

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.123



电极布置对电阻率精确性影响的试验研究与仿真分析

申纪伟,毛海涛,黄庆豪,王正成,闫磊

(重庆三峡学院 土木工程学院,重庆 404100)

摘要:电阻率法在土壤测试的精确性方面存在较多不足,而电极是影响精度的重要原因,尤其是二极法测试。若能确定电极与土壤的接触程度,以及两电极间距离对测试结果的影响,将可最大化避免电极的干扰。基于二极法电阻率测试方法,选用锌污染标准砂作为模拟土壤,以测试交流电阻率为例,设置不同接触程度与不同电极间距两种工况,并结合 COMSOL 软件仿真分析,研究电极布置对电阻率测试的影响,并建立分析模型与误差计算式。研究表明:试验与模拟分析可相互验证和补充。接触程度越大,越有利于电阻率测试,随接触程度增大对测试电阻率的影响逐渐减弱;电极间距越大,对测试电阻率的影响越弱,细长型试样更有益于提高测试精度。导电模型分为正常段与受电极影响的过渡段串联,同时,径向电流密度可较好表征出各段的长度和极化情况。过渡段长度和极化随接触程度的增大而减小,与电极间距无关,通过电极布置模型可拟合不同电极间距的测试结果,得出正常电阻率。

关键词:电阻率;COMSOL 仿真;电极极化;电流密度

中图分类号:X859 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0061-10

Experimental and simulation analysis on influences of electrode arrangement on resistivity accuracy

Shen Jiwei, Mao Haitao, Huang Qinghao, Wang Zhengcheng, Yan Lei

(College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, P. R. China)

Abstract: There were many deficiencies in the accuracy of soil resistivity test technology, and electrode arrangement is an important reason, especially in two-electrode method. If the contact between electrode and soil and the distance of two electrodes can be controlled, electrode influences will be avoided to the

收稿日期:2019-01-03

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ1601017、KJ1601028、KJ1601029、KJQN201801223)、国家自然科学基金(41602367)、重庆市基础研究与前沿探索项目(No. cstc2018jcyjAX0673)、重庆市科委技术创新与应用示范项目(cstc2018jcsx-msyb0517)

作者简介:申纪伟(1987-),男,主要从事环境岩土监测研究, E-mail:shenjiwei200888@163.com.

毛海涛(通信作者),男,教授,博士, E-mail:maohaitao1234@163.com.

Received:2019-01-03

Foundation item: Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1601017, KJ1601028, KJ1601029, KJQN201801223); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 41602367); Chongqing Science & Technology Commission Basic and Frontier Research Projects (No. cstc2018jcyjAX0673); Technological Innovation and Demonstration Project of Chongqing Municipal Science and Technology Commission(cstc2018jcsx-msyb0517)

Author brief: Shen Jiwei (1987-), main research interest: environmental geotechnical monitoring research, E-mail: shenjiwei200888@163.com.

Mao Haitao(corresponding author), professor, PhD, E-mail: maohaitao1234@163.com.

greatest extent. Therefore, based on two-electrode test model, zinc-contaminated sand was selected as simulated soil to test its AC resistivity. Electrode arrangement conditions of contact degree and electrode distance were set up, and the influences of them on resistivity measurement were studied combining with COMSOL simulation. The influences of electrode arrangement on resistivity test were studied, and an analytical model and error calculation formulas were established. The results show that test and simulation can verify and supplement each other. The greater contact degree, the more favorable resistivity test, and the influence of contact on resistivity test gradually decreases as it increases. The greater electrode distance, the weaker effect on resistivity test and the slender sample is more beneficial for improving the test accuracy. Conductive model is divided into two transition segments and normal segments in series based on whether it is affected by polarization. The length and polarization of each segment are characterized by radial current density, which decreases with the increase of contact, but slightly affected by electrode distance. Normal resistivity can be obtained by fitting the testing results under different electrode distances using the electrode arrangement model.

Keywords: resistivity; COMSOL simulation; electrode polarization; current density

电阻率测试技术具有快速、无损、全面、经济等诸多优势^[1],多用于土壤环境污染监测、土壤物化性质探测等方面的研究^[2-4]。电阻率测试方法也不断推陈出新,主要有万用表直接测量法^[5]、二极法^[6]、四极法^[7]、交流阻抗法^[8]、高密度电法^[9]等。其中,二极法是电阻率测试的基本方法,具有装置简单、线路易于布置、连接方便等优点,在研究中常结合土工试验仪器联合使用。如 Liu 等^[10]选用圆形的 Soil Box 测试箱分析了铬浓度、含水量、复电阻率等因素的相互关系,并在圆柱形试样两端采用了铜电极,同时,避免电极边缘与装置接触。蒋吉方等^[11]利用固结仪布置塑料环刀及两个铜片电极,测到了软粘土压缩过程中电阻率的变化规律。

二极法中存在电极与试样间的接触问题,同时无法避免电极极化的影响^[12],针对这一问题,多数研究试验在电极布置上作了思考。如 Chen 等^[13]借助一维固结仪,依靠轴向压力增加接触,并采用了不锈钢网状电极测量磷矿土电阻率。Kibria 等^[14]采用打了均匀小孔的不锈钢电极,并利用固结压力,在研究土的固结电阻率变化中,充分增加电极与土样的接触。López-sánchez 等^[15]在指出双电极法中试样电阻与接触电阻不可能分开的缺点后,通过改变电极测试位置,应用新的方法来获得有效的电阻率,减少了非样本元素测量的影响。Erzin 等^[16]采用不锈钢电极,并且在电极面做了加工和钝化,以避免电极极化,使界面效应最小化。

