

# 地盤調査の科学兵器 S 大砲

柴藤喜平

## 1. 日本の産業ならびに国土開発等の発展 にかくべからざる地盤調査 とくに軟 弱地盤の調査に必要な S 波弾性波探査

日本という国は衆知のように狭隘な上に山地が多くほとんどの産業地帯は その残されたきわめて軟弱な沖積層 または埋立て地帯の上に展開しているし また今後も発展せざるを得ない。しかるに一方 日本は特質として 台風 地震 大雨等の天災が非常に多く これらの軟弱地質は 上述の自然現象のために種々の災害をおこし しばしば社会問題として 新聞をにぎわしている。したがって わが国の産業の発展は 軟弱地盤というきわめてウイークな面の上にうちたてられねばならぬことになる。

これは日本にとって 軟弱地盤の調査がいかに重要な意味をもっているかを物語っている。また軟弱地盤とはいえないが 硬い地盤内でもその中に 種々の破碎帯やクラック等があつてウイークになっているところなどトンネルやその他の土木工事の設計において重要な問題であり 今までの調査で種々研究されてきた。しかしはなはだ 残念ながら硬軟いずれの場合も問題にとりくむためには 従来から行なわれていたボーリング 土質調査ならびに今までの地震探査だけでは十分な資料が得られず ものたりなさがあつた。これらの調査の要求にもっと接近した資料を出す目的にうかびあがってきたのが S 波による弾性波探査である。

## (2) S 波による弾性波探査の効果

軟弱地盤の調査については ボーリングや土質調査等を行なうことはもちろん必要であるが これらは地盤の静的な性質の一部で これら地盤の調査には動的な性質をもあわせ調査し 総合的に判断するのが 最も大切であることはいうまでもない。

動的性質の調査には 従来より弾性波探査によって P 波の伝播速度の分布を求め それによって地下構造および岩盤の硬軟の程度を判断する資料とされていたが 盤圧のため岩盤が破碎していたり クラックがあつても岩盤が硬い場合は かえつて P 波の速度は早くなり 破碎帯の存在を予知することが不可能となることが多かつた。また 軟弱地盤の場合には P 波の速度は土質の硬軟より 土中の含水率 (水中の P の速度  $1500 \text{ m/sec}$ ) によ

つて左右され とくに地下水が浅い場合は構造物の基礎としての調査方法としては好ましくない状態であつた。また 大地震時の構造物その他の一次的被害の程度は主として その地点の基礎地盤の良否によってきまるとされているが これの判定に最も寄与するのは地盤の S 波速度であり 基礎と表層との S 波速度比であるとされている。とくに最近になっては土木方面から岩盤の土質力学的資料 (弾性定数) を要求されるようになってきた。こうなってくると ますます P 波だけの測定により 地面の弾性定数を求めることは不可能になってくる。

岩盤の弾性定数の測定には ジャッキ法や水密法や試料から直接室内実験で求める方法もあるが これらは測定する岩盤が露出していないと使用できないし また露出していても 風化したところの弾性定数を測定したことになることが多く 欠点があつた。以上に述べたように 動的な性質の調査には P 波による測定だけでは不十分な点が多かつた。しかるに S 波は性質上 媒質の剛性率と密度によってきまるから 岩石中に破碎帯があれば 当然剛性率の変化が予想され S 波による弾性波探査で検出できる可能性がある。また軟弱地盤の場合にあつては P 波と違って S 波速度が含水量の影響を受けにくいので よりよい地下構造の推定資料としてのである。とくに土木方面からの弾性定数の要求にも 従来からの P 波による弾性波速度のほかに S 波の弾性波速度を求めることによって 理論計算により弾性定数を求めることができる (ただしこの議論は 地盤の振動振幅が あまり大きくなく「フックの法則」にしたがう範囲 すなわち線型弾性論で議論できる範囲でなくてはならない)。

新潟地震などで大被害をうんだいわゆる地盤の流動化は 上記の範囲をとびだして 非線型の領域にはいつていると思われるが このような領域に成立する理論は現在のところ確立されていない。したがって 現時点にあつては データの蓄積により どこまで線型弾性論であつかえるかを調べるのが先決だと思われるのである。

以上のように P 波の速度測定のほかに S 波の速度もあわせ測定することにより 弾性定数を求め 岩盤を総合的に判断することは 解析上間違いを生ずる可能性が少なくなる等の利点も考えられる。

