

水库诱发地震若干震例的初步分析

肖安予

(广东省地震局地震科学研究所)

本文对国内外63个水库诱震震例进行了分析,就其工程意义做一些探讨。

一、水库蓄水对当地地震活动的影响

可归纳为四种类型:

1. 水库位于无震区、蓄水后出现频繁的地震活动,例如乌溪江水库,库区及邻近地区在蓄水前均未发现地震活动。蓄水后四个月,随水位的升高,库区发生了一系列地震。属此类型的还有柯依纳和卡里巴等三十多座水库。

2. 水库位于有地震活动的地区,蓄水后地震频度和强度大大超过当地及其邻近地区的正常水平。例如新西兰的本莫尔水库,蓄水后库区及邻近地区地震增加3—6倍,日本的釜房则增加约100倍。克里马斯塔和新丰江等十余座水库也属此类型。

3. 伴随水库蓄水,附近的地震向库区迁移。丹江口水库区的观测资料表明,蓄水前外围(特别是库西北赵川一带)有较频繁的小震活动。随着库水位的升高,地震向库岸迁移,频度和强度渐增。诺勒克和奥尔托—托科伊等水库属此类型。

4. 由于水库蓄水,库区的地震活动水平下降。我国台湾的曾文水库,美国的佛莱敏谷(Flaming Gorge),巴基斯坦的塔尔贝拉(Talbel)等属此类型。

所谓水库诱发地震,主要指前三种类型。

二、水库地震的主要特点

与一般构造地震相比,水库诱发地震主要有下述特点:

1. 它同水库蓄水密切相关 在无震区,发生于水库开始蓄水之后;在地震活动区,因水库蓄水而显著加强。

在活动水平(频度和强度)上,一般随库水位的上升而增强。最大地震往往发生在最高库水位(尤其是第一次高水位时期),每因地质背景的差异而稍有滞后(如座落于花岗岩体之上的新丰江水库),或提前(如库区分布有碳酸岩且古岩溶发育的克里马斯塔水库)。因而,按正常情况蓄水的水库,是否诱发地震,诱震强度的高低,通常在蓄水后的头十年内可见分晓。

库水位的急剧变化,常常引起地震活动的明显变化。一般水位急速上升(加载),地震活动水平随之升高;水位快速下降甚至放空(卸载),地震活动减弱。当然也有例外。例如卡多水库,在库水位升高时引起了频繁的地震,放空后,却又导致了一连串地震。

2. 它的空间分布与水库有密切的联系 水库地震一般局限于库区,且多密集于水域边缘特别是大坝附近的峡谷区。

震源深度很浅,多数为1—5公里,一般不超过10公里。

新丰江和柯依纳的地震资料表明,在主震发生前夕,小

震有大致沿水库延伸方向往返跳迁,然后在接近大坝处发生主震的情况。

3. 地震序列延续时间长,余震频繁且强度高 水库地震序列一般延续数年甚至数十年。主震震级仅2.4级的南水水库,地震序列竟延续近七年,而其邻近地区同时期发生的构造地震,尽管震级较大,延续二、三个月便停息。新丰江水库共记录 $M_c \geq 0.4$ 级的余震约25万次,延续近20年,尚无停息迹象。

水库地震的余震不仅频繁,而且强度也较大。卡里巴在6.1级主震之后,接着又发生6.0级余震一次,5.8级余震2次,5.5—5.6级余震3次,最大余震与主震震级的比值高达0.98。克里马斯塔的最大余震为5.5,与主震震级的比值为0.89。柯依纳 ≥ 5.0 级的余震多达15次。

4. 震级有限,烈度偏高 至今水库诱发的最大地震还没有超过6.5级者。但由于震源很浅,震中烈度往往偏高。1级的地震,震中区就有感觉;2—3级地震,震中烈度可达IV—VI度。

5. 波速比异常延续时间短且空间范围小 新丰江水库地震波速比 V_p/V_s 的研究表明,由于库水的作用,6.1级主震前的 V_p/V_s 异常延续的时间仅约11个月,异常区的长度仅约20公里,只分别相当于相同震级的构造地震统计值的1/3和1/5。

