

蓄水条件下脉动注浆对黏土心墙坝应力与变形的影响

常留红^{1,2},周佳瑶^{1,2},廖奕^{1,2},胡鹏程³,张国安^{1,2},曾浩荣^{1,2},
Sadik Mohammad Nafis^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与海洋工程学院; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室;
3. 中国电力建设集团有限公司中国水利水电第八工程局有限公司科研设计院)

摘要:依托车田江水库黏土心墙坝除险加固工程,采用流固耦合基本理论,建立了黏土心墙坝脉动注浆数值模型,模拟分析了蓄水条件下脉动注浆压力、注浆时间和注浆频率等脉动注浆参数对黏土心墙坝应力应变的影响,并与现场注浆试验结果进行了对比。结果表明:坝体应力和位移随脉动注浆压力、注浆时间、注浆持续段时间的增加而增大,随注浆间歇段时间的延长而减小;当脉动注浆压力为 0.5~1.5 MPa 时,坝体大部分区域处于受压状态且受力较为均匀;受上游水压力的影响,上游坝体水平位移小于下游坝体水平位移;当脉动注浆压力为 0.5~1.5 MPa,注浆时间为 1 200~1 800 s 时,注浆持续段时间在 7~9 s 内,注浆间歇段时间在 3~5 s 内,有利于提高蓄水条件下脉动注浆对坝体的变形控制,从而有效提高脉动注浆过程中坝体的稳定性。

关键词:黏土心墙坝;脉动注浆;蓄水条件;应力;变形;车田江水库

Influence of pulsating grouting on stress and deformation of clay core wall dam under impounding conditions// Chang Liuhong^{1,2}, Zhou Jiayao^{1,2}, Liao Yi^{1,2}, Hu Pengcheng³, Zhang Guoan^{1,2}, Zeng Haorong^{1,2}, Sadik Mohammad Nafis^{1,2} (1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province; 3. Research and Design Institute of Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Power Construction Corporation of China)

Abstract: Based on the risk removal and reinforcement project of the clay core wall dam of the Chetianjiang Reservoir, a numerical model of pulsating grouting for clay core wall dam was established using the basic theory of fluid-solid coupling. The influence of pulsating grouting parameters such as pulsating grouting pressure, grouting time and grouting frequency on the stress and strain of clay core wall dam under the impounding condition was simulated and analyzed, and compared with the results of field grouting test. The results show that the stress and displacement of the dam increase with the increase of pulsating grouting pressure, grouting time and grouting duration, and decrease with the extension of grouting interval. When the pulsating grouting pressure ranges from 0.5 to 1.5 MPa, most of the dam body is under pressure and the force is relatively uniform. Affected by the upstream water pressure, the horizontal displacement of the upstream dam is smaller than that of the downstream dam. When the pulsating grouting pressure ranges from 0.5 to 1.5 MPa, the grouting time ranges from 1 200 to 1 800 s, the grouting duration ranges from 7 to 9 s, and the grouting interval ranges from 3 to 5 s, it is beneficial to improve the deformation control of the dam body by the pulsating grouting under the impounding condition, so as to effectively improve the stability of the dam body during the pulsating grouting process.

Key words: clay core wall dam; pulsating grouting; impounding condition; stress; deformation; the Chetianjiang Reservoir

我国在役大中型水库中,黏土心墙坝是较为常见的坝型。由于大多建于 20 世纪 60—70 年代,受限于当时的经济技术条件,此类坝体普遍存在填筑密实度差、防渗性能差等问题,易引发心墙变形、开裂等^[1-2]。注浆是提高除险加固工程中坝体的抗渗加固能力和耐久性、抑制坝体产生变形的的主要工程措施^[3]。目前,黏土心墙坝除险加固施工大多在水库放空条件下进行,严重影响库区生产、生活和生态用水,制约区域社会经济可持续发展。因此,如何在蓄水条件下进行黏土心墙坝除险加固施工,是工程界关注的焦点问题。

脉动注浆防渗处理技术已成功应用于云南八尺水库坝基防渗加固工程^[4]、托口水电站防渗帷幕工程^[5],表现出较好的密实防渗效果。目前国内外对

除险加固工程中的脉动注浆工艺相关研究成果主要集中于采用不同注浆工艺,结合原型试验注浆方式,分析浆液的扩散规律和注浆工艺对土体应力场及位移场的影响。例如:张聪等^[6]基于宾汉体流变方程、渗流方程和颗粒沉积理论,推导了脉动压力下宾汉流体的渗透扩散理论计算公式,分析了脉动注浆参数对浆液扩散距离的影响,并通过室内注浆模拟试验对其进行了验证;郑刚等^[7-8]基于注浆原位试验,研究了双排注浆过程中注浆孔距离、注浆速率等注浆参数对土体水平位移的影响;程雪松等^[9]基于应变法并结合现场试验模拟了土体性质和注浆参数对土体水平位移的影响;张聪等^[10]通过原型试验探究了脉动压力下黏土固化浆液的扩散规律,建立 COMSOL 模型模拟了堤坝脉动注浆过程中脉动控制注浆浆液扩散机制;晏莉等^[11]采用 FLAC3D 软件,对太原某地铁站试验段富水粉砂地层深基坑加固工程进行了数值模拟,分析了单液注浆联合双液注浆的止水效果及其对基坑变形的影响;卢晓鹏^[12]以白鹤水库除险加固工程为例,研究了高压喷射注浆技术的关键参数及防渗效果;张贵金等^[4]针对常规注浆在八尺水库趾板下基岩防渗注浆施工的局限性,通过现场试验优化注浆施工,解决了八尺水库坝基渗漏问题;窦金熙等^[13]采用 COMSOL 模型,对全风化花岗岩砂质土介质的脉动注浆防渗控制参数及其机理进行了研究,并通过邦干水库注浆工程试验,验证得出脉动注浆控制参数。可见,现有研究主要针对新建大坝或放空条件下的大坝脉动注浆技术开展,蓄水条件下的大坝除险加固脉动注浆技术尚有待进一步研究。

