

電導コーンの開発とその応用

福江正治¹・田屋直美²・松本 基³・酒井 豪⁴

¹正会員 Ph. D 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 清水市折戸3-20-1)

²工修 興亜開発株式会社 関東支店 環境部長 (〒130-0022 東京都墨田区江東橋5-3-13)

³興亜開発株式会社 関東支店 技術部 (〒130-0022 東京都墨田区江東橋5-3-13)

⁴工修 りんかい建設株式会社 広島支店 (〒730-0032 広島市中区立町1-22)

地盤層序の決定や地盤汚染域検出を目的として、コーン貫入試験機のコーン上端ロッド部に電極を取り付けた電導コーンを開発した。地盤の比抵抗を深さ方向に連続的に調べるために、異なるロッド径や電極配置に対する比抵抗と電位差の関係を理論的に導き、同じ土試料を使用した次元電流実験によって、その適用性を調べた。その結果、導いた理論的關係が妥当であることがわかった。また、室内実験によって電導コーンの有用性を確認し、原位置測定を実施した。その結果、電導コーンによって測定される地盤の比抵抗が地盤の種類を極めてよく反映し、層序決定や地盤汚染域の検出装置として有効な試験機となることがわかった。

Key Words: *in-situ test apparatus, cone penetration, resistivity, clay, sand, contaminated soil, water content, void ratio, electrolyte concentration*

1. まえがき

地盤の電導特性は、間隙水の電導特性や土の構造特性によって、変化することがよく知られている。そこで、従来のコーン貫入試験機のコーン上端ロッド部に電極を取り付け、貫入時に地盤の比抵抗を測定することによって詳しく地盤特性を把握できる装置を開発した。その主な応用として、次のことが考えられる。

(1) 地盤が重金属、各種電解質または有機溶剤で汚染されたところとそうでない場所では、電導特性が異なると考えられる。したがって、比抵抗の深度分布を調べることによって汚染ブルームの検出を行う。

(2) 一般には、砂質土と粘性土では比抵抗がかなり異なることから、比抵抗値からその判別を行い、層序の決定に役立てる。

したがって、本研究では、地盤調査を効率よく行うために、予備調査やボーリング調査の補間の手法として、手軽にしかも低コストで地盤汚染域(汚染ブルーム)を検出でき、また地盤層序を決定できる測定装置の開発を行うことを目的とする。

2. 既往の研究

土や岩石の比抵抗は、物理探査の分野で古くから研究されている。Archie¹⁾(1942)は石油貯留層の調査を目的として、NaCl溶液(濃度20~100g/l)を間隙水としてもつ飽和砂岩(間隙率10~40%)の比抵抗を測定し、地層と比抵抗について次の関係式を得た。

$$\rho = F \rho_w$$

$$F = n^{-m}$$

ここに、 ρ : 岩石の比抵抗、 F : 地層比抵抗係数、 ρ_w : 間隙水の比抵抗、 n : 有効間隙率、 m : 固結係数である。

Archieの関係式について多くの追従する研究が行われた。Patnode and Wyllie²⁾(1950)は、粘性土の地層係数が間隙水の比抵抗によって変化することを指摘した。この指摘に対し、Wyllie and Southwick³⁾(1954)、およびWaxman and Smith⁴⁾(1968)らは、粘土粒子表面付近に電解質イオンの吸着層が存在するために、粘土粒

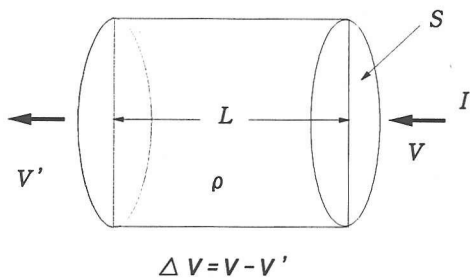


図-1 物体中の電気の流れ

子の過剰電導性が現れると考えた。この現象について、山口⁵⁾(1962)や西川⁶⁾(1950)は、粘土粒子-間隙水の界面には、常にこのような現象が存在し、粒子の比表面積が大きいときや間隙溶液の電気伝導率が小さいときに顕著に見られ、砂であってもこのような現象が起こることを述べた。しかし、千葉・熊田⁷⁾(1994)は、花崗岩や凝灰岩において間隙水の比抵抗値が $0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 程度であれば表面電導の影響はほとんど無視できるとしている。

関根ら⁸⁾(1996)は、前述したような電流電導経路であるならば、岩石の比抵抗は体積含水率によって一意的に決まる可能性があるとし、岩石の力学特性と比抵抗の関係を実験的に調べた。また、Olhoeft⁹⁾(1985)は電流の周波数によっても比抵抗が変わることを指摘した。

Campanella *et al.* (1990)¹⁰⁾(1993)¹¹⁾ はコーン貫入試験機に比抵抗測定装置を取り付け、それによって地盤内の比抵抗変化を調べた。この研究では、コーン貫入試験によって地盤汚染検出が可能としている。

これらのことから、土の比抵抗は、固体成分と間隙水の比抵抗、これら成分の割合(間隙率・間隙比・密度)、粒径や粒径分布を含む骨格構造特性、土粒子の表面電荷特性、電流周波数などに関係すると思われる。

本研究では、Campanella ら^{10), 11)}と同様な電導コーンを作製し、彼らが必要とした実験のキャリブレーションを不要にするために、コーン周辺の電場について比抵抗-電流-電位差の理論的關係を求め、また電極間隔を可変とできる装置の開発を目的とした。

3. 電導コーンによる比抵抗測定の原理

(1) 基本原理

図-1のように、電流 I がある比抵抗 ρ を持つ物体中を電圧差 ΔV で一次的に流れるとき、電流、電位差および比抵抗の關係は、オームの法則に従って次の

コーン型比抵抗測定装置(Aタイプ)



