

孔压静力触探在确定砂土内摩擦角中的应用

王虎刚, 贾 巍

(中海油田服务股份有限公司, 天津 300459)

摘 要:内摩擦角作为砂土的抗剪强度指标之一,是工程设计的重要参数。常规海洋工程勘察中主要依据室内土工试验确定,如三轴压缩试验、直接剪切试验、颗粒粒径、级配和密实度等。随着孔压静力触探(Piezocone Penetration Test, PCPT)在海洋工程勘察中广泛开展,利用孔压静力触探测试的锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力等参数确定砂土内摩擦角具有无需取样、快速、合理、可靠的优点,在桩基础、管线路由、水下基础等海洋工程勘察中具有越来越重要的工程意义。本文总结了 3 种利用 PCPT 资料确定砂土内摩擦角的方法即 Mayne 提出的内摩擦角评估经验公式、砂土最大最小经验公式和 Senneset 等提出的计算砂土内摩擦角经验公式,在中国广东沿海某风电场开展了 3 个钻孔的应用实践。对结果进行对比分析后认为,在熟练掌握 PCPT 测试方法、资料采集、数据处理和成果解释的基础上,依据 Senneset 等提出的计算方法,用 PCPT 资料确定砂土内摩擦角,具有一定的可靠性与适用性。

关键词:砂土;内摩擦角;孔压静力触探;可靠性

中图分类号:TU441⁺.5; TU195

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)02-0124-06

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.02.007

引用格式:WANG H G, JIA W. Application of PCPT data to the determination of internal friction angle of sandy soil[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 124-129. 王虎刚, 贾巍. 孔压静力触探在确定砂土内摩擦角中的应用[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 124-129.

在国内海洋勘察工程中,内摩擦角是砂土的重要力学指标,是工程设计计算中最重要的参数之一。内摩擦角取值过高或者过低都会对工程设计、施工造成巨大的危害或者经济损失^[1]。

目前,海洋工程勘察过程中砂土内摩擦角的取值主要来源于室内土工试验,如三轴压缩试验、直接剪切试验、颗粒粒径、级配和密实度等。由于受海上作业环境的限制,砂土钻探取样过程易造成样品扰动而导致难以获得原状样品^[2],使得通过室内试验确定砂土内摩擦角难度加大,特别对于薄砂层内摩擦角的确定,显得尤为困难。孔压静力触探是 20 世纪 70 年代在国际上兴起的新型原位测试技术,近年来,随着孔压静力触探(Piezocone Penetration Test, PCPT)在海洋工程勘察中广泛开展,利用孔压静力触探测试的锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力等参数确定砂土内摩擦角具有无需取样、速度快、扰动小和再现性好等优点^[3-4],在桩基础、管线路由和水下基础等海洋工程勘察中具有重要的意义^[5]。

早在 20 世纪 70 年代就有多位国外学者提出了利用 PCPT 测试资料确定砂土内摩擦角的经验方法,如 Durgunoglu 和 Mitchell 提出的图表法^[6]、Mayne 提出的适用于非胶结石英砂的内摩擦角评估经验公式^[7]和 Senneset 等根据孔穴扩张理论提出的计算砂土内摩擦角经验公式^[8]等。然而,在我国利用 PCPT 测试资料确定砂土内摩擦角尚无可靠的经验公式,主要依据《工程地质手册》中的查表法^[9]。这些经验公式和查表法虽然在实际工程中都具有一定的应用性,但大都只应用于陆地或港口工程勘察,实际应用于海洋工程地质勘察中的却寥寥无几。

伴随着我国广东沿海风电场项目的蓬勃发展,为探明风机位海底地层特性,采用孔压静力触探和液压薄壁钻孔取样对重点区域进行了工程地质场地勘察。基于 3 种利用 PCPT 资料确定砂土内摩擦角的方法即

收稿日期:2019-03-07

作者简介:王虎刚(1986-),男,工程师,主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail: wanghg6@cosl.com.cn

(王 燕 编辑)

Mayne 提出的内摩擦角评估经验公式、砂土最大最小经验公式和 Senneset 等提出的计算砂土内摩擦角经验公式,结合广东沿海某风电场 3 个钻孔实例,将 3 种方法的结果进行比对,以期在对该海域砂土的特性深入认识后,充分说明用 PCPT 资料确定砂土内摩擦角具有一定的可靠性与适用性。

1 理论方法

由于 PCPT 探头贯入是个复杂的过程,所有的理论方法都针对土的性质、破坏机理和边界条件做了假定,这些理论解不仅需要根据现场和室内试验数据进行验证,而且在模拟不同应力历史、非均质特征和灵敏度等条件下,真实土体的性能具有局限性。正因如此,实际应用中较多采用经验公式^[10]。目前,在国内外海洋工程勘察中,根据孔压静力触探数据确定砂土内摩擦角应用比较广泛的经验方法有 3 种。

