

静力触探法研究综述

徐海波, 宋新江, 钱财富

(安徽省·水利部淮河水利委员 水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 静力触探法是工程中广泛使用的一种原位测试方法。通过归纳分析国内外相关资料, 概述了静力触探仪器设备发展历程, 系统归纳了静力触探在锥头贯入阻力理论研究、模型试验、数值模拟、成果应用等方面的研究进展, 总结了不同行业、不同地区利用静力触探成果估算土体参数的经验公式; 提出由静力触探成果推求土体参数时, 应充分考虑区域性土的工程特性; 指出在超孔隙水压力理论分析、柱形孔空间问题解析解和以大变形分析理论为基础的数值模拟等方面需要进一步完善。

关键词: 静力触探; 理论研究; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0078-04

Research Review on Static Cone Penetration Test

XU Hai bo, SONG Xing jiang, QIAN Cai fu

(Anhui and Huaihe River Water Resources Institut, Bengbu 233000, China)

Abstract: Static cone penetration test (CPT) is an in situ test, which is widely used in the engineering practice. Based on recent research results, this paper introduced the development course of CPT and summarized the research progress of the instrument development, theoretical research of cone resistance, model test, numerical simulation, and engineering application of CPT. Empirical formula to calculate the soil parameters using CPT for different industries and different areas were summarized. The paper pointed out that it is necessary to fully consider the engineering characteristics of regional soil when using the CPT results. Moreover, the theoretical analysis of excess pore water pressure, analytic solution of cylindrical hole space problem, and numerical simulation for large deformation analysis theory need to be further improved.

Key words: cone penetration test; theoretical research; model test; numerical simulation

静力触探法是用于划分土层、判别土体液化、确定地基承载力等参数常用的原位测试方法, 具有操作简单、费用低、成果准确、周期短、节省人力等优点。1917年, 该方法最先用于瑞典铁路建设, 1930年荷兰学者通过技术攻关, 改进了仪器结构, 构成了现有静力触探设备的框架。静力触探法经过百年的发展, 无论在仪器设备、理论研究、模型试验、数值模拟技术还是基于测试成果基础上的土层划分、地基承载力、土体物理力学参数、桩体承载力、土体液化判别、压实填土质量判别等方面均取得了很大进步。

1 静力触探的仪器设备发展

原始的静力触探设备为螺旋锥头式静探仪。该仪器操作复杂、不便应用, 受外界因素影响较大, 测试精度较低。1930年, 荷兰人设计了“荷兰静力触探试验”, 其使用的设备

简称“荷兰锥”, 用于测试浅层软土的物理力学性质指标。在1948年荷兰鹿特丹召开的第2届国际土力学基础会议上, 该试验被视为最有效测定锥头贯入阻力 q_c 的深层测试方法^[1,2]。1954年, 我国学者陈宗基首次将该技术用于黄土地区, 但测试效果不甚理想, 原因是: 杆与管之间的摩擦力极大地抵消、掩盖或歪曲了原有的锥尖阻力; 钻杆自重产生的负压力及土层摩阻力使得靠地面油压表显示的锥尖贯入阻力读数失真; 土体进入钻杆与套管之间的空隙, 产生极大的假贯入阻力^[3]。1950年, 在“荷兰锥”的基础上, Vermeiden和Plantema设计了带有一定长度的侧壁摩擦筒的圆锥形探头, 较好的解决了上述问题, 现有静力触探设备仍采用该结构。1962年, 我国原建筑工程部综合勘察研究院成功研制了电阻应变式静力触探仪, 有效消除了旧式静力触探设备装置的各项误差, 大大提高了测试精度, 为静力触探方法在工程中的

收稿日期: 2013-01-08 修回日期: 2013-08-13 网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1609.026.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201101012)

作者简介: 徐海波(1981-), 男, 河南开封人, 工程师, 硕士, 主要从事岩土工程地基处理及质量检测研究。E-mail: hbxu2006@163.com

广泛运用提供了坚实基础^[4]。1980年以后,国外研制了具有多功能的静力触探探头,在量测锥尖贯入阻力和侧壁摩擦阻力的同时,还可以量测侧向应力、热传导率、地温、倾斜、地震波、电阻率等参数,并逐步代替了单一型探头。随着电子技术的快速发展和机械制造工艺的提升,静力触探设备由单一的单桥探头逐步发展到双桥探头、孔压静探探头、波速静探探头、密度静探探头、地震静探探头等;探测深度由原来的不足10 m到现在的近100 m;记录方式由传统的人工读数到自动记录;设备传输由原有的电缆传输发展到无电缆声波传输;作业方式由人工向半自动、全自动作业方式转变;工程应用范围由浅层软土扩展至砂土、粉土、黏土、淤泥质土、素填土及含少量碎石的土。