図-2 電導コーンの電極配置図

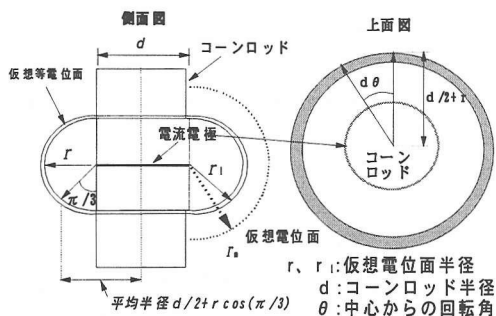


図-3 コーン周辺の電場

ように表せる。

$$\rho = \frac{S}{L} \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

ここに、 ρ : 比抵抗, S : 電流の流れる断面積, L : 電流の流れる距離, ΔV : 電位差, I : 電流である。

(2) コーンロッド周辺の電位差と比抵抗の關係

本研究で開発した比抵抗測定装置は 図-2 のようにコーン貫入試験装置の上端ロッド部に電流電極 A, B と、その間に電位電極 M, N を設け、この M-N 間の電位差を測定する方式である。この装置を電導コーンと呼ぶことにする。電極 M-N 間における電位差は、式(1)で求められるが、実際には 図-2 のような境界条件における使用電流と測定電位差の關係が必要になる。本研究では、 図-1 の一次元電流を用いた室内実験から得られる土の比抵抗と等価な値を得るために、 図-2 の条件における比抵抗と電位差の理論的關係を導いた。

コーンロッド周辺地盤が等方かつ一様であり、電極 B が無限の距離にあると仮定する。このとき、等電位面を、 図-3 のように電極 A を中心とする半径 r の半円形の広がりとして表す。実際は、電極が点電極でなく直径 d のコーンロッドの円周上に位置しているため、等電位面の断面形は半円からいくらか歪むと考えられる。しかし、その歪みは小さいと考え、ここでは半円形と仮定する。

したがって、求める等電位面の面積 S は、**図-3** に示すように、電極を中心とし、コーンロッド側面に垂直な半径 r の半円を、コーンロッドの中心にコーンロッドの周りに回転させたときの表面積である。**図-3** の右図で、回転角 $d\theta$ に対応する仮想等電位面の面積は、 $\pi r \{ d/2 + r \cos(\pi/3) \}$ と $d\theta$ の積となる。したがって、断面積 S は次式で表される。

$$S = 2\pi r \left\{ \frac{d}{2} + r \cos \frac{\pi}{3} \right\} \int_0^{\pi} d\theta$$

$$= \pi^2 r (d + r) \quad (2)$$

図-3 に示す電極から電流 I を流し、電極からの距離 r と r_1 との等電位面間の電位差を求める。ただし、もう一つの電極は無限の位置にあるものとし、そこでの電位は 0 とする。このときの電流、電位および比抵抗の関係は式 (1) と (2) から次式で表せる。

$$\Delta V = \rho \frac{L}{\pi^2 r (d + r)} I = \rho L i \quad (3)$$

ここで、 $L = r_1 - r$ 、 $r_1 \doteq r$ であるから、 S を求めるときの距離は r 、 r_1 のどちらでもよい。したがって、式 (3) は次のように表せる。

$$\Delta V = \rho \frac{r_1 - r}{\pi^2 (dr + rr_1)} I \quad (4)$$

式 (4) の分母、分子を rr_1 で除し、次式を得る。

$$\Delta V_1 = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1/r}{(d/r + 1)} - \frac{1/r_1}{(d/r_1 + 1)} \right\} \quad (5)$$

式 (5) を求めたのと同様に、 r_1 と r_2 の電位差は次式となる。

$$\Delta V_2 = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1/r_1}{(d/r_1 + 1)} - \frac{1/r_2}{(d/r_2 + 1)} \right\} \quad (6)$$

また、式 (5) および (6) を得たと同様に、それぞれ r_2 と r_3 、 r_3 と r_4 、 \dots 、 r_{n-1} と r_n についての ΔV_i を得ることができる。ここで、半径 r の円周上の任意点の電位を求めるには、 r から無限長 r_n までの全電位差を加えなければならない。したがって、半径 r の距離にあるその点の電位は、次式で表せる。

$$V_r = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_n \quad (7)$$

求めた ΔV_1 から ΔV_n を式 (7) に代入すると、

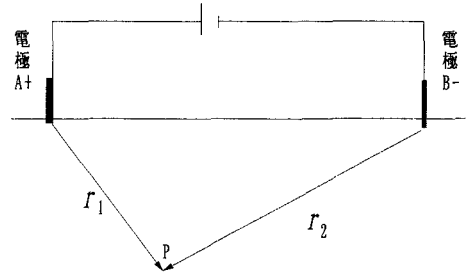


図-4 有限電極間の電位差

$$V_r = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1/r}{(d/r + 1)} - \frac{1/r_1}{(d/r_1 + 1)} + \frac{1/r_1}{(d/r_1 + 1)} - \dots + \frac{1/r_n}{(d/r_n + 1)} \right\} \quad (8)$$

したがって、

$$V_r = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1}{d + r} + \frac{1}{d + r_n} \right\} \quad (9)$$

ここで、 r_n は無限であるから、式 (9) の右辺第 2 項は 0 となり、式 (9) は次のように簡単になる。

$$V_r = \frac{\rho I}{\pi^2} \frac{1}{d + r} \quad (10)$$

これにより、無限に広がる電場において、電極から任意の距離にある点の電位を求めることができる。次に、有限の電極間の電位は、以下のように求めることができる。**図-4** に示すように、正の電極 A によって生じる P 点の電位 V_{PA} は、式 (10) を用いて以下のように表せる。

$$V_{PA} = \frac{\rho I}{\pi^2} \frac{1}{d + r_1} \quad (11)$$

同様に負の電極 B による P 点の電位 V_{PB} は次式で表せる。

$$V_{PB} = \frac{\rho I}{\pi^2} \frac{-1}{d + r_2} \quad (12)$$

したがって、P 点の電位 V_P は次式で表せる。

$$V_P = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1}{d + r_1} - \frac{1}{d + r_2} \right\} \quad (13)$$

