



止水围堰技术在内挖式港口 干施工中的应用

夏林, 刘兴安

(中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 介绍了止水围堰技术在汉班托塔海港工程中的应用情况。从设计、施工方面详细论述了采用止水围堰围成基坑形成干作业环境后, 在基坑内开挖港池、建造码头形成大海港的全过程。止水围堰工艺在该港干施工中的成功应用, 说明了干施工建造海港是可行的, 并为以后应用该工艺提供了借鉴。

关键词: 港口工程; 围堰; 防渗墙; 港口施工

中图分类号: U 655.54⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0203-05

Application of diaphragm wall structure & cofferdam in dry construction of marine port

XIA Lin, LIU Xing-an

(China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: This article discusses the design and construction technology of diaphragm wall structure & cofferdam in Hambantota port, esp. the whole process of marine port formation through basin excavation and pier building. The successful application of diaphragm wall structure & cofferdam to form the dry construction condition reveals that dry construction is feasible to the construction of marine port.

Key words: port engineering; cofferdam; diaphragm wall structure; port construction

1 工程概况

斯里兰卡汉班托塔海港发展一期工程, 由中国港湾有限责任公司作为总承包方, 是工期为39个月的EPC项目。施工内容包括2个10万吨级通用码头、1个10万吨级油码头、1个工作船码头、长311 m东防波堤和988 m西防波堤、1个开挖量为1 260万m³的港池、1条炸礁疏浚长1 000 m宽210 m的航道、设计水深-16 m港池以及港机设备与其他附属设施等。

汉班托塔海港位于斯里兰卡东南部滨临印度洋的一个面积为425万m²的内陆泻湖内, 该地区属热带海洋性气候, 全年只有雨季和旱季之分, 雨季为每年5—7月及9—12月, 年降雨量超过1 500 mm。该港口的建设采用止水围堰围成大基坑, 建造

防渗墙形成干作业施工环境, 通过开挖泻湖形成港池、陆上施工码头, 爆破拆除海岸形成进港航道, 连通印度洋形成一个内陆大海港。

2 港口工程由水下施工改为陆上施工

在项目的前期策划中, 本着不占耕地和陆域的原则, 靠科学、重实效、精勘查, 港址选在滨临海洋的泻湖位置。利用天然泻湖作为港池, 待港口建成后, 通过排洪通道, 洪水可以泻在港池内, 这样保持了原泻湖的功能, 另外泻湖地势低可减少港池的开挖量、减少伐树及拆迁工作, 既保护了环境, 还维护了自然生态平衡。根据地质钻孔勘探, 十字板和抽、注水试验, 对项目的整体实施方案经由各相关方反复研究, 确定采用内

收稿日期: 2012-01-11

作者简介: 夏林(1953—), 男, 高级工程师, 建造师, 从事港口施工管理。

挖式干施工的方法建设汉班托塔海港工程。

内挖式干施工方法是采用土石方围堰抵抗土体的滑动，在围堰体内开槽，现浇形成的止水防渗墙止水，在围成的基坑内使用水泵降水，形成干施工环境后，在基坑内地进行土方开挖、岩石爆破、运出土石方，当开挖达到设计的高程后，在基坑内进行码头结构的干施工，形成靠泊码头和港池。

通过止水围堰围成的基坑，在干基坑内建造码头与港池的施工方法实际是由以前水下施工港口的传统施工方法改变为陆域施工港口的办法。陆域施工港口工艺与水下施工港口工艺相比有以下几点优势：

1) 陆域施工比水下施工节约造价。陆上爆破相同量的岩石比水下炸礁的效率提高7倍以上，陆域挖土、爆破岩石及运输土石方所用的设备成本比采用水下炸礁、清礁所用的设备的成本大为降低，减少了大量的船舶费用，水下爆破开挖土石方的单方造价比陆域开挖爆破的土方造价贵4~7倍。

