



冲刷计算技术规程

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.冲刷深度计算	1
1.1 韩海骞公式（适用于粉土、粘土）	1
1.2 王汝凯公式（适用于砂土）	2
1.3 动态输砂平衡——DNV 公式	4
1.4 任意时刻的冲刷深度计算（适用于砂石或砾石）	6
2.局部冲坑半径计算	8
3.冲刷剪切应力与希尔兹数计算	8
3.1 波速计算	8
3.2 输入参数	9
3.3 浪致剪切应力计算	10
3.4 流致剪切应力计算	11
3.5 波浪和海流剪切应力联合计算	11
3.6 希尔兹数计算	12
3.7 临界希尔兹数计算	13
3.8 θ/θ_{cr} （用于护甲层、海床启动流速计算）	14
4. 启动流速计算	15
4.1 水流冲刷临界流速计算	15
4.2 波浪临界流速计算	16
5. 砂被软体排最小厚度	17

1.冲刷深度计算

1.1 韩海骞公式（适用于粉土、粘土）

依据 NB-T 11602-2024 中 4.2.1 节第一条相关规定，底部为粉土和粘性土的桩基础最大局部冲刷深度可按照韩海骞公式进行计算，具体规定如下：

1 底质为粉土和黏性土的桩基础最大局部冲刷深度可采用韩海骞公式，按下列公式计算：

$$\frac{h_b}{h} = 17.4 k_1 k_2 \left(\frac{B}{h} \right)^{0.326} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0.167} F_r^{0.628} \quad (4.2.1-1)$$

$$F_r = u / (gh)^{0.5} \quad (4.2.1-2)$$

式中： h_b ——潮流作用下桩基础最大冲刷深度（m）；

h ——全潮最大水深（m）；

k_1 ——基础桩平面布置系数，可取 1.0；

k_2 ——基础桩处布置系数，直桩取 1.0，斜桩取 1.176；

B ——最大水深条件下平均阻水宽度（m）；

d_{50} ——泥沙中值粒径（m）；

F_r ——弗汝德数；

u ——全潮最大流速（m/s）；

g ——重力加速度（m/s²），取 9.81 m/s²。

韩海骞公式的适用范围如下：（NB-T 11602-2024 附录中 4.2.1 节规定）

1 韩海骞公式：通过查找原始研究成果，补充韩海骞公式适用条件如下：最大水深条件下基础平均阻水宽度 B 范围为 0.8 m～42.0 m；全潮最大流速（垂线平均流速） u 的范围为 1.4 m/s～8.0 m/s；水深 h 范围为 4.5 m～31.0 m；泥沙中值粒径 d_{50} 的范围为 0.008 mm～0.140 mm。

韩海骞公式原始公式中只能计算水流作用下的局部冲刷深度，若想考虑波流共同作用下的局部冲刷深度，可依据 NB-T 11602-2024 附录中 4.2.1 节的相关规定进行计算，具体规定如下：

近岸海域由于水深较浅，波浪作用不容忽略，可在潮流流速的基础上叠加波浪的附加流速，以此在韩海骞公式中反映波浪对于局部冲刷的贡献。有学者采用行业标准《港口与航道水文规范》JTS 145 附录 U 中 U.0.7-4 计算波浪水质点平均流速，并与全潮最大流速 u 进行线性叠加，代入本导则式 (4.2.1-2)，计算波流共同作用下的局部冲刷深度。计算结果与埕岛油田海洋平台桩基

局部冲刷资料较为接近。因此。对于海岸与近海地区建筑物的局部冲刷深度计算，流速取波流合成速度时，韩海骞公式也有一定的适用性和参考价值。补充波浪水质点平均流速计算公式如下：

$$V_2 = 0.2 \frac{H}{h} C \quad (4-1)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (4-2)$$

