

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250394

基于堆石料试验的高沥青混凝土心墙坝筑坝 安全性预测分析

方 博¹, 肖 澎¹, 王 辉²

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014;
2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 分析大坝安全性对维持大坝安全运行至关重要。依托某拟建抽水蓄能电站下水库高沥青混凝土心墙堆石坝工程,开展过渡层、上游堆石区和下游堆石区的堆石料力学特性试验,测定堆石料的邓肯 E-B 模型和流变模型参数,在此基础上开展大坝三维非线性应力变形有限元计算,从坝体、心墙和防渗墙等方面论证大坝安全性。结果表明,正常蓄水位下,大坝沉降极值为 -22.29 cm ,沉降率 0.28% ;坝体大、小主应力分别为 $1.38/0.54\text{ MPa}$ 。心墙顺河向、坝轴向和竖向位移极值分别为 $11.55/-3.70/3.63/-21.46\text{ cm}$;心墙主拉应变极值为 -0.8% 。防渗墙顺河向、坝轴向和竖向位移极值分别为 $1.32/-0.11/0.02/-0.54\text{ cm}$;大、小主应力极值分别为 $6.82/-1.20\text{ MPa}$ 。计入流变和湿化后,运行期(8年)坝体沉降极值为 -35.00 cm ,沉降率 0.44% ,心墙顺河向、坝轴向和竖向位移极值分别为 $13.65/-4.97/4.77/-33.01\text{ cm}$ 。综合分析计算成果,大坝应力变形分布和极值合理,沥青混凝土心墙拉应变和坝基混凝土防渗墙拉应力均未超标,可以判定大坝能够满足安全运行要求。

关键词: 抽水蓄能电站; 沥青混凝土心墙堆石坝; 堆石料力学特性试验; 非线性有限元法; 心墙; 防渗墙
中图分类号: TV641.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2026)01-0128-05

Safety Prediction Analysis of High Asphalt Concrete Core Rockfill Dam Based on Rockfill Test

FANG Bo¹, XIAO Peng¹, WANG Hui²

(1. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Analyzing the safety of the dam is of vital importance for maintaining their safe operation. Relying on the high asphalt concrete core rockfill dam project of the lower reservoir of a planned pumped storage power station, the mechanical characteristics tests of rockfill materials in transition layer, upstream rockfill area and downstream rockfill area were carried out. The Duncan E-B model and rheological model parameters of rockfill materials were measured. On this basis, the three-dimensional nonlinear stress-deformation finite element calculation of the dam was carried out. The safety of the dam was demonstrated from the aspects of dam body, core wall and cutoff wall. The results show that under the normal water level, the extreme settlement value of the dam is -22.29 cm and the settlement rate is 0.28% . The major and minor principal stresses of the dam are 1.38 MPa and 0.54 MPa , respectively. The extreme values of core wall displacement along the river, dam axial displacement and vertical displacement are 11.55 cm , $-3.70\text{ cm}/3.63\text{ cm}$ and -21.46 cm , respectively. The extreme value of principal tensile strain is -0.8% . The extreme displacement values of the cutoff wall along the river, the axial direction and the vertical direction of the dam are 1.32 cm , $-0.11\text{ cm}/0.02\text{ cm}$ and -0.54 cm , respectively. The extreme values of major and minor principal stresses are 6.82 MPa and -1.20 MPa respectively. After rheology and wetting are taken into account, the extreme value of dam settlement is -35.00 cm , and the settlement rate is 0.44% . The extreme values of core displacement along the river, dam axial and vertical displace-

收稿日期: 2025-03-05, **修回日期:** 2025-04-08, **接受日期:** 2025-04-15

基金项目: 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金(PKLHD202004)

作者简介: 方博(1991-),男,硕士、高级工程师,研究方向为抽水蓄能电站设计及工程数字化, E-mail: 542841357@qq.com

ment are 13.65 cm, -4.97 cm/4.77 cm and -33.01 cm, respectively. The comprehensive analysis results indicate that the distribution and extreme value of stress and deformation of the dam are reasonable, and the tensile strain of asphalt concrete core wall and the tensile stress of concrete wall in dam foundation are not beyond the standard value, so it can be judged that the dam can meet the requirements of safe operation.

