

DOI: 10.7672/sgjs2026030035

减隔震组合技术在教学楼加固中的应用*

刘怀斌¹, 李德超¹, 田坤²

(1. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610081;

2. 上海市建筑科学研究院有限公司上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032)

[摘要] 针对某学校教学楼抗震性能不满足规范要求的问题, 分别采用隔震技术和减隔震组合技术进行加固方案设计。采用有限元分析软件分别建立未加固结构模型(FIX模型)、隔震加固结构模型(ISO模型)和减隔震组合加固结构模型(MIX模型), 采用弹塑性时程分析方法对3个模型地震响应特性进行对比分析。研究表明, 通过隔震技术可明显延长结构自振周期; 相对于FIX模型, ISO, MIX模型加速度响应明显减小, 最大减小幅度分别为85.3%, 84.5%; ISO模型层间位移角相对于FIX模型得到有效控制, 但1层处层间位移角仍明显大于其余各层; MIX模型通过在1层处增设黏滞阻尼器, 其层间位移角相对于ISO模型明显降低, 最大降低幅度为58.6%; 随着输入地震动峰值加速度的增大, 隔震支座和黏滞阻尼器变形增大, 可进一步提高地震能量耗散能力, 动力响应控制效果随之提升。

[关键词] 教学楼; 减隔震; 加固; 改造; 地震响应

[中图分类号] TU352

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0035-09

Application of Combined Seismic Mitigation and Isolation Technology in Reinforcement of Teaching Buildings

LIU Huaibin¹, LI Dechao¹, TIAN Kun²

(1. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In view of the problem that the seismic performance of a school teaching building does not meet the requirements of the code, the isolation technology and the combined seismic mitigation and isolation technology are used to design the reinforcement scheme. The unreinforced structure (FIX) model, the isolation reinforced structure (ISO) model and the combined seismic mitigation and isolation reinforced structure (MIX) model are established by finite element analysis software. The seismic response characteristics of the three models are compared and analyzed by elastoplastic time-history analysis method. The research results show that the natural vibration period of the structure can be significantly prolonged by isolation technology. Compared with FIX model, the maximum reduction of acceleration response of ISO model and MIX model is 85.3% and 84.5% respectively. Compared with the FIX model, the inter-story drift angle of the ISO model is significantly reduced, but the inter-story drift angle of the first floor is still significantly greater than that of other floors. Through the addition of viscous dampers at the first floor, the inter-story drift angle of the MIX model is significantly reduced compared with that of the ISO model, with the maximum reduction rate reaching 58.6%. As the peak ground acceleration increases, the deformation of the seismic isolation bearings and viscous dampers increases, which can further enhance the dissipation of seismic energy, and the dynamic response control effect improves accordingly.

Keywords: teaching buildings; seismic mitigation and isolation; reinforcement; transformation; seismic response

*上海市住房和城乡建设管理委员会2024年度科研项目(沪建科2024-002-007)

[作者简介] 刘怀斌, 高级工程师, E-mail: 1055201630@qq.com

[通信作者] 李德超, 高级工程师, E-mail: 187179387@qq.com

[收稿日期] 2025-10-22

0 引言

随着我国经济发展与科技进步,城市化与新型城镇化步伐越来越快,在此背景下建筑结构安全性成为至关重要的问题。我国地处环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带之间,地震灾害较严重。近年来,超越最初设防等级的大震频发,地震灾害会导致建筑物破坏,造成严重的经济损失和人员伤亡。通过对历次地震灾害调查发现,建筑物倒塌及附属设施设备破坏是造成人员伤亡和经济损失的主要原因,其中 95% 以上人员伤亡是由建筑物倒塌造成的,结构在遭受地震时产生的过大侧向变形及残余变形是导致倒塌的直接原因。

传统抗震设计主要通过增加结构自身刚度抵抗地震作用,并通过结构塑性损伤耗散地震能量,但过大的塑性损伤会使加固难度和成本大幅度增加。过大的残余变形对于濒临倒塌或可能遭受余震灾害的结构危害更严重,当结构残余层间位移角 $> 1/200$ 时,其维修加固成本将超过重建成本。

对未进行抗震设计或存在抗震缺陷的结构进行抗震加固,能够有效减轻结构在地震作用下的破坏程度。传统抗震加固方法主要包括增大构件截面法、外包型钢加固法、粘钢加固法、粘贴纤维增强复合材料(FRP)加固法、砂浆面层加固法、增设支撑法等,这些方法的主要原理是通过增加结构抗侧刚度提高抗震性能。但在提高抗侧刚度的同时,结构承受的地震作用相应增大。此外,这些方法还存在加固效率低、施工周期长、湿作业面积大等缺陷。

随着新材料和新技术的研发与应用,减隔震技术在既有建筑加固改造中的应用日益广泛。消能减震技术通过在结构中设置消能减震装置,在地震灾害发生时,通过该装置耗散地震能量,从而减小结构地震响应。隔震技术是通过在结构中设置柔性隔震层,延长结构自振周期,从而降低结构地震响应。历次地震灾害调查发现,隔震建筑在地震中普遍具有较好的表现,可显著降低主体结构及附属设施地震响应。对于整体抗震能力较差且存在薄弱层的结构,单纯采用减震技术或隔震技术可能难以满足工程需求,需采用减震与隔震组合控制技术(减隔震组合技术)。