方法 1:Mayne 提出适用于磨圆度好的非胶结石英砂内摩擦角(φ)评估经验公式^[7]:

$$\varphi=17.6+11.0\times\lg\left[\frac{10q_t}{(\sigma'_{vo}/100)^{0.5}}\right],$$

(1)

式中, q_t 为校正后锥端阻力(kPa), σ'_{vo} 为有效上覆压力(kPa)。该式在计算混有细粒质土砂土时应根据区域经验进行折减。

方法 2:根据砂土相对密实度和上覆压力计算砂土内摩擦角的最小值($\varphi_{\min}$)和最大值($\varphi_{\max}$),其经验公式^[11]为

$$\varphi_{\min}=30^{\circ}+3\{[10-\ln(2.7\sigma'_{vo})]\times0.01D_r-1\},$$

(2)

$$\varphi_{\max}=30^{\circ}+3\{[10-\ln(1.1\sigma'_{vo})]\times0.01D_r-1\},$$

(3)

式中, D_r 为砂土相对密实度(%)。

方法 3:考虑探头贯入过程中周围土的弹塑性变形及初始应力状态对探头贯入过程的影响,根据孔穴扩张理论和临界土力学理论,Senneset 等提出计算砂土内摩擦角的公式^[8]:

$$\frac{N_q-1}{1+N_u\times\Delta u/(q_t-\sigma_{vo})}=\frac{q_t-\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}+\alpha'},$$

(4)

式中: N_q , N_u 为无量纲承载力系数,均由砂土内摩擦角 φ 确定; σ_{vo} 为总上覆压力(kPa); Δu 为超孔隙水压力(kPa); α' 为经验系数,根据土质类型和区域经验确定,典型值可参考表 1。

表 1 α' 典型值

Table 1 Typical α' values

土质类型	状 态	α' /kPa
粉土	软	$0<\alpha'\leq5$
粉土	稍硬	$5<\alpha'\leq15$
粉土	硬	$15<\alpha'\leq30$
砂	松散	$\alpha'=0$
砂	中密	$10<\alpha'\leq20$
砂	密实	$20<\alpha'\leq50$
土(超固结,胶结)	硬,坚硬	$\alpha'>50$

2 应用实例

某风电场位于广东省南侧内陆架海域(图 1),北靠亚洲大陆,南临热带海洋,气候温暖潮湿,属亚热带

海洋性季风气候区,平均气温 22.8℃,海底地形较平坦,水深为 23~27 m,整体上从西北向东南方向水深逐渐加深。



图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of the study area

风电场所在区域属于华南地层区,勘探深度内上部地层为第四纪全新统及上更新统松散堆积物,成因以海积、冲海积和残积相为主,下伏基岩为寒武系八寸群片岩,局部为燕山期入侵花岗岩。本文选取广东沿海某海上风电场 3 个(分别为 A、B 和 C)孔上部地层的 PCPT 数据,利用 3 种方法解释砂土层内摩擦角,结果如图 2 所示,其中,直剪/三轴压缩试验结果依据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[12]中规定的试验方法确定。

研究海域目标层为冲海积和残积相土层,结合勘探状况取样发现,样品以稍密到中密的砂质粉土和中砂为主,成分主要为石英和长石。砂土层的含水率为 15%~30%,容重变化范围为 19~20 kN/m³,黏粒(粒径小于 0.005 mm 的颗粒)质量占样品总质量的 3%~16%。

对于风电场海域冲海积和残积相砂土层,利用方法 1 分析所得的砂土内摩擦角全部大于试验结果(图 2),很大程度上高估了砂土内摩擦角,所以,方法 1 适用于颗粒较粗、磨圆度好的非胶结石英砂层。本研究海域砂土层中普遍存在不同含量的黏粒和粉粒,因此使得计算结果高于试验结果。

方法 2 考虑了土层上覆压力和密实度的影响,确定了内摩擦角的下限与上限值。方法 3 将孔穴扩张理论和临界土力学理论应用到实际分析中,充分考虑了土颗粒的微观效应和土体的宏观影响,其分析结果更能反映土层真实情况。直剪/三轴压缩试验基于液压薄壁钻孔取样所获得的样品进行,样品扰动小、质量高,能准确反映砂土层的工程特性。结合图 2,分析结果表明,利用方法 2 和方法 3 分析所得的砂土内摩擦角与试验结果吻合度较高,能真实反映砂土的内摩擦角,可为设计取值提供可靠依据。

