

# 江苏海相黏土电阻率与岩土特性参数间相关性研究

蔡国军, 张涛, 刘松玉, 邓永锋, 邹海峰

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 土的电阻率是表征土体导电性的基本参数, 也是土体固有物性的综合指标之一。电阻率静力触探技术是一种可原位测试土体电阻率的新型测试技术。首先介绍了江苏海相黏土和电阻率静力触探技术, 采用电阻率静力触探在江苏海相黏土地进行了原位测试, 得到土的原位电阻率测试值, 结合室内基本土工试验, 分析了该海相黏土电阻率与基本土性指标和力学特性指标间的相关关系。研究表明: 孔隙液含盐量、黏粒含量和塑性指数是电阻率的主控因素。电阻率随孔隙液含盐量、黏粒含量增加而减小, 两者与电阻率均呈现较好的指数相关性, 孔隙液含盐量大于 6 g/L 或黏粒含量大于 60 % 时, 电阻率趋于定值; 江苏海相黏土电阻率随塑性指数的增加而减小; 其他岩土特性指标对电阻率存在一定的影响, 但与电阻率之间相关性不显著。

**关键词:** 海相黏土; 电阻率; 孔压静力触探; 岩土特性

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)08 - 1470 - 08

**作者简介:** 蔡国军(1977 - ), 男, 山东兖州人, 博士, 副教授, 主要从事多功能孔压静力触探等现代原位测试技术方面的研究工作。E-mail: focuscai@163.com。

## Relationship between electrical resistivity and geotechnical characteristic parameters for Jiangsu marine clay

CAI Guo-jun, ZHANG Tao, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, ZOU Hai-feng

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The resistivity of soil is a basic parameter to describe its electrical conductivity and one of the inherent physical properties of soil. The resistivity piezocone penetration test is a new kind of in-situ testing technique, which can measure the resistivity of the soil. The marine clay in Jiangsu province of China and the measuring equipments and the operation principles of the resistivity piezocone penetration test are introduced. Based on the measurements of soil resistivity and the laboratory test results, the relationship among the resistivity of marine clay, basic soil index and mechanical properties is analyzed. It is concluded that the salt content of pore fluid, clay content and plasticity index are the main controlling factors of the soil resistivity. The resistivity decreases with the increase of the salt content of pore fluid and the clay content, and there is a good exponential decay relationship between the resistivity and the two indexes. When the salt content of pore fluid is greater than 6 g/L or the clay content greater than 60%, the value of resistivity tends to be a constant. The resistivity decreases with the increase of the plasticity index of soil with different plastic degrees. Although other characteristic indexes have a certain influence on the resistivity, the correlations between the resistivity and those indexes are not significant.

**Key words:** marine clay; resistivity; piezocone penetration test; geotechnical characteristic

## 0 引言

土的电阻率是表征土体导电性的基本参数, 是土的基本物性参数之一, 实际上就是当电流垂直通过边长为 1 m 的立方体土体时所表现的电阻大小, 单位为  $\Omega \cdot m$ 。土电阻率测试原理是通过测试恒定电流下两电极间的电压降, 并根据欧姆定律计算出土的电阻大小, 然后得出土样的电阻率<sup>[1]</sup>。近年来, 国内外许多学者对电阻率与土的微观结构形态、物理力学性质、以及土体环境污染等方面进行了大量的研究工作<sup>[2-3]</sup>。研究

结果表明, 土的电阻率与众多土性参数密切相关, 如含盐量、黏粒含量、含水率、塑性指数、灵敏度、重度、抗剪强度和孔隙率等。Friedman<sup>[4]</sup>通过对饱和土和非饱和土的电阻率特性影响因素的研究, 指出影响土的电阻率的因素十分复杂, 但主要来自土体因素、

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202203); “十二五”科技支撑计划(2012BAJ01B02); 江苏省自然科学基金重点项目(BK2010060); 中央高校基本科研业务费资助项目(3221003202)

收稿日期: 2013 - 01 - 14

土颗粒因素和环境因素 3 方面。查甫生等<sup>[5]</sup>以合肥膨胀土为例, 分析了含水率、孔隙水电阻率、温度等对电阻率的影响, 并建立了适用于非饱和黏性土的电阻率结构模型。蔡国军<sup>[6]</sup>通过现场电阻率孔压静力触探 (CPTU) 测试, 结合室内试验, 分析了矿物成分、离子含量、胶结特性、氧化环境、孔隙率和含水率等与海相黏土电阻率间的关系。Long 等<sup>[7]</sup>总结了大量的前人研究成果, 通过电阻率 CPTU 与电阻率层析成像技术, 对比分析了挪威 15 个典型海相黏土地场的电阻率值与基本岩土参数间的关系, 认为土体电阻率受孔隙液含盐量影响最为显著, 同时还受到其他因素的影响。虽然影响土的电阻率因素众多, 但是对于哪一种或哪几种因素对电阻率值起主控作用目前尚缺乏相关认识。中国江苏沿海地区广泛分布着经历多次海侵、海退的海相黏土, 其中以苏北滨海平原区海相黏土最为典型, 研究这一区域土的电阻率与基本岩土参数间的相关关系以及电阻率受哪些参数主控, 对于丰富土性认识、指导工程建设实践等均有着重要意义。

