

SH波発生装置の試作とその実験

嶋悦三*・太田裕*・柴藤喜平・平沢清・伊藤公介

地質調査所

Designing of an SH-Wave Generator and Its Field Tests

By

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

Geological Survey of Japan, Tokyo

Abstract

The Mark I SH-wave generator and its field tests are introduced in this paper. The generator was successful to produce SH-waves and its capacity was so excellent that the observable distance of the generated waves was greatly extended. Owing to the shortage of the dead weight of the generator itself, however, it was inconvenient to study how amplitudes and periods of the generated waves are affected by the increment of charges. When firing a large amount of charges, the generator revealed a strong unbalance. These demerits may be easily improved.

Finally derived S information *in situ* is summarized in Fig. 8.

1. はじめに

従来、地震探査の方法によって、構造を知り、煤質の震動性状を知ろうとする場合、主として用いられたのは直接あるいは屈折P波の初動走時を使った解析であった。周知のごとく煤質の弾性的性質を理解するにはP波による情報のみでは不十分であって、S波に関する知識がぜひとも必要である。ある場合にはP波よりもS波に関する資料が一層重要となることもある。たとえば、大地震時の構造物その他の一次的な被害の程度は、主としてその地点の基礎地盤の良否によって決まるとされているが、この判定に最も関与するのは地盤のS波速度であり、基盤と表層とのS波速度比であるとされている¹⁾。それにもかかわらず従来弾性波探査による地盤調査には主としてP波による法が行なわれ、S波を使った例はきわめて少なかった。われわれが研究の対象

としている地表面近傍ではP、Sによる速度境界が著しく異なる場合が少なくないと考えられる。たとえば煤質を構成する物質中の水分存在の程度はP波速度にはきわめて敏感であるがS波に対してはそれほどではない。このような場合S波測定が不可欠となる。また、仮にS波による構造がP波のそれと一致する場合でも両者はお互いに独立な測定量であるから、P、S両者を同時に測定しておけば結果の信頼性を一段と増すことになる。

このような理由からS波を現場で、直接あるいは間接に測定する試みは過去に多くなされた。このうち前者は多くが、重錘落下、火薬爆発にともなう発生したSV波をとらえる方式²⁾である。ここで特に問題となるのは震源の与え方と、この方式では必然に発生するP、Rayleigh波からのSV波分離の方法であった。一方これとは逆に発生したRayleigh波からS波速度を推定する試みもあった。しかしこの場合、表面波の性質上、また実験技術的にも、大変

* 調査員 (東京大学地震研究所)

良くいって、表層ごく近くのS波速度の推定が精々であった。これらはいずれも記録上SV波またはRayleigh波などの後続波として表われ、これを利用してはいるのであるからP波初動を利用する場合に比して若干精度が落ちるのはやむをえない。

S波を記録上の初動として観測する方法がある。われわれの今回の実験もこれに属するもので、S波の一つであるSH波を使う方法である。弾性波理論でよく知られているように、SH波はP、SV波とは違って、これの伝搬法則はきわめて簡単である。したがって震源で何らかの方法でSH波のみを発生する工夫がなされるならば、以後の記録解析等の処理はSV波に比べれば一段と容易になる。この観点からSH波のみを出す震源の工夫がなされてきたのではあるが、近年に至るまで見るべき成果は得られなかった。

Jolly (1956)³⁾ は彼のいわゆる 'Gun' と称するSH波発生装置を試作して、ある程度の成功を収めた。一方国内ではほぼ同じ頃、小林直太を中心として小爆破グループで、'板叩き'によるSH波発生法⁴⁾が工夫され、現在ごく小規模の実験では実用に供せられるようになってきている。これは長さ15～25 m、幅30～50 cm、厚さ5～8 cmの板を地面におき、これにじゅう分な重量をかけた状態で板の1端をカケヤで強打して、地面と板との間に瞬時のズリ応力を発生させる方式である。これは原理、実際の操作等大変簡単な秀れた方法ではあるが、力源を人力にたよっているためSH波の到達距離にはおのずから制限があり、現在実用上は100～150 mが限度である。また、当然のことながら記録の再現性等にも問題があり、波動理論との対比の実験には直ちに使えない。

こんな訳で、この人力を火薬におきかえて到達距離、立ち上がりを改良する目的で小牧⁵⁾は、先のJollyのものによく似た装置を作成したが、装置と地面とのコンタクト、全体のバランスに若干の問題があり、現在までのところ板叩き法をしのぐには至っていない。

筆者らはかねてから、これらに代わる一層安定度の高いSH波発生装置の出現を期待していたところ、今回機会を得て、SH波発生装置を試作し、これの実験を行なったところ、かなりいい結果を得たので

