

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220758

基于有限元法的沥青混凝土心墙及坝基防渗墙应力分析

崔熙灿¹,王大勇²,张凌凯^{1,3a},张幸幸^{3a,3b}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2. 黑龙江省三江建设管理有限公司,黑龙江 哈尔滨 150036;
3. 中国水利水电科学研究院 a. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室; b. 水利部水工程建设与安全重点实验室,北京 100038)

摘要: 在沥青混凝土心墙堆石坝设计中,坝基防渗墙与沥青混凝土心墙的轴线重合,但因施工误差等原因,实际可能会出现坝基防渗墙与心墙轴线不完全重合的情况。基于有限元分析方法,研究坝基防渗墙相对于心墙轴线在不同偏移量情况下防渗墙的应力状态。结果表明,轴线重合时,坝基防渗墙在施工期和运行期局部拉应力处于没有或较小状态,对整体影响甚微;坝基防渗墙轴线向下游的偏移会对运行期防渗墙应力产生一定的不利影响,主要表现为坝基防渗墙下游面(非邻水面)局部拉应力增大,存在应力集中现象,局部拉应力较未发生偏移最大增长3.6倍;可将心墙的混凝土基座依据坝基防渗墙偏移情况向下游进行一定的扩展,能使运行期坝基防渗墙下游面的局部拉应力最高降低59.3%,减弱应力集中现象,从而改善坝基防渗墙的应力状态。有限元模拟结果可为坝基防渗墙偏心情况下的安全性评价和工程处理措施选择提供支持。

关键词: 沥青混凝土心墙坝;坝基防渗墙;应力;有限元模拟

中图分类号: TV641.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0083-03

1 引言

某水库挡水建筑物为沥青混凝土心墙砂砾石坝,坝基采用混凝土防渗墙防渗。心墙最大高度42.35 m,下部厚60 cm、上部厚50 cm,坝基防渗墙厚80 cm。防渗墙施工后测量发现,部分槽段防渗墙出现略向下游偏移的情况,偏移主要发生在桩号0+189~0+198槽段之间,最大偏移量约为27 cm。防渗墙轴线的偏移可能会对其应力状态造成不利影响,但影响程度有待评估。现有研究对坝基防渗墙轴线偏移探究甚少,发生类似工程问题时无可供参考的方案体系。为此,本文借助有限元法,对某水库坝整体及坝基防渗墙开展一系列模拟分析,深入研究了坝基防渗墙发生偏移情况下的应力状态,可为类似工程提供参考。

2 有限元模拟及分析方案

2.1 坝体及坝基整体有限元模型

以某水库坝高最大的断面为典型分析断面,建立图1所示的二维有限元分析模型,模型共包含863个节点、831个单元。模型由坝体、坝基、坝基防渗墙、基座及坝基部分砂岩层、帷幕灌浆、级配不良砾层组成,同时采用有效应力法分析,所述应力均已扣除了孔隙水压力(孔隙水压力由渗流分析确定)。

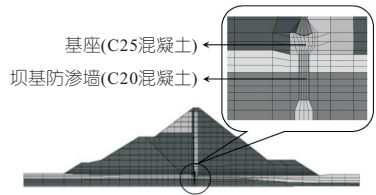


图1 整体有限元网格

Fig. 1 Global finite element mesh

2.2 分析方案和局部有限元模型

为研究坝基防渗墙向下游发生偏移时可能会产生的不利影响及可补救措施,拟定6种方案(表1),各方案坝基防渗墙及混凝土基座局部和周边的有限元网格见图2。

收稿日期: 2022-04-16,修回日期: 2022-05-08

基金项目: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金项目(IWHR-SKL-KF201908);新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2019Y020);新疆维吾尔自治区天山青年计划项目(2019Q077)

