

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3667-05

# 土坝震害评估模型研究

郭恩栋<sup>1</sup>, 张丽娜<sup>1</sup>, 王亚东<sup>2</sup>, 王再荣<sup>1</sup>, 王 琼<sup>1</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省水利水电勘测设计研究院, 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 为了快速准确地对遭受地震影响的土坝工程的破坏状态进行评估, 以土坝震害经验统计判断模型为基础, 选取了更为合理的土坝震害影响因素, 采用最小二乘法重新对土坝震害数据资料进行回归分析, 得到了各震害影响因素在不同条件下的回归系数取值, 从而建立了一个改进的土坝震害经验统计判断模型。与原模型相比, 改进模型既剔除了不合理的震害影响因子, 同时又使回归模型的预测准确度得到提高, 其相关系数为 0.908, 标准差为 0.459, 均比原模型要好。采用两种模型对汶川地震中遭到破坏的 47 座土坝进行震害评估, 并与实际震害进行了对比分析, 初步验证了改进模型的可靠性。

**关 键 词:** 土坝; 震害; 改进的经验统计模型; 汶川地震

中图分类号: P 315

文献标识码: A

## Study of evaluation model of earthquake damage to earth dams

GUO En-dong<sup>1</sup>, ZHANG Li-na<sup>1</sup>, WANG Ya-dong<sup>2</sup>, WANG Zai-rong<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China,

2. Survey Design and Research Institute of the Heilongjiang Water Utilities, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to evaluate earthquake damage to earth dams quickly and accurately, more rational influence factors of the damage are chosen based on the empirical model. The least square method is used to re-analyze the earthquake damage data of earth dams. The regression coefficients of the influence factors of earthquake damage under different conditions are presented; and an improved empirical model to evaluate the earthquake damage to earth dams is set up. In the new model, irrational influence factors are eliminated; and the prediction accuracy of the regression model is improved with the correlation coefficient of 0.908 and the standard deviation of 0.459, which are better than the original model. By using both the improved and original model, 47 earth dams damaged in Wenchuan Earthquake are evaluated. The results are analyzed by comparing with the real seismic damages, preliminarily proving the improved model to be more satisfying.

**Key words:** earth dam; earthquake damage; improved empirical evaluation model; Wenchuan earthquake

## 1 引 言

地震发生后, 遭受地震影响的水利工程, 尤其是土坝工程的震害及功能状态如何是当地政府和民众非常关心的问题, 只有快速准确地获取震区土坝工程的震害情况及溃坝灾害危险性, 有关部门才能采取有针对性的措施, 从而降低溃坝灾害对人民生命财产安全的威胁。我国是一个多地震国家, 据史料记载, 几乎各省都发生过破坏性地震, 虽然因地震造成的水库垮塌的事例很少, 但后果非常严重, 例如受阿富汗地震的影响, 新疆伽师县西克尔水库副坝受地震作用撕裂垮塌, 水库下游数村被淹。

2008 年 5 月 12 日发生的汶川大地震, 仅四川境内就有上千座水库大坝受到影响, 部分水坝出现高危险情, 图 1、2 为绵竹市两座均质土坝的震害情况。

我国已建各类水坝 8.6 万多座, 尤以中小型土石坝最多, 且多数处于地震区, 震后若逐个详细评价其震害则耗时、耗力、耗资, 又由于震后时间紧迫, 较适宜进行快速评估, 然后根据具体情况, 有需要的再进行详评<sup>[1]</sup>。目前对土坝震害进行预测评估主要采用以下几种方法: ①采用数理统计分析方法对土坝震害进行线性回归, 给出不同地震烈度下土坝的震害预测经验公式<sup>[2]</sup>; ②采用概率分析和地震易损性分析相结合的方法<sup>[3-4]</sup>, 首先给出在一定

收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAC13B03-0301); 地震行业科研专项经费项目 (No.201008005, No.200808026)。

