

# 秀英港7号、8号泊位重力式方块码头修复加固方案研究及应用

李送根<sup>1,2</sup>, 杨青柏<sup>1</sup>, 韩鹏洲<sup>1</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 结合工程实例, 秀英港7号、8号泊位码头存在失稳倾覆风险, 为保证码头的正常使用和生产, 提出码头修复加固方案。针对码头基床掏空区域, 设置水下钢筋笼并抛石, 侧面采用石坝封堵, 形成局部封闭区域, 浇筑水下不分散混凝土并进行二次压浆的方案进行修复; 针对方块倾覆区域, 设置预制L形挡板, 侧面采用橡胶气囊封堵, 形成局部封闭区域, 浇筑水下不分散混凝土并进行二次压浆的方案进行修复。项目实施取得了良好的施工效果, 可为类似工程提供借鉴。

**关键词:** 钢筋笼抛石; L形挡板; 橡胶气囊封堵; 水下不分散混凝土; 二次压浆

中图分类号: U656.111

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2024)10-0021-05

doi: 10.7640/zggwjs202410004

## Research and application of restoration and reinforcement scheme for gravity block wharf of berth No.7 and No.8 in Xiuying Port

LI Song-gen<sup>1,2</sup>, YANG Qing-bai<sup>2</sup>, HAN Peng-zhou<sup>1</sup>

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-Span Bridge Construction Technology of Ministry of Communications, Wuhan, Hubei 430040, China)

**Abstract:** According to the project example, in view of the area of wharf foundation bed hollowing out, underwater steel cage and stone throwing are set up, and stone dams are used on both sides of the gap area between the steel cage and foundation bed hollowing out, and underwater non-dispersed concrete is poured and secondary grouting is carried out for restoration. For the overturning area of the block, a prefabricated L-shaped baffle is set up, and rubber air bags are used on both sides of the gap area between the baffle and the overturning area of the block, and underwater non-dispersed concrete is poured and secondary grouting is carried out for repair. The implementation of the project has achieved good construction results, which can provide reference for similar projects.

**Key words:** steel cage riprap; L-shaped baffle; rubber air bag sealing; underwater non-dispersible concrete; secondary grouting

### 0 引言

随着部分码头建成投产接近使用年限及周边环境的影响, 部分码头基床水下有掏空现象, 易致使码头塌陷。目前常规的处理方案包括水下模袋混凝土修复与基床灌浆修复2种, 其中水下模袋混凝土修复即通过袋装混凝土修复基床的基本

轮廓, 利用模袋混凝土进行护面和护底, 同时与原抛石基床形成一个较为封闭的区域, 最后使用不分散混凝土进行填充<sup>[1-7]</sup>; 基床灌浆方案的主要原理是利用灌浆加固技术对码头基床进行加固修复。本项目提出利用L形挡板和钢筋笼形成封闭区域, 并在此区域内灌注水下混凝土, 通过二次

压浆使基床掏空区域填充密实的方案。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

秀英港位于海南省海口港区, 7号、8号泊位于1984年改造成1000吨级泊位, 码头长度约114 m, 原码头面高程3.5 m, 码头前沿停泊水域底标高为-3.0 m。7号、8号泊位为重力式实心方块结构, 基床为15~100 kg块石, 方块上部为0.9 m卸荷板, 卸荷板上为现浇混凝土胸墙, 方块结构后方回填15~100 kg火山石。

### 1.2 水文条件

1) 潮汐与潮位。港口潮汐系数 $F=3.92$ , 属于不规则日潮混合潮。平均海平面1.51 m, 平均高潮2.04 m, 平均低潮0.94 m, 最高潮4.25 m, 最低潮-0.25 m, 平均潮差1.10 m, 最大潮差3.6 m。

2) 设计水位。设计高水位2.41 m(高潮累积频率10%的潮位), 设计低水位0.41 m(低潮累积频率90%的潮位), 极端高水位4.31 m(50 a一遇), 极端低水位-0.25 m(50 a一遇)。

