

山地地盤の研究(Ⅲ)

—表層地盤構造の調査法—

中 川 鮮

A STUDY ON THE GROUND OF MOUNTAINOUS REGION (III)

—Exploration Methods on the Subsurface Ground Structure—

By Akira NAKAGAWA

Synopsis

The present paper deals with the application of the geophysical exploration methods on the subsurface ground structure. It is necessary to simplify the survey for adapt to the condition on the slope ground of mountainous region. The geophysical exploration is the effectual measurement system owing to the survey is carry out together with the three methods be based on the seismic and electric ways and penetration test.

The writer carried out the survey about the respective characteristics of the three methods on the experimental fields in Kyoto and Gifu prefecture. In the present paper, the writer is shown in the cases of two popular examples of the survey.

1. はじめに

山地地盤の表層部の構造については、弾性波探査によって田上山地に分布する花崗岩風化帯を例として1報¹⁾で報告した。その中でもふれたが、地盤の表層にはいわゆる風化帯が存在しており、深層部に移るにしたがって、上下層の性質が相対的に変化する位置をある深さに認めることがある。この変化する地中の部分が面状で薄い場合や、層状に厚さを有し、変化が漸移的な構成状態を形成している場合がある。いずれにしても、自然地盤は長年月の間に風化現象により、地中において不連続的に性質が変化する構造になっているのが一般的である。

山地の傾斜地盤においても、上下層で風化度合が異なる地盤構造のため、山くずれや地すべりが発生していることがある。地盤構造は上下層の垂直方向にのみ相対的な変化をしているだけではなく、水平方向にも変化している場合がある。地盤の形成が古い地質時代の堆積層によるものは、地盤が傾動していたり、褶曲作用や変成作用により、地層に断層が走っていたり、地層が部分的に破砕現象により変質していることがある。こうしたことが原因で強度的に不均一な構成状態にあり、雨水浸透や震動によるなど外部からの作用で地盤崩壊の発生をみることもある。

表層地盤の不均一な構造が、山くずれや地すべりの発生に素因として関係していることは最近では明らかなこととされており、崩壊発生後の調査によって広く認められるようになってきた。突発的に起っているように見うける傾斜地盤中の崩壊が、事前の調査によって発生地点とその発生に対する危険度が何らかの方法によって発見できないものかどうか、また、発生地点がすでにわかっている危険な地点において、不安定地盤の規模が量的に見積ることができないものかどうかなど、崩壊を予知、予測することが望まれる。当面このような点について何らかの資料を提供する調査法を確立する必要がある。

2. 地盤崩壊と地盤調査法

地すべりの対策上の問題として表層部の地盤構造と性質を調べるのが通常実施されている。山くずれについては、現象が瞬時に発生して終了してしまうという状況のため、地盤に何らかの変状が認められてから調査するという時間的余裕がない。多くの場合山くずれの発生後において調査がおこなわれている。事後調査で発見される地盤に関する原因のいくつかは、山くずれ発生に関する結果論として取扱われており、山くずれ防止対策上に充分生かされないきらいがある。また、ある地点における調査結果はきわめて特殊なケースとして、その発生地点の地盤構造の説明にのみ解釈が可能であり、他の地点にあてはめるためには大胆な修正をおこなう必要があり、定量的な意味を有しないまでに一般化しなければ通用しないとさえ考えられている。それは調査法自体の問題というより、傾斜地盤の構成状態がきわめて複雑であって、相似なものが存在しないからである。しかし、山くずれ、地すべりなど崩壊現象が発生しているものを事後において調べてみると、誘因として作用した雨水浸透の問題、素因として関係した地盤構造の問題において、発生原因と判断でき得る点が認められるのである。

日本における山くずれ、地すべりの発生危険地点は無数に分布しているといわれているが、地形、地質的にその分布を分類してみるとかなりの地帯、地域に限定することができる。最近では、道路、鉄道、住宅地などの拡大によって、危険地域との接点も増大しているといわれている。これら全部の危険地点を調査するということはきわめて困難な問題であるが、重点的にいくつかの危険地点に焦点を合わせ調査することはできる。また調査法自体が簡便でかつ解析精度が満足できれば、調査実施可能な地点数を増加させることができる。

