

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0903-05

竖向与水平复合加载下桶形基础 承载性能的分析

武 科^{1, 2}, 栾茂田^{1, 2}, 范庆来^{1, 2}, 王志云^{1, 2}

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

摘 要: 在竖向和水平力共同作用的复合加载条件下地基承载性能及其破坏模式是吸力式桶形基础设计与施工中的关键技术问题。为此, 以大型通用有限元分析软件系统 ABAQUS 为基础建立了桶形基础三维有限元计算模型, 运用位移控制法确定了均质软黏土地基极限承载力系数与位移之间的归一化关系; 采用 Swipe 试验加载方法, 确定了桶形基础在竖向力与水平力平面上的地基破坏包络图, 从极限分析上限方法的角度探讨了由数值计算所揭示的桶形基础破坏机制。

关 键 词: 桶形基础; 复合加载; 承载力; 有限元方法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Numerical analysis of bearing capacity behaviour of suction bucket foundations under joint loading condition of vertical and horizontal loads

WU Ke^{1,2}, LUAN Mao-tian^{1,2}, FAN Qing-lai^{1,2}, 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)

Abstract: Not only is the suction bucket foundation subjected to vertical loading induced by weights of offshore platform and equipments, but also undergoes horizontal force and moment caused by winds and waves. Therefore the performance of bucket foundation subject to the joint loading of both vertical force (V) and horizontal force (H) is one of the key issues in design and construction of a bucket foundation. A 3-D FEM-based computational model of bearing capacity and failure mechanism of bucket foundation under the above joint loads is proposed and then numerically implemented using the general-purpose finite element analysis package ABAQUS. The normalized relationship between the factor of ultimate bearing capacity and resulting displacement is obtained by applying the displacement controlled method for homogeneous soft soil profile. The failure envelope of the foundation in the load subspace of vertical and horizontal forces (V - H) is determined by utilizing loading procedure of the Swipe test. The load-carrying performance and failure mechanism of bucket foundation under joint loading are interpreted from the standpoint of upper-bound limit analysis based on the deformation pattern obtained from numerical analyses. The numerical results computed using the proposed method is helpful to engineering practices.

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

1 前 言

海洋结构及其地基除了承受巨大的竖向自重荷载长期作用之外, 往往还遭受到暴风和波浪等所引起的水平力和力矩的共同作用。作为一种新型海洋基础形式, 吸力式桶形基础在近海和深海工程中得到了广泛采用。在竖向力 V 、水平力 H 和力矩 M 等

多个荷载分量共同作用的复合加载模式下, 桶形基础及地基的承载性能及其破坏机理是海洋结构及地基设计与建造中的关键技术问题之一^[1]。Murff^[2]、Martin^[3]、Bransby 与 Randolph^[4]等针对不排水条件下的饱和软土和砂土, 采用不排水抗剪强度 $c = s_u$ ($\phi = 0$), 基于极限分析确定了复合加载模式下地基的破坏包络面, 并以此评价地基的整体稳定

收稿日期: 2006-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50579006, 50179006)与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, 男, 1978 年生, 博士生, 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。

性。在荷载空间内,达到极限平衡状态时的竖向力、水平力和力矩等 3 个荷载分量组合形成了一个空间破坏包络面,当将各个荷载分量进行无量纲化后,破坏包络面方程可表达为

$$f\left(\frac{V}{As_u}, \frac{H}{As_u}, \frac{M}{ABs_u}\right) = 0 \quad (1)$$

式中 A 为基础表面面积; B 为基础宽度或直径; s_u 为地基土的不排水抗剪强度。实际上,在复合加载模式下,基础及地基的破坏包络面密切地依赖于荷载组合方式、基础型式、下覆地基土的工程特性、土层分布特征等多种因素^[5]。尽管对于某些简单情况,已经通过理论分析得到了一些简化解答。然而对于实际中的各种复杂情况,目前尚缺乏严密而实用的分析方法与计算模型。对于复合加载模式,Swipe 试验加载方法^[6]可以通过特殊加载路径的加载试验或分析逐步确定破坏包络面上每个可能的极限荷载组合点,广泛地应用于承载力数值分析中^[5]。

