

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. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.054

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. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.054

## 地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分析<sup>①</sup>

崔路苗<sup>1</sup>, 郭志宇<sup>2</sup>

(1. 长治职业技术学院, 山西 长治 046000; 2. 西安市勘察测绘院, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 传统方法一般依据静力检测数据测试居民建筑钢结构的极限承载力, 对构件数量的要求较高, 无法量测隐蔽构件, 测试结果精度低。因此提出基于振动参数以及动力模型修正的地震区居民建筑钢结构极限承载力预测与分析方法, 分析建筑钢结构振动参数与极限承载能力的关系, 塑造地震区居民建筑钢结构简化以及振动方程, 获取其极限载荷与振动参数间的关系。采用基于动力模型修正的极限承载力评估方法, 基于动力模型修正理论, 采用线性屈曲法、几何非线性法以及双重非线性分析法, 对地震区居民建筑钢结构极限承载力进行检测。实验结果说明, 所提方法能对居民建筑钢结构立柱轴向性和大钩荷载关系以及荷载-挠度曲线, 且实施数值运算效果好, 预测获取的极限承载力值精度高, 建筑的钢结构状态比较稳定。

**关键词:** 地震区; 居民建筑钢结构; 极限承载力; 测试; 震动参数; 动力模型修正

**中图分类号:** TU391.02

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2018)01-0054-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.054

## Test and Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Residential Building Steel Structures in Seismic Areas

CUI Lumiao<sup>1</sup>, GUO Zhiyu<sup>2</sup>

(1. Changzhi Vocational and Technical Colleg, Changzhi 046000, Shanxi, China;

2. Xi'an Geotechnical Investigation and Surveying Insitute, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

**Abstract:** Traditional methods used to test the ultimate bearing capacity of residential building steel structures are generally based on static test data and have high requirements for several of their components. However, these methods cannot measure hidden components, thus providing low-accuracy test results. Therefore, a method based on vibration parameters and dynamic model updating is proposed to predict and analyze the ultimate bearing capacity of residential building steel structures in a seismic area in this study. The relationship between vibration parameters and the ultimate bearing capacity of building steel structures was analyzed, and the simplified vibration equation was derived to determine the relationship between vibration parameters and limit load. Based on the dynamic model updating theory, the linear buckling method, geometric non-

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 山西省教育科学“十三五”规划 2017 年度规划课题(GH-17137); 国家档案局科技项目(2017-X-43)

作者简介: 崔路苗(1978-), 女, 山西长治人, 硕士, 国家一级注册结构师, 讲师, 研究方向: 建筑抗震与防震减灾、钢结构。

E-mail: 15534588867@163.com。

linear method, and double nonlinear analysis method were adopted to detect the ultimate bearing capacity of residential building steel structures in an earthquake area. The experimental results show that the proposed method is effective in analyzing the hook load and load-deflection relation curve of residential building steel structures. Furthermore, the effect of numerical calculation is good, and the precision of predicted ultimate bearing capacity is high.

**Key words:** seismic area; residential building steel structure; ultimate bearing capacity; test; vibration parameters; dynamic model updating

## 0 引言

当前我国处于地震多发期,对地震区居民建筑钢结构的抗震性能分析逐渐成为相关人员研究的热点方向<sup>[1]</sup>。近年来受到规划以及施工误差、材料性能降低、超重以及自然灾害等因素的干扰,导致地震区居民建筑钢结构出现损伤,其承载力以及稳定性大大降低。因此寻求有效的方法对地震区建筑钢结构的极限承载力实施有效预测,对于确保人们群众的生命和财产安全具有重要意义<sup>[2]</sup>。传统方法一般依据静力检测数据实现居民建筑钢结构极限承载力的预测,但该方法受到构件数量的制约,不能对隐蔽构件进行准确量测,具有受应用条件约束以及预测结果精度低的弊端。面向该种情况,本文提出基于振动参数以及动力模型修正的地震区居民建筑钢结构极限承载力预测与分析方法,其不受建筑钢结构规模以及隐蔽构件的约束,可实现结构极限承载力的准确测试。

