

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.01.030

福州闽江河道软土的电阻率试验研究

唐大振^{1,2}, 樊秀峰^{1,2}, 范智毅^{1,2}, 郑俊清³

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108; 3. 福州市勘测院, 福建 福州 310003)

摘要: 电阻率值在一定程度上反映了岩土的物理力学性质。借助现场原位测试、室内试验, 采用相关性分析、灰色关联分析及土体电性理论分析等方法, 分析研究了闽江河道软土电阻率分布规律及与物理力学指标间的相关关系。结果表明, 河道中各类土随粗粒含量的增多、强度的增大, 电阻率逐渐增大; 厚层分布的淤泥质土电阻率随含水率、重度、孔隙比、孔隙率、饱和度、塑性指数、黏聚力的增大而减小, 且具有良好的相关性; 河道中淤泥质土电阻率的主要影响因素依次是天然重度、饱和度、孔隙率; 建立了河道淤泥质土的电阻率模型, 定量的揭示了闽江河道淤泥质土电阻率变化的本质。

关键词: 电阻率试验; 物理力学参数; 淤泥质土; 闽江

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)01-0160-06

Experiment on Resistivity Test of Soft Soil in Minjiang River Channel Fuzhou

TANG Dazhen^{1,2}, FAN Xiufeng^{1,2}, FAN Zhiyi^{1,2}, ZHENG Junqing³

(1. College of Environment and Resource, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering and Engineering Geology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. Fuzhou Investigation and Surveying Institute, Fuzhou, Fujian 310003, China)

Abstract: To a certain extent resistivity values can reflect the physical and mechanical properties of the rock and soil. By means of in situ testing, laboratory test and by using the correlation analysis, grey correlation analysis and electrical theory methods, the resistivity distribution of soft soil in the Minjiang River Channel and the correlation with physical and mechanical indexes were analyzed. The results show that resistivity of the various types of soil in channel increases gradually with coarse grain content and intensity increasing. Resistivity of thick mucky soil decreases with the increasing of moisture content and unit weight, porosity, porosity ratio, saturation, plasticity index and cohesive force, there are good correlations. The main impact factors are natural unit weight, saturation, porosity in turn. Resistivity model of the mucky soil was also established, and resistivity change of mucky soil in Minjiang River channel was quantified.

Keywords: the resistivity test; physical and mechanical parameters; mucky soil; Minjiang River

电阻率是表征物质导电性的基本参数, 某种物质的电阻率实际上就是当电流垂直通过该物质边长为一米的立方体时而呈现的电阻。显然, 物质电阻率越低, 其导电性越好。岩土电阻率在工程领域中(如地基处理、成因分析、固结监测等)已经得到了很好的应用^[1-3]。

自然界中多相体系的岩土, 其性质千变万化。不同成分的岩土(粒度、矿物成分)会有不同的电阻率, 刘国华等^[4]经研究提出土的种类是电阻率变化的主因之一, 即使成分相同的岩土体也会由于地域

成因历史条件不同, 其电阻率也不相同。付伟等^[5]、蔡国军等^[6-7]、Long 等^[8]、朱帆济等^[9]、董晓强等^[10]分别对青藏铁路冻黏土、连云港海相黏土、挪威 15 个典型海相黏土场地、江苏海相淤泥、武汉地区长江两岸阶地黏性土、山西典型黄土的电阻率进行了大量研究, 分别从岩土电阻率特性的基础试验、岩土土性参数与电阻率的相关关系等方面展开了研究, 取得了很多有价值的成果。然而, 由于区域的差异性、沉积历史的多样性、地层的非均质性使不同地区土性电阻率特性与其物理力学特性之间表现出不同的

收稿日期: 2015-09-20

修稿日期: 2015-10-17

基金项目: 福建省自然科学基金(2012J01170); 福建省教育厅基金(JA13056)

作者简介: 唐大振(1990—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害防治。E-mail: 1400997562@qq.com

