

# 竖向偏心荷载作用下吸力桶荷载-变形特性非共轴本构数值分析

罗 强<sup>\*1</sup>, 冯 娜<sup>2</sup>, 贾 虎<sup>1</sup>, 马可栓<sup>1</sup>

(1. 南阳师范学院 土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061;

2. 河南工业职业技术学院 经济管理学院, 河南 南阳 473000)

**摘要:** 在竖向偏心荷载作用下建立吸力式桶形基础数值分析模型, 采用砂土非共轴弹塑性本构模型研究土体主应力方向旋转和非共轴角度的变化规律, 探讨非共轴特性对吸力桶力学特性的影响. 主要研究结论表明: 在地基变形过程中, 非共轴角度呈现先增大后减小的发展趋势. 随着偏心距的增加, 等效塑性应变在地基中的分布范围逐渐减小, 非共轴特性也将减弱, 非共轴特性对荷载-变形特性的影响逐渐减弱. 对于桶壁端部阻力和桶壁外侧摩擦阻力, 非共轴特性的影响随着偏心距的增加而减弱. 对于桶体顶部阻力和桶壁内侧摩擦阻力, 非共轴特性的影响随着偏心距的增加而逐渐显著.

**关键词:** 非共轴理论; 偏心荷载; 吸力桶; 本构模型; 数值分析

**中图分类号:** TU473.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7511/dllgxb201801011

## 0 引 言

吸力式桶形基础适用于深、浅海域, 在海上采油平台和风力发电机领域的应用比较广泛. 桶形基础在实际使用过程中往往处于复合荷载(自重、风、波浪荷载)作用状态, 其中竖向偏心荷载的作用比较显著. 目前, 国内外大部分研究工作主要针对竖向轴心受压或水平推压受力状态, 对竖向偏心荷载状态下吸力桶承载性能的研究尚不深入. 张宇等<sup>[1]</sup>针对砂土中不同长径比的桶形基础, 通过数值计算和模型试验对基础的竖向力学机理进行了分析. 武科等<sup>[2]</sup>的研究表明竖向荷载偏心距对竖向倾斜承载力的影响较大, 桶形基础承载性能随着偏心距的增加而减小. Zdravkovic 等<sup>[3]</sup>采用有限元数值模型分析研究了桶形基础在承受倾斜荷载作用时的荷载特性. 鲁晓兵等<sup>[4]</sup>采用模型试验方法研究了桶形基础的竖向承载特性, 研究结果表明偏心距对吸力桶承载力有较大影响. Bransby 等<sup>[5]</sup>、Gourvenec 等<sup>[6]</sup>采用模型试验和数值计算等方法, 在复合加载条件下对地基承载力进行了研究.

目前, 国内外的研究工作大多将主应力方向假定为固定不变, 忽略了主应力方向旋转对土体力学特性的影响. 事实上, 土体发生剪切变形时, 主应力方向处于旋转状态, 并对土体的力学特性有显著影响<sup>[7-8]</sup>. 沈瑞福等<sup>[9]</sup>的砂土剪切试验结论表明主应力方向旋转会降低土体强度. 姚仰平等<sup>[10]</sup>的研究结论表明应当考虑主应力方向旋转对土体变形与强度特性的影响. 因此, 应当深入研究主应力方向旋转对土体荷载-变形特性的影响.

在土体主应力方向旋转过程中, 主应力与塑性主应变增量的方向又不相同, 两者之间存在着显著差异, 一般称为非共轴特性<sup>[11-12]</sup>, 该特性在砂土中尤为显著. 通过对传统弹塑性本构理论进行完善, 国内外学者相继提出了非共轴本构理论<sup>[13-14]</sup>. 目前, 非共轴本构理论在复杂工程中的应用较为欠缺. 竖向偏心荷载作用下土体与吸力桶间的相互作用机理比较复杂, 对非共轴特性在这种力学状态下的影响更是缺少深入研究.

