

厚岸大橋近傍地盤において観測された強震記録の特性(2)

中 辻 隆*・芳 村 仁**

Characteristics of Strong Motion Accelerograms Observed near the Akkeshi Bridge (2)

Takashi NAKATSUJI and Jin YOSHIMURA

Synopsis

The strong motion earthquake observations have been continued near the Akkeshi Bridge (the Eastern Hokkaido) Since 1971, many accelerograms including the Nemuro Peninsula Earthquake records in 1973 have been obtained.

In the 1-st report we discussed the fundamental characteristics of the accelerograms, such as Fourier spectrum or Amplitude spectrum.

In this report, we analysed the behaviors of body waves and surface waves in this alluvium soft ground. The results are summarized as follows ;

- (1) frequencies at Airy phase in which the group velocity of surface waves take minimum values are close to the characteristic frequencies of S waves.
- (2) in these frequencies surface waves show similar behaviors with S waves.

1. ま え が き

北海道東部厚岸町に架設されている厚岸大橋の近傍地盤に強震計が設置され、道土木部、北大によって強震観測が行なわれている。この地方が従来より地震の多発地帯であり、また架橋地点が深さ 60 m 以下に支持層をもつ軟弱地盤であることから、その地震時の挙動記録は耐震工学上貴重な資料となっている。

前回、実際に得られた記録を用いて各種のスペクトル解析あるいは地表記録に含まれる表面波成分の抽出などの結果を報告した。本研究ではその強震記録に含まれる実体波と表面波の当該軟弱地盤中における挙動について報告したい。

強震記録に含まれる表面波成分に関してはそれらが比較的長周期成分であるために加速度量としては小さく、また表面波成分に見合う固有周期を有する構造物が少なかったために工学的にはこれ

まであまり考慮されていなかった。しかしながら近年の高層ビル、あるいは高橋脚をもつ橋梁の出現に伴ってその重要性が認識されるようになっており、また実際の強震記録においても、震源が浅く震央距離の十分大きい地震波の主要動は表面波成分であるとの指摘がなされている。さらに多層地盤中における実体波と表面波の挙動の差異は、原子力発電所あるいは沈埋管等の設計に無視出来ない影響をもつと言われている。

本研究は、厚岸大橋架設地点のような軟弱地盤中における実体波と表面波の挙動、特に SH 波と Love 波の挙動を重点にこれまでに得られている強震記録を用いて明らかにしようとするものである。

2. 基 本 式

図-1 に示すような、基盤を含めて n 層から成るお互いに平行な多層地盤を考える。 x, y, z 各方向の変位成分を u, v, w とし、 v が SH 波と Love 波の、 u, w が P 波、SV 波および Rayleigh 波の

* 助教授 土木工学科

** 教授 北大工学部土木工学科

変位成分を表わすものとする。多層地盤の重複反射に関してはすでに成書に詳しいのでここでは式の展開の要点だけを示す。

2.1 SH波とLove波

第 m 層の地盤内を斜め方向に伝播するSH波とLove波の波動運動方程式とその解は

$$\frac{\partial^2 v_m}{\partial t^2} = \beta_m^2 \left[\frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

$$v_m = [A_m e^{-ik\gamma_{\beta m} z} + B_m e^{ik\gamma_{\beta m} z}] e^{i(\rho t - kx)} \quad (2)$$

$$\gamma_{\beta m}^2 = \left(\frac{c}{\beta_m}\right)^2 - 1, \quad \beta_m^2 = \frac{\mu_m}{\rho_m}, \quad c = \frac{p}{k} \quad (3)$$

と表わすことが出来る。ここで ρ_m と μ_m はそれぞれ密度とせん断のヤング係数であり、 β_m はS波速度、 c は位相速度である。

v_m を c を用いて無次元化すると

$$\frac{\dot{v}_m}{c} = ik[A_m e^{-ik\gamma_{\beta m} z} + B_m e^{ik\gamma_{\beta m} z}] \quad (4)$$

となる。

$\dot{v}_m$ は $\frac{\partial v_m}{\partial t}$ を表わす。

また、せん断応力は次式のようにになる。

$$(\tau_{yz})_m = -ik\mu_m\gamma_{\beta m}[A_m e^{-ik\gamma_{\beta m} z} - B_m e^{ik\gamma_{\beta m} z}] \quad (5)$$

$$(\tau_{xy})_m = -ik\mu_m[A_m e^{-ik\gamma_{\beta m} z} + B_m e^{ik\gamma_{\beta m} z}] \quad (6)$$

