

三峡工程几个重大地质问题的研究与论证

陈德基, 满作武

(长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

[摘要] 回顾和介绍了三峡工程坝址选择、区域构造稳定性和地震活动性、水库库岸稳定性、水库诱发地震 4 个重大地质问题的研究过程, 研究的主要内容、方法和结论, 也对三峡工程 2003 年蓄水运行以来, 上述几个问题的初步检验结果做了扼要的评述。

[关键词] 三峡工程; 重大地质问题; 研究论证

[中图分类号] TV221; P315.9 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)07-0043-08

1 前言

三峡工程由于其巨大的规模和极端重要的地理位置, 地质条件的可靠性一直是工程设计研究和社会各界关注的重点问题之一。焦点集中在坝址选择、区域构造稳定性和地震活动性、库岸稳定性、水库诱发地震等几个问题。第一个问题的研究从 20 世纪 50 年代初一直持续到 1979 年坝址选定才告一段落。后面三个问题是 20 世纪 80 年代三峡工程重新论证时地质地震专题的重点论证课题, 并一直为人们所关注。文章就以上 4 个问题的研究过程及主要结论做一简要回顾。

2 关于三峡工程的坝址选择

对于三峡工程这样巨大的水利工程项目, 选择一个地质条件相对优越、水工布置和施工条件都相对有利的坝址具有战略意义。现在所选定的三斗坪坝址, 是在长 51 km 的河段内, 从 2 个坝区、15 个坝段中, 经过大量的勘测设计和试验研究工作, 前后历时 24 年, 反复研究比较后确定的。这从一个侧面反映了三峡工程建设决策的严谨与慎重。

20 世纪 40 年代中期, 国民党政府资源委员会和美国垦务局合作进行扬子江三峡工程计划期间,

在三峡出口的南津关至石牌长 13 km 的石灰岩河段内, 选择了 5 个坝址进行研究, 进行了中等比例尺的地质调查和少量的钻探, 初步勘察后认为 II 号和 III 号坝址较好。

中华人民共和国成立后, 1954—1955 年, 长江水利委员会经多次查勘后认为, 黄陵背斜核部结晶岩出露的河段(从南沱至庙河)建坝条件优越, 决定将三峡工程建设河段的研究范围, 从国民党政府资源委员会和美国垦务局研究过的峡谷出口河段扩展到上游庙河, 总长 51 km。这一河段的地形地质条件, 可分为特征迥然不同的两个坝区: 南津关坝区(又称石灰岩坝区)和美人沱坝区(又称结晶岩坝区)。石灰岩坝区上起石牌, 下至南津关, 长 13 km, 从中选择了 5 个坝段; 结晶岩坝区上起美人沱, 下至南沱, 长 25 km, 从中选择了 10 个坝段, 对两个坝区 15 个坝段进行比较(见图 1), 并以南 III(南津关)和美 VIII(三斗坪)两个坝段作为坝区比较的代表性坝段, 深入进行勘察。为坝区比较所进行的地质勘察历时 3 年(1956—1958 年), 仅钻探工作量一项, 总进尺达 53 000 m。

通过勘察发现, 石灰岩坝区的地质缺陷十分明显, 工程地质、水文地质条件复杂。同时, 对于长江这样的大河, 要兼顾防洪、发电、航运等多目标开发,

[收稿日期] 2011-05-20

[作者简介] 陈德基(1935—), 男, 贵州平坝县人, 教授级高级工程师, 中国工程勘察大师, 从事水利水电工程地质与地质灾害防治研究;
E-mail: chendj9593@126.com

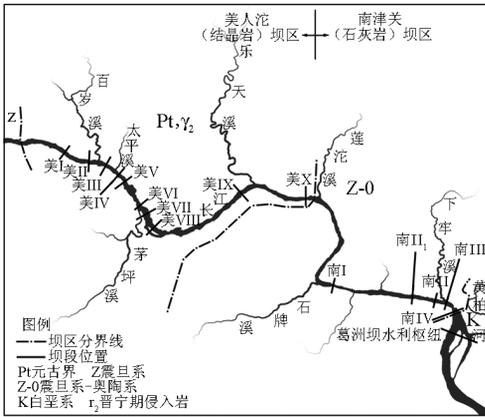


图1 长江三峡水利枢纽坝区、坝段位置示意图

Fig.1 Location of the dam region and dam sections of Three Gorges Project

河谷过于狭窄,水工布置和施工条件都极为困难。美人沱坝区为元古界结晶岩分布区(古老的变质岩和侵入的花岗岩、花岗闪长岩),地质条件优越,且河谷较开阔,临江地形低缓,便于水工布置,施工条件也较好。因此,从地形、地质、水工布置及施工条件综合比较,结晶岩坝区明显优于石灰岩坝区。在1959年完成的三峡水利枢纽初步设计要点报告中,正式选定了美人沱结晶岩坝区。

