

DOI: 10.11779/CJGE2022S2003

# ZJU-400 离心机机载微型 CPTu 装置研制与性能测试

周燕国<sup>1, 2, 3</sup>, 王智男<sup>1, 2, 3</sup>, 马 强<sup>1, 2, 3</sup>, 梁 甜<sup>4</sup>, 陈云敏<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

**摘要:** 孔压静力触探 (CPTu) 是一种重要的土体原位特性测试手段, 在常重力环境下的实际工程中得到了良好应用。在超重力离心模型试验过程中, 由于存在模型高倍缩尺、承受高倍离心加速度和高速旋转产生机械振动等因素, 利用静力触探方法测试模型地基土体特性存在较大的技术难度。浙江大学研制了离心机机载微型孔压静力触探装置, 在离心超重力环境下具备沿水平轨道移动定位, 坚向触探测量锥尖阻力、侧摩阻力和孔隙水压力的能力。开展了饱和砂性土模型地基离心机模型试验, 在 30g 离心超重力下检验了该装置的测试性能, 并初步揭示模型地基触探指标随模型地基深度的变化规律。

**关键词:** 孔压静力触探; 离心机模型试验; 锥尖阻力; 侧摩阻力; 孔压

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0011-05

作者简介: 周燕国(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事土动力学与地震工程、地基与基础工程性能设计与智能监测、水利水电基础设施抗震性能与服役韧性, 以及超重力离心物理模拟方向的研究。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

## Development and performance testing of in-flight miniature CPTu equipment on ZJU-400 centrifuge

ZHOU Yan-guo<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Zhi-nan<sup>1, 2, 3</sup>, MA Qiang<sup>1, 2, 3</sup>, LIANG Tian<sup>4</sup>, CHEN Yun-min<sup>1, 2, 3</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Center for Hypergravity Experiment and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

**Abstract:** The piezocone penetration test (CPTu) is an important in-situ soil testing method widely used in conventional 1g condition in engineering practices. Due to the highly scaled model ground, high centrifugal acceleration and rotation-induced vibration during centrifuge model tests, the in-flight testing of CPTu in model ground remains a challenging task. A miniature CPTu equipment is developed in Zhejiang University based on ZJU-400 centrifuge apparatus, which is capable of moving horizontally to locate the penetration spot, and then measuring the cone tip resistance, sleeve friction resistance and pore water pressure during penetration under centrifugal hypergravity condition. The testing performance of this CPTu equipment is preliminarily checked by the centrifugal model tests on saturated sandy soils under centrifugal acceleration of 30g, and the depth variation of penetration parameters are observed and analyzed.

**Key words:** piezocone penetration test; centrifugal model test; cone tip resistance; sleeve friction resistance; pore water pressure

## 0 引言

孔隙水压力静力触探 (piezocone penetration test) 简称为孔压静力触探 (CPTu), 是 20 世纪 80 年代在国际上发展的原位测试技术, 之后我国许多高校、科研院所及勘测单位相继开展 CPTu 的研究和测试<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 随着岩土工程离心超重力物理模拟装备与研究的不断发展, 在离心机转机过程中开展模型地基原位测试成为重要的技术需求。例如, Bolton 等探索了在离心机上进行 CPTu 测试的可行性<sup>[3]</sup>。在离心机模型试验中开展 CPTu 测试, 具有如下功能: 首先,

测得端阻、侧阻和孔压等触探指标沿模型地基深度的变化规律, 可用于评价土体密实度和模型均匀性, 表征模型土体初始状态<sup>[4]</sup>; 其次, 可有效识别模型地基土体分层情况<sup>[5]</sup>; 再次, 通过物理模型和原型场地两个尺度上的 CPTu 测试结果对比, 验证或改进原型场地基于 CPTu 触探指标的各种经验公式, 用于工程<sup>[6]</sup>。

本文介绍了浙江大学依托 ZJU-400 超重力离心机

基金项目: 国家自然科学基金项目(51988101, 51978613, 52278374);  
高等学校学科创新引智计划项目(111 计划, B18047)