ここに報告したい。

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」の一つとして行なわれたものである。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 発生装置の試作

従来の装置を一段と改良し、一層安定度の高いSH波発生装置を作成するという観点から、今までの装置の長所・欠点を考えてみよう。この種の装置が実用される場合、次の諸点に対する配慮が最も重要であろう。

- ① SH波を安定に発生すること
- 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

①は更に詳しくいえば、SH波以外の波の発生の少ないこと、再現性の程度のすぐれていることとなる。

板叩きの方法は、装置の構成からみて取り扱いがきわめて簡単なことはいうまでもないが、更に、地面との接触面積が比較的大きいので板に加えた衝撃力をズリ応力として地面に与える方式としては大変すぐれたものである。このため、多くの場合1回ごとのSH波発生状況はなかなか良いし、またこのことが力源を人力としているにもかかわらず100～150 mの距離で観測できる主な理由であろう。しかしこの方式では、前述のごとく再現性、立ち上がり、したがって到達距離等の点で問題が残されている。

これらの点を解決する一つの試みとして、火薬利用のS波発生装置が小牧らによって作成されたのではあるが、やはりいくつかの問題が残されている。小牧らは、これの原型であるJollyの'Gun'においても採用された地面とのコンタクトの方法—装置の下部に数本のスパイクを出して、これを地中に打ち込み装置全体を固定する—を用いたこと、また薬室側と反対側のバランスがじゅう分ではなく、したがって得られたSH波も必ずしも安定したものではなかった。また装置全体の耐衝撃強度も不足気味で、火薬30gが一応の限度とされていた。

筆者らは以上のように各装置の検討をじゅう分に

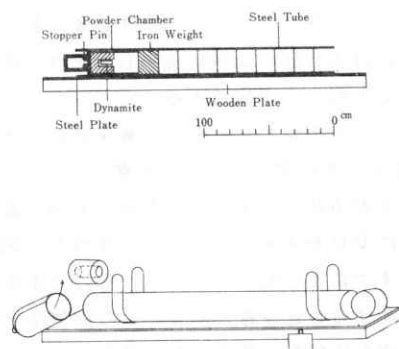


Fig. 1. Schematic diagram of the Mark I SH-wave generator.

行なった後に、媒質とのコンタクトには板叩きの方法を取り入れ、力源としては火薬を用い、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じゅう分に生かしたものの作成を意図した。

具体的には Fig. 1 に見る如く、50 cm × 5 cm × 250 cm の板（上面は鉄板で補強されている）を台座としこの上に直径 20 cm 肉厚 0.8 cm 長さ 200 cm

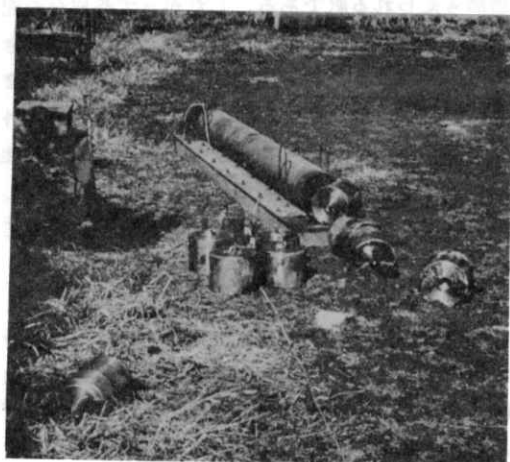


Photo 1a. General view of the Mark I SH-wave generator. Iron weights are seen outside the pipe.



Photo 1b. Close-up view of the powder chamber of the generator.

の鋼管を固定した。これ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と固定した。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1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押し出され（実際には飛び出す）、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。すなわち、単一のズリ応力震源に近い性質を持つと考えられることになる。これがわれわれの装置のおおよその原理である。なおズリ応力の発生には火薬の量はもちろん、地面に及ぼす単位面積当たりの重量が大きく影響することはいうまでもない。この点の処置も検討したが、今回は一応装置の自重のみとし、特に重みをかけることはしなかった。ちなみに、鉄のおもり9個で約270 kg、鋼管、薬室、台座で約300 kg、合計して装置全体では約600 kg 弱である。この試作1号機では1回当たり最大使用火薬量は100 g 程度を限度として設計された。実際のもは Fig. 1 の見取図、または Photo 1 (a)、(b) を参照されたい。なお Photo 1 (a) で地面

に置いてあるのが1個30Kgのバランスウェイトである。またPhoto 1(b)は薬室の部分を鋼管からはずした状態でとったものである。

本装置作成後、これの本実験に先立って、41年1月に地質調査所構内において、簡単な予備テスト⁶⁾(charge: 125~50g)を行なったところほぼ満足すべきものであったが、ストッパーピンと鋼管結合の方法等若干の欠陥も見いだされたので、これらを改良して本実験に備えた。

