

# 浅層反射法による地盤調査

——P波・S波の反射波と屈折波, およびレーリー波による盛土地盤の調査と検討——

木村 薫 平間 邦興  
丸山 誠 桑原 徹  
玉井 昭雄  
(本社 技術本部 土木技術第一部)

## Experimental Investigation of Shallow or Engineering Seismic Reflection Method

——Exploration Results and Discussions on Seismic Reflection,  
Seismic Refraction Waves (P and S Waves) and Rayleigh Wave  
in Bank of Known Stratification——

Kaoru Kimura Kunioki Hirama  
Makoto Maruyama Tohru Kuwahara  
Akio Tamai

### Abstract

The present investigation was carried out on the shallow or engineering seismic reflection method (SSRM) concerning both P and S waves under different measuring conditions in a bank of known stratification. As a consequence of the investigation, it was clarified that SSRM is useful for classification of strata and seismic velocity structures, and various problems such as measuring and analysis methods, for example, selection of offset distance and abnormal moveout of travel-time, could also be discussed. SSRM was also compared with the seismic refraction method and Rayleigh wave exploration carried out at the same time.

### 概要

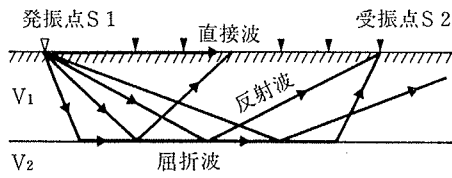
本報告は、既知の盛土地盤に対して異なる測定条件下で、P波とS波の浅層反射法探査を実施した。その結果、浅層反射法は地盤の地層区分や速度構造の解析に有効であることが確認でき、さらにオフセット距離のとり方や走時のムーブアウト異常などの測定方法や解析方法の問題点も明らかにすることができた。併せて屈折法弾性波探査とレーリー波探査も実施し、これら三つの弾性波探査結果を検討した。

#### 1. はじめに

P波・S波の反射波を用いる反射法探査は、沖積層下の支持層、沖積層下の断層、あるいは風化層の層厚などの調査に今後しばしば用いられることが予想される。反射法探査は、石油探査のような大深度の探査では十分確立されている<sup>1)</sup>。しかし土木調査への適用としては数例しか報告がなく<sup>2)~6)</sup>、地表付近の浅い部分での探査については、測定方法・記録のS/N比の改善・データ処理・解釈の方法などに検討すべき問題が残ってい

る。

本報告では、主に新第三紀層と盛土からなり前もって構造のわかっている地盤に対して、各種測定条件下で反射法探査を実施した。その結果、“浅層反射法探査”の問題点が明らかにできたとともに、その有効性を確認することができた。同時に、従来から行なわれている屈折法弾性波探査と最近開発されたレーリー波による探査も併せて実施し、これらの屈折波・反射波、およびレーリー波による弾性波探査の結果が検討された。



図一 弾性波の伝播経路

## 2. 浅層反射法の測定方法と測定条件

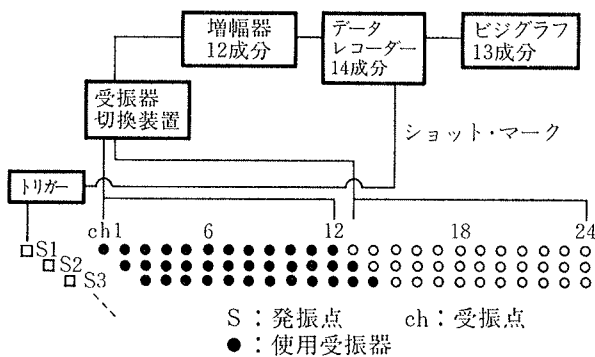
### 2.1. 反射法探査と屈折法探査のちがい

反射法探査と屈折法探査のちがいは、図一に示した反射波と屈折波のちがいから考えることができる。屈折法は、地層境界を伝播する屈折波と地表面を伝播する直接波とを利用するもので、測線  $S_1S_2$  間の両端点  $S_1, S_2$  点から得られる往復走時曲線から  $S_1S_2$  間の地盤の平均的速度構造を求める方法である。一方反射法は、地層境界での反射波の反射点を測線  $S_1S_2$  間で連続的にトレースし、地層境界の連続性を直接求めるものである。測定結果からさらに速度解析を行ない、各地層内の速度が計算される。このためには、 $S_1S_2$  間で発振点と受振点を移動させながらくりかえし測定を行ない、反射点の位置を追跡する必要がある。

