

文章编号: 1005-9865(2001)02-0018-05

# 筒型基础总体尺寸初步设计方法

何炎平, 蒋如宏, 谭家华

(上海交通大学 船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

**摘 要:**筒型基础平台是一种新型海洋平台,它通过在筒腔内产生一个比周围小的压强而自主插入海底,工作期间又具有在筒腔内形成负压来增强抵抗外载荷的能力。本文介绍一种以抗拔能力为设计基准的筒型基础总体尺寸的初步设计方法,并对方法中的各参数提出了选用原则和取值范围,给出了相应的计算图谱,最后还以两个筒型基础为例演示了方法的使用。

**关键词:**筒型基础平台;初步设计;抗拔能力

**中图分类号:**P752 **文献标识码:**A

## Initial design method for bucket foundation's general dimensions

HE Yan-ping, JIANG Ru-hong, TAN Jia-hua

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The bucket foundation platform (BFP) is an up-to-date ocean platform in the world. It can insert itself into the seabed by producing less pressure in its cavity than that of the circumambience. It can also produce suction in the cavity to increase its ability to endure the force coming from environment. In this paper, a method of assessing the value of bucket foundations by predicting foundation capacity from soil properties, foundation geometry, and suction intensity is presented. Design graphs and charts are presented to simplify the bucket foundation design, and typical design examples are given to demonstrate the use of this method.

**Key words:** bucket foundation platform; initial design; breakout capacity

筒型基础平台具有特殊的结构型式,它用新型的筒型基础来代替传统的导管架基础,在其适用的工作范围具有很大的优越性。筒型基础平台不仅能够节省用于桩基的钢材有效地降低平台的制造费用,而且可以采用特殊的安装就位方式,安装就位时间短,不需要采用大型浮吊,使得海上安装的费用能够大大减少,更令人注目的是,因为筒型基础的特殊工作机理,使筒型基础平台成为一种可移动的海上作业设备,具有能够重复利用的优点。

筒型基础适用的土质范围(不排水剪切强度  $S_u = 6 \sim 60\text{kPa}$ )、水深范围(目前筒型基础的应用水深  $d = 7 \sim 300\text{m}$ )及环境载荷类型(风力、波浪力、流力、冰力)均相当宽广,我国的渤海及南海北部湾的广阔水域都处在这一范围内。

筒型基础平台作为一种新型移动式设施,采用的是一种全新的技术。这种技术目前还不成熟,现在世界上仅有二座筒型基础平台在 20 世纪 90 年代中期在北海投入使用,这种筒型基础平台的设计方法和理论还很不完善。本文介绍一种筒型基础总体尺寸的初步设计方法,提出了方法中各参数的选用原则和取值范围,并给出相应的计算图谱,最后用此方法对两例筒型基础进行了计算。

收稿日期:2000-10-27

基金项目:国家 863 海洋领域高技术青年基金资助项目(820-Q-15)

作者简介:何炎平(1971-),男,湖北仙桃人,讲师,主要从事船舶与海洋工程专业研究。

## 1 筒型基础抗拔能力计算方法和设计图谱

筒型基础总体尺寸一般是以满足工作所需的抗拔能力为设计基础的,一般安全系数取2左右就可满足工作使用要求,但要考虑所选用数据的准确程度。筒型基础的抗拔能力与地基土的失效形式密切相关,按筒型基础的失效形式,一般可以分为三种:局部剪切失效、局部拉伸失效和大范围剪切失效(详见参考文献1)。对于局部拉伸失效的工作情况,筒型基础的抗拔能力可以通过计算土壤垂向应力来得到,它等于初始有效垂向应力减去失效时的有效应力,可以用下式表示:

$$p' = \sigma'_0 - \delta'_{3f} \quad (1)$$

其中,  $p'$  为土壤垂向应力;  $\sigma'_0$  为初始有效垂向应力;  $\delta'_{3f}$  为失效时的有效应力。

土壤垂向应力可以描述为作用在筒型基础与附着楔形土上的力,参见图1。在失效状态时,由垂向力平衡可以得到如下方程:

$$p' = \frac{1}{A} (Q - W_A - W_S - F) \quad (2)$$

其中,  $Q$  为拔出力;  $W_A$  为筒型基础的浸水重量;  $W_S$  为筒型基础附着土的浸水重量;  $F$  为沿筒型基础裙外壁的摩擦力和粘附力;  $A$  为筒型基础的横截面积。

