



白茆沙持续冲刷对鑫海码头的 结构安全影响^{*}

谢华伟^{1,3}, 于传见², 杨斌^{1,3}

(1. 浙江水利水电学院 水利与环境工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

3. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 由于鑫海码头前沿区域水流冲刷严重, 水下泥面高程已低于竣工时的状况, 需对码头结构安全及岸坡稳定进行重新评估。通过对水下岸坡的地形监测, 得到桩基的冲刷深度。根据相关规范要求, 对码头上部结构承载力、桩基承载力、岸坡稳定等指标进行复核验算。结果显示结构安全性各项指标符合规范要求, 但桩身拉应力已接近极限值, 如冲刷深度进一步加深, 将对码头的结构安全产生威胁。综合考虑后, 采用联锁块软体排+抛石的方案来保护岸坡。

关键词: 冲刷; 码头结构; 桩基承载力; 安全复核

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0067-06

Influence of continuous scouring by Baimao sand on the structural safety of Xinhai Wharf

XIE Hua-wei^{1,3}, YU Chuan-jian², YANG Bin^{1,3}

(1. School of Water Conservancy & Environment Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

3. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Due to the serious scouring of water flow in the front area of Xinhai Wharf, the underwater mud surface elevation has been lower than the condition at the time of completion. Thus, it is necessary to reassess the structural safety of the wharf and the stability of the bank slope. The scour depth of the pile foundation is obtained by monitoring the topography of the underwater bank slope. According to the requirements of relevant specifications, the bearing capacity of the upper structure of the wharf, the bearing capacity of the pile foundation and the stability of the bank slope shall be rechecked and calculated. The results show that all indicators of structural safety meet the requirements of the specifications. However, the tensile stress of the pile body is close to the limit value. If the scour depth further increases, it will threaten the structural safety of the wharf. After comprehensive consideration, the scheme of the soft mattress of interlocking blocks and riprap is adopted to protect the bank slope.

Keywords: scouring; wharf structure; bearing capacity of pile foundation; safety recheck

长江下游航道水下地形复杂多变, 岸坡冲刷变化频繁。根据多年监测结果显示, 白茆沙水道

“南强北弱”态势持续增强^[1], 南水道整体上以冲刷为主^[2-3], 深水航道南岸近岸区域冲刷明显,

收稿日期: 2021-09-30

*基金项目: 浙江省高校国内访问学者“教师专业发展项目”(FX2018075); 浙江省水利厅科技项目(RC2005)

作者简介: 谢华伟(1983—), 男, 硕士, 讲师, 从事河流海岸动力学及泥沙运动方向研究。

已严重威胁到码头水下岸坡稳定及主体结构的安全^[4]。为了全面掌握码头结构的健康状况,根据水运工程的相关行业技术规范^[5-7],需对码头岸坡的水下地形进行重新测量,以分析码头区的冲淤情况;并根据前期设计、竣工资料,对码头的上部结构构件、桩基的承载力和整体稳定性进行复核计算,确认码头在受水流冲刷后是否满足安全性要求,为下一步实施维修加固提供决策依据^[8-10]。

本文依据相关规范要求,对太仓港受冲刷影响较为严重的鑫海码头进行安全影响复核。对于码头结构安全性、岸坡稳定性不满足要求的,提出修复、加固等治理建议,可为该类工程安全复核提供一定的借鉴。

1 工程概况

1.1 码头概况

太仓港古称浏家港,于20世纪90年代建港,

目前共有鹿河、新泾、荡茜、浮桥、茜泾5个作业区,已初步形成以浮桥作业区集装箱运输为核心,矿石、煤炭等散货运输为重点,并相应发展石化特色中转和为临港工业服务的货主及商贸码头相结合的总体格局。至2018年底,港区共有生产性泊位82个,总长度14.327 km,散货、件杂货通过能力为1.1亿t,集装箱通过能力445万TEU。