Key words: pumped storage power station; asphalt concrete core rockfill dam; mechanical characteristics test of rockfill material; nonlinear finite element method; core wall; impervious wall

1 概况

我国某抽水蓄能电站装机容量为 2 400 MW,为一等大(1)型工程。下水库位于大隆水库右岸大坝上游第一条支沟内的宽谷段——大地坪,坝址下游为大隆水库尾水,冲沟近东西向,呈“S”形狭谷,上游为一宽谷,谷底高程 55~65 m。防渗墙设计结合右岸地质条件,采用混凝土基座+水泥灌浆帷幕方案。下水库采用沥青混凝土心墙堆石坝,最大坝高 81.00 m,坝顶高程 120.00 m。下水库正常蓄水位 114.00 m,死水位 83.00 m。沥青混凝土心墙位于大坝轴线,沿高程变厚布置,顶部宽度 0.6 m,底部厚度 1.2 m,在心墙底部设 3 m 高的放大脚,心墙厚度由 1.2 m 渐变为 3.0 m。图 1 为沥青混凝土心墙堆石坝典型断

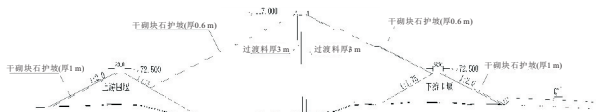


图 1 下水库沥青混凝土心墙坝典型断面

Fig. 1 Typical sectional view of asphalt concrete core dam in lower reservoir

面图。对于沥青混凝土心墙堆石坝,堆石体、心墙和防渗墙的变形协调是影响整个大坝安全的主要因素;另外,水库蓄水引起上游坝料的湿化变形及库水作用下堆石体的流变变形亦对大坝安全有显著影响。目前,针对沥青混凝土心墙堆石坝安全性的研究成果较丰富。如李志强等^[1]基于三轴试验研究沥青混凝土的应力应变关系及其力学特性,结果表明沥青混凝土的应力应变曲线呈现应变硬化和软化两个阶段;岑威钧等^[2]改进土石料的双屈服面弹塑性本构模型,并将改进模型结果与三轴试验结果进行对比,验证了算法的可靠性和优越性;JIN W 等^[3]为研究高应力水平下堆石料颗粒破碎模式,开展大型三轴剪切试验,结果表明围压对颗粒破碎影响显著;刘翀等^[4]借助大型三轴试验进行堆石料湿化特性研究,结果表明湿化时的应力水平不影响峰值强度,却显著影响最终体变;岑威钧等^[5]基于亚塑性理论,采用改进的堆石料 Gudehus-Bauer 亚塑性模型进行心墙坝湿

化效应研究,结果表明该模型可准确计算考虑湿化后的大坝应力变形;张丙印等^[6]分别采用 E- μ 、K-G 模型对三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝进行计算,对比了两种模型下大坝应力变形的差别;江时俊等^[7]采用三维有限元法对云南省某沥青混凝土心墙坝进行计算,探讨心墙厚度对大坝防渗的影响,结果表明心墙拱效应随着心墙厚度的增大而增大;SHAHRAM S^[8]采用二维静力应力应变分析方法研究沥青混凝土心墙堆石坝几何参数的变化对不同位置心墙性态的影响。尽管现有研究在材料特性、本构模型和数值模拟等方面取得了显著进展,但仍存在以下不足,一是多数研究侧重于单一材料或单一因素影响,对堆石料流变与湿化变形的耦合作用及其对大坝长期变形的影响研究尚不深入;二是现有试验多局限于常规应力条件,缺乏针对实际工程中高应力、复杂应力路径下堆石料力学特性的系统测试;三是数值模拟方面,多采用简化的本构模型或二维分析方法,难以全面反映坝体三维应力状态及心墙与防渗墙的协同工作机理。因此,本文通过大型三轴剪切和流变试验等方法测定某沥青混凝土心墙堆石坝过渡层、上游堆石区和下游堆石区的堆石料力学特性参数,并采用三维非线性有限元法对大坝进行应力变形计算,从坝体、心墙、防渗墙等方面论证大坝的安全性,并论证堆石料的流变和湿化变形对大坝变形的影响,以期工程的设计、施工提供理论指导。