調査法の簡易化は山くずれ、地すべりの発生危険地域の分布からしてみても、できる限り多くを調査するという意味においてもきわめて重要な課題といえる。

本報文では、主として山地地域というきわめて調査活動に制約の多い場所で、表層地盤構造を探索するた

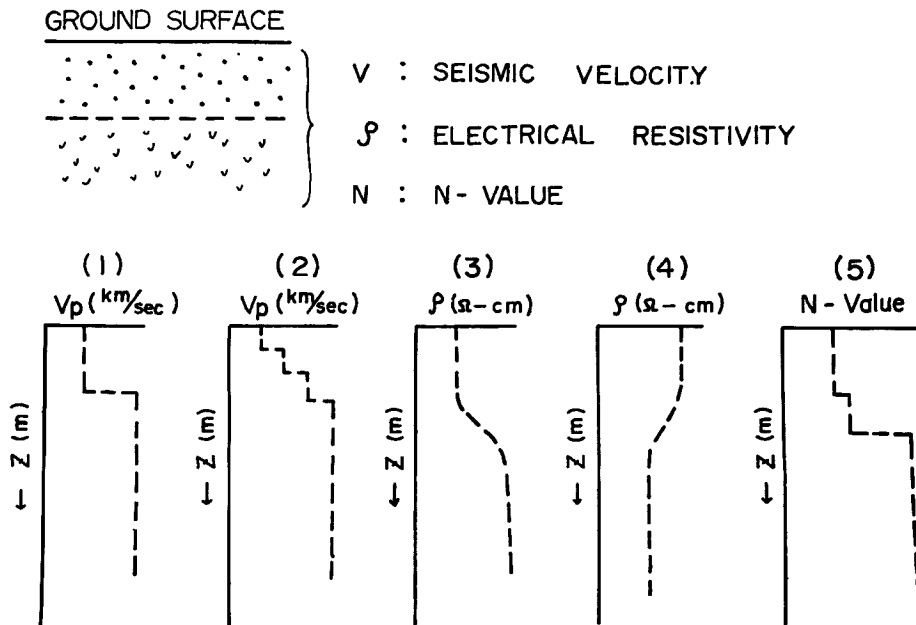


Fig. 1 Schematic illustration of two horizontal layers and typical response of its layers.

めに弾性波探査，電気比抵抗探査，貫入試験の3種類の調査法を組合わせ実施することを考察する。この3種類の調査方法にも，調査計画のため次第では精査する方法もあるが，これらの調査法の中でもきわめて簡易的な小規模なものを採用して検討してみた。

3. 表層地盤調査法

山地地盤の表層風化帯で弾性波探査法を用いる簡易的な調査については，1報¹⁾において検討した。本報文では弾性波探査，電気比抵抗探査および貫入試験を同一地点で実施し検討してみた。

電気比抵抗探査には，2報²⁾においても1部ふれたように種々な方法があるが，今回は Wenner の4極法を採用した。貫入試験にも種々な方法が原位置試験法としてあるが，きわめて簡易な手法である土研式貫入試験器を用いて行なった。

弾性波探査，電気比抵抗探査についてはそれぞれ，1報，2報において述べてきたので本報文では貫入試験に関することを記す。貫入試験は調査対象とする地盤で原位置試験をおこなうもので，その方法の概略は次のようなものである。地盤構造の相対的強度を測るために，ロッドの先端部に抵抗体となるコーンを装置

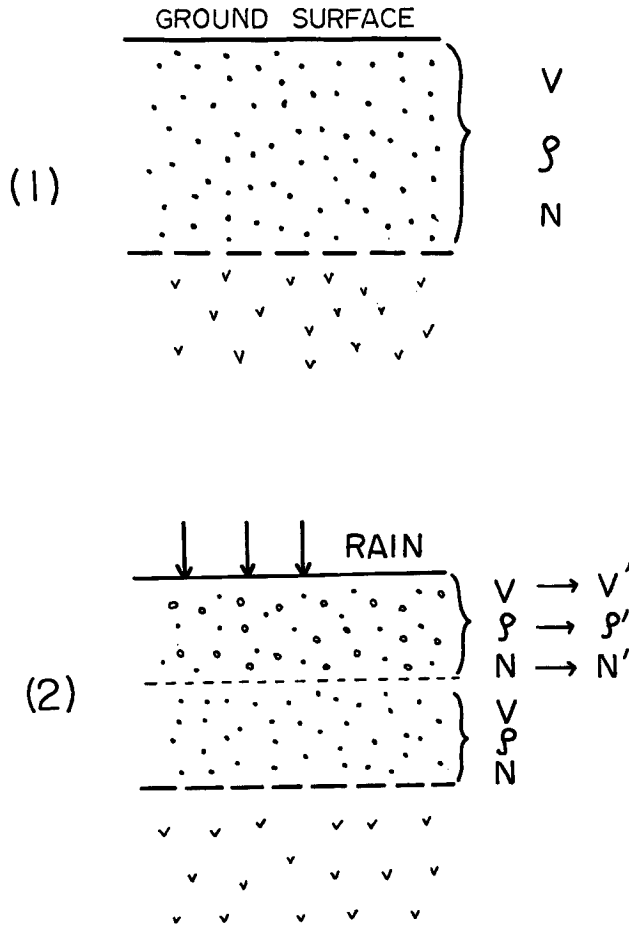


Fig. 2 Schematic illustration of the apparent layers in the subsurface by the infiltration of rain water.

