

斜壁桶形基础水平承载力的三维有限元分析*

徐文强, 袁凡凡[†], 李火兵, 韦昌富

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

(2011年1月21日收稿; 2011年3月14日收修改稿)

Xu W Q, Yuan F F, Li H B, 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.

摘要 利用有限元软件 ABAQUS 对桶形基础受水平荷载进行数值模拟, 并与模型试验结果进行对比. 通过数值计算, 分析饱和软黏土中单个斜壁桶形基础受水平荷载后的破坏模式. 通过变动参数, 分别探讨了土体有效重度、土体不排水抗剪强度、桶体等效长度和宽度、荷载作用高度对饱和软黏土中单个斜壁桶形基础水平承载力的影响及相对敏感性.

关键词 斜壁桶形基础; 三维有限元分析; 水平极限承载力; 参数研究

中图分类号 P752

桶形基础是伴随着边际油气田开发的需要应运而生的一种新型海洋平台结构基础型式. 在外观上, 桶形基础为底端开口、顶端封闭的倒扣大直径圆桶. 安装时, 首先在预定海域依靠桶体自重使其部分插入土中以形成密闭空间, 然后抽出桶内和土体之间的气体或液体, 从而使桶体内外形成压力差, 逐步压入至海床内预定深度完成安装^[1]. 桶形基础弥补了传统的桩基平台和重力式平台等浅海海洋工程结构的自重大、工程造价随水深大幅度增加的不足, 具有造价低、可重复使用的优点, 被海洋石油专家誉为“导管架平台基础工程技术新时代的曙光”^[2-4].

考虑到海洋平台主要承受风荷载、冰荷载、波浪荷载等水平向荷载作用, 因此确定其水平承载力对于桶形基础稳定性而言十分重要. 对于直壁桶形基础的水平承载力, 国内外一些专家在试验和数值方面已经做了充分的研究^[5-7]. 张伟等^[8]在室内外及大港滩海进行了一系列现场试验. 主要参数如下: 桶壁厚度 $t = 3$ mm, 桶体直径 $D = 0.5$ m, 桶体埋深 $L = 0.5$ m, 大港滩海现场土体的不排水抗剪强度 $S_u = 5.5$ kPa, 含水量 $w = 38.6\%$, 有效重度 $r' = 8.3$ kN/m³, 液性指数 $I_L = 0.82$. 试验采用单循环连续加载法, 每级加载量约为预估极限承载力的 1/10, 每级维持 20 min, 当基础侧面地表出现明显裂缝或隆起时, 即认为桶基到达了极限状态, 此时测得水平承载力 P_h 为 1.20 kN.

但是对于斜壁桶形基础目前还没有引起更多的关注. 斜壁桶形基础不同于通用直壁桶形基础, 其下端开口处的直径略大于上部封闭端的直径, 这种斜壁结构可以更有效地发挥桶土联合作用, 从而产生相对于直壁桶形基础更大的承载力^[9]. 因此本文基于大型通用有限元分析软件 ABAQUS, 建立斜壁桶形基础在水平加载模式下的三维有限元计算模型, 分析了斜壁桶形基础受水平荷载后的破坏模式; 通过变动参数系统研究了弹性模量 E 、土的粘聚力 C 、土的有效重度 r' 、桶体几何参数(直径 D_{up} 、等效长度 L)、荷载作用高度 L_p 对饱和软黏土中单个斜壁桶形基础水平承载力的影响及相对敏感性.

* 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室重点方向性项目(Q110601)和中国科学院“百人计划”择优项目资助

[†] 通信作者, E-mail: ffyuan@whrsm.ac.cn

1 有限元数值模型及其分析方法

1.1 有限元计算模型

对于斜壁桶形基础的极限承载性能,采用不排水总应力分析方法.考虑到结构和荷载的对称性,采用结构一半对称建模.模型采用三维二十节点减缩积分实体单元.桶体视为线弹性体,其泊松比 $\nu = 0.125$,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,桶壁斜率 10%.土体视为理想弹塑性体,按照 Von Mises 屈服准则进行计算^[10],其泊松比 $\nu = 0.49$,弹性模量 E 取 $300S_u$.为了保证在数值分析过程中地应力的平衡,这里假定桶体和土体的浮重度相等^[11].根据已有的研究结果^[10]可知,当土体直径为桶体直径的 10 倍,土体高度为桶体高度的 6 倍时,边界效应对于计算结果的影响较小,可以忽略不计.对于桶壁和周围土体的接触计算,采用 ABAQUS 中的主从接触面算法,界面滑动摩擦系数 μ 取 0.4(相当于外摩擦角 21.8°).当 2 个接触面发生相对滑动的趋势或者相对滑动时,接触面上的切向剪应力 τ 服从 Coulomb 摩擦定律.法向接触则采用可分离的“硬”接触形式.

