

文章编号: 1000-4882(2003)S-00441-06

桶形基础的承载特性与承载力计算

吴梦喜¹ 时忠民²

(1 中国科学院力学研究所, 2 中海石油研究中心)

摘要

桶形基础的承载特性, 由于埋深范围和筒内包裹大块土体, 而显著区别于桩基和普通浅基础。水平承载力计算与桩基存在显著的差别。本文结合了 API 规范中有关桩基和浅基础承载力的有关规定, 结合桶形基础的特点, 基于刚体极限平衡理论, 提出了桶形基础承载力计算的一种方法, 并用于分析垂直荷载与泥面弯矩对水平承载能力的影响。

(一) 前 言

桶形基础是一种新型的海洋结构物基础形式, 可以作为平台基础和吸力锚。由于其采用抽水产生的桶内外压差贯入地基的特点, 其安装简单快捷而使其与普通的桩、锚基础相比, 具有显著的技术经济优越性而被越来越广泛地应用。桶形基础的设计一般参照打入式桩基的设计方法和准则并做一些调整。这种方法的优点是打入式桩基的设计已有大量的实际应用经验。然而, 与桩基相比、由于桶形基础直径大、埋深浅, 其受荷特点与破坏机制与桩基存在显著差别。在土性方面, 桶形基础主要依靠变异性比较大的浅层沉积物承载、而打入式桩主要依靠下部 1/3 桩长, 桩基的设计往往依据不排水三轴试验, 浅层软粘土等土体的不扰动土样获取的困难使这种试验往往不切实际, 必须依靠其他的试验方式如十字板、静力触探试验等获取土性参数, 这种非标准的方法得到的参数要结合桩的设计理论得到合理的结果是困难的; 在垂直承载力方面, 一方面包裹土塞的端部面积较大因而端部承载力的发挥需要更大的垂直位移, 这有可能由于基础周围一定范围内土体的应变软化而降低桶侧壁的摩阻力, 另一方面桶形基础可能承受显著的水平荷载, 这将影响基础周围土体的应力状态而影响整个基础的外壁摩擦力; 横向承载力是依据不同的方法设计, 在桩的设计中, 土体被当作是一个抵抗桩的水平位移的非线性弹簧体系, 唯一的设计校核是桩身的容许应力, 一般不考虑桩土体系的极限承载力, 而桶形基础相对于土体为刚性, 土的承载力是设计的核心, 土体强度的不确定性转化为承载力的不确定性^[1]。

(二) 承载机理与承载力计算方法

作为倒扣于地基中的桶形基础, 在施加于其上部的水平和垂直荷载作用下, 结构将发生垂直下沉、平移和转动。由于垂直承载力的不足而发生的破坏可能为刺入地基的大变形或整体的剪切破坏; 水平(含抗倾)承载力的不足往往引起较大的平移或倾倒。

如图 1 示, 在轴向垂直荷载作用下, 以包含桶内土塞的筒体作为脱离体, 土体将产生沿筒外壁向上的摩擦力, 端部土体产生垂直于桶底的端部反力。由于存在筒体的转动, 垂直反力会自动调整承担一部分弯矩。在水平荷载作用下, 筒体的平移和转动推动泥面下一块楔形土体并从楔下犁过, 其水平反力分布如图 2 示。

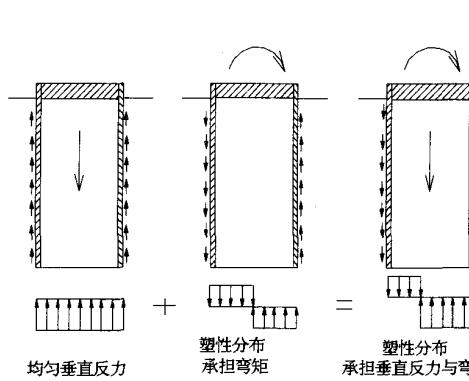


图 1 垂直反力分布示意图

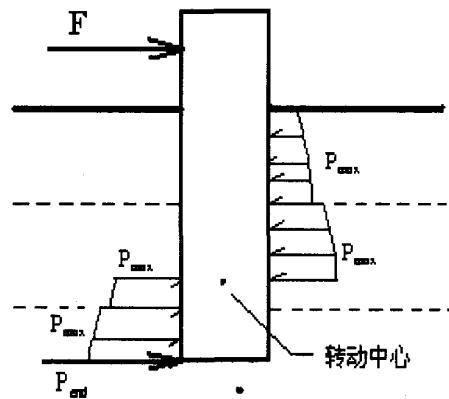


图 2 水平反力分布示意图

由于桶形基础的水平承载力与垂直承载力相互影响显著，因而不能象桩基承载力计算一样，二者分开单独考虑。然而，可先计算只有单向荷载作用时的承载力，然后再根据荷载特点来考虑其相互影响，最终得到一个综合的承载力安全系数。

