

文章编号 : 1005-9865 (2005) 02-0087-05

自升自航式船桩靴入泥初步分析

龚 闽^{1,2}, 谭家华¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100176)

摘 要: 初步分析自升自航式船桩靴的入泥过程、入泥机理和入泥深度的组成, 讨论桩靴入泥深度的计算分析方法, 将入泥过程看作基础埋深增大的过程, 用极限承载力公式分析计算桩靴的入泥深度和适宜的地基。

关键词: 自升自航式船; 桩靴; 入泥; 分析

中图分类号: U661.4 **文献标识码:** A

Preliminary analysis of liftboats spuncan penetration in soil

GONG Min^{1,2}, TAN Jia-hua¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. China National Petroleum Offshore Engineering Co., LTD, Beijing 100176, China)

Abstract: The process, mechanism and depth of liftboats spuncan penetration in soil are analyzed, and the methods for calculating spuncan penetration discussed. Considering the process of spuncan penetrating in soil as foundation depth augmenting, the classical ultimate capacity formula is used to calculate the depth of spuncan penetration and to predict the foundation fit for liftboats.

Key words: liftboats; spuncan; penetration; analysis

自升 - 自航式船是一种特殊的海洋工程船,有许多优良特性,在我国有良好的开发前景,但我国目前还没有使用和建造报道。自升 - 自航式船的重要技术特点是采用尺寸相对较大的独立大桩靴,带来的重要优点之一是桩靴入泥深度小,船的插、拔桩速度快,机动性好。入泥深度的分析是我国开发自升 - 自航式船的关键技术之一。本文主要讨论自升 - 自航式船^[1]桩靴入泥深度的计算分析方法,初步计算出桩靴入泥深度的范围,初步掌握了自升 - 自航式船适用的海底工程地质条件。

在自升 - 自航式船操作手册中,入泥深度控制非常重要,通常作为限制条件给出。我国有关规范没有给出计算方法,国外也没有相关的可以直接计算的方法。文献[2,3]比较了自升式平台现场测量的入泥深度和极限承载力公式计算的入泥深度,结果显示极限承载力公式计算值有较好的参考价值。

自升 - 自航式船类似于独立桩靴自升式平台,与自升式平台相比,自升 - 自航式船有其特殊性,它的桩靴尺寸相对较大,对地比压和入泥深度大大小于一般独立桩靴自升式平台,是一种典型的浅基础,用浅基础极限承载力公式更加适合,更有参考价值。文献[3]认为按 Skempton 公式计算的地基极限承载载荷与实际接近。

本文将桩靴作为浅基础,海底土作为地基,入泥过程看作是基础埋深增大的准静态过程,桩靴入泥过程中,其底部的地基土始终处于失效破坏状态,入泥停止时,地基土相当部分处于塑性区。讨论了相关的可能用于入泥计算的方法,包括陆地《建筑地基基础设计规范》计算地基沉降量的方法,《海上固定式平台入级与建造规范》中计算桩端的承载力的方法,临塑载荷、临界载荷公式和极限承载力公式方法。分析认为极限承载力公式较为适合用于独立大桩靴入泥深度的计算。

