

水库大坝的震害调查评估方法研究¹

许亮华^{1,2)} 郭永刚¹⁾ 苏克忠¹⁾ 许光¹⁾

1) 中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心, 北京 100048

2) 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124

摘要 水库大坝震害具有与其它建筑物震害不同的类型和特性, 目前对水库大坝的震害评估尚无统一标准。本文通过研究分析建国以来 19 次大地震对水库大坝造成的震害调查资料, 并结合笔者以往的震害调查经验, 总结了水库大坝的震害调查方法, 制定出了水库大坝震害评估等级表。利用该表可以比较准确和客观地评估出水库大坝的震害水平, 为采取相应的应急预案和评估灾害损失提供依据。

关键词: 水库大坝 震害评估 震害等级 震害调查

引言

1949 以来, 我国共发生大于等于 6 级、小于 7 级的地震 300 余次; 大于等于 7 级、小于 8 级的地震 54 次; 大于等于 8 级的地震 3 次。地震灾害特别是大地震灾害给国家经济建设和发展造成了严重影响, 同时也给水利工程及其设施带来严重震害。其中造成水利工程破坏数量最多、最严重的地震灾害有 3 次:

1970 年 1 月 5 日, 云南通海 7.7 级大地震, 震中烈度高达 X 度。地震区受影响的水利设施, 均为没有进行过抗震设计的中小型水库大坝, 共有 63 座, 且除 4 座为污工重力坝外, 其余 59 座均为土石坝(常亚屏, 1983)。

1976 年 7 月 28 日, 河北唐山市东南部发生 7.8 级大地震, 震中烈度达 XI 度, 震源深度 16km。地震中各类水利工程遭到严重破坏², 地震区有库容在 100 万 m³ 以上的大、中、小型水库 58 座, 除 15 座无明显震害外, 其余 43 座均遭受不同程度的震害, 尤以陡河、密云白河 2 座大型水库破坏最为严重; 有 180 多座大、中型水闸遭受不同程度的震害; 有 10m³/s 以上的大型排灌站 40 余座遭受不同程度的震害; 有 800 多 km 长的河道堤防遭受破坏。

2008 年 5 月 12 日, 四川省汶川县城境内发生 8.0 级特大地震, 震中烈度达 XI 度, 属于毁灭性地震。有统计资料显示, 地震灾区有大、中、小型水利水电工程 2360 余座(晏志勇等, 2009), 主要分布在四川, 其次是甘肃、陕西、重庆的部分地区。其中大型水利水电工程 6 座, 中型水利水电工程 21 座, 主要分布在岷江上游, 涪江和白水江三大流域, 其余均为小型

1 基金项目 地震行业科研专项(201008005)、西藏自治区科技计划项目

[收稿日期] 2011-09-12

[作者简介] 许亮华, 男, 生于 1978 年。北京工业大学建工学院博士生, 工程师。主要从事水工结构抗震分析、损伤识别方法研究、强震监测系统开发等方面工作。E-mail: shepherd2008@126.com

2 汪闻韶, 1990. 中国水利工程震害资料汇编 1961—1985 [内部资料]. 中国科学院水利水电科学研究院抗震防护研究所.

水利水电工程（宋胜武，2009）。处于极震区中的大型水利水电工程以紫坪铺大坝最受关注，地震造成大坝的堆石体震陷最大沉降量约 81cm，混凝土面板周边缝发生较大位移，部分面板间的结构缝发生错台。部分混凝土面板与垫层间有脱空现象，最大脱空 23cm。

汶川特大地震发生后 2 天，即 2008 年 5 月 14 日，水利部专家检查组在考察紫坪铺大坝后向社会发出通告，“紫坪铺水库大坝结构稳定、安全”。正是专家组对紫坪铺大坝安全性的快速评估，给国家应急抢险部门提供了有力的支持，使得抢险部门能够充分利用紫坪铺水库作为进入汶川地区的水上救助通道，为应急抢险工作做出了重大贡献。由此也证明了水库大坝震害快速评估的重要性。

1 水库大坝震害影响

建国以来，我国已建成的大坝有 82000 多座，其中大型水库 480 余座，中型水库 2000 余座。大中型水库按照抗震设防标准采取了抗震设计和抗震措施，一般震害较轻，而未进行抗震设计的早年兴建的中小型水库震害较重，对于病险水库则更为严重。

