

海上风电勘察中确定土体抗剪强度的实用方法

李忠信, 孙泉雄, 刘东华, 贾鈺崑, 孙伟

引用本文:

李忠信, 孙泉雄, 刘东华, 等. 海上风电勘察中确定土体抗剪强度的实用方法[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 37-42.

LI Zhongxin, SUN Xiaoxiong, LIU Donghua, et al. Practical Methods for Determining Soil Strength Parameters in Offshore Wind Power Geotechnical Investigation[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 37-42.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

珠海横琴软土工程性质与埋深相关性研究

Study on Correlation Between Soft Soil Engineering Characteristics and Burial Depth in Hengqin New Area of Zhuhai City
南方能源建设. 2018, 5(z1): 199-203 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.036>

海上风电大直径单桩自沉深度分析

Self-weight Penetration Prediction Methods for Large Diameter Monopiles in Offshore Wind Farm
南方能源建设. 2020, 7(1): 40-46 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.006>

基于CPTU的地质参数分析及其在海上风电场的应用

Analysis of Geological Parameters Based on CPTU and Its Application in Offshore Wind Farm
南方能源建设. 2018, 5(2): 37-46 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.005>

广东沿海海上风电项目工程勘测综述

Investigation Summary of Offshore Wind Farm Along Guangdong Coastline
南方能源建设. 2018, 5(z1): 194-198 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.035>

浅析海上风电施工安全管控

Brief Analysis on Safety Management and Control of Offshore Wind Farm Construction
南方能源建设. 2020, 7(1): 128-132 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.021>

海上风电勘察中确定土体抗剪强度的实用方法

李忠信¹, 孙枭雄^{2,✉}, 刘东华², 贾铤崑², 孙伟³

(1. 南方海上风电联合开发有限公司, 广东珠海 519080; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 3. 辉固勘探(深圳)有限公司, 广东深圳 518042)

摘要: [目的] 在相对缺少可靠试验数据的情况下, 为了能够更加准确、可靠地确定岩土参数, 基于国内外工程经验以及相关研究成果, 提出了基于静力触探试验(CPT)和标准贯入试验数据得到粘土不排水抗剪强度和砂土内摩擦角的实用方法。[方法] 首先介绍了根据CPT四个基本数据进行快速分层的方法, 旨在利用通用数据划分出砂土层和粘土层。然后介绍了根据CPT参数推算计算粘土不排水抗剪强度经验系数 N_{kl} 的方法。最后介绍了综合考虑CPT和标贯数据, 根据经验方法推算砂土内摩擦角的方法。[结果] 根据CPT参数估算的方法, 得到的粘土不排水抗剪强度与室内试验结果对照结果较好, 同时该方法可以得到粘土不排水抗剪强度的剖面。CPT和标贯联合方法能够相对可靠地测算砂土内摩擦角, 弥补了由于海上勘察较难取得砂土样品所带来的试验数据的缺失。[结论] 所论述的方法可以在现有的海上勘察手段较为有限、勘察资源比较紧张的情况下, 为确定岩土的强度设计值提供更多更可靠的参考依据。

关键词: 砂土内摩擦角; 海上风电; 勘察; 静力触探试验; 标准贯入试验

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)04-0037-06

开放科学(资源服务)二维码:



Practical Methods for Determining Soil Strength Parameters in Offshore Wind Power Geotechnical Investigation

LI Zhongxin¹, SUN Xiaoxiong^{2,✉}, LIU Donghua², JIA Hongwai², SUN Wei³

(1. Southern Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd., Zhuhai 519080, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

3. Fugro Offshore Survey (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518042, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In order to determine soil strength parameters more accurately and reliably, based on domestic and foreign engineering experience and research results, this paper proposes a practical method to obtain the undrained shear strength of clay and the friction angle of sand based on static cone penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT) data. [Method] Firstly, it introduced the method of rapid stratification based on the four basic data of CPT, aiming to divide the sand layer and clay layer. Then the method of calculating the empirical coefficient N_{kl} of the undrained shear strength of clay based on the CPT parameters was introduced. Finally, a method of comprehensively considering CPT and standard penetration data and calculating the internal friction angle of sand based on empirical methods was introduced. [Result] According to the method of CPT parameter estimation, the obtained clay undrained shear strength is well compared with the laboratory test results which can obtain the clay undrained shear strength profile. The combined method of CPT and SPT can measure the friction angle of sand reliably, which fills the gaps of test data due to the difficulty in obtaining sand samples from offshore exploration. [Conclusion] The method discussed in this paper can provide more reliable reference for determining the design values of soil strength considering the existing condition in which offshore survey methods are limited and the equipment resources are relatively scarce.

