

⑫

沟后水库溃坝原因分析及经验教训

王丰 孙伟 张原川

张晓宁

(青海省水利水电科学研究所 西宁 810001) (青海黑泉工程局 西宁 810001)

摘要 通过在现场坝体布点开挖探坑,对坝体填筑质量、干密度、坝体分区等溃坝后的现状进行测试研究,并对沟后水库建坝前后的设计、施工、质量检测 and 溃坝后洪水计算资料进行整理分析,总结了沟后坝溃坝原因及经验教训。

关键词 溃坝 颗粒分离 渗透系数 洪水计算 沟后水库

水库

沟后水库位于青海省共和县黄河支流恰卜恰河上,距恰卜恰镇 13 km,总库容 330 万 m^3 ,设计洪水位和正常水位均为 3278.0 m。大坝为钢筋混凝土面板砂砾石坝,坝顶高程 3281.0 m,最大坝高 71.0 m,坝长 265 m,泄洪、导流共用一个泄水洞,洞径 3.8 m。该库区多年平均降水量为 311.8 mm,属少水干旱区,多年平均径流量为 128.6 亿 m^3 ,平均流量 0.4 m^3/s ,坝址河谷宽 20~50 m,该地区地震基本烈度为 6 度,地处青藏高原东部地壳隆升区。该工程由陕西省水利电力土木建筑勘测设计院设计,铁道部第二十工程局施工。水库于 1985 年 7 月 15 日动工兴建,1989 年 10 月开始蓄水,1992 年 9 月竣工验收,1993 年 8 月 27 日大坝溃决,当时库水位 3277.308 m,冲毁部分约占坝体的 50%。

1 现场试验及成果分析

沟后水库大坝溃决后,在现场开展了坑探试验,其试验分析结果如下。

1.1 密度试验

在现场坝体 40 个测点中测得干密度最大值 2.37 g/cm^3 ,最小值 1.81 g/cm^3 (垫层

区),平均值 2.10 g/cm^3 。其中在坝 IV 区和坝 III 区上部及下游边坡取样 18 个,平均干密度 2.08 g/cm^3 ;坝 II 区垫层顶部 6 个测点平均干密度 1.99 g/cm^3 ;溃口剖面高程 3258.0~3260.0 m 间,坝 III、IV 区坝体中 16 个测点最大干密度为 2.37 g/cm^3 ,最小值 1.91 g/cm^3 ,均值 2.16 g/cm^3 ,而符合 III、IV 区原设计值 2.21 g/cm^3 ,测点仅占 38%,合格率很低。但据铁道部第二十局竣工文件“大坝碾压试验报告”,该施工单位采用 MC-III 型核子湿度密度仪自检大坝填筑碾压质量,测点共 1000 个,合格率为 95%;坝坡测点 101 个,合格率为 99%。另外溃坝后从坝体探坑中揭露情况看,坑壁疏松、坍塌严重,且有钢丝绳、钢管、木板和其它铁件埋入坝内。从实测结果和对探坑观察,沟后坝填筑质量差。

1.2 含水量试验

在溃坝现场共进行含水量试验 76 个,目的是通过对坝体含水量的测定,了解溃坝坝体的饱和区和浸润线高程。从测定结果分析,坝料总体含水量最大值为 7.6%,最小值为 1.7%,平均值为 3.8%;粒径小于 5 mm 的部分含水量最大值为 9.9%,最小值为

第一作者简介:王丰,男,副研究员,青海省水利科学研究所所长,从事土工试验和坝工技术研究,曾发表《高寒地区水坠坝冬季施工技术试验研究》等论文。

3.3%,平均值为5.1%,比总体平均含水量高1.5%。

1.3 颗粒级配试验

从现场筛分试验知,大于5mm的含量一般在60%~70%,平均值64.2%,其填筑料基本符合设计要求。但小于0.1mm的含量如按设计小于5.0%的要求,则基本大于此值,不符合要求,如按10%要求,其含泥量超过标准。另外,经试验分析,所有试样的不均匀系数均大于5,符合要求。部分的试样不均匀系数过大,这反映小于0.1mm的含量偏高,最大粒径受取样条件的限制,在筛分曲线中不能反映。总之,经取样试验,填筑料一般符合要求,但在垫层区见到粒径达300mm的卵石,显然与该层设计要求不相符。

