

# 电阻率法快速测定三轴土样含水量的试验研究

岳祖润<sup>1</sup>, 杨志浩<sup>2</sup>, 冯怀平<sup>1</sup>, 王飒一<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 四方学院 河北 石家庄 051132)

**摘要:**以朔黄铁路病害路基填土为研究对象,应用范德堡法通过自行研制的含水量测定系统进行了土壤电阻率随土样含水量和盐分含量的变化规律试验,并对此测试系统进行了验证。试验表明:此测试系统具有良好的稳定性与重复性,为施工现场含水量的测定提供了一种更为简单、快速、精确的方法。

**关键词:**范德堡;含水量;电阻率

**中图分类号:**U215.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2014)03-0042-05

目前,在路基、堤坝、房建等施工现场,含水量的测定是一项重要的内容,但是现存的测定方法很难在现场实际中得到广泛地应用,传统测定含水量采用烘干的方法,虽然精确,但过程既费时又费力。采用土样的电特性测定其含水量摆脱了原始的方法,且方便、快捷、精确。电阻率是土壤的一个固有性质,能够反映土壤丰富的物理化学性质,但是影响土壤电阻率的因素很多,比如:离子类型、浓度、压实度、含水量、土的矿物组成等,如何回避这些影响,成为通过电阻率测试含水量的一个瓶颈。中国农业大学的李民赞等<sup>[1]</sup>基于“电流-电压四端法”理论上研制的便携式土壤电导率测试仪,在实验室土槽内进行了验证试验,验证结果表明与电导率仪测定结果的趋势一致,但是所用仪器输入的激励电流为恒定值,不能随土壤实际电导率的大小作调整,在电导率过小或过大的情况下难以满足试验精度要求;之后李民赞等<sup>[2]</sup>又对该系统进行了改进,在测定电路中加了一个精密电阻,并对改进的系统性能进行了评价,重新测定了土壤电导率和含水量的变化关系,虽然克服了激励电流恒定值的缺陷,但是所用的输入电流还是直流电流,这就造成了土壤在测试过程中会出现极化现象,影响试验精度;周密等<sup>[3]</sup>进行了土壤电阻率测量影响因素的试验研究,研究了土壤电阻率与测试方法(采用二极法还是四极法)以及测试信号类型的关系。试验表明:四极法比二极法更能准确地测定土壤的电阻率;土壤在直流电压下存在极化效应,宜采用交流电压;刘尧军等<sup>[4]</sup>进行了应用电容法测定土壤含水量的试验研究,并拟合出了相关公式,但测定结果规律性不强,很难精确地测定土壤含水量;吴月茹等<sup>[5]</sup>利用TDR法来标定土壤含水量,但由于仪器精度的误差以及测量时探针插孔对容重的影响,测量结果也不是很高;Zbigniew Moron<sup>[6]</sup>介绍了范德堡法的工作原理以及应用范德堡法测定电解液电导率的试验研究。

综上所述,之前学者对依靠土壤电特性来测定含水量的技术研究还不够完善,本试验通过自行研制的测试系统应用范德堡法测定三轴土样电阻率与含水量和盐溶液浓度的关系,并对该系统进行评价、验证,为施工现场含水量的测定提供了一种快速、稳定、精确的方法。

## 1 试验土样及原理

### 1.1 土样的制备以及对所选取土样进行常规物性实验

在重载铁路病害路基现场取得所需土样,在实验室进行常规物性试验,包括含水量,干密度,颗粒比

DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxzb.2014.03.09

收稿日期:2014-03-19

作者简介:岳祖润 男 1962年出生 教授

重、孔隙比、粒径级配组成, 以及最大干密度、最优含水量、液限、塑限、塑性指数实验, 具体过程见文献 [7]。所用土样的击实曲线和级配曲线如图 1 和图 2 所示。