式中： V_2 ——波浪水质点平均垂线水平流速 (m/s)；

H ——波高 (m)；

h ——水深 (m)；

C ——波速 (m/s)；

g ——重力加速度 (m/s^2)；

T ——波周期 (s)；

k ——波数。

1.2 王汝凯公式（适用于砂土）

依据 NB-T 11602-2024 中 4.2.1 节第二条相关规定，底部为砂土的桩基础最大局部冲刷深度可按照王汝凯公式进行计算，具体规定如下：

2 底质为砂土的单桩基础最大局部冲刷深度可采用王汝凯公式，按下列公式计算：

$$\lg\left(\frac{S_{ul}}{h}\right) = -1.293 + 0.1917 \lg \beta \quad (4.2.1-3)$$

$$\beta = N_f \frac{H}{L} U_r N_s N_{\pi} = \frac{H^2 L V^3 D [V + (1/T - V/L) HL / (2h)]^2}{[(\rho_s - \rho) / \rho] v g^2 h^4 d_{50}} \quad (4.2.1-4)$$

$$N_f = \frac{V^2}{gh} \quad (4.2.1-5)$$

$$U_r = \frac{HL^2}{h^3} \quad (4.2.1-6)$$

$$N_s = \frac{V_{fw}^2}{[(\rho_s - \rho) / \rho] g d_{50}} \quad (4.2.1-7)$$

$$N_{rp} = \frac{VD}{\nu} \quad (4.2.1-8)$$

式中: S_{ul} ——桩基础最大冲刷深度 (m);

N_f ——海流的弗汝德数的平方;

β ——反映波流动力因素和泥沙、桩径的综合参数;

H ——波高 (m);

L ——波长 (m);

g ——重力加速度 (m/s^2), 取 9.81 m/s^2 ;

U_r ——厄塞尔数 (UrSELL);

N_s ——希尔兹参数 (Shields);

N_{rp} ——桩的雷诺数;

V ——水流流速 (m/s);

D ——桩柱直径 (m);

T ——波浪周期 (s);

V_{fw} ——摩阻流速 (m/s);

h ——水深 (m);

ρ_s ——泥沙密度 (kg/m^3);

ρ ——海水密度 (kg/m^3), 无实测数据时可取 1025 kg/m^3 ;

d_{50} ——泥沙中值粒径 (mm);

ν ——水的运动黏滞系数 (m^2/s), 无实测数据时可取 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

注意:

$$\lg\left(\frac{S_{ul}}{h}\right) = -1.293 + 0.1917 \lg \beta \quad (4.2.1-3)$$

王汝凯二 王汝凯一

$$\beta = N_f \frac{H}{L} U_r N_s N_{\pi} = \frac{H^2 L V^3 D [V + (1/T - V/L) HL / (2h)]^2}{[(\rho_s - \rho) / \rho] v g^2 h^4 d_{50}}$$

由于 β 两个公式得出结果不一致, 因此分别把这两个公式命名为“王汝凯一”和“王汝凯二”二者取最大冲刷坑深度的较大值即可。

其中 U_{fw} 的计算方法如下 (4.2.2 节相关规定):

$$v_f = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{\max} \quad (4.2.2-6)$$

$$f_w = \begin{cases} 0.04 (a / k_N)^{-0.25} & (a / k_N \geq 100) \\ 0.04 (a / k_N)^{-0.75} & (a / k_N < 100) \end{cases} \quad (4.2.2-7)$$

$$a = \frac{u_{\max} T}{2\pi} \quad (4.2.2-8)$$

王汝凯公式的适用范围如下: (NB-T 11602-2024 附录中 4.2.1 节规定)

2 王汝凯公式: 王汝凯基于室内试验分析结果得出, 采用无量纲形式列出适用条件如下: D/d_{50} 的范围为 63.5~201.3; N_{π} 的范围为 4094.9~23299.5; N_s 的范围为 4.7~7.8。

公式 (4.2.1-9) 雷诺数中的运动黏滞性系数是温度的函数, 《Support structures for wind turbines》DNV-ST-0126 中推荐运动黏滞性系数为 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。当温度对计算结果影响较大时, 不同温度下水的运动黏滞系数可按行业标准《港口工程荷载规范》JTS 144 表 F.0.1-2 取用。

1.3 动态输砂平衡——DNV 公式 (适用于砂石或砾石、浊水冲刷)

依据 NB-T 11602-2024 中 4.2.1 节第三条相关规定, 底部为砂石或砾石、浊水冲刷 (希尔兹数 $\theta >$ 临界希尔兹数 θ_{cr}) 的桩基础最大局部冲刷深度可按照王汝凯公式进行计算, 具体规定如下:

3 动平衡输沙状态下,对于底质为砂土或砾石的单桩基础最大局部冲刷深度可按下列公式计算:

1) 冲刷坑最大深度可按下列公式计算:

$$\frac{S}{D} = 1.3 \{1 - \exp[-0.03(KC - 6)]\} \quad (KC \geq 6) \quad (4.2.1-9)$$

$$KC = \frac{u_{\max} T}{D} \quad (4.2.1-10)$$

$$u_{\max} = \frac{\pi H}{T \sinh(kh)} \quad (4.2.1-11)$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = gk \tanh(kh) \quad (4.2.1-12)$$

式中: S ——冲刷坑最大深度 (m);

D ——桩的直径 (m);

T ——波浪周期 (m);

H ——有效波高 (m);

KC ——Keulegan Carpenter 无量纲数;

u_{\max} ——近底波浪水质点速度幅值 (m/s);

k ——波数。

2) 对恒定流, KC 趋向于无穷, S 与 D 比值趋近于 1.3。

动态输砂平衡的公式的其他相关解释如下: (NB-T 11602-2024 附录中 4.2.1 节规定)

3 DNV 公式: DNV 公式适用于无黏性土在动床冲刷情况下局部冲刷深度计算。Sumer 和 Fredsøe(2001)提出,公式(4.2.1-10)中的波浪周期可为谱峰周期,具体详见《Scour around pile in combined waves and current》。Chen(2022 年)和 Gong(2023 年)等人的研究成果表明,对于大直径单桩, $4 < KC < 6$ 时,基础周围也会出现一定冲刷,叠加水流影响冲刷更为显著。因此,在进行大直径单桩冲刷分析时, $4 < KC < 6$ 时,应该谨慎使用 DNV 公

式，具体可参考《Large-scale experimental study on scour around offshore wind monopiles under irregular wave》和《Large-scale experimental study on scour around offshore monopile under combined wave and current condition》。

1.4 任意时刻的冲刷深度计算（适用于砂石或砾石）

依据 NB-T 11602-2024 中 4.2.2 节相关规定，底部为砂石或砾石的桩基础任意时刻局部冲刷深度可按照下面公式计算进行计算，具体规定如下：

4.2.2 底质为砂土或砾石时，任意时刻的桩基础周围局部冲刷深度可按照下列公式计算：

$$S_t = S \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_1} \right)} \right] \quad (4.2.2-1)$$

$$T_1 = \left(\frac{\sqrt{g(G_s - 1)} d^3}{D^2} \right)^{-1} T^* \quad (4.2.2-2)$$

$$\theta_s = \frac{u_f^2}{g(G_s - 1)d} \quad (4.2.2-3)$$

$$\frac{V}{U_f} = 6.4 - 2.5 \ln \left(\frac{2.5d}{h} + \frac{4.7v}{hu_f} \right) \quad (4.2.2-4)$$

$$T^* = \frac{1}{2000} \frac{h}{D} \theta_s^{-2.2} \quad (4.2.2-5)$$

$$v_f = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{\max} \quad (4.2.2-6)$$

$$v_f = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{\max} \quad (4.2.2-6)$$

$$f_w = \begin{cases} 0.04 (a/k_N)^{-0.25} & (a/k_N \geq 100) \\ 0.04 (a/k_N)^{-0.75} & (a/k_N < 100) \end{cases} \quad (4.2.2-7)$$

$$a = \frac{u_{\max} T}{2\pi} \quad (4.2.2-8)$$

$$T^* = 10^{-6} \left(\frac{KC}{\theta_s} \right)^3 \quad (4.2.2-9)$$

式中: S_t ——冲刷时间 t 时的冲刷深度 (m);
 S ——基础最大局部冲刷深度 (m);
 t ——冲刷时间 (s);
 T_1 ——特征时间 (s);
 T^* ——无量纲特征时间, 当海洋动力为恒定流时, 可按照式 (4.2.2-4)、式 (4.2.2-5) 计算 T^* ; 当海洋动

力为波浪时, 可按照式 (4.2.2.6) ~ 式 (4.2.2.9) 计算 T^* ;

θ_s ——希尔兹参数 (Shields);
 v_f ——摩阻流速 (m/s);
 f_w ——波浪摩阻系数;
 u_{\max} ——近底波浪水质点速度幅值 (m/s), 可按本导则式 (4.2.1-11) 和式 (4.2.1-12) 计算;
 G_s ——土粒比重;
 d ——泥沙粒径 (m), 可取中值粒径 d_{50} ;
 a ——近底波浪水质点位移幅值 (m);
 KC ——Keulegan Carpenter 无量纲数;
 k_N ——砂粒粗糙度 (m), 可取 $2.5d_{50}$ 。

