

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202000858



本刊网刊

电渗模型电阻测量技术

庄艳峰, 刘娅妮*, 郭康仕

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:本文对电渗模型中电阻测量方法进行了改良, 提出串联法代替当前的电势测针法和夹具法, 并提出适用于测量EKG电极电阻的走线法。串联不同长度的电渗土体测量电极与土体间的接触电阻, 消除了电势测针法中测针与电极之间一段土体电阻值的误差影响, 同时避免了电势测针插入土壤对土壤电流分布的影响; 串联不同长度的电渗电极测量电极电阻率时, 消除了夹具法测量时夹具和电极之间接触电阻的误差影响。结果表明: 电势测针法所得的接触电阻与串联法得到的接触电阻的比值大多为1.3~1.4, 验证了电势测针法将测针与电极间的一段土体值计入了接触电阻, 造成测得的接触电阻偏大, 故该比值的大小取决于该段土体的电阻值; 串联法对于当前应用广泛的EKG电极并不适用, 提出的走线法测量EKG电极电阻率能消除电极板内因嵌入铜制导线而电流分布不均的影响, 测量结果基本不受电极长度的影响, 具有良好的可靠性和稳定性, 且测量便捷, 方便应用于EKG电极生产工艺中, 有比较广阔的应用前景; 走线法测量EKG电极所得的电阻率与夹具法得到电阻率的比值大多为0.08~0.10, 该比值主要与夹具和电极板间的接触电阻相关, 该接触电阻仅取决于夹具和电极板, 故可利用该比值对使用夹具法的测量结果进行修正; 在许多室内试验和工程中均应用到了EKG电极, 考虑EKG电极电阻率对整个试验和工程的能耗影响时, 可参考电阻率比值0.08~0.10进行修正。

关键词:电渗; 电极电阻; 接触电阻; EKG电极

中图分类号:TU4; T3; TM93

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)05-0138-08

Resistance Test Technology of Electroosmosis Model

ZHUANG Yanfeng, LIU Yani*, GUO Kangshi

(School of Civil Eng., Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

Abstract: The resistance measurement methods in the electroosmotic model were modified. The series method was proposed to replace the current electric potential measurement and fixture method, and the wiring method suitable for measuring the resistance of EKG electrode was proposed. The method of measuring contact resistance between electrode and soil with electroosmotic soil of different lengths in series eliminated the error influence of resistance of a section of soil between the measuring needle and electrode in electric potential measurement and avoided the influence on current distribution because of inserting the potentiometric needle in the soil. The method of measuring electrode resistivity with electrodes of different lengths in series eliminated the error influence of contact resistance between electrode and fixture in fixture method. The experimental results showed that the ratio of contact resistance obtained by electric potential measurement to that obtained by series method was mostly between 1.3~1.4, which verified that the contact resistance measured by electric potential measurement was larger because resistance of a section of soil between the needle and electrode was included in the contact resistance. The ratio depended on the resistance value of the soil between the needle and electrode. Series method for EKG electrode was not applicable. The wiring method was presented to measure EKG electrode resistivity to eliminate the influence of uneven current distribution in the electrode plate due to embedded copper wire. The measurement results of

收稿日期:2020-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41472039; 51109168)

作者简介:庄艳峰(1978—),男,副教授,博士生导师。研究方向:电渗和土工合成材料。E-mail: zhuang@tsinghua.edu.cn

*通信作者:刘娅妮, E-mail: 15273163206@163.com

网络出版时间:2021-08-27 17:52:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20210827.1402.003.html>

wiring method were basically not affected by the length of the electrode, with good reliability and stability. The wiring method was convenient and applied in EKG electrode in the production process. There is a broad application prospect. The ratio of resistivity of EKG electrode obtained by wiring method to that obtained by the fixture method was mostly between 0.08~0.10. The ratio was mainly related to the contact resistance between electrode and fixture which just depended on the fixture and electrode. Therefore, the ratio could be used to modify previous results obtained by fixture method. The EKG electrodes have been used in many laboratory tests and projects. Considering the influence of the resistivity of EKG electrode on the energy consumption of the whole test and project, the resistivity ratio of 0.08~0.10 could be adopted for correction.