太仓港受冲刷码头主要位于新泾与荡茜作业区,自上游向下游分别为鑫海码头(原美锦码头)、万方码头、润禾码头、武港码头、华能港务码头和华能电厂码头。本次结构安全影响分析对象为上游鑫海集装箱码头,其泊位基本情况见表1,设计断面见图1、2。

表1 鑫海码头1#~3#、5#泊位基本情况

泊位名称	泊位长度/m	泊位等级/万DWT	投产年份	PHC桩基/mm
1#~3#	775	10	2003	1 000
5#	310	10	2012	1 000

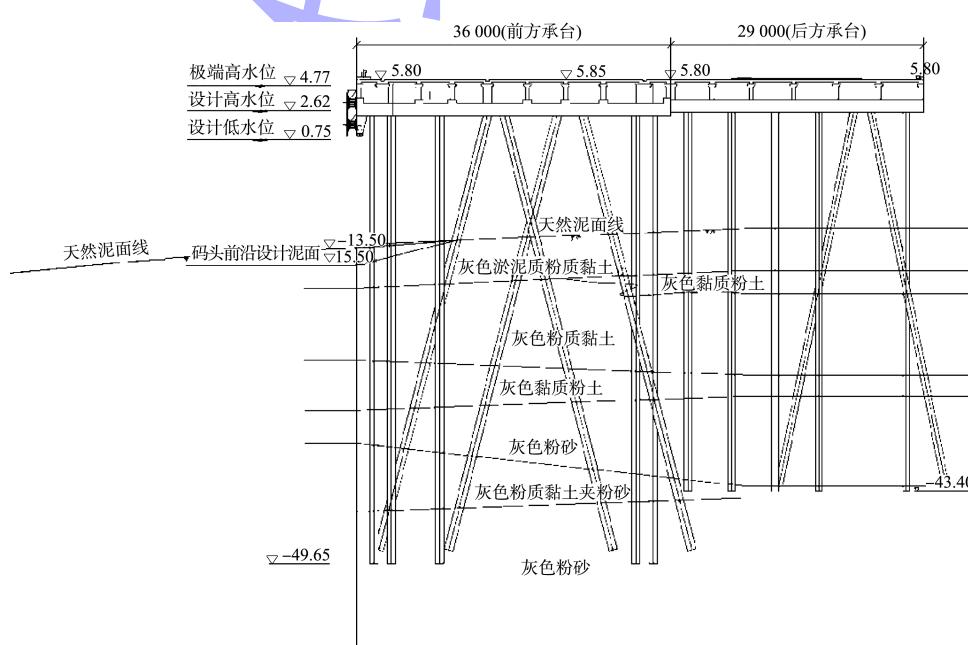


图1 鑫海码头1#~3#泊位断面(尺寸:mm;高程:m)

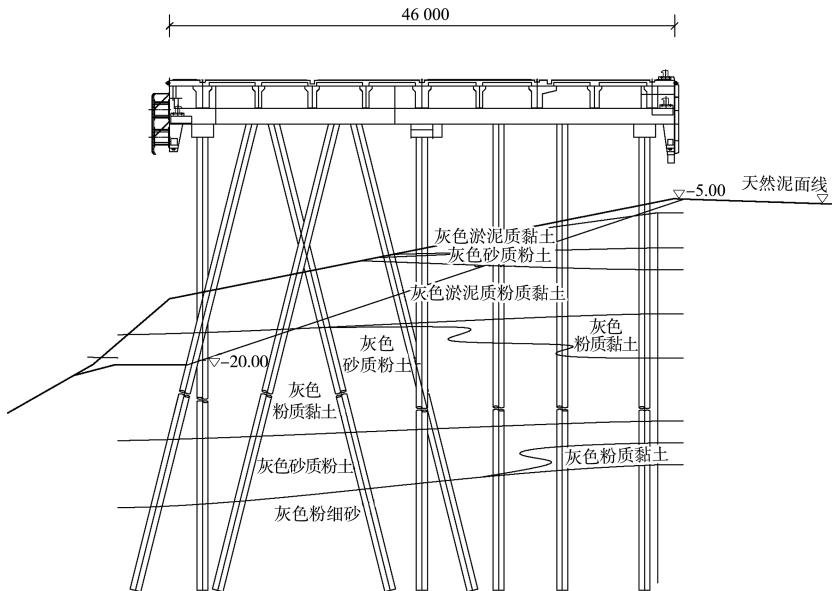


图 2 鑫海码头 5#泊位断面 (尺寸: mm; 高程: m)

