

DOI: 10.11779/CJGE2020S2016

# 倾斜荷载作用下吸力桶基础不排水上拔承载特性研究

孙立强<sup>1</sup>, 邢晓佳<sup>1</sup>, 翟雪丽<sup>2</sup>, 吴雄志<sup>2</sup>, 王 荣<sup>3</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 2. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

**摘 要:** 针对吸力桶在工作过程中上拔力对其承载性能产生影响的问题, 基于有限元的方法, 对不同长径比、不同强度分布条件下吸力桶基础在倾斜荷载作用下的承载特性进行研究, 建立了竖向和水平承载力系数与长径比( $L/D$ )和土质不均匀系数 $K$ 之间的关系并给出了其计算方法, 建立了竖向荷载( $V$ )与水平荷载( $H$ )承载力包络面, 最终给出了 $V$ - $H$ 组合条件下承载力计算方法, 研究成果可为海洋浮式结构抗拔基础设计提供依据。

**关键词:** 吸力桶; 倾斜荷载; 数值分析; 抗拔承载力

**中图分类号:** TU431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2020)S2-0088-06

**作者简介:** 孙立强(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事地基处理及海洋岩土工程等方面的研究工作。

E-mail: slq0532@126.com。

## Undrained uplift bearing capacity of suction bucket foundations under inclined loads

SUN Li-qiang<sup>1</sup>, XING Xiao-jia<sup>1</sup>, ZHAI Xue-li<sup>2</sup>, WU Xiong-zhi<sup>2</sup>, WANG Rong<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. China Harbor LLC, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the suction force of the suction bucket affects its bearing characteristics during the working process, the suction bucket is required to bear the uplift force of floating structures. Its bearing characteristics are related to the geometrical size of the suction bucket, the strength of the soil layer, the load characteristics and other factors. The bearing characteristics of suction bucket foundations under inclined loads under different aspect ratios and strength distributions are studied based on the finite element method. The relationship among vertical, horizontal bearing capacity coefficient and diameter ratio ( $L/D$ ) and heterogeneity coefficient of soils  $K$  is established. The relevant method is also given. The envelope of vertical load ( $V$ ) and horizontal load ( $H$ ) is established, and the method for calculating the bearing capacity under the  $V$ - $H$  combination is finally exhibited. The research results may provide a basis for the design of anti-pull-out foundation of marine floating structures.

**Key words:** bucket foundation; inclined load; numerical simulation; uplift bearing capacity

## 0 引 言

随着海洋资源的开发利用, 浮式平台得到迅速发展。吸力桶锚固基础成为浮式平台的一种创新及突破。桶形基础作为浮式平台锚固基础如图1所示, 其在经济性与安全性上优于普通的桩基础。在复杂的海洋环境中, 附加荷载通过锚链以倾斜荷载的形式传至桶形基础, 其足够的抗拔能力是保证海洋风电基础安全工作的关键所在, 故吸力桶基础的竖向上拔承载力、水平承载力以及倾斜荷载承载力研究显得尤为重要。

目前, 国内外学者对于桶形基础承载力问题做了大量研究。对于桶形基础在组合荷载下承压问题中, 武科等<sup>[1-3]</sup>、Gourvenec等<sup>[4-6]</sup>通过数值方法分析了桶形

基础在组合加载模式( $V$ - $H$ ,  $V$ - $M$ ,  $H$ - $M$ ,  $V$ - $H$ - $M$ )下的承载力破坏机理, 给出了承载力计算公式。Watson等<sup>[7]</sup>在NGI的二维极限平衡法基础上引入上限塑性理论, 提出吸力式沉箱在竖向荷载与水平荷载作用下的破坏模式; Zdravkovic等<sup>[8]</sup>依据这一成果深入研究了多种荷载组合(竖向荷载、水平荷载和弯矩荷载)情况下的承载力计算半经验公式, 后来Martin等<sup>[9]</sup>, Murff等<sup>[10]</sup>, Bransby等<sup>[11-12]</sup>又研究了倾斜荷载对承载力的影响, 提出了 $V$ - $H$ 破坏包络线法, 认为其破坏包

