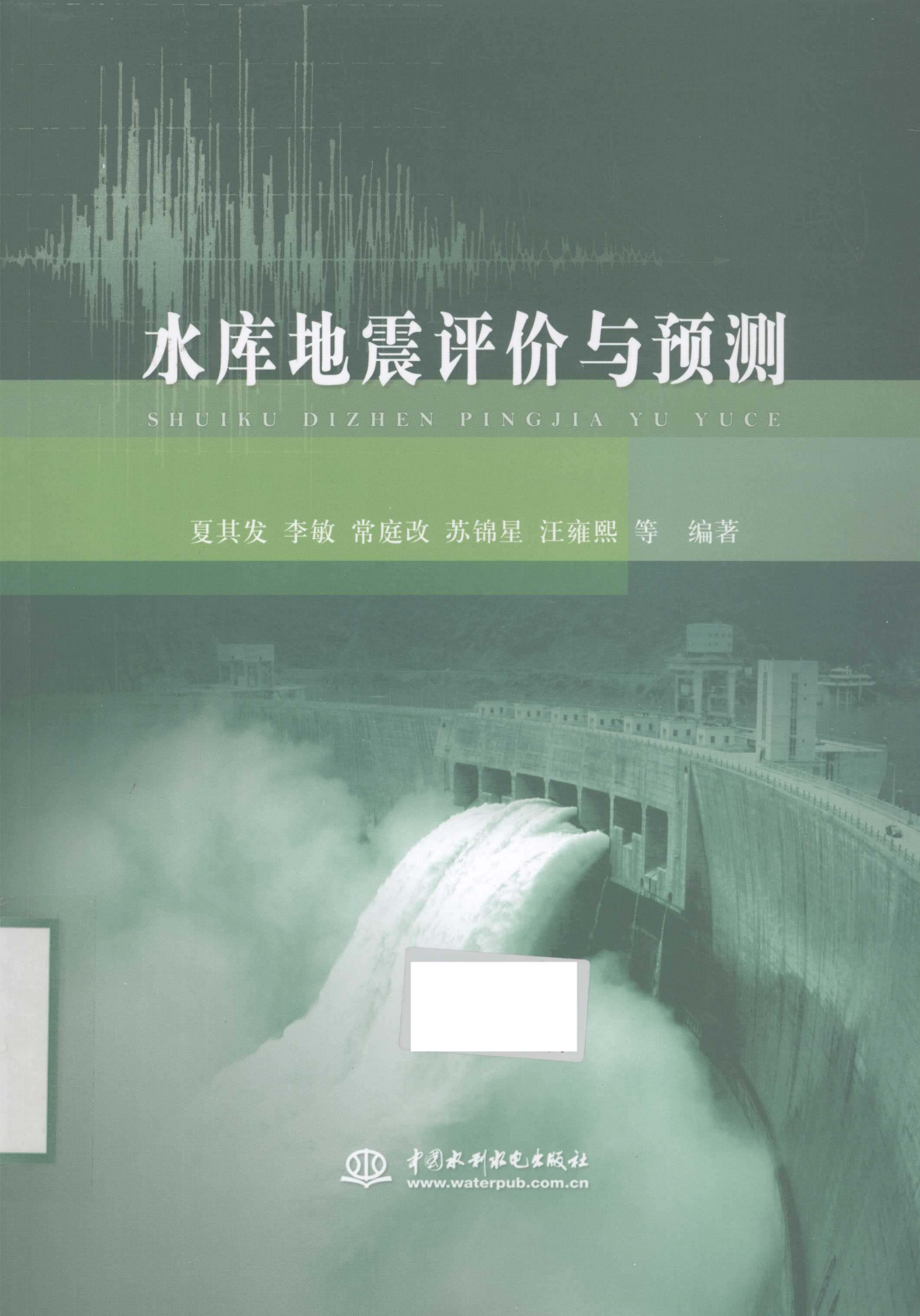




水库地震评价与预测

SHUIKU DIZHEN PINGJIA YU YUCE

夏其发 李敏 常庭改 苏锦星 汪雍熙 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水库地震评价与预测

夏其发 李敏 常庭改 苏锦星 汪雍熙 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从工程地质学和环境地质学的角度提出了“水库地震评价与预测”的研究和分析方法,其主要内容除绪论外,共分十章。绪论部分简述了水库地震研究的概况、含义和领域以及研究的必要性;第一章到第三章,分别论述了水库地震的基本情况与其共同特征;第四章论述了库水在水库地震中的作用,讨论了水库地震的成因类型及其判别标志;第五章论述了水库地震工程地质条件与地震地质内容的分析;第六章与第七章论述了水库地震的评价目的与步骤以及水库地震危险性的评价方法;第八章介绍了水库地震的监测预测系统;第九章讨论了水库地震的对策研究;第十章用了3个实例,分别介绍了对水库地震预测和监测工作的内容和方法。