2 静力触探的理论研究进展

2.1 锥头贯入阻力计算

静力触探法理论研究主要侧重于锥头贯入阻力计算方面。影响锥头贯入阻力的因素很多,如土的含水率、强度、压缩性、材料性质差异较大的界面等,现有的本构关系往往只侧重于土体的某个特性,不能精确反映土体所有性质。因此,工程中只能采用近似理论方法分析计算锥头贯入阻力,如承载力理论、孔扩张理论、运动点位错法、应变路径法等。

承载力理论:将锥头贯入阻力作为探头以下土体受圆锥头贯入产生剪切破坏的直接因素,土体破坏时的荷载即为锥头贯入阻力的大小。常采用极限平衡与滑移线两种方法估算锥头贯入阻力,如 Kerisel 理论、Durgunoglu 和 Mitchell 理论、Janbu 和 Senneset 理论^[5-7]。极限平衡法是先假定一种破坏机制,然后对土体进行整体平衡分析,得到破坏面的破坏荷载。滑移线法是将平衡方程和屈服准则联立,给出土体的一组表征塑性平衡的微分方程,利用滑移线法求解破坏荷载;将破坏荷载乘以锥头形状系数,即为锥头阻力。承载力理论最大的不足是未考虑土的压缩性和探杆周围应力增加的影响,不能精确计算锥头阻力,不过该理论相对简单,易被工程技术人员掌握,应用较广。

孔扩张理论:基于弹塑性介质中产生一个深孔所要求的压力与在相同情形下扩展一个相同体积的空洞所需要的压力相等的原理,通过联立平衡方程、几何方程和本构方程等三个方程,并借助破坏准则和边界条件进行求解。根据扩张形状的不同,孔扩张理论分析法可分为球形扩张分析法和圆柱扩张分析法。该方法考虑了土体的弹塑性,能反映实际情况;如 Yu^[8-9]对黏土得到的理论计算结果与实测结果误差在3%以内;Collins^[10]对砂土得到的理论解与试验结果符合较好。但在孔压静力触探超孔隙水压力理论分析和柱形孔空间问题解析解等方面孔扩张理论仍有待于发展。

运动点位错法:认为运动的正常点位错的行为与锥头贯入过程中超静孔压的产生、消散及锥头贯入阻力之间存在相关关系,其优点是考虑了孔隙水的消散作用。Cleary^[11]、Elsworth^[12-13]等学者研究表明,超静孔压产生的速度随贯入速度的增加而增加,随固结系数的增大而减小,停止贯入后则完全相反。该方法的缺点是未考虑土体的塑性特性和点位错的锥头尺寸大小影响,与锥头实际贯入过程存在差别。

应变路径法:假设在锥头贯入过程中,周围土体相对锥头存在一个恒定流场,通过流场方程及边界条件计算锥头阻力^[14]。根据构造流场的不同可分为 Rankine 法和保角映射法。其中 Rankine 法是将平行流和一系列源和汇叠加而成,有效性需通过试验验证,且该方法仅适用于饱和黏土的不排水情况,对于其他土体有待于进一步研究。

2.2 模型试验研究

目前有关静力触探模型试验的研究成果并不多,国内铁道部静力触探协作组^[15]、夏增明^[16]、刘仕顺^[17]、刘仰韶^[18]等学者通过砂土的静力触探模型试验分析了锥头阻力、附加应力和变形规律、自由表面效应、深度效应、层位界面效应及相对密实度等特性;陈铁林^[19]以室内模型试验为基础,并结合堆砌体模型,建立了结构性黏土流变模型;安岚^[20]研究了贯入过程中黏性土的孔隙水压力的消散程度和土体径向应力的分布,揭示了孔压静力触探测试黏土固结系数的机理。室内模型试验针对性强,可根据需要制备不同土体类别,开展不同密实度及各种工况条件下的静力触探试验。因此,静力触探室内模型试验是现场原型试验的有效补充研究手段,是研究和验证贯入机理、建立土体本构模型及相关参数的重要方法。