6. 在震源错动型式中倾滑型占有显著地位 在有震源机制资料的5个诱发强震型地震的震例中,卡里巴、柯依纳和克里马斯塔的主震均为倾滑型,奥鲁维尔因主震初动不清,不能求解,但从主震前后的较强地震的震源机制解均为倾滑型推测,其主震也很可能是倾滑型。仅新丰江的主震为走滑型。

7. 标示大小地震比例关系亦即频度~震级关系 b 的值较高,且前震的 b 值又较余震高(表1)而一般构造地震则相反。

表 1

| 库(坝)名 | 前震 b 值 | 余震 b 值 | 区域构造地震 b 值 |
|----------|----------|----------|--------------|
| 新丰江 | 1.12 | 1.04 | 0.72 |
| 卡里巴 | 1.18 | 1.02 | 0.53 |
| 克里马斯塔 | 1.41 | 1.12 | 0.64 |
| 柯依纳 | 1.87 | 1.09 | 0.51 |
| 丹江口(林茂山) | 1.05 | 0.98 | 0.51 |
| 南水 | | 0.95 | 0.47 |

(据 Gupta、沈崇刚、高锡铭等)

8. 地震活动度 (A 值) 高 由于水库地震一般频度较高, 空间分布十分密集, 因此单位时间、单位面积内的地震次数多——地震活动度高。例如, 新丰江水库的 A 值, 比苏联加尔姆地区 (世界上构造地震 A 值较高的地区之一) 要高两个数量级。

三、水库诱震的地质背景

研究表明, 水库诱震的形成有着特殊的地质条件。

1. 绝大多数诱震水库位于现今仍处活动阶段的大地构造单元内。最新的火山喷发, 断层的复活与新生, 较急剧的差异升降运动等等, 标志着较强烈的新构造运动, 因而能够积累一定数量的构造应变能, 造成利于诱震的初始应力状态。

2. 相当数量的震例处于中生代断陷盆地或其附近。几乎所有的诱震水库区断层、裂隙发育; 陡倾角的活动性张性及张剪性断层对水库诱震更为有利。诱发地震活动频繁而强烈的地段, 往往是多组断裂的交汇处, 特别是与现今区域构造应力场中最大剪应力方向一致或接近的那两组断裂的交汇处。

3. 在已掌握岩性资料的 49 个诱震水库中, 库区有碳酸岩类分布的占 53%, 发展地段多在岩溶发育地段; 有 20.5% 的水库位于火山岩及花岗岩地区。库区为粘土岩和砂页岩很少诱发地震。库底有较厚的泥质沉积物, 也不利于水库诱震。

4. 库区周围隔水层的分布, 可形成大致圈闭的水文地质条件, 有利于保持较大的水头压力, 使库水得以向深部渗入, 改变岩体的物理力学性质, 增加构造裂隙特别是断层中的孔隙压力, 使库水的诱震作用得以更好地发挥。

5. 温泉及地热异常的存在, 可能有利于诱震。因为在十多个震例中 (包括四个诱发 6 级地震的), 库区发育有温泉或处热水区。

此外, 我国部分诱震水库如新丰江、丹江口、前进、黄石等, 均位于高重力梯度带。

由于我们还未确切地掌握水库诱震的地质条件, 上述诸项仅仅是从已有震例中分析出来的初步认识。不过, 可以设想, 这些条件愈齐备, 诱发地震的可能性就越大, 强度也可能越高。

四、坝高对诱发地震的影响

据已有震例的分析, 坝高 (库水深度) 的差异对诱震有着不同的影响。

1. 坝体越高 (相应地库水越深), 诱发地震的可能性越大。

世界上有坝高 ≥ 15 米的水库约三万座, 已知诱震的 < 0.3%。然而, 在坝高 ≥ 100 米的 318 座水库中, 已知诱震的有 34 座, 约占 10.7%; 在 70 座坝高 ≥ 150 米的水库中, 已知诱震的有 14 座, 占 20%; 在 25 座坝高 ≥ 200 米的水库中, 竟有 8 座诱发了地震, 高达 32%。

