

人為加振による地盤の震動特性について

吉川宗治・島 通 保・後藤典俊
入倉孝次郎・赤松 純平

ON VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF THE GROUND BY THE USE OF VIBRATING MACHINE

By Soji YOSHIKAWA, Michiyasu SHIMA, Noritoshi GOTO
Kojiro IRIKURA, and Jyunpei AKAMATSU

Synopsis

The vibration characteristics of the ground were investigated with a vibrating machine, applying the horizontal periodic force to the ground surface. The observed amplitude spectra of velocity for a constant force depended mostly on the geological structure. Although the generated waves spread spherically, the spectra were coincident well with those of the earthquakes and of the theoretical SH-multiple reflections. Love wave of fundamental mode were also observed.

1. 序

耐震工学上意味のある地盤の特性として、従来、弾性波探査で問題にされてきた地下構造の物理的性質（速度、密度、剛性率、粘性）の他にこれらの総合特性として、動力学的な特性である震動スペクトルが、いろいろな人によって議論されている。理論的には、垂直に入射するSH-波の表層での多重反射によるものとして、無限調和波を用いた計算がある。又、常時微動や自然地震の記録から、周波数頻度分布やスペクトルが求められている。しかしこれらは、主に地表で観測したものであって、基盤に入射する地震波のスペクトルが得られなければ、耐震工学上重要な地盤の固有スペクトルを正確に知ることはできない。

先に、吉川等は、岩盤で地表及び地下 40 m までの横坑に、地震計及びSH-型の波を発生させる起振機を設置して、自然地震、人工加振の種々の深さでのスペクトルを得、これらが、SH-波多重反射の理論スペクトルで、ほぼ説明できることを示した¹⁾。又、軟弱地盤においては、分散性の表面波を用いて、地盤の総合特性を表わすことを試みた²⁾。

起振機を用いて波を発生させる場合、理論的には、Heelen P. A. や、Cherry J. T. によって研究されているように^{3), 4)}、球面状に広がる波で、自然地震で考えられる平面波ではない。又、起振機と地盤のCouplingについて、Dynamic Ground Couplianceの問題もあり、未解決の部分は多いが、起振力が判っているので、この点地盤自体の固有振動を調べるには非常に都合がよい。

ただ、技術的には、起振機の構造や固定の方法、ならびに地盤の地表面の強度などの問題のため、期待される単純な波が発生せず、rocking などによる高調波で乱されることがある。しかし、考えている波以外の寄与が、大きくない場合は、充分議論できるし、球面波であっても、第一近似としては、地震に対する地盤の震動特性を表わし得ると考えられる。

水平方向に伝播する表面波を考えると、これは、地下構造に依存した mode を形成し、地盤の震動特性を表わしている。人為的に表面波を発生させるには、震源として、爆破、板叩きなどがある。爆破の場合、

大きなエネルギーを出せる利点はあるが、発生する表面波は、Rayleigh 波であって、解析が複雑である。また板叩きの場合、比較的 Love 波の発生は容易であると思われるが、エネルギーが小さく低周波も発生しにくいので、fundamental mode は形成されにくい。板叩きによる記録から、Love 波の位相速度、群速度を報告している例⁹⁾はあるが、周波数の範囲はせまく、地下構造との対応を明確には説明し難い。また記録から、群速度は直接読みとれるが、位相速度は相互相関のフーリエ変換をとる⁹⁾などの方法を講ずる必要がある。

この点、低周波においても、加振力を大きくできる水平方向の起振機を用いるなら、周波数範囲の広い Love 波を発生させることが可能であり、fundamental mode を観測し得ると考えられる。

とくに、地下に速度の異なるはさみ層がある場合、従来行なわれている屈折法による探査だけでは、ユニークな層構造を決定するのは困難であるが、この場合低周波の Love 波の分散曲線を求め、これを併用するならば、低速度層の存在も明らかになり、より正確な層構造が得られるであろう。

本研究は、SH-型の波を発生させる起振機を、普通の都市地盤及び軟弱地盤に設置し、地表及び種々の深さの地中で観測したスペクトルと、地表で観測した分散性の表面波を、地下構造と対比させる。また、比較のために自然地震のS波部分のフーリエ・スペクトルにも考察を加える。

実験場所は、次の3地点である。

A地点：京大防災研究所宇治構内。

B地点：長野県国民宿舎松代荘の庭。

C地点：長野県国鉄信越本線千曲川橋りょう附近河川敷。

なお、C地点での実験観測は、国鉄技研構造物研究室、藤原俊郎主任研究員らと協同行なった。

2. 起振機と測定器及び測定方法

使用した起振機は、伊藤精機製不平衡重錘型水平起振機で、構造を Fig. 1 に示す。周波数は、1 cps から 20 cps まで可変であり、最大加振モーメントは 3000 kg・cm、最大加振力は、2 ton・g である。水平方向の正弦波のみを出せるよう重心の位置は低くしてある。

設置方法は、表土の影響を除くために、50 cm ほど掘り下げ、ワク組みの中にコンクリートを流し込んで、4 m×4 m×0.5 m、又は、4 m×2 m×0.5 m のブロックの基礎を作り、これにボルトで固定した。

振巾を議論するために用いた地震計は、固有周波数 1 cps の国際機械振動製、及び、3 cps の東京振動研究所製の、いずれも動輪線型地震計であり、100 cps までフラットな特性を有する直流増巾器を通して、電磁オシログラフ、又は、ペンレコーダーに接続した。変位振巾については、記録システムのレスポンスに関する補正を、Data 処理の際に行なった。