收稿日期: 2022-12-01

研发的机载微型孔压静力触探装置，并开展了饱和砂性土模型地基离心机模型试验以检验其测试性能，并对触探指标沿模型地基深度的变化规律做了探讨。

## 1 ZJU-400 机载微型 CPTu 系统研制

浙江大学研制的 ZJU-400 离心机机载微型 CPTu 系统如图 1 所示。该装置主要由 CPTu 探头、竖向贯入模块、水平移动模块、移动控制系统以及支座反力框架组成。在移动控制系统配合下，水平导轨移动模块用于调整探孔的平面位置，竖向贯入系统用于控制试验过程中探杆的贯入速率和探测各通道数据，支座反力框架提供向下贯入触探所需要的反力，并提供抵御超重力方向变形的能力。下面简单介绍各子系统的参数与性能。

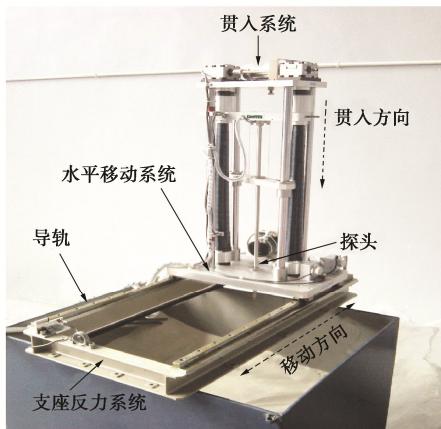


图 1 ZJU-400 离心机机载微型 CPTu 装置

Fig. 1 In-flight miniature CPTu on ZJU-400 centrifuge

### 1.1 CPTu 探头

CPTu 探头是装置的核心部件。在综合考虑超重力几何缩尺、模型箱尺寸与边界效应以及模型土体颗粒粒径效应等影响因素的基础上，研制了如图 2 所示的 CPTu 探头，探杆直径 12 mm，探杆长度 500 mm，锥头的锥角为 60°，投影面积为 113 mm<sup>2</sup>。探头内安装了两个测力计，测力计 1 位于摩擦筒的前部，用于测量施加在锥头上的端阻力；测力计 2 位于摩擦筒的后部，用于测量端阻力和施加在摩擦筒上的侧摩阻力之和，因此，两个测力计读数之差即为侧摩阻力。每个测力计由 4 个对称布置的应变片组成，以全桥路连接的方式构成惠斯登电桥，以消除探头倾斜、偏心的影响，同时提供温度和弯曲应力补偿。

孔压计设置在锥头后部，通过硅胶固定其位置。此外，硅胶还具有密封作用，防止流体进入测力计内，并且能够消除测力计与孔压计之间的相互干扰，确保测量结果的准确性。模型土体中的饱和流体通过透水滤器与孔压计接触。本装置将透水滤器安置在锥肩部，

可避开触探时锥头底下的复杂应力区，所测得的孔压比较稳定，孔压消散接近于圆柱轴对称径向排水条件，且透水滤器也不易磨损或堵塞。

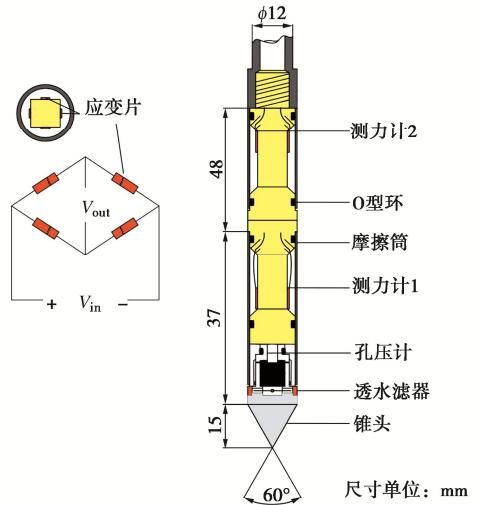


图 2 CPTu 探头结构示意图

Fig. 2 Schematic of cone structure of CPTu

### 1.2 水平移动和竖向贯入模块

支座反力框架位于 CPTu 装置的底盘，在底盘上设有水平驱动电机、水平位移传感器及定向导轨。在水平移动电机驱动下，竖向贯入模块能够以 100 mm/min 的速率沿垂直于离心加速度的方向移动，移动距离由水平位移传感器监测。竖向贯入模块位于导轨之上，控制系统控制直流电动机进行驱动，最大贯入力为 10 kN，贯入速率可以在 0~2 mm/s 区间内调节，贯入的深度由垂直位移传感器监测。

