

新型海上静力触探设备的研制与应用^{*}

季福东¹, 贾永刚^{1,2}, 刘晓磊¹, 郭 磊¹, 张民生¹, 单红仙^{1,2}

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

2. 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:海上静力触探是一种操作简单、经济高效、测量数据可靠的海床土体原位测量方法。国内自主研发的海上静力触探设备很少能够广泛的应用在实际工程勘察中。本文介绍了一种新型海上静力触探设备,由贯入系统、液压系统、甲板控制系统、浮力系统四部分组成,可在地形复杂多样的滩浅海区域进行连续走航测试。利用这套设备在黄河口海域进行地质勘察,并对该海域的海床土层结构划分进行了探讨,证明了该设备在滩浅海地区的工程勘察领域有着广阔的应用前景。

关键词:静力触探;原位测试;工程勘察

中图分类号: P743

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2016.02.001

海底土体性质的调查研究是海上石油平台、海底隧道、油气管道、光缆等海洋工程建设必不可少的重要部分,海底以下数米至数十米内沉积物性质的研究对于海洋环境调查、海底资源勘探、海洋开发利用等各方面都具有重要意义^[1-2]。海上静力触探的方法是一种操作简单、经济高效、测量数据可靠的海床土体原位测量方法,在海上工程勘察、地质灾害研究等方面有着广阔的应用前景^[3-5]。

海上静力触探技术自 20 世纪 60 年代出现开始,距今已有 50 a 的历史。静力触探是目前应用最为广泛、最成熟的海上原位探测技术,在许多国家现已成为海洋工程地质调查的必做项目,国外已经形成了完全商业化的产品,还有专门从事海上静力触探勘察技术服务的公司。然而目前为止,我们国内开展的海上静力触探技术基本都是由国外引进的方法,触探仪器也大都为外国生产,国外应用较多的海床式静力触探系统如 Geomil 公司的“MANTA”系统和辉固公司的“SEACALF”系统等,这些深海静力触探设备最大工作水深在 2 000 m 左右,但由于这些设备一般较为笨重,对调查船体要求较高,另外国外设备一般价格昂贵,这都使得很难在我们国内的工程勘察领域广泛应用。

自 20 世纪 70 年代开始,我们国内部分研究所和高校研制了一些海上静力触探设备,如 1973 年,中国科学院海洋研究所研制的我国第一个海床式水下静力触探设备^[6]。它的动力装置采用水下电机带动机械传动的方式进行贯入,然而设备测量深度较浅,作业效率

^{*} 收稿日期:2015-12-15

资助项目:国家自然科学基金项目——复杂深海工程地质原位长期观测设备研制(41427803)

作者简介:季福东(1990-),男,硕士研究生,主要从事海岸工程地质方面研究。E-mail:jifudong@126.com.com

(王佳实 编辑)

较低、风险和难度也相对较大;2001年,广州海洋地质调查局研制的钻孔式静力触探设备,为国内首次采用液压驱动装置,工作水深可达100 m,触探深度可达120 m,这种钻孔式静力触探设备对调查船要求较高,一般需要有大型勘察施工船才能进行作业,这也限制了这种设备的普及应用;2005年,吉林大学工程技术研究所研制的“浅海域海底静力触探测试系统”^[7-8],这套设备采用柔性钢制探杆的贯入方式,设备仅在海上进行了试验测试,并没有形成成熟的产品。这些静探设备的研制促进了我国静力触探技术的发展,因为种种原因,却都没能够广泛应用在实际工程勘察中。针对目前的现状,迫切地需要研制我们自己的海上静力触探设备,并将其广泛的应用在工程勘察、建设等领域。

本文介绍的海上新型静力触探设备(Cone Penetration Test System for Shallow Sea, CPTss)由山东省海洋环境地质工程重点实验室自主研发。设备可在地形复杂多样的滩浅海区域进行连续走航测试。使用该设备在黄河三角洲区域进行多次外业测试,在海床土体工程性质测量方面取得了很好的效果。

1 CPTss 系统设计

1.1 设备概述

设备为长方形,外框架结构采用钢制材料焊接而成(图1)。配备充气式浮力装置,设备能够漂浮在海面上由船拖动行走;通过给浮力系统充气或排气,使得设备沉于海底或自动上浮(图2)。设备由贯入系统、液压系统、甲板控制系统、浮力系统四部分组成。



图1 触探设备主体



图2 设备漂浮于水面

Fig. 1 The main body of the new CPT equipment Fig. 2 Equipment floating on the sea surface

