

地中地震計による地下構造決定法について

吉川宗治・島 通 保・後藤典俊・赤松純平

AN EXPLORATION PROJECT WITH THE BOREHOLE SEISMOGRAPH

By *Soji YOSHKAWA, Michiyasu SHIMA, Noritoshi GOTO and
Junpei AKAMATSU*

Synopsis This paper presents an available method of seismic prospecting especially designed for engineering purposes.

To explore minute geological structures and to study physical properties of rock layers, seismic prospectings in the adit have been employed. But experiments in the adit are attended generally with the trouble about velocity lowering in the wall by the wethering effect and the trouble about the experimental apparatus, and much time and much expense are used up.

In order to keep away these troubles, the field works were performed on the ground surface in stead of in the adit and the measurements in the borehole were made with three component installations of geophones clamped on the wall of the cased borehole in any depth. The small explosion shots were detonated in shot holes to observe P waves and S waves, and the plate hammering shots were smitten at the mouth of the measuring hole and the geophone was moved to get S wave distribution along the hole.

1. 序 論

近年弾性波探査は土木方面への応用が盛んになり、構造物の基礎としての地盤、岩盤の問題を扱うようになってきた。この問題は岩盤の力学的な測定によって扱われる物理的性質に類するもの、および地質構造的な拡がり方に類するものが含まれる。例えばダム、発電所等を設置する場合でも、設計、施工の方針を立てるときに、十分な強度をもつ岩盤が、どの深さにどれだけの拡がりで存在するかが明らかにされ、断層がどのようにはいっているかというような情報があらかじめ知られなければならない。力学的な性質ばかりでなく、その規模の大きさ、入り方といった構造的要素を明らかにすることが、構造物の完成後や工事中の安全を確保する上で重要な問題となる。

弾性波探査は、主として地下の構造およびその物理的性質を量的に推定するために行われているものである。しかし、地下構造はもともと地質学的現象に由来する事柄であるから、弾性波探査だけから一義的に適確な地下構造を求める事はむずかしく、地質学的な知識の応用が必要である。このように地質学的な知見はもとより抜きにできないものであるが、これによって構造についての適確な量的情報を得ることはむずかしい。また力学的な試験は、これが採取された資料についてなされるときはもちろん、現場でなされるときでも、厳密にはその試験された地点の情報しか与えることはできない。しかもこれらの試験をするときに、人為的な操作によって、本来の岩盤の状態を乱してしまうことが多い。サンプルを切り出す場合はもちろんそうであるし、調査横孔などの坑道を利用して試験するときも掘削にともなう影響をまぬがれることはできない。

ところで工事のためにもっとも必要なのは、空間的にある拡がりをもった情報であり、またその情報は存在するままの乱されていない状態におけるものであることが望ましい。弾性波探査はその性格上このような要求によく応えることができる。ただし、弾性波探査は、一般に土木に必要な物理量を直接的に与えることはできないから、ほかの直接的な試験や観察と結びつけ、地質学的な知識の助けのもとに結果を合理的に解釈しなければならないが本文では結果を求める方法について述べ、結果の土木的な解釈については触れないことにする。

今まで弾性波探査の行なわれて来た場所はおおむね地表面である。地表面の方がいろいろな面で作業しやすいのは当然であるが、問題にある程度深入りするには、観測点を地表面に限定することなく、ボーリング孔とか坑道に積極的にもちこんで測定しなければならない。以上のような観点から著者等は数年来坑道を利用した弾性波探査を行なってきたのであるが¹⁾、地表での作業に比較して制約が多く、また経費、時間等もそれだけ多くかかることになる。また調査横孔のようにある程度大きな坑道での測定になると、盤圧の解放により掘削面にゆがみが生じ、岩盤の本来の状態が乱されてしまうことが多い。このような種々の弊害をさける意味で、地表からの数本のボーリング孔を利用し、地中地震計を利用した探査を開発する意図で実験が行なわれた。

