

利用落锥试验确定深水软黏土的不排水抗剪强度^{*}

王虎刚,周松望

(中海油田服务股份有限公司,天津 塘沽 300451)

摘 要:不排水抗剪强度是黏性土的重要力学指标,在边坡稳定性分析、地基和桩基承载力的计算中都有广泛的应用。在国内海洋勘察工程中,通常软黏土不排水抗剪强度的确定方法有不固结不排水三轴压缩试验、手动十字板试验、电动十字板试验和无侧限压缩试验等。中国南海北部陆坡深水海域,海底浅层沉积物多为饱和软土,这种软土土质比较均一,具有高含水量、高液限和塑性指数、容重小、抗剪强度低等特点,从而使这种沉积物与常规意义上的饱和软土特性相比可能存在差异,利用落锥试验方法确定其黏性土不排水抗剪强度,具有很强的适用性。本文介绍了落锥试验的试验方法和试验关键技术点,通过该深水海域两个孔位的部分土质资料对比,说明落锥试验确定的黏性土不排水抗剪强度与海上工程设计、分析中使用的不排水抗剪强度具有很好的相关关系。

关键词:落锥试验;深水软黏土;均质土;不排水抗剪强度

中图分类号: TU411.7 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.02.004

目前,在国内海洋勘察工程中,土体的不排水抗剪强度一直是工程设计计算当中最重要的参数之一,准确确定土的不排水抗剪强度,一直是各国研究者和工程技术人员重点关注的内容^[1]。土的不排水抗剪强度受多方面因素的影响,如试验方法、加荷速率、初始应力状态、应力路径等^[2]。有很多种方法可以用来确定土的不排水抗剪强度,常规的试验方法有不排水不固结三轴压缩试验(Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test, UU),手动十字板试验,袖珍贯入试验,电动十字板试验(Miniature Vane Test, MV)等。

落锥试验作为一种测试黏性土液限的方法,已被许多国家采用并列入相应的土工试验规程。其实,落锥试验本质上是一种确定黏性土不排水抗剪强度的方法,Hansbo 早在 1957 年就通过大量的试验研究就提出了利用落锥试验预测不排水抗剪强度的经验公式^[3],靠落锥的自重贯入土中并记录锥头贯入的深度,根据锥重量、贯入深度和经验系数可以计算黏性土不排水抗剪强度。

以往,我国海洋能源的开发均限于浅水区域,落锥试验确定黏性土不排水抗剪强度的

^{*} 收稿日期:2015-11-24

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

(王佳实 编辑)

方法在海洋浅海勘察工程中由于受到土质复杂、缺乏经验数据等因素的影响,应用还是很少见的。近年来,随着我国油气勘探开发迈向深海,获得了大量宝贵的海底土质资料,对于深水海底沉积物的特性有了一定的科学认识。深水环境中,海底浅层沉积物多为饱和软土,这种软土土质比较均一,具有高含水量、高塑性指数、容重小、不排水抗剪强度低等特点,从而使这种沉积物与常规意义上的饱和软土特性相比可能存在差异^[4],落锥试验确定黏性土不排水抗剪强度的方法也得到了实际应用。本文介绍了落锥试验的试验方法和试验中关键技术点,并通过对中国南海北部陆陂深水海域两个孔位的部分土质资料做以统计分析,将 UU 试验、MV 试验、实际海洋工程中使用的不排水抗剪强度值与落锥试验测得不排水抗剪强度做以对比,充分说明了利用落锥试验确定的不排水抗剪强度值在该区域的可靠性和适用性。