今回使用するコーン貫入試験装置は**図-5** に示すよう

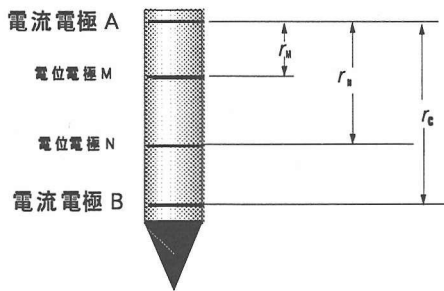


図-5 電導コーンの電極配置

な電極配置をもつ。図中、 r_M は図-4のP点が電極A-B線上にあるとき r_1 に等しい。また、各電極間距離が等しいとき $r_2 = r_C - r_M = r_N$ である。ここで、M極とN極間の電位差を表すには、まずM極とN極の電位を表す必要がある。したがって、電流を I 、電流の通る物質の比抵抗を ρ とすると、M極の電位は式(13)より次式で表せる。

$$V_M = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1}{d + r_M} - \frac{1}{d + (r_C - r_M)} \right\} \quad (14)$$

同様に、N極の電位は次式で表せる。

$$V_N = \frac{\rho I}{\pi^2} \left\{ \frac{1}{d + r_N} - \frac{1}{d + (r_C - r_N)} \right\} \quad (15)$$

したがって、M、N間の電位差 ΔV は次式で表せる。

$$\Delta V = V_M - V_N \quad (16)$$

これにより、電流の通る物質の比抵抗 ρ は、次式で表せる。

$$\rho = \frac{\pi^2 \Delta V}{C I} \quad (17)$$

ただし、

$$C = \frac{1}{d + r_M} - \frac{1}{d + (r_C - r_M)} - \frac{1}{d + r_N} + \frac{1}{d + (r_C - r_N)} \quad (18)$$

ここに、 ΔV は電極A、B間に電流 I (A)を流したときのM、N極間の電位差(V)である。また、測定される電位差と使用された電流 I を式(17)に代入することによって、測定対象となる地盤の比抵抗 ρ を算出できる。

表-1 土試料の物理特性

試料名	土粒子 度(g/cm ³)	粒 径 (μ m)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)
硅砂	2.640	5~300	—	—
木節粘土	2.720	D ₅₀ = 3	43.8	16.9

ここで、式(18)で算出されるC値は、電極部分のコーンロッドの直径 d 、各電極間の間隔 r_C 、 r_M 、 r_N の関係で表されるが、式(18)を誘導する際に、電場はコーン側面の垂直方向に半円状に広がると仮定したことにより、実際の値との誤差が問題となる。そこで、この誤差が許容範囲内にあるかどうかを検討する必要がある。本研究では、圧密試験器を改良した試験装置によって電流の流れが一次元の測定を行い、コーン型装置を用いた結果と比較する。

4. 室内試験

本研究では、電導コーンの基本特性を調べるため、原位置測定の前に室内実験を行った。

(1) 試料の物理特性

測定に使用した土試料は、一般に市販されている木節粘土と硅砂(7号)である。この2種類の土試料の物理特性を表-1に示す。

なお、硅砂に含まれる不純物を取り除くため、75 μ mのふるいを使用し蒸留水で洗浄した。

間隙水に電解質が含まれると比抵抗が変化する。本研究では、間隙溶液として蒸留水およびKCl溶液を用いた。KCl溶液は、濃度0.003~30g/lの計5種類である。

(2) 実験装置および実験方法

a) 電導コーンの場合

原位置で土の比抵抗を測定する装置として、現在使われている三成分コーン貫入試験装置に比抵抗を測定するための電極を取り付けた原位置試験装置(電導コーン)を作製した。

電導コーンの概略を図-6に示す。電導コーンはロッドにテーパーを付けたもの(Aタイプ)と、付けないもの(Bタイプ)の2種類を製作した。Aタイプは、肉厚5mm、外径25mmのステンレス製ロッドを軸芯とし、それに絶縁カラーと電極を取り付けた構造を持つ。また、Bタイプには、肉厚3.5mm、外径20mmのロッドを用いた。これによって、電極と地盤の密着度の影響

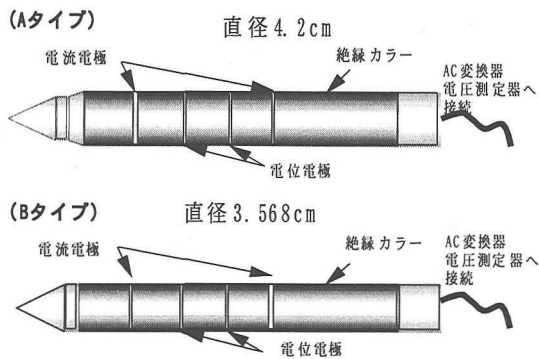


図-6 電導コーン概略図

表-2 比抵抗測定コーン装置の試験条件

条 件	r_M (cm)	r_N (cm)	r_C (cm)	d (cm)	C値 (1/cm)
A タ イ プ	CASE1 5.25	10.5	16.0	4.2	0.074
	CASE2 3.25	6.5	10.0	4.2	0.079
	CASE3 2.25	4.5	7.0	4.2	0.078
	CASE4 1.25	2.5	4.0	4.2	0.065
B タ イ プ	CASE5 5.25	10.5	16.0	3.57	0.083
	CASE6 3.25	6.5	10.0	3.57	0.092
	CASE7 2.25	4.5	7.0	3.57	0.093
	CASE8 1.25	2.5	4.0	3.57	0.082

を調べる。すなわち、Aタイプではコーンロッド径が大きいので、Bタイプより密着性に優れていると考えられる。比抵抗測定用の電極は、分極による誤差を防ぐために4極とした。2極法では、電極で電気化学的变化が起これ、イオンによる分極が起これ一定の比抵抗が得られない。このような分極現象はDC電流で低周波数の場合に顕著に現れる。

