文章编号:1000-8608(2008)05-0702-06

桶形基础承载性能弹塑性有限元数值分析

武科^{1,2}, 栾茂田^{*1,2}, 范庆来³, 王志云^{1,2}, 唐小微^{1,2}

(1.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁大连 116024;
2.大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所,辽宁大连 116024;
3.鲁东大学土木工程学院,山东烟台 265304)

摘要:确定桶形基础在竖向荷载、水平荷载和力矩等共同作用下的承载特性,建立复合加载 模式下桶形基础的破坏包络面,并进而依此评价海洋平台基础及地基的稳定性是桶形基础设 计与施工中的关键问题.采用位移控制法和 Swipe 试验加载方法,分别针对单个荷载和各种 荷载组合方式,在大型通用有限元分析软件 ABAQUS 平台上,建立了桶形基础承载性能的 计算模型,确定了桶形基础在单个荷载作用下的极限承载力与复合加载作用下的破坏包络 面,利用极限平衡理论探讨了桶形基础在极限状态时的破坏机理,即桶形基础地基破坏形式 或失稳模式.

关键词: 桶形基础; 复合加载; Swipe 试验方法; 有限元法 **中图分类号**: TU432 **文献标志码**: A

0 引 言

吸力式桶形基础是海洋工程建筑物的一种重 要基础形式,在工作中不仅承受上部结构及其自 身所引起的竖向荷载的长期作用,而且往往还受 到波浪、海流等所引起的水平荷载及力矩的作用. 这些荷载通过基础传到地基上,从而使地基受到 水平荷载、竖向荷载和力矩荷载的共同作用,这种 加载方式称为复合加载模式[1].考虑到海洋荷载 的特点,对于吸力式桶形基础,必须探讨地基在这 种复合加载模式下的承载性能及其破坏模式,在 荷载空间内,达到极限平衡状态时的各个荷载分 量组合形成了一个空间曲面,称为极限荷载包络 面或稳定/破坏包络面. Murff^[2]、Martin^[3]、 Bransby 与 Randolph^[4,5]针对不排水条件下的饱 和软土和砂土,运用不排水抗剪强度 $c = S_{\mu}(\phi =$ 0), 基于极限分析确定了复合加载模式下地基的 破坏包络面,并进而运用这种破坏包络面评价地 基的稳定性.

在复合加载条件下,地基破坏包络面与荷载 组合方式、基础型式、下覆地基土的工程特性、土 层分布特征等密切相关.尽管对于某些简单情况, 已经通过分析获得了一些解答,然而对于实际中 的复杂情况,目前还没有一套严密而实用的分析 方法与计算模型.Swipe试验加载方法^[6]通过两 种特殊加载路径直接逐步寻找破坏包络面上每个 荷载组合点的近似下限解,可以采用这种通用的 试验加载方式进行承载力的数值计算.因此本文 采用这种有效的 Swipe试验加载方法,针对各种 复合加载模式,在大型通用有限元分析软件 ABAQUS 平台上,建立桶形基础承载性能的计 算模型,并进行进一步研究.

1 有限元计算模型

作为大型通用有限元分析软件,ABAQUS 具有强大的非线性计算功能、丰富的本构模型以 及便利的用户子程序接口,可以针对先进本构模

收稿日期: 2006-12-04; 修回日期: 2008-08-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579006;重点基金 5063910);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20060141017);教育部跨世纪优秀人才培养计划研究基金资助项目(教技函[1998]2号).

作者简介:武 科(1978-),男,博士生,E-mail:wk4223@163.com;栾茂田*(1962-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:mtluan@ dlut.edu.cn.

型、复杂场变量、状态变量及特殊单元、复杂边界 条件进行二次开发^[7].

