

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

THE INFLUENCE OF S-WAVE VELOCITY OF SUBSURFACE LAYER
ON THE INTENSITIES OF SURFACE GROUND MOTION

沢田 勉* 平尾 潔**

By Tsutomu SAWADA and Kiyoshi HIRAO

In this study, we investigate how the vertical distribution of shear wave velocity has effects on rms acceleration, velocity and displacement of surface ground motion. Assuming that the incident acceleration wave consists of SH wave with band limited white noise, the effective coefficients for rms acceleration, velocity and displacement of surface ground motion are defined regarding to shear wave velocity and thickness of a layer. The effective coefficients are calculated to several ground models in Japan. It is found that the effective coefficients of rms acceleration is large not only at the surface layer and base rock but also at the medium layers whose shear wave velocity is relatively small. The effective coefficients of rms velocity and displacement are large at the layers whose predominant period is large.

1. 緒 言

本研究は、地盤のせん断波速度の構造が地表地震動の強度特性（加速度、速度、変位のrms値）にどのような影響を与えるかを検討し、若干の考察を加えたものである。

構造物の耐震設計を行う際の基本的かつ重要な問題として、入力地震動の特性を的確に把握することが挙げられる。地震動特性は、強度特性、周波数特性、および非定常特性に大別され、従来よりこれら諸特性を解明するために多くの研究がなされてきた。これらの特性のうち強度特性は、耐震設計の際の地震荷重として直接用いられるため、工学的にとくに重要である。地震動強度は、震源特性、伝播経路、地盤条件の影響を受けるが、とくに地盤条件は地震動強度に複雑な影響を与え、近接する2地点でも地盤条件が異なれば地震動強度にかなりの差異が生じることが指摘されている。この原因は、地震波を構成する実体波および表面波が地表付近の地盤構造によって複雑に変化するためと考えられる。地表地震動強度と地表付近の地盤構造の間の関係を求めようとする研究は、これまでいくつかなされている。嶋は¹⁾、東京の地盤データについて多くの数値計算を行い、地盤の周波数伝達関数の共振点における振幅が最上層と基盤のS波速度の比にほぼ比例することを見出した。井上・伯野は²⁾、水平多層構造の波動インピーダンスの鉛直分布と地表最大加速度との一般的関係を、数値実験と数量化理論を組合せることによって調べた。その結果、地表加速度

* 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島町2丁目1番地)
** 工博 徳島大学教授 工業短期大学部土木工学科 (770 徳島市南常三島町2丁目1番地)

の基盤入力に対する応答倍率が、基盤と地表層の波動インピーダンスの比でほぼ決定され、中間層の波動インピーダンスにはほとんど関係しないことを見出した。この結果は、構造物の建設地点の震度を知るためには、地表付近の地盤構造のみを考えればよいという点で、工学的に有用な情報である。後藤・亀田・杉戸は³⁾、地表付近の地盤条件を定量的に表すためにN値を用いた評価法を提案し、それを地表加速度、速度、変位のアテニュエーション式に導入した。そして、N値による地盤の軟弱さの指標を用いることによって加速度および速度のアテニュエーション式まわりのばらつきが減少すること、速度が相対的にある程度深い地盤の影響を受けること、変位にはさらに深い部分の地盤条件が反映されることなどを指摘した。山田・野田・上松は⁴⁾、地盤構成が表面波の分散特性に及ぼす影響を検討するため、位相速度と群速度の地盤パラメータに関する偏導関数を導き、八戸港湾を対象にして数値計算を行った。そして、位相速度の変動を支配する主要な要因がS波速度であること、八戸港湾の地盤では36 - 180 mの層のS波速度が表面波に大きな影響を与えることなどを指摘した。土岐・戸早⁵⁾は、大阪の多数の地盤を対象にして、地盤の非線形性を考慮した震動解析を行い、それらの結果に対して多くのパラメータを含めた数理化理論を適用して、地表での最大加速度および最大速度に対してどの地盤パラメータが影響を及ぼすかを調べた。そして、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し、これが深いほど地表面加速度が減少することを明らかにした。神山は⁶⁾、震動継続時間とそれに関連する震動パラメータについて、とくに地盤条件を考慮して理論的考察を加えるとともに、それを強震記録の統計解析に適用して半経験公式を導いた。その結果、地表地震動のrms振幅値が観測点の地盤条件によって0.8 - 3.5程度の増幅率をもって変動することを見出した。このような研究から、実地盤の地盤条件が地表地震動強度に及ぼす影響や、モデル地盤におけるS波速度の分布が地表加速度に及ぼす影響などが明らかになった。しかしながら、地表地震動強度が観測点直下の地盤の複雑な地盤構成に大きく影響されることを考えると、実地盤を対象にし、かつ地盤を構成する各層の地盤パラメータが地表地震動強度にどのような影響を及ぼすかを詳細に検討することが必要である。

