

嵌岩桩的碰桩验算及调整优化

寇本川，苏航

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：为有效降低水运工程嵌岩桩设计和施工风险，降低工程造价，基于绘图验算法可以有效确定桩长，结合基于编程的公式验算法可以有效考虑桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差，并求出最短净距及相应的点坐标，从而满足嵌岩桩碰桩验算及调整优化的设计和施工需求，为同类工程计算提供了依据。

关键词：嵌岩桩；碰桩验算；公垂距离；调整优化

中图分类号：U 656.1⁺13 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)12-0153-04

Pile collision calculation and optimization adjustment of rock-socketed pile

KOU Ben-chuan, SU Hang

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

Abstract: To reduce effectively the design and construction risks of rock-socketed piles in port and waterway engineering and save the engineering cost, we can determine the pile length by the graphic checking method, and obtain the minimum distance and corresponding coordinate of points considering the deviation of pile top, the inclination angle and torsional angle of the longitudinal axis by the formula checking method based on programming, thus to meet the design and construction demands of pile calculation and optimization adjustment of rock-socketed piles.

Keywords: rock-socketed pile; pile collision calculation; minimum distance; optimization adjustment

1 工程概况

1.1 设计方案

某工程建设规模为 30 万 DWT 铁矿石接卸泊位 1 个，考虑码头结构远期发展并充分利用优越的水深条件，码头结构按靠泊 40 万 DWT 散货船设计。码头前沿设计底高程为 -28.00 m，码头面高程为 5.50 m。

码头结构总长 420 m，采用高桩梁板结构形式，共分为 7 个结构段，第 1~3 结构段结构宽度为 39.00 m，第 4~7 结构段结构宽度为 79.70 m。第 1 结构段设 4 榀排架，排架间距 7.40 m；第 2 结构段设 7 榀排架，排架间距 8.00 m；第 3~7 结构

段设 9 榀排架，排架间距 8.00 m。

码头第 1~7 结构段每榀横向排架前桩台下共布置 8 根钢管桩，采用部分嵌岩桩设计：前轨下布置 2 根 $\phi 1\ 400$ 直桩，坡度为 20:1；中轨下布置 2 根 $\phi 1\ 400$ 斜桩，坡度为 5:1；排水沟梁下布置 2 根 $\phi 1\ 400$ 斜桩，坡度为 5:1；后轨下布置 2 根 $\phi 1\ 400$ 直桩，坡度为 20:1；第 4~7 结构段布置后桩台，后桩台下布置 5 根 $\phi 900$ 直桩。共计 448 根 $\phi 1\ 400$ 钢管桩，180 根 $\phi 900$ 钢管桩，其中 210 根为 $\phi 1\ 400$ 嵌岩桩。 $\phi 1\ 400$ 嵌岩桩采用 $\phi 1\ 200$ 芯柱嵌岩，钢筋混凝土芯柱嵌入中风化岩 4.0 m，并伸入桩底以上 6 m。

