

· 争鸣与探索 ·

电阻率 CPTU 的环境污染场地评价研究现状

蔡国军, 刘松玉

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 简述了当前静力触探的现状与发展。介绍了国际最新研制的 RCPTU (电阻率孔压静力触探) 探头和多功能静力触探技术在污染场地评价、地下水污染和垃圾填埋场地下水位高度评估等环境领域的应用及工程实例。指出了多功能静力触探测试技术研究中的问题, 展望了其应用前景。

关键词: 电阻率; 孔压静力触探; 污染场地; 环境污染评价

中图分类号: TU 413 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2010)05-0048-05

Geoenvironmental Investigation Based on Resistivity Piezocone Tests (RCPTU) for Contaminated Site

CAI Guojun, LIU Songyu

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

Abstract The present situation and development of Cone Penetration Test were described. It was emphasized on that a new kind of in-situ testing technique [resistivity piezocone penetration test (RCPTU)] had widely been used in western countries for geoenvironmental and contaminated site investigation. RCPTU could measure tip resistance, sleeve friction, pore pressure and soil resistivity simultaneously in the field for evaluation of contaminated site and groundwater pollution as well as level assessment of groundwater in landfill. The problems about technology and research were discussed in the multi-function RCPTU for its future development and application.

Key words Resistivity; Piezocone penetration test; Contaminated site; Environmental pollution assessment

现代孔压静力触探是 20 世纪 80 年代国际上兴起的新型原位测试技术^[1-3], 与我国传统的单、双桥静探相比, 该测试技术具有理论系统新、功能齐、参数准确、精度高、稳定性好等优点, 既可以用超孔压的灵敏性准确划分土层、进行土类判别, 又可求取土的原位固结系数、渗透系数、动力参数、结构参数等, 在欧美诸国已得到广泛的应用^[4-5]。

随着经济快速发展, 城市化和工业化进程加快, 土壤污染越来越严重^[6-9]。从 20 世纪 70 年代开始, 不少国际机构研制开发了多种新型适合于污染场地评价的原位测试技术^[10-14], 进一步促进了环境岩土工程的发展。国内的原位测试技术因传感器等技术落后, 在此方面基本上处于空白状态。在国内外静力触探技术的现状与发展评述的基础上, 介绍国外常用的电阻率孔压静力触探 (Resistivity Piezocone Tests, 简称 RCPTU) 探头, 并且对多

功能静力触探技术在污染场地评价、地下水污染和垃圾填埋场地下水位高度评估等环境土工方面的应用及工程实例进行重点分析, 以促进国内现代孔压静力触探技术向多功能和多领域的方向发展。

1 CPT/CPTU 技术的现状与发展

刘松玉等 (2004)^[11]对静力触探 (Cone Penetration Test, 简称 CPT) 发展历史作了详细阐述, 但其最重要的发展是于 20 世纪 80 年代初成功研制的可测孔隙水压力的孔压静力触探 (Piezocone Penetration Test, 简称 CPTU)。它可以同时测量锥尖阻

收稿日期: 2010-03-12 修订日期: 2010-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40702047); 江苏省交通科学研究计划资助项目 (8821006021)

作者简介: 蔡国军 (1977-), 男, 山东兖州人, 讲师, 博士, 从事环境岩土工程与现代原位测试技术等方面的研究工作。

力、侧摩阻力和孔隙水压力, 为现实了解土的更多工程性质及提高测试精度提供极大的可能性。从 20 世纪 90 年代以来, 探头的研制朝着多功能化方向发展, 在新型传感器技术的支持下, 出现了如测

地温、测斜、地震波孔压静力触探 (SCPTU)、电阻率孔压静力触探 (RCPTU)、可视化静力触探 (Vis-CPT) 等, 孔压静力触探技术得到了广泛应用和进一步发展。CPTU 主要新传感器见表 1。

表 1 CPTU 主要新传感器

Table 1 New additional sensors incorporated CPTU

传感器名称	测量参数	应用情况	研制时间及单位
侧压力传感器 (Lateral Strees)	侧向应力	尚未投入使用	美国加利福尼亚伯克利分校 (UCB 1990)
静探旁压仪 (Cone Pressuremeter)	应力, 应变确定模量	有应用, 未成熟	Fugro (1986)
振动传感器 (Vibro CPT)	波速 v_p , v_s	有应用, 未成熟	加拿大哥伦比亚大学 (UBC, 1986)
电阻率传感器 (Elect CPT)	电阻率	有应用	荷兰 (1985)
热传感器	热传导率	尚未投入使用	Fugro (1986)
放射性传感器	重度、含水量	有应用	Delft Geotechnics (1985)
激光荧光器传感器 (LF)	荧光强度	试验成功	Hirshfield (1984)
可视化静力触探 (Vis CPT)	图像、Energy、wavelet	试验成功	Hryciw, R. D. (1997)