2. 測定実施地点および測定方法

地点

測定実施地点は四国西部の発電所建設予定地で、地表は段々畑の急斜面になっており、その地下構造はボーリングの資料によると頁岩と砂岩の互層からなり、岩石の状態は亀裂が多く、スライム化してコアの採取不能なところもあり、概して岩質不良である。したがってボーリング孔はケーシングを抜きとった状態で地震計を設置することは非常に危険であり、現にビニールパイプを挿入した状態でも地震計の回収が不能になるという事態が起ったほどである。実験場所としてはあまり適当ではなかった。測線の配置は Fig. 1 に

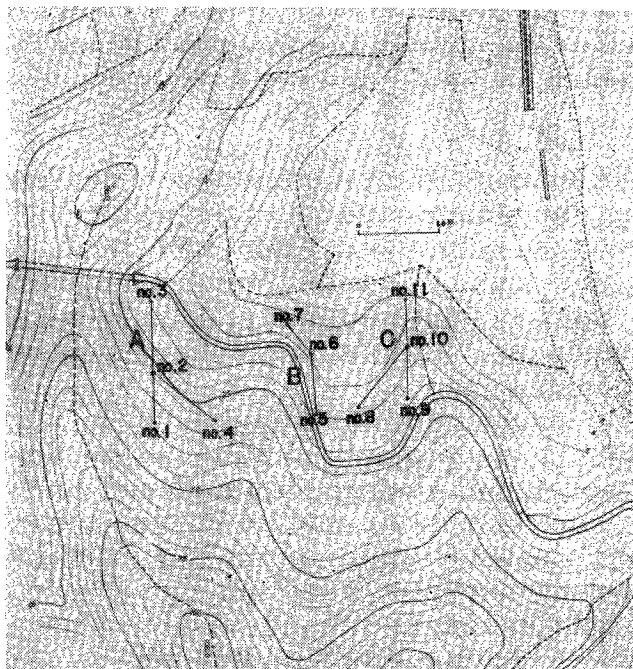


Fig. 1 The plane figure of the site.

示すとうりである。A地点ではボーリング孔 No.2, B地点では No.6, C地点では No.10 がそれぞれ測定孔であり、この中に3成分地中地震計が任意の深度で固定される。ボーリング孔 No.1, No.3, No.4, No.5, No.7, No.8, No.10 はそれぞれ発破孔である。

測定方法

(1) 検 層

ボーリング孔沿いのP波速度分布を求めるために、チタン酸バリウム磁器の hydrophone を 3m 間隔に 12こ連結した速度測定ケーブルを水をつまっている測定孔中に吊し、孔の底または孔口近くの地表面で発破し、その走時からP-波の孔沿いの速度分布を求める。発破孔沿いのP-波速度分布は、発破孔口近くの地表面に受振器を置き、発破孔内の各深度の発破による初動走時から求めることができる。また測定孔沿いのS-波速度分布は孔口付近で 10cm×20cm×100cm の板<材木>をかけやで水平に叩く、いわゆる板たたき法によるSH-波を発生させて、地中地震計の水平動成分で受振する。記録の一例を Fig. 2 に示す。下の3

