<報 文>

徳島県一字地すべり地における弾性波探査

On Seismic Survey at Itchu Landslide in Tokushima Prefecture

川 本 整*

Osamu KAWAMOTO

The Itchu landslide in Tokushima prefecture may be difinated as a typical example of the landslides occurred in the Sanbagawa belt. In order to study the mechanism of landslide, seismic survey was carried out. By the survey, the relation between the earth layers or rock facies and P wave velocities are obtained, that is,

1st layer: 0.5-0.7km/s, soil and debris deposit,

2nd layer: 0.9-1.5km/s, debris deposit and/or the upper part of bedrock,

3rd layer: 3.7-4.5km/s, bedrock,

low velocity zone in bedrock: 2.4-2.8km/s, weathering part of bedrock.

Basing on the obtained earthground structure, the sliding active force along the main measure line is introduced. The distribution of the force indicates that the sliding area should be divided into the upper and the lower parts. In addition, the difference of P wave velocities in blocks and the location of the groundwater vein are taken into consideration, it becomes clear that the sliding movement is caused directly by the behavior of the groundwater after heavy rainfalls.

1. はじめに

徳島県美馬郡一字村の一字地すべり地は、5万分の1「剣山」図幅内にあり、徳島本線貞光駅から吉野川の支流貞光川に沿って、県道一字貞光線を約10km南下したところ、貞光川が一字峡とよばれる峡谷美をなす付近の左岸に位置している。この地域は日本でも屈指の多雨地帯であるとともに、台風にもなう集中豪雨の多いところである。その上、地質的には三波川帯に属する結晶片岩地域であるため、この付近一帯には数多くの地すべりや崩壊が発生している。一字地すべりはその1つである。

地すべり地内には、写真に示すように20軒弱の農家が点在し、急傾斜な地形ではあるが南向斜面を利用した畑作を主とする一集落を形成している。地すべり地の面積は約30haで、平均傾斜角は20度強であり、地すべり地末端部を県道と貞光川が並行している。

地すべり滑動は古くから緩慢に続いており、近年部分的に滑動が活発化し、剣山に通ずる交通の要所であることとあいまって問題視されてきた。そのため、貞光川に護岸工事をなすとともに、県道に土留め壁を施工するなどの抑止工が実施され、現在では滑動は小康を保っている。

われわれは、本地すべりの根本的防止対策をたてる上での基礎資料を得るために、1972年7月に屈折法による弾性波探査を実施し、この結果に基づき移動機構に関する若干の検討を行なった。その結果について述べる。

2. 地質の概要

調査域を構成する岩体は、三波川帯に属する結晶片岩と、それらの岩屑から成る崩積土層である。本域周辺の三波川帯は、泥質片岩を主とする無点紋片岩であって¹⁾、剣山研究グループの野々脇層に相当すると考えられる²⁾。

本地すべり地の基岩である三波川帯は、泥質片岩を主にし、砂質片岩と塩基性片岩をとまなう。泥質片岩は、黒色～灰色の比較的塊状の部分と、黒白の縞模様が顕著で、剝離性に富む部分がある。前者はいくぶん砂質状であり、堅固である。後者はこまかなちりめん状の微褶曲構造が発達し、それにともない軸面劈開が発達して、きわめて脆弱な岩質を示す。砂質片岩は、灰色～黒色、比較的塊状、厚さ1～数mの薄層で、泥質片岩中に挟まれている。源岩は細粒～中粒砂岩と思われる。塩基性片岩は、緑色、薄く板状に割れやすく、泥質片岩中に厚さ1～数mの薄層で挟まれている。本域周辺では、砂質片岩および塊状の泥質片岩は、層序的に下位で発達し、塩基性片岩は上位で優勢になっている。

地すべり地をおおう崩積土層は、全く円磨されていない大小さまざまな角礫～亜角礫を砂または砂質粘土で充填した固結不十分の淘汰のわるい礫層である。礫の径は、数mmから1mをこえるものまでであるが、通常10～30cmである。礫種は泥質片岩がきわめて多い。本層は20～30mの厚さを有し、地すべり滑動の主部をなす。

*大阪工業大学

写真-1 一字地すべり地全景

本域の三波川帯は、本地すべり地の北方約 2 km の土釜に $N70^{\circ}E$ 方向の背斜軸があり、本域はその背斜構造の南翼部にあたる。この背斜構造は大歩危背斜であり、四国三波川帯の第一級の背斜構造である³⁾。

本域の結晶片岩の層面片理面は、10~100cm の間隔で顕著に発達し（源岩の層面と考えられる）、その走向、傾斜は、 $N70^{\circ}\sim 90^{\circ}E$, $50^{\circ}\sim 70^{\circ}S$ である。また、層面片理面に次いで発達する軸面劈開面は、走向 $N70^{\circ}\sim 90^{\circ}E$, 傾斜 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}N$ を示している。このため、本域の結晶片岩の線構造は、 $N70^{\circ}\sim 90^{\circ}E$ の方向に卓越している。なお、本域には層面片理面に沿って小さなズレのみられる小断層以外に、顕著な断層はない。

