

浅層反射法の地盤調査への適用性検討

Shallow or Engineering Seismic Reflection Method and Its Applications to Researches of Geotechnical Engineering Structure

ひら ま くに おき* くわ はら とおる
平 間 邦 興* 桑 原 徹*
まる やま まこと
丸 山 誠*

1. はじめに

反射法による地盤探査は、元来石油採掘のために開発された探査技術である。その後いくつかの分野への応用が試みられ、現在までに地下数千mでの石油調査をはじめとして、数百mでの石炭層調査、100m以浅での建設工事のための地質調査や地震予知のための活断層調査、および海底の各種地質調査などに、この反射法地盤探査が用いられている。地下数十m程度を対象とする反射法探査は、地下深部を対象とする石油調査などと比較すると、極めて浅い部分を調査するために、特に「浅層反射法(Shallow Seismic Reflection MethodあるいはEngineering Seismic Reflection Method)」と呼ばれている。

建設に関する地質調査で浅層反射法を実施する場合、その適正な対象深度は一般的に50m以浅と考えられる。このような地下浅部の場合でも、解析方法は石油調査等と基本的に異なるものではないが、実際の運用にあたっては地形の起伏・地質構造の凹凸・ノイズの増大・発振源の選択・解析結果の精度などが、新たに解決すべき問題として提起されてくる。そこで近年、建設に関連する調査を目的として、浅層反射法の研究がしばしば行われており、筆者らも浅層反射法の可能性を検討してきた^{1)~3)}。筆者らの目的は、施工現場に見られる多様な地形・地質条件に対して浅層反射法適用の可能性・実用性を探ることにある。そのため比較的事例の多いマルチチャンネル浅層反射法と事例の少ないシングルチャンネル浅層反射法の両者を実施し、浅層反射法の多様化を試みている。

建設工事のための地質調査で、一般に用いられている「弾性波探査」は「屈折法弾性波探査」であり、ここで取り扱う「浅層反射法」との違いは、解析に用いる波、すなわちP波・S波の屈折波と反射波のいずれを使用するかという点に関係している。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を利用するもので、往復走時曲線から測線間の地盤の平均的速度構造を求めるものである。一方反射法は、地層境界面での反射波の反射点を測線上で連続的に追跡し、地層境界面の連続性を求めるとともに、各層の弾性波速度や地層境界の深度を求めるものである。したがって反射法では、測定は発振点～受振点を移

動させながら繰り返し行い、反射波の調査・解析を行う。

この報文は、2つの事例に基づき、マルチチャンネル浅層反射法(以下「マルチチャンネル方式」と呼ぶ)とシングルチャンネル浅層反射法(以下「シングルチャンネル方式」と呼ぶ)の適用性・相違点・有効の利用方法などについて検討したものである。

2. 浅層反射法の測定方法と解析方法

2.1 測定システム

測定装置のシステムと発振器～受振器の配置を図-1に模式的に示す。測定装置は増幅器・データレコーダー・ビジグラフなどからなり、屈折法探査と基本的には同様である。反射法と屈折法の違いは、発振器～受振器の移動にある。測定は、測線上に受振器を設置後、適切な距離をとって発振器を設置し、スタッキングを数回行い、波形を記録して始まる。浅層反射法では、次に発振器～受振器全体を測線上で一定間隔ずつ移動させながら、測定作業を繰り返し行う。今回マルチチャンネル方式では受振器を12個用い、すべての記録を解析に用いるのに対し、シングルチャンネル方式では受振器を4個用いて記録の欠損を防ぐとともに、その中で最もS/N比の良い記録を使えるようにした。すなわち1測点あたり解析に用いる波形の数は、マルチチャンネル方式では2～6波、シングルチャンネル方式では1波である。実際の作業では作業能率の向上のために、前もって測線上に多数の受振器を設置し、増幅器側でのチャンネル切換えが実質的な受振器の移動となるようにしている。

