

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221780

庙堂沥青混凝土心墙堆石坝心墙基座嵌岩深度对基座应力的影响分析

罗 澳^a, 王俊杰^b, 黄诗渊^b, 李玉桥^a

(重庆交通大学 a. 河海学院; b. 材料科学与工程学院, 重庆 400074)

摘要: 沥青混凝土心墙堆石坝基座作为连接心墙与坝基的特殊结构,其受力状态对大坝的稳定至关重要。以在建的重庆庙堂沥青混凝土心墙堆石坝为例,选取其最大断面,建立二维模型进行有限元计算,分析探讨了基座在未嵌入基岩、半嵌入基岩、全嵌入基岩三种不同布置形式下的应力分布情况。结果表明,基座在基岩中的嵌入深度与基座内部的拉应力之间关联性较强。在蓄水期,不同布置形式之间拉应力相差最大可达334%,同时,由于廊道在蓄水期时受基座内部较大拉应力的影响,容易造成拉裂破坏,通过改变廊道在基座中的位置,降低廊道周围的拉应力,避免廊道产生破坏。廊道位置改变后,周围拉应力相比于原来下降幅度最大可达87%。

关键词: 沥青混凝土心墙堆石坝; 混凝土基座; 嵌岩深度; 应力状态

中图分类号: TV642

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0110-03

1 工程概况

庙堂大坝为沥青混凝土心墙堆石坝,位于重庆巫山,坝顶高程1121 m,最大坝高107 m,坝顶宽度9 m,心墙最大高度97.7 m,顶部宽度0.6 m,底部宽度1.2 m,距基座3 m范围心墙局部加厚逐渐至3.0 m,心墙上、下游设置有水平宽度3.0 m过渡层。心墙底部与混凝土基座连接,混凝土基座布置在弱风化岩层中、下部,基座内灌浆廊道净空3.0 m×3.5 m(宽×高)。心墙基座下面设置混凝土防渗墙,宽度为1.85 m,最大深度16.5 m。大坝正常蓄水位为1118 m,典型横剖面图见图1。基座作为连接心墙与坝基的特殊结构,对维持坝体的稳定性至关重要。周扬等^[1]通

过有限元计算对比分析了高基座体型变化对基座受力状态的影响;沈振中等^[2]分析了心墙基座与防渗墙的连接方式,但以上研究均未考虑到基座与基岩之间的关联性。鉴此,结合在建的重庆庙堂沥青混凝土心墙堆石坝最大断面建立二维模型进行有限元计算,分析探讨了基座在未嵌入基岩、半嵌入基岩、全嵌入基岩三种不同布置形式下的应力分布情况,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

2 计算模型

2.1 基座布置形式

基座布置分为基座未嵌入基岩、基座半嵌入基岩、基座全嵌入基岩三种布置形式,且三种形式下的基座高度相等,均为12 m。其中未嵌入基岩、半嵌入基岩、全嵌入基岩布置形式的嵌入深度分别为0、4、12 m。周扬等^[1]通过有限元二维模型分析研究了基座的上、下游坡比的变化会极大地改变基座的受力状态,因此基座未嵌入基岩布置形式的上、下游坡比与半嵌入基岩布置形式中未嵌入基岩部分的上、下游坡比相等,为1:0.5;

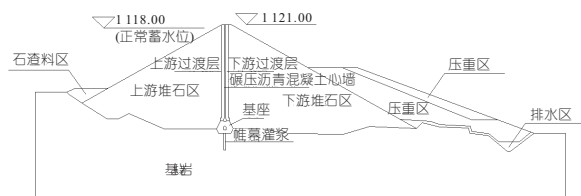


图1 坝体典型横剖面图(单位:m)

Fig. 1 Typical cross section of dam

收稿日期: 2022-07-29, 修回日期: 2022-09-19

基金项目: 重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K202000705); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目(LSDP202101); 国家自然科学基金项目(52109113); 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX1114)

