

## せん断波速度の構造が地盤伝達関数に与える影響

THE INFLUENCE OF S-WAVE VELOCITY OF SUBSURFACE LAYER ON  
TRANSFER FUNCTION OF MODEL GROUND

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 the shape of transfer function of subsurface layer. The effective coefficients for transfer function and its maximum peak value are defined on the basis of partial derivatives of transfer function regarding to shear wave velocity and thickness of a layer. The effective coefficients are calculated to several subsurface layer models in Japan. It is concluded that the effective coefficients of the shear wave velocity of upper layer and base rock are generally larger than those of the medium layers. However, in the subsurface layer model which has relatively large shear wave velocity and large thickness in medium layers, it is found that the effective coefficients in the medium layers are considerably large.

## 1. 緒 言

本研究は、地盤のせん断波速度の構造が地盤伝達関数の形状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最も基本的かつ重要な問題として、対象地震動としてどのような特性をもつものを考慮すべきかという点が挙げられる。地震動特性は強度特性、周波数特性、および非正常特性に大別され、それらは地震の震源特性、伝播経路、地盤条件等の影響を受けて複雑に変化する。特にわが国のように地表付近に比較的軟弱な地層をもつ地盤では、地震動の周波数特性は地盤条件の影響を大きく受けると考えられる。したがって、ある地点の地震動の周波数特性の概略を知るためには、その地点の地盤条件を用いて地盤の周波数伝達関数（以下では伝達関数と略す）を求めればよいと考えられる<sup>1),2)</sup>。このように、地盤条件さえわかれば伝達関数から個々の地盤における地震動の周波数特性を知ることができるが、地盤条件と周波数特性の一般的関係を求

めることはそれほど簡単ではない。たとえば、地盤を構成する地層のうちどの層が地震動の卓越周期付近のスペクトル振幅に寄与するかは比較的容易に知ることができるが、ある特定の層が周波数領域全体のスペクトル形状にどのような影響を与えるかを把握することは難しい。

地盤構造と地表地震動特性の一般的関係を記述した研究として、嶋<sup>3)</sup>、井上・伯野<sup>4)</sup>、および土岐・戸早<sup>5)</sup>の研究がある。嶋<sup>3)</sup>は、東京の地盤データについて重複反射法により多くの数値計算を行った結果、地盤の伝達関数の最大ピーク値が最上層地盤と基盤のS波速度の比にほぼ比例することを見出した。この結果は、ある地点で卓越する揺れの大きさ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。また、井上・伯野<sup>4)</sup>、水平な多層地盤の波動インピーダンスの鉛直分布と地表地震動の最大加速度の関係を、数値実験と数量化理論を組み合わせることで調べた。その結果、地表最大加速度の基盤入力に対する応答倍率が、基盤と最上層地盤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、嶋が指摘したことを裏づけるものであり、実用的な見地から有用である。土岐・戸早<sup>5)</sup>、大阪の多数の実地盤を対象にして、地盤の非線形性を考慮した震動解析を行い、

\* 正会員 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 2-1)

\*\* 正会員 工博 徳島大学教授 工業短期大学部土木工学科  
(同上)

これらの結果に対して数量化理論を適用して、地表面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ーが影響を及ぼすかを調べた。そして、最小のせん断波速度をもつ層の出現深度が地表面の速度および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。

しかしながら、上述の研究においては、対象とした地盤が一部を除き比較的浅い地盤に限られたこと、また基盤のせん断波速度を数 100 m/s 程度としたこと等の制約もある。もちろん、この制約が上述の結果の一般性を損なうものではないが、地盤構造と地表地震動の特性についてのさらに一般的な関係を求めるためには、基盤せん断波速度の異なる種々の地盤に対する検討が必要である。また、地盤構造と地震動の周波数特性の関係を見出すためには、周波数の全領域において両者の関係を検討することも必要である。

このような観点より、本研究では、地盤のせん断波速度の構造が地表地震動の周波数特性（具体的には伝達関数）の形状にどのような影響を及ぼすかを、いくつかの異なる地盤モデルについて検討した。手法的には、嶋らと同様に重複反射法による伝達関数を用いたが、特に地盤パラメーター（各層の層厚とせん断波速度）に関する伝達関数の偏導関数を用いて影響度係数を定義し、地盤のせん断波速度の構造が伝達関数の形状にどのような影響を与えるかを調べた。また、嶋<sup>3)</sup>と同様に、地盤の卓越周期における伝達関数の振幅がどの地盤パラメーターに影響されるかについても検討した。本研究より得られた結果は、従来の研究結果を裏づけるものであるが、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。