### 3. S波による探査のむずかしさ

普通の地震を観測すると 初期微動と呼ばれる小さい振動に始まり 次に主要動と呼ばれる大きい振動が少しおくれて始まる。前者をP波 後者をS波と呼ぶ。これらは各々 Primary wave, Secondary wave の頭文字をとったものである。P波は圧縮膨脹の変形の状態の伝播であり 粒子の振動方向が波の進行方向に平行であるから縦波といい S波は捩れ変形状態の伝播であり粒子の振動方向が波の進行方向と直角であるので横波という。従来からわれわれが行なってきた弾性波探査はダイナマイト爆発によって生じたP波により地下の構造を推定していたものであった。このP波による探査はその歴史も古く 現在では探査方法も確立され 解析方法も一般にいくつかの定まった方法がある。しかしS波は P波のようにダイナマイト爆発によって簡単に発生するものではなく また発生しても S波の伝播速度はP波のそれより遅く 記録紙上にはおかれて到達するので S波を受振しようとする場合 すでに到達したP波によって受振計がゆれている時刻に入射してくる。したがって P波の中からS波のゆれを判別することが必要となってくる。しかしこれは非常に至難の技術なので 従来からS波による弾性波探査はあまりやられていなかった。

### 4. S波とP波とから求められる弾性常数

弾性波探査によってS波とP波との速度が求められ別に岩石の密度を測定すれば 種々の弾性定数の間には次のような関係がある。

$$E = \rho(3P^2 - 4S^2) / (P^2/S^2 - 1)$$

$$n = \rho S^2$$

$$K = \rho(P^2 - \frac{4}{3}S^2)$$

$$\sigma = (\frac{P^2}{2S^2} - 1) / (\frac{P^2}{S^2} - 1)$$

ここで E=ヤング率 P=縦波の速度  
 n=剛性率 S=横波の速度  
 K=体積弾性率 ρ=密度  
 σ=ポアソン比

ポアソン比と  $(\frac{S波の速度}{P波の速度})$  %との間の関係の概要を表にすると 次のようである。

σ (ポアソン比)	S波の速度/P波の速度 (%)
0	71.42
0.25 (岩石)	57.73
0.3	53.45
0.4	40.81
0.5 (水)	0

この表でσ=0という物質は事実上ないが σが0~0.5までの上限と下限の場合のS/P%の限界を示すとこのようになる。σ=0.5というのは 水の場合であり ほぼσ=0.25は岩石の場合である。したがって水中では  $\frac{S}{P} = \frac{0}{1.500} = 0$ となる。この表で最も注意すべき点はσが 0.4と0.5との間で  $\frac{S}{P}$  が急激に小さくなることであろう。軟弱地盤のσは0.5に近い値でありしたがってこの表から S/P もきわめて小さい値になることがわかる。このことは従来軟弱地盤も σ=0.25として取り扱っていたために S/P が実際と違った結果となり おかしなことになっていたことが容易にわかる。

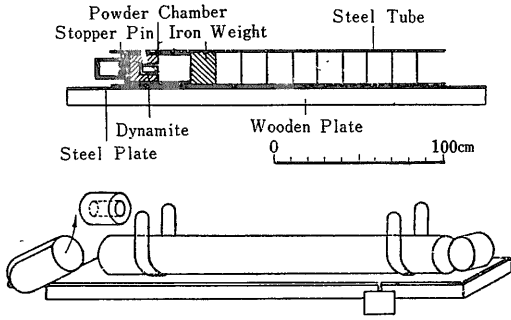
### 5. 今までのS波発生装置の歴史と特性

このように重要であるS波の測定が 従来あまり行なわれなかったのは 先述したように 1つにはS波の発生装置がむずかしかったことと 他の1つは記録紙上で受振した波のPとSとの分離が困難であったことによるものである。したがって 今P波を全然またはほとんど発生せず S波だけを発生させることができれば S波の測定には上述の問題は一度に解決される。S波のみを発生させる方法には地層にねじりを与えるか すべりを与える方法がある。ねじりを地層に与えることは未だ成功していないが すべりを地層に与えることはさほどむずかしいことではない。すなわち 地表または地層の内部を 一方向にこすってやればよい。測定も近似的には 一方向の変位を測定すればよいのでやさしい。世界でいろいろと S波発生に関して研究がなされてきたが その代表的なものの歴史と各装置の特長をあげると 次のようである。