尽管需要更多的试验和数据去验证文中方法在其他地方的可靠性,但通过分析证明在本文中海上风电场海域,对于浅表砂土层,文中方法 2 和方法 3 能很好地反映砂性土的内摩擦角,可为桩基础设计、管线路由和下水基础等海上工程提供可靠的岩土设计参数。

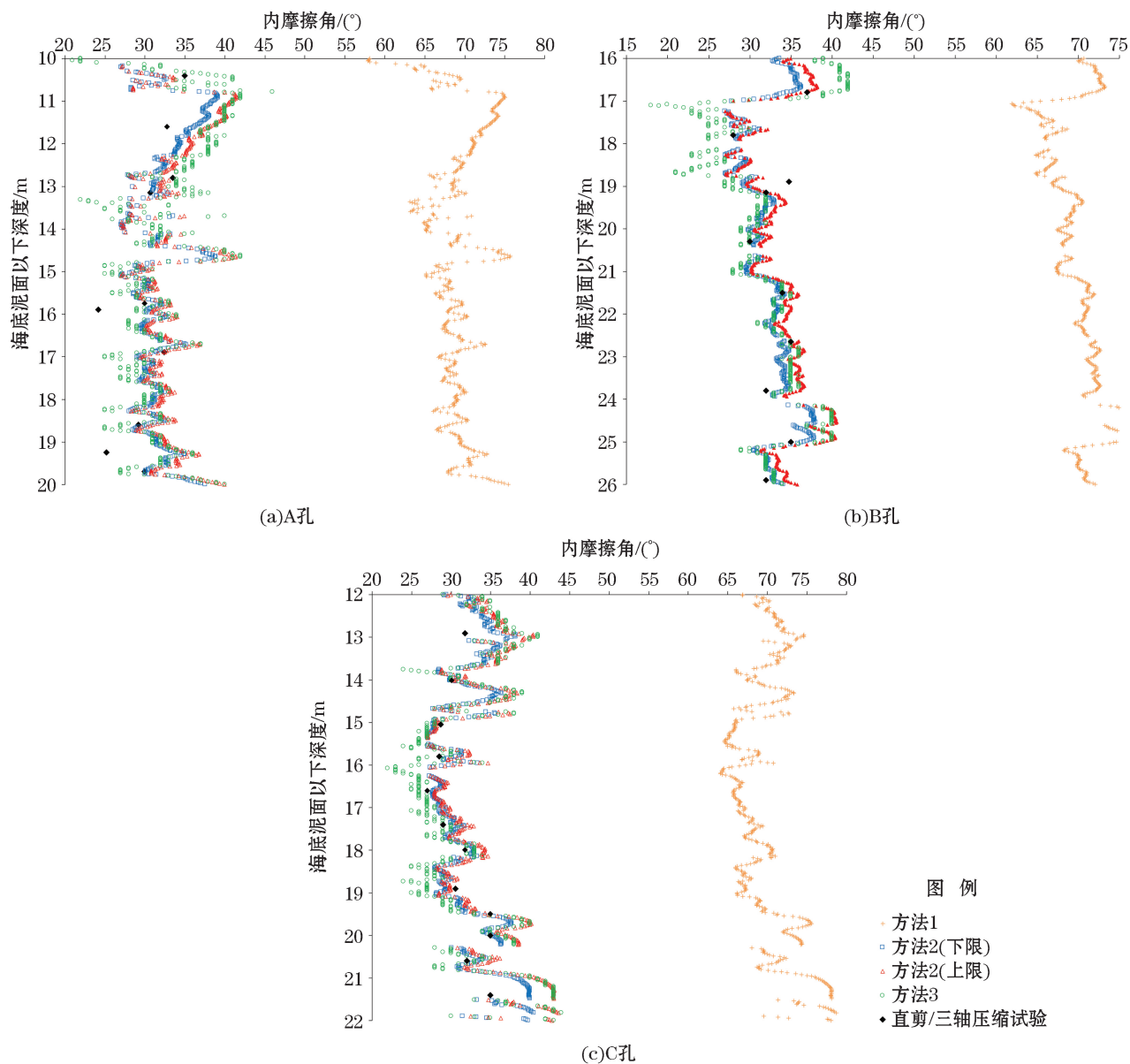


图2 A, B, C孔部分土层内摩擦角(利用PCPT解释)

Fig.2 Internal friction angles of partial soil layers in borehole A, B and C (by using PCPT data)

3 结 论

基于文中介绍的3种方法,通过对广东海上某风电场海域砂土层的土质特性和内摩擦角进行对比研究,主要得出结论:

1)直剪/三轴压缩试验是目前国内海洋工程勘察中砂土内摩擦角确定的主要方法,但该方法对所取砂土样品的质量要求高,所需土样多,试验结果也易受各种因素影响。

2)在熟练掌握PCPT测试方法、资料采集、数据处理和成果解释的基础上,对比分析可知,利用方法2和方法3确定砂土内摩擦角方法可在当地工程经验的基础上推广应用。

3)由于PCPT能够测得土的锥尖阻力等指标随深度变化的连续曲线,更精确地反映土的类型、强度和

排水属性等工程性质随深度的变化,对砂土内摩擦角分析更加方便快捷、结果可靠。

4)利用 PCPT 资料确定砂土内摩擦角时,大多数是基于经验公式,不存在适用各种砂土的唯一公式,仅仅针对某一区域的相关关系是可靠的,在没有当地经验时,可做粗略估计;如果有当地的试验数据,应当根据当地经验关系对公式进行修正。

5)在海洋工程勘察中,砂土的内摩擦角对后期工程的影响是不容忽视的,应根据建设工程的规模、重要性、地基的复杂程度等综合多种方法确定。

参考文献(References):

- [1] JIANG M M. Theoretical study and test of sand in situ test[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. 蒋敏敏. 砂土原位测试理论研究和试验[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] DU Y, SHE H, DAI Y X. Application of CPTU data interpretation in soil investigation of HZMB[J]. Port & Waterway Engineering, 2013, 481(7): 30-34. 杜宇, 余红, 代云霞. CPTU 数据解译在港珠澳大桥勘察中的应用[J]. 水运工程, 2013, 481(7): 30-34.
- [3] LU F C. Application of CPT in marine geotechnical engineering[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 陆凤慈. 静力触探技术在海洋岩土工程中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [4] LU F C, QU Y D, LIAO M H. The development status and applications of in situ cone penetration test technology[J]. Ocean Technology, 2004, 23(4): 32-36. 陆凤慈, 曲延大, 廖明辉. 海上静力触探(CPT)测试技术的发展现状和应用[J]. 海洋技术, 2004, 23(4): 32-36.
- [5] GENG G Q. Research on penetration mechanism of piezocone penetration test (CPTU) and its application on pile foundation engineering [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. 耿功巧. 孔压静力触探贯入机理及其桩基工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [6] DURGUNOGLU H T, MITCHELL J K. Static penetration resistance of soils[C]//Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties. Raleigh, North Carolina, USA. 1975: 151-189.
- [7] MAYNE P W. CPT indexing of in situ OCR in clays[C]//Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Site 86. Blacksburg, Virginia, USA. 1986: 780-793.
- [8] SENNESET K, JANBU N, SVANO G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests[C]//Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam, Netherlands. 1982(2): 863-870.
- [9] Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological engineering handbook[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [10] TONG L Y, CAI G J, LIU S Y, et al. Evaluation of soft clay properties from piezocone test (CPTU)[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(Suppl.): 334-339. 童立元, 蔡国军, 刘松玉, 等. 多功能孔压静力触探(CPTU)测试技术在软土工程性质评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2008, 16(增): 334-339.
- [11] LUNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1997.
- [12] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123-1999[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

Application of PCPT Data to the Determination of Internal Friction Angle of Sandy Soil

WANG Hu-gang, JIA Wei

(China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: As one of the shear strength indexes of sandy soil, the internal friction angle is an important parameter in engineering design, and in conventional marine engineering surveys it is mainly determined by indoor geotechnical tests such as triaxial compression test, direct shear test and particle size, gradation and compactness. With the broadly implementing of PCPT in marine engineering surveys, parameters such as cone resistance, sleeve friction and pore-water pressure measured through PCPT have been used to determine the internal friction angle of sandy soil, which has the advantages of no sampling, fast, reasonable and reliable and is of more and more important engineering significance in the marine engineering surveys such as pile foundation, pipeline routing and underwater foundations. In the present paper, three types of methods in which the PCPT data is used for determining the internal friction angle of sandy soil are summarized, which are the empirical formula for evaluating the internal friction angle proposed by Mayne, the maximum minimum experience formula for sandy soil and the empirical formula for calculating the internal friction angle of sandy soil proposed by Senneset, and application practice is carried out in three boreholes taken from a wind farm in Guangdong coastal area of China. It has been illustrated that using PCPT data to determine the internal friction angle of sandy soil has certain reliability and applicability if skilled in measuring method, data acquisition, data processing and interpretation of PCPT and based on the calculation method proposed by Senneset.

Key words: sandy soil; internal friction angle; PCPT; reliability

Received: March 7, 2019