据 60 座诱震水库的资料, 其中坝高小于 50 米的 5 座, 仅占 8.3%; 坝高 50—99 米的 21 座, 占 33%; 坝高 ≥ 100 米的有 34 座, 超过诱震水库总数的一半, 比例高达 56.7%。

2. 坝体愈高, 诱发较强地震的概率愈大。

根据各水库诱发的最大地震的强度, 可将其划分为微弱 (最大地震 < 4.0 级, 或震中烈度 $\leq V$ 度)、中强 (最大地震

为 4.0—5.4 级, 或震中烈度 VI—VII 度) 和强烈 (最大地震 ≥ 5.5 级, 或震中烈度 $\geq VIII$ 度) 三种类型。分析发现, 坝高 < 50 米的诱震水库, 其强度均为微弱型, 诱发中强型地震的水库, 坝高都在 50 米以上, 并且其中 60% 的水库坝高 > 100 米; 诱发强烈型地震的水库, 坝高全部大于 100 米。

五、水库地震的分布

据现有资料, 在二十个国家的水库地震震例中, 以美国 (12 例)、中国 (11 例)、澳大利亚 (4 例)、意大利 (4 例)、苏联 (4 例) 和印度 (可靠的 3 例, 可疑的 8 例) 等国家较多。也正是上述各国, 已建成的各类水库特别是高坝大库比较多。

对照世界地震分布图, 水库地震极少发生在主要地震带内。对蓄水前后均有地震资料的水库地震震例分析表明, 2/3 为强烈型、1/2 为中强型以及大多数微弱型震例位于无震和弱震区。日本位于著名的环太平洋地震带, 地震强烈而频繁。可是, 在近三千座坝高 ≥ 15 米的水库中, 仅两座即不到千分之一的水库诱发了地震; 在 44 座坝高 ≥ 100 米的水库中, 仅有一座诱发了地震, 只占 2.3%。上述数字远远低于前述的世界平均值。我国的 11 座诱震水库中, 有 10 座位于无震及弱震区。我国的台湾省地震频繁而强烈, 高坝水库也不少, 至今尚未报导过诱发地震事件。

六、从柯依纳和新丰江二震例看水库诱发地震的工程意义

印度柯依纳水库区在蓄水前从未发现过地震活动。在印度地震区划图上, 属于零度 (无震) 区。水库蓄水后五年, 却在距大坝约 3 公里处诱发了 6.4 级、震中烈度 VIII 度的地震, 整个工程遭受严重破坏而不堪使用, 死伤一千七百多人。

新丰江大坝原按地震基本烈度 VI 度设计、施工。水库蓄水后, 蓄区随即出现了频繁的地震活动。为确保大坝及下游几百万人民的安全, 按 VIII 度标准对大坝紧急加固。加固工程将完成时, 在离大坝 1.1 公里处发生 6.1 级、震中烈度 VIII 度的地震。大坝在整体稳定方面经受了考验, 但仍造成了较严重的破坏与损失。

由此可见, 水库诱发地震给水电工程的勘测设计提出了新的要求。

1. 勘测坝址时, 应注意当地是否存在有利于水库诱震的地质构造条件, 并尽可能地避开最可能的诱震部位。

2. 仅按一般构造地震的特点确定的地震基本烈度鉴定意见, 作为水电工程尤其是高坝大库的设计依据, 显然是不够的。因为, 水库的蓄水, 可能改变库区甚至邻近地区正常的地震孕育和发展过程, 不仅会导致发展时间的提前, 而且会使其频度和强度升高。大坝抗震设防标准过低, 不但招致水电工程本身的破坏, 还会带来严重的次生灾害。然而, 由于有的水库诱发了强烈地震, 便不加分析地一概提高设防标准, 既浪费资金和建材, 又会延长工期。