结晶岩坝区的10个坝段,构造背景、岩性条件基本相似。10个坝段大体可分两种类型,一类以美Ⅲ太平溪坝段为代表的中等宽河谷,一类以美Ⅷ三斗坪坝段为代表的宽河谷。经比较,在初设要点报告中,选择了美Ⅷ三斗坪坝段。

从1961年起,出于人防安全和工程防护的需要,又对河谷较窄的石牌坝址及美人沱河段的太平溪坝址(美Ⅲ)进行勘察研究。经过近3年的工作(1961—1963年),石牌坝址大爆破筑坝方案被否定。从1964年起,集中力量在太平溪坝址全面开展勘察设计工作,直至1979年。

太平溪和三斗坪两坝址相距7 km,地质条件基本相似,都具备兴建高坝的良好地质条件。所存在的一些差别,不是影响坝址选择的主要因素。但两坝址的地形条件相差较大。太平溪坝址河谷相对较窄,两岸山体完整雄厚,谷坡较陡,适于布置地下厂房,混凝土工程量较小,土石方开挖量大;三斗坪坝址河谷开阔,河床右侧有中堡岛顺江分布,两岸谷坡平缓,地形完整性差,适于布置坝后式厂房。混凝土工程量较大,土石方开挖量相对较小,施工场地较开阔。国家有关部门多次组织全国性的专家会议讨

论,综合多方面的意见,于1979年选定了三斗坪坝址。到坝址选定,两坝址累计完成的地质勘察工作都十分可观,仅钻探工作量一项,分别达30 000 m和53 000 m。

3 区域构造稳定性和地震活动性

三峡工程区域构造稳定性和地震活动性问题,自工程勘察始起,就被放在极其重要的位置进行研究。

区域构造稳定性和地震活动性问题是一个跨学科、多专业、高难度的研究课题。三峡工程对这一问题的研究有两条基本做法:一是采用地质、地理、地貌、地震、地球物理、大地测量等多学科的综合手段,从多个侧面勾绘出一个地区区域构造稳定性和地震活动性的清晰的面貌;二是凡是可以数据说明的问题,一定设法取得数据。三峡工程取得了包括各壳层的深度、厚度,莫霍面的形态及埋深,主要断裂的切割深度,断裂形变速率,断裂最新活动年龄,地形变测量,长达半个多世纪的测震成果等,多方面地提供了有说服力的数据,并与宏观地质、地震研究所得出的结论相互支持、印证,才得以做出可信的结论。研究的主要内容可归纳为以下几个方面:

1) 区域地层、岩性、地质史和大地构造环境的研究。该项研究为三峡工程进行了数万平方千米的地质调查与专项测绘。与之相适应,进行了与地学相关的多学科的基础地质研究。

2) 深部地球物理和地壳结构的研究。包括大面积航空重力、磁力测量资料分析,坝址及库首段高精度航磁测量,地面重力测量以及东西向(奉节—江陵)和南北向总长3 260余 km的纵和非纵测线人工地震测深等。

3) 区域及坝区断裂构造的展布、规模、性质及活动性的研究。重点对坝区及外围几条主要断裂的性质及活动性进行大中比例尺地质测绘,断裂的运动学、动力学、岩石学、年代学以及地质力学模型的研究,断裂带位移的定点监测等。

4) 地貌及新构造运动性质的研究。包括山区夷平面,西部鄂西山地与东部江汉平原过渡带,中~新生代沉积盆地的特征、形成及演变历史,河流阶地形成年代和位相对比,第四系堆积物变形的调查研究等。

5) 现代地壳运动性质的研究。坝址及库首区的周期性精密环线水准测量,GPS地形变监测等。

6) 地震活动特征与规律的研究。统计分析历史地震,现代测震和1958年起工程专用地震台网所获得的大量资料,结合地震地质条件,研究本区地震活动的本底特征和时间、空间、强度规律等。

7) 地震危险性分析和地震动参数研究。

通过上述工作,对三峡工程区域构造稳定性、地震活动性得出了以下结论:

1) 三峡工程位于扬子准地台中部,是中国大陆地壳稳定性较高的地区,为典型的弱震构造环境。

2) 深部地球物理场的研究表明,本区地壳结构清晰,壳内介质成层性好,主要界面基本连续(见图2)。几条地区性断裂均为基底I型断裂,地壳整体处于基本均衡状态。

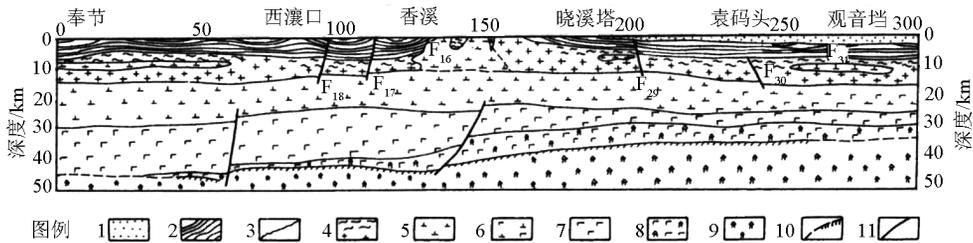


图2 奉节—江陵(观音挡)人工地震测深地质解释剖面图

Fig. 2 Geological profile from Fengjie to Jiangling (Guanyindang) by deep seismic sounding

1 - 陆相沉积岩层; 2 - 海相沉积岩层; 3 - 不整合面; 4 - 基底变质岩—花岗质岩层;

5 - 闪长质岩层; 6 - 辉长闪长质岩层; 7 - 辉长质岩层; 8 - 壳幔过渡层; 9 - 铁镁质橄榄岩层;

10 - 莫霍界面及推测莫霍界面; 11 - 断裂

3) 坝址所在的黄陵地块是稳定程度更高的刚性地块,无区域性断裂和活动性断裂分布。地块周缘的几条较大断裂都是基底型断裂,现今活动微弱,不具备发生强震的条件。

4) 2000多年的历史中,三峡工程坝址及库区邻近的10余个县市历史上无破坏性地震记载。有仪器记录以来,坝址60~70 km范围内,发生过3次震级 M_s 4.8~5.1级的中强震,影响到坝址烈度都在5度以下。而坝址所在的黄陵结晶岩地块内,50年仪器监测,仅记录到 $M_s \leq 2$ 级的地震10余次,是地震活动极其微弱的地区。2008年四川汶川“5·12”大地震在坝区的影响烈度仅4度。

5) 三峡工程坝区地震基本烈度经国家有关部门前后4次鉴定,均定为VI度。主体建筑物的抗震设计地震动参数,取年超越概率 1×10^{-4} 为基准。在此概率水平下,基岩(弱风化顶面)水平加速度峰值为 125 cm/s^2 。

2001年新建的三峡工程水库诱发地震监测预测系统,通过近10年的监测,无论是断层位移、地形变,还是地震活动的监测成果,都表明前期对三峡工程构造稳定性和地震活动性的研究结论是正确的。

4 水库库岸稳定性研究

三峡水库库岸稳定性的研究,有如下几个特点:

a. 面大、线长。调查研究范围面积约 4500 km^2 ;干、支流库岸岸坡合计总长约 5000 km 。b. 地质条件复杂。不论库岸岸坡结构类型、岩性、构造、地貌,还是崩塌、滑坡的类型、规模、形成条件和稳定状态,都复杂多变。c. 研究程度要求高。库岸稳定性涉及主体工程、长江航运、库区城镇和居民点的安全、库区移民选址及库区社会经济的发展规划,要求研究结论足够可靠。这些特点在全世界范围内都是独一无二的。

4.1 库岸稳定性的前期勘察研究

三峡工程水库库岸稳定性问题,在20世纪50年代至70年代的常规勘察、80年代的三峡工程重新论证、国家“七五”科技攻关和水库移民选址的补充勘察中,都进行了研究。在国内众多部门的参与下,多学科、多手段、多层次协同攻关。研究内容包括干、支流库岸岸坡的地质条件,岸坡结构类型、稳定程度;崩塌、滑坡体的分布、发育规律,形成条件和影响因素;体积大于 10 万 m^3 的崩塌、滑坡体的位置、规模及稳定性;大型崩、滑体,危岩体的专项勘察和稳定性计算;基岩顺层高边坡的稳定性现状评价和蓄水后的变化预测;大型崩、滑体失稳入江涌浪的计算和模型试验,涌浪沿程衰减特征和危害程度;几处大型崩、滑体的变形监测和防治措施等。这些研究工作使前期勘察对库岸稳定性的认识取得了重大