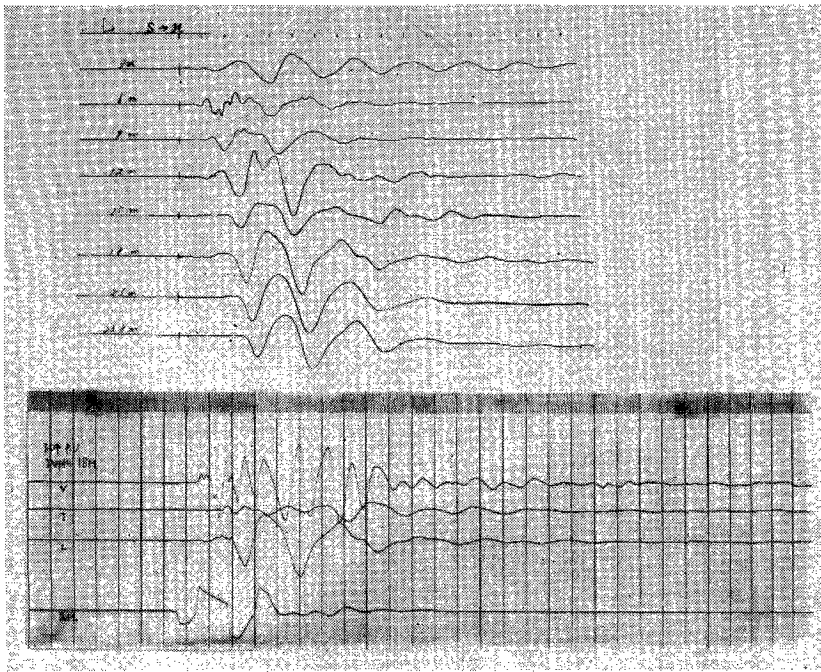


Fig. 2 Sample records of S wave logging.

成分の記録は原記録であり、注目する成分のトレースを深さの順にならべたのが上の部分である。

(2) 地表測線

測定孔と発破孔を結ぶ地表に約 10m 間隔に受振器をならべ発破孔の各深度での発破から得られる走時曲線から地下構造の概略を推定する。例えばA地点では Fig. 1 あるいは Fig. 7 に示されているようにボーリング孔 No.1 から No.2 を通って No.3 にいたる地表測線上に受振器を 10m 間隔にならべ、発破孔 No.1 および発破孔 No.3 で深さ 5m, 10m, 15m, 20m でそれぞれ発破した。B地点, C地点でも同様のことを行ない Fig. 3, 4, 5 のような走時曲線を得た。

(3) 地中発破地中受振

地中受振の場合には受振器をボーリング孔内に設置しなければならない。P-波の初動走時だけを測定す

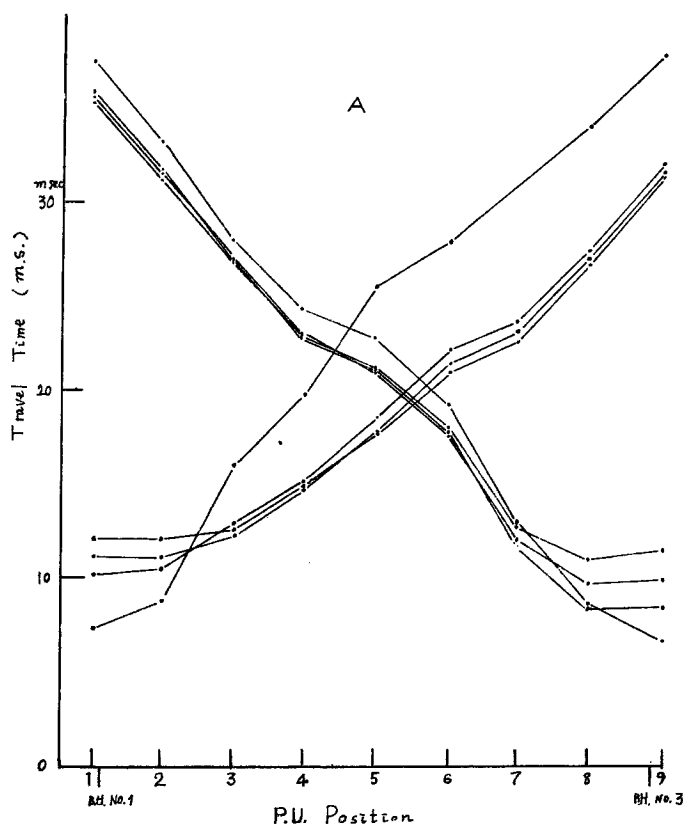


Fig. 3 Travel time curves of surface geophones from borehole shots. at A section.

