



波浪力荷载计算（切片法）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

1.参数计算与输入	1
1.1 波长及波数计算	1
1.2 波浪雍高计算	2
1.3 结构物参数输入	3
1.4 桩尺度判断	4
1.5 波浪力计算分类	5
2.莫里森公式计算波浪力	6
3.等直径公式法计算波浪力（规范方法）	7
3.1 规范波浪力计算	7
3.1.1 雍高计算依据	7
3.1.2 惯性力和拖拽力计算依据	8
3.2 α 和 β 修正	9
3.3 γ_m 和 γ_p 的修正	10
3.4 水生物附着放大	11
3.5 最大波浪力和最大波浪力矩的计算	11

1.参数计算与输入

1.1 波长及波数计算

以 Nakwol 一期项目第 18 号机位为例，取水深为 15.5m，取最高高水位为 7.77m，则高水位时水深为 23.27m；有益波高为 6.9m，最大波高为 12.8m，波周期为 12.1s。

角频率 σ 为：

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{12.1} = 0.519 \text{ rad}$$

波数 k 为：

$$k = \frac{\sigma^2}{g} = \frac{0.519^2}{9.8} = 0.027 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

波长 L' 为：

$$L' = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{0.027} = 228.35 \text{ (m)}$$

修正后的 L 为：

$$L = \frac{e^{kd} - e^{-kd}}{e^{kd} + e^{-kd}} \times L' = 129.05 \text{ (m)}$$

计算角度为 0° 和 270°；C_D 和 C_M 系数取值分别为 1.2 和 2.0。

计算依据如下：

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: $d/L > 0.5, \tanh kd = 1$	有限深度水深	浅水: $d/L < 0.05, \tanh kd = kd$
-------------------------------	--------	---------------------------------

$\omega^2 = gk$ $\omega^2 = gk \tanh kd$

$c_0 = \frac{gT}{2\pi}$ $c = \frac{gT}{2\pi} \tanh kd$ $c = \sqrt{gd}$

$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$ $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd$ $L = T \sqrt{gd}$

2) 波形特征

自由面形状（波面方程）： $\eta = a \cos(kx - \sigma t)$

$$\text{波长: } L = \frac{2\pi}{k}$$

$$\text{周期: } T = \frac{2\pi}{\sigma}$$

$$\text{频率: } \sigma = \sqrt{kg}$$

$$\text{波数: } k = \frac{2\pi}{L}$$

$$\text{波速: } C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad \text{深水波}$$

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \operatorname{th}\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad \text{中等水深波}$$

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh} \quad \text{浅水波}$$

1.2 波浪雍高计算

根据上述参数：

$$\frac{H}{D} = 0.55$$

则根据下图，雍高与波高的比值为：

$$\frac{\eta}{D} = 0.75$$

$$\eta = 9.6 \text{ m}$$

高水位水深为：

$$d = 23.272 \text{ m}$$

则切片长度为：

$$d + \eta = 32.87 \text{ m}$$

每 1m 生成一个切片，因此需要生成切片 33 个。

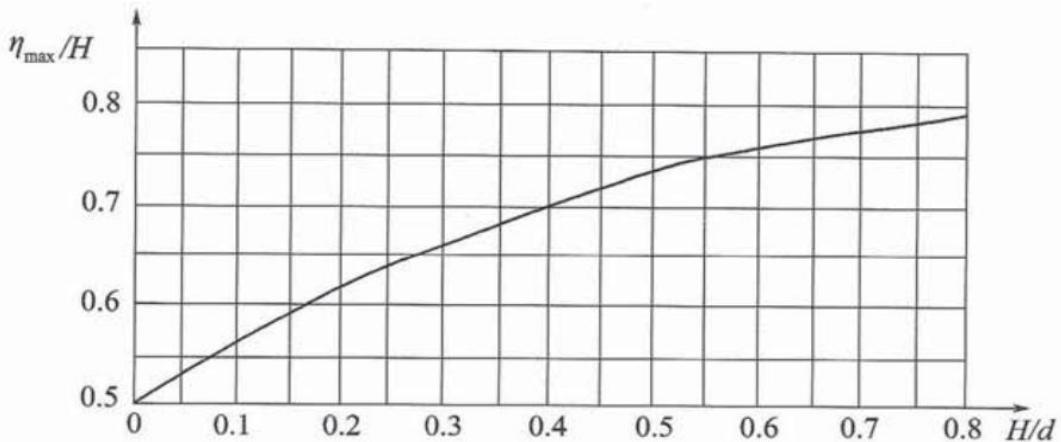
图 10.3.2-1 $\omega t = 0^\circ$ 时的 η_{max} 值

