

## S V波発生のための二、三の試み

太田裕\*・嶋悦三\*・柴藤喜平・平沢清・伊藤公介

地質調査所

### Preliminary Experiments on Generation of SV-Waves

By

Y. Ohta\*, E. Shima\*, K. Shibato, K. Hirasawa and K. Ito

*Geological Survey of Japan, Tokyo*

#### Abstract

A seismic source cased in an iron pipe is proved to be effective to produce the directivity of the force and hence to generate the SV-waves. We found that, however, the strength of the iron pipe used in this experiment was not sufficient for bigger charges. Stronger pipes should be used in the future study.

It is surprising that the SV-waves can be easily generated by hitting the casing pipe vertically downwards with a hammer. Because the method is simple and practical, more quantitative study on this matter is required.

#### 1 はじめに

前報文<sup>1)</sup>でSH波を発生させるための装置を作製し、これによる実験結果について報告した。また、現場的にS波を測定することの重要性にも触れておいた。ここではS波の他の一つの波であるSV波について、これを発生させるための二、三の試みを行なった結果について報告したい。

周知のとおり、SV波はSH波と違って、この波の生成・伝搬はP波のそれに密接に関係する。このため記録上SH波実験では比較的簡単であったものが、SV波の場合、必ずP波が出現し、記録も複雑になるのが通例である。また人工震源として多く用いられている火薬爆発による場合、これに伴って発生する波群のうち最も優勢な波はP波であり、更に火薬震源はP波に対してかなりの程度まで球対称的と考えるのが一般であった。つまり震源に何らかの処置をほどこさない限りSV波はなかなか発生しがたいとされていた。

このため、従来、時々火薬爆発の際SV波が得られたという報告がなされたのではあるが、多分に疑問視され、あるいはあまりこれを積極的に取り上げようという動きはなかった。

米国ではWhiteら<sup>2)</sup>が石油資源開発の要請で地下構造を調べるためこの問題を積極的にとりあげ、ある程度の成果をみるに至っている。かれらの結果によれば孔井中で火薬爆発を行なった場合、孔井が作用して爆発は非対称的におこる。また孔井を充てんする水中を上下に走る圧力波が発生し、これもSV波発生に寄与しているという。なお、薬量は大きいほど一層SV波発生に有利という訳ではないという。一方国内ではKitsunozaki<sup>3)</sup>が金属鉱山中で、薬室に特殊な操作をほどこして、高周波SVの発生に成功している。

以上はすべて煤質が比較的硬岩からなる場合の実験である。

一方軟弱な地盤内のS波速度を知るためにクイ打ち実験等の行なわれたこともあるが充分な結果はいまだ得られてはいない。

\* 調査員 (東京大学地震研究所)

ところでSV波を発生させようとする場合、震源に何らかの操作を行なって、幾何学的ないしは力学的に指向性を与えて（つまり球対称震源でなくして）やればよろしい。Whiteらの場合はたまたま孔井（爆発孔）自体がこの働きをなした。また Kitsunezakiも爆破用に掘った横穴が同様の作用をなしたと考えられる。彼らのように媒質が硬岩からなる場合はともかく、一般には上述の方法が適用できるかどうかはわからない。特に軟弱地層の場合、上述の方法では同一爆発孔で多数回の爆破を行なうことはとうてい無理である。

SV波発生の場合、同時にP波が出現するのは物理的に避けがたいので、P、SV波識別の問題がある。これは一方では震源の問題であり、また観測体系をどうするかの問題にもつながる。

最近に至って軟弱地層の単純火薬爆発でSV波を観測したという報告も二、三<sup>4)</sup>出てはきたが、いず

れも結果的にSV波が見いだされたといっているのである。

われわれが今回ここに取り上げた実験は、これを一步進めてSV波を積極的にとり上げようとするものである。つまり一方では震源に操作を加えてS/P比を上げ、他方これの実用化への道をきり開こうとするものである。

本研究は科学技術庁国立防災科学技術センターを中心とする地震防災総合研究「地震時における軟弱基礎地盤の振動性状に関する研究」の一つとして行なったものである。なお、解析計算などの研究費の一部は、文部省科学研究費をも使用した。