して地中に貫入する。貫入は一定の高さ (50cm) から 5 kg の金属製のおもりを落下させロッドを打撃して行なう。この打撃回数と貫入深度との関係から各深度毎の地盤の相対的強度を知ろうとするものである。使用するロッドは長さ 1 m のものを、貫入に従って順時継ぎたしていくようになっており、山地地域の傾斜地内へも簡単に搬入が可能である。これらの条件は短時間で少数の人員によって原位置試験ができ、位置を移動して繰り返し行なえるなど山地地域の制約にかなった調査法として注目できる。

弾性波探査、電気比抵抗探査、貫入試験の 3 種によって山地地盤に施こされる調査について一般的な問題点を検討してみると次のようになる。

Fig. 1 に模式的に表示した 2 層地盤モデルについて考えてみると、今回用いた 3 種の調査法で測定する物理量の弾性波伝播速度 (V) 電気比抵抗 (ρ) 貫入値 (N) について、上下の地層において測定した場合、Fig. 1 の下部に表示したように、先ず弾性波伝播速度については (1) のように 2 層モデルの上部層が低速度層で、下部層が相対的に高速度層を示し、2 層モデルの境界面において変化していることを意味している。(2) においては、2 層モデルの上部層では深度が増加するに従って速度が漸移的に増加しており、下部層では (1) の場合の下部層と同様に一定の値の速度層を表わしている。この (2) の上部層の場合には 1 報において花崗岩風化帯の 2 層目に認められた層に当るもので一般にミラー層として理解されているものである。電気比抵抗では (3) に表示したように、上部層で比抵抗値が低く下部層で高く、(4) ではその逆の関係を表わしている。これらは上下 2 層において比抵抗値 (ρ) に対照関係があることを意味していて、電氣的に上下 2 層を分類し得る状態を意味している。貫入試験では (5) に表示したように、2 層モデルの上部層において貫入値 (N) が低く下部層で高い。このことは上部層より下部層の方が、貫入時に打撃回数が多いもので、相対的に地層

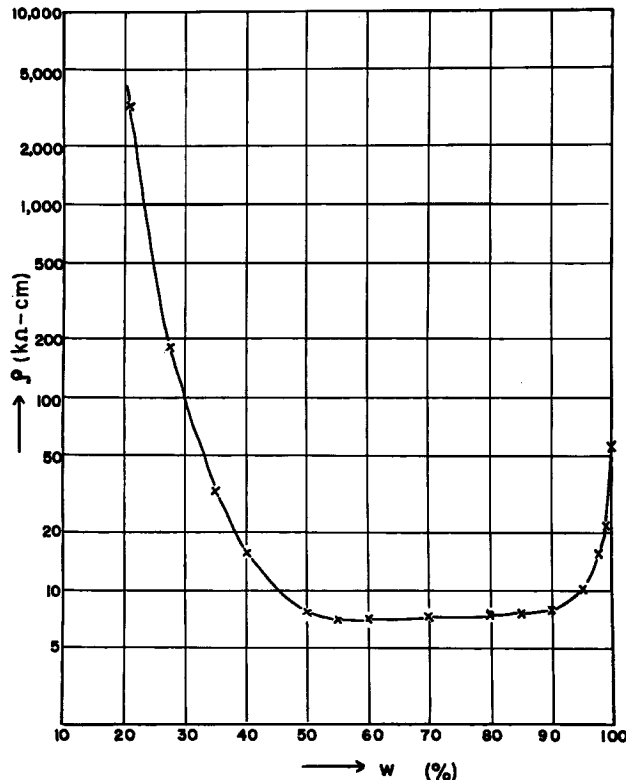


Fig. 3 Relation between resistivity and water content. (after Mogami)

が硬い構成状態にあることを示している。当然、実際の山地地盤には、部分的に上部より下部の方が軟弱な状態にあることもある。

自然地盤では、これら3種類の調査法において測定値が見掛け上変化する現象として、雨水浸透によって地盤の個有物理量が変わる場合がある。Fig. 2 (1) に表示したように2層モデル上部層にはそれぞれ個有の物理量 (V, ρ, N など) がある。この上部層に雨水浸透が生じ、(2) に表示したように、ある深さまで浸潤したとすると、2層モデルの上部層の中にも、含水状態の変化による見掛け上の境界が現出し、個有物理量の V, ρ, N などが V', ρ', N' と変化する。しかし、雨水によって浸潤しない部分では V, ρ, N の値を保持しているために、上部層中に二つの層が形成される。雨水浸透により電気比抵抗値 (ρ) の変化することに関しては2報³⁾ において詳しく述べた。

地盤中で雨水の浸透などによる含水状態が変わると弾性波速度、電気比抵抗および貫入値に変化が生じることは一般に認識されている。最上³⁾ は東大構内の土で実験を行なって Fig. 3 に示した関係を得ている。実験方法は供試土に蒸留水を増減して測定したものであり、含水率 (W) が50, 60%位までは含水率の増加につれて比抵抗 (ρ) は著しく低下することが解る。また、含水率と貫入量との関係については、関東ロームを均一な条件になるよう処理して締め固め、含水量を変化させて金属棒を鉛直に貫入するテストを行なって調べている。含水率が40%位まで増加させると貫入量は低下の傾向を静すが、それ以上に含水率が増加すると急激に貫入量が増加して、土が液体的性質を帯びてくることを示している⁴⁾。弾性波速度は地盤中の空隙率によって変化する性質があり、Fig. 4 にその関係を示した。地盤の空隙は雨水浸透にきわめて密接な関係にあり、含水量も当然関係してくる。

