



# 海岛复杂水文地质条件下 船坞扩建围堰施工技术 \*

刘齐辉，李毅

(中国铁建港航局集团有限公司，广东 珠海 519000)

**摘要：**在海岛船坞扩建施工中，围堰为船坞施工提供干作业环境。围堰施工是船坞扩建施工中的关键环节，决定船坞扩建施工的成败。结合工程实践，因地制宜优化设计海岛复杂水文地质条件下船坞扩建临时围堰结构形式。研发了一种新型复合围堰结构，通过有限元法建模验算，确保了围堰结构的稳定性和抗渗性要求，为船坞扩建施工提供了良好的干作业环境。实践证明，该船坞扩建围堰施工技术取得了显著效果。

**关键词：**船坞扩建；围堰；方案优化

中图分类号：U 656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)08-0192-05

## Cofferdam construction technology for dock expansion under complex hydrogeological conditions on island

LIU Qi-hui, LI Yi

(CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** In the dock expansion construction on an island, the cofferdam provides a dry working environment for dock construction. Cofferdam construction is a key link in dock expansion construction and determines its success or failure. Taking into account engineering practice and local conditions, this study optimizes the form of the temporary cofferdam structure for dock expansion under the complex hydrogeological conditions on the island. After developing a new type of composite cofferdam structure, this study verifies that it meets stability and impermeability requirements through finite-element modeling and checking and that it offers a favorable dry working environment for dock expansion construction. Practice proves that the proposed cofferdam construction technology for dock expansion achieves remarkable results.

**Keywords:** dock expansion; cofferdam; scheme optimization

近年来，随着我国海洋贸易的蓬勃发展，大型远洋货轮的数量逐渐增多，对大型船坞的需求也日趋增多，原有的船坞不能满足当前大型船舶的需要，因此船坞改扩建工程也随之增多。在海岛船坞扩建施工中，围堰为船坞施工提供干作业条件，围堰施工是关键环节。虽然国内外船坞施

工技术已有了长足的发展，但目前已有船坞围堰结构技术研究主要是针对一般水文地质条件进行的，对海岛复杂水文地质条件下围堰施工技术研究甚少。总结国内外的建坞经验，临时围堰一般有板桩式结构或重力式结构。其中板桩式结构有单/双排钢板桩、格型钢板桩、钢板桩基坑围护法

收稿日期：2022-01-27

\*基金项目：中国铁建股份有限公司科技计划项目(2018-B10)

作者简介：刘齐辉(1964—)，男，硕士，正高级工程师，从事港口与航道工程、水利水电、公路、市政等技术管理工作。

等结构形式, 以及张燕<sup>[1]</sup>干船坞工程建造板式支护结构、郭荣等<sup>[2]</sup>船坞改造接长施工围堰结构。而重力式结构有土石坝、预制沉箱、方块等形式。这些围堰结构难以满足海岛复杂水文地质条件船坞扩建干作业施工要求, 为解决海岛船坞施工干作业环境的难题, 需研究一种围堰结构, 满足围水干作业的施工要求。

通过研究海岛复杂水文地质条件下船坞扩建临时围堰结构形式优化设计、围堰水下整体爆破拆除防护措施、围堰防渗方案等, 研制了一种由“钻孔灌注桩+水下旋喷桩+双排水上挡板+袋装黄土+现浇纵横梁”组成的框架式复合围堰结构; 采用一种水下爆破实体防护装置, 在既有坞门口上依次铺设柔性材料、钢板和压载层等3层材料组成防护层, 充分降低了临时围堰水下爆破拆除时对既有坞门口的影响。