2) 陆域施工比水下施工节约工期。码头结构及港池施工由水下施工优化成为陆上干施工，在陆域施工不需要船机设备，有效规避了港口施工因季风、洋流、气候的影响而对工期造成的影响。

3) 陆域施工比水下施工质量可控度提高，施工更安全。陆上施工码头基础、港池池底比水下不可见条件下施工基础质量更有保证，港池池底平整度高，不存在水下炸礁不可视条件下造成的死角；陆域施工不受风浪影响，因此作业环境更安全。

3 止水围堰设计与施工

汉班托塔海港一期工程的止水围堰总长为4 184 m，通过止水围堰在泻湖内围出一个面积为110万m²的基坑（图1）。

南侧面临印度洋最窄处有宽不到100 m的砂坝与印度洋相隔，砂坝高程约7.0 m，西南侧为一小山丘，最高处约16.0 m，其余部分均是用新回填成的土围堰。拟建码头、港池等水工建筑物位于泻湖内，泻湖原地面高程为-1.0~0 m，施工前与外

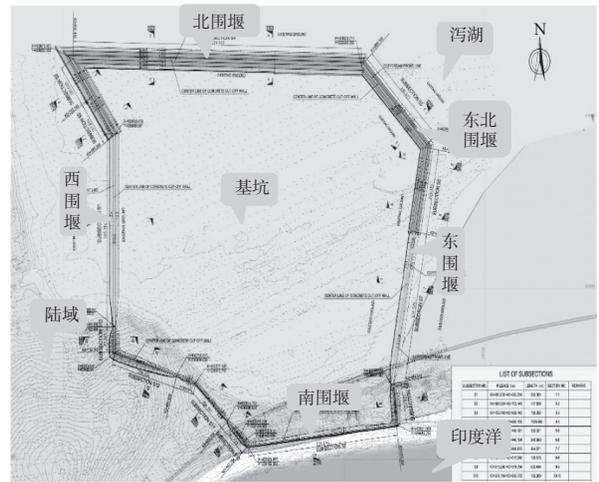


图1 止水围堰平面布置

海尚未相连。

3.1 气象、水文及地质

每年5—9月为西南季风期，平均风速为5~6.94 m/s，最大风速为7.64 m/s。设计中采用正常运用条件设计风速取 $1.5 \times 7.64 \text{ m/s} = 11.46 \text{ m/s}$ ，非常运用条件取7.64 m/s。

水文情况：地下水类型以孔隙水为主，其次为基岩风化裂隙水。孔隙水主要存于砂土层和黏性土层中，由泻湖湖水补给，水量丰富。基岩风化裂隙水主要分布在强风化岩带，由湖水及外海水补给。水位特征：泻湖正常水位为1.0 m，设计水位为2.0 m，校核水位为3.0 m；外海极端高水位为1.2 m，设计高水位为0.8 m，设计低水位为0.05 m，极端低水位-0.3 m。

地质情况：地质分层从上至下为：污泥、黏土、强风化、中风化、微风化、局部风化花岗片麻岩。

3.2 围堰设计与施工

围堰采用陆地自卸汽车运土回填、震动式压路机碾压。堰体封闭后，形成围堰包围的基坑，在其坑内需进行土石方爆破、开挖及码头和港池施工。根据工期的安排，围堰使用期为3 a，因此该工程围堰按4级围堰进行设计。该工程需围闭的面积大，要填筑的围堰较长，经过论证和比选，采用了土石围堰，该形式具有较好的稳定性，能就地取材。工程采用了砂性土和风化花岗片麻岩

