

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.06.015

卡马水库大坝滑塌原因分析

周克发 龙智飞 王昭升 张士辰

(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 :在抢险记录、事后现场调查、补充地质勘察、现场检测与监测等基础上,对卡马水库大坝的滑塌原因进行分析。通过对导流洞水击振动荷载的估算以及坝坡稳定分析,认为卡马水库大坝坝坡偏陡、稳定安全系数偏小是导致坝体滑塌的内因;导流洞水击振动荷载作用是造成坝体滑塌的外因。建议在大坝加固措施实施前,应保证水库安全泄洪,维持水库低水位运行,确保大坝安全;在加固措施实施时做好施工组织计划及应急预案。

关键词 :卡马水库;大坝滑塌;水击;振动荷载;坝坡稳定计算

中图分类号 :TV698 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2010)06-0063-04

Causes for dam slump of Kama Reservoir///ZHOU Ke-fa, LONG Zhi-fei, WANG Zhao-sheng, ZHANG Shi-chen(*Dam Safety Management Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract :Based on the emergency records, field investigations, additional geological surveys, field inspections and monitoring and design and construction information, the causes for the dam slump of Kama Reservoir were analyzed. By estimating the vibration loads of water hammer of the diversion tunnel and analyzing the dam slope stability of Kama Reservoir, the steep slope of Kama Reservoir dam and its insufficient stability safety were regarded to be the internal causes for the dam slump, and the vibration load of water hammer of the diversion tunnel was the external causes. It was suggested that the safety of flood discharge of Kama Reservoir should be guaranteed and the low operating water level should be maintained so as to too ensure dam safety before implementing rehabilitation programs.

Key words :Kama Reservoir; dam slump; water hammer; vibration load; stability calculation of dam slope

1 卡马水库大坝概况

卡马水库位于广西壮族自治区河池市罗城县境内的龙江支流卡马河上,是一座以灌溉为主,兼顾防洪、发电、养殖等综合利用的小(1)型水库,总库容为 $930 \times 10^4 \text{ m}^3$,死水位为 194.20 m(黄海高程,下同),正常蓄水位为 220.10 m,50 年一遇设计洪水位为 222.49 m,500 年一遇校核洪水位为 223.89 m。水库始建于 1957 年,1958 年建成,大坝原设计为 7.40 m 高的浆砌石滚水坝。1971 年 9 月对滚水坝进行扩建,1981 年 2 月主体工程竣工,达到现状规模。枢纽工程由大坝、溢洪道、输水涵管、坝后灌溉涵洞、坝下导流洞组成。枢纽平面布置见图 1。大坝坝顶高程为 224.80 m,最大坝高为 38.70 m,坝顶长 250.3 m,坝顶宽 4.20~4.70 m。大坝名为混凝土面板干砌石重力坝,实际上为组合坝型——斜混凝土防渗墙堆石坝^[1]。大坝典型断面见图 2。

因工程质量差、结构老化、渗漏严重,该水库大坝于 2007 年被鉴定为三类坝,并于 2008 年 9 月开始除险加固施工。2009 年 6 月 24 日,受强降雨影响,库水位快速上升,大坝导流洞进口堵体被击穿,出现严重漏水险情。7 月 3 日,导流洞出口边坡因冲刷滑塌,并引起上部坝体滑塌,险情加剧。险情发生后,国家防汛抗旱总指挥部、广西壮族自治区政府以及河池市政府领导高度重视,快速响应,果断处置,成立了卡马水库抗洪抢险指挥部和现场专家组。经各方努力,采取开挖右岸排洪渠、拓挖左岸溢洪道、坝脚堆石压重、导流洞进口封堵等应急处理措施,险情得到了有效控制。

2 坝体滑塌原因调查与初步判断

2009 年 7 月 3 日 17:30 库水位达到最高洪水位 219.95 m;20:00 左右导流洞出口被滑塌的巨石堵塞,并引起坝顶部分长约 20 m、高约 15 m 的坝体滑