贯入系统由贯入油缸、滑轮组、传动钢缆、滑板、夹持油缸及回转马达等部件组成(图3),探杆贯入时,贯入油缸活塞杆伸出,通过传动钢缆和整个滑轮组带动滑板向下运动,固定在滑板上的夹持油缸带动探杆缓慢匀速插入沉积物中,插入深度由位移传感器测量;探杆上提时,滑板向上运动,即可将探杆提出沉积物。贯入系统采用液压缸驱动滑轮组合的行程放大机构,降低了设备的整体高度,提高了设备在海底的稳定性。

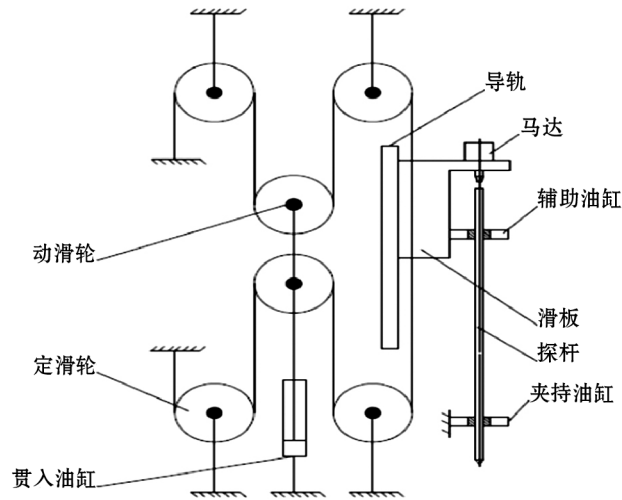


图 3 贯入机构工作原理

Fig. 3 Working principle of the penetration system

夹持油缸一次贯入回合内带动探杆行程 500 mm。它由两组液压机械手分步夹持探杆部件,其中,探杆提升夹持机械手沿上下导向机构运动,完成探杆的下插和提升动作,固定夹持机械手在下部,在提升夹持机械手空动及设备待机时夹持探杆,防止探杆滑落。贯入系统内部的位移传感器,将测量的贯入深度等参数和系统的其他工作参数一起在控制面板中显示。

液压系统由单相交流 220 V/50 Hz 船载发电机供电,液压站在设备内部,通过控制系统对水下的换向阀操作,从而实现探杆贯入和提起、探杆的夹持和导向、配重丢弃等功能。

液压系统主要由水下直流电机和液压驱动单元组成。由图 4 可见,液压驱动单元的工作原理,首先水下电机和液压泵启动,之后依靠控制单元控制各电磁阀完成设备工作,通过贯入系统内部的位移传感器及系统压力传感器测量的参数,可以判断探杆的贯入深度及贯入力^[9]。当探杆贯入至设定深度或达到设定工作压力时,甲板操纵平台可以根据该参数,进行下一步的操作,直至全部工作完成。