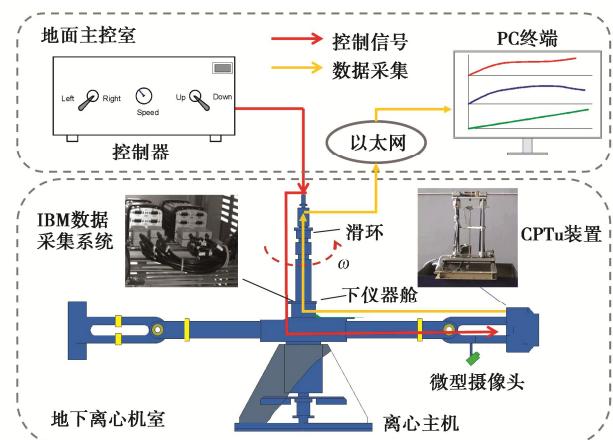


图 3 CPTu 移动控制和数据采集系统

Fig. 3 Motion control and data acquisition system for CPTu

### 1.3 移动和触探控制系统

为了使 CPTu 装置能够在离心机高速旋转的工况下开展水平移动和竖向贯入控制，以及实现 3 个传感通道数据采集，将控制器放置于主控室内进行远程操作，其构架如图 3 所示。地面控制器命令经离心机滑

环传给 CPTu 装置上的两台驱动电机, 控制 CPTu 装置产生平移和贯入动作, 并通过一个微型摄像机来实时观察 CPTu 的工作状态。此外, CPTu 触探数据通过安装于离心机主机室内的 IBM 数据采集系统采集, 然后通过以太网传输到地面的数据采集终端。

## 2 超重力模型试验测试性能

为检验上述微型 CPTu 装置的测试性能, 开展了饱和砂性土地基的离心机模型试验, 在 30g 离心超重力环境下开展 CPTu 测试。下面对装置调试过程和测试数据分析作详细介绍。

### 2.1 传感器标定

在使用 CPTu 探头前必须对其进行标定, 将标定系数乘以相应的输出电压读数, 即可以求出锥尖阻力 ( $q_c$ )、侧摩阻力 ( $f_s$ ) 和孔隙水压力 ( $u$ ) 数值。CPTu 探头传感器的标定包括测力传感器 (测力计) 和孔压传感器 (孔压计) 两部分标定。

测力计标定装置由反力架、锥帽、标准测力仪和便携式应变仪构成。标定时首先装好标定装置和探头, 接通仪器, 然后先重复加载和卸荷 2~3 次, 以消除探头由于加工而产生的残余应力, 同时减小应变片的滞后性和非线性产生的影响。正式标定得到测力计的标定系数线性度很好, 归零误差小于 1%。此外, 在测力计标定时对孔压计进行观测, 发现孔压计数值没有发生变化, 说明测力计与孔压计之间不存在相互干扰。

孔压计的标定装置主要由加压通道、密封容器、压力表和便携式应变仪构成。装好标定装置和探头后, 接通仪器。首先打开阀门让流体进入加压通道以排除通道及探头内的气体, 待气体排完以后关闭阀门。然后先重复加压和卸压动作 2~3 次, 随后开始正式标定。孔压计标定系数线性度很好, 归零误差小。

### 2.2 试验条件及模型制备

模型试验选用福建石英砂和萧山黏土的混合土作为试验材料, 两者的颗粒级配曲线见图 4, 其物理力学性质分别见表 1 和表 2。选用无色透明黏度为 30 cst、密度为 0.96 g/cm<sup>3</sup> 的甲基硅油作为饱和流体。采用空中落雨法制备萧山黏土含量为 10% 的干砂模型。当砂雨落距小于 20 cm 时, 黏粒和砂粒离析程度较小。在此落距范围内, 模型混土体初始相对密度为  $D_r = 40\%$ 。

表 1 福建砂物理力学性质  
Table 1 Physical and mechanical properties of Fujian sand

参数	$G_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$D_{50}/\text{mm}$	$D_{30}/\text{mm}$	$D_{10}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$	$\phi/^\circ$
值	2.622	0.943	0.6	0.16	0.14	0.1	1.6	0.96	39

表 2 萧山黏土物理力学性质  
Table 2 Physical and mechanical properties of Xiaoshan clay

参数	$G_s$	$w/\%$	$e$	$w_p/\%$	$w_L/\%$	$I_p/\%$	$I_L$	$c_{cu}/\text{kPa}$	$\phi_{cu}/(^\circ)$	$S_t$
值	2.734	60~65	1.72~1.74	26.5	53.0	26.5	1.6	15.5	15	13.7~15

