

不同含盐量饱和盐渍土电阻率试验

王乐凡, 余承华, 顾强康, 张仁义, 裴元新

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

摘要 为了研究饱和盐渍土电阻率特性从而应用电阻率反算土体含盐量,通过拟合公式,可以在已知或测量电阻率的情况下反算该土体的含盐量。判断土体主要含盐的种类,并且对不同含盐量氯盐渍土和硫酸盐渍土的电阻率进行了试验;通过数据拟合,得到饱和状态下氯盐和硫酸盐电阻率与含盐量变化的拟合公式,并对其电阻率进行比较,得出结论:在饱和状态下,在相同含盐量时氯盐渍土的电阻率大于硫酸盐渍土,氯盐渍土的电流变化率也大于硫酸盐渍土。

关键词 硫酸盐渍土;氯盐渍土;电阻率;含盐量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.007

中图分类号 TU448 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0025-04

A Study of Resistive Experiment on Saturated Saline Soil with Different Salinity

WANG Le-fan, YU Cheng-hua, GU Qiang-kang, ZHANG Ren-yi, PEI Yuan-xin

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to study the relationships between the resistivity and the salinity of chloride saline soil and of sulphate saline soil with different salinity under the condition of saturation state, the resistivities of chloride saline soil and sulphate saline soil with different salinity are tested. Through data fitting, a fitting formula of the resistivities of chloride saline and sulphate saline and the variation of salinity are obtained under the condition of saturated state. Compared with their resistivities the results show that the resistivity of chloride saline soil is bigger than that of sulphate saline soil under the condition of saturation state with the same salinity and output voltage, so is the rate of current change. This study is a salutary lesson for the research on electro-osmosis method for saline soil treatment.

Key words: sulphate saline soil; chloride saline soil; resistivity; salinity

电阻率是土的重要物理性质,岩土体电阻率的研究始于石油测井中,1942年 Archie^[1]提出适用于纯净无泥质砂岩的电阻率公式后,根据泥质岩土体的不同,许多学者提出了派生的公式与模型来进行修正^[2-4],国内的许多学者针对不同土质的电阻率进行了研究^[5-9]。文献[10]对盐渍土的电阻率进行室内试验,提出电阻率随土体含水情况变化的经验公式,并用于电法勘探结果验证。盐渍土的含盐量是其重要性质,对工程有着重大的影响^[11],所以含盐量的测定极为重要。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用黄土取自西安某工地。采用液塑限联合测定仪依照土工试验方法标准《公路试验规程》测得其液塑限和塑性指数,进行多组试验,得塑限平均值为24.6,液限平均值为32.5,塑性指数定为7.9,定名为粉土。土样天然密度为1.65 g/cm³,土颗粒密度为2.71 g/cm³,最大干密度为1.83 g/cm³。

收稿日期:2013-12-16

作者简介:王乐凡(1989-),男,陕西咸阳人,硕士生,主要从事机场地基处理和边坡加固技术。E-mail: ganyilejidian@163.com

引用格式:王乐凡,余承华,顾强康,等.不同含盐量饱和盐渍土电阻率试验研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(4):25-28. WANG Lefan, YU Chenghua, GU Qiangkang, et al. A study of resistive experiment on saturated saline soil with different salinity[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 25-28.

1.2 试验方案

设置土样的压实度为90%，称取过筛烘干后的土825 g，按不同含盐量，分别配取0.5%、1%、2%、4%的硫酸钠盐渍土和氯化钠盐渍土共8个，加入干土14%（约115.5 g）左右的水达到最优含水量，充分搅拌混合，闷置24 h使其均匀。然后应用20 cm×5 cm×5 cm=500 cm³的钢模具制样，成型长方体土样，将其放入厚度为3 mm，体积为25 cm×5 cm×5 cm的可密封且有排气管的有机玻璃槽中。土样饱和需水为500-825÷2.71=195.57 g，故再注入80 g左右水。密封玻璃槽，从排气管抽真空，使土样充分饱和。

由于阳性电极有强烈腐蚀作用，铜、铁等电极材料会对试验产生影响，故应用石墨电极板。放置2块极板与土样两侧完全贴合，供电电极间距20 cm，通过导线连接电源，再将4个探针分别以相距L₁=11 cm和L₂=17 cm固定在绝缘塑料板上，将探针固定板的探针插入土样中，入土深度均为2.5 cm，测量试验中电压的变化，试验简易装置图见图1。