以上のような観点より、本研究では、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与えるかをモデル地盤と実地盤を対象にして検討した。手法的には、井上・伯野²⁾および土岐・戸早⁵⁾が時間領域の応答計算を多数行い、その結果を数理化理論を用いて整理したのに対し、本研究では、この問題を周波数領域で定式化し、特定の地盤パラメータが地表地震動強度にどのように関与するかを表す影響度係数を定義した。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、地盤パラメータに対するそれらの偏導関数を導き、それを用いて特定の地盤パラメータが地表地震動強度にどのような影響を与えるかを明らかにする。基盤入力波としては鉛直下方から基盤に入力する有帯域ホワイトノイズからなるSH波を考え、重複反射法が適用できるものと仮定した。本研究の結果は、従来の研究成果を裏付けるものであるが、それ以外にも、二、三の興味ある結果が得られたのでここに報告する。

2. 地盤伝達関数の偏導関数と地表地震動強度の影響度係数

本節では、まず重複反射法による地盤伝達関数とその偏導関数について述べた後、特定の地盤パラメータが地表地震動強度のrms値に及ぼす寄与の程度を表す係数、すなわち影響度係数を定義する。

(1) 地盤伝達関数とその偏導関数^{7), 8)}

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_m 、 ρ_m 、 Q_m とし、各層の上面に座標原点をとる。このとき、第m

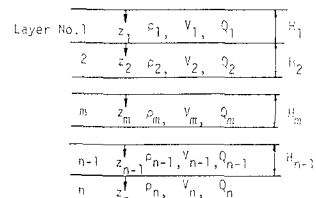


Fig.1 Structure of S-Wave Velocity

層の上面のせん断変位振幅およびせん断応力 $u_m(0)$ 、 $\tau_m(0)$ と下面におけるそれら $u_m(H_m)$ 、 $\tau_m(H_m)$ の間にはつぎの関係が成立する。

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

ここで、 $[S_m]$ は 2×2 の成分をもつ行列であり、それら成分は地盤の減衰 (Q 値) を考慮すると次のように表すことができる。

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

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。

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

つぎに、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 $[R_{n-1}]$ の第1行第1列および第2行第1列成分 R_{11} および R_{21} 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。²⁾

$$U(\omega) = 2 / |R_{11} - iR_{21} / (\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n})| \quad (5)$$

以下では、計算の都合上次の記号を用いる。

$$\begin{aligned} \phi &= \text{Re}\{R_{11} - iR_{21} / (\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n})\} \\ \psi &= \text{Im}\{R_{11} - iR_{21} / (\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n})\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\text{Re}(\cdot)$ および $\text{Im}(\cdot)$ はそれぞれ実数部および虚数部を表す。この ϕ と ψ を用いると、式 (5) は

$$U(\omega) = 2(\phi^2 + \psi^2)^{-1/2} \quad (7)$$

となる。式 (2) ~ (5) より、 $U(\omega)$ は ρ_m 、 V_m 、 H_m 、および Q_m の関数となるが、本研究では地盤のS波速度の構造が $U(\omega)$ に及ぼす影響を考えるから、以下では V_m と H_m のみを地盤パラメータとして用いる。つぎに、地盤パラメータ V_m または H_m に対する $U(\omega)$ の偏導関数を導く。ただし、 H_m に対する偏導関数は V_m と同様にして得られるから、ここでは V_m についてのみ述べる。式 (7) を V_m ($m = 1, 2, \dots, n-1$) について偏微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial U(\omega)}{\partial V_m} = -\frac{2}{(\phi^2 + \psi^2)^{3/2}} \left(\phi \frac{\partial \phi}{\partial V_m} + \psi \frac{\partial \psi}{\partial V_m} \right) \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial V_m} &= \text{Re} \left(\frac{\partial R_{11}}{\partial V_m} - \frac{1}{\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n}} \frac{\partial R_{21}}{\partial V_m} \right) \\ \frac{\partial \psi}{\partial V_m} &= \text{Im} \left(\frac{\partial R_{11}}{\partial V_m} - \frac{1}{\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n}} \frac{\partial R_{21}}{\partial V_m} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) の右辺に現れる偏導関数 $\partial R_{11} / \partial V_m$ および $\partial R_{21} / \partial V_m$ は式 (4) の行列 $[R_{n-1}]$ を V_m に関して偏微分することによって得られる次の行列の第1行第1列および第2行第1列の成分である。

$$\frac{\partial [R_{n-1}]}{\partial V_m} = [S_{n-1}] \cdots \cdots \frac{\partial [S_m]}{\partial V_m} \cdots \cdots [S_1] \quad (10)$$

上式に含まれる偏導関数 $\partial [S_m] / \partial V_m$ の各成分は式 (2) を V_m について偏微分することによって容易に得られる。以上のことより、 V_m ($m = 1, 2, \dots, n-1$) に対する $U(\omega)$ の偏導関数を求め