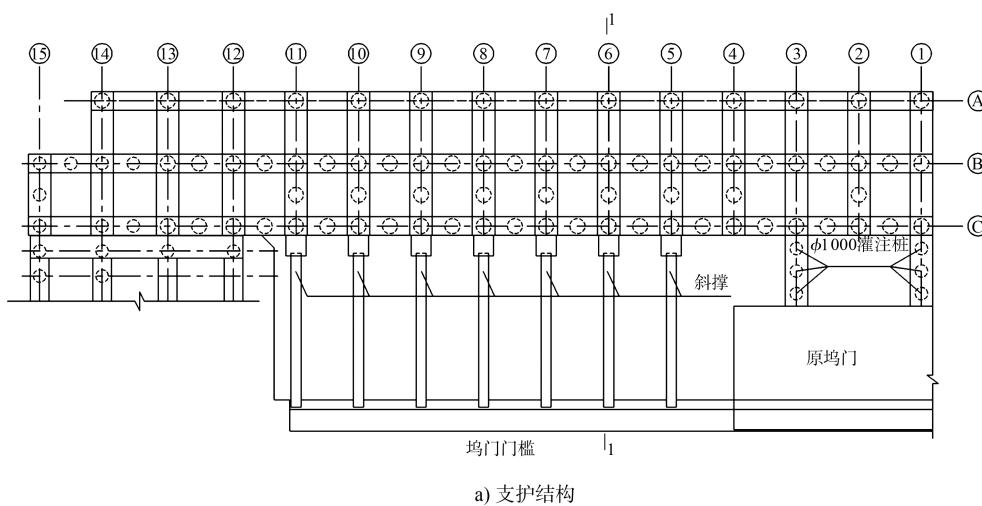
## 1 工程概况

某船坞改扩建项目位于宁波舟山市普陀区六横岛西北侧, 主要是将原有船坞由  $353\text{ m} \times 54\text{ m}$  扩建至  $610\text{ m} \times 90.8\text{ m}$ , 深度与原船坞保持一致, 仍为 13 m。工程临海建设, 坞口及西侧部分坞墙处在海水中, 地质较为复杂, 位于浙闽粤燕山期火山活动带, 主要为软土及强风化凝灰岩, 岩石呈

碎裂状结构, 中间夹杂淤泥、淤泥质黏土和黏性土砾砂, 易发生渗流, 对围堰的防渗性要求较高; 场区潮差大(最大潮差达到 4.18 m)、风浪影响大(平均风速在 5.2 m/s, 最大风速达到 19~25 m/s), 且基坑开挖深度超过 13 m, 基坑开挖和基础结构施工安全风险大, 对围堰的结构稳定性要求较高; 该船坞紧邻码头, 受码头作业影响, 围堰施工场地非常狭窄, 施工期间需减少对临近已建构建筑物的影响。

## 2 围堰施工方案优化

本工程临海建设, 坞口及西侧部分坞墙处在海水中, 需采用临时围堰围护确保干作业施工。原设计临时围堰结构为“灌注桩+纵横梁+挡泥钢板+高压旋喷桩”, 现场勘查发现: 由于水文地质条件复杂、海侧基岩覆盖层较厚, 施工场地受限。为降低施工安全风险、加快施工进度, 将海侧一排  $\phi 1.2\text{ m}$  灌注桩优化为  $\phi 1.2\text{ m}$  PHC 桩; 为节约成本, 将泥面以上高压旋喷桩止水帷幕优化为袋装黄泥止水帷幕。优化后围堰结构为“钻孔嵌岩灌注桩+水下旋喷桩+双层水上挡板+袋装黄土+现浇纵横梁”新型复合围堰止水结构, 同时在围堰内侧增加钢管斜撑确保围堰稳定。船坞坞门围堰支护结构见图 1。



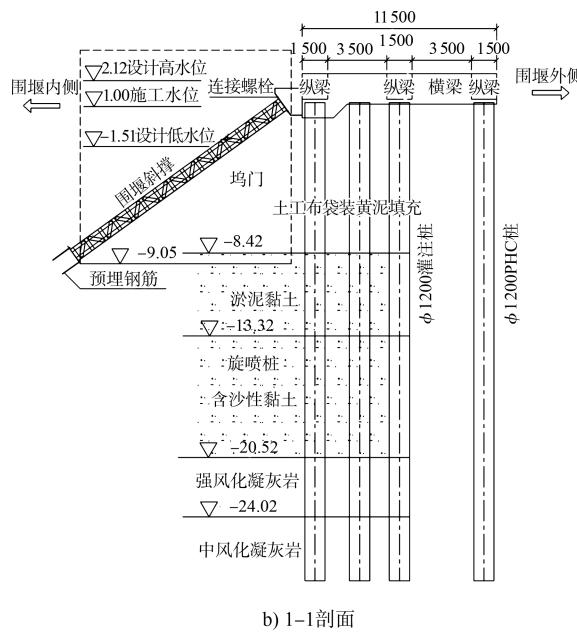


图 1 船坞坞门围堰支护结构 (高程: m; 尺寸: mm)