2 堆石料力学特性试验

2.1 试验方法

大型三轴剪切试验采用 SZ30-4DA 粗粒土三轴剪切试验机。试样直径为 30 cm,高 60 cm,采用饱和固结排水剪试验方式。流变试验在中型三轴流变仪上进行,试样材料为花岗岩,分别进行不同围压下的等向压缩流变和剪切流变试验,测定荷载作用下堆石料的体积变形和剪切变形。

2.2 试验结果

室内试验级配曲线按照《水电水利工程粗粒

土试验规程》(DL/T5356-2024)^[9]的相关要求进行编制,其中过渡区、上游堆石区和下游堆石区平均线均在相似级配法处理基础上再采用等量替代法进行编制,试验级配曲线见图 2。

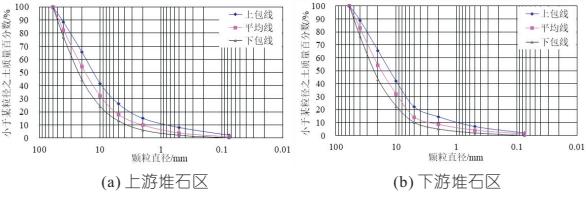


图 2 下水库堆石料原型级配曲线
Fig. 2 Grading curve of prototype of rockfill material in lower reservoir

堆石料三轴剪切试验得到的堆石料的邓肯非线性 E-B 模型^[10]参数见表 1。表 1 中, ρ 为密度; φ_0 为围压 $\sigma_3 = P_a$ 时的 φ 值; $\Delta\varphi$ 反映 φ 值是随 σ_3 而降低的一个参数; K 、 n 分别为弹性模量数、弹性模量指数; K_b 、 m 分别为体积模量数、体积模量指数; R_f 为破坏比。

表 1 下水库大坝各堆石料固结排水剪试验成果

Tab. 1 Test results of consolidation and drainage shear of rockfill materials in lower reservoir

坝体分区	岩性	ρ	孔隙率/%	φ_0 /(°)	$\Delta\varphi$ /(°)	K	n	R_f	K_b	m
过渡层	平硐微新	2.15	18.9	56.3	9.1	1 257	0.30	0.64	735	0.20
	二长花岗岩									
上游堆石区	平硐弱风化	2.08	20.9	54.7	8.5	1 138	0.38	0.71	652	0.14
下游堆石区	二长花岗岩	2.05	22.1	53.0	7.7	1 018	0.37	0.69	506	0.17

注: ρ 单位为 g/cm^3 。

堆石料流变模型采用七参数流变模型^[11],试验参数见表 2。表 2 中, α 、 b 、 c 、 d 、 m_1 、 m_2 、 m_3 均为模型参数。

表 2 坝体各分区流变试验参数

Tab. 2 Rheological test parameters of each partition of dam body

坝体分区	α	$b/\%$	$c/\%$	$d/\%$	m_1	m_2	m_3
过渡层	0.006 0	0.100	0.020	0.280	0.270	0.385	0.470
上游堆石区	0.005 5	0.137	0.027	0.340	0.310	0.400	0.510
下游堆石区	0.005 2	0.164	0.038	0.418	0.380	0.510	0.650

3 有限元模型与计算参数

3.1 计算模型

根据下水库库区地形图、大坝平面布置图和剖面图等资料,结合大坝施工方案,建立沥青混凝土心墙堆石坝三维有限元计算模型,见图 3,其中节点 60 991 个,单元 65 467 个。

3.2 计算参数

湿化变形计算主要针对水位以下部分坝料,计算区域为上游正常蓄水位以下的上游堆石区及下游相应水位以下的下游堆石区。堆石料湿化模

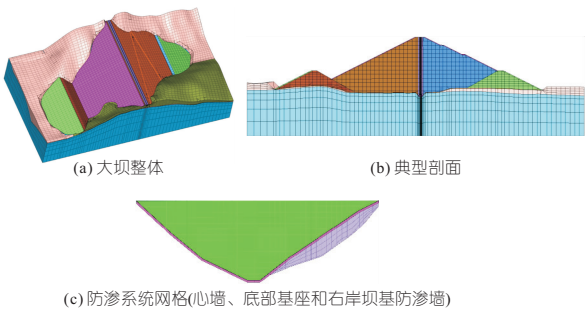


图 3 大坝三维有限元网格

Fig. 3 Three-dimensional finite element mesh of dam

型采用沈珠江三参数模型^[12],计算参数通过工程类比得到,其中上游堆石区 $n_w = 0.40$, $C_w = 0.11\%$, $b_w = 0.30\%$;下游堆石区 $n_w = 0.39$, $C_w = 0.10\%$, $b_w = 0.30\%$ 。

