

電気低抗式土壌水分計の設計とその周波数特性

正員 山形 積 治*

1. ま え が き

土木工事, 耕地用土壌で土壌中の水分が問題になる事がしばしばある。その測定法には, ① 土壌をとり出して来て直接重量を測定して含水率を知るもの, ② 含水率の変化によって土壌の誘電率が変わる事を利用したもの, ③ 含水率の変化によって土壌の電気抵抗が変化することを利用したものがある。ここでは電気低抗式の新しい測定素子(針状素子)を設計し測定に用いる bridge 用電源の周波数

について色々変えてみた結果, 10,000 cycle 程度の周波数を用いると, 充分実用価値がある事が知られたので報告します。

2. 測定用素子の設計

土壌中の含水率を測定する素子として広く知られているものに Bouyoucos の石こうブロック (Plaster of Paris Blpck) 及びナイロンユニット (Nylon Unit) があり, 特性も多く研究者によって調べられている。しかし速答性に欠けている。ここで実験した針状素子は速答性と云う点に重点を置いて設計した。そのその型状は Photo. 2-1 に示す通りで細部の寸方は Fig. 2-1 及び Fig. 2-2 に示します。1本の針の周囲に8本針を同心円状に配列し, 中心の1本と周囲の8本が2つの電極になっている。こうする事によって電場が平行板を用いた時のように広がる事を防ぎます (Fig. 2-3)。

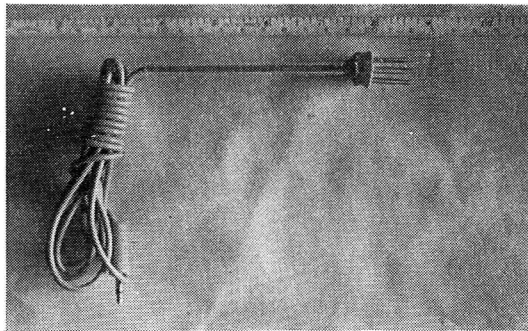


Photo. 2-1.

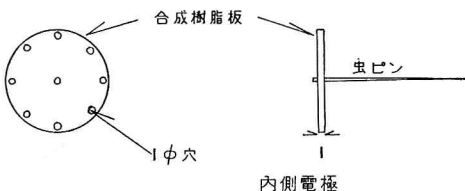
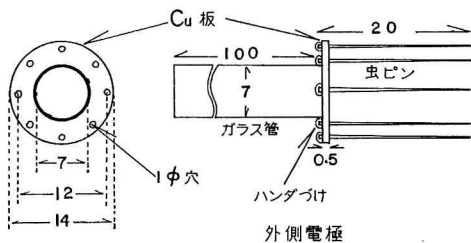


Fig. 2-1. 電極 寸法単位は mm

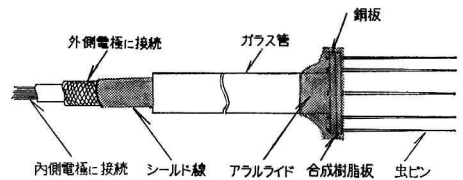


Fig. 2-2. 針状測定素子 (実物大)

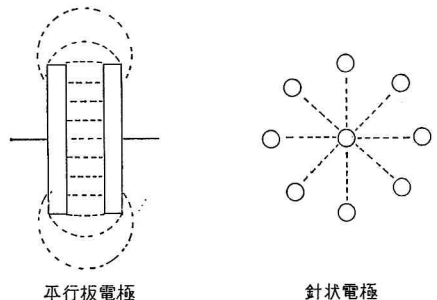


Fig. 2-3. 電場の広がり (点線電場)

3. 使用 法

含水率を測定したい土壌に測定素子を垂直につき立てて Fig. 3-1 のように電極針が土壌の中に入り込むようにす

* 北海道教育大学旭川分校物理学教室

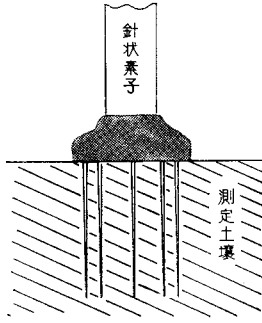


Fig. 3-1.

