

# 海上风电筒型基础承载力设计计算工具

——帮助文档

## 一、操作说明

海上风电筒型基础承载力设计计算工具（以下简称为筒型基础计算工具）是一款基于规范《Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures [ISO/DIS 19901-4]》及《Suction Installed Caisson Foundations for Offshore Wind: Design Guidelines [Offshore Wind Accelerator]》的筒型基础承载力计算软件，筒型基础计算工具以交互友好，引导简单的形式帮助用户完成竖向承载力、水平承载力、抗拔承载力三者的计算，具体操作说明如下：

主界面包含上部标题栏，左侧菜单栏，右侧内容区三部分，如图 1 所示。进入主界面后，可点击参考规范材料获取相关 pdf 文件，首先选择当前工作目录，并选择左侧菜单栏对应需计算的承载力形式。



图 1

确定了工作区和承载力形式后，右侧内容区将显示对应的 excel 计算文件，如图 2 所示，此时，可创建新的计算文件或编辑已有的计算文件。



图 2

承载力计算界面，如图 3 所示，输入相应的参数，点击右下角计算按钮即可计算并自动在相应的工作目录下保存，若只保存当前页面的信息，请点击保存按钮。

计算参数信息

外部荷载设计值

外部水平荷载 $H_{LRP}$  (N)

请输入

筒型基础结构尺寸

基础直径 $D$  (m)

请输入

基础埋深 $h$  (m)

请输入

地基土体物理力学参数

泥面处土体不排水抗剪强度 $\tau_{um}$  (Pa)

请输入

土体不排水强度随深度的变化梯度 $k$  (

请输入

土体浮容重 $\gamma'$  (N/m<sup>3</sup>)

请输入

其他参数及系数

材料系数 $\gamma_m$ 

请输入

计算结果

裙边抗力 $H_{side} = 3.30$

基底抗力 $H_{base} = 1.41$

水平向极限承载力 $H_{ult} = 4.71$

$H_{LRP} < H_{ult}$ , 设计满足规范要求,  $f_s = H_{ult}/H_{LRP} = 4.71$

## 二、计算原理

### 1. 竖向承载力（黏土/不排水工况）

具体计算公式为：

输入“外部竖向荷载  $V_{LRP}$  (N)”、“外部水平向荷载  $H_{LRP}$  (N)”、“外部倾覆荷载  $M_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”、“基础埋深  $h$  (m)”，以上为筒型基础结构尺寸参数；“泥面处土体不排水抗剪强度  $s_{um}$  (kPa)”、“土体不排水强度随深度的变化梯度  $k$  (kPa/m)”、“土体浮容重  $\gamma'$  (N/m<sup>3</sup>)”，以上为地基土体物理力学性质参数；“筒-土相互作用系数  $\alpha$ ”、“筒型基础浮重荷载  $W_{bucket}$  (N)”。“材料系数  $\gamma_m$ ” 预设建议值 1.25，可以修改。

$$s'_{um} = \frac{s_{um}}{\gamma_m} \quad (1-1)$$

$$k' = \frac{k}{\gamma_m} \quad (1-2)$$

$$V_{side} = \pi D h \alpha \left( s'_{um} + \frac{k' h}{2} \right) \quad (1-3)$$

$$V'_{base} = V_{LRP} + W_{bucket} + \frac{\pi D^2 h \gamma'}{4} - \pi D h \alpha \left( s'_{um} + \frac{k' h}{2} \right) \quad (1-4)$$

$$H_{side} = D h \left( \frac{\gamma' h}{2} + 2 s'_{um} + k' h \right) \quad (1-5)$$

$$M'_{base} = M_{LRP} + H_{LRP} h - \frac{D h^2}{3} \left( \frac{\gamma' h}{2} + 2 s'_{um} + k' h \right) \quad (1-6)$$

$$e = \frac{M'_{base}}{V'_{base}} \quad (1-7)$$

$$A_{eff} = 2 \left[ \frac{D^2}{4} \arccos \left( \frac{2e}{D} \right) - e \sqrt{\frac{D^2}{4} - e^2} \right] \quad (1-8)$$

