

# 水泥土防渗墙工艺性试验参数比选 及质量控制

蔡娟<sup>1</sup>, 张鹏<sup>2</sup>, 于金龙<sup>3</sup>

(1. 灌云县水利工程质量监督站, 江苏 连云港 222200; 2. 连云港市水利局, 江苏 连云港 222200;  
3. 灌云县水利局打井工程队, 江苏 连云港 222200)

**摘要:**水泥搅拌防渗墙具有工艺成熟、施工质量可控、造价经济等优点, 广泛应用于防渗工程, 易取得较好的墙体强度、均匀性、防渗效果。但水泥搅拌防渗墙对当地土质、土层性质敏感性较强, 如对淤泥质黏土来说, 不易取得较高的墙体均匀性, 对富含砂、石的土层来说, 常常钻进困难。阐述了新沂河左堤防渗工程在第一次墙体工艺性试验时, 无法取得合格的试验成果。通过地质复勘, 纠正地质勘察成果与实际情况的偏差, 调整水泥搅拌防渗墙桩机型号、电机功率、浆气压力、钻进下沉与提升次数、行程时间等施工参数, 并对特殊位置采取扩大防渗体补偿等处理手段, 获取试验成果, 推进工程实施。

**关键词:**水泥搅拌防渗墙; 试验成果; 施工参数; 新沂河

中图分类号: TV523

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)04-0020-0004

## Comparative selection of technological test parameters and quality control of soil-cement cutoff wall

CAI Juan<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, YU Jinlong<sup>3</sup>

(1. Guanyun County Water Conservancy Project Quality Supervision Station, Lianyungang 222200, China;  
2. Lianyungang Water Conservancy Bureau, Lianyungang 222200, China;  
3. Guanyun County Water Conservancy Well Drilling Engineering Team, Lianyungang 222200, China)

**Abstract:** Cement mixing cutoff wall has the advantages of mature technology, controllable construction quality, low cost and so on. It is widely used in anti-seepage engineering and easy to achieve better wall strength, uniformity and anti-seepage effect. However, the cement mixing cutoff wall is sensitive to the properties of soil and soil layer. For example, for mucky clay, it is not easy to achieve high wall uniformity, and for sand and stone rich soil layers, it is often difficult to drill. This paper describes the failure of the first construction test of Xinyi River project. Through geological survey, the deviation between geological survey results and the actual situation is corrected, construction parameters of cement mixing cutoff wall such as pile type number, motor power, slurry pressure, drilling and lifting times, travel time, etc. are adjusted, and treatment methods such as expanding impervious body compensation are adopted for special positions to obtain test results and promote project implementation.

**Key words:** cement mixing cutoff wall; test results; construction parameters; Xinyi River

收稿日期: 2023-01-16

作者简介: 蔡娟(1976—), 女, 高级工程师, 本科, 主要从事水利工程施工质量研究。E-mail: 823812580@qq.com

## 1 项目概况

### 1.1 项目基本情况

新沭河属沂沭泗水系,是沂沭泗河洪水东调入海的主要通道,宣泄骆马湖和沭河人民胜利堰洪水。近年来当新沂河持续高水位行洪时,多处堤段出现散浸、渗水现象。渗流问题的存在严重危及大堤防洪安全。针对新沂河历年巡查及行洪中暴露出来的堤坡渗水等问题,拟对新沂河北堤4 937 m堤段采用深搅桩防渗处理,解决堤身因裂缝、空洞和深层堤基透水性较强造成的渗流险情,恢复新沂河行洪流量7 500~7 800 m<sup>3</sup>/s的设计标准。从技术、经济、施工等方面对机械垂直铺膜、高压定喷防渗墙、多头小直径深搅桩等3类方案进行比选,考虑到本次防渗处理深度接近20 m,多头小直径深搅桩有明显的工程造价优势,因此初步选定防渗效果好、单价较低的多头小直径深搅桩方案<sup>[1-2]</sup>。设计深搅桩直径为0.39 m,桩与桩连续搭接形成墙体,最薄处墙厚不小于0.22 m,固化剂采用42.5级普通硅酸盐水泥,掺入量为18%(原为12%),水泥浆的水灰比介于1.2:1~2.0:1之间,无侧限抗压强度(28 d)不小于0.5 MPa,板墙渗透系数小于 $1\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$  cm/s,防渗墙体下限以进入相对不透水层0.5~1 m为控制,桩顶高程9.2~9.6 m,桩长17.4~19.2 m<sup>[1-2]</sup>。多头小直径深层搅拌桩墙体形状示意图1所示。