### 2.2. 測定作業と測定機材

発振点と受振点の配置・測定装置のシステムは図二に模式的に示す。測定作業の基本的流れは次のようになる。

(1) 図二のように24個の受振器を設置する。測定自体は12個の受振器で行なうが、作業能率の向上のために前もって多数の受振器を設置しておく。



図二 測定システム

(2) 発振源を決められたオフセット距離（発振源とこれに最も近い、すなわち第1chの受振器との間の距離）だけ離して置く。

(3) アンプの切替スイッチにより、測定個所の12個の受振器は、アンプの1chから12chに接続する。

(4) 測定システムを作動させた後、発振点で人工震源により起震し、数回スタッキングを行ない、データを記録する。

(5) 発振源を次の場所に移動させ、アンプのチャンネルを切り替えて、次の測定個所で同じ作業をくり返す。

測定装置は屈折法探査で用いるものとはほぼ同じであるが、反射法探査では後の電算機処理のために、データレコーダーによる測定データの記録が必要である。

### 2.3. 予備測定と本測定

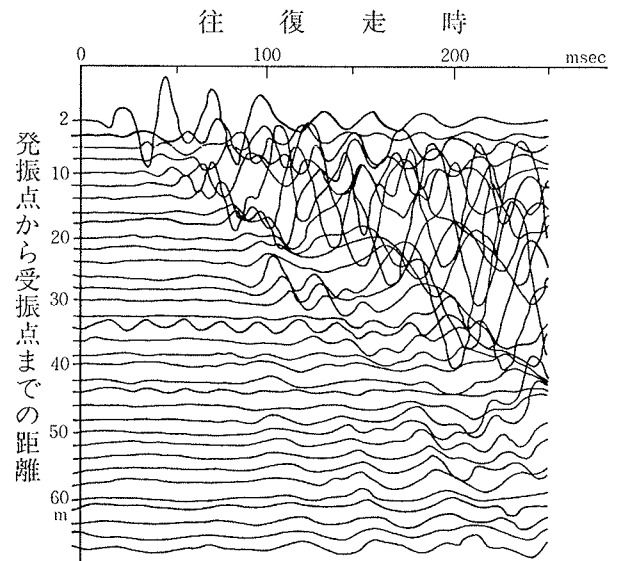
浅層反射法の本測定に先立って、地盤中のP波・S波・表面波の伝播状況を調べるために、予備測定が実施される。予備測定の目的は主に次のような点にある。

(1) 表面波の発生・伝播状況の把握→オフセット距離の決定

(2) 深度方向への発震エネルギーの到達状態の把握→測定回数（スタッキング回数）の決定

(3) 受振点間隔の決定

(4) 反射波の周波数帯域の把握→フィルターの決定



図三 P波の予備測定結果

CASE	弾性波	人工震源	測線長	オフセット距離	受振点間隔	測定回数/1発振点	受振器	サンプリング間	レコード長	トレース数	C D P 用 トレース数
1	P波	鉄ハンマーと鉄板	132m	20m	2m	4回	上下動1成分 28Hz, 24個	0.5msec	512msec	67	134
2	P波	鉄ハンマーと鉄板	132m	40m	2m	4回	上下動1成分 28Hz, 24個	0.5msec	512msec	67	134
3	S波	板たたき法	132m	14m	2m	4回×2 = 8回	水平動1成分 45Hz, 18個	1.0msec	1,024msec	67	134

表一 浅層反射法の測定条件

(5) 人工震源の選択→重錘，鉄ハンマー，掛矢，エアガン，ウォーターガン

この中で特に重要なものはオフセット距離の決定である。反射波はそれ自体が弱いことと，優勢な表面波や重複反射波により，他の波と比べて反射波の識別はより困難になる。したがってまず表面波の影響をさけるために，表面波の発生・伝播状況と必要な探査深度との関係からオフセット距離を決めることになる。図-3は今回の予備測定の例である。予備測定の結果，音波とP波の初動が近いので  $V_p \approx 300 \text{ m/s}$  と考え，また地盤構造から GL-30 m まで解析するとして，往復走時が 200 msec までの反射波を解析できるようにオフセット距離が選ばれた。