1.2 有限元模型验证

在斜壁桶形基础极限承载力数值计算过程中,假定基础已安装就位且已投入正常工作,从而基础极限承载力的求解过程中,忽略了负压沉贯过程中负压的作用,以及安装就位造成的水流对周围土体的冲刷和掏空的影响.

与模型试验相似,在有限元计算过程中,一般采用荷载控制方法或位移控制方法进行加载.相对于荷载控制加载,位移控制加载方法能更准确地得到基础的荷载-位移之间的关系.当荷载-位移曲线的斜率接近零时,意味着在荷载不变的情况下基础位移持续增大,从而认为此时的地基已经达到了极限状态,与此对应的荷载就是地基的极限承载力^[12].

基于以上理论原则和张伟试验参数首先建立直壁桶形基础有限元模型,将结果同试验比较如下.

图 1 表明有限元计算与模型试验结果二者吻合较好,本文所建立的有限元计算模型与计算参数取值合理,由此基础进一步建立斜壁桶形基础有限元模型.从图 2 可以看出,斜壁结构可以显著地提高桶形基础的承载力,其中对力矩和竖向承载力影响最为显著,随着桶壁斜率的增长呈线性增长关系.

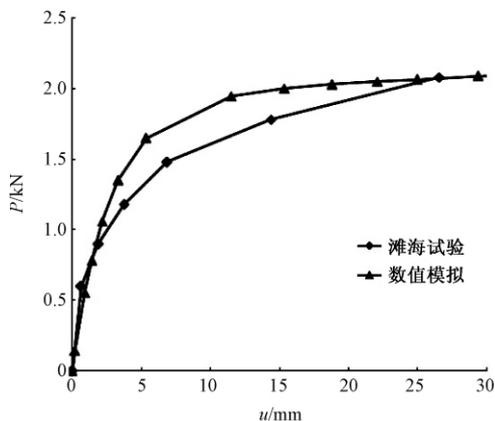


图 1 桶形基础水平极限承载力有限元计算值与试验实测值之间的对比

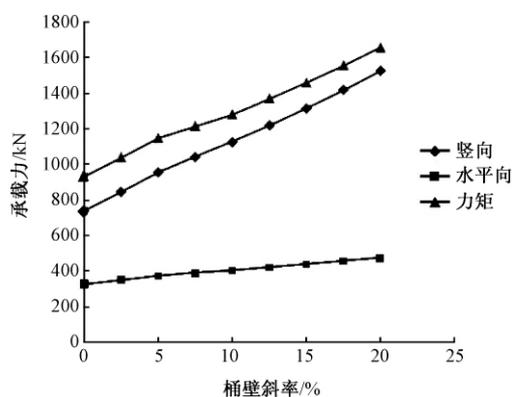


图 2 桶壁斜率对承载力的影响

1.3 水平荷载作用下斜壁桶形基础结构的破坏形式

为便于斜壁桶形基础同直壁桶形基础进行结果对比,对斜壁桶形基础的尺寸进行如下等效:

$$D = (D_{up} + D_{bot}) / 2, \quad L = L_s \cos\alpha \tag{1}$$

(1) 式中 D_{up} 为斜壁桶形基础顶端直径; D_{bot} 为斜壁桶形基础底端直径; L_s 为斜壁桶形基础斜壁长度; $\cos\alpha$ 为斜壁桶形基础斜壁斜率。

图 3 给出了斜壁桶形基础在水平位移荷载作用下,地基中等效塑性应变分布和土体合位移矢量图.

由图 3 可知,在水平力作用下,斜壁桶形基础底部形成连贯的勺形塑性区;而在桶体两侧土体内形成楔形塑性区。地基在水平荷载作用方向的一侧为被动区,土体产生隆起,桶体挤入土体产生较大的土压力;而在另一侧为主动区,桶与土体之间产生裂缝,桶体内土塞绕泥面与桶底之间某点发生转动形成球形旋转破坏区,转动深度大约为 $4/5L$ 。

