

文章编号:1673-9469(2023)03-0034-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.005

高烈度区某天燃气工程指挥部隔震加固设计与施工

李广洲^{1,2}, 刘万义³, 包霞³

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832003; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东广州 510640;
3. 新疆建筑科学研究院(有限责任公司), 新疆乌鲁木齐 830054)

摘要: 针对新疆某天燃气工程指挥部的抗震问题, 对其采用隔震技术进行加固, 并采用“抱柱托梁加垫”和“夹墙梁”的方法进行施工, 确保其上部结构安全。采用国际通用的三维空间有限元软件 ETABS 对其进行建模分析, 并用时程分析方法对其进行隔震加固设计分析。在此基础上, 分析了其减震效果, 并介绍了本工程采用的施工工艺及相应的关键技术。结果表明: 该工程隔震加固效果比较显著, 能较好地满足现行规范和使用功能的要求, 故对其进行隔震加固设计与施工是可行的。

关键词: 高烈度区; 框架-剪力墙结构; 隔震加固; 施工技术; 时程分析

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

Design and Construction of Seismic Isolation and Reinforcement for a Natural Gas Engineering Headquarters in High Intensity Areas

LI Guangzhou^{1,2}, LIU Wanyi³, BAO Xia³

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;
2. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. Xinjiang Research Institute of Building Sciences, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: In view of the seismic problem of the gas engineering headquarters in Xinjiang Province, the seismic isolation technology was adopted to strengthen the headquarters, and the methods of “pad the column joist” and “clamp the wall beam” were adopted for construction to ensure the safety of its superstructure. Based on the method of time history analysis of seismic isolation and reinforcement, the structure was analyzed by ETABS, an internationally accepted three-dimensional finite element software. On this basis, the damping effect is analyzed. The construction technology and the corresponding key technologies adopted in this project are also introduced. The results show that the isolation effectiveness is relatively remarkable and it can better meet the requirements of the current norms. Therefore, it is feasible to design and construct the base isolation reinforcement.

Key words: high earthquake intensity zone; frame-shear wall structure; isolation reinforcement; construction technique; time history analysis

大量的老旧建筑已进入超设计年限使用, 需要进行维修、加固或拆除, 对老旧建筑物进行加固, 是实行“低碳经济”的重要举措^[1]。传统的建筑抗震加固方法会给原结构在外观及功能上造成较大的影响, 而且被加固构件受力机理复杂, 在增

加结构刚度的同时也增加了地震作用^[2]。隔震加固技术改变了传统加固结构“硬碰硬”式的抗震加固思想, 改“抗”为“隔”, 开辟了抗震加固的新途径, 是一项值得推广和应用的新技术^[3-4]。张龙飞等^[5]采用隔震技术对云南某办公楼进行了加固,

收稿日期: 2022-11-28

基金项目: 兵团重点领域科技攻关项目(2021AB027); 石河子大学校级项目(ZZC202004B)

作者简介: 李广洲(1989-), 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 副教授, 从事结构隔减震和装配式建筑结构技术方面的研究。

结果表明,水平地震作用大大降低,达到抗震加固目的;魏新强等^[6]对兰州某中学砖混教学楼进行隔震加固设计,从而满足抗震鉴定标准,达到抗震加固的目的;吴迪等^[7]对某高层分析后表明,隔震技术能够有效降低高层框架-剪力墙结构的地震响应;滕晓飞等^[8]对隔震剪力墙结构的有害层间位移角进行了相关研究;李广洲等^[9]研究了高烈度区多层砌体结构基础隔震加固,大大提高了结构的安全性;陈文斌等^[10]对地铁地下车站采用隔震技术进行了相关研究,提升了整体抗震性能;张孝荣等^[11]对隔震技术在高烈度区剪力墙结构中的应用进行了研究,分析结果表明能满足设防目标。党育等^[12]对抱箍式托换节点隔震加固的施工过程进行仿真分析,研究结果对隔震加固的实际施工起到指导作用。

本文以抗震设防烈度为8度的新疆燃气集团天然气工程指挥部为研究对象,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)^[13]的要求,采用国际通用的三维空间弹性有限元设计及分析软件ETABS对结构进行建模,运用时程分析方法进行设计分析,在此基础上研究了其减震效果,采用自上而下的“抱柱托梁加垫”和“夹墙梁”的方法进行施工,确保其安全。

