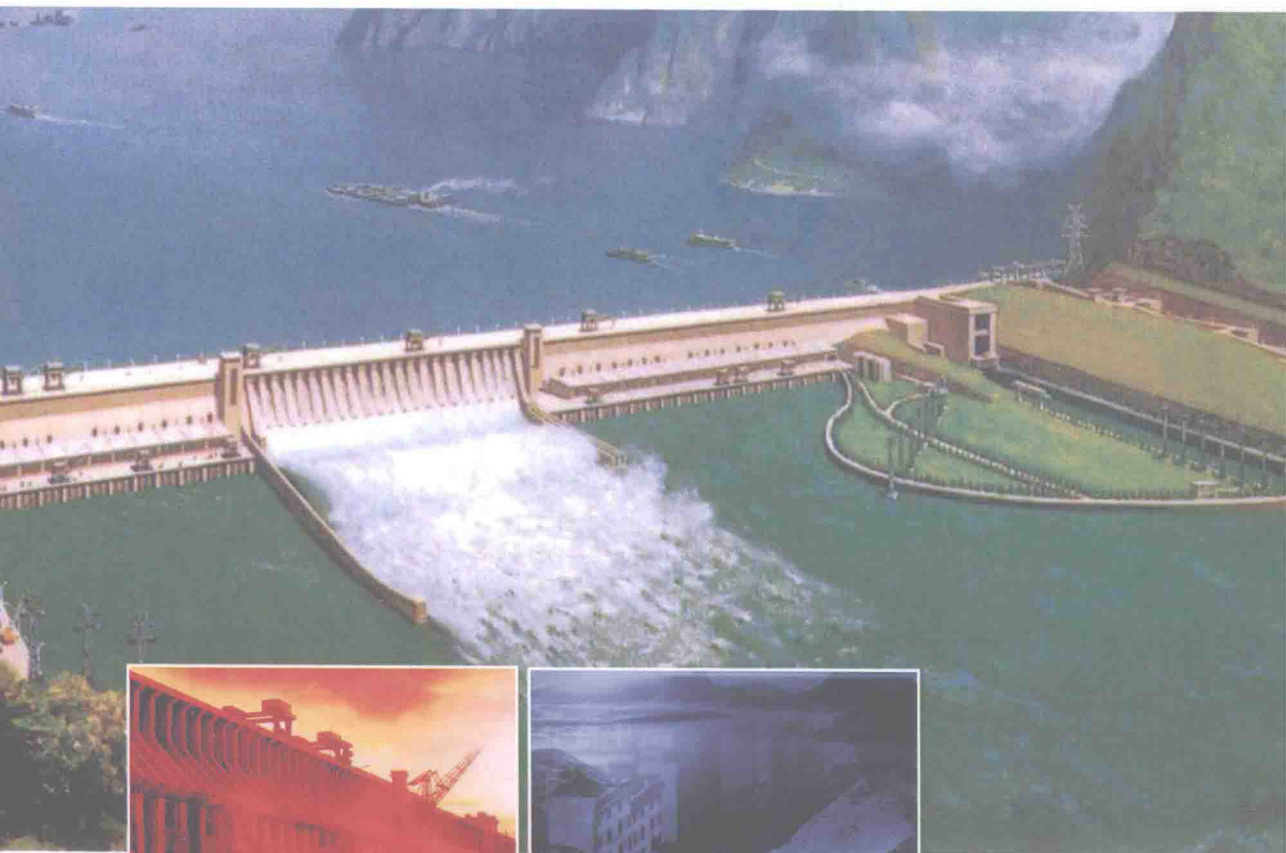




SHUIKU YOUFA DIZHEN JIANCE XITONG SHEJI YU SHIJIAN

水库诱发地震监测系统 设计与实践

刘文清 李茂华 朱建 宋伟 董建辉 著



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

水库诱发地震监测系统设计与实践

SHUIKU YOUFA DIZHEN JIANCHE XITONG SHEJI YU SHIJIAN

刘文清 李茂华 朱 建 著
宋 伟 董建辉



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 提 要

作者根据多年从事水库诱发地震监测与研究的经验,比较系统地介绍了水库诱发地震监测系统的设计理论、工作原理、技术构成及工程案例。本书分为上下两篇,第一篇从水库地震基本知识入手,介绍了水库地震与天然地震之间的区别,水库地震类型、成因、强度、现象、特征等,科普了水库地震知识,让读者大致了解水库地震与天然构成地震的区别。本书从第二章开始,依次介绍了监测系统中水库诱发地震危险区的确定方法、监测系统设计思路和总体构成、地震监测台网总体布局、地震台站台基噪声测试与等级划分、地震监测系统监控能力评估方法、监测系统设备选型与配置、地震监测数据分析技术与监测资料归案方法等。第二篇为实践篇,介绍了汉江丹江口水库地震监测系统的设计技术与建设实践案例。在案例中,比较详细地介绍了如何根据库区地震地质环境特点和实际情况,因地制宜,采用多种技术手段进行系统设计。在系统设计章节中,分项介绍了设计思路和原则及技术系统构成。在系统建设章节中,全面介绍了监测系统在建设过程中所采用的技术措施和施工方法,并重点介绍了水库地震监测系统的技术性能和功能要求,以及采用怎样的技术手段达到水库地震监测要求。书中所介绍的案例为今后再次开展水库地震监测系统设计提供了很好的借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

水库诱发地震监测系统设计与实践/刘文清等著. —武汉:中国地质大学出版社,2015. 12
ISBN 978-7-5625-3805-9

- I. ①水…
- II. ①刘…
- III. ①水库地震-地震预测-研究