本书可供水利水电工程设计施工运行管理、水库地震台网监测人员和抗震防护科研人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水库地震评价与预测 / 夏其发等编著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2012.5
ISBN 978-7-5084-9759-4

I. ①水… II. ①夏… 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(2012)第090816号

审图号: GS(2012)561号

书 名	水库地震评价与预测
作 者	夏其发 李敏 常庭改 苏锦星 汪雍熙 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 14.75印张 350千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

1959年广东省新丰江水库发生了水库地震，有关科研单位开展了大量研究工作，取得了可观的成果。但在“文革”期间，这些研究工作基本被迫停止。1978年后，我国丹江口、乌溪江、乌江渡等水库陆续出现水库地震震情，再次引起了各方面的重视。

1980年初，中国水利水电科学研究院抗震防护研究所组建了水库地震研究小组，从总结国内外水库地震的震例资料开始，开展了水库地震的研究预测工作。

水库地震属于水库建成后的物理环境改变导致的一个重要现象。自从20世纪30年代在美国的胡佛坝（又名米德湖水库）观察到这一现象后，因系列小震对大坝威胁不大，所以在国际学术界也未引起重视。直到20世纪60年代，在印度的柯依纳水坝、希腊的克里马斯塔水库和赞比亚—津巴布韦的卡里巴水库又相继诱发了较强的水库地震，才引起社会和研究人员的广泛关注。1975年在加拿大的班夫城举行了第一届国际诱发地震会议，水库地震是其重要内容。其后，在加拿大西部环境局的赞助下，于1995年11月1~5日在北京召开了国际水库地震讨论会，从水库地震的性质和机制、水库地震调查和危险性评估、监测和仪器及工程地震、水库地震和环境及其他诱发地震等4个专题共交流了48篇论文。我国对水库地震的研究已日益受到国际上的重视。

水库地震的关键问题在于确定大坝的设防标准。一般都是根据当地历史最大地震和地震地质的评价分析而进行估计的。随着水库地震研究的逐步深入，对其机制有了进一步的了解，对其评价和预测已逐步具备条件。

中国水利水电科学研究院的水库地震研究小组20余年来完成了大量研究工作，对近20座在建或拟建的水库进行了水库地震研究的工程地质勘测研究和评价，先后完成论文30余篇（截至2000年底），报告30余份，本书是该项工作的全面总结，着重从工程地质学和环境地质学的角度研究，形成

了一套比较完整的水库地震的研究内容和评价方法。本书的出版和发行，为大坝抗震设计工作提供了参考和依据。也望能对本问题有兴趣的科研、运行人员有所裨益。

中国工程院院士 陈厚群

2012年2月11日

前言



1979年10月7日浙江省乌溪江水库发生了 $M_s2.8$ 级地震后,引起了各方面的极大关注。因为该水库区被认为是一个稳定区,其基本烈度为Ⅵ度,大坝未考虑抗震设防,且选用了与广东新丰江大坝相似的轻型坝型,所以就提出了该水库会不会发生类似新丰江水库那样的强震($M_s6.1$ 级)、大坝是否需要按更高的烈度预先加固,蓄水计划是否需要推迟,这些都是亟待解决的问题。同时在20世纪70年代中后期,国内外又出现了一个研究水库地震的热潮。在这样的形势下,1980年初国家地震局,声明由于他们的力量有限,难以承担水库地震的研究任务,要水电部自行组织力量解决,于是中国水利水电科学研究院受水电部科技司的委托,在水科院抗震防护研究所内组建了水库地震研究课题组。其任务就是搜集与调查研究国内外的水库地震震例资料,分析水库地震的诱震条件与发生发展规律及其对工程和环境的影响,提高水库地震的评价和预测预报水平,为水利水电建设抗震防灾服务。

课题组成立后,首先开展了对正在发震的乌溪江和乌江渡两水库的水库地震发展趋势研究与评价,与此同时搜集与研究了国内外的震例资料,并对国内已发震的新丰江、丹江口、参窝、前进、邓家桥、南冲、黄石、鲁布革等水库进行了实地调查,分析其诱震条件与形成机制。随后还相继对拟建与在建的二滩、三峡、瀑布沟、天生桥一级、观音阁、龙羊峡、棉花滩、东风、百色、大化、岩滩、临江、斗堰、铜街子、燕山、大藤峡、隔河岩水库等20余座水库,开展了蓄水前诱发地震条件的工程地质研究,并进行了评价和预测工作。

2007年年初在夏其发同志的倡议下,由汪雍熙、苏锦星以及在职的李敏和常庭改等组成编写组,一同分析并研究了20多年来已发表过的论文,并在此基础上,认为有必要进行一次总结,撰写一本有关水库地震研究方面的书籍,一方面普及一下水库地震的知识,另一方面为从事水库地震研究工作的技术人员提供参考。于是夏其发同志根据大家的意见进行准备,2007年底提出一份框架性的材料,征求大家的意见,同时继续进行修改补充,并在2008年6月完成了初稿,请大家补充和修改。后由于汪雍熙同志承担了长江三峡工