图 1-1 波浪-雍高关系图

1.3 结构物参数输入

结构物参数的输入入下图所示：

标黄为需要输入的部分，无需要强调和注意的点。

E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
2			海床面标高	极端高水位标高	吃水深度	transition需切片总长度(从transition底部到 d+η for οt=0° 和 d+η for οt=270° 两者中大的一个)	transition层数			
3	D	A			d	MAX(d+η for οt=0°; d+η for οt=270°)-底板高度	n	dz	z	z2 z1
4	mm	m	m ²	m	m	m	个	m	m	m
5	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	0.500	1.000
6	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	1.500	2.000
7	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	2.500	3.000
8	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	3.500	4.000
9	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	4.500	5.000
10	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	5.500	6.000
11	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	6.500	7.000
12	7500	7.5	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	7.500	8.000
13	7557.5	7.5575	45	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	8.500	9.000
14	7442.5	7.4425	44	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	9.500	10.000
15	7327.5	7.3275	42	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	10.500	11.000
16	7212.5	7.2125	41	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	11.500	12.000
17	7097.5	7.0975	40	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	12.500	13.000
18	6982.5	6.9825	38	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	13.500	14.000
19	6867.5	6.8675	37	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	14.500	15.000
20	6752.5	6.7525	36	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	15.500	16.000
21	6637.5	6.6375	35	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	16.500	17.000
22	6522.5	6.5225	33	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	17.500	18.000
23	6407.5	6.4075	32	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	18.500	19.000
24	6292.5	6.2925	31	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	19.500	20.000
25	6180	6.18	30	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	20.500	21.000
26	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	21.500	22.000
27	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	22.500	23.000
28	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	23.500	24.000
29	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	24.500	25.000
30	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	25.500	26.000
31	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	26.500	27.000
32	6000	6	28	-15.5	7.77	23.27	33	1.000	27.500	28.000

1.4 桩尺度判断

依据《港口与航道水文规范 JTS 145-2015》规范中第 10.3.1 节，小尺度桩的判断依据如下：

10.3.1 D/L 或 $b/L \leq 0.2$ 时为小尺度桩(柱)。对小尺度桩(柱), $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L \geq 0.35$ 时, 作用于水底面以上高度 z 处(图 10.3.1)柱体全断面上与波向平行的正向力速度分力和惯性分力, 可按下列公式计算:

