

自升式钻井平台插桩深度计算 及几个问题的探讨

郑喜耀

中国海洋石油南海西部勘探设计公司, 湛江坡头, 524057

摘要 在海上油气的勘探和开发中, 自升式钻井平台发挥了很大的作用。自升式钻井平台就其基础类型不同分为桩基式和沉垫式2种。本文就桩基式钻井平台的桩靴在均一黏性土、砂土及粉土上的插桩深度计算方法及其强度参数的选取等问题进行探讨。

关键词 自升式钻井平台 桩靴 不排水抗剪强度 有效内摩擦角 土的极限承载力

桩基式钻井平台在我国海上油气勘探开发中使用广泛。对于海上某一预定钻井位置, 钻井平台桩靴插入深度的计算是分析插桩压力是否满足基底土极限承载力要求的问题, 为非规则型且难于用某一埋深进行描述的问题。对海上建筑物地基上极限承载力的计算, 目前我国还没有统一规范, 在实际工作中, 一般采用国外提出的针对不同类型土的极限承载力简化计算式(下文叙述其中的一部分)计算。在我们近20年的工作实践中, 利用这些公式计算的平台插桩深度与实际插桩深度基本相符; 但由于作业区不同, 土质不同, 地区经验不同, 某些土试验参数的确定, 计算参数的选取, 应用计算公式时限制条件的选择等, 对计算结果影响较大, 有的甚至很大。笔者将工作中遇到的一些问题及解决的办法提供给读者, 以便参考和讨论。

1 插桩深度计算及问题的探讨

目前, 用于各种土层及土层组合类型的地基土承载力的计算方法各家不一, 下列各式为笔者在工作实践中所采用的。

1.1 黏性桩靴土的极限承载力计算及不排水抗剪强度 τ_s 的取值

对于黏性土, 一般按桩靴插入土中所产生的孔及孔壁是否崩塌分为土的回填和非回填2种情况。对于回填情况, 土的极限承载力用下式计算:

$$F = A N_c \tau_s + \gamma V \quad (1)$$

$$N_c = 6(1 + 0.2 h/b) \quad (2)$$

式中: F 为土的极限承载力, kN; A 为桩靴面积, m^2 ; h 为桩靴埋深, m; b 为桩靴宽度, m; N_c 为承载力因子; τ_s 为桩靴埋深以下土的平均不排水抗剪强度, $kN \cdot m^{-2}$; γ 为桩靴所排开的土的有效容重, $kN \cdot m^{-3}$; V 为桩靴排开的土体积, m^3 。

对于非回填情况, 土的极限承载力则用下式计算:

$$F = A(N_c \tau_s + \gamma' h) \quad (3)$$

式中 γ' 为桩靴埋深以上土的平均有效容重, $kN \cdot m^{-3}$ 。

在上述公式的应用中, 土的不排水抗剪强度 τ_s 取值大小对计算结果影响很大, 并且该式假定黏性土的内摩擦角 $\varphi = 0^\circ$ 。土的抗剪强度不是定值, 它取决于土工试验的类型。一般推荐不固结不排水三轴剪切试验(UU)及小型十字板试验的结果作为计算的主要依据。对于黏性土, 当其在一定的压力(σ)下受剪切直至破坏时, 土的抗剪强度 τ_f 由黏聚力和摩擦力构成。根据库仑定律, $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 。黏性土中含粉砂、含砂量越多、稠度越大, 内摩擦角也越大。对 UU 试验而言, 试验过程中围压 σ_3 加大, 抗剪强度

也跟着增大; 但 σ_3 应加多大, 目前国内外比较有权威的工程勘察公司及科研单位做法并不一致: 有的主张采用水压 + 土压 ($\sigma_3 = \gamma_w H + \gamma h$), γ_w 为水的重度, H 为水深; 有的主张采用土的有效压力 [$\sigma_3 = (\gamma - 1)h$]; 也有的主张采用土压 ($\sigma_3 = \gamma h$)。笔者认为: 上述几种用法各有其道理, 但也存在着一定的局限性。就某个土样来说, 试验时 σ_3 需加多大, 应以上述方法为主要依据, 结合黏性土的软硬程度及其含砂量和级配情况来确定, 即: (1) 当土为硬到极硬 (100~200 kPa) 土, 且含粉砂和含砂较多到很多时, σ_3 应取偏小值, $\sigma_3 = (\gamma - 1)h$, $\sigma_3 = 70$ kPa; (2) 当黏性土为极软到较硬 (0~50 kPa) 土, 且含粉砂和含砂少到很少时, σ_3 取大值, $\sigma_3 = \gamma_w H + \gamma h$ 。笔者在北部湾某区块几个井位工程地质调查中为某钻井平台所做的插桩深度计算中所遇到的情况证实了上述观点。

