

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221711

南水北调中线雄安调蓄库帷幕灌浆方法试验研究

李子康¹, 肖碧¹, 刘洋²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 南水北调中线实业发展有限公司, 北京 100038)

摘要: 雄安调蓄库为抽水蓄能水库, 是支撑雄安新区建设发展的重要水源工程, 以及保障新区供水安全的关键配套工程, 对工程防渗要求较高。库盆范围最大的 F_{173} 断层以 NE-SW 向贯穿, 并在库盆 NE 侧、SW 侧形成低矮的垭口, 沿断层局部发育有溶蚀现象。水库岩性、构造封闭条件较差, 为控制水库渗漏, 库周采用帷幕灌浆防渗。为探索适合雄安调蓄库帷幕灌浆的实施方式, 需要通过灌浆试验研究, 确定针对 F_{173} 断层的防渗处理措施、灌浆施工方法和施工工艺。结果表明, 各部位岩体灌浆后透水率满足防渗标准要求, 抗疲劳特性得以改善。

关键词: 雄安调蓄库; 灌浆试验; 帷幕灌浆; 防渗处理

中图分类号: TV543

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0123-06

1 工程概况

南水北调中线雄安调蓄库工程位于保定市徐水区境内, 调蓄库工程建成后, 可满足雄安新区供水需求和供水安全, 提高保定、廊坊等地供水保证率, 兼顾蓄能发电、沉藻沉沙等。工程总调蓄库容约 $2.34 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中调蓄上库约 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 调蓄下库约 $0.77 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为 I 等工程, 大(1)型规模。调蓄上、下库间由输水隧洞相连, 并经联通工程与南水北调中线总干渠相通, 调蓄上、下库间布置抽水蓄能电站, 装机容量约 600 MW。调蓄库工程主要由调蓄上库、调蓄下库、输水发电系统和联通工程等建筑物组成。调蓄上库利用义王庄村所在沟谷拦沟筑坝而成, 正常蓄水位 234 m。主坝为混凝土面板堆石坝, 最大坝高 133 m; 副坝为混凝土重力坝, 最大坝高 47 m。库盆范围出露的基岩为震旦系上统景儿峪组 (Z_{3j})、下马岭组 (Z_{3x}) 砂岩、页岩岩组和震旦系中统铁岭组 (Z_{2t})、雾迷山组 (Z_{2w}) 白云岩地层。景儿峪组 (Z_{3j})、下马岭组 (Z_{3x}) 砂岩、页岩属相对隔水层, 岩层缓倾, 主要出露于正常蓄水位之上, 对于阻止水库外渗作用不大。铁岭组 (Z_{2t})、雾迷山组 (Z_{2w}) 以白云岩为主, 系围限库盆与库底的主要地层, 属可溶性碳酸盐岩, 岩溶地质条件复杂。水库岩性、构造封闭

条件较差, 为控制水库渗漏, 主坝、副坝及库周均采用帷幕灌浆防渗。为探索适合雄安调蓄库灌浆的实施方式, 通过试验确定了针对 F_{173} 断层的防渗处理措施、灌浆施工方法和施工工艺, 结果表明, 采用限流缓慢升压灌注、高压水喷射冲洗等措施较好。

2 南水北调中线雄安调蓄库帷幕灌浆方法

2.1 工程特点与帷幕灌浆方法

调蓄库库盆构造背景复杂, 发育有规模较大的贯穿性 F_{173} 断层, 该断层平面上 NE-SW 向穿过库盆发育, 主断层带宽 10.0~15.0 m, 断层影响带宽度约 5.0~30.0 m, 延伸长度大于 5.0 km, 断层错距达 210.0 m, 对水库渗漏影响很大, 是形成水库渗漏的主要地质问题。

目前国内岩溶地层灌浆主要采用孔口封闭高压灌浆法施工^[1], 对灌浆压力要求较高, 而该水库主坝为面板堆石坝, 趾板灌浆盖重小, 层状岩体倾角平缓, 倾角 $3^\circ \sim 8^\circ$, 主坝帷幕灌浆在缓倾地层薄趾板条件下进行, 极易发生灌浆抬动或外漏, 导致升压困难, 且趾板部位不具备后期补灌条件^[2]。因此, 保证在趾板不抬动破坏的前提下, 尽可能提高灌浆压力, 特别是浅层的灌浆压力, 确保帷幕灌

