

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-1095-07

倾斜荷载作用下桶形基础承载力特性研究

武 科^{1,2}, 栾茂田^{1,2}, 范庆来³, 王志云^{1,2}

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

摘 要: 针对吸力式桶形基础结构, 借助大型通用有限元软件 ABAQUS 平台, 建立了均质软黏土地基上倾斜荷载作用的三维弹塑性有限元计算模型。通过系统地计算分析, 得到了单个倾斜荷载分量作用下桶形基础的承载力特性及其破坏机制。进一步研究了水平倾斜荷载与竖向倾斜荷载共同作用下的桶形基础承载性能, 得到了该倾斜荷载加载方式作用下桶形基础在 V - H 平面内的破坏包络面, 依此建立了倾斜荷载与偏心距 e 之间的三维破坏包络曲面。计算结果表明, 偏心距 e 对竖向倾斜承载力的影响相对水平倾斜承载力较大; 桶形基础承载性能随着偏心距 e 的增大而减小。

关 键 词: 桶形基础; 倾斜荷载; 承载力; 有限元方法

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

Studies of bearing capacity of bucket foundation against inclined loading

WU Ke^{1,2}, LUAN Mao-tian^{1,2}, FAN Qing-lai³, WANG Zhi-yun^{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: A series of studies of suction bucket foundation in normally consolidated clay are carried out to investigate the bearing capacity of bucket foundation under inclined loads. A finite element method for assessing bearing capacity of offshore foundations or structures under eccentric and inclined loads is numerically implemented in the framework of the general-purpose FEM software package ABAQUS. In the method, a number of three-dimensional elastoplastic FEM computations for bearing capacity and failure mechanisms are conducted. The numerical results computed by the proposed method indicate that the effect of bearing capacity against vertical inclined loads is more significant than that against horizontal inclined loads. Moreover, failure envelopes in V - H loading space are reducing with the increase of eccentric distance and further investigations of a simple unique expression of failure envelopes. Finally, the three-dimensional failure envelope is formatted in different V - H corresponding to varied eccentricity. Those results by computed will provide referential resources for design and construction.

Key words: bucket foundation; inclined loading; bearing capacity; finite element method

1 前 言

随着陆上可用资源日益短缺和近海资源开发日益成熟, 海上资源勘探、开发与利用正迅速向深海区域发展。传统的重力式和导管架式等固定式浅海海洋工程结构形式不再适用, 为此, 许多新型的适用于深海开发的海洋基础型式不断涌现。作为一种新型的海洋基础型式, 吸力式桶形基础被广泛地应

用到浅海或深海油气田开采海洋平台中。其结构型式为底部敞开、上端封闭的圆桶, 圆桶上端封闭端开有抽气口。首先借助于自重作用将桶形基础下沉至海底, 然后用真气泵通过抽气孔在桶中形成负压, 在桶内外形成的压力差作用下将圆桶压入土中, 直至圆桶空腔为土体所充满。吸力式桶形基础正是依靠这种吸力而贯入土中。当平台需要移动时, 可再通过抽气孔向桶内充气将圆桶从土中拔出,

收稿日期: 2007-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50579006, No. 50179006); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 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)。

第一作者简介: 武科, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程基本理论与数值分析、海洋土力学计算等方面的研究。E-mail: wk4223@163.com
通讯作者: 栾茂田, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土土力学基本理论与数值分析、海洋土力学理论与实验技术、非线性土动力学理论与计算等方面的科研与教学工作。E-mail: mtluan@dlut.edu.cn

因此,吸力式桶形基础可以重复使用,并且具有投资费用低、施工时间短、可重复使用等优点^[1]。

桶形基础结构在其正常运行过程中,不仅受到海洋平台结构及其自身所引起的竖向荷载的长期作用,而且一般往往遭受风、波浪等所引起倾斜荷载的循环或瞬时作用。因此,与陆地上建筑物相比,在深水码头、海洋平台等大型港口工程与海洋工程建筑物的基础与地基设计中,除了需要考虑复杂的工程地质条件外,还必须考虑倾斜荷载的影响^[2]。针对倾斜荷载作用下桶形基础的极限承载力问题,国内外开展的理论研究工作相对较少。Sukumara、Deng、Carter、McCarron 和 Cao 等^[3-6]针对桶形基础承受单个竖向荷载或水平荷载作用下的承载性能进行了数值分析。而 Andersen、Randolph、Aubeny、Cho 和 Bang 等^[7-10]基于极限分析或极限平衡理论,通过假定简单的破坏模式,求解了吸力锚或桩的极限承载力。Zdravkovic、Senders 和 Kay 等^[11-12]采用有限元数值计算方法分析了倾斜荷载作用下桶形基础的承载力特性。然而,针对倾斜荷载作用下桶形基础破坏包络面以及破坏包络面随着偏心距 e 变化的特性尚缺乏深入而系统地探索。为此,针对不同长径比(L/D)的桶形基础结构,基于 Swipe^[13]试验加载方法,在大型有限元分析软件 ABAQUS 平台上,建立了均质软黏土地基上桶形基础的三维有限元计算模型。通过弹塑性有限元数值分析,分别考虑单个倾斜荷载和水平、竖向倾斜荷载共同作用两种加载方式,研究了倾斜荷载作用下桶形基础的极限承载力及其破坏机制,进而分析了桶形基础破坏包络面与偏心距 e 之间的关系,得到了桶形基础承载性能与 e 之间的三维破坏包络面,为桶形基础的工程设计和施工提供了参考依据。