进展。三峡工程动工兴建后,国家又斥巨资,以库岸稳定性为重点,分三期对库区地质灾害进行勘察与防治,从而基本消除了库岸失稳对水库运行和移民安全可能造成的危害。

前期研究的主要结论:

1) 三峡工程水库岸坡主要由坚硬—中等坚硬岩石组成,总体稳定性较好。稳定条件差的岸坡共计长约 72 km,仅占库岸总长的 1.4% 左右,而且分散地分布在远离坝址的局部地段上。

2) 库区共发现体积大于 10万 m^3 的崩塌、滑坡和危岩体 684 个,总体积 30.4亿 m^3 。上述崩、滑体中,稳定与基本稳定的共 569 处,体积约 26.2亿 m^3 ,分别占总数的 83.2% 和总体积的 86.2%;稳定性差和较差的 115 处,体积约 4.2亿 m^3 ,分别占总数的 16.8% 和总体积的 13.8%。

3) 在水库蓄水后,稳定性差与较差的崩、滑体可能失稳。但后者的破坏形式主要是前缘部分的蠕滑、坍滑或解体,整体性复活将比较少见。

4) 库区稳定条件差和较差的崩、滑体总体积约 4.2亿 m^3 ,即使全部失稳入库,对水库的库容和寿命无实质性影响。

5) 坝前 16 km 范围内,不存在大型崩、滑体。距坝址最近的野猫面崩滑体(距坝址 17 km),经详细勘察和多年变形监测,处于稳定状态。新滩滑坡和链子崖危岩体距坝址分别为 26 km 和 27 km。新滩滑坡已于 1985 年 6 月整体滑落,在可预见的工程年代里,再次发生整体失稳的可能性很小;链子崖危岩体已于 20 世纪 90 年代进行了系统加固整治。其余的大型崩、滑体距坝址都在 50 km 以远。因此,局部岸坡失稳不会影响坝址建筑物的安全。

6) 三峡水库形成后,干流库段的水面宽度、水深和水下断面均较天然情况大大增加,大型崩、滑体滑落入水库对航道的危害较之天然条件下将大为改善。

7) 三峡工程库区有 13 个县市及 130 余个建制镇位于水库淹没影响区,库岸稳定性对库区移民选址及现有城镇、居民点安全的影响将是库岸稳定性研究和评价的重点。

4.2 水库蓄水以来库岸变形情况及稳定性评价

自 2003 年蓄水以来,涉水岸坡发生各类大小变形点 520 余处。但整体失稳滑移、坐落、崩塌,且规模在 10万 m^3 以上的仅 10 余处。其中造成一定危

害的仅有秭归千将坪滑坡、巴东县姚家滩滑坡、巫山龚家坊塌滑、奉节土狗子洞滑坡与云阳凉水井滑坡等数处,其余多为局部坍滑或地表产生局部裂缝变形,居民屋舍、道路局部受损的情况,多属岩土体受库水影响产生的调整性变形。2010 年蓄水至 175 m 水位后,规模较大的岸坡变形有 3 处。第一处是巫峡神女溪古堆积体坍塌,体积约 30万 m^3 。第二处是秭归郭家坝镇东门头堆积层坍塌,体积约 5万 m^3 。该两处均为临江松散堆积层坍塌。第三处是原龚家坊崩塌下游一带仍存的危岩体在变形。另外,巫山望峡危岩(海拔 1 200 m,体积数十万立方米,水平距库边线 1.28 km)因采煤与不当勘探等原因发生剧烈变形。对上述 4 处变形(危岩)体,国土资源部三峡库区地质灾害防治工作指挥部正在进行研究评估中,但没有做出影响 175 m 正常蓄水的警报。

总体衡量,三峡工程水库蓄水后的岸坡变形失稳程度没有超出此前的预测,没有影响工程正常运行,没有给库区移民生命财产、工农业生产和长江航运带来重大影响。主要原因如下:

1) 前期勘测结论,三峡水库主要由基岩库岸岸坡构成,稳定性好和较好的库段占库岸总长的 93%,稳定性差的库岸仅占库岸总长的 1.4%,因此岸坡失稳只会发生在少数地段发生。蓄水后库岸变形的事实证明,这一总的结论是正确的。

