



筒形基础承载力计算技术规程

中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司

目录

1.荷载选择与组合	1
1.1 荷载选择	1
1.2 荷载组合	2
1.3 土材料系数	2
2.抗拔承载力计算（仅考虑外摩阻力）	3
3.抗压承载力计算	4
3.1 考虑土塞	4
3.2 不考虑土塞	6
3.3 抗滑移计算	7
3.4 抗倾覆计算	8
3.4.1 考虑土塞	9
3.4.2 不考虑土塞	10

1.荷载选择与组合

1.1 荷载选择

依据 SACS 计算结果，可提取泥面处节点的荷载，示例如下：

0101-0201	0101	L01	UL01	-19945.68	-2718.53	-1617.17	664.04	-2299.30	3561.39
			UL02	-23377.21	-2758.51	-2242.96	435.28	-485.65	2201.31
			UL03	-24767.27	-2566.98	-2718.16	120.69	1000.95	752.91
			UL04	-23347.39	-2076.66	-2897.65	-191.19	2425.63	-773.78
			UL05	-11395.18	-1738.05	-1489.06	1011.87	152.10	1595.20
			UL06	-12624.87	-1644.98	-2109.03	921.17	1462.10	742.23
			UL07	-13077.80	-1430.96	-2475.91	721.53	2073.80	-43.96
			UL08	-12580.51	-1018.90	-2644.81	514.68	2624.92	-928.07
			UL09	-17274.33	-3089.96	-1364.27	574.35	-2183.41	3437.28
			UL10	-20044.64	-3066.26	-2192.34	400.36	-443.88	2113.02
			UL11	-21067.20	-2715.91	-2833.35	93.98	976.10	778.41
			UL12	-20025.46	-2069.18	-3170.80	-217.83	2272.57	-661.58
			UL13	-11301.74	-2442.22	-1297.13	876.91	-401.25	2598.61
			UL14	-12406.57	-2278.30	-2073.66	777.37	950.42	1478.37
			UL15	-12838.93	-1905.82	-2653.70	547.78	1836.30	444.55
			UL16	-12322.71	-1283.81	-2953.39	312.72	2572.80	-651.86
			UL17	-19788.35	-2225.85	-1697.67	461.71	-2012.75	2825.99
			UL18	-22958.30	-2290.37	-2038.01	206.85	-561.79	1665.80
			UL19	-24080.39	-2220.29	-2372.97	113.18	717.40	436.36
			UL20	-22948.05	-1877.37	-2440.00	18.76	1931.16	-884.53
			UL21	-11222.99	-1132.08	-1498.49	771.41	50.66	1.63
			UL22	-12208.71	-1075.14	-1851.43	685.63	1013.88	-485.38
			UL23	-12552.29	-1061.54	-2127.78	692.18	1633.03	-733.58
			UL24	-12200.42	-778.03	-2140.79	694.97	1883.41	-1406.11
			UL25	-16609.30	-2332.84	-1423.54	300.81	-1710.46	2632.31
			UL26	-18958.42	-2340.89	-1828.94	90.59	-505.74	1698.81

荷载提取的原则：

1. 计算抗拔承载力，选取上拔荷载最大的桩和对应的荷载组合；
2. 计算抗压承载力，选取竖向荷载最大的桩和对应的荷载组合；
3. 计算抗滑移承载力，选取上拔荷载较大和水平荷载最大的桩和对应的荷载组合；（此处不能仅考虑水平滑移荷载最大，因为水平滑移荷载最大时，有可能竖向荷载为压力，因此一般选上拔荷载最大时计算。）
4. 计算抗倾覆承载力，选取上拔荷载最大的桩和对应的荷载组合。

1.2 荷载组合

依据 DNV-ST-0126 中表 3-3 中的相关规定，荷载组合系数可根据下列规定取值：

Table 3-3 Load factors γ_f for variable functional loads on platform areas etc.

Variable functional loads		Environmental loads		Permanent loads*		
ULS	FLS, ALS, SLS	ULS	FLS, ALS, SLS	ULS		FLS, ALS, SLS
				Favourable	Unfavourable	
1.25	1.0	0.7**	1.0	0.9	1.25	1.0

* Permanent loads included for example dead loads and pre-tension loads
** When functional loads from ship impacts are to be combined with environmental loads, the environmental load factor shall be increased from 0.7 to 1.0 to reflect that ship impacts are correlated with the wave conditions.

