基于关键指标的水库大坝震损程度综合评价体系

倪小荣，王士军，谷艳昌
（南京水利科学研究院，水利部大坝安全管理中心，江苏 南京 210029）

摘要： 地震导致水利工程的破坏，而震损水库给下游人民带来严重威胁. 合理评价水库震损程度对指导除险加固具有重要意义. 针对震损水库的特点，建立了震损水库综合评价指标体系. 采用震损水库4级划分原则，对指标进行分级和阈值确定，并提出了关键指标的概念. 在所建立的综合评价体系中，首先对指标体系中的关键指标进行评价. 当关键指标显著时，则认为综合评价体系整体显著；当关键指标均不显著时，再运用线性加权和法对水库震损程度评价指标体系进行整体评价. 实例分析表明，文中所提的评价体系客观可行.

关 键 词： 水库大坝；震损程度；指标体系；关键指标；综合评价
中图分类号： TV697 **文献标志码：** A **文章编号：** 1009-640X(2010)04-0027-06

地震给人类带来了巨大灾难，同时也造成了大量水利工程的损坏. 2008年的汶川地震造成了四川、重庆、陕西等8省市2 385座水库大坝的破坏[1]. 震损水库不仅不能继续发挥原有作用，而且存在着溃坝风险，对下游人民的生命财产安全造成了很大威胁. 震损水库的除险加固成为震后急需解决的问题. 然而，由于震损水库数量众多，除险加固工作很难在短时间内完成. 这就需要对水库的震损程度进行评价，从而根据评价结果来合理安排震损水库除险加固的顺序.

汶川大地震后，对水库、水电站等震损水利工程进行了排查分析，按照险情危害程度，提出了应急措施和建议[2]，并提出了一些除险加固的建议[2-7]. 在震后检查中，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等3类[3]. 这种分级方法在震损水库应急检查中发挥了重要作用，但存在分级定量程度不明确. 此外，传统的定量评价方法往往通过对指标的简单线性加权和得出评价结果，会导致一些关键性因素的作用降低，使综合评价结果失真.

本文在采用震损程度4级划分标准的基础上，采用定量分析的方法，建立了基于关键指标的震损水库综合评价体系，综合评价震损水库震损严重程度，为震损水库处理提供技术支撑.

1 震损程度评价指标体系的建立

根据震损水库现场检查及综合分析，确定水库震损程度评价指标体系由6大指标体系组成，即：坝体裂缝、坝体滑坡、渗漏、坝顶沉陷和坝体变形、泄水建筑物损坏及其他破坏. 这6大指标体系覆盖了影响水库安全运行的主要震损特征.

坝体裂缝、坝体滑坡、渗漏及坝顶沉陷和坝体变形指标是针对地震直接对大坝造成的损害设置的，通过对这些指标的定量分析，可以清楚了解大坝的损坏程度. 泄水建筑物损坏和其他破坏则是通过与影响大坝安全紧密相关的其他设施的损坏来间接评价大坝的震损情况，例如通过评估溢洪道的损坏情况可以间接了解

收稿日期： 2010-01-10
基金项目： “十一五”国家科技支撑计划课题《水库大坝安全信息监测与预测预警技术研究》(2006BAC14B06)，《震损水库安全评估与应急处置技术研究》(2009BAK56B04)；水利部公益性行业专项经费项目(200901053)；南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目《震损水库基础数据平台建设》(Y70802)
作者简介： 倪小荣(1987-)，女，河南南阳人，硕士研究生，主要从事大坝安全监测研究. E-mail：iamnixiaorong@163.com

大坝的泄洪能力受到了多大影响,以及其对大坝安全运行造成了多大威胁.

这 6 大指标体系对震损程度的影响又通过低一层次的指标来进行衡量. 具体评价指标体系框图见图 1.

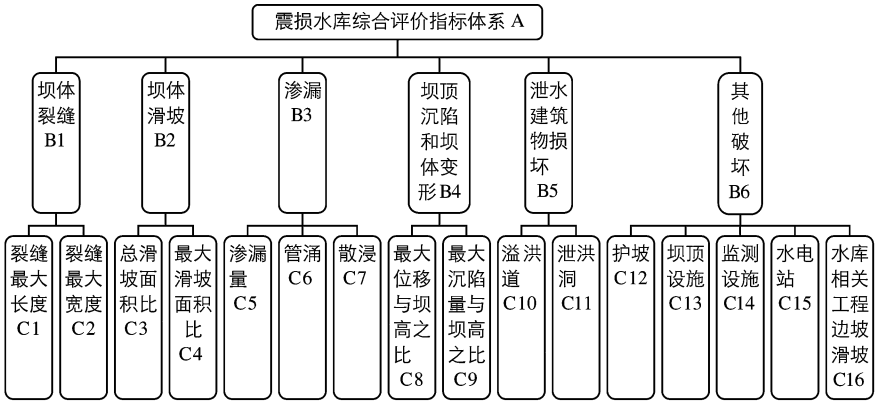

图 1 震损水库综合评价指标体系

Fig. 1 The comprehensive evaluation indexes system of earthquake damaged reservior