1 研究区概况

车田江水库建成于 1978 年,是一座以灌溉为主,兼顾发电、防洪、养殖的大(2)型水利工程,主要建筑物为 2 级。大坝为弧形堆石黏土心墙坝,坝体各区域分别为心墙区、坝壳堆石区、过渡区、心墙段基础以及坝壳段基础(图 1)。

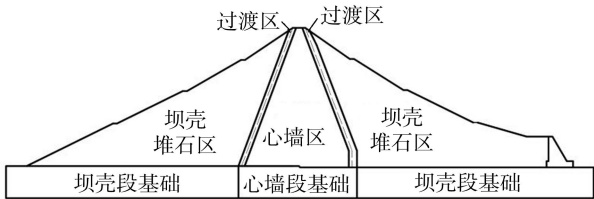


图 1 黏土心墙坝剖面分区

心墙区以黄褐色黏土为主,夹含粉砾和细砾,土体多呈可塑状,具中等压缩性,土体孔隙较大,心墙干密度平均值小于 1.46 g/cm³。心墙土体现场渗透

系数为 2.0×10⁻⁵~9.7×10⁻⁴ cm/s,平均值为 3.1×10⁻⁴ cm/s,不满足 SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》中碾压后小于 1.0×10⁻⁵ cm/s 的要求,心墙区与坝基接触带存在接触渗流隐患。经现场大坝安全监测和钻孔注水试验,心墙区土体渗透系数不满足现行规范要求,存在渗透稳定问题,影响大坝安全稳定,水位高处心墙较薄,且库水位不能放空,而采用高喷注浆、劈裂注浆等常规注浆方式可能会造成心墙劈裂破坏等问题。因此,经多方案技术经济比较,采用可控复合膏浆高压脉动注浆对坝体进行除险加固。

2 研究方法

2.1 注浆过程流固耦合基本理论

黏土心墙不具有堆石体或砂卵石的大孔隙特性,符合多孔介质材料特征,浆液扩散方式为渗流,驱动力为注浆压力在土体中产生的压力差。现作出如下假设:①浆液在坝体中的流动符合改进的达西定律,且不考虑在流动过程中土体对浆液的渗滤作用;②黏土心墙土体本构模型为邓肯-张模型。

黏土心墙坝脉动注浆过程是浆液与土体相互耦合的过程,采用渗流控制方程与应力场控制方程进行描述,具体方程见文献[14]。

在注浆过程中,浆液密度由于注浆压力作用发生动态变化,考虑浆液黏度随时间的变化,浆液流动使多孔介质内有效应力发生变化,土体骨架产生形变,土体渗透率、孔隙率等为动态变量。浆液密度、浆液黏度、土体孔隙率、土体渗透率、渗透系数的具体方程见文献[14]。

2.2 黏土心墙坝脉动注浆数值模型

2.2.1 计算模型及网格划分

针对车田江水库黏土心墙坝脉动注浆除险加固工程,建立黏土心墙坝几何模型,选取注浆试验断面,使用自由三角形网格模块对几何模型进行网格划分,对心墙区网格进行细化处理。最大单元尺寸为 1.00 m,最小单元尺寸为 0.01 m,最大单元增长率为 1.12,曲率因子为 0.25。

2.2.2 计算参数设定

坝体邓肯-张模型参数指标和坝体各分区土体物理力学性能指标见表 1。

脉动注浆压力、注浆时间及注浆频率是影响脉动注浆效果的关键参数。采用式(1)分段函数绘制出脉动注浆函数,进行周期性外推。采用设计脉动注浆压力范围为 0.5~3.0 MPa,注浆总时长在 300~1800 s 内,脉动注浆持续段时间为 3~12 s,脉动注浆间歇段时间为 3~9 s。

表1 坝体邓肯-张模型及坝体区域土体物理力学性能参数

区域	R_f	K	n	G	F	D	K_{ur}	$\varphi/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	c/MPa	n_0	$k/(\text{m/s})$	E/MPa	ν	$\rho/(\text{g/cm}^3)$	α
心墙区	0.75	550	0.41	0.38	0.01	7.5	900	35	0	5	0.473	3.5×10^{-6}	6.3	0.31	1.50	1
坝壳堆石区	0.65	1000	0.52	0.32	0.06	5.0	1800	53	10	0		5.0×10^{-4}			2.30	1
过渡区	0.65	800	0.52	0.33	0.09	5.0	1500	50	6	0		1.0×10^{-4}			2.15	1
心墙段基础	0.50	4500	0.76	0	0	0	9800	0	0	0	0.473	3.5×10^{-6}	6.0	0.35	2.35	1
坝壳段基础	0	8000	0	0.28	0	0	2000	43	0	25	0.473	3.5×10^{-6}	8.0	0.20	2.70	1