收稿日期: 2022-08-17, **修回日期:** 2022-09-05

基金项目: 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主科研项目(CX2020Z08)

作者简介: 李子康(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构工程、水利工程施工组织管理, E-mail: lizikang_sdxxy@whu.edu.cn

浆质量,是趾板薄盖重灌浆的重点和难点。

库周帷幕灌浆一般采用布置单层灌浆平洞方式施工,钻灌深度约 90 m,特别是 F_{173} 断层部位,帷幕钻灌深度约 140 m。从国内岩溶地层灌浆施工情况看,深孔灌浆施工难度大,需通过现场灌浆试验确定合适的施工工艺和超深帷幕灌浆质量控制措施^[3,4]。此外,库盆防渗线路以岩溶化地层为主,溶蚀发育及断层破碎部位幕体的耐久性 & 抗击出性能等关乎防渗帷幕长期安全^[5-7]。

2.2 灌浆试验基本思路

(1)经济合理孔排距研究。上库防渗帷幕线路主要地层为铁岭组 Z_{2t} 白云岩,主要地质构造为 F_{173} 断层,分别针对 F_{173} 断层及其影响带、 Z_{2t} 地层,对比研究双排和三排灌浆孔、孔距 2.0 m 和 2.5 m 的灌浆效果,确定代表性地层的经济合理孔排距,为施工设计及帷幕优化提供依据。

(2)缓倾地层趾板薄盖重灌浆技术研究。针对主坝缓倾地层趾板薄盖重灌浆,借鉴水布垭水电站等高面板堆石坝经验,重点从清基质量控制、抗抬锚杆辅助升压、固结灌浆辅助防渗、分排分序逐级升压等方面开展研究,确定主坝灌浆合适的灌浆工艺及参数,探索合适的浅层灌浆压力及升压措施。

考虑主坝建基岩体主要为 Z_{2t} 地层,与库周防渗帷幕线路主要地层一致,而库周防渗帷幕浅层帷幕要求低于趾板部位帷幕灌浆要求,趾板部位灌浆研究成果对库周 Z_{2t} 地层防渗帷幕具有很好的指导性,将两者结合进行试验探索。

(3)溶蚀岩体灌浆研究。针对溶蚀岩体,重点从灌浆压力入手,利用高压灌浆技术对溶蚀岩体进行高压挤密和适度的劈裂,通过灌前、灌后的常规压水、疲劳压水及破坏压水试验、电磁波 CT 等,探索高压灌浆对溶蚀岩体的改善程度,分析溶蚀岩体帷幕灌浆的可灌性、合适灌浆压力,幕体的渗透性、耐久性 & 承压能力等问题。

2.3 灌浆方案设计

2.3.1 试验场区选择与试验布孔方案

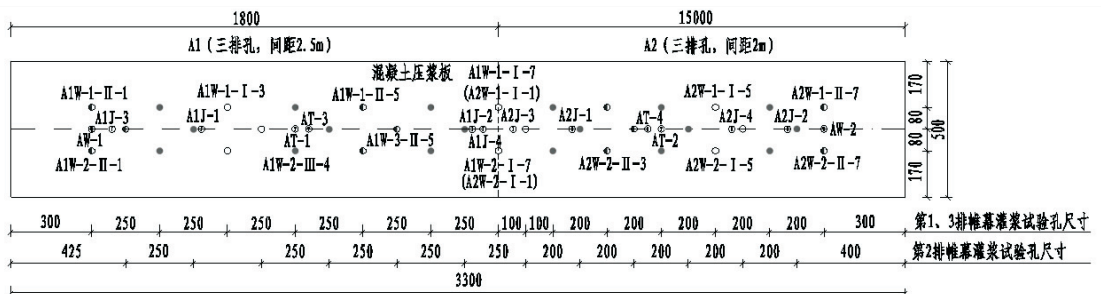


图 2 帷幕灌浆试验 A 区孔位布置图

Fig. 2 Hole layout in area A of curtain grouting test

A 区场地选在副坝(# 2 坝口处)坝轴线与 F_{173} 断层相交处,帷幕灌浆试验可结合副坝永久帷幕布置。针对 F_{173} 断层及其影响带进行灌浆试验,同时进行 Z_{3x}/Z_{2t} 界线附近强烈溶蚀带灌浆试验,试验场地位置见图 1。

