

胡可.基于隔震就位连接技术的高层钢框架结构建筑抗震技术研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1460-1465.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1460

HU Ke.Seismic Resistance Technology of High-rise Steel Frame Structures Based on Isolation-in-Place Connection Technology [J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1460-1465.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1460

基于隔震就位连接技术的高层钢框架结构 建筑抗震技术研究

胡 可

(西昌学院土木与水利工程学院,四川 西昌 615000)

摘要:以抗震设防7度区的某高层钢框架结构建筑为研究对象,研究基于隔震就位连接技术的高层钢框架结构建筑抗震技术。对研究对象采用抗震就位连接技术,通过在隔震层中设置弹性滑板支座、厚层橡胶隔震支座化黏滞阻尼器等隔震装置提升研究对象自振周期,降低其上部结构受地震作用的影响程度,增强抗震性能。对研究对象进行模态分析与时程分析,结果显示,所研究隔震技术在显著提升研究对象自振周期,使其摆脱场地特征周期的同时,也能够延缓扭转振型的形成,显著降低地震作用对研究对象上部结构的影响,说明所研究技术的运用具有较好的抗震效果。

关键词: 隔震就位连接; 高层; 钢框架结构; 抗震技术; 隔震层; 隔震支

中图分类号: TU746.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1460-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1460

Seismic Resistance Technology of High-rise Steel Frame Structures Based on Isolation-in-Place Connection Technology

HU Ke

(College of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract: Taking a high-rise steel frame structure building in a 7-degree seismic fortification area as the research object, the seismic technology of high-rise steel frame structure buildings based on isolated-in-place connection technology was studied. Seismic in situ connection technology was used to increase the natural vibration period of the research building by setting elastic skateboard bearings, thick rubber isolation bearings, and viscous dampers in the isolation layer, so as to reduce the influence of earthquakes on the superstructure and enhance seismic performance. Modal and time-history analyses were carried out on the research building. Results showed that the proposed isolation technology only significantly improved the natural vibration period of the structure, but also delayed the formation of torsional vibration mode, significantly reducing the influence of seismic action on the superstructure of the research object. It was shown that the studied technology has a good seismic effect.

收稿日期: 2019-01-28

基金项目: 四川省教育厅一般项目(18ZB0544)

第一作者简介: 胡可(1983-),男,四川西昌人,硕士,讲师,研究方向: 建筑工程施工技术与组织,工程经济方向。

E-mail: huke.h@163.com.

Keywords: isolation-in-place connection; high-rise; steel frame structure; seismic technology; isolation layer; isolation bearing

0 引言

高层钢框架结构作为几种结构体系创新的结果,其以自重轻、工程量少、施工周期短等优势成为当下建筑加固改造过程中应用最为广泛的一种建筑结构^[1]。但高层钢框架结构建筑在钢筋混凝土结构同钢结构间易产生刚度突变,造成其上柔下刚,形成薄弱层,无法满足地震作用下建筑抗震相应规范要求^[2],因此研究高层钢框架结构建筑抗震技术尤为重要。

隔震就位连接技术在保护高层钢框架结构建筑完整性上具有较大优势,现有的隔震就位连接技术主要分为直接同新基础刚性连接的技术和通过隔震支座的隔震就位连接技术^[3]。与直接同新基础刚性连接的技术相比,隔震就位连接技术为分离高层钢框架结构建筑上部结构和地震动,将隔震层设置在托盘系统同新址基础之间,利用隔震层的阻尼吸收地震能量^[4],抑制高层钢框架结构建筑上部结构受地震能量的影响。本文中,设计的隔震层包含弹性滑板支座、厚层橡胶隔震支座化黏滞阻尼器等隔震装置,在隔震层平面布置过程中保障刚度中心同上部结构质量中心重叠,降低研究对象上部结构受地震作用的影响程度,增强研究对象抗震性能,提升高层钢框架结构建筑的安全储备,解决以往隔震就位连接技术通过单一刚性连接或单一隔震支座导致钢框架结构高层建筑稳定性较差的问题。

1 高层钢框架结构建筑抗震技术研究

1.1 工程概况

将研究对象设定为某高层钢框架结构建筑,其所在区域抗震设防烈度为 7 度^[5]。研究对象共 9 层,长、宽、高分别为 26.74 m、14.87 m 和 36 m,占地面积和总质量分别为 397.62 m²和 1 150 t。试验对象的上层部分和底层部分间不存在分割缝。由于道路施工需求,该研究对象需向西平移 15 m。