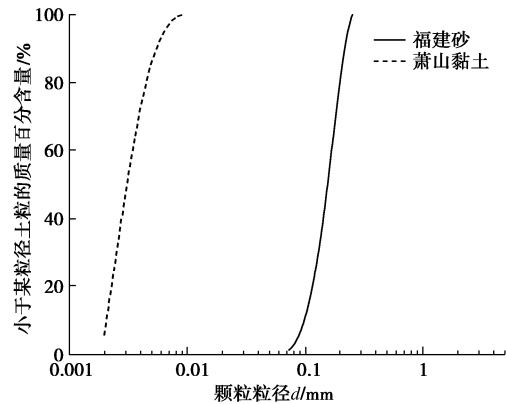


图 4 试验土样颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of test soils

本次试验所用模型箱为高强合金矩形层状剪切箱, 内部尺寸 730 mm×350 mm×425 mm (长×宽×高), 共由 12 层矩形框堆叠而成。模型箱内部敷设平均厚为 2.5 mm 的橡皮膜 2 层, 以保证模型箱的密封性及防止土粒进入叠层之间。图 5 为模型试验布置图, 模型土层总高度为 300 mm, 包括 50 mm 厚的粗砂层和 250 mm 厚的混合土体。在 30g 离心机加速度下模拟原型 9 m 厚的饱和砂土地基。模型制备完成后采用压力与流速精密可调的真空饱和装置进行抽真空饱和, 由于黏粒含量的存在整个饱和过程耗时约 170 h, 饱和后液面比模型地表高 12 mm。

离心加速度达到 30g 后, 等待因转机加载产生的超静孔隙水压力消散后开始在探孔 1 位置进行贯入测试, 贯入结束后将探杆拔出并调整探杆至探孔 2 处准备下一次贯入测试。为获得高质量的端阻、侧阻和孔压数据, 需要设备能保持稳定的贯入速率。本次试验对模型地基进行了 2 次触探测试, 探孔位置见图 5(b)。为观察贯入速率对锥尖阻力及孔压读数的可能影响, 对 2 个探孔采用不同的贯入速率, 其中探孔 1 的贯入速率为 12 mm/min, 探孔 2 的贯入速率为 120 mm/min。

### 2.3 测试结果及初步分析

考虑到 CPTu 探头锥尖肩部前后受力面积的差别 (如图 6 所示), 使得测量值与施加在锥尖上的力不一致<sup>[6]</sup>, 提出修正公式如下:

$$q_t = q_c + u(1-a) \quad (1)$$

式中,  $q_t$  为修正锥尖阻力,  $q_c$  为实测值锥尖阻力, 参

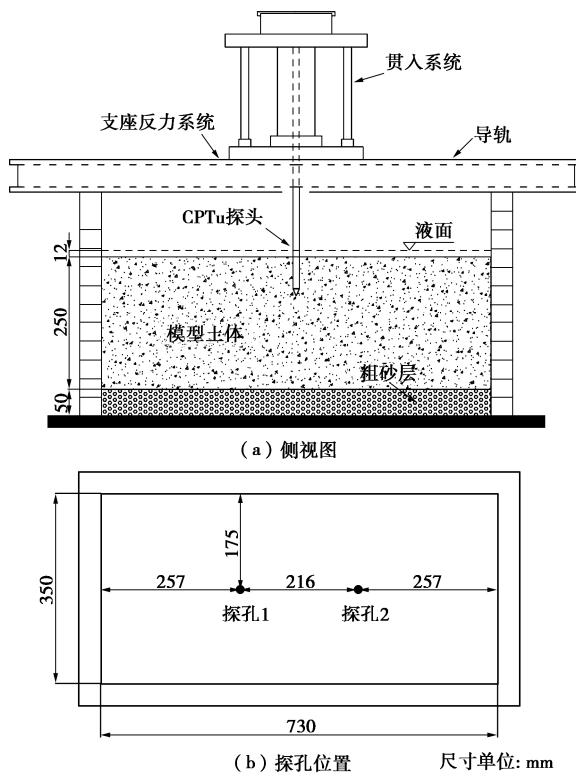


图 5 模型布置图

Fig. 5 Layout of model

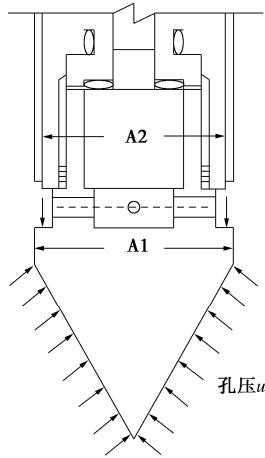


图 6 CPTu 探头锥尖周围孔压示意图

Fig. 6 Schematic of pore pressure around cone tip

数  $a$  为锥尖肩部后净面积  $A_2$  与锥尖投影面积  $A_1$  之比, 本次试验所使用的探头  $a=0.83$ 。

图 7 给出了孔压和根据公式 (1) 修正后的锥尖阻力。由图 7 可见, 不同贯入速率下探头测得的孔压响应和锥尖阻力均不同。贯入速率为 12 mm/min 时, 测得的孔压值与静水压力一致, 说明贯入过程中探头周围土体基本处于完全排水状态; 当贯入速率提高到 120 mm/min 时, 测得的孔压比静水压力大, 说明在该贯入速率下, 探头周围土体处于非完全排水状态, 产生了一定的超静孔压累积, 进而影响锥尖贯入阻力。

比较两次贯入的锥尖阻力可知, 贯入速率越大则锥尖阻力越小, 这与已有原位测试结果规律一致<sup>[2]</sup>。由此可见, 对于饱和土体而言, CPTu 的贯入速率是影响测试结果的重要因素。

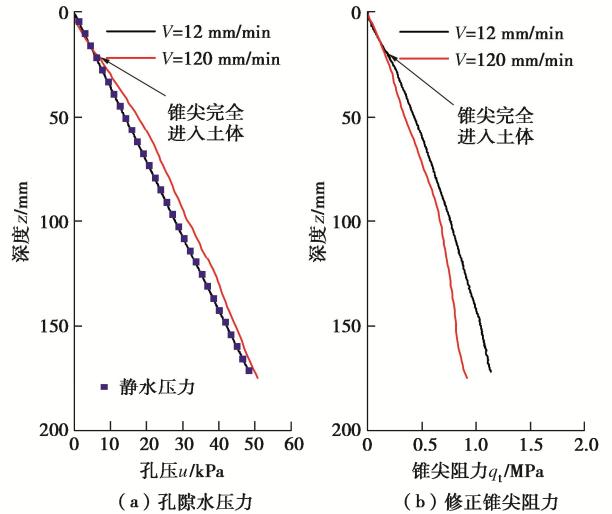


图 7 CPTu 测试结果

Fig. 7 Test data of CPTu

图 8 给出了两次不同贯入速率的侧摩阻力测试数据。由图 8 可见, 贯入速率越大, 测得的侧摩阻力越小。这说明侧摩阻力与锥尖阻力的深度变化规律类似, 都会受到快速触探引起的超静孔压的影响。将侧摩阻力  $f_s$  与锥尖阻力  $q_t$  的比值定义为摩阻比  $R_f$  ( $R_f=f_s/q_t$ ), 如图 8 (b) 所示, 当贯入速率为 12 mm/min 时, 摩阻比沿深度变化较稳定, 其值约为 1%, 与现场原位测试中砂性土的摩阻比通常不大于 2% 的认识相符<sup>[1]</sup>; 当贯入速率提高到 120 mm/min 时, 由于贯入过程产生超静孔压, 摩阻比呈现沿深度增大的趋势, 与原位测试经验不符。由此可见, 在超重力离心机中进行静力触探测试, 需选取合适的贯入速率以获得合理的测试结果。

在静力触探测试中, 可采用无量纲分析法来分析试验结果。例如, 采用上覆有效应力对锥尖阻力  $q_t$  进行归一化处理, 得到归一化锥尖阻力  $Q$ , 如式 (2) 所示; 采用贯入深度将探杆直径归一化得归一化深度  $Z$ , 如式 (3) 所示:

$$Q = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma'_v} \quad , \quad (2)$$

$$Z = \frac{z}{d} \quad , \quad (3)$$

式中,  $\sigma_v$  和  $\sigma'_v$  分别为竖向总应力和竖向有效应力,  $z$  为贯入深度,  $d$  为探杆直径。

图 9 给出了归一化锥尖阻力  $Q$  与归一化深度  $Z$  的关系。由图 9 可见, 存在某个临界归一化深度  $Z_{crit}$ , 将  $Q-Z$  的深度变化分为两个阶段: 首先, 在临界深度

