

水平帷幕灌浆在砂卵石地层中的应用及效果分析

颜 硕¹, 张 磊¹, 赵 利¹, 桑 亮², 张国宇²

(1. 北京翔鲲水务建设有限公司, 北京 100192; 2. 北京市南水北调建设管理中心, 北京 100195)

摘要: 对大宁水库防渗工程来说, 穿越永定河倒虹吸下部防渗至关重要。为使该灌浆防渗帷幕顺利施工, 确保工程质量和进度, 在施工之前进行专项课题研究和科研性试验, 以了解该部位砂卵石覆盖层的地质特性、可灌性和灌浆效果, 重点研究灌浆材料、浆液配合比、钻孔和灌浆施工工艺参数等。据此, 通过灌浆试验和对灌浆材料、浆液配合比和施工工艺的优选, 提出了针对不同地质条件下所采用的相应灌浆方法和技术参数, 为帷幕灌浆设计提供了依据, 确保了防渗方案的合理性和可靠性。

关键词: 砂卵石地层; 帷幕灌浆; 施工工艺; 效果分析; 大宁水库

中图分类号: TV543.5(21) 文献标识码: B 文章编号: 1000-0860(2013)02-0082-08

Application of horizontal curtain grouting to sand-gravel strata and analysis on its effect

YAN Shuo¹, ZHANG Lei¹, ZHAO Li¹, SANG Liang², ZHANG Guoyu²

(1. Xiangkun Water Conservancy Construction Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. Beijing Construction Management Center of South-to-North Water Transfer Project, Beijing 100195, China)

Abstract: The anti-seepage for the lower part of Yongdinghe River Crossing Inverted Siphon is quite important for the anti-seepage project of Daning Reservoir. In order to ensure the smooth construction, construction quality and process of the anti-seepage grouting curtain for it, the relevant special-subject study and scientific experiment are made before the construction of the project, so as to acquire the geological characteristics, groutability and grouting effect of the sand-gravel overburden therein and study on the focus of the parameters such as grouting materials, mixing ratio of grout, hole-drilling and grouting technologies for the grouting construction, etc. On the basis of this, the corresponding grouting experiment and grouting materials to be adopted for various geological conditions are put forward through the relevant grouting experiment and the optimizations of grouting materials, mixing ratio of grout and construction technology; which lay a basis for the design of the curtain grouting, and then the rationality and reliability of the anti-seepage scheme are ensured as well.

Key words: sand-gravel strata; curtain grouting; construction technology; effect analysis; Daning Reservoir

1 引言

大宁水库是永定河滞洪水库的一部分, 也是作为南水北调工程的调蓄水库。南水北调工程总干渠永定河倒虹吸从大宁水库库区东南角穿过, 沿大宁水库周边设置防渗墙, 在副坝段和中堤段防渗墙与倒虹吸发生交叉, 分别在副坝和中堤处。永定河倒虹吸为4孔3.8 m×3.8 m钢筋混凝土方涵, 经方案论证和多次

专家建议, 认为在倒虹吸下方采取水平灌浆防渗帷幕可满足防渗要求, 此方案对总干渠建筑物影响最小。

根据专家意见, 要求灌浆前先进行灌浆试验, 试验区位于副坝段F1竖井北侧井壁上, 高程为45.5~44.0 m处, 共布置10个水平灌浆试验孔, 分三序施

收稿日期: 2012-09-27

作者简介: 颜 硕(1987—), 男, 助理工程师。

工,垂直向分3排,水平向分为4排,按排分序逐级加密施工,根据试验大纲和现场实际情况进行试验,现已完成。

2 地质情况

2.1 工程地质

根据地质资料成果显示大宁水库库坝区地层分布有第三系始新统长辛店组(E_{2c})泥岩、砂岩及砾岩层,第四系全新统冲积洪积($al-plQ_4$)卵砾石及全新统坡洪积($dl-plQ_4$)砂壤土含碎石地层及人工堆积物(rQ)。

第三系始新统长辛店组(E_{2c})基岩岩性以紫红色泥岩、砾岩为主,中加浅紫色砂岩,泥岩(透水率值 $q=0.03\sim 7.67Lu$)、砾岩与砂岩(透水率值 $q=0.06\sim 9.5Lu$)不规则分布。该地层与上覆第四系卵砾石地层呈角度不整合接触。

第四系全新统冲积($al-plQ_4$)地层,广泛分布于库区,岩性以卵砾石层为主,中密~密实,卵石含量一般30%~60%,粒径一般4~8cm,大者12~15cm,含漂石,一般粒径为25~30cm,充填物以砂为主,其含量20%~25%,该地层厚度为8.8~33.0m,与下伏第三系基岩呈角度不整合关系。副坝段第四系覆盖层厚度一般13.6~29.7m,其中上半部分布粘质粉土/粉质粘土层,褐黄色~黄色,可塑~硬塑,钻孔揭露厚度3.7~7.2m,层底高程46.15~49.35m。下部卵砾石层厚度一般8.7~29.7m,层底高程24.74~39.88m。其中中细砂层渗透系数 $k=11\sim 19m/d$,卵砾石层渗透系数 $k=50\sim 75m/d$ 。

