

# 龙羊峡水库地震溃坝的可能性及溃坝洪灾程度的分析<sup>\*</sup>

高思如, 郭安宁, 王兰民, 焦 姣, 李 鑫

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 讨论了龙羊峡库区将来发生大地震的可能性; 分析了万一产生溃坝的灾害链问题。计算了其溃坝后洪水到达下游贵德县、康扬镇、尖扎县、循化县和兰州市的洪水最大流量、洪水起涨时间和消退时间。

**关键词:** 龙羊峡水库; 断裂带; 地震; 溃坝; 洪水

**中图分类号:** P642.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2011)02-0050-04

龙羊峡水电站位于青海省共和、贵南两县交界的黄河龙羊峡谷进口段, 被称为黄河上游龙羊峡至青铜峡河段的“龙头”水库, 属第一座梯级水电站, 也是最大的高原水库。主坝为混凝土重力拱坝, 最大坝高 178 m, 总库容 276.3 亿 m<sup>3</sup>。水库设计正常蓄水位 2 600 m, 相应库容 247 亿 m<sup>3</sup>, 设计水头 122.0 m, 最大水头 148.5 m, 最小水头 75.5 m, 水库淹没面积 380 km<sup>2</sup>, 具有优良的多年调节性能<sup>[1]</sup>。陈厚群院士指出<sup>[2]</sup>: “水库大坝的抗震防灾战略重点应当是防止遭遇最大可能的极端地震时发生水库失控下泄所导致严重次生灾害的溃决灾变。为此必须合理确定坝址可能发生的最大地震, 即 MCE, 以及设计中对各类坝型溃决极限状态的定量准则。这两个问题是当前在大坝安全评估中的主要障碍和亟待解决的前沿课题, 是必须面对的挑战”。而龙羊峡水库坝址地质条件十分复杂, 不仅坝高库大, 而且处于高寒缺氧和地震(含水库地震)较频的地质环境中。另外其下游有青海省的贵德县、康扬镇、尖扎县、循化县等和我国西北著名的工业城市兰州市。因此, 对于龙羊峡这种高坝溃坝的灾害链问题<sup>[3]</sup>作一些讨论是很必要的。

## 1 龙羊峡地区的地质构造和地震背景

### 1.1 地质构造

龙羊峡库区(35°30′~36°30′N, 100°00′~101°

30′E)位于青海共和盆地东部边缘。共和盆地是青藏高原范围内第三纪以来形成的菱形断陷盆地, 其北缘是青海南山, 南边是阿尼玛卿山, 西缘是鄂拉山, 东缘是瓦里贡山<sup>[4]</sup>。据朱德瑜等人的研究<sup>[5]</sup>, 盆地块体周围沿山脉分布着一系列深大断裂带, 如图 1 所示。而龙羊峡水库就位于瓦里贡山—岗察寺活动断裂带附近。它包括大山水沟断层、东龙沟断层、曲乃亥断层、拉西瓦断层和伊黑龙断层。断裂带总体走向为 NNW 向, 大部分为逆冲断层, 倾角较陡。1996 年 12 月 19 日在伊黑龙断层的北端发生了 4.9 级地震<sup>[6]</sup>。这说明瓦里贡山—岗察寺活动断裂带现在是活动的。

龙羊峡坝区位于共和盆地东部边缘巨大的印支期花岗岩闪长岩岩盘的边缘地带。花岗岩闪长岩岩性坚硬, 断裂十分发育, 仅坝轴线附近的大断裂就有 5 条, 还有 3 条大断裂贯穿下游两岸山体, 而且龙羊峡坝肩比较单薄<sup>[7]</sup>。

### 1.2 地震

1990 年前的几百年内, 共和盆地及其周边中强以上地震活动水平相当低, 几乎没有发生 5 级以上地震。自 1981 年为防洪需要暂时拦洪和 1986 年大坝正式蓄水以来, 随着库水位的升高, 库区小震活动水平明显增强。1990 年 4 月 26 日距水库 45 km 的塘格木发生了一次 7.0 级地震, 等震线图如图 2 所示, 且该地区直至 1994 年 10 月共发生了 10 次 5 级以上中强地震。1996 年 12 月 14 日 17:00, 在龙羊峡库区北东距大坝 20 km 左右, 发