1 试验方法

1.1 落锥试验方法

落锥试验设备有一个机械装置,允许锥上升或下降,在释放锥之前调整锥尖接触样品表面,落锥自由下落,5 s 后,通过刻度尺读取锥头贯入深度。不排水抗剪强度(S_u)与锥头的重量(Q)成正比,与贯入土中深度(h)的平方成反比:

$$S_u = k \times Q/h^2, \quad (1)$$

式中, k 是锥角 β 和系数 X 函数^[5], X 是衡量圆锥和土之间的摩擦作用的参数,Houlsby 将 X 用锥土间的黏着力 α_u 和土的不排水抗剪强度 S_u 的比值 α_u/S_u 表示, $0 \leq \alpha_u/S_u \leq 1$, α_u/S_u 值越大,圆锥表面越粗糙^[6],落锥锥尖如图 1 所示。例如当锥头重量为 60 g, β 为 60° 时,系数 k 取 2.5,表 1 中给出了 k 推荐的取值。表中的 k 值也可根据区域经验调整。

表 1 落锥仪的技术参数

Table 1 Specifications of the fall cone

Q/g	$\beta/^\circ$	h/mm	S_u/kPa	k
10	60	5.0~20.0	1.00~0.06	2.5
60	60	5.0~15.0	6.00~0.67	2.5
100	30	4.0~15.0	40.00~4.44	10.0
400	30	5.0~15.0	250.00~17.78	10.0

1.2 落锥试验技术要求

1) 落锥试验中的原状样品是由取样管中推出并切割

成约 40 mm 厚的柱状样。将圆柱状样品放置在落锥装置的平台上,选择 3 个位置(测试点的分布要遵循各结果之间互不影响、测试点不受边缘影响。锥尖插入土的部分与样品边缘的距离不能小于 7 mm,两个测试点的距离不能小于 14 mm)进行贯入试验^[7],3 个贯入深度的读数一般不超过平均值的 10%,最后取 3 个强度的平均值。

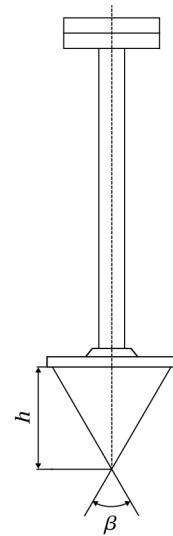


图 1 落锥锥尖示意图

Fig. 1 Sketch of the fall cone tip

2)对于重塑土的落锥试验,将做完原状试验的样品拿在手上揉搓至土均匀,一般为 5 min,然后将揉搓均匀的土填满落锥试验专用的杯中(至少有 60 mm 的直径和 30 mm 的深度),利用平口刀将土样与杯口平面刮平。然后进行与原状落锥试验相同步骤测试扰动土的强度。重塑土抗剪强度的测定应当在重塑完成后直接进行。

3)落锥试验中贯入深度的读数应该在表 1 中所列的深度范围内。当贯入深度超过 20 mm 时,需要另选一个更轻更钝的锥。贯入深度小于 5 mm 时,需要另选一个更重更尖的锥。

4)落锥由防锈的材料制成,并且粗糙度小于 $0.8\ \mu\text{m}$ 的光滑表面。每次试验前还得涂以薄层润滑脂,使 α_u/Su 值维持在某一较低值,同时大大消减了试验过程中 α_u/Su 前后不一致造成的圆锥贯入阻力前后不一致的影响。

5)落锥连同杆的质量误差应控制在额定质量的 1%,锥尖角度误差应控制在额定角度的 0.2° 范围内。

6)锥尖的最大的损耗应小于 0.3 mm。

7)锥必须锁定到位。要检查零值设定,如果仪器有特殊要求,初始零值读数到最近 0.1 mm 读数均需要记录。

8)样品与锥尖的接触面必须光滑并保持水平。

9)对于未扰动的样品,至少要做 3 次试验。如果任何一个测试值与平均值相差 10%,那么必须要加试一次,且在计算平均值时偏差较大的值要剔除。

2 应用实例

本文选取了 2014 年在中国南海北部陆坡深水区域两个(分别为 A 和 B)孔位的钻孔资料共 40 组数据进行对比。部分土质参数(含水量、液限、塑限、电动十字板试验值、落锥试验值、UU 试验值和海洋工程上使用的不排水抗剪强度值)如图 2 和图 3 所示,其中液限采用卡氏碟式仪法测得,塑限通过搓条法确定。

