



筒形基础沉贯计算技术规程

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.土壤设计曲线	1
1.1CPT 推荐值法和 CPT 最大值	1
1.2 砂土强度指标法（内摩擦角）	2
1.3 粘土不排水抗剪强度法	3
1.4 设计曲线	4
2.土壤限值曲线	5
2.1 屈曲控制压差曲线（规范法）	5
2.2 屈曲控制压差曲线（有限元法）	7
2.3 土体破坏控制压差（砂土渗透+粘土土塞破坏）	7
2.4 可用压差控制压差	8
2.5 空化压差控制压差	9

1.土壤设计曲线

1.1CPT 推荐值法和 CPT 最大值

静力触探（CPT）方法通过建立筒壁摩阻力和筒端阻力与静力触探锥尖阻力 q_c 的相关性进行计算。《DNVGL-RP-C212》（2017）的 7.3.3.5 节规范给出了筒型基础在砂土和黏土中的下沉阻力的计算公式，见下式：

$$R = (A_o + A_i) \int_0^h k_f(z) q_c(z) dz + A_{tip} k_p(h) q_c(h) \tag{5.1-2}$$

式中： h —筒端下沉深度；

$k_p(z)$ —端阻系数；

A_{tip} —筒端面积；

q_c —CPT 平均锥尖阻力；

A_o —筒裙外周长；

A_i —筒内部周长；

$k_f(z)$ —侧摩阻系数；

k_p, k_f 按表 5.1-1 取值。

表 5.1-1 k_p 及 k_f 取值范围

土的类型	推荐值		最大值	
	k_p	k_f	k_p	k_f
黏土	0.4	0.03	0.6	0.05
砂土	0.3	0.001	0.6	0.003

选取 k_p 及 k_f 推荐值和最大值计算下沉阻力，按系数最大值计算为了保证筒型基础下沉到位。

7.3.3.5 The penetration resistance R of a single foundation or a single-skirted footing, as applicable, is calculated from the following expression

$$R = k_p(d) \cdot A_p \cdot \bar{q}_c(d) + A_s \cdot \int_0^d k_f(z) \cdot \bar{q}_c(z) \cdot dz$$

where:

- d = depth of tip of penetrating member [m]
- $k_p(d)$ = empirical coefficient relating q_c to end resistance
- $k_f(z)$ = empirical coefficient relating q_c to skin friction

$\bar{q}_c(z)$ = average cone resistance, horizontally across foundation footprint, as function of depth z [MPa]
 A_p = tip area of penetrating member [m^2]
 A_s = side area of penetrating member, per unit penetration depth [m^2/m].

7.3.3.6 Based on [7.3.3.5] a most probable and a highest expected penetration resistance, R_{prob} and R_{max} , respectively, may be calculated using the coefficients k_p and k_f for **dense sand** and **stiff clay** with the tentative values given in Table 7-1, see Lunne and Kvalstad (1982).

Table 7-1 Tentative values of coefficients k_p and k_f for sand and clay, North Sea conditions

Type of soil	Most probable (R_{prob})		Highest expected (R_{max})	
	k_p	k_f	k_p	k_f
Clay	0.4	0.03	0.6	0.05
Sand	0.3	0.001	0.6	0.003

Guidance note:
Experience from large-area gravity-base foundations has shown that values of k_p and k_f for the upper 1.0 m to 1.5 m could be from 25% to 50% lower than those given in Table 7-1 due to local piping or lateral movement of the platform. However, for foundations with sufficient water evacuation capacity to avoid piping – which is usually the case for suction piles and bucket foundations for subsea structures – such reductions of k_p and k_f are not applicable. Use of skirts with increased tip area or with stiffeners will reduce the k_f values. Highly stratified soils or sand/clay mixtures will achieve k_p and k_f values between those specified in Table 7-1.

1.2 砂土强度指标法（内摩擦角）

《ISO/DIS 19901-4》（2022）规范中 A.11.5.2.2.1 中给出了筒型基础在砂土中的下沉阻力计算公式，见下式：

$$R = F_o + F_i + Q_{tip} = (A_o + A_i) \int_0^h f(z) dz + A_{tip} q_u(h) \tag{5.1-3}$$

式中： $q_u = \sigma'_v N_q + 0.5 \gamma' t N_\gamma$, $f = K \gamma' z \tan \delta$, $N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 (45 + \varphi / 2)$,
 $N_\gamma = 1.5 (N_q - 1) \tan \varphi$;

N_q 、 N_γ —承载力系数；
 φ —土体排水内摩擦角；
 δ —筒壁与砂土之间摩擦角（ $\delta=r\varphi$ ）， r —筒裙与砂土之间的粗糙度系数，密砂建议取 0.9；
 D —基础直径。

