

自然地震と人為加振による地盤の 振動特性について

吉川 宗治・島 通保・入倉孝次郎

VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF THE GROUND BY THE OBSERVATION OF NATURAL EARTHQUAKE AND BY THE USE OF OSCILLATOR

By Soji YOSHIKAWA, Michiyasu SHIMA, Kojiro IRIKURA

Synopsis

Vibration characteristics of the ground was investigated from the observation of natural earthquakes and the results of vibrational tests of an oscillator by measuring the oscillational mode of seismographs situated on the ground surface and in a drift.

Fourier components were obtained in the case of seismograms of natural earthquakes and the amplitude-frequency relation for a constant vibrational force in the case of vibrational tests.

The ground structure is rather complicated, however, the amplitude and phase distributions at each measuring point (on the ground surface and in drift) coincide well with that of theoretical calculation in regards to the ground structure and spectrum of the place.

1. 序 論

同じ地震でも観測地点が異なると、その地点の地下構造によって、異なった地震動が得られることはよく知られている。これは地盤のもつ、地下構造に対応した固有の卓越周期や、レスポンス・スペクトルによるものであることが、いろいろな人によっていわれ^{1)~3)}、理論的には、地震波の、特に垂直に入射するS波の表層での多重反射によるものとして、無限調和波を用いて計算されている。Field の観測としては、常時微動や自然地震の記録から、周波数頻度分布やフーリエ・スペクトルが求められ^{4)~6)}、地盤はその地下構造の物理的性質(S波速度、密度、剛性率、粘性)や表層の厚さに応じた、固有のスペクトルを有することが研究されている。

地下構造や岩盤によるこの地震の震動特性の違いは、大きな地震にみまわれた時の被害の大きさに密接に関連し、また地盤の動力学的な特性として、この震動スペクトルを得ることは、耐震工学上重要な意味をもつことが明らかになってきている。

従来、現実の地盤の固有震動の特性を調べるのに、ほとんど地表の地震動の観測についてのみ行なわれてきた。表層の地盤構造が簡単で、基盤より上に一層あるいはせいぜい二層程度の明瞭な層があるような場合であれば、地表観測のみで、地下構造より地表での地盤の震動特性を説明することができる。しかし地下構造が複雑になり、地表から基盤までの層構造が、三層以上の平行層から成っている場合、地表や境界面が傾斜している場合、層から層へ移るのが漸次的に変化していて、層の境界面が明瞭でない場合などでは、地表の震動特性を地下構造によって説明することの困難なことが多く、したがって地中の震動の模様を調べるこ

とが必要になってくる。

また構造物の構築の基盤がほとんど地表近くに限られているのであれば、地表の震動特性のみ明らかであればよいが、構造物の下部構造が地中かなりの深さまで達する様な場合には、地中深部に至る震動特性も調べて、震動の大きさや位相の地点間の差異も、はっきりさせておく必要がある。

以上のような観点から、筆者らは地表はもとより、地下40mの地点までの各点の震動も記録し、解析を行なうことにした。しかしながらここで一つ問題になるのは、我々の求めているのは自然地震動に対する地盤の震動特性である。表層に置かれた地震計による地震動の周波数特性を $U(\omega)$ とし、 $O(\omega)$ 、 $Q(\omega)$ 、 $G(\omega)$ をそれぞれ地震の震源の震動特性、 $path$ として通ってくる $crust$ の震動特性、および観測点の地下構造による震動特性とすると

$$U(\omega) = O(\omega) \cdot Q(\omega) \cdot G(\omega)$$

であるから、 $G(\omega)$ を求めるには、地表近くの地下構造の影響を受けない、 $O(\omega) \cdot Q(\omega)$ の形を知らねばならない。それを知るために基盤層における地震波の波形を観測することによって、問題をかなり解決できるわけであるが、少なくとも岩盤下 100m 以上の深さで観測しなければならず、通常極めて困難である。

日立鉾山の坑道を利用して得られた地震記録から、地下数 100m の基盤の地震波のスペクトルは、変位速度一定という結果が報告されているが⁷⁾、一定である周波数の範囲に限られていて、基盤の地震波のスペクトルについては、地震によっても、また震源から基盤までの途中の経路によっても異なるであろうし、未だ不明の点が多い。

このように任意の地点の基盤のスペクトルが得られないのが普通であるから、したがって表層の地震動スペクトルがわかって、ただちに地盤の固有のスペクトルを得ることはできない。このような現状では、通常、変位(速度・加速度)スペクトルを求めて、グラフの山、谷の相対的な関係から、固有周波数を推定するほかない。

ところで、地盤の起振力として人工的な手段を使えば起振力の性質がわかっているの、地盤自体の固有震動を調べるのに都合がよいが、自然地震のような基盤から入射する平面波に対応するものは得られないので、どうしても球面波的な波によって地盤を励起する外ない。この場合発生する波の主成分が入射 S 波に対応する SH 波的なものであって、このような成分の波を測定するようにすれば、地盤の震動特性に間接的ではあるが、有力な資料が得られるものと思われる。以上のような考えに基づいて、自然地震動と加振機による振動の、2つの方法によって、この地点の地盤震動特性を調べてみた。

観測地点は福井県美浜町で、地表と試掘横坑内の地下10mと40mの所に、水平動および上下動の地震計を設置した。観測期間は昭和39年12月から40年7月の間で、得られた自然地震のうち8つを、IBM7090電子計算機を用いて計算したフーリエ・スペクトルと、同一地点で行った地表と坑内に設置した加振機による振動試験により、地盤の振動スペクトルを求めた。別に地震探査およびボーリングで得た地下構造、弾性定数を用いて地盤の振動 $mode$ の様式を、多重反射の理論値と比較し、地盤構造と地盤の振動特性との関係について検討を試みた。

2. 加振機および測定器

自然地震の観測に使用した装置は、固有周期1サイクルの国際機械振動製の地震計を、増巾装置に接続して、最大感度9,000倍に増巾したもので記録の送り速度は2.5cm/secである。変位に関して周波数特性は2~30サイクルまで一定、それ以上あるいはそれ以下の周波数では、急速に感度が落ちる。地震計の感度補正はData処理の際行なった。地震計の配置はFig.1の通りで、S-1は地表、S-2は斜坑内、地下10m、S-3、S-4は横坑内、地下40mの地点にある。S-3には水平2成分、垂直成分の3成分、他は水平1成分のみで、計7つの地震計を設置した。

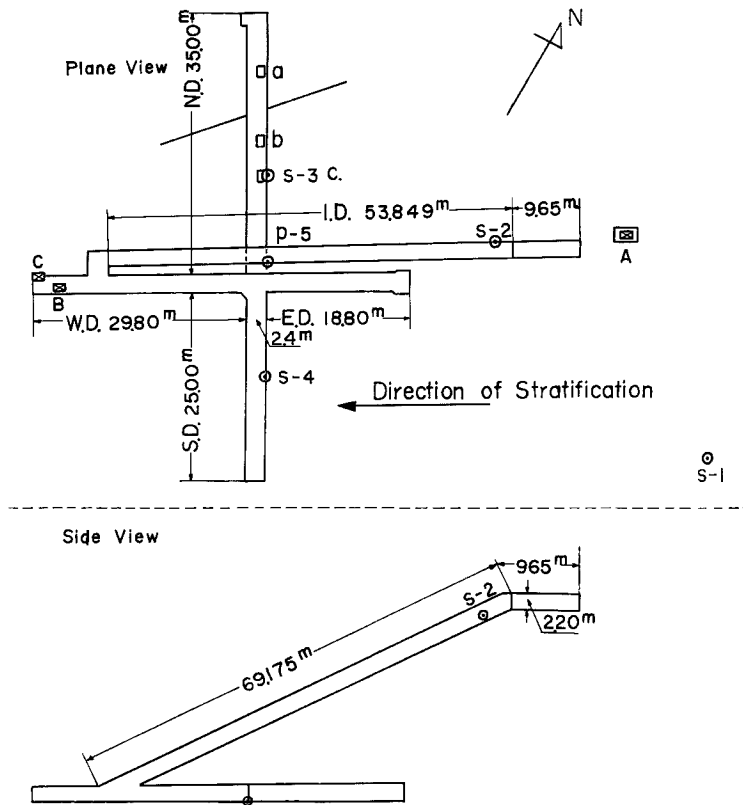


Fig. 1 Plane and side view of drift and the locality of seismo-graphs.