通讯作者: 樊秀峰(1975—), 女, 内蒙古秀峰人, 副教授, 硕导, 从事岩土工程与地质工程的教学与科研工作。E-mail: fdfxf@126.com

关系规律。福州盆地形成于复杂的地质成因历史时期,地层沉积复杂多样,尤其是闽江河道内分布厚层淤泥质土及含砂粒、粉粒不同含量的其他土层。目前针对福州闽江河道软土电阻率与其物理力学参数间关系的系统研究还未见报道。

作者参与了福州市轨道交通 2 号线的详勘工作,收集了大量资料并对控制性钻孔(其编号为 MBZ3)进行了大量的室内外试验,进而探讨了闽江河道土体的电阻率与物力参数间的关系,分析其变化规律并探索其变化机理。研究成果可为闽江河道软土区勘测的地球物理参数向土力学参数的转化提供依据,对提高该地区物探结果的解释精度和可利用性有重要意义。

1 试验场地概况及电阻率测试

1.1 闽江河道的试验场地及其地层资料

钻孔 MBZ3 位于福州市地铁 2 号线金祥站—样板站区间闽江河道中的一个小沙洲,其沙洲高程高于河道水位 50 cm 左右,水平位置如图 1 所示。

本钻孔揭露出闽江河道的主要地层是第四系的(含泥)中砂、(含砂)粉质黏土、淤泥质土、粉质黏土、卵石、花岗岩。表 1 给出了各土层的深度(每米底层算)及其均值电阻率,表 2 给出了钻孔中淤泥质土每米的物理力学指标。室内试验时,每米取 2~3 个

样,每米的指标取其平均值,但 29 m~30 m 时,夹砂透镜较厚,约 80 cm,所取 3 个样全是夹砂透镜体,所以所测数据剔除掉。

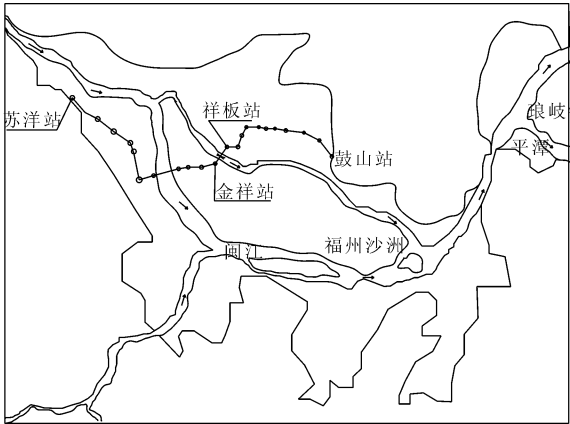


图 1 福州闽江段试验点位置示意图

表 1 MBZ3 钻孔主要土层

主要地层	深度范围 /m	厚度 /m	均值电阻率 /(Ω·m)
(含泥)中砂	1.0~7.0	7.0	118.01
(含砂)粉质黏土	8.0~11.0	4.0	68.90
(含泥)中砂	12.0~17.0	6.0	118.01
淤泥质土	18.0~38.0	21.0	19.31
粉质黏土	39.0~40.5	2.5	60.50
卵石	41.5~51.5	11.0	