作者简介: 崔熙灿(1998-),女,硕士研究生,研究方向为土石坝工程安全,E-mail: cuixican0317@qq.com

通讯作者: 张幸幸(1985-),女,博士、高级工程师,研究方向为土的本构模型及土石坝工程安全,E-mail: xingr8596@163.com

表 1 坝基防渗墙向下游偏移时的不同方案

Tab. 1 Different schemes for diaphragm of dam foundation moving downstream

方案	坝基防渗墙向下游发生偏移量/cm	混凝土基座向下游拓宽量/cm
1	0	0
2	20	0
3	30	0
4	20	30
5	30	30
6	30	50

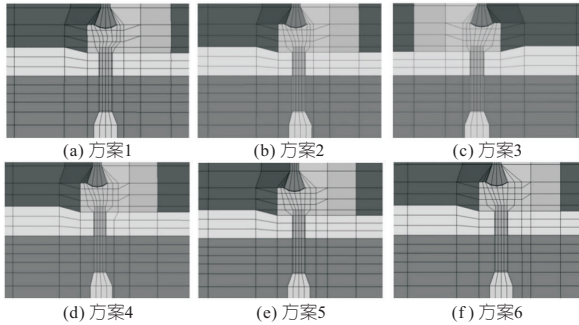


图 2 坝基防渗墙及周围局部网格放大图

Fig. 2 Diaphragm of dam foundation and its surrounding local grid magnification map

2.3 本构模型及其参数

混凝土坝基防渗墙的应力主要取决于坝体及坝基的变形。为合理模拟坝体及坝基岩土体的变形,充分考虑岩土材料的应力变形特点,采用邓肯 E-B 模型来描述筑坝土料、堆石料、覆盖层等土石材料的瞬时变形。参考规范^[1]拟定材料的邓肯 E-B 模型参数见表 2。表 2 中, K 为弹性模量数; n 为弹性模量指数; R_f 为破坏比; K_{ur} 为卸荷弹性模量数; c 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 均为强度指标; K_b 为体积模量数; m 为体积模量指数。

表 2 材料的邓肯 E-B 模型参数

Tab. 2 Duncan E-B model parameters of materials

参数	坝体砂砾石	坝体堆石	下游压重	坝基级配不良砾	沥青混凝土心墙
饱和重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	21.6	23.39	22.44	22.25	22.8
K	1 000	940	720	1 200	870
n	0.25	0.35	0.303	0.25	0.48
R_f	0.75	0.849	0.798	0.75	0.79
K_{ur}	2 000	1 980	1 550	2 400	1 740
c/kPa	0	0	0	0	38
$\varphi_0/(\text{°})$	38	40	38	42	20.4
$\Delta\varphi/(\text{°})$	7.5	13	13.5	7.5	0
K_b	500	340	800	500	1 100
m	0.25	0.18	0.18	0.25	0.39

混凝土材料和基岩采用线弹性模型模拟,参数见表 3。坝基防渗墙为 C20 混凝土,基座为 C25 混凝土,其杨氏模量和泊松比按《水工混凝土结构设计规范》^[2] 的建议选取。

表 3 混凝土和基岩的计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of concrete and bedrock

混凝土	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/MPa	泊松比
混凝土基座	2 400	2.80×10^4	0.167
防渗墙	2 400	2.55×10^4	0.167
砂岩	2 500	1.50×10^3	0.200

采用基于 Biot 固结理论的渗流-固结全耦合的有效应力法,能更为合理地模拟坝体及坝基的有效应力状态,各种材料渗透系数见表 4。

表 4 应力变形计算采用的渗透系数

Tab. 4 Permeability coefficient used in stress deformation calculation

材料	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
排水料	完全透水
坝体堆石料、砂砾石料	完全透水
坝基级配不良砾	1×10^{-3}
砂岩	1×10^{-5}
混凝土	1×10^{-9}
沥青混凝土	1×10^{-9}