本文以某学校教学楼为例,分别针对未加固、采用基础隔震技术和采用基础减隔震组合技术加固方案,对比分析了结构在不同地面峰值加速度 PGA 下的自振周期、层间位移角、加速度响应等动力响应特性。

1 工程概况

本工程为上海市某学校 4 层教学楼,建筑面积约 $2\ 300\text{m}^2$ 。结构 1 层层高为 4.58m , 2~4 层层高均为 3.60m 。本工程抗震设防烈度为 7 度 ($0.1g$),设计地震分组为第二组,场地类别为 IV 类,场地特征周期为 0.9s ,抗震设防类别为重点设防类(乙类)。

根据该教学楼抗震鉴定报告可知,1 层为薄弱层,层间位移角不满足规范要求,同时部分梁和柱承载力不满足要求。基于此,为保障建筑结构安全,需对该教学楼进行整体加固处理。

2 分析模型建立

依据《建设工程抗震管理条例》的规定,位于高烈度设防区、地震重点监视防御区的学校建筑,进行抗震加固时,应经充分论证后采用减震、隔震等技术。鉴于此,对该教学楼采用减隔震组合技术进行加固设计,并对不同加固方案进行比选。方案 1 采用在结构底部增设隔震层的基础隔震技术,即在结构 1 层柱底安装 LRB420 型铅芯叠层橡胶隔震支座;方案 2 采用基础减隔震组合技术,即在方案 1 的基础上,在结构 1 层增设黏滞阻尼器。

为对比分析各方案加固效果,采用有限元分析软件分别建立未加固结构模型(见图 1a,简称 FIX 模型)、采用方案 1 的基础隔震加固结构模型(见图 1b,简称 ISO 模型)和采用方案 2 的基础减隔震组合加固结构模型(见图 1c,简称 MIX 模型)。

3 分析工况设置

为研究结构在地震作用下的动力响应特性,采用弹塑性时程分析法,针对 3 个模型在 $PGA = 0.035g, 0.220g$ 工况下的动力响应进行了对比分析。地震波选用 El-Centro 波、Loma 波、Tabas 波和 Taft 波,其频谱特性如图 2 所示。地震波输入采用三向加载方式, x, y, z 向地震波加速度输入峰值比例为 $1 : 0.85 : 0.65$ 。

4 计算结果分析

4.1 自振周期

3 个模型前 3 阶自振周期如表 1 所示。由表 1 可知,ISO 模型自振周期相对于 FIX 模型明显延长,可避免结构自振周期与场地卓越周期相近造成的共振现象,减小结构在地震作用下的动力响应。ISO 模型和 MIX 模型自振周期基本相同,增设黏滞阻尼器不会为结构提供附加刚度,对结构自振周期无显著影响。

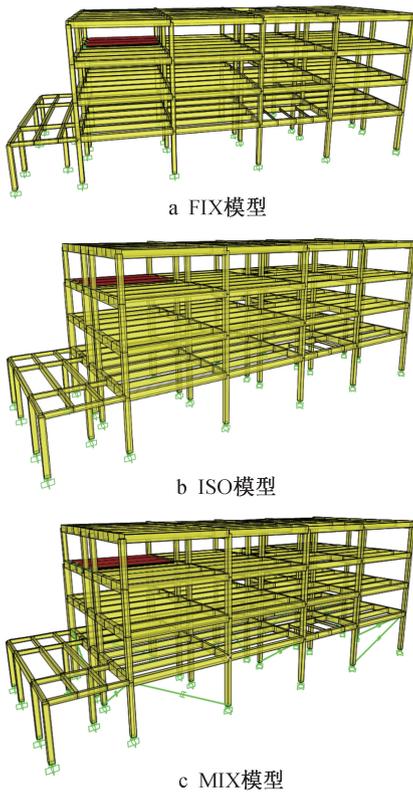


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element models

表1 结构自振周期

Table 1 Natural vibration periods of the structure

模型名称	一阶自振周期/s	二阶自振周期/s	三阶自振周期/s
FIX	0.92	0.90	0.72
ISO	3.13	3.01	2.30
MIX	3.09	3.01	2.29

4.2 加速度

$PGA=0.035g, 0.220g$ 工况下 3 个模型加速度放大系数分别如图 3,4 所示,加固后模型(ISO, MIX 模型)相对于未加固模型(FIX 模型)加速度响应减