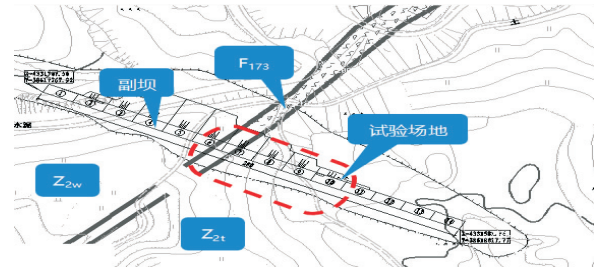


图 1 A 区试验场地位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of the test site in area A

(1)帷幕灌浆孔布置。综合考虑试验目的及尽可能覆盖 F_{173} 断层的需求,A 区共布置帷幕灌浆孔 38 个,分为 A1、A2 两个子区。A1、A2 区均布置三排帷幕灌浆孔,排距 80 cm,孔距分别为 2.5、2.0 m。为减少场地开挖量,灌浆平台开挖高程确定为 210 m。因浅表层强风化岩体性状较差,为更好地模拟副坝建基岩体,帷幕灌浆试验区起灌高程确定为 205 m。帷幕灌浆孔底高程 60 m,钻孔深度 150.6 m,基岩灌浆段长 145 m。

(2)抬动观测孔和物探测试孔布置。A 区布置 2 个抬动观测孔(AT-1、AT-2),基岩孔深 30 m;布置 2 个物探 CT 测试孔(AW-1、AW-2),基岩孔深 150 m。

(3)检查孔布置。A 区共布置 8 个检查孔。A1、A2 区双排帷幕中心线上各布置 2 个灌后压水检查孔(A1J-1、A1J-2、A2J-1、A2J-2),分别检查双排孔距 2.5、2.0 m 的帷幕灌浆效果;A1、A2 区三排帷幕中心线上各布置 2 个灌后压水检查孔(A1J-3、A1J-4、A2J-3、A2J-4),分别检查三排孔距 2.5、2.0 m 的帷幕灌浆效果。检查孔深入岩体 150 m,疲劳压水、破坏压水利用压水检查孔进行。A 区孔位布置见图 2。

2.3.2 帷幕灌浆试验主要工艺及参数

(1) 钻孔冲洗。灌浆孔段钻孔结束后均应进行钻孔冲洗,钻孔冲洗后孔底残留物厚度不得大于 20 cm。灌浆孔第 1 段(接触段)钻孔冲洗结束后应进行裂隙冲洗(其余孔段一般不进行裂隙冲洗),裂隙冲洗可结合钻孔冲洗进行。裂隙冲洗要求至回水澄清,且总冲洗时间要求单孔不少于 20 min。断裂构造、软弱夹层、裂隙密集带及岩溶发育带等地质缺陷部位,裂隙冲洗回水达不到澄清要求的孔段,初步确定冲洗时间达 30 min 以上。裂隙冲洗压力按灌浆压力的 80% 且不大于 1 MPa 控制。

(2) 水泥浆液及变换。灌浆浆液的浓度应由稀到浓,逐级变换。水灰比采用 5 : 1、3 : 1、2 : 1、1 : 1、0.8 : 1、0.5 : 1 等 6 级,水泥浆液开灌水灰比暂定 5 : 1。浆液应由稀到浓逐级变换,浆液变换应遵循如下原则:①当灌浆压力保持不变,注入率持续减少,或当注入率不变而压力持续升高时,不得改变浆液水灰比。②当某级浆液注入量达到 300 L 以上,或灌注时间达到 30 min 以上,而灌浆压力和注入率均无显著改变时,可换浓一级水灰比浆液灌注。③当注入率大于 30 L/min,且基本不起压时可越级换浓水灰比。

