

饶力. 遗址建筑结构在不同地震作用下安全性能分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1493-1498. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1493

RAO Li. Safety Performance of Building Structures in Relic Parks under Different Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1493-1498. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1493

# 遗址建筑结构在不同地震作用下安全性能分析

饶力

(宜春学院土木工程系, 江西 宜春 336000)

**摘要:** 以往通过专家经验判断遗址公园建筑结构地震安全性时存在一定误差, 可信性低, 因此提出新的遗址公园建筑结构的地震安全性鉴定方法。构建材料本构模型, 判断遗址公园建筑结构损伤情况; 使用局部损伤指数评价模型, 计算遗址公园建筑结构局部损伤指数; 通过局部损伤指数获取遗址公园建筑整体结构损伤指数, 以此为依据判断遗址公园建筑结构地震安全性。以古罗马遗址公园建筑结构为例, 进行地震安全性分析。结果显示, 当地震波幅值达到 800 gal 时, 该遗址公园建筑结构地震安全性最差, 损坏程度为高度损坏, 且此方法的分析结果精度极高, 可信性强。

**关键词:** 遗址公园; 建筑; 结构; 地震; 安全性; 损伤指数

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1493-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1493

## Safety Performance of Building Structures in Relic Parks under Different Earthquakes

RAO Li

(Department of Civil Engineering, Yichun University, Yichun 336000, Jiangxi, China)

**Abstract:** Expert experience indicates that there are certain errors and generally low credibility in the assessments of the seismic safety of building structures in relic parks. To address this issue, we propose a new seismic safety assessment method for building structures in relic parks. We constructed a material constitutive model to determine the structural damage that would occur in a relic park, and obtained a local damage index of the structure using the local damage index evaluation model. Then, we calculated an overall structural damage index for buildings in relic parks based on the local damage index. Taking as an example the architectural structure of the ancient Roman ruins park, we performed a seismic safety analysis. The results showed that when the amplitude of the seismic wave reached 800 gal, the seismic safety of this park was poorest, and the degree of damage was high. The analysis results of the proposed method were highly accurate and reliable.

**Keywords:** relic park; building; structure; earthquake; safety; damage index

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11201411)

第一作者简介: 饶力(1983-), 女(土家族), 湖北来凤县人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 高层建筑结构、抗震分析、装配式结构、绿色节能建筑等的研究。E-mail: raoli4375@126.com。

## 0 引言

地震安全性可理解为建筑工程在遭受地震灾害后,其主体结构和自身内部结构的破坏对人们生命安全威胁情况。该领域的专家与学者提出“性能水平”这一指标,用以分析建筑工程的抗震安全性,因此建筑物性能水平判定成为评价建筑物抗震性能的核心目标。利用性能水平分析建筑结构与非结构部分损坏时,还需分析当建筑结构达到固定破坏条件时引起的建筑安全、社会影响和经济损失等不良结果。以某种角度来说,建筑结构安全性判断是构建在统计学基础之上,对建筑安全信息进行数据分析与统计,并从现实施工设计和施工水平以及目前所在区域经济情况等多个角度进行整体分析。

文献[1]提出钢筋混凝土压弯构件受力性能数值模拟方法,分析地震影响下钢筋混凝土压弯部分受力情况,根据受力情况评价建筑地震安全性,但其计算过程不可控因素过多,且主观性较强,导致后期地震安全性评估结果可信性差;文献[2]主要围绕基于GIS的工程场地地震安全性分析系统进行深入研究,虽然该系统可对海量建筑数据进行分析,但在实际应用中还需进一步验证其实用性;文献[3]以研究地震作用设计参数为主,分析不同参数下框架结构的地震安全性,但仅针对框架结构建筑进行研究,其研究结果存在局限性。除上述几种文献之外,对遗址公园建筑结构地震安全性分析相关研究少之又少,为数不多的研究均是建立在专家经验判断的基础上,其主观性强,可信性与准确性较差,因此本文对此进行深入研究,提出新的遗址公园建筑结构的地震安全性鉴定方法,为地震灾害研究与遗址公园保护领域提供借鉴资料。

