

# 孔压静力触探试验在菲律宾 某填海项目中的应用

杜宇<sup>1,2</sup>, 闻博<sup>1</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510220; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 孔压静力触探试验作为一种快速、准确的原位测试手段在国内海洋工程领域得到了广泛的应用。本文基于海床式静力触探设备在菲律宾某填海项目的成果, 对比分析了 ROBERTSON (1990) 分类图、刘松玉等 (2013) 分类图和《水运工程静力触探技术规程》(JTS/T 242—2020) 分类图对于菲律宾填海项目的适用性, 总结出第 3 种分类图的解译结果最优。其次对比分析了基于孔压静力触探试验的 3 种不同细粒土不排水抗剪强度解译方法在菲律宾填海项目中的适用性, 总结出基于净锥尖阻力的解译方法结果最优。并基于该方法绘制了细粒土不排水抗剪强度剖面, 值得在其它填海项目中进一步推广应用。

**关键词:** 孔压静力触探试验; 海床式静力触探设备; 土层分类; 不排水抗剪强度; 净锥尖阻力; 有效锥尖阻力; 不排水抗剪强度剖面

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0167-07

## The application of CPTU tests to a land reclamation project in Philippines

DU Yu<sup>1,2</sup>, WEN Bo<sup>1</sup>

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510220, Guangdong, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** Piezocone penetration test (CPTU) is a rapid and accurate in-situ testing method, and it has been widely adopted in domestic and oversea marine engineering project. The seabed CPTU system has been successfully adopted in a land reclamation project in Philippines. Three different CPTU-based soil classification charts proposed by ROBERTSON's (1990), LIU Song-yu et al (2013), and Technical Specification for Cone Penetration Testing in Port and Waterway Engineering (JTS/T 242—2020) were selected for performance evaluation. It can be summarized that the third classification chart leads to the closest soil classification to the adjacent borehole data. Secondly, the applicability of three different interpretation methods of undrained shear strength of fine-grained soil based on CPTU test in the reclamation project was compared and analyzed. It is concluded that the interpretation method based on the net cone tip resistance is the best. Based on this method, the undrained shear strength profile of fine-grained soil was drawn, which is worthy of further promotion and application in other reclamation projects.

**Key words:** piezocone penetration test (CPTU); seabed CPTU system; soil classification; undrained shearing strength; net cone tip resistance; effective cone tip resistance; undrained shearing strength profile

## 0 引言

近十几年来, 随着“一带一路”的不断推进, 我国参与建设的海外项目越来越多。在工程建设中经常出现设计参数不可靠或不稳定、施工过程中不

断变更设计的问题, 往往造成巨大经济损失或工程安全问题, 影响正常营运。产生这些问题的主要原因是岩土参数的确定与设计方法和实际不符合。由于岩土工程参数与复杂多变的自然条件密切联系, 确定岩土工程参数与合理设计往往成为工程建设

的难点，也是保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高工程经济效益和社会效益的关键技术。目前岩土工程参数的获取，一般通过室内试验和原位测试技术。钻孔取样、室内试验会造成土样扰动，试验结果难以反映地基岩土的真实状况，原位测试技术是在天然位置对岩土工程性能进行测试的一种技术，是准确获得土体参数的有效方法。孔压静力触探试验（Piezocone Penetration Test, CPTU）作为国际上最常用的原位测试技术，具有快速便捷、不需取样、采集数据量大、干扰小及费用低廉的优点，特别适用于水运工程的线形分布，范围宽广的大型工程。

### 1 水运工程静力触探设备现状

目前针对水运工程的静力触探测试方式主要

分为海床式、固定式、井下式和浮动式，每个方式的场地适用条件见表 1<sup>[1]</sup>。

在表 1 的 4 种不同测试方式中，海床式因其可以在贯入过程中连续添加探杆，可以实现真正意义上的不间断贯入，所以其数据质量最高<sup>[2]</sup>。海床式设备的作业原理是首先将贯入主机放置于海床面上，通过自重提供反力，最大反力可达 20 t，随后通过挤压轮传动、链式传动或液压缸式传动实现连续贯入<sup>[1]</sup>，如图 1 所示。

