

刘兆文,李云,丁斌.基于震灾图像维度分析下景观带毁损程度评估的探讨[J].地震工程学报,2019,41(5):1367-1373.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1367

LIU Zhaowen, LI Yun, DING Bin. Discussion of Damage Degree Evaluation of Landscape Belts Based on Dimension Analysis of Earthquake Disaster Images[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1367-1373. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1367

基于震灾图像维度分析下景观带 毁损程度评估的探讨

刘兆文¹, 李云², 丁斌³

(1. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231; 2. 江西师范大学, 江西 南昌 330026;
3. 杭州市城建设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 地震灾害是所有自然灾害中破坏程度最为严重的灾害之一,当景观带遭到地震破坏时,景观带中的规则建筑结构发生改变,景观带毁损程度评估是城市避震减灾体系研究的重点内容,因此对景观带中规则建筑毁损程度研究有重要意义。为深入探讨景观带毁损程度评估的问题,基于震灾图像维度分析下对景观带毁损程度的评估方法进行尝试。根据规则建筑震灾图像质量,按图像维度的变化特征对规则建筑结构的破碎程度进行划分,获取破碎概率分布,根据破碎概率划分最佳阈值,采用分数维方法提取图像维度特征,根据提取到的规则建筑震灾图像维度特征,将毁损的规则建筑空间自相关程度转换成正态分布曲线,进而构建评估模型对规则建筑毁损程度进行评估。针对实例分析,实现基于震灾图像维度分析下景观带毁损程度评估方法并进行了探讨。

关键词: 规则建筑; 分数维方法; 图像维度; 正态分布曲线

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1367-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1367

Discussion of Damage Degree Evaluation of Landscape Belts Based on Dimension Analysis of Earthquake Disaster Images

LIU Zhaowen¹, LI Yun², DING Bin³

(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, Zhejiang, China;

2. Jiangxi Normal University, Nanchang 330026, Jiangxi, China;

3. Architectural & Civil Engineering Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: Earthquakes are one of the most serious of all natural disasters. If a landscape belt is destroyed by an earthquake, regular building structures in the landscape belt will be also changed. Degree-of-damage evaluation of landscape belts is key to urban earthquake avoidance and disaster

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568025); 浙江省水利科技计划项目(RC1760)

第一作者简介: 刘兆文(1982-),女,江西吉安人,博士研究生,讲师,研究方向:城乡规划与景观设计。

通信作者: 李小云(1978-),男,江西吉水人,博士,副教授,研究方向:历史文化遗产保护。

丁斌(1979-),男,四川自贡人,高级工程师,研究方向:建筑结构设计。E-mail: zora2015@qq.com。

reduction, so it is of great significance to study degrees-of-damage to regular buildings in the landscape belt. In this paper, a method based in dimensional analysis of earthquake disaster images is used to evaluate the damage degree of landscape belts. According to the earthquake disaster image quality of regular buildings, fragmentation degree was categorized based on the change characteristics of the image dimensions. Optimal threshold was then calculated according to the crushing probability, and the fractional-dimension method was used to extract image dimension features. On this basis, the spatial autocorrelation degree of damaged regular buildings was transformed into a normal distribution curve. A model was then constructed to evaluate the degree-of-damage of the buildings. This case study proved that the method of landscape zone damage degree evaluation, based on dimensional analysis of earthquake disaster images, can be applied to real-life cases.

Keywords: regular building; fractional-dimensional approach; image dimension; normal distribution curve

0 引言

在当前全球气候变化和灾害频发的背景下,频繁的突发性自然灾害造成巨大的人力、物力、财产损失,严重影响了经济社会的发展与稳定,为人类面临的真正威胁。景观带作为可能的地震中破坏区域,是城市避震减灾体系中的重要要素。当发生地震时,景观带中的规则建筑作为景观带中的重要组成部分,因地震灾害影响,规则建筑结构发生变化,因此研究景观带中规则建筑遇到突发性的自然灾害与制定减灾对策已成为人们关注的重^[1-2]。作为景观带分布最广泛设施,规则建筑即是受灾害作用的客体,同时也承担提供生态保护的任务,因此对景观带中规则建筑毁损程度评估的研究有重要意义。毁损程度评估是景观带保护的重要方面,可为景观带保护提供决策支持。由于地震灾害后需要快速、准确地检测出景观带中规则建筑毁损程度,拟定迅速、科学的抢修方案并进行修复,这就需要及时获取景观带中规则建筑毁损相关信息^[3-4]。采用传统人工实地察看景观带中规则建筑毁损,很难实现快速与准确地获取规则建筑毁损信息,因此深化景观带破坏的力学机制研究,革新景观带养护体制,拓展科学养护景观带内涵,在地震灾害下将景观带中规则建筑毁损程度纳入风险评估的思想,都是目前我国景观带规划的迫切需求。目前景观带中规则建筑毁损已引起很多专家学者的重视,同时也产生很多好的方法^[5]。