在筒长相对于壁厚较大的情况下，筒壁摩擦会在筒壁两侧产生额外的竖向应力，进而导致筒端竖向应力的增加，筒端土体的竖向有效应力可表示为：

$$\sigma'_v = \gamma' z + \alpha_f f_{tip} = \gamma' z (1 + \alpha_f K \tan \delta) \tag{5.1-4}$$

式中： α_f —筒端垂直竖向应力增量与筒壁摩擦力之比，建议取 1；
 f_{tip} —筒端处的筒壁摩擦力。

1) Bearing capacity approach

In the bearing capacity model, the penetration resistance is calculated as;

$$P_f = Q_{tip} + Q_{side} = q_{tip} A_{tip} + f_{s,av} A_{wall} \quad (A.74)$$

where

q_{tip} is $0,5\gamma' t N_{\gamma-} + q N q$;

$f_{s,av}$ is $0,5 \gamma' z K \tan \delta$ (average friction over skirt length);

A_{tip} is $\pi D t$;

A_{wall} is $2 D z$ (sum of inside and outside);

$N q$ is $e^{\pi \tan \varphi} \cdot \tan^2(45 + \varphi/2) \cdot N_{\gamma-} = 1,5(N q - 1) \tan \varphi$;

Q is the effective overburden pressure outside skirt at skirt tip level;

γ' is the effective unit weight of sand;

φ is the peak drained friction angle of sand (angle based on a reference vertical effective consolidation stress of $\sigma_{vc} = 200$ kPa);

r is the roughness factor between skirt wall and sand ($r = 0,9$ is suggested used);

δ is the friction angle between sand and skirt wall $\delta = r\varphi$;

K is the ratio between horizontal and initial vertical effective stresses at skirt wall ($K = 0,8$ is suggested used);

T is the skirt wall thickness (assumed to be small compared to the diameter);

D is the diameter of foundation or anchor (external D can be used since t is small);

Z is the depth below sand surface.

Formula (A.74) for skirt wall friction assumes homogeneous sand conditions. For a horizontally layered soil profile the wall friction can be calculated as the sum of the contributions from the different soil units. For foundations or anchors with long skirt walls, the skirt wall friction can give an important additional vertical stress outside the skirt wall. This increase can cause an increased skirt tip resistance. With reference to Reference [15], this contribution can be added to the *in situ* effective overburden;

$$q = \gamma' z + \alpha_f f_{s,tip} = \gamma' z (1 + \alpha_f K \tan \delta) \quad (A.75)$$

where

α_f is the ratio between vertical normal stress increase and skirt wall friction at skirt tip level ($\alpha_f = 1$ suggested);

$f_{s,tip}$ is the skirt wall friction at skirt tip level.

1.3 粘土不排水抗剪强度法

筒型基础在黏性土中下沉时，筒内负压对基础下沉的有利影响较小，一般不予考虑。《DNVGL-RP-E303》（2017）规范中 A.2.1 节给出了筒型基础在黏土中下沉阻力的计算公式：

$$\begin{aligned} R &= F_o + F_i + Q_{tip} \\ &= (A_o + A_i) h \alpha s_{u,D}^{av} + A_{tip} (N_c s_{u,tip}^{av} + \gamma' h) \end{aligned} \quad (5.1-1)$$

式中： A_o —筒裙外周长；

A_i —筒内部周长；

A_{tip} —筒端面积；

h —入泥深度；

α —抗剪强度系数= $1/s_t$ ；

$s_{u,D}^{av}$ —筒底以上土体平均抗剪强度（DSS 试验）；

$s_{u,tip}^{av}$ —筒端土体平均抗剪强度（三轴压缩、三轴拉伸和 DSS 不排水抗剪强度平均值）；

γ' —有效土容重；

N_c —承载力系数，取 7.5；

z —下沉深度。

A.2.1 Basic equations

The penetration resistance, Q_{tot} , for skirts without stiffeners is calculated as the sum of the side shear along the skirt walls, Q_{side} , and the bearing capacity at the skirt tip, Q_{tip} ; i.e.:

$$\begin{aligned} Q_{tot} &= Q_{side} + Q_{tip} \\ &= A_{wall} \cdot \alpha \cdot s_{u,D}^{av} + (N_c \cdot s_{u,tip}^{av} + \gamma' \cdot z) \cdot A_{tip} \end{aligned} \quad (A-1)$$

where:

A_{wall}	= skirt wall area (sum of inside and outside)
A_{tip}	= skirt tip area
α	= shear strength factor (normally assumed equal to the inverse of the sensitivity; if the skirt wall is painted or treated in other ways, this must be taken into account in the α -factor)
$s_{u,D}^{av}$	= average DSS shear strength over penetration depth
$s_{u,tip}^{av}$	= average undrained shear strength at skirt tip level (average of triaxial compression, triaxial extension and DSS shear strengths)
γ'	= effective unit weight of soil
N_c	= bearing capacity factor, plane strain conditions
z	= skirt penetration depth The skirt tip resistance may be reduced if underpressure is used to penetrate the skirts. The skirt tip resistance may also be influenced by the shear stress along the skirt wall. However, the skirt tip resistance is normally not significant for steel skirts in clay, and these effects are therefore neglected in the equation above

1.4 设计曲线

基于以上三种粘土与砂土土阻力计算方法，可形成 4 条设计曲线，分别为：

1. CPT 推荐值曲线
2. CPT 最大值曲线
3. 砂土 CPT 推荐值+粘土不排水抗剪强度曲线
4. 砂土强度指标（内摩擦角）+粘土不排水抗剪强度法

2.土壤限值曲线

2.1 屈曲控制压差曲线（规范法）

筒型基础在吸力沉贯过程中，会受到较大的压力作用，结构屈曲控制压差可以确保筒型基础在压力作用下不会发生屈曲失稳，从而保证其结构的完整性和稳定性。如果压差超过结构屈曲控制压差，筒型基础可能会发生屈曲，导致沉贯失败甚至结构损坏。

（1）规范算法

DNVGL-RP-C202 规范规定了壳屈曲计算方法。

对于无纵向加劲肋的圆柱形壳体，壳体环向膜应力设计值宜按下式计算：

$$p = \frac{f_E t}{r} \quad (5.2-1)$$

式中： p —壳体侧向压力设计值，视为内外压力之间的差值；

r —筒型基础半径；

t —壁厚；

f_E —屈曲强度。

① 加劲肋之间的曲面板弹性屈曲强度

长宽比 $l/s > 1$ 时，壳板的弹性屈曲强度为：

$$f_E = C \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s} \right)^2 \quad (5.2-2)$$

曲率折减系数：

$$C = \psi \sqrt{1 + \left(\frac{\rho \xi}{\psi} \right)^2} \quad (5.2-3)$$

式中： f_E —壳的弹性屈曲强度；

ν —材料泊松比；

E —钢材弹性模量；

s —纵向加劲肋的间距；

C —曲率折减系数，壳体屈曲模式时加劲肋之间曲面板的屈曲系数宜按表 5.2-1 取值；

f_E —弹性屈曲强度；

ψ , ζ 和 r —曲率系数。

表 5.2-1 加劲肋之间面板的屈曲系数取值

	ψ	ζ	ρ
轴向应力	4	$0.702 Z_s$	$0.5(1+r/150t)^{-0.5}$
剪应力	$5.34+4(s/l)^2$	$0.856\sqrt{\frac{s}{l}}Z_s^{3/4}$	0.6
环向压缩	$[1+(s/l)^2]^2$	$1.04\frac{s}{l}\sqrt{Z_s}$	0.6

曲率参数 Z_s , 定义为:

$$Z_s = \frac{s^2}{rt} \sqrt{1-\nu^2} \quad (5.2-4)$$

② 长宽比 $l/s < 1$ 时, 可视为长度为 l 的无加劲肋的圆柱形壳体计算。

圆柱形壳体弹性屈曲强度为:

$$f_E = C \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad (5.2-5)$$

式中: l 为无支撑长度; C 为曲率折减系数, 按式 (5.2-3) 计算。

未设置纵向加劲肋时, 屈曲曲率系数宜按表 5.2-2 取值。

表 5.2-2 无加劲肋的圆柱形壳体屈曲系数取值

	ψ	ζ	ρ
轴向应力	1	$0.702 Z_l$	$0.5 \left(1 + \frac{r}{150t} \right)^{-0.5}$
弯矩	1	$0.702 Z_l$	$0.5 \left(1 + \frac{r}{300t} \right)^{-0.5}$
扭矩和剪力	5.34	$0.856 Z_l^{3/4}$	0.6
侧向压力 ¹	4	$1.04 \sqrt{Z_l}$	0.6
静水压力 ²	2	$1.04 \sqrt{Z_l}$	0.6

注: 1. 侧向压力系数 $\psi=4$, 考虑侧向压力仅作用于圆柱形桥体上;