作者简介: 罗澳(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程, E-mail: 943404603@qq.com

通讯作者: 王俊杰(1973-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为岩土工程, E-mail: wangjunjie@cqjtu.edu.cn

全嵌入基岩布置形式的上、下游坡比与半嵌入布置形式中嵌入基岩部分的上、下游坡比相等,为 1:0.5。与基座接触部分基岩为弱风化灰岩夹页岩条带。有限元模型见图 2。

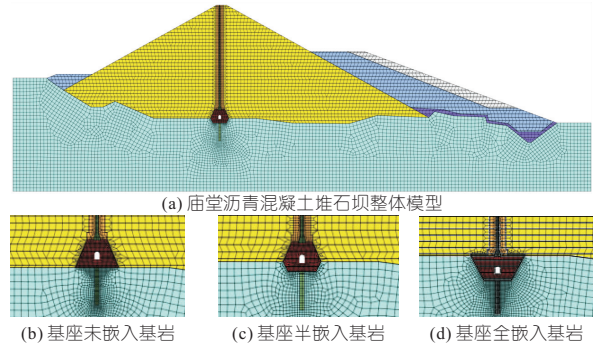


图 2 基座布置形式有限元模型

Fig. 2 Finite element model of foundation layout

2.2 有限元模型和边界条件

基座应力有限元分析计算采用 Midas GTS NX 有限元软件,此外,由于坝体填筑材料与基岩性质相差较大,单纯的绑定约束忽略了二者之间的不连续性,因此在基岩与坝体的接触面上施加界面单元,用于模拟二者接触面上由于水压力的推动产生的摩擦力,将坝体和基岩分离开来。基岩上游侧和下游侧分别施加水平约束,底部施加水平和竖向约束。

2.3 本构模型与计算参数

有限元应力变形计算中,土体本构模型及其参数对结果影响很大,因此必须选用合适的本构模型^[3,4]。本文有限元计算筑坝材料和沥青混凝土心墙采用邓肯-张 E-B 模型进行模拟,参数见表 1,根据相关模拟经验^[5-7],混凝土基座、地基岩体、灌浆帷幕均采用线弹性模型进行模拟,参数见表 2,坝体材料渗透系数见表 3,模型参数取自《重庆市巫山县庙堂水库坝体填筑材料试验研究》。

表 1 邓肯-张 E-B 模型参数

Tab. 1 Duncan Zhang E-B model parameters

材料	ρ	ρ'	c/kPa	φ /(°)	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}
石渣料区	2.11	2.33	27.93	56.5	509	0.342	0.810	240	0.100	1 018
堆石区	2.27	2.49	31.12	58.3	866	0.394	0.730	433	0.160	1 732
过渡料	2.39	2.59	31.23	57.5	936	0.359	0.810	486	0.205	1 872
心墙料	2.44	2.44	222.00	35.7	367	0.338	0.588	1 200	0.150	734
压重区	2.07	2.40	13.23	43.0	402	0.228	0.680	157	0.158	804
排水区	2.25	2.48	29.78	55.7	823	0.382	0.790	452	0.110	1 646

注: ρ 为密度, g/cm^3 ; ρ' 为饱和密度, g/cm^3 ; c 为粘聚力; φ 为摩擦角; K 、 n 、 K_b 、 m 、 K_{ur} 均为试验常数; R_f 为破坏比。

表 2 线弹性模型参数

Tab. 2 Parameters of linear elastic model

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho'/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν
混凝土基座	2.40	2.40	30	0.17
灌浆帷幕	2.30	2.30	30	0.20
基岩	2.40	2.40	23	0.20