3 実験内容

3.1 実験期間・実験地点・使用計器

昭和41年3月上旬に4日間行なった。実験は利根川下流域(千葉県成田市竜台)の河川敷内においておこなわれた。この本実験は、この地点に架橋予定の長豊橋に関する地震防災研究の一環として行なわれた。実験には本来物探用のSIE 24成分探鉱器(磁気記録装置つき)を使用した。また地震計は主として物探用30 cps PU(NEC製)を使った。われわれの実験では、上記物探用計器のみでなく、精密測定可能な観測体系によって実施する予定であったが、諸般の事情により実施不可能となったのは残念であった。

なお、同時にこの実験地で実施されたP波物探の結果⁷⁾によれば、地表ごく近傍(0m~数m)に300~500 m/sの遅い速度があるほかは、深さ50~60mまでは、ほぼ一様な速度(1400~1700 m/s)と報告されている。また地層構成の主なもの砂およびシルト層である。

3.2 実験項目

ここで行なわれた実験項目は次のとおりである。まず、

- a. SH板叩き法との比較
- b. 指向性テスト

を行なうことによって、本装置がSH波を発生していることを確認し、ついで

- c. 波動の再現性テスト
- d. 薬量変化と波形(振幅・周期)を調べるテストを行なった。これは先に述べた装置の安定性、立ち上がりの問題等を調べるもののほかに本装置改良の際の基礎資料を得ることを目的とした。最後にこれを作製した最大の目的の一つであるSH波到達距離の実験を、一方では装置の耐久テストを兼ねて実施

した。

これらの実験は比較的短期間にまとめて実行されたにもかかわらず、総体的には成功であり、この種の実験を今後継続することがぜひ必要である。実際われわれは本装置の改良に着手しており、第2回の実験も近々行なう予定である。

以下に上記実験結果について多少詳しく述べる。

3.2.1 SH板叩き法との比較

板叩きの方法で、板の長手方向と直角な測線上で横方向にPUをすえ付けた場合、SH波を記録することはすでによく知られている。そこで本装置がSH波を発生することを確認する一つの簡便な方法として、両者を比較して類似の波が得られるかどうかを調べた。この際両者とも念のため3成分観測とした。結果はFig.2に見るとおり、両者は波形の細部に至るまでよく似ている。ここに板叩きの場合は1人が精一杯のカケヤ打ち、またこの装置では100g×1/16の火薬を使った結果である。両者は同一の利得でとってある。一つ注意すべきは、板叩き、本装置ともに H_T のほか H_L 、 V にも明らかな波群が見られることである。

ところでわれわれの実験では30 cps 上下動PUを水平動代用として使用しているために、たとえ同一のPUでも、それを本来の鉛直成分として使ったときと、水平成分とした場合では感度が変わることは当然考えられる訳である。したがって各成分の記録上振幅を直接には比較しえないことに留意すべきである。また、台座および装置全体が有限にとどまっている以上、爆発の衝撃にともなうSH波以外の波—P, SV, Rayleigh 波等—が副次的に発生するのはやむをえない。問題はこれらの波が安定して発生しているかどうかである。これは後に改めて触れるはずである。

3.2.2 指向性実験

SH波が、単一ズリ応力源で予想される指向性分布を示すならば、われわれの場合、装置の長手方向では横成分は最小、直角方向測線で最大になるはずである。⁸⁾これをチェックするために装置を中心とする半径30mの円周上の横成分をとらえる実験を行なった。結果をFig.3に示す。