NB/T 10105—2018

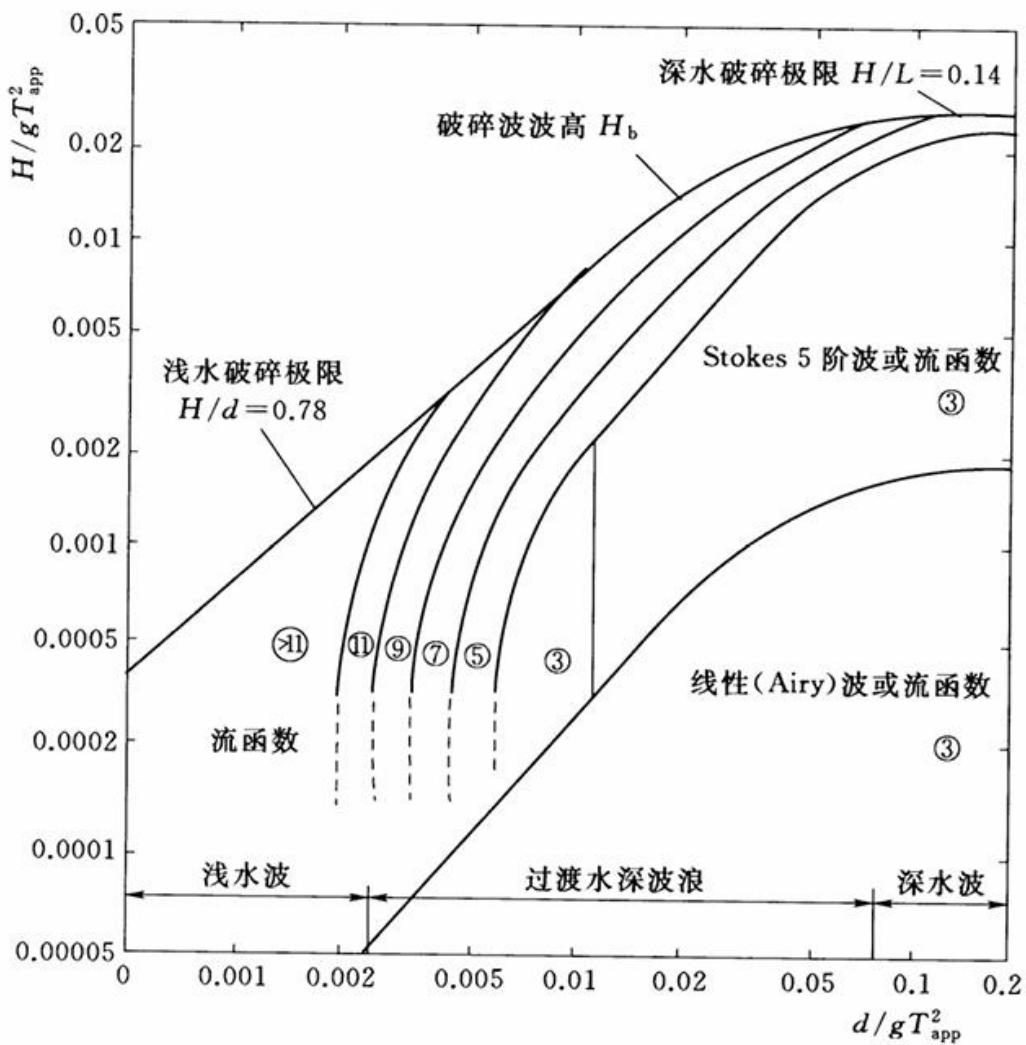


图 5.4.2 流函数、Stokes 5 阶波和线性波理论的适用范围

注：图中③、⑤、⑦…为流函数的阶数。

本算例中，修正后的波长为 129m，单桩直径为 7.5m，因此， $D/L=0.06$ 。

一般情况下，对于海上风电涉及到单桩和导管架基础都为小尺度桩，当波高小于3m时，再判断是否为大尺度桩，否则均为小尺度。

1.5 波浪力计算分类

6	依据规范-小尺度桩用不等直径计算
7	$D/L < 0.2$ 时，为小尺度桩
8	$H/d \leq 0.2$ 且 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L \geq 0.35$ ；调用 2 计算力和力矩
9	$H/d \leq 0.2$ 且 $d/L < 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L < 0.35$ ；调用 4 对 pDimax 及 mDimax 进行修正
10	$0.04 \leq d/L \leq 0.2$ 时，调用 5 对 pIimax 及 mIimax 进行修正（韩国365项目采用）
11	调用 6 计算 pimax 及 mimax
12	调用 7 计算 Pmax 及 Mmax

①满足

$H/d \leq 0.2$ 且 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L \geq 0.35$ ；调用 2 计算力和力矩

使用莫里森方程计算 P_d 和 P_m 。（对应表格中表 2。）

将所得的波浪荷载乘海生物放大系数即为最终结果。（按照第二章计算）

②满足

$H/d \leq 0.2$ 且 $d/L < 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L < 0.35$ ；调用 4 对 pDimax 及 mDimax 进行修正

