

水库工程病险成因典型实例分析

李宏恩,李 铮,何勇军

(南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所,江苏 南京 210029)

摘要:以某座因未按设计要求施工而引起水库工程渗流和结构问题的土石坝为例,在工程现场检查 and 地质勘察的基础上,进行了大坝渗流安全分析、结构稳定分析、抗震安全分析,并对该水库工程的安全现状进行了综合分析评价。分析结果表明:由于该工程未按设计要求进行施工,直接导致该工程结构不完整,大坝的渗透安全性、结构安全性及抗震安全性均不满足要求,大坝安全监测等工程管理设施欠缺,可归为三类坝。

关键词:水库工程;土石坝;病险成因;渗流计算;抗滑稳定

中图分类号:TV139.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)06-0066-04

Typical case study on danger cause of reservoir engineering//LI Hongen, LI Zheng, HE Yongjun (*Dam Safety and Management Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: This work presents a typical case of small-sized reservoir with seepage and structural problems caused by non-standard and not following design construction. Based on field examination and geological survey, dam seepage safety, structural stability and anti-seismic ability are analyzed. The current safety status of the project is evaluated comprehensively. The result shows: non-standard and not following design construction directly caused strict dam safety problems, such as incomplete structure of the project, unsatisfied seepage, structural and seismic safety, lack of dam safety monitoring devices etc. Hence, the project here analyzed could be classified as ‘C’.

Key words: reservoir engineering; rockfill dam; danger cause; seepage calculation; anti-sliding stability

第一次全国水利普查我国现有水库 98 002 座,已建水库 97 246 座,在建水库 756 座,面广量大。水库工程建设应特别重视建设期施工的规范化与科学化,为提高新建水库工程建设期的管理水平,保证工程实施的科学性和规范性,国务院颁布了《水库大坝安全管理条例》,水利部颁布了《水库大坝安全鉴定办法》、《水库大坝安全管理应急预案编制导则(试行)》和其他规程、导则^[1-2]。本文将详细介绍一座修建于 2007 年未按设计施工、运行即出险情的土石坝工程,并对其病险成因及大坝安全进行全面分析与评价,旨在总结工程经验教训,为今后修建类似水库工程提供技术指导和借鉴。

1 工程简介

某水库设计库容为 968 万 m³,防洪标准按 30 年一遇洪水设计,300 年一遇洪水校核。工程修建的目的是为解决邻近工业区的生产和生活用水问题,改善周边生态环境。大坝为碾压式均质土坝,设计最大坝高 25.95 m,坝顶长 941 m,坝顶宽 6 m,上、下游筑坝材料为当地粉土、壤土,坝轴线建基面附近设置黏土截水槽,基岩采用帷幕灌浆防渗,坝体下游设置褥垫、棱柱体及贴坡相结合的排水方式,坝体上游坡面采用干砌石护坡,下游坡面为砂砾石护坡。选取最大坝高所在位置的断面为典型断面,大坝设计典型断面如图 1 所示。在大坝实际施工过程中,取消了下游褥垫排水及棱柱体排水,且仅在坝基沿坝轴线 50~100 m 范围内进行了局部帷幕灌浆,大坝实际典型断面如图 2 所示。

该工程建设时间短,工程管理不规范,2007 年 11 月开工建设,2008 年 6 月便进行了初期蓄水,蓄水后在大坝左岸坝体及岸坡处出现较为严重的坝体、坝基及绕坝渗漏现象,如图 3 所示。2008—2011 年,上游护坡水位变化区在风浪及冰冻作用下,部分块石护坡遭到破坏,逢强降雨时,下游砂砾石护坡破损严重。经现场检查,该水库存在的主要问题包括:

- a. 未按设计施工,大坝清基不彻底,直接修建

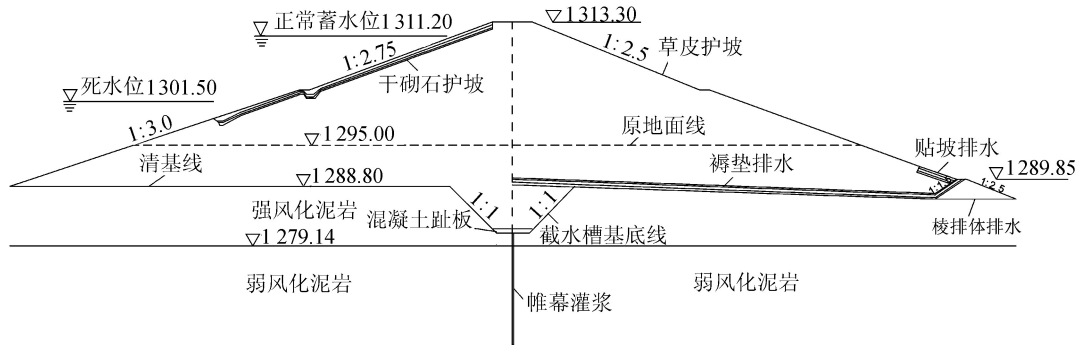


图1 大坝设计典型断面(单位:m)