## 2 実験内容

実験地、測定器械等は前報文と全く同様である。

### (1) パイプ方式による実験

考えはHeelanの理論<sup>5)</sup>、Whiteら<sup>6)</sup>の実験に類似するものであるが、今回の実験地が利根川の川原

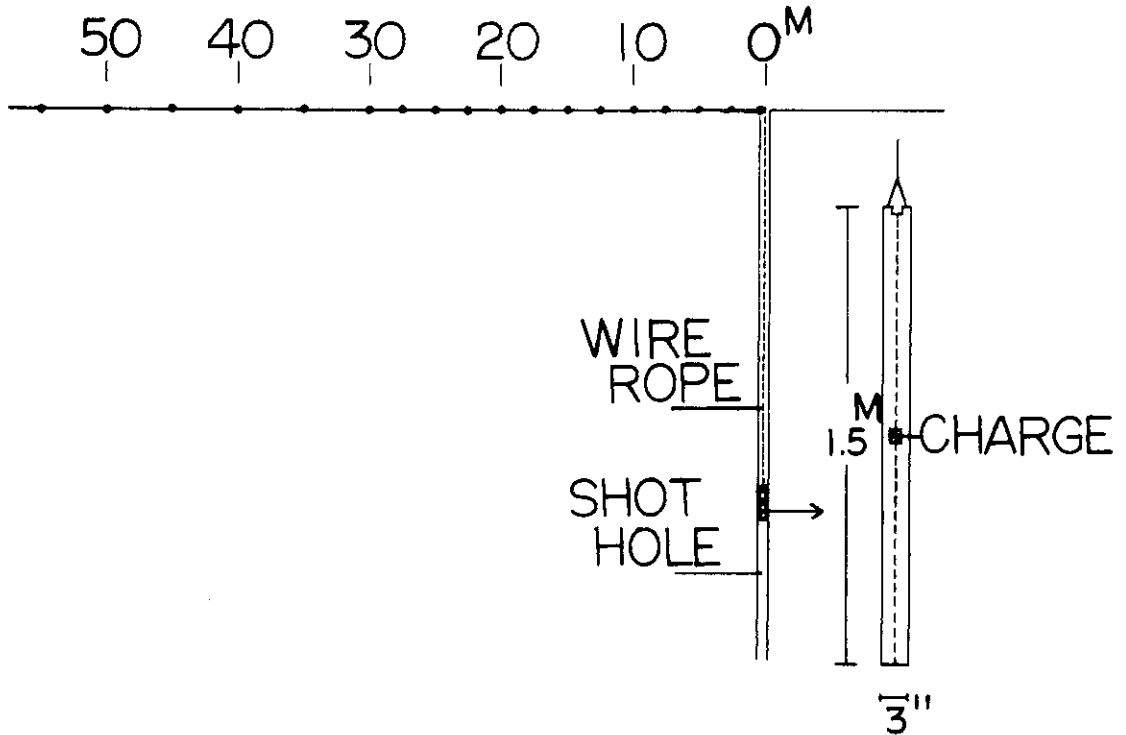


Fig.1. Spread of the seismometers and the iron pipe to regulate the seismic source.

SV波発生のための二、三の試み—太田・嶋・柴藤・平沢・伊藤

であり、またわれわれのおもな関心が軟弱地層のSV波を対象としているため、White らのように孔井内の単純な火薬爆破では①孔井による指向性効果の弱いこと、②孔の保持等の点で問題があり、またこれら欠点を避けるための操作があまり複雑になっても困ること、などの点を考えて、具体的には次のような方法を試みた。すなわち Fig. 1 に示すように、長さ 150 cm、直径 7.5 cm、肉厚 0.3 cm の鋼管（鉄パイプ）を用意し、この中心に所要の火薬を装

てんした状態で、全体をワイヤロープにつないで、孔内におろし、所定の深さで爆破する方式をとった。こうすると鉄パイプの側壁があるため、半径方向の衝撃力は媒質に直接には伝わらず、パイプに沿った方向、つまり上下方向のみに強力な圧力波が発生すると考えられる。この結果全体としては縦方向の指向性をもった震源パターンが形成される。