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(51890912); 天津市自然科学基金项目(19JCYBJ22100); 中国交通建设集团项目(2018-ZJKJ-01)  
**收稿日期:** 2020-08-07

络线是一个椭圆形; 对于桶形基础在组合荷载下上拔问题中, 丁红岩等<sup>[13]</sup>、Ahn 等<sup>[14]</sup>利用 ABAQUS 有限元计算软件研究了大长径比桶形基础在倾斜荷载作用下的承载特性, 得到了倾斜荷载作用时桶形基础承载力计算公式。邱月等<sup>[15]</sup>、Iskander 等<sup>[16]</sup>采用模型实验, 探讨了砂土与黏土中桶形基础上拔与下压承载特性, 考虑了长径比与荷载倾斜角度对基础承载特性的影响, 给出承载力计算公式。

综上所述, 对于承压式桶形基础前人已经做出了大量研究, 但对于桶形基础在组合荷载作用下拉拔承载特性研究仍有待进一步深化。通过锚链向吸力桶传递倾斜荷载但不能传递弯矩, 故本文基于数值分析方法考虑了桶形基础的长径比, 地基土的不均匀系数对桶形基础拉拔承载力的影响, 建立三维有限元模型, 得到了不同工况下桶形基础竖向上拔承载力、水平承载力以及 V-H (竖向上拔荷载 - 水平荷载) 组合下的承载力破坏包络线, 得出承载力计算公式。

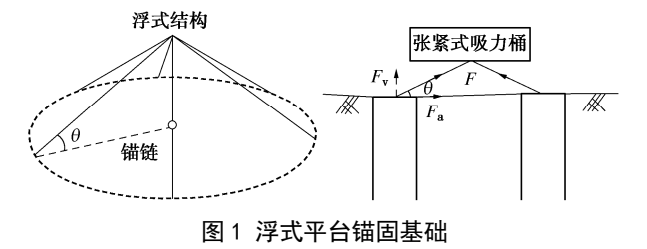


图 1 浮式平台锚固基础

1 有限元计算模型

本文基于 Abaqus6.14 建立三维有限元模型, 研究吸力桶基础在竖向、水平以及 V-H 组合等拉拔荷载作用下地基破坏机理及承载力计算方法。

1.1 模型设置

几何尺寸使用国家规定的量名称。吸力桶直径为  $D=5\text{ m}$ , 长度  $L=1.25, 2.5, 5, 10\text{ m}$  ( $L/D=0.25, 0.5, 1, 2$ ), 桶壁厚度  $t=0.03\text{ m}$ ; 为消除边界条件对承载力计算结果的影响, 土体直径为  $5D$ , 深度为  $6L$ , 约束土体侧向位移, 约束土体底部所有自由度。本文模拟基础不排水上拔, 对此认为基础内部土塞, 土塞与基础底面在负孔压吸力的作用下不会产生脱离, 基础内外侧面与土体允许滑动。基础底部与土的接触采用 Tie 接触, 桶壁内外侧与土接触为 Rough 接触。单元采用 C3D8R, 模型剖面图及网格划分如图 2 所示。放大的红色部分为桶型基础结构物剖面。

本文对于组合荷载全部采用固定位移比法。在俩个方向施加一定比值的位移, 保持其比值在加载过程中不变, 当俩个方向的位移均不在增大时, 在应力便得到了一个点, 改变位移比值, 得到应力空间的其他

点连接成线, 就得到了破坏包络线。

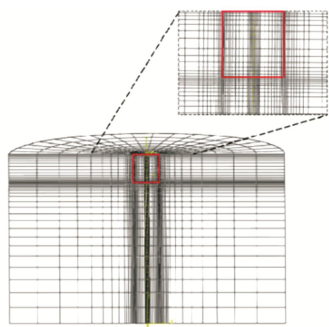


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 FEM Model

1.2 材料属性

土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。地基不排水强度沿着深度线性增长, 如图 3 所示。本文中地基不排水强度计算公式<sup>[5]</sup>为

$$S_u = kZ + S_{u0} \quad (1)$$

式中  $k$  为地基土不排水强度沿  $z$  轴方向的增长梯度, 一般为  $1\sim2\text{ kPa/m}$ , 本文取  $k=1\text{ kPa/m}$ ;  $S_{u0}$  为地表的不排水强度,  $S_{u0}=5\text{ kPa}$ ;  $Z$  为土体深度 ( $\text{m}$ )。