2.2 竖井开挖地质条件

通过竖井开挖了解到试验区覆盖层以砂卵石为主,中间以砂为主填充物并夹杂有粉质粘土/粘质粉土,同一高程地层变化较大,孔隙分布不均匀,地层可灌性差距较大,开挖4次取样所作颗粒分析试验结果见表1。

从表1中4次送检颗粒分析报告得知 d_{15} 分别为

0.62mm、0.54mm、4.5mm和0.35mm,水泥颗粒 d_{85} 约等于0.075mm,根据可灌比值计算公式: $M=d_{15}/d_{85}$,当 $M\geq 10$,可灌入水泥膨润土浆,分别得到4次送检土样可灌比分别为8.3、7.2、60、4.7,1组具备可灌性,2组接近可灌,1组不可灌。

4组送检土样颗粒分析报告结果显示,小于0.1mm的颗粒分别为1.5%、1.9%、1.5%、2.8%均满足小于5%的可灌指标。

根据以上两个可灌比指标分析,灌浆试验既要解决局部大孔隙的灌注,又要解决细小颗粒可灌性差的难题是本次灌浆试验的重点。

3 试验要求

(1)通过灌浆试验,为建造可靠的防渗帷幕提供依据,力求达到帷幕渗透系数为 $i\times 10^{-5}cm/s$ 的设计指标。

(2)通过灌浆试验,在既定排距、孔距的基础上,确定合理的灌浆材料、浆液配合比、灌浆压力及灌浆段长等。

(3)通过灌浆试验,提出灌浆质量检查方法。

(4)根据灌浆成果、压水试验结果和检查孔芯样的研究,分析灌浆帷幕的可靠性。

4 试验区选择与钻孔布置

4.1 试验区选择

考虑试验目的、试区地层条件和工程要求,试验选在F1灌浆竖井内北面井壁上进行,钻灌方向背向副坝。

4.2 钻孔布置

试验孔按3排进行布置,⑤、⑥排排距1.5m,⑥、⑦排排距1.2m,边排孔数3个,中间排孔数4个,开孔孔距约0.5m,终孔孔距1.50m。钻孔深度按设计孔深控制,灌浆孔数共10个,共完成钻孔总量约228.0m,灌浆进尺219.5m,另布置2个水平检查孔和2个地面垂直检查孔。垂直检查孔J-3位置在⑤、⑥排之间、距井壁5.0m,垂直检查孔J-4

表1 副坝F1竖井土样颗粒分析

试验 编号	颗粒组成/%							d_{60} /mm	d_{10} /mm	d_{15} /mm
	>20mm	20~2mm	2~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.1mm	0.1~0.075mm	<0.075mm			
1	40.1	32.5	16.3	7.7	1.9	0.6	0.9	19	0.47	0.62
2	33.6	35.6	17.6	10.0	1.3	0.8	1.1	14.5	0.43	0.54
3	49.9	38.2	3.3	5.7	1.4	0.8	0.7	29	0.9	4.5
4	46.6	21.6	7.6	18.8	2.6	2.0	0.8	28	0.3	0.35

注: d_{15} 数值为颗粒大小分配曲线查得。

位置在⑥、⑦排之间,距井壁 15.0 m 处。根据水平灌浆对井壁稳定性要求,试验大纲中预先考虑布置的 16 个固结灌浆孔,为预防灌浆过程中井壁变形发生危险而采取的安全措施。在灌浆试验过程中,压力达到预定灌浆压力情况下,井壁安全监测未出现异常现象,故此本灌浆试验未对井壁进行固结灌浆处理。试验区孔位剖面布置见图 1。

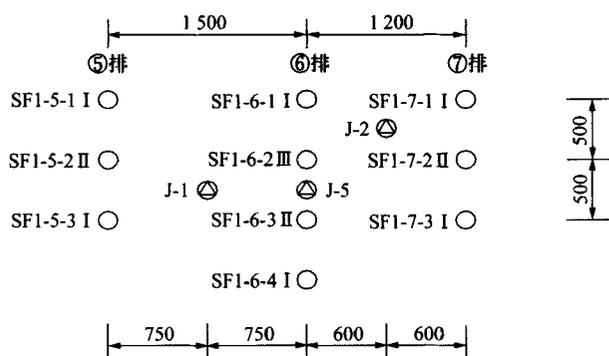


图 1 灌浆试验区井壁孔位平面布置示意(单位: mm)

5 现场灌浆试验

5.1 试验工作程序

本次帷幕灌浆试验各个项目的主要工作程序见图 2。

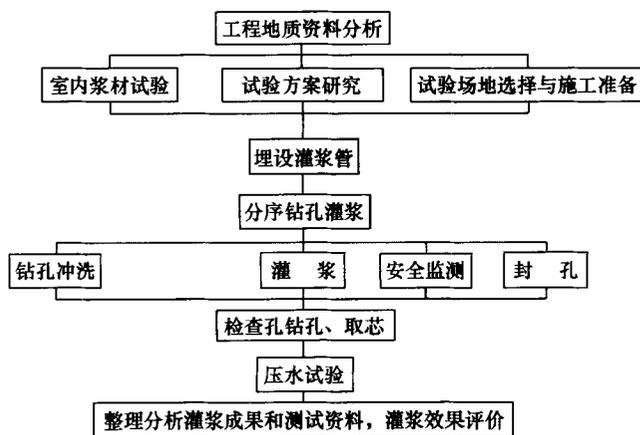


图 2 帷幕灌浆试验程序框图

5.2 灌浆试验方案

5.2.1 预埋孔口管

在竖井井壁固定钢格栅后,按设计的灌浆孔和检查孔的钻孔方向,利用竖井给出的高程线和防渗轴线确定孔口管角度和方位,在钢格栅上固定孔口钢管。钢管的外径为 $\phi 180$ mm,长度为超过混凝土井壁厚度孔口露出 10.0 cm。