该陆坡区域平面呈北东—南西向展布,陆坡东西两端稍窄而中段宽广,海底地形起伏较大,总体上为北西向南东倾斜。A 和 B 孔水深在 500~1 000 m,在该深水环境中,海底浅层沉积物多为饱和软土,这种软土具有高含水量、高液限和塑性指数、容重小、抗剪强度低等特点。图 2 和图 3 中,土层的含水量在 60%~80%,容重变化范围为 $15\sim 16\ \text{kN/m}^3$,塑性指数变化范围为 25~50,液限含水率变化范围为 55%~80%,不排水抗剪强度在 10~40 kPa,根据美国试验及材料协会规范 2000 版中对土类的判别该土属于软到稍硬的高液限弹性粉土。

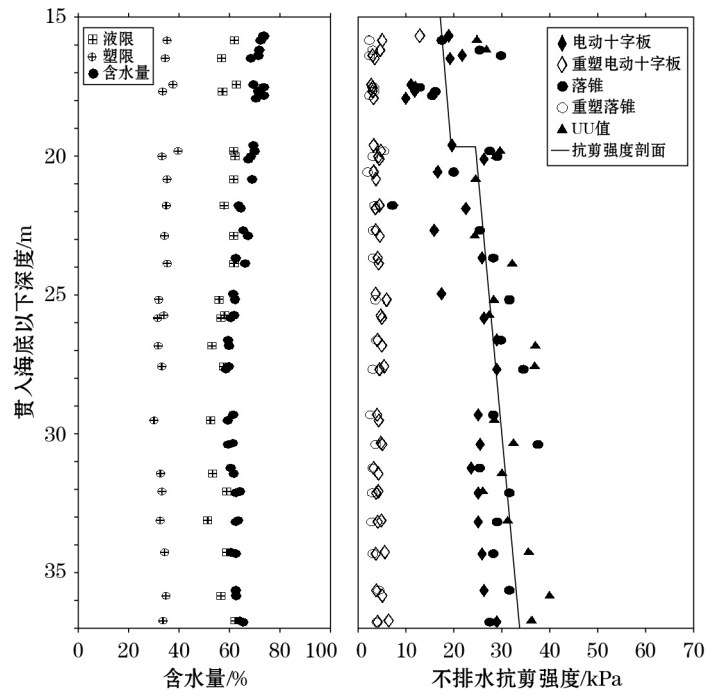


图2 A孔部分土质参数试验结果

Fig. 2 Data of soil material from Borehole A

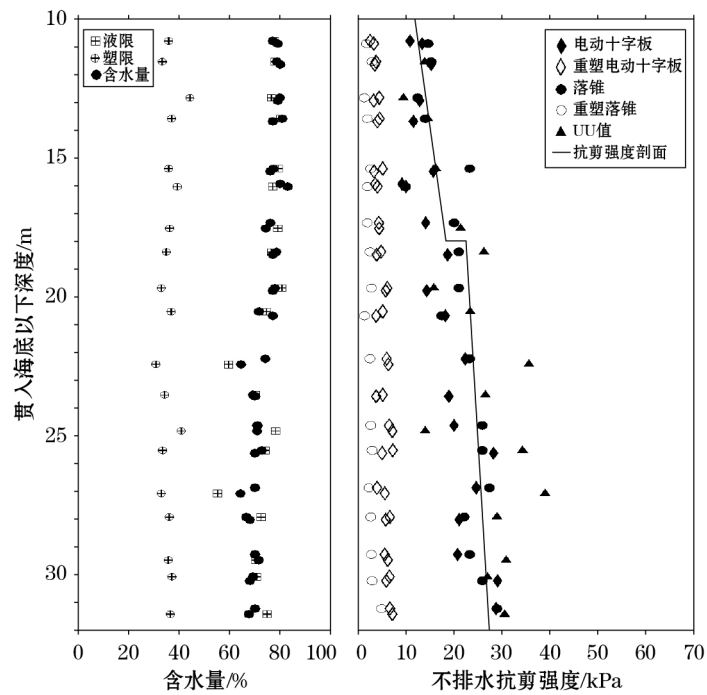


图3 B孔部分土质参数试验结果

Fig. 3 Data of soil material from Borehole B