るには hydrophone の速度検層ケーブルを用い、ボーリング孔に充填されている水の音圧変化として受振するのが最も能率的である。しかし、受振点の地動をベクトル変化として受振したいときには、三成分の地中地震計が必要である。そこで moving coil 型の小型受振器を3こ（上下動1成分、水平動2成分）ベクトル的にたがい垂直に向くように組み込んだ地中3成分地震計を試作した。3成分の受振器は円筒状の容器におさめられ、この容器がボーリング孔内の任意の位置で固定されるようになっている。固定の機構は、自動車のブレーキを利用したもので、油圧により容器の上部と下部の2ヶ所から一方向にアームが伸び出し、孔壁をおしつける仕組になっている。なお受振部は容器の中央に位置し、安定をよくするためにその上下2ヶ所でクランプするように工夫された。方向はロッドにより地表から調整する。この3成分受振器を測定孔の5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30mの深さに移動させ、発破孔でそれぞれに対応する深さの小さな発破を行なった。

3. 解 析

最初にボーリング孔沿いの検層による解析結果から各ボーリング孔付近での不連続面と、各層の速度分布をきめる。P波検層のときは観測孔沿いでは地表で発破したので、得られた記録上で初動の立ち上りが鋭くなく精度はおちる。次に地表測線の走時からだいたいの層構造を推定し、もっともらしい地下構造モデルを一応作りあげる。モデルができあがったら逆に発破点と受振点を結ぶ波線を作図し、その走時を観測された

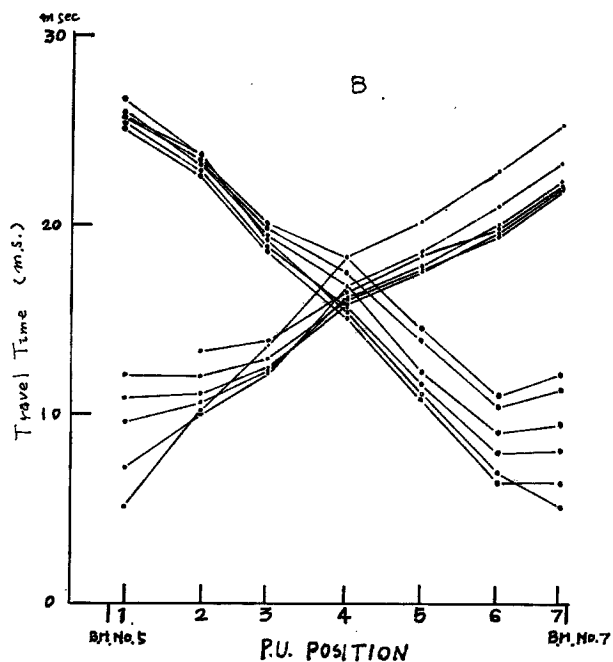


Fig. 4 Travel time curves of surface geophones from borehole shots at B section.

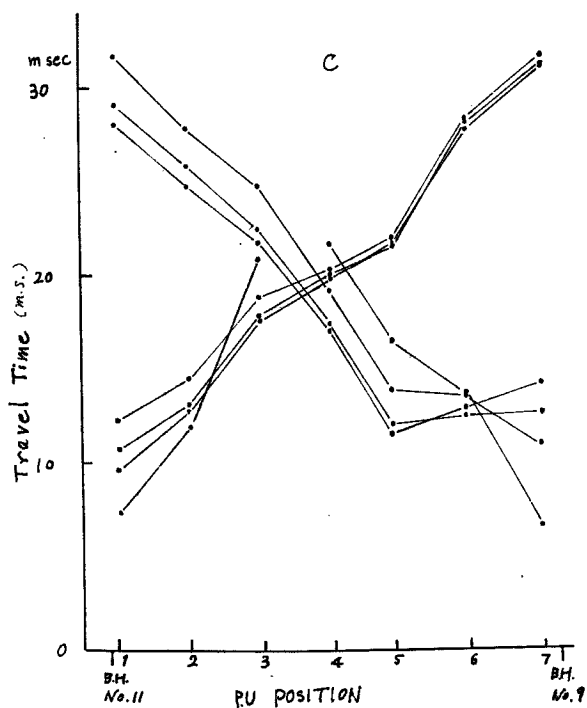


Fig. 5 Travel time curves of surface geophones from borehole shots at C section.

