

新しい弾性波探査による法面構造の解析

——シングルチャンネル浅層反射法を主体とした
第三紀層地すべり斜面の弾性波探査——

木 村 薫 平 間 邦 興 丸 山 誠
桑 原 徹 外 山 聡 鈴 木 健 一 郎

Geophysical Exploration of Slope Structure Based on New Seismic Prospecting Method

——Seismic Prospecting for Landslide layers Composed of Tertiary Mudstone
Mainly Utilizing Single Channel Data of Shallow Seismic Reflection Method——

Kaoru Kimura Kunioki Hirama Makoto Maruyama
Tohru Kuwahara Satoshi Toyama Ken-ichiro Suzuki

Abstract

This study ascertains the practicality of analyzing slope structures based on the shallow seismic reflection method utilizing landslide slope, and also attempts classification of landslide structures. In spite of reflection wave analyses by single component, reflection phases judged to be reflection planes were well continuous, and four layers with different velocities of P-waves were recognized in the slope. The two upper layers were landslide deposits which included “shallow sliding” and “deep sliding”, and this landslide was subdivided into three landslide blocks. Main scarps, tongues, and tails were observed in each block. The two lower layers were basements composed of mudstone and sandstone of Neogene time, and several faults were also observed between these two layers. These types of information are thought will be valuable for design and construction.

概 要

この報告は、地すべり斜面を利用してシングルチャンネル浅層反射法による斜面構造の解析の実用性を検証するとともに、地すべり構造の解明を試みた。シングルチャンネルによる反射波の解析にもかかわらず、反射面と考えられる反射位相がよく認められ、この斜面では4層が識別できた。上位2層が地すべり層で、浅層すべりと深層すべりからなり、斜面は三つの地すべりブロックに分けられることが分かった。また各ブロックには滑落崖や末端隆起部などが見られる。下位の2層は新第三紀層の砂岩・泥岩からなり、2層の間にはいくつかの断層が認められる。斜面についてこのような情報は、設計、施工にあたって重要なものになると考えられる。

1. はじめに

現在反射法弾性波探査の土木調査への実用化を目指して、「浅層反射法」の研究がしばしば行なわれている。筆者らもこの浅層反射法の実用化を目指して、すでに実験を行ってきた^{1)~3)}。一般に浅層反射法は、12チャンネルや24チャンネルのマルチチャンネルでデータの測定・解析が行なわれている。マルチチャンネルで得られたデ

ータを高精度で解析するためには、共通反射点(CDP)の一致が不可欠であるため、多くの場合浅層反射法は地形的に平坦な沖積地盤上で行なわれている。実際の調査は斜面でも多数要求されるけれども、地盤中の地層境界面が急傾斜をなしていると、反射波の共通反射点が全く一致しないので、地層境界にあたる反射面は現われてこない²⁾。そこで今回筆者らは、斜面の一例として地すべり斜面を利用して、1チャンネルのデータすなわちシン

