

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230451

基于影像识别和 AutoBank 的某大坝稳定性分析

姚纪华¹, 伍佑伦¹, 宋子龙¹, 刘亚玲², 梁经纬¹, 宋文杰¹, 杨媛丽¹

(1. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南长沙 410007; 2. 湖南九一工程设计有限公司, 湖南长沙 410018)

摘要: 某水库坝后汇总渗流量达 16.7 L/s, 出渗点为坝脚排水体和低涵, 但坝内防渗体为弱—微透水性且胶结密实, 而影像识别结果揭露低涵管身外坝体已形成贯穿性渗漏通道。对此, 选取坝体中心线及涵管位置断面, 基于坝体岩土物理参数和坝后渗流量等实测资料, 利用 AutoBank 建模对大坝稳定性进行计算并修正参数, 同时模拟加固后大坝稳定性。结果表明, 低涵管内水均来自管壁外水内渗, 且渗漏点普遍集中在桩号 K0+058~0+131.5, 以淋雨状或射流状为主, 其他段为点滴状渗水或无渗水, 涵管外 2.9 m 内坝体已形成贯穿性渗漏通道, 为排水体及涵管渗漏的主因; 大坝中心断面在 176.50 m 水位、正常蓄水位、校核洪水位工况下均处于渗透、抗滑稳定状态; 大坝涵管位置断面在各工况下均发生渗透破坏, 计算总渗流量与现场实测值较相符; 除水位骤降工况下上游坝坡抗滑失稳外, 其余工况坝坡均稳定; 加固后大坝各工况下均处于渗透、抗滑稳定状态。

关键词: 影像识别; AutoBank; 外水内渗; 渗漏通道; 稳定性

中图分类号: TV223.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0091-05

1 工程概况

某水库位于萍水河一级支流长平河, 大坝为高压旋喷灌浆防渗体心墙坝, 最大坝高 36.9 m, 正常蓄水位 178.30 m, 总库容 $675.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。涵管位于大坝左坝脚, 为 $\varnothing 0.3 \text{ m}$ 预制砼管, 每节管长 1 m, 进、出口底板高程分别为 147.30、144.80 m, 总长 190 m。2021 年 3 月入汛后, 随着库水位上升, 坝脚排水体及低涵见涌水状渗漏, 稍浑浊且日趋增大, 至 4 月 19 日(库水位 176.50 m), 坝脚河床测定汇总渗流量约为 16.7 L/s(量水堰法), 其中低涵出口渗流量约为 10.5 L/s(进口闸门已关闭), 坝脚排水体从左岸至右岸均有集中渗漏, 且以临近低涵的棱体中渗水量最大。为查明水库渗漏原因, 2021 年 4 月 21 日对大坝防渗体进行勘察, 发现岩芯胶结密实且呈弱—微透水性。经分析, 原因可能为: ①涵管自身严重漏水, 涵管内部水外渗至坝体。②涵管外坝体存在渗漏通道, 部分外水内渗至涵管。为准确获得低涵管内渗漏隐患信息, 本文基于坝体岩

土参数、坝后渗流量和涵管内影像识别实测结果, 选取坝体中心线及涵管位置断面, 利用 AutoBank 建模分析大坝加固前后稳定性, 以期同类大坝渗漏隐患识别、稳定性分析和防渗处置提供实践经验。

2 研究方法

2.1 管道机器人基本原理及试验方案

采用上海岩联工程技术有限公司生产的 YL-CCTV(c)型管道机器人拍摄涵管内影像, 识别低涵管内渗漏隐患。

从低涵出口向进口逆行, 行驶速度控制为 0.1~0.2 m/s, 设出口端桩号为 K0+000, 进口端桩号为 K0+190, 试验时间 2021 年 4 月 21 日。

2.2 渗流分析理论

对于符合 Darcy 定律的二维均质各向异性饱和—非饱和土体稳定渗流, 当土体已完全固结时, 其符合 Laplace 方程^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2023-03-24, **修回日期:** 2023-05-13