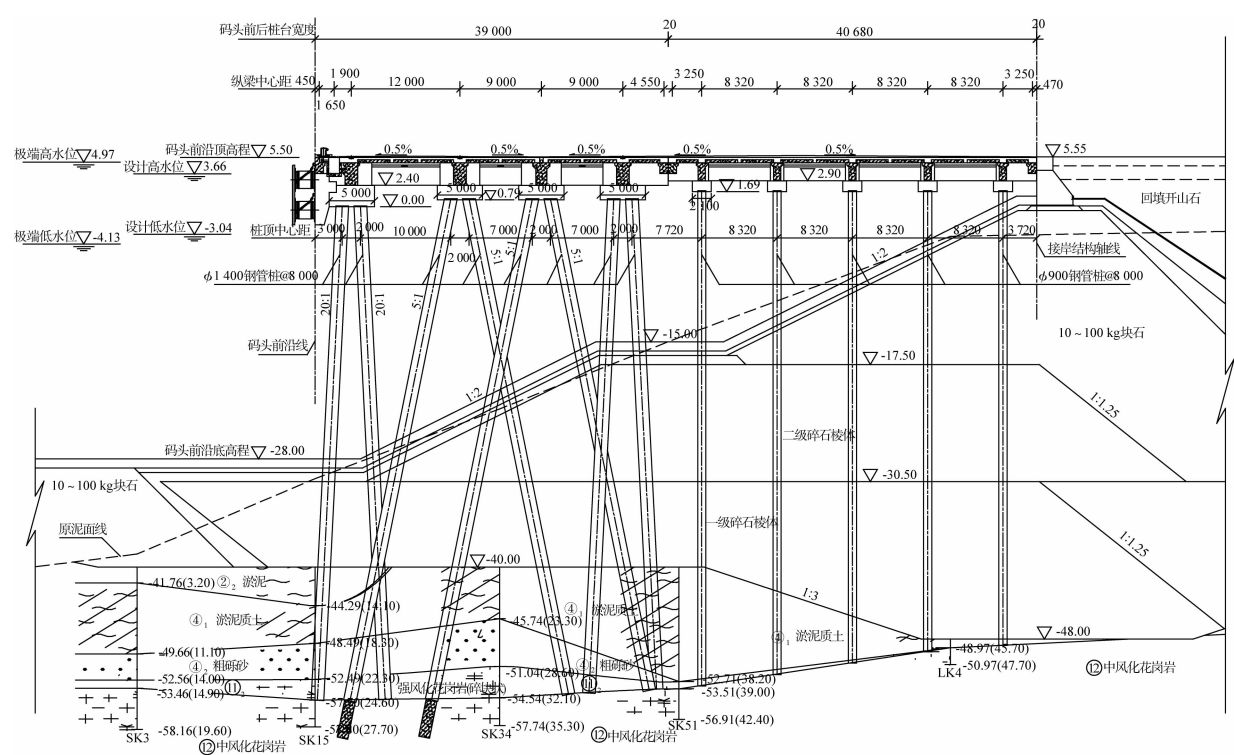


图 1 码头结构断面

1.2 地形地貌及地质

拟建场地处于陆域向海域过渡地带，场地西南侧、西北侧为陆地，东侧连北侧为海域。海域主要为海滩沉积地貌。场地地势总体呈西南高、东北低，从陆域向海域倾斜，地形起伏变化大。海域地段勘探点孔口地面高程变化在 -40.53 ~ 1.63 m，陆域区勘探点孔口地面高程变化在 1.08 ~ 48.87 m。

拟建港区地层上部主要为海相沉积、陆相冲洪积层，底部为燕山晚期钾长花岗岩风化带，局部地表部分有薄层素填土。场地岩土层按其成因及力学强度不同分为 12 个工程地质层，水域主要岩土层自上而下分别为：②₂淤泥、③₁黏土、③₃卵石、④₁淤泥质黏土、④₂粗砾砂、⑪₁强风化花岗岩（砂土状）、⑪₂强风化花岗岩（碎块状）、⑫中-微风化花岗岩。其中地勘范围内水域⑫中-微风化花岗岩岩面高程为 -69.10 ~ -7.50 m。

1.3 嵌岩桩的设计难点

- 1) 码头前沿线区域⑫中-微风化花岗岩岩面高差大，桩长难以确定；
- 2) 相邻排架间距 8.00 m，斜桩桩长较长（最长约 76 m），易发生碰桩；

3) 水上沉桩存在桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差，碰桩验算时需综合考虑。其中钢管桩在有掩护水域，水上沉桩桩顶允许偏差为：直桩 100 mm、斜桩 150 mm；桩的纵轴线倾斜度偏差不宜大于 1%^[1]；扭角偏差按 ±1°考虑。

2 碰桩验算方法

2.1 绘图验算法

基于 AutoCAD 计算机辅助设计软件进行三维建模，通过导入地质勘察数据建立岩面图层，可以确定嵌岩桩的桩长，同时也可绘制桩基的三维模型来验算碰桩的可能性^[2]。建模思路如下：

- 1) 在原总平面布置图坐标系中，通过“cylinder”命令绘制桩基，其中桩顶以实际高程为准，桩长暂按 100 m 考虑（图 2）；
- 2) 整理地质勘察报告中的钻孔数据，重点关注⑫中-微风化花岗岩层（嵌岩段底高程可将高程点 Z 坐标减去嵌岩段的长度），通过克里金插值法将高程点间距由 20 ~ 70 m 加密至 5 m；
- 3) 将加密点连接成二维网格，并通过“convtosurface”命令转化为曲面（图 3、4）；

4) 通过“slice”命令用曲面切割圆柱体, 从而得出含嵌岩段桩基的长度;

5) 通过“interfere”命令检查是否出现碰桩(图 5)。

通过以上方法可以求得嵌岩桩的桩长, 并可检查一定条件下的碰桩情况, 但是对于桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差, 以上方法有较强的局限性。