1.2 隔震就位连接技术

隔震就位连接技术是在制作高层钢框架结构建筑托换梁过程中,将隔震支座的上连接钢板预埋件和下连接钢板预埋件分别设置在高层钢框架结构建筑墙体和移位后的新基础对应位置上^[6],当研究对象平移到位后,安装隔震支座,撤消滚轴,这时托换加固体系将为研究对象隔震层提供一个刚性底盘。

研究对象的整体位移结构同原基础分离将造成其整体刚度显著下降^[7],隔震连接就位技术通过设置隔震层可显著提升研究对象的自振周期,降低研究对象上部结构受地震作用的影响程度,增强研究对象抗震性能,使平移后的研究对象抗震强度较平移前不降反升,提升高层钢框架结构建筑的安全性。

实验对象隔震层中包含弹性滑板支座、厚层橡胶隔震支座化黏滞阻尼器等隔震装置。隔震层平面布置过程中需保障刚度中心同上部结构质量中心重叠^[8]。

1.2.1 弹性滑板支座

在各钢框架底部相应位置均设置一个弹性滑板支座,依照滑板支座面压环境,滑板支座的规格为 330 mm 和 430 mm 两种类型。在重力荷载作用下,每个弹性滑板支座面压基本为 3.8~4.2 MPa 上下,由此可知在竖向承载力上,弹性滑板支座的安全性较高,能够更好地确保隔震层在竖向荷载下的变形协调。为达到抗震目的,将滑板支座摩擦因数设置成 0.013,确保受较小的水平向荷载影响时,隔震层不会形成滑动^[9]。弹性滑板支座的实物图如图 1 所示。

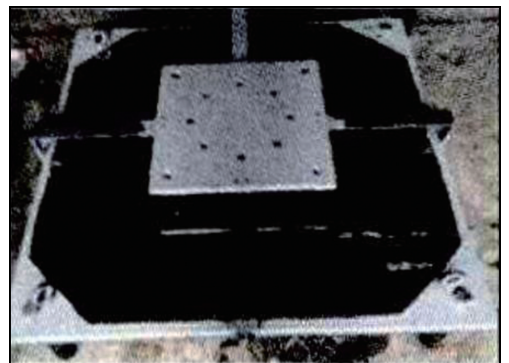


图 1 弹性滑板支座

Fig.1 Elastic skateboard support

1.2.2 厚层橡胶隔震支座

在隔震就位连接技术中,由于橡胶支座存在刚度小、变形适应能力强的优势,因此其主要作用为减少隔震层的最大水平位移与残余变形^[10]。将四个厚层橡胶隔震支座分别设置在隔震层四个角落中,所选厚层橡胶隔震支座规格为 600 mm。隔震层中的厚层橡胶隔震支座不直接受钢框架底部竖向荷载影响,可充分实现稳定控制,适合于摩擦滑移隔震层水平变位大的特点。同时,较少的支座数量使单支

座的水平刚度降低,不会对高层钢框架结构建筑减震层的减振效果产生消极作用。

在分析多遇与罕遇水平的地震过程中,以双线性模型为厚层橡胶隔震支座的恢复力模型^[11],对双线性模型实施等效线性化,将剪切变形为50%和200%时的等效阻尼及水平刚度作为厚层橡胶隔震支座的力学参数。表1为厚层橡胶隔震支座技术参数。图2为其实物图。

表1 厚层橡胶隔震支座技术参数

Table 1 Technical parameters of thick rubber isolation bearing

参数名称	参数详情	
数量/个	4	
橡胶外径/mm	600	
允许水平位移/mm	160	
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	1 055	
设计承载力/kN	665	
等效水平刚度/(N·mm ⁻¹)	1 267	
水平剪应变为50%	等效阻尼比/%	32
	屈服后刚度/(N·mm ⁻¹)	554
水平剪应变为200%	等效水平刚度/(N·mm ⁻¹)	530
	等效阻尼比/%	17
	屈服后刚度/(N·mm ⁻¹)	367