位相速度を見るために、25 cps の NEC P. U. ETL 12 成分低周波増巾器、電磁オシログラフを用いた。

なお、地震計の固定は、1 cps は地面に浅い穴を掘り、コンクリートベースを作って設置し、地中地震計は、ボーリング底に粘土を入れてつきさした。NEC は、板叩き法で行なわれているごとく、地表面に10～20 cm ほど穴をあけ、P. U. を横にねかせて埋めた。

測定方法は、加振方向と直角な方向に観測点を選び、起振機から数メートル以内の点から掘られた深さの異なる数本のボーリングの底と地表とに、3成分づつ地震計を展開して同時に観測した。

発生する波は、加振方向と直交する平面内では、地中、地表とも Transverse 成分（加振方向）の卓越するかなり良好な正弦波であるから、震源からは、主にSH-型の波が出ているとみなしてよいであろう。周波数によっては、Vertical 成分にこれの2倍の周波数の波が記録されることがあり、Rocking を起こしていることも考えられる。又、地盤の共振点でない周波数では、起振機で加振している周波数の波の外、地盤の高次の固有振動や、種々の波の干渉波などを記録しており、必ずしも Transverse 成分が卓越しているとは言えない。實際上、以上のような問題点があるので、振巾を議論する場合は、3成分を記録し、波の

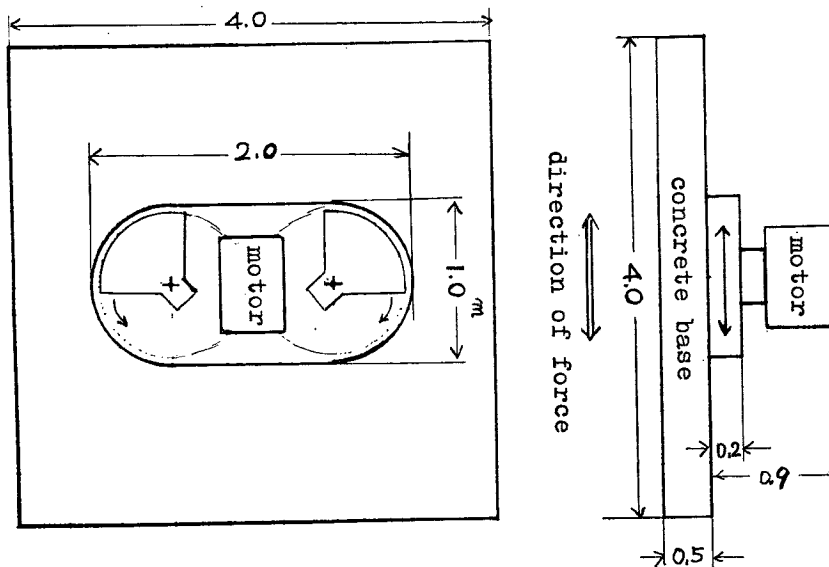


Fig. 1 Structure of vibrating machine.

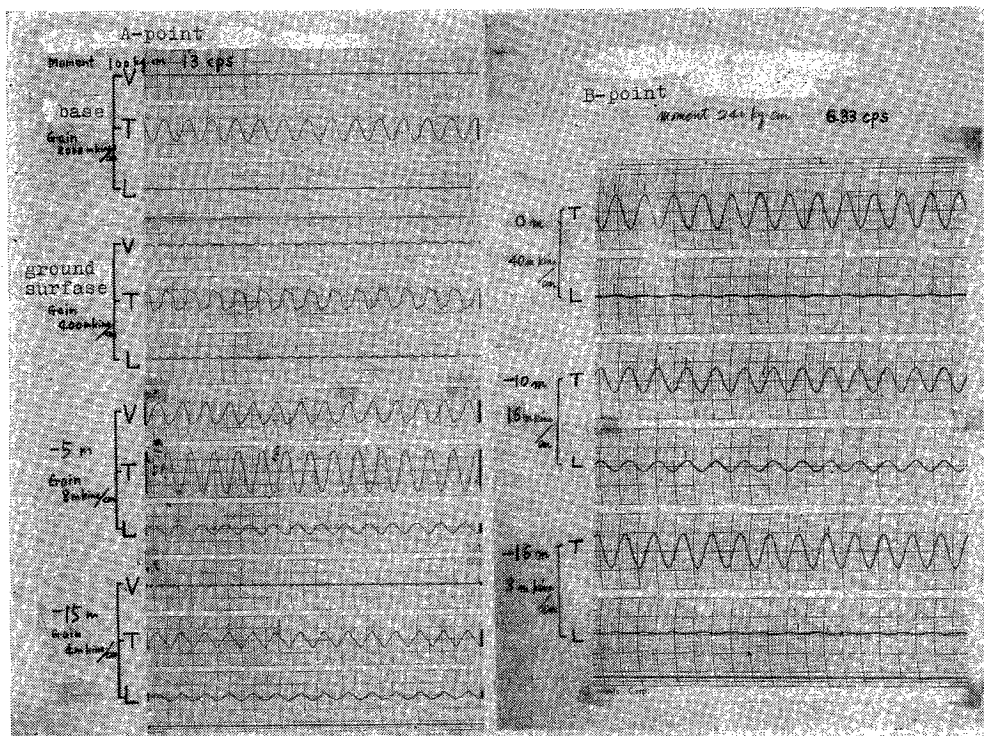


Fig. 2 Example of records, left: at A-point, right: at B-point.

polarization と波形に充分注意を払った。記録の例を Fig. 2 に示す。

加振力の大きさは、震源附近の地盤の弾性限界が不明であるが、震源の保存と再現性をよくするために、ノイズレベルを考えて、なるべく小さく加振した。

なお、A 地点（宇治構内）に於て、地表面に半径約 27 m で、 30° 間隔に 3 成分を半円状に展開し、radiation pattern を求めたが、他の実験のために震源附近の弾性限界を越えて加振したあとであったため、point source で考えられるような、きれいな pattern は得られなかった。B, C 地点では radiation pattern は求めなかったが、再現性、波形、加振方向への polarization 等は良好であった。