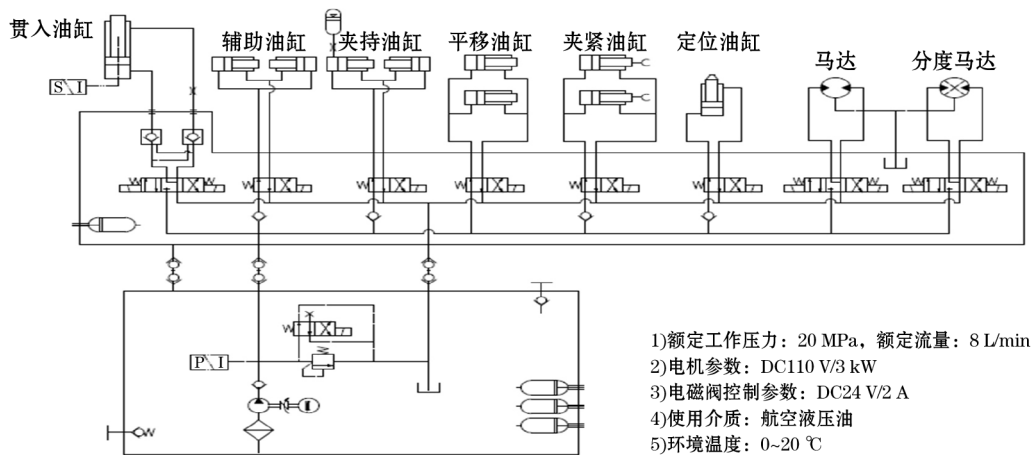


图4 液压系统工作原理

Fig. 4 Working principle of the hydraulic system

浮力系统由24套浮力皮囊组成。皮囊对称分布在设备框架两端,每套浮力皮囊可产生净浮力约90 kg共可产生浮力2 160 kg。皮囊排气后浮力消失设备下沉,充气后皮囊膨胀产生浮力,浮力大于设备重量时设备开始上浮,当充气后皮囊压力与水深压力平衡时,浮力达到最大。为使皮囊内压力保持与外界压力平衡,防止皮囊内压力过大损坏皮囊,在上浮的过程中,皮囊内气体可对空排放,使皮囊内外压力保持平衡,压力控制由压力变送器监控完成,数值在界面上可实时显示。皮囊内外压差设定为 0.1 kgf/cm^2 (约7 psi),超压后报警,自动排气。

控制系统包括水下部分的实时测控系统和甲板监控平台等,由硬件和软件两部分组成。实时测控系统通过电缆与甲板上的数据处理系统相连。

水下实时测控系统电路,以微处理器为信息处理控制中心,通过铠装同轴电缆及深水接插件与相应传感器、控制对象连接,完成换向阀组转向、位移传感器数据转换、设备动作、姿态参数及相关数据处理,并完成水下模拟量、数字量和频率信号的采集、存储和上传。

甲板集成化监控平台是监测和控制水下电子设备的综合操作平台,主要包括甲板通讯机、甲板操作台和甲板多功能机箱,甲板监控系统与水下传感器及可执行单元之间的通信由铠装同轴电缆完成。

通过控制系统的计算机界面可显示:液压系统的工作状态、压力参数(或输出力 N)、设备工作深度、探杆贯入位移参数、贯入深度。而探杆的测量数据则单独通过线缆传输到采集仪进行实时监控和存储。

1.2 技术指标

设备主要技术参数如表1所示。

表 1 设备技术指标

Table 1 Specifications of the equipment

| 项 目 | 指 标 | 备 注 |
|----------|----------------------------------|---------------|
| 外形尺寸 | 长 3 000 mm×宽 2 200 mm×高 1 700 mm | |
| 整机重量 | 1.2 t | 不含配重,空气中重量 |
| 最大浮力 | 大于 2 t | |
| 贯入深度 | 10 m | 单次贯入深度 500 mm |
| 探 杆 | 外径为 28 mm,内径 20 mm | 内部空心用于穿线 |
| 探头类型 | 横截面积 10 cm ² | 双桥探头 |
| 贯入速度 | 2 cm/s | 可调 |
| 工作水深 | 0~20 m | |
| 主电机参数 | 单项 AC220 V/50 Hz/950 r/1.5 kW | |
| 控制系统供电电压 | DC24 V | |

注:空白处无参数

2 设备测试步骤

设备在 0~2 级海况下测量稳定,但在 3 级以上海况下,若利用较小渔船进行测试时,由于晃动的原因,加接探杆时危险性大大增加,故不推荐在此海况或更差的海况条件下使用,利用这套滩浅海静力触探设备进行测试的操作流程见图 5。测试操作步骤如下:

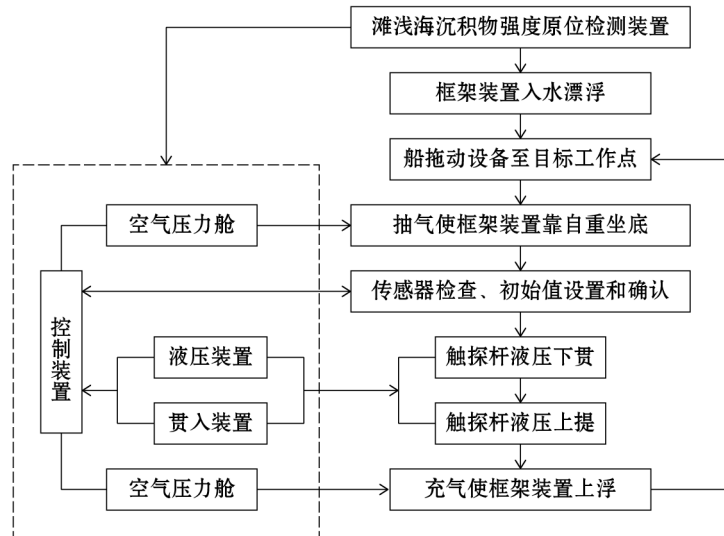


图 5 设备操作流程

Fig. 5 Flow chart for operating the equipment

1)准备工作:开始测试之前连接好充气管路、电缆等部件,使用空气压缩机给浮筒充气至 0.1 kgf/cm² (7 psi)左右,之后开启液压站打开上、下夹持油缸安装探杆,最后将各个配套部件装船、布放,将设备吊至水面后连接拖动缆绳。