沥青混凝土心墙采用邓肯 E-B 模型^[13],计算参数参考黄金坪、去学和向阳水电站沥青混凝土参数拟定,取值 $\rho = 2.42 \text{ g}/\text{cm}^3$, $c = 190 \text{ kPa}$, $\varphi_0 = 27.5^\circ$, $K = 184$, $n = 0.14$, $R_f = 0.57$, $K_b = 1 674$, $m = 0.66$ 。心墙混凝土基座和混凝土防渗墙采用线弹性模型,材料参数根据规范和经验取值。C30 混凝土计算参数取 $\rho = 2.4 \text{ g}/\text{cm}^3$, $E = 30 \text{ GPa}$, $\mu = 0.167$ 。沥青混凝土心墙与过渡料接触模型计算参数取 $K_1 = 3 500$, $n' = 0.35$, $R'_f = 0.80$, $\varphi = 30^\circ$, $K_n = 5 \times 10^5$, $V_m = 0.05 \text{ m}$, $e = 0.10 \text{ m}$ 。心墙与混凝土基座接触模型计算参数取 $K_1 = 3 500$, $n' = 0.56$, $R'_f = 0.76$, $\varphi = 28^\circ$, $K_n = 5 \times 10^5$, $V_m = 0.05 \text{ m}$, $e = 0.10 \text{ m}$ 。混凝土防渗墙泥皮接触面模型计算参数取 $K_1 = 1 500$, $n' = 0.35$, $R'_f = 0.86$, $\varphi = 10^\circ$, $K_n = 5 \times 10^5$, $V_m = 0.05 \text{ m}$, $e = 0.10 \text{ m}$ 。上、下游围堰由平硐弱风化二长花岗岩填筑,设计标准分别与上、下游堆石区相同,相应的计算参数根据对应的堆石料试验参数取值。

基岩地层岩性为燕山晚期侵入的细粒、中细粒钾长花岗岩,计算参数中饱和单轴抗压强度平均值 45.70 MPa ,变形模量 $1.17 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 0.14 ,抗剪断强度 $f' = 1.00$ 、 $c' = 0.95 \text{ MPa}$ 。

4 坝体变形和应力

图 4 为正常蓄水位大坝河床典型剖面变形分布云图。由图 4 可知,蓄水后,由于心墙上游侧水压力大于下游侧,水荷载使大坝向下游变形。正常蓄水位,大坝顺河向水平位移极值分别为 -3.36 cm (向上游)、 11.62 cm (向下游);心墙在水压力作用下向下游变形,进而使坝体沉降中心位置由心墙下游侧“转移”到心墙上游侧,大坝

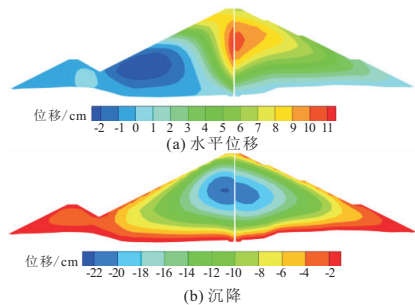


图 4 正常蓄水位大坝河床典型剖面变形分布云图
Fig. 4 Deformation distribution nephogram of typical dam section under normal water level

沉降极值为-22.29 cm,沉降率 0.28%。

图 5 为计入流变和湿化后运行期大坝河床典型剖面坝体变形分布云图,坝体各特征点流变引起的沉降增量时程曲线见图 6,其中运行期对应水库正常蓄水运行 8 年。由图 5、6 可知,与不计堆石料流变和湿化时相比,计入堆石料流变和湿化后的坝体变形分布规律基本不变,向上、下游的

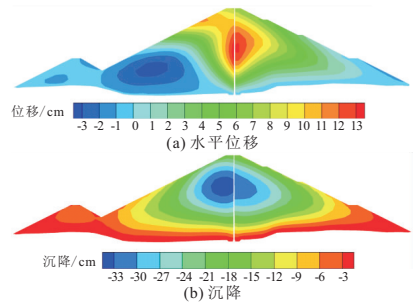


图 5 计入流变和湿化后运行期大坝变形分布云图
Fig. 5 Nephogram of dam deformation distribution in operation period after rheology and humidification