$0.04 \leq d/L \leq 0.2$ 时，调用 5 对 pIimax 及 mIimax 进行修正（韩国365项目采用）

调用 6 计算 pimax 及 mimax

调用 7 计算 Pmax 及 Mmax

对于满足以上条件的基础，需要按照《港口与航道水文规范 JTS 145-2015》的规范方法计算波浪力，并进行修正。（按照第三章计算）

2.莫里森公式计算波浪力

依据《港口与航道水文规范 JTS 145-2015》中 10.3.1 节，用莫里森方程计算波浪力公式如下所示：

10.3.1 D/L 或 $b/L \leq 0.2$ 时为小尺度桩(柱)。对小尺度桩(柱), $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L \geq 0.35$ 时, 作用于水底面以上高度 z 处(图 10.3.1)柱体全断面上与波向平行的正向力速度分力和惯性分力, 可按下列公式计算:

$$p_D = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} C_D D u |u| \quad (10.3.1-1)$$

$$p_I = \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10.3.1-2)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi z}{L}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cos \omega t \quad (10.3.1-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh \frac{2\pi z}{L}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \sin \omega t \quad (10.3.1-4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (10.3.1-5)$$

74

式中 D ——柱体的直径(m), 当为矩形断面时, D 改用 b (m);

L ——波长(m);

a, b ——矩形柱体断面平行和垂直于波向的宽度(m);

H ——建筑物所在处进行波波高(m);

d ——建筑物前水深(m);

z, z_1, z_2 ——计算点在水底面以上的高度(m);

p_D ——波浪力的速度分力(kN/m), 其最大值 $p_{D\max}$ 出现在 $\omega t = 0^\circ$ 的相位上;

γ ——水的重度(kN/m³);

g ——重力加速度(m/s²);

C_D ——速度力系数, 对圆形断面取 1.2, 对方形或 $a/b \leq 1.5$ 的矩形断面取 2.0;

u ——水质点轨道运动的水平速度(m/s);

p_I ——波浪力的惯性分力(kN/m), 其最大值 $p_{I\max}$ 出现在 $\omega t = 270^\circ$ 的相位上;

C_M ——惯性力系数, 对圆形断面取 2.0, 对方形或 $a/b \leq 1.5$ 的矩形断面取 2.2;

A ——柱体的断面积(m²);

$\frac{\partial u}{\partial t}$ ——水质点轨道运动的水平加速度(m/s²);

T ——波浪周期(s);

ω ——波浪运动的圆频率(s⁻¹);

t ——时间(s), 当波峰通过柱体中心线时 $t = 0$ 。

3.等直径公式法计算波浪力（规范方法）

3.1 规范波浪力计算

3.1.1 雍高计算依据

10.3.2 小尺度桩(柱),作用于整个柱体高度上的最大速度分力 $P_{D\max}$ 和最大惯性分力 $P_{I\max}$,应按下列规定确定。

10.3.2.1 $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L \geq 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L \geq 0.35$ 时,可按下列方法确定:

(1)沿柱体高度选取不同 z 值,按式(10.3.1-1)和式(10.3.1-2)分别计算 $\omega t = 0^\circ$ 的 $p_{D\max}$ 和 $\omega t = 270^\circ$ 的 $p_{I\max}$,计算点不宜少于 5 个点,其中包括 $z = 0, d$ 和 $d + \eta$ 三点; $\omega t = 0^\circ$

75

港口与航道水文规范(JTS 145—2015)

时, $\eta = \eta_{\max}$, η_{\max} 按图 10.3.2-1 确定; $\omega t = 270^\circ$ 时, $\eta = \eta_{\max} - H/2$;沿柱体高度断面有变化时,则在交接面上下分别进行计算;由 $p_{D\max}$ 和 $p_{I\max}$ 分布图形即可算出总的 $P_{D\max}$ 和 $P_{I\max}$;

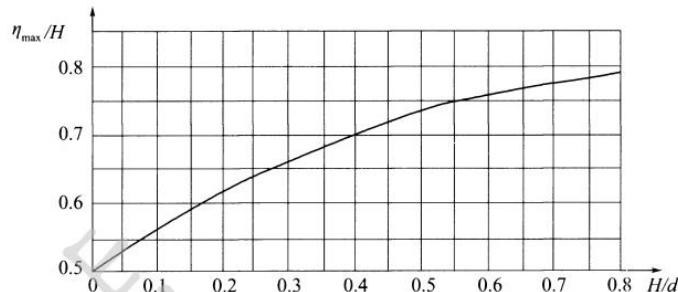


图 10.3.2-1 $\omega t = 0^\circ$ 时的 η_{\max} 值

3.1.2 惯性力和拖拽力计算依据

(2) z_1 和 z_2 间柱体断面相同时,作用于该段上的 $P_{D\max}$ 和 $P_{I\max}$ 分别按下列公式计算:

$$P_{D\max} = C_D \frac{\gamma D H^2}{2} K_1 \quad (10.3.2-1)$$

$$P_{I\max} = C_M \frac{\gamma A H}{2} K_2 \quad (10.3.2-2)$$

$$K_1 = \frac{\frac{4\pi z_2}{L} - \frac{4\pi z_1}{L} + \operatorname{sh} \frac{4\pi z_2}{L} - \operatorname{sh} \frac{4\pi z_1}{L}}{8 \operatorname{sh} \frac{4\pi d}{L}} \quad (10.3.2-3)$$

$$K_2 = \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi z_2}{L} - \operatorname{sh} \frac{2\pi z_1}{L}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L}} \quad (10.3.2-4)$$

(3) $P_{D\max}$ 和 $P_{I\max}$ 对 z_1 断面的力矩 $M_{D\max}$ 和 $M_{I\max}$ 分别按下列公式计算:

$$M_{D\max} = C_D \frac{\gamma D H^2 L}{2\pi} K_3 \quad (10.3.2-5)$$

$$M_{I\max} = C_M \frac{\gamma A H L}{4\pi} K_4 \quad (10.3.2-6)$$

$$K_3 = \frac{1}{\operatorname{sh} \frac{4\pi d}{L}} \left[\frac{\pi^2 (z_2 - z_1)^2}{4L^2} + \frac{\pi(z_2 - z_1)}{8L} \operatorname{sh} \frac{4\pi z_2}{L} - \frac{1}{32} \left(\operatorname{ch} \frac{4\pi z_2}{L} - \operatorname{ch} \frac{4\pi z_1}{L} \right) \right] \quad (10.3.2-7)$$

$$K_4 = \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L}} \left[\frac{2\pi(z_2 - z_1)}{L} \operatorname{sh} \frac{2\pi z_2}{L} - \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi z_2}{L} - \operatorname{ch} \frac{2\pi z_1}{L} \right) \right] \quad (10.3.2-8)$$

(4) 若沿整个柱体高度断面相同,计算整个柱体上的 $P_{D\max}$ 及其对水底面的力矩 $M_{D\max}$ 时,取 $z_1 = 0$ 和 $z_2 = d + \eta_{\max}$;在计算整个柱体上的 $P_{I\max}$ 及其对水底面的力矩 $M_{I\max}$ 时,取 $z_1 = 0$ 和 $z_2 = d + \eta_{\max} - H/2$ 。

式中 H ——建筑物所在处进行波波高(m);