注: R_f 为破坏比; K 为模量系数; n 为模量指数; G 、 F 、 D 均为体变参数; K_{ur} 为卸载再加载模量系数; φ 为内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为内摩擦角增量; c 为黏聚力; n_0 为初始孔隙率; k 为渗透系数; E 为弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为密度; α 为比奥系数。

$$P(t)=\begin{cases} P'/t_1 & 0\leq t\leq t_1 \\ 0 & t_1<t\leq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P' 为设计注浆压力; t_1 为脉动注浆持续段时间; t_2 为脉动注浆间隔段时间。

按照现场施工设计,可控复合膏浆浆液配合比为黏土 100 kg、水泥 100 kg、外加剂 15 kg、早凝剂 5 kg、水 160 L、改性剂 5 kg。

2.2.3 边界条件设置

a. 压力边界条件。黏土心墙坝渗流计算结果显示,浸润线在心墙区骤降。在大坝上游侧水下部分添加压力水头,在注浆孔处设置脉动注浆压力。

b. 位移边界条件。在大坝基础底部施加固定约束,基础两侧施加辊支撑;坝体剖面设置重力,确保数值模型模拟接近真实情况。将浆液渗流运动产生的动水力作为荷载输入应力场,实现模型中应力场控制方程的嵌入。

2.2.4 模型验证

注浆主要影响注浆孔附近心墙区域,采用自由三角形网格进行网格细化,将最大单元尺寸从 1 m 调整至 0.5 m,进一步增加注浆孔附近心墙区域网格数量,建立网格加密验证模型。以正常蓄水位条件下脉动注浆压力为 1.5 MPa、注浆总时长为 1800 s、脉动注浆频率为 4 次/min 的脉动注浆黏土心墙坝模型为研究对象,对比分析原型模型和网格加密模型的浆液分布和浆液扩散半径变化过程,进行网格无关性验证,结果见图 2。其中,相对固相质量分数是指不同位置处浆液中固相质量分数与注浆距离 0 m 处浆液中固相质量分数的比值。

由图 2 可知,相同计算参数下原型模型和网格加密模型的浆液分布和浆液扩散半径计算误差约 3%,在误差控制范围内,可以保证计算结果的准确性。

3 结果与分析

3.1 脉动注浆参数对坝体应力场的影响

3.1.1 脉动注浆压力对坝体应力场的影响

研究工况为:上游蓄水位为正常蓄水位 491.2 m,脉动注浆时间为 1800 s,脉动注浆频率为 4 次/min(脉动注浆持续段时间为 12 s,注浆间歇段

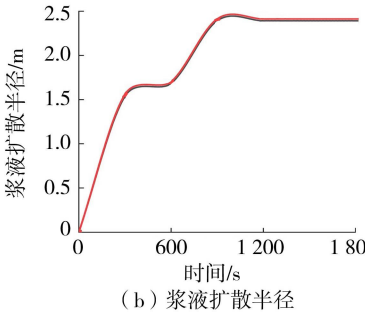
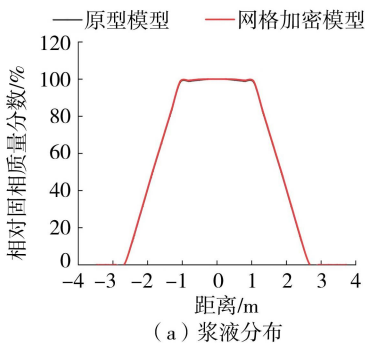


图2 原型模型和网格加密模型浆液分布和扩散半径

时间为 3 s),模拟蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析脉动注浆压力为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 MPa 时,坝体应力随脉动注浆压力变化的分布规律。结果见表 2。

表2 不同脉动注浆压力下坝体主应力分布情况

脉动注浆 压力/MPa	第一主应力/MPa		第三主应力/MPa	
	最大压应力	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力
0.5	0.883	-12.10	0.493	-2.30
1.0	0.961	-2.69	0.380	-6.24
1.5	1.420	-3.32	0.547	-6.93
2.0	1.860	-4.05	0.701	-8.09
2.5	2.280	-4.79	0.841	-9.99
3.0	2.610	-5.45	0.875	-12.10

由表 2 可见,上游蓄水位、脉动注浆时间及脉动注浆频率不变时,坝体第一、第三主应力值随脉动注浆压力的增大而增大。脉动注浆压力由 0.5 MPa 增大至 3.0 MPa,坝体第一、第三主应力值的最大压应力分别增加了 195.0%、77.3%,此时坝体在注浆孔底部区域出现第一主应力最大拉应力达到 -5.45 MPa、第三主应力最大拉应力达到 -12.10 MPa,影响注浆过程中坝体的安全稳定性。

不同脉动注浆压力(0.5、1.5 MPa)下坝体的主

应力分布如图 3 所示。蓄水条件下进行脉动注浆除险加固施工时,不同脉动注浆压力下坝体主应力集中于注浆孔口区域,主应力分布范围和强度随脉动注浆压力的增加而增加,脉动注浆压力值在 0.5~1.5 MPa 时,坝体大部分区域处于受压状态且受力均匀,有利于保证脉动注浆施工过程中坝体的安全稳定性。