针对上述问题, 本文基于典型江苏海相黏土地场的电阻率 CPTU 试验, 在现场静力触探试验与归纳相关文献的基础上, 结合室内基本土工试验, 简要介绍了现代数字式电阻率 CPTU 测试技术原理, 分析了典型场地电阻率与孔隙液含盐量、黏粒含量、塑性指数等基本土性参数和力学特性参数间的关系, 研究了电阻率与各影响因素之间的相关关系。

## 1 江苏海相黏土

江苏省地处中国东部沿海, 长江、淮河的下游, 临海沿江的地理位置和发达的水网系统使得江苏省广泛分布海相沉积的黏土。第四纪以来, 由于剧烈的地壳升降运动, 加上频繁的古气候周期性冷暖变化, 使得江苏沿海地区发生了多次海侵、海退。相关资料显示, 江苏东部沿海地区平原第四系至少发育 5 个海侵层, 海侵层的发育分布标志着该地区曾经为海的环境。江苏海相黏土主要分布于苏北滨海平原区, 该区域位于范公堤以东的苏北沿海, 包括连云港地区东部 (连云港市)、盐城地区东部 (盐城市、响水县、射阳县、大丰县等) 以及南通地区东部 (如东县), 主要地貌为盐化平原、盐田和海湾低平原。连云港地区在浅部 40 m 以上有 3 层海相地层, 沿海岸线往南, 海相地层厚度增加。盐城地区土层总体上属于第四纪冰川影响下形成的海相、泻湖相沉积构造, 由于古气候冷暖交替变化, 引起海侵、海退, 沉积了很厚的松软黏性土、砂性土等物质。苏北滨海相软土地区地面表层存在一定厚度的硬壳层, 硬壳层中土体由于风化淋滤以及植

物吸收作用使得有机质和细颗粒散失, 土体具有一定的强度。硬壳层以下为软土层, 该层土体多为淤泥及淤泥质黏土, 以海积沉积作用为主, 冲海积为辅, 具有含水率高、孔隙比大、低强度、高塑性、黏粒含量高和具有一定的流变性等特点。软土层以下为强度较高的硬泥层, 以黏土、粉质黏土为主并夹有细粉砂<sup>[8]</sup>。

## 2 试验场地描述

本文现场电阻率 CPTU 试验以临海高等级公路建设项目为依托, 临海高等级公路地处江苏省沿海地区东部, 东邻近海岸线, 自北向南串联连云港、盐城、南通 3 市东部地区。路线始于苏鲁交界, 穿过连云港区域, 跨灌河后经响水、滨海、射阳、大丰和琼港临海产业区, 向南进入南通海安; 向东偏南, 经海安、如东、通州、海门和启东滨海工业区, 终于江北沿江高等级公路, 全长约 521 km。

图 1 为孔压静力触探 (CPTU) 与电阻率 CPTU 试验场地位置图。试验场地所在线路划分为 3 个路段, 即射阳亭湖段、盐城段和连云港段。其中射阳亭湖段位于盐城 - 东台冲海积平原区, 局部为海积盐田地貌, 区域内地势宽广平坦, 河流纵横成网, 地表水系发育, 线路长约 71 km。盐城段沿线地貌为冲海积平原区与废黄河三角洲平原, 局部为海积盐田地貌, 沿线区域内地势平坦, 河流纵横成网, 地表水系发育, 线路长约 243 km。连云港段沿线为海积平原地貌, 地势低洼, 总体属于苏北滨海平原区, 其表层全部为第四纪所覆盖, 第四纪沉积物以海、冲积物为主, 线路长约 113 km。

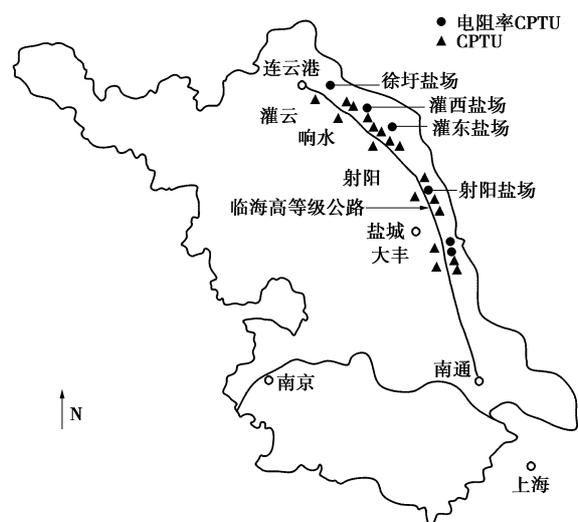


图 1 试验场地位置

Fig. 1 Location of test sites

表 1 为现场原位试验汇总表, 表中射阳亭湖段共进行 4 组 CPTU 试验, 其中电阻率 CPTU 试验 1 组,

试验场地位于射阳盐场；盐城段共进行8组CPTU试验，其中电阻率CPTU试验3组，2组位于大丰，1组位于灌东盐场；连云港段共进行6组CPTU试验，其中电阻率CPTU试验2组，分别位于灌西盐场和徐圩盐场。

