

投稿論文 (和文)
PAPERS

不飽和土の電気比抵抗特性と 不飽和浸透計測への電気探査法の適用

西田一彦*・青山千彰**

不飽和地盤内への雨水の浸透状況を計測する手法として電気探査法に注目し、比抵抗と体積含水比の関係、不飽和浸透時の比抵抗変化について検討した。

その結果、吸排水過程での体積含水率の変化と比抵抗変化率との関係は水分特性曲線と同様、異なった曲線を描き、吸水過程に限って Archie 式が利用できることがわかった。また、不飽和浸透実験では比抵抗変化により水の浸透過程を経時的かつ面的に表現しうることを明らかにした。

Key Words : unsaturated seepage flow, resistivity, water retention curve,
Archie's formula, electric prospecting

1. はじめに

雨水の不飽和地盤内への浸透状況は、不飽和パラメータに関する計測技術と不飽和浸透解析法¹⁾の目ざましい発達により、ある程度まで正確に把握できるようになってきた。そのため、最近では、これらの手法を降雨による斜面の崩壊予測問題にまで拡大・適用した報告²⁾が見られるようになってきている。しかし、これらの手法のほとんどは人工的に締固められた土層をモデルとした均質な透水媒体を仮定しているのに対し、実際の流れは、「斜面に設けたトレンチ断面で通水量を測定した場合、その大部分が特定の水みちを流れている」と新藤³⁾が指摘するように、まだ、自然地盤への不飽和浸透解析の適用は難しい段階にあると考えられる。

このように解釈の相違が生じる原因は、地盤内の浸透状態を測定する方法がないため、現実にはどの様な地中浸透状態にあるのか把握できないことに起因している⁴⁾。そこで、測定地盤を乱すことなく、広範囲に浸透状態を把握する手法として地下水探査に用いられる電気探査法に注目し、不飽和地盤内での適用の可能性について検討した。

電気探査法は地下水の探査法として用いられてきた経緯を持つため、気水境界を取り扱う都合上、主に岩の含水量と比抵抗との関係についてかなりの研究成果が見られる。特に、比抵抗と含水量との関係⁵⁾は有名であり、サクシオンと比抵抗の違いはあるが、吸水過程での水分特性曲線に非常に類似した曲線が得られる。Archie^{6),7)}によると、岩盤の比抵抗を R_t 、岩盤を飽和している間隙水の比抵抗を R_w とし、実験的に、飽和度 S_r と間隙率 n との関係式 $R_t/R_w=1/(S_r \cdot n)^m$ を得ている。サク

シオンと含水量との関係が、べき関数タイプの実験式で整理されていることを考え合わせると興味深い。一方、不飽和透水係数と比抵抗との関係においても同様である。透水係数 K と地層比抵抗係数 F との関係は、茂木⁸⁾によると $K=a \cdot F^{-b}$ となり、不飽和透水係数と圧力水頭あるいは体積含水比との関係で Ahuja 型、Wind 型⁹⁾に類似した関係式が得られる。このように比抵抗は水分特性値、不飽和透水係数と有意の関係にあることが予想され、これらの相互関係を明確にすれば不飽和浸透状況を求める手法の一つとして位置づけが可能になるものと考えられる。

本論文では不飽和浸透パラメータと比抵抗との関係を室内試験で検討した後、現場に作成した実験土層に電極とサクシオン計を深度方向に埋設した状態で、人工降雨による浸透実験を実施した。その結果、比抵抗値から体積含水率への変換上の問題点と取り扱い方、電気探査法による降雨強度と浸透能、湿潤前線のトレース、ならびに不飽和浸透問題への適用上の問題点について、いくつかの知見を得たので報告する。

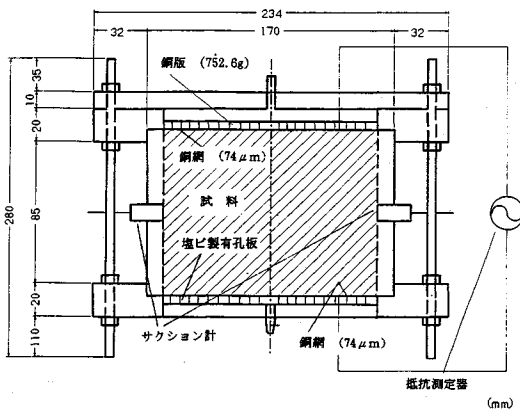
2. 室内での比抵抗計測実験法と現場における不飽和浸透計測実験について

実験は、まず、土の含水量と比抵抗との関係を明らかにする室内実験を実施し、これらの関係を基に、水分量を変化させた地盤で、電気探査による不飽和浸透計測実験を実施した。

なお、比抵抗の絶対値そのものは室内実験、電気探査による現場実験ともに電極の接触電位、さまざまな境界条件の影響に支配される。そのため、本論では土中の水分量だけを変化させた場合の、比抵抗値の変化量に注目することとし、検定試験での比抵抗表現を除いて、以下に示す相対値(比抵抗変化率 C_s)として取り扱うこととした。比抵抗変化率はサクシオンの値が最小(ほぼ飽

* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科
(〒564 吹田市山手町 3-3-35)