1.无偏心垂直承载力

桶形基础的垂直承载力，与浅基础也存在显著差别，如果长径比超过 1，侧壁摩阻力的影响就很明显。而其端部的阻力是以桩端阻力计算公式为上限的。

垂直承载力 Q_d 为侧壁摩阻 Q_f 与端阻 Q_p 之和，即：

$$Q_d = Q_f + Q_p \quad (1)$$

(1) 侧壁摩擦力

侧壁阻力可参照桩的侧壁摩阻力计算，但在参数的选取上，应考虑壁面摩擦不大于残余摩擦强度。对于粘性土地基，垂直承载力计算可采用 API α 法^[3]，由下式计算：

$$Q_f = fA_s = \alpha c A_s \quad (2)$$

其中 f 为单位面积侧壁摩阻； c 为计算点的不排水抗剪强度； A_s 为筒体外侧壁面积； α 为无量纲因数，由 (3) 式确定，并满足 $\alpha \leq 1$ 的条件。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.5\psi^{-0.5} & \psi \leq 1.0 \\ \alpha &= 0.5\psi^{-0.25} & \psi > 1.0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\psi = c / p_0'$ ， p_0' 为计算点的有效上覆压力。

对于无粘性土，单位面积的侧壁摩擦力可由下式计算：

$$f = Kp_0' \tan \delta \quad (4)$$

其中 K 为侧压力系数， δ 为土体与筒壁的外摩擦角。

(2) 端部垂直承载力

端部阻力可用如下公式表示：

$$Q_d = qA_p \quad (5)$$

其中 q 为单位面积端部阻力； A_p 为筒体端部面积。

端部阻力分为不排水与排水两种情况。根据排水情况的不同, q 的计算采用不同的公式。

对于瞬时荷载或短期荷载, 地基为渗透系数较低的粘土地基, 在荷载作用期间土体来不及排水固结, 土体的强度宜采用不排水抗剪强度指标。

不排水情况下 ($\phi=0$) 的总的端部阻力可表示为:

$$q = cN_c d_c + \gamma H \quad (6)$$

其中 c 为不排水抗剪强度, N_c 为无量纲常数, $\phi=0$ 时等于 6.17, ϕ 为内摩擦角, γ 土的总容重, H 为基础埋深, d_c 为埋深修正系数, 为 1~1.9 之间的系数, 是埋深的单调增函数, 具体计算公式有待于试验研究确定。

当荷载的作用时间相对较长, 或地基的渗透系数比较大时, 基础在荷载作用下处于排水固结状态。端部单位面积的垂直承载力可参照 API 有关规定^[3], 按如下公式计算:

$$q = c' N_c (1 + N_q / N_c) d_c + p_0' N_q (1 + \tan \phi') d_q + 0.3 \gamma' D N_r \quad (7)$$

其中 c' 为有效凝聚力,

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi') \tan^2(\pi/4 + \phi'/2), \quad \phi' \text{ 为内摩擦角} \quad (8)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (9)$$

N_r 为 γ 与 ϕ' 的无量纲经验函数, 可用下式近似计算:

$$N_r = 2(N_q + 1) \tan \phi' \quad (10)$$

D 为筒体的直径

d_c 、 d_q 为埋深修正系数

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \frac{H}{D}, \quad H \text{ 为基础埋深} \quad (11)$$

$$d_c = d_q - (1 - d_q) / (N_c \tan \phi') \quad (12)$$

2. 水平承载力

所采用的方法为塑性极限平衡分析法^{[4][6]}。

如图 2 示, 假定转动中心位于泥面下筒轴线上某一点, 筒的水平反力由沿着筒身的水平反力和筒底部的摩擦力构成, 根据力和力矩平衡可求得筒体的极限反力。

水平承载力计算的关键, 是确定单位面积上的极限水平反力。根据三维塑性极限分析的结果^[4], 将问题简化为如图 2 所示的二维计算简图, 按以下的方法计算单位面积的土反力。