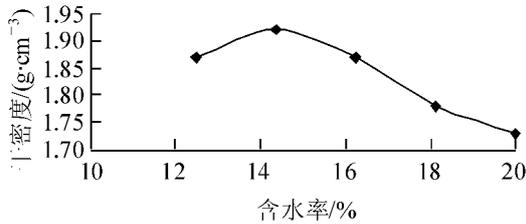


图 1 击实曲线

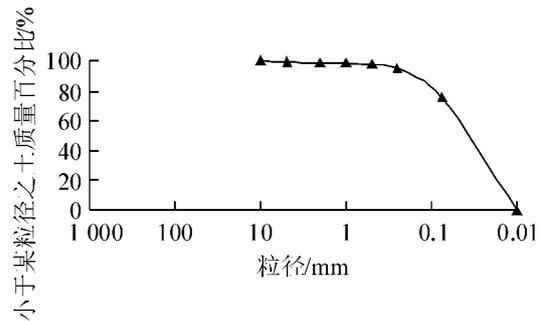


图 2 级配曲线

### 1.2 试验原理

利用范德堡法测量电阻率, 试样边缘两个相邻电极之间的电流使试样上额外的两个电极间产生电压降。如图 3(a) 所示, 电流从  $p$  端流向  $o$  端, 同时可以测得  $m$ 、 $n$  两端的电压, 从而可以测得电阻  $R_{po\ mn} = V_{mn}/I_{po}$ 。由于电极是对称分布的, 调换电压源和电流源的两级或者互换电压和电流源会得到相同的电阻值, 这个电阻记作  $R_A$ 。测量  $r$  个电阻值然后取均值, 这样可以减小电极的形状不规则以及试样的不均匀造成的影响, 但这并不是严格必要的。同样, 采用如图 3(b) 所示的电极布置方式, 可以测得电阻  $R_B$  ( $R_B = R_{no\ mp}$ )。其他 3 个类似电阻也同理可以测得。一般情况下  $R_A$  和  $R_B$  是不同的, 这两个电阻组成的范德堡关系式如下

$$\exp\left(-\frac{\pi d R_A}{\rho}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d R_B}{\rho}\right) = 1 \tag{1}$$



图 3 范德堡法电极布置图

式中,  $\rho$  是指试样的电阻率;  $d$  指试样的厚度。当  $R_A$  和  $R_B$  相等时, 范德堡关系式才能求出电阻率  $\rho$  的解析解, 相反当  $R_A$  和  $R_B$  不相等时, 可以采用标准的数值方法来解, 例如二分法。

范德堡法所采用的是如图 3 所示形状的土样, 对于这种形状不规则的土样都能适用, 试验所采用的圆形土柱试样也能适用, 采用范德堡关系式来计算电阻率, 试验采用的土样电极布置如图 4。测得电阻  $R_A$  和  $R_B$ , 然后代入范德堡关系式求出电阻率。

## 2 试验设备

本测试系统主要由五部分组成, 计算机、交流恒流源、Agilent 精密信号采集仪、水分迁移控制器以及土样。为了更好地防止土样在测试过程中出现极化现象, 紧贴土样的是 4 个钛铌铂片, 这种材料具有良好的导电性和抗极化性能, 缺点是焊锡无法焊住, 由于铜的延展性很好, 先用钳子将微小的铜片夹在铂片上, 然后在铂片的一面用胶水将小铜片粘接, 起到进一步加固作用, 再把导线焊接到铜片上; 交流恒流源能够稳定地输出恒定的交流电流, 并且可以调节输出电流和频率的大小, 操作简单、精确; 水分迁移控制器是自行研制的, 能够方便地改变土样的电流输入端和输出端。信号采集仪能够精确地采集到土样中电压的变化。测试系统流程图如 5 所示。



图 4 试验采用电极布置图

### 3 试验过程及结果分析

#### 3.1 洗土

为了防止土壤中自带离子对试验的误差影响,试验采用洗土的方法将原土样中的自由离子尽可能全部清除,然后再根据试验需要配以统一的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液得到试验所需的浓度。洗土过程中每洗一次土后选取适量土样进行烘干并配成含水量为 10%、压实度为 0.93 的土样进行电阻率测试试验,重复进行几次,绘出土壤电阻率与洗土次数的函数关系,如图 6 所示。找到最优的洗土次数,消除土壤里原有自由离子误差,为以后大量的洗土及标定试验提供依据。

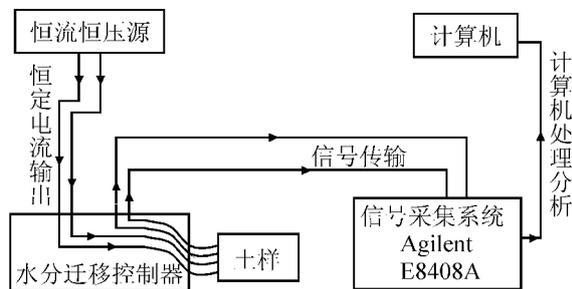


图 5 含水量测试系统流程图

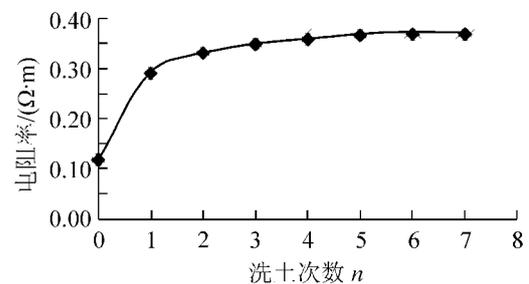


图 6 洗土次数标定曲线

由图 6 可以看出随着洗土次数的增加,土壤电阻率随之增大,开始阶段增大趋势较快,后阶段增大趋势减缓,从洗 6 次和洗 7 次所测得的土壤电阻率数值出现相同情况可以看出,洗 6 次的土壤已经达到了消除内部的杂质离子的效果。