3. 由于震中多近大坝, 震源几乎就在坝体的下方, 竖向地面振动对大坝的影响较明显; 较强地震特别是主震多在高库水位时期发生, 动水压力对坝体抗滑稳定性的影响, 以及震源很浅, 在主震之后常有与主震震级相近的强余震活动等, 都是工程设计中不可忽视的因素。

水库地震震例简表

| 序号 | 库(坝)名及所属国家 | 坝高 (米) | 建库前地震概况 | 开始蓄水 时间 | 诱发初次 地震时间 | 诱发最大地震 (M_s) | |
|----|-------------------------|--------------|---|------------|--------------|------------------|--------------|
| | | | | | | 时间 | 震级或 震中烈度 |
| 1 | 新丰江(中国广东) | 105 | 弱震区 | 1959.10. | 1959.11. | 1962.3.19. | 6.1 |
| 2 | 卡里巴(Kariba, 赞比亚—津巴布韦) | 128 (125) | 无震区 | 1958.12. | 1961.7. | 1963.9.13 | 6.1 |
| 3 | 克里马斯塔(Kremasta, 希腊) | 165 (147) | 地震活动区。 但蓄水前15年, 库区40公里范围 内无地震活动。 | 1965.7. | 1965.12. | 1966.2.5. | 6.2 |
| 4 | 柯依纳(Koyna, 印度) | 103 | 无震区 | 1962.6. | 1963. | 1967.12.10. | 6.4 (6.5) |
| 5 | 阿科索博(Akosombo, 加纳) | 113 | 强震区 | 1958 | | 1964.11. | Ⅶ |
| 6 | 奥罗纳尔(Oroville, 美国) | 235 (236) | 弱震区 | 1967 | 1975.5. | 1975.8.1. | 5.8 (5.6) |
| 7 | 马拉松(Marathon, 希腊) | 63 | 地震活动区 | 1929.10 | 1931 | 1938 | 4.7 (5.0) |
| 8 | 米德湖(Lake Mead, 美国) | 221 | 无震区 | 1935 | 1936.9. | 1939.5.4. | 4.6 (5.0) |
| 9 | 富达湖(Qued Fodda, 阿尔及利亚) | 89 | 无震区 | 1932.12. | 1933.1. | 1954.9.9. | Ⅶ |
| 10 | 黑部第四(Kuyobe, 日本) | 186 | 弱震区 | 1960 | 1961.8. | 1961.8.19. | 4.5 |
| 11 | 蒙台纳特(Monteynard, 法国) | 155 | 无震区 | 1962.4. | 1963.4. | 1963.4.25 | 5.0 (4.9) |
| 12 | 瓦让(Vajont, 意大利) | 261 (266) | 1933年发生过 一次较强地震 | 1960.2. | 1960.10. | 1963.9. | 4.0 |
| 13 | 康脱拉(Contra, 瑞士) | 240 (230) | | 1964.8. | 1965.5. | 1965.10.11. | 4.0 |
| 14 | 匹阿斯脱拉(Piastra, 意大利) | 93 | 地震活动区 | 1965 | 1965.10. | 1966.4.7. | Ⅵ—Ⅶ |
| 15 | 本莫尔(Benmore, 新西兰) | 118 | 无震区 | 1964.12. | 1965.2. | 1966.7. | >4.5 |
| 16 | 巴耶纳(Bajina Basta, 南斯拉夫) | 89 | 地震活动区 | 1967.6. | 1967.7. | | 4.5—5.0 |
| 17 | 尤库巴内(Eucumbene, 澳大利亚) | 113 | 无震区 | 1958 | | | 5 |
| 18 | 沃格兰(Vouglans, 法国) | 110 | 弱震区 | 1969 | 1971.6. | 1971.6.21. | 4.5 |
| 19 | 佛子岭(中国安徽) | 74 | 中强地震区 | 1954.6. | 1954.12. | 1973.3.11. | 4.5 |
| 20 | 诺勒克(Hypek, 苏联) | 315 (317) | 地震活动区 | 1967 | | 1972.11.6. | 4.1 |
| 21 | 丹江口(中国湖北) | 97 | 弱震区 | 1967.11. | 1970.1. | 1973.11.29. | 4.7 |