$$B_e = D - 2e \quad (1-9)$$

$$L_e = \sqrt{D^2 - (D - B_e)^2} \quad (1-10)$$

$$L_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{L_e}{B_e}} \quad (1-11)$$

$$B_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{B_e}{L_e}} \quad (1-12)$$

$$H'_{base} = H_{LRP} - H_{side} \quad (1-13)$$

$$i_{ca} = 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H'_{base}}{A_{eff} (s'_{um} + k'h)}} \quad (1-14)$$

$$V_{base} = A_{eff} \left\{ (2 + \pi)(s'_{um} + k'h) \left[ 1 + 0.2(1 - 2i_{ca}) \frac{B_{eff}}{L_{eff}} + 0.3 \arctan \left( \frac{h}{B_{eff}} \right) - i_{ca} \right] + \gamma'h \right\} \quad (1-15)$$

$$V_{ult} = V_{base} + V_{side} \quad (1-16)$$

在计算结果展示位置中输出裙边侧摩阻力  $V_{side}$ 、偏心距  $e$ 、地基有效面积  $A_{eff}$ 、基底抗力  $V_{base}$  和竖向极限承载力  $V_{ult}$ 。通过比较外部竖向荷载  $V_{LRP}$  和竖向极限承载力  $V_{ult}$  的大小，来判断设计是否满足要求，具体的比较方法为：如果  $V_{LRP} + W_{bucket} > V_{ult}$ ，则设计不满足要求，在结果展示位置中输出“设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“设计满足规范要求”。

## 2. 竖向承载力（砂土/排水工况）

具体计算公式为：

输入“外部竖向荷载  $V_{LRP}$  (N)”、“外部水平向荷载  $H_{LRP}$  (N)”、“外部倾覆荷载  $M_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”、“基础埋深  $h$  (m)”，以上为筒型基础结构尺寸参数；“土体有效内摩擦角  $\varphi'$  (°)”、“土体浮容重  $\gamma'$  (N/m<sup>3</sup>)”、“水平向土压力系数  $K$ ”，以上为地基土体物理力学性质参数；“筒-土接触面外摩擦角  $\delta$ ”、“筒型基础浮重荷载  $W_{bucket}$  (N)”。“材料系数  $\gamma_m$ ”预设为建议值 1.15，可以修改。

$$\varphi'' = \arctan \left( \frac{\tan(\varphi')}{\gamma_m} \right) \quad (2-1)$$

$$\delta' = \arctan \left( \frac{\tan(\delta)}{\gamma_m} \right) \quad (2-2)$$

$$V_{side} = \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (2-3)$$

$$V'_{base} = V_{LRP} + W_{bucket} + \frac{\pi D^2 h \gamma'}{4} - \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (2-4)$$

$$K_p = \frac{1}{K_a} = \frac{1 + \sin(\varphi'')}{1 - \sin(\varphi'')} \quad (2-5)$$

$$H_{side} = \frac{\gamma' h^2 D}{2} (K_p - K_a) \quad (2-6)$$

$$M'_{base} = M_{LRP} + H_{LRP} h - \frac{\gamma' h^3 D}{6} \left[ \frac{1 + \sin(\varphi'')}{1 - \sin(\varphi'')} - \frac{1 - \sin(\varphi'')}{1 + \sin(\varphi'')} \right] \quad (2-7)$$

$$e = \frac{M'_{base}}{V'_{base}} \quad (2-8)$$

$$A_{eff} = 2 \left[ \frac{D^2}{4} \arccos\left(\frac{2e}{D}\right) - e \sqrt{\frac{D^2}{4} - e^2} \right] \quad (2-9)$$

$$H'_{base} = H_{LRP} - H_{side} \quad (2-10)$$

$$B' = L' = \sqrt{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (2-11)$$

$$B_e = D - 2e \quad (2-12)$$

$$L_e = \sqrt{D^2 - (D - B_e)^2} \quad (2-13)$$

$$L_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{L_e}{B_e}} \quad (2-14)$$

$$B_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{B_e}{L_e}} \quad (2-15)$$