本域では、微褶曲が発達し、剝離性に富む脆弱な泥質片岩と、比較的塊状の泥質片岩および砂質片岩とが互層をなしている。前者の厚く発達している部分が地すべりの頭部にあたり、崩積土層を構成する岩屑を多量に供給したものと考えられる。さらに、本地すべり地は南斜面にあるので、構造的には流れ盤地すべりであり、主滑動方向も層面片理面の傾斜方向にはほぼ一致している。このように、本域は岩相的にも、構造的にも地すべりをおこしやすい地域といえる。

3. 屈折法による弾性波探査

1) 測定の方法

測定機器 測定は火薬爆破によって発生した弾性波を換振器でとらえ、電子回路で増幅して電磁オシログラフに記録させる一般の屈折法によった。換振器は HS-J

型で、固有振動数 28Hz, 出力 0.1volt/kine である。増幅器としては、最大増幅度 60db のトランジスタ平衡型および集積回路による増幅器を、適当な増幅度にして用いた。電磁オシログラフは三栄 300A 型、ガルバノメータは三栄 G-30A で、固有振動数 30Hz, 感度は約 1.5mm/ μA である。

測線の位置 測線は地すべり地全域をできるだけカバーするように、すべり方向に X 測線 (450m), Y 測線 (450m), Z 測線 (410m) の 3 測線を、これらの測線とほぼ直交する横方向に上部より A 測線 (330m), B 測線 (440m), C 測線 (420m) の 3 測線を設定した。測線の

図-1 測線の位置

図-2 X測線の走時図

全長は 2.5km である。これらの測線の位置を図-1 に示す。図中、×印は発破点の位置を示す。

換振器は原則として 10m 間隔で設置し、全体として 52葉の記録をえた。

2) 走時解析

記録からえられた走時図の 1 例を図-2 に示す。これは X 測線について示したものであり、まずこれについて検討してみる。図で折線は実際の走時を結んだものであり、「はざとり計算」⁴⁾の結果を大スパンについては●印、小スパンについては○印で示し、これらから求めるいわゆる T' 直線を実線（みかけの速度をあたえる場合には点線）で示し、この傾きから求める速度値を直線に沿って記入してある。

まず、第 1 層の P 波伝播速度 V_1 は、発破点近傍の走時曲線の傾きから、0.5~0.7km/s とみなせる。次に、

小スパン (80m 前後)、中スパン (150m 前後)、半スパン (230m)、大スパン (450m) におけるはざとり計算から求めた T' 直線の示す速度値をまとめると、図-3 に示すようになる。複雑さをさけるために、走時図 (図-2) にはこのうちの小スパンと大スパンの結果のみが示してある。図-3 を検討すると、それぞれの速度値は数字の前に示した第 2 層の速度 V_2 、第 3 層の速度 V_3 、およびみかけの速度 $2V_{2,3}$ ⁵⁾ を与えるものとするむじゅんがない。したがって、X 測線については、 $V_2 =$

表-1 調査域の P 波伝播速度

第 1 層 (崩壊土層)	0.5~0.7km/s
第 2 層 (崩壊土層を主体として、一部基盤岩の風化部を含む層)	0.9~1.5km/s
第 3 層 (基盤岩)	3.7~4.5km/s
基盤岩中に 2.4~2.8km/s の低速度帯が存在	

杭番号	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45
小スパン	V_2 1.3	V_2 1.3	V_2 0.9	V_2 0.9	V_2 1.3	V_2 1.3				
中スパン	$2V_{2,3}$ 1.9				$2V_{2,3}$ 1.5	$2V_{2,3}$ 2.0				
中スパン		$2V_{2,3}$ 1.9	$2V_{2,3}$ 1.4		$2V_{2,3}$ 2.0					
半スパン	$2V_{2,3}$ 1.9	V_3 3.7	$2V_{2,3}$ 1.4	$2V_{2,3}$ 1.5	V_3 4.5	$2V_{2,3}$ 2.0				
大スパン	$2V_{2,3}$ 1.9	V_3 3.7	V_3 2.4	V_3 4.5		$2V_{2,3}$ 2.0				

図-3 X測線の T' 直線の示す速度値 (単位 km/s)

0.9~1.3km/s, $V_3=3.7\sim4.5$ km/s と考えられる。なお, V_3 層中には杭番号 X-17~X-24 の位置に, 2.4km/s の低速度帯が存在している。