Key words: electroosmosis; electrode resistance; contact resistance; EKG electrode

在处理深厚的软黏土地基时,电渗法噪声小、排水固结速度快,在减低土体含水量的同时,可显著提高土体的抗剪强度,极大降低土体的灵敏度^[1]。此外,该方法对不同深度土体的加固效果较为均匀,且强度基本维持不变^[2]。电渗过程中的电现象也可用于去除或封锁土中污染物,传输金属和极性污染物,冲洗土中污染物^[3-4]。然而,在实际应用中存在较高的能耗及界面电阻导致的阳极腐蚀^[5]、电极产气滞留^[6]及电压损失^[7-8]等问题,影响电渗能耗。孙召花等^[9]进行了真空预压与电渗异步加固的联合试验以降低能耗;苏俊伟^[10]将电渗法应用于运营期过湿路基排水工程,研究了不同参数下的土体电渗能耗问题;刘志涛^[11]、Nasiri^[12]等将电渗法应用于污染土修复,从能耗角度优选添加剂。由此可知,能耗是研究电渗法必须考虑的问题之一。能耗问题与电阻息息相关,电渗中电阻分为电极电阻、接触电阻和土体电阻3个部分,准确测量各部分电阻对电渗设计及应用十分重要。研究发现,当前测量电渗模型中电阻的电势测针法和夹具法均存在一定的缺陷。

电渗模型通电后的土体和电极之间产生的电阻为接触电阻,该电阻常以接触电阻^[13-14]或者界面电阻^[15-18]表示。电渗中,电极与土体间的接触电阻在接触部位会产生界面电势降,导致作用在土体的有效电压低于电源输出电压。文献^[13-16,19]显示,电渗过程中接触部位的界面电势降随时间逐渐增大,土体有效电势占比降低,导致过多的电能浪费在土体与电极的接触部位上。相关的文献^[13-15,20]中测量接触电阻的方法均为电势测针法,在土体中尽可能接近电极的位置插入电势测针,测量当前位置测针的电势,从而计算出测针与电极之间接触电阻的大小。该方式较为简单快捷,但在测量土体电阻和电极间的接触电阻时,由于测针与电极之间始终存在一段土体,造成所测得的接触电阻由于包含了该段土体电阻而偏大,并且由于电势测针的插入会扰动土壤而影响电流分布造成测量误差。为避免上述缺陷,本文提出串联法,即通过串联不同长度的电渗模型土体,联立方程组求解接触电阻。

同时发现,串联法原理同理可应用于测量电极

电阻率。电极电阻率是电极产品质量控制的重要参数,在电极母料的选材阶段及后期产品生产的品控与成品验收阶段都需要测定电阻率。试验采用的电极是越来越广泛运用于室内试验及工程实践的EKG电极^[21-25]。当前测量EKG电极电阻采用的是夹具法,使用一套铁质夹具夹在电极两端通电,通过欧姆定律计算出电极电阻。应用夹具法测量电极电阻时,因为没有考虑夹具和电极之间的接触电阻而导致测得的电极电阻偏大;而串联法测量电极电阻时,通过串联不同长度的电极,联立方程组,消除了夹具和电极间的接触电阻,避免了夹具和电极间接触电阻的误差影响。

串联法原理应用的基础在于被测物应该是均匀的,即电阻率相同,但在电渗过程中通电一段时间后,土体内部含水率发生变化不再均匀,可见串联法测量接触电阻只适用于土体均匀的初始阶段,故对于通电过程中的接触电阻,本文画出含水率和土体电阻率的关系曲线,并测量出电势测针到电极的土体长度及土体含水率,计算出该段土体电阻,再用电势测针所测得的接触电阻减去该部分土体电阻,从而得到准确的接触电阻。在应用串联法测量电极电阻时,由于被测量的EKG电极板内嵌入了两根导线,串联法原理不再适用,故作者提出采用走线法进行测量。走线法采用直接从电极板内引出导线取代夹具,既避免了夹具与电极之间接触电阻的误差影响,又避免了由于内嵌导线电极板内电流分布不均引起的误差影响。

1 串联法测量电渗模型电阻

当前测量电极土体之间的接触电阻和电极电阻的方法分别为电势测针法和夹具法,这两种方法的测量原理均为伏安法。

1.1 串联法测量接触电阻

目前,测量接触电阻所采用的测针法是在土体中插入电势测针,测出当前土体位置的电势大小,从而计算得出接触电阻。该方法虽然看起来便捷、简单,但是电势测针的插入会扰动土体的电场分布情况,并且电势测针只能尽可能地接近电极板,测针和电

极之间始终存在一段土体。测针法的目标是测得电极与土体间的接触电阻,而直接将测针与电极接触测得的是电极与测针的接触电阻,故测针只能在土体中尽量靠近电极板却无法消除此段土体。测针法测得的接触电阻将该段土体电阻值也计入在内,故而所测得的结果将偏大,当电流较小时,该段土体电阻将会非常大,进而影响测得的阻值大小。在此基础上,本文作者提出串联法,从而避免电势测针法存在的问题。串联法测量接触电阻的电路图如图1所示,将两个横截面积相同、长度不同的土体模型串联接上电源,测量相同电流下的不同电压,从而换算得出接触电阻。

