

小浪底高压旋喷灌浆技术及应用实例简述

李立刚

(小浪底水力发电厂,河南 济源 454681)

摘要:小浪底高压旋喷灌浆工程选用国际上先进的施工设备和施工工艺,通过现场试验确定施工参数,在先进施工设备的保证下,通过控制施工工艺来保证施工质量.在小浪底工程中,用高压旋喷灌浆技术构筑上游围堰防渗墙、对左岸河床心墙区砂卵石地基加固、进行主坝混凝土防渗墙“老虎嘴”封堵和原1号槽孔修补,均取得了很好效果.

关键词:高压旋喷灌浆;围井试验;防渗墙;地基加固;地下工程补救;小浪底水利枢纽工程

中图分类号:TV543

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2002)02-0040-03

高压旋喷灌浆技术是使浆液在很高的压力下通过注浆管,从喷嘴高压射出,注入地基,在射流的冲击、切削、搅拌作用下,浆液与原地基混为一体,对地基产生挤压、渗透作用,使旋喷桩及其周围土体的密实度和承载能力得到提高.其主要应用有:①构筑防渗墙体;②加固地基,提高地基承载力;③用于地下构筑物的修补.

经过近年来的不断开发和应用,高压旋喷灌浆技术在各个方面都得到很快发展,应用领域不断扩大,适应地层由开始限于中细砂、壤土、淤泥等细颗粒地层,逐渐扩大到包括强透水的砂卵石、卵石和堆石渣层、球状土层等在内的整个第四系覆盖层,施工设备、施工工艺不断更新,浆液压力、流量不断增大,提升速度逐渐加快,喷浆设备更趋向于高压、大流量的二重管、三重管.二重管法是在压缩空气保护下,高压浆液直接喷射到地层中;三重管法是在压缩空气保护下,由高压水开路,同时注入低压浆液进行旋喷.由于高压旋喷灌浆技术对地基防参与加固处理具有不需明挖、施工场地小等特点,因此,目前仍处在迅猛发展阶段.

1 旋喷灌浆设备

小浪底高压旋喷灌浆工程由意大利仕纪公司分包施工,主要设备包括高压旋喷机、履带自行式钻机和供浆设备等.

履带自行式高压旋喷机型号为 SIRIO2SC,本身具有一定的钻进功能,机架高 46 m.旋喷钻杆为双重管,内径 30 mm,为高压浆液通道,外径 90 mm,内、外

径之间有 12 个小孔为压缩空气通道.每节长 3 m,装卸方便,密封性好.旋喷机配有钻灌参数自动记录仪,型号为 LUT2CL88,全过程自动记录孔深、浆压、气压、转速、提升速度等参数,同时显示于荧光屏上,便于参数的监测和随时调整.履带自行式钻机为 Casagrande 钻机 C8 型,自行定位,操作方便,性能稳定,带有偏心钻头,可跟管钻进,对地层适应性强.搅拌机有 2 台,分别用于搅拌膨润土浆液和水泥浆液,搅拌能力分别为 $12\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $24\text{ m}^3/\text{h}$.2 台高压泵型号分别为 HT400 和 7T-450.7T-450 型高压泵最大输浆压力可达 100 MPa,最大输出流量可达 $453\text{ L}/\text{min}$,高压泵通过高压管路与旋喷机连接.

2 现场围井试验

2.1 试验布置及参数

围井试验的目的是选定合适的施工参数和浆液配比及验证防渗墙渗透系数.试验区位于旋喷灌浆防渗墙轴线下游侧 5 m 的一块平整场地上,与旋喷灌浆防渗墙地层一致,上部 0~12 m 为砂卵石填筑层,下部 12~32 m 为原河床覆盖层.围井由 25 个旋喷桩组成,其中 16 个间距 1 m、深 32 m 的桩组成一个正方形围井,中间有 9 个同样深度的旋喷桩封底,即仅对这 9 个桩底部 2 m 进行旋喷,其布置如图 1 所示.

