

# 汶川地震后对大坝抗震安全的思考

陈厚群

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

[摘要] 简要概述了震区大坝,尤其是坝高超过 100 m 的 4 座大坝的震情;总结了此次破坏性地震中有关大坝安全的经验教训;对在我国强震区兴建高坝的有关大坝抗震安全的几个关键问题做了分析和探讨,并提出了相应的建议。

[关键词] 汶川地震;经验教训;水库地震;优先战略

[中图分类号] P315.9 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)06-0044-10

## 1 前言

“5·12”四川汶川大地震不仅造成了巨大的人员伤亡和经济损失,而且产生了巨大的地质灾害。笔者在已有研究基础上<sup>[1,2]</sup>,简要概述了震区大坝的震损情况,初步总结了破坏性地震中有关大坝安全的经验教训,同时,分析和探讨了与之有关的几个关键问题。

## 2 汶川地震对水坝的影响及初步经验教训

### 2.1 对水坝的影响

按照我国水工建筑物抗震设计规范,在最大设计地震作用下,水工建筑物允许出现可修复的损坏。很显然,地震作为一种不可战胜的自然力量,例如在汶川地震这种极端情况下,建筑结构不出现任何损伤是不可能的。

#### 2.1.1 绝大多数中小型坝的震害情况

据统计,在汶川地震当中,1 803 座坝受到不同程度的震损。但是,其中大多数坝(约 95%)是用于供水和灌溉的小型土坝,其库容不到  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。这些坝体的主要震害表现为开裂、边坡滑移、坝顶沉降或出现裂缝、泄洪设施损坏等。

为四川东部平原灌溉供水达 2 000 余年的著名的都江堰工程,尽管靠近震中区,但它在此次地震中

安然无恙,仅在鱼嘴表面出现了 2~3 cm 的细小裂缝,以及泄水闸启闭机支撑结构上部支座出现局部破坏。在岷江流域山高坡陡地区,大多数水电工程为引水式电站和库容较小的混凝土低坝。与土石坝相比,其抗震性能更好,且具有一定的承受漫顶的能力。

地震中虽然有一些高危坝体,但幸而因在汛前期,大多数水库的水位较低。通过采取溢洪道或泄洪孔及时泄水降低水位的紧急措施,有效地控制了库水位,确保了工程安全。像沙牌、太平驿、映秀湾等电站及其发电设施,虽主要因山体滑坡而遭受严重震害,但是大坝安然无恙,即使如太平驿电站等遭受漫顶的混凝土坝也未受损。

#### 2.1.2 4 座坝高 100 m 以上不同类型大坝的震害情况

在地震烈度超过 7 度的震害区,100 m 以上的高坝只有 4 座,它们的类型各异。

1) 紫坪铺面板堆石坝。紫坪铺面板堆石坝坝高 156 m,于 2006 年完工,距离震中 17 km。坝址遭受的地震烈度为 9 度,远超过其设计地震水平。地震期间水库水位在 817 m 高程,接近死水位,库容仅  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而其设计的正常水位为 877.0 m 高程,相应库容为  $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

地震过后,高程 884 m 的坝顶的最大沉降量为

[收稿日期] 2009-04-14;修回日期 2009-04-23

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(90510017);水利公益项目(200701004)

[作者简介] 陈厚群(1932-),男,江苏无锡市人,中国工程院院士,教授级高级工程师,研究方向为水工结构;E-mail: chenhq@iwhr.com

683.9 mm, 高程 850 m 的坝体内部出现了 810.3 mm 的沉降量。震后有向下游的水平变形为 199.9 mm。两岸河谷变形都指向河流。部分面板沿竖向结构缝和水平施工缝产生错位, 错位量分别达到 15 ~ 35 mm 和 17 mm。高程 845 m 之上的大部分面板脱空(见图 1), 坝顶路面和下游斜坡保护层间出现明显裂缝(见图 2)。渗流量从震前的 10.38 L/s 到震后最大达 19.3 L/s。地震两天之后渗流水质由混变清。周边缝有轻微变形, 坝顶局部防浪墙和护栏震毁, 泄水建筑和多功能设施遭受不同程度的损坏。总体上, 紫坪铺大坝的主体结构安全稳定。



图 1 坝体面板震损情况

Fig. 1 The seismic loss of dam concrete face



图 2 下游斜坡保护的震损情况

Fig. 2 The seismic loss of protective slope in downstream

2) 沙牌碾压混凝土拱坝。沙牌拱坝坝高 130 m, 于 2003 年完工。大坝距离震中区 30 km, 地震期间库水接近正常设计水位 1 866.0 m。坝体设置两条横缝和两条诱导缝, 坝基为花岗岩和花岗闪长岩及闪长岩脉地层, 两岸山体陡峭, 呈“V”型河谷。坝肩由 II 类岩体支撑, 其设计地震峰值加速度是 0.138 g, 相应设计标准是 500 年一遇。震后通往大坝的道路被大量山体滑坡堵塞, 但航拍照片显示, 大坝维持正常蓄水功能(见图 3)。近期笔者在现场的考察表明, 大坝安全无损, 坝体和坝肩都未发现任何震害(见图 4)。然而, 由于两岸崩石, 距坝 5 km 外

的跨河高压输水管道伸缩节被砸坏, 发电厂房被淹并严重受损。



图 3 沙牌拱坝震后航拍照片

Fig. 3 Aerial image of Shapai arch dam after the earthquake

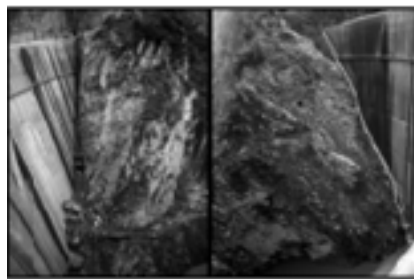


图 4 沙牌拱坝震后左右坝肩

Fig. 4 The left and right abutments of Shapai arch dam after the earthquake

3) 宝珠寺混凝土重力坝。宝珠寺混凝土重力坝坝高 132 m, 库容  $25.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。设计地震为 7 度, 但它在汶川地震中位于 8 度区。该坝距离震中 260 km, 但青川地区发生的 6.4 级最大余震离大坝仅约 40 km。震后调查表明, 大坝未遭震损, 扬压力未见异常变化, 坝基未出现异常渗漏。地震后渗水浑浊, 但两天后即转为正常。