電極は厚さ5mmの黄銅製で、絶縁カラーには硬度に優れたMCナイロンを使用した。なお、地盤測定に最適な電極間隔を使用するために、電極間隔 r_M を1cm刻みで変更可能にしてある。

室内実験は、コーン部を図-7のように土槽内に設置し、所定の含水比の土試料を入れて行った。土槽は円形断面を有し、その直径は約45cmである。そのときの測定条件を表-2に示す。

2種類の試験装置にそれぞれ電極間隔を4段階に変え、計8ケースの測定を行った。また、試験には主に砂砂を使用し、木節粘土についてはCASE1についてのみ実験を行った。なお、電流として、AC-0.01~200mAの間を16段階に変えた。

Olhoeft⁹によると、周波数の違いによって測定される比抵抗が異なることがわかっている。一般的には、3kHz以上の周波数では比抵抗測定値に誘起効果が含まれ、低周波では分極が起これるとされている¹⁰。この

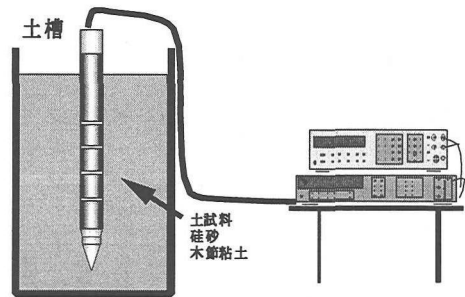


図-7 電導コーン室内試験装置概略図

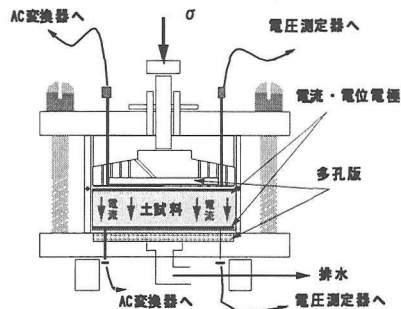


図-8 圧密試験器を用いた比抵抗測定装置概略図

ような理由から本研究では、Campanellaら¹⁰が用いた周波数と同じ1000Hzを用いた。

なお、電圧測定装置(HEWLETT PACKARD HP3457)に電流周波数変換器(HEWLETT PACKARD HP3245A)を接続して電位差をはかった。

b) 圧密試験装置の場合

本研究では、補助実験として圧密試験型比抵抗測定装置を作製した。この測定装置は、一次元電流場における土試料の電導特性を知ることが主目的として、装置の測定限界、測定精度および原位置試験で用いるコーン貫入試験装置のためのキャリブレーションなどを得るために開発された。この装置を図-8に示す。なお、この方法では、a)式(1)を直接適用できる、b)試料が少なくても実験が行え、しかも簡単である、などの利点がある。以後、この装置を圧密セルと称す。圧密セルは、セル側面部分をアクリル樹脂、上下排水載荷板の試料面側にステンレス製メッシュの電位、電流電極を取り付け、電流の流れが一次元となるようにしてある。これによって、土供試体上下面の電位差を測定できる。

電導コーンの場合と同様に、電流は0.01~200mAの範囲を16段階に変え、分極による誤差を防ぐために交流電流(AC)を使用した。周波数は1000Hzとした。また、比抵抗は測定した電位差から式(1)によって計算した。

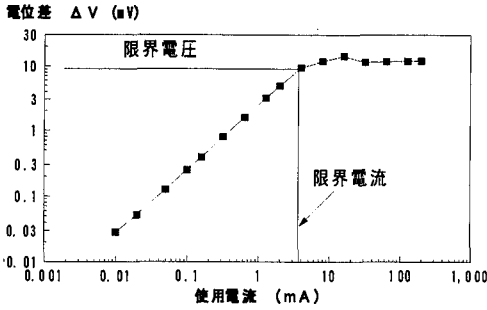


図-9 電位差と使用電流の関係 (硅砂: $w=21\%$)

測定に当たっては、電流、電位電極と試料の接触を確かなものとするため、載荷板に 670 N/m^2 の荷重を載せた。この荷重では供試体の圧密沈下は微小である。特に砂試料では圧密は起こらないので、測定中の間隙比変化はない。

5. 室内試験の結果と考察

(1) 電導コーンの結果

図-9に測定した電位差と使用電流の関係 (CASE 1・硅砂) の一例を示す。図-9の右上がりの直線部は式(17)によって計算すると、一定の比抵抗が得られる部分である。また、電流の値が大きくなると測定電位差が一定になるのは、測定器の測定限界による。なお、試料の硅砂はよく洗浄し、間隙水として蒸留水を用いた。

図-10は、式(17)によって電位差から比抵抗を計算し、比抵抗と電流の関係を求めたものである。図から見られるように、電導コーンから得られた比抵抗が一定となるための電流には、下限値と上限値がある。下限値は約 0.1 mA である。一方、上限値は比抵抗、すなわち電位差によって異なる。一般に、比抵抗が低いほど、上限値は大きくなる。これは、先に述べたように電位差測定器の限界による。

図-10は、含水比が土の比抵抗に与える影響をも示す。これについては、他の結果を加えて後述する。室内試験の結果からは、図-12で説明するように、コーンのタイプ、電極間隔などについてほとんど違いが見られなかった。これは使用した試料が均質であったことによると思われる。もし、厚さが数cmごとに異なる土層について同様の実験を行えば、違いが出てくるものと思われる。

(2) 圧密セルの場合

図-11は、圧密セルを用いて硅砂(蒸留水)につい

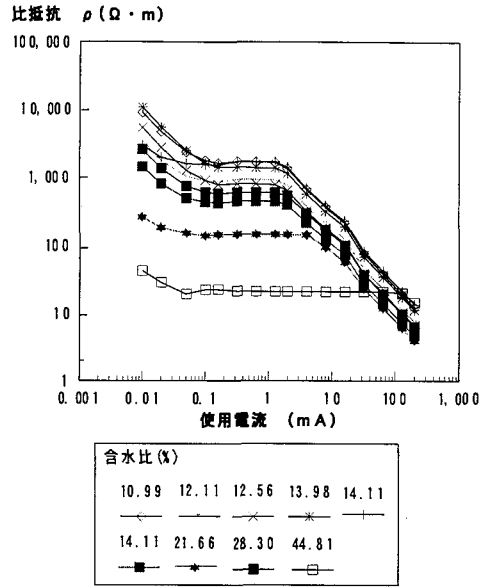


図-10 電導コーンの場合の硅砂における比抵抗と使用電流の関係 (CASE 5)