2.3 数值模拟技术研究

随着计算机技术的发展,以小变形、大变形和离散元等三种分析理论为基础的数值模拟技术^[21]被引入到静力触探研究。小变形分析理论假设锥头进入一个预先成型的孔中,但周围土体仍处于初始应力状态,执行一个增量塑性破坏计算,对应的破坏荷载即为锥头阻力。该模拟过程与实际不符,因为锥头在贯入过程中增大了锥杆附近的侧向压力,使实际应力值大于小应变分析结果。考虑到静力触探过程中,探头附近土体的应变通常超过10%,有时剪切应变甚至达到40%,因此以大变形理论为基础的数值模拟技术应运而生。陈铁林^[19]等采用大变形有限元和简单的接触面理论,将静力触探过程看作边界条件不断改变的过程,模拟了静力触探的整个贯入过程,并将砌块体模型的大变形模拟计算结果与弹性模型、修正剑桥模型计算结果进行对比,揭示了大变形模型在模拟分析静力触探试验具有一定的优势。蒋明镜^[22]基于离散元原理模拟了静力触探试验过程,认为在粒状材料触探分析时,建立的本构关系应包含土体的剪胀性、率相关性、颗粒破碎和非共轴性。以大变形分析理论为基础模拟土-锥界面刚度的过程非常复杂,整个数值模拟的完整性仍不清楚,而基于离散元理论的土体本构关系的建立仍然需要做很多工作。

3 静力触探测试成果的应用研究

3.1 土体参数的计算

借助静力触探试验测试成果,能获得较多的土体参数,如土层划分、估算地基承载力与单桩承载力、土体物理力学指标、土体液化趋势判别、黄土湿陷程度等。静力触探法以土体受力的反映特性为基础,通过建立土体受力与粒径分布、阿太堡界限等传统土质分类方法的联系,进行土层分类。图1和图2分别是文献[23]中利用双桥探头静力触探试验和孔压探头静力触探试验进行土体判别的结果。图1中 $R_f =$

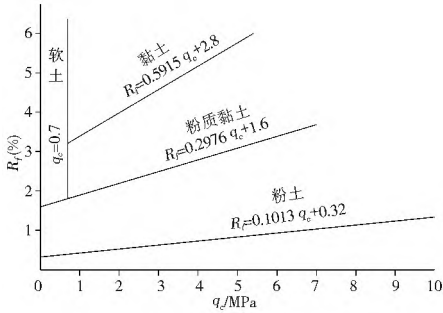


图 1 根据双桥探头触探参数的土类判别^[23]

Fig. 1 Soil classification according to the parameters of the static cone penetration test with double bridge probe

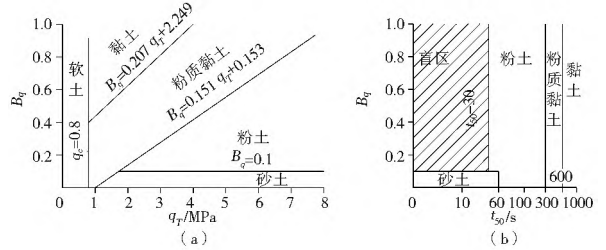


图 2 根据孔压静力触探参数的土类判别 (过滤片置于锥面)^[23]

Fig. 2 Soil classification according to the parameters of the piezocone penetration test (filter in cone)

表 1 静力触探法应用情况^[23]

