



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.020

刘金龙, 陈陆望, 王吉利, 等. 斜壁桶形基础水平承载力计算方法[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 123-128. LIU Jir long, CHEN Lu wang, WANG Ji li, et al. Calculation method for horizontal bearing capacity of tapered bucket foundation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 123-128. (in Chinese)

斜壁桶形基础水平承载力计算方法

刘金龙¹, 陈陆望², 王吉利³, 汪东林⁴

(1. 合肥学院 建筑工程系, 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 4. 安徽建筑大学 土木工程学院, 合肥 230601)

摘要: 基于斜壁桶形基础的空间受力状态和基本假定, 利用极限平衡法推导得到了斜壁桶形基础的水平承载力表达式, 并与模型试验结果进行对比, 验证了该计算方法的可靠性。通过变动参数, 分别探讨了桶壁倾角、地基反力比例系数、桶基顶部直径、桶基高径比、水平力作用点高度等水平承载力的影响及相对敏感性。计算表明斜壁桶形基础的水平承载力随着桶壁倾角的增大而急剧增大。研究结果有助于对传统桶形基础进行优化设计。

关键词: 斜壁桶形基础; 水平承载力; 极限平衡; 倾角

中图分类号: P754 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0123-06

Calculation method for horizontal bearing capacity of tapered bucket foundation

LIU Jir long¹, CHEN Lu wang², WANG Ji li³, WANG Dong lin⁴

(1. Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei 230022, China;

2. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

4. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on the three dimensional stress state and some assumptions of the tapered bucket foundation, we used the limit equilibrium method to obtain the calculation formula of horizontal bearing capacity of tapered bucket foundation, and compared the results with the model test results, and thus validated the reliability of the formula. Through varying different parameters, we analyzed the influence of the obliquity of bucket wall, proportionality coefficient of soil resistance, top diameter of bucket foundation, height diameter ratio of bucket foundation, and height of acting point on the value of horizontal bearing capacity of tapered bucket foundation. It was found that the horizontal bearing capacity increased rapidly as the obliquity of bucket wall increased. The results of this research are helpful to the optimization design of traditional bucket foundation.

Key words: tapered bucket foundation; horizontal bearing capacity; limit equilibrium method; obliquity

桶形基础是一种特殊的基础形式, 其上部封闭、底部开口, 因像倒扣在土中的圆桶而得名。这种基础在安装时, 借助桶中抽真空形成的负压把圆桶贯入土中, 因而也称负压桶形基础或吸力式基础。世

界上第一座桶形基础平台 Europipe 16/11-E 于 1994 年 7 月在北海安装成功^[1]。与传统的桩基础或重力式基础相比, 桶形基础具有造价低、便于运输安装、施工速度快和可重复使用等特点, 可用于近海

收稿日期: 2016-02-23 修回日期: 2016-08-12 网络出版时间:
网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(41306088); 院土木工程重点建设学科项目(2014xk04); 院级学科带头人培养对象项目(2014dtr01)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41306088); Institute of Civil Engineering Key Discipline Construction Project(2014xk04); The Object of Training Project School Level Academic Leaders(2014dtr01)

作者简介: 刘金龙(1979-), 男, 江西宜春人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: alnile@163.com

风电工程、浅海石油与天然气资源开发、系泊海上浮动式结构物等工程的基础形式^[2], 被称为“导管架基础工程技术新时代的曙光”。

目前使用的桶形基础多为直壁圆桶形式, 如 Europipe 16/11-E 的导管架由 4 个直径 12 m、桶高 9.5 m 的桶形基础承担, 平台总重量 5 240 t; 渤海湾西南部海洋石油 QHD 32-6-4 中的吸力锚为桶直径 6.0 m、桶高 3.2 m、单个锚重 35 t 的桶形基础; 中国南海西部海域的文昌 13-1、文昌 13-2 油田中, 用于浮式生产存储、卸油系统系泊的吸力锚直径 5.0 m、高度 11.5 m, 单个锚重 50 t^[3]。