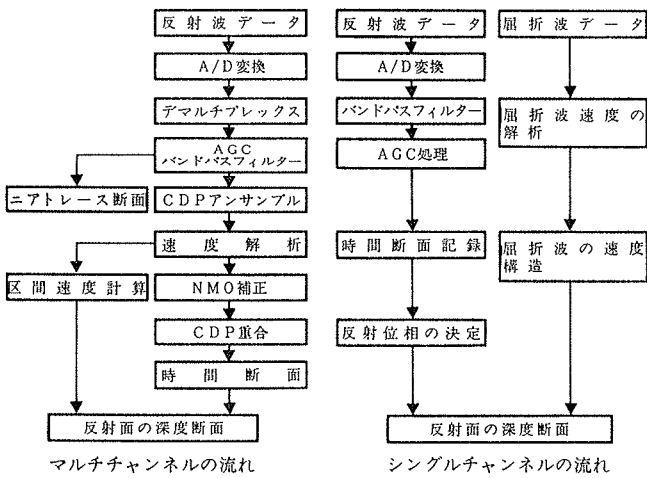


図-1 データ処理の流れ図

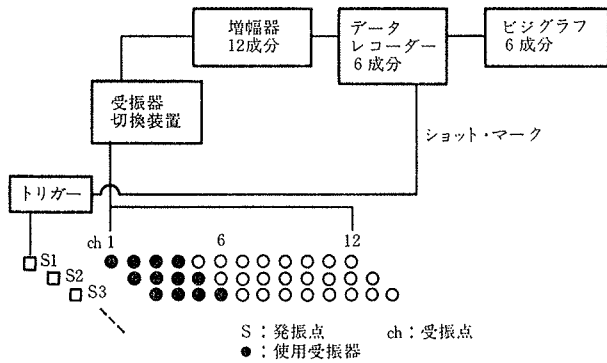


図-2 測定システム

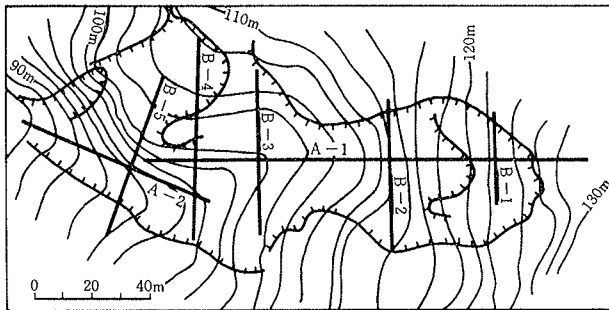


図-3 調査地の地形と弾性波探査の測線

グルチャンネルによる反射波の検出や解析が実用上可能であるかどうかを検討した。反射波の解析結果から地すべり層の詳しい構造も解析できたが、これらの結果は設計・施工にあたって有効な情報になると考えられる。

2. 浅層反射法におけるマルチチャンネルとシングルチャンネルのちがい

マルチチャンネルとシングルチャンネルにおけるデータ処理のちがいは、図-1に示す。マルチチャンネルの特徴は、速度解析・NMO補正・CDP重合にあり、反射波のデータだけ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のデータ処理は、マルチチャンネルにおける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では、反射波自体のデータから各層の速度を求めることはできない。すなわち1チャンネルの反射波データでは速度解析やRMS速度を用いたDixの式による解法が行えないので、反射面の深度を求めるためには、PS検層・屈折法弾性波探査などによって別に速度を決める必要がある。これらの点から、データ処理的にはシングルチャンネルはマルチチャンネルの簡易法と考えられる。

3. 測定方法と測定条件

測定作業・測定装置・本測定に先立つ予備測定の実施・予備測定の目的などの測定方法は、すでに報告したマルチチャンネルの場合²⁾と基本的には同様である。測定システムは図-2に示す。今回はシングルチャンネルが目的であるが、測定にあたっては4チャンネルでデータを記録し、データの欠損を防ぐとともに、最もS/N比の良い記録を解析に利用できるようにした。各層の速度は、合わせて行なった屈折法弾性波探査によって決めることにした。

調査地の地形と弾性波探査の測線は図-3に示す。調査地は新第三紀層の泥岩・砂岩からなり、第三紀層地すべりを生じている。地すべりの斜面勾配は平均12度、最大30度である。測線は地すべり斜面に対して、縦断方向に2測線、横断方向に5測線の合計7測線をとった。

浅層反射法・屈折法探査の測定条件は、予備測定・地すべり構造・探査深度などから表-1のように決められ

	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	トレース数
浅層反射法	P波	掛矢と鉄板	452m	2m	1m	2~4回	測定は28Hz 4個	0.2msec	459
屈折法探査	P波	掛矢と鉄板	464m	2m	4m	主に4~8回	28Hz 12個	—	—