- IV. ①P315.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 314729 号

水库诱发地震监测系统设计与实践

刘文清 李茂华 朱 建 著
宋 伟 董建辉

责任编辑:姜 梅 马 严

责任校对:代 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:339 千字 印张:13.25

版次:2015 年 12 月第 1 版

印次:2015 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉三新大洋数字出版技术有限公司

印数:1—200 册

ISBN 978-7-5625-3805-9

定价:39.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

水库诱发地震是指由水库蓄水而导致的地震。由于这些地震紧邻水库和大坝,是否影响大坝及库坝区人们的生产生活安全,受到社会各界高度关注。

构成水库的岩体中可能存在断层、裂隙、褶皱、岩溶洞穴、矿坑矿井,地表有峡谷陡崖,这些部位,应力应变相对集中,水库蓄水形成的水体压力和库水渗流作用会打破岩体中的应力平衡,形成地震,使岩体中积累的地震能量以高于天然地震的发生频率、较小的量级释放出来。大多数学者认为,水库诱发地震的震级不会超过当地天然地震的水平,因此,不影响大坝的抗震设计标准。

据 2013 年不完全统计,世界已建成高度 15m 以上(含坝高 5~15m,但库容大于 300 万 m^3)的水坝有 6.8 万座,100m 以上的 888 座,最大坝高已达 305m(我国的锦屏一级高拱坝)。据不完全统计发生过水库诱发地震的水库有 109 例,发震比例很低。其中 5.0~5.9 级地震 10 例,6.0~6.5 级地震 4 例。最大震级为 1967 年 12 月 10 日印度柯依纳水库的 6.5 级地震,造成了严重的人员伤亡。对大坝或相关水工建筑物造成局部损害的只有两例,即柯依纳地震和我国广东省的新丰江水库地震(1962 年 3 月 19 日,6.1 级),至今为止,未出现水库诱发地震造成垮坝的事例,一般 3 级~4.9 级的地震不影响水工建筑物的运行和安全,但可能对民用建筑有一定损伤。而绝大部分水库诱发地震是人们感觉不到的微震、超微震,只有用科学仪器才能记录到,对人类活动没有影响。水库地震一般发生在蓄水初期,之后渐趋天然状态。