作为围堰材料。

围堰应能作施工道路,并能满足在围堰内进行防渗墙施工,还应考虑基础地质条件,以减少围堰基础处理工程量。

本工程南侧位于临海航道,为了创造更多的陆上开挖区域,南侧围堰设置于砂坝的外侧。

围堰的高度需防止泻湖水漫过围堰进入基坑,影响基坑内的干地施工,堰顶高程按设计洪水的静水位加波浪高度,并计入安全超高。堰顶高程参考下式计算:

$$Y=R+e+A \quad (1)$$

式中: A 为安全加高(m); e 为最大风壅水面高度(m); R 为最大波浪在坝坡上的爬高(m),按莆田试验站公式计算,采用累计频率为5%的波浪爬高值。

围堰使用期间,考虑泻湖正常水位为1.0 m,设计水位为2.0 m,根据计算堰顶高程最大值为3.721 m,设计时围堰顶高程为3.50 m,靠泻湖侧加高至3.80 m,靠近外临海侧因港口口门敞开宽度达490 m,而且正面为常浪向,为防止越浪,高程增加到了5 m。

在进行围堰施工之前首先进行淤泥清除,使用箱型组合式简易绞吸船将泻湖内淤泥排除,根据设计和地质资料,采取不同的施工方法进行围堰施工。

断面设计,围堰主要分为东围堰、东北围堰、南围堰、西围堰、北围堰5段,根据工程区域地形和地质条件,各段围堰采用不同的断面形式。

东、西围堰位于泻湖内,堰基地质条件较好,采用直接推填开挖土形成,两侧按1:2.5放坡,采用200 mm厚的碎石护坡,碎石下设土工布1层。

东、西围堰堰底淤泥厚度在2 m以内,堰堤身直接推填形成,采用挖掘机在附近取开山土,自卸车运输,推土机推填。施工过程中水下部分直接推填完成,水上堰体分3层推填碾压,3层控制高程为1.5 m, 2.5 m, 3.5 m,推填宽度按设计要求。推填施工过程中测量人员事先放好边线后,用彩旗进行立标。每完成一层长度约100 m,即采用振动压路机碾压5~8遍,全断面完成后采用反

铲理坡。另外,在防渗墙完成后,对围堰顶修理倒坡,防止雨水、汇流水流进基坑,减小基坑干施工排水的负担。

东北围堰位于泻湖内,堰基淤泥较厚,最厚处约8 m,堰体无法推填成型。首先将堰基淤泥挖除,施工时采用功率分别为1 200匹和500匹的两条绞吸船开挖清除淤泥层,开挖底高程为-3.81~-8.74 m,堰基淤泥开挖宽度为28~38 m,开挖坡比为1:4,总挖泥量约为15万 m^3 。然后回填开挖土形成堰体,水下部分直接回填土,陆上分层推填围堰至3.5 m高程。围堰两侧侧坡比为1:2.5和1:3,泻湖侧在高程1.7 m处设宽4 m平台,采用500 mm厚块石和200 mm厚的碎石护坡,防止湖水冲刷破坏,碎石下设土工布1层;基坑侧在高程1.2 m处设宽4 m平台,采用500 mm厚块石和200 mm厚的碎石护坡,碎石下设土工布1层。

南围堰靠近印度洋,此段地形6.0 m较高,不需要填筑,采用直接开挖至高程5.0 m形成防渗墙的施工平台。由于表面有植被、灌木,在施工前,先用推土机先清表,开挖砂层至1.5~2 m高程,同时把开挖出来的砂堆放海侧,形成防浪砂堤。开挖完成后换填土(目的是利于施工防渗墙导墙)并分层碾压回填至5 m高程,围堰顶宽度10 m。围堰推填方法与东、西围堰相同。

北围堰位于泻湖内,根据后期的勘察资料,此段地质条件较差,淤泥厚度约2~4 m,对这种厚度不大的淤泥,比较适合的处理方式是开挖换填,主堤区域回填中细砂,然后进行插板处理,由于此区域的淤泥固结系数较小,强度增长较慢,因此主堤两侧采用块石反压处理,以保证围堰的稳定,反压块石要求落于淤泥下部的黏性土上。