本測定における測定条件は，予備測定により表-1 のように決定された。

### 2.4. 地盤構造

調査地域は新第三紀三浦層群からなる丘陵地を切盛土した宅造地である。新第三紀層は部分的に薄い砂岩層をはきむが，主に塊状泥岩からなる。盛土は谷の部分について行なわれ，谷の中には沼があり約 3m の粘土層が堆積している。盛土～粘土層の最大層厚は約 16m である。

### 3. 浅層反射法の解析方法

反射波データの解析・処理は図-4の流れ図にしたがって行なわれる。各解析・処理過程の概略は以下の通りである<sup>1)</sup>。

#### 3.1. デマルチプレックス

AD変換によってデジタル化された測定データは，測

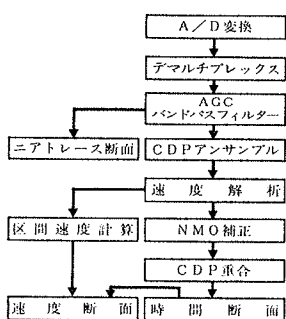


図-4 データ処理の流れ図

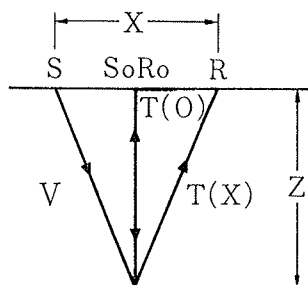


図-5 水平二層構造の反射波波線

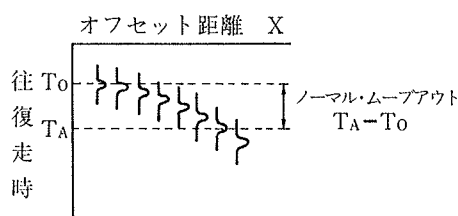


図-6 反射波の走時曲線

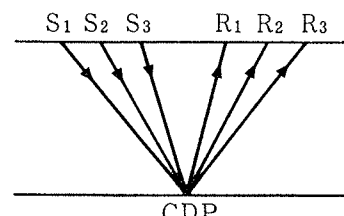


図-7 CDPにおける波線

定順序に配列している。しかしデータ処理のためにはチャンネル単位（トレース単位）の配列の方が便利であり，この配列変更をデマルチプレックスと呼ぶ。

#### 3.2. AGC 処理

伝播中に受ける弾性波の減衰はきわめて著しい。特に反射波記録は非常に微弱で，表面波や重複反射波などのノイズの大きさは，反射波と同等以上であることがまれではなく，反射波は優勢なノイズにおおい隠されていると考えなければならない。したがって浅層から深層まで反射波を正確に記録するためには，ダイナミックレンジの広い探査機が必要となる。しかし広いダイナミックレンジの記録を固有のダイナミックレンジを持った探査機で記録するためには，波形の振幅が記録中のどの時刻でもほぼ同じような大きさになるようなデータ処理が必要である。これを A. G. C. (Automatic Gain Control) 処理と呼んでいる。

#### 3.3. ニアトレース記録断面の作成

発振点に最も近い受振点の記録，すなわち各測定における 1 ch の記録を集めて描いた反射波の時間断面は，ニアトレース断面と呼ばれる。これによって地下構造の概略がとらえられる。

#### 3.4. 共通反射点トレースの編集

図-5のような水平二層構造では反射波の走時は次式で表わすことができる。

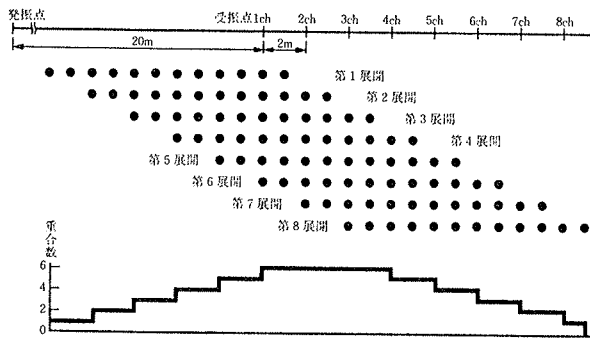
$$T(X) = \sqrt{T^2(O) + (X/V)^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ただし, } T(O) = 2Z/V \quad \dots\dots\dots(2)$$

