

文章编号: 1000-7598 (2014) 07-2109-09

一种静力触探模型箱试验装置的研制 及其试验研究

蒋明镜^{1,2}, 戴永生^{1,2}, 王新新^{1,2}, 王 闯³, 吴晓峰^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要: 设计了一套静力触探模型箱试验装置, 该装置可以在模型箱水平面内任意位置进行贯入试验, 贯入速率在一定范围可控, 贯入倾角可调节。将该装置用于 TJ-1 模拟月壤静力触探力学特性的研究, 试验结果表明: 地基层层模拟月壤发生刺入剪切破坏; 贯入阻力随贯入深度的增加而增加; 探杆周围同一深度处土体的水平土压力表现出轴对称特征, 其值在探头靠近土压力盒过程中逐渐增大至最大值, 后随探头远离土压力盒又逐渐减小至 0, 且不同深度土体水平土压力峰值随贯入深度增加而增大; 贯入点正下方土体的垂直土压力随贯入深度的增加而增加, 主要影响范围约为距探头 200 mm 处。基于以上试验研究, 表明该模型箱的设计是合理的, 且 TJ-1 模拟月壤力学特性的研究成果能够为将来涉及到 TJ-1 模拟月壤的航天试验提供必要的技术参考。

关 键 词: 静力触探试验; 模型箱; 土压力; TJ-1 模拟月壤

中图分类号: TU 411; P 184

文献标识码: A

Development of a calibration chamber for cone penetration test and corresponding experimental research

JIANG Ming-jing^{1,2}, DAI Yong-sheng^{1,2}, WANG Xin-xin^{1,2}, WANG Chuang³, WU Xiao-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: An experimental apparatus for calibration chamber penetration test is designed. The device can fulfill the cone penetration test at any point on the chamber plane; and it can also accomplish the inclined cone penetration test with different inclined angles under the controlling penetration velocity. The apparatus is used to investigate the mechanical properties in the vertical cone penetration test for TJ-1 lunar soil simulant. The test results indicate: (1) The superficial layer of TJ-1 lunar soil simulant ground occurs shear failure. (2) The cone tip resistance increases with the increasing of penetration depth. (3) The horizontal earth pressure increases to maximum as the cone approaching to the soil earth cell and decreases to zero when passed by; the maximum value of each layer increases with the penetration depth; the horizontal earth pressure also appears axisymmetric property. (4) The vertical earth pressure under the penetration point increases with the penetration depth. It is shown that the design of calibration chamber is rational based on the experimental research. The study of mechanical property of TJ-1 lunar soil simulant is of great importance to the corresponding experiments related to such material.

Key words: cone penetration test; calibration chamber; earth pressure; TJ-1 lunar soil simulant

1 引 言

静力触探是一种简单、准确、快速和经济的地基土原位测试技术, 广泛应用于岩土工程现场测

试^[1-2]。贯入阻力作为静力触探试验成果的一个重要方面, 是划分土层、辨别土性、确定土的物理力学特性及确定地基承载力重要依据^[3]。自 20 世纪 50 年代以来, 大量的学者对静力触探的贯入机制

收稿日期: 2013-06-19

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(No. 51025932); 国家自然科学基金项目(No. 10972158)。

第一作者简介: 蒋明镜, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

进行了研究,主要的研究方法有^[3-5]:理论研究(承载力理论、孔穴扩张理论、应变路径理论)、数值分析(有限单元法、离散单元法)和试验研究(离心机试验、模型箱试验)。探头贯入土体过程中,土体既有压缩,又有剪切,既有挤密,又有剪胀,既有固结,又有塑滑,这些力学机制交织在一起,存在于整个静力触探过程中。因此,任何单一的力学模型都无法对其进行完整地描述^[6],获得静力触探贯入阻力的精确解存在很大地困难。

模型箱试验是指在模型箱中制备好试样,然后固结到所期望的应力水平,最后在给定的边界条件下进行相应的试验^[7-8]。模型箱最早应用于20世纪60年代,由澳大利亚CRB用于标定电测摩擦式静力触探仪^[9],之后静力触探模型箱试验在无黏性土中得到广泛应用。Phillips和Valsangkar^[10]采用刚性边界模型箱研究了边界、颗粒尺寸和贯入速率等因素对静力触探贯入阻力的影响;Houlsby和Hitchman^[11]采用圆柱形模型箱研究了砂土在不同应力状态下的静力触探试验,结果表明贯入阻力与水平有效应力的关系取决于土体的内摩擦角;Baziar和Moayed^[12]采用刚性边界模型箱,研究了饱和松散粉砂中粉粒含量从10%到50%变化时,对贯入阻力的影响,结果表明:随粉粒含量增加贯入阻力减小;陈维家和陈映南^[13]采用大型模型槽和中等模型槽进行静力触探试验,研究表明,不同密度的砂土地基中,静力触探贯入机制各不相同,并且提出了适用于中密和紧密砂土,同时考虑探头周围土体压缩体变和剪切体变的理论计算方法;夏增明等^[14]通过大型模型箱试验实测应力场揭示了静力触探的贯入机制,分析了自由表面效应、深度效应和层位界面效应的机制;Hsu等^[15]研制了一种能够模拟现场情况的模型箱设备,试验表明,试样相对密实度在65%~84%时,该设备可以模拟现场侧向边界无限远情况。