表2为3个试验路段主要土层工程性质指标汇总。表中可以看出各土层土体具有以下主要特征：表层素填土和粉质黏土含水率较低，淤泥质粉质黏土含水率相对较高，含水率 $w$ 变化在24.2%~49.0%之间；各土层土体重度 $\gamma$ 差别不大，在16.8~20.0 kN/m<sup>3</sup>之间；塑性指数 $I_p$ 与不排水抗剪强度 $S_u$ 变化范围分别在6.1~34.5 kPa和29.7~108.5 kPa之间。

表1 现场原位试验汇总表

Table 1 Summary of in-situ tests

路段	CPTU /组	电阻率 CPTU/组	电阻率 CPTU 位置
射阳亭湖段	4	1	射阳盐场
盐城段	8	3	大丰、灌东盐场
连云港段	6	2	灌西盐场、徐圩盐场

### 3 电阻率 CPTU 技术

#### 3.1 技术背景

过去的数十年，由于先进的传感器技术、数据采集设备和数据处理软件的不断发展，采用土的电阻率值作为土层及土体判别的测试技术已有广泛应用。电阻率原位测试技术的发展还得益于勘探和取样技术相对较高的费用。电阻率原位测试技术不仅为某一未勘察区域的土层提供概述，还作为后续研究以及决定最佳勘察场地的基础。Solberg等<sup>[9]</sup>整理了不同材料的电阻率代表值（表3），电阻率CPTU技术是一种有效测

试土体电阻率的原位测试技术，该技术具有快速、方便、准确、有效且成本相对较低等特点。

#### 3.2 试验与数据采集设备

本文采用的电阻率CPTU设备为东南大学岩土工程研究所引进的美国原装进口多功能电阻率CPTU测试设备，电阻率探头规格为：锥角60°，锥底截面积10 cm<sup>2</sup>，侧壁摩擦筒表面积150 cm<sup>2</sup>。现场数据采集使用Enhanced Field Computer System 4.0计算机系统，数据处理软件为CONEPLOT和CLEANUP。电阻率传感器由4个彼此绝缘开来的铜质电极及内部电路系统组成，同步、连续地测量中间两电极间的电压降，并根据欧姆定律计算出电极周围接触土体的电阻率。探头贯入速率为2 cm/s，沿深度每5 cm记录一组数据。

#### 3.3 数据处理

静力触探测试数据需通过解译才能转化成相应的土性参数，本文对相关土性参数的解译方法或原理做简要说明。灵敏度 $S_t$ 采用Schmertmann<sup>[10]</sup>提出的摩阻比 $R_f$ 方法来估算，

$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \quad (1)$$

式中， $N_s$ 为经验系数，Schmertmann建议取值15。

不排水抗剪强度 $S_u$ 为基于CPTU测试数据确定的非均值固结不排水条件下土的剪切强度，实测数据与 $S_u$ 之间的经验表达式为

$$S_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (2)$$

式中， $\Delta u$ 为超孔压， $N_{\Delta u}$ 为圆锥系数<sup>[11]</sup>。

压缩模量 $E_s$ 采用Kulhawy等<sup>[12]</sup>提出的经验关系式进行估算，

$$E_s = 8.25(q_t - \sigma_{v0}) \quad (3)$$

表2 主要土层工程性质指标汇总

Table 2 Summary of engineering property indexes of soil

	土类	厚度/m	$w$ /%	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$w_L$ /%	$w_P$ /%	$I_p$	$S_u$ /kPa
射阳亭湖段	素填土	1.5	28.1	19.3	29.1	22.6	6.5	99.1
	淤泥质粉质黏土	0.9	47.0	17.4	48.2	23.1	25.1	32.2
	粉质黏土	1.5	28.2	19.4	32.3	18.8	13.5	80.3
	粉土	2.0	24.2	19.5	28.6	22.4	6.2	—
	淤泥质粉质黏土	9.4	43.7	17.0	48.2	23.1	25.1	46.0
盐城段	素填土	0.1	27.9	19.8	28.9	22.8	6.1	—
	粉土	1.1	27.0	19.5	29.1	22.1	7.0	—
	淤泥质粉质黏土	7.3	45.5	17.4	47.6	23.2	26.5	29.7
	粉质黏土	3.1	28.0	20.0	40.8	21.7	19.1	108.5
连云港段	黏土	4.3	39.9	18.1	45.2	22.5	22.7	71.8
	淤泥质黏土	12.8	49.0	16.8	44.7	24.1	34.5	33.2
	粉质黏土	3.6	27.1	18.0	36.0	19.1	16.9	102.5



式中,  $q_t$  为修正锥尖阻力,  $\sigma_{v0}$  为土体上覆压力。

剪切波速  $V_s$  应用单孔下孔法原理, 测试过程中地震波探头以 20 mm/s 的速率贯入土层, 每隔 1 m 停止贯入进行地震剪切波速测试, 可测得各层土体剪切波速。