て行った測定結果を示す。電導コーンと同様に測定限界として上限値と下限値がある。砂では比抵抗が大きいので、一般に測定可能な電流範囲が狭い。その値は約 $0.1 \sim$ 数 mA である。したがって、 $0.1 \sim 2 \text{ mA}$ の電流を使用すれば、電導コーン、圧密セルとも結果にそれほど影響はないと思われる。

また、次に述べるように、電導コーンと圧密セルを用いた場合、土試料が同じであれば測定結果に違いはほとんどない。

(3) 電導コーンと圧密セルを用いた実験結果の比較

一般に土の固体成分と液体では、液体の方が電気を通しやすく、液体部分について比抵抗をはかっていることになる。したがって、同じ間隙比なら、含水比が高いほど比抵抗は小さくなる。また、飽和土においては、固体成分が多いほど、すなわち密度が高いほど、比抵抗は高くなる。

図-10および11に示す結果はこれらのことを示す。図中に示す結果が必ずしも含水比に対応して変化していないのは、含水比が同じでも、飽和度が異なる場合や、密度(間隙比)が異なることによる。また、構造骨格の違いも比抵抗値に影響すると思われる。とくに、硅砂の比抵抗が $10,000 \text{ Ω} \cdot \text{m}$ を越える場合は、電極の付近に空気が混入したと考えられる。また、 $100 \text{ Ω} \cdot \text{m}$ 以下の場合には電極の周りの砂が極めて粗な状態にな

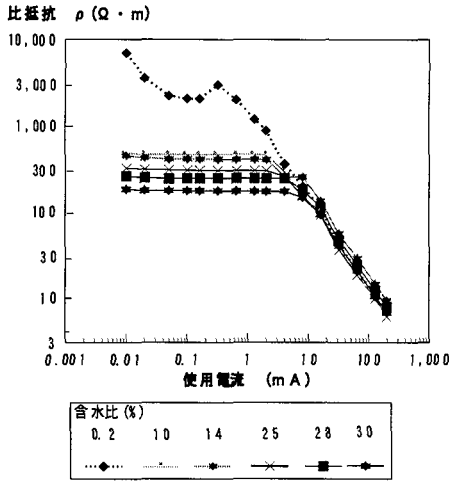


図-11 圧密セルの場合の砂における比抵抗と使用電流の関係

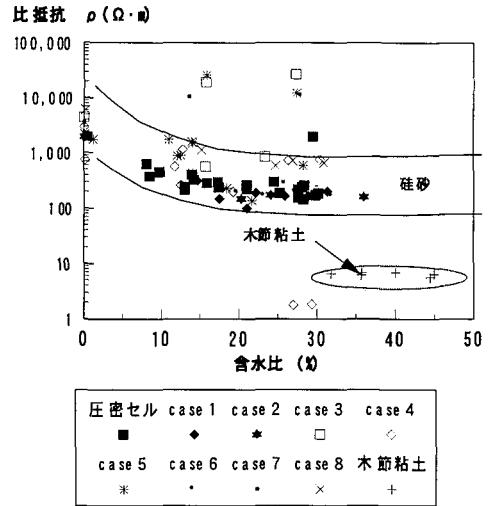


図-12 電導コーンと圧密セル実験の比較
-含水比と比抵抗の関係(0.1 mA)-

ったと考えられる。これらを総合的に考えると、比抵抗と含水比の関係は、例外的なものを省くと、図-12の曲線で示した範囲にあると考えられる。

図-12は、砂と木節粘土について電導コーンと圧密セルの両方から得た含水比と比抵抗の関係を示す。なお、図中に木節粘土として囲ったもの以外はすべて砂について得た結果である。また、CASE 1～8は表-2に示したように、コーンのタイプと電極間隔に関係する。したがって、図-12は、先に述べた含水比の増大に伴う比抵抗の低下をよく示している。また、電導コーンと圧密セルによって調べた比抵抗が同種の土に対してほぼ同じ値を示している。このことは、電導コーンによって現場の土の比抵抗が得られることを示し、またコーンのタイプや電極間隔の影響がほとんどないことを示している。

室内実験測定結果からは、例外を除き砂の比抵抗範囲は $140 \Omega \cdot m$ 以上であるのに対し、木節粘土は $5 \sim 7 \Omega \cdot m$ である。これは粘土の方が砂に比べて間隙比が大きく、含水比が高いために比抵抗が小さくなったためと、また木節粘土にもともと含まれていたイオンが加えた蒸留水に溶けだし、粒子表面に吸着された結果表面電導を起こした⁴⁾と考えられる。いずれにしても、固体成分に比べて間隙水の電導性が十分高い場合には、次の傾向が明らかである。

- a) 比抵抗は間隙水の比抵抗に依存する。ただし、見かけの比抵抗であるので間隙率の関数となる。
- b) 不飽和土の場合、間隙空気存在のために、比抵抗は大きい。
- c) 飽和度が高くなるほど比抵抗は小さくなり、飽和含

水比が高いほど比抵抗は小さい。

d) 一般に比抵抗は次の順で小さくなる。

乾燥砂>>不飽和砂>>密な飽和砂>>緩い飽和砂>>不飽和粘性土>>低含水比の飽和粘性土>>高含水比の飽和粘性土

ただし、間隙水が電解質を含む場合や有機溶剤などを含む場合は、その影響が大きいため、上の関係は成立しない。電解質が含まれると比抵抗は下がり、また電気を通しにくい有機溶剤が含まれると、比抵抗は大きくなると予想される。