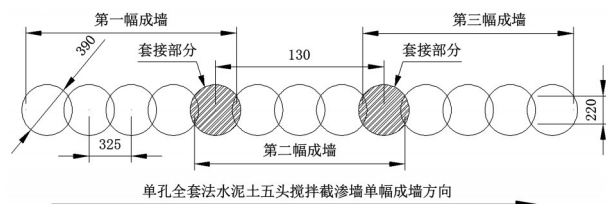


图1 多头小直径深层搅拌桩墙体形状示意图(单位:mm)

### 1.2 项目区地质情况

工程地质揭示主要关注影响钻头钻进的土质类别及分层情况,以及影响堤防防渗效果等因素。场地在勘探深度范围内揭示的地层分为层为堆填土,全场地分布,层厚0.4~8.5 m,土体颗粒组成0.25~0.07 mm占9.7%、0.07~0.005 mm占52.5%、小于0.005 mm占37.8%,渗透系数 $3.20\times 10^{-4}$  cm/s;②层为粉质黏土,含铁锰质结核及砂礓,全场地分布,层厚0.6~3.4 m,土体颗粒组成0.25~0.07 mm占10.0%、0.07~0.005 mm占54.7%、小于0.005 mm占35.3%,渗透系数 $7.50\times 10^{-7}$  cm/s;③层为轻粉质壤土,全场地分布,层厚

4.5~9.8 m,土体颗粒组成0.5~0.25 mm占0.1%、0.25~0.07 mm占20.0%、0.07~0.005 mm占69.8%、小于0.005 mm占10%,渗透系数 $1.78\times 10^{-4}$  cm/s;⑦层灰黄色粉质黏土,含铁锰质斑及砂礓,最大揭示层厚11.6 m,土体颗粒组成0.25~0.07 mm占5.3%、0.07~0.005 mm占58.5%、小于0.005 mm占36.2%,渗透系数 $1.70\times 10^{-7}$  cm/s<sup>[3-4]</sup>。

## 2 首次工艺性试验成果

### 2.1 试验方案

#### 2.1.1 试验方法及搅拌钻头设置

搅拌桩试验采用普通型MSMTW工法工艺进行试验施工,为五头小直径深层深搅桩桩机施工,该桩机1、3、4钻杆供水泥浆,2、5钻杆供气,试桩时移动主机至试验段钻孔位置,并进行机械调平,水平对中孔位,实际施工精度符合设计要求。启动主机,桩机钻头搅拌下沉,同时开启喷浆泵送浆至设计深度,流量计记录输浆量;控制搅头下沉的速度均匀,速率符合其技术规定;重复搅拌提升,同时喷浆直至孔口;关闭搅拌桩机。桩机横向平移就位调平后,重复上述过程,进行下一个单元墙施工。钻头采用4层叶片,每层2片的型式,每层叶片间距不小于200 mm,叶片宽度8 cm,直径390 mm,叶片与钻杆夹角60°。不同钻杆叶片分层错位布置,钻杆旋转时不发生碰撞。其中直径390 mm叶片顶端加焊耐磨的硬质合金。

#### 2.1.2 搅浆过程控制

(1)计算单幅桩体水泥用量。根据设计技术要求,结合现场工艺试验确定水泥掺入量不少于18%。通过计算,本次直径0.39 m每幅(幅宽1.3 m)搅拌桩水泥用量为73.1 kg/m<sup>2</sup>。水泥浆液设计参数见表1,搅拌桩施工参数见表2。