測線は Fig. 1 に示すように、地表展開を主として用いた。これは  $\Delta = 0 \sim 50$  m の間を PU 間隔 25 m

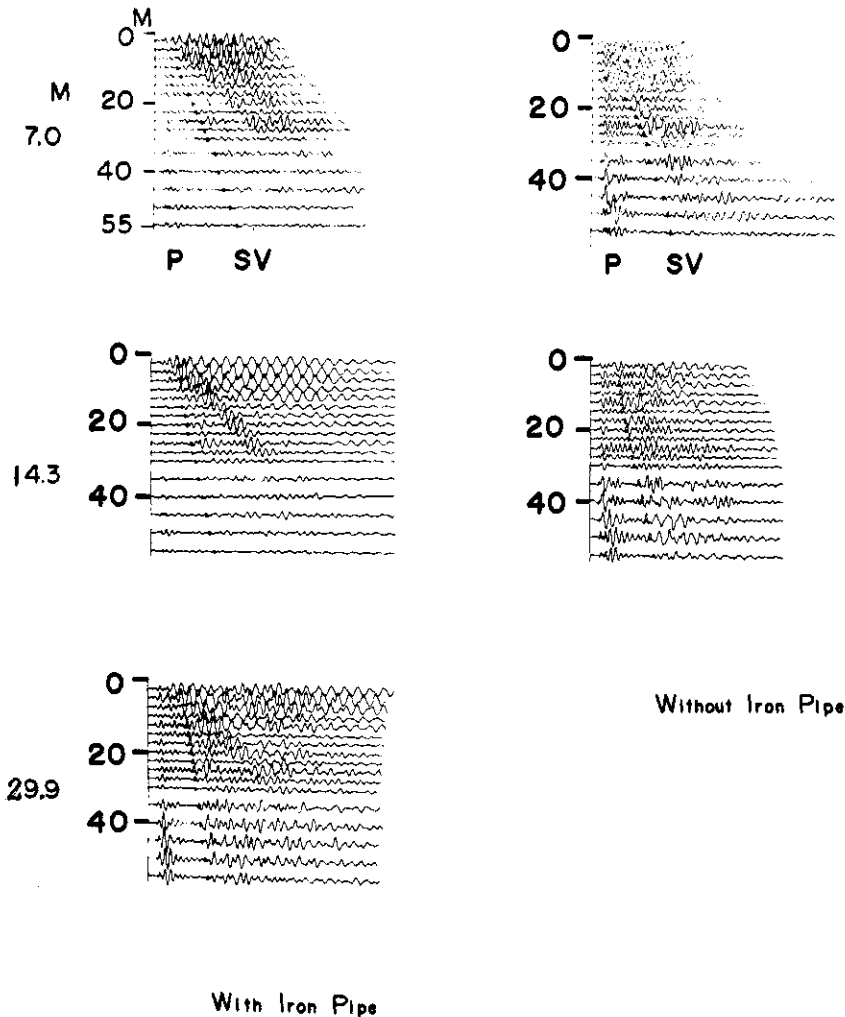


Fig. 2. Comparison of the seismograms from seismic sources with the iron pipe and without the pipe.

あるいは5 m 間隔で鉛直方向または半径方向に配置した。このほか、補助的に爆破孔深度30 m を中心として1/4 円周上に7個のPU地中展開を行なった。前者では45 cps, 27 cps PUを適宜利用し、また後者は45 cps 鉛直 PUで行なった。