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-09-30

基金项目: 国家科技部公益专项“黄河上游水库群强震灾害链预测研究”(8-44)

作者简介: 高思如(1984-), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事地震震害预测研究. E-mail: haimohan66@yahoo.com.cn

生了一次显著的震群活动;到1997年3月13日震群活动基本结束,历时3个月;整个序列共发生 $M_L \geq 1.0$ 地震278次,最大地震为1996年12月19日 $M_L 4.9$ 地震,震中距大坝20 km,库区震感强烈,但未造成太大破坏;根据青海省地震局地震现场考察,本次地震震级小,但震源很浅,地震造成VI度烈度区(倒淌河—拉脊山一带)内产生大量的地表裂缝,裂缝最长几十米,最宽4~5 cm<sup>[6]</sup>。2000年9月12日青海省海南州兴海县发生6.6级地震,此次地震震级大,震源深,有感范围广,有感范围波及到海北州、果洛州、黄南州、西宁市,甚至甘肃省兰州市<sup>[8]</sup>。

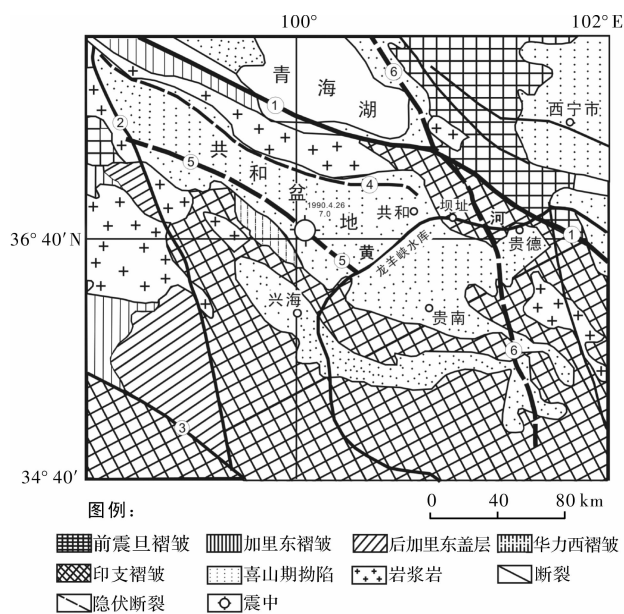


图1 共和盆地构造分区图(构造据朱德瑜等<sup>[5]</sup>)

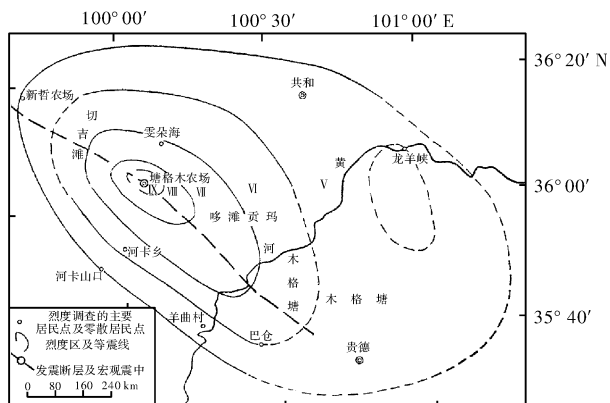


图2 青海共和塘格木农场地震等震线图<sup>[9]</sup>

### 1.3 滑坡

龙羊峡库区的地形从上游向下游依次为吾哈

士峡、野狐峡、拉干峡、共和盆地和龙羊峡谷。库盆为第四系湖相沉积地层和松散的河流沉积层所覆盖。库区上游两岸的高台地上,分布有沙漠,近坝址区的右岸,分布有许多滑坡,库岸陡峻,高达300~500 m,系以超固结软性为主的湖相地层。