Table 1 Applications of static cone penetration test

参数名称	公式	适用范围/kPa	公式来源	
承载力	$f_0 = 20 p_s + 59.5$	粉细砂 $1 < p_s < 15$	用静探测定砂土承载力	
	$f_0 = 36 p_s + 76.6$	中粗砂	联合试验小组报告	
	$f_0 = 91.7 \sqrt{p_s} - 23$	水下砂土	铁道第三勘察设计院	
黏性土	$f_0 = 104 p_s + 26.9$	$0.3 \leq p_s \leq 6$	工业与民用建筑工程地质勘察规范 (TJ 21-77)	
	$f_0 = 183.4 \sqrt{p_s} - 46$	$0 \leq p_s \leq 5$	铁道第三勘察设计院	
	$f_0 = 17.3 p_s + 159$	北京地区老黏性土	原北京市勘察处	
	$f_0 = 91.4 p_s + 44$	$1 \leq p_s \leq 3.5$	原湖北综合勘察院	
	$f_0 = 249 \lg p_s + 157.8$	$0.6 \leq p_s \leq 4$	原建筑工程部综合勘察院西南分院	
	$f_0 = 86 p_s + 45.3$	无锡地区 $p_s = 0.3 \sim 3.5$	无锡市建筑设计室	
	$f_0 = 1167 p_s^{0.387}$	$0.24 \leq p_s \leq 2.53$	天津市建筑设计院	
	$f_0 = 90 p_s + 90$	贵州地区红黏土	贵州省建筑设计院	
	$f_0 = 112 p_s + 5$	软土, $0.085 < p_s < 0.9$	铁道部 (1988)	
	$f_0 = 87.8 p_s + 24.36$	湿陷性黄土	原建筑工程部综合勘察院西北分院	
软土	$f_0 = 0.112 p_s + 5$	$85 \leq p_s \leq 800$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
	东南带 $f_0 = 0.05 p_s + 65$	$500 \leq p_s \leq 5000$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
	西北带 $f_0 = 0.05 p_s + 35$	$650 \leq p_s \leq 5500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
	北部边缘带 $f_0 = 0.04 p_s + 40$	$1000 \leq p_s \leq 6500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
老黏性土 (Q ₁ ~Q ₃)	$E_0 = 11.78 p_s - 4.69$	$3000 \leq p_s \leq 6000$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
软土及饱和黏性土 (Q ₄)	$E_0 = 6.03 p_s^{1.45} + 0.8$	$85 \leq p_s \leq 2500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
变形模量 E ₀	细砂、粉砂、粉土	$E_0 = 3.57 p_s^{0.684}$	$1000 \leq p_s \leq 20000^4$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
	东南带	$E_0 = 13.09 p_s^{0.64}$	$500 \leq p_s \leq 5000$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
	西北带	$E_0 = 5.95 p_s + 1.41$	$1000 \leq p_s \leq 5500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
	北部边缘带	$E_0 = 5 p_s$	$1000 \leq p_s \leq 6500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
不排水抗剪强度 c _u	软黏土	$c_u = 30.8 p_s + 4$	$100 \leq p_s \leq 1500$	中交天津港湾工程设计院有限公司
	镇海软黏土	$c_u = 71 q_c$	镇海地区软黏土	同济大学
轻黏土	$c_u = 0.9 (p_s - \sigma_{v0}) / N_k$	$S_i = 2 \sim 7, I_p = 12 \sim 40$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
	$c_u = 0.04 p_s + 2$			
内摩擦角 φ _a	软黏性土	$\lg \varphi_a = 1.4 \Delta C_u / \Delta \sigma'_{v0}$	OCR ≤ 2, p _s 随深度线性递增	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
	饱和黏性土	$\gamma = 8.23 p_s^{0.12}$	$p_s \leq 400$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
		$\gamma = 9.56 p_s^{0.12}$	$400 \leq p_s \leq 4500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)
$\gamma = 21.2$	$p_s \geq 4500$	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)		
单桩承载力	$R_d = \frac{U \sum f_i h_i}{\gamma_a} + \frac{\alpha p_s A_p}{\gamma_p}$	采用单桥探头估算预制单桩极限承载力	《上海市地基基础设计规范》(DGJ 08-11-2010)	
	$Q_u = \sum_{i=1}^n h_i \beta_i f_{si} + \alpha c q_p$	双桥探头估算打入钢筋混凝土桩、混凝土钻孔灌注桩的极限承载力	《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018-2003)	
	$Q_{uk} = u \sum q_{sik} h_i + \alpha p_s A_p$	单桥探头估算混凝土预制单桩极限承载力	《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)	

注: 表中 f_0 为承载力; p_s 为单桥探头比贯入阻力; E_0 为弹性模量; c_u 为不排水抗剪强度; q_c 为双桥探头锥尖阻力; σ_{v0} 为土的自重压力; $N_k = 25.81 - 0.75 S_i - 2.25 \ln I_p$; γ 为土体天然重度; q_u 为抗压强度; R_d 为单桩竖向承载力设计值; U 为桩周长; f_{si} 为静力触探比贯入阻力估算的桩周土层的极限摩阻力标准值; h_i 为土层长度; γ_a 为分项系数; α 、 γ_p 为桩端阻力修正系数; P_s 为比贯入阻力平均值; A_p 为桩周长; Q_u 为极限承载力; β_i 、 α 为修正系数; A_c 为桩底全断面面积; q_p 为桩底端阻力计算值; u 为桩身周长; q_{sik} 为第 i 层极限侧阻力。

