

张建云,王亮.钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1155-1160.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1155

ZHANG Jianyun,WANG Liang.A Prediction Method for the Survival Probability of Reinforced Concrete Frame Structures after an Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1155-1160.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1155

钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法研究

张建云¹,王 亮²

(1. 宁夏建设职业技术学院, 宁夏 银川 750021; 2. 中国矿业大学银川学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对当前钢筋混凝土震后存活预测相关方法存在预测值与实际值拟合度低的问题,提出基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法。利用混凝土本构模型关联数值和钢筋本构模型数值计算,实现钢筋混凝土框架材料本构模型关联数值分析。结合建筑和结构施工图实现钢筋混凝土有限元模拟,将钢筋混凝土框架有限元模型的最大竖向荷载作为结构整体构造竖向极限承载力,并引入随机 Pushdown 方法及随机竖向 IDA 法得到钢筋混凝土框架震后可存活概率。经实验证明,将有限元应用至钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测中切实可行;预测值与实际值拟合度高于目前常用方法。所提方法的性能完善,可为该领域发展提供可借鉴的信息。

关键词: 钢筋混凝土; 可存活概率; 预测

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1155-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1155

A Prediction Method for the Survival Probability of Reinforced Concrete Frame Structures after an Earthquake

ZHANG Jianyun¹, WANG Liang²

(1. Ningxia College of Construction, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. China University of Mining and Technology Yinchuan College, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In view of the low fitting degree between actual and predicted values in the current methods of predicting the post-earthquake survival probability of reinforced concrete frame structures, a prediction method based on the finite element is proposed. Numerical analysis of the constitutive model of reinforced concrete frame materials was carried out using the correlation value of the concrete constitutive model and numerical calculation of the reinforcement constitutive model. The finite element simulation of reinforced concrete was realized by combining building and construction drawings. Maximum vertical load of the finite element model of the reinforced concrete frame was taken as the vertical ultimate bearing capacity of the whole structure. The random Pushdown method and the random vertical IDA methods were then introduced to obtain the survival probability of a reinforced concrete frame after an earthquake. Experiments showed

收稿日期: 2019-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175084)

作者简介: 张建云(1972-), 女, 宁夏银川人, 副教授, 讲师, 研究方向: 建筑工程、建筑施工技术、建筑识图与构造。

E-mail: zhangjianyun0425@163.com。

that it is feasible to apply the finite element to prediction of the survival probability of reinforced concrete frame structures after an earthquake. The fitting degree between the predicted value and the actual value is higher than in the current method. Performance of the proposed method was perfect, providing a basis for further development of this field.

Keywords: reinforced concrete; survival probability; prediction

0 引言

地震建筑可存活概率指的是地震过后,房屋倒塌或破坏率。地震力较大时,会使底层柱子和墙体瞬间增加很大的动荷载,叠加上部的自重,当超出底层柱子和墙体的承载能力,底层墙柱会垮掉从而导致破坏,此时建筑物会形成一定程度的破坏。与建筑易损性不同之处在于,建筑可存活率即建筑生存概率,是指该建筑在地震后是否还能以整体的形式呈现,也就是说该建筑是否完全倒塌,而建筑易损性仅是在某特定区域内分析建筑结构的受力状态及表现,一般以破坏程度为评价标准。地震可存活概率评估和预测中包含直接和间接经济损失预测。实际应用表示,我国震后建筑可存活概率预测方法还有待提升^[1]。钢筋混凝土构件是房屋建筑中不可缺少的构架之一,预测震后施工中的钢筋混凝土构件可存活概率是后续建设的重点内容^[2]。为了保障地震现场建筑安全鉴定精确性和客观性,需要提出一种可靠性强的预测方法。