载荷侧安全系数根据 DNV-ST-0126 进行选择。所有的组合值都将被视为等于 1.0。

作用		ULS	ALS
不利的永久荷载	γ_G	1.25	1.00
有利的永久荷载	γ_G	0.90	1.00
不利的可变荷载	γ_Q	1.25*	1.00
有利的可变荷载	γ_Q	0.00	0.00
偶然荷载	γ_A	0.00	1.00

*) 组合系数：环境负荷被设置为 0.7 倍，而不是 1.25 倍。然而，当不利的功能负荷与环境负荷（船的冲击）相结合时，环境负荷系数就会增加到 1.00（而不是 0.7）。

1.3 土材料系数

依据 DNV-ST-0126 中 7.6.1.6 节中的相关规定，土材料安全系数可根据下列规定取值：

7.6.1.6 Unless otherwise specified, the following material safety factors γ_M shall be applied to the characteristic soil strength parameters for determination of design soil resistance against lateral loading of piles in the ULS and the SLS:

Table 7-1 Partial material safety factors for pile foundations

Type of geotechnical analysis	Limit state	
	ULS	SLS
	γ_M	γ_M
Effective stress analysis	1.15	1.0
Total stress analysis	1.25	1.0

2. 抗拔承载力计算（仅考虑外摩阻力）

上拔筒型基础的承载力校核参照《Suction Installed Caisson Foundations for Offshore Wind_Design Guidelines(Offshore Wind Accelerator)》设计指南和 API 规范中的设计规定进行校核，上拔承载力主要由基础的侧摩阻力贡献，其计算方法可分为黏性土和无黏性土工况。

考虑到筒型基础上拔工况是筒型基础承载力校核中最危险工况，为安全起见，本项目计算中仅考虑单侧摩阻力对上拔承载力的贡献。

（1）黏性土工况

黏性土中筒型基础的上拔承载力计算方法为：

$$V_{ult,t,clay} = \pi D h \alpha s_{ul} \quad (\text{黏性土}) \quad (5.6-1)$$

式中： D —基础直径；

h —基础埋深；

s_{ul} —计算深度处土体的不排水抗剪强度；

α —无量纲系数，根据 API 规范中的相关规定，其计算公式如下：

$$\alpha = \begin{cases} 0.5\psi^{-0.5} & (\psi \leq 1.0) \\ 0.5\psi^{-0.25} & (\psi > 1.0) \end{cases} \quad (5.6-2)$$

式中： ψ —无量纲系数， $\psi = s_u/p_0(z)$ ；

$p_0(z)$ —某深度处的有效上覆压力；

s_u —土体不排水抗剪强度（考虑材料系数后）。

当 $\alpha > 1.0$ 时， α 取 1.0。

（2）无黏性土工况

根据 API 规范中的相关规定，单位侧摩阻力计算方法：

$$f = \beta p_0(z) \quad (5.6-4)$$

式中： $p_0(z)$ —某深度处的有效上覆压力，即 $p_0(z) = \gamma' h^2/2$ ；

β —无量纲轴向摩擦系数，即 $\beta = K \tan \delta$ （考虑材料系数后即 $\beta/1.15$ ）。

无黏性土中筒型基础的上拔承载力计算方法为：

$$V_{ult,t,sand} = \pi D \beta p_0(z) \quad (\text{无黏性土}) \quad (5.6-3)$$

式中: γ' —土体的有效容重;

K —土体的侧向土压力系数;

δ —土体的外摩擦角。

如无确切资料, 对于开口打入桩, β 可按表 5.6-1 取值; 对于形成土塞或端部封闭的闭口桩, β 可按表 5.6-1 增大 25%取值。

对于长桩, f 不会随着上覆压力无限的线性增加, 在这种情况下, 需将 f 限制在表 4.4-1 中的限定值内。

表 5.6-1 无粘性硅质土的设计参数表

相对密实度 ^a	土的类型	轴向摩擦系数 β_1	极限单位桩侧摩阻力 kPa	N_q	极限单位桩端承载力 MPa
极松	砂				
松	砂				
松	砂质粉土 ^b	不适用	不适用	不适用	不适用
中密	粉土				
密实	粉土				
中密	砂质粉土 ^b	0.29	67	12	3
中密	砂				
密实	砂质粉土 ^b	0.37	81	20	5
密实	砂				
极密	砂质粉土 ^b	0.46	96	40	10
极密	砂	0.56	115	50	12

①相对密实度的定义如下:

—极松, 0-15%; —松, 15-35%; —中密, 35-65%; —密实, 65-85%; —极密, 85-100%。

②砂质粉土是含砂土和粉土均较多的土, 强度值一般随砂土含量的增加而增大, 随粉土含量的增加而减小。

3.抗压承载力计算

3.1 考虑土塞

考虑土塞时, 筒型基础的抗压承载力主要由基础“外侧摩阻力”和“底部土塞端的端阻力”共同贡献, 其计算方法可表示为:

$$V_{ult} = V_{ult,base} + V_{ult,side} - W_{caisson} \quad (5.6-7)$$

式中: V_{ult} —竖向极限承载力;