** 正会員 工博 関西大学講師 工学部土木工学科



図一 不飽和土の室内比抵抗計測容器

和状態)となる地点での比抵抗 ρ_{s0} と任意での比抵抗 ρ_s より比抵抗変化率 C_s を求めた。

$$C_s = (\rho_s - \rho_{s0}) / \rho_{s0} \dots \dots \dots (1)$$

(1) 不飽和土の比抵抗計測装置と試験方法

土の不飽和領域における比抵抗と水分量、サクシヨンの関係を明らかにするため、図一に示す計測容器(直径 150 mm, 高さ 100 mm)を作製した。これは日本鉄道施設協会の地質調査標準準方書(12-1-12)¹⁰⁾に示される比抵抗計測容器を基に、通水できるように改良を加えたものである。本実験では、比抵抗値に影響を与える因子として、電極と試料との接地抵抗、密度、水分量が考えられる。その内、もっとも制御が難しく、実験値への影響が大きいのは接地抵抗で、同一拘束圧下でも試料表面と電極との極僅かな接地状態の違いが結果に大きく影響を与える。そのため、試験容器の特徴は接地状態を極力変化させないように、含水量調整による試料交換をせずに水分量を変化させる点にある。しかし、後述の手法で、水分量を変化させる場合、試料内部で片寄り不飽和状態になる可能性も十分にあり、当実験では比抵抗の測定結果を試料全体でとらえて考えている。

主な改良点は、銅板の代わりに 74 μm の銅製のフィルターを試料上下に使用し、載荷板側にはさらに、協会指定のものと同重量の銅製の有孔板を置いた。容器側面にはサクシヨン計測用のセンサーを 2箇所図のように取り付けた。これは防水加工したひずみゲージ型圧力センサー(1 kgf/cm², 感度 5 mm 水頭)に AEV=2.0 kgf/cm² の素焼円筒を取り付けたものである。供試体は 2層に分け、予め設定した水分量と密度になるように静的に締固めた。

容器は上下にコックがあり、密閉された状態で空気圧が加えられるようになっている。比抵抗の計測には交流抵抗器を用いた。試料の吸水・排水方法は以下の手順で実施した。吸水過程では、試料底面に水面を接触させた状態で約 10 秒から 30 秒程度吸水させることで水分量を

増加させた。排水過程では、試験機上部より空気圧(0.05 kgf/cm²)をかけ、飽和度の大きい状態では短時間で一定の水分(約 30 cc)を強制排水し、小さいところでは 15 分程度通気することで乾燥させた。なお、水分量の測定は常に試験器ごとばかりに載せて計量した。

(2) 電気探査法による不飽和浸透計測方法

実験土層は、(① 2極法を用いているため無限遠電極を遠くに取れること、② 乾燥状態から湿潤させるため同一条件土層が常時必要)、このような条件を満たすため図二のようにピットを掘り、ピット内の土を入れ替え、作成した。締固めは 5cm 間隔で板を用いて、電極を折らないように、加圧しながら所定の密度まで締固めた。この際、電極の周辺は手で加圧するに止めた。

初期含水比は約 5% に調整し、締固め密度は 1.5 g/cm³ とした。含水比は計測結果の検定用として、各深度毎に実験前後で測定した。土層は、図中の電極並びにサクシヨン計に圧力がかからないように静的に締め固めた。電極(炭素棒)は間隔 30 cm で 8 対、サクシヨン計も同一深度に 8 個、ピット底面に間隙水圧計 2 個とし、底面には礫を敷き詰めた状態でその内部に 2 本のパイプ(給水、排気兼用)を埋設した。各電極は電探装置¹¹⁾を通じてコンピュータに、サクシヨン計はデータロガーに連結した。実験中におけるデータのサンプリング速度は、電気探査で 1-8 ch (1 cycle/40 s)、また、サクシヨンの場合 1 min 間隔で 1-8 ch (1 cycle/8 s) である。データの取り込みはフロッピーディスクまたは IC カードを利用し、実験開始 1 時間前から連続的に取り続けた。

実験土層内に水を入れる方法は人工降雨装置を用いて表層から浸透させる場合と土層下部から水面を上昇させる 2 つの手法を採用した。人工降雨装置は無数に設置した針を振動させながら雨を降らせる機構をもち、降雨量の調整幅は 10~150 mm/h である。降雨パターンは図三に示すように豪雨(type 2)とやや強め(type 1)の 2 種類とした。一方、水位上昇は土層底面に設置した間隙水圧計をモニターしながら給水パイプを用い図四のように給水した。

ここで、比抵抗値の取扱であるが、通常、電極が深度方向に埋設された手法の場合、計測時の見掛けの比抵抗は水平探査のように位置決定することができない。しかし、今回の場合、電極間隔も狭く、電流、電位電極間では図のように水平方向にのみ計測したため、その深度での見かけの比抵抗値とした。

なお、これらの実験に平行して、比抵抗値と湿潤前線の関係把握するため、湿潤前線が観察できる円筒容器(φ 45 × h 50 cm)を用いた浸透実験を同一電極配置状態で実施した。

実験土層
(100×120×100cm)

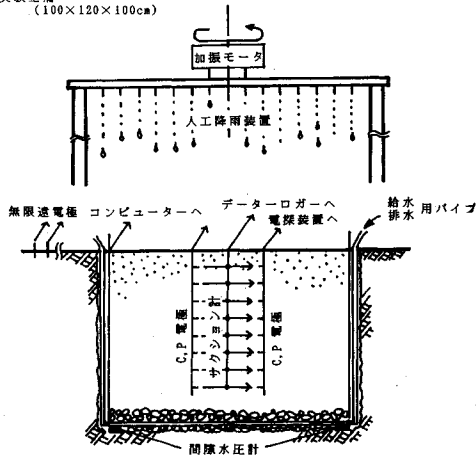


図-2 電気探査を用いた現場降雨浸透実験

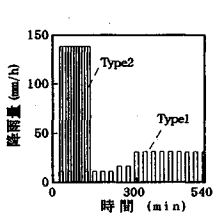


図-3 降雨パターン

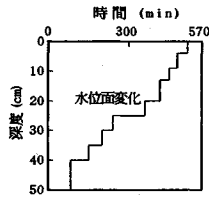


図-4 水位上昇過程

表-1 試料の基本的性質

	土粒子密度	初期含水比	初期間隙比
まさ土	2.72	12.97~17.26	0.987~1.315
標準砂	2.65	5.70~11.16	0.847~1.12
シルト混じり砂	2.66	4.91~5.10	0.773~0.886