2 有限元计算模型及分析方法

2.1 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型、复杂场变量、状态变量及特殊单元、复杂边界条件进行 2 次开发^[14]。对于吸力式桶形基础的极限承载力,采用不排水总应力分析方法。

考虑到结构和荷载的对称性,对桶形基础整体结构与计算区域的一半建立有限元计算模型,如图 1 所示。整个模型采用三维 20 节点减缩积分实体单元。桶体材料为钢材,桶壁厚度 $t=50$ mm,桶的外径 $D=4$ m。采用线弹性本构模型,弹性常数分

别取弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比 $\nu=0.125$ 。桶形基础的长径比分比取 $L/D=0.5$ 、 1.0 、 2.0 。地基为均质软黏土,处于完全不排水状态,不排水抗剪强度 $S_u=6.0$ kPa,采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型,土的变形模量 $E=500S_u$, $\nu=0.49$,认为土体是不可压缩的。

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,选取刚度大的桶体表面为主动面,土体表面为被动面,界面滑动摩擦系数 μ 取为 0.5 (相当于外摩擦角 26.6°),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,接触面上具有法向接触应力 p 与剪切摩擦力 τ ,服从 Coulomb 摩擦定律。当接触面上的剪应力小于 Coulomb 极限摩阻力时,则没有相对滑动而处于粘结状态;当接触面上的剪应力大于极限摩阻力时,则产生相对滑动^[14]。

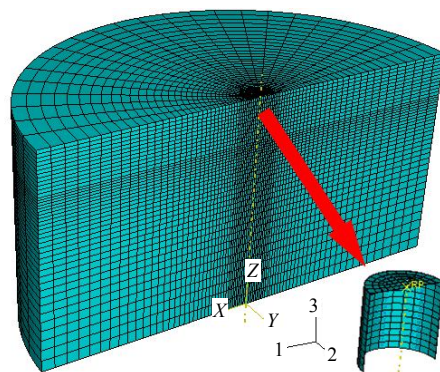


图 1 桶形基础有限元计算模型

Fig.1 FEM computational model of bucket foundation

2.2 倾斜荷载在有限元分析中的数值实施

水平荷载、竖向荷载分量共同作用且作用点偏离基础中心的加载方式称为倾斜加载模式或者偏心加载模式,如图 2 所示,图中 e 为偏心距; V 、 H 分别为桶形基础顶部所承受的竖向荷载、水平荷载。然而,在有限元计算中按照一定的加载路线或程序进行加载,以此可以唯一地确定地基达到极限平衡状态时所对应的破坏荷载^[15]。对此本文采用 Swipe 试验加载方式进行加载分析。Swipe 试验加载方法最早由 Tan^[13]提出,并应用于离心机模型试验中,有限元分析加载方法如表 1 所列。

通过 Swipe 试验加载方法进行加载有限元分析,直接寻找倾斜加载条件下破坏包络面上每个荷载组合点的近似下限解,并由此确定在给定倾斜加

载条件下地基的破坏模式及其承载力。对于不同偏心距 e 的倾斜荷载组合重复进行数值计算, 可以确定倾斜加载条件下由不同偏心距 e 所对应的破坏荷载组合所形成的破坏包络面。进而依此确定倾斜加载模式下地基的承载性能与偏心距 e 之间的三维破坏包络面。