実験は当初、深度30 m で鉄パイプ中および、これのない単純火薬爆発の両者を、薬量変化とともに実施して、SV波発生の様子、鉄パイプを用いることの効果の程度等を詳しく調べる計画であった。しかしこの目的で深度30 m, 鉄パイプ中で $100 \text{ g} \times 1/16$ の爆破を行なったところ、鉄パイプの回収が不能になり（おそらくはパイプの強度不足で、孔保護用に入っているエスロンパイプをこわしたので）、このためやむなく、深度を浅くし、深度14.3 m, 7.0 mの2点においてそれぞれ鉄パイプ付、なしの各1回ずつのテストしか行ないえなかった。なお、この際は安全のためキャップ1本ずつとした。得られた記録をまとめたのがFig.2である。このうち左側が鉄パイプのある場合、右がない場合である。両者を対比しながら記録をながめてみよう。いずれの場合も明りょうな波群は3ないし4ある。たとえば真中の図( $D=14.3 \text{ m}$ )について見ると、鉄パイプの有無に関係なく、記録上最も早い時間に出現する見かけ速度 $1500 \text{ m/s}$ のP波、ついで見かけ速度 $250 \text{ m/s}$ 程度の、P波よりはやや周期の長い、孤立的な波がかなり明りょうにみられる（図中に黒丸を付けたもの）。この波の特徴の一つは爆破深度の変化に応じて見かけ速度を異にしており、屈折波を思わせる。これらP, SV波はパイプの有無に関係なく両者に共通して現われる波である。ところが、次の位相、つまり、ほぼ原点から速度 $50 \sim 60 \text{ m/s}$ （最表層S波速度に近い）で続く、明りょうな波群は、鉄パイプのある場合に限って出現する。特に著しいことは、この位相にかぎって、速度、出現時間ともにほとんど爆破深度に関係しないことである。この波を説明する一つの考えとして、爆破に伴って孔井中で上下方向に向かって伝搬した圧力波が表面に達した時、二次的に発生したSV波とみることができ、これを支持する一つの証拠がある。周知のように表面波は震源が浅いほど一段とよく発生するにもかかわらず、Fig.2の記録を見ると、鉄パイプのある場合、 $D=14.3 \text{ m}$ の爆破深度の際にも明り

ように認められる。しかるに鉄パイプなしの爆破の場合、深度7 mでも表面波はほとんど見いだされていない。つまり鉄パイプのある場合、何らかの理由で二次震源が地表ごく近くに発生したものと考えざるを得ない。

次に今一つ注意すべきは、鉄パイプのある場合、P波の発生は、パイプの無い場合に比べて一段とおだやかな点である。記録振幅が小さく厳密な比較はむずかしいが、鉄パイプを入れたことによって多少エネルギー配分が多少とも改良されたのではないかと考えられる。ただ、記録全体としては鉄パイプのある場合1/2～1/3程度と小さいようである。

### (iii) ケーシングパイプ打ちによる記録

前述したように深度30 m で鉄パイプ中の火薬爆発を行なったところ、この付近が崩壊した。そこで、当初の実験計画に加えて、孔壁保護のためのエスロンパイプを地表でハンマー打ちすることによって、SV波を発生させる他の試みを行なった。他方これは鉄パイプを用いたときの波形との対応を知る興味もあった。記録の一部をFig.3に示す。A(1), A(2)がそれである。A(1)は深度30 mの火薬爆発の直後に行なった実験である。またA(2)は深度7 mでの火薬爆発の後に行なったものであり、この時には深度7 m以深のエスロンパイプはすでに破損していた。このため有効長は7 m以内と考えられる。これが原因で、前者の記録でSV波の見かけ速度は $240 \text{ m/s}$ であるのに対して、後者A(2)では、 $120 \text{ m/s}$ が対応する。カケヤ打ちした際の表面SV波はいずれも $60 \sim 70 \text{ m/s}$ と変わらない。つまり、A(1), A(2)はそれぞれ深度14.3 m, 7 mでのパイプ中の爆発の際得られた記録によく似ている。ただエスロンパイプ打ちでは表面波がはっきりしていないが、これは火薬爆発のときのPUが45 cpsであったのに、この場合30 cpsのPUを使ったためであろう。この方式でもSV波の発生が確かめられたのは幸いであった。特にA(1)では $L=17 \text{ m}$ で折れ曲がりが見られ、SV屈折波であることが一層はっきりする。

この結果SV波がパイプの両端（地表面および下端）を原点として発生していると考えられるが、この理由はまだ判然としない。なお同図のBは地面を直接カケヤ打ちした時の記録である。これでもSV