2.局部冲坑半径计算

依据 NB-T 11602-2024 中 4.2.3 节相关规定，单桩基础局部冲刷坑半径的计算方法如下：

4.2.3 单桩基础的局部冲刷坑半径可按下式进行计算：

$$r = \frac{D}{2} + \frac{S}{\tan \varphi} \quad (4.2.3)$$

式中： r ——以桩中心为原点的冲刷坑半径（m）；
 D ——单桩直径（m）；
 S ——单桩基础最大局部冲刷深度（m）；
 φ ——冲刷坑坡度（°），宜通过工程海域、邻近海域冲刷监测数据或通过试验确定，在无相关资料时，可假设坡度与内摩擦角相同。

3.冲刷剪切应力与希尔兹数计算

3.1 波速计算

第二章 小振幅波（线性波）理论

2.1 常深度小振幅简单波动

○ 2.1.3 二维小振幅推进波的特性

— 波速和波长（弥散关系）

深水： $d/L > 0.5$, $\text{th} kd = 1$

有限深度水深

浅水： $d/L < 0.05$, $\text{th} kd = kd$

$\omega^2 = gk$

$\omega^2 = gk \text{th} kd$

↓

$c_0 = \frac{gT}{2\pi}$

$c = \frac{gT}{2\pi} \text{th} kd$

$c = \sqrt{gd}$

$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$

$L = \frac{gT^2}{2\pi} \text{th} kd$

$L = T\sqrt{gd}$

波数迭代计算			
波浪周期	T	10.4	s
水深	d	22	m
深水波数	k	0.037207161	
修正波数	k	0.0478	m ⁻¹
参数 1	$(2\pi/T)^2$	0.364630178	
参数 2	$gk \tanh(kh)$	0.366520397	
比值	$(gk \tanh(kh)) / ((2\pi/T)^2)$	1.005183936	
复核	$(2\pi/T)^2 \approx gk \tanh(kh)$	OK	

已知波浪周期和水深，可计算得到深水波数 k：

波浪的角频率 ω 计算方法如下：

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p}$$

波数 k 可通过下式计算：

$$k = \frac{\omega^2}{g}$$

依据 NB/T10105-2018 中 F.0.3 节中的相关规定，有限水深的波数应通过下式计算：

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \times k \times \tanh(kd)$$

其中，T 为波浪周期，k 为波数，d 为水深。

依据上式可以迭代出波数 k，偏差保证在 0.99~1.01。

（计算软件可以计算出准确值）

3.2 输入参数

所需的输入参数如下表所示：

波高	H	6.9	m
海流速度	U	1.85	m/s
海水密度	ρ	1025	kg/m ³
波浪周期	T	12.1	
护面层中值粒径	d_{50}	0.9	m

土颗粒密度	ρ_s	2100	kg/m ³
水的运动粘滞系数	ν	1.00E-06	m ² /s
流和浪之间的角度 (°)	α	90	度

注意：海流速度为表层最大流速/1.07 得到。

3.3 浪致剪切应力计算

依据 DNV-RP-0618-2022 中 3.2 节的相关规定，波浪导致的剪切应力计算方法如下：

3.2 Wave-induced bed shear stresses

3.2.1 General

For a plane bed exposed to regular orbital water movement, the shear stress τ_w can be written as:

$$\tau_w = 0.5 f_w \rho U_{m,reg}^2$$

where:

f_w = wave friction factor
 $U_{m,reg}$ = near-bed orbital velocity.

f_w depends on the grain roughness and the orbital amplitude at the seabed A_{bed} :

$$A_{bed} = \frac{T}{2\pi} U_{m,reg}$$

Several methodologies for determining of $U_{m,reg}$ exist, see [3.5].

For first order regular wave theory, $U_{m,reg}$ is determined as:

$$U_{m,reg} = \frac{2\pi}{T} \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \frac{H}{2}$$

where:

T = regular wave period
 h = water depth
 H = regular wave height
 L = wavelength determined by:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

Several expressions for the wave friction factor f_w have been suggested in the literature. Here the approach by Roulund, which is a combination of /5/: Dixen et al. (2008), /24/: Soulsby (1997): and /9/: Fredsøe and Deigaard (1992), has been chosen:

$$f_w = \begin{cases} 0.32 \left(\frac{A_{bed}}{k_s} \right)^{-0.8} & 0.2 < \left(\frac{A_{bed}}{k_s} \right) < 2.92 \quad \square \\ 0.237 \left(\frac{A_{bed}}{k_s} \right)^{-0.52} & 2.92 < \left(\frac{A_{bed}}{k_s} \right) < 727 \quad \square \\ 0.04 \left(\frac{A_{bed}}{k_s} \right)^{-0.25} & 727 < \left(\frac{A_{bed}}{k_s} \right) \quad \square \end{cases}$$

where:

k_s = is the bed roughness taken to be $2.5d_{50}$, see [3.2.2].

