

· 地基与基础 ·



# 重力式码头地基承载力计算研究

于志安, 只红茹

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 经公式推导, 将JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》中关于均质土地基( $\varphi>0$ )、均布边载上的重力式码头地基承载力计算的区间总和求解方法简化, 得到公式求解法。利用地基极限承载能力曲线与实际荷载设计值曲线推导出二者交点 $b_{\text{交}}=0.5B_e$ 。在结构算例中应用上述2种方法进行地基承载力计算, 得到相近的结果, 验证了公式求解法。

**关键词:** 重力式码头; 地基承载力; 粘聚力; 内摩擦角

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0142-05

## Calculation of foundation's bearing capacity of gravity wharf

YU Zhi-an, ZHI Hong-ru

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** According to *Code for Soil Foundation of Port Engineering* (JTS 147-1-2010), we obtain a formula for calculating the foundation's bearing capacity of gravity wharf based on homogeneous soil( $\varphi>0$ ) and side loading, which is calculated originally by dividing the foundation width into many intervals and summing the ultimate bearing capacity. The intersection point  $b_{\text{交}}=0.5B_e$  is derived by the ultimate bearing capacity curve and the design load curve. The formula is verified by the two methods in the same example.

**Key words:** gravity wharf; bearing capacity of foundation; cohesion force; internal friction angle

随着航运业大船低成本、低碳的发展趋势, 码头建设趋于大型化。同时, 受自然条件、施工能力、经济因素的约束, 在黏土地基上建设大型重力式码头不可避免。大型重力式码头结构底应力大, 而黏土地基容许承载力较低, 地基承载力的验算需要依据JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》进行计算。该规范中地基承载力计算采用区间总和的方法, 参与计算的参数多, 计算过程繁琐。本文对JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》中均质土地基、均布边载且 $\varphi>0$ 时的地基承载力计算进行公式推导, 力求简化计算过程。

### 1 地基承载能力计算方法

地基承载能力的极限状态设计表达式为<sup>[1]</sup>:

$$\gamma'_0 V_d \leq F_k / \gamma_R \quad (1)$$

收稿日期: 2012-07-09

作者简介: 于志安(1981—), 男, 硕士, 注册土木工程师(港口与航道工程), 从事港口航道及海岸工程设计。

$$V_d = \gamma_s V_k \quad (2)$$

式中:  $F_k$  (计算面上地基承载力的竖向合力标准值) 和  $V_d$  (作用于计算面上竖向合力的设计值) 是计算抗力分项系数 $\gamma_R$ 的关键。

### 2 地基承载力计算方法的简化

#### 2.1 $V_d$ 的计算

基床底面竖向应力可以按照线性分布考虑, 其后端、前端的竖向应力可按式(3)~(5)计算<sup>[1]</sup>, 其分布如图1所示。

$$p_{v_1} = \frac{B_1}{B_e} p_1 + \rho g d \quad (3)$$

$$p_{v_2} = \frac{B_1}{B_e} p_2 + \rho g d \quad (4)$$

$$B_e = B_1 + 2d \quad (5)$$

该分布直线的函数表达式为:

$$p_v(b) = -\frac{P_{v2} - P_{v1}}{B_e} b + P_{v2} \quad (6)$$

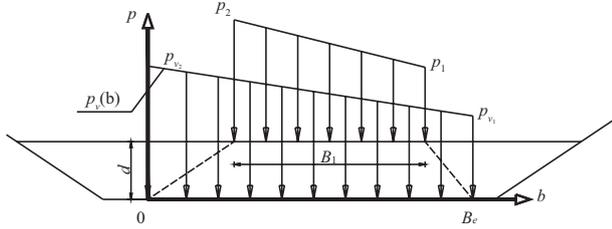


图1 基础计算面应力分布

将式 (3) ~ (5) 代入式 (2) 可得:

$$\begin{aligned} V_d = V_k &= 0.5(P_{v1} + P_{v2})B_e = \\ 0.5\left[\frac{B_1}{B_e}P_2 + \rho g d + \frac{B_1}{B_e}P_1 + \rho g d\right]B_e &= \\ 0.5(P_2 + P_1)B_1 + \rho g d B_e &= V_{ko} + \rho g d B_e \quad (7) \end{aligned}$$