本文在大型有限元分析软件 ABAQUS 的平台上进行了二次开发,以此可对均质软黏土地基上桶形基础在水平荷载和竖向荷载共同作用下的复合加载过程进行数值模拟,采用位移控制法和 Swipe 试验方法分别对均质软黏土在水平、竖向荷载单独作用下及复合加载模式下的地基承载力性能,并确定了复合加载模式下地基破坏包络面;利用极限平衡理论分析了桶形基础在极限状态时的破坏机制。

2 Swipe 试验加载方法

对于竖向力与水平力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,以此可以唯一地确定地基达到极限平衡状态时所对应的破坏荷载^[5]。对此一般采用 Swipe 试验加载方式进行加载分析。Tan^[6]最早提出了 Swipe 试验方法,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位移增大而改变;(2) 保持 i 方向的位移不变而沿 j 方向施加位移 u_j 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 2 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^[5],如图 1 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,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。实际上,如此所确定的承载力是真实解的某一下限近似解。

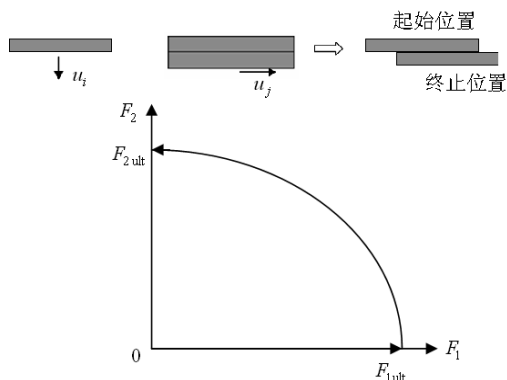


图 1 Swipe 试验加载方法

Fig.1 The loading procedure of Swipe tests

3 有限元计算模型及分析方法

3.1 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、复杂边界条件进行二次开发^[4]。

对于地基土,采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型,在不排水条件下,泊松比取为 $\nu = 0.49$,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 $E = 500s_u$,不考虑地基中应力水平对模量的影响,实际上,变形模量的取值对于极限承载力的影响极小,但是对达到极限承载力所对应位移的影响将是非常显著的。

对于桶形基础桶体结构,采用线弹性本构模型,弹性常数为 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 与 $\nu = 0.125$ 。

对于桶形基础桶壁与周围土体之间的接触问题,采用 ABAQUS 中的主动-被动面接触算法进行分析,选取刚度大的桶体表面为主动面,土体表面为被动面,界面滑动摩擦系数取为 $\mu = 0.5$,相当于外摩擦角为 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 μp 时,则没有相对滑动而处于黏结状态;当接触面上的剪应力大于极限摩阻力 μp 时,则产生相对滑动^[7, 8]。

3.2 有限元分析方法

本文首先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,直到曲线的斜率逼近于 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。

进而采用 Swipe 试验加载方法通过不同的加载路径确定桶形基础在竖向力与水平力复合加载作用下的破坏包络面。

4 复合加载下桶形基础承载性能分析

下面采用上述的总应力有限元方法分析吸力式桶形基础的极限承载力。

4.1 单向荷载作用下桶形基础的承载力

根据桶形基础结构的对称性, 取半个桶体及地基来分析, 采用 6 面体 20 节点单元(C3D20R)建立有限元计算模型, 如图 2 所示。在算例分析中, 桶体直径与高度分别选为 $D=4.0\text{ m}$ 与 $L=4.0\text{ m}$, 高径比为 $L/D=1$ 。同时计算范围在横向与竖向分别取为 $4D$ 与 $5L$ 。桶形基础安装就位以后, 地基土体受到上部结构及基础自身的重力, 图 3 给出了桶形基础在自重应力作用下位移分布。在自重应力作用下桶体发生了竖向沉降, 且中心处最大, 向外依次减小。