Key words: the friction angle of sand; offshore wind farm; site investigation; static cone penetration test; standard penetration test

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-07-13 修回日期: 2021-09-03

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电基地人工岛建设研究”(EV06371W)

随着海上风电发展加速,作为海上风电开发建设的关键工作之一,海上岩土勘察也愈显重要。海洋岩土勘察与陆地土建工程勘察有很大不同。海洋岩土勘察成本较陆地更高,需要动用专业的勘察船舶,成本极高。在海上取得的每一个不扰动样品其花费不菲。鉴于目前国内专业勘察船数量限制,大部分取得的土样扰动程度较高,砂土也极难取得原状样品。因此CPT等原位测试手段在海洋岩土勘察中得到了广泛的应用。陆地传统的标贯测试由于应用经验丰富,设备简单,也在目前的海洋岩土勘察中有着广泛的应用。

由于取得原状土样的成本极高,如何根据目前常用的CPT和标贯方法取得可靠的勘察参数有十分重要的应用价值。

1 项目背景介绍

拟建某风电工程位于广东海域珠江下游入海口内陆架内,场址规划用海面积10.43 km²,水深值介于4.3~13.2 m。岩土勘察工作包括在每个机位进行钻孔取样、标贯测试。除此外,还选择35号机位和43号机位两处,每个机位进行两个CPT测试,共完成4个CPT测试。

2 CPT快速划分地层

在实际项目实施过程中,不同生产商制造的CPT设备会记录不同的数据格式,通常需要相匹配的软件才能做进一步数据处理和数据解释,比如完成土的分类等工作。本文不再深究该如何使用CPT数据进行细致的岩土分层和分类,目前分类方法已经相当成熟,可详见ROBERSON 1990^[1]、ROBERSON 2009^[2]、ROBERSON 2010^[3]。本文着重介绍根据CPT最基本的数据锥尖阻力 q_c ,侧壁摩擦力 f_s ,孔隙水压力 u_2 和摩阻比 R_f 来进行快速地层划分。

根据上述四类基本数据进行快速土层划分,可以根据以下几个原则进行:

1) q_c 突然变化的位置为土的分层位置。

2) R_f 发生较大变化的位置为土的分层位置。

3) $R_f < 1$ 可判断为砂性土, $R_f > 2$ 可判断为粘性土,位于两者之间的时候,可能为粉土或者粉砂或沙土粘土混合,具体情况需根据 q_c 大小判定。

4) 砂土的 q_c 较高,在本项目中为10 MPa或者更高。

5) u_2 发生剧烈变化的时候,可能是土层发生变化或某一层土中的成分、密实程度发生了突然变化。

需注意的是,根据以上几个原则划分的土层,并不代表该层土的设计参数需相同。比如同一层粘土中,可能出现强度分别为20 kPa和50 kPa,但是在上述四个指标参数中,无法得到明显区分。

3 粘性土不排水抗剪强度

3.1 CPT数据计算粘土不排水抗剪强度

已经有许多学者提出采用CPT计算粘土不排水抗剪强度的方法。

CPT采用下式计算粘土的不排水抗剪强度 S_u 。

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

式中:

q_t ——修正CPT锥尖阻力(kPa),通常可直接从CPT设备中导出此数据;

σ_{v0} ——上覆压力(kPa);

N_{kt} ——经验系数。

如果CPT设备操作系统无法自动导出 q_t 数据,可以用下式来计算 q_t :