Z: 地層の厚さ, V: 反射波の速度, X: 距離, T(X): X での往復走時

である。すなわち T(O) は X=0 で垂直入射する時の走時であり，垂直走時(ノーマル・タイム)と呼ばれる。反射波の走時は(1)式からも明らかであるように双曲線を示し，図-6のように表わすことができる。T(A)-T(O) はノーマルムーブアウトと呼ばれ，距離 X=A と X=0 の間の走時のずれを表わしている。また傾斜した二層構造についてもその傾斜が小さければ，反射波の走時は(1)式でおおよそ近似できるとされている。

反射波の波線を見ると，発振点・受振点の配置は，図-5にも示されているように，その中点を常に固定し



図一八 共通反射点重合法の概念

ており、 $T(0)$  はその固定点での垂直走時である。ところで異なる発振点の記録中には、図一七のように複数の波線が固定した共通の反射点を持つことがある。この反射点は共通反射点 (Common Depth Point, CDP) と呼ばれる。この共通反射点記録を重合 (加算) することによって非常な S/N 比の改善ができるので、これを共通反射点 (水平) 重合法 (CDP 重合法) と呼んでいる。実際の測定作業における発振点と受振点の配置と CDP の関係は図一八のように示される。重合する前の、一つの共通反射点に対する共通反射点トレース群 (波線群) は CDP アンサンブル記録と呼ばれている。

3.5. 速度解析, NMO 補正, CDP 重合

反射波の S/N 比向上のために CDP 重合を行なう時には、各反射面からの双曲線状の走時曲線を補正して、ノーマルタイム上の直線状走時の並びに直すことが必要である。これを NMO (ノモ) 補正と言う。NMO 補正を正しく実施するためには、正しい反射波の速度が必要となる。そこでまず速度解析を実施することになる。

速度解析には Constant Velocity Stack 法 (CVSK 法)

と Constant Velocity Scan 法 (CVS 法) があり、今回は CVSK 法を用いた。CVSK 法では、CDP アンサンブル記録中でノーマルムーブアウトを示す反射波を選び出し、これらが仮定された各速度に対してどのように NMO 補正されるかを調べる。すなわち図一九に示したように、ノーマルタイム上の直線上並びに NMO 補正が行なわれる速度が、求めるべき真の速度である。この真の速度に対して NMO 補正・CDP 重合が行なわれると、反射波の位相のみがそろい振幅も大きくなり、記録の S/N 比が向上する。

3.6. 時間断面と深度断面

速度解析・NMO 補正・CDP 重合の結果、求めるべき反射波の時間断面記録が得られる。一般に受振点間隔が  $Nm$  であるとき、共通反射点の間隔は  $(N/2)m$  となる。すなわち発振点が  $M$  個所あれば、得られる時間断面記録は  $2M$  個のトレース (波線) 数からなる。これは記録の密度が 2 倍になることを表わし、共通反射点を利用される一つの理由でもある。

時間断面記録からは反射面の位置が直接決まり、各反射面までの速度はすでに速度解析によって決定されている。ところでこの速度は、実は平均二乗速度 (Root Mean Squar Velocity, RMS 速度) であり、次の式で表わされる。

$$V_{RMS}^2 = X^2 / T^2(X) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $X$ : 距離、 $T(X)$ :  $X$  における反射波の往復走時、である。

この RMS 速度と次の Dix の式を用いて、反射面の深度・各反射面の間隔の区間速度・各層の厚さが計算でき、最後に求めるべき深度断面記録が得られる。

$$V_{i+1} = \sqrt{\frac{V_{RMS(i+1)}^2 \cdot T_{0(i+1)} - V_{RMS(i)}^2 \cdot T_{0(i)}}{T_{0(i+1)} - T_{0(i)}}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$V_{i+1}$ :  $i$  層の区間弾性波速度

$V_{RMS(i+1)}$ :  $(i+1)$  層の RMS 速度

$V_{RMS(i)}$ :  $i$  層の RMS 速度

$T_{0(i+1)}$ :  $(i+1)$  層の反射走時 (ノーマルタイム)