小幅度分别如图 5,6 所示。由图 3~6 可知, $PGA=0.035g$ 工况下 FIX 模型各楼层加速度响应基本随着楼层的升高而增大; ISO, MIX 模型各楼层加速度响应特性相似,上部结构加速度响应随着楼层的升高整体呈缓慢增大趋势,加速度增大速率相对于 FIX 模型明显降低;相对于 FIX 模型, ISO, MIX 模型各楼层加速度响应明显减小,其中 ISO 模型 x, y 向加速度响应最大减小幅度分别为 73.2%, 69.3%, MIX 模型 x, y 向加速度响应最大减小幅度分别为 73.5%, 63.3%, 这表明采用基础隔震技术加固后可有效减小隔震层上部结构加速度响应,在 1 层增设黏滞阻尼器对整体结构加速度响应的影响较小。 $PGA=0.220g$ 工况下 3 个模型各楼层加速度响应规律与 $PGA=0.035g$ 工况类似,但加固后模型加速度响应相对于 FIX 模型减小幅度均高于 $PGA=0.035g$ 工况, ISO 模型 x, y 向加速度响应最大减小幅度分别为 85.3%, 78.8%, MIX 模型 x, y 向加速度响应最大减小幅度分别为 84.5%, 79.1%。

不同工况下结构 1 层加速度反应谱如图 7,8 所示,结构 4 层加速度反应谱如图 9,10 所示。由图 7~10 可知, FIX 模型结构加速度反应谱呈多峰值特性, ISO, MIX 模型结构加速度反应谱特性相似,峰值数量均少于 FIX 模型,且峰值点对应的幅值明显下降,下降幅度随着 PGA 的增大与楼层的升高均呈增大趋势。

4.3 位移

不同工况下各楼层层间位移角如图 11,12 所示。由图 11,12 可知, ISO 模型楼层层间位移角相对于 FIX 模型明显减小,采用基础隔震技术可有效减小隔震层上部结构变形。 $PGA=0.035g$ 工况下 ISO 模型楼层 x, y 向层间位移角相对于 FIX 模型最大减小幅度分别为 72.9%, 66.8%, $PGA=0.220g$ 工