表 2 MBZ3 钻孔淤泥质土的物性力学指标

电阻率 /(Ω·m)	深度 /m	天然含水率 /%	天然重度 /(kN·m ⁻³)	干燥重度 /(kN·m ⁻³)	天然孔隙比	孔隙率	饱和度 /%	塑性指数	压缩模量 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
30.624	18	39.600	16.775	11.283	1.053	0.513	96.333	13.500	3.573	9.0	7.6
28.150	19	41.000	16.810	11.335	1.091	0.522	96.667	14.200	3.530	9.0	7.0
23.331	20	41.000	16.870	11.412	1.119	0.528	97.000	14.767	3.510	11.0	6.0
21.520	21	41.333	16.903	11.475	1.080	0.519	97.750	14.850	3.410	10.5	5.2
20.934	22	42.425	16.925	11.480	1.128	0.530	99.000	14.567	3.363	11.0	6.1
20.653	23	42.850	17.215	12.070	1.156	0.536	99.000	15.000	3.030	12.0	6.4
20.220	24	42.600	17.167	12.033	1.154	0.536	98.000	15.667	3.100	15.0	5.6
20.169	25	43.000	17.270	12.103	1.145	0.534	99.000	15.525	2.980		
20.158	26	42.900	17.230	12.097	1.120	0.528	99.200	15.200	3.010	14.0	5.0
20.092	27	42.433	17.003	11.615	1.145	0.534	99.000	15.300	3.170		
20.016	28	42.500	17.041	11.903	1.125	0.529	99.250	15.500	3.120	11.1	7.1
19.888	29	43.600	17.338	12.165	1.106	0.525	99.500	16.500	2.877	19.0	6.1
19.608	31	43.167	17.270	12.160	1.183	0.542	99.667	16.450	2.900	14.3	5.7
19.251	32	44.770	17.360	12.215	1.224	0.550	99.000	17.042	2.815		
15.768	33	47.000	17.430	12.260	1.249	0.555	98.000	17.200	2.749	17.0	5.0
13.361	34	47.229	17.460	12.260	1.258	0.557	100.000	17.400	2.720		
12.581	35	48.833	17.850	12.950	1.283	0.562	100.000	18.000	2.583		
12.067	36	48.000	17.465	12.358	1.246	0.555	100.000	17.433	2.695	19.0	4.5
11.821	37	48.050	17.660	12.360	1.269	0.559	100.000	17.650	2.683	20.0	4.0
11.112	38	48.500	17.660	12.650	1.297	0.565	100.000	17.800	2.640	21.0	4.3

1.2 电阻率试验仪器介绍

本次钻孔中地层的电阻率测试采用的仪器为 WDJB-1 型多功能数控集流激电仪,测量使用电极系是梯度电极系中的底部梯度电极系,具体型式和装置为:A0.9M0.2,测量点距为 1 m。

2 各类土样的电阻率与其物理力学参数间的关系

土中颗粒成分含量不同,会对其电阻率值产生直接的影响,以下分别研究了淤泥质土、粉质黏土、(含砂)粉质黏土、(含泥)中砂等 4 种土样的电阻率与其物理力学指标间的关系,试验结果如图 2 所示。

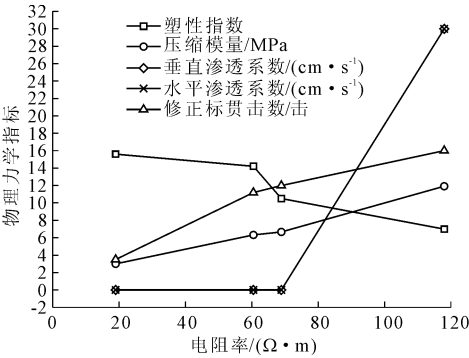


图 2 电阻率与物理力学指标间关系曲线

从图 2 可以看出,从淤泥质土—粉质黏土—(含砂)粉质黏土—(含泥)中砂,土样的电阻率逐渐增大;电阻率随塑性指数的减小而增加,而随渗透系数、压缩模量、标贯的增大而增大。

从淤泥质土—粉质黏土—(含砂)粉质黏土—(含泥)中砂,土的黏粒含量越来越少,粗粒含量越来越多,表现为塑性指数的减小和渗透系数的变大;土样强度越来越高,表现为土样的压缩模量、标贯指标越来越高。试验结果表明,电阻率与土样的物质成分、强度有很大关系。

