

李玉洁,彭立顺.公共建筑结构的抗地震倒塌能力优化评估分析[J].地震工程学报,2018,40(1):20-25.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.020

LI Yujie, PENG Lishun. Optimized Evaluation Analysis of Seismic Collapse Capacity of Public Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 20-25. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.020

公共建筑结构的抗地震倒塌能力优化评估分析^①

李玉洁¹, 彭立顺²

(1. 重庆能源职业学院建筑设计与工程管理系, 重庆 402260; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以往基于模态增量动力方法对公共建筑进行抗地震倒塌能力评估时是单纯地从总体角度进行考察的,其得到的结果较为粗糙,无法准确反映出公共建筑的抗地震倒塌能力,导致其经济效益较差。提出新的公共建筑结构抗地震倒塌能力优化评估方法以分析公共建筑整体的抗地震倒塌能力,总结出其与子结构以及构件三者间的关系,进而研究构件的损毁情况,以实现对建筑抗地震倒塌能力的整体评估。基于公共建筑的倒塌破坏区间,采用其结构抗震倒塌能力评估方法,对公共建筑结构的抗地震倒塌能力实施优化评估分析,得到其具体破坏指数,实现对其进行准确评估。实验结果说明,所提方法可准确描述公共建筑结构的抗地震倒塌能力,提高建筑结构抗地震倒塌能力和经济效益。

关键词: 公共建筑; 抗地震; 倒塌能力; 优化评估; 框架柱; 位移

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)01-0020-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.020

Optimized Evaluation Analysis of Seismic Collapse Capacity of Public Buildings

LI Yujie¹, PENG Lishun²

(1. Department of Architectural Design and Engineering Management, Chongqing Energy College, Chongqing 402260, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In the past, using the modal incremental dynamic method to evaluate the seismic collapse capacity of public buildings did not accurately reflect the earthquake collapse resistance of public buildings, thus gaining poor economic benefits. In this study, a new and optimized evaluation method of determining the seismic collapse capacity of public buildings is proposed and used to analyze the overall performances of public buildings. Then, the relationship among the overall structure of public buildings, substructures, and components is summarized. The overall evaluation on the public building is fulfilled by evaluating the damage situation of components. Based on the seismic damage interval of public buildings, the optimized evaluation on seismic collapse capacity of public buildings are finished with the proposed method, and the damage indices of the seismic collapse capacity of public buildings are obtained. The experimental results indicate that

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 基金项目: 重庆能源职业学院教改项目(2015J03003); 国家档案局科技项目(2017-X-43)

作者简介: 李玉洁(1985—), 女, 山东潍坊人, 硕士, 讲师, 研究方向: 建设工程项目管理。E-mail: 417225852@qq.com。

the proposed method could exactly describe the seismic collapse capacity of public buildings, thus improving the economic benefits.

Key words: public buildings; earthquake resistance; anti-collapse capacity; optimized evaluation; frame column; displacement

0 引言

随着我国经济技术的不断发展,城市化进程发展速度加快,对大型公共建筑的抗地震倒塌能力研究已成为当今社会研究的重点^[1]。大量的历史资料表明,部分高层建筑在强烈地震的影响下容易受到严重摧毁,造成大量人员伤亡和财产损失,而一些公共建筑受损的情况较轻,抗地震倒塌能力较强。对公共建筑的抗倒塌能力实施优化,可进一步提高建筑物整体的稳定性和经济性能。过去基于模态增量动力方法对公共建筑进行抗地震倒塌能力评估时是单纯地从总体角度进行考察的,其得到的结果较为粗糙,不能真实反映出公共建筑的抗地震倒塌能力,经济效益差。本文研究一种新的公共建筑结构抗地震倒塌能力优化评估方法,以提高建筑的抗地震倒塌能力。