## 1 遗址公园建筑结构的地震安全性鉴定

### 1.1 材料本构模型

在先验知识的基础上,本文所构建的遗址公园建筑结构材料本构模型为:

$$D_{\text{model}} = \frac{G \cdot D_a}{D} \quad (1)$$

式中: $G$ 为通过压应变 $\beta$ 导致的遗址公园建筑结构细观区域损伤; $D_a$ 为将地震后由微小柱体(细观区域)损坏引起的建筑结构退出工作的面积; $D$ 为遗址公园建筑结构横截面面积。

当震后遗址公园建筑结构遭到损坏时,在外界压应力 $k$ 影响下会出现宏观压应变,按照宏观单元体压力方向的平衡准则分析,则有:

$$k = A_0 \beta (1 - G) \quad (2)$$

式中: $A_0$ 为遗址公园建筑结构初始弹性模量。

根据该模型计算细观区域损伤数值可有效判断地震后遗址公园建筑结构力学特征,从而获取遗址公园建筑结构损伤情况<sup>[4-5]</sup>。

### 1.2 局部损伤指数评价模型

现在使用较多的损伤模型是基于应力等效的损伤计算模型。该模型只分析了弹性应变,未分析遗址公园建筑结构中混凝土塑性。针对此问题,本文对遗址公园建筑结构中混凝土塑性进行分析<sup>[6]</sup>。

遗址公园建筑结构细观区域损伤 $G$ 中的损伤因子 $a$ 与弹性模量关系是:

$$G(a) = 1 - A_d^{\text{el}} / A_0 \quad (3)$$

式中:遗址公园建筑结构损伤后弹模为 $A_d^{\text{el}}$ 。

因此遗址公园建筑结构应力和弹性应变 $\beta^{\text{el}}$ 的关系是:

$$b = A_d^{\text{el}} \beta^{\text{el}} = (1 - a) A_0 \beta^{\text{el}} \quad (4)$$

地震后遗址公园建筑结构混凝土应变在抗拉强度中属于线性弹性,则混凝土结构应力应变曲线为:

$$\begin{cases} b = A_0 \beta & \beta \leq \beta_0 \\ b = \frac{A_0 \cdot \beta \cdot \beta_0}{c_t \cdot \beta_0 \cdot (\beta / \beta_0 - 1) 1.7 + \beta} & \beta > \beta_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:建筑结构弹性极限时的应变为 $\beta_0$ ;  $c_t$ 表示降低曲线参数,通过线性弹性与应力应变关系准则设定其数值<sup>[7-8]</sup>,与其对应的基于能量等效的损伤演化方程表示为:

$$M = 1 - a - \sqrt{\frac{\beta_0}{c_t \cdot \beta_0 \cdot (\beta / \beta_0 - 1) 1.7 + \beta}} \quad (6)$$

如果地震后损伤的遗址公园建筑结构损伤因子 $a$ 数值不小于0.75,则遗址公园建筑结果存在宏观裂缝<sup>[9]</sup>。

按照式(4)~(6)可知地震后遗址公园建筑结构弹性应变 $\beta^{\text{el}}$ 和塑性应变 $\beta^{\text{pl}}$ 表示为:

$$\begin{cases} \beta^{\text{el}} = \sqrt{\frac{\beta_0}{c_t \cdot \beta_0 \cdot (\beta / \beta_0 - 1) 1.7 + \beta}} = (1 - a) \beta \\ \beta^{\text{pl}} = \beta - \beta^{\text{el}} \end{cases} \quad (7)$$