(4) 電解質が比抵抗に与える影響

土が電解質で汚染されると、比抵抗は下がる。ここでは、間隙水としてKClを含む場合について実験的に検討した。

地盤中には既に天然のイオンや種々の化学物質が含まれている。また、海水が進入している場合もある。したがって、そのような場合、人為的に混入した汚染物質と天然のそれらを比抵抗から区別するには、たとえばバックグラウンド値が必要となる。方法的には幾つかの選択肢が考えられるものの、本研究ではそれ以前の問題として、電解質濃度が比抵抗に与える影響について調べる。なお、汚染地盤の原位置処理の効果を比抵抗から見るときは、比抵抗の経時変化を調べることになるので、上記の問題は重要ではなくなる。

図-13および14は、それぞれ砂および木節粘土の比抵抗と使用電流の関係を示す。砂、木節粘土とも、

電流の違いによる比抵抗は間隙水が蒸留水の場合と似た傾向を示す。しかし、蒸留水と間隙水として高濃度の KCl (30g/l) を含む場合を比べると、ほぼ同じ含水比において、珪砂では3オーダー、また木節粘土では1オーダー比抵抗が異なることがわかる。すなわち、間隙水の電気伝導度が高くなるに従い比抵抗は減少する。これらのことは、重金属元素や塩など電気伝導度の高い物質が間隙水に含まれたり、またそれらが土粒子表面に吸着されると、それによって比抵抗が下がることを意味する。したがって、これらの物質で汚染された地盤内領域では、比抵抗が相対的に小さいはずである。つまり、地盤内で汚染域を検出するには、比抵抗が相対的に低い領域を検出できるかどうかにある。実際には土質の違いによって比抵抗が大きく変わるので、まず層序を決定し、同一層内で相対的な比抵抗の違いがあるかどうかを検討することから始まる。

図-15 は珪砂 1 kgあたりに含まれるKCl濃度と比抵抗の関係の例を示す。図から、KCl濃度が1 ppm程度変化する場合でも、比抵抗が相当変化することがわかる。なお、この場合の濃度は加えたKCl濃度と珪砂の含水比を用いて計算した。

いずれにしても、その土が汚染されていない場合の比抵抗値(バックグラウンド)がわかるかどうか、汚染されているかどうかの評価につながる。これらについては今後の課題として残る。

6. 原位置実験

(1) 実験場所

電導コーンの適用性について、茨城県那珂湊市下大野町的那珂川河川敷の脇にある水田において、原位置測定実験を行った。位置決定には、同地のボーリング調査の資料が存在すること、およびコーン貫入試験に適した土層であったことを考慮した。なお、測定前の数日間は降雨がなく、表層はやや乾燥状態にあった。また、地下水面は地表面から-65cmであった。

(2) 原位置実験の方法

実験は条件を変えて次の6回行った。その実験条件を表-3に示す。なお、各CASEについての条件は表-2に示すとおりであるが、CASE1-1と1-2、5-1と5-2はそれぞれ同じ条件で場所を変えて2度貫入を行ったことを示す。

電流はACを用い、周波数はすべて1000 Hzとした。

表-3の使用電流の決定については、室内実験の結果から測定装置のほぼ測定限界と考えられる0.1~1.28 mAの最大値(1.28mA)および最小値(0.1mA)を使用した。

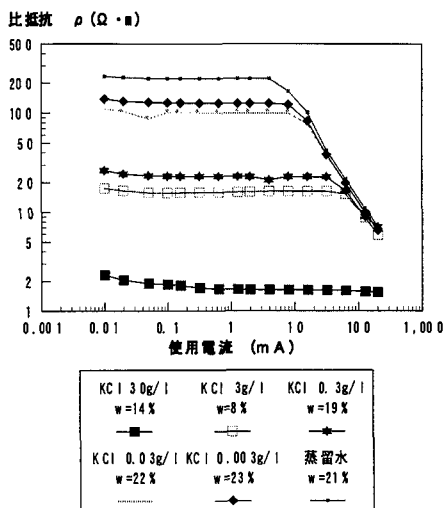


図-13 比抵抗と使用電流の関係(珪砂・各種KCl溶液)

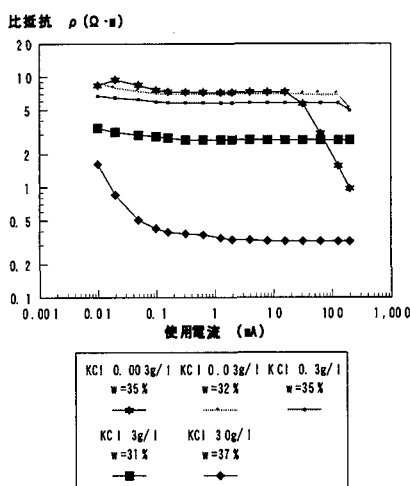


図-14 比抵抗と使用電流の関係(木節粘土・各種KCl溶液)

表-3 原位置実験条件

CASE	最大深さ (m)	使用電流 (mA)
1 -1	6	1.28
1 -2	19	0.1
4	18	0.1
2	21	0.1
5 -1	6	0.1
5 -2	2	0.1

