

汶川 8.0 级地震后中江县水库震害调查与分析^{*}

陈国兴¹, 景立平², 周新贵¹, 王志华¹, 李永强²

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 汶川 8.0 级地震对四川省水库造成了严重的震害和巨大的经济损失。依据德阳市水库地震灾害的现场科学考察资料, 对德阳市中江县 19 座高危险情以上的水库土石坝的震损现象做了初步总结和分析。这些震损水库基本上都建于 1950 – 1980 年代, 未经抗震设计, 典型震害现象包括水库坝顶中部及坝轴线两侧纵向裂缝、坝体纵横向裂缝、大坝沉陷、坝坡滑坡和护坡滑动、坝脚渗漏、水库泄水构筑物震损、防浪墙震裂等震害现象。这说明了对于中小型水库土石坝进行抗震设防的必要性, 今后应深入研究中小型水库土石坝的震害机制, 以指导水库土石坝的抗震设计。

关键词: 汶川 8.0 级地震; 水库土石坝; 震害调查; 四川中江县

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 811X(2009)03 – 0069 – 06

0 引 言

四川省德阳市中江县已建成各类水库 50 座, 包括: 中型 5 座、小(1)型 14 座和小(2)型 31 座, 水库总库容 21 230.3 万 m³。中江县属于四川盆地干旱地区, 水库是当地灌溉的主要源泉。这些已建水库对中江县抗旱防涝、改善生态环境、促进工农业生产和国民经济健康持续发展起举足轻重的作用。2008 年 5 月 12 日四川汶川县发生了 8.0 级地震, 导致中江县水库的严重震害和巨大的经济损失。震后对中江县的水坝震害情况进行了实地调查和资料收集, 在中江县 50 座小型水库中, 出现溃坝险情水坝 1 座、高危险情水坝 18 座、次高危险情水坝 14 座和基本安全水坝 17 座, 这些水坝的分布区域见图 1。

四川省水坝建设数量众多, 选择有代表性的地域进行震害调查, 即可宏观了解水坝的震害特点。文中选取德阳市中江县为震害样本调查地点, 是基于如下两个原因: ① 中江县水库土石坝类型较多, 小(2)型水库、小(1)型水库和中型水库都有; ②中江县地震烈度不太高, 部分地域烈度为 VII 度, 部分地域烈度为 VI 度, 但水库土石坝震损比例很高。本文对实地调查和资料收集到的水坝震害进行初步的分析和总结。

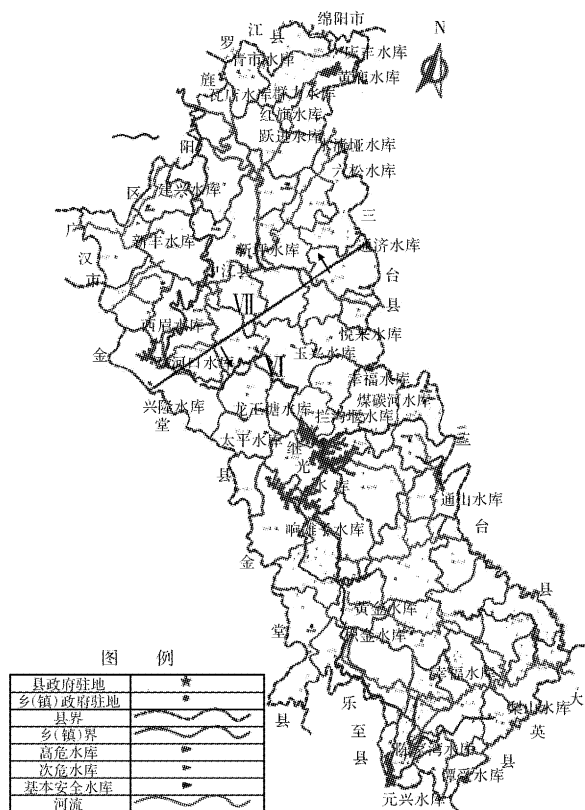


图 1 德阳市中江县震损水库分布示意图

1 汶川地震中江县水坝震害调查

汶川 8.0 级地震中, 中江县震损水坝具有如下

^{*} 收稿日期: 2009 – 03 – 18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC13B02); 中国地震局汶川 8.0 级地震科学考察专项经费