收稿日期:2004-02-24

作者简介:龚 闽(1963 -),男,安徽人,高级工程师,主要从事海洋工程方面的研究设计。

分析和控制桩靴入泥深度的意义还在于：

1)入泥深度影响船的最低安全作业气隙和机动性,参见图 1。

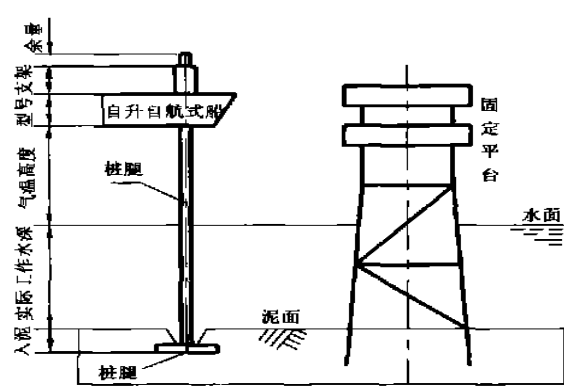


图 1 自升 - 自航式船工作水深、入泥示意图
Fig. 1 Schematic view of liftboats penetration

桩腿长度、作业水深已定时,入泥深度越大,气隙高度越小。

入泥过深,拔桩困难,船的机动性不好甚至会有危险。

2)入泥深度影响建造成本

最大作业水深给定后,桩靴的设计入泥深度越大,桩腿的设计长度越大。

相同桩靴尺寸,入泥深度越大,所需拔桩力越大,船体主尺度、重量、升降装置的能力、桩腿直径等都要增大,船的造价增加。

限制了入泥深度就等于限制了作业的海域和海底工程地质条件。

1 自升自航式船及桩靴的基本特点

处于支撑状态的自升自航式船,桩靴插入海底并支撑于海底泥中,船体距海面一定高度,参见图 2。

其桩靴的典型形状为长方形,长度和宽度较大,高度较小,参见图 3 和表 1。桩靴的对地比压一般在 35 ~ 70 kPa 之间,相对较小,风暴状态可接近 100 kPa^[2]。表 1 列出五个国外自升自航式船的典型尺寸。

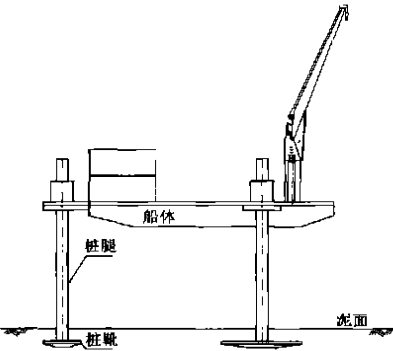


图 2 处于支撑状态的自升自航式船
Fig. 2 A liftboat in supported condition

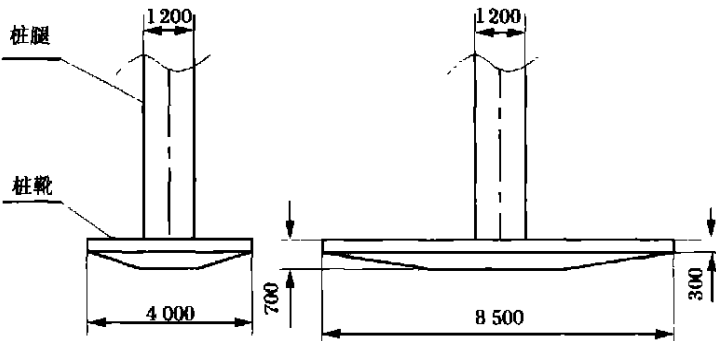


图 3 典型的桩靴示意图
Fig. 3 A representative liftboats spun can

表 1 五个典型的自升自航式船及其桩靴的尺寸(由英制转为公制)

Tab. 1 The dimensions of five typical liftboats and spuncans

型号 (ft)	桩腿/ (ft) 直 径	主船体尺度/ m 型长 ×型宽 ×型深	桩靴尺度 / m	吊机能力 (两台)
Class105	32	19.4 ×17.3 ×1.8	5.5 ×2.7 ×0.6	15t + 25t
Class145	42	24.5 ×11.5 ×2.4	7.3 ×3.6 ×0.6	25t + 40t
Class175	54	29.7 ×12.1 ×2.7	7.9 ×4.2 ×0.6	10t + 80t
Class200	66	33.6 ×20.0 ×3.0	9.7 ×4.8 ×0.6	25t + 125t
Class250	72	47.4 ×31.2 ×3.9	14.5 ×8.8 ×1.7	175t + 175t

注:表中的前四条船为 ARIES MARINE CORPORATION,第五条船为 Superior Energy Services 公司

2 桩靴入泥的组成及入泥深度的估算方法分析

2.1 桩靴入泥包括三种沉降,瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降

1)瞬时沉降入泥发生在快速加载的升船和预压阶段。瞬时沉降是桩靴沉降入泥的主要部分。瞬时沉降是由土体产生的剪变形引起的沉降^[3]。

2) 固结沉降发生在整个支撑状态过程中。桩靴产生的附加应力使土体的孔隙压缩而产生的沉降^[3]。对于粘性土壤,固结沉降很小。对于非粘性砂质土,固结沉降较多一些,但总沉降量不大。

3) 次固结沉降在整个支撑状态过程中都可能发生:地基被施加载荷后经历较长时间,土中超孔隙水压力完全消散,有效应力不变的情况下,由于土的固体骨架长时间缓慢蠕变产生的沉降^[3],这部分沉降量较小。

2.2 估算方法的分析

2.2.1 船级社规范

《海上移动式平台入级与建造规范》中没有计算桩靴承载力的方法。《海上固定式平台入级与建造规范》中有计算桩基平台桩的承载力方法。桩的承载力分为两部分,一部分为桩的表面摩擦阻力,一部分为桩端的承载力,其中在粘性土壤中桩端的承载力为地基剪切强度的9倍。这个计算方法固定平台有其合理性,因为固定平台的桩通常较长,插入海底数十米深处,深处泥土的强度较高,承载能力较大,加上桩在被打入过程中,端部的泥土被强力挤压,密度较大,因此取用较大的桩端承载力系数是可以的。而自升自航式船桩靴入泥浅,没有被强力打入的过程,失去了上述两个基本条件,利用固定平台桩端承载力的计算方法显然不合适。