测试过程中探头的测试数据通过数据线传输到贯入主机上的数据采集系统，然后通过母线电缆传输到甲板上的母线电缆绞盘，并最终反映在控制系统的电脑屏幕上。操作者通过探头的实时测试数据，包括锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力和探头倾角判断贯入土层的特性，并在特殊情况下及时停止试验。

表 1 水运工程静力触探测试方式与场地适应条件一览表<sup>[1]</sup>

Table 1 List of CPTU testing methods and site adaptation conditions for water transportation projects

测试方式	载体	适用水深/m	贯入能力与方式
海床式	大型驳船	3~300	一次性连续贯入，无法穿透厚层密实砂层
固定式	自升式平台	0~30	可多次贯入，可配合钻机引孔
井下式	大型驳船	3~300	可多次贯入，可配合钻机引孔
浮动式	大型驳船	0~30	可多次贯入，可配合钻机引孔

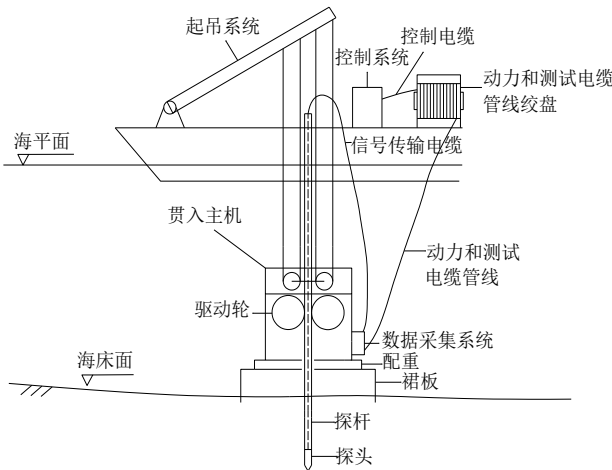


图 1 海床式静力触探设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seabed CPTU system

风化层。为了对填海范围外侧护岸进行稳定性分析，在护岸轴线开展了间距为 50 m 的孔压静力触探测试工作，布孔图如图 2 所示。

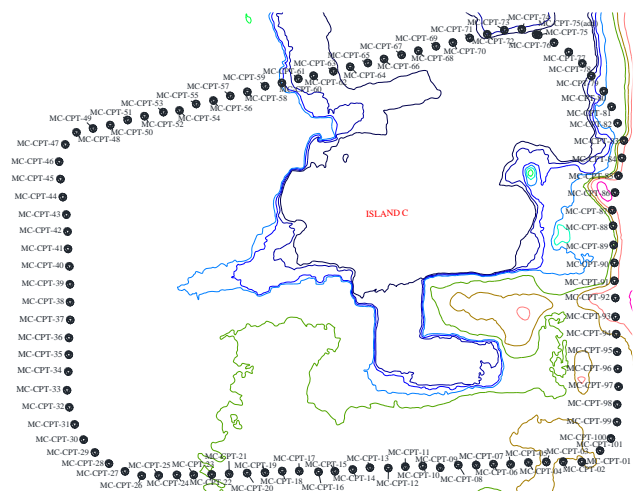


图 2 CPTU 布孔图

Fig. 2 Layout of CPTU tests

### 2 工程概况

菲律宾某填海项目水深范围在 5~25 m 之间，据钻孔的揭示情况，地层从上到下依次概括为：①层海相软弱土层；②层海陆交互相地层；③层基岩

现场采用 A.P.Vandenberg 公司生产的 Roson 海床式静力触探设备开展孔压静力触探测试工作。设备测试照片如图 3 所示。



图 3 Roson 海床式孔压静力触探设备图  
Fig. 3 Roson seabed CPTU system

通过对护岸断面的稳定性分析,②层海陆交互相地层是关键地层。根据稳定性分析结果,对于不排水强度小于 100 kPa 的黏性土需要进行疏浚换填处理。因此将②层进一步细分为②<sub>1</sub>黏性土层(不排水抗剪强度≤100 kPa),②<sub>2</sub>黏性土层(不排水抗剪强度>100 kPa)和②<sub>3</sub>层中密-密实砂层。

对完成的 CPTU 数据进行解译分析,首先通过与邻近钻孔的室内土工试验结果进行对比分析,确定适用于本工程的土分类方法。然后对比分析基于 CPTU 的黏性土不排水抗剪强度解译方法,确定适用于本工程的解译公式。