4) 碧口心墙堆石坝。碧口心墙堆石坝位于震中附近的甘肃省境内, 坝高 105.3 m, 库容  $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 1976 年建成。该坝的设计地震是 7 ~ 8 度, 但汶川地震时该坝承受的地震是 8 ~ 9 度。调查显示, 坝顶防浪墙受损, 坝顶沉降 24.2 cm, 向上游的位移量为 15.4 cm。除此以外, 未发现其他震损情况。

#### 2.1.3 大坝震情初步结论

汶川地震之后, 国家发改委等要求对所有高坝均进行抗震复核。目前对大坝震情的深入调研和分析正进行中, 但已可以得出如下初步结论。

1) 所有大坝都处于安全范围之内, 无一大坝发

生溃决；

2)震中区4座超过100 m高的大坝结构安全稳定；

3)水电站和紫坪铺水库在本次抗震救灾中发挥了重要作用,深水航运水道是坚不可摧的救灾生命线,震后主要电网迅速恢复供电,给灾区点燃光亮,带来希望和动力。

## 2.2 初步的经验教训

1)汶川地震中,震中附近大坝(如紫坪铺和沙牌坝)坝址实际遭受的地震烈度远高于其设计地震烈度。这几座大坝尽管出现了局部可修复损坏,但整体结构都稳定,保持了蓄水功能。因此可以认为,只要认真按规范进行抗震设计,精心施工和运行管理到位,基本可保证大坝的抗震安全。

2)对大坝基岩在强震作用下的地质稳定是怎么强调也不过分的。紫坪铺和沙牌大坝的坝肩岩体都因采用了预应力锚固处理,在强震作用下确保了高边坡的稳定,而相邻未锚固区域的边坡则严重滑落,由此验证了此类加固边坡工程措施的必要性和有效性。

3)汶川地震表明,紧急降低库水水位是防止次生灾害发生的最有效途径。因此,在破坏性地震的应急预案中,应当高度重视泄水结构和设施及其能源供应的应急保证。

## 3 对汶川地震后我国大坝抗震安全几个关键问题的探讨

汶川地震之后,国内外学术界和社会公众都关注我国的大坝抗震安全,出现了许多与该议题相关的不同观点的评论和争议。目前的讨论有助于大坝抗震安全的理解和促进该学科的深化研究,但是,学术讨论应该基于客观实际和科学依据。对于汶川地震后引起广泛关注的我国大坝抗震安全几个关键问题,谨将笔者的理解和观点概述如下。

### 3.1 我国地震区建坝的必要性和大坝抗震安全的重要性

水和能源是人类社会发展的重要物质基础,直接关系到社会和国民经济的可持续发展,人民物质和精神生活的提高与改善。我国正在实现现代化和全面建设小康社会的宏伟目标,面临人口、资源和环境的巨大挑战。我国人口众多,人均水资源极为短缺,尚不到世界平均水平的1/4,在世界银行统计的153个国家中排行第88位,且时空分布又很不均

匀,与土地资源和生产力布局不相匹配。频繁而严重的干旱、洪涝灾害制约社会经济发展,影响生态环境,一直是中华民族的心腹大患。通过水库大坝等水工程建设,尽可能调节和利用汛期洪水,对抗旱防洪都有重大意义。我国人均能源消费水平和资源占有量都不到世界平均水平的1/2。我国的水能资源又位居世界之首,仅大陆部分水电的技术可开发容量为 $5.4 \times 10^8 \text{ kW}^{[1]}$ ,按使用100年计算,水能资源约占已探明常规能源的40%;水电作为可再生清洁能源,在我国全面进入小康社会过程中,对改善我国以煤电为主的二次能源结构、减轻煤电造成的巨大环境影响及资源和运输紧张,提高能源利用效率,有利于全国联网和优化调度以保证供电安全等,都起到无可替代的重要作用,大力发展水电是我国能源发展战略中的重要环节。因此,在充分重视生态和环境影响的前提下,充分而合理地利用水资源,积极有序地进行水库大坝建设,发挥其综合效益,是切合我国国情和为社会经济发展所急需的。

我国大陆处于地壳几大板块的夹持之中,位于世界上两个最活跃的地震带交汇部位,东濒环太平洋地震带西支,西部和西南部是欧亚地震带所经之处,是一个多地震国家。我国大陆属欧亚板块东部,地震具有发生在大陆内部的板内特点。板内地震由于地壳较厚、岩龄较老、强度较高,积聚的能量大而导致地震的强度大,且震源大多在10~30 km深度内,内陆浅源地震的震害破坏都较重。因此,我国不仅地震区域广阔而分散,大部分国土面积都属地震区,而且地震频繁而又强烈。我国大陆有两条明显的地震带,一条从北向南穿越国土中部,另一条自东向西跨过华北地台。地震烈度无论在时间和空间的展布上,西部地槽地区都大于东部的地台地区。西部地区是我国大陆的主要地震区,近代我国大陆82%的强震都发生在该地区。地震灾害严重威胁着人民生命财产安全,同时也是制约经济建设和社会发展的的重要因素之一。我国是世界上遭受地震灾害最为严重的国家。所以,震情严峻、震害严重是我国又一个基本国情。

我国量大面广的众多水坝很多都位于地震区。高100 m以上的坝,约有1/3是在地震区。我国的水能资源约80%集中在西部。20世纪80年代起我国在全国规划12个大型水电基地,近年来又规划把云南怒江流域中下游划为第13个水电基地。这些水电基地规划的大多是沿大江大河干流分布的大