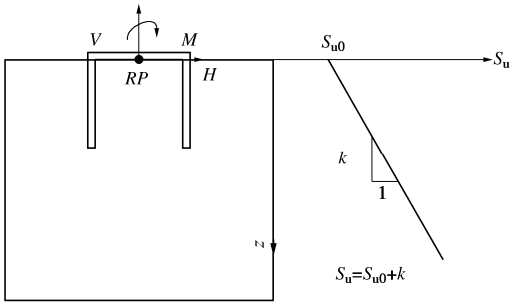


图 3 土体不排水抗剪强度沿深度变化关系

Fig. 3 Relationship between undrained shear strength and depth

采用无量纲土体强度不均匀系数  $K$  表示土体的强度均匀性, 其表达式<sup>[5]</sup>为

$$K = kD / S_{u0} \quad (2)$$

为研究不同强度分布规律对上拔承载力的影响, 本文取  $K=0, 1, 2, 5, 10$  这 5 个值, 其中  $K=0$  表示地基土为均质土, 关于  $K, k, S_{u0}$  的取值见表 1。

表 1  $K, k, S_{u0}$  参数取值

Table 1 Values of parameters $K, k$ and $S_{u0}$		
$K=kD/S_{u0}$	$k/(\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$S_{u0}/\text{kPa}$
0	0	5
1	1	5
2	1	2.5
5	1	1
10	1	0.5

土体弹性模量与不排水抗剪强度成正比, 取  $E=500 S_u$ , 土体有效重度为  $6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ , 泊松比为 0.49。吸力桶弹性模量和泊松比分别为  $E=200\text{ GPa}$  和 0.3, 桶形基础重度为  $6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

### 1.3 模型验证

Martin<sup>[17]</sup>推导了圆形浅基础长径比为0~2, 土体不均匀系数为0-∞的竖向承载力系数上下限解。本文建立有限元模型, 分别计算了 $L/D=0.25, 0.5, 1, 2$ 的承载力, 按照下式计算其承载力系数 $N_{cv}$ :

$$N_{cv} = V_{ult} / AS_{um} \quad (3)$$

式中 $N_{cv}$ 为桶形基础竖向承载力系数; $V_{ult}$ 为基础上拔极限承载力(kN); $A$ 为桶形基础底面积( $m^2$ ); $S_{um}$ 为桶形基础底部处土体不排水强度(kPa)。

图4, 5分别为模型上拔位移-荷载和竖向承载力系数和Martin的上下限解对比图, 可知结果均位于上限解与下限解之间, 验证了模型的可靠性。

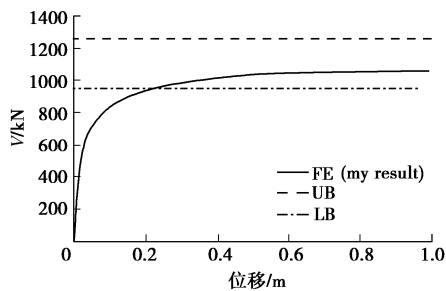


图4  $D=5$  m,  $L=1.25$  m,  $K=0$  模型上拔荷载位移曲线

Fig. 4 Curves of uplift load displacement of model of  $D=5$  m,  $L=1.25$  m,  $K=0$

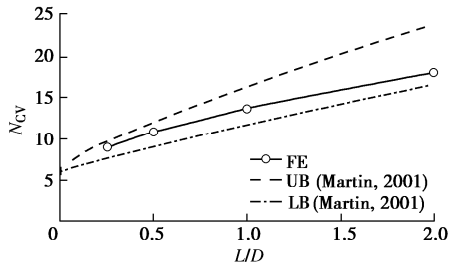


图5 不同长径比竖向承载力系数

Fig. 5 Vertical bearing capacity coefficients with different aspect ratios

## 2 计算结果与分析

### 2.1 桶形基础竖向上拔极限承载力

分别计算了 $L/D=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$ 以及 $K=0, 1, 2, 5, 10$ 情况下的竖向抗拔承载力, 图6分别为 $K=0$ 及 $K=1$ , 不同长径比 $L/D$ 的归一化拉拔力与位移的关系曲线。由图可知, 随 $L/D$ 和 $K$ 的增大, 其承载力系数增大。