施晓春等^[4]基于模型试验对桶形基础在水平荷载作用下的变形与土压力分布进行了研究, 提出了单桶水平承载力计算方法; 刘振纹等^[5]通过模型试验和有限元计算, 分析了单桶基础的地基极限水平承载力, 考察了基础主动区与被动区的土压力分布; 王庚荪等^[6]根据土体的简化弹簧模型, 从理论上分析了横向荷载作用下土体与桶形基础的相互作用; 金书成等^[7]基于有限元方法研究了饱和排水砂土条件下吸力式桶形基础的水平极限承载力和失稳模式; 国外学者 Zdravkovic 等^[8]、Aubeny 等^[9]、Houlsby 等^[10]也对直壁桶形基础进行了广泛深入的研究, 促进了桶形基础的发展。

事实上, 为了把应力扩散到更大面积的桶底土层上, 可以采用斜壁形式的桶形基础^[11-12]。目前对这种新型的桶形基础研究较少, 缺乏有效的试验数据, 对其承载力与稳定性的计算更无规范可参考。

为此, 本文基于力学分析方法, 对斜壁桶形基础的水平承载力进行了系统性研究, 考察了斜壁倾角、桶高、桶径、土性参数等对水平承载力的影响, 为斜壁桶形基础的设计与应用提供参考。

1 水平承载力计算方法

1.1 计算模型

当斜壁桶形基础达到水平极限平衡状态时, 其受力模型见图 1。

图 1 中 H 为桶体高度 (m); D 为桶顶部直径 (m); β 为斜壁倾角 ($^\circ$); P_u 为水平极限荷载 (kN); L_p 为水平荷载的作用高度 (m); σ_x 为作用于外侧桶壁的水平土体抗力 (kPa); σ_z 为作用于桶底的竖向土体抗力 (kPa); T_1 为作用于前侧外桶壁的摩擦合力 (kN); T_2 为作用于后侧外桶壁的摩擦合力 (kN); T_b 为作用于桶底的摩擦力合力 (kN); z_0 为水平荷载作用下桶形基础旋转点 A 的深度 (m),

待求。

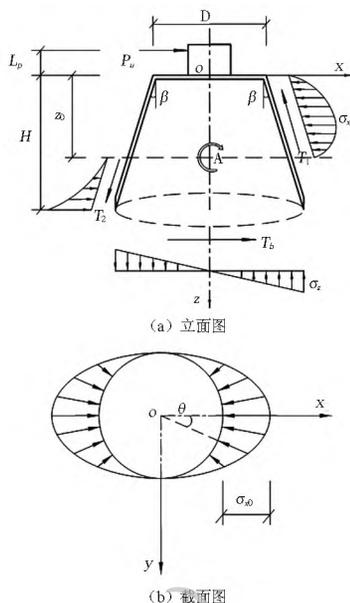


图 1 斜壁桶形基础受力分析模型

Fig. 1 Analytic model of the tapered bucket foundation

1.2 基本假定

(1) 桶基内部被土体填充密实无空隙, 桶基与其内部的土塞视为一个统一刚性体, 即内部土塞与桶内壁之间不再发生变形与变位;

(2) 作用于外侧桶壁上的水平土体抗力服从 Winkler 假定, 在 xoz 平面内水平抗力沿桶高呈抛物线分布, 如图 1 (a) 所示, 其表达式为:

$$\alpha_{x0} = k_x(z - z_0)\omega \quad (1)$$

式中: k_x 为水平向地基系数, 可由“m”法确定, 即 $k_x = mz$, 其中 m 为比例常数, 由试验确定。 ω 为桶基在水平荷载作用下产生的转角。

(3) 在 xoy 平面内, 土体径向水平抗力沿桶周呈三角函数关系分布, 如图 1 (b) 所示, 其表达式为:

$$\alpha_r = \alpha_{r0} \cos \theta \quad (2)$$

可见土体径向水平抗力沿 x 轴方向的分量为

$$\alpha_x = \alpha_r \cos \theta = \alpha_{x0} \cos^2 \theta \quad (3)$$

(4) 作用于外侧桶壁上的土体摩擦力与该处的径向水平土体压力成正比, 即

$$T_r = f \alpha_r \quad (4)$$

式中: f 为土体与桶壁之间的摩擦系数, 由试验确定。

(5) 作用于基底表面上的竖向土体抗力也服从 Winkler 假定, 如图 1 (a) 所示, 其表达式为:

$$\alpha_z = -k_z z \omega \quad (5)$$

式中: k_z 为竖向地基系数, 可取 $k_z \approx 2k_x$ ^[13]。

1.3 受力分析

(1) 水平土压力合力 N (积分示意图见图 2):