第(1)种情况的 UU 试验结果见图 1。可以看出, UU 试验围压采用 $(\gamma - 1)h$ 结果与现场的 PP、Tv 试验结果很吻合。综合考虑上述诸土工试验结果, 提取土的不排水抗剪强度 τ_s 值, 利用式(3)进行计算, 得出该平台在该位置的插桩深度为 2.0 m, 但该平台 3 条桩腿的实际插深分别为 2.33、2.33、3.09 m。造成上述插桩深度差异的原因是多方面的, 但如果从 τ_s 值方面找原因, 则 τ_s 的取值偏大了。就 UU 试验而言, 试验时所加的 σ_3 较合理或稍大些。

第(2)种情况, 土的 UU 试验 σ_3 取 $(\gamma_w H + \gamma h)$ 所得的结果, 见图 2。可以看出, 现场 PP、Tv 试验结果与 UU 试验结果很吻合, 但一般情况下, UU 试验结果比 PP、Tv 试验结果稍大。理论计算该平台在这一位置的插桩深度为 13.2 m, 而实际插桩深度平均为 12.5 m。对于这一类土, σ_3 取较大值是合适的。

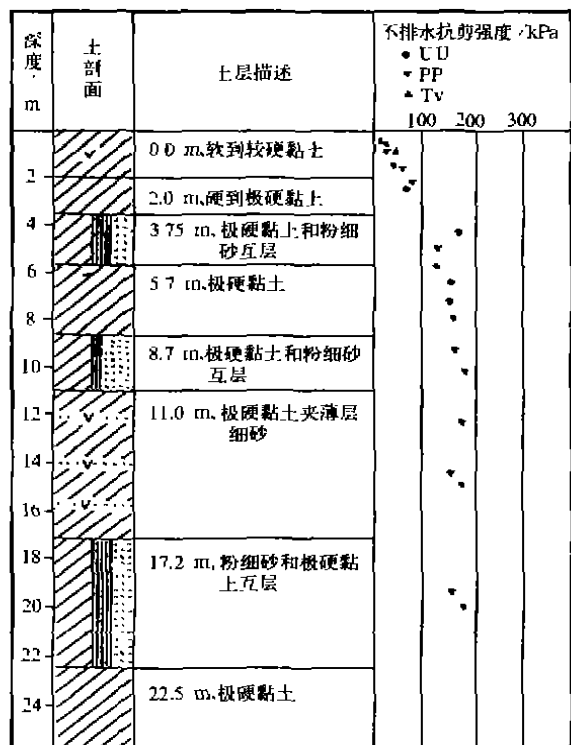


图 1 北部湾某井场钻孔剖面图(实例 1)

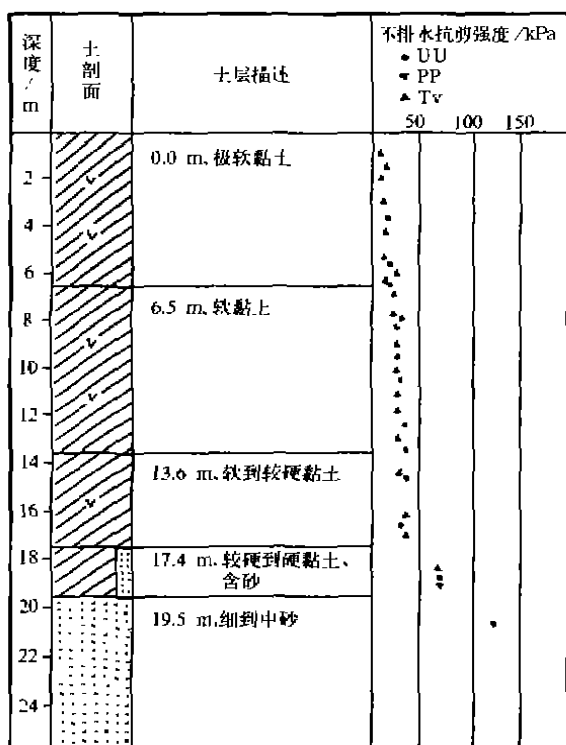


图 2 北部湾某井场钻孔剖面图(实例 2)