文献[3]考虑建筑结构与地震动的双重不确定性对建筑易损性的影响,采用人工合成地震波及拉丁超立方体抽样来考虑地震动与结构的不确定性,借助于 Open SEES 有限元平台对混凝土平面框架结构分别进行概率地震需求分析与概率能力分析,绘制混凝土框架建筑物的地震易损性曲线,并分别讨论结构高宽比及轴压比对混凝土框架结构抗震性能的影响。该方法运行过程逻辑性较强,但整体运行能耗较高。文献[4]提出基于 KPCA 和 GA-LSSVR 的惠州砖混建筑物震害易损性研究,建立了样本库以及基于 KPCA 和 GA_LSSVR 的预测模型,对无详细图纸的砖混建筑进行了震害指数预测,得到了惠州区域砖混建筑物的震害易损性矩阵。该预测模型利用 KPCA 对建筑物震害影响因素进行特征提取,并用 LSSVR 来对建筑物震害指数进行回归预测,利用 GA 对 LSSVR 中的相关参数进行寻优。该方法运行过程简单,因未考虑建筑物可存活概率的问题,存在预测值与实际值拟合度较低的问题。

以上文献仅针对震后钢筋混凝土易损性、抗毁

性进行了分析,对建筑物可存活概率考虑不全,基于此,提出基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法。本文将在传统方法的基础上引入随机 Pushdown 方法及随机竖向 IDA 法得到钢筋混凝土框架震后可存活概率,分析建筑抗倒塌能力,提高了倒塌参数灵敏度,使建筑结构可存活概率计算精度得以保证。

1 钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测

1.1 钢筋混凝土构件有限元模拟

依据钢筋混凝土结构,利用 OpenSees 构建该结构有限元模型。

(1) 材料本构模型关联数值解析

混凝土本构模型关联数值计算基于混凝土设计相关机制,混凝土轴心抗压强度的标准数值和均值间关系可表示为:

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{(1 - 1.65\delta_c)} \quad (1)$$

式中: f_{cm} 代表混凝土轴心抗压强度的均值; f_{ck} 代表标准数值; δ_c 代表变异系数,针对 C25 混凝土选择 0.16。混凝土的梁和柱都选择 C25。

假设 E_c 代表混凝土弹性模量,其和立方体抗压强度的设计值间存在如下关系:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu,k}} \quad (2)$$

其中: $f_{cu,k}$ 代表立方体抗压强度的设计值, $f_{cu,k} = 0.75f_{cm}$ 。

假设混凝土立方体的抗压强度数值是均值 $f_{cu,m}$,则混凝土弹性模量均值可表示为:

$$E_{cm} = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu,m}} E_c \quad (3)$$

钢筋本构模型数值计算依据钢筋生产质量检测需求,其抗拉强度需要具备 97.8% 的保障率,那么钢筋屈服强度的标准数值与均值间关联可表示为:

$$f_{ym} = \frac{f_{yk}}{(1 - 1.96\delta_c)} E_{cm} \quad (4)$$

其中: f_{ym} 代表钢筋屈服强度的均值; f_{yk} 代表标准数值。由于钢筋弹性模量变异系数比较小,因此直

接选取混凝土结构设计有关规范中钢筋弹性模量当作钢筋弹性模量均值^[5-7]。

(2) 钢筋混凝土有限元模拟

钢筋混凝土有限元模型构建过程中的各种材料选用的本构模型与恢复力模型为典型钢筋混凝土结构和单榀框架。其中,针对横跨方向上的构件框架梁,因每一根横梁上的支座配筋和跨中截面上的配筋大不相同,由此在模拟时应该划分成三段并分别进行模拟。将一榀框架当作对象举例说明,构件框架如图 1 所示。在横跨方向上无洞口填充墙,采用的是等效斜撑模型予以模拟构建,如图 2 所示。

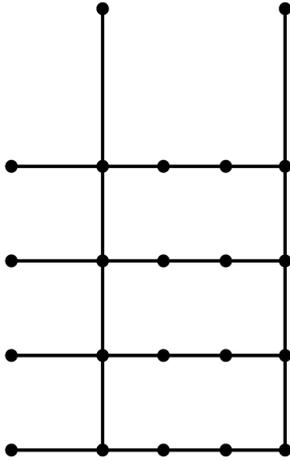


图 1 模型框架

Fig.1 Model framework

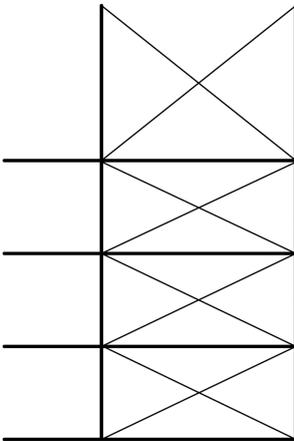


图 2 框架填充墙

Fig.2 Frame infill wall

综上,钢筋混凝土整体框架经 OpenSees 构建的有限元模型如图 3 所示。

基于建筑和结构施工图实现钢筋混凝土有限元模拟。利用有限元构建钢筋混凝土框架具备的灵活性,以更好地适应框架震后可存活概率预测,增强了

预测过程的灵活性,也就减少了预测耗时,进而降低预测能耗^[8-9]。其最大竖向荷载计算公式如下:

$$\sigma_c = \begin{cases} zC\sigma_s - z\bar{M}\sigma_s, & 0 \leq z \leq \xi \\ \sigma_s + (zC - 1)\eta\sigma_s - z\bar{M}\sigma_s, & \xi \leq z \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: C 表示截面弯曲曲率比; σ_s 表示材料初始屈服应力; \bar{M} 表示弯矩与曲率比的关系; η 表示强化系数; z 表示震后截面残余应力分布方向。

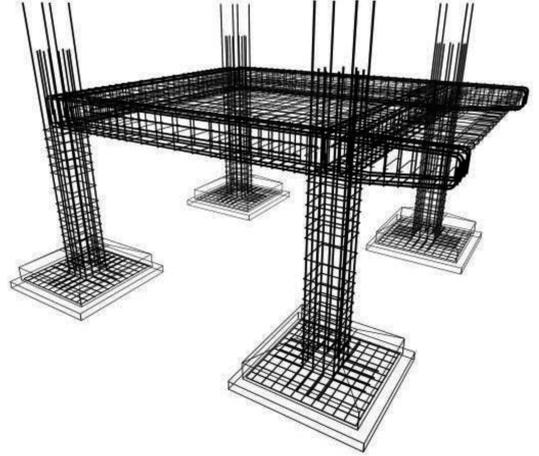


图 3 钢筋混凝土整体框架有限元模型

Fig.3 Finite element model of reinforced concrete frame

1.2 钢筋混凝土框架震后可存活概率预测

将钢筋混凝土整体框架有限元模型的最大竖向荷载当作结构整体垂直方向极限承载性能,框架在竖向的荷载下整体竖向承载极限状态可利用式(6)方程表示:

$$Z_u = \sigma_c g(V_u, DL, LL) = V_u - DL - LL \quad (6)$$

式中: V_u 代表钢筋混凝土整体框架有限元模型完好时的竖向承载能力; DL 代表钢筋混凝土框架恒荷载值; LL 代表框架活荷载值。

经上述计算,将损伤部分最大的竖向荷载当作框架整体上的竖向极限承载性能,那么损伤框架在垂直方向荷载下连续倒塌极限能力可利用式(7)表示:

$$Z_r = g(V_r, DL, LL) = V_r - DL - LL \quad (7)$$

式中: V_r 代表损伤框架垂直方向上的承载力。

框架倒塌性能的研究,要求对结构各层的典型竖向支撑构件进行地震倒塌率的计算,框架结构的倒塌率越低,证明其抗连续倒塌的能力越强,建筑可存活概率越高。倒塌率 p_c 可表示为:

$$p_c = n_c / n \quad (8)$$

式中: n_c 表示发生连续倒塌的工况数量; n 表示框架构建总工况数量。

采用随机 Pushdown 方法对结构进行静力抗倒塌能力分析,得到竖向随机 Pushdown 曲线。在进行竖向 Pushdown 分析时采用位移控制,随着节点竖向位移的增加,荷载系数增加,在达到第一个峰值后由下降过程,体现了结构的整体连续性倒塌能力,主要由框架的梁端受弯承载力提供。影响结构竖向承载力的因素主要为钢筋屈服强度 f_y 和混凝土容重 γ ,在进行竖向抗倒塌承载能力分析时结构荷载的影响不可忽视。

在钢筋混凝土框架整体竖向连续倒塌分析过程中,出于对框架不确定因素的考虑,将屈服强度 f_y 和混凝土容重 γ 当作强度参数 IM ,通过竖向倒塌易损性研究钢筋混凝土框架倒塌性能。