るには、式(10)より $\partial [R_{n-1}] / \partial V_m$ を計算し、その第1行第1列および第2行第1列の成分を式(9)に代入して $\partial \Phi / \partial V_m$ および $\partial \Psi / \partial V_m$ を求め、それらを式(8)に代入すればよい。また、基盤のS波速度 V_n に対する $U(\omega)$ の偏導関数は、次式の $\partial \Phi / \partial V_n$ および $\partial \Psi / \partial V_n$ を計算し、それらを式(8)に代入することによって求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial V_n} &= \operatorname{Re} \left(\frac{i}{\omega \rho_n V_n^2 \sqrt{1+i/Q_n}} R_{21} \right) \\ \frac{\partial \Psi}{\partial V_n} &= \operatorname{Im} \left(\frac{i}{\omega \rho_n V_n^2 \sqrt{1+i/Q_n}} R_{21} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

(2) 地表地震動強度の影響係数

地表地震動強度として加速度、速度、変位のrms振幅値を考え、これらが特定の地盤パラメータ(層厚 H_m 、S波速度 V_m)にどのように影響されるかを表す影響係数を導く。いま、基盤に入射する加速度波を $\omega_l \sim \omega_u$ の角振動数帯域において一定振幅をもつ帯域ホワイトノイズからなるSH波と仮定すると、地表加速度波のフーリエスペクトルは $\omega_l \sim \omega_u$ において地盤伝達関数と相似形になる。したがって、地表地震動の加速度、速度、変位のパワースペクトル $G_a(\omega)$ 、 $G_v(\omega)$ 、 $G_d(\omega)$ は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} G_a(\omega) &= k^2 U^2(\omega), & \omega_l \leq \omega \leq \omega_u \\ G_v(\omega) &= k^2 U^2(\omega) / \omega^2, & \omega_l \leq \omega \leq \omega_u \\ G_d(\omega) &= k^2 U^2(\omega) / \omega^4, & \omega_l \leq \omega \leq \omega_u \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 k は係数であり、 ω は角振動数である。これらの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。

$$\begin{aligned} a_{rms} &= \left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} G_a(\omega) d\omega / 2\pi \right\}^{1/2} = k \left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} U^2(\omega) d\omega \right\}^{1/2} / \sqrt{2\pi} \\ v_{rms} &= \left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} G_v(\omega) d\omega / 2\pi \right\}^{1/2} = k \left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} U^2(\omega) / \omega^2 \cdot d\omega \right\}^{1/2} / \sqrt{2\pi} \\ d_{rms} &= \left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} G_d(\omega) d\omega / 2\pi \right\}^{1/2} = k \left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} U^2(\omega) / \omega^4 \cdot d\omega \right\}^{1/2} / \sqrt{2\pi} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、積分の上下限値は有帯域ホワイトノイズの下限および上限の角振動数 $\omega_l = 2\pi f_l$ および $\omega_u = 2\pi f_u$ であるが、これらについては後述のように $f_l = 0.1 \text{ Hz}$ 、 $f_u = 25 \text{ Hz}$ を用いた。式(12)から明らかなように、下限振動数 f_l は速度および変位のパワースペクトルの低振動数成分に大きな影響を与えるため、 f_l の選択には配慮が必要である。たとえば、 f_l として地震学におけるコーナー振動数 f_c を用いることも考えられるが、ここでは工学の分野において対象とする地震動の周波数帯域が $0.1 \text{ Hz} \sim 25 \text{ Hz}$ 程度であることを考慮して上述の値を用いた。つぎに、特定の地盤パラメータ(たとえば第 m 層のS波速度 V_m)が微小量(ΔV_m)だけ変化したときの a_{rms} の変化量 Δa_{rms} について考える。 v_{rms} および d_{rms} については、 a_{rms} と同様であるから、ここでは省略する。 Δa_{rms} は式(13)の第1式を用いることにより次のように得られる。

$$\Delta a_{rms} \approx \frac{\partial a_{rms}}{\partial V_m} \Delta V_m = \frac{k}{\sqrt{2\pi}} \frac{\int_{\omega_l}^{\omega_u} U(\omega) \cdot \partial U(\omega) / \partial V_m \cdot d\omega}{\left\{ \int_{\omega_l}^{\omega_u} U^2(\omega) d\omega \right\}^{1/2}} \Delta V_m \quad (14)$$

ところで、地盤パラメータ V_m の値は層ごとにかなり異なるので、上式のままでは V_m が a_{rms} に与える影響を公平に評価できない。そこで、各地盤パラメータがもとの値に対して同一の割合いで変化したときに、 a_{rms} の変化量がいくらになるかを知ることが必要となる。いま、 ΔV_m を

$$\Delta V_m = \epsilon V_m \quad (15)$$

と置くと、式(14)は次のようになる。

$$\Delta a_{rms} \cong \frac{\varepsilon k}{\sqrt{2\pi}} \frac{V_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) \cdot \partial U(\omega) / \partial V_m \cdot d\omega}{\left\{ \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) d\omega \right\}^{1/2}} \quad (16)$$

式(15)において、 ε は微小な正值(たとえば0.01)であり、すべての地盤パラメータについて共通とする。つぎに、式(16)の Δa_{rms} と式(13)の a_{rms} の比をとると、次式が得られる。

$$\frac{\Delta a_{rms}}{a_{rms}} \cong \varepsilon \frac{V_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) \cdot \partial U(\omega) / \partial V_m \cdot d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) d\omega} \quad (17)$$

