

# 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 $s_{um}$  (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

### 一、竖向承载力（黏土/不排水工况）

计算公式中涉及“外部竖向荷载  $V_{LRP}$  (N)”、“外部水平向荷载  $H_{LRP}$  (N)”和“外部倾覆荷载  $M_{LRP}$  (N)”，以上为荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”和“基础埋深  $h$  (m)”，以上为筒型基础尺寸参数；“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)”和“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)”和“材料系数  $\gamma_m$ ”，其中“材料系数  $\gamma_m$ ”预设值为 1.25。

具体计算公式为：

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

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

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

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

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

$$M'_{base} = M_{LRP} + H_{LRP} h \quad (1-6)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

如果  $V_{LRP} + W_{bucket} > V_{ult}$ ，则设计不满足要求，反之则满足要求。

## 二、竖向承载力（砂土/排水工况）

计算公式中涉及“外部竖向荷载  $V_{LRP}$  (N)”、“外部水平向荷载  $H_{LRP}$  (N)”和“外部倾覆荷载  $M_{LRP}$  (N)”，以上为荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”和“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>)”和“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)”和“材料系数  $\gamma_m$ ”，其中“材料系数  $\gamma_m$ ”预设设为 1.15。

具体计算公式为：

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

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

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

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

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

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

$$M'_{base} = M_{LRP} + H_{LRP} h \quad (2-7)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

如果  $V_{LRP} + W_{bucket} > V_{ult}$ ，则设计不满足要求，反之则满足要求。

### 三、抗滑承载力（黏土/不排水工况）

计算公式中涉及“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)”和“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)”和“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；“材料系数  $\gamma_m$ ”预设 1.25。

具体计算公式为：

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

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

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

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

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

如果  $H_{LRP} > H_{ult}$ ，则设计不满足要求，反之则满足要求

### 四、抗滑承载力（砂土/排水工况）

计算公式中涉及“外部竖向荷载  $V_{LRP}$  (N)”和“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)”和“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>)”和“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)”和“材料系数  $\gamma_m$ ”，其中“材料系数  $\gamma_m$ ”

预设 1.15。

具体计算公式为：

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

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

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

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

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

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

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

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

如果  $H_{LRP} > H_{ult}$ ，则设计不满足要求，反之则满足要求。

## 五、抗拔承载力（黏土/不排水工况）

计算公式中涉及“外部上拔荷载  $V_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”和“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)”和“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)”、“水体容重  $\gamma_w$  (N/m<sup>3</sup>)”和“材料系数  $\gamma_m$ ”，其中“大气压强  $p_a$  (Pa)”预设 1.0×10<sup>5</sup>Pa，“水体容重  $\gamma_w$  (N/m<sup>3</sup>)”预设 1.0×10<sup>4</sup>N/m<sup>3</sup>，“材料系数  $\gamma_m$ ”预设 1.25。

工具箱在计算开始前首先判定  $p_{void}$  取值的合理性， $p_{void}$  的取值范围在  $0 \leq p_{void} \leq p_a + \gamma_w h_w$ 。

具体计算公式为：

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

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

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：

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

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,base}$ ，则设计不满足裂缝出现基础底部下方的承载力要求，反之则满足要求。

如果  $V_{LRP} > V_{ult,t,lid}$ ，则设计不满足裂缝出现基础顶盖下方的承载力要求，反之则满足要求。

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，反之则满足要求。

## 六、抗拔承载力（砂土/排水工况）

计算公式中涉及“外部上拔荷载  $V_{LRP}$  (N)”，以上为外部荷载参数；“基础直径  $D$  (m)”和“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>)”和“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)”、“顶盖裂缝处产生的空穴压力  $p_{void,lid}$  (Pa)”、“大气压强  $p_a$  (Pa)”、“水体容重  $\gamma_w$  (N/m<sup>3</sup>)”和“材料系数  $\gamma_m$ ”，其中“大气压强  $p_a$  (Pa)”预设为  $1.0 \times 10^5$  Pa，“水体容重  $\gamma_w$  (N/m<sup>3</sup>)”预设为  $1.0 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>，“材料系数  $\gamma_m$ ”预设为 1.15。

工具箱在计算开始前首先判定  $p_{void}$  取值的合理性， $p_{void,base}$  的取值范围在



$0 \leq p_{\text{void,base}} \leq p_a + \gamma_w h_w + \gamma_w h$ ;  $p_{\text{void,lid}}$  的取值范围在  $0 \leq p_{\text{void,lid}} \leq p_a + \gamma_w h_w$ 。

具体计算公式为：

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

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

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

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

如果  $V_{\text{LRP}} > V_{\text{ult,t,base}}$ ，则设计不满足裂缝出现基础底部下方的承载力要求，反之则满足要求。

如果  $V_{\text{LRP}} > V_{\text{ult,t,lid}}$ ，则设计不满足裂缝出现基础顶盖下方的承载力要求，反之则满足要求。

如果  $V_{\text{LRP}} > V_{\text{ult,t,slow}}$ ，则设计不满足长期上拔工况的承载力要求，反之则满足要求。