基金项目: 长沙市自然科学基金项目(kq2202358); 湖南省重大水利科技项目(XSKJ2021000-09); 湖南省水利科技项目(XSKJ2022068-17); 湖南省水利水电科学研究院优秀人才培养支撑项目(2021-11, 2021-01)

作者简介: 姚纪华(1986-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为水工环地质, E-mail: yjh860716@163.com

式中, x 、 y 分别为平面坐标; k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 轴方向渗透系数; φ 为水头势函数。

采用基于三角单元有限元法的 AutoBank7.7 软件进行大坝稳定性分析, 建立坝体中心线及涵管位置断面有限元模型, 计算大坝不同断面、不同水位工况下的稳定性^[2-3]。

2.3 抗滑稳定理论

坝坡抗滑稳定性采用简化毕肖普法进行计算, 某特定水位下和库水位陡降时大坝抗滑稳定分别应采用总应力法和有效应力法^[4]。大坝抗滑稳定总应力法和有效应力法安全系数 K_1 、 K_2 计算公式分别为:

$$K_1 = \frac{\sum \left\{ [c_{cu} b_i + (W_i \sec \theta_i - U_i) \tan \varphi_{cu}] \frac{K_1}{K_1 + \tan \varphi_{cu} \tan \theta_i} \right\}}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{\sum \left\{ [c' b_i + (W_i \sec \theta_i - U_i) \tan \varphi'] \frac{K_2}{K_2 + \tan \varphi' \tan \theta_i} \right\}}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (3)$$

式中, c_{cu} 、 φ_{cu} 分别为计算条块滑面总强度指标; b_i 为计算条块滑面的宽度; θ_i 为计算条块重力线与通过此条块底面中点的半径间夹角; U_i 为计算条块单位宽度总水压力; W_i 为计算条块自重; c 、 φ' 分别为计算条块滑面有效强度指标。

受力分析见图 1。

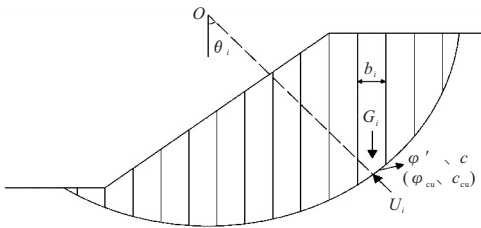


图 1 大坝抗滑稳定性计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of dam anti slip stability

3 结果与分析

3.1 管道机器人影像识别结果与分析

涵管内主要外水内渗点影像和位置及与渗流量相关性见图 2~4。由图 2~4 可知: ①涵管渗漏均来源于管身外水内渗, 且渗流点普遍集中在 K0+058.0~131.5, 其中 K0+058.6、K0+060.5、K0+073.4、K0+085.1 为淋雨状, K0+096.8、K0+100.2、K0+105.9、K0+109.7、K0+121.4、

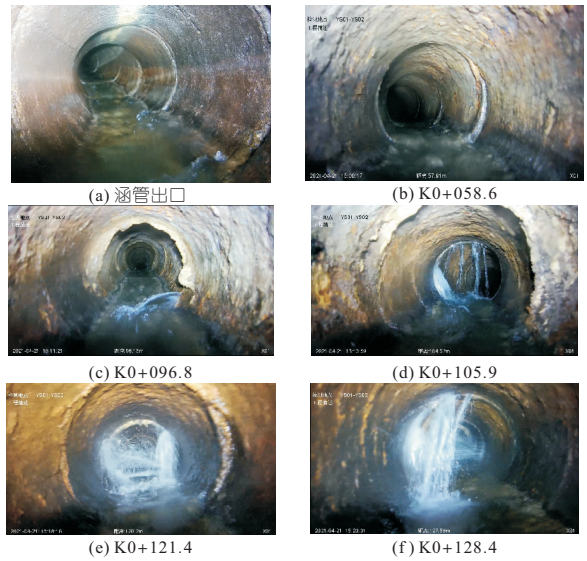


图 2 低涵外水内渗典型影像图

Fig. 2 Typical image of low culvert external water infiltration

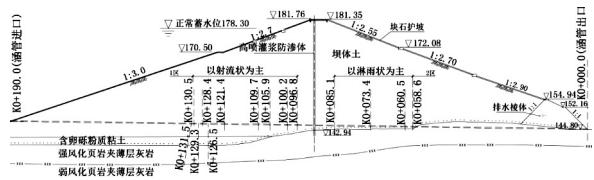


图 3 低涵主要外水内渗点位置图(单位: m)