2) 三峡水库库岸,经过地质灾害防治的专项勘察,确定针对不同的情况,分别采用工程治理、搬迁避让和监测预警 3 种对策加以应对。这三项综合措施极大地减轻了水库蓄水后大型地质灾害的发生和危害,保证了迁建城镇及大型居民点的安全。图 3 为奉节县新城猴子石滑坡治理续建工程 IV-IV' 工程地质纵剖面图(长江水利委员会三峡勘测研究院周云提供)。

3) 建立了较有效的库岸变形监测网。国土资源部门在三峡库区先后设立了专业监测点 255 处,群测群防点 3 049 处。监测工作自 135 m 蓄水以来,对数十个滑坡发布了险情和预警通知(其中 3 个滑坡为橙色预警),针对不同情况,及时采取应急对策,最大程度减小了地质灾害的危害,确保人民群众和长江航运的安全。

4.3 对库区地质灾害的几点基本认识

1) 三峡工程库区是我国地质灾害的多发区之一,历史上有记载的大型崩塌(山崩)、滑坡就有

数十次之多。云阳、秭归等老县城都曾毁于滑坡。新滩滑坡历史上曾多次堵江碍航。20世纪80年代三峡工程兴建前,先后发生云阳鸡扒子和秭归新滩两次大滑坡,严重阻碍长江航道。前述正在变形的

望峡危岩体,分布高程1200 m,与水库蓄水毫不相干。因此不论是否兴建三峡工程,这一地区的地质灾害都会时有发生,认识这一点是评估三峡工程库区地质灾害时必须考虑的前提条件。

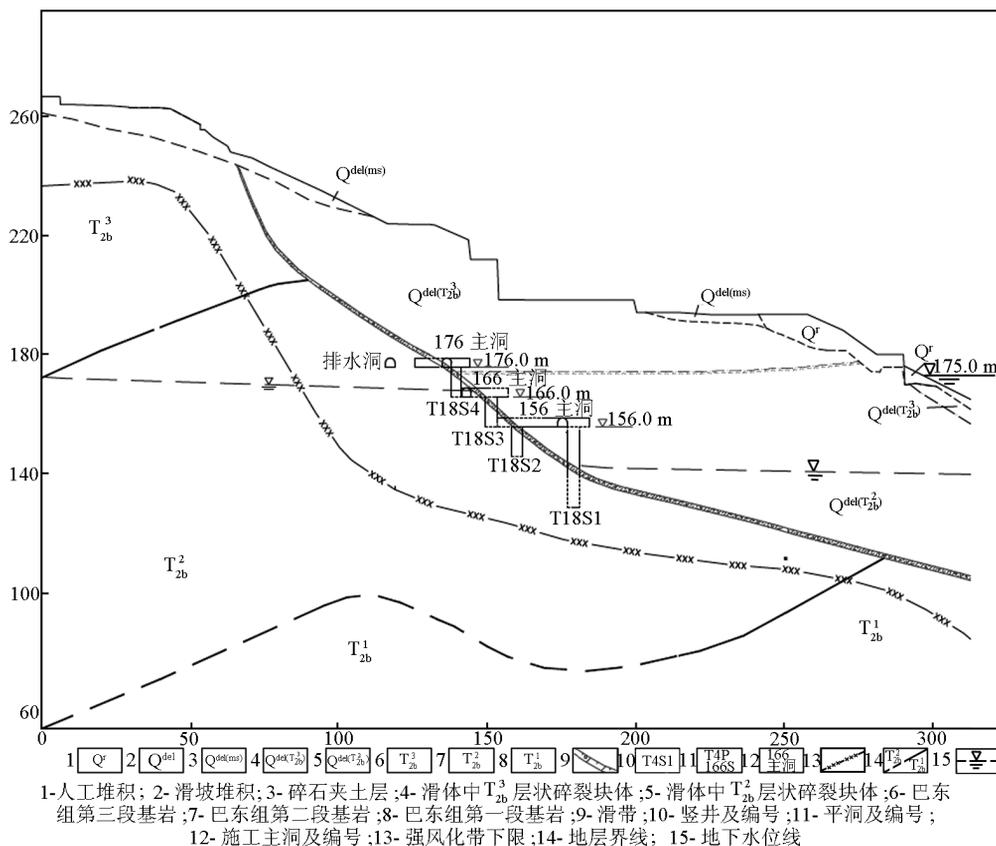


图3 奉节县新城猴子石滑坡治理续建工程IV-IV'工程地质纵剖面图

Fig. 3 IV-IV' geological profile of extension works for Houzishi landslide control in the new city of Fengjie County