3. 地下構造

各観測点のボーリング柱状図及び弾性波探査による地下構造図を Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, に示す。

A 地点は、5 m 附近に N 値の大きい玉石まじりの堅い層があるが、9 m まで N 値 20 前後の、砂礫、粘土、砂の層から成り、それより深いところでは、N 値の大きい粘土、砂、礫の互層となっている。起振機近くでは、ボーリング孔を利用した S 波検層⁷⁾で、250 m/sec 670 m/sec の 2 層が検出されており、表面波を観測した 55 m~110 m 地点では、板叩き法により、160 m/sec, 680 m/sec の 2 層が測定された。

B 地点は、1) で報告されたごとく、表面に厚さ 70 cm 程の S 波で 210 m/sec のかなり堅い層がある。ボーリング孔のある 20 m までは、非常に低い速度の粘土層で、N 値も小さく、軟弱な地盤で、いわゆる地震基盤と考えられる堅い地盤は、板叩き法、爆破による P 波屈折法では観測されていない。

C 地点は、砂、粘土、砂礫から成る 3 層で、ボーリング柱状図と弾性波探査の結果は、ほぼ一致し、S 波速度はそれぞれ 140~160 m/sec, 270 m/sec, 470 m/sec である。

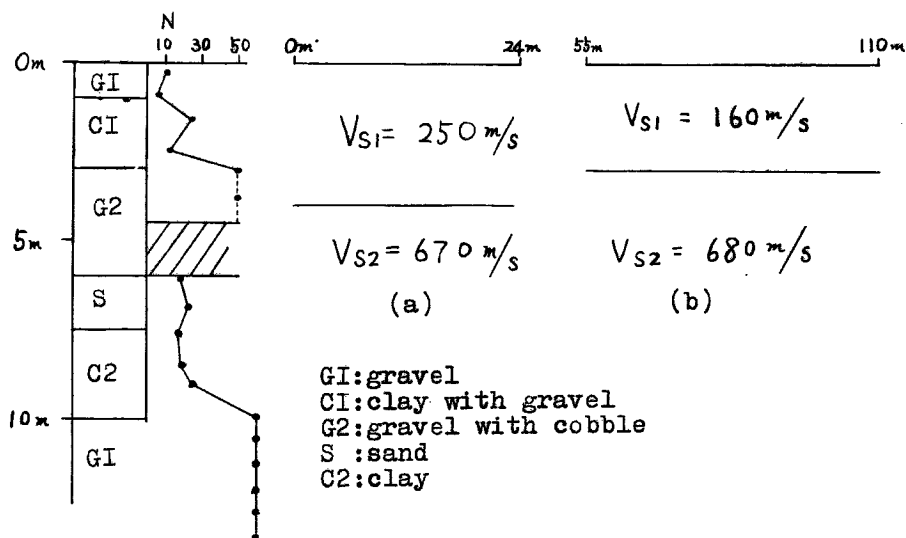


Fig. 3 Geological structure of A-point.

- (a) vibrating point
- (b) observation point of surface wave

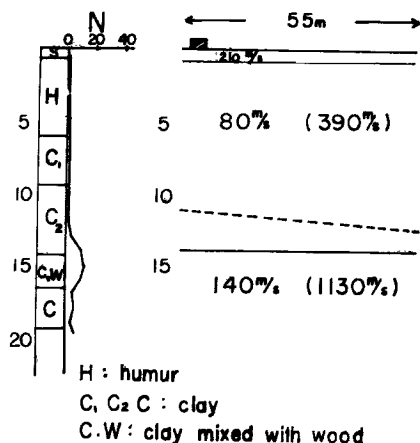


Fig. 4 Geological structure of B-point.

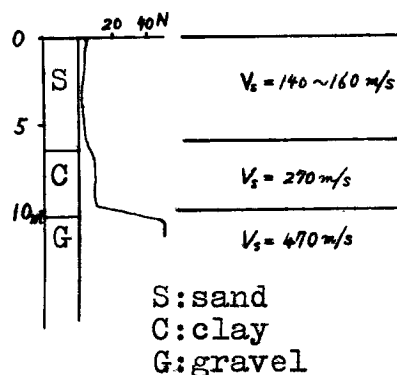


Fig. 5 Geological structure of C-point.

4. 速度スペクトルと地盤の固有振動

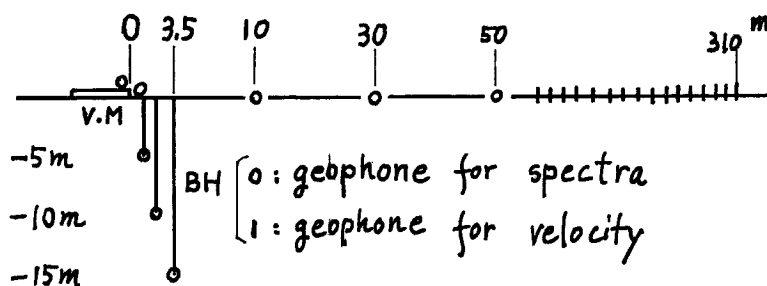


Fig. 6 Spread of geophones at A-point.