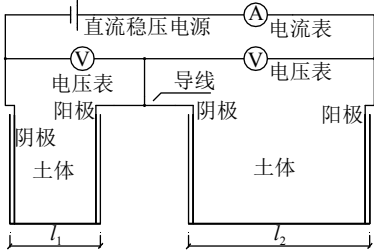


图 1 串联法电路图

Fig. 1 Circuit diagram of series

电渗模型的电阻分为电极电阻、接触电阻和土体电阻,电极电阻的电阻率比土体电阻的电阻率低好几个数量级,且虽然电极与土体过流面积一样,但土体长度远大于电极电阻厚度,故电路中的电阻只需考虑接触电阻和土体电阻。

$$R = R_S + R_C + R_E \approx R_S + R_C \tag{1}$$

式中, R_S 为土体电阻, R_C 为接触电阻, R_E 为电极电阻。

由图1可知,

$$R_C + R_{S1} = R_C + \frac{\rho_S l_1}{bh} = \frac{U_1}{I} \tag{2}$$

$$R_C + R_{S2} = R_C + \frac{\rho_S l_2}{bh} = \frac{U_2}{I} \tag{3}$$

$$R_C = \frac{U_1}{I} - \frac{(U_2 - U_1)l_1}{I(l_2 - l_1)} \tag{4}$$

当 $l_2 = 2l_1$ 时,

$$R_C = \frac{2U_1 - U_2}{I} \tag{5}$$

$$\rho_S = \frac{(U_2 - U_1)bh}{I(l_2 - l_1)} \tag{6}$$

式(2)~(6)中, R_{S1} 为 l_1 长度的土体电阻, R_{S2} 为 l_2 长度的土体电阻, b 为土体宽度, h 为土体高度, ρ_S 为电阻率。

1.2 串联法测量电极电阻

当前,对于电渗模型中的电极电阻测量常采用夹具法,电极如图2所示,夹具示意图见图3,夹具法

电路图见图4。在电极两端分别用夹具夹住,接通电源,通过测量夹具两端的电压及电路中的电流从而得到电极电阻,计算出电极电阻率。



图 2 均匀电极

Fig. 2 Uniform electrode

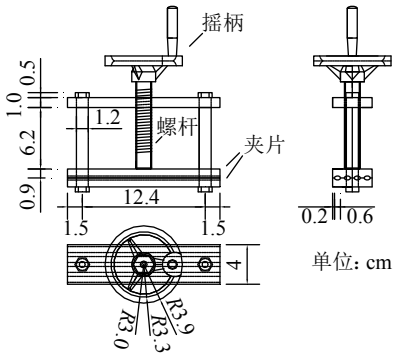


图 3 夹具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fixture

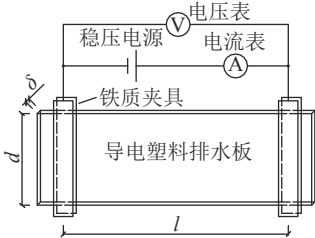


图 4 夹具法电路图

Fig. 4 Fixture method circuit diagram

因为:

$$R_g = \frac{U}{I} \tag{7}$$

且有:

$$R_g = \frac{\rho_g l}{d\delta} \tag{8}$$

则电极电阻率的计算公式为:

$$\rho_g = \frac{Ud\delta}{Il} \tag{9}$$

式(7)~(9)中, R_g 为夹具两端的电阻, U 为夹具两端电压, I 为电路电流, l 为夹具两端距离, d 为电极板宽度, δ 为电极板厚度。

由式(9)可知,夹具法测量电极电阻时,并未考

考虑夹具与电极之间的接触电阻, 该方法所测出的电极电阻值比实际电极电阻值偏高, 故本文对夹具法进行了改进, 以消除夹具与电极之间接触电阻的误差影响。改进原理如下:

夹具两端电压考虑为接触电阻与电极电阻之和:

$$\frac{U}{I} = R_g + R_j = \frac{\rho_g l}{d\delta} + R_j \tag{10}$$

则电极电阻率的计算公式可写为:

$$\rho_g = \left(\frac{U_1}{I_1} - \frac{U_2}{I_2} \right) \frac{d\delta}{(l_1 - l_2)} \tag{11}$$

式中, R_j 为夹具与电极之间的接触电阻。

改变夹具两端距离 ($l_1 > l_2$), 对同一电极测得两次电阻率:

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{\rho_g l_1}{d\delta} + R_j \tag{12}$$

$$\frac{U_2}{I_2} = \frac{\rho_g l_2}{d\delta} + R_j \tag{13}$$

如式(14)所示, 将式(12)和(13)相减, 可消除接触电阻, 可更准确地测出电极电阻率 ρ_g , 见式(15):

$$\frac{U_1}{I_1} - \frac{U_2}{I_2} = \frac{\rho_g (l_1 - l_2)}{d\delta} \tag{14}$$

$$\rho_g = \left(\frac{U_1}{I_1} - \frac{U_2}{I_2} \right) \frac{d\delta}{(l_1 - l_2)} \tag{15}$$