但是,鉴于世界上已出现过破坏性水库诱发地震,人们不得不防。几十年来,对此问题的重视程度、社会投入不断提高,方法手段、资料积累方面大有进展。不过,水库诱发地震震源深度可达数千米至 10km 左右,在此深度内的岩体应力应变、温度、渗流等物理状态及变化难以直接探测和监测,因此其形成机理的研究仍旧停步在假说分析阶段。高坝大库的建设还在继续,人口稠密地区的水库还要修建,水库地震的前期研究评价和运行期的监测已成为许多重要大坝与水库建设的

常规程序,以策安全。

长江三峡勘测研究院有限公司(武汉)(以下简称“三峡院”)是我国较早从事水库地震监测研究工作的单位之一。1958年在三峡地区就开始为三峡及葛洲坝工程建设开展本底地震研究工作,为大坝抗震设防提供了科学依据。20世纪90年代初,自国家拟建三峡工程开始,三峡院进一步加强了三峡地区的地震监测研究工作,在长江三峡总公司的支持下,联合地震专业部门,在三峡地区先后建立了三峡人工值守监测地震台网、三峡模拟地震遥测台网、三峡数字遥测地震台网、库首区强化监测地震台网,为深入研究水库地震,训练出一大批技术人才,并为成功设计和建设黄河小浪底地震遥测台网、珠江流域右江百色水库遥测地震台网、清江高坝洲、水布垭数字地震遥测台网和汉江丹江口水库地震监测系统提供了强有力的技术支持。

本书共分两篇,第一篇介绍水库诱发地震的基本知识、地震监测手段,水库地震监测系统的设计内容、方法和建设工序,提出了监测系统的性能指标和验证方法;第二篇列出了丹江口水库地震监测系统的设计情况和建设资料。本书结合工程实践,总结了工程设计和建设经验,明确水库地震监测系统设计目标和实现方法,特别适合从事水库地震监测和研究的专业人员使用,也可供初入本行业的技术人员学习和参考。

薛梁夫

2015年12月

目 录

绪 论	(1)
第一节 地震监测技术发展历史	(1)
第二节 水库地震综述	(1)
第三节 水库地震成因探讨	(2)
第四节 水库地震与水的关联性	(3)
第五节 水库地震研究状况	(3)

第一篇 水库诱发地震监测系统设计

第一章 水库地震基本知识	(7)
第一节 水库地震介绍	(7)
第二节 水库地震实例	(8)
第三节 水库地震现象与特点	(8)
第四节 水库地震类型	(9)
第五节 水库地震分析	(10)
第六节 水库地震预测预报	(13)
第二章 水库地震监测	(14)
第三章 水库诱发地震危险区的确定	(15)
第一节 水库诱发地震监测分区意义	(15)
第二节 水库诱发地震危险区划分方法	(15)
第四章 地震监测系统构成	(18)
第一节 地震信息拾取子系统	(18)

第二节	地震数据传输子系统	(19)
第三节	地震信息分析处理子系统	(20)
第四节	供电避雷子系统	(23)
第五章	地震监测台网总体布局	(24)
第一节	地震台网布局原则和依据	(24)
第二节	地震台网布设方案	(25)
第三节	监测项目设置	(26)
第六章	台基噪声测试	(27)
第一节	台址干扰测试的目的和要求	(27)
第二节	台站等级标准	(28)
第三节	台基测试结果综合评估	(28)
第七章	地震监测系统监控能力设计与评估	(30)
第八章	地震监测系统总体技术构成设计	(32)
第一节	技术系统测震学指标	(32)
第二节	技术系统的总体构成	(32)
第三节	台网中心数据记录方式和地震数据处理	(33)
第四节	监测系统设备选型	(33)
第五节	实时处理软件功能要求	(36)
第六节	人机交互分析处理软件功能要求	(36)
第七节	地震数据库软件功能要求	(36)
第八节	地震台站主要设备配置	(37)
第九节	地震台网中心主要设备配置	(38)
第九章	水库地震监测系统试运行与考核运行	(39)
第一节	系统试运行	(39)
第二节	系统考核运行	(39)
第十章	监测系统土建工程设计	(41)
第一节	遥测地震台站房屋设计	(41)
第二节	台网中心装修设计	(41)