北围堰堰底淤泥厚度从西往东在2~4.5 m,在围堰推填完成后,经钻探及设计院重新核算,淤泥上回填围堰不能满足稳定要求,回填过程中也经常发现堰体推填出水面时突然大面积坍塌,淤泥厚度较薄的西北侧堰体推填露出水面至2.5 m高程时,堰顶出现多道纵向通缝,堰体两侧出现

不同程度坍塌。针对北围堰底淤泥强度抗剪强度低、固结系数小、固结时间长的特点,在北围堰增加插打排水板处理,同时对在北围堰淤泥厚度较薄的西侧600 m基坑侧增设项高程2.5 m,宽度12.5 m的石堤,泻湖增设项高程2.5 m,宽度20 m的砂堤;北围堰淤泥厚度较厚的东侧400 m两侧均增设项高程2.5 m,宽度12.5 m的石堤;另外,为防止围堰堰体向两侧坍塌及基坑开挖时围堰的稳定,增设的石堤堤底需穿透淤泥层。

围堰施工完成后待围堰沉降位移基本稳定后,需进行防渗墙的施工,为保证防渗墙施工的安全,围堰施工时应进行碾压密实处理。

3.3 防渗墙设计与施工

本工程的围堰实际上是土石坝堤,为减少渗漏量、控制地基渗透变形,采取措施控制坝基渗流,增加渗径、降低渗透坡降,减少渗漏量,但不能完全截断渗流。垂直防渗能可靠、有效地截断渗流。本工程场地存在有透水性较强的砂层,且周边水量丰富,特别是北侧、东侧为泻湖,南侧靠近印度洋;基坑爆破震动施工规模大、外运土石方量多,基坑内施工的人员多、设备多,还要为码头结构创造陆上施工条件,基坑干施工环境维持周期长,因此基坑防渗是本工程的关键,是生命线。

在选择防渗结构方式时,重点进行了高压旋喷桩墙和混凝土防渗墙两种结构比选,两种结构均可以满足本工程的防渗要求,在质量控制方面,防渗墙成槽采用打水砣验收,具有可视性、可监控性;旋喷桩整个施工过程处于隐蔽状态,施工质量决定于操作人员的素质。机械效率及进度控制方面,防渗墙施工机械的施工效率为旋喷桩机械的4~6倍,大大缩短了工期,降低了设备和人力的投入。对本工程的适应性等方面,柔性防渗墙在强风化岩部分可以采用冲锤、钻机形成槽段,满足设计要求的槽段尺寸,防渗系数可以达到 1×10^{-7} cm/s,槽段内填筑塑性混凝土可提高结构的抗震系数;旋喷桩桩尖可以按要求钻进强风化岩0.5 m,但高压浆液对强分化层的切割是否能满足最低要求的500 mm的直径很难判断,旋喷

桩止水达到防渗系数 1×10^{-6} cm/s非常困难,形成旋喷桩刚性结构,对结构本身抗震不利。综合比较,混凝土防渗墙具有质量可控性好、施工速度快、工程造价低、防渗效果好、可靠性高等特点,更适合本工程^[1]。混凝土防渗墙的设计主要为:墙体深度、墙体厚度、墙体材料等。

确定防渗墙深度时,考虑了以下因素:防渗墙本身的支承条件、允许应力和不均匀沉降的要求,防渗墙墙底与基岩或相对不透水层之间接触带的渗透稳定和水量损失,便于造孔和浇筑,与其他防渗措施的配合,干地开挖的要求,防渗墙入岩太深会加大施工困难、太浅则易形成接触渗透,影响防渗效果。根据工程经验和规范的规定,防渗墙的底部要求进入强风化岩1 m或中风化0.5 m。本项目设计墙体深度最大23 m,大部分在10~20 m。