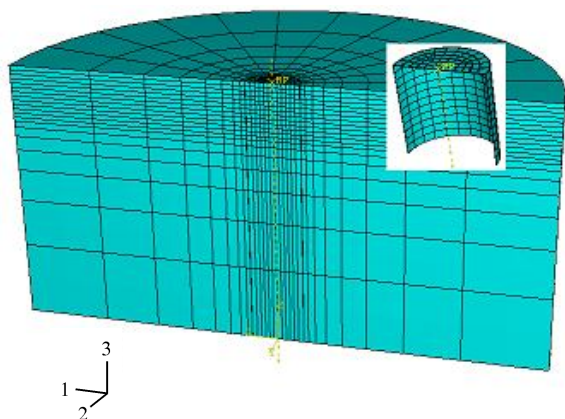


图2 有限元计算模型

Fig.2 The finite element model for analyses

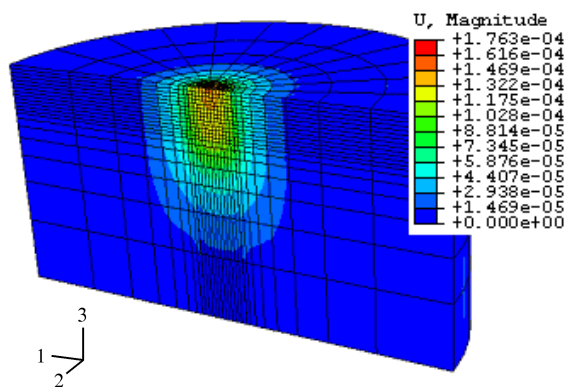
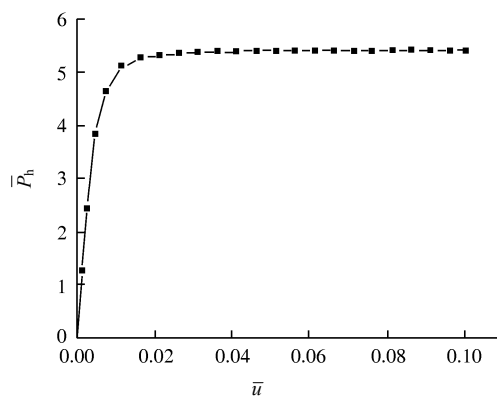


图3 自重应力作用下位移

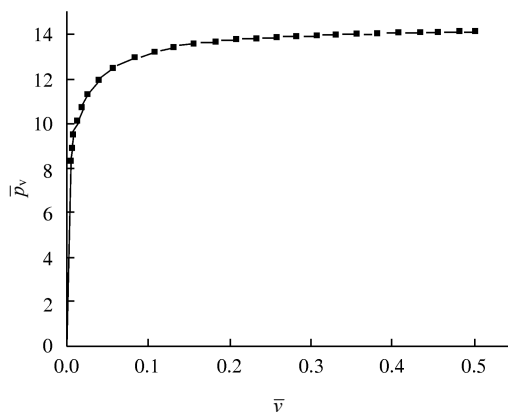
Fig.3 Displacement under self-weight stress