$100 f_s/q_c$, R_f 为摩阻比, f_s 为侧摩阻力, q_c 为锥尖阻力。当 $q_c < 0.7 \text{ MPa}$ 时, 可划分为软土。图 2 中(a) 为主判别, (b) 为辅助判别, q_T 为总锥尖阻力, B_q 为超孔压比。国内较早开展静力触探试验研究的铁道第三勘察设计院、原湖北综合勘察院、天津市建筑设计院、机械工业勘察设计院等单位, 根据大量现场试验资料, 建立了黏性土、砂土、黄土等地基的承载力计算公式和单桩承载力计算公式, 并给出了土体变形模量、不排水抗剪强度、土体内摩擦角、天然重度等指标计算公式, 部分成果已被相关地方标准、行业规范采纳。表 1 为相关单位和规范推荐使用的静力触探法应用情况^[21]。由表 1 中资料分析可知, 根据静力触探成果推求土体参数时, 应充分考虑区域性土的工程特性。

3.2 堤防工程质量检测的应用

土体颗粒之间的接触紧密程度是影响静力触探试验锥尖阻力和侧摩阻力大小的主要因素, 而土体的接触紧密程度可用土体的压实度表示, 即可以通过 q_c 、 f_s 的换算来反映土体的压实质量, 因此, 利用静力触探成果判定土方压实质量是可行的。周景宏^[24]、陈维家^[25]等学者相继提出了锥尖阻力与砂土压实度之间的经验公式。在检测堤防工程质量方面, 仅局限于 q_c 或 f_s 与密度、干密度等之间的简单相关公式转换, 未考虑含水率对 q_c 的影响, 研究成果相对较少。目前, 作者正在进行粉土、黏土等土料压实质量检测基础理论、检测成果可靠性和合理性等方面研究, 已建立了粉土的干密度、锥尖阻力、与含水率三者之间的非线性计算模型, 通过蚌埠市圈堤工程的应用验证了模型的合理性和可靠性。