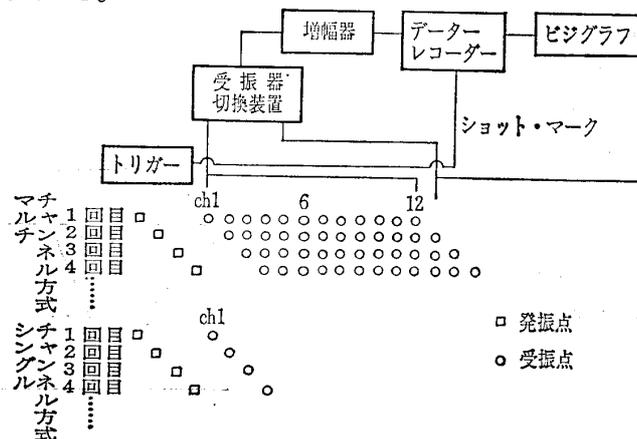


図-1 測定システム

*榎大林組 技術研究所 土木第一研究室

2.2 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、予備測定が必要である。予備測定の目的は主に次のような点にある。

- ① 表面波の発生状況を把握して、発振器とそれに最も近い受振器との距離（オフセット距離）を決定。
- ② 受振器の間隔の決定。
- ③ 深度方向への発振エネルギーの到達状況を把握し、発振器（人工震源）のスタッキング回数を決定。
- ④ データ処理時に最適なバンドパスフィルターを選択するために、反射波のおおよその周波数帯域を確認。
- ⑤ 重錘・鉄ハンマー・掛矢・エアガン等の人工震源の選択。

これらは主に記録のS/N比の向上のために行うものである。反射波はそれ自体が弱いこと、減衰および他の優勢な表面波などにより、反射波の識別は他の波と比較して困難となる。したがって表面波の影響を避けるために、表面波の発生状況と必要な探査深度との関係から、オフセット距離を最初に決めることが多い。このような予備測定に基づいて測定条件が決定される。

2.3 解析法の流れ

マルチチャンネル方式とシングルチャンネル方式の解析・処理は、それぞれ図-2の流れ図に従って行う。マルチチャンネル方式の特徴は、後述するように速度解析・NMO補正・CDP重合にあり、反射波の記録自身から直接地層境界の位置と各層の弾性波速度が求まる。一方シングルチャンネル方式のデータ処理は、マルチチャンネル方式の「ニアトレース断面の作成」にほぼ相当しており、反射面の同定が可能である。シングルチャンネル方式では反射波の記録から各層の速度を直接計算できないので、PS検層・屈折法探査などの別の方法で得られた速度が、反射面の深度を計算するためには必要となる。これらの点からシングルチャンネル方式は、データ処理上マルチチャンネル方式の簡易法と考えることができる。

2.4 マルチチャンネル浅層反射法の解析法

マルチチャンネル方式における解析法の概略は、以下のとおりである^{4)~6)}。

(1) CDP アンサンブル記録の編集

デジタル化された測定記録は、データ処理の便宜上測点ごとの記録としてまとまるように配列変更される（デマルチプレックス）。また反射位相を見やすくするためには、バンドパスフィルター処理とともに、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波形処理が必要である。これをAGC (Automatic

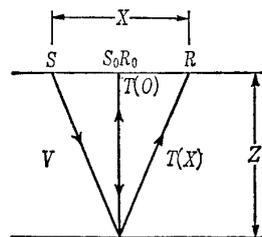


図-3 水平2層構造の反射波波線

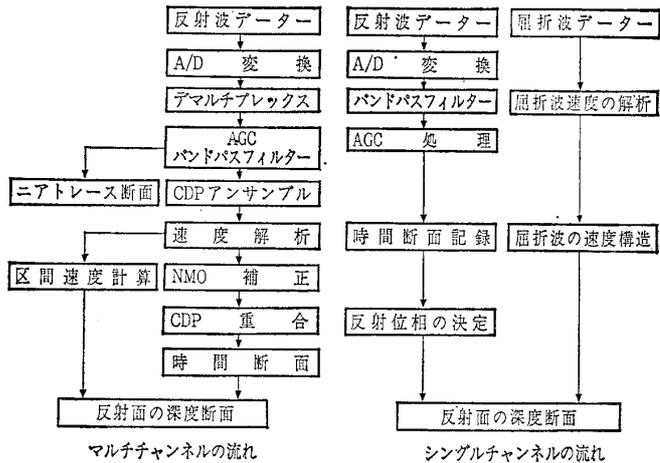


図-2 データ処理の流れ図

Gain Control) 処理と呼ぶ。ここで発振点に最も近い受振点（第1ch）の記録を集めた反射波の時間断面記録は、ニアトレース断面と呼ばれる。

反射波の走時は、図-3のような水平2層構造では、次式で表すことができる。

$$T(X) = \sqrt{T^2(0) + (X/V)^2} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、