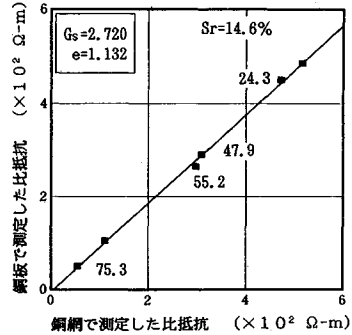


図-5 比抵抗に及ぼす銅フィルターの影響

3. 試料

実験に用いた試料の基本的性質を表-1に示す。室内実験では標準砂とまさ土を使用し、現場実験での入れ替え土にはシルト混じり砂を使用した。いずれも、吸排水しやすく、限界毛管水頭の小さな透水性の大きい試料を採用した。室内実験試料の場合は炉乾燥後加水して初期含水比調整したが、現場実験では気乾燥状態で供試土とした。

4. 改良型計測容器の検定

協会で指定された比抵抗計測容器を不飽和土用に改良することで、以下に示す3項目の検定実験を行った。なお、検定用の試料として、締めめ易いまさ土を用いた。

① 銅板と銅フィルター交換の影響

協会で指定された比抵抗測定容器の特徴は試料上下の銅板の重量と寸法が指定されている点にある。これらを銅製のフィルター(上板は協会指定のものと同重量752gfの銅製有孔板と銅製の74 μ mフィルター、下板は塩ビ製有孔板の上に銅製の74 μ mフィルター)に替えた場合、その影響について調べたのが図-5である。同一密度で含水比の異なる試料について比較した場合、図より明らかなように、銅板を銅製の74 μ mフィルターに替えた影響はほとんど見られない。したがって、銅製の74 μ mフィルターを使用しても十分協会指定の計測容器

と同等の能力を持つと考えられる。

② 拘束圧が比抵抗値に及ぼす影響

比抵抗計測実験で拘束圧は試料と電極との接触抵抗に影響する重要な因子となっている。そこで、同一密度で含水比の異なる試料を用い、銅製の74 μ mフィルターを使用して、拘束圧(上部の載荷荷重)の影響を調べたのが図-6である。各含水状態で異なる比抵抗を示すが、いずれも拘束圧の増加につれ一定値に収束していく傾向を見せている。特に、協会指定用の荷重(752.6gf, 4.26gf/cm²)付近より荷重の増加に対し比抵抗はほぼ一定値となっていることより、極力、試料を圧縮しない範囲に特定すると、この程度の拘束圧より十分精度の高い比抵抗が得られると考えられる。しかし、Sr=56.4%のように、試料表面の接地状態が異なる場合、比抵抗値が大幅に異なるケースが生じるため、注意を要する。

③ 比抵抗の経時変化について

不飽和状態の試料の水分量を変化させた場合、経時的に試料内の水分分布が変化するため、比抵抗値の適正な計測時間を求めることは非常に難しい。図-7は同一密度で含水比の異なるまさ土試料について、比抵抗の経時変化を表したものである。その特徴は、水分量が多い試料では比抵抗が小さく、変化幅の小さい曲線を描く。水分量の減少ともない、比抵抗の絶対値が大きくなり、時間の経過につれ比抵抗が減少する傾向が見られる。全体を通じて、比抵抗値がほぼ一定の値を示すようになるのは30分経過後と見られるため、以後、比抵抗の計測時間は30分で統一した。ただし、砂質土系の供試土の種類、密度が異なると適正な計測時間は当然異なることが予想されるが、透水速度が速い点を考慮して、今回の実験では全試料とも30分とした。