1.2 水文、地质条件

白茆沙河段北水道落潮为优势流, 落潮流大于涨潮流, 平均流速比约为 $v_{\text{涨}}/v_{\text{落}} = 0.75$; 南水道在中枯水时涨潮流大于落潮流, 平均流速比约为 $v_{\text{涨}}/v_{\text{落}} = 1.5$ 。大洪水情况下南水道表现为落潮流大于涨潮流, 流速比约为 $v_{\text{涨}}/v_{\text{落}} = 0.8^{[11]}$ 。根据实测资料分析, 2002—2020 年南水道分流比总体增长约 14%。其中 2018 年 8 月南水道落潮分流比达到了 73%, 2020 年 8 月更是达到了 74.6% 的历史高值, 南强北弱的分流格局愈加明显^[12-14]。

根据最新勘测资料, 工程区勘探范围内揭露的地层属于第四系全新统海陆交互的松散堆积物, 由松散、稍密-中密状的粉细砂、软塑、流塑状的淤泥、淤泥质粉质黏土、淤泥质粉质黏土夹砂为主组成。由于靠近入海口, 受潮水影响, 沉积物杂乱、规律性差, 相变大, 粉细砂和淤泥质土多呈相互交错或互层状分布。

工程河段地处长江入海口三角洲地带, 受河流冲积作用和滨海沉积作用的共同影响, 地貌分区属滨海冲积平原区长江水下江心洲。太仓—南通河段水域宽阔, 长江河床宽为 5~12 km, 水下地势起伏较大, 各江心沙洲较高, 各江心沙洲之间夹槽较低, 泥面高程为 -14~1 m, 最深可达 -70~-50 m。

2 冲淤变化影响

2.1 河势影响分析

白茆沙水道上游起于常熟徐六泾, 下至太仓七丫口, 全长约 33 km。江中的白茆沙和小白茆沙属暗沙, 高潮时被淹没, 低潮时部分露出水面。白茆沙形成后快速淤大, 至 1992 年达到最大值 33.8 km²; 1992 年后, 白茆沙总体呈冲刷态势, 沙体面积减小, 沙头后退, 沙尾上提, 2014 年南京以下 12.5 m 深水航道一期治理工程在白茆沙上实施护滩工程后, 白茆沙沙体演变速度趋缓; 洪水期, 白茆沙表现为淤积态势^[15]。

监测资料表明, 长江太仓段白茆沙南北水道“南强北弱”态势持续增强, 河床冲刷造成深泓持续南移, 长江航道主槽和近岸河床冲深明显, 鑫海码头 2011 年-20 m 等高线距码头前沿 102 m, 至 2018 年仅有 47 m; 2011 年-30 m 等高线距离码头前沿 112 m, 2018 年已缩短至 59 m。

2.2 码头局部冲刷影响

太仓港新太海汽渡—七丫口段近 19.4 km 列为新出现的险工段, 被列为 I 级崩岸预警。2018—2021 年间, 每年汛前、汛后对太仓港沿岸险工段进行加密水下地形监测, 监测时间汛前测次为 3—5 月, 汛后测次为 10—11 月。