$$T(0) = 2Z/V \dots\dots\dots(2)$$

- 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

すなわち $T(0)$ 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)式からも明らかのように、図-4のように双曲線となる。 $T(A) - T(0)$ はノーマルムーブアウトと呼ばれ、 $X=A$ と $X=0$ の間の走時のずれを表す。

また異なる発振点の記録を整理すると、図-5のような共通の反射点を持った複数の波線が認められる。この反射点は共通反射点（Common Depth Point, CDP）と呼ばれ、このCDPを持つ波形を重合（加算）することによって大幅なS/N比の改善ができるので、これを共通反射点重合法（CDP重合法）と呼んでいる。測定における発振点～受振点の配置とCDPの関係は、図-6のように表される。重合する前の1つのCDPに対する記録（波線群）

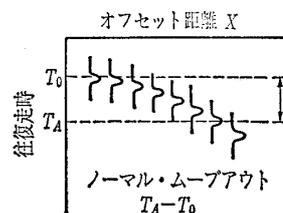


図-4 反射波の走時曲線

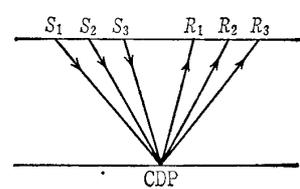


図-5 CDP (共通反射点) における波線

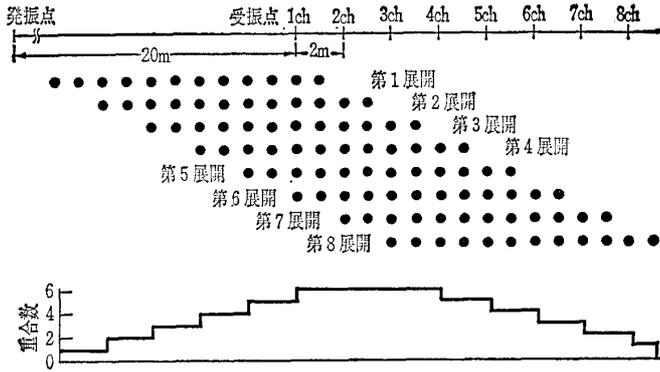


図-6 共通反射点重合法の概念

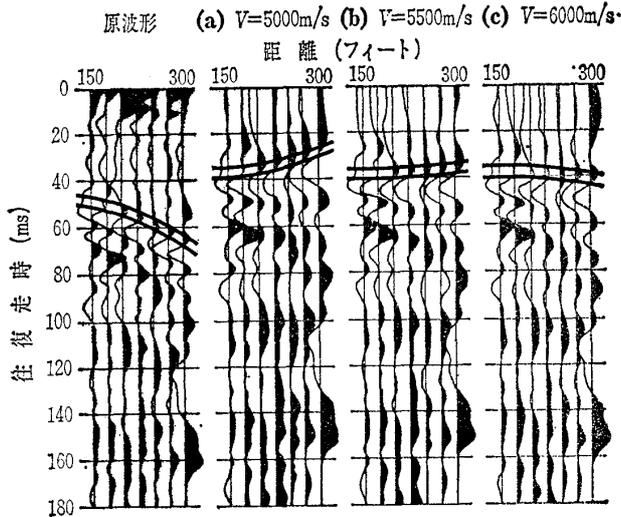


図-7 NMO補正と速度解析⁵⁾
 (a) NMO補正が過大補正, 速度過小
 (b) NMO補正が適正補正, 速度適正
 (c) NMO補正が過小補正, 速度過大