(3) 灌浆方法、段长及灌浆压力。帷幕灌浆孔均采用孔口封闭法灌浆,灌浆孔灌浆段长划分为第 1 段钻孔深度 7 m,灌浆段(接触段)长 2 m(高程 205 m 以上不灌浆),第 2 段 3 m,第 3 段及以下各段一般为 5 m。如浅层岩体条件较差,孔口管深度可适当加大,浅层岩体灌浆压力均采用第 1 段灌浆压力。

为了增强岩体可灌性,增加帷幕厚度、密实度及耐久性,帷幕灌浆应采用较高的灌浆压力。结合其他工程经验,初拟灌浆压力见表 1,具体灌浆压力根据现场灌浆试验情况动态调整确定。

表 1 帷幕灌浆试验 A 区下游排灌浆压力表

Tab. 1 Downstream grouting pressure gauge of curtain grouting test area A MPa

段次 (段长)	I序孔		II序孔		III序孔	
	起始压力	目标压力	起始压力	目标压力	起始压力	目标压力
第 1 段(2 m)	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5
第 2 段(3 m)	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6
第 3 段(5 m)	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7
第 4 段(5 m)	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8
第 5 段(5 m)	0.8	1.0	0.8	1.0	1.0	1.2
第 6 段(5 m)	1.2	1.5	1.2	1.5	1.5	2.0
第 7 段及以下	2.0	2.5	2.0	2.5	2.5	3.0

灌浆试验初期,开展升压试验。采用分级升压方式逐级升压至目标压力。具体操作以起始压力降低 0.1~0.2 MPa 为基础,按每 0.05 MPa 为

一级,逐级升压至设计压力,分级升压时每级压力的纯灌时间不少于 10 min,升压过程中密切关注抬动变形和注入率的变化,以不发生抬动和注入率陡增为前提逐级升压,并探索灌浆压力—抬动变形—注入率的关系。灌浆过程中灌浆压力与注入率的关系按表 2 控制。

表 2 注入率与灌浆压力关系

Tab. 2 The relationship between injection rate and grouting pressure

注入率 /(L·min ⁻¹)	灌浆压 力/MPa	注入率 /(L·min ⁻¹)	灌浆压 力/MPa
>30	<0.3P	10~20	0.5P~0.8P
20~30	0.3P~0.5P	<10	0.8P~1.0P

注:P 为设计压力。

2.3.3 帷幕灌浆试验主要施工设备及工艺

(1) 灌浆设备。灌浆采用 DDZG6-80 智能灌浆设备。通过人工操作智能控制系统实现自动采集灌浆数据、分析、控制输出、自动配浆、调压、变浆。

(2) 钻孔要求。钻孔采用 XY-2 地质钻机,帷幕灌浆孔、压水检查孔、物探测试孔应严格进行孔斜控制,深孔钻进时,严格控制孔深 50 m 以内的偏差,终孔偏差控制在 2.5 m 以内。采用钻孔数字测斜仪(KXP-3D)测斜,钻孔测斜节点孔深分别为 20、40、70、100、150 m 终孔测斜验收。预埋管之前必须对钻孔测斜,判断钻孔倾斜程度并确定是否需要纠正。下入预埋管后,在预埋管内测斜,并转动预埋管后测斜,使其处于有利姿态,减小钻孔倾斜趋势,对预埋管采取固定措施后注入水泥浆。通过节点深度测斜数据,计算孔底偏斜程度及发展趋势,调整钻孔工艺,确保钻孔偏差符合设计和规范^[8]要求,保证灌浆质量。钻孔垂直度控制在 0~20 m 比较关键,现场控制标准为钻孔顶角 0.4° 以内。

(3) 抬动观测孔施工。抬动观测孔孔径均为 Φ76 mm。抬动观测孔施工步骤为钻孔→抛投水泥砂浆球→下插测杆、待强(不少于 24 h)→抛投粘土球→下套管→套管外粉细砂充填→管口封闭→测墩浇筑。混凝土盖板浇筑完成 3 d 后进行抬动观测孔钻孔。