5.2.2 钻孔方法

钻孔施工顺序按照先施工两边排,再施工中间

排,每排按孔序自下而上施工。

本次灌浆试验大纲中拟采用三种钻孔工艺:(1)风动潜孔锤跟管钻进工艺。(2)循环钻灌法,金刚石回转钻进,清水冲洗工艺。(3)循环钻灌法,金刚石回转钻进,泥浆护壁工艺。

以上三种钻孔方法试验当中优先考虑风动潜孔跟管钻进技术,在钻孔试验过程中,对风动潜孔钻机跟管钻进工艺的钻进速度、钻进压力、角度、孔斜率进行控制,各项参数指标均能满足在砂卵石层钻孔需要,因此,循环钻灌法,泥浆固壁施工工艺,在本试验中未使用。金刚石回转钻进清水冲洗工艺,主要用于灌浆检查孔施工,施工采用 XY-2 型地质钻机,垂直检查孔、水平检查孔钻孔直径 $\phi 110$ mm,使用双管单动钻具取芯,尽可能保证完整的岩芯采取率。

5.2.3 下设袖阀管和注入夹圈料

钻孔结束终孔验收起拔套管前,下设袖阀管。袖阀管内径为 $\phi 40$ mm ~ $\phi 60$ mm,材质选用 ABS 管和钢管,套阀孔直径 $\phi 10$ mm,每环 4 个孔,相邻两环距 33 ~ 50 cm,袖阀管长度可根据孔深具体要求任意搭接。通过灌浆试验,ABS 管比钢管更适用。

注入夹圈料通过泵送方式,即通过双栓注浆器从内套阀孔向袖阀管外侧整孔灌注,起拔套管结束后利用特制加工的孔口封闭装置封闭孔口,下设双栓注浆器从孔底至孔口每隔 1.0 m 继续灌注夹圈料,大约 50.0 L/m 左右,夹圈料灌注至孔口处待压力表起压后停止本孔夹圈料灌注,填完夹圈料待凝 3 d 后,方可进行下道工序施工。

5.2.4 开环、钻孔冲洗与压水试验

试验区灌浆孔在冲孔、压水试验之前使用单环长度双栓注浆器对灌浆段之内的套阀孔逐次进行开环,使每环在压力作用下流量有明显增加时,开环即结束,开环结束灌浆段均采用纯压式冲孔,然后进行压水试验。冲孔、压水的目的,一是了解该段地层的透水情况,二是通过压水将该地层中微细颗粒通过压力作用将其冲散到距灌浆区域远处地方,以提高该段砂卵石地层可灌性。冲孔不少于 10 min、压水采用灌浆压力的 80%,且不大于 1 MPa,压水时间不少于 20 min,用最后流量数值计算透水率。

5.2.5 灌浆方式

水平帷幕灌浆方式采用预埋袖阀管法。

预埋袖阀管灌浆方法在水平帷幕灌浆方面具体应用还处于摸索阶段,没有借鉴的工程实例,本次水平

帷幕灌浆施工参数都要通过灌浆试验予以确定。

跟管钻进成孔后,进行终孔验收,经各方验收代表验收合格,即对孔内下设袖阀管,并通过套阀孔使袖阀管外部注满夹圈料,待凝3 d后,下设特殊加工双栓注浆器在袖阀管内孔口至3.0 m处,采用自上而下灌浆,对孔口段先进行灌浆加固,以下各段自下而上进行灌浆。灌浆试验中,夹圈料对袖阀管开环、冲孔、压水、灌浆均能起到较好的保护作用。通过灌浆试验验证了钻孔跟管钻进、灌浆预埋袖阀管法以及配套夹圈料施工工艺,在水平灌浆上取得较好的效果。

5.2.6 灌浆段长

灌浆试验过程中,通过对前三个灌浆I序孔的压力、段长和胶凝材料注入量资料分析,采用对袖阀管每环单独开环,分段灌浆方式,在保证灌浆注入量供给的前提下认为灌浆段长可相应增大,且最大不超过2.0 m段长,这样既可保证灌浆质量又可提高施工进度。最终段长划分见表2。

表2 灌浆试验区灌浆段长划分

段次	1	2	3	4	5	6	7	8	以下各段
段长/m	1	1	1	2	2	2	2	2	2

5.2.7 灌浆压力

灌浆试验中对前三个灌浆I序孔资料统计,以及对井壁、抬动安全监测资料分析,可以适当提高灌浆压力,以最大限度的提高灌浆效果。灌浆压力调整后,仅I序孔中出现胶凝材料单位注入量小于20.0 kg/m的段次,在II、III序孔都没有出现。