なお、伝達関数の計算に際しては、鉛直下方から基盤に入射する SH 波を考え、重複反射法が適用できるものと仮定した。

2. 伝達関数と影響度係数

本節では、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ー（厚層およびせん断波速度）が伝達関数に及ぼす影響の程度を表わす係数すなわち影響度係数を定義する。

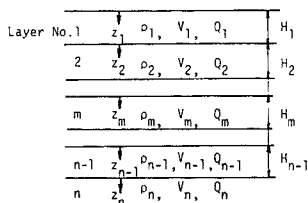


Fig. 1 Structure of S-Wave Velocity.

(1) 地盤伝達関数とその偏導関数<sup>6),7)</sup>

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、せん断波速度、密度、および  $Q$  値をそれぞれ  $H_m, V_m, \rho_m, Q_m$  とし、各層の上面に座標原点をとる。このとき、第  $m$  層の上面における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  $u_m(H_m), \tau_m(H_m)$  の間には次の関係が成立する<sup>6)</sup>。

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

ここで、 $[S_m]$  は  $2 \times 2$  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わすことができる。

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

ただし、 $a_m, b_m$  は次式で与えられる。

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

行列  $[S_m]$  を各層について求め、次の行列の積を計算する。

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

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  $\omega$  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<sup>6)</sup>。

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

以下では、計算の都合上次の記号を用いる。

$$\begin{cases} \phi = R_e(R_{11} - iR_{21}/\omega\rho_n V_n\sqrt{1+i/Q_n}) \\ \psi = I_m(R_{11} - iR_{21}/\omega\rho_n V_n\sqrt{1+i/Q_n}) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $R_e(\cdot)$ 、および  $I_m(\cdot)$  はそれぞれ、実数部、および虚数部を表わす。この  $\phi$  と  $\psi$  を用いると、式(5)は次のようになる。

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

式(2)~(5)よりわかるように、 $U(\omega)$  は  $\rho_m, V_m, H_m$  および  $Q_m$  の関数であるが、本研究では地盤のせん断波速度の構造が  $U(\omega)$  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ーとして用いる。

次に、地盤パラメーター  $V_m$  または  $H_m$  に関する  $U(\omega)$  の偏導関数を導く。ただし、 $H_m$  に関する偏導関数は  $V_m$  に関する偏導関数と同様にして得られるため、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<sup>7)</sup>.

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

ここで,

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial V_m} = R_e \left( \frac{\partial R_{11}}{\partial V_m} - \frac{i}{\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n}} \frac{\partial R_{21}}{\partial V_m} \right) \\ \frac{\partial \psi}{\partial V_m} = I_m \left( \frac{\partial R_{11}}{\partial V_m} - \frac{i}{\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n}} \frac{\partial R_{21}}{\partial V_m} \right) \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

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.

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

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  $V_m$  について微分することによって容易に得られる. 以上のことにより,  $V_m(m=1, \dots, n-1)$  に関する  $U(\omega)$  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.

基盤せん断波速度  $V_n$  に関する  $U(\omega)$  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り得られる.

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial V_n} = R_e \left( \frac{i}{\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n}} R_{21} \right) \\ \frac{\partial \psi}{\partial V_n} = I_m \left( \frac{i}{\omega \rho_n V_n \sqrt{1+i/Q_n}} R_{21} \right) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

(2) 地盤伝達関数の影響度係数

上述の  $U(\omega)$  の偏導関数  $\partial U(\omega)/\partial V_m$  は, 第  $m$  層のせん断波速度  $V_m$  が  $U(\omega)$  にどのような変化を与えるかを表わすが,  $V_m$  の値は層ごとにかなり異なるので, このままでは  $V_m$  が  $U(\omega)$  に与える影響を公平に評価できないと考えられる. そこで, 各地盤パラメーターがもとの値に対して同一の割合で変化したときに,  $U(\omega)$  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,  $V_m$  が

$$\Delta V_m = \varepsilon V_m \dots\dots\dots (12)$$

だけ変化したときの  $U(\omega)$  の変化量  $\Delta U(\omega)$  を考えると, 次のようになる.