从上世纪 60 年代起，我国地震活动进入活跃期，先后发生了广东新丰江（6.1 级）、河北邢台（6.8 级）、山东渤海湾（7.0 级）、云南通海（7.7 级）、辽宁海城（7.3 级）、河北唐山（7.8 级）、新疆乌恰（7.4 级）、云南澜沧（7.6 级）、四川汶川（8.0 级）等 19 次地震，给国家和人民生命财产造成重大损失，同时对各类水工建筑物破坏也极其严重（见表 1）。其中多数都是中小型土石坝，也有大型土石坝、大型混凝土坝、大型提防、大型水闸、大型排灌站、大型水电站等工程。这些水工建筑的震害实例，为我们研究大坝的震害调查项目、方法、划分震害类型、震害等级、灾害损失评估及应急抢险措施等提供了可靠的依据。

如何快速有效地应对和减轻大地震后的灾害，提高地震灾害应急的工作效率，水利工程的强震监测、震后灾害快速评估、结构安全快速评价分析、地震灾害信息的网络速报等关乎水利工程安全的基础设施和技术支撑工作的建设亟待加强。

表 1 历次大地震中大中型水库遭受震害影响情况（1961—2008 年）

Table 1 Damage of 19 large and medium-sized reservoir dams caused by domestic earthquakes between 1961 to 2008

编号	地震时间 (年.月.日)	参考地名	北纬 (°)	东经 (°)	震级	震中 烈度	水库大坝震害
1	1961.4.14	新疆巴楚西	39.53	77.45	6.8	IX	西克尔水库等受破坏
2	1962.3.19	广东河源	23.43	114.40	6.1	VIII	新丰江水库等局部损坏
3	1966.3.8	河北隆尧东	37.21	114.15	6.8	IX	大量提防、水闸、河道被破坏
4	1969.7.18	渤海	38.20	119.40	7.4		王屋、冶源、黄山 3 座土坝发生滑坡、堤坝受损
5	1969.7.26	广东阳江	21.45	111.45	6.4	VIII	中小水库受损，大堰出现裂缝
6	1970.1.5	云南通海	24.00	102.70	7.7	X	中小型土坝、圪工坝受震害的有 50 余座
7	1974.4.22	江苏溧阳	31.26	119.18	5.5	VII	大中型水库、涵、闸发生震害
8	1974.5.11	云南永善大关	28.20	103.90	7.1	IX	小型水坝震害轻微
9	1975.2.4	辽宁海城	40.39	122.48	7.3	IX	中小型水库、水闸、排流站提防发生震害

续表

编号	地震时间 (年.月.日)	参考地名	北纬 (°)	东经 (°)	震级	震中 烈度	水库大坝震害
10	1976.4.6	内蒙和林格尔	40.14	112.12	6.3	VIII	小水库、小塘坝、机井扬水站发生震害
11	1976.5.29	云南龙陵潞西	24.33	98.45	7.6	IX	中小型水库震害严重的有 4 座
12	1976.7.28	河北唐山	39.60	118.20	7.8	XI	大中型水库、水闸、排流站渡槽、堤防机井发生震害
13	1979.7.9	江苏溧阳	31.27	119.15	6.3	VIII	大中型水库、水闸、排流站、提防发生震害
14	1985.4.18	云南禄劝	25.51	102.49	6.3	VIII	中小型水库、堤防发生震害
15	1985.8.23	新疆乌恰南	39.20	75.30	7.5	IX	喀什一级电站的大坝、厂房发生震害
16	1988.11.6	云南澜沧	22.90	100.11	7.6	IX	大中型水库发生震害, 山体滑坡, 河道变形
17	1990.4.26	青海格尔木	36.07	100.08	6.9	VIII	龙羊峡水库地震烈度 VI 度, 基本完好
18	2007.6.3	云南普洱	23.00	101.10	6.4	VIII	中小型水库大坝、溢洪道、输水隧洞等发生较严重震害
19	2008.5.12	四川汶川	31.02	103.37	8.0	XI	大中小型水库发生震害, 山体滑坡形成堰塞湖

2 震害调查

水利设施主要包括水库大坝和水电站。它不但属“生命线工程”，而且是“次生灾害源”。一旦地震破坏了水电供应，将影响社会生活和生产；堤坝一旦溃决，将引发严重的次生水灾，其造成的损失可能超过地震直接灾害的损失。因此，每当大地震发生时，水电系统总是在第一时间，奔赴震区进行震害调查，采取应急措施，防止次生水灾的发生。

2.1 调查范围

当发生大于等于 6 级的大地震时，应立即组成调查组，在地方水利部门和水库管理单位配合下，对地震烈度 VI 度以上范围内的水利设施进行调查。采取由极震区向四周扩散的路线，对高危大坝采取有效的应急预案，防止次生水灾的发生。

