

DOI: 10.11779/CJGE2017S2035

# 基于 CPTU 的三亚新机场海洋软土工程特性评价

彭 鹏<sup>1, 2</sup>, 蔡国军<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>\*1, 2</sup>, 祝刘文<sup>3</sup>, 赵 健<sup>4</sup>, 夏 涵<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;

3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510275; 4. 上海辉固岩土工程技术有限公司, 上海 200135)

**摘要:** 三亚新机场项目为中国海南省计划, 拟于三亚市红塘湾建成的一座总面积达 28 平方公里的大型海上机场项目。项目的建设对于海南省发挥作为“海上丝绸之路”战略支点的重大作用, 推动海南省经济高速发展具有重要意义。项目填海造岛工程的现场勘测采用海洋 CPTU 技术。CPTU 技术作为国内外普遍使用的原位测试手段, 能够有效评价土体的工程特性, 但其在国内海洋工程方面仍缺乏使用经验。本文利用自主研发的 CPTU 设备, 对三亚新机场填海造岛工程进行海上 CPTU 试验。结合该地区相关现场勘察及室内土工试验数据对实验结果进行分析, 认为 CPTU 技术作为一种较为成熟的海洋原位测试技术, 能够较好地应用于海洋工程实践, 且具有很好的指导意义。

**关键词:** 孔压静力触探; 海洋软土; 工程特性; 填海造岛

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0140-05

作者简介: 彭 鹏(1993 - ), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋岩土原位测试技术研究。E-mail: ocptpeng@163.com。

## Evaluation of soft soil engineering characteristics of Sanya New Airport from CPTU data

PENG Peng<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-jun<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, ZHU Liu-wen<sup>3</sup>, ZHAO Jian<sup>4</sup>, XIA Han<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China; 3. Fourth Harbor Engineering Investigation and Design Institute, Co., Ltd., China Communications Construction Company, Guangzhou 510275, China; 4. Shanghai Huigu Geotechnical Company Ltd, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** The new airport project in Sanya planned by government of Hainan Province of China, is located at Hongtangwan of Sanya City, that is, to build an offshore airport with an area of a 28 square kilometers. The construction of this project makes great contribution to the economic development of Hainan Province, which plays an important role as a strategic fulcrum of the Maritime Silk Road. The site investigation of the land reclamation is based on the CPTU tests, which are widely used in the evaluation of characteristics of soils, but there is no related experience of offshore projects using the CPTU tests. An offshore CPTU test is carried out in the land reclamation of Sanya New Airport using the CPTU system developed by Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University. The test results are analyzed and compared with the field data and laboratory tests. It is shown that the CPTU tests, as relatively mature in-situ tests, are applied to offshore engineering practice.

**Key words:** cone penetration test; ocean soft soil; engineering characteristic; land reclamation

## 0 引言

随着中国经济近几年的高速发展, 以及“海上丝绸之路”政策的提出, 海南省得到了经济建设上的长足发展并逐渐成为中国东南沿海重要的商业枢纽。于此同时, 海南省在其极为丰富的自然旅游资源基础上, 发展出了发达的旅游经济。新机场的建成, 对于发挥三亚地区经济优势, 带动周边地区发展, 有着非常重要的战略意义。

本文介绍了海洋 CPTU 技术, 总结了目前海洋 CPTU 技术的贯入机理研究。在位于三亚红塘湾的新

机场项目相关地区, 利用东南大学自主研发的 CPTU 探头和上海辉固公司的测试系统进行了海上 CPTU 试验。通过海上 CPTU 测试的数据, 结合场地相关的现场勘察及室内土工测试结果分析讨论, 评价了海洋 CPTU 技术在中国海洋工程中的应用。本次海上 CPTU 试验的进行, 能够进一步丰富国内海洋工程的经验,

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0800201); 国家自然科学基金项目(41672294); 江苏省杰出青年基金项目(BK20140027)

收稿日期: 2017-08-02

\*通讯作者(E-mail: liusy@seu.edu.cn)