作者简介: 陈国兴(1963 –), 男, 浙江新昌人, 博士, 教授, 主要从事土动力学与岩土地震工程研究. E-mail: gxc@njut.edu.cn

特征：数量多、分布广、险情重、种类多、中型和小(1)型水坝震损严重(表1)。

1.1 震损水坝比例高、险情高

汶川 8.0 级地震及其后发生的余震，使中江县水库水坝受损严重，全县水库有 33 座水库发生震损，占全县水库总数的 66%，其中：中型 5 座、小(1)型 13 座、小(2)型 15 座，直接经济损失 22 300 万元，预期恢复重建所需费用 40 980 万元。

震损水库按受损程度分为溃坝险情、高危险情和次高危险情三类。一类溃坝险情水库：水库大坝及其主体工程发生漫溢、出现较大贯穿性裂缝、上下游坝坡大面积滑坡、大流量集中渗流等情况，短时间内有导致溃坝的险情；二类高危险情水库：水库大坝及其主体工程发生上述险情，可能直接影响大坝及主要建筑物安全的险情；三类次高危险情水库：水库大坝及其主体工程发生上述险情，但不影响主体工程安全运行的险情。据此核定，中江县 5

座中型水库均为高危险情；14 座小(1)型水库中有溃坝险情 1 座、高危险情 8 座和次高危险情 4 座，仅有 1 座水库属基本安全；31 座小(2)型水库中有高危险情 5 座、次高危险情 10 座。

1.2 震损水坝险情种类多

19 座高危险情以上震损水库中，险情主要表现为：大坝纵横向裂缝，大坝沉陷，坝坡滑坡、护坡滑动，坝脚渗漏，防浪墙震裂、错缝，起闭设施损坏，溢洪道及附属设施、其他防水设施震损，大多数水库同时出现多种险情，水库险情十分严重。

1.3 震损土石坝类型多

19 座高危险情以上的震损水库中，5 座中型水库坝型分别为钢筋混凝土斜墙干砌石坝、粘土心墙堆石坝、粘土心墙石渣坝、粘土心墙坝和泥岩土石渣心墙坝，13 座小(1)型水库中土石混合坝 1 座、粘土心墙土坝 1 座和均质土坝 11 座，5 座小(2)型水库均为均质土坝。

表 1 四川省德阳市中江县震损水库基本情况表

编号	水库名称 建成年代	库容 /万 m ³	水库 类型	坝型	地震 烈度	主坝最大坝 高/坝长/m	险情 等级	主要震损情况
1	继光水库 1980	9 820.0	中型	混凝土斜墙 干砌石坝	Ⅵ	45.70/ 262.10	高危	坝顶以下 0.6 m 处，有一条水平纵向裂缝，贯穿整个大坝，最大缝宽 5 cm，裂缝形状为中间大，往两岸逐渐减小；其余水平纵向裂缝长短不一，缝宽在 0.5 cm 左右；较长的横向裂缝 7 条，缝宽约 2~5 mm；较短的横向裂缝 10 多条，长 3~5 m、宽 3 mm 左右；下游坝坡浆砌条石局部拱起、外移；坝体沉降约 30 cm，向下游位移约 27 cm；渗流量从震前的 29.5 L/s 增大到 37.5 L/s；放空隧洞工作闸门出现漏水
2	响滩子水库 1965-1973	1 879.0	中型	粘土心墙 堆石坝	Ⅵ	42.00/ 216.00	高危	坝顶混凝土路面纵向裂缝有 3 条，总长约 220 m，缝宽 5~30 mm；下游坝坡踏步拱起，裂缝较宽，达 30 mm；地震发生后大坝垂直位移增加 +80 mm，水平位移增加 -17 mm。左坝脚渗漏，原导流洞渗流量加大。大坝渗漏由震前 0.93 L/s 增至震后 1.17 L/s。防浪墙局部受挤压破坏，出现裂缝
3	双河口水库 1966-1993	2 016.0	中型	粘土心墙 石渣坝	Ⅶ	46.7/ 452.00	高危	坝顶裂缝总长 21 m，缝宽 0.5~1.0 cm；大坝最大垂直位移 92 mm，最大水平位移 50 mm；渗流量增加，由震前的 32.81 L/s 增加至 33.96 L/s；坝顶防浪墙及下游条石栏杆局部拱起、震裂，其中防浪墙裂缝总长 29 m，缝宽 0.5~1.5 cm；充(泄)水工程中泄水槽工作闸门启闭机房立柱、楼梯等均被震裂；放水隧洞进口“井”字型排架横梁梁端部有环向裂缝，摇晃厉害
4	元兴水库 1959	1 252.0	中型	粘土心墙坝	Ⅵ	30.44/ 172.28	高危	坝顶防浪墙部分拉裂、错缝，错缝宽度为 10 mm；坝顶下游侧部分倒虹管基混凝土板缝处挤压破坏；坝顶下游侧 4 节倒虹管(Φ=100 cm)裂缝渗水。溢洪道钢闸门局部变形，起闭机部分震损，起闭不灵。管理站管理房裂缝损坏 2 035 m ² 。防洪公路旁挡土墙垮塌两处，长度约 30 m
5	黄鹿水库 2008	2 350.0	中型	泥岩土石渣 心墙坝	Ⅶ	38.73/ 472.00	高危	防浪墙存在拉裂缝。坝顶路面中间出现纵、横向裂缝。坝顶震陷明显，观测下陷超过 22 cm，上游砼预制块护坡大面积分离滑动。下游坝坡马道处据观测也有向外鼓出的现象，砼预制块护坡部分分离滑动。表面观测下游坝坡在整体上震损程度较轻