然而,多数电阻率测试仅在试验操作上尽可能增加接触面积和降低极化程度,鲜有在电极布置方面对该问题进行系统讨论、分析和量化。前期研究

表明,电极与试样间的接触不完全,从而导致电流在试样端部存在严重的极化现象,这也是电极影响电阻率测试结果的主要因素。因此,在考虑电极极化方面,基于二极法土壤电阻率测试模型,以模拟土壤交流电阻率为例,经室内测试试验与仿真分析,探讨电极布置中存在的接触程度与电极间距两个主要因素对电阻率测试结果的影响,建立受电极影响的分析模型和误差计算式,在电极布置形式方面为电阻率测试装置减小和量化测试误差提供合理建议。

1 试验方法

1.1 测试装置与参数设置

试验电阻率测试装置如图 1 所示,试样装入圆形的 PVC 绝缘筒中,为便于电极片的安设,选择竖向放置试样,在上下两端设置圆形铜电极片,电极片由两端导线接入数字电桥。

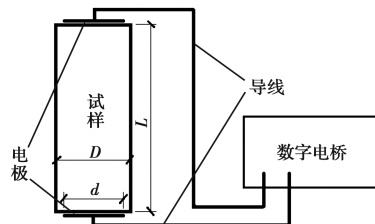


图 1 电阻率测试装置图

Fig. 1 Device diagram for resistivity test

试验材料选用中国 ISO 标准砂,并经去离子水充分洗涤后烘干,以除去砂粒表面的可溶性离子。此外,为使试样具有一定的导电性,与土壤电阻率相接近,同时,综合考虑锌离子为土壤中最常见的污染离子之一,锌元素的活性高于铜元素,不与铜电极发

生反应,硝酸锌易溶于水等因素,在级配均匀的标准砂中,配入一定量的硝酸锌溶液,以利于试验的测试。试验前,将配置好的硝酸锌溶液与处理过的标准砂均匀拌和,放入塑料盒中静置备用,此时,砂中锌离子含量为 1 000 mg/kg,含水量为 3%。

在电阻率测试中,含水量是影响测试结果的最主要因素^[4]。试验设置了含水量分别为 3%、6%、9%、12%的 4 种试样类型。在前期尝试性试验中得出,砂中含水量超过 15%时,水分受重力的影响而出现水气分布不均匀现象。因此,砂中含水量不能过大。试验中所设置的 4 种含水量均能和标准砂均匀拌和,在测试过程中均匀分布,以保证试样各处电阻率相同。此外,砂粒的密实情况也是影响电阻率大小的因素之一,为保证电阻率相同,试验根据

PVC 绝缘筒的体积,等比例控制砂的装入量,通过尝试性试验得出孔隙率为 0.38 时为宜。

电极布置设置方面,通过改变圆形电极的直径来模拟电极与试样的接触程度,共设置了直径 d 为 20、30、40、50 mm 共 4 种情况,电极与试样之间涂有导电胶(电阻率约 $0.000\ 35\ \Omega \cdot \text{m}$)以保证电极与试样的完全接触。若试样端面为 S_0 ,电极片面积为 S ,可定义接触程度 s 为电极片面积与试样端面的比值,即 $s=S/S_0$ 。此时,上述情况的接触程度分别为 12.5%、28.1%、49.9%和 78.0%。电极间距 L 为两电极片之间的距离,试验通过改变 PVC 筒的长度来实现,共设置了 0.5 D 、1.0 D 、1.5 D 、2.0 D 、2.5 D 和 3.0 D 共 6 种情况,其中, D 为试样的直径,为 56.6 mm,见表 1。

表 1 试验参数取值表

Table 1 Values of experiment parameters

试样性质参数			电极布置参数		
含水量 $\omega/\%$	孔隙率 n	锌含量 $c/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	电极间距 L/D	电极直径 d/mm	接触程度 $s/\%$
3、6、9、16	0.38	1 000	0.5、1.0、1.5、2.5	20、30、40、50	12.5、28.1、49.9、78.0

1.2 试验步骤

电阻率测试主要采用型号为 TH2828A 的 LCR 数字电桥测试电阻,如图 2 所示,再通过电阻率换算公式(1)计算得出。

$$\rho = Z \frac{S_0}{L} \quad (1)$$

式中: ρ 为测试电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; Z 为试样测试电阻, Ω ; S_0 为试样截面积, m^2 ; L 为电极间距, m 。



图 2 交流电阻测试图

Fig. 2 Test pictures of AC resistance

将砂试样配置一定量的蒸馏水,用玻璃棒拌和均匀,静置 3 h,使水气分布均匀。

选择一组等高的 PVC 绝缘筒,底部分别放入直径为 20、30、40、50 mm 并涂有导电胶的电极片,再将拌和均匀的砂试样装入筒中,顶部装满后轻轻按压,并称量装入后的质量,控制好砂的密实度。装好后为防止表面水分蒸发,采用玻璃片覆盖在顶部。