在此,引入随机 Pushdown 方法及随机竖向增量动力分析 (IDA 法) 分析钢筋混凝土框架震后可存活概率,进行完好和损坏结构竖向连续倒塌能力概率分析及参数灵敏度分析。

基于频率的统计方法获得结构倒塌的失效概率:

$$P(IM) = 1 - p_c f_y \gamma \frac{N_{X',c}}{N_{X'}} \cdot Z_u \cdot Z_r \quad (9)$$

式中: $N_{X',c}$ 代表钢筋混凝土框架倒塌数量; $N_{X'}$ 代表框架样本的总体数量。钢筋混凝土框架相关函数能够理解成框架抗倒塌性能概率模型,基于结构倒塌失效概率的计算可有效提高概率模型的拟合度,为确保获取数值精确地描述建筑可存活概率模型,本文将采用倒塌参数灵敏度分析方法,分析荷载系数影响下损伤框架竖向承载性能累积分布情况,为建筑可存活概率提供理论保障。

倒塌参数灵敏度分析具体步骤如下:

- (1) 建立结构有限元分析模型;
- (2) 确定基本随机向量 X 的统计参数和分布模型;
- (3) 采用点估计法对基本随机变量进行抽样处理,形成结构样本;
- (4) 对结构样本进行 Pushdown 分析,获取结构样本竖向极限荷载系数;
- (5) 结合荷载系数得到参数灵敏度分析模型。

经随机 Pushdown 方法及随机竖向 IDA 法能够得到框架荷载系数相关曲线。根据荷载系数相关曲线,即得到了损伤框架竖向承载性能累积分布模型。其模型表达式为:

$$F(x) = f_{ym} \left(\frac{\ln(m_c)}{\beta_c} \right) \quad (10)$$

式中: m_c 代表基于 IM 的钢筋混凝土框架可存活概率中位值; β_c 代表基于 IM 的钢筋混凝土框架可存活概率对数标准差^[10]。得到损伤框架竖向承载性能累积分布模型后,将倒塌失效概率应用至式(11)的对数正态概率函数中进行拟合,得到建筑可存活概率。

$$W(x) = P(IM)F(x)f_{ym} \quad (11)$$

2 实验结果与分析

以验证基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法整体性能为目的,开展一次相关性实验。

(1) 钢筋混凝土框架测试状况

为分析钢筋混凝土框架损伤现象,以某省灯塔地震中正在建设的办公楼当作原型,为了降低实验复杂度,构建了 1 榀框架,实验在某大学结构实验室开展。试件利用 1:2.5 比例设计完成。其中,典型的钢筋混凝土结构拟静力测试中包含 1 榀单层框架,可表示为 KJ1。

KJ1 有限元模型钢筋混凝土梁和柱的本构关系都是用 Concrete02 Material。

底部剪力法不能用于地震时土体刚度有明显降低或者产生液化的场合,而且只适用于设计加速度较小、动力相互作用不甚突出的结构抗震设计。基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率方法应用范围较广,具体对比拟合图 4、5 所示。

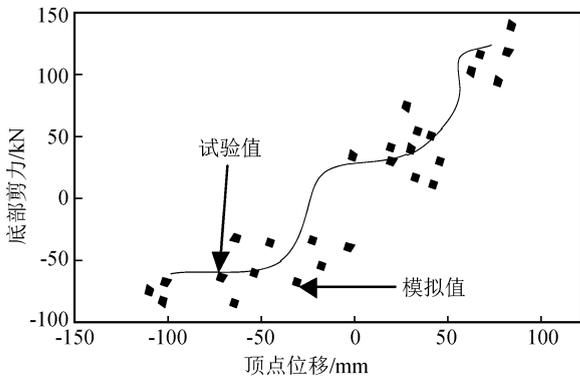
测试和模拟获取的底部剪力法与本文方法的顶点位移骨架曲线比较图,如图 4 所示。

通过测量地震情况下钢筋混凝土框架的位移情况,得知地震对该建筑结构的影响程度,因此,以位移结果作为地震作用下结构损失程度的分析指标,从而得到可存活概率。将构建的完好钢筋混凝土整体框架有限元模型最大竖向荷载当作结构整体构造竖向极限承载性能,并引入随机 Pushdown 方法及随机竖向 IDA 法得到钢筋混凝土框架震后可存活概率。由图 4 实验结果可知,在本文方法与顶点位移骨架曲线示意图中能够看出模拟结果良好,说明将有限元应用至钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测中是切实可行的。

