

# 强透水超深超厚砂层竖井封底施工技术研究

杨志先, 廖周楷

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

**摘要:**强透水超深超厚砂层竖井施工首先需要考虑的是安全问题。在安全能够得到保障的前提下,才能提供高效与快捷的施工条件。通过现场工艺试验及论证,总结了河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程下穿沁河段检修井封底防渗施工采用MJS工法的技术可行性及可靠性并形成了完善的施工技术,最终实现了安全高效与快捷施工的目的,所取得的经验可为其他类似工程施工提供借鉴。

**关键词:**强透水超深超厚砂层;竖井;封底;防渗施工;MJS工法;施工技术

**中图分类号:**TV554;TV52;TV7

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2022)04-0089-04

## Construction Technology of Shaft Bottom Sealing in Ultra-Thick Sand Layer with Strong Permeability

YANG Zhixian, LIAO Zhoukai

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610213)

**Abstract:** The top priority in construction of a shaft in an ultra-thick sand layer with strong permeability is safety. Only on the premise that safety can be guaranteed, efficient and fast construction conditions be provided. Through field tests and demonstrations, this paper summarizes the technical feasibility and reliability of the MJS construction method for the bottom sealing and anti-seepage construction of the shaft in the Qinhe river reach under the Xixiyuan Water Conveyance And Irrigation Project in Henan Province, forming a perfect construction technology, Finally, the goal of safty, efficient and fast construction is achieved, which provides an effective reference for other similar projects.

**Key words:** Ultra-thick sand layer with strong permeability; Shaft; Bottom sealing; anti-seepage construction; MJS construction method; Construction Technology

## 1 概述

近年来,随着国民经济的高速发展及工程技术的进步与创新,下穿河流湖海的隧洞工程不断增多。通过对河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程下穿沁河段强透水超深超厚砂层中检修井封底防渗施工的方案进行分析研究及现场工艺试验论证,将原有施工方案变更为MJS工法,通过变更方案的实施,验证了MJS工法在该地层中的可行性及可靠性,MJS工法的使用可以有效节约施工时间。阐述了对强透水超深超厚砂层竖井封底施工技术进行的研究。

河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程下穿沁河段的检修井布置在沁河东岸,距沁河左岸大堤坡脚约290 m,其主要作用是在隧洞检修前将洞内的存水排出,施工期间作为盾构接收井使用。

检修井为圆形竖井,采用地下连续墙围护结构,外径为21.8 m,内径为18.8 m,墙厚1.5 m,深度为76 m;主体结构内径为16.4~15.4 m,井深45.75 m,自上而下采用逆作法施工,内衬底板厚3 m。

该工程厂区位于黄河I级阶地,地层岩性为第四系全新统冲积物,检修井开挖的地层从上至下分别为:轻粉质壤土,粉质黏土,重粉质壤土,中细砂。场区自地表12 m以下均为中细砂地层,具中等~强透水性。厂区位置的沁河为地上悬河,常年有水,由沁河河水补给地下水,河水与承压性地下水直接联系,实测场地地下潜水水位距地面约7 m,地下水主要位于砂层中,微承压且丰富。

## 2 竖井封底技术实施的背景与研究

鉴于检修井地基透水层深厚且基坑为超深基坑,检修井下部地层为含水量丰富的中细砂地层,且地下连续墙的底部未嵌入不透水层,

随着主体结构逆作法的施工,井内外水位差变大,井内降水难度亦将不断加大,导致内衬结构施工难以进行,故在设计时对检修井底部采用封底防渗处理措施,该措施既是深基坑工程安全施工的重要保证措施,同时亦可大大减小井内降水对临近堤防和建筑物的影响。施工图设计阶段的封底处理措施为双高压三管法喷射灌浆,桩与桩之间相互搭接,在井底形成高喷固结体。高喷封底处理的范围为:平面范围超出地下连续墙外边线 2 m,竖向范围为基坑底面以下 10 m。

检修井地面标高为 91.2 m,基坑底标高为 46.81 m,封底标高为 46.81~36.81 m,检修井封底高压旋喷桩深度超过 50 m。针对上述情况,如何确保基坑底高压旋喷桩封底桩的有效直径及搭接满足设计要求,保证地下水不会从搭接处向基坑渗漏,在该工程高喷灌浆正式施工前,根据相关要求,施工单位进行了现场工艺性试验。高压喷射灌浆现场工艺性试验情况如下。

