

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2014.03.045

丹江口水库陶岔渠首枢纽工程地基渗控处理

奚建猛¹, 孙业文², 龚志明¹

(1. 盐城市河海工程建设监理中心, 江苏 盐城 224002; 2. 淮河水利委员会 治淮工程建设管理局, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 丹江口水库高水位运行时, 其副坝—陶岔渠首枢纽工程存在坝基渗漏及绕坝渗漏问题, 需对坝基及坝两岸地基进行渗控处理。通过现场帷幕灌浆试验, 根据工程特点制订了合理的地基渗控处理设计和施工方案, 最终解决了深厚覆盖层钻进成孔、灌浆孔口管理以及土岩接触面灌浆、深厚覆盖层下岩溶强透水岩体灌浆成幕等难题。地基渗控处理完成后进行了工程质量检测和安全监测, 结果表明陶岔渠首枢纽工程地基渗控处理满足设计要求, 达到预期效果。该工程现场帷幕灌浆试验方法和帷幕灌浆设计、施工方案, 可为类似的深厚覆盖层渗控处理问题提供参考。

关键词: 陶岔渠首; 渗控处理; 帷幕灌浆; 深厚覆盖层

中图分类号: TV 68; TV 52 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2014)03-0205-04

Seepage Control Treatment of Dam Base in Pivotal Project of Taocha Canal Headwork of Danjiangkou Reservoir

XI Jianmeng¹, SUN Yewen², GONG Zhiming¹

(1. Yancheng Engineering Construction Supervision Center, Yancheng 224002, China;

2. Zhihuai Engineering Construction Administration, Huai River Water Resources Commission, Bengbu 233001, China)

Abstract: When the water level is high in the Danjiangkou Reservoir, the following problems occur in its accessory dam - the pivotal project of Taocha Canal Headwork, such as seepage in the dam base and around the dam, therefore the seepage control treatment needs to be conducted to the dam base and dam foundation. Based on the field curtain grouting experiment and the project characteristics, a reasonable seepage control treatment design and construction scheme for dam base was proposed, which can solve the following problems including drilling holes in deep overburden layers, burying and covering up grout nipple, grouting at the contact face between the land and rock, and curtain grouting to the highly permeable karst rock mass under the deep overburden layers. After the completion of the seepage control treatment for dam base, the quality and safety of the project were investigated, and the results showed that the seepage control treatment for dam base in the pivotal project of Taocha Canal Headwork meets the design requirements and achieves the desired results. The field curtain grouting experiment method, and design and construction scheme can provide reference for solving similar problems of seepage control of deep overburden layers.

Key words: Taocha Canal Headwork; seepage control treatment; curtain grouting; deep overburden layer

陶岔渠首枢纽工程是南水北调中线输水总干渠的引水渠首, 也是丹江口水库的副坝。工程主要由混凝土重力坝、引水闸及电站等建筑物组成。丹江口水库大坝加高完成后, 水库正常蓄水位由 157 m 提高至 170 m, 库水位变得高于两岸山体地下水水位, 使得地下水渗流场及其补排方式发生改变, 由山体地下水补给库水变为库水补给山体地下水。水库在高水位运行时, 陶岔渠首枢纽工程存在坝基渗漏及绕坝渗漏问题, 主要渗漏途径有 3 种: (1) 从坝前入渗区向坝基或绕坝从右岸向坝后渠道方向渗漏; (2) 从汤山西与西北侧入渗区内的裸露灰岩、覆盖层厚度较薄处入渗, 向坝后总干渠内

灰岩出露区渗漏或以泉的形式从黏性土层相对较薄处涌出; (3) 从上游引渠及汤山西南库区孤岛入渗区向龙潭河方向渗漏。为控制坝基及两岸绕坝渗漏, 降低坝基扬压力, 防止软弱结构面和岩溶充填物等软弱地质构造发生渗透破坏, 需对坝基及坝两岸一定范围地基进行渗控处理。