2 指标的分级及其阈值确定

本文采用4 级标准[1],即:溃坝险情、高危险情、次高危险情和轻微险情. 溃坝险情指水库、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、集中渗漏等情况,短期内有可能导致垮坝的险情. 高危险情指水库、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. 次高危险情指水库、大坝及建筑物发生一般险情,但不影响主体工程安全运行的险情. 轻微险情指震后大坝出现轻微的渗漏问题、大坝及其他主体工程建筑物出现轻微的变形与沉陷,对水库及主体工程建筑物安全运行基本无影响的险情.

为了实现震损水库的定量评价,需要将震损状况的定性描述转化为定量分析,这就需要对评价指标进行赋值. 考虑到水库的实际震损状况,并依据专家经验对评价指标进行分级,具体见表 1.

表 1 水库震损程度评价指标分级

Tab. 1 The evaluation index classification of earthquake damaged reservior

指 标	1 级 [0,2)	2 级 [2,4)	3 级 [4,6)	4 级 [6,8]
裂缝最大长度	无裂缝	连续性较差,断续延伸大于 15 m	10 ~ 20 m	>20 m
裂缝最大宽度	无裂缝	毫米级	大于厘米级	大于数厘米级
总滑坡面积比(‰)	无滑坡	<10	10 ~ 30	>30
最大滑坡面积比(‰)	无滑坡	<5	5 ~ 10	>10
渗漏量(L/min)	<0.5	0.5 ~ 5	5 ~ 20	>20
管 涌	轻微或没有	一般	较严重	严重
散 浸	轻微或没有	一般	较严重	严重
最大沉陷量/坝高 (‰)	<0.1	0.1 ~ 1	1 ~ 5	>5
最大位移/坝高(‰)	<0.05	0.05 ~ 0.5	0.5 ~ 3	>3
溢洪道	轻微或无损坏	一般	较严重	严重
泄洪洞	轻微或无损坏	一般	较严重	严重
护 坡	轻微或无损坏	一般	较严重	严重
坝顶设施	轻微或无损坏	一般	较严重	严重
监测设施	轻微或无损坏	一般	较严重	严重
水电站	轻微或无损坏	一般	较严重	严重
水库相关工程边坡滑坡	轻微或无损坏	一般	较严重	严重

在表 1 对水库震损程度评价指标分级的基础上，对每级指标赋予一定的指标值范围，即 1 级[0,2)，2 级[2,4)，3 级[4,6)，4 级[6,8]. 这样就可以在水库震损情况检查的基础上，根据实际震损情况和专家经验确定一个指标值，实现了定性到定量的转化.

3　基于关键指标的震损程度综合评价体系的建立

3.1　关键指标的确定

在该指标体系中，影响水库震损程度的指标有 6 个，其中坝体裂缝、坝体滑坡和渗漏这 3 个指标对于水库震损程度起着关键性的作用，称为关键指标. 这 3 个关键指标通过低一层次的指标来进行评价：坝体裂缝严重程度通过裂缝的最大长度和最大宽度来确定；坝体滑坡严重程度通过总滑坡面积比和最大滑坡面积比来确定；渗漏通过渗漏量、管涌和散浸的严重性程度来确定.

3.2　震损程度综合评价体系

本文在震损程度 4 级分级的基础上，建立综合评价指标体系并对指标进行分级和阈值确定. 在进行震损水库的总体评价之前，首先对关键指标进行评价并判定级别. 根据关键指标的级别对水库震损程度进行初步判别，即若有 1 个关键指标达到了 4 级，则判定该水库为溃坝险情；若有 1 个关键指标达到了 3 级，则判定该水库为高危险情. 在关键指标均未达到 3、4 级时，再运用线性加权和法进行总体的综合评价，根据评价值确定震损水库的险情级别.