表1 水泥浆液设计参数

| 水灰比   | 浆液密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 每米段浆量/<br>(L·m <sup>-2</sup> ) | 备注 |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|----|
| 1.9:1 | 1.30                           | 163.07                         |    |

(2)浆液配置控制。按照确定的浆液配合比和搅浆桶体积计算每搅1桶浆水泥和水的用量。在搅浆桶内壁上标识出水量和浆液控制线,按标识位置放水和水泥;每桶浆液搅拌不少于3 min,搅拌均匀后用泥浆比重称或玻璃管比重计进行校核,根据校核情况再次对水和水泥用量进行微调;水泥浆

| 表2 搅拌桩水、浆、气施工参数     |               |      |       |                                |        |                               |                            |    |        |                               |
|---------------------|---------------|------|-------|--------------------------------|--------|-------------------------------|----------------------------|----|--------|-------------------------------|
| 北堤桩号                | 地层            | 层厚/m | 水灰比   | 每米段浆量/<br>(L·m <sup>-2</sup> ) | 浆液     |                               | 速度/(cm·min <sup>-1</sup> ) |    | 供气     |                               |
|                     |               |      |       |                                | 压力/MPa | 流量/<br>(L·min <sup>-1</sup> ) | 下沉                         | 提升 | 压力/MPa | 流量/<br>(L·min <sup>-1</sup> ) |
| 82+878-<br>82+872.8 | ①层堆填土         | 8.30 |       |                                |        |                               |                            |    |        |                               |
|                     | ②粉质黏土、重粉质壤土   | 2.50 | 1.9:1 | 163.07                         | 2      | 76.23                         | 70                         | 70 | 0.8    | 70                            |
|                     | ③轻粉质壤土、重粉质砂壤土 | 9.30 | 1.9:1 | 163.07                         | 3      | 60.20                         | 40                         | 70 | 0.8    | 70                            |
|                     | ⑦粉质黏土         | 0.57 |       |                                |        |                               |                            |    |        |                               |

液检测合格后通过筛分过滤存放至储浆池和供浆桶,为防止水泥浆液离析、沉淀,搅浆桶、储浆池和供浆桶内均设搅拌装置。后台水泥浆制作控制参数见表3。

通过试验桩数据可知,平均幅宽(1.3 m一组,桩长18.0 m)浆液用量6 151 L,水泥用量2.9 t,设计用量为1.8 t,即幅宽水泥超量1.1 t/m,发电机油量超标,幅宽超标量为52.5 kg/m。深度10~13 m存在砂

| 表3 水泥浆制作控制参数 |                                |         |       |                 |                 |              |              |
|--------------|--------------------------------|---------|-------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| 水灰比          | 浆液密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 水泥用量/kg | 水量/kg | 搅拌桶内水面<br>高度/cm | 搅拌桶内浆液<br>高度/cm | 水量控制<br>时间/s | 水泥控制<br>时间/s |
| 1.9:1        | 1.30                           | 200     | 380   | 43              | 51              | 44           | 72           |

说明:搅浆桶内径1.06 m,桶内总深度0.73 m,正常施工时桶内浆液搅至0.51 m。桶内0.51 m深度时浆液体积为0.450 m<sup>3</sup>。

疆层、流砂层,影响钻进,导致钻进困难。深度15~20.8 m时,地质中存在大量的砂疆结核,多头搅桩机施工难度加大,容易出现抱钻、埋钻杆、电机断电等现象。此时需将该段浆液流量调至不小于30 L/min,钻头为合金钻头,采用提升吊钻入孔方法,且需钻杆来回疏通循环钻进,这样就引起钻进时间超长、水泥浆液严重超量,流失严重。

2.2 试验数据调整

根据首期试桩情况,决定采用两搅两喷、先稀后浓工艺,造孔后先喷稀浆(水灰比6:1),提升时加浓浆(水灰比1.25:1)并加压喷浆。如果采用常规带浆钻进,由于地质较硬,阻力较大,且下面有流砂、砂疆等物质,不但不进尺,浆液难以灌入,翻浆严重时,易出现抱钻埋钻杆现象。

