

土的电阻率特性及其工程应用研究

Research on electrical resistivity feature of soil and it's application

刘国华¹, 王振宇¹, 黄建平²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 水利部农村电器化研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 在阐述电阻率层析成像理论的基础上, 采用改进的 Miller Soil Box 进行土样的室内电阻率试验, 根据 4 因素 3 水平正交试验得出影响土的电阻率变化的主次因素顺序是: 含水率、孔隙水的导电性、饱和度、土的种类。依据大量试验数据, 分析了电阻率与土的基本物理指标之间的相关性, 建立一个基于推广阿尔奇公式的黏土电阻率模型。对实测结果进行电阻率层析成像, 能较好地发现地下目标。

关键词: 电阻率; 层析成像; 正交试验; 含水率

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)01-0083-05

作者简介: 刘国华(1963-), 男, 汉族, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 从事水工结构与系统分析的研究和教学工作。

LIU Guo-hua¹, WANG Zhen-yu¹, HUANG Jian-ping²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. National Research Institute for Rural Electrification, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Based on the discussion of the theory of electrical resistivity tomography (ERT), Miller soil box is adopted to perform a standardized laboratory procedure for measuring soil electrical resistivity. Through orthogonal test, it is discovered that the influences of electrical resistivity decrease in such an order: water content, pore water electrical conductivity, degree of saturation, type of soil. The correlation between electrical resistivity and soil physical indexes is also thoroughly studied in this paper. Then, an electrical resistivity model and its Archie's parameters of typical clay are established. Finally, A practical demonstration is given to illustrate the ability to find potential object by ERT.

Key words: electrical resistivity; tomography; orthogonal test; water content

0 前言^①

应用地球物理技术解决工程与环境问题是近年来学科交叉发展形成的前沿研究领域, 并引起工程界的广泛关注, 电阻率层析成像就是该领域蓬勃发展的一个分支。电阻率层析成像在工程地质调查、隐患探测、水文地质探测和环境监测等方面已有一些成功的应用^[1-3], 它的依据是探测目标的物理力学性质与电阻率有一定的相关性。但由于岩土材料的复杂性, 以及影响电阻率变化的因素较多, 至今对土的电阻率特性认识仍不够清晰。造成电阻率层析成像结果的分析判断主要依赖于经验, 在一定程度上制约了电阻率法的应用效果。

关于多孔介质电学性质的早期研究始于针对岩石所提出的阿尔奇 (Archie, 1942) 公式和汉布尔 (Humble, 1952) 公式。Rhoades (1976) 和 Frohlich (1989) 也分别提出了一个非饱和土电阻率模型^[4], 但都没考虑孔隙率对电阻率的影响。Fukue (1999) 的电阻率试验研究则偏重于对土的微观结构的阐述与解释^[5]。Gil Lim Yoon (2001) 研究了工业污染对砂土电阻率的影响^[6]。Delaney (2001) 的研究工作主要针对寒冷地区电阻率法的应用问题, 故考虑了低温对土体电阻率变化的影响^[7]。

总的来说, 在土体电阻率特性的基础试验研究方面, 国内外开展的工作相对较少, 本文在这方面作了一些探索性的工作。通过 4 因素 3 水平的正交试验, 分析影响土的电阻率变化的主次因素, 以及与基本物理指标的相关性, 并根据电阻率试验数据提出一个地区性的黏土电阻率模型, 对特定地电结构进行层析成像验证了该模型的有效性。本文工作将有助于电阻率层析成像技术的进一步提高和完善。

1 电阻率层析成像的基本原理

1.1 点源二维电场的有限单元法^[8]

取三维笛卡儿坐标系的 x 轴垂直于地质体走向方向, y 轴为地质体走向方向, z 轴垂直向下 (xOz 平面即实测平面)。设点电源位于 $A(x_0, y_0, z_0)$ 点, 对稳定电流场的基本微分方程沿 y 轴方向作傅立叶变换, 将在 (x, y, z) 空间中的电位 U 变换到 (x, K_y, z) 空间的广义电位 U' , 即

$$\begin{aligned} \nabla [\alpha(x, z) \nabla U'(x, K_y, z)] - K_y^2 \alpha(x, z) U'(x, K_y, z) \\ = -\frac{1}{2} \delta(x - x_0) \delta(z - z_0), \end{aligned} \quad (1)$$

