

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.01.020

# 土石坝震损程度快速评估方法研究

杨德玮<sup>1</sup>, 张士辰<sup>1,2</sup>, 王昭升<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 以“5.12”汶川地震震损水库大坝调查、分析及现场专家险情评级资料为依据, 将土石坝震损级别以险情程度划分四级, 结合震损水库特征与破坏机理, 以层次分析法(AHP)为手段, 通过建立震损土石坝综合评估指标体系, 对震损土石坝险情快速评估技术进行了深入研究, 获得了土石坝震损险情快速评估方法, 并应用于四川绵竹市红刺藤水库震后评价, 结果表明, 该方法能够客观反映土石坝震损程度, 便于使用, 为震损土石坝应急处理提供了一定的技术支持。

**关键词:** 土石坝; 震损程度; 指标体系; 评估方法

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)01—0107—05

## Rapid Assessment Method of Seismic Damage Degree for Earth Dam

YANG Dewei<sup>1</sup>, ZHANG Shichen<sup>1,2</sup>, WANG Zhaosheng<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**Abstract:** Based on the reservoir investigation and analysis of seismic damage and experts' danger rating in Wenchuan earthquake on 12th May, 2008, the seismic damage level was divided into four levels according to the danger level. Combined with the reservoir characteristics of the seismic damage and failure mechanism, rapid assessment technology of seismic damaged reservoir earth dam was further studied through the establishment of index system for a seismic damaged earth dam, weight calculation and determining criterion by using the analytic hierarchy process (AHP). Rapid assessment method of earth dam's seismic damaged danger was obtained and applied in Hongcitemeng Reservoir in Mianyang Sichuan successfully. The results show that this method can reflect the seismic damage degree of the earth dam which is easy to use and could provide technical supports for the emergency treatment of seismic damaged earth dam.

**Keywords:** earth dam; seismic damage degree; index system; assessment method

2008年“5.12”汶川8级特大地震共造成四川17个市96个县(市、区)1997座水库不同程度受损, 其中土石坝震损水库达1880座, 占震损水库总数的95%以上<sup>[1]</sup>。这些震损水库大坝出现塌陷、裂缝、滑坡和渗漏等不同程度的险情, 形成脆弱性结构体, 可能在余震、洪水等条件下溃决, 引发地震次生灾害, 严重威胁下游公众、基础设施安全与社会稳定, 影响灾区恢复正常生活与灾后重建<sup>[2-4]</sup>。目前, 国内已有震损水库相关分析方法: 震损水库的模糊综合评

价法<sup>[5]</sup>, 水库大坝震损隐式预测模型<sup>[6]</sup>, 基于关键指标的 水库大坝震损程度综合评价体系<sup>[7]</sup>, 但以上方法建模复杂, 计算历时较长。本文在以上方法的基础上, 优化土石坝震损评估指标体系, 给出了土石坝震损级别, 从而可以快速的评估土石坝震损险情, 为有效决策震损水库应急处置方案提供了必要条件。

## 1 震损评估指标体系

### 1.1 指标体系的建立

“5.12”汶川地震中, 土石坝震害的主要类型有

裂缝、滑坡、渗漏、坝顶下沉、防浪墙损坏和护坡块石滑坡。据统计地震造成的 1 997 座水库中,险情以大坝裂缝(1 425 座)和滑坡(354 座)、渗漏(428 座)为主,同时造成放水设施、溢洪道、管理房等不同程度损毁,其中 50% 以上的水库同时出现多种险情<sup>[8-9]</sup>。

综合土石坝震损特点,根据内涵明确、代表性、独立性、全面性、可操作性及定性定量相结合的原则,建立了震损土石坝综合评估指标体系见图 1。震损土石坝综合评估指标体系,由 5 个一级指标(B)、13 个二级指标(C)和 26 个三级指标(D)组成,其中(A)为顶层指标,(D)为底层指标。