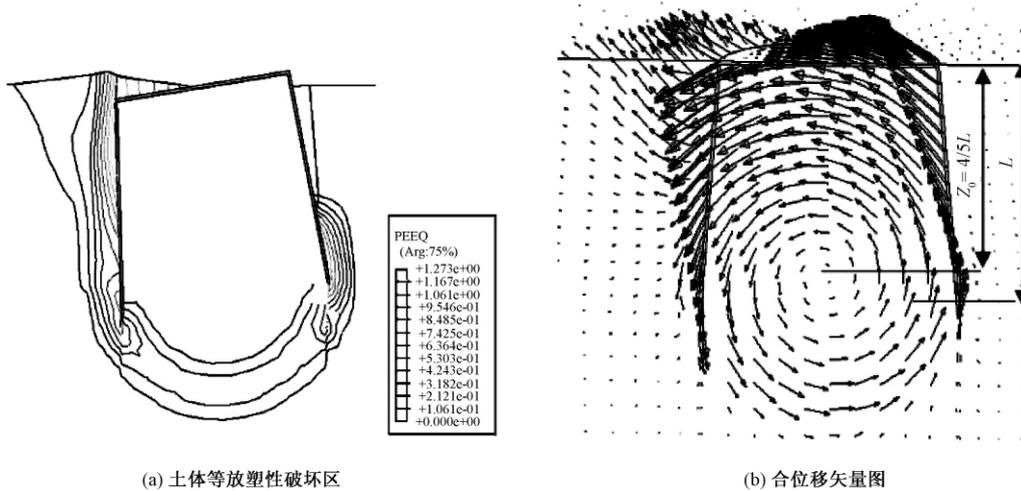


图 3 有限元预测的破坏模式

2 参数敏感性分析

已有的研究表明^[13-15],单个桶形基础的水平承载力主要受到土体的有效重度 γ' 、土体不排水抗剪强度 S_u 、桶体的等效长度 L 、桶体直径 D_{up} 、荷载作用高度 L_p 等因素的影响。因此下文通过分别变动以上参数来分析其对斜壁桶形基础水平承载力的影响。

2.1 土体有效重度对单个斜壁桶形基础水平承载力的影响

土体不排水抗剪强度 S_u 取定值 6 kPa, $L = D_{up} = 4$ m, 荷载作用位置为桶顶中心处。通过变动土体有效重度取值进行 7 组计算分析,得到相应的水平极限承载力值。结果如图 4 所示,可以发现,单个斜壁桶形基础的水平承载力随土体有效重度的增加呈线性增长的趋势。有效重度相对增长幅度 70%,水平承载力 F 只相对增加 7.78%,说明有效重度取值对于斜壁桶形基础水平承载力并不敏感。

2.2 土体不排水抗剪强度对单个斜壁桶形基础水平承载力的影响

固定土体有效重度取值 ($\gamma' = 6000$ N/m³) 和桶体长度、直径(均取值 4 m),荷载作用在桶顶中心处,土体不排水抗剪强度 S_u 由 2 ~ 8 kPa 范围取一系列值,来探讨其对斜壁桶形基础水平承载力的影响规律。本文基于有限元分析结果得到斜壁桶形基础水平承载力和土体不排水抗剪强度的关系如下(见图 5):斜壁桶形基础水平极限承载力随着土体不排水抗剪强度增大而增大,二者近似成线性关系。当土体有效重度取值相对增加 300%, F 相对增加 226%,表明土体不排水抗剪强度取值对于斜壁桶形基础承载力具有较高的敏感性。

2.3 桶体等效长度对单个斜壁桶形基础水平承载力的影响

为了得到桶体等效长度对单个斜壁桶形基础水平承载力的影响,通过固定土体有效重度、土体不排水抗剪强度取值和桶体直径($\gamma' = 6000$ N/kg, $S_u = 6$ kPa, $D_{up} = 4$ m),荷载作用在桶顶中心处,变动桶体等效长度取值来计算得到一系列相应的单个斜壁桶形基础的水平极限承载力,位移荷载关系结果如图 6 所示。分析可知,单个斜壁桶形基础的水平承载力随着桶体等效长度的增大而增大,近似成二次曲线分布。桶体等效长度相对增加 500% 时,水平承载力相对增加 336%,由此知道桶体等效长度的增加可以显著提高桶的水平极限承载力。