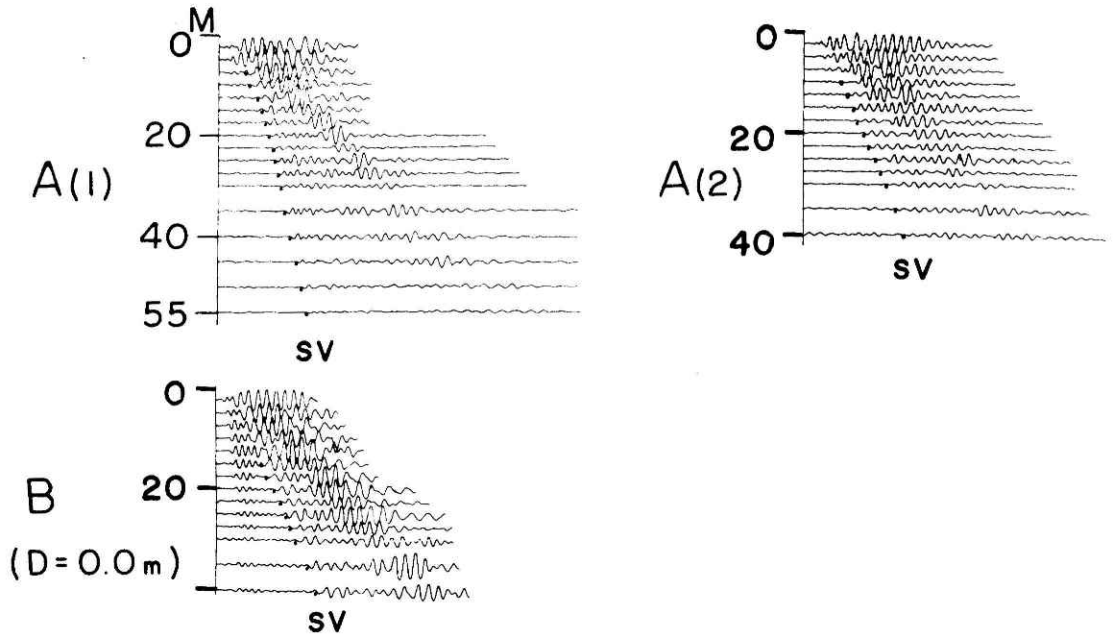


Fig. 3. Seismograms obtained by hitting the casing pipe vertically downwards by the hammer. (A (1) and A (2) ) B is the one from surface hit by the hammer.

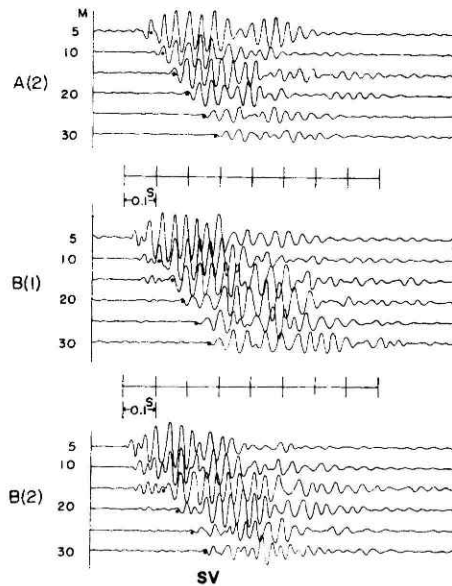


Fig. 4. Examples of records of radial components from various seismic sources. A (2) : hitting the casing pipe. B (1) : hitting the ground surface. B (2) : conventional shot (a cap at the depth of 30 cm).