式中:  $p_{v1}$ ,  $p_{v2}$  为计算面后端、前端竖向应力标准值 (kPa);  $B_e$  为抛石基床底面的计算宽度 (m);  $p_1$ ,  $p_2$  为建筑物后踵、前趾竖向应力标准值 (kPa)<sup>[2]</sup>;  $B_1$  为抛石基床顶面的实际受压宽度 (m);  $\rho$  为抛石基床填料水下密度 ( $t/m^3$ );  $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ );  $d$  为抛石基床厚度 (m);  $V_{ko}$  为建筑物底面竖向合力标准值 (kN/m)<sup>[2]</sup>。

### 2.2 $F_k$ 的简化计算

JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》中对均布边载、均匀土地基 ( $\varphi > 0$ ) 计算  $F_k$  时, 将计算宽度划分为若干小区间  $\Delta B = B_e/M$ , 对每个小区间内的地基极限承载力求值并总和, 其表达式为<sup>[1]</sup>:

$$F_k = \sum_{j=1}^m \min(p_{zj}, p_{vj}^*) \Delta B \quad (8)$$

如图2所示,  $F_k$  为图中  $M$  个阴影所示面积的总和。

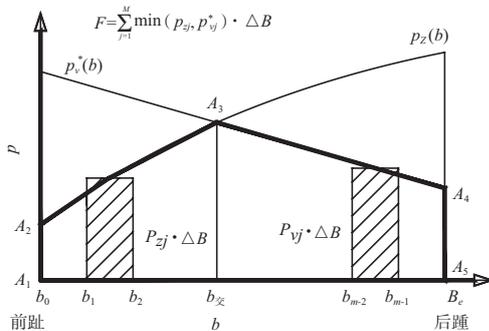


图2  $F_k$  区间总和法求解示意

从该图可见, 当  $\Delta B \rightarrow 0$  时,  $F_k$  为区域  $A_1A_2A_3A_4A_5$  的面积。那么当曲线  $p_z(b)$ ,  $p_v^*(b)$  的函数

表达式已知时, 该区域的面积将可以用积分的方式求得, 即  $F_k$  可以用下式表达:

$$F_k = \int_0^{b_c} \min[p_z(b), p_v^*(b)] db + \int_{b_c}^{B_e} \min[p_z(b), p_v^*(b)] db \quad (9)$$

本文将对  $p_z(b)$ ,  $p_v^*(b)$  进行分析, 推导其函数表达式, 并求得交点横坐标  $b_{\text{交}}$ , 进而利用积分的方法实现  $F_k$  的简化计算——公式求解法。

#### 2.2.1 $p_z(b)$ 的函数表达式

区间  $[b_{j-1}, b_j]$  和  $[b_j, b_{j+1}]$  ( $b_j = j\Delta B$ , ( $j=0, 1, 2, \dots, M$ )) 上的极限承载力竖向应力平均值按下式计算<sup>[1]</sup>:

$$p_{zj} = 0.5\rho_k g(b_j + b_{j-1})N_\gamma + q_k N_q + c_k N_c \quad (10)$$

$$p_{z(j+1)} = 0.5\rho_k g(b_{j+1} + b_j)N_\gamma + q_k N_q + c_k N_c \quad (11)$$

式中:  $\rho_k$  为土体水下密度标准值 ( $t/m^3$ )。式 (11) 减式 (10) 可得:

$$p_{z(j+1)} - p_{zj} = 0.5(b_{j+1} - b_{j-1})\rho_k g N_\gamma = \Delta B \rho_k g N_\gamma \quad (12)$$

当  $\Delta B \rightarrow 0$  时, 得函数  $p_z(b)$  的导数如下:

$$p'_z(b) = \lim_{\Delta B \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta B} = \lim_{\Delta B \rightarrow 0} \frac{p_{z(j+1)} - p_{zj}}{\Delta B} = \rho_k g N_\gamma \quad (13)$$