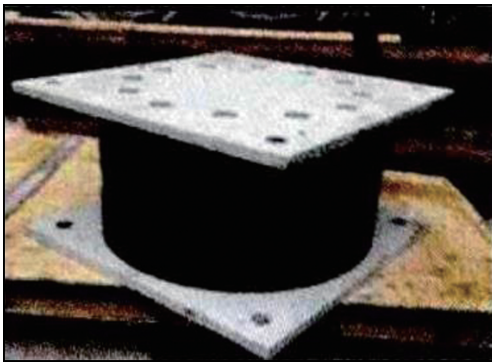


图2 厚层橡胶隔震支座

Fig.2 Thick-story rubber isolation bearings

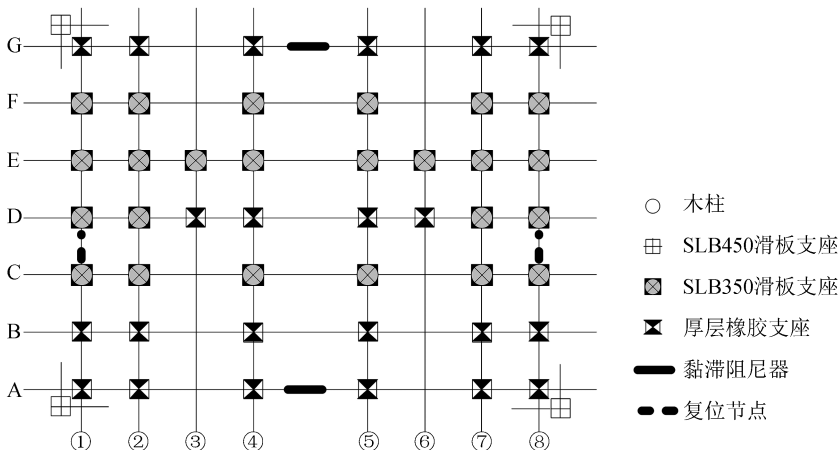


图4 隔震层平面布置图

Fig.4 Layout of the isolation layer

1.2.3 黏滞阻尼器

由于当总阻尼力一致时,黏滞阻尼器的数量越多越好^[12],因此研究对象隔震层在设置黏滞阻尼器时在外围沿x方向和y方向分别设置4个,各黏滞阻尼器质量相对较小。黏滞阻尼器的主要作用是利用阻尼力消磨地震能力^[13],将附加阻尼比供给研究对象的隔震层,降低罕遇地震对隔震层的变形影响程度。具体的黏滞阻尼器的实物图如图3所示。



图3 黏滞阻尼器

Fig.3 Viscous dampers

1.3 隔震层平面布置

依据1.2小节中隔震层技术分析,其主要包括弹性滑板支座、厚层橡胶隔震支座和黏滞阻尼器等3种隔震装置。隔震层的平面布置应尽量规则、均匀,保证隔震层刚度中心与上部结构质量中心的重合。具体的隔震层布置平面图如图4所示。

2 实例分析

实验为研究隔震就位连接技术对高层钢框架结构建筑抗震性能的影响,对比研究对象采用本文抗震技术前后的抗震性能,结果如下所述。

2.1 模态分析

研究对象采用本文所提抗震技术前后,模态分

析结果如表 2 所示。

由表2可知,使用本文技术前,研究对象前三阶

表 2 模态分析结果

Table 2 Modal analysis results

不同抗震技术		自振周期/s	横向方向/s	纵向方向/s	竖向方向/s
使用本文技术前	1 阶模态	0.161 57	0.168 89	0.000 03	0.005 7
	2 阶模态	0.152 49	0.012 33	0.128 89	0.248 89
	3 阶模态	0.140 33	0.023 5	0.178 89	0.000 01
本文抗震技术	1 阶模态	1.067 56	0.031 33	0.389 99	0.004 08
	2 阶模态	0.957 38	0.908 89	0.074 25	0.288 89
	3 阶模态	0.889 64	0.000 15	0.508 89	0.688 89

自振周期仅为 0.15 s 左右,与研究对象所在区域的场地特征周期 0.30 s 差距较小;而采用本文抗震技术后,研究对象的前三阶自振周期均达到 0.9 s 左右,大幅高于研究对象所在区域的特征周期,可使研究对象的地震反应显著下降。由于研究对象上部结构利用隔震层实现整体平动,因此地震动的变形集中在研究对象的隔震层内,这一结果与地震反应谱曲线内呈现的结果相同。同时,经由不同方向的质量参与系数能