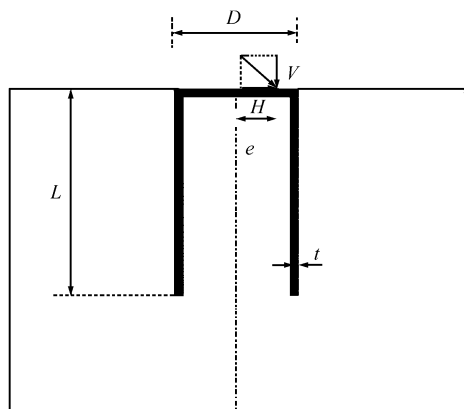


图2 计算简图

Fig.2 Schematic representation of bucket foundation

表1 有限元加载分析方法
Table 1 Program of analyses

No.	加载方式	注释
1	位移控制法	Swipe 试验: 首先施加 V 再施加 H
2	位移控制法	Swipe 试验: 首先施加 H 再施加 V
3	位移控制法	$\delta h / \delta v = 2.0$
4	位移控制法	$\delta h / \delta v = 1.0$
5	位移控制法	$\delta h / \delta v = 0.5$

2.3 应力标记方法

本文所施加和计算所得到的应力均按照 Butterfield^[16]所规定的右手准则和顺时针法则评判。则应力标记方法如表2所列。

表2 应力标记方法
Table 2 Load nomenclature

荷载	无量纲值	归一化值
竖向荷载 H	$F_H = H / AS_{u0}$	$h = H / H_{ult}$
横向荷载 V	$F_V = V / AS_{u0}$	$v = V / V_{ult}$

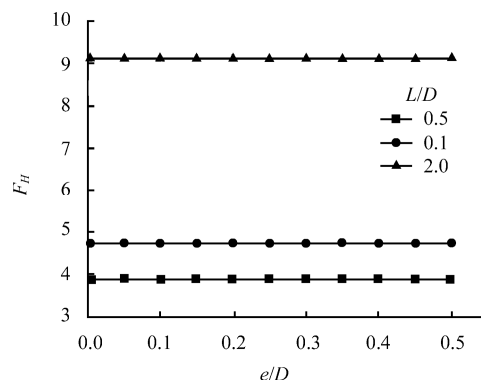
注: 下标“ult”表示极限承载力。 H_{ult} 、 V_{ult} 为不同长径比的桶形基础在 $e=0$ 时所对应的极限承载力; A 为桶形基础地面积; S_{u0} 为不排水抗剪强度。

3 倾斜荷载作用下桶形基础承载性能分析

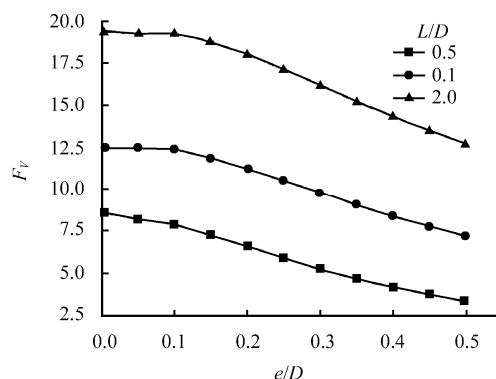
3.1 单个倾斜荷载分量作用下桶形基础极限承载力

采用位移控制方法, 分别在桶体顶部不同偏心

距 e 处施加水平位移、竖向位移, 依此分析研究了单个倾斜荷载分量作用下桶形基础的极限承载力及其破坏机制。图3为不同长径比(L/D)桶形基础在单个倾斜荷载作用下无量纲极限承载力与偏心距的关系。由图可知, ①针对相同的长径比, 无量纲水平倾斜极限承载力 F_H 并不随着偏心距的增大而发生显著变化, 而无量纲竖向倾斜极限承载力 F_V 随着偏心距的增大而降低, 并且长径比越大其减小幅度越小, 其中 $L/D=0.5$ 、 1.0 、 2.0 所对应的无量纲竖向倾斜极限承载力 F_V 随着偏心距的增大而分别减小了 60.85%、42.54%、34.41%。②针对不同的长径比, 桶形基础在单个倾斜荷载作用下的无量纲水平倾斜极限承载力 F_H 或无量纲竖向倾斜极限承载力 F_V 都随着偏心距的增加而增大。由此可知, 在单个倾斜荷载作用下, 桶形基础的竖向极限承载力相比水平极限承载力受偏心距的影响显著, 且竖向极限承载力随着偏心距的增大而降低。