第一作者简介: 郭恩栋, 男, 1966 年生, 硕士, 研究员, 博导, 主要从事生命线工程抗震研究。E-mail: iemged@263.net

预测年限的地震烈度的超越概率, 然后建立表示土坝和土堤地震易损性的震害概率矩阵, 并取 10% 超越概率为标准, 估计土坝的震害等级; ③动力非线性有限元分析方法<sup>[5]</sup>; ④人工神经网络方法<sup>[6]</sup>等。以上方法大都基于土坝震害经验数据, 可见采用震害经验数据进行震害评估或预测具有一定的优越性。本文主要针对震后土坝工程震害的快速评估, 采用经验统计回归分析的方法, 对文献[7]中的经验统计模型进行改进, 剔除了不合理的震害因素——液化, 又考虑到地震中可能发生液化对震害的影响, 使得新模型的合理性和可靠性得到进一步提升。



图 1 新油房水库大坝裂缝  
Fig.1 Dam crack of the Xinyoufang Reservoir



图 2 民乐水库副坝滑坡  
Fig.2 Auxiliary dam landslide of the Minle Reservoir

## 2 土坝震害经验统计判断模型

土坝的主要震害现象有裂缝、沉陷、液化、渗漏量增大、滑裂滑坡、防浪墙破坏、护坡破坏及溃坝等, 一般情况下几种震害现象可能同时发生。土坝震害评估模型, 应该综合考虑土坝结构类型及几何因素、建设年代、施工质量、使用现状、场地条件、震时库水位、抗震设防水平以及所遭受地震作用等因素。

袁一凡<sup>[7]</sup>给出了土坝震害经验统计判断模型, 将土坝的震害程度划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏及毁坏 5 个等级, 分别对应不同

的震害指数取值范围。将震害指数作为因变量, 将影响土坝震害因素的参数称为震害因子, 作为自变量, 主要震害因子有坝型、坝料、坝基、施工质量、液化和地震烈度。回归公式为

$$DI_i = \sum_{m=1}^M a_m + \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^K b_{jk}^{\delta_{ijk}} \quad (1)$$

式(1)是由乘积项和求和项组成的, 将式中的乘积项两边取对数, 可化为一般的线性回归:

$$\ln DI_i = b_0 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \delta_{ijk} \ln b_{jk} \quad (2)$$

$$b_0 = \ln \sum_{m=1}^M a_m \quad (3)$$

式中:  $DI_i$  为第  $i$  个坝的震害指数;  $a_m$  为第  $m$  个求和项回归系数;  $b_{jk}$  为乘积项中第  $j$  个项目第  $k$  个类别的回归系数;  $\delta_{ijk}$  为克拉奈特记号, 表示第  $i$  个坝对乘积项因子的选择, 当第  $j$  个项目中有第  $k$  个类别因子影响时取 1, 否则取 0。

震害经验统计判断模型震害因子分类及其系数取值、土坝震害等级划分参见文献[7], 由于篇幅原因, 不在文中列出。本文在此模型基础上进行了合理的改进。

## 3 改进的土坝震害经验统计判断模型

上一节中介绍的土坝震害经验统计判断模型, 将液化作为一项震害前提影响因素。实际上, 液化是震害的一种具体表现形式, 是由于浸润线以下的坝体材料在地震荷载作用下导致的, 未发生地震时无法判断坝基或坝体是否液化, 故将液化作为土坝震害前提影响因素是不合理的, 因此, 在改进模型中将液化因素剔除掉。

但地震中一旦发生液化, 会对震害结果造成很大的影响, 所以在震害评估时又必须考虑到地震中发生液化的可能性。地震发生时, 孔隙水压力升高, 使土体有效应力减小, 对于砂土而言, 会发生液化, 而对于黏土而言, 会发生沉陷, 无论液化还是沉陷都会使坝体失去原有的承载能力, 提高坝体的震害等级。砂土在地震作用下是否发生液化、规模大小、震害轻重都与土的类型、状态有密切关系。所以在土坝震害评估时, 可以认为地震中坝体、坝基是否发生液化与坝基、坝体材料的性质息息相关, 因此, 在坝基、坝体震害因子中应考虑导致液化发生的可能性及对整体震害程度的贡献, 这样也就兼顾考虑到发生沉陷对震害的影响, 考虑的更加合理全面。

