

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250377

基于等效法与毕肖普法的土石坝渗漏与稳定性安全评价

卢建南

(新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 为全面评估某土石坝的安全状况,通过等效法结合 Autbank 软件计算了坝体的渗漏情况,并采用毕肖普法对坝坡进行稳定分析及抗震安全评价。结果表明,该大坝最大日渗漏量总和占总库容的 0.25%,渗漏量相对较小,坝体浸润线低于设计值,坝体出逸点渗透比降均小于允许渗透比降,不会发生渗透破坏现象。大坝上、下游坝坡的抗滑稳定安全系数均大于规范规定的最小值,坝坡稳定性满足规范要求。研究成果为水库大坝的安全管理和未来维护提供了科学依据和技术支持,有力地保障了水利工程建设的高质量发展。

关键词: 大坝; 安全鉴定; 渗流计算; 边坡稳定

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0188-05

Safety Evaluation of Seepage and Stability in Earth-Rock Dams Based on the Equivalent Method and Bishop Method

LU Jian-nan

(Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower Limited
Liability Company, Urumqi 830000, China)

Abstract: This study aims to comprehensively evaluate the safety status of earth-rock dams. The seepage conditions of the earth-rock dam were calculated using the equivalent method in conjunction with Autbank software. The dam slope stability analysis and seismic safety evaluation were performed using the Bishop method. The results indicate that the maximum daily leakage of the dam accounts for only 0.25% of the total reservoir capacity, which is relatively low. Additionally, the infiltration line is below the design value, and the infiltration ratio drop at the escape point is within permissible limits, indicating no risk of seepage damage. The safety coefficients for anti-slip stability of both the upper and lower slopes exceed the minimum values specified in the regulations, confirming that the dam slope stability meets the required standards. These findings provide a scientific basis and technical support for the safety management and future maintenance of reservoir dams, ensuring the high-quality development of water conservancy projects.

Key words: dams; safety assessment; seepage calculations; slope stability

1 概况

随着全球气候变化的加剧和水资源的紧缺,水库大坝作为重要的水利设施,在现代社会中扮演着不可或缺的角色^[1]。它们不仅保障了防洪安全,引水调蓄,还对生态供水灌溉等多个方面产生了深远影响,其安全运行已成为保障国家水资源安全和经济社会发展的关键问题^[2]。光明水库工程区处于塔里木河源流灌区之一的托什干河下游平原。工程任务是向生态治理灌区引水调蓄、生

态供水灌溉,控制灌溉面积 5.33×10^4 ha。水库总库容为 980×10^4 m³,为Ⅳ等小(1)型工程,由进水闸、挡水大坝、放水涵洞、入库渠等组成。大坝为土工膜斜墙坝,坝顶长度为 3 242 m,最大坝高 15.3 m。坝体采用土工膜防渗,库盘防渗采用土工膜全库盘防渗。水库所在区域的地震动峰值加速度为 0.2g,地震基本烈度为Ⅷ度,本工程按 8 度设防。光明水库大坝作为重要的水利建筑物,其安全性直接影响周围区域的公共安全与经济发展。然而,随着大坝长期运行,其变形、渗流、裂缝等问题逐渐显现,传统的监测手段已难以满足需

收稿日期: 2025-03-01, 修回日期: 2025-04-16, 接受日期: 2025-04-23

基金项目: 新疆水利发展投资(集团)有限公司科研基金项目(SLSJY-研 2423)

作者简介: 卢建南(1996-),男,硕士、工程师,研究方向为水利水电工程勘察设计,E-mail:1413485744@qq.com

求^[3]。因此,对大坝的安全鉴定评价分析显得尤为重要。研究表明,通过高精度传感器监测变形、渗流和裂缝等关键指标,并结合软件分析,可有效预测大坝安全性^[4]。然而,基于传统 Autobank 软件在分析平原水库渗流时,缺乏对复合土工膜防渗效果的全面评估与分析能力。鉴此,本文将深入研究光明水库大坝的安全评价,利用等效法结合 Autobank 软件计算坝体及库盘防渗土工膜的渗漏量,并分析因施工缺陷导致的渗漏量,对大坝的渗流进行安全评价,依据毕肖普法对坝坡进行稳定性和抗震安全评价。研究结果不仅为水库大坝安全评估提供新方法与技术支持,也有助于提升大坝安全性,保障下游用水安全,促进水库的可持续发展。