3 坝体和坝基整体应力变形分布

因各计算方案的差别主要在于坝基防渗墙和心墙基座的局部,故各方案大坝和坝基整体的应力变形分布差异不大。图 3 为方案 4 坝体竣工期、运行期的应力变形、位移分布。

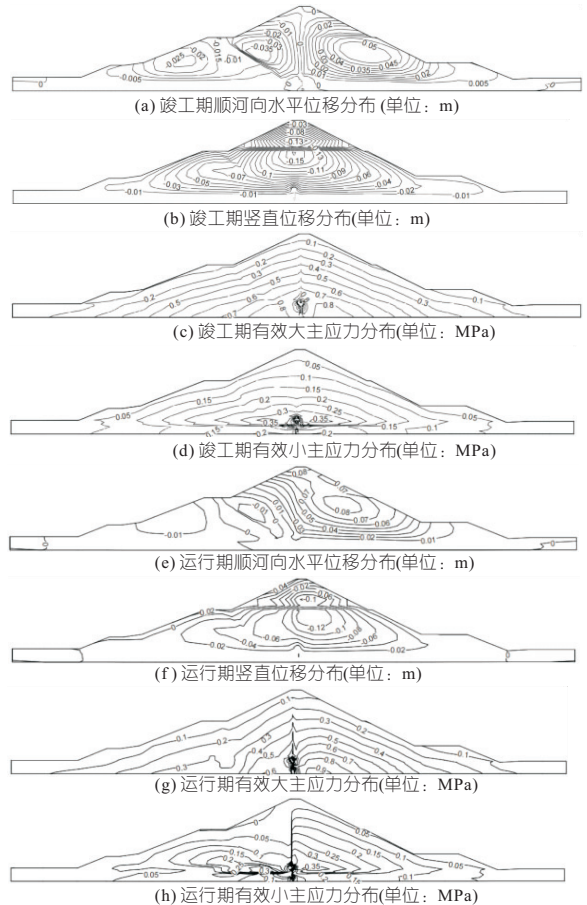


图 3 竣工期、运行期方案 4 坝体应力变形、位移分布
Fig. 3 Stress and deformation and stress deformation distribution of scheme 4 during completion period and operating period

由图 3(a)~(d)可知,竣工期引起的坝体应力变形主要为材料的自重,在自重荷载作用下,坝体发生竖直沉降和水平位移,坝体向上游、下游的水平位移最大值分别约为 0.041、0.056 m,出现在约 1/4 坝高处,且沿心墙两侧基本呈对称分布。坝体最大沉降量为 0.156 m,约在坝高的 1/3~

1/2 处。由于沥青混凝土的模量相比坝壳堆石体差异不大,因此在坝体内部未出现明显的拱效应。但值得注意的是,坝基防渗墙与周围土体的模量差异较大,其中的应力明显大于周围的土体。

由图 3(e)~(h)可知,蓄水后在自重荷载和向上游水压力的共同作用下坝体发生竖直沉降和水平位移,其中坝体向上游、下游的水平位移极值分别为 0.022、0.091 m,坝体最大沉降量为 0.135 m,约出现在坝高的 1/3~1/2 处。水压力作用在心墙和坝基防渗墙上,相比竣工期产生向下游的水平位移,向下游的水平位移极值增加。受浮力影响,上游坝壳的有效自重应力降低,故最大沉降相比竣工期有所减小;因浮力作用,上游坝壳区的有效大、小主应力均显著减小。

统计各方案沥青混凝土心墙砂砾石坝在竣工期、运行期的坝体坝基的变形极值和应力极值,发现各方案在最大沉降量、顺河向位移及大小主应力数值上均无本质区别,可见坝基防渗墙轴线的微小偏移对坝体及坝基的应力变形极值影响甚微。