(1)②层以上9.1 m,钻机下沉速度为40 cm/min,电机转速400 r/min左右,电流显示为40~50 A常规范围内,这时喷稀浆,加压至0.6 MPa。当钻头进入距③层轻粉质壤土层还有1 m时,一桶浆液(700 kg)添加0.05 kg氢氧化钠,以加大钻进过程泥

浆流动性,减少钻进阻力。  
(2)进入③~⑦层重粉质壤土、粉质黏土层后,下沉速度放缓至20 cm/min。电动头电机转速控制在300 r/min以下,电流显示为55~70 A之间,每桶水泥用量调整为100~200 kg,为防止深层流砂土包裹钻杆,同时防止埋钻杆、大砂疆等现象,加大气压将2台气泵气压调至0.6 MPa,同时反转提升循环往复钻进。

(3)达到设计桩底高程-7.8 m时,开始回转提升钻杆喷浆,③~⑦层土厚约为10.1 m,提升速度约为14 cm/min,提升过程中钻杆来回疏通孔洞放缓提升速度,同时加大灰浆浓度,每桶水泥用量调至400 kg(总量900 kg),水泥灰比调至1:8,同时将气泵气压调至0.3~0.4 MPa,防止气泵压力过大,浆液上翻贯入不进,③~⑦层提升时间为45 min。

(4)进入A层地质,水灰调整为1.25:1,泥浆浓度为1.43 g/cm<sup>3</sup>,同时关闭气泵压力。A层土提升用时约为20 min。



### 3 施工总体方案

#### 3.1 基本方案调整

调整方案仍采用多头小直径深搅桩防渗处理,采用一次钻进、一次提升、两搅两喷、先稀后浓工艺完成单幅造墙。深搅桩轴线布置在堤顶道路上游紧挨水泥路边,桩直径为0.39 m,桩与桩连续搭接形成墙体,最薄处墙厚不小于0.22 m,固化剂采用42.5级普通硅酸盐水泥,根据试桩成果,掺入量调整为18%(原为12%),水泥浆水灰比介于1.2~2.0之间,无侧限抗压强度(28 d)不小于0.5 MPa,板墙渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$  cm/s。防渗墙体下限以进入相对不透水层调整为不小于0.5 m。

#### 3.2 施工工艺

根据前期试桩试验情况,采用两搅两喷、先稀后浓的施工工艺,造孔后先喷稀浆,提升时加浓浆并加压喷浆的施工方法。

(1)在先钻进层土6 m以内时,检查或测试桩机电路、水路、供气管道及仪表显示等工作状态,再按工艺性试验要求将气压、浆压、浆液流量等指标调整至工艺要求后,机械操作手发出试机指令,主机操作手缓缓下放钻杆,开始按照预定的施工参数搅拌下沉。

(2)上部~②土层9.1 m,钻机下沉速度为40 cm/min,电动头电机转速控制在400 r/min左右,电流显示为40~50 A常规范围内,这是正常喷浆(带稀浆液)加压0.6 MPa。当钻头进入距③层轻粉质壤土层还有1 m时,1桶浆液(700 kg)添加0.05 kg氢氧化钠,以加大钻进过程泥浆流动性,减少钻进阻力。

(3)进入③~⑦层重粉质壤土、粉质黏土层后,下沉速度放缓至20 cm/min。电动头电机转速控制在300 r/min以下,电流显示为55~70 A之间(极限75 A),档位3~4钻进,每桶水泥用量调整为100~200 kg,为防止深层流砂土包裹钻杆,同时防止埋钻杆、大砂疆等现象,加大气压将2台气泵气压调至0.8 MPa左右,同时反转提升循环往复钻进。

