

## 傾斜基盤の存在により生じる Love 波の特性

CHARACTERISTICS OF LOVE WAVE GENERATED AROUND  
A DIPPING BASEMENT

中村 晋\*・末富岩雄\*・秋山伸一\*・吉田 望\*\*

By Susumu NAKAMURA, Iwao SUE TOMI, Shinichi AKIYAMA and Nozomu YOSHIDA

Source mechanism and characteristics of the horizontally propagating waves generated around a dipping basement due to the incident SH wave are investigated. A new analytical method which combines boundary elements, finite elements and energy transmitting boundary is proposed. Two layered media, the upper layer of which has semi-infinite boundary in one side and a dipping interface in the other side, is used in the analysis. It is found that the incident SH wave is mostly transformed into Love wave whose period is close to Airy phase at the horizontal part of the surface layer in the case that both the ratio of wave impedance and the inclination of basement are small; all reflected SH wave is predominant in the other case.

Keywords: love wave, all reflected SH wave, dipping basement, new coupling method of BE and FE

## 1. はじめに

近年、高層ビル、長大橋梁等の固有周期の長い構造物も多く構築されるようになった。また、1985年に生じたメキシコ地震では、2秒前後に卓越周期を有する地震動によって中層建築構造物が大きな地震被害を受けた<sup>1)</sup>。このような背景から、最近、数秒から10秒程度の間卓越周期を有する、いわゆるやや長周期地震動の予測に関する研究が盛んに行われるようになってきた<sup>2)</sup>。

やや長周期地震動の予測に際して対象となる地震動の波動成分には、実体波と表面波がある。このうち表面波については、震源の特性より生じる表面波と、堆積盆地、傾斜基盤を有する地盤における基盤の不整形性により表層の堆積層に2次的に生じる表面波の2つがある。このうち、後者については、木下<sup>3)</sup>、瀬尾<sup>4)</sup>、鳴海<sup>5)</sup>らが関東・大阪平野等の沖積平野における地震動のアレー観測に基づきその存在を指摘している。さらに、木下<sup>3)</sup>は、関東平野の地盤構造を傾斜基盤を有する2層地盤にモデル化し、SH波の全反射と直達波のみを考慮した破線理論的

な解析を行い、SH波が傾斜基盤と地表面の間を屈折・反射を繰り返すことにより全反射波が発生し、それがLove波的な表面波に成長することを指摘している。また、Bard and Bouchon<sup>6),7)</sup>、堀家<sup>8)</sup>は、Aki and Lerner法<sup>9)</sup>を用い堆積盆地に実体波(SH波等)を入射した際、盆地両端部より表面波が発生することを指摘している。大槻<sup>10)</sup>は、数値解析結果と地震観測記録を比較し、基盤の傾斜により表面波が発生することを指摘している。

やや長周期地震動のうち、基盤の不整形性により2次的に発生する表面波を予測する方法として、瀬尾<sup>4)</sup>は全反射SH波により伝播機構をモデル化した手法を提案している。しかし、その発生機構つまり基盤に入射した実体波が表面波に変換される過程が定量的に明らかとされていないことから、そのような表面波を定量的に予測するまでには至っていない。

本研究では、まず、基盤の不整形性により2次的に発生する表面波地震動を算出するため、有限要素法と境界要素法の結合解析法<sup>11),12)</sup>に有限要素領域の側方にLove波のように水平方向に伝播する波動を側方に透過させる境界としてエネルギー伝達境界を加えた新たな手法の提案を行った。次に、一方に傾斜基盤を有する地盤の解析を行い、得られた表面波地震動の性質およびその性質に及ぼす地盤条件および地震動の入射条件の影響を把握し

\* 正会員 工修 佐藤工業(株)中央技術研究所  
(〒243-02 厚木市三田47-3)

\*\* 正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所主席研究員  
(同上)

た.最後に,ここで得られた2次的に発生する表面波地震動と水平成層地盤における表面波地震動を比較することにより,その発生機構について検討を行った.

2. 解析手法

Fig. 1 に示すような傾斜基盤を有する地盤において, SH 波が基盤に入射した際,表層に生じる水平方向に伝播する波動の振動性状を解析するための手法を示す.このような地盤モデルの表層地盤に発生する表面波の応答を算出する手法の1つである Aki and Larnier 法は傾斜基盤形状の周期性を考慮した手法であるため,表層地盤の応答には,基盤に入射した地震動による応答と傾斜基盤の対称位置より反射した波動による応答の2つが含まれていることから,一方向に伝播する波動のみを算出することは困難であり,実用的ではない.有限要素法<sup>13)</sup>,境界要素法<sup>14)</sup>は,一方向に伝播する波動の応答を地層境界面における地震波の透過・反射のみならず回折波の影響をも考慮して算出できる.しかし,有限要素法は,地震波の入射角等の入射条件の取扱いが困難である.境界要素法ではその取扱いが容易であるが,複雑な地盤構造の応答を算出する際,有限要素法に比べて計算時間が長く,コンピュータによる計算時に大きなコア容量が必要となる.

ここでは,有限要素法と境界要素法の長所を生かし傾斜基盤上の地盤およびその周辺の表層地盤を有限要素法,基盤層を境界要素法にて定式化し,有限要素領域の側方に水平方向に伝播する波動を透過させる Lysmer の伝達境界<sup>15)</sup>を加え,それらを結合することにより得られる新たな結合解析手法を提案する.

(1) 基礎方程式

SH 波の基礎方程式は,次式で与えられる.

$$\mu \nabla^2 u(x, z, t) - \rho \ddot{u}(x, z, t) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $\mu$  は Lamé の定数,  $\rho$  は質量密度,  $u(x, z, t)$  と  $\ddot{u}(x, z, t)$  は座標位置  $(x, z)$  の時刻  $t$  における  $y$  方向地盤変位と加速度を表わす. また,  $\nabla^2$  はラプラスアンである. この式を Fourier 変換すると次式のようになる.

$$\mu \nabla^2 U(x, z, \omega) + \rho \omega^2 U(x, z, \omega) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $U(x, z, \omega)$  は,座標位置  $(x, z)$  の円振動

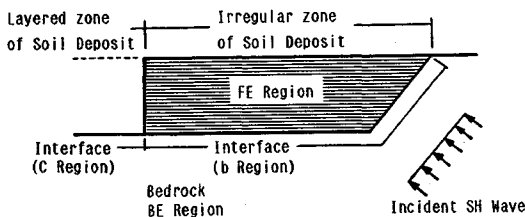


Fig. 1 Illustration of the analytical model.