针对海洋软土特性,采用 Mohr-Coulomb 弹 塑性本构模型,在饱和不排水条件下,土体参数分 別为 $\nu = 0.49, \gamma = 16.0 \text{ kN/m}^3, S_{\mu} = 6.0 \text{ kPa}; 假$ 定变形模量近似地与其不排水抗剪强度成比例而 取为定值 E=500S_u. 对于桶形基础桶体结构,采 用线弹性本构模型,弹性常数分别取为 $E=2.1\times$ 10⁵ MPa 与 v=0.125. 而对于桶形基础桶壁与周 围土体接触计算,采用 ABAQUS 中的主动-被动 面接触算法,洗取刚度大的桶体表面为主动面,土 体表面为被动面,界面滑动摩擦因数取为 $\mu=0.5$ (相当于外摩擦角 26.6°). 按照接触算法, 被动面 的节点不能侵入主动面,而主动面的节点可以侵 入被动面.当两个面接触在一起且产生相对滑动 趋势或者相对滑动时,接触面上的法向接触应力 p 与剪应力 τ 服从 Coulomb 摩擦定律. 当接触面 上的剪应力 τ 小于 Coulomb 极限摩阻力 μp 时, 则不会产生相对滑动而处于黏结状态;当接触面 上的剪应力 τ 大于极限摩阻力 μp 时,则产生相 对滑动[7、8].

根据桶形基础结构的对称性,取半个桶体及 地基进行分析,采用6面体20节点单元 (C3D20R)建立有限元计算模型,如图1所示.在 算例分析中,桶体直径与高度分别选为D=4.0 m与L=4.0m,高径比为L/D=1.同时计算范 围在横向与竖向分别取为10D与6L.



图 1 计算模型网格 Fig. 1 The computation model mesh

2 有限元分析方法

在吸力式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并且投入正常工作,从而 桶形基础极限承载力的求解过程忽略了负压沉贯 过程中负压的作用以及安装就位造成的水流对周 围土壤的冲刷和掏空的影响.

2.1 桶形基础极限承载力分析方法

在采用弹塑性有限元数值计算方法确定极限 荷载时,一般通过荷载控制方法或位移控制方法 进行加载.与荷载控制方法相比,位移控制方法往 往能较准确地得到基础的荷载-位移之间关系.当 荷载-位移曲线的斜率接近0时,意味着在荷载不 变的情况下基础位移在持续地增大,因而可以认 为此时地基达到了极限平衡状态.与极限平衡状 态相对应的荷载就是地基的极限承载力^[9].这里 采用位移控制法逐步施加位移,确定相应的荷载, 由此得到地基的荷载-位移关系曲线,直到曲线的 斜率接近于0,按照理想塑性流动概念,此时所对 应的荷载可作为桶形基础的极限承载力.其位移 作用点在桶体轴线的顶部,如图2所示.针对桶形 基础,采用上述位移控制法,确定单调加载模式下 地基的极限承载力.



图 2 作用在桶形基础上的荷载和位移 Fig. 2 The loads and resulting displacements of footing on bucket foundation

2.2 复合加载下桶形基础承载性能分析方法

对于竖向力、水平力与力矩等多种荷载分量 共同作用的复合加载模式,在有限元计算中必须 按照一定的加载路线或程序进行加载,以此可以 惟一地确定地基达到极限平衡状态时所对应的破 坏荷载^[9].对此一般采用 Swipe 试验加载方式进 行加载分析. Swipe 试验加载方法最早由 Tan^[6] 提出,并应用于离心机模型试验中,试验过程包括 两个加载步骤.下面以搜寻 *ij* 荷载平面上的破坏 包络面为例阐述加载程序:(1) 沿 *i* 方向从 0 加 载状态开始施加位移 *u_i* 直至 *i* 方向上的荷载不 再随着位移的增大而改变;(2) 保持 *i* 方向的位 移不变而沿 *j* 方向施加位移 *u*, 直到沿 *j* 方向所 施加的荷载不随 *j* 方向的位移增加而改变. 第二 步中所形成的加载轨迹可以近似地作为 *ij* 荷载 平面上的破坏包络面^[9], 如图 3 所示.

通过上述两种特殊加载路径进行加载有限元 分析,直接寻找复合加载条件下破坏包络面上每 个荷载组合点的近似下限解,并由此确定在给定 复合加载条件下地基的破坏模式及其承载力.对 于不同的荷载组合重复进行数值计算,可以确定 复合加载条件下由各个破坏荷载组合所形成的破 坏包络面.