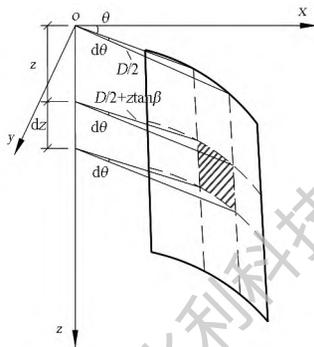


图2 斜壁桶基侧壁积分示意图

Fig. 2 Integration on the wall of tapered bucket

$$N = \iint_{s(A)} \sigma_x ds = 2 \int_0^H \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_x \left[\frac{D}{2} + z \tan \beta \right] d\theta dz = \frac{m \omega \pi}{2} \left[\left(\frac{H^3}{3} - \frac{H^2}{2} z_0 \right) \frac{D}{2} + \left(\frac{H^4}{4} - \frac{H^3}{3} z_0 \right) \tan \beta \right] \quad (6)$$

(2) 桶基前侧外壁摩擦力合力:

$$T_1 = \iint_{s(A)} \tau_z ds = 2 \int_0^H \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_z \left[\frac{D}{2} + z \tan \beta \right] d\theta dz = - \frac{m \omega f}{6} (z_0^3 D + z_0^4 \tan \beta) \quad (7)$$

T_1 沿 x 轴、 z 轴的分量 T_{1x} 、 T_{1z} 分别为:

$$T_{1x} = T_1 \sin \beta = - \frac{m \omega f}{6} (z_0^3 D + z_0^4 \tan \beta) \sin \beta \quad (8)$$

$$T_{1z} = T_1 \cos \beta = - \frac{m \omega f}{6} (z_0^3 D + z_0^4 \tan \beta) \cos \beta \quad (9)$$

(3) 桶基后侧外壁摩擦力合力 T_2 :

$$T_2 = \iint_{s(B)} \tau_z ds = 2 \int_{z_0}^H \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_z \left[\frac{D}{2} + z \tan \beta \right] d\theta dz = 2m \omega f \left[\left(\frac{H^3}{3} - \frac{H^2}{2} z_0 + \frac{z_0^3}{6} \right) \frac{D}{2} + \left(\frac{H^4}{4} - \frac{H^3}{3} z_0 + \frac{z_0^4}{12} \right) \tan \beta \right] \quad (10)$$

T_2 沿 x 轴、 z 轴的分量 T_{2x} 、 T_{2z} 分别为:

$$T_{2x} = T_2 \sin \beta \quad (11)$$

$$T_{2z} = T_2 \cos \beta \quad (12)$$

(4) 水平土压力合力 N 对转动中心 A 点产生的弯矩 M_N 为:

$$M_N = \iint_{s(A)} \sigma_x (z_0 - z) ds \quad (13)$$

(5) 桶基外壁摩擦力对转动中心 A 点产生的弯矩 M_T 为:

$$M_T = (T_1 - T_2) \left[\frac{D}{2} + z_0 \tan \beta \right] \cos \beta \quad (14)$$

(6) 桶底竖向抗力 σ_z 产生的弯矩 M_b 为:

$$M_b = \iint_{s(B)} \sigma_z x ds = \frac{k_z \omega \pi}{4} \left[\frac{D}{2} + H \tan \beta \right]^4 \quad (15)$$