数  $\omega$  における複素 Fourier 振幅を表わす.

(2) 有限要素領域の定式化

基礎方程式 (2) に重みつき残差法を適用し,離散化すると有限要素領域の支配方程式は次式のようになる.

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fn} & K_{fb} \\ K_{Lf} & K_{Ln} & K_{Lb} \\ K_{bf} & K_{bn} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_n \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ Q_n \\ [M]q_b \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

ここで,  $U$  は節点変位,  $K$  は剛性マトリックス,  $Q_n$  は側方境界における節点力ベクトル,  $q_b$  は表面力ベクトル,  $[M]$  は分布マトリックスを表わす. また,添字  $f, n, b$  は,それぞれ有限要素の内点,側方境界点および境界要素との境界点であることを表わす.

(3) 有限要素と伝達境界の結合

まず, Lysmer<sup>15)</sup> の示した,剛基盤上の水平地盤に対する Love 波の固有方程式を次式に示す.

$$[K(k)] + \omega^2 [M][U] = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで,  $[K(k)]$  は剛性マトリックスで,波数  $k$  の関数である. また,  $\omega$  は円振動数,  $[M]$  は質量マトリックスを表わす.

本研究で対象としている地盤では,基盤層を弾性体としているため,剛基盤に対する式 (4) をそのまま用いることはできない.そこで,Chen らが Rayleigh 波に関して示した手法<sup>16)</sup>と同様に,基盤層と表層地盤の変位・応力の適合条件として SH 波の波動エネルギーの下方への逸散を考慮する際に用いられている下方ダンパー境界を設ける.すなわち,式 (4) に示す質量マトリックスを,次式のように表わす.

$$[M] = \frac{\rho_n h_n}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} - \frac{i \rho_r V_{sr}}{\omega} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

ここで,  $\rho_n, h_n$  は表層地盤における最下層の質量密度および層厚を表わす. また,  $\rho_r, V_{sr}$  は基盤層における質量密度およびせん断波速度である.

このような下方ダンパー境界の有効性を検討するため,ここで示した Love 波の固有方程式と Haskell の手法<sup>18)</sup>により得られる Love 波の基本モードに関する伝播特性の比較を2層地盤モデルについて行う.両手法により得られた Love 波の位相速度と周期の関係を Fig. 2 に示す.全体として両者は,ほぼ一致している.

次に,前項で示した有限要素領域の支配方程式と水平地盤に対する Love 波の固有方程式を Lysmer により示された両領域の境界における応力のつり合いにより結合する手法<sup>15)</sup>を用い結合すると次式のようになる.

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fn} & K_{fb} \\ K_{Lf} & K_{Ln}' & K_{Lb} \\ K_{bf} & K_{bn} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_n \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ [M]q_b \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$[K_{Ln}'] = [K_{Ln}] - [L]$$

$$[L] = i[A][V][H][V][A]$$

$$[A] = \frac{h_i G_i}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 $[V]$  は Love 波の固有方程式より得られるモーダルマトリックス、 $[H]$  はその  $(j, j)$  成分に Love 波の  $j$  次モードに対する波数  $k_j$  を有する対角マトリックス、 $[A]$  は  $i$  層のせん断剛性  $G_i$  とその層厚  $h_i$  により表わされるマトリックスである。

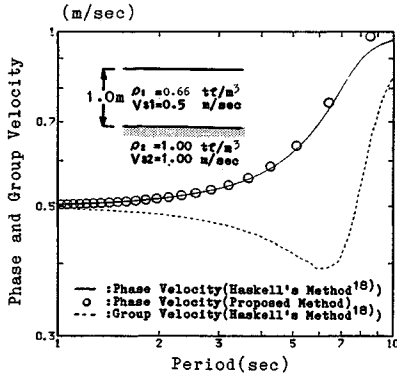


Fig. 2 Comparison of phase velocity by the proposed method to that by Haskell's method.

(4) 境界要素領域の定式化

基盤層におけるある円振動数  $\omega$  に対する地盤変位  $U_b$  は次式のように下方から入射する入射波  $U_i$  と散乱波  $U_s$  の和で表わされる。

$$U_b = U_i + U_s \dots \dots \dots (7)$$

散乱波  $U_s$  が無限遠において放射条件を満たしているとするとき式 (2) の Green 関数表示による積分方程式は次式のように表わすことができる。

$$CU_b(X_0, Z_0) + \int_{b+c} (Q(r)U_s(x, z) - U(r)q_b(x, z))d\Gamma = U_i(X_0, Z_0) \dots \dots \dots (8)$$

$$U(r) = \frac{i(H^2(kr) + H^2(kr'))}{4}$$

ここで、 $U(r)$  は SH 波の Green 関数、 $H^2(kr)$  は第 2 種 0 次の Hankel 関数、 $k$  は波数、 $r$  は  $xz$  面における座標位置  $(X_0, Z_0)$  から座標位置  $(x, z)$  までの距離、 $r'$  は  $(X_0, Y_0)$  から座標位置  $(x, -z)$  までの距離、 $U_b(x, z)$  は未知変位、 $Q(r)$  は Green 関数により規定される応力ベクトル ( $= \partial U(r)/\partial n$ ,  $n$  は境界面から要素外側への単位法線ベクトル)、 $q_b(x, z)$  は未知応力ベクトル、 $C$  は境界の形状により規定される定数、 $d\Gamma$  は境界  $b+c$  に沿った積分を表わす。