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

式中:

q_c ——CPT锥尖阻力(kPa);

u_2 ——探头水压力(kPa);

a ——探头面积比,是探头出厂设计参数,对于某一型号探头为固定值,通常处在0.6~0.8。

N_{kt} 的取值并不固定,在不同的场地,场地中不同的地层中取值也会不同。因此 N_{kt} 的最终取值需配合其他的测试手段来确定,包括高质量的强度试验、现场十字板剪切试验等方法。不同的粘土通常会表现出不同的 N_{kt} 值。LOW et al. (2010)^[4]通过研究3个陆地和11个海上场地的CPT粘土,通过与三轴试验结果对比后,提出 N_{kt} 取值在8.6~15.3,平均值为11.9。如果与三轴试验、单剪试验和三轴拉伸实验得到的强度平均值对比后, N_{kt} 取值在10.6~17.4,这个范围相对更接近单剪试验的结果。如果与现场的十字板剪切试验结果做对比, N_{kt} 取值在10.8~19.9,平均值为13.3。MAYNE et al.

2015 在研究了 17 种不同强度的粘土后, 得到的 N_{kt} 平均值为 13.6。

KARLSRUD et al. (2005)^[5] 测试了灵敏的挪威粘土, 三轴试验结果对比显示 N_{kt} 取值范围相对较低, 取值在 7.5 ~ 11.5。WANG et al (2015)^[6] 测试了魁北克地区的十字板强度, 结果对比显示 N_{kt} 取值为 10.5。

对于超固结的结构性粘土, POWELL & QUARTERMAN (1988)^[7] 提出 N_{kt} 取值在 20 至 30 之间的时候, 才能与室内的三轴试验和现场平板结果取得较好的对照。

MAYNE & PEUCHEN (2018)^[8] 对比 407 个粘土样品的三轴试验强度与 CPT 数据后, 提出了一种通过 CPT 指标计算 N_{kt} 的方式。他们通过研究最终的 N_{kt} 取值和 CPT 孔压系数 B_q 的关系可以近似表示为:

$$N_{kt} = 10.5 - 4.6 \cdot \ln(B_q + 0.1), B_q > -0.1 \quad (3)$$

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

基于上式可以得到 35 号机位和 43 号机位的 N_{kt} 取值如图 1、图 2 所示。

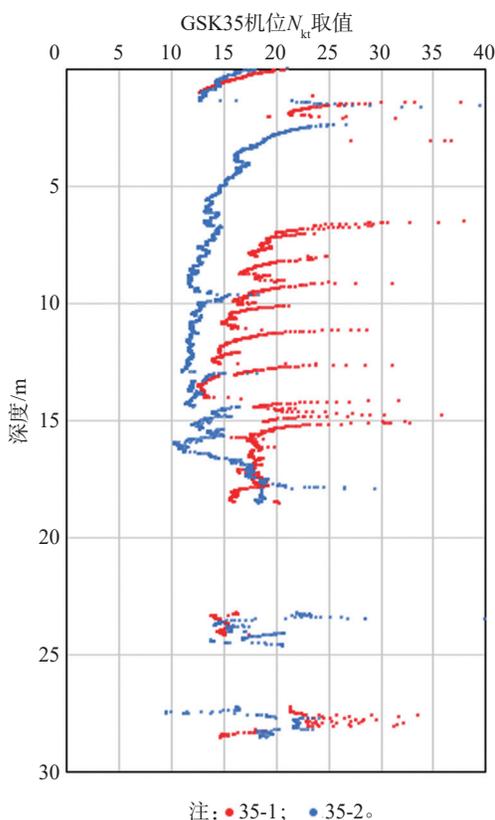


图 1 GSK35 号机位的 N_{kt} 的取值
Fig. 1 The value of N_{kt} for GSK35 position

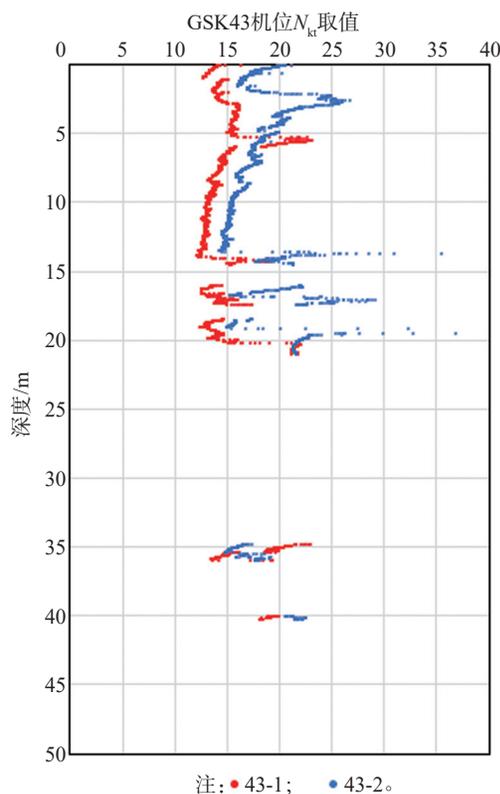


图 2 GSK43 号机位的 N_{kt} 的取值
Fig. 2 The value of N_{kt} for GSK43 position

从图 1、图 2 可以看到, CPT 35-1 的 N_{kt} 取值大多落在 15 ~ 20, 20 m 以下的部分粘土层混砂较多, N_{kt} 取值波动范围较大, 23 ~ 25 m 范围内 N_{kt} 为 10 左右, 27 ~ 29 m 范围内取值为 20 ~ 25, 但代表性相对较差。CPT 35-2 表层 2 m 范围内 N_{kt} 取值变化较大。2 ~ 5 m 范围内 N_{kt} 取值为 15 ~ 25, 5 ~ 17 m 范围内大段粘土的 N_{kt} 取值为 10 ~ 15, 23 ~ 25 m 范围内 N_{kt} 为 15 ~ 20, 27 ~ 29 m 范围内取值为 15 ~ 25, 但代表性相对较差。CPT 43-1 粘土层 N_{kt} 取值基本落在 12 ~ 16, 除 35 ~ 38 m 范围内 N_{kt} 取值为 15 ~ 20。CPT 43-2 粘土层 N_{kt} 取值基本在 15 ~ 20, 局部深度 N_{kt} 降至 25 左右但很快升高至 15 ~ 20 的范围。

根据以上方法计算得到 N_{kt} 可以得到 35 机位和 43 机位的粘土不排水强度剖面如图 3、图 4 所示。

从图 3、图 4 可以看到, 对于 35 号机位, UU 和 CU 试验结果相对 CPT 结果对照较好, UU 结果偏向 CPT 的较低取值, CU 结果偏向 CPT 的较高取值, 整体对照情况较好。对于 43 号机位, CPT 结果相比 UU 试验和 CU 试验结果更高, 局部深度 CPT 结果高过 CU 实验结果。

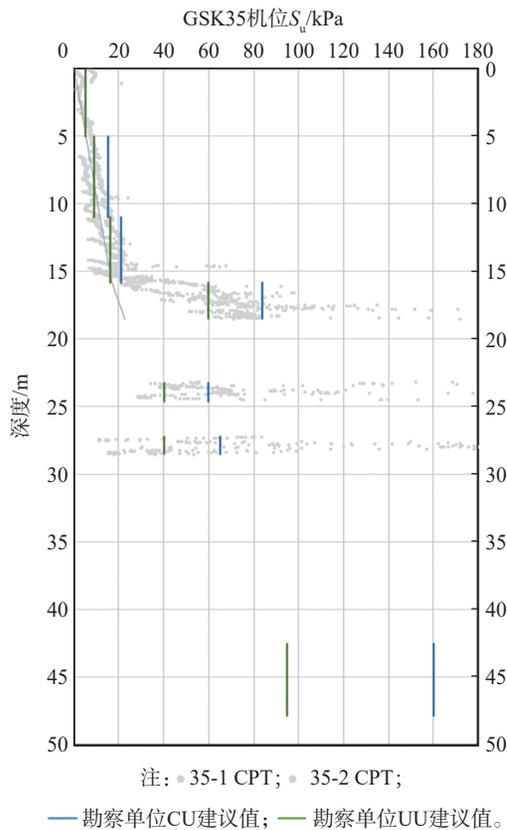


图3 GSK35号机位的粘土不排水强度剖面

Fig. 3 Undrained strength profile of clay at the GSK35 position

3.2 CPT计算粘土不排水抗剪强度的特点

通过以上对比我们可以看出：

1) 本项目粘土的不排水强度应该是随深度增长，目前勘察结果中对一段较厚的粘土层只提出一个统一的强度指标是相对粗糙的。

2) N_{kt} 的取值需通过与高质量的室内试验对比来确定。

3) 本项目粘土的 N_{kt} 取值范围在15~20是相对合理的，这也与前期研究成果相吻合。

4 砂土的内摩擦角

CPT确定砂土内摩擦角的手段相对单一，应用成果相比CPT在粘土中的应用也较少。目前常见的根据CPT计算砂土有效摩擦角的常用公式是MAYNE (2014)^[9]提出的：