第十一章 水网观测系统设计与实践 (42)

第一节 水井网发展过程与意义 (42)

第二节 井网布局设计 (42)

第三节 观测井的设计 (44)

第四节 观测井观测技术系统设计 (46)

第五节 观测井台房建设设计 (48)

第六节 观测井数据传输方式设计 (48)

第七节 资料的分析内容 (48)

第八节 观测井经费预算方法 (49)

第十二章 地震监测资料归档及存储 (50)

第十三章 系统验收 (51)

第二篇 应用实例

第十四章 汉江丹江口水利枢纽水库诱发地震监测系统总体设计 (55)

第一节 地震监测系统设计的主要内容及技术依据 (55)

第二节 台网地震监测能力评估 (116)

第三节 台网信道设计 (116)

第四节 丹江口水库地震台网技术系统设计 (118)

第五节 台网建设及试运行和考核运行 (130)

第六节 遥测地震台网建设费和运行费预算 (135)

第七节 地下水动态观测系统技术设计 (135)

第八节 地震分析系统技术设计 (143)

第十五章 汉江丹江口水利枢纽水库诱发地震监测系统建设 (145)

第一节 工程施工建设的主要内容和技术要求 (145)

第二节 施工组织和质量管埋 (146)

第三节 完成的主要工程量 (148)

第四节 土建工程施工 (149)

第五节 设备安装调试.....	(168)
第六节 工程施工质量.....	(197)
第七节 安全生产、文明施工和环境保护	(199)
后 记	(201)
主要参考文献	(202)

绪 论

第一节 地震监测技术发展历史

地震是自然界不可抗拒的地质灾害,同时也给人类带来了巨大的灾难。有史料记载,我国的地震监测和研究工作可追溯到张衡时代(公元 78—139 年),至今已有 2000 多年的历史。随着在地震监测和研究方面人力、物力投入的增加,研究手段和监测方法不断得到提高和完善,对地震的认知也取得了较大的突破。从观测仪器技术发展方面可以看出监测研究技术的成长过程。解放初期,我国使用的是哈林观测仪(第一代),随着科学技术的发展,20 世纪七八十年代已研制成功第二代地震仪(地震计为 DD-1,记录仪为 DJ-1),80 年代末 90 年代初成功研制了自动记录仪 768 和模拟遥测地震监测系统,90 年代末至今开始将数字化技术应用于地震观测(第三代),日前在我国地震活动较频繁的区域均建设了地震监测台网,特别是在强震带地区,投入了更多的监测力量和技术手段,为深入研究地震成因和活动规律创造了条件,也使地震预测预报工作成为可能。在地震专业人员的不懈努力下,我国曾成功地预报了 1971 年 3 月 23、24 日新疆乌恰两次 6.3 级地震,1975 年 2 月 4 日辽宁海城 7.3 级地震。尤其是海城 7.3 级地震,得到了全世界同行的认可,也获得了国家科技进步二等奖。总之,我国现在能够对某些特殊类型的地震做出一定程度的预报,但不能预报所有的地震,在中长期地震预报上已有一定的可信度,但短期、临震预报的成功率仍很低。