采用位移控制法分别计算水平力、竖向力等单个荷载分量单独加载中桶形基础及地基位移发展过

程, 由此确定相应的极限承载力。图 4 给出了计算所得到的相应荷载与位移之间归一化关系, 图中 $\bar{p}_h = P_h / A s_u$ 、 $\bar{p}_v = P_v / A s_u$ 分别为水平力和竖向力等单独作用下桶形基础的承载力系数; $\bar{u} = u / D$, $\bar{v} = v / D$, P_h 、 P_v 分别为作用在桶形基础顶部水平力、竖向力; A 为桶形基础桶顶面积; u 、 v 为桶形基础顶部的水平与竖向位移。由图可知, 在水平力、竖向力单独作用下, 在加载初始阶段作用在桶形基础上的荷载随着位移的增加而近似地线性增长。进一步地, 对于水平力单独作用情况, 当 $\bar{u} > 0.02$ 时, 由计算所得到的荷载与位移之间归一化关系曲线的斜率接近于 0, 此时所对应的归一化水平力 $\bar{p}_h = 5.45$ 可作为桶形基础的水平极限承载力系数。同理, 对于竖向力单独作用情况, 当 $\bar{v} > 0.15$ 时, 桶形基础的竖向极限承载力系数可确定为 $\bar{p}_v = 13.52$ 。



(a) 水平荷载



(b) 竖向荷载

图4 计算所得到的归一化荷载一位移关系

Fig.4 Relationship between load and displacement computed using FEM analyses

图 5 为桶形基础在竖向荷载与水平荷载单独作用下地基中等效塑性应变分布。由图可见, 在水平或竖向荷载作用下, 桶形基础底部形成连贯的勺形

塑性区。在水平荷载作用下,在桶形基础右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处于被动状态,桶体挤入土体产生较大的土压力;而桶体另一侧则处于主动状态,桶体与地基土之间产生相对分离。在竖向荷载作用下,桶体的下沉使得桶体与地基接触区产生剪切破坏,从而造成桶形基础两侧及其与地基接触区的塑性应变较大。

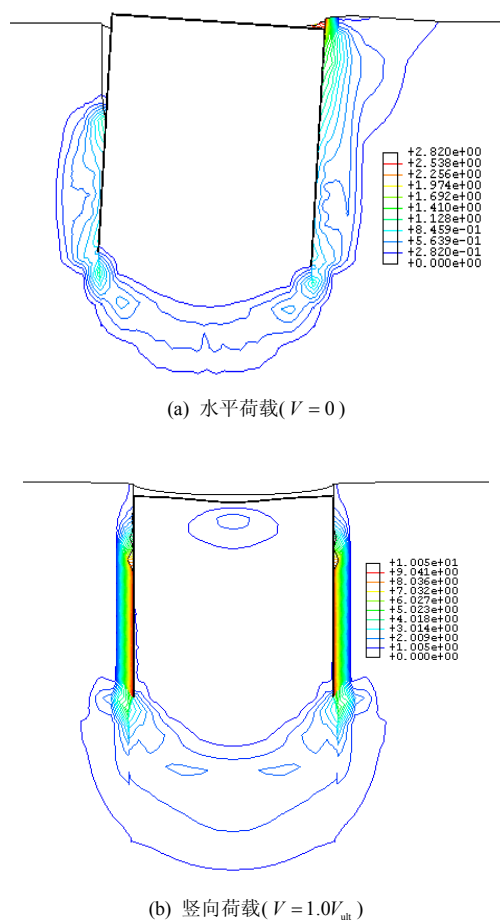
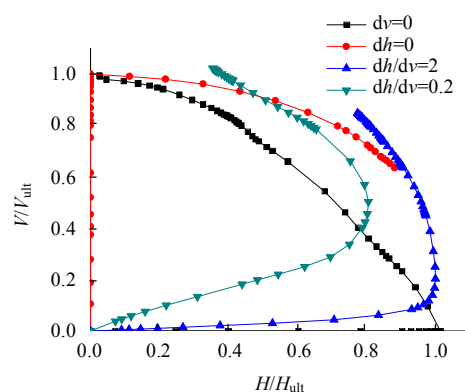