文献[6]提出基于模糊神经网络的灾区园林景观毁损程度评估方法,确定园林景观毁损程度评估

的3个指标,并通过样本学习训练,获取评价专家的经验知识与直觉思维,将训练好的神经网络用于地震灾区园林景观毁损程度评估。文献[7]提出基于海量视频监控的灾区园林景观毁损程度评估方法。采用定性分析灾区园林景观毁损程度经验矩阵,创建基于视频图像变化的灾区园林景观毁损定量分析方法,采用该方法评估景观毁损程度。文献[8]提出基于烈度差的灾区园林景观毁损程度评估方法,根据烈度差的概念,结合实地调研数据研究典型城市的地震震害,分别采用地震烈度与烈度差建立园林景观的地震易损伤评估矩阵,根据该矩阵对灾区园林景观毁损程度进行评估。

在以上研究基础上,本文基于震灾图像维度分析下对景观带毁损程度的评估进行探讨。结合实例分析结果表明,本文方法具有一定的可行性,值得进一步探讨。

1 规则建筑毁损程度评估方法

1.1 基于分数维的震灾图像维度特征提取

景观作为一种规则建筑,因地震灾害影响,规则建筑结构发生变化。由于越碎的东西维度越高,因此采用分数维方法提取规则建筑震灾图像维度特征^[9]。分数维是复杂程度的度量,其研究自然界中没有特征长度的形状和集合的自相似性,其形状或集合的复杂程度可以用维数 D 表示,其维数 D 越大,相应的几何对象越复杂。分数维方法多应用于地表形态、断裂机理和地震科学等领域中。图1为震灾前和震灾后景观带毁损情况。



(a) 震灾前的景观带毁损情况 (b) 震灾后的景观带毁损情况

图 1 震灾前后景观带毁损情况

Fig.1 Damage of landscape zone before and after earthquake

利用 GIS 遥感技术对景观带中规则建筑的多空间动态地理信息进行监测,生成规则建筑震灾图像。根据规则建筑震灾图像质量,按震灾图像维度的变化特征对规则建筑结构的破碎度进行划分,图像维度越大,则破碎越厉害,进而获取破碎概率分布,根据破碎概率划分最佳阈值,采用分数维方法提取规则建筑震灾图像维度特征^[10]。

根据规则建筑震灾图像破碎度表现可以看出,规则建筑在图像中一般为低维度区域,同时与其他建筑结构有很大差异,因此可根据这一特点使用分数维方法对规则建筑结构的破碎度进行划分,从而将感兴趣的维度特征分割出来,便于进一步处理。目前,分数维方法是效果较好的图像维度特征提取算法,其方法能够自适应的选择适合的阈值,使分割出来的类间差异最大,最大限度地减少了人为因素对阈值分割的影响^[11]。

假设一幅规则建筑震灾图像的维度为 1~2,维度值为 i 的图像质量为 n_i ,则图像总质量为 N ,则有:

$$N = n_0 + n_1 + \dots + n_{255} = \sum_{i=0}^{255} n_i \quad (1)$$

各图像质量等级出现的概率为 $p_i = n_i / N$,然后使用整数 t 将图像的质量按照维度划分为两类,分别为 C_0 与 C_1 ,具体过程为:

$$C_0 = \{0, 1, \dots, t\} \quad (2)$$

$$C_1 = \{t + 1, t + 2, \dots, 255\} \quad (3)$$

则这两类维度出现的概率分布分别为(即破碎概率):

$$\omega_0 = C_0 p_r = \sum_{i=0}^t p_i \quad (4)$$

$$\omega_1 = C_1 p_r = \sum_{i=t+1}^{255} p_i \quad (5)$$

式中: ω_0 代表概率最大值; ω_1 代表概率最小值; p_r 代表图像质量因子; p_i 代表概率均值。

各类图像质量的破碎概率均值为:

$$u_0 = \sum_{i=0}^t i \times p_r(i | C_0) = \sum_{i=0}^t \frac{i \cdot p_i}{\omega_0} \quad (6)$$