根据工程类比和室内试验,采用了掺加 5% (水泥用量)膨润土的稳定浆液,其水、水泥与膨润土的配比为 850:450:22,密度 $1.35\text{ g}/\text{cm}^3$,马氏粘度 35~40 s.施工参数:旋喷浆液压力大于 40 MPa,空气压力为 1.5 MPa;2 个喷嘴,直径为 3 mm,转速 $12\text{ r}/\text{min}$,浆

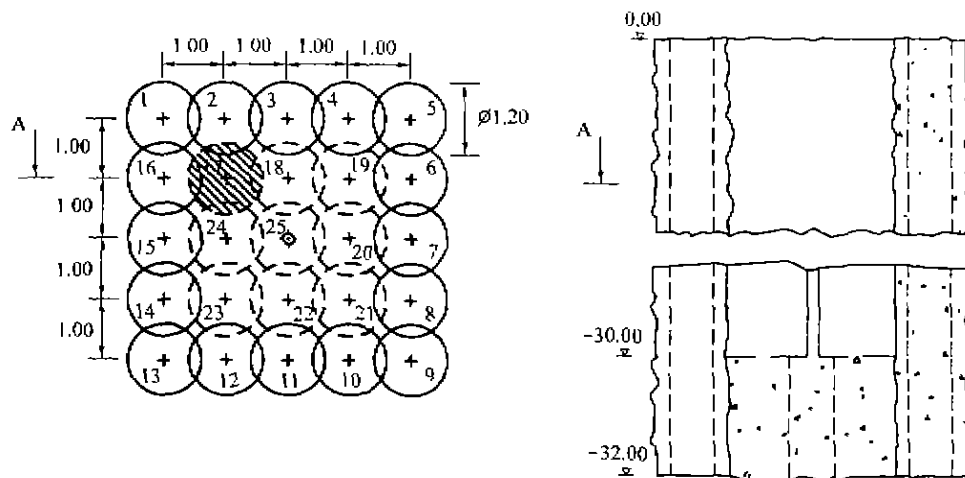


图1 围井试验布置(单位:m)

液流量 225 L/min; 提升速度: I, II 序孔原地层为 17 cm/min, 回填料区为 26 cm/min, III 序孔均为 26 cm/min.

2.2 渗透试验

2.2.1 试验方法

根据有关手册^①的规定, 试验方法分为定水头法和变水头法. 定水头法是指由套管隔离出试验段, 维持孔内水位不变, 待流量稳定后, 读取时间和流量, 按公式(1)计算渗透系数; 变水头法只能在围井内使用, 待围井内注水达到饱和后, 停止注水, 记录水位下降过程, 按公式(2)计算渗透系数.

$$K = \frac{q}{FH_c} \quad (1)$$

$$K = \frac{A}{F(T_2 - T_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

$$F = \frac{2.4\pi L}{\ln \left[1.2 \frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(1.2 \frac{L}{D} \right)^2} \right]} \quad (3)$$

式中: K 为渗透系数, m/s; q 为稳定渗透流量, m^3/s ; F 为影响参数; H_c 为稳定水头, m; A 为所测断面面积, m^2 ; L 为所测段长, m; D 为所测断面直径, m; T_1 , T_2 为时间, s; H_1 , H_2 为在时间 T_1 , T_2 时的水头, m.

2.2.2 试验结果

围井旋喷桩完成后, 在围井内做了 8 次渗透试验, 其中 6 次是定水头试验, 一次是变水头试验, 一次是开挖后井内注水试验; 围井外共做 3 次, 试验全部为定水头试验, 其中有一次未成功.

围井外测得 2 组渗透系数平均值为 $2.805 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 此数值与地质部门提供的渗透性为 36 ~ 200 m/d (相当于 $4.16 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) 一

致, 说明这种方法是合适的. 围井内定水头渗透试验结果最大值为 $1.41 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 最小值为 $1.17 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 平均值为 $9.62 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. 变水头试验结果为 $3.705 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 围井内注水法测得的结果为 $5.925 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$. 即渗透系数比原地层降低了三个数量级.