3.4 流致剪切应力计算

依据 DNV-RP-0618-2022 中 3.3 节的相关规定，海流导致的剪切应力计算方法如下：

3.3 Current-induced bed shear stresses

For a fully developed current over a plane, the rough bed can be assumed to follow the logarithmic velocity profile. The friction velocity U_{fc} can be calculated from the depth averaged current velocity, U_c water depth, h , and $k_{s, armour}$ as:

$$U_{fc} = \frac{U_c}{6.0 + 2.5 \ln \left(\frac{h}{k_{s, armour}} \right)}$$

The current-induced bed shear τ_c stress is:

$$\tau_c = 0.5pU_{fc}^2$$

If the current profile is not fully developed, the bed shear stress shall be determined as part of the site conditions.

其中， $k_{s, armour}$ 为 $2.5d_{50}$ ； p 为海水密度。

3.5 波浪和海流剪切应力联合计算

依据 DNV-RP-0618-2022 中 3.4 节的相关规定，波浪和海流联合剪切应力计算方法如下：

3.4 Combined current and regular wave-induced bed shear stresses

For combined current and regular wave flow over a plane bed, the mean and maximum bed shear stresses can be found by the empirical formula derived by [25].

The mean bed shear stress τ_m is larger than the pure current bed shear stress τ_c and is determined by:

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right]$$

The maximum combined current and wave bed shear stress τ_{max} during a wave cycle is determined by:

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau_m^2 + \tau_w^2 + 2\tau_w\tau_m \left| \cos \left(\frac{\alpha\pi}{180} \right) \right|}$$

where:

α = angle between the current and waves in degrees.

注意：其中 α 为波浪和海流的夹角，根据水文报告得到。

3.6 希尔兹数计算

依据 DNV-RP-0618-2022 中 4.1 节的相关规定，波浪和海流联合时候参数选取方法如下：

4.1 General

The determination of the stone stability shall be based on the 50-year 3-hour sea state.
If limited or no information is available for the joint occurrence between waves, current and water level, the design shall be based on the 'Shields parameter' determined from the three combinations listed in Table 4-1.

Table 4-1 Proposed combinations for determination of the '50-year design Shields parameter'

Load combination	Waves	Current	Low water level
1	50 years	5 years	5 years
2	5 years	50 years	5 years
3	5 years	5 years	50 years

依据 DNV-RP-0618-2022 中 4.2 节的相关规定，希尔兹数的计算方法如下：

4.2 Shields parameter

The mobility of armour stones, filter stones and sediment can be evaluated by the Shields parameter θ , which is the ratio between the combined wave and current induced driving forces (horizontal and vertical), and the stabilizing friction and gravity forces:

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd_{50}}$$

where:

- τ = the combined wave and current induced shear stress (acting on the armour stones, filter stones or seabed)
- g = gravity
- ρ = water density
- ρ_s = stone/sediment density
- d_{50} = mean diameter (of the armour stones, or the filter stones of the seabed).

Movement on a plane bed consisting of stone or sediment will occur when the Shields parameter:

$$\theta = \frac{\tau_{\max}}{g(s-1)d_{50} \rho}$$

依据 NB-T 11602-2024 中 4.2.1 节，王汝凯公式中，希尔兹数计算方法如下：

$$N_s = \frac{V_{fw}^2}{[(\rho_s - \rho) / \rho] gd_{50}} \tag{4.2.1-7}$$

其中 U_{fw} 的计算方法如下（4.2.2 节相关规定）：

$$v_f = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{\max} \quad (4.2.2-6)$$

$$f_w = \begin{cases} 0.04 (a / k_N)^{-0.25} & (a / k_N \geq 100) \\ 0.04 (a / k_N)^{-0.75} & (a / k_N < 100) \end{cases} \quad (4.2.2-7)$$

$$a = \frac{u_{\max} T}{2\pi} \quad (4.2.2-8)$$

注意：DNV-RP-0618-2022 和 NB-T 11062-2024 中的希尔兹数计算方法本质上是相同的！！！！

3.7 临界希尔兹数计算

依据 DNV-RP-0618-2022 中 4.2 节的相关规定，雷诺数计算方法如下：

$$Re^* = \frac{U_f \times d_{50}}{\nu}$$

is above the critical Shields parameter θ_{cr} .