试验拟采用灌浆压力见表3。灌浆压力调整后见表4。

灌浆压力的增加,使胶凝材料注入量得到较好的

表3 试验拟采用灌浆压力

灌浆深度/m		0~3	3~6	6~9	9~12	12~20	
灌浆压力/MPa	边排	I、II序	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~1.0	1.0~1.5
		III序(如有)	0.3~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.2	1.2~1.8
	中间排	I、II序	0.3~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.2	1.2~1.8
		III序(如有)	0.4~0.5	0.5~0.8	0.8~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0

表4 调整后灌浆压力

段次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
段长/m	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
灌浆压力/MPa	I序	0.3	0.6	1	1	1.5	1.5	2	2	2	2	2	2
	II、III序	0.5	1	1.5	1.5	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

改善。调整灌浆压力后在灌浆过程中加强对井壁、抬动观测,测得井壁累计位移数值为3.35 mm。使用高精水准仪测得试验区地层最大累计抬动数值为0.35 mm。

本次灌浆试验因采用袖阀管灌浆工艺,正常施工中未出现因增大灌浆压力发生窜浆和冒浆现象。

5.2.8 浆液配比选用

灌浆过程中浆液的合理变换,对保证帷幕的厚度、控制浆液扩散范围,节约材料,降低投资成本起着重要作用。

本次灌浆试验前,试验大纲采用五级浓度的水泥基浆液,即水固比为2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1、0.45~0.4:1,后经灌浆验证在地层可灌性差的部位,2:1浆液在1.5 MPa压力下灌入情况较差,在逐渐增大灌浆压力(2.0~2.5 MPa)的情况下,也没有较好的效果,因此对浆液比级做出调整,同时也逐级增大了胶凝材料中膨润土的含量(10%~20%),增加了两个浆液比级,水固比调整为5:1、3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1、0.45~0.4:1。

5.2.9 灌浆结束标准

根据灌浆采用的浆液类型,采用不同的结束标准:(1)膏状浆液灌注时,在设计压力下,达到基本不吸浆时结束本段灌浆。本次灌浆试验浆液比级变换未使用到膏状浆液。(2)其他比级浆液灌注时,在设计压力下,当注入率小于1 L/min时,继续灌注30 min,结束本段灌浆。

5.2.10 灌浆特殊情况处理

(1)当对灌浆孔底部进行灌浆时,孔口管处发生窜、漏浆,在孔口采取封堵无效时,采用综合灌浆法先从孔口段进行灌浆,灌浆压力取该灌浆段对应压力值,直至找到窜浆段,再从孔底部自下而上灌浆。

(2)对可灌性较差的段次,根据井壁安全监测值或地面抬动监测值适当增大该段灌浆压力,以提高有效灌浆注入量。

5.2.11 灌浆质量检查

灌浆待凝14 d后进行钻孔检查,分段进行取芯和压水试验,检查孔施工方法如下。

5.2.11.1 检查孔钻孔

检查孔施工前,搭设好施工平台,埋设好孔口管,待凝48 h

后,进行检查孔施工。

检查孔施工要求钻机摆放平稳,开孔前要求用角度尺对正钻机,钻机立轴方向要求必须与钻孔方向一致,方可进行钻孔作业。

5.2.11.2 检查孔压水试验

检查孔 J-1、J-2 采用 XY-2 地质钻机清水回转钻进,压水试验采用静水头单点综合压水法,静水头单点综合压水即压力值为库区最高蓄水位 58.5 m 至试段中点高程之差。在连续四个数值达到稳定状态下,取最后流量值减去上段次灌后流量值作为计算流量,计算该段透水率。公式为: $q = Q / (P \cdot L)$ 。Q 为压入流量(L/min); P 为试段内全压力(MPa); L 为试段长度(m)。

J-5 检查孔使用袖阀管法,压水采用两种方法:一是静水头单点法,自下而上分段压水;二是灌浆泵单点法压水方式,压力为灌浆压力 80%,且不大于 1 MPa,连续四个数值达到稳定状态下,取最终值作为计算值。两种方法所得数据进行对比。

5.2.11.3 破坏性压水试验

为了解试区地层经灌浆后所能承受的水力极限破坏压力,选择垂直检查孔 J-3、J-4 两孔进行破坏性压水试验,根据试验成果分析灌浆帷幕的水力渗透极限与压水压力相关关系。

6 灌浆效果检查及数据分析

6.1 灌前透水率分析

压水试验是得知地层透水情况的一种手段,通过压水试验,了解灌浆前、后地层透水率减少的程度,并以此来评价灌浆效果。各次序孔透水率情况见表 5。

表 5 各次序孔透水率情况

孔序	孔数	平均透水率 / Lu	总段数	区间段数(频率/%)				
				<5 Lu	5 ~ 10 Lu	10 ~ 20 Lu	20 ~ 40 Lu	>40 Lu
I 序孔	6	32.94	87	0(0)	4(5)	21(24)	35(40)	27(31)
II 序孔	3	17.86	39	2(5)	12(31)	12(31)	9(23)	4(10)
III 序孔	1	9.15	13	4(31)	3(23)	4(31)	2(15)	0(0)
合计	10	26.49	139	6(4)	19(14)	37(27)	46(33)	31(22)