$T_{0(i)}$ :  $i$  層の反射走時 (ノーマルタイム)

$$D_{i+1} = V_{RMS(i+1)} \cdot T_{0(i+1)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

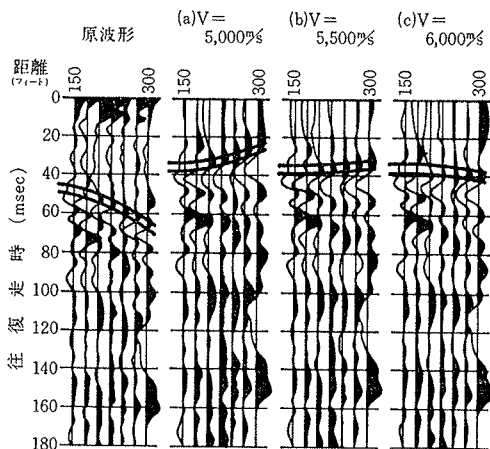
$D_{i+1}$ :  $(i+1)$  層の深度

$$DD_i = D_{i+1} - D_i \quad \dots\dots\dots(6)$$

$DD_i$ :  $i$  層の層厚

4. 浅層反射法の測定および解析結果

測定および解析結果は次のようにまとめることができる。



図一九 NMO 補正と速度解析<sup>7)</sup>

(a) NMO 補正: 過大補正, 速度過小

(b) NMO 補正: 適正補正, 速度適正

(c) NMO 補正: 過小補正, 速度過大

4.1. 測定条件

今回三つの条件下で測定を実施したが、結果的にはCASE1, CASE3, CASE2の順に良い結果が得られた。P波とS波は、波の種類がちがうので一概には言えないが、探査精度はほぼ同じと考えられる。作業能率はP波探査の方がS波探査より約2倍良い。

記録の良否はオフセット距離に負う所が多い。P波のCASE1, 2については、CASE2の記録は表面波を十分さけているが、第1反射面までの深度10~20mに対してオフセット距離が大きすぎ、第1・第2反射面からくる両方の反射波が混在してしまい、結果的にS/N比が悪くなったようである。一方S波のCASE3については、予備測定にもかかわらずオフセット距離がやや短かかったようで、これは多少のS/N比の低下を招いていると考えられる。したがってオフセット距離は、探査深度が浅いので表面波をさけながら可能な限り短くとるべきで

	測点	RMS速度 (%)	速度V (%)	到達時間 (msec)	層厚 (m)	深度 (m)
第一層	50	400	400	60	12	12
	60	500	500	70	17	17
	70	500	500	65	16	16
	80	400	400	60	12	12
	90	400	400	60	12	12
	100	500	500	50	12.5	12.5
第二層	50	700	1,030	95	18	30
	60	700	1,150	90	12	29
	80	800	1,170	105	23	35
	90	700	1,030	95	18	30