表 3 不同材料的典型电阻率值<sup>[9]</sup>

Table 3 Typical resistivity values for various materials<sup>[9]</sup>

电阻率 $\rho/(\Omega\cdot m)$	主要特征	说 明
1~10	未淋滤的海相沉积黏土	沉积过程中受到很少的淋滤作用, 孔隙中仍含有使土体结构稳定的盐水。孔隙水具有较高的离子浓度, 土体导电性良好, 电阻率低。
10~100	经淋滤的沉积黏土	由于地下水的离子淋滤作用, 逐渐转变为灵敏性土, 土体电导率较高, 但不及未淋滤的海相黏土。
>100	沉积黏土的干外壳、粗泥沙、基岩	黏土的干外壳; 流黏土滑坡中产生的干的重塑黏土; 粗颗粒材料, 如砂土、砂砾等, 较海相黏土具有较高的电阻率值, 大多数基岩的电阻率值高达数千 $\Omega\cdot m$ 。

### 4 试验结果及相关性分析

文中所有场地沿土层深度每米取平均值作为土的电阻率, 对于土层厚度较小位置(土层厚度小于 1 m), 取土层厚度范围内电阻率平均值。孔隙液含盐量、黏粒含量和塑性指数等基本土性指标通过室内土工试验获得。力学特性指标基于电阻率 CPTU 测试结果解译获得, 相关指标解译方法如前所述, 不再赘述。

#### 4.1 电阻率与基本土性指标的关系

##### (1) 电阻率与孔隙液含盐量

土颗粒表面存在有双电层, 双电层中的阳离子和阴离子在电场作用下具有一定的导电能力。土体中溶解盐矿物通常以离子形态存在于孔隙液中, 当孔隙液含盐量发生变化时, 离子交换作用方向和双电层作用范围受到影响, 最终导致土体电阻率改变<sup>[13]</sup>。图 2 为土体电阻率随孔隙液含盐量的变化关系曲线。图中两参数关系十分显著, 随着孔隙液含盐量增加, 电阻率值急剧减小, 呈明显的指数衰减形式, 其表达式为

$$y = 53.8x^{-0.85} \quad (4)$$

式中,  $y$  为电阻率数值 ( $\Omega\cdot m$ ),  $x$  为孔隙液含盐量数值 (g/L)。

指数趋势线表现出较好的相关性,  $R^2=0.83$ 。当孔

隙液含盐量大于 6 g/L 时, 电阻率值接近为常数 8  $\Omega\cdot m$ 。有学者指出, 如 Bjerrum<sup>[14]</sup>和 Rosenqvist<sup>[15]</sup>, 当土体含盐量小于 5 g/L 或灵敏度大于 30 时, 黏土变成快黏土。后来, Torrance<sup>[16]</sup>建议含盐量界限应为 2 g/L。图 3 为土体灵敏度与孔隙液含盐量关系图。可以看出, 江苏海相黏土大多为高灵敏性土(灵敏度大于 4), 但是仍存在相当数量的数据点, 其灵敏度大于 30, 含盐量却大于 2 g/L 或 5 g/L。这一现象表明: 高灵敏性海相黏土也可具有较高的含盐量, 这主要是由于多次海侵、海退作用引起。Michael 等<sup>[17]</sup>和 Andersson 等<sup>[18]</sup>认为含盐量并不是划分快黏土的唯一标准, 非海相快黏土由于持续的淋滤和风化作用, 也具有较低的含盐量。虽然孔隙液含盐量是非常重要的控制因素, 但是海相黏土的灵敏度还受到其他因素的影响<sup>[18]</sup>。

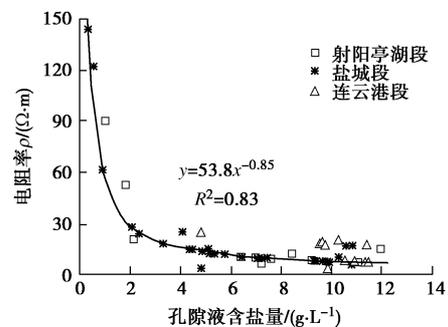


图 2 电阻率与孔隙液含盐量

Fig. 2 Relationship between resistivity and salt content of pore fluid

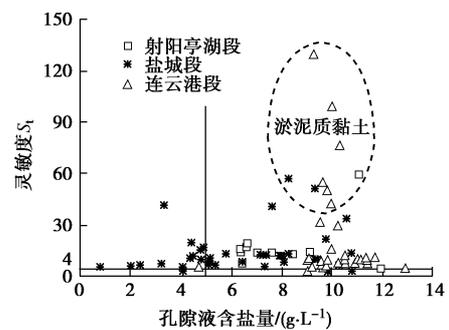


图 3 灵敏度与孔隙液含盐量

Fig. 3 Relationship between sensitivity and salt content of pore fluid

##### (2) 电阻率与黏粒含量

土体是由各种大小不同的颗粒组成的散粒体, 一定质量的土体, 颗粒越细, 表面积越大。黏粒表面带有一定的电荷, 这些电荷具有吸引外界极性分子或离子的能力, 同样质量的土体, 黏粒含量越多, 比表面积越大, 土颗粒带电性越强, 土体电导率也越大。图 4 为电阻率与黏粒含量相关关系图, 电阻率值随黏粒含量的增加而减小。可以看出, 两参数表现出相对显