本文以砂土地基中吸力桶为分析对象, 研究偏心距对地基等效塑性应变分布特征的影响, 明

收稿日期: 2017-05-26; 修回日期: 2017-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609117, 51209028); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B560023).

作者简介: 罗 强<sup>\*</sup> (1981-), 男, 博士, 讲师, E-mail: luoqiang1212@sina.com.

确土体主应力方向的旋转变化,非共轴特性的产生及演变,非共轴特性对桶土间相互作用的影响,竖向荷载偏心距对非共轴特性的影响,在竖向偏心荷载作用下研究非共轴特性的影响。

### 1 非共轴理想弹塑性本构模型

根据屈服角点结构非共轴弹塑性理论,应变增量采用以下形式:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{pc} + \dot{\epsilon}_{ij}^{pn} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{pc}$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{pn}$  分别为应变增量、弹性应变增量、共轴塑性应变增量和非共轴塑性应变增量。

$\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{pc}$  可由传统弹塑性本构理论求得。

非共轴塑性应变增量  $\dot{\epsilon}_{ij}^{pn}$  采用以下形式:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pn} = \frac{1}{h_{nc}} \left( \dot{s}_{ij} - \frac{\mathbf{s}_{ij} \mathbf{s}_{kl}}{2\tau^2} \dot{s}_{kl} \right) \quad (2)$$

$$h_{nc} = h_{nc0} [1 - e^{(-16\epsilon^p)^{0.7}}]^{-1} \quad (3)$$

$$\tau = \sqrt{0.5 \mathbf{s}_{ij} \mathbf{s}_{ij}} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{s}_{ij}$  为剪应力张量,  $h_{nc}$  为非共轴塑性模量,  $\epsilon^p$  为累积塑性应变,  $h_{nc0}$  为初始非共轴塑性模量<sup>[15]</sup>。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}^{ep} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (5)$$

$$D_{ijkl}^{ep} = E_{ijkl} - \frac{(E_{ijab} R_{ab})(E_{klcd} l_{cd})}{K_p + l_{mn} E_{mnst} R_{st}} - \frac{4G^2}{h_{nc} + 2G} N_{ijkl} \quad (6)$$

$$N_{ijkl} = \frac{1}{2} \left( \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{\mathbf{s}_{ij} \mathbf{s}_{kl}}{\tau^2} \right) \quad (7)$$

式中:  $K_p$ 、 $G$  分别为体积模量、剪切弹性模量;  $\mathbf{D}$  为弹塑性刚度矩阵;  $\delta_{ij}$  为克罗内克符号;  $\mathbf{R}$  为塑性势函数;  $l$  为屈服函数;  $\mathbf{E}$  为弹性刚度矩阵;  $N_{ijkl}$  为与非共轴因素相对应的矩阵项<sup>[15]</sup>。

非共轴本构模型的数值积分方法详见文献 [15-16]。

### 2 吸力桶荷载-变形特性数值分析

#### 2.1 有限元模型及边界条件

采用  $D_r = 40\%$  的饱和中密砂,浮容重为  $6 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$ ,弹性模量  $E = 50 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.3$ 。基础直径为  $4 \text{ m}$ ,高度为  $4 \text{ m}$ ,壁厚为  $0.1 \text{ m}$ ,在数值分析模型中,桶体设定为不发生变形的刚体,桶土接触面的作用采用摩擦接触算法进行计算,摩擦因数取为  $0.3$ 。

竖向集中荷载作用在吸力桶顶面,当考虑偏心作用时,竖向荷载作用在桶体竖向中轴线的右侧,相应力矩为顺时针方向。偏心距  $e$  为  $0 \sim 0.500D$ ,  $D$  为桶体直径。

#### 2.2 地基等效塑性应变分布特征分析

在不同偏心距条件下,吸力桶竖向荷载达到极限承载力时,地基的等效塑性应变分布形式如图 1 所示。图中“ $\times$ ”符号代表竖向集中荷载在吸力桶顶面的作用位置。