1 地基渗控处理方案

1.1 水文地质背景

陶岔渠首枢纽工程范围内下伏基岩为奥陶系中统灰岩、白云岩(O₂³), 含泥质条纹灰岩(O₂²), 两岸地基表层覆盖层

收稿日期: 2014-03-03 修回日期: 2014-03-29 网络出版时间: 2014-05-08

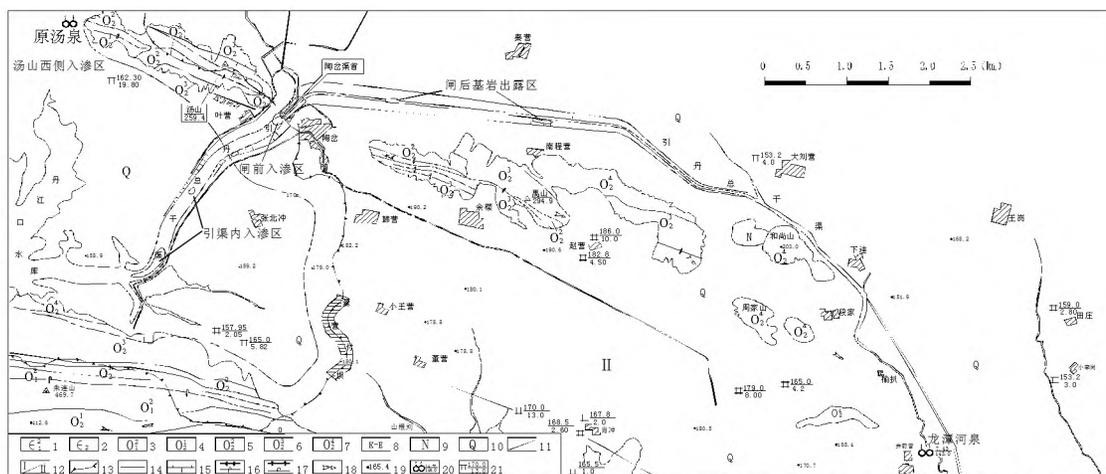
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtk.2014.03.043.html>

作者简介: 奚建猛(1967-), 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 主要从事水利工程建设及管理工作。E-mail: xjianmeng@163.com

通讯作者: 孙业文(1966-), 男, 安徽庐江人, 教授级高级工程师, 主要从事水利工程建设及管理工作。E-mail: 1150865832@qq.com

为下更新统洪积层(Q_1)、中更新统冲积层(Q_2)、人工堆积层(rQ)等粉质黏土,厚10~40 m,且以 Q_2 粉质黏土为主(图1)。勘探资料表明,黏土覆盖层渗透系数小,透水性弱;下部可溶岩体透水性多在10~100 Lu之间,属中等-强透水性岩体。受NW-SEE向主构造线的影响,岩体NW向透

水性较强,地下水渗流具明显的方向性。垂直岩层走向方向(即顺渠道方向)岩体透水性相对较弱且不均一,只有当局部NNE向结构面及同向岩溶发育时,透水性较强。NW向和NNE向裂隙的组合构成基岩渗漏的主要通道。在勘探深度范围内,尚未见连续的相对隔水层。



1.下寒武统第二岩组 2.中寒武统 3.奥陶系下统第二岩组 4.奥陶系中统第一岩组 5.奥陶系中统第二岩组 6.奥陶系中统第三岩组 7.奥陶系中统第四岩组 8.白垩系至下第三系 9.上第三系 10.第四系 11.地层界线 12.岩溶水文地质分区界线及分区代号 13.地表分水岭 14.断层 15.逆断层 16.背斜 17.向斜 18.地下水流向 19.地表高程点 20.上升泉 21.井

图1 研究区水文地质

Fig. 1 Hydrological map of the study area

1.2 防渗方案

根据《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2005)^[1]相关规定,工程防渗帷幕设计防渗标准如下。(1)坝身段:基岩透水性 $q \leq 3 \text{ Lu}$; (2)两岸山体近岸段:基岩透水性 $q \leq 5 \text{ Lu}$; (3)两岸山体远岸段:基岩透水性 $q \leq 10 \text{ Lu}$ 。

