

李广霖, 刘建武. 深大竖井开挖及逆作法施工技术研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 28-31.

LI Guanglin, LIU Jianwu. Research on excavation and reverse construction technology for deep and large vertical shafts[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 28-31.

# 深大竖井开挖及逆作法施工技术研究

李广霖, 刘建武

(深圳市原水有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 逆作法是一种超常规的施工方法, 一般是在深基础、地质复杂、地下水位高等特殊情况下采用, 地下结构采用逆作法施工, 相比传统的施工方法可降低造价、缩短工期, 减少周边环境的影响, 施工安全又能得保证, 是施工高层结构地下室或地下结构的有效方法。但地下结构的理论分析起步较晚, 特别是施工方面理论还不是很完善, 因此对施工过程的深入细致的研究是十分必要的。

**关键词:** 逆作法; 深大竖井; 开挖

**DOI:** 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.006

**中图分类号:** TU94+1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0860(2025)S1-0028-04

## Research on excavation and reverse construction technology for deep and large vertical shafts

LI Guanglin, LIU Jianwu

(Shenzhen Raw Water Company, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** Reverse construction method is an unconventional construction method, generally used in special situations such as deep foundations, complex geology, and high groundwater levels. Underground structures are constructed using reverse construction method, which can reduce costs, shorten construction periods, reduce the impact on the surrounding environment, and ensure construction safety. It is an effective method for constructing high-rise basement or underground structures. However, the theoretical analysis of underground structures started relatively late, especially in terms of construction theory, which is not yet very complete. Therefore, it is necessary to conduct in-depth and detailed research on the construction process.

**Keywords:** top-down construction method; deep and large shaft; excavation

## 1 工程概况

公明水库—清林径水库连通工程是珠江三角洲水资源配置工程在深圳境内配套项目之一。工程主要任务是实现东江和西江水资源联合调配, 提升水资源调配能力, 实现龙岗区和龙华区双水源, 保障深圳市供水战略储备目标, 增强深圳市水安全保障能力, 并为向香港应急供水创造条件。

雁田通风排水井位于龙岗区雁田水库西南侧, 其

井为圆形, 内径尺寸为 32 m, 竖井井口设置有 3 m 高、2.7 m 宽的冠梁, 顶高程为 56.5 m。底板底高程为 -26.65 m, 竖井开挖深度 82.65 m。采用地下连续墙加钢筋混凝土内衬墙支护, 基坑开挖采用地下连续墙垂直支护, 内衬墙采用逆作法施工, 竖井内衬墙厚 1.5 m、每节长 3 m, 与地下连续墙紧贴一起。其具体的基坑支护结构设计为: 地下连续墙墙厚 1.2 m, 逆作法内衬墙厚 1.5 m, 衬砌后内直径分别为 37.4 m 和 32 m。

收稿日期: 2024-07-01

作者简介: 李广霖(2001—), 男, 工程师, 学士, 主要从事水利工程技术研究与管理工作。E-mail: 1124283893@qq.com

## 2 竖井施工方案及关键技术

### 2.1 逆作法原理

逆作法是一种超常规的施工方法,一般是在深基础、地质复杂、地下水位高等特殊情况下采用。逆作法的工艺原理是:沿建筑物地下结构外墙线(地下连续墙同时也是地下室结构承重墙)或外墙外侧(地下连续墙等仅用作支护结构时)施工地下连续墙或其他支护结构;同时在建筑物内部的关键节点位置(如柱子或内隔墙转角及交接处等,根据需要由设计单位和施工单位共同确定)浇筑或打下中间支承桩和柱,承受地下结构施工期间上、下部结构自重和施工荷载;然后施工地面一层的楼面(梁、板)结构,作为地下支护结构的首道支撑;随后逐层向下开挖土方并及时浇筑各层地下结构,直至底板完成。由于地面一层的楼面结构已完成,为上部结构施工创造了条件,因此在地下结构施工的同时,可以向上逐层进行地上结构的施工。如此可实现地上、地下同时进行施工,直至地下结构工程结束。但在地下结构底板封底之前,地上部结构允许施工的层数要经设计计算确定<sup>[1]</sup>。