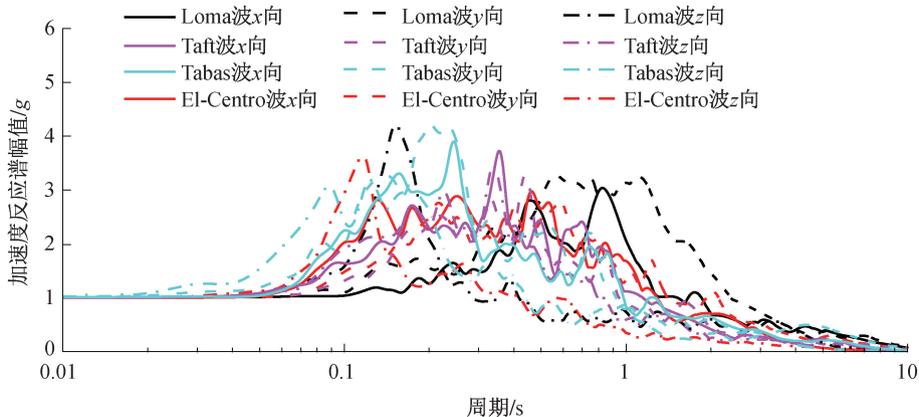


图2 地震波加速度反应谱

Fig. 2 Acceleration response spectrum of seismic waves

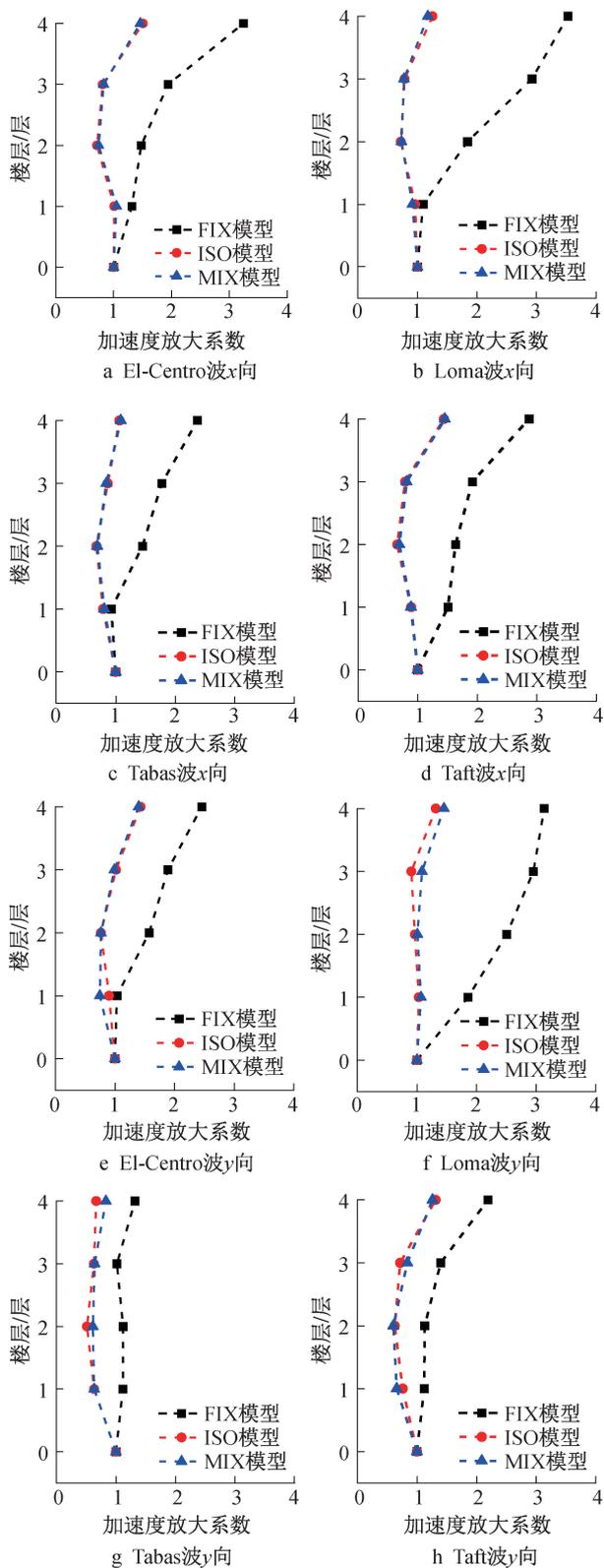


图 3 $PGA=0.035g$ 时结构加速度放大系数

Fig.3 Acceleration amplification coefficients of the structure under the condition of $PGA=0.035g$

况下 ISO 模型楼层 x,y 向层间位移角相对于 FIX 模型最大减小幅度分别为 84.5%,81.7%。MIX 模型整体层间变形得到进一步控制, $PGA=0.035g$ 工况

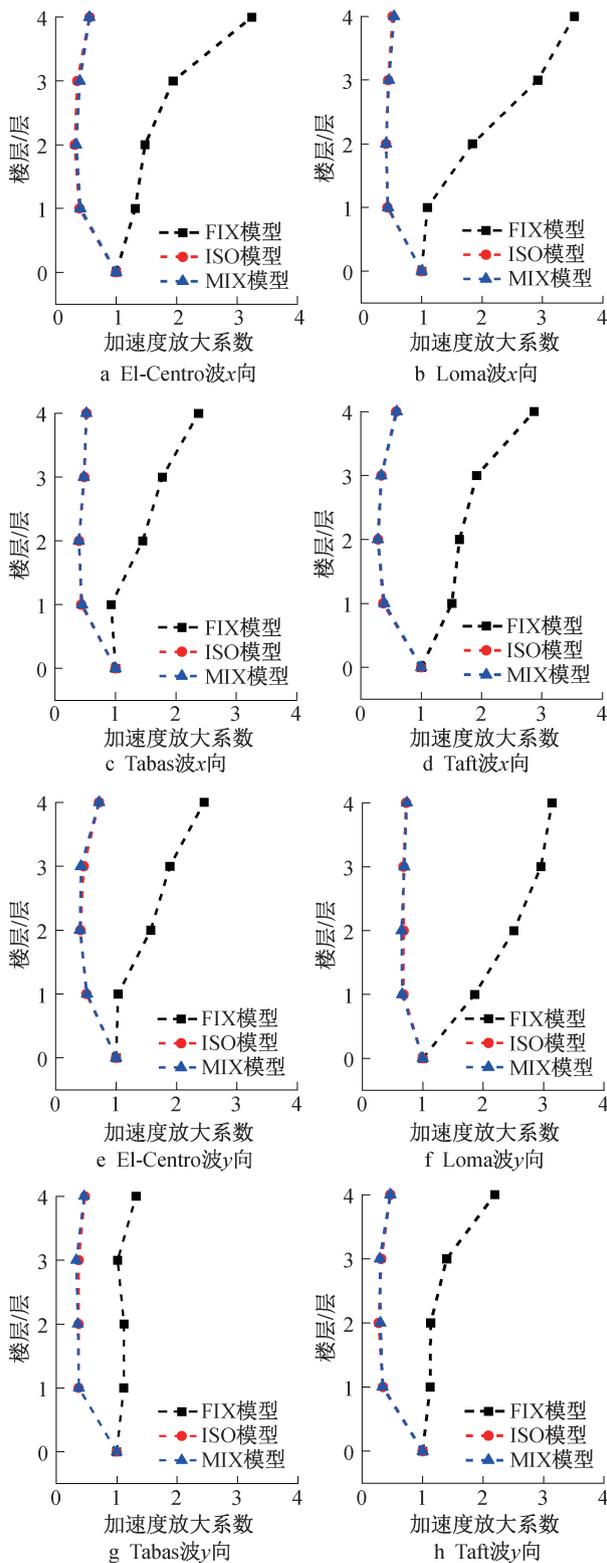


图 4 $PGA=0.220g$ 时结构加速度放大系数

Fig.4 Acceleration amplification coefficients of the structure under the condition of $PGA=0.220g$