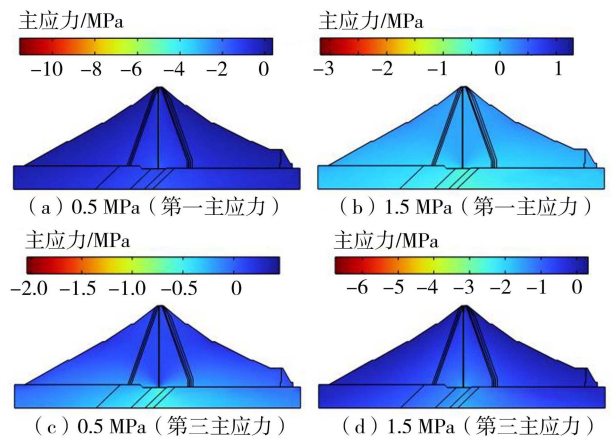


图 3 不同脉动注浆压力下坝体主应力分布云图

3.1.2 脉动注浆时间对坝体应力场的影响

研究工况为:上游蓄水位为正常蓄水位 491.2 m,脉动注浆压力为 1.5 MPa,脉动频率为 4 次/min(脉动注浆持续段时间为 12 s,注浆间歇段时间为 3 s),模拟蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析脉动注浆时间为 300、600、900、1 200、1 500、1 800 s 时,坝体主应力随脉动注浆时间变化的分布规律。结果见表 3。

表 3 不同脉动注浆时间下坝体主应力分布情况

脉动注浆 时间/s	第一主应力/MPa		第三主应力/MPa	
	最大压应力	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力
300	1.770	-3.50	1.100	-7.46
600	1.680	-3.40	0.932	-7.32
900	1.600	-3.37	0.767	-7.18
1200	1.540	-3.35	0.626	-7.08
1500	1.470	-3.32	0.578	-6.99
1800	1.410	-3.32	0.547	-0.69

由表 3 可见,上游蓄水位、脉动注浆压力及脉动注浆频率不变时,坝体主应力值随脉动注浆时间增加而减小,脉动注浆压力为 1.5 MPa 时,脉动注浆时间从 300 s 增加至 1 800 s 时,坝体第一、第三主应力值的最大压应力分别减小了 20.3%、50.3%;此时坝体大部分区域呈受压状态,注浆过程中不易产生裂缝,有利于黏土心墙坝防渗加固。

不同脉动注浆时间(1 200、1 800 s)下坝体的主应力分布见图 4。坝体主应力值随着脉动注浆时间的增加而减小,脉动注浆时间为 1 800 s 时第一主应力值最小为 1.42 MPa,第三主应力值最小为

0.55 MPa,注浆孔底部出现的应力也为最小值,脉动注浆时间对坝体的第三主应力分布影响不大。坝体大部分区域呈现受压状态,注浆过程中不易产生裂缝,有利于黏土心墙坝的防渗加固。

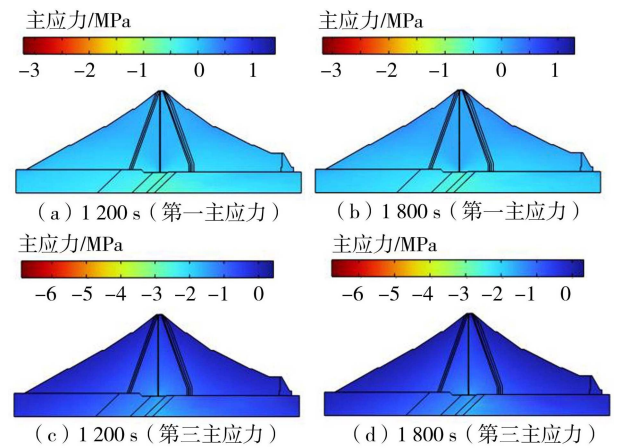


图 4 不同脉动注浆时间下坝体主应力分布云图

3.1.3 脉动注浆频率对坝体应力场的影响

研究工况为:上游蓄水位为正常蓄水位 491.2 m,脉动注浆压力为 1.5 MPa,脉动注浆时间为 1 800 s,模拟蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析脉动注浆间歇段时间 t_2 为 3 s,注浆持续段时间 t_1 为 3、5、7、9 s 时及脉动注浆持续段时间 t_1 为 12 s,注浆间歇段时间 t_2 为 3、5、7、9 s 时的应力分布变化。

表 4 为不同脉动注浆频率下坝体主应力分布情况。由表 4 可见,上游蓄水位、脉动注浆压力及脉动注浆时间不变时,坝体主应力随着注浆持续段时间的增加而增大,注浆持续段时间从 3 s 增加至 9 s 时第一、第三主应力值的最大压应力分别增大了 4.0%、49.7%,表明较短的注浆间歇段时间有利于提高坝体的承载能力。

表 4 不同脉动注浆频率下坝体主应力分布情况

注浆持续 段时间/s	注浆间歇 段时间/s	第一主应力/MPa		第三主应力/MPa	
		最大压应力	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力
3	3	0.721	-2.49	0.195	-5.22
5	3	0.725	-2.49	0.289	-6.08
7	3	0.725	-2.49	0.292	-6.09
9	3	0.750	-2.61	0.292	-6.09
12	3	1.420	-3.32	0.547	-6.93

图 5 为不同脉动注浆频率下坝体主应力分布云图。由图 5 可知,注浆间歇段时间不变情况下,第一、第三主应力分布变化类似。坝体第一主应力随脉动注浆持续段时间的增加而增加,注浆持续段时间在 7~9 s 时,第一主应力增长速率缓慢;持续段时间不变时,第三主应力随注浆间歇段时间的增加而减小;间歇段时间增加会降低主应力值,表明脉动注