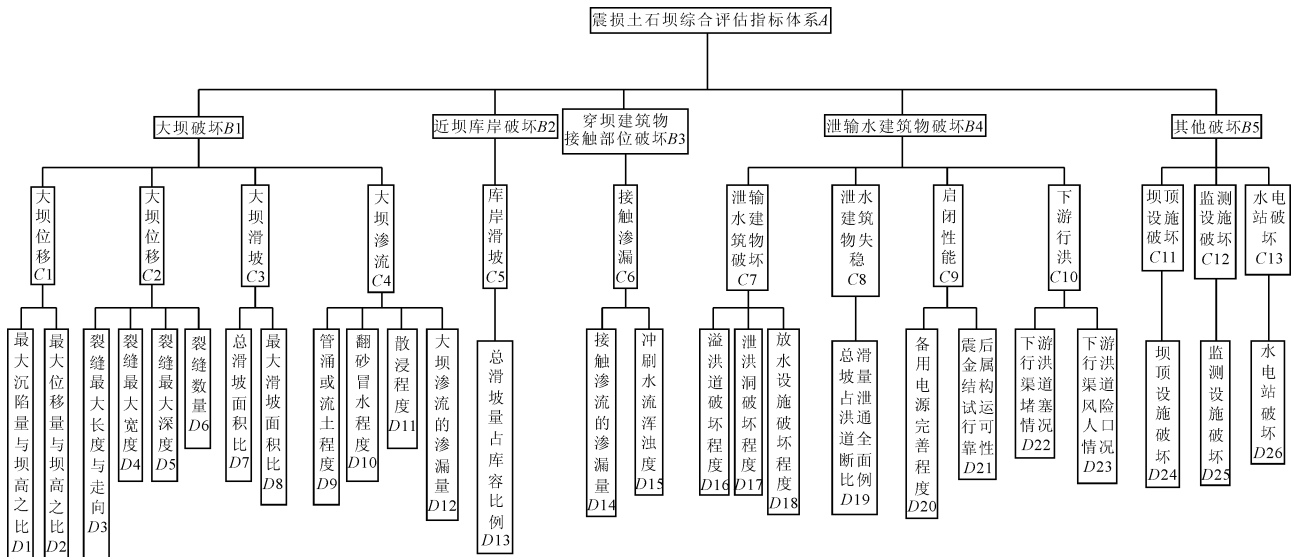


图 1 震损土石坝综合评估指标体系

## 1.2 指标赋值

对于底层指标(D)的赋值,是土石坝震损快速评估核心问题之一。底层指标按严重性程度分为四级,即一、二、三、四级。指标处于一级时说明震损较为轻微,而处于四级时则说明指标震损严重。为方便水库震损程度的定量研究,在指标分级基础上,对各级指标进行赋值。由于指标的四级划分本身就是一个范围,为了对水库进行综合评估时可以加入专家的经验,这里对指标的赋值也是一个范围,指标值范围是 0~8,其中一级 0~2,二级 2~4,三级 4~6,四级 6~8。根据实际震损情况、依据专家经验对水库震损程度评估指标分级标准,便可以实现对指标定量赋值。

## 1.3 指标权重的确定

对于各指标权重的确定,是土石坝震损快速评估核心问题之二。上、下游指标之间权重可根据相互重要性定性判别,经过定量转换,通过层次分析法确定权重,并最终通过判断矩阵的一致性检验<sup>[6]</sup>。本文指标体系的判断矩阵见表 1~表 12。

表 1 第一指标层 B 对目标层 A 的判断矩阵

| 一级指标           | B1  | B2  | B3  | B4  | B5 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|----|
| 大坝破坏 B1        | 1   | 1   | 1   | 1   | 7  |
| 近坝库岸破坏 B2      | 1   | 1   | 1   | 1   | 7  |
| 穿坝建筑物接触部位破坏 B3 | 1   | 1   | 1   | 1   | 7  |
| 泄输水建筑物破坏 B4    | 1   | 1   | 1   | 1   | 7  |
| 其它破坏 B5        | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1  |

表 2 第二指标层 C 对第一层指标 B1 的判断矩阵

| 二级指标    | C1  | C2  | C3  | C4  |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 大坝位移 C1 | 1   | 2/3 | 2/3 | 2/3 |
| 大坝裂缝 C2 | 3/2 | 1   | 1   | 1   |
| 大坝滑坡 C3 | 3/2 | 1   | 1   | 1   |
| 大坝渗流 C4 | 3/2 | 1   | 1   | 1   |

