonlinear Model Ground

H_m/V_m	Model A			Model HA		
	a_{rms}	v_{rms}	d_{rms}	a_{rms}	v_{rms}	d_{rms}
0.02	127.7	26.24	15.74	95.25	36.04	23.16
0.05	126.5	26.19	15.74	95.23	36.04	23.16
0.10	121.9	25.99	15.74	95.17	36.01	23.15

$$a_{rms} = rms \text{ Acc. (cm/sec}^2) \quad v_{rms} = rms \text{ Vel. (cm/sec)}$$

$$d_{rms} = rms \text{ Dis. (cm)}$$

線形化によって低下し、例えば Model A の最上層においては初期値の50%程度になるが、便宜上、初期せん断波速度 V_{m0} を用いて H_m/V_{m0} を規定する。表より、 $H_m/V_{m0} \leq 0.1$ の場合とそれ以上細分割した場合とでは結果にほとんど差がないことがわかったので、以下の解析では、 $H_m/V_{m0} \leq 0.1$ として計算した。Table 3 には、このようにして地盤各層を細分割したときの層厚と初期S波速度を示す。

Table 3 Soil Layer Profiles of Nonlinear Model Ground

Layer No.	Model A		Model HA		Model KU		Model MI	
	H	V	H	V	H	V	H	V
1	10	100	2	100	2	50	2.2	164
2	10	200	2	160	5	70	7.5	300
3	10	300	6	195	13	400	1.9	164
4	10	400	2	380	11	150	200	800
5	10	500	1	200	11	150	—	1500
6	—	600	4	375	10	250		
7			1	200	33	500		
8			10	430	—	1400		
9			8	270				
10			36	370				
11			36	370				
12			36	370				
13			36	370				
14			180	650				
15			—	1500				

次に、地盤を線形としたときと非線形としたときの地表地震動特性の差異について簡単にふれておく。Fig.5 には、入射波振幅を $a_{rms,0} = 40gal$ としたときの各地盤の伝達関数を示した。この図をFig.4の線形地盤の場合と比べると、地盤の非線形性を考えた場合には、地盤伝達関数の高振動数領域の振幅が小さくなるのがわかる。従って、地盤の非線形性が強くなると、地表地震動の高振動数成分は減少し、加速度振幅の増幅率は小さくなることが予想される。

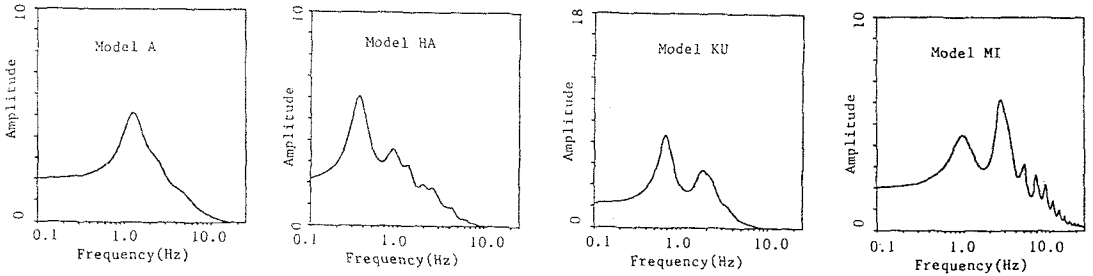


Fig.5 Transfer Function of Model Ground ($a_{rms,0} = 40cm/sec^2$)