これは一応はPU—Amp—Recorder系の特性の補正がほどこしてあるが、前に述べたように詳しい鑑

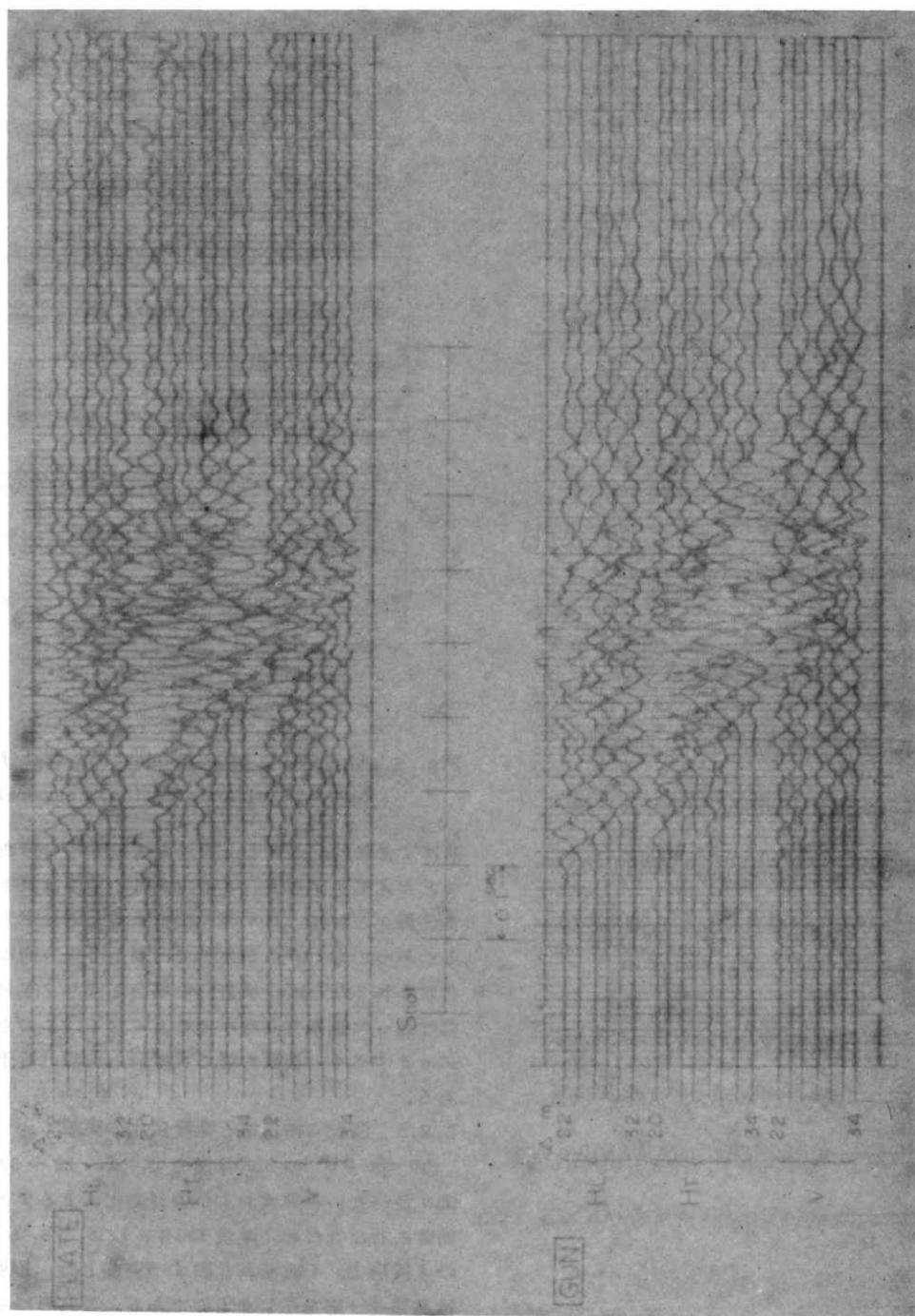


Fig. 2. Comparison of the records obtained from the SH-sources, by hitting the plate (PLATE) and the generator (GUN).

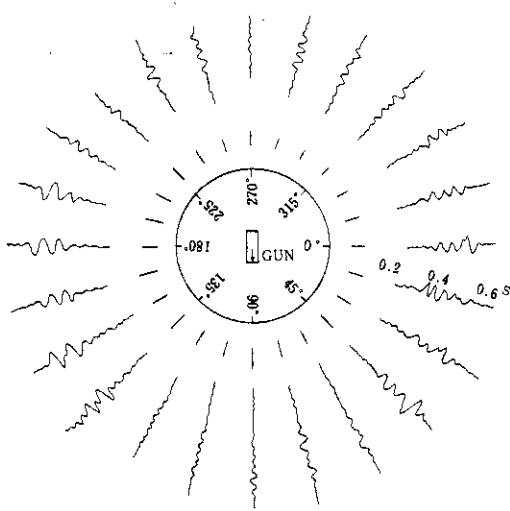


Fig. 3. Result of directivity test.