图 3 Swipe 试验加载方法 Fig. 3 The loading procedure of Swipe test

3 单个荷载分量作用下桶形基础的 承载性能分析

采用位移控制方法,分别在桶体顶部施加水 平位移、竖向位移和转角,从而确定单个荷载分量 作用下桶形基础的极限承载力.图4为水平力、竖 向力和力矩单独作用下所得到的归一化荷载与归 一化位移之间的关系,其中 $\bar{p}_u = P_u/As_u, \bar{p}_w =$ $P_w/As_w, \overline{m} = M/ADs_w$ 分别为不同荷载分量单独 作用下桶形基础的承载力系数; $\bar{u} = u/D, \bar{w} =$ w/D、θ分别为归一化水平位移与竖向位移及转 角;P_w、P_w 与 M 分别为作用在桶形基础顶部水平 力、竖向力与力矩;A为桶形基础桶顶面积;u、v 与θ为桶形基础顶部的水平与竖向位移及转角. 由图 4(a) 可知,当u > 0.02 时,由计算所得到的 归一化荷载与位移关系曲线的斜率接近于 0,此 时所对应的归一化 p, 即为在桶形基础水平力作 用下的极限承载力系数,即 $p_u = 5.45$.同理,当w> 0.15 时,桶形基础在竖向荷载作用下的极限承 载力系数 $\bar{p}_w = 13.52; 当 \theta > 0.02 时,桶形基础在$ 力矩荷载作用下的极限承载力系数m = 3.66.





Fig. 4 The normalized relationship between loads and displacements computed by FEM analyses

图 5 给出了桶形基础在各个荷载分量作用下 地基中等效塑性应变分布.由图 5(a)可知,在水 平力作用下,桶形基础底部形成连贯的勺形塑性 区;而在其两侧土体内形成楔形塑性区,与水平荷 载作用方向一致的桶体侧是被动区,桶体挤入地 基土体产生较大的土压力,而桶体的另一侧是主 动区,桶体与地基土之间产生分离.由图 5(b)可 知,在竖向加载作用下,桶形基础底部形成连贯的 勺形塑性区;桶体下沉使得桶体与地基接触区域 产生较大剪切破坏,从而造成桶形基础桶体两侧 与地基土接触区域塑性应变较大.由图 5(c)可 知,在力矩加载作用下,桶形基础底部形成连贯的 勺形塑性区,并与桶形基础两侧土体所形成楔形 塑性区连为一体,延伸至地基表面.





4 复合加载条件下桶形基础的承载 性能分析

对于水平荷载、竖向荷载和力矩共同作用的 复合加载模式,采用 Swipe 试验加载方法进行了 加载弹塑性数值计算,由此确定桶形基础的承载 特性,建立了不同荷载空间内的极限荷载包络面. 图 6 分别给出了在 *M*=0、*H*=0、*V*=0 等 3 个荷 载平面内,各种荷载分量组合下的极限承载力包 络面,图中 H/H_{ult}、V/V_{ult}、M/M_{ult}分别为不同荷 载分量的归一化系数,H、V、M 分别为桶形基础 在复合加载作用下顶部水平力、竖向力和力矩, H_{ult}、V_{ult}、M_{ult}分别为水平力、竖向力和力矩单独 作用下的桶形基础极限承载力.当不同的荷载组 合位于极限荷载包络面之内时,基础与地基处于 稳定状态;当不同的荷载组合位于极限荷载包络 面之外时,基础与地基将发生失稳.





针对不同的竖向荷载分量,图7给出了桶形 基础在水平荷载与力矩共同作用下地基中的等效 塑性应变分布.由图可见,桶形基础底部形成连贯 的勺形塑性破坏区;由于水平荷载和力矩的作用, 在与水平位移方向或与力矩旋转方向相同的桶体 一侧形成了处于被动状态的楔形塑性破坏区,而 且等效塑性应变较大,随着竖向荷载分量的增加, 该被动区域不断减小.而与水平位移方向或与力 矩旋转方向相反的桶体一侧形成了处于主动状态 的楔形塑性破坏区,随着竖向荷载的增加,该主动 区的等效塑性应变不断减小;当竖向荷载达到竖 向极限承载力即 V=1.0V_{ult}时,桶形基础两侧楔 形塑性区可能消失,地基失稳模式主要表现为桶 形基础底部的勺形塑性破坏,不再能够承受水平 荷载和力矩的作用.

