



考虑后期维护费用的高桩码头结构优化

卓文雅, 尹 涛, 李荣庆

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 高桩码头建成后, 受水工结构桩基的影响, 水动力条件发生变化, 部分地区码头面下部泥沙淤积较为严重。为保证码头结构安全, 码头下方和后方在后期需要定期疏浚, 维护困难且费用较高。为使工程初期投入和后期维护成本达到最优, 考虑桩基与土之间的相互作用, 采用三维实体有限元分析方法, 结合某工程实例分析了泥沙淤积对码头基桩的影响。根据分析结果和结构受力特点, 针对不同结构方案进行了优化计算和成本分析。分析表明: 桩顶弯矩较大的向岸基桩采用钢管桩、其余基桩采用混凝土大管桩组合桩, 工程初期投入和维护成本最优。

关键词: 淤积; 高桩码头; 不同桩型; 桩芯混凝土

中图分类号: U 656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0194-05

Structural optimization of high-piled wharf considering maintenance cost in later period

ZHUO Wen-ya, YIN Tao, LI Rong-qing

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

Abstract: After the construction of high-piled wharf, due to the influence of the pile foundation of the hydraulic structure, the hydrodynamic conditions have changed, and the sediment deposition of the lower part of the wharf surface in some areas is serious. To ensure the safety of the wharf structure, the bottom and rear of the wharf need to be maintained by dredging regularly in the later stage, which is difficult to maintain and expensive. To optimize the initial investment and later maintenance cost of the project, taking into account the interaction between the pile and the soil is considered, and the 3D solid finite element analysis method is used to analyze the impact of sedimentation around the wharf foundation piles based on an engineering example. The optimization calculation and cost analysis are carried out for different structural schemes based on the analysis results and structural force characteristics. The analysis shows that the initial investment and maintenance cost of the project are optimal when steel pipe piles are used for the shoreward raking piles with large pile top bending moment and concrete large pipe pile combination piles are used for the rest of the foundation piles.

Keywords: sediment deposition; pile-supported wharf; different pile types; pile core concrete

高桩码头建成后, 受水工结构桩基的影响, 水动力条件发生变化, 部分地区码头面下部泥沙淤积较为严重。码头下回淤泥沙产生的土压力作用在码头桩基上, 使桩基产生较大弯矩及变形, 严重影响码头结构的安全。为保证码头结构安全, 码头下方和后方在后期需要定期疏浚, 目前码头平台下采用的清淤技术不成熟、费用高。为使工

程初期投入和后期维护成本达到最优, 结合某工程实例, 采用三维实体有限元分析方法, 考虑桩基与土之间的相互作用, 分析了泥沙淤积对码头基桩的影响^[1-3], 根据分析结果和结构受力特点, 针对不同结构方案进行了优化计算和成本分析。分析表明, 对桩顶弯矩较大的向岸基桩采用钢管桩、其余基桩采用混凝土大管桩组合桩时, 工程

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 卓文雅(1978—), 女, 高级工程师, 从事港口工程结构设计工作。

表 1 土参数

层号	岩土名称	天然含水量 ω /%	密度/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	土粒比重 G_s	饱和度 S_r /%	天然孔隙比 e	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}$ / MPa^{-1}	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ / MPa	直剪				标贯击数 N / [击/ (30 cm) $^{-1}$]
													快剪		固快		
													内摩 擦角 φ_q / (°)	黏聚 力 C_q / kPa	内摩 擦角 φ_c / (°)	黏聚 力 C_c / kPa	
① _{2a}	淤泥	61.7	1.65	2.74	100.0	1.709	40.8	22.8	17.9	2.11	1.385	1.95	2.2	6.8	8.4	13.7	—
① ₂	淤泥质 粉质黏土	41.8	1.81	2.72	100.0	1.128	33.5	20.5	13.2	1.69	0.709	3.10	3.3	7.7	10.4	14.5	—
① ₃	粉砂	26.2	1.96	2.69	93.9	0.754	—	—	—	—	0.149	11.87	31.3	4.9	33.6	4.2	11.8
② ₁	淤泥质 粉质黏土	37.6	1.84	2.73	97.3	1.035	33.2	19.0	14.3	1.28	0.601	3.42	3.9	7.8	11.1	14.6	—