著的相关关系，随着黏粒含量增加，土体电阻率逐渐减少，呈指数衰减形式，其表达式为

$$y = 7.8 + 511.58 \exp(-x/11.39) \quad (5)$$

式中,  $y$  为电阻率数值 ( $\Omega \cdot m$ ),  $x$  为黏粒含量数值 (%)。

这一现象如前所述，黏土颗粒有助于增加土体比表面积，且具有较强的带电性，有助于增加土体电导率，减小土体电阻率。图 4 中指数衰减趋势线表现出较高的相关性， $R^2=0.75$ ，盐城段场地土体中黏粒含量较少，则表现出较高的电阻率值。当黏粒含量超过 60% 时，电阻率值趋于定值。

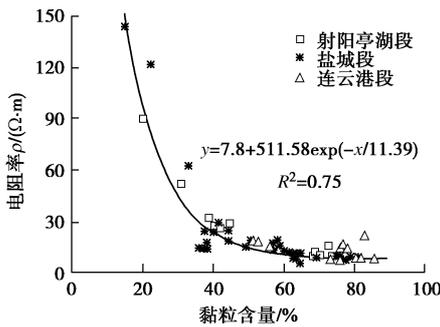


图 4 电阻率与黏粒含量

Fig. 4 Relationship between resistivity and clay content

### (3) 电阻率与塑性指数

图 5 是电阻率与塑性指数关系图。图中对于  $I_p > 26$  % 的高塑性黏土，数据点相对较少且多为连云港场地土体。与电阻率和黏粒含量的关系相似，即随着塑性指数增加，土体电阻率逐渐减小。这与上述黏粒含量的分析结果是一致的，土体塑性指数越大，颗粒越细，其比表面积越大，双电子层厚度越大，电阻率越小。但是塑性指数在灵敏度不同的土体中，不仅受上述因素影响，还与淋滤程度有关。Bjerrum<sup>[14]</sup>曾指出挪威海相黏土受淡水淋滤作用，其液限自 45% 降至 25%，塑限自 20% 降至 17%。因此，灵敏度高的黏土表现出相对于非灵敏黏土相对较低的塑性指数，这就使得电阻率与塑性指数间的关系变得较为复杂。

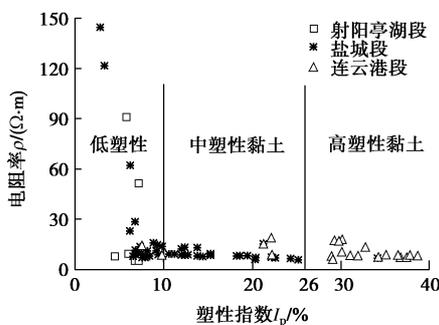


图 5 电阻率与塑性指数

Fig. 5 Relationship between resistivity and plasticity index

本文 3 种塑性土体均有分布，对于低塑性黏土，其电阻率值通常较高，数据分布也较为分散，可能是

由上述讨论的原因引起；中、高塑性土体，电阻率值较低（接近于  $8 \Omega \cdot m$ ）。曾尝试对图中数据进行多项式趋势拟合，但相关系数  $R^2$  值较低。

### (4) 电阻率与灵敏度

灵敏度是原状土剪切强度  $S_u$  与重塑土剪切强度  $S_{ur}$  的比值。 $S_u$  和  $S_{ur}$  并不是常量，其值随着试验类型、变形方式、应力条件、应变速率等条件变化而变化。反过来，灵敏度的绝对值取决于试验类型<sup>[19-20]</sup>。为统一起见，文中灵敏度  $S_t$  结果均来自 CPTU 试验，解译方法采用 Schmertmann<sup>[10]</sup>提出的摩阻比方法，其中  $N_s$  取值 15。虽然淋滤作用对  $S_{ur}$  会产生较大影响，但是  $S_u$  值很大程度上不受其他因素影响，因此，电阻率与灵敏度间应存在良好的相关关系<sup>[7]</sup>。

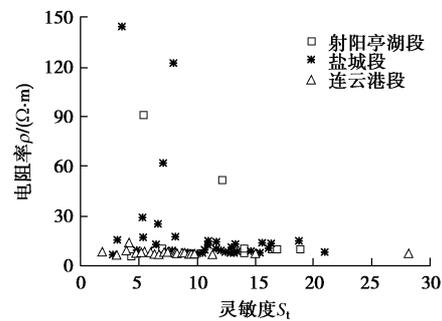


图 6 电阻率与灵敏度

Fig. 6 Relationship between resistivity and sensitivity

图 6 是电阻率与灵敏度的关系图，由于数据量的局限性与电阻率值的集中分布，两特性参数间关系不明显，故对相关数据进行局部放大。图 7 是电阻率值小于  $30 \Omega \cdot m$  与灵敏度关系图。两特性参数间呈明显线性关系，随着灵敏度增加，电阻率值逐渐增加。由于试验的精确度，使得图中分布少数随灵敏度变化的分散点。部分土体具有较高灵敏度值主要是由于土体中含有淤泥、淤泥质黏土引起的。