- ① アメリカ：プランコ型けんすい振子を地表にずらせるようにし その時の摩擦力をS波の原動力とするもの
- ② 村 内：火薬の形状を工夫し その幾何学的な形から生ずる波のうちから S波成分をとり出すもの
- ③ アメリカ・表・小牧：円筒形の容器に火薬を充填して爆発させ その反動力のエネルギーを装置と地面との間のズリの力にかえてS波を発生するもの
- ④ 小 林：地中に水平に埋めた木材を長さの方向にたたいて 水平衝撃力を与える この力が板と地面のズリの力となってS波を生ずるもの(板叩き法)

等がなされている。

これらの内①と④についてはエネルギー源に限度があるので あまり大きいものは望めない。②と③については 火薬源なので 将来大エネルギーを利用しうる可能性がある。しかし機構的に今まであまり成功とはいえないままで終っている。近距離の場合は 板たたき法は波形が割合によくそろっているし 小規模な土木



第 1 図 S 大砲

現場の物探なさなどには手軽な点でよく使用されている。しかしエネルギーの与え方が人力によるので S 波の立ち上がりがあまり明瞭でなく たたき手の個人差によるむらがある。またこれの実用使用距離は条件がよくて 100~150m であるので 地下 20~40m 位までしか解析出来ない。この点 S 波利用の将来性からみて不十分であろう。

したがって発生装置の大型化 エネルギー供給方法の改良が今後の問題とされていた。

### 6. 今回研究された S 大砲とは

以上述べてきたように S 波を発生させるために以前から種々の考案がなされてきたが 色々な面で必ずしも満足すべきものではなかった。したがって今回地震研究所と地質調査所とが共同でその装置を考案し 従来の欠点を除き成功をおさめたので ここに紹介する。

まず 従来の諸考案から この装置のために配慮すべき点をまず列挙すると 次のようである。

- ① S 波を安定に発生すること (再現性があること)
- ② 立ち上がり (初動) が強力であること
- ③ 到達距離がすぐれていること
- ④ 取り扱いが余り複雑にならぬこと
- ⑤ 他の波の発生が少ないこと

従来からの板たたき法はたいへんよいものであるが再現性と 立ち上がり、到達距離の点で問題が残されている。

前に述べたように これらの点を解決するために小牧らは火薬を用いて 研究を行なったが 装置のアンバランス 地盤に固定するためのスパイクが P 波を発生するものになって うまくいっていなかった。

したがってわれわれは 板たたき法の原理に火薬力を用いる方法を考えた。すなわち 第 1 図のように板の上に大砲をとりつけ その中で火薬を爆発させ 弾丸の飛び出す反動で 板と地面との間にすべりを生じ S 波を発生させる方法である。

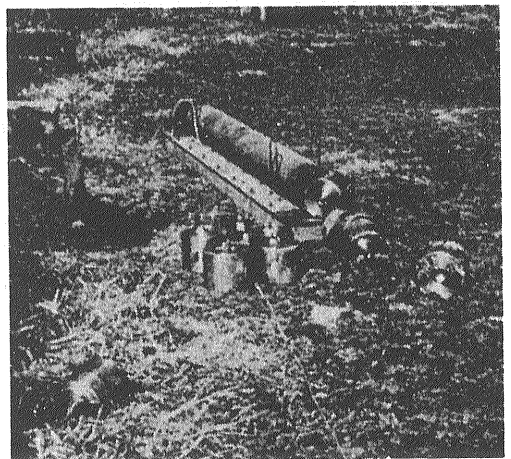
すなわち 媒質とのコンタクトには板たたきの方法をとり入れ 力源に火薬を用い また全体のバランスにも留意した。いわば 今までの装置の長所を十分に生かしたものを作成したもので われわれは これを S 大砲と名づけた。具体的には 1 図のよう板 (50cm×5cm×250cm) を台座とし この上に直径 20cm 肉厚 0.8cm 長さ 200cm の鋼管を固定した。この片側に図示のように二重におおった薬室 (内側は耐熱特殊鋼) を設け これと鋼管とは 火薬装てん後 ストッパーピンでしっかり固定した。