θ_{cr} depends on the Particle Reynolds number Re and can be found from [Figure 4-1](#).

$$Re^* = \frac{U_f d_{50}}{\nu}$$

where the friction velocity is given as:

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{\rho_w}}$$

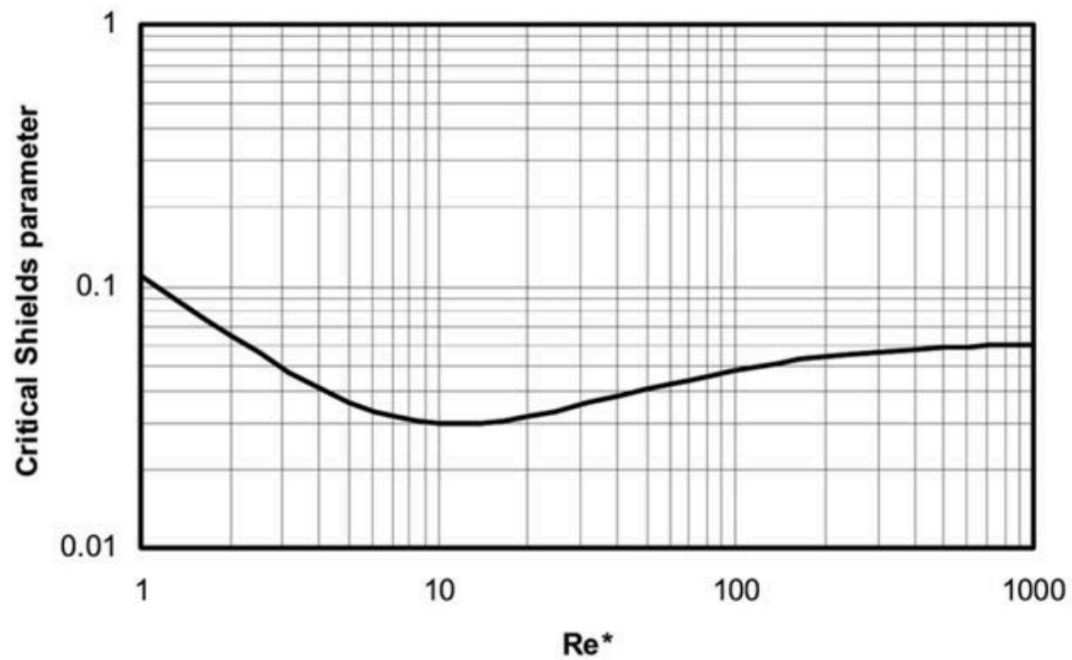


Figure 4-1 Critical Shields parameter shown as a function of the friction-velocity-based Reynolds number (adapted from Fig. 7.6 in Fredsøe and Deigaard, 1992)

雷诺数一般大于 1000，因此我们临界雷诺数一般取 0.06。

3.8 θ / θ_{cr} （用于护甲层、海床启动流速计算）

该部分计算既可用于护甲层和海床的启动流速计算。

依据 DNV-RP-0618-2022 中 4.3 节的相关规定， θ / θ_{cr} 计算方法如下：

注意：由于在桩附近，冲刷会更加剧烈，因此规范中选用安全系数为 2.4。

- the horizontal width dimension of the scour protection relative to the pile diameter
- the height of the scour protection relative to the pile diameter
- the Keulegan-Carpenter number, $KC = \frac{(U_w + U_c)T_p}{D}$
- the wave-current ratio $U_{wc} = \frac{U_w}{U_c + U_w}$
- the angle α between the waves and current.

The ratio of the maximum shear stress to the critical shear stress forms the stability criterion

$$Mob = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{cr}}$$

Without completion of model tests, a bed shear amplification factor of $2.4 = 1/0.415$ can be used, corresponding to no movement:

$$Mob = \frac{\theta_{\max}}{\theta_{cr}} = 0.415$$

The values of Mob can be compared to threshold values given by /3/ and summarized in Table 4-2.

