

山地地盤の研究 (I)

—多電極を用いた比抵抗測定による降雨浸透の考察—

中 川 鮮

A STUDY ON THE GROUND OF MOUNTAINOUS REGION (II)

—Investigation on the Infiltration of Rain Water through
the Measurement of Resistivity with Multi-Electrodes—

By Akira NAKAGAWA

Synopsis

Generally speaking, it is one reason when the ground failure of mountainous region be caused by the infiltration of rain water. It does not take part in correlative relation that the phenomena occurred as failure and slip on the slope ground and the variation of ground water level, but it can discuss as to occur ground failure and slip due to the increase of hydrous water by the infiltration. The author has carried out investigation through the electrical survey about the movement of hydrous, specially, the drop wetting front dew to the infiltration of rain water in the ground of mountainous region. The method of investigation was to consider about the correlation of the distribution of electrical apparent resistivity values with multi-electrodes and variation in the distribution of hydrous with precipitation and was applied some knowledge of the underground geological structure. Mainly, this paper is the report as variation of the ρ_a - a characteristic curves was influenced rain water and confirmed that apparent resistivity (ρ) was dropped about 20-30% from background values responded with the condition of ground structure.

1. はじめに

地すべり、山くずれ等の地盤崩壊が発生するきっかけとして、降雨による地盤中への浸透水が密接に関与していることは一般に認められている^{1), 2), 3)}。しかし、地盤中に貯留される含水の増加と崩壊発生とが見掛け上の現象でかならずしも相関関係にあるとはいえないが、山地地盤の含水増加が崩壊発生の重大因子であることには変わらない。地盤崩壊が一義的に浸透水の増加にともない多発するものであるならば、含水状態の変化を時間的的成分を考慮して計測し、崩壊発生時でもその挙動を捕捉し得る調査法を確立することが要望される。

これまでに地すべり現象を解明するために地下水位変動を記録し、地盤の移動状況と対比し検討するという方法があるが、地下水位面を形成する飽和水層での地盤の挙動を考察する点で有効な一手法である。が、地盤崩壊が急速に発生し進行する場合や不飽和水層に崩壊が生じる場合には、水位面の変動さえ計測不能な条件にある。また、山地地盤の特性として、地下水位面形成の不確かさおよび水位面が不連続的に存在するために、仮に水位変動を計測記録しても、それが地盤中の地下水のどのような挙動を意味し、崩壊現象とどのように結びつかを解明できない場合が多い。以上のように直接地下水位変動を測ることに問題性がある。

本報文では主として山地地盤の崩壊発生の前駆的現象を、地盤中の水分増加状態で知り、崩壊を予知的に

取り扱う基礎的研究を目的としている。

今回の実験は多電極を地表に定置して地盤比抵抗を測定する方法をとっているが、従来の電気探査法と本質的にことなつたものではなく、その理論と技術を応用している。雨水の浸潤下降による含水分布の変化を時間的要素を考慮して究明するのであるが、従来の電気探査法では電極間距離 a を変化させるたびに、人為的に電極棒を移動させて行なうため流電条件の定常化および労力と時間が今回の実験には条件的に実施不可能である。

電極棒の設置において測定毎に移動させると、同一地点に同一電極棒を設置しても、測定回数が極めて多くなると電極系の位置の条件及び電極棒と地盤の接触条件など流電条件に均一性を欠く恐れがあり、くりかえし測定した資料を比較検討する上で問題性を含むと判断された。そこでこれらの制約を多電極とターミナル・ボックスの使用によって解決できることが実験の結果判明した。また観測小屋からの遠隔操作により、降雨中でも実験を続けることができわめて有効な条件を有することがわかった。

2. 多電極法の適用

地盤比抵抗測定において電極を多電極法により配置すれば、電極棒を測定毎に移動させる必要がないので、同一地盤上で測定を繰り返えし行なう際の流電条件を一定に保つことができる。降雨に基づく浸潤面 wetting front の下降を捕捉するためには、流電条件が一連の測定において不変であることが必要である。一般に電気比抵抗法を用いて地盤探査を行ない、同一地盤を繰り返えし測定しその間に生ずる地盤中の比抵抗分布にかかわる変動現象を考察しようとするれば、繰り返えし測定を行なうときの流電条件を正確に同一条件下におかなければ、測定解析の結果に意味をもたないものである。

地盤比抵抗は地形、地質及び地盤構造とそれらに包括される構成鉱物、含水、孔隙率、孔隙の形状、温度等に影響を受けるが⁵⁾、多電極法によって流電条件を一定にしておけば、浸潤下降現象を考察するに必要な繰り返えし測定の期間内では含水、温度の条件変化が地盤比抵抗を変化させ得る因子と限定でき、他の因子は constant な条件で関与すると考えられる。

浸潤下降現象を考察することは、地盤中の比抵抗変化を媒介として含水挙動を知ることに基づいているので、同時に発生する温度変化に左右される地盤比抵抗変化を一種の noise とみなし考慮しなければならない。しかし、今回の実験は 8～9 月の比較的高温時期に行なつたので、降雨作用による地盤温度は 10～15°C 前後の変域にあると推定され、温度変化による影響は含水による比抵抗変化の変位量の中に吸収されそのしめる割合は低いものと考え、補正を行なわなかった。

降雨による地盤中に起こる浸潤下降現象を比抵抗測定による $\rho_a - a$ 曲線で仮定して模式的に Fig. 1 に示した。この模式的に示した地盤は比抵抗分布において二層構造を意味しているが、今回の実験地が前報⁶⁾で取り扱った弾性波探査の結果速度層による一層、二層までが関連しているとし、二層構造を模擬したことによる。

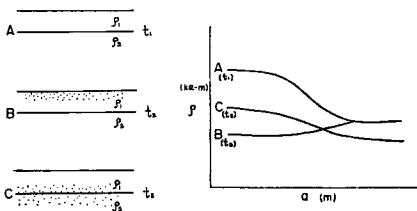


Fig. 1 Schematic illustration of the ground structure and example of electrical resistivity measurement showing the $\rho_a - a$ characteristic curves.