由 x 方向力平衡得

$$\sum \alpha = P_u + T_b + T_{1x} + T_{2x} = 0 \quad (16)$$

由 z 方向力平衡得

$$\sum z = T_{1z} + T_{2z} = 0 \quad (17)$$

由绕 A 点的弯矩平衡得

$$\sum M_A = M_N + M_T + M_b + P_u(L_p + z_0) - T_b(H - z_0) = 0 \quad (18)$$

联立上述各式求得

$$z_0 = \frac{2HD + 3H^2 \tan \beta}{3D + 4H \tan \beta} \quad (19)$$

$$P_u = \frac{1}{H + L_p} \left\{ \frac{k_z \omega \pi}{4} \left[\frac{D}{2} + H \tan \beta \right]^4 + m \omega f \left[\frac{z_0^3}{3} D + \frac{z_0^4}{3} \tan \beta \right] \left[\frac{D}{2} + z_0 \tan \beta \right] \cos \beta + \frac{m \omega \pi D}{4} \left[\frac{H^4}{4} - \frac{2H^3}{3} z_0 + \frac{H^2}{2} z_0^2 \right] + \frac{m \omega \pi \tan \beta}{2} \left[\frac{H^5}{5} - \frac{H^4}{2} z_0 + \frac{H^3}{3} z_0^2 \right] \right\} \quad (20)$$

可见,确定斜壁桶基水平承载力的计算方法为:先根据式(19)计算桶基的旋转点深度 z_0 ,再和其它参数一起代入式(20)便得水平极限荷载 P_u 。此即为本文所提的斜壁桶基水平承载力计算方法。

特别地,当 $\beta = 0^\circ$ 时为传统的直壁桶形基础,其水平承载力计算公式变为:

$$z_0 = \frac{2H}{3} \quad (21)$$

$$P_u = \frac{\omega}{H + L_p} \left\{ \frac{k_z \pi D^4}{64} + \frac{4mf}{81} H^3 D^2 + \frac{m \pi}{144} H^4 D \right\} \quad (22)$$

而式(22)与文献[13]所给的计算公式相同。因此,文献[13]所提的直壁桶形基础水平承载力计算公式,可看作是本文斜壁桶基水平承载力式(20)在 $\beta = 0^\circ$ 情况下的一个特例。

2 计算结果与模型试验的比较

关于桶形基础的模型试验较少,而关于斜壁桶形基础的试验研究更鲜有文献提及。文献[4]给出了一种直壁桶形基础的模型试验方案与实测结果,其参数为: $D = 0.5 \text{ m}$, $L_p = 0.1 \text{ m}$, $\omega = 0.02 \text{ rad}$, $f = 0.3278$ 。地基反力比例系数 m 需根据实验确定(原文献未提供),参考桩基规范“流塑状黏性土 $m = 6 \sim 14 \text{ MN/m}^4$ ”,此处取 $m = 8000 \text{ kN/m}^4$ 。

单桶基础水平承载力 P_u 试验结果与计算结果的比较见表1。由表1数据可见,文献[4]与本文计算结果与实测值更为接近,而文献[5]的误差较大。进一步比较知,文献[4]所提计算公式中所考虑的影响因素较多,导致其表达式是隐式方程,需进行复杂迭代计算才能求得桶形基础的水平承载力,不便于在实际工程中的应用。

表1 水平承载力计算结果与试验结果的比较

Tab. 1 Comparison between calculation results and model test results of horizontal bearing capacity kN

桶高/m	试验值	文献[4]	文献[5]	本文式(20)
0.3	1.0	0.932	3.59	0.82
0.5	1.2	1.275	3.88	1.13
0.8	1.65	1.576	5.0	2.04

需要指出的是,以上公式仅在较小尺度的室内模型试验中进行了验证,是计算斜壁桶形基础水平承载力的一种尝试。倘若应用于工程实际,还需进一步开展大尺度(如1:1模型)的模型试验研究,有待进一步验证与修正。

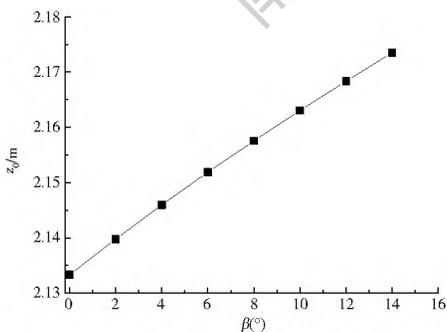
3 参数敏感性分析

通过上述力学分析得到了斜壁桶形基础的水平承载力计算方法式(20),其含有较多的计算参数,有必要进一步探讨各计算参数对水平承载力的影响,即参数敏感性分析。

现以渤海湾西南部海洋石油 QHD 32-6-4 的吸力锚为分析对象进行参数敏感性分析,其参数为: $D=6.0\text{ m}$, $H=3.2\text{ m}$, 水深即 $L_p=20.0\text{ m}$, $\omega=0.02\text{ rad}$, $f=0.3278$, $m=8000\text{ kN/m}^3$ 。参数敏感性分析时,仅变换要考察的参数,其余参数取值不变。