る。しかし素子が測定物の中にめり込む程力を加える事はよくない。周波数を適当に選択すれば力のかけ具合によってはそれ程測定誤差が生じない事が実験で知られた。

4. 素子を組み込む bridge について

内側電極と外側電極間の電気抵抗を測定するのであるから直接 ohm 計で測定する事も考えられるが、本実験では周波数による特性も調べるので、Fig. 4-1 の bridge に組み込んでその出力電圧によって抵抗を求めた。

Fig. 4-1 で R_x は測定素子電極間の電気抵抗である。

今、ACB と流れる電流を i_1 、ADB と流れる電流を i_2 とすれば

$$i_1 = \frac{E}{R+R'}, \quad i_2 = \frac{E}{2R} \quad (4-1)$$

よって AC の電圧を E_{AC} 、AD の電圧を E_{AD} とすれば

$$E_{AC} = \frac{ER}{R+R'}, \quad E_{AD} = \frac{E}{2} \quad (4-2)$$

従って CD 間の電位差 E_{CD} は次の式で表わされる

$$E_{CD} = E_{AD} - E_{AC} = \frac{E(R'-R)}{2(R+R')} \quad (4-3)$$

又 CB 間の抵抗は bridge の抵抗と素子の抵抗が並列に入っているので

$$R' = \frac{RR_x}{R+R_x} \quad (4-4)$$

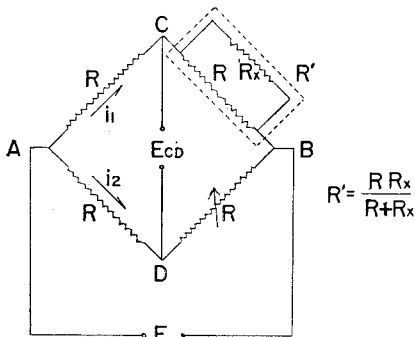


Fig. 4-1. bridge

となる。(4-4) 式を (4-3) 式に代入して

$$E_{CD} = \frac{E}{2} \cdot \frac{\left(\frac{RR_x}{R+R_x} - R \right)}{\left(R + \frac{RR_x}{R+R_x} \right)} = \frac{E}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + 2RR_x)} \quad (4-5)$$

(4-5) 式を R_x について解けば

$$R_x = \frac{(E - 2E_{CD}) \cdot R}{4E_{CD}} \quad (4-6)$$

$E \gg E_{CD}$ であるので (4-6) 式は

$$R_x = \frac{RE}{4E_{CD}} \quad (4-7)$$

Fig. 4-1 で bridge を構成している抵抗には 120Ω の Strain Gauge を同一の Cu 板の裏、表に接合し温度差による bridge 自体の歪を防いだ。

さらに bridge にかかる電源電圧は常に $E = 0.50 \text{ V}$ とした。

よって (4-7) 式は

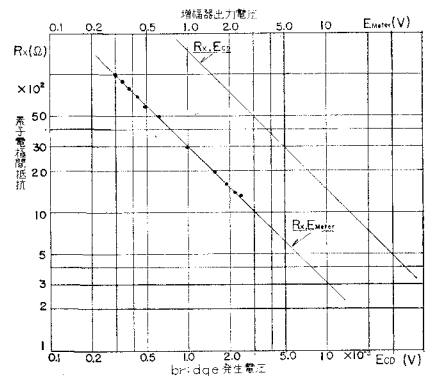
$$R_x = \frac{15}{E_{CD}} [\Omega] \quad (4-8)$$

又は

$$E_{CD} = \frac{15}{R_x} [\text{V}] \quad (4-9)$$

(4-8), (4-9) を確かめるために E に 1000 cycle, 0.50 V の電源を与え素子の電極間に抵抗箱を接続し、 R_x を変化させて、 E_{CD} を測定した。 E_{CD} は微小電圧なので bridge に増幅器をとりつけ、その出力に電圧計をつないで出力電圧 E_{Meter} を測定し Graph 4-2 に E_{CD} の計算値と並べて示してある。

Graph 4-2 から明らかなように $E_{CD} - R_x$ の関係、 $E_{\text{Meter}} - R_x$ の関係は直線になるので (4-8), (4-9) が正しい事が確認できる。さらに両直線が平行になるので AMP の増幅率も一定である。さらに graph から AMP の増幅率 $\alpha = 207$ 倍である。



Graph 4-2. R_x と E_{CD} (計算値), R_x と E_{Meter} (実測値)