Fig. 1 の A, B, C によって同一地盤中の含水分布変化 (量的変化もともなつて) が生じたものを仮定し、 t_1, t_2, t_3 と時間割に順時比抵抗を測定してみると、Fig. 1 の右側に画いたような $\rho_a - a$ 曲線が得られる。 ρ は見掛け比抵抗値を、 a は地盤上に設置した電極間の距離を意味し、電気探査法の理論考察によって a を深度 (m) とみなしている。模式的な Fig. 1 の $\rho_a - a$ 曲線 $A(t_1)$ は時間 t_1 に測定したとき、地盤中が乾燥して上部層より下部層に比抵抗の低い地層を持った二層構造の地盤を表現した曲線姿態である。時間 t_2 に測定したときは地盤上部に比抵抗値を低下させる降

雨浸透があり、 ρ_a-a 曲線もその影響を受けて、電極間距離 a のせまい位置で ρ が低くなったことを ρ_a-a 曲線 $B(t_2)$ で表現している。時間 t_3 においては降雨が止んで上部層に浸透したものが浸潤下降してゆく状態を ρ_a-a 曲線 $C(t_3)$ によって表現したものである。Fig. 1 の模式図に示した ρ_a-a 曲線 $A(t_1), B(t_2), C(t_3)$ は比較的乾燥している地盤中に降雨による浸潤下降が生じ、その状態について比抵抗を測定し、地盤の見掛け比抵抗値が降雨浸透によって上部層では約 50%，下部層では 30% の低下があり降雨浸透が中断されると、浸潤下降現象だけになり、含水（主として重力水）が地盤中を下降していくとともに上部層より次第に見掛け比抵抗が上昇して、 $A(t_1)$ の状態に移項回復してくる一連の現象を模擬している。以上のような仮定に基づいて、多電極法によるシステムを考案し実験を行なった。

3. 測 定

(1) 実験地

今回の実験は前報⁶⁾で主として花崗岩風化帯の構造について探査を行なった場所である（滋賀県大津市田上山地滝ヶ谷地区）。測定場所は花崗岩風化物で覆われて尾根状の地形を形成している。地盤構造は弾性波探査によって Fig. 2 に示すように三層の速度層（P波による）からなっている。

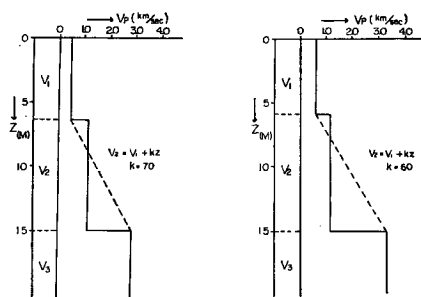


Fig. 2 Resulting logs of seismic prospecting using P-waves.
Vp; velocity of seismic wave

(2) 測定機器類

今回使用した測定機器で電極棒、ターミナル・ボックス、測定機について記載する。

多電極用の電極棒は径 0.8cm、長さ 25cm の銅製で、一端を旋盤で鉛筆の先端状に削ったものを使用した (Photo. 1)。電極棒の上端より 2.5cm の位置に径 3mm の穴を長軸に対し直角に明け、電線を通しハンダ付けで固定した。電線は測定機へ結ぶ延長線となるもので、ビニール被覆したものをを使用した。

ターミナル・ボックスは大きさ 37cm×27cm×7cm のアルミ製シャーシーに、端子を164個取り付け、多電極棒より延長した測定用電線をコネクターによって接続し配線した。コネクター、端子を使用して接触不良をふせいだ (Photo. 2)。

比抵抗測定機は横河電気製作所製大地比抵抗測定機 3244 型⁷⁾で、L-10 型と同様のメガー型で手まわし式発電機の部分はトランジスタ・インバータを使用している。電源は1.5V 乾電池を 8 枚 (12V) 用いた。電池の消耗がかなり激しいので測定途中でテスターで検圧し電圧が低くなる前に電池を交換して用いるようにした。

(3) 測定方法

実験地に多電極用電極棒を 0.5m 間隔で 25m にわたり線状に配列し (Photo. 3)、延長電線で観測小屋 (Photo. 4) まで約 80m 引いてきてコネクターでターミナル・ボックスに接続した。使用電極棒は 51 本である。測定機につないだ約 1m の電線にバナナチップをつけターミナル・ボックス上に格子状に取りつけた端子に電極系を模擬した配列で、電極間距離 a を変化させて結合した。

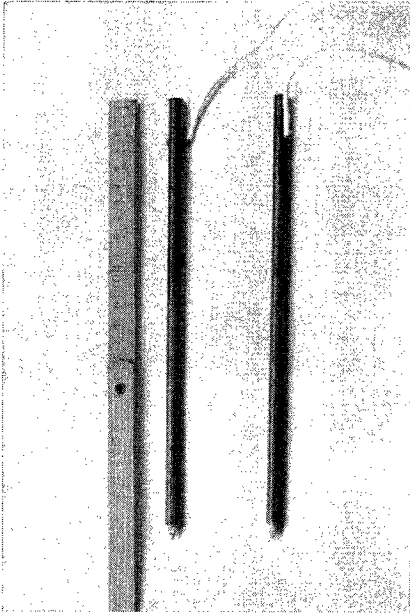


Photo. 1 Multi-electrodes for resistivity determination.

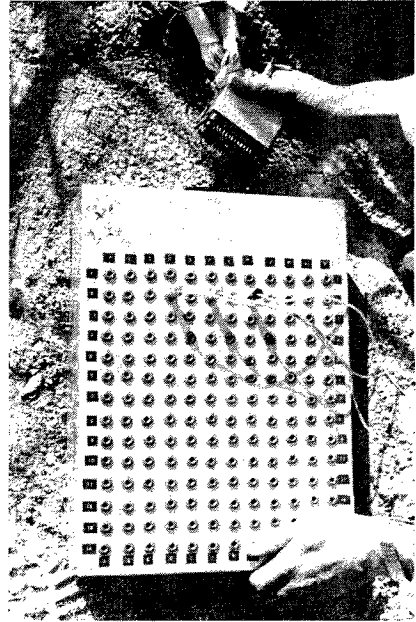


Photo. 2 Terminal-box for multi-electrodes method.

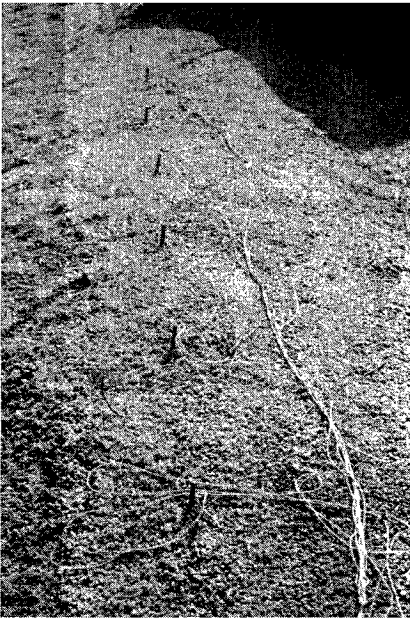


Photo. 3 Electrode arrangements for multi-electrodes method.