3) 波浪。码头波浪以风浪为主, 本地常、强浪向为北北东方向(NNE), 频率为39.16%, 次向为北方(N)和东北方(NE), 频率分别为12.1%和12.55%。设计波浪要素见表1。

表1 设计波浪要素表

Table 1 Design wave elements table

波向	波要素 重现期	$H_{1\%}/$ m	$H_{4\%}/$ m	$H_{5\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	波高 $H/m$	平均波 周期 $T/s$	波长 $L/m$
NNE	50 a 一遇	3.10	2.80	2.70	2.40	1.70	7.00	43.00
	25 a 一遇	2.90	2.60	2.50	2.20	1.55	6.00	42.00
	10 a 一遇	2.70	2.40	2.30	2.00	1.39	6.50	40.00
NNW —NW	50 a 一遇	3.65	3.20	3.12	2.71	1.84	7.80	59.27
	50 a 一遇	3.19	2.84	2.77	2.44	1.71	7.80	51.60
	25 a 一遇	3.38	2.95	2.87	2.48	1.67	7.40	55.71
	25 a 一遇	2.97	2.63	2.56	2.24	1.55	7.40	48.64
	10 a 一遇	2.65	2.29	2.23	1.90	1.25	6.40	46.68
	10 a 一遇	2.43	2.12	2.07	1.79	1.20	6.40	41.14
	2 a 一遇	1.54	1.31	1.27	1.06	0.68	4.20	25.71
	2 a 一遇	1.41	1.21	1.17	0.99	0.64	4.20	23.85

注: 表中 NNE 代表北北东方向, NNW 代表北北西方向, NW 代表西北方向,  $H_{1\%}$  代表累计频率为 1% 的波高,  $H_{4\%}$  代表累计频率为 4% 的波高,  $H_{5\%}$  代表累计频率为 5% 的波高,  $H_{13\%}$  代表累计频率为 13% 的波高。

### 1.3 水下探摸检测

秀英港 7 号、8 号泊位码头的重力式方块结合部情况正常, 方块表面广泛附着贝类藻类海生物, 经局部清理后未见破损、裂缝等缺陷; 底部块石基床掏空严重, 基床掏空深入长度均超过方块宽度的 20%, 码头基床技术状态为五类(危险)。基床掏空与方块倾覆情况见图 1—图 4。

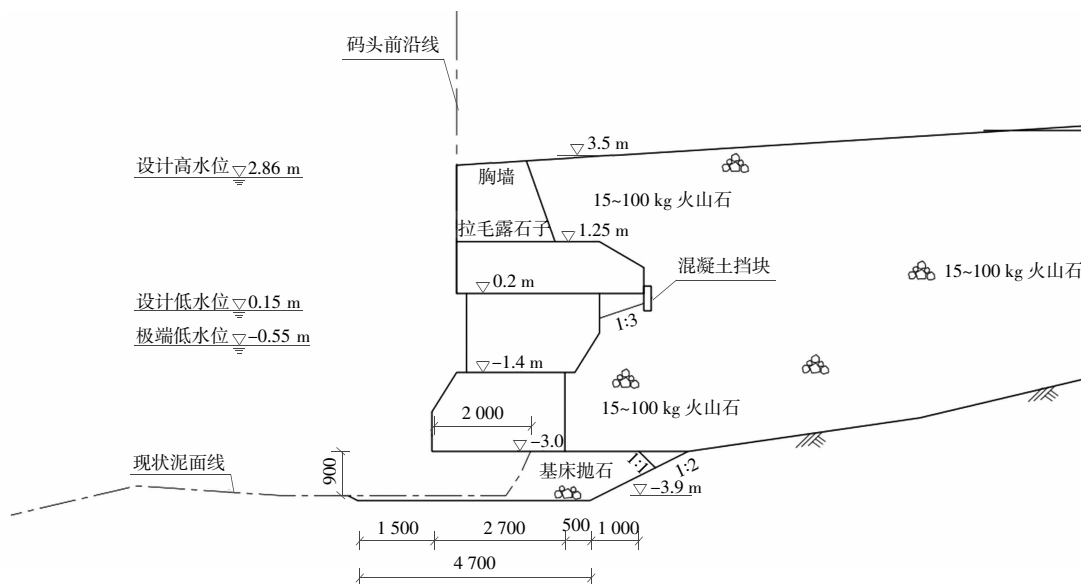


图1 码头方块下基床掏空示意图(mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the hollowing out of the foundation bed under the dock block(mm)