2.2 调查方法

对大中型（1、2、3 等）水工建筑物及堰塞湖进行现场调查，小型（4、5 等）工程可采取由水库管理单位填写调查表，对破坏严重的小型水工建筑物，宜进行核查。在震区通讯设施或道路交通被破坏的条件下，应立即进行航空遥感或航拍，初查水库大坝震害和堰塞湖分布，尽快全面掌握水工建筑物震害，对险库及时采取应急措施，防止震害的进一步扩展和次生水灾的发生。对重点险库应立即布设流动强震动加速度仪加强监测，为除险加固设计提供科学数据。向震区的省、地、县和水工建筑物基层管理单位发放统一的震害调查表，尽快上报，进行分析研究。

2.3 震害检查项目

应以易发生次生水灾的大坝为重点进行检查，检查项目包括坝体、坝基、坝肩、引水建筑物、泄水建筑物、发电厂房、坝区和近坝库区岸坡等。

2.4 调查记录和报告

震害检查应做好详细的现场记录，认真填写震害检查表，应附有略图，照片，必要时进行录像。检查中发现异常震害时，应结合强震动加速度记录和静态安全监测资料进行震害分

析，立即采取应急措施，并上报主管部门。

完成震害调查工作后，应迅速区分震害类型、确定震害等级，并进行快速震害损失评估，给应急抢险部门提供决策帮助。

3 震害等级划分准则

一次大地震对水工建筑物地震灾害损失评估既要快速，又要比较准确。其准确程度，取决于水工建筑物震害等级划分的准确程度，因为灾害损失评估等于工程总造价乘以震害损失比。损失比的大小是按水工建筑物震害等级赋值的。

除根据宏观水工建筑物震害划分震害等级外，还可根据水工建筑物上预先布置的强震动安全监测取得的加速度记录资料，用统计模型或数学模型进行计算，再依据计算结果进行震害等级划分。

对不同震害类型应采取不同的应急抢险措施，是防止震害进一步扩展和次生水灾发生的关键。根据不同震害类型，可采取针对性的措施，如开闸放水，降低库水位；对发生滑坡的土坝用土袋加固；对有可能溃坝的水库，提前组织下游人民转移到安全地带等，都是行之有效的措施。

震害等级的制定是研究工作的难点和重点。我国地震部门是根据量大面广的一般房屋震害程度，制定出《中国地震烈度表（GB/T 17742—1999）》（中华人民共和国国家标准，1999），并用统计学的办法，引进“震害指数”，将震害划分成“基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏”5个等级。大坝是属于特殊的水工建筑物，其表现的震害类型和震害等级划分以及震害损失评估等与一般房屋震害不完全相同。一般房屋是低矮的、小体积的、结构单一的建筑物，其自振周期较短，而大坝是属于大体积的复杂结构，且坝上有巨大水体的特殊的水工建筑物，涉及到大坝、地基、库水动力相互作用等问题，其地震动力特性依坝高、坝型、体积不同而有差异，因此震害表现与一般房屋震害表现有很大不同，这已被多次强震震害所证明。有时一般房屋震害严重，而水工建筑物震害轻微；有时一般房屋震害轻微，而水工建筑物震害严重。水工建筑物震害等级划分目前尚无统一标准。

3.1 水库大坝震害类型

一般来说，水库大坝震害主要有坝体震害、坝基震害、边坡震害、泄水建筑物震害、附属建筑震害。

3.1.1 坝体震害

（1）土石坝震害类型有：在坝顶、坝坡出现与坝轴线平行的纵向裂缝；在坝头、坝顶出现与坝轴线垂直的横向裂缝；在坝坡出现弧形裂缝或坝体滑坡，坝体沉陷、测压管水位上升、坝体渗漏量增大及水质变浑等。