图5 计算所得到的地基中等效塑性应变
Fig.5 Computed equivalent plastic strain

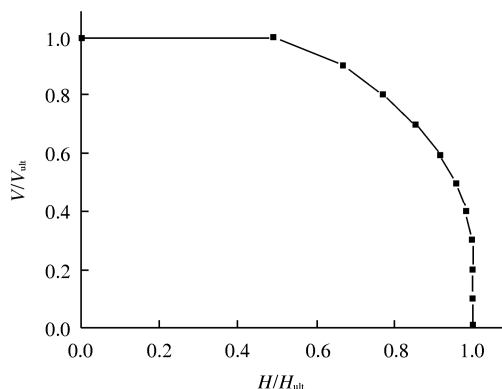
4.2 复合加载模式下桶形基础的破坏包络面

采用 Swipe 试验加载方法计算竖向荷载与水平荷载联合作用下桶形基础及地基的承载力,由此确定荷载空间内的破坏包络面^[3],进而以此评价在不同组合的复合加载下桶形基础及其地基的稳定性。首先沿竖直方向从 0 加载状态开始施加竖向位移直至达到竖向极限承载力所对应的竖向极限位移,此时竖直方向上的荷载不再随位移增大而改变;然后,保持竖直方向的位移不变,而沿水平方向施加水平位移直至达到水平极限承载力所对应的水平极限位移,此时沿水平方向所施加的荷载不再随水平方向的位移增加而改变。由此可以得到桶形基础在竖向

荷载与水平荷载某种组合作用下的破坏包络面。同理,也可以先施加水平位移后施加竖向位移而使桶形基础进入极限破坏状态,由此可以确定在竖向荷载与水平荷载的另外一种组合作用下桶形基础的破坏包络面。类似地,也可以进行控制竖向与水平位移之比例的加载分析,由此也可以得到相应的地基破坏包络面。针对上述不同的加载程序,图 6 在 V - H 平面内给出了竖向荷载和水平荷载共同作用下的极限承载力包络面,其中 H/H_{ult} 、 V/V_{ult} 分别为不同荷载分量的归一化系数; H 、 V 分别为桶形基础在复合加载作用下顶部水平力、竖向力; H_{ult} 、 V_{ult} 分别为水平荷载、竖向荷载单独作用下的极限承载力。由图 6(a)可知,不同 Swipe 试验加载方法得到了不同的复合加载破坏曲面,各个曲面都在不同的破坏点发生弯曲,此弯曲破坏点即为复合加载破坏包络点,连接这些破坏包络点就构成了复合加载破坏包络面,如图 6(b)所示。针对不同的竖向荷载分量,图 5 与图 7 联合给出了桶形基础在复合加载模式下地基中的等效塑性应变分布。由图可知,桶形基础底部形成连贯的勺形塑性破坏区;由于水平荷载的



(a) 不同 Swipe 加载方法所得到的破坏包络面



(b) V - H 平面内归一化破坏包络面

图6 Swipe 方法 V - H 破坏包络面($M=0$)
Fig.6 Failure envelope of foundation in V - H plane obtained from Swipe tests($M=0$)

作用,使得在与水平位移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的作用。

5 结 论

针对桶形基础在竖向荷载和水平荷载共同作用下的复合加载模式地基承载力性能,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 试验加载方法分别对桶形基础在单向荷载作用下和复合加载作用下地基承载力性能进行了数值计算与分析。计算与分析表明: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,而水平荷载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,必须联合考虑竖向与水平荷载分量共同作用的影响。