$$N_q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi''}{2}\right) e^{\pi \tan(\varphi'')} \quad (2-16)$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1) \tan(\varphi'') \quad (2-17)$$

$$i_q = 1 - 0.5 \left( \frac{H'_{base}}{V'_{base}} \right)^5 \quad (2-18)$$

$$i_{\gamma} = 1 - 0.7 \left( \frac{H'_{base}}{V'_{base}} \right)^5 \quad (2-19)$$

$$s_q = 1 + i_q \left( \frac{B'}{L'} \right) \sin(\varphi'') \quad (2-20)$$

$$s_{\gamma} = 1 - 0.4 i_{\gamma} \left( \frac{B'}{L'} \right) \quad (2-21)$$

$$d_q = 1 + 1.2 \left( \frac{h}{B'} \right) \tan(\varphi'') [1 - \sin(\varphi'')]^2 \quad (2-22)$$

$$V_{base} = A_{eff} \left( \frac{1}{2} \gamma' B_{eff} N_{\gamma} s_{\gamma} d_{\gamma} i_{\gamma} + \gamma' h N_q s_q d_q i_q \right) \quad (2-23)$$

$$V_{ult} = V_{base} + V_{side} \quad (2-24)$$

在计算结果展示位置中输出裙边侧摩阻力  $V_{side}$ 、偏心距  $e$ 、地基有效面积  $A_{eff}$ 、基底抗力  $V_{base}$  和竖向极限承载力  $V_{ult}$ 。通过比较外部竖向荷载  $V_{LRP}$  和竖向极限承载力  $V_{ult}$  的大小，来判断设计是否满足要求，具体的比较方法为：如果  $V_{LRP} + W_{bucket} > V_{ult}$ ，则设计不满足要求，在结果展示位置中输出“设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“设计满足规范要求”。

### 3. 抗滑承载力（黏土/不排水工况）

具体计算公式为：

输入“外部水平向荷载  $H_{LRP}(N)$ ”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D(m)$ ”、“基础埋深  $h(m)$ ”，以上为筒型基础结构尺寸参数；“泥面处土体不排水抗剪强度  $s_{um}(kPa)$ ”、“土体不排水强度随深度的变化梯度  $k(kPa/m)$ ”、“土体浮容重  $\gamma'(N/m^3)$ ”，以上为地基土体物理力学性质参数。“材料系数  $\gamma_m$ ”预设为建议值 1.25，可以修改。

$$s'_{um} = \frac{s_{um}}{\gamma_m} \quad (3-1)$$

$$k' = \frac{k}{\gamma_m} \quad (3-2)$$

$$H_{side} = Dh \left( \frac{\gamma' h}{2} + 2s'_{um} + k' h \right) \quad (3-3)$$

$$H_{base} = \frac{\pi D^2}{4} (s'_{um} + k'h) \quad (3-4)$$

$$H_{ult} = H_{base} + H_{side} \quad (3-5)$$

在计算结果展示位置中输出裙边抗力  $H_{side}$ 、基底抗力  $H_{base}$  和水平向极限承载力  $H_{ult}$ 。通过比较外部水平向荷载  $H_{LRP}$  和水平向极限承载力  $H_{ult}$  的大小，来判断设计是否满足要求，具体的比较方法为：如果  $H_{LRP} > H_{ult}$ ，则设计不满足要求，在结果展示位置中输出“设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“设计满足规范要求”。

#### 4. 抗滑承载力（砂土/排水工况）

具体计算公式为：

输入“外部竖向荷载  $V_{LRP}$  (N)”、“外部水平向荷载  $H_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”、“基础埋深  $h$  (m)”，以上为筒型基础结构尺寸参数；“土体有效内摩擦角  $\varphi'$  (°)”、“土体浮容重  $\gamma'$  (N/m<sup>3</sup>)”、“水平向土压力系数  $K$ ”，以上为地基土体物理力学性质参数；“筒-土接触面外摩擦角  $\delta$ ”、“筒型基础浮重荷载  $W_{bucket}$  (N)”。“材料系数  $\gamma_m$ ” 预设建议值 1.15，可以修改。