第二节 水库地震综述

水库诱发地震是指因水库蓄水而诱使坝区、水库库盆或近岸范围内发生的地震。水库诱发地震在水利工程建设过程中备受关注,主要是因为它涉及到枢纽运行安全问题。日前统计的数字显示,已得到国内外地震、地质专家普遍承认的水库诱发地震约 70~80 起,虽然它们仅占世界大坝会议已登记的 3.5 万座水库的 2‰~3‰,但是不容忽视。随着大坝坝高的增加,发生水库诱发地震的比例也相应增加,坝高超过 200m 的水库,发生诱发地震的实际比率为 34%。绝大多数水库诱发地震的震级小于里氏 5 级,属于弱震或微震,约占总数的 80%以上;较强的水库诱发地震不到总数的 20%,其中 5.0~5.9 级的中等强度地震 10 例,6.0~6.5 级强度地震仅 4 例。目前世界上已记录到的最大的水库诱发地震为 6.5 级(1967 年 12 月发生在印度柯依纳水库)。迄今为止,只有两例水库诱发地震对大坝局部地段造成较大损害,一个是我国的新丰江水库(6.1 级),另一个是印度的柯依纳水库,坝址处地震强度均为 8 度,经抗震加固后,至今都在安全运行。也就是说,迄今为止,世界上尚未发生因水库诱发地震而使大坝失事的实例。根据精确定位的水库诱发地震的震中资料,震中位置均分布在坝区、水库库盆

及近岸地段范围内,距库边线一般不超过 3~5km,最远 10km。随着库区地质构造环境的差异,水库诱发地震主要有以下两种类型:一种是岩溶塌陷型,岩溶塌陷型水库诱发地震最常见,多为弱震或中强震,我国在岩溶地区的大型水库有 8 个,其中 4 个诱发了地震;另一种是断层破裂型,断层破裂型水库诱发地震发生的概率虽然较低,但有可能诱发中强震或强震,我国的新丰江水库和印度的柯依纳水库的诱发地震都属于这种类型。研究表明,水库地震震中一般密集分布于库坝附近,主要集中在水库边岸几千米到十几千米的范围内,也有部分震中密集于水库最大水深处及其附近,还有一些位于水库主体两侧的峡谷区,但一般震源极浅,震源体小。由于水库诱发地震主要发生于库水或水荷载影响范围内,所以震源深度很浅,多在地下 10km 范围内。正由于其震源浅,所以面波强烈,震中烈度一般较天然地震高,但影响范围小,等震线衰减迅速,影响范围多属局部。在发震时间上,较水位或库容峰值有所滞后。当水位急剧下降或上升,特别是急剧下降时,水荷载发生重大变化,往往有较强地震产生。

第三节 水库地震成因探讨

水库地震的成因比较复杂,人类工程活动如注水和修建水库等均可诱发地震。水库诱发地震分为两种情况:一种是在原本没有地震断裂带的地区,由于建设水坝以后形成水库,水库蓄水改变了原来的地应力分布,从而产生了局部的地震。这种情况比较普遍,但是,由于水库增加的水体重量通常是均匀地分布在一块较大的面积之上,而且由于水库周围原有山体的比重肯定高于水体,所以,水库蓄水后对地壳造成的压力变化一定是属于消除应力集中改善地球表面受力的情况,因此,水库蓄水引发的微震,不仅不可能造成较大的地震,而且总体上应该是属于有利于地壳均匀受力的一种调整。据实际观测统计,世界上绝大多数的水库建成后,仅仅由水库蓄水引发的地应力改变所产生的地震都非常小,大多数是人们难以察觉的微震,不会对当地居民的生产生活造成威胁。另一种情况是由于水库蓄水区域原来就是地震区,有明显的地震断裂带存在,原有的地应力积累就已经孕育着地震的发生,由于水库蓄水打破了原有的受力平衡,导致了原有地震的延迟或者提前发生,在这种情况下发生的地震,其危害和破坏程度主要取决于原有的地震能量。这种情况下,水库蓄水只是引发或者诱发了地震,而不是造成地震。经过进一步分析可知,按工程地质条件来分类,水库诱发地震具有不同的成因类型,主要有岩溶塌陷型和断层破裂型。岩溶塌陷型水库诱发地震最常见,不过多为弱震或中强震,破坏性不大。断层破裂型水库诱发地震发生的概率虽然较低,但有可能诱发中强震或强震,而且是我们必须重视的水库诱发地震问题。断层地震的产生机理主要在于,地应力的积累、变化使断层产生了突然的破裂或者错动,而断层地震的发生条件就在于不同方向的地应力的合力克服了断层之间的摩擦力。当断层间的摩擦力越大时,需要克服摩擦力的作用力就越大,这种情况下需要地应力的变化积蓄更长的时间、更多的能量,所以,短时间内不容易发生地震,然而,一旦发生地震后释放的能量也就比较大。相反,如果断层之间的摩擦力越小,需要克服摩擦力的地震作用力就越小,越容易产生地震,同时地震发生后释放的能量也越低。所以说,决定断层地震爆发时能量强弱的关键在于断层之间的摩擦力,从这一点上看,由于水库蓄水后将会加大地下渗流,水的浸润一般只能使原有的断层之间摩擦力降低,所以,水库蓄水通常会伴随出现加速原有地震地区断层地震发生的现象,不过这也同时还有提前释放地应力所积蓄的能量、减小原有地震地区的震级的作用。水库蓄水能促发地震、减小强震,这也许就是世界上虽然已经