表-1 測定条件

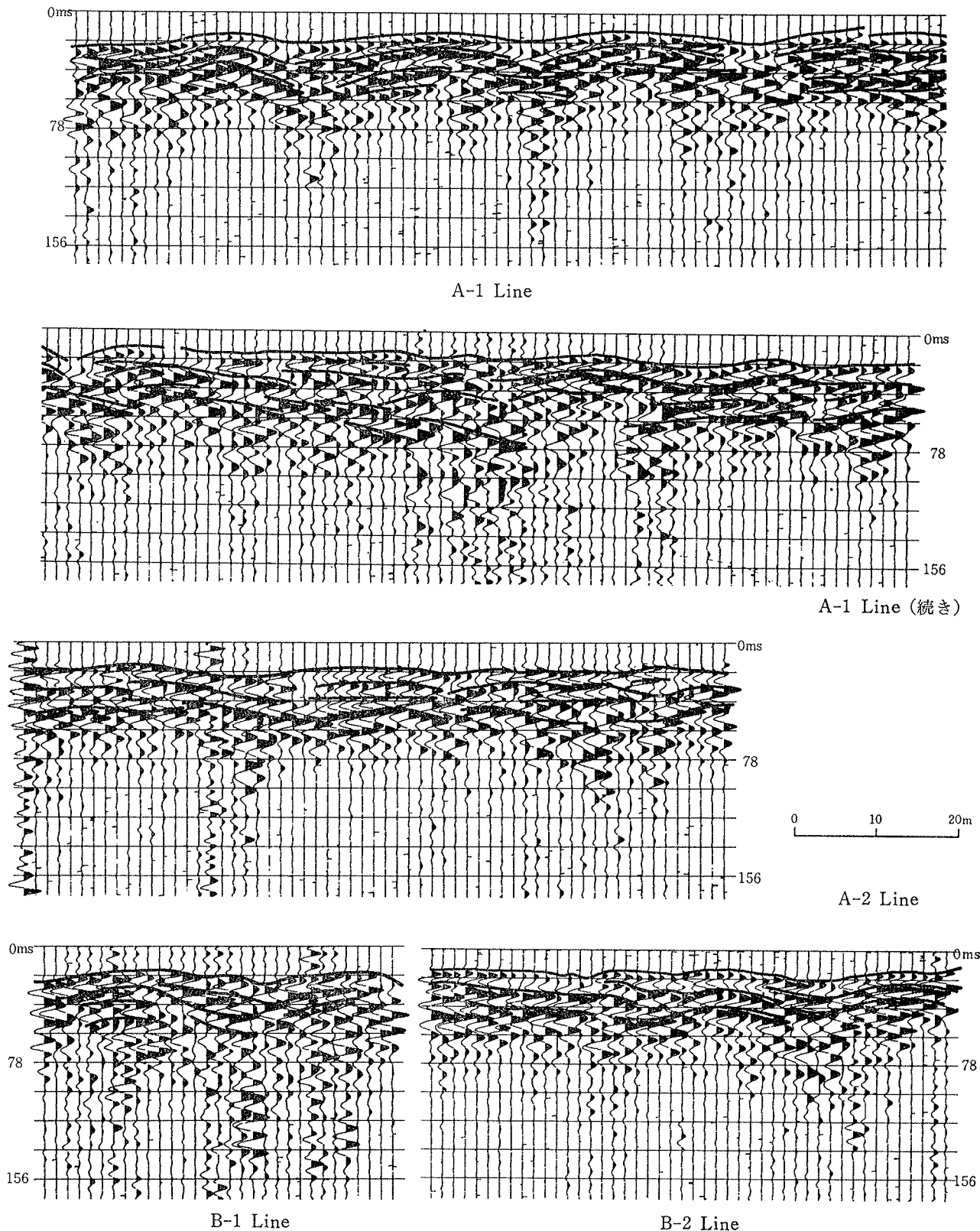


図-4 測定結果

た。

4. 測定結果と解析結果

4.1. 時間断面記録

浅層反射法における各測線の測定結果、すなわち時間断面記録は図-4に示されている。図中の実線は反射面と思われる反射位相を連ねたもので、多くの測線で4層構造が認められる。全測線に共通していることは、第二