损伤因子和损伤范畴能够表示遗址公园建筑结构在地震作用下刚度退化情况<sup>[10]</sup>。顾及到遗址公园建筑结构划分的范围与其局部损伤指数存在较大关联,但又没有统一区域划分规范,本文针对建筑一部分的损伤成片范围,因此对每个单元损伤因子实行加权平均的方式获取各个损伤范围损伤指数 $E_G$ :

$$E_G = c_G \frac{\sum f_{Gj} z_{Gj}}{\sum z_{Gj}} \quad (8)$$

式中: 遗址公园建筑结构在地震作用下, 损伤区域  $G$  中  $j$  个单元损伤因子设为  $f_{Gj}$ ; 损伤区域  $G$  中  $j$  个单元的单元面积设为  $z_{Gj}$ ; 损伤区域  $G$  权重系数设为  $c_G$ , 其中权重系数  $c_G$  计算方法是:

$$c_G = c_G^1 \times c_G^2 \quad (9)$$

式中: 遗址公园建筑结构在地震作用下, 损伤区域  $G$  中裂缝开始方位的干扰系数为  $c_G^1$ ;  $c_G^2$  表示损伤区域  $G$  中裂缝停止方位的干扰系数。

### 1.3 整体结构安全性鉴定

基于上小节计算的遗址公园建筑结构详细构件损伤指数, 能够计算出遗址公园建筑整体结构损伤指数, 最终判断遗址公园建筑结构损伤等级, 完成遗址公园建筑结构地震安全性分析<sup>[11-13]</sup>。

针对遗址公园建筑结构的构件损伤指标的加权组合方法是: 将遗址公园建筑结构每个构件损伤指数与其相应的加权系数相乘, 并实行加权平均, 以此获取遗址公园建筑整体损伤指标<sup>[14-16]</sup>。遗址公园建筑整体损伤指数是:

$$E = \sum_j^n c_G E_G \quad (10)$$

地震后, 加权系数在进行遗址公园建筑整体结构安全性鉴定过程中也同样重要, 使用加权平均法把每个构件损伤指数融合为遗址公园建筑结构整体的损伤指数<sup>[17-19]</sup>, 则有:

$$c_o = \frac{E_G}{\sum E_G} \quad (11)$$

式中:  $c_o$  为遗址公园建筑结构整体损伤系数。

基于上述计算获取遗址公园建筑结构整体损伤指数, 便可以分析出遗址公园建筑结构地震安全性<sup>[20-21]</sup>。分析准则如表 1 所列。

表 1 基于损伤指数的损伤等级判断准则

Table 1 Damage level judgement criterion based on damage index

基本完整	轻度损坏	中度损坏	高度损坏	坍塌
0~0.21	0.21~0.41	0.41~0.61	0.61~0.91	>0.91

## 2 应用分析

为了验证本文方法的实际应用效果, 对古罗马遗址公园建筑结构在地震灾害中的安全性进行分析 (数据来源为: <http://www.turismoroma.it/>)。古罗马斗兽场始建于公元 72—80 年, 是古罗马文明的象征。古罗马遗址公园从外观上看呈现正圆形; 俯

瞰时为椭圆形, 其占地面积约 2 万  $m^2$ , 长轴约为 188 m, 短轴约为 156 m, 圆周长约为 527 m, 围墙高约 57 m, 其建筑结构属于四层混凝土框架结构 (图 1)。



图 1 古罗马遗址公园建筑结构

Fig.1 Architectural structure of the ancient Roman relic park

首先设定该遗址公园建筑结构损伤信息 8 种调查方式, 详情如表 2 所列。

表 2 该遗址公园建筑结构损伤信息 8 种调查方式

Table 2 Eight investigation methods of structural damage information of the relic park

编码	详情
方式 1	分析该遗址公园建筑全部构件损伤
方式 2	单独分析该遗址公园建筑柱
方式 3	分析该遗址公园建筑首层核心构件损伤以及前百分之五十损伤较严重的构件
方式 4	分析该遗址公园建筑首层核心构件损伤以及前百分之二十五损伤较严重的构件
方式 5	分析该遗址公园建筑结构中第四层损伤情况
方式 6	分析该遗址公园建筑结构第三层损伤情况
方式 7	分析该遗址公园建筑结构第二层损伤情况
方式 8	分析该遗址公园建筑结构首层损伤情况