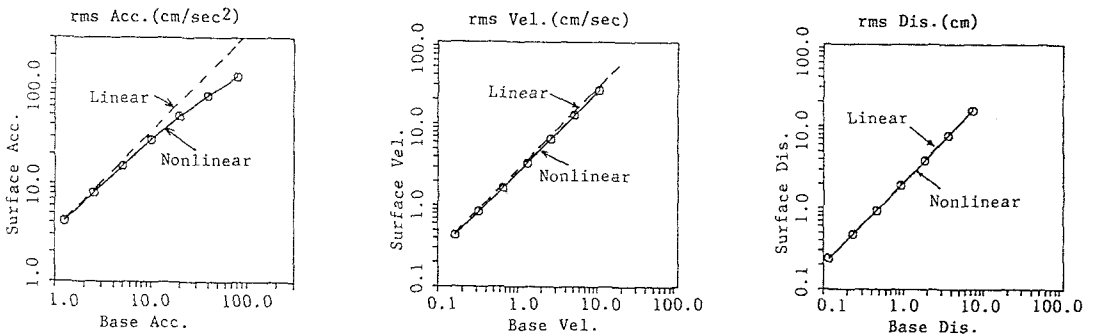


Fig.6 Relation of rms Intensities between Base and Surface (Model A)

Fig.6 は、Model A について横軸に基盤入射波の rms 振幅を、縦軸に地表でのそれをとって図示したものであり、(a) 加速度、(b) 速度、(c) 変位について示している。図中の点線は線形地盤に対応する。図より、加速度の rms 値には地盤の非線形性の影響が大きく現れ、基盤に対する地表での加速度の増幅率は入射波の振幅の増大とともに低下することがわかる。この結果は、入射波振幅が増大すると地盤伝達関数の高振動数成分が減少するためであり、文献(5)の解析結果とも調和的である。図(b) および(c)の速度および変位については、地表と基盤の振幅はほぼ比例関係にあり、線形地盤のそれ(点線)との差異は小さい。これは、速度および変位の rms 値が、地盤の非線形化による高振動数成分の減少にあまり影響されないためと思われる。

次に、前述の各地盤モデルの加速度、速度、変位の影響度係数について述べる。Fig.7~10には、基盤入射波振幅 $a_{rms,0}$ が 0.1gal と 80gal の場合について、各地盤の地表地震動加速度、速度、変位の影響度係数 r_{av} 、 r_{vv} 、 r_{dv} を式(24)~(26)より求め図示した。図において、横軸は影響度係数の値を、縦軸は深さ方向の各層の位置を層厚を無視して示した。また、図の左側には初期 S 波速度の構造も図示した。これらの図のうち、 $a_{rms,0}=0.1gal$ の結果は、線形地盤に関する既往の研究結果²⁾に対応するものであるが、本研究では基盤入射波振幅を若干変えていること、および各層を細分割したことのため、両者の間には微妙な差異があることに注意されたい。なお、入射波振幅が 5gal、20gal、および 40gal については紙面の都合で割愛した。

以下では、Fig.7~10に基づいて初期 S 波速度の影響を順次検討する。

Model A (Fig.7)では、地盤が線形($a_{rms,0}=0.1gal$)の場合、加速度および速度の影響度は基盤と最上層で大きい。しかし、非線形($a_{rms,0}=80gal$)の場合、加速度の最上層における影響度は非常に小さくなる。また、加速度の基盤における影響度および速度の最上層と基盤における影響度も線形の場合に比べて小さくなっている。このように、地盤の非線形性を考慮すると、基盤と最上層の初期 S 波速度が加速度、速度に及ぼす影響は、相対的に小さくなる。中間層の S 波速度が加速度、速度に及ぼす影響は線形と非線形であまり変わらない。変位については、影響度係数は全般に小さく、地盤の非線形性の影響をあまり受けない。