初始有效垂向应力  $\sigma'_0$  等于有效负载应力(因筒型基础和附着土的水中重量产生的)加上由稳态泵吸诱导产生的粒间应力,由泵吸产生的粒间应力可以表示为负压  $\Delta p$  的函数。失效时的有效应力  $\sigma'_{3f}$  能够用摩尔-库仑失效理论来估算,但要考虑筒型基础上拔时产生的孔隙压力变化。失效时的孔隙压力的大小随拔出速度变化,能用失效时的固结率  $U_z$  和孔隙压力系数  $A_f$  来描述。

摩擦力和粘附力  $F$ , 是沿着筒裙外壁的,它等于粘聚力  $C_a$  和摩擦阻力之和。摩擦阻力和筒裙壁的有效正应力成正比,有效正应力由筒型基础和附着土的水中重量产生的有效负载应力和由稳态泵吸诱导产生的粒间应力产生。由泵吸诱导产生的粒间应力而形成的有效正应力可以描述为负压  $\Delta p$  的函数。

把前面所讨论的内容加以整理,可以得到筒型基础抗拔能力方程(详见参考文献2):

$$q = [(W_A + W_S)/A][2 - Y'_2(\varphi')] + 2c'[1 - (1 - U_z)A_f]\tan\alpha'/Y'_1(\varphi') + 4(L/D)[C_a + (K_0\gamma'L/2)\tan\delta] + [C_1[1 - Y'_2(\varphi')] + 4(L/D)C_2\tan\delta]\Delta p \quad (3)$$

从上式的  $q$  中减去筒型基础和附着土的水中重量,附着土的水中重量假设为:

$$W_s \cong \gamma'L \quad (4)$$

可以得到如下净抗拔能力方程:

$$q_{net} = \gamma'L[2 - Y'_2(\varphi')] + 2c'[1 - (1 - U_z)A_f]\tan\alpha'/Y'_1(\varphi') + 4(L/D)[C_a + (K_0\gamma'L/2)\tan\delta] + [C_1[1 - Y'_2(\varphi')] + 4(L/D)C_2\tan\delta]\Delta p \quad (5)$$

其中:

$$Y'_1(\varphi') = 1 - (1 - U_z)A_f(1 - \tan^2\alpha') \quad (6)$$

$$Y'_2(\varphi') = 1 + [1 - (1 - U_z)A_f](K_0\tan^2\alpha' - 1)/Y'_1(\varphi') \quad (7)$$

把前面关于筒型基础的讨论结果代入式(5),可以得到抗拔能力方程:

$$q_{net} = q_0 + \lambda\Delta p \quad (8)$$

其中:

$$q_0 = \gamma'LN_\gamma + c'N_c + (\gamma'L^2/D)N_A \quad (9)$$

$$N_\gamma = 2 - Y'_2(\varphi') \quad (10)$$

$$N_c = 2[1 - (1 - u_z)A_f]\tan\alpha'/Y'_1(\varphi') \quad (11)$$

$$N_A = 4(C_a/\gamma'L + 0.5K_0\tan\delta) \quad (12)$$

$$\lambda = N_1[1 - Y'_2(\varphi')] + N_2\tan\delta \quad (13)$$

$$N_1 = 0.45e^{-0.90(L/D)} \quad (14)$$

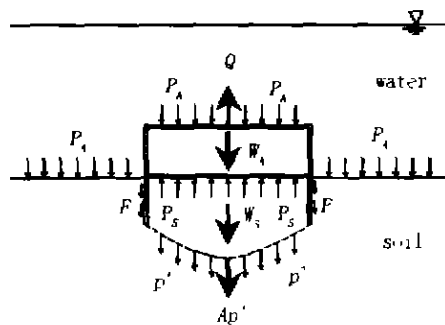


图1 筒型基础受力分析

Fig.1 Force components on an bucket foundation

$$N_2 = 0.44(L/D)e^{-L/D} \quad (15)$$

式中:  $L$  为筒型基础的长度(m);  $D$  为筒型基础的直径(m);  $c'$  为土的有效粘附力( $N/m^2$ );  $\phi'$  为土的有效内摩擦角( $^\circ$ );  $\alpha' = 45^\circ - \phi'/2$ ( $^\circ$ );  $\delta$  为筒裙壁和土之间的摩擦角( $^\circ$ );  $\gamma'$  为土的浸水比重( $N/m^3$ );  $U_z$  为土的固结率;  $A_f$  为孔隙压力系数;  $K_0$  为土压力系数。

净抗拔能力计算公式中的  $q_0$  与负压无关,它随土壤有效粘附力  $c'$  和裙长直径比  $L/D$  的增加而增大。 $\lambda$  与筒型基础的几何尺寸以及土壤的剪切强度无关,它的物理意义为抗拔能力和负压  $\Delta p$  的斜率。为了方便使用,把上面的关系式绘成图谱,见图 2~5。