走時曲線と比較し、地下構造モデルを少しずつ修正していく。同時に地中地震計の走時から **Fig. 6** のように波線を作図し、計算された走時と観測された走時を比較するという一連の手続きを何回か繰り返す。この段階では受振点におけるP-波の入射方向、ボーリング資料、地質学的な観測資料等あらゆる参考資料の助けをかり、最終的な地下構造を決定する。求められた地下構造の結果および観測から得られた値を **Fig. 7**, **Fig. 8**, **Fig. 9**, **Fig. 10** に示す。

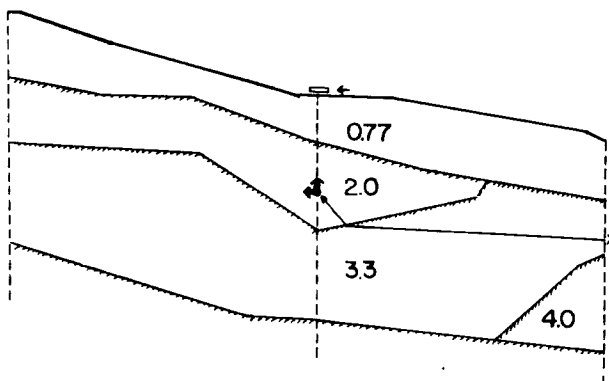


Fig. 6 Example of the wave path from a shot point to the geophone.

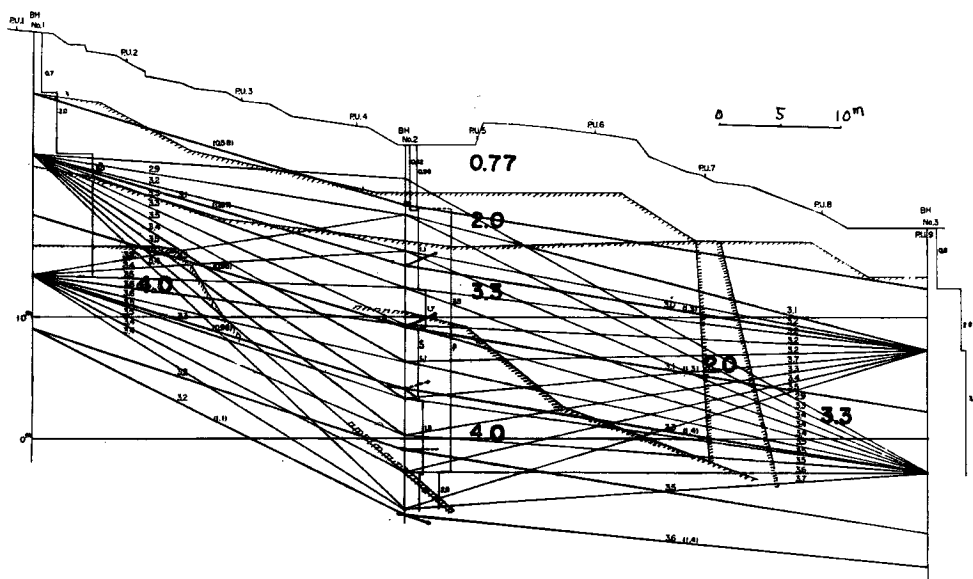


Fig. 7 Results of the prospecting at A section.