2.1 第一次试验情况

按照施工图要求,高压喷射灌浆形成的桩径达 1 m。依据相关规范并参考类似工程经验,现场选用的桩间距为 0.7 m、0.9 m 并初步选定了 2 种高喷灌浆参数进行试验,每种参数各 3 组,试验共布置 6 组,每组 3 根桩。试验采用双高压三重管法在设计桩位处进行试验,检修井外盾构端头加固范围内布置 4 组,检修井内布置 2 组,试验钻孔深度为 54.59 m,其上部 23.64 m 为空桩,下部 30.95 m 范围为实际桩长。第一次试验桩位布置情况见图 1。

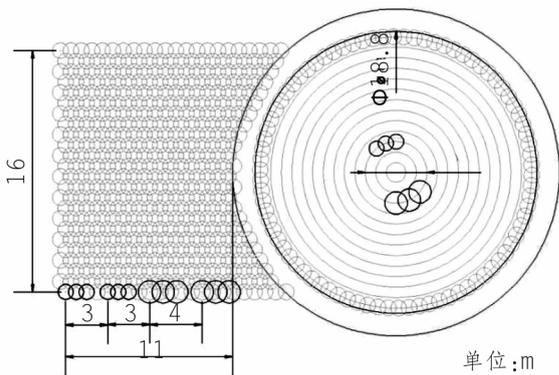


图1 第一次试验桩位布置图

试验桩施工完成后共取芯 9 处,取芯的最小

深度为 6 m,最大深度为 51 m,30~40 m 以内芯样较完整,深度超过 40 m 后大部分无芯样。根据取芯情况进行分析与推测:在喷射深度小于 30 m 时成桩直径为 1 m 以上,喷射深度为 40~55 m 时,由于钻孔偏斜等原因,推测成桩直径为 0.6~0.9 m。桩与桩之间是否搭接亦不好判断,未能达到试验目的。

2.2 第二次试验情况

由于第一次试验没有达到预期目的,存在不能完全封底的风险,故在检修井内中心部位选取了一定数量的桩进行第二次高喷灌浆工艺试验,以进一步验证灌浆的总体效果、有效桩径、施工参数、适宜的孔排距及固结体的抗压、防渗性能等。同时,根据第一次试验情况:双高压三管法成桩直径较小,施工功效较低且存在不能完全封底的风险,经综合考虑灌浆效果、工期因素,在第二次试桩时,在端头加固区域采用 MJS 工法同时进行高喷试验并对比验证了试验效果。

(1)针对试验方案,在分析总结了第一次试验结果后,第二次试验对试验桩位的布置等进行了调整,本次试验桩布置在井中心区域内,共布置了 39 根桩,分为 4 个区域,选用相应桩间距 0.8 m、0.6 m、0.7 m,对应 4 种施工参数,灌浆范围高程为 48.31~36.81 m,上部 43.09 m 为空桩,下部 11.5 m 为实际桩长。双高压三重管法试验桩位布置情况见图 2。

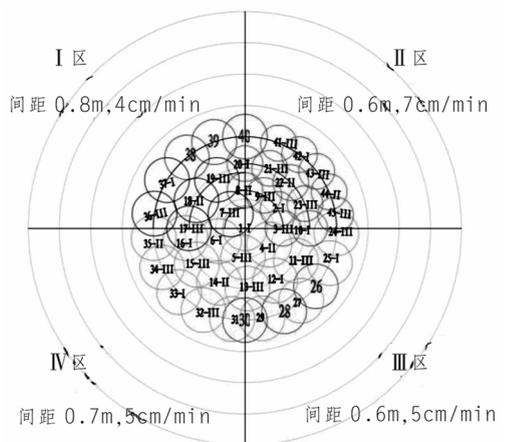


图2 第二次双高压三重管法试验桩位布置图

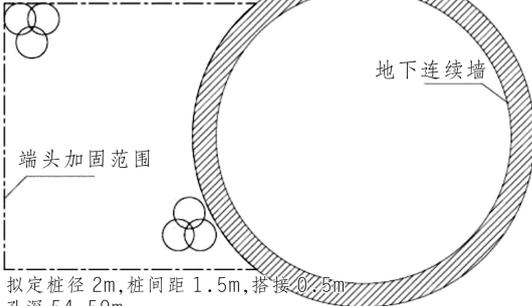
第二次双高压三重管法试验取芯共计 6 处,分别位于 4 个区域,最大取芯深度为 53 m,取芯点位随机选取桩体间的搭接部位,取芯率为 68.8%~98.5%,芯样最小强度为 3.6 MPa,满足