选择与筒底大小相同的电极片,涂导电胶后,放

在试样的顶部,并施加一定的压力保证接触。用导线将两电极片与数字电桥连通,读取频率为 50 Hz 时试样的交流电阻。

分别改变砂试样含水量和 PVC 绝缘筒的高度,重复上述试验步骤,完成全部测试,整个测试过程中,室温在 $20 \pm 2\ ^\circ\text{C}$ 范围内^[17],以排除温度对测试结果的干扰。

2 试验结果与分析

2.1 接触程度对测试电阻率的影响

在有关电阻率测试的研究中,测试常为原状土样、混凝土、岩石等表面较硬的试样,而测试电极往往为铜质或不锈钢,所以,电极与试样的接触程度成为影响结果的重要因素之一。图 3 为 4 个不同的含水量下,测试电阻率随接触程度的变化曲线。

图 3 中,含水量一定时,真实电阻率相同,但受接触程度和电极间距的影响,测得电阻率大小不一。由图 3 可得,在不同电极间距下,测试电阻率变化规律较为一致,随着接触程度的增大,测试电阻率逐渐降低。以电极间距为 2.0 D 为例,含水量分别为 3%、6%、9%、12%的 4 种情况中,随着接触程度由 12.5% 增大到 78%,测试电阻率分别降低 36.9%、34.2%、27.3%、42.4%。同样,含水量为 9% 时,电

极间距由 $0.5D$ 增大到 $3.0D$ 的情况下,测试电阻率分别降低 62.5%、53.3%、44.8%、27.3%、36.3%、30.4%。由此可见,接触程度对电阻率的测试结果影响较大。从曲线的凹凸性上可以看出,接触程度小于 49.9% 时,测试电阻率受其影响程度大于超过 49.9% 后的情况。测试电阻率受接触程度的影响随接触程度的增大而越来越弱。

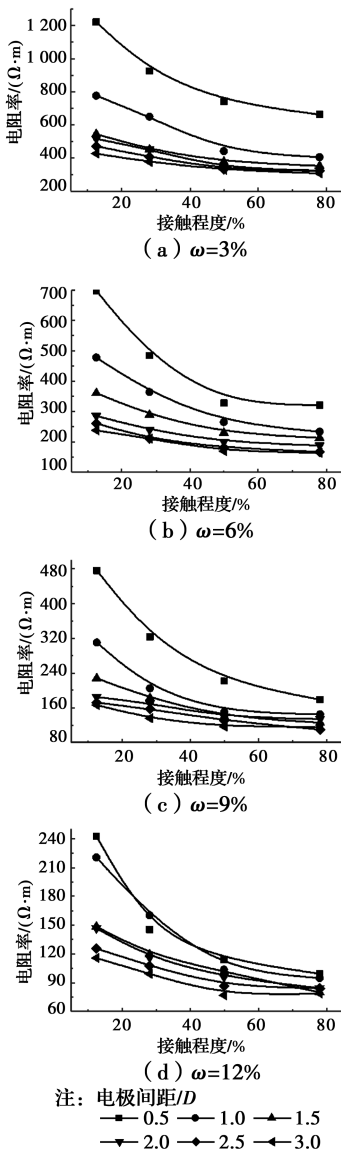


图3 测试电阻率与接触程度的关系曲线

Fig. 3 Curves of test resistivity and contact degree

当电极与试样接触不足,试样端部的电流通路就会发生由少增多的现象。端部电极接触面越小,则开始形成的电流通路越少,所表现出的电阻能力也就越大。接触程度小于 49.9% 时,电流通路经少变多的过程较长,测试电阻率也受其影响较大,超过 49.9% 后,电流通路形成过程相对较快,测试电阻率受其影响逐渐减小。

2.2 电极间距对电阻率的影响

电阻率测试研究中,通常需要设置合适的试样长度,试样长度及对应的电极间距也会对测试结果有影响。图4以试样直径 D 为参考,给出了不同含水量下电极间距由 $0.5D$ 增大到 $3.0D$ 时测试电阻率的变化曲线。