Fig. 6 にA地点での地震計の設置点を示す。他の観測点も同じような地震計の展開をした。記録システムの感度補正をして、一定加振力に対する速度振巾でスペクトルを求めた。なるべく小さい加振力で加振する必要から、加振モーメントは変化させているが、モーメントを変えた周波数の前後はそれぞれのモーメントで重ねて記録してある。これによる誤差はB地点地下16mの20%が最大で、他は読みとり誤差の範囲内であった。再現性については、地表での観測に少しの乱れがあるが、地中地震計ではほとんど完全に一致した。

A, B, C, 各地点での、地中及び地表での加振方向成分のスペクトルを Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 に示す。

各観測点とも、起振機の近くでは速度スペクトルはほぼ平坦で、低周波数に向って次第に小さい値を示していることから、この地点での波はほぼ起振機から地中に伝えられたままのもので、地下構造の影響をほとんど受けてないと考えてよい。しかし、半無限弾性体表面の加振による変位振巾では、Ground Compliance による共振点の現れる点を除きほぼ一定で、Fig. 7~Fig. 9 に現れている程の低周波での極端な低下は見られない。ところで、ベースの振動中は、そのすぐ近くでは地盤は弾性限界を越え、Yielding していると思われる。そのため低周波に対してはより流動体的な挙動を示すと思われる。低周波振動を、起振機のペー

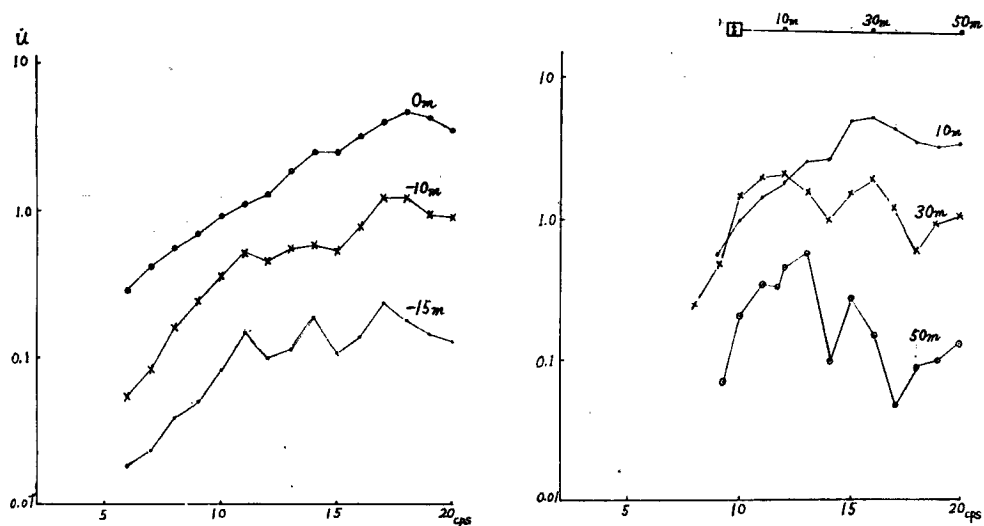


Fig. 7 Velocity spectra for constant vibrational force at A-point. left: observed underground, right: observed on ground surface.

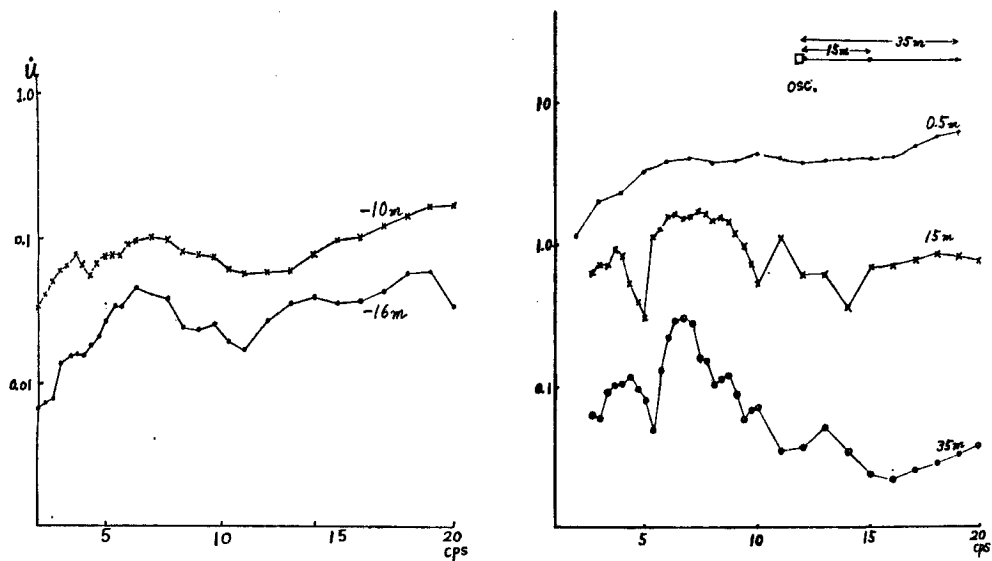


Fig. 8 Velocity spectra for constant vibrational force at B-point, left: observed underground, right: observed on ground surface.