2 模型箱试验装置的研制

模型箱设计的主要依据有以下几个方面:①探头选型;②模型箱边界形式的选择;③机械系统的设计、用土量等问题。

2.1 探头选型

静力触探探头的选型主要取决于土体颗粒的有效粒径。Salgado等^[8]指出静力触探模型箱试验测得的贯入阻力与现场试验测得的贯入阻力的差值随模型箱尺寸的减小和探头直径的增大而增大,同时Bolton等^[16]指出探头直径越小越能够提供土层的详

细信息和准确的贯入阻力。因此,选择合理的探头尺寸能够有效减小模型箱边界效应对贯入阻力的影响,提高测试准确度。Gui等^[17]的离心机试验统计分析表明探头直径与颗粒的平均直径的比值 $d/d_{50} > 20$ 时,才能满足静力触探试验的要求。本次拟选用南光地质仪器厂生产WCT-5型单桥静力触探探头,表1为该试验探头参数,从表中可知探头锥底直径 $d = 25.2$ mm。TJ-1模拟月壤中值粒径 $d_{50} = 260$ μm ,二者比值 $d/d_{50} = 96.9 > 20$,因此,WCT-5型单桥静力触探探头符合要求。

表1 WCT-5型单桥静力触探探头参数
Table1 Parameters of WCT-5 cone penetration

型号	锥角 /(°)	锥底截面积 /cm ²	锥底直径 /mm	标定系数 /(kPa/ μe)
WCT-5	60	5	25.2	3.098

2.2 模型箱边界形式及外形选择

图1为模型箱典型边界条件,从图中可知模型箱的边界条件有完全柔性、完全刚性以及柔性、刚性相结合3种形式。表2为模型箱中各边界条件应力、应变特点,从表中可知不同边界条件对应不同的应力、应变。Huang和Hsu^[18]指出:在原位静力触探试验中,场地边界在侧面是向无限远处延伸的,介于边界条件BC1和BC3之间。为了尽可能的模拟原位测试条件并且考虑模型箱加工的可行性,模型箱外形采用矩形形式,四周及底部为刚性边界,上部为自由边界。

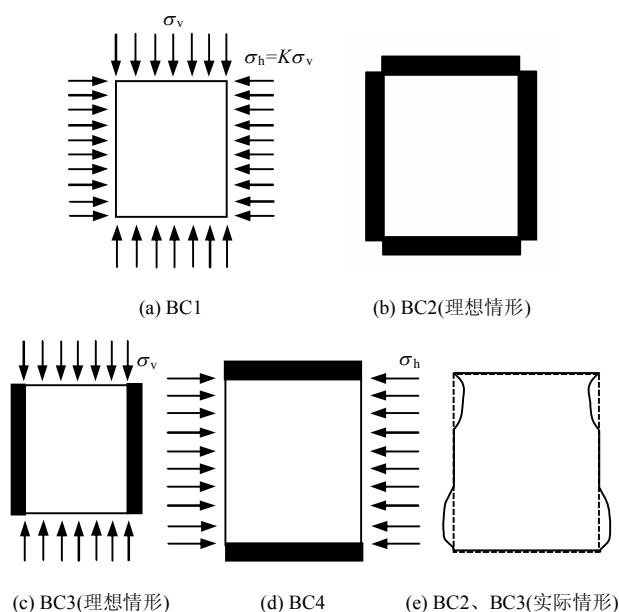


图1 模型箱典型边界条件^[18]

Fig.1 Boundary conditions of calibration chamber^[18]

表 2 模型箱中各边界条件应力、应变特点^[18]Table 2 Stress and strain characteristics under different boundary conditions^[18]

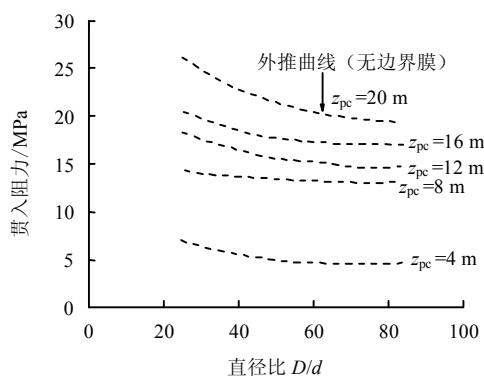
边界条件类型	侧向边界条件		上部和底部边界条件	
	应力 σ_h	应变 ε_h	应力 σ_v	应变 ε_v
BC1	恒定		恒定	
BC2		0		0
BC3		0	恒定	
BC4	恒定			0