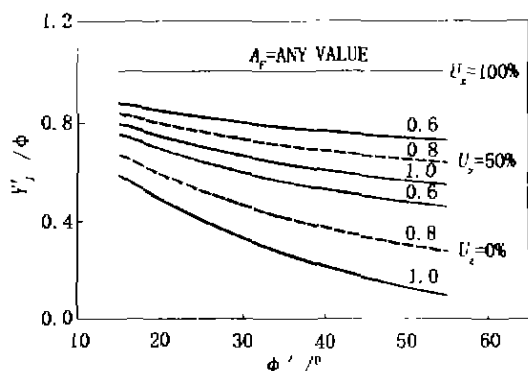


图 2 函数  $Y_1'(\phi')$  曲线

Fig.2 Curves for function  $Y_1'(\phi')$

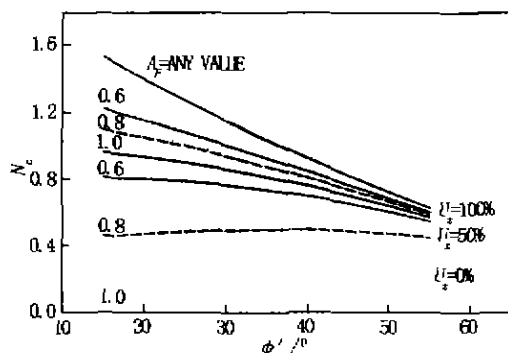


图 4 函数  $N_c$  曲线

Fig.4 Curves for function  $N_c$

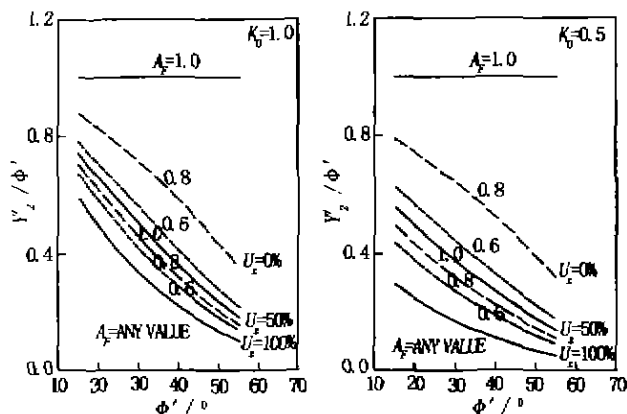


图 3 函数  $Y_2'(\phi')$  曲线

Fig.3 Curves for function  $Y_2'(\phi')$

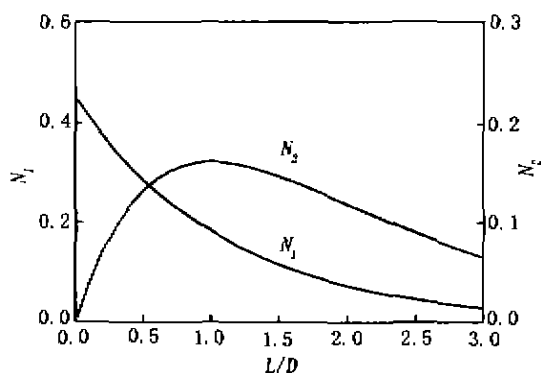


图 5 函数  $N_1$  和  $N_2$  曲线

Fig.5 Curves for function  $N_1$  and  $N_2$

## 2 参数的选用

### 2.1 固结系数

$U_z$  为固结系数,对于工作在海底的筒型基础,一般可以认为工作在饱和和不排水状态,因此可以认为其值为零。

### 2.2 孔隙压力系数

孔隙压力系数是用来表述土样在三轴不排气、不排水条件下的空隙压力对总应力变化的反映,饱和粘土  $A_f$  值的典型范围如表 1。

### 2.3 地基土的强度指标

因为剪切破坏是地基土强度破坏的主要原因,其中包括土颗粒的滚动和滑动。当地基土受到压力(或拉力)时,就是靠土的抗剪强度而获得地基稳定的。土抵抗剪切破坏的能力主要来自土本身所具有的内摩擦角  $\phi$  与粘附力  $c$  这两个强度指标,并可以用著名的库仑

表 1 饱和粘土的  $A_f$  值

Tab.1  $A_f$  of saturated clay

| 土 类    | $A_f$     | 土 类    | $A_f$      |
|--------|-----------|--------|------------|
| 高灵敏粘土  | 0.75~1.5  | 弱超固结粘土 | 0~0.5      |
| 正常固结粘土 | 0.5~1.0   | 压实粘质砾石 | ~0.25~0.25 |
| 压实砂质粘土 | 0.25~0.75 | 强超固结粘土 | -0.5~-0    |

方程来表达。即:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (16)$$

若用有效应力来表示,则为:

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi' + c' \quad (17)$$

式中:  $\tau_f$  为土的抗剪强度;  $\varphi$  为土的内摩擦角;  $\sigma$  为垂向切面的压应力;  $\sigma'$  为有效应力  $= \sigma - u$ ;  $u$  为孔隙水压力;  $c$  为土的粘附力;  $\varphi'$  为土的有效内摩擦角;  $c'$  为土的有效粘附力。

土的抗剪强度和一般固体材料的抗剪强度是不同的,它不像固体材料那样为一常数,而是随土的有效应力的大小而增减的。另外,用不同的试验方法对含水粘土土样进行试验时,其抗剪强度是不会相同的,因为只有在有效应力相同的情况下抗剪强度才会相同。在工程测量内摩擦角最常用的实验方法为:

1) 不固结不排水试验,简称 U 试验; 2) 固结不排水试验,简称 CU 试验; 3) 固结排水试验,简称 CD 试验。

抗剪强度试验所用仪器有三种:三轴试验仪、直剪试验仪和直剪单剪仪。在设计中,究竟用哪种试验所得的  $\varphi, c$  值,应该依照地基土的性质和工程的特点而定。换言之,也就是看地基中由工程和所产生的有效应力状态是否符合试验方法中的有效应力(即排水情况)而定了。

表 2 列出了过去各种试验方法求得的内摩擦角的典型值变化范围,可供参考查用。

表 2 土的内摩擦角的典型值

Tab.2 Typical intrinsic friction angle of soil

|      | 实 验 方 法       |                |              |
|------|---------------|----------------|--------------|
|      | 不固结不排水试验<br>U | 固结不排水<br>试验 CU | 固结排水试验<br>CD |
| 卵石   |               |                |              |
| 中等尺寸 | 40 ~ 50°      |                | 40 ~ 55°     |
| 较小尺寸 | 35 ~ 50°      |                | 35 ~ 50°     |
| 砂    |               |                |              |
| 松 干  | 28 ~ 34°      |                |              |
| 松饱和  | 28 ~ 34°      |                |              |
| 密实干  | 35 ~ 46°      |                | 43 ~ 50°     |
| 密实饱和 | 比密实干砂低 1 ~ 2° |                | 43 ~ 50°     |
| 粉砂   |               |                |              |
| 松    | 20 ~ 22°      |                | 27 ~ 30°     |
| 密实   | 25 ~ 30°      |                | 30 ~ 35°     |
| 粘土   | 0°如饱和         | 3 ~ 20°        | 20 ~ 42°     |