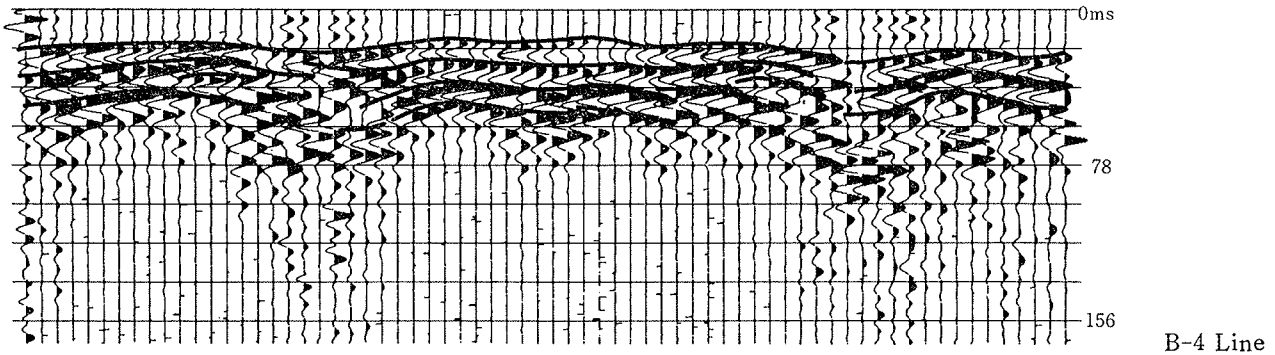


図-4 (続き)

層以深からの反射波がしばしば凹の構造をなして、そこでは反射波が不連続、不明瞭になっていることである。凹部では反射波の周波数が低く減衰は小さく、凸部では逆に周波数が高く減衰は大きいという規則性も認められる。したがってこの原因は、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。

4.2. 解析条件

時間断面記録から深度断面記録を求める際の解析条件は以下の通りである。

- (1) オフセット距離: 3m (第2chの記録を使用)
- (2) バンドパスフィルター: 100~120 Hz
- (3) 第一層速度: $V_1=400\sim600$ m/sec
- (4) 第二層速度: $V_2=800\sim1,300$ m/sec
- (5) 第三層速度: $V_3=1,800$ m/sec

(3)~(5)の速度は屈折法の結果から与えた。屈折法によると、第一層は $V_1=350\sim650$ m/sec、一部 $V_1=700$ m/sec で、厚さ0.5~3m、第二層は標高の高い部分で $V_2=1,300$ m/sec、低い部分で $V_2=800\sim1,000$ m/sec であり、厚さは2~7m、第三層は $V_3=1,800$ m/sec となる。

今回設計したバンドパスフィルターは100~120 Hzなので、 $V_1=400$ m/sec とすると、これは波長が約4mであることを示している。よって反射波の発生・検出のためにはその1/4波長よりも地層が厚いことが条件となるので、第一層では層厚が1~1.5mより薄い所では検出できないことになる。同様にして、第二層は2.5~3m、第三層は4mが検出できる限界となる。

4.3. 反射面の深度

反射面の深度は、屈折法で得られたその位置での速度値を用いて計算されている。この場合オフセット距離の影響と、反射走時の補正の問題が考えられる。

n層の水平多層構造における反射走時 T_n は(1)式で表わすことができる。

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

Z_i : i層/(i+1)層の反射面の深度, V_i : i層の速度, θ_i : 第一層への入射角

ここで反射面の深度が大きくなると θ_i は非常に小さくなり、 $\sin \theta_i \simeq 0$ と近似できる。したがって i 番目の反射面の深度は、(1)式から(2)式のように与えられる。

$$Z_i = (T_i - T_{i-1}) \cdot \frac{V_i}{2} + Z_{i-1} \dots\dots(2)$$

これから反射面が深ければ、オフセット距離の影響はほぼ無視できると考えられる。

一方反射面が浅い場合、たとえば水平二層構造では、オフセット距離が次のように関係している。

$$Z_1 = \sqrt{l^2 - \left(\frac{x}{2}\right)^2} \dots\dots(3)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{x}{2l} \dots\dots(4)$$