够得到,相较于使用本文技术前扭转模态主要形成于第二阶模态的情况,采用本文抗震技术后扭转模态形成于第三阶模态中,说明隔震就位连接技术在一定程度上也起到延迟扭转模态形成的作用。

2.2 时程分析

2.2.1 多遇地震下的加速度反应分析

研究对象在不同实际地震波中的加速度反应最大值对比结果如表 3 所列。

表 3 地震作用下的加速度对比结果(单位:cm/s²)

Table 3 Contrast results of acceleration under earthquake action (Unit:cm/s²)

对比指标	本文抗震技术				使用本文技术前			
	东西向		南北向		东西向		南北向	
	墙顶	墙角	墙顶	墙角	墙顶	墙角	墙顶	墙角
EI Centro 波	22.74	25.90	18.08	17.82	51.09	34.76	49.65	34.24
Taft 波	18.04	17.95	20.45	20.27	36.75	33.93	41.30	34.70
TAR-TARZANA 波	10.06	9.98	7.03	6.97	44.30	34.38	42.01	35.00

分析表 3 可知,研究对象使用本文技术前,墙顶和墙角的加速度反应波动较为显著;采用本文抗震技术后,加速度反应变化显著降低,也就是说采用本文抗震技术后研究对象以整体平动反应为主要反应。同时本文抗震技术将使研究对象加速度反应明显下降,在东西向输入 EI Centro 波(0.2g)与 Taft 波(0.2g)的条件下研究对象墙顶加速度只达到使用本文技术前的 1/2 左右,而在输入 TAR-TARZANA 波(0.2g)的条件下,墙顶加速度只达到使用本文技术前的 1/4 左右,而墙角的加速度同样显著降低,这说明隔震就位连接技术可有效抑制研究对象

受水平地震作用的消极影响。在南北向输入 EI Centro 波的条件下,采用本文抗震技术后墙顶加速度仅为使用本文技术前的 1/2.5 左右,而墙角加速度为使用本文技术前的 1/2 左右;在输入地震波为 TAR-TARZANA 波的条件下,采用本文抗震技术后墙顶和墙角的加速度均低于使用本文技术前的 1/5,这说明本文抗震技术对高层钢框架结构建筑南北方向上的地震作用抑制效果更为显著。

2.2.2 多遇地震下的层间剪力反应分析

研究对象在 3 条实际强地震波作用下,采用两种不同抗震技术后的层间剪力对比结果如表 4 所列。

表 4 地震作用下的层间剪力对比结果(单位:kN)

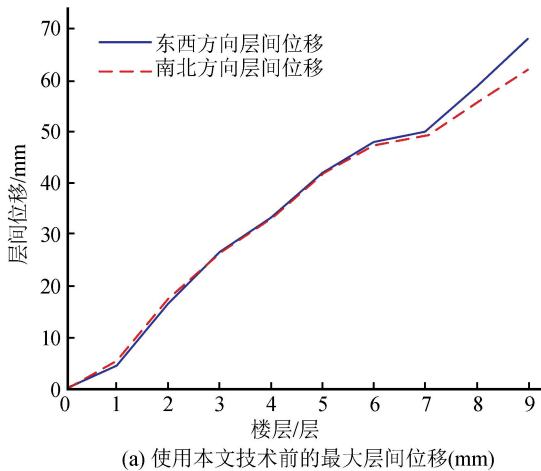
Table 4 Comparison of inter-story shear forces under earthquake (Unit: kN)

对比指标	本文抗震技术		使用本文技术前	
	东西向	南北向	东西向	南北向
EI Centro 波	253.30	121.25	532.64	464.21
Taft 波	265.09	161.42	471.44	479.04
TAR-TARZANA 波	195.52	134.12	282.11	292.10