表 3 第二指标层 C 对第一层指标 B4 的判断矩阵

| 二级指标         | C7 | C8 | C9  | C10 |
|--------------|----|----|-----|-----|
| 泄水建筑物结构破坏 C7 | 1  | 1  | 1/2 | 1/2 |
| 泄水建筑物岸坡失稳 C8 | 1  | 1  | 1/2 | 1/2 |
| 启闭性能 C9      | 2  | 2  | 1   | 1   |
| 下游行洪 C10     | 2  | 2  | 1   | 1   |

表 4 第二指标层 C 对第一层指标 B5 的判断矩阵

| 二级指标       | C11 | C12 | C13 |
|------------|-----|-----|-----|
| 坝顶设施破坏 C11 | 1   | 1   | 4/3 |
| 监测设施破坏 C12 | 1   | 1   | 4/3 |
| 水电站破坏 C13  | 3/4 | 3/4 | 1   |

表 5 第三指标层 D 对第二层指标 C1 的判断矩阵

| 三级指标          | D1 | D2 |
|---------------|----|----|
| 最大沉降量与坝高之比 D1 | 1  | 1  |
| 最大位移量与坝高之比 D2 | 1  | 1  |

表 6 第三指标层 D 对第二层指标 C2 的判断矩阵

| 三级指标         | D3  | D4  | D5  | D6  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| 裂缝最大长度与走向 D3 | 1   | 2   | 2   | 3   |
| 裂缝最大宽度 D4    | 1/2 | 1   | 1   | 3/2 |
| 裂缝最大深度 D5    | 1/2 | 1   | 1   | 3/2 |
| 裂缝数量 D6      | 1/3 | 2/3 | 2/3 | 1   |

表 7 第三指标层 D 对第二层指标 C3 的判断矩阵

| 三级指标       | D7  | D8 |
|------------|-----|----|
| 总滑坡面积比 D7  | 1   | 2  |
| 最大滑坡面积比 D8 | 1/2 | 1  |

表 8 第三指标层 D 对第二层指标 C4 的判断矩阵

| 三级指标         | D9  | D10 | D11 | D12 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| 管涌或流土程度 D9   | 1   | 2   | 3   | 3   |
| 翻砂冒水程度 D10   | 1/2 | 1   | 3/2 | 3/2 |
| 散浸程度 D11     | 1/3 | 2/3 | 1   | 1   |
| 大坝渗流的渗漏量 D12 | 1/3 | 2/3 | 1   | 1   |

表 9 第三指标层 D 对第二层指标 C6 的判断矩阵

| 三级指标         | D14 | D15 |
|--------------|-----|-----|
| 接触渗流的渗漏量 D14 | 1   | 2/3 |
| 冲刷水流浑浊度 D15  | 3/2 | 1   |

表 10 第三指标层 D 对第二层指标 C7 的判断矩阵

| 三级指标         | D16 | D17 | D18 |
|--------------|-----|-----|-----|
| 溢洪道破坏程度 D16  | 1   | 1   | 3   |
| 泄洪洞破坏程度 D17  | 1   | 1   | 3   |
| 放水设施破坏程度 D18 | 1/3 | 1/3 | 1   |

1.3.1 权重计算

根据判断矩阵,计算其特征向量,将其归一化处

理后,即得计算权重系数。本文特征向量计算采用求根法近似计算。求根法的计算方法为:将矩阵按行求列元素的几何平均值,见式(1);归一化处理即可得到权重系数,见式(2)。

表 11 第三指标层 D 对第二层指标 C9 的判断矩阵

| 三级指标             | D20 | D21 |
|------------------|-----|-----|
| 备用电源完善程度 D20     | 1   | 1   |
| 震后金属结构试运行可靠性 D21 | 1   | 1   |

表 12 第三指标层 D 对第二层指标 C10 的判断矩阵

| 三级指标             | D22 | D23 |
|------------------|-----|-----|
| 下游行洪渠道阻塞程度 D22   | 1   | 1/2 |
| 下游行洪渠道风险人口情况 D23 | 2   | 1   |

$$b_i = \left( \prod_{j=1}^n u_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$w_j = b_j / \sum_{k=1}^n b_k \quad (2)$$