2.3 模型箱尺寸的确定

模型箱尺寸的选择主要考虑边界效应对贯入阻力的影响。目前多以圆柱形模型箱来研究边界效应，本文以圆柱形模型箱的内直径 D 作为设计矩形模型箱的宽度 W 。

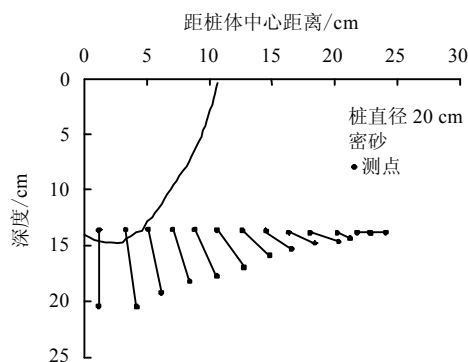
图 2 为土体相对密实度较大时，贯入阻力与直径比的关系^[19]。从图中可以看出，在不同贯入深度下，贯入阻力在 $D/d < 30$ 时波动普遍较大， $D/d = 30 \sim 40$ 时波动较小， $D/d > 40$ 时贯入阻力基本不随直径比改变，这种现象在贯入深度较小时尤为明显。

TJ-1 模拟月壤的相对密实度 $D_r = 53\%$ ，属于中密样^[20]，且拟研究的贯入深度范围较小，所以本文直径比在 $30 \sim 40$ 范围内取值。取 $D/d = 30、40$ 时，模型箱的直径分别为 756、1 008 mm。模型箱宽度取 1 008 mm 时，边界效应非常小，但模型箱尺寸偏大，所需土样量较大，会造成不必要的浪费。模型箱宽度取 756 mm 时，边界效应又可能会对贯入阻力产生一定的影响。综合考虑以上两种因素，取 $D/d = 35$ ，既减少不必要的浪费，又减小了尺寸效应对贯入阻力的影响，计算得模型箱宽度为 882 mm，为便于加工取为 900 mm。

图 2 贯入阻力与直径比的关系^[19]Fig.2 Relationships between tip resistance and diameter ratio^[19]

模型箱长度最小值应与模型箱宽度相等，但试验过程中需在同一地基中进行对比试验，验证试验

的可重复性，这要求不同贯入点间距要合理，彼此之间不能造成影响。图 3 为圆柱形桩体桩端下方土体位移场，从图 3 可知在密砂地基中，当直径为 200 mm 的桩体贯入时，桩周受影响较明显的范围距桩体中心约为 250 mm。静力触探过程与压桩过程相似，由此可类推出静力触探锥尖影响范围。WCT-5 探头直径为 25.2 mm，取贯入点影响范围 150 mm 必然能满足要求，试验拟在长度方向进行 3 组对比试验，为减小边界效应的影响，模型箱长度方向再向两边各扩展 150 mm，则模型箱长度为 1 200 mm。

图 3 圆柱形桩体桩端下方土体位移场^[8]Fig.3 Displacement field under the end of cylinder pile^[8]

模型箱高度要满足以下两个条件：①能够获得稳定的贯入阻力曲线；②不受底部边界效应影响。

Gui 等^[17]指出探头贯入 $5d$ 时，贯入阻力的曲线才趋于平稳，对应 WCT-5 型静力触探探头获得稳定贯入阻力的贯入深度为 $h_1 = 127.5$ mm。当达到稳定贯入阻力，探头还需要再贯入一定深度以获取土体的稳定力学性质，贯入深度计算如下：

$$h = h_1 + h_2 \quad (1)$$

式中： h 为探头贯入深度； h_2 为贯入阻力稳定后的贯入深度。

贯入阻力稳定后探头再贯入深度 h_2 ，该值拟取 372.5 mm，将其代入式(1)得 $h = 500$ mm。

根据 Bolton 和 Gui^[19]的研究表明：底部边界对试验测得的贯入阻力值也有影响，锥肩距底部边界的最佳拟合曲线为

$$\frac{X}{d} = 0.099D_r + 0.596 \quad (2)$$

式中： X 为锥肩距底部边界的距离； d 为探头直径； D_r 为土体相对密实度(%)。

将 TJ-1 模拟月壤相对密度 $D_r = 53\%$ 和 $d =$

25.2 mm 代入式 (3) 计算得 $X=147.2$ mm。

模型箱的高度为探头的贯入深度 h 与为减小底部边界效应而预留深度 X 之和, 同时考虑一定安全系数:

$$H = A_1 h + A_2 X \quad (3)$$

式中: H 为模型箱高度; A_1 为探头贯入深度安全系数; A_2 为预留深度安全系数。

取 $A_1=1.4$ 、 $A_2=1.3$, 并将式 (1)、(2) 的计算结果代入式 (3) 得 $H=891.6$ mm, 为便于加工, 模型箱高度取 900 mm。

模型箱沿长度方向能够进行一定倾角下的贯入试验。试验要求贯入方向与水平面夹角最小为 60° , 垂直贯入深度 $h=500$ mm, 则贯入终止点距初始贯入点的水平距离:

$$\Delta l = h / \tan 60^\circ = 500 / \tan 60^\circ = 289 \text{ mm} \quad (4)$$