为消除码头主体结构失稳的安全隐患, 确保港口安全生产, 必须尽快对码头掏空基床采取紧急修复加固措施。基床最大掏空高度1.5 m, 最大掏空深度2.6 m, 基床掏空深入长度均超过方块宽

度的20%; 并且在距离码头西端17.0~18.7 m和32.3~35.7 m两个区段分别出现1件底层方块向水侧倾覆、2件底层方块及1件中层方块向水侧倾覆的情况。

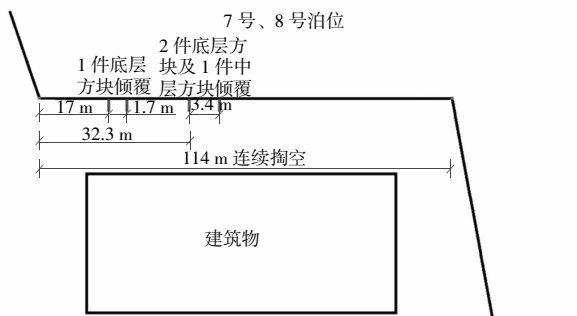


图2 码头掏空及方块倾覆情况分布示意图

Fig. 2 Distribution diagram of wharf hollowing and block overturning

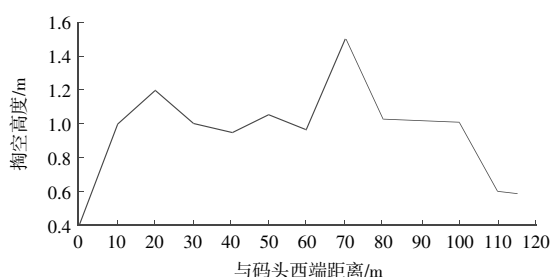


图3 7号、8号泊位码头掏空高度示意图

Fig. 3 Distribution diagram of wharf hollowing height of berth No. 7 and No. 8

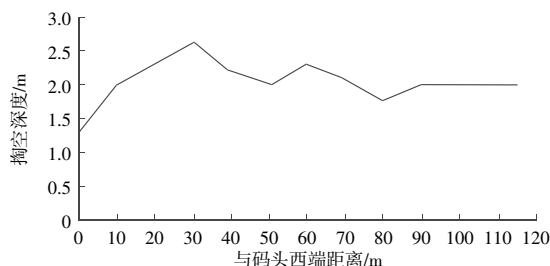


图4 7号、8号泊位码头掏空深度示意图

Fig. 4 Distribution diagram of wharf hollowing depth of berth No. 7 and No. 8

#### 1.4 基床掏空原因分析

1) 码头年久失修。7号、8号泊位是1985年建成投产, 已接近使用年限。

2) 轮渡船舶靠离泊方式改变导致基床掏空。泊位码头原设计为货运码头功能, 船舶靠泊方式为顺岸侧靠, 后改造成斜坡泊位, 轮渡船舶靠泊方式为丁靠, 轮渡船舶靠离泊时螺旋桨形成的波能对基床抛石产生吹力和吸力, 长年累月, 导致基床的块石被淘掉。