下楼层 x,y 向层间位移角相对于 FIX 模型最大减小幅度分别为 83.1%,80.0%。 $PGA=0.220g$ 工况下楼层 x,y 向层间位移角相对于 FIX 模型最大减小幅度分别为 87.6%,80.9%。需注意的是, $PGA=0.220g$

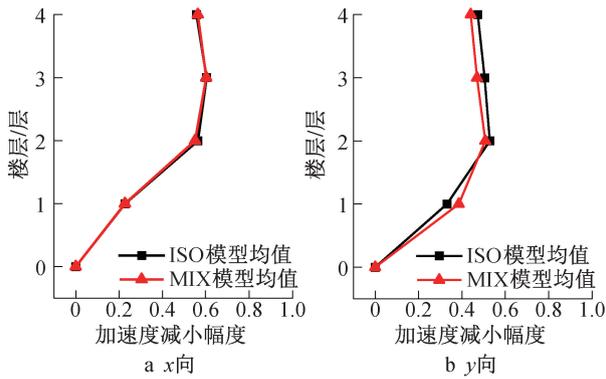


图5 $PGA=0.035g$ 时结构加速度减小幅度

Fig. 5 Acceleration reduction amplitude of the structure under the condition of $PGA=0.035g$

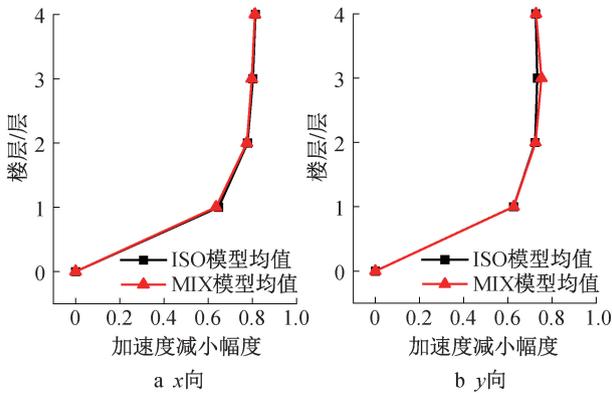


图6 $PGA=0.220g$ 时结构加速度减小幅度

Fig. 6 Acceleration reduction amplitude of the structure under the condition of $PGA=0.220g$

工况下 ISO 模型 1 层层间位移角明显大于其余楼层; MIX 模型整体变形模式得到改善,薄弱层 1 层层间位移角相对于 ISO 模型明显减小,最大减小幅度为 58.6%。这表明在薄弱层增设黏滞阻尼器,可有效减小薄弱层层间变形。

4.4 滞回曲线

不同工况下 MIX 模型中隔震支座典型滞回曲线如图 13,14 所示,黏滞阻尼器典型滞回曲线如图 15,16 所示。由图 13~16 可知, $PGA=0.035g$ 工况下隔震支座内部铅芯发生屈服,其滞回曲线整体呈双线性特性,但由于总体变形较小,使其耗散地震能量的能力有限;黏滞阻尼器由于变形很小,其滞回曲线呈狭长细窄特征,未能充分发挥耗能能力。随着输入地震动峰值加速度的增大, $PGA=0.220g$ 工况下隔震支座与黏滞阻尼器变形明显增大,滞回曲线更饱满,能够有效耗散地震能量。因此, $PGA=0.220g$ 工况下结构地震响应控制效果相对于 $PGA=0.035g$ 工况下更显著。

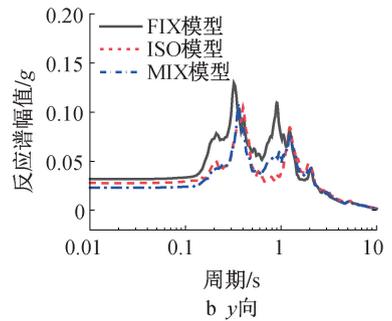
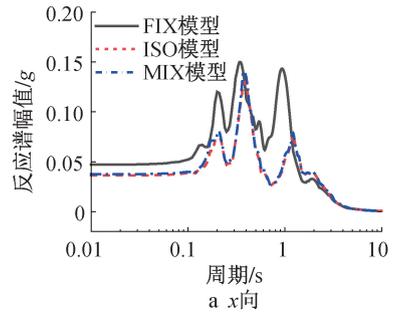


图7 $PGA=0.035g$ 时结构 1 层加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration response spectrum at the first floor under the condition of $PGA=0.035g$

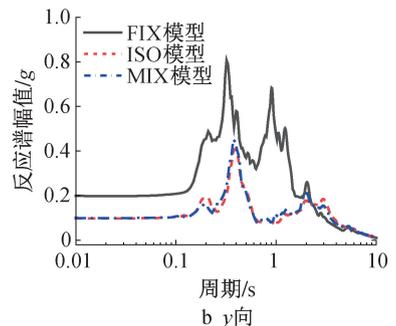
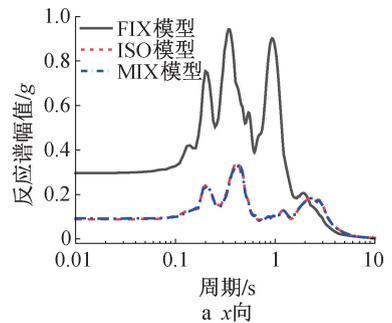