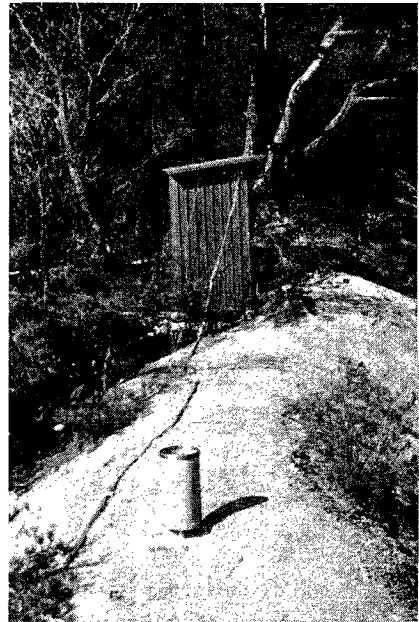


Photo. 4 Observation booth and pluviometer.

探査法は Wenner の三極法⁸⁾ を採ったので、遠方に一本の固定電極を設けた。距離は多電極設置点より 200 m 離れた。

電極系は Wenner の三極法により、電極間距離 a のせまい方から順時測定するようにした。測定点は 18 点で、各々の点において電極間距離を $a=0.5$ m から 0.5 m ずつ増加して $a=8.0$ m まで 16 通りの電極間距離を組んで測定した。

4. 測定値の解析

今回の実験は多電極法によって地盤比抵抗を測定し、雨水の浸潤下降に基因して地盤比抵抗分布に変化が生じ、比抵抗値の変位量が地盤中の含水分布変化を検討するにあたいするかどうか、および多電極法で組む電極系においてその変化を補足し得るか否かなどの基礎的な問題点を持っていたのでまず測定値について検討してみる必要がある。

実験は昭和46年8月から9月にかけて実施した。比抵抗測定を行なったのは8月14, 20日に(1)注¹⁾, (2)回を、(3)~(6)回は Fig. 3 に測定時期の降雨量と共に記入したように8月30, 31日, 9月4, 7日である。Fig. 3 には(1), (2)の測定について記入しなかった。今回は8月30~31日にかけて、台風23号にともなった降雨前後における浸潤下降現象を検討することにしよう。

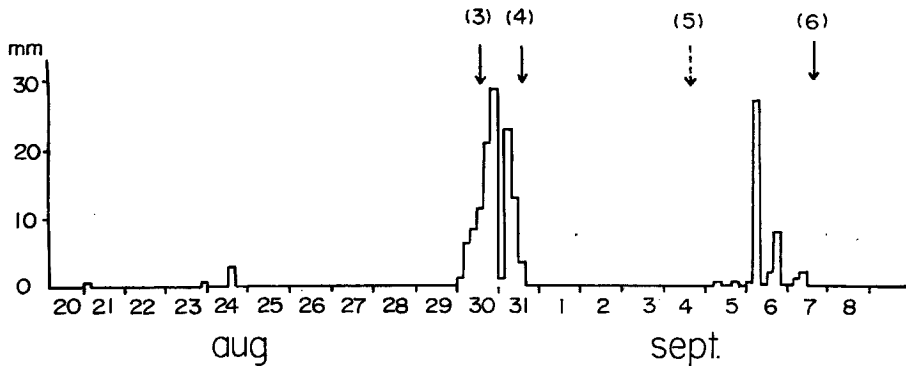


Fig. 3 Precipitation at Takigadani section in Tanagami mountain range, (3)-(6) mean ordinal numbers by electrical resistivity survey.

降雨量は実験地で隔測自記雨量計 (Photo. 4) によって観測したもので、Fig. 3 には4時間雨量として記入した。8月30, 31日の両日間に合計約 110 mm の降雨を記録した。

比抵抗測定の実験(3), (4)を8月30, 31日に実施しているが、測定は当時の降雨前後をとらえて行なったが、(3)の時点は、測定前より少し降雨があり、地表面は幾分湿った状態にあった。

実験による測定値として見掛け比抵抗値 ρ について電極間距離 a を変化させて測定したものを ρ_a - a 曲線として Fig. 4 の(a)~(c)に示す。この(a)~(c)の3図は測定地点18点の中から3点のデータを取り出したものだが、全体的に各測点の ρ_a - a 曲線が示す状態に大きな変化は認められず、全曲線についての記載は今回の考察には不要なので別の機会に取り扱うことにした。

Fig. 4 (a)~(c)に各々(3), (4), (6)について同軸グラフ内に測定日別に画いた。図中(3)は実験間ぎわに小雨が降り始めたが8月30日以前のかなり長期間にわたる降雨の少ない時期を経た地盤比抵抗で、先