北围堰 B、C 排架和西围堰 14、15 排架部位处, 其钻孔嵌岩灌注桩基之间的桩间土采用双排高压旋喷桩作为临时止水帷幕墙<sup>[3-4]</sup>, 海底以上焊接两排挡土钢板, 两排钢板之间填袋装黄土用于止水, 桩顶采用现浇纵横梁连成一体。北围堰 5~11 排架南侧共设置 7 根钢结构斜撑, 作为围堰支撑。

### 3 围堰支挡结构计算分析

围堰结构采用桩基+纵横梁+钢管斜撑结构, 桩基采用 3 根  $\phi 1.2$  m 灌注桩+1 根  $\phi 1.2$  m PHC 桩, 钢管斜撑采用  $\phi 500 \times 6$  mm 钢管桩, 坎室底板高程以下采用旋喷桩作为防渗帷幕、以上采用 2 块竖直大钢板倚靠在前后 2 根灌注桩内侧作为挡块, 腔内填充土工布袋内装黄泥, 作为防渗水结构。

#### 3.1 有限元模型

围堰支挡结构主要由桩基、纵横梁系、混凝土面板、钢管斜撑组成。采用有限元软件建立模型, 见图 2(隐去混凝土面板)。

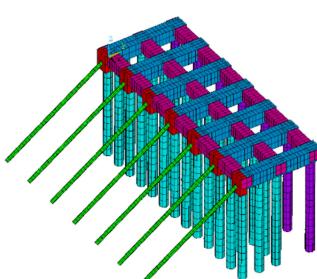


图 2 围堰支挡结构有限元模型

#### 3.2 模型边界条件

采用竖向弹性地基梁法计算, 对桩底位移进行约束、桩与土之间采用弹簧单元进行模拟、对弹簧单元端头进行嵌固。

#### 3.3 荷载分析

##### 3.3.1 恒载计算

恒载主要为结构的自重, 采用有限元软件进行计算时, 结构自重可通过软件自行加载计算。

##### 3.3.2 水土压力

地基基础及回填土质为有黏性土, 按照规范采用水土合算。

#### 3.4 计算分析

##### 3.4.1 钢管桩分析

钢管桩直径 500 mm、壁厚 6 mm, Q235B 钢材。横截面积  $A = 0.009312 \text{ m}^2$ , 惯性矩  $I = 0.000284 \text{ m}^4$ 。

回转半径  $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 0.175 \text{ m}$ 。钢管的计算长度为 15 m。查现行钢结构规范表格, 钢管的长细比为 85.88, 轴压稳定系数  $\varphi = 0.6488$ , 钢管的轴压稳定相当折算应力为 193 MPa, 小于许用应力 (215 MPa), 满足要求。

##### 3.4.2 桩基分析

1) 灌注桩承载力计算。混凝土桩弯矩与轴力共同作用下的配筋复核, 采用现行混凝土设计规范中的圆形截面偏心受压计算公式进行反复迭代验算。

$$N_u = \alpha_1 \alpha_t f_c A \left[ 1 - \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi\alpha} \right] + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s \quad (1)$$

$$N_u \eta e_i = \frac{2}{3} \alpha_1 f_c A r \frac{\sin^3(\pi\alpha)}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin(\pi\alpha) + \sin(\pi\alpha_t)}{\pi} \quad (2)$$

$$\alpha_t = 1.25 - 2\alpha \quad (3)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (4)$$

式中:  $N_u$  为受压承载力设计值 (N);  $\alpha_1$  为系数;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ );  $f_y$  为纵向普通钢筋抗压强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ );  $\eta$  为偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数;  $A$  为圆形截面面积 ( $\text{mm}^2$ );  $A_s$  为全部纵向

钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ )； $r$ 为圆形截面的半径( $\text{mm}$ )； $r_s$ 为纵向钢筋重心所在圆周的半径( $\text{mm}$ )； $e_0$ 为轴向压力对截面重心的偏心距( $\text{mm}$ )； $e_a$ 为附加偏心距( $\text{mm}$ )； $\alpha$ 为对应于受压区混凝土截面面积的圆心角弧度值与 $2\pi$ 的比值； $\alpha_t$ 为纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值。

将灌注桩各参数以及内力计算结果代入上述公式, 计算得出配 $\phi 32 \text{ III}$ 钢筋20根满足要求。但在实际施工中, 充分考虑安全系数, 配筋 $\phi 32 \text{ III}$ 钢筋28根。