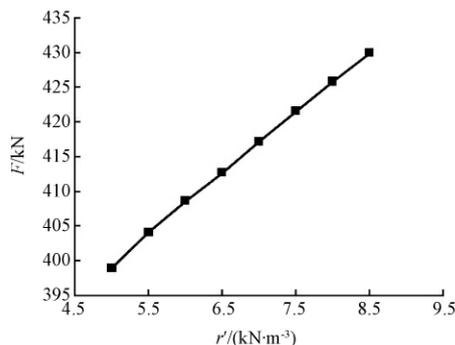


图 4 土体有效重度对水平承载力的影响

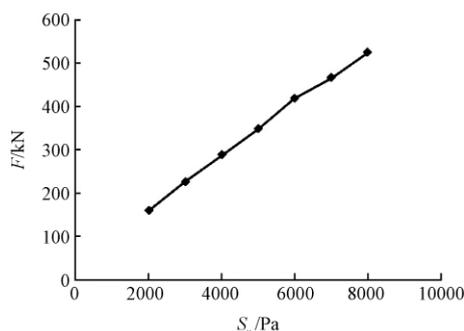


图 5 土体不排水抗剪强度对水平承载力的影响

2.4 桶体直径 D_{up} 对单个斜壁桶形基础水平承载力的影响

和桶的长度相似,桶的直径 D_{up} 也是斜壁桶形基础的水平极限承载力重要的影响因素. 为了得到之间的关系,本文固定土体有效重度、土体不排水抗剪强度取值($r' = 6000 \text{ N/kg}$, $S_u = 6 \text{ kPa}$),桶的等效长度 L 取值 4 m,桶的直径取 4、6、8、10、12 m 5 组数据分别计算,荷载均作用在桶顶中心处,计算结果如图 7 所示. 从图 7 中可以看出,不同于桶的等效长度 L 对水平极限承载力的影响,桶的水平极限承载力随着桶的直径增大而近似线性增长. 桶径相对增长 200%,极限水平承载力相对增长 456%. 通过比较可以发现,相比于桶的长度,桶体直径对提高桶基的水平极限承载力效果更为显著.

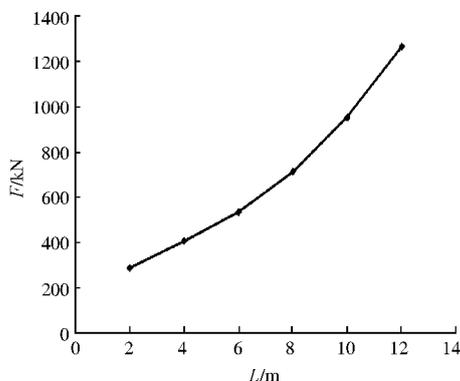


图 6 桶体等效长度对水平承载力的影响

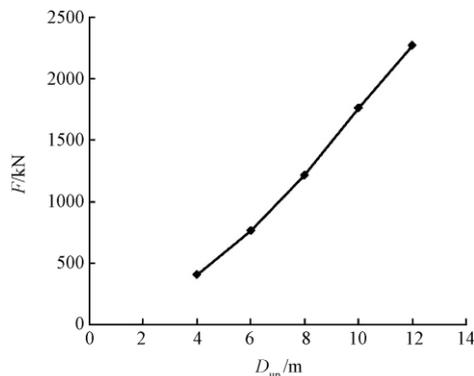


图 7 桶体直径对水平承载力的影响

2.5 荷载作用高度对单个斜壁桶形基础水平承载力的影响

根据已有的研究经验,荷载作用高度也是影响桶形基础水平承载力的重要因素. 由于桶形基础在实际海洋工程应用中,会受到不同高度的水平荷载作用,因此正确地估算不同水平荷载作用高度下的桶形基础水平承载力,对于评价桶形基础安全性和稳定性具有重要意义. 为了得到单个斜壁桶形基础水平承载力随荷载作用高度的变化关系,令土体有效重度、土体不排水抗剪强度、桶体长径比取定值,荷载作用高度 L_p 则在 $0 \sim 1.0L$ 范围内取值,计算结果如图 8 所示. 可以看出,随荷载作用高度的增加,单个斜壁桶形基础的水平承载力迅速降低,近似呈抛物线关系. 因此,在实际应用中应该充分地考虑到加载高度变化对斜壁桶形基础水平承载力的影响,避免发生意外造成损失.

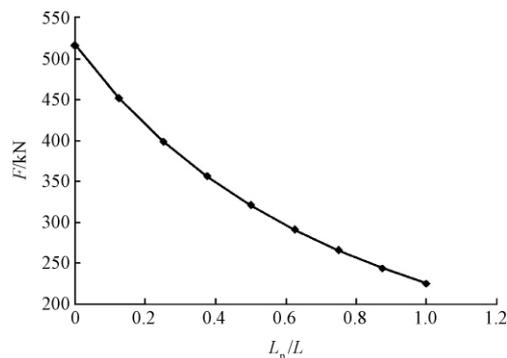


图 8 荷载相对高度对水平承载力的影响

3 结论

本文通过建立斜壁桶形基础三维有限元数值模型,并与室外模型试验结果进行了比较,验证了其可行性,进一步开展了饱和软黏土中单个斜壁桶形基础受水平荷载时的破坏性状及水平极限承载力关于土体参数和桶体几何参数的敏感性分析。