3.1 桶壁倾角 β 对桶体旋转点深度 z_0 的影响

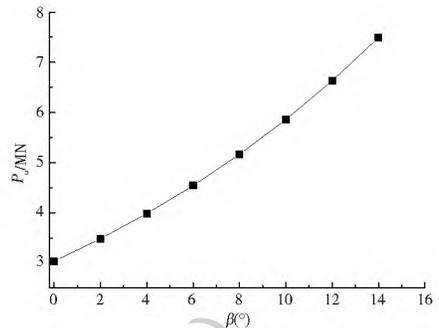
由式(19)可得桶体旋转点深度 z_0 与桶壁倾角 β 之间的相互关系,见图3。可见,桶体旋转点深度 z_0 随着桶壁倾角 β 的增大而增大。即 $\beta=0^\circ$ 时直壁式桶形基础的旋转点深度 z_0 为最小值,该值由式(21)确定。

图3 桶体旋转点深度 z_0 与桶壁倾角 β 之间的依赖关系Fig. 3 Relationship between depth of rotation point z_0 and obliquity of bucket wall β

进一步分析知, $\beta=10^\circ$ 时直壁式桶形基础的旋转点深度 $z_0=2.163\text{ m}$, 仅比 $\beta=0^\circ$ 时的 z_0 值增加 1.4%。故桶壁倾角 β 对旋转点深度 z_0 的影响较小(甚至可以忽略)。

3.2 桶壁倾角 β 对水平承载力 P_u 的影响

桶壁倾角 β 的不同取值对水平承载力 P_u 的影响见图4。由图可见,斜壁桶形基础的水平承载力 P_u 随着桶壁倾角 β 的增大而急剧增大。 $\beta=4^\circ$ 、 $\beta=8^\circ$ 、 $\beta=12^\circ$ 时的水平承载力比直壁式桶形基础 $\beta=0^\circ$ 时的水平承载力值分别增加 31.4%、70.3%、118.6%。

图4 桶壁倾角 β 对水平承载力 P_u 的影响Fig. 4 Influence of obliquity of bucket wall β on horizontal bearing capacity of foundation P_u

海洋平台主要承受风荷载、流荷载、冰荷载和波浪荷载,这些荷载都导致底部的桶形基础承受巨大的水平力。即桶形基础的水平荷载承受能力对其稳定性而言显得更为重要。本文所提出的斜壁式桶形基础,仅通过使桶壁向外倾斜一个较小的角度 β 便可获得较大的水平承载力,这个规律的认识对桶形基础的优化设计有重要的促进作用。

当然实际工程中,桶壁倾角 β 越大,施工难度也越大,故应根据水平承载力的要求选择一个合适的桶壁倾角 β 值。

3.3 地基反力比例系数 m 对水平承载力 P_u 的影响

上述计算模型中,桶侧与桶底土压力的计算均依赖于一个参数——地基反力比例系数 m ,土性参数对桶形基础的影响也主要体现在该参数上。即地基反力比例系数 m 的取值是工程地质条件、海洋土物理力学参数的综合体现。

图5给出了 $\beta=6^\circ$ 时桶基水平承载力 P_u 与地基反力比例系数 m 之间的相互关系。可见,水平承载力 P_u 随着地基反力比例系数 m 的增加而增大,并呈线性关系。

但实际工程中,地基反力比例系数 m 难以准确测定,影响其值的因素较多。如在建筑桩基技术规范中提到,地基土水平抗力系数的比例系数 m 不仅已地基土类别有关,还与桩的类型和荷载的作用性质有关,软塑状黏性土对于预制桩和钢桩可取 $m=$