は、CDP アンサンブル記録と呼ばれている。

(2) 速度解析・NMO補正・CDP重合

CDP重合にあたっては、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、反射波の正しい速度が必要となる。そこでまず速度解析を実施する。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から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-7に示したように、ノーマルタイム上の直線状ならびにNMO補正が行われる速度が、求めるべき真の速度である。

(3) 時間断面と深度断面

反射面の位置はCDP重合の結果得られた時間断面記録から決まり、各反射面までの速度は速度解析で得られている。この速度は平均2乗速度(Root Mean Square Velocity, RMS速度)であり、次式で表される。

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

X: 距離

T(X): Xにおける反射波の往復走時

各層の弾性波速度はこのRMS速度と次の(4)式のDix(ディックス)の式⁶⁾から求まり、また各層の層厚と反射面の深度はそれぞれ(5), (6)式から求まり、反射面の深度断面が得られる。

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

$$DD_{(i+1)} = (T_{0(i+1)} - T_{0(i)}) \cdot V_{(i+1)} / 2 \dots\dots\dots(5)$$

$$D_{(i+1)} = DD_{(i+1)} + D_{(i)} \dots\dots\dots(6)$$

ただし、

V_(i+1): (i+1)層の区間弾性波速度

V_{RMS(i+1)}, V_{RMS(i)}: (i+1), i層下面までのRMS速度

T_{0(i+1)}, T_{0(i)}: (i+1), i層下面までの反射波の垂直走時

DD_(i+1): (i+1)層の層厚

D_(i+1), D_(i): (i+1), i層下面までの深度

2.5 シングルチャンネル浅層反射法の解析法

シングルチャンネル方式で得られた時間断面記録から、反射面の深度は屈折法で得られた速度を用いて次のように計算できる。

n層の水平多層構造における反射走時T_nは、次式で表すことができる⁷⁾。

$$T_n(\theta_1) = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{V_i \sqrt{1 - ((V_i/V_1) \sin \theta_1)^2}} \dots\dots\dots(7)$$

Z_i: i層の層厚

V_i: i層の速度

θ₁: 第1層への入射角

ここで、反射面の深度が大きくなるとθ₁は非常に小さくなるので、sin²θ₁≒0として近似する。よって、i番目の反射面(i層の下面)の深度は(8)式のように与えられ、オフセット距離の影響は反射面が深ければ無視できると考えられる。

$$D_i = Z_i + D_{i-1} = (T_i - T_{i-1}) \cdot (V_i / 2) + D_{i-1} \dots\dots(8)$$

D_i, D_{i-1}: i, (i-1)番目の反射面の深度

一方反射面が浅い場合、例えば水平2層構造では、オフセット距離が次のように関係している。

$$Z_1 = \sqrt{l^2 - (x/2)^2} \dots\dots\dots(9)$$

$$\sin \theta = x / 2l \dots\dots\dots(10)$$

2l: 反射波の往復距離

x: オフセット距離

また屈折法では初動から走時を読み取るのに対し、反射法では波形のピークやゼロクロス点を走時とすることはできないので、反射位相と屈折波の走時は原理的におおよそ半波長程度の位相のずれを生じている。このずれは反射面が浅いと無視できなくなる。このずれの時間をt₀、反射位相までの時間をt、反射波の速度をV₁とすると、求める反射走時t'と反射面の深度Z₁は次のようになる。

$$2l = t' \cdot V_1 = (t - t_0) \cdot V_1 \dots\dots\dots(11)$$

表-1 測定条件

		弾性波	人工震源	測線長	オフセット距離	受振点間隔	スタッキング回数	受振器	サンプリング時間	レコード長	トレース数	CDP用トレース数
マルチチャンネル方式	CASE 1	P波	鉄ハンマーと鉄板	132m	20m	2m	4回	上下動1成分 28 Hz, 12個	0.5 ms	512 ms	67	134
	CASE 2	P波	鉄ハンマーと鉄板	132m	40m	2m	4回	上下動1成分 28 Hz, 12個	0.5 ms	512 ms	67	134
	CASE 3	S波	板たたき法	132m	14m	2m	4回×2=8回	水平動1成分 45 Hz, 12個	1.0 ms	1024 ms	67	134
シングルチャンネル方式	反射法	P波	掛矢と鉄板	452m	2m	1m	2~4回	上下動1成分 28 Hz, 4個	0.2 ms	205 ms	459	-
	屈折法	P波	掛矢と鉄板	464m	2m	4m	主に4~8回	上下動1成分 28 Hz, 12個	-	-	-	-

$$Z_1 = \sqrt{\left\{ \frac{(t-t_0) \cdot V_1}{2} \right\}^2 - \left(\frac{x}{2} \right)^2} \dots\dots\dots (12)$$