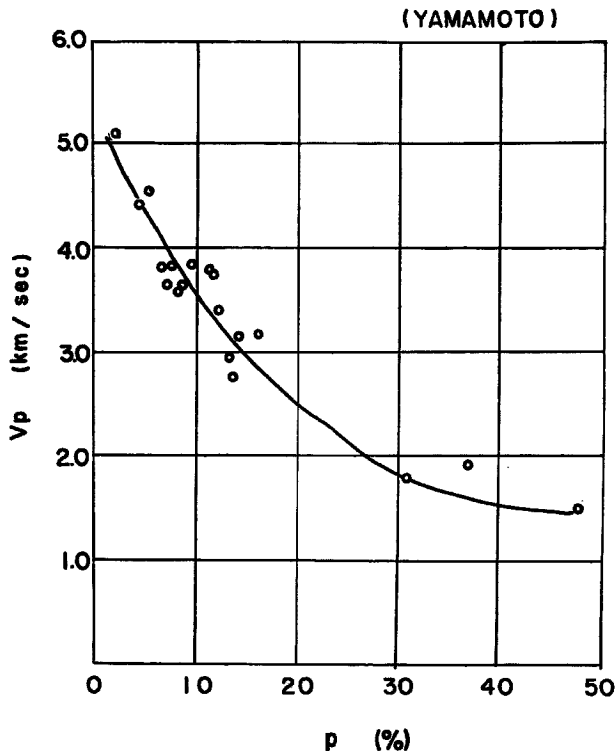


Fig. 4 Relation between seismic velocity (V_p) and porosity. (after Yamamoto)

4. 調査例

山地地盤の調査法として弾性波探査、電気比抵抗探査、貫入試験の3種の調査を実施することをあげてきたが、ここで、3種の調査法によって測定した例を2箇所について示す。

Fig. 5 は京大農学部附属演習林上賀茂試験地内に、昭和47年夏期に山くずれが発生し、崩落の生じた位置とその上部斜面を示したものである。斜面は谷頭部にあり、破線でかこんだ部分は不安定地盤で、クラックが走っている。a-b, c-d の位置で断面をみると Fig. 5 右側に示したようになる。このような場所で表層地盤を調べるために調査を行なった。

Fig. 6 に示したように、傾斜地盤上で弾性波探査、電気比抵抗探査、貫入試験を実施した。弾性波探査

KAMIGAMO (KYOTO)

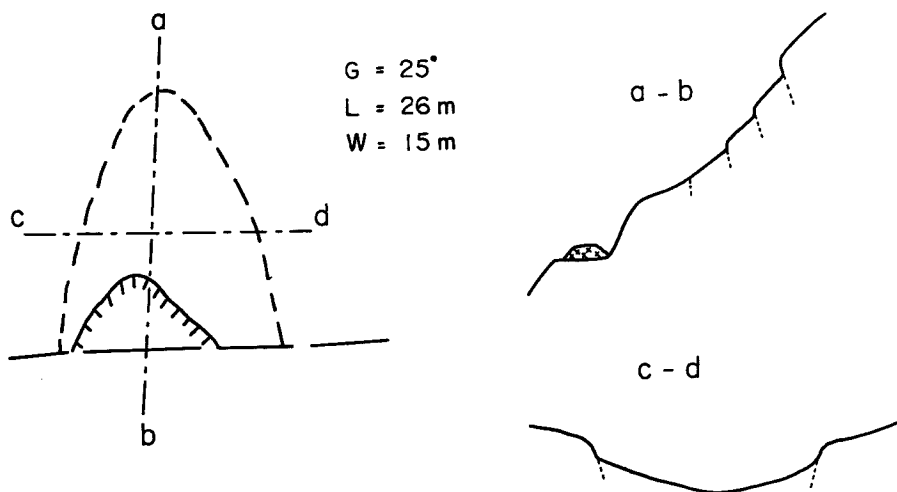


Fig.5 Profile of landslide area as a-b section and c-d section in Kamigamo examination site of Kyoto University.

KAMIGAMO (KYOTO)

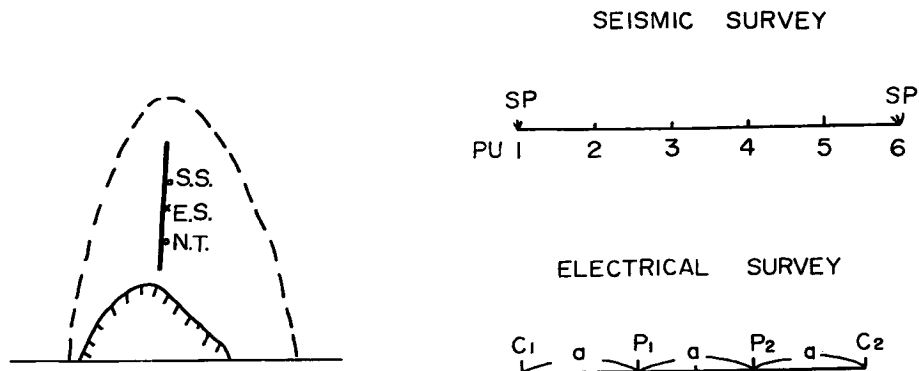


Fig. 6 Survey line and points on the landslide area in Kamigamo examination site of Kyoto University.