由于左、右岸帷幕线沿线表层粉质黏土厚度较大,透水性小,渗透系数 $3 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,自身可满足防渗要求,因此工程防渗主要针对坝基及两岸山体基岩进行。为进一步降低坝基扬压力,在坝基防渗帷幕后布置了一道排水孔幕。

防渗帷幕线在建筑物范围内沿坝基灌浆廊道轴线布置,由坝身段向左右两岸延伸一道连续防渗帷幕,防渗线路布置包括坝身段、右岸山体段、左岸山体段。

坝身段:防渗线路沿坝基灌浆廊道轴线布置,并分别向两岸延伸至左、右岸上坝公路内侧,帷幕线路长度305 m。

右岸山体段:防渗线路为自右坝端顺上游引渠渠坡向上游延伸,穿过右岸入渗区后折向右岸,帷幕线路长约465 m。

左岸山体段:左岸山体段防渗帷幕的作用主要是拦截顺汤山西侧及西北侧灰岩岩溶入渗区的来水,防渗帷幕布置在汤山东北坡脚,防渗帷幕轴线总体走向基本垂直于汤山区域的渗漏方向,帷幕线路长约1 220 m。

1.3 关键问题

分析工程地质条件后认为,工程防渗帷幕沿线同时存在深厚覆盖层和岩溶发育等工程地质问题,给防渗帷幕的形成带来以下几方面困难。

(1) 深厚覆盖层钻进成孔及灌浆孔口管理设问题。两岸防渗帷幕近1 700 m沿线的地表均覆盖有厚达10~40 m的深厚覆盖层,其下伏岩体又为溶蚀发育的石灰岩,根据目前国内强岩溶地层防渗帷幕成幕经验,须采用“小口径、孔口封

闭、高压灌浆法”施工。因此,如何在深达40余m的深覆盖层中钻进成孔并埋设灌浆孔口管成为影响帷幕灌浆施工进度、灌浆质量和施工成本的一个较突出的技术难题。

(2) 土岩接触面灌浆问题。勘探资料表明,覆盖层与下部灰岩土岩接触面附近透水性较大,是工程防渗的一个薄弱环节,特别是丹江口水库正常蓄水位提高到170 m后,接触面处渗透坡降也随之增大,易产生接触破坏。由于该部位上覆土层耐压能力差,下部的岩体岩溶发育,接触面灌浆时,浆液易劈裂上部土层和顺下部岩溶外漏。因此,如何确定适宜的灌浆方法、工艺、灌浆材料及设计参数,保证土岩接触面处防渗质量成为工程防渗的另一个难题。

(3) 深厚覆盖层下岩溶强透水岩体灌浆成幕问题。本工程防渗帷幕绝大部分都是在深覆盖层条件下施工,岩溶地层防渗处理中常用的岩溶追踪开挖、清理、回填等岩溶防渗处理方法无法在本工程应用,仅能采取单一的高压灌浆方法成幕,因而深厚覆盖层下岩溶强透水岩体的灌浆成幕是本工程防渗处理的第三个技术难题。

2 现场帷幕灌浆试验

为了找到解决上述难题的最佳方案,以保证帷幕灌浆施工的顺利进行,在帷幕灌浆施工前,进行了现场灌浆试验的研究。

2.1 灌浆试验路线

(1) 通过采取钻孔取芯、注水试验、压水试验等手段,分析研究覆盖层和土岩接触面的物质特性和自身防渗能力。

(2) 通过对合金钻头和鱼尾钻头的试验应用比较,确定覆盖层合适的钻孔方法、工艺及配套工艺措施。

(3) 通过对套管+孔口管法(双管法)、套管兼孔口管法

(单管法)、隔管法(搭接管法)的试验比较,确定孔口管理设方法。

(4)通过单排孔距 2 m、单排孔距 2.5 m 以及双排孔距 2.5 m 的灌浆效果分析,确定帷幕灌浆合适的设计参数和配套的施工方法、工艺。

(5)通过灌浆试验探索,研究确定土岩接触面、浅表层岩体及深部岩体的合适灌浆压力。

(6)通过对强岩溶层的灌浆试验研究,确定岩溶防渗处理的基本方法和控制措施。

2.2 灌浆试验研究

灌浆试验在一个试验区内进行,共布置 10 个帷幕孔,7 个质量检查孔,1 个抬动观测孔,分别进行不同布孔形式试验研究,对钻灌施工方法、施工工艺以及岩溶防渗处理措施等关键技术进行了重点研究,结果如下。