① 基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (502020)

收稿日期: 2003-01-24

式中 I 为电流强度, σ 为导电率, K_y 为空间波数, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克(Diracdelta)函数。考虑混合边界条件, 上式的求解等价于求下列泛函的极小问题:

$$W(U) = \iint_D \left[\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|^2 + \alpha K_y^2 U^2 - I \delta(x - x_0) \delta(z - z_0) U \right] dx dz + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \alpha U^2 ds, \quad (2)$$

式中 D 为所研究的二维地电断面的区域, Γ 为 D 区域的边界, ds 为沿边界积分的积分变量, $\alpha = K_y \cdot \frac{K_1(K_y r)}{K_0(K_y r)} \cos \theta$, K_0 和 K_1 分别为零阶、一阶修正贝塞尔函数, θ 为场源到边界点的矢径 r 与边界外法线 n 之间的夹角。对求解区域进行离散, 按照有限单元法求得广义电位 U' 后, 再通过反傅立叶变换即可求得真实的电位 U 。

1.2 平滑约束的最小二乘反演^[9]

平滑约束的最小二乘反演方法计算效率较高, 对自由噪声不敏感, 其数学格式是

$$(J^T J + uF) d = J^T g - uFr. \quad (3)$$

式中 F 为二维平滑矩阵, $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$, f_x 为水平平滑矩阵, f_z 为垂直平滑矩阵; J 为雅可比偏微分矩阵; u 为阻尼因子; d 为模型扰动向量; g 为计算电阻率与实测电阻率的残差向量; r 为模型的电阻率值取对数形成的向量。残差向量 g 代表了计算视电阻率与实测视电阻率的差异程度, 其大小采用均方根误差来衡量, 并作为反演收敛的标准。为提高数据分析的质量, 在对实测数据与计算数值进行拟合时, 两者均取对数, 即均方根误差为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{ \ln[\rho_0(j)] - \ln[\rho_i(j)] \}^2}, \quad (4)$$

式中 N 为断面测点总数, $\rho_0(j)$ 是第 j 点实测电阻率值, $\rho_i(j)$ 是第 i 次迭代后第 j 点计算电阻率值。

2 试验方案

2.1 试验材料

取杭州地区代表性的黏土、砂和淤泥, 其天然状态物理指标见表 1。原状土样在进行电阻率试验前经筛分、烘干、磨细等制备过程。

表 1 天然状态土的基本物理指标

Table 1 Physical parameters of original soil used in this study

土样名称	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	G_s	e	w /%	S_r /%	w_L /%	w_p /%
黏土	17.1	2.73	0.85	16	51	46.4	25.1
砂	14.7	2.69	0.92	5	15		
淤泥	16.8	2.73	1.59	57	98	44.5	25.9

2.2 试验装置

土的电阻率室内试验装置有 Miller Soil Box 和圆形四电极电阻率测试装置(circular four-probe resistivity cells)两种。圆形四电极电阻率测试装置稍复杂, 且测得的视电阻率需换算才能得到土的真实电阻率, 因此本文对 Miller Soil Box 进行了适当改进, 作为电阻率试验装置。