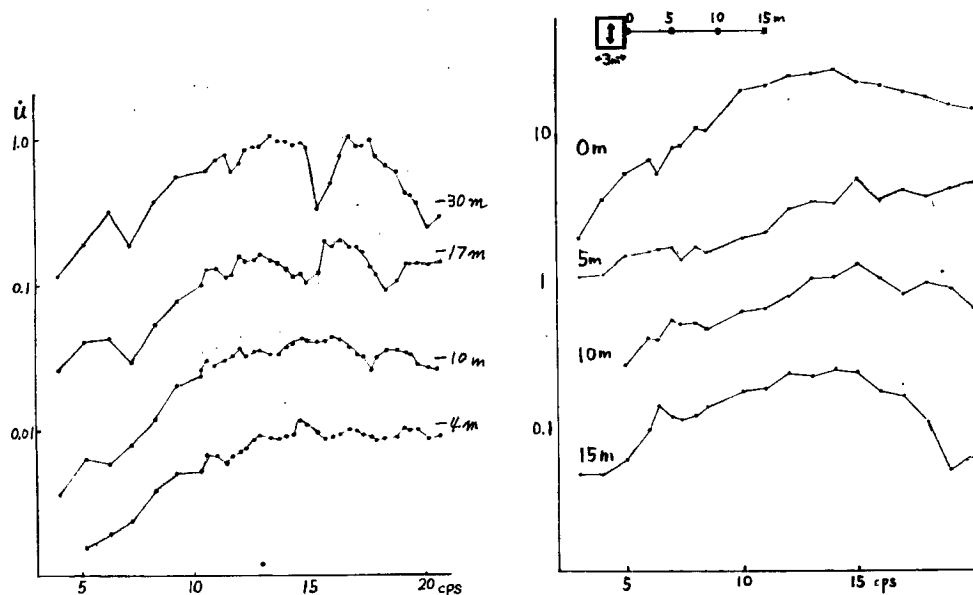


Fig. 9 Velocity spectra for constant vibrational force at C-point, left : observed underground, right: observed on ground surface.

スを通して有効に地中に伝えるのには、ベースの大きさ自体更に大きい方がよいのかも知れない。また、起振機ベースの大きさ及び重量のため、いわゆる Dynamic Ground Coupliance による共振点が現れるが、半無限弾性体表面での長方形基礎についての計算⁹⁾によると、この周波数範囲では、振巾は低周波では30%ほどなだらかに落ちていて明瞭な共振点は現れず、地盤構造によって生ずるスペクトルの山谷の位置にもずれを起こさせないと考えてよい。

各観測点とも、深さ方向、水平方向とも震源からの距離の増加と共に、スペクトルの山谷は明瞭になっている。これは Transverse 成分に関する層構造に依存した振動 mode が明瞭になったものである。

地中地震計で得たスペクトルが、ある深さまでの地下構造の起振機による振動特性を示すと考えると、これと自然地震による地盤の振動特性との対応をつける必要がある。震源の位置が自然地震の場合と逆になっているが、弾性波動論における相反性の定理によると、地表加振による地中受震は、地中加振に対して地表での受震に等価である。従って、起振機から発生する波が自然地震と異なり球面波であることを一応考慮しないとすると、地中地震計で得たスペクトルを、地表での自然地震スペクトルと対比でき、自然地震による地盤の振動の特性の推定の1つの手段となり得ると考えられる。

B地点で記録した松代群発地震3個のS波部分についてのフーリエ・スペクトルの相剰平均を Fig. 10 に示す。10 cps 以上では、EW, NS 成分で一致しないが、いずれも 2~3 cps 6~7 cps に peak を示しており、Fig. 8 の起振機による地下 16 m のスペクトルの peak とほぼ一致する。(Fig. 8 で、0.5 m のスペクトルから判るように、低周波部分は波が発生しにくいのであって、地盤の振動特性としては、低周波で peak を示すと解釈すべきである。)

C地点地下 4 m での2つの自然地震の記録の、S波部分の平均スペクトルを Fig. 11 に示す。この図の実線及び破線は、Fig. 5 の地下構造をモデルとして計算した地下 4 m 及び地表での理論スペクトル⁹⁾である。Fig. 9 の起振機近くのスペクトルが、10~15 cps でゆるい山を示していることを考慮すると、地中 17 m, 30 m において、5 cps 附近、15~18 cps で peak を示しており、自然地震のスペクトルの peak

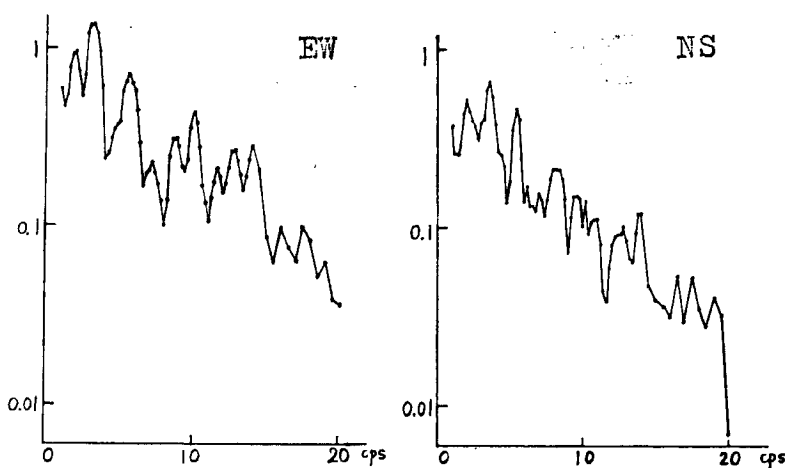


Fig. 10 Average amplitude velocity spectra of three earthquakes observed on ground surface at B-point.

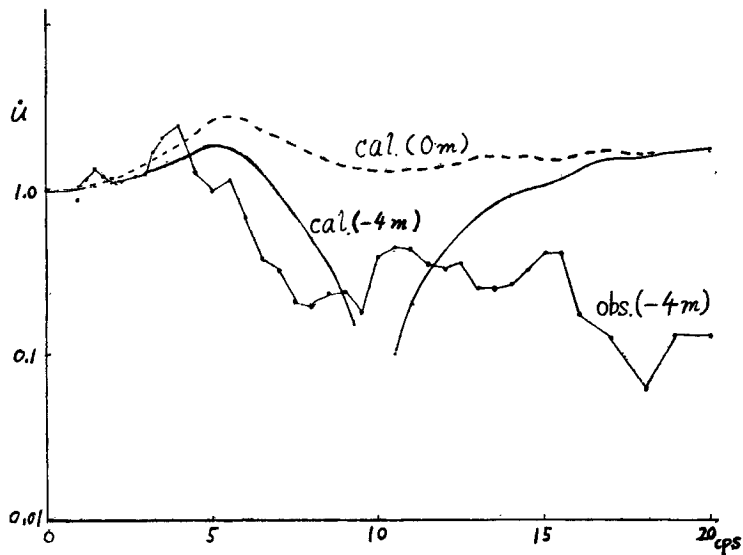


Fig. 11 Average amplitude velocity spectrum of two earthquakes underground (4m depth), full line: theoretical velocity spectrum of 4m depth, dotted line: theoretical velocity spectrum of ground surface.