(a) 偏心距与水平无量纲承载力之间的关系



(b) 偏心距与竖向无量纲承载力之间的关系

图3 偏心距与无量纲承载力之间的关系
Fig.3 Relationship between e and bearing capacity

图4~5分别给出了不同长径比(L/D)桶形基础在单个水平倾斜荷载或单个竖向倾斜荷载作用下的

破坏机制。由图可知, ①针对相同的长径比(L/D), 桶形基础在水平倾斜荷载作用下的地基破坏机制并不随着偏心距的增大而发生显著变化, 从而进一步说明了桶形基础的水平倾斜极限承载力受偏心距的影响较小。然而, 桶形基础在竖向倾斜荷载作用下的地基破坏机制随着偏心距的增大而发生显著变化, 当 $e/D=0.0$ 时, 桶形基础在竖向荷载作用下产生竖直向下的位移破坏模式, 且沿桶体中轴线对称分布; 当 $e/D=0.25$ 、 0.5 时, 桶形基础在竖向倾斜

荷载作用下绕地基内某点产生旋转的位移破坏模式, 并且在远离倾斜荷载作用的一侧土体产生向上挤压破坏趋势, 从而形成一个楔形破坏区域; 其旋转中心随着偏心距的增加而向桶体中轴线移动。从而进一步说明了桶形基础的竖向倾斜极限承载力受偏心距的影响显著。②针对不同的长径比, 桶形基础在单个水平倾斜荷载或竖向倾斜荷载作用下的破坏机制随着偏心距的增加而变化, 并且变化趋势基本相同。

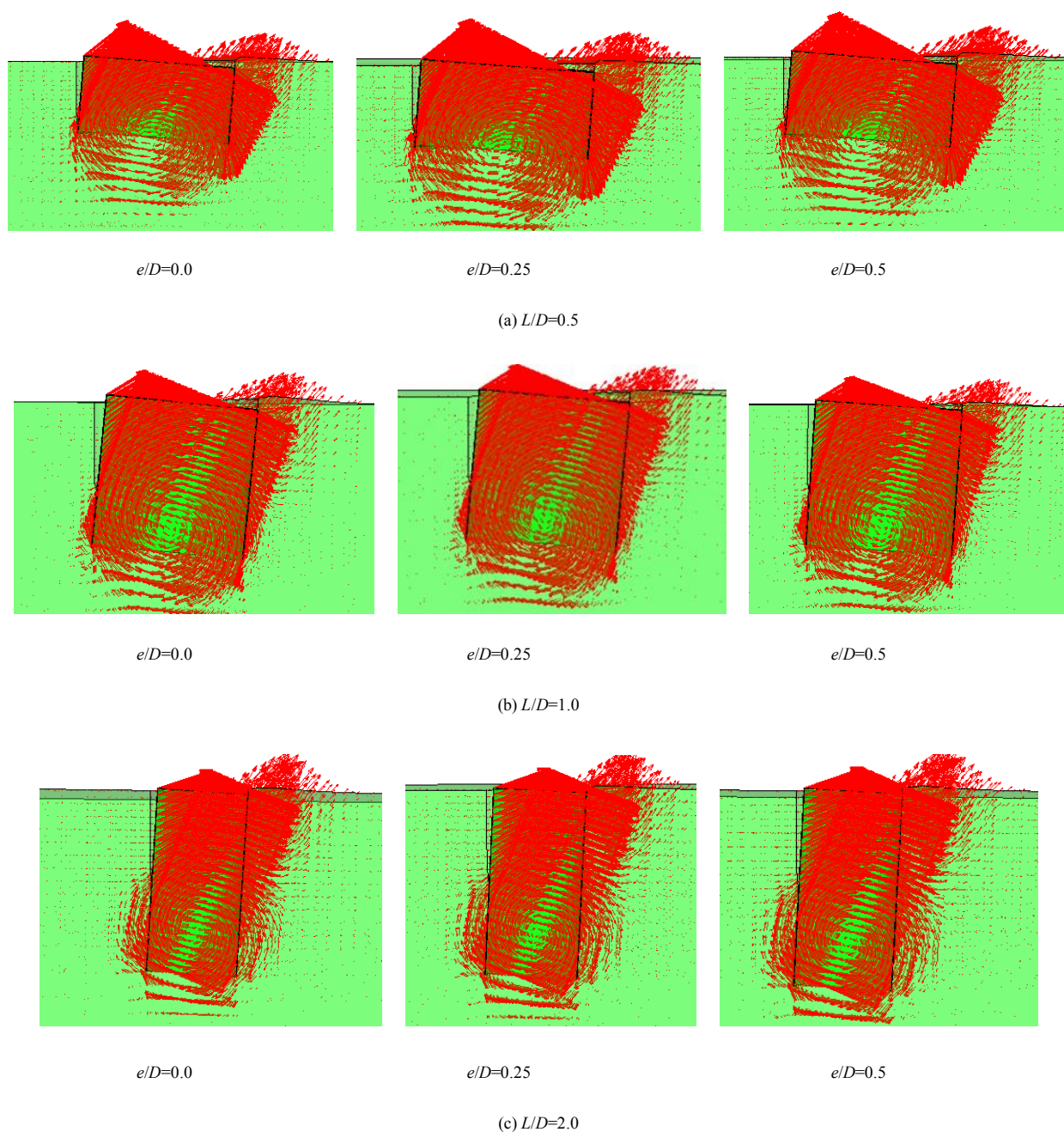


图 4 不同长径比桶形基础水平倾斜荷载破坏机制

Fig.4 Failure mechanism of bucket foundation with aspect ratios against horizontal inclined loads