推进了中国海洋静力触探技术的发展。

## 1 海洋 CPTU 技术

### 1.1 技术简介

海洋 CPTU 技术是一种现代原位测试方法, 试验于海上把一定规格的圆锥形探头借助机械匀速压入土中, 并测定锥尖阻力  $q_c$ 、侧壁摩阻力  $f_s$ 、孔隙水压力  $u_2$  等参数。测试能够得到沿深度方向连续的测量结果, 具有扰动小、快速简便、准确可靠、高效率、多功能等特点<sup>[1]</sup>。海洋 CPTU 测试结果可应用于划分土层, 进行土类判别, 且可用于估算土的不排水抗剪强度、超固结比、灵敏度、压缩模量、不排水杨氏模量、固结系数、渗透系数等力学、变形特性<sup>[3]</sup>。

### 1.2 试验装置

本次海上 CPTU 试验采用海床式静力触探系统, 应用辉固的 Seacalf 海床式贯入设备, 以及东南大学自主研发的多功能 CPTU 测试探头进行, 如图 1 所示。



图 1 孔压静力触探探头

Fig.1 Piezocene penetration probe

## 2 场地工程地质概况

三亚新机场项目位于三亚市以西红塘湾地区, 东靠天涯海角风景区, 西邻南山风景旅游区交通便利。场地的海底标高约为-15~-25 m, 主要沉积淤泥类土、黏性土、砂类土及混合类土。测试区域水下地区平缓, 由北向南倾斜。

勘察地区地层主要为海陆交互沉积地层。上部为第四系全新统地层, 含淤泥, 淤泥质土, 松散—稍密的细沙, 粗砂及混合土层; 下部为第四系中更新统北海组土层及下更新统湛江土层的黏土—粉质黏土, 中密、密实、极密实的粉细砂, 中砂, 粗砂, 砂砾层。

CPTU 测试试验在填海造岛工程的陆域形成区与护岸区分别设置多个测试孔位, 每个孔位都对应有至少一个钻孔的对比孔。

## 3 基于 CPTU 的场地土层划分

CPTU 测试侧壁摩阻力  $f_s$  精确度较低, 导致土层分类大多依赖锥尖阻力及孔隙水压力测试结果。研究

发现: 综合利用 CPTU 的实测锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力三个指标能够更为有效地进行土层划分。国际上综合对 CPTU 测试的土分类方法主要基于摩阻比  $R_f$ 、净锥尖阻力  $q_t$  和孔压参数比  $B_q$ , 其定义为

$$R_f = f_s / q_t \quad , \quad (1)$$

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad , \quad (2)$$

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{v0}) \quad , \quad (3)$$

式中,  $q_c$  为实测锥尖阻力,  $u_2$  为锥肩处实测孔隙水压力,  $a$  为有效面积比,  $u_0$  为静水压力,  $\sigma_{v0}$  为总上覆土应力。

Robertson 等<sup>[4]</sup>于净锥尖阻力与摩阻比、孔压参数比, 忽略上覆土应力影响提出了一种较为简便准确的土分类方法如图 2(a)、(b) 所示。现在国际上使用的 CPTU 测试土层划分主要依靠 Robertson 和 Campanella 的土分类图, 经过大量的实际检验其具有较高的准确率。

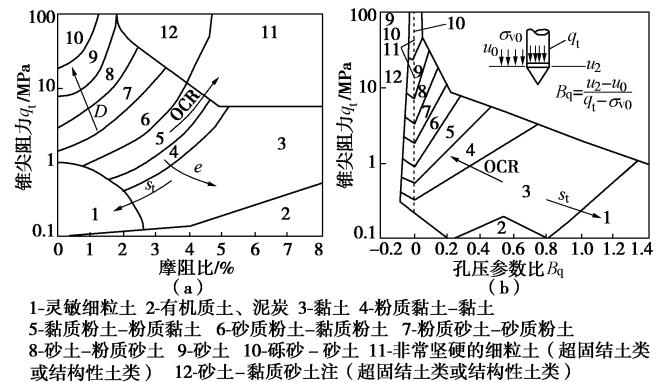


图 2 基于 CPTU 的土分类图<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Soil classification map based on CPTU tests

本次三亚新机场项目 CPTU 测试的土层划分采用 Robertson 和 Campanella 土分类方法。典型的测试数据及场地划分结果如图 3 所示。其中图 3(a)、(b) 分别为场地陆域形成区及护岸区域的场地划分图。