由图 2 和图 3 可见,在该深水区域落锥试验结果确定的不排水抗剪强度基本分布于所设计抗剪强度剖面(桩基础设计、管线路由、水下基础等海上工程实际设计中使用的岩土设计参数)的两侧附近,即二者的相关性最好。重塑土的电动十字板试验值和落锥试验值吻合度也比较高。

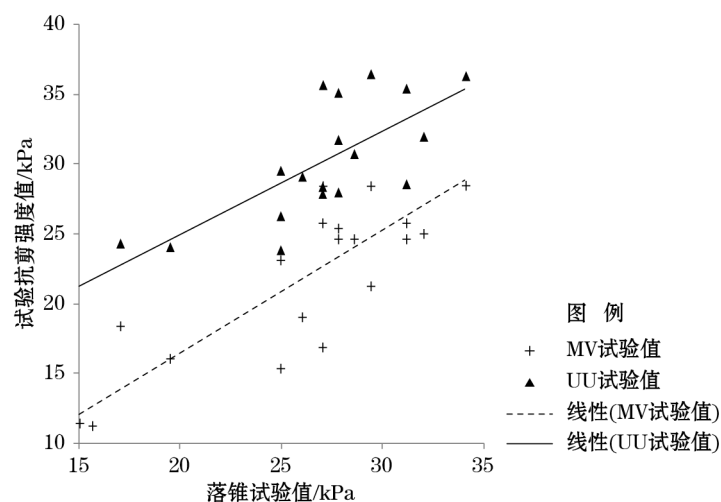


图 4 A 孔落锥试验与试验抗剪强度值线性回归曲线

Fig. 4 Linear regression curves between the fall-cone-tested and the tested shear strengths at Borehole A

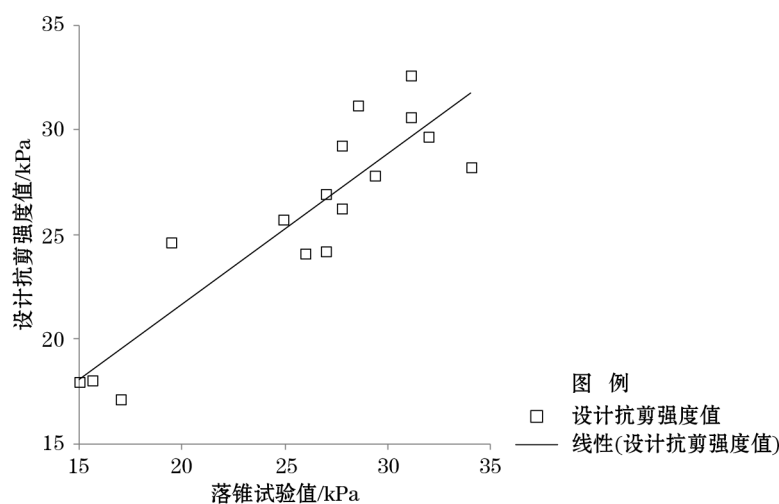


图 5 A 孔落锥试验与设计抗剪强度值线性回归曲线

Fig. 5 Linear regression curves between the fall-cone-tested and the designed shear strengths at Borehole A