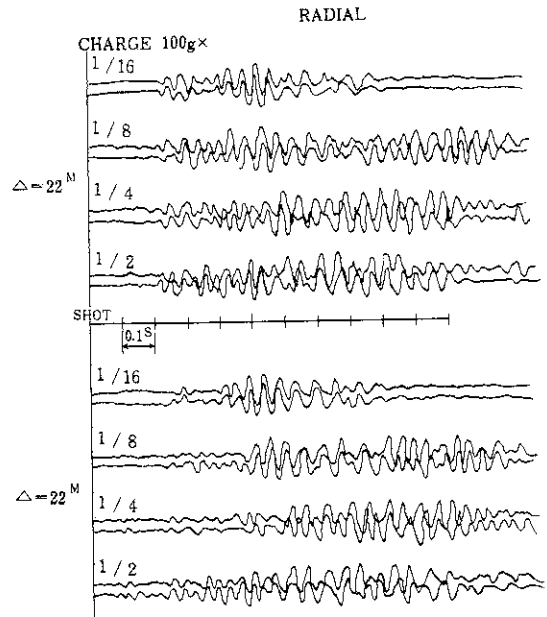


Fig. 5. Examples of reproduction test for both radial and vertical components.

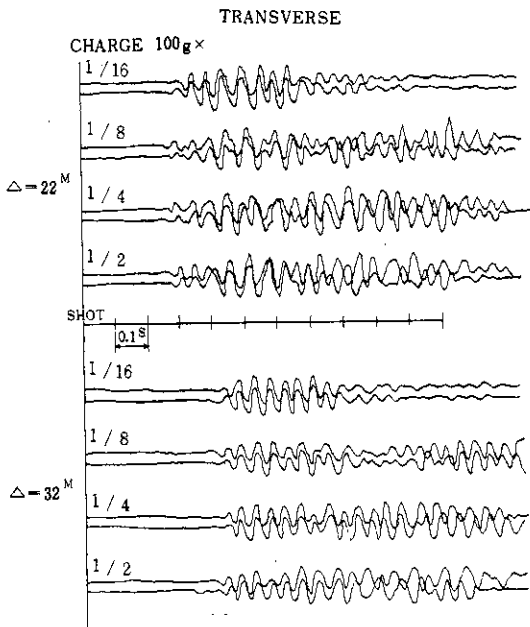


Fig. 4. Examples of reproduction test for transverse components.

論はできない。大勢としては上述の振幅の分布を持つと考えてよからう。このほかこの装置は長手方向に測線をとれば、SV発生装置にもなるはずである。したがってもしPUがすべて円周上半径方向にすえ付けられるならば、横方向の場合とはちょうど90°だけ違った振幅分布を示すことになる。この点もチェックすべく、機会を得て再度詳しく調べる予定である。

3.2.3 波動の再現性と薬量変化の実験

30 cps PU の3成分観測で、 $\Delta = 22 \sim 32$ mの間に並べた。再現性および薬量変化によるテストを同時に行なうため、薬量 $100 \text{ g} \times 1/16, 1/8, 1/4, 1/2$ の4段階で、それぞれ2回ずつ実施した。Fig. 4, 5は結果の一部を示したものである。これらに見るとおり、3成分ともに波形の再現の程度はいずれの薬量の場合でも大変によい。なお更に詳しく見れば、鉛直方向、半径方向、横方向の順に両者の対応が一段とよくなっている。特に横成分では、それぞれの