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して読み取ることはできないので、反射位相と屈折法の走時は、原理的におよそ半波長程度の位相のずれ、すなわち時間のずれを生じていることになる。このような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 t_0 、反射面の位相までの時間を t とすると、求める反射走時 t' は次のように表わすことができる。

$$t' = t - t_0 \dots\dots(5)$$

したがって、反射波の速度を V_1 とすると、

$$2l = t' \cdot V_1 = (t - t_0) \cdot V_1 \dots\dots(6)$$

となるので、反射面の深度は次式から求められる。

$$Z_1 = \sqrt{\left\{ \frac{(t - t_0) \cdot V_1}{2} \right\}^2 - \left(\frac{x}{2}\right)^2} \dots\dots(7)$$

今回、第一層/第二層の反射面は(7)式から、第二層/第三層の反射面以深のものは(2)式からそれぞれ深度を計算している。

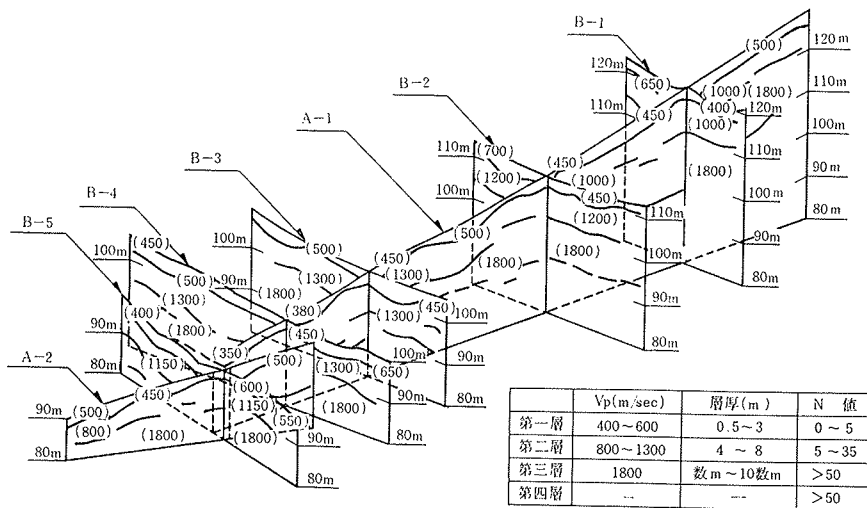


図-5 深度断面記録のブロックダイアグラム

4.4. 深度断面記録

各測線の深度断面記録をまとめて示すと、図-5のような深度断面記録のブロックダイアグラムが得られる。併せて、各層の速度・層厚・N値も示してある。この地すべり斜面は4層に分けることができる。今回の調査結果では、各反射面の深度方向の起伏がかなり大きく現われている。反射法では1~2m毎に測定を行なうのに対し、屈折法は速度はその探査の性格上10数m~数10mごとにしか得られない。したがって速度が局所的に著しく変わる場合には、計算される深度には誤差が含まれることになる。しかし反射法は深度方向の径路から解析し、水平方向の径路成分は含まれていないので、反射面の深度の水平方向の変化、すなわち構造の変化については、反射法はその検出能力がすぐれていると考えられる。

5. 地すべり斜面の構造

5.1. 地すべり層の構造

第一層・第二層はその弾性波速度やN値から地すべり層と考えられる。地すべりの構造は、大きく削剝域と押出域の二つに分けられる。削剝域は土塊の崩壊する部分

で、主すべり面や副すべり面に伴う滑落崖や副次滑落崖・凹状地・湖沼や池・引張りきれつ・崩壊によるリッジや分離小丘を含んでいる。押出域は崩壊土塊が流れる流送域とそれらが停止・再堆積する堆積域に分けられる。押出域には圧縮きれつ・リッジ・末端隆起部などがあり、押出域の下底面は二次すべり面とも呼ばれている^{4)~5)}。図-6は、第一層/第二層反射面および第二層/第三層反射面の等