由图 1 可知:(1)当竖向荷载偏心距  $e$  为  $0$  时,等效塑性应变在地基中呈马鞍状对称分布。吸

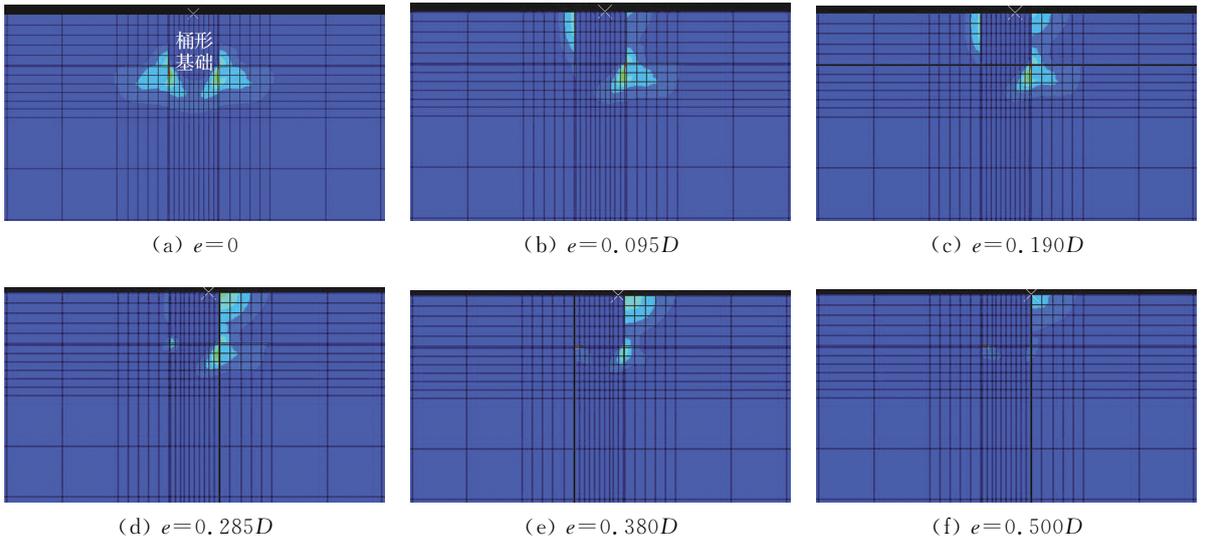


图 1 地基等效塑性应变分布图

Fig. 1 Distribution map of equivalent plastic strain of foundation

力桶端平面以下 U 形区域内的土体以弹性变形为主. 在吸力桶外侧, 等效塑性应变集中在端部外侧的三角形区域. (2) 承受竖向偏心荷载时, 等效塑性应变分布范围呈现显著的不对称现象, 等效塑性应变主要集中在桶体右侧端部以下和桶壁右侧以外范围. 随着偏心距的增加, 等效塑性应变分布范围逐渐减小. (3) 在顺时针力矩作用下, 桶壁右侧以外的土体主要处于被动受压作用状态, 等效塑性应变在该区域的分布范围比较大, 其分布范围受到偏心距的影响较小.

### 2.3 非共轴角度发展规律分析

当竖向荷载偏心距  $e = 0.380D$  时, 桶体右侧桶壁端部下方土体单元的主应力方向和塑性主应变增量方向的旋转变化如图 2 所示, 纵坐标为旋转角度  $\alpha$ , 横坐标为竖向沉降  $s$  与基础直径  $D$  的比值.