对于粘性土地基, 圆筒受力后与土体有分离趋势的一侧在荷载作用下开裂与不开裂情况下, 位于深度 Z 处单位面积筒上的土体极限抗力可分别按 (13)、(14) 式计算^{[5][6]}

$$P_{\max} = N_p c + \sigma_z \quad (13)$$

$$P_{\max} = N_p c \quad (14)$$

其中 σ_z 为作用点处的有效垂直土压应力, N_p 为无量纲横向承载因数。

对于土层表面强度为 s_{u0} , 沿深度强度线性增长率为 s_{u1} 的单层土剖面, 有如下的经验关系:

$$N_p = N_1 - N_2 \exp(-\frac{\zeta z}{D}) \quad (15)$$

其中 D 为筒径, z 为计算点的埋深, (对于成层土, 在计算第 1 层以下的土层的极限水平反力时, 埋深 z 的取值根据其上覆层的参数, 依照反力等值的原则折算等效上覆层厚度来修改该层的埋深 z 值。) N_1 、 N_2 为与筒表面粗糙度有关的参数, 下文将综合考虑垂直反力承担弯矩, 因而这里计算水平承载力时参照光滑桩参数计算, 根据塑性极限分析, 取 $N_1=9$, $N_2=7$, ξ 是 λ ($\lambda = s_{u0} / (s_{u1} D)$) 的函数:

$$\begin{aligned}\xi &= 0.25 + 0.05\lambda \quad \lambda < 6 \\ \xi &= 0.55 \quad \lambda \geq 6\end{aligned}\tag{16}$$

对于排水的情况或砂性土地基, 单位面积水平极限反力可按 Rankine 被动土压力与主动土压力之差的 3 倍计算。

不排水和排水情况下筒体端部的水平剪切力, 可分别按 (17) 和 (18) 式计算:

$$p_{end} = \beta c A_{end}\tag{17}$$

$$p_{end} = \beta(c + \sigma_z \tan \phi') A_{end}\tag{18}$$

其中 A_{end} 为圆筒端部外径包围的圆的面积, β 为因数, 对于转动破坏机制, 筒端部剪切位移如果不够大, 其剪切反力发挥的程度有很大的不确定性, 本文没有深入研究 β 的合理取值, 在计算时取 $\beta = 0.5$ 。

3. 垂直反力分担弯矩后承载力计算

当垂直方向的极限承载力与荷载之比大于水平方向的这一比值时, 可通过垂直反力调整承担部分弯矩, 来模拟垂直反力和水平反力共同承担弯矩的力学机制, 最终使这两个比值相等, 这一比值就是总体的极限承载力安全系数。由于水平承载力和垂直承载力的计算均满足力和力矩的平衡条件, 通过垂直与水平反力分担力矩的改变, 可迭代求解得到最终的总体极限承载力安全系数。

垂直反力调整承担弯矩的大小, 可以按垂直荷载偏心受力来考虑, 筒体外侧可承担等值的反向摩擦力, 端部的反向力排水情况时为 0, 粘性土不排水情况时考虑拉压参数的不同而取单位面积抗压承载力的折减 (如 0.8)。

(三) 承载力计算实例

某场地为层状土地基, 其容重和固结快剪指标如表 1 所示。下面分析在该种场地地基条件下桶形基础的承载力特性。

表 1 计算采用的土层参数

土层编号	土层名称	起点深度 (m)	终点深度 (m)	浮容重 (kPa)	凝聚力 C (kPa)	内摩擦角 (°)	外摩擦角 (°)
1	粉细砂混淤泥	0	10	9.5	0	32	25
2	淤泥质粘土及粉质粘土	10	15	8.6	13	19	15
3	粉土	15	19	10.0	25	28	20
4	粉质粘土及粘土	19	30	9.4	30	19.3	15

图 3 为(a) 直径 10m, 入土深度为 25m 和(b) 直径 18m, 入土深度为 15m 两种情况下, 不同弯矩作用下桶形基础在不同垂直荷载情况下的不排水水平承载力, 可见泥面弯矩的大小显著影响基础的水

