

电阻率静力触探测试技术与分析

蔡国军, 刘松玉, 童立元, 杜广印

(东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 首先, 简要回顾土的电阻率理论及影响因素, 介绍电阻率静力触探测试技术。然后, 在归纳相关文献与基于电阻率静力触探现场试验工作的基础上, 对电阻率静力触探所测电阻率与土性变化、探头参数及土的其他特性指标进行对比分析。提供的资料表明, 电阻率静力触探作为一种快速、经济、可靠的原位测试工具, 在评价土的工程特性和预测一些岩土参数是可行的, 尤其适用于软土工程的勘察。最后, 讨论应用电阻率静力触探测试技术存在的问题, 展望电阻率静力触探的研究与应用前景。

关键词: 土力学; 电阻率; 静力触探; 土性

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3127 - 07

RESISTIVITY CONE PENETRATION TEST TECHNIQUE AND DATA INTERPRETATION

CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, DU Guangyin

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

Abstract: As a new kind of in-situ testing technique, the resistivity cone penetration test(RCPT), which widely has been used in the foreign countries because of its advantages, can measure tip resistance, casing friction, pore pressure and soil resistivity simultaneously in the field. Soil resistivity can represent its geotechnical properties well, such as characteristics of soil contamination and ground liquefaction potential. Therefore, the RCPT technique has been extensively used in both the environmental and geotechnical fields, especially in contaminant site investigations. Firstly, a review on the theory of soil resistivity and factors affecting resistivity is presented in brief. Measuring equipment and operation principle of the Vertek-Hogentogler RCPT system are introduced. Based on some literatures and field test results with the RCPT at two different sites in China, the relationships between resistivity measured from RCPT and soil lithology, cone bearing, and other characteristic indexes are analyzed. The presented test data show that the resistivity measurement can be indicative of soil lithology and groundwater regimes. The results of two RCPT testing sites illustrate that there is a better relationship between friction ratio and resistivity. The peaks or increases in friction ratio are generally matched with troughs or decreases in the resistivity. The test data indicate that the electrical resistivity decreases with increasing liquid limit and plasticity index; and the Atterberg limits of clay tend to be a correlative function of the electrical resistivity, with the electrical resistivity being a slightly better indicator of liquid limit than that of plasticity index. Although there are few data relating electrical resistivity to specific geotechnical parameters, the presented testing results show that the RCPT is a practical tool for evaluating engineering behaviors and predicting geotechnical properties of soils due to their

收稿日期: 2006 - 06 - 18; **修回日期:** 2006 - 09 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478073); 东南大学优秀博士学位论文基金项目

作者简介: 蔡国军(1977 -), 男, 2001 年毕业于南京建筑工程学院土木工程系岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: focuscai@163.com

speed, economy, and reliability. Finally, the problems and the applied prospects of RCPT in site investigations are discussed.

Key words: soil mechanics; resistivity; cone penetration test(CPT); soil properties

1 引言

新发展起来的电阻率静力触探(RCPT)是一种方便、无损、快捷、连续、经济、可靠的原位测试技术,集成了常规静力触探的功能(可测端阻、摩阻、倾斜和孔压)及土的电阻率测试功能^[1, 2]。土的电阻率是表征土体导电性的基本参数,是土的固有物性参数之一,取决于土的孔隙率^[3]、孔隙形状、孔隙液电阻率、饱和度、含水量^[4]、固体颗粒成分、形状、定向性、胶结状态等^[5]。因此,土的电阻率及其相关指标的变化规律可以反映土体物理力学性质指标的变化规律,并可反映土的一些特殊性质,如土的污染特征^[6]、地基液化特征^[7, 8]等。本文首先简要回顾了土的电阻率理论及影响因素,介绍了 RCPT 测试技术;然后在归纳相关文献与现场试验的基础上,对 RCPT 所测电阻率与土性变化、探头参数及土的其他特性指标进行了对比分析;最后讨论了 RCPT 测试技术研究中的问题,展望了 RCPT 的研究与应用前景。