程施工期与蓄水初期的水库地震的监测预报工作,直至2011年中完成,所以本书迟至今日才能继续完成编写工作。最后本书定名为《水库地震评价与预测》,由夏其发同志完成其定稿工作。

本书的内容除绪论外,共分十章。绪论部分简述了水库地震研究概况、含义和领域以及研究的必要性;第一章到第三章,分别论述了水库地震的基本情况与其共同特征;第四章论述了库水在水库地震中的作用,讨论了水库地震的成因类型及其判别标志;第五章论述了水库地震工程地质条件与地震地质内容的分析;第六章与第七章论述了水库地震的评价目的与步骤以及水库地震危险性的评价方法;第八章介绍了水库地震的监测预测系统;第九章讨论了水库地震的对策研究;第十章用了3个实例,分别介绍了对水库地震预测和监测工作的内容和方法。

20多年的工作,我们的体会是,根据国内外震例资料的分析与研究,可以看出高坝大库对水库地震的影响并不是必然的因素,而起决定作用的因素应是库区是否具备诱发地震的工程地质条件。水库地震与某些水库蓄水后可能产生渗漏、浸没、坍岸、淤积等工程地质问题一样,同属于水库工程地质问题的研究范畴。这就应该运用工程地质学与水文地质学的理论与方法,并结合地震的发震机制等因素进行分析研究,来确定是否已具备发生水库地震的条件。然而在这方面,以往的研究是非常不够的,所以当前的首要问题就是要加强水库地震的基础地质(包括工程地质、水文地质与地震地质)研究;其次,是加强区域稳定性的研究和微震监测;再次,是加强预测预报与评价方法的研究;第四是加强库水与岩体相互作用的理论研究与模拟试验;最后,继续进行诱发机制的探讨。

从事水库地震评价与预测研究20多年,虽然在水库地震研究方面取得了一些成果,积累了一些经验,同时亦提出了一些问题,但由于水平所限,认识不一定正确,现提出来与大家讨论,希望能起到抛砖引玉的作用,书中不妥之处恳请读者批评指正。

编著者

2012年1月20日

目 录

序

前言

绪论	1
第一章 水库地震的基本概况	6
第一节 水库地震震例的分布概况	6
第二节 水库地震与坝高和库容的关系	23
第三节 水库地震与地质构造的关系	25
第四节 水库地震与岩性的关系	25
第五节 水库地震的发震强度	26
第六节 水库地震的震害	26
第二章 水库地震活动的几种典型情况	28
第一节 蓄水后地震活动性增强	28
第二节 蓄水后地震活动规律变化	44
第三节 蓄水后地震活动性减弱	53
第四节 蓄水后没有发生水库地震活动	56
第五节 已有震例的分类简述	57
第三章 水库地震的共同特点	61
第一节 水库地震与坝高、库容的对应关系	61
第二节 水库地震活动与水库的空间联系	63
第三节 水库地震分布的特点与岩性关系	65
第四节 与水库有关的地震特征	66
第四章 水库地震成因类型和判别标志	67
第一节 水在水库地震中的作用	67
第二节 蓄水对库区地质体的影响	70
第三节 水库地震的水文地质结构面理论	75
第四节 水库地震与岩溶水文地质结构	85
第五节 水库地震的成因分类	102
第六节 水库地震的判别标志	106

第五章 水库地震的工程地质条件分析和地震研究工作	111
第一节 水库地震与岩体性质的关系	111
第二节 水库地震与地质构造条件的关系	111
第三节 水库地震与水文地质条件的关系	112
第四节 水库地震的工程地质类型	114
第五节 水库地震区域活动性研究内容	117
第六章 水库地震评价的目的、步骤及内容	119
第一节 水库地震评价的目的	119
第二节 水库地震评价的步骤	120
第三节 水库地震评价的内容	121
第七章 水库地震危险性的评价方法	124
第一节 水库地震综合性工程地质分区的原则	124
第二节 水库地震强度评价方法讨论	127
第三节 水库地震可能性的定量评价	129
第四节 水库地震对大坝和库区环境影响评价	144
第八章 水库地震监测预测系统	148
第一节 概念的提出	148
第二节 水库地震监测预测系统的组成	150
第三节 监测手段的设置	152
第四节 人工水体形成时期的监测研究工作	155
第五节 库区震情明显变化时的研究预测工作	158
第九章 关于水库地震对策研究的讨论	160
第一节 关于抗震设防标准	160
第二节 风险度和经济分析	161
第三节 库区的设防标准	161
第四节 地震社会学问题	161
第十章 水库地震评价预测预报与监测工作的几个实例	163
第一节 雅砻江二滩水库地震工作	163
第二节 长江三峡工程水库地震危险性初步预测	189
第三节 清江隔河岩水库地震工作	199
附录 历年来公开发表的水库地震研究论文目录	219
参考文献	221
后记	225