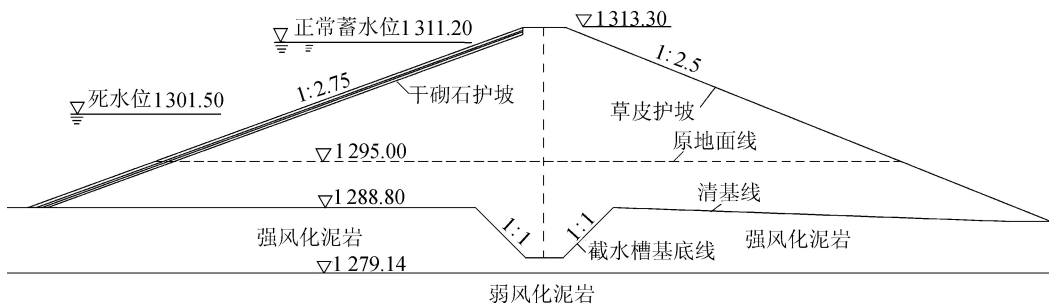


图2 大坝实际典型断面(单位:m)



(a) 坝脚局部渗漏点



(b) 绕坝渗漏位置

图3 大坝渗漏现象

在强风化泥岩上,导致坝基渗漏严重;褥垫层、棱柱体、贴坡等排水设施未按设计要求实施,坝体存在严重安全隐患。

b. 左岸坝肩渗漏量大,近坝脚处渗漏冲蚀,影响坝体稳定。

c. 大坝自建成尚未经高水位运行考验,若继续蓄水,大坝所存在的渗漏问题将随着水位升高而变得更加严重。

d. 两岸岸坡岩体为强风化泥岩,强度较低,未进行工程处理。

e. 工程无安全监测设施和水文测报系统;无地质勘察、设计变更及工程竣工验收等重要资料;工程建设和管理混乱。

2 地质勘察结果分析

为掌握大坝实际填筑质量,获取后续渗流和结构计算参数,通过钻探、现场及室内试验等手段对该水库大坝进行了地质勘察。

在坝体取原状土样 20 组进行现场试验,试验结果表明:①坝体砂壤土渗透变形的主要类型为流土,允许渗透坡降为 0.25,渗透系数为 $2.48 \times 10^{-4} \sim 4.24 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,渗透系数偏大是造成坝体渗漏的原因之一;②通过坝基压水试验,坝基上部存在透水率大于 10 Lu 的岩层,最大透水率达到 24.6 Lu,这可能是形成坝基及绕坝渗漏的重要原因;③坝体压实度不均匀,干密度相差较大,变化范围为 $1.52 \sim 1.64 \text{ g/cm}^3$,孔隙比为 0.630 ~ 0.748。

在坝体中取试样 2 组,室内试验结果表明:最优含水率平均为 15.55%,最大干密度平均为 1.805 g/cm^3 ,按压实系数 0.96 乘以最大干密度计算,坝体压实后干密度为 1.732 g/cm^3 。在坝体 20 组原状土样中,干密度均未达到 1.732 g/cm^3 ,按干密度平均值 1.58 g/cm^3 计算,压实度仅为 0.87,坝体压实度不满足设计要求。大坝各部位用于后续计算的材料参数建议值见表 1,材料强度为有效应力指标。

表 1 大坝各部位材料参数建议值

大坝部位	渗透系数/ ($10^{-4}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
坝基弱风化层	2.48	2.58	28.0	29.0
坝基强风化层	4.24	2.18	20.0	29.0
帷幕灌浆	0.10	2.58	30.0	29.0
褥垫排水	390.00	2.0	0.0	30.0
棱柱体排水	5000.00	1.90	0.0	35.0
截水槽	2.70	2.10	15.0	25.0
坝体	2.60	1.84	8.95	25.1

3 大坝渗流安全评价

3.1 有限元渗流计算

由于该水库无安全监测设施,因此采用有限元方法对大坝进行渗流计算进而评价大坝的渗流安全性是一条简单易行的途径^[3]。分别对正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位下的大坝渗流稳定性进行计算分析,计算成果可为大坝的抗滑稳定计算提供依据。为评估该水库未按设计要求实施渗流控制措施对大坝渗流及结构安全的影响程度,分别对大坝设计和实际情况的渗流稳定性进行计算分析,各筑坝材料参数仍采用此次地质勘察所得参数进行计算分析。