针对给定的竖向荷载分量,图 8 在 M-H 荷 载空间内给出了水平荷载与力矩共同作用下桶形 基础与地基的破坏包络面.由图可见,随着竖向荷 载分量的增加,M-H 平面内复合加载模式下破坏 包络面不断缩小,当V=1.0V_{ult}时,该破坏包络线 最终成为一点,即此时桶形基础只能够承担竖向 荷载.





Fig. 7 Distribution of the equivalent plastic strain ϵ_p in foundation under combined load

图 9 在 V-M-H 荷载空间内给出了复合加载 模式下地基的三维破坏包络面.由图可知,随着竖 向荷载分量的增加,M-H 平面内的破坏包络线不 断缩小,最终退缩为一点,由此形成一个封闭的 1/4 椭球体.根据实际的复合加载状态与这种空 间破坏包络曲面之间的相对关系,可以评判实际 荷载作用下桶形基础的工作状态,例如当实际荷载组合位于破坏包络面之外时,可以判定地基将可能发生失稳.



图 8 不同竖向荷载作用下地基 M-H 破坏包络面 Fig. 8 The failure envelopes in the M-H plane of foundation under different vertical loads



图 9 地基 V-M-H 三维破坏包络面 Fig. 9 The 3D failure envelope of foundation

5 结 语

针对复合加载模式下桶形基础地基承载力性 能,在大型有限元软件 ABAQUS 的计算平台上 进行了二次开发,采用位移控制法和 Swipe 试验 方法分别计算分析了桶形基础在单个荷载分量作 用下和复合加载作用下地基承载力性能,得到了 桶形基础在复合加载模式下的三维空间破坏包络 面,为桶形基础的设计施工提供评判标准.数值计 算结果表明:随着竖向荷载分量的增大,桶形基础 两侧等效塑性应变减小,而桶形基础底部塑性应 变增大,勺形破坏区域扩大,水平荷载和力矩对桶 形基础承载力性能的影响逐渐减小.因此,对于桶 形基础在实际的复合加载条件下的稳定性分析, 必须合理地考虑竖向荷载分量作用的影响.

参考文献:

- [1] 栾茂田,金崇磐,林 皋.非均质地基上浅基础的极限承载力[J].岩土工程学报,1988,10(4):14-27
- [2] MURFF J D. Limit analysis of multi-footing foundation systems [C] // Proceedings of International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1994:233-244
- [3] MARTIN C M. Physical and numerical modeling of offshore foundations under combined loads [D].Wellington Square: The University of Oxford, 1994
- [4] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. The effect of embendment depth of the response of skirted foundations to combined loading [R]. Perth: Department of Civil Engineering, The University of

Western Australia, 1998

- [5] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundations [J]. Geotechnique, 1998, 48: 637-655
- [6] TAN F S. Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand [D]. London: Cambridge University, 1990
- [7] HIBBIT, KARLSSON, SORENSEN. ABAQUS
 Scripting User's Manual(Version6.3) [M].
 Pawtucket: HKS, 2002
- [8] 屠 玮.负压桶形基础抗拔承载力有限元计算[D]. 杭州:浙江大学,2002
- [9] 栾茂田,赵少飞,袁凡凡,等.复合加载模式作用下地 基承载性能数值分析[J].海洋工程,2006,24(1): 34-40

Numerical analysis of bearing capacity behavior of bucket foundation based on elasto-plastic FEM

WU Ke^{1,2}, LUAN Mao-tian^{*1,2}, FAN Qing-lai³, WANG Zhi-yun^{1,2}, TANG Xiao-wei^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 - 3. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai 265304, China)

Abstract: It is one of the key fundamental issues in design and construction of bucketfoundation-supported offshore platforms to evaluate overall stability behavior and failure mechanisms of structures and foundations under combined loading pattern comprised of both vertical and horizontal load and moment. An elasto-plastic finite element method for numerical assessment of bearing capacity of bucket foundation under combined loads is developed. Both displacement-controlling procedure and the Swipe test procedure of loading are numerically implemented by virtue of the general-purpose FEM software ABAQUS. The ultimate bearing capacity of foundation under single load component is determined while the load-carrying capacity under different combinations of various loading components is defined and failure envelopes are established in different load spaces. The failure mechanism of foundation is examined through the distribution of plastic strain around the foundation.

Key words: bucket foundation; combined loading; Swipe test procedure; finite element method (FEM)