续表 1

6	建兴水库 1960	155.0	小(1)	均质土坝	VII	16.40/ 91.00	溃坝	坝顶有一条纵向裂缝, 长 50 m、宽 20 mm 左右; 大坝下游坝脚渗漏量加大, 且发生了严重的管涌现象, 距左坝肩 30~47 m 之间共 5 处, 5 处的管涌水量共达 0.3 m ³ /s 左右; 防浪墙震裂, 有多条裂缝; 溢洪道上部交通桥桥台及拱座变形, 拱顶侧墙外倾, 并产生竖向裂缝; 左岸放水涵管可能被震裂, 出现裂缝或脱离坝体, 在溢洪道陡坡段下部出现渗漏现象, 水比较浑浊
7	煤炭河水库 1966	150.0	小(1)	土石 混合坝	VI	26.2/89	高危	坝顶中部纵向裂缝长约 45 m、宽 30~50 mm、深约 1.0 m; 上游砼面板纵向裂缝长 17 m、宽约 2 mm; 坝后坡与纵向缝对应位置表部变形, 坝坡太陡, 有多处裂缝、错动; 大坝左岸下游渗水较大, 绕坝渗漏较严重
8	新坪水库 1959	106	小(1)	均质土坝	VII	17.4/106	高危	坝体上游面右侧护坡条石局部下挫, 范围约 10~15 m; 下游坝坡表部局部开裂, 变形较严重, 有少量滑移; 右坝脚渗漏; 左坝肩放水涵管渗水有增加的趋势
9	玉兴水库 1958	243	小(1)	均质土坝	VI	14.95/ 193.5	高危	右坝肩坝顶纵向裂缝, 长约 10 m、宽 2 mm; 坝顶过水渠有裂缝; 下游坡脚灌溉渠漏水严重; 溢洪道启闭机房墙体及屋面裂缝, 一墙角严重震裂, 缝宽 3~4 cm, 溢洪道启闭机基础损坏, 无法固定; 左坝肩放水涵卧管渗漏
10	兴隆水库 1958	265	小(1)	均质土坝	VII	26.1/ 240.5	高危	坝顶和坝坡横向裂缝 2 条, 长约 3~15 m, 宽 15~30 mm, 大坝与溢洪道结合部有横向裂缝; 迎水面坝坡多条纵向裂缝, 坡脚附近局部垮塌, 后缘高差 15~20 cm; 溢洪道交通桥拱座竖向裂缝, 缝宽 2 cm; 溢洪道右岸边坡有土石崩落
11	龙王塘水库 1960 年 12 月	208.98	小(1)	均质土坝	VI	14.14/ 95.6	高危	坝顶纵向裂缝, 长 45 m、宽 5~10 mm; 有横向裂缝, 渗流量增加; 防浪墙与上游坡面存在拉裂缝; 溢洪道闸门变形, 启闭不灵活
12	通济水库 1980	599	小(1)	均质土坝	VII	主坝: 24/ 270, 副坝: 10.57/219	高危	副坝坝顶沿坝轴线裂缝 1 条, 长 186 m、宽 0.5~10 cm; 主坝右坝肩和放水隧洞震后渗流量增大; 放水设施损坏, 闸门变形、打不开, 启闭不灵活
13	太平水库 1958-1959	115	小(1)	均质土坝	VI	10.2/ 294.0	高危	大坝横向裂缝 6 条, 基本贯穿 5 条, 坡脚 1 条, 长 20 m 左右, 宽 1~2 cm; 左侧坝下游反压位置横向裂缝 2 条, 长 15~20 m, 宽 1~2 cm; 下游坝坡侧纵向裂缝, 靠近右岸溢洪道的 1 条裂缝长 15~20 m、宽 2~3 mm; 靠右岸的 1 条裂缝长 4~5 m、宽 2~3 mm; 坝中放水涵管左侧的 1 条裂缝长 4~5 m、宽 2~3 mm; 溢洪道右侧挡墙渗漏严重; 溢洪道交通桥右侧桥墩下游侧开裂严重; 溢洪道启闭机房四周裂缝
14	庆丰水库 1958	141	小(1)	粘土心 墙土坝	VII	15.1/247	高危	大坝中部纵向裂缝长约 30 m, 地表裂缝宽 3~4 cm, 地下裂缝宽 6~7 cm, 深达 2 m; 大坝左中生横向裂缝, 长约 2~3 m, 地表缝宽 2~3 mm; 上游坝坡中间部位明显向水库鼓出, 有滑动痕迹, 长 15~20 m; 坝后人民渠渠内、外坡有渗漏
15	红旗水库 1960 年 1 月	21	小(2)	均质土坝	VII	7.3/298	高危	坝顶纵向长裂缝长 50 m、最宽 4 cm, 深 60 cm; 迎水坡护面裂缝; 下游坡脚 5 处渗水
16	跃进水库 1958	51	小(2)	均质土坝	VII	11.3/284	高危	震前大坝下游坡滑坡, 宽 20 m, 后缘高差 1.5~2 m, 震后滑坡有所加大, 两侧滑坡影响带范围 12 m; 坝顶纵向长裂缝, 长 30 余 m, 宽 3~4 mm; 上游防渗面板纵横向裂缝 15 条, 宽 2~3 mm; 溢洪道右侧条石挡墙出现裂缝; 左坝头坝脚少量渗水
17	幸福水库(龙台) 1960	27	小(2)	均质土坝	VI	5/285	高危	左侧下游坝坡脚纵向裂缝, 长 2~3 m, 1~2 mm 宽; 大坝上游坡防渗面板地震前裂缝较多, 局部面板脱落, 震后发现部分裂缝增长加宽; 左坝肩漏水少量渗水

