



# 厚抛石基床重力式码头结构 应力分布规律研究\*

丁泽祥<sup>1</sup>, 别社安<sup>2</sup>, 朱 铭<sup>1</sup>, 徐 韬<sup>1</sup>

(1. 江西交通职业技术学院, 江西 南昌 330013; 2. 天津大学, 天津 300072)

**摘要:** 针对现行规范未系统性研究厚抛石基床重力式码头设计技术标准的问题, 进行厚抛石基床重力式码头受力状态、设计方法和理论的研究。结合典型的厚抛石基床重力式码头工程实例, 采用理论分析、数值模拟、设计计算方法分析等方法, 揭示厚抛石基床应力分布规律, 提出厚抛石基床应力的改进算法、基槽开挖底宽和基槽抛石体断面的上限和下限取值以及厚抛石基床判别标准。结果表明: 基床应力并不是从前趾向前按照 1:1.5 扩散线传递, 随着深度加深, 应力分布呈现前大后小、前后相近、前小后大的变化趋势; 基床应力改进方法较规范计算方法大有改善; 明确了厚抛石基床的判别标准。研究结论丰富了厚抛石基床重力式码头设计理论, 可为同类型工程设计提供借鉴与参考。

**关键词:** 重力式码头; 厚抛石基床; 结构优化; 判别标准

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0057-06

## Stress distribution of deep rubble-bedding foundation for gravity quay

DING Zexiang<sup>1</sup>, BIE Shean<sup>2</sup>, ZHU Ming<sup>1</sup>, XU Tao<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanchang 330013, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To solve the problem that the design technical standard of the deep rubble-bedding foundation for gravity quay is not systematically studied. The stress state, design methods and theories of gravity quay with the deep rubble-bedding foundation have been studied. Based on the introduction for a typical gravity quay with a deep rubble-bedding foundation, this paper used theory analysis, numerical simulation and design calculation methods to study on the optimization design of the deep rubble-bedding foundation for gravity quay. The stress distribution laws of the deep rubble-bedding foundation is summarized, an improved algorithm is proposed for the stress of the deep rubble-bedding foundation, the upper and lower limit values of the bottom width of foundation trench excavation and the cross-section of riprap body in foundation trench, the identification criteria of the deep rubble-bedding foundation are proposed. The results show that the stress of the deep rubble-bedding is not within the slope line of 1:1.5 on the front side of the front toe, and with the deepening of the depth, the the stress distribution shows a trend of increasing in the front and decreasing in the back, similar in the front and back, and decreasing in the front and increasing in the back. The improved algorithm is much better than the standard method, the discrimination standard of the deep rubble-bedding foundation is defined. The research conclusion enriches the design theory of gravity quay, which provides reference and guidance for similar engineering designs.

**Keywords:** gravity quay; deep rubble-bedding foundation; structure optimization ; discrimination standard

随着我国港口事业的飞速发展, 内河及沿海  
码头岸线资源日益减少, 在风浪较大岸段、自然

条件和地形地质复杂岸段建设深水泊位是未来码  
头建设的重要发展方向。受岸线资源及地形地质

收稿日期: 2024-03-18

\*基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ214614)

作者简介: 丁泽祥(1991—), 男, 硕士, 讲师、工程师, 研究方向为港口工程教学、科研。



应考虑基床塑性变形和应力重分布的情况, 进行适当的改变。

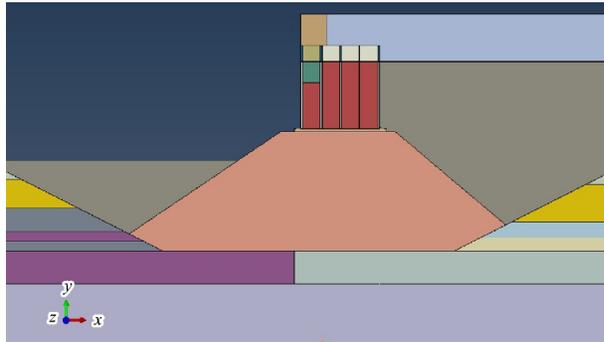


图 2 模型断面

其次是抛石基床的应力扩散。主要是前趾向下的应力扩散与规范所述差异较大, 规范假定以 1:1.5 的斜线扩散, 但实际上上部结构造成的附加应力以一个近乎垂直的小角度扩散, 这与规范的假定差距较大。同时应力分布在基床表层呈现前趾大、后趾小的近似梯形分布, 随深度加深趋于平缓, 到底层近似一个均布荷载, 这些都与规范方法计算的结果不同。按照规范条文设计的基床底面过宽, 承载力富余较大, 因此有必要在相关工程设计、施工时, 对大开挖重力式码头结构断面做适当优化, 减少开挖量, 节约工程投资。