所以  $p_z(b)$  为一条关于  $b$  的直线, 直线斜率为  $\rho_k g N_\gamma$ 。假设:

$$p_z(b) = \rho_k g N_\gamma b + p_0 \quad (14)$$

由式 (10) 和 (14) 可知, 当  $b = b_1$  时有:

$$p_{z1} = p_z(b_1) = 0.5\rho_k g(b_1 + b_0)N_\gamma + q_k N_q + c_k N_c = \rho_k g N_\gamma b_1 + p_0 \quad (15)$$

式中:  $b_1 = \Delta B$ ,  $b_0 = 0$ <sup>[1]</sup>, 令  $QC = q_k N_q + c_k N_c$ , 代入式 (15) 得:

$$p_0 = QC - 0.5\rho_k g N_\gamma \Delta B \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (14) 得到  $p_z(b)$  的直线函数表达式为:

$$p_z(b) = \rho_k g N_\gamma b + QC - 0.5\rho_k g N_\gamma \Delta B \quad (QC = q_k N_q + c_k N_c) \quad (17)$$

为  $b$  的增函数。

#### 2.2.2 $p_v^*(b)$ 的函数表达式

计算面上地基极限承载力竖向合力按下式计算<sup>[1]</sup>:

$$P_z = \sum_{j=1}^M p_{zj} \Delta B \quad (18)$$

当  $\Delta B \rightarrow 0$  时,  $(\Delta B)^2$  是无穷小量, 该项可以忽略, 由式 (17) 和 (18) 得:

$$\begin{aligned}
P_z &= \lim_{\Delta B \rightarrow 0} \sum_{j=1}^M (\rho_k g N_\gamma b_j + QC - 0.5 \rho_k g N_\gamma \Delta B) \Delta B \\
&= \int_0^{B_e} (\rho_k g N_\gamma b + QC) db = 0.5 \rho_k g N_\gamma B_e^2 + B_e QC
\end{aligned}
\tag{19}$$

将式(19)代入预估分项系数 $K^* = P_z / V_d^{[1]}$ 得:

$$K^* = \frac{0.5 \rho_k g N_\gamma B_e^2 + B_e QC}{V_d} \tag{20}$$

当结构确定且为均质土地基时,  $K^*$ 为一个常数。

将式(6)和式(20)代入 $p_{vj}^* = K^* p_{vj}$ , 求得 $p_v^*(b)$ 函数表达式为:

$$p_v^*(b) = K^* p_v(b) = kb + w \tag{21}$$

$$k = -\frac{p_{v2} - p_{v1}}{B_e} K^* \tag{22}$$

$$w = p_{v1}^2 K^* \tag{23}$$

可知 $p_v^*(b)$ 也是一条直线, 为 $b$ 的减函数。

### 2.2.3 $p_z(b)$ 与 $p_v^*(b)$ 的交点横坐标 $b_{交}$

联立式(17)和式(21), 求得直线 $p_z(b)$ 与 $p_v^*(b)$ 的交点横坐标:

$$b_{交} = \frac{w - QC + 0.5 \rho_k g N_\gamma \Delta B}{\rho_k g N_\gamma - k} \tag{24}$$

当 $\Delta B \rightarrow 0$ 时:

$$\lim_{\Delta B \rightarrow 0} b_{交} = \lim_{\Delta B \rightarrow 0} \frac{w - QC + 0.5 \rho_k g N_\gamma \Delta B}{\rho_k g N_\gamma - k} = \frac{w - QC}{\rho_k g N_\gamma - k} \tag{25}$$

将式(7), (20), (22), (23)代入式(25)得,  $\Delta B \rightarrow 0$ 时:

$$b_{交} = 0.5 B_e \tag{26}$$

此时两条曲线交点位于计算面宽度的中点位置, 那么 $p_z(b)$ 和 $p_v(b)$ 存在以下关系:

$$\begin{cases} p_z(b) < K^* p_v(b), b \in [0, 0.5 B_e] \\ p_z(b) > K^* p_v(b), b \in [0.5 B_e, B_e] \end{cases}$$