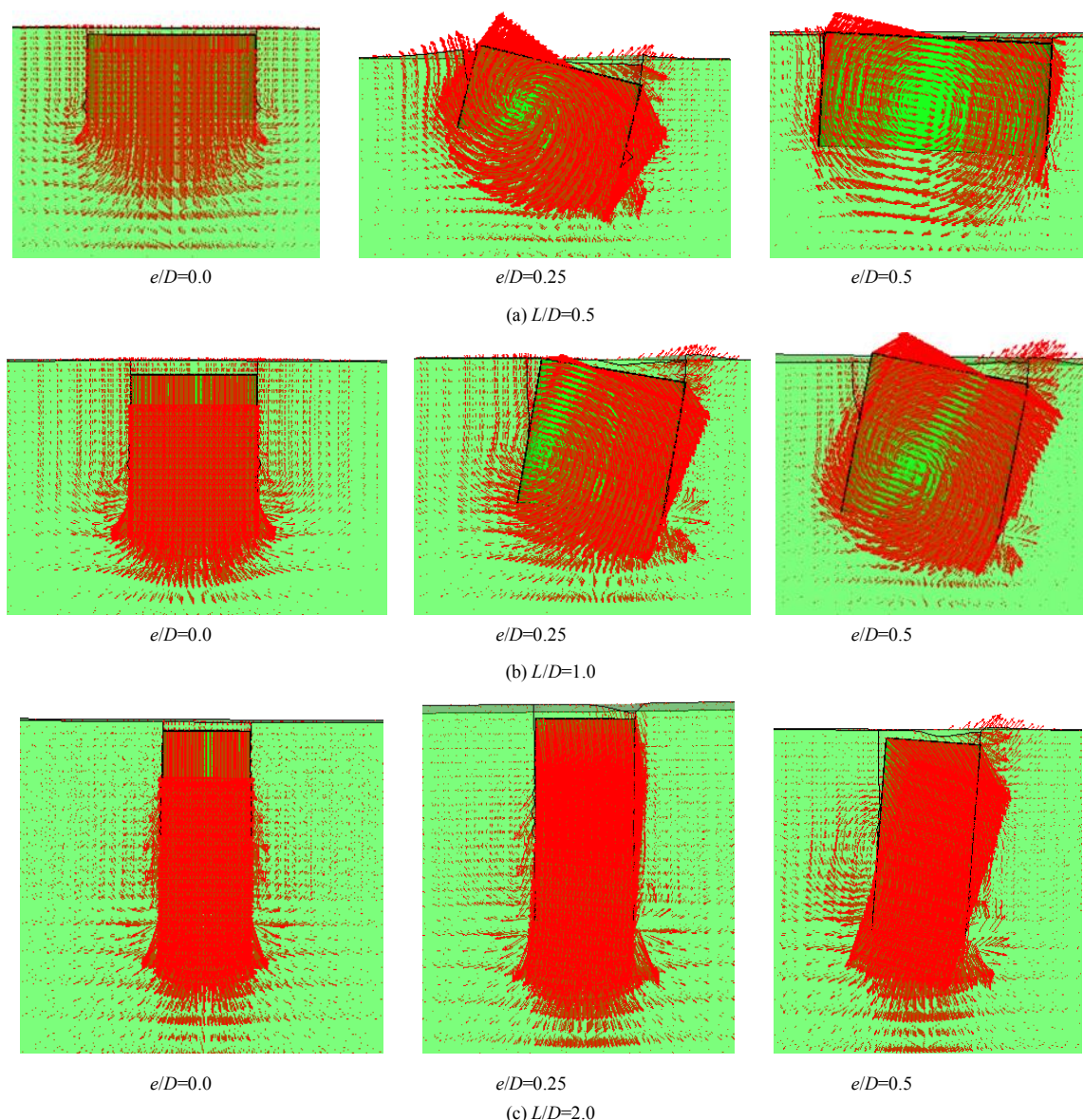


图5 不同长径比桶形基础竖向倾斜荷载破坏机制

Fig.5 Failure mechanism of bucket foundation with aspect ratios against vertical inclined loads