浆持续段时间在 7~9 s 内,且注浆间歇段时间在 3~5 s 内有利于提高坝体应力水平,增强坝体承载能力,保持坝体应力的均匀分布。

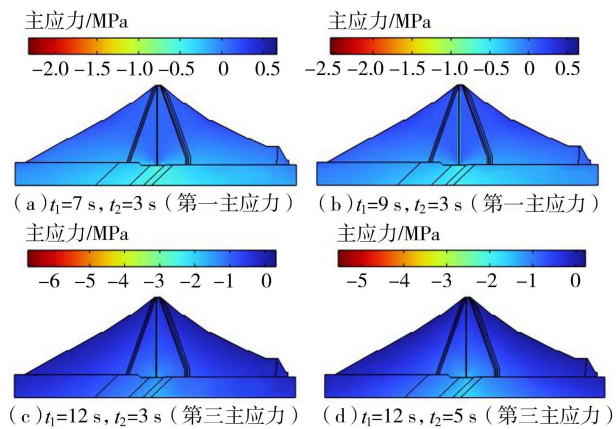


图 5 不同脉动注浆频率下坝体主应力分布云图

3.2 脉动注浆参数对坝体位移场的影响

基于蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆数值模型,模拟水库蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析不同脉动注浆压力、注浆时间及注浆频率对黏土心墙坝的位移场的影响。研究工况与 3.1 节对应。

3.2.1 脉动注浆压力对坝体位移场的影响

表 5 为不同脉动注浆压力下坝体位移分布情况。当上游蓄水位、脉动注浆时间及脉动注浆频率不变时,坝体水平移和垂直位移随脉动注浆压力增大而增大。上游侧坝体中,由于水位压力的作用抑制了注浆压力的影响,导致坝体上游侧最大水平位移均比下游侧小 0.1 m 左右。

表 5 不同脉动注浆压力下坝体位移分布

脉动注浆 压力/MPa	最大水平位移/m		最大垂直 位移/m
	上游	下游	
0.5	0.220	0.235	0.333
1.0	0.229	0.242	0.341
1.5	0.239	0.251	0.349
2.0	0.251	0.261	0.359
2.5	0.263	0.272	0.369
3.0	0.278	0.285	0.381

图 6 为不同脉动注浆压力下坝体位移分布云图。由图 6 可知,在上游蓄水位、脉动注浆时间、脉动注浆频率不变的情况下,坝体水平位移随脉动注浆压力的增大而增大。上游侧坝体受水压力作用可减小脉动注浆压力对坝体产生的水平位移,注浆孔上游侧坝体最大水平位移小于下游侧坝体最大水平位移。坝体垂直位移随脉动注浆压力的增大而增大,在实际施工中控制脉动注浆压力可有效避免注浆过程中产生坝体变形等问题。

3.2.2 脉动注浆时间对坝体位移场的影响

表 6 为不同脉动注浆时间下坝体位移分布情

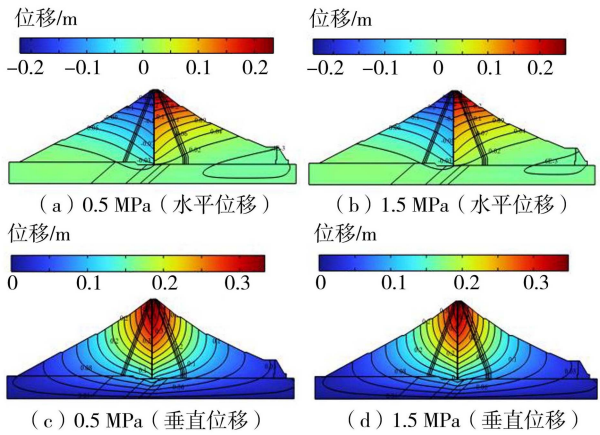


图 6 不同脉动注浆压力下坝体位移分布云图

况。当上游蓄水位、脉动注浆压力及脉动注浆频率不变时,随脉动注浆时间增加,坝体水平位移呈增加趋势。当脉动注浆压力为 1.5 MPa、脉动注浆时间从 300 s 增加至 1 800 s 时,坝体水平上游、下游最大位移分别增加了 6.1%、6.3%,垂直位移增加了 13.7%。

表 6 不同脉动注浆时间下坝体位移分布

脉动注浆 时间/s	最大水平位移/cm		最大垂直 位移/cm
	上游	下游	
300	0.224	0.236	0.335
600	0.225	0.238	0.345
900	0.228	0.240	0.354
1200	0.231	0.244	0.363
1500	0.235	0.247	0.372
1800	0.238	0.251	0.381

图 7 为不同脉动注浆时间下坝体位移分布云图。由图 7 可知,在上游蓄水位、脉动注浆压力、脉动注浆频率不变的情况下,坝体脉动注浆过程中坝体水平位移逐渐增大,与不同脉动注浆压力下坝体水平位移的分布规律相似;受坝体的竖向荷载作用,坝体水平位移随着注浆深度的增加而减小。而坝体垂直位移呈辐射状分布,垂直位移随着注浆深度的增加而逐渐减小,随着脉动注浆时间的推进,坝体垂