## 1 地震区居民建筑钢结构极限承载力预测与分析方法

### 1.1 振动参数与极限承载能力的关系

#### 1.1.1 地震区居民建筑钢结构简化以及振动方程

形成地震区居民建筑钢结构主体能折算成两端铰支简支梁的原因是,在轴向载荷影响下导致地震区居民建筑钢结构顶部侧移偏小。依照稳定等效原理和折算长度  $L_z$  观点,将变刚度、铰支座和空腹组合杆的地震区居民建筑钢结构折算成一根延伸度上质量分布均衡且刚度恒定的简支梁<sup>[3]</sup>。

若地震区居民建筑钢结构简支梁在两端轴向力  $p$  作用下进行弯曲自由振动,使得微段  $dx$  中承受的力是剪切力  $Q(x, t)$ 、弯矩  $M(x, t)$  以及轴向力  $P$ (图1),则获取微段在  $Y$  方向振动微分方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

设式(1)解的形式为:

$$y(x, t) = y(x) \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (2)$$

依据简支梁边界条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} x=0, y(0)=0, y''(0)=0 \\ x=L_z, y(L_z)=0, y''(L_z)=0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

可求得简支梁的各阶固有频率为:

$$\omega_{nr} = \frac{r^2 \pi^2}{L_z^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \sqrt{1 - \frac{PL_z^2}{r^2 \pi^2 EI}}, \quad (r=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

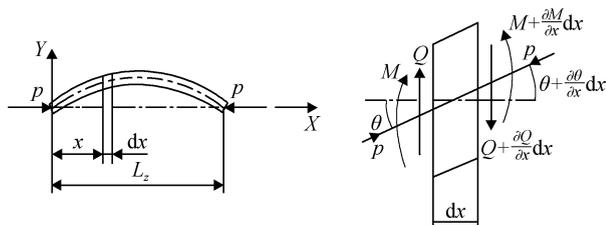


图1 简支梁微段受力简图

Fig.1 Force diagram of micro-segmented free beam

#### 1.1.2 极限载荷与振动参数间的关系

由于地震区居民建筑钢结构一阶固有频率具有辨识容易、检测精度高的优势,则将一阶固有频率作为分析目标,辨别地震区居民建筑钢结构影响载荷及振动参数间的联系<sup>[4]</sup>。

根据式(4)得出地震区居民建筑钢结构一阶固有频率及载荷联系为:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L_z^2} - \frac{L_z \rho A}{\pi^2} \omega_{n1}^2 \quad (5)$$

依据式(5)总结出:地震区居民建筑钢结构影响轴向载荷及固有频率平方成线性关系,轴向力  $P=0$  时为空载时地震区居民建筑钢结构固有频率,且有  $\omega_0 = \frac{\pi^2}{L_z^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ ;如果轴向力  $P$  扩大、频率降低且趋于零,则轴向力  $P$  同临界值基本一致。

为了获取地震区居民建筑钢结构极限承载力检测措施,应全面分析载荷同频率平方的线性联系<sup>[5]</sup>。检测地震区居民建筑钢结构在两个各异载荷影响下一固有频率可得,其同载荷对一阶频率作用大抵一致,按照随意两载荷-频率平方点,可获取如下方程:

$$P = \frac{P_i - P_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \omega^2 + \frac{\omega_i^2 P_j - \omega_j^2 P_i}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \omega^2 \quad (6)$$

式中:第 $i(j)$ 种载荷工况是 $P_i(P_j)$ ;  $\omega_i(\omega_j)$ 为在载荷 $P_i(P_j)$ 影响下地震区居民建筑钢结构一阶固有圆频率,  $\omega_{i(j)} = 2\pi f_{i(j)}$ ,  $f_{i(j)}$ 为地震区居民建筑钢结构一阶固有频率。

当 $\omega \rightarrow 0$ , 获取地震区居民建筑钢架结构极限载荷及振动参数关联式为:

$$P_E = \frac{f_i^2 P_j}{f_i^2 - f_j^2} - \frac{f_j^2 P_i}{f_i^2 - f_j^2}, \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, i \neq j) \quad (7)$$