防渗墙的厚度应满足墙体抗渗性、耐久性、墙体应力和变形的要求,同时还应考虑到地质情况及施工设备等因素。在防渗墙厚度设计时根据防渗墙破坏时的水力坡降确定墙体厚度(δ),经验计算公式如下:

$$\delta = \frac{\Delta H_{\max}}{J} \quad (2)$$

$$J = \frac{J_{\max}}{K} \quad (3)$$

式中: δ 为墙体厚度(m); ΔH_{\max} 为作用在防渗墙上的最大水头差(m); J 为防渗墙允许承受的水力坡降; J_{\max} 为防渗墙渗透破坏坡降,取300; K 为抗渗坡降安全系数,一般取3~5。根据地质资料及计算,本工程最大水头差在19 m,计算墙体厚度约32 cm;本工程墙体厚度采用40 cm和60 cm共2种。

墙体材料,用于防渗墙的材料大致分为2类:刚性、塑性。刚性混凝土弹性模量较大,塑性及抗烈性相对较差;塑性混凝土具有抗渗性能好、变形模量低、极限应变值大、适应变形能力强等特点。根据场地地质条件,本工程防渗墙墙体主要采用塑性和刚性混凝土2种。北围堰因流塑状淤泥较厚,且难以处理,采用刚性混凝土防渗墙,其它段采用塑性混凝土防渗墙^[2]。

防渗墙施工前, 先进行导向槽施工, 导向槽的作用是为防渗墙施工起到导向和保护槽口作用, 导向槽采用支模现浇C20钢筋混凝土建造, 深1.5 m, 40 cm墙槽口宽50 cm (60 cm墙槽口宽0.70 m), 断面为倒L型, 肩宽为1 m, 厚为20 cm。导向槽具有必要的强度、刚度和精度, 要满足挖槽机械和接头管起拔设备的施工要求。

成槽完成后, 使用泥浆净化机可将泥浆中的沉渣及砂分离出来, 泥浆重复使用, 达到节省泥浆、清孔及护壁效果。

槽孔分两期施工, 先施工 I 期槽、后施工 II 期槽。I、II 期槽孔长度根据现场实际情况划分。施工前期做生产性试验, 根据实际情况予以调整, 其原则是只要不塌孔、槽孔尽量长、有利于减少槽段接缝, 保证施工质量的同时, 也加快了施工进度。

成槽满足设计要求深度后终孔, 进行清孔换浆工作。清孔换浆分两步进行: 第一步, 用抓斗捞取孔底大颗粒沉渣; 第二步, 用抽桶或砂石泵抽吸孔内泥浆。为改善泥浆性能指标, 在清孔换浆过程中可向槽孔内注入新鲜浆液。

采用泥浆下直升导管法浇筑。混凝土浇筑导管内径以200~250 mm为宜, 导管使用前应进行密闭承压试验。导管底部距槽孔底部不得大于25 cm, 混凝土必须连续浇筑, 槽内混凝土面上升速度不得小于2 m/h, 各套浇筑导管应均匀放料, 保证混凝土面均匀上升, 其高差不得超过0.5 m。

槽段之间搭接头清孔 (图3), 采用专用的钢丝刷子钻具刷洗, 清除槽孔端头混凝土壁上的泥皮, 以刷子钻具基本上不带泥屑、孔底淤积不再

增加为合格标准^[3]。



图3 搭接头洗刷

4 结语

斯里兰卡汉班托塔海港项目一期围堰防渗系数远低于 1×10^{-7} cm/s, 止水效果非常明显; 节约了大量的船机设备、材料、人力; 港池开挖提前了4个月, 港口开港提前了3个月, 工程取得了成功, 得到多国同仁对采用止水围堰进行内挖式干施工方案的认可。止水围堰围成110万m²基坑形成的陆上施工的环境, 整个海港工程在干作业条件下进行施工是港口工程施工中的第一次成功应用。这种干施工港口方案的成功实施, 为陆地干施工积累了宝贵经验, 具有指导意义。

参考文献:

- [1] SL 174—1996 水利水电工程混凝土防渗墙施工规范[S].
- [2] JTJ 303—2003 港口工程地下连续墙结构设计与施工规程[S].
- [3] 交通部第一航务局. 港口工程施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.

(本文编辑 武亚庆)