Table 4-2 Mobility for the top layer of scour protection around a MonoPile according to /3/

Stability classes		
Limited movement	<	0.415
Some movement	<	0.460
Significant movement	>	0.460

4. 启动流速计算

本章节基于《海上风电设计指南（蓝皮书）》第十三章第二节进行计算。

4.1 水流冲刷临界流速计算

水流冲刷的临界启动流速计算方法如下：

挪威船级社 DNV 规范中，针对水流和波浪两种情形分别给出了临界流速的确定方法。首先，根据图 13-5，临界希尔兹参数 θ_{cr} 范围在 0.05~0.06。对于水流冲刷情况，基于式 (13-6) 和临界希尔兹参数 θ_{cr} 可得到临界剪切流速 U_f ，表达式为^[7]：

$$U_f = \sqrt{\theta_{cr} g (s-1) d} \quad (13-15)$$

式中 g ——重力加速度；
 s ——土颗粒的相对密度；
 d ——土颗粒粒径，可取中值粒径。

恒定流下冲刷的临界流速 U_c 计算方法如下：

恒定流作用下，对应的临界流速 U_c 可采用 Colebrook White 方程求解，即：

$$\frac{U_c}{U_t} = 6.4 - 2.5 \ln \left(\frac{2.5d}{h} + \frac{4.7v}{hU_t} \right) \quad (13-16)$$

式中 v ——海水的运动黏滞系数，取值为 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ；

h ——海水深度；

d ——泥沙颗粒的中值粒径，即 d_{50} ；

U_t ——床面剪切流速。

4.2 波浪临界流速计算

波浪作用下，临界启动流速计算方法如下：

对于波浪作用状况，海床面不受干扰的最大剪切流速可采用下式计算：

$$U_t = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{\max} \quad (13-17)$$

式中 f_w ——摩擦系数；

u_{\max} ——桩柱处海床附近的波浪速度最大值。

海床摩擦系数 f_w 可按式计算。

$$f_w = \begin{cases} 0.04(a/k_N)^{-0.25} & (a/k_N > 100) \\ 0.04(a/k_N)^{-0.75} & (a/k_N < 100) \end{cases} \quad (13-18)$$

式中 k_N ——床面糙度，取 $2.5d_{50}$ ， d_{50} 泥沙颗粒的中值粒径；

a ——水质点在海底处运动轨迹的长半轴。

水质点在海底处运动轨迹的长半轴按照下式计算：

$$\begin{cases} a = \frac{u_{\max} \cdot T}{2\pi} \\ u_{\max} = \frac{\pi \cdot H}{T \operatorname{sh}(kh)} \end{cases} \quad \eta = \frac{e^{\gamma} - e^{-\gamma}}{2} \quad (13-19)$$

式中 T ——波浪周期；

H ——波高；

h ——水深；

k ——波数。

波数 k 可由波浪色散方程解得，色散方程表达式如下，一般需要迭代求解。

$$\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = g \cdot k \operatorname{th}(kh) \quad (13-20)$$

5. 砂被软体排最小厚度

依据 NB-T 11602-2024 中 5.3.4 节相关规定，砂被软体排的最小厚度计算方法如下：

5.3.4 砂被软体排应满足波流共同作用下的抗掀动稳定性，并应符合下列规定：

1 波流共同作用下的压载稳定可由模型试验确定，砂被软体排在海流作用下的抗掀动稳定验算可按式(5.3.4)进行：

$$t_m \geq K_s \frac{\alpha_m V^2}{\frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} 2g} \quad (5.3.4)$$

式中： t_m ——砂被软体排等效厚度 (m)，指折算到单位面积上压载物的平均厚度；

K_s ——抗掀动安全系数，可取 1.2~1.4，海流复杂的区域可取大值；

α_m ——系数，与海流流态、压载形式有关，无压载或抛石压载可取 1.0；

V ——海流垂线平均流速 (m/s)；

γ_m ——砂被软体排重度 (kN/m³)；

γ_w ——海水重度 (kN/m³)；

g ——重力加速度 (m/s²)。

注意：此处计算的砂被软体排最小等效厚度指的是，护甲层（抛石层）和砂被软体排叠加的最小厚度。（护甲层（抛石层）的抗冲刷剪切稳定性按照 3.8 节相关内容进行计算）