根据式(3)计算得到的承载力可求得不同 $L/D$ ,  $K$ 条件下的承载力系数绘制于图7中。可知桶形基础竖向上拔承载力系数随土体不均匀系数 $K$ 的增大而增大, 在 $K>10$ 时,  $L/D<0.5$ 时竖向上拔承载力系数随着长径比的增加而减小, 而当长径比 $L/D>0.5$ 时又随着

长径比的增加而增加, 说明在长径比较小时土体不均匀系数对承载力系数的影响大于长径比对承载力系数的影响。但是长径比一定时, 均随着 $K$ 的增大而增大。

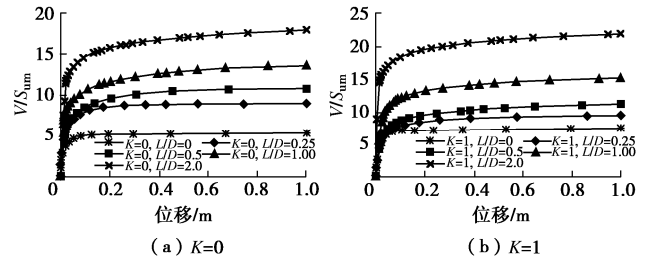


图6 归一化拉拔力与位移的关系曲线

Fig. 6 Normalized relation curves of uplift force and displacement

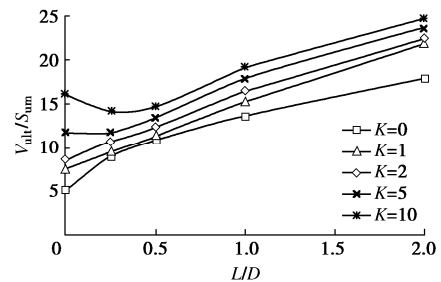


图7 桶形基础有限元计算结果

Fig. 7 FEM results of bucket foundation

为了便于拟合, 参考Gourvenec等<sup>[5]</sup>使用的方法, 定义 $D_v = N_{cv}(L/D) / N_{cv}(L/D=0)$ 。故先拟合得出 $N_{cv}(L/D=0)$ 的计算表达式为

$$N_{cv}(L/D=0) = 5.14 + 1.68K - 0.06K^2 \quad (4)$$

图8为不同土体强度不均匀系数 $K$ 下 $D_v$ 与 $L/D$ 关系图。由图8可知,  $D_v$ 与 $L/D$ 成非线性关系, 可以采用二次多项式进行分析拟合, 其表达式为

$$D_v = 1 + a_1 \left( \frac{L}{D} \right) + a_2 \left( \frac{L}{D} \right)^2 \quad (5)$$

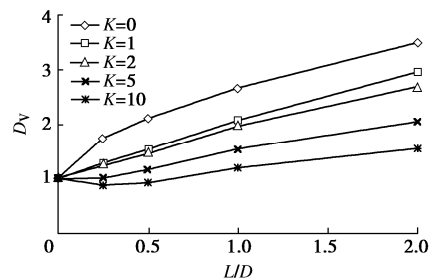


图8  $D_v - L/D$  曲线图

Fig. 8  $D_v - L/D$  curves

式中 $a_1, a_2$ 期为与 $K$ 相关的拟合系数, 根据图8数据得到的 $a_1, a_2$ 与 $K$ 的拟合公式((6a), (6b)), 其拟合方差均在0.96以上。

$$a_1 = 1.32 - 0.61 \ln(K + 0.19) \quad (6a)$$

$$a_2 = -0.51 + 0.19K - 0.01K^2 \quad (6b)$$

综上可知, 桶形基础竖向上拔极限承载力为式 (6a), (6b), (7) 和 (8):

$$V_{ult} = N_{CV} AS_{um}, \quad (7)$$

$$N_{CV} = D_V \cdot N_{CV}(L/D=0)$$

$$= \left[ 1 + a_1 \left( \frac{L}{D} \right) + a_2 \left( \frac{L}{D} \right)^2 \right] \cdot (5.14 + 1.68K - 0.06K^2), \quad (8)$$