(1)根据坝址区工程地质条件,参考其它类似工程施工经验,通过对单排孔距 2.5 m、单排孔距 2.0 m 和双排孔距 2.5 m 排距 0.6 m 等三组布孔型式的试验研究,认为灌浆质量可分别达到要求的 $q \leq 3 \text{ Lu}$ 、 $q \leq 5 \text{ Lu}$ 、 $q \leq 10 \text{ Lu}$ 设计防渗标准,同时确定了相应的防渗帷幕设计参数。

坝身段防渗帷幕按两排布置,孔距为 2.5 m,排距为 0.5~0.6 m;主排(下游排)帷幕孔深按设计防渗底线控制,前排帷幕孔深按主排帷幕孔深的 1/2 左右控制;两岸山体防渗帷幕按单排布置,其中近岸地段帷幕孔距为 2 m,远岸地段(距闸端 100 m 以远)帷幕孔距为 2.5 m。帷幕孔深:左岸 40~110 m,右岸 80~96 m。

(2)针对工程深覆盖层孔口管理设问题,灌浆试验中进行了套管加孔口管法、套管兼孔口管法、隔管法等三种孔口管理设方法的比较研究。结果发现,隔管法可保证下部岩体灌浆正常升至最大设计灌浆压力 2.5 MPa,且该法施工工艺较简单,覆盖层套管可兼作孔口管,减少管材损耗,因此本工程孔口管理设采用隔管法施工。

(3)针对覆盖层钻孔方法问题,试验过程中重点对合金钻头造孔加泥浆固壁法、合金钻头造孔加下套管保护法、干钻法和鱼尾钻法等覆盖层钻孔方法进行了比较研究。结果发现,鱼尾钻法具有钻头加工制作简便、钻进速度快、孔径适应性强、易形成泥浆固壁、塌孔事故率低等特点,具有明显优势。

(4)针对覆盖层下强岩溶地层帷幕灌浆问题,采用孔口封闭灌浆法,最大灌浆压力 2.5 MPa,同时灌浆施工过程中对大漏量孔段采取限流、限量、待凝复灌等控制浆液扩散范围、节省灌浆材料措施。

3 帷幕灌浆施工

(1)防渗帷幕施工。通过帷幕灌浆试验,确定了帷幕灌浆施工方法及施工工艺。坝身段帷幕灌浆在基础廊道内或坝顶施工,两岸山体段帷幕灌浆在地表施工;两岸深覆盖层帷幕孔的施工工艺流程为:覆盖层钻孔→覆盖层保护套管理设→土岩接触面灌浆→基岩第 1 段钻孔、灌浆→下隔管→待凝→以下各段钻孔、灌浆。两岸山体段地表覆盖层钻孔采用鱼尾钻造孔,钻孔孔径 130 mm;两岸山体段及坝身段基岩钻孔采用金刚石钻头造孔,钻孔孔径 56~91 mm。

帷幕灌浆采用“小口径孔、孔口封闭、自上而下分段灌浆法”施工,其中两岸地表覆盖层部位帷幕灌浆孔口管理设采用隔管法。

帷幕灌浆浆液以普通纯水泥浆液为主,普通纯水泥浆液水灰比(重量比)采用 3:1、2:1、1:1、1:0.8、1:0.5:1 等五个比级,开灌水灰比一般为 3:1。帷幕灌浆最大灌浆压力为 2.5 MPa,各灌段控制灌浆压力见表 1。

表 1 帷幕灌浆控制压力

Table 1 Curtain grouting control pressure

部位	孔序	灌浆压力/MPa			
		基岩第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段及以下各段
两岸山体段	\bar{N} 、 \bar{O} 序孔	0.5~0.7	1.0	1.5	2.5
	\bar{O} 序孔		1.5	2.0	2.5
坝身段	\bar{N} 、 \bar{O} 序孔	0.7	1.0	1.5	2.5
	\bar{O} 序孔		1.5	2.0	2.5