采用上述 8 种方式分析该遗址公园建筑结构损伤信息, 并利用 SUPER-ETABS 软件所构建的建筑模型输入, 在不同地震波幅值情况下模拟测试遗址公园建筑结构损伤指数, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着地震波幅值的不断提高, 该遗址公园建筑结构损伤指数也逐渐增大。将图 2 中的不同地震波幅值下遗址公园建筑结构损伤指数进行平均计算, 以此直观分析遗址公园建筑结构损伤情况, 计算结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 当地震波处于 200~1 000 gal 之间时, 该遗址公园建筑结构损伤指数均值处于 [0.068, 0.855] 之间, 将该组数值用于地震安全性分析中, 通过表 1 则可得表 3 的遗址公园建筑结构的地震安全性分析结果。

由表 3 可知, 随着该遗址公园建筑结构随着地震波幅值的不断增加, 损伤指数、损伤程度也逐渐加

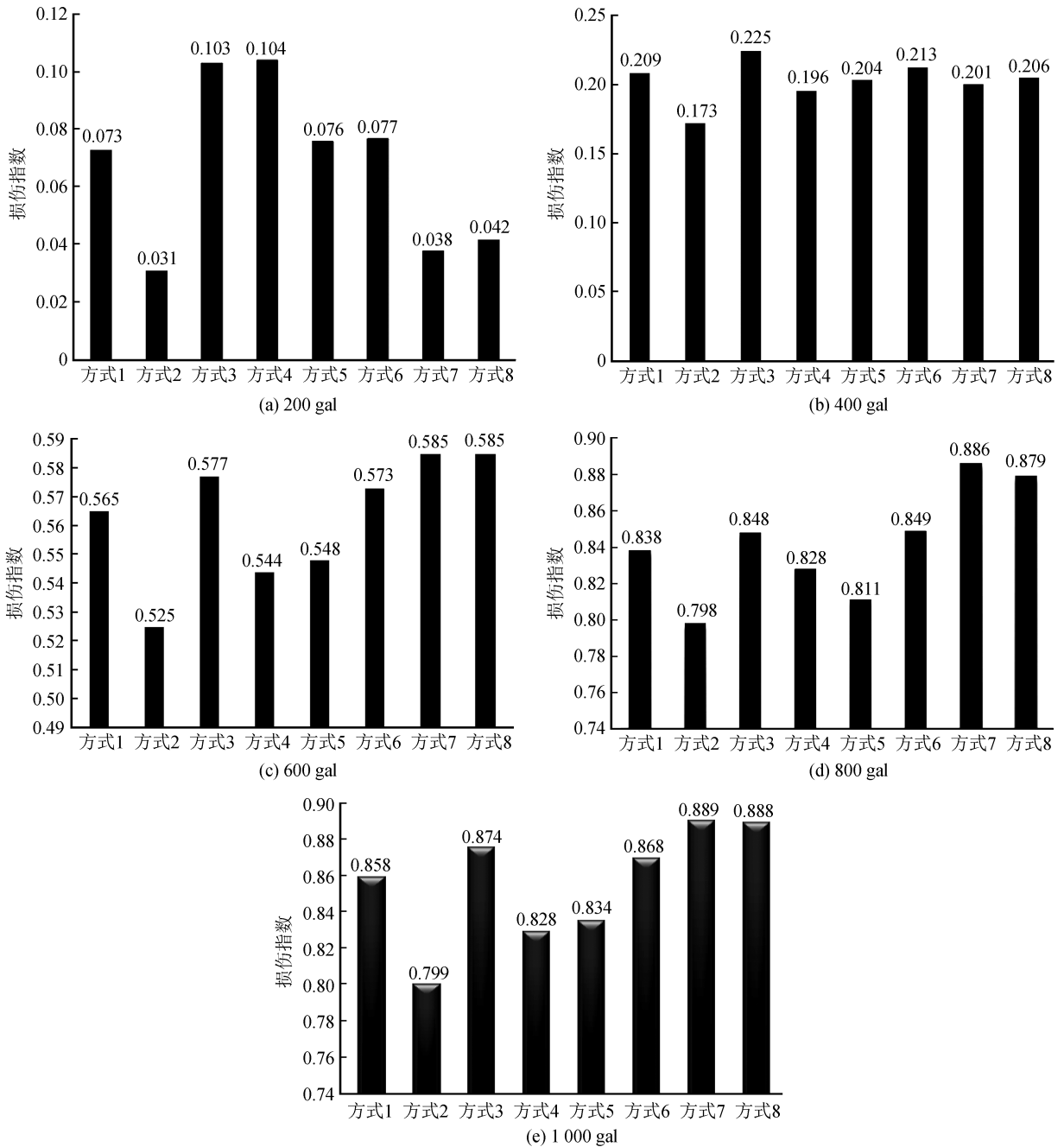


图2 不同地震波幅值下古罗马遗址公园建筑结构损伤指数计算结果

Fig.2 Calculation results of the structural damage indexes of the ancient Roman relic park under different amplitudes of seismic wave

大,当地震波幅值达到 800 gal 时,该遗址公园建筑结构地震安全性最差,损伤程度达到高度损坏。