2 土的电阻率理论

G. E. Archie^[9]通过试验研究了土的电阻率与其结构的关系,建立了适用于饱和和无黏性土的电阻率模型,提出著名的 Archie 方程:

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (1)$$

式中: ρ 为土的电阻率, ρ_w 为孔隙水电阻率, n 为土的孔隙率, a 为土性参数, m 为胶结系数。

R. Kalinski 和 W. Kelly^[10]将 Archie 模型拓展用于非饱和土,提出如下方程:

$$\rho = a\rho_w n^{-m} S_r^{-p} \quad (2)$$

式中: S_r 为饱和度, p 为饱和度指数。

Archie 模型忽略了土颗粒表面导电性对整个土体导电性的影响,在孔隙水电阻率很小且土体中黏土矿物含量很低的情况下是适用的。针对土颗粒表面导电性不能忽略的情况, M. H. Waxman 和 L. J. M. Smits^[11]通过对两并联电阻试验研究,提出了适用于

表面导电性良好的黏性土电阻率模型:

$$\rho = \frac{a\rho_w n^{-m} S_r^{1-p}}{S_r + \rho_w BQ} \quad (3)$$

式中: 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。

土的电阻率受许多因素影响,如孔隙率、孔隙液的电阻率、固体颗粒的组成、饱和度、颗粒形状与排列方向、孔隙结构以及温度等^[12]。一般地,土的电阻率随其孔隙率、饱和度和温度的增加而降低。土的电阻率和渗透系数之间的关系与土的类型有关。土中离子含量的增大将导致整个土体电阻率的下降,离子类型与浓度对土的电学性能也产生重要影响。

3 RCPT 测试技术

3.1 仪器设备

RCPT 设备的核心部分为电阻率传感器,最早的电阻率传感器是用来估算原位土的孔隙率和密度的,近年来则用于圈定被污染的土壤或水的范围。在荷兰,从 20 世纪 70 年代中期就开始应用 CPT 附加电阻率传感器来测量并圈定污染土的范围^[13]。该仪器是在锥头装置 2 个电极,一个是电流电极,另一个是测量电极。锥头每贯入 0.2 m 就停下,然后测量出该位置土的电阻率。R. G. Campanella 等^[14, 15]研制出双电极 RCPTU 探头,可以同时测出孔压、水的电阻率、土的电阻率、侧壁摩阻力和锥尖阻力,并采用该探头对地下水的污染程度和范围进行了研究。

东南大学岩土工程研究所引进的美国多功能 RCPT 测试系统,配备了最新的电阻率功能测试探头(见图 1)。探头采用四电极排列方式,以消除气体发生和电镀可能造成的误差。探头有特制的电伺服系统,使用自动修正技术确保在 0~10 000 ms/s 范围内的测试精度。探头规格符合国际标准:锥角 60°,锥底截面积 10 cm²,侧壁摩擦筒表面积 150 cm²。现场数据采集使用 E4FCS 计算机系统,使用 CONE PLOT 和 CLEANUP 软件得到数据列表及有关电导率或电阻率图像。为保证 RCPT 探头匀速贯

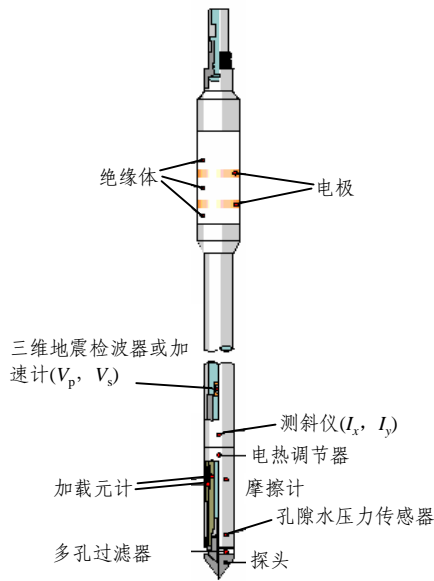


图 1 RCPT 探头示意图

Fig.1 Schematic diagram of RCPT cone

入, 系统贯入装置采用液压活塞控制, 贯入速率为 2 cm/s, 沿深度每 5 cm 记录 1 组读数。

3.2 RCPT 测试原理

由于探杆周围土中电场的复杂性, 且边界条件难于控制, 使得由探头所测得的土电学特征很复杂。M. Fukue 等^[16]通过欧姆定律得出了触探试验的理论方程。土电阻率是通过测试恒定电流下两电极间的电压降 ΔV, 并根据欧姆定律计算出土电阻 R 的大小而得出的。试样的竖直电阻率 ρ 可表示为