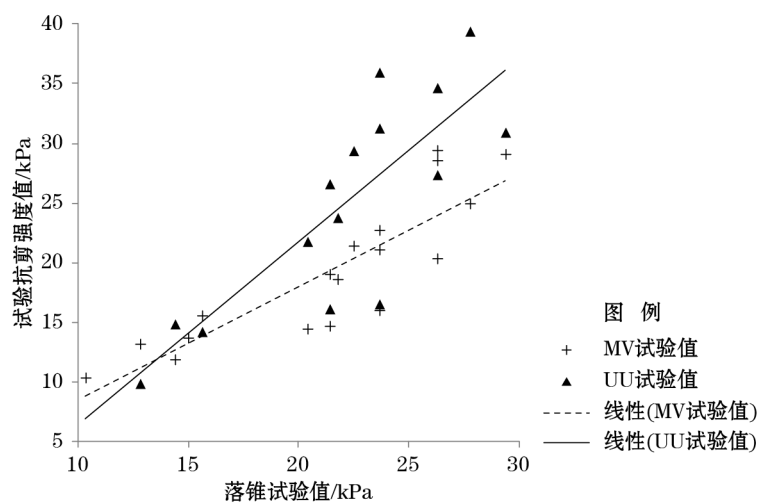


图6 B孔落锥试验与试验抗剪强度值线性回归曲线

Fig. 6 Linear regression curves between the fall-cone-tested and the tested shear strengths at Borehole B

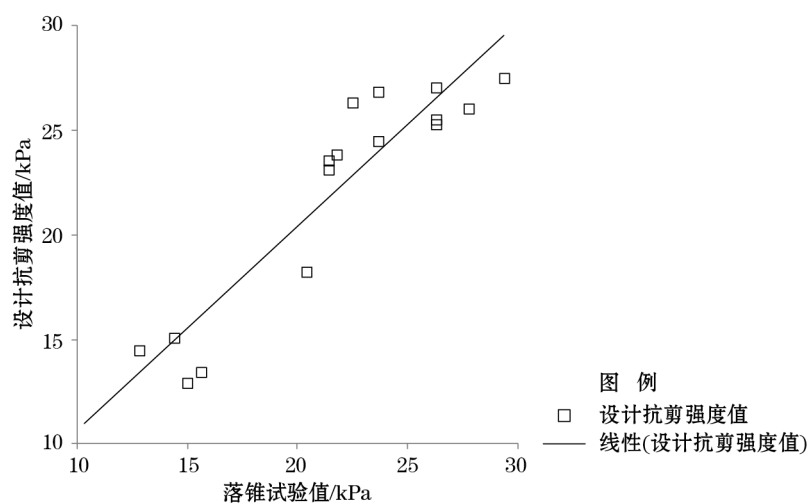


图7 B孔落锥试验与设计抗剪强度值线性回归曲线

Fig. 7 Linear regression curves between the fall-cone-tested and the designed shear strengths at Borehole B

表2 A孔落锥试验(FC)与试验/设计强度值相关关系

Table 2 The correlations between the fall-cone-tested (FC) and the tested/designed shear strengths at Borehole A

试验类型	相关关系	相关系数
MV 试验	$y=0.881\ 3x-1.169\ 5$	0.727 9
UU 试验	$y=0.742\ 0x+10.108$	0.515 3
设计抗剪强度	$y=0.715\ 6x+7.370\ 1$	0.832 7

表 3 B 孔落锥试验(FC)与试验/设计抗剪强度值相关关系

Table 3 The correlations between the fall-cone-tested (FC) and the tested/designed shear strengths at Borehole B

试验类型	相关关系	相关系数
MV 试验	$y=0.946\ 0x-0.901\ 4$	0.754 1
UU 试验	$y=1.533\ 0x-8.968\ 5$	0.664 0
设计抗剪强度	$y=0.974\ 9x+0.869\ 1$	0.856 1

从图 4、图 5、图 6、图 7 和表 2、表 3 可以看到,落锥试验与电动十字板以及设计抗剪强度间均具有很好的相关关系,与 UU 试验相关性稍差,相关系数基本上都大于 0.70,落锥试验与设计抗剪强度剖面相关系数达 0.8 以上,在 B 孔区域甚至达 0.85 以上。因此,在该区域利用落锥试验确定黏性土不排水抗剪强度的适用性得到了证实。