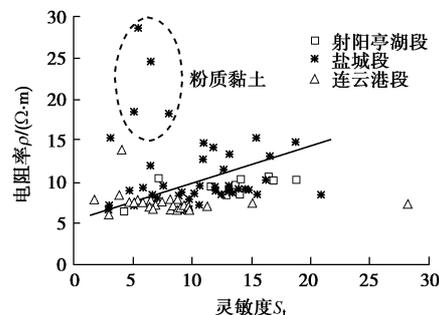


图 7 小于  $30 \Omega \cdot m$  的电阻率与灵敏度的关系

Fig. 7 Relationship between resistivity less than  $30 \Omega \cdot m$  and sensitivity

### (5) 电阻率与重度

电阻率与重度的关系如图 8 所示。一般地，电阻率随重度增加而减小，因为重度增加意味着土颗粒在

外力作用下变得更为紧密<sup>[7]</sup>。图中大部分数据电阻率值低于  $50 \Omega \cdot m$ ，电阻率随重度增加而减小的趋势并不明显，且各个试验场地各不相同。例如，射阳亭湖段场地微弱的表现出预期的电阻率随重度增加而减小的趋势；盐城段场地表现出相反的趋势；连云港段场地在一定重度范围内，电阻率值基本不变。盐城段场地中超出常规的较高电阻率值，主要是由于土体中砂质、粉质黏土引起的。连云港段较低的电阻率值以及重度，主要是由于土体中淤泥、淤泥质黏土引起的。虽然重度对土体电阻率有着一定的影响，但是这种影响并不明显或被其他因素所抵消。

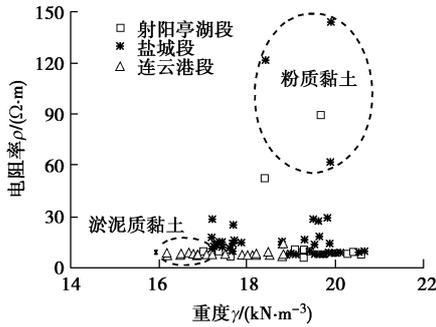


图 8 电阻率与重度

Fig. 8 Relationship between resistivity and bulk unit weight

(6) 电阻率与含水率

图 9 为电阻率与含水率关系图。即使图中主体数据点的电阻率值低于  $50 \Omega \cdot m$ ，但两特性参数间仍没有明显的相关趋势。同电阻率与重度的关系类似，土体中含有较多的淤泥、淤泥质黏土或砂质、粉质黏土时，会使得相应的试验数据点偏离主体数据。

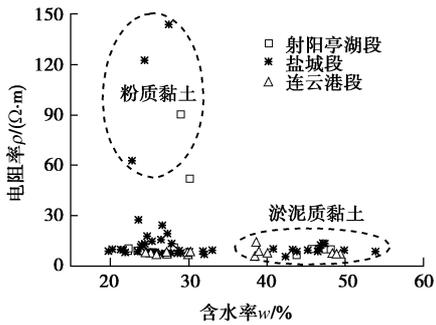


图 9 电阻率与含水率

Fig. 9 Relationship between resistivity and water content

4.2 电阻率与力学特性指标的关系

(1) 电阻率与不排水剪切强度

土是具有土骨架孔隙特性的三相体，抗剪强度是土的重要力学特性参数，与土中孔隙液含盐量密切相关<sup>[6-7]</sup>。由前述分析可知，土体电阻率受孔隙液含盐量影响显著，因此不排水抗剪强度对土体电阻率也存在一定的影响。本文所涉及的土体不排水剪切强度均是基于 CPTU 测试结果解译的非均质固结不排水条件下

三轴抗压剪切强度，采用无体积变化的总应力分析假定，根据孔穴扩张理论的半经验半解析解，建立不排水抗剪强度与超孔压间的关系<sup>[11]</sup>。

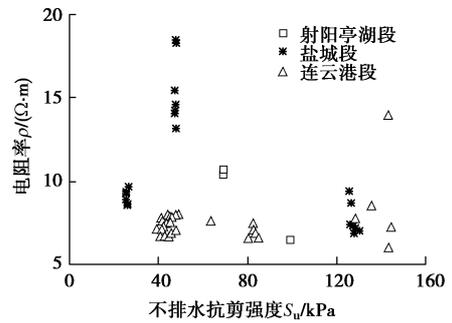


图 10 电阻率与不排水剪切强度

Fig. 10 Relationship between resistivity and undrained shear strength

图 10 为电阻率与不排水抗剪强度关系图。由于缺少相关测试结果，图中数据具有一定的局限性，总体上，电阻率与不排水抗剪强度间相关性不明显。射阳亭湖段场地数据点较少，不具有代表性；盐城段场地较高不排水抗剪强度值对应较低电阻率，但不排水抗剪强度较低时（约 40 kPa），电阻率值较为分散；连云港段场地电阻率值较为集中，不排水抗剪强度在 40 ~ 150 kPa 之间。