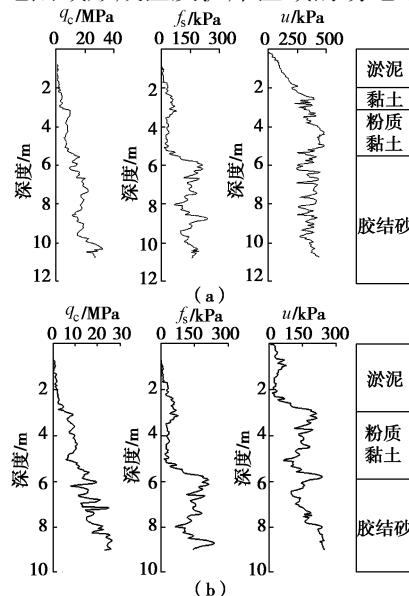


图 3 基于海上 CPTU 的场地土层划层图

Fig. 3 Schematic of soil classification by offshore CPTU tests

本文对比多处孔位的海上 CPTU 测试土层划分结果与钻探得到的勘察结论如表 1 所示,发现测试结论较为一致,具有较高的准确度。结论认为海上 CPTU 测试适用于海南三亚地区海上工程项目场地的土层划分,能够为土层划分提供可靠的参照依据。

## 4 基于 CPTU 的软土工程特性评价

CPTU 测试数据可用于对软土的多种物理力学指标进行评价,其中包括状态特性指标、强度指标以及变形指标等。本文解译分析三亚新机场项目海上 CPTU 测试数据,并与其他现场勘察及室内试验数据进行了对比。

### 4.1 状态特性指标评价

#### (1) 天然重度 $\gamma$

Larsson 等<sup>[5]</sup>分析瑞典、挪威与英国黏土场地的 CPTU 测试数据,提出基于净锥尖阻力  $q_{\text{net}}$  和孔压参数比  $B_q$  估算黏土重度的方法,如图 4 所示。由于  $(q_t - \sigma_{v0})$  和  $B_q$  的计算需要土的重度  $\gamma$ 。

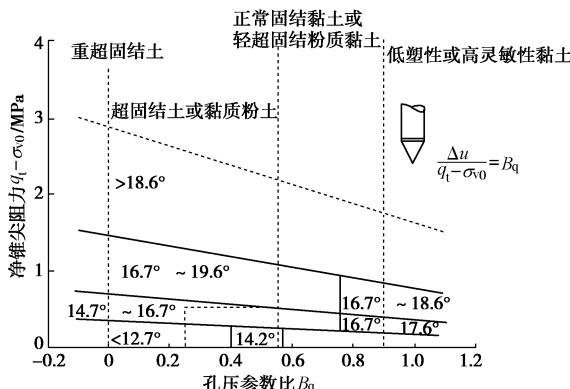


图 4 基于 CPTU 的土天然重度估算

Fig. 4 Estimation of natural density by CPTU tests

基于本次海洋 CPTU 测试结果,粗略估计土层重度与室内试验的土重度结果如下表 1 所示。

表 1 天然重度评价结果

Table 1 Evaluation of natural density

区域	地层	天然重度 $\gamma_{\text{CPTU}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然重度 $\gamma_{\text{lab}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	误差 /%
陆域形成区	淤泥	17.89	19.23	6.9
	黏土	18.81	19.49	3.5
	粉质黏土	19.87	19.94	0.4
	胶结砂	20.13	—	—
护岸区	淤泥	17.96	18.58	3.3
	粉质黏土	18.92	19.89	4.8
	胶结砂	20.15	—	—

结果表明,国外基于 CPTU 经验的天然重度评价方法应用于国内实际情况时,仍存在一定的误差,不

能完全适用,应根据实际情况进行修正。

#### (2) 超固结比 OCR

黏土的超固结比 OCR 定义为历史上土层受到的最大有效固结应力与当前有效应力之比:

$$\text{OCR} = \sigma_p / \sigma'_{v0} \quad (4)$$

基于 CPTU 的 OCR(或先期固结压力  $\sigma'_p$ )预测方法主要为经验方法。Lunne<sup>[6]</sup>等对已有研究成果进行了分析和总结,指出当缺乏经验时建议采用下式进行土层 OCR 的估算公式:

$$\text{OCR} = k \cdot (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} = k \cdot Q_t, \quad (5)$$