建有几十万座水坝,而且水库诱发地震现象非常普遍(根据国外资料记载,有的水库蓄水后,曾经观测到成千上万次的微小地震),但是,大都是危害性不大的微震和弱震的原因。迄今为止,全世界尚未有一起因为地震造成的垮坝事故。多年的实际观测和研究已经使很多学者逐渐认识到,即便是在地震高发区修建的水库也并非就一定是坏事,在很多情况下水库诱发的地震,有助于该地区地震能量的提前释放,对于减小地震灾害的破坏性还有一定的积极作用。

第四节 水库地震与水的关联性

长期观测表明,水库诱发地震与水位的关系可分为快速响应型和滞后型。一般破坏性大的水库诱发地震多为滞后型地震,水库地震与水库的荷载关系密切,当然也与一定的地质构造有关,其中水的作用只是一种诱发因素。广东河源新丰江水库,从1959年蓄水后,在水库区周围地震频度慢慢增加,于1962年3月19日发生了一次6.4级地震,震中强烈度达到了8级,是已知最大水库地震之一。到1972年为止,该区共记录了近26万次地震。著名的埃及阿斯旺水库,坝高110m,库容量达 $165 \times 10^8 \text{ m}^3$,1960年正式开工,1964年开始蓄水截流,1968年正式投入运行。此地区在修建水库前历史上无地震记录,从1980年起出现小震、微震,于1981年11月在坝址西南60km库区发生了5.6级地震,于1982年同一地点又发生了5级和4.6级地震。此外,深井注水、地下抽水等也可触发地震,如美国科罗拉多州有一个落基山军工厂,为处理废水凿了一口3614m的深井,用高压注水于地下,于1962年发生地震,后来停止注水,地震活动减弱,恢复注水,地震又有所增加。上述地震,特别是水库地震的成因引起人们极大关注,一般认为,在一定的有利于地震的地质构造条件下的水库蓄水可诱发地震。

第五节 水库地震研究状况

我国对水库诱发地震研究起步较晚,前期的研究主要是以天然构造地震为主,我国个别水库出现了水库地震之后才引起专业机构和水利枢纽建设单位的重视,相继颁发了行业规范与标准。有些专业研究机构或单位采用了数学或物理模型,对部分水库的地震问题进行专业研究和深入探讨。其中举世瞩目的长江三峡枢纽工程水库诱发地震研究大体经历了3个阶段:1976年以前,是以区域稳定性为主的基础研究阶段。全国许多科研、教学和生产单位的数百名地学专家及科技人员做了大量的基础地质工作,并设立了由7个地震监测台组成的三峡台网,已连续观测近30年,取得了丰富翔实的地震活动实测资料。1976至1985年,对三峡水库诱发地震问题进行全面地震地质论证。在进行了大量野外勘察和室内研究工作的基础上,对发震可能性、可能发震库段和最大震级等,做出了分区的初步评价,研究成果和学术报告超过了30项。1986年三峡工程重新论证以来,长江流域规划办公室和有关部门在地质与地震专家组指导下又进行了补充工作,提交了新的研究成果,对三峡水库的地震地质背景和地质条件进行了系统分析,对发震可能性及最大震级做出了评价。由此可见,我国在重大水电工程中对水库地震研究的重视程度。