本次试验采用改进的 Miller Soil Box 作为电阻率试验装置(图 1)。在盒子长度方向的两个相对面上嵌入铝片, 盒子的内边尺寸为 $B \times H \times L$ (净宽 $\times$ 净高 $\times$ 净长, 单位为 m)。将待测试土样放入盒子中, 用电路导线与铝片相连, 测得 Miller Soil Box 两端电压为 U (单位为 V), 电路电流为 I (单位为 A), 则土样的电阻率(单位为 $\Omega \cdot \text{m}$)为

$$\rho_0 = \frac{U B H}{I L}. \quad (5)$$

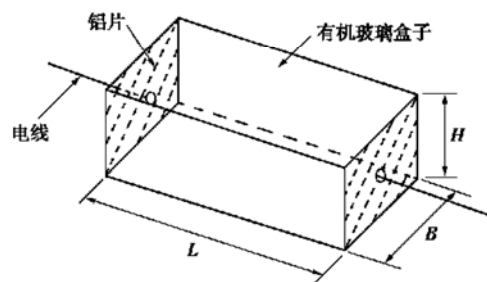


图 1 Miller Soil Box 示意图

Fig. 1 Typical Miller soil system

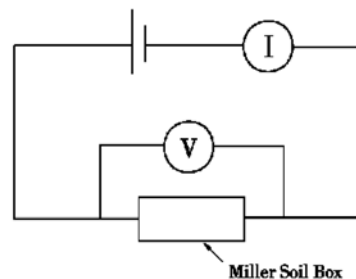


图 2 电阻率测试电路图

Fig. 2 Circuit diagram for resistivity test

2.3 试验内容与步骤

试验内容包括两部分: ①通过正交试验确定影响土电阻率的主次因素。本次试验以土的电阻率为试验指标, 选取土样种类、含水率、饱和度和孔隙水导电性 4 个因素, 各试验因素所考虑的 3 个水平详见表 2。②测试不同含水率、饱和度和孔隙率条件下土样的电阻率, 以归纳总结电阻率与基本物理指标之间的相关性。

每一个试验条件下的具体步骤: 称量制备好的土样和相应含水率所需的水, 在容器内拌制均匀; 已知 Miller Soil Box 的体积可换算出满足密实度要求的土样

质量; 将装有土样的 Miller Soil Box 接入测量电路(图 2), 读取电压表和电流表的读数 U 和 I , 根据式(5) 计算土样电阻率; 清洗 Miller Soil Box 和其他试验装置, 准备下一组试验。

表 2 正交试验因素水平表
Table 2 Factors and levels of the orthogonal test

水平 编号	土样种类 (因素 A)	含水率 (因素 B)/%	饱和度 (因素 C)/%	孔隙水电阻率 (因素 D)/(Ω·m)
1	砂	5	10	87.5
2	黏土	10	20	56.5
3	淤泥	25	30	5.7

注: 孔隙水电阻率为加入土样前的测定值。

3 试验数据分析与讨论

3.1 正交试验结果分析

根据正交试验的数据处理方法, 用各因素相应水平的编号作横坐标, 用各因素相应水平的电阻率平均值作纵坐标, 绘出因素与指标的关系如图 3 所示。可以得到以下结论: 土的电阻率随着含水率、饱和度的增大而减小, 随着孔隙水电阻率的减小而减小; 固体颗粒(即土的种类)对电阻率影响较小。图 3 中电阻率指标极差大小反映了试验中各因素作用的主次, 本次试验的各因素由主至次顺序为: 含水率、孔隙水电阻率、饱和度和土的种类。

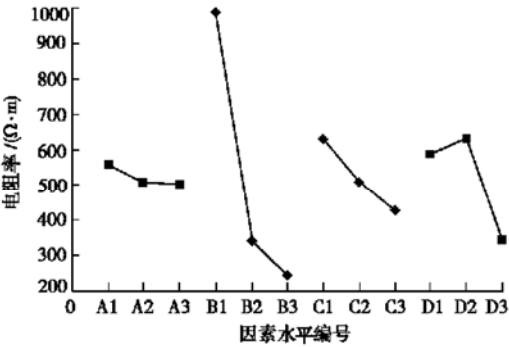


图 3 正交试验各因素变化与电阻率的关系

Fig. 3 Relationships between the factors and resistivity index of the orthogonal test