2.2.2 《建筑地基基础设计规范》

陆地建筑基础沉降过程与桩靴入泥过程地基土变形的机理不同。

首先,陆地地基的设计承载能力是足够的,陆地基础不允许出现过大的沉降,沉降量限制在非常小的范围之内。其次,陆地基础沉降时间长,沉降量小,通常发生地基土层孔隙压缩变形,以固结沉降为主,计算方法基于泥土的初始破坏。

海上桩靴入泥是动态过程,在桩靴入泥停止之前的过程中,地基的承载能力始终处于不足状态。再者桩靴入泥速度快,时间短,在粘性土中入泥深度较大,通常不发生地基土层孔隙压缩变形,以瞬时沉降为主,在停止入泥的时刻,地基的承载力刚好等于桩靴的对地压力。

因此,《建筑地基基础设计规范》不适用于桩靴入泥计算分析。

2.2.3 承载力公式

承载力公式有三种,临塑载荷、临界载荷和极限载荷公式。

临塑载荷是指在桩靴载荷作用下,地基中刚开始产生塑性变形时,桩靴底面单位面积上所承受的载荷。临界载荷是指在桩靴载荷作用下,地基产生的塑性变形范围控制在一定限度时,桩靴底面单位面积上所承受的载荷。极限载荷是指在桩靴载荷作用下,地基中产生的应力达到极限平衡时,桩靴底面单位面积上所承受的载荷。

桩靴在入泥过程中,对地基产生的压力始终大于地基土的极限承载力。桩靴入泥停止时,地基的承载力刚好等于桩靴的对地压力,此时,桩靴底部的地基土大部分处于塑性区。因此,桩靴的入泥深度估算不宜使用临塑载荷和临界载荷公式,而应该使用极限承载力公式。

本文将桩靴入泥过程看作基础埋深增大的过程,使用经典土力学极限承载力理论公式。

3 桩靴入泥深度的估算

国外使用经验认为自升-自航式船的入泥深度控制在0.5~1.5 m之间。

3.1 土力学极限承载力公式

Tersagi 条形基础极限承载力公式^[4]:

$$q_u = CN_c + \gamma_1 \cdot DN_q + 1/2 \gamma_2 BN_r \quad (1)$$

式中: q_u 为地基极限承载力; C 为土的凝聚力; N_c 为承载能力系数; γ_1 为桩靴基线以上土的有效重度; γ_2 为桩靴基线以下深度 B 的土的有效重度; B 为桩靴的宽度; D 为若桩靴顶面没有覆土回填,海底泥面到桩靴基线,如果桩靴顶面被覆土回填,取桩靴的平均厚度 h ; N_c , N_q , N_r 为承载能力系数,与内摩擦角、桩靴形状和入泥深度有关,查文献[4]图可得。

1) 不排水条件的粘性土,内摩擦角 $\phi=0$,极限承载力公式(1)可改为:

$$q_u = CN_c + \gamma \cdot D \quad (2)$$

式中: C 为桩靴下 $0.7B$ 深度处土的平均剪切强度(kPa); $0.7B$ 深度内土壤剪切强度的变化范围在 $\pm 50\%$ 内。

Skempton 给出承载力系数 N_c 的计算方法^[3]:

$$N_c = 5.0(1 + 0.2D/B)(1 + 0.2B/L)$$
 (3)

式中： L 为桩靴的长度， γ 为土的有效重度。

2) 完全排水条件的砂土，凝聚力 $C=0$ ，极限承载力公式(1) 改为：

$$q_u = 1 S_q D N_q + 1/2 \cdot 2 S_r B N_r$$
 (4)

式中： S_r 、 S_q 为形状因素。

长方形桩靴的承载力公式：
$$q_u = DN_q + 0.4 BN_r$$
 (5)

3) 双层或多层粘土

遇到双层或多层粘土时，可用 Brown 和 Meyerhof 's 方法^[4]。该方法给出了圆形基础双层地基土的承载力计算方法。

$$q_u = S_{ut} N_{mc}$$

式中： N_{mc} 为承载力因素，与 S_{ub}/S_{ur} 、 H/B 有关，查文献[5]有关图可得； S_{ur} 为上层土的平均剪切强度； S_{ub} 为下层土的剪切强度，位于桩靴最宽处以下 $1/2B$ 处； H 为上层土的厚度； B 为桩靴的宽度或直径。