注:表中压力系指回浆管孔口表压力

(2)钻孔要求。所有帷幕灌浆孔、抬动观测孔和质量检查孔编号、孔序、孔深、段长等均按照设计图纸及施工技术要求进行,保证钻孔开孔孔位与设计位置的偏差小于 10 cm。覆盖层钻孔深度按钻至土岩接触面控制,终孔孔深按设计孔深或设计高程控制。

(3)压水试验要求。压水试验在钻孔冲洗或裂隙冲洗结束后 24 h 以内分段进行。先导孔、质量检查孔的压水试验采用单点法,常规帷幕灌浆孔的压水试验采用简易压水法。

(4)灌浆要求。帷幕灌浆按分排分序加密、自上而下分段的原则分三序施工,采用孔口封闭灌浆法灌注。灌浆段灌浆时,射浆管管口距孔底距离小于 50 cm,射浆管外径与钻孔孔径之差小于 20 mm。灌浆过程中经常转动和上下活动射浆管,回浆管宜有 15 L/min 以上的回浆量;尤其是深孔段强岩溶层灌浆,应每隔 2~3 min 转动并上下活动一次射浆管。强岩溶段灌浆时,如吸浆量大或不返浆,可采取限流、限量、待凝复灌等处理措施。

(5)质量检查。帷幕灌浆工程的质量检查以钻孔压水试验成果为主,结合钻孔(取芯)、灌前压水试验、灌浆、钻孔测斜、抬动变形观测等成果资料综合评定。

4 地基渗控处理效果

4.1 灌前透水性及单位注入量

通过陶岔渠首枢纽工程帷幕灌浆成果统计分析,灌浆孔平均透水率和平均单位注入量均随孔序增加呈明显递减,透水率与单位注入量有较强的相关性,符合灌浆分序递减规律。

4.2 灌后质量检查

帷幕灌浆灌后质量检查按照施工单位检测(监理单位跟踪)和第三方抽检层次分别进行,质量检查孔结合灌浆中间成果资料统一布置,检查孔总数为帷幕灌浆孔总数的 10%。在施工单位检测(监理单位跟踪)后,委托第三方检测单位采用钻孔单点压水试验法进行质量检测,帷幕灌浆共检测 5 个部位,合计 73 段,压水检查合格率为 100% (表 2)。

表 2 帷幕灌浆压水试验成果

Table 2 Curtain grouting pressure water test results

部位	入岩深度 /m	芯样提取率 (%)	段数	设计标准 /Lu	透水性/Lu		透水性超标率	
					最大值	平均值	段数	(%)
Ta+ 003.90, Tb+ 134.45	51	91.2	11	3	1.74	0.94	0	0
Ta+ 003.90, Tb+ 104.80	61.75	95.6	13	3	2.11	0.80	0	0
Ta+ 003.90, Tb+ 056.55	69.11	90.4	15	3	1.06	0.49	0	0
Z-F 31	90.66	90.2	19	5	2.54	1.09	0	0
Y-DSF 1	66.7	90.4	14	5	2.27	1.27	0	0

4.3 渗流渗压和坝基渗漏量监测

地基渗控处理结束后,由有资质的监测单位进行了渗流渗压监测、坝基渗漏量及两岸帷幕前后地下水水位监测。监测成果表明,帷幕前测压管水位随库水位变化,略低于库水位;蓄水后较高的库水位实测时,帷幕后测压管水位无明显变化,测压管测值均在设计允许范围之内;大坝左右岸帷幕前绕坝渗流测压管水位基本随库水位变化,蓄水后帷幕后的

绕坝渗流测压管水位变幅较小。

大坝基础廊道 6 号坝段上下游共布置了 3 个量水堰用于观测大坝渗漏量,编号分别为 WE01JCLD、WE02JCLD、WE03JCLD。其中 WE02JCLD 量水堰布置在横向排水沟用于观测廊道上游渗漏量,WE01JCLD、WE03JCLD 量水堰布置在下游排水沟,用于观测廊道下游(帷幕后)渗漏情况。渗流量观测成果见表 3。