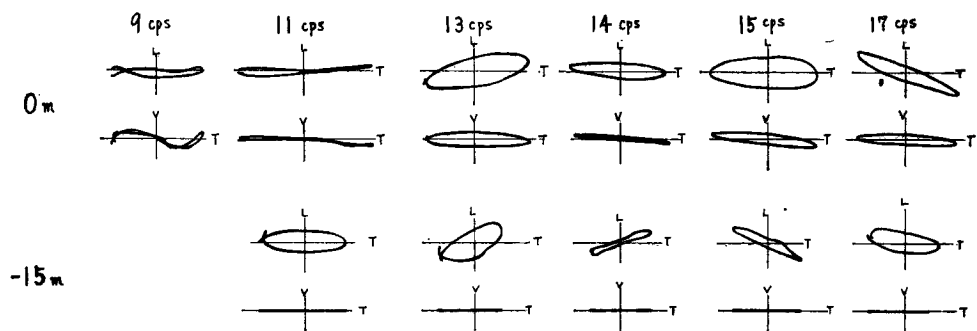


Fig. 12 Loci of oscillation at A-point.

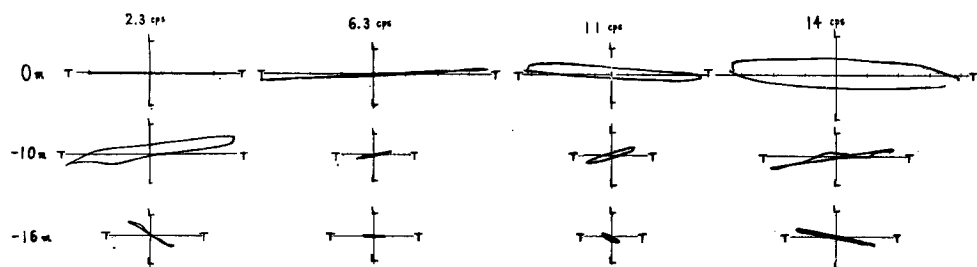


Fig. 13 Loci of oscillation at B-point.

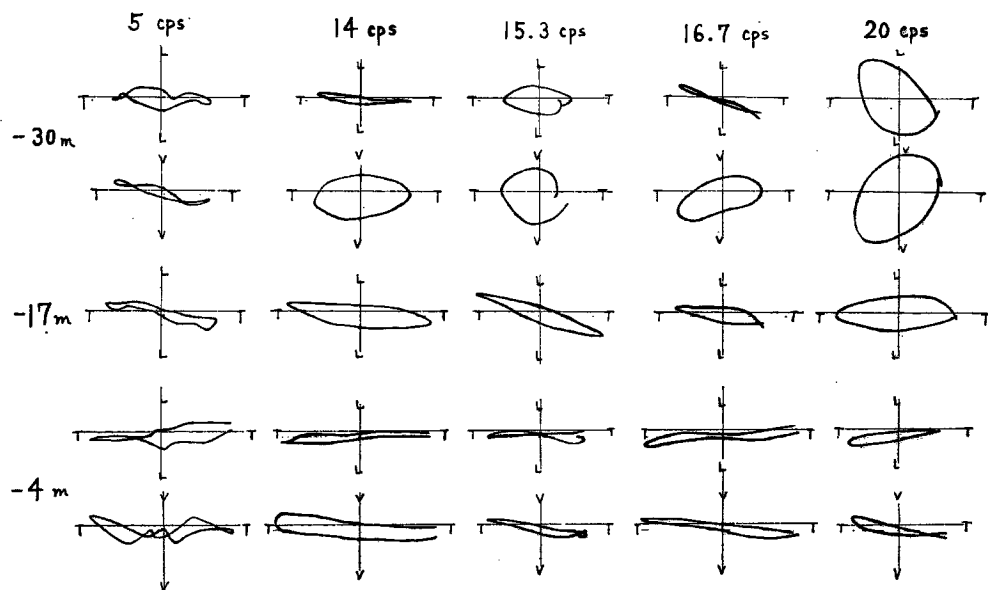


Fig. 14 Loci of oscillation at C-point.

にほぼ対応している。

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 は、それぞれ A, B, C 地点の起振機近くの地表と地中でのローカスである。各周波数とも Transverse 方向への polarization は良好であり、スペクトルが山を示す S-波に対する地盤の共振点と思われる周波数では、更に良い形を示している。これは、transverse 成分の S-波のみがこの周波数で共振し、他の成分に比して波が強められたことによると思われる、この点からも共振現象を確認することができる。

5. 位相速度と地下構造

加振方向と直角な方向に測線をとる、Transverse 成分を検出するように、NEC, P. U. を 5 m 間隔で 12個横にねかせて、位相速度を測定した。A 地点では、(1) 55~110 m, (2) 155~210 m, (3) 255~310 m に、C 地点では、170~220 m に展開した。

起振機からは運転中は単一周波数の定常的な調和波が連続して起されるから、記録された測線上の各点の波形で位相を対応させ、走時曲線を描くと、ただちに位相速度を与える。位相速度を求める際の計算上の処理からくる誤差はない。しかし波形がきれいな正弦波にならないと位相の対応が不正確になり当然誤差は大きくなる。