绪 论

水库地震是指由于水库蓄水引起水库区及其周边邻近区,地下水水位能产生影响的地区内出现的地震现象,及由此而产生地震活动性的加剧或减弱。人们在筑坝拦洪、蓄水发电、引水灌溉,变水害为水利的时候,某些水库由于蓄水增加地壳的荷载,改变了库区的水文地质条件,破坏了地壳内部的应力平衡状态,从而发生了地震,威胁着水工建筑物和附近城镇居民区的安全。这是人类在兴修水利、水电建设、改造自然过程中遇到的新课题,但其与一般水库蓄水后产生的库区淹没、库水渗透,库边的浸没与库岸坍塌等问题一样,同属于水库区的工程地质问题,因此水库地震问题亦应用工程地质的理论和方法来研究和解决。

我国的水利水电资源十分丰富,水能蕴藏量为 6.8 亿 kW,其中可开发利用的为 3.7 亿 kW,年发电量为 1.9 万亿 kWh,但还没有很好地开发利用,急需建设一大批水库和水电站。可是我国又是一个多地震的国家,西南和西北是我国地震活动最频繁和最强烈的地区。这些地区的水利和水电资源却又十分丰富,既具备了建造水库和水电站的有利条件,又迫切需要水和电。在这些地区修建水库和水电站会不会诱发更多或更大的水库地震?由于上述地区修建的水库不多,至今尚无震例,而从我国水库地震震例来看,水库地震都发生在我国无震区或弱震活动区,其中新丰江水库还诱发了 Ms6.1 级的强震,并造成了一定的震害。因此,水库地震评价和预测需要深入研究,认真对待,防患于未然。

一、水库地震研究工作概况

人类修堤筑坝已有几千年的历史,水库地震问题是在 20 世纪 30 年代才发现的。一个是美国的米德湖 (Lake Mead),又称博尔德 (Boulder) 水库或称胡佛 (Hoover) 水坝,1939 年在库区发生了地震,由于研究程度较详细而确认为水库地震;另一个是希腊的马拉松 (Marathon) 水库,在 1931 年当水库水位猛涨时发生了 Ms5.0 级地震,由于希腊是多地震的国家,当时未意识到它是水库地震,只是后来有人发现水位涨落和地震的频度、强度有明显的相关性,才确定下来的;再一个是阿尔及利亚的乌德福达 (Oued Fodda) 水库,1933 年初开始为小震活动,直到 1954 年发生了烈度达Ⅶ度的地震。也许是由于这三个水库地震没有对大坝造成损坏,又没有造成灾害,人们便认为水库地震是局部性的、个别的现象。特别是博尔德水库地震给人们两点影响:一是高坝大库蓄水会诱发地震,引起人们的重视;二是认为水库地震不过如此,不会造成破坏。再加上 20 世纪 40~50 年代,由于受第二次世界大战的影响,水利建设速度放慢以及发现水库地震的震例不多,因而使人们放松了警惕。

直至 20 世纪 60 年代相继发生了 4 个 Ms6.0 级以上的水库地震震例后,才重新引起了人们的重视。如:①1962 年 3 月中国的新丰江水库发生了 Ms6.1 级水库地震;②1963



年赞比亚—津巴布韦的卡里巴 (Kariba) 水库发生了 Ms6.1 级水库地震; ③1966 年希腊的克里玛斯塔 (Kremasta) 水库发生了 Ms6.2 级水库地震; ④1967 年印度的柯依纳 (Koyna) 水坝发生了 Ms6.5 级水库地震, 震中烈度Ⅷ~Ⅸ度。除卡里巴水库外, 都引发了震害。尤其是柯依纳水坝, 当蓄水初次发生小震时, 印度一位工程师搬用了博尔德水库的经验, 推断地震活动会变缓和, 因而未采取措施, 结果却反而加剧, 发生了 Ms6.5 级强地震 (是目前水库地震强度最大的一个), 大坝虽未被破坏, 却使水电站建筑物受到了损坏, 并有 180 人死亡, 这次预报失败的教训值得我们吸取。另外, 1963 年 9 月意大利的瓦依昂 (Vajont) 水库, 蓄水后诱发的地震震级虽然不大, 只有 Ms4.0 级, 没有引起人们的注意, 可是由于地震的影响, 于 1 个月后引起了库区的古滑坡复活, 使 2.4 亿 m^3 的滑坡体滑入库区, 将坝前 1.8km 长的库区完全填满, 使世界上最大拱坝之一的瓦依昂坝报废。