1 工程概况

新疆某天然气工程指挥部位于克拉玛依东路北巷,结构长50.1 m,宽12.3 m;占地面积约616 m²,地下一层,地上十二层,局部突出电梯间。地下室层高4.5 m,1~2层层高为4.5 m;3~11层层高为3.3 m,12层层高3.9 m,局部突出电梯间层高3.8 m,建筑总高度43.05 m;室内外高差0.450 m。该建筑的楼面结构布置如图1所示。

该建筑结构形式为框架-剪力墙结构,场地类别为II类,抗震设防类别为重点设防类(乙类),抗震设防烈度为8度(0.2 g),设计地震分组为第二组,场地特征周期0.4 s,周期折减系数0.85,活荷重力荷载代表值组合系数0.5,设计基准期50 a,使用年限30 a,基本风压为0.6 kN/m²,地面粗糙度为B类。

2 加固方案对比

2.1 传统加固

根据计算结果及构造要求,基础及基础以上主体均须进行加固处理,此方案对现有建筑将造

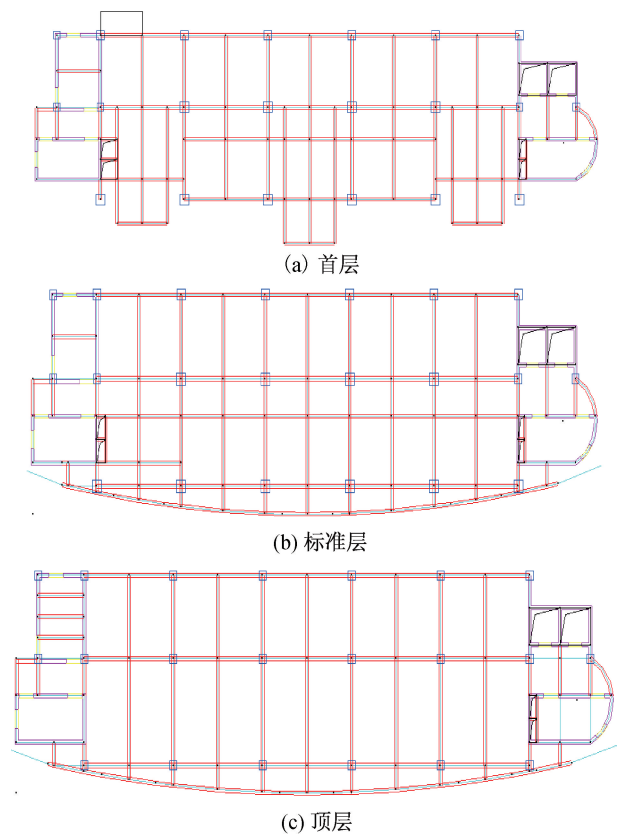


图1 楼面结构布置图

Fig. 1 Layout diagram of floor structure

成大面积破坏,对建筑物破坏性较大。施工范围:全楼。优点:加固工艺及施工方法简单、实用性广、工程造价较低。缺点:对建筑的外观破坏严重,对建筑物的使用功能破坏严重,施工创伤面积大,施工周期长。严重影响居民生产生活。施工湿作业面广,业主须进行停业配合施工,恢复性装修费用较高。

2.2 隔震加固

隔震方案仅涉及±0.000 m地面以下,通过合理布设叠层橡胶支座设置隔震层,该支座竖向刚度很大,可以承受上百吨的荷载,水平刚度很小,只要有几吨的荷载就发生变形,从而限制了传上部结构的地震力,使得上部结构在地震时处在弹性状态。

与传统加固方案相比,隔震加固方案具有创伤面小、工期短、加固成本低的特点,且结构安全度高。

3 静力特性计算

3.1 隔震支座的布置及选型

依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016年版)^[13]第12.2.3条规定:本工程为乙类建

筑,橡胶隔震支座在重力荷载代表值的竖向压应力不应超过压应力限值 12 MPa。该项目共选用 36 个橡胶隔震支座,其型号和数量为 LRB700:7 个、LNR700:14 个、LRB800:7 个、LRB1000:4 个、LNR1000:4 个,隔震支座参数见表 1,橡胶隔震支座在重力荷载代表值作用下的压应力设计值见表 2,均满足规范要求。

表 1 隔震支座参数

Tab. 1 Parameters of isolation bearing

型号	有效直径/mm	橡胶总厚/mm	竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	屈服力/kN
LNR700	700	120	3 228.3	—
LRB700	700	120	3 774.6	123.1
LRB800	800	138	4 125.9	160.8
LRB1000	1 000	182	5 157.0	251.2
LNR1000	1 000	203	4 414.9	—