一方鋼管の他の側は ほぼ鋼管の内径を直径とする 1 個 30kg のおもり 9 個を装てんし これによって装置全体のバランスを一層よくすることをねらった。したがって台座—鋼管—薬室は原理的には一体として動作することになる。火薬の爆発によって生じた鋼管内圧力によって おもりは全体として衝撃的に外部へ飛び出しこの反動によって 鋼管 したがって台座は前方に押し出され この間地面との間に急激なズリ応力が発生する。なお鉄のおもり 9 個で 270kg 鋼管+薬室+台座で約 300kg 合計して装置全体では約 600kg 弱である。

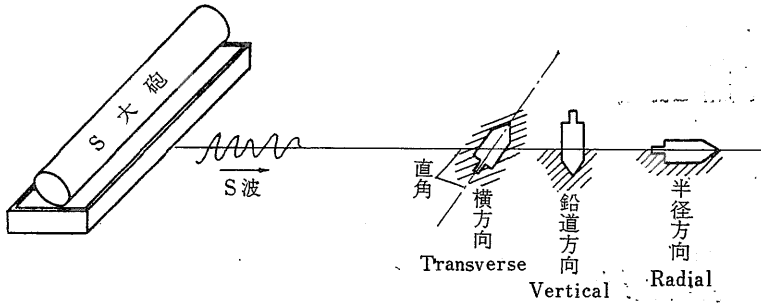
第 2 図は全体の写真である。地面においてあるのが 1 個 30kg のバランススイートである。

### 7. S 大砲により得られる記録

受振計については また後ほど述べるが 今回の実験では P 波用の 30cps の受振計を 3 成分観測 (鉛直方向 横方法 半径方向 図面③参照) で S 大砲より 22~32m の間にならべて 波の観測を行なった。この結果の一部を第 4 図に示す。これは波動の再現性と薬量変化 ( $100\text{ g} \times \frac{1}{16} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2}$  の 4 段階) との関係をテストしたもので それぞれ 2 回づつ実施している。



第 2 図 S 大砲の実物写真



第3図 受振計の3方向のならば方

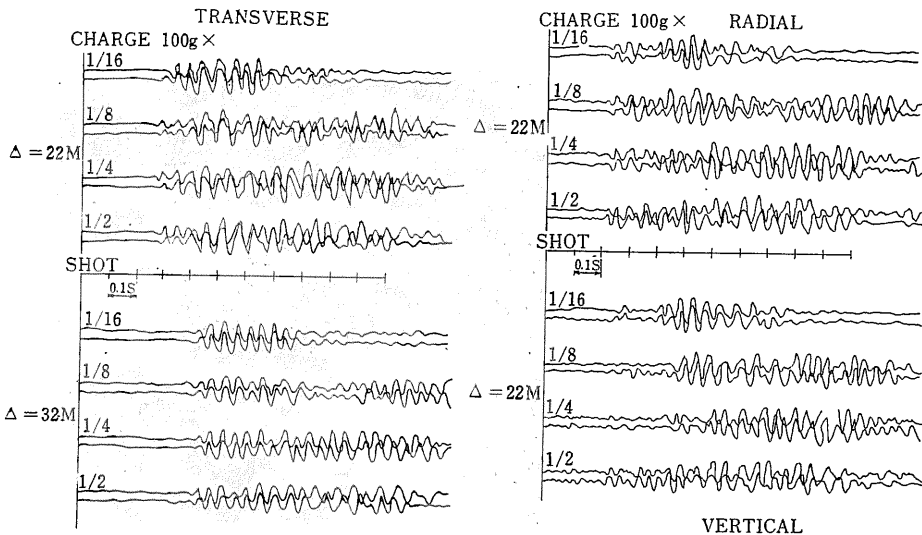
この結果 3成分とも波形の再現の程度は いずれの葉量の場合でもたいへんによい。なおさらに詳しく見れば 鉛直方向 半径方向 横方法の順に 両者の対応が一段とよくなっている。とくに横成分では それぞれかなり細部にいたるまでよく一致している。この結果からこのS大砲は 板たたきの場合と違って それぞれの爆発の葉量さえ一定ならば かなり安定した波動を送り出すことがわかる。次に葉量変化のテストは葉量の増大に伴って振幅 周期ともに 増加するだろうとの予想のもとに実験したものであったが 第4図に見られるように若干の伸びは見られるものの その程度は期待される値とは違ってきわめてわずかである。この原因についてその後研究された結果 S波の発生機構が 爆発の際の台座と地表面との間に発生するズリ応力によっての関係上 両者間に働く摩擦力を増大するために装置全体の重さを増す必要があることが判明した。