自 20 世纪 60 年代末期以来, 水库地震已逐渐成为大型水利水电工程的常规研究课题之一。不仅地震地质人员, 而且工程地震和水工人员都做了大量的工作。有的大坝因考虑水库地震的影响, 而做出了重大变动。如美国当时正在施工的奥本 (Auburn) 水电站, 由于渥洛维尔 (Oroville) 水库区发生了 Ms5.7 级地震而停建, 重新考虑了设防烈度后才继续开工。许多国际学术会议或讨论会, 都有关于水库地震的论文。例如, 国际地震和地球内部物理协会 (IASPEG) 1969 年在智利圣地亚哥召开的第四届国际地震工程会议, 同年在印度马德里和 1971 年在莫斯科召开的第二、第三届地震预报会议; 国际岩石力学协会 1972 年 9 月在西德斯图加特召开的“裂隙岩渗流会议”上都曾讨论过这一问题。联合国教科文组还于 1970 年组成一个水库地震现象工作组, 于 1970 年、1971 年、1973 年举行过三次会议, 并于 1975 年在加拿大召开了第一次国际诱发地震讨论会, 会上宣读了 62 篇论文, 其中水库地震方面的论文约占半数。这次会议的目的是讨论由于兴建水库、地下注水、采矿等工程活动所引起的地震活动和今后诱发地震研究的方向。有关这方面的文献除散见于某些地学杂志外, 还出版了专门文献。如 1972 年美国国家科学院出版了地学科学部地震和岩石力学问题联合小组委员会的报告《与水库蓄水有关的地震》; 同年还出版了以人类活动伴生的局部地震为主的《工程地质史实》第八辑。

从 20 世纪 70 年代末到 80 年代初起, 在这方面的研究工作相当活跃, 如 1979 年第 13 届、1981 年第 14 届国际大坝会议, 1980 年国际大坝抗震设计讨论会以及 1982 年 12 月在新德里召开的国际工程地质大会等会议上都有这方面的论文。1981 年 12 月在中国武汉召开了“全国诱发地震座谈会”, 会上主要讨论了水库地震, 并于 1983 年底出版了《中国诱发地震》论文集; 1990 年 3 月, 在武汉又召开第二次全国水库地震学术会议; 1995 年 11 月 1~5 日在北京召开了第二届诱发地震国际会议, 并出版了会议文集。目前的趋势, 一是对大型水利水电工程普遍进行了水库地震研究, 设置微震监测系统; 二是水库地震的预测烈度工作已开始直接进入大坝的抗震计算。

随着水利水电建设的发展, 特别是 20 世纪 60 年代初广东新丰江水库蓄水诱发地震后, 我国在水库地震领域开展了广泛的科研工作, 取得了很多成果。此后, 陆续又有 10 余座水库诱发了地震, 其中除丹江口水库进行了水库地震研究与观测台网的监测工作外, 其他水库很少进行研究。20 世纪 70 年代中期, 曾有过一个研究水库地震的热潮, 但对已



发震的水库研究较多,对蓄水前的前期勘测研究很少开展。后来由于浙江乌溪江水库与贵州乌江渡水库相继又发生了水库地震,江西柘林水库水位继续抬高后,又发生了 Ms2.2 级地震。因此,促使人们开始重视水库地震的研究。

20 世纪 80 年代初中国水利水电科学研究院受水电部科技司的委托,组织了水库地震研究组,设在抗震防护研究所内。为了开展水库地震的研究工作,水电部水电规划设计总院于 1981 年 10 月在北京举办了水库地震讲习班。后来除了上述 5 座水库进行监测研究外,还开展了四川二滩水库、青海龙羊峡水库、广西岩滩水库的前期勘察与微震监测工作,以及广西龙滩水库、河南小浪底水库等的前期水库地震研究工作。直到 20 世纪 80 年代后期,对所兴建的大型水库,在勘测初期均进行了水库地震的勘测与科研工作。如长江三峡、雅砻江的锦屏梯级电站以及金沙江上的各个大型水电站均进行了水库地震的前期论证工作,并将水库地震列为大坝设计烈度时的一部分。

在这段时间,地震地质学者们写出了许多专著和研究报告。如:《第一届国际诱发地震讨论会概况及加拿大参观纪要》出国参观考察报告,1976,科技文献出版社;H. K. 古普塔、B. K. 拉斯托吉著,王卓凯、刘锁旺译《水坝与地震》(1980),地震出版社;Packer et al.,《Study of Reservoir Induced Seismicity》(1979);肖安予,《水库诱发地震若干震例的初步分析》(《水文地质工程地质》1982 年 3 期);夏其发,《水库诱发地震(讲稿)》(1983.7);胡毓良编,《水库地震研究的新进程(评述)》(《地震地质译丛》1983.5 卷 3 期);国家地震局地震研究所武汉地震大队水库地震类比小组,《水库地震类比研究报告》(1984);丁原章等,《水库诱发地震》(征求意见稿)(1987.10),并于 1989 年地震出版社出版。这些专著为进一步研究水库地震提供许多极有价值的资料。