式中: u_0 代表破碎值。

同时下式等式恒成立:

$$\omega_0 + \omega_1 = 1, \omega_0 u_0 + \omega_1 u_1 = u_T \quad (7)$$

式中: u_T 代表破碎的绝对差值; u_1 代表破碎最小值。

两类方差分别为:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=0}^t (i - u_0)^2 p_r(i / C_0) = \sum_{i=0}^t (i - u_0)^2 \frac{p_i}{\omega_0} \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=t+1}^{255} (i - u_1)^2 p_r(i / C_1) = \sum_{i=t+1}^{255} (i - u_1)^2 \frac{p_i}{\omega_1} \quad (9)$$

式中: σ_0^2, σ_1^2 分别代表两类方差。为了进一步评估阈值分割效果,引入以下评价参数 λ, k, η ,具体过程为:

$$\lambda = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2}, K = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_W^2}, \eta = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2} \quad (10)$$

式中: σ_W^2 代表类内方差; σ_T^2 代表总体方差; σ_B^2 代表类间方差,具体过程如下式:

$$\sigma_W^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (11)$$

如果选择最优阈值 t ,只需 λ, k, η 个评价参数最大,由于 $\sigma_T^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2$ 成立,则评价参数间的关系成立:

$$K = \lambda + 1, \eta = \frac{\lambda}{\lambda + 1}, K = \frac{1}{1 - \eta} \quad (12)$$

从上述关系式可知,三个评价参数的单调性一致,而 η 是计算最简单的,因此类间方差 σ_B^2 可以作为分类的评价主要参数:

$$\sigma_B^2 = \frac{|u_T \omega_0(t) - u_0(t)|^2}{\omega_0(t)[1 - \omega(t)]} \quad (13)$$

因此,最佳阈值 t^* 的类间方差 $\sigma_B^2(t^*)$ 的表达式为:

$$\sigma_B^2(t^*) = \max\{\sigma_B^2(t)\} \quad (14)$$

在实际操作中,由于规则建筑在园林景观中表现较暗,潜在的规则建筑只会存在较暗的区域,因此可以将整幅图像平均破碎度求出,然后该平均破碎值作为首分割阈值^[12]。将整幅图像划分成两个部分,一部分小于平均破碎值的区域为待二次分割区域,另一部分为非规则建筑信息区域。假设计算出的平均破碎值为 T ,则可以将二次分割的阈值取舍范围设置在 $0 \sim T$,根据破碎概率划分最佳阈值,采用分数维方法来计算每个像元的分形维数,这样就可以提取出潜在的维度特征,这种方法能够减少计算量,以最快的速度取得合适的阈值将维度特征划分出来。

把规则建筑中心像元看作原点,以 (r, R) 表示窗口中像元分别到纵轴和横轴的距离,当 $R = 0$ 时, (r, R) 表示在横轴和纵轴上的像元点的坐标。根据像元点的坐标计算分形维数 D ,其表达式为:

$$D = \frac{|3 - H|}{T} R \sigma_B^2(t^*) \quad (15)$$

式中: H 代表拟合直线的斜率。

根据分形维数提取规则建筑震灾图像的维度特征,具体过程为:

$$\mu_1 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K D_i \quad (16)$$

式中: μ_1 表示规则建筑震灾图像的维度特征。在规则建筑震灾图像的维度特征提取的基础上,对规则建筑毁损程度评估进行建模分析。

1.2 构建规则建筑毁损程度评估模型

根据提取到的规则建筑震灾图像的维度特征建立震害正态分布曲线,进而构建规则建筑毁损程度评估模型,根据其模型对规则建筑毁损程度进行评估。

设定 s_i 代表毁损系数,获取参数 $in\bar{d}_j$ 与 s_i ,即可建立毁损空间正态分布曲线 $in\bar{d}_j$,其表达式为:

$$in\bar{d}_j = 0.2 \times \left[\prod_{j=1}^2 X_j \right] - 0.1s_i \quad (17)$$

式中: X_j 代表灾区第 j 个毁损空间所对应的量化值。由于规则建筑震灾图像维度与震害正态分布曲线呈正相关性,图像维度越大,震害正态分布曲线越明显,则毁损的规则建筑空间自相关程度就越高。自相关是指震害正态分布曲线在某一时刻的量化值与另一时刻的量化值之间的依赖关系,如果规则建筑毁损程度评估模型所选用的函数形式与实际变量

