文章编号:1005-9865(2007)02-0126-05

深水土工调查技术和分析方法新进展

王淑云, 鲁晓兵
(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要:简要介绍了近年来国外在深水土工调查技术和分析方法方面取得的新进展,包括:钻孔取样技术在钻入模式和取样器的多样化和有效组合,从而实现不同水深和不同土类条件下的高质量取样;带孔压测量的圆锥触探试验在测量方法、孔压测量单元设计、探头的小型化和多样化、数据的快速传输以及分析理论方面的进展;减少土样扰动,准确评估粘土不排水抗剪强度的"SHANSEP"室内试验方法及应用。

关键词:土工调查; 钻孔取样; 触探试验; 土样扰动
中图分类号:TU43 **文献标识码**: A

Recent advances in techniques and analytic methods of deepwater geotechnical investigation

WANG Shu-yun, LU Xiao-bing
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: New advances in techniques and analytic methods of deepwater geotechnical investigation in recent years are introduced briefly. Drilling mode and sampling equipment in drilling and sampling techniques are diversified and effectively assembled in order to obtain good quality samples in different water depth and soil conditions. Piezo-cone penetration test was developed in the measurement method, design of pore-pressure unit, mini-size and multi-type of cone, in-time transmitting of data and the method of analysis. The concept and application of "SHANSEP" were proposed as a new laboratory test method which can minimize the sampling disturbance and more correctly estimate the undrained shear strength of clay.

Key words: geotechnical investigation; drilling and sampling; cone penetration; sampling disturbance

深水海域一般指水深大于 300 m 的大陆坡地段,其地质和地形条件复杂,浪高、海底静水压力大。深水土工调查的难度较浅水大得多,它不仅要求调查船的动力定位准确、海水波动补偿系统好、海底钻探能力强,而且要求原位测量和取样的设备和技术也能适应深水环境[1,2]。它需要更先进的原位测量设备、技术和相应的分析方法,如先进的钻孔取样技术,静力触探探头的耐压性、小型化、多样化和无缆测量技术,减少土样扰动性的室内试验方法等。

海洋深水土工调查是从 20 世纪 70 年代开始的,早期大多数集中在墨西哥湾、巴西和西非地区,后来逐渐扩大到里海、北海、挪威海、马来群岛、北大西洋地区和南中国海等海域。目前,深水调查的水深已达到 3 000 多米,钻孔取样深度最大可达到 120 m。近十年来,由于对油气和矿产资源的迫切需要、对开发海洋战略意义的深刻认识,世界各国政府和石油公司纷纷投资,海洋石油开发事业蓬勃发展,与深水土工调查有关的关键技术、测量设备和分析方法也得到很大的提高,并在许多深水地区得到越来越广泛地应用。

我国的海洋土工调查和评价工作从 80 年代初引进了日本的 503 船以后才逐渐自主地开展起来,但船上的主要土工原位测试技术设备仍为进口,尤其是静力触探试验还依赖外国专家和工作人员。目前 503 船仍

收稿日期:2006-04-24
基金项目:中国科学院知识创新十五重大项目资助(KJCX2 - SW - L03 - 0140025103)
作者简介:王淑云(1965 -),女,天津人,高级工程师,主要从事海洋和岩土工程方面的实验研究工作。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

承担着我国自主海洋土工调查的主要任务,但它的最大工作水深仅为 500 m。目前我国南海海区对外招标的勘探水深为 1 500～3 000 m,在水深大于 500 m 的海域进行土工调查,还只能依赖和引进国外的土工调查技术和装备。

主要介绍国外在深水土工调查中最常用的钻孔取样技术、带孔压测量的圆锥触探试验 CPTU(cone penetration test with pore pressure measurement)或压电圆锥贯入试验 PCPT(pizometer cone penetration test)技术及分析方法的最新进展,以及室内试验中如何减少土样扰动的"SHANSEP"(stress history and normalized soil engineering properties)方法及应用情况。

1　钻孔取样技术

目前,在深水地区的海洋平台和海底管线设计中,可靠土性参数的获得仍离不开原位取样技术和对原状土样室内实验结果的评价。与浅水相比,深水取样的特点主要在于土工调查船的高钻探能力和取样方法。