5. 土壌含水率の表現について

土壌中の含水率を現わす方法に絶乾重量基準のものと、
湿潤基準のものがある
各々次の式で示される。

$$m_1 = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad [\%] \quad (5-1)$$

$$m_2 = \frac{W - W_0}{W} \times 100 \quad [\%] \quad (5-2)$$

上式で W_0 は砂あるいは土壌の絶乾状態の質量

W は水を含んだ状態での質量

$W - W_0$ は水だけの質量である。

本実験では容積含水率という値を用いた。これは m_1 の別の表示方法と考えられる。

すなわち、ある容器 V_s の中に砂あるいは土壌を最大限につめこんでその質量 W_s を計り密度を出しそれを ρ_s とする。

容積含水率 ϕ は V_s という体積の砂の中に V_w という体積の水が含まれていたとした時の体積の割合であるから

$$\phi = \frac{V_w}{V_s} = \frac{W_w / \rho_w}{W_s / \rho_s} = \frac{W_w}{W_s} \times \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{W_w}{W_s} \times \rho_s \quad (5-3)$$

となる。上式で W_w は体積 V_w の水の質量である。 ρ_w は水の密度である。よって容積含水率 ϕ は m_1 で用いた記号で示せば

$$\phi = \frac{W - W_0}{W_0} \cdot \rho_s \cdot 100 \quad [\%] \quad (5-4)$$

となる。

本実験では被測定物として砂を用いた、その密度は

$$\rho_s = 1.43 \text{ g/cm}^3 \quad (5-5)$$

であった。

6. 実験方法

実験室においてあらかじめ (5-4) 式にもとづいて含水率を測定した砂 (平物直径 0.35 mm) に針状素子が無作意的に数回さし込み、この時の bridge の出力電圧 E_{CD} の最大と最小を取った。 E_{CD} は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Volt 程度の電圧であるので増幅器で増幅してその出力に電圧計をつなぎその電圧 E_{Meter} を読んだ。増幅器の増幅率 α は周波数によって異なるのであらかじめ測定しておいた。

E_{Meter} は E_{CD} に比例するので

$$E_{\text{Meter}} = \alpha E_{CD} \quad (6-1)$$

この式と (4-9) 式とから

$$E_{\text{Meter}} = \frac{15\alpha}{R_x} \quad (6-2)$$

が導かれる。さらに 1897 年 Gardner によって導かれた式

$$\phi \alpha = \sqrt{\frac{\phi^2 R_x}{R_x \alpha}} \quad (6-3)$$

$$\therefore \phi^2 R_x \alpha = \phi^2 R_x = \gamma \quad (6-4)$$

を考慮する。この式の意味はある時点での含水率 $\phi\%$ の 2 乗とその電気抵抗 R_x を乗ずれば含水率の値いかにかわらず一定の値 γ になる事を示している。

よって (6-4) 式より

$$R_x = \frac{\gamma}{\phi^2} \quad (6-5)$$

となる。

(6-2) 式に (6-5) 式を代入して

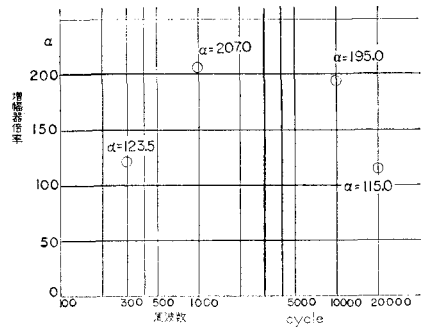
$$E_{\text{Meter}} = 15 \cdot \frac{\alpha \phi^2}{\gamma} \quad (6-6)$$

が得られる。

従って方眼紙の上で ϕ^2 を横軸に E_{Meter} を縦軸にとってデータをまとめる。

実験は 300, 1,000, 10,000, 20,000 各 cycle の四種類の周波数で行った。周波数に対する α の値は Graph 6-1 に示す。

実験中における温度の変化は最大 $\pm 3^\circ\text{C}$ であったので、この範囲であると R_x の温度による変化は無視できる程度であることが知られている。