式中,  $a_1$ ,  $a_2$  如式 (6a), (6b) 所示。

## 2.2 桶形基础水平极限承载力

分别计算了  $L/D=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$  以及  $K=0, 1, 2, 5, 10$  情况下的水平承载力, 图 9 分别为  $K=0$  及  $K=1$ , 不同长径比  $L/D$  的归一化水平承载力与位移的关系曲线。由图可知, 随  $L/D$  和  $K$  的增大, 其承载力系数增大。

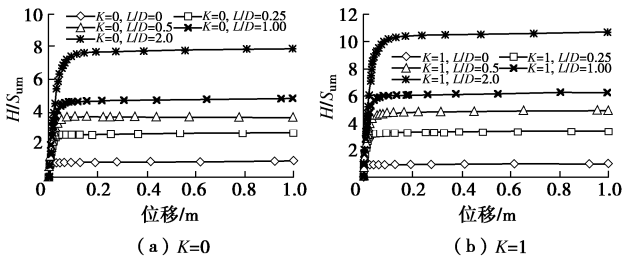


图 9 归一化水平承载力与位移的关系曲线

Fig. 9 Normalized relation curves of horizontal bearing capacity and displacement

桶形基础在水平荷载作用下位移矢量云图如图 10 所示, 由图 10 可知随着桶形基础长径比增加, 桶形基础破坏模式发生改变。桶形基础长径比  $L/D=0.25$  时基础在水平荷载作用下只发生平动, 当桶形基础长径比  $L/D=0.5$  时, 桶形基础在水平荷载作用下既发生平动又伴有转动。

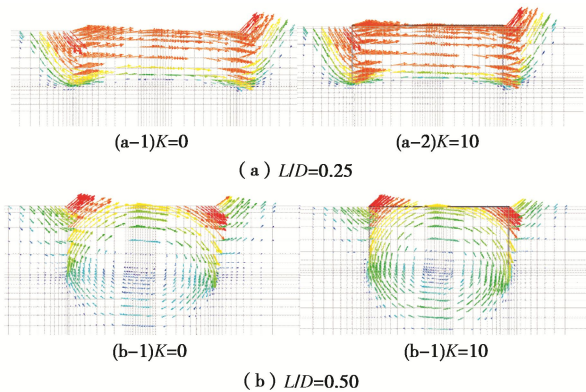


图 10 有限元计算位移矢量图

Fig. 10 Displacement vectors by FEM

水平承载力系数计算公式如下式

$$N_{CH} = H_{ult} / AS_{um}, \quad (9)$$

式中,  $N_{CH}$  为桶形基础水平承载力系数,  $H_{ult}$  为基础水

平极限承载力 (kN)。

根据式 (9) 计算得到不同  $L/D$  与  $K$  条件下的承载力系数, 图 11 为承载力系数随  $L/D$  的关系曲线, 由图 11 可知, 桶形基础水平承载力系数随土体不均匀系数  $K$  的增大而增大, 在  $L/D \leq 0.25$  时水平承载力系数与  $L/D$  呈线性关系, 而当  $L/D \geq 0.25$  时与  $L/D$  呈非线性关系。

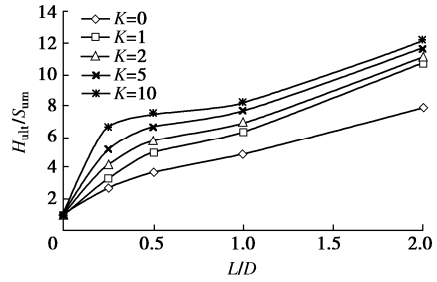


图 11 长径比与水平承载力系数关系曲线

Fig. 11 Relationship curves between aspect ratio and horizontal bearing capacity coefficient