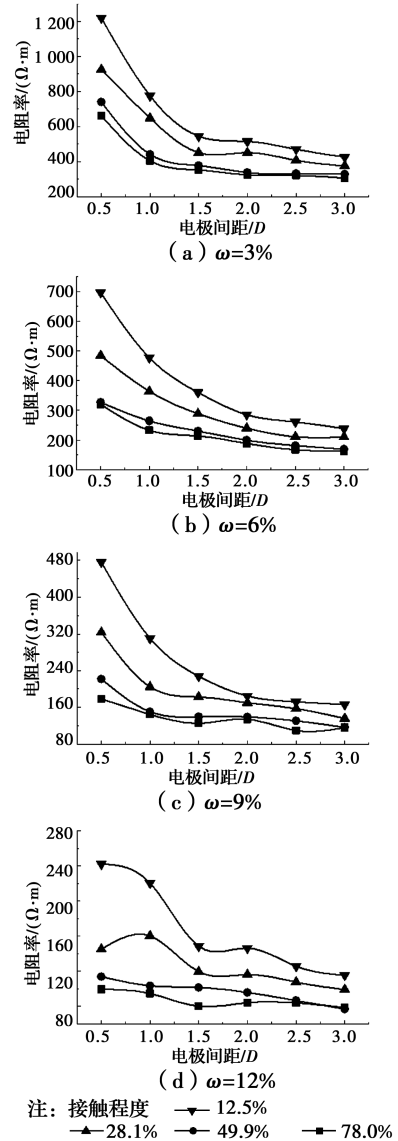


图4 测试电阻率与电极间距的关系曲线

Fig. 4 Curves of test resistivity and electrode distance

图4各曲线的规律较一致,电阻率随电极间距的增大而减小。以接触程度 49.9% 为例,图4中,电极间距由 $0.5D$ 增大到 $3.0D$ 的过程中,测试电阻率分别降低了 55.5%、48.4%、47.4% 和 32.4%。同样,含水量为 9% 时,接触程度分别为 12.5%、28.1%、49.9%、78.0% 的情况下,电阻率分别降低了 65.1%、58.0%、47.4% 和 35.1%。说明电阻率受电极间距的影响较大。由图4可知, $1.5D$ 可以作为电极间距对测试电阻率影响的一个分界点。当电

极间距小于 $1.5D$ 时,电极间距的变化对测试电阻率的影响显著;大于 $1.5D$ 时,电极间距的变化对测试电阻率的影响减弱较多。

测试中,电极两端极化导致测试电阻增大是测试电阻率增大的主要原因,而随着试样长度的增加,中间部分的比例逐渐加大,从而随着电极间距的增加,测试电阻率减小。由此看出,试样越长,测试越接近真实电阻率。然而,实际操作中,试样长度的增加,在取样、加工等方面存在不足,如岩芯断裂、混凝土裂纹、原状土样均匀性差异大等。因此,二极法电阻率测试中,电极间距选取应综合考虑上述两个方面。

3 COMSOL 仿真分析

二极法电阻率之所以受接触程度和电极间距的影响,是因为试样两端存在电极极化现象,若将电极的极化区域和程度划分出来,则有助于进一步对测试偏差进行分析。COMSOL 是一个多物理场模拟软件,在多物理场耦合方面有优势,其在导电分析上能够较好的仿真、计算和分析。

3.1 建模分析

模型采用三维建模,如图 5 所示,代表性选取了接触程度为 28.1%、电极间距为 $2.0D$ 的锌污染砂导电模型,模型选用右手直角坐标系,沿圆柱型模拟试样轴线为 z 轴,坐标原点设在模拟试样中心。参数设置方面,模型材料选取了与试验级配相同的纯砂粒材料,测试电压为 1 V,与试验数字电桥信号相同,试样介电常数利用 092SF 表面式探针介电常数仪测试得出。模拟以保证各种情况下模型整体电阻与试验测试电阻相等为主要前提条件。

经仿真计算,某一时刻电势和电流密度情况如图 5 所示,圆形曲面为等势面,电势由 1 V 逐渐减小至 0 V。箭头表示电流密度的大小与方向,在模拟试样的两端,电流密度存在极化现象,电流密度大小也不相同。相比两端的情况,中间部分电流密度大小均匀、方向一致。从等势面上也可以看出,电势为 0.95 V 和 0.05 V 的等势面,沿两端电极边缘形成了新凸起的极化电偶层。电势为 0.85 V 和 0.15 V 的等势面极化程度较大,而中间部分的等势面基本平行。

为区分极化现象和正常导电过程,可将两端存在极化的导电过程划分为过渡段。因两端电极布置情况相同,测试信号为交流信号,所以两个过渡段参数一致。如图 5 所示,设过渡段电阻为 Z_1 、竖向长度为 L_1 ,剩余部分为正常段,设电阻为 Z_0 、长度为 L_0 ,试样总长度为 L 。划分后可看作试样两端过渡

段与中间正常段竖向串联导电。

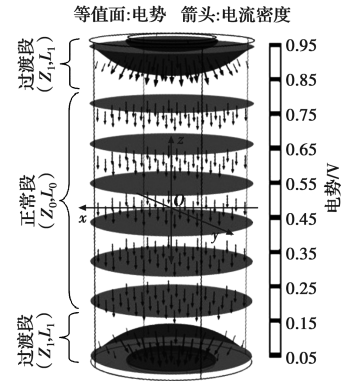


图 5 仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation model

电流密度垂直于等势面,在过渡段中从一端极化分出,正常段平行于模拟试样轴线,在另一过渡段极化聚拢。受极化影响,过渡段中电流密度紊乱、复杂,正常段大小和方向较为一致。通过数据分析发现:在区分正常段与过渡段上,选择垂直于模拟试样轴线方向的径向电流密度表征最为合适。

3.2 接触程度对过渡段的影响

为探讨接触程度与过渡段长度、电极极化的关系,图 6 为选取了模拟试样含水量为 9%、电极间距为 $2.0D$ ($-56 \sim 56$ mm) 时,不同接触程度下,径向电流密度(中心轴线处的电流密度沿 x 轴方向的投影)的大小变化曲线。