水库地震的研究不仅直接关系到水坝和千百万人民生命财产的安全,在理论上也是为天然地震的发震机制和探索人工控制地震的一个有意义的途径。因为这类地震活动短时期内在固定的地区多次重复发生,而且注入水的水头和库水位可以人为调节,所以地震学者将它看作为研究地震成因的大型试验场,希望从中获得发震机制、介质物理状态等方面的资料,进而希望能为地震预测预报探索出新途径,并为控制灾难性地震提供可能性。工程地质人员则希望从这些事例的研究中找出可能产生强烈水库地震的地质条件和建筑物技术特性方面的标志,以便在为新建的水库进行工程地质勘察时,就能预测到水库地震产生的可能性和它的强度,从而更有效地保证水工建筑物本身及其邻近已有建筑物的安全与稳定。然而,目前国内外水库地震资料积累得还不多不全,研究地震的工程地质标志还未建立,因此,水库地震研究,除了从水库地震实例中积累资料外,还应从实际工作中去积累资料和总结经验,建立判断水库地震的工程地质标志(或发震的工程地质条件),供新建水库和水电站在勘测设计阶段对水库地震的可能性作预测评价,以保证水工建筑物经济和安全。

二、水库地震的含义

已有的震例表明,水库地震是一种相当复杂的地震地质与工程地质中的一种地质现象,其发生发展的机理还没有完全搞清楚。在这里,什么是水库地震,或者说水库地震的界定,具有十分重要的意义。如果把距水库很远的地震或蓄水后库区范围内发生的所有地



震都认为是水库地震,必然会将许多无关的地震事件与由蓄水引起的地震混淆在一起,不可能得出正确的判别标准。反之,一概否认水库地震的存在,或把蓄水后发生的地震笼统地认为是天然构造地震的观点,也早已被事实所否定。

根据大量震例和蓄水后没有发生水库地震的工程资料,特别是对我国已建成工程的蓄水前后的地震活动资料分析,水库地震可定义为“水库蓄水后而引起库区以及库水影响所及的邻近地区新出现的地震现象或原有地震活动性的明显改变(加剧或减弱)”。水库地震的诱发条件(亦可称之为发震因素)是复杂的,其中有些与地壳的内动力地质作用有关,也有一些与地表的外动力地质作用关系密切。因此,可以认为,水库地震是人类大规模水利水电建设工程活动与地质环境中原有的内生不稳定因素或外在不稳定因素相互作用的结果,是成因类型不同、最大发震强度及其对工程危害程度不同的工程地质现象的总称。

其研究范围,根据大量已发震水库的震例资料,应首先考虑的是,当库区水位抬高后,库区范围内的地下水位受其影响而增幅的部分,即直到原有的地下水位不受其改变的区域,其范围一般小于 $3\sim 5\text{km}$ 。因此在山区的工作范围可到库区周边的地下水第一分水岭;丘陵地区一般以 10km 为宜;如有区域性的深、大断裂带通过地区,或在岩溶发育地区,均应根据实际情况适当向外延伸其勘测研究范围。

三、水库地震研究的必要性

水库地震是客观存在的事实,是人类大规模水利水电建设中所遇到的特殊问题之一,如新丰江大坝,原为一轻型支墩坝,在1959年10月新丰江水库蓄水后不久,库区出现了频繁的地震活动,于是开始了以探索库区地震的形成条件和发展趋势为主要内容的综合性地质地震研究工作,同时对大坝按地震烈度Ⅷ度抗震标准进行了紧急加固,加固工程临近竣工时,在距大坝 1.1km 处发生了 $M_s 6.1$ 级地震,而大坝未遭毁坏,仅在坝身上部产生了平行大坝的水平向长裂缝,有库水向坝下渗水的可能,但附属建筑物受到损毁而使电站停止运转。另造成房屋倒塌1800间,有6人死亡,80人受伤。自1962年3月19日发生主震以来,连续观测20多年即记录到32万多次地震,为开展水库地震研究提供了难得的实验场地。

水库地震研究的必要性主要表现在以下四个方面:

(1) 在已建工程中,水库地震有一定的发生概率。对于高坝大库来说,其发生概率超过了库区若干常见的不良工程地质现象。已有的震例显示,中等强度以上的水库地震,有可能造成大坝和水工建筑物的损坏,也会给库区带来一定的人员伤亡和物质损失。在某些特殊情况下,近坝的水库地震有可能成为抗震设计中的控制工况。因此,在水利水电工程的勘测设计阶段,必须对水库地震的危险性做出合理的预测或评估。

(2) 在施工期间或蓄水初期,若发现库坝区的地震活动明显增强,是否需要在水工建筑物采取预先加固措施或调整水库调度运行方式,是否需要在震中区采取一定的防震抗震对策等,是工程建设者必须及时解决的实际工程问题,处理不慎,就会造成重大的安全问题和巨大的经济损失。可见,像水情监测和滑坡监测系统那样,从施工初期就设置水库地震监测预测系统,成为保障工程抗震安全的重要措施之一。