$$\varphi' = 17.6^\circ + 11^\circ \cdot \log(q_{t1}) \quad (5)$$

$$q_{t1} = q_t / (\sigma_{atm} \cdot \sigma'_{vo})^{0.5} \quad (6)$$

这里 σ_{atm} 是大气压，可取100 kPa。该式最初是根据CPT标定箱数据得到的，使用的是标准石英

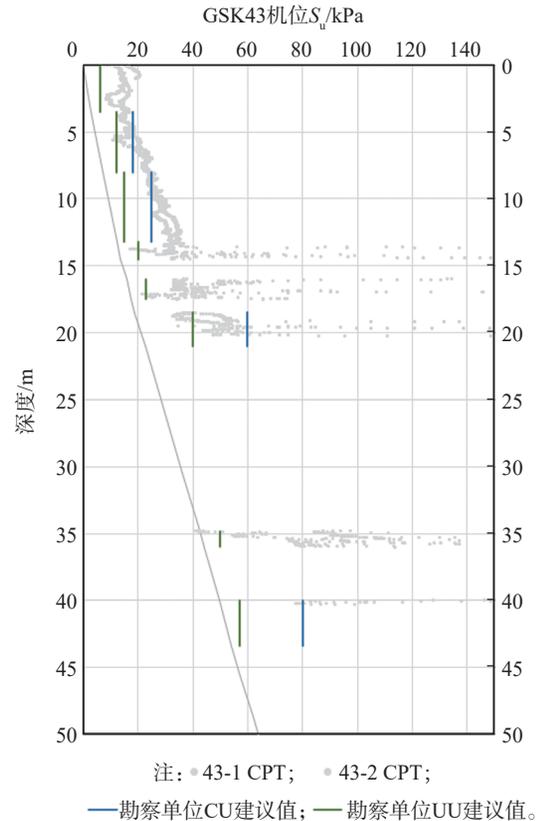


图4 GSK43号机位的粘土不排水强度剖面

Fig. 4 Undrained strength profile of clay at the GSK43 position

砂。MAYNE (2006, 2009) 用17个场地取得不扰动(冰冻)砂样进行三轴试验，测得了砂土样的摩擦角。试验结果显示上式也能够得到非常好的拟合效果。

目前的海上勘察中，标准贯入试验也应用非常普遍，但是目前标贯在海上勘察中的应用适用性有非常大的争议，由于CPT在国内发展时间较短，设备数量较少，无法保证每个机位都有CPT，标贯依旧是现场测试最主要的手段。

标贯在海上岩土工程勘察中应用的特点包括：

1) 标贯的应用非常普遍，也有非常丰富的地区经验把标贯结果和设计指标建立经验关系，但这些经验主要集中于陆地。由于标贯探杆自由段过长，因此陆地上已经成熟的经验能否移植到海洋岩土的勘察工作中，是一个需要更多研究和工程实践的问题。

2) 标贯设备本身成本低，市场供应大，而CPT本身设备成本相对标贯更高，特别是专门的孔下CPT(downhole CPT)成本更高，同时相对来讲，CPT的数据处理和解释需要更专业的岩土技术