注) (1)回, (2)回等の()は比抵抗測定を実施した順番を示した番号に符し, (1)~(6)までありそれぞれ1回目, 2回目を意味する。

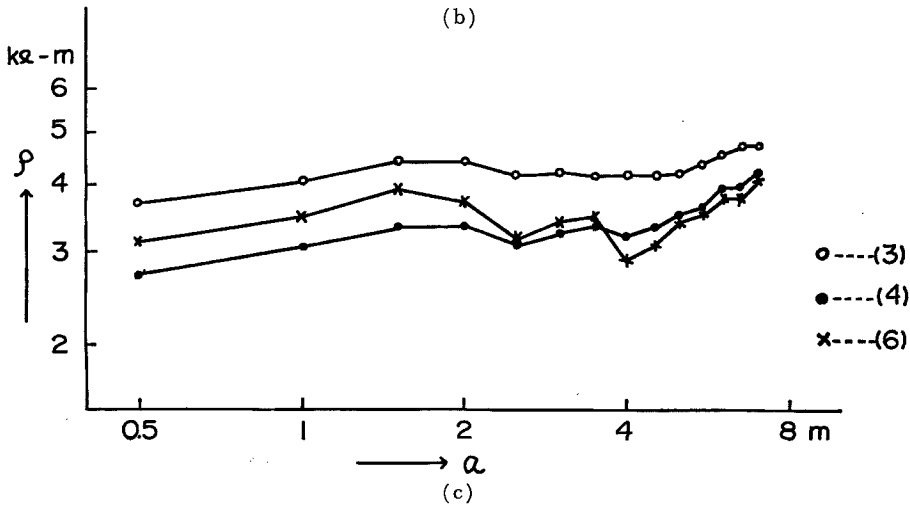
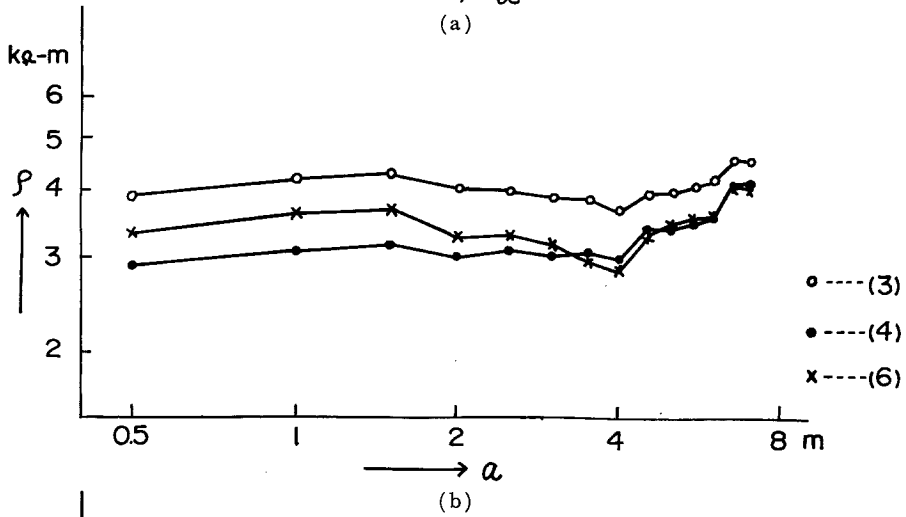
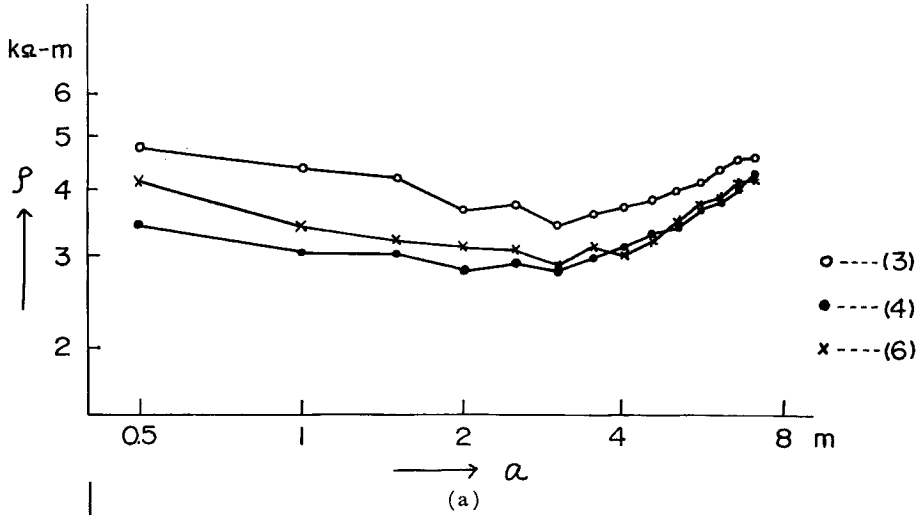


Fig. 4 ρ_a - a curves in electrical resistivity measurement with multi-electrodes showing (a), (b) and (c).

行含水は少ない時のものである。従って見掛け比抵抗値もおおむね $4K\Omega\text{-m}$ をとり、乾燥した花崗岩風化物から形成する地層としては妥当な値とみなせる。Fig. 4 (a)~(c) では $\rho_a\text{-}a$ 曲線に対して(4)のそれは電極間距離 a のせまいところでは ρ 値が20~30%も低くなっている。また(6)になると電極間距離 a が3~4 m まではせまい方から広い方へ次第に ρ 値が回復の傾向を示しているが、注意を要することは電極間距離 a が3~4 m で(4)と(6)の曲線が接近及び交叉していることである。これを当時の降雨を考慮して考えてみると次のようなことが推定できる。

(3)で測定した ρ 値は、当時の降雨に関する資料からみて、地盤中は日々乾燥する方向にあったものが、測定日の8月30日になって台風23号による降雨で地表面はかなり湿潤状態となってきた。しかし地表面の浸透能測定の結果(Fig. 7)を考慮してみると地盤中での先行含水はまだ増加するにはいたっていない。このことは(3)による $\rho_a\text{-}a$ 曲線の結果と矛盾しないものである。8月30日からの台風23号による降雨はその後増加し翌日の31日の測定(4)では $\rho_a\text{-}a$ 曲線で明かなように地盤中上部より ρ 値の下降が顕著に認められ、(3)、(4)の測定実施時間の間隔が26時間あり、この間に不飽和な地盤中を浸潤して含水状態に変化を与えた結果とみなし得る。

その後9月4日に(5)を測定したが、電源の不良によって測定値に信頼度が薄いと判断されたので、一応今回の検討資料には加えてない。次に9月7日に(6)を測ってみると、5日前後に約40 mmの雨が降った後にもかかわらず、 ρ 値は上部層から回復傾向を示すように高くなっている。ところが電極間距離が $a=3\sim 4\text{ m}$ 付近で(6)による $\rho_a\text{-}a$ 曲線がむしろ(4)の ρ 値より低い部分がめだつたが、この両曲線の姿態が意味するものは、地盤中の含水状態が一義的に上部から下部にかけて乾燥してゆく、つまり、降雨が中止された条件のもとでの浸潤下降現象の通過を反映したものと解釈するのが妥当であろう。

Fig. 4 に示した $\rho_a\text{-}a$ 曲線は、各々測定を行なったときの ρ 値を電極間距離 a を考慮してプロットしたものである。ここで、 ρ 値の変位量について、比較的乾燥期に測定した8月14、20日の(1)、(2)の測定値を平均して background とし、(3)、(4)、(6)の ρ 値を対比してみると Fig. 5 の(a)~(c)に示したようになる。 $\Delta\rho/\bar{\rho}$ は、(1)、(2)の平均値 $\bar{\rho}$ と各(3)、(4)、(6)の ρ 値の差をとって $\Delta\rho$ として、 $\bar{\rho}$ の比によって示したものである。Fig. 5 で一般的に曲線(3)の a が上部及び下部の位置で $\Delta\rho/\bar{\rho}$ が0より低いか0に近いが、大部分で数パーセント高くなっている。この関係は a が上部においては、8月30日の降雨の開始によって湿ったために ρ 値が低下を始めたことを意味しており、 a が下部においては、先行含水が浸潤下降の停滞状態として残っていたものと解釈できる。こうした現象は難透水層(もしくは面)に達したとき形成されると考えられる。曲線(4)では a の上部で $\Delta\rho/\bar{\rho}$ が極端に低くなっており、降雨のために10~30%ほど低下している。その低下状況も a の上部ほど顕著であり、この時点で a の上部ほど ρ 値低下条件としての含水増加があったものと解釈される。このことは乾燥地盤に雨が降った直後に発生する浸透水の挙動と一致した現象と考えられ、物理的意味も満足しているものと思われる。曲線(6)では a の上部で乾燥が開始され始めて、下部では浸潤下降を続けている状態が推定され、Fig. 3 の $\rho_a\text{-}a$ 曲線と同様の傾向が認められる。