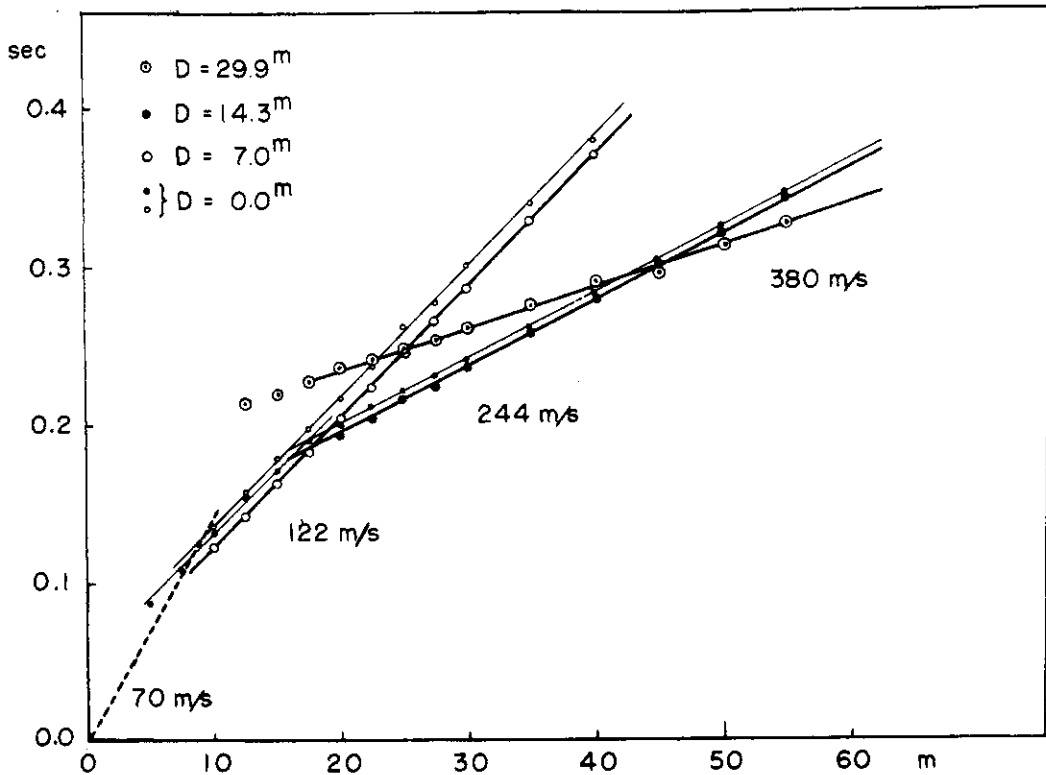


Fig. 5. Travel-time graph of initial motions of SV-waves.

波は現われている。以上はすべて上下動記録である。Fig. 4は、これらを半径方向のPUで観測したものである。ここにA(2)はエスロンパイプ打ち、B(1)は地面を直接ハンマー打ちしたもの、B(2)は深度30 cmでキャップ1本を爆破した際の記録である。A(2)の記録が最もすぐれていることは、— SV波到着以前のP波によるじょう乱が最も少ないことから— 容易に了解できよう。

以上の結果を総括し、かつSV波初動にのみ注目して作ったのがFig. 5の走時曲線である。ただ、これは通常のものとは違って、それぞれ異なった震源深度からの読み取りを1枚の図面に表現したものである。また最表層の速度70 m/sは前報文<sup>1)</sup>の結果および今回のSV直接波の速度を参照して決めた値である。図中の実線はSH波の速度で引いた直線である。

最近SV、SH波速度の差異が論ぜられているが、われわれの実験場では両者に差があると考えなくてもよさそうである。

(iii) SV波による地下構造の推定

われわれの場合、震源の深さは既知であるからFig. 5から手さぐり法の方法で、SV波による地下構造を求めることができる。この結果、

第1層	70 m/s	3.2 m
第2層	122 m/s	9.4 m
第3層	244 m/s	17.4 m
第4層	380 m/s	

が得られる。この実験場では別に、コア試料採取のほか、二、三の物性試験が行なわれている。地質柱状図、電気検層、標準貫入試験の結果とともに、先のSH波による地下構造と合わせて比較したのがFig. 6