钻孔取样系统的模式有两种:基于海床的钻入(seabed mode)和从船上直接钻入(drilling mode)。前者最大适应水深为 20～2 000 m,贯入深度为 2～100 m;后者最大适应水深和贯入深度则取决于配备绞盘和操作系统的能力[3]。取样器可分为振动式、重力式、活塞式和箱式等。目前在深水中所用的钻孔取样器以及对应的工作水深和贯入深度参见表 1。取样设备的选择要根据钻入系统的模式、土类以及要求的取样质量来决定。一般在粘土中,首选活塞式取样器,如不能用,则可采用薄壁的推入取样器;在密砂中,得用锤击取样器;在含砾的粘土中或胶结性土中,需要用岩石取芯技术。不同钻入模式和取样设备配合所取出的土样质量可参照表 2。

表 1　钻入模式,取样设备和土样质量之间的关系

Tab. 1　The relations among models of drilling, types of sampling equipment and sample quality

钻入模式	取样设备	土样质量		
		砂土	粘土	岩石
基于海底的	重力/活塞取样	2	3	1
	振动取样	2～3	2～3	1
	箱式取样	1～2	5	1
	旋转取样	1	2	3～4
下孔(钻入)	水力活塞取样	3～4	5	1
	水力推入取样	3～4	4～5	1
	锤击取样	2～3	2～3	1
	旋转取样	1	2	3～4

注:1 代表质量很差,2 代表可接受,3 代表中等,4 代表好,5 代表很好。

由美国国家科学基金、德国、日本和英国联合资助的海洋钻井规划项目在取样方面发明了一种先进的有线的水力活塞取样器[4],它可在水深 3 000 m 条件下取到海床以下 300 m 范围内的土样,一次取样程度可达 10 m。而且,在软到硬的海底地基土中,取土器能得到 100 %的恢复。

表 2　不同取样设备对应的工作水深、贯入深度和适用土类

Tab. 2　Water depths, penetration depths and suitable soil types associated with different sampling equipments

取样设备	最大工作水深/m	贯入深度/m	适用土类
重力取样器	不确定(受操作系统的能力限制)	1～8	粘土
活塞取样器	不确定(受操作系统的能力限制)	3～30	粘土(扰动较小)
振动取样器	1 000	3～8	粘土和砂土(扰动较大)
箱式取样器	不确定(受操作系统的能力限制	0.3～0.8	海床表面土

"STARFISH"[5]是由法国 MARINE GEOSYSTEM 公司发明的一种新概念静力取样设备,它工作水深可达到 6 000 m,可钻探取样到海床以下 30 m 范围。它不同于传统的有线动力冲击贯入方法,由液压系统提供动力将取样器推入土中。整个设备由框架系统、动力系统、岩芯取样管、测量系统、能量提供和定位系统组成,并由控制系统控制贯入速度、位置以及保证垂直取样等。STRFISH 还可以用于做地震贯入测量和原位十字板试验。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对于取样设备的取样质量评估,除了表 1 所示可作为参考之外,有些学者还做了些比较研究。如:Silva[6]在水深 800～2 700 m 条件下同时做了大直径重力取样和大直径长活塞取样,并对所取土样进行了相关的室内试验,通过比较,认为两种取样方法得到的土性参数很接近。

2 CPTU 试验及分析方法

CPTU(或 PCPT)是海洋土工调查原位测试试验中最常用的方法。与其它原位试验相比,它具有经济、快速和连续贯入的优点,试验结果也具有很好的重复性和可靠性,尤其在划分土层剖面和区分土类以及评价土的强度和变形参数等方面更令人满意。与室内试验相比,它具有更真实反映原位土应力状态的优点,尤其在遇到较软的或高灵敏性有机质粘土时,由于深水条件下土样扰动问题的严重性和不可避免性而造成对土性强度参数评估不准的情况下,CPTU 试验和结果更显得重要和必不可少。