考虑到边界效应的影响, 应将模型箱长度再扩展 300 mm, 因此, 模型箱的长度取为 1 500 mm。

综上所述, 确定模型箱的尺寸为 1 500 mm(长)×900 mm(宽)×900 mm(高)。图 4 为模型箱简图: 模型箱四周采用厚 15 mm 的有机玻璃, 底板为厚 8 mm 的钢板, 周边骨架采用角钢焊接以保证模型箱结构的牢靠。

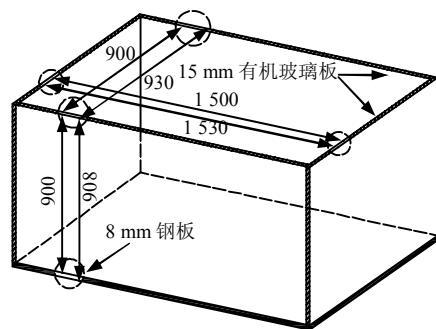


图 4 模型箱简图 (单位: mm)

Fig.4 Schematic diagram of calibration chamber (unit: mm)

2.4 机械系统设计

图 5 所示为模型箱机械装置。从图中可知: 静力触探模型箱的机械装置主要是由贯入系统、量测系统、贯入位置控制系统和倾角调节系统组成; 此外还包括一些附属机械装置如紧固装置等。

贯入系统主要包括贯入动力装置、探杆和反力装置三部分。贯入动力装置采用电动机械加压方式, 主要由静力触探仪、YS0.4kW-4P 三相异步电机、RB600 变频调速器、防过载装置、电机底座等组成。图 6 为动力控制装置: 通过变频调速器改变输入电

流的频率控制电机的转速, 从而实现对贯入速率的控制。如图 6(c)所示, 电机与静力触探仪的连接处有防过载装置, 防止因过载误伤试验人员及造成电机损坏, 确保试验人员及仪器的安全。

位移控制系统由长度方向位移导轨、宽度方向位移导轨组成, 见图 5。试验中通过导轨移动静力触探仪, 到达试验指定贯入位置, 并用紧固装置锁牢, 整个位移控制系统形成一个类似地锚的反力装置。

图 7 为倾角调节系统, 主要由探杆导向装置、可转动顶板、固定底板、调节螺母及支撑螺杆等组成, 通过调节静力触探仪底上的可转动顶板和支撑螺杆上的调节螺母, 从而实现一定角度范围内的倾斜贯入试验; 采用图 5 中的防倾覆撑杆将倾斜贯入产生的力分解为水平和垂直方向的力, 提高了设备的稳定性和安全性。

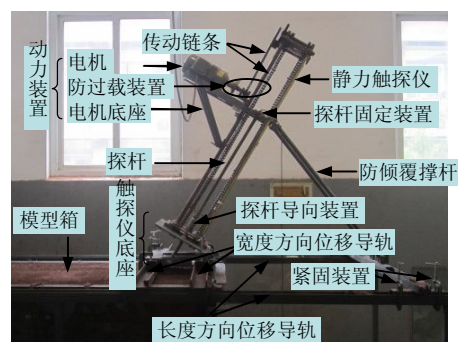


图 5 模型箱主要机械装置

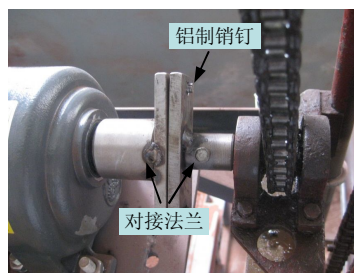
Fig.5 Apparatuses of calibration chamber



(a) RB600 变频调速器



(b) YS0.4kW-4P 三相异步电机



(c) 防过载装置

图 6 动力控制装置

Fig.6 Power devices

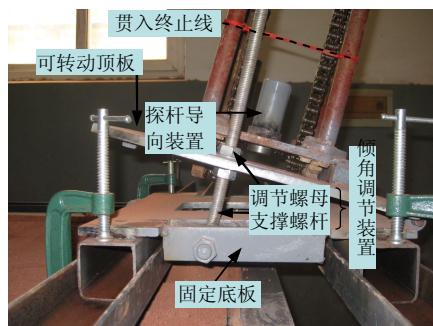


图 7 倾角调节装置

Fig.7 Adjusting device of penetration angle

2.5 数据测量系统

采用电测式数据量测系统记录贯入阻力和土压力的变化。图 8 为数据采集流程，从图中可知数据量测系统主要包括 WCT-5 单桥静力触探探头，BW-0.02 型、BW-0.05 型和 BW-0.2 型土压力盒、YE2539 静态应变采集仪、笔记本电脑、数据采集软件和接口转换器等。