#### 3.2 电极布置位置对测试精度的影响

由于不能保证每次贴的 4 个电极位置是完全一样的,每次位置不同可能会造成测试结果的差异,差异存在就不再满足单一变量原则,所得到的试验结果及结论就是错误的,为此试验验证电极布置位置的差异对所测电导率的影响规律。配置含水量  $w = 10\%$ 、压实度  $K = 0.95$ 、高度  $h = 10 \text{ mm}$  的土样,分别按照如图 7 所示的电极布置方式。由布置图可以看出,电极 C 和 D 等效,电极 B 和 E 等效,故可以分为 3 种情况进行电极布置测试,恒流源输出电流选择 0.5 mA,电流输入端和测试电压端分别按 BCDE 接通、ACDE 接通和 ABDE 接通。

同时测试了试验设备的时间效应及稳定性,测试时间分别为 2013.9.8 上午 8:40、2013.9.8 下午 14:40、2013.9.8 晚上 20:35、2013.9.9 晚上 21:40,如图 8 所示。测试过程中试样四周用凡士林密封,关闭电源保持土样处于自然密封不通电状态。

由图 8 可以看出随着测试电极位置及时间的改变,所测得的电阻率基本不变,在误差范围之内。验证了所用测试设备的良好稳定性及测试精度,时间效应良好。

#### 3.3 溶液浓度对土体电导率测试影响

本试验经过对比分析,拟采用  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  作为测试溶液溶质。为了研究溶液浓度对于土体含水量测试

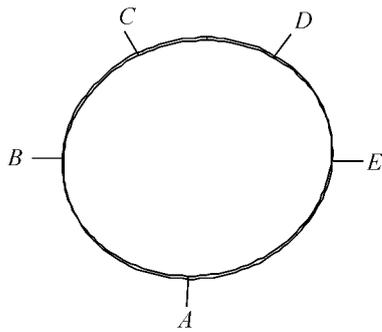


图 7 试验电极布置图

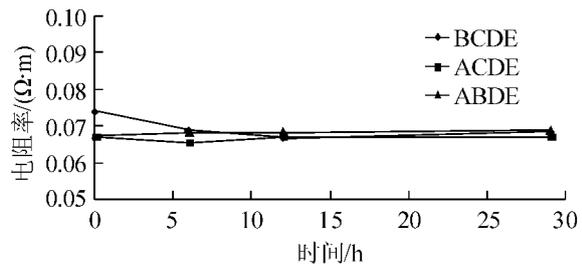


图 8 测试系统时间效应测试曲线

精度的影响, 分别配置 0%、3%、5%、7%、9%、11% 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液, 用这些不同浓度的溶液分别配成含水量为 10% 压实度为 0.93 的土样。目的是得到对测试影响明显的溶液浓度, 以提高精度, 为后续试验提供依据。

由图 9 可以看出, 总体上讲随着浓度的增大电阻率降低, 在 0~7% 之间下降趋势显著, 基本呈线性变化, 随着浓度的继续增大, 电阻率总体下降较平缓, 但在浓度为 9% 时有点起伏。原因在于, 对于  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等强电解质来说, 在浓度不是很大时, 溶液电阻率随浓度增大而明显减小, 原因为单位体积溶液中导电粒子数增多; 然而溶液中  $\text{Na}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  间相互作用力也随着溶质浓度的增大而增大, 进而影响导电性能, 当浓度超过某值之后, 离子间相互作用导致的导电能力减小影响大于导电粒子增多而引起的导电能力增大的影响, 此时, 电阻率随浓度增大反而减小。所以在电导率与浓度的关系曲线上可能会出现一个拐点。

### 3.4 含水量-电阻率标定试验

根据前面得到浓度标定曲线本试验最终采用 5% 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度。并以此溶液浓度配置含水量为 5%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20% 压实度为 0.93 的土样进行试验, 每类土样配制 3 个做平行试验取平均值, 建立电阻率与含水量的对应关系。试验结果绘制成曲线如图 10 所示。