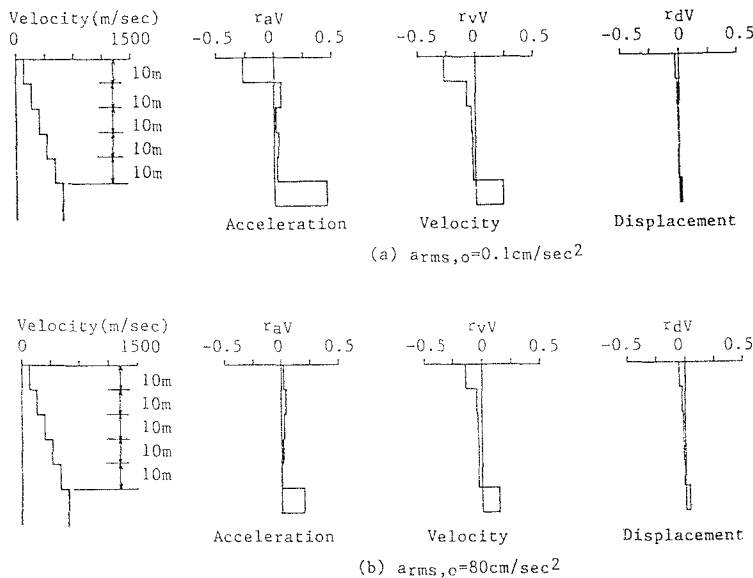


Fig.7 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion (Model A)

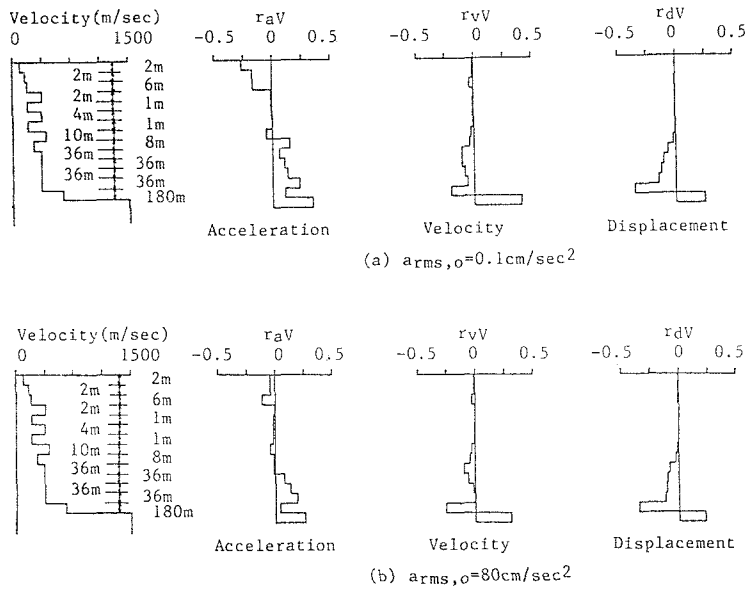


Fig.8 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion (Model HA)

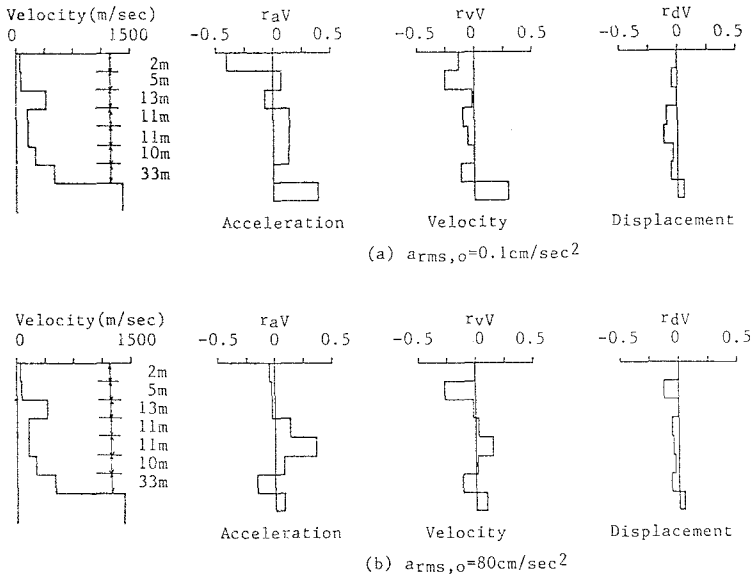


Fig.9 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion (Model KU)