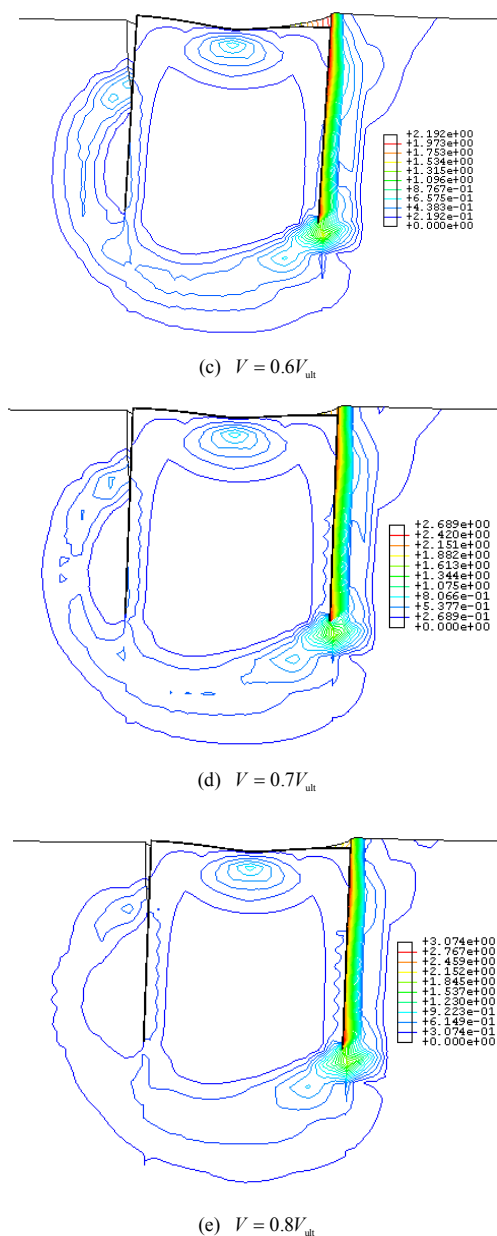
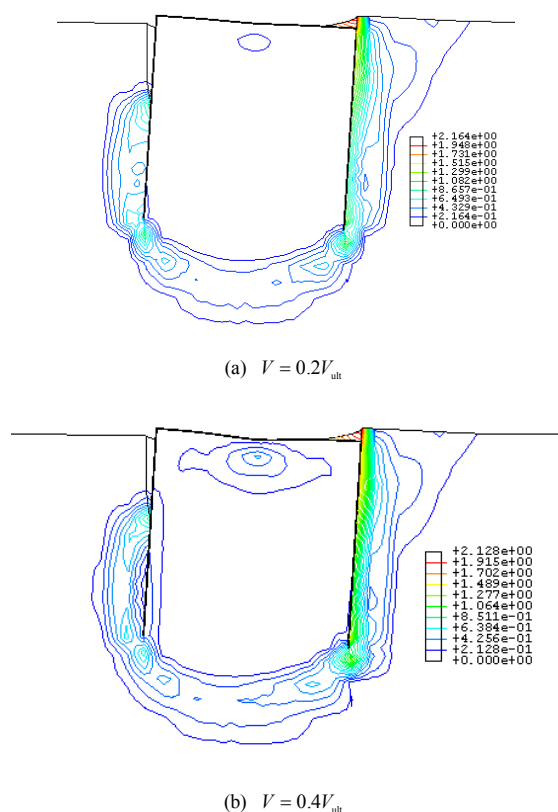


图 7 复合加载模式下桶形基础地基中等效塑性应变($M=0$)

Fig.7 Distribution of ε_p in foundation under joint loading($M=0$)

参 考 文 献

- [1] Bransby M F, Randolph M F. The effect of embedment depth of the response of skirted foundations to combined loading[R]. Department of Civil Engineering, The University of Western Australia, Perth, 1998.
- [2] Murff J D. Limit analysis of multi-footing foundation systems[A]. **Proceedings International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics[C]**, Rotterdam: Balkema, 1994, 233–244.
- [3] Martin C M. Physical and numerical modeling of offshore foundations under combined loads[Ph.D Thesis][D], Wellington Square: The University of Oxford, 1994.

-
- [4] Bransby M F, Randolph M F. Combined loading of skirted foundations[J]. **Geotechnique**, 1998, 48: 637–655.
- [5] 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 behaviour of foundation under combined loading[J]. **The Ocean Engineering**, 2006, 24(1): 34–40.
- [6] Tan F S. Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand[Ph.D thesis][D]. London: Cambridge University, 1990.
- [7] Hibbitt, Karlsson, Sorensen (Inc.). 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[硕士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2002.