采用二维有限元渗流模型进行计算。根据大坝典型断面的设计图并考虑大坝实际情况,采用三角形和四边形混合单元对其进行剖分,相应的材料分区及离散的有限元网格如图 4 所示。按大坝设计情况计算时,考虑排水设施;按大坝实际情况计算时,将该网格中的褥垫、排水棱柱体分区替换为坝体材料,帷幕灌浆分区替换为对应位置的地基材料。渗流计算得到大坝典型断面在正常蓄水位下的坝体与坝基的浸润线分布如图 5 所示,大坝各部位的渗漏量计算成果见表 2。

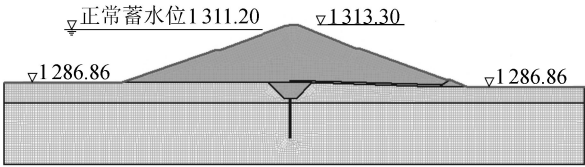


图 4 大坝典型断面有限元网格(单位:m)

表 2 大坝各部位渗漏量计算成果

库水位	下游坝坡出逸点 高程/m		下游坝脚 出逸坡降		允许 出逸 坡降	坝基日单宽渗漏量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	
	设计	实际	设计	实际		设计	实际
正常蓄水位	1286.86	1306.60	0.01	1.60	0.25	0.0640	2.34
设计洪水位	1286.86	1307.37	0.01	1.64	0.25	0.0659	2.39
校核洪水位	1286.86	1308.15	0.01	1.67	0.25	0.0678	2.44

3.2 渗流计算成果分析

从图 5(a)按设计情况计算结果看,在大坝典型断面考虑排水设施情况时,在截水槽、坝基灌浆的防

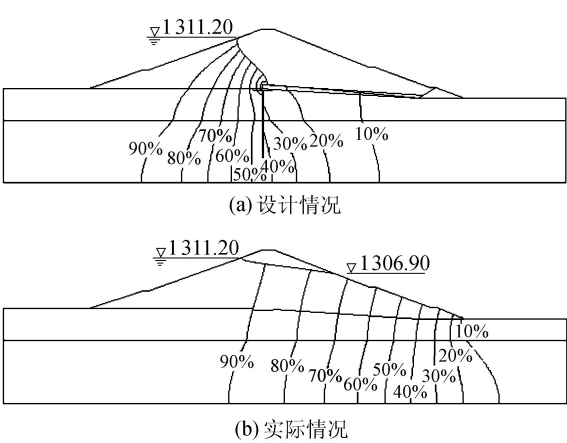


图 5 大坝典型断面浸润线分布(高程单位:m)

渗作用下,结合深入坝体的褥垫层、坝脚棱柱体及贴坡的联合排水作用,坝体内渗流场位势衰减较快,大坝防渗及排水体系效果明显,下游坝坡出逸点位置均位于排水棱柱体顶部高程以下接近下游地面高程,且下游出逸部位的水平坡降为 0.01,远小于允许出逸坡降 0.25,因此若该水库工程按设计进行防渗及排水设施施工,即使大坝填筑质量保持现状,坝体防渗及下游坝坡出逸位置的安全性也是基本有保证的。

从图 5(a)按大坝实际情况计算结果看,下游坝坡出逸点高程在 1306.60~1308.15 m 之间,坝内浸润线较高,下游坝坡出逸点位置均位于大坝下游坝坡上部,且出逸部位的水平坡降约为 1.60,已大于允许出逸坡降 0.25,大坝下游坝坡极易发生渗透破坏,这与现场检查所发现的问题相吻合。此外由于大坝实际没有有效的截渗和排水设施,客观导致了大坝渗流场位势衰减较慢且坝内浸润线较高的现状。因此,从渗流计算结果看大坝实际的坝体防渗及下游坝坡出逸位置的渗流安全性是无保证的,存在严重渗流安全问题。

从表 2 的渗漏量计算结果看,当库水位升至正常蓄水位时,取平均值得到大坝实际的坝基日单宽渗漏量约为 $2.34\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^{-1})$,是按设计要求考虑排水设施情况坝基日单宽渗漏量 ($6.40\times10^{-2}\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^{-1})$) 的 37 倍,若坝长以 941 m 计,则大坝坝基日渗漏量约为 0.22 万 m^3 ,年渗漏量约为 67.00 万 m^3 ,水库渗漏损失大,大坝坝基防渗能力不足。

综合现场检查及渗流有限元的计算成果分析,该水库大坝坝体防渗体较差,坝体及坝基渗透稳定性不满足设计要求,大坝渗漏严重。实际施工中未按设计要求对大坝截水槽下坝基进行全面帷幕灌浆,未设置褥垫层、棱柱体及贴坡等排水设施,存在严重渗流安全隐患。