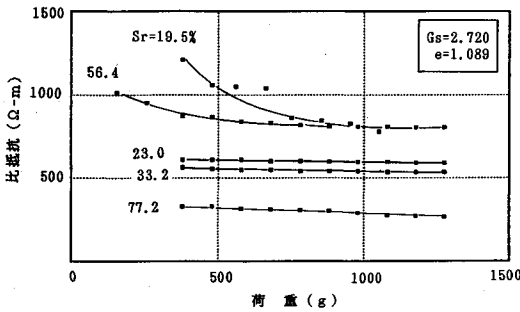


図-6 拘束圧が比抵抗に及ぼす影響

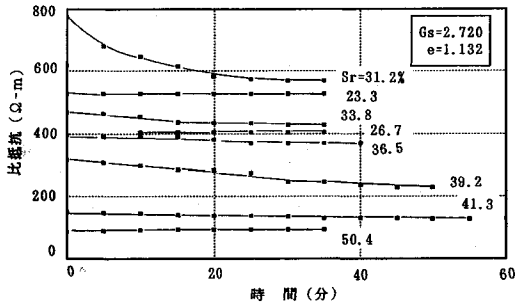


図-7 不飽和土の比抵抗の経時変化

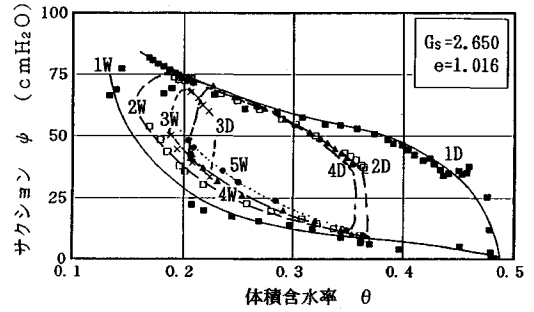


図-8 水分特性曲線

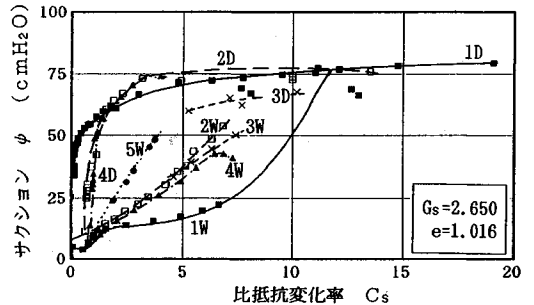


図-9 サクシオン—比抵抗変化率の関係

5. 水分特性曲線と比抵抗特性

不飽和領域での比抵抗変化と水分特性曲線との関連性について検討するため、標準砂での実験結果を図-8～10に示す。(図中数字は吸水過程をW、排水過程をDで表し、数字は回数を意味する：図-9)。図-8は水分特性曲線で、途中吸水・排水の繰り返しを実施したものである。この経路にしたがって、比抵抗変化率とサクシオンの関係を図-9に、また、比抵抗変化率と体積含水比θの関係を図-10に示す。

水分特性曲線は、試験方法の違いにもかかわらず、西垣ら¹²⁾の瞬時水分計測法から得られた実験結果によく類似し不飽和土の比抵抗測定装置として十分な精度が得られることを物語っている。なお、初期吸水過程でθ=0.2付近の大きな曲率変化は、炉乾燥試料に僅かに水分補給した状態で測定を開始しているため、水分分布の不均質性の解消によると考えている。

比抵抗変化率Csとサクシオンの関係は初期吸水過程で曲率変化するもののその後の吸水過程でかなり良い直線性を示す。また、排水過程ではCsの小さい地点で非常に大きな曲率変化を持つ曲線を描く。このように給排水過程で両者の関係は全く異なる傾向を示し、試料内の電流の流れる経路が変化していることを暗示している。

Csとサクシオンの関係は、吸水過程では、標準砂に限らず他の土においても良い直線性を示し、

$$\psi = aC_s + b \dots\dots\dots (2)$$

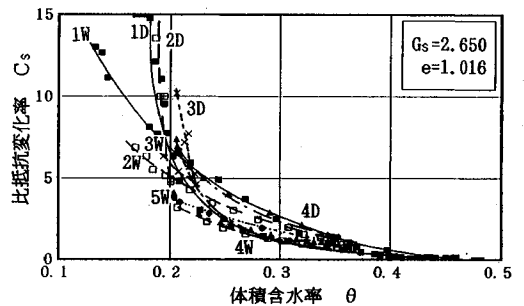


図-10 体積含水率—比抵抗変化率の関係

a, bは実験定数、で表される一次式で表される。排水側になると急激な曲率変化が生じるため、バイリニアな直線あるいは双曲線を示す。

$$\psi = C_s / (c + dC_s) \dots\dots\dots (3)$$

c, dは実験定数、で表される。

一方、図-10の比抵抗変化率Csとθとの関係も、Csとサクシオンの関係と同様に吸水過程と排水過程で明らかに異なる曲線を描く。このことは、他の土試料を用いた実験においても同様の傾向が見られ、後述する、飽和度と比抵抗との関係で吸排水過程を考慮に入れていないArchie式を適用する場合の問題点となっている。

各曲線の特徴は、吸水側の場合、べき関数あるいは対数式で表し易い曲線を描くことである。排水側になると曲率変化が著しくなり、この点を挟んでほぼ直線的な曲線を描く。標準砂の場合には、比抵抗変化率は吸水過程側が排水過程側を上回るが、まさ土の場合は反対となり、

両者の関係は土質や密度の影響を受ける。また、吸排水の繰り返しによる曲線勾配への影響は吸水側に著しく表れるが、水分特性曲線においても吸水側に差異が生じていることの反映によると考えられる。

6. 比抵抗より体積含水率への変換式の検討

比抵抗と不飽和パラメータとの関係を表した実験式として、Archie の式^{6),7)}がある。

$$\rho/\rho_0 = 1/S_r^n \dots\dots\dots (4)$$

ただし ρ : 任意の不飽和状態での比抵抗, ρ_0 : 飽和時の比抵抗, S_r : 飽和度, n : 水飽和指数と呼び、通常 2 に近い値をとる。

ここで、式(1)におけるサクション=0での ρ_{s0} と飽和時の ρ_0 が等しいとすれば、比抵抗変化率 C_s は

$$C_s = (\rho - \rho_0)/\rho_0 \text{ となるため、}$$

$$C_s = (1/S_r^n) - 1$$

あるいは、

$$C_s = (\theta(1+e)/e)^{-n} \dots\dots\dots (5)$$

と表される。したがって、水飽和指数 n を 2 に固定すると、間隙比を与えれば C_s と θ との関係は一義的に定まる。

しかし、図-10 から明らかなように C_s と θ との関係は吸排水の繰り返し過程で異なり、このままでは両過程を表現することができない。そこで、対数関数、指数関数、双曲線等の回帰式による検定を行った結果、

$$\theta = a + b \cdot \log C_s \dots\dots\dots (6)$$

を用いた場合の相関係数が最も大きくなり、実験結果を良く表現していることがわかった。比較のため、前述の図-10 における実験結果に、式(5)の Archie 式と、式(6)の対数回帰式、式(2)と水分特性曲線から得た $C_s - \theta$ の 3 曲線を重ねたものが図-11, 12 である。

1 回目の吸水過程 (図-11) では回帰式と、式(2)は実験値に近い値を取っているが、Archie 式も近似した曲線を描く。この傾向は、他の土においても同様の結果が得られる。しかし、吸排水の繰り返しを行うと、 $C_s - \theta$ 曲線がずれるため、Archie 式では実験値とかなりの差が生じる。