深線を表わしたものである。等深線にみられる各層の形態から、先に述べた地すべりの構造を参考にすると、当地すべり層の構造は表-2のように考えられる。すなわち当地すべり斜面は、三つの地すべりブロックと各2層のすべり層から成っている。

Aブロックは斜面の上~中部を、Bブロックは中~下部を、Cブロックは下部をそれぞれ占めている。各ブロックで、2層のすべり層が認められ、第一層は「浅層すべり」を、第二層は「深層すべり」をそれぞれ形成している。特徴的な地すべり構造としては、幅広いあるいは細長い滑落崖・分離小丘・流送域から堆積域に至る平坦部や末端隆起部などが認められる。

5.2. 基盤層の構造

第三層・第四層はN値が50以上であるので、当斜面の基盤と考えられる。第三層/第四層反射面はしばしば不連続的に深度が変わるという特徴がある。これは地すべりの構造というよりも、むしろ基盤をなす新第三紀層の泥岩・砂岩そのものの構造と考えられる。この反射面の深度の不連続は、図-7の図中に示したa~jの断層によるものと考えられる。a~jはみかけの垂直変位量が

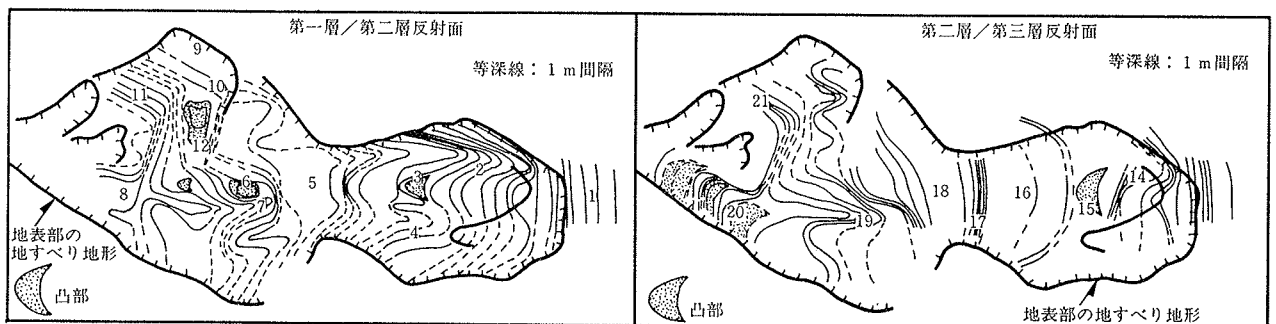


図-6 第一層/第二層反射面、および第二層/第三層反射面の等深線図 (図中の番号は表-2に対応)

地すべりブロック	すべり層	特徴的な地すべりの構造	位置 (図-6中の番号に対応)
A ブ ロ ック	浅層 すべり	細長い馬蹄形の滑落崖	{ 2 }, { 4 }
		分離小丘	{ 3 }, { 6 }
		末端(平坦)部	{ 1 }, { 5 }
	深層 すべり	幅広い馬蹄形の滑落崖	{ 14 }, { 17 }
		分離小丘	{ 15 }
	末端平坦部	{ 16 }, { 18 }	
B ブ ロ ック	浅層 すべり	狭小・谷状の滑落崖	{ 7 }
		末端部	{ 8 }
	深層 すべり	狭小・谷状の滑落崖	{ 19 }
	末端隆起部	{ 20 }	
C ブ ロ ック	浅層 すべり	幅広い滑落崖	{ 10 }, { 11 }
		分離小丘	{ 12 }
	深層 すべり	幅広い滑落崖	{ 21 }