1 公共建筑结构的抗地震倒塌能力优化评估分析

1.1 公共建筑结构整体性能研究

针对公共建筑结构的抗倒塌能力优化评估研究的重点为建筑结构整体性能的退化规律^[2]。要定义建筑结构整体性能的退化规律,解释公共建筑抗地震倒塌机理以及规范公共建筑结构的倒塌临界状态,应着重对子结构的抗地震倒塌性能实施探究^[3],以合理定义和区分公共建筑整体结构、子结构以及构件三者之间的关系。图 1 为这三者间的损伤和破坏关系图。

分析构件与公共建筑整体结构、子结构的相互作用及关系是研究其对建筑整体性能贡献的重要指标。由于建筑整体结构受到地震影响的不确定干扰^[4],造成对建筑构件与整体结构性能研究的难度较大。若不重视构件对公共建筑整体抗地震倒塌能力的贡献,则会降低公共建筑的抗地震倒塌性能,因此构件、子结构与公共建筑整体结构的关联性分析是分析公共建筑倒塌能力的关键。

传统建筑中的子结构通常为 一根房梁、一片瓦片或一个建筑的几层楼,虽然其大小不容易确定,但其所包含构件的数量和是一定的,因此可以采取分

析构件损毁情况的方法来分析公共建筑整体结构的抗地震倒塌能力。

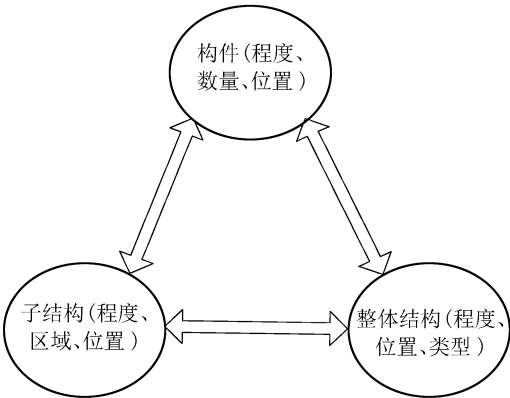


图 1 整体结构、子结构与构件三者关系示意图
Fig.1 Schematic diagram of the relationship among over-all structure,substructure,and components

1.2 公共建筑结构倒塌破坏区间

对公共建筑进行抗地震倒塌研究的首要问题是科学定义建筑物结构破坏区间,并详细地进行建筑倒塌描述。本文基于上小节获取的整体结构、子结构与构件三者关系,塑造公共建筑结构倒塌破坏区间。支撑公共建筑物的主要力量为建筑中钢架结构,当建筑物内薄弱层全部的框架柱都变为发育良好的柱端塑性铰后,建筑结构将会发生转变,可以将这种极限状态加以定义^[5],并用图 2 表示。图中的 E 点出现重力分布缺失现象,形变慢慢变大而承受力却在减少,此时该公共建筑倒塌现象不可避免,该点的塑性铰密度值 $D=1.0$ 。

若 E 点(倒塌极限点)折射出铰柱的受损程度和内力重力的特征分布,并准确规定公共建筑的临界状态^[6],则该点是建筑物结构破坏临界值,而处于该点两端的区域则是建筑物结构破坏区间。

1.3 公共建筑结构抗地震倒塌能力评估方法

本文以塑性铰密度破坏准则以及公共建筑结构倒塌破坏区间为基础,提出一种公共建筑结构抗震倒塌能力评估方法,来对倒塌破坏值的定义进行优化^[7],以分析钢筋框架结构的倒塌指数计算过程和倒塌分析流程图。以下为公共建筑抗震倒塌指数计算步骤:

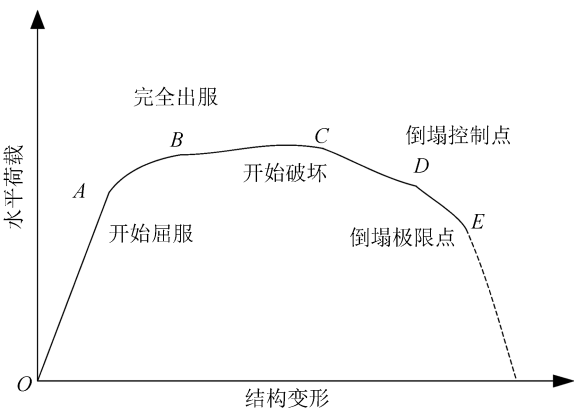


图 2 公共建筑结构倒塌图

Fig. 2 Collapse chart of public buildings

以某公共建筑的钢筋混凝土框架结构为例,用 i 表示该建筑框架的第 i 层,第 i 层的第 j 条框架柱用 ij 表示,具体的倒塌计算过程如下:

(1) 构建钢筋混凝土框架结构的有限元模型,经计算得出不同楼层不同框架柱的曲率 φ_y 和最大曲率 φ_u ;

(2) 对框架结构进行弹塑性分析^[8],计算出地震影响期间全部框架柱的瞬时形变曲率 φ_{ij} ,并给出对应柱铰的发育程度,用 d_{ij} 表示;

(3) 经计算得到公共建筑结构不同层的塑性铰密度破坏指数 D_i ,由此得到公共建筑整体的最大倒塌指数,用 $\max(D_i)$ 表示;

(4) 其中倒塌破坏指数最大的楼层呈现塑性变形较为密集的状态^[9],当塑性铰密度倒塌破坏指数的值与倒塌控制点存在 $\max(D_i) > D_{\min}$ 的关系时,说明该公共建筑可能会发生倒塌, $\max(D_i) - D_{\min}$ 的值越接近 1.0,证明该公共建筑第 i 层的倒塌概率越高。

针对公共建筑钢筋混凝土框架结构的完整倒塌分析包括构件静力分析^[10]、动力时程分析以及结构 Pushover 三部分。经量化分析得到其塑性发育程度和构件受损伤数量指标^[11],计算出在地震影响下公共建筑的倒塌破坏指数。具体的公共建筑结构抗地震倒塌能力评估流程如图 3 所示。

公共建筑框架柱中的塑性铰属于单向瞬时铰,其与地震的施加方向和时间有关,塑性铰的大小和出铰与否都是动态变化的。在量化公共建筑结构抗倒塌破坏能力时,对塑性铰的定义是在截面曲率的基础上对截面屈服后得到的塑性铰实施判定^[12],当截面曲率达到最大时其对应的塑性铰值为 1。截面曲率可以对混凝土钢筋和性能退化规律实施定义,

能准确反映剪跨比和轴压比对构件的曲率延性和塑性变形程度。融合 Opensees 程序,可以精确得到梁柱截面的变化情况和公共建筑整体法塑性形变集中分布的区域^[13],由此推断出公共建筑的退化情况。在强烈地震的影响下,公共建筑的塑性铰密度计算公式为:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^m d_{ij}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}^{(\max)}} \tag{1}$$

式中: D_i 表示公共建筑物第 i 层的倒塌破坏指数; d_{ij} 表示在地震干扰下该建筑第 i 层第 j 条框架柱的损伤指数即塑性铰发育程度; $d_{ij}^{(\max)}$ 表示第 i 层中框架柱个数为 n 、框架柱损伤指数达到要求的个数为 m 、编号为 ij 的框架柱的极限破坏指数。当某公共建筑所处状态为临近倒塌时^[14],柱铰的发育情况完善^[10],此时的倒塌破坏指数 $D_{\max} = 1$ 。从公共建筑结构倒塌的不确定性分析,将倒塌破坏指数 $D_{\min}$ 控制为 0.6 时,可以准确评估公共建筑抗倒塌能力^[15]。