### 3 土层分类对比分析

国内外已有许多针对 CPTU 的土分类方法研究,部分以贯入阻力为主要指标进行土类判别,部分则以贯入阻力结合孔隙水压力进行判别,各有其优势。

目前国际上比较通用的是 ROBERTSON<sup>[3]</sup>于 1990 年提出的土分类图,通过归一化锥尖阻力  $Q_m$ 、归一化摩阻比  $F_r$  和孔压参数比  $B_q$  这 3 个参数划分土类。

国内刘松玉等<sup>[4]</sup>以江苏省典型地质成因的 95 孔 CPTU 与室内钻孔取样试验数据为基础,建立了我国基于 CPTU 的实用土分类方法。《水运工程静力触探技术规程》(JTS/T 242—2020)<sup>[1]</sup>提出了适用于水运工程的基于 CPTU 土体分类图。

因为测试样本来源不同,上述分类图针对不同地区的分类效果也存在差别。本文对上述 3 种方法对菲律宾项目的适用性进行对比分析。分析样本为 10 个钻孔资料和与钻孔相距 5 m 以内的 10 组 CPTU 测试数据。对比结果见图 4~6 和表 2,表 2 中  $S_u$  为不排水抗剪强度。

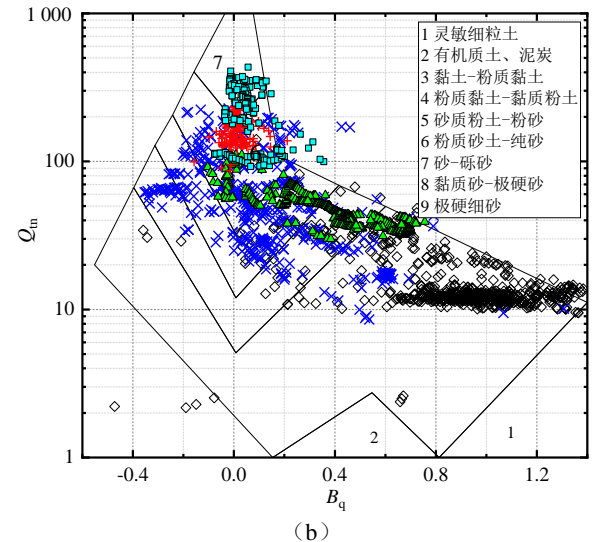
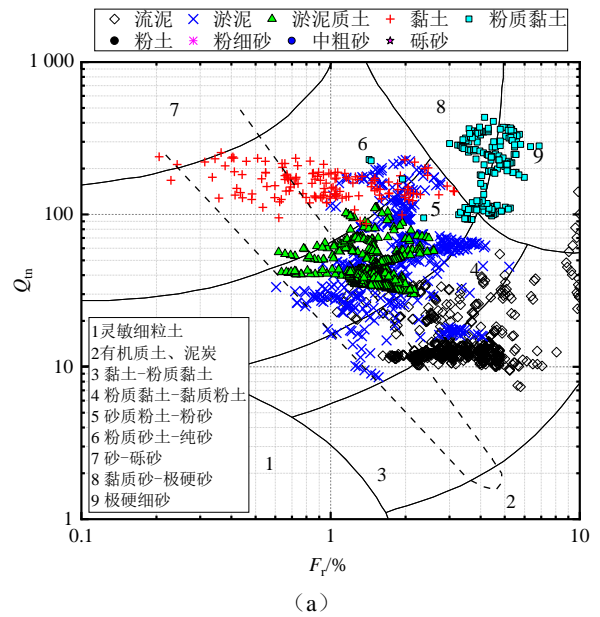