2 大坝现场检查情况

2.1 坝顶

坝顶为混凝土路面,路面相对平整,但个别部位有横向裂缝。路面与防浪墙未见裂缝、变形、位移,坝顶及弃渣平台无不均匀沉降迹象。大坝与放水涵洞闸井边墙接触部位未发现裂缝。初步分析表明,坝顶路面裂缝可能受坝体沉降、地震和车辆荷载影响。其他坝顶段基本完好,仅有个别表层裂缝,宽度 $\leq 0.2\text{ mm}$,延伸 $2\sim 4\text{ m}$,现场检查情况见图 1(a)。

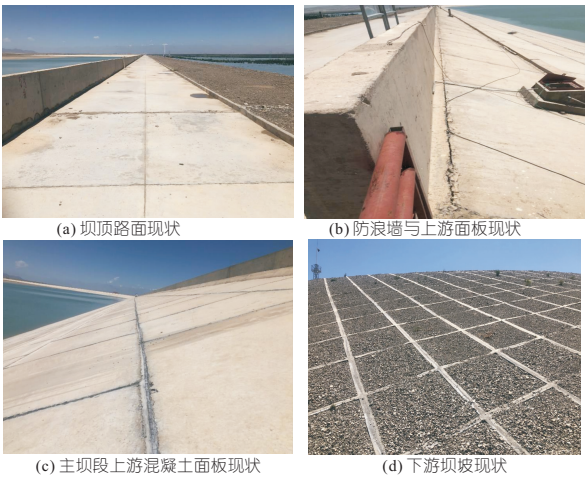


图 1 现场检查情况

Fig. 1 On-site inspection status

上游侧设“L”型钢筋混凝土防浪墙,高出坝顶 1.2 m ,墙顶未设护栏,调查发现防浪墙较为笔直,未见沉降,但部分位置产生细小拉裂缝,并未形成大面积的贯穿缝,宽度 $1\sim 5\text{ mm}$ 不等,初步分析为坝体碾压差异和地震导致的裂缝,现场检查情况见图 1(b)。

2.2 上游坝坡

上游坝坡为 $1:2.5$,上游护坡板为现浇混凝土板,检查发现部分混凝土面板有裂缝,最高坝段上游坡面与防浪墙之间有裂缝,但未见异常变形,混凝土面板无明显破损和剥落现象,部分面板间缝填缝材料出现开裂、松动。初步分析可能是由坝体不均匀沉降和地震造成。然而,坝体总体外观质量良好,未发现较大异常变形。现场检查情况见图 1(c)。

2.3 下游坝坡

下游坝坡为 $1:2.0$,设有宽为 8 m 的弃渣平台,平台后设置了下游网格梁护坡。护坡坡面较为平整,坡脚处未设排水沟,未见不均匀沉陷变形、散浸或潮湿漏水等现象发生,坡脚干燥无积水。盖重平台与下游坝坡较为平整、未见塌陷,现场检查情况见图 1(d)。

3 大坝结构安全评价与分析

3.1 大坝工程质量评价

为复核大坝基础处理的可靠性、防渗效果及结构的完整性、耐久性和安全性。现对大坝工程质量进行以下四方面评价:①坝基质量评价。坝基岩性为含细粒土砾石,母岩岩性主要为砂岩、凝灰岩,满足土石坝填筑要求。坝后未见渗漏现象,坝基及防渗质量基本满足规范要求。②坝体填筑质量评价。质量监督站的统计表显示坝体相对密度达到设计要求。尽管防浪墙强度未达 C25 标准,但不影响工程安全。现场检查显示坝体整体完好,未见不均匀沉降,经历 7.1 级地震后无裂缝、沉陷,坝后无异常出水,坝体状况满足运行要求。③上游护坡总体完好,部分板间填缝材料出现开裂、松动和脱落,护坡板有 389 m 发生裂缝和位移,最大裂缝宽度约 5 cm 。④水库未达到正常蓄水位,坝体通过土工膜防渗。监测资料表明地震对土工膜有影响,但由于基础覆盖层深厚且地下水位低,库区渗漏未从坝坡脚出露。