3) 港池维护疏浚出现超挖造成基床掏空。码头附近挖泥作业距离码头前沿太近, 对基床造成损坏, 导致基床的块石滑落港池。

## 2 修复加固方案设计

### 2.1 总体方案设计

原码头面高程3.5 m, 码头前沿停泊水域底标高为-3.0 m, 现为适应客货滚装船在不同水位作业的需要改为不同高度的斜坡道结构, 施工期间及修复完成后不影响过往船舶靠泊。本项目综合考虑码头基床掏空情况、成本控制以及工程经验等因素, 舍弃了常规模袋混凝土修复, 借鉴挡土墙的原理, 针对基床掏空区域修复, 将块石抛填至钢筋笼内并浇筑混凝土形成坝体结构挡于基床前部, 在坝体后方浇筑混凝土填充基床掏空区域, 并通过二次压浆使基床掏空区域填充密实<sup>[8]</sup>; 针对码头方块倾覆区域修复, 采用汽车吊分别吊放L形挡板和钢筋笼到指定位置并安装混凝土灌注管道, 随后在钢筋笼内抛填块石, 然后在方块与挡板空隙和钢筋笼块石内灌注水下混凝土, 并通过二次压浆使基床掏空区域填充密实。

基床掏空区域的修复施工均采用陆上施工的方式, 首先用长臂挖掘机对施工区域的基底进行清理和整平并在岸上绑扎钢筋笼, 钢筋笼外侧安装土工格栅及土工布复合物, 随后用汽车吊吊放钢筋笼到指定位置并安装混凝土灌注管道, 随后在钢筋笼内抛填块石, 然后灌注水下混凝土。从码头西侧端部开始分段修复施工, 每段长6 m, 沿码头岸线向东流水施工直至完成整个码头基床的修复。基床掏空修复示意图见图5。

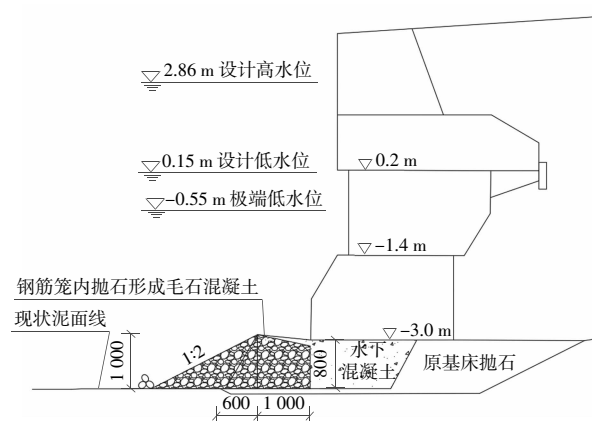


图5 基床掏空修复示意图(mm)

Fig. 5 Restoration schematic diagram of the foundation bed hollowing out (mm)

码头方块倾覆区域的修复施工均采用陆上施工的方式, 首先用长臂挖掘机对施工区域的基底进行清理和整平并在岸上绑扎钢筋笼, 钢筋笼外

侧安装土工格栅及土工布复合物,随后用汽车吊分别吊放 L 形挡板和钢筋笼到指定位置并安装混凝土灌注管道,随后在钢筋笼内抛填块石,然后在方块与挡板空隙和钢筋笼块石内灌注水下混凝土。码头方块倾覆区域的修复见图 6。

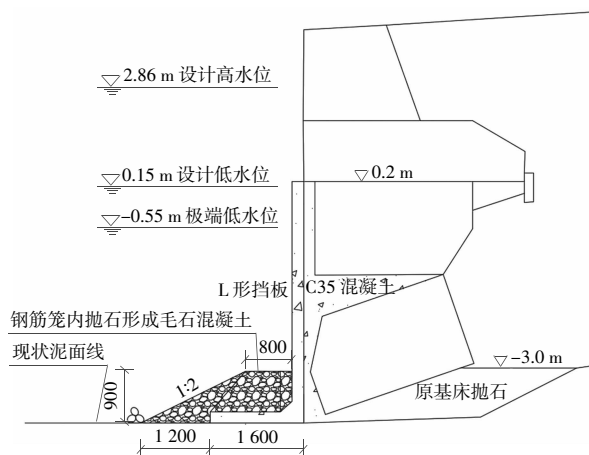


图 6 方块倾覆区修复示意图(mm)

Fig. 6 Restoration schematic diagram of the overturning area of the block(mm)

## 2.2 修复加固后验算

基床掏空区及方块倾覆区加固修复后,按现行规范验算滑移与倾覆稳定。考虑了设计高低水位、极端高低水位及设计水位、低水位之间的某一不利水位,工况组合见表 2,摩擦系数取值如表 3 所示。