图 4 ROBERTSON<sup>[3]</sup> 分类图对比结果

Fig. 4 Comparison results of ROBERTSON<sup>[3]</sup> classification map

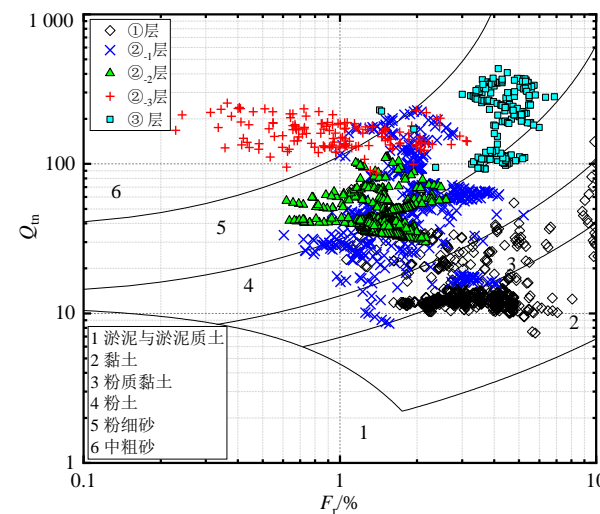


图 5 刘松玉等<sup>[4]</sup> 分类图对比结果

Fig. 5 Comparison results of LIU Song-yu et al<sup>[4]</sup> classification map

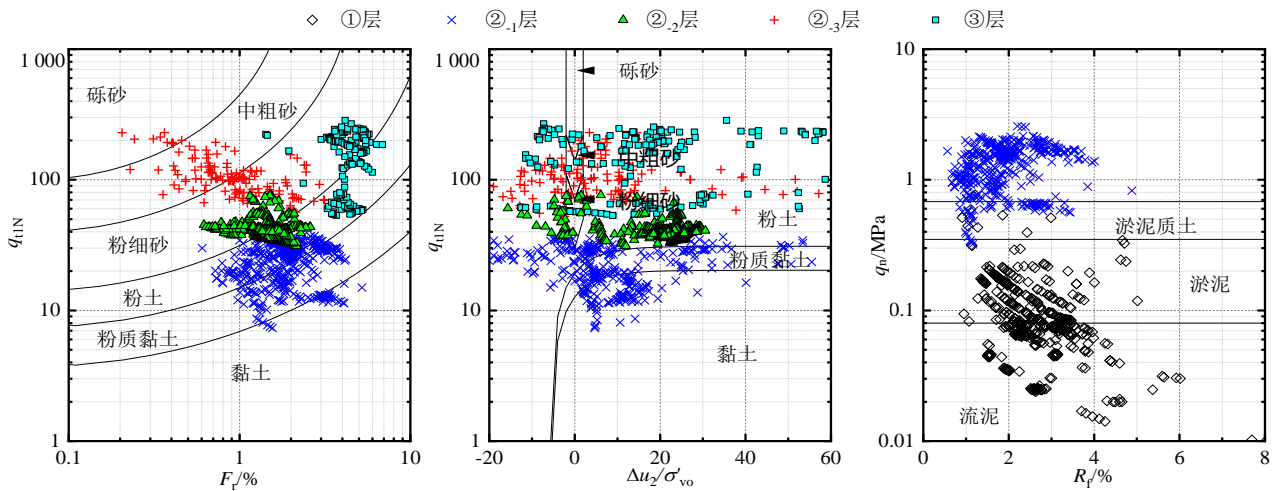


图6 水运工程 CPTU 分类图对比结果

Fig. 6 Comparison results of Technical Specification for Cone Penetration Testing in Port and Waterway Engineering CPTU classification map

表2 钻孔地层与不同 CPTU 分类图分类结果对比表

Table 2 Comparative table of different CPTU-based classification charts with adjacent borehole data