式中: $b_i$ 、 $b_j$  分别为矩阵行、列向量的期望值; $u$  为矩阵元素值; $w$  为权重系数。依照此方法确定的上两层指标权重分别为:指标层元素 B1、B2、B3、B4、B5 对准则层元素 A 为  $W_{BA} = (0.241 \ 0.241 \ 0.241 \ 0.241 \ 0.035)^T$ ; 指标层元素 C1、C2、C3、C4 对准则层元素 B1 为  $W_{CB1} = (0.182 \ 0.273 \ 0.273 \ 0.273)^T$ ; 指标层元素 C7、C8、C9、C10 对准则层元素 B4 为  $W_{CB4} = (0.185 \ 0.185 \ 0.369 \ 0.261)^T$ ; 指标层元素 C11、C12、C13 对准则层元素 B5 为  $W_{CB5} = (0.364 \ 0.364 \ 0.273)^T$ 。

1.3.2 判断矩阵的一致性检验

对判断矩阵进行一致性检验,一致性检验的判别式  $[CR] = [CI]/[RI]$ 。[RI] 是随机一致性指标,按表 13 取值。

一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (3)$$

式中, $\lambda_{\max}$  为矩阵的最大特征根; $n$  为判断矩阵阶数。当  $[CI] = 0$  时,单排序的计算结果满足完全一致性;当  $[CI] \neq 0$  且  $[CR] < 0.10$  时,说明排序的计算结果满足一致性;否则应调整判断矩阵的标度值<sup>[10]</sup>。

表 13 随机一致性指标

| n  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0.52 | 0.89 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 | 1.46 | 1.49 | 1.52 | 1.54 | 1.56 | 1.58 |

## 2 综合评估

### 2.1 综合评估流程

震损土石坝综合评估体系建立的基本思路为:在综合评估指标体系建立的基础上,对指标进行分级及阈值确定,根据专家经验对各个指标赋予一定的值,为后面的定量分析做准备。鉴于关键指标对震损土石坝安全性起着决定性的作用,在进行整体评估时,为了避免其作用由于权重分配而导致其贡献程度减弱现象的发生,首先对土石坝综合评估起决定作用的指标即关键指标进行评估。关键指标主要包括:大坝裂缝 C2;大坝滑坡 C3;大坝渗流 C4;库岸滑坡 C5;接触渗漏 C6;泄输水建筑物结构破坏 C7;泄水建筑物岸坡失稳 C8;启闭性能 C9。

关键指标根据以上 8 个二级指标进行综合评估,按照关键指标的严重程度将其分为一、二、三、四级。若有不少于一个关键指标达到了四级,则判定该水库为溃坝险情;若有不少于一个关键指标达到了三级,但无一个关键指标达到四级时,则判定该水库为高危险情;当所有关键指标均未达到三、四级时,再对震损水库进行总体评估,得到各个指标综合的评估值,并依据该值确定其险情级别。震损土石坝综合评估流程,见图 2。

### 2.2 险情评估方法

按照上述评估流程,当采用关键指标评估达到三级或四级险情时候,则按照上述方法确定险情级别;当达不到三级和四级险情时,采用线性加权和法进行综合评估。采用线性加权和法时,设体现了各个指标综合影响的综合评估函数为  $L$ ,其线性加权和法表达式如下:

$$L = \sum_{i=1}^n w_i F_i = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \cdots + w_n F_n \quad (4)$$

式中:  $w_1, w_2, \cdots, w_n$  和  $F_1, F_2, \cdots, F_n$  分别为评估指标的权重系数及其影响系数,其中影响系数是指各指标性态变化对震损程度的综合影响。