### 2.2 附加应力扩散角度分析

在前期研究成果建立的数值模型基础上, 本文研究基底应力的准确分布, 提出一种新的计算方法。依托工程典型断面, 由 ABAQUS 应力分析得到的基床在自重状态下初始应力和理论计算值基本一致, 将模拟得到的竖向应力值减去相应的初始应力, 可得附加应力值。沿深度方向每隔 5 m 取一条路径, 以最大应力值为 1, 画出各深度附加应力分布曲线, 见图 3。可以看出, 从前趾向前, 附加应力值先以一个小角度迅速减小, 然后变化放缓, 后趾向后的附加应力值趋于 0。深度较小时, 前趾正下方附加应力较大, 后趾正下方的附加应力小, 随着深度加深, 当约 15 m 时, 前、后趾附加应力值趋于相等, 到 20 m 后出现后趾附加应力值大于前趾的情况, 表明抛石基床厚度对于基床底面附加应力分布影响显著。

由于在底部附加应力扩散宽度大, 不需要将所有扩散范围纳入计算, 为确定前趾扩散角度, 绘制各深度抛石基床附加应力累计率曲线, 见图 4, 取累计率为 5% 的点作为基床底面附加应力分布起始点。由图 4 可知, 应力扩散近似直线扩散, 计算得到扩散线坡度, 见表 1。由表可知, 当抛石基床较厚时, 抛石基床即可按 1:1 的应力扩散线近似。基床较薄时, 其扩散角与基床的厚度、塑性变形等均相关。

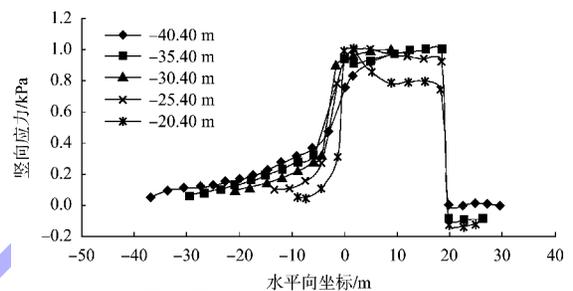


图 3 各深度竖向应力分布

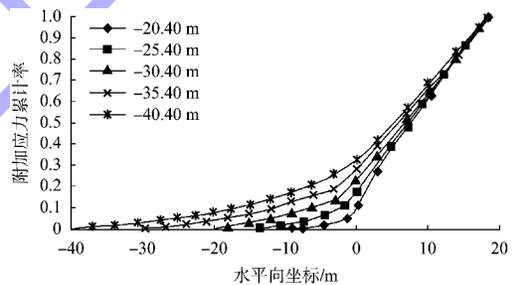


图 4 各深度附加应力累计率曲线

表 1 附加应力扩散坡度

| 高程/m   | 深度/m  | X/m    | 累计率  | 扩散坡度  |
|--------|-------|--------|------|-------|
| -20.40 | 5.00  | -3.00  | 0.03 | 1:0.3 |
|        |       | -1.50  | 0.05 |       |
|        |       | 0.00   | 0.10 |       |
| -25.40 | 10.00 | -6.00  | 0.04 | 1:0.5 |
|        |       | -5.25  | 0.05 |       |
|        |       | -4.50  | 0.06 |       |
| -30.40 | 15.00 | -13.50 | 0.04 | 1:0.8 |
|        |       | -12.00 | 0.05 |       |
|        |       | -10.50 | 0.06 |       |
| -35.40 | 20.00 | -19.48 | 0.04 | 1:0.9 |
|        |       | -18.01 | 0.05 |       |
|        |       | -16.54 | 0.06 |       |
| -40.40 | 25.00 | -26.26 | 0.04 | 1:1   |
|        |       | -25.08 | 0.05 |       |
|        |       | -23.88 | 0.06 |       |