加振機による振動試験の測定は、前記の地震計以外に、同一の型の地震計をFig. 1のa, b, cの3地点に水平2成分づつ設置し、増巾して、Data Recorderで記録した。その変位についての周波数特性は2～100サイクルまで一定である。

加振機はFig. 2のような、間隔2mのコンクリート壁を水平方向に正弦波的に加振し、SH波が伝播する様に考慮した。加振力は $F=286f^2$ 、(f : c. p. s, F : kg 重)で2サイクルから7サイクルでは、1ton から14ton 程度の大きさである。

3. 附近の地層構造

地震探査、およびボーリングの結果得られた附近の地下構造は、Fig. 3に示される。速度分布はP, S波速度を、 V_P , V_S で表わすと、

	V_P (km)	V_S (km)
第一層 表土	0.3～0.8	0.1～0.2
第二層 真砂	1.7	0.5
第三層 風化花崗岩	3.0～3.3	1.0～1.1
第四層 花崗岩	3.8～4.2	1.3～1.6

この地域に分布する花崗岩体は、節理がよく発達しており、

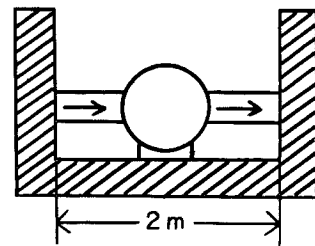


Fig. 2 Oscillator

この節理の卓越している方向は、Fig. 1 の矢印で示されている方向 ($N60^{\circ}E$) になっている。地下40mの横坑は、第四層にあたる花崗岩であるが、この四層目の花崗岩も幾分風化を受けている。坑内に配置したS-3, S-4, S-5の観測点は、風化度が幾分異なり、堅さが異なる岩盤の上におかれている。S-2は真砂のところにおかれている。

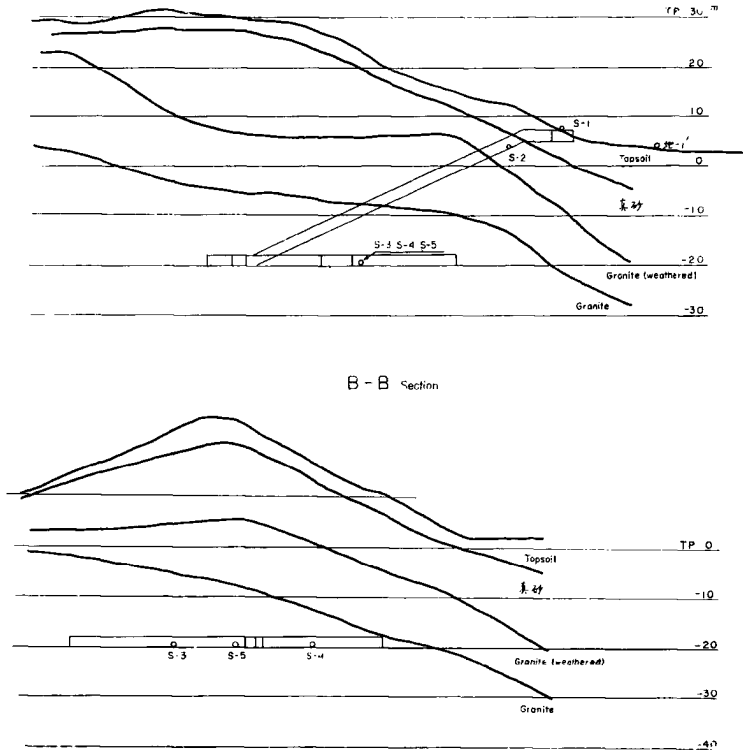


Fig. 3 Outline of geological structure of the neighbouring part of observing stations.

4. 自然地震の解析

得られた自然地震記録の例がFig. 4 に示されている。これは解析に用いたS波部分の記録である。

解析した自然地震をE-1～E-8と名付け、その内、ここでは近地地震E-1からE-5までの解析結果を収録した。E-1, E-2は、 $N30^{\circ}W$ 方向の水平成分(節理直角方向)E-3, E-4, E-5は、 $N60^{\circ}E$ 方向の水平成分をとってあり、震源は、E-1～E-4は琵琶湖西方、E-5は福井県麓北地方である。

解析の方法は地震記録の主要動であるS波部分について読み取り、Fourier 積分を行って、震動の変位の振巾スペクトルと位相スペクトルを求めた。解析する周波数の範囲は、0～25サイクルであるので、波形の振巾を読み取る時間間隔は0.02秒(1秒の間に50個のサンプリング)で、解析の範囲の大きさは地震によって多少異なるが、6.7～12.0秒程度である。

Fig. 5～Fig. 9 までが、その得られたスペクトルで、上の方のグラフが振巾スペクトル、Fの方が位相スペクトルである。Uは表面、S-1, Mは斜坑内、S-2(地下10m)、Lは横坑内S-3, S-4, S-5(地下40m)である。L₃, L₄, L₅は、それぞれS-3, S-4, S-5に応じたものである。

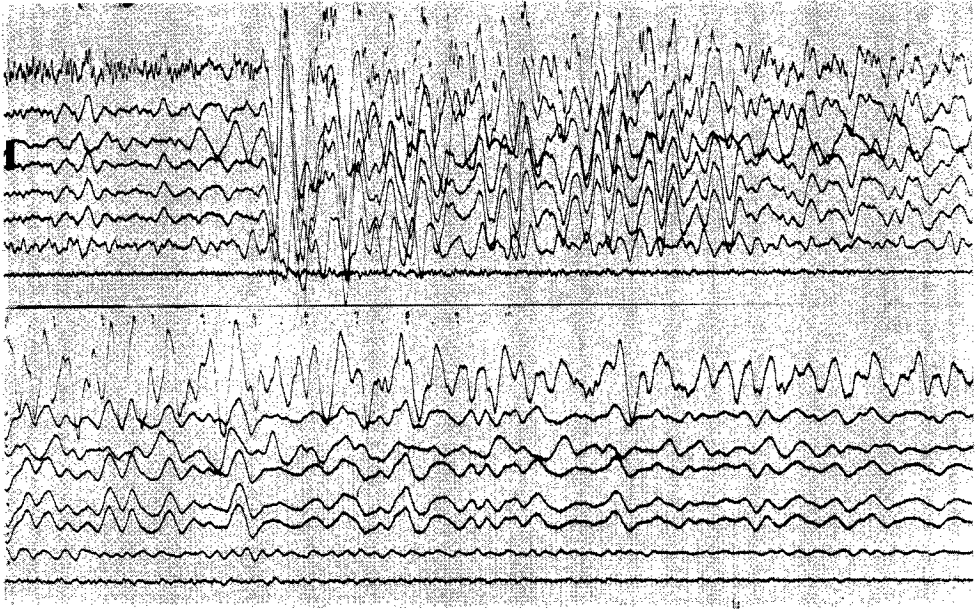


Fig. 4 Examples of the portions (S-wave part) of seismograms of natural earthquakes used in Fourier analysis.