2) 要分清三峡工程水库涉水部分引发的地质灾害、移民工程各项建设引发的次生地质灾害和纯粹自然灾害三者之间的界限。严格意义上的三峡工程水库带来的地质灾害应仅限于涉水部分引发的地质灾害,这是三峡工程水库造成的负面影响;移民工程各项建设引发的次生地质灾害是人类活动的产物,从本质上来讲是可以避免或可控的;大型自然地质灾害的发生是这一地区自然条件使然,发生概率较低,但要从根本上消除则是不现实的。三峡工程的地质灾害治理从全局上减轻了这一地区自然地质灾害的危害。但如果认为有了三峡工程库区的地质灾害防治,这一地区就不可能或不应该再出现较重大的自然地质灾害,这种想法是不符合实际的。做这三种划分有利于正确评价三峡工程所造成的地质

灾害的负面影响程度。

3) 三峡工程库区地质灾害防治的重点是库区移民生命财产的安全。巴东、巫山、奉节等新县城以及许多大型集镇的城(镇)址都是在没有理想新址的情况下无奈的选择,是地质灾害防治的重点。在完成大规模防治工程后,确保安全的主要措施是加强监测。实践证明,专业监测结合群测群防是有效的手段。

三峡库区是一个地质环境比较脆弱的地区,因此,库区尤其是大型城镇的建设速度和发展规模必须适应这一地质环境,避免人为地加重三峡库区地质灾害的危害程度。

4) 坍岸是库岸变形失稳最常见的一种形式,主要发生在松散堆积层岸坡,容易发生且数量多,但规

模及危害性均较局部。预计在 175 m 蓄水的最初几年,在没有进行护岸工程的一些松散堆积层岸坡段,仍会出现坍岸灾害,需根据情况及时治理。许多居民点无序地建在容易发生坍岸的临江松散地基层上,应该严加禁止。

5) 三峡工程水库已蓄水运行 7 年,试验性蓄水在 170 m 水位以上运行近 3 年,库岸稳定性问题的性质及危害程度已基本显露。运行多年来的检验表明,水库涉水部分引发的地质灾害,其规模和影响程度都是有限的,并且随着时间的推移会逐步减弱。

5 水库诱发地震问题研究

三峡工程水库诱发地震问题的分析有坚实的基础地质工作、广泛的专题研究和高精度的专业地震监测台网做支撑,主要研究内容有:

1) 区域地质背景和大地构造环境、主要断裂及其活动性、地震时空分布及活动规律等研究。

2) 分析整理了全世界百余座水库诱发地震的震例。

3) 全面调查研究了水库区的岩性、断裂构造和岩体渗透性,分析其诱震条件。

4) 在坝址区、库首的茅坪镇和归州镇附近进行了深孔地应力、孔隙水压力、渗透率、节理裂隙和地温测量。

5) 利用小孔径台网对坝区、库首结晶岩分布区及几个重点库段进行地震强化观测,充分掌握这些地段地震活动的本底。

6) 整理分析前期近 40 年三峡工程台网的测震资料,总结库区地震活动规律。

7) 用数值分析和物理模拟方法研究在库水作用下,库盆的应力场和应变场的变化,分析其对水库诱发地震的影响。

8) 综合上述研究成果,分区分段进行水库诱发地震可能性综合评价。

通过上述研究,对三峡工程水库是否会产生诱发地震,可能发震的地点、强度,对工程建筑物和库区环境的可能影响做出了预测评价。

前期研究的主要结论是:从坝前至庙河的第一库段为结晶岩库段,段内无区域性大断裂通过,历史及现今地震活动微弱,岩体完整坚硬,透水性弱,地应力水平不高,预计只能产生浅表微破裂型地震,最大震级 3 级左右。奉节以上的第三库段主要分布侏罗系、白垩系砂页岩红层,除干流局部灰岩峡谷段和

乌江、嘉陵江碳酸盐岩河谷段有可能产生岩溶型水库地震外,一般不会产生水库地震。从庙河至奉节的第二库段有面积碳酸盐岩出露,分布有仙女山、九湾溪、高桥等地区性断裂,渔阳关—秭归和黔江—兴山两个弱震带横穿库区,1979 年秭归龙会观 5.1 级地震即位于该库段。分析认为,该库段有产生构造型和岩溶型水库诱发地震的可能。最可能产生构造型水库地震的地段为九湾溪—仙女山两断裂展布区和高桥断裂沿线一带,最高震级 5.5 级左右;而干流巫峡和支流龙船河、大宁河等大面积碳酸盐岩分布区,则会发生岩溶型水库地震,最大震级 4 级左右。