为了便于拟合承载力计算公式, 本文将其划分为两段, 当  $L/D \leq 0.25$  时, 选用线性拟合公式如下:

$$N_{CH} = 1 + c \left( \frac{L}{D} \right), \quad (10)$$

式中,  $c$  是关于  $K$  的函数, 整理拟合结果为  $c=7.0420+2.4937K-0.099K$ 。

当桶形基础长径比  $L/D \geq 0.25$  时, 定义  $D_H = N_{CH}(L/D) / N_{CH}(L/D=0.25)$ 。根据数据计算结果得到  $D_H$  的表达式

$$D_H = 1 + b_1 \left( \frac{L}{D} \right) + b_2 \left( \frac{L}{D} \right)^2, \quad (11)$$

式中,  $b_1$ ,  $b_2$  期为与  $K$  相关的拟合系数, 根据图 11 数据得到的  $b_1$ ,  $b_2$  与  $K$  的拟合公式 ((12a), (12b)), 其拟合方差均在 0.98 以上。

$$b_1 = 0.5593 - 0.0446K, \quad (12a)$$

$$b_2 = 0.2159 - 0.0236K + 0.0018K^2. \quad (12b)$$

综上可知, 桶形基础水平极限承载力为式 (12a), (12b), (13), (14) 和 (15), 其中  $L/D \leq 0.25$  时选用 (14),  $L/D > 0.25$  时选用 (15):

$$H_{ult} = N_{CH} AS_{um}, \quad (13)$$

$$N_{CH} = 1 + (7.0420 + 2.4937K - 0.099K^2) \left( \frac{L}{D} \right), \quad (14)$$

$$N_{CH} = D_H \cdot N_{CH}(L/D=0.25)$$

$$= \left[ 1 + b_1 \left( \frac{L}{D} \right) + b_2 \left( \frac{L}{D} \right)^2 \right] \cdot (2.7605 + 0.6234K - 0.0248K^2), \quad (15)$$

式中  $b_1$ ,  $b_2$  是关于土体不均匀系数  $K$  的函数, 如式 (12a), (12b) 所示。

2.3 V-H 组合荷载作用下吸力桶地基极限承载力

建立三维有限元模型，分别计算了吸力桶长径比  $L/D=0.25, 0.5, 1, 2$ ，土体不均匀系数  $K=0, 1, 2, 5, 10$  时的 V-H 承载力，根据计算结果建立了归一化承载力包络线，如图 12 所示。

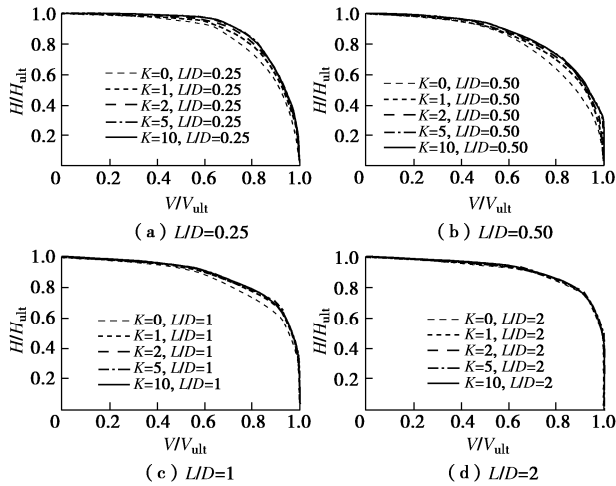


图 12 桶形基础 V-H 破坏包络面有限元计算结果

由图 12 可知，当吸力桶长径比一定时，桶形基础破坏包络线会随着  $K$  的增加而外扩，其截距的变化符合单向荷载作用时的变化规律；根据包络线形式，可参考 Senders 等<sup>[18]</sup>采用椭圆方程进行描述，如下式所示：

$$\left(\frac{V}{V_{ult}}\right)^m + \left(\frac{H}{H_{ult}}\right)^n = 1 \quad , \quad (16)$$