之间的真实关系不相符,那么毁损的规则建筑空间往往会存在自相关。即:

$$\mu_j(ind) = e^{\frac{(\mu_1 - \mu_1 ind_j)^2}{2S^2}} \quad (18)$$

式中: $\mu_j(ind)$ 代表灾区第 j 个规则建筑区域的空间自相关程度; s 代表景观带区域。

在毁损区域的空间自相关程度与规则建筑毁损程度概率 v 基本满足线性关系,具体过程如下式:

$$v = \{0.96 - (\mu_j(ind) - 0.12) \times 1.31579, \\ 0.09 < ind < 0.6 \quad (19)$$

根据地震灾害下实测数据所构建的规则建筑毁损程度评估模型,可以实现震后规则建筑毁损风险快速评估,以满足应急管理需要。该毁损程度评估模型未考虑地震对规则建筑毁损的影响。因此对该模型进行简化修正,式(20)为新创建的将次生地震影响因素考虑在内的规则建筑毁损程度评估模型,次生地质灾害的量化参考地震对次生地质灾害进行等级划分,具体过程为:

$$in\bar{d}_j' = 0.2 \times \left[\prod_{j=1}^7 X_j \right] \times v - 0.1 \quad (20)$$

式中: $in\bar{d}_j'$ 代表考虑地震灾害因素下第 j 个毁损空间的毁损程度划分结果。根据划分结果完成对规则建筑毁损程度评估。

2 实例分析

利用构建的规则建筑毁损程度评估模型对四川省汶川县地震灾区景观带毁损程度进行探讨。对地震灾区前后图像选取具有高空间分辨率的遥感飞机航拍,多光谱波段空间分辨率为 2.44 m,经过遥感图像处理后可达到 0.61 m 的真彩色融合图像。图 2 为汶川县地震灾区景观带地震前后变化情况。

地震灾害下,景观带遭到破坏,在空间上景观带整体或局部产生不规则的结构变化。根据景观带地震前后变化情况,采用本文评估方法对汶川县地震灾区景观带格局指标变化特征进行探讨。如表 1 所列。

根据表 1 可知,景观带破碎越厉害,毁损程度越严重,景观匀称性越差。根据汶川县地震灾区景观带格局指标震前和震后的变化,探讨其毁损程度。有林地、疏林地和水域震后景观破碎度分别为:81.05%、82.21%、80.56%,景观匀称性分别为 0.54%、0.55%、0.54%,为轻微毁损;草地和耕地震后景观破碎度分别为:72.02%、72.35%,景观匀称性均为 0.48%,为中度毁损;城乡居民地和裸地的震后景观破碎度分别为:50.99%、52.22%,景观匀