$$\begin{aligned} \Delta U(\omega) &\approx \partial U(\omega)/\partial V_m \cdot \Delta V_m \\ &= \varepsilon V_m \partial U(\omega)/\partial V_m \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

式(12)または(13)において,  $\varepsilon$  は微小な正値 (たとえば  $\varepsilon=0.01$ ) であり, すべての地盤パラメーターについて共通とする. 式(13)より,  $V_m$  が  $U(\omega)$  に与える影響の

程度を表わす指標として次式の  $R_{V_m}(\omega)$  を定義する.

$$R_{V_m}(\omega) = V_m \partial U(\omega)/\partial V_m \dots\dots\dots (14)$$

本研究では, この  $R_{V_m}(\omega)$  を  $V_m$  に対する  $U(\omega)$  の影響度係数とよぶことにする.  $R_{V_m}(\omega)$  は,  $V_m$  が  $\varepsilon V_m$  だけ変化したときに,  $U(\omega)$  が  $\varepsilon R_{V_m}(\omega)$  だけ変化することを示す係数である.

$H_m$  に対する  $U(\omega)$  の影響度係数  $R_{H_m}(\omega)$  も同様にして定義され, 次式となる.

$$R_{H_m}(\omega) = H_m \partial U(\omega)/\partial H_m \dots\dots\dots (15)$$

(3) 地盤伝達関数の最大ピーク値に対する増幅度係数

嶋<sup>3)</sup>と同様に, 地盤伝達関数の卓越周期における振幅値に地盤パラメーターがどのように影響するかを調べるために, 次のような増幅度係数を用いる. いま, 任意の地盤パラメーターが与えられたときの伝達関数の最大ピーク値を  $U_{\max}$  とする. すなわち,

$$U_{\max} = \max_{\omega} U(\omega) \dots\dots\dots (16)$$

とする. 次に, 特定の地盤パラメーター  $V_m$  が  $\Delta V_m = \varepsilon V_m$  だけ変化したときの伝達関数の最大ピーク値  $U'_{\max}$  を次式より計算する.

$$U'_{\max} = \max_{\omega} \{U(\omega) + \varepsilon V_m \partial U(\omega)/\partial V_m\} \dots\dots\dots (17)$$

$V_m$  に対する最大ピーク値の増幅度係数  $A_{V_m}$  は次式で定義される.

$$A_{V_m} = (U'_{\max} - U_{\max})/\varepsilon U_{\max} \dots\dots\dots (18)$$

上式は,  $V_m$  の微小変化による伝達関数の最大ピーク値の変化量を  $\varepsilon U_{\max}$  によって基準化したものである. 層厚  $H_m$  に対する増幅度係数  $A_{H_m}$  も同様に定義される.

3. 数値計算例および考察

前節で定義した地盤伝達関数の影響度係数, およびその最大ピーク値に対する増幅度係数を用いて, 地盤のせん断波速度の構造 ( $V_m$  および  $H_m$ ) が伝達関数にどのような影響を与えるかを検討する. 解析に用いた地盤モデルの構造を Table 1 および Fig. 2 に示す. Fig. 2 において, 横軸はせん断波速度 (m/s) 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4) で用いられた地盤であり, 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, YA, MU, MI, および SH は, 文献8) の実地盤 (八戸, 釧路, 青森, 細島, 山下変, 室蘭, 宮占, および塩釜の地盤) の表層付近の地盤を1層または2層で簡略化したものであり, 第1層の層厚は 10~20 m 程度にしている. 日本の沖積地盤では普通浅い層は構造が急激に変化している例が多いが, 原地盤のままでは層の数が多くモデル地盤が複雑になりすぎることで, また, 第1層および第2層をモデル化しても原地盤の伝達関数の傾向が反映されること<sup>7)</sup>などを考えて第1