4 结语

静力触探法作为一种工程中广泛使用的现场测试方法, 历经近百年发展, 其仪器设备与测试理论逐步完善, 应用范围逐步扩展。随着科学技术的进步, 新型带有多功能参数测试探头将逐步广泛应用, 但在锥头贯入阻力理论和数值模拟技术方面与工程实际差别较大, 仍需要进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 王钟琦. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 517-522. (WANG Zhongqi. The Chinese CPT and the Prospect of Penetration Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 517-522. (in Chinese))
- [2] 康晓娟, 李波. 国外静力触探技术发展现状及未来趋势[J]. 岩土工程界, 2008, 11(5): 63-65. (KANG Xiaojuan, LI Bo. Current Situation and Trend of Foreign on CPT[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(5): 63-65. (in Chinese))
- [3] 叶启民, 刘永超, 孟庆文. 铁路静力触探四十年的成就[J]. 铁道工程学报, 2005, 12(增刊): 419-424. (YE Qimin, LIU Yongchao, MENG Qingwen. The 40 Years Achievements of CPT for China Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 12(Supp.): 419-424. (in Chinese))
- [4] 唐贤强, 叶启民. 静力触探[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989. (TANG Xianqiang, YE Qimin. Cone Penetration Test[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese))
- [5] Durgunoglu H T, Mitchell J K. Static Penetration Resistance of Soils I: Analysis[A]. Raleigh N C, ed. Proc ASCE Spec Conf on In Situ Measurement of Soil Properties[C]. New York: ASCE, 1975: 151-171.
- [6] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [7] Janbu N, Senneset K. Effective Stress Interpretation of Insitu Static Penetration Tests. In: Robertson P K, ed. Proc European Symp. On Penetration Testing. ESOPT I A A Balkema, 1974 12-06 12. Rotterdam: A A Balkema Publisher, 1974, 479-488.
- [8] Yu H S, Houslyby G T, Burd H J. A Novel Isoparametric Finite Element Displacement Formulation for Axisymmetric Analysis of Nearly Incompressible Materials[J]. Int J Numer Methods in Engrg, 1993, 36(14): 2453-2472.
- [9] Yu H S, Houslyby G T. Finite Cavity Expansion in Dilatant Soil Loading Analysis[J]. Geotechnique, 1991, 46(3): 349-353.
- [10] Collins I F, Pender M J, Wang Y. Cavity Expansion in Sands under Drained Loading Conditions[J]. Int J Numer and Analytical Methods in Geomech, 1992, (16): 3-23.
- [11] Cleary M P. Fundamental Solutions for Fluid saturated Porous Solid[J]. Int J Solids Structures, 1977, 13(9A): 785-806.
- [12] Elsworth D. Theory of Partially Drained Piezometer Insertion[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1990, 116(6): 899-914.
- [13] Elsworth D. Analysis of Piezocone Dissipation Data Using Dislocation Methods[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1993, 119(10): 1601-1623.
- [14] 崔新壮, 丁桦. 静力触探锥头阻力的近似理论与试验研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(2): 251-262. (CUI Xinzhuang, DING Hua. Approximate Theoretical and Experimental Research Development of Cone Penetration Resistance in Static CPT[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(2): 251-262. (in Chinese))
- [15] 静力触探协作试验组. 砂类土静力触探机理的模型实验[J]. 长沙铁道学院学报, 1984, (1): 1-10. (CPT Group Cooperation. Model Test on CPT Mechanism of Sand[J]. Journal of Changsha Railway University, 1984, (1): 1-10. (in Chinese))
- [16] 夏增明, 蒋崇伦, 孙渝文. 静力触探模型试验及机理分析[J]. 长沙铁道学院学报, 1990, 8(3): 1-10. (XIA Zengming, JIANG Chonglun, SUN Yurwen. The Model Experiment and Analysis of the Mechanism in Static Penetration Test[J]. Journal of Changsha Railway University, 1990, 8(3): 1-10. (in Chinese))
- [17] 刘仕顺, 吕建兵, 田卿燕. 桥涵台背回填中粗砂检测模型试验相似分析[J]. 公路与汽运, 2005, (3): 115-118. (LIU Shishun, LV Jianbing, TIAN Qingyan. Similarity Analysis of Detection Model Test on Backfill Medium Coarse Sand in Back of Bridges and Culverts[J]. Highways and Automotive Applications, 2005, (3): 115-118. (in Chinese))
- [18] 刘仰韶, 田卿燕, 吕建兵. 轻型动力触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的试验方法研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 67-70. (LIU Yangshao, TIAN Qingyan, LV Jianbing. Study on the Light Dynamic Penetration to Test Coarse Sand in Bridge sand Filling[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 67-70. (in Chinese))

水资源,以维持和补给土壤水分。

参考文献(References):