一方、図-12 の排水過程の場合、式(3)より得た値と水分特性曲線を組み合わせたものを用い、併せて、Archie 式、対数回帰式もプロットした。ここで、Archie 式は吸排水過程が考慮されておらず当然合わないし、繰り返すと実験値とのズレが大きくなる。最も近似するのは対数回帰式であるが、吸水過程ほどには実験値に近似しない。

比抵抗より体積含水率への変換式の精度について、全体を通じての評価は対数回帰式が最も精度が高いが、測定領域の全域から試料を採取し比抵抗と体積含水比の関

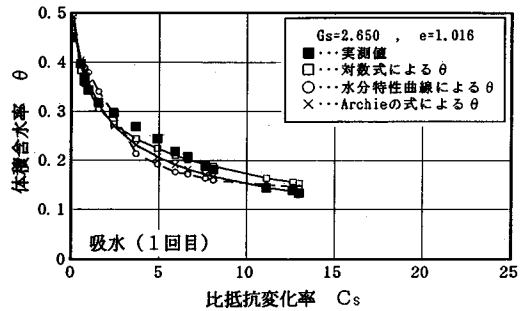


図-11 吸水過程における変換式の検討

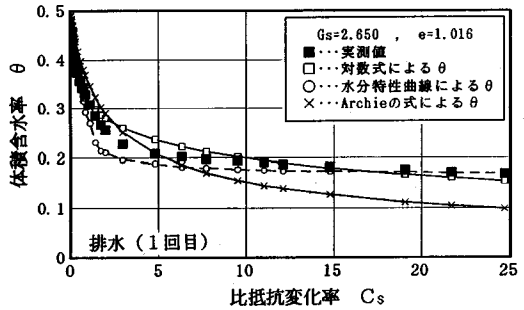


図-12 排水過程における変換式の検討

係を求める必要があり、室内実験に過度の負担がかかる。その点、現場への簡便な適用を考慮すると、精度は悪いが、間隙比のみから体積含水比と比抵抗変化率との関係が得られる Archie 式が最も優れていると考えられる。ただし、Archie 式を適用する場合、現段階では、吸水過程側での使用に限定される。

7. 不飽和浸透に伴う比抵抗変化について

(1) 予備試験結果

本実験に先立ち、実験土層に使用したシルト混じり砂の比抵抗と水分特性との関係を検討するため、室内実験を実施した。図-13 は吸水過程における $C_s - \theta$ 曲線を示したものである。図より、 $C_s - \theta$ 曲線は吸水過程であり差異がなく、Archie 式もかなり良く一致している。そのため、実験は吸水過程 (乾燥状態の土層へ降雨浸透、あるいは水位上昇させる) のみとし、比抵抗から体積含水比への変換には後述するように、一部改良した Archie 式を用いることとした。

(2) 人工降雨実験結果

Type-1 (図-3) の降雨浸透実験を実施した結果、測定時間ごとの見掛けの比抵抗 ρ_a の深度分布は図-14 となる。浸透開始時に地表付近の ρ_a が減少し始め、時間の経過につれて順次変化域が下部に及んでいく過程を読み取ることができる。この図を各深度における経時変化として書き変えたのが図-15 である。図は浸透に伴う ρ_a 変化が下部に移動していることを示しているが、