層の層厚を Model A と同程度  
の 10~20 m とした。

これらの各地盤モデルの特徴を述べると以下ようになる。Model A, および B では、層厚は異なるもののせん断波速度の深さ方向の変化は緩やかである。これに対し、実地盤をモデル化した地盤では、せん断波速度が深さ方向でかなり複雑に変化しているものがある。Model HA, AO, および YA は基盤がかなり深い位置にあり、Model HA では第 4 層, 第 5 層の層厚, およびせん断波速度が  $H_4 = 144$  m,  $V_4 = 370$  m/s,  $H_5 = 180$  m,  $V_5 = 650$  m/s, Model AO では第 4 層で  $H_4 = 550$  m,  $V_4 = 900$  m/s, Model YA では第 4 層で  $H_4 = 200$  m,  $V_4 = 600$  m/s 程度の層厚の大きい中間層が基盤上に存在する。Model KU では第 2 層目に比較的インピーダンスの大きい層があり、その下に軟弱層が続き、せん断波速度の変化が特に顕著である。Model MU, および MI の地盤構造は類似しており第 1 層の下にインピーダンスが大きく層厚の大きい中間層が存在する。Model SH も Model MU, および MI と同様に第 1 層の下にインピーダンスの大きい中間層をもつが、その層厚は小さく、基盤も浅い。

Fig. 3 は、Fig. 2 の各地盤モデルの伝達関数を図示したものであり、横軸は振動数 (Hz)、縦軸は伝達関数の振幅値である。また、Table 2

には、Fig. 3 の伝達関数の最大ピークに対する周期 (以下卓越周期とよぶ) を示した。これらの図表より、Model B, および HA では低振動数成分が、Model MU, および 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 の卓越周期は

Table 1 Soil Layer Profiles of Model Ground<sup>(4),8)</sup>.

No.	Model A				Model B				Model HA				Model KU				Model AO				
	H	Vs	p	Q	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	10	170	1.8	10	7	65	1.7	20	21	155	1.7	10	
2	10	200	1.8	10	100	200	1.8	20	18	410	1.8	60	13	400	2.0	5	19	260	1.7	8	
3	10	300	1.8	10	100	300	1.8	20	8	270	1.8	10	22	150	1.8	11	60	500	2.0	100	
4	10	400	1.8	10	100	400	1.8	20	144	370	1.9	10	10	250	2.0	8	550	900	2.2	100	
5	10	500	1.8	10	100	500	1.8	20	180	650	2.0	100	33	500	2.0	100	-	1500	2.2	100	
6	-	600	2.0	100	-	600	2.0	100	-	1500	2.1	100	-	1400	2.3	100	-	-	-	-	-

No.	Model HO				Model YA				Model MU				Model MI				Model SH			
	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q	H	Vs	p	Q
1	19.5	155	1.7	20	15	185	1.8	10	14.5	280	1.8	6	11.6	250	1.8	10	13.8	100	1.5	20
2	18.5	230	1.8	10	20	280	1.9	7	300	700	2.0	100	200	800	2.0	100	10	850	2.0	100
3	8	165	1.7	20	20	300	2.0	7	-	1100	2.2	100	-	1500	2.2	100	-	1500	2.2	100
4	10	850	2.0	100	200	600	2.0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	1100	2.2	100	-	1000	2.2	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

H=thickness(m) Vs=S-wave velocity(m/sec) p=density(kg/m<sup>3</sup>) Q=Q value

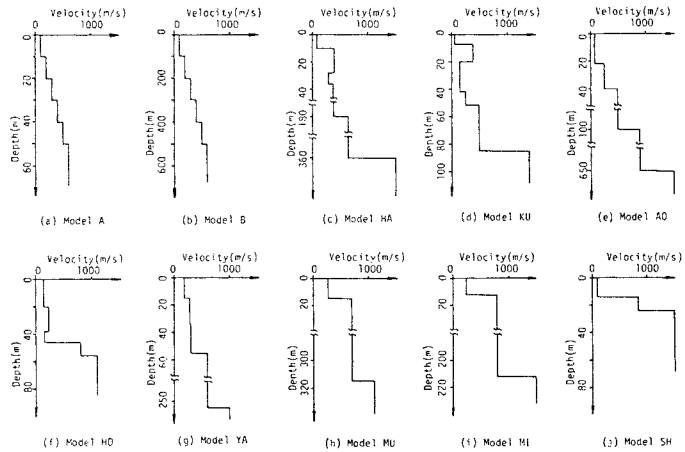


Fig. 2 Structure of S-Wave Velocity of Model Ground.