如果其中一层为粒状土时，可以用等效的方法换算出当量粘土剪切强度，再用上述公式计算承载力^[4]。

3.2 计算分析举例

为计算方便，桩靴简化成长方体， h 是桩靴平均高度， D 为长方体桩靴基线到泥面高度。

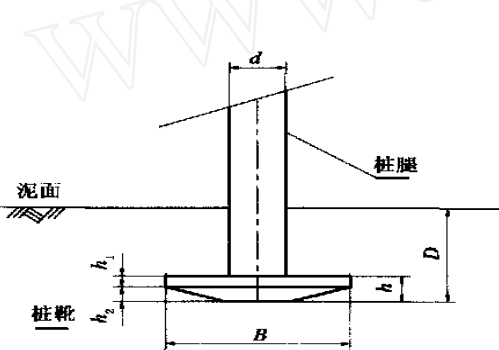


图 4 桩靴入泥状态示意图
Fig. 4 Schematic view of spuncan penetration

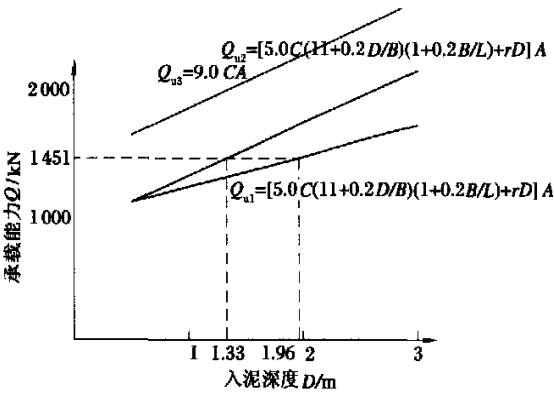


图 5 Class145 船入泥深度估算图
Fig. 5 The drawing for calculating penetration depth of liftboat of Class145

算例一：估算 Class145 船在某已知粘性土中可能的入泥深度 D 。

已知单只桩靴设计最大对地压力 $Q_{max} = 1451$ kN，桩靴宽度 $B = 3.6$ m，桩靴长度 $L = 7.2$ m，桩靴平均高度 $h = 0.5$ m； $A = B \cdot L$ ；粘性土的有效重度 $\gamma = 7$ kN/m³；地基土凝聚力 C 随深度增加， $C = 6.3 + 1.4D$ 。

按 Skempton 公式，如果“独立大桩靴”入泥后，顶面被覆土回填， $q_{u1} = 5.0 \cdot C(1 + 0.2D/B)(1 + 0.2B/L) + \gamma h$ 。如果“独立大桩靴”入泥后，顶面没有覆土回填， $q_{u2} = 5.0 \cdot C(1 + 0.2D/B)(1 + 0.2B/L) + \gamma D$ 。 $Q_{u1} = q_{u1} \cdot A$ ， $Q_{u2} = q_{u2} \cdot A$ 。图 5 为 Class145 船入泥深度估算图。图中还给出《海上固定式平台入级与建造规范》中计算桩端的承载力的计算结果， $q_{u3} = 9.0 \cdot C$ ，明显偏大。

由计算知桩靴可能入泥在 1.33 ~ 1.96 m 之间，接近 1.5 m。此处土的凝聚力在 8.4 ~ 9.1 kPa 之间。

算例二：估算 Class145 船在无粘性土中可能的入泥深度 D 。

已知设计参数同算例一。以渤海湾胜利油田胜海 6 井位海底土工程地质为例，上层土 0 ~ 2.6 m 为粉土，有效容重 $\gamma = 9.9$ kN/m³，内摩擦角 $\phi = 20^\circ$ ，承载力系数 $N_q = 6.4$ ， $N_r = 5.4$ 。

将数据 N_q 、 N_r 、 B 和 γ 代入公式(5)得： $D = 0$ 时， $q_u = 77$ kPa，总承载力 $Q_u = q_u \cdot B \cdot L = 1995$ kN。

$Q_u = 1995$ kN 大于 $Q_{max} = 1451$ kN，可以认为 Class145 船桩靴的入泥深度为零。但实际 0 ~ 2.6 m 深度范围内的粉土强度并不一样，表层比较松散，实际桩靴有比较小的入泥。

算例三：几种推算

最大对地比压改为 $q_u = 100 \text{ kPa}$, 算例二中的桩靴尺寸、内摩擦角和有效容重不变, 由公式(5) 得入泥深度 $D = 0.36 \text{ m}$ 。