（2）混凝土坝震害类型有：大坝头部出现水平裂缝，在坝头、坝顶出现与坝轴线垂直的横向裂缝，相邻坝段伸缩缝拉开或错动，扬压力上升、渗漏量增大及水质变化等。

3.1.2 坝基震害

砂土液化、不均匀沉陷、地裂缝、地震断层、地基渗漏等。

3.1.3 边坡震害

裂缝、滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等。

3.1.4 泄水建筑物震害

溢洪道（泄水洞）的进水塔、闸墩、边墙、胸墙裂缝，闸门变形不能正常工作，起闭控制系统的设备被破坏，电源断电。

3.2 震害类型与震害水平的关系

(1) 裂缝震害：笔者把裂缝震害作为一种震害类型综合考虑，并未把裂缝条数、缝宽、深度作为分级的定量因素。理由是直接作为参量进行定级并不科学。根据以往的震害调查资料，笔者发现震害严重与裂缝条数多少、缝宽、缝深并不成正比关系。震害现场调查由于时间紧急，专家团往往需要调查震区较大范围水工建筑物震害。调查时对于裂缝震害的观察可以统计裂缝条数，表面缝宽，但是对于裂缝深度却没时间深入判断。有的裂缝表面宽度大，可是在后来修复时挖探槽观察裂缝从表面往下几米便消失了，有时裂缝条数很多，可裂缝都是表面裂缝不影响大坝整体稳定性和蓄水功能，这种情况的震害以缝宽、条数作为判断准则就会产生震损程度的错误判断。裂缝结合渗水量以及渗水的浑浊程度可以判断坝体是否产生较大的破坏。如果当坝体出现较大较多裂缝，其中含贯穿裂缝，渗水量持续增大且水质浑浊，那么可断定坝体受到严重损害。当裂缝不是贯穿裂缝，而下游渗水的水质清澈，渗水量不大时一般可以认为坝体内部未受太大损伤。地震中能造成大坝较大损害的是贯穿性裂缝，特别是坝肩及坝轴线拐角处产生的横向贯穿性裂缝对大坝稳定性产生较严重的影响，对于贯穿性裂缝，特别是大坝有横向贯穿裂缝时一般可以认为震损程度已达到中等破坏甚至更严重。

(2) 滑坡类型：滑坡类型震害属于较大的坝体震害，修复一般都比较困难。一旦出现大面积滑坡都是严重震害。

(3) 坝基震害类型：坝基震害类型除坝基轻微渗漏外，其余如坝基液化、地震断层等震害都是严重震害，不仅修复困难而且威胁大坝安全。

(4) 沉陷类型：对于沉陷类型震害，这里对该类型的考虑与裂缝类型的考虑类似。对于未按照施工规范施工的六七十年代建设的小水库，由于土法施工、施工时压实度不够等原因，即使未发生地震都会有相当大的沉陷量。地震导致这些土坝产生的沉陷震害没有规律性。这些大坝的震害严重程度不能用沉陷量大小作为震害评级参考。而经过规范设计和规范施工的大坝可以用沉陷量作为震害程度的评级指标。

(5) 闸门损伤：这里特别提出闸门损伤作为震害的一种类型，是因为闸门是否被打开关乎大坝的安全。大坝是挡蓄水建筑物，由于水资源日益珍贵，一般除灌溉、发电以及特殊情况下才会开闸放水。地震后如果水闸正常，管理部门可根据实际情况开闸调节水库储水量。然而一旦水闸被破坏，特别是闸门无法打开时，这种情况是必需立刻修复的，否则上游来水量突然增加就可能造成大坝有漫坝和溃坝的险情。因此，将水闸破坏修复的难易程度也作为震害等级的指标之一。

3.3 等级划分

笔者在统计总结以上 19 次大地震造成的大量水工建筑物特别是大中型水库大坝工程震害的基础上,按照水工建筑物震害的类型、轻重、震害对工程安全可能造成影响程度以及修复难易程度,制定出统一的水工建筑物震害等级划分表(详见表 2),将震害划分成“基本完好、局部损坏、中等破坏、严重破坏、溃决”5 个等级。

表 2 水库大坝震害等级划分表

Table 2 Earthquake damage classification of reservoir dams

震害等级	震害类型	震害轻重	修复难易	应急措施
基本完好	浅表裂缝	大坝基本完好,附属建筑物略有损害。	经简单处理,即可正常使用。	
局部损坏	少量局部裂缝、沉陷	局部裂缝,未贯穿上下游,沉陷量不大,一般不超过 50cm。附属建筑物遭受破坏。	短时间内,经一般修理仍可恢复使用。	
中等破坏	多条贯穿裂缝、滑坡、沉陷、位移、渗漏	土石坝出现贯穿性裂缝,较大沉陷量,孔隙水压力上升,渗流量增大,或局部滑坡。 混凝土坝出现贯穿性裂缝,相邻坝段伸缩缝拉开或错动,扬压力上升,渗流量增大及水质变化等。	需进行大修,1 年之内可恢复使用。	应开闸放水。必要时可启动针对性的工程抢险措施。
严重破坏	出现多种震害类型,且问题严重。	土石坝出现贯穿性裂缝,深度大,渗流量不断加大,或滑坡面积大。 混凝土坝裂缝贯穿,扬压力不断上升,渗流量增大等。 溢洪道(泄水洞)闸门遭受破坏不能自动开启,且修理困难。 坝基发生液化或不均匀沉降或出现断裂。	须进行抗震加固设计,按基建程序进行大修。修复期 1 年以上。	应启动工程抢险措施,以防止灾害的进一步扩展和次生水灾的发生。
溃决	溃决、库水下泄	当震害达到“严重破坏”等级,出现多种震害类型时,若不能及时有效地进行工程抢险措施,或采取的工程措施不当,或水库上游来水量过大,有可能发展到漫坝、溃决、库水下泄,形成次生水灾。	大坝工程应进行重建。	一旦有可能溃坝时,应立即通知水库下游人民转移到安全地带,以避免人员伤亡。