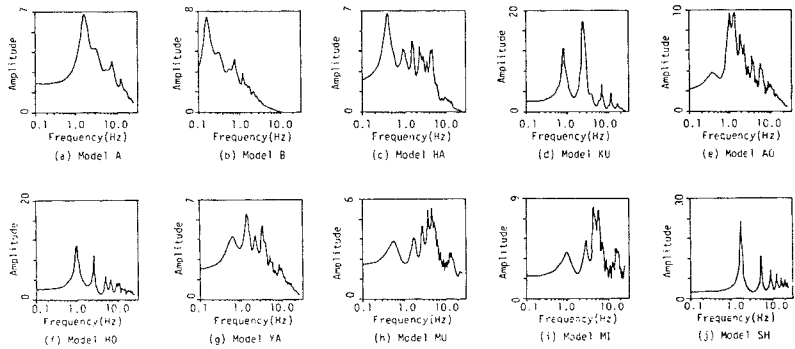


Fig. 3 Transfer Function of Model Ground.

Table 2 Predominant Period of Subsurface Layer Model (sec).

A	B	HA	KU	AO	HO	YA	MU	MI	SH
0.59	5.92	2.57	0.42	1.01	1.00	0.71	0.21	0.22	0.52

0.5 秒程度, Model AO, および HO では 1 秒程度である。

このような地盤モデルの特徴を踏まえて、以下解析結果について述べる。まず前節の式(14), および(15)で定義した  $V_m$ , および  $H_m$  の影響度係数  $R_{V_m}(\omega)$ ,  $R_{H_m}(\omega)$  を

Fig. 2の各地盤モデルについて計算した。以下では、これらの結果のうち、Model A, HA, KU, AO, HO, MI, およびSHについて述べる。Model B, YA, およびMUについては紙面の都合で割愛したが、前述の地盤モデルの特徴から類推できるように、それらの結果はそれぞれModel A, HA, およびMIと同様な傾向を示した。Fig. 4~10には、各地盤モデルに対する影響度係数を、横軸に振動数 (Hz), 縦軸に影響度係数の値をとって示した。これらの図において、左側はせん断波速度の影響度係数, 右側は層厚の影響度係数を示す。これらの図より、各地盤モデルの影響度係数について次のようなことが指摘できる。

Model A (Fig. 4) では、影響度係数は第1層目で  $R_{v1}$ ,  $R_m$ とも大きく、下層になるにつれて小さくなる。また、せん断波速度と層厚の影響度係数は第1層目では同程度の大きさであるが、下層になるほど層厚の影響が小さくなる。さらに、影響度係数は Fig. 2の伝達関数の卓越振動数より高振動数領域で大きい値をとっている。

Model HA (Fig. 5) では、第1層、第4層、および第5層で影響度係数が大きい。それらが現われる振動数域は異なっている。すなわち、 $R_{v1}$ , および  $R_m$ は数

Hz程度の比較的高振動数で大きな値をとるが、 $R_{v4}$ ,  $R_m$ ,  $R_{v5}$ ,  $R_{m5}$ は比較的低振動数領域においてもかなりの振幅をもっている。この第4層、第5層は、前述のように、せん断波速度はかなり大きい層厚も大きい中間層である。このように、せん断波速度が数100 m/s程度であっても層厚が大きい場合には、その層は地盤伝達関数に大きな影響を与える。

Model KU (Fig. 6) では、第1層で影響度係数が大きい。第3層のそれと比較的大きい。そして、第1層の影響度が2 Hz以上で現われるのに対し、第3層のそれは0.6~1.0 Hzの振動数領域で大きな値をとる。この第3層目は、 $V_3=150$  m/sの軟弱層であり、層厚も  $H_3=22$  mと比較的大きい層である。

Model AO (Fig. 7) では、第1層および第4層で影響度が大きい。それ以外の中間層もかなりの影響度をもっている。特に、第4層目はせん断波速度が  $V_4=900$  m/sと大きい層厚も大きいため、Model HAと同様に、影響度の大きい層になっている。

Model HO (Fig. 8) では、第1層で影響度が大きく下層ほど小さくなるという特徴をもち、Model Aと類似の傾向を示している。しかし、第2層および、第3層