表 3 渗流量观测成果

Table 3 Seepage flow observation results

编号	部位	距坝轴线 /m	高程 /m	渗流量(L·s ⁻¹)		备注
				2013-07-19	2013-11-19	
WE01JCLD	落水井下游排水沟	6.0	123.5	0.05	0.061	
WE02JCLD	落水井上游排水沟	5.6	123.5	--	--	无流量
WE03JCLD	落水井下游排水沟	6.0	146.0	--	--	无流量

坝基排水孔渗漏量采用单孔容积法观测,对基础廊道目前渗流量最大 5 个排水孔进行观测,编号分别为 6-P 8、7-P 1、7-P 2、7-P 3、8-P 3。目前实测最大渗流量为 0.03 L/s (7-P 1),其它 4 个排水孔渗漏量较小,在 0.014 L/s 以内。

5 结语

陶岔渠首枢纽工程坝址处基岩地下渗流具有明显方向性,存在坝基渗漏及绕坝渗漏问题。通过采用覆盖层钻孔(鱼尾钻造孔)→覆盖层保护套管埋设(隔管法)→土岩接触面灌浆→基岩第 1 段钻孔、灌浆→下隔管→待凝→以下各段钻孔、灌浆的施工工艺,解决了深厚覆盖层钻孔成孔及灌浆孔口管埋设、土岩接触面灌浆、深厚覆盖层下岩溶强透水岩体灌浆成幕等难题,并通过帷幕灌浆试验对帷幕线长度及设计参数及时进行了优化,降低了工程投资,保证了工程质量。

参考文献(References):

- [1] SL 319-2005, 混凝土重力坝设计规范[S]. (SL 319-2005, Design specification for concrete gravity dams[S]. (in Chinese))
- [2] 朱岳明, Darcy. 渗流量计算的等效结点流量法[J]. 河海大学学报, 1997, 25(4): 105-108. (ZHU Yue ming, Darcy. Seepage Flow Calculation of Equivalent Nodal Flow Method [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(4): 105-108. (in Chinese))
- [3] 崔皓东, 朱岳明. 二滩高拱坝坝基渗流场的反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 194-199. (CUI Haodong, ZHU Yue ming. Inversion Analysis of Ertan Arch Dam Foundation Seepage Field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 194-199. (in Chinese))
- [4] 邹艾刚. 浅谈某水库岩溶坝基防渗帷幕灌浆施工[J]. 城市建设, 2010, (60): 422. (ZOU Aigang. Introduction to a Karst Reservoir Dam Foundation Seepage Prevention Curtain Grouting Construction [J]. Journal of Urban Construction, 2010, (60): 422. (in Chinese))
- [5] 高钟璞. 大坝基础防渗墙[M]. 中国电力出版社, 2002. (GAO Zhongpu. Dam Foundation Diaphragm Wall [M]. China Electric Power Press, 2002.)
- [6] 李振, 付爱平, 王新峰. 大坝防渗帷幕灌浆施工方法在大坝防渗中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2010, (14): 233. (LI Zhen, FU Aiping, WANG Xinfeng. Dam Anti-seepage Curtain Grouting Construction Method in the Application of the Dam Seepage Control [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010, (14): 233. (in Chinese))
- [7] SL 62-94. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. (SL 62-94, The Hydraulic Structures of Cement Grouting Construction Technology Standard [S]. (in Chinese))
- [8] 江勇, 闰新. 帷幕灌浆防渗技术在坝基处理中的应用[J]. 湖南水利水电, 2008, (3): 19-20. (JIANG Yong, RUN Xin. The Curtain Grouting Anti-seepage Technology Application in Dam Foundation Treatment [J]. Hunan Province Water Conservancy and Hydropower, 2008, (3): 19-20. (in Chinese))
- [9] 刘文东, 杨宝国. 帷幕灌浆方案在水库坝基防渗工程中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 4(38): 79-80. (LIU Wending, YANG Baoguo. Curtain Grouting Scheme in the Reservoir Dam Foundation Seepage Control Engineering Application [J]. Heilongjiang Science and Technology of water Conservancy 2010, 4(38): 79-80. (in Chinese))