根据对工程区开展的潮流泥沙三维模型试验研究报告，桩基码头建设引起流速降低是该区域泥沙强淤的主要原因。码头前沿的复杂回流使得悬沙由湾外向湾内输送，桩基局部产生更大的悬沙落淤。码头后沿的大幅回淤使得码头前后沿断面坡度加大，并可能由于边坡不稳定导致岸滩坍塌滑坡导致码头后沿泥沙进入港池。

码头建成后 2009 年 10 月—2010 年 4 月半年时间内，一阶段码头前沿回淤 1~4 m，主要回淤段位于码头北侧 350 m 范围，宽度大约距离码头前沿30 m 之内，见图 2。一阶段码头工程实施以后在码头桩基局部产生了明显的回淤，最大淤积强度在5.5 m/a 以上。码头前沿港池淤积强度在 0.8~2.2 m/a。码头后侧栈桥区也有 1.2 m/a 左右的回淤。

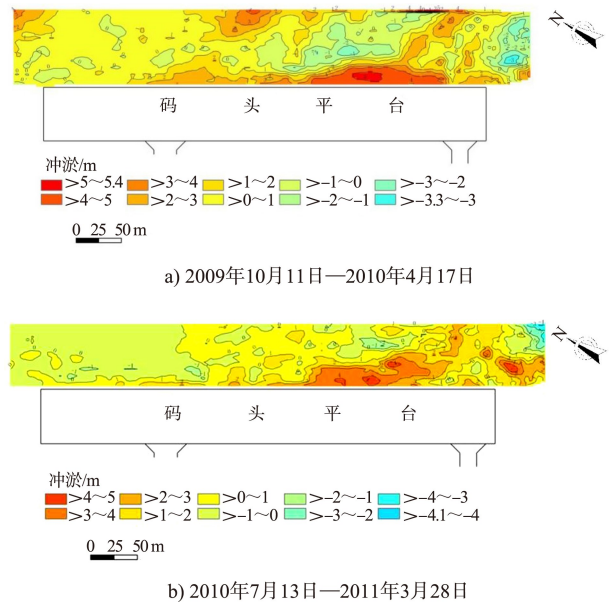


图 2 地形冲淤

对比码头平台下部桩群区域 2007 年 4 月测图至建成后 2011 年 6 月测图，码头平台下桩群回淤 10~14 m，主要位于一期工程码头中部，整体形态呈马鞍形，坡度约 1:2。码头后方引桥区水域平均回淤 3~4 m。见图 3。

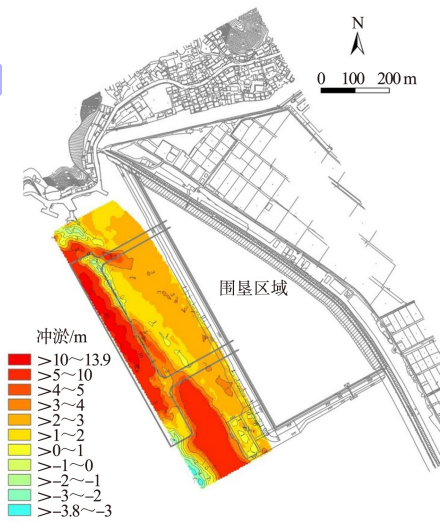


图 3 2007 年 6 月—2011 年 6 月码头桩群的冲淤分布

3 结构优化方案

一阶段码头下方淤积较为严重，由于及时采取了疏浚措施，尚未发现大管桩出现裂缝。为防患于未然且减少疏浚困难及费用，对二阶段码头结构进行优化。

采用 ADINA 有限元分析软件计算土压力作用下的码头结构内力，采用 STAAD 有限元结构分析与设计软件进行除土压力作用外的码头结构内力计算，并将两种计算结果在各种工况下进行作用效应组合^[4-5]。码头-地基三维有限元模型见图 4。