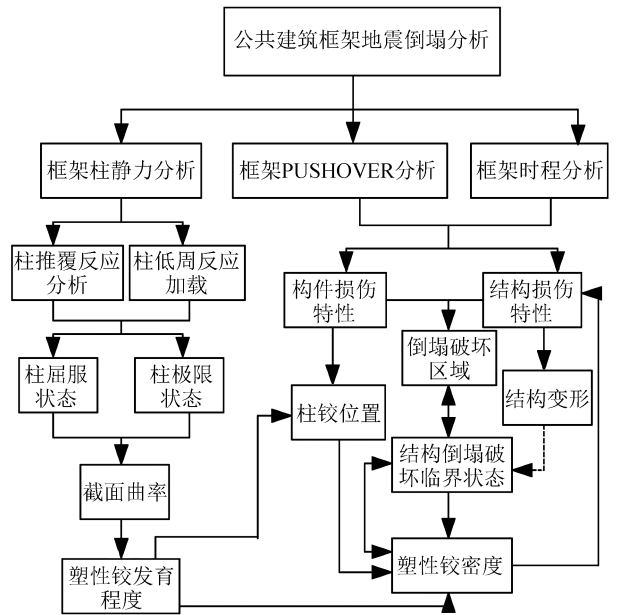


图 3 公共建筑结构抗地震倒塌能力评估流程图

Fig.3 Flow chart for evaluating the anti-collapse capacity of public buildings

2 实验分析

为检测本文提出的公共建筑结构抗地震倒塌能力优化评估方法的性能优劣,分别采用本文方法和传统基于模态增量动力的评估方法,对某市的某栋高层公共建筑进行抗震倒塌能力实证分析。图 4 为

该高层公共建筑图。



图 4 公共建筑图
Fig.4 Public building

为分析不同方法下的公共建筑结构的抗地震倒塌能力,分别对其施加不同的地震动加速度。实验施加的地震动加速度曲线用图 5 描述。从图中可以分析出,随着时间的变化实验模拟的地震动加速度也在逐渐发生变化,地震动加速度先变大后减小。施加地震后本文方法下的公共建筑物只是存在一些轻微的晃动,并未发生倒塌现象;而基于模态增量动力方法下的公共建筑晃动较明显,存在一些倒塌。说明本文方法下的公共建筑物具有较高的抗地震倒塌能力,是一种有效的建筑抗地震倒塌评估方法。

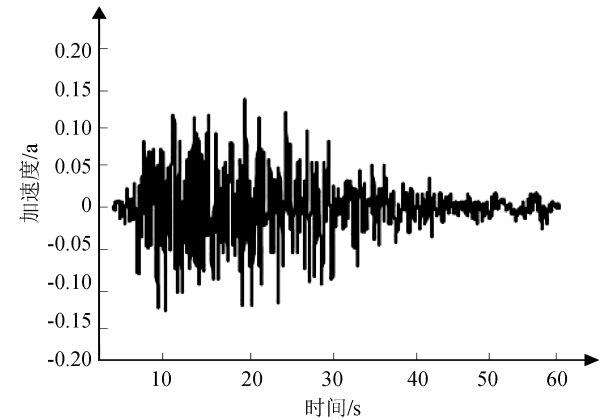


图 5 实验施加地震动加速度曲线图
Fig.5 The acceleration curve of ground motion used in the experiment

分别测量不同方法下的公共建筑顶部、底部和中部的位移变化量,实验结果见图 6。

从图 6(a)中可以看出,在一定的地震强度下,该建筑会发生一定的位移变化,但不同部位其表现不同:建筑底部几乎没有发生变化,人体也感觉不到晃动;中部的位移变化稍许强烈,但体感并无较大感觉;建筑顶部的位移变化量较底部和中部明显增大,但其值保持在 0.02 m 左右,在建筑的可承受

范围内,不会出现倒塌现象。从图 6(b)的结果可以看出,基于模态增量动力方法对公共建筑施加一定程度的地震可能会造成一些房屋的倒塌,建筑顶部、中部、底部的位移变化量出现了大幅度的变化趋势,说明此方法下的公共建筑的抗地震倒塌能力比较差。