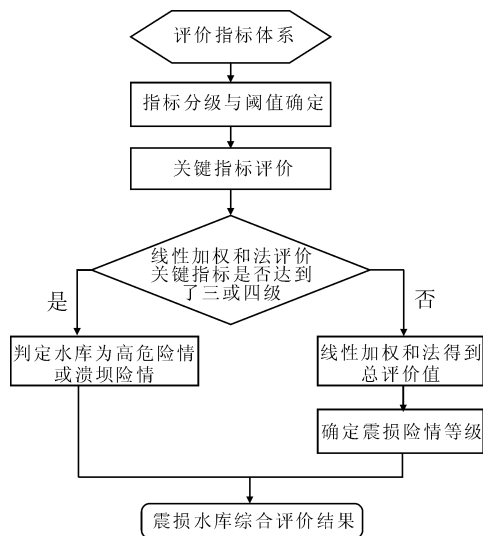


图 2 土石坝震损程度综合评估流程图

由于 logistic 曲线的发展状况与指标对水库震损程度影响的过程相似<sup>[11-12]</sup>,故利用 logistic 曲线来模拟指标性态与影响系数之间的函数关系,则影响系数  $F$  按下式确定:

$$F = \frac{1}{1 + e^{-0.5x}} \quad (5)$$

式中:  $F$  为评估指标对评估结果的影响系数;  $x$  为指标性态。指标值  $p$  的变化范围为  $[0, 8]$ ,而在该模型中指标性态  $x$  的变化范围是  $[-10, 10]$ ,故需用公式  $x = -10 + 2.5p$  进行转换。将获得指标值代入上式,便可以得到相应指标严重性程度的影响系数。

### 2.3 评估结果分级

依据 logistic 曲线的取值范围以及线性加权和法的特点<sup>[13-15]</sup>,可确定综合评估函数  $L$  的取值范围为  $[0.0067, 1.0]$ 。考虑到影响系数的特点,将综合评估结果分为四个区间:  $[0.0067, 0.0759)$ 、 $[0.0759, 0.5000)$ 、 $[0.5000, 0.9241)$ 、 $[0.9241, 1.0]$ 。其对应的关键指标评估及震损程度综合评估分级标准见表 14。

表 14 关键指标、震损程度分级标准

| 评估值    | [0.0067, 0.0759) | [0.0759, 0.5000) | [0.5000, 0.9241) | [0.9241, 1.0] |
|--------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| 关键指标分级 | 一级               | 二级               | 三级               | 四级            |
| 震损程度   | 轻微险情             | 次高危险情            | 高危险情             | 溃坝险情          |

## 3 工程实例

### 3.1 工程震损情况

红刺藤水库位于绵竹市东北镇境内,距绵竹市

城区 4 km。大坝为均质土坝,水库工程由大坝、溢洪道和放水设施组成。震损情况如下:(1) 大坝裂缝:现场发现主要大坝裂缝险情包括纵缝 5 条、横缝 5 条,最大裂缝长 120 m 左右,最大裂缝开口约 18 cm

且上游坡面局部混凝土面板损坏、脱落,裂缝较多;淘刷严重,存在明显坍塌。(2)坝体渗漏:震后及时放水,降低了库水位,现场在坝下未发现明显的渗漏点。(3)泄水建筑物及其它建筑物损毁情况:溢洪道老化失修,溢洪闸右翼墙震裂;闸门螺旋启闭杆丢失,已无法启闭;排洪渠堵塞。(4)无任何观测设施。(5)有较为严重的蚁害现象。(6)防汛公路质量路况差、无上坝公路。

综合以上情况,根据现场专家判断,将震损险情判定为“溃坝险情”。

### 3.2 基于层次分析法的震损程度评估分析

根据震损实际情况,对震损险情判别指标体系

中的各底层指标进行人工赋值,完成定性判断到定量表达的转换过程,以用于震损险情计算分析与判别。各底层指标赋值及  $F$  值见表 15。针对八个关键指标大坝裂缝、大坝滑坡、大坝渗流、库岸滑坡、接触渗漏、输泄水建筑物破坏、泄输水建筑物岸坡失稳和启闭性能计算各自实际分值,将该分值与表 14 关键指标、震损程度分级标准中评价值进行对比判断,明确是否有某关键指标达到四级或三级。经计算,大坝裂缝指标实际分值为 0.8227,大坝滑坡为 0.0067,大坝渗流为 0.023,库岸滑坡为 0.0067,接触渗漏为 0.023,输泄水建筑物破坏为 0.9271,泄输水建筑物岸坡失稳为 0.0067,启闭性能为 0.9241。