若设内摩擦角为 $\phi = 25^\circ$, 算例二中桩靴尺寸、有效容重不变, 最大对地比压 $q_u = 100 \text{ kPa}$, 由公式(5) 得 $D = 0 \text{ m}$ 。若希望桩靴入泥 0.6 m , 则内摩擦角为 $\phi = 18.9^\circ$, 见图 6。

桩靴宽度尺寸改为 4.2 m , 算例二中内摩擦角、有效容重不变, 最大对地比压 $q_u = 100 \text{ kPa}$, 由公式(5) 得入泥深度 $D = 0 \text{ m}$ 。若希望桩靴入泥 0.6 m , 则桩靴宽度可减为 3.3 m , 见图 7。

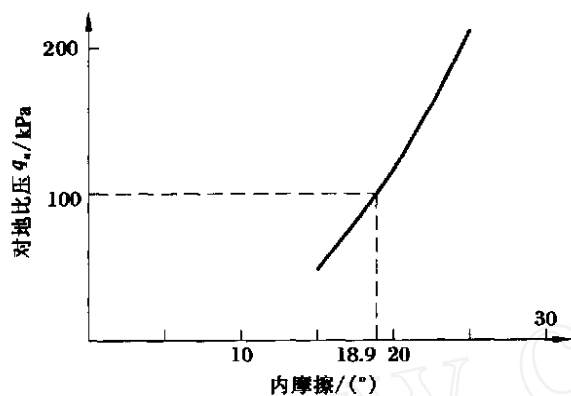


图 6 算例 3 中 $q_u = 100 \text{ kPa}$ 的计算结果

Fig. 6 The calculating result in example 3 with $q_u = 100 \text{ kPa}$

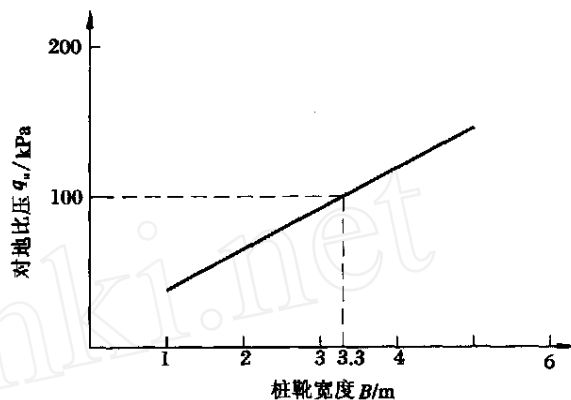


图 7 算例 3 中 $\phi = 25^\circ$ 的计算结果

Fig. 7 The calculating result in example 3 with $\phi = 25^\circ$

4 分析

在承载力较高的砂性土或粉土上, 自升 - 自航式船桩靴的入泥深度较小。在承载力较弱的粘性地基土中, 入泥深度一般较大。

4.1 粘性土情况分析

由计算结果知:

- 1) 土壤的凝聚力 C 总是对入泥深度影响最大, 应注意剪切强度与入泥深度的关系。
- 2) 桩靴的形状对入泥深度有一定的影响, 但形状因素“ $0.2 B/L$ ”对入泥深度影响较小。

4.2 无粘性土情况分析

在无粘性土中, 对地比压小于 100 kPa 的自升自航式船入泥深度不会大。

当桩靴的宽度 B 足够大时, 桩靴基本无入泥量; 内摩擦角足够大时, 桩靴基本无入泥量。

5 结 语

研究表明, 现有自升自航式船及其桩靴尺寸对粘性土、粉土和砂土海底地基有较好的适应能力。作业在土壤的凝聚力 $C = 20 \text{ kPa}$ 左右的粘土地基上, 入泥深度控制较好。在排水条件下, 内摩擦角为 21.6° 时, 控制入泥为 0.6 m , 比一般的自升式平台的适应地基范围更大。

经典极限承载力计算公式估算入泥深度的方法简单, 公式包含经验因素, 预测的入泥深度范围比较宽, 在实践中修正非常重要。

参考文献:

- [1] 龚 闽, 谭家华. 自升自航式船发展概况[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 101 - 104.
- [2] Shailendra N Endley, Vladimir Rapoport. Prediction of jack - up rig footing penetration[A]. OTC[C], 4144, 1981.
- [3] A O P. Casbarian Barnett & Casbarian "Footing type, soil affect leg penetration"[J]. Offshore, 1982.
- [4] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [5] Steven C Helfrich, Alan G Young. Temporary seafloor support of jacket structures[A]. OTC[C], 3750, 1980.