2)设备入水:设备拖至作业点后,启动真空泵对浮筒抽气排空,使设备缓慢沉入水下,同时释放电缆、测试缆及钢丝绳。设备开始下沉后可以关闭真空泵,打开排气阀对空排

气。在设备下沉过程中注意观察其姿态及水深等参数,设备触底后查看倾角参数如不大于 10° ,即可开始贯入操作。

3)贯入操作:在水深及姿态等参数稳定后,开启液压站进行贯入操作。在贯入操作过程中注意设备姿态的变化,如倾角参数发生较大变化,或触底后倾角大于 10° ,应将设备收回重新释放或更换作业点;同时要注意贯入阻力的变化范围,防止阻力过大导致设备倾斜。贯入过程如出现其他异常,应及时停止贯入操作,检查原因,排除故障后再进行贯入操作。

4)设备回收:贯入过程结束,探杆回到原位后,开启压缩机对浮筒充气,当充气压力与水深压力平衡时设备开始上浮,设备浮出水面后浮筒内压力控制在 0.2 kgf/cm^2 (15 psi)左右,保持设备漂浮在水面。

5)出水保养:采样结束后,设备出水,用淡水对其内外进行全面冲洗,去除海水及沉积物,保持设备清洁。

3 设备海上试验应用

3.1 工作区域情况

研究区选取在渤海湾南部的埕岛油田海域(图6)。埕岛油田海区位于现代黄河三角洲的前缘,地势西南高、东北低,黄河口在这一带曾多次转移改道,经历了海侵与海退和黄河三角洲进积与蚀退的交替反复过程,使该区滩海浅地层结构紊乱,地层沉积特征复杂^[10-12]。选取的两个典型特征点附近海底地形地貌及测点位置水深都有较大差别,利用静力触探设备在研究区内这两个测点进行静力触探测试,并在测点附近进行钻孔取样分析。

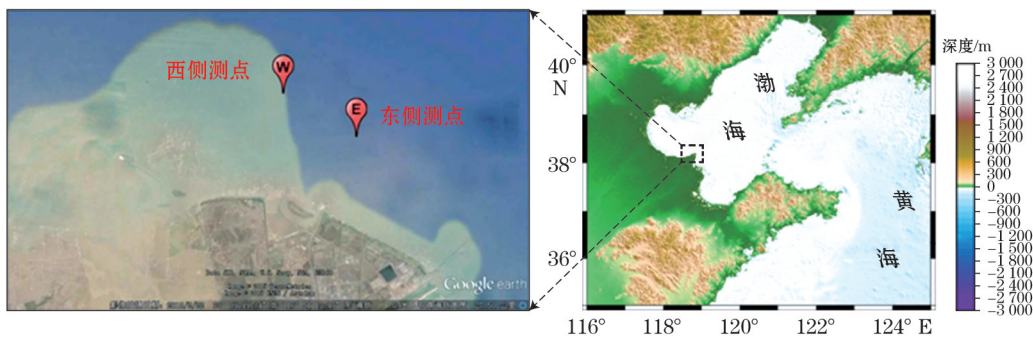


图6 研究区域和测点位置示意图

Fig. 6 Locations of the study area and the measuring points

东侧测点水深:7.0 m;平均坡度为 $7^\circ\sim 8^\circ$ 。该区域表层为黄褐色粉土,局部夹粉质黏土,中密状态为主,含水量 $27.4\%\sim 32.3\%$,密度 $19.4\sim 20.1 \text{ kN/m}^3$ 。西侧站点地形平坦,水深为9.5 m,地形坡度较小。表层为层厚黄褐色粉土,中等密实状态,含水量 $23.4\%\sim 32.1\%$,密度 $18.7\sim 20.4 \text{ kN/m}^3$ 。

3.2 测试结果与分析

根据静力触探测试可得到各个测点的锥尖阻力、侧摩擦力、摩阻比参数随深度变化曲线。进而可分析埕岛油田海域海床土体成层特征。两测试点测试得到的锥端阻力及侧壁摩擦力曲线如图7所示。