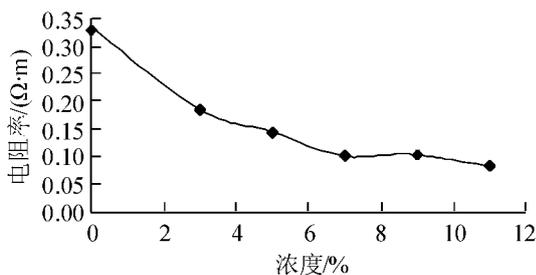


图 9 浓度-电阻率标定曲线

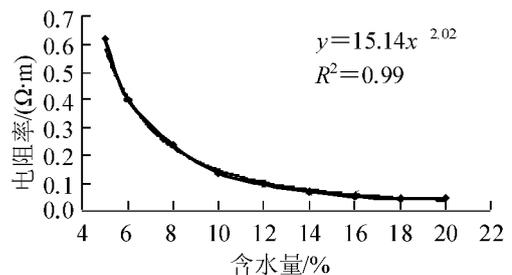


图 10 含水量-电阻率标定试验

由图 10 可以看出随着含水量的增加, 土样的电阻率随之减小, 且减小的趋势越来越平缓, 最后基本不变。当含水量小于 12% 时, 随着含水量的增大电阻率下降很快, 原因是在含水量增大过程中离子浓度同时增大, 导电能力增强, 电阻率随之减小; 当含水量达到 20% 时电阻率的变化值很小, 这说明土样已基本达到饱和, 颗粒之间的连接通道完全被水分子所贯通, 所以随着含水量的继续增大电阻率的值基本不变。得到标定曲线的拟合公式为  $y = 15.14x^{-2.02}$  相关系数为 0.99。

## 4 结论与展望

试验结果表明本测试系统具有较好的稳定性、可靠性及实用性, 能够对施工现场含水量的测定提供一种便捷、精确的方法。通过试验研究可得到如下结论:

(1) 范德堡法不仅适用于金属材料电阻率的测定而且完全适用于土木工程领域土壤电阻率的测定, 并且具有良好的稳定性和精度。

(2) 洗土过程能够很好的去除土壤中的杂质离子, 再配以一定浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液, 总体上随着浓度

的增大土样电阻率相对减小,且减小趋势越来越平缓。

(3) 当土壤含水量在 5% ~ 12% 之间时,土壤电阻率变化显著,含水量继续增大电阻率下降趋势变缓,最后值基本不变其原因是土壤已经达到饱和的缘故。

(4) 其他影响因素对土壤电阻率的影响还没进一步的研究探讨,只有把更多的影响因素考虑进来,建立多参数的相互模型才能更加准确的标定出含水量与土壤电阻率的关系。

## 参 考 文 献

- [1]王琦,李民赞,汪懋华. 便携式土壤电导率测试系统的开发[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(4): 20-23.
- [2]陈玲,李民赞,赵勇. 便携式土壤电导率测试仪改进设计及试验[J]. 农机化研究, 2009, 3(7): 175-177.
- [3]周密,王建国. 土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3269-3275.
- [4]刘尧军,黄祖光. 电容法测定砂土含水量的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2002, 15(2): 10-12.
- [5]吴月茹,王维真. TDR 测定土壤含水量的标定研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 262-267.
- [6] Zbigniew Moron. Investigations of van eer pauw method applied for measuring electrical conductivity of electrolyte solutions [J]. Measurement, 2003(33): 281-290.
- [7]铁道部第一勘察设计院. TB10102—2010 铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [8]孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39-41.
- [9]Mojid M A, Cho H. Wetting solution and electrical double layer contributions to bulk electrical conductivity of sand-clay mixtures [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(3): 972-980.
- [10]Waxman M H, Smits L J M. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, 8: 107-122.
- [11]刘国华,王振宇,黄建平. 土的电导率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83-87.

## Research on Resistivity Method for Rapid Determination of Water Content of Triaxial Test Soil Sample

Yue Zurun<sup>1</sup>, Yang Zhihao<sup>2</sup>, Feng Huaiping<sup>1</sup>, Wang Sayi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Sifang College, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 051132, China)

**Abstract:** In this paper, the subgrade soil defects of shuohuang railway is taken as an example. By using Van der Pauw method, the changing regulation of soil resistivity with the soil salt and water content variation is analyzed through the moisture gage developed by us and the testing system is verified. The experimental results indicate that the testing system has favorable stability and repetition within the permission scope. With the advantages of simple operation, fast response and high sensitivity, this method can be widely applied on construction site for moisture content determination.

**Key words:** van der pauw; water content; resistivity

(责任编辑 刘宪福)