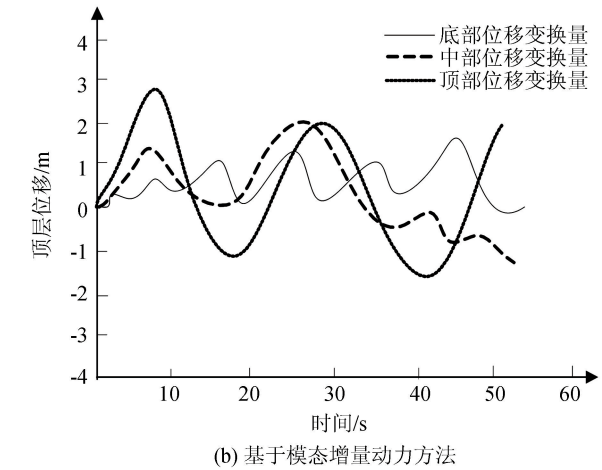
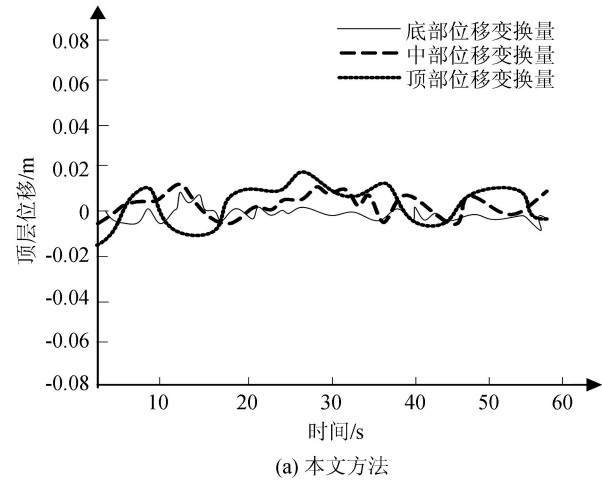


图 6 不同方法下公共建筑不同位置的位移变化量
Fig.6 Displacements in different positions of the public buildings using different methods

墙体受损程度大小可通过墙体受损面积所占百分比确定,墙体受损程度越高,代表建筑物的抗地震倒塌能力越差。在地震动加速度施加时间范围内,将本文方法下的实验公共建筑顶层位移变化较大和底部位移变化较小区域的室内墙面进行划分,分别从这两部分中选取 8 个区域进行统计。同时也从基于模态增量动力方法下的实验公共建筑的墙体中提取 8 个区域进行墙体受损统计。表 1 为本文方法下公共建筑顶层和底部区域墙体受损程度统计结果,表 2 为基于模态增量动力方法下公共建筑的顶层以及底部墙体受损统计结果。

表 1 本文方法下公共建筑顶层及底部墙体受损统计结果

Table 1 Statistical results of the damage on the top wall and bottom wall of the public building using the proposed method

实验部位	时间/s	损伤面积百分比/%							
		区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6	区域 7	区域 8
顶层墙体	10	15.6	24.5	16.5	24.2	16.7	17.5	16.2	18.9
	20	26.8	24.6	24.1	24.6	21.2	22.6	24.2	23.1
	30	27.8	24.9	24.6	24.8	27.6	23.6	24.5	24.6
	40	28.6	25.5	24.6	27.5	27.5	24.5	24.6	25.5
	50	28.9	27.6	24.8	30.1	28.6	25.5	25.6	27.9
	60	32.1	31.2	26.5	31.4	29.6	26.2	26.5	28.6
底部墙体	10	6.1	3.5	3.6	5.5	4.8	4.6	6.5	4.2
	20	6.5	4.8	4.9	6.3	5.4	6.5	7.5	4.5
	30	6.6	5.9	4.7	6.5	5.6	6.8	8.2	5.8
	40	7.6	6.6	6.2	7.2	6.6	6.8	8.2	6.4
	50	11.2	7.6	6.4	8.5	6.7	8.5	8.5	6.4
	60	11.2	8.6	7.6	8.5	7.6	9.5	8.6	6.5