该经验公式参数  $k$  的取值由钻孔取样的室内试验所得  $\sigma'_p$  与 CPTU 试验所得  $(q_t - \sigma_{v0})$  所确定,如图 5 所示。

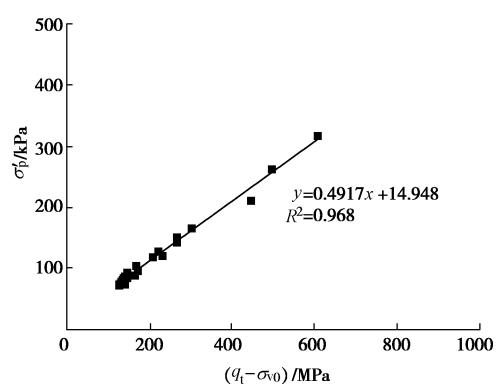


图 5 参数  $k$  的确定

Fig. 5 Determination of values of  $k$

此次海上 CPTU 测试总结的对于三亚地区海底软土 OCR 预测经验公式参数  $k$  的取值约为 0.49 左右,可以作为相关测试的参考。但由于测试样本数量有限,有关三亚地区基于 CPTU 的 OCR 评价的进一步精确仍需要更多的测试结果进行验证与修正。

### 4.2 强度指标评价

#### (1) 不排水抗剪强度 $S_u$

CPTU 测试技术控制贯入速率为 2 cm/s,可认为测试贯入过程对于黏性土产生不排水剪切破坏,因此可以建立 CPTU 测试参数与黏性土不排水抗剪强度  $S_u$  之间的关系式。Lunne 等<sup>[7]</sup>总结多种试验及理论方法对 CPTU 测试贯入机理的研究结果提出根据修正后贯入阻力预测不排水抗剪强度:

$$q_t = N_{kt} \cdot S_u + \sigma_{v0}, \quad (6)$$

式中,  $N_{kt}$  为经验圆锥系数,取值范围为 15~20。

本文根据本次 CPTU 测试参数与室内土工试验反算,取得经验圆锥系数  $N_{kt}=17$ 。并对试验场地黏性土层的不排水抗剪强度平均值做出了评价,如表 2 所示。

基于 CPTU 测试的黏性土层不排水抗剪强度评价结果与室内试验比较发现,其对于淤泥的不排水抗剪强度预测结果偏大,而对于黏土与粉质黏土的预测结

果较为准确。分析认为可能是由于淤泥的强度较低, CPTU 探头灵敏度相对下降使得于淤泥中的测试结果与实验室结果相差较大。

表 2 不排水抗剪强度评价结果

Table 2 Evaluation of undrained shear strength

区域	地层	$s_u\text{-CPTU}/\text{kPa}$	$s_{u\text{-lib}}/\text{kPa}$
陆域形成区	淤泥	18.7	12.1
	黏土	26.1	20.0
	粉质黏土	46.4	42.8
	胶结砂	—	—
护岸区	淤泥	19.2	14.2
	粉质黏土	42.5	41.9
	胶结砂	—	—

### (2) 灵敏度 $S_t$

灵敏度  $S_t$  为原状土不排水抗剪强度与完全重塑土不排水抗剪强度的比值, 能够反映黏性土的结构性特征。Lunne 等<sup>[7]</sup>的研究表明, 侧壁摩阻力  $f_s$  与黏性土重塑状态下不排水抗剪强度有关。Schmertmann 等<sup>[8]</sup>提出基于 CPTU 的灵敏度预测公式如下:

$$S_t = N_s / R_f \quad (7)$$

式中,  $N_s$  为经验系数,  $R_f$  为摩阻比。

Xiao 等<sup>[9]</sup>提出  $N_s$  在 5~10 之间, 并取其平均值 7.5<sup>[9]</sup>。本文取  $N_s=7.5$ , 对淤泥层的灵敏度进行预测, 并与室内土工测试结果进行比较, 结果如表 3 所示。