2 测量技术应用

为使提出的串联法能可靠地应用于工程实践, 设计多组试验, 验证测试方法的稳定性及实用性。

2.1 串联法测量土体接触电阻

1) 试验概述

试验所用土为海相吹填淤泥, 其基本物理特性指标如表1所示。

表 1 基本物理特性指标

Tab. 1 Basic physical properties indexes			
塑限/%	液限/%	塑性指数	初始含水率/%
22.64	46.80	24.16	73.38

把淤泥土烘干后磨碎, 调制成含水率为65%的重塑土样; 测量时所使用的EKG电极宽度为10 cm, 电极板表面设有厚约3 mm的排水槽和两条平行于长度方向距离为5 cm的金属铜线; 试验用模型为2个长度不同的定制有机玻璃模型, 模型装土的横截面大小均为12 cm×12 cm, 长度分别为10 cm(模型P)及20 cm(模型M)。把EKG电极分别放入模型的阴阳极位置, 然后分层加入重塑土, 并控制P和M模型中土样的干密度一致, 按照图1所示的电路组装。两个模型的俯视图如图5所示(此时没有插入电势测针)。

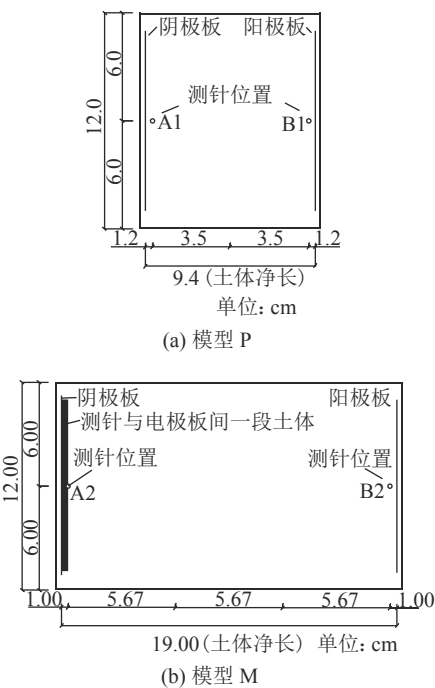


图 5 两个模型的俯视图

Fig. 5 Top view of the two models

组装电路后, 静置模型(P、M)12 h; 然后通电, 综合地考虑通电情况, 设置电流在0~3 A之间, 相应电流面密度在0~247.5 A/m²之间。分别对两个模型进行如下试验步骤: ①调节电源电压至0 V; ②调节旋钮使得电源电压升高, 同时观察电流表读数直至预定数值(0.05、0.10、0.15、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.00、1.20、1.40、1.60、1.80、2.00、2.20、2.40、2.60、2.80、3.00), 一次试验共21个值; ③记录电压表及电流表读数; ④重复步骤②和③, 直至电流达到3 A。将该组试验标注为T1, 即串联法。T1试验结束后, 将电势测针插入土体靠近阴阳电极板区域, 测针的位置如图5所示。静置模型(P、M)12 h, 按照图1所示的电路组装, 其中, 图1中的电压表改接至测针, 然后, 对两个模型重复步骤①至④, 期间通过电压表测量阴极至电势测针的电势, 此次试验记为T2, 即电势测针法。试验方案见表2。

表 2 试验方案

Tab. 2 Test plans				
组别	测量方法	电极	重塑土含水率/%	是否插入电势测针
T1	串联法	EKG电极	65.12	否
T2	电势测针法			是

2) 试验结果分析

通过串联法得到的接触电阻与用电势测针测得的接触电阻如图6所示, 其中, $R_{接}$ 为串联法所得的接触电阻, $R_{P接}$ 、 $R_{M接}$ 分别为P、M模型电势测针法的实测值。

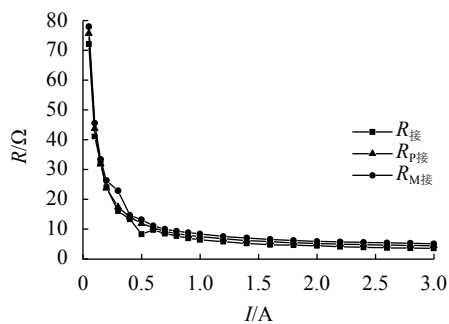


图 6 接触电阻值

Fig. 6 Contact resistance values

如图6所示:电势测针法得到的接触电阻变化规律与串联法得到的变化规律一致;测针法测得接触电阻偏大,测针法所得的接触电阻与串联法得到的电阻比值为1.3~1.4,验证了第1.1节中测针和电极之间始终存在一段土体(图5(b)),使得测针法测得的电阻值偏大的推论,该比值的大小取决于串联法中所消除的一段土体电阻值。