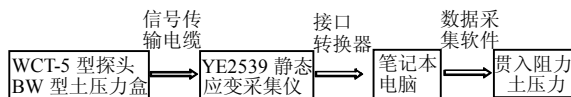


图 8 数据采集流程

Fig.8 Procedure of data acquisition

3 试验设计

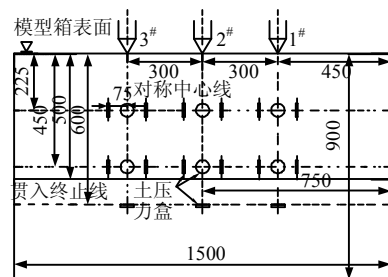
采用自主设计加工的室内静力触探模型箱研究 TJ-1 模拟月壤垂直静力触探过程中地表土体变形、贯入阻力以及探头周围土压力的变化。

3.1 试验方案

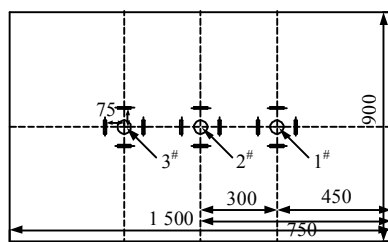
图 9 为静力触探测点布置示意图。从图 9 可知：垂直静力触探共有 3 个测点，试验中按 1~3 的编号依次贯入；贯入点的间距为 300 mm，贯入点在宽度方向距边界距离为 450 mm、在长度方向距边界最小距离为 450 mm；在模型箱高度方向距表面 225 mm 和 450 mm 深度处的水平面上埋设土压力盒，用于测量探杆周围水平土压力的变化，土压力盒距贯入点对称中心线 75 mm。同时在距表面 600 mm 深度处贯入点正下方埋设土压力盒，测量土体竖向土压力的变化。

3.2 试验材料

试验用土样采用同济大学蒋明镜等研制的 TJ-1 模拟月壤，其物理力学参数指标如表 3 所示^[20-21]。试验前随机取样 15 个，对其进行含水率测试，测得平均含水率为 0.06%，满足试验对 TJ-1 模拟月壤含水率小于 2% 的要求^[22]。



(a) 主视图



(b) 俯视图

图 9 静力触探测点布置示意图 (单位: mm)

Fig.9 Layout of measuring points (unit: mm)

表 3 TJ-1 模拟月壤物理力学参数
Table3 Physico-mechanical parameters of TJ-1 lunar soil simulant

密度 /(g/cm ³)	土粒相 对密度	孔隙比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	压缩指数	含水率 /%
1.36	2.72	1.0	47.6	0.86	0.086	<2

3.3 试验步骤

静力触探模型箱试验的主要步骤如下所示：①试样前准备，主要是仪器的调试；②地基制备，主要是地基铺设过程中的质量控制和土压力盒的埋设；③贯入试验；④试验结束，整理仪器，处理试验数据。

试验的关键步骤是地基制备和贯入试验。模拟月壤地基采用分层填筑的方法制备，通过控制每一层的密度保证地基的均匀性。图 10 为土体分层填筑示意图，从图 10 中可知模拟月壤地基总高度为 900 mm，均分成 12 层每层高度为 75 mm。每铺设完一层地基应对平整度进行检查，图 11 为地基平整度检测示意图，每层地基铺设完成并抹平后使用水准尺对该层土体的表面平整度进行测量，以水准尺上的 3 个气泡均居中为该区域土体表面平整的依据。每铺设 2 层采用环刀法测定一次模拟月壤地基的密度，确定 TJ-1 模拟月壤的物理性能指标是否满足试验要求。在模拟月壤地基填筑至图 9 所示土压力盒的深度时埋设土压力盒，埋设过程中应保证埋设土压力盒的水平度和垂直度，主要通过控制地基的平整度和图 12 所示的埋设方法保证，为了减少土压力盒导线对土体产生的加筋效应，将导线水平引

向模型箱的侧壁再沿侧壁引出到土体表面。

由文献[17]可知:当贯入速率为2~20 mm/s时,速率对贯入阻力影响很小,本次试验中由于贯入深度有限,在不影响试验结果的前提下,尽可能获得完整的贯入阻力曲线,所以选用2 mm/s的贯入速度。



图10 土体分层填筑图(单位: mm)

Fig.10 Fill-up ground by layers (unit: mm)



图11 地基平整度检测

Fig.11 Test of ground planeness

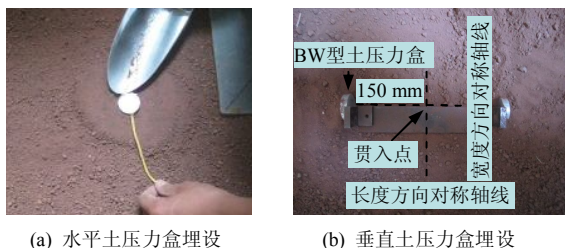


图12 土压力盒埋设

Fig.12 Soil pressure cell inbuilt

4 试验结果分析

4.1 地表土体变形

图13为地基表面土体变形。由图13可看出,探头退出土体后地基表面形成直径大约为60 mm的圆柱形孔,约是探头直径的2倍,且圆柱形孔洞在模型箱长度方向和宽度方向都表现出以贯入点为对称中心的对称性。