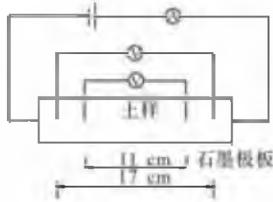


图1 电阻率测试装置

Fig.1 The resistivity testing device

1.3 试验操作与原理

试验输出电压分别设定为10 V、15 V、20 V、25 V、30 V共5个级别，记录每个级别、每种含盐量通过电流大小，并测定2组探针在每种电压下，通电2 s时的电压变化情况，记录数据，去除时间对测量误差的影响，然后根据电阻率的计算公式，计算出2组探针不同相距处和极板处土样的电阻率大小，绘制饱和硫酸钠盐渍土和氯化钠盐渍土在不同含盐量状态下电阻率的变化规律图，进行分析比较。

电阻率的计算公式为：

$$\rho = \Delta U S / I L \quad (1)$$

$$\rho_1 = \frac{\Delta U_1 5 \times 5 \times 10^{-4}}{I_1 11 \times 10^{-2}} = \frac{\Delta U_1}{I_1} \times 2.27 \times 10^{-2} \quad (2)$$

$$\rho_2 = \frac{\Delta U_2 5 \times 5 \times 10^{-4}}{I_2 17 \times 10^{-2}} = \frac{\Delta U_2}{I_2} \times 1.47 \times 10^{-2} \quad (3)$$

$$\rho_{\text{极板}} = \frac{\Delta U_{\text{极板}} 5 \times 5 \times 10^{-4}}{I_{\text{极板}} 20 \times 10^{-2}} = \frac{\Delta U_{\text{极板}}}{I_{\text{极板}}} \times 1.25 \times 10^{-2} \quad (4)$$

式中： ΔU 、 I 分别为探针处测量的电位差和电流； S 为电流通过的横断面积(m²)； ρ_1 、 ρ_2 分别为L₁和L₂时的电阻率计算值； $\rho_{\text{极板}}$ 为极板处的电阻率计算值。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

通过8组试验测得饱和状态时不同含盐量2种盐渍土实测电压电流关系，见表1。

表1 饱和硫酸钠、氯化钠盐渍土试验测试结果

Tab.1 The experimental test results of the saturated sodium sulfate saline soil and chloride saline soil

	输出 电压 /V	0.5%含盐量		1%含盐量		2%含盐量		4%含盐量					
		电流 /A	17 cm 电压 /V	11 cm 电压 /V	电流 /A	17 cm 电压 /V	11 cm 电压 /V	电流 /A	17 cm 电压 /V	11 cm 电压 /V			
硫 酸 钠	10	0.03	6.20	4.20	0.05	5.59	3.62	0.08	5.36	3.38	0.15	5.71	3.65
	15	0.06	9.90	6.30	0.08	8.98	5.99	0.14	8.65	5.75	0.26	9.77	6.25
	20	0.08	14.20	9.10	0.12	12.40	8.20	0.20	12.20	8.20	0.38	13.96	8.93
	25	0.10	18.90	12.30	0.15	17.00	10.02	0.27	16.00	10.69	0.50	18.09	11.57
	30	0.13	22.70	15.60	0.18	20.50	12.60	0.32	19.31	12.87	0.60	21.79	13.95
氯 化 钠	10	0.02	3.20	1.96	0.05	3.89	2.15	0.09	3.54	2.24	0.21	4.74	3.21
	15	0.04	5.69	3.56	0.09	7.10	4.03	0.17	6.23	5.25	0.38	8.42	5.36
	20	0.06	8.41	5.22	0.14	10.51	6.04	0.25	9.28	5.92	0.55	12.04	7.73
	25	0.09	11.43	7.13	0.19	14.05	8.12	0.33	12.35	7.90	0.74	16.12	10.29
	30	0.11	14.92	9.20	0.24	17.05	10.24	0.42	15.50	9.97	0.94	20.15	12.80

2.2 饱和盐渍土含盐量与土样电阻的关系

不同含盐量时电压与电流之间的关系见图2。随着电压的增高，土样中通过的电流基本呈线性变化，电压越高，电流越大；相同电压条件下，含盐量越

大的土样，电流越大；根据电阻的公式R=U/I，由图2可知，相同含盐量时，随着电压的增高，电阻值越来越小；同一种盐，在相同电压下，含盐量越高，电阻值越小，土中的电流是由于外加电场下土中离子可以进