为判断本文方法分析结果可信性,以置信度为判断指标,判断结果如图 4 所示。

通过图 4 可知,在不同地震波幅值测试下,本文方法对该遗址公园建筑结构的抗震安全性分析结果的置信度一直大于 0.94,其中最大值为 0.97,说明本文方法的分析结果可信度极高,从侧面说明了分析

结果的准确性较高。

### 3 结论

本文针对地震后遗址公园建筑结构安全性进行深入探讨,并提出遗址公园建筑结构地震安全性鉴定方法,并将其应用于四层结构的古罗马遗址公园结构地震安全性分析实验中。经验证,地震波幅值达到 800 gal 时,该遗址公园建筑结构地震安全性最



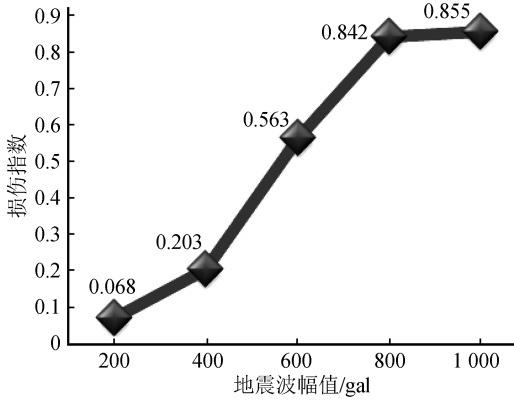


图 3 不同地震波幅值下遗址公园建筑结构损伤指数平均值

Fig.3 Average value of the structural damage index of the ancient Roman relic park under different amplitudes of seismic wave

表 3 遗址公园建筑结构的抗震安全性分析结果

Table 3 Seismic safety analysis results of the building structure of the site park

地震波幅值/gal	损伤指数	损伤程度
200	0.068	基本完整
400	0.203	基本完整
600	0.563	中度损坏
800	0.842	高度损坏
1 000	0.855	高度损坏