なお波線を何回も作図するにあたり屈折透過波の径路を作図する簡単な方法を述べると、**Fig. 10** において(b)のように地下構造モデルを tracing paper 上に描き、境界面に入射する波線をまず引き、その交点を(a)図のOにかさね境界線をx軸に一致させ(c)図のようにする。(a)図はグラフ用紙の上に円を書いただけのものであり、円周上の点の座標がただちに読めるようにしてある。また(d)図は高さの比が

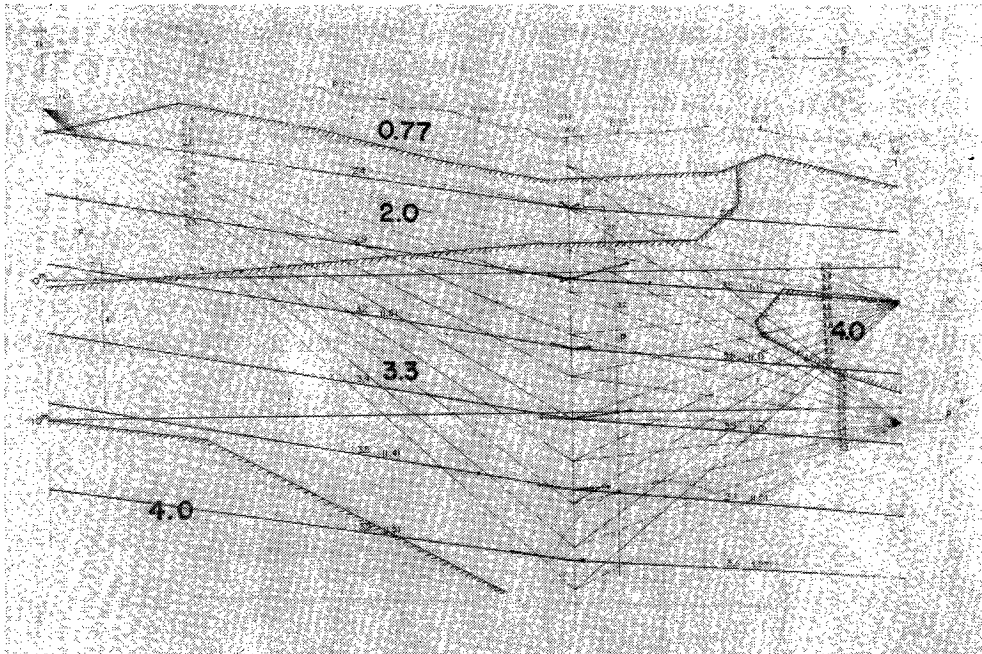


Fig. 8 Results of the prospecting at B section.

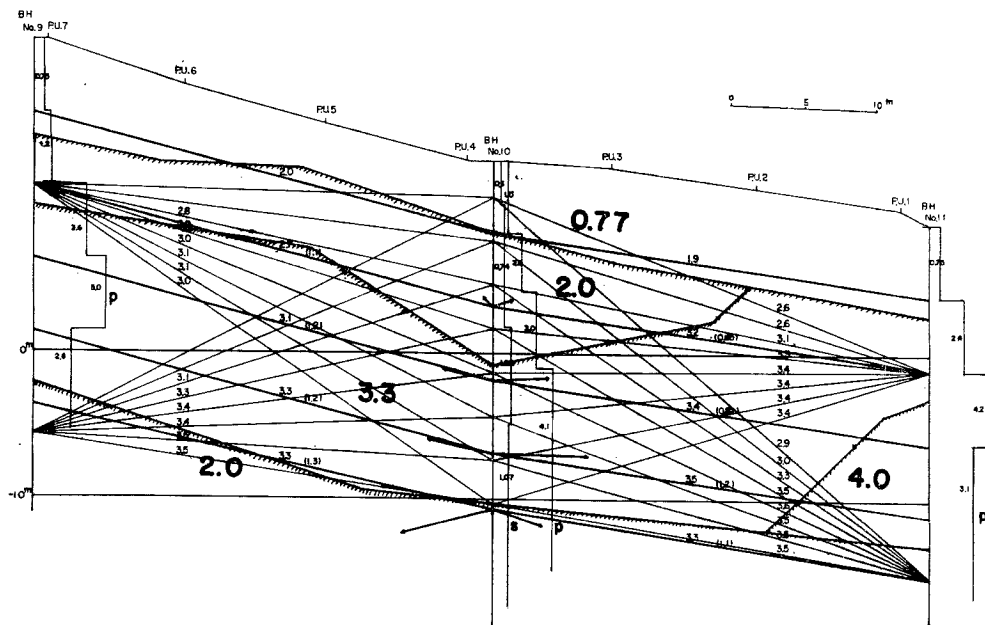


Fig. 9 Results of the prospecting at C section.