一般来讲,CPTU 试验可得到锥尖阻力、侧摩阻力和不同位置的孔隙水压力,根据这些数据和分类图,可以很方便地得到进行土层分类和剖面图。目前,根据 CPTU 数据,评价土的应力历史、固结系数以及砂土的相对密度和液化可能性的应用最多,评价粘土的不排水抗剪强度、砂土的内摩擦角、压缩和剪切模量、压缩性和渗透系数方面的应用次之。此外,关于 CPTU 的贯入阻力与土的不排水抗剪强度以及其它土性参数的关系,已有了一个世界范围内的综合、理论和经验性的数据库可供参考。

与 CPTU 配套的贯入系统有基于海床的(seabed-based)系统和下孔(dowmhole)系统[7]。基于海床的系统允许试验前对海水的静压进行零点校正且较为准确,从而在深水中得到广泛地应用。CPTU 的常用贯入测量方法均利用减型(subtraction-type)贯入测量方法,它通过在贯入仪内部注满绝缘流体,由管路将压力补偿仪与绝缘流体连接,最后引到海面的办法,实现了对外部压力的补偿。如:Peuchen[8]介绍的一种适于 300 m 水深和软粘土的高质量的减型贯入仪,它还配备了先进的电子元件,最终使传感器测量达到了高精度、高灵敏度而又不会过载。

CPTU 技术的最新进展主要体现在探头设计小型化、多功能和多样化方面。

在探头小型化方面,近几年出现了一种适用于深水土工调查的小直径压电探头[9],它主要在圆锥锥角、截面、长度以及孔压、侧摩阻力测量单元的大小和相对位置方面做了些改进。如:孔压透水石由位于圆锥后的直径 38 mm 改为位于锥尖部的直径 6.35 mm,同时锥尖部与套管距离从 229 mm 加大到 2 900 mm,减少了由于套管插入引起的孔压梯度变化,从而使得孔压测量结果和孔压消散特性试验质量大大提高,并且与计算机处理和显示孔压的系统配套,还达到了实时和快速的目的。

在探头的多功能方面,目前,除了带锥尖阻力、摩擦阻力和孔隙水压力测量的常规一体化探头外,还有地震、电阻率、水平应力以及十字板探头等[10]。在原位钻杆钻入过程中,可通过更换不同的探头和配备不同的传感器来完成不同类型的试验,如:在圆锥触探过程中,需要做软粘土的强度试验时,则只需要更换 T-bar 探头即可。根据功能不同,探头可分为单独功能的独立探头和多功能的综合一体化探头,但独立探头和综合一体化探头也不是一成不变的,如地震波的单独测量探头,现已可以成为与锥尖阻力、摩擦阻力和孔隙水压力测量相结合的综合一体化探头。

探头的多样化设计表现在多孔压单元的测量。CPTU 的孔压测量单元的布置可以在探头前部、中部、后部和尾部。对于同深度的同一种土来讲,在探头贯入过程中,不同位置孔压感应单元会测量到不同孔压数据和孔压消散特性,这些丰富的数据非常有益于土层的分类和土性参数的确定。目前,已有一次贯入试验可同时测量探头附近几个位置的孔压值,Anderson[11]的多传感器压电圆锥设计就是很好的一例。在孔压测量方面,一方面,较高的深水压力使得传感器的压力测量范围也要增加,传感器测量精度降低,另一方面,传感器测量系统的饱和在深水条件下会更好,测量精度又会有所提高。

目前,对触探试验结果的分析方法有:承载力方法、空穴膨胀理论、稳定贯入理论、有限元方法、应力特性和应变路径理论等。其中承载力方法简单,但不适合探头稳定贯入问题。空穴膨胀理论,具有模拟和较真实反映土行为的优点。应力路径方法则更适用于深基础和粘性地基。传统上的基于经验或半经验以及各种贯入理论的只由端部阻力或上覆应力确定粘土不排水抗剪强度公式已显不足,不排水抗剪强度与孔压的关系在不断地充实到分析和评价中。

