

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221487

砌石拱坝坝后加固结合面力学特性研究

徐立君¹, 邓宇轩²

(1. 湖南水利水电职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 441108)

摘要: 针对某砌石拱坝上游坝面中下部存在大面积拉应力超标现象, 基于该砌石坝加固工程中的两种坝后局部加固方案, 采用接触单元模拟新老坝体结合面的连接特性, 分析了规范中五种工况下结合面的受力特性及变形特性。研究表明, 加固后, 两种方案结合面的张开特性和受力特性在整体上相似, 其中助墩方案中边墩存在不对称张开及受力现象; 高水位工况下加固结构主要在上部承力, 下部应力较小并可能张开; 低水位工况下结合面应力水平较低, 加固结构基本不承受荷载; 加固后温降工况下, 砌石坝体以加固结构上部为支点进行转动变形, 在低水位条件下结合面会出现大面积张开; 温升工况下, 低水位时坝体向上游变位, 导致结合面间隙分布在水平方向上呈对称光滑的抛物线形分布。

关键词: 砌石拱坝; 培厚方案; 助墩方案; 结合面特性

中图分类号: TV641.3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0092-04

1 引言

由于砌石材料能就地取材、施工方便, 在1970年代至21世纪初, 大量中小型拱坝采用砌石材料进行建设^[1]。随着多年的运行, 受自然因素、设计施工缺陷等影响, 许多砌石拱坝出现渗漏、应力缺陷等病险, 因此需进行除险加固处理^[2]。在已有的加固实践中, 常采用拱梁分载法或有限元法(等效应力)评价加固效果, 且这些分析方法多认为加固部分与原坝体结合良好, 具有较高的整体性。但新老坝体的结合面往往是加固后结构的薄弱面, 尤其是局部加固或加固材料与原坝体材料存在巨大差异时, 结合面会产生接触应力和变形现象。目前已有许多中小型砌石拱坝的加固工程实例^[3,4], 但鲜有针对新老坝体结合面特性的研究。为此, 本文以某砌石拱坝加固工程为例, 采用三维有限元法探究了其加固后结合面的变形和受力特性, 以期为其他类似的加固工程提供建议。

2 研究方法

2.1 工程概况

某工程为砌石高拱坝, 坝高72 m, 厚高比0.2、河谷宽高比3.27, 在结构计算中发现拱坝坝

踵附近存在大范围的拉应力超标现象, 需增强坝体中下部的刚度^[5]。该工程基于坝体病险提出了培厚和助墩两种加固方案, 见图1。

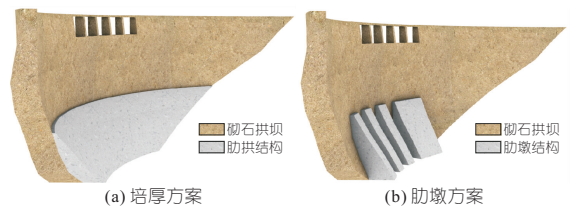


图1 加固方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the reinforcement scheme

2.2 有限元分析模型

基于ANSYS软件建立两种方案加固的三维有限元模型, 模型坐标系以指向左岸为 x 轴正向, 以指向上游为 y 轴正向, 以竖直向上为 z 轴正向。经过网格敏感性分析, 发现当坝体单元数量大于15 000个时最大位移和等效应力趋于稳定, 因此两种方案中坝体部分单元数量分别为27 152、19 368个, 可保证计算结果的网格无关性。

根据地质资料, 有限元模型中各区域材料取值参数见表1。

2.3 模拟方案

在已有新老混凝土数值模拟研究的基础上^[6-7], 采用接触单元模拟结合面的特性, 基于ANSYS有限元计算软件进行分析, 计算砌石坝规范^[1]中的五种工况下结合面的特性, 并总结得

收稿日期: 2022-06-19, 修回日期: 2022-08-05

作者简介: 徐立君(1979-), 女, 副教授, 研究方向为水工结构, E-mail: 359479116@qq.com

表 1 模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of FEM

材料	弹性模	密度	泊松比	线膨胀
	量/GPa	/(kg·m ⁻³)		
坝体浆砌毛块石	9.0	2 300	0.20	0.8×10 ⁻⁵
闸墩钢筋混凝土	25.5	2 400	0.20	1.0×10 ⁻⁵
基础混凝土垫层	22.0	2 300	0.20	1.0×10 ⁻⁵
左岸基岩(高程 120 m 以上)	6.0	2 700	0.22	
右岸基岩(高程 120 m 以上)	6.5	2 700	0.22	
加固结构(C20 混凝土)	25	2 400	0.167	1.0×10 ⁻⁵