式中: $P_E$ 为地震区居民建筑钢结构临界载荷。

有一种载荷工况是零, 能推出地震区居民建筑钢结构临界载荷:

$$P_E = \frac{f_0^2}{f_0^2 - f_i^2} P_i \quad (8)$$

式中: $P_i$ 表示地震区居民建筑钢结构影响载荷; $f_0$ 和 $f_i$ 分别表示无载荷影响下以及载荷影响下的基本频率。

## 1.2 基于动力模型修正的极限承载力评估

### 1.2.1 动力模型修正过程

参照结构动力模型修正理论和基于动力的居民建筑钢结构承载力评估法, 依照地震区居民建筑钢结构实验以及有限元研究结果<sup>[6]</sup>, 获取基于动力模型修正的极限承载力预测方法, 其详细过程为:

(1) 为了得到地震区居民建筑钢结构的动力特性, 应塑造地震区居民建筑钢结构原始有限元模型, 并进行自由振动剖析<sup>[7]</sup>, 该过程可依据初始设计图纸以及相关材料实施;

(2) 地震区居民建筑钢结构真实振动测试参数可通过其振动实验获取;

(3) 依据振动测试信息修正建筑钢结构有限元模型的动力, 获取精准有限元模型, 对建筑钢结构运行状态进行准确描述;

(4) 基于修正后的有限元模型, 通过极限承载力预测方法完成模型极限承载力的准确分析<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 动力模型修正理论

通过 1.1 小节获取的地震区居民建筑钢结构振动测试参数, 在有限元模型实施修正过程中应运算不同阶频率同实测频率是否相同, 同时检测振型同计算振型的匹配情况。用 $f_i$ 及 $f_i$ (其对应特征值为 $\lambda_i$ 及 $\lambda_i$ )描述有限元模型及振动测试测出前 $m$ 阶固有频率, 有限元模型的状态变量以及目标函数分别是其前 $p$ 阶固有频率和相对误差平方和, 有限元模型的几何尺寸、刚度以及边界条件等不确定参数是设计变量, 那么可将居民建筑钢结构固有频率修正

过程看成是非线性最小二乘过程<sup>[9]</sup>, 用式(9)描述:

$$F(\eta) = \min \sum_{i=1}^p [\lambda_i - \lambda_i(\eta)]^2 = \min f(\eta)^T f(\eta) \quad (9)$$

其中:限制规范是 $\eta_1 \leq \eta \leq \eta_n$ , 设计变量以及目标函数分别是 $\eta$ 以及 $F(\eta)$ , 同设计变量关联的状态变量用 $\lambda_i(\eta)$ 描述, 设计变量函数为 $f(\eta)$ 。通过一阶搜索优化形式实现动力模型的修正<sup>[10]</sup>。采用模态保证规范对运算振型以及实测振型进行运算。

### 1.2.3 极限承载力分析方法

基于地震区居民建筑钢结构的有限元模型实行线性屈曲、几何非线性及双重非线性研究, 评价其极限承载力。线性屈曲是一种特征值求解过程, 通常采用逆矢量迭代法以及子空间迭代法对其进行处理<sup>[11]</sup>。

线性屈曲法是承载钢结构极限承载力检测的通用方法。如果结构及材料都是线性, 运用解答特征值的形式获取结构失效因子 $\lambda$ , 得到建筑钢结构的极限承载力; 几何非线性分析法将材料看成是线性的, 针对结构梁柱效应和大位移效应, 运用增量及迭代手段处理结构极限承载力; 几何及材料非线性研究法的结构和资料具有非线性属性, 采用增量及迭代措施形式获取建筑钢结构的极限承载力<sup>[12]</sup>。

#### (1) 线性屈曲法

在临界荷载影响下地震区居民建筑钢结构线性平衡方程是:

$$(\mathbf{K}_0 + \lambda \mathbf{K}_\sigma) \cdot \{\Delta u\} = 0 \quad (10)$$

式中: $\mathbf{K}_0$ 表示建筑钢结构的弹性刚度矩阵; $\mathbf{K}_\sigma$ 表示参照荷载 $F_0$ 情况下的几何刚度矩阵; $\{\Delta u\}$ 、 $\lambda$ 分别表示节点位移增量以及荷载稳定系数。通过逆矢量迭代法、子空间迭代法来处理式(10)呈现出的特征值问题<sup>[13]</sup>。结构临界荷载显示为 $F = \lambda_{\min} \cdot F_0$ 。