2021 年 8 月测次鑫海码头断面上, 码头前沿

河床高程为-13.6 m，码头前后沿高差为12.3 m，断面河槽最深点高程为-49.8 m，最深点至码头前沿距离为133 m，码头前沿有约70 m河床坡度相对平缓，其外侧河槽原陡峭陡坎被冲成斜坡，该测次数据显示最陡处坡比为1:1.6。由图3可知，2021年8月与2021年4月测次相比，码头前沿局部略有冲刷，平坦段河床冲淤变化不大，但平坦河床外侧深槽斜坡顶部表现出一定幅度向岸侧的冲刷。2020年7月—2021年8月时段，太仓侧河床陡峭段深槽斜坡平面向太仓侧推进了约6 m，斜坡移动速度为0.43 m/月。

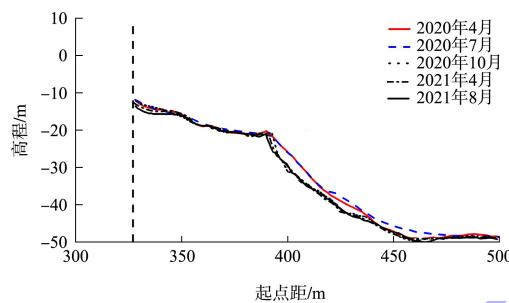


图3 鑫海码头 DM3 断面

根据监测结果可知，1#~3#泊位原设计泥面高程(85高程)为-15.50 m，码头前沿现状泥面高程为-16.4~-12.6 m，平均冲深为1 m；5#泊位原设计泥面高程为-16.70 m，码头前沿现状泥面高程为-17.8~-14.5 m，平均冲深为2 m。

3 结构安全复核

码头前沿水域发生冲刷后，码头桩基自由长度增加，桩基轴向承载力设计值呈下降趋势，桩基轴力设计值变化不大(主要与上部荷载相关)，码头安全度降低。管桩应力、横梁弯矩和横梁剪力均呈增加趋势，前沿泥面变深对桩基安全性的影响程度大于对上部结构的影响。码头前沿泥面被冲刷后，地基土会产生水平变形，从而对桩基产生附加内力。若码头泥面继续降低，管桩应力设计值将超过桩基强度设计值，码头结构将处于不安全状态。因此，在码头前沿水域发生冲刷后，需对码头的结构安全性进行复核。

3.1 复核方法

3.1.1 上部结构构件承载力验算

根据JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[16]，结构构件承载能力设计应采用极限状态设计表达式：

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

式中： S_d 为作用效应组合设计值； R_d 为结构构件承载力设计值。

上部结构构件按强度设计进行承载力验算时，抗力包括正截面受弯承载力设计值和斜截面受剪承载力设计值。

3.1.2 桩基承载力验算

根据桩基检测结果和地质资料，按原码头的设计荷载或经使用部门确认后的荷载条件对桩基进行承载力验算，结果须满足JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》稳定性要求^[17]。

当按承载力经验参数法确定单桩垂直极限承载力设计值时，应按式(2)计算：

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum q_{fi} l_i + q_R A) \quad (2)$$

式中： Q_d 为单桩垂直极限承载力设计值(kN)； γ_R 为单桩垂直承载力分项系数，取1.45； U 为桩身截面周长(m)； q_{fi} 为单桩第*i*层土的极限侧摩阻力标准值(kPa)； l 为桩身穿过第*i*层土的长度(m)； q_R 为单桩极限桩端阻力标准值(kPa)； A 为桩身截面面积(m^2)。

3.1.3 岸坡稳定性验算

高桩码头岸坡稳定性的验算可采用圆弧滑动法，并应遵守JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》中的有关规定。