不排水状态下的粘附力  $c$  和压实压力以及塑性指数之间的关系可近似用下式表示:

$$\frac{C}{p} = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (18)$$

其中  $p$  为压实压力;  $I_p$  为塑性指数。

## 2.4 土压力系数

在水中的建筑物及其基础所受的水平作用力远较陆上建筑物的水平作用力多而且大,致使它具有与竖向荷载同等重要的性质。在筒型基础工作期间,可以把土体看成受侧限而无位移变形,即认为土对筒裙的侧压力为静止土压力,其压力系数的变化范围,对砂性土为 0.4 ~ 0.6; 对粘性土为 0.4 ~ 0.8。

## 2.5 土与基础材料相互作用参数

土与基础材料之间的相互作用可以用摩擦力来描述,通常也称为外摩擦力,用土的外摩擦角  $\delta$  和粘聚力  $C_a$  描述,粘聚力  $C_a$  通常可取为与土的粘附力  $C$  相等,地基土与各种基础材料之间的摩擦角见表 3。

表 3 各种基础材料与地基土之间的摩擦角

Tab.3 Friction angle between foundation material and soil

|             | 作用面的材料名称                | 摩擦角 $\delta$<br>(°) |
|-------------|-------------------------|---------------------|
| 现浇混凝土或圬工    | 干净的坚硬岩石                 | 35                  |
|             | 干净卵石,卵石夹砂,粗砂            | 29 ~ 31             |
|             | 干净中细砂,粉砂或粘土中含卵石、粘砂土     | 24 ~ 29             |
|             | 干净细砂质粘土或粘质中细砂土          | 19 ~ 24             |
|             | 砂质粘土,粉砂                 | 17 ~ 19             |
|             | 坚硬粘土、超固结粘土              | 22 ~ 26             |
|             | 硬塑、硬粘土及砂粘土              | 17 ~ 19             |
| 钢板          | 干净卵石,卵石夹砂,级配好的碎石        | 22                  |
|             | 干净砂、粉砂粉卵石,级配不好的(一种尺寸)碎石 | 17                  |
|             | 粉砂、砂或卵石中混有粘土或淤泥         | 14                  |
| 预制的混凝土或预应力管 | 细砂质淤泥,粉砂                | 11                  |
|             | 干净卵石,卵石夹砂,级配好的石渣        | 22 ~ 26             |
|             | 干净砂、粉砂粉卵石,级配不好的碎石       | 17 ~ 22             |
|             | 粉砂、砂或卵石中混有粘土或淤泥         | 17                  |
|             | 细砂质淤泥、粉砂                | 14                  |

### 3 计算实例

#### 3.1 计算实例 1

一筒型基础平台工作的海底为砂土,其尺寸和形式见图 6。根据设计要求,每个筒型基础所需的抗拔能力为 135kN,且不考虑负压诱导的抗拔能力。按此筒型基础工作环境的勘察结果,工作区域砂土的有效内摩擦角  $\varphi = 32^\circ$ ,比重为  $\gamma_s = 1\,594\text{kg/m}^3$ ,剪切失效时的孔隙压力系数  $A_f = 0.6$ ,固结系数  $U_z = 0$ ,土压力系数  $k_0 = 0.5$ ,土体和筒裙的摩擦角  $\delta = 20^\circ$ ,砂的有效粘附力  $C' = C_a = 0$ 。土的有效重度为  $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w = 581\text{kg/m}^3$ 。设计取筒型基础的直径为 3m,有效工作长度为 2.8m,通过计算或查图表可以得到:  $Y'_1 = 0.58$ ,  $Y'_2 = 0.42$