分析表 4 可知,与使用本文技术前相比,采用本文抗震技术后,层间剪力显著降低。在东西向输入

地震波的条件下,本文抗震技术的层间剪力约为使用本文技术前的 1/2 左右,而在南北向输入地震波

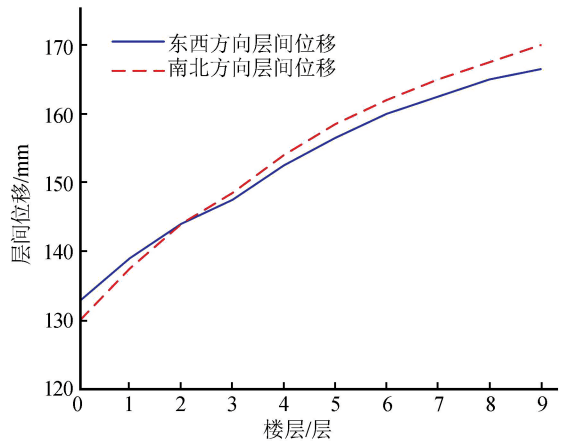
的条件下,本文抗震技术的层间剪力约为使用技术前的 $1/2\sim 1/4$ 。这说明本文抗震技术可有效抑制高层钢框架结构建筑的层间剪力。



(a) 使用本文技术前的最大层间位移(mm)

2.2.3 多遇地震下的位移反应分析

图5为 $0.2g$ EI Centro波条件下的层间位移曲线对比结果。



(b) 本文抗震技术的最大层间位移(mm)

图5 EI Centro波作用下的层间位移曲线

Fig.5 Inter-story drift curves under EI Centro wave

由图5可知,使用本文技术前的层间位移显著高于采用本文抗震技术后的层间位移。试验结果二次验证研究对象采用本文抗震技术后,在地震波影响下以整体平动反应为主要反应。并且采用本文抗震技术后,研究对象隔震层在不同地震波影响下位移显著,东西向和南北向位移分别为 122 mm 和 119 mm 。在此条件下隔震支座弹性状态依旧较好,地震作用结束后能够恢复到原本状态。相比之下,使用本文技术前,研究对象最下层同最上层的位移明显,东西方向最大位移大于 65 mm ,研究对象整体结构变形严重,易形成破坏。研究结果表明本文抗震技术能够减小层间位移,降低高层钢框架结构建筑破坏概率。

2.2.4 罕遇地震下的地震反应分析

两种抗震技术下研究对象受罕遇地震作用影响,分别沿厚层橡胶隔震支座两个互相垂直的水平方向输入峰值加速度均为 $0.4g$ 的三条地震波,获取两种抗震技术在单向地震波影响下移位结构的剪力和层间位移反应,结果如表5所列。

表5 罕遇地震反应平均值对比结果

Table 5 Contrast results of mean value of rare earthquake response

对比指标	本文抗震技术		使用本文技术前	
	东西向	南北向	东西向	南北向
层间剪力/kN	1 463.02	1 127.69	2 612.026	2 513.194
层间位移/mm	0.067	0.066	0.077	0.078

分析表5可知,相较于使用本文技术前,采用本

文抗震技术后研究对象的剪力作用和层间位移都呈现明显下降趋势。在研究对象不同方向输入地震波条件下,采用本文抗震技术后研究对象层间剪力的平均值仅为使用本文技术前的 $1/2$ 左右,且层间位移也有不同程度的降低。对比之下,研究对象南北向抗震效果稍高于东西向抗震效果。

3 结论

钢框架结构的延性以及耗能性能显著高于混凝土结构,且受地震作用影响时,不仅能够大量消耗地震能量,还具有良好的变形能力,因此在世界范围内被广泛应用,研究其抗震技术意义尤为重要。本文研究基于隔震就位连接结束的高层钢框架结构建筑抗震技术,以某高层钢框架结构建筑为研究对象,构建研究对象平面布置图,对本文抗震技术与使用本文技术前进行模态分析与动力时程分析。实例分析结果显示,与使用本文技术前相比,本文抗震技术能够显著延长研究对象自振后期,降低地震作用的消极影响,延缓扭转主振型形成;显著降低研究对象受地震影响下层间剪力和位移反应,提升研究对象抗震性能。分析结果说明本文抗震技术在高层钢框架结构建筑移位后的抗震方面具有显著优势。

参考文献(References)

- [1] 段先军,潘旦光,谭晋鹏,等.基于支座位移的隔震层楼板施工环境温度研究[J].建筑技术,2018,49(9):63-65.
DUAN Xianjun, PAN Danguang, TAN Jinpeng, et al. Study on