2001 年 10 月,新建立的三峡工程水库诱发地震监测预测系统投入运行。该系统由三大部分组成:数字遥测地震台网、地壳形变监测网、地下水动态监测井网。该系统的建立,为认识水库地震的活动规律和预测水库诱发地震的发展趋势提供了更坚实的物质基础。三峡水库遥测地震台网布局见图 4 (长江水利委员会三峡勘测研究院曾新平提供)。

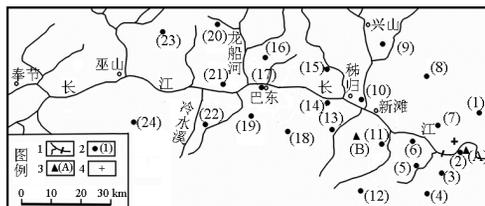


图 4 三峡水库遥测地震台网布局示意图

Fig. 4 Arrangement of telemetering seismic network of Three Gorges Reservoir

1 - 长江、支流和三峡工程坝址;

2 - 测地震台站及编号; 3 - 信息中继站及编号;

4 - 地震台网中心

(1) 牛坪垭; (2) 代石沟; (3) 鸡冠石; (4) 白云山; (5) 双山;

(6) 黄土坡; (7) 长岭; (8) 三堡; (9) 郑家坪; (10) 赵家山;

(11) 周坪; (12) 大块田; (13) 百佛寺; (14) 卢家山;

(15) 石头垭; (16) 炮台山; (17) 金子山; (18) 肖家坪;

(19) 梅花山; (20) 茅山岭; (21) 淹水塘; (22) 较场坝;

(23) 梨子坪; (24) 猫子山; (A) 黄牛岩; (B) 大金坪

自 2003 年开始蓄水以来,至 2009 年 12 月,三峡工程水库地震监测台网共记录到地震事件 15 988 次(包括可定位地震和单台记录地震)。蓄水后的地震活动有以下几个显著特点:

1) 以微震和极微震为主。记录到的 15 988 次地震中,震级小于 $M_L 3.0$ 级的微震和极微震共计 15 969 次,占全部地震总数的 99.8%。 $M_L \geq 3.0$ 级的地震 19 次,其中 $M_L \geq 4.0$ 级的仅 1 次(2008 年 11 月 22 日秭归县屈原镇 $M_L 4.1$ 级地震)。除极少数地

震附近的居民有感外,绝大部分都只是仪器记录的反映。这是由于三峡工程水库诱发地震监测台网的灵敏度极高,才能在蓄水7年内记录到如此庞大数字的“地震事件”。

2) 地震震源浅。平均深度约为5 km,绝大多数震源为0~1 km。震中大多集中分布在长江干流和支流两岸10 km以内。

3) 地震活动与库水位有很好的对应关系。随着库水位的抬升,地震活动水平也相应地提高。如135 m (139 m) 水位运行过程中,地震活动平均月次数为64次;156 m 水位运行过程中,平均月次数为143次;水位170 m 以上运行过程中,平均月次数为181次。

4) 多数地震震中呈团块集中分布在两类地区。一是被库水淹没的废弃矿区引发的“矿震”;二是大片碳酸盐岩分布区的岩溶型地震。说明三峡工程水

库地震绝大多数都是非构造型,也与微震、极微震为主的特点相吻合。

5) 在每一特定运行水位(135 m、156 m、170 m) 情况下,地震发震频率都是到达该水位的第一年(2003年、2006年、2008年) 频度最高,以后逐年降低。以135 m 水位为例,2003年月平均发生率为68次,2004年为61次,2005年降为56次(见图5);170 m 水位以上运行3年来,尽管2008年、2009年库水位低于2010年,但发震频率却高于2010年。这三年每年9、10、11月三个月的月平均发生率,2008年为276次/月、2009年为171次/月,而2010年降为132次/月。