3 灌浆效果分析

3.1 灌前透水率统计特征

(1) 灌前物探孔 AW-1 采用单点法压水,AW-2 采用五点法压水。孔深 0~20 m 范围内浅部岩体透水率均大于 100 Lu。该部位为 Z_{3j} 景儿峪组砂岩、页岩或 Z_{3x} 泥岩、页岩,岩体为强风化,

透水性强。

(2)两个物探测试孔深 20~150 m 范围共压水 52 段,其中小于 1 Lu 共 44 段,占比 84.6%,岩体总体透水率较小。透水率大的孔段主要位于孔深 70 m 以内,结合物探孔取芯成果分析,岩体局部透水率大的主要原因为风化带、溶蚀夹泥、F₁₇₃ 断层角砾岩或破碎岩体部位。

(3)AW-2 孔深 139~141 m 附近钻孔失水,透水率较大,结合岩芯照片和孔内电视录像成果分析,该部位溶蚀结构面岩体破碎,表明深部仍存在不规则分布的溶蚀岩体。

3.2 灌浆注入量统计特征

由 A 区各序孔深部孔段平均单位注灰量分析可知,试验 A1 区第 1 排深部孔段平均注灰量为 92.68 kg/m,单位注灰量小于 20 kg/m 的孔段占 72.0%,单位注灰量大于 300 kg/m 的孔段占 14.3%;试验 A2 区第 1 排深部孔段平均注灰量为 130.63 kg/m,单位注灰量小于 20 kg/m 的孔段占 52.0%,单位注灰量大于 300 kg/m 的孔段占 19.9%。试验 A 区岩体可灌性差异性大,平均注灰量两极分化较为突出。相对而言,A2 区较 A1 区分化现象更为突出,主要是 A1 区总体雾迷山组(Z_{2w})地层占比高,岩体完整性相对更好,因此小于 20 kg/m 的孔段更多;A2 区位于铁岭组(Z_{2t})地层占比高,小于 20 kg/m 的孔段较 A1 区少。A1、A2 区第 3 排深部孔段平均注灰量分别为 35.58、34.64 kg/m,大注灰量孔段占比很低,表明岩体完整性进一步增强。

3.3 灌后压水检查结果

(1)试验 A 区双排灌浆孔灌后压水检查透水率全部满足设计合格标准 $q \leq 3$ Lu,灌浆效果好。

(2)A1、A2 区孔深 0~20 m 的浅部岩体平均透水率分别为 1.48、1.58 Lu,最大透水率 2.56 Lu,表明浅部强风化岩体经灌浆处理后透水率大幅降低。

(3)孔深 20~150 m 的深部岩体最大透水率为 1.1 Lu,其余孔段透水率均小于 1 Lu,A1、A2 区深部岩体平均透水率分别为 0.08、0.04 Lu,表明采用试验的灌浆工艺和参数后,深部岩体包含 F₁₇₃ 断层、局部夹泥、溶蚀破碎等部位采取双排灌浆孔后,已能满足灌浆帷幕设计防渗标准 $q \leq 3$ Lu 的要求。

(4)孔距 2.5、2.0 m 灌后差别不大,均能满足要求。分析认为,一方面灌浆工艺和参数合理可行,灌浆效果均较好;另一方面,A1 区(双排,2.5 m 孔距)雾迷山组(Z_{2w}),岩体完整性相对更

好,灌浆难度相对较小;A2 区主要位于铁岭组(Z_{2t}),裂隙相对发育,灌浆难度相对较大。孔距与地层对灌后检查的影响一定程度上有所抵消。

(5)考虑该工程防渗要求较高,灌后岩体防渗性能不仅关系水库正常蓄水,也直接关乎工程效益。从 A 区试验成果看,雾迷山组(Z_{2w})一般地层部位,推荐双排帷幕灌浆孔,孔距 2.5 m;铁岭组(Z_{2t})断层或溶蚀夹泥发育部位,推荐双排帷幕灌浆孔,孔距 2.0 m;一般部位可采用双排帷幕灌浆孔,孔距 2.5 m。