试验所用的电势测针底部1 cm不直接与土体接触,为绝缘状态,在理想的1维电渗情况下不会影响电势测量,但受室内试验的模型边界影响,试验中不能达到理想的1维电渗。电势测针测得的为土体截面电势,但无法得知是哪个深度下的电势。作者曾在试验中发现,土体表面、土体中部和电渗土体底部的电势大小并不相同,进一步验证了使用串联法所得的接触电阻要比电势测针法更加精确。

随着电渗的进行,模型中的土体不再均匀,串联法并不适用,可见串联法只适用于电渗初始阶段,对于电渗过程中的接触电阻,作者通过含水率和土体电阻率之间的关系求出电势测针到电极一段土体的电阻,再用电势测针测得的接触电阻减去该段土体电阻,从而消除该段土体带来的误差影响。

2.2 串联法测量电极电阻

1) 试验概述

测量时所使用的电极也为EKG电极。A组电极长20 cm,夹具距离20.0 cm; B1组电极长30 cm,夹具距离30.0 cm; B2组电极长30 cm,夹具距离29.5 cm; B3组电极长30 cm,夹具距离20.0 cm。分别将A、B1、B2、B3组电极接入图4所示电路,并进行如下试验步骤:①调节电源电压至0;②调节旋钮使得电源电压升高,同时观察电流表读数直至预定的数值(0.025、0.050、0.075、0.100、0.125、0.150、0.175、0.190、0.300、0.400、0.500、0.600、0.700、0.800、0.900、1.000、1.200、1.400、1.600、1.800、2.000、2.200、2.400、2.600、2.800、3.000、3.200、3.400、3.600、3.800、4.000、4.500、5.000);③记录电压表及电流表读数;④重复步骤②和步骤③,直

至电流达到5 A。

2) 试验结果分析

串联法测量电极电阻的电压电流曲线如图7所示。由图7可知,B1组电极电阻低于A组电极电阻,若按照式(15)计算,则电极电阻率是负值,这显然不合理。串联法是在均匀电极的基础上得出的,而试验使用的电极是当前应用广泛、板内嵌入金属导线后改进了的EKG电极,不是均匀电极。使用串联法通过夹具进行测量时,电流在板内流动的同时也沿着金属丝流动,电流分布情况未知,在该情况下应用串联法测电极电阻率的式(15)不再适用,故需提出一种适用的测试方法。

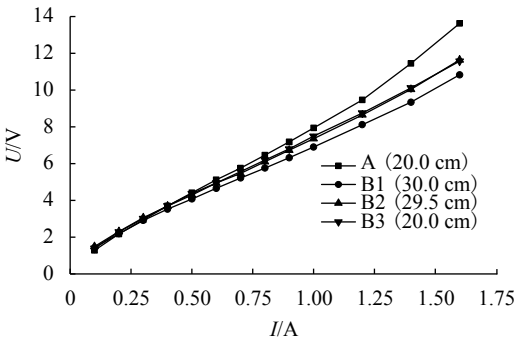


图 7 电压电流曲线

Fig. 7 Voltage and current curves

2.3 走线法测量电极电阻

1) 走线法

通过对电极研究,本文提出一种命名为走线法的电极电阻率测试技术,电路图见图8。

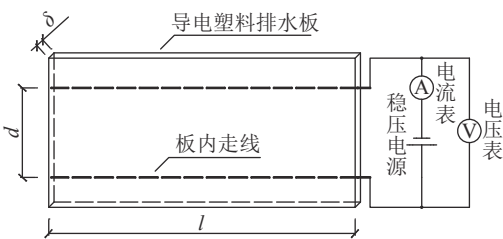


图 8 走线法电路图

Fig. 8 Circuit diagram of wire method

电极板的两根板内走线分别接到电源的正负极,这样板内电流会沿着板的宽度方向流动,过流面积为 $l\delta$,长度为 d ,则电极电阻为:

$$R = \frac{\rho_{\text{板}} d}{l \delta} = \frac{U}{I} \tag{16}$$

由此可得出电极电阻率:

$$\rho_{\text{板}} = \frac{U}{I} \cdot \frac{l \delta}{d} \tag{17}$$

式中, l 、 d 、 δ 分别为板长、板厚和板宽,试验中可改变板长验证测出的电阻率值稳定性。

走线法测电极电阻率无需考虑接触电阻影响,因为铜制导线是电极板的一部分,之间的电阻为电极板的内阻。该方法测量便捷,室外现场应用测量只需利用万用表电阻档即可测得板的电阻率。