v_2/v_1 になるような2つの3角形をあらかじめグラフ用紙上に描いて、斜辺上の任意の点の高さが読みとれるようにしておく。このとき3角形の高さの大きい方を (a) 図の円の半径に等しくしておくことと便利である。いま (c) 図において入射波線と円の交点の x 成分の長さ a を読みとったとする。(d) 図において v_1 に対応する3角形において高さ a になるような斜辺上の点を見つけ、 v_2 に関する3角形の斜辺上のそれに対応する点の高さ x を読みとり、(c) 図において x 成分が (d) 図で読みとった値 x になるような円周上の点を求めて透過波線を引けばよい。

解析結果の Fig. 7~9 において、発破点と発振点が直線で結ばれており、[直線距離/走時] による速度 (km/s) が示されている。() の中は S-波の [直線距離/走時] による速度である。この値は屈折した波については正しい速度を与えないが、速度分布の大体の概念をこの速度をもって知ることができる。また受振点における矢印は P-波の入射した方向をあらわし、その大きさは振巾の相対的な大きさを示すがそれぞれ別々の発破震源によるものであるから詳しい議論の対称にはならない。孔沿いのグラフは速度検層の結果である。

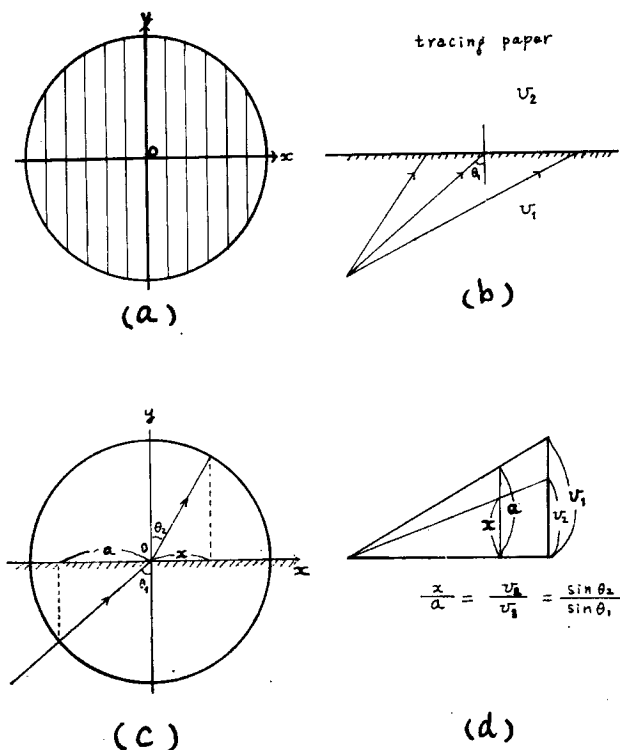


Fig. 10 A graphical method of wave path construction.

4. 議 論

一つの受振点で得られた地中地震計の記録から S-波の phase を読みとることは非常に困難なことであるが、particle orbit から P-波の振動方向と直交することや、他の実験で得られた S-波の記録¹⁾と比較して経験的に、周期、振巾等から波形を検討することにより S-波初動を求めた。particle orbit の一例を Fig. 11 に示す。矢印で示された振動方向の成分を比較すると P-波と S-波の振動方向の交わる角度は $65^\circ \sim 90^\circ$