同様に他の測線についても検討した結果, 調査域は表-1 に示す3つの層から成ると考えると各測線についての走時図を調和的に説明できる。

これらの速度値を用いて, はぎとり法により地下構造を求めると, 図-4 に示すようになる。

3) 地下構造

調査域の地下構造は, 表-1 に示す3層から成っており, 表層(崩積土層)の層厚は 5~20m で, 平均層厚は約10mで, かなり厚く地表面を覆っている。この層の下に崩積土層を主体として, 一部基盤岩の風化部を含む層とみられる 0.9~1.5km/s の速度層が, 平均層厚 20~30m, 厚いところでは 40m にもおよぶ厚さで存在している。この層のP波伝播速度の平面分布は, 図-5 に示すようになっている。すなわち, 滑動地域の大半の地区で 1.3km/s で, その中央部を斜断する地区において 0.9km/s となっている。また, 地すべり地西部地区で 1.5km/s, 東北部地区で 1.1km/s となっている。速度値からみて, この層は滑動している可能性が強いので, この層の速度分布はこの地域の地すべり機構を考える上で重要な手がかりとなるう。

基盤岩 (3.7~4.5km/s) は, 地表面から 30~40m の深さに存在しているところが多いが, 浅いところでは地表面下 10m 程度, 深いところでは 50m におよぶところもあり, かなりの起伏がある。P波伝播速度は上部地区および東部地区で 3.7km/s, 中央部から下部地区にかけて 4.5km/s となっている。そして中央部を東西に横断する方向に, 幅50~60m で 2.4~2.8km/s の低速度帯が存在している。この低速度帯の位置および基盤岩の等高線を図-6 に示す。これによると, 基岩面の傾斜

図-4 a 地下構造

図-4 b 地下構造

図-5 第2層のP波伝播速度の平面分布

図-6 岩盤等高線および低速度帯の位置

は上部地区で30度強、下部地区で30度弱の急傾斜をなし、その間のB測線付近において15度強の比較的緩傾斜をなす地区が存在している。この緩傾斜部の基盤岩中に低速度帯が存在している。

この低速度帯の延長方向が、本域結晶片岩の走向方向に一致していること、本域には断層による顕著な破碎部がみられないこと、低速度帯の幅が相当広いこと、低速度帯の延長部に泥質片岩の発達した露頭がみられることから、この低速度帯は泥質片岩が風化し、その岩質が軟質化し脆弱化した部分と考えられる。したがって、この低速度がこの地域の地すべり機構になす役割は大きいものと推定される。

4. 滑動力の分布

1) 滑動力の求め方

弾性波探査によって求めた地下構造から、地すべり面を推定してみる。P波伝播速度から判断して、第3層(3.7~4.5km/s)の基盤岩を不動層とし、第1層(0.5~0.7km/s)および第2層(0.9~1.5km/s)の崩積土層が滑動していると考えられる。そこで、まず基岩面をすべり面と仮定する。崩積土層の速度からみて、これらの層の含水量は少なく、地下水位はかなり深い(基岩面に近い)と推定される。したがって、間隙水圧を無視し、さらに土の粘着力 c 、内部摩擦係数 $\tan \phi$ 、比重 γ は一定と仮定すると、滑動しようとする力および抵抗する力とはともに基岩の傾斜および深さのみに関係する量となる。

いま、すべり面上の土塊を n 個のブロックに分割し、 i 番目の水平応力を T_i 、垂直応力を N_i 、すべり面長を l_i とすると、1番目のブロックについては滑動しようとする力が T_1 、それに抵抗する力が $N_1 \tan \phi + cl_1$ であるから、差し引き $S_1 = T_1 - (N_1 \tan \phi + cl_1)$ が滑動しようとする力として2番目のブロックに影響を与える。傾斜角の違いを無視すると、2番目のブロックについては、 $S_1 > 0$ の場合

$$S_2 = T_2 - (N_2 \tan \phi + cl_2) + S_1$$

$S_1 \leq 0$ の場合

$$S_2 = T_2 - (N_2 \tan \phi + cl_2)$$

となる。同様に順次 S を計算すれば、 i 番目のブロックについては

$$S_i = T_i - (N_i \tan \phi + cl_i) + S_{i-1}$$

(ただし、 $S_{i-1} < 0$ の場合は $S_{i-1} = 0$ とする)

となる。この S_i を滑動力と呼ぶことにする。

すべり面は、基岩面の深さ、傾斜に密接に関係していると考えられるので、この滑動力が斜面にそってどのように変動しているかを調べると、すべり面を推定するのに役立つと考えられる。

2) 粘着力と内部摩擦係数

滑動力を求めるに必要な粘着力 c と内部摩擦係数 $\tan \phi$ は、つぎのようにして定めた。基岩面をすべり面とし、間隙水圧は地下水位が非常に深いと推定されるので無視し、X、Y、Zの各測線の斜面について現状の安定係数を1とした場合について、分割法により $c - \tan \phi$ 線図を求めた。なお、土の比重は 1.8 ton/m^3 とし、ブロック分割は 10 m 幅とした。