注: X 为各深度附加应力累计率曲线的水平向坐标值。

### 2.3 附加应力计算方法改进

不考虑附加应力累计率小于5%的部分,抛石基床前趾应力按1:1的坡度扩散,后趾扩散线垂直向下,见图5。

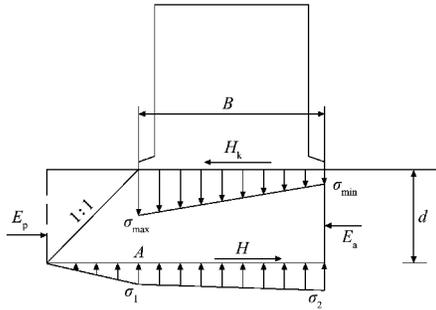


图5 受力分析

由图5分析可知,抛石基床只在顶面和前趾以下发生塑性变形,整体仍然可以假定为刚体,并假定应力前趾按1:1扩散,后趾垂直扩散,考虑后方主动土压力合力  $E_a$  和前方被动土压力合力  $E_p$ ,沉箱宽度为  $B$ ,基床底部受到土体的摩擦力  $H$ ,基床上部受到结构的摩擦力  $H_k$ ,基床顶部应力仍按规范求解,底部前趾正下方应力为  $\sigma_1$ ,后趾正下方应力为  $\sigma_2$ 。

竖向力平衡:

$$0.95 \left( \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right) B = \frac{d}{2} \sigma_1 + \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) B \quad (1)$$

对A点的力矩平衡:

$$0.95 \left( \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right) B \frac{B}{3} + 0.95 \sigma_{\min} B \frac{B}{2} - \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) B \frac{B}{3} -$$

$$\sigma_2 B \frac{B}{2} + \frac{\sigma_1}{2} d \frac{d}{3} = M \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{6M + 0.95B^2\sigma_{\max}}{(d+B)^2} \\ \sigma_2 = 0.95\sigma_{\min} + 0.95 \frac{d}{B+d} \sigma_{\max} - \frac{6M}{(B+d)B} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为抛石基床顶面的最大和最小应力标准值, kPa;  $d$  为基床厚度, m;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为抛石基床底面前趾、后趾正下方应力值, kPa;  $B$  为沉箱宽度, m;  $M$  为基床前被动土压力和后方主动土压力以及水平力标准值对A点的力矩之和, kN。

$$M = E_a h_a - E_p h_p + H_k d \quad (4)$$

式中:  $h_a$  为主动土压力合力到基床底部距离, m;  $h_p$  为被动土压力合力到基床底部的距离, m;  $E_a$  为后方主动土压力合力, kN;  $E_p$  为前方被动土压力合力, kN;  $H_k$  为基床上部受到结构的摩擦力, kN。

其中  $H_k$  对  $M$  值影响很大, 却距离最远, 但是抛石基床的刚体假定和实际存在差距, 考虑抛石基床的塑性性质, 对整个  $H_k$  造成的力矩值乘以折减系数 0.8, 即:

$$M = E_a h_a - E_p h_p + 0.8 H_k d \quad (5)$$

### 2.4 工程实例计算

依托工程实例, 选用工作状态下极端低水位工况进行计算对比, 规范计算、数值模拟、改进算法三者的基底附加应力值的对比见表2和图6。

表2 基底附加应力值3种方法对比

| 方法   | $\sigma_1$ /kPa | $\sigma_2$ /kPa |
|------|-----------------|-----------------|
| 规范方法 | 135.84          | 88.50           |
| 数值模拟 | 241.42          | 321.21          |
| 改进方法 | 213.00          | 274.32          |

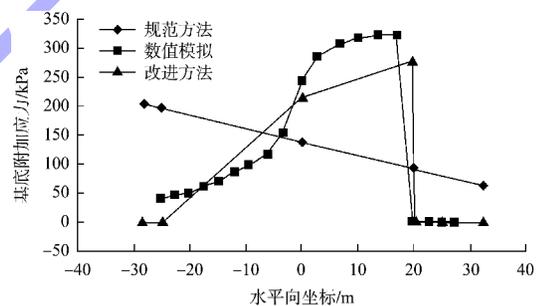


图6 改进方法对比效果

改进方法和数值模拟的结果较为接近, 沉箱正下方相较于数值模拟值较小, 主要因为前趾扩散边界到前趾段并不是线性增加, 越靠近前趾增幅越大。但是相较于规范方法已有较大改善, 基底应力值可采用下列公式计算:

$$\begin{cases} \sigma'_1 = \frac{6M + 0.95B^2\sigma_{\max}}{(d+B)^2} + \gamma d \\ \sigma'_2 = 0.95\sigma_{\min} + 0.95 \frac{d}{B+d} \sigma_{\max} - \frac{6M}{(B+d)B} + \gamma d \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma'_1$  为计算面与前趾垂直线交点的竖向应力, kPa;  $\sigma'_2$  为计算面与后趾垂直线交点的竖向应力, kPa;  $\gamma$  为抛石基床重度(水下取浮容重), kN/m<sup>3</sup>。