将影响土坝的震害因素坝型、坝料、坝基、施工质量和地震烈度分别归类为震害因子，列于表 1 第 1、2、3 列，本文用于统计回归分析的资料是文献[7]中 134 座土石坝震害资料，限于篇幅，逐座分列的土坝详细资料略，根据式（2）进行线性回归，回归分析得到的常数因子太大，如果将它作为震害起算值，则不符合常规认识，引入常数因子用来考虑未计入因素的影响，为此要作归一化调整，使之符合易损性分析的认识，可将每个项目的回归系数除最小值<sup>[7]</sup>，列于表 1 中的第 4 列。

由于液化、沉陷发生与否是一项不定因素，只能根据数据进行试凑拟合，在试算当中，曾将坝料、坝基中的第 1、2、3 类都处理为和项，但只有将坝料第 3 类、坝基第 3 类处理为和项得到的结果最为理想，也符合实际的情况，坝料第 3 类和坝基第 3

类的是最差的情况，发生液化或沉陷的可能性也就更大。根据实际震害指数进行试凑拟合，得出和项因子及拟合后的建议系数列于表 1 的第 5 列。相关系数为 0.908，标准差为 0.459，相关系数变大，标准差变小，改进的模型得到了更好的结果。

#### 4 汶川部分土坝震害实例分析

对汶川地震中遭到破坏的 47 座土坝<sup>[8]</sup>进行评估，土坝震害因子取值及评估结果见表 2，其中  $X_1$ 、 $X_2$  分别为改进的土坝震害经验统计型判断模型预测的震害指数与震害等级； $Y_1$ 、 $Y_2$  分别为原土坝震害经验统计型判断模型预测的震害指数与震害等级。对两种模型的评估结果、标准差及相关系数进行对比分析，详见表 3，由表可见，改进的经验统计型模型比原模型好。

表 1 土坝震害因子分类及系数取值  
Table 1 Classification and coefficient value of earth dams damage factors

| 项目   | 类别 | 分类根据                                                                                                                                          | 回归系数  | 建议系数  |
|------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| 坝型   | 1  | 均质坝                                                                                                                                           | 1.00  | 1.00  |
|      | 2  | 心墙坝                                                                                                                                           | 1.04  | 1.10  |
|      | 3  | 斜墙坝                                                                                                                                           | 1.15  | 1.20  |
|      | 4  | 水中填土坝，水坠坝                                                                                                                                     | 1.27  | 1.25  |
| 坝料   | 1  | 均质坝用料强度高，符合筑坝要求，例如用重壤土（黏土）或粉质黏土，土料中砂粒含量不超过 75%，黏粒含量不超过 50%~60%，压实干密度达 1.6~1.7 g/cm <sup>3</sup> 或以上。心墙坝和斜墙坝的坝壳料用级配均匀的风化料或砂砾土，压实相对密度达 70%~75%。 | 1.00  | 1.00  |
|      | 2  | 用料较差，对均质坝如粉土含量太大，不满足设计要求，或用料不均匀，掺合不符合要求的土料，如表层风化土、含砾石过多或含腐植质多的土料等。心墙坝和斜墙坝的坝壳料用级配不够均匀土料，压实相对密度不足 0.70，或掺合不符合要求的土料。                             | 1.27  | 1.25  |
|      | 3  | 均质坝用料很差，严重不符合要求。心墙坝和斜墙坝，坝壳用料严重不符合要求，级配不匀，或使用大量风化表层土等，坝料严重不符合要求，震中发生液化或沉陷的可能性就很大。                                                              |       | +1.10 |
| 坝基   | 1  | 岩石地基或 5 m 以内的砂砾层地基。                                                                                                                           | 1.0   | 1.00  |
|      | 2  | 覆盖土层 20 m 以内，无淤泥层或粉细砂层，或经过处理（如砂垫层、挤淤、围封、人工加固、灌浆胶结）的地基。                                                                                        | 1.07  | 1.10  |
|      | 3  | 覆盖土层组成复杂，有分布普遍的软土层，有厚度 1 m 以上淤泥层或粉细砂层或夹层，或其他不利抗震的因素，如断层通过，岩石破碎等。在此情况下，发生液化和沉陷的可能性也很大。                                                         |       | +1.10 |
| 施工质量 | 1  | 坝料充分压实，黏土干密度和砂料相对密度达到要求；坝基清理彻底，用截水墙或帷幕灌浆防止地基渗漏；设置反滤体并用料级配良好，位置得当，浸润线低；与岸坡接合良好；有较好的维护保养措施。                                                     | 1.00  | 1.00  |
|      | 2  | 坝料压实一般，有部分坝段可能不符合要求；坝基清理不够彻底，铺盖式防渗，漏水明显；反滤体效果一般；护坡有裂缝。                                                                                        | 1.31  | 1.30  |
|      | 3  | 分期施工，质量较差，有明显的不均匀接缝，合拢处施工赶进度，施工草率；坝料压实不足，或多个坝段未经压实；坝基未做清理，未做截水槽或漏水严重；与岸坡接合处理不够完善，边坡削陡；施工中曾经出现过裂缝、沉陷，但经过了灌浆等处理，效果不理想。                          | 1.77  | 1.80  |
|      | 4  | 病险水库，不能正常工作，或不能蓄水；施工中出现过裂缝、沉陷、滑坡等事故，处理不善；有重大隐患，如铺盖有裂缝空穴，护坡水下部分被掏空等。                                                                           | 2.20  | 2.20  |
| 地震烈度 | 1  | Ⅵ度                                                                                                                                            | 1.00  | 1.00  |
|      | 2  | Ⅶ度                                                                                                                                            | 1.12  | 1.10  |
|      | 3  | Ⅷ度                                                                                                                                            | 1.20  | 1.20  |
|      | 4  | Ⅸ度                                                                                                                                            | 1.46  | 1.45  |
| 常数项  |    |                                                                                                                                               | 0.90  | 0.90  |
| 相关系数 |    |                                                                                                                                               | 0.711 | 0.908 |
| 标准差  |    |                                                                                                                                               | 0.321 | 0.459 |