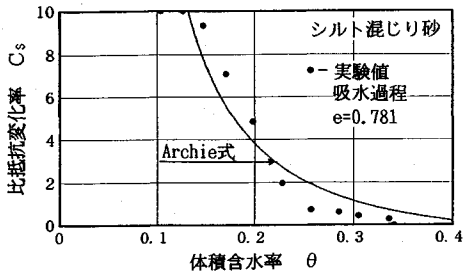


図-13 比抵抗変化率と θ の関係

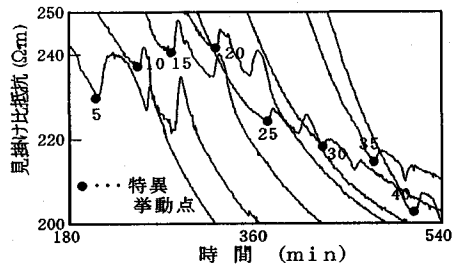


図-16 ρ_a-t 曲線

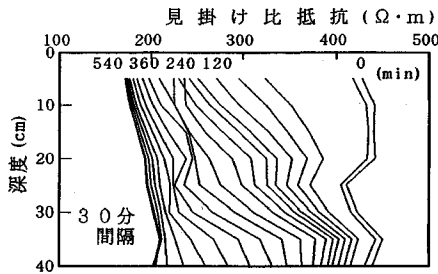


図-14 降雨浸透時の ρ_a の変化

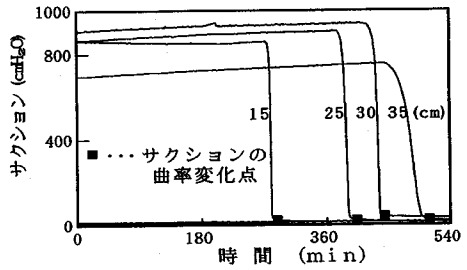


図-17 深度別サクシヨンの経時変化

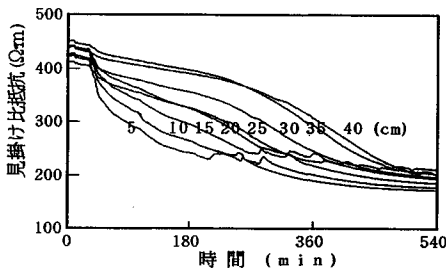


図-15 深度別 ρ_a の経時変化

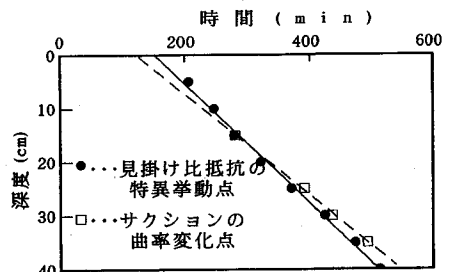


図-18 特異挙動点とサクシヨン

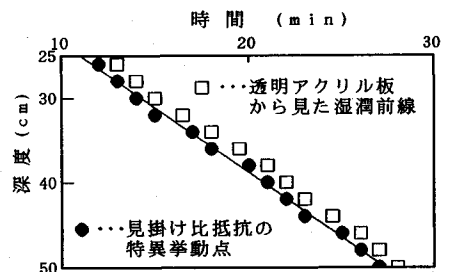


図-19 特異挙動点と湿潤前線

減少過程で共通した曲率変化が現れている。この部分をさらに拡大すると(図-16)、どの地点においても急激に減少した後、急増し、やがて元の曲線の変化程度にまで回復する。このような部分は程度の違いはあるが、ほとんどの不飽和浸透実験に現れる共通したもので、以下、この点を特異挙動点と呼称する。

一方、各測点でのサクシヨンの経時変化は図-17に示すように急激な低下曲線を描く。このように急激なサクシヨン変化は現場計測時によく現れる特徴の1つで、湿潤前線の降下速度が早いため、ほとんど中間値を示さず急低下したものと考えられる。

ここで、このサクシヨン-時間曲線の下部曲率変化点と上述の特異挙動点との対比を行うと図-18が得られる。図より両者は良く一致し、ともに同一物理現象に支配された挙動であることが推察される。一方、図-19は透明円筒容器を用い、肉眼で確認した各深度における前線通過位置と特異挙動点の発生との関係を対比したものである。湿潤前線の位置と特異挙動点は一致し、両者が比例関係にあることを物語っている。したがって、前

線通過に伴い、サクシヨンが急低下し、特異挙動点が見られたものと解釈される。なお、特異挙動の原因には電極が急激に濡れることによる接触電位変化が考えられるが詳細は不明である。

次に、見掛けの比抵抗 ρ_a 値を体積含水率 θ へ変換する手法として、まず、室内試験での比抵抗変化率 C_s と同様に比抵抗変化率 $C_a = (\rho_a - \rho_{a0}) / \rho_{a0}$ として相対変化量とした。ただし、 ρ_{a0} はサクシヨン値=0(ほぼ飽和状態)の時の見掛け比抵抗値とする。次に、 $C_s - \theta$ 、 $C_a - \theta$ との関係はサクシヨン=0地点を介して、

室内、現場ともに等しいとして、 $C_s-\theta$ 曲線を室内試験から求め、対数、指数帰帰曲線あるいは Archie 式等を基に θ に変換する手法を検討してきた¹³⁾。

しかし、飽和状態での比抵抗値 ρ_0 をサクション=0 としても、現場で様々な地点での再現性のある ρ_0 を求めることは非常に難しい。そこで、Archie 式において、この部分を一時的に除外し、測定値のより相対的変化成分にのみ注目する。水飽和指数が 2 の場合の Archie 式が相対的に $\rho_a-\theta$ 曲線の変化量に等しいとして、式(5)を変形し、

$$\theta = \alpha \cdot \theta_a \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $\alpha = \sqrt{\rho_0}$, e : 間隙比

$$\theta_a = \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_a}} \dots \dots \dots (8)$$

である。ここで、 θ_a は体積含水率の相対変化を表す無次元量であるから、全測定点での真の ρ_0 が計測できた場合に α を θ へ換算するとして、とりあえず、 ρ_a を θ_a に変換して使用することとした。図-20 は図-14 を θ_a に変換した場合である。地表から深部にかけて経時的な水分変化の傾向を読みとることができる。

今、Type-2 (図-3) の降雨における θ_a の経時変化を図-21 に表す。図-20, 21 の両図の比較は、豪雨状態での浸透が通常降雨と全く異なる浸透状態であることが理解できる。豪雨の場合、これくらいの深度では地表面から土層底まで殆ど変わらない速度で水分変化が生じている。斜面安定問題に及ぼす降雨量、雨量強度の影響について、様々な角度から研究がなされてきたが、その大部分が水文的統計処理を行うものとなっている。その原因は、雨量強度と浸透能について、具体的な計測手段がなかったためであるが、今回の手法を用いることで、斜面内への降雨の浸透状況が把握できるようになったと考えられる。

一方、特異挙動点は他の実験同様、急激に減少した後、急増するという同じ現象として現れるが、雨量 130 mm/hr の豪雨の場合、その変化幅は Type-1 に比べ 10 倍近く生じる箇所がある。ここで、特異挙動点が生じる地点を湿潤前線の通過点と考え、その前線通過速度を計算すると Type-1 で 0.017 cm/s、Type-2 で 0.066 cm/s となり約 4 倍早くなっている。

(3) 水位上昇実験結果

水位上昇実験の特徴は、降雨浸透実験に比べ水位面が土層内で一定となる点にある。そのため、計測結果と水位位置との正確な比較が行いやすい。

実験は図-4 に示すように、水压を測定しながら給水量を調整して任意時間内一定水深を保ち、段階的に水面上昇させていった。図-22 は θ_a の深度別の経時変化を表したものである。水面が下部から上昇するにつれ、水