设计值 3 MPa 的要求。

对芯样进行了室内渗透试验,测得芯样渗透系数为  $3.5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$  cm/s,渗透系数均小于设计值  $1 \times 10^{-5}$  cm/s。在现场取芯处进行了注水试验,渗透系数亦小于设计值  $1 \times 10^{-5}$  cm/s。对试验采用的 3 种桩间距(0.8 m、0.7 m、0.6 m)随机取芯,取芯结果均显示搭接。

(2)MJS 工法喷射灌浆试验。MJS 工法喷射灌浆试验区域布置在检修井外盾构接收端头加固处,分 2 组桩,每组 3 根,共计 6 根,按照 MJS 工法选定的桩径为 2 m。MJS 工法喷射灌浆试验桩位布置情况见图 3。MJS 工法喷射灌浆试验参数见表 1。

拟定桩径 2m,桩间距 1.5m,搭接 0.5m  
孔深 42.64m  
灌浆长度:19m+1.5m  
端头加固灌浆范围



拟定桩径 2m,桩间距 1.5m,搭接 0.5m  
孔深 54.59m  
灌浆长度:10m+1.5m  
包含端头加固及地下连续墙外 2m 封底灌浆范围

图 3 MJS 工法喷射灌浆试验桩位布置图

表 1 MJS 工法喷射灌浆试验参数表

项目	参数	
提升速度 / $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	2.5	
旋转速度 / $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	3	
浆液	流量 / $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	85~100
	压力 / MPa	$\geq 38$
	水灰比	1:1
空气	压力 / MPa	0.8~1.5
	风量 / $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	1~2.5

MJS 工法喷射灌浆试验取芯共计 4 根,第一组和第二组各 2 根,每组中的取芯位置为桩搭接处和桩边缘处各一处,取芯深度为 42~51 m。第一组位于桩搭接处的取芯率为 94.7%,桩边缘处的取芯率为 81.2%;第二组位于桩搭接处的取芯率为 75%,桩边缘处的取芯率为 60%,第二组 MJS 成桩和取芯时间间隔为 13 d,桩体未完全固结,取出的芯样有尚未凝固的水泥块。所取出芯样中的最小强度为 5.7 MPa,满足设计

值 3 MPa 的要求。

对芯样进行了室内渗透试验,测得芯样渗透系数为  $6.3 \times 10^{-6} \sim 7.2 \times 10^{-6}$  cm/s,渗透系数均小于设计值  $1 \times 10^{-5}$  cm/s。在现场取芯处进行了注水试验,渗透系数亦小于设计值  $1 \times 10^{-5}$  cm/s。根据取芯情况判断,桩径能达到 2 m。

(3)两种试验成果之对比。从试验成果看,双高压三重管法灌浆和 MJS 工法高喷灌浆均能满足该工程地层加固、防渗的要求;MJS 工法工艺较双高压三重管法工艺的成桩直径更大,用于地层加固时,桩体数量显著减少,可以有效节约施工时间;MJS 工法成桩的胶结情况更好,两种高喷工艺加固体的渗透系数基本相当。

参考目前国内已建类似工程竖井采用双高压三管法喷射灌浆封底防渗的失效案例<sup>[1,2]</sup>,根据高压旋喷桩的特点与技术现状,结合国内以往在砂层中的施工经验发现:双高压三管法喷射灌浆用于砂土地层加固时,桩体的垂直度较难保证,随机造成桩体之间的搭接咬合效果不佳<sup>[3]</sup>,达不到理想的止水和加固土体的效果。而在富水砂土地层中,桩体咬合不好会在加固体中间形成水的渗流通道,容易引发涌水涌砂等工程事故<sup>[4]</sup>。鉴于以上原因及现场试验论证、经过仔细分析与专家咨询论证后得出以下看法:MJS 工法比双高压三重管法的工艺更具有可实施性和可靠性,MJS 工法的最大有效加固深度可达 100 m。在上海地区试验时约 50 m 深度处开挖外露的桩径可达 2.5 m<sup>[5]</sup>。鉴于此,最终决定变更原有的封底防渗加固设计方案,该工程采用 MJS 工法施工。

### 3 主要技术措施

MJS 工法是在传统高压喷射灌浆法的基础上增加了前端施工装置,其核心技术为主动排泥和孔内压力监测。前端施工装置具有以下三个特点:有 3 个独立喷嘴,分别向地层中喷射硬化材料、高压空气、高压水;带有压力传感器,可探测孔内压力并将其传至控制中心;具有主动排泥口,主动排泥口内部通过高速流体产生负压,可以主动吸走多余的泥浆。按照 MJS 工法最终选择的桩径为 2 m,成桩直径大,可以有效减小成桩数量。