表 2 汶川地震部分土坝震害因子取值与震害评估结果  
Table 2 Damage factor values and evaluation results of part earth dams of Wenchuan earthquake

| 序号 | 坝名        | 坝型 | 坝长<br>/ m | 坝高<br>/ m | 水库<br>规模 | 坝料<br>系数 | 坝基<br>系数 | 施工质<br>量系数 | 地震烈度<br>/ 度 | 实际<br>震害 | X1   | X2 | Y1   | Y2 |
|----|-----------|----|-----------|-----------|----------|----------|----------|------------|-------------|----------|------|----|------|----|
| 1  | 九岭镇大田水库   | 1  | 100       | 7.55      | 小二       | 2        | 3        | 4          | 8           | 4        | 4.07 | 4  | 4.02 | 4  |
| 2  | 战旗镇洞子沟水库  | 1  | 182       | 18.00     | 小二       | 2        | 1        | 4          | 8           | 3        | 2.97 | 3  | 2.87 | 3  |
| 3  | 八一乡观音堂水库  | 1  | 148       | 9.00      | 小二       | 2        | 3        | 4          | 8           | 4        | 4.07 | 4  | 4.02 | 4  |
| 4  | 九岭镇合作水库   | 1  | 120       | 20.00     | 小二       | 2        | 3        | 4          | 8           | 4        | 4.07 | 4  | 4.02 | 4  |
| 5  | 二郎庙镇火烧坡水库 | 1  | 45        | 9.00      | 小二       | 2        | 1        | 4          | 8           | 3        | 2.97 | 3  | 2.87 | 3  |
| 6  | 永胜镇牛角埝水库  | 1  | 37        | 6.00      | 小二       | 2        | 1        | 3          | 8           | 3        | 2.43 | 2  | 2.25 | 2  |
| 7  | 二郎庙镇漆树坝水库 | 1  | 38        | 9.00      | 小二       | 2        | 1        | 4          | 8           | 3        | 2.97 | 3  | 2.87 | 3  |
| 8  | 龙凤镇岐山水库   | 1  | 314       | 21.00     | 小一       | 2        | 3        | 4          | 8           | 4        | 4.07 | 4  | 4.02 | 4  |
| 9  | 大埝乡狮儿河水库  | 1  | 241       | 17.40     | 小一       | 2        | 3        | 4          | 8           | 4        | 4.07 | 4  | 4.02 | 4  |
| 10 | 太康镇吴家大堰水库 | 1  | 120       | 8.00      | 小二       | 2        | 3        | 4          | 8           | 4        | 4.07 | 4  | 4.02 | 4  |
| 11 | 城郊乡朝阳水库   | 1  | 130       | 18.00     | 小二       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |
| 12 | 城郊乡红旗水库   | 1  | 420       | 11.40     | 小二       | 2        | 2        | 3          | 7           | 2        | 2.45 | 2  | 2.27 | 2  |
| 13 | 龙门镇锦江水库   | 1  | 222       | 18.70     | 小二       | 2        | 2        | 3          | 7           | 3        | 2.45 | 2  | 2.27 | 2  |
| 14 | 河边镇上游水库   | 1  | 470       | 22.67     | 中型       | 2        | 2        | 3          | 7           | 3        | 2.45 | 2  | 2.27 | 2  |
| 15 | 玉皇镇团结水库   | 1  | 161       | 16.15     | 小一       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |
| 16 | 丰谷镇新建水库   | 1  | 231       | 8.75      | 小二       | 2        | 2        | 3          | 7           | 3        | 2.45 | 2  | 2.27 | 2  |
| 17 | 磨家镇跃进水库   | 1  | 110       | 14.40     | 小二       | 2        | 2        | 3          | 7           | 3        | 2.45 | 2  | 2.27 | 2  |
| 18 | 新鲁镇向阳水库   | 1  | 405       | 20.00     | 小一       | 2        | 2        | 4          | 7           | 3        | 2.99 | 3  | 2.89 | 3  |
| 19 | 来龙乡袁板桥水库  | 2  | 98        | 11.50     | 小二       | 2        | 2        | 3          | 7           | 3        | 2.70 | 3  | 2.49 | 2  |
| 20 | 朝真乡崇林水库   | 1  | 150       | 10.00     | 小二       | 2        | 2        | 3          | 8           | 4        | 2.67 | 3  | 2.47 | 2  |
| 21 | 新桥镇和平水库   | 1  | 175       | 24.40     | 小一       | 2        | 2        | 3          | 8           | 3        | 2.67 | 3  | 2.47 | 2  |
| 22 | 街子乡金花水库   | 1  | 240       | 18.60     | 小一       | 2        | 2        | 3          | 8           | 3        | 2.67 | 3  | 2.47 | 2  |