灌浆各次序孔透水率频率曲线图 3。

由表 5 和透水率频率曲线图可看出,透水率随孔序的递增而减少,递减效果较明显,II 序孔透水率比 I 序孔透水率递减 45.9%,III 序孔透水率比 II 序孔透水率递减 48.8%。

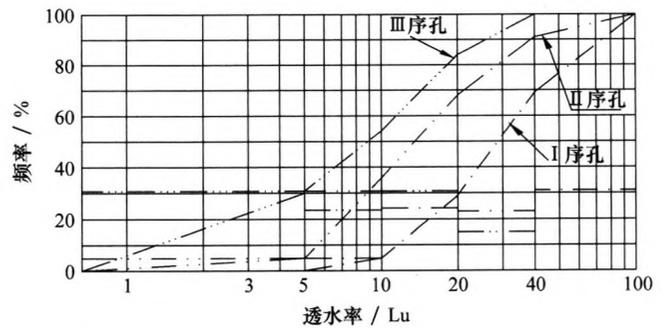


图 3 透水率频率曲线

从各次序孔灌前透水率图表显示,灌浆试验区各次序孔灌浆递减效果符合灌浆规律。

6.2 胶凝材料单位注入量分析

帷幕灌浆胶凝材料单位注入量可反映出灌浆过程所采用的工艺技术、灌注材料、浆液配合比是否具有合理性。一般情况下,灌浆各次序孔的单位注入量遵循逐序递减的规律,且次序间递减明显,说明灌浆效果较好。本灌浆试验区胶凝材料单位注入量情况见表 6。

表 6 灌浆试验区胶凝材料单位注入量情况

孔序	孔数	单位注入量 / kg · m ⁻¹	总段数	区间段数(频率/%)				
				<20 kg/m	20 ~ 100 kg/m	100 ~ 200 kg/m	200 ~ 300 kg/m	>300 kg/m
I 序孔	6	397.2	89	9(10)	17(19)	15(17)	7(8)	41(46)
II 序孔	3	175.1	39	0(0)	14(36)	15(38)	4(10)	6(15)
III 序孔	1	91.4	13	0(0)	10(77)	2(15)	0(0)	1(8)
合计	10	300.7	141	9(6)	41(29)	32(23)	11(8)	48(34)

灌浆各次序孔单位注入量频率曲线见图 4。

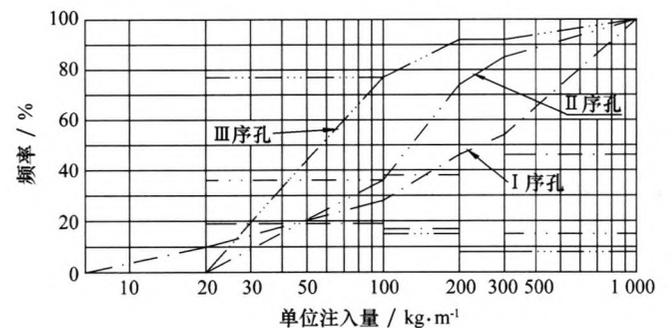


图 4 注入量频率曲线

由表 6 和单位注入量频率曲线图可知,水泥、膨润土单位注入量随孔序增加有较明显递减趋势,II 序孔单位注入量比 I 序孔单位注入量递减 56%,III 序孔单位注入量比 II 序孔单位注入量递减 47.8%,灌浆各次序孔递减效果较明显,符合灌浆

规律。

根据成果统计资料显示,单位注入量依照地层可分布情况呈现一定的规律性,在砂层反映出透水性大注浆量小,砂卵石层透水性大注浆量也随之增大的规律。灌浆试验区单位注入量大的孔段集中在10.0 m至终孔段,其中有部分段次单位注入量较大,如SF1-5-1孔0.35~10.0 m单位注入量为273.46 kg/m,平均透水率为60.68 Lu,10.0~22.0 m终孔单位注入量904.4 kg/m,其中有一段单注达到2 560.0 kg/m,平均透水率为30.79 Lu;SF1-7-1孔0.35~10.0 m单位注入量293.1 kg/m,平均透水率为46.4 Lu,10.0~22.0 m终孔单位注入量为439.9 kg/m,平均透水率23.46 Lu,两孔情况相似,反映出10.0 m以内地层单位注浆量较小,而透水率较大,说明该地层可灌性较差,跟J-1、J-2检查孔取芯情况揭示的地层变化基本一致,检查孔孔口段至9.35 m处以砂层为主,卵石含量较少,钻孔取芯过程中塌孔现象严重;10.0 m以下砂卵石地层中卵石含量较大,单位注入量随之增大,地层可灌性也逐渐改善。从单位注入量角度来分析,砂卵石地层卵石含量较大地段颗粒状浆液灌注效果较好,砂含量较大的地段采用颗粒状浆液灌浆效果不理想。

超细水泥单位注入量分析:在灌浆试验区由于部分段次透水性较大而单位注浆量较小,针对这一现象,考虑采用超细水泥进行对比试验,对不同透水性数值的段次进行超细水泥浆液灌浆,共灌浆11段次,其中I序孔3段次,平均透水率为28.84 Lu,单位注入量为33.6 kg/m;II序孔1段次,平均透水率为0.36 Lu,单位注入量为44.2 kg/m;III序孔7段次,平均透水率为7.98 Lu,单位注入量为45.9 kg/m,通过对各次序孔单位注入量对比灌浆规律不明显。各次序孔单位注入量只是随着次序孔压力的增大有少量增加。