今回は、第1層/第2層の反射面は(12)式から、それ以上の反射面は(8)式から、それぞれの深度を計算した。

3. 地盤調査への適用性検討

ここでは2つの探査事例を取り上げるが^{(1),(2)}、それらの測定条件は表-1にまとめて示してある。

3.1 マルチチャンネル方式による盛土基礎地盤の解析

調査地は新第三紀三浦層群からなる丘陵地を切盛土した所で、盛土の厚さは最大約15mである。三浦層群は部分的に薄い砂岩層を含むが、主として塊状の泥岩層からなる。

今回表-1の3つの異なる条件下で調査を行ったが、結果的にはCASE 1, 3, 2の順に良い結果が得られた。P波とS波は波の種類が違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ようである。作業能率はP波探査の方がS波探査よりも約2倍良く、記録のS/N比の良否は主としてオフセット距離に負う所が大きい。CASE 1の時間断面記録・深度断面・速度解析結果を、それぞれ図-8, 9, 表-2に示す。CASE 1の深度断面ではP波の第1層/第2層反射面は、盛土と泥岩層の境界面におおむね一致しており、CASE 3のS波についても同様な結果が得られた。

3.2 シングルチャンネル方式による地すべり斜面の解析

調査地は古第三紀保田層群の泥岩・砂岩層からなり、第三紀層地すべりを生じている。地すべり斜面の勾配は平均12度、最大30度である。測線は地すべりの斜面に対して、縦断方向に2測線、横断方向に5測線を設置した。図-10は時間断面記録の1例で、これらはオフセット距離3m(第2ch)の記録である。多くの測線で4層構造が認められる。図-11は深度断面のブロックダイアグラムである。

3.3 解析上の留意点

(1) 地層の弾性波速度

地層の弾性波速度は、反射面の深度を

求めて速度構造を決める上で重要な要素であるが、速度の求め方はマルチチャンネル方式とシングルチャンネル方式とで大きく異なる。マルチチャンネル方式では速度解析によるが、今回の速度解析は反射面がほぼ水平な測点50~110mについて、10mおきにCDPアンサンブル記録を取り出し、200~1000 m/sに対して100 m/sごとに行った。速度解析は、原理上すべてのCDPアンサンブル記録に対

表-2 速度解析結果 (CASE 1, P波)

	測点	RMS速度 (m/s)	速度V (m/s)	到達時間 (msec)	層厚 (m)	深度 (m)
第1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
第2層	100	500	500	50	12.5	12.5
	50	700	1030	95	18	30
	60	700	1150	90	12	29
	80	800	1170	105	23	35
	90	700	1030	95	18	30

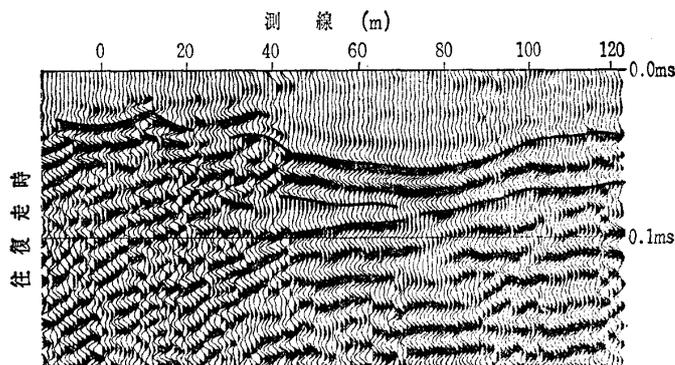


図-8 時間断面記録 (CASE 1, P波)