表 2 基于模态增量动力方法的公共建筑顶层及底部墙体受损统计结果

Table 2 Statistical results of the damage on the top wall and bottom wall of the public building using the modal incremental dynamic method

实验部位	时间/s	损伤面积百分比/%							
		区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6	区域 7	区域 8
顶层墙体	10	80.6	84.5	86.6	84.5	83.2	85.4	85.6	86.5
	20	81.2	85.2	86.7	85.1	84.5	86.5	86.5	87.6
	30	81.6	85.6	87.5	85.6	86.2	86.8	87.6	88.3
	40	82	85.8	87.6	85.8	86.5	87.5	89.6	92.6
	50	84.5	86.2	88.2	86.2	86.7	88.6	92.5	95.6
	60	86.2	87.2	88.3	86.3	89.2	89.9	95.6	98.6
底部墙体	10	32.2	36.8	38.1	38.2	34.3	34.9	36.7	36.4
	20	35.6	38.2	39.6	34.6	36.8	33.4	39.4	32.4
	30	36.8	33.1	32.7	36.2	39.5	30.9	33.4	33.4
	40	29.5	26.9	30.7	36.2	32.4	34.7	37.4	36.8
	50	30.8	34.5	36.4	32.4	36.2	36.9	32.8	32.8
	60	29.6	26.4	27.2	36.7	30.7	37.4	39.2	31.7

对比分析表 1 和表 2 可得,本文方法下的公共建筑顶层墙体受损面积远远低于基于模态增量动力方法下的顶层墙体受损面积,而其底部墙体受损面积也低于基于模态增量动力方法下的底部墙体受损面积。说明基于模态增量动力方法下的公共建筑墙面受损状况非常严重,抗地震倒塌能力较弱。而本文方法下的公共建筑受地震影响墙面损毁较轻,抗地震倒塌能力较强,具有较高的经济效益。

3 结论

本文提出一种公共建筑结构抗地震倒塌能力优化评估方法分析公共建筑结构的整体性能,并对公共建筑的倒塌破坏区间、抗地震倒塌评估方法流程进行研究,进而对公共建筑结构的抗地震倒塌能力进行分析和评估,实验证明本文新提出的方法能增强公共建筑的抗地震倒塌能力。

参考文献(References)

[1] 伍云天,林雪斌,李英民,等.山地城市掉层框架结构抗地震倒塌能力研究[J].建筑结构学报,2014,35(10):82-89.
WU Yuntian,LIN Xuebin,LI Yingmin, et al.Seismic Collapse-resistant Capacity of Moment Frames Supported by Stepped Foundation in Mountainous City[J].Journal of Building Structures,2014,35(10):82-89.

[2] 王凯睿,徐秀丽,李雪红,等.强震作用下减隔震桥梁抗震性能试验研究[J].桥梁建设,2016,46(5):59-64.
WANG Kairui,XU Xiuli,LI Xuehong, et al. Experimental Study of Seismic Performance of Seismically Mitigated and Isolated Bridges under Strong Earthquake[J]. Bridge Construction,2016,46(5):59-64.

[3] 韩建平,张丽丽,徐阳.近断层脉冲型地震动作用下 RC 框架结构抗整体性倒塌能力分析[J].结构工程师,2017,33(1):32-42.
HAN Jianping,ZHANG Lili,XU Yang.Investigation on Global Collapse Resistant Capacity of RC Frame under Near-fault Pulse-type Ground Motions[J].Structural Engineers,2017,33