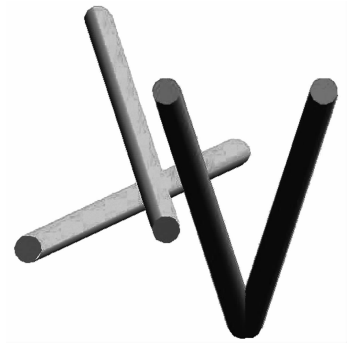


图 2 桩基绘制平面图

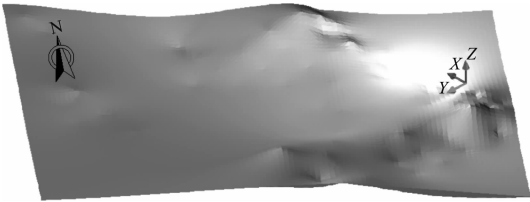


图 3 ⑫中-微风化花岗岩岩层效果

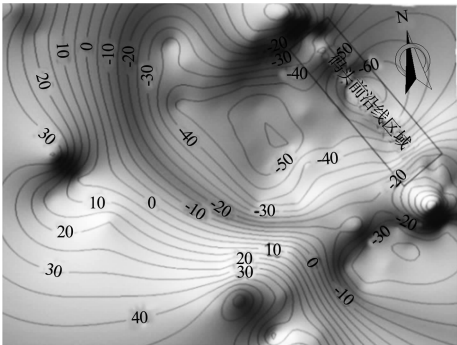


图 4 ⑫中-微风化花岗岩岩层等值线 (单位: m)

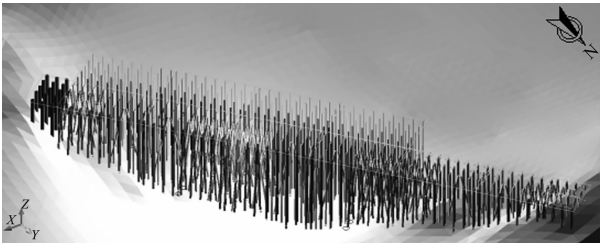


图 5 桩基布置三维效果

2.2 公式验算法

考虑一般情况下两根斜桩的碰桩验算, 将桩基简化为轴心直线, 则求两桩之间的最短净距可简化为求空间两条直线的公垂距离^[3]。依据已知条件, 即轴线顶坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) , 坡度分别为 $n_1:1$ 和 $n_2:2$, 平面扭角分别为 α_1 和 α_2 , 桩径分别为 d_1 和 d_2 , 桩长分别为 l_1 和 l_2 。假设轴线底坐标分别为 (x_a, y_a, z_a) 和 (x_b, y_b, z_b) , 则轴线的空间参数方程为:

$$\begin{cases} x_a = x_1 + (z_1 - z_a) \cos\alpha_1/n_1 \\ y_a = y_1 + (z_1 - z_a) \sin\alpha_1/n_1 \\ z_a = z_a \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} x_b = x_2 + (z_2 - z_b) \cos\alpha_2/n_2 \\ y_b = y_2 + (z_2 - z_b) \sin\alpha_2/n_2 \\ z_b = z_b \end{cases} \tag{2}$$

空间两点的距离为

$$S = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \tag{3}$$

将方程组(1)和(2)代入(3), 分别对 z_a 和 z_b 求导。

在空间直线公垂距离处 S 存在最小值, 即

$$\frac{\partial S}{\partial z_a} = 0 \tag{4}$$

与

$$\frac{\partial S}{\partial z_b} = 0 \tag{5}$$

联立方程组(4)和(5)即可求得 z_a 和 z_b 。

检查 z_a 和 z_b 是否在桩长范围内: 1) 若 z_a 和 z_b 均在轴线上, 可直接求得公垂距离 S ; 2) 若 z_a 和 z_b 仅存在一个, 公垂距离 S 为存在计算点与另一条轴线端点的距离; 3) 若 z_a 和 z_b 均不存在, 公垂距离 S 为两条轴线端点的距离。直桩与直桩、直桩与斜桩之间的公垂距离可参照以上轴线的空间参数方程进行简化计算。

本方法手工计算工作量大, 同时也难以全面考虑桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差, 因此需要改进。

2.3 基于编程的公式验算法

结合数学计算软件进行编程设计, 依据上节

给出的公式,结合桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差,可快速求得公垂距离及相应的点^[4]。编程思路如下:

- 1) 定义并给出相关计算参数: x_1 、 y_1 、 z_1 、 x_2 、 y_2 、 z_2 、 n_1 、 n_2 、 α_1 、 α_2 、 d_1 、 d_2 、 l_1 、 l_2 ;
- 2) 定义取值范围: $x_1 \in (x_1 - 0.15, x_1 + 0.15)$, $y_1 \in (y_1 - 0.15, y_1 + 0.15)$, $x_2 \in (x_2 - 0.15, x_2 + 0.15)$, $y_2 \in (y_2 - 0.15, y_2 + 0.15)$, $1/n_1 \in (1/n_1 \times 0.99, 1/n_1 \times 1.01)$, $1/n_2 \in (1/n_2 \times 0.99, 1/n_2 \times 1.01)$, $\alpha_1 \in (\alpha_1 - 1, \alpha_1 + 1)$, $\alpha_2 \in (\alpha_2 - 1, \alpha_2 + 1)$;
- 3) 选取初始值,依据桩长 l_1 和 l_2 求解出相应轴线底坐标 z'_1 , z'_2 ;
- 4) 联立方程组(4)和(5),求解得出 z_a 和 z_b ;
- 5) 判断 z_a 和 z_b 是否分别属于 (z'_1, z_1) 和

(z'_2, z_2) ,依据上节的判断条件求解出公垂距离 S ,建立相应的矩阵存储计算结果;

- 6) 若 $S - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2} - e \leq 0$, 停止下一步计算,直接进入第 8) 步, 否则进入第 7) 步;
- 7) 改变初始值,循环 3) ~ 6) 的计算过程;
- 8) 判断矩阵中 S 的最小值,并输出相应的计算参数。

注: 允许的桩间最小安全距离 $e = (2 \sim 3)d^{[5]}$ 。

3 碰桩验算结果及调整优化

3.1 计算结果汇总

选取两组嵌岩桩进行碰桩验算及调整优化(表 1)。

表 1 嵌岩桩碰桩验算结果及调整优化												
编号	验算桩号	桩顶坐标/m			桩底坐标/m			桩长 l_i /m	桩半径 r_i /m	坡度 n_i	平面扭角 $\alpha_i/(^\circ)$	
		x_{1i}	y_{1i}	z_{1i}	x_{2i}	y_{2i}	z_{2i}					
1	B1-25	263.00	15.00	0.89	258.66	2.39	-65.79	68.00	0.70	5.00	251.00	
	B1-26	255.00	15.00	0.89	258.45	4.37	-66.18	68.00	0.70	6.00	288.00	
2	B1-25	263.00	15.00	0.89	258.66	2.39	-65.79	68.00	0.70	5.00	251.00	
	B1-26	255.00	15.00	0.89	263.31	7.52	-66.18	68.00	0.70	6.00	318.00	
3	B2-26	255.00	17.00	0.89	250.82	29.87	-66.77	69.00	0.70	5.00	108.00	
	B-27a	248.00	16.00	0.89	259.91	21.55	-64.81	67.00	0.70	5.00	25.00	
允许偏差		允许偏差时公垂距离计算参数						最短净距/m		不考虑安全距离时结论		说明
偏位 Δe_i /m	扭角 $\Delta \alpha_i/(^\circ)$	斜率 $\Delta l/n_i$	x_i	y_i	z_i	n_i	α_i	正位	允许偏差	正位	允许偏差	
0.15	1.00	0.01	258.55	3.34	-62.56	4.95	250.00	0.60	0.00	不碰桩	碰桩	优化调整前
0.15	1.00	0.01	258.28	4.60	-62.77	5.94	287.00					
0.15	1.00	0.01	260.37	8.02	-35.07	4.95	250.00	1.60	0.99	不碰桩	不碰桩	优化调整后
0.15	1.00	0.01	259.60	10.70	-35.26	5.94	317.00					
0.15	1.00	0.01	253.42	21.01	-21.35	5.05	109.00	2.27	1.71	不碰桩	不碰桩	不需优化调整
0.15	1.00	0.01	252.27	18.16	-21.81	4.95	26.00					

综上,在不考虑允许的桩间最小安全距离 e 的情况下,桩号 B1-25 和桩号 B1-26 的碰桩验算在不考虑偏差时,最短净距为 0.60 m,不碰桩;考虑偏差时,最短净距为 0.00 m,发生碰桩。经过调整优化,B1-26 扭角增加 30° ,两桩在考虑偏差时,最短净距为 0.99 m,不发生碰桩。

3.2 验算方法优缺点比较

各种验算方法优缺点比较见表 2。

表 2 验算方法优缺点比较			
编号	方法	优点	缺点
1	绘图验算法	形象、直观;可依据岩层高程,直接求出桩长	难以全面考虑桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差;无法求出公垂距离
2	公式验算法	可求出公垂距离	难以全面考虑桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差;需要在给定桩长的情况下计算
3	基于编程的公式验算法	可求出公垂距离;可全面考虑桩顶允许偏差、纵轴线倾斜度偏差和扭角偏差	需要在给定桩长的情况下计算

(下转第 160 页)