型梯级电站。大部分水电基地位于西部强地震区。特别是近年来在西部修建的高坝,其设计地震加速度值都很高,地震往往成为设计中的控制工况,诸如:锦屏( $H = 305\text{ m}$ ,  $a_g = 0.197\text{ g}$ ),二滩( $H = 240\text{ m}$ ,  $a_g = 0.20\text{ g}$ ),龙羊峡( $H = 178\text{ m}$ ,  $a_g = 0.23\text{ g}$ ),小湾( $H = 292\text{ m}$ ,  $a_g = 0.308\text{ g}$ ),溪洛渡( $H = 273\text{ m}$ ,  $a_g = 0.321\text{ g}$ ),白鹤滩( $H = 275\text{ m}$ ,  $a_g = 0.325\text{ g}$ ),大岗山( $H = 210\text{ m}$ ,  $a_g = 0.557\text{ g}$ )等。

需要指出的是,作为众多大江大河源头的我国西部地区,多高山峻岭、陡险狭谷。一方面这里蕴藏着约80%的我国可开发的巨大水能资源,及具备宜于修建淹没移民相对小而调节性能好的诸多高坝大库坝址;但另一方面形成这些条件的区域性构造也正是孕育强震的条件。因此,抗震安全问题无可避免地成为我国西部高坝大库建设中的一个突出特点。

众所周知,地震是一个十分复杂的自然灾害现象,由于发生在地壳深部,其发震成因和机制难以直接观测了解,而地震波的传播途径和介质条件又十分复杂,加之强震发生的时间间隔较长,统计资料少而分散,对其规律性的认识还很不够,强震发生的时间、地点和强度都有很大的随机性,因而迄今为止地震预报在全世界都是尚未能较好解决的技术难题。很多强震发生时,往往并无明显的前兆现象,突发性强,很难预警。对于高坝大库,一旦遭受强震毁坏,溃坝导致的人为洪峰对下游造成的严重次生灾害远比工程本身的损失要重。在汶川地震中为防止唐家山堰塞湖溃决引发次生灾害,牵动了高层领导和全国人民的心。唐家山堰塞湖的库容仅两亿多立方米。设想较大水库特别是蓄水达数百亿立方米的梯级中的龙头水库高坝一旦失事,其导致的严重次生灾害后果将是不堪设想的。

因此,基于我国国情,由于水库大坝特别是高坝大库无可替代的重要作用、难以避让的抗震问题及其一旦发生严重灾变不堪设想的次生灾害后果,决定了确保其抗震安全的极端重要性。

### 3.2 水坝抗震安全评估及我国水坝抗震安全现状

#### 3.2.1 水坝抗震安全评估

众所周知,地震预测是至今尚未解决的世界性难题。但是,各国在强震区都在兴建包括大坝在内的各项基础设施。在日本、伊朗、土耳其、意大利、美国、智利、墨西哥等地震较多的国家,都修建了不少高坝。当然,在坝址地震危险性评价和大坝抗震设

计方面,相关研究一直都在持续深入开展,以不断提高大坝的抗震安全性。

从全球范围看,各国的大坝中,绝大多数为土石坝<sup>[3,4]</sup>,其中很多也位于地震区。有不少土石坝已遭受不同程度的震害,主要的震害形式多为浅层滑坡、沉陷和变形、坝体纵向裂缝、渗流量增长、面板等防渗结构的局部损坏及坝顶防浪墙和护栏等结构的损坏等。但在地震中溃坝的事故极少,仅限于砂土填筑且早期施工质量差的低坝<sup>[5]</sup>。例如:在日本6次重大地震中溃决的小土坝中,仅有1座坝高超过10 m。美国唯一遭受地震后溃决的土坝,是位于加州的高仅为7.63 m的谢菲尔德混凝土面板均质土坝。在1925年的圣·巴巴拉(Santa·Barbara)6.3级地震中,坝址距震中11.2 km,烈度为8~9度,估计地面峰值加速度为0.15 g,有效震动历时15~18 s。地震时库内水深4.6~5.5 m,蓄水 $11.3 \times 10^4\text{ m}^3$ 。失事原因是由于坝体防渗和排水设计不良,震前压实较差的坝基已因绕坝渗漏而呈饱和,地震使孔隙水压升高而导致坝基液化,使坝体上至中部长约128 m的坝体,突然绕其左端向下游滑出60 m。地震时坝体和地基土料的液化还导致一些土石坝的严重裂缝和沉陷及深层滑坡。例如:我国唐山地震中的陡河水库因地基液化产生的不均匀沉陷导致坝体严重裂缝;美国下圣费南多(Lower San Fernando)水力冲填坝(高43.2 m),在1971年6.6级地震中因坝体土料液化引发深层滑坡,我国唐山地震中的密云水库白河大坝上游保护层,因级配不良的砂砾料液化而大面积坍塌。

在全世界800多座高100 m以上的大坝中及我国已建的130多座100 m以上的高坝中,超过1/2是混凝土坝,且混凝土坝的比重随坝高的愈益增大而提升。在我国150 m和200 m以上的高坝中,混凝土坝的比例分别高达58%和78%<sup>[3]</sup>。特别是我国大江大河的源头和水能资源集中在西部高山崇岭的陡峻河谷中,地形地质条件适宜于修建移民淹地相对较少而调节性能好的高坝大库。近期我国西部在建和拟建的200 m至300 m级的高坝,大部分都采用混凝土拱坝方案。

与土石坝相比,迄今为止,混凝土坝,特别是高坝,遭受强震的震害实例更少。但就已有的少量经受强震的百米级混凝土坝的震害看,虽然有一定程度的局部开裂等可修复的损坏,也还尚未有因经受地震动而溃坝的事例。只有在1999年台湾7.3级