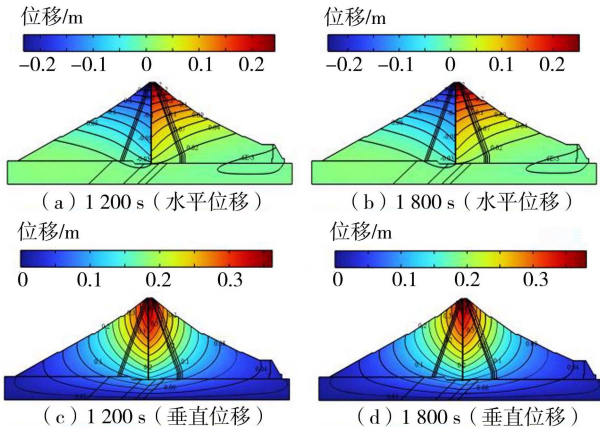


图 7 不同脉动注浆时间下坝体位移分布云图

直位移最大值缓慢增大,脉动注浆时间的增加对坝体隆起作用的影响较小。在同一水平线上,心墙区垂直位移值大于坝壳堆石区的垂直位移值,心墙区材料变形模量比坝壳堆石区材料变形模量低,出现了心墙区与坝壳堆石区变形不协调的情况。

3.2.3 脉动注浆频率对坝体位移场的影响

表 7 为不同脉动注浆频率下坝体位移分布情况。在上游蓄水位、脉动注浆压力、脉动注浆时间不变的情况下,坝体水平、垂直位移随脉动注浆持续段时间的增加而增加,随间歇段时间的增加而下降。较长脉动注浆持续段时间和较短间歇段时间的频率可有效避免坝体实际注浆过程产生坝体变形等问题。

表 7 不同脉动注浆频率下坝体位移分布

注浆持续段 时间/s	注浆间歇段 时间/s	最大水平位移/m		最大垂直 位移/m
		上游	下游	
3	3	23.33	23.86	35.71
5	3	22.58	23.98	35.83
7	3	25.03	26.05	35.86
9	3	24.98	26.01	35.93
12	3	28.85	29.32	46.17
12	5	24.86	25.91	35.73

图 8 为不同脉动注浆频率下坝体位移分布云图。由图 8 可知,在上游蓄水位、脉动注浆压力、脉动注浆时间不变的情况下,当脉动注浆间歇段时间保持不变时,随着脉动注浆持续段时间的增长,孔隙水压力逐渐增大,进而减缓了坝体水平位移和垂直位移的增加速度;当脉动注浆持续段时间保持不变时,坝体位移随着注浆间歇段时间的增加而减小。注浆间歇段时间的增加导致浆液在土体孔隙中凝絮停滞时间延长,浆液渗透扩散产生的孔隙压力减小使水平位移值减小;延长脉动注浆持续段时间可有效控制坝体垂直位移在较短时间内产生突变,有利于提高坝体在脉动注浆过程中的稳定性。黏土心墙坝脉动注浆施工过程中注浆持续段时间控制在 7~9 s,脉动间歇段时间控制在 3~5 s,有利于提高防渗

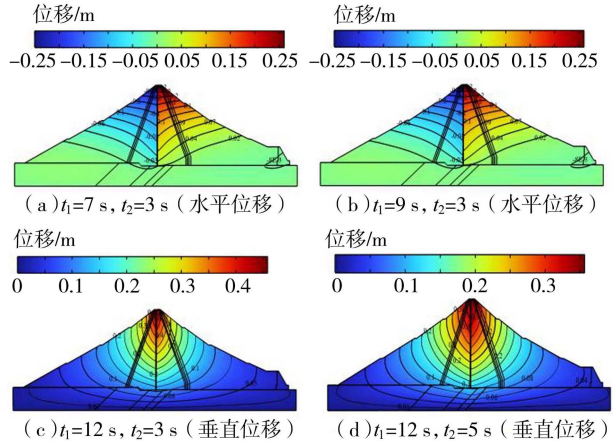


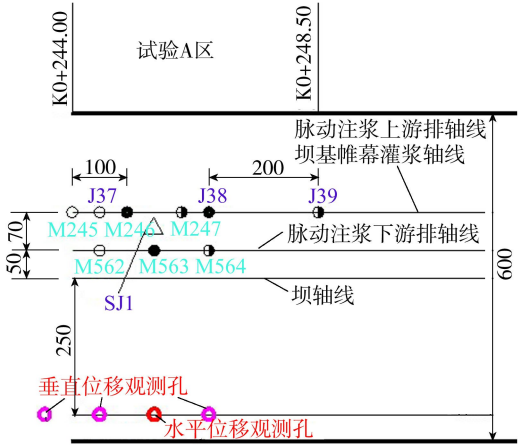
图 8 不同脉动注浆频率下坝体位移分布云图

加固效果。

3.3 现场注浆试验

3.3.1 可控复合膏浆高压脉动注浆施工

复合膏浆通常由水泥、黏土、外加剂(减阻剂、早强剂和速凝剂)及水以一定的比例配合组成,具有良好的流变性能。在坝体与坝基之间的岩土结合部位 1 m 范围内采用可控复合膏浆开展高压脉动注浆施工试验。选择右岸较高的坝段为试验区,验证高压脉动注浆工艺的可行性,将试验区与永久性施工相结合,布置在工程建设部位, A 区 K0+244.00~K0+248.50 为坝体厚度最大区域,且地质情况具有典型代表性,脉动注浆试验区位置如图 9 所示。



图例 ○ I 序孔 ● II 序孔 ● III 序孔 △ 检查孔
M550 脉动注浆孔编号 J37 帷幕注浆孔编号

图 9 试验 A 区钻孔及位移监测平面布置(单位:dm)

试验 A 区布置脉动注浆孔 6 个,检查孔 1 个,位移观测孔 4 个;注浆试验孔分两排布置,每排钻孔按三个次序进行施工,排距 0.7 m,孔距 1.5 m,对 I 序孔、II 序孔、III 序孔进行施工,试验区注浆完成 14 d 后对检查孔进行施工。试验区钻孔注浆参数见表 8。