说明在计算面前趾侧一半宽度范围内荷载设计值超过了地基极限承载能力, 而在后半荷载设计值并没有达到地基极限承载能力。

### 2.2.4 $F_k$ 的求解公式

将式(17), (21), (26)代入式(9), 忽略无穷小量, 得到均布边载、均匀土地基( $\varphi > 0$ )计算面上地基承载力的竖向合力标准值—— $F_k$ 求解公式如下:

$$\begin{aligned}
F_k &= \int_0^{b_{交}} (\rho_k g N_\gamma b + QC) db + \int_{b_{交}}^{B_e} (kb + w) db = \\
&\frac{1}{8} (\rho_k g N_\gamma + 3k) B_e^2 + \frac{1}{2} (QC + w) B_e
\end{aligned}
\tag{27}$$

式中:  $QC = q_k N_q + c_k N_c$

$$k = -\frac{p_{v2} - p_{v1}}{B_e} K^*$$

$$w = p_{v1} K^*$$

$$p_{v1} = \frac{B_1}{B_e} p_1 + \rho g d$$

$$p_{v2} = \frac{B_1}{B_e} p_2 + \rho g d$$

$$K^* = \frac{0.5 \rho_k g N_\gamma B_e^2 + B_e QC}{V_d}$$

$$V_d = V_{ko} + \rho g d B_e$$

$$b_{交} = 0.5 B_e$$

式中:  $\rho_k$ 为地基土体水下密度标准值( $t/m^3$ );  $\rho$ 为抛石基床填料水下密度( $t/m^3$ );  $g$ 为重力加速度( $m/s^2$ );  $c_k$ 为地基土体粘聚力标准值(kPa);  $\varphi_k$ 为地基土体内摩擦角标准值( $^\circ$ );  $q_k$ 为计算面以上边载标准值(kPa);  $N_\gamma$ 为地基土体重力相关承载力系数<sup>[1]</sup>;  $N_c$ 为地基土体粘聚力相关承载力系数<sup>[1]</sup>;  $N_q$ 为地基土体边载相关承载力系数<sup>[1]</sup>;  $B_1$ 为抛石基床顶面的实际受压宽度(m);  $d$ 为抛石基床厚度(m);  $V_{ko}$ 为建筑物底面竖向合力标准值(kN/m)<sup>[2]</sup>。

因此均布边载、均匀土地基( $\varphi > 0$ )计算面上地基承载力的竖向合力标准值可以利用式(27)得到简化计算。当受力层由多层土组成, 各土层的抗剪强度指标相差不大且边载变化不大时, 可采用加权平均的强度指标和密度进行地基承载能力的计算<sup>[1]</sup>。

## 3 简化计算方法的验证

### 3.1 算例结构

1) 结构尺寸。

如图3所示, 结构采用重力式方沉箱结构, 沉箱底高程-15.8 m, 码头顶高程5.0 m。暗基床结构, 基床前回填块石。沉箱主尺度为18.45 m × 15.125 m × 17.8 m(长×宽×高), 趾1.0 m, 箱格尺寸为4.625 m × 4.25 m, 底板厚0.6 m, 前壁厚0.4 m, 其他外壁0.35 m, 隔墙厚0.25 m, 沉箱内回填