#### 3.1 施工工艺流程

结合该工程地质条件,MJS 工法施工工艺流程见图 4。

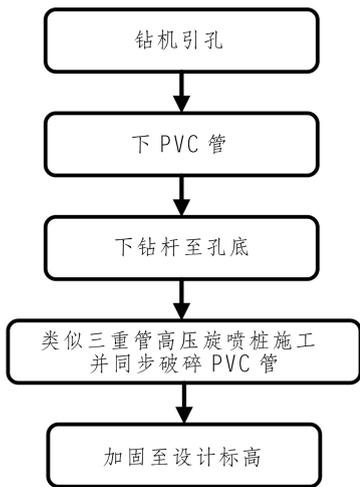


图4 MJS工法施工工艺流程图

3.2 操作要点

(1)MJS工法施工的主要控制参数见表2。

(2)垂直度控制——垂直度不大于0.5%。

①场地平整,地基承载力需达到承担设备重

表2 MJS工法施工主要控制参数表

序号	内容	参数	序号	内容	参数
1	桩径	2 000 mm	9	垂直度误差	≤1/200
2	水灰比	1 : 1	10	水泥掺量	30%~40%
3	水泥浆压力	40 MPa	11	提升速度	全圆 26 min/m 半圆 13 min/m
4	水泥浆流量	≥125 L/min	12	转速	3~4 rpm
5	主空气压力	0.5~0.8 MPa	13	地内压力	K=1.1~1.6
6	主空气流量	1.0~2 m <sup>3</sup> /min	14	步距行程	2.5 cm
7	倒吸水压力	8~25 MPa	15	步距提升时间	全圆 39 s 半圆 19.5 s
8	倒吸水流量	0~60 L/min	16	削孔水压力	10~30 MPa

井底无涌水涌砂情况发生,封底防渗效果明显,确保了深基坑工程安全施工,为内衬结构施工提供了安全的作业环境,加快了施工进度,达到了预期效果及目的。

5 结语

通过对河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程下穿沁河段超深超厚强透水砂层中检修井封底防渗处理方案的研究及现场工艺试验论证,最终将原施工工法变更为MJS工法,确保了检修井封底防渗处理的效果,为后续开挖及内衬结构施工提供了安全的作业环境,证明了MJS工法在该地层中实施的可行性及可靠性,成桩直径更大,将其用于地层加固时,桩体数量显著减少,可以有效节约施工时间,所取得的经验可为类似工程提供参考。

量的要求。

②引孔时每隔1 h对钻机进行垂直度检测。

(3)其它控制措施。

①尽量缩短注浆距离以减少压力损耗。

②清洗水泥浆管、喷浆管、钻杆等管路,保持管路畅通。

③施工前选择性地停止采用MJS工法施工周围的降水井抽水等措施,以避免在采用MJS工法施工期间导致其周围地下水水位面不平产生的地下水流动,使注入的水泥浆不随地下水流失。

4 开挖质量的检验及评价

检修井封底防渗处理采用MJS工法完成后,对封底区10处、地下连续墙槽接缝1处采用常水头试验方法进行了渗透性能检测,渗透系数≤1×10<sup>-5</sup> cm/s,满足设计要求;取芯固结体28 d抗压强度≥3 MPa。

检修井从竖井第一层开挖直至开挖至井底,

参考文献:

[1] 崔文光、崔春霖、夏可风. 南水北调穿黄工程北岸竖井水下开挖施工技术[A]. 中国水力发电工程学会编, 2008 中国水力发电论文集[C]. 北京: 中国电力出版社, 2008 年, 450-454.

[2] 张健. 超深竖井水下开挖施工关键技术[J]. 公路与汽运, 2011, 27(2): 174-177.

[3] 江玉生, 等. 盾构始发与到达——端头加固理论研究与工程实践(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.

[4] 刘根宁. 富水砂层中盾构端头加固体失效原因分析及防治[J]. 山西建筑, 2014, 40(6): 182-183.

[5] 孔飞. MJS工法桩在施工中的应用及与传统旋喷桩的对比分析[J]. 砖瓦世界, 2019, 36(5): 17, 19.

[6] 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范, DL/T5200-2019 [S].

作者简介:

杨志先(1978-),男,山东菏泽人,高级工程师,从事水电工程施工技术与管理工作;  
廖周楷(1986-),男,四川台山人,经济师,从事工程管理工作。

(责任编辑:李燕辉)