- [1] 曾亦健, 万力, 王旭升, 等. 浅层包气带地温与含水量昼夜动态的实验研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 52-57. (ZENG Yi jian, WAN Li, WANG Xu sheng, et al. An Experimental Study of Day and Night Trends of Soil Temperature and Moisture in the Shallow Unsaturated Zone[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 52-57. (in Chinese))
- [2] Monteith J L. Dew[J]. QJR Meteorol. Soc. 1956, 42: 572-580.
- [3] Hillel R, Pinder G F. Approximate Analysis of Upcoming[J]. Advance of Water Resource, 1977, 1: 97-101.
- [4] 于庆和. 塔里木盆地北东缘群克地区土壤凝结水的初步研究[J]. 干旱区地理, 1992, 15(3): 77-84. (YU Qing he. Preliminary Study on Soil Coagulation Water at Qongkol Region in Northeastern Fringe of Tarim Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 1992, 15(3): 77-84. (in Chinese))
- [5] 于庆和. 塔里木盆地北东缘潜水蒸发研究[J]. 新疆地质, 1993, 11(3): 246-254. (YU Qing he. Study of the Evaporation of Phreatic Water in the Northeastern margin of Tarim Basin[J]. Xinjiang Geology, 1993, 11(03): 246-254. (in Chinese))
- [6] Adrie F, G Jacobs. A Simple Model for Potential Dewfall in an Arid Region[J]. Atmospheric Research, 2002, 64: 285-295.
- [7] Seyoum leta. Enhancing Biological Nitrogen Removal form Tannery Effluent by Using the Efficient Brachyomonas Denitrificans in Pilot Plant Operations[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2005, 21: 545-552.
- [8] 王哲, 梁煦枫, 王德建, 等. 鄂尔多斯风沙滩地区土壤凝结水试验研究[J]. 地下水, 2006, 28(6): 28-31. (WANG Zhe, LIANG Xu feng, WANG De jian, et al. Experiment Research on Soil Dew of in the Windy Beach Area of Ordos[J]. Ground water, 2006, 28(6): 28-31. (in Chinese))
- [9] 韩双平, 荆继红, 荆磊, 等. 温度场与凝结水的观测研究[J]. 地球学报, 2007, 28(5): 482-487. (HAN Shuang ping, JING Ji hong, JING Lei, et al. Observation and rResearch on Tempera
- ture Field and Coagulating Water[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(5): 482-487. (in Chinese))
- [10] Jacobs A FG, Heusinkveld B G, Berkowicz SM. Dew Deposition and Drying in a Desert System: a Simple Simulation Model[J]. Journal of Arid Environments, 1999, 42:211-22.
- [11] 曹文炳, 万力, 周训, 等. 西北地区沙丘凝结水形成机制及对生态环境影响初步探讨[J]. 水文地质工程地质, 2003, (2): 6-10. (CAO Wen bing, WAN Li, ZHOU Xun, et al. A Preliminary Study of the Formation Mechanism of Condensation Water and Its Effects on the Ecological Environment in Northwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, (2): 6-10. (in Chinese))
- [12] 李玉灵, 朱帆, 张国盛, 等. 毛乌素沙地凝结水动态变化及其影响因子的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 61-66. (LI Yu ling, ZHU Fan, ZHANG Guo sheng, et al. Dynamics of Dew Condensation and Its Controlling Factors in Mu Us Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 61-66. (in Chinese))
- [13] 郭斌, 陈亚宁, 郝兴明, 等. 不同下垫面土壤凝结水特征及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1963-1974. (GU O Bin, CHEN Ya ning, HAO Xing ming, et al. Characteristics of Soil Condensation Water and Its Influencing Factors on Different Underlying Surfaces in the Lower Reaches of the Tarim River[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 1963-1974. (in Chinese))
- [14] 李洪波, 白爱宁, 张国盛, 等. 毛乌素沙地土壤凝结水来源分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 241-246. (LI Hong bo, BAI Ai ning, ZHANG Guo sheng, et al. Analysis on Soil Condensation Water Source in Mu Us Sandland[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 241-246. (in Chinese))
- [15] 白爱宁, 余建, 边春雷, 等. 土壤吸湿凝结水研究进展[J]. 内蒙古林业科技, 2010, 36(01): 50-53. (BAI Ai ning, YU Jian, BIAN Chun lei, et al. Research Progress on Soil Absorption and Condensation Water[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2010, 36(01): 50-53. (in Chinese))

(上接第 81 页)

- [19] 陈铁林, 沈珠江, 周成. 用大变形有限元对土体静力触探的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2004, 6(2): 1-6. (CHEN Tie lin, SHEN Zhu r jiang, ZHOU Cheng. Numerical Simulation of Cone Penetration Process by Large strain Finite Element Method[J]. Hydror science and Engineering, 2004, 6(2): 1-6. (in Chinese))
- [20] 安岚. 孔压静力触探测试土的固结系数机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005. (AN Lan. The Mechanism Study of the Consolidation Coefficient of Doils Determined by Piezocone Penetration Test [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005. (in Chinese))
- [21] 李波. 孔扩张理论研究及其在静力触探技术中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (LI Bo. Study on Cavity Expansion and Its Applications to Cone Penetration Test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [22] 蒋明镜. 用于触探试验分析的粒状材料本构模型之展望[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1281-1288. JIANG Ming jing. Main features of Future Constitutive Models for Granular Materials in Penetration Analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1281-1288. (in Chinese))
- [23] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册(第四版)[K]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (CHANG Shi piao, ZHANG Su min. The Engineering Geology Manual (Fourth Edition) [K]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [24] 周景宏, 汪圻. 静探试验成果与伊通河阶地砂土密实度关系浅析[J]. 东北水利水电, 2007, 25(6): 65-66. (ZHOU Jing hong, WANG Xi. The Analysis on the Relationship between YiTong River Terrace Sandy Soil Compactness and Static Penetration Test Results[J]. Northeast Water Conservancy and Hydropower, 2007, 25(6): 65-66. (in Chinese))
- [25] 陈维家, 姚锋杰. 砂土比贯入阻力与相对密度的关系[J]. 水文地质工程地质, 2003, (1): 36-38. (CHEN Wei jia, YAO Feng jie. The Relationship between Relative Density and Specific Penetration Resistance of Sand[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, (1): 36-38. (in Chinese))