行定向迁移,从而表现出导电现象;含盐量越高,土中离子浓度越大,电流越大,所以电阻值越小。

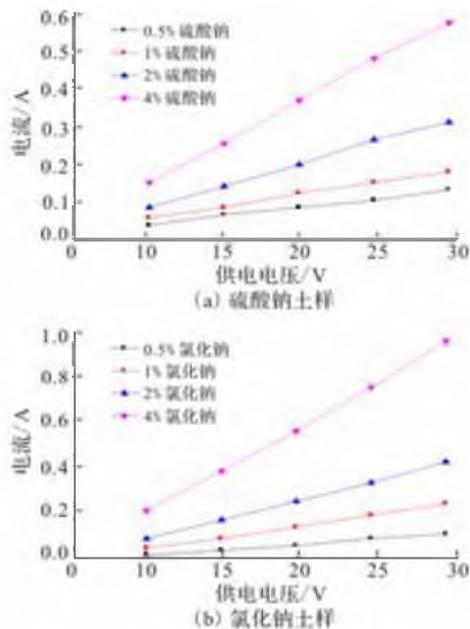


图 2 饱和状态不同种类盐的含盐量与电阻的关系
Fig.2 Relationship between the salinity and electric resistance in different kinds

不同种盐在相同的供给电压和含盐率的情况下,饱和氯化钠土样的电流通过量均大于相同电压、含盐量下饱和硫酸钠土样的通过电流。其原因为:氯离子半径为 1.81 \AA ,而硫酸根离子半径为 2.30 \AA ,前者在土样中的移动比后者活跃,所以在相同电压下,饱和氯化钠土样中的电流大于饱和硫酸钠土样,即前者电阻值小于后者。

2.3 饱和硫酸钠、氯化钠盐渍土含盐量与电阻率的关系

2 种盐渍土含盐量与电阻率的关系见图 3~图 4。试验中石墨极板处的电阻率普遍大于探针处,易产生较大的误差,故在测量电压计算电阻率时,不可采用两侧极板的电压。

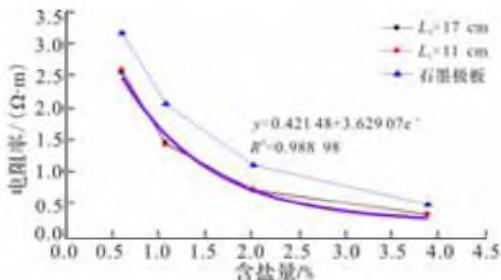


图 3 饱和硫酸钠盐渍土电阻率与含盐量的关系
Fig.3 Relationship between the resistivity and salinity of the saturated sodium sulfate saline soil

图 3 显示,随着硫酸钠含盐量的增大,电阻率不断减小,且减小幅度呈递减趋势,且当含盐量为 2%~4%时,电阻率的减小趋势变缓。当含盐量增大到

一定限度时,电阻率达到最低点,基本不再明显减小,到达电阻率的最低值。

根据饱和硫酸钠土样中室内测试不同相距处电阻率的数据点,计算相同含盐量时电阻率的平均值,进行曲线拟合,公式为 $y = 0.42148 + 3.62907e^{-x}$,饱和硫酸钠盐渍土在不同含盐率时电阻率基本符合此公式的计算值。

图 4 中电阻率的减小幅度呈递减趋势,即含盐量越高,电阻率的变化率越小,且当含盐量为 2%~4%时,电阻率的减小趋势已经趋于平缓。当含盐量增大到一定限度时,电阻率变化率达到最低点,基本不再明显减小,到达电阻率的最低值。

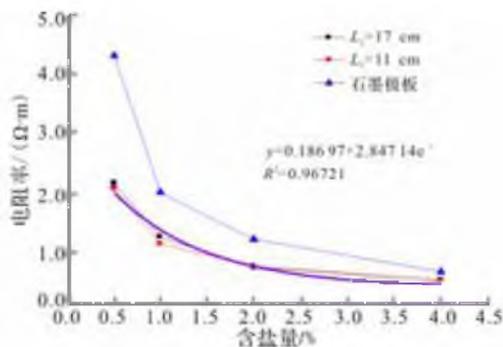


图 4 饱和氯化钠盐渍土电阻率与含盐量的关系
Fig.4 Relationship between the resistivity and salinity of the saturated sodium chloride saline soil

根据饱和氯化钠土样中室内试验得到不同相距时 $L_2 = 17 \text{ cm}$ 电阻率的数据点,计算相同含盐量时,电阻率的平均值,进行曲线拟合,拟合后公式为 $y = 0.18697 + 2.84714e^{-x}$,即饱和氯化钠盐渍土在不同含盐率时,电阻率基本符合此公式的计算值。

2.4 饱和氯化钠与硫酸钠盐渍土电阻率比较

饱和硫酸钠和氯化钠盐渍土的含盐量与电阻率变化关系见图 5,相同含盐量时,饱和硫酸钠盐渍土的电阻率均大于氯化钠盐渍土的电阻率;饱和状态下,2 种盐渍土含盐量增大时,电阻率逐渐减小,呈幂指函数减少且具有相接近的电阻率变化趋势。故在饱和状态下,不同成分盐的盐渍土对于电阻率有着较大的影响。