表-2 地すべり層中の小構造

約2~6mの小規模な断層である。

5.3. 地すべり斜面の構造

この地すべり斜面の模式的構造は図-8のように表わすことができる。地すべり層はA, B, Cの地すべりブロックに分けられる。Aブロックでは、第二層からなる「深層すべり」は、幅広い滑落崖~末端隆起部からなる三つの小地すべりブロックからなり、一方第一層からなる「浅層すべり」は斜面の右側と左側にある細長い滑落崖と平坦部~末端隆起部からなっている。Bブロックでは、浅層すべり、深層すべりとも狭小な谷状の滑落崖とこれに伴う末端隆起部からなっている。またCブロックでは、地表部分も含めると4段の滑落崖が見られ、これらは副次滑落崖と考えられる。浅層すべりと深層すべりはほぼ同時に発生したと考えられ、深層すべりは地すべり地形全体を支配しているのに対し、浅層すべりはAブロックで見られるように局所的な動きも示している。また基盤層中の断層a~c, iはみかけ上正断層であるため、この斜面に対して流れ盤となり、将来の主すべり面となる要因とも考えられる。

6. まとめ

今回地すべり斜面を利用してシングルチャンネル浅層反射法を実施した結果、シングルチャンネルによる反射波の解析の実用性が確認され、併せて地すべり構造についての新たな知見も得ることができた。地すべり構造についてのこのような知見は、設計・施工にあたっての有益な情報になると考えられる。

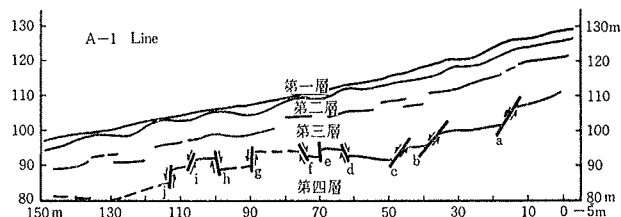


図-7 第三層/第四層の反射面と断層

謝 辞

今回の研究にあたっては、千葉県南部林業事務所の深い御理解を賜りました。関係各位の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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, 土木学会第39回学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和59. 10), pp. 527~528
- 2) 木村 薫, 他: 浅層反射法による地盤調査, 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 94~100
- 3) 平間邦興, 丸山 誠, 桑原 徹: シングルチャンネル浅層反射法を主体とした地すべり斜面の弾性波探査, 土木学会第40回学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和60. 9), pp. 777~778
- 4) 藤原明敏: 地すべり調査と解析, 理工図書(昭和45. 7)
- 5) 大八木規夫: 地すべりの構造, アーバンクボタ, No. 20, (1982), pp. 42~46

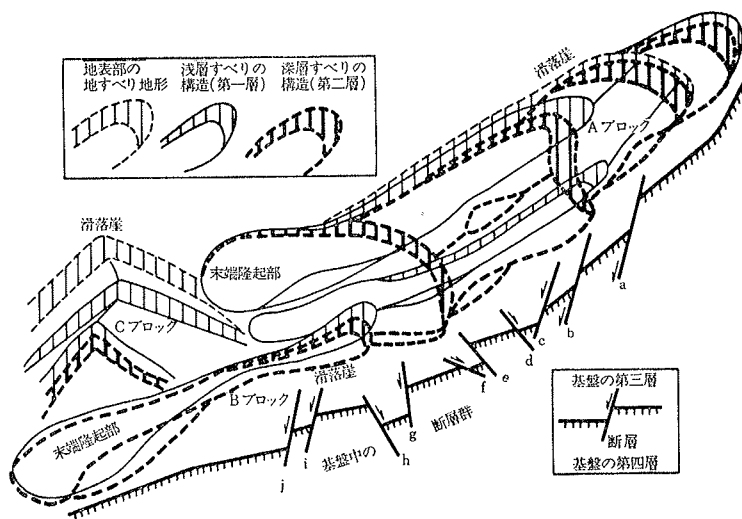


図-8 地すべり構造の模式図