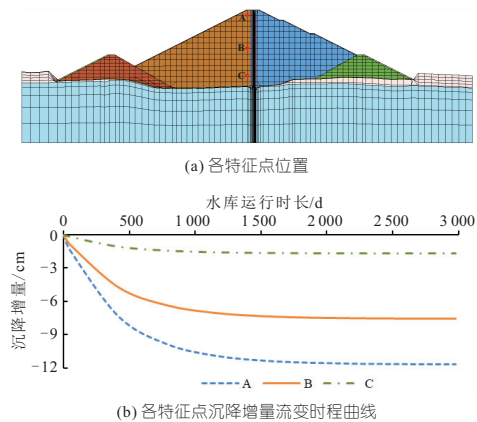


图 6 坝体流变引起的沉降增量时程曲线
Fig. 6 Time-history curve of settlement increment caused by dam rheology

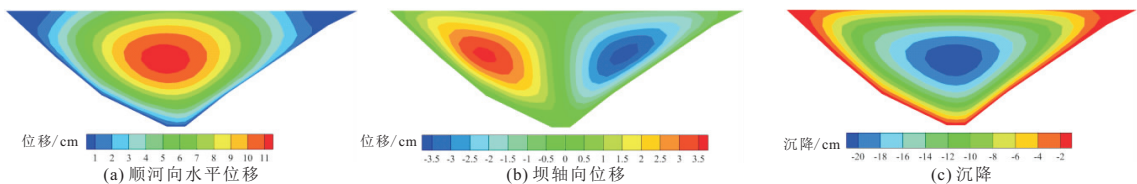


图 8 正常蓄水位下心墙变形云图
Fig. 8 Deformation nephogram of core wall under normal water level

水平位移和沉降极值有所增加;水库蓄水运行前期坝体流变变形增速较大,随着时间的推移,流变增速放缓。计入流变和湿化后,运行期(8 年)坝体顺河向水平位移极值分别为-4.30(向上游)、13.86 cm(向下游),沉降极值增至-35.00 cm,沉降率增至 0.44%。

图 7 为正常蓄水位下大坝河床典型剖面主应力分布云图。竣工期,在自重荷载作用下,大坝大、小主应力为压应力,大主应力等值线近似平行坝坡,量值总体随埋深增加而增大。蓄水后,水荷载作用下,下游堆石体应力有所增大,等值线有所“抬升”,正常蓄水位大坝大、小主应力极值分别为 1.38、0.54 MPa。

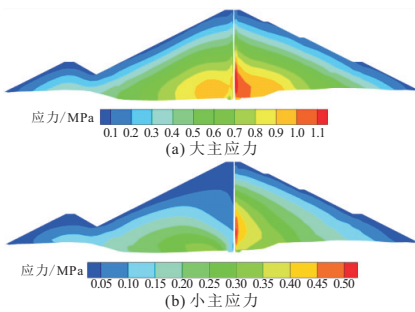


图 7 正常蓄水位大坝河床典型剖面主应力云图
Fig. 7 Principal stress nephogram of typical section of dam riverbed under normal water level

5 防渗系统变形和应力

图 8 为正常蓄水位下心墙纵剖面变形分布云图。由图 8 可知,正常蓄水位下,由于心墙上游侧水头大于下游侧,水荷载作用下心墙向下游变形,心墙顺河向水平位移极值为 11.55 cm(向下游);坝轴向位移分布规律较竣工期基本不变,极值有所增加,极值分别为-3.70(向左岸)、3.63 cm(向右岸);沉降极值位于河床中央墙高中部,极值为-21.46 cm。

相比不考虑堆石料流变和湿化工况,计入堆石料流变和湿化后的心墙各向变形均有所增加,运行期(8 年)心墙顺河向位移极值为 13.65 cm(向下游),坝轴向位移极值分别为-4.97(向左岸)、4.77 cm(向右岸),沉降极值为-33.01 cm。