求めた結果を図-7に示す。3つの測線は同一地すべり地内で、しかもさほど距離的にはなれていないので、 c 、 $\tan \phi$ は同じ値を用いることにする。さらに、求める滑動力は絶対値よりも値の変動を問題にするので、ここでは $c = 4.0 \text{ ton/m}^2$ とし、このときの $\tan \phi$ は3測線の平

均値 0.39 とすることにする*。これらの値を用い、各測線について滑動力を計算した結果を図-8に示す。

3) 滑動力の分布

図-8に示した滑動力の変動図において、滑動力が増加していく地区では滑動しようとする力が抵抗力よりも大きく、滑動力が減少していく地区では抵抗力の方が大きいことを示している。この滑動力の変動の様子から、3測線とも明らかに大きく2つのすべりブロックに分けられる。すなわち、各測線について上方から杭番号31付近までを1つのすべりとする円弧地すべりと、それより

図-7 c - $\tan \phi$ 線図

図-8 滑動力

図-9 滑動力の平面分布 (鎖線は地表面地形)

*同規模の他の地すべり地で c - $\tan \phi$ 直線上の種々の値で S を計算したが、非常に大きい c を用いないかぎり S はさほど変わなかった。

も下方のもう1つの円弧地すべりを想定するのが最も妥当と考えられる。もちろん、これらの2つのブロックはお互いに独立ではなく、一方の安定が乱されると、他方のブロックに影響を及ぼす可能性を多分にもっている。

つぎに、これらの滑動力を平面分布で示すと図-9のようになる。これによると、Y測線の中央部のA測線とB測線にはさまれた地区と、Z測線の下部地区に滑動力がきわめて大きくなるところがあり、この両地区を含むそれぞれの地すべりブロックが最も危険な地区と推定される。

また、B測線とC測線の間の地区では滑動力がきわめて小さくなっており、この付近を境にして上部・下部の2つの地すべりブロックに分けられる。図-5に示した第2層の速度分布と対比すると、0.9km/sの速度層の分布地区は、上部の地すべりブロックに対しては末端部、下部の地すべりブロックに対しては上端部に位置しているため、滑動により最ももまれた地区に相当していると考えると調和的である。

中央部の滑動力の大きい地区は、低速度帯の位置とほぼ一致している。しかも、第2層の含水量は弾性波速度から判断して少ない。この付近の基岩面の傾斜は比較的ゆるやかであるので、おそらく降雨時には低速度帯付近では地下水位は上昇し、地下水は低速度帯にそって流れ、地すべり地内のどこか数箇所集中的に下部へ流出しているものと推定される。このため、上部地すべりブロックに対しては引き、下部地すべりブロックに対しては押しによる滑動を生じさせているのではないかと考えられる。

したがって、今後本地すべり地域の地下水流脈を調査し明らかにするとともに、地下水位の変動と滑動との関係調べることが、防止対策上最も重要ではないかと考える。

5. むすび

結晶片岩地域に発生した徳島県一字地すべり地において、屈折法による弾性波探査を実施し、地下構造の概略を明らかにするとともに、この地下構造を基にしてすべり方向の斜面に沿って滑動力がどのように変化するかを調べた。

その結果、他に調査資料がなく弾性波探査の結果のみから移動機構を推定する上において、基岩上の崩積土層もしくは風化層の弾性波速度の地域分布、および滑動力の分布が有用であることが手がかりを得た。

今後、他の地すべり地において同様な調査を行なってみるとともに、当地すべり地において移動量や地下水に関する調査が実施されたときに、これらの調査資料を加え検討したい。

おわりに、ご指導いただいた大阪工業大学玉城逸夫教授に深く感謝します。また、地質については調査を担当された藤田崇教授のご指導をえ、現場調査は大場康行講師のご協力をえた。ここに深謝の意を表します。

さらに、この調査の機会を与えられ、現場においてご協力をえた、徳島県土木部砂防課および脇町土木事務所の方々に深謝します。

参 考 文 献

- 1) 徳島県 (1972) : 15万分の1 徳島県地質図及び同説明書
- 2) 剣山研究グループ (1963) : 四国東部結晶片岩地域の地質, 地球科学, No. 69, pp. 16~19.
- 3) 前掲 1)
- 4) 萩原尊礼 (1951) : 物理探鉱法, pp. 23~27, 朝倉書店
- 5) 田治米鏡二・武内俊昭 (1958) : 屈折法の解析に対する萩原の方法の拡張, 物理探鉱, Vol. 11, No. 1, pp. 44~46

(原稿受理日 昭和50年 6月 13日)