(4)达到设计桩底高程-7.8~-9.6 m时,开始回转提升钻杆喷浆,2~3档位提升,③~⑦层土厚约为10.1 m,提升速度约为14 cm/min,提升过程中钻杆来回疏通孔洞放缓提升速度,同时加大灰浆浓度,将气泵压调至0.3~0.4 MPa,以保证成桩质量,防止气泵压力过大,浆液上翻贯入不进,③~⑦层提升时间为45 min。

(5)钻杆提升进入层约为7.6 m时,由于阻力减轻,这时把水灰比、转速调至正常指标,水灰比为

1.25:1,泥浆浓度为1.43 g/cm<sup>3</sup>,同时关闭气泵压力保证浆液正常输送,随着浆液的不断贯入钻杆上下来回搅拌提升,以保证搅拌的均匀性与流动性。整个层土提升用时约为20 min,提杆喷浆结束。钻进和提升整个过程,为适应地质钻井难度,主机电流需从40~60 A范围内不断调整中。

#### 3.3 难点处理

为保证防渗工程质量,对难工段采取高压定喷方案进行处理。高压定喷孔距1.2 m,喷嘴喷射方向与高喷施工轴线夹角为30°,板墙渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$  cm/s。施工主要参数为高压定喷钻机引孔直径不小于110 mm,钻孔深度应大于设计深度30 cm;水泥浆液水灰比按照0.8~1.0控制,密度1.4~1.5 g/cm<sup>3</sup>;高压定喷施工采用二序法,即先施工单号孔,再施工双号孔。水泥为硅酸盐水泥42.5级,防渗墙体渗透系数不小于 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$  cm/s,抗压强度2 MPa<sup>[5]</sup>。

#### 3.4 质量控制

考虑到③层为流砂性土容易包裹钻头、埋钻杆,⑦层为重黏土夹砂疆,钻头阻力大,钻进进尺困难。根据以往在深层搅拌施工中积累经验,本次试验采取了应对措施。钻孔时采用先导孔清水钻进、后提升缓慢喷浆方法,如果导孔时就喷浆必然导致钻孔不进尺、磨损大、易发生抱钻、埋钻杆、浆液上翻等现象。钻头采用合金钻头,造孔时不断地加大钻孔过程的供气量和气压,控制钻进速度并来回疏通,采用提升吊钻入孔方法。提升喷浆过程中,根据提升难易程度调节浆液浓度,上下来回搅拌,在提高水泥土搅拌均匀性的同时,降低了水泥土对钻杆、钻头的包裹阻力。主机操作手时刻注意搅拌桩成桩施工过程中的仪表盘电流值,一旦电流值急聚增大,立刻减档,降低钻杆转速和下沉速度,并通知后台加大供浆、供气量,使孔内水泥土浆液呈沸腾翻滚状。为提高施工人员警觉性和责任心,加强前后台的联系,安排专人密切关注喷嘴、管路工作状态及供浆、供气和孔口溢浆情况等。及时、准确、真实做好试验段施工记录,为后续施工提供依据。

### 4 结 语

经过试桩成果分析与施工中经验的不断成熟、技术上的不断改进,本工程水泥土搅拌桩桩身搅拌均匀性、完整性、连续性、不透水性较好。桩身抗压强度为0.59~3.13 MPa,防渗墙成墙厚度不小于220 mm,搅拌桩渗透系数为 $6.36 \times 10^{-7} \sim 4.95 \times 10^{-6}$  cm/s,

(下转第27页)

表2 两种打桩方案比较

| 序号 | 方案   | 单价/元 | 工程量 / km | 造价/万元 | 力学性能   |
|----|--|------|----------|-------|--|
| 1  | 方案1:C60 仿木桩( $\varphi 30\text{ cm}$ 、 $L=7.5\text{ m}$ ) | 130  | 25       | 325.0 | 桩体采用预应力钢筋,蒸汽养护,桩体强度高,抗弯及抗裂性能较好,抗冲击能力较强,不易变形、变色,稳定性较好 |
| 2  | 方案2:松木桩( $\varphi 30\text{ cm}$ 、 $L=7.5\text{ m}$ )     | 175  | 25       | 437.5 | 抗剪、抗弯能力差,易折断,地下水位变化幅度较大时不宜使用松木桩                      |