4.5~6.0 MN/m⁴, 而对于灌注桩则取 $m = 6.0 \sim 14.0 \text{ MN/m}^4$ 。

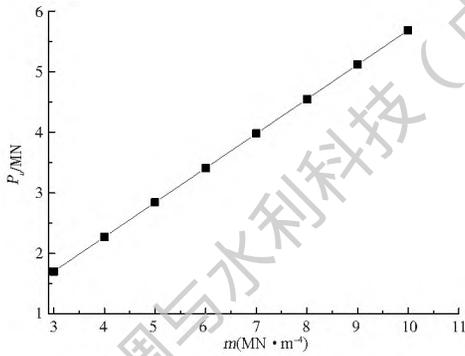


图5 地基反力比例系数 m 对水平承载力 P_u 的影响

Fig.5 Influence of proportionality coefficient of soil resistance m on horizontal bearing capacity of foundation P_u

这种大范围的 m 取值变动对水平承载力 P_u 的计算值影响较大。因此, 急需发展针对海洋土、海床地基反力比例系数 m 的准确确定方法, 并建立相应的详细表格供查取。

3.4 桶基尺寸对水平承载力 P_u 的影响

$\beta = 8^\circ$ 时水平承载力 P_u 与桶基顶部直径 D 之间的相互关系见图6; $\beta = 4^\circ$ 、 $D = 4 \text{ m}$ 时, 桶基高度与顶部直径之比 H/D 对水平承载力 P_u 的影响见图7。可见, 水平承载力 P_u 随着桶基顶部直径 D 或高度与顶部直径之比 H/D 的增大而急剧增大。

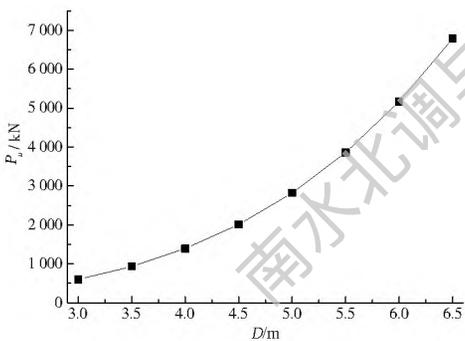


图6 桶基顶部直径 D 对水平承载力 P_u 的影响

Fig. 6 Influence of top diameter of bucket D on horizontal bearing capacity of foundation P_u

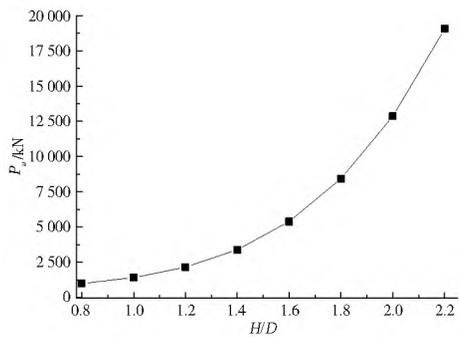


图7 桶基高度与顶部直径之比 H/D 对水平承载力 P_u 的影响

Fig. 7 Influence of height diameter ratio of bucket H/D on horizontal bearing capacity of foundation P_u

实际工程中, 桶基顶部直径 D 、高度 H 和桶壁倾角 β 三个参数的最合理取值问题, 需根据水平承载力要求、海床地质条件、土性参数、施工难易程度等综合确定。

3.5 海床深度对水平承载力 P_u 的影响

桶形基础可用于近海风电工程、浅海石油与天然气资源开发、系泊海上浮动式结构物等工程的基础形式, 而这些工程的建设与海床深度密切相关。海床越深, 海洋平台的高度越大, 导致水平荷载至桶基顶部的距离增加, 故可用水平荷载的作用高度 L_p 来反映海床深度。

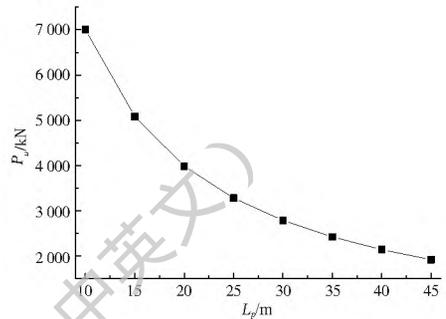


图8 荷载作用点高度 L_p 对水平承载力 P_u 的影响

Fig. 8 Influence of the height of acting point L_p on horizontal bearing capacity of foundation P_u

图8给出了 $\beta = 4^\circ$ 时水平荷载作用高度 L_p 对桶基水平承载力 P_u 的影响。 $L_p = 35.0 \text{ m}$ 时的水平承载力比 $L_p = 20.0 \text{ m}$ 时的水平承载力减小了 39.3%。桶基水平承载力 P_u 随着水平荷载作用高度增加而急剧减小。