根据灌浆资料,总体而言,灌浆方法和过程控制可行,同时也反映出颗粒状灌浆材料对地层的不适应性。

6.3 检查孔压水试验分析

灌浆质量检查孔以压水试验成果数据为主,结合施工记录、灌浆成果资料综合评定灌浆效果。

6.3.1 水平检查孔

水平检查孔J-1、J-2采用清水回转钻进、静水头单点综合压水方式。J-1、J-2检查孔各段压水情况见表7、表8。

表7 J-1检查孔静水头压水情况

序号	压水起/m	压水止/m	段长/m	灌浆前		灌浆后		单段透水率/Lu
				压力/MPa	流量/L·min ⁻¹	压力/MPa	流量/L·min ⁻¹	
1	0.35	1.35	1	0.14	18.7	—	—	133.57
2	0.35	2.35	2	0.14	16.9	—	—	负值
3	2.35	3.35	1	0.141	28.0	0.141	48.2	11.07
4	3.35	5.35	2	0.142	24.7	0.142	47.4	负值
5	5.35	7.35	2	0.144	47.6	0.144	38.2	0.56
6	7.35	9.35	2	0.145	36.3	0.145	47.2	负值
7	9.35	11.35	2	0.146	48.4	0.146	26.6	4.14
8	11.35	13.35	2	0.148	45.5	0.148	41.7	63.85
9	13.35	15.35	2	0.149	42.3	0.149	30.3	2.01
10	15.35	17.35	2	0.151	42.4	0.151	52.26	40.17
11	17.35	19.35	2	0.152	55.7	—	—	11.32
12	19.35	21.0	1.65	0.153	56.1	—	—	1.58

表8 J-2检查孔静水头压水情况

序号	压水起/m	压水止/m	段长/m	灌浆前		灌浆后		单段透水率/Lu
				压力/MPa	流量/L·min ⁻¹	压力/MPa	流量/L·min ⁻¹	
1	0.35	1.35	1	0.135	41.91	0.135	32.14	310.44
2	1.35	2.35	1	0.136	33.68	—	—	11.32
3	2.35	3.35	1	0.137	29.21	0.137	36	负值
4	3.35	5.35	2	0.138	35.75	0.138	43.45	负值
5	5.35	7.35	2	0.14	38.52	0.14	41.85	负值
6	7.35	9.35	2	0.142	45.51	0.142	39.21	12.89
7	9.35	10.35	1	0.143	1.14	0.143	47.34	7.97
8	10.35	12.35	2	0.145	45.1	0.145	18.35	负值
9	12.35	14.35	2	0.147	42.59	0.147	50.32	82.45
10	14.35	16.35	2	0.148	39.48	0.148	30.27	负值
11	16.35	18.35	2	0.15	43.90	—	—	44.73
12	18.35	20.90	2.55	0.152	49.37	—	—	14.65

注:9.35~10.35 m为单段卡塞,不减灌后流量,计算透水率。

通过J-1、J-2两孔压水数据显示,灌前、灌后压水流量数值均偏大,并时常出现灌前压水流量小于上段灌后压水流量的数据,使透水率计算出现负值的现象。出现这种异常现象,经分析认为,与该地层水饱和度有一定关系,另外,局部地质条件复杂,可灌性差,导致综合压水数据相差较大,个别段次透水率计算出现负值(负值段次可认为透水率值较小)。

经各参建单位及相关专家分析要求,试验区再增加一个J-5检查孔,J-5检查孔压水方法与灌浆孔压水方法一致,采用袖阀管法,J-5检查孔在同条件下对灌浆孔质量进行检测,用所得数据对灌浆效果进行综合评定。

J-5检查孔压水采用两种方法如下。

(1)采用静水头单点压水法,压力取库区最高蓄

水位高程 58.5 m 与试段中点高程之差, 压入流量在稳定的压力下每 5 min 读取一次压入流量, 连续四次读数中最大值与最小值之差小于最终值的 10%, 或最大值与最小值之差小于 1 L/min 时, 取最终值作为计算值, 计算透水率。J-5 各段压水(静水头)情况见表 9。

表 9 检查孔 J-5 静水头压水情况

段次	压水自 /m	压水至 /m	段长 /m	水柱压力 /MPa	流量 /L·min ⁻¹	透水率 /Lu	渗透系数 /cm·s ⁻¹
1	0.35	1.35	1	0.140	0.79	5.64	7.34 × 10 ⁻⁵
2	1.35	2.35	1	0.140	0.41	2.93	3.81 × 10 ⁻⁵
3	2.35	3.35	1	0.141	0.88	6.24	8.11 × 10 ⁻⁵
4	3.35	4.44	1.09	0.142	1.55	10.01	1.30 × 10 ⁻⁴
5	4.44	6.44	2.0	0.143	1.54	5.38	7.00 × 10 ⁻⁵
6	6.44	8.44	2.0	0.144	1.37	4.76	6.18 × 10 ⁻⁵
7	8.44	10.44	2.0	0.146	0.81	2.77	3.61 × 10 ⁻⁵
8	10.44	12.44	2.0	0.147	0.61	2.07	2.70 × 10 ⁻⁵
9	12.44	14.44	2.0	0.148	0.45	1.52	1.98 × 10 ⁻⁵
10	14.44	16.44	2.0	0.150	0.21	0.70	9.10 × 10 ⁻⁶
11	16.44	18.44	2.0	0.151	2.26	7.48	9.73 × 10 ⁻⁵
12	18.44	20.44	2.0	0.153	1.07	3.50	4.55 × 10 ⁻⁵