2) PHC桩承载力计算。PHC桩最大弯矩值为 $796 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 根据产品手册,  $\phi 1200 \text{ mm}$  PHC桩抗裂弯矩为 $1580 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 故承载能力满足要求。

### 3.4.3 围堰位移计算

围堰支挡结构位移计算值为 $33 \text{ mm}$ , 符合要求, 且与监测位移数据( $0 \sim 40 \text{ mm}$ )基本相符, 围堰结构稳定性满足要求。

## 4 渗流分析

### 4.1 渗流的特点

#### 4.1.1 空间性

干船坞的一侧临海, 另3个侧面与底部被地下水包围, 在海水位与地下水位差的作用下, 形成了沿坞口与坞室底板下的纵向有压渗流, 以及与坞轴线相垂直的横向有压渗流, 此外海水还绕过坞口边墩形成了渗流。因此干船坞的渗流呈现了空间特性, 坞口渗流的空间性表现更为明显。

#### 4.1.2 不恒定性

由于海潮位的变化, 透水坞底的坞室灌泄水使渗流又呈现不恒定的特性。

### 4.2 渗流验算简化

1) 不考虑渗流的非恒定性, 按恒定渗流计算<sup>[5]</sup>。由于地下水位随水域潮位的变化往往滞后一段时间, 实测资料表明其变化范围不大, 并且离开水域一段距离后潮水位的变化对它并无影响, 因此一般不考虑渗流的不恒定性, 按最大水头作用下的恒定渗流计算, 这样处理既简化了计算, 其结果也是安全的。

2) 空间渗流可近似简化为平面渗流计算。对于坞室墙的渗流, 由于坞墙沿轴线方向的长度(即纵向渗流)远比墙下地下轮廓线(横向渗流)长, 因此坞墙的渗流可以近似只考虑墙下的横向渗流, 近似简化为恒定、平面渗流计算。

3) 在坞口两侧足够范围采用截水防渗措施后, 海水从两侧绕流的渗径大于坞口纵向渗透长度, 因此两侧的绕流一般不予考虑。

### 4.3 渗流计算

渗透压力计算采用JTS 190—2018《船厂水工工程设计规范》、SL 265—2016《水闸设计规范》中改进的直线比例法, 假定渗流中的水头损失沿着换算的地下轮廓线均匀分布, 实践证明其精度满足工程要求。

#### 4.3.1 坞室渗径计算

$$L \geq CH_s \quad (5)$$

$$L = \sum L_s + m \sum L_c + \sum L_x \quad (6)$$

$$L_x = \sqrt{L_1^2 + (mL_2)^2} \quad (7)$$

式中:  $L$ 为渗透轮廓换算渗径总长度( $\text{m}$ )； $C$ 为渗径系数, 按渗径系数表选取;  $H_s$ 为渗径起点与终点水位差( $\text{m}$ )； $L_s$ 为渗透轮廓水平段长度( $\text{m}$ )； $m$ 为换算系数, 对单道防渗板桩取1.5, 对多道防渗板桩取2.0； $L_c$ 为渗透轮廓垂直段长度( $\text{m}$ )； $L_x$ 为渗透轮廓倾斜段换算长度( $\text{m}$ )； $L_1$ 为渗透轮廓倾斜段水平投影长度( $\text{m}$ )； $L_2$ 为渗透轮廓倾斜段垂直投影长度( $\text{m}$ )。

#### 4.3.2 渗透压力与总水压力计算

渗径起算面以上的水压力可按静水压力计算, 渗径起算面以下的总水压力强度按以下公式计算:

$$P_x = \rho gh_1 + \rho gh_2 \quad (8)$$

$$h_2 = \frac{H_e}{L} x \quad (9)$$

式中:  $P_x$ 为计算点水压力强度( $\text{kPa}$ )； $\rho$ 为水的密度( $\text{t}/\text{m}^3$ )； $h_1$ 为计算点与墙前水位的高差( $\text{m}$ ), 计算点在墙前水位以下时取正值、以上取负值;  $h_2$ 为计算点渗透水头( $\text{m}$ )； $H_e$ 为坞墙前后水位差( $\text{m}$ )； $L$ 为坞墙换算渗径总长度( $\text{m}$ )； $x$ 为计算点至渗径终点的换算渗径长度( $\text{m}$ )。