注: E 、 ν 分别为弹性模量、泊松比。

表 3 渗透系数

Tab. 3 Permeability coefficient

材料	渗透系数 K /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	材料	渗透系数 K /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	材料	渗透系数 K /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
石渣料区	1.054	心墙料	1×10^{-8}	混凝土基座	1×10^{-8}
堆石区	1.492	压重区	1.000	基岩	5×10^{-5}
过渡料	0.039	排水区	1.661	灌浆帷幕	5×10^{-6}

3 基座不同布置形式分析比较

3.1 受力分析比较

在基座的应力分析中,由于混凝土的抗拉强度远低于抗压强度,因此重点分析基座内部出现的拉应力。表 4 为基座应力最大值。由表 4 可知,在竣工期阶段,基座在全嵌入基岩时拉应力最大,为 0.56 MPa,出现在廊道底部;基座半嵌入基岩方案其次,为 0.44 MPa,出现在廊道底部;基座未嵌入基岩时拉应力最小,为 0.22 MPa,出现在基座顶面。其原因是在竣工期无渗流力的影响,基座内部所产生的拉应力主要来自坝体的重量,而基座在上部直接承受了过渡料和心墙的重量。当基座全嵌入基岩时,心墙和过渡料直接作用在基岩表面,此时心墙和过渡料的长度最长,重量达到了最大,因此对基座造成拉应力达到了最大;而基座未嵌入基岩时,基座在坝体内部占据了一定高度,心墙和过渡料的长度达到最短,重量在三种方案最低,对基座造成的拉应力最低。在蓄水期阶段,基座拉应力在全嵌入基岩方案时最低,为 1.61 MPa,出现在廊道顶拱;半嵌入基岩方案的基座拉应力为 2.83 MPa,出现在基座上游侧与基岩和堆石料三者相交处,是全嵌入基岩方案的 176%;而未嵌入基岩方案基座的拉应力最高,为 5.37 MPa,出现在基座上游侧底面与基岩和堆石料三者的相交处,位置与半嵌入基岩方案相同,是全嵌入基岩方案的 334%,可见基座布置形式对基座拉应力的产生有着重大影响。

表 4 基座应力最大值

Tab. 4 Maximum stress of base MPa

基座布置形式	拉应力最大值		压应力最大值	
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
基座未嵌入基岩	0.22	5.37	-4.63	-9.35
基座半嵌入基岩	0.44	2.83	-4.76	-6.37
基座全嵌入基岩	0.56	1.61	-3.69	-4.24

注:“-”代表压应力。

表 5 为蓄水期坝体孔隙水压力最大值。由表 5 可知,基座在三种布置形式下所承受的孔隙水压力最大值均为 0.95 MPa,在未嵌入和半嵌入基岩两种方案中,基座孔隙水压力最大值与基座拉应

表 5 蓄水期坝体孔隙水压力最大值

Tab. 5 Maximum pore water pressure of dam body during impounding period MPa

基座布置形式	基座孔隙水压力最大值	出现位置	出现位置是否与基座拉应力最大值的位置一致
基座未嵌入基岩	+0.95	基座上游侧与基岩和堆石料三者相交处	是
基座半嵌入基岩	+0.95	基座上游侧与基岩和堆石料三者相交处	是
基座全嵌入基岩	+0.95	廊道顶拱	否

注：“+”代表有水流条件。

力最大值出现于同一位置,因此孔隙水压力对基座的直接挤压是导致基座拉应力升高的一个重要因素。而全嵌入基岩方案,基座孔隙水压力最大值与基座拉应力最大值未出现在同一位置,其原因是由于基座完全嵌入基岩,坝体内部的防渗完全由心墙承担,由于堆石料与地基基岩的渗透系数相差较大,仅有少量水从基岩渗透至完全嵌入基岩的基座附近,水压力未直接作用在基座上,基座受到的直接挤压较少,此时更多的水流由堆石料渗透到坝体底部,直接作用在基座顶部与基岩的相交面,因此孔隙水压力最大值出现于此。当基座不嵌入或半嵌入基岩时,由于部分基座位于坝体内部,在蓄水时相当于承担着心墙的防渗作用,因此水从堆石料中渗透到基座附近产生的孔隙水压力直接作用于基座,导致这两种布置形式基座的拉应力偏高。蓄水期阶段,基座三种布置形式下所受到的压应力也是在基座全嵌入基岩时最小,为 4.24 MPa;在基座未嵌入基岩时压应力最大,为 9.35 MPa,可见水压力的作用对基座的受力有重要影响。