10~100 kg块石。沉箱上部现浇钢筋混凝土胸墙, 兼做门机前后轨基础。沉箱后方回填10~100 kg抛

石棱体, 顶高程为2.0 m, 宽9.8 m, 棱体顶部设置倒滤结构, 后回填开山石。

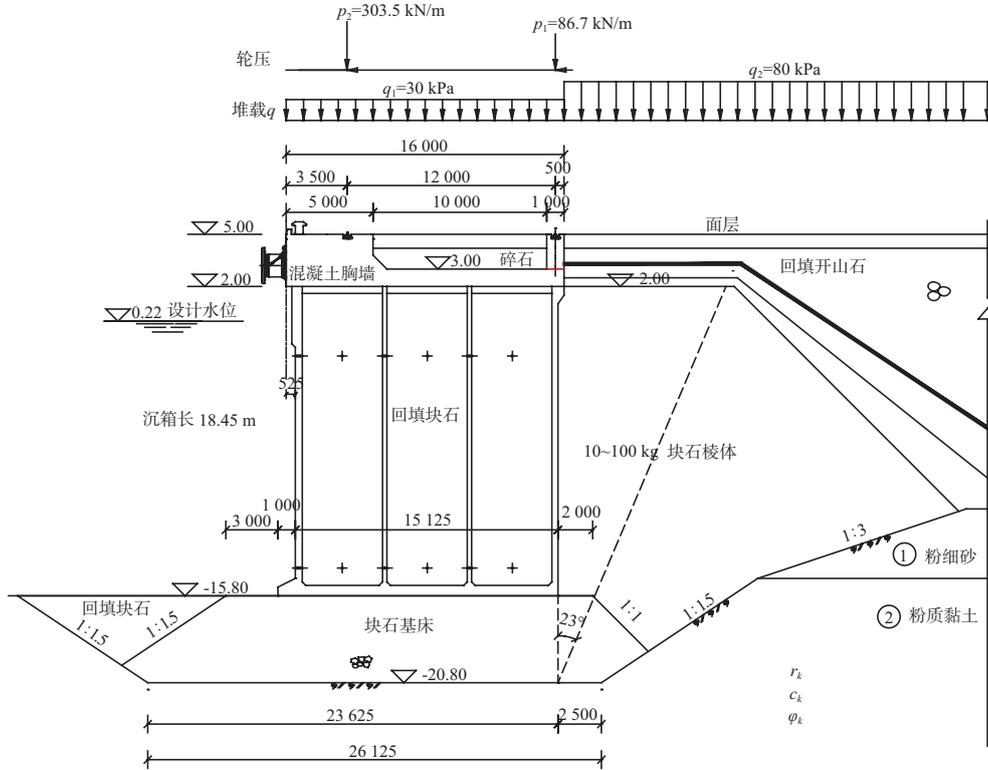


图3 算例结构断面

2) 工程地质。

地基土体从上到下分层依次为①土层、②土层, 其①土层位于沉箱底以上, 予以清除, 基床坐落于②土层, 据经验, 一般土体水下密度变化不大, 故以下各计算中 $\rho_k g$ 取 $9.5 \text{ kN/m}^3$ , 土体直剪固结快剪粘聚力和内摩擦角分别为 $c_k$ 和 $\phi_k$ 。

3) 设计水位。

计算水位采用0.22 m。

4) 荷载。

永久荷载: 结构自重等; 堆货荷载: 后轨向前均载 $q_1=30 \text{ kPa}$ , 向后均载 $q_2=80 \text{ kPa}$ ; 门机轮压: 双机作业, 门机轮压荷载见表1。本次研究, 暂不考虑波浪荷载。

表1 门机轮压荷载折合为线荷载  $p$  kN/m

前轨竖向力	前轨水平力	后轨竖向力	后轨水平力
303.52	30.4	86.72	8.7

注: 垂直轨道水平力按照轮压的10%考虑。

5) 荷载组合。

荷载组合为永久荷载+堆货荷载 ( $q_1+q_2$ ) + 门机轮压。

表2 算例结构基床顶面以上结构作用标准值

$V_k/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_{k0}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$M_R/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	$M_\theta/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1})$
5 229.35	715.09	4 4613.55	7 229.25