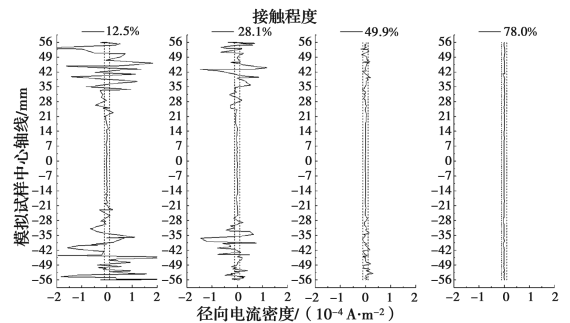


图 6 不同接触程度下径向电流密度曲线

Fig. 6 Curves of radial current density under different contact degrees

由图 6 可得,不同接触程度下,受电极极化的影响,模拟试样两端径向电流密度变化较大、方向不一。中间正常段则变化较小、较稳定,表明中间电流方向基本平行于模拟试样中心轴线。因此,可以根据径向密度变化曲线,进一步划分出极化范围,表现极化程度的大小。为准确划分过渡段(极化范围),综合考虑模拟仿真情况,表 2 中选取了径向电流密度超过 $1.0 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 的为过渡段,如图 6 中划分出的虚线范围所示,划分结果见表 2。

表2 不同接触程度下过渡段长度及极化程度表

Table2 Transition length and polarization under different contact degrees

接触程度/%	范围/mm(长度/mm)			径向电流密度数字平均值/($10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$)		
	下端过渡段	正常段	上端过渡段	下端过渡段	正常段	上端过渡段
12.5	-56~-22.78(33.22)	-22.78~22.69(45.47)	22.69~56(33.32)	6.18	0.237	6.43
28.1	-56~-26.85(29.15)	-26.85~24.84(51.69)	24.84~56(31.17)	3.25	0.179	2.83
49.9	-56~-33.90(22.10)	-33.90~33.77(67.67)	33.77~56(22.23)	0.592	0.171	0.714
78.0	忽略过渡段			0.014 1		

由表2可知,在同一接触程度下,模拟试样两端过渡段长度基本相等。随着接触程度的增加,过渡段的长度逐渐减小,当接触程度超过78%时,过渡段可忽略。另一方面,径向电流密度的大小是电极极化的表现。当接触程度为12.5%时,过渡段径向电流密度数字平均值达到 6.18×10^{-5} 和 $6.43 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。随着接触程度的增加,过渡段极化现象逐渐减小,接触程度超过49.9%时,过渡段径向电流密度数字平均值小于 $7.14 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。过渡段分出后,正常段的径向电流密度数字平均值大幅减小,模拟试验中接触程度为12.5%时最大仅为 $2.37 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。随着接触程度的增加,径向电流密度数字平均值逐渐减小。

3.3 电极间距对过渡段的影响

为进一步探讨过渡段长度和电极极化是否受电极间距的影响,图7选取了接触程度为28.1%时,不同电极间距下,各试样中心轴线处径向电流密度的大小变化曲线。

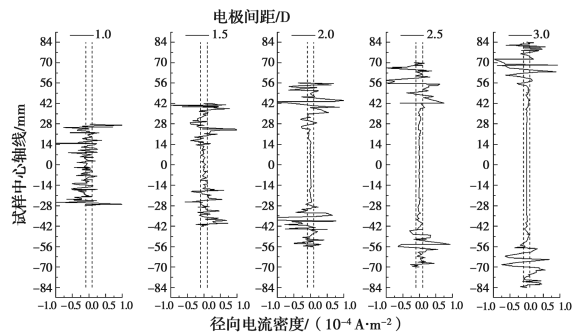


图7 不同电极间距下径向电流密度曲线

Fig. 7 Curves of radial current density under different electrode distances

图7中,不同电极间距下,模拟试样两端均以径向电流密度的情况表现出了极化现象,中间部分径向电流密度相对较小。为进一步理清过渡段长度和极化程度,采用超过 $1.0 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 的径向电流密度对过渡段进行划分,划分区间如图7中虚线所示,划分具体情况见表3。

表3 不同电极间距下过渡段长度及极化程度表

Table 3 Transition length and polarization under different electrode distances

电极间距/D	范围/mm(长度/mm)			径向电流密度数字平均值/($10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$)		
	下端过渡段	正常段	上端过渡段	下端过渡段	正常段	上端过渡段
1.0	无正常段,均受极化影响			1.96		1.87
1.5	-42~-12.52(29.48)	-12.52~13.66(26.18)	13.66~42(28.34)	2.53	0.325	1.90
2.0	-56~-26.85(29.15)	-26.85~24.84(51.69)	24.84~56(31.17)	3.20	0.179	2.83
2.5	-70~-40.19(29.82)	-40.19~39.19(79.38)	39.19~70(30.81)	3.01	0.131	1.96
3.0	-84~-55.10(28.90)	-55.10~55.12(110.22)	55.12~84(28.88)	3.06	0.115	2.30

表3为不同电极间距下,两端过渡段与中间正常段的长度和径向电流密度数字平均值的变化情况。模拟试样上下两端的过渡段长度基本相同。值得注意的是:接触程度相同时,不同电极间距下的模拟试样过渡段也基本相同。如表3中电极间距由

1.5D~3.0D变化时,过渡段长度均在28.34~31.17 mm较小范围内变化,平均值为29.57 mm。电极间距为1.0D时,模拟试样整个导电过程均受极化的影响,因此,没有划分出正常段。这与试验结果分析中电极间距小于1.5D对测试电阻率影响显著的分