Model HA (Fig. 8) の加速度、速度、変位の影響係数は地盤構造の複雑さを反映して層ごとにかなり変化している。線形地盤の r_{aV} の絶対値は最上層と基盤で大きい、第 9~13 層目においても大きい。この中間層は、上下を比較的大きな S 波速度をもつ層に挟まれた低速層とみなすことができる。ところが、この地盤モデルでは、第 5 および 7 層目にも低速層が存在するが、それらの r_{aV} は小さい。このように、同じ低

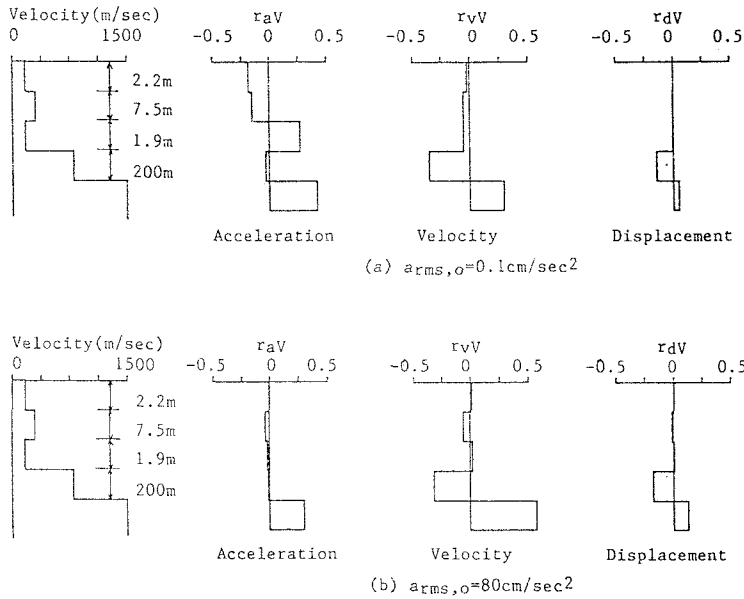


Fig.10 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion (Model MI)

速度層であっても、第 9～13層目と第 5、7層目では加速度に及ぼす影響度は異なっている。両者の差異は、前者が後者に比べて基盤に近い位置に存在し、かつ層厚が大きいことである。線形地盤に関する既往の研究²⁾では、上下を比較的硬い層に挟まれた低速度層が地震動加速度に大きな影響を及ぼすことを指摘したが、ここではそれに加えて、この低速度層が基盤に近いほどその影響度が大きくなるという事実を追加しておく。この結果は、土岐・戸早⁴⁾が指摘したこと、すなわち、最小のS波速度をもつ層の出現深度が地表速度、加速度に大きく影響することと矛盾しない。次に、線形と非線形の場合の影響度係数を比較する。図より、地盤の非線形性を考慮した場合には、加速度に対する最上層と基盤の影響度は線形の場合に比べてかなり減少すること、また、基盤に近い軟弱な中間層の影響度は線形地盤と同程度であることがわかる。速度および変位については線形と非線形の間にはあまり差が見られない。

Model KU (Fig. 9) の線形地盤の影響度が最上層、基盤、および低速度層で大きいことは Model HA と同様である。非線形地盤の r_{aV} の絶対値は線形に比べて最上層と基盤で減少し、中間層では増加している。速度については加速度と同様な傾向がみられるが、変位は線形と非線形であまり違わない。

Model MI (Fig. 10) の線形地盤における r_{aV} の絶対値も、上述の各モデル同様、最上層、基盤、および低速度層で大きい。非線形地盤の r_{aV} は、最上層、基盤では各モデル同様減少しているが、低速度層の出現深度が浅い本モデルでは、低速度層が基盤近傍に存在する場合は逆にその r_{aV} が減少している。速度については、地盤が非線形化することによって基盤の影響が増大する傾向があるが、変位についてはあまり差がない。