人员来进行。

对于标贯试验数据, 这里建议采用 SCHMERTMANN^[10] 方法推算砂土的内摩擦角, 如图 5 所示。

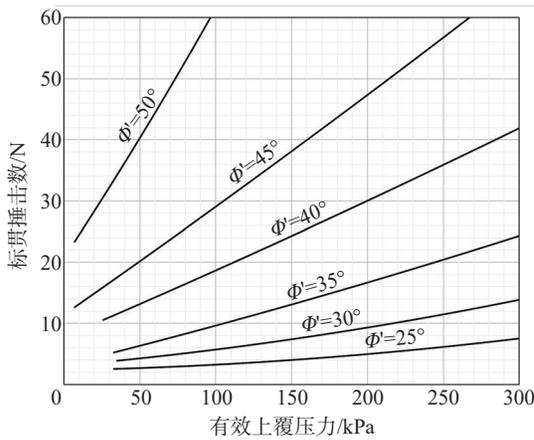
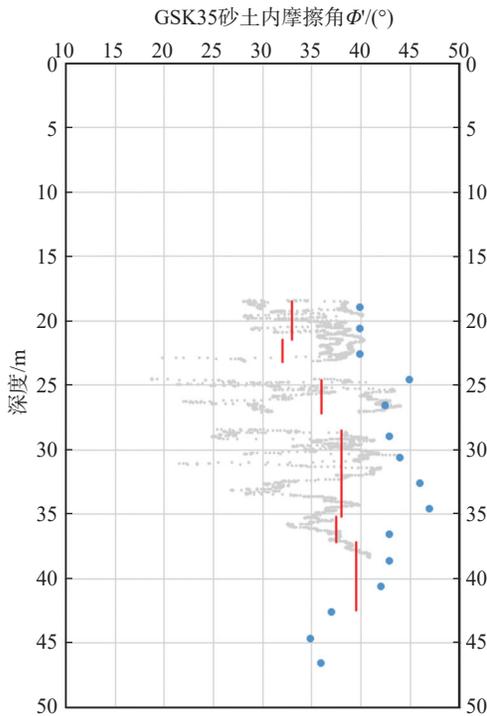


图 5 标贯锤击数与砂土摩擦角的经验关系

Fig. 5 Empirical method for estimating ϕ' of a sand from standard penetration test 'N' values

根据上式, 我们得到了 35 机位和 43 机位的摩擦角剖面图。

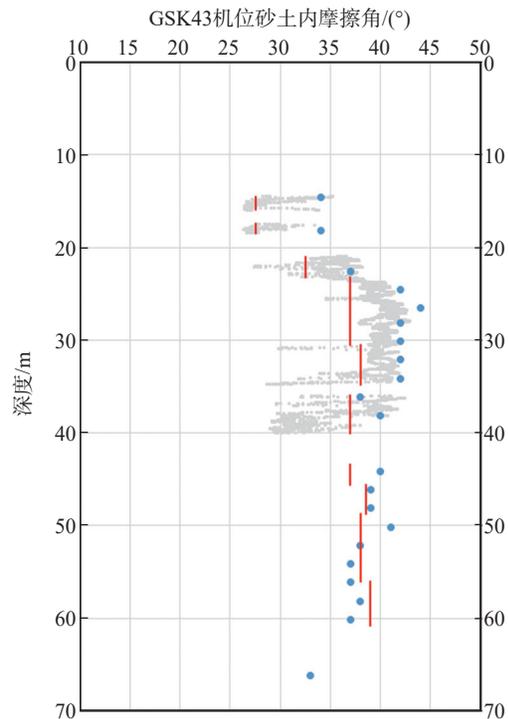
从图 6、图 7 可以看到, 基于标贯结果使用



注: ● CPT 35-1; ● CPT 35-2; ● 35# Schmertmann, J.H.(1975); — 勘察单位建议值。

图 6 GSK35 机位的摩擦角剖面图

Fig. 6 Friction angle profile of GSK35 position



注: ● CPT 43-1; ● CPT 43-2; ● Schmertmann, J.H.(1975); — 勘察单位建议值。

图 7 GSK43 机位的摩擦角剖面图

Fig. 7 Friction angle profile of GSK43 position

SCHMERTMANN^[10] 方法与 CPT 经验公式计算得到的结果基本吻合, SCHMERTMANN^[10] 方法的结果基本是 CPT 结果的上包络线。同时, 在对比中, 还可以发现:

1) 无论 CPT 还是标贯计算砂土的有效内摩擦角时, 都需考虑有效上覆压力的影响。

2) 标贯能够反映砂层的密实度变化的趋势, 但标贯数据不连续, 不够丰富。

3) SCHMERTMANN^[10] 方法在标贯超过 60 锤或有效上覆压力超过 300 kPa 后对砂土摩擦角的准确程度无法保证, 原因是当埋深超过一定深度, 杆长自由段过长的时候, 对于标贯锤击能量的修正无法准确估计, 这也是标贯在海洋岩土勘察应用中备受争议的因素。