表 2 隔震支座压应力设计值

Tab. 2 Compressive stress design value of isolation bearing

型号	数量	平均压力/kN	最大面压/MPa	平均面压/MPa
LNR700	7	2 645.8	10.28	6.87
LRB700	14	2 600.9	9.72	6.76
LRB800	7	3 942.5	9.58	7.84
LRB1000	4	8 270.4	10.82	10.53
LNR1000	4	7 321.4	9.87	9.32

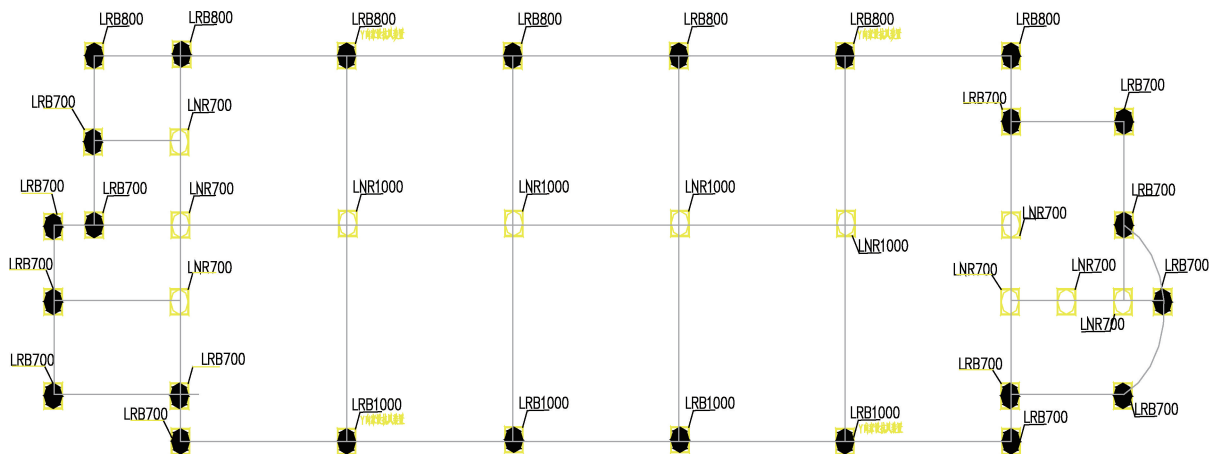


图 2 支座布置图

Fig. 2 Diagram of isolation bearing arrangement

表 3 隔震结构的偏心率计算

Tab. 3 Eccentricity calculation of isolated structure

方向	质心坐标/m	刚心坐标/m	偏心距离/m	扭转刚度/(kN·mm·rad×10 ⁻⁶)	回转半径/m	偏心率/%
X 向	23.61	24.05	0.44	10 766.8	44.21	1.0
Y 向	7.54	7.77	0.23	122 148.0	44.21	0.5

注: X 向为结构的横向, Y 向为结构的纵向。

本工程的隔震层橡胶支座的布置方法采用一柱一橡胶隔震支座,经多次试算后的平面布置图如图 2 所示,外围布置铅芯橡胶隔震支座。

3.2 偏心率计算

结构的质心坐标、刚心坐标、偏心率等值见表 3。X 向和 Y 向偏心率均小于 3%,结构的偏心影响很小,避免了 P-Δ 效应,满足抗规的要求。

3.3 隔震层参数

《建筑抗震设计规范》^[13]第 12.2.4 条规定:对水平向减震系数计算,应取剪切变形 100%的等效刚度和等效黏滞阻尼比;对罕遇地震验算,宜采用剪切变形 250%时的等效刚度和等效黏滞阻尼比,当隔震支座直径较大(直径不小于 600 mm)时可采用剪切变形 100%时的等效刚度和等效黏滞阻尼比。等效刚度及等效阻尼计算结果如表 4 所示。

3.4 隔震结构抗风验算

《建筑抗震设计规范》^[13]第 12.2.1 条规定:隔震设计应根据预期的竖向承载力、水平向减震系数和位移控制要求,选择适当的隔震装置及抗风装置组成结构的隔震层。