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{\Delta VS}{IL} \quad (4)$$

式中: S 为电极面积(m²), L 为电极间距(m), I 为

电流强度(A)。

RCPT 电阻率测试部分主要由 4 个铜质电极以及内部的电路系统等所组成, 铜电极之间用绝缘塑料隔离开来, 形成 O 形环状密封系统。通过其内部的电路系统与 4 个电极同步、连续地测量内部两电极间的电压变化, 并根据欧姆定律原理编制计算程序计算电极周围土体的电阻率大小。

4 测试分析

4.1 场地描述

2005 年 5 月, 作者采用 RCPT 设备在南京金陵图书馆新馆的拟建场地上进行试验, 现场共钻孔 2 个, 测试深度分别为 10.0 和 14.0 m。2005 年 6 月, 在连盐高速场地共钻孔 2 个, 深度分别为 12.25 和 15.0 m。

金陵图书馆新馆拟建场地地貌属于长江河漫滩地貌单元, 地形高程低, 地下水位高, 场地内分布厚度较大的淤泥质软弱土层以及粉土、粉细砂等中等液化土层。金陵图书馆新馆场地土性随深度变化见图 2。

连盐高速场地位于连盐高速灌云三标 K14+140 断面附近, 场地所在区域主要为海陆交互沉积的滨海平原区, 西高东低呈微倾斜状, 地势低平, 水系发育, 浅部新近沉积的软土分布较为普遍。软土层主要为②-2 层淤泥及②-3 层软黏土及淤泥质(亚)黏土, 该 2 层软土具含水量高(最高达 88.3%)、压缩性大、强度低、天然孔隙比大等特征。连盐高速场地土性随深度变化见图 3。