表 2 工况组合

Table 2 Working condition combinations

工况组合	荷载
持久状况 1	自重+土压力+波浪力+水压力+水流力
持久状况 2	自重+土压力+系缆力+水压力+水流力

表 3 摩擦系数及内摩擦角取值

Table 3 Friction coefficient and internal friction angle values

名称	摩擦系数	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
火山石	—	40
混凝土与混凝土面	0.55	—
墙底与抛石基床顶面	0.60	—
抛石基床底面与地基土	0.40	—

基床掏空区和方块倾覆区修复后,抗滑抗倾覆验算结果见表 4—表 5。

表 4 基床掏空区修复后抗滑抗倾覆验算结果

Table 4 Calculation results of anti-sliding and anti-overturning after restoration of foundation bed hollowing out

验算项	验算位置				
	胸墙	第 1 层块石	第 2 层块石	第 3 层块石	基床底
抗滑移	2.22	1.86	1.78	1.45	1.24
抗倾覆	1.85	1.67	1.53	1.42	—

注:表中计算结果是按分项系数计算的抗力与效应的比值,为表 2 持久状况工况 1 与工况 2 验算结果包络值。

表 5 方块倾覆区修复后抗滑抗倾覆验算结果

Table 5 Calculation result of anti-sliding and anti-overturning after restoration of block overturning area

验算项	验算位置				
	胸墙	第 1 层块石	第 2 层块石	第 3 层块石	基床底
抗滑移	2.22	1.86	3.23	3.63	3.32
抗倾覆	1.85	1.67	2.38	2.53	—

注:表中计算结果是按分项系数计算的抗力与效应的比值,为表 2 持久状况工况 1 与工况 2 验算结果包络值。

经过上述计算,基床掏空区及方块倾覆区修复后使得整个码头稳定性比原来进一步加强,改造效果明显,满足现行规范要求。

## 3 试验段修复方案验证

### 3.1 试验段施工目的

为了验证施工方案的可行性,码头修复施工试验段选取码头西侧端部作为起始点,沿码头向东约 17 m 长度范围内,对码头基床掏空段的施工方案可行性进行验证。本次试验段施工主要验证内容包括长臂挖机对原泥面基床的整平效果验证、6 m 长钢筋石笼加工制作与定位吊放效果验证、钢筋笼抛填块石的填充效果验证、橡胶气囊封堵效果及水下混凝土浇筑效果验证、二次压浆的必要性和压浆效果验证。

### 3.2 试验段施工

秀英港 7 号、8 号泊位码头存在失稳倾覆风险,混凝土浇筑完成前的施工过程禁止潜水人员下水。施工前需要对码头掏空区进行断面探测,确定掏空尺度并绘制掏空断面图,水下探测采用水下机器人。试验段基床底整平处理,底部标高控制在-3.9 m,基床整平施工的同时岸上进行钢筋笼的绑扎施工,钢筋笼单个长度 6 m,为类直角梯形结构。钢筋笼采用汽车吊吊放,并使用水下机器人对钢筋笼安装位置进行核验检查;布置水下混凝土及压浆管道,在钢筋笼内抛填块石,