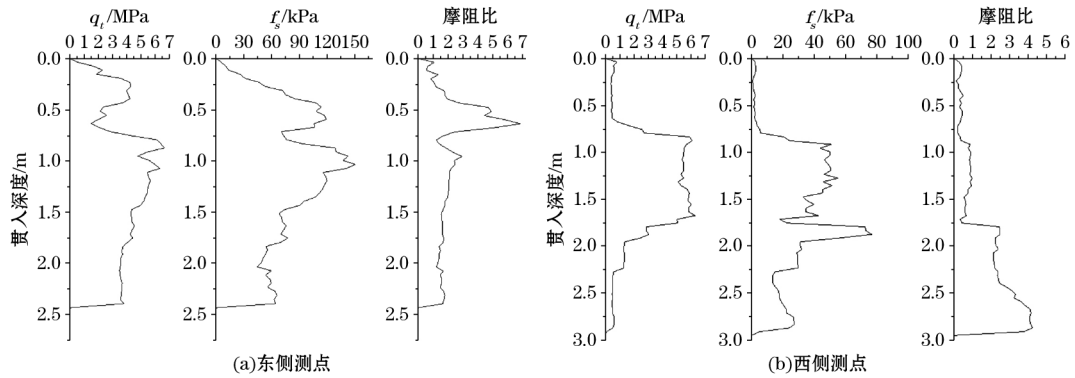


图 7 东西两测点静探曲线随深度变化示意图

Fig. 7 Changes of the static sounding curves with depth at the eastern and the western measuring points

用静探曲线判定土质类型,在工程实践中应用较多的是按静力触探指标和曲线特征划分土类。在静力触探过程中,当探头从上覆土层贯入,到达下卧土层之前,在层面以上一定深度内,上覆土层的锥尖阻力值出现“超前”现象;而当探头进入下卧土层后,层面以下一定深度内,下卧土层的锥尖阻力值出现“滞后”现象^[13]。由上一土层单元的超前段和下一土层单元的段构成不同土层单元之间的过渡段,这种过渡段中的某个确定的深度位置处可以作为不同土层的力学分层界面^[14-15]。

通过测试,确定了站点土体的垂向分布情况和强度参数,从土层垂向分布情况上看,在深度 5 m 范围内,地层强度差异较大,存在软硬交互的现象,锥尖阻力最高为 7 MPa,最低仅有 0.1 MPa;侧摩阻力最高为 140 kPa,最低仅有 0.3 kPa。根据锥尖阻力、侧摩阻力和摩阻比曲线,同时钻孔取样测试结果对比分析,研究区各静力触探点位 3 m 以浅土体大致分为 3 层,表层为淤泥质粉质黏土,中间层为粉土层,底层为粉质黏土层。

根据静力触探所反映出对土质特征的对应关系,将测试点土层结构进行划分,同时依据研究区内测得的锥尖阻力、侧摩阻力,结合黄河水下三角洲地区经验公式,对研究区内各个土层地基承载力进行计算^[16-17](表 2)。为验证各静力触探点测试结果,在测点通过钻探取芯进行层位划分,并查阅测点附近历史钻孔资料,与静力触探测试结果相比,都有着较好的对应^[18]。

表 2 静探测点土层划分

Table 2 The soil-layer divisions at the static sounding points

| 静探点号 | 分层深度 /m | 土质类型 | 平均锥尖阻力 /MPa | 平均侧摩阻力 /kPa | 平均摩阻比 /% | 地基承载力 /kPa |
|------|------------|---------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| 东侧测点 | 0.00~0.75 | 淤泥质粉质黏土 | 2.90 | 71.28 | 2.72 | 57.80 |
| | 0.75~1.50 | 粉土层 | 5.54 | 111.02 | 2.02 | 109.80 |
| | 1.75~2.50 | 粉质黏土层 | 3.92 | 62.45 | 1.60 | 77.88 |
| 西侧测点 | 0.00~0.75 | 淤泥质粉质黏土 | 0.58 | 1.96 | 0.33 | 12.08 |
| | 0.75~1.75 | 粉土层 | 5.44 | 56.80 | 0.68 | 107.89 |
| | 1.75~3.00 | 粉质黏土层 | 0.78 | 21.90 | 3.06 | 16.02 |

4 结 语

我们研制的这套滩浅海静力触探设备,通过在黄河水下三角洲的测试,实验结果表明:系统操作简单,运行稳定,可以快速、经济、高效的进行多个测点的作业实验。但同时设备中也存在一些问题可以改进和提高,如设备贯入操作前需预接杆,杆过长之后危险性增加,应考虑水下自动接杆技术,增加触探深度;工作水深增大时,触探探头的耐压和防水性能受到考验,另外探头采集数据需要单独一根导线连接至甲板采集仪器,设备的风险性增加,考虑应用无缆触探探头进行数据采集、存储工作。