$V_{ult,base}$ —筒端土塞阻力;

$V_{ult,side}$ —筒外侧摩阻力;

$W_{caisson}$ —筒内土重。

(1) 筒侧摩阻力

筒型基础侧摩阻力的计算方法根据黏性土和无黏性土工况可分为两种, 其中黏性土中筒侧摩阻力计算方法:

$$V_{ult,side,clay} = \pi D h \alpha s_{u1} \quad (5.6-8)$$

式中: α —无量纲系数, 含义与式(5.6-1)中参数 α 相同, 计算方法如式(5.6-2)所示。

无黏性土中筒侧摩阻力计算方法:

$$V_{ult,side,sand} = \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan \delta \quad (5.6-9)$$

$K \tan \delta$ 取值为0.45~0.8 (砂土密实取大值, 松散取小值), 取值后考虑材料系数折减。

因此式(5.6-9)同样可表示为:

$$V_{ult,side,sand} = \pi D \beta p_0(z) \quad (5.6-10)$$

式中参数 β 可按表5.6-1中的相关描述进行取值。

(2) 筒端阻力校核

筒型基础端阻力的计算方法同样可根据黏性土和无黏性土工况分为两种, 其中黏性土中筒型基础端阻力的计算方法为:

$$V_{ult,base,clay} = A [N_c s_{u0} (1 + s_{ca} + d_{ca} - i_{ca}) + \gamma' h] \quad (5.6-11)$$

式中: A —筒型基础基底的截面积;

N_c —承载力系数, 通常认为在黏性土中 $N_c = 2 + \pi = 5.14$;

s_{u0} —筒型基础端部处土体的不排水抗剪强度;

s_{ca} 、 d_{ca} 、 i_{ca} —形状、深度、倾斜修正系数, 具体计算方法为:

$$\begin{cases} s_{ca} = 0.2(1 - 2i_{ca}) \\ d_{ca} = 0.3 \arctan\left(\frac{h}{D}\right) \\ i_{ca} = 0.5 - 0.5\sqrt{1 - \frac{H_{base}}{AS_{u0}}} \end{cases} \quad (5.6-12)$$

式中： H_{base} —上部荷载作用于基础底部的水平向荷载，具体计算方法为：

$$H_{base} = H - H_{side} \quad (5.6-13)$$

式中： H —上部荷载的水平向分量；

H_{side} —侧壁所激发的侧向土抗力，假定 $H_{side} = H_{ult,side}$ ， $H_{ult,side}$ 的计算方法详见 4.4.4 节。

无黏性土中筒型基础端阻力的计算方法为：

$$V_{ult,base,sand} = A \left(0.5\gamma' D N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma + \gamma' h N_q s_q d_q i_q \right) \quad (5.6-14)$$

式中： N_γ 、 N_q —承载力系数，其中 $N_q = \tan^2(\pi/4 + \varphi/2) e^{\tan\varphi}$ ， $N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varphi$ ；

s_q 、 s_γ —形状修正系数，其中 $s_q = 1 + i_q \sin\varphi$ ， $s_\gamma = 1 - 0.4i_\gamma$ ；

d_q 、 d_γ —深度修正系数，其中 $d_q = 1 + 1.2h/D \tan\varphi (1 - \sin\varphi)^2$ ， $d_\gamma = 1.00$ ；

i_q 、 i_γ —倾斜修正系数，具体计算方法为：

$$\begin{cases} i_q = 1 - 0.5 \left(\frac{H_{base}}{V_{base}} \right)^5 \\ i_\gamma = 1 - 0.7 \left(\frac{H_{base}}{V_{base}} \right)^5 \end{cases} \quad (5.6-15)$$

式中： V_{base} —上部荷载作用于基础底部的竖向荷载，具体计算方法如下。

$$V_{base} = V + W_{caisson} - V_{side} \quad (5.6-16)$$

式中： V —上部荷载的竖向分量；

V_{side} —侧壁所激发的侧摩阻力，假定 $V_{side} = V_{ult,side}$ ， $V_{ult,side}$ 的计算方法详见 5.6.2 节。

3.2 不考慮土塞

不考虑土塞时，筒型基础的抗压承载力主要由筒体“外侧摩阻力”、“内侧摩阻力”和“圆筒裙引起的环端阻”共同贡献，其计算方法可表示为：

$$V_{ult} = V_{o, side} + \zeta V_{i, side} + V_{环, base} \quad (5.6-17)$$

式中: V_{ult} —竖向极限承载力;