### 2.2 施工方案

深大竖井的施工主要难点分两大点:施工难度高:深度大、直径大增加了挖掘、支护等工作的难度和风险,对施工技术和工艺要求严格。涌水与防水:深度大可能导致较高的水压,涌水问题突出,防水处理难度大。

对两大重点问题定制了竖井的施工方案:周边旋喷桩→地下连续墙施工+帷幕灌浆→地连墙接缝处高压旋喷桩→地连墙控制段分层开挖与衬砌(逆作法)→岩层段分层开挖及支护衬砌(逆作法)→井底锚筋桩施工→封底混凝土浇筑→井底基岩固结灌浆<sup>[2]</sup>。

### 2.3 围护结构布置及逆作法施工

雁田通风排水井为圆形结构,采用双层衬砌结构,外层为地下连续墙,内层为满堂现浇钢筋混凝土内衬墙。围护结构主要包括:周边高喷防渗帷幕、冠梁、地下连续墙、内衬墙、底板、底板锚筋桩、底板固结灌浆及墙底帷幕灌浆<sup>[4]</sup>。

(1)周边高喷防渗帷幕。根据水文试验成果,第四系砂质黏土具微透水性,全风化变质砂岩及强风化变质砂岩呈弱-中等透水性,微风化变质砂岩具弱-中等透水性。竖井开挖后,地下水将通过强风化变质砂岩及裂隙向竖井涌水,存在竖井涌水问题。因此,在地连墙外10 m布置2排三重管高压旋喷桩,孔深36 m,初拟孔排距1.0 m×1.0 m。

(2)冠梁。冠梁采用现浇C35W8钢筋混凝土。对地下连续墙及内衬起顶压作用。顶部高程为56.5 m,底部高程53.5 m,梁高3.0 m,厚2.7 m,内径32.0 m,外径37.4 m。

(3)地下连续墙。根据地质描述,竖井开挖存在第四系覆盖层、全、强风化带、碎裂结构带、断层带井壁稳定问题和基坑涌水问题,且临近雁田水库,设计考虑采用接地式地连墙,地连墙深入竖井底部以下。地连墙采用接地式C30W8现浇钢筋混凝土结构。参考类似工程经验,经结构和稳定计算,确定墙厚为1.2 m。地下连续墙内径35.0 m,外径37.4 m,墙顶高程53.5 m,墙底高程-31.7 m,墙深85.2 m,深入底板以下5 m。为防止外水通过地连墙槽段接头进入竖井内,在地连墙二期槽段间接头处预埋高压旋喷注浆管,高压旋喷孔深入强风化岩层3 m。

(4)内衬墙。内衬墙采用现浇C35W12钢筋混凝土,在开挖过程中作为成环结构,对地下连续墙起到弹性内支撑作用。内衬墙厚1.5 m,顶部高程53.5 m,底部高程-21.7 m,衬砌高75.2 m,内径32.0 m,外径35.0 m。

(5)底板。底板采用现浇C35W12钢筋混凝土,经底板结构及抗浮计算,确定底板厚5.0 m。底板直径35.0 m,顶部高程-21.7 m,底部高程-26.7 m。底板下部基岩固结灌浆孔按2.5 m×2.5 m梅花形布置,孔深6 m。底板设置3φ36、L=12 m锚筋桩,间排距2.0 m×2.0 m。

(6)墙底帷幕灌浆。地下连续墙下部设置两排帷幕灌浆孔,灌浆孔排距和孔距分别为0.5 m和1.5 m。帷幕底线高程为-46.7 m,帷幕深度为15.0 m,灌后岩体透水性要求小于3 Lu。

(7)内衬墙施工方法。每层开挖完成后,进行内衬墙施工。为便于内衬墙竖向钢筋安装,在内衬墙下部位置超挖0.9 m深,靠井圆心方向根据土层自稳情况放坡,便于人员上下及竖向钢筋安装。超挖完成后及时对该部分地连墙砼面进行凿毛,避免竖向钢筋安装后,下层施工时凿毛困难。内衬墙竖向钢筋安装完成后,及时进行回填,回填不能采用块石堆填,且需人工配合设备作业,避免回填作业时将已安装竖向钢筋冲击变形。接近本层底高程时,进行止水安装,采用沙土回填并修成内外高差30 cm的坡,随后浇筑10 cm C15素混凝土垫层作为底模。埋入下方土层的竖向钢筋必须采用保护套筒进行保护。钢筋绑扎完成,进行模板安装作业。圆形井模板采用整体升降模板,由电机控制下降到位后,液压系统进行安装,在