4 竣工期防坝基渗墙的应力状态分析

表 5 为各方案坝基防渗墙应力极值汇总。由表 5 可知,竣工期的坝基防渗墙的有效大主应力极值(压应力极值)均小于混凝土抗压强度(11.0 MPa);有效小主应力极值均远未超过混凝土抗拉强度;当坝基防渗墙不发生偏移(方案 1)时,竣工期坝基防渗墙受到的最大压应力、最大拉应力分别约为 5.65、0.04 MPa,均远小于混凝土的抗压、抗拉强度;当坝基防渗墙向下游偏移 20~30 cm(方案 2~6)时,竣工期坝基防渗墙呈现出一定程度的偏心受压状态,最大压应力约为 7.35 MPa,最大拉应力小于 0.1 MPa,整体处于受压状态,不会因为偏心受力而出现拉、压破坏情况。

表 5 各方案坝基防渗墙应力极值

Tab. 5 Stress extreme values of diaphragm of dam

方案	时期	foundation for various schemes				MPa
		最大压应力	最大拉应力	最大竖向压应力	最大竖向拉应力	
1	竣工期	5.65	0.04	5.62	0	
	运行期	3.77	0.24	3.60	0.10	
2	竣工期	6.77	0.04	6.74	0	
	运行期	4.28	0.81	4.07	0.66	
3	竣工期	7.35	0.04	7.31	0	
	运行期	4.74	1.12	4.55	0.96	
4	竣工期	6.06	0.03	6.03	0	
	运行期	3.98	0.33	3.78	0.21	
5	竣工期	6.75	0.06	6.71	0	
	运行期	4.43	0.62	4.24	0.48	
6	竣工期	6.16	0.05	6.15	0	
	运行期	4.45	0.50	4.28	0.37	

由表 5 可知,在运行期,坝基防渗墙的应力状

态显示为受压、受弯结合。若坝基防渗墙不发生偏移(方案 1),局部拉应力最大值约为 0.24 MPa;若坝基防渗墙向下游偏移 20 cm(方案 2),局部拉应力最大值达 0.81 MPa,较未发生偏移增长 2.4 倍,此时若将混凝土基座向下游扩展 30 cm,则局部拉应力的最大值降至 0.33 MPa(方案 4),降幅达 59.3%;若坝基防渗墙向下游偏移 30 cm(方案 3),局部拉应力最大值达 1.12 MPa,较未发生偏移增长 3.6 倍,此时若将混凝土基座向下游扩展 30 cm 或 50 cm,则局部拉应力的最大值降低为 0.62 MPa(方案 5)或 0.50 MPa(方案 6),降幅分别为 44.6%、55.4%。可见坝基防渗墙拉应力极值随其向下游偏移量的增大而增大、随基座向下游的拓宽而减小。

综上所述,沥青混凝土心墙坝坝基防渗墙向下游偏移,会导致施工期、运行期坝基防渗墙的应力状态发生改变,但其对防渗安全性的主要不利影响反映为运行期坝基防渗墙下游面的局部拉应力极值增大;作为补救措施,可将沥青混凝土心墙下的混凝土基座略向下游扩展。

5 结论

a. 在理想状态下,沥青混凝土心墙堆石坝的心墙轴线与坝基防渗墙轴线重合,竣工期防渗墙处于轴心受压,不会出现拉应力,运行期防渗墙受到一定的弯矩作用,下游面仅存在 0.24 MPa 的局部拉应力,对其整体影响不大。

b. 当坝基防渗墙轴线相对沥青混凝土心墙略向下游偏移(偏移量 < 30 cm)时,竣工期防渗墙处于偏心受压,但未出现拉应力;运行期防渗墙受到压力和弯矩的共同作用,下游面的局部拉应力相比防渗墙未发生偏心时的 0.24 MPa 分别增为 0.81 MPa(方案 2)、1.12 MPa(方案 3)。

c. 在坝基防渗墙向下游偏移的前提下,若将混凝土基座向下游适当扩展,则会使运行期防渗墙下游面的局部拉应力由 0.81 MPa(方案 2)减为 0.33 MPa(方案 4),降幅达 59.3%,由 1.12 MPa(方案 3)分别减为 0.62 MPa(方案 5)、0.50 MPa(方案 6),降幅分别为 44.6%、55.4%,表明本文措施可改善防渗墙的应力状态。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: SL 274-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [2] 中华人民共和国国家能源局. 水工混凝土结构设计规范: DL/T 5057-2009[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