在区内14.3 km河段中,滑坡分布地段长达13 km,占整个地段的90%左右。这些滑坡的共同特点是规模大( $10^6 \sim 10^8 \text{ m}^3$ )、滑速高(20~45 m/s)、滑程远(1.5~3 km)。如距坝6.5 km的查纳滑坡发生于1943年农历正月初三,下滑量达1.6亿 $\text{m}^3$ ,滑体前缘向前推进约3 km,埋没了河边林带及坡下的查纳村,使黄河断流,估算最大滑速45 m/s<sup>[10-11]</sup>。

## 2 龙羊峡水库溃坝的可能性

从图1中可以看出,有一个①号断裂,即青海南山一天水断裂带,通过坝区附近。这是一个活动的大断裂带。在1976年国家地震局编制出版的《中国活动性构造和强震震中分布图》(300万分之一)上,也有这条重要的断裂带,与图1中的相同。说明这个断裂带是比较肯定的。在这个断裂带天水段,历史上曾在143年发生过7级地震(甘谷西),另外还有1654年8级地震。由于1654年8级地震可能与南北地震带有关,我们不把它移植于青海南山一天水断裂带上。但已经有7级地震说明这个断裂带是可能发生强震的。这个断裂带于1936年在康乐西南曾发生6.7级地震,接着在该断裂的青海天峻西于1938年8月23日发生6级地震,说明该断裂是十分活跃的。

此外,于1990年在共和西南塘格木农场地区曾发生7级地震,该地震的发震构造是一个隐伏断裂(图1中⑤号断裂,即哇玉香卡—拉干断裂)。1996年12月19日4.9级地震就发生在瓦里贡山—岗察寺活动断裂带的伊黑龙断层的北端。这说明在龙羊峡的大区域内发震背景是很高的。

根据以上所述,我们不能对通过龙羊峡库区的青海南山一天水断裂带、哇玉香卡—拉干断裂带和瓦里贡山—岗察寺活动断裂带的地震震级估计过低。地震危险性分析上有一种观点,认为一个地区的最大地震可用过去表现过的最大地震加半级<sup>[12]</sup>。这样我们可把通过龙羊峡的最大可能地震定为7.5级。对于7.5级地震,它一旦发生在地表是可以产生断层错动的。而当该错动发生在坝体时,按台湾1999年7.3级集集地震时一个次生

断层发生错动就可把坝高 24.4 m 的石岗混凝土重力坝错断,故陈厚群院士指出<sup>[2]</sup>:“应当说,像石岗这类少有的坝基中断层大幅度错断的‘抗震’问题,并不属于抗震安全的范畴。目前各类大坝尚无法抗御这类灾害”。那么在青海南山一天水断裂带或者哇玉香卡一拉干断裂发生 7.5 级地震的情况下,是否可牵动坝址附近的次生断层呢?这虽然不能肯定,但也不能完全排除,所以我们从“以防万一”角度出发对龙羊峡溃坝作最坏情况考虑。

另外,龙羊峡库区是高滑坡地段,而当水库一旦溃坝,溃坝将造成上游水位急剧下降,破坏库岸原有稳定结构,将引发上游大面积发生滑坡、崩塌,大滑坡滑入水库地区其涌浪对水坝造成破坏也会加剧溃坝的程度。

因此,考虑到龙羊峡高坝大库引发次生灾害的地震灾变的极端重要性,对龙羊峡水库进行溃坝洪水计算分析,以下就是溃坝后的水力计算。

### 3 溃坝洪水分析<sup>[13]</sup>

#### 3.1 坝址断面溃坝最大流量

坝址处溃坝最大流量计算采用黄河水利委员会水利科学研究所根据实验求得的公式:

$$Q_m = \frac{8}{27} g^{1/2} (B/b)^{0.4} \{ [11H_0 - 10(H_0 - h)/H_0] \}^{0.3} \times b(H_0 - h)^{3/2}, \quad (1)$$

式中:  $B$  为坝址断面平均宽度(m);  $H_0$  为溃坝前上游水深(m);  $b$  为溃口平均宽度(m);  $h$  为溃坝后坝体的残留高度(m);  $g$  为重力加速度( $m/s^2$ )。