到加固后坝体的变形模式。

计算中采用以下参数及假定:①模型假定加固部分结构与模型基础结合良好,不会发生相对移动;②接触单元基于库伦摩擦模型,即认为结合面的受力与摩擦系数、凝聚力有关,当结合面张开时认为法向压力为 0;③模型材料为均匀的线弹性材料;④加固后结合面初始为闭合状态;⑤参考相似工程^[8],结合面参数取为摩擦系数 1.2,凝聚力 1.5 MPa;⑥采用生死单元和分步计算并施加初始地应力的方式消除模型边坡和基础的初始沉降,同时考虑加固前坝体的应力应变状态。

3 结合面应力分析

计算分析规范^[1]规定的五种工况,各工况下结合面最大开度、法向压应力和剪应力计算结果见表 2。由表 2 可知,两种加固方案的最大开度、法向压应力和剪应力变化规律基本一致。其中培厚方案中,接触面开度依次为死水位温升工况>正常温降工况>校核温升工况>设计温升工况>死水位温降工况。肋墩方案中,接触面开度依次为死水位温升工况>正常温降工况>校核温升工况>设计温升工况>死水位温降工况。在死水位温升工况下,受低水位和温升荷载影响,坝体向上游侧变位,不利于新老坝体的结合,因此结合面开度远大于其他工况。结合面的法向压应力和剪应力的分布也反映了这一现象,死水位温升工况下培厚方案和肋墩方案最大法向压应力均为 0.04 MPa、最大剪应力均为 0.01 MPa,即新增加固体

表 2 接触特性汇总表

Tab. 2 Summary of contact characteristics

计算 工况	培厚方案			肋墩方案		
	最大开 度/mm	法向压应 力/MPa	剪应力 /MPa	最大开 度/mm	法向压应 力/MPa	剪应力 /MPa
正常温降	0.29	1.08	0.86	1.06	1.72	1.12
设计温升	0.10	1.11	0.58	0.38	1.34	0.72
死水位温降	0.02	0.10	0.08	0.01	0.21	0.07
死水位温升	4.59	0.04	0.01	3.95	0.04	0.01
校核温升	0.11	1.18	0.63	0.63	1.49	0.79

基本无承力。在高水位工况下水位相差较小(正常蓄水位 160 m、设计洪水位 160.05 m、校核洪水位 161.12 m),但正常温降工况下结合面的开度明显大于设计温升工况和校核温升工况,可认为在相近的水位条件下,拱坝在温降荷载作用下向下游变位,易导致结合面中下部脱开。由于肋墩方案接触面更小,因此肋墩方案的最大法向压应力和最大剪应力明显高于培厚方案,其中最大法向压应力、最大剪应力分别为 1.72 MPa(正常温降工况)、1.12 MPa(正常温降工况)。

分析培厚方案各工况下结合面应力可知,正常温降、设计温升和校核温升工况下库水位较高,在荷载作用下坝体变形自顶向下递减,且三种工况下结合面的压应力分布规律相似,均表现为在结合面顶部最大并向坝底递减,最大应力出现在结合面顶部的拱端附近并存在一定的应力集中现象,表明加固后新老坝体的变形模式为老坝体在新坝体中上部的支撑下变形,即结合面中上部承受大部分荷载,下部基本不承受荷载甚至出现间隙。死水位温降和死水位温升工况下库水位较低,因此水位以上部分坝体受外界气温影响加大,容易产生较大的温度应力,而水位以下坝体温差较小。加固体高程为 90~120 m,位于死水位以下,因此死水位工况下结合面的应力受温度荷载影响较小,应力水平较低。与高水位工况相比,死水位工况下结合面应力水平较低,分布比较均匀。温降工况下结合面顶部存在最大压应力为 0.096 MPa,结合面内部分布的最大压应力为 0.064 MPa。温升工况下最大压应力位于结合面高程 90~100 m 内,为 0.037 MPa。

分析肋墩加固方案各工况下结合面应力可知,正常温降、设计温升和校核温升工况下应力分布规律与培厚方案相似,以结合面顶部的压应力最大,向坝底递减。由于肋墩方案结合面的接触面积远小于肋拱方案,因此结合面的压应力水平较培厚方案明显增大,其三种工况下最大压应力分别为 1.72、1.34、1.49 MPa。死水位温降和死水位温升工况下结合面应力水平较低。在温降工况下结合面受力较为均匀,坝面大范围分布的最大应力约 0.11 MPa。温升工况下最大应力位于#1 墩和#4 墩两侧高程 90~100 m 内,为 0.037 MPa。

综上所述,根据各方案、各工况结合面下的受力特性,将规范中的五种计算工况分为高水位工况和低水位工况两种,其中高水位工况指正常温降工况、设计温升工况和校核温升工况,低水位工