1.4 渗透系数试验

现场试验采用双环法测定渗透系数,并按以下近似公式计算:

$$K = \frac{Q}{Ai}$$

式中 Q 为渗流量, cm^3/s ; A 为环内面积, cm^2 ; i 为水力梯度。现场渗透试验在探坑中进行,探坑深度小于2.0m测1点,大于2.0m测2点,共测定的15个渗透系数中,大于 10^{-1} cm/s 的占20%,小于 10^{-2} cm/s 的占80%。虽然测试数较少,但基本能反映沟后坝的渗透性能。从整体看,大坝渗透系数 $K = 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$,对混凝土面板砂砾石坝来讲属透水性低的坝体,故设计中应考虑坝体排水问题。

2 溃坝水文计算及分析

2.1 溃坝过程

1993年8月27日晚9时许,沟后水库突然发生异常响声,坝顶石块滚落撞击发出火花,水库管理人员随即骑摩托车去共和县政府报警,约晚11时45分,洪水咆哮着向恰卜恰镇袭来,持续时间约1个小时。

2.2 溃坝沿程洪水计算

青海省水文局采用两种方法对溃坝沿程洪水进行了计算:一是溃坝水力学算法;二

是采用洪水调查法。基于沟后大坝系砂粒体坝体,溃决过程逐步发生且库容仅为330万 m^3 等因素,故沿程洪水采用洪水调查法计算较符合实际。应用洪水计算包括瞬时最大流量、洪水过程及洪峰到达时间,为符合洪水调查法对河段选择的要求,经实地调查确定,溃坝沿程洪水断面为距坝址1060m,4150m,11513m四个断面(含坝址断面)。

2.2.1 坝址瞬时最大洪峰流量 Q_m 计算

据调查,沟后水库溃坝属双向局部溃坝,采用削克利希公式、美国水道试验站公式、黄河水利委员会水利科学研究院公式,以水库泄空时间确定 Q_m ,并用四种方法进行分析计算,结果坝址处最大洪峰流量为3000 m^3/s 。坝址下游1060m,4150m,11513m(含坝址断面)断面处洪水 Q_m 计算结果见表1。

表1 沟后水库溃坝洪水沿程各断面流量计算结果

沿程断面地址	各方法断面最大洪峰流量 $Q_m/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			推荐值
	水力学法	洪水调查法 比降面积法	水面曲线法	
坝址	2980			3000
距坝下游1060m	2710	2780		2780
距坝下游4150m	2080	2440		2208
距坝下游11513m	1230	1390	1250	1290

注:距坝下游11513m断面距恰卜恰镇1号桥937m,该处洪水为进入恰卜恰镇的洪水。

2.2.2 溃坝洪水流量过程线

经分析计算,坝址下游各断面洪水过程见图1,图中曲线均为修正后的曲线。

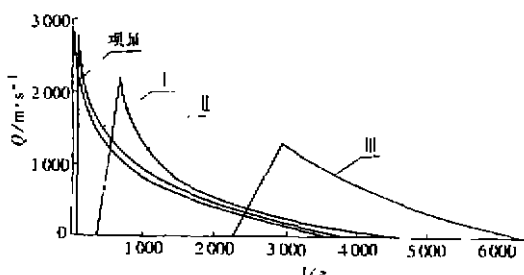


图1 沟后水库溃坝洪水沿程各断面过程线
I.距坝址1060m处过程线;II.距坝址4150m处过程线;III.距坝址11513m处过程线

2.3 垮坝时蓄水位线测定

垮坝时库水位究竟在什么位置,是否达到或超过设计水位,这对研究沟后坝溃决是一个重要的参数。为此有关单位联合进行了实地踏勘和实测,并选定了左右两岸共计 11 个明显水位痕迹点进行了测定,通过对所选定水位痕迹点的测量,最后确定水库垮坝时的水位为 3 277.308 m

3 由实测坝体分区分析填筑质量

该坝原设计按填料级配分成四个区(见表 2),现场试验结果见表 3。从试验结果看,坝体四个区不存在,从上游至下游基本上是同一级配料源。不仅如此,在设计垫层区,还

表 2 坝体填筑标准技术设计参数

分区	填 筑 料	厚度 /m	最大粒 径/mm	干密度 /g·cm ⁻³
I ₁	砂砾石垫层料	0.2	20	2.25
I ₂	砂砾石垫层料	0.3	100	2.25
II	2 号料场及新料场砂砾石料	0.6	400	2.23
III	2 号料场及新料场砂砾石料	0.9	600	2.21
IV	2 号料场及新料场砂砾石料石碴开挖料,砂卵石开挖料(坝基河床覆盖层)	0.9~1.3	800	2.21