次に、Fig. 1 に示す境界領域  $b, c$  について式 (8) を離散化する。まず、 $c$  領域の地盤変位を次式のように Love 波の地盤変位で表わせると仮定する。

$$U_c(x_c) = U(x_p) \exp(ik_1 x) \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $U_c(x_c)$  は伝達境界と境界要素の境界変位、 $U(x_p)$  は伝達境界、有限要素と境界要素領域の境界点における地盤変位である。 $k$  は水平成層地盤における Love 波の波数であるが、Love 波の地盤変位は、低次モードほど大きくなる性質を有しているため<sup>17)</sup>、ここでは基本モードのみを用いる。式 (9) は  $b$  領域の端部  $x_p$  点の地盤変位と  $c$  領域における境界要素の形状関数の積となっているため、式 (8) を離散化する際の未知地盤変位としては  $b$  領域における地盤変位のみを考慮すればよい。

以上より式 (8) を離散化すると次式ようになる。

$$[H][U_b] + [G][q_b] = [U] \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $[H]$ 、 $[G]$  の成分は

$$H_{ij} = \int_{b+c} U(r_{ij}) N(\zeta) \det(J) d\Gamma$$

$$G_{ij} = \int_{b+c} Q(r_{ij}) N(\zeta) \det(J) d\Gamma$$

で表わされ、 $N(\zeta)$  は形状関数 ( $b$  領域:  $(1-\zeta)/\zeta$ ,  $c$  領域:  $\exp(ikx)$ ) を表わす。また、 $J$  は、座標系を全体系から局所系へ変換する際の Jacobian マトリックスである。

(5) 有限要素と境界要素の結合手法

有限要素領域と境界要素領域の境界  $b$  領域における地盤変位および表面力の連続条件は次式のようになる。

$$u_b^e = u_b^s, q_b^e + q_b^s = 0 \dots \dots \dots (11)$$

式 (6)、(10)、(11) により次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{ft} & K_{fb} \\ K_{tf} & K_{tt} & K_{tb} \\ K_{bf} & K_{bt} & K_{bb} \\ 0 & 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_t \\ U_b \\ q_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -[M] \\ 0 & 0 & -[G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_b \\ U_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_t \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

式 (12) より有限要素領域と境界要素領域の境界における地盤変位  $U_b$  が次式のように得られる。

$$[U_b] = [H]^{-1} [G][M]^{-1} (-[K_{bf}][K_{ff}]^{-1}[K_{fb}] + [K_{bb}])^{-1} [U_t] \dots \dots \dots (13)$$

$$[K_{bt}'] = [K_{bf} K_{bt}], [K_{rb}] = [K_{fb} K_{tb}]^T,$$

$$[K_{ff}'] = \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fb} \\ K_{tf} & K_{tt}' \end{bmatrix}$$

また、 $[U_b]$  が求めれば有限要素領域における未知地盤変位  $[U_f] = [U_f U_t]^T$  は式 (12) より次式のように得られる。

$$[U_f] = -[K_{ff}']^{-1} [K_{rb}'] [U_b] \dots \dots \dots (14)$$

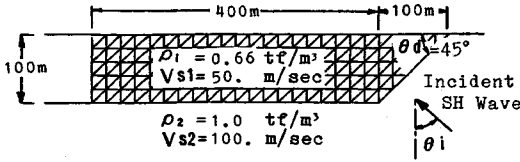


Fig. 3 The analytical model and the material properties.

Table 1 Differences ratio of displacement at ground surface.

		Period (sec)		
		6	8	10
Incident Angle of SH Wave (Degree)	0	0.26	0.03	0.24
	45	0.11	0.03	0.12
	90	0.00	0.07	0.33

(6) 解析手法の検証

ここでは、有限要素領域にて生じた波動の側方境界における透過に対する本手法の有効性の検討を行うため、本提案手法と境界要素法による応答値の比較を行う。解析の対象としたのは Fig. 3 の地盤で、SH 波の入射角および入射波の周期をパラメータとした。地盤は、表層地盤の層厚が 100 m、せん断波速度が 50 m/s、質量密度が 0.66 t/m<sup>3</sup>、基盤の傾斜角が 45 度、せん断波速度が 100 m/s、質量密度が 1.0 t/m<sup>3</sup> の 2 層地盤とした。基盤における SH 波の入射条件は、鉛直方向と SH 波の入射方向の成す角（以後入射角とよぶ）が 0、90 度および 45 度とした。また、入射波は、単位変位振幅を有する調和波とした。その周期には、Love 波の Airy 相を与える周期 6 秒と 8、10 秒とした。

本手法と境界要素法で得られた最大地表面変位の差の境界要素法により得られた最大地表面変位に対する比を Table 1 に示す。

Table 1 より両手法による最大地盤変位の差異は、一部を除き 0~12% 程度と小さい。次に、両手法により得られた地表面における地盤変位分布を比較する。Fig. 4 に両手法の差異の小さい SH 波の入射角が 45 度、周期 8 秒の場合、および、差異が大きい SH 波の入射角が 90 度、周期 10 秒の場合について、地表面変位の実部および虚部を示す。図には、両手法の差異が最大となる位置を▼で示している。両手法の差異が小さい Fig. 4(a) では、地盤変位分布は分布形状、値ともよく一致してい

●:Real part of Displacement(Proposed Method)  
 ▲:Imaginary part of Displacement(Proposed Method)  
 ○:Real part of Displacement(BEM)  
 △:Imaginary part of Displacement(BEM)

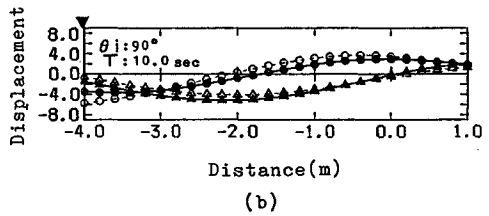
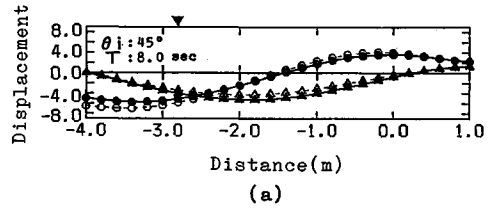


Fig. 4 Comparison of displacements at ground surface obtained by the proposed method and by the B.E.M.