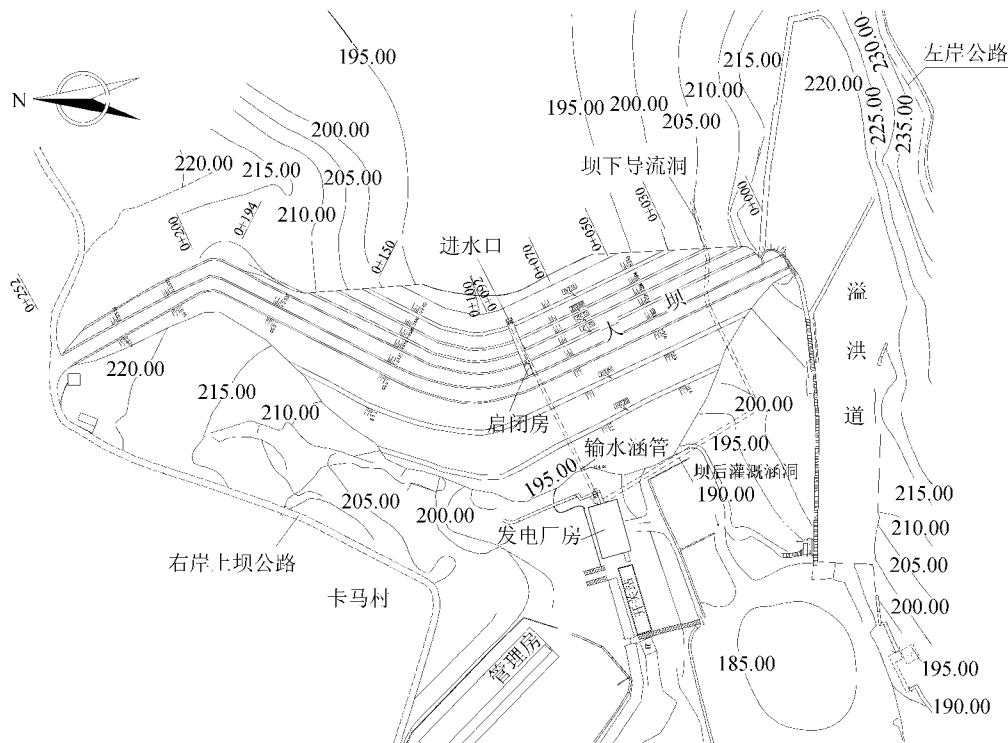


图 1 工程枢纽平面布置示意图
(单位 高程、桩号以 m 计 其余以 mm 计)

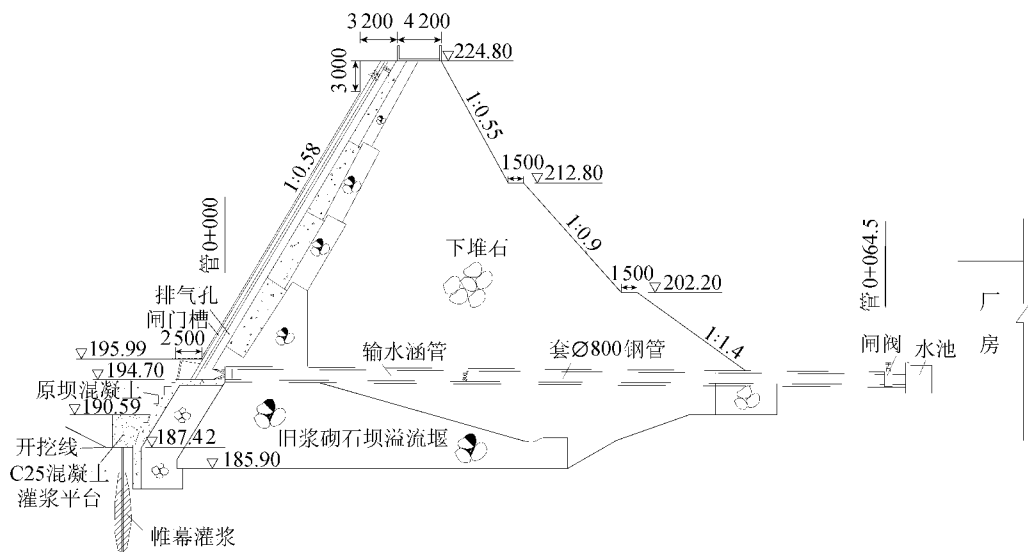


图 2 大坝典型断面图
(单位 高程、桩号以 m 计 其余以 mm 计)

塌,滑塌坝段桩号为 0+024.5~0+044,坝顶部分滑塌宽度为 19.5 m,底部滑塌宽度为 12.6 m,底部高程为 213.00 m。

通过对当时在场人员(约 15 人)的走访调查获知 2009 年 7 月 3 日 20:00 左右导流洞出口左侧发生滑坡,先是土块滑至导流洞出口顶部,随后 2 块条石滑落至导流洞上方,另外,早在 2008 年 10 月施工电线搭建时左岸山坡已下沉约 10 cm;值班民警反映,开始时坝面有少量块石滑落,随后大片块石滑落,发出巨大响声,随即接到上级指令,鸣枪示警,通