3.2 倾斜荷载作用下桶形基础的破坏包络图

对于水平倾斜荷载和竖向倾斜荷载共同作用下的加载模式,采用表1所对应的有限元加载方法进行了弹塑性数值计算,由此研究了桶形基础在水平倾斜荷载与竖向倾斜荷载共同作用下的极限承载力特性,建立了不同偏心距所对应的 $V-H$ 荷载空间内的极限荷载包络面。图6为不同长径比桶形基础在水平倾斜荷载与竖向倾斜荷载共同作用下的 $V-H$ 荷载空间内的极限荷载包络面与偏心距之间的关系,由图可知,①针对相同的长径比,倾斜荷载作用下桶形基础的破坏包络面形状随着偏心距的增加而缩小,其中水平极限承载力基本不变,而竖向极限承载力逐渐减小,这与单个倾斜荷载作用下桶形基础的承载力特性基本相同。②针对不同的长径比,桶形基础在水平倾斜荷载、竖向倾斜荷载共同作用下

的破坏包络面随着偏心距的增加而扩大,其中水平极限承载力和竖向极限承载力都随着偏心距的增加而增大,这与单个倾斜荷载作用下桶形基础的承载力特性基本相同。

图7为不同长径比桶形基础在水平倾斜荷载与竖向倾斜荷载共同作用下的 $V-H$ 极限荷载与偏心距之间的三维破坏包络图。通过比较可知,三维破坏包络面随着长径比的增大而扩大,而随着偏心距的增加而缩小。图8给出了同一坐标系内不同长径比桶形基础在水平倾斜荷载与竖向倾斜荷载共同作用下的 $V-H$ 极限荷载与偏心距之间的三维破坏包络图,其中破坏包络面由里向外分别是长径比为0.5、1.0、2.0。由图可知,当 $e/D=0.0$ 时,不同长径比桶形基础所对应的破坏包络面形状一致,而随着偏心距的增加,其破坏包络面逐渐缩小,且 $L/D=2.0$

的桶形基础破坏包络面相比 $L/D=0.5$ 的桶形基础破坏包络面缩小缓慢, 因而可以根据实际的倾斜荷载加载状态与这种空间破坏包络曲面之间的相对关

系, 判断实际倾斜荷载作用下桶形基础的工作状态, 例如, 当实际倾斜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。