于是可以通过进一步计算得到:

$$N_y = 1.58, N_c = 0.76, N_A = 0.36,$$

$$\text{因此: } q_0 = 30.595\text{ kN/m}^2$$

筒型基础的抗拔能力为:

$$Q = q_0 \times \pi D^2 / 4 = 216.261\text{ kN} > 135\text{ kN}$$

#### 3.2 计算实例 2

工作在海底粘土的筒型基础,直径  $D = 7\text{m}$ ,长度为  $L = 8\text{m}$ ,平台的形式和尺寸见图 7。每个筒型基础需要的抗拔能力为 170tf,考虑二个大气压的负压作用。粘土的有效内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$ ,比重为  $\gamma_s = 1\,435\text{kg/m}^3$ ,剪切失效时的孔隙压力系数  $A_f = 0.8$ ,固结系数  $U_z = 0$ ,土压力系数  $k_0 = 0.5$ ,土体和筒裙的摩擦角  $\delta = 0^\circ$ ,砂的粘聚力  $C' = C_a = 630\text{kg/m}^2$ 。土的有效重度为  $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w = 422\text{kg/m}^3$ 。

通过计算或查图可以得到:  $Y'_1 = 0.467$ ,  $Y'_2 = 0.643$

进一步计算得到:  $N_y = 1.357$ ,  $N_c = 0.495$ ,  $N_A = 0.746$ ,  $\lambda = 0.057$ ,

$$\text{因此: } q_0 = 7461.738\text{ kg/m}^2$$

$$q_{\text{net}} = q_0 + \lambda \Delta p = 8\,610.923\text{ kg/m}^2$$

筒型基础的抗拔能力为:

$$Q = q_{\text{net}} \times \pi D^2 / 4 = 331.3837\text{ tf} > 170\text{ tf}$$

### 4 结 语

筒型基础平台是一种新型的可移动海洋平台,被誉为“导管架基础工程新时代的曙光”。但筒型基础作为一种新的基础型式,它的基本工作原理虽然已为人们所了解,但准确的计算方法和详细的设计思路还正在探索之中。本文介绍了一种简单而有效的初步设计方法,提供了相关的计算公式和设计曲线,可供确定筒型基础尺寸时参考。

#### 参考文献:

- [1] J O Steensen-Bach. Recent model tests with suction piles in clay and sand[A]. OTC 6844[C]. 1992.
- [2] M C Wang, V A Nacci. Applications of the suction anchors in offshore technology[A]. OTC 3203[C]. 1978.
- [3] A Bye, NOTEBY, C Erbrich, Kvaerner Earl & Wright, et al. Geotechnical design of Bucket Foundations[A]. OTC 7793[C]. 1995.
- [4] 李蔚. 筒形基础平台拖航与沉放研究[D]. 上海:上海交通大学. 1999.

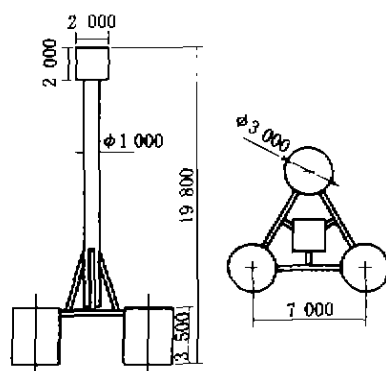


图 6 例 1 筒型基础平台尺寸和形式(mm)

Fig.6 Schematic of BFP 1(mm)

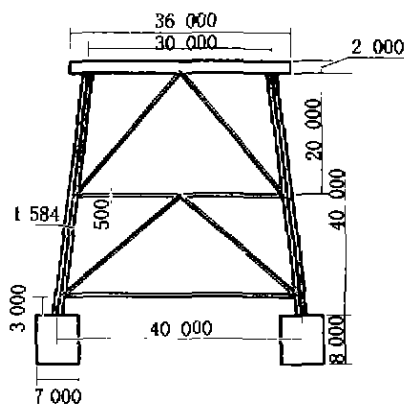


图 7 例 2 筒型基础平台尺寸和形式(mm)

Fig.7 Schematic of BFP2(mm)