(3) 在我国西部和中部地区,一批坝高 $200\sim 300\text{m}$ 量级、库容 100亿 m^3 以上的水利



水电工程正在加紧建设，这些工程地区的地震地质条件更加复杂，水库地震危险性预测将是工程抗震安全和环境保护的重要问题之一，而目前的研究水平很难满足设计和施工的要求，必须结合现有工程的实践，加强现场工作和理论研究，及早积累必要的技术储备。

(4) 从水库地震所产生的危害来看，应给予重视。水库地震亦为库区的主要工程地质问题之一，同时又是环境评估中的一个重要方面。因此，为了确保大坝施工期与建成后的安全以及震中区居民的生产与生活秩序不受影响，应该作为专题研究。通过对库坝区水库地震环境地质条件的研究，并正确评价发生水库地震的可能性及可能造成的危害，为大坝提供是否要考虑和按什么标准考虑抗震措施的设计依据；同时根据前期工作的评价意见，布置适当的监测系统，密切监视施工和运行期间的库坝区的震情变化，查明其原因，预测其发展趋势，为工程建设和管理部门采取合理的对策提供依据。这些工作，不仅是直接为工程建设服务所必不可少的，而且也是水库地震理论研究的基础工作。

第一章 水库地震的基本概况

要了解水库地震的特点，首先就得了解各国的水库地震的基本概况，从中找出它们共同的发震条件和基本规律，来对比和预测新建水库是否具备水库地震的发震条件和可能的强度，以便工程设计和施工采取必要的预防措施。

第一节 水库地震震例的分布概况

据初步统计，目前世界上在 33 个国家中，已知有 134 座水库发生过水库地震（见表 1-1），其中亚洲 12 个国家 54 例，非洲 5 个国家 6 例，大洋洲 2 个国家 7 例，欧洲 8 个国家 31 例，北美洲 2 个国家 22 例，拉丁美洲 4 个国家 14 例。因此，欧洲比原先减少了一个国家和 6 个震例，而亚洲则增加了 5 个国家和 6 个震例（见图 1-1）。世界各国水库地震震例参数统计总表见表 1-2。

表 1-1 世界各国水库地震的震例数统计表

序号	国 名	已报道 水库地震 震例总数	按最大地震强度分档统计			
			强烈地震 ≥Ms6.0	中等强度 Ms5.9~4.5	弱震 Ms4.4~3.0	微震 <Ms3.0
1	阿尔及利亚 Algeria	1		1		
2	澳大利亚 Australia	5		2	2	1
3	奥地利 Austria	1				1
4	巴 西 Brazil	10		1	5	4
5	加拿大 Canada	4		1	2	1
6	中 国 China	25	1	3	8	11
7	多米尼加 Dominica	1				1
8	埃 及 Egypt	1		1		
9	法 国 France	4		2	1	1
10	格鲁吉亚 Georgia	2		1	1	
11	加 纳 Ghana	1		1		
12	希 腊 Greece	3	1	2		
13	印 度 India	13	1	2	5	5
14	伊 朗 Iran	1		1		
15	意大利 Italy	4		1	1	2
16	日 本 Japan	3		2		1



续表

序号	国 名	已报道 水库地震 震例总数	按最大地震强度分档统计			
			强烈地震 $\geq M_s 6.0$	中等强度 $M_s 5.9 \sim 4.5$	弱震 $M_s 4.4 \sim 3.0$	微震 $< M_s 3.0$
17	哈萨克斯坦 Kazakhstan	1				1
18	吉尔吉斯斯坦 Kyrgyzstan	1				1
19	墨西哥 Mexico	2		1	1	
20	新西兰 New Zealand	2		1	1	
21	巴基斯坦 Pakistan	3			2	1
22	罗马尼亚 Romania	3				3
23	南非 South Africa	1				1
24	西班牙 Spain	7		2	3	2
25	瑞士 Switzerland	7			2	5
26	塔吉克斯坦 Tajikistan	1		1		
27	泰国 Thailand	2		2		
28	土耳其 Turkey	1			1	
29	美国 U. S. A.	18		5	4	9
30	乌兹别克 Uzbekistan	1		1		
31	委内瑞拉 Venezuela	1			1	
32	原南斯拉夫 Yugoslavia	2		1	1	
33	赞比亚 Zambia	2	1		1	
合计		134	4	35	41	54
百分比 (%)		100	2.98	26.12	30.60	40.30

在这 134 个震例中,有地质与地震资料的有 129 例,只报道有地震活动,但无地质资料的有 5 例。在资料齐全的 129 例中,有争议的有美国的渥洛维尔、圣路易斯、卡宾溪,加拿大的买加,中国的佛子岭、新店、大化、岩滩、潘家口水库等 9 例。