| 23 | 仙海区三要水库   | 1  | 400       | 7.40      | 小二       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |
| 24 | 文昌镇长岭水库   | 1  | 256       | 10.60     | 小二       | 2        | 2        | 4          | 7           | 3        | 2.99 | 3  | 2.89 | 3  |
| 25 | 双板乡五七水库   | 1  | 110       | 21.60     | 小二       | 2        | 1        | 3          | 8           | 3        | 2.43 | 2  | 1.62 | 2  |
| 26 | 建兴乡新桥水库   | 1  | 107       | 17.00     | 小二       | 2        | 1        | 3          | 7           | 3        | 2.23 | 2  | 1.49 | 1  |
| 27 | 交泰乡幸福水库   | 1  | 80        | 11.20     | 小二       | 2        | 1        | 3          | 7           | 3        | 2.23 | 2  | 1.49 | 1  |
| 28 | 西北乡上坝水库   | 1  | 120       | 28.00     | 小二       | 2        | 2        | 4          | 8           | 3        | 3.27 | 3  | 3.16 | 3  |
| 29 | 松林镇景顶水库   | 1  | 145       | 18.20     | 小二       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |
| 30 | 锥城镇龙泉水库   | 2  | 183       | 33.60     | 小一       | 2        | 2        | 3          | 7           | 2        | 2.45 | 2  | 2.49 | 2  |
| 31 | 孟家乡大同水库   | 1  | 184       | 10.00     | 小二       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |
| 32 | 双东镇青山水库   | 1  | 95        | 6.90      | 小二       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |
| 33 | 八一水库      | 1  | 130       | 10.50     | 小二       | 2        | 3        | 4          | 7           | 4        | 3.82 | 4  | 3.68 | 4  |
| 34 | 鄯家镇早长湾水库  | 1  | 150       | 7.00      | 小二       | 2        | 2        | 4          | 7           | 3        | 2.99 | 3  | 2.89 | 3  |
| 35 | 德安镇尖梁子水库  | 1  | 167       | 10.00     | 小二       | 2        | 2        | 3          | 7           | 3        | 2.45 | 2  | 2.27 | 2  |
| 36 | 金山镇罗家湾水库  | 1  | 246       | 12.80     | 小一       | 2        | 2        | 4          | 7           | 3        | 2.99 | 3  | 2.89 | 3  |
| 37 | 新盛镇百善团结水库 | 1  | 118       | 11.20     | 小二       | 1        | 3        | 4          | 7           | 3        | 3.28 | 3  | 2.83 | 3  |
| 38 | 新盛镇一根松水库  | 1  | 167       | 9.80      | 小二       | 2        | 3        | 4          | 7           | 3        | 3.82 | 4  | 3.68 | 4  |
| 39 | 遵道镇陈家湾水库  | 1  | 308       | 19.00     | 小二       | 2        | 3        | 3          | 9           | 4        | 4.04 | 4  | 3.67 | 4  |
| 40 | 东北镇红刺藤水库  | 1  | 156       | 12.00     | 小二       | 2        | 2        | 2          | 9           | 4        | 2.33 | 2  | 2.08 | 2  |
| 41 | 孝德镇众力水库   | 1  | 1 095     | 9.30      | 小二       | 2        | 2        | 3          | 8           | 2        | 2.67 | 3  | 2.47 | 2  |
| 42 | 土门镇民乐水库   | 1  | 167       | 10.00     | 小一       | 2        | 3        | 3          | 9           | 4        | 4.04 | 4  | 3.67 | 4  |
| 43 | 遵道镇太平水库   | 1  | 190       | 23.20     | 小一       | 2        | 3        | 4          | 9           | 3        | 4.04 | 4  | 4.69 | 5  |
| 44 | 龙台镇拦沟堰水库  | 1  | 234       | 5.00      | 小二       | 1        | 2        | 2          | 6           | 1        | 1.29 | 1  | 1.14 | 1  |
| 45 | 黄鹿镇庆丰水库   | 2  | 247       | 15.10     | 小一       | 2        | 1        | 4          | 7           | 3        | 2.72 | 3  | 2.89 | 3  |
| 46 | 太平乡太平水库   | 1  | 294       | 10.20     | 小一       | 2        | 3        | 4          | 6           | 4        | 3.58 | 4  | 3.34 | 3  |
| 47 | 南华镇新坪水库   | 1  | 106       | 17.40     | 小一       | 2        | 3        | 3          | 7           | 3        | 3.33 | 3  | 2.88 | 3  |