况指死水位温降工况和死水位温升工况。高水位工况上游水荷载是影响结合面应力水平的主要因素,结合面应力呈自顶向下递减的规律,主要由加固体上部承力,加固体下部应力较小并可能出现张开现象;低水位工况下上游面静水荷载较小,且水位以下部分受温度荷载影响较小,因此结合面应力水平较低。两种加固方案因加固体的体型、轮廓不同在应力集中的大小及分布位置存在差异,整体应力分布规律基本一致。

4 结合面间隙分析

为分析结合面的张开特性,分别沿结合面高程 100、110、120 m 定义三条水平路径和拱冠竖向路径,并提取各路径的间隙分布数据,结果见图 2。由图 2 可知:①高程 100 m 结合面间隙。培厚方案的间隙分布规律表现为左拱端大、右拱端小,最大张开 0.084 mm;肋墩方案表现为拱端大、拱冠小的分布规律,最大张开为 0.910 mm。两种方案下间隙大小均表现为正常温降工况 > 校核温升工况 > 设计温升工况 > 死水位温降工况和死水位温升工况,可见在该高程下温降荷载是导致结合面间隙张开的主要因素。②高程 110 m 结合面间隙。培厚方案最大接触间隙为 1.548 mm,位于死水位温升工况下,该工况下结合面张开情况呈拱冠大、拱端小的对称分布规律。其余工况结合面张开规律表现为左拱端大、右拱端小,间隙

张开不对称;肋墩方案最大接触间隙为 1.272 mm,位于死水位温升工况,该方案下结合面的张开规律与培厚方案基本一致,以死水位温升工况下结合面间隙值远大于其余工况。③高程 120 m 结合面间隙。培厚方案最大接触间隙为 4.592 mm、肋墩方案最大接触间隙为 3.947 mm,在死水位温升工况呈拱冠大、拱端小的分布规律,其余工况下不存在间隙。

图 3 为拱冠处间隙分布。由图 3 可知,两种方案下间隙分布规律相似。死水位温升工况下结合面自某一高程处开始张开,并随高程增大间隙不断增大,至结合面顶部间隙达到最大,分别为 4.592 mm(培厚方案)、3.947 mm(肋墩方案)。死水位温降工况下拱冠结合面不存在间隙,其余工况的间隙表现为在结合面底部(高程 90~100 m)和中上部(高程 105~115 m)存在一大一小两间隙,最大间隙分别为 0.285、0.454 mm。

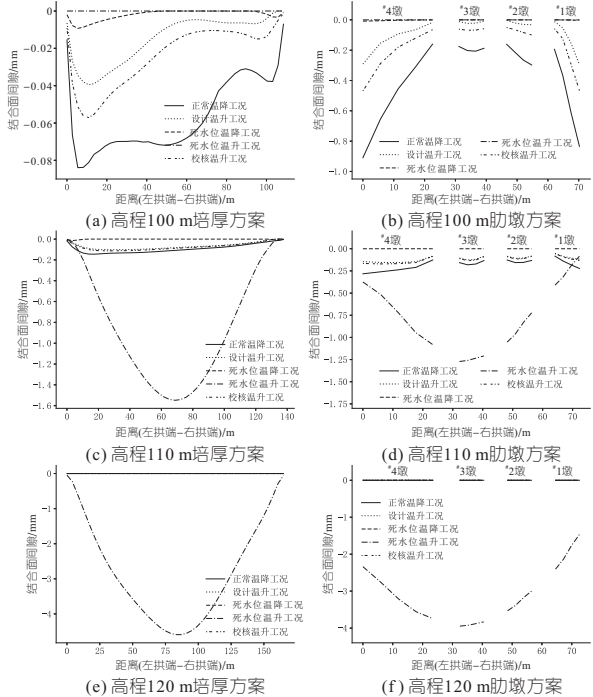


图 2 高程 100、110、120 m 结合面间隙

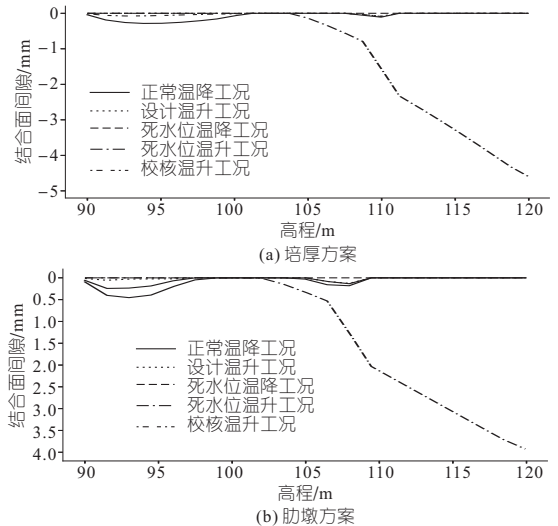


图 3 拱冠结合面间隙

Fig. 3 Joint surface gap at the arch crown

综上所述,两种方案加固后死水位温升工况下结合面间隙分布规律为拱冠大、拱端小,间隙最大为 4.592 mm(培厚方案)、3.947 mm(肋墩方案),位于结合面顶部,是加固中的危险工况;其余工况下间隙分布规律为拱冠小、拱端大,最大间隙均小于 1 mm,位于结合面中下部。