3.2 含水率对电阻率的影响

对黏土、砂、淤泥作相同孔隙率、不同含水率情况下的电阻率试验, 可得含水率与电阻率的关系(图 4), 图中实线为以幂函数关系拟合得到的趋势线。在孔隙率一定的情况下, 含水率增大则电阻率降低, 特别是当含水率较小时, 含水率的较小变化就能引起电阻率的显著变化, 与正交试验所得结论一致。

3.3 孔隙率对电阻率的影响

分别在含水率为 6%、10% 和 20% 的情况下, 作不同孔隙率的土样电阻率试验, 孔隙率与电阻率关系的

幂函数拟合曲线见图 5~ 7, 在含水率一定的情况下, 孔隙率增大则电阻率增大。

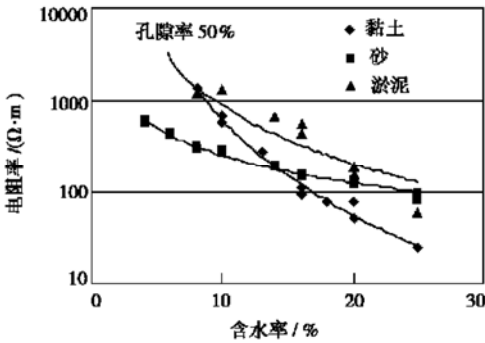


图 4 孔隙率 50% 时含水率对电阻率的影响

Fig. 4 Relationship between the water content and resistivity when the void ratio is 50%

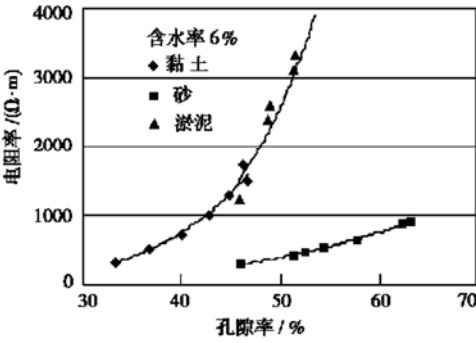


图 5 含水率 6% 时孔隙率对电阻率的影响

Fig. 5 Relationship between the void ratio and resistivity when the water content is 6%

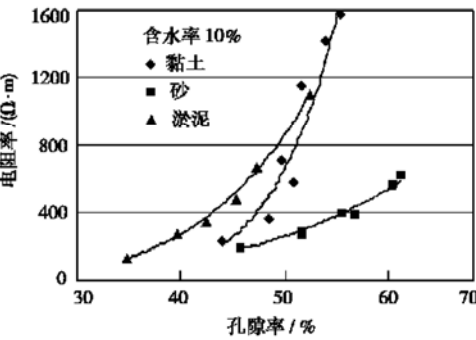


图 6 含水率 10% 时孔隙率对电阻率的影响

Fig. 6 Relationship between the void ratio and resistivity when the water content is 10%

3.4 饱和度对电阻率的影响

图 8~ 10 表示在含水率一定的情况下, 饱和度对电阻率的影响。随着饱和度的增大, 电阻率呈幂函数关系减小。当土接近饱和时, 电流几乎都通过孔隙水传导, 土的电阻率趋于稳定, 约等于孔隙水的电阻率。

3.5 黏土的电阻率模型

根据上述分别考虑单因素(含水率或饱和度或孔隙率)对电阻率影响的分析, 它们与土的电阻率都符合

幂函数关系。在实际工程中,对于特定区域黏土的孔隙水电阻率 ρ_w 和土颗粒性质差异不大,而且孔隙率、饱和度和含水率之间存在着一定的换算关系,因此采用推广的阿尔奇公式来表示土的电阻率,即

$$\rho_0 = K \phi^m S_r^{-n} \rho_w, \quad (6)$$

式中 ϕ 为土的孔隙率, S_r 为土的饱和度, ρ_w 为孔隙水的电阻率, K 、 m 和 n 为与土性有关的参数。根据上述试验数据统计分析得到一个地区性的黏土电阻率模型(见图 11)为