称性分别为 0.32%、0.34%，为重度损毁。

为了探讨分形维数 D 与震害正态分布之间的关系,根据图 3 的汶川县地震空间分布示意图,利用

本文方法对汶川县地震后的 D 值和震害正态分布值进行评估计算。各研究区 D 值和震害正态分布值如表 2 所列。

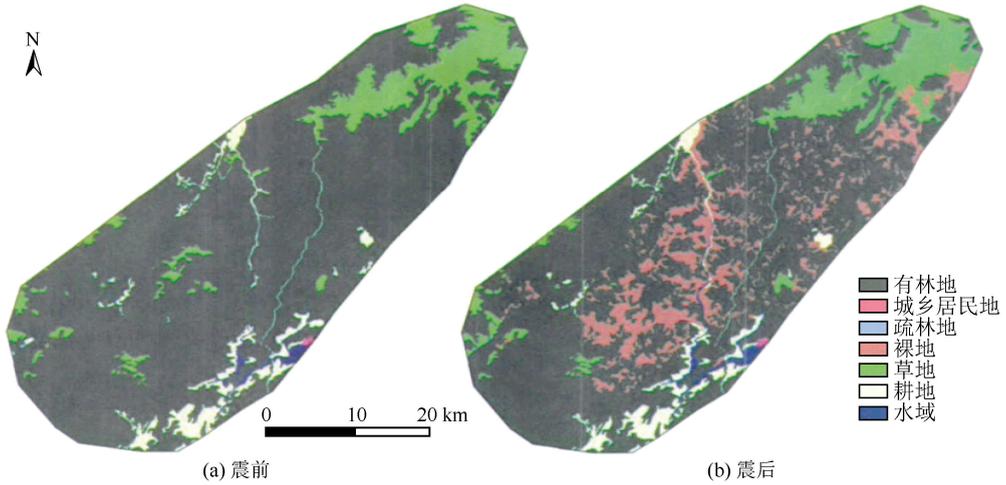


图 2 汶川县地震灾区景观带地震前后变化情况

Fig.2 Variation of landscape belt in Wenchuan county before and after the earthquake

表 1 景观带格局指标变化特征

Table 1 Variation characteristics of landscape pattern index

景观带	景观破碎度/%		景观匀称性/%		损毁程度	损毁率/%
	震前	震后	震前	震后		
有林地	94.40	81.05	0.38	0.54	轻微损毁	1.13%
疏林地	94.42	82.21	0.37	0.55	轻微损毁	2.10%
草地	95.62	72.02	0.36	0.48	中度损毁	23.85%
水域	94.01	80.56	0.38	0.54	轻微损毁	1.52%
城乡居民地	94.88	50.99	0.38	0.32	重度损毁	73.18%
裸地	94.53	52.22	0.36	0.34	重度损毁	88.13%
耕地	94.63	72.35	0.36	0.48	中度损毁	27.99%



图 3 汶川县地震空间分布及研究区示意图

Fig.3 Spatial distribution of earthquakes in Wenchuan County and schematic diagram of the study area

表2 各研究区 D 值和震害正态分布值Table 2 D value and normal distribution value of earthquake damage for each study area

研究区	D 值	震害正态分布值
A1	1.60	1.15
A2	1.24	0.82
A3	1.58	1.13
A4	1.47	1.06
A5	1.38	0.97
A6	1.32	0.95
A7	1.50	1.09
A8	1.42	1.00
A9	1.46	1.04
A10	1.28	0.83

根据表2可知,在A1、A3、A4、A7、A8、A9研究区内 D 值较大。通过比较各研究区的震害正态分布值,最大的震害正态分布值出现在A1区,为1.15,说明了A1区景观带损毁程度较为严重;最小的震害正态分布值出现在A2区,为0.82,这说明了A2研究区景观带损毁程度较差, D 值越大,震害正态分布值越大。

为探讨空间自相关程度与震害正态分布值和 D 值之间的关系,对比震害正态分布曲线和空间自相关程度,对比结果如图4所示。

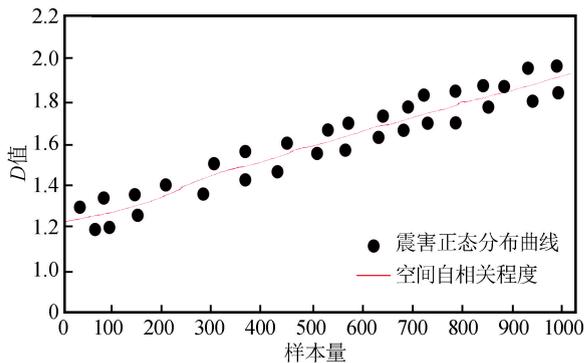


图4 三种指标间的关系

Fig.4 Relationship among three indexes

随着 D 值的增长,震害正态分布曲线逐渐上升,而毁损的规则建筑空间自相关程度随着震害正态分布曲线的增长而增长。说明三者呈正相关性,分形维数越大,震害正态分布曲线越明显,则毁损的规则建筑空间自相关程度就越高。

3 结束语

景观带损毁程度是地震灾情评估的重要内容,对于灾后重建和救助提供了较大的帮助,因此本文基于震灾图像维度分析下对景观带损毁程度的评估进行探讨。采用分数维提取规则建筑震灾图像维度