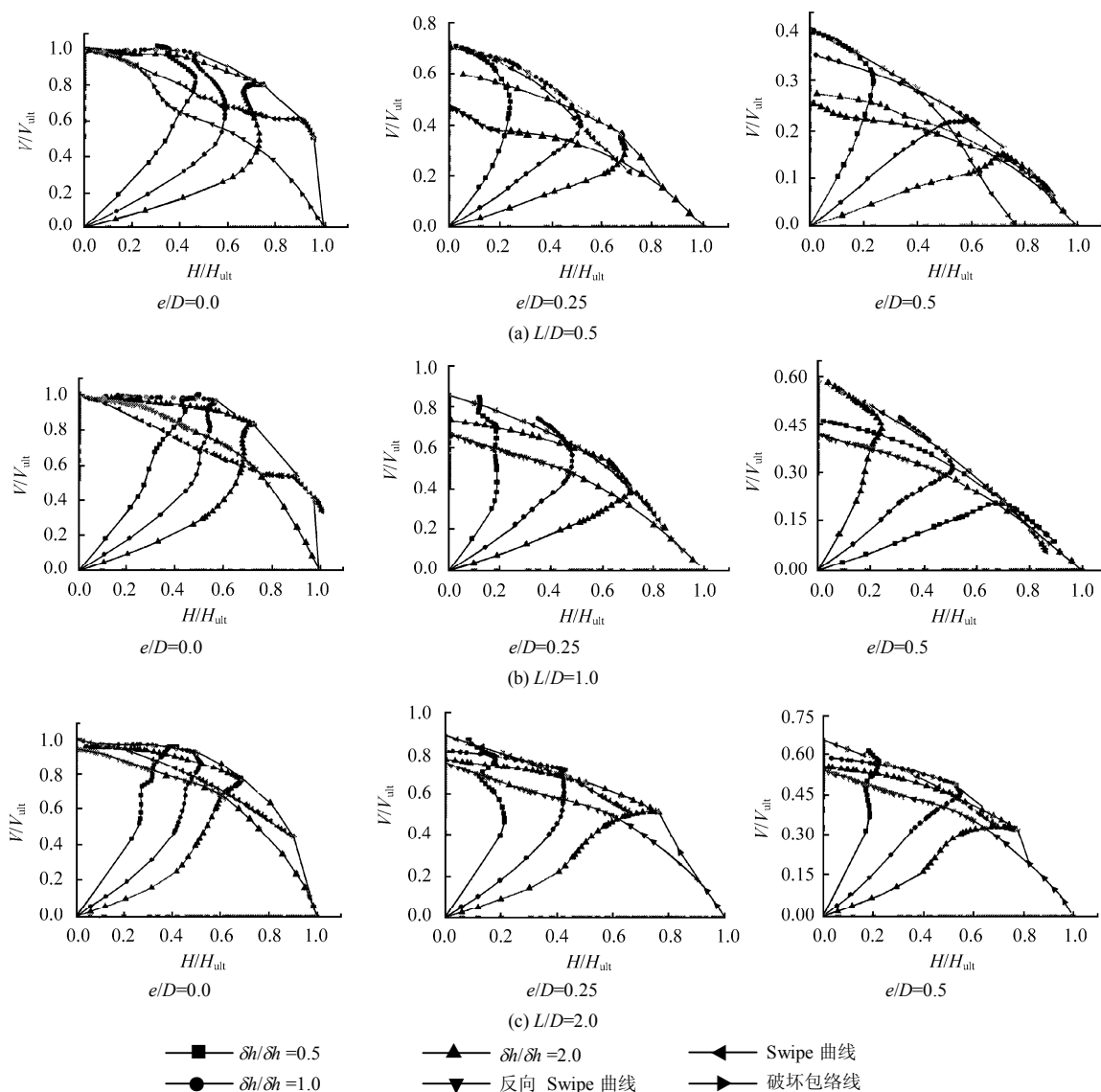


图 6 倾斜荷载作用下不同长径比桶形基础破坏包络面

Fig.6 Failure envelopes of bucket foundation with aspect ratios against inclined loads

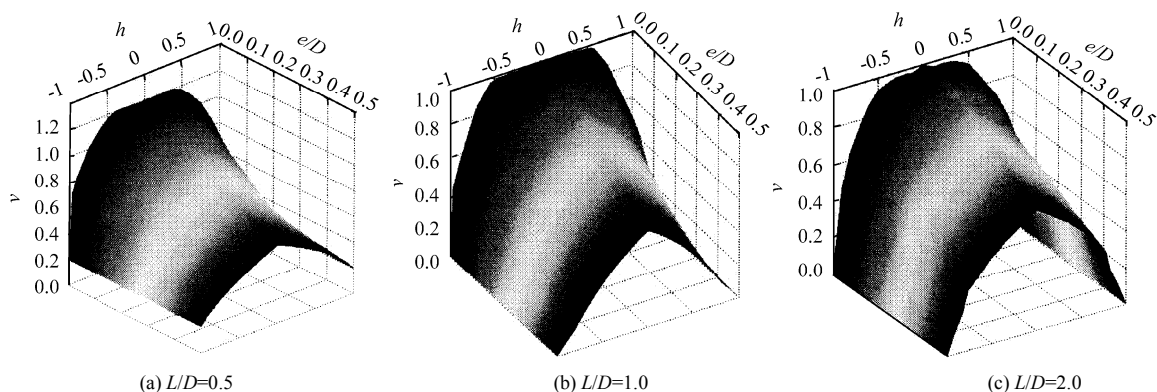
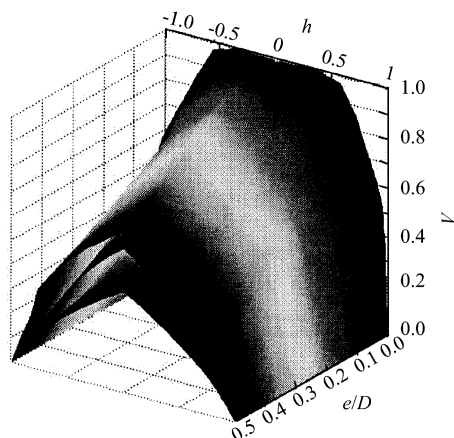


图 7 倾斜荷载作用下不同长径比桶形基础的 $V-H-e$ 三维破坏包络面

Fig.7 3-dimensional failure envelope of foundation with aspect ratios against inclined loads in the $V-H-e$ load space

图8 V - H - e 三维破坏包络面Fig.8 3-dimensional failure envelope of foundation in the V - H - e load space