$$\rho_0 = 2.1 \phi^{2.051} S_r^{-3.135}, \quad (7)$$

复相关系数为 0.921,属于高度相关。

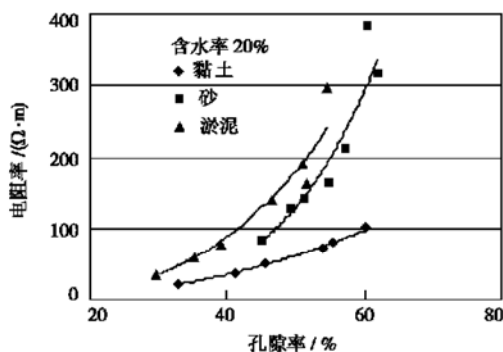


图 7 含水率 20% 时孔隙率对电阻率的影响

Fig. 7 Relationship between the void ratio and resistivity when the water content is 20%

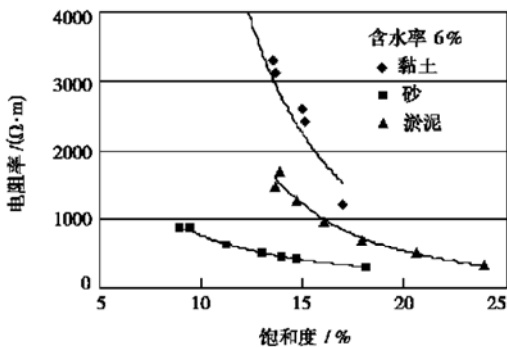


图 8 含水率 6% 时饱和度对电阻率的影响

Fig. 8 Relationship between the degree of saturation and resistivity when the water content is 6%

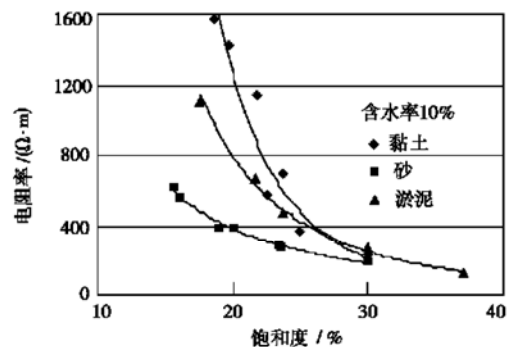


图 9 含水率 10% 时饱和度对电阻率的影响

Fig. 9 Relationship between the degree of saturation and resistivity when the water content is 10%

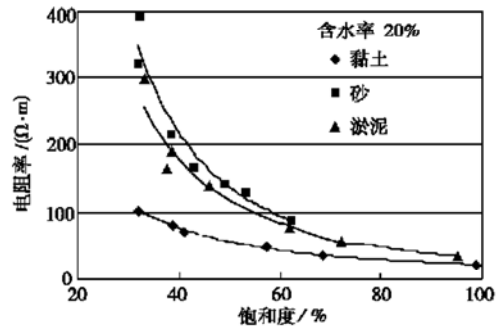


图 10 含水率 20% 时饱和度对电阻率的影响

Fig. 10 Relationship between the degree of saturation and resistivity when the water content is 20%

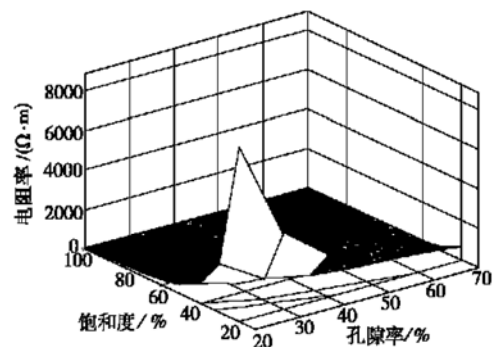


图 11 黏土的电阻率模型

Fig. 11 The resistivity model of clay

4 应用实例

某人工土坡由黏土堆积而成,已经知道一直径约 25 cm 的涵管贯穿土坡,如图 12 所示。在坡面上垂直涵管方向进行高密度电阻率法测试。测试的目的是:①检验能否发现已知地下目标;②比较层析成像所得电阻率数值与式(7)所得结果是否一致,检验黏土电阻率模型的合理性。电阻率层析成像结果如图 13 所示,在水平位置 15.5 m、深度 0.7 m 处可以发现该涵管所对应的圆形高阻区,除涵管位置以外的其他区域平均电阻率为 70~100 ($\Omega \cdot m$)。在该土坡上取土样进行室内试验得黏土的孔隙率为 45.9%,含水率为 16%,根据式(7)得电阻率为 83 ($\Omega \cdot m$),与层析成像结果吻合较好。