在风荷载设计值作用下,隔震结构应不产生水平位移,即要求隔震结构各支座的屈服力总和应大于隔震结构所受的风荷载设计值。本工程 X

表 4 等效刚度及等效阻尼计算

Tab. 4 Calculation of equivalent stiffness and equivalent damping

型号	数量	设防地震 ($\gamma_i = 100\%$)		罕遇地震 ($\gamma_i = 250\%$)		屈服力 Q_d /kN	竖向刚度 K_v /(kN · mm ⁻¹)	屈服后刚度 K_d /(kN · mm ⁻¹)
		等效水平 刚度 K_i	等效阻 尼比 ζ_i	等效水平 刚度 K_i	等效阻 尼比 ζ_i			
		/(kN · mm ⁻¹)	/%	/(kN · mm ⁻¹)	/%			
LNR700	7	1.06	—	1.06	—	—	2 767.1	—
LRB700	14	1.96	28.5	1.26	17.78	123.1	3 235.4	1.08
LRB800	7	2.14	28.5	1.42	17.78	160.8	3 514.6	1.22
LRB1000	4	1.55	—	1.55	—	—	4 099.5	—
LNR1000	4	2.86	28.5	1.84	17.78	251.2	4 788.6	1.58

注:总刚度:($\gamma_i = 100\%$) $K_h = \sum K_i = 68.01$ kN/mm, ($\gamma_i = 250\%$) $K_h = \sum K_i = 48.57$ kN/mm;等阻效尼:($\gamma_i = 100\%$) $\zeta_{eq} = \sum K_i \zeta_i / \sum K_i = 22.80\%$, ($\gamma_i = 250\%$) $\zeta_{eq} = \sum K_i \zeta_i / \sum K_i = 12.81\%$;总屈服力: $Q = \sum Q_d = 3 853.8$ kN;剪重比: $Q/G = 2.66\%$ 。

向和 Y 向的风荷载均小于总屈服力,满足规范的要求。

3.5 橡胶隔震支座弹性恢复力验算

为保证橡胶隔震支座具有良好的复位性能,在设防烈度地震作用下,橡胶隔震支座必须满足弹性恢复力(取剪切应变为 100%)大于橡胶隔震支座水平屈服力设计值的 1.4 倍,即需符合下列要求:

$$K_{100} t_r \geq 1.4 V_{rw}$$

式中, K_{100} —橡胶隔震支座水平剪切应变为 100% 时的水平刚度, kN/mm; t_r —隔震垫中橡胶的总厚度, mm; V_{rw} —隔震支座水平屈服荷载设计值, kN。

该工程弹性恢复力为 10 848 kN,大于橡胶隔震支座水平屈服力设计值(5 395 kN)的 1.4 倍,满足要求。

4 动力特性计算

4.1 计算程序和力学模型

本工程采用国际通用的三维空间弹性有限元设计及分析软件 ETABS 对结构进行建模分析。上部结构及隔震层采用三维模型,上部梁、柱以及楼板只考虑弹性,天然橡胶隔震支座的水平刚度简化为线性,铅芯橡胶隔震支座的水平刚度简化为双线性计算模型。隔震结构的三维空间模型如图 3 所示。

4.2 输入地震波选取

根据《建筑抗震设计规范》^[13]第 5.1.2 条规定,本工程选取 4 组实际强震记录(分别简称为 DSP000、ELNS、TAFT(EW)、AFT(NS))和 3 组人工波(分别简称为 RG1、RG2、RG3)进行结构地震