利用这套静力触探设备测得的锥尖阻力、侧摩擦力数据,进而可推算区域海床土体性质、土体分层、推算土的物理力学参数、土体地基承载力等,结合钻孔分析数据,可为海上工程设施的勘查工作提供有力保障。同时也希望能对我们国内自己静力触探设备的研制提供参考,促进我们国内静力触探技术的不断发展。

参考文献:

- [1] SEIFERT A, STEGMANN S, RZ T M, et al. In situ pore-pressure evolution during dynamic CPT measurements in soft sediments of the western Baltic Sea[J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(4): 213-227.
- [2] WHEATCROFT R A, STEVENS A W, JOHNSON R V. In situ time-series measurements of subseafloor sediment properties[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2007, 32(4): 862-871.
- [3] 刘晓磊,贾永刚,郑杰文,等.一种新型静力触探系统在滩浅海工程地质勘查中的应用[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(增): 439-444.
- [4] LUNNE T. The CPT in offshore soil investigations-a historic perspective[J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2012, 7(2): 75-101.
- [5] 宋玉鹏,孙永福,李淑玲.轻型海洋静力触探系统在黄河水下三角洲的应用[J]. *海洋开发与管理*, 2012(1): 61-66.
- [6] 陈奇,徐行,石要红,等.国内外海底静力触探的技术研究与进展[J]. *南海地质研究*, 2009: 78-89.
- [7] 李世民.浅海域海底静力触探测试系统机械结构研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [8] 邱道宏.滩涂静力触探履带式载体机械结构研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [9] 季念迎,刘敬喜.海底静力学参数原位测量系统设计[J]. *液压与气动*, 2011(11): 19-21.
- [10] 仲德林,刘建立.埕岛油田海区海底地形变化及预防措施[J]. *海岸工程*, 2001, 20(3): 14-18.
- [11] 赵文哲.埕岛海区浅表层地质特点分析[J]. *海岸工程*, 2005, 24(4): 27-34.
- [12] 邹积山,梁瑞才,张卫明,等.胜利油田海岸的蚀退与防治[J]. *海岸工程*, 2004, 23(3): 1-6.
- [13] VANNESTE M, SULTAN N, GARZIGLIA S, et al. Seafloor instabilities and sediment deformation processes: The need for integrated, multi-disciplinary investigations[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 183-214.
- [14] 周瑜,晏鄂川,李辉,等.基于静力触探曲线的土体量化分层方法[J]. *工程勘察*, 2011(3): 24-26.
- [15] 程建军,郭桂仁.静力触探在管道勘察中的划分土层应用实践[J]. *西部探矿工程*, 2005(6): 18-19.
- [16] 张珂,贾永刚,刘正银,等.黄河三角洲地区地基承载力的确定[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2): 420-422.
- [17] 单红仙,陈勇,刘正银,等.现代黄河三角洲粉质类土承载力确定[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006,

25(增 2):4089-4096.

[18] 贾永刚,单红仙,杨秀娟,等. 黄河口沉积物动力学与地质灾害[M]. 北京:科学出版社,2011.

Development and Application of New Offshore CPT Equipment

JI Fu-dong¹, JIA Yong-gang^{1,2}, LIU Xiao-lei¹, GUO Lei¹,
ZHANG Min-sheng¹, SHAN Hong-xian^{1,2}

(1. *Environmental Geotechnical Engineering Institute, Ocean University of China*,
Qingdao 266100, China; 2. *Key Laboratory of Marine Environment & Ecology*,
Ministry of Education, Qingdao 266003, China)

Abstract: Offshore cone penetration test (CPT) is a method for in-situ measurement of seabed soils, which is simple in operation, cost effective and reliable in measured data. The offshore CPT equipment developed independently in China is rarely able to be widely applied in the practical engineering explorations. Herein, a new offshore CPT equipment is introduced. This type of equipment consists of penetration system, hydraulic system, deck control system and buoyancy system, and can make exploration continuously in navigation in the beach and shallow areas with complex topography. This set of equipment has been applied for a geological survey in the Yellow River delta area, by which the structures of subbottom sediments are divided and discussed, indicating that the equipment has wide potential applications in the field of engineering geologic exploration in the beach and shallow sea areas.

Key words: CPT; in-situ test; engineering exploration