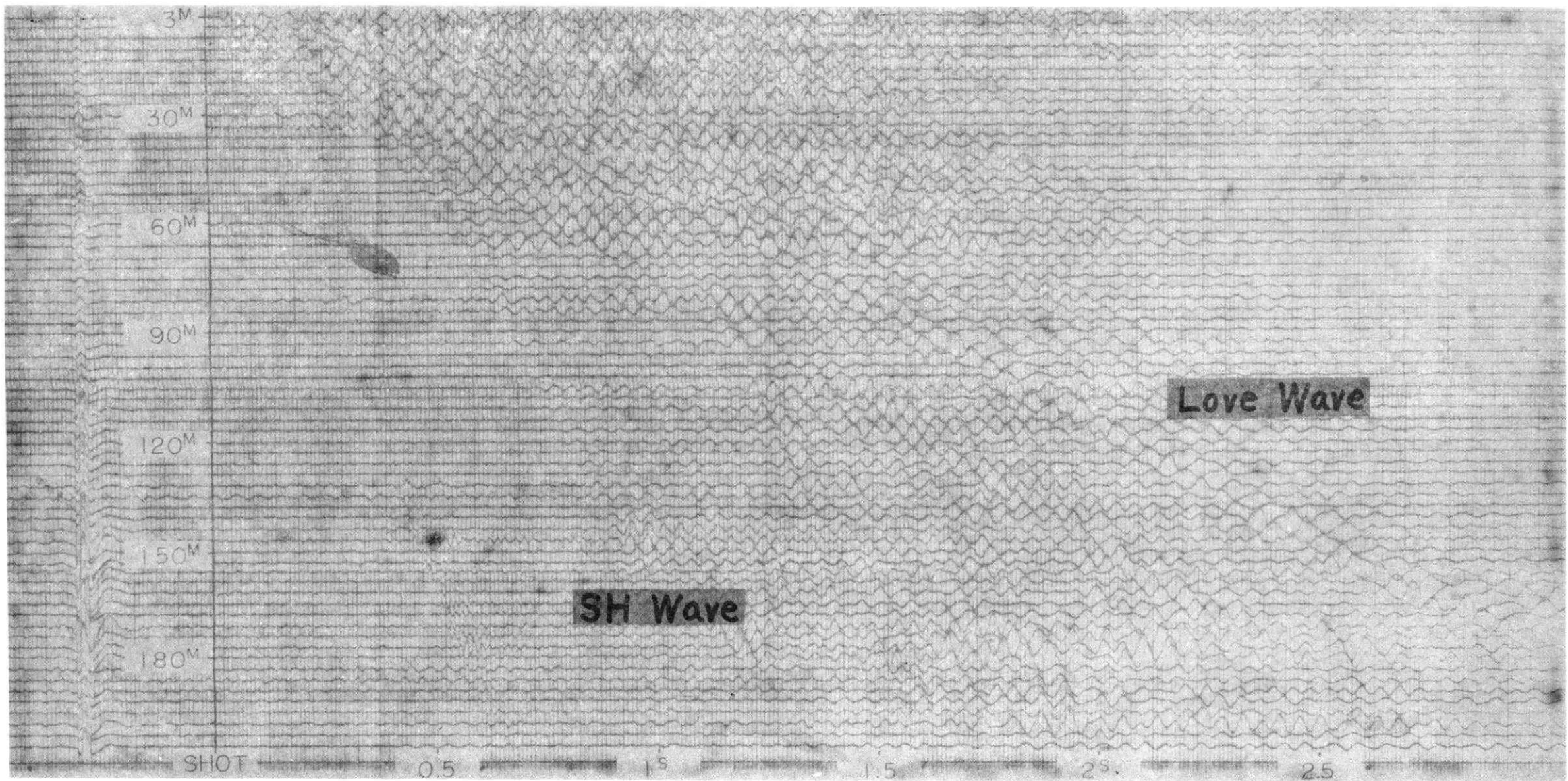


Fig.6. Paste-up of the seismograms obtained by the low-gain playback.