5 结论

通过以上列举的方法所得到的结果, 可以总结出下列结论:

1) 目前国内海上风电勘察手段有限而且勘察装备供应紧张。在此大背景下, 本文提供了一种在

海上勘察较难取得不扰动样品且经常仅有 CPT 和标贯数据可用的情况下, 推算土的抗剪强度的可靠方法。

2) 高质量的土工试验是保证海上勘察岩土参数准确的基础, 但由于目前客观条件的限制, 取样扰动较大的因素仍然无可避免, 因此根据现场 CPT 测试和标贯测试的结果推算岩土参数有很大的应用价值。

3) CPT 方法在确定粘土的不排水抗剪强度的时候有较大的优势, CPT 测试精度高, 属于原位测试, 没有土样扰动的问题, 方便绘制粘土不排水抗剪强度随深度变化的剖面。

4) 粘土强度通常随深度增长, 粘土层提出单一强度参数相对粗糙。

5) 勘察现场极难取得砂土原状样, 因此采用 CPT 和标贯经验方法, 综合判断, 确定合适的砂土有效内摩擦角是一种非常实用且有应用价值的方法。

参考文献:

- [1] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 151-158.
- [2] ROBERTSON K R. Interpretation of cone penetration tests-a unified approach [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46 (11): 1337-1355.
- [3] ROBERTSON P K. Estimating in-situ state parameter in sandy soils from the CPT [C]//Gregg Drilling & Testing Inc. Proc. 2nd Intl. Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 9-11, 2010. Huntington Beach: Gregg Drilling & Testing Inc, 2010: 3.
- [4] LOW E H, LUNNE T, ANDERSEN H K, et al. Estimation of intact and remoulded undrained shear strengths from penetration tests in soft clays [J]. Géotechnique, 2010, 60 (11): 843-859.
- [5] KARLSRUD K, LUNNE T, KORT D A, et al. CPTU correlations for clays [C]//ICSMGE. Proc. 16th ICSMGE, Osaka, Japan, 2005. Osaka: ICSMGE, 2005: 396-702.
- [6] WANG B, BROOKS G R, HUNTER J A M. Geotechnical investigations of a large landslide site at Quyon [C]//Geology Survey of Canada. Proc. GeoQuébec, Québec, Canada, 2015. Québec: Geology Survey of Canada, 2015: 355.
- [7] POWELL J J M, QUARTERMAN R S T. The interpretation of cone penetration tests in clays with particular reference to rate effects [C]//Gregg Drilling & Testing Inc. Proc. 1 st Int. Symp. on Penetration Testing, Orlando, FL, USA, 1988. Orlando: Gregg Drilling & Testing Inc, 1988: 903-909.
- [8] MAYNE P W, PEUCHEN J. Cone penetration testing 2018 [M]. London: Taylor and Francis Group, 2018.
- [9] MAYNE P W. Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests [C]//ISSMGE. Proc. 3rd International Symposium on CPT, Las Vegas, USA, 2014. Las Vegas: ISSMGE, 2014: 47-73.
- [10] SCHMERTMANN J H. Static cone to compute static settlement over sand [J]. Journal of soil mechanics and foundations, 1970, 96(3): 1011-1043.

作者简介:



李忠信

1968-, 男, 辽宁铁岭人, 工程师, 学士, 主要从事海上风电工程施工管理工作 (e-mail) lizx2@csg.cn。

李忠信

孙泉雄 (通信作者)

1992-, 男, 湖南株洲人, 工程师, 硕士, 主要从事海上风电水工结构设计工作 (e-mail) sunxiaoxiong@gedi.com.cn。

刘东华

1982-, 男, 辽宁葫芦岛人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事海上风电、火电、核电的水工结构设计工作 (e-mail) liudonghua@gedi.com.cn。

贾钊威

1984-, 男, 山西河曲人, 工程师, 学士, 主要从事工程施工管理工作 (e-mail) jiahongwei@gedi.com.cn。

孙伟

1992-, 男, 河北唐山人, 工程师, 硕士, 主要从事岩土工程勘察设计 (e-mail) m.sun@fugro.com。

(责任编辑 李辉)