尽管需要更多的试验和数据去验证其它地方的落锥试验是否可靠,但通过以上分析证明在中国南海北部陆陂深水区域,对于均质土样,落锥试验值能更好的反应黏性土的不排水抗剪强度,可为桩基础设计、管线路由、水下基础等海上工程提供可靠的岩土设计参数。

3 结 论

基于落锥试验的方法和技术关键点,通过对中国南海北部陆陂区域均质沉积物的土质特性和不排水抗剪强度进行对比研究,主要得到以下结论:

- 1)中国南海北部陆陂深水海域,海底浅层沉积物多为饱和软土,这种软土土质比较均一,具有高含水量、高液限和塑性指数、容重小、抗剪强度低等特点。
- 2)在中国南海北部陆陂区域沉积的均质土样,利用落锥试验确定的黏性土不排水抗剪强度可为海上工程提供可靠的岩土设计参数。
- 3)对于非均质土样(夹有砂土,粉土薄层或含有贝壳,粗砂粒,裂隙等),落锥试验方法所得的不排水抗剪强度比其他试验有较少的代表性。
- 4)在进行落锥试验时,严格按照试验的技术要求进行试验,保证测试结果的可靠性。本文各种测试方法所得到土的试验强度值有所差别,主要是由于应变速率、土的各向异性和土层的破坏机理不同引起的。
- 5)本文中推荐的 k 值较好地预测了该区域的不排水抗剪强度值。系数 k 值也可根据不同区域的土质资料进行调整,在缺少经验的区域,落锥试验的可靠性有待实际验证。

参考文献

[1] 刘剑涛. 超固结黏性土不排水抗剪强度的研究[J]. 港工技术, 2013, 50(6): 47-50.
[2] 龚晓南. 软黏土地基土体抗剪强度若干问题[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1596-1600.
[3] HANSBO S. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test [J]. Swedish Geotech Institute Proc, Stockholm, 1957, 14: 1-48.
[4] 周杨锐, 王建华, 李书兆. 南海荔湾深水重塑沉积物的静、动特性[J]. 海洋通报, 2013, 32(5): 521-526.

- [5] HOULSBY G T. Theoretical analysis of the fall cone test[J]. *Geotechnique*, 1982, 32(2): 111-118.
- [6] Geotechnical investigation and testing-laboratory testing of soil-Fall cone test; CEN ISO/T S17892-6[S]. Genveve; ISO international, 2004.
- [7] TANAKA H, HIRABAYASHI H, MATSUOKA T, et al. Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials[J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(4): 590-599.

Determination of Undrained Shear Strength of Deepwater Soft Clays Through Fall Cone Test

WANG Hu-gang, ZHOU Song-wang

(*China Oilfield Services Limited, Tanggu 300451, China*)

Abstract: Undrained shear strength is an important mechanical property of clayey soils and is widely applied for analyzing the slope stability and calculating the bearing capacities of the foundation and the pile foundation. In the domestic marine engineering investigation, the methods for determining the undrained shear strength of soft clays are usually the unconsolidated-undrained triaxial compression test, the torvan test, the miniature vane test and the unconfined compression test. In the deepwater area of the northern South China Sea, the shallow sediment is mostly saturated soft clay, which is relatively homogeneous, high in water content and liquid limit and plasticity index, small in volume weight and low in shear strength. This type of sediment may differ in its property from the commonly saturated soft clays. It may be, therefore, suitable to use the fall cone test for determining the undrained shear strength of such clay. The methods and key techniques for the fall cone test are introduced. By comparing with the data of soil material from two boreholes drilled in the study area, the undrained shear strength of the clay determined through the fall cone test is well correlated to those designed for the marine engineering and used for the analysis.

Key words: fall cone test; deepwater soft clay; homogeneous soil; undrained shear strength