4.2 贯入阻力

为了便于对静力触探贯入阻力进行分析,将贯入阻力归一化为

$$q_{Nc} = \frac{q_c}{\sigma_{v,ini}} \quad (5)$$

$$h_N = \frac{h}{R} \quad (6)$$

式中: q_{Nc} 为归一化贯入阻力; $\sigma_{v,ini}$ 为初始垂直应力(kPa),即土的重度与贯入深度的乘积 $\sigma_{v,ini} = \gamma h$; h_N 为归一化贯入深度。



图13 地基表面土体变形

Fig.13 Deformation of ground surface

图14为贯入阻力及归一化贯入阻力随贯入深度的变化曲线。其中,贯入深度通过记录探杆贯入时间和贯入倾角换算得到。图14(a)为贯入阻力,由图可知:贯入阻力随贯入深度的增加而增大,这一变化规律与真实月壤原位静力触探测试结果规律相一致[23];3个不同测点的贯入阻力曲线的偏差并不大,说明试验具有很好的重复性、试验结果可靠。图14(b)为归一化贯入阻力,由图可知:归一化贯

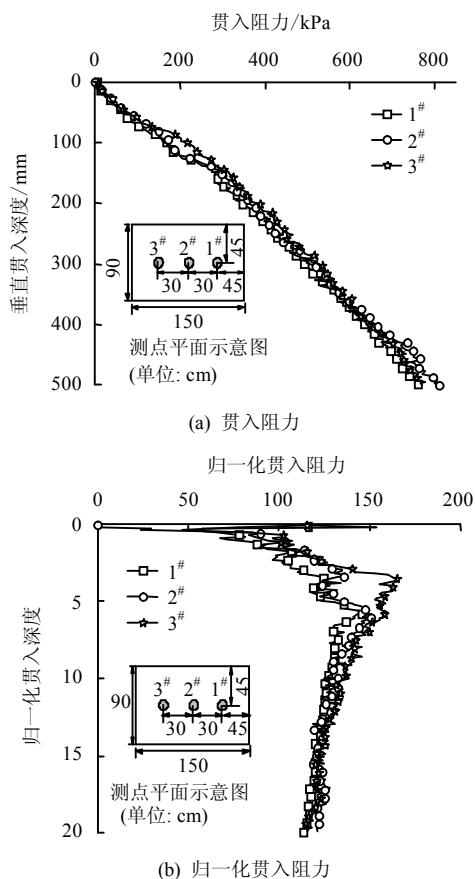


图14 贯入阻力及归一化贯入阻力变化曲线

Fig.14 Tip resistance and its normalized curves

入阻力随贯入深度的增加先增大再减小，在初始贯入的阶段归一化贯入阻力有较大的波动性，最后均趋于稳定，这与 Bolton 等^[24]从离心机静力触探试验获得的规律相吻合。

4.3 水平土压力

由于 3 个贯入点具有较好的重复性，限于篇幅，仅取 1[#]测点的水平土压力进行分析。图 15 为 1[#]测点不同深度处土压力变化曲线。从图 15(a)、15(b)中可知：探头贯入过程中，水平土压力随贯入深度的增加表现出先增大再减小的变化规律。在探头靠近土压力盒时，水平土压力值逐渐增大至最大值，之后又随探头远离土压力盒逐渐减小至 0。同一水平面上距贯入点中心位置等距离处土体水平土压力大体相等，说明同一水平面上，由垂直贯入引起的水平土压力在以贯入点为圆心形成的圆柱面上基本

是等值的。

4.4 垂直土压力变化

图 15(c) 为 1[#]贯入点下 600 mm 深度处土体垂直土压力变化曲线。由图可知，垂直土压力随贯入深度的增加而增大；在 0~200 mm 时，垂直土压力增幅非常小；在 200~400 mm 时，垂直土压力增幅较之前有明显的增大，但也维持在较低水平。说明探头贯入最初阶段对观测点处土体的影响较小；当贯入深度达到 400 mm 时，观测点处土体的垂直土压力随贯入深度的增加急剧增大，说明探头距离观测点 200 mm 时土体受探头贯入的影响较大。据此可以推断：当探头距模型箱底部约 200 mm 时，静力触探试验结果受模型箱底部边界效应的影响才会比较明显，这也验证了式 (2) 对底部边界考虑的正确性，说明模型箱贯入深度设计是合理的。