3.3　线性加权和法

建立指标体系后，先对关键指标进行评价，然后再进行震损水库的总体评价. 两次定量评价均采用线性加权和法[8].

设综合评价函数为 L，其线性加权和法表示为：

$$L = \sum_{i=1}^{n} w_i F_i = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \cdots + w_n F_n \tag{1}$$

式中：$w_1, w_2, \cdots, w_n$ 和 $F_1, F_2, \cdots, F_n$ 分别为评价指标的权重和评价对象影响因数.

3.3.1　*指标权重 w 的确定*　权重反映了每个指标对大坝震损程度的重要性. 在确定各指标的重要程度时，既要考虑到指标的实际重要性，也要综合专家经验. 本文采用层次分析法[8-10]确定评价指标的权重. 最终确定各指标的权重为：

(1)对关键指标进行评价时的权重：①坝体裂缝：最大长度和最大宽度的权重都为 0.500 0；②坝体滑坡：总滑坡面积比和最大滑坡面积比的权重分别为 0.666 7 和 0.333 3；③渗漏：渗漏量、管涌和散浸的权重分别为 0.500 0，0.250 0 和 0.250 0.

(2)对水库震损程度进行总体评价时，16 个指标的权重分别为：w = [0.173 9　0.173 9　0.231 8　0.115 9　0.058 0　0.029 0　0.029 0　0.034 7　0.034 7　0.034 7　0.034 7　0.023 5　0.007 8　0.007 8　0.005 9　0.004 7].

3.3.2　*影响因数 F 的确定*　根据文献[11-12]，logistic 曲线与震损指标对关键指标及震损程度的影响过程相似，因此可利用 logistic 曲线来模拟.

$$F = \frac{1}{1 + e^{-0.5x}} \tag{2}$$

式中：F 为评价指标对评价结果的影响因数；x 为指标形态.

设指标值为 p，其变化范围为[0,8]，而在该模型中指标性态 x 的变化范围是[-10,10]，则需要用以下公式进行转换：$x = -10 + 2.5p$.

在对具体的水库进行关键指标评价时，可以先根据震损指标的描述以及分级标准确定它们的指标值，然后通过式(2)得出它们对评价结果严重性程度的影响因数.

3.3.3　*评价结果分级*　根据 logistic 曲线的取值范围及线性加权和法的特点，可确定综合评价函数 L 的取

值范围为[0.006 7,0.993 3]. 考虑到影响因数的特点,将评价结果分为 4 个级别:[0.006 7,0.075 9),[0.075 9,0.500 0),[0.500 0,0.924 1),[0.924 1,0.993 3];其对应的关键指标分级依次为1 级、2 级、3 级、4 级;震损程度的分级依次为轻微险情、次高危险情、高危险情、溃坝险情.

4 工程实例分析

四川省绵阳市某小(2)型水库在汶川地震中遭到破坏,经水利部震损水库核查工作组鉴定,该水库险情定为高危险情.

4.1 工 程 概 况

该水库于1954 年12 月1 日建成,是一座以灌溉为主,兼有防洪等综合功能的小(2)型水利工程. 水库枢纽工程由大坝、溢洪道、放水设施等部分组成. 大坝为均质土坝,最大坝高 12.2 m,坝顶长 259.3 m,宽4.6 m. 大坝上游边坡从坝顶至坝脚平均坡度为 1∶2.5,坡面无护坡. 大坝下游边坡从坝顶至坝脚平均坡度为 1∶2.5,坡面为草皮护坡. 下游坝脚设有截水槽,紧接耕地. 溢洪道位于大坝右端,进口属正槽开敞式明渠出流,进口有条石衬砌. 放水设施位于大坝右段坝体内,为卧管涵形式. 库岸斜坡自然坡度平缓,植被茂盛,坡面较缓,故水库岸坡稳定性良好. 震后未发现滑坡及坍岸,汶川地震对水库岸坡稳定性未造成明显影响.

4.2 基本震损情况

(1) 裂缝:坝顶中部出现纵向裂缝,裂缝延伸约 15 m,裂缝最大宽度 30 mm,最大可探深度 0.7 m, 未发现明显的横向裂缝.

(2) 滑坡:坝体坝顶和上、下游坝坡没有发现局部或整体滑坡迹象.

(3) 渗流变化:据调查,震后坝体、坝肩和坝基均未发现明显渗流变化.

(4) 泄水建筑物及其他建筑物损毁情况:地震后原有溢洪道未受到明显损坏,溢洪道堰口已被子堰堵住超高蓄水. 输水卧管涵也未受到明显损坏,能正常放水.