Fig. 3 Location map of main external and internal water infiltration points of low culvert

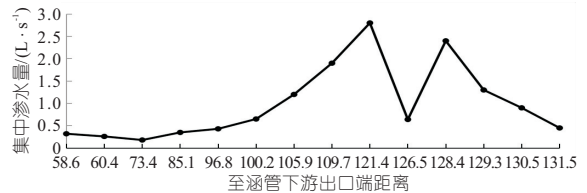


图 4 低涵外水内渗点与渗漏量关系

Fig. 4 Relationship between water infiltration points and leakage volume outside low culverts

K0+126.5、K0+128.4、K0+129.3、K0+130.5、K0+131.5 为射流状; K0+000~024.5、K0+140~190 段无渗水; K0+024.5~058.0、K0+131.5~140 m 段为滴、渗水。②渗流量 0.1~3.0 L/s 外水内渗点有 14 处, 小于 0.1 L/s 有 21 处。且 K0+105.0~131.5 渗量大、渗点多。③ K0+024.5~150.0 段管身内侧冲刷、老化、剥蚀严重, 凹凸不平, 管间均已错位, 并多伴悬挂式析出物。

分析渗漏原因为库水被大坝防渗体阻隔, 只能通过涵管外坝体渗漏通道向坝下运移, 渗漏水多内渗至低涵内, 剩余部分通过防渗体后强透水性坝壳漫流至坝脚排水体。且防渗体上游侧渗透压力大, 涵管 K0+096.8~131.5 段外水内渗表现为射流状; 防渗体下游渗水压力逐渐变小, K0+

058.6~085.1 段为先淋雨状后滴水状;至 K0+058 管身基础为弱透水性基岩,水无法渗入至涵管内,而向坝脚排水体排泄。坝下渗漏表现为坝脚排水体和涵管均有渗漏,且排水体临近涵管渗漏量较大而远离涵管渗漏量小。

为验证推论,2021 年 4 月 25 日,于涵管管身走向轴线和坝轴线交点位置进行干钻孔。深度 0.0~33.4 m 为灰白色,弱—微透水性、胶结密实防渗体;33.4~36.3 m 为大粒径片、碎石,且涵管出口水变浑浊;36.3~36.4 m 为砼块,36.4 m 后掉钻约 0.3 m,管身已被钻穿。可见,涵管顶 2.9 m 范围内坝体土中细颗粒已完全被带走,只残留片、碎石骨架。可能是涵管外坝体防渗体未与涵管形成整体封闭,给工程留下重大安全隐患。

3.2 大坝渗流稳定结果与分析

大坝中心线及涵管位置断面有限元模型见图 5。

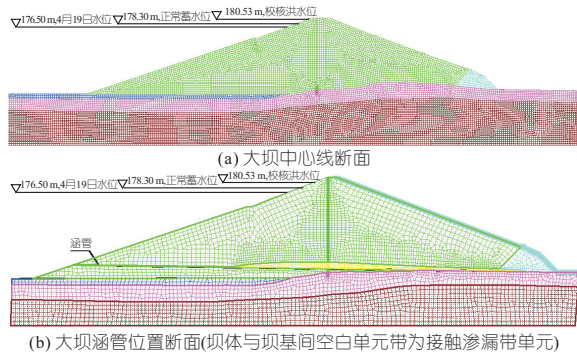


图 5 大坝中心线及涵管断面有限元模型及网格划分

Fig. 5 Finite element model and grid division of dam centerline and culvert pipe section