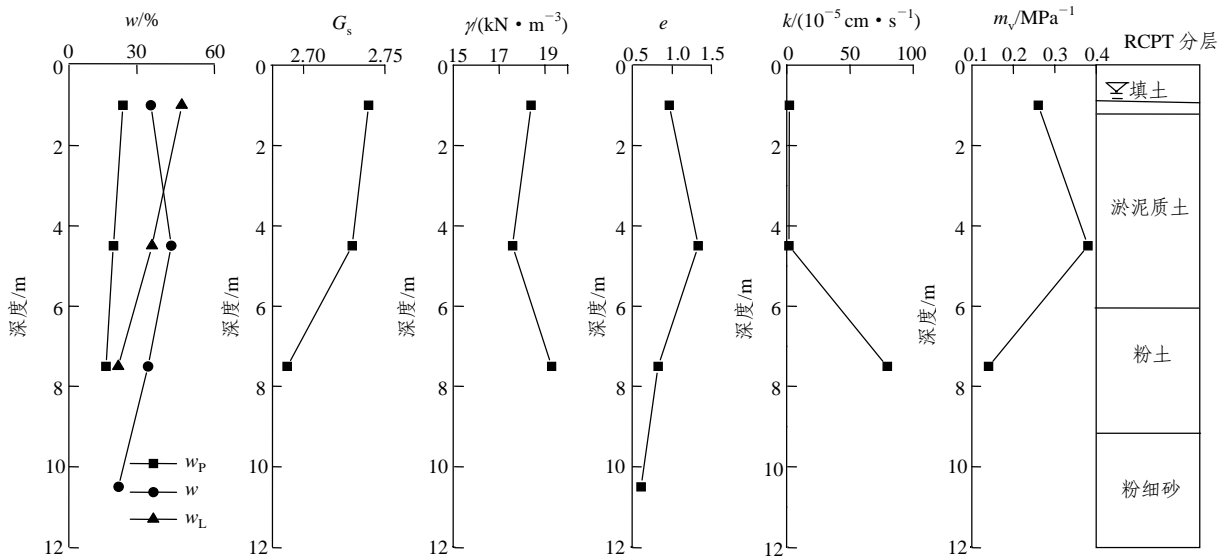


图 2 金陵图书馆新馆场地土性随深度变化

Fig.2 Variation of soil characteristics with depth at New Jinling Library site

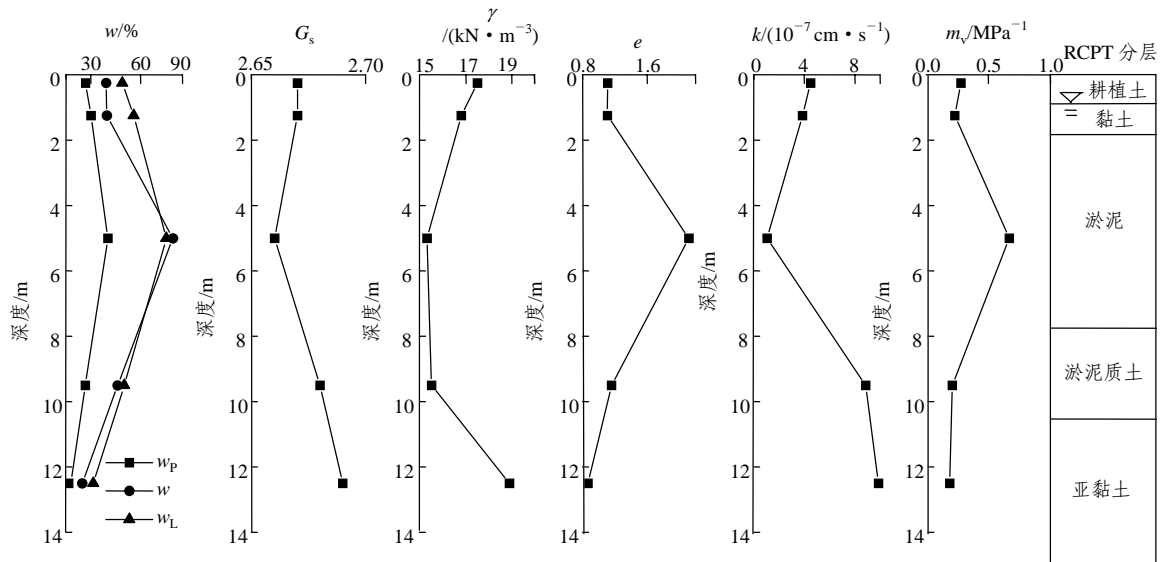


图3 连盐高速场地土性随深度变化

Fig.3 Variation of soil characteristics with depth at Lianyungang—Yancheng expressway site

4.2 试验结果

金陵图书馆新馆场地电阻率测试曲线见图 4，该场地上层为厚约 1.0 m 的杂填土，杂填土中主要成分为回填的建筑垃圾和少量生活垃圾混以粉质黏土组成；其下为厚约 5.2 m 的淤泥质土，以淤泥质粉质黏土为主，含少量腐殖质；再下部为厚 4.1 m 的粉土，砂质含量高；底部为粉细砂，具有水平沉积层理。表 1 中场地土层电阻率测试结果表明：表层填土的电阻率很高，清楚显示地下水水位约 0.8 m。淤泥质土中的电阻率平均值为 4.81 Ω·m，这么低的电阻率可能是由于淤泥质土中含水量较高的原因，且该层电阻率沿深度有增大的趋势。在淤泥质土和粉土分界面处可以清楚地看出孔压的突然减小和电阻率的增加，粉土层电阻率平均值为 7.35 Ω·m。在深度 10.2 m 左右，电阻率有增加的趋势，而孔压有降低的趋势，这是由于该处接近粉细砂层的缘故砂层中排水条件好，孔隙水的通过可以滤去附近的黏

表 1 2 个场地土层电阻率测试结果

Table 1 Testing results of resistivity of soils at two sites

场地	土名	厚度/m	电阻率/(Ω·m)		
			最小值	最大值	平均值
金陵图书馆新馆	填土	1.0			
	淤泥质土	5.2	3.97	8.04	4.81
	粉土	4.1	5.39	12.99	7.35
	粉细砂	5.7	6.53	9.02	7.79
连盐高速	耕植土	0.5			
	黏土	1.5	4.72	5.65	4.97
	淤泥	8.7	3.91	4.92	4.16
	淤泥质土	1.2	3.97	4.27	4.12
	亚黏土	3.3	4.10	4.64	4.21

土，由于缺乏导电性强的黏土矿物，因此该层的电阻率比较高，平均值为 7.79 Ω·m，但这更可能由于砂层中孔隙液电阻率很高的缘故。

连盐高速场地电阻率测试曲线见图 5。该场地为厚 2.0 m 的硬壳层，表面有厚 0.5 m 的耕植土；其下为厚 9.9 m 的淤泥和淤泥质土，含腐植物，含水量高，孔隙比大，是典型的连云港海相软土；底层为亚黏土。淤泥层上部的硬壳层(厚度约 2.0 m)具有很高的探头阻力和较高的电阻率，电阻率最大值为 5.65 Ω·m，平均值为 4.97 Ω·m。进入淤泥层后，孔压随深度升高而电阻率减小，表明要么是土性的改变，要么是孔隙液电阻率的改变。室内试验发现：连云港海相软土含盐量高，孔隙液电阻率低，根据 Archie 方程可知，土的电阻率相应降低。而在淤泥质土中电阻率最小，平均值为 4.12 Ω·m，低的电