4.3 评价指标确定

根据水库震损情况的描述,参照指标分级表给出各个指标值见表 2.

表 2 指标值及震损程度影响因数

Tab. 2 The index values and impact factors of earthquake damage degree

指 标	震损描述	指 标 值 p	指标性态 x	震损程度影响因数 F
裂缝最大长度	裂缝延伸至 15 m	5.5	3.75	0.867 0
裂缝最大宽度	裂缝最大宽度 30 mm	5.0	2.5	0.777 3
总滑坡面积比/ ‰	没有发现局部或整体滑坡迹象	1.5	−6.25	0.042 1
最大滑坡面积比/ ‰		1.5	−6.25	0.0042 1
渗漏量(L/ min)	未发现明显渗流变化	1.0	−7.5	0.023 0
管 涌		1.5	−6.25	0.042 1
散 浸		1.5	−6.25	0.0042 1
最大沉陷量/坝高(‰)	坝顶沉陷与坝体变形轻微	2.5	−3.75	0.133 0
最大位移/坝高(‰)		2.0	−5	0.075 9
溢洪道	震后原有溢洪道未受明显损坏,溢洪道堰口已被子堰堵住超高蓄水	5.0	2.5	0.777 3
泄洪洞	未受到明显破坏	2.0	−5	0.075 9
护 坡		1.5	−6.25	0.042 1
坝顶设施		1.0	−7.5	0.023 0
监测设施		2.0	−5	0.075 9
水电站	无水电站	0	−10	0.006 7
水库相关工程边坡滑坡	未造成明显影响	2.0	−5	0.075 9

4.4　评价结果比较分析

先对 3 个关键指标进行评价. 首先运用线性加权和法求得大坝裂缝的综合评价值 $L=0.867\ 0\times0.500\ 0+0.777\ 3\times0.500\ 0=0.822\ 2$. 根据关键指标的分级标准,该水库的大坝裂缝等级为 3 级,由此可判定该水库的震损程度为高危险情.

若按照传统的评价方法,直接运用线性加权和法,则得综合评价值 $L=\sum_{i=1}^{16}w_iF_i=0.343\ 4$. 根据水库震损程度的评价标准,判定该水库为次高危险情.

比较分析上述两种计算结果,第 1 种方法强调了关键指标的决定作用,在关键指标单方面显著的情况下,判定该水库为高危险情;第 2 种计算方法不考虑关键指标的作用,直接对所有指标进行了加权平均,最后判定该水库为次高危险情. 就大坝的实际震损表现,大坝最主要的震害是裂缝,坝顶中部出现的纵向裂缝延伸约 15 m,裂缝最大宽度 30 mm,最大可探深度 0.7 m. 对一座小型水库而言,如此大的裂缝可能会影响到坝体的整体稳定性,对大坝安全造成威胁. 但由于裂缝并未贯通,所以对大坝的威胁尚未达到溃坝的程度,所以判定该水库为高危险情更加合理. 由于第 2 种方法忽略了关键指标的作用,使结果偏离实际. 由此可以看出,采用本文提出的评价方法可以有效避免关键指标对最后评价结果作用被忽略情况的发生,评价结果与实际情况相符合.

5　结　语

(1)在震损水库 4 级划分标准的基础上,研究建立了综合评价指标体系,并进行了指标分级和阈值确定.

(2)针对线性加权和法应用于震损水库评价时的不足,提出了关键指标的概念. 在整体评价之前,先对关键指标进行定量评价,并根据关键指标的评价值对震损水库进行初步判定. 如有 1 个关键指标值达到 4 级时,判定水库为溃坝险情;如有 1 个关键指标值达到 3 级时,判定水库为高危险情. 在 3 个关键指标值均未达到 3、4 级时,再运用线性加权和法对水库进行总体综合评价,得到评价值,根据险情分级标准,确定水库的险情等级.

(3)通过工程实例分析,表明应用本文提出的方法可以对震损水库进行综合评价,切合实际,更加客观.