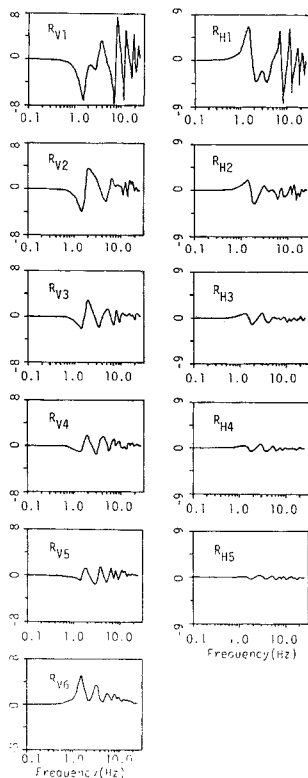


Fig. 4 Effective Coefficient (Model A).

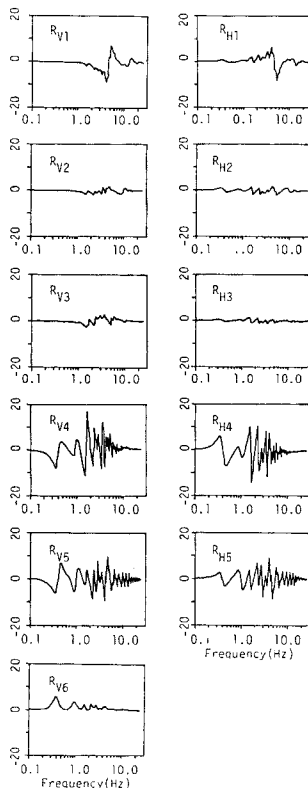


Fig. 5 Effective Coefficient (Model HA).

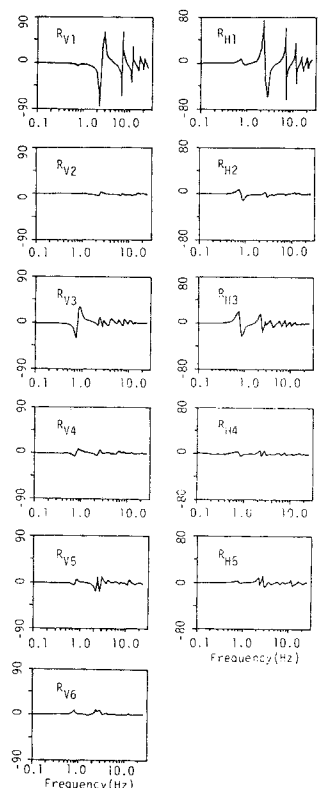


Fig. 6 Effective Coefficient (Model KU).

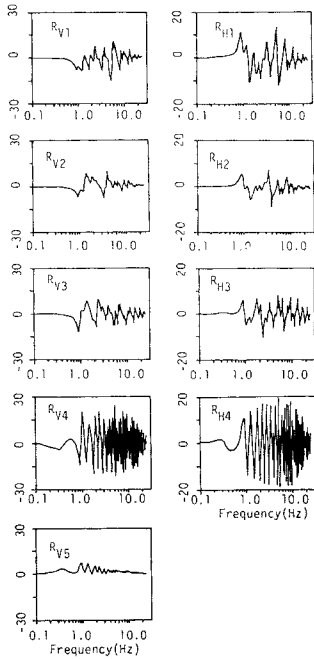


Fig. 7 Effective Coefficient (Model AO).

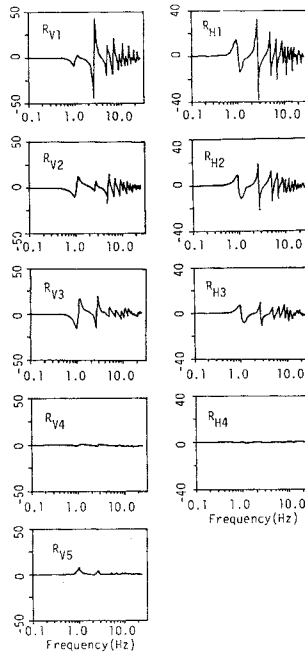


Fig. 8 Effective Coefficient (Model HO).