有粒径达 300 mm 卵石。坝体干密度值由 I 区到 IV 区实测无递减规律,且四个区填筑干密度值部分未达到设计要求。颗粒大小设计从 I 区到 IV 区由细变粗,但实测 d_{50} 粒径在垫层区还大于 II、III 区,大于 5 mm 粒径含量也是垫层区和 IV 区最多。从溃口剖面观察及试验成果分析,坝体四个区填料无明显差别,实际为均质砂砾石坝体。

4 关于填筑料颗粒分离问题

为证实填筑料是否有分离现象和产生分离后对压实的影响,在坝左和坝右不同高程取填筑层分离现象较明显的部位为取样点,共取 12 个填筑层,每层取样点分上下两层取样进行试验,试验结果见表 4。由表 4 分析知:同一坝料由于填筑颗粒分离,同层上下部填料性质相差很大,并有以下试验结果:①每层下部粗颗粒集中,由于级配变差,细颗粒不足充填大颗粒之间孔隙,干密度值骤降,平均干密度仅为 1.78 g/cm³,比上部平均干密度 2.03 g/cm³ 减少了 0.25 g/cm³。②从颗粒组成看,大于 2.0 mm、5.0 mm、20.0 mm 含量的三个值,下部比上部分别高出 16.4%,19.9%,26%,说明下部料中砂、细粒、中砾含量减少

表 3 坝体四个区填筑质量检查结果

坝 区	$\rho_d/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	颗粒粒径含量(%)		d_{50}/mm	$K/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
		>5 mm	<0.1 mm		
I 垫层区	1.81~2.00	59.0~81.0	4.0~14.7	10.4~32.5	$2.6\times 10^{-2}\sim 3.9\times 10^3$
	1.99/6 次	68.6/6 次	7.6/6 次	22.8/6 次	1.69×10^{-2}
II 过渡区	1.97~2.22	53.5~68.6	5.5~12.5	6.0~23.0	$1.7\sim 2.1\times 10^{-1}$
	2.41/9 次	59.7/8 次	10.1/8 次	13.3/8 次	
III 主堆石区	1.91~2.37	43~71	6.0~19.0	4.2~40.5	1.72×10^{-2}
	2.15/14 次	62.2/11 次	9.2/10 次	14.9/10 次	
IV 下游堆石区	1.84~2.30	56.0~96.5	2.0~10.5	7.5~84.0	$1.78\times 10^{-1}\sim 3.5\times 10^{-1}$
	2.11/11 次	70.0/11 次	6.5/11 次	27.7/11 次	1.23×10^{-1}

表 4 填筑料颗粒分离试验结果

层 位	ρ_d /g·cm ⁻³	>2.0 mm (%)	>5.0 mm (%)	>20.0 mm (%)	<0.1 mm (%)	d_{10} /mm	d_{20} /mm	d_{50} /mm	d_{60} /mm	c_u (d_{60}/d_{10})
上层	范围值	1.85~2.30	57.8~61.0	48.0~71.0	21.1~55.5	5.0~11.5	0.058~0.88	0.37~5.6	4.50~28.5	11.5~232.0
	平均值	2.03	68.8	59.1	41.6	8.4	0.25	1.32	12.9	23.3
下层	范围值	1.65~2.25	68.3~97.0	58.5~96.5	37.2~89.8	1.59~10.5	0.097~2.50	0.52~42.0	9.6~10.2	17.5~99.0
	平均值	1.78	85.2	79.0	67.6	4.4	2.69	11.8	57.0	75.5

过多,形成架空结构,使原级配性质变差,难以压实;③由于下层颗粒变粗,下层 d_{10} 和 d_{20} 均比上层增大,我们采用哈增和中国水利科学研究院推荐的计算渗透系数公式对上下层的 K 值进行计算,因下层 d_{10} 、 d_{20} 分别增大,则渗透系数也明显提高。