表-2 CASE 1 の P 波速度解析結果

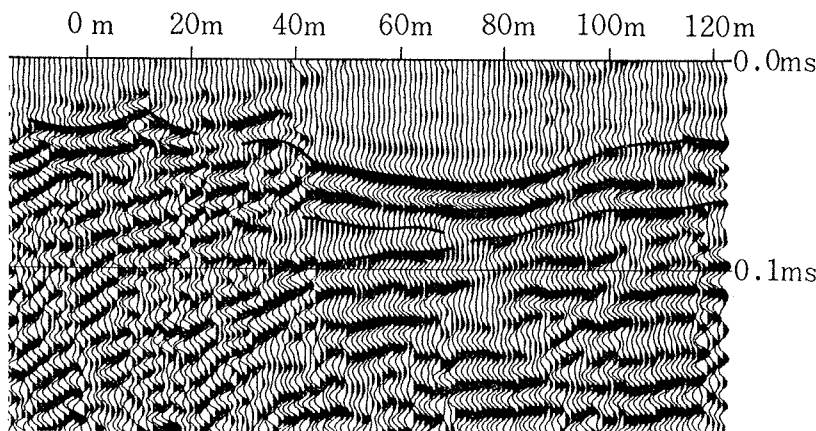


図-10 CASE 1 の P 波時間断面記録

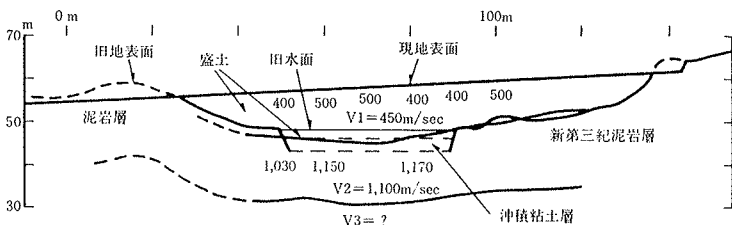


図-11 CASE 1 の P 波深度断面記録

ある。

4.2. 時間断面記録と深度断面記録

CASE1, P波の速度解析結果・時間断面記録・深度断面記録を、表-2, 図-10, 図-11にそれぞれ示す。速度解析は、反射面が水平に近いと思われる測線上50~110mについて、10mおきの地点でCDP アンサンブル記録を取り出し、200~1,000 m/sec に対して100 m/sec おきに行なった。

時間断面記録で、測線上約30~120mに見られる大きな位相は第1層/第2層からの反射波、その下に実線で示したやや弱い位相は第2層/第3層からの反射波である。一方この両者の間にある大きな位相は、震源が単パルスでないために、第1層/第2層からの反射波の第1ピークと伴に強調されてしまった第2のピークと思われる。今回はデコンボリューションフィルターをかけていないが、この記録から反射面は十分識別できると考えられる。

深度断面記録では、P波の第1層/第2層の反射面はおおむね地層境界面に一致している。

S波のCASE3についても同様な結果が得られた。

4.3. CDP アンサンブル記録中の“逆走時”

反射波の走時はノーマルムーブアウトの原理上、発振点からの距離に比例して長くなる。しかし図-12のように、走時が逆に短くなる“ムーブアウト異常(逆走時)”が、CASE1, 3の一部とCASE2に認められた。今回得られた速度構造をもとにして二層構造で直接波・屈折波・反射波の走時をシミュレーションすると、この“逆走時”は測線中央部で第2層がつくる舟底型構造の斜面の肩から地表に伝播する屈折波が原因と考えられる。

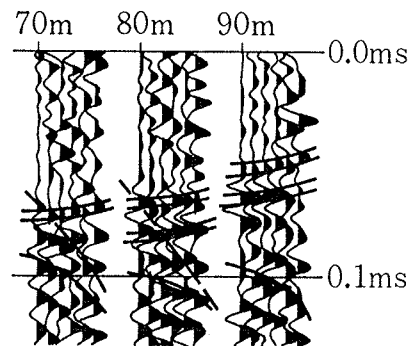


図-12 CASE 1, CDP アンサンブル

記録中のムーブアウト異常(逆走時) 二重線: ムーブアウト異常, 実線: 正常なムーブアウト

#### 4.4. CDP アンサンブル記録中の“負の走時”

ノーマルムーブアウトの原理上、異なる反射面からの走時の差はオフセット距離と共に小さくなるはずである。しかし図-13のように走時の差が大きくなる現象がCASE1の一部とCASE2に認められた。これも4.3.の場合と同様にシミュレーションした結果、第1反射面の深度が浅いため、あるオフセット距離以上の受振点では第1反射面と第2反射面からくる反射波の走時が逆転してしまい、図-13のように走時の傾斜が通常よりも急な“負の走時”というムーブアウト異常が現われると考えられる。

#### 4.5. 反射面の傾斜

反射面が傾斜していると、図-14のように本来一致すべき共通反射点は大きく離れてしまう。これはノーマルタイム  $T_0$  が正確に求まらなくなり、地層の正確な速度や深度が決定できないことを表わしている。今回の地盤でも図-10のように測線 20~40 m 付近の30度の傾斜部分では明瞭な反射面が現われていない。

### 5. 屈折法弾性波探査とレーリー波探査

P波・S波の屈折波、レーリー波はそれぞれ、従来から実施されている屈折法弾性波探査および最近開発されたレーリー波探査に利用されている。ここでは浅層反射法を中心として三つの弾性波探査を比較検討するために、浅層反射法を実施した測線を用いて、屈折法弾性波探査とレーリー波探査を実施した。