3 淤泥质土电阻率与物理力学参数间的相关关系

场地分布深厚层的淤泥质土,本文采用最小二乘法研究淤泥质土的电阻率与其物理力学参数的相关关系。各指标与电阻率的相关关系拟合曲线如图 3~图 12 所示。

图 3~图 12 显示,淤泥质土的电阻率随含水率、重度、孔隙比、孔隙率、饱和度、塑性指数和黏聚力的增加而减小,而随压缩模量、内摩擦角的增大而增大。

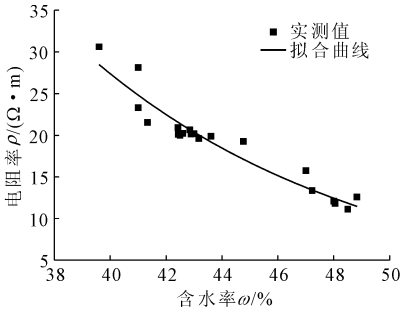


图 3 电阻率与含水率关系曲线

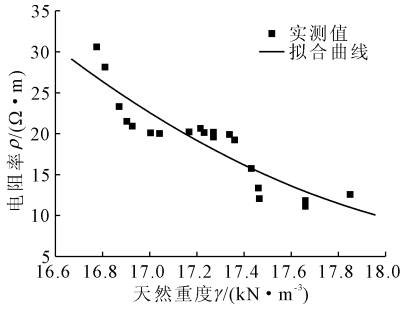


图 4 电阻率与天然重度关系曲线

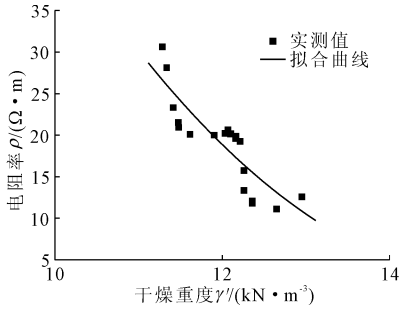


图 5 电阻率与干重度关系曲线

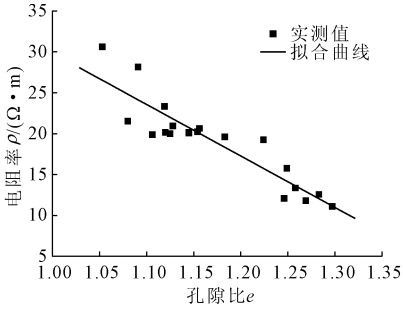


图 6 电阻率与孔隙比关系曲线

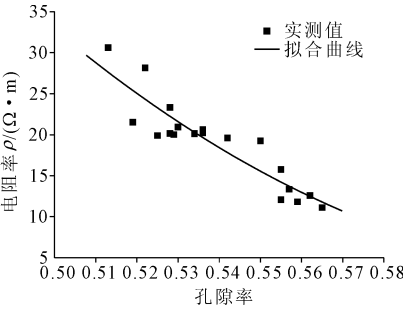


图 7 电阻率与孔隙率关系曲线

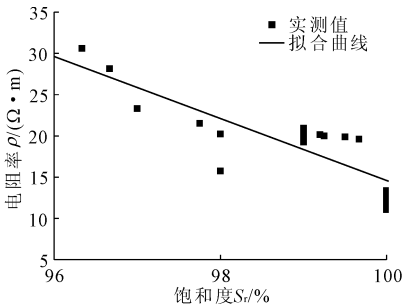


图 8 电阻率与饱和度关系曲线

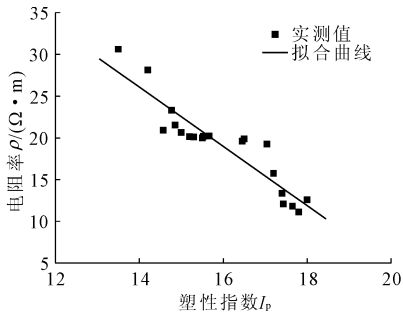


图 9 电阻率与塑性指数关系曲线

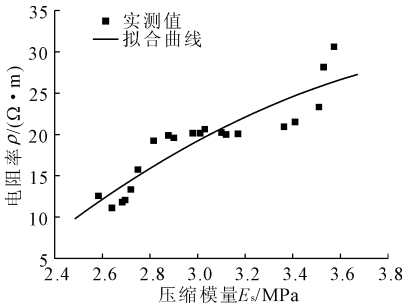


图 10 电阻率与压缩模量关系曲线

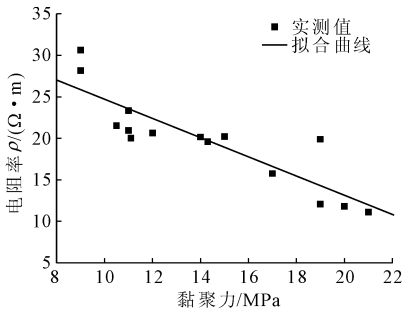


图 11 电阻率与黏聚力关系曲线

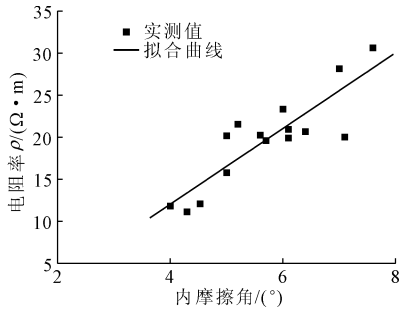


图 12 电阻率与内摩擦角关系曲线

图 3、图 8 表明土的电阻率随含水率的增大而减小。接近饱和土体的电阻率一般只包括土颗粒和孔隙水的电阻率两部分,且土颗粒的电阻率要远大于孔隙水的电阻率。随着含水率的升高,土体导电性增强,电阻率则降低。

土的电阻率随重度的增加而减小(如图 4、图 5 所示)。一般而言,压实越紧密,土的重度就越大,电阻率就越小,因为重度增大就意味着土颗粒在外力作用下变得更加紧密^[7]。

图 9 表明发现土的电阻率随着塑性指数的增大而减小。土体塑性指数越大,宏观上颗粒就越细,比表面积就越大,微观上双电子层厚度就越大,所以电阻率变得越来越小。