隣りあう各層の変位 v と応力 τ_{yz} の連続条件を用いると(7)の関係を得る事が出来る。

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\dot{v}_m}{c} \\ \tau_m \end{array} \right\} = \mathbf{a}_m \mathbf{a}_{m-1} \cdots \mathbf{a}_1 \left\{ \begin{array}{c} \frac{\dot{v}_0}{c} \\ \tau_0 \end{array} \right\} \cdots \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_m = \begin{bmatrix} \cos Q_m & i(\mu_m \gamma_{\beta m})^{-1} \sin Q_m \\ i\mu_m \gamma_{\beta m} \sin Q_m & \cos Q_m \end{bmatrix} \cdots \quad (8)$$

$$Q_m = k \gamma_{\beta m} d_m \cdots \quad (9)$$

ここで、 $\frac{\dot{v}_m}{c}$ と τ_m は第 m 層の下層面における変位と応力 τ_{yz} の値を表わすものとする。また $\frac{\dot{v}_0}{c}$ と τ_0 は地表面における値である。(自由表面においては $\tau_0 = 0$) SH波の位相速度は基盤面(第 m 層)における入射角 θ を与えることによって決定することが出来る(図-1参照)

$$c = \frac{\beta_n}{\sin \theta} \cdots \quad (10)$$

Love波においては、基盤面内の変位、応力は指数関数的に減少する性質を持つので

$$\gamma_{\beta n}^2 = \left(\frac{c}{\beta_n}\right)^2 - 1 < 0, \quad B_n = 0 \cdots \quad (11)$$

を満足する c の値を決定しなければならない。すなわち、基盤面においては(7)は

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\dot{v}_{n-1}}{c} \\ \tau_{n-1} \end{array} \right\} = \mathbf{a}_{n-1} \mathbf{a}_{n-2} \cdots \mathbf{a}_1 \left\{ \begin{array}{c} \frac{\dot{v}_0}{c} \\ \tau_0 \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\dot{v}_0}{c} \\ \tau_0 \end{array} \right\} \cdots \quad (12)$$

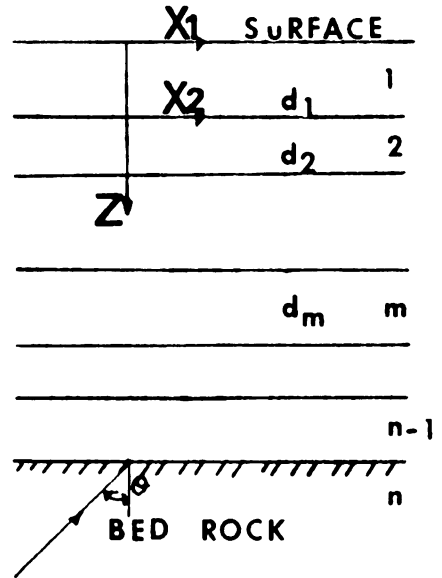


図-1 多層地盤モデル

となるので次に示す固有方程式の解を求めなければならない。

$$F[c(k)] = \mu_n \gamma_{\beta n} A_{11} + A_{21} = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

上式は、波長 $L = 2\pi/k$ によって位相速度が異なる事を示している(分散性)。なお、二層地盤では(13)式は容易に

$$\tan k d_1 \sqrt{\left(\frac{c}{\beta_1}\right)^2 - 1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{c}{\beta_2}\right)^2}{\left(\frac{c}{\beta_1}\right)^2 - 1}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

と書き換える事が出来る。

分散性を有する波の群速度は

$$U = \frac{\delta p}{\delta k} = c + k \frac{\delta c}{\delta k} \quad \dots\dots\dots (15)$$

から求める事が出来るが、ここでは、数値微分による計算誤差を避けるためにエネルギー積分法を用いて求める。(1)の微分方程式は

$$c^2 k^2 I_1 - k^2 I_2 - I_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$I_1 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} \rho_m V_m^2(z) dz \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$I_2 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} \mu_m V_m^2(z) dz \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$I_3 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} \mu_m \left[\frac{dV_m}{dz}(z) \right]^2 dz \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$V_m(z) = A_m e^{-ik\gamma_{\beta m} z} + B_m e^{ik\gamma_{\beta m} z} \quad \dots\dots\dots (20)$$