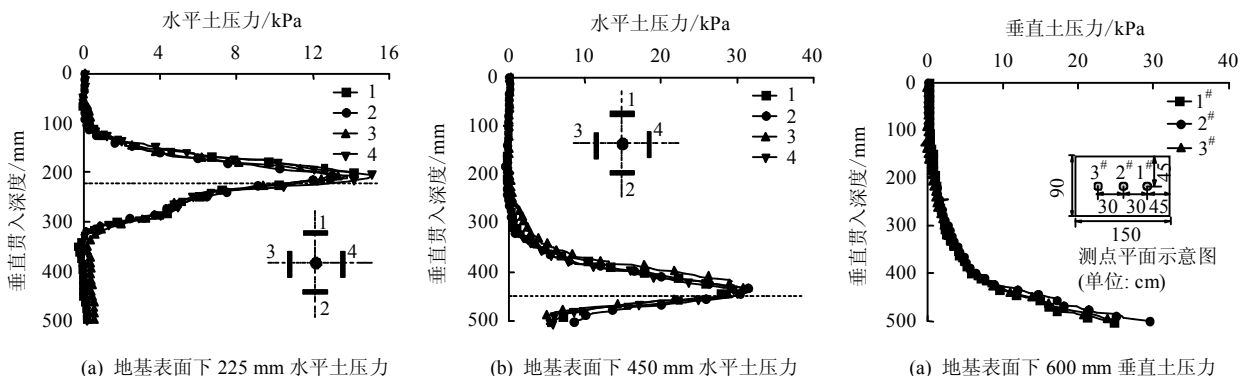


图 15 1[#]测点不同深度处土压力变化

Fig.15 Earth pressures of measuring point No.1 at different depths

5 结 论

本文研制加工了一套静力触探模型箱试验装置，该装置可以在模型箱水平面内任意位置进行贯入试验，贯入速率在一定范围可控，贯入倾角可调节。模型箱采用矩形形式，四周及底部为刚性边界，上部为自由边界，模型箱的尺寸为长 1 500 mm、宽 900 mm、高 900 mm。采用该装置对 TJ-1 模拟月壤进行垂直静力触探试验的初步研究，主要结论如下：

(1) 地基表层模拟月壤发生刺入剪切破坏，探头退出 TJ-1 模拟月壤地基后，地基表层形成直径约 60 mm 的圆柱形孔，约是探头直径的 2 倍。

(2) 贯入阻力随贯入深度的增加而增加，归一化贯入阻力随贯入深度的增加先增加再减小，最后趋于稳定。3 个测点贯入阻力曲线偏差不大，说明试验重复性好、结果可靠，装置设计合理。

(3) 静力触探过程中，探杆周围土体的水平土

压力随探头靠近土压力盒逐渐增大至最大值，而后随探头远离土压力盒逐渐减小至 0，探杆周围土体的水平土压力呈轴对称分布。

(4) 贯入点正下方 600 mm 深度处土体的垂直土压力随探头贯入深度的增加而增加，当探头距土压力盒约 200 mm 时，垂直土压力急剧增大，由此推断探头距模型箱底部约 200 mm 时，试验结果受模型箱底部边界效应的影响才会比较明显，模型箱贯入深度设计是合理的。

以上通过对 TJ-1 模拟月壤垂直静力触探试验的初步分析，说明了模型箱的设计是合理的，能够满足试验要求。基于该模型箱试验装置，还进行了 TJ-1 模拟月壤倾斜静力触探试验，研究了 TJ-1 模拟月壤的力学特性，以期将来涉及到 TJ-1 模拟月壤的试验研究提供必要的技术参考。关于 TJ-1 模拟月壤垂直静力触探与倾斜静力触探试验的对比分析，由于篇幅所限将另文发表。

致谢：感谢同济大学地下建筑工程系硕士研究生梅启培、张宁、闫超在试验过程中的帮助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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 Song-yu, WU Yan-kai. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 553—556.
- [3] 崔新壮, 丁桦. 静力触探锥头阻力的近似理论与实验研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(2): 251—262.
CUI Xin-zhuang, DING Hua. Approximate theoretical and experimental research development of cone penetration resistance in static cone penetration test[J]. **Advances in Mechanics**, 2004, 34(2): 251—262.
- [4] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modeling of deep penetration in granular soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(4): 335—361.
- [5] YU H S, MITCHELL J K. Analysis of cone resistance: Review of methods[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124: 140—149.
- [6] 武汉水利电力学院. 关于静力触探贯入机理的综述[J]. 勘察技术资料, 1976, (1): 16—21.
Wuhan Hydraulic and Electric Institute. Synthesis of static cone penetration mechanism[J]. **Survey and technical information**, 1976, (1): 16—21.
- [7] HUANG A B, HSU H H. Advanced calibration chambers for cone penetration testing[C]//Proceedings of ISC-2 on Geotechnical and Geophysical SITE Characterization. Rotterdam: Mill Press, 2004: 147—166.
- [8] SALGADO R, MITCHELL J K, JAMIOLKOWSKI M. Cavity expansion and penetration resistance in sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(4): 344—354.
- [9] HOLDEN J C. History of the first six CRB calibration chambers[C]//Proceedings of the First International Symposium on Calibration Chamber Testing. New York: Potsdam, 1991: 1—12.
- [10] PHILLIPS R, VALSANGKAR A J. An experimental investigation of factors affecting penetration resistance in granular soils in centrifuge modeling[R]. Research Report: CUEO/O-Soils/TR210. Cambridge, U K: Department of Engineering, Cambridge University, 1987.
- [11] HOULSBY G T, HITCHMAN R. Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand[J]. **Géotechnique**, 1988, 38(1): 39—44.
- [12] BAZIAR M H, MOAYED R Z. Evaluation of cone penetration resistance in loose silty sand using calibration chamber[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2006, 4(2): 106—119.
- [13] 陈维家, 陈映南. 砂土中静力触探机理分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 64—72.
CHEN Wei-jia, CHEN Ying-nan. Analysis of cone penetration mechanism in sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(2): 64—72.
- [14] 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—9.
XIA Zeng-ming, JIANG Chong-lun, SUN Yu-wen. The model experiment and analysis of the mechanism in static penetration test[J]. **Journal of Changsha Railway Institute**, 1990, 8(3): 1—9.
- [15] HSU H H, HUANG A B. Development of an axisymmetric field simulator for cone penetration tests in sand[J]. **ASTM Geotechnical Testing Journal**, 1998, 21(4): 348—355.
- [16] BOLTON M D, GUI M W, GARNIER J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(4): 543—552.
- [17] GUI M W, BOLTON M D, GARNIER J, et al. Guidelines for cone penetration tests in sand[C]//Centrifuge 98. Rotterdam: Balkema, 1998: 155—160.
- [18] HUANG A B, HSU H H. Advanced calibration chambers for cone penetration testing in cohesionless soils[C]//Proceedings of ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Rotterdam: Mill Press, 2004: 147—166.
- [19] BOLTON M D, GUI M W. The study of relative density and boundary effect for cone penetration tests in centrifuge modeling[R]. Research Report: CUED/D-SOILS/TR210. Cambridge, U K: Department of Engineering, Cambridge University, 1987.
- [20] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程