2)试验概述

为验证走线法的实用性,剪取0.1 m和1.0 m的EKG电极板,使用走线法测量EKG电极电阻,按照图8所示接入电路中,试验步骤同第2.2节。

3)试验结果分析

0.1 m和1.0 m长的EKG电极的伏安特性曲线如图9所示。

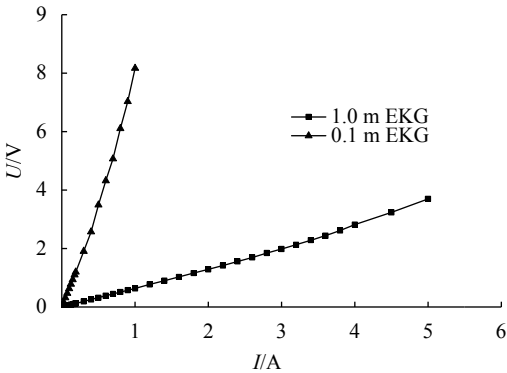
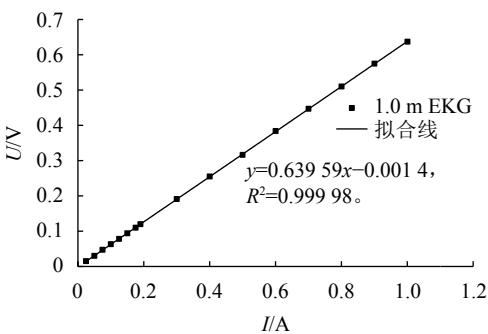


图9 伏安特性曲线

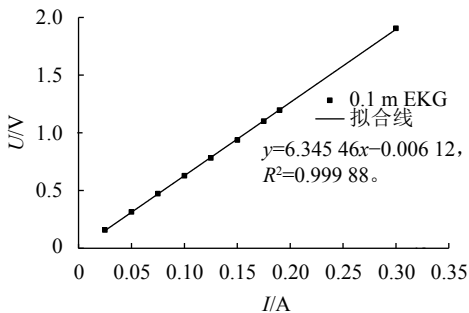
Fig. 9 Volt ampere characteristic curves

由图9可知:电极板的伏安特性曲线近似呈线性关系,但超过一定电压后曲线上翘,呈一定的非线性特征,即EKG的伏安特性曲线主要分为两段,线性段和非线性段。当电流较低时,其伏安特性曲线基本为线性,这表明此时EKG电极的电阻基本稳定不变;当电流较大时,曲线开始上翘,说明此时EKG电极的电阻开始上升。初步分析认为,电流较大时,电极测试的热效应导致EKG板内部发生了一系列的变化,使得电极电阻上升,故取线性段数据进行拟合,如图10所示。

通过EKG电极电阻测试方法计算0.1和1.0 m长EKG的电阻率,结果如表3所示。由表3可知,0.1 m长EKG电阻率为 $3.81\times10^{-2}\ \Omega\cdot\text{m}$,1.0 m长EKG的电阻率为 $3.84\times10^{-2}\ \Omega\cdot\text{m}$,数据显示,即便在电极板长度差一个数量级时,所测得的电阻率值也较稳定。由此可以得出,走线法测量嵌入铜制走线的EKG电极电阻率,不仅消除了夹具法测量时夹具和电极之间接触电阻的误差影响,还消除了电极板内电流分布不均的影响,测量结果基本不受电极长度的影响,具有良好的可靠性和稳定性。走线法更加精确地测定了电阻率,能更好地应用于电极母料选材,以及产品品控及成品验收,对EKG电极生产工艺有比较广阔的应用前景。



(a) 1.0 m EKG 电极板



(b) 0.1 m EKG 电极板

图10 伏安特性曲线线性段拟合结果

Fig. 10 Fitting results of the linear segment of volt ampere characteristic curves

表3 EKG的电阻率计算结果

Tab. 3 Resistivity calculation results of EKG				
EKG 电极长度	电阻 R/Ω	长度 l/m	过流面积 A/m^2	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$
1.0 m	0.639 59	0.05	3×10^{-3}	3.84×10^{-2}
0.1 m	6.345 46	0.05	3×10^{-4}	3.81×10^{-2}

EKG电极板内贯入铜线是于2012年提出的,至今,其电阻率仍然是通过夹具法测量的。即便夹具法目前被试验证明不适用于EKG电极,但由于近几年夹具法多次用于进行电阻率的测量,积累了许多经验,作者通过设计试验,找到夹具法和走线法测量结果间的规律,实现两者试验结果的修正和转换。

为探究两种方法测量结果间的关系,分别使用夹具法和走线法进行多组EKG电极电阻测试。走线法测量时,剪取长1.0 m或0.5 m的EKG电极进行测试;夹具法测量时,剪取0.2 m长的EKG电极。用两种方法对9个批次的EKG电极进行电阻率测试,结果见表4。

表4中,使用夹具法与走线法得到的电阻率的比值平均为0.084 4,比值大小在0.035 2~0.117 2之间,且多集中在0.08~0.10之间。该比值主要与夹具和电极板间的接触电阻相关,且该接触电阻仅取决于夹具和电极板,故可利用该比值对夹具法的测试结果修正。在考虑EKG电极电阻率对整个试验和工程的能耗影响时,可参考电阻率比值0.08~0.10进行修正。