以断面 K0+400 为例, 根据渗透压力检测数据, 采用旋喷桩防渗帷幕方案后, 基底西侧的扬压力  $P_x$  最大值减小为 8 kPa, 计算点至渗径终点的换算渗径长度  $x$  仍为 22.4 m。通过反算, 采用旋喷桩作为防渗帷幕, 渗径长度  $L=330.26\text{ m} >$  构造要求渗径长度 ( $CH_s=7\times11.5\text{ m}=80.5\text{ m}$ ), 满足渗径长度要求。

## 5 围堰爆破拆除

船坞围堰是建造船坞前搭建的临时构筑物, 作用是修筑船坞时防止水流进入, 以保证干涸的施工环境。由于船坞围堰属临时施工措施, 在船坞建造施工完成后, 常以爆破方式对其进行拆除。该围堰邻近已浇筑的坞门, 爆破拆除时需要对坞门进行保护, 爆破时爆破点要选择精确、爆破深度须控制好, 在钻孔灌注桩施工时预埋爆破装药管。针对临时围堰结构复杂的特点, 采用水下一次整体爆破的方式进行拆除<sup>[6-7]</sup>, 在水下爆破时对邻近的坞门区域已建构筑物做好水下爆破防护措施。通过在已建坞门口顶部自下而上依次铺设柔性材料层、钢板层和压载层组成防护层, 有效降低围堰水下爆破时对已建坞门口的影响<sup>[8-9]</sup>。爆破后, 围堰上部纵横梁与灌注桩连接处分离, 采用抓斗式挖泥船清渣。

## 6 结语

1) 通过有限元软件建模验算设计研发一种由“钻孔嵌岩灌注桩+水下旋喷桩+双排水上挡板+袋装黄土+现浇纵横梁”组成的框架式新型复合围堰结构, 抗波浪能力强、防渗性能好, 解决了波浪冲击力大、基岩易渗流、施工场地受限等诸多难题, 为船坞扩建施工提供了干作业条件, 确保了该工程安全优质高效完成。

2) 分析施工期各种工况下围堰内外侧土压力和水压力差等外部环境共同作用下围堰整体结构

的稳定性, 并通过观测施工期间的沉降位移, 验证围堰结构设计的合理性。

3) 针对施工现场和海洋环境条件进行深入分析, 采用高压旋喷桩和嵌岩桩组成止水帷幕、改进的直线比例法计算渗透压力, 改进的直线比例法假定渗流中的水头损失是沿着换算的地下轮廓线均匀分布。实践证明其精度能满足工程要求。

4) 针对临时围堰结构性能良好的特点, 采用水下整体爆破的方式进行拆除, 在水下爆破时对临近区域的已建构筑物做好水下爆破防护措施, 在已建坞门口顶部自下而上依次铺设柔性材料层、钢板层和压载层组成防护层, 充分减少临时围堰水下爆破时对已建坞门口的影响, 确保了坞口设施保护完好。

## 参 考 文 献:

- [1] 张燕.板式支护在干船坞工程建造中的运用[J].中国港湾建设, 2018, 38(11): 52-56.
- [2] 郭荣, 朱启龙.某造船基地修船区 2#船坞改造接长施工技术[J].中国水运(下半月), 2013, 13(9): 288-289.
- [3] 顾宽海, 朱忠余, 陆晶晶.双排钻孔灌注桩坞墙结构设计[J].水运工程, 2013(9): 138-142.
- [4] 陈东俊.高压旋喷止水帷幕在船坞围堰工程中的应用[J].港工技术, 2013, 50(5): 35-37, 48.
- [5] 刘先珊, 刘少炜, 余永康.土石围堰渗流场分析及稳定性评价[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(S1): 212-215.
- [6] 管志强, 张海平.船坞改扩建工程围堰拆除爆破技术[J].工程爆破, 2021, 27(2): 91-99.
- [7] 宋胜林, 赵业亭.水中炸礁爆破施工技术总结[J].铁道建筑技术, 1998(2): 37-38.
- [8] 陈志鹏.复杂环境船坞围堰拆除爆破安全评价与防护研究[D].舟山:浙江海洋大学, 2017.
- [9] 陈鸽, 焦峰, 应海剑.船坞围堰爆破拆除泥岩界面准确性控制技术[J].爆破, 2013, 30(4): 75-78, 95.