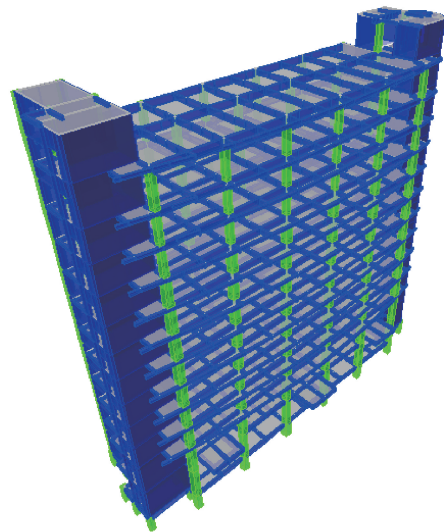


图 3 分析模型

Fig. 3 Analytical model

反应分析。7 条地震波拟合平均反应谱与规范反应谱曲线在统计意义上相符,如图 4 所示,满足规范的要求。

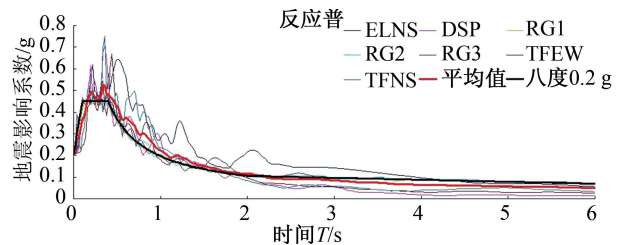


图 4 拟合反应谱与规范反应谱曲线

Fig. 4 Fitting response spectrum and normalized response spectrum curve

4.3 水平向减震系数

根据《建筑抗震设计规范》^[13]第 12.2.5 条规定计算水平向减震系数如图 5 所示。由图可知,本

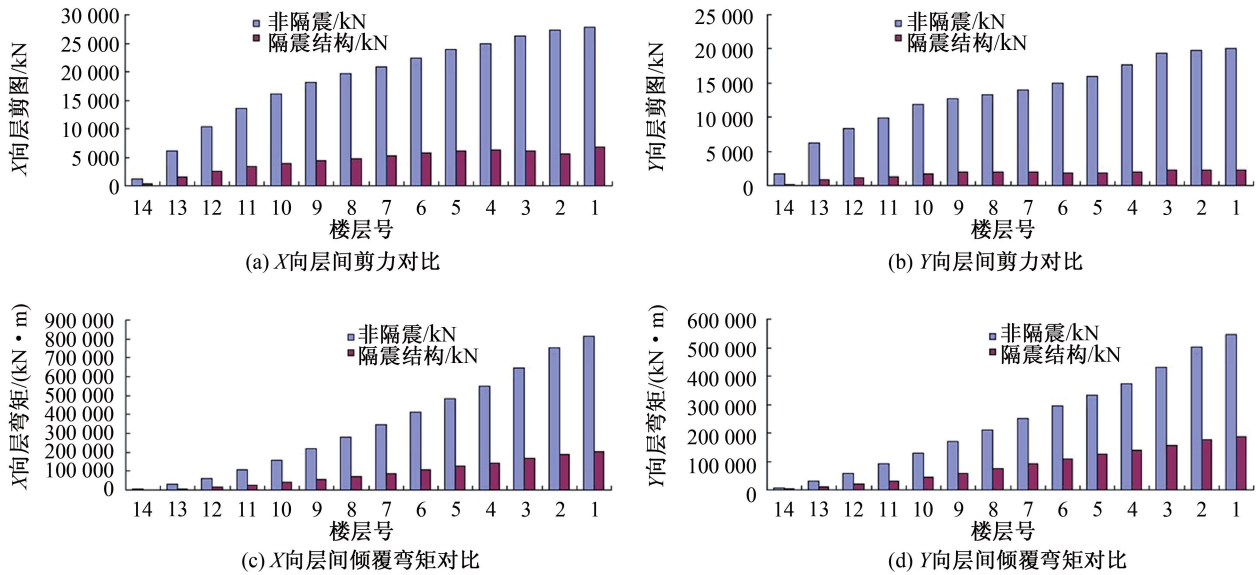


图5 剪力和弯矩对比

Fig. 5 Comparison of shearing force and bending moment

工程在采用隔震技术以后,层间剪力和层间倾覆弯矩明显减少;层间剪力比值和倾覆弯矩比值的最大值为0.37,故本结构水平向减震系数取为0.37,上部结构水平地震作用比在抗震时减少50%。

4.4 罕遇地震作用下隔震效果分析

在罕遇地震作用下,隔震上部结构的最大层间位移角为 $1/719$,小于隔震性能目标弹塑性位移角限值 $1/100$ 。根据时程分析结果,罕遇地震作用下结构隔震层最大位移平均值为195 mm,小于最大容许位移385 mm。在罕遇地震作用下,隔震支座极大面压的最大值为29.89 MPa,短期极小面压值为0.06 MPa,短期极小面压均为压应力,没有出现拉应力,均满足规范的相关规定。

5 隔震加固施工

5.1 独立柱托换梁

本工程原有框架柱部位进行托换时,先对原有框架柱进行“V”字形切割处理,切割角度 45° ,切割深度45 mm,开口尺寸80 mm,“V”字形切口间距80 mm,切割部位与新增托换梁接触部位,在切口部位安装14 mm厚斜向钢板埋件,用于增加构件间的相互摩擦力。