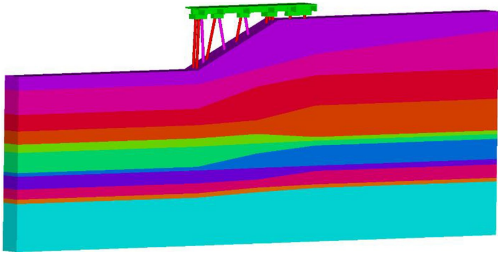


图 4 码头-地基三维有限元模型

针对以下 3 种工况进行了计算分析：1) 工况 1。码头前沿水深-18.00 m，边坡坡度 1:2，码头下方泥面高程 2.00 m。2) 工况 2。码头前沿水深-18.00 m，边坡坡度 1:3，码头下方泥面高程 2.00 m。3) 工况 3。码头前沿水深-18.00 m，边坡坡度 1:3，码头下方泥面高程 0.00 m。先对不换钢管桩结构进行计算分析，结果见表 2。

表 2 大管桩方案验算结果

状态	工况	位置	弯矩作用效应/结构抗力/%											
			a-A	b-A	B	C	D	E	F	G	a-H	b-H	J	K
正常使用极限状态	1	桩顶	35	35	40	30	59	20	107	40	92	92	67	74
		桩中	34	35	44	43	63	63	65	43	49	48	30	26
	2	桩顶	35	34	39	36	57	41	105	51	87	87	77	86
		桩中	26	24	24	34	44	52	54	49	60	59	56	48
	3	桩顶	32	31	37	32	53	36	99	47	83	83	76	88
		桩中	27	27	25	34	45	52	52	45	53	53	46	38
承载能力极限状态	1	桩顶	73	88	77	45	69	35	107	61	106	106	104	105
		桩中	72	79	108	66	97	81	85	62	69	70	56	45
	2	桩顶	71	74	82	51	74	54	106	76	104	104	118	121
		桩中	55	56	71	50	77	67	79	70	94	95	93	75
	3	桩顶	68	71	80	46	71	48	99	70	99	99	100	100
		桩中	60	64	72	50	76	66	77	65	83	84	79	62

计算发现，全部采用大管桩时，边坡坡度 1:3 淤积至 0 m 时可满足要求，边坡坡度 1:3 淤积至 2 m 和边坡坡度 1:2 淤积至 2 m 均不满足要求。

将 D 轴和 F 轴桩换为 20 mm 厚、直径 1 200 mm 钢管桩(桩顶至嵌固点灌注混凝土)后的计算结果表

明，边坡坡度 1:3 淤积至 2 m 时满足设计要求，边坡坡度 1:2 淤积至 2 m 时，B 轴桩仍不满足要求。

优化方案将 B、D、F 轴桩换为 20 mm 厚、直径 1 200 mm 钢管桩(桩顶至嵌固点灌注混凝土)，计算结果见表 3。

表 3 极限状态验算结果

状态	边坡坡度	泥面高程/m	位置	作用效应/结构抗力/%											
				a-A	b-A	B	C	D	E	F	G	a-H	b-H	J	K
持久状况正常使用	1:2	2	桩顶	33	33	-	22	-	3	-	5	71	73	48	53
			桩中	32	34	-	39	-	56	-	36	41	41	25	13
	1:2	0	桩顶	28	28	-	18	-	1	-	17	71	73	54	63
			桩中	33	34	-	39	-	54	-	29	33	32	16	24
持久状况承载能力	1:2	2	桩顶	62	65	71	37	48	56	63	69	90	90	83	82
			桩中	63	67	79	58	59	75	55	56	58	58	50	31
	1:2	0	桩顶	60	63	69	33	45	60	61	71	90	91	93	94
			桩中	66	70	78	60	57	74	48	50	50	50	41	45
地震状况承载能力	1:2	2	桩顶	35	38	53	30	45	57	73	96	97	97	60	71
			桩中	57	61	75	85	47	54	60	63	49	51	78	63