我国在 20 世纪 80 年代后对探头传感器技术改进很少, 主要使用“单桥”和“双桥”探头, 其规格与国际通用的也不尽相同。在 CPT 理论研究、CPTU、环境 CPT 等技术方面与先进国家差距明显, 主要表现为: ①国际 CPT 测试成果直接用于岩土工程设计, 且可靠性稳定; ②国外普遍采用 B_{q1} 、 R_b , 即 CPTU 技术已经广泛使用, 我国主要用 q_{cs} 、 f_{sp} ; ③国际 CPT 的应用建立在较完善的理论基础之上, 达到较理性的程度; ④国外 CPT 技术大量应用在环境岩土工程领域, 我国在这一方面是空白。

2 RCPTU 测试技术

RCPTU 设备的核心部分为电阻率传感器, 安装在标准 CPTU 探头后部, 最早的电阻率传感器用于估算原位土的孔隙率和密度, 近来用作圈定被污染土壤或水的范围。

国外最常用的电阻率探头测试部分主要由 4 个铜质电极及内部的电路系统所组成。铜电极之间用绝缘塑料隔离, 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, 连续地测量内部两对电极间的电压变化, 并根据欧姆定律编制程序计算电极周围土体的电阻率大小。Hogentogler 电阻率 CPTU 探头的结构见图 1。

电阻率探头同时还包含全套其他测试功能, 可同步记录贯入过程中的锥尖阻力、侧面摩擦力、孔隙压力与测斜等。有的电阻率探头还具有测试周围土体温度与接收地震剪力波等功能。东南大学

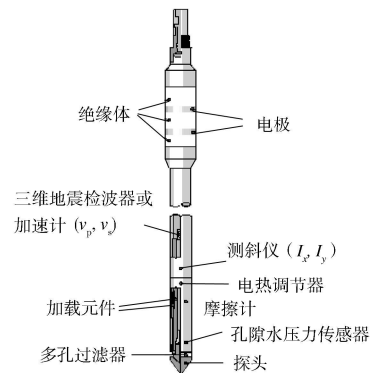


图 1 Hogentogler 电阻率孔压静力触探探头

Fig 1 Hogentogler Resistivity Piezocone (RCPTU)

岩土工程研究所 2005 年初引进美国 Hogentogler 原装多功能数字式车载 RCPTU 系统, 配备了最新的电阻率功能测试探头^[15]。

现场数据采集使用 E4FCS 计算机系统, 通过 CPTSND 软件控制电阻率数据的采集, 使用 CONE-PLOT 和 CLEANUP 软件得到数据列表及有关电导率 (mS/s) 或电阻率图像 ($\Omega \cdot m$)。

3 RCPTU 技术在环境土工中的应用

土或岩石的电阻率取决于孔隙率、含水量、温度、物质组成、孔隙水的盐分与含盐度、颗粒分布和颗粒形状与排列特征等^[16-23]。每种土类都包含固有的传导率 (电阻率背景值), 其变异意味着土壤可能受到了污染^[14], 即可以通过比较土体中污染水电阻率与与其有相似物理性质的未受污染土体

中的水电阻率之间的差异判断地下水污染的基本特征^[12]。典型的 RCPTU 连续的地下水位以下土的体积电阻率测试值和相应的孔隙液电阻率的测试参数见表 2。

表 2 典型场地的电阻率参数

Table 2 Summary of typical resistivity measurements

场地类型	体积电阻率	流体电阻率
	$\rho_b / (\Omega \cdot m)$	$\rho_f / (\Omega \cdot m)$
受盐入侵影响的三角洲砂土	2	0.5
来自于砂土层中的饮用水	50	15
典型的垃圾沥出液	1~30	0.5~10
尾矿(贱金属)和氧化硫化物沥出液	0.01~20	0.005~15
无氧化硫化物沥出液的尾矿(贱金属)	20~100	15~50
砷污染砂砾土	1~10	0.5~4
工业场地的无机污染砂土	0.5~1.5	0.3~0.5
工业场地的碳酸污染淤泥土和砂土	200~1000	75~450
工业场地的木材腐烂类污染的黏质粉土	300~600	80~200