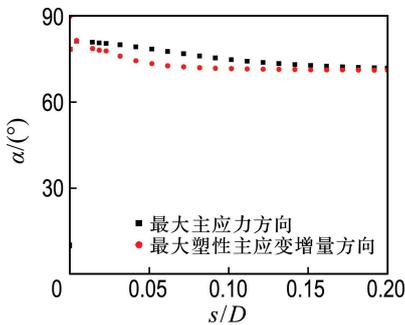


图 2 土体主应力、塑性主应变增量方向旋转

Fig. 2 Rotation of the direction of principal stress and plastic principal strain increment in soil

由图 2 可知: (1) 主应力方向和塑性主应变增量方向处于旋转状态, (2) 在基础沉降增长到  $0.050D$  的过程中, 两者的差异逐渐增加. 随着基础沉降的进一步增加, 两者之间的差异逐渐减小. (3) 主应力方向滞后于塑性主应变增量方向的旋转变化.

当偏心距  $e$  在  $0 \sim 0.500D$  变化时, 针对桶体右侧桶壁端部下方土体单元, 非共轴角度的变化如图 3 所示. 其中, 非共轴角度  $\beta$  为主应力方向与塑性主应变增量方向的差值.

由图 3 可知: (1) 随着地基沉降的增加, 非共轴角度呈现先增大后减小的发展趋势. (2) 当  $e$  为  $0 \sim 0.500D$  时, 基础沉降达到  $0.020D$  之前, 偏心

距的变化对非共轴角度影响可以忽略. 当基础沉降为  $0.020D \sim 0.130D$  时, 偏心距的变化对非共轴角度的影响比较显著. 当基础沉降超过  $0.130D$  时, 偏心距的变化对非共轴角度的影响可以忽略. (3) 随着偏心距的增加, 等效塑性应变分布范围逐渐减小, 非共轴角度随之减小, 非共轴特性也将减弱.

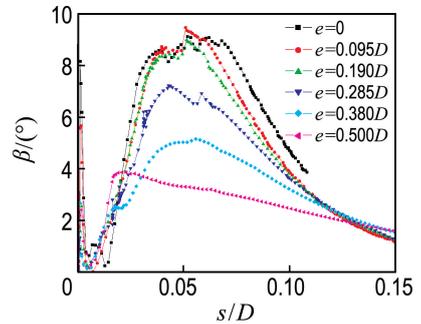


图 3 非共轴角度变化

Fig. 3 Variation of non-coaxial angle

### 2.4 吸力桶荷载-变形特性分析

吸力桶与地基土体之间的相互作用主要表现为 4 部分阻力: 内、外两侧摩擦阻力 ( $f_i$ 、 $f_o$ ), 桶壁端部阻力  $f_t$ , 以及桶体内部土塞对顶板内侧的反力  $f_p$ . 这 4 部分阻力共同构成了吸力桶所承受的竖向荷载  $f_v$ .

当竖向荷载偏心距  $e = 0.380D$  时, 吸力桶竖向荷载  $f_v$  与基础沉降  $s/D$  的对应关系如图 4 所示, 前述 4 部分阻力与沉降的对应关系如图 5~8 所示.