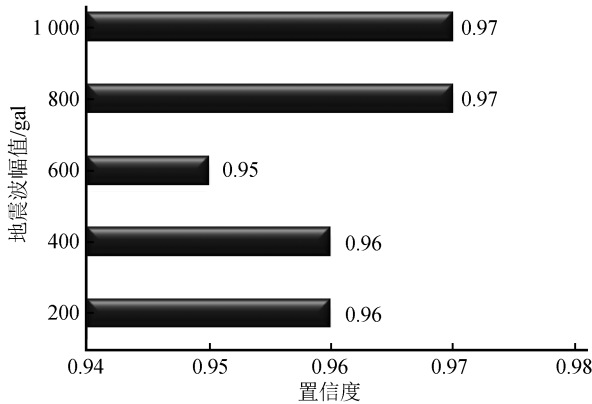


图 4 本文方法分析结果置信度判断结果

Fig.4 Confidence judgment results of the analysis results of this method

差,且本文方法分析结果置信度高达 0.97,可信性较高。

围绕本文所研究内容,本文认为在未来遗址公园建筑结构保护中,混凝土保护层厚度设计需要在耐久性和承载性基础上进行考虑,如果需要强化其抗弯承载性能,应降低混凝土保护层厚度;如果想要优化其耐久性,应提高保护层厚度。保护层厚度

状况决定建筑开裂宽度,设定合理的混凝土保护层厚度,可避免地震后遗址公园出现异常损坏情况,提高遗址公园的地震安全性,保证游客的生命财产安全。

参考文献(References)

[1] 张令心,徐梓洋,刘洁平.型钢混凝土压弯构件受力性能数值模拟及影响参数分析[J].地震工程与工程振动,2017,37(2):47-55.  
ZHANG Lingxin, XU Ziyang, LIU Jieping. Numerical Simulation and Influence Paramter Analysis for the Performance of SRC Compression-bending Members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2):47-55.

[2] 赵俊兰,王磊.基于 GIS 的工程场地地震安全性分析系统数据库的设计与实现[J].建筑技术,2017,48(7):755-757.  
ZHAO Junlan, WANG Lei. Database Design and Implementation for Seismic Safety Evaluation of Engineering Sitesbased on Gis[J]. Architecture Technology, 2017, 48(7):755-757.

[3] 卢啸,陆新征,李梦珂,等.地震作用设计参数调整对框架结构抗震设计及安全性的影响[J].工程力学,2017,34(4):22-31.  
LU Xiao, LUXinzheng, LI Mengke, et al. Influence of Seismic Action Adjustments on Seismic Design and Safety of Re Frames[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4):22-31.

[4] 姚继涛,宋璨,刘伟.结构安全性设计的广义方法[J].建筑结构学报,2017,38(10):149-156.  
YAO Jitao, SONG Can, LIU Wei. A General Method for Structural Safety Design[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10):149-156.

[5] 戴中华.一起励磁系统通道异常导致的故障分析[J].电力工程技术,2017,36(1):106-108.  
DAI Shenhua. Analysis of the Trip Caused by Abnormal Channel of Excitation System[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):106-108.

[6] 王珊,张郁山.各类抗震设计规范对设计地震动时程规定的对比分析[J].中国地震,2017,33(1):56-67.  
WANG Shan, ZHANG Yushan. Comparison of Various Seismic Design Codes on Design Ground Motion Time History[J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(1):56-67.

[7] PANTÒ B, CALIÒ I, LOURENÇO P B. Seismic Safety Evaluation of Reinforced Concrete Masonry Infilled Frames Using Macro Modelling Approach[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(9):3871-3895.

[8] 梁建文,梁佳利,张季,等.深厚软土地中三维凹陷地形非线性地震响应分析[J].岩土工程学报,2017,39(7):1196-1205.  
LIANG Jianwen, LIANG Jiali, ZHANG Ji, et al. Nonlinear Seismic Response of 3D Canyon in Deep Soft Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7):1196-1205.

[9] KONG X J, ZHANG Y, ZOU D G, et al. Seismic Cracking Analyses of Two Types of Face Slab for Concrete-faced Rockfill