3.4 灌后疲劳压水与破坏压水试验分析

(1)疲劳压水试验。三排灌后常规压水检查结束后,根据常规压水检查结果及钻孔岩芯,选择 A1J-4 号孔深 21~26 m 段、A2J-3 号孔深 22~27 m 段、A2J-4 号孔深 30~35 m 段进行疲劳压水和破坏压水试验,以评估岩体灌后渗透稳定性和耐久性。其中,A1J-4 号孔深 21~26 m 段、A2J-3 号孔深 22~27 m 段均为针对溶蚀夹泥部位岩体,A2J-4 号孔深 30~35 m 段针对 F₁₇₃ 断层角砾岩部位。根据流量 1 h 区间流量平均值,绘制疲劳压水试验注入率—历时曲线,见图 3。

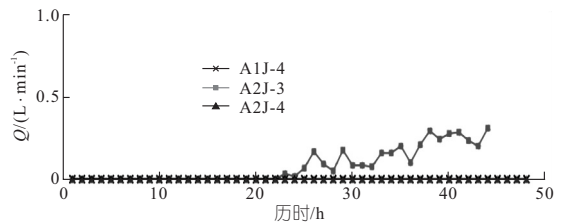


图 3 疲劳压水试验注入率—历时曲线

Fig. 3 Fatigue pressurized water test injection rate-duration curve

由图 3 可看出,疲劳压水过程中注入率较稳定,A1J-4、A2J-4 注入率均为 0 L/min,A2J-3 升压至 1 MPa 持续 23 h 后,注入率稳定为 0.1~0.3 L/min。注入率均较小,未发生劈裂情况,表明溶蚀夹泥、断层角砾岩部位灌后耐久性好,抗疲劳压水能力较双排灌后进一步提高。

(2)破坏压水试验。破坏压水试验与疲劳压水试验一致,针对 A1J-4 号孔深 21~26 m 段、A2J-3 号孔深 22~27 m 段、A2J-4 号孔深 30~35 m 段进行破坏压水试验,其压力—注入率曲线见图 4。由图 4 可看出,破坏压力—注入率变化规律分为两个阶段:①升压阶段。升压过程中,A1J-4、A2J-3 出现了注入率增加现象,其中 A1J-4 注入率加大对应的压水压力为 2.4 MPa,A2J-3 注入率加大对应的压水压力约 2.6 MPa,但注入率均仅 5~6 L/min,表明岩体裂隙或溶蚀夹泥层承压

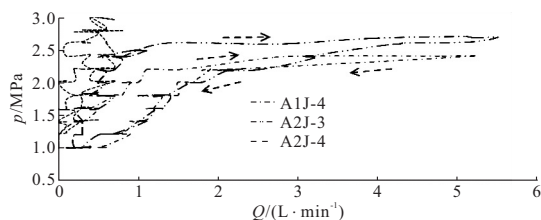


图 4 破坏压水试验压力~注入率曲线

Fig. 4 Destruction pressurized water test pressure-injection rate curve

能力较强,仅部分裂隙有所张开,但破坏不严重。灌浆处理后,溶蚀夹泥和断层角砾岩的破坏压力均大于双排灌后断层角砾岩破坏压力 1.8~2.0 MPa。A1J-4 在压力达到 3.0 MPa 仍未破坏。三排灌浆进一步提高了岩体承压能力,特别是溶蚀夹泥部位经高压喷射冲洗+高压灌浆后承压能力显著增强,可见灌浆采取的方法、工艺、参数合理。

②降压阶段。降压曲线不能回复到升压曲线上,形成滞回环,压力下降到 1 MPa,注入率均下降至 1 L/min 以下,裂隙基本闭合恢复。

3.5 物探测试结果

A 区帷幕灌浆前后电磁波 CT 检测结果对比见图 5。对比灌前、灌后电磁波 CT 结果,分析认为:①高程 190 m 以上灌前电磁波视吸收系数 $\beta > 0.2$ NP/m 的区域面积为 466 m²,灌后电磁波视吸收系数 $\beta > 0.2$ NP/m 的区域面积为 461 m²,灌后异常面积比灌前异常面积缩小 5 m²,缩小面积占比 1.1%。相对高吸收区与灌后相比面积减小不大,主要原因是强风化岩体性状很差,含泥量高,灌浆降低了其渗透性,但物质成分不会有大的改变,仍存在相对高吸收区。②高程 190 m 以下灌前电磁波视吸收系数 $\beta > 0.2$ NP/m 的区域面积为 257 m²,灌后电磁波视吸收系数 $\beta > 0.2$ NP/m 的区域面积为 189 m²,灌后异常面积比灌前异常面积缩小 68 m²,缩小面积占比 26.5%。特别是高程 180 m 以下基本无相对高吸收区,进