钻孔地层	ROBERTSON <sup>[3]</sup> 分类图				刘松玉等 <sup>[4]</sup>		水运工程 <sup>[1]</sup> 分类图			
	$Q_{tn}-F_R$		$Q_{tn}-B_q$		分类图		$Q_{tn}^*-F_R$		$Q_{tn}^*-B_q$	
	编号及名称	比例	编号及名称	比例	编号及名称	比例	编号及名称	比例	编号及名称	比例
①层淤泥-淤泥质土层	3 黏土-粉质黏土	67%	3 黏土-粉质黏土	84%	2 黏土	55%	1 流泥	50%	1 流泥	50%
	4 粉质黏土-黏质粉土	28%	4 粉质黏土-黏质粉土	5%	3 粉质黏土	36%	2 淤泥	48%	2 淤泥	48%
②<sub>1</sub>黏性土层 ( $S_u \leq 100$ kPa)	4 粉质黏土-黏质粉土	19%	5 砂质粉土-粉砂	33%	4 粉土	44%	5 粉质黏土	27%	5 粉质黏土	24%
	5 砂质粉土-粉砂	71%	6 粉质砂土-纯砂	34%	5 粉细砂	42%	6 粉土	58%	6 粉土	51%
②<sub>2</sub>黏性土层 ( $S_u > 100$ kPa)	5 砂质粉土-粉砂	97%	3 黏土-粉质黏土	40%	4 粉土	51%	6 粉土	65%	6 粉土	99%
	6 粉质砂土-纯砂	3%	4 粉质黏土-黏质粉土	39%	5 粉细砂	49%	7 粉细砂	35%	7 粉细砂	1%
②<sub>3</sub>砂层	5 砂质粉土-粉砂	13%	6 粉质砂土-纯砂	79%	5 粉细砂	28%	7 粉细砂	55%	6 粉土	87%
	6 粉质砂土-纯砂	84%	7 砂-砾砂	19%	6 中粗砂	72%	8 中粗砂	35%	8 中粗砂	6%
③砂岩风化层	8 黏质砂-极硬砂	43%	6 粉质砂土-纯砂	37%	4 粉土	15%	6 粉土	38%	6 粉土	94%
	9 极硬细砂	47%	7 砂-砾砂	53%	5 粉细砂	84%	7 粉细砂	61%	7 粉细砂	2%

备注：\*比例为与钻孔分层位置对应的 CPTU 数据在土分类图上结果的占比。

根据表 2 的对比结果，3 种不同 CPTU 分类图对菲律宾项目均具有比较好的适用性。从分类的效果上看，水运工程的 CPTU 分类图对①层、②<sub>1</sub>层、②<sub>2</sub>层、②<sub>3</sub>层和③层的区分效果最好，5 种地层在水运工程 CPTU 分类图上的分布更有规律。但土体分类图仅能对粗粒地层（②<sub>3</sub>砂层、③砂岩风化层）、细粒土层（②<sub>1</sub>黏性土层（ $S_u \leq 100$  kPa）和②<sub>2</sub>黏性土层（ $S_u > 100$  kPa））和软土层（①层淤泥-淤泥质

土层）进行精确划分，②<sub>1</sub>层和②<sub>2</sub>层还需要通过不排水抗剪强度进行进一步细分。

#### 4 不排水抗剪强度对比分析

土的不排水抗剪强度并非固有值，而是取决于所采用的试验方法，包括剪切模式、边界条件、剪切速率、围压水平、初始应力状态和其他因素等<sup>[5]</sup>。

常用的剪切试验包括三轴试验、无侧限抗压强度试验和十字板剪切试验等几大类。

基于 CPTU 解译黏性土不排水抗剪强度一般分以下 3 种方法:

(1) 方法一: LUNNE 等<sup>[2]</sup> 提出所有贯入机理研究方法均具有统一的形式, 按式 (1) 可以计算黏性土的不排水抗剪强度。

$$S_u=(q_t-\sigma_{v0})/N_{kt} \quad (1)$$

式中:  $S_u$  为不排水抗剪强度;  $q_t$  为经孔压修正后的锥尖阻力;  $\sigma_{v0}$  为上覆总应力;  $N_{kt}$  为无量纲经验系数。

(2) 方法二: SENNESET 等<sup>[6]</sup> 提出采用孔隙水压力  $u_2$  与修正后锥尖阻力  $q_t$  联合进行解译, 按式 (2) 进行计算。