涵管与坝体接触带边界复杂,建模时对涵管进行分段简化等效处理:①K0+140~0+190 简化为不透水体,渗透系数取 1×10^{-8} cm/s。②K0+

058.0~0+131.5 段射流、淋雨状外水内渗点(K0+058.6、K0+060.5、K0+073.4、K0+085.1、K0+096.8、K0+100.2、K0+105.9、K0+109.7、K0+126.5、K0+128.4、K0+129.3、K0+130.5、K0+131.5)均分割成独立单元,尺寸为 0.3 m×0.1 m,其渗透系数近似取各点实测内渗总流量与渗水圆环面积之比,且总渗漏量为 10.5 L/s(水位 176.50 m),正常蓄水位和校核洪水位时渗透系数等比增大。外水内渗点均已渗透破坏且中空,外水极易内渗,可近似取其允许渗透坡降为 0.01,重度近似取 0。③K0+00~0+058.0、K0+058.0~0+131.5、K0+131.5~0+140.0 段涵管(不含外水内渗点)也划分独立单元,内中空,最大过水流量为涵管设计流量 0.06 m³/s,其渗透系数可近似取涵管最大设计流速 0.87 m/s,允许渗透坡降可近似取混凝土,为 1 800^[5]。涵管单元为内空圆柱体,重度近似取加权平均值。

坝体(壳)、防渗体、坝基冲积层和岩体、涵管外渗漏通道的重度、抗剪强度指标均来源室内试验;渗透系数取室内试验和现场原位注水(压水)试验中大值平均值,其中涵管外渗漏通道渗透系数还考虑坝后总渗漏量;坝体(壳)、坝基冲积层允许渗透坡降取室内试验结果,其他单元允许渗透坡降参考《水闸设计规范》(SL 265-2016)^[6]和工程经验所得。在此基础上,模拟计算 176.50 m 水位下大坝中心线及涵管位置断面稳定性和单宽渗漏量,并调整修正计算参数(表 1)使最终计算结果与大坝现状稳定性及坝后实测总渗漏量相符。大坝中心线和涵管断面渗流计算结果见表 2,176.50 m 水位、正常蓄水位和校核洪水位工况下渗流结果见图 6。

表 1 大坝岩土修正物理力学参数统计

Tab. 1 Statistics of physical and mechanical parametric statistics of dam geotechnical correction

岩土类型	重度 (kN·m ⁻³)	浮重度 (kN·m ⁻³)	有效应力 c/kPa	有效应力 φ/(°)	总应力 c/kPa	总应力 φ/(°)	水平渗透系数 K _x /(cm·s ⁻¹)	垂直渗透系数 K _y /(cm·s ⁻¹)	允许渗 透坡降
坝体(壳)	18.3	8.5	17.7	25.4	18.2	24.3	2.0×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	0.35
防渗体	20.4	10.6	24.6	18.8	25.3	17.6	9.6×10 ⁻⁶	7.2×10 ⁻⁶	40.00
坝基冲积土	19.4	9.5	19.8	23.3	20.7	22.5	6.0×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻⁴	0.40
排水体	23.6	13.6	0	32.0	0	35.0	2.0×10 ⁻²	2.0×10 ⁻²	0.60
坝基(强风化)	23.2	13.2	200.0	40.0	200.0	40.0	8.0×10 ⁻⁵	6.0×10 ⁻⁵	0.80
坝基(弱风化)	25.8	15.8	500.0	50.0	500.0	50.0	1.5×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁵	5.00
涵管外接触渗漏带	12.6	3.2	0	10.0	0	10.0	2.0	2.0	0.20

表 2 大坝中心线断面、涵管断面渗流计算结果

Tab. 2 Calculation results of dam centerline and dam culvert pipe cross section seepage