析一致。

在径向电流密度数字平均值表现极化程度方面,表 3 中电极间距在 $1.5D \sim 3.0D$ 时,过渡段的径向电流密度数字平均值也基本相同。下部过渡段变化范围为 $(2.53 \sim 3.20) \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$,上部过渡段变化范围为 $(1.90 \sim 2.83) \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。

综上,在电极接触程度相同时,电极间距的变化对两端过渡段长度和极化程度的影响较小。这也说明极化现象仅与接触程度有关,与电极间距无关。

4 准确性分析

上述分析中,同一接触程度的模拟试样中,过渡段长度和极化程度基本相同,且受电极间距的影响较小。这与试验及模拟中的对称性假设一致,也就是说,两端相同接触情况下,过渡段长度、极化程度及过渡段电阻可看作是相同的。根据图 5 介绍的串联模型可得,测试电阻为中间正常段电阻与两端过渡段电阻之和,如式(2)所示。

$$Z = Z_0 + 2Z_1 \tag{2}$$

式(2)结合测试电阻率式(1),得式(3)。

$$\rho \frac{L}{S_0} = Z_0 + 2Z_1 \tag{3}$$

设正常段电阻率为 $\rho_0, \Omega \cdot \text{m}$;过渡段平均电阻率为 $\rho_1, \Omega \cdot \text{m}$;各导电段试样截面面积均为 S_0, m^2 。根据电阻率定义,得式(4)和式(5)。

$$Z_0 = \rho_0 \frac{L_0}{S_0} \tag{4}$$

$$Z_1 = \rho_1 \frac{L_1}{S_0} \tag{5}$$

联立式(3)~式(5),得式(6)。

$$\rho \frac{L}{S_0} = \rho_0 \frac{L_0}{S_0} + 2\rho_1 \frac{L_1}{S_0} \tag{6}$$

结合图 5 模型中长度关系式($L = L_0 + 2L_1$),得式(7)。

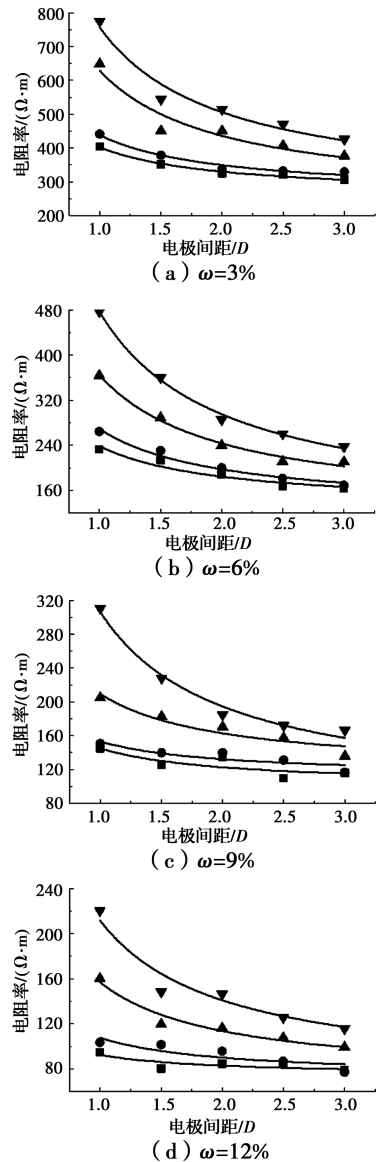
$$\rho = (\rho_1 - \rho_0) \frac{2L_1}{L} + \rho_0 \tag{7}$$

式(7)建立了测试电阻率与正常电阻率、过渡段平均电阻率以及电极间距(试样长度)、过渡段长度的关系式。值得关注的是:模拟分析中,接触程度一致时,电极间距几乎不影响过渡段平均电阻率及长度。因此,在接触程度一定时,式(7)中测试电阻率

仅受电极间距的影响。此时,设参数 $A = 2L_1(\rho_1 - \rho_0)$,在确定的试样中,参数 A 仅受接触程度的影响。将参数 A 代入式(7),得式(8)。

$$\rho = \frac{A}{L} + \rho_0 \tag{8}$$

式(8)建立了电极布置分析模型,在接触程度一定时,图 8 为采用式(8)拟合分析测试电阻率与电极间距关系,所得拟合结果见表 4。



注: 接触程度
 ▼12.5% ▲28.1% ■49.9% ●78.0%

图 8 电极布置分析模型拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of electrode arrangement analysis model

根据图 8 拟合结果,表 4 给出了不同含水量、不同接触程度下,参数 A 与正常段电阻率的结果,同时给出了拟合相关性指数 R^2 。

表4 电极布置分析模型拟合结果

Table 4 Fitting results of electrode arrangement

analysis model

含水量/%	接触程度/%	参数 A/ ($\Omega \cdot \text{m}^2$)	正常电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	相关性 指数 R^2
3	12.5	28.04	255.6	0.95
	28.1	21.56	243.4	0.91
	49.9	9.89	261.1	0.97
	78.0	8.05	258.1	0.98
6	12.5	20.40	112.9	1.00
	28.1	13.62	121.7	0.99
	49.9	8.04	125.5	0.97
	78.0	6.09	129.8	0.92
9	12.5	12.51	92.8	0.98
	28.1	5.21	116.2	0.88
	49.9	2.34	111.2	0.70
	78.0	2.51	100.2	0.62
12	12.5	8.41	64.2	0.93
	28.1	4.84	70.4	0.94
	49.9	1.98	72.3	0.63
	78.0	1.07	73.2	0.64