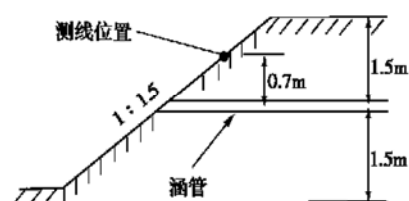


图 12 测线位置示意图

Fig. 12 Location of the test line

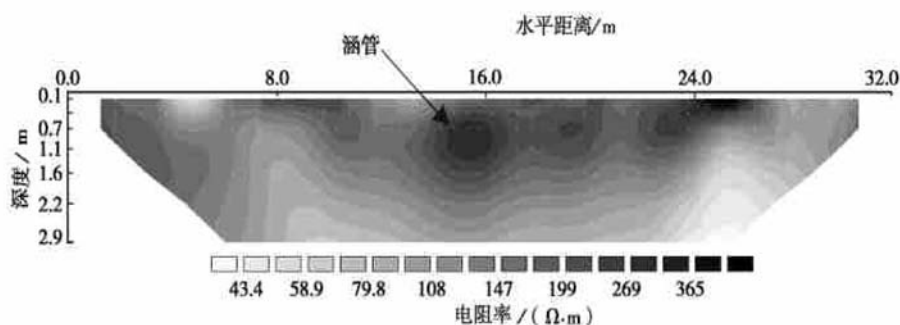


图 13 土坡中涵管探测的电阻率层析图

Fig. 13 Electrical resistivity tomography for detecting pipeline in a slope

5 结 语

土的电阻率与土的基本物理指标有较好的相关性。本次试验中,影响电阻率的各因素由主至次顺序为:含水率、孔隙水的导电性、饱和度、土的种类。

含水率、饱和度和孔隙率分别与土的电阻率呈幂函数关系,根据试验结果和推广的阿尔奇公式建立了一个地区性的黏土电阻率模型。由于岩土材料的复杂性,本项工作仍需开展进一步的深入研究。

点源二维有限单元法正演和考虑平滑度约束的最小二乘反演算法合理,效率较高。

电阻率层析成像能较好地发现地下目标,层析成像所得电阻率与黏土电阻率模型所得结果吻合良好。

参考文献:

- [1] Alain Tabbagh, Michel Dabas, Albert Hesse, et al. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation[J]. Geoderma, 2000, 1997: 393– 404.
- [2] Ji Soo Kim, Soor-Hyung Han, Woo-Hun Ryang. On the use of statistical methods to interpret electrical resistivity data from the Eumsung basin (Cretaceous), Korea[J]. Journal of Applied

Geophysics, 2001, 48: 199– 217.

- [3] 冯 锐, 李晓芹, 陶裕录. 电阻率层析成像用于水文地质勘探[J]. 地震学报, 1997, 19(6): 655– 663.
- [4] Kalinski R J, Kelly W E, Bogardi I, et al. Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers[J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 30: 161– 173.
- [5] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The micro-structures of clay given by resistivity measurements[J]. Engineering Geology, 1999, 54: 43– 53.
- [6] Gil Lim Yoon, Jun Boum Park. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, (B84): 147– 161.
- [7] Delaney Allan J, Peapples Paige R, Arcone Steven A. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2001, 32: 107– 119.
- [8] 周熙襄. 直流电法正演计算中的有限单元法[J]. 物化探电子计算技术, 1982, 4(4): 65– 76.
- [9] Loke M H, Barker R D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 131– 152.