钢筋笼海侧抛填块石放坡 1:2, 然后开始水下混凝土浇筑。为了观察检验浇筑施工效果, 试验段使用浇筑速率较低的地泵, 浇筑段长度为石笼长度,

侧面采用橡胶气囊封堵(见图 7), 橡胶气囊通过管道送入断面分割处, 充气后对断面混凝土流动起到填充封堵作用, 混凝土凝固后放气回收。

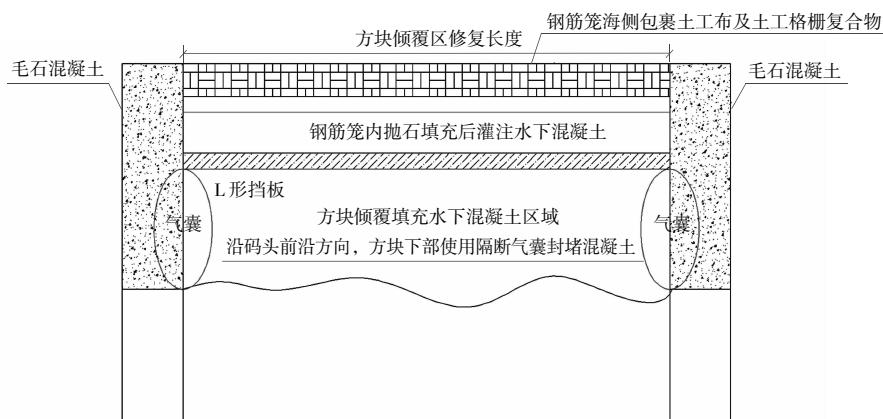


图 7 橡胶气囊封堵示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sealing rubber airbag

## 4 修复方案实施及效果

### 4.1 修复方案实施

#### 1) 长臂挖掘机对原泥面基床的整平

采用长臂挖掘机对基床底进行清理和整平, 使基床底具备回填、安放 L 形挡板和混凝土灌注要求。

#### 2) 6 m 长钢筋石笼加工制作与定位吊装

在岸上进行钢筋笼的制作施工, 在钢筋笼靠海侧包裹一层土工布及土工格栅复合物, 防止混凝土浇筑过程中混合料流失, 钢筋笼使用汽车吊将钢筋笼吊放至指定位置, 吊装完成后, 使用水下机器人对钢筋笼安装位置进行核验检查。

#### 3) 钢筋笼抛填块石填充

采用长臂挖掘机向钢筋笼内抛石, 抛填过程采用水砣测量的方法进行动态高程控制, 随时掌握抛石面的变化, 要求块石互相贴紧嵌固, 抛理坡面各点标高误差 $\leq 30$  cm。

#### 4) 水下混凝土浇筑及二次压浆

安装混凝土灌注管道, 水下不分散混凝土灌注采用泵车+料斗+管道。针对基床掏空区域, 每个灌注段长度为钢筋石笼长度, 侧面采用石坝封堵; 针对方块倾覆区域, 每个灌注段长度为方块倾覆修复区长度, 上部码头方块与 L 形挡板的空隙区域两侧采用橡胶气囊封堵。水下混凝土灌注完成并养护到期后进行取芯, 检验混凝土的密实度, 如果发现有混凝土空隙, 则从取芯孔处进行二次注浆施工来填补空隙。

### 4.2 实施效果

1) 基床检测: 基床掏空处被水下混凝土充填, 水下混凝土靠方块前趾处抛石覆盖, 抛石均匀平整; 钻芯法所取芯样基本完整, 芯样连续未发现空洞, 据此判断方块下方基床无掏空。结合水下探摸检查结果, 综合判断修复后基床技术状态为一类(好)。

2) 强度检测: 抽检的 4 组混凝土试块立方体抗压强度值为 36.9~38.8 MPa, 抽检的 3 组水下灌浆料试块立方体抗压强度值为 26.0~27.0 MPa, 均满足设计基床混凝土试块立方体抗压强度大于 25 MPa 的要求。

3) 码头前沿泥面标高: 共抽检 7 号—8 号泊位 60 个测点, 结果显示港池泥面标高介于-5.4~-2.8 m, 可以满足海峡渡轮靠泊吃水要求。

## 5 结语

本次码头基床修复加固方案中有 2 个关键点:

1) 对块石抛填和平整施工过程进行实时监控, 控制抛石的位置、高度和平整度;

2) 利用橡胶气囊或石坝封堵浇筑水下不分散混凝土, 并通过二次压浆使基床掏空区域填充密实。

本次基床修复加固借鉴挡土墙原理, 采用设置水下钢筋笼抛石及挡板挡在基床前面, 在钢筋石笼及挡板后方浇筑水下不分散混凝土并进行二次压浆的方案进行修复, 方案实施效果良好, 相

(下转第 69 页)