- Ambient Temperature of Isolation Floor Slab Construction Based on Bearing Displacement[J]. Architecture Technology, 2018, 49(9): 63-65.
- [2] 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): 136-143.
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): 136-143.
- [3] 洗俊伟, 吴轶, 杨春, 等. 基于隔震改造的大型阀门结构抗震性能评估[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(6): 69-76.
Xian Junwei, Wu Yi, Yang Chun, et al. Seismic Performance Assessment of Large-scale Valve Hall Structure Based on Seismic Isolation Renovation[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2018, 40(6): 69-76.
- [4] 石岩, 王东升, 孙治国. 基于位移的中等跨径减隔震桥梁抗震设计方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 71-81.
SHI Yan, WANG Dongsheng, SUN Zhiguo. Displacement-based Seismic Design Method for Medium Span Bridges with Seismic Isolation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 71-81.
- [5] 朱健, 赵均海, 谭平, 等. 基于增量动力分析的多层隔震结构全寿命期地震成本研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(6): 46-60.
ZHU Jian, ZHAO Junhai, TAN Ping, et al. Seismic Life-cycle Cost Estimation of Multi-story Base-isolated RC Buildings Based IDA[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(6): 46-60.
- [6] 陆婷婷, 梁兴文. 高强钢筋高延性纤维增强混凝土框架结构的屈服机制和抗震性能[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 166-175.
LU Tingting, LIANG Xingwen. Yielding Mechanism and Seismic Performance of Frame Structure with High-strength Bars and High-ductile Fiber-reinforced Concrete[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 166-175.
- [7] 柳春光, 任文静. 基于 Monte Carlo 抽样的近海隔震桥梁地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(1): 108-117.
LIU Chunguang, REN Wenjing. Vulnerability Analysis of Off-shore Isolation Bridge Based on Monte Carlo Sampling[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(1): 108-117.
- [8] 杨巧荣, 任天娇, 何文福, 等. 组合隔震系统基于负刚度装置的隔震效果研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(4): 77-83.
YANG Qiaorong, REN Tianjiao, HE Wenfu, et al. Study on Seismic Isolation Effect of Composite Isolation System Based on Negative Stiffness Device[J]. Structural Engineers, 2018, 34(4): 77-83.
- [9] 曲激婷, 房文琪. 基于性能的基础隔震结构地震易损性分析[J]. 计算力学学报, 2018, 35(5): 567-573.
QU Jiting, FANG Wenqi. Performance-based Seismic Vulnerability Analysis of Base Isolation Structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(5): 567-573.
- [10] 张艳霞, 张贺昕, 刘安然, 等. 可恢复功能的装配式预应力钢框架性能化设计研究[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(4): 6-14.
ZHANG Yanxia, ZHANG Hexin, LIU Anran, et al. Performance-Based Design Research of Resilient Prefabricated Prestressed Steel Frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(4): 6-14.
- [11] 田宇, 崔帅文, 沈钰皓. 钢结构建筑物抗震性能数值仿真与试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(4): 60-64.
TIAN Yu, CUI Shuaiwen, SHEN Yuhao. Numerical Simulation and Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(4): 60-64.
- [12] 戴淑丹, 尚继英, 谭平. 模块化钢框架摩擦摆隔震结构抗震性能研究[J]. 华南地震, 2018, 38(2): 111-119.
DAI Shudan, SHANG Jiyong, TAN Ping. Seismic Performance of Isolated Modular Steel Frames System by Using Friction Pendulum Bearing[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(2): 111-119.
- [13] 潘剑峰, 牡丹, 单红波, 等. BIM 技术应用于超高层钢结构施工安全管理研究[J]. 施工技术, 2016, 45(18): 18-20.
PAN Jianfeng, DU Dan, SHAN Hongbo, et al. Application of BIM Technology in the Construction Safety Management of High-rise Steel Structure[J]. Construction Technology, 2016, 45(18): 18-20.
- [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] 吕志军, 侯瑞, 宋一铭, 等. 不同荷载工况下高层薄壁钢结构的抗震性能研究[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(9): 1899-1906.
LÜ Zhijun, HOU Rui, SONG Yiming, et al. Seismic Behavior of High Thin-walled Steel Structure with Different Load Distribution[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(9): 1899-1906.