参　考　文　献:

[1] 柳景华, 杨火平. 震损水库险情判别标准及方法的初步探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 21-22. (LIU Jing-hua, YANG Huo-ping. Preliminary discussion on identification standard and measure of earthquake-damaged reservoir risk situation [J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 21-22. (in Chinese))

[2] 李茂华, 朱爱林. 水库震害险情与震损特点分析[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 19-20. (LI Mao-hua, ZHU Ai-lin. Analysis of earthquake damaged reservoir risk situation and earthquake-damaged characteristics[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 19-20. (in Chinese))

[3] 景立平, 陈国兴, 李永强, 等. 汶川地震中江油市水坝震害调查与分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25(2): 1-10. (JING Li-ping, CHEN Guo-xing, LI Yong-qiang, et al. Investigation of earthquake damage to dams in Jiangyou city during Wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(2): 1-10. (in Chinese))

[4] 张家发, 程展林, 文松霖, 等. "5.12"汶川地震对土石坝的损害及应急处置[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 9-11. (ZHANG Jia-fa, CHENG Zhan-lin, WEN Song-lin, et al. Damage on earth-rock dam by "5.12" Wenchuan earthquake and emergency treatment[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 9-11. (in Chinese))

[5] 孙少楠, 张先起, 田林钢. "5.12"地震中小型水库震损机理分析研究[J]. 人民长江, 2009, 40(7): 58-61. (SUN Shao-nan, ZHANG Xian-qi, TIAN Lin-gang. Research on earthquake damage mechanism of middle and small reservoirs in "5.12" earthquake[J]. Yangtze River, 2009, 40(7): 58-61. (in Chinese))

[6] 代思波, 张林, 李佳奕, 等. 汶川地震震损水库情况调研及震害分析[J]. 四川水力发电, 2009, 28(5): 73-75. (DAI Si-

bo, ZHANG Lin, LI Jia-yi, et al. Investigation of reservoirs subjected to Wenchuan earthquake and their seismic damage analysis [J]. Sichuan Water Power, 2009, 28(5): 73-75. (in Chinese))

[7] 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. (JING Li-ping, CHEN Guo-xing, LI Yong-qiang, et al. Investigation on earthquake-induced dam damage during Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 14-23. (in Chinese))

[8] 张国栋, 李雷, 彭雪辉. 基于大坝安全鉴定和专家经验的病险程度评价技术[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(9): 158-166. (ZHANG Guo-dong, LI Lei, PENG Xue-hui. Appraising techniques for dam severity based on dam safety appraisal and expert's experience[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(9): 158-166. (in Chinese))

[9] 王靖, 张金锁. 综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(2): 52-57. (WANG Jing, ZHANG Jin-suo. Comparing several methods of assuring weight vector in synthetical evaluation[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2001, 30(2): 52-57. (in Chinese))

[10] 王桂琴, 罗一鸣, 李国学, 等. 基于层次分析法的城市生活垃圾收运模式优选[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9): 838-842. (WANG Gui-qin, LUO Yi-ming, LI Guo-xue, et al. Optimizing the collection and transportation of municipal solid wastes based on AHP[J]. China Environmental Science, 2008, 28(9): 838-842. (in Chinese))

[11] 李雷, 王昭升, 张士辰. 大坝性态危险程度判别模型研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 149-152. (LI Lei, WANG Zhao-sheng, ZHANG Shi-chen. Study on identifiable mode of dam performance hazard degrees[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(3): 149-152. (in Chinese))

[12] 郑鹏武, 谭忠盛, 朱元生, 等. 地铁施工引起地表沉降的 logistic 模型预测及应用[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(3): 23-26. (ZHENG Peng-wu, TAN Zhong-sheng, ZHU Yuan-sheng, et al. Application of logistic model in prediction of ground sedimentation caused by subway construction[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(3): 23-26. (in Chinese))

Comprehensive evaluation of earthquake damage degree of reservoir dam based on key indexes

NI Xiao-rong, WANG Shi-jun, GU Yan-chang

(*Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: Hydraulic projects are damaged during the earthquake, and earthquake damaged reservoirs bring tremendous threats to the downstream residents. Evaluation of earthquake damaged reservoir dams is of significance to the risk control and reinforcement of damaged reservoir dams. According to the characteristics of damaged reservoirs, the comprehensive evaluation indexes system is established. This paper adopts the 4-level grading of earthquake damage, and the indexes are classified to determine their thresholds. Then the concept of key indexes is put forward. In the comprehensive evaluation system established in this paper, the evaluation of key indexes should be carried out first. If one of the key indexes is remarkable, the whole comprehensive evaluation system is considered remarkable. If all the indexes aren't remarkable, then the linear additive weighting method is used to carry out the holistic comprehensive evaluation of earthquake damaged reservoirs. The project application indicates the method presented in this paper is more objective and practical.

Key words: reservoir dam; earthquake damage degree; index system; key index; comprehensive evaluation