$$S_u=(q_t-u_2)/N_{ke} \quad (2)$$

式中:  $u_2$  为锥尖处孔隙水压力;  $N_{ke}$  为无量纲经验系数。

(3) 方法三: BATTAGLIO 等<sup>[7]</sup> 提出基于孔穴扩张的理论方法和半理论-半经验方法按利用超孔压解译不排水抗剪强度。

$$S_u=(u_2-u_0)/N_{\Delta u} \quad (3)$$

式中:  $u_0$  为静水压力;  $N_{\Delta u}$  为无量纲经验系数。

基于孔隙扩张理论,  $N_{\Delta u}$  的变化范围为 2~20<sup>[2]</sup>。LUNNE 等<sup>[8]</sup> 利用超静孔压与各向异性三轴压缩试验的不排水抗剪强度进行对比分析, 得出对于挪威海相黏土的  $N_{\Delta u}$  变化范围为 4~10。蔡国军<sup>[9]</sup> 采用连云港海相黏土的多功能 CPTU 现场测试数据分析了上述 3 种方法的经验系数取值, 指出对连云港海相黏土而言,  $N_{kt}$  可取 16,  $N_{ke}$  可取 11.3,  $N_{\Delta u}$  可取 8.5, 此时所预测的不排水抗剪强度值与现场十字板测试结果符合, 其中以  $N_{kt}$  的预测符合程度最高。

菲律宾现场钻孔中进行了十字板剪切试验, 并取样进行了三轴不固结不排水压缩试验。通过与钻孔附近 CPTU 数据的对比分析, 得出了适用于菲律宾现场黏土的最优经验公式, 见图 7~9。图中橙色虚线 (系列 6) 是分布范围下限, 黑色虚线 (系列 7) 是分布范围上限。

通过对比 3 种不同解译方法发现, 解译方法一对菲律宾项目的适用性最好,  $N_{kt}=17.2$  时的相关指数  $R^2$  为 0.95; 方法二的适用性次之,  $N_{ke}=12.7$  时的相关指数  $R^2$  为 0.68; 方法三的适用性最差,  $N_{\Delta u}=5.2$  时的相关指数  $R^2$  为 0.65。

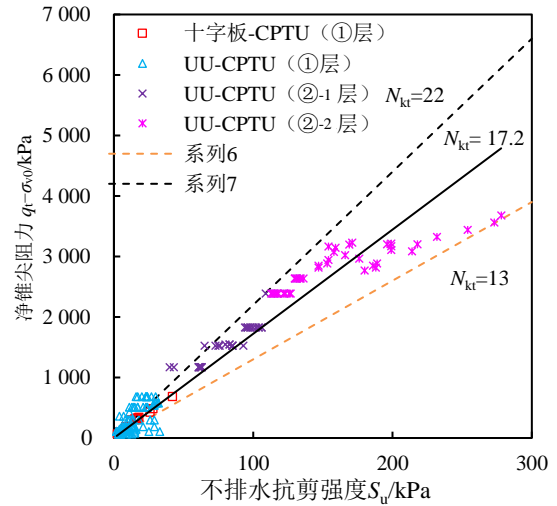


图 7 不排水抗剪强度对比图 (解译方法一)

Fig. 7 Comparison of undrained shear strength (interpretation method 1)

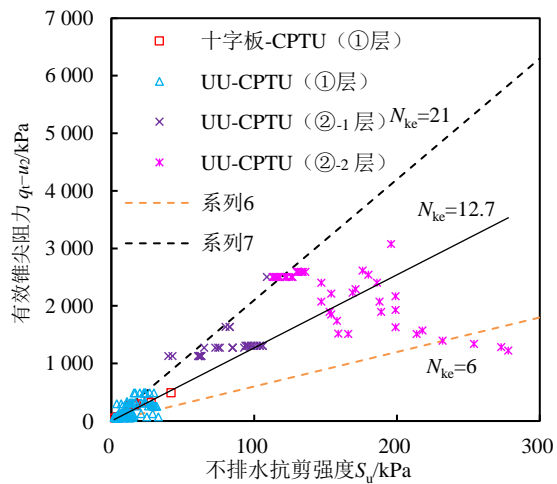


图 8 不排水抗剪强度对比图 (解译方法二)

Fig. 8 Comparison of undrained shear strength (interpretation method 2)

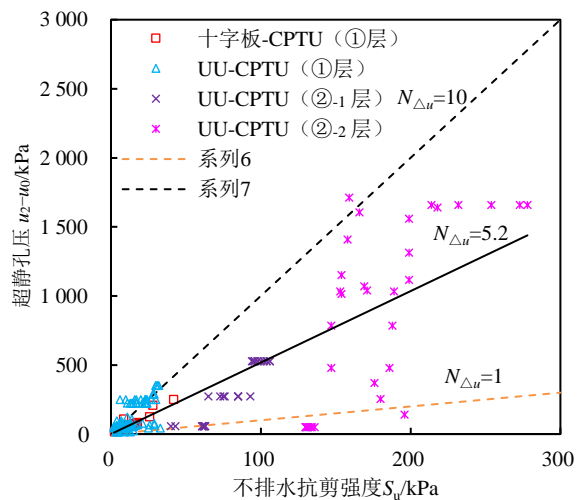


图 9 不排水抗剪强度对比图 (解译方法三)