3.2 坝顶高程复核

库区多年平均最大风速 10.1 m/s ,多为东北风,其次为北风,吹程为 $1\,800\text{ m}$ 。坝顶高程由水库静水位与坝顶超高之和决定,分别按以下运用情况计算,计算结果见表 1。由表 1 可知,防浪墙顶计算高程为 $1\,259.645\text{ m}$,蓄水池大坝现状坝顶高程为 $1\,258.80\text{ m}$,防浪墙顶高程为 $1\,260.00\text{ m}$ 。从复核计算结果可知,现状坝顶高程较复核后的坝顶高程高 0.355 m ,坝顶高程满足规范要求。

表 1 坝顶超高计算结果

Tab. 1 Calculation results of dam crest overheight

指标	单位	不同工况取值		指标	单位	不同工况取值	
		工况 1	工况 2			工况 1	工况 2
水位	m	1 257.50	1 257.50	水位	m	1 257.50	1 257.50
平均水深 H_m	m	8.40	8.40	壅高 e	m	0.01	0.00
风速 W	m/s	15.15	10.10	糙率系数 K_Δ		0.90	0.90
吹程 D	m	1 800	1 800	爬高 R_m	m	1.16	0.69
边坡 m		2.50	2.50	超高 A	m	0.5	0.3
波高 h_m	m	0.44	0.24	地震超高	m	0	1.15
周期 T_m	s	2.94	2.17	坝超高 Y	m	1.669	2.145
波长 L_m	m	7.92	5.28	坝顶高程	m	1 259.169	1 259.645

3.3 抗震设防烈度复核

原设计采用的地震设防烈度为Ⅷ度,根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)^[5]划分,工程区 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度为 0.20g,地震烈度为Ⅷ度,采用基本烈度作为设防烈度满足规范要求。

3.4 渗流安全评价

3.4.1 计算断面

坝型为土工膜斜墙坝,由于大坝基础的岩性单一,因此在做渗流计算分析时,选取 1 个最大断面,作为划分计算单元,采用防渗体等效置换。坝体横断面有限元网格见图 2。

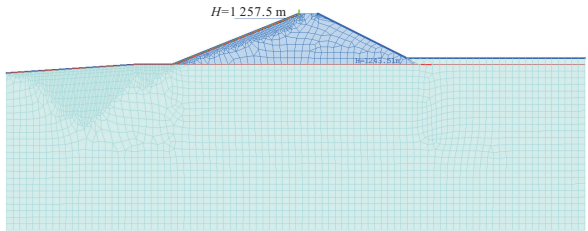


图 2 坝体横断面有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh of the dam cross section

3.4.2 计算参数

采用 Autobank 渗流计算软件,对坝体标准横断面进行网格划分开展平面稳定渗流计算。在上游正常蓄水位与下游相应最低水位工况下,计算出坝体渗流量和出逸点的渗透比降。渗流计算时,将坝体和库盘 0.5 mm 厚的防渗土工膜等效为厚度 0.2 m,渗透系数为 4.00×10^{-9} cm/s 的防渗体。根据地质勘察试验成果,渗流计算参数见表 2。

表 2 渗流计算参数表

Tab. 2 Calculated parameters for seepage

项目	等效防渗体	坝壳料	坝基
	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
渗透系数	4.00×10^{-9}	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}

3.4.3 渗流安全复核结果

通过计算断面的单宽渗流量为 $1.646\ 5 \times 10^{-7}$ $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。根据土工合成材料的相关计算公式,对坝坡和库盘土工膜本身和施工缺陷的单

宽渗流量进行计算。渗流量计算式为:

$$Q_g = K_g A \Delta H / T_g \quad (1)$$

式中, Q_g 为土工膜的渗流量, m^3/s ; K_g 为土工膜渗透系数, m/s ; A 为土工膜渗透面积, m^2 ; ΔH 为土工膜上、下的水头差, m ; T_g 为土工膜厚度, m 。

计算结果见表 3(Q_d 为土工膜总的单宽渗流量, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$)。