#### 5.1. 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査はP波・S波について行ない、人工震源はP波については鉄ハンマーによる鉄板打撃、S波については板たたき法を採用した。測定は12chで行なった。また測定は、測線を重複するように三つに分け、受振点間隔4m、オフセット距離 $\approx 0$ mを基本として実施した。走時曲線の解析は、P波については二層構造の表層除去法、S波については水平二層構造による解法を用いた。

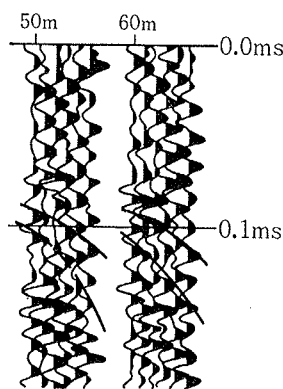


図-13 CASE 2, CDP アンサンブル記録中のムーブアウト異常 (負の走時)

#### 5.2. レーリー波探査

レーリー波探査の目的の

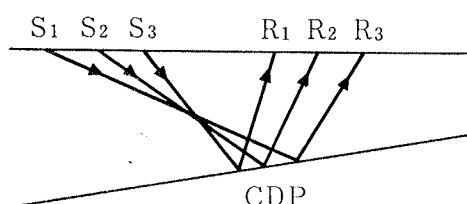


図-14 傾斜構造のCDPにおける波線

一つは、表面波の一つであるレーリー波の速度がポアソン比0.4~0.5の未固結層ではほぼS波速度に等しいので、発生困難なS波の速度をレーリー波の速度で近似しようというものである。レーリー波探査は、地表面に置いた起振機からレーリー波を発生させ、1~2mの間隔で測線と直交する方向に配置された2個の受振器の間の、地盤の平均的レーリー波速度を測るものである。すなわちレーリー波探査は、ボーリング掘削を行わないPS検層という感覚である。

発振機は自由に周波数すなわち波長を変えることができる。したがって、地表で発生させたレーリー波が地盤中でもレーリー波として伝播すると仮定すると、浅い部分は短い波長の波で、深い部分は長い波長の波で、地表からレーリー波の到達する深度までの平均速度が求まる。これから各区間の速度と層厚を計算することができる<sup>8)</sup>。

今回、受振器間隔は1mとし、測定は測線0~132m上の0, 20, 40, 60, 70, 80, 100, 120mの計8測点で実施した。

### 6. P波・S波の反射波・屈折波およびレーリー波による弾性波探査結果の検討

P波の反射波と屈折波の速度構造、S波の反射波と屈折波の速度構造、およびレーリー波の速度構造は、それぞれ図-15, 16, 17に示す。図-15, 16中で、 $V_1$ , ( $V_1$ )はそれぞれ平均値としての反射波速度、屈折波速度であり、500, (390)はそれぞれ各測点での反射波速度、屈折波速度である。これらの測定結果は以下のようにまとめることができる。

(1) 第1層のP波速度は、反射波で400~500(平均450) m/s, 屈折波で370 m/s, 390~570(平均480) m/s, 300~680(平均490) m/sであり、また第2層のP波速度は、反射波で1030~1170(平均1100) m/s, 屈折波でそれぞれ1100, 1270, 1260 m/sであるので、反射波速度と屈折波速度はほぼ一致している。

(2) P波の第1層/第2層の境界は、盛土~沖積粘土、あるいは盛土~新第三紀泥岩層の境界にほぼ一致する。

(3) 第1層のS波速度は、反射波で200~250(平均210) m/s, 屈折波で170 m/s, 140~215(平均172) m/sであり、第2層のS波速度は、反射波で330~360(平均340) m/s, 屈折波で370 m/s, あるいは地表部では620 m/sとなる。切土して地表に現われた第2層のS波速度がかなり大きい値になっている点を除けば、

両者はおおよそ一致している。

(4) S波の第1層/第2層の境界は、谷中央部でP波の場合よりやや浅く、盛土中の旧水面付近に認められる。

(5) レーリー波速度は各測定で深度とともにほぼ増加しているが、速度値は同じ地層にもかかわらず測点間のバラツキが大きい。レーリー波速度は大きく、80~190 m/s, 190~300 m/s, 300~500 m/s, 500 m/s以上、の4層に分けることができる。各層の境界は谷の形にほぼ対応しており、第1層/第2層の境界は盛土~沖積粘土(あるいは泥岩)にほぼ一致している。