断面 桩号	计算工况	大坝中心线断面			大坝涵管断面			
		最大渗流坡降值 J _{max}		单宽渗漏量总 计/(L·s ⁻¹)	最大渗流坡降值 J _{max}			单宽渗漏量总 计/(L·s ⁻¹)
		高压旋喷 防渗体	排水棱体 (出逸点)		高压旋喷 防渗体	渗漏通道与 坝体接触面	排水棱体 (出逸点)	
大坝中心 线断面	高程 176.5 m	0.701	0.234	0.003 96	6.82	1.90	0.878	2.78
	正常蓄水位	0.777	0.259	0.004 69	11.20	2.02	0.919	3.11
	校核洪水位	0.846	0.288	0.005 61	14.60	2.16	1.030	3.34
	允许值[J]	40.000	0.600		40.00	0.35	0.600	

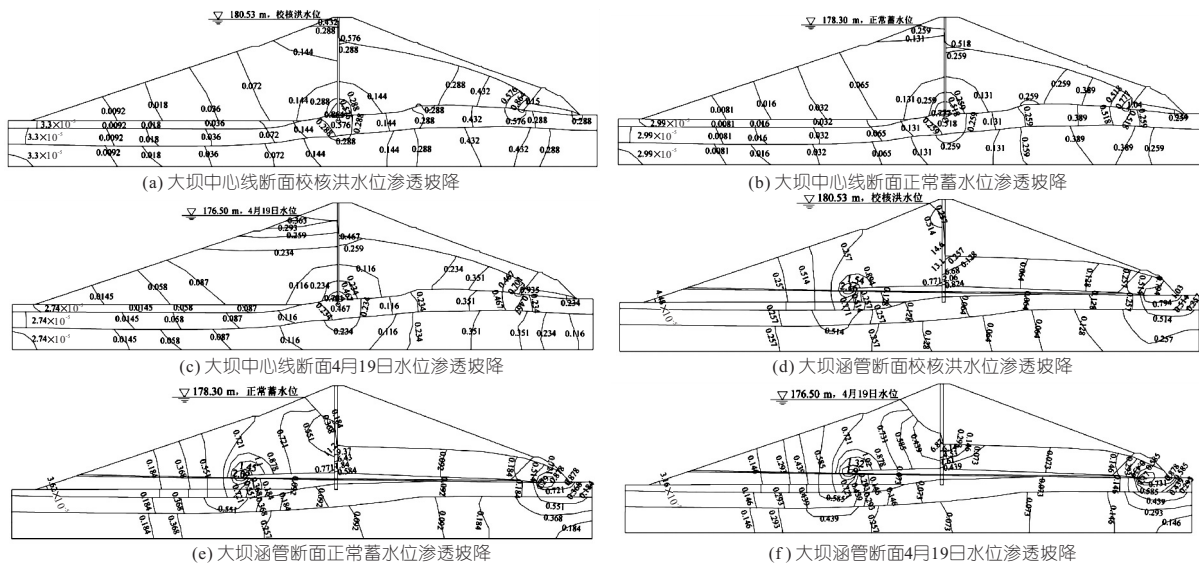


图 6 176.50 m 水位、正常蓄水位和校核洪水水位工况下渗流坡降

Fig. 6 Seepage slope under 176.50 m water level, normal storage level, and check flood level conditions

由表 2、图 6 可知：①大坝中心断面在 176.50 m 水位、正常蓄水位、校核洪水水位工况下防渗体最大渗透坡降值分别为 0.701、0.777、0.846，排水体最大渗透坡降值分别为 0.234、0.259、0.288，均小于允许值，处于渗流稳定。其单宽渗漏量分别为 0.003 96、0.004 69、0.005 61 L/s，即总渗漏量分别为 0.257、0.304、0.364 L/s，这与现场情况较符。②大坝涵管位置断面在 176.50 m 水位、正常蓄水位、校核洪水水位工况下防渗体最大渗透坡降值分别为 6.82、11.2、14.6，小于允许值 40.0。渗漏通道与坝体接触面最大渗流坡降值分别为 1.90、2.02、2.16，排水体最大渗流坡降值分别为 0.878、0.919、1.030，均大于允许值，已发生渗透破坏。其单宽渗漏量分别为 2.78、3.11、3.34 L/s，因管顶 2.9 m 坝体已成渗漏通道，渗漏通道总宽约 5.8 m，则总渗漏量分别为 16.13、18.04、19.37 L/s，与坝脚实测汇总总渗漏量 16.7 L/s 较接近。表明修正后参数与实际较相符。