前设计的支护条件能满足岩壁吊车梁现状和后续开挖的稳定。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 地下厂房岩壁吊车梁设计规范: NB/T 35079-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 金丰年, 翁杰, 许宏发. 岩锚吊车梁设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 1): 175-179.
- [3] 王安亭, 肖明, 朱奎旭. 高地应力下岩锚吊车梁浇

筑时机优化分析[J]. 水力发电, 2019, 45(9): 109-113, 134.

- [4] 刘春霞. 地下厂房中岩壁式吊车梁的结构分析与稳定性计算[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [5] 李良权, 万祥兵, 陈建林, 等. 白鹤滩水电站地下厂房岩壁吊车梁稳定性分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 124-135.
- [6] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范: SL 319-2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.

Structural Safety Analysis of Rock-anchored Crane Beam of Underground Powerhouse with High Geostress

JIANG Ming-huan, CEN Wei-jun, WANG Hui, CAO Yi-fan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For underground powerhouse in high geostress area, the excavation of the lower powerhouse cavern after the completion of the pouring of the rock-anchored crane beam may have an adverse impact on the crane beam. Aiming at this problem, three-dimensional elastoplastic finite element method was used to analyze the stress and deformation, the stress of the anchor and the stability of the crane beam of an underground powerhouse during construction and operation period. The results show that in the high geostress field, the rock-anchored crane beam will have large deformation, and the joint surface between the beam and the surrounding rock will have large tensile stress. After the crane beam is poured, the stress and deformation of the beam will increase greatly in three stages. As the excavated part is far away from the beam, the stress and deformation of the beam will become gentle, and the safety factor of the joint surface between the beam and the wall will be large, which can provide a reference for the crane beam pouring and cavern construction in similar projects.

Key words: high geostress; underground powerhouse; rock-anchored crane beam; anchor stress; FEM; safety factor

(上接第 85 页)

Stress Analysis of Asphalt Concrete Core Wall and Diaphragm of Dam Foundation Based on Finite Element Method

CUI Xi-can¹, WANG Da-yong², ZHANG Ling-kai^{1,3a}, ZHANG Xing-xing^{3a,3b}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Heilongjiang Sanjiang Construction Management Co., Ltd, Harbin 150036, China; 3a. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin; 3b. Key Laboratory on Construction and Security of Water Projects of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In the design scheme of asphalt concrete core rockfill dam, the axis of diaphragm of dam foundation and asphalt concrete core wall is overlapped. However, due to construction errors and other reasons, the axis of diaphragm of dam foundation and asphalt concrete core wall may not be completely overlapped. Based on the finite element analysis method, the stress behavior of diaphragm of dam foundation and asphalt concrete core wall under different offsets was studied. The results show that under the superposition of axes, the local tensile stress of the diaphragm of dam foundation is in a state of no or small in the construction period and operation period, which has little influence on the whole. The minor offset of the axis of the diaphragm of dam foundation to the downstream will have a certain adverse effect on the stress of the diaphragm of dam foundation during operation. The main performance is that the local tensile stress of the downstream face of the diaphragm of dam foundation increases, and there is stress concentration. The local tensile stress increases by 3.6 times compared with that without offset. The concrete base of the asphalt concrete core wall can be slightly extended to the downstream according to the offset of the diaphragm of dam foundation, which can reduce the local tensile stress of the downstream surface of the diaphragm of dam foundation by 59.3% and weaken the stress concentration, so as to improve the stress state of the diaphragm of dam foundation. The finite element simulation analysis can provide support for safety evaluation and selection of engineering treatment measures under eccentric condition of diaphragm of dam foundation.

Key words: asphalt concrete core dam; diaphragm of dam foundation; stress; finite element modeling