由于水库诱发地震的震源浅,引起的灾害较重, M_s 4.0级地震就有可能造成一定的灾害,因此引起了国内外水电工程界与地震学界的广泛关注。20世纪80年代开始,在已发生与被认为有可能发生破坏性诱发地震的水库区,陆续建立水库诱发地震监测网。在我国现行的法

规中,凡符合建设规范要求的水利枢纽工程基本都建设了水库诱发地震监测台网,如三峡工程水库诱发地震监测系统、雅砻江流域中下游水库诱发地震监测系统、南水北调中线丹江口水库诱发地震监测系统等。水库地震监测系统是从事水库地震监测与研究的专业技术手段,它包含地震前兆监测和地震过程监测,其中水库地震监测台网是为某特定水库蓄水可能诱发地震而建设的专用区域性台网。该类型的地震监测台网具有孔径小,台站密度高,监测地震下限低等特点。

第一篇

水库诱发地震监测系统设计

第一章 水库地震基本知识

第一节 水库地震介绍

水库蓄水而引起库区出现的地震现象,或在原有地震活动性基础上出现明显改变,称之为水库诱发地震。

人类工程活动如注水和修建水库等均可诱发地震。构造型诱发地震的内因较多,如岩体储存了构造能,水库蓄水后可能导致构造应力提前释放,从而诱发了地震。还有一类是由水库蓄水后,库水压入溶洞引起塌陷和气爆,从而诱发的地震。此外,在库边存在危岩体或滑坡体,这些不稳体受到库水渗透后,引起区域荷载重新调整导致危岩体或滑坡体滑移(或滑脱)而诱发地震。上述几类地震均称为水库诱发地震。水库诱发地震区域分为两种情况:一种是在原本没有地震断裂带的地区,由于大坝的建设以后形成水库,水库蓄水改变了原来的地应力分布,从而产生了局部的地震,这种情况比较多。世界上绝大多数的水库建成后,仅由水库蓄水引发的地应力改变所产生的地震一般都非常微弱,大多数都是人们难以察觉的微震,不会对当地居民的生产生活造成威胁。另一种情况是由于水库蓄水地区原属地震区域,有明显的地震断裂带存在,原有的地应力积累就已经孕育着地震,由于水库蓄水打破了原有的应力平衡,导致了原有地震的延迟或者提前发生。这种情况下发生的地震,其危害和破坏程度主要取决于原有的地震能量。经进一步的详细研究分析,按工程地质条件来分类,水库诱发地震具有不同的成因类型,主要有岩溶塌陷型和断层破裂型。岩溶塌陷型水库诱发地震最常见,不过多为弱震或中强震,破坏性不大。断层破裂型水库诱发地震发生的概率虽然较低,但有可能诱发中强震或强震,因此必须引起高度重视。断层地震的产生机理主要在于地应力的积累、变化使断层产生了突然的破裂或者错动。