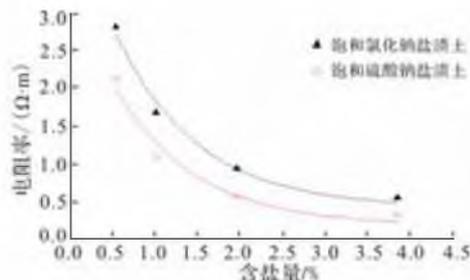


图 5 饱和硫酸钠和氯化钠盐渍土拟合曲线关系
Fig.5 Relationship between the saturated sodium sulfate and sodium chloride saline soil

3 结论

本文通过对硫酸钠盐渍土与氯化钠盐渍土的电阻率进行试验研究,得到了2种盐渍土在含盐量改变时的电流通过量变化和电阻率拟合曲线,并得到以下结论:

1)饱和状态的硫酸钠和氯化钠盐渍土,随着两端电压的增高,电流线性增大;相同电压不同含盐量时,含盐量越大,电流越大,且含盐量越大,电流随着电压变化趋势越大;相同电压、含盐量时,饱和氯化钠盐渍土的电流通过量大于硫酸钠盐渍土,前者电阻大于后者。

2)饱和状态的硫酸钠和氯化钠盐渍土,随着含盐量的增大,电阻率逐渐减小,且减小的趋势逐渐平缓。将其电阻率变化曲线拟合,分别得到电阻率与含盐量的关系公式,基本符合幂指数减小,硫酸钠盐渍土为 $y=0.42148+3.62907e^{-x}$,氯化钠盐渍土为 $y=0.18697+2.84714e^{-x}$ 。可以进行根据饱和状态下土的电阻率反推含盐量的研究。工程中,由于盐渍土含盐种类可能存在比较复杂的情况,本试验后续将进行其他盐渍土电阻率的研究。

参考文献(References):

- [1] Archie G E. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of the american institute of mining and metallurgical engineers, 1942, 146:54-61.
- [2] Waxman M H, Smits L J M. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand [J]. Society of petroleum engineers journal, 1968, 8(2):107-122.
- [3] Clavier C, Coates G, Dumanoir J. The theoretical and experimental bases for the "dual water" model for the interpretation of shaly sands [C]//SPE 52nd annual fall technical conference. Denver, Colorado: SPE, 1977: 6859.
- [4] 查甫生,刘松玉,杜延军,等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8):1671-1676.
ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(2): 155-165. (in Chinese)
- [5] 查甫生,刘玉松,杜延军,等. 击实黄土的电阻率特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):155-165.
ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, et al. Characteristics of electrical resistivity of compacted loess[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(2):155-165. (in Chinese)
- [6] 刘国华,王振宇,黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1):83-87.
LIU Guohua, WANG Zhenyu, HUANG Jianping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese journal of geotechnical, 2004, 26(1):83-87. (in Chinese)
- [7] 刘松玉,韩立华,杜延军. 水泥土的电阻率特性与应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11):1921-1926.
LIU Songyu, HAN Lihua, DU Yanjun. Experimental study on electrical resistivity of soil-cement[J]. Chinese journal of geotechnical, 2006, 28(11):1921-1926. (in Chinese)
- [8] 韩立华,刘松玉,杜延军. 一种监测污染土的新方法——电阻率法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1028-1032.
HAN Lihua, LIU Songyu, DU Yanjun. New method for testing contaminated soil: electrical resistivity method[J]. Chinese journal of geotechnical, 2006, 28(8):1028-1032. (in Chinese)
- [9] 敬芸仪,邓良基,张世熔. 主要紫色土电导率特征及影响因素研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(3):617-619.
JING Yunyi, DENG Liangji, ZHANG Shirong. Study on the character of purple soil EC and effecting factors[J]. Chinese journal of soil science, 2006, 37(3): 617-619. (in Chinese)
- [10] 李玲,周仲华,张虎元,等. 盐渍土电阻率试验研究[J]. 环境工程, 2012, 30:498-503.
LI Ling, ZHOU Zhonghua, ZHANG Huyuan, et al. Research on electrical resistivity test of saline soil[J]. Environmental engineering, 2012, 30: 498-503. (in Chinese)
- [11] 顾强康,刘伟. 爆夯加固法在机场地基处理中的应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004, 5(2):20-22.
GU Qiang kang, LIU Wei. Application of explosion compaction technology to ground strengthening in air-field [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2004, 5(2):20-22. (in Chinese)

(编辑:徐敏)