的“9·21”集集大地震中,高 21.4 m 的石岗混凝土重力坝,由于发震的车笼埔断层在坝址下游 3 km 处通过,引发的次断裂恰好通过石岗坝右侧坝轴线,断层左侧上盘上升了约 10 m,而右侧下盘上升仅 2.2 m,使该处坝段两侧产生了约 7.8 m 的垂直错动,导致该处部分坝段完全毁坏,库水流失<sup>[6]</sup>。应当说,象这类少的坝基中断层大幅度错断的“抗断”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。因此,国内外的规范中都明确规定,坝址的选择必须经详细的地震地质查勘,避开可能活动的断层。

至今为止,全世界仅有 3 座重力坝遭受过 8 度以上的强震,分别为印度 Koyna 大坝、中国新丰江大坝和伊朗的 Sefid Rud 大坝。这 3 座坝在近坝顶断面突变处,都发生水平向延伸的上下游贯穿裂缝的类似震害,表明地震时重力坝上部断面突变处,是抗震薄弱部位。但并未见坝基面受损或整体失稳等现象<sup>[4,7]</sup>。此外,坝高在百米以下的英国黑溪、日本鸠谷、五本松、一库等遭受不同强度地震的重力坝也都没有或仅有轻微损害。

对拱坝而言,最为典型的震害实例是美国的帕柯依玛(Pacoima)拱坝<sup>[8,9]</sup>。该坝建于 1928 年,坝高 113 m,是当时美国最高的拱坝,坝址基岩为片麻石英闪长岩,节理和剪切带发育。因左岸上部地质条件差,设置了 18 m 高的重力墩。1971 年 2 月 9 日在圣费尔南多断层发生震级为 6.6 级的强震,坝址震中距仅 6.4 km。在左坝肩距坝址 37 m、高出坝顶 15 m 处的基岩面实测到峰值加速度水平和竖向分量分别为 1.27 g 和 0.72 g,持续时间约 10 s。震后研究表明,坝底基岩的峰值加速度水平分量大致在 0.6~0.8 g 之间。地震时库水位在坝顶下 45 m 处。坝体的主要震害为:坝体与左岸重力墩间垂直径向横缝张开 6.35~9.7 mm,延伸 13.7 m,终止于与一条施工缝相交处;左岸重力墩沿水平施工缝开裂延伸至 1.5 m 后,向下与重力墩下基岩相交。震后左岸坝体与重力墩之间的横缝用预应力锚索锚固。1994 年 1 月 17 日在坝址西南 18 km 处又发生了震级达 6.8 级的北岭(Northridge)地震。地震时库水位低于坝顶约 40 m。实测的坝顶和坝底部位横河向加速度的水平分量值分别达到 2.0 g 和 0.5 g。震后左岸坝体与重力墩之间经预应力锚索锚固的横缝,再度被拉开,其顶部张开 50 mm,在墩底以上 3 m 处横缝张开减为 6 mm。重力墩底横缝端部岩体

中有向下斜向延伸至墩底基岩的较大裂缝。两次强震中,震害大体类似,在 1994 年的地震中较之在 1971 年地震中要严重得多。因下游河流向左拐弯,左岸坝肩两面临空的单薄山脊破坏较严重,在重力墩下部基岩形成被陡倾角裂面分为两部分的滑动体,其上部岩块有变形显著,下部岩块有明显的残余位移,表明地震中曾往复滑移,但震后仍能维持稳定。

迄今除帕柯依玛拱坝外,在各类文献资料中,对经受不同强度地震的拱坝震例报导还有不下 40 余例,但一般坝不高,且大多均无震害或主要只是震后渗漏量加大。其中明确经受 7 度以上强震且高度在百米以上的高坝仅有 6 例<sup>[10]</sup>,其中台湾德基双曲拱坝建于 1974 年<sup>[11]</sup>。坝高 181 m,大坝离 7.3 级的集集地震震中约 60 km,主震时在坝顶下游溢流孔底部记录到峰值加速度为 0.87 g,估计坝址地面峰值加速度约 0.3 g。震后对坝体进行的详细检查表明坝体、坝座都基本完好。但坝底及左岸廊道渗漏量从震前 230 L/m 增加至震后的 791 L/m;坝基总渗漏量震后较震前增加 41.7 倍;坝基个别单孔渗漏量由震前的 2.3 L/m 增加至震后的 197 L/m。但在震后三个月坝基的总渗漏量逐渐减少,单一排水孔及区域平均的渗漏量大多未超过 2 吕容和 0.5 吕容的允许值,且渗漏的水质清沏。其余包括正倒锤线位移在内的各项常规观测记录,地震后均未见异常。

此外,智利 1968 年建造的高 112 m 的腊贝尔拱坝,经受 1985 年 7.7 级震中距 80 km 的地震,坝址烈度 8 度;意大利 1947 年建造的高 136 m 的留米意(Lumiei)拱坝,经受 1976 年 6.5 级震中距 43 km 的地震;意大利 1949 年建造的高 112 m 的皮夫德卡多尔(Pieve de Cadore)拱坝,遭受 7 度地震;罗马尼亚 1965 年建造的高 167 m 的维德·阿格斯(Vid·Arges)拱坝,经受 1977 年的 7 度强地震。这些坝均无震害报导。总之,就抗震安全而言,目前国外尚无高坝因强震震动而溃决的震例。

### 3.2.2 我国水坝抗震安全现状

我国已建水库 8 万多座,居世界之首。截止 2004 年底的统计,全世界 48 000 多座高 15 m 以上的大坝中,我国占 46%,共 22 000 多座。到 2005 年底,我国已建和在建的高 30 m 以上的大坝共 4 860 座,其中大多为中小型土石坝,共占 3 256 座<sup>[3]</sup>。绝大部分的小型土石坝,量大面广且大多位于地震区。我国政府一贯高度重视大坝抗震安全。