续表

| 序号 | 库(坝)名及所属国家 | 坝高 (米) | 建库前地震概况 | 开始蓄水 时 间 | 诱发初次 地震时间 | 诱发最大地震 (M_s) | |
|----|--------------------------|--------------|---------|-------------|-----------------|------------------|--------------|
| | | | | | | 时 间 | 震级或 震中烈度 |
| 22 | 藤窝(中国辽宁) | 50.3 | 无震区 | 1972.11. | 1973.2. | 1974.12.22. | 4.8 |
| 23 | 齐尔克依(Чиркей, 苏联) | 233 | 地震活动区 | 1974.7 | | 1974.12.23. | 5.1 |
| 24 | 夏斯塔(Shasta, 美国) | 184 (183) | 无震区 | 1945 | | | 小震 |
| 25 | 瓦尔萨克(巴基斯坦) | 76 (70) | | 1951 | 1952 | | 小震 |
| 26 | 莫瓦桑(Mauwisin, 瑞士) | 237 | 无震区 | 1957 | | | 小震 |
| 27 | 安卑斯塔(Ambies a, 意大利) | 59 | | 1957 | | | 小震 |
| 28 | 卡马里拉斯(Camarillas, 西班牙) | 44 | 中等地震活动区 | 1960 | 1961.3. | 1961.12. | 3.5 (4.8) |
| 29 | 瓦拉根巴(Warragamba, 澳大利亚) | 137 | 无震区 | 1961 | | | 小震 |
| 30 | 恩蒂亚(Ential, 美国) | 37 | 无震区 | 1961 | | | 小震 |
| 31 | 洛基锐克(Rocky Reach, 美国) | 59 | 无震区 | 1961 | | | 小震 |
| 32 | 康内里斯(Canelles, 西班牙) | 150 (133) | | 1960 | 1962.6. | 1962.6.9. | V |
| 33 | 格兰特瓦尔(Grandval, 法国) | 88 (78) | 无震区 | 1959.9. | 1960.3. | 1963.8.5. | V |
| 34 | 卡多(Pieve di Cadore, 意大利) | 112 | | 1949 | 1950 | 1964.5.18. | 2.0 |
| 35 | 卡宾溪(Cabin Creek, 美国) | 10 (11.5) | 无震区 | 1925 | 1958(?) | 1967.4. | 1.5 (0.6) |
| 36 | 威尔扎斯卡(Verzasca, 瑞士) | 69 | | 1967 | | | 小震 |
| 37 | 圣路易斯(San-Luis, 美国) | 116 | 无震区 | 1967 | 1969.1. | 1969.6. | 2.5 (1.6) |
| 38 | 平头(Flat Head, 美国) | 60 | 无震区(?) | 1937 | 1969 | | 小震 |
| 39 | 格兰萨来沃(Grancarevo, 南斯拉夫) | 123 | 地震活动区 | 1967 | 1967.11. | 1970 | >2.0 |
| 40 | 南水(中国广东) | 81.5 | 无震区 | 1969.2. | 1969.12. (?) | 1970.2.26. | 2.4 |
| 41 | 埃尔格拉多(El Grado, 西班牙) | 130 (88) | | | | 1966.4. | IV |
| 42 | 釜房(Kamafusa, 日本) | | 微震活动区 | 1970.2. | 1970.4. | | 2.5 |
| 43 | 曼格拉(Mangla, 巴基斯坦) | 135 (136) | 地震活动区 | 1967.2. | 1967.3. | 1970 (1972) | 3.6 (3.5) |