图8 $PGA=0.220g$ 时结构 1 层加速度反应谱

Fig. 8 Acceleration response spectrum at the first floor under the condition of $PGA=0.220g$

5 罕遇地震作用下结构弹塑性分析

通过罕遇地震($PGA=0.220g$)工况下结构塑性铰状态对构件性能进行评估,3 个模型典型塑性铰状态如图 17 所示,图中灰色表示塑性铰状态未超过立即使用性能点,绿色表示塑性铰状态超过立即使

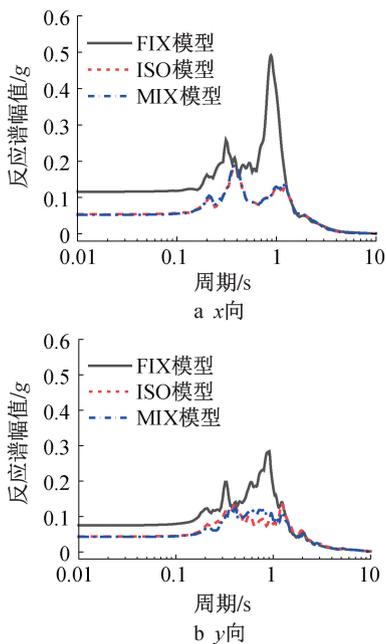


图 9 $PGA=0.035g$ 时结构 4 层加速度反应谱
Fig. 9 Acceleration response spectrum at the fourth floor under the condition of $PGA=0.035g$

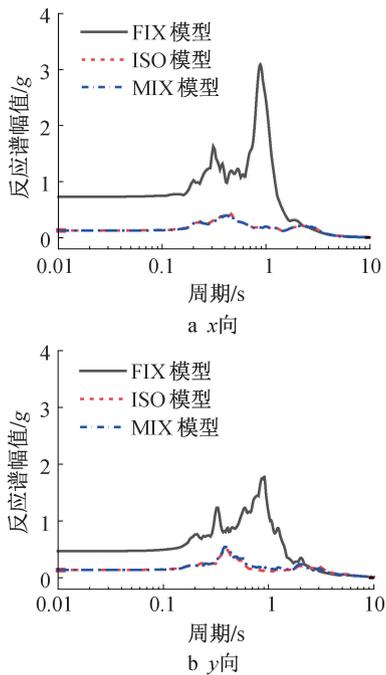


图 10 $PGA=0.220g$ 时结构 4 层加速度反应谱
Fig. 10 Acceleration response spectrum at the fourth floor under the condition of $PGA=0.220g$

用性能点但未超过生命安全性能点,蓝色表示塑性铰状态超过生命安全性能点但未超过防止倒塌性能点。由图 17 可知,在 Loma 波作用下, FIX 模型 1 层柱脚塑性铰状态普遍超过立即使用性能点,右侧 2 排柱脚处塑性铰状态普遍超过生命安全性能点; ISO, MIX 模型中塑性铰状态均未超过立即使用性