通过 K 值计算知:①由于计算公式不同,同层渗透系数相差 1~5 倍;②由于填筑料产生分离,级配发生变化,下层比上层的渗透系数大 115~180 倍;③下层平均粒径 d_{50} 为 57.0 mm,上层平均粒径为 12.9 mm,增大 4.4 倍,亦表明下层颗粒变粗;④不均匀系数 c_u 上层最大值是最小值的 6.7 倍,而下层最大值是最小值的 4.6 倍,说明下层颗粒粗细变幅大。另外,由现场检测分析知,造成填料颗粒分离的原因是:沟后水库料场掌子面高 70 余米,开挖后粗料集中,装运不当造成第一次分离;由于自卸汽车高位卸料,铺料时又不做处理造成第二次分离。施工时摊铺厚度过大,粗料集中在各层下部 60~80 cm 以下,采用灌砂法或粒子密度仪难以测到应取深度,故施工质量检测结果仅仅反映该压实层中上部质量,并不代表整个压实层的压实效果。

5 关于坝体上下分层问题

经我们对溃口剖面观察和中国水利科学研究院刘杰教授的建议,在坝体不同高程,填

筑料的粗细比例、剖面坡度等方面有一些差异,为证实是否因填筑料和坝料的原因使坝体有明显分层现象,故按观察分五层取样试验,其结果列入表 5,分层如图 2。试验结果表明:①第四层小于 0.1 mm 颗粒含量平均值为 6.4%,均为五层中含量最小, d_{50} 均值 31.2 mm;大于 5.0 mm 含量平均值为 72.4%,均为五层中最粗,这与对该层观察的特征基本相符。②第一、二层 $d_{50} > 5$ mm 的含量小,比其它层颗粒要细,这也与目观特征一致。第三层密度最大,级配良好,也符合剖面实际情况。总之,从坝体一些填筑层的颗粒级配、结构的紧密程度比较,测试值与观察值有一致之处,而有些部位又无明显对应关系,因此以此判断回填造成坝体分层原因尚不充分,但可证明填筑料的不均匀性对分析溃坝原因有一定参考价值。

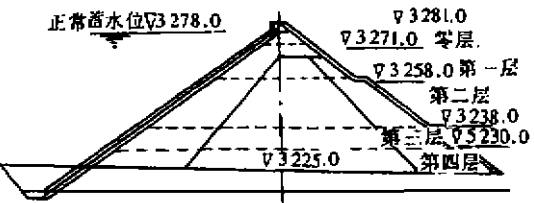


图 2 溃口剖面观察分层示意
(左右剖面分层高程相同)

6 溃坝原因及教训

a. 通过试验分析研究认为,溃坝原因主

表 5 坝体溃口剖面五层物理试验结果

层 次	高 程 /m	层 厚 /m	观察特征	ρ_s /g·cm ⁻³	d_{50} /mm	不同粒径含量(%)		K /cm·s ⁻¹
						<0.1 mm	>5.0 mm	
零 层 (YP-0)	3277 ~3271	6	结构疏松、颗粒 分离多而明显	2.18~1.97 2.1/4	6.0~13 10.88/4	10.0~14.0 12.1/4	53.5~61.0 57.4/4	2.79×10^{-2} 2.10×10^{-3} 5.8×10^0 1.7×10^{-2}
第一层 (YP-1)	3271 ~3258	13	剖面有冲沟,坡 度缓,大卵石少	1.84~2.24 2.08/11	7.5~45.5 7.4/11	5.5~21.0 7.4/11	54.0~68.6 60/8	1.48×10^{-2} 2.1×10^{-3} 7.7×10^{-3} 3.5×10^{-1}
第二层 (YP-0)	3258 ~3238	20	坡陡、含大卵石 较一、三层多	1.84~2.37 2.12/12	5.5~43.5 19.6/9	5.0~19.0 9.4/9	43.0~77.0 63.6/9	7.7×10^0 1.7×10^{-3}
第三层 (YP-II)	3238 ~3230	8	坡陡、颗粒 比二层细	2.09~2.27 2.18/5	9.6~11.5 10.25/3	6.4~11.0 8.2/3	63~71 67.3/3	
第四层 YP-IV	3230 ~3225	5	坡陡、颗粒 最粗	1.91~2.3 2.12/4	31.2/5	6.4/5	72.4/5	