#### (2) 几何非线性法

地震区居民建筑钢结构几何非线性增量平衡方程式为:

$$(\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_\sigma) \cdot \{\Delta u\} = \Delta F \quad (11)$$

式中: $\Delta F$ 为外荷载增量。

通过增量 Newton Raphson 迭代法解答式(11)中非线性增量平衡方程。

#### (3) 双重非线性分析法

考虑几何非线性及材料非线性增量平衡方程是:

$$(\mathbf{K}_{ep} + \mathbf{K}_\sigma) \cdot \{\Delta u\} = \Delta F \quad (12)$$

式中: $\mathbf{K}_{ep}$ 为结构的弹塑性刚度矩阵。通过增量

Newton Raphson 迭代以及弧长法对式(12)的非线性增量平衡方程进行求解。

## 2 实验分析

### 2.1 钢结构的顶部节点竖向位移变化与大钩荷载关系

为分析本文方法对地震区居民建筑钢结构极限承载力的应用效果,采用其对某地震区一居民建筑钢结构的最大承载力进行分析,并与上文提到的线性屈曲法和几何非线性法的钢结构最大承载力结果进行实验对比。三种方法下钢结构的顶部节点竖向位移变化与最大承载力关系如图 2 所示。从图中分析得出,线性屈曲法和几何非线性法的极限承载力分别为 7 842.7 kN 和 6 233.6 kN,双重非线性方法分析得到的该居民建筑钢结构的极限承载力为 6 611.2 kN。分析图 2 还可以得出,几何非线性以及材料非线性协同作用形成实验所用某地震区一居民建筑钢结构极限承载力,双重非线性分析的载荷位移曲线在屈服点前,载荷位移曲线具有较强的线性关系,载荷值高于临界点后,位移值逐渐提升,同时载荷降低,说明建筑钢结构失稳。综合分析可以看出,本文方法实现了对地震区居民建筑钢结构极限承载力的有效预测。

实验分析该居民建筑中下段某立体柱的轴向应

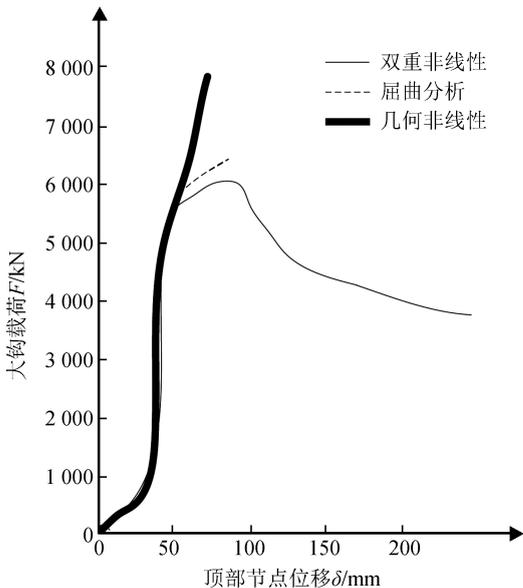


图 2 三种方法钢结构的顶部节点竖向位移变化与大钩荷载关系

Fig.2 Relationship between the vertical displacement of top nodes and the hook load of steel structure using three methods

力与最大承载力的关系,建筑现场实地勘测得到的轴向应力与最大承载力采用本文方法预测的实验地震区居民建筑钢结构中下段②号立柱,逐级荷载实验的应力同实际测试获取的轴向应力同大钩荷载关系如图 3 所示。分析该图得出,本文方法预测的应力值同逐级加载实验应力值误差低于 5%,说明本文方法可对民居建筑钢结构的力学行为实施真实描述;同时得出,民居建筑钢结构未达到极限承载临界点情况下,大钩荷载同轴向应力具有线性关系,如果载荷值达到临界点,则轴向应力呈大幅度下降趋势。