表 3 土工膜本身渗流量计算结果

Tab. 3 Calculation results of geomembrane's own seepage volume

类别	Q_d	Q_g	A $/\text{m}^2$	K_g $/(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	ΔH $/\text{m}$	T_g $/\text{m}$
坝坡处防渗土工膜本身单宽渗流量计算	0.002 7	3.17×10^{-8}	25	1.00×10^{-13}	6.3	0.000 5
库盘处防渗土工膜本身单宽渗流量计算	0.009 9	1.15×10^{-7}	46	1.00×10^{-13}	12.5	0.000 5
坝体防渗土工膜本身渗流量计算	4.46	0.000 052	41 337	1.00×10^{-13}	6.3	0.000 5
库盘土工膜本身渗流量计算	291.6	0.003 375	1 350 000	1.00×10^{-13}	12.5	0.000 5

注:表中 Q_d 、 Q_g 单位分别为 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$ 、 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

计算断面土工膜施工缺陷引起的渗流量计算式为:

$$Q' = \mu A' \sqrt{2gH_w} \quad (2)$$

式中, Q' 为土工膜施工缺陷引起的渗流量, m^3/s ; μ 为流量系数,取 0.65; A' 为土工膜缺陷孔的面积总和; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_w 为土工膜上下水头差, m 。

计算结果见表 4。

施工缺陷出现的偶然性很大,约每 4 000 m^2 就会有一个新的缺陷出现^[6]。由于接缝不实造成的缺陷,其等效孔径通常在 1~3 mm 之间,而在特定的连接位置,孔径可以达到 5 mm。由其他偶发因素引起的土工膜缺陷,其接缝缺陷导致的小孔等效直径为 2 mm,大孔则为 10 mm,孔的大小与施工条件密切相关。

坝体及库盘防渗土工膜采用公式法计算本身单宽渗流量之和为 1.46×10^{-7} $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$,小于 Autobank 计算值 $1.646\ 5 \times 10^{-7}$ $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$,故计算断面总渗流量宜采用 Autobank 计算值与土工膜施工缺陷渗流量之和,即 1.29×10^{-5} $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。依据此渗流量调整土工膜等效黏土防渗体的渗透系数为 3.25×10^{-7} cm/s,使坝体渗流量和该渗流量基本相同,再计算坝体内浸润线及下游坡脚渗流出逸比降。计算结果见图 3、表 5。由表 5 可知,坝后弃渣平台坡脚出逸点渗透比降为 0.017,坝基细粒土允许的水力比降为 0.11,故渗透变形满足规范要求。

表 4 土工膜施工缺陷渗漏量计算结果

Tab. 4 Calculation results of seepage volume from geomembrane construction defects

类别	$Q_d/[\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}]$		$Q'/[\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$		$g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$		H_w/m		A'/m^2		μ	
	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔	等效孔
	径 10 mm	径 2 mm	径 10 mm	径 2 mm	径 10 mm	径 2 mm	径 10 mm	径 2 mm	径 10 mm	径 2 mm	径 10 mm	径 2 mm
坝坡处土工膜施工	0.310	0.032	59×10^{-6}	1.44×10^{-7}	9.81	6.3	6.3	4.99×10^{-7}	1.99×10^{-8}	0.65	0.65	
缺陷单宽渗漏量计算												
库盘处土工膜施工	0.793	0.032	9.17×10^{-6}	3.67×10^{-7}	9.81	9.81	12.5	12.5	9.01×10^{-6}	3.60×10^{-8}	0.65	0.65
缺陷单宽渗漏量计算												
坝坡处土工膜施工	504.8	20.2	0.005 8	0.000 2	9.81	9.81	6.3	6.3	8.12×10^{-4}	3.25×10^{-5}	0.65	0.65
缺陷渗漏量计算												
库盘处土工膜施工	23 312.8	932.5	0.269 8	0.010 8	9.81	9.81	12.5	12.5	2.65×10^{-2}	1.06×10^{-3}	0.65	0.65
缺陷渗漏量计算												

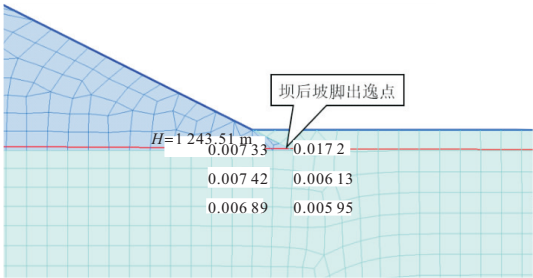


图 3 坝后弃渣平台坡脚出逸点渗透比降

Fig. 3 Infiltration ratio drop at the escape point at the foot of the spoil disposal platform behind the dam