要是坝顶防渗体失败,导致库水大量入渗(测试中发现面板顶水平缝的橡胶止水大都脱离墙底座,且形成空洞,洞内有大量草屑和冲刷痕迹,面板 3255.0 m 高程水平缝止水也不佳),且由于坝体上部砂砾石颗粒分离严重,形成水平渗漏通道,使上部坝体迅速饱和,造成坝体和坝坡的渗透破坏、渗流冲刷和局部滑塌,形成初期溃口,随库水下泄,冲刷坝体,最终溃坝。因此,在这类坝型施工中不但要保证砂砾石坝体的填筑质量,也要保证面板及接缝防渗体止水的质量,这样才会使大坝万无一失。

b. 坝体原设计从上游到下游分为四个区,经试验和观察,四个区的实际技术指标没有明显的差异,坝体近似砂砾石均质坝。因此这类坝施工中一定要按设计要求施工,确保相对密度由大到小排列,其目的是考虑使坝体透水性能逐渐加大。而施工中未按设计施工,运行中排水不畅,是形成溃坝的直接原因。建议在今后施工中,如果填筑料过细,一定要设专门排水体。青海小干沟和黑泉面板堆石坝体现了这一设计,加设了“乙”型排水体,确保坝体排水畅通。

c. 由试验分析知,坝体填筑质量分离现象有些部位较严重。在颗粒分离严重区,坝体无法压实,出现了干密度的低值,产生架空现

象,形成渗透通道,使渗透系数增大到 10^{-1} cm/s 和 10^0 cm/s。因此要考虑料场材料在施工中的颗粒分离和变异,不能简单搬用料场勘探后试验设计结果,而需要在填筑时做碾压试验,对填筑料的级配及渗透性能做校核试验后调整施工质量控制标准和有关参数。

d. 从含水量测定值难以确定浸润线位置,但在 3277.0 m 高程以下试坑的开挖中多处可见渗流痕迹,故可认为 3277.0 m 高程是浸润线最高出逸点部位,这与坝顶防渗体失效导致库水入渗有密切关系。

e. 根据本次试验测定,坝体填筑干密度平均合格率只有 24%,坝体中间部位测定的干密度合格率也只有 38%。根据土坝施工质量的要求,坝体总体施工质量较差。建议今后的质检一定要按规范要求进行,不但要控制填筑干密度值、含水量值和相对密度值,也要注意铺土厚度、碾压遍数、碾压机具的选择等参数,综合评价和控制坝体填筑质量,不能用单纯的一个参数评价其填筑质量。

参考文献

- 1 李君纯.青海沟后水库及其溃坝原因分析.岩土工程学报,1994(6)
- 2 刘杰.土的渗透稳定与渗流控制.北京:水利水电出版社,1992

(收稿日期:1996-12-31 编辑:熊水斌)

三峡工程之最

▲三峡工程从首倡到正式开工有 75 年,是世界上论证历时最长的水利枢纽。

▲三峡工程的兴建问题在国内外都受到广泛的关注,是首次经过我国最高权力机关全国人民代表大会审议的投票表决的水利工程。

▲三峡水库总库容 393 亿 m^3 ,防洪库容 221.5 亿 m^3 ,水库调洪可削减洪峰流量 2.7~3.3 万 m^3/s ,是世界上防洪效益最为显著的水利工程。

▲三峡水电站总装机 1820 万 kW,年发电量 846.8 亿 kW·h,是世界上最大的电站。

▲三峡工程包括大坝、电站、通航建筑物,总长 2309.5 m。泄流坝段 483 m,水电站机组 26×70 万 kW,双线五级船闸加升船机,无论单项、总体都是世界上建筑规模最大的水利工程。

▲三峡工程深水围堰最大水深 60 m,土石方月填筑量 170 万 m^3 ,混凝土月浇筑量 45 万 m^3 ,碾压混凝土最大月浇筑量 38 万 m^3 ,月工程量都突破世界纪录,是水利施工强度最大的工程。

▲三峡工程截流流量 1.4~1.9 万 m^3/s ,施工导流最大洪峰流量 7.9 万 m^3/s ,是世界水利工程施工期截流量最大的工程。

▲三峡工程水库移民最终可达百万左右,是世界上水库移民最多、最为艰巨的移民建设工程。

(摘自 1997 年 11 月 8 日《中国水利报》)