3.1 RCPTU 在污染场地中的应用

在大量工业垃圾与生活垃圾污染地下水和土质的情况下,评价场地的土质状况,如地下水和土的性能显得尤为重要。为了有效治理污染场地,美国环保部门指出场地的物理性能与化学特征应符合要求:①岩土组成;②地下水资料;③渗透系数;④化学分布与潜在的污染源接受体。

化学分析法是探测污染土层最基本的方法,但是化学分析费用高、耗时长。因此,需要研究简单、快捷、成本低的探测方法。一种迅速有效的评价地表污染方法是用地球物理的方法检测受污染的土体。电阻率法是地球物理方法中的一种迅速无损的原位测试方法。土的电阻率取决于土的类型、饱和度、离子浓度及温度与孔隙水等因素。每种土的类型都包含固有的传导率;其变异意味着可能的污染等。土体的污染能改变地下水与土的导电性能,从而影响土体的电阻率。

由于污染物通常是电解质或者有机质,如重金属和有机化合物,因此有可能通过土的电阻率的不同区分污染土与未被污染的土。研究揭示,电阻率高预示着含水量低、孔隙中含气体量高、砂或砂砾含量大等。

Yoon 等^[24]对于污染的砂土的电阻率研究揭示污染土中电阻率变化规律。

(1)土的含水量与孔隙流体化学成分、沥出物对土的电阻率的影响要比土的重度与土的类型大。

(2)土的电阻率在掺入含有重金属沥出物的前后变化非常大,加入污染性的沥出物后土的电阻率减小幅度显著,这说明电阻率模型可有效用于描绘场地受污染的程度等。

(3)电阻率也同样随土的重度、饱和度、砂土的含水量、气候性砂土(MASA)变化,但淤泥质土(SAN-TO)的电阻率随其重度、饱和度与含水量的变化趋势与前者有所不同,这是由于淤泥质土中含有大量的细粒和淤泥黏土颗粒(8%)所致。土体颗粒中粘性成分含量的高低对土的电阻率也有显著的影响。

(4)需进一步研究黏土中矿物成分对其电阻率的影响,并进一步研究土的电阻率随土体孔隙水变化的原因。

M. Fukue 等^[25]通过室内与现场的电阻率探头实验系统研究电阻率法检测污染土的理论与方法后认为:①土的电阻率随 KCl 溶液浓度增大而减小,随电流强度增加而降低,大电流对土体有一定的极化作用。②电阻率随含水量增大而减小,同等含水量时,土的电阻率随油含水量上升而减小;同时,含水量愈高,油含量对土的电阻率影响愈小。

3.2 RCPTU 在地下水污染评价中的应用

随着工业和城市快速发展,大量废水和固体废物进入地下水,对地下水的质量评估和污染程度评价变得日益重要。污染物通常为电解质或者有机质,如重金属和碳、硫等有机化合物,有可能通过土中水电阻率的差异区分受到污染的与未受污染的水体并进一步评价污染特征,通过比较污染水电阻率与其有相似物理性质的未受污染的水电阻率之间的差异判断地下水污染的基本特征。研究表明,RCPTU 是评价地下水污染特征的有效手段。

某矿区分布硫化物矿体的尾矿,场地相对平坦,其环境岩土工程特性、水文地质特性及地球化学特性引起工程技术人员的关注。采用存在 10 年的观察井无法确定污染物的空间分布或隐藏的污染通道运动方向。土的表面导电性越大,地下水的离子浓度越高,体积电阻率越小。Campanella 等^[11, 14]利用 UBC 的 RCPTU 和 BAT 取(水)样及现场水力传导性测试系统对该矿区进行了调查。在高水平氧化区由于产生酸导致在地下水位以上的电阻率较小,场地地形 RCPTU 测试曲线见图 2。