KAMIGAMO (KYOTO)

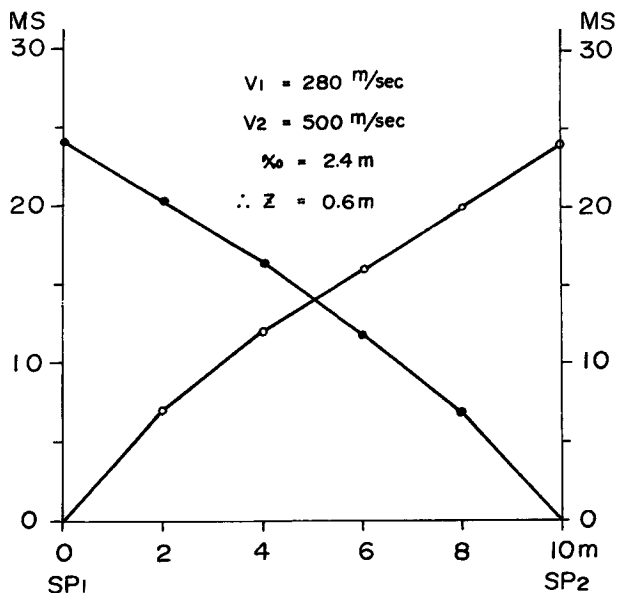


Fig. 7 Travel-time curves on the landslide area in Kamigamo examination site of Kyoto University.

KAMIGAMO (KYOTO)

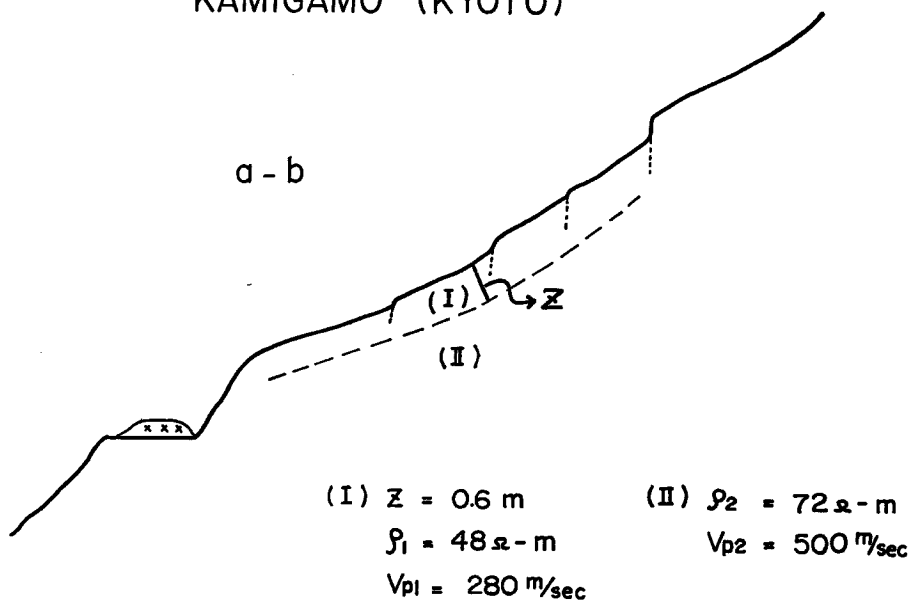


Fig. 8 Results of the seismic survey and the electric resistivity survey on the landslide area in Kamigamo examination site of Kyoto University.

は受振計を2 m間隔に設置し、測線を10mとした。弾性波の発生は木製のカケヤにより、測線の両端で受振計 (PU.1, PU.6) に近接して設置したハンマリング・ヘッドを打撃して行なった。

測定結果を Fig. 7 に走時曲線で示した。解析してみると1層目と2層目の境界面は0.6 m 深となり、1層 (V_1) は280 m/sec, 2層 (V_2) は500 m/secであった。

電気比抵抗探査は Fig. 6 に示したように Wenner の4極法を採り電極配列は $C_1-P_1-P_2-C_2$ とし、電極間距離 (a) を順次拡大して測定した。測定時の電極配列の方向は、斜面の上下方向と水平方向の二通りに配置して行なった。測定値を ρ_a-a 曲線として両対数グラフ上に描き、標準曲線を用いて解析した結果1・2層の境界は弾性波探査によって求められた0.6 m 深さと同一深さに存在した。1層の比抵抗 (ρ_1) は $48\Omega\text{-m}$ で2層 (ρ_2) では $72\Omega\text{-m}$ であった (Fig. 8 参照)。

貫入試験の結果は Fig. 9 に示したように、0.7~0.8 m 深に境界層が認められた。この貫入試験は2地点で実施したが、2層目ではおもりの落下回数を増加しても全く貫入量が認められないので、その位置で試験を終えたものである。Fig. 8, Fig. 9 に破線 (E.S., S.S.) で示した位置が、弾性波探査、電気比抵抗探査によって求められた境界層である。貫入試験の結果よりかなり上部にきていることが認められる。