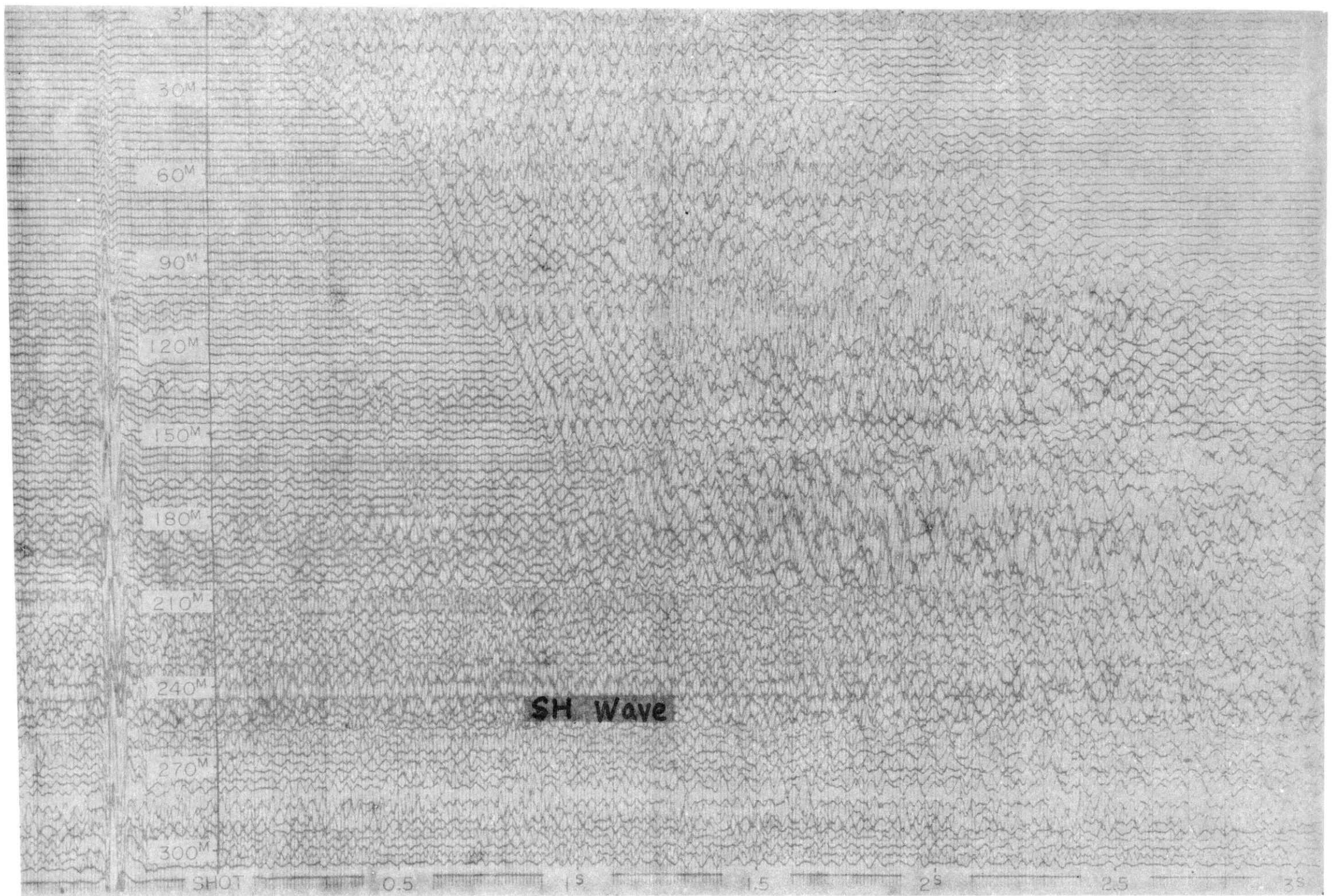


Fig.7. Paste-up of the seismograms obtained by the high-gain playback.

かなり細部に至るまでよく一致している。以上の結果から、われわれの装置は、板叩きの場合とは違って、それぞれの爆破は薬量さえ一定ならば、かなり安定した波動を送り出していることがわかる。

われわれがこの装置を作成した理由の一つが、この点にあったことはすでにはじめに述べておいた。

ところで記録を見ると、薬量が増加するにつれて、波の持続時間が、一見増大しているように見える。しかしこの原因は次の点にある。鋼管内の9個のおもりは、爆発と同時に台座の運動とは反対方向にとび出す。これが急激に地面に落下し、この地点から二次的な波を発生するためである。ちなみに、飛び出したおもりの数は薬量100g×1/16ではなし、1/8で4個、1/4で8個、1/2のとき9個全部であった。横方向(4=32mの場合)を見れば一次的な波がほとんど消失した後上述の二次波が発生した様子がよくわかる。記録上再現性の悪い部分(記録の後半)があるのは、二次波によるものである。かかる二次波発生は実用上はほとんど邪魔にならない(Fig.6参照)。

ところで、一般の火薬爆発の場合、薬量の増大に伴って、振幅・周期ともに増加することはよく知られている。われわれの装置でも、同様の結果が得られるであろうとの予想のもとに薬量変化の実験を行なった。結果はFig.4,5に見るとおり振幅・周期ともに若干の延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。周期については、われわれの装置の場合、火薬爆発→弾性波発生のプロセスが、通常の場合と違っていることから、薬量増加が、周期の延びに直接にはきかないかもしれない。また計器の特性の問題もあろう。薬量が異なった場合振幅の変わり具合は大変少ない。つまり少なくともこの実験では薬量効果ははっきりしない。

ところで、この装置によるSH波の発生の機構は、爆発の際に台座と地表面との間に発生するズリ応力によっている。これはいうまでもなく両者間で働く摩擦力にはかならない。これの大きさは主として装置全体の重さが関与する。われわれの装置の600kgはまだ重量不足と考えられる。一方火薬爆発による衝撃力は、この摩擦力に打ちかって台座を前進させる働きをする。上述の実験では100g×1/16程度の

薬量ですでに、おもり600kgによる摩擦力に打ち勝っていると考えられ、したがって更に薬量を増しても、ズリ応力を一層大きくする点の効果はほとんど見られない。この点を考慮して現在改良ちゅうの装置は、一段と重量を増し薬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ている。

3.2.4 SH波到達距離の実験

われわれの実験目的の重要な一つであるSH波到達距離の程度を調べるため、30 cps PU 17個を1スプレッド(PU間隔:3m, 1スプレッド長さ:51m)で震源から6スプレッド(306m)、以後は6m間隔で2スプレッド、最遠点までの距離は510mとした。

3.2.2の実験によって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、台座をコンクリート打ちすることによって、事実上の重量補充をした後にこの実験を行なった。火薬の量は25gないし50gを標準としたが、一部、装置の耐久テストを兼ねて、200g, 300g等の比較的大きな火薬量を使用した。