表 3 灵敏度评价结果

Table 3 Evaluation of sensitivity

区域	地层	$S_{t\text{-CPTU}}/\text{kPa}$	$S_{t\text{-lib}}/\text{kPa}$
陆域形成区	淤泥	1.52	1.70
	黏土	2.17	2.30
	粉质黏土	—	—
	胶结砂	—	—
护岸区	淤泥	2.08	2.00
	粉质黏土	—	—
	胶结砂	—	—

### 4.3 变形指标评价

土的变形特性主要包括压缩模量  $E_s$ 、不排水杨氏模量  $E_u$  以及小应变剪切模量  $G_0$  等。CPTU 测试对黏性土的压缩模量预测采用 Kulhawy 等<sup>[10]</sup>提出的经验公式

$$E_s = 8.25(q_t - \sigma_{v0}) \quad (8)$$

测试结果如表 4 所示。

表 4 压缩模量评价结果

Table 4 Evaluation of compression modulus

区域	地层	$E_{s\text{-CPTU}}/\text{MPa}$	$E_{s\text{-lib}}/\text{MPa}$
陆域形成区	淤泥	15.84	7.45
	黏土	18.36	16.72
	粉质黏土	25.72	28.98
	胶结砂	—	—
护岸区	淤泥	16.43	7.62
	粉质黏土	27.68	32.40
	胶结砂	—	—

对比分析 CPTU 测试与室内土工试验结果, CPTU 预测淤泥压缩模量与室内试验结果有较大差距, 对黏土与粉质黏土的压缩模量预测结果较为准确。

## 5 结 论

本文介绍了海洋孔压静力触探技术的发展现状和机理, 通过对比三亚新机场项目海洋 CPTU 测试数据及室内土工试验数据, 分析论证了海洋 CPTU 测试在海南三亚地区勘察应用的可靠性, 得出如下 3 点结论。

(1) 海洋静力触探是一种较为成熟的海洋原位测试技术, 通过锥尖阻力、侧壁摩阻力及孔隙水压力的测定, 能够进行土层划分并对海洋软土的多项物理力学以及变形指标进行评价, 对工程实践仍具有良好的指导意义。

(2) 海洋静力触探机理仍有待完善, 目前对于软土工程特性的评价, 大多是基于经验关系, 存在较大的地域局限性。实际工程应用时, CPTU 测试数据能够作为估算依据, 通过当地的试验数据对关系式修正后, 能够进一步良好地评定土体各项工程特性。

(3) 三亚新机场项目的 CPTU 测试结果可以作为海南地区 CPTU 数据解译的依据, 指导海南省附近海域海洋工程项目 CPTU 测试及软土工程特性评价。

## 参 考 文 献:

- [1] 沈小克, 蔡正银, 蔡国军. 原位测试技术与工程勘察应用[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 98~120. (SHEN Xiao-ke, CAI Zheng-yin, CAI Guo-jun. Applications of in-situ tests in site characterization and evaluation[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 98~120. (in Chinese))
- [2] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blakie Academic & Professional, 1997.
- [3] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan. The theory and engineering application of modern multi function CPTU[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [4] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, GILLESPIE D, et al. Use of piezometer cone data[C]// Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ'86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, 1986: 1263~1280.
- [5] LARSSON R, MULABDIC M. Piezocon Tests in clay[R]. Linkoping: Swedish Geotechnical Institute, 1991.
- [6] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone

- penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1997.
- [7] KULHAWY F H, MAYNE P H. Manual on estimating soil properties for foundation design[M]. EPRI, Electric Power Research Institute, 1990.
- [8] SCHMERTMANN J H. Guidelines for cone penetration test, performance and design[R]. Washington DC: US Federal Highway Administation, 1978.
- [9] 邹海峰. 多功能 CPTU 工程应用软件开发研究[D]. 南京: 东南大学, 2013. (ZOU Hai-feng. Research on software programming of multifunctional piezocone penetration test (CPTU) for engineering application[D]. Nanjing: South-east University, 2013. (in Chinese))
- [10] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design[J]. Epri palo Alto report. el, 1990.

(本文责编 孙振远)