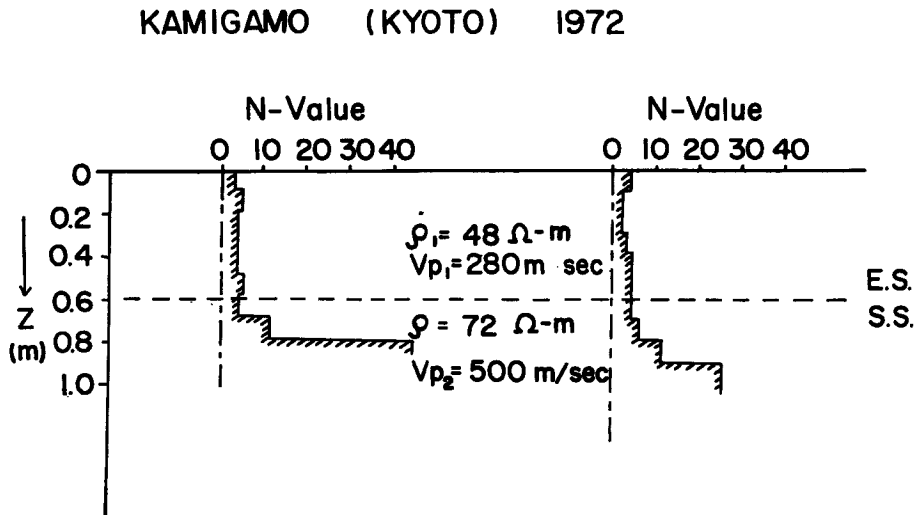
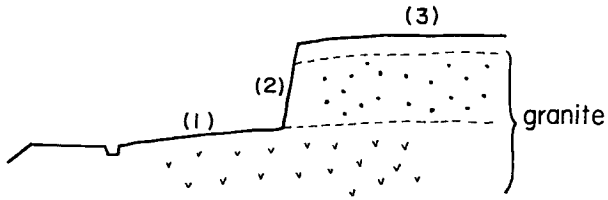


Fig. 9 Results of the survey by the three methods on the landslide area in Kamigamo examination site of Kyoto University.

Fig. 10 は岐阜県中津川市坂本地区に分布する、花崗岩層の1例である。表層部がかなり風化していることが認められる。Fig. 10 で示した上部2層を観察すると表層を茶黒色を呈する土壌が30 cmの厚さをもっている。その下部に風化したマサ土がある。また、その下部3層目は比較的固結度の高い花崗岩で、もともとはマサ土によっておわれていたが、人為的に採土して取り除いた部分を左側に示したものである。このように、地盤構造が明確に観察できる場所で実験を行なってみた。調査法はやはり弾性波探査、電気比抵抗探査、貫入試験の3種である。先ず弾性波探査において、受振計を2 m間隔毎に設置して測定してみると、Fig. 11 の走時曲線が得られた。走時曲線によると最上部をおおっている土壌を反映した傾向は認められない。このことは受振計の最少間隔が2 mであり、深さ30 cmを反映するには広すぎる間隔と考えられる。白丸、黒丸でプロットした2本の走時曲線からみて、地盤は1層、2層の境界面が左側で浅く右側で深い傾斜層であることが判る。同一地点で受振計を5 m間隔に拡大して測定してみると Fig. 12 に示した走時曲線が得られた。この走時曲線によると3層を反映していることが判る。また1、2層の境界が左側で浅く右側

SAKAMOTO (GIFU)



- (1) } SEISMIC SURVEY
- (2) } SEISMIC SURVEY
- (3) } SEISMIC SURVEY
ELECTRICAL SURVEY
N - VALUE TEST

Fig. 10 Mesurment points of the survey by the three methods on the granite rock area in Sakamoto section at Nakatsugawa city, Gifu prefecture.

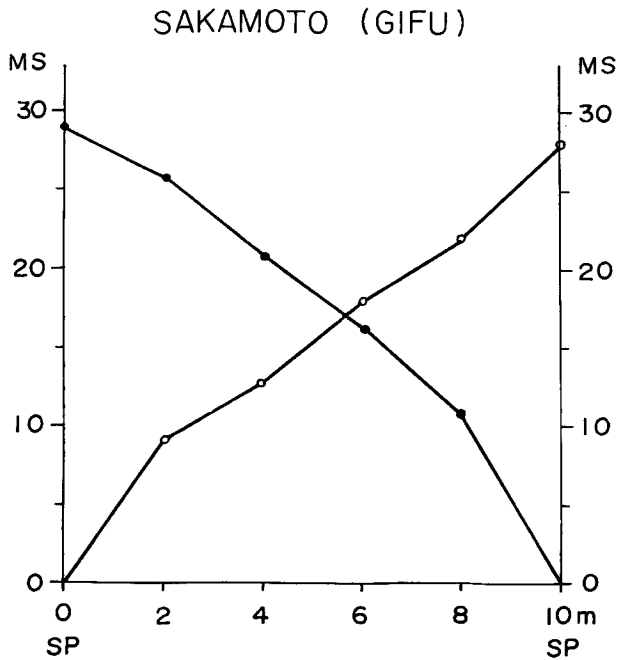


Fig. 11 Travel-time curves by the seismic survey on the granite rock area in Sakamoto section at Nakatsugawa city, Gifu prefecture.