码头结构设计规范中的附加应力扩散,在基床各深度均以梯形分布,呈前趾大后趾小的形状。在厚抛石基床中,随着深度加深,应力分布呈前大后小、前后相近、前小后大的变化趋势,并且前趾向前应力扩散的边界应力值接近于0,最大附加应力值从前趾正下方向后趾正下方移动,这与规范差距较大。对于厚抛石基床,抛石基床应力扩散从前趾1:1向前,后趾垂直向下,分布近似成一个三角形和梯形,通过规范计算值、数值模拟结果和改进方法计算值的比较后,发现改进方法和数值模拟拟合程度较规范计算方法改善显著。

### 3 码头结构优化设计

#### 3.1 厚抛石基床尺度优化

研究表明,对于厚抛石基床重力式码头,其规模等级、功能、地质条件、建设方案各有不同,结构受力特点也各不相同,应结合项目自身特点,灵活开展设计工作,不可一概而论。因此本文提出厚抛石基床重力式码头基槽开挖底宽和基槽抛石体断面的上限和下限取值。

下限取值:对于厚抛石基床重力式码头,取基槽底宽与抛石基床顶面有效肩宽相同,基槽按照稳定开挖边坡进行,基床前侧从前肩开始按1:1的坡度抛填块石,后侧从后肩开始按1:0.5的坡度抛填块石,基槽其余部分无需抛填块石,见图7。

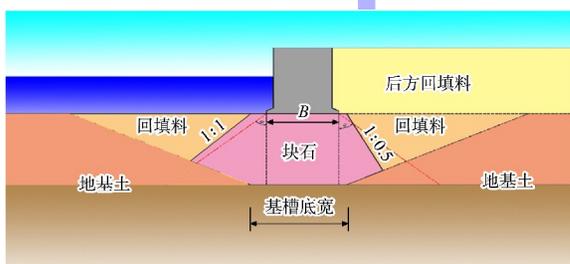


图7 优化后抛石基床尺寸

上限取值:按JTS 167—2018《码头结构设计规范》规定,基槽底宽不宜小于码头墙底宽度与2倍基床厚度之和,对于墙后有回填土的情况,沉箱前趾前侧基槽底宽不小于 $1.5d$ ,沉箱后侧不小于 $0.5d$ 。对于墙后无回填土的情况,沉箱前趾前侧基槽底宽不小于 $1.0d$ ,沉箱后侧不小于 $1.0d$ 。

#### 3.2 厚抛石基床判别标准

在优化设计抛石基床尺度的过程中,如何判别厚抛石基床和普通基床尤为关键,将直接决定基床尺度是否需要优化,结构断面是否最优,进而影响工程投资。

根据本研究成果和多个重力式码头设计施工经验,从结构受力、经济性及易操作性角度分析,提出厚抛石基床重力式码头判别标准:将抛石基床的厚度 $d$ 从 $0.5B$ 变为 $B$ ( $B$ 为沉箱底面宽度,可取变化步长为 $0.5\text{ m}$ ),进行抛石基床底面的抗滑稳定性和地基承载力验算,抗滑稳定性和地基承载力均能满足的最小深度,即为抛石基床的厚度 $d$ 。当开挖的基槽深度 $D$ 大于抛石基床的厚度 $d$ 时,则为厚抛石基床重力式码头。