续表 1

18	拦沟堰水库 1960	45	小(2)	均质土坝	Ⅵ	5/234	高危	溢洪道左侧边墙局部震裂、外倾甚至垮塌;放水涵管砌体震裂,漏水严重,首部闸阀控制室亦已震裂、破损
19	幸福水库(仓山) 1966	13	小(2)	均质土坝	Ⅵ	8.7/106	高危	坝顶纵向裂缝长约 80 m、宽约 5~20 mm;上游面板纵向裂缝;右侧坝后坡上部出现范围约 3.0 m 的表部滑坡,后缘高约 1.0~1.5 m;下游坝坡左岸有一处渗水点,震后渗水量增加

2 中江县水库土石坝典型震害现象

中江县有代表性的高危险情以上水坝震害现象的详细描述见表 1,典型震害现象如图 2~图 13

2.1 大坝纵、横向裂缝

所示,包括溃坝险情小(1)型水库 1 座,高危险情的中型水库 4 座、小(1)型水库 5 座和小(2)型水库 2 座,其中,水库坝址位于地震烈度Ⅶ度区 8 座、Ⅵ度区 4 座。



图 2 继光水库大坝下游面震裂情况



图 3 煤炭河水库坝顶纵向裂



图 4 太平水库下游坝脚裂



图 5 庆丰水库坝顶裂缝

2.2 坝坡局部垮塌、滑动



图 6 兴隆水库局部垮塌



图 7 庆丰水库上游坝坡局部鼓出



图 8 新坪水库下游坝坡滑移



图 9 黄鹿水库迎水坡护坡滑移

2.3 坝脚渗漏



图 10 建兴水库下游坝脚出现管涌



图 11 新坪水库右坝脚渗漏

2.4 其他震害



图 12 跃进水库上游防渗面板裂缝



图 13 双河口水库防浪墙折断和裂缝

3 总结

通过德阳市中江县水坝震害的现场科学考察与调查、分析, 主要成果总结如下:

(1) 震损水库无一溃坝, 但震损严重。中江县的震损水库, 除中型水库中的黄鹿水库于 2008 年建成使用、双河口水库于 1989 年底 - 1993 年第三次扩建、大坝加高外, 其他水库均建于 1950 - 1980 年代, 未经抗震设计, 土坝震损严重, 但也无一发生溃坝事件。这说明对中、小型水库土石坝应进行抗震设防。

(2) 中江县高危险情以上的 19 座水库, 坝址位于地震烈度 VII 度区 9 座、VI 度区 10 座, 烈度 VI ~ VII 度地区有 38% 的水库发生高危险情以上震害, 实属少见; 高危险情以上水库的典型震害现象包括水库坝顶和坝体纵横向裂缝、大坝沉陷、坝坡局部滑坡和护坡局部滑动、坝脚渗漏、水库泄水构筑物震损、防浪墙折断和震裂、防渗面板开裂、坝坡梯步裂缝等。这是土石坝地震稳定性不足或丧失的表现, 因此, 应对中小、型水库土石坝震害现象开展深入的研究, 搞清其破坏机制, 以指导今后这类坝体的抗震设计, 提高其抗震性能。

(3) 除了由于地震作用产生了震害外, 很多病

险原来就已经存在,如渗漏现象,只是地震加重了病险的危害。分析病害产生的原因主要有:①设计欠合理,土坝断面偏小,坝坡偏陡;②泄洪能力不够;③施工质量差;④管理不善,年久失修。

致谢:在中江县水库震害科学考察期间,中江县水务局给予了大力支持,并提供了大量宝贵的现场震害资料,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 陈国兴,景立平,汤皓,等.汶川地震中绵竹市水库土坝震损调查与分析[J].南京工业大学学报,2009,31(1):15-23.
- [2] 景立平,陈国兴,李永强,等.汶川8.0级地震水坝震害调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):14-23.

Investigation and Analysis on Earthquake Damages to Reservoirs in Zhongjiang County During M8.0 Wenchuan Earthquake

Chen Guoxing¹, Jing Liping², Zhou Xingui¹, Wang Zhihua¹ and Li Yongqiang²

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;*

2. *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*)

Abstract: M8.0 Wenchuan earthquake resulted in great damages to reservoir dams and caused great economic losses. Based on the field investigation of the reservoir dam damages caused by the earthquake in Deyang city, damage characteristics of 19 reservoir earth-rock dams with high risk in this area are summarized and analyzed. Most of these dams were constructed in the period from 1950 to 1980, without anti-seismic designs. Typical damage phenomena include longitudinal fissures in the center of dam top and on both side of dam axes, transverse fissures of dam body, dam settlements, landslides of dam slopes, slips of slope protection, leakages of dam toes, damage of discharge structures and parapet walls of reservoirs. These earthquake damage phenomena indicate the necessity to perform anti-seismic designs for small or moderate reservoir earth-rock dams. The study on earthquake damage mechanisms of small or moderate reservoir earth-rock dams should be strengthened aiming at guiding anti-seismic designs for reservoir earth-rock dams.

Key words: M8.0 Wenchuan earthquake; reservoir earth-rock dam; earthquake damage investigation; Zhongjiang County of Sichuan Province

(上接第 65 页)

Prediction and Evaluation of Landslide Stability Based on Artificial Neural Network

Gong Qinghua and Huang Guangqing

(*Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China*)

Abstract: The stability of slide rock is comprehensively influenced by factors of geological, engineering, etc. for its structure and physical and mechanical properties have characteristics of discontinuity and high nonlinearity macroscopically and microscopically. Landslide is determined a complicated variable nonlinear system by rock deformation, nonlinearities of evolution law and of internal factors. BP model for artificial neural network (ANN) is applied in the prediction and evaluation of landslide stability according to the nonlinear characteristics of slope instability, and by using ANN toolbox of MATLAB, the model is tested and validated based on the data of 86 landslides along G324 national highway as training and forecasting samples. It is shown that the established landslide stability prediction method is of comparatively high prediction precision.

Key words: slope stability; artificial neural network; prediction and evaluation