3.2 结构作用

结构基床顶面以上沿码头岸线长度方向单位长度承受作用标准值见表2。

3.3 简化计算方法的验证

为验证本文公式求解法, 应用2种方法对以上的结构进行地基承载力的计算。验证算例中各参数取值为 $C_k=20 \text{ kPa}$ ,  $\phi_k=20^\circ$ ,  $\rho_k g=9.5 \text{ kN/m}^3$ , 基床厚度 $d=5.0 \text{ m}$ ; 相关参数计算结果为 $H_k=1 040.87 \text{ kN/m}$ ,  $V_k=6 535.60 \text{ kN/m}$ ,  $V_d=6 535.60 \text{ kN/m}$ ,  $q_k=47.50 \text{ kPa}$ ,  $p_1=214.06 \text{ kPa}$ ,  $p_2=434.54 \text{ kPa}$ ,  $B_1=16.13 \text{ m}$ ,  $B_e=26.13 \text{ m}$ ,  $p_{v1}=182.12 \text{ kPa}$ ,  $p_{v2}=318.21 \text{ kPa}$ ,

$\tan\delta=0.17$ ,  $\lambda=6.66$ ,  $\varepsilon=0.62$ ,  $N_c=10.21$ ,  $N_q=4.71$ ,  $N_r=2.54$ 。

1) 区间总和法。

将基础底计算面划分为  $M=11$  个小区间，

$\Delta B=B_e/M=2.38$  m，将数据代入 JTS 147-1-2010 《港口工程地基规范》公式，计算过程及结果如表3所示。 $Z_{\max}=12.72$  m,  $\sum P_{zj}=19\ 419.0$  kN/m,  $\sum F_{kj}=16\ 067.39$  kN/m。

表3 区间总和法  $F_k$  计算过程及结果

$j$	$b/m$	$P_{zj}/kPa$	$P_{zj}/(kN \cdot m^{-1})$	$K^*$	$p_{vj}/kPa$	$p_{vj}^*/kPa$	$F_{kj}/kN$
	0.00				318.21		
1.00	2.38	456.70	1 084.67	2.97	305.84	927.10	1 084.67
2.00	4.75	514.03	1 220.81	2.97	293.47	890.34	1 220.81
3.00	7.13	571.35	1 356.95	2.97	281.09	853.58	1 356.95
4.00	9.50	628.67	1 493.09	2.97	268.72	816.83	1 493.09
5.00	11.88	685.99	1 629.22	2.97	256.35	780.07	1 629.22
6.00	14.25	743.31	1 765.36	2.97	243.98	743.31	1 765.36
7.00	16.63	800.63	1 901.50	2.97	231.61	706.55	1 678.06
8.00	19.00	857.95	2 037.64	2.97	219.24	669.79	1 590.76
9.00	21.38	915.27	2 173.77	2.97	206.87	633.03	1 503.46
10.00	23.75	972.59	2 309.91	2.97	194.50	596.28	1 416.16
11.00	26.13	1 029.92	2 446.05	2.97	182.12	559.52	1 328.86

2) 公式求解方法。

将数据代入本文提出的公式 (27)， $F_k$  的公式求解过程及结果如表4所示。

表4 公式求解法  $F_k$  计算过程及结果

$QC/kPa$	$K^*$	$k/kPa$	$w/kPa$	$b_{交}/m$	$Z_{\max}/m$	$F_k/(kN \cdot m^{-1})$
428.04	2.97	-15.48	945.48	13.06	12.72	16 039.46

如表3和表4所示，两种方法计算  $F_k$  的结果十分接近，但公式求解方法中间参数少，过程明显较区间总和法简洁明了，易于实现，利于工作效率的提高。

#### 4 结论

1) 利用地基极限承载能力曲线与实际荷载设计值曲线，经公式推导，求得二者的交点横坐标

$b_{交}=0.5B_e$ 。

2) 经公式推导，将 JTS 147-1-2010 《港口工程地基规范》中关于均布边载、均质地基土 ( $\varphi>0$ ) 上的地基承载力计算的区间总和法简化，得到公式求解法。

3) 在结构算例中应用上述2种方法进行地基承载力计算，得到了相近的结果，验证了公式求解方法。公式求解法过程简单明了、易于实现、便于结构方案的比选、利于工作效率的提高。

#### 参考文献:

- [1] JTS 147-1-2010 港口工程地基规范[S].
- [2] JTS 167-2-2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [3] 杨进良. 土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

( 本文编辑 武亚庆 )