平承载力，而垂直荷载在其与极限承载能力中所占比重不太大时，对水平承载力影响不明显。

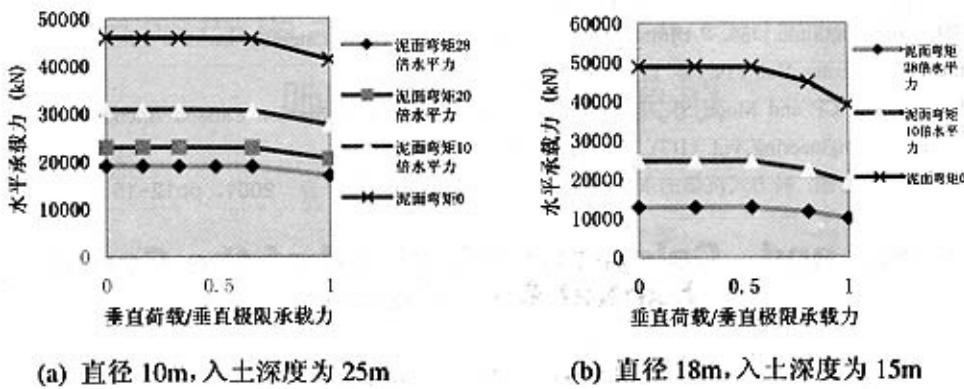


图 3 垂直荷载对水平承载力的影响

图 4 为泥面弯矩为水平荷载的 28 倍时承载力与入土深度(直径 10m)、承载力与筒直径(入土深度 15m)的关系。当入土深度增加或桶体直径增大时垂直荷载的增长率大于水平承载力的增长率，增长率的大小与所处土层的强度参数有关。

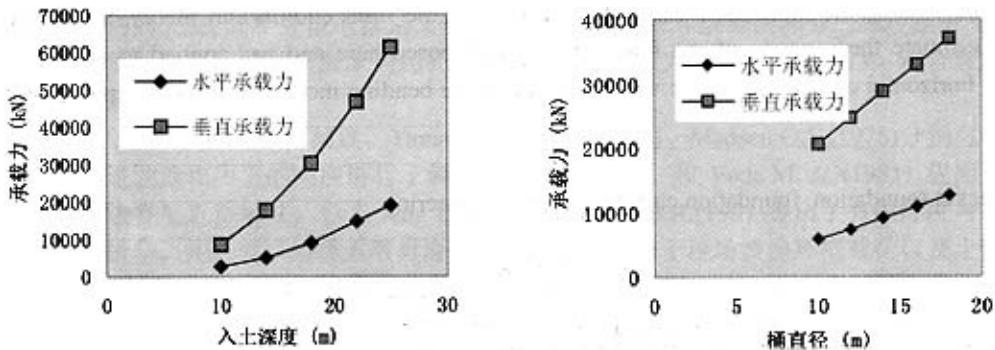


图 4 承载力与入土深度(直径 10m)、承载力与筒直径(入土深度 15m)的关系

(四) 结束语

桶形基础的垂直承载力可以参照桩基的有关规定计算，而水平承载力的计算与桩基存在显著差别，在存在较大的倾覆弯矩时，基础的破坏形式为桶的刚性转动，桶体的水平承载能力受倾覆弯矩的显著影响。本文的承载力计算方法是近似计算方法，可用于初步设计时对桶体尺寸参数的确定，而比较准确的承载力计算有赖于有限元等精确的方法。

参 考 文 献

- [1] Gilbert, R. B and Murff, J. D. (2001) Identifying Uncertainties in the Design of Suction Caisson Foundations. Proceedings, International Conference on Geotechnical, Geotechnical and Geological and Geophysical Properties of

- Deepwater Sediments Honoring Wayne A. Dunlap, OTRC, Houston, Texas, 231~242.
- [2] 孙大鹏, 袁中立, 朱其敏. 滩海平台桶形基础模型承载力试验研究, 石油工程建设. 1999, 12~19.
- [3] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 2A-LRFD First Edition, 1993.
- [4] Murff, JD, and Hamilton, JM. P-Ultimate for Undrained Analysis of Laterally Loaded Piles. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 1, 1993. PP91~107.
- [5] Murff, JD, Aubeny, CP and Moon SK, Lateral Undrained Resistance of Suction Caisson Anchors, International of Offshore and Polar Engineering, vol. 11(3), Sept. 2001, PP211~219.
- [6] 吴梦喜, 王梅, 楼志刚. 吸力式沉箱的水平极限承载力计算. 中国海洋平台, 2001, pp12~15.

Mechanism and Calculation Method of the Capacity of bucket foundation

WU Mengxi¹ SHI Zhongmin²

(1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 2 Research Center of Chinese Ocean Oil Exploration)

Abstractor

The mechanism of the bucket foundation is quite different from the pile foundation or general shallow foundation, for there is a large sums of soil inside the bucket. The method of horizontal capacity calculation of the foundation is different to the pile foundation. Based on the limit equilibrium theory, a method to approximately estimate the capacity of the foundation has proposed here and has applied to analysis the affection to the horizontal capacity from the vertical load and the bending moment which is imposed on the foundation.

Key words: Bucket foundation, foundation capacity, ocean engineering

作 者 简 介

吴梦喜 男, 1967 年出生, 中国科学院力学研究所副研究员, 博士。主要研究方向: 海洋土力学。