4 结 论

针对吸力式桶形基础结构,在大型通用有限元分析软件 ABAQUS 平台上,建立了均质软黏土地基上桶形基础的三维有限元计算模型。考虑了单个倾斜荷载和水平、竖向倾斜荷载共同作用两种加载方式,通过弹塑性有限元数值分析,研究了倾斜荷载作用下桶形基础的极限承载力及其破坏机制,进而分析了桶形基础破坏包络面与偏心距之间的关系,得到了桶形基础承载性能与偏心距之间的三维破坏包络面。计算结果表明:

(1) 当考虑单个倾斜荷载作用时,桶形基础的竖向倾斜承载力相比水平倾斜承载力受偏心距的影响显著,其中竖向倾斜极限承载力随着偏心距的增加而降低,而水平倾斜极限承载力随着偏心距的增加基本保持不变。

(2) 当考虑单个倾斜荷载作用时,桶形基础在水平倾斜荷载作用下的破坏机制基本一致,而在竖向倾斜荷载作用下其破坏机制随着偏心距的增加而围绕地基内某点产生旋转破坏,旋转中心逐渐向桶形基础中轴线偏移。

(3) 当考虑水平倾斜荷载与竖向倾斜荷载共同作用时,桶形基础在 V - H - e 三维空间内的破坏包络面随着偏心距的增加而缩小;长径比较大的桶形基础破坏包络面相比长径比较小的桶形基础破坏包络面缩小缓慢。

(4) 根据实际的倾斜荷载加载状态与 V - H - e 三维空间内的破坏包络面之间的相对关系,可以判断实际倾斜荷载作用下桶形基础的工作状态。

参 考 文 献

[1] 张建红, 林小静. 深海海洋平台基础简介[J]. 岩土工程界, 2004, 7(12): 19—22.
ZHANG Jian-hong, LIN Xiao-jing. Introduce of deep offshore platform foundation[J]. *Geotechnical Engineering*

World, 2004, 7(12): 19—22.
[2] 袁凡凡, 栾茂田, 闫澍旺, 等. 倾斜荷载作用下层状非均质地基的极限承载力[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 564—573.
YUAN Fan-fan, LUAN Mao-tian, YAN Shu-wang, et al. Ultimate bearing capacity of layered inhomogeneous foundations under inclined loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp.2): 564—573.
[3] SUKUMARAN B, MCCARRON W O, JEANJEAN P, Abouseeda, H. Efficient finite element techniques for limit analysis of suction caissons under lateral loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 1999, 24(2): 89—107.
[4] DENG W, CARTER J P. A theoretical study of the vertical uplift capacity of suction caissons[C]//The Proceeding of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle, USA: [s. n.]. 2000: 342—349.
[5] MCCARRON W O, SUKUMARAN B. Ultimate capacities of suction caissons and pile elements for deepwater applications[C]//The Proceeding of the Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle, USA: [s. n.]. 2000: 466—469.
[6] CAO J, PHILLIPS R, POPESCU R, AUDIBERT J M E, AI-KHAFAJI Z. Numerical analysis of the behavior of suction caissons in clay[C]//The Proceeding of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu. Japan: [s. n.], 2002: 795—799.
[7] ANDERSEN K H, DYVIK R, SCHROEDER K, HANSTEEN O E, BYSVEEN S. Field tests of anchors in clay II: Predictions and interpretation[J]. *J. Geot. Eng. Div., ASCE*, 1993, 119(10): 1532—1549.
[8] RANDOLPH M F, HOUSE A R. Analysis of suction caisson capacity in clay[C]//The Proceeding of Annual Offshore Technology Conference. Houston: OTC. 2002: 14236.
[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] CHO Y, BANG S. Inclined loading capacity of suction piles[C]//The Proceeding of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu. Japan: ISOPE. 2002: 827—832.
[11] 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.
[12] SENDERS M, KAY S. Geotechnical suction pile anchor design in deep water soft clays[C]//Conference Deepwater Risers Mooring and Anchorings. London: IBC, 2002.
[13] TAN F S. Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand[D]. London: Cambridge University, 1990.
[14] HIBBITT, KARLSSON, Sorensen (I). ABAQUS scripting user's manual (Version 6.3) [M]. Pawtucket: HKS, 2002.
[15] 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.
LUAN Mao-tian, ZHAO Shao-fei, YUAN Fan-fan, et al. Numerical analysis of bearing capacity behavior of foundation under combined loading[J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(1): 34—40.
[16] BUTTERFIELD R, HOULSBY G T, GOTTARDI G. Standardised sign conventions and notation for generally loaded foundations[J]. *Geotechnique*, 1997, 47(5): 1051—1054.