研究显示本区域淤泥质土与其力学指标的关系十分紧密。淤泥质土的压缩模量随电阻率的增大而增大(图 10 所示),是因为淤泥质土接近饱和,土的电阻率由土颗粒和孔隙中的水共同决定,压缩模量增大,则孔隙率减小,含水率降低,相应的土颗粒的含量增大,所以电阻率增大。土体的内摩擦角和黏聚力存在明显的负相关性,是因为一固定土体,细粒土与粗粒土的含量是相对的,一个增多,另一个则减少;但土体的黏聚力随着黏粒含量的增大而增大,其内摩擦角随着砂粒含量的增大而增大,因此土体的电阻率随黏粒含量的增大而减小,随砂粒含量的增大而增大,如图 11、图 12 所示。

图 6、图 7 显示,本区域淤泥质土的电阻率随着孔隙比或孔隙率的增大而减小,这与文献[4]结论相反,分析其原因可知,土的电阻率是多种因素综合作用的结果,不仅受孔隙比(率)影响,还与含水率、重度、塑性指数、孔隙液含盐量等因素相关。

表 3 给出了闽江河道厚层淤泥质土电阻率随其物理力学参数变化的具体量化关系式及相关系数,它们的相关性系数均大于 0.8,可知本区域淤泥质土的电阻率与含水率、重度、孔隙比、孔隙率等有明显的相关关系。

4 闽江河道软土电阻率影响因素的灰色关联度分析

4.1 灰色关联度分析方法介绍

通过上面研究可知闽江河道淤泥质土的电阻率受多种因素影响,为查清其主导因素,进一步采用灰色关联法进行分析。

表 3 淤泥质土电阻率与物理力学指标间的关系式

序号	土样物理力学指标	回归关系式	相关性系数
1	电阻率—含水率	$\rho = 1231.73\exp(-0.0955\omega)$	$R = 0.958$
2	电阻率—天然重度	$\rho = 5.182\gamma^2 - 194.2\gamma + 1826.3$	$R = 0.901$
3	电阻率—干重度	$\rho = 1.47\gamma_{\text{sat}}^2 - 45.1\gamma_{\text{sat}} + 348.42$	$R = 0.860$
4	电阻率—孔隙比	$\rho = -62.977e + 92.844$	$R = 0.906$
5	电阻率—孔隙率	$\rho = 1456.1n^2 - 1874.3n + 605.9$	$R = 0.910$
6	电阻率—饱和度	$\rho = -3.747S_r + 389.33$	$R = 0.839$
7	电阻率—塑性指数	$\rho = -3.552I_p + 75.814$	$R = 0.924$
8	电阻率—压缩模量	$\rho = -5.284E_s^2 + 47.236E_s - 74.938$	$R = 0.906$
9	电阻率—黏聚力	$\rho = -1.166c + 36.279$	$R = 0.872$
10	电阻率—内摩擦角	$\rho = 4.503\phi - 5.985$	$R = 0.868$