Fig. 4 は見掛け比抵抗 ρ を電極間距離 a との関係でみる方法で電気比抵抗法では垂直探査と呼んでいる。主として調査地点の垂直成分について調べる手法である。この他水平成分について地盤の連続的性質を調べる目的で水平探査と呼んでいる方法がある。これは一定の電極間距離の電極系を保って測定点を測線上にそって移動し測定するもので、これによると同一深度の地盤中の状態について、水平方向に連続的に知ることができる。多電極法では、前もって電極棒が線状に配列されているので、ターミナル・ボックス上の操作によって、垂直探査、水平探査が自由に行なえる。今回の実験では設定した電極系において、垂直探査、水平探査の両調査法に必要な測定値は全て一連の測定によって得ることができた。

Fig. 6 は水平探査法の結果を示したものである。(a)~(f)に電極間距離 $a=2.0\sim 8.0\text{ m}$ をそれぞれ示した。Fig. 6 中の黒丸太字線でプロットしたのは8月14、20日に測定したものを平均した曲線であり、実験当時の降雨状態から考えてみて、実験地盤が乾燥に近い状態と推定され、この平均曲線を background として他

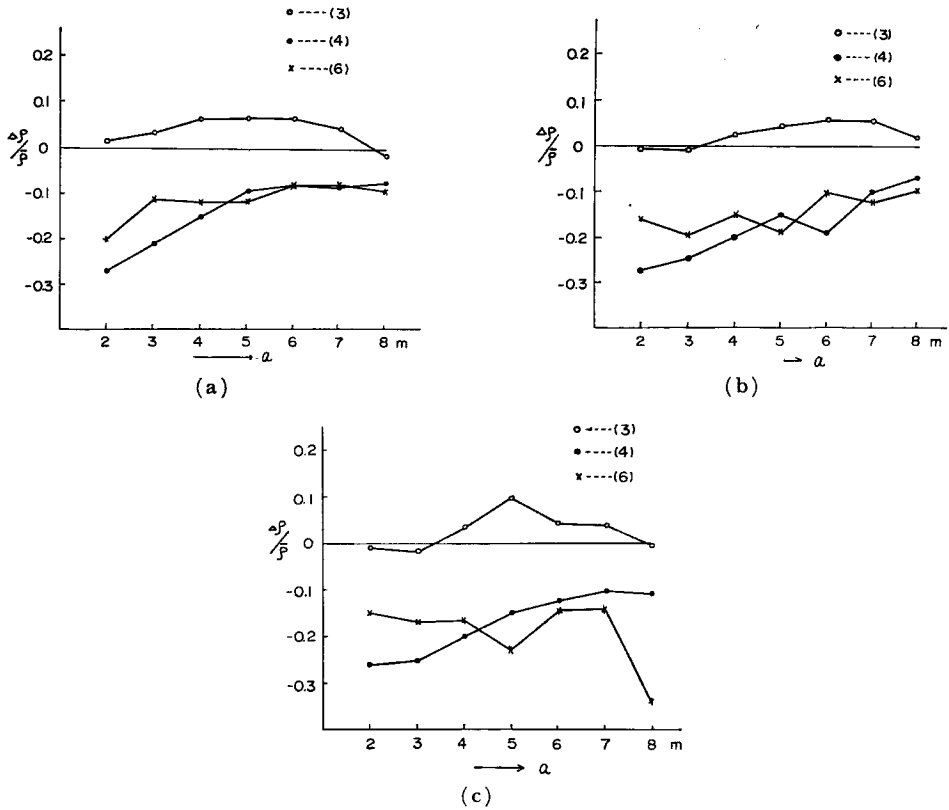


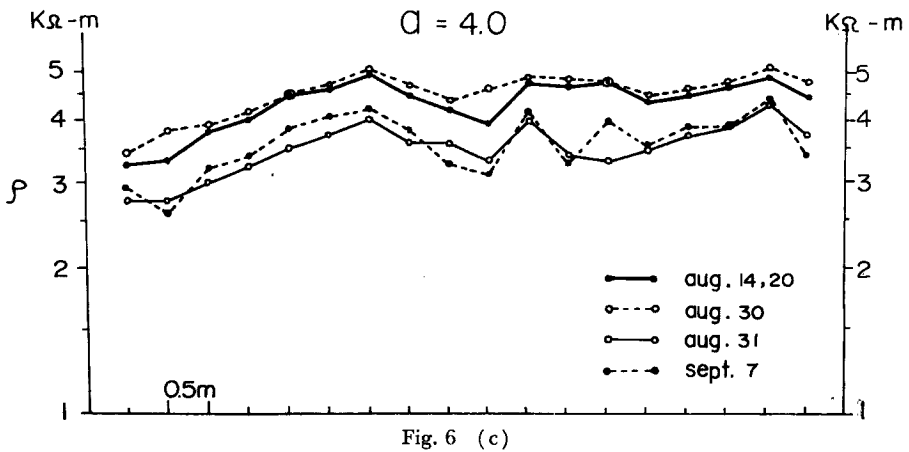
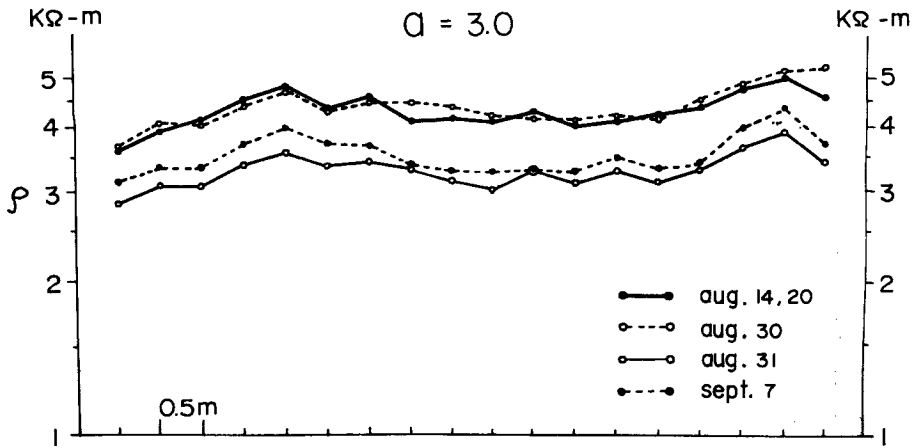
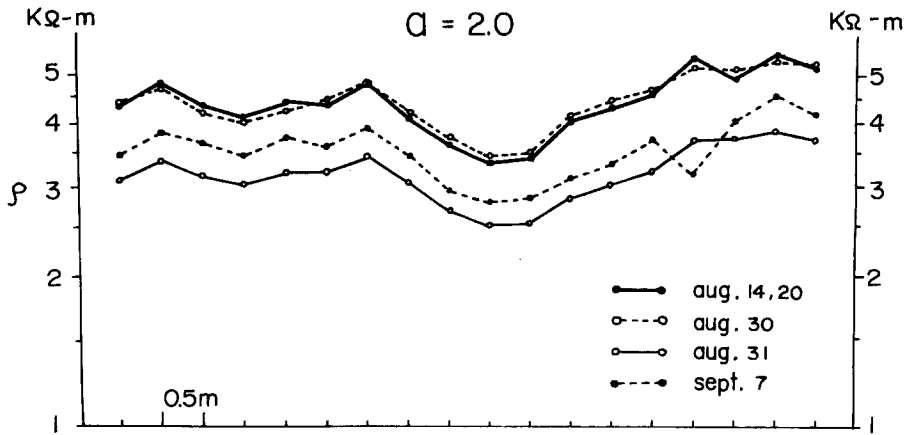
Fig. 5 Compare curves of measurement values, (3)-(6) mean ordinal number by electrical resistivity survey.