$$\varphi'' = \arctan\left(\frac{\tan(\varphi')}{\gamma_m}\right) \quad (4-1)$$

$$\delta' = \arctan\left(\frac{\tan(\delta)}{\gamma_m}\right) \quad (4-2)$$

$$V_{side} = \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (4-3)$$

$$V'_{base} = V_{LRP} + W_{bucket} + \frac{\pi D^2 h \gamma'}{4} - \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (4-4)$$

$$H_{base} = V'_{base} \tan(\varphi'') \quad (4-5)$$

$$K_p = \frac{1}{K_a} = \frac{1 + \sin(\varphi'')}{1 - \sin(\varphi'')} \quad (4-6)$$

$$H_{side} = \frac{\gamma' h^2 D}{2} (K_p - K_a) \quad (4-7)$$

$$H_{ult} = H_{base} + H_{side} \quad (4-8)$$

在计算结果展示位置中输出裙边抗力  $H_{side}$ 、基底抗力  $H_{base}$  和水平向极限承载力  $H_{ult}$ 。通过比较外部水平向荷载  $H_{LRP}$  和水平向极限承载力  $H_{ult}$  的大小，来判断设计是否满足要求，具体的比较方法为：如果  $H_{LRP} > H_{ult}$ ，则设计不满足要求，在结果展示位置中输出“设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“设计满足规范要求”。

## 5. 拔承载力（黏土/不排水工况）

具体计算公式为：

输入“外部上拔荷载  $V_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”、“基础埋深  $h$  (m)”，以上为筒型基础结构尺寸参数；“泥面处土体不排水抗剪强度  $s_{um}$  (kPa)”、“土体不排水强度随深度的变化梯度  $k$  (kPa/m)”、“土体容重  $\gamma$  (N/m<sup>3</sup>)”，以上为地基土体物理力学性质参数；以及“筒-土相互作用系数  $\alpha$ ”、“筒型基础浮重荷载  $W_{bucket}$  (N)”、“水深  $h_w$ ”、“空穴压力  $p_{void}$  (Pa)”。“大气压强  $p_a$  (Pa)” 预设值为建议值  $1.0 \times 10^5$  Pa，可以修改；“水体容重  $\gamma_w$  (N/m<sup>3</sup>)” 预设值为建议值  $1.0 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>，可以修改；“材料系数  $\gamma_m$ ” 预设值为建议值 1.25，可以修改。

计算过程中应首先判定  $p_{void}$ ， $p_{void}$  的取值范围在  $0 \leq p_{void} \leq p_a + \gamma_w h_w$ 。如果  $p_{void}$  不在该范围内，应首先提出报错，提出“ $p_{void}$  取值不合理，应在  $0 \sim p_a + \gamma_w h_w$ ”，并要求修改  $p_{void}$  取值。

$$s'_{um} = \frac{s_{um}}{\gamma_m} \quad (5-1)$$

$$k' = \frac{k}{\gamma_m} \quad (5-2)$$

如果裂缝出现在基础底部下方：

$$V_{ult,t,base} = \frac{\pi D^2}{4} \gamma h + W_{bucket} + \frac{\pi D^2}{4} (p_a + \gamma_w h_w - p_{void}) + \alpha \pi D h \left( s'_{um} + \frac{k'h}{2} \right) \quad (5-3)$$

如果裂缝出现在基础顶盖下方：

$$V_{ult,t,lid} = W_{bucket} + \frac{\pi D^2}{4} (p_a + \gamma_w h_w - p_{void}) + 2\alpha \pi D h \left( s'_{um} + \frac{k'h}{2} \right) \quad (5-4)$$

如果上拔过程为长期荷载：

$$V_{ult,t,slow} = W_{bucket} + 2\pi D h \alpha \left( s'_{um} + \frac{k'h}{2} \right) \quad (5-5)$$



在计算结果展示位置中输出裂缝出现在基础底部下方的抗拔极限承载力  $V_{ult,t,base}$ 、裂缝出现在基础顶盖下方的抗拔极限承载力  $V_{ult,t,lid}$  和长期荷载工况的抗拔极限承载力  $V_{ult,t,slow}$ 。