## 4 结 论

本文以太平河河道整治工程为例,为推求天然河道沿程设计洪水位,以稳定非均匀流为计算依据,按伯努利能量方程对河道水位进行推求,并对该河岸的护岸设计方法进行了分析研究。研究结果表明,本次河道水面线计算起始水位基本资料采用合理,采用伯努利能量方程依次往上推算水面线,符合水面线推算原则,因此可以认为本次水面线计算成果比较合理。此外,采用C60仿木桩( $\varphi 30\text{ cm}$ 、 $L=7.5\text{ m}$ )和松木桩( $\varphi 30\text{ cm}$ 、 $L=7.5\text{ m}$ )两种打桩形式进行护岸方案比较,得出松木桩的抗剪、抗弯能力差,易折断,且松木桩方案投资相比C60仿木桩方案高,因此C60仿木桩更适合河道护岸。

### 参考文献:

- [1] 邓瑞欣. 增江流域派潭河上游段河道设计洪水研究[J]. 水利科技与经济,2022,28(11):90-94.
- [2] 龚定,李致家,臧帅宏,等. 河道汇流演算方法对比分析与研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):

33-39,57.

- [3] 贺成山,陈情情,刘波,等. 河道下游存在梯级水库的溃坝洪水演进模拟研究[J]. 科学技术创新,2022(30):147-150.
- [4] 康璐,向波,张婧,等. 黑龙江河道演变及工程整治技术的研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(5):138-147.
- [5] 王海强. 浅析韩城市盘河水库下游段交通桥洪水分析计算[J]. 陕西水利,2022(10):41-43,46.
- [6] 王玲玲,姜兆宇,韩建军,等. 长江浦口段江滩复绿对河道行洪能力的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):316-321.
- [7] 吴心艺,吴小靖,张骁,等. 吴淞江(江苏段)河道整治设计水位探讨[J]. 中国水运(下半月),2021,21(6):109-111.
- [8] 张红. 河道防洪治理工程设计断面水文分析[J]. 青海农林科技,2021(1):69-73.
- [9] 程维. 河道防洪整治工程设计[J]. 陕西水利,2020(11):187-188.
- [10] 马惠群,王勇. 山丘区河道设计洪水位对电力工程的影响[J]. 工程建设,2020,52(11):49-51.
- [11] 曾黄锦. 滨海河口地区设计洪水位的研究[J]. 广东水利水电,2013(增刊1):40-42.

(上接第23页)

均满足设计强度要求<sup>[6-7]</sup>。

新沂河堤防建设年代久远,地质条件复杂,深搅桩防渗施工过程中,可能会遇到堤内砂礞等障碍物,使得施工机械严重受损而无法正常工作。对于这种难以预见的施工障碍物,必须及时调整施工方案,重新试桩,选定施工参数,满足工程质量要求,对于技术上难以“逾越”的问题,经过经济、技术比较后,可作为“难工”专门处理,从而加快工程进度,及早发挥防洪效益。

### 参考文献:

- [1] 王天云. 多头小直径深层搅拌桩防渗墙在文瀾湖水库

中的应用[J]. 山西水利,2017(10):36-38.

- [2] 王浩淼. 水泥搅拌桩在堤防工程软土地基处理中的应用[J]. 陕西水利,2021(5):166-167,170.
- [3] 高大钊. 关于土的目力鉴别[J]. 工程勘察,2003(1):1-4.
- [4] 华建新. 工程地质手册[M]. 5版,北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [5] 侯永峰,龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. 浙江大学学报,2000,34(2):77-81.
- [6] 王静芳. 多头小直径搅拌桩防渗墙体的性能研究及其渗流分析[D]. 扬州:扬州大学,2009.
- [7] 郝洁,李军,郑国宝,等. 水泥土搅拌桩防渗墙对土坝防渗效果的模拟研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2020,37(4):1-6.