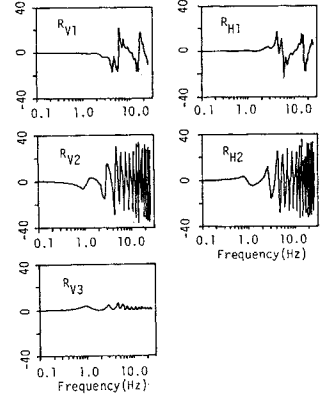


Fig. 9 Effective Coefficient (Model MI).

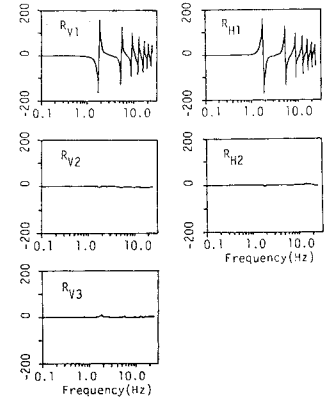


Fig. 10 Effective Coefficient (Model SH).

Table 3 Predominant Period of Each Layer of Model (sec).

Layer No.	A	B	HA	KU	AO	HO	YA	MU	MI	SH
1	0.40	4.00	0.24	0.43	0.54	0.50	0.32	0.21	0.19	0.50
2	0.20	2.00	0.18	0.13	0.29	0.32	0.29	1.71	1.00	0.05
3	0.13	1.33	0.12	0.59	0.48	0.19	0.27	—	—	—
4	0.10	1.00	1.56	0.16	2.44	0.05	1.33	—	—	—
5	0.08	0.80	1.11	0.26	—	—	—	—	—	—

の影響度も比較的大きい。

Model MI (Fig. 9) では、第1層、第2層とも大きな影響度をもっている。特に、第2層目は  $V_2=800$  m/s とせん断波速度は大きい、層厚も  $H_2=200$  m と大きい、ため、Model HA、および AO と同様に、影響度係数が大きな層になっている。

Model SH (Fig. 10) では、第1層の影響度係数が極端に大きいことが特徴である。

以上、各地盤モデルについて影響度係数の特徴を述べたが、これらの結果より、一般的な傾向として次のようなことが指摘できる。

(i) 第1層の影響度係数はいずれの地盤についても大きい。これは地震動が地表付近の地盤条件の影響を大きく受けることを示しており、経験的に知られている事実と一致する。

(ii) 層厚、およびせん断波速度が深さ方向であり変わらない地盤 (Model A, HO, SH 等) では、中間層の影響度は下層ほど小さい。

(iii) 基盤と最上層の中間に軟弱層が存在する (Model KU の第3層目) か、またはせん断波速度が数 100 m/s 程度の厚い中間層が存在する場合には、その層の影響度係数は大きく、最上層のそれよりも大きくなることもある。また、これらの層の影響度係数は、最上層の影響度が現われる振動数域よりも低振動数の領域においても大きい値をとる。

(iv) 基盤のせん断波速度の影響度係数はすべての振動数領域において常に正である。これは、基盤のインピーダンスが増加すると伝達関数の振幅が常に増大することを示している。

以上の結果のうち、(i)、(ii)、および (iv) は、嶋<sup>3)</sup>、および井上・伯野<sup>4)</sup>が指摘したことを裏づけるものである。すなわち、最上層地盤の影響度が大きくかつ中間層の影響が比較的小さい Model A, B, KU、および SH のような地盤では、地表地震動の特性は最上層と基盤のせん断波速度の影響を大きく受け、中間層にはほとんど影



大きな値となる。特に、第1層のせん断波速度の影響度は一般に層厚のそれより大きく負の値をとる。これは、第1層のせん断波速度が小さいほど伝達関数の最大ピーク値が増大することを示している。

(3) 伝達関数に対する基盤せん断波速度の影響度係数はすべての振動数域において常に正である。また、最大ピーク値に対する増幅度係数も正で大きな値になる。これより、基盤せん断波速度が大きくなると地表地震動の振幅が増大することがわかる。

(4) 基盤と最上層の中間に、軟弱な層かまたはせん断波速度が数100 m/sで層厚の大きい中間層が存在する場合には、それらの層の影響度係数は大きな値をとる。この現象を説明するため、各層の卓越周期を導入して比較した結果、影響度係数の大きい層は卓越周期も大きい層であることがわかった。