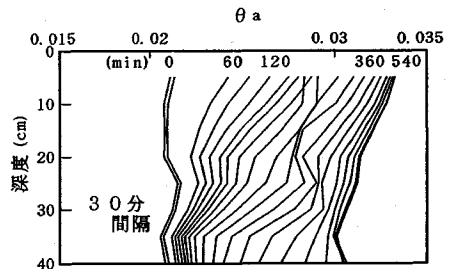


図-20 通常降雨時の (Type-1) の θ_a 変化

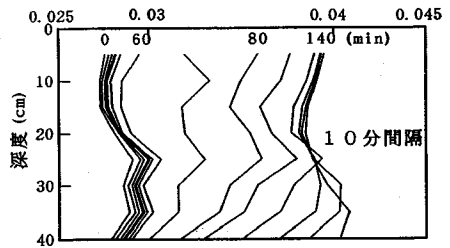


図-21 豪雨時の (Type-2) の θ_a 変化

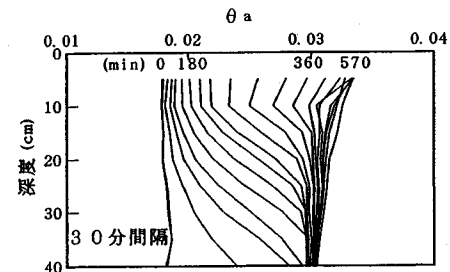


図-22 水位上昇時の θ_a 変化

分増加領域が上昇していく過程が正確に表現されている。この過程における特異挙動点も降雨浸透時と同様の傾向を示すがその変化幅は小さい (図-23)。ここで特異挙動点に注目すると、降雨実験の場合、図-15 のように特異挙動点発生後 ρ_a は低下するが、水位上昇実験では特異挙動点発生後、殆ど変化しない。これは湿潤前線あるいは水位面通過に伴う飽和度の分布の違いによるもの、つまり、この実験では水浸飽和領域が電極間で一様に広がるためと考えられる。したがって、サクションの計測のしやすさにも反映され、降雨浸透実験では反応が非常に鈍く、複雑になるのに対し、水面上昇実験では、各深度ごとに据え付けられたサクション計の位置での水位上昇に伴うサクション変化を表すと図-24 が得られる。実験開始時に各深度とも右端のサクション状態であったものが、水位の上昇とともに、下部側から順次サクション計の設置位置を要にして扇子が開くように左側へサクション低下し、0 になると、その上部が同様の低下をしていく様を段階的に表したものである。図は、正確に水面上昇に追従した曲線を描いている。なお、図-18 と同様、サクションの曲率変化点と特異挙動点との

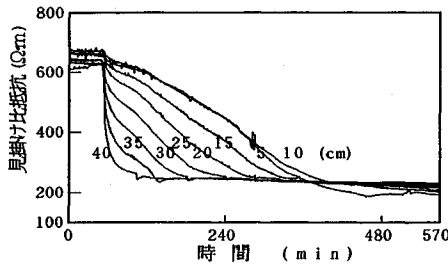


図-23 見掛け比抵抗の経時変化

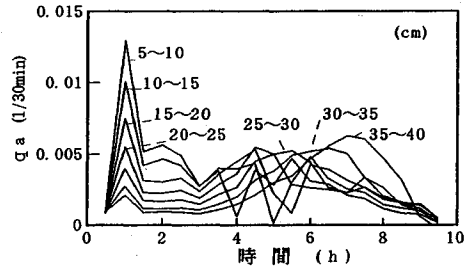


図-26 通常降雨時の q_a-t 曲線

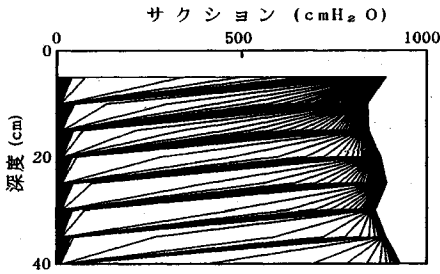


図-24 水位上昇時のサクシオン変化

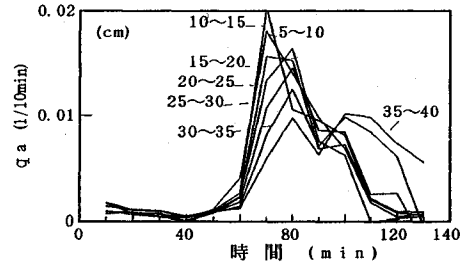


図-27 豪雨時の q_a-t 曲線

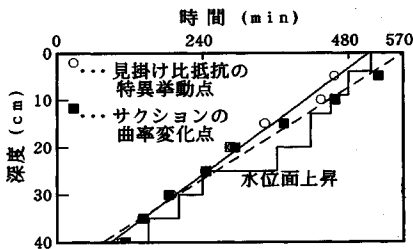


図-25 特異挙動点とサクシオン

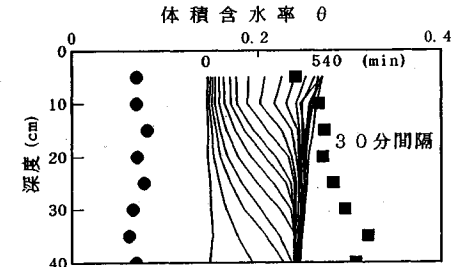


図-28 定量化の精度

対比を行うと図-25 が得られる。図より、各水位面に於ける両者の関係はよく一致した直線を描き、水面位置で特異挙動点が生じることを物語っている。

8. 流量評価ならびに定量化への問題点と展望

降雨浸透による水分変動を計測する以上、計測区間の流量も相対的な変動量として表すことが必要である。そのため、図-20, 21 の θ_a -深度曲線を用い、5 cm のブロック単位ごとに 30 分間隔で積分して単位流量に相当する値 q_a を求めた。

Type-1, Type-2 降雨の q_a -時間曲線を図-26, 27 に示す。両図より、降雨強度の違いによる浸透の違いを簡単に読み取ることができる。特に、豪雨時の場合には全領域でほとんど時間差なく流れのピークを向かえるのに対し、通常降雨では、開始時に少しピークを示した後、降雨量が増えているにも関わらず緩慢な変化に留まっている。このように、降雨の違いによる浸透能が明確に表せることから、今後、様々な地盤の浸透能について検討する手段として有効な計測法であると言える。