CASE 1-1 CASE 1-2 CASE 4 CASE 2 CASE 5-1 CASE 5-2
 1.28mA 0.1mA 0.1mA 0.1mA 0.1mA 0.1mA

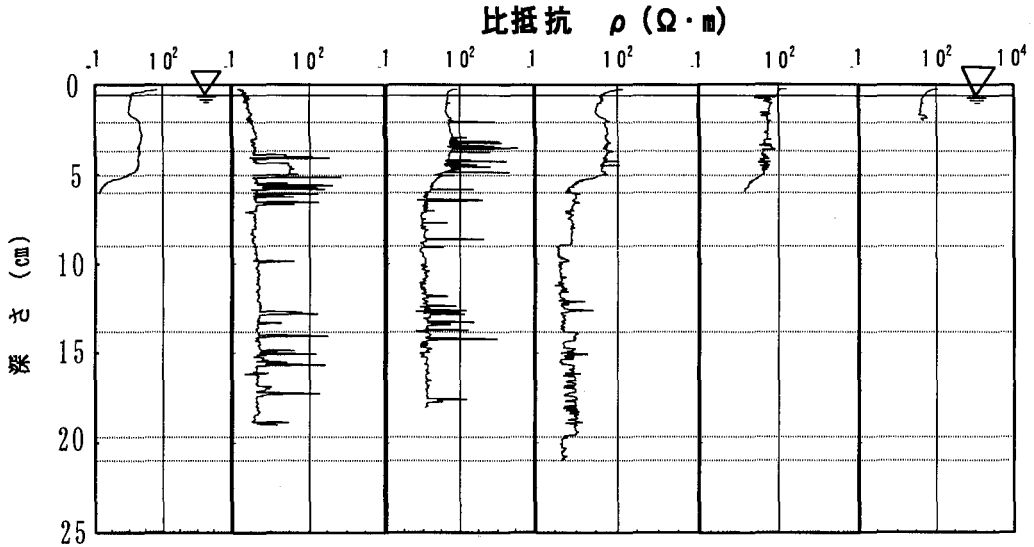


図-16 原位置測定による深さと比抵抗の関係

貫入位置は表-3の上から順に川方向に約60cmほど直線上に移動させた。貫入速度は、あらかじめ行ったボーリング調査から地層変化の激しい約0~6mを細かく測定するため、通常の貫入速度より遅い0.4cm/sとし、それより下層では1cm/sとした。なお、原位置試験では、表層付近に細砂層が存在するが、電導コーンの貫入に特に問題はなかった。また、絶縁カラーおよび電極の摩耗は見られなかった。

(3) 原位置実験の結果

原位置測定結果を図-16に示す。CASE 1-1は、電極間隔5.25cmのAタイプコーンを用いた場合の結果を示す。これを見ると、深さに対する比抵抗の傾向は、CASE 1-2を除いて他の場合とほとんど一致するが、比抵抗の値そのものは他の場合に比べ相対的にやや低い。これについては、測定位置の違いによる土質の違いとも考えられるが、他の測定では使用電流を0.1mAとしたのに対し、ここでは1.28mAを用いたためと考えられる。すなわち、CASE 1-1の場合、電流が測定限界に近い。

CASE 1-1と同じ条件で場所を変えたCASE 1-2については、表層の比抵抗値が他のケースと若干異なっている。しかし、深部において他のケースとさほど違いがないことから、表層部の土質または含水比などが他の位置とは異なっていたのであろう。

CASE 1-2およびCASE 4では比抵抗の急激な変化を示

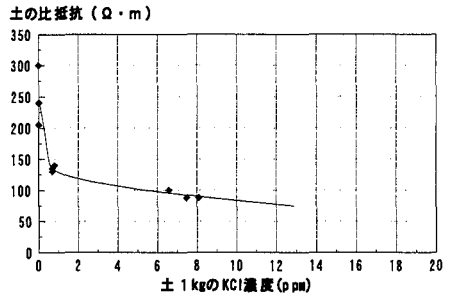


図-15 低濃度のKClを含む場合の土の比抵抗

している。このほかのCASEでもその傾向はみられるが、それほど顕著ではない。これについて、表-2に示す条件から考えると、コーンタイプや電極間隔によるものではないことがわかる。現時点では図-17に示すように比較的均質なシルト層でこのような突出した比抵抗変化が見られないことから、砂や貝殻片の介在が影響しているものと考えられる。

そのほかの場合は、傾向、値ともに概ね一致しており、次のことがいえる。

- a) 地下水位より上の表層部(約65cm)は不飽和土であるためか、粘土であるにも係わらず比抵抗が大きい(最大100Ω·m)。
- b) 深さ約5mまでは比抵抗が約70~80Ω·mと相対的に大きい値を示す。

c) 深さ約 5 m から比抵抗は約 $10 \Omega \cdot m$ まで急激に下がり、7 m 以深から増加の傾向にある。

図-17は 電極間隔が最も狭いCASE 4 の場合の試験結果とボーリング柱状図を比較したものである。この図に示すように、ボーリング柱状図と比抵抗から推定した土層図を比較すると若干の違いがある。たとえば、深さ約 3 m のシルト（黒灰色）層は、比抵抗から考えると上の細砂層とそれほど変わらない。したがって、このシルトで表された土層は細砂である可能性もある。ただし、この違いがボーリング調査地点と電導コーン貫入位置の違いによることも考えられる。また、この層ではコーン貫入時に比抵抗が瞬間的に大きくなる。この原因ははっきりしないが、貫入時に砂を挟んだような感触が得られたことから、先に述べたように砂-シルトの互層と考えている。同様なことが、深さ約 13 m 付近でみられる。この深さでは貝殻片や雲母片が混入しているのがボーリング調査から確認されている。

深さ約 7 m 以深では、比抵抗の対数値が深さ方向にほぼ直線的に増大することは既に述べた。これは、均質な土の場合、深いほど有効土被り圧が大きいので、圧密によって間隙比が減少する過程を示すものと思われる。このことは、次のことから推察される。

一般に、土の比抵抗は間隙比 e が減少するにしたがい増大するが、粘土の圧密中に比抵抗を測定すると、 $\log e - \log \rho$ 関係は 図-18 のようになる。この関係は図に示すように、ほぼ直線となる。なお、図-18 は本研究で開発した圧密セルを用い、蒸留水で練り返した木節粘土の標準圧密試験を行いながら比抵抗をはかった結果である。

電導コーンで測定可能な地盤の範囲は、図-3に示したように電流電極の間隔 r_c を直径とする半円内と考えられる。すなわち、ロッド周面から外側に $r_c/2$ までの土の比抵抗が測定できるものと思われる。今回用いた電導コーンの場合、表-2に示すように、 $r_c/2$ は 2 ~ 8 cm である。したがって、電極間隔が大きいほどロッド周面から測定できる範囲が広がり、またコーン貫入による土の乱れの影響が軽減されると思われる。その反面薄い層の検出が難しくなる。コーン貫入による乱れの影響については今後検討の余地があるが、細粒土の場合、貫入時は非排水条件とみなされるので、含水比変化は無いと考えることができる。