以上のことより、本研究においても、中間層に卓越周期の大きい層をもたない地盤については、嶋<sup>3)</sup>、および井上・伯野<sup>4)</sup>の指摘を裏づける結果が得られた。しかしながら、中間層に卓越周期の大きい層が存在する場合には、地表地震動はその層の影響を大きく受けるため、基盤と最上層のインピーダンスのみで地表地震動の特性を評価することはできないものと考えられる。

以上本研究では、地盤パラメーターが伝達関数の形状に及ぼす影響について述べたが、これと並行して地表地震動の強度特性と地盤パラメーターの関係について検討中である。これについては別途報告する予定である。

補 遺

本研究では、各層の層厚  $H_m$  およびせん断波速度  $V_m$  を独立な地盤パラメーターとして用い、それらが伝達関数およびその最大ピークに対してどのような影響を及ぼすかを調べた。これは、各種地盤探査法によって  $H_m$  および  $V_m$  を推定した場合、その推定精度が  $H_m$  と  $V_m$  で異なると考えたためである。しかし、解析結果により、特に中間層においては各層の卓越周期が伝達関数やその最大ピークに大きな影響を及ぼすことが明らかになったので、ここでは各層の卓越周期の影響について述べておく。第  $m$  層の卓越周期  $T_m$  は式 (19) に与えられるように次式で定義される。

$$T_m = 4H_m / V_m \dots\dots\dots (A.1)$$

伝達関数  $U(\omega)$  の  $T_m$  に対する影響度係数  $R_{T_m}(\omega)$  は式 (14) と同様にして次式のようになる。

$$R_{T_m}(\omega) = T_m \partial U(\omega) / \partial T_m \dots\dots\dots (A.2)$$

ここで、 $\partial U(\omega) / \partial T_m$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(\omega)}{\partial T_m} &= \frac{\partial U(\omega)}{\partial H_m} / \frac{\partial T_m}{\partial H_m} + \frac{\partial U(\omega)}{\partial V_m} / \frac{\partial T_m}{\partial V_m} \\ &= \frac{1}{T_m} \left\{ H_m \frac{\partial U(\omega)}{\partial H_m} - V_m \frac{\partial U(\omega)}{\partial V_m} \right\} \\ &= \frac{1}{T_m} \left\{ R_{H_m}(\omega) - R_{V_m}(\omega) \right\} \dots\dots\dots (A.3) \end{aligned}$$

上式を式(A.2)に代入すると次式が得られる。

$$R_{T_m}(\omega) = R_{H_m}(\omega) - R_{V_m}(\omega) \dots\dots\dots (A.4)$$

上述のように、伝達関数  $U(\omega)$  の  $T_m$  に対する影響度係数は、 $H_m$  および  $V_m$  に対する影響度係数の差によって定義される。ところで、Fig. 4~10 よりわかるように、一般に、 $R_{H_m}(\omega)$  と  $R_{V_m}(\omega)$  は同一振動数において逆の符号をもつ値になる。このことより、 $R_{H_m}(\omega)$  および  $R_{V_m}(\omega)$  の絶対値が大きい場合には、 $R_{T_m}(\omega)$  の絶対値も大きくなることがわかる。最大ピークに対する増幅度係数については、二、三の例外 ( $A_{H_m}$  と  $A_{V_m}$  の符号が一致することもある) はあるが、伝達関数と同様なことがいえるので、ここでは省略する。

参 考 文 献

- 1) 田中・吉沢：強震地動に含まれる地盤特性，第4回日本地震工学シンポジウム，pp.161~167，1974年。
- 2) 翠川・小林：地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質，日本建築学会論文報告集，第273号，pp.43~53，1978年。
- 3) 嶋：東京の地盤，予防時報，第99巻，pp.62~68，1974年。
- 4) 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。
- 5) 土岐・戸早：数量化理論による大阪地盤の震動予測，京大防災研究所年報，第26号，B-2，pp.1~13，1983年。
- 6) 土岐：新体系土木工学11・構造物の耐震解析，pp.80~90，技報堂出版，1981年。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 前出6)，pp.101~105。
- 10) 土田・倉田・須藤：港湾地域強震観測点資料(その2)，港湾技研資料，No.107，1970年。

(1985.6.5・受付)