知全体工作人员撤离;多位现场抢险专家组成员反映,7 月 3 日 20:15 左右导流洞左岸岩体先滑塌,将导流洞出口堵塞,发出巨大响声,随后上方坝体堆石塌落,坝脚灌溉涵洞顶部约 194.00 m 高程附近有水冒出。现场调查时导流洞出口被巨石堵塞,见图 3。

综合上述调查情况,初步判断坝体滑塌原因为导流洞出口被滑塌的巨石瞬间堵塞后产生水击现象,库水一方面沿着与导流洞连接的灌溉涵洞破损洞壁向坝体扩散,大量水流从下游坝坡约 194.00 m 高程处条石缝间逸出,另一方面瞬间产生的水击对坝体造成了

短暂的较大冲击振动,巨大声响即来自水击作用及其导致的坝体振动,随即引发上部坝体滑塌。



图3 导流洞出口巨石堵塞现场

3 水击作用分析

3.1 水击传播速度计算

类似于水电站机组瞬间关闭导致有压运行的导流洞发生水击,卡马水库导流洞出口被滑落的巨石瞬间堵塞的过程也会导致有压运行的导流洞发生水击,属直接水击。水击波的传播速度是影响水击压力的重要参数,直接水击可按式(1)计算^[21]:

$$a = 1435 \left(1 + \frac{\varepsilon D}{E \delta} \right)^{-0.5} \quad (1)$$

式中: a 为水击波的传播速度, m/s ; ε 为水的弹性模量, GPa ; D 为压力管直径, m ; E 为浆砌石的弹性模量, GPa ; δ 为压力管管壁的计算厚度, m 。

本次卡马水库导流洞水击传播速度有关计算参数取值如下: $\varepsilon = 2.1 \text{ GPa}$; 由于水击计算公式考虑的是圆形断面,因此本次估算近似取用导流洞上部半圆形断面的直径,即 $D = 1.2 \text{ m}$, $\delta = 0.5 \text{ m}$; 参考 SL25—2006《砌石坝设计规范》,并考虑到浆砌石体力学性能较差,其弹性模量应较低,取 $E = 0.2 \text{ GPa}$ 。将有关参数代入式(1)得 $a = 280.35 \text{ m/s}$ 。

3.2 水击压力估算

水击压力水头增量按式(2)计算^[21]:

$$\Delta H = H - H_0 = -\frac{a}{g} (v - v_0) \quad (2)$$

式中: ΔH 为水击压力水头增量, m ; H 为水击压力水头, m ; H_0 为初始水头, m ; v 为压力管道中水击发生后的流速, m/s , $v = 0$; v_0 为压力管道中水流的初始速度, m/s ; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

当水击发生时,库水位为 219.95 m ,导流洞横截面面积 $S = 1.2 \text{ m} \times 1.1 \text{ m} + 0.25\pi \times (1.2 \text{ m})^2 \times 0.5 = 1.855 \text{ m}^2$,下泄流量 $Q = 15.9 \text{ m}^3/\text{s}$,则水流初始流速 $v_0 = Q/S = 8.571 \text{ m/s}$ 。将有关参数代入式(2),得 $\Delta H = 245.19 \text{ m}$ 。

3.3 水击振动荷载的估算

根据卡马水库导流洞洞体特征,结合此次水击

实际情况,可假设水击振动荷载沿导流洞直线分布^[21],导流洞进口处为零,出口处最大,即出口处的水头压强 $p_{\text{出口}} = 2402.9 \text{ kPa}$ ($245.19 \text{ mH}_2\text{O}$),见图4。因导流洞内各断面上的水击压力顺径向作用于洞壁,为确定水击振动荷载瞬间作用于洞身上部滑坡段竖直向上的力,可将洞内各断面上的所有径向水击压力分解至竖直向上方向。设导流洞上部圆弧半径为 r ,则出口部位截面竖直向上的压力 $P_{\text{出口}} = 2p_{\text{出口}}r$,而进口部位截面竖直向上的压力 $P_{\text{进口}} = 0$ 。考虑到滑坡段坝体覆盖导流洞整个长度中部,导流洞全长 75 m ,坝踵距离进口约 10 m ,坝趾距离出口约 5 m ,则坝踵、坝趾处水击压力值分别为 $P_{\text{坝踵}} = 0.1333 P_{\text{出口}} = 0.267 p_{\text{出口}} r$, $P_{\text{坝趾}} = 0.9333 P_{\text{出口}} = 1.867 p_{\text{出口}} r$ 。则导流洞上部滑坡段坝体所受竖直向上的水击作用总力 $P_{\text{总}} = (P_{\text{坝踵}} + P_{\text{坝趾}}) \times (75 \text{ m} - 10 \text{ m} - 5 \text{ m}) \times 0.5 = 92299 \text{ kN}$ 。