由图 4~8 可知: (1) 非共轴特性对桶体的力学特性具有显著影响, 与传统共轴模型的计算结果之间存在显著差异. (2) 当基础沉降比较小时,

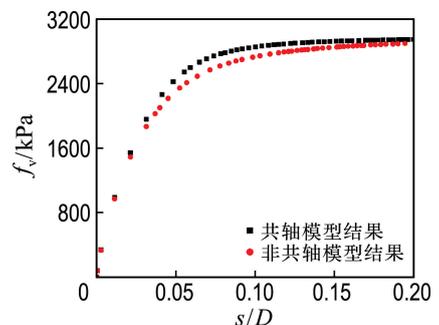


图 4 竖向荷载-沉降关系

Fig. 4 Relations of vertical load and settlement

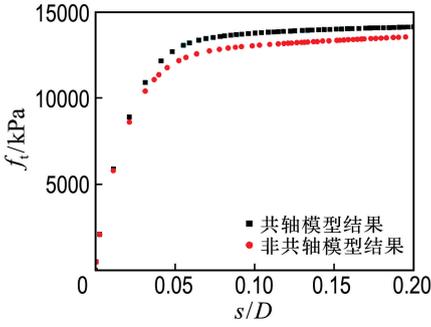


图 5 端部阻力-沉降关系

Fig. 5 Relations of tip resistance and settlement

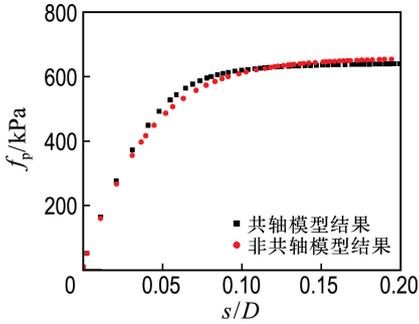


图 6 顶部阻力-沉降关系

Fig. 6 Relations of top resistance and settlement

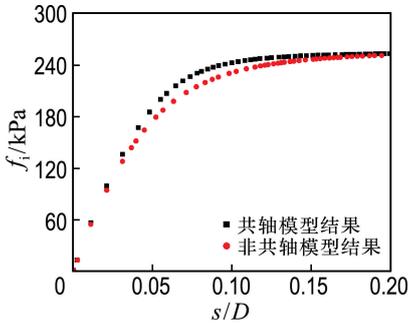


图 7 内侧摩擦阻力-沉降关系

Fig. 7 Relations of inner friction resistance and settlement

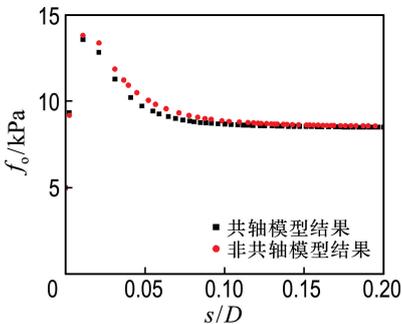


图 8 外侧摩擦阻力-沉降关系

Fig. 8 Relations of outer friction resistance and settlement

地基变形以弹性为主,非共轴特性不显著,两种模型计算结果之间的差异可以忽略.当基础沉降较大时,地基进入弹塑性变形阶段,非共轴特性的影响逐渐显著,非共轴特性对荷载-变形关系具有显著的滞后作用.随着基础沉降的增加,地基变形逐渐达到完全塑性极限状态,两种模型计算结果的差异逐渐减小.(3)非共轴特性对 4 部分阻力均有显著影响.桶壁端部、桶顶部内面和桶壁内侧 3 部分的阻力均随着沉降的增加而增长到极值,桶壁外侧阻力呈现先增大后减小的发展趋势.

图 4~8 中非共轴与共轴模型计算结果的比值  $K$  与基础沉降的对应关系如图 9 所示.

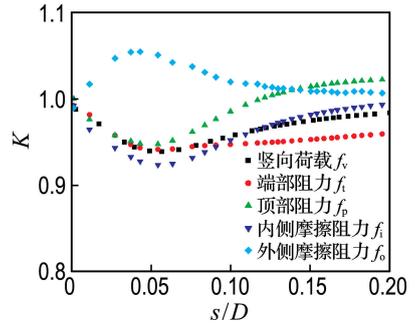


图 9 非共轴与共轴模型计算结果对比

Fig. 9 Comparison of non-coaxial and coaxial models calculation results

由图 9 可知:(1)对于竖向荷载、端部阻力、顶部阻力和内侧摩擦阻力而言,两种模型计算结果比值均为先减小后增大的发展趋势.对于外侧摩擦阻力而言,该比值则为先增大后减小的发展趋势.(2)在基础沉降达到  $0.050D$  之前,非共轴特性的影响逐渐增加.(3)在基础沉降达到  $0.050D$  时,两种模型计算结果差异达到最大.在图 3 中,非共轴角度在基础沉降为  $0.050D$  时达到最大,此时,非共轴特性的影响最为显著.(4)基础沉降超过  $0.050D$  时,两种模型计算结果的差异逐渐减小,非共轴特性的影响逐渐减弱.(5)非共轴特性对桶壁内、外侧摩擦阻力的影响要高于其对桶体端部和顶部阻力的影响.