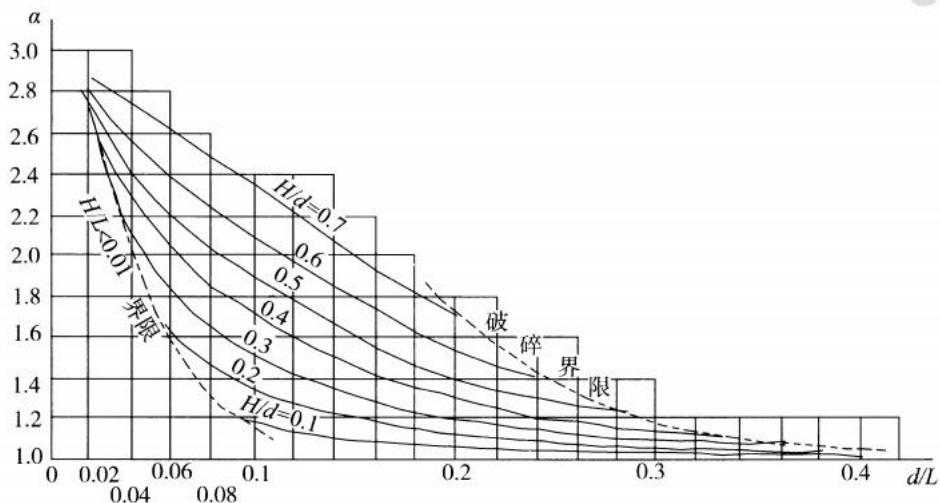
d ——建筑物前水深(m)；
 L ——波长(m)；
 z, z_1, z_2 ——计算点在水底面以上的高度(m)；
 ω ——波浪运动的圆频率(s^{-1})；
 t ——时间(s),当波峰通过柱体中心线时 $t=0$ ；
 P_{Dmax} ——作用于柱体计算高度上的最大速度力(kN)；
 P_{Imax} ——作用于柱体计算高度上的最大惯性力(kN)；
 η ——波面在静水面以上的高度(m)；
 η_{max} ——波峰在静水面以上的高度(m)；
 C_D ——速度力系数,对圆形断面取 1.2,对方形或 $a/b \leq 1.5$ 的矩形断面取 2.0；
 γ ——水的重度(kN/m^3)；
 D ——柱体的直径(m),当为矩形断面时, D 改用 b, b 为矩形柱体断面垂直于波向的宽度(m)；
 K_1, K_2, K_3, K_4 ——系数,按上述公式计算,或按图 10.3.2-2 ~ 图 10.3.2-7 确定；
 C_M ——惯性力系数,对圆形断面取 2.0,对方形或 $a/b \leq 1.5$ 的矩形断面取 2.2；
 A ——柱体的横断面面积(m^2)；
 M_{Dmax} ——作用于柱体计算高度上的最大速度力矩($kN \cdot m$)；
 M_{Imax} ——作用于柱体计算高度上的最大惯性力矩($kN \cdot m$)。

3.2 α 和 β 修正

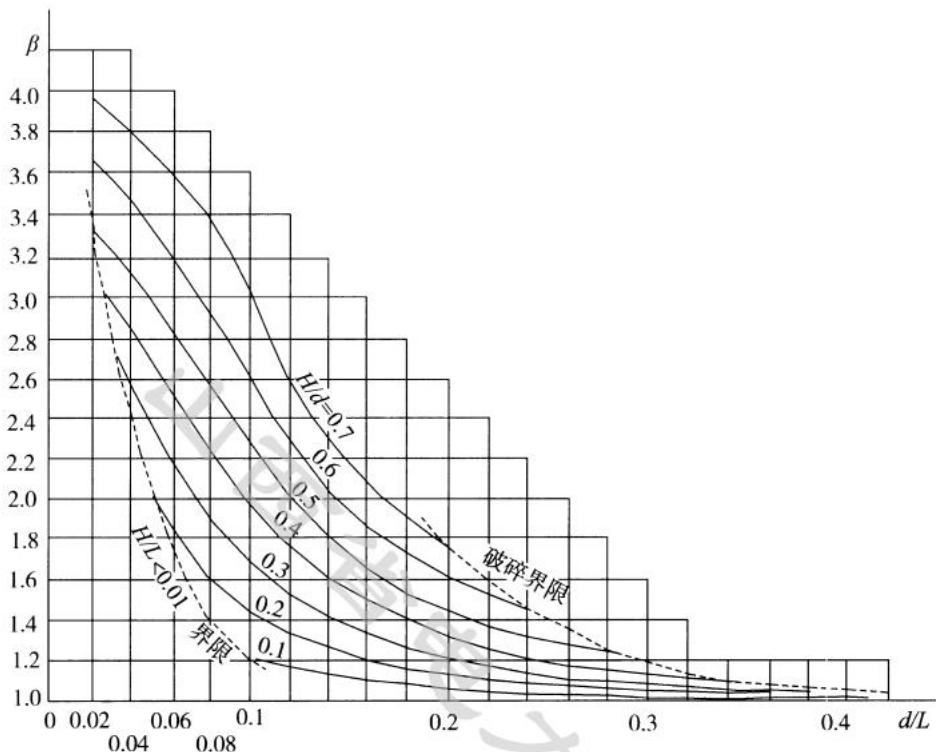
依据《港口与航道水文规范 JTS 145-2015》对于小尺度桩,应根据以下要求进行修正:

10.3.2.2 $H/d \leq 0.2$ 且 $d/L < 0.2$ 或 $H/d > 0.2$ 且 $d/L < 0.35$ 时,可按第 10.3.2.1 款的规定计算作用于整个柱体上的正向波浪力,并应对 P_{Dmax} 乘以系数 α ;对 M_{Dmax} 乘以系数 β 。 α 和 β 可分别按图 10.3.2-8 和图 10.3.2-9 确定。

参数 α 取值如下:

图 10.3.2-8 系数 α

参数 β 取值如下：

图 10.3.2-9 系数 β

3.3 γ_m 和 γ_p 的修正

依据《港口与航道水文规范 JTS 145-2015》，当 $0.04 \leq d/L \leq 0.2$ 时，应对惯性力 (P_i 和 M_i) 进行如下修正：

10.3.2.3 $0.04 \leq d/L \leq 0.2$ 时，除应按第 10.3.2.2 款的规定外，尚应对 $P_{l_{max}}$ 乘以系数 γ_P ，对 $M_{l_{max}}$ 乘以系数 γ_M 。系数 γ_P 和 γ_M 可按图 10.3.2-10 确定。

3.4 水生物附着放大

依据 NB/T 10105-2018《海上风电场工程风电机组基础设计规范》应对海生物附着进行如下修正：

5.9.2 海生物类型对波浪荷载计算中使用的水动荷载系数值的影响可按相应柱段上的波浪力按乘以增大系数 n 处理，增大系数 n 可按表 5.9.2 的规定选取。

表 5.9.2 增大系数 n

附着生物程度	相对糙率 ϵ/D	n
一般	<0.02	1.15
中等	$0.02 \sim 0.04$	1.25
严重	>0.04	1.40

注： ϵ 为附着生物的平均厚度（m）； D 为桩的直径（m）。

以 Nakwol 韩国海上风电一期为例，海生物附着区域为泥面至+6.1m，计算为 $15.5+6.1=21.6$ m，因此仅考虑切片 0~22m 的海生物附着系数即可。

海生物厚度为 100mm，因此 $\epsilon/D = 0.013$ ，因此海生物放大系数为 1.15，放大区域为 0~21.6m。

3.5 最大波浪力和最大波浪力矩的计算

依据《港口与航道水文规范 JTS 145-2015》第 10.3.4 节，小尺度桩的最大波浪力和最大波浪力矩应根据以下公式进行计算：

10.3.4 对于小尺度桩(柱),作用于整个柱体高度上的最大总波浪力和最大总波浪力矩可按下述方法确定:

(1) $P_{D\max} \leq 0.5P_{I\max}$ 时,正向水平最大总波浪力按式(10.3.4-1)计算,对水底面的最大总波浪力矩按式(10.3.4-2)计算,此时相位为 $\omega t = 270^\circ$;

$$P_{\max} = P_{I\max} \quad (10.3.4-1)$$

$$M_{\max} = M_{I\max} \quad (10.3.4-2)$$

(2) $P_{D\max} > 0.5P_{I\max}$ 时,正向水平最大总波浪力按式(10.3.4-3)计算,对水底面的最大总波浪力矩按式(10.3.4-4)计算,此时相位按式(10.3.4-5)计算。

$$P_{\max} = P_{D\max} \left(1 + 0.25 \frac{P_{I\max}^2}{P_{D\max}^2} \right) \quad (10.3.4-3)$$

$$M_{\max} = M_{D\max} \left(1 + 0.25 \frac{M_{I\max}^2}{M_{D\max}^2} \right) \quad (10.3.4-4)$$

$$\sin \omega t = -0.5 \frac{P_{I\max}}{P_{D\max}} \quad (10.3.4-5)$$

式中 $P_{D\max}$ ——作用于整个柱体高度上的最大速度力(kN);

$P_{I\max}$ ——作用于整个柱体高度上的最大惯性力(kN);

P_{\max} ——作用于整个柱体高度上的正向水平最大总波浪力(kN);

M_{\max} ——作用于整个柱体高度上的最大总波浪力矩(kN·m);

$M_{I\max}$ ——作用于整个柱体高度上的最大惯性力矩(kN·m);

$M_{D\max}$ ——作用于整个柱体高度上的最大速度力矩(kN·m);

ω ——圆频率(s^{-1});

t ——时间(s),当波峰通过柱体中心线时 $t=0$ 。