る。また、両手法の差異が大きい Fig. 4(b) では、差が最大となるのは、側方境界のモデル化の影響を最も受けている側方境界位置であり、その周辺を除くと Fig. 4(a) 同様地盤変位分布、値ともよく一致している。このことより、本提案手法における側方境界は、有限要素領域で発生した水平方向に伝播する波動を十分に透過していると考えられる。

3. 傾斜層を有する地盤の応答性状

ここでは、Fig. 1 に示したような地盤モデルに SH 波を入力した際、表層地盤に発生する水平方向に伝播する地震動の水平方向伝播特性、周波数応答特性およびそれらに及ぼす地盤および SH 波の入射条件の影響を検討する。検討条件として①基盤の傾斜角、②表層地盤と基盤層の波動インピーダンス比および③地震動の入射角を用いる。

(1) 解析モデルおよび条件

解析には、解析パラメータが最も単純で、解析パラメータと応答の関係を把握しやすい Fig. 5 に示す 2 層地盤モデルを用いた。解析では、地盤を弾性体とした。計算に用いた表層地盤の層厚およびせん断波速度、表層地盤および基盤の密度は図に示している。また、解析に際してパラメータとして用いる基盤傾斜角 (θa)、波

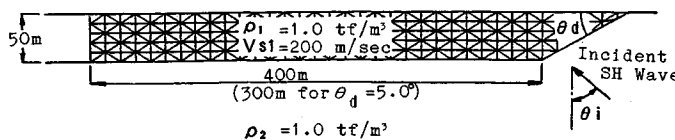


Fig. 5 The analytical model and the material constants.

Table 2 Analytical Parameters.

Parameter	Values
Inclination of Basement (Degree)	5, 15, 30, 45
Ratio of Wave Impedance	0.2, 0.33, 0.5
Incident Angle (Degree)	0, 45, 60, 75, 85
Period of Incident Wave (second)	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0

動インピーダンス比 ( $\alpha = \rho_1 V_{s1} / (\rho_1 V_{s2})$ ) および SH 波の入射角 (鉛直方向と SH 波の入射方向のなす角) の値は、それぞれ Table 2 に示した。ここで、基盤に入射する SH 波は、単位変位振幅を有する調和波とし、その周期も合わせて Table 2 に示した。

Fig. 5 に示した解析モデルの基盤全面に SH 波を入力した結果得られる表層地盤の応答には、水平基盤部に入射した SH 波により表層地盤に生じる実体波と木下<sup>3)</sup>が指摘したような傾斜基盤部に入射した SH 波が地表面と傾斜基盤面の間を多重反射を繰り返すことにより生じる水平方向に伝播する波動の両方が含まれている。ここでは、水平方向に伝播する地震動を対象とした表層地盤の応答性状の把握を目的としていることから、基盤における SH 波の入力位置は、傾斜基盤部のみとする。

(2) 水平方向伝播速度の相違

Table 2 に示した解析パラメータの全組合せについて応答解析を行い、表層地盤の応答より地震動の水平方向伝播速度に及ぼす各解析パラメータの影響について

検討を行った。ここで、地震動の水平方向伝播速度は、傾斜基盤上の表層地盤ではその応答に層厚の違いによる影響がみられるため、層厚が一定である水平地盤部について算出した。

地震動の水平方向伝播速度は、有限要素でモデル化された表層地盤の地表面において隣接する 2 節点の位相差より算出した各水平方向伝播速度を水平地盤部について次式により平均した値とした。

$$C = \frac{\sum_{e=1}^n \frac{L_{ij}^e}{2\pi(\theta_i - \theta_j)}}{n} \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 $C$  は平均伝播速度、 $L_{ij}^e$  は  $e$  要素における  $i, j$  節点間の距離、 $\theta_i, \theta_j$  は  $i, j$  節点における位相角 (s/rad)、 $n$  は有限要素領域における水平地盤部の地表面を含む要素の数を表わす。

まず、Fig. 6 に波動インピーダンス比が 0.2 の場合について SH 波の入射角に応じた地震動の水平方向伝播速度を基盤傾斜角ごとに示す。なお、Fig. 6 には、水平地盤部の地盤定数を用い Haskell の手法により算出した Love 波の理論位相速度特性を合わせて示している。ほとんどの入射角に対して解析により得られた位相速度はほぼ同じ値であり、Fig. 6 ではその差異が識別できない。地震動の水平方向伝播速度は、基盤傾斜角および SH 波の入射角にかかわらず Love 波の理論位相速度特性と一致している。さらに、Fig. 7 に波動インピーダンス比が 0.33 および 0.5 の場合について SH 波の入射角に応じた地震動伝播速度と Love 波の理論位相速度特性を示

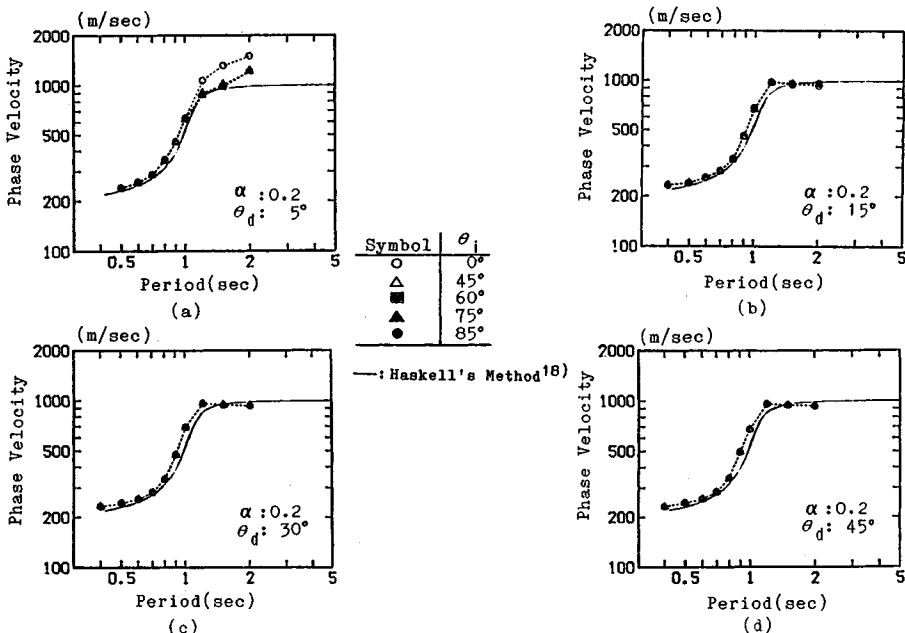


Fig. 6 Comparison of phase velocity computed by the proposed method to that by Haskell's method.