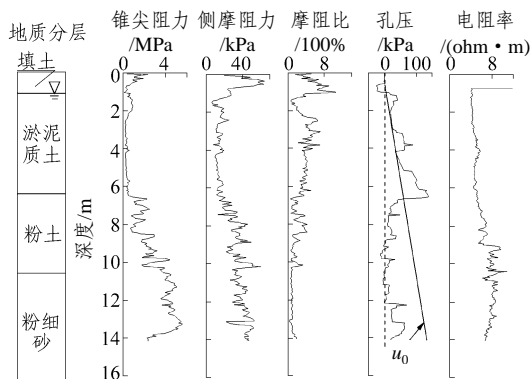


图4 金陵图书馆新馆场地电阻率测试曲线

Fig.4 Testing curves of resistivity at New Jinling Library site

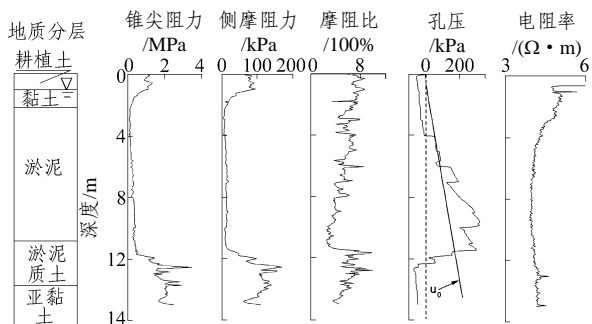


图 5 连盐高速场地电阻率测试曲线

Fig.5 Testing results of resistivity at Lianyungang—Yancheng expressway site

阻率值原因为：(1) 淤泥质土往往具有很高的含水量；(2) 有机质具有很高的阳离子交换量(CEC)，能使离子很容易通过土颗粒，因此导电性增强。亚黏土层电阻率平均值为 $4.21 \Omega \cdot m$ ，略高于淤泥和淤泥质土层。

4.3 电阻率与其他特性指标的对比

(1) 电阻率与探头参数的关系

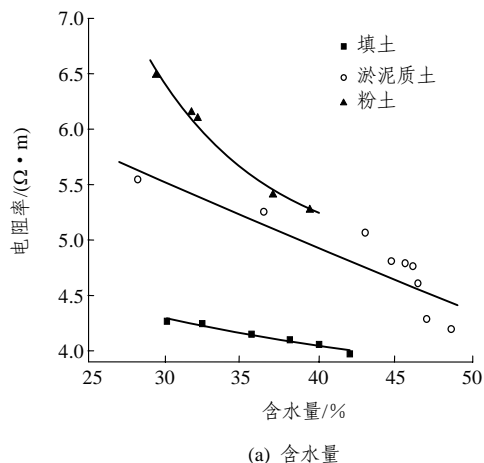
P. K. Robertson 和 R. G. Campanella^[17]研究结果表明，砂土的锥尖阻力与水平有效应力、土的压缩性和相对密实度有关，并提出了相对密实度和经过水平有效应力归一化的锥尖阻力之间的关系。所建立的土结构因子和归一化锥尖阻力的相关关系也是合理的，因为结构因子和土的孔隙率有关，当土的电阻率相对较低时，这个关系相当精确。归一化锥尖阻力随着结构因子的增加而增加，土的相对密实度相应减小。摩阻比($R_f = (f_s/q_t) \times 100\%$, f_s 为侧摩阻力, q_t 为锥尖阻力)随着静止侧压力系数 K_0 的增加和细粒含量的增加而增大。在砂土中, K_0 为常数, R_f 的变化可以反映细粒含量的变化。砂土中细粒土的存在影响土的电阻率的原因为：(1) 细粒含量增加将减小土的孔隙率，因为细粒土占据了砂土颗粒之间的孔隙，孔隙率减小将导致电阻率的升高；(2) 细粒土的存在表明导电性强的黏土矿物的存在，亦将引起电阻率的减小。