表 4 夹具法与走线法测试结果

Tab. 4 Test results of fixture method and wiring method

EKG批次	测试方法	电极长度/m	R/Ω	过流面积/(10^{-4} m^2)	过流长度 l/m	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	夹具法与走线法 测量结果比值
20150928	走线法	0.5	2.128	15	0.05	6.38×10^{-2}	0.103 4
	夹具法	0.2	4.402	3	0.20	6.60×10^{-3}	
20160320	走线法	0.2	7.012	6	0.05	8.41×10^{-2}	0.076 5
	夹具法	0.2	4.293	3	0.20	6.44×10^{-3}	
20170818	走线法	0.5	1.948	15	0.05	5.84×10^{-2}	0.052 2
	夹具法	0.2	2.032	3	0.20	3.05×10^{-3}	
20171017A	走线法	1.0	0.650	3	0.05	3.90×10^{-2}	0.117 2
	夹具法	0.2	3.046	3	0.20	4.57×10^{-3}	
20171017B	走线法	1.0	0.655	30	0.05	3.93×10^{-2}	0.080 1
	夹具法	0.2	2.098	3	0.20	3.15×10^{-3}	
20171211A	走线法	1.0	0.705	30	0.05	4.23×10^{-2}	0.103 7
	夹具法	0.2	2.923	3	0.20	4.38×10^{-3}	
20171211B	走线法	1.0	0.632	30	0.05	3.79×10^{-2}	0.100 2
	夹具法	0.2	2.533	3	0.20	3.80×10^{-3}	
20171211C	走线法	1.0	0.656	30	0.05	3.94×10^{-2}	0.091 1
	夹具法	0.2	2.390	3	0.20	3.59×10^{-3}	
20180119	走线法	0.5	1.074	15	0.05	3.22×10^{-2}	0.035 2
	夹具法	0.2	0.756	3	0.20	1.13×10^{-3}	

3 结 论

对电渗模型中电阻的测量方法进行了改良,提出串联法代替当前的夹具法和电势测针法,并提出了适用于测量EKG电极电阻的走线法。

1)串联法测量接触电阻比电势测针法更加准确,消除了电势测针法中测针与电极之间一段土体电阻值的误差影响,同时避免了电势测针插入土壤对土壤电流分布的影响。测针法所得的接触电阻与串联法得到的电阻比值大多在1.3~1.4之间,验证了电势测针法将测针与电极间的一段土体值计入了接触电阻造成所测得的接触电阻偏大,故该比值的大小取决于串联法中所消除的一段土体电阻值。

2)串联法测量电极电阻率消除了夹具法测量时夹具和电极之间接触电阻的误差影响,但不适用于板内嵌入导线的EKG电极。

3)提出的走线法测量嵌入铜制走线的EKG电极电阻率,不仅消除了夹具法测量时夹具和电极之间接触电阻的误差影响,还消除了电极板内电流分布不均的影响,测量结果基本不受电极长度的影响,具有良好的可靠性和稳定性。走线法测量便捷,能方便地应用于EKG电极生产工艺中,有比较广阔的应用前景。

4)夹具法所得的电阻率与走线法测量EKG电极

电阻得到电阻率的比值平均为0.084 4,比值大多集中在0.08~0.10之间,可利用该比值对使用夹具法的试验和工程测量结果进行修正。

参考文献:

[1] Bjerrum L,Moum J,Eide O.Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay[J]. Géotechnique,1967,17(3):214-235.

[2] Lo K Y,Ho K S,Incullet I I.Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay[J].[Canadian Geotechnical Journal](#),1991,28(1):74-83.

[3] Lageman R,Pool W,Seffinga G.Electro-reclamation:Theory and practice[J].Chemistry & Industry,1989,18:585-590.

[4] Lageman R,Pool W,Seffinga G A.Electro-reclamation:State-of-the-art and future developments[M].Amsterdam:Springer,1990.

[5] Xue Zhijia,Tang Xiaowei,Yang Qing,et al.Comparison of electro-osmosis experiments on marine sludge with different electrode materials[J].[Drying Technology](#),2015,33(8): 986-995.

[6] Kalumba D,Glendinning S,Rogers C,et al.Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics[J]. [Journal of Environmental Engineering](#),2009,135(11):1227-1236.