采用不同偏心距进行计算,共轴模型所得到的竖向荷载-沉降关系如图 10 所示.将非共轴与共轴模型计算结果进行对比,如图 11 所示.

由图 10、11 可知:(1)在理想弹塑性条件下,

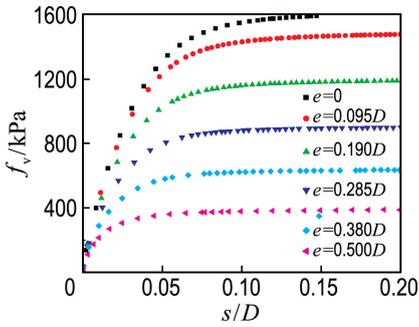


图 10 共轴模型竖向荷载-沉降关系

Fig. 10 Relations of vertical load and settlement in coaxial model

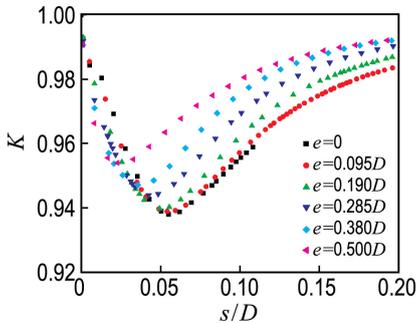


图 11 不同偏心距条件下竖向荷载计算结果对比

Fig. 11 Comparison of vertical load calculation results under different eccentricity conditions

共轴模型计算得到的桶形基础竖向荷载-沉降关系曲线为陡降型,具有显著的极值.随着荷载偏心距的增加,竖向荷载极值逐渐增加,达到极值时的基础沉降也逐渐增加.(2)当考虑非共轴特性时,如图 11 所示,非共轴与共轴模型计算结果的比值呈现先减小后增大的发展趋势.当偏心距  $e=0$  时,在基础沉降达到  $0.050D$  之前,两种模型比值逐渐减小,表明非共轴特性的影响逐渐增大;在基础沉降达到  $0.050D$  时,两种模型计算结果的比值最小,表明非共轴特性的影响最显著;在基础沉降达到  $0.050D$  以后,随着变形的增加,比值逐渐向 1.00 发展,表明非共轴特性的影响逐渐减弱.(3)随着偏心距的增加,结果比值达到最小时的基础沉降逐渐减小;随着偏心距的增加,两种模型计算结果比值的最小值逐渐增大.总体而言,随着偏心距的增加,图 11 中的曲线分布范围逐渐减小,表明非共轴特性对竖向荷载-沉降关系的影响随着偏心距的增加而逐渐减小.

在不同偏心距条件下,针对桶体端部阻力、顶

部阻力、内侧摩擦阻力和外侧摩擦阻力,非共轴与共轴模型计算结果的比值与沉降的关系如图 12~15 所示.

由图 12~15 可知:(1)对于桶体端部阻力、顶部阻力、内侧摩擦阻力和外侧摩擦阻力,非共轴与共轴模型计算结果的差异随着基础沉降的增加而呈现先增大后减小的发展趋势.在基础沉降达到  $0.050D$  之前,两种模型结果的差异逐渐增加到极