4.1.1 灰色关联分析方法的概

念 灰色关联度分析方法在岩土方面已有广泛应用^[11-12]。两个系统之间的因素,随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度,称为关联度。灰色关联分析方法,就是把因素之间发展趋势的相似或相异程度,即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法。由灰色系统理论提出的对各子系统进行灰色关联度分析的概念,通过一定的方法去寻求系统中各子系统(或因素)间的数值关系。

4.1.2 灰色关联法分析步骤

- (1) 确定参考序列 x_0 和比较序列 x_i 。
- (2) 对(1) 中的两个序列做无量纲化处理。
- (3) 计算差序列 $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$ 。
- (4) 求最大和最小差序列值 $\max_i \max_k \Delta_i(k)$ 和

$\min_i \min_k \Delta_i(k)$ 。

(5) 求关联系数 $\xi_i = \gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$

式中 ζ 为分辨系数,本文中取 0.5。

(6) 求关联度 γ_i 即 $\gamma_i(x_0 - x_i)$,按下式计算:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

γ_i 即为 x_0 和 x_i 的关联度, γ_i 越大,则 x_0 和 x_i 的关系越紧密。

4.2 电阻率影响因素的灰色关联分析

表 2 中的物性指标经过上述过程,其计算结果见表 4。

表 4 淤泥质土电阻率与各因素间的灰色关联度

影响因素	含水率	天然重度	干重度	孔隙比	孔隙率	饱和度	塑性指数
关联度	0.5444	0.5840	0.5652	0.5432	0.5711	0.5829	0.5118

由表 4 可知,淤泥质土电阻率的影响因素从大到小依次是:天然重度、饱和度、孔隙率、干重度、含水率、孔隙比、塑性指数。分析可知:其电阻率与土性(反映在重度上)关系最大,其次是饱和度和孔隙率,这三个影响因素都反映在下面讨论的电阻率模型中。

5 闽江河道软土的电阻率模型研究

5.1 软土电阻率模型建立

1968 年, Waxman 等^[13]通过试验研究,提出了适用于非饱和黏性土的电阻率模型:

$$\rho = \frac{A\rho_w n^{-f} S_r^{1-p}}{S_r + \rho_w BQ}$$

(1)

式中: n 为土的孔隙率; ρ_w 为孔隙水电阻率; S_r 为饱和度; A 为试验参数; f 为胶结系数; p 为饱和度指数; B 为双电层中与土颗粒表面电性相反电荷的电导率; Q 为单位土体孔隙中阳离子交换容量; BQ 为土颗粒表面双电层的电导率($1/(\Omega \cdot \text{m})$)。

虽然式(1) 为黏性土的电阻率公式,但实验室中对测试 B 、 Q 的仪器要求高、操作复杂,实践中难以实现。为此,需要寻找另外构建电阻率模型的方法。

Archie^[14] 在 1942 年就提出了适用于饱和和无黏性土的 Archie 模型:

$$\rho = A\rho_w n^{-f}$$

(2)

式中: n 、 ρ_w 的含义同式(1) 中的含义, A 、 f 为与地区

土性有关的参数。

实际工程中,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,且孔隙率、饱和度和含水率之间存在着一定的换算关系,可采用推广的 Archie 模型^[15] 来表示土的电阻率,即

$$\rho = A\rho_w n^{-f} S_r^{-p}$$

(3)