为了加强监督并检查大坝抗震安全,颁发了强制性的技术规范。1978年我国颁发了第一版《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ10-78),1997年颁发了修订版的《水工建筑物抗震设计规范》(SL203-97)。汶川地震之后,目前该规范已准备重新修订。我国规范对大坝的抗震设防标准远高于一般房屋建筑,与国外大坝抗震设防标准相比,也是较高的。对重要大坝要求在承受100年内超越概率为0.02(重现期为4950年)的最大设计地震时,仅发生局部可修复的损坏。而且明确规定了需采取的相应工程抗震措施。同时,我国政府也高度重视大坝抗震安全研究。研究成果为我国西部强震区大坝安全建设提供了强大的科技支撑。此外,根据1998年我国颁布的“中华人民共和国抗震减灾法”,所有主要水工建筑物都要求制订地震应急预案,以及时采取防止次生灾害的有效措施。这些都在保证水坝抗震安全中发挥了重要作用。

此次汶川地震中,紫坪铺混凝土面板堆石坝经受了远超过其设计地震的考验。在其按规范要求认真设计和精心施工过程中,开展了包括堆石材料的工程特性、数值模拟、分区优化、变形控制、防渗阻漏措施等系统研究。震后各层管理到位,迅速采取控制库水位、恢复泄水及供水和发电功能等有效应急措施,确保工程安全和正常运行,并很快对面板等震害进行了修复。此外,在9度区的沙坪碾压混凝土拱坝,在远超过其设计地震作用下,坝体和两岸抗力体都完好无损。并未发生美国帕柯依玛拱坝那样的较重震害,虽然后者坝高和地震时水位都比较低、且是用常规混凝土浇筑的,这充分说明坝肩岩体稳定对拱坝抗震安全的重要性。值得指出的是,同样经受8度强震的宝珠寺重力坝头也并未出现裂缝。初步认为是由于坝体各坝段间的横缝均设置键槽,并在下部进行过灌浆处理,大坝与坝后厂房连为一体。地震时库水位接近死水位558m;以及从坝顶平板闸门的抓梁被沿坝轴线方向平移了20多厘米的现象判断,地震主要分量是沿坝轴线方向等因素所致。在此次汶川8级大地震中,震区众多水坝无一溃决,百米以上不同类型高坝都结构稳定,震区水坝的抗震安全经受了特大强震的检验。

综上所述,国内外已有实际震例表明,迄今凡按规范要求认真进行抗震设计、切实保证施工质量、管理到位的水坝工程,其抗震安全是有基本保证的。

但是也应指出,近期我国将在西部强地震区建

设一系列具有300m级高拱坝的重大水电工程。对这些高坝工程,迄今国内外都既缺乏工程实践的先例,更无遭受震害的实例。在汶川大地震中经受强震检验的高坝都在160m以下,其与300m级的高坝相比,可能存在从量变到质变的本质差异。而目前规范中对大坝地震响应的分析,大多仍沿用基于已有工程实践经验和类比的传统理念和方法,并不能完全反映高坝在强震作用下的实际性态和很好地解释震害实例。在当前科研进展所提供的科技支撑赶不上工程建设发展的规模和速度的现状下,必然存在着一定的震害风险。此外,还有一些量大面广的小型工程,是建于20世纪50年代末和60年代初,以及“文革”时期,未能按常规要求进行抗震设计,有些在正常运行工况下就属于病险库,因而震害风险较大。因此,对我国水坝的抗震安全,既要增强信心,也决不能掉以轻心,必须继续予以高度重视和切实加强大坝抗震的深化研究工作。

### 3.3 关于水库地震问题

汶川地震后对其是否与紫坪铺和三峡水库蓄水有关的问题曾在国内外都引起诸多争议。笔者认为出于对高坝大库抗震安全的关注持不同观点进行探讨,对促进高坝大库抗震安全的重视和加强深化研究是有利的。但学术争鸣需要基于实事求是的科学依据。由于这些分歧涉及到对水库地震的理解,为此,在对汶川大地震是否与水库蓄水有关之前,首先需要从水库地震的概述出发。

#### 3.3.1 对水库地震的理解

世界上已有30多个国家先后报导了100多个与水库蓄水有关的事例,但对其中一些事例是否与水库蓄水有关尚存有争议。其中被较普遍确认的不到一半。在最近国际大坝委员会(ICOLD)颁布的公报《水库触发地震-知识概述》中,列出了39个水库地震震例<sup>[12]</sup>。但无论怎样统计,在全球为数众多的水库中,因水库蓄水引发水库地震的事例所占比率终归是极小的。高坝中的比率虽略高,但被确认的也不多。

需要区分非构造型和构造型两类不同的水库地震。非构造地震一般与岩溶、采矿、以及地表浅层的应力调整有关。根据已有水库地震的震例统计,非构造型水库地震震级一般不超过3~4级,至今为止大部分水库地震属于这种类型。构造型水库地震一般与断层有关。需要在3个特定条件下被库水触发,即:发震构造位于或毗邻水库区域,发震构造在

水库蓄水前已接近临界状态,库区存在使库水能渗透到深部岩层中的水文地质条件。满足上述条件的水库触发地震很少,但因其可能触发不超过该天然断层所固有的最大震级,而最受社会和工程界的关注。至今为止,全球只有4例震级超过6.0级的水库触发地震,分别为印度 Koyna 重力坝( $H=103\text{ m}$ ,  $M=6.3$ )、希腊的 Kremasta 土石坝( $H=120\text{ m}$ ,  $M=6.3$ )、我国的新丰江支墩坝( $H=105\text{ m}$ ,  $M=6.1$ )以及赞比亚的 Kariba 拱坝( $H=122\text{ m}$ ,  $M=6.25$ )。

水库蓄水后,在库水逐渐向深部渗透过程中,多先发生频繁的前震,主震有所滞后。因而水库触发地震多为“前震—主震—余震”类型,在其水库地震的频率( $N$ )—震级( $M$ )曲线  $\lg N = a - bM$  中的  $b$  值一般较高,余震与主震震级比值也较高,震源较浅。从断层应力状态分析,正断层和走滑断层较逆断层更易被触发。这类构造型地震与天然地震并无本质区别<sup>[12]</sup>。