以上, 归一化锥尖阻力  $Q$  随归一化深度  $Z$  增加而增加, 与土体上覆压力有关, 表现出浅基础承载力的土力学机制; 其次, 在临界深度以下, 归一化锥尖阻力  $Q$  随归一化深度  $Z$  的增加而减小, 这与 CPTu 探头在模型土体中形成局部破坏模式有关, 体现了与深基础承载力相关的力学机制, 这一试验结果与 Bolton 等<sup>[3]</sup>的试验观测类似。上述模型试验结果说明了 ZJU-400 离心机机载微型 CPTu 装置在超重力条件下能正常开展触探测试, 且性能可靠。

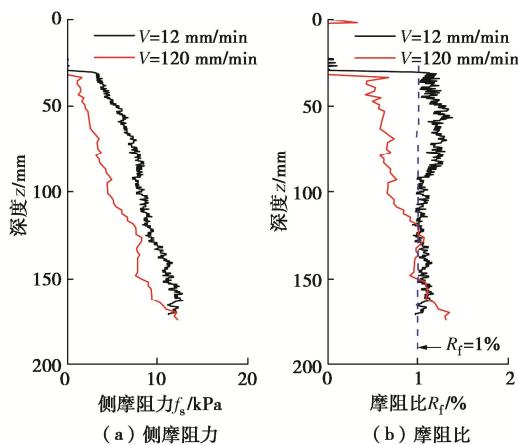


图 8 CPTu 测试结果

Fig. 8 Test data of CPTu

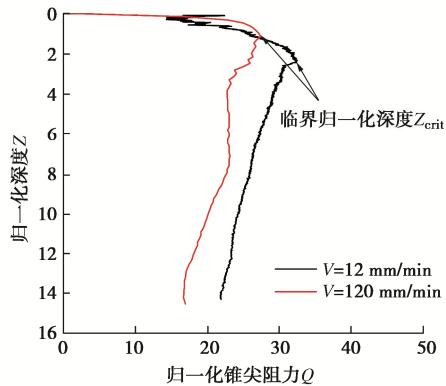


图 9 CPTu 测试归一化锥尖阻力

Fig. 9 Normalized cone tip resistances of CPTu tests

### 3 结语

本文研究研发了 ZJU-400 离心机机载微型 CPTu 装置, 对其模块组成、测试功能和操作方法进行了详细介绍, 并开展了饱和砂性土的超重力离心机模型试验, 对该装置的测试性能进行了观测。

超重力离心机模型试验表明, 所研制的微型 CPTu 装置能在超重力环境下实现水平移动准确定位和竖向触探的功能, 并获取端阻、侧阻和孔压数据, 模型地基内测试结果和深度变化规律与原型场地 CPTu 测试结果具有高度一致性。该装置可为超重力离心机模型试验提供先进的触探工具, 同时也为进一步完善 CPTu 测试方法和数据分析提供了物理模拟技术手段。

### 参考文献:

- [1] 马淑芝, 汤艳春, 孟高头. 孔压静力触探测试机理、方法及工程应用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007. (MA Shu-zhi, TANG Yan-chun, MENG Gao-tou. Piezocone Penetration Test Mechanism, Methods and Its Engineering Application [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 孔压静力触探(CPTU)测试成果影响因素及原始数据修正方法探讨 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 632 – 636. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. General factors affecting interpretation and corrections of primary data from piezocone penetration test(cptu)[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 632 – 636. (in Chinese))
- [3] BOLTON M D, GUI M W, GARNIER J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand [J]. Géotechnique, 1999, 49(4): 543 – 552.
- [4] MA Q, et al. A state parameter-based scaling law for centrifuge modelling [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: 107487.
- [5] 林军, 刘松玉, 程月红, 等. 基于孔压静力触探的江苏地区软土分类研究应用 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 241 – 244. (LIN Jun, LIU Song-yu, CHENG Yue-hong, et al. Classification of soft clay in Jiangsu Province based on piezocone penetration tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 241 – 244. (in Chinese))
- [6] TANI K Z, et al. Development of centrifuge cone penetration test to evaluate the undrained shear strength profile of a model clay bed [J]. Soils and Foundations, 1995, 35(2): 37 – 47.

(编校: 黄贤沙)