3.3 大坝抗滑稳定结果与分析

大坝中心线及涵管位置断面校核洪水水位、正

常蓄水位、176.50 m 水位上下游坝坡抗滑稳定结果见图 7、表 3。

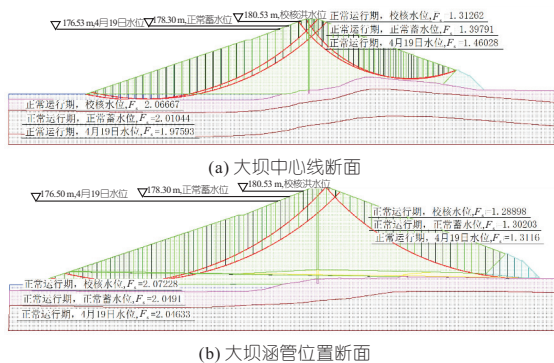


图 7 大坝中心线和涵管位置断面各工况下上下游坝坡抗滑稳定结果

Fig. 7 Stability of upstream and downstream dam slopes against sliding under various working conditions of dam centerline and culvert pipe position section

由表 3、图 7 可知：①大坝中心断面在校核洪水水位、正常蓄水位、176.50 m 水位工况下上游坝坡抗滑稳定系数分别为 2.067、2.010、1.976，下游坝坡分别为 1.313、1.398、1.460，均稳定。水

表 3 大坝中心线断面、涵管断面各工况上下游坝坡抗滑稳定结果

Tab. 3 Results of anti sliding stability of upstream and downstream dam slopes under various working conditions of dam centerline and culvert section

计算断面	水位	大坝中心线断面		大坝涵管断面		规范允许值	备注
		上游坝坡最 小安全系数	下游坝坡最 小安全系数	上游坝坡最 小安全系数	下游坝坡最 小安全系数		
大坝中心线断面	校核洪水水位(180.53 m)	2.067	1.313	2.072	1.289	1.25	有效应力
	正常蓄水位(178.30 m)	2.010	1.398	2.049	1.302	1.25	有效应力
	4月19日 176.50 m 水位	1.976	1.460	2.026	1.312	1.15	有效应力
	校核水位 180.53 m 骤降 至正常蓄水位 178.30 m	1.986	1.326	2.035	1.296	1.15	有效应力
	正常蓄水位 178.30 m 骤 降至死水位 147.30 m	1.237	1.404	1.081	1.326	1.15	有效应力
		1.174	1.247	0.891	1.261	1.15	总应力

位骤降工况下上下游坝坡也处于稳定状态。②大坝涵管位置断面在校核洪水位、正常蓄水位、176.50 m 水位工况下上游抗滑坝坡稳定性系数分别为 2.072、2.049、2.026,下游坝坡分别为 1.289、1.302、1.312,均稳定。水位骤降工况下下游坝坡稳定,而上游坝坡失稳。大坝加固迫在眉睫。

4 大坝加固方案及稳定性分析

4.1 加固方案及效果

鉴于坝体渗漏现状,采取以下应急处置:①库水位降至死水位;②采取先素砼后超细水泥浆全面封堵低涵;③右坝肩山体新开输水隧洞。

实施后,2021 年 6 月下旬,水库再次蓄水至正常蓄水位,低涵及坝脚排水体均未见明显渗漏。

可见,基于地质钻探和涵管内影像诊断出的大坝渗漏隐患位置较准确、可信。

4.2 加固后稳定性分析

除原渗漏通道和外水内渗点参数改为灌浆体,其他不变。可得:①加固后大坝涵管位置断面在 176.50 m 水位、正常蓄水位、校核洪水位工况下防渗体、排水体及灌浆体等最大渗透坡降值均小于允许值,处于渗流稳定。且单宽渗流量分别为 0.001 23、0.001 92、0.002 88 L/s,与加固后坝脚无渗漏较相符。②加固后大坝多种工况下上下游坝坡均处于抗滑稳定状态。