分析得出, B、D、F 轴大管桩换成钢管桩后, 边坡坡度 1:2 淤积至高程 0 m 和 2 m 时, 满足设计要求。

换 3 根钢管桩后, 为确定合理的混凝土灌注长度, 对不灌注混凝土和灌注混凝土至原泥面两种情况进行计算。结果表明, 当不灌注混凝土时, 由于直径 1 200 mm 钢管桩抗弯刚度小于大管桩, 陆侧 4 根大管桩将承受较大外力, 均不满足设计要求; 当钢管桩内灌注混凝土至原泥面时, 钢管桩抗弯刚度增加, 承受较大外力, 同时其他大管桩均满足设计要求。

如不采用灌注混凝土的措施, 经计算分析, 需要采用桩径 1 600 mm、有效壁厚 16 mm 的钢管桩方可满足设计要求。

4 经济性分析

分别对原施工图方案及优化方案的基桩、疏浚内容进行技术经济比较, 同时计算优化方案采用直径 1 600 mm 钢管桩、桩内不灌注混凝土方案的工程费用。根据泥沙淤积分析, 疏浚范围定为码头后沿 50 m, 疏浚频率为 1 次/a, 深度为 2 m/次。根据一阶段的淤积情况, 疏浚年限定为 20 a。

原施工图方案 D1200B32-2 预应力混凝土组合管桩 1 209 根, 工程费用 1.764 0 亿元, 20 a 疏浚费用 7 569 万元, 总计 2.520 9 亿元。

优化方案 D1200B32-2 预应力混凝土组合管桩 858 根、钢管桩 300 根, 结构工程费用为 2.032 4 亿元。如采用直径 1 600 mm 钢管桩, 结构工程费用 2.217 2 亿元, 无疏浚。

经比较, 优化方案比原施工方案基桩费用增加 2 684 万元, 由于无疏浚费用, 总体节省了 4 885 万元。如采用直径 1 600 mm 钢管桩方案, 增加费用 4 532 万元, 总体节省 3 037 万元。

5 结论

1) 根据其他码头多年的使用情况, 码头底下泥沙淤积超过边坡坡度 1:2 的情况发生概率很低, 同时, 根据相关研究表明水下土体本身在大于 1:2 的坡度下会失稳, 群桩效应下土体边坡坡度是否会大于 1:2 也有待研究, 建议在后期运行中加强观测, 及时开展分析研究。

2) 采用原施工方案(大管桩方案)时, 自码头前沿泥面以边坡坡度 1:3 向后淤积至高程 0 m 以下, 码头结构是安全的。运营时应对应水深定期进行观测, 在边坡坡度达到 1:3 向后淤积至高程 0 m 前及时进行疏浚, 确保码头结构的安全。根据泥沙淤积分析, 疏浚范围定为码头后沿 50 m, 疏浚频率为 1 次/a, 浚深为 2 m/次。

3) 采用优化方案(换 3 根钢管桩)时, 自码头前沿泥面以边坡坡度 1:2 向后淤积至高程 2 m 以下, 码头结构是安全的。优化后的码头结构安全适用、经济合理, 可以降低运营维护难度及减少后期疏浚费用。

参考文献:

- [1] 李荣庆, 侯永为. 考虑泥沙淤积影响的高桩码头三维有限元分析[J]. 水运工程, 2016(10): 95-99.
- [2] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法: NL 法[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 97-101.
- [3] 崔新壮, 丁桦, 金青, 等. 刚性桩横向承载力的三维极限分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 641-646.
- [4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] 交通部第三航务工程局科学研究所. 港口工程预应力混凝土大直径管桩设计与施工规程: JTJ/T 261—1997[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

(本文编辑 武亚庆)