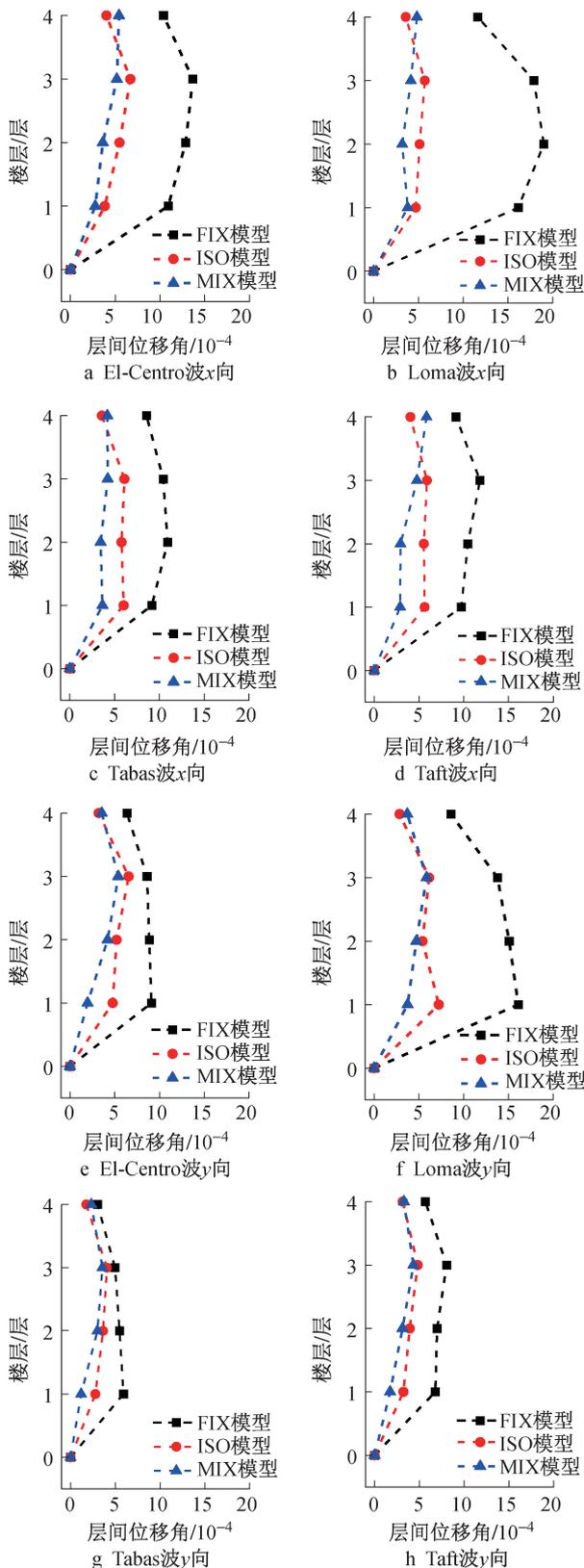


图 11 $PGA=0.035g$ 时楼层层间位移角
Fig. 11 Inter-story drift angles of floors under the condition of $PGA=0.035g$

能点,构件塑性破坏明显小于 FIX 模型。

1 层柱典型塑性铰如图 18 所示。由图 18 可

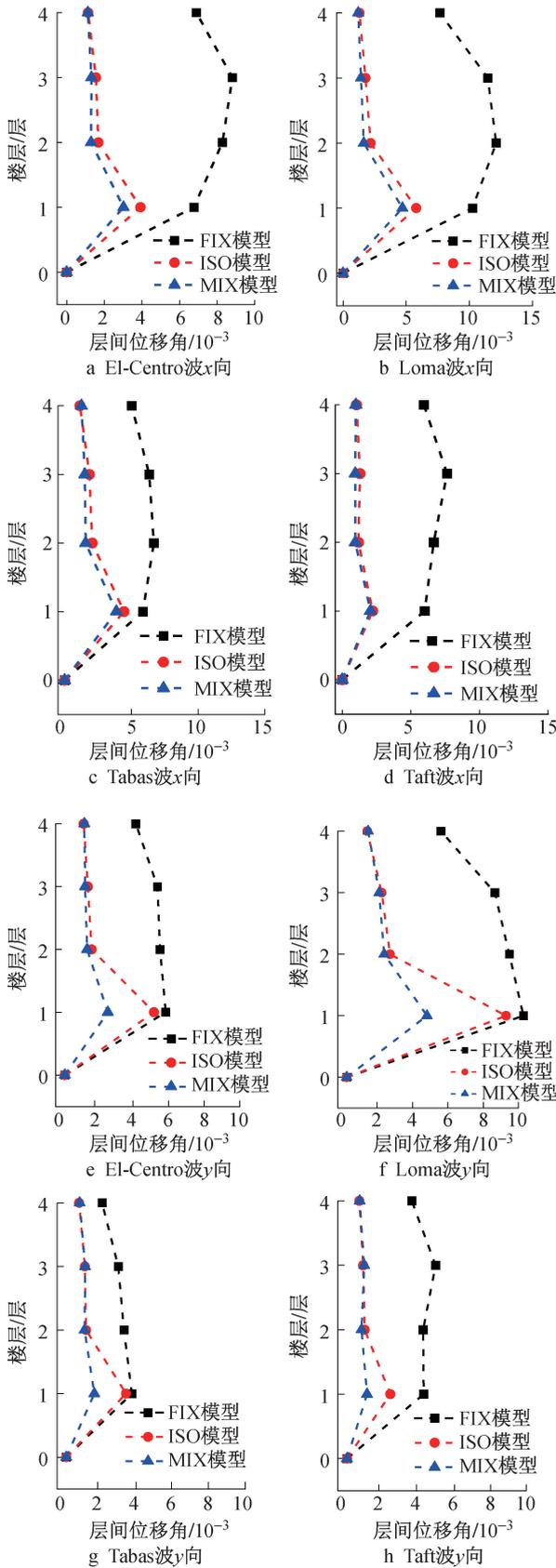


图 12 $PGA=0.220g$ 时楼层层间位移角

Fig. 12 Inter-story drift angles of floors under the condition of $PGA=0.220g$

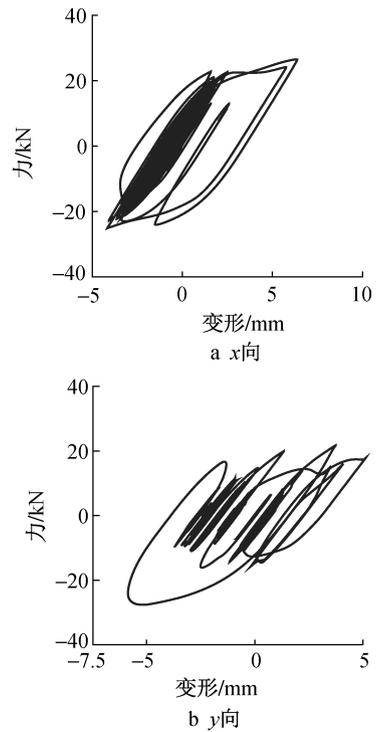


图 13 $PGA=0.035g$ 时隔震支座典型滞回曲线

Fig. 13 Typical hysteretic curves of isolator under the condition of $PGA=0.035g$