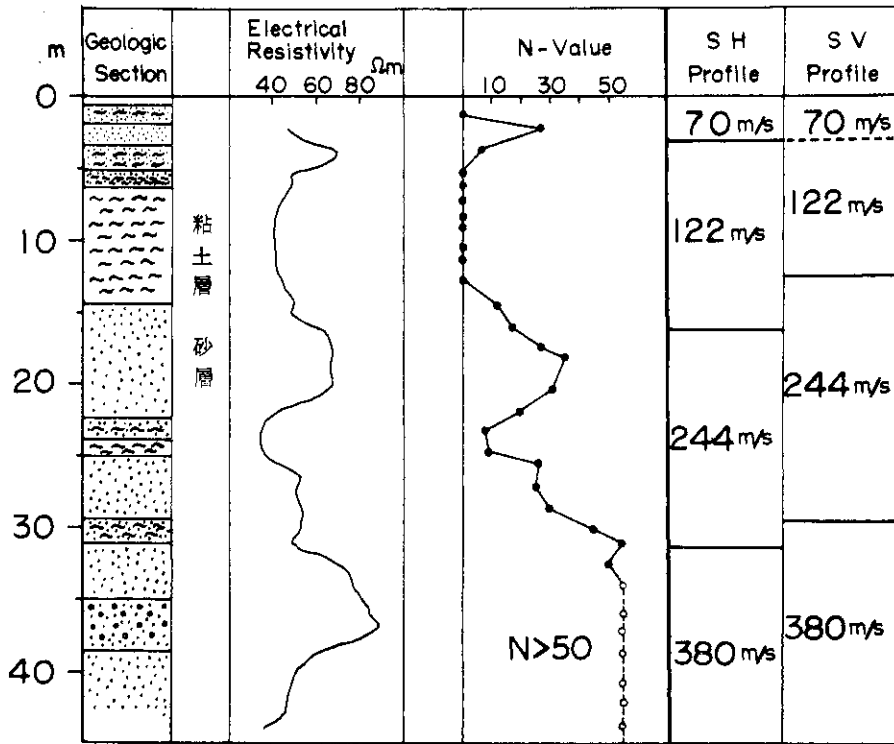


Fig. 6. Underground structure for S-waves.

である。SH波、SV波で構造に若干の差があるが、両者の実験場所が100 m弱離れていること、またいずれも片測線からの解析結果であることを考えるとよく合っている。電気検層、N値の対応関係は大変見事であって、両者は高低の関係がきわめてよく一致している。これを柱状図と比べると、両者は砂層で大きく、粘土層で小さくなっている。つまり物性との関係が大変に顕著である。特に深度4~14 mに存在する粘土質層はかなり軟弱で、これから推測すれば一見低速層の存在を思わせるが、図に見るようにSH波、SV波ともに低速層は存在しない。下へ行くに従って順次速度を増している。従来からN値等の物性を弾性定数との関数関係で結ぼうという考えがあるが、この結果はこれがそれほど単純でないことを示唆する一例である。

深度約30 m ( $N > 50$ ) の変化のはげしい境界は沖積—洪積の不整合面と対比されている。われわれの測定結果でも明りょうである。

P波測定結果によれば深度50~60 mに至るまで

1400~1700 m/sのほぼ均一な速度が得られている。これは上記物性試験とは対応しない。地層構成物質が多量の水分を含有しているためと考えられる。S波測定の意味の一端を示し得たと言えよう。

### 3 結果と今後の問題

鉄パイプそう入実験では、これによって震源に一層の指向性を与えることがわかった。今後鉄パイプ強度を増し、薬量変化等のテストを行なうならば、 $\theta/\phi$ を最も能率よくする適性火薬量を知ることも可能であり、他方この種の実験を通じて、SV波を現場的にたやすく測定する方式を見いだす可能性も出てきた。

またエスロンパイプ打ちでもじゅう分にSV波が発生していることから、実験が手軽であるがゆえに、更にこれに関連したテストを繰り返す必要がありそうである。

なお、SV波測定に並行して各種物性試験も同時に実施し、Fig.6類似のデータを多数集め、これの一般性を知って工学への要求に答える期待もある。

今後ともS波発生と伝搬の問題は積極的に続けられるべきである。

測定全般は宇部興産物理探査班(班長田中敬次

氏)の協力によった。また図面作成は日高、植松嬢に依頼した。各位に厚くお礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) 嶋悦三・太田裕・柴藤喜平・平沢清・伊藤公介：SH波発生装置の試作とその実験。防災科学技術総合研究速報 6, 7 - 14.
- 2) J.E. White and R.L. Sengbush, *Geophysics*, 28 (1963), 1001-1019.
- 3) C. Kitsunezaki, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst.*, 15 (1965), 19-41.
- 4) 高山勉：地震探鉱記録におけるS屈折波。物理探鉱, 19 (1966), 1 - 11.  
A. Kubotera and Y. Ohta, *Spec. Contr. Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, 6 (1966), 267 - 279.
- 5) P. A. Heelan, *Geophysics*, 18 (1953), 685 - 696.
- 6) *loc. cit.*<sup>2)</sup>