$$\gamma_0 M_{sd} \leq \frac{M_{RK}}{\gamma_R} \quad (3)$$

式中： γ_0 为重要性系数，取1.00； M_{sd} 、 M_{RK} 为作用在危险圆弧面上的滑动力矩设计值和抗滑力矩的标准值； γ_R 为抗力分项系数。

所有计算中土性参数采用前期设计时所使用的值。

3.2 单桩极限承载力复核

根据表2计算结果,鑫海码头1[#]~3[#]、5[#]泊位的单桩极限承载力均满足要求,但富余量较小,

为设计桩力的1%~2%,桩身拉应力已接近极限值。横梁内力设计值小于结构抗力值,裂缝开展宽度及抗裂验算满足规范要求,结构满足受力要求。

表2 码头结构复核验算结果

泊位	项目	承载能力极限状态设计值						正常使用极限状态设计值				
		PHC 桩			横梁		PHC 桩		横梁			码头位移/mm
		压桩力/kN	拔桩力/kN	桩弯矩/(kN·m)	最大正弯矩/(kN·m)	最大负弯矩/(kN·m)	剪力/kN	拉应力/MPa	最大正弯矩/(kN·m)	最大负弯矩/(kN·m)	裂缝宽度/mm	
	复核结果	5 768	-987	781	10 460	-18 666	5 624	-8.61	4 278	-6 871	0.17	17.6
1 [#] ~3 [#]	结构抗力	5 905	-1 972	1 524	19 576	-20 356	9 115	有效预压应力 8.97	-	-	<0.25	-
	对比结果	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	-	-	满足	-
	备注	持久组合			持久组合		标准组合	准永久组合	准永久组合	准永久组合	标准组合	
	复核结果	6 184	-441	1 130	12 737	-15 616	5 085	-8.36	5 430	-6 788	0.21	21.8
5 [#]	结构抗力	6 265	-2 297	1 524	23 708	-18 640	6 482	有效预压应力 8.97	-	-	<0.25	-
	对比结果	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	-	-	满足	-
	备注	持久组合			持久组合		标准组合	准永久组合	准永久组合	准永久组合	标准组合	

3.3 岸坡稳定性复核

根据表3计算结果,鑫海码头1[#]~3[#]泊位使用期抗力分项系数 $\gamma_R=1.39$,地震期抗力分项系数 $\gamma_R=1.26$,均满足规范对于最小稳定抗力分项系数的要求;5[#]泊位使用期抗力分项系数 $\gamma_R=1.60$,地震期抗力分项系数 $\gamma_R=1.44$,均满足规范要求。码头岸坡整体稳定。

考虑深水大流速条件下施工可行性及防护结构的稳定性。综合对比后,选取联锁块软体排+抛石的保护方案,对河床和深槽边坡形成防护,从码头前沿开始铺设混凝土联锁块软体排(连锁块尺度480 mm×480 mm×120 mm),软体排上抛100~200 kg块石压护,抛石厚度为2.0 m,防护区域为码头前沿纵向65 m范围内。

表3 岸坡稳定复核结果

泊位名称	计算工况	抗力分项系数 γ_R	最小稳定抗力分项系数	是否满足规范要求
1 [#] ~3 [#]	使用期	1.39	1.10	满足
	地震期	1.26	1.00	满足
5 [#]	使用期	1.60	1.10	满足
	地震期	1.44	1.00	满足

4 防护措施

鑫海码头5[#]泊位深槽已位于码头前沿,需及时采取防护措施,防护范围为码头前方深槽区域。由于本河段底沙主要是细砂,主槽床砂较粗,南岸边滩以及沿岸夹槽为淤泥质细粉砂。整体河床质抗冲刷能力差,导致河床稳定性较差,防护结构需有良好的透水保砂性能。同时,由于码头前沿水域垂线平均最大流速在2.5~3.0 m/s,方案需

5 结论

1)由于长江上游来沙量减少以及白茆沙南北水道流速“南强北弱”态势持续增强,白茆沙南水道整体上以冲刷为主,深水航道南岸近岸冲刷明显。根据实际监测结果,鑫海码头1[#]~3[#]泊位平均冲深为1 m,5[#]泊位平均冲深为2 m,需对码头进行安全复核。