5 变形模式分析

根据培厚方案、肋墩方案加固后不同水位和温度荷载下各高程和拱冠处间隙的分布情况,可总结出加固后坝体的变形模式和变形特点。两种方案加固后结合面间隙在整体分布规律基本一致,在数值上培厚方案温降工况下最大间隙略小,

温升工况下略大。坝体整体变形规律为: ①温降工况下。低水位时, 坝体主要受温降荷载影响而向下游变形, 由于加固结构刚度较大、砌石坝体刚度较小, 砌石坝体以加固结构上部(高程 115~120 m)为支点进行转动变形。因计算时假定加固结构与基础接触良好, 在拱端和地基的约束下, 结合面中部出现大面积间隙, 在水平方向和竖直方向均表现为类抛物线形。高水位时, 随着水荷载的增大, 拱冠高程 100~110 m 附近间隙压闭合, 拱冠竖向间隙呈一大一小的两个抛物线形。由于坝体左侧坝面较宽阔, 在水平方向上间隙以左拱端侧大、右拱端侧小。②温升工况下。低水位时, 坝体在温升荷载的作用下向上游变形, 由于结合面不抗拉, 在拱端和地基的约束作用下, 结合面自底向上间隙不断增大、自拱端向拱冠增大。随着运行水位升高, 水荷载的作用逐渐抵消温升荷载的影响, 结合面起裂高程不断增大。

6 结论

a. 高水位工况下结合面应力受上游静水荷载主导, 主要由加固体上部承力, 加固体下部应力较小; 低水位工况下结合面应力水平较低, 加固结构基本不承受荷载。

b. 温降工况下, 砌石坝体以加固结构上部为

支点进行转动变形, 导致低水位状态下结合面出现大面积张开。

c. 温升工况下, 坝体向上游变位, 结合面间隙在竖直方向上随高程不断增大, 随着上游水位增大, 起裂高程不断增大、最大间隙不断减小。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 砌石坝设计规范(SL25-2006)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [2] 何奇滨, 谭茶生, 唐欣薇. 龙洞槽砌石拱坝加固方案三维有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(3): 100-103, 109.
- [3] 冯道雨, 傅少君, 彭成佳, 等. 长沙坝水库大坝加固方案有限元分析及安全评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004(5): 50-53.
- [4] 郑克红, 刘燕琴, 林湘如. 基于改进等效应力法的某拱坝下游加固培厚应力分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 125-127.
- [5] 邓宇轩, 李勇泉, 王均星, 等. 会人溪砌石拱坝局部加固研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 79-82, 86.
- [6] 李同春, 章杭惠. 改进的拱坝等效应力分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 104-107.
- [7] 朱伯芳. 论混凝土拱坝有限元等效应力[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 30-32.
- [8] 陈芳芳, 武永新. 新老混凝土结合面断裂——接触耦合分析[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(1): 108-111.

Study on Mechanical Properties of Joint Surface After Masonry Arch Dam Reinforcement

XU Li-jun¹, DENG Yu-xuan²

(1. Hunan Polytechnic of Water Resources and Electric Power, Changsha 410131, China;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., LTD., Wuhan 441108, China)

Abstract: A large area of tensile stress in the middle and lower part of the upstream of a stone-masonry arch dam exceeds the standard and needs to be strengthened. Based on two local reinforcement schemes of a masonry dam, the contact element was used to simulate the joint characteristics of the new and old dam bodies, and the stress and deformation characteristics of the joint surface under five standard working conditions were analyzed. The results show that after reinforcement, the opening and loading characteristics of the joints of the two schemes are similar, and the side pier of the rib pier scheme has asymmetrical opening and loading phenomenon. Under the condition of high water level, the reinforced structure mainly supports the load at the upper part, and the stress at the lower part is small and may open. Under the condition of low water level, the stress level of the joint surface is low and the reinforced structure does not bear the load. Under the condition of temperature drop after reinforcement, the masonry dam body rotates and deforms with the upper part of the reinforced structure as the fulcrum, and the joint surface will open in a large area under the condition of low water level. Under the condition of temperature rise, the dam body shifts upstream when the water level is low, resulting in a symmetrical and smooth parabolic clearance distribution on the horizontal direction.

Key words: masonry arch dam; culture thick solution; buttress scheme; interface characteristic