2.2.3 开挖检查

在渗透试验结束后, 对围井内部和外部的一侧进行开挖检查, 开挖深度内部为 6.8 m, 外部为 5.7 m, 露出了 4.2 m 高的墙体 (上部 1.5 m 没有旋喷). 从外观看, 墙体连续性、胶结性都较好. 经实测, 最大桩径为 2.56 m, 最小桩径为 1.36 m, 平均桩径为 1.84 m, 墙体搭接处最小厚度为 0.88 m.

3 应用实例

3.1 上游围堰旋喷灌浆防渗墙施工

上游围堰旋喷灌浆防渗墙作为枯水围堰的主要防渗措施, 并作为大坝的一部分起永久防渗作用, 河床覆盖层属第四纪河床冲积物, 级配不良, 中小粒径偏少, 局部地段有较大粒径卵石. 设计单排桩防渗, 桩距 1.0 m, 胶结强度 $R_{28} = 1.5 \sim 2.2 \text{ MPa}$, 渗透系数小于等于 10^{-6} cm/s . 防渗墙轴线长 400 m, 孔底入基岩至少 0.5 m, 最大孔深 51.0 m, 共计旋喷桩 408 个, 钻孔总进尺 11500 m, 喷浆 10074 m, 成墙面积 9897 m^2 .

3.1.1 施工参数

在施工中, 通过调整提升速度控制桩径来保证墙体的连接, 提升速度介于 15 ~ 26.7 cm/min, 根据孔序、孔深和孔斜情况调整参数, 见表 1 (表中 δ 为偏斜率).

3.1.2 施工质量控制及效果

旋喷防渗墙体需深入基岩 0.5 m 以上, 保证墙体

① Civil Engineering Department Hongkong. Guide to site investigation, 1987, 116 ~ 117, 277 ~ 280.

与基岩的连接,施工时分I、II、III序孔,按逐序加密的原则施工,将I序孔作为勘探孔,每个孔必须作基岩鉴定,对于II、III序孔根据I序孔确定的基岩面确定孔深,但终孔时 also 需取样鉴定,钻孔偏斜率控制标准为小于1%,钻孔完成后即进行测斜,尽快提交资料,工程师根据孔序、孔深和孔斜情况按表1中的数据调整提升速度,对于偏斜率大于1%的孔,采用降低提升速度来增加桩径或增加附加桩的方法解决。

表1 上游围堰旋喷灌浆防渗墙提升速度

地层	孔序	提升速度/(cm·min ⁻¹)			
		$\delta \leq 0.5\%$	$0.5\% < \delta \leq 0.75\%$	$0.75\% < \delta \leq 1\%$	$\delta > 1\%$
原地层	I	20.0	17.1	17.1	15(或附加桩)
原地层	II	20.0	20.0	17.1	15(或附加桩)
原地层	III	26.7	26.7	26.7	15(或附加桩)
回填区	I、II、III	26.7	26.7	26.7	15(或附加桩)

旋喷灌浆防渗墙的施工,减少了基坑渗水量,降低了大坝心墙区施工难度,说明防渗墙有较好的连续性和防渗性。

3.2 左岸河床地基加固

在主坝左岸坡脚处,横贯心墙区有一近似垂直长约140m的岩坎直插入河床,相邻覆盖层属第四系河流冲积物形成的砂卵石层,粒径最大140mm,砾石成分以硅质、钙质为主,并夹有厚约6m的粉细砂层,局部还有类似坡积物块石地层出现,此区域覆盖层沉积条件较差,密度低,不能满足心墙区的承载要求,经过多种方案比较,采用高压旋喷灌浆对此区域基础进行加固。帷幕防渗轴线上、下游两侧边坡陡直,布置旋喷桩间距为1.5m×1.5m,其他区域桩间距为2.5m×2.5m,并按1:1的坡度降低旋喷桩高程,最小旋喷桩高度为5m,形成坡角为45°的地基加固区。