また、それぞれの地点で各周波数に対応する位相速度が求まるためには、測定区間内での地下構造が同一であることが必要条件であり、そうでないと走時曲線は直線にならない。また振巾の距離に関する減衰曲線も単調でなくなる。

地下構造との対応のつけ易さ、伝播させる波の mode の種類の単純さを利用するため、起振機からできるだけ SH 的な波のみが発生するようにしたが、周波数によっては起振機ベースが rocking して、Rayleigh

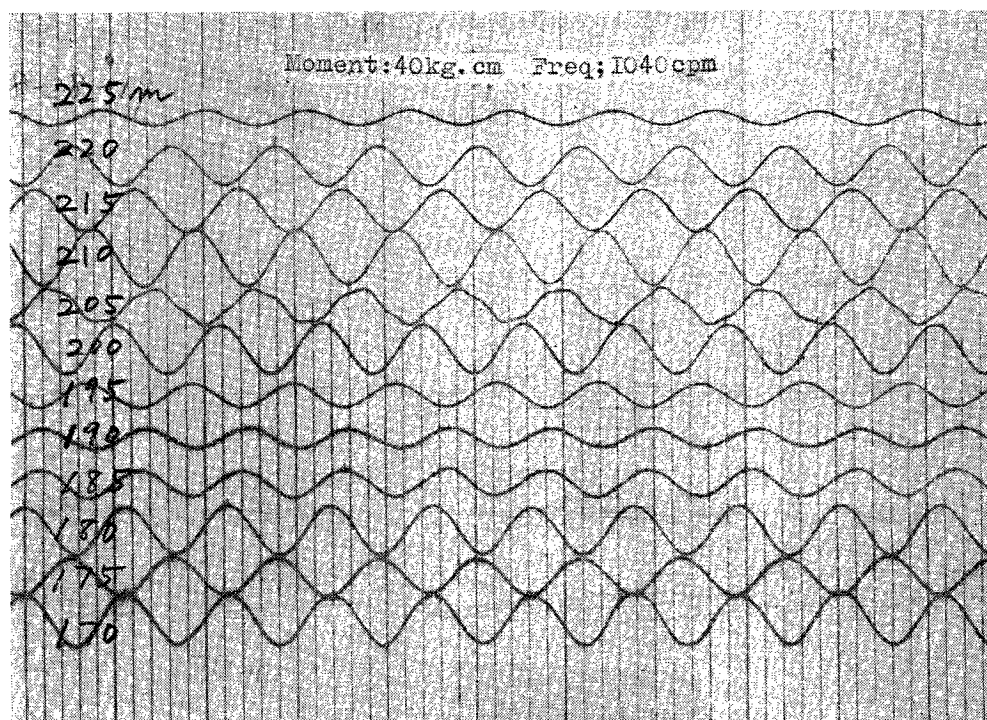


Fig. 15 Example of Love wave record.

型の表面波が発生している場合もあった。また震源からはSH-波がでて、地層の境界面が測線を含む鉛直面に直交しないときには、二次的擾乱によるP-波やRayleigh波が発生し、伝播現象はさらに複雑になる。起振機の場合連続波であるから、ある周波数に対して2つ以上のmodeが存在すれば、重なりあうが、表面波ではfundamental modeが最も大きいから、このmodeのAiry phaseに対応する周波数の前後であればほとんどfundamental modeのみ記録されているとみてよい。今回の測定周波数はこの範囲にあった。

C地点で得た記録の例をFig. 15に示す。

各周波数ごとの位相時曲線と、振巾の減衰曲線から、(1)については80~110mで減衰が一樣で、走時も直線にのった。(2)と(3)は、走時曲線は直線にならず、振巾の減少の仕方も一樣でない。種々の波の干渉¹⁰⁾、local dispersionの影響が入っているものと考えられる。C地点での走時曲線は非常によく直線

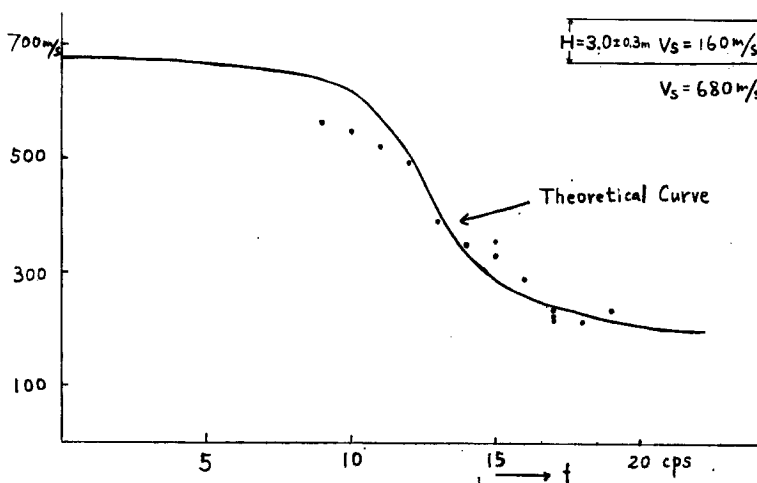


Fig. 16 Phase velocity observed at A-point and theoretical dispersion curve.

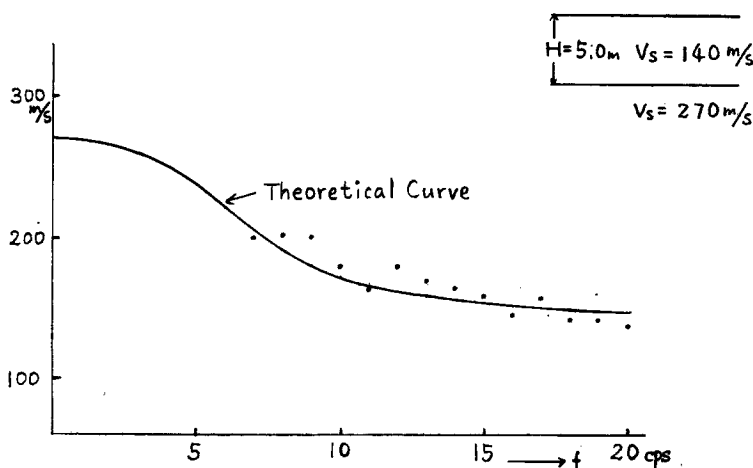


Fig. 17 Phase velocity observed at C-point and theoretical dispersion curve.