最後に、定量化する際の問題は、上述の飽和時の比抵

抗 ρ_0 を現場で精度よく求めることが難しいため、取りあえず室内実験で求め、その値で図-22 を体積含水率 θ に換算したのが図-28 である。図中、●■が測定前後で計測した θ であるが、あまり精度は良くない。この原因には境界問題、 ρ_a 、Archie 式の利用などいろいろ考えられるが、どの程度の精度までなのか見極める必要がある。

今後、電気探査法としてインバージョン解析、トモグラフィ表現技術がより高度化し、電気探査法の最大の問題点である安定した接触電位が保たれる電極を開発することで、不飽和問題への適用精度は向上することが期待される。

9. 結論

本論では、電気探査法が不飽和浸透問題へどの程度適用できるのか、その手法と精度、適用限界について検討してきた結果、以下の結論を得た。

1. 日本鉄道施設協会の地質調査標準示方書に示される比抵抗計測容器を不飽和土用に使えるように改良し用いた。改良点は、不攪乱試料の計測が可能であり、一つ

の試料を用いて含水量を変化させながらサクシオンならびに比抵抗の測定ができるようにした点である。

2. 水分特性曲線の吸排水過程で、サクシオン、体積含水率と比抵抗変化率との相関性について検討した。サクシオンと比抵抗変化率との関係は吸排水過程で全く異なる曲線を描き、吸水過程の飽和度が高い領域で両者は直線性を示す。体積含水率と比抵抗変化率との関係もやはり吸排水過程で異なる曲線を描き、吸排水過程での違いを明確にした。曲線の形状は Archie 式に代表されるようにべき関数に近いものであるが、対数関数での回帰が最も一致する。現場へ適用していく場合は精度は悪いが Archie 式が取扱い易い。しかし、排水過程では使用できない。

3. 土層を用いた降雨浸透実験では Archie 式を利用して相対的な比抵抗値の変化を表現することにより、雨水が土中に浸透していく過程を経時的に表すことが概ね可能となった。現段階では、接触電位問題のため、計測値を体積含水比に変換するには精度的な問題点が多いが、各計測値の変化状況と水面位置の相対的な関係に於いて十分に水分変化を捕らえていると考えられる。したがって、斜面等の現場に於ける雨水の不飽和浸透状況を把握する手法として、適用の糸口をつかんだと考えられる¹⁴⁾。

謝辞：本研究を進めるにあたり、九州大学工学部資源工学科の佐々木祐先生ならびにダイヤコンサルタントの井上誠氏に数多くの御援助を頂いた、末筆ながら謝意を表すものである。

参 考 文 献

- 1) 例えば、不飽和土の工学的性質に関する研究委員会：不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム，土質工学会，pp.259～370，1987。
- 2) 風間秀彦・芥川真知・滝沢太郎：降雨に伴う砂質土の強度低下と斜面の不安定化，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム，pp.267～274，1987。
- 3) 新藤静夫：谷頭部斜面に発生する崩壊と地中水の挙動，文部省科学研究費・自然災害特別研究報告書，1983。
- 4) カークビー：新しい水文学，朝倉書店，pp.64～104，1983。
- 5) 例えば，池田和彦：土と基礎の物理探査，土質工学会，p.101，1981。
- 6) Archie, G.E. : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, AIME, Vol.146., pp.54～62, 1942.
- 7) Archie, G.E. : Electrical resistivity as an aid in core analysis interpretation, Bull. Am. Assoc. Petroleum Geol. AIME, Vol.31, No.2, pp.350～366, 1947.
- 8) 茂木透・菅野強・佐々宏一・吉住永三郎：砂のせん断強度及び透水性と比抵抗，土質・岩盤物性調査への物理探査技術の応用・分化研究会，pp.1～3，1979。
- 9) 西垣誠：飽和・不飽和域内の土中水の浸透特性に関する2, 3の考察，土木学会論文報告集，Vol.23, No.3, 1983。
- 10) 日本鉄道施設協会編：地質調査標準示方書，pp.72～73，1983。
- 11) 井上誠：地表面の降雨による比抵抗変化の測定法，昭和63年度物理探査学会講演講演概要。
- 12) 河野伊一郎・西垣誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.307, pp.59～69，1981。
- 13) 西田一彦・青山千彰・堀川昌裕・西宏之：不飽和浸透計測への電気探査法の適用，土木学会年次学術講演会講演概要集，第Ⅲ部，pp.896～897，1991。
- 14) 西田一彦・青山千彰：平成3年度防災工学研究報告書，関西大学工業技術研究所，pp.1～50，1982。

(1991.12.12 受付)

THE CHARACTERISTICS OF RESISTIVITY OF THE UNSATURATED SOIL AND THE APPLICATION OF ELECTRIC PROSPECTING FOR EVALUATION OF SEEPAGE FLOW THROUGH THE GROUND

Kazuhiko NISHIDA and Chiaki AOYAMA

The measurement of the moisture distribution within a soil layer during permeation of water is much more important for understanding of the flow mechanism throughout a profile of the unsaturated ground. However no adequate methods has been developed yet. The authors proposed an electric prospecting system applicable to this purpose.

The relation between resistivity and volumetric moisture content, and the resistivity changes with moisture contents both for unsaturated soil specimen and for a model ground have been examined in detail.

Following conclusions were derived from the present study ;

- 1) The relation between the volumetric moisture content and resistivity shows the differential curves in the process of wetting and drying.
- 2) Archie's formula is valid for expressing the wetting process, and useful in transforming the values of resistivity into those of volumetric moisture contents.
- 3) The field examinations showed a possibility of application of this method to evaluate the two dimensional unsaturated flow within the ground.