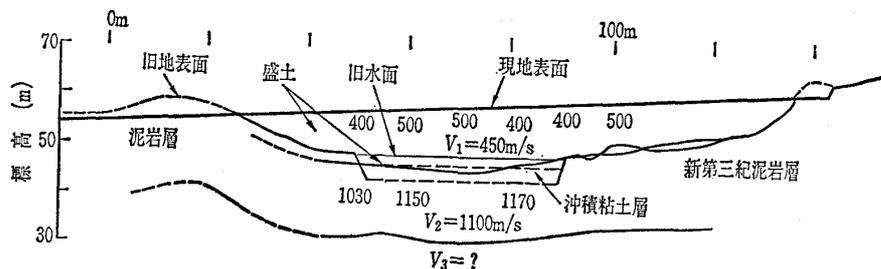


図-9 深度断面図 (CASE 1, P波)

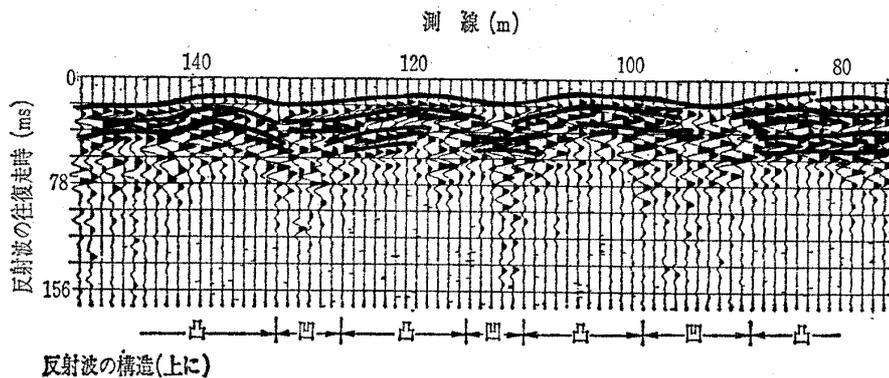


図-10 時間断面記録 (A1 測線の一部)

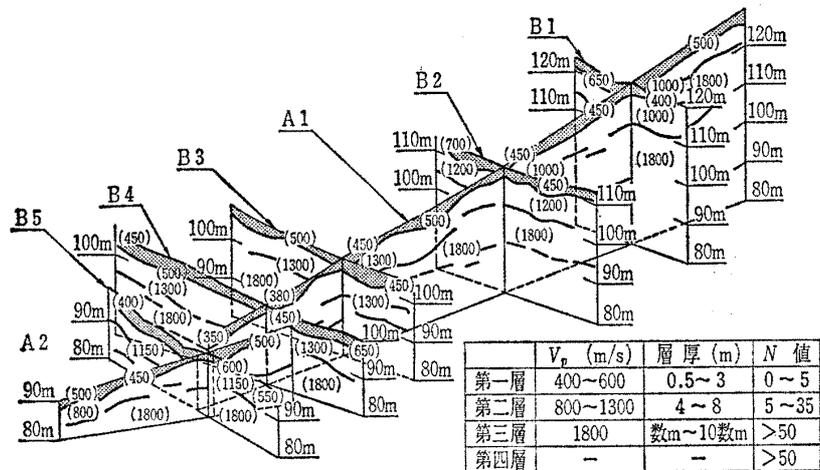


図-11 深度断面のブロックダイアグラム

して、また速度をもっと細区分して行えるが、実用上および計算コストの点から上述の精度で行った。

シングルチャンネル方式では今回同時に実施した屈折法を用いている。屈折法は、その探査の性格上10数m~数10mごとにしか得られないので、1~2mごとに測定を行う反射法に対しては、速度が局部的に著しく変わる場合、計算される深度には誤差が含まれることになる。このようにマルチチャンネル方式とシングルチャンネル方式では、速度のとらえ方や精度がやや異なっている。