上式は、 V_m がもとの値に対して ε だけ変化したときの a_{rms} の変化率を表す。微小量 ε はすべての地盤パラメータについて共通であるからこれを除去すると、次に示す影響度係数 r_{aV_m} を定義することができる。

$$r_{aV_m} = V_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) \cdot \partial U(\omega) / \partial V_m \cdot d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) d\omega \quad (18)$$

上式の r_{aV_m} は、 V_m の微小変化が地表地震動加速度のrms値 a_{rms} にどのような変化を与えるかを示す係数であり、それを定量的に表す尺度となる。たとえば、 $\varepsilon = 0.01$ の場合には、 V_m が1%だけ変化したときに、 a_{rms} が r_{aV_m} %変化することを示す。

式(18)を求めたと同様にする、 a_{rms} の H_m に対する影響度係数 r_{aH_m} 、速度 v_{rms} 、変位 d_{rms} の V_m 、 H_m に対する影響度係数 r_{vV_m} 、 r_{vH_m} 、 r_{dV_m} 、 r_{dH_m} を次のように定義できる。

$$r_{aH_m} = H_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) \cdot \partial U(\omega) / \partial H_m \cdot d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) d\omega \quad (19)$$

$$r_{vV_m} = V_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) / \omega^2 \cdot \partial U(\omega) / \partial V_m \cdot d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) / \omega^2 \cdot d\omega \quad (20)$$

$$r_{vH_m} = H_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) / \omega^2 \cdot \partial U(\omega) / \partial H_m \cdot d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) / \omega^2 \cdot d\omega \quad (21)$$

$$r_{dV_m} = V_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) / \omega^4 \cdot \partial U(\omega) / \partial V_m \cdot d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) / \omega^4 \cdot d\omega \quad (22)$$

$$r_{dH_m} = H_m \int_{\omega_1}^{\omega_u} U(\omega) / \omega^4 \cdot \partial U(\omega) / \partial H_m \cdot d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_u} U^2(\omega) / \omega^4 \cdot d\omega \quad (23)$$

式(18)～(23)の積分に含まれる $U(\omega)$ と $\partial U(\omega) / \partial V_m$ または $\partial U(\omega) / \partial H_m$ は式(7)および(8)より得られるから、数値積分を行うことによっておのおのの影響度係数を求めることができる。積分の下限および上限としては、前述のように $f_l = 0.1 \text{ Hz}$ 、 $f_u = 25 \text{ Hz}$ に対応する角振動数を用い、数値積分は台形公式によった。

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、地盤のS波速度の構造(V_m および H_m)が地表地震動強度の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構造をTable 1に、S波速度の構造をFig.2に示す。Fig.2において、横軸はS波速度(m/sec)であり、縦軸は深度(m)である。これらのモデルのうち、Model AおよびBは、文献(2)で用いられた地盤であり、各層の層厚はすべて等しく、Model Aで10 m、Model Bで100 mである。また、Model HA、KU、AO、HO、MI、およびSHは文献(6)で用いられた実地盤(八戸、釧路、青森、細島、宮古、および塩釜の地盤)である。ただし、八戸の地盤については、層の数が多すぎるので原地盤の特性を損なわない程度にモデル化した。具体的には、原地盤の第4～7

層を Table 1 の第 4 層目のようにしている。これら各地盤モデルの S 波速度の構造についてその特徴を述べると次のようになる。Model A と B は、層厚は異なるものの S 波速度の深さ方向の変化はゆるやかである。これに対し、Model HA~ SH では、S 波速度が深さ方向でかなり複雑に変化しているものもある。Model HA および A0 では基盤がかなり深い位置にあり、基盤上に厚い中間層が存在する。Model KU では、第 3 層目に比較的インピーダンスの大きな層があり、その下に軟弱層が存在する。Model HO は Model KU と同様に中間層として軟弱層を有するが、S 波速度の深さ方向の変化がとくに顕著である。Model MI および SH では、地表から浅いところにインピーダンスの大きな中間層が存在するが、その厚さは Model MI では大きく、Model SH では小さい。Fig.3 は、上述の各地盤モデルの地盤伝達関数を図示したものであり、横軸は振動数(Hz)、縦

Table 1 Soil Layer Profiles of Model Ground
(After Inoue,Hakuno(2) and Kamiyama(6))

No.	Model A				Model B				Model HA				Model KU			
	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q
1	10	100	1.8	10	100	100	1.8	10	2	100	1.8	14	2	50	1.6	19
2	10	100	1.8	10	100	200	1.8	20	2	160	1.8	13	5	70	1.7	17
3	10	300	1.8	10	100	300	1.8	20	6	195	1.9	12	13	400	2.0	5
4	10	400	1.8	10	100	400	1.8	20	8	380	2.0	7	22	150	1.8	11
5	10	500	1.8	10	100	500	1.8	20	10	430	1.6	100	10	250	2.0	8
6	—	600	2.0	100	—	600	2.0	100	8	270	1.7	7	33	500	2.0	100
7	—	—	—	—	—	—	—	—	144	370	1.9	9	—	1400	2.3	100
8	—	—	—	—	—	—	—	—	180	650	2.0	100	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1500	2.1	100	—	—	—	—