水库诱发地震按与库水位的关系可分为快速响应型和滞后响应型。快速响应型水库诱发地震与水库水位变化密切相关。有的水库蓄水后,很快发生地震,即属快速响应型。快速响应型地震的成因之一是岩溶塌陷或气爆,多发生于溶洞发育的石灰岩库段。水库荷载引发的地震也属快速响应范畴。另一类型地震则要在开始蓄水相当长一段时间后才发生。其滞后时间长短各不相同,一般为数月到数年不等。滞后响应型水库地震释放构造能,它的发生与库水沿断层渗透、断层面摩擦系数降低和岩石抗剪强度降低有关。因此,这一类型地震的强度与水库水位的变化关系不明显。构造型诱发地震的强度主要取决于发生地震的构造储能,与蓄水时间的长短无关。破坏性大的水库诱发地震多为滞后型地震。水库地震与水库的作用有关,当然也与一定的构造和地层条件有关,而水的作用只是一种诱发因素。

第二节 水库地震实例

据不完全统计,全世界已建水库约有几十万座,已诱发水库地震的仅 90 余座,其中 17 座发生有破坏性的水库地震。其中高坝大库中出现诱发地震的占 25% 左右,特别是近几年蓄水的高坝大库,4 座中已有两座发生水库地震,比例达 50%,而中小型水库诱发地震的为数极少。坝高、库容大的水库在建坝前的工程地质调查中,应研究水库诱发地震产生的可能性。

世界上已有一些国家的水库蓄水后发生地震,1967 年 12 月 11 日,印度柯依纳水库发生地震。这次地震是迄今已知的水库地震中最大的一次,震级为 6.5 级。它发生于比较稳定的德干高原地区内。主震的震中位置在大坝南 3km。柯依纳水库坝高 103m,1962 年开始蓄水,蓄水后至今发生了约 450 次地震。

中国已建成九万余座水库,其中已发现十多个水库蓄水后发生地震,如广东河源新丰江水库,据了解,河源市新丰江水库于 1959 年 10 月 20 日蓄水一个月后,开始出现地震活动,随着库区水位迅速上升,地震活动相应加强。当水位首次接近满库峰高达 110.5m 时,在 1962 年 3 月 19 日 04 时 18 分 53 秒诱发了 6.1 级地震,震中在大坝附近 1km 处(北纬 $23^{\circ}43'$,东经 $114^{\circ}40'$),震中强烈度达到了Ⅷ度,震源深度 5km,是已知最大水库地震之一。该次地震滞后第一次高水位半年,强烈地震造成数千间房屋损毁,死伤 85 人。据广东省地震局的历史资料记载,自 1962 年 3 月 19 日,河源市新丰江水库地区发生 6.1 级地震后几十年内,陆续发生过 5 级以上地震 6 次、4 级以上地震 44 次。我国其他水库如湖北丹江口、清江、三峡,湖南南冲和浙江新安江及安徽的佛子岭、江西的柘林、辽宁的参窝等水库,在蓄水后均出现水库地震,但微震较多,破坏性中强地震较少。

著名的埃及阿斯旺水库,坝高 110m,库容量达 $165 \times 10^8 \text{ m}^3$,1960 年正式开工,1964 年开始蓄水截流,1968 年正式投入运行。此地区在修建水库前历史上无地震记录,从 1980 年起出现小震、微震,于 1981 年 11 月在坝址西南 60km 库区发生了 5.6 级地震,在 1982 年同一地点又发生了 5 级和 4.6 级地震。此外,因深井注水、地下抽水等也可诱发地震,如美国科罗拉多州有一个落基山军工厂,为处理废水凿了一口 3614m 的深井,用高压注水于地下,于 1962 年发生地震。以后停止注水,地震活动减弱,恢复注水,地震又有所增加。上述地震,特别是水库地震的成因引起了人们的极大关注,一般认为,在有利于地震构造的地质构造环境下进行蓄水可诱发地震。

第三节 水库地震现象与特点

一、水库地震现象

水库地震发生时有以下 3 种现象。

(1) 蓄水前库区及周缘地区的部分库段或区域是弱震区或无震库段,蓄水后该区域出现明显的地震活动。

(2) 蓄水后发生的地震震级和频次明显高于本地区本底地震活动水平。

(3) 蓄水后发生的最大诱发震级,一般都低于蓄水前发生的最大震级。