得られたスペクトルをみると振巾は、2サイクル付近では地表も坑内もよく似ていて、スペクトルの振巾の大きさもほとんど変わらないので、層の影響はあまりみられない様にみえる。3～4サイクル付近では、 U 、 M 、 L 共に、それぞれピークがみられるが、 M は L の1.5倍、 U は2倍程度に、表面に近い程大きくなっている。また8サイクル付近の波は、主に、地表で卓越していて、地下では、 $\frac{1}{16} \sim \frac{1}{10}$ 程度に小さくなっている。5サイクル付近では、地表でも地下でもスペクトルが谷になっている。

位相スペクトルは、Fig. 5～Fig. 9 の F の方のグラフで矢印で示してある様に、4サイクルのピークでは U 、 M 、 L 、ともに余り位相のずれはないが、8サイクルでは、 U と M では同位相であるが、さらに地下の L ではしばしば位相が逆転している。

横坑内の S-3、S-4、S-5 の地点は、それぞれ風化度の異なる岩盤になっているが、その堅さによる振巾スペクトルの差は、殆どみられない。S-4、S-5、S-3 の順に岩盤は堅くなっている。

5. 加振機による地震波の解析

加振機による加振は、坑口、坑内で主要節理方向に対して平行、および直角に加振した。得られた記録例は、Fig. 10 に示される。

加振機による波の性質を知るために、その Locus を描いてみた。S-3 地点には、水平2成分、垂直成分の3成分が設置してあるので、その地点における水平面内と垂直面内の Locus が Fig. 11、Fig. 13、Fig. 14 に示される。

Fig. 11 は坑内(地下40m)で加振したものを、殆ど同じ水平面内の坑内で受振したもの(矢印が加振方向)である。これをみると加振方向に平行な方向に振巾は大きく振動し、 z 方向(垂直方向)は非常に小さい。Fig. 13、Fig. 14 は地表加振を坑内で受けたものであるが、やはり同じ様な傾向がみられる。Fig. 12 は他の地点 S-2、S-4、S-5 における二つの記録を用いて位相差から試みに Locus を求めたもので、坑内加振の水平面内の Locus であり、やはり同じ傾向がみられる。(S-2、S-4、S-5 の地点には

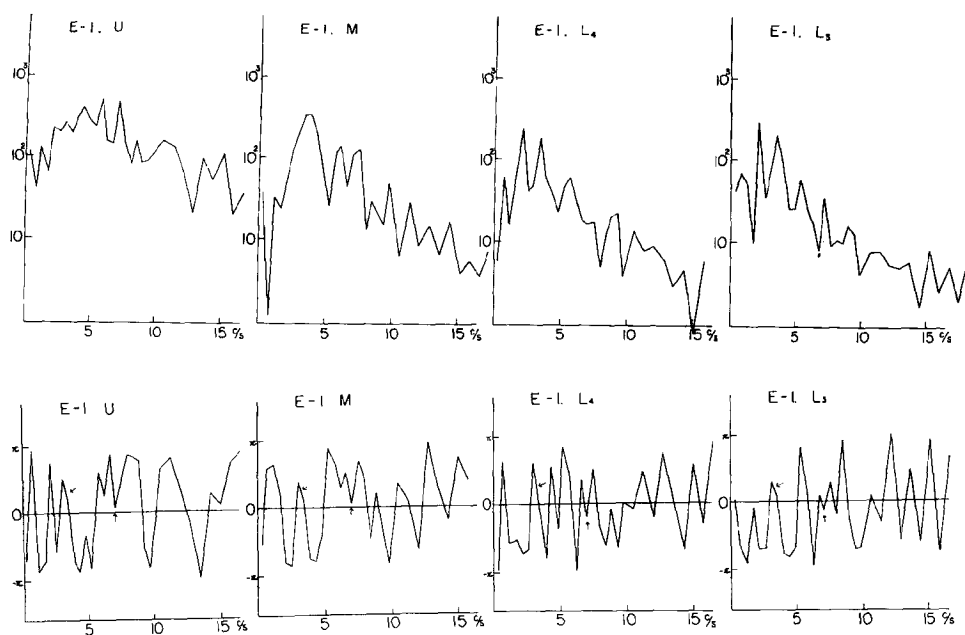


Fig. 5 Upper is amplitude spectra of displacement of No. 1 earthquake and lower is phase spectra.

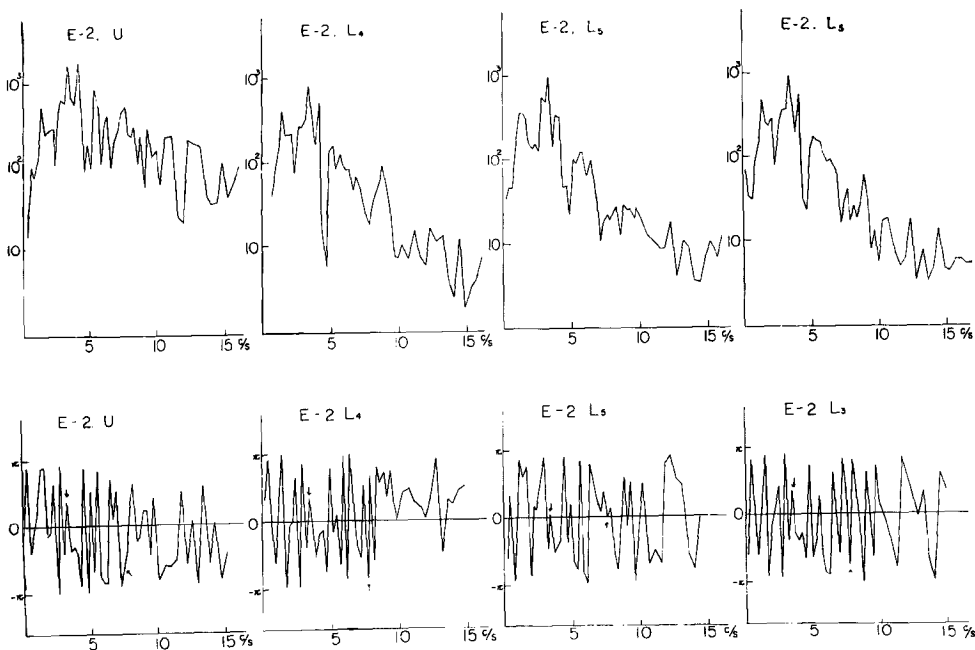


Fig. 6 Upper is amplitude spectra of displacement of No. 2 earthquake and lower is phase spectra.