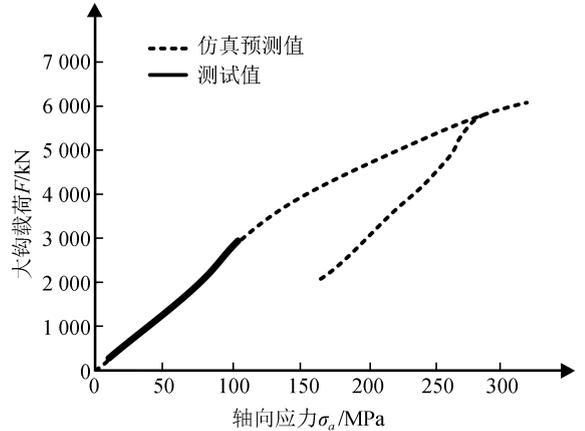


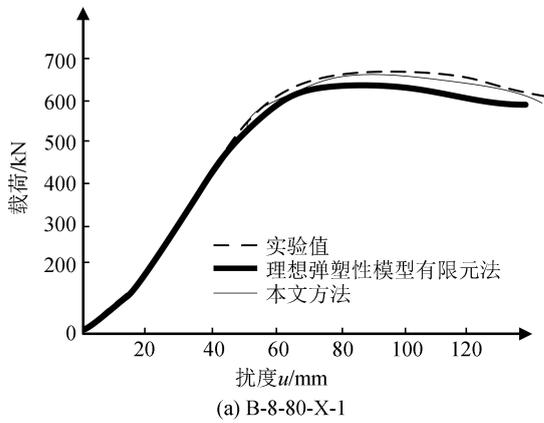
图 3 中下段②号立柱轴向应力和钩荷载关系

Fig.3 Relationship between the axial stress and hook load of column ② of the middle-lower section

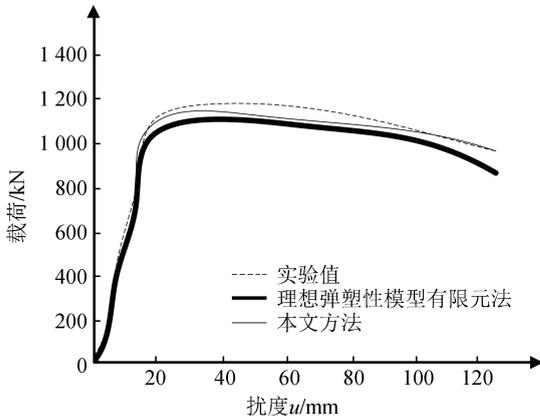
通常基于检测数据研究原始损伤缺陷后,应采用合理的方法对民居建筑钢结构的极限承载力实施研究。总体初弯曲以及荷载偏心较高、总体稳定性起关键作用的民居建筑钢结构应通过线性屈曲法对顶部位移进行研究。本文采用双重非线性法对实验地震区民居建筑钢结构局部杆件存在的严重损伤缺陷进行处理。

### 2.2 不同方法下钢结构荷载-挠度曲线对比

残余应力是干扰地震区民居建筑压弯构件稳定、破坏极限承载力的关键原始弊端。实验通过对实测残余应力结构同不同材料模型实施有限元法运算,检测采用本文方法以及传统理想弹塑性模型有限元方法获取的残余应力分析结果同真实数值间的区别。不同方法获取的 B-8-80-X-1 以及 B-12-55-X-2 荷载-挠度曲线情况如图 4 所示。从图 4 中能够得出采用本文方法预测的钢结构荷载-挠度同真实值的匹配度较高,二者间的差值低于 2%,符合工程运算需求。这说明采用本文方法实施数值运算是有效的,而采用传统理想弹塑性模型有限元法运算结果比真实值略高,存在一定的偏差。



(a) B-8-80-X-1



(b) B-12-55-X-2

图4 不同方法的载荷-挠度曲线比较

Fig.4 Comparison between load-deflection curves by using different methods

### 2.3 极限承载力预测

采用本文方法将实验地震区民居建筑钢结构不同杆件转换成梁单元实施有限元离散分析,共127个节点以及246个单元。塑造的民居建筑钢结构有限元模型精度同模型结构误差、模型阶次误差及模