3.4 等级划分实例

(1) 基本完好等级事例:以“5.12”汶川特大地震时的沙牌碾压混凝土拱坝最为典型,实际地震烈度 IX 度,大坝整体完好,坝顶电梯井操作房受损。两条泄洪洞的闸门起闭正常。坝肩工程边坡保持完好,两岸自然边坡局部塌滑。

(2) 局部损坏等级事例:以“5.12”汶川特大地震时的紫坪铺混凝土面板堆石坝为典型,实际地震烈度 IX—X 度,大坝整体稳定,大坝堆石体震陷明显,最大沉降量 81cm,混凝土面板周边缝发生较大位移,部分面板间的结构缝发生错台,并出现挤压破坏现象。最大错台 17cm,部分混凝土面板与垫层间有脱空现象,最大脱空 23cm,坝顶防浪墙基本完好,下游侧护栏大部分遭到破坏。渗流量较震前增加较小,总渗量约 20L/s 左右。两条泄洪洞及冲沙放水洞的部分结构缝受损,闸门起闭不能正常运行。工程整体稳定,属局部损坏等级。

1962 年广东河源 6.1 级地震时,新丰江混凝土单支墩大头坝在头部 108—109m 高处出现水平裂缝,右岸长 82m,左岸断续出现,也属局部损坏等级。

(3) 中等破坏等级事例:密云白河主坝发生震害,砂砾料保护层全线滑坡,滑坡全长 900m,塌滑方量约 15 万 m^3 。由于滑坡仅限于砂砾料保护层,未伤及粘土斜墙防渗层,大坝

整体上还是稳定的,属中等破坏等级。

(4) 严重破坏等级事例:以“7.28”唐山大地震时陡河均质土坝为典型,陡河土坝陡河水坝坝址所处地震烈度IX度,有纵、横向裂缝100余条,坝体沉陷,滑坡,坝顶防浪墙倒塌,排水沟挤窄抬高,上下游坝脚喷水冒砂,全坝左右扭曲,上下起伏。上下游坝坡各有1条主要纵向裂缝带贯穿全坝,深至坝基。好像将整个坝体劈成3块,中间块下沉1.64m。由于及时采取正确的应急抢险措施,避免了溃坝和次生水灾的发生。

(5) 溃决等级:目前我国大中型水库中尚无地震造成的溃决实例。

4 结语

震害评估需要有一个科学的等级划分标准,本文在大量水工建筑震害调查资料分析的基础上,研究制定了水库大坝震害等级划分表,根据该表划分的大坝震害等级可较客观和准确地反应出震害水平,同时划分出的大坝震害等级还是判断大坝工程危险程度、评价大坝地震灾害损失的依据。笔者下一步的研究工作是如何制定大坝灾害损失比,研发大坝地震灾害快速评估软件,目前该工作正在进行之中。

参考文献

- 晏志勇,王斌,周建平,2009.汶川地震灾区大中型水电工程震损调查与分析.北京:中国水利水电出版社.
- 常亚屏,1983.通海地震水利工程震害及加固[抗震防护研究班讲义].中国科学院水利水电科学研究院抗震防护研究所.
- 宋胜武,2009.汶川大地震工程震害调查分析与研究.北京:科学出版社.
- 中华人民共和国国家标准,1999.中国地震烈度表(GB/T 17742-1999).北京:中国标准出版社.

Methodology of Investigation and Assessment of Earthquake Damage to Reservoir Dams

Xu Lianghua^{1,2)}, Guo Yonggang¹⁾, Su Kezhong¹⁾ and Xu Guang¹⁾

1) Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

2) The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In terms of earthquake damage Reservoir dam is different from other building structures. There is no a unified standard for earthquake damage assessment to reservoir dam at present yet in China. Based on studying and analyzing the data of reservoir dam damages from 19 large domestic earthquakes and the previous experience of earthquake damage investigation of reservoir dam, we summarizes some methods of earthquake damage assessment and sets the rules of earthquake damage classification to reservoir dam in this paper. Our results will provide a base for launching emergency response plan for earthquake emergency management and evaluating disaster loss of reservoir dams in practice.

Key words: Reservoir dam; Earthquake damage assessment; Damage classification; Damage investigation