(16)式のエネルギー方程式と同値であるので、 k と c の変分 $\delta k, \delta c$ を考える事により、群速度 U は

$$U = \frac{I_2}{c I_1} \quad \dots\dots\dots (21)$$

と決定する事が出来る。

2.2 P 波, SV 波, Rayleigh 波

P 波, SV 波, Rayleigh 波の基本微分方程式は変位ポテンシャル φ と ψ を用いて

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \alpha_m^2 \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], \quad \left(\alpha_m^2 = \frac{\mu_m + \lambda_m}{\rho_m} \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \beta_m^2 \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right], \quad \left(\beta_m^2 = \frac{\mu_m}{\rho_m} \right) \quad \dots\dots\dots (23)$$

と表わすことができ、その時の変位と応力も

$$\begin{aligned} \frac{\dot{u}}{c} = & -\frac{\alpha_m^2}{c^2} [(A_m + B_m) \cos k \gamma_{\alpha m} z - i(A_m - B_m) \sin k \gamma_{\alpha m} z] \\ & - \gamma_{\beta m} \gamma_m [(C_m - D_m) \cos k \gamma_{\beta m} z - i(C_m + D_m) \sin k \gamma_{\beta m} z] \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{w}}{c} = & -\gamma_{\alpha m} \frac{\alpha_m^2}{c^2} [(A_m - B_m) \cos k \gamma_{\alpha m} z - i(A_m + B_m) \sin k \gamma_{\alpha m} z] \\ & + \gamma_m [(C_m + D_m) \cos k \gamma_{\beta m} z - i(C_m - D_m) \sin k \gamma_{\beta m} z] \quad \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z = & -\rho_m \alpha_m^2 (\gamma_m - 1) [(A_m + B_m) \cos k \gamma_{\alpha m} z - i(A_m - B_m) \sin k \gamma_{\alpha m} z] \\ & - \rho_m c^2 \gamma_m^2 \gamma_{\beta m} [(C_m - D_m) \cos k \gamma_{\beta m} z - i(C_m + D_m) \sin k \gamma_{\beta m} z] \quad \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

$$\tau_{zx} = \rho_m \alpha_m^2 \gamma_m \gamma_{\alpha m} [(A_m - B_m) \cos k \gamma_{\alpha m} z - i(A_m + B_m) \sin k \gamma_{\alpha m} z]$$

$$-\rho_m c^2 \gamma_m (\gamma_m - 1) [(C_m + D_m) \cos k \gamma_{\beta m} z - i(C_m - D_m) \sin k \gamma_{\beta m} z] \quad \dots\dots\dots (27)$$

と導くことが出来る。

ここで $\gamma_{am}^2 = c^2/\alpha_m^2 - 1$, $\gamma_m = 2\beta^2/c^2$ である。

2.1 同様に各層境界での変位, 応力は

$$\begin{Bmatrix} \dot{u}_m/c \\ \dot{w}_m/c \\ \sigma_m \\ \tau_m \end{Bmatrix} = \mathbf{a}_{m-1} \mathbf{a}_{m-2} \dots \mathbf{a}_1 \begin{Bmatrix} \dot{u}_o/c \\ \dot{w}_o/c \\ \sigma_o \\ \tau_o \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (28)$$

のように伝達関数表示される。ここで σ_m と τ_m はそれぞれ σ_z と τ_{yz} を表わしている。

P波, SV波が基盤から θ の角度で入射してくる時には, 位相速度 c はそれぞれ,

$$c = \frac{\alpha_m}{\sin \theta}, \quad c = \frac{\beta_m}{\sin \theta} \quad \dots\dots\dots (29)$$

と決定される。

Rayleigh波が存在するためには,

$$(J_{11} - J_{21})(J_{32} - J_{42}) - (J_{12} - J_{22})(J_{31} - J_{41}) = 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

を満足する k , c の値を決定すればよい。但し J_{ij} は $\mathbf{J} = \mathbf{E}_n \mathbf{a}_{n-1} \mathbf{a}_{n-2} \dots \mathbf{a}_1$ から求まる行列の要素であり, $\mathbf{E}_n$ は基盤層に対する (24)~(27) において $z=0$ とした時の係数行列である。すなわち,

$$\begin{Bmatrix} \dot{u}_{n-1}/c \\ \dot{w}_{n-1}/c \\ \sigma_{n-1} \\ \tau_{n-1} \end{Bmatrix} = \mathbf{E}_n \begin{Bmatrix} A_n + B_n \\ A_n - B_n \\ C_n - D_n \\ C_n + D_n \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (31)$$

また, Rayleigh波のエネルギー方程式は

$$k^2 c^2 I_1 - k^2 (I_2 + I_5) + k(I_3 + I_6) - (I_4 + I_7) = 0 \quad \dots\dots\dots (32)$$