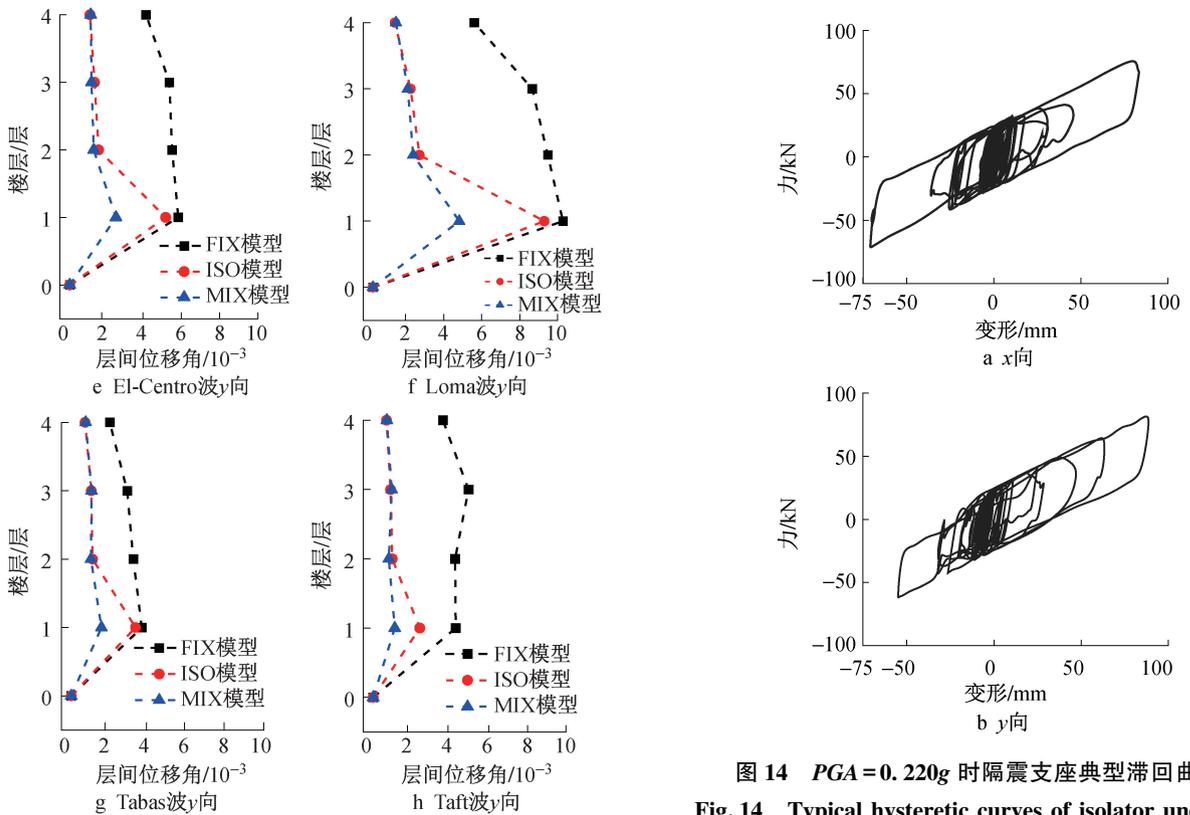


图 14 $PGA=0.220g$ 时隔震支座典型滞回曲线

Fig. 14 Typical hysteretic curves of isolator under the condition of $PGA=0.220g$

知,ISO,MIX 模型柱端弯矩及转角相对于 FIX 模型明显减小,ISO 模型 x,y 向柱端弯矩相对于 FIX 模型分别减小了 37.92%,36.81%,ISO 模型 x,y 向柱

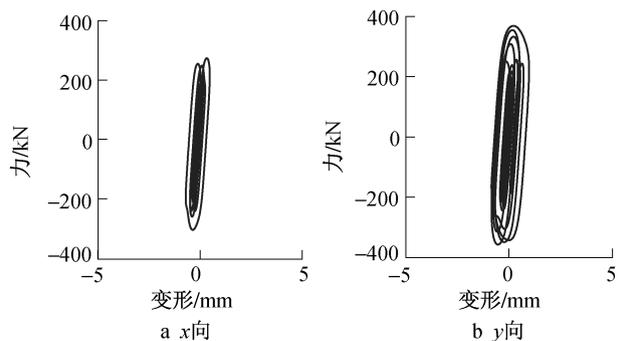


图 15 $PGA = 0.035g$ 时黏滞阻尼器典型滞回曲线
 Fig. 15 Typical hysteretic curves of damper under the condition of $PGA = 0.035g$