Fig. 9 Comparison of undrained shear strength (interpretation method 3)

## 5 成果应用

根据第3节和第4节的对比分析,对所有CPTU数据按下列流程进行处理:

(1)应用水运工程CPTU分类图对所有CPTU数据进行土类划分。

(2)对于土类划分结果在①流泥-⑥粉土的CPTU数据按式(4)计算土的不排水抗剪强度:

$$S_u=(q_t-\sigma_{v0})/17.2 \quad (4)$$

(3)结合基于CPTU的不排水抗剪强度连续曲线对②<sub>1</sub>层( $S_u \leq 100$  kPa)和②<sub>2</sub>层( $S_u > 100$  kPa)进行精细化分层。

典型的基于CPTU的不排水抗剪强度曲线剖面如图10所示。

基于CPTU数据的不排水抗剪强度曲线可以连续反应出黏性土层强度随深度的变化规律,为后续②<sub>1</sub>层的疏浚提供了精细的深度控制标准。通过现场施工的反馈,基于CPTU的分层结果与现场实际疏浚情况一致。

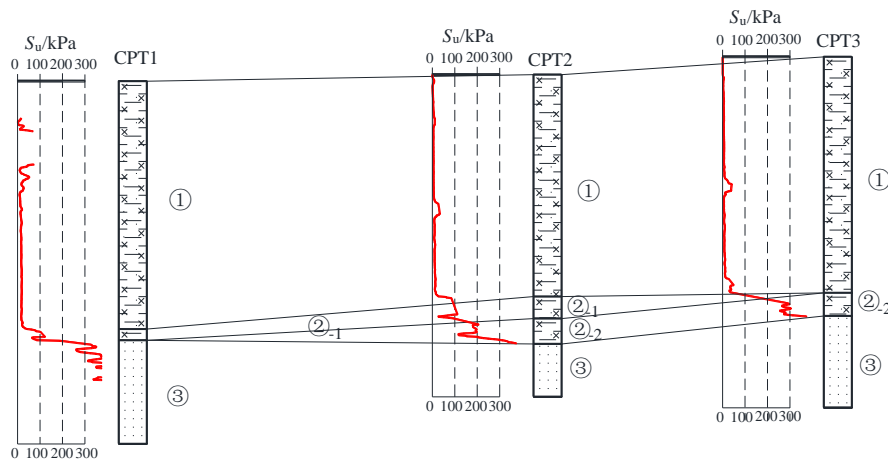


图10 典型基于CPTU的不排水抗剪强度剖面

Fig. 10 Typical undrained shearing strength profiles based on CPTU

## 6 结论

采用海床式静力触探设备Roson在菲律宾某填海项目中进行了大量孔压静力触探试验,经过与钻孔资料、土工试验等数据进行对比分析,得出以下结论:

(1)经过对比研究,水运工程CPTU分类图在菲律宾项目中的适用性最高。

(2)经过对比研究,采用 $N_{kt}=17.2$ 的基于净锥尖阻力解译的细粒土不排水抗剪强度与室内试验及十字板剪切试验的相关性最高。

通过上述结论,基于CPTU数据可以绘制沿深度方向的不排水抗剪强度曲线,进而对地层进行精细划分,为后续设计和施工提供了更为准确的现场勘察数据,值得在国内外填海项目中推广应用。

### 参考文献

[1] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程静力触探技术规范: JTS/T 242—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股

份有限公司, 2021.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specification for Cone Penetration Testing in Port and Waterway Engineering: JTS/T 242—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

[2] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice[M]. Blackie Academic & Professional, 1997.

[3] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 151-158.

[4] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于CPTU的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765-1776. LIU Song-yu, CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1765-1776.

[5] KULHAWY F H, MAYNE P H. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design[M]. New York: Electric Power Research Institute, 1990.