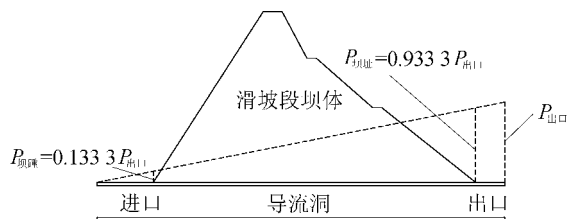


图4 水击振动荷载沿导流洞直线分布示意图

坝体干砌石湿密度取试验平均值 1890 kg/cm^3 ,水击发生瞬间受水击作用的坝体段长度按实际滑坡长度 20 m 计,受水击作用的坝体底高程按导流洞顶平均高程 193.55 m 计。经计算,受水击压力作用的坝体体积为 18780 m^3 ,质量为 35494.2 t ,则水击发生瞬间作用于滑坡坝段竖直向上的加速度 $a_0 = 92299 \text{ kN} / 35494.2 \text{ t} = 2.601 \text{ m/s}^2 = 0.265g$ (g 取 9.8 m/s^2),该加速度值介于Ⅷ度地震对应的地震动峰值加速度 $0.2g$ 与Ⅸ度地震对应的地震动峰值加速度 $0.4g$ 之间。鉴于水击振动荷载估算采用圆形断面,与实际断面不同,且在水击发生时导流洞在出口上游部分与灌溉涵洞连通,这会产生较大的能量耗散,水击振动荷载通过洞壁与坝体产生相互作用,又会有一定的能量消耗。因此,模拟分析水击作用对坝体滑坡的影响时,水击发生瞬间作用于滑坡坝段竖直向上的加速度值应做适当的折减。

4 坝坡稳定计算分析

4.1 计算断面及计算方法

选择 $0+030$ 断面作为计算断面,并将坝体断面分成5个区,计算简图见图5。对滑坡体滑塌前的稳定性及水击振动荷载对坝体的影响进行模拟分析。计算方法采用斯宾塞法,稳定分析近似按二维

问题考虑 ,滑动面采用下游坡滑塌后的不规则曲面。根据现场调查^[1] ,初步判定坝体滑塌前导流洞水击产生的水体进入坝体内部 ,但这部分水体基本不影响坝体安全性 ,因此 ,主要分析上部干堆石坝体部分的稳定性。稳定计算时 ,上游水位取坝体滑塌前的库水位 219.95 m。水击振动荷载对坝体下游坡稳定性的影响采用拟静力法进行分析 ,仅考虑竖向振动荷载的作用 ,竖向加速度分别取 0.05g ,0.10g ,0.20g 和 0.30g。

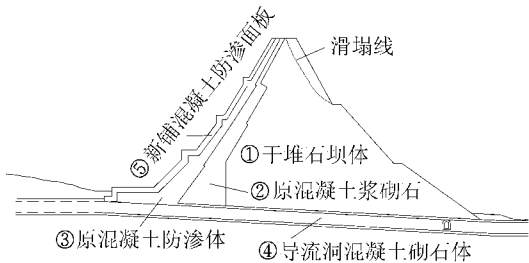


图 5 0+030 断面坝体抗滑稳定计算简图

4.2 堆石体咬合力合理性分析

若不考虑堆石体咬合力 c' (本文指坝体块石之间的黏结力) ,按无渗流作用下的无黏性土坡分析 ,堆石体坝坡抗滑稳定安全系数计算公式如下 :

$$F_s = m \tan \varphi \tag{3}$$

式中 : F_s 为抗滑稳定安全系数 ; m 为坝坡坡比的倒数 ; φ 为无黏性土的内摩擦角。

由式 (3) 可知 ,堆石体坝坡要达到极限平衡状态 ($F_s = 1$) 堆石体的内摩擦角要达到 61.2°。显然 ,所要求的内摩擦角数值过大 ,这不符合卡马水库大坝坝体的实际情况 ,因此 ,应考虑堆石体咬合力的作用。堆石体咬合力 c' 分别选取 5 kPa ,7.5 kPa 和 10 kPa 进行稳定分析。坝坡稳定分析计算参数见表 1。