(6) レーリー波とS波の第1層、第2層の速度をそれぞれ比較すると、レーリー波速度はS波速度の50~90%しかなく、理論的な割合よりも小さい場合が多い。

(7) 反射法の場合、発振点を含めた測線長の最大60%程度の水平位置について反射波を検出し、速度を特定することができた。これは、反射法では求めるべき深度の約1.7倍の測線長が必要であることになり、屈折法の一般的な5~6倍と比べるとかなり短い測線ですむことを示している。

(8) 同じ発振エネルギーを用いる時、反射法の方が屈折法よりも1層程度深い所まで求められそうである。

### 7. まとめ

反射波・屈折波、レーリー波による三つの弾性波探査を既知の盛土地盤で比較検討した。特に浅層反射法の測定・解析上の問題点と解析結果が検討され、その有効性が確認できた。

本研究を実施するにあたって(株)大林組成瀬工事事務所 浜地俊男所長代理ならびに同職員の方々には多大な御配慮を賜った。また浅層反射法には川崎地質(株)、レーリー波探査には国際航業(株)とビィック地下探査(株)の協力を得た。関係各位に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

1) 朝倉夏雄: 初心者のための反射法データ処理, 物理探査, vol. 35, (1982), pp. 351~374  
 2) 渡辺史郎, 加野直巳: 浅層反射法, 物理探査, vol.

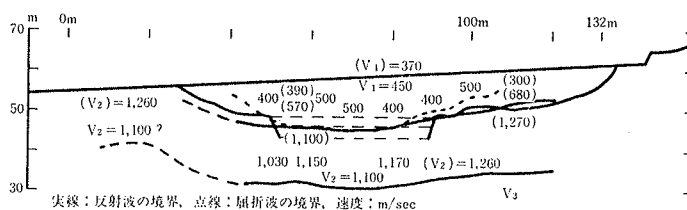


図-15 P波の速度構造

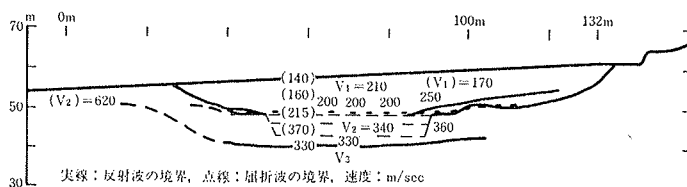


図-16 S波の速度構造

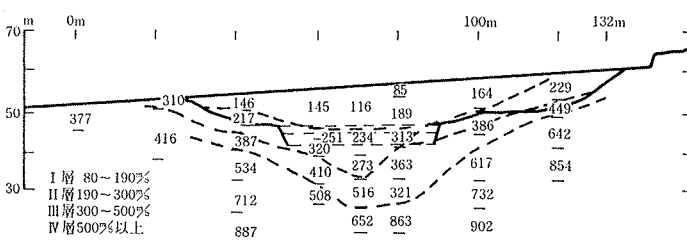


図-17 レーリー波の速度構造

35, (1982), pp. 42~52

3) 稲崎富士: S波を利用した浅層反射法探査の実験的考察, 土木技術資料, vol. 25, (1983), pp. 61~66  
 4) 大島洋志: 浅層反射法における現場測定法とデータ処理法, 鉄道技術研究資料, vol. 40, (1983), pp. 349~354  
 5) 大友秀夫, 太田賢治, 大石善雄: SH波による都市地盤での支持層探査, 第38回土木学会講演会講演概要集, 第3部, (昭和58. 9), pp. 273~274  
 6) 平間邦興, 丸山 誠, 桑原 徹: 浅層反射法による盛土地盤下の基盤調査, 第39回土木学会講演会講演概要集, 第3部, (昭和59. 10), pp. 527~528  
 7) Lankston, R. W. and Lankston, M. M.: An Introduction to the Utilization of the Shallow or Engineering Seismic Reflection Method, Geo-Compu-Graph, Inc., (1981)  
 8) 国際航業(株): VIC GR-810による地下探査技術, 国際航業(株), 技術資料, No. 12, (1983)