2)根据安全复核计算结果,鑫海码头结构安全性各项指标符合规范要求,但桩身拉应力已接近极限值,如冲刷深度进一步加深,将对码头的结构安全产生威胁。

3)为了保护码头安全,需对该码头进行冲刷防护,考虑到水流、地质等因素,在码头前沿区

域采用了联锁块软体排+抛石的方案保护岸坡，有较好的排水保砂效果。

参考文献：

- [1] 方爱东, 王效远, 赵凯. 长江白茆沙航道整治技术[J]. 水运工程, 2016(10): 136-140.
- [2] 朱庆元, 杜德军, 夏云峰, 等. 长江徐六泾河段白茆小沙近期演变特征分析[J]. 水运工程, 2015(12): 80-85.
- [3] 张朝阳, 刘桂平, 张志林. 典型洪水作用下长江口白茆沙水道演变特性[J]. 水运工程, 2018(3): 106-111.
- [4] 张朝阳, 刘羽婷, 张志林. 长江口太仓段险工近期发展新特点及趋势[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 7-12.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 港口工程结构可靠性设计统一标准: GB 50158—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [6] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 港口工程地基规范: JTS 147-1—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [8] 江莱, 单良洁. 某高桩码头的整体稳定及结构安全评估[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(4): 227-229, 231.
- [9] 寇本川, 苏航, 刘贻华, 等. 存在软弱夹层的高桩码头接岸结构地基稳定验算[J]. 水运工程, 2021(7): 199-204, 230.
- [10] 麦远俭, 叶建科. 重力式码头抗滑抗倾稳定性验算的抗力变异系数及对分项系数的修订建议[J]. 水运工程, 2015(2): 53-59.
- [11] 夏云峰, 曹民雄, 陈雄波. 长江下游三沙(福姜沙、通州沙、白茆沙)水道演变分析及深水航道整治设想[J]. 泥沙研究, 2001(3): 57-61.
- [12] 刘猛, 吴华林, 李为华. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程白茆沙水道工程局部冲刷试验研究: I: 模型设计[J]. 水运工程, 2013(1): 5-11.
- [13] 曹民雄, 应翰海, 钱明霞. 长江南京以下 12.5 m 深水航道建设一期工程的主要技术问题与研究成果[J]. 水运工程, 2012(11): 5-13.
- [14] 刘猛, 戚定满, 张宏伟. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程白茆沙水道工程局部冲刷试验研究: II: 模型试验[J]. 水运工程, 2013(2): 5-10.
- [15] 李瀛, 谭洁, 李尚. 白茆沙水道河势演变研究及成因分析[J]. 中国水运·航道科技, 2021(2): 1-8.
- [16] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [17] 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.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 66 页)

- [3] 刘勋纯. 自动导引运输车发展现状及关键技术分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 19-24.
- [4] 乔冠翔, 王森, 孙敬, 等. 自动化集装箱码头水平运输设备选型[J]. 装备维修技术, 2020, 48(13): 201.
- [5] 罗勋杰. 全自动化集装箱码头水平运输方式对比[J]. 水运工程, 2016(9): 76-82.
- [6] 刘耀徽, 李永翠, 杨杰敏, 等. 自动化集装箱码头水平运输设备的路径规划[J]. 水运工程, 2019(7): 13-16, 22.
- [7] 王聪, 金淳, 李兆隆. 考虑 AGV 作业行为的自动化集装箱码头水平运输优化[J]. 运筹与管理, 2019, 28(11): 9-17.
- [8] 唐立辉, 张连钢. 自动化集装箱码头水平运输系统动力系统及充电方案[J]. 水运工程, 2020(6): 74-77.
- [9] 毕艳飞, 单磊, 黄旭东, 等. 自动化集装箱码头水平运输定位技术[J]. 集装箱化, 2018, 29(5): 18-22.
- [10] 金祺, 罗勋杰, 韩保爽. 自动化集装箱码头水平运输设备选型[J]. 水运工程, 2016(9): 87-90.
- [11] 元征, 于青双. 青岛港集装箱自动化码头关键技术综述[J]. 港工技术, 2020, 57(5): 16-19.
- [12] 王永成, 杨明漾, 张国辉. 基于改进 A 星算法对自动导引小车路径规划研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(8): 130-138, 144.

(本文编辑 郭雪珍)