$\Delta\rho$; variation of apparent resistivity
 $\bar{\rho}$; average value of apparent resistivities between (1) to (2)
 a ; electrode spacing

の実験による曲線と対比してみた。勿論 background とした地盤中が完全な乾燥状態に近いというのではなく年間を通して地盤中の状態が無降雨が続くことによる比較的乾燥状態にあるものという意味である。Fig. 6 で8月14, 20日の平均曲線と8月30日の曲線とを対比してみると $a=2.0\sim6.0$ においてその ρ はかなり等値であるが、微視すれば a が増加するほどずれが多くなり、8月30日測定による曲線に対して8月31日測定による曲線(白丸実線でプロット)は明かに ρ の低下を示し、水平成分においてはほとんど background の姿態を維持している。(a)~(g)を順時みると ρ の低下は a が増大するほど少なくなっているが、このことは降雨が上部層より浸潤下降してゆくことを意味している。

さらに9月7日に測定した曲線(黒丸破線でプロット)は(a)~(g)と検討してみると a がせまいときは ρ が10~20%ほど回復しているが a が増大すると回復が遅れていて $a=8.0$ に至るにつれて ρ が低下しているところが多くなって来る。この関係は、水平探査の結果においても、 a を順時増大させて曲線を対比してみれば、浸潤下降による地盤中の状況が解釈できることを意味している。

水平探査に基づく各 a の曲線は、 ρ 値を対数でプロットしたので降雨によって地盤中に含水が増加したときほど、曲線の姿態に表われていた特性を明確に強張する傾向がある。



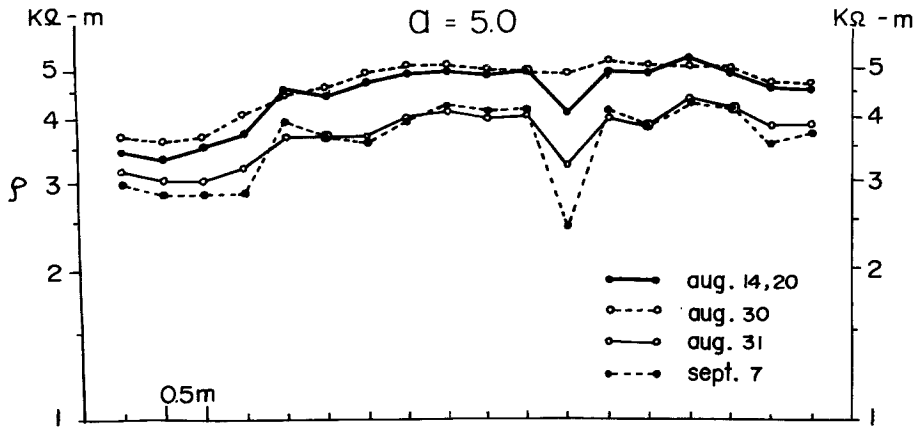


Fig. 6 (d)

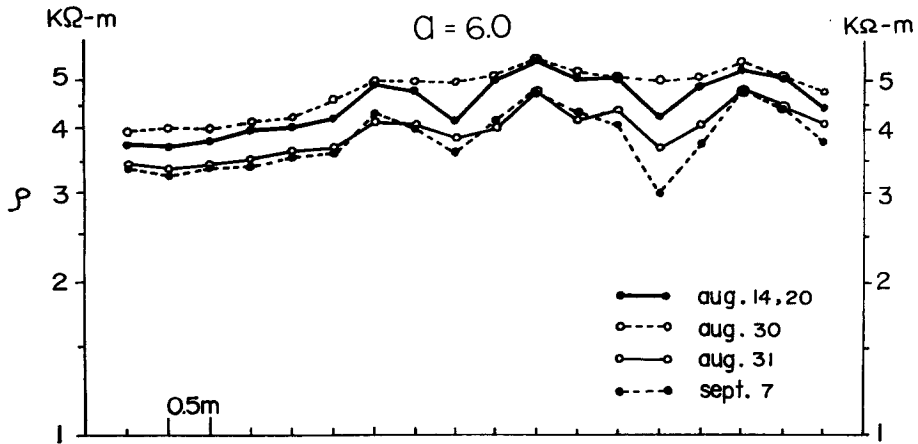


Fig. 6 (e)

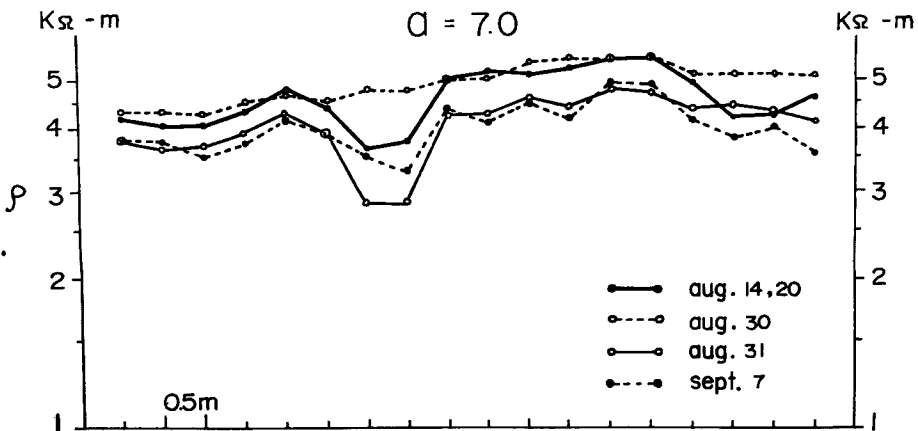


Fig. 6 (f)