施工工艺流程为:钻孔、注浆准备→钻进成孔→注浆管安装→注浆段灌入封闭浆体→封闭浆体待凝→高压脉动注浆→自下而上小间隔提升灌注→本注浆段注浆结束→下一段注浆至顶部以下 5 m→自下而上小间隔提升灌注稳定浆液→结束封口。

实施钻孔内浆体阻塞、自下而上、分小段纯压式注浆,灌注可控复合膏浆,每个灌段长 0.5 m,当该灌段满足注浆结束标准时,实施下一灌段注浆,脉动注浆压力与注入量控制标准见表 9 和表 10,孔深最大为 80 m,提升间隔为 0.5 m。

试验区施工完毕 14 d 后,按规范要求进行注水试验,结合检查孔取芯、注浆资料分析等进行综合评定。验收标准要求注浆完成后坝体渗透系数小于 1.0×10^{-5} cm/s。试验区共完成压水试验 2 段,注水

表 8 试验区钻孔注浆参数

孔号	孔序	里程桩号	钻孔顶高程/m	注浆顶高程/m	钻孔底高程/m	钻孔总深度/m	注浆总深度/m
M245	I	K0+244.00	496.08	495.82	424.78	71.30	71.04
M246	Ⅲ	K0+245.00	496.08	495.82	424.84	71.24	70.98
M247	Ⅱ	K0+246.00	496.08	495.82	424.91	71.17	70.91
M562	I	K0+244.50	496.09	495.82	424.89	71.20	70.93
M563	Ⅲ	K0+245.50	496.09	495.82	424.96	71.13	70.86
M564	Ⅱ	K0+246.50	496.09	495.82	425.04	71.05	70.78

表 9 脉动注浆压力与注入量控制标准

孔序	脉动注浆压力/MPa		注入量/L	
	最小	最大	最小	最大
I	1.5	2.0	350	400
Ⅱ	2.0	2.5	250	300
Ⅲ	2.5	3.0	150	200

表 10 试验区注浆孔脉动注浆压力

孔号	孔序	各孔不同注浆段压力值/MPa			
		最大	最小	平均	对应隆起部位
M245	I	1.10	0.30	0.90	1.00
M246	Ⅲ	1.10	0.20	0.81	0.60
M247	Ⅱ	1.10	0.40	0.89	0.90
M562	I	1.10	0.10	0.95	1.10
M563	Ⅲ	1.10	0.30	0.88	0.70
M564	Ⅱ	1.10	0.20	0.88	1.00

试验 12 段,检查孔各孔段平均渗透系数为 5.22×10^{-6} cm/s,满足心墙加固设计防渗要求。

3.3.2 大坝变形施工监测及位移观测

为保证在蓄水水位下对坝体进行注浆时的施工安全和注浆质量,监测注浆时和注浆前后坝体内心墙状态及注浆过程中产生的水平和垂直裂缝及变形。脉动注浆前在试验区上游布设水平位移监测仪器,在 10、20、40 m 孔深位置处布设垂直位移监测仪器。

垂直位移测点布置在测孔管底部,置于坝体孔深 10、20、40 m 处,垂直位移监测孔施工完成后,采用自动采集设备进行测斜监测,以第一次抬动数据为基准,在注浆时和注浆后分别进行测量,与第一次的测量数据对比,计算注浆时和注浆后心墙垂直方向的变形。垂直位移观测装置安装在右侧坝段,图 10 为坝体内部垂直位移累积变形过程,其中 HG01、HG02、HG03 分别代表坝体孔深 10、20、40 m 位置的垂直位移计监测数据。由图 10 可知,坝体垂直位移随坝体孔深的增大呈现先减小后增大的趋势。

水平位移监测孔采用 YGL-C200 工程锚固钻机钻孔,开孔孔径 146 mm,终孔孔径 146 mm,钻孔方向与被监测的抬动面垂直,采用铅直孔。不同深度处坝体水平位移见图 11。

数值模型测线与现场监测仪器位置一致,现场脉动注浆压力平均值为 0.9 MPa,对比数值模型计算结果与现场监测结果,验证黏土心墙坝测线处的

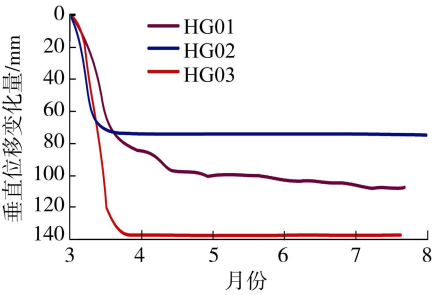


图 10 坝体内部垂直位移累积变形过程

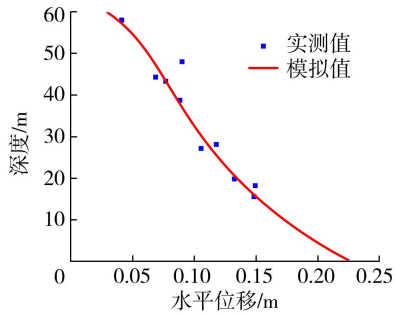


图 11 黏土心墙坝不同深度处水平位移对比

水平位移。由图 11 可知,坝体实测水平位移随注浆深度增加呈现锯齿状下降趋势,且水平位移主要受注浆量和坝体致密性影响。沿注浆深度方向水平位移计算值与实测值变化趋势基本一致,但注浆深度 45 m 以下时出现一处突变点。由于数值计算材料采用各向同性的多孔材料,而受施工技术限制,实际黏土心墙致密性并非始终一致,心墙致密性较差处水平位移较大,图 11 中出现突变点处部位与注浆工程中单元注浆量大、坝体心墙的致密性相关;数值模型计算水平位移与现场监测结果的计算误差约 5%,在误差控制范围内。可见,数值计算结果与现场监测结果较为吻合。