でありその群速度は次式によって求まる。

$$U = \frac{\delta p}{\delta k} = \frac{2k(I_2 + I_5) - (I_3 + I_6)}{2kcI_1} \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここで

$$I_1 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} \rho_m [U_m(z)^2 + W_m(z)^2] dz \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$I_2 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} \lambda_m U_m(z)^2 dz \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$I_3 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} 2\lambda_m U_m(z) \frac{dW_m}{dz}(z) dz \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$I_5 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} \mu_m [2U_m(z)^2 + W_m(z)^2] dz \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$I_6 = \sum_{m=1}^n \int_0^{d_m} 2\mu_m W_m(z) \frac{dU_m}{dz}(z) dz \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$u_m = -i U_m(z) e^{i(pz - kx)} \quad \dots\dots\dots (39)$$

$$w_m = W_m(z) e^{i(pz - kx)} \quad \dots\dots\dots (40)$$

3. 数 値 解 析

3.1 地盤構成および強震記録

厚岸大橋の近傍地盤において強震計が設置されている地盤の土質柱状図を図-2に, また計算に用いた弾性定数を表-1に示した。図-2の柱状図に見る通り, 当該地盤は, N値0~10の粘土

層とN値10~25の砂層が互層となっているいわゆる軟弱地盤である。一応の支持基盤と見られる層は-60m地点にあるN値が50を越える泥岩層である。本地盤においては, S波速度 β の測定は行っていないので β の値はせん断ヤング係数 μ とN値の関係, あるいは代表的な記録波を用いたSHAKEプログラムによる解析結果等を

参考にして推定したものである。P波速度の α については、架橋時に調査した結果を用いた。なお、 α と β の値から決定されるポアソン比の値は基盤を除き0.47~0.49となっている。

表-2は解析に使用した強震記録の地震諸元である。Aの地震は昭和48年6月17日の根室半島沖地震である。震央が橋軸に対しほぼ真横位置となっている。Bの地震は昭和53年12月のエトロフ沖地震であるがその震央は橋軸に対し約45°傾いた方向にある。地震の強さとしては、ともにマグニチュードが7を越える大地震である。

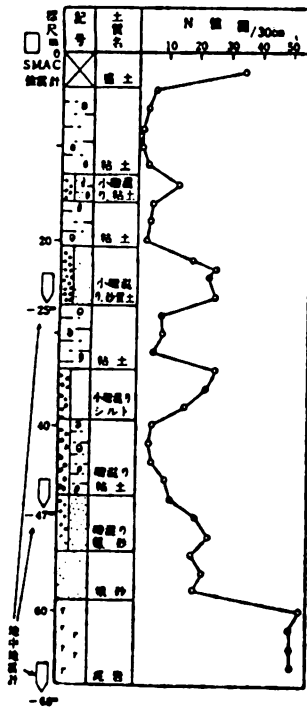


図-2 土質柱状図

表-1 弾性定数

NO	$d_m(m)$	$\beta_m(m/s)$	$\rho_m(g/cm^3)$
1	3.0	140.0	1.8
2	10.0	65.0	1.8
3	3.0	155.0	1.8
4	5.0	105.0	1.8
5	4.0	275.0	1.8
6	2.0	290.0	1.8
7	7.0	215.0	1.8
8	5.0	340.0	1.8
9	8.0	255.0	1.8
10	12.0	360.0	1.8
11	9.0	1500.0	2.6
12		1500.0	2.6

3.2 S波, Love波, Rayleigh波の挙動比較

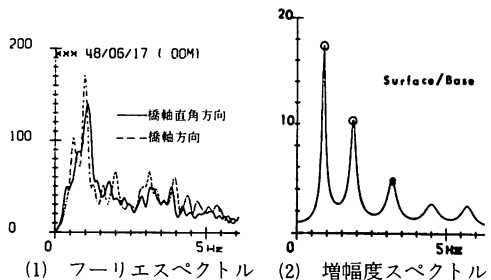
当該地盤におけるS波, Love波およびRayleigh波の挙動特性を知るために、(1)A地震(震央がほぼ真横方向にあるので、もし強震記録中に表面波成分が含まれるとしたならば、Love波が橋軸方向成分に、Rayleigh波が橋軸直角方向成分に含まれると予想される。)の橋軸および橋軸直角方向のフーリエスペクトル、(2)S波の重複反射理論から求められる地表/基盤の増幅度スペクトル、(3)Love波の分散曲線、(4)Rayleigh波の分散曲線を図-4に示した。