特征,构建规则建筑毁损程度评估模型,以汶川县为基础,对汶川县地震灾区景观带格局指标变化特征进行探讨;并对分形维数、震害正态分布曲线和规则建筑空间自相关程度的关系进行了探讨,验证本文方法具有一定的可行性,值得更进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 刘科元,李海滨.地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J].计算机仿真,2017,34(1):423-426.
LIU Keyuan, LI Haibin. Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake [J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 423-426.
- [2] 张豫翔,吴明功,李野,等.航空加权网络抗毁性综合评估方法[J].火力与指挥控制,2017,42(1):154-158.
ZHANG Yuxiang, WU Mingong, LI Ye, et al. Comprehensive Evaluation Method for Airline Weighted Network Survivability [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(1): 154-158.
- [3] 陈启浩,聂宇靓,李林林,等.极化分解后多纹理特征的建筑物损毁评估[J].遥感学报,2017,21(6):955-965.
CHEN Qihao, NIE Yuliang, LI Linlin, et al. Buildings Damage Assessment Using Texture Features of Polarization Decomposition Components [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 955-965.
- [4] 闫秋实,杜修力.典型地铁站柱在爆炸荷载作用下损伤评估方法研究[J].振动与冲击,2017,36(1):1-7.
YAN Qiushi, DU Xiuli. Damage Evaluation for a Column of a Typical Subway Station Subjected to Internal Blast Loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 1-7.
- [5] 王树和,张举兵.基于地震损失风险钢筋混凝土框架结构弯矩增大系数评估[J].工程力学,2018,35(3):132-140.
WANG Shuhe, ZHANG Jubing. Evaluation of Moment Magnifying Coefficients of Rc Structures Based on the Seismic Risk Assessment Method [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 132-140.
- [6] 史华.基于复杂网络的建筑物强震下抗毁性估计模型[J].地震工程学报,2017,39(6):1024-1028.
SHI Hua. Invulnerability Estimation Model of Buildings with Complex Networks under Strong Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1024-1028.
- [7] 胡良明,陈海生,孙宝成,等.缝对混凝土高拱坝的地震影响分析[J].人民黄河,2017,39(11):128-131.
HU Liangming, CHEN Haisheng, SUN Baocheng, et al. Analysis of the Impact of High Concrete Arch Dam on Parting [J]. Yellow River, 2017, 39(11): 128-131.
- [8] 张健,潘文,宋志刚,等.基于烈度差的城市建筑地震易损性评估[J].地震工程与工程振动,2017,37(4):77-84.
ZHANG Jian, PAN Wen, SONG Zhigang, et al. An Assessment of Seismic Vulnerability of Urban Structures Based on the Intensity Gap [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 77-84.

- [9] 张鹏,王艺环,秦国晋.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.
ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin. Non-probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline under Non-random Process Earthquake Excitation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 134-141.
- [10] 林季桦,林永峻,谭义绩,等.地震灾害损失评估方法及其应用研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2017,39(4):373-380.
LIN Jihua, LIN Yongjun, TAN Yiji, et al. Research on Earthquake Loss Estimation Approach and Its Application[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering), 2017, 39(4): 373-380.
- [11] 李清,薛耀东,王永花,等.大底盘双塔结构层间隔震技术的抗震性能分析[J].科学技术与工程,2017,17(1):85-91,114.
LI Qing, XUE Yaodong, WANG Yonghua, et al. Seismic Performance Analysis of Story Isolated Twin Tower Structure with Large Base[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 85-91, 114.
- [12] 董伟,刘智,姜慧,等.基于短距离应急通信技术的地震灾情采集技术研究是实现[J].华南地震,2018,38(3):31-38.
DONG Wei, LIU Zhi, JIANG Hui, et al. Earthquake Disaster Data Collection Technology Based on Short-distance Emergency Communication Intelligent Technology[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(3): 31-38.

(上接第 1279 页)

- [11] 李强,张景发,焦其松.北川地震遗址震害建筑物遥感数字化保存与震害特征[J].科学技术与工程,2017,17(18):159-167.
LI Qiang, ZHANG Jingfa, JIAO Qisong. Seismic Damage Characteristics and Digital Preservation of Remote Sensing Image of Beichuan Earthquake Site[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 159-167.
- [12] 娄亚龙,刘永,李向阳,等.某铀尾矿库地震和渗流耦合作用下稳定性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):79-83.
LOU Yalong, LIU Yong, LI Xiangyang, et al. Study on Stability of a Certain Uranium Tailings under Coupling Effect of Earthquake and Seepage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(5): 79-83.