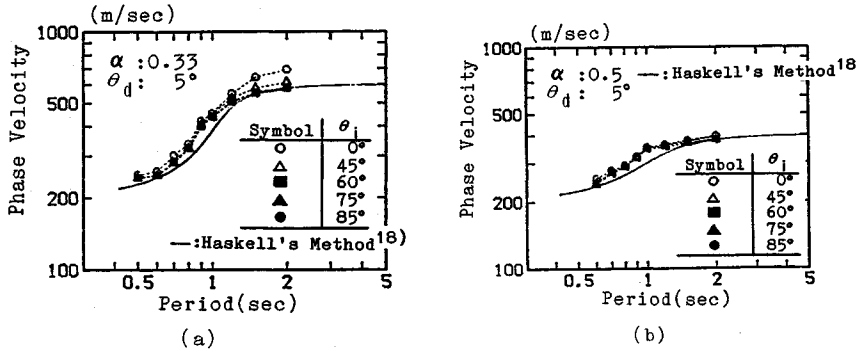


Fig. 7 Comparison of phase velocity computed by the proposed method to that by Haskell's method.

す。ただし、波動インピーダンス比が0.2の場合と同様、地震動の水平方向伝播速度に基盤傾斜角の影響がみられないため、ここでは基盤傾斜角5度についてのみ示している。波動インピーダンス比が0.2の場合と同様、地震動の水平方向伝播速度は、SH波の入射角にかかわらずLove波の理論位相速度特性と一致している。

(3) 表層地盤の応答特性の相違

水平方向に伝播する地震動による表層地盤の周波数応答特性を把握する。周波数応答特性としては、地表面変位振幅と傾斜基盤に入力するSH波の振幅の比を用いる。

波動インピーダンス比が0.2, SH波の入射角が5度、周期が1.0秒の場合について、基盤傾斜角に応じた水平地盤部の地表面変位振幅分布を Fig. 8(a) に示す。さらに、Fig. 8(a) で地表面位置による位盤変位の差異が最も大きい、基盤傾斜角が5度の場合について、SH波の入力周期およびその入射角に応じた水平地盤部における地表面変位分布を Fig. 8(b), (c) に示す。他の波動インピーダンス比に対しても同様な傾向がみられる。このような地表面各位置における地盤変位の差異は、丹羽ら<sup>14)</sup>が指摘しているように傾斜基盤上の堆積層中に生じる次の3つの波動のうち③の回折波の影響に起因していると考えられる。

- ① 傾斜基盤端部で発生した表面波
- ② 地表と基盤面の間を屈折、反射を繰り返すことにより生じる波動
- ③ 回折波

ここでは、水平方向に伝播する地震動として、上記①、②項の波動による表層地盤の応答の把握を目的としていることから、地表面の応答から回折波の影響を取り除くため、地盤変位として地表面上の各節点における地盤変位を平均した値を用いる。

応答解析より得られた周波数応答倍率のうち、Fig. 9に基盤傾斜角が5度の場合についてSH波の入射角に応じた周波数応答倍率を示す。

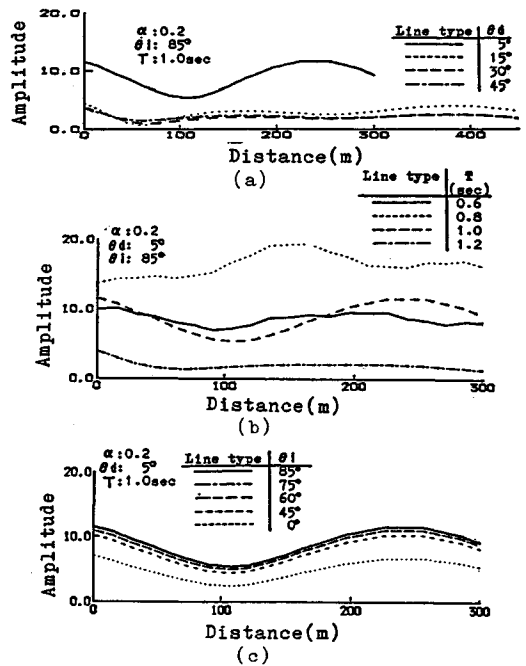


Fig. 8 Amplitude of displacement at the ground surface.

まず、水平方向に伝播する地震動による表層地盤の最大周波数応答倍率と水平成層地盤におけるSH波の最大周波数応答倍率の比に及ぼす各解析パラメーターの影響を検討する。ここで、水平成層地盤におけるSH波の最大周波数応答倍率は、その値が最も大きな鉛直入射の場合による値を用いる。Fig. 10に波動インピーダンス比が0.2, 0.33の場合の最大応答倍率比を示す。これより、波動インピーダンス比にかかわらず、基盤傾斜角が大きくなるにつれ水平方向に伝播する地震動の最大応答倍率比は小さくなっていることがわかる。また、波動インピーダンス比が0.2の場合、その最大応答倍率比は基盤傾斜角が5度の場合を除きSH波の入射角にかかわらず同程度の値であり、その値は1より小さい。すなわち、表層