现有研究表明:CPTU 有能力达到高精度水平,即其测量的结果与实际土的情况可以做到相吻合的程度,

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

只是尚待时日。未来的趋势是:用 CPTU 试验结果为平台基础设计提供土性参数会越来越重要。

3 “SHANSEP”试验方法及应用

深水条件下,原位地基土所受的应力非常大,土样一旦从原位取出,周围应力释放,土样内部的气体溢出,土样内部的孔压也由内到外降低,因此土样的扰动比浅水情况严重得多。一般来讲,对于粘性土的原状土样,扰动带来的对土样内部结构的破坏是不可以完全恢复的。据调查,因扰动而引起土样强度降低的程度可达 20 %～50 %,因此,在后续的原状土样室内试验中,为了减少土样扰动性带来的对土样强度的影响,正确评估土样的实际强度参数,室内实验采用何种技术手段和分析方法显得尤为重要。

目前,可以减少粘土原状土样扰动的室内固结不排水剪切实验方法有两种。一是 Bjerrum 提出的将原状土样固结到原位土有效上覆应力状态再进行剪切的方法,它适用于结构性强、灵敏度高和自然胶结的粘土。另一个是 Ladd 和 Fott[12]提出的将原状土样固结到 1.5～2.5 倍原位土最大先期固结压力条件下再进行剪切的“SHANSEP”方法,它则适用于低灵敏度、非自然胶结和结构性不太强的粘土。

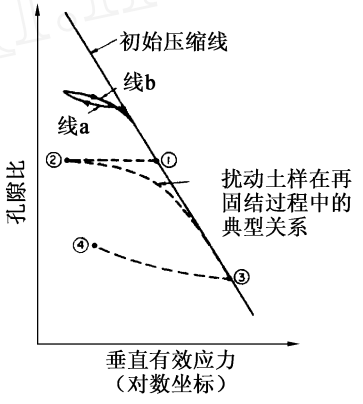

图 1　反映土样扰动影响和室内实验过程的 e-lgp 图

Fig. 1　Plot of e-lgp showing effect of sample disturbance and process of laboratory test

图 1 所示为原状土样从原位取出、经过应力释放、在室内三轴实验中再加载至原位应力(Bjerrum 方法)或高于原位应力(SHANSEP 方法)时土样孔隙比与有效应力变化关系的示意图。图 1 中,线 ab 表示土样在变成超固结土时所经历的有效应力减少、体积膨胀,以及再固结至初始压缩曲线时,其孔隙比与有效应力的关系。SHANSEP 方法正是基于此关系,认为正常固结土样从原位应力状态点 1,因取样和应力释放到点 2,经室内再固结至其初始压缩曲线点 3,再卸载至一定超固结比点 4,最后进行剪切实验,得到土样在此超固结比条件下的抗剪强度值。

SHANSEP 方法的具体试验步骤为:1) 用原状土的一维固结试验确定不同深度处土的最大先期固结压力以及应力历史;2) 用 K_0 固结的三轴不排水剪切试验(简称 CK_0U)确定正常固结土样的不排水抗剪强度是否具有归一化特性;3) 用 CK_0U 试验确定不同超固结比土样的归一化不排水抗剪确定与超固结比之间的关系。从而得到土的归一化不排水抗剪强度与超固结比之间的关系曲线或公式

$$(S_u/\sigma'_{VC})_{OCR} = (S_u/\sigma'_{VC})_{NC} * OCR^{\Lambda}$$

式中:$(S_u/\sigma'_{VC})_{NC}$和 Λ 是 CK_0U 试验确定的参数,OCR 是原位试验或室内一维固结确定的参数。在已知原位应力和应力历史的条件下,通过此公式可推算原位土的不排水抗剪强度值。

SHANSEP 方法的优势在于:能以较少的土样得到土的归一化不排水抗剪强度与超固结比之间的关系曲线或公式;如果原位地基土质条件均匀,应力历史情况已知,就可以由此公式推算不同钻孔、不同深度处原位土的强度剖面。此方法不仅大大降低了原位取样费用,而且还减少了室内试验的工作量。

自从美国土工试验权威杂志 ASTM STP 上报道了将该方法用于评价海洋粘土的不排水抗剪强度之后,近十年,SHANSEP 方法不断地被世界各地的土工专家和学者采用,成功应用于深海工程地质调查和评价的实例报道也越来越多[13]。如 Fugro-Mcclelland 公司的 Quiros[14]等、Al-Khafaji[15]等于 2003 年在 OTC 上分别报道了在墨西哥湾水深 180～1 300 m 范围内的两个 120 m 钻孔、4 个 152 m 钻孔的 SHANSEP CK_0U 试验结果,并将其与原位十字板、CPTU 以及室内 UU 试验结果进行了比较,对海洋粘土的强度参数成功地进行了评价。