No.	Model A0				Model HO				Model MI				Model SH			
	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q
1	8	144	1.8	11	12	175	1.7	15	2.2	164	1.7	10	3.5	95	1.6	20
2	6	173	1.7	10	7.5	127	1.6	20	7.5	300	1.9	7	7.2	89	1.4	20
3	7	152	1.6	11	3.1	230	1.8	10	1.9	164	1.7	10	3.1	145	1.7	20
4	6	205	1.6	9	5.4	164	1.6	20	200	800	2.0	100	16	850	2.0	100
5	7	260	1.7	7	10	260	1.8	10	—	1500	2.2	100	—	1500	2.2	100
6	6	320	1.9	6	8	164	1.7	20	—	—	—	—	—	—	—	—
7	60	500	2.0	100	10	850	2.0	100	—	—	—	—	—	—	—	—
8	550	900	2.2	100	—	1100	2.2	100	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	1500	2.2	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

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

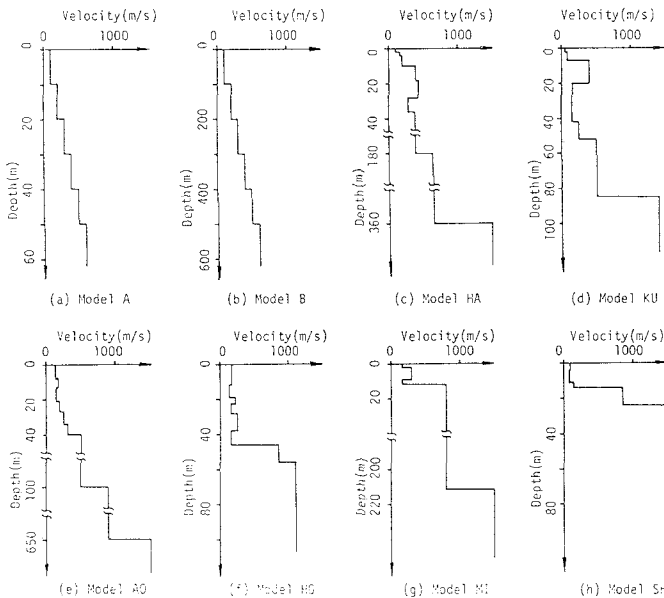


Fig.2 Structure of S-Wave Velocity of Model Ground

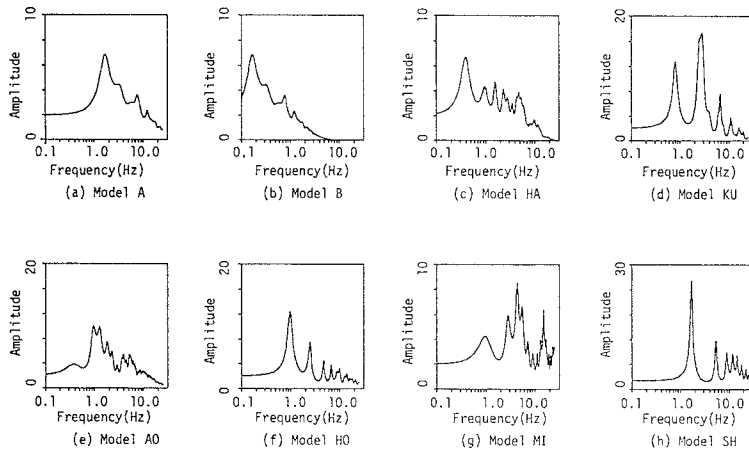


Fig.3 Transfer Function of Model Ground

軸は振幅である。図より、Model B および HA では低振動数成分が、Model MIでは、比較的高振動数成分が卓越することがわかる。また、Model A、KU、および SH の卓越振動数は 2Hz 前後であり、Model A0 および H0 では 1Hz 程度である。以上のような地盤モデルについて、前節で定義した地表加速度、速度、変位の rms 値の影響度係数を、式(18)～(23)を用いて計算した。

Figs.4～11の (a)～(c) は、地表加速度、速度、変位の S波速度に対する影響度係数 r_{aV_m} 、 r_{vV_m} 、 r_{dV_m} を実線で、また層厚に対する影響度係数 r_{aH_m} 、 r_{vH_m} 、 r_{dH_m} を点線で示したものである。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、Figs.4～11の (d)には、右側に S波速度の構造を、左側に各層の卓越周期 T_m (sec) を、それぞれ層厚を無視して示した。卓越周期 T_m は次式から求めた。

$$T_m = 4H_m / V_m \quad (24)$$

以下では、Figs.4～11に基づいて順次考察を加える。

Model A と B は層厚は異なるものの、影響度係数は同様な傾向を示している。Model A (Fig.4) を例にとると、加速度の影響度係数 r_{aV} および r_{aH} の絶対値は最上層と基盤で大きく、中間層で小さい。そして、最