表 1 坝坡稳定分析计算参数

土料分区	物理性指标		抗剪强度指标	
	湿密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和密度 $\rho_{\text{sat}} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$
① 干堆石坝体	18.90	19.60	5.0 ~ 10.0	42.0
② 原混凝土浆砌石	19.50	21.00	10.0	41.0
③ 原混凝土防渗体	22.00	24.00	10.0	34.0
④ 导流洞混凝土砌石体	18.40	19.00	10.0	42.0
⑤ 新铺混凝土防渗面板	22.50	24.00	15.0	36.0

注 :堆石体内摩擦角 φ 取有效应力指标 φ' ,下同。

4.3 计算结果分析

根据表 1 ,滑坡体滑塌前 0+030 断面下游坡坝体稳定分析计算结果见表 2。由表 2 可知 ,在静力条件下 ,大坝运行多年基本保持了稳定状态 ,坝坡稳定安全系数应大于 1。从计算结果看 , c' 取 5 kPa 时 ,静力条件下稳定安全系数为 1.026 ,因此 , c' 下限取 5 kPa

较合理。本次发生的水击振动荷载加速度约为 0.265g ,对照表 2 ,若 c' 取 10 kPa ,水击振动荷载 0.30g 对应的稳定安全系数为 1.112 ,安全系数大于 1 ,与坝坡已失稳破坏的实际情况不相符 ; c' 取 7.5 kPa 时 ,水击振动荷载 0.20g 和 0.30g 分别对应的稳定安全系数为 1.012 和 0.974 ,与坝坡处于稳定临界状态时的安全系数很接近 ,与坝坡在 0.265g 的水击作用下失稳相吻合 ,符合实际情况。可见 , c' 上限取 7.5 kPa 较合理。由前述分析可知 ,当 c' 取 5 ~ 7.5 kPa 时 ,下游坡坝体在静力条件下稳定安全系数不满足规范要求 ,在水击振动荷载作用下稳定安全系数大多小于 1 ,因此 , c' 取 5 ~ 7.5 kPa 是比较合理的。

表 2 0+030 断面坝坡稳定分析计算结果

抗剪强度指标		计算工况	F_s
c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$		
0	42.0	静力条件	0.783
5	42.0	静力条件	1.026
7.5	42.0	静力条件	1.136
7.5	42.0	水击振动荷载 (0.05g)	
7.5	42.0	水击振动荷载 (0.10g)	1.059
7.5	42.0	水击振动荷载 (0.20g)	1.012
7.5	42.0	水击振动荷载 (0.30g)	0.974
10.0	42.0	静力条件	1.242
10.0	42.0	水击振动荷载 (0.05g)	
10.0	42.0	水击振动荷载 (0.10g)	1.175
10.0	42.0	水击振动荷载 (0.20g)	1.128
10.0	42.0	水击振动荷载 (0.30g)	1.112

根据 SL228—98《混凝土面板堆石坝设计规范》规定 ,当填筑材料为硬岩堆石料时 ,上、下游坝坡坡度可采用 1:1.3 ~ 1:1.4 ,软岩堆石体应适当放缓 ;当用性能良好的天然砂砾石料填筑时 ,上、下游坝坡坡度可采用 1:1.5 ~ 1:1.6。相比较之下 ,卡马水库大坝坝坡偏陡 ,在振动情况下出现滑坡是必然的。

5 结 语

在抢险记录、事后现场调查、补充地质勘察、现场检测与监测等基础上 ,考虑到大坝运行多年基本保持稳定状态 ,认为大坝坝坡偏陡、稳定安全系数偏小是造成坝体滑塌的内因 ,而导流洞水击振动荷载作用则是造成坝体滑塌的外因。建议在大坝加固措施实施前加强高水位的巡视检查 ,保留洪水的下泄通道 ,确保大坝安全 ,并在加固措施实施时做好施工组织计划及应急预案。

参考文献 :

[1] 李雷 ,龙智飞 ,张士辰 ,等 .广西壮族自治区罗城仫佬族自治县卡马水库大坝安全评估及处置对策研究 [R] .南京 :南京水利科学研究所 ,河池 :广西河池水利电力勘测设计研究院 ,2009.

[2] 华东水利学院 .水力学 [M] .北京 :科学出版社 ,1979.

(收稿日期 2010-01-15 编辑 骆超)