第4図の実験ではすでに  $100g \times \frac{1}{16}$  程度の葉量で 総重量600kgの摩擦力に打ち勝っていると考えられたが さらには葉量を増しても ズリ応力を一層大きく

する効果がほとんど見られない。この点を考慮して 第2次S大砲(第5図)は重量を増し 葉量増加によるズリ応力の効果を出すように配慮がなされ すでに大なる成果を収めている。

さて この第1次S大砲でどの程度の距離まで S波が到達するであろうか これを調べるために

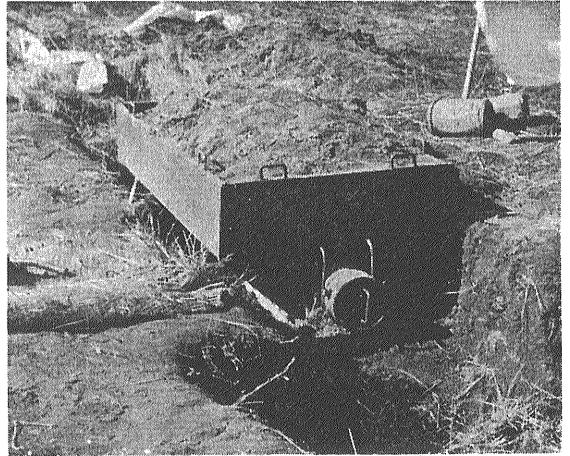
30cpsの受振計17コを1スプレッド(受振計間隔3m 1スプレッドの長さ51m 受振計方向は横方向)とし 震源から6スプレッド(306m) 以後は6m間隔で2スプレッド 最遠点までの距離510mとして S波の観測を行なった結果(前述のように装置全体の重量がかなり不足していることがわかったので 応急措置として台座をコンクリート打ちすることによって 重量補充をした後この実験を行なった) 第6図 a, b のような記録がとれた。aは波形全体を見やすくするため やや利得を下げた状態で再生したものである。速度70~75 m/sec 振動数15cps 位のとくにはっきりした位相は 一見S波を思わせるが 実際には位相速度(70~75m/sec)と最大振幅伝播速度(60m/sec)との間に明りょうな差があり Love波であることは間違いない。このほか主要な波群のほとんどはS波初動と Love波との間に存在する。なお原点から330m/sの速度で かつきわめて短周期(100cps前後)の波がS波初動に先行しているがこれは火薬爆発に付随する音波である。これを除けば記録上の波形はすべてS波起源の波と考えてよい。通常の火薬爆発の記録に比べて 著しく単純なことを特長としている。



第4図 S大砲による波動の再現性と葉量変化との関係

第6図 bはS波初動をさらに詳しく調べるため おそい位相の振幅を犠牲にして やや利得をあげて再生した結果である。これにみるとおり 200mまでの距離は S-N比がたいへんよく S波初動は明りょうに読みとれる。第4スプレッド付近ではS波初動の読み取りはかなりつらくなるが読みとりは可能である。

ところが第5スプレッド以遠はノイズのためS波初動はたいへん読みづらくなる。これはもちろん振幅におけるS-N比の点もあるが 信号 ノイズ両者の周期 (25~30cps)が一致しているのがおもな理由である。しかしb図にわかるように初動に ややおくれた位相は300mの距離まで はっきり読みとれる。このようにテストした結果 S大砲は十分安定したS波を発生し その到達距離の点でも 従来の各装置に比べて一段とすぐれた性能をもっていることが立証された。第7図は第6図のS波の走時曲線と それによって計算された地下構造を示している。



第5図 第2次S大砲の実物写真

### 8. S波測定に必要な計器

ここではもちろん完成した計器の説明はまだ不可能である。ただどのようなものであった方がよいかという理想的なことについてだけ述べることにしたい。

**弾性波探査器**：観測には現在はE.T.L等の普通の地震探査器が用いられているが とられた波の mixing, filtering等を行なったり 波の形や減衰等が研究される必要が生じてくるので 理想としては磁気記録式の地震探査器が必要となってくる また深部のS波の反射等をとる場合は 波の到達時間が非常に遅いので フィルムの巻取り法が考案されねばならなくなってこよう