注：在这些震害资料中，都没有提及液化方面的信息，在采用原土坝震害经验统计型判断模型进行评估时，则认为液化取值为0，因此，表中未列出液化这一项。

表 3 两种模型对比分析  
Table 3 Comparative analysis of two models

| 判断模型             | 震害等级相符的土坝 |      | 震害等级差1个等级的土坝数量 |      | 震害等级差2个等级的土坝数量 |      | 标准差   | 相关<br>系数 |
|------------------|-----------|------|----------------|------|----------------|------|-------|----------|
|                  | 数量/座      | 比例/% | 数量/座           | 比例/% | 数量/座           | 比例/% |       |          |
| 改进的土坝震害经验统计型判断模型 | 33        | 70   | 13             | 28   | 1              | 2    | 0.459 | 0.908    |
| 原经验统计型判断模型       | 30        | 64   | 12             | 26   | 5              | 10   | 0.506 | 0.886    |

## 5 结 语

在土坝震害经验统计判断模型的基础上, 提出了一个改进模型, 剔除了原模型中不合理的震害影响因素——液化, 而是将可能导致液化发生的坝基、坝体材料的性质与液化这种震害现象联系起来, 综合考虑了液化对震害结果的影响, 使得震害因子的选择更合理, 结果更可靠。基于汶川地震中 47 座土坝震害资料, 采用两种模型进行评估并与实际震害对比分析, 改进模型既剔除了不合理的震害影响因素, 同时又使回归模型的预测准确度得到提高, 其相关系数为 0.908, 标准差为 0.459, 而原模型结果的相关系数为 0.886, 标准差为 0.506, 因此, 改进的模型得到的结果比原模型更好。