从 2 个场地 RCPT 试验结果可以看出：摩阻比和电阻率存在一定的关系，摩阻比的峰值或增加一般对应着电阻率的谷值或减小。当电阻率减小时，这个关系变得不太明显。相关研究报告^[18]提出了摩阻比和电阻率之间的关系，考虑了土性改变的影响，并提出了土的归一化电导率和摩阻比之间的函数关系，任何一个函数关系都和电阻率有关。然而，土的电阻率的复杂性使得这方面的应用还有待进一步研究。

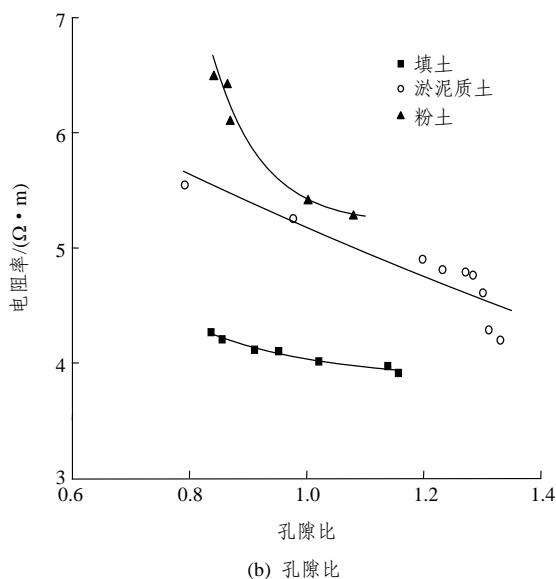
在不排水和部分排水土中描述土性改变时，孔隙水压力参数也是非常有用的。例如，从粉土到黏土的改变，将引起电阻率的减小，也将探测到孔隙水压力的快速增加。从淤泥质土到粉土的改变，将引起电阻率的增加，同时也探测到孔隙水压力的快速减小。

(2) 电阻率与含水量、孔隙比的关系

土的电阻率由两部分组成：孔隙水的电阻率和土颗粒的电阻率。土中固体颗粒的电阻率要比孔隙水的高得多。很多学者都对土的含水量与电阻率的关系进行过研究，研究发现：随着含水量的升高，土体导电性增强，电阻率则降低。图 6, 7 分别给出了金陵图书馆和连盐高速场地电阻率与含水量的关系曲线。由图 6(a), 7(a)可知：不同土类的含水量和电阻率具有很好的相关关系，随着含水量在某个范围内的升高，土的电阻率下降，不同土类的下降幅



(a) 含水量



(b) 孔隙比

图 6 金陵图书馆新馆场地电阻率与含水量、孔隙比的关系曲线

Fig.6 Relation curves between resistivity, water content and void ratio at new Jinling Library site

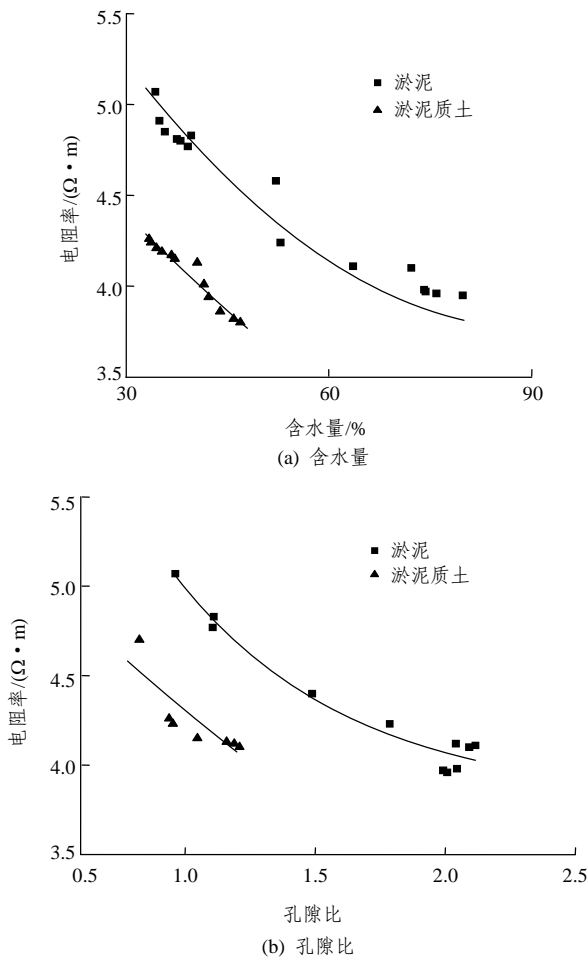


图7 连盐高速场地电阻率与含水量、孔隙比的关系曲线
 Fig.7 Relation curves between resistivity, water content and void ratio at Lianyungang—Yancheng expressway site