- Dams[J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(4): 510-522.
- [10] 邹德高, 韩慧超, 孔宪京, 等. 近断层脉冲型地震动作用下面板堆石坝的动力响应[J]. *水利学报*, 2017, 48(1): 78-85.  
ZOU Degao, HAN Huichao, KONG Xianjing, et al. Seismic Response of a Concrete-faced Rockfill Dam to Near-fault Pulse-like Ground Motions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(1): 78-85.
- [11] 裴兴旺, 李慧民, 孟海, 等. 既有建筑结构安全性检测过程质量脆弱性评价[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(1): 181-186.  
PEI Xingwang, LI Huimin, MENG Hai, et al. Quality Vulnerability Assessment on Safety Testing Process of Existing Building Structure[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(1): 181-186.
- [12] 张效亮, 张郁山, 吴昊. 地震动衰减关系中震中距和断层源距转换[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(1): 178-189.  
ZHANG Xiaoliang, ZHANG Yushan, WU Hao. The Relationship between the Point-source Distance and the Fault-source Distance in Ground Motion Prediction Equation[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2018, 38(1): 178-189.
- [13] 樊春雷, 郝际平, 袁昌鲁. 钢框架-钢板剪力墙结构抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(4): 213-221.  
FAN Chunlei, HAO Jiping, YUAN Changlu. Seismic Behavior of Steel Frame-steel Plate Shear Wall Structure[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2015, 35(4): 213-221.
- [14] 李国欣, 祖建锁, 宫海军, 等. 抗震性能化设计在某高层抗震加固中的应用[J]. *工程抗震与加固改造*, 2017, 39(3): 120-124, 136.  
LI Guoxin, ZU Jiansuo, GONG Haijun, et al. Application of Seismic Performance Design in a High-rise Building Seismic Strengthening[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2017, 39(3): 120-124, 136.
- [15] 成宏, 唐寿高. 钢筋混凝土结构非线性的可靠性评估[J]. *太原理工大学学报*, 2017, 48(4): 657-662.  
CHENG Hong, TANG Shouga. Reliability Evaluation of Nonlinearity for Reinforced Concrete Structures[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2017, 48(4): 657-662.
- [16] 赵根模, 吴中海, 刘杰, 等. 印度—欧亚板块碰撞变形区的大地震时空分布特征与迁移规律[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 315-317.  
ZHAO Genmo, WU Zhonghai, LIU Jie, et al. The Time Space Distribution Characteristics and Migration Law of Large Earthquakes in the Indian- Eurasian Plate Collision Deformation Area[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(3): 315-317.
- [17] 张社荣, 于茂, 王超, 等. 不同横缝状态影响下混凝土重力坝抗爆性能研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6): 509-514.  
ZHANG Sherong, YU Mao, WANG Chao, et al. Effect of Contraction Joint State on the Anti-knock Performance of Concrete Gravity Dam[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(6): 509-514.
- [18] 刘坤, 陈幼佳, 章敏. 地震条件下桥台主动土压力的合理简化计算方法[J]. *太原理工大学学报*, 2016, 47(2): 249-253.  
LIU Kun, CHEN Y. Frank, ZHANG Min. Simplified Approach for Rational Determination of Seismic Induced Earth Pressure on Abutments[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, 47(2): 249-253.
- [19] 宋勇, 张华刚, 姜岚, 等. 人字形密肋式折板壳结构地震响应分析[J]. *贵州大学学报(自然版)*, 2017, 34(6): 98-104.  
SONG Yong, ZHANG Huagang, JIANG Lan, et al. The Seismic Response Analysis of Herringbone-ribbed folded-plate Shell Structure[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2017, 34(6): 98-104.
- [20] 郑连弟, 杨江峰, 袁联生, 等. 哥伦比亚 Llanos 盆地东部油田 Carbonera 组 C5 段河道砂岩地震识别与预测[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(3): 618-621.  
ZHENG Liandi, YANG Jiangfeng, YUAN Liansheng, et al. Seismic Identification and Prediction of C5 Channel Sandstone in the Carbonera Formation, Llanos Basin, Colombia[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(3): 618-621.
- [21] 田甜, 邱文亮, 张哲. 混合桥墩抗震性能试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6): 528-534.  
TIAN Tian, QIU Wenliang, ZHANG Zhe. Experimental Study on the Seismic Behavior of Hybrid Bridge Column[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(6): 528-534.