[7] Mohamedelhassan E,Shang J Q.Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis[J].Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improve-

- ment,2001,5(1):3–11.
- [8] Zhuang Yanfeng,Wang Zhao.Interface electric resistance of electroosmotic consolidation[J].*Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*,2007,133(12):1617–1621.
- [9] Sun Zhaohua,Yu Xiangjuan,Gao Mingjun,et al.Experimental studies on vacuum preloading incorporated with electro-osmosis consolidation for dredger fill[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2017,39(2):251–258.[孙召花,余湘娟,高明军,等.真空-电渗联合加固技术的固结试验研究[J].*岩土工程学报*,2017,39(2):251–258.]
- [10] Su Junwei.Laboratory tests and numerical simulation study on electro-osmosis reinforcement of wet subgrade during operation period[D].Qingdao:Shandong University,2020.[苏俊伟.运营期过湿路基电渗加固的室内试验和数值模拟研究[D].青岛:山东大学,2020.]
- [11] Liu Zhitao.Electrokinetic remediation of lead contaminated kaolin and study on mechanism of reversed direction of electroosmotic flow[D].Wuhan:Wuhan University,2019.[刘志涛.铅污染高岭土电动修复与反向电渗流机理研究[D].武汉:武汉大学,2019.]
- [12] Nasiri A,Zanjani A J,Khodadadi-Darban A.Application of enhanced electrokinetic approach to remediate Cr-contaminated soil:Effect of chelating agents and permeable reactive barrier[J].*Environmental Pollution*,2020,266:115197.
- [13] Li Ying,Gong Xiaonan,Zhang Xuechan.Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage[J].*Rock and Soil Mechanics*,2011,32(3):709–714.[李瑛,龚晓南,张雪婵.电压对一维电渗排水影响的试验研究[J].*岩土力学*,2011,32(3):709–714.]
- [14] Wang Ningwei,Jiao Jun,Xiu Yanji,et al.Effect of electrode spacing on standard electro-osmotic dewatering[J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2012,34(Supp1):177–181.[王宁伟,矫军,修彦吉,等.电极距对水平电渗排水影响的试验研究[J].*岩土工程学报*,2012,34(增刊1):177–181.]
- [15] Li Ying,Gong Xiaonan.Experimental research on effect of electrode spacing on electro-osmotic dewatering under same voltage gradient[J].*Rock and Soil Mechanics*,2012,33(1):89–95.[李瑛,龚晓南.等电势梯度下电极间距对电渗影响的试验研究[J].*岩土力学*,2012,33(1):89–95.]
- [16] Liu Feiyu,Mi Wei,Wang Jun,et al.Influence of applying stepped voltage in electroosmotic reinforcement of dredger fill[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2014,33(12):2582–2591.[刘飞禹,宓炜,王军,等.逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(12):2582–2591.]
- [17] Zhuang Yanfeng,Wang Zhao.Study on interface electric resistance of electro-osmotic consolidation[J].*Rock and Soil Mechanics*,2004,25(1):117–120.[庄艳峰,王钊.电渗固结中的界面电阻问题[J].*岩土力学*,2004,25(1):117–120.]
- [18] Shi Zhenming,Zhou Yuanyuan,Peng Ming,et al.Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmosis in montmorillonite clay[J].*Journal of Southwest Jiaotong University*,2016,51(5):1005–1013.[石振明,周圆媛,彭铭,等.含盐量对蒙脱石粘土电渗影响试验研究[J].*西南交通大学学报*,2016,51(5):1005–1013.]
- [19] Tao Yanli,Zhou Jian,Gong Xiaonan,et al.Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2013,35(2):388–394.[陶燕丽,周建,龚晓南,等.铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J].*岩土工程学报*,2013,35(2):388–394.]
- [20] Chen Zhuo,Zhou Jian,Wen Xiaogui,et al.Experimental research on effect of polarity reversal to electro-osmotic[J].*Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*,2013,47(9):1579–1584.[陈卓,周建,温晓贵,等.电极反转对电渗加固效果的试验研究[J].*浙江大学学报(工学版)*,2013,47(9):1579–1584.]
- [21] 庄艳峰,邹维列,王钊,等.一种可导电的塑料排水板:ZL201210197981.4[P].2012–06–15.
- [22] Jones C J F P,Lamont-Black J,Glendinning S.Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications[J].*Geotextiles and Geomembranes*,2011,29(4):381–390.
- [23] Glendinning S,Lamont-Black J,Jones C J F P.Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J].*Journal of Hazardous Materials*,2007,139(3):491–499.
- [24] Jones C J F P,Lamont-Black J,Glendinning S,et al.Treatment of lagooned sewage sludge in sludge using electrokinetic geosynthetics[J].*Geosynthetics International*,2008,15(3):192–204.
- [25] Jared W L,Stewart D I,Binley A M,et al.Resistivity imaging of electrokinetic transport in soil[J].*Journal of Geoenvironmental Engineering*,1997,61(4):565–574.

(编辑 李轶楠)

引用格式:Zhuang Yanfeng,Liu Yani,Guo Kangshi.Resistance test technology of electroosmosis model[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(5):138–145.[庄艳峰,刘娅妮,郭康仕.电渗模型电阻测量技术[J].*工程科学与技术*,2021,53(5):138–145.]