ここに得た記録のうち、最初の第6スプレッド(306m)までは磁気記録も並行してとったが以後は光学記録のみとした。SIE探鉱器では磁気テープにとりうる最大時間は4秒であるが、S波は遅いので、われわれの場合、記録全体をテープにおさめることができないのである。また第4スプレッド以後次々に記録器の利得を上げるに従って、付近の架橋工事の人工ノイズが妨害波となった。

更に第7スプレッド以後は降雨に見舞われるという悪条件下の測定であった。それにもかかわらず得られた記録は満足すべきものであった。各スプレッドの記録を距離の順に並べたのがFig.6, Fig.7である。このうちFig.6は波形の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70~75m/s, 振動数15cpsぐらゐの特にはっきりした位相は一見SH直接波を思わせるが、実際には、位相速度(70~75m/s)と最大振幅伝搬速度(60m/s)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。測定系がより長周期の側もカバーしているならば、きれいな分散波として観測されるはずの波であろう。このほか、主要な波群のほとんどはSH初動とLove波との間に

存在する。先に見たおもりの落下による二次的な波は、60～70 mの距離ではほとんど見られなくなっている。

なお、原点から330 m/sの速度で、かつきわめて短周期(100 cps前後)の波が、SH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SH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徴としている。

さて、SH波初動を更に詳しく調べるため、おそい位相の振幅を犠牲にして、やや利得を上げて再生した結果がFig.7である。これに見るとおり Δ が200 m程度までは、S-N比は大変よくSH波初動は明りょうに読み取れる。第4スプレッド以前ではSH波初動の読み取りははかなりつらくはなるが、読み取りは可能である。近い方から順に70 m/s, 120 m/s, 240 m/s, 380 m/sと読める。 Δ が150 m以遠では一層速い速度も見られるようである。その他、二、三の位相を読んだものがFig.8に記入してある。われわれの測定は片測線のみであるが、仮に平行層近似を採用すれば、Fig.8の左上に示した構造が得られる。

ところで第5スプレッド以遠はノイズのためSH波初動は大変に読みづらい。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(25～30 cps)が一致しているのが主たる理由である。しかしFig.7でもわかるように初動にやや遅れた位相は Δ が300 mでもはっきりと読みとれる。これはまた、測線を展開した全区間510 mまで一応の読み取りが可能である。

なお、今回は記録上の各波群について充分な検討をする余裕はなかったが、詳しく調べるならば波動論上きわめて重要な成果が得られるであろう。

参 考 文 献

- 1) K. Kanai, Bull. Earthq. Res. Inst., 85(1957), 457-471.
- 2) J. E. White, Seismic Waves, McGraw-Hill, 1965.
- 3) R. N. Jolly, Geophysics, 21(1956), 905-938.
- 4) 小林直太, 地震II, 12(1959), 19-24.
- 5) 小牧昭三, 地震探査実験グループ会報, 18(1959), 91-100.
- 6) 太田裕, 嶋悦三, 柴藤喜平, 平沢清, 伊藤公介: 地質調査所構内におけるS波速度測定. 地質調査所月報, 18(1967), 43-48.
- 7) 平沢清, 伊藤公介: 千葉県長豊橋附近地震防災研究実験地の地震探査(印刷中)
- 8) J. T. Cherry, Jr., Bull. Seism. Soc. Amer., 54(1962), 27-36.

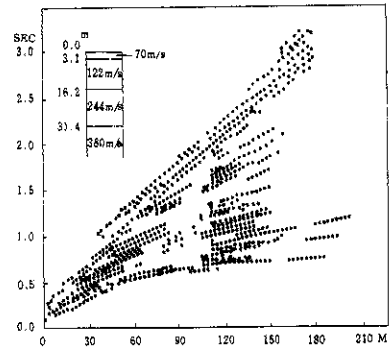


Fig. 8. Travel-time graph of the SH arrivals. The calculated underground structure is also shown.

4 おわりに

SH波発生のための装置を作成した。その結果、本装置は充分に安定したSH波を発生していることがわかった。これのSH波到達の程度を調べる実験の結果、従来の各装置に比して一段とすぐれた性能を持っていることが立証された。

ただ、装置全体としての重量不足が目立ちこのため薬量増加による波の振幅・周期への効果の程度を知ることはできなかった。また火薬の量を増した場合、装置に強度のアンバランスのあることが見いだされた。

しかしこれらの欠点は比較的容易に改良しうるものであって、この種の実験を継続してゆくならば、一般の実用に供しうる装置を完成することが可能である。現在装置の改良作業に入っていることを付言する。

測定作業の多くは宇部興産K. K.地震探査班(班長田中敦次氏)にいただいた。図面の作成は日高、植松両氏に依頼した。これらの方々にお礼申し上げる。