2. 静水压力分况, $\psi=2$, 考虑侧向压力作用于圆柱形壳体和顶部盖板上。

其中曲率参数 Z_l :

$$Z_l = \frac{l^2}{rt} \sqrt{1-\nu^2} \quad (5.2-6)$$

2.2 屈曲控制压差曲线（有限元法）

筒型基础屈曲临界压力数值分析的核心是利用商业有限元软件 Abaqus 中的特征值屈曲分析法来计算结构屈曲的临界荷载。特征值屈曲分析法基于结构线弹性、小变形理论，其特征值方程见下式。Abaqus 中 Buckle 分析步相当于特征值线性分析，应力刚度矩阵[S]可加强或减弱结构刚度，当结构刚度弱化至负刚度，位移无限增加，结构发生屈曲，此时的荷载即为临界屈曲荷载。

$$([K] + \lambda[S])\{a\} = 0 \quad (5.2-7)$$

式中：[K]—刚度矩阵；

[S]—应力刚度矩阵；

{a}—位移特征向量；

λ —特征值（又叫做比例因子或载荷因子）。

特征值屈曲分析是一种线性屈曲分析方法，能够自动寻找最可能发生屈曲的情况，并按特征值排序，通常取一阶特征值与施加荷载的乘积作为基础的屈曲临界压力。

2.3 土体破坏控制压差（砂土渗透+粘土土塞破坏）

筒型基础在沉贯过程中，会与土体接触并产生相互作用。土体破坏控制压差可以防止因水力梯度过大而导致的土体渗透破坏或土塞大量隆起，如流土、管涌、土体反向承载力破坏等现象。这些现象会影响筒型基础的沉贯效果和稳定性，甚至可能引发地基的不均匀沉降或失稳。

（1）依据《Suction Installed Caisson Foundations for Offshore Wind: Design Guidelines》第 6.2.2 节筒型基础沉放过程中砂土层的渗透破坏控制标椎采用下式计算：

$$s_{crit} = 1.32\gamma' D \left(\frac{h}{D} \right)^{0.75} \quad (5.2-8)$$

式中： s_{crit} —发生渗透破坏的临界压差；

D —筒型基础直径；

h —筒壁入土深度；

γ' —有效土容重。

Andersen et al. (2008) describes a variation of this method. There are several suggestions for calculating s_{crit} ; for example in Senders and Randolph (2009): $s_{crit} = 1.32 \gamma' D \left(\frac{L}{D}\right)^{0.75}$.

(2) 《DNVGL-RP-E303》(2017) 规范给出了筒型基础黏土中土塞隆起的计算公式，见下式：

$$s_{plug} = A_i h \alpha s_{u,D}^{av} / A_{in} + N_c s_{u,D}^{LB} \quad (5.2-9)$$

式中： h —筒端下沉深度；

A_i —筒内部周长；

α —抗剪强度系数= $1/s_t$ ；

$s_{u,D}^{av}$ —筒底以上土体平均抗剪强度（DSS 试验）；

$s_{u,D}^{LB}$ —2/3 倍的筒端土体平均抗剪强度（三轴压缩、三轴拉伸和 DSS 不排水抗剪强度平均值）；

γ' —有效土容重；

N_c —承载力系数， $N_c = 6.2[1 + 0.34 \arctan(z_i/D)]$ 。

2.4 可用压差控制压差

可用压差控制压差是指在筒型基础沉贯过程中，能够有效利用的压差范围。这个压差范围需要考虑沉贯设备的性能。通过控制可用压差，可以确保筒型基础在沉贯过程中既能顺利下沉。

筒型基础下沉，可用压差 s 由泵自身可提供的负压值和水压提供的压差两部分组成。

$$s = s_{pump} + \gamma_w (h_w - L + h) \quad (5.2-10)$$

式中： s_{pump} —泵自身可提供的负压值；

γ_w —水的容重；

h_w —水深；

L —筒裙长度；

h —沉贯深度。

2.5 空化压差控制压差

在筒型基础吸力沉贯过程中，如果压差过大，筒内水的绝对压力等于水的蒸汽压（在标准温度下约为 1 kPa 至 2 kPa）时，水将在筒内承受最低压力的部分发生空化，此时，舱压无法进一步降低。空化压差控制压差 s 可以防止因空化现象而产生的气泡对筒型基础表面的冲蚀和损坏，保证沉贯过程的顺利进行和结构的耐久性。

$$s = \frac{p_a + \gamma_w(h_w - L + h)}{K} \quad (5.2-11)$$

式中： p_a —大气压；

γ_w —水的容重；

h_w —水深；

L —筒裙长度；

h —沉贯深度；

K —安全系数，1.25。