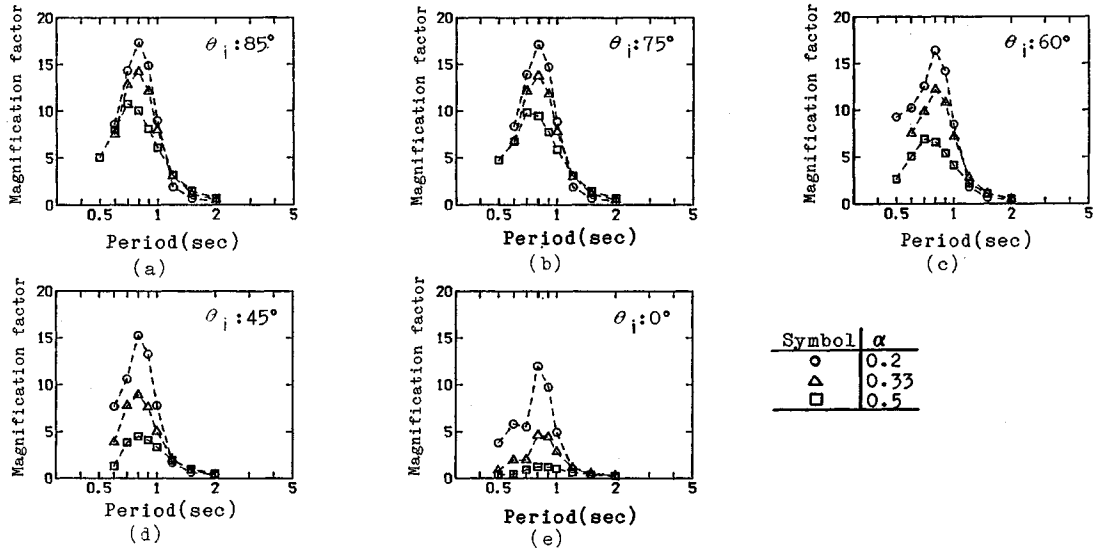


Fig.9 Frequency characteristics of magnification factor.

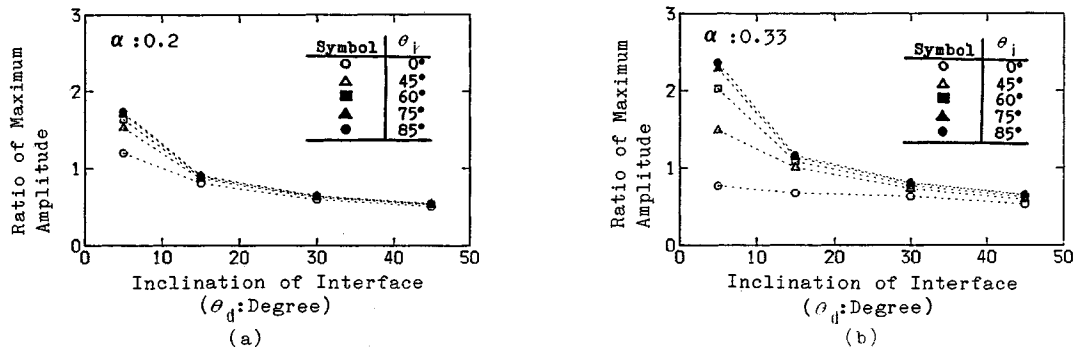


Fig.10 Ratio of maximum amplitude versus inclination of basement.

地盤の最大周波数応答倍率は、水平成層地盤における SH 波の最大周波数応答倍率より小さな値となっている。一方、基盤傾斜角が 5 度の場合には、表層地盤の最大周波数応答倍率は水平成層地盤における SH 波の最大周波数応答倍率より大きな値となっている。波動インピーダンス比が 0.33 の場合には、基盤傾斜角の大きな 30、45 度の最大周波数応答倍率は、SH 波の入射角にかかわらず同程度の値となっており、表層地盤の最大周波数応答倍率は水平成層地盤における SH 波の最大周波数応答倍率より小さな値となっている。また、基盤傾斜角が 5 度、15 度の場合には、SH 波の入射角が大きくなるにつれ最大応答倍率は大きくなっている。

次に、最大周波数応答倍率を与える周期つまり表層地盤の固有周期と各解析パラメーターの関係を検討する。Table 3 に波動インピーダンス比が 0.2 の場合における基盤傾斜角と SH 波の入射角に応じた表層地盤の地震動の卓越周期を示す。ただし、卓越周期には、SH 波の入

Table 3 Predominant Period versus inclination of basement ( $\alpha=0.2, \theta_i=85^\circ$ ).

	Inclination of Basement(Degree)			
	5	15	30	45
Predominant Period (sec)	0.8	0.7	0.6	0.5

射角による差異がみられないため、Table 3 には SH 波の入射角が 85 度の場合のみを示している。

Table 3 より、地震動の卓越周期は、基盤の傾斜角が大きくなるにつれ短くなっていることがわかる。水平地盤部における地盤定数を用いて算出した Love 波の理論群速度特性の極小値より得られる卓越周期は 0.95 秒であり、Table 3 に示したいずれの解析パラメーターにより得られた卓越周期より大きな値となっている。波動インピーダンス比が 0.33 の場合についても、基盤傾斜角が大きくなるにつれ卓越周期は短くなっている。また、波動インピーダンス比が 0.5 の場合には明瞭な卓越周期

がみられない。水平方向に伝播する地震動の卓越周期は、SH波の入射角によらず、基盤傾斜角にのみ依存した値を示すことから、この値は地盤に固有の周期と考えられる。この値は、水平成層部のみならず、傾斜基盤上の堆積層における応答性状の影響を受けている。

4. 基盤入射波と表層地盤の地表面応答の関係

ここでは、傾斜基盤の存在により生じるLove波の発生量とその発生に影響を及ぼす地盤条件および地震動の入力条件の関係よりLove波の発生機構について把握する。

前章で得られた水平方向に伝播する地震動は、伝播速度がLove波の理論位相速度とほぼ一致していることから、傾斜堆積層内にて励起されたLove波を含んでいることは明らかであるが、これ以外に、傾斜堆積層内にて多重反射を繰り返すことにより生じる全反射SH波の影響も含まれていると考えられる。とすれば、Fig. 9に示した基盤の不整形性により2次的に生じる水平方向に伝播する地震動の周波数応答倍率は、Love波と全反射SH波の2つの成分の重ね合わせと考えられる。このうちLove波成分の影響を把握するため、次式に示すように水平方向に伝播する地震動の周波数応答倍率( $A_s(t)$ )とLove波の理論変位応答倍率( $A_L(t)$ )との比で得られるLove波の影響係数 $T(t)$ を算出する。

$$A_s(t) = A_L(t) \cdot T(t) \quad \dots\dots(16)$$

$$A_L(t) = \frac{1}{\cos\left(\frac{2\pi H \sqrt{(1/V_s)^2 - (1/C(t))^2}}{t}\right)}$$