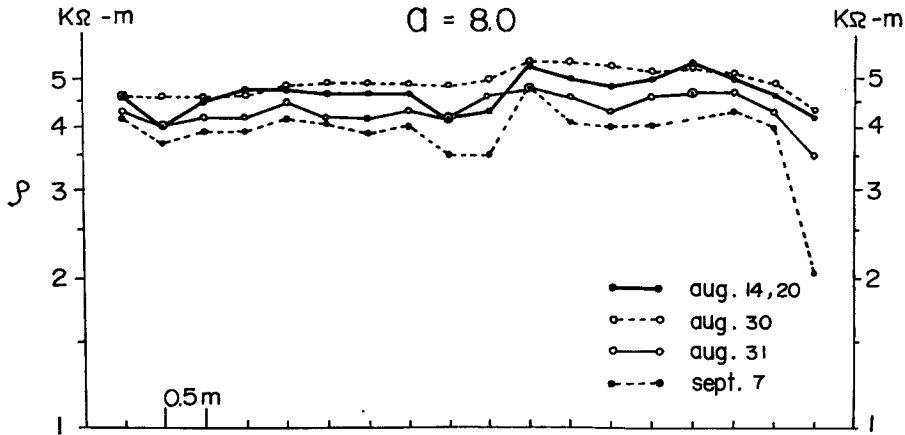


Fig. 6 (g)

Fig. 6 Graphic curves of apparent resistivity and each measuring points.
a; electrode spacing

Fig. 7 で示した現位置の地表面浸透能測定は Musgrave 型浸透計を実験地に 4 カ所設置して測定した。測定値は 121~191 mm/hr とかなりばらついているが、花崗岩風化帯の地表面で、しかも山地地盤は微地形的に起伏に富んでいて、常時地表流の集水性、散水性の現象が起こっていて、小面積での局所的な浸透能試験ではこの程度のばらつきはある。

実験地盤の表層部の含水比を求めるために、中性子水分計による測定を奥西が行なっているが、今回の実験と平行して実施した部分について Fig. 8 に示す。中性子水分計による測定は表層部の深さ 1.8m までで、比抵抗探査で測定する $a=2.0$ より上部になっており、測定方法から両調査法の不足分を相い補う目的を持っている。Fig. 8 の 8 月 28 日の比較的乾燥時の測定結果をプロットした曲線を background として、8 月 30 日の台風 23 号による降雨の降り始めからの測定 (降雨のため測定を中断)、8 月 31 日の降雨後と 9 月 4 日に測定したものを示した。この間の降雨状況については Fig. 2 に示した。

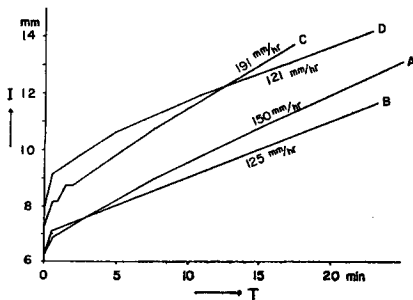


Fig. 7 Curves of infiltration rate.
I; infiltration capacity

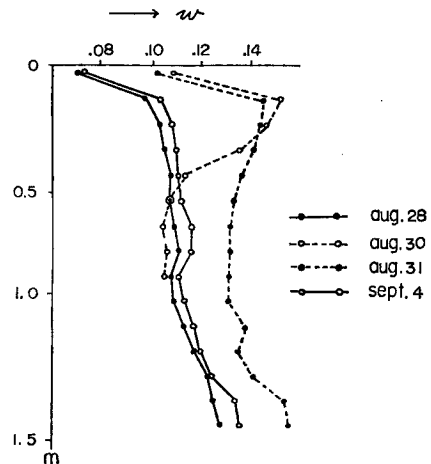


Fig. 8 Graphic curves of hydrous ratio through the neutron hydrogic mater.

使用した中性子水分計は挿入型のもので、実験地盤にボーリング孔を設け、孔中にプローブを挿入して測定した。

8月30日には測定を開始した当初より、実験にさしつかえない程度の小雨が降っていたが途中より大雨になって実験が続けられなくなった。この時の測定結果を Fig. 8 に示したが(白丸破線でプロット)、深さ約 20 cm で含水比 (w) がピーク(約 15%) になっている。降雨が降り始めて約 1 時間で作業を中止したので、このピークを浸潤下降のフロント(wetting front)と考えると、1 時間に約 20 cm 浸透したことになる。このことは浸透能測定の結果とかなり近いものである。8月31日は降雨が止んだ直後より測定を開始したが Fig. 8 に示した結果(黒丸破線でプロット)によると全層にわたって 13~15% の含水比を示している。9月4日に至ると8月28日測定の background 近くまで回復しているが、下部においてやや回復の遅れが残っていることが読み取れる。

5. 考 察

実験を行なった尾根状の地点の地下構造は電気探査および弾性波探査の結果に基づいて Fig. 9 に示した。

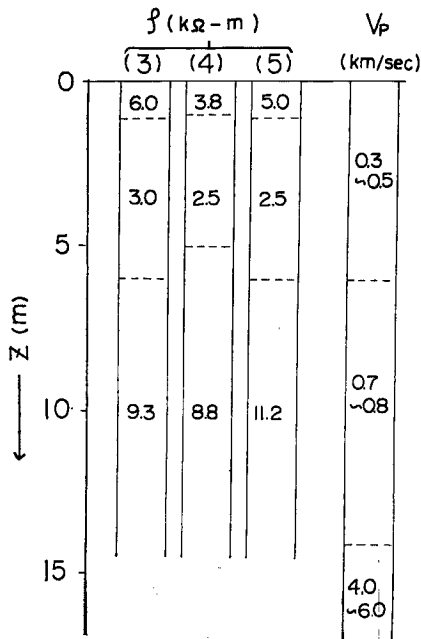


Fig. 9 Resulting logs of resistivity and seismic prospecting.