至今水库触发地震的机理与天然地震同样尚难完全搞清。但较普遍接受的共识是:主要由水库渗透的孔隙水压力降低了岩层的有效应力和剪切强度,而非由于水体重量的影响。因为与发震深度处岩体自重相比,即使高坝大库的库水重量所增加的应力也是可以忽略不计的<sup>[12]</sup>。

### 3.3.2 紫坪铺和三峡水库蓄水与汶川大地震无关

基于以上水库地震的认识和理解,就可以针对汶川地震是否是紫坪铺水库蓄水引起的问题作出回答。

首先,紫坪铺周边距离龙门山断裂最近的岷江河道的洪水水位是 EL 884 m,而紫坪铺水库的最高水位从未超过 EL 875 m。汶川地震时,紫坪铺水库的水位接近死水位 EL 817 m(见图5)。因此,显然汶川地震不具备水库触发地震的水文地质条件。此外,紫坪铺水库地震监测系统早在2004年8月就已建成,而紫坪铺水库2005年10月才开始蓄水。监测记录表明,紫坪铺水库蓄水前后的地震活动性(包括月平均频次和震级)并无明显变化(见图6)。

至于三峡水库的蓄水不可能触发汶川地震的依据则更为显然了。首先,龙门山断裂带与三峡工程库区分属于青藏地震区、龙门山地震带和华南地震区、长江中游地震带,两者在区域构造上并无联系。其次,汶川地震震中距三峡水库的库尾重庆市300 km以上,距坝址则更在700 km以远。三峡水库早在2003年第一期开始蓄水至135 m水位前两年的2001年10月,就建成了以26个子台组成的数字

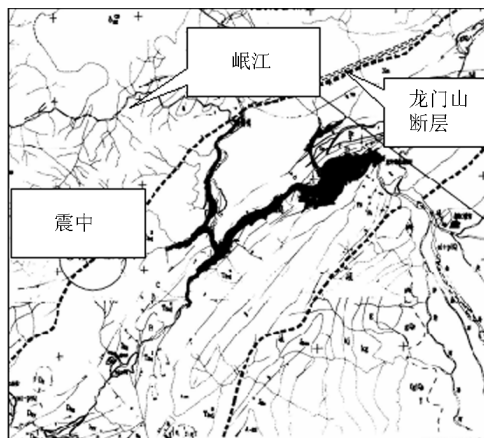


图5 紫坪铺水库位置

Fig. 5 The location of Zipingpu reservoir

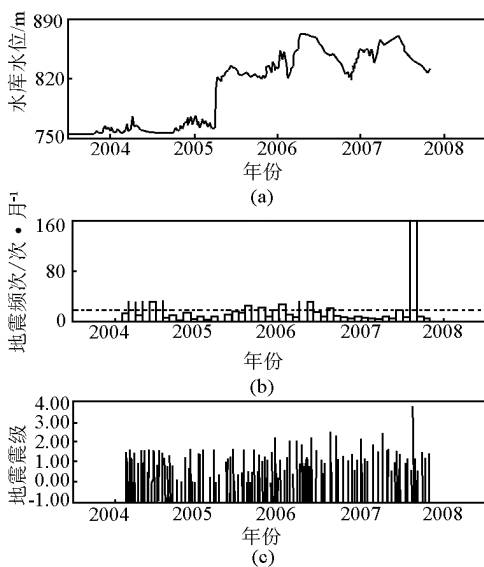


图6 地震频次、震级与水库水位记录曲线

Fig. 6 Record curves of earthquake and reservoir water level

遥测台网为主体的三峡工程水库地震监测系统。此外,在库区由坝址至巴东库段的两岸10 km范围内的重点地段,还布设了18个人工值守的流动地震观测台。在水库蓄水前后,完整有效地控制了整个峡江段,特别是从坝区到奉节县城两侧各20~30 km的重点监测区内的地震活动性。多年监测结果表明,蓄水后库坝区微震频度虽有明显增加,但经查证,迄今为止绝大部分是发生在岩溶、矿洞分布地区、震级浅层微震,主要显示了非构造型水库地震的特征。库区有厚度大的隔水岩层,封闭条件好,不存在库区渗漏问题,更不可能渗透到几百公里以外远处。因此,汶川地震也不可能是三峡水库蓄水引起的。

此外,还可从水库地震具有震源浅、呈现“前震—主震—余震”类型、且一般更易与正断层和走滑断层有关等特征分析<sup>[13]</sup>。汶川地震的主震震源已被证实是一个深度约 15 km 的右旋逆冲断层带,地震类型为“主震—余震”型,且其最大余震的震级与主震震级之比为 0.8<sup>[14]</sup>。汶川地震的地震序列特征、断层类型、余震分布和震源深度都与水库构造地震的特征完全不同。

以上实际资料足以说明,紫坪铺和三峡水库蓄水既不具备触发汶川地震的条件,同时汶川地震也不具有水库地震的特征。

在最近的文献[15]中,发表了探讨有关紫坪铺水库蓄水引起汶川地震的研究,同时该研究成果也在美国的文献[16]中被引用。在该文中,采用了过于简化的二维模型,同时假定整个水库都位于断裂带。而事实上,仅有狭窄的岷江穿过断层。但即便如此,如文献[15]中附图所示,增加的水体重量和孔隙水压力引起的摩尔库仑应力增量( $\Delta CFS$ )在 5~7 km 以下也是可以忽略不计的,而触发汶川地震的震源深度则在 15 km 以下。

这里有一个很值得思考的问题是:如果基于过于简化的模型和假定,以及诸多不确定因素如震源深处高温高压( $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $5 \times 10^5\text{ kPa}$ )下的地震断层的应力状态岩体和水的材料属性,求得一个蓄水引起的摩尔库仑应力微小增量 $\Delta CFS$ 。然后,又基于一个难以验证的假设,即蓄水前发震断层的应力状态与临界应力状态就已仅相差这样一个接近误差范围的微量,从而由此得出正是这个摩尔库仑应力微小增量 $\Delta CFS$ 足以引发一个 8 级大地震的推论。这样的论据能令人信服吗?