ここで、 $t$ は周期(秒)、 $V_s$ は表層地盤のせん断波速度、 $H$ は層厚、 $C(t)$ はLove波の理論位相速度を表わす。Love波の理論周波数応答倍率( $A_L(t)$ )は、Love波伝播時における地表面変位と基盤変位の比を表わし、水平地盤部を水平成層地盤としHaskellの手法により算出した。 $T(t)$ が1の場合、周波数応答倍率( $A_s(t)$ )はLove波の周波数応答倍率と等しいことを意味しているため、 $T(t)=1$ の周期における周波数応答倍率はLove波によるものであると考えられる<sup>注1)</sup>。

$T(t)$ が1以外の値の場合、周波数応答倍率( $A_s(t)$ )はLove波と全反射SH波の影響を含んでいると考えられる。基盤に入力したSH波が傾斜堆積層内を多重反射を繰り返し、水平地盤部に到達するときの全反射SH波

注1) Love波は、入射角 $\theta_0 = \sin^{-1}(V_{s1}/C(t))$ で、地表面と基盤面を全反射しながら水平に伝播するSH波である。周波数応答倍率 $A_s(t)$ がすべて $\theta_0$ の入射角を有して水平方向に伝播する全反射SH波によるものとするれば、 $\cos \theta_0 = \pm \cos \theta_L(t) + V_{s1} t n / H$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ )を満たす周期 $t$ にて $T(t)=1$ となる。つまり、周波数応答倍率が全反射SH波によるものとしても $T(t)=1$ における周波数応答倍率はLove波によるものである。

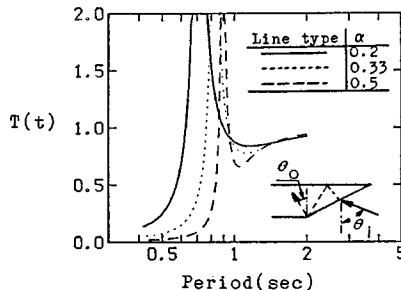


Fig. 11 Coefficient of influence due to Love wave ( $A_s(t) = A_s(t)$ ).

の周波数応答倍率 $A_B(t)$ は、Fig. 11の2層地盤に対して次式となる。

$$A_B(t) = \frac{1}{\cos\left(\frac{2\pi H \cos \theta_0}{t V_s}\right)} \quad \dots\dots(17)$$

水平地盤部を伝播する波がすべてこの全反射SH波とすれば、Love波の影響係数 $T(t)$ は、式(16)より、形式的に $A_B(t)$ とLove波の周波数応答倍率( $A_L(t)$ )の比として表わせる。ここで、 $\theta_0$ は全反射SH波の入射角である。基盤傾斜角が5度の場合について、この関係を示すとFig. 11となる。全反射SH波によるLove波の影響係数 $T(t)$ は周期0.8~1.0秒の間で1より大きく、その周期の長短周期側で1より小さく、特に短周期側ではかなり小さな値となっている。

まず、Fig. 12に波動インピーダンス比が0.2、SH波の入射角が85度の場合について基盤傾斜角に応じたLove波の影響係数 $T(t)$ と周期の関係を示す。これより、基盤傾斜角が5度の場合、周期0.8秒から1.0秒においてLove波の影響係数 $T(t)$ がほぼ1となり、傾斜基盤に入射したSH波は、ほとんどがLove波に転換されたことがわかる。また、水平地盤部におけるLove波の変位成分が最も大きくなるAiry相を与える周期は、群速度の極小値を与える周期0.95秒であり、 $T(t)=1$ となる周期とほぼ一致している。他の周期で

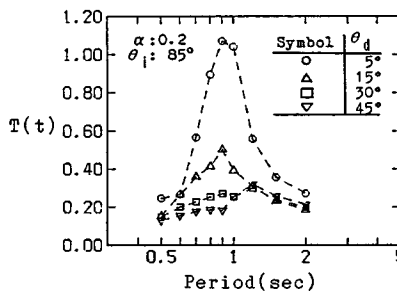


Fig. 12 Coefficient of influence due to Love wave versus inclination of basement.



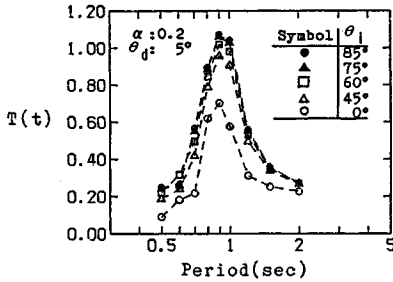


Fig. 13 Coefficient of influence due to Love wave versus incident angle of SH wave.

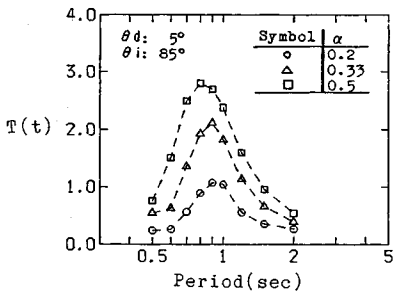


Fig. 14 Coefficient of influence due to Love wave versus ratio of wave impedance.

は、Love 波の影響係数  $T(t)$  が 1 よりかなり小さく Love 波より全反射 SH 波の影響が支配的である。また、基盤傾斜角が 5 度より大きい場合には周期にかかわらず Love 波の影響係数  $T(t)$  は、1 よりかなり小さいことから全反射 SH 波の影響が支配的である。

次に、基盤傾斜角が 5 度の場合について、波動インピーダンス比が 0.2 に対する SH 波の入射角に応じた Love 波の影響係数  $T(t)$  と周期の関係を Fig. 13 に示す。これより、鉛直入射 ( $\theta_i=0$ ) の場合を除き、入射角にかかわらず Love 波の影響係数  $T(t)$  はほぼ同程度の値となっている。このため、SH 波の入射角は傾斜基盤の存在により生じる水平方向に伝播する波動の波動種別および周波数応答倍率を支配する因子とならないことがわかる。