度不同；金陵图书馆新馆场地，粉土的电阻率随含水量下降幅度最大，而淤泥质土和填土的电阻率随含水量下降较为平缓，基本为线性关系；连盐高速场地，淤泥的电阻率高于淤泥质土的，两者随含水量的升高均急剧下降，但是当淤泥的含水量升高到某一范围(约 80%)时，电阻率的下降幅度明显减小，曲线趋于平缓。

由图 6(b), 7(b)可知：电阻率总体随着孔隙比的升高而下降，不同的土类下降幅度不同；金陵图书馆新馆场地，粉土的电阻率随孔隙比下降幅度最大，当孔隙比升高到一定某一范围(约 1.1)时，电阻率的下降幅度明显减小，曲线趋于平缓；连盐高速场地，淤泥和淤泥质土的电阻率随孔隙比的增大下降幅度相差不多。淤泥或淤泥质土由于含水量高、孔隙比大，因此电阻率最小，一般为 $4.5 \Omega \cdot m$ 左右，而粉土、砂土等粗粒土电阻率一般为 $7.5 \Omega \cdot m$ 左右，而且粗粒土和细粒土的电阻率受含水量、孔隙比影响程度是不同的。

(3) 电阻率与液限和塑性指数的关系

Z. Abu-Hassanein 等^[19]在标准击实功条件下，研究了阿太堡限与土的电阻率之间的关系。研究表明，土的电阻率随着液限和塑性指数的增加而降低。这个变化趋势与黏土的矿物成分有关，蒙脱石含量高的黏土一般具有较高的液限和塑性指数。蒙脱石黏土的表面电导率随着蒙脱石含量的增加而升高。由于较高的表面电导率产生较低的体积电阻率，两者互为倒数关系。因此，电阻率指标可以对黏土的液限和塑性指数进行评价。图 8, 9 分别给出了金陵图书馆新馆和连盐高速场地电阻率与液限和塑性指数与关系曲线。从图 8, 9 中可以看出，黏土阿太堡限与电阻率之间的关系为

$$w_L = \alpha_1 \rho^{\beta_1} \tag{5}$$

$$I_p = \alpha_2 \rho^{\beta_2} \tag{6}$$

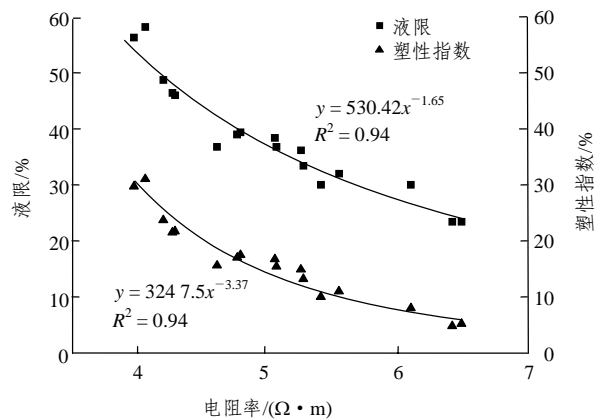


图8 金陵图书馆新馆场地电阻率与液限和塑性指数的关系曲线

Fig.8 Relation curves between resistivity, liquid limit and plasticity index at new Jinling Library site

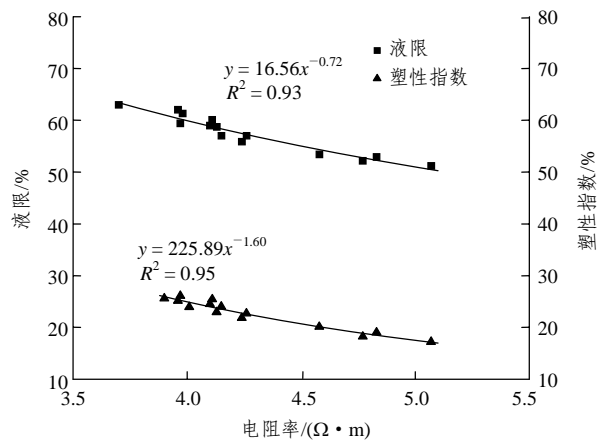


图9 连盐高速场地电阻率与液限和塑性指数的关系曲线
 Fig.9 Relation curves between resistivity, liquid limit and plasticity index at Lianyungang—Yancheng expressway site