在国内,连云港地区海底粘土的室内试验研究结果表明[16,17]:用 SHANSEP 方法评价该地区粘土的不排水抗剪强度有效且可行,并建议国内工程部门尽快将该方法用于其它地区的海洋工程地质调查和评价的实际项目中。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结 语

目前,国外在深水土工调查中居于领先地位,尤其在最常用的钻孔取样技术、CPTU技术及分析方法、"SHANSEP"方法及应用方面,体现出技术高、设备新、能力强和应用广的特点。

我国在深水土工调查技术和应用方面还很落后,亦或说才刚刚起步[18]。即使在浅水(0～120 m)和半深水(120～300 m)区域,对于CPTU和"SHANSEP"方法还没有给予充分的重视和应用,对于土工强度参数的评价还主要依赖大量的钻孔取样和室内常规三轴试验结果。

在今天全球都在重视开发和利用深海海洋油气资源的时候,迫切要求我们赶快采取行动,大力发展我国的深水土工调查原位试验技术,同时重视和开展原状土样室内试验新方法的研究和应用。

参考文献:

[1] Henry S P, Repsol YPF, Paul W. World-wide deepwater exploration and production: past, present and future[A]. Offshore Technogy Conference[C]. 2002. OTC14024.

[2] Bradley J C, Nimish P D, Michael A M, *et al*, Gulf of mexico ultra-deepwater development study[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2001. OTC12964.

[3] Geotechnical & geophysical investigations for offshore and nearshore developments[R]. Written and Produced by Technical Committee 1, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005.

[4] Moran K. Deepwater technology in the international ocean drilling program[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2000. OTC12179.

[5] Bienvenu V, Bessonart J. An innovative deepwater geotechnical tool[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2001. OTC13096.

[6] Silva A J, Bryant W R, Young A G, *et al*. Long coring in deep water for seabed research, geohazard studies and geotechnical investigations[A]. Offshore Technology Conference[C]. 1999. OTC10923.

[7] Meunier J, Sangouard D, Lhuillier B. A new seabed penetrometer[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2000. OTC12095.

[8] Peuchen J. Deepwater cone penetration tests[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2000. OTC12094.

[9] Dutt R N, Rainey W S, Hamilton T K. Recent advances in deepwater gulf of Mexico geotechnical investigations[A]. Offshore Technology Conference[C]. 1997. OTC8303.

[10] Wei I, Tumay M T, Abu-Farsaka M Y. Field testing of inclined cone penetration[J]. Geotechnical Testing Journal, GTJ12541, 2005, 28(1): 31 - 41.

[11] Anderson G R, Bennett R H, Barber M E, *et al*. A multi-sensor piezometer for shallow marine sediments in coastal environments[J]. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1996, 19(4): 373 - 383.

[12] Ladd C C, Fott R. New design procedure for stability of soft soil[J]. ASCE J. Geotech. Eng. Div. 1974, 100(GT7): 736 - 786.

[13] Tan T S, Lee F H, *et al*. Effect of sampling disturbance on properties of Singapore clay[J]. ASCE J. Geotech. and Geoenvir. Eng., 2002, 128(11): 898 - 906.

[14] Quiros G W, Little R L. Deepwater soil properties and their impact on the geotechnical program[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2003. OTC15262.

[15] Al-Khafaji Z A, Young A G, Degroff W, *et al*. Geotechnical properties of the sigbee escarpment from deep soil borings[A]. Offshore Technology Conference[C]. 2003. OTC15158.

[16] 王淑云,顾小芸. SHANSEP方法的试验研究[J]. 中国造船, 2003, 44: 466 - 470.

[17] Wang Shuyun, Gu Xiaoyun, Tang Xingeng. Laboratory study on the undrained shear strength of marine clay[A]. Proc. of Second International Conference on Soft Soil Eng[C]. 1996. 163 - 168.

[18] 顾小芸. 海洋工程地质的回顾与展望[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 40 - 45.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net