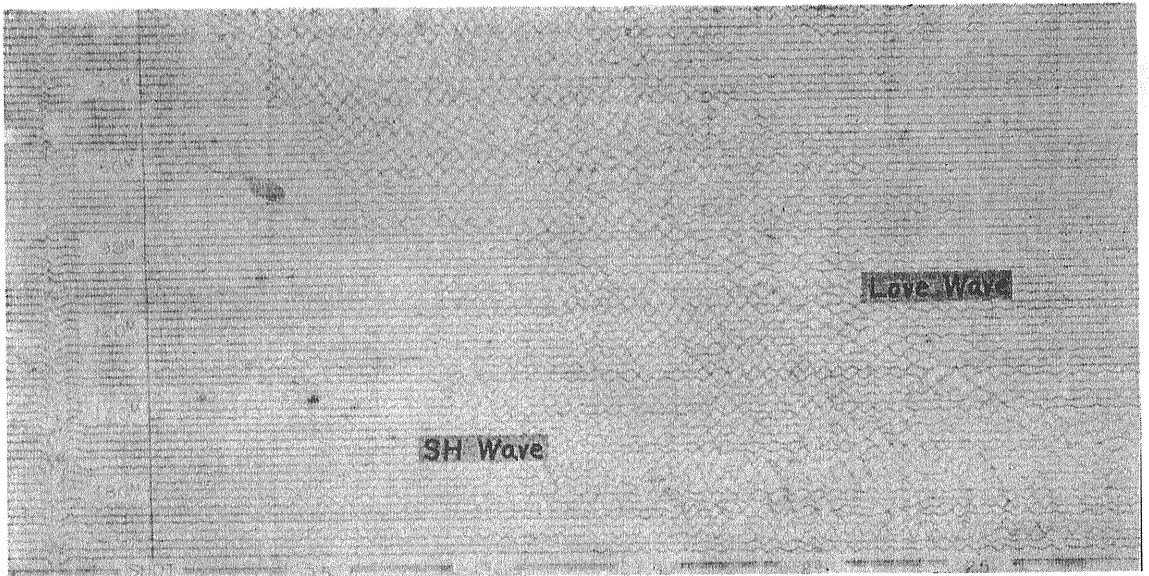
**受振計**：S波の周波数はP波のそれに比較して低いとくに地下構成物質が軟弱な土質では周波数はますます低いしたがって普通P波の弾性波探査に使用されている受振計(7~25cps)のものでは周波の長い波を測ることは適当ではないことは明らかである。とくに波形等を問題にするようになってくると P波用のものを横においただけでは 精度の点において不十分であると共に 各受振計の特性をそろえ

ることがむずかしく 波形解析の際 波の対応がつけにくいしたがって理想としてはS波の受振は忠実に波形を表示してくれるS専用の受振計を用いる必要がある

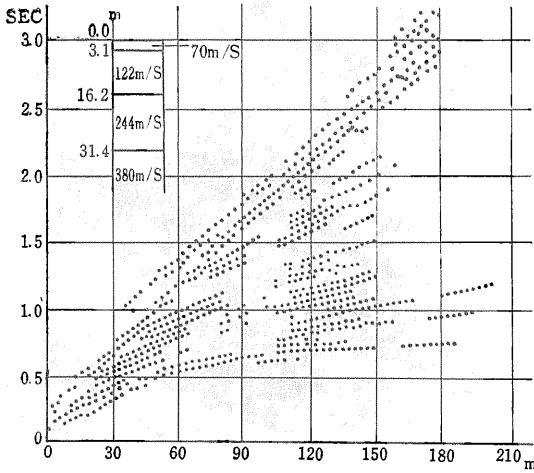
しかしながら 上述のことはあくまでも理想であって E.T.L等の普通の地震探査用のものでも また受振計も普通のP波用のものでも うるさいことをいわねば 現時点ですでにS波の観測ができるということは ここで最も力説しておきたいことである。

### 9. S波測定による今後の調査の発展について

S波による調査の必要性については すでに述べたとおりであるが 日本における現状はまだまだの段階であり やっとこれらの研究が緒につきだしたという位のものである。



第6図 a 第1次S大砲によるS波到達距離の観測結果(利得を下げて再生したもの)



第7図 S波の走時典線とその解析の結果  
S波調査をP波なみに使用するようになるためには 次のような点が研究されねばならない。

- ① S大砲の実用化研究 (実用的S大砲の設計)
- ② S波専用受振計の研究 (波形論議ができる受振計の完成)
- ③ S波の垂直方向の伝播速度を直接測定する  
velocity-logging

④ S波による反射法の研究

⑤ どの程度の振動に対して軟弱地盤が弾性体として とりあつかいうるか?