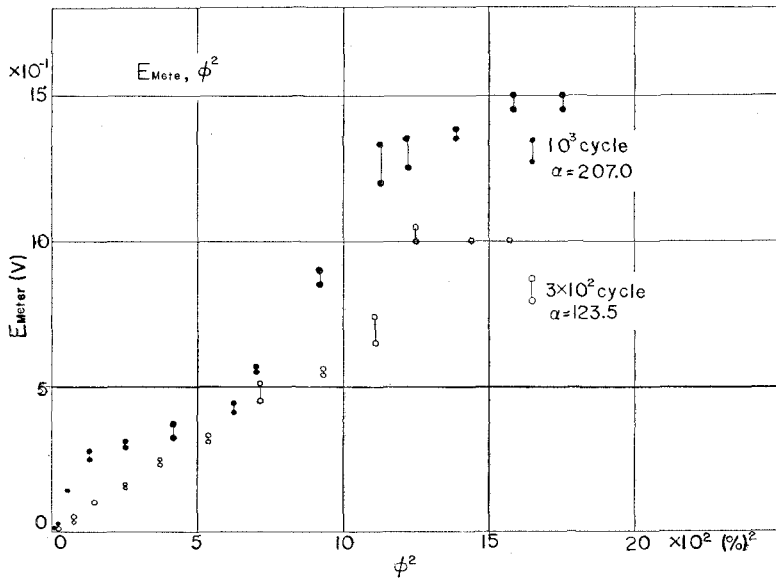


Graph 6-1.

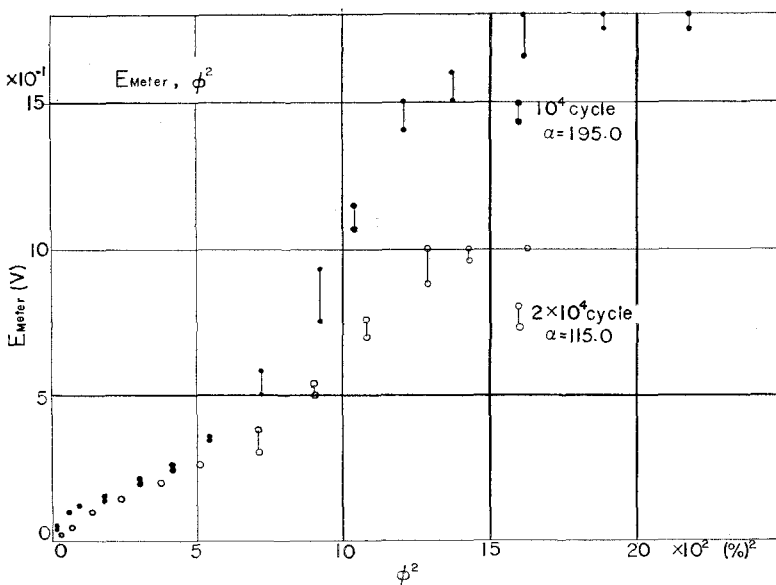
7. 測定結果

Bridge に結線した増幅器の出力電圧 E_{Meter} と容積含水率の 2 乗 ϕ^2 との関係は (6-6) 式に従って、各周波数について Graph 7-1, 7-2 に示した。ここで E_{Meter} に幅があるのは被測定物の中に針状素子が無作意的につき立てたときに出力メーターの振れには範囲があり、その最大、最小値を示したからである。Gardner の考察に従えば E_{Meter} と ϕ^2 との関係は直線になるはずであるが、結果は曲線を示す。

周波数の低い 300 cycle では測定値を結べば直線性を示し 1000 cycle になるとかなり直線から外れる。しかし、さらに周波数を上げて 10,000, 20,000 cycle にすると直線に



Graph 7-1. 増幅器出力電圧 E_{Meter} と容積含水率の2乗 ϕ^2



Graph 7-2. 増幅器出力電圧 E_{Meter} と容積含水率の2乗 ϕ^2

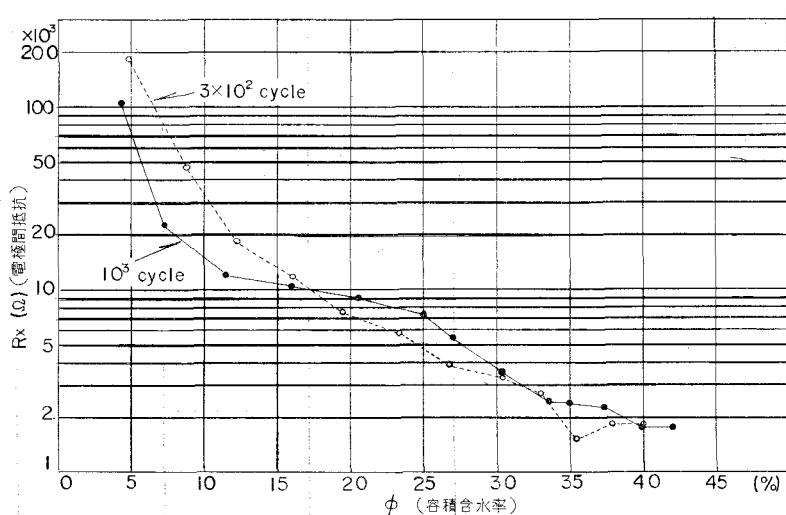
はならないが、一定の幾何学的曲線を示すので、この素子には周波数特性があることが認められる。