式中: w_L 为液限; I_p 为塑性指数; α_1 , β_1 , α_2 , β_2 均为试验参数, 取决于不同土类(或黏土矿物), 对连盐高速场地海相黏土: $\alpha_1=16.56$, $\beta_1=-0.72$, $\alpha_2=-225.89$, $\beta_2=-1.60$ 。

在实际应用中, 试验参数的变化可能更依赖于黏土矿物的成分与含量。一般来讲, 黏土的表面电导率可以作为预测阿太堡限的有效工具, 这是因为非膨胀黏土的液限和塑性指数主要受扩散双电层的影响, 而双电层又控制着黏土的表面导电性。已有研究结果^[20]表明, 非膨胀黏土的液限和表面导电性均随着双电层厚度的增加而增加。

5 结 论

RCPT 现场试验结果表明: 电阻率静力触探作为一种新型的原位测试技术, 可以精确地测试土的电导率参数。土的电导率及其相关指标的变化规律可以反映土体物理力学性质指标的变化规律。因此, 土的电导率可以作为土质分类和划分土层的一个参考参数。土的电导率和其他的 CPT 探头参数具有一定的相关关系。土的孔隙率、含水量也影响电导率, 而且不同的土类影响程度是不同的。土的电导率参数可以反映土的基本物理力学特性, 如可用来反映土体的含水量、孔隙率、饱和度、阿太堡限、含盐量、压实度、液化势、固结度以及渗透特性等。因此, 采用 RCPT 所测原位电导率可以预测岩土工程参数。

土的电导率理论目前还不成熟, RCPT 测试技术还存在一些问题有待进一步深入研究。地下土层条件复杂多变, 存在空间变异性, 如卵石、大孔隙、裂纹、裂隙与地势的起伏等状况等都使得实测电导率资料存在很大离散性。因此, 必须意识到探头经过严格标定和测试参数经过修正的重要性, 对特定场地的勘察, 需要与所取水样和土样进行室内试验相结合。

参考文献(References):

[1] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553 - 556.(LIU Songyu, WU Yankai. On the strategy and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 553 - 556.(in Chinese))

[2] YOON G L, OH M H, PARK J B. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer[J]. Environmental Geology, 2002, 42(1): 18 - 28.

[3] ARULANANDAN K. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil[J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1991, 117(2):

319 - 330.

[4] SELIG E T, MANSUKHANI S. Relationship of soil moisture to the dielectric property[J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1975, 101(8): 755 - 770.

[5] 于小军. 电阻率结构模型理论的土力学应用研究[博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2004.(YU Xiaojun. On the theory and application of electrical resistivity model in soil mechanics[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Southeast University, 2004.(in Chinese))

[6] FUKUE M, MINATO T, MATSUMOTO M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers[J]. Engineering Geology, 2001, 60(2): 361 - 369.

[7] ARULANANDAN K, MURALEETHARAN K K. Level ground soil liquefaction analysis using in-situ properties, part I[J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1988, 114(7): 771 - 790.

[8] ARULMOLI K, ARULANANDAN K, SEED H B. New method for evaluating liquefaction potential[J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1985, 111(1): 95 - 114.

[9] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146(1): 54 - 62.

[10] KALINSKI R, KELLY W. Electrical-resistivity measurements for evaluating compacted soil liners[J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1994, 120(2): 451 - 457.

[11] 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.

[12] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1): 45 - 70.

[13] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic and Professional and Chapman and Hall, 1997.

[14] CAMPANELLA R G, WEEMEES I. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 557 - 567.

[15] CAMPANELLA R G, DAVIES M P, BOYD T J, et al. Geoenvironmental subsurface site characterization using in-situ soil testing methods[C]// The First International Congress on Environmental Geotechniques. Edmonton: Alberta, 1994: 21 - 26.

[16] FUKUE M, TAYA N, MATSUMOTO M, et al. Development and application of cone for measuring the resistivity of soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 596(3/4): 283 - 293.

[17] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Interpretation of cone penetration tests. part I: sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(6): 718 - 733.

[18] Earth Technology Corporation. Report on conductivity CPT[R]. Long Beach, Canada: Earth Technology Corporation, 1987.

[19] ABU-HASSANEIN Z, BENSON C, BLOTZ L. Electrical resistivity of compacted clays[J]. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1996, 122(5): 397 - 406.

[20] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1993.