表-2 解析に用いた強震記録の諸元

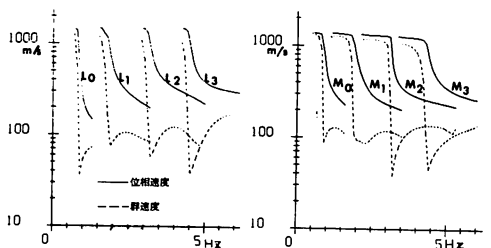
記号	年月日	地震名	M	震央距離	震源深さ
A	48・6・17	根室半島沖	7.4	90km	40km
B	53・12・6	エトロフ沖	7.7	250	100



図-3 震央分布



(1) フーリエスペクトル (2) 増幅度スペクトル



(3) Love波分散曲線 (4) Rayleigh波分散曲線

図-4

フーリエスペクトル図において、およそ 0.9 Hz, 1.9 Hz そして 3.2 Hz 付近に卓越が見られるが、これらは(2)の増幅度スペクトル図において地表の基盤に対する増幅度が極大となる周波数と一致し、あるいは、(3)(4)の分散曲線図において Love 波および Rayleigh 波の群速度を極小にする周波数にほぼ対応している。この事は、当該地盤においては、S 波、Love 波そして Rayleigh 波が、ともに同じような周波数成分の波で卓越し地盤動に大きな影響を与える事を意味している。

図-5は図-6の各図の基本モードにおいて極値を与える 0.9 Hz 成分に対し、この成分波が S 波、Love 波あるいは Rayleigh 波であると仮定した時の地盤内に生じる変位、応力振幅の深さ方向分布を示したものである。(1)(2)は地盤の各深さ位置における変位 $u(z)$, $v(z)$ を地表変位 $u(0)$, $v(0)$ との比で表わしたものであり、(4)は地表変位 $v(0)$ を 1 とした場合の τ_{yz} (全層厚 $H=(n-1)\Sigma d_i$ とせん断ヤング係数 μ で無次元化) の分布である。(1)(2)から、当該地盤においては 0.9 Hz 成分の SH 波と Love 波、SV 波と Rayleigh 波では、その変位分布にほとんど差異を生じていない事がわかる。これは、0.9 Hz に対する Love 波、Rayleigh 波の位相速度 c が基盤層を除いて各層の S 波速度 β より大きいために (図-4 (3)(4)参照) 変位振

幅が指数関数的に減少するのが基盤層のみである事によると考えられる。例えば、Love 波の 0.9 Hz 成分に対する位相速度は 450 m/s であるが、この位相速度 c に対して基盤層を除いて $\beta < c$ であるので、0.9 Hz 成分の波は地盤内を S 波と同じに反射、屈折を繰り返している。図-6に、基盤から 45° の方向で入射した SH 波と、上に述べた 0.9 Hz 成分の Love 波の反射、屈折の方向を示した。

Love 波の位相速度が小さい 1.3 Hz 成分に対する $v(z)/v(0)$ の分布を図-5(3)に示した。この時の位相速度 ($c=147$ m/s) では、基盤以外にも多くの地盤内において変位振幅が指数関数的に減少するが、この周波数成分は当該地盤においては卓越しないため、地盤動に与える影響は小さいものと思われる。

図-5においては、ある特定の周波数成分に対する変位の深さ方向分布を検討したが、こんどは逆に、ある深さ位置における各周波数成分に対する変位振幅の特性を調べてみたのが図-7である。図-7の(1)(2)はそれぞれ、強震計の設置されている -25 m, -47 m 地点における (1) SH 波と Love 波の $v(z)/v(0)$, (2) SV 波と Rayleigh 波の $u(z)/u(0)$ の値を各周波数成分に対して示したものである。ここで、SH 波と SV 波はともに鉛直下方向から入射してくる波であり、実線で Love 波と Rayleigh 波を、破線で S 波を表わしている。図-7を見ると、Love 波あるいは Rayleigh 波の基本および 1 次モードにおいて群速度を極小にする 0.9 Hz および 1.9 Hz 付近においては、 $v(z)/v(0)$ と $u(z)/u(0)$ の値が実体波と表面波がともに同じような値になっている事がわかる。

以上の解析によって、当該地盤のように、振動インピーダンスの大きい基盤の上に振動インピーダンスの小さい軟弱層があるような地盤においては、特にその地盤動に大きな影響をもつ周波数範