**致谢:** 在论文完成过程中, 得到了袁一凡研究员、张令心研究员、景立平研究员、陈国兴教授、黄龙生研究员及李永强硕士的大力协助, 在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 常宝琦, 梁纪彬. 土坝的地震易损性和震害快速评估[J]. 人民珠江, 1994, (6): 12—16.  
CHANG Bao-qi, LIANG Ji-bin. Vulnerability and evaluation of seismic damage for earth dams[J]. *Pearl River*, 1994, (6): 12—16.
- [2] 黄代清. 土坝震害预测[J]. 云南农业大学学报, 1992, 7(1): 1—5.
- [3] 常宝琦, 陈仁法, 杨廉法, 等. 珠江三角洲土坝和堤围震害初步预测[J]. 华南地震, 1994, 14(2): 30—36.  
CHANG Bao-qi, CHEN Ren-fa, YANG Lian-fa, et al. Preliminary prediction of earthquake damage to earth structures in the pearl delta[J]. *South China Journal of Seismology*, 1994, 14(2): 30—36.
- [4] 唐丽华, 尹力峰, 赵纯青, 等. 克孜尔水库大坝及其建筑物的震害预测[J]. 地震研究, 2001, 24(4): 363—369.  
TANG Li-hua, YIN Li-feng, ZHAO Chun-qing, et al. Forecast of seismic hazards for the dam of Kezier Reservoir and its buildings[J]. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24(4): 363—369.
- [5] 马尔曼, 张全虎. 关于坝体震害预测的研究[J]. 西北地震学报, 1994, 16(1): 70—77.  
MA Er-man, ZHANG Quan-hu. The research of seismic disaster prediction of earth dam[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1994, 16(1): 70—77.
- [6] 常宝琦, 梁纪彬. 土坝的震害预测——人工神经网络方法的应用[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 70—74.  
CHANG Bao-qi, LIANG Ji-bin. Application of the artificial neural network on earth dam seismic damage prediction[J]. *South China Journal of Seismology*, 1998, 18(1): 70—74.
- [7] 袁一凡. 岩土工程结构震害预测方法研究[R]. 哈尔滨: 中国地震工程力学研究所, 2000.
- [8] 景立平, 陈国兴. 汶川地震科学考察中期总结报告[R]. 哈尔滨: 中国地震工程力学研究所, 2008.
- [9] ZOU Guang-dian. Analysis of stability against upheaval of deep excavation by an upper limit method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1873—1878.
- [14] 王成华, 鹿群, 孙鹏. 基坑抗隆起稳定分析的临界宽度法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 295—300.  
WANG Cheng-hua, LU Qun, SUN Peng. Critical width method for analyzing stability of foundation pits against basal heave failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3): 295—300.
- [15] 曾宪明, 林润德, 易平. 基坑与边坡事故警示录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [16] MICHALOWSKI R L. Slope stability analysis: A kinematical approach[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(2): 283—293.
- [17] MICHALOWSKI R L. Stability of uniformly reinforced slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1997, 123(6): 546—556.
- [18] VIRATJANDR C, MICHALOWSKI R L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(8): 802—814.
- [19] DRUCKER D C, PRAGER W, GREENBERG H J. Extended limit design theorems for continuous media[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, 9(4): 381—389.
- [20] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1975.
- [21] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [22] WINTERKOM H F, FANG H Y. Foundation engineering handbook[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1975: 427—428.
- [23] 孙淑贤. 深基坑抗隆起稳定计算方法的研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1999, 12(1): 68—70.  
SUN Shu-xian. Calculation method of resistant heave stability for deep excavations[J]. *Journal of Yantai University(Natural Science and Engineering)*, 1999, 12(1): 68—70.
- [24] 赵锡宏, 陈志明, 胡中雄. 高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.

上接第 3659 页