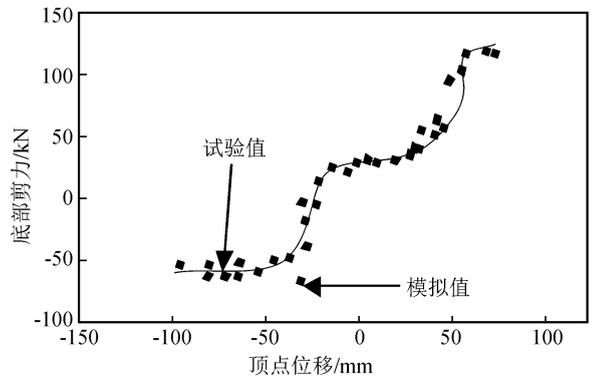
(2) 预测结果准确性

地震动输入值如表 1 所列。

将上述地震动值代入式(11),通过可存活概率计算公式获得预测值。



(a) 框架底部剪力法与顶点位移骨架曲线比较图



(b) 本文方法与顶点位移骨架曲线比较图

图 4 KJ1 相关曲线示意图

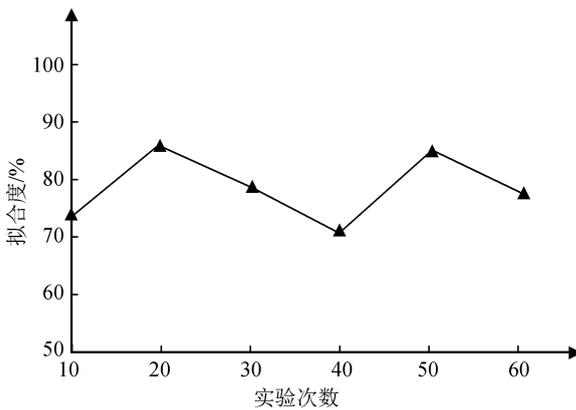
Fig.4 Schematic diagram of KJ1 correlation curve

表 1 地震动输入值

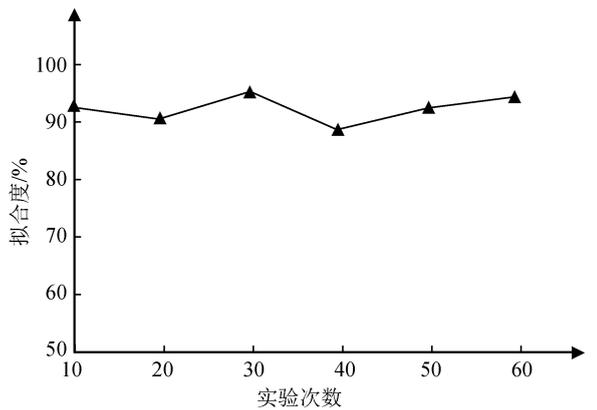
Table 1 Input ground motion

名称	参数值
竖向承载能力/kN	700
框架恒荷载值/(kN·m ⁻¹)	580
框架活荷载值/(kN·m ⁻¹)	751
损伤框架竖直方向上的承载力/kN	654
连续倒塌的工况数量	150
总工况数量	355
钢筋混凝土框架倒塌数量	142
框架样本的总体数量	369

评估预测值与实际值拟合度越高则表示预测精度越高,准确性越好。从图 5 中可以看出,基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法在运行过程中,引入随机 Pushdown 方法及随机竖向 IDA 法分析钢筋混凝土框架震后可存活概率,以此根据荷载系数,利用荷载系数中的极限荷载系数或者是连续性的倒塌荷载系数,表征钢筋混凝土框架的震后可存活率,从而有效提升钢筋混凝土框架震后可存活概率预测精度,也就提升了预测值与实



(a) 基于KPCA和GA_LSSVR的钢筋混凝土震后损失率评估预测值与实际值拟合度



(b) 基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测值与实际值拟合度

图 5 不同方法预测值与实际值拟合度对比

Fig.5 Comparison of the fitting degrees between predicted and actual values with different methods