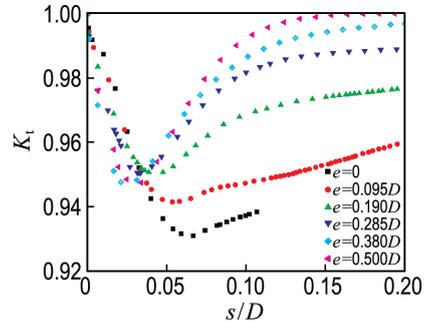


图 12 端部阻力计算结果对比

Fig. 12 Comparison of tip resistance calculation results

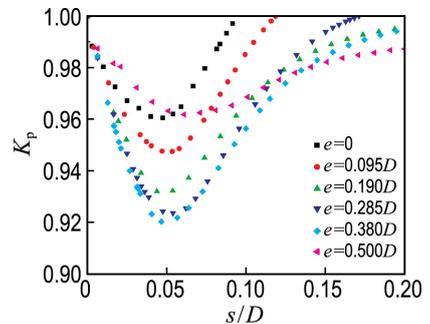


图 13 顶部阻力计算结果对比

Fig. 13 Comparison of top resistance calculation results

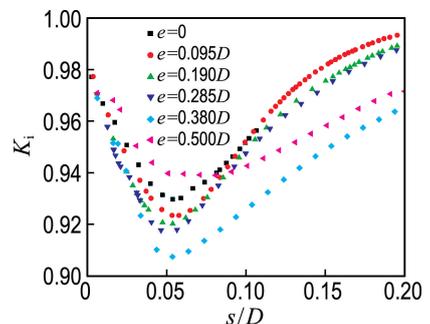


图 14 内侧摩擦阻力计算结果对比

Fig. 14 Comparison of inner friction resistance calculation results

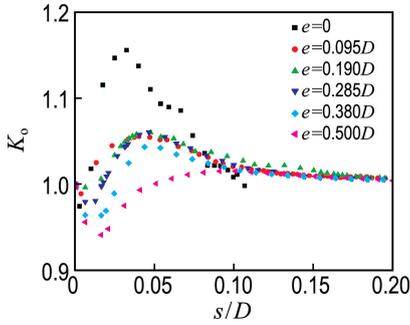


图 15 外侧摩擦阻力计算结果对比

Fig. 15 Comparison of outer friction resistance calculation results

值,表明非共轴特性的影响逐渐增加;随着沉降的进一步增加,差异逐渐减小,表明非共轴特性的影响逐渐减弱。(2)对于桶体端部阻力和外侧摩擦阻力,非共轴与共轴模型结果比值与基础沉降关系曲线的分布范围均随着偏心距的增加而逐渐减小,表明非共轴特性的影响随着偏心距的增加而减弱。(3)对于桶体顶部阻力和内侧摩擦阻力,当偏心距为  $0 \sim 0.380D$  时,该关系曲线的分布范围随着偏心距的增加而逐渐增大,表明非共轴特性的影响随着偏心距的增加而逐渐显著;当偏心距为  $0.500D$  时,该关系曲线分布范围要低于  $0.380D$  时的范围。

### 3 结 论

(1)在土体剪切变形过程中,主应力方向滞后于塑性主应变增量方向的发展,两者间的差异为非共轴角度.随着地基沉降的增加,非共轴角度呈现先增大后减小的发展趋势。

(2)随着偏心距的增加,地基中等效塑性应变分布范围逐渐减小,非共轴特性也将减弱,非共轴特性对竖向荷载-沉降关系的影响逐渐减弱。

(3)对于桶壁端部阻力和桶壁外侧摩擦阻力,非共轴特性的影响随着偏心距的增加而减弱.对于桶体顶部阻力和桶壁内侧摩擦阻力,非共轴特性的影响随着偏心距的增加而逐渐显著。

### 参考文献:

[1] 张 宇,王 梅,楼志刚. 竖向荷载作用下桶形基础与土相互作用机理研究[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(2):97-101.

ZHANG Yu, WANG Mei, LOU Zhigang. A study on the mechanism of interaction between bucket foundation and soil under vertical loadings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, **38**(2):97-101. (in Chinese)