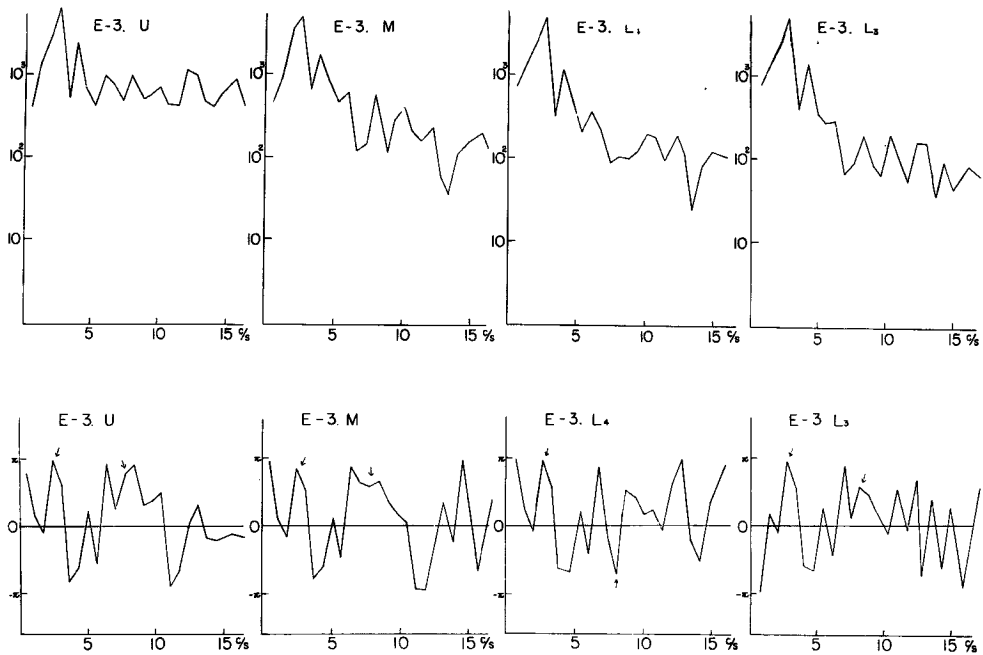


Fig. 7 Upper is amplitude spectra of displacement of No. 3 earthquake and lower is phase spectra.

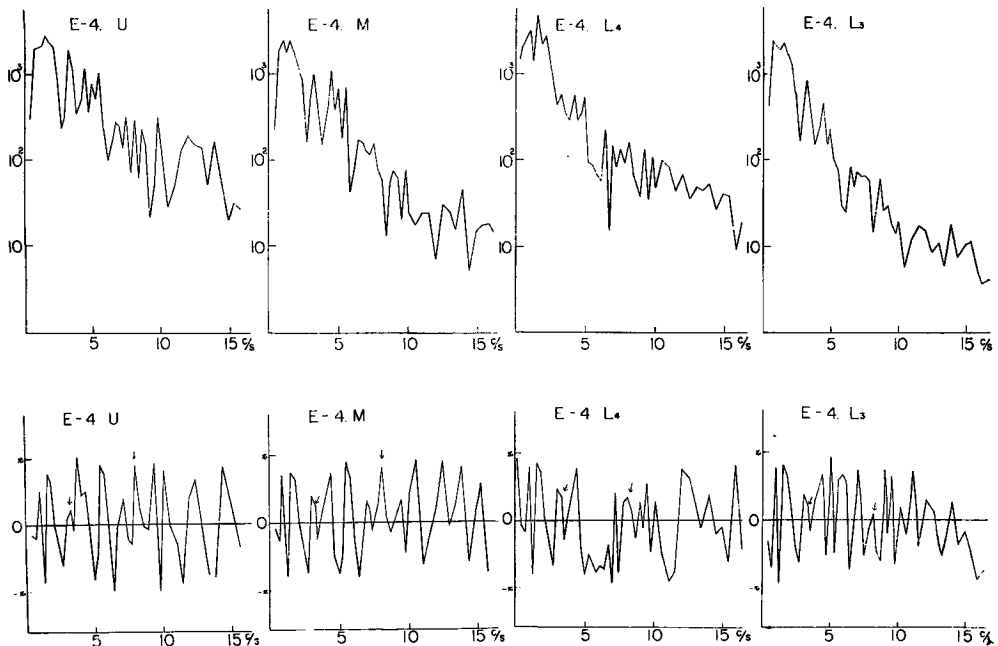


Fig. 8 Upper is amplitude spectra of displacement of No. 4 earthquake and lower is phase spectra.

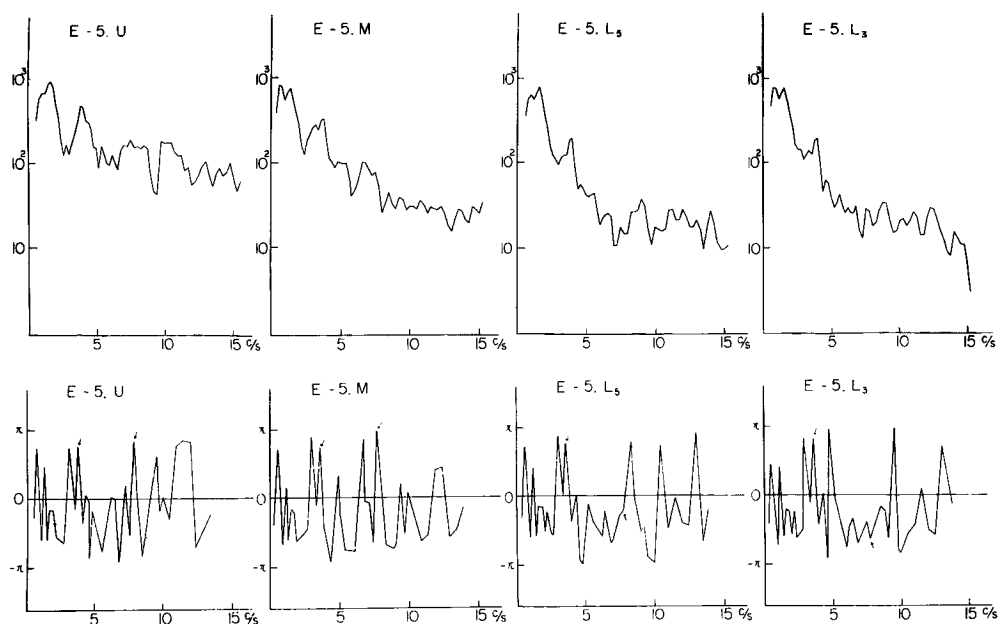


Fig. 9 Upper is amplitude spectra of displacement of No. 5 earthquake and lower is phase spectra.

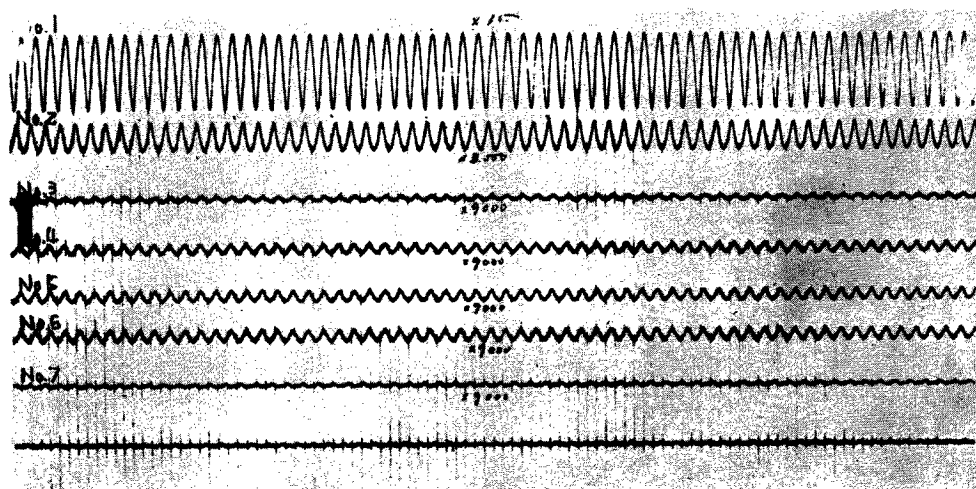


Fig. 10 Example of seismograms of vibration tests by the oscillator.