中国在 1986 年报道了 18 例水库地震,1996 年增加到 25 例,(图 1-2 与表 1-2)。其中地震震级大于或等于 $M_s 6.0$ 级仍为 1 例; $M_s 5.9 \sim 4.5$ 级的增加 1 例为 4 例; $M_s 4.4 \sim 3.0$ 级的增加 3 例为 9 例;小于 $M_s 3.0$ 级的增加 6 例为 11 例。这是由于中国改革开放以来,水电建设速度加快,一大批新的水电站建成蓄水发电所致。水库蓄水向库区周边产生了库水的临时渗漏,使库区岸边卸荷带中的干燥的岩体产生微破裂,这是水库蓄水初期的必然现象。在早期修建的大量水库没有发现水库地震,主要是由于对水库地震的重视不够,同时也未在库区架设微震台网进行观测。但从已取得的资料分析可知,大量的水库地震均属于微震,仍属于正常现象,个别的达到弱震,这可能与当地的小断裂有关,需要继续观测,但其仍属于裂隙型的水库地震。

表 1-2 中所列的中国 25 个震例,其中 20 例被大多数研究者公认为是水库地震;有 5 例则有争议。其中有 2 例,如佛子岭、石泉 2 座水库地震,均属于发生在地震活动带中所发生的构造地震。

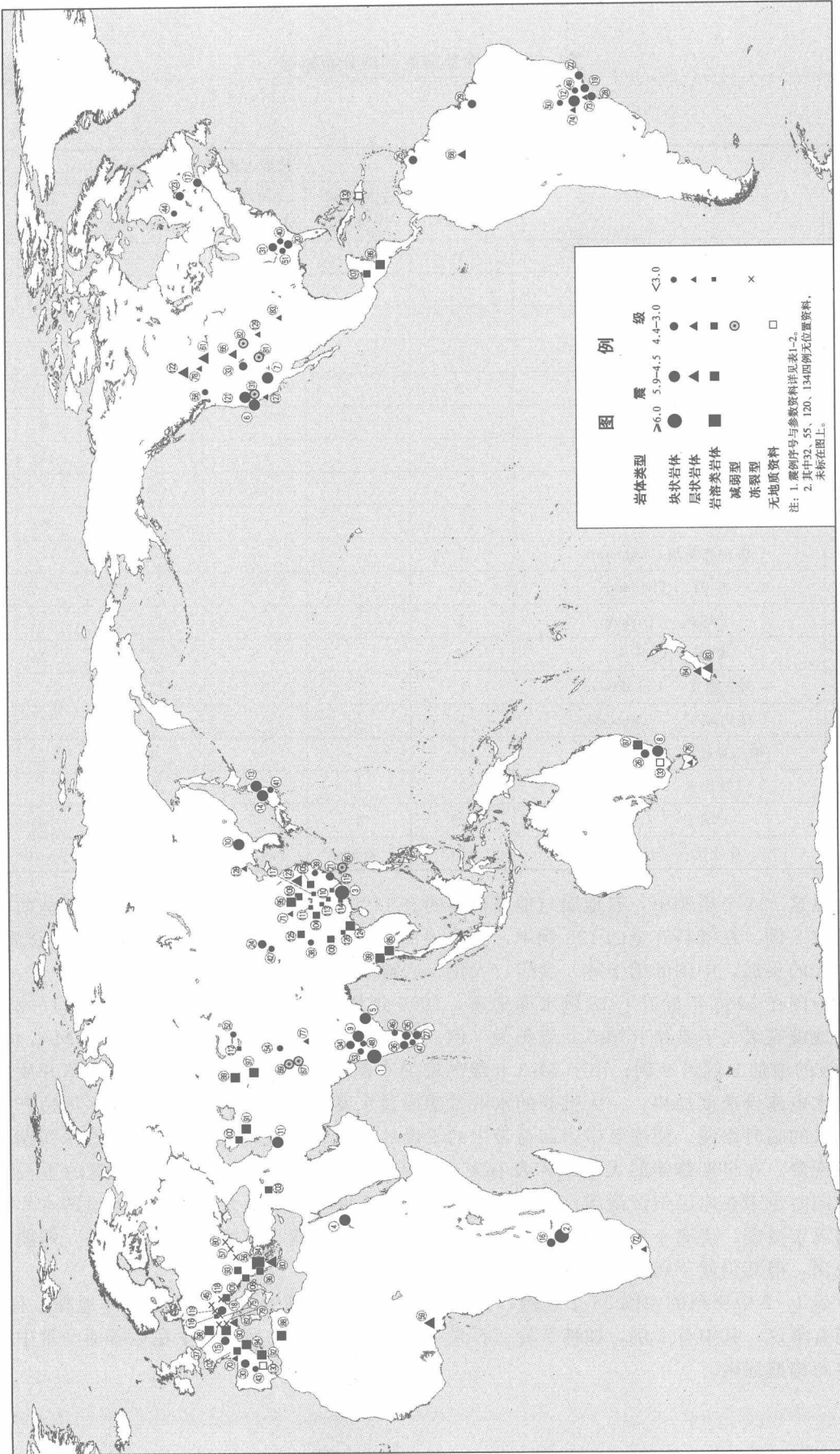


图 1-1 世界各国水库地震震例分布示意图