表 15 红刺藤水库工程震损险情底层指标赋值及影响系数  $F$  值表

| 底层指标       | 最大沉降量与坝高之比 $D1$ | 最大位移与坝高之比 $D2$ | 裂缝最大长度与走向 $D3$ | 裂缝最大宽度 $D4$ | 裂缝最大深度 $D5$ | 裂缝数量 $D6$ | 总滑坡面积比 $D7$ | 最大滑坡面积比 $D8$ | 管涌(或流土)程度 $D9$ | 翻砂冒水程度 $D10$ | 散浸程度 $D11$ | 渗漏量 $D12$ | 总滑坡量占总库容比例 $D13$ |
|------------|-----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-----------|-------------|--------------|----------------|--------------|------------|-----------|------------------|
| 赋值 $p$     | 4.35            | 7.125          | 6.47           | 5.73        | 6           | 2.67      | 0           | 0            | 1              | 1            | 1          | 1         | 0                |
| 指标性态值 $x$  | 0.875           | 7.8125         | 6.175          | 4.325       | 5           | -3.325    | -10         | -10          | -7.5           | -7.5         | -7.5       | -7.5      | -10              |
| 影响系数 $F$ 值 | 0.6077          | 0.9803         | 0.9564         | 0.8968      | 0.9241      | 0.1594    | 0.0067      | 0.0067       | 0.0230         | 0.0230       | 0.0230     | 0.0230    | 0.0067           |

| 底层指标       | 接触渗漏破坏程度 $D14$ | 冲刷水流浑浊度 $D15$ | 溢洪道破坏程度 $D16$ | 泄洪洞破坏程度 $D17$ | 放水设施破坏程度 $D18$ | 总滑坡量占溢洪道全断面比例 $D19$ | 备用电源完善程度 $D20$ | 震后金属结构试运行可靠性 $D21$ | 下游行洪渠道阻塞程度 $D22$ | 下游行洪渠道风险人口(人数) $D23$ | 坝顶设施破坏程度 $D24$ | 监测设施破坏程度 $D25$ | 水电站破坏程度 $D26$ |
|------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------------|----------------|--------------------|------------------|----------------------|----------------|----------------|---------------|
| 赋值 $p$     | 1              | 1             | 7             |               | 5              | 0                   | 6              | 6                  | 5.5              | 6.17                 | 7              |                |               |
| 指标性态值 $x$  | -7.5           | -7.5          | 7.5           | 无此建筑物         | 2.5            | -10                 | 5              | 5                  | 3.75             | 5.424751             | 7.5            | 无此设施           | 无此建筑物         |
| 影响系数 $F$ 值 | 0.0230         | 0.0230        | 0.9770        |               | 0.7773         | 0.0067              | 0.9241         | 0.9241             | 0.8670           | 0.9378               | 0.9770         |                |               |

根据前述震损水库险情判别的程序以及表 14 关键指标、震损程度分级标准,当某关键指标计算分值介于  $[0.9241, 1.0]$  区间时,可判定关键指标分级为四级,相应震损水库险情级别为溃坝险情。由上述计算结果可知,输泄水建筑物破坏为 0.9271,启闭性能为 0.9241 均在该区间内,表明关键指标分级为四级,相应震损水库险情级别为溃坝险情,该结论与现场专家组判断结果一致。

## 4 结 论

土石坝震损程度快速评估方法的研究,对于提高应急抢险指挥机构的决策水平和速度、有效降低震损土石坝溃坝风险、提高应对突发事件的能力、增强溃坝灾害防控能力,具有十分重要的现实意义,同

时也为土石坝发生震损破坏的机理研究提供重要的参考价值。本文以层次分析法主要技术手段,根据土石坝震害类型、震损特征,建立震损土石坝综合评估指标体系,通过指标阈值、权重计算、确定判别标准等,给出了土石坝震损程度综合评估流程,并利用 logistic 曲线模拟指标性态与影响系数之间的函数关系,确定关键指标与震损程度分级标准,得到土石坝震损程度快速评估方法。选择红刺藤水库对该方法进行了验证,分析结果与现场专家根据工程经验判断结果一致,表明该方法具备有效性与可操作性。

### 参考文献:

[1] 王士军,倪小荣,谷艳昌,等.汶川地震对四川水库大坝影响及其规律探讨[J].水利水运工程学报,2012(6):1-6.