安装之前涂刷脱模剂。模板安装好后,由模板自身支撑系统进行支撑,不设额外支撑。待仓号钢筋、模板验收通过后即可进行混凝土浇筑施工。混凝土采用商品混凝土,罐车运输。采用37~72 m天泵入料,天泵浇筑时精确控制混凝土塌落度,在能泵送入料的前提下尽量减小混凝土塌落度,以保证混凝土浇筑质量<sup>[3]</sup>。由模板上预留的进料口进料,工人由模板顶部的振捣口采用 $\Phi 50$ 软轴振捣器进行振捣。采用平铺法施工,每层铺料厚度按照30~50 cm进行控制。下料时应均匀下料,及时振捣,保证仓号各位置混凝土均匀上升,避免产生模板受力不平衡的现象。浇筑过程中严格控制混凝土上升速度,每层浇筑40~50 cm,每小时浇筑一层。工作井开挖至第26层时开始洞门墙施工,第23~25层洞门墙采用逆作法施工,分层高度3 m,第26层洞门墙高3.15 m,待底板浇筑完成后采用顺作法施工。洞门墙段开挖过程中,预留洞门型部分岩层暂不开挖,开挖面浇筑10 cm混凝土垫层,作为内衬墙混凝土浇筑底模使用,垫层上铺设一层塑料薄膜便于开挖后混凝土与岩层分离。门洞侧模采用15 mm厚的覆面木胶合板拼成;支撑部分,主梁采用50 mm×100 mm方木,横向布置间距为600 mm;小梁采用 $\Phi 48 \times 3.5$ 钢管,竖向布置间距为250 mm;对拉螺栓采用M14型,横向间距600 mm,竖向间距600 mm;门洞侧模板拉杆需与周边钢筋形成稳定连接,避免浇筑混凝土时发生上浮移位。混凝土浇筑与井壁混凝土类似,采用72 m天泵浇筑混凝土。浇筑过程中注意控制混凝土对门洞模板、预埋钢环造成的冲击,避免造成模板、预埋件移位。浇筑过程中严格控制混凝土上升速度,每层浇筑40~50 cm,每1 h浇筑一层<sup>[5]</sup>。

### 3 关键问题

#### 3.1 块体稳定分析

雁田通风排水井变质砂岩岩层具有倾向倾角,且有破碎带,存在块体稳定问题。

假定块体滑动时黏聚力为0,块体单宽下滑力 $F$  (kN/m)按下式计算

$$F = G \sin \theta - fG \cos \theta \quad (1)$$

式中, $G$ 为单宽块体的重力(kN/m); $\theta$ 为滑动面的倾角(kN/m); $f$ 为滑动面的摩擦系数。

地连墙单宽抗滑力 $F'$  (kN/m)按下式计算

$$F' = \frac{Ed}{R^2} h \quad (2)$$

式中, $E$ 为地连墙墙体材料的弹性模量(kN/m<sup>2</sup>); $d$

为地连墙墙体有效厚度(m); $R$ 为地连墙墙体中心线半径(m); $h$ 为块体高度(m)。

雁田通风排水井块体面积约120 m<sup>2</sup>,块体高21 m,滑动面倾角61°,经计算,块体单宽下滑力为1 522 kN/m,地连墙单宽抗滑力为2 307 622 kN/m,远大于块体单宽下滑力,块体是稳定的。

#### 3.2 基坑渗漏保护措施

为提高地下连续墙防渗效果,此次设计总共设置三道防渗漏措施。竖井在开挖前距离地下连续墙10 m处设置第一道防渗措施,高压旋喷桩与帷幕灌浆相结合。第二道防渗措施则是地下连续墙,竖井开挖前在地下连续墙的每个槽段接缝外侧,打入三根深入全风化以下的高压旋喷桩,进行地连墙I、II槽缝处的加固。第三道则是内衬墙,接缝处采用GB/T 31538—2015硬质塑料或硬质橡胶骨架接缝注浆管+止水铜片的措施,防止地下水的渗漏。