さらに (6-2) 式により E_{Meter} の中間値を素子電極間抵抗 R_x に換算して、 ϕ の変化に基づいてプロットしたものが Graph 7-3, 7-4 である。この Graph からみても 300, 1,000 cycle では測定される R_x は ϕ にバラバラの対応を示すが、10,000, 20,000 cycle になると ϕ の変化に対する R_x の変化は安定な形を示し、一定の曲線を示す。

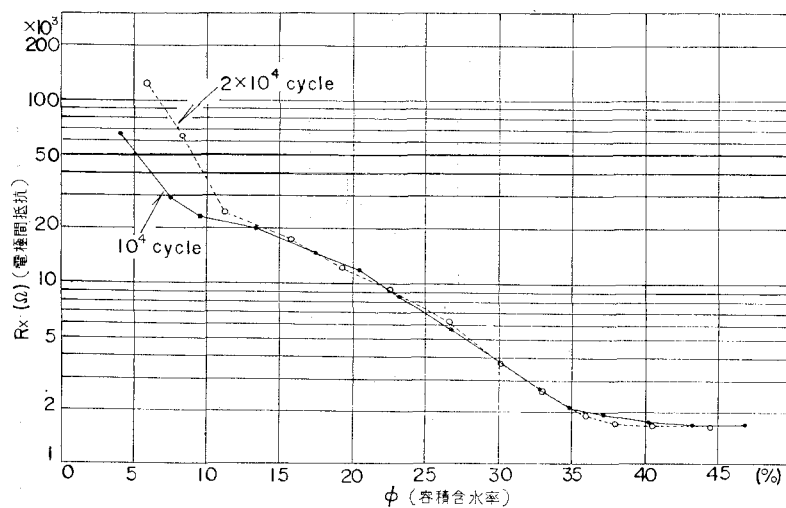
この事は周波数を高くする事によって針状電極と被測定

物との接触抵抗による誤差を小さくする事が可能となったためであると考えられる。

従って Graph 7-4 に基づけば 10,000~20,000 cycle の範囲の周波の電源を bridge にかければ、針状素子を用いて 10~40% の範囲の砂の含水率はかなり精密にしかも即時的に求めることができる。尚容積含水率で 35% というと砂であればほとんど水びたしの状態である。



Graph 7-3.



Graph 7-4.

8. ま と め

こで出した結果は実験室で行なったもので実際 Field に下した場合には予期しない色々の問題が生ずると考えられる。ことに被測定物の粒子の大きさ、土壤中に含まれている電解質の問題 (これの対策はすでに研究されている) 等である。Transistor を用いれば発振器、増幅器とも携帯用に組む事が出来るので、次は Field において実験を行なう予定である。特に使用周波数は Bouyoucus の実験以来 1,000 cycle 前後とされていたが、針状電極には 10,000~20,000 cycle を用いると測定誤差が小さく、測定範囲も広がる事が知られた。

猶、本研究遂行に当り、参考文献の貸与、並びに相談に応じて下さいました。北海道教育大学旭川分校の長谷川敏男先生に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 星合正治：電気式水分計 (日刊工業新聞社 1960).
- 2) 小谷佳人・木村 肇：電気抵抗法による土壌水分の測定 (農業気象, 第 15 巻, 第 4 号).
- 3) 福田仁志：土の電気抵抗と土中水分との函数関係について (応用物理, 第 19 巻, 第 9~12 号).
- 4) S. J. Bourget, D. E. Elrick and C. B. Tanner: Electrical Resistance Units for Moisture Measurements: Their Moisture Hysteresis, Uniformity, and Sensitivity, Soil Science 86, 6, 298 (Dec. 1958).
- 5) 桂山幸典：電気抵抗法による野外土壌水分の測定 (土地改良, 第 7 巻, 第 6 号).
- 6) 小林 一：畑地土壌水分中の電氣的測定に関する研究 (岐阜大学農学部研究報告, 第 6 報, 1956).