### 3.4 我国大坝安全的战略重点

基于我国国情,水库大坝特别是高坝大库建设在我国具有无可替代的重要作用、难以避让的抗震问题及其一旦发生严重灾变不堪设想的次生灾害后果,以及考虑到地震的不确定性和地震预报是尚未解决的世界性难题,而我国在强震区兴建和即将兴建超高大坝在 MCE(最大可信地震)情况下的抗震安全,既无工程实践经验,又无经受强震的震例可供参考。因此,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库水失控下泄所导致严重次生灾害的溃坝灾变。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坝极限状态的定量准则。这两个问

题是当前在大坝抗震安全评估中的主要障碍和亟待解决的前沿课题,是必须面临的挑战。

#### 3.4.1 合理定义最大可信地震及其相应地震动输入参数

在目前基于概率理论进行的坝址地震危险性分析中,其统计样本主要依据的是缺乏近断裂大震的强震记录,通过外推这样的地震危险评价曲线来定义例如重现期为万年的小概率事件的最大可信地震,显然有很大的不确定性,是不可取的,特别是还把地震作为一个点源处理。而汶川地震的发震断层长度超过 300 km,深度达 20 km,破裂逐步扩展的持续时间超过 100 s,能量释放的时空分布极不均衡。因此,像汶川地震这种有着较宽断裂面的近断层大震显然不能将其再视作一个点源,这种情形下传统意义上的震中和震中距已并无实际意义。更为合理的可行途径,可能是用“随机有限断层法”的确定性方法,直接合成设计地震加速度时间历程。该方法沿重要潜在震源的主要活动断层面划分为一系列的子断层,把每个子断层视为一个点源,按照一定的破裂模式、破裂速度和时间序列分别迭加其对坝址的影响。通过对坝址周围每个点源按顺序积分,直接生成坝址的地震动加速度时间历程。因而考虑了断裂模式、速度、时间序列、方向性和上盘等因素的影响。当然,断层的所有参数,如断层类型、滑动方向、倾角、破裂面的长度、宽度和面积以及平均滑移量等,都需要通过理论或半经验统计确定。对此,笔者研究团队正在与地震部门共同协作研究中。当前的主要困难在于,需要进一步研究集中于表征障碍体的非均质断裂滑动模式,以及基于我国强震数据库和地震矩方法的诸多断层参数值的合理确定。

#### 3.4.2 定量评价溃坝极限状态

作为与最大可信地震设防水准相应的功能目标是防止溃坝。但溃坝是一个定性的且很模糊的概念,很难应用于工程设计。而要定量确定溃坝极限状态的判别准则,目前还非常困难。因为坝型各不相同,且即使相同坝型,其几何参数和地质条件也都有差异,很难有统一的定量判别准则。

就混凝土坝而言,近年来,笔者的团队在这方面作了初步探索。首先,针对混凝土坝的大坝—地基—库水整个体系,开发了一套动力分析方法,该方法考虑了下列所有关键因素:大坝—地基—库水的动态相互作用、地震时坝体横缝的张开、远域地基辐射阻尼、地基的地形地质条件(含两岸坝肩的潜在



滑动块、断层)、地基的不均匀地震动输入。该方法采用人工透射边界代替远域地基,坝体横缝以及坝肩滑块采用基于拉格朗日乘子的动态接触理论进行处理。整个体系在空间上进行了有限元网格划分,在时域内视为一个波动问题采用中心插分法进行显式积分求解,为混凝土坝的大坝—地基—库水整个体系地震响应分析构建了基本平台。

鉴于混凝土坝的坝体—地基—库水整个体系在地震作用下的稳定性是保证其蓄水功能的关键,已提出了一个取代传统的以“刚性性极限平衡法”判别失稳的新概念。建议以混凝土坝的坝体—地基—库水整个体系地震位移响应的突变点作为表征大坝体系失稳溃决的判别准则。目前沿用的“刚性性极限平衡法”实质上只是一个静态分析方法,它既不能考虑地震时坝体和地基的变形耦合和动力相互作用,也不能考虑峡谷两岸的动力响应。显然,在往复地震作用下,瞬间达到极限平衡状态并不导致最终失稳;另一方面,尽管坝肩并未达到极限平衡状态,但由于变形过大,坝体也可能严重损伤。这已为美国帕柯依坞拱坝的震害所验证。目前主要的困难在于研发更接近实际地反映坝体和地基损伤破裂过程的非线性动力分析模型和求解方法。

对于混凝土面板堆石坝,基于土壤 3D 非线性动力本构模型,已开发了可靠的 3D 非线性分析方法和软件,并成功应用于紫坪铺面对堆石坝的地震设计分析。该方法用 3D 用各向异性薄层单元模拟混凝土面板与堆石之间的接触面,采用有效应力分析法并考虑了孔隙水压力的扩散,可直接估算地震引起的永久变形量。

由于高坝损伤破裂过程的非线性动力分析方法的计算工作量极为庞大。为此,正利用中科院计算所梁国平教授开发的“并行有限元程序生成器(PFEPPG)”,进一步开发了高性能并行计算程序。同时,安装了 5 节点的联想 1800 并行工作站,每个节点配 2 个 CPU。实践结果表明,并行计算的效果十分显著<sup>[17]</sup>。

## 4 结语

考虑到水库大坝、特别是高坝大库防止引发次生灾害的地震灾变的极端重要性,对我国水坝抗震防灾能力建设提出以下几点对策建议。

1) 建议对我国地震区的重大水坝工程有步骤地进行全面的地震安全性复核和评价,并对存在问

题落实相应的抗震安全保障措施。在这类工程的立项报审时,应提出对其抗震安全评估的专题报告。

2) 世界各国历来都十分重视紧抓大地震后的调研总结工作,并在此基础上对抗震设计规范及时进行修订。汶川大地震使大量水库大坝经受了不同程度的震害,需要对震害实例进行详尽深入的调研、认真地分析总结其经验教训,并在此基础上,结合近期的有关科研成果,对我国已颁行 10 多年的《水工建筑物抗震设计规范》进行全面修编。修编中特别应补充:对重要大坝工程,不仅能满足目前抗震设计中最大设计地震单一水准的规定,还需要对场地地震地质条件下可能发生的极端地震即所谓最大可信地震下不发生溃坝灾变进行专门研究。建议有关部门对此项工作能做出具体安排,并切实落实各项相应的支持措施。