6) 构造型特征较明显的地震,多分布在高桥断裂沿线,九湾溪和仙女山断层展布区也有发生,与前期的预测部位基本一致。

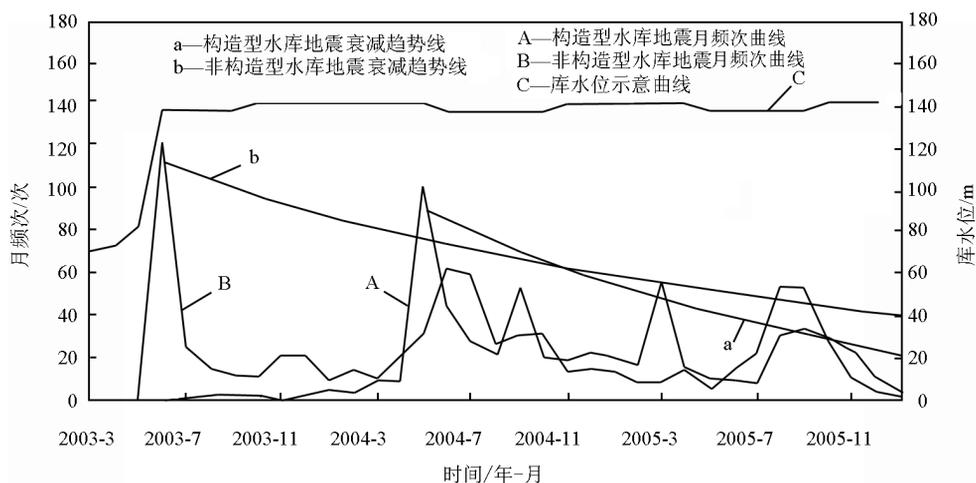


图5 水库地震月频次随时间变化曲线(2003—2005年,库水位135(139)m)

Fig. 5 Monthly frequency changing curves with time of the reservoir earthquake (reservoir level of 135(139)m from 2003 to 2005)

上述地震活动规律与前期分析的主要结论基本一致,即:发震地点集中在第二库段的中部;灰岩地区主要诱发岩溶型地震;构造型诱发地震主要出现在高桥断裂和九湾溪—仙女山断裂展布区;随着时间的延长,地震活动会逐渐减弱等。已发生的最大地震(M 4.1级)则远低于前期的预测(M 5.5级)。对于库水淹没废弃矿山引发矿震,前期虽也有所预判,但远没有想到会有实际发生的这么广泛、强烈和持久。

2010年试验性蓄水始于9月,自9月10日至11月17日共记录地震301次,月频次约132次,日频次4.4次,均低于2008年和2009年的频次。最大地震为巴东陈家湾 M_L 3.0 (M_S 2.3) 级。震中位置与以前无变化。

根据对国内外55个水库的统计,主震在水库蓄水后1年内发生的有37个,占67.3%;2~3年发震的12个,占21.8%;5年发震的2个,占3.6%;5年以上的4个,占7.3%。换言之,主震在

水库蓄水后 3 年内发生的占总数的 90 %。三峡工程自开始蓄水迄今已 7 年,在 170 m 高水位运行也已 3 年。诱发矿山型和岩溶型地震的岩体,均已接受了接近最高水位库水的渗透、浸泡和渗压作用,经历了两次高低水位的循环;对于可能诱发构造型地震的几条断裂,也在高水位条件下进行了 3 年的应力调整;所出现的最大震级则远低于最初预测的强度。初步判断三峡工程水库诱发地震的危险期即将过去,逐渐趋于平静。现在虽不能断言三峡工程水库地震不会出现新的情况,但较有把握的一个预判是:出现高于预测的 $M > 5.5$ 级的水库诱发地震的

可能性很小。

致谢:文章在编写过程中得到长江水利委员会三峡勘测研究院陈友华、周云、曾新平等几位同志的大力协助,特此表示感谢。

参考文献

- [1] 长江水利委员会. 三峡工程地质研究[M]. 武汉:湖北科技出版社,1997.
- [2] 陈德基,汪雍熙,曾新平. 三峡工程水库诱发地震问题研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1513-1524.

The research and demonstration of some major geological problems of Three Gorges Project

Chen Deji, Man Zuowu

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research,
Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

[**Abstract**] The research process, main contents, methods and conclusions for some major engineering geological problems of Three Gorges Project (TGP) are reviewed and introduced, including dam site selection, regional tectonic stability and seismic activity, stability of reservoir bank and reservoir-induced earthquake. Meanwhile, the above mentioned engineering geological problems are evaluated according to the preliminary storage test results since TGP's operation and impoundment in 2003.

[**Key words**] Three Gorges Project; major geological problems; research and demonstration