应用上述诸式, τ_s 的取值范围也是一个值得商榷的问题。按照式(1)和式(3)的建议, τ_s 的取值范围为基础最大埋深往下 $b/2$ 之间的平均值, 但实际应用则不能一概而论。对于均一黏土层, 且厚度很大, 上述 τ_s 值的取法较合适; 但对于海底表层土为极软、软到较硬, 且土层厚度不大 (例如 < 3 m) 的情况, 当其下伏土层为很厚的硬到极硬黏性土时, 如果 τ_s 值平均到 $b/2$ 深度处, 则计算的土的极限承载力偏大, 对应的插桩深度减小, 但实际的插桩深度比理论计算的要大; 如果 τ_s 值只平均到上覆软层底面, 其取值明显小, 计算的土的极限承载力也小, 相应的插桩深度增大, 与实际插桩深度的差距缩小。上述第(1)种

情况理论计算平台插桩深度为 2.0 m, 而实际 3 条桩腿的插深为 2.33、2.33、3.09 m, 颇能说明这一问题。在这种情况下, 建议 τ_s 的取值范围应减小, 即软层中平均值较合适。

1.2 砂土桩靴土的极限承载力计算及有效内摩擦角 φ' 的取值

砂土桩靴土的极限承载力用下式计算:

$$F = [0.3 \gamma'_1 b N_\gamma + \gamma'_2 h (N_q - 1)] + \gamma' V \quad (4)$$

式中: γ'_1 为 $(h \sim h + b/2)$ 土的平均浮容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; γ'_2 为桩靴埋深以上土的浮容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; N_γ 、 N_q 为基于土有效内摩擦角 φ' 的承载力系数; γ' 为桩靴所排开土的平均有效浮容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

应用式(4), 砂土的极限承载力主要取决于土的内摩擦角 φ 。一般推荐 φ 值取自三轴 CD 试验结果。由于平台桩靴材质为表面光滑的钢材, 桩靴与土的实际摩擦力比普通的表面粗糙的刚性材料小, 计算时取土的有效内摩擦角 φ' , 且 $\varphi' = \varphi - 5^\circ$ 。应用上述方法, 从理论上讲较为合理, 但 CD 试验对土样要求高, 操作复杂, 难度较大。笔者 1987 年参加的南海东部海域某井位为“南海 4 号”钻井平台所做的插桩深度分析说明了上述问题。该井位钻孔资料见图 3。可以看出, CD 试验结果为: 1~2 m, $\varphi = 35^\circ$; 2~3 m, $\varphi = 33^\circ$; 8~9 m, $\varphi = 35^\circ$ 。应用式(4), 计算时取 $\varphi' = \varphi - 5^\circ$, 得出的“南海 4 号”平台在该位置的插桩深度为 1.15 m, 而该平台的实际插桩深度为 1.2 m, 结果令人满意。

1.3 粉土桩靴土的极限承载力计算方法

粉土上的桩靴土的极限承载力计算没有固定的公式, 其插桩深度分析根据桩靴插入期间土的排水属性估计, 分别按砂土上的桩靴计算方法或黏性土上的桩靴计算方法进行计算。这里主要涉及到对地基土的工程特性判断的问题。笔者建议对于这一类土, 土属性的判断应以现场判断为主, 用取样时土的阻力及实验室颗分结果等加以证实。笔者 1996 年在莺歌海某井位为“南海 4 号”钻井平台所做的插桩分析便是一个很典型的例子。该孔位钻遇土层情况见图 4。从图中可以看出, 海底表层 0~13.65 m 深度范围内, 土主要为粉土。现场取样及土工试验结果表明, 该土主要表现为排水性, 土的极限承载力按式(4)计算。

三轴 CD 试验表明该土的内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$, 计算时取土的有效内摩擦角 $\varphi' = \varphi - 5^\circ = 15^\circ$ 。理论计算

深度 m	土剖面	土层描述	有效内摩擦角 (°)
0.0		0.0 m, 中粗砂、中细砂、松散	30
2			30
4		2.3 m, 砂, 含砾	30
8			30
10			30
12			30
14		13.1 m, 中到细砂	
16			
18		17.1 m, 砂, 含砾	
20			
22		21.4 m, 中到细砂	
24			

图 3 南海东部海域某井场钻孔剖面图(实例 3)

深度 m	土剖面	土层描述	有效内摩擦角 (°)
0.0		0.0 m, 粉土, 含黏质、砂质	15
2			15
3		2.0 m, 粉土, 含黏质、砂质、夹少量粉质黏土微层	15
4			15
5			15
6		5.25 m, 粉土, 含砂质、黏质	15
7			15
8			15
9			15
10		9.2 m, 粉土, 含砂质、黏质、或粉土, 含黏质	
11			
12			
13			
14		13.65 m, 砂含砾, 或粉土, 含黏质	
15		15.4 m, 硬黏土	