型参数误差相关<sup>[14]</sup>。如果模型参数误差是关键影响因素,其是由粗糙材料、几何参数和联结以及边界规范预测所导致。本文方法在修正有限元模型参数过程中设置材料参数是精确的,联接部位都进行焊接,若是刚性联接,则对有限元模型实施研究过程中,未对部署的钢结构砥柱的起升导轨以及钢结构顶端固定设备进行分析<sup>[15]</sup>。因此实验民居建筑钢结构主要承载杆件的截面参数是设计变量。通过振动检测获取的前二阶固有频率,对有限元模型实施调整,调整后的有限元模型第三阶固有频率同模态实验检测获取的第三阶固有频率实施对比,进而对本文方法修正过程的有效性实施检测。原始频率以及调整结果如表1所列。能够看出通过本文方法调整后的有限元模型准确描述了实验民居建筑钢结构的模态参数,还反演了目标函数外的参数,具有较强的预测性能。

表1 初始频率和修正结果

Table 1 Initial frequencies and updating results

固有频率	初始频率 /Hz	目标频率 /Hz	修正频率 /Hz	修正前频率误差 /%	修正后频率误差 /%
$f_1$	0.795	0.614	0.597	27.85	2.62
$f_2$	1.005	0.749	0.737	47.42	0.26
$f_3$	1.599	1.327	1.446	10.23	1.21

采用本文方法修正后的有限元模型分析实验民居建筑钢结构的受力性能,设置大钩荷载是458 kN,钢结构关键杆件的测试轴向应力、运算应力和二者间相对误差情况如表2所列。分析该表可得,本文方法修正的有限元模型应力预测值同检测获取的轴向应力误差低于6%,说明本文方法可以准确描述地震区民居建筑钢结构的真实承载性能,预测

表2 测试应力值与预测应力值比较

Table 2 Comparison between tested and predicted stresses

轴向应力	二层台立柱编号				中下段立柱编号			
	①	②	③	④	①	②	③	④
测试值/MPa	-11.82	-12.86	-10.97	-8.69	-10.44	-11.38	-10.51	-9.91
预测值/MPa	-11.91	-12.83	-10.23	-8.84	-10.11	-10.83	-10.95	-8.39
相对误差/%	-0.076	0.19	2.24	2.46	2.75	4.39	3.85	5.98

得到的极限承载力精度较高。

## 3 结论

本文提出基于振动参数以及动力模型修正的地震区居民建筑钢结构极限承载力预测与分析方法,基于地震区居民建筑钢结构振动参数,通过基于动力模型修正的极限承载力评估方法,实现建筑钢结

构极限承载力的准确预测。

### 参考文献(References)

- [1] 丁柱,张立翔.强地震作用下混凝土重力坝响应特性分析[J].水利水电技术,2016,47(10):1-5.  
DING Zhu,ZHANG Lixiang.Analysis on Response Characteristics of Gravity Dam Under Strong Earthquake Effect[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(10):1-5.