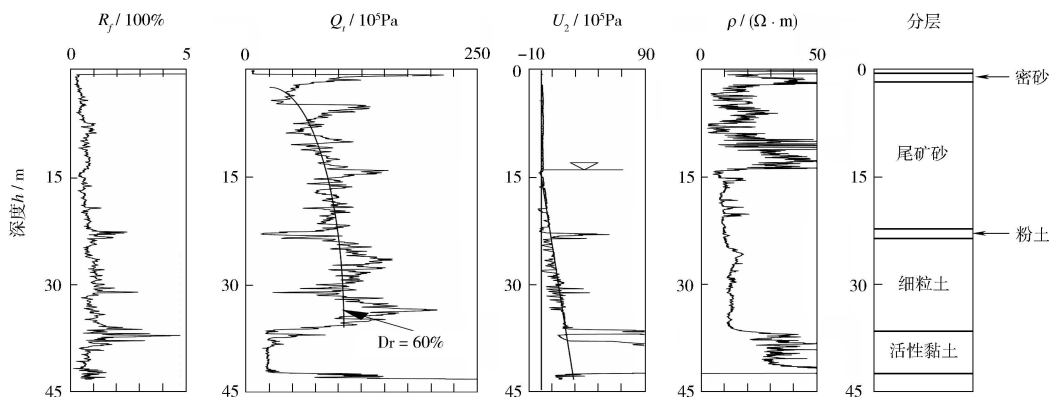


图 2 硫化物尾矿分布区典型 RCPTU 测试曲线

Fig 2 Typical RCPTU sounding profile from sulphide ore mine tailing

Campanella 等^[14]应用 UBC 的电阻率探头对加拿大 Richmond Fraser River 河口三角洲地区盐水入侵到砂土含水层 (新鲜水) 中的情况进行了勘

测, 在长 500 m 的测试剖面中, 以体积电阻率小于 $5 \Omega \cdot m$ 指示出盐水入侵线的展布情况, 从虚线勾勒范围清晰可见盐水入侵的分布范围, 见图 3。

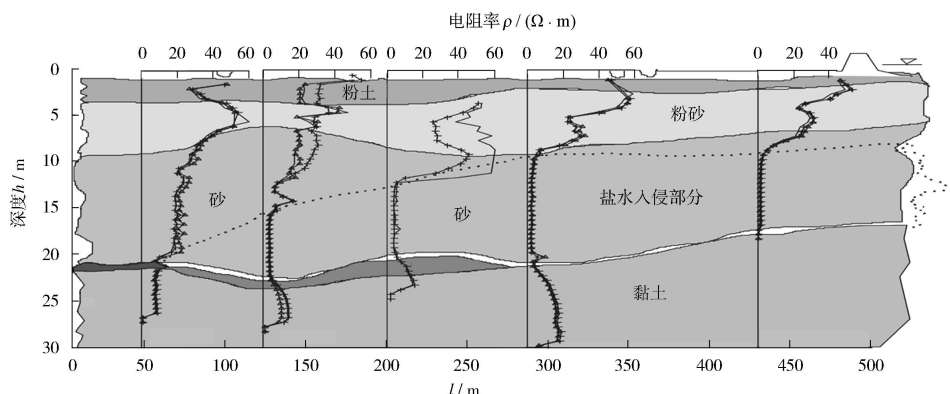


图 3 河口三角洲地区盐水入侵含水砂层的 RCPTU 剖面示意

Fig 3 RCPTU profile showing estuary salt water intruding into sand aquifer

根据 RCPTU 及室内水样化学分析结果, 建立了孔隙水中溶解硫酸盐与体积电阻率的关系, 见图 4。

4 结语

土的电阻率理论当前尚不成熟, RCPTU 测试技术在中存在应用的问题有待深入研究。地下土层复杂多变, 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都使得实测电阻率资料降低利用价值。由于土的可变性, 所有参数的获得均应该在相同的触探试验中测试。多功能 CPTU 技术可靠、经济、快捷、连续, 适合于污染场地评价与环境岩土工程的应用。在欧美诸国, CPTU 技术已经超出了传统意义上的静力触探概念, 沿着多参数、多功能化的方向发展, 多功能 RCPT 技术会有广阔应用空间。

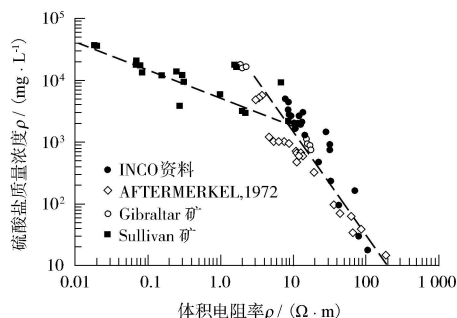


图 4 硫化物尾矿孔隙水中溶解硫酸盐浓度与体积电阻率的关系

Fig 4 Sulphide ore mine tailing porewater chemistry of sulphate ion concentration