图 4 莺歌海某井场钻孔剖面图(实例 4)

南海 4 号平台在该位置的插桩深度为 4.6 m, 而该平台的实际插桩深度为 4.5 m, 结果几乎一致。

2 结 论

(1) 自升式钻井平台地基土极限承载力的计算, 与陆上建筑物地基土承载力计算的方法有所不同, 计算公式经过了简化, 并且在某些方面带有一些经验性, 对于不同土样, 采用不同的公式进行计算。

(2) 就均一黏土层上的桩靴土的极限承载力计算而言, 计算时土的不排水抗剪强度主要以三轴 UU 试验的结果为主, 并假定内摩擦角 $\varphi = 0^\circ$, 但对不同的土样, 试验时所加围压(σ_3)的大小, 对试验结果的影响较大, 甚至很大。建议进行 UU 试验时, 所加 σ_3 的大小根据不同的土样而定。在 σ_3 确定前, 先取一两个土样进行试做, 参考现场 PP、Tv 试验结果, 然后确定所加围压的依据及应加的大小。

(3) τ_s 的取值范围一般情况下为 $(h \sim h + b/2)$, 具体数据应根据土层情况做相应的调整。

(4) 砂土上的桩靴极限承载力的计算所用的内摩擦角一般取自三轴 CD 试验。

(5) 粉土上的桩靴极限承载力的计算主要基于对粉土属性的判断: 当其表现为排水性时, 用砂土上的桩靴公式进行计算; 当其表现为不排水性时, 用黏性土上的桩靴公式进行计算。

3 参考文献

1 Fugro Engineer's B.V. Computation Methods for Jack-Up Rig Footings on Uniform Soils 1992

2 Alan G Young, et al. Foundation Performance of Offshore Jack-Up Drilling Rigs. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(7)

(收稿日期: 1998-08-10; 编辑: 张金禄)

(上接第 17 页)

卡在隔水导管上, 随隔水导管放入导管架内。考虑到基盘和导管架的制造安装误差, 在扶正器外缘与导向环内径之间留有 25.4 mm 的间隙。为避免隔水导管在风浪下的位移和震动, 把它在水面上标高为 EL + 4.5 m 处用楔块固定。在隔水导管就位后, 在每个导向环内焊接 4 个楔块将隔水导管固定。

5 基盘安装和回接结果

平湖油气田平台钻井基盘的建造由南海西部公司的利海公司于 1996 年 10 月完成, 焊接质量和尺寸控制均满足规格书要求。1996 年 10 月 24 日, 南海 6 号钻井船装载基盘并进行了运输和海上安装。经过 2 周多的海上作业, 该基盘的安装工作于 11 月 18 日完成。经现场测试, 该基盘安装方位误差为 0.7° ; 基盘和定位桩倾角误差为 0.5° , 平均沉降量为 0.457 m。

在导管架安装之前, HEEREMA 对基盘的安装情况进行了预调查, 发现钻井岩屑确实掩埋了部分基盘, 其中在东南角岩屑掩埋厚度超过 1.2 m。由于在设计时预料到了这些因素并采取了对策, 因而未影响回接作业。此外, 也发现出乎意料的情况, ROV 调查发现基盘和定位桩上挂有鱼网, 经测试, L_1 桩倾斜 2° , L_2 桩倾斜 1.2° , 2 桩顶端的水平距离为 13.03 m。由于 2 桩倾斜方向一致, 其中心距的相对水平误差仍在允许的范围内。至于桩顶的垂直误差, 经实测, L_1 桩在泥面上 9.4 m, L_2 桩在泥面上 6.94 m, 相对高差为 2.46 m, 与定位桩的设计高差基本一致。

导管架的就位在 1998 年 4 月完成, 经过调平, 导管架水平度在 NE-SW 方向为 0.126° , 最大高差为 100 mm, 在安装允许误差 152 mm 范围内, 也满足钻、完井提出的小于 0.3° 的要求。

导管架和基盘安装的良好水平度控制, 为预钻井的回接打下了良好的基础。1998 年 8 月, 井口回接作业以每 2 d 1 口井的速度顺利完成, 其中气井回接在我国海上油气田还是首次, 因此, 平湖油气田钻井基盘和回接辅助结构的实践, 为以后的工程项目提供了宝贵的经验。

(收稿日期: 1999-04-16; 编辑: 张金禄)