4 结 论

a. 坝体应力随脉动注浆压力的增加、脉动注浆时间的推进和持续段时间的增加而增加,随注浆间歇段时间的延长而减小。脉动注浆除险加固施工过程中,延长脉动注浆持续段时间,缩短注浆间歇段时间,有利于保证浆液达到合理扩散半径,提高坝体变形控制效果。

b. 坝体水平位移、垂直位移随脉动注浆压力、

注浆时间、注浆持续段时间的增大而增大,随注浆间歇段时间的减小而减小。蓄水条件下受上游水压力作用,上游坝体水平位移小于下游坝体水平位移;在同一水平线上,心墙区的垂直位移大于坝壳堆石区的垂直位移。延长脉动注浆持续段时间可有效减少坝体垂直位移值产生突变的可能,有利于提高坝体在脉动注浆过程中的稳定性。

c. 综合各参数对坝体应力场和位移场的影响,在脉动注浆压力为 0.5~1.5 MPa、脉动注浆时间为 1200~1800 s 时,注浆持续段时间控制在 7~9 s,注浆间歇段时间控制在 3~5 s,能提高蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆除险加固工程施工质量,保证施工过程中坝体的安全性。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2022[M]. 北京:中国水利水电出版社,2022:27.

[2] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):22-28. (Zhu Ruiheng,Cen Weijun,Xue Yang,et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(4):22-28. (in Chinese))

[3] 李吉林. 水布垭面堆石坝基础注浆试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):67-70. (Li Jilin. Foundation grouting tests on Shuibuya face rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(5):67-70. (in Chinese))

[4] 张贵金,司马尹亮,陈安重,等. 强风化坝基渗水堵漏脉动注浆技术[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(3):78-83. (Zhang Guijin, Sima Yinliang, Chen Anzhong,et al. Seepage plugging technology for strongly weathered dam foundation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (3): 78-83. (in Chinese))

[5] 张贵金,许毓才,陈安重,等. 一种适合松软地层高效控制注浆的新工法:自下而上、浆体封闭、高压脉动注浆[J]. 水利水电技术,2012,43(3):38-41. (Zhang Guijin, Xu Yucai, Chen Anchong, et al. A new technical method for efficient and control grouting for loose ground: high pulsating pressure grouting from bottom to up stemming with slurry [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2012,43(3):38-41. (in Chinese))

[6] 张聪,梁经纬,张箭,等. 基于脉动注浆的宾汉流体渗透扩散机制研究[J]. 岩土力学,2018,39(8):2740-2746. (Zhang Cong,Liang Jingwei,Zhang Jian,et al. Mechanism of Bingham fluid permeation and diffusion based on pulse injection[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(8):2740-2746. (in Chinese))

[7] 郑刚,王若展,程雪松,等. 注浆对邻近土体水平变形影响的原位试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(9):959-968. (Zheng Gang, Wang Ruozhan, Cheng Xuesong, et al. In situ test study of influence of grouting on horizontal deformation of adjacent soil [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2019,52(9):959-968. (in Chinese))

[8] Zheng Gang, Pan Jun, Cheng Xuesong, et al. Use of grouting to control horizontal tunnel deformation induced by adjacent excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2020,146(7):05020004.

[9] 程雪松,高洁,潘军,等. 注浆水平纠偏的作用规律与影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):136-147. (Cheng Xuesong, Gao Jie, Pan Jun, et al. Effect and influencing factors of the grouting on the horizontal deformation control [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44 (5): 136-147. (in Chinese))

[10] 张聪,梁经纬,阳军生,等. 堤坝脉动注浆浆液扩散机制及应用研究[J]. 岩土力学,2019,40(4):1507-1514. (Zhang Cong, Liang Jingwei, Yang Junsheng, et al. Research on the diffusion mechanism and application of pulsate grouting in embankment and dam[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(4):1507-1514. (in Chinese))

[11] 晏莉,杨海涛,崔云龙,等. 富水粉砂地层深基坑底部注浆加固数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):80-86. (Yan Li, Yang Haitao, Cui Yunlong, et al. Numerical simulation analysis of grouting reinforcement at bottom of a deep foundation pit in water-rich silt stratum [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):80-86. (in Chinese))

[12] 卢晓鹏. 高压喷射注浆技术在云南病险水库加固工程中的应用[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):82-85. (Lu Xiaopeng. Application of high-pressure sprinkling grouting technology to reinforcement of ill-conditioned reservoirs in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(5):82-85. (in Chinese))

[13] 窦金熙,张贵金,陈安重,等. 全风化花岗岩地层脉动注浆控制防渗机理研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):309-318. (Dou Jinxi, Zhang Guijin, Chen Anzhong, et al. Mechanism of seepage control of pulsating grouting in completely weathered granite stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (2): 309-318. (in Chinese))

[14] 崔澈,李永杰,戚蓝,等. 高自生热材料注浆过程多场耦合数值分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(11):941-949. (Cui Wei, Li Yongjie, Qi Lan, et al. Numerical analysis of multifield coupling in high self heating material grouting process [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2018,51(11):941-949. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-11 编辑:俞云利)