となる。今回の実験では必ずしもS-波の記録がうまくとれたとはいえない。S-波の phase が明瞭にあらわれるときもあれば、全くそれらしき phase の判別がつかない記録もとれた。どのような状態のときにS-波がもっとよく観測にかかるかということを整理し、その原因を明らかにする必要がある。この実験においては測定孔はビニールパイプのケーシングを入れた状態で地中地震計を固定したために、岩盤とケーシングの間にすきまが生じたと思われる受振点もいくつかあった。測定孔にケーシングのない状態が望ましいのはもちろんであるが、岩盤の状態によってやむを得ない場合にはパイプとまわりの岩盤との間のすきまに適当な詰めものをする工夫が必要である。実験中そのことに気がつき、間げきに砂を流し込んである程度の成果をおさる事ができた

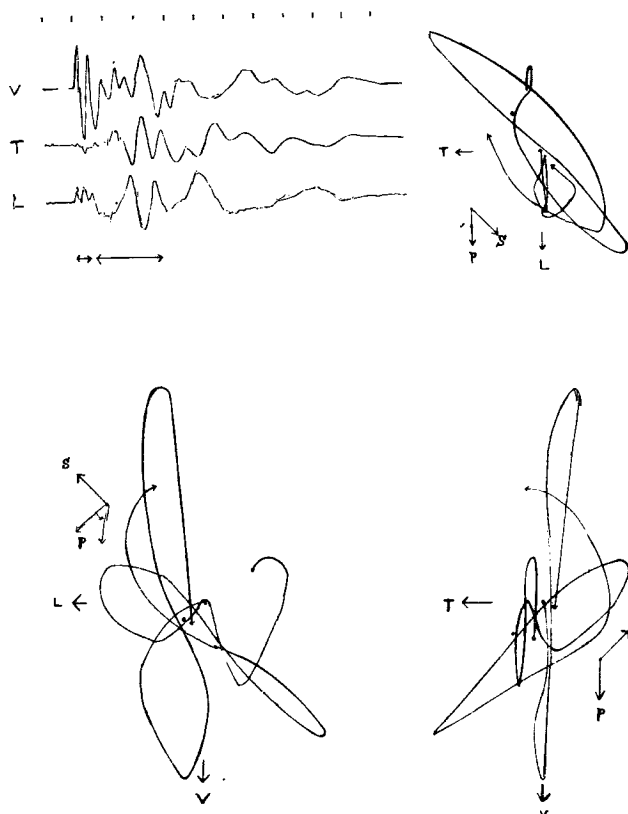


Fig. 11 A sample record obtained with 3 component geophone and its particle orbits.

5. 結 語

土木に必要な力学的量を波動の性質を利用して量的に表現する事が望まれるが、そのためには積極的にボーリング孔を用いた探査がとり入れられなければならない。地表からの探査では低速度層の確認および複雑な地下構造に対する分解能に限度があり、この限界を破るためには観測点を地中にもちこみ、いろいろな径路を通過する波について観測しなければならない。本実験では地中地震計を用いてこれらの試みが行なわれ、ある程度の成功をおさめる事ができた。作業を地表で行うということは坑道内での実験にくらべはるかに能率がよく、また測定器に対する配慮もいちじるしく軽減される。坑道を利用する探査では坑道の状態によつ

て探査の測線計画が制約されるのに比して、地表からのボーリングは比較的容易なため測線計画にしたがったボーリング孔を配置することができ、日時、経費の面からも有利であり実用的である。またボーリング孔の配置を適当に考慮すれば縦方向の断面のみならず横の拡がりに対する地質構造を得る事が可能であり、3次元的な微細構造を推定する事が可能になるであろう。今後残された問題は、測線計画のしかたとそれに伴う構造計算法（解析法）を確立すること、および一つの震源に対して多点で同時観測できるよう受振システムを改良することである。

謝 辞

本実験の現場作業に際して四国電力の担当の方々にお世話になった。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉川宗治, 狐崎長琅「土质地質に対する地震探査の適用例」防災研究所年報第7号, 1964年, pp. 39—49.