(2)使用灌浆泵单点压水法, 压力取灌浆压力的 80%, 且不大于 1 MPa, 连续四次读数中最大值与最小值之差小于最终值的 10%, 或最大值与最小值之差小于 1 L/min 时, 取最终值作为计算值, 计算透水率。J-5 各段泵压单点法压水情况见表 10。

表 10 检查孔 J-5 压水(泵压)情况

段次	压水自 /m	压水至 /m	段长 /m	表压力 /MPa	水柱压力 /MPa	流量/L·min ⁻¹	透水率 /Lu	渗透系数 /cm·s ⁻¹
1	0.35	1.35	1	0.33	0.100	2.16	5.02	6.53 × 10 ⁻⁵
2	1.35	2.35	1	0.74	0.100	1.66	1.98	2.57 × 10 ⁻⁵
3	2.35	3.35	1	0.92	0.101	11.37	11.14	1.45 × 10 ⁻⁴
4	3.35	4.44	1.09	0.91	0.102	9.86	8.94	1.16 × 10 ⁻⁴
5	4.44	6.44	2.0	0.93	0.103	31.76	15.37	2.00 × 10 ⁻⁴
6	6.44	8.44	2.0	0.90	0.104	14.93	7.44	9.67 × 10 ⁻⁵
7	8.44	10.44	2.0	0.93	0.106	16.89	8.15	1.06 × 10 ⁻⁴
8	10.44	12.44	2.0	0.93	0.107	11.92	5.75	7.47 × 10 ⁻⁵
9	12.44	14.44	2.0	0.95	0.108	3.21	1.52	1.97 × 10 ⁻⁵
10	14.44	16.44	2.0	0.94	0.110	0.81	0.39	5.01 × 10 ⁻⁶
11	16.44	18.44	2.0	0.82	0.111	8.07	4.33	5.63 × 10 ⁻⁵
12	18.44	20.44	2.0	1.02	0.113	22.87	10.09	1.31 × 10 ⁻⁴

以上两种压水方法反映出的地层透水情况, 通过两种结果对比, 并参照 J-1、J-2 检查孔压水情况和灌浆成果资料, 分析得出采用袖阀管泵压单点法压水, 基本能够反映出地层透水情况, 但还存有一定问题。压水数据显示, J-5 检查孔 12 段压水中, 其中

5 段渗透系数大于 $i \times 10^{-5}$, 而且较多集中在 0.35 ~ 10.0 m 砂层分布较多的地段, 卵石含量较大的地段检测效果较理想, 建议采用袖阀管泵压单点压水法作为质量检测方法。理由为: 通过袖阀管静水头单点法、袖阀管泵压单点法, 清水回转钻进静水头单点综合压水法三种压水方式所得数据对比, 认为袖阀管静水头单点压水法所得数据偏小, 与实际数据偏差较大; 清水回转钻进静水头单点综合压水法, 因钻孔过程对地层扰动大, 塌孔现象严重, 造成孔内情况复杂化, 使压水数值偏大, 并时常出现本段压水流量减上段灌后流量出现负值现象, 使流量无法参与透水率计算; 袖阀管泵压单点法所得压水数据居于前两者之间, 并能够反映出该试段透水地层的一般规律, 与灌前压水可同条件下对比, 数据趋于合理, 故建议使用袖阀管泵压单点压水法。

6.3.2 垂直检查孔

J-3、J-4 为垂直检查孔布置在试验区上部地表面, 两孔距井壁水平距离分别为 5.0 m、15.0 m 处, 非灌段镶筑孔口管, 钻孔深度分别为 9.5 m、10.0 m, 下设 $\phi 127$ mm 钢管至孔底, 底部 2.0 m 用 0.5:1 纯水泥浆液镶筑, 待凝 48 h 可进行钻孔, 钻孔采用 $\phi 110$ mm 双管单动钻具清水钻进, 终孔深度为 10.1 m 和 10.9 m, 段长为 0.6 m 和 0.9 m, 钻孔结束进行静水头单点法压水试验, 压力取值库区最大蓄水位高程 58.5 m 与试段中点高程之差。J-3、J-4 检查孔静水头单点法压水数据统计见表 11。

表 11 J-3、J-4 检查孔静水头单点法压水数据统计

孔号	压水自 /m	压水至 /m	段长 /m	压力 /MPa	流量/L·min ⁻¹	透水率 /Lu	渗透系数 /cm·s ⁻¹
SF1-J-3	9.5	10.1	0.6	0.138	0.25	3.02	3.93 × 10 ⁻⁵
SF1-J-4	10.0	10.9	0.9	0.145	0.47	3.6	4.68 × 10 ⁻⁵