- [2] 武 科,栾茂田,范庆来,等. 倾斜荷载作用下桶形基础承载力特性研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(4):1095-1101.
- WU Ke, LUAN Maotian, FAN Qinglai, *et al.* Studies of bearing capacity of bucket foundation against inclined loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(4):1095-1101. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 鲁晓兵,矫滨田,刘 亮. 饱和砂土中桶形基础承载力的实验研究[J]. 岩土工程技术, 2006, **20**(4):170-172.
- LU Xiaobing, JIAO Bintian, LIU Liang. Experimental study on the bearing capacity of bucket foundation in saturated sand [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2006, **20**(4):170-172. (in Chinese)
- [5] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundations [J]. *Geotechnique*, 1998, **48**(5):637-655.
- [6] GOURVENEC S, RANDOLPH M F. Effect of strength non-homogeneity on the shape of failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay [J]. *Geotechnique*, 2003, **53**(6):575-586.
- [7] MADSEN O S. Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed [J]. *Geotechnique*, 1978, **28**(4):377-393.
- [8] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads [J]. *Soils and Foundations*, 1983, **23**(4):11-26.
- [9] 沈瑞福,王洪瑾,周克骥,等. 动主应力旋转下砂土孔隙水压力发展及海床稳定性判断[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3):70-78.
- SHEN Ruifu, WANG Hongjin, ZHOU Keji, *et al.* Building-up of pore water pressure under cyclic

- rotation of principal stress and evaluation of stability of seabed deposit [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, **16**(3):70-78. (in Chinese)
- [10] 姚仰平, 谢定义. 砂土的形变能破坏准则[J]. 西安理工大学学报, 1994, **10**(1):42-46, 75.  
YAO Yangping, XIE Dingyi. Criterion for the destructiveness of sand deformation energy [J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 1994, **10**(1):42-46, 75. (in Chinese)
- [11] ROSCOE K H. The influence of strains in soil mechanics [J]. **Géotechnique**, 1970, **20**(2):129-170.
- [12] JOER H A, LANIER J, FAHEY M. Deformation of granular material due to rotation of principal axes [J]. **Géotechnique**, 1998, **48**(5):605-619.
- [13] YANG Yunming, YU Haisui. Numerical simulations of simple shear with non-coaxial models [J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, **30**(1):1-19.
- [14] YANG Yunming, YU Haisui. Application of a non-coaxial soil model in shallow foundations [J]. **Geomechanics and Geoengineering: an International Journal**, 2006, **1**(2):139-150.
- [15] 罗强. 非共轴本构模型的数值应用及离心机试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.  
LUO Qiang. Numerical application and centrifugal modeling study of a non-coaxial constitutive model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 罗强, 冯娜, 贾虎. 考虑非共轴特性的吸力桶基础竖向荷载-变形特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, **57**(4):390-395.  
LUO Qiang, FENG Na, JIA Hu. Research on vertical load-deformation behavior of suction bucket foundations in consideration of non-coaxial characteristic [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2017, **57**(4):390-395. (in Chinese)

## Non-coaxial constitutive numerical analysis of load-deformation behavior of suction buckets with vertical eccentric loading

LUO Qiang<sup>\*1</sup>, FENG Na<sup>2</sup>, JIA Hu<sup>1</sup>, MA Keshuan<sup>1</sup>

( 1. Academy of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;  
2. Institute of Economics and Management, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China )

**Abstract:** A numerical analysis model of suction bucket foundation with vertical eccentric loading condition is established, a non-coaxial elastoplastic constitutive model of sand is used to analyze the change rules of the rotations of the directions of the principal stress and the non-coaxial angles, and to study the non-coaxial influence to the mechanical characteristic of the suction buckets. The main study conclusions show that during the foundation deformation the non-coaxial angles increase first and then decrease. With the increasing of load eccentricity, the equivalent plastic strain distributing area is decreasing, and the non-coaxial characteristic is also decreasing. The non-coaxial influence to the load-deformation relation is decreasing with the increasing of load eccentricity. In view of the tip resistance and the inner friction resistance of the buckets, the non-coaxial influence is decreasing with the increasing of load eccentricity. In view of the top resistance and the outer friction resistance, the non-coaxial influence is increasing with the increasing of load eccentricity.

**Key words:** non-coaxial theory; eccentric loading; suction bucket; constitutive model; numerical analysis