電気探査は $\rho_a - a$ 曲線の一例について降雨前後の条件のもとで得た資料を使用し、標準曲線を用いて解析した。弾性波探査は前報⁶⁾で報告したのものの中から調査地点での探査結果を電気探査の結果に対比して記入したものである。Fig. 9 による深さ 5~6 m の境界面位置は両探査法の結果がかなり合致しており、この面を境界面とみなし上下層をみると、比抵抗においては約 1:3~1:4 以上の対照 (contrast) を示し、弾性波 (P 波) においては 1:2 の対照 (contrast) を示す。これらの点を考慮して 5~6 m 付近が地盤構造の上下層を区分する boundary と便宜的に解釈することができる。しかし、花崗岩風化帯の現場でしばしば見かける露頭の観察や、弾性波 (P 波) の走時曲線⁶⁾から判断しても、この boundary は境界面をはさんで急激に地層が変化しているという応答が得られているものではなく、むしろ gradually に変化を示す境界層として理解されるものである。表層部より風化が地下内部へ進行するものとすれば、physical image としても 5~6 m 付近を境界層あるいは上下地盤の変域帯として取り扱う方が妥当なようである。問題はこの層域を浸潤下降する水の挙動であるが、今までのデータでは詳細な検討を可能にするに至っていない。

多電極法による観測システムで隔測的に行なっている比抵抗測定を時間的連続性を考慮して自動計測システムを計画するなど、境界層付近の浸潤下降現象については今後の課題の一つとして今回は深く考察をおこなわなかった。

Fig. 9 の電気探査(4)においては、全層にわたって、わずかであるが比抵抗値の低下が認められ、解析した境界面も幾分浅くなっている。いずれにしても深さ 5~6 m で境界層が存在し、この付近を浸潤下降する浸透水の下降速度に低下があれば、その層域には一時的に貯留水層の形成が考えられる。今回の実験で8月31日の(4)は降雨直後の測定値なので、全層にわたって ρ が低い応答があったことは妥当で、電氣的に浸透水による含水量の増加が地盤中の導電性を高めた結果である。Fig. 9 の(4)において解析された bound-

ary が浅くなっていることが、境界層付近に含水の増加があり、不飽和層が次第に飽和層へ近づいているという現象だとすれば、多電極法によって地盤中に含水増加が生じる現象を捕捉する手段としての効果が期待できるものである。

淵田⁹⁾によると定常電界は電流の流し方と導電率の分布状態できまり、地下構造を反映している地表の電界（電位分布）は電流の流し方（電極の数・形・大きさ・配置・電流値など）、つまり流電条件に従属してきまるとしている。

多電極法は、実験地盤に一定の流電条件を保持しつつ、従来の電気探査で用いられた種々の電極系を組むことが可能で、これまでの電気探査法は、地下水探査に利用されるとき常に static な扱いに終始してきたが、多電極法を応用することにより時間的成分を加えてデータ処理ができるなど、電気探査法の dynamic な取り扱いを可能にするものである。多電極法は流電条件を一定にして繰り返し測定を容易にしたが、多電極の中から目的に適合した電極系を組んで定常電界を形成すれば、電界を変化させる因子は降雨による地盤中の比抵抗分布に限定され、本来の調査目的にかなった探査法とみなすことができる。

今回の実験結果では、Fig. 7 で示した浸透能測定による 121~191 mm/hr の値をかりに浸潤下降現象にも拡大して、wetting front の下降速度として地盤中についても考察してみると、8月30日(3)と31日(4)の比抵抗測定の時間間隔が約26時間あるので、地盤中の浸潤下降はこの間に224~496 cm 進んだことになる。浸潤下降現象は先行含水や、地盤中の不均一性に支配されて、きわめて複雑な形態を示すであろうが、単純に考えて224~496 cm という値は Fig. 4 の(3)、(4)の ρ_a - a 曲線と比較してみても、浸潤の到達域を意味していると考えられる。Fig. 4 の(4)にみる ρ_a - a 曲線の姿態で $a=3\sim 4$ m までが、 ρ が明らかに低下していることが浸潤下降を捕捉したことを裏づけている。

Fig. 8 に示した中性子水分計の結果は、地盤中の多電極法で対象とした位置より浅層部ではあるが、台風23号のもたらした降雨前後において、浸透水の浸潤下降現象を捕捉した上で、きわめて多電極法と対応しうる結果を示した。

6. おわりに

従来電気探査は地表が降雨などで湿めると、電極棒を全て地表に設定して電極間距離を決めているので、地下構造を判定する上でかなり重大な誤りを解釈上に持つものだとわれていた。今回の実験でも地表面だけが湿ったとき、電極間距離を大きくとって測定してみると確かに ρ は全般的に低くなる。Fig. 4 で(3)、(4)の ρ_a - a 曲線を比較してみると、(3)に対して(4)では全電極間距離において ρ が低下した曲線姿態を示しているが、これにはかなりの noise が含まれているものと推定できた。しかし、(6)に至ると $a=3\sim 4$ m を境として曲線の姿態が逆に上下に変動する状態を示しているが、地盤中の浸潤による ρ の低下は(6)によって $a=3\sim 4$ m 以上の部分で低下変動したものが応答していると考えなければならない。

多電極法で山地地盤の傾斜層での浸潤現象を取り扱うために電極棒の配置を再検討する必要がある。また、地盤の不連続性が、浸透、浸潤による含水の増加を特定な位置に貯留水層を形成させようと、含水増加が崩壊現象へ結びつく可能性が生じてくる。そのためには多電極法で含水分布を監視すると同時に地盤構造の探査を他の調査法によって可能な限り実施しておき、その上で含水分布を動的に捕捉し解釈してゆく効果があるであろう。特に崩壊という現象が地盤の強度低下に起因し、崩壊面の形成が含水増加による質的变化と応力集中との相補的結合によるものと推定できるので、乾燥状態での地盤強度テストを実施することも必要である。

謝 辞

本報文のおわりにあたって、研究上で常にお世話になっている島通保教授に深謝の意を表します。現地実験、研究の助言、手伝をしていただいた奥西一夫助手および現地実験で手伝っていただいた京大大学院生江角周一君に感謝いたします。大変わずらわしい製図を快く引き受けて下さった倉内洋子事務官に謝意を表し

ます。

現地実験、参考資料などで便宜を計って下さった建設省びわ湖工事事務所の各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中 茂：山地斜面への浸透に関する研究，建設工学研究所報告，No. 4，昭 38，pp. 105-128
- 2) 田中 茂：雨水の浸透に基く斜面崩壊の実験的研究，第 1 報，建設工学研究所報告，No. 6，昭 39，pp. 131-147
- 3) 田中 茂・橋本光史：パイピング現象に起因する斜面崩壊の問題点，第 3 回災害科学総会シンポジウム論文集，京都，昭 41，pp. 78-79
- 4) 福尾義昭：浸透地下水流にもとづく斜面の崩壊，京都大学防災研究所年報，第 14 号 B. 昭 46. 3，pp. 707-715
- 5) 山下明夫：堆積層の比抵抗に関する研究，物理探鉱，第 24 卷第 3 号，昭 46. 6，pp. 14-23
- 6) 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—，京都大学防災研究所年報，第 14 号 A，昭 46. 4，pp. 589-597
- 7) 笹岡健三・松田哲郎：大地比抵抗測定器 (Type 3244)，横河技報，Vol. 12，昭 43
- 8) 志村 馨：電気探査法，昭見堂，昭 40. 2
- 9) 淵田隆門：人工電位法の基礎的考察，物理探鉱，第 5 卷第 1 号，昭 27. 3，pp. 27-31