具体步骤包括:1)根据地基土层初步确定基槽的总深度。2)假定抛石基床的厚度为 $2\text{ m}$ (规范2.3.10中规定“基床表层 $2\text{ m}$ 以下的块石重量范围可适当放宽”),按规范方法计算 $2\text{ m}$ 抛石基床底部的应力。3)将 $2\text{ m}$ 以下的抛石体按地基换填处理考虑,利用地基规范计算地基承载力(计算结合换填块石体的尺度、含泥量等因素,建议将换填块石体的内摩擦角取 $36^\circ\sim 42^\circ$ ,有别于抛石基床的 $45^\circ$ )。4)将抛石基床的底部应力与其下换填地基的承载力进行比较,如果承载力满足要求,则抛石基床的厚度可取 $2\text{ m}$ ,其下为换填地基;如果承载力不满足要求,则将抛石基床的厚度增加 $0.5\text{ m}$ ,即假定抛石基床的厚度为 $2.5\text{ m}$ ,其下为换填地基,再重复计算抛石基床的底部应力和换填地基的承载能力进行比较,若承载力满足要求,则抛石基床的厚度可取 $2.5\text{ m}$ ,其下为换填地基;若承载力不满足要求,则继续以 $0.5\text{ m}$ 为增量,增加抛石基床的厚度,直至换填地基的承载能力满足抛石基床底部的应力作用,则确定了抛石基床的厚度。

### 4 结论

1)厚抛石基床应力分布形态不同于JTS 167—2018《码头结构设计规范》的规定,并不是从前趾

向前按照 1:1.5 扩散线传递,而是随着深度加深,应力分布呈前大后小、前后相近、前小后大的变化趋势。当抛石基床较厚时,抛石基床可按 1:1 的应力扩散线近似;基床较薄时,其扩散角与基床的厚度、塑性变形等均相关。

2) 提出厚抛石基床应力改进算法,结合工程实例进行计算分析,发现改进方法较规范计算方法改善显著。

3) 考虑厚抛石基床重力式码头项目特点各不相同,提出基槽开挖底宽和基槽抛石体断面的上限和下限取值,灵活开展设计工作。

4) 明确厚抛石基床判别标准,解决了如何判别厚抛石基床和普通基床的长期难题。研究成果为大开挖重力式码头结构断面优化提供了设计理论参考,有助于减少开挖和回填量,节约工程投资。

**参考文献:**

[1] 张炜煌. 超深基槽重力式码头结构选型与设计关键技术[J]. 水运工程, 2014(4): 52-56.

[2] 卢少彦. 重力式码头换填基槽开挖底宽优化设计探讨[J]. 工程建设与设计, 2012(10): 141-144.

[3] 金文龙. 广州南沙港区二期码头结构设计难点与对策[J]. 水运工程, 2009(7): 112-117.

[4] 别社安, 贺立, 齐越, 等. 重力式码头抛石基床滑移破坏计算模式研究[R]. 天津: 天津大学, 2007.

[5] 只红茹, 别社安, 任增金. 重力式码头抛石基床内部滑移破坏研究[J]. 水运工程, 2009(1): 50-56.

[6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[7] 秦川, 别社安. 重力式码头抛石基床应力分析[J]. 水运工程, 2014(3): 88-93.

[8] 关兴. 重力式码头暗基床应力扩散特征分析[J]. 水运工程, 2014(8): 66-70.

[9] 郭隆洽, 邬光远, 袁达, 等. 深基槽重力式码头地基应力分布研究及基槽开挖优化[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 173-180.

[10] 丁泽祥, 鄢真, 张炜煌, 等. 重力式码头厚抛石基床应力数值分析[J]. 福建交通科技, 2022(11): 103-105.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 50 页)

[9] 徐港, 张懂, 刘德富, 等. 氯盐环境下混凝土中锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 452-459.

[10] ALMUSALLAM A A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars[J]. Construction and building materials, 2001, 15(8): 361-368.

[11] APOSTOLOPOULOS C A, PAPADAKIS V G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar [J]. Construction and building materials, 2008, 22(12): 2316-2324.

[12] 安琳, 欧阳平, 郑亚明. 锈坑应力集中对钢筋力学性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(6): 940-944.

[13] 王军强. 大气环境下锈蚀钢筋力学性能试验研究分析[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2003, 3(3): 25-27.

[14] 罗小勇, 刘晋宏, 聂经纶. 锈蚀钢筋截面分布特征及轴向拉伸力学性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 730-736.

[15] 张威. 锈蚀钢筋表面特征的统计分析及其力学性能退化模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.

[16] 陆春华, 王一健, 成璞. 混凝土内自然锈蚀钢筋力学性能试验及数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2019, 33(6): 106-113.

[17] 西安建筑科技大学, 中交四航工程研究院有限公司. 既有混凝土结构耐久性评定标准: GB/T 51355—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[18] 交通运输部天津水运工程科学研究院. 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

(本文编辑 王璁)