(2) 反射位相の決定

反射面を表す反射位相の決定も基本的な問題であり、調

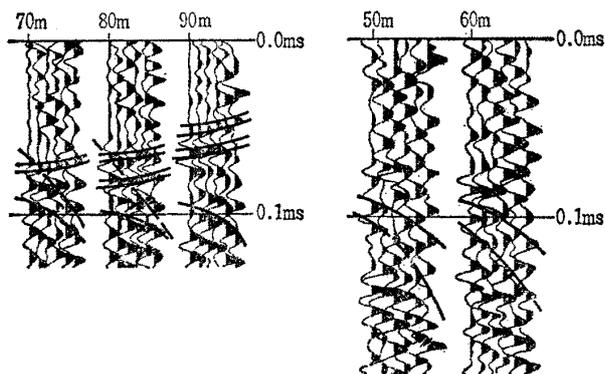


図-12 “ムーブアウト異常” (その1)

図-13 “ムーブアウト異常” (その2)

査地の地形・地質が傾斜や凹凸を含む場合には特に問題が多い。

マルチチャンネル方式では、反射面が傾斜していると本来一致すべき CDP が離れて、地層の速度や深度が決定できなくなる。今回も図-8の測線20~40m付近、30度の斜面は反射面として現れていない。また走時の“ムーブアウト異常”が2つある。1つは、第2層(泥岩層)から地表に伝播する屈折波が原因と考えられるもので、発振点からの距離に比例して長くなるはずの反射走時が、図-12のように逆に短くなる現象である。もう1つは、第1層・第2層の深度と速度の関係から、ある距離だけ離れた受振点では、第1反射面と第2反射面とから来る反射波の走時が逆転してしまうものである。このため異なる反射面からの走時の差は、距離とともに小さくなるはずのものが、図-13のように大きくなっている。このような場合、波のパス計算を行って検討することが必要となる。

シングルチャンネル方式では図-10のように、斜面勾配にかかわらず反射位相は明りょうに得られている。全測線に共通して波形記録は、反射位相の連続が上に凸になる部分と、

その間の上に凹になるとみなせる部分とからなる。特に凹の構造を示す部分では、第2層以深からの反射波が不明りょうになることが多い。また凹の構造では反射波の周波数が低く減衰は小さく、凸の構造では逆に周波数が高く減衰が大きめという規則性も認められる。この原因は地盤中の速度の変化よりも地盤の構造の変化によるものと考えられる。また凹部の上を通過すると、凹部の底よりもその斜面から反射してくる反射位相が大きく現れる場合もある。

このように反射位相の決定は、解析方法の特性や地質条件を十分考慮に入れて行わなければならない。

3.4 地質的検討例

浅層反射法では時間断面や深度断面から、いかに多くの地質情報を読み取るかということも重要な問題である。図-14は、図-10のシングルチャンネル方式の結果を利用して地質的検討を行った1例である。この地すべり斜面では、第1層・第2層は弾性波速度やN値などの値から地すべり層と考えられる。この場合浅層反射法による地層層厚の分解能は最大1~1.5mであるので、第1層/第2層反射面と第2層/第3層反射面の等深線図を1m間隔で描くと、例えば図-15のように反射面の地形的形態や起伏の検討が可能となる。