可见, 海床深度也是桶形基础设计中的一个重要参数。若海床较深, 采用单个桶形基础难以满足要求时, 可采用多桶联合基础, 此时计算方法更为复杂。

4 结论

(1) 基于斜壁桶形基础的空间受力状态和基本假定, 利用极限平衡法推导得到了斜壁桶形基础的水平承载力表达式, 并与试验结果进行比较, 验证了该计算方法的可靠性。

(2) 斜壁桶形基础的水平承载力随着桶壁倾角的增大而急剧增大。这个规律的认识对桶形基础的优化设计有重要的促进作用。

(3) 桶形基础的水平承载力随着地基反力比例系数的增加而增大, 并呈线性关系。地基反力比例系数难以准确测定, 影响其值的因素较多。故需发展针对海洋土、海床地基反力比例系数的准确确定方法, 并建立相应的详细表格供查取。

(4) 桶形基础的水平承载力随着桶基顶部直径或桶基高度的增大而急剧增大,随着作用点高度的增加而急剧减小。

实际工程中,桶基顶部直径、高度和桶壁倾角等参数的合理取值,需根据水平承载力要求、海床地质条件、土性参数、施工难易程度、海床深度等因素综合确定。

参考文献(References):

- [1] Tjeltna T. Geotechnical aspects of bucket foundations replacing piles for the Europipe 16/11 E Jacket. OTC 7379, Houston, 1995, 73-82.
- [2] Iskander M, El Charbawy S. Performance of suction caissons in sand and clay[J]. Can Geotech, 2002, 39: 576-584.
- [3] 袁中立, 秦延龙, 唐海燕. 浅海桶形基础平台[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010, 1-9. (YUAN Zhongli, QIN Yanlong, TANG Haiyan. Bucket foundation platform in shallow sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010, 1-9. (in Chinese))
- [4] 施晓春, 徐日庆, 龚晓南, 等. 桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 723-726. (SHI Xiaochun, XU Riqing, GONG Xiaonan, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of single bucket foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 723-726. (in Chinese))
- [5] 刘振纹, 王建华, 秦崇仁, 等. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 691-695. (LIU Zhenwen, WANG Jianhua, QIN Chongren, et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 691-695. (in Chinese))
- [6] 王庚荪, 孔令伟, 杨家岭, 等. 水平载荷作用下土体与桶形基础的相互作用[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 107-113. (WANG Gengsun, KONG Lingwei, YANG Jialing, et al. Interaction of soil mass and bucket foundation under horizontal loads[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 107-113. (in Chinese))
- [7] 金书成, 张永涛, 杨炎华, 等. 饱和砂土地基中吸力式桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 221-227. (JIN Shucheng, ZHANG Yongtao, YANG Yanhua, et al. Research on horizontal ultimate bearing capacity of suction bucket foundation in saturated sand ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 221-227. (in Chinese))
- [8] Zdravkovic L, Potts D M, Jardine R J. A parametric study of the pull out capacity of bucket foundations in soft clay[J]. Geotechnique, 2001, 51(1): 55-67.
- [9] Aubeny C P, Han S W, Murff J D. Inclined load capacity of suction caissons[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(14): 1235-1254.
- [10] Houlsby G T, Byrne B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. Geotechnical Engineering, 2005, 158(GE3): 135-144.
- [11] Zeinoddini M, Keyvani J, Nabipour M. Tapered suction caissons: A numerical investigation into their pull-out performance[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(4): 695-707.
- [12] 徐文强, 袁非凡, 李火兵, 等. 斜壁桶形基础水平承载力的三维有限元分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(2): 200-205. (XU Wenqiang, YUAN Fanfan, LI Huobing, et al. Horizontal bearing capacity of tapered bucket foundations based on three dimensional finite element numerical analysis[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29(2): 200-205. (in Chinese))
- [13] 孙曦源, 栾茂田, 唐小微. 饱和软黏土地基中桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 667-672. (SUN Xiyuan, LUAN Maotian, TANG Xiaowei. Study of horizontal bearing capacity of bucket foundation on saturated soft clay ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 667-672. (in Chinese))