该公式对边界条件没有特别的要求,适用条件较广,因此,本计算采用该公式进行计算。此外,由于  $Q_m$  的大小与溃坝时的坝址水深、坝址断面形状及尺寸有关,溃坝时有可能瞬间局部决口或局部渐垮,也有可能瞬间全垮,其中后一种情况最恶劣,在各水库大坝溃决工况难以确切估计的情况下,均按极端情况考虑为瞬间全溃、瞬间 1/2 溃、瞬间 2/3 溃和瞬间 1/3 溃坝来计算。

#### 3.2 溃坝洪水向下游演进

##### 3.2.1 溃坝下游某处的最大流量

溃坝洪水向下游演进到某处最大流量计算采用李斯特万公式,目前,该公式在我国的溃坝洪水计算中使用较多,运用相对成熟。李斯特万经验公式:

$$Q_{LM} = \frac{W}{\frac{W}{Q_m} + \frac{L}{vk}}, \quad (2)$$

式中:  $Q_{LM}$  为当溃坝最大流量演进至距坝址  $L$  处时,在该处出现的最大流量( $m^3/s$ );  $W$  为水库溃坝时的库容( $m^3$ );  $Q_m$  为坝址处的溃坝最大流量( $m^3/s$ );  $L$  为距坝址的距离(m);  $v$  为河道洪水期断面最大平均流速,在有资料的地区  $v$  可采用历史上的最大值,如无资料,一般山区可采用  $3 \sim 5 m/s$ ,半山区可采用  $2 \sim 3 m/s$ ,平原区可采用  $1 \sim 2 m/s$ ;  $K$  为经验系数,山区为  $1.1 \sim 1.5$ ,半山区为  $1.0$ ,平原区为  $0.8 \sim 0.9$ 。

此外,黄河水利委员会根据实际资料分析认为,公式中的  $vK$  值应取下列数值:山区河道,  $vK = 7.15$ ; 半山区河道,  $vK = 4.76$ ; 平原区河道,  $vK = 3.13$ 。

##### 3.2.2 洪水起涨时间

洪水起涨时间  $t_1$  利用下式进行计算:

$$t_1 = K \frac{L^{1.75} (10 - h_0)^{1.3}}{W^{0.2} H^{0.35}}, \quad (3)$$

式中:  $W$  为可泄库容(可泄总水量,  $m^3$ );  $H$  为坝上游水深(m);  $L$  为距坝址距离(m);  $h$  为溃坝洪水到达前下游计算断面的平均水深(m);  $K$  为系数,等于  $0.65 \times 10^{-3} \sim 0.75 \times 10^{-3}$ ,取平均值  $0.7 \times 10^{-3}$ ;  $t_1$  为洪水起涨时间(s)。

##### 3.2.3 洪水消退时间

洪水消退时间  $t_3$  利用下式进行计算:

$$t_3 = \frac{2W}{Q_{LM}} + t_1, \quad (4)$$

式中:  $Q_{LM}$  为计算断面处最大流量( $m^3/s$ );  $W$  为下泄总水量( $m^3$ );  $t_1$  为洪水起涨时间(s);  $t_3$  为洪水消退时间(s)。

#### 3.3 计算结果

进行溃坝洪水计算的目的是确定下游各不同断面的洪水最大流量、洪水到达时间、洪水消退时间,以便采取预防及转移等措施。计算结果见表 1。

### 4 结语

青海南山一天水断裂带、哇玉香卡一拉干断裂带以及瓦里贡山一岗察寺活动断裂带均距离龙羊峡水库区较近,一旦在这些断裂带发生大地震,其对龙羊峡水库溃坝可能性是应当慎重考虑的。目前,对溃坝的可能性还不好估计,但从“以防万一”考虑,也要考虑其可能性。因此本文也对溃坝洪水演进进行计算。