以上两孔压水数据全部满足设计要求。

6.4 破坏性压水试验

在检查孔 J-3 孔 9.5 ~ 10.1 m 段处进行破坏性压水试验, 试验数据见表 12, 试验结果见图 5。

由图 5 中可看出该孔在压力 2.12 MPa 压力下发生水力破坏, 其对应流量为 12.9 L/min, 透水率为 10.14 Lu。根据 J-3 孔得到水力破坏压力值为 2.12 MPa, 距防渗幕体边缘最近渗径厚度为 0.95 m。

在检查孔 J-4 孔 10.0 ~ 10.9 m 段处进行破坏性压水试验, 试验数据见表 13, 试验结果见图 6。

由图 6 中可看出该孔在压力 2.1 MPa 压力下发生

表 12 J-3 孔 9.5~10.1 m 段处破坏性压水试验数据

流量/L·min ⁻¹	0	1.15	0.92	0.93	1.09	1.24	1.05	1.42	1.92	1.63	1.84	2.07	2.97	5.7	12.9	62.9
压力/MPa	0	0.39	0.44	0.47	0.56	0.62	0.72	0.96	1.33	1.54	1.63	1.76	1.94	2.04	2.12	2.26

表 13 J-4 孔 10.0~10.9 m 段处破坏性压水试验数据

流量/L·min ⁻¹	0	1.07	1.14	1.5	1.63	1.85	2.02	2.32	2.48	3.42	6.17	8.28	12.5	16	19.4	32.5	51.5
压力/MPa	0	0.34	0.44	0.53	0.66	0.78	0.87	0.97	1.05	1.16	1.34	1.62	1.77	2.03	2.1	2.28	2.4

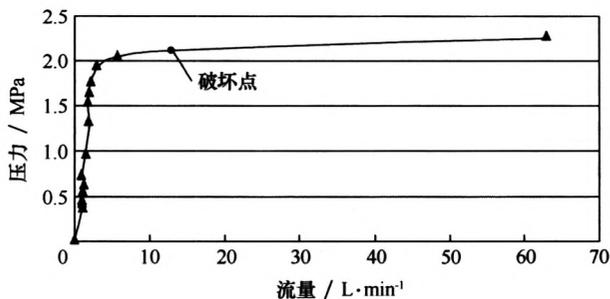


图 5 试验区 SF1-J3 孔 9.5~10.1 m 破坏性压水试验

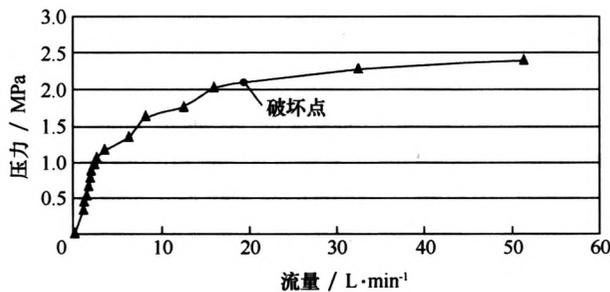


图 6 试验区 SF1-J4 孔 10.0~10.9 m 破坏性压水试验

水力破坏,其对应流量为 19.36 L/min,透水率为 10.2 Lu。根据 J-4 孔得到水力破坏压力值为 2.1 MPa,最薄渗径厚度为 0.6 m。

J-3、J-4 破坏性压水结束从中选取压力 1 MPa 所对应的流量值进行渗透系数计算,成果见表 14。

表 14 渗透系数计算成果

孔号	压水自/m	压水至/m	段长/m	压力/MPa	流量/L·min ⁻¹	透水率/Lu	渗透系数/cm·s ⁻¹
SF1-J-3	9.5	10.1	0.6	0.96	1.42	2.47	3.2 × 10 ⁻⁵
SF1-J-4	10.0	10.9	0.9	0.97	2.32	2.66	3.45 × 10 ⁻⁵

从破坏性压水试验所得渗透系数指标满足设计要求。

7 钻孔与灌浆工效分析

通过钻孔、灌浆工效的统计,可以了解针对此地层采用的钻孔、灌浆工艺参数以及机具配置的合理

性,为生产施工时人力、设备的组织和工期安排提供参考,本次灌浆试验工效见表 15。

表 15 钻孔灌浆统计

类型	开竣工日期/年-月-日	进尺/m	工效/m·h ⁻¹		
			纯钻(灌)	生产	平均
钻孔灌浆	2010-08-01~2010-08-29	228.04	1.44	0.95	0.75
	2010-08-02~2010-09-05	219.5	1.01	0.38	0.38

灌浆试验孔单机钻孔平均工效比灌浆平均工效高出 1 倍,灌浆试验按一机两泵机具配置是合理的。

试验施工中,由于场地狭小,钻灌相互干扰大,钻机停等时间较长,在今后生产性施工时,场地相对增大,钻孔工效还会有所增加。

8 结论

通过上述对灌浆试验的论述和数据分析,据此在施工现场组织了国内行业知名专家审核会议,对本次灌浆试验所采用的施工工艺以及灌浆施工技术参数的合理性进行确认,在国内行业规范对砂卵石地层灌浆没有具体要求的前提下,通过专家审核;专家着重提示在施工中依据本灌浆试验所提供的灌浆参数,根据施工中遇到的具体情况,酌情修正技术参数,在保证倒虹吸安全前提下,为倒虹吸下帷幕灌浆连续施工提供了保证。

(责任编辑 欧阳越)