我国 CPT 技术还不成熟, 应加强多功能 CPT 技术的研究, 特别是探头制造技术和各种传感器技

术的研究, 推广多功能 CPT 技术在污染场地评价和环境岩土工程的应用, 尤其是电阻率的应用, 并建立相应的技术标准, 加强国际交流, 积极引进国外先进的多功能 CPT 技术, 赶上世界先进水平。

[参考文献]

- [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
- [2] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 电阻率静力触探测试技术与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 3127-3133
- [3] 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.
- [4] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice [M]. London UK: Blackie Academic and Professional and Chapman and Hall 1997.
- [5] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: John Wiley & Sons Inc 2005.
- [6] 中国土木工程学会. 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集 [C]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.
- [7] 杨锦辉. 土壤污染与防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [8] 朱杰, 剑敏. 浅析污染源监督监测工作的问题和对策 [J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(1): 8-11
- [9] 胡冠九. 我国环境监测技术存在的问题及对策 [J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(8): 1-4
- [10] CAMPANELLA R G, WEEMES I. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies [J]. Canadian Geotechnical Journal 1990 27(1): 557-567
- [11] CAMPANELLA R G. Geo-environmental site characterization: Proceedings of the third international conference on site characterization ISC'3 [C]. London UK: Taylor & Francis Group, 2008 3-15
- [12] DANIEL C R, GIACHETTI L, HOWIE J A, et al. Resistivity piezocone (RCPTU) data interpretation and potential applications [C]. Proceedings XI panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering 1999(1): 361-369.
- [13] FUKUE M. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. Engineering Geology, 2001(60): 361-369
- [14] CAMPANELLA R G. Geo-environmental site characterization of soils using in situ testing methods: Asian Institute of Technology 40th Year Conference [C]. Richmond British Columbia Canada New Frontiers & Challenges 1999.
- [15] 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.
- [16] ARCHIE G E. The electric resistivity log as a aid in determining some reservoir characteristics [J]. Trans, American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers 1942(146): 54-61
- [17] KELLER G, FRISCHKNECHT F. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. New York: Pergamon Press 1966.
- [18] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand [J]. Society of Petroleum Engineers Journal 1968(65): 1577-1584
- [19] MCCARTER W J. The electrical resistivity characteristics of compacted clays [J]. Geotechnique 1984 34(2): 263-267.
- [20] ABU-HASSANEN Z, BENSON C, BLOTZ L. Electrical resistivity of compacted clays [J]. J Geotech Engg, ASCE, 1996, 122(5): 397-406
- [21] ARULANANDAN K. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil [J]. J Geotech Engg Div, ASCE, 1991, 117(2): 319-330
- [22] MITCHELL J K, ARULANANDAN K. Electrical dispersion in relation to soil structure [J]. J Soil Mech. and Found Div, ASCE, 1968 94(2): 447-471.
- [23] ARULANANDAN K. Low frequency dielectric dispersion of clay water electrolyte systems [J]. Clay and Clay Minerals 1967(16): 337-351.
- [24] 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
- [25] FUKUE M, TAYA N, MATSUMOTOM, et al. Development and application of cone form measuring the resistivity of soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering Japanese Society of Civil Engineers 1998, 59(43): 283-293.

• 征订启事 •

欢迎订阅 2011 年《环保科技》

《环保科技》(原名《贵州环保科技》)是贵州省环境保护厅主管, 贵州省环境科学研究设计院主办的技术性环保科技期刊(季刊)。为中文科技期刊数据库、中国期刊网、中国学术期刊光盘版、中国学术期刊综合评价数据库、万方数据-数字化期刊群全文收录期刊。刊载环境科研、环境监测、环境管理、环境工程、环境经济、环境医学、环境法规、生态环境等方面的研究报告、应用技术、环境评价、论述等。公开发行人, 中国标准连续出版物号: ISSN 1674-0254 CN 52-1143/X, 邮发代号: 66-59, 广告经营许可证号: 5201001000048, 全国各地邮局均可订阅。如漏订, 亦可向本刊编辑部补订。本刊 3、6、9、12 月 25 日出版, 定价 6 元/本。

地址: 贵州省贵阳市金阳新区兴筑东路 25 号省环科院 403 室 邮编: 550000 电话: 0851-5507192

E-mail: gzhbkjcn52@tom.com