- (1):32-42.
- [4] 施炜,张磊,陆新征,等.模型参数不确定性对结构抗地震倒塌能力影响的定量估计[J].工程抗震与加固改造,2015,37(2):9-16.
- SHI Wei,ZHANG Lei,LU Xinzhenget al.Quantitative Estimation of the Effect of Model Parameter Uncertainties on the Collapse Resistance of Structures[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2015,37(2):9-16.
- [5] 刘原,冯远,蒋欢军.建筑结构平面形状对结构抗倒塌能力的影响[J].中国科技论文,2016,11(13):1445-1451.
- LIU Yuan,FENG Yuan,JIANG Huanjun.Influence of Structural Planar Shape on the Collapse Resistance[J].China Sciencepaper,2016,11(13):1445-1451.
- [6] 党王桢,梁兴文.RC框架结构地震倒塌易损性分析的实用方法[J].震灾防御技术,2015,10(4):986-995.
- DANG Wangzhen,LIANG Xingwen.The Practical Method of Collapse Fragility Analysis of RC Frame Structure[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2015,10(4):986-995.
- [7] 许文祥,黄信,任强强.基于纤维模型的单层球面网壳抗震倒塌反应分析[J].钢结构,2017,32(2):11-14.
- XU Wenxiang,HUANG Xin,REN Qiangqiang.Analysis of the Earthquake Collapse-resistance Response for Single-layer Spherical Lattice Shell Based on Fiber Model[J].Steel Construction,2017,32(2):11-14.
- [8] 潘毅,唐丽娜,王慧琴,等.芦山7.0级地震古建筑震害调查分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):140-146.
- PAN Yi,TANG Lina,WANG Huiqin,et al.Investigation and Analysis of Damage to Ancient Buildings in Lushan $M_s7.0$ Earthquake[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2014,34(1):140-146.
- [9] 齐永胜,周军文,沈炜,等.人字形中心支撑钢框架抗地震倒塌富余度研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(4):66-70.
- QI Yongsheng,ZHOU Junwen,SHEN Wei,et al.Research on Seismic Collapse Margin Ratio of Inverted-V CBSF[J].Sichuan Building Science,2016,42(4):66-70.
- [10] 赵艳兵,陈红鸟,陈嘉健.混凝土梁的断裂能及其尺寸效应的试验研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(4):100-103.
- ZHAO Yanbing,CHEN Hongniao,CHEN Jiajian.Experimental Study on Fracture Energy and Size Effect of Concrete Based on Three Point Bending Tests[J].Journal of Guizhou University(Natural Science),2016,33(4):100-103.
- [11] 王茹,戴会超,唐德善.大中型水电工程建设风险系统分析[J].水利水电技术,2016,47(9):134-138.
- WANG Ru,DAI Huichao,TANG Deshan.Systematic Analysis of Risk from Construction of Large and Medium Sized Hydropower Project[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(9):134-138.
- [12] 冯有亭,李卓,周涛.坡脚冲刷作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究[J].水利水电技术,2016,47(12):121-125.
- FENG Youting,LI Zhuo,ZHOU Tao.Model Experimental Study on Near-dam Reservoir Bank Slop Landslide Under Slope Toe Erosion[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(12):121-125.
- [13] 孙治国,司炳君,陈灿,等.山区桥梁排架抗震能力评价方法[J].振动与冲击,2015,34(18):1-6.
- SUN Zhiguo,SI Bingjun,CHEN Can,et al.Seismic Analysis Method for RC Bridge Bents in Mountain Areas[J].Journal of Vibration and Shock,2015,34(18):1-6.
- [14] 占昌宝,罗川,丁振坤,等.高层建筑抗震性能预测仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(8):397-402.
- ZHAN Changbao,LUO Chuan,DING Zhenkun,et al.Research on Seismic Performance Prediction of High-rise Buildings[J].Computer Simulation,2016,33(8):397-402.
- [15] 魏晓刚,麻凤海,刘书贤.爆破开采对采空区地面建筑抗震性能的影响分析[J].中国安全科学学报,2015,25(9):102-108.
- WEI Xiaogang,MA Fenghai,LIU Shuxian.Analysis of Impact of Blasting Mining on Seismic Performance of Ground Buildings in Coal Mining Area[J].China Safety Science Journal,2015,25(9):102-108.