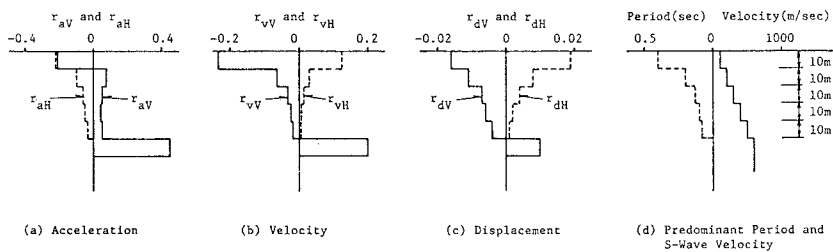


Fig.4 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model A)

上層で $r_{av1} = -0.21$ 、基盤で $r_{av6} = 0.45$ であることは、最上層のS波速度が小さくなるほど、また、基盤のそれが大きくなるほど地表加速度が大きくなることを示している。このことは、地表加速度が最上層と基盤のインピーダンス比に大きく影響されることを示しており、従来の研究結果を裏付けている。層厚に対する影響度係数 r_{ah} は最上層で大きく、下層にいくにしたがって小さくなる。 $r_{ah1} = -0.21$ であることは、最上層の層厚が小さくなるほど地表加速度が大きくなることを示すが、これは、 H_1 が大きくなると卓越周期 T_1 が長くなり、短周期成分が減少するためと考えられる。速度および変位の影響度係数では、第1層～第5層において、 r_{dv} および r_{dv} は負、 r_{vh} および r_{dh} は正の値をとる。このことは、基盤上のすべての層においてS波速度が減少するほど、かつ層厚が増加するほど地表速度および変位が増大することを示す。速度の影響度係数の絶対値は最上層と基盤で大きく中間層で小さい。同様なことは変位についてもいえるが、 r_{dv} 、 r_{dh} と r_{vv} 、 r_{vh} を比べると、変位の影響度係数は深部に位置する中間層において速度のそれより大きいことがわかる。このように、変位は深部の地盤条件の影響を受けやすい。

Model HA (Fig.6)の加速度、速度、変位の影響度係数は地盤構造の複雑さを反映して、層ごとにかなり大きく変化している。 r_{av} の絶対値は最上層と基盤で大きい、中間層においても大きく、とくに第7層目においては大きくなっている。この中間層はS波速度が $V_7 = 370\text{m/sec}$ であるが、層厚も $H_7 = 144\text{m}$ と大きい、卓越周期は $T_7 = 1.57\text{sec}$ と大きい層になっている。また、7層目とその上の6層目は、上下をS波速度が比較的大きい層に挟まれた低速度層とみなすこともできる。この低速度層の r_{av} が正であることは、S波速度が大きくなるほど加速度が大きくなることを示している。これは、低速度層のS波速度が増大

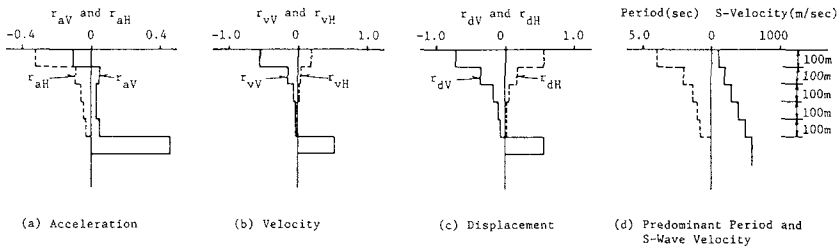


Fig.5 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model B)

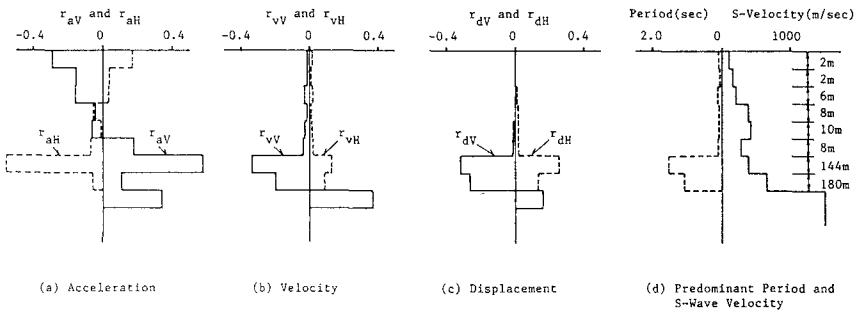


Fig.6 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model HA)

すると、短周期成分が上方へ伝達されやすくなるためと考えられる。この意味では、低速度層は一種のローパスフィルターの役目をしているといえる。つぎに、速度と変位の影響度係数について考える。図(b) および(c) に示すように、 r_{vV} および r_{dV} の絶対値は第7層目、第8層目、および基盤で大きく、それより上層では小さい。図(d) の卓越周期と対比すると、速度および変位の影響度係数が大きい層では卓越周期も長い。このように、卓越周期が長い層は速度および変位に大きな影響を及ぼす。また、加速度、速度、変位を比べると、変位、速度、加速度の順に、より下層に位置する中間層の影響が大きくなっている。