土体不排水抗剪强度随沉积环境、测试方法以及解译方法等变化而变化，虽然不排水抗剪强度对土体电阻率有着一定的影响，但是这种影响并不明显或可能被其他因素所抵消。

(2) 电阻率与压缩模量

压缩模量  $E_s$  是表征土体力学特性的另一重要指标<sup>[20]</sup>。同样的，文中所述压缩模量均来自 CPTU 测试数据解译结果，解译方法采用 Kulhawy 等<sup>[12]</sup>提出的经验关系式。图 11 为电阻率与压缩模量关系图，可以看出，电阻率随压缩模量的增加而增加。当压缩模量小于 20 kPa 时，电阻率随压缩模量增加而缓慢增加；当压缩模量大于 20 kPa 时，电阻率随压缩模量增加而急剧增加。产生这种现象的原因可能是本文数据量有限，压缩模量较大的数据点相对较少，或测试结果精确度较差等。少数与主体数据偏离较大的点可能与土体的应力历史和沉积环境有关。总之，土体电阻率受压缩模量影响显著，但限于本文研究数据的局限性，这一结论并不是普遍适用的。

(3) 电阻率与剪切波速和小应变剪切模量的关系

剪切波速是表征土体土体动力学特性的重要指标之一。土层剪切波速的原位测试方法很多，常用的有

跨孔法、下孔法和面波法等,本文采用单孔下孔法原理测试土层剪切波速。图12为电阻率与土层剪切波速关系图。图中可以看出,电阻率值较大数据点对应的剪切波速较小;电阻率值小于 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 时,剪切波速分布较为离散,无明显相关性。产生这种现象的原因主要是试验场地表层为电阻率值较高的硬壳层,硬壳层以下,土体电阻率较低,分布有不同类型的土层,如粉土层、淤泥层和砂土层等,造成剪切波速值分布较为离散。

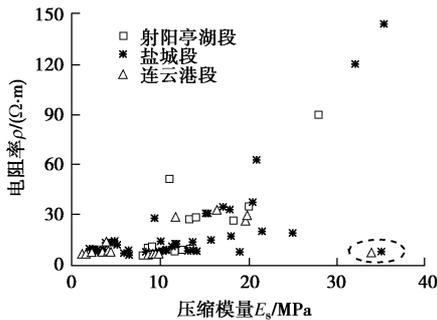


图11 电阻率与压缩模量

Fig. 11 Relationship between resistivity and modulus of compression

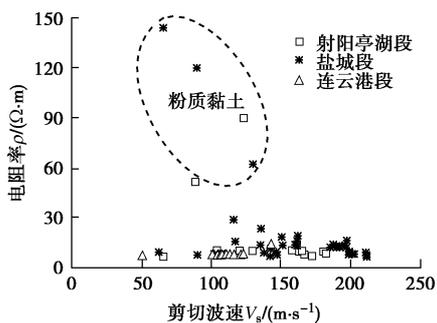


图12 电阻率与剪切波速

Fig. 12 Relationship between resistivity and shear wave velocity

土体在非常小的应变条件下(通常指应变小于 $10^{-4}$ ),剪切模量表现出最大值,并且剪切模量随应变的增大而减小。通常认为在应变率小于 $0.001\%$ 时,剪切模量为常数。土的小应变剪切模量与剪切波速密切相关,也是表征土体力学特性的重要参数之一<sup>[21]</sup>。根据CPTU测试的剪切波速 $V_s$ ,相应的小应变剪切模量 $G_0$ 表达式为

$$G_0 = \rho_T V_s^2 \quad (6)$$

式中, $\rho_T = \gamma_T g$ 为土体密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $\gamma_T$ 为土的重度( $\text{kN}/\text{m}^3$ ), $g=9.8\text{m}/\text{s}^2$ 为重力加速度常数, $V_s$ 为土层原位剪切波速( $\text{m}/\text{s}$ )。

图13为电阻率与小应变剪切模量关系图。图中小应变剪切模量对电阻率的影响,既不同于重度,也不同于剪切波速,但仍没有显著的相关关系。小应变剪切模量是土的电阻率影响因素之一,但这种影响在本文研究数据中并不明显或被其他显著因素所抵消。

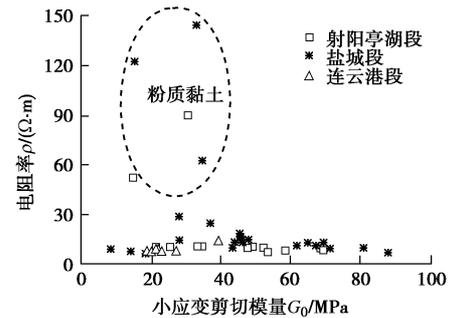


图13 电阻率与小应变剪切模量

Fig. 13 Relationship between resistivity and small strain shear modulus

## 5 讨论

上述试验结果分析表明:土体电阻率值与许多因素密切相关,难以将每个因素的影响单独区分开来。以图6为例,将灵敏度对电阻率的影响单独分析,但是黏粒含量等对电阻率的影响已经叠加于电阻率与灵敏度的关系图中。虽然高黏粒含量的土体对应较低的电阻率值,但是由于缺少足够的数据或显著的相关关系,本文仅仅分析了部分黏粒含量的相关关系。