このことから、図-17 の深さ 7 m 以深でみられる比抵抗の増大は含水比および間隙比の減少によると考えられる。したがって、間隙比と比抵抗の関係が明らかな場合、比抵抗値から間隙比の推定が可能となるので、電導コーンによって飽和土の間隙比や含水比を推定できる可能性がある。

上記のことから、電導測定部を三成分コーン貫入試

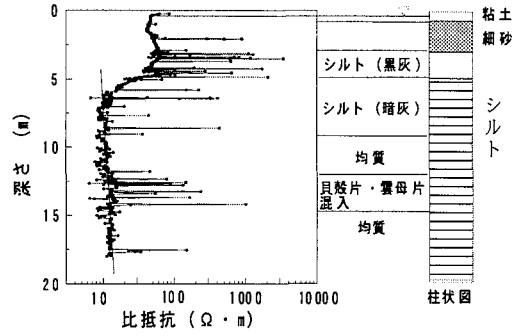


図-17 比抵抗の原位置測定結果と柱状図

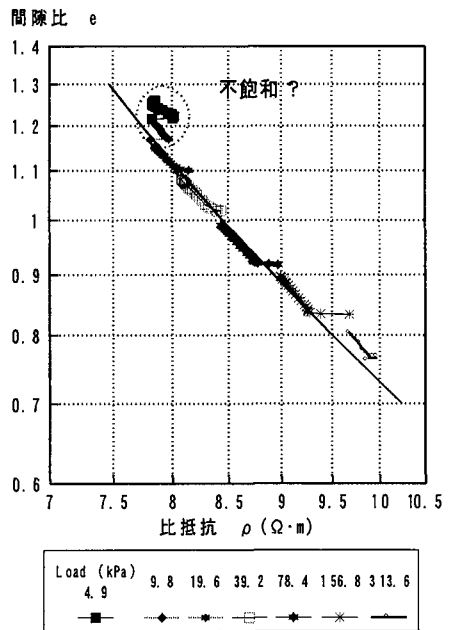


図-18 標準圧密試験による比抵抗と間隙比の関係 (木節粘土: 蒸留水, 0.1 mA, 1000 Hz)

験装置と併用すれば、地盤層序を得るのに十分活用できると考えられる。しかし、汚染域検出のために本装置を適用するにはさらに詳しい研究を行う必要があることを述べておく。

7. 結論

土の比抵抗をはかるために、電導コーンおよび圧密セル装置を開発した。これらの装置を用いて土の比抵抗を測定した。その結果について比較検討したところ、電導コーンによって土の比抵抗を求められることがわかった。

これまで言われているように、比抵抗は次の条件に

よって変わることが分かった。

- a) 土の種類
- b) 間隙溶液の電気伝導度
- c) 間隙比
- d) 含水比

電導コーンを用いて原位置測定を実施した結果、異なる土層の判別や含水比特性などが比抵抗から得られることが判明した。

以上のことから、電導コーンは地盤層序の決定や汚染域の検出などの試験装置として適用可能である。今後実用化に向けて研究を進める。

謝 辞： 本研究を行うに当たり、当時東海大学海洋学部生であった、半田貴久、望月 剛、永坂 泰君には実験補助としてご協力いただいた。ここに謝意を表します。本研究は一部平成9年度文部省科学研究費補助（基盤研究C、課題番号：09650556）に依った。

参考文献

- 1) Archie, G.E. : The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. A.I.M.E.*, Vol.146, pp.54-62, 1942.
- 2) Patnode, G.E. and Wyllie, M.R.J.: The presence of conductive solids in reservoir rocks as facts in

electric log interpretation, *Trans.A.I.M.E.*, Vol.189, pp. 47-52, 1950.

- 3) Wyllie, M.R.J. and Southwick, P.E.: An experimental investigation of the Sp and resistivity phenomena in dirty sands, *Trans.A.I.M.E.*, Vol.201, p.43, 1954.
- 4) Waxman, M.H. and Smith, L.J.M.: Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, *Trans.A.I.M.E.*, Vol.243, pp.107-122, 1968.
- 5) 山口久之助：砂の地層係数と表面電導の関係について、*物理探査*, Vol. 15, pp. 26-33, 1962.
- 6) 西川政忠：表面電導現象について、*電気化学*, Vol. 18, pp. 157-187, 1950.
- 7) 千葉昭彦、熊田政宏：花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定、*物理探査*, Vol. 47, No. 3, pp. 161-172, 1994.
- 8) 関根一郎、西牧均、石垣和明、原敏昭、齋藤章：岩石の比抵抗とその力学的性質との関係、*土木学会論文集*, No. 541/III-35, pp. 75-86, 1996.
- 9) Olhoeft, G.R.: Low-frequency electrical properties, *Trans, Geophysics*, Vol.50, pp.2492-2503, 1985.
- 10) Campanella, R.G. and Weemees, I.: Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.557-567, 1990.
- 11) Campanella R.G., Davies, M.P. and Boyd, T.J.: Characterizing contaminated soil and groundwater systems with in-situ testing, *Proc. of the Joint CSCE- ASCE National Conference on Environmental Engineering*, pp. 1497-1504, 1993.

(1997. 9. 8受付)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF CONE FOR MEASURING THE RESISTIVITY OF SOIL

Masaharu FUKUE, Naomi TAYA, Motoki MATSUMOTO and Go SAKAI

In order to obtain better information of soil with stratification and contaminated zone of subsoil, two types of cones for measuring the resistivity of soil were developed. To examine the feasibility of the instrument the laboratory experiments were carried out using the cones and consolidation test apparatus. The results showed that the theoretical relationship between resistivity and voltage for soil can be applied in fields.