Model KU (Fig. 7) も Model HA と同様に、影響度係数は層ごとに複雑に変化している。 r_{aV} と r_{aH} は最上層と基盤で大きい、第4層目においてもかなり大きい。この層は卓越周期が長く、また第5層とともに上下を比較的硬い層で挟まれた低速度層である。このように中間層として低速度層が存在する場合には、その層は加速度に大きな影響を与える。また、低速度層の r_{aV} が正であることは、この層がローパスフィルターになっていることを示している。速度と変位の影響度係数は卓越周期と対比しており、卓越周期が長い層では r_{vV} 、 r_{dV} が大きい。また、変位は速度に比べて相対的に深い層の影響を受けている。

Model AO (Fig. 8) は Model HA や KU と比べて S 波速度の深さ方向の変化が小さく、Model A や B と同様な地盤構造をしている。このことを反映して、 r_{aV} および r_{aH} の絶対値は最上層と基盤で大きく、中間層では小さい。しかしながら、基盤のすぐ上に層厚が大きく卓越周期の長い層があるため、速度および変位の影響度係数はその層で大きく、とくに、変位に対してはこの層の影響が支配的である。

Model H0 (Fig. 9) では、低速度層が第2、4、6層目にあり、この影響が顕著に現れている。 r_{aV} と r_{aH}

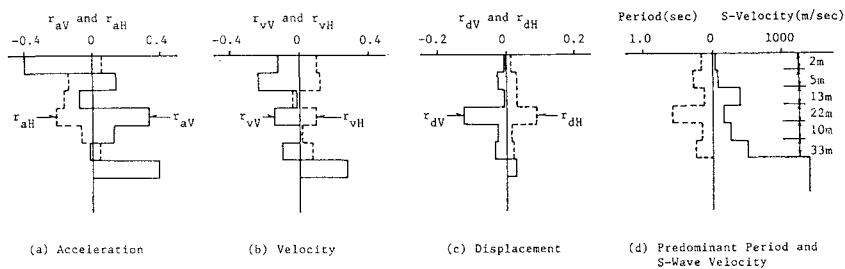


Fig.7 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model KU)

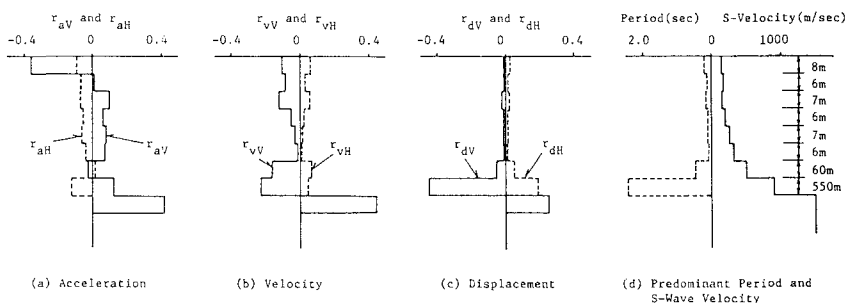


Fig.8 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model AO)

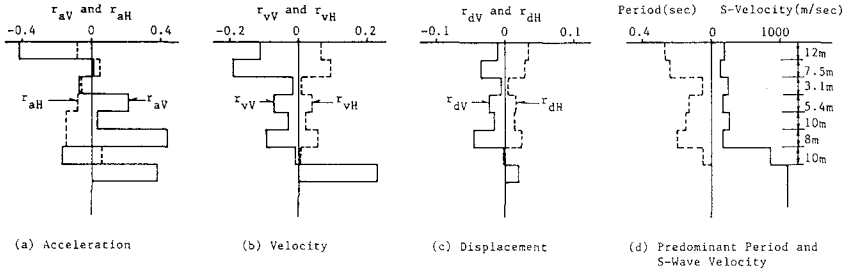


Fig.9 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model H0)

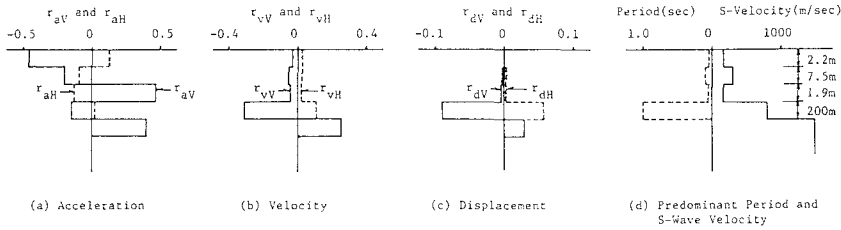


Fig.10 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model MI)