4. 結 言

本研究では、地盤を構成する各層のS波速度が、地盤の非線形性を考慮したときの地表地震動の加速度、速度、変位にどのような影響を及ぼすかを検討するため、地盤の非線形応答解析を周波数領域で定式化するとともに、加速度、速度、変位の偏導関数を用いてそれらの影響度係数を定義した。そして、4つの代表的な地盤モデルを対象にして影響度係数を求め、若干の考察を加えた。得られた結果を要約すると以下のよう

になる。

- (1) 地盤の非線形性が地表地震動強度に及ぼす影響は、加速度で最も大きく、速度、変位の順に小さくなる。これは、地盤が非線形化されることによって、地表地震動の高振動数成分が減少するためである。
- (2) 地盤各層の初期S波速度が地表加速度に及ぼす影響は、地盤を線形としたときと非線形としたときで若干異なる。地盤を線形としたときには、最上層と基盤のS波速度が地表加速度に及ぼす影響は大きいのにに対し、非線形性を考慮したときには、それらの影響はかなり小さくなる。
- (3) 比較的硬い中間層と基盤の間に存在する低速度層は、地盤の線形、非線形を問わず、地表加速度に大きな影響を及ぼす。また、このような低速度層は地表速度および変位にも大きな影響を及ぼすので、低速度層が地盤深部に存在するか否かを知ることは、地表地震動特性を予測する上で重要である。

以上のことより、非線形地盤のS波速度の構造が地表地震動強度にどのような影響を及ぼすかがある程度明らかになった。しかしながら、本研究では、地盤を水平成層構造と設定したこと、入射波として鉛直下方より入射する有帯域ホワイトノイズを用いたこと、土の非線形性を表すために用いたHardin・Drnevichモデルの妥当性等の問題点があり、各種のアレー観測記録等による検討が必要である。これらについては、今後検討したい。

参 考 文 献

- 1) 井上・伯野：地盤の鉛直剛性分布が地表地震動特性に及ぼす影響，土木学会論文報告集，第310号，pp.1～10，1981年。
- 2) 沢田・平尾：地盤のせん断波速度の構造が地表地震動強度に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.32A，pp.777～783，1986年。
- 3) 沢田・平尾：せん断波速度の構造が地盤伝達関数に与える影響，土木学会論文集，No.368/I-5，pp.329～336，1986年。
- 4) 土岐・戸早：数量化理論による大阪地盤の震動予測，京都大学防災研究所年報，第26号，B-2，pp.1～13，1983年。
- 5) 杉戸・亀田・広瀬：工学的基盤面と沖・洪積地盤の地震動の変換係数，構造工学論文集，Vol.32A，pp.789～799，1986年。
- 6) 土岐：新体系土工学11・構造物の耐震解析，pp.71～80，技報堂出版，1981年。
- 7) Hardin, B. D. and Drnevich, V. P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Proc. of ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667～692, 1972.
- 8) Sugito, M., Kameda, H. and Saito, H.: A Dataset of Modified Strong Earthquake Motion Rock Surface, Research Report No. 86-3, Disaster Prevention Research Institute Kyoto Univ., 1986.
- 9) 前出6)，pp.122～123。
- 10) 山内：土質力学，pp.111～117，理工図書，1979年。
- 11) 松尾・富永：土圧，pp.32，鹿島出版会，1976年。
- 12) 石原：土質動力学の基礎，pp.136～208，鹿島出版会，1976年。
- 13) 赤井：土質力学，pp.84～94，朝倉書店，1981年。
- 14) 後藤・亀田・杉戸・今西：デジタルフィルターによるSMAC-B2型加速度記録の補正について，土木学会論文報告集，第277号，pp.57～70，1978年。
- 15) 神山：地盤の影響を考慮した震動継続時間およびその関連パラメータの統計解析，土木学会論文集，No.350/I-2，pp.271～281，1984年。

(1986年10月18日受付)