式中: n 、 ρ_w 、 S_r 的含义同式(1) 中的含义, A 、 f 、 p 是与地区土性有关的参数。

本文采用上述方法,结合表 2 中的数据分析得到闽江河道淤泥质土的电阻率模型为 $\rho_0 = 0.233 n^{-6.923} S_r^{-7.262}$ 。

复相关系数为 0.8951,属于高度相关。
刘国华等^[4] 采用此方法得到杭州地区代表性的黏土电阻率模型,并在其电阻率层析成像中得到了很好的验证。

5.2 软土电阻率模型验证

为了检验此电阻率模型在闽江河道的适用性,

选取本区间另外的电阻率测孔作为验算孔。本工程闽江段电阻率的测试孔共 3 个,河道中一个,本区间左离闽江岸边 6 m 左右一个孔 YZ1,还有一个选用区间右侧样板站场地唯一含有淤泥质土的电阻率测孔 YZ2。

对验算孔 YZ1、YZ2 进行验算,得出实测电阻率和模型电阻率随深度的变化图及其误差百分比,如图 13 及表 5 所示。

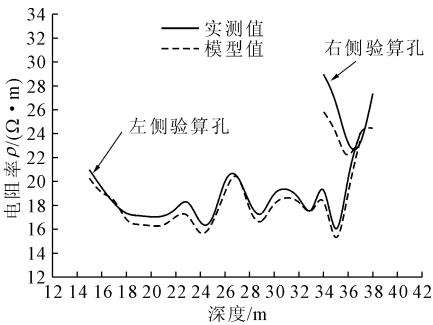


图 13 左右侧验算孔的电阻率随深度的变化图

表 5 左右侧验算孔实测电阻率与模型电阻率的误差百分比

左侧孔深/m	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
误差百分比	3.417	2.964	3.556	4.365	4.277	4.200	4.919	2.596	6.875	6.623	0.237
左侧孔深/m	26	27	28	29	30	32	33	34	35	36	37
误差百分比	7.126	2.422	4.208	3.172	5.212	2.362	2.050	6.768	2.328	7.710	2.417
右侧孔深/m		34		35		36		37		38	
误差百分比		10.865		9.901		6.269		9.188		10.611	

试验孔左侧的淤泥质土沉积较厚(约 20 m 左右),土性比较均匀,计算结果中除个别点的误差百分比大于 5% 外,其余大部分的误差百分比均小于 5%。从金祥站往右,淤泥质土形成后受到后期河水冲刷改造严重,淤泥质土尖灭,此段电阻率模型计算误差百分比比较大,因受河道环境与土层交错的影响,均在 10% 左右。

综上所述,闽江河道淤泥质土的电阻率模型在闽江河道的淤泥质土中是适用的。

6 结 论

由以上试验结果的分析可得出以下结论:
(1) 闽江河道中,从淤泥质土—粉质黏土—(含砂)粉质黏土—(含泥)中砂,土样的电阻率逐渐增大。其电阻率值随黏粒含量的增多而减小,随强度的增大而增大。
(2) 闽江河道中,厚层淤泥质土的电阻率随含水率、孔隙比、饱和度、重度、塑性指数、压缩模量的

增加而减小,其电阻率参数与其物理力学参数间的相关性较强。
(3) 通过灰色关联分析知,闽江河道中淤泥质土电阻率的主要影响因素依次是:天然重度、饱和度和孔隙率。
(4) 利用闽江河道淤泥质土的测试数据,建立了该地区的电阻率模型公式,定量的揭示了闽江河道淤泥质土电阻率变化的本质。

参考文献:

[1] 查甫生,刘松玉,杜延军.电阻率法在地基处理工程中的应用探讨[J].工程地质学报,2006,14(5):637-643.
[2] 蔡国军,刘松玉,邵光辉,等.基于电阻率静力触探的海相黏土成因特性分析[J].岩土工程学报,2008,30(4):529-535.
[3] 单红仙,刘晓磊,贾永刚,等.黄河口沉积物固结过程电阻率监测研究[J].岩土工程学报,2010,32(10):1524-1529.