施工期间在基坑中部设置1个降水井,水泵抽排至井外排水系统,降水井内水位低于开挖线1 m,控制开挖渣料含水率,避免影响土石方外运。

降水井深度约17.5 m,采用工程地质钻机成孔,钻孔直径600 mm。钻进前测量好钻具总长,精确计算机上余尺,控制钻进深度,深度要大于设计深度,以考虑抽水期间沉淀物可能达到的沉积高度所产生的影响,钻进中保持泥浆比重在1.15~1.25 g/cm<sup>3</sup>,钻进过程中要对地层分层描述,确定降水含水层的确切层位和岩性,并保证钻孔圆正垂直。钻孔过程中采集土样,核对含水层所在部位和土的颗粒组成。

终孔深度达到后,井管下入前进行清孔作业,调浆宜慢,清孔后泥浆比重1.05 g/cm<sup>3</sup>左右。清孔采取注入清水置换,利用砂石泵抽出沉渣,并测定井深。

降水井管采用直径400 mm钢制滤水管,每节长约6 m,利用人工配合吊车分节吊放。钢管滤水孔处用300 g/m<sup>2</sup>无纺布包裹严密,下到设计深度,并采取措施(如在井管附近设置标记,并用木板将其围住)加以临时保护,随开挖随拆除部分井管,剩余部分作好保护。

井管到达设计深度后,适当稀释井内泥浆,然后立即在井管周围灌填滤料。滤料采用人工沿井孔四周均匀连续填入。施工潜水井的滤料采用粒径3~7 mm干净细小的河卵石与中粗砂混合,将滤料填至井口下2 m处,其上用粘土回填至地面。

完成滤料灌填后,按规定进行洗井。在成井后8 h内,将水泵放入井底反复抽洗,以保证渗水效果,

洗井过程中观测水位及出水量变化情况。

安装潜水泵及管路系统前检查电机和泵体, 确认完好无误后方可安装; 潜水电机、电缆和接头的绝缘安全可靠, 并配有保护开关控制, 以确保安全运转; 安装过程中保证各连接部位密封可靠不漏气; 将真空泵进出水、进出气调节好, 保证正常运转。

洗井后, 对井管进行试抽, 如有异常情况, 重新洗井, 并再次进行抽水试验。洗井结束后, 待水位恢复可按设计下泵, 下入深度宜在滤水管下半部分, 以保证足够的降深。排水管道及电源线路一定要先连接好, 试抽 3 h, 测定井内水位及观测孔水位变化, 安装水表测流量。

进行降水作业时, 水泵抽水位置与开挖高度相适应, 随工作井开挖逐步下降抽水高程, 以保证地下水位降至开挖面以下 0.5~1.0 m, 不得直接由降水井底部抽水, 避免井内降水过多影响工作井土体及支护结构稳定性。

管井降水拟配置 1 台 100QJ8-40/8 型井用潜水泵接 PE 排水管抽排。

## 4 结 语

施工区土体岩石比较破碎透水系数大、自稳性

差, 但排水方便采用“逆作法”较为安全, 此工程施工与设计相结合创新内容选择三层防渗措施起到了有效的防渗的作用, 底板加厚并在下部采用固结灌浆的形式解决了抗浮力, 施工期间基坑中部也设置降水井解决了基坑排水问题, 从而保证了施工过程中基坑的安全稳定性。

在公明水库—清林径水库连通工程中得到了验证, 希望同类工程可以借鉴。

## 参考文献:

- [1] 别怀庆. 土体支承盖挖逆作法施工技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [2] 于澎涛, 王江涛, 龚浩. 南水北调中线穿黄工程深竖井逆作法施工技术[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 91-92.
- [3] 李晨. 某深大基坑逆作法施工实例应用分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(5): 124-126.
- [4] 黄学龙. 逆作法支护方案优化研究[J]. 广东建材, 2024, 40(6): 131-134.
- [5] 林能文. 复杂施工条件下地下连续墙施工技术[J]. 陕西水利, 2023(3): 122-124.

(责任编辑 王 璐)