式中， $V$  为桶形基础竖向上拔承载力 (kN)， $H$  为桶形基础水平承载力 (kN)， $m, n$  为拟合参数。

Senders 等<sup>[18]</sup>研究了均值土层( $K=0$ )时承压式吸力桶承载力时建议  $m, n$  均取 3，本文通过有限元计算研究了土层不同不均匀系数下的强度包络线，本文取  $m=2$ ，通过拟合给出了  $n$  与  $L/D$  和  $K$  的表达式，当长径比小于 0.5 时选用公式 (17a)，当长径比大于 0.5 时选用公式 (17b)：

$$n = 7.74 - 3.55 \times 0.63^K - (9.20 - 5.45 \times 0.66^K)(L/D) \quad , \quad (17a)$$

$$n = 2.13 - 0.63 \times 0.33^K + 2(L/D) \quad , \quad (17b)$$

拟合方差在 0.98 以上，拟合公式较为合理。

2.4 应用算例

通过一算例对桶型基础竖向上拔极限承载力、水平极限承载力和 V-H 组合荷载下破坏包络面进行计算，说明计算的必要步骤。所需计算参数包括基础尺寸  $D$  和  $L$ 、地基表面土体不排水抗剪强度  $S_{u0}$  及强度增长梯度  $k$ 。本次算例取  $D=5\text{ m}$ ， $L=5\text{ m}$ ， $S_{u0}=1\text{ kPa}$ ， $k=1\text{ kPa/m}$ 。其他计算参数列于表 2。

表 2 计算参数取值

Table 2 Values of parameters

步骤	计算内容	依据	结果
竖	土体强度不均匀系数 $K$	式(2)	5
向	$a_1$	式(6a)	0.34
承	$a_2$	式(6b)	0.13
载	竖向上拔极限承载力系数 $N_{CV}$	式(8)	17.81
力	竖向上拔极限承载力 $V_{ult}/\text{kN}$	式(7)	2098.52
水	土体强度不均匀系数 $K$	式(2)	5
平	$b_1$	式(12a)	0.34
承	$b_2$	式(12b)	0.14
载	水平承载力系数 $N_{CH}$	式(15)	7.78
力	水平极限承载力 $H_{ult}/\text{kN}$	式(13)	916.19

竖向上拔极限承载力计算步骤为：步骤一，计算无量纲土体强度不均匀系数  $K$ 、竖向上拔极限承载力相关系数  $a_1$  和  $a_2$ ；步骤二，通过计算  $N_{CV}$  ( $L/D=0$ ) 和  $D_v$ ，计算竖向上拔极限承载力系数  $N_{CV}$ ；步骤三，计算竖向上拔极限承载力  $V_{ult}$ 。

水平极限承载力计算步骤为：步骤一，计算无量纲土体强度不均匀系数  $K$ 、在  $L/D \leq 0.25$  时计算水平承载力系数  $c$ ，当  $L/D \geq 0.25$  时计算水平极限承载力相关系数  $b_1$  和  $b_2$ ；步骤二，计算水平承载力系数  $N_{CH}$ ，在  $L/D \leq 0.25$  时采用公式 (14)，当  $L/D \geq 0.25$  时采用式 (15)；步骤三，计算水平极限承载力  $H_{ult}$ 。

V-H 组合荷载下破坏包络面计算步骤：步骤一，分别计算竖向上拔极限承载力  $V_{ult}$  和水平极限承载力  $H_{ult}$ ；步骤二，计算  $n$  值，当  $L/D \leq 0.5$  时选用公式 (17a)，当  $L/D \geq 0.5$  时选用公式 (17b)；步骤三，根据不同竖向荷载或水平荷载，采用公式 (16) 计算包络面上点，绘制破坏包络面，如图 13。

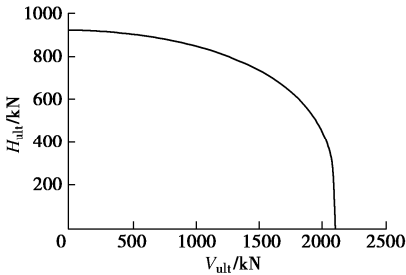


图 13 V-H 破坏包络面

Fig. 13 V-H failure envelope

3 结 论

本文研究了不排水条件下桶形基础在竖向上拔荷载、水平荷载以及倾斜荷载作用时拉拔承载特性，成果如下：

(1)通过数值计算建立了竖向和水平承载力系数计算方法，承载力系数为长径比 ( $L/D$ ) 以及土的不均匀系数 ( $kD/S_{u0}$ ) 的函数，进而提出了水平及竖向承载力计算方法。