学报, 2011, 33(2): 209—214.

JIANG Ming-jing, LI Li-qing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(2): 209—214.

- [21] JIANG M J, LI L Q, SUN Y G. Properties of TJ-1 lunar soil stimulant[J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2012, 25(3): 463—469.
- [22] 蒋明镜, 李立青, 王闯, 等. 含水率和颗粒级配对 TJ-1 模拟月壤力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1921—1925.

JIANG Ming-jing, LI Li-qing, WANG Chuang, et al. Effects of moisture content and gradation on mechanical properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 1921—1925.

- [23] COSTES N C, Carrier W D, MITCHELL J K et al. Apollo 11 soil mechanics investigation[J]. **Science**, 1970, 167(3918): 739—741.
- [24] BOLTON M D, GUI M W, GARNIER J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand[J]. **Géotechnique**, 1999, 49(4): 543—552.

上接第 2087 页

- [12] ZHU J Z, ZIENKIEWICZ O C. Superconvergence recovery technique and a posteriori error estimators[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1990, 30(7): 1321—1339.
- [13] RUPPERT J. A Delaunay refinement algorithm for quality two-dimensional mesh generation[J]. **Journal of Algorithms**, 1995, 18(3): 548—585.
- [14] SHEWCHUK J R. Tetrahedral mesh generation by Delaunay refinement[C]//Proceedings of the 14th Annual Symposium on Computational Geometry. New York: ACM, 1998.
- [15] SHEWCHUK J R. A condition guaranteeing the existence of higher-dimensional constrained Delaunay triangulations[C]//Proceedings of the 14th Annual Symposium on Computational Geometry. New York: ACM, 1998.
- [16] JAMES M A. A plane stress finite element model for elasto-plastic model I/II crack growth[D]. Kansas: Kansas State University, 1998.
- [17] HARBAKEN A M, CESCOTTO S. An automatic remeshing technique for finite elements simulation of forming process[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1990, 30(8): 1503—1525.
- [18] AKAI K, TAMURA T. Numerical analysis of multidimensional consolidation accompanied with elastic-plastic constitutive equation[C]//Proceedings of the Society of Civil Engineering. Japan: JSCE, 1978, III(269): 95—104.

- [19] OKA F, YASHIMA A and SHIBATA T. FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elastic-plastic model[J]. **Applied Scientific Research**, 1994, 52(3): 209—245.
- [20] UZUOKA R. Analytical study on the mechanical behavior and prediction of soil liquefaction and flow[D]. Kyoto: Kyoto University, 2000.
- [21] OKA F, YASHIMA A and KATO A, et al. A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its applications[C]//Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Barcelona: [s. n.], 1992.
- [22] OKA F, YASHIMA A, TATEISHI A, et al. Cyclic elastic-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(5): 661—680.
- [23] 邵琪, 唐小微. 基于 SPR 的误差评估与回归场函数选择[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(2): 234—240.
SHAO Qi, TANG Xiao-wei. An error estimation based on SPR and selecting of recovered field function[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2013, 53(2): 234—240.
- [24] 邵琪, 唐小微. SPR 误差评估在动静力数值分析中的验证与应用[J]. 计算力学学报, 2013, 30(1): 130—136.
SHAO Qi, TANG Xiao-wei. Verification and application of SPR error estimation in static and dynamic numerical analysis[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2013, 30(1): 130—136.