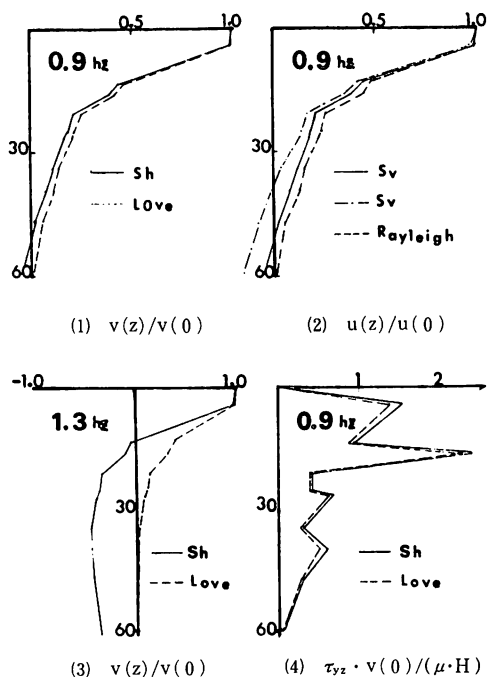


図-5

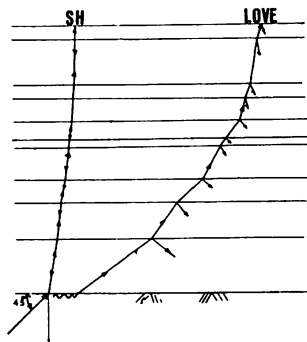


図-6 SH 波と LOVE 波の進行方向

図に対して、実体波と表面波とが類似した挙動を示す事が推察される。この事をより簡単なモデル地盤を用いて検証してみたい。計算に用いたモデル地盤は図-8に示す通りに表層と基盤の二層からなり、モデルⅠは振動インピーダンス比が小さく、モデルⅡは振動インピーダンス比が大きいものとなっている。

このモデル地盤のS波の卓越周波数は0.5Hz, 1.5Hz……となる。また図-9に示す通りに、Love波の群速度が極小となるのは、モデルⅠでは1.3Hz, 3.0Hz…であり、モデルⅡでは0.6Hz, 1.7Hz……となり、モデルⅡの地盤においてS波とLove波がより似た周波数で卓越する事がわかる。図-7と同様にして、モデル地盤中の中点 ($z=25\text{m}$) における $v(z)/v(0)$ の値を各周波数成分に対して求めたのが図-10であるが、振動インピーダンス比の大きいモデルⅡの地盤において、0.5Hzあるいは1.5Hz近傍でのS波と

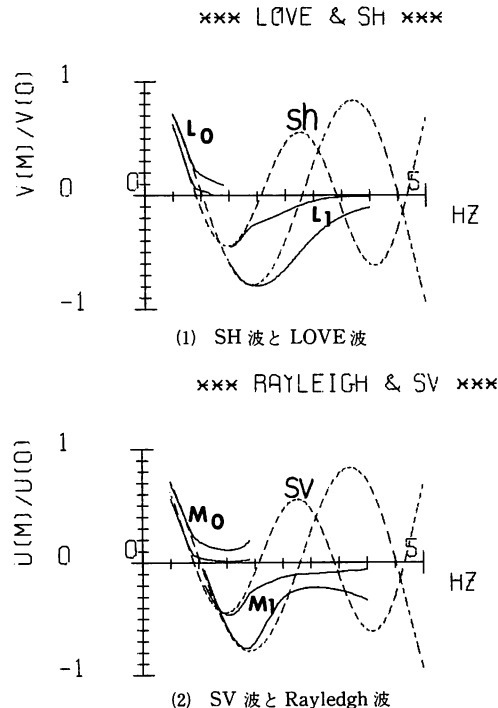


図-7 変位振幅特性 (厚岸)

Model I	Model II
50_m	50_m
$\beta_1=100$	$\beta_1=100$
$\beta_2=120$	$\beta_2=100\sqrt{8}$