表4中,相同含水量下,不同电极直径之间的正常电阻率较为接近,变异系数分别仅为3.05%、5.87%、10.06%、5.79%,离散程度较小。参数A受接触程度的影响,随接触程度的提高而降低,表明接触程度越高,过渡段平均电阻率越接近正常电阻率。

在测试结果的精确性评价方面,可选择绝对误差 Δ 、相对误差 δ 两个参数对测试结果进行评价,结合测试模型式(8)得

$$\text{绝对误差: } \Delta = \rho - \rho_0 = \frac{A}{L} \quad (9)$$

$$\text{相对误差: } \delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{A}{L\rho_0} \quad (10)$$

综上所述,在接触程度一定的情况下,参数A基本不变,电阻率测试中,可以设置电极间距不同的平行试验,通过式(8)拟合分析获得正常电阻率,同时,可以进一步分析结果误差随电极间距的变化,选择合理的电极间距和试样长度。

5 讨论

在二极法电阻率测试中,电极布置情况在电极

接触程度与极化现象对测试结果产生影响,在实际测试过程中,影响电阻率测试的因素是多方面的,测试分析中还需结合其他方面综合考虑。此外,提高精度通常需花费更多的时间、经济成本,这往往与电阻率测试技术快速、全面等优点是相悖的。从本例的角度出发,以下几点还需进一步思考:

1)模拟土壤试样主要是由粘附在砂粒表面的孔隙水溶液导电,因而真实的电流通路曲折复杂,随砂粒大小、分布、级配等不同而不同,接触程度和极化现象也会受到一定的影响。如砂粒较大时,接触程度往往较低,电流在砂粒表面的孔隙水溶液中流通,极化也发生在砂粒表面的孔隙水溶液中。砂颗粒的分布、级配也会影响孔隙水溶液的分布,形成不同的网状导电结构,电极极化的规律性将减弱。若在土壤测试中,除考虑孔隙水溶液外,土颗粒间的导电也是不能忽视的,存在固、液和固液联合导电的情况^[18],其中的电流密度分布受这些影响也会更复杂。

2)电极与土壤接触方面也存在较多因素,如土壤含水量、电极接触压力、电极接触方式等。此外,土体温湿状况,测试设备等影响因素也应注意统一和规避。土壤含水量越大,越有利于电极的接触。电极与土样接触一般需要施加一定的压力,在压力增大的过程中,测试电阻也会逐渐减小,可看作为接触程度提高的过程。电极接触方式方面,二极法通常采用电极片放置试样端的方法测试,四极法采用探针插入试样,而探针的周围也会发生极化现象^[13]。电极接触方式的不同,极化影响也不相同,进而产生不同的测试结果。关于温度对土壤电阻率测试结果影响的讨论已有深入研究^[17],温度的高低也会对电极与试样接触的优劣产生影响。

3)数据分析方面,试验研究数据较少,仿真分析也是在试验的基础上建立,因此,存在一定的局限性。试验分析指出大于49.9%时的接触程度对测试电阻率影响减弱,还有待进一步给出电极最低接触程度,以利于带孔或网状不锈钢电极的布置。模拟分析中通过电流密度得出接触程度超过78%时,极化影响几乎可忽略,这里也有待于找出可忽略极化影响的最低接触程度。考虑电极间距时,试验分

析指出 1.5 倍试样直径的电极间距可作为影响测试电阻率大小的分界点。同时,模拟分析显示电极间距小于两倍过渡段长度时,整个试样均受极化影响,对测试电阻率的影响较大。根据这一原因,结合过渡段长度可得出接触程度分别为 12.5%、28.1%、49.9%时,电极间距分界点为 1.19、1.08、0.79 倍的试样直径。若接触程度进一步提高,则分界点也会进一步减小,因此,合适的电极间距也受到接触程度的影响。

4)模型分析方面,单独划分了受极化影响的过渡段,针对接触程度提出了包含过渡段长度和过渡段平均电阻率的参数 A ,针对电极间距划分了测试长度 L ,并在接触程度一定时,拟合分析了正常段电阻率。参数 A 受接触程度的影响有待进一步分析,例如,如何测试电极与试样的接触程度,接触区域不再是圆形而是多点区域等。土壤电阻率与土壤含水量、污染物浓度、孔隙裂缝等均有关,这些因素对电阻率是综合影响的。有学者划分主次因素方式,对土壤污染物浓度、含水量、孔隙等进行定量评价^[19],这也进一步提出了误差精度范围的选取,建立测试过程中的定量误差分析模型也尤为重要。

6 结论

基于土壤电阻率二极法测试原理,以测试含有锌离子污染砂的交流电阻为例,通过室内试验与模拟仿真,系统分析了电极布置的两个方面对测试电阻率的影响。结论如下:

1)接触程度越大越有利于电阻率测试,接触程度对测试电阻率的影响随其增大而逐渐减弱;电极间距的增大对测试电阻率的影响逐渐减弱,细长型试样更有益于提高测试精度。

2)导电模型可划分为正常段与两端过渡段串联,径向电流密度可较好表征出各段的长度和极化情况。接触程度越大过渡段长度越小,接触程度较大时,极化影响很小可忽略。

3)试样两端过渡段长度和极化程度仅与接触程度有关,与电极间距无关。电极间距小于两倍过渡段长度时,试样均受极化的影响。试验与模拟分析可相互验证和补充。

4)建立了电极布置对测试电阻率影响的分析模型以及误差计算式,参数 A 仅与接触程度有关,长度 L 代表电极间距,可通过拟合不同电极间距的测试结果得出正常电阻率。

参考文献:

- [1] KRAM M, KELLER A, MASSICK S, et al. Complex NAPL Site characterization using fluorescence part 1: selection of excitation wavelength based on NAPL composition [J]. *Soil and Sediment Contamination (Formerly Journal of Soil Contamination)*, 2004, 13 (2): 103-118.
- [2] 陈云敏, 施建勇, 朱伟, 等. 环境岩土工程研究综述 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(4): 165-182.
CHEN Y M, SHI J Y, ZHU W, et al. A review of geoenvironmental engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45 (4): 165-182. (in Chinese)
- [3] 刘松玉. 污染场地测试评价与处理技术 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 1-37.
LIU S Y. Geotechnical investigation and remediation for industrial contaminated sites [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40 (1): 1-37. (in Chinese)
- [4] 周蜜, 王建国, 黄松波, 等. 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.
ZHOU M, WANG J G, HUANG S B, et al. Experimental investigation on influencing factors in soil resistivity measurement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3269-3275. (in Chinese)
- [5] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 重金属污染黏性土电阻率影响因素分析及其预测模型 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(4): 866-871.
CHU Y, LIU S Y, CAI G J, et al. Impact factor analysis of resistivity of heavy metal polluted cohesive soil and its prediction model [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46 (4): 866-871. (in Chinese)
- [6] 宋志伟, 董晓强, 高宜涛, 等. 重金属污染砂的交流电阻率特性试验 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2015(5): 60-65.
SONG Z W, DONG X Q, GAO Y T, et al. Experimental analysis of AC resistivity properties of

- zinc contaminated sand [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering*, 2015(5): 60-65. (in Chinese)
- [7] 张贺, 杨辉, 俞海勇. 对四电极法测试混凝土表面电阻率影响因素的研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(1): 9-12.
- ZHANG H, YANG H, YU H Y. Research of influencing factors on concrete surface resistivity with Wenner four-probe measurement [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(1): 9-12. (in Chinese)
- [8] 董晓强, 黄凤凤, 苏楠楠, 等. 非饱和黄土受压过程中交流电阻率特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 189-197.
- DONG X Q, HUANG F F, SU N N, et al. Experimental study of ac electrical resistivity of unsaturated loess during compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 189-197. (in Chinese)
- [9] 郭秀军, 贾永刚, 黄潇雨, 等. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1662-1669.
- GUO X J, JIA Y G, HUANG X Y, et al. Application of multi-electrodes electrical method to detection of slide-face position [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1662-1669. (in Chinese)
- [10] LIU H R, YANG H L, YI F Y. Experimental study of the complex resistivity and dielectric constant of chrome-contaminated soil [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 131: 109-116.
- [11] 蒋吉方, 余闯, 廖饶平, 等. Cu^{2+} 对温州软粘土电阻率特性影响的试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(6): 85-90.
- JIANG J F, YU C, LIAO R P, et al. Tests on electrical resistivity characteristics of Wenzhou soft clay with Cu^{2+} [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(6): 85-90. (in Chinese)
- [12] 刘志彬, 许翀. 土电阻率测试中的几个基本问题[J]. *公路*, 2010, 55(9): 187-192.
- LIU Z B, XU C. Several basic problems in electrical resistivity measurement of soils [J]. *Highway*, 2010, 55(9): 187-192. (in Chinese)
- [13] CHEN Y L, WEI Z A, IRFAN M, et al. Laboratory investigation of the relationship between electrical resistivity and geotechnical properties of phosphate tailings [J]. *Measurement*, 2018, 126: 289-298.
- [14] KIBRIA G, HOSSAIN S, KHAN M S. Determination of consolidation properties using electrical resistivity [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 152: 150-160.
- [15] LÓPEZ-SANCHEZ M, MANSILLA-PLAZA L, SÁNCHEZ-DE-LAORDEN M. Geometric factor and influence of sensors in the establishment of a resistivity-moisture relation in soil samples [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 145: 1-11.
- [16] ERZIN Y, RAO B H, PATEL A, et al. Artificial neural network models for predicting electrical resistivity of soils from their thermal resistivity [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(1): 118-130.
- [17] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1151-1155.
- HAN L H, LIU S Y, DU Y J. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1151-1155. (in Chinese)
- [18] DOOLITTLE J A, BREVIK E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies [J]. *Geoderma*, 2014, 223/224/225: 33-45.
- [19] 孙亚坤, 能昌信, 刘玉强, 等. 铬污染土壤电阻率特性及其影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1992-1998.
- SUN Y K, NAI C X, LIU Y Q, et al. Investigation on the electrical resistivity of chromium contaminated soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 1992-1998. (in Chinese)