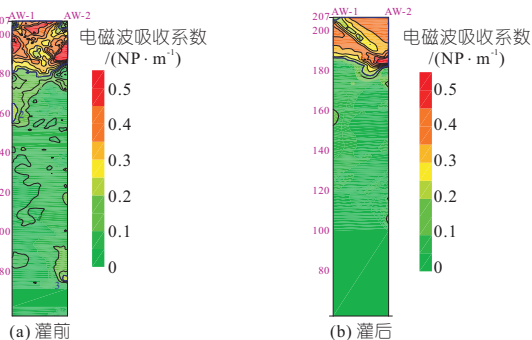


图 5 A 区帷幕灌浆前后电磁波 CT 检测结果对比

Fig. 5 Comparison of electromagnetic wave CT detection results before and after curtain grouting in area A

一步证明灌浆效果优良。

3.6 灌浆效果总体评定

(1)试验 A 区浅部孔深 0~20 m 范围内岩体风化强烈,透水性强;孔深 20~150 m 范围岩体总体透水性较小,局部不规则分布少量透水性大的孔段,主要位于断层及影响带中上部及下马岭组(Z_{3x})与铁岭组(Z_{2t})界线附近。

(2)试验 A 区浅部孔深 0~20 m 范围内岩体灌浆注灰量大,灌前透水率和平均注灰量分排、分序递减规律总体较好;试验 A 区深部孔深 20~150 m 范围内透水率和注灰量总体不大,灌前透水率和平均注灰量分排、分序递减规律良好。压水和灌浆过程中,溶蚀夹泥及破碎角砾岩部位由于承压能力低易发生劈裂,灌浆难度大。

(3)双排和三排灌后压水检查表明,各部位岩体灌后透水率均能满足防渗标准,孔距 2.5 m 和双排孔距 2.0 m 灌后压水检查均效果良好,差别不明显。

(4)双排灌后,溶蚀夹泥及破碎角砾岩部位抗疲劳特性总体较好,破坏压水压力约 1.8~2.0 MPa;三排灌后,破坏压水压力进一步提高至 2.6 MPa 以上。

4 结论

a. F_{173} 断层部位景儿峪组(Z_{3j})、下马岭组(Z_{3x})地层风化强烈,完整性及承压能力差,透水性强;下马岭与铁岭组界线断层带以泥质胶结为主,含泥量 50%~70%,灌浆压力作用下沿泥质胶结面易发劈裂,发生串浆、漏浆现象。

b. F_{173} 断层由多个次级断层带形成,总体呈集束状发育,断层带以钙质胶结的角砾岩为主,胶结紧密。断层影响带溶蚀主要发育在界线附近,弱风化带以上溶蚀较为强烈,弱风化带以下断层带溶蚀轻微。

c. F_{173} 断层弱风化带岩体透水性较大,局部夹泥,采取高压喷射冲洗等措施后,能满足升压灌注的要求。弱风化带以下岩体完整性较好,透水性总体较小,岩体承压能力较好,一般能正常灌注。

d. F_{173} 断层角砾岩局部胶结较差、破碎部位透水性一般不大,但承压能力较低,灌浆时在 1.2~1.6 MPa 易发生劈裂,浅层风化部位 1 MPa 以下即透水性很大,劈裂后灌浆注灰量大,但灌后承压能力明显提高,基本不影响下部孔段升压灌注。

e. F_{173} 断层采取针对性灌浆处理后,能满足库盆防渗标准,承压能力明显增强。

参考文献:

[1] 敖国碧,伍锡举,李峰. 复杂岩溶地层中钻孔灌浆法防渗治理效果研究[J]. 岩土工程界,2008,11(9):77-78.