1) 饱和软黏土中单个斜壁桶形基础的水平破坏模式为转动破坏,桶体绕泥面与桶底之间大约为 $4/5L$ 处发生转动,相对于直壁桶形基础,斜壁结构更有利于基础与土体相互作用,发挥更大的水平承载力。

2) 饱和软黏土中单个斜壁桶形基础水平承载力随着土体有效重度、土体不排水抗剪强度、桶体等效长度和直径的增大而增大,其中受桶体直径影响最为显著;随荷载作用高度的增大而显著降低。

参考文献

- [1] Andersen K H, Murff J D, Randolph M F, et al. Suction anchors for deep water applications [C] // *Frontiers in Offshore Geotechnics*. Netherlands, Taylor and Francis Group, 2005.
- [2] Shi X C, Xu R Q, Gong X N. Introduction of bucket [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 33(4): 68-73, 92 (in Chinese).
施晓春, 徐日庆, 龚晓南. 桶形基础发展概况 [J]. *土木工程学报*, 2002, 33(4): 68-73, 92.
- [3] Tjelta T I. Geotechnical aspects of bucket foundations replacing piles for the Europipe 16/11E jacket [C] // *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, 1994, OTC7379: 73-82.
- [4] Ding H Y, Zhang M, Li T, et al. Full scale tests of skin friction forces during penetration down/pull up processes of a bucket foundation dolphin platform [J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(1): 63-67 (in Chinese).
丁红岩, 张明, 李铁, 等. 筒型基础系统平台沉/拔过程侧摩擦阻力原型测试 [J]. *天津大学学报*, 2003, 36(1): 63-67.
- [5] Wu M X, Wang M, Lou Z G. Ultimate Lateral Bearing Capacity of Suction Caisson [J]. *China offshore Platform*, 2001, 16(4): 12-15 (in Chinese).
吴梦喜, 王梅, 楼志刚. 吸力式沉箱的水平极限承载力计算 [J]. *中国海洋平台*, 2001, 16(4): 12-15.
- [6] Liu Z W, Wang J H, Qin C R, et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 691-695 (in Chinese).
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.
- [7] Sun X Y, Luan M T, Tang X W. Finite element study of horizontal bearing characteristics of single-bucket foundation on saturated soft clay ground [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, 50(2): 228-233 (in Chinese).
孙曦源, 栾茂田, 唐小微. 饱和软黏土地集中单桶形基础水平承载特性有限元研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(2): 228-233.
- [8] 张伟. 滩海桶形基础三维弹性数值分析与模型试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [9] 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.
- [10] Chen W. Limit analysis and soil plasticity [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [11] Supachawapote C, Randolph M, Gourvenec S. Inclined pull-out capacity of suction caissons [C] // *Proceedings of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Toulon: International Society of Offshore & Polar Engineering, 2004.
- [12] 赵少飞. 复合加载条件下海洋地基承载力特性数值分析方法及其应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [13] Mccarron W O, Sukumaran B. Ultimate capacities of suction caissons and pile elements for deepwater applications [C] // *Proceeding of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seattle: International Society of Offshore & Polar Engineering, 2000: 466-469.
- [14] Randolph M F. Effect of strength anisotropy on capacity of foundations [C] // *Proceedings of the John Booker Memorial Symposium*. Sydney: Balkema, 2000: 313-327.
- [15] Zdravkovic L, Potts D M. Parametric finite element analyses of suction anchors [C] // *Frontiers in Offshore Geotechnics*. Perth: Taylor & Francis, 2005: 297-302.

Horizontal bearing capacity of tapered bucket foundations based on three-dimensional finite element numerical analysis

XU Wen-Qiang , YUAN Fan-Fan , LI Huo-Bing , WEI Chang-Fu

(*State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering , Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Wuhan 430071 , China*)

Abstract The bucket foundations by the horizontal load was simulated by means of ABAQUS finite element software , and the results were compared with the model test results. The failure mode of a single tapered bucket foundation by the horizontal load in the saturated soft clay was studied by numerical calculations. On the basis of the numerical calculations with different parameters , we studied the impacts and relative sensitivities of soils' effective unit weight , undrained shear strength , bucket geometry , and loading position on the horizontal bearing capacity of a single tapered bucket foundation in the saturated soft clay.

Key words tapered bucket foundation; three-dimensional finite element analysis; horizontal bearing capacity; parameters