にのつた。板叩き法によって得られた層構造 (Fig. 3, Fig. 5) をモデルとして, Love 波の fundamental mode の dispersion curve¹⁾ と, 実測値を Fig. 16, Fig. 17 に示す。板叩きによって観測されるものに比して, かなり広い範囲にわたって位相速度が得られたので, 地下構造に対応する分散曲線との対比によって, 地下構造を決定する際, 層の厚さ, 速度のあいまいさを小さくできる。理論曲線からのずれはあるが, Love 型の分散性表面波の寄与が大きいのと思われる。たとえば, A地点での分散曲線において低周波数での食い違いがかなりあって, Love 波の位相速度の方が, SH-屈折法によって決めた地下構造に対応する理論曲線より低い。この地点では, 厚さ 3~4 m の表層より下は, 第3節において述べたように, ボーリング柱状図からも, 粘土, 砂が, それぞれ数mごとに互層をなし, S-波速度 680 m/sec が屈折波より得られた。表層との境界にこの速度の土質が存在し, この下にこれより低速度の層が存在していても, 屈折法では, 屈折波初動が数十サイクル以上であるため, 上の 680 m/sec が得られる。このような複雑な地下構造の場合には, 互層からなる層の全体としての動力学的な特性はむしろ低周波の Love 波の方が反映していると考えられる。なお, higher mode の cut off frequency は, いずれも十数サイクル以上である。

6. ま と め

異なった地下構造を有する地盤3地点での実験結果から次のことが判った。

(1) 水平方向に加振する起振機から発生する波を, 起振機を含む鉛直面内の地中及び地表面で観測したところ, 観測精度, local effects などはあるが, 加振方向に polarize したほぼSH-型の正弦波であった。

(2) Dynamic Ground Compliance で考えられる以上に, 低周波の波は形成されにくい。

(3) 一定加振力に対する速度スペクトルから, 加振方向には, 地下構造に依存した振動 mode を形成しており, 深さ方向, 水平方向とも距離の増加と共に得られたスペクトルの山谷は明瞭となって, それぞれの山谷の形は互いに比較的似かよってきた。

(4) 地中, 地表とも起振機から離れた地点でのスペクトルの形は, 地表で観測した自然地震のS-波部分のフーリエスペクトルの形に, また, 物理探査によって得られた地下構造をモデルとしたSH-波多重反射の理論スペクトルの形に, それぞれ fundamental mode の周波数附近で似ている。

(5) 位相速度は分散しており, その傾向は, fundamental mode の Love 波で説明し得る。

また今後残された問題として, 次の諸点をあげることができる。

(1) ベースの形, 重さ, 固定の方法を考慮して, 低周波をも有効に伝えるようにすること。

(2) 単純な場所で, radiation pattern を求め, また他の手段を併用して mode separation (P-波, SH-波, Love 波, Rayleigh 波, etc を分離) を行なうこと。これから地下構造の分散曲線の関係, 減衰をも含めた振巾の定量的な議論などをとおして, 自然地震源のスペクトルを決める一要素である表面波の excitation function を求めることも可能となるであろう。

なお, 本研究において, 実験を手伝っていただいた西正夫, 小林年夫両技官, および一部解析を担当していただいた松尾和子氏に感謝の意を表します。

本研究の費用の一部は, 文部省特定研究(災害科学)費による。

参 考 文 献

- 1) 吉川宗治, 島通保, 入倉孝次郎: 自然地震と人為加振による地盤の振動特性について, 京大防災研年報第9号, 昭和41年, 119—136.
- 2) 吉川宗治, 島通保, 後藤典俊: 新潟地震被害地における人為加振による地盤調査, 京大防災研年報第8号, 昭和40年, 19—25.
- 3) Heelan, P. A.: Radiation From a Cylindrical Source of Finite Length. Geophysics 18 1953 685~696
- 4) Cherry, J. T.: The Azimuthal Stress Applied at the Surface of an Elastic HalfSpace.

- Bull. Seism. Soc. Am. 52 1962 27—36
- 5) 小柳敏郎：SH波実験資料の整理，北大地球物理学研究報告第12号，昭和39年，29—41.
 - 6) Laster, S. J. & Linville, A. F.; Application of Multichannel Filtering to the Separation of Dispersive Mode of Propagation. J. Geophys. Res. 1966 Vol. 71, No. 6, 1669—1701
 - 7) 吉川宗治他，地中地震計による地下構造決定法について，京大防災研年報第11号，昭43年，掲載予定.
 - 8) 小堀鐸二他，長方形基礎の Dynamic Ground Compliance (その1)，京大防災研年報第10号A，昭和42年，283—314.
 - 9) K. Kanai & S. Yoshizawa: Relation between the Amplitude of Earthquake and the Nature of Surface Layer. 4. Bull. Earth. Res. Inst. 34, 1956, 167~184
 - 10) 渡辺健，起震器により起される弾性波の伝播に関する研究，地質工学第2輯，昭和37年，69—102.
 - 11) Ewing et al: Elastic Waves in Layered Media. 1957, 210
 - 12) 島通保，入倉孝次郎：SH型トルクによる多層構造地盤の震動特性について，京大防災研年報第11号，昭和43年，掲載予定.