结合基座的三种布置形式,由于竣工期基座所受到的应力普遍较小,蓄水期受到的应力普遍较大,因此以蓄水期的计算结果为主要参考,从应力的角度来考虑,基座全嵌入基岩布置形式是最优的一种布置方案。

3.2 基座廊道优化

为便于大坝灌浆、排水和监测等工作,通常要设置一些孔口或廊道结构^[8],然而廊道的存在会对基座的连续性产生一定影响,尤其是在坝体蓄水运行期间容易出现应力集中、开裂等不利影响。通过分析,在基座的三种布置形式中,基座全嵌入基岩方案在大坝蓄水期受到的拉应最小,为 1.61 MPa,但其出现的位置位于廊道顶部,在该位置产生拉应力会对廊道的稳定性造成影响,从而影响基座整体的稳定性,故选取基座全嵌入基岩布置

形式进行有限元分析计算,对廊道受力展开优化。

全嵌入基岩的基座在蓄水期所受到的拉应力主要集中于基座的上游侧,下游侧主要受到压应力的作用,而廊道位于基座中间部位,承受了基座上游侧传递过来的拉应力,因此提出将廊道向下游偏移。

3.3 基座廊道优化结果分析

依次向下游偏移 2.5、5.0 m 来分析研究廊道承受拉应力的情况。表 6 为蓄水期廊道拉应力。由表 6 可知,当廊道未偏移时,蓄水期基座的拉应力最大值为 1.61 MPa,出现在廊道顶拱;偏移 2.5、5.0 m 后,基座拉应力的最大值出现在基座顶部,而不再是廊道周围,且最大值从 1.61 MPa 降低到了 1.02、1.19 MPa,可见廊道周围易导致应力集中,致使基座拉应力升高。廊道向下游偏移后,廊道周围的拉应力最大值分别为 0.59、0.21 MPa,与 1.61 MPa 相比,分别下降了 73%、87%,表明廊道向下游偏移有效规避了来自上游水压力对基座的挤压而产生的拉应力。因此,在工程建设中,廊道修建的位置也是一个非常值得考虑的问题。

表 6 蓄水期廊道拉应力

Tab. 6 Tensile stress of gallery during impounding period

MPa			
廊道偏移距离	基座拉应力最大值	出现位置	廊道周围拉应力最大值
未偏移	1.61	廊道顶拱	1.61
向下游偏移 2.5 m	1.02	基座顶部	0.59
向下游偏移 5.0 m	1.19	基座顶部	0.21

4 结论

a. 在蓄水期,基座全嵌入基岩时,由于基岩与堆石料渗透系数相差较大,仅有少量水渗透到基岩中,基座受到的水荷载相对较低,使得基座内部拉应力相对较低。因此,从基座的受力角度考虑,基座全嵌入基岩是最佳的布置形式。

b. 在蓄水期,基座内部的拉应力主要集中在上游侧,基座下游侧以压应力为主,通过将廊道向下游偏移而规避基座上游侧传递而来的拉应力,使得廊道周围的拉应力减少。以维持廊道的安全性。在基座全嵌入基岩方案中,将廊道向下游偏移 5 m 后,蓄水期廊道周围拉应力最大值为 0.21 MPa,相比于未偏移时的 1.61 MPa 下降了 87%。

参考文献:

[1] 周扬,刘士佳,屈永倩. 去学沥青混凝土心墙坝高基座体型研究[J]. 水电能源科学,2020,38(3):71-73,176.