沥青混凝土心墙应具有足够的抗拉强度和变形能力,通过大量室内试验和工程案例验证,综合考虑沥青混凝土的抗拉应变允许值为1%。正常蓄水位下,沥青混凝土心墙大主应变表现为压应变,沿高程方向大致成层分布,极值为1.73%,位于心墙两侧与基座连接部位;小主应变表现为拉应变,极值为-0.80%,位于心墙下部区域。沥青混凝土心墙的应力水平很小,不会发生剪切破坏,小于应变极值分别小于沥青混凝土拉应变一般允许值1.0%,因此蓄水期沥青混凝土心墙能满足安全运行要求。

图9为正常蓄水位下右岸坝基防渗墙纵剖面变形分布云图。正常蓄水位下,防渗墙顺河向水平位移极值为1.32 cm(向下游);坝轴向位移极值分别为-0.11(向左岸)、0.02 cm(向右岸);沉降极值为-0.54 cm。防渗墙大主应力为压应力,总体上量值随墙体埋深的增加而增大,顶部区域小主应力出现拉应力。防渗墙大主应力极值为6.82 MPa,小主应力极值分别为0.71(压应力)、-1.20 MPa(拉应力),防渗墙主压应力和主拉应力极值分别小于混凝土的抗压和抗拉强度,防渗墙能够满足安全运行要求。

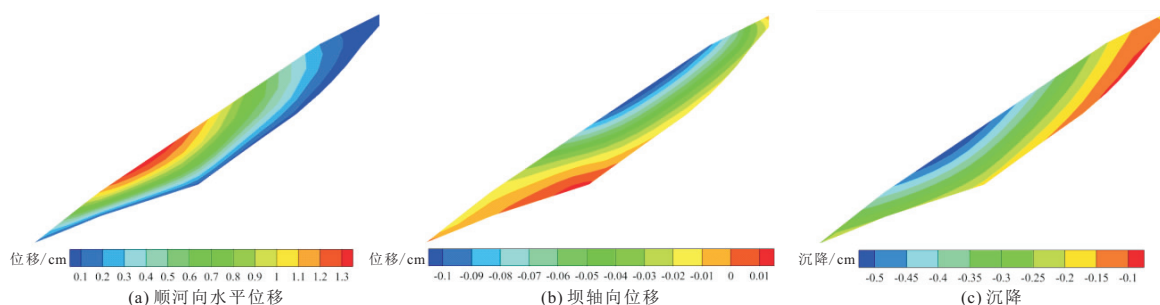


图9 正常蓄水位防渗墙变形分布云图

Fig. 9 Cloud diagram of deformation distribution of cutoff wall under normal water level

6 结论

a. 竣工期,大坝沉降极值为-22.10 cm,沉降率为0.28%。正常蓄水位,大坝沉降极值为-22.29 cm,沉降率0.28%;大、小主应力极值分别为1.38、0.54 MPa。计入流变和湿化后,运行期(8年)坝体沉降极值为-35.00 cm,沉降率0.44%。竣工和运行期,坝体应力变形分布和极值合理。

b. 正常蓄水位下,沥青混凝土心墙顺河向、坝轴向和竖向位移极值分别为11.55、-3.70/3.63、-21.46 cm。计入堆石料流变和湿化后,运行期(8年)心墙顺河向、坝轴向和竖向位移极值分别为13.65、-4.97/4.77、-33.01 cm;心墙主拉应变极值为-0.8%。蓄水期和运行期,沥青混凝土心墙不会受拉破坏,能够满足坝体防渗要求。

c. 正常蓄水位下,右岸坝基混凝土防渗墙顺河向、坝轴向和竖向位移极值分别为1.32、-0.11/0.02、-0.54 cm,防渗墙大、小主应力极值分别为6.82、-1.20 MPa。蓄水期,混凝土防渗墙不会出现受拉破坏,能够满足坝基防渗要求。

参考文献:

[1] 李志强, 张鸿儒, 侯永峰, 等. 土石坝沥青混凝土心墙三轴力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 997-1002. (LI Z Q, ZHANG H R, HOU Y F, et al. Triaxial test study on mechanical

characteristics of asphalt concrete in the core wall of earth-rock fill dam[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(5): 997-1002. (in Chinese))

[2] 岑威钧, 陈司宁, 邓同春, 等. 土石料双屈服面弹塑性模型的二次开发算法与应用[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 582-588. (CEN W J, CHEN S N, DENG T C, et al. Algorithm development and application of double-yield-surface elastoplastic constitutive model for earth-rock materials [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 582-588. (in Chinese))

[3] JIN W, YANG X, YANG F C, et al. Particle breakage of ultra-high dam rockfills under drained shearing[J]. Granular matter, 2024, 26(2): 55.