表 5 坝体渗流计算结果

Tab. 5 Results of seepage calculations for the dam body			
Autobank 计算渗流量	渗流出逸	坝轴线处浸润线	下游坡脚浸润
$/(\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1})$	点渗透比降	距坝基高度/m	线高度/m
1.29×10^{-5}	0.017	0.45	0.21

坝体防渗土工膜、库盘土工膜本身渗漏量计算结果见表 3。坝坡、库盘土工膜施工缺陷引起的渗漏量计算结果见表 4。经计算,坝体和库盘防渗土工膜的总渗漏量为 $296.06 \text{ m}^3/\text{d}$ 。考虑到施工缺陷后水库的日渗漏量总和最大为 $24\,113.7 \text{ m}^3$,最小为 $1\,248.8 \text{ m}^3$,占总库容的 $0.01\% \sim 0.25\%$ 。

3.5 坝坡稳定分析及抗震安全评价

3.5.1 计算工况

通过以下两种条件进行坝坡稳定计算,非常运用条件Ⅰ即水库水位非常降落,降落至死水位以下;非正常快速降落、大流量快速泄空时的上、下游坝坡。非常运用条件Ⅱ即正常蓄水位稳定渗流期加Ⅷ度地震的上、下游坝坡。

3.5.2 计算参数

采用坝体最大断面和正常蓄水位进行稳定计算,地震情况采用拟静力法,采用原设计地震设防烈度和对应的地震动峰值加速度进行复核,坝坡稳定分析参数见表 6。

3.5.3 计算结果

根据《碾压式土石坝设计规范》SL274-2020^[7],

表 6 坝坡稳定计算参数

Tab. 6 Parameters for dam slope stability calculations				
筑坝材料	$\Phi/(\circ)$	C/kPa	天然重度	饱和重度
			$/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
坝体砂砾料	34	0	19.6	22.54
坝基砂砾料	34	0	19.6	20.00

水库大坝为 4 级建筑物,坝坡稳定计算采用简化毕肖普法。计算结果如表 7。由表 7 可知,水库上、下游坝坡在正常蓄水位运行期和水位骤降工况下安全系数的最小值均大于规范允许值。在考虑正常蓄水位和地震作用的情况下,水库上、下游坝坡安全系数的最小值均大于规范允许值。综上所述,坝坡在不同工况下均具有良好的稳定性,为水库在后续的安全使用提供了保障。

表 7 坝坡稳定计算结果

Tab. 7 Dam slope stability calculation results			
计算工况	不同部位稳定安全系数		
	上游坝坡	下游坝坡	规范允许值
正常蓄水位	1.976	1.438	1.25
(1 257.50 m) 运行期			
水位骤降	1.719	1.405	1.15
正常蓄水位	1.354	1.225	1.10
运行期+Ⅷ度地震			

4 结论

a. 通过等效法和 Autobank 软件计算了光明水库大坝目前的渗漏情况,最大日渗漏量总和占总库容的 0.25% ,渗流量较小,大坝渗流压力与渗流量变化规律基本正常,坝体浸润线低于设计值,未出现渗透破坏现象。

b. 经计算复核,设计坝顶高程较复核后的坝顶高程高 0.355 m ,大坝设计坝顶高程满足规范要求。上、下游坝坡抗滑稳定安全系数均大于规范规定的最小值,坝坡稳定性符合规范要求。坝坡抗震设防烈度与原设计一致,抗震安全性良好。

c. 根据《水库大坝安全评价导则》,光明水库大坝的渗流稳定和结构安全评价等级定为“B”

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] 张丙印,李全明,熊焰,等. 三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝应力变形分析[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 18-21. (ZHANG B Y, LI Q M, XIONG Y, et al. Numerical study on Maopingxi Rockfill Dam with asphalt concrete core in Three Gorges Project [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2004, 21(2): 18-21. (in Chinese))
- [9] 江时俊,杨具瑞,汤敏,等. 沥青混凝土心墙与过渡层变形协调性及防渗的影响研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 98-107. (JIANG S J, YANG J R, TANG M, et al. Deformation coordination and seepage prevention of asphalt concrete core-wall and transition layers [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2016, 35(4): 98-107. (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)