际值的拟合度。

经以上实验测试,基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法的运行精度优于文献所提方法。由此可见,本文所提方法鲁棒性与可实践性强,具有实际应用价值。

3 结束语

建筑施工过程中震后钢筋混凝土框架可存活率

预测能够为加固房屋提供可行性较强的信息。面对当前钢筋混凝土震后损伤评估预测相关方法存在的问题,提出基于有限元的钢筋混凝土框架结构震后可存活概率预测方法。本文通过分析材料本构模型关联数值,进行钢筋混凝土有限元模拟,并获取最大竖向荷载,根据荷载模拟数值分析框架在竖向的荷载下整体竖向承载极限状态。据此,引入随机 Pushdown 方法及随机竖向增量动力分析(IDA 法)

方法进行概率模型的计算,在考虑结构倒塌的失效概率对可存活概率影响后,对其在对数正态概率函数中拟合,得到建筑可存活概率。最后利用实验证明了所提方法的可行性,并为下一步提出展望:

(1) 将不同楼层和刚度分布的钢筋混凝土框架当作震后可存活概率预测对象,拓展研究范围。

(2) 后续工作中,可根据梁和柱相对刚度或者其他因素进行相互拟合而得到更加合理的梁和柱组合形式与系数设定。

(3) 下一步可将建筑风险概率预测融入至可存活概率预测中,为将来完善有关数据提供更为可靠的数据支撑。

参考文献(References)

- [1] 付建.随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J].地震工程学报,2018,40(2):241-245.
FU Jian.Research on Seismic Performance Testing Method of Long-Span Concrete-Filled Steel Tubular Columns under Random Vibrations[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):241-245.
- [2] 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.
- [3] 程艳秋,商效瑀,郑山锁,等.考虑结构与地震动双重不确定性的混凝土框架建筑地震易损性研究[J].工业建筑,2017,47(1):68-72,112.
CHENG Yanqiu,SHANG Xiaoyu,ZHENG Shansuo,et al.Sesmic Vulnerability Analysis of Rc Buildings Considering Double Uncertainty of Structure and Ground Motion[J].Industrial Construction,2017,47(1):68-72,112.
- [4] 彭志兰,孙海,高惠瑛,等.基于KPCA和GA-LSSVR的惠州砖混建筑物震害易损性研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(2):176-183.
PENG Zhilan,SUN Hai,GAO Huiying,et al.Study on Seismic Damage Vulnerability of Huizhou Brick Masonry Building Based on KPCA and GA-LSSVR Model[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2018,38(2):176-183.
- [5] 刘航,王胜,王海深,等.预应力自复位装配式混凝土框架节点抗震性能研究[J].建筑技术,2018,49(1):50-53.
LIU Hang,WANG Sheng,WANG Haishen,et al.Research on Seismic Behavior of Self-Centering Prefabricated Rc Frame Joint with Prestressed Tendons[J].Architecture Technology,2018,49(1):50-53.
- [6] 陆进保.主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法[J].华南地震,2018,38(2):33-38.
陆进保.主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法[J].华南地震,2018,38(2):29-34.
LU Jinbao.Seismic Disaster Loss Assessment Method of Concrete Bridge under Main Aftershock[J].South China Journal of Seismology,2018,38(2):29-34.
- [7] 崔路苗,郭志宇.地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分析[J].地震工程学报,2018,40(1):54-59.
CUI Lumiao,GUO Zhiyu.Test and Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Residential Building Steel Structures in Seismic Areas[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):54-59.
- [8] 侯为军.超高层矩形建筑混凝土结构层间位移角限值分析[J].科学技术与工程,2018,18(20):303-309.
HOU Weijun.Analysis on the Limit of Displacement Angle between Concrete Floors of Super Tall Building[J].Science Technology and Engineering,2018,18(20):303-309.
- [9] 丛苏莉.多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌仿真分析[J].地震工程学报,2018,40(1):41-47.
CONG Suli.Simulation and Analysis of the Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures under Multidimensional Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):41-47.
- [10] 王新妮,吴海波.钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1018-1023.
WANG Xinni,WU Haibo.Damage Analysis of Panel Structures in Reinforced Concrete Buildings Subjected to Continuous Vibration[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1018-1023.