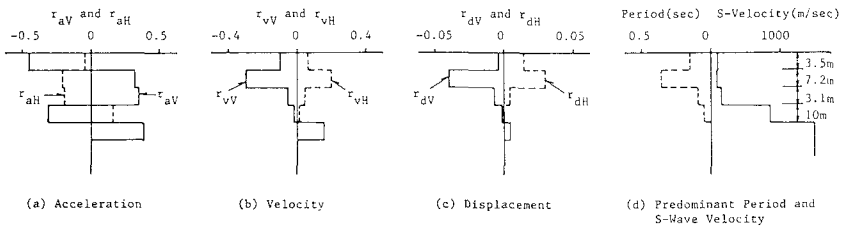


Fig.11 Effective Coefficients for rms Intensities of Ground Motion, and Predominant Period and S-Wave Velocity of Each Layer (Model SH)

の絶対値は、最上層、第4、6層目、および基盤で大きい。速度、変位については、卓越周期の大きい第1、2、4、6層目の影響が大きい。変位は速度に比べてより深い層の影響が相対的に大きくなっている。

Model MI (Fig.10)では、 r_{av} 、 r_{ah} の絶対値は、第1、3層目、および基盤で大きい。第3層目は低速度層であり、加速度に大きく影響している。他方、速度および変位については、卓越周期の大きい第4層目の影響が大きい。

Model SH(Fig.11)では、 r_{av} 、 r_{ah} の絶対値はすべての層で同程度であり、その値は第1、4層で負、第2、3層、および基盤で正である。とくに、第2層、および第3層は低速度層であり、これらの層の r_{av} は正になっている。速度、変位については、卓越周期の大きい層の影響が大きいことは他のモデルと同様である。

以上の解析より得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) すべてのモデルにおいて、 r_{av} は最上層で負、基盤で正であり、その値は大きい。とくに、S波速度の深さ方向の変化がゆるやかな場合 (Model A, B, およびA0)には、中間層に比べて最上層および基盤の影響が大きい。このことは、加速度が最上層と基盤のインピーダンス比に支配されることを裏付けている。
- 2) 中間層のうち、上下を比較的硬い層で挟まれた低速度層では、 r_{av} は正で大きな値になる。このように、低速度層ではS波速度が増大すると短周期成分が上方へ伝達されやすくなり地表加速度が大きくなる。このことは、低速度層が一種のローパスフィルターになっていることを示している。
- 3) 卓越周期が大きい層においては、速度および変位の影響度係数の絶対値は大きい。このことより、卓越周期が大きい層は地表速度および変位に大きな影響を与えることがわかる。とくに、卓越周期の大きい層が深部にある場合には、その層は速度および変位に大きな影響を与える。

4. 結 言

本研究では、S波速度の構造が地表地震動の加速度、速度、変位のrms値に及ぼす影響を検討するため、基盤入力波を有帯域ホワイトノイズと仮定し、地盤伝達関数の偏導関数を用いて加速度、速度、変位の影響度係数を定義した。そして、2つのモデル地盤と6つの実地盤を対象にしてそれらの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S波速度が深さ方向にゆるやかに変化する場合には、最上層と基盤のS波速度は地表加速度に大きな影響を与えるが、中間層の影響は相対的に小さい。
- (2) 中間層のうちS波速度の小さい低速度層は地表加速度に大きな影響を及ぼす。このような低速度層では、S波速度が増大すると地表加速度振幅が増大する。これは、低速度層のS波速度が増大すると短周期波が上方へ伝達されやすくなるためと考えられる。このことより、低速度層は一種のローパスフィルターの役目をしているといえる。
- (3) 卓越周期の長い層は速度および変位に大きな影響を及ぼしている。とくに、深部に位置する卓越周期の長い層は地表地震動の速度および変位に大きな影響を与える。

以上のことより、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、基盤入力波として0.1~25 Hzの有帯域ホワイトノイズを用いたことや、地盤の非線形性を考慮しなかったことなどの問題点も残った。これらについては今後検討したい。

参 考 文 献

- 1) 島 : 東京の地盤、予防時報、第99巻、pp.62-68,1974年。
- 2) 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。
- 3) 後藤・亀田・杉戸 : 地震動の最大地動の予測におけるN値を用いた地盤条件の評価法について、土木学会論文報告集、第317号、pp.69-78,1982年。
- 4) 山田・野田・上松 : 地盤構成が表面波の分散特性に及ぼす影響、土木学会論文報告集、第335号、

pp.31-40,1983年.

- 5) 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
- 6) 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.271-280,1984年.
- 7) 土岐 : 新体系土工学11・構造物の耐震解析, pp.80-90, 技報堂, 1981年.
- 8) 椎野・沢田 : 強震記録による深層地盤構造の概略推定について, 第6回日本地震工学シンポジウム, pp.185-192,1982年.
- 9) 大崎 : 地震動のスペクトル解析入門, pp.115-117, 鹿島出版会, 1974年.
- 10) 星谷 : 確率論手法による振動解析, pp.156-162, 鹿島出版会, 1974年.
- 11) Aki,K. and Richard,P.G. : Quantitative Seismology Theory and Method, Vol.2, pp.819-825, W.H. Freeman and Company,1980.

(1985年10月18日受付)