図-8 モデル地盤

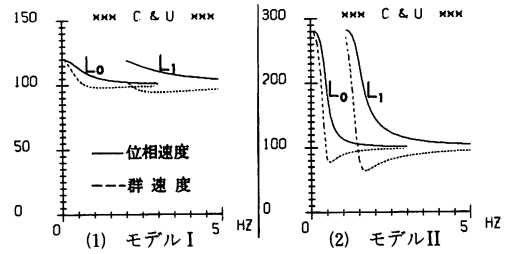


図-9 モデル地盤のLove波分散曲線

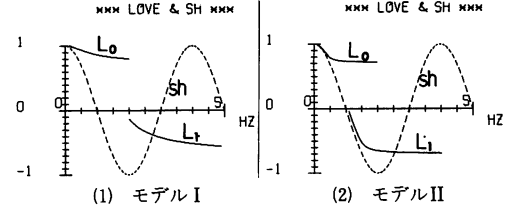


図-10 モデル地盤の変位振幅特性

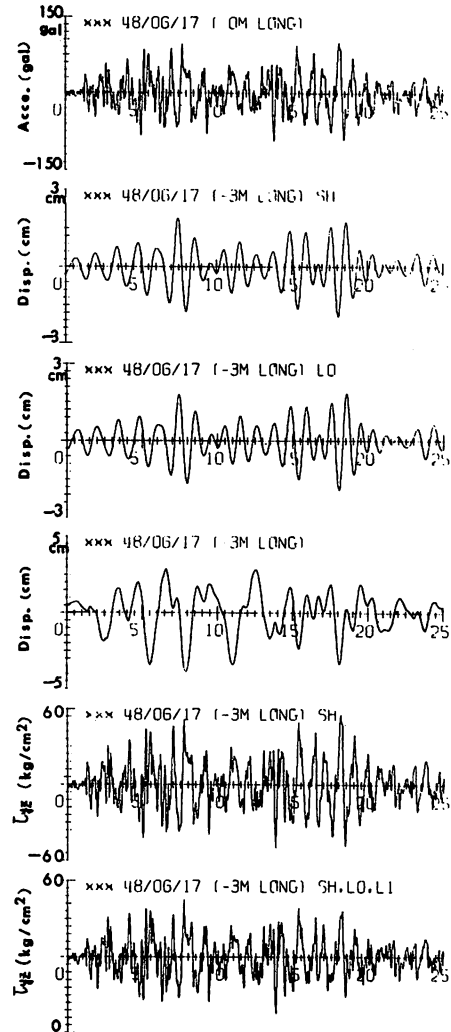


図-11 SH波とLove波の挙動比較

Love 波の挙動の類似が見られる。

実際に観測された地震記録 A (図 11-(1)) を用いて上に述べた事を検証したのが図-11 の(2)~(4)である。(2)(3)は全周波数成分のうち L_0 の主要部分 (0.7~1.3 Hz) だけを取り出して、それらが(2) SH 波, あるいは(3) Love 波であるとして地中-3 m 地点での変位の経時変化を示したものである。両者の差異は(最大-最小)で約 2% である。これは, L_0 成分の主要部分において, S 波と挙動特性の異なる成分の地盤変位に与える影響は小さい事を意味している。(4)の図は, 全周波数成分が SH 波であるとした場合と, L_0, L_1 成分 (1.6~3.2 Hz のみ) だけが Love 波であるとした場合の変位波形を同一面上に重ね書きしたものであるが, 図上からは両者の差異は認められない。

応力分布についても, 図-5 (4)から変位同様の傾向を知る事が出来るが, 変位に比べ, SH 波と Love 波の差異は大きい。図-11 の(5)(6)は地中-3 m 地点における τ_{yz} の経時変化を(4)と同じようにして比較したものである。全周波数成分が SH 波 (鉛直下方入射) とした(5)の方が, (6)に対し (最大-最小) の値で約 20% 大きくくなっている。

図-12 は, 0.7~1.3 Hz 成分だけを取り出して, それらが(1)基盤面と 45° の角をなして入射する SH 波, あるいは(2) Love 波であると仮定した時の τ_{xy} の経時変化である。鉛直下方から入射する SH 波では常に $\tau_{xy} = 0$ となる性質のものであり, その大きさも τ_{yz} に比べ小さいが, Love 波と仮定した(2)の波形において, 表面波成分の特徴である波群を明瞭に見られるのは興味深い。