地震計は1成分しか置いていなかったが、坑内の同一方向の二度にわたる加振に対して、地震計の受振方向を加振方向に対して平行及び直角方向に変えて記録した。）

これらの結果は、無限弾性体内、あるいは自由表面上に、点震源を考えた時の Heelen, P. Aidan⁸⁾ や Cherry⁹⁾ などの研究による SH 波の伝播の Pattern と定性的には、近似的に一致していると考えられる。

Fig. 15 の上の方は、Heelen, P. Aidan により得られた SH 波の伝播による振巾の変化で、下の方が模式化した、震源と地震計の相互位置である。

Fig. 15~18 は、周波数によって異なる加振力を一定に換算して、横軸に周波数、縦軸に変位をとってある。実線は表面加振、点線は坑内加振であり、太線は節理方向加振、細線は節理直角方向加振となっている。

地表加振では、S-1 (U), S-2 (M) の地点は、波が表面波のためか、ピークは明瞭ではない。S-3, S-4, S-5 (L) の地中では、4 サイクルともう一つは7 サイクル前後（加振機的能力上、7 サイクルまでしか加振してないので、確かではないが、7 サイクルで振巾が大きくなっていくことだけは明らかにみられる。）にピークがみられる。5 サイクルでは明瞭な谷がみられる。

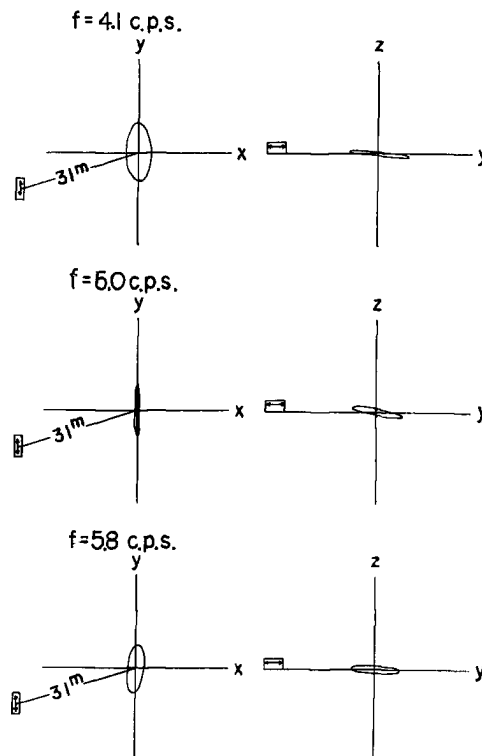


Fig. 11 Loci of oscillation at S-3 (a depth of 40 meters) generated by the oscillator situated in drift. The oscillations were applied to normal to the direction of stratification.

坑内加振の時は、S-1、S-2では、4サイクル、7サイクルにピークがあり、5サイクルに谷があることがはっきりみとめられるが、S-3～S-5は4サイクルのみピークがあらわれ、5サイクルの谷、7サイクルのピークははっきりしない。

これは地表加振では、S-3～S-5の地点の上にある層にエネルギーがたまると、地中40mの加振では、エネルギーはそれより下の層に発散してしまうのだからと思われる。

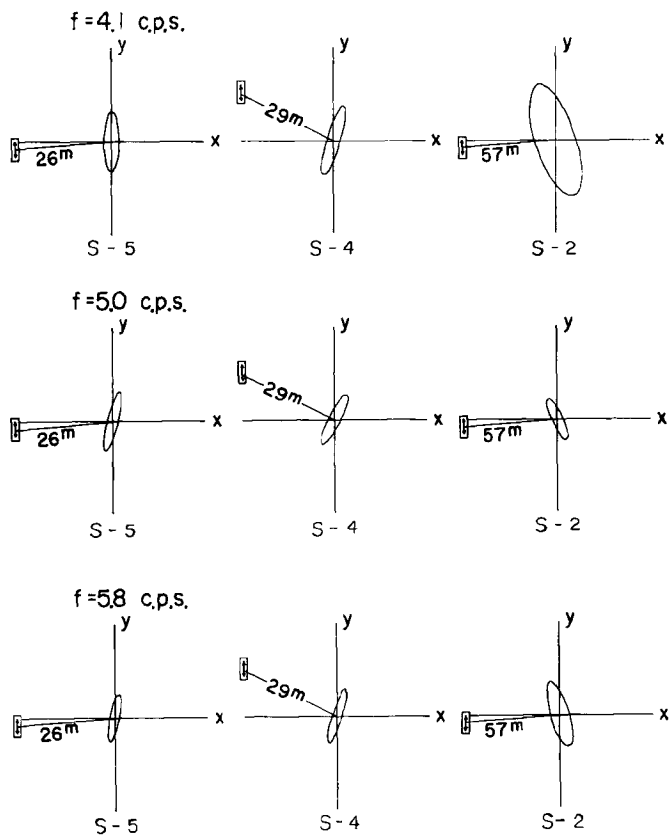


Fig. 12 Loci of oscillation at S-2, S-4, and S-5 generated by the oscillator situated in drift.

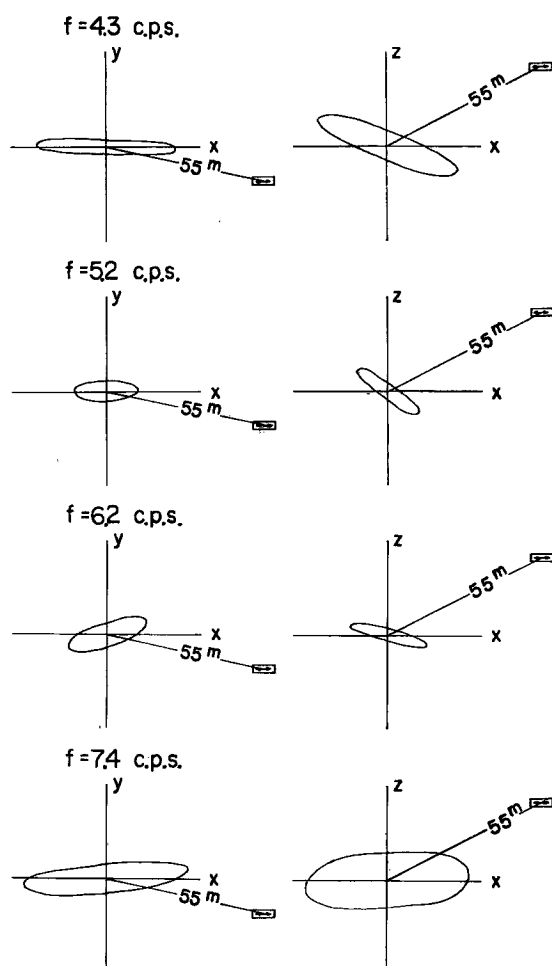


Fig. 13 Loci of oscillation at S-3 generated by the oscillator situated at the ground surface. The oscillations were applied to parallel to the direction of stratification.