5.2 隔震支座安装工程

隔震支座上支墩底模安装→上支墩预埋件安装固定→双层钢筋网片安装→上支墩侧模及托换梁预留部位侧模安装→浇筑混凝土→模板拆除→

隔震支座下连接板对位安装→隔震支座安装→隔震支座上连接板对位安装→隔震支座校正、固定→隔震支座防护处理。隔震支座上下支墩钢筋绑扎及连接板如图6所示。



(a) 支座上预埋板

(b) 支座下预埋板

图6 支座上下预埋板

Fig. 6 Embedded plate above and below the isolation bearing

5.3 支撑卸荷

框架柱的支撑卸荷主要施工步骤:(1)按设计要求对框架柱、框架梁进行截面加大加固,刚性层同时施工;(2)按设计要求进行卸荷支撑体系施工;(3)加固后混凝土达到设计强度100%后,进行框架柱混凝土的试切割;(4)全面检查建筑物的沉降量、挠度;(5)采用静力拆除法,拆除框架柱安装隔震垫处的混凝土;(6)按设计要求进行隔震垫安装;(7)下一批隔震垫的施工;(8)待全部隔震垫安装完毕、混凝土强度达到设计强度后,依序拆除卸荷支撑体系。支撑卸荷如图7所示。

剪力墙的支撑、卸荷方案:(1)剪力墙处新增梁和截面加大梁,为了保证原结构的安全性,采用在墙体两侧加大截面,梁的钢筋锚固在原框架柱



(a) “抱柱托梁加垫” (b) 静力切割框架柱混凝土

图7 支撑卸荷

Fig. 7 Unloading of support

和新增柱中,剪力墙钻透孔绑扎箍筋或植筋绑扎箍筋的方案(夹墙梁)。(2)墙体隔震缝在隔震垫安装完毕,且混凝土强度达到设计强度的100%后进行施工,隔震缝在梁底100 mm处,缝高度为50 mm,缝宽同墙宽,缝中填塞发泡聚氨酯,外用镀锌铁皮封固。拆除采用水钻静力开孔、液压金刚石绳锯切割方法进行。

6 结论

1)对新疆某天然气工程指挥部进行隔震加固,大大降低地震作用对上部结构的破坏,确保了其良好的抗震安全性能,同时也保证了在极端环境下,该建筑不至于丧失使用功能,对灾后的重建以及救援提供了保障。

2)8度设防烈度地震(0.2 g)作用下,经过时程分析方法计算得出的水平减震系数为0.37,因此上部结构水平地震作用比在抗震时减少50%,可以降低1度进行设计。8度罕遇地震作用下,隔震层最大位移小于橡胶隔震支座水平位移的最大限值,且隔震支座没有产生拉应力,均符合规范要求。

3)本工程采用自上而下的“抱柱托梁加垫”和“夹墙梁”的方法进行施工,既保证了上部结构的安全性和稳定性,又不会对下部基础造成不必要的破坏,故对其进行隔震加固设计与施工是可行的。

参考文献:

- [1] 尚守平. 中国工程结构加固的发展趋势[J]. 施工技术, 2011, 40(337): 12-14.
- [2] 郭健, 刘伟庆, 王曙光, 等. 隔震技术在砌体结构抗震加固中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(1): 43-54.
- [3] 赵玉成. 基于性能的隔震加固结构设计探讨[J]. 工程结构, 2008, 28(2): 146-148.
- [4] 梁倍, 文兴红, 杨铭钊, 等. 昆明某老建筑的隔震加固设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 132-136.
- [5] 张龙飞, 陶忠. 隔震技术在云南某办公楼加固工程中的应用与分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(5): 24-28.
- [6] 魏新强, 安贵仓, 唐晓琳. 兰州某中学教学楼隔震加固设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(11): 54-59.
- [7] 吴迪, 霍维刚, 熊焱, 等. 某高层框架-剪力墙基础隔震结构地震响应分析[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 65-70.
- [8] 滕晓飞, 谭平, 周林丽, 等. 隔震剪力墙结构的有害层间位移角研究[J]. 华南地震, 2017, 37(4): 72-78.
- [9] 李广洲, 袁康, 郭军林, 等. 高烈度区多层砌体结构基础隔震加固设计与研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(3): 104-108.
- [10] 陈文斌, 庄海洋, 李晟, 等. 基于柱顶隔震的3层3跨地铁地下车站结构抗震性能研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 146-156.
- [11] 张孝荣, 叶丽影, 曹辉林. 隔震技术在高烈度区剪力墙结构中的应用研究[J]. 震灾防御技术, 2020, 15(2): 305-316.
- [12] 党育, 温久宏. 抱箍式托换节点隔震加固的施工过程仿真分析[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(3): 113-119.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010(2016), 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(责任编辑 王利君)