此时需要进行三次比较，分别为：

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,base}$ ，则设计不满足裂缝出现在基础底部下方的承载力要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础底部下方时，设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础底部下方时，设计满足规范要求”。

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,lid}$ ，则设计不满足裂缝出现在基础顶盖下方的承载力要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础顶盖下方时，设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础顶盖下方时，设计满足规范要求”。

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,slow}$ ，则设计不满足长期上拔工况的承载力要求，在结果展示位置中输出“基础承受长期上拔荷载时，设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“基础承受长期上拔荷载时，设计满足规范要求”。

## 6. 抗拔承载力（砂土/排水工况）

具体计算公式为：

输入“外部上拔荷载  $V_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”、“基础埋深  $h$  (m)”，以上为筒型基础结构尺寸参数；“土体容重  $\gamma$  (N/m<sup>3</sup>)”、“土体浮容重  $\gamma'$  (N/m<sup>3</sup>)”、“水平向土压力系数  $K$ ”，以上为地基土体物理力学性质参数；以及“筒-土接触面外摩擦角  $\delta$ ”、“筒型基础浮重荷载  $W_{bucket}$  (N)”、“水深  $h_w$ ”、“基底裂缝处产生的空穴压力  $p_{void,base}$  (Pa)”、“顶盖裂缝出产生的空穴压力  $p_{void,lid}$  (Pa)”。“大气压强  $p_a$  (Pa)”预设为建议值  $1.0 \times 10^5$  Pa，可以修改；“水体容重  $\gamma_w$  (N/m<sup>3</sup>)”预设为建议值  $1.0 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>，可以修改；“材料系数  $\gamma_m$ ”预设为建议值 1.15，可以修改。

计算过程中应首先判定  $p_{void}$ 、 $p_{void,base}$  的取值范围在  $0 \leq p_{void,base} \leq p_a + \gamma_w h_w + \gamma_w h$ ； $p_{void,lid}$  的取值范围在  $0 \leq p_{void,lid} \leq p_a + \gamma_w h_w$ 。如果  $p_{void}$  不在该范围内，应首先提出报错，提出“ $p_{void}$  取值不合理， $p_{void,base}$  应在  $0 \sim p_a + \gamma_w h_w + \gamma_w h$ ； $p_{void,lid}$  应在  $0 \sim p_a + \gamma_w h_w$ ”，并要求修改  $p_{void}$  取值。

$$\delta' = \arctan\left(\frac{\tan(\delta)}{\gamma_m}\right) \quad (6-1)$$

$$V_{ult,t,base} = \frac{\pi D^2}{4} \gamma h + W_{bucket} + \frac{\pi D^2}{4} (p_a + \gamma_w h_w - p_{void,base}) + \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (6-2)$$

$$V_{ult,t,lid} = W_{bucket} + \frac{\pi D^2}{4} (p_a + \gamma_w h_w - p_{void,lid}) + 2\pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (6-3)$$

$$V_{ult,t,slow} = W_{bucket} + 2\pi D \frac{\gamma' h^2}{2} K \tan(\delta') \quad (6-4)$$

在计算结果展示位置中输出裂缝出现在基础底部下方的抗拔极限承载力  $V_{ult,t,base}$ 、裂缝出现在基础顶盖下方的抗拔极限承载力  $V_{ult,t,lid}$  和长期荷载工况的抗拔极限承载力  $V_{ult,t,slow}$ 。

此时需要进行三次比较，分别为：

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,base}$ ，则设计不满足裂缝出现在基础底部下方的承载力要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础底部下方时，设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础底部下方时，设计满足规范要求”。

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,lid}$ ，则设计不满足裂缝出现在基础顶盖下方的承载力要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础顶盖下方时，设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“当裂缝出现在基础顶盖下方时，设计满足规范要求”。

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,slow}$ ，则设计不满足长期上拔工况的承载力要求，在结果展示位置中输出“基础承受长期上拔荷载时，设计不满足规范要求”；反之则满足要求，在结果展示位置中输出“基础承受长期上拔荷载时，设计满足规范要求”。