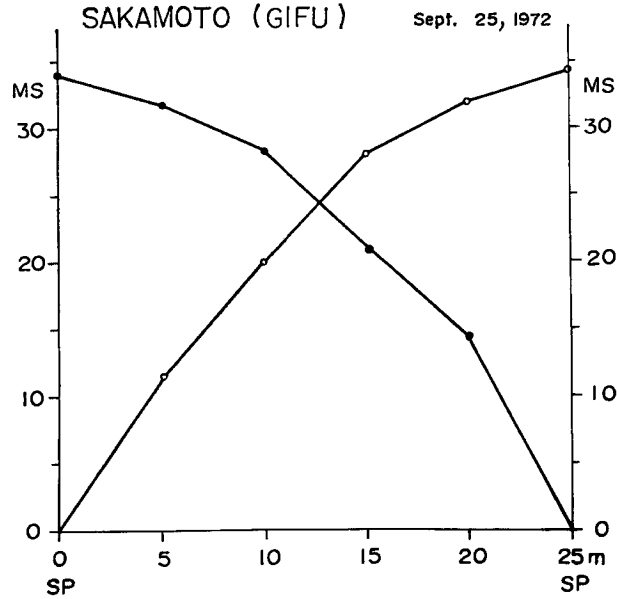


Fig. 12 Travel-time curves by the seismic survey on the granite rock area in Sakamoto section at Nakatsugawa city, Gifu prefecture.

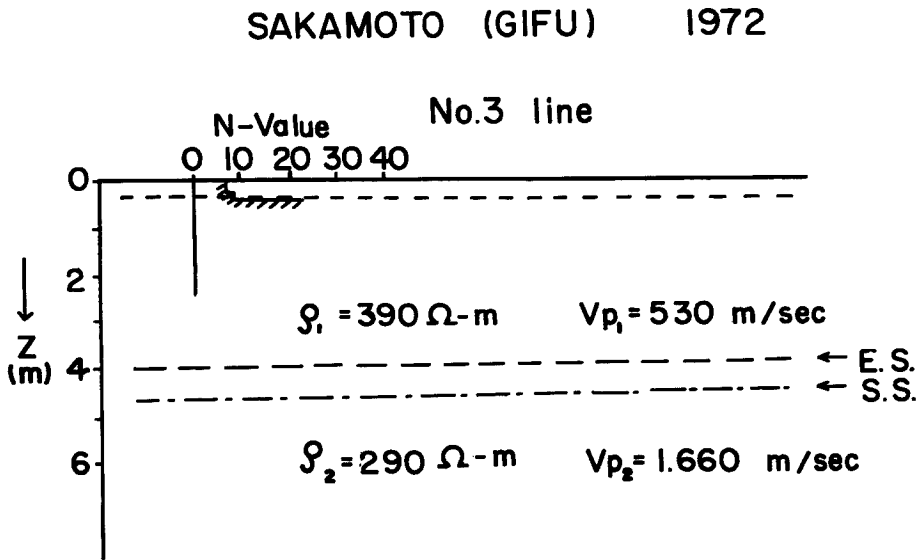


Fig. 13 Results of the survey by the three methods on the granite rock area in Sakamoto section at Nakatsugawa city, Gifu prefecture.

に深い傾斜をしていることが判る。白丸でプロットした走時曲線を解析してみると、1、2層の境界は4.6m深となり1層が530m/sec、2層が1.660m/secと求められた。

電気比抵抗探査は Wenner の4極法によって測定し、解析結果は4m深で境界が認められ、1層(ρ_1)が390 Ω -m、2層(ρ_2)が290 Ω -mとなった。両調査法による実験結果と貫入試験の結果とを Fig. 13 に示した。貫入試験では最上部に認められた茶黒色の土壌で測定可能であって、それ以下では貫入できなかった。

5. おわりに

表層地盤の調査法として比較的簡便な探査法を3種類組合わせて実験してみたが、まだ調査例が少なく詳細な点について解らない事が多い。特に、京大上賀茂試験地の場合に認められた、弾性探査と電気比抵抗探査の結果と貫入試験の結果とが一致しなかった点について興味深い関係があるようである。貫入試験のように直接的に強度測定する方法で得られた結果はきわめて信頼性があるが、弾性波探査、電気比抵抗探査では、地表に受振計、電極棒を水平方向に測線を設けて典開するために、水平方向に半無限的に均一媒質を仮定した解析法と実際の地盤とで相入れない条件が存在することも考えられる。従って弾性波速度および電気比抵抗の分布を水平方向にも表層で測定してみる必要がある。また、測定対象となる物理量が、3種類の調査法において異なっているので、地層中の各物理量の分布に相異があることも留意しなければならない。

今までに岐阜県および滋賀県の花崗岩地帯で実施した弾性波探査で、表層風化帯の弾性波伝播速度を反映したと解釈できるものを60個所の例によって Fig. 14 にヒストグラフで示した。花崗岩風化帯の表層では0.3~0.5km/secに頻度分布が認められる。