土体电阻率受孔隙液含盐量、黏粒含量和塑性指数的影响最为显著,其他基本土性指标的影响不明显或被其他因素所抵消。力学特性指标与基本土性指标影响不同,由于其值本身受试验方法等影响,与电阻率间相互关系较为复杂,本文研究并未发现显著的力学特性指标与电阻率的相关关系。许多其他学者认为含水率对电阻率的影响是非常显著的,但是由于本文研究数据量的局限性,并未发现含水率与电阻率间存在明显的相关关系。

## 6 结论

(1) 江苏海相黏土电阻率的主控因素依次为孔隙液含盐量、黏粒含量和塑性指数。孔隙液含盐量增加,导致土体电导率增加,电阻率减小,两者之间呈明显的指数衰减形式。黏粒含量增加,有助于增加土体比表面积和颗粒带电性,使得电阻率减小,两者之间也呈指数衰减形式,当孔隙液含盐量大于 $6 \text{g}/\text{L}$ 或黏粒含量大于 $60\%$ 时,电阻率趋于定值。不同塑性的江苏海相黏土的电阻率随塑性指数的增加而减小,塑性指数对电阻率的影响还与沉积环境和淋滤程度有关。

(2) 江苏海相黏土电阻率随灵敏度的增加而增加,当电阻率小于 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 时,两者表现为较明显的线性关系。重度对电阻率有着一定的影响,但这种影响被孔隙液含盐量、黏粒含量等其他主控因素所抵消。含水率与电阻率间并未得到明显的相关关系,可能是由于研究数据量的局限性所致。

(3) 基于电阻率 CPTU 的江苏海相黏土不排水抗剪强度对电阻率的影响无明显相关关系, 3 个试验场地表现出各自不同的趋势, 因此有待进一步研究。电阻率随压缩模量的增加而增加, 当压缩模量小于 20 kPa 时, 电阻率随压缩模量增加而缓慢增加; 当压缩模量大于 20 kPa 时, 电阻率随压缩模量增加而急剧增加。

(4) 基于 CPTU 测试结果的剪切波速和小应变剪切模量自身受到许多因素的影响, 单独分析二者对电阻率的影响较为复杂, 未得到影响电阻率的明显相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 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. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, SHAO Guang-hui, et al. Analysis of formation characteristics of marine clay based on resistivity cone penetration test (RCPT)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **30**(4): 529 - 535. (in Chinese))
- [2] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements[J]. Engineering Geology, 1999, **54**(1/2): 43 - 53.
- [3] YOON G L, OHMH, PARK J B. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer[J]. Environmental Geology, 2002, **43**: 18 - 28.
- [4] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, **46**: 45 - 70.
- [5] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和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 Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1671 - 1676. (in Chinese))
- [6] 蔡国军. 现代数字式多功能 CPTU 技术理论与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010. (CAI Guo-jun. Study on theory and engineering application of digital multifunctional piezocone penetration test (CPTU)[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))
- [7] LONG M, DONOHUE S, LHEUREUX J, et al. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(10): 1158 - 1168.
- [8] LIU Song-yu, SHAO Guang-hui, DU Yan-jun, et al. Depositional and geotechnical properties of marine clays in Lianyungang, China[J]. Engineering Geology, 2011, **121**(1-2): 66 - 74.
- [9] SOLBERG I L, HANSEN L, RONNING J S, et al. Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, **71**(1): 119 - 133.
- [10] SCHMERTMANN J H. Guidelines for cone penetration test, performance and design[R]. Washington, D C: US Department of Transportation, 1978.
- [11] LUNNE T, CHRISTOPHERSEN H P, TJELTA T I. Engineering use of piezocone data in North Sea clays[C]// Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985.
- [12] KULHAWY F H, MAYNE P H. Manual on estimating soil properties for foundation design[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1990.
- [13] DONG Xiao-qiang, YANG Guo-hui, BAI Xiao-hong, et al. The alternating current impedance characteristics of silty soil with various water contents[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2012, **21**(2): 433 - 470.
- [14] BJERRUM L. Geotechnical properties of Norwegian marine clays[J]. Geotechnique, 1954, **4**(1): 49 - 69.
- [15] ROSENQVIST I T. Investigations in the clay-electrolyte-water system[M]. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute Publication 9, 1955.
- [16] TORRANCE J K. A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays[J]. Géotechnique, 1974, **24**(2): 155 - 173.
- [17] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.
- [18] ANDERSSON S Y, TORRANCE J K, LIND B O, et al. Quick clay—A case study of chemical perspective in southwest Sweden[J]. Engineering Geology, 2005, **82**(2): 107 - 118.
- [19] CAI Guo-jun, LIU Song-yu, ANAND J P, et al. Assessment of the coefficient of lateral earth pressure at rest ( $K_0$ ) from in situ seismic tests[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(4): 310 - 320.
- [20] LONG M, ELHADJ N, HAGBERG K. Quality of conventional fixed piston samples of Norwegian soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(2): 185 - 198.
- [21] CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan. Field evaluation of deformation characteristics of a lacustrine clay deposit using seismic piezocone test[J]. Engineering Geology, 2010, **116**(3/4): 251 - 260.