[4] 刘翀, 傅中志, 张意江, 等. 堆石料湿化变形特性大型三轴试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 138-147. (LIU C, FU Z Z, ZHANG Y J, et al. Large-scale triaxial test study on wetting deformation characteristics of rockfill materials [J]. Hydro-science and engineering, 2023(3): 138-147. (in Chinese))

[5] 岑威钧, ERICH BAUER, SENDY F TANTONO. 考虑湿化效应的堆石料 Gudehus-Bauer 亚塑性模型应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3808-3812. (CEN W J, BAUER E, TANTONO S F. Application of Gudehus-Bauer hypoplastic model of core-wall type rockfill dams considering wetting behavior [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(12): 3808-3812. (in Chinese))

(下转第192页)

级,经综合评定,该大坝属于“二类坝”。建议运行期间加强大坝安全监测与巡查,如发现渗流出逸或异常沉降,应立即停止蓄水并降低水位;对防浪墙、混凝土板及结构缝出现裂纹部位及时进行修复工作。

参考文献:

- [1] 于磊,蓝一颗,沈宏泉. 水利建设与生态融合研究[J]. 红水河, 2023, 42(4): 35-38. (YU L, LAN Y K, SHEN H Q. Water conservancy construction and ecological integration [J]. Hongshui river, 2023, 42(4): 35-38. (in Chinese))
- [2] 钮新强,吴永妍,王磊,等. 高质量建设国家水网工程的思考与建议[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 108-119. (NIU X Q, WU Y Y, WANG L, et al. Thoughts and suggestions on high-quality construction of national water network project [J]. Strategic study of CAE, 2024, 26(6): 108-119. (in Chinese))
- [3] 郑宇航,潘登,田甜,等. 大坝变形监测序列的阶段性趋势识别方法研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 97-100. (ZHENG Y H, PAN D, TIAN T, et al. Study on the phased trend recognition method of deformation monitoring sequence for dams [J]. Water resources and power, 2023, 41(12): 97-100. (in Chinese))
- [4] 汪卫,廖杰林,朱少坤. 机器学习在大坝渗流预测中的应用、挑战与展望[J]. 人民珠江, 2024, 45(4): 1-10. (WANG W, LIAO J L, ZHU S K. Application, challenges, and prospect of machine learning in dam seepage prediction [J]. Pearl river, 2024, 45(4): 1-10. (in Chinese))
- [5] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese))
- [6] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: Part II. Composite liners [J]. Geotextiles and geomembranes, 1989, 8(2): 71-111.
- [7] 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. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for rolled earth-rock fill dams: SL 274-2020 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [8] SHIRAVI S. Static parametric stress-strain analysis for asphaltic concrete core of rockfill dams [J]. Journal of applied engineering sciences, 2022, 12(1): 87-96.
- [9] 电力行业水电施工标准化技术委员会. 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356-2024 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2024. (Standardization Technical Committee for Hydropower Construction in the Electric Power Industry. Code for coarse-grained soil tests for hydropower and water conservancy engineering: DL/T 5356-2024 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2024. (in Chinese))
- [10] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 387-395. (QIAN J J, YIN Z Z. Geotechnical principle and calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996: 387-395. (in Chinese))
- [11] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用 [J]. 水利水运科学研究, 1994(4): 335-342. (SHEN Z J. Rheological model of soil and stone and its application [J]. Hydro-science and engineering, 1994(4): 335-342. (in Chinese))
- [12] 沈珠江. 土石料的本构模型和土质心墙坝蓄水变形数值模拟 [M]. 南京: 南京水利科学研究院, 1989. (SHEN Z J. Constitutive models of earth-rock materials and numerical simulation of water storage deformation in earth-core rockfill dams [M]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989. (in Chinese))
- [13] 国家能源局. 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范: NB/T 11015-2022 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for design of asphalt concrete facings and cores for embankment dams: NB/T 11015-2022 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2022. (in Chinese))

(上接第 132 页)