最後に、基盤傾斜角が 5 度、SH 波の入射角が 85 度の場合について波動インピーダンス比に応じた Love 波の影響係数  $T(t)$  と周期の関係を Fig. 14 に示す。これより、波動インピーダンス比が 0.2 の場合に Love 波の支配的な周期 0.8 秒から周期 1.0 秒において、波動インピーダンス比が 0.2 以上の Love 波の影響係数  $T(t)$  は、1 よりかなり大きく周期にかかわらず全反射 SH 波の影響が支配的であることがわかる。

以上より、傾斜基盤の存在により Love 波が 2 次的に発生するためには、基盤傾斜角および波動インピーダ

ス比の 2 つが支配因子であり、両者が小さい場合に Love 波が 2 次的に発生することがわかる。

## 5. 結 論

本研究では、単純な傾斜基盤を有する 2 層地盤モデルを用いた応答解析により、2 次的に発生する水平方向に伝播する地震動の性質およびその発生機構について検討を行った。応答解析には、有限要素法と境界要素法の結合解析法に有限要素領域の側方に Love 波のように水平方向に伝播する地震動を透過させる境界として Lysmer の伝達境界を加えた新たな手法の提案を行った。

この結果、傾斜基盤に入力した SH 波により傾斜堆積層内を多重反射を繰り返すことにより、水平基盤上の堆積層に生じる水平方向に伝播する地震動の性質について以下のような結果が得られた。

(1) 水平方向伝播速度は、Love 波の位相速度とほぼ一致しており、基盤の不整形性を表わす基盤傾斜角および SH 波の入射角の影響を受けていない。

(2) 周波数応答倍率(地表面応答/基盤入射波)には、基盤の不整形性を表わす基盤傾斜角の影響が支配的である。基盤傾斜角が小さくなるにつれ、その値は大きくなる。さらに基盤傾斜角が小さい場合には、SH 波の入射角も影響するようになり、入射角が大きくなるにつれ周波数応答倍率は大きくなる。

(3) 周波数応答倍率の最大値は、基盤傾斜角が小さい場合に水平成層地盤における SH 波の鉛直入射時の周波数応答倍率の最大値より大きい。

(4) 水平方向に伝播する地震動の卓越周期は、層厚、波動インピーダンス比等の地盤定数に加え基盤傾斜角にも依存しており、基盤傾斜角が大きくなるにつれその卓越周期は短くなる。

さらに、水平方向に伝播する地震動、特に Love 波の発生機構について次のような結果が得られた。

(5) 基盤傾斜角と波動インピーダンス比の両方が小さな場合には、水平地盤部における Love 波の Airy 相を与える周期をもつ Love 波が発生する。また、Airy 相を与える周期の長短周期側における地震動の波動成分は、全反射 SH 波が Love 波に比べて優勢である。

(6) 基盤傾斜角および波動インピーダンス比が大きな場合に発生する地震動の波動成分は、周期にかかわらず全反射 SH 波が支配的である。

水平方向に伝播する地震動の発生機構についての考察を行う際に用いた Love 波の発生率を表わす係数は、地盤形状に固有な値であると考えられる。今後、実地盤との対応を計ることにより、このような地震動を予測する手法への適用を検討していきたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) Scawthorn, C., Celebi, M. and Prince, J. : Performance Characteristics of Structure, 1985 Mexico City earthquake, The Mexico Earthquake 1985, pp.217~233, 1986.
- 2) たとえば, 井上涼介: やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望, 土木学会論文報告集, 第374号, pp.1~23, 1986.
- 3) 木下繁夫: 傾斜基盤におけるSH波の全反射伝播, 地震, 第38巻, pp.597~608, 1985.
- 4) 瀬尾和太: 深い地盤の震動性状を探る, 第13回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.27~34, 1985.
- 5) 鳥海 勲: 堆積層表面波の構造について—大阪平野の場合—, 第14回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.69~74, 1986.
- 6) Bard, Y.P. and Bouchon, M. : The Seismic Response of Sediment-Filled Valleys Part.1 The case of Incident SH wave, Bull. Seis. Soc. Am., Vol.70, No.4, pp.1263~1286, 1980.
- 7) Bard, Y.P. and Bouchon, M. : The Two-Dimensional Response of Sediment-Filled Valleys, Bull. Seis. Soc. Am., Vol.75, No.2, pp.519~541, 1985.
- 8) 堀家正則: 複数の曲がった境界を有する減衰のある媒質の地震動応答計算法へのAL法の拡張とそれを用いた堆積盆地の地震動特性, 地震, 第40巻, pp.247~259, 1987.
- 9) Aki, K. and Larner, L.K. : Surface motion of a layered medium having Irregular Interface due to Incident SH Waves, J. Geophys. Res., Vol.75, No.5, pp.933~954, 1970.
- 10) 大槻 明・田蔵 隆・清水勝美: 傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ, 土木学会論文報告集, 第350号, pp.291~300, 1984.
- 11) 三田 彰・高梨和光: ハイブリット法による波動解析—その1 解析手法と解析精度—, 日本建築学会学術講演概要集, pp.815~816, 1983.
- 12) 秋山伸一・宮原 玄: 境界要素・有限要素の結合解析法による非均質地盤の動的応答解析, 第39回土木学会年次大会講演概要集, pp.821~822, 1984.
- 13) Lysmer, J., Utake, T., Tsai, T.C. and Seed, H.B. : Flush-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problem, Report No.EERC 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1975.
- 14) 丹羽義政・広瀬壮一: 傾斜層を有する地盤における理論的地震動解析, 土木学会論文報告集, 第337号, pp.57~66, 1983.
- 15) Lysmer, J. and Waas, G. : Shear Waves in Plane Infinite Structure, A. S. C. E., EM 1, pp.85~105, 1972.
- 16) Chen, C.J., Lysmer, J. and Seed, H.B. : Analysis of Local Vibrations in Free Field seismic ground motion, Earthquake Engineering Research Center, Report No.EERC 81-03, University of California, 1981.
- 17) Tazime, K. : Maximum Group Velocity, Maximum Amplitude and Quarter Wave-Length Law, J. Phys. Earth, Vol.5, No.1, pp.43~50, 1957.
- 18) Haskell, N.A. : The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bull. Seis. Soc. Am., Vol.43, No.2, pp.17~34, 1953.

(1988.3.25・受付)