$V_{o, side}$ —筒外侧摩阻力;

$V_{i, side}$ —筒内侧摩阻力;

$V_{环, side}$ —圆筒裙引起的环端阻, 面积为 πDt , D 为筒形基础直径, t 为筒形

基础壁厚;

ζ —内侧摩阻力面积折减系数, 取 0.667。

上式中, 侧摩阻力和端阻力的计算与 5.6.3.1 中相同, 具体方法不赘述。

3.3 抗滑移计算

根据《Suction Installed Caisson Foundations for Offshore Wind Design Guidelines》, 基础的水平向极限承载力 H_{ult} 一般由极限侧土抗力 $H_{ult,side}$ 和底部极限摩阻力 $H_{ult,base}$ 组成, 即:

$$H_{ult} = H_{ult,base} + H_{ult,side} \quad (5.6-18)$$

(1) 黏性土工况

在不排水条件下, 除了极软粘土的所有粘土中, 侧土抗力 $H_{ult,side,clay}$ 可按下式计算:

$$H_{ult,side,clay} = (Dh) \left(\frac{\gamma' h}{2} + 2s_{u1} \right) \quad (5.6-19)$$

式中: s_{u1} —不同深度处的土体强度。具体计算方法为:

$$s_{u1} = s_{um} + \frac{kh}{2} \quad (5.6-20)$$

式中: s_{um} —泥面处土体的不排水抗剪强度;

k —土体不排水抗剪强度随深度的增长系数;

筒型基础底部极限摩阻力 $H_{ult,base}$ 的计算方法为:

$$H_{ult,base,clay} = \frac{\pi D^2}{4} s_{u0} \quad (5.6-21)$$

式中: s_{u0} —筒型基础基底处土体的不排水抗剪强度;

(2) 无黏性土工况

在砂土中, 极限侧土抗力 $H_{ult,side,sand}$ 可表示为:

$$H_{ult,side,sand} = \frac{\gamma'Dh^2}{2}(K_p - K_a) \quad (5.6-22)$$

式中: K_p 、 K_a —被动和主动土压力系数。具体计算方法为:

$$K_p = \frac{1}{K_a} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5.6-23)$$

式中: φ —土体的内摩擦角;

在砂土中, 底部摩阻力 $H_{ult,base,sand}$ 可按下式计算:

$$H_{ult,base,sand} = V_{base} \tan \varphi \quad (5.6-24)$$

式中: V_{base} —筒型基础基底所受荷载, 具体计算方法如 5.6.3.1 节中所示。

3.4 抗倾覆计算

(1) 被动土压力计算

当吸力筒在环境载荷作用下挤压土体时, 吸力筒会受到被动土压力的作用。朗肯(Rankine)土压力理论综合考虑了土体粘聚力和内摩擦角的作用, 适用于表面光滑的吸力筒的土压力计算。多年的实践应用经验表明, 朗肯土压力理论能够满足工程计算的需求。本文使用朗肯土压力理论计算吸力筒在载荷作用下的被动土压力。粘性土中吸力筒上的被动土压力强度 P 为:

$$P = \gamma z \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$$

式中, γ 为土壤容重, z 为泥面以下任一点深度, Φ 为土体内摩擦角, c 为物体粘聚力。

无粘性土中吸力筒上的被动土压力强度 P 为:

$$P = \gamma z \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$$

(2) 底部摩阻力计算

土的底摩阻力为:

$$T = c' A_T$$

式中, c' 为土的不排水抗剪强度, A_T 为吸力筒底部与土体接触的面积。

(3) 侧摩阻力、端阻力

侧阻力和端阻力的计算依据 5.6.2 节和 5.6.3 节计算。

3.4.1 考虑土塞

倾覆破坏模式 A: 吸力筒内形成土塞, 筒内土体与吸力筒一起运动, 受力示意图如图 3-2 所示:

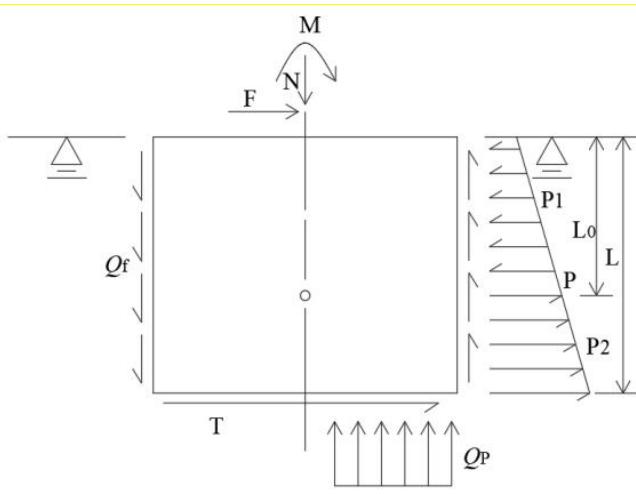


图 3-2 倾覆破坏模式 A

如图 3-2 所示, 吸力筒所受的土压力为 P (其中旋转中心以上部分所受土压力为 P_1 , 旋转中心以下部分所受土压力为 P_2), 侧摩阻力为 Q_f , 筒底摩阻力为 T , 筒底土反力为 Q_p , 上部结构对其水平作用力为 F 、竖向作用力为 N 、弯矩为 M , 吸力筒入土深度为 L , 旋转中心的深度 L_0 。旋转中心的深度可对吸力筒顶部列力矩平衡方程求得:

$$M_{Qf} + M_{Qp} + M_T + M_{P2} - M_{P1} - M = 0$$

由侧摩阻力 Q_f 引起的抗倾覆力矩 M_{Qf} 为:

$$M_{Qf} = 4 \int_0^{\pi/2} dM_{qf} = q_f D^2$$

$$dM_{qf} = \left(ds \cdot q_f \frac{D}{2} \cos \theta \right) = \frac{q_f D^2 \cos \theta d\theta}{4}$$

式中, D 为筒的直径, q_f 为单位吸力筒周长的侧摩阻力。

单位吸力筒周长的侧摩阻力 q_f 为:

$$q_f = \sum_{i=1}^n f_i L_i$$

式中, f_i 为第 i 层土的单位面积侧摩阻力, L_i 为第 i 层土中筒壁长度。

底部土反力 Q_p 引起的抗倾覆力矩 M_{Qp} 为:

$$M_{Qp} = Q_p \frac{2D}{3\pi}$$

此处将底部土反力 Q_p 视为均布载荷。在吸力筒有转动的情况下,认为吸力筒底部只有右半部受到土的挤压, $2D/3\pi$ 为半圆形心到圆心的距离。

底部摩阻力 T 引起的抗倾力矩 M_T 为:

$$M_T = T \cdot L$$

式中, L 为吸力筒的入泥深度。

吸力筒旋转中心以上部分和旋转中心以下部分所受的抗倾力距 M_{P1} , 和 M_{P2} 。, 分别为:

$$M_{P1} = \int_0^{l_0} P(z)zDdz$$

$$M_{P2} = \int_{l_0}^L P(z)zDdz$$

联立公式可求得旋转中心深度 L_0 。得到旋转中心深度后, 可求得吸力筒的水平极限承载力 F_H :

$$F_H = \int_0^{l_0} P(z)zDdz - \int_{l_0}^L P(z)zDdz - T$$

3.4.2 不考虑土塞

倾覆破坏模式 B: 吸力筒和筒内土体存在相对滑动, 筒体的受力示意图如图

3-3

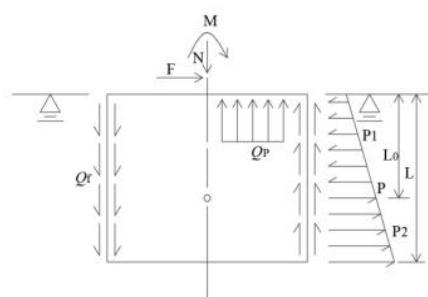


图 3-3 倾覆破坏模式 B

在筒内土体与筒体存在相对滑动的情况下，吸力筒不受底摩阻力的作用。筒体受土压力为 P (其中旋转中心以上部分所受土压力为 P_1 , 旋转中心以下部分所受土压力为 P_2)、侧摩阻力为 Q_f 、顶部土反力为 Q_p 、上部结构对其水平作用力为 F 、竖向作用力为 N 、弯矩为 M 。其中, F 、 N 、 M 、 P 和 Q_p 的情况与倾覆破坏模式 A 相同。因为筒体内外均受摩阻力作用, 所以由摩阻力引起的力矩为倾覆破坏模式 A 的 2 倍:

$$M_{Qf} = 2q_f D^2$$

由吸力筒顶部的力矩平衡方程可知:

$$M_{Qf} + M_{Qp} + M_{p2} - M_{p1} - M = 0$$

根据极限平衡条件求得旋转中心的深度为 L_0 , 再由水平力平衡方程可求得筒体的水平极限承载力 F_H :

$$F_H = \int_0^{l_0} P(z)zDdz - \int_{l_0}^1 P(z)zDdz$$