等深線図に見られる地形的特徴は、地すべり地形の各構造によく対応している。規模は小さいものの、幅広いある

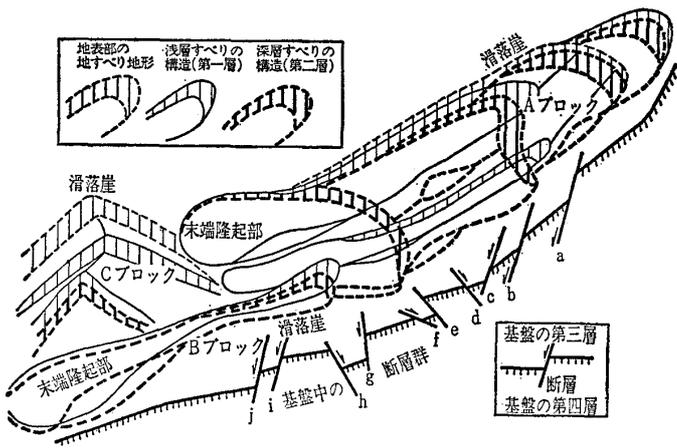


図-14 地すべり斜面の模式構造図

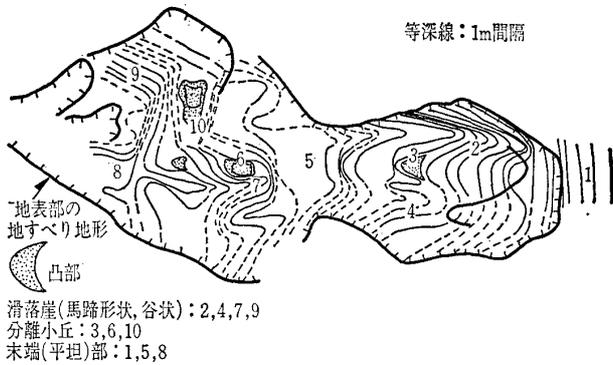


図-15 第1層/第2層反射面の等深線図

いは細長い滑落崖・分離小丘⁹⁾・流域から堆積域に至る平たん部や末端隆起部⁹⁾などがそれぞれ認められる。

第3層・第4層はN値が50以上あるので当斜面の基盤層と考えられる。第3層/第4層反射面はしばしば不連続的に深度を変えるが、これは基盤中に発達する見かけの垂直変位量が2~6mの小規模な断層と考えられる。

以上のような特徴とボーリングコア試料から、この第三紀層地すべり斜面は3つの地すべり小ブロックに分かれ、各ブロックは2層のすべり層からなり、これらの基盤層中には地すべり斜面に対して流れ盤となるような断層が発達すると考えられる。この地すべり斜面の構造は図-14のよ

うに模式的に表すことができる。このような地質情報は、設計・施工に当たっての有益な情報になると考えられる。

4. おわりに

この報文では、主としてマルチチャンネル方式とシングルチャンネル方式による浅層反射法の事例について検討した。現時点では事例はまだ多いとは言えないが、マルチチャンネル方式では、①測定した波形記録に対して各種の情報処理を施し、②解析は平たん地の水平構造に対してすぐれ、③測定・解析作業の量は多く、④計算コストは高くなり、またシングルチャンネル方式では、①測定記録に対する情報処理が少ない簡易解析法で、②地形条件にはあまり拘束されず、③測定・解析作業量は少なく、④計算コストは安くなる、という傾向が認められる。また浅層反射法は、沖積地盤ばかりでなく軟岩地域でも十分利用可能と考えられる。今後さまざまな地形・地質条件下での実績を積み重ね、調査・設計・施工に当たっての、浅層反射法の有効的な実施方法や利用方法を検討することが必要と思われる。

参考文献

- 1) 木村 薫・平間邦興・丸山 誠・桑原 徹・玉井昭雄: 浅層反射法による地盤調査, 大林組技術研究所報, No.30, pp.94~100, 1985.
- 2) 木村 薫・平間邦興・丸山 誠・桑原 徹・外山 聡・鈴木 健一郎: 新しい弾性波探査による法面構造の解析, 大林組技術研究所報, No.32, pp.5~10, 1986.
- 3) 平間邦興・桑原 徹・外山 聡: トンネル工事における浅層反射法探査, 土木学会第41回学術講演会講演概要集, 第3部, pp.673~674, 1986.
- 4) 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, No.6, pp.351~374, 1982.
- 5) Lankston, R.W. and Lankston, M.M.: An Introduction to the Utilization of the Shallow or Engineering Seismic Reflection Method, Geo-Compu-Graph, Inc., pp.1~39, 1983.
- 6) Dix, C.H.: Seismic Velocities from surface measurements, Geophysics, Vol.20, pp.68~86, 1955.
- 7) 朝倉夏雄: 反射法速度解析による地下速度の概念, 物理探査, Vol.36, No.3, pp.49~54, 1983.
- 8) 藤原明敏: 地すべり調査と解析, 理工図書, pp.1~214, 1970.
- 9) 大八木規夫: 地すべりの構造, アーバンクボタ, No.20, pp.42~46, 1982.

(原稿受理 1987.1.21)