5 结论

a. 本文基于影像识别和地勘结果,揭露出大坝渗漏隐患位置,查明了坝脚排水体和低涵渗漏原因,并分析了大坝典型断面稳定性,据此对低涵和坝体进行除险,效果较显著。

b. 低涵管内水均为外水内渗, K0+058.0~

0+131.5 段渗漏多为淋雨状或射流状, K0+024.5~058、K0+131.5~0+180.0 段以滴、渗水为主,其余段无明显渗水。

c. 大坝中心断面在 176.50 m 水位、正常蓄水位、校核洪水位工况下处于渗流稳定状态,且各工况下上下游坝坡均处于抗滑稳定状态;大坝涵管位置断面在各工况下均已发生渗透破坏,计算总渗流量与现场实测值较符;仅水位骤降工况下上游坝坡失稳,其他工况下均处于抗滑稳定状态。

d. 加固后大坝涵管位置断面各种工况下均处于渗流稳定状态,上下游坝坡也处于抗滑稳定状态。

e. 大坝高水位运行时一旦失稳,危害极大,本文仅分析了病险大坝加固前后隐患识别和稳定性,未来应加强大坝隐患早期识别、信息化监测预警和应急处置的理论和试验研究。

参考文献:

- [1] 王成华,殷忠平,李军. 堤坝 Forchheim 型非达西渗流场特性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2015,32(3):66-69.
- [2] 李兆宇,贾金生,苏安双,等. 胶结土坝漫顶溃坝模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):98-104.
- [3] 张寅寅. 不同排水方案下均质土坝渗流及坝坡稳定性有限元仿真[J]. 中国农村水利水电,2019(8):110-115.
- [4] BHASKAR PUNEET, PUPPALA ANAND J, BOLUK BURAK. Influence of unsaturated hydraulic properties on transient seepage and stability analysis of an earthen dam[J]. International journal of geomechanics,2022,22(7):166-173.
- [5] 方坤河,阮燕,曾力. 混凝土允许渗透坡降的研究[J]. 水力发电学报,2000(2):8-16.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范:SL 265-2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.

Stability Analysis of a Dam Based on Image Recognition and AutoBank

YAO Ji-hua¹, WU You-lun¹, SONG Zi-long¹, LIU Ya-ling², LIANG Jing-wei¹,
SONG Wen-jie¹, YANG Yuan-li¹

(1. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China;

2. Hunan Jiuyi Engineering Design Co., Ltd., Changsha 410018, China)

Abstract: The total leakage amount behind a certain reservoir dam reaches 16.7 L/s, with the seepage points being the drainage body at the dam foot and the low culvert, but the anti-seepage body inside the dam is weak to slightly permeable and tightly cemented. The image recognition results reveal that the dam body outside the low culvert pipe has formed a penetrating leakage channel. This article selects the centerline of the dam body and the cross-section of the culvert pipe position as example. Based on measured data such as the physical parameters of the rock and soil of the dam body and the leakage amount behind the dam, AutoBank modeling was used to calculate and modify the stability of the dam, while simulating the stability of the reinforced dam. The results show that the water inside the low culvert pipe comes from the water seepage outside the pipe wall, and the leakage points are generally concentrated in the pile number K0+058~0+131.5, mainly in the form of rain or jet, while other sections are in the form of drip or no seepage. The dam body within 2.9 m outside the culvert pipe has formed a penetrating leakage channel, which is the main cause of drainage and culvert pipe leakage. The central section of the dam is in a state of seepage and anti-sliding stability under the conditions of 176.50 m water level, normal water storage level, and check flood level. The cross-section of the dam culvert pipe location undergoes seepage failure under various working conditions, and the calculated total leakage is in good agreement with the on-site measured value; Except for the anti-sliding instability of the upstream dam slope under the condition of sudden water level drop, the dam slopes under all other conditions are stable. After reinforcement, the dam is in seepage and anti-sliding stability under all working conditions.

Key words: image recognition; AutoBank; external water infiltration; leakage channel; stability