[2] 曹志宇,吕仕龙,廖洋波. 水布垭水电站高面板坝趾板灌浆试验研究[J]. 水力发电,2002(10):35-37.

[3] 马新江. 某水利枢纽基岩帷幕灌浆试验分析[J]. 陕西水利,2015(增刊1):49-50.

[4] 孙宪国. 白莲河电站上库帷幕灌浆试验工艺及效果

分析[J]. 人民长江,2009,40(6):37-38,47.

[5] 袁歧. 灌浆试验在灌浆工程中指导作用分析[J]. 黑龙江水利科技,2013,41(2):251-252.

[6] 张晓悦,张晓乐,王建新. 二滩高拱坝坝基灌浆帷幕防渗效果研究[J]. 水电能源科学,2012,30(3):121-123,99.

[7] 施华堂,顾功开,乔兴斌,等. 乌东德水电站左岸防渗帷幕布置方案优化研究[J]. 人民长江,2019,50(3):161-165.

[8] 国家能源局. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范:DL/T 1548-2021[S]. 北京:中国电力出版社,2021.

Test Study on Curtain Grouting Method of Xiongan Storage Reservoir in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

LI Zi-kang¹, XIAO Bi¹, LIU Yang²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China;

2. South-to-North Water Diversion Middle Route Industrial Development Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The Xiongan storage reservoir is a pumped storage reservoir, an important water source project supporting the construction and development of the Xiongan new area, and a key supporting project to ensure the safety of water supply in the new area, with high requirements for project seepage prevention. The F₁₇₃ fault, which is the largest fault in the reservoir basin, runs through the NE-SW direction, and forms low passes on the NE side and the SW side of the reservoir basin, and there is local dissolution along the fault. The lithology and structural sealing conditions of the reservoir are poor. In order to control the seepage of the reservoir, curtain grouting was used to prevent seepage around the reservoir. In order to explore a suitable implementation method for curtain grouting of Xiongan storage reservoir, it is necessary to determine the anti-seepage treatment measures, grouting construction method and construction technology of the F₁₇₃ fault through grouting test research. The results indicate that the permeability meets the anti-seepage standards and the fatigue resistance is improved.

Key words: Xiongan storage reservoir; grouting test; curtain grouting; anti-seepage treatment

(上接第 93 页)

[6] 孔德志,朱俊高. 邓肯-张模型几种改进方法的比较[J]. 岩土力学,2004(6):971-974.

[7] 黄焜,蔡德所,涂小龙. 猴子岩超高面板堆石坝应力和位移非线性有限元分析[J]. 水电能源科学,2018,36(5):57-60.

[8] 张媛媛. ANSYS 在土坝渗流场和应力场及其耦合分析中的应用研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[9] 袁野,费文平. 基于 ANSYS 软件 UPFs 的邓肯-张模型二次开发[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(7):601-608.

[10] 孙明权,陈姣姣,刘运红. 邓肯-张 E-B 模型的 ANSYS 二次开发及应用[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(2):30-34.

[11] 中华人民共和国水利部. 混凝土面板堆石坝设计规范:SL228-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

Development of ANSYS-based Optimized Duncan-Zhang Model Calculation Program Module and Panel Rockfill Dam Stress-Deformation Analysis

CHENG Yang, ZHANG Hui-ying, WANG Xin-hua, ZHANG Zhi-hao, WANG Shuo

(College of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The Duncan-Zhang model is not able to reflect the influence of the mid-major stress on the strength and deformation of the rockfill body in the finite element calculations of the panel rockfill dam. The Duncan-Zhang E-B model and its optimization model for the panel rockfill dam has been developed by the secondary development of ANSYS based APDL language. The Duncan-Zhang E-B model and its optimization model were used to calculate the three-dimensional finite element static force of a panel rockfill dam in Yunnan Province. The results show that the settlement of the dam body was reduced, the horizontal displacement was reduced, and the stress change was small. The strain results obtained from the optimization model are closer to the actual data. The optimization Duncan-Zhang E-B model considering the medium principal stress can better reflect the stress-deformation characteristics of the panel rockfill dam.

Key words: ANSYS; Duncan-Zhang model; secondary development; panel rockfill dam; stress-strain