⑥ 等々 破碎帯のクラック調査への研究

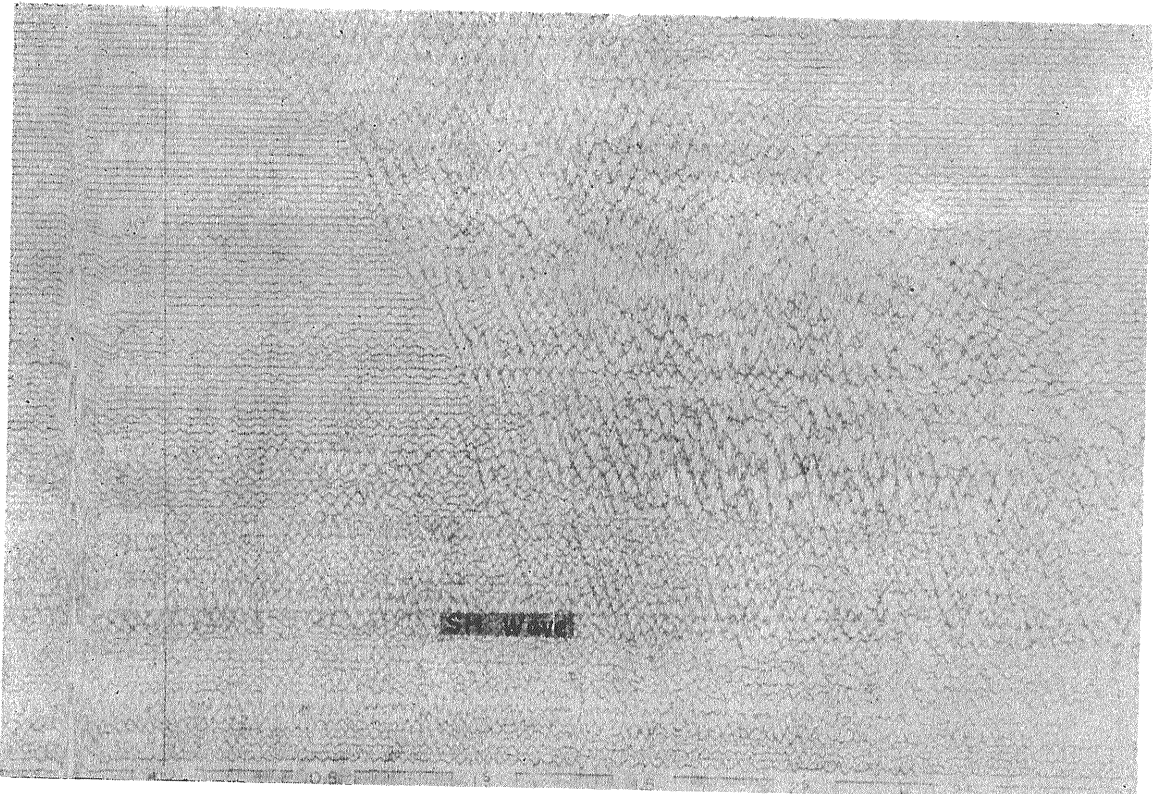
しかし S波測定は社会的要請のきわめて強い分野だけに これらの研究もまもなく完成し ますます応用範囲を広めていくものと考えられる。

最後に本文の草稿にあたり数多くのご教示をいただいた東大地震研研究所の 嶋 悦三 大田 裕 両助教授に深く感謝を表する。

(筆者は 物理探査部 探査課長)

参 考 文 献

1. 嶋悦三・大田裕・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号
2. 地震探鉱実験グループ：シンポジウム特別号 地震探鉱  
実験グループ会報 37号
3. 服部保正：弾性波探査法 地質工学 第4輯
4. 高橋竜太郎：軟弱地盤とS波 地質工学 第4輯
5. 鈴木武夫：軟弱地盤の地質調査 地質工学 第4輯



第6図 b 第1次S大砲によるS波到達距離の観測結果 (利得をあげて再生したもの)