Table 1 に山本⁵⁾によって整理された、各岩種別の弾性波伝播速度 (V_p) を示した。同一岩石においても個有弾性波速度はかなり巾を持った値として表示され、岩石の状態によって変化する

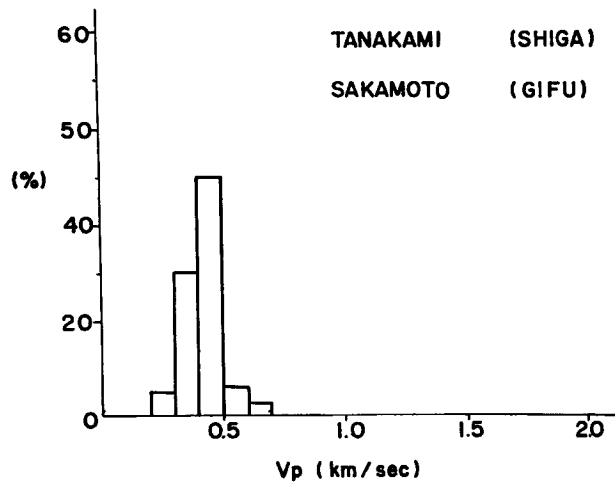


Fig. 14 Histogram of the seismic velocity (P-wave) measured on the surface layer at granite rock area in Tanakami section in Shiga pref. and Sakamoto section in Gifu pref.

Table 1 Seismic velocity of the formation and the rock. (after Yamamoto).

formation, rock	V_p (km/sec)
surface soil	0.1~0.6
gravel, sand (dry)	0.5~1.0
sand (wet)	0.6~1.8
sandy clay	1.8~2.4
gravel layer	1.2~1.5
shale	1.0~3.0
sandstone, tuff	1.5~3.5
limestone	2.0~4.0
granite	4.0~6.0
metamorphic rock	3.0~7.0
water	1468 at 15°C

ることを意味している。Table 2 に志村⁶⁾によって整理された、各岩種別地層別の電気比抵抗を乾湿の状態を示した。これによっても各岩石の個有比抵抗にかなりの巾を有することがわかる。特に比抵抗の場合には乾湿によるちがいが大きいので、地質状態の判明している地域では、地下水の産状を調べるのに有効な手段となる。

Table 2 Electric resistivity of the formation and the rock. (after Shimura).

formation, rock	dry $\rho(\Omega-m)$	wet $\rho(\Omega-m)$
gravel layer	1000~15000	200~10000
sand and gravel layer	1000~7000	200~5000
sand layer	300 ~7000	100~700
sandstone	200 ~2500	100~500
loam	500 ~5000	100~1000
tuff	100 ~1000	
granite	1000~10000	
crystalline schist	200 ~20000	

物理的手法を用いる地下探査法として伊崎⁷⁾⁸⁾によって示されたことがあるが、弾性波探査器は最近になって、小型で軽量なものが製作されており、山地地域にも搬入が便利になっているものもある⁹⁾。貫入試験器も簡易なものが種々あるが、地盤が粘土層のような礫石を混入していない場合のみ測定が可能のため、使用範囲に限界がある。大久保¹⁰⁾によって、千葉県の崩壊発生地で実験を行ない良好な結果が報告されている。今回の実験では貫入能力に限界があり、弾性波速度 (V_p) で 500 m/sec 以上の地層へは、5 kg のおもりでは貫入が不可能であった。この点について今後検討すべき課題を残している。

謝 辞

本報文を作成するにあたり、指導していただいた島通保教授に深謝いたします。実験を手伝って下さいました奥西一夫氏、江角周一氏に感謝いたします。また図表作成について助力して下さいました倉内洋子氏、奥野早苗氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 中川 鮮：山地地盤の研究(I)——弾性波探査を用いた田上山地の花崗岩風化帯について——，京大防災研究所年報，第14号A，昭46. 4，pp. 589-597.
- 2) 中川 鮮：山地地盤の研究(II)——多電極を用いた比抵抗測定による降雨浸透の考察——，京大防災研究所年報，第15号B，昭47. 4，pp. 183-196.
- 3) 最上武雄：土質力学，岩波書店，昭40. 3，pp. 87.
- 4) 最上武雄：土質力学，岩波書店，昭40. 3，pp. 29-30.
- 5) 山本荘毅：地下水探査法，地球出版，昭37. 5，pp. 49.
- 6) 志村 馨：電気探査法，昭見堂，昭40. 2，pp. 64-65.
- 7) 伊崎 晃：物理的地下探査法(I)，土と基礎，Vol. 4, No. 5, 昭31. 10, pp. 39-45.
- 8) 伊崎 晃：物理的地下探査法(II)，土と基礎，Vol. 4, No. 6, 昭31. 12, pp. 48-53.
- 9) 大久保彰・佐竹昭弘・石黒正樹・中沢 稔・伊藤 健：簡易型地震探査装置(ハンディー・サイスモグラフ)による土木の地質調査，応用地質，Vol. 12, No. 2, 昭46. 6, pp. 83-103.
- 10) 大久保彰・上坂利幸・船崎昌経：簡易貫入試験の斜面地盤調査への適用，地すべり，Vol. 8, No. 4, 昭47. 4, pp. 21-29.