(2)通过计算给出了吸力桶在倾斜荷载作用下的极限承载力, 桶形基础长径比  $L/D$  一定时, 建立了不同不均匀系数  $K$  的 V-H 破坏包络线。

(3)建立了 V-H 组合荷载下承载力的计算方法, 其组合极限承载力为土体强度、长径比以及土质不均匀系数的函数。

#### 参考文献:

- [1] 武 科, 栾茂田, 范庆来, 等. 竖向与水平复合加载下桶形基础承载性能的分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(增刊 2): 903 - 908. (WU Ke, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. Numerical analysis of bearing capacity behaviour of suction bucket foundations under joint loading condition of vertical and horizontal loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(S2): 903 - 908. (in Chinese))
- [2] 武 科, 栾茂田, 范庆来. 竖向与水平荷载复合加载下桶形基础承载性能的分析[C]// 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集(下册), 2006, 昆明: 1042 - 1045. (WU Ke, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. Analysis of bearing capacity of bucket foundation under combined vertical and horizontal loads[C]// Papers of the First Symposium on Geotechnical Mechanics and Engineering of Water Conservancy and Hydropower in China (Volume 2), 2006, Kunming: 1042 - 1045. (in Chinese))
- [3] WU Ke, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. Failure envelopes of bucket foundation subjected to combined loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 574 - 580.
- [4] GOURVENEC S, JENSEN K. Effect of embedment and spacing of cojoined skirted foundation systems on undrained limit states under general loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, **9**(6): 267 - 279.
- [5] GOURVENEC S, BARNETT S. Undrained failure envelope for skirted foundations under general loading[J]. Géotechnique, 2011, **61**(3): 263 - 270.
- [6] GOURVENEC S. Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading[J]. Géotechnique, 2015, **58**(3): 177 - 185.
- [7] WATSON P G, RANDOLPH M F. Failure envelopes for caisson foundations in calcareous sediments[J]. Applied Ocean Research, 1998, **20**(1): 83 - 94.
- [8] ZDRAVKOVIC L, I'OTTS D M, JARDINE R J. A parametric study of the pull-out capacity of bucket foundations in soft clay[J]. Géotechnique, 2001, **51**(1): 55 - 67.
- [9] MARTIN C M, HOULSBY G T. Combined loading of spudcan foundations on clay: laboratory tests[J]. Géotechnique, 2000, **50**(4): 325 - 328.
- [10] MURFF J D, AUBENY C P, YANG M. The effect of torsion on the sliding resistance of rectangular foundations[J]. Frontiers in Offshore Geotechnics II, 2010: 439 - 443.
- [11] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundations[J]. Géotechnique, 1998, **48**(5): 637 - 655.
- [12] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loading[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(4): 19 - 33.
- [13] 丁红岩, 王旭月, 张浦阳, 等. 砂土中宽浅式复合筒型基础三维包络面研究[J]. 太阳能学报, 2018, **39**(4): 1097 - 1104. (DING Hong-yan, WANG Xu-yue, ZHANG Pu-yang, et al. Study of three-dimensional enveloping surface foundation in sandy soil[J]. Acta energiae solaris Sinica, 2018, **39**(4): 1097 - 1104. (in Chinese))
- [14] AHN J, LEE H, KIM Y T. Holding capacity of suction caisson anchors embedded in cohesive soils based on finite element analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, **38**(15): 1541 - 1555.
- [15] 邱 月, 高玉峰, 黎 冰, 等. 倾斜荷载作用下沉箱基础的极限承载力计算方法[J]. 长江科学院院报, 2017, **34**(6): 107 - 111. (QIU Yue, GAO Yu-feng, LI Bing, et al. Calculation methods for ultimate inclined bearing capacity of caisson foundation under inclined load[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, **34**(6): 107 - 111. (in Chinese))
- [16] ISKANDER M, EL-GHARBAWY S, OLSON R. Performance of suction caissons in sand and clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(3): 576 - 584.
- [17] MARTIN C M. Vertical bearing capacity of skirted circular foundations on Tresca soil[C]// Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2001, Istanbul: 743 - 746.
- [18] SENDERS M, KAY S. Geotechnical suction pile anchor design in deep water soft clays[C]// 7th Annual Conference Deepwater Risers, Moorings & Anchorings, 2002, London.

(编校: 黄贤沙)