以上の結果から, SH 波と Love 波に関しては, 当該地盤のように, 基盤との振動インピーダンスの差が大きい地盤においては, 地震波の挙動は,

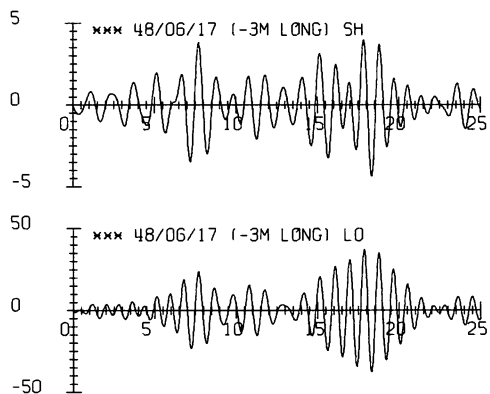


図-12 SH 波 (45°入射) と Love 波の τ_{xy}

鉛直下方に伝播する SH 波であると仮定しても誤差は小さいものと判断されるが, これを, 地表と地中において同時に記録を得ている地震 B の強震波形を用いて実測値との比較を通して検証したのが図-13 である。図-13 の(1)~(4)は, 地表で観測された(1)の波形 (震央と観測値を結ぶ線分の法線方向成分) を入力として, 鉛直に伝播する S 波の重複反射理論を用いて, 地中-25, -47, -68 m の各地点の変位波形を計算すると同時に, 各地点で観測された強震記録からも変位波形を求めそれらを比較したものである。各深さ位置で必ずしも合致しているとは言えないが, 全体的な波形の動き, あるいは比較的合っているものと言える。

4. あ と が き

いわゆる軟弱地盤である厚岸大橋近傍地盤で観測された強震記録の解析を通して以下の事が明らかになるとともに多くの課題が今後に残された。

(1)前報告の RES や今回の τ_{xy} の波形に見られるように, 観測された強震記録中には表面波成分が含まれている。しかしながら, 本研究においては, その分析は未だ不十分である。特に, 地表記

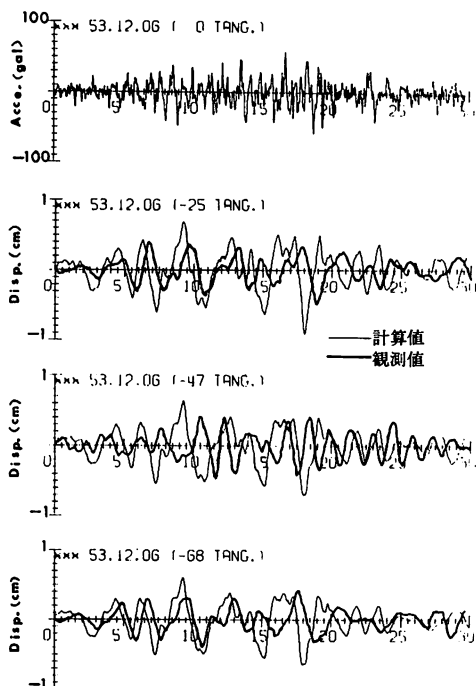


図-13 SH 波理論による計算値と観測値の比較

録だけではなく地中で得られた記録についても検討を加え、分散性の相違などを明らかにしていかなければならない。

(2)当該地盤のように、基盤に対する振動インピーダンス比の大きい地盤構造においてはS波の卓越する周波数と表面波の群速度が最小となる周波数とが近くなり、しかもそれらの周波数付近においてはS波と表面波の挙動が類似している事が明らかになった。すなわち、このような地盤においては、地盤中の地震波の挙動は鉛直に伝播するS波であるとしてもその誤差は小さい事を示した。しかしながら今回の研究の大部分はS波とLove波の関係についてであり、S波とRayleigh波の関係については、未だ十分な議論がなされていないので今後さらに検討して行きたい。

最後に、本研究の実施にあたっては、強震観測あるいは波形解析において北海学園大学早川寛先生に負うところが大きいことを述べ、ここに深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) Haskell ; The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 43, 1953
- (2) Gazetas et al ; Shear and Rayleigh Waves in Soil Dynamics, ASCE, Vol. 105, GT12, DEC. 1979.
- (3) Snabel et al ; SHAKE, A Computer Programm For Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site ; Coll. Eng. Univ. Calif. Berk., No. EERC 72-12, Dec. 1972
- (4) 佐藤；弾性波動論，岩波書店，1978
- (5) Brekhouskikh : Waves in Layered Media Academic Press, 1980
- (6) Ewing et al ; Elastic Waves in Layered Media, Frank Rress, 1957
- (7) 神山；地震時における地盤内の応力，ひずみの評価，土木学会論文報告集，第250号，1976
- (8) 鳴；強震記録に見られる表面波成分，第3回地震工学シンポジウム論文集，1970
- (9) 中辻，芳村他；北海道東部において観測された強震記録について(1)(2)；土木学会学術講演会概要集，1980，1981
- (10) 中辻，芳村，早川；厚岸大橋地盤における強震記録の解析について，土木学会北海道支部論文報告集，第36～37号，1980～1981
- (11) 芳村，中辻；厚岸大橋近傍地盤において観測された強震記録の特性について，第16回地震工学研究発表会，1981
- (12) 中辻，芳村；厚岸大橋近傍地盤において観測された強震記録の特性(1)，苫高専紀要第16号，1981
(昭和56年11月30日受理)