为检测旋喷加固地基的效果,由黄河水利委员会勘测设计院物探总队采用“附加质量法”及弹性波速法,对地基物理力学参数进行原位测试,在旋喷地基加固区均匀布置检测点位12处,其中4号、5号、6号和9号点布置于旋喷桩桩位处,其余各点均布置于4个旋喷桩的中心处,1号至5号点位分别作了喷浆前后两次检测,其余各点仅作喷浆后一次检测。

检测结果表明:在喷浆前各点位的物性参数相近,地基承载力在342~359 kPa之间,平均值在347.6 kPa;原位密度在2.246~2.292 g/cm³之间,平均值为2.256 g/cm³;在旋喷灌浆加固后,桩间和桩位上各点物性参数均有不同程度的提高。对于桩位点,地基承载力平均值为3 052 kPa,比加固前提高7.77倍;原位密度平均值为2.456 g/cm³,比加固前提高8.87%;对于桩间点,地基承载力平均值为933 kPa,比加固前提高1.68倍;原位密度平均值为

2.365 g/cm³,比加固前提高4.83%。

3.3 地下工程的补救

3.3.1 “老虎嘴”处理

在混凝土防渗墙轴线靠近左岸处有一垂直高约20m凹向岸坡约6m的反坡,俗称“老虎嘴”,如全部挖除突出的岩石(约80 m²,承包商所提双轮铣工作效率为0.04 m²/h),需要长时间开挖且影响相邻槽孔的施工,将使处于大坝关键线路上混凝土防渗墙的施工工期延后,且增加较多投资。经多方案比较,采用对突出岩石保持原状基本不开挖,在防渗墙轴线及上、下游侧增加3排旋喷灌浆桩,形成厚约3m的旋喷防渗墙,有效地堵住“老虎嘴”。在防渗墙底部帷幕灌浆完成后,对此段旋喷灌浆防渗墙打检查孔压水试验,透水率满足技术规范要求,表明此种方案是合适、有效的。

3.3.2 防渗墙原1号槽修补

混凝土防渗墙分两期施工,第一期原1号槽孔在浇筑混凝土过程中,比设计高程欠浇约11m,在处理原1号槽孔施工质量问题的过程中,多次发生塌孔,原地层已发生扰动,如果对混凝土的缺陷部位(宽2.8m、深约11m),采用支护边坡明挖补浇混凝土,由于受地下水的影响,很可能发生塌方,给施工造成困难。受围井试验的启发,在缺陷部位的周围布置高压旋喷桩,将缺陷部位包在旋喷桩中间,在旋喷灌浆施工完成后,对槽孔缺陷部位开挖至原防渗墙顶部高程,形成了一宽2.8m、厚1.2m、深约10m的槽孔,直接浇筑缺陷部位混凝土。采用这种处理方案,旋喷桩对地层起加固和防渗作用,且无地下水影响,大大降低了施工难度,加快了施工进度。

4 结 语

a. 高压旋喷灌浆在小浪底工程中应用于构筑防渗墙、地基加固、地下工程补救上都取得了较好的效果,旋喷灌浆工作需要的场地小,尤其是在工期紧、施工干扰大的情况下,显示出旋喷灌浆工作不需开挖的优势,大大降低了施工难度。

b. 旋喷灌浆使用了先进的施工设备,旋喷机采用了双重管法,使用大直径的双喷嘴,在压缩空气的保护下,浆液直接喷射到地层中,浆液压力高、流量大,旋喷半径大,使旋喷灌浆工作可在较大粒径的地层中施工,同时采用较高的提升速度,加快了施工进度。

c. 旋喷灌浆工作采用现场试验来确定参数和工艺,以此作为施工控制的依据,在先进设备的保证下,加上严格的质量控制,确保了施工质量,此经验对类似工程具有较高的指导意义。

(收稿日期:2001-03-26 编辑:马敏峰)