- [2] 郑晓东,刘云贺,马静.考虑强震持续时间的混凝土重力坝损伤累积研究[J].水利水电技术,2016,47(4):18-23.  
ZHENG Xiaodong, LIU Yunhe, MA Jing. Study on Accumulated Damage of Concrete Gravity Dam under Consideration of Strong-motion Duration[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(4): 18-23.
- [3] 徐金英,王星.鲁地拉重力坝坝基非线性对坝体极限抗震能力的影响研究[J].水利水电技术,2016,47(2):15-18.  
XU Jinying, WANG Xing. Study on Influence of Foundation Nonlinearity on Ultimate Seismic Capacity of Gravity Dam of Ludila Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(2): 15-18.
- [4] 吴帮,申波,马克俭,等.U形钢板-混凝土组合空腹夹层板在遭遇地震作用下的抗震性能分析[J].贵州大学学报(自然版),2016,33(2):117-122.  
WU Bang, SHEN Bo, MA Kejian, et al. Analysis on Seismic Behavior of U-shaped Steel Plate-Concrete Composite Open-web Sandwich Slab Structure under the Frequent Seismic Action [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2016, 33(2): 117-122.
- [5] 郑晋阳,马克俭,魏艳辉,等.超高层装配式正交斜放空间网格式筒中筒混合结构在不同场地特征周期下的地震响应[J].贵州大学学报(自然版),2016,33(6):83-88.  
ZHENG Jinyang, MA Kejian, WEI Yanhui, et al. The Seismic Response of the Assembly Integral Spatial Steel Grid "Tube-in-Tube" Cassette Super High-rise Structures in Different Characteristic Period[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2016, 33(6): 83-88.
- [6] 杨晓敏.钢结构建筑顶棚的抗震性能测试分析研究[J].科技通报,2015,31(10):151-153.  
YANG Xiaomin. Analysis of Aseismic Test of Steel Structure Building Roof[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(10): 151-153.
- [7] 徐佳琦,吕西林.高烈度地震区带软钢阻尼器的框架-核心筒结构抗震性能分析[J].中国科技论文,2014(5):512-516.  
XU Jiaqi, LÜ Xilin. Seismic Analysis of Frame-core Wall Structure Using Hysteretic Dampers in High-intensity Earthquake Region[J]. China Sciencepaper, 2014(5): 512-516.
- [8] 吕西林,姜淳,蒋欢军.超高层建筑结构 benchmark 模型的地震损伤分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):1-7.  
LÜ Xilin, JIANG Chun, JIANG Huanjun. Seismic Damage Analysis of a Benchmark Model for Mega-tall Buildings[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 1-7.
- [9] 刘斌,齐五辉,叶列平,等.不同地震剪力系数控制方案对某超高层建筑结构抗震性能的影响[J].建筑结构学报,2014,35(8):1-7.  
LIU Bin, QI Wuhui, YE Lieping, et al. Influence of Different Seismic Shear Force Coefficient Control Methods on Seismic Performance of a Super-tall Building[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 1-7.
- [10] KANEDA K, AOKI M, OHTSUKA S. Rigid Plastic Fem Analysis Considering Inclined Load and Size Effects on Ultimate Bearing Capacity of Spread Foundation on Sandy Soils [J]. Journal of Structural & Construction Engineering, 2016, 81(728): 1665-1671.
- [11] 刘军进,张宏,李建辉,等.超高层建筑幕墙地震作用设计取值研究[J].建筑科学,2014,30(1):33-37.  
LIU Junjin, ZHANG Hong, LI Jianhui, et al. Research on Design Value of Earthquake Action for Super High-rise Building Curtain Walls[J]. Building Science, 2014, 30(1): 33-37.
- [12] 宋夏芸,李海旺,王俊刚.落地式钢拱桁架体系弹塑性地震响应研究[J].太原理工大学学报,2014,45(4):548-552.  
SONG Xiayun, LI Haiwang, WANG Jungang. Study on the Elastic-Plastic Seismic Response of Floor Type Steel Arch Truss under Earthquake Waves[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(4): 548-552.
- [13] 陈建伟,苏幼坡,张超,等.两层带水平缝钢管混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(3):93-101.  
CHEN Jianwei, SU Youpo, ZHANG Chao, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Two-story Shear Wall With Concrete Filled Steel Tube Columns and Horizontal Joints[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 93-101.
- [14] 钱稼茹,冯宝锐.钢筋混凝土柱弯矩-转角骨架线特征点及性能点转角研究[J].建筑结构学报,2014,35(11):10-19.  
QIAN Jiaru, FENG Baorui. Study on Rotation Angles at Characteristic Point and Performance Point of  $M-\theta$  Skeleton Curve for RC Columns[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 10-19.
- [15] 南力菲,李海旺,李伟伟.具有隔震支座钢管拱桁架结构体系抗震性能研究[J].太原理工大学学报,2014,45(6):785-790.  
NAN Lifei, LI Haiwang, LI Weiwei. Study on Elastoplastic Seismic Performance of Isolators Technology on Three-dimensional Steel Arch-truss[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(6): 785-790.