表 1 龙羊峡不同方式溃坝下洪水到达某处的最大流量、起涨时间和消退时间

龙羊峡全溃状态				
断面名称	溃坝坝址处最大流量 $Q_m/(\text{m}^3/\text{s})$	溃坝下游某处断面洪水流量过程参数		
		最大流量 $Q_{lm}/(\text{m}^3/\text{s})$	起涨时间 $t_1/\text{h}$	消退时间 $t_3/\text{h}$
贵德	1 569 290. 67	1 054 118. 40	0. 68	13. 70
康扬		728 153. 62	3. 06	21. 90
尖扎		685 743. 18	3. 70	23. 71
循化		556 169. 47	6. 78	31. 45
兰州		331 628. 85	23. 79	65. 17
龙羊峡 2/3 溃状态				
贵德	1 183 018. 34	864 509. 79	0. 68	16. 55
康扬		632 350. 51	3. 06	24. 76
尖扎		600 118. 80	3. 70	26. 57
循化		498 485. 11	6. 78	34. 31
兰州		310 223. 34	23. 79	68. 02
龙羊峡 1/2 溃状态				
贵德	713 334. 41	583 670. 13	0. 68	24. 19
康扬		467 732. 74	3. 06	32. 39
尖扎		449 861. 10	3. 70	34. 20
循化		390 221. 12	6. 78	41. 95
兰州		264 546. 37	23. 79	75. 66
龙羊峡 1/3 溃状态				
贵德	273 092. 07	251 686. 41	0. 68	55. 20
康扬		227 382. 56	3. 06	63. 40
尖扎		223 074. 37	3. 70	65. 21
循化		207 359. 12	6. 78	72. 96
兰州		165 564. 08	23. 79	106. 67

计算溃坝洪水时,洪水到达下游的时间、到达下游的流量过程和洪水消退过程是人们最关心的。本文未考虑龙羊峡下游各梯级水库的调洪作用,直接从龙羊峡溃坝向下游沿河道进行演进,求得了其溃坝后洪水对下游黄河边上的城镇贵德、康扬、尖扎、循化和兰州的洪水最大流量、洪水起涨时间和消退时间。

据悉,近期我国西部在建和拟建 200 ~ 300 m 级的高坝,而我国西部广大地区又是强烈地震活动区,因此本文对今后建立高坝的防灾问题也是一种参考。而在一些黄河支流会修建许多中小型水库,我们也要进一步研究,例如在 2008 年汶川 8.0 级地震导致中江县位于地震烈度 VI ~ VII 度的 38% 的水库发生高危险情以上震损破坏<sup>[14]</sup>,因此对于这些中小型水库也是应当重视的。

## 参考文献:

- [1] 国家电力公司西北勘测设计研究院. 黄河上游水电站工程 [R]. 深圳: 雅昌彩色印刷有限公司, 2002.
- [2] 陈厚群. 汶川地震后对大坝抗震安全的思考[J]. 中国工程科学, 2009, 11(6): 44 - 53.
- [3] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987(2): 25 - 33.
- [4] 王新玲. 龙羊峡区域地质构造形成机制研究[J]. 水文地质, 2001(S0): 72 - 74.
- [5] 朱德瑜, 肖振敏, 陈玉华, 等. 1990 年青海共和 7.0 级地震发震构造特征[C]//地壳构造与地壳应力文集. 北京: 地震出版社, 1997: 78 - 85.
- [6] 张敏, 张启胜. 龙羊峡水库区的地震活动[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 216 - 218.
- [7] 马启超, 戚蓝. 龙羊峡坝区三维地应力场及其断裂带机制分析[J]. 岩土工程学报, 1993, 3(5): 1 - 8.
- [8] 孙洪斌, 杨青春, 马玉虎, 等. 兴海 6.6 级地震灾害调查与损失评估[J]. 高原地震, 2001, 13(1): 60 - 65.
- [9] 陈章立. 中国地震年鉴[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [10] 李季, 苏怀智, 胡江. 龙羊峡近坝岸滑坡群稳定性分析及预警技术研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 599 - 604.
- [11] 刘汉超, 张倬元. 龙羊峡附近超固结粘土大型滑坡的形成机制及高速远滑的原因[J]. 成都地质学院学报, 1986, 13(8): 94 - 104.
- [12] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [13] 李炜. 水利计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [14] 陈国兴, 景立平, 周新贵, 等. 汶川 8.0 级地震后中江县水库震害调查与分析[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 69 - 74.