3) 建议对较重要的水坝工程,要按《中华人民共和国防震减灾法》要求的抗震防灾应急预案的落实情况作定期检查。由于地震后及时泄放库水降低库水位是保障工程安全,尤其是防止土石坝漫顶,避免发生次生灾害最重要的有效措施,因而要重点检查大坝工程泄水结构和闸门结构的抗震性能,其启闭装置和备用电源设备和燃料需常备不懈,要注意防止泄水结构出水口附近山体边坡坍塌可能造成的堵塞。

4) 目前作为抗震设计主要依据的基本基于以往工程实践经验和类比的方法,难以反映其强震时的实际性态和对震害实例做出合理解释。特别是西部强震区在建的一系列 300 m 级的高坝大库,目前尚无工程实践经验和经受强震的震害实例。从保障其抗震安全、防止其遭受强震可能引发次生灾害的严重后果的战略任务高度出发,亟需按综合评价、创新突破的战略思路,紧密结合实际工程,大力加强学科交叉和国际协作,建立由国家科研单位发挥骨干和引领作用,高校发挥基础和生力军作用,“产学研”相结合的国家级的创新基地和专门的科研攻关项目,充分发挥我国能集中力量办大事的优势,以满足保障工程抗震安全和社会经济发展的迫切需要。

5) 众多分布在地震区的小型水坝,一般都未经抗震设防,有些还属于病险库。因此建议对一些位于强震区且其失事时可能对下游地区造成较大次生灾害威胁的工程,应有重点地对其抗震安全性进行复核。特别在病险库鉴定和加固处理时,应包括对这类工程抗震要求的内容。

6) 目前对3级以下的大坝尚无有关抗震设防的标准规定,建议有关部门对这类量大面广的工程,基于对已有震害经验教训的总结,着重于采取有效和可行的工程抗震措施,以及综合分析水库使用年限、地方的实际情况等因素,制定经济合理又可操作性强的专门的抗震设计导则,并做出其相应的行政管理规定。

#### 参考文献

- [1] Chen Houqun. Consideration of dam safety after Wenchuan Earthquake in China, paper of "China Day" [A]. 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering [C]. Beijing, 2008
- [2] 陈厚群, 徐泽平, 李敏. 汶川地震与大坝安全 [J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1158 - 1167
- [3] 贾金生, 袁玉兰, 马忠丽. 坝统计简述与世界大坝情况介绍、中国大坝技术发展水平与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007
- [4] 陈厚群. 大坝抗震 [A]. 中国大坝 50 年 [C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- [5] 汝乃华. 国外土石坝地震震害实例和统计 [R]. 上海: 大坝科技咨询有限公司, 2001
- [6] 台湾电力公司. 九二一集集大地震德基坝特别检查成果报告 [R]. 台北: 中兴工程顾问股份有限公司, 1999
- [7] Indermaur W, Brenner R P, Arasteh T. The effects of the 1990 Manjil earthquake on Sefid Rud Buttress dam [J]. Dam Engineering, 2(4): 275 - 305

- [8] Ram P S, Brain T S. Rehabilitation of Earthquake - Shaken Pacoima Arch Dam, Q51 [A]. ICOLD 16<sup>th</sup> Congress on Large Dams [C]. Lausanne: 1985
- [9] Ram P S, Harry E J, Sree Kumar. Effects of the January 17, 1994 Northridge Earthquake on Pacoima Arch Dam and Interim Remedial Repairs, Q75 [A]. ICOLD 20<sup>th</sup> Congress on Large Dams [C]. Florence: 1997
- [10] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全·拱坝 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995
- [11] 台湾电力公司. 九二一集集大地震德基坝特别检查成果报告 [R]. 台北: 中兴工程顾问股份有限公司, 1999
- [12] ICOLD Committee on Seismic Aspect of Dam Design. Reservoirs and seismicity - state of knowledge [R]. Paris: ICOLD Bulletin, 2006
- [13] Shen Chungkang, Chen Houqun, et al. Earthquake induced by reservoir impounding and their effect on Hsinfengkiang dam [J]. Scientia Sinica, 1974, 17(2): 239 - 272
- [14] Ma Zongjin. Wenchuan Earthquake and damage evaluation [A]. Material for the Press Conference of the State Council Information Office [C]. 2008
- [15] 雷兴林, 马胜利, 闻学泽, 等. 地表水体对断层应力与地震时空分布影响的综合分析 - 以紫坪铺水库为例 [J]. 地震地质, 2008, 30(4): 1046 - 1063
- [16] Richard A, Kerr, Richard Stone. A human trigger for the great quake of Sichuan? [J]. Science, News of the week, 2009
- [17] 陈厚群, 马怀发, 涂劲, 等. 高拱坝地震分析并行计算 [J]. 地震工程与工程振动, 2008, 7(1): 1 - 11

## Consideration on seismic safety of dams in China after the Wenchuan Earthquake

Chen Houqun

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

[Abstract] In this paper the damages and behaviors of dams, especially for the 4 dams with a height over 100 m, in the area affected by the devastating Wenchuan Earthquake on May 12, are briefly described. The lessons concerning dam safety learnt from the quake are preliminarily drawn. Some critical problems related to the seismic safety of dams in China are discussed. The strategic priority of dam safety for large dam in China and the corresponding tactics to overcome its main obstacles are suggested. Finally, some suggestions and comments for improving seismic safety of dams in China are provided.

[Key words] Wenchuan Earthquake; safety of dams; reservoir earthquake; strategic priority