4 大坝结构安全评价

4.1 大坝结构计算

采用简化毕肖普法^[4]对大坝实际及设计情况的坝体上、下游坝坡稳定进行计算,计算过程中考虑了前述渗流场的影响。除正常运用条件外,还计算了非常运用条件Ⅰ(校核洪水位)、非常运用条件Ⅱ(地震作用下,坝址区地震动峰值加速度为0.20g,基本烈度为Ⅷ度)下的上、下游坝坡稳定。坝体上、下游坝坡抗滑稳定计算结果表见表3。

表3 坝体上、下游边坡抗滑稳定成果

工况	水位	最小安全系数				允许安全系数
		上游坝坡		下游坝坡		
		设计	实际	设计	实际	
正常运用条件	正常蓄水位	2.535	2.177	1.657	1.103	1.25
	设计洪水位	2.549	2.192	1.657	1.099	1.25
	死水位	1.955	1.804	1.658	1.422	1.25
非常运用条件Ⅰ	校核洪水位	2.565	2.204	1.657	1.092	1.15
	正常蓄水位	1.129	1.009	1.065	0.726	1.15
非常运用条件Ⅱ	设计洪水位	1.131	1.011	1.065	0.725	1.10
	死水位	1.087	1.016	1.065	0.937	1.10

4.2 结构计算成果分析

从表3看出,正常运用条件及非常运用条件Ⅰ下,大坝上游坝坡无论是设计情况还是实际情况,最小安全系数均满足要求,这是由于水压力作用于上游坝坡,其抗滑力远大于因大坝自重产生的滑动力,水库一般运用条件下不存在整体滑动问题。在非常运用条件Ⅱ下,无论是设计情况还是实际情况,上游坝坡均出现了最小安全系数均小于允许安全系数的情况,可见大坝坝坡的抗震安全性是无保证的。

从下游坝坡抗滑稳定计算结果看,在正常运用条件及非常运用条件Ⅰ下,设计情况各工况的最小安全系数均满足要求;而实际情况各工况均不满足要求。可见实际情况大坝下游坝坡的抗滑稳定安全性是没有保证的,当库水位达到或超过正常蓄水位时,大坝下游坝坡存在结构稳定问题。

综合大坝上、下游坝坡抗滑稳定计算结果分析,该水库大坝出现较为严重的坝坡稳定性问题的根本原因是由于坝体填土压实度不足,且大坝防渗体系作用有限,造成坝内渗流场浸润线较高,孔隙水压力的存在造成土体有效应力降低,直接降低了土体抗滑力,进而导致大坝下游坝坡稳定性不满足要求。

5 结 语

该水库工程未按设计要求进行施工,工程结构不完整,实际施工中未按设计要求对大坝截水槽下的坝基进行全面帷幕灌浆,未设置褥垫层、棱柱体及

贴坡等排水设施,坝体压实度不足,导致大坝渗透安全性、结构安全性及抗震安全性均不满足要求,此外,大坝安全监测等工程管理设施欠缺,按《水库大坝安全评价导则》的有关规定,该工程可归为三类坝。

参考文献:

[1] SL233—2008 水利水电建设工程验收规程[S].
[2] SL258—2000 水库大坝安全评价导则[S].
[3] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2003.
[4] 王世夏.水工设计的理论和方法[M].北京:中国水利水电出版社,2000.

(收稿日期:2013-10-17 编辑:周红梅)

(上接第65页)

[4] 金忠青,韩龙喜.复杂河网的水力计算及参数反问题[J].水动力学研究与进展,1998,13(3):280-285. (JIN Zhongqing, HAN Longxi. Hydrodynamic calculation and parameter inverse problem for complex flow in open-channel networks [J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(3): 280-285. (in Chinese))
[5] 董文军,杨则荣.一维圣维南方程的反问题研究与计算方法[J].水利学报,2002,9:61-65. (DONG Wenjun, YANG Zeshen. Calculation method for inverse problem of 1-D St. Venant equations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 9:61-65. (in Chinese))
[6] 李光炽,周晶晏,张贵寿.用卡尔曼滤波求解河道糙率参数反问题[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):490-493. (LI GuangZhi, ZHOU Jingyan, ZHANG Guishou. The Application of Kalman filter technique in inverse analysis of river channel roughness parameter [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2003, 31(5):490-493. (in Chinese))
[7] 李光炽.流域洪水演进模型及其参数反问题研究[D].南京:河海大学,2001.
[8] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001.
[9] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

(收稿日期:2013-09-24 编辑:周红梅)