续表

| 序号 | 库(坝)名及所属国家 | 坝高 (米) | 建库前地震概况 | 开始蓄水 时 间 | 诱发初次 地震时间 | 诱发最大地震 (M_s) | |
|----|-------------------------------|--------------|---------|----------------|--------------|------------------|---------------|
| | | | | | | 时 间 | 震级或 震中烈度 |
| 44 | 伯罗沃尔林 (Blowering, 澳大利亚) | 112 (113) | 无震区 | 1968 (1970) | | | 小震 |
| 45 | 韦尔沃德 (Hendrik Verwoerd, 阿扎尼亚) | 88 | 地震活动区 | 1970.9. | 1971.2. | | 2.0 (>2.5) |
| 46 | 他宾戈 (Talbingo, 澳大利亚) | 162 | 弱震区 | 1971.5. | 1971.5 | | 3.5 |
| 47 | 前进 (中国湖北) | 50 | 无震区 | 1970.5. | 1971.10. | 1971.10.20. | 3.0 |
| 48 | 舒勒盖斯 (Schlegeis, 奥地利) | 130 (102) | 无震区 | 1971.5. | 1971.10. | | ≤ 1.0 |
| 49 | 卡普那孟斯克 (苏联) | 50 | 无震区(?) | 1971 | 1971.12. | | 小震 |
| 50 | 柘林 (中国江西) | 63.5 | 无震区 | 1972.1. | 1972.6. | 1972.10.14. | 3.2 |
| 51 | 南冲 (中国湖南) | 45 | 无震区 | 1967 | 1967.夏 | 1974.7.25. | 2.8 |
| 52 | 克拉克丘 (Clark Hill, 美国) | 67 (70) | 无震区 | 1952 (1954) | 1973.9. | 1974.8.2. | 3.9 (3.2) |
| 53 | 黄石 (中国湖南) | 40 | 无震区 | 1970 | 1973.5. | 1974.9.21. | 2.3 |
| 54 | 凯班 (Keban, 土耳其) | 207 (160) | 地震活动区 | 1973.11. | 1974.3. | 1974.6. | 3.5 |
| 55 | 乔卡西 (Jocasse, 美国) | 133 | 无震区 | 1972 | 1975.10. | 1975.11.25. | 2.5 |
| 56 | 利贝 (Libby, 美国) | 136 | 无震区(?) | 1973 | | | 小震 |
| 57 | 奥尔托—托科伊 (Орто-Токой, 苏联) | | 弱震区 | 1974 | | | 1.5 (?) |
| 58 | 马尼夸冈3号 (Manicouagan 3, 加拿大) | 108 | 无震区 | 1975.8. | 1975.9. | 1975.12.23. | 3.8 |
| 59 | 帕里萨特斯 (Palisades, 美国) | 82 | | | | | 小震 |
| 60 | 帕腊木比库拉姆 (Parambikulam, 印度) | 57 | 无震区 | | | | 小震 |
| 61 | 穆拉 (Mula, 印度) | | 无震区 | | | | 小震 |
| 62 | 乌溪江 (中国浙江) | 129 | 无震区 | 1979.1. | 1979.5. | 1979.10.7. | 2.8* |
| 63 | 乌江渡 (中国贵州) | 165 | 无震区 | 1979.11. | 1980.6.19. | 1980.6.20. | 1.0** |

注: 序号1—6为强烈型震例, 1—23为中强型震例, 24以后为微弱型震例; 括号内数据取自不同资料。除表内所列者外, 疑为诱震水库者尚有: 印度的 Ukai、Kinnersani、Ghirni、Bhandara、Mangalam、Shalayar、Sharavathi 和 Bhakra, 美国的 Meredith Lake 和 Anna, 希腊的 Kastraki, 瑞士的 Emosson, 加拿大的 Mica, 埃塞俄比亚的 Fendeho 和中国的黄壁庄等。

* 乌溪江水库尚在蓄水过程中。发生2.8级地震时的库水位为195.5米, 设计正常水位为230米。

** 乌江渡水库尚处蓄水初期。据国家地震局情报资料室《地震科技动态》报导, 1980年6月18日—21日, 因暴雨, 库水位猛涨(离设计水位还有30米), 随即诱发了一系列小震。水位猛跌后, 地震活动暂息。