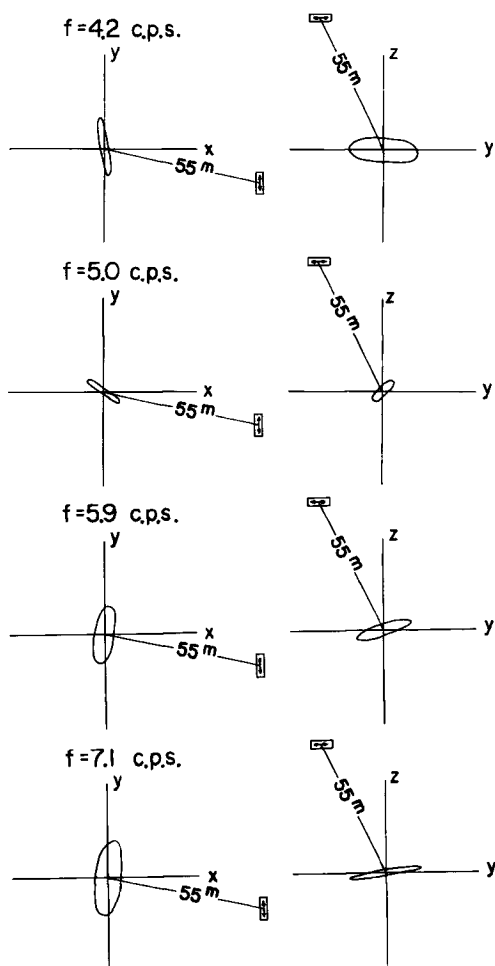


Fig. 14 Loci of oscillation at S-3 generated by the oscillator situated at the ground surface. The oscillation were applied to normal to the direction of stratification.

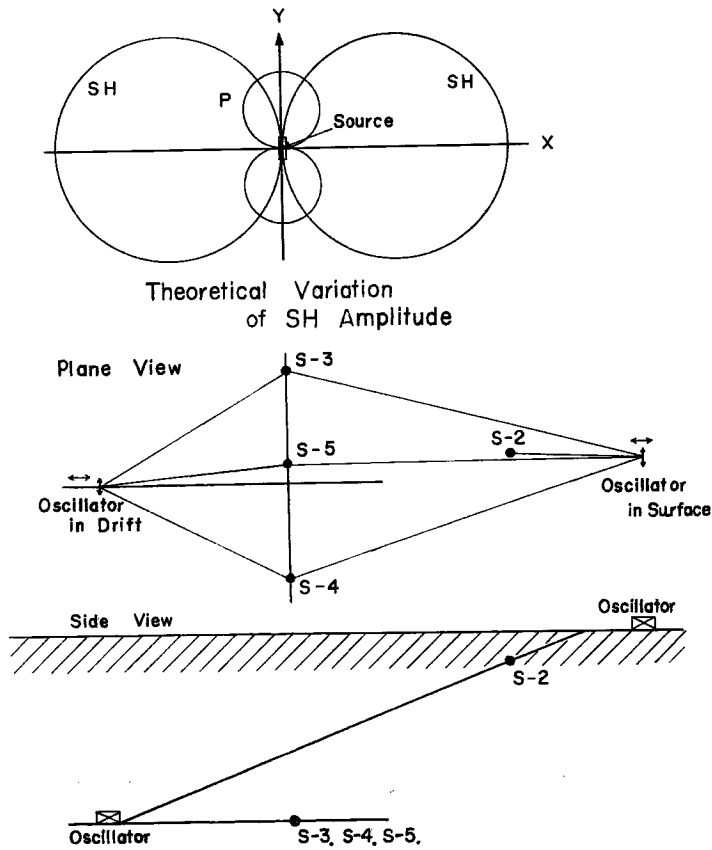


Fig. 15 Upper ; theoretical variation of SH-amplitude radiated by point source in an unbound solid. Lower ; the schematic diagram between the situation of oscillator and that of seismographs.

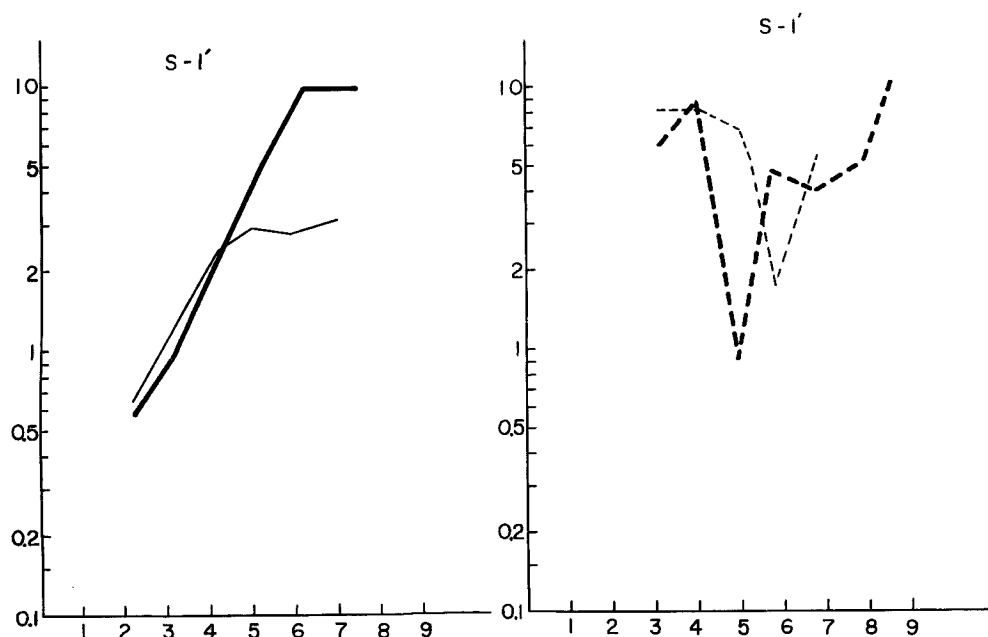


Fig. 16 The amplitude-frequency relation vibration tests of oscillator at S-1.

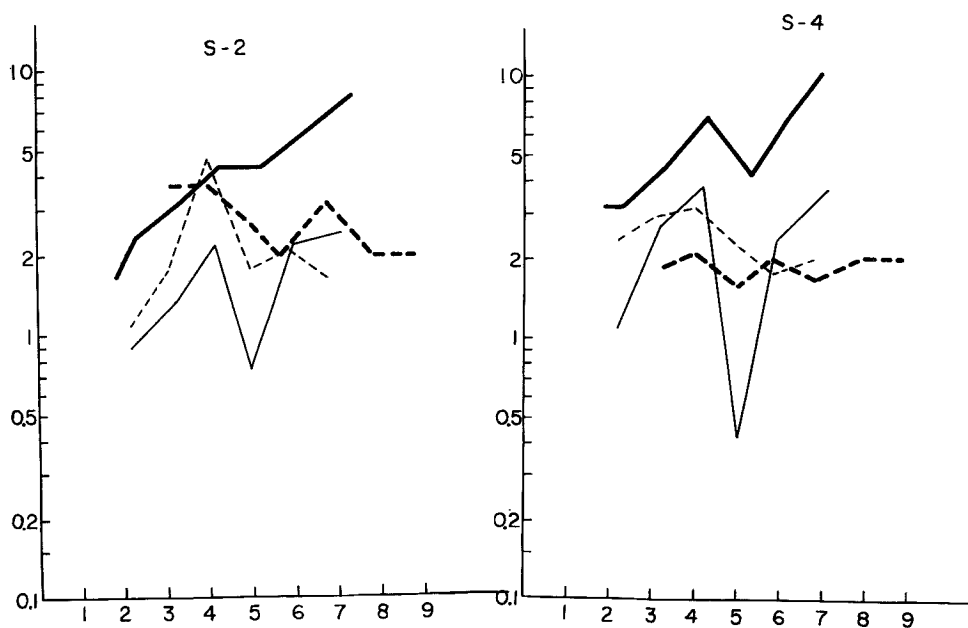


Fig. 17 The amplitude-frequency relation of vibration tests of oscillator at S-2 and S-4.

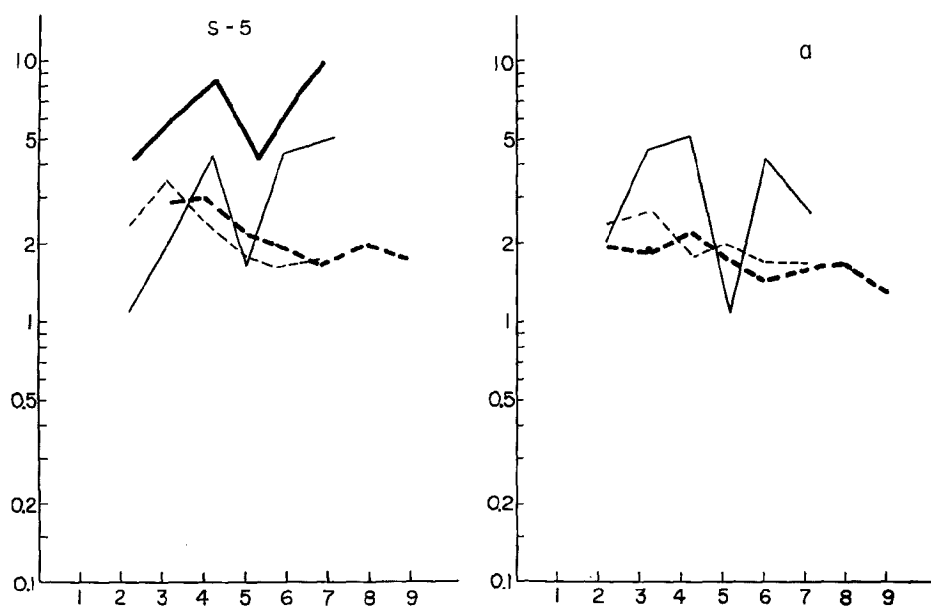


Fig. 18 The amplitude-frequency relation of vibration tests of oscillator at S-5 and a.

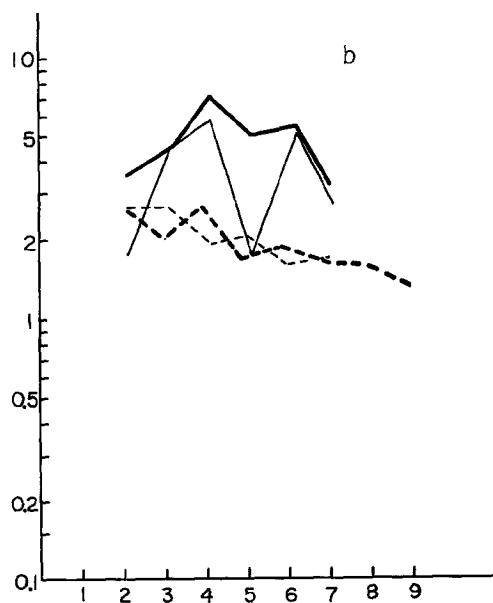


Fig. 19 The amplitude-frequency relation of vibration tests of oscillator at b.

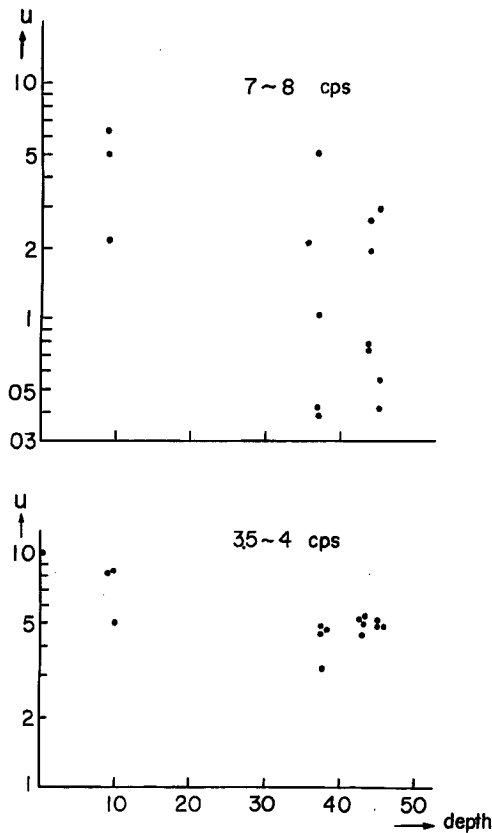


Fig. 20 Amplitude ratio various depth from ground surface. (The case of 3.5~4c.p.s. and 7~8c.p.s.)

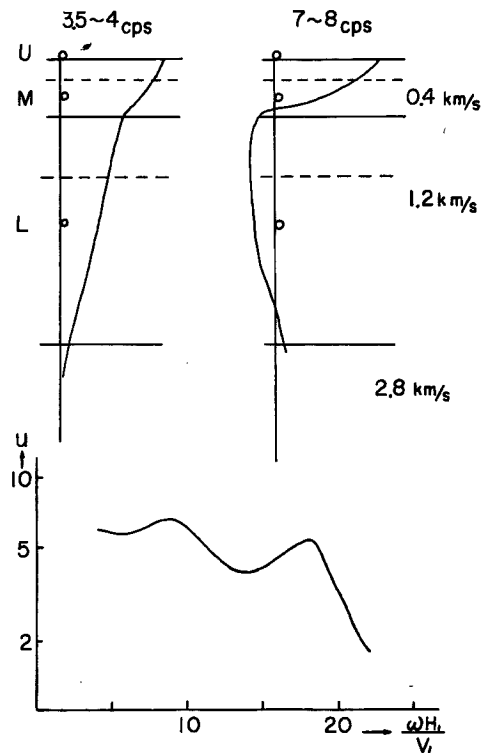


Fig. 21 Upper ; theoretical vibration mode dependent on depth in vicinity of 3.5~4c.p.s. and 7~8c.p.s.
Lower ; theoretical amplitude spectrum of the ground surface.

6. 測定結果の考察と結論

自然地震により得られた振巾スペクトルで、4サイクルと8サイクルのピークの、地表に対する深さによる振巾の大きさの比が Fig. 20 に示される。地表を10にした時の振巾比で、地下10mで8~6、地下40mで5と単調に減少しており、8サイクルでは、M(地下10m)では6~2、L(地下40m)ではかなりばらついているが、1以下が多い。位相は先に述べた様に地表と地中で4サイクルで一致し、8サイクルではM、Lの間で逆転している。以上のことを考えると、8サイクルのピークは、MとLの間にある不連続面に影響され、4サイクルのピークは、それよりかなり下にある不連続面によるものと考えられる。

そこで今三層の水平構造を仮定し、第一層、第二層の厚さ、密度、剛性率、S波速度をそれぞれ、 H_1 , ρ_1 , μ_1 , V_1 , H_2 , ρ_2 , μ_2 , V_2 とする。入射波に無限調和波が鉛直下方から入射してくるとする。入射面を原点0にして、鉛直上方に x をとり、入射波を U_0 、第一層における変位を U_1 、第二層における変位を U_2 、第三層における変位を U_3 として、その実数部分のみを考えると¹⁰⁾

$$U_0 = \cos(pt - f_3 x) \quad (1)$$

$$U_1 = \frac{2R_1}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cos\left(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}\right) \quad (2)$$

$$U_2 = \frac{2R_2}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cos\left(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}\right) \quad (3)$$

$$U_3 = \frac{2P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cos\left(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}\right) \quad (4)$$

そして

$$\left. \begin{aligned} P &= 2\cos \frac{pH_1}{V_1} \cdot \cos \frac{pH_2}{V_2} - 2\alpha \sin \frac{pH_1}{V_1} \cdot \sin \frac{pH_2}{V_2} \\ Q &= 2\gamma \cos \frac{pH_1}{V_1} \cdot \cos \frac{pH_2}{V_2} + 2\beta \sin \frac{pH_1}{V_1} \cdot \sin \frac{pH_2}{V_2} \\ R_1 &= \cos\left(1 + \frac{H_2}{H_1} - \frac{x}{H_1}\right) \frac{pH_1}{V_1} \\ R_2 &= \cos \frac{pH_1}{V_1} \cos\left(1 - \frac{x}{H_2}\right) \frac{pH_2}{V_2} - \alpha \sin \frac{pH_1}{V_1} \cdot \sin\left(1 - \frac{x}{H_2}\right) \frac{pH_2}{V_2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2}, \quad \beta = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_3 V_3}, \quad \gamma = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_3 V_3}, \quad \frac{2\pi}{p} = T, \quad \frac{2\pi}{f_3} = V_3 T \quad (6)$$

Fig. 21 に見られるように、測定地盤の地下構造には、3つ不連続面が存在し、その下にもさらに不連続面が存在するかも知れない。しかし地表で観測される明瞭な卓越周波数は2つであることから、これらの波に対応する地下構造としては、一応 Fig. 21 のような三層構造を仮定し、第一層に対応する8サイクル前後の卓越周波数の波の位相が $M(S-2)$, $L(S-3)$ の間で逆転していることや、この波の振巾の深さに伴う減少にばらつきが多く、単調な減少傾向のみられないことから、第一層と第二層の境界面を、 $S-2$ と $S-3$ の間にある真砂と風化岩の境界面にとることとする。そうすると第一層のS波の平均速度は0.4km程度第二層では1.2km/sec程度であり、第三の基盤層は風化を全く受けない岩として、2.8km/secを採用し、地下70~80m付近に存在すると仮定して、これに見合う値として、(1)~(6)の式に

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 \quad V_1 : V_2 : V_3 = 1 : 3 : 6 \quad H_1 : H_2 = 1 : 4$$

の値を代入すると、3.5~4サイクルの地盤の振動モードは Fig. 21 の左上の形になり、7~8サイクルでは右上の形になり、入射波 U_0 の速度 $\dot{U}_0$ が一定としたときの地表のスペクトルは下の図で表わされる。スペクトルの横軸は $\frac{wH_1}{V_1}$ 、縦軸は変位値がとってある。この理論値で得たスペクトルは我々が自然地震や加振機による振動試験で振ったスペクトルとほぼ一致する。

以上我々は自然地震のフーリエ・スペクトル Analysis と加振機の振動試験の上記2つの方法によって、地表および地中において、地盤振動を測定し、固有周波数その他いくつかの注目すべき結果を得た。この2つの方法はかなり異なったものであるが、地盤固有のスペクトルなどについてはかなりよく一致する結果を得た。

従来加振機による地盤振動試験は、機械自身の性能やまた Rocking など影響で高調波が卓越してしまったり、波形、あるいは周波数がみだれてあまりよく Data が得られないといわれていたが、今回の実験は機械の取付の基礎がしっかりしていて、また加振機の性能もよくなってきたためか、波形も殆んどみだれない高調波でもでない、きれいな正弦波が得られた。このようにきれいな波形が得られるなら、この測定地点のような複雑な地形における、加振機による点状震源の問題が理論的にとけていれば、このような実験方法によって、ほぼ完全に地盤の震動特性と地下構造の関係を説明できる。自然地震の場合に発生する地震動の推定が可能であろう。しかしながら現状では地盤にできるだけ SH 波的な波を発生させ、その垂直方向の多重反射の成分を測定できるように地震計を配置して記録し、解析するより外に方法はないであろう。

今回の測定では、節理直角方向加振で、その方向成分の受振はほぼ上記の条件に合致しており、受振した

波も SH 波のであったが、このような測定結果が自然地震動スペクトルとほぼ一致していることは、上述の考察の妥当なことを裏付けるものと思われる。

また地中においても測定点をとって行なったが、このような複雑な地盤構造においては、地表の解析結果をそのまま地下構造に対応させることは不可能である。どの境界面が主たる不連続面として働き、地表の震動特性に対応するか等の問題をすすめるためには、地中の震動の位相関係、振巾分布を各サイクルの波に対して調べることの必要なことが明らかにされ、ほぼ満足する結果が得られた。

今回の福井県美浜町における調査にあたり、御協力いただいた関西電力の原子力部ならびに建設部の方々に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) A. Imamura, "On the Earth-vibrations Induced in some Localities at the Arrival of Seismic Waves." Bull. Earthq. Res. Inst. 7 (1929) 489~491
- 2) K. Sezawa, "Possibility of the Free-oscillations of the Surface-layer excited by the Seismic-waves". Bull. Earthq. Res. Inst. 8 (1930) 1~11
- 3) K. Kanai, "Relation between the Nature of Surface Layer and the Amplitudes of Earthquake Motions." Bull. Earthq. Res. Inst. 30 (1952) 31~37
- 4) K. Kanai, T. Tanaka and K. Nagata, "常時微動の測定結果" Bull. Earthq. Res. Inst. 32 (1954), 35 (1957)
- 5) S. Omote, S. Konaka, N. Kobayashi, "Earthquake Observations in Kawasaki and Tsurumi Area and the Seismic Qualities of the Ground". Bull. Earthq. Res. Inst. 34 (1956)
- 6) Berg, G.V. and G.W. Housner, "Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Ground Motions." Bull. Seism. Soc. Am. 51 (1961) 175~189
- 7) K. Kanai, T. Tanaka and S. Yoshizawa, "Comparative Studies of Earthquake Motions on the Ground and Underground". Bull. Earthq. Res. Inst. Vol. 37 (1959) 53~87
- 8) Heelan, Patrik Aidan : "Radiation from a Cylindrical Source of Finite Length" Geophysics 18 (1953) 685~696
- 9) Cherry, J.T. "The Azimuthal Stress Applied at the Surface of an Elastic Half Space." Bull. Seism. Soc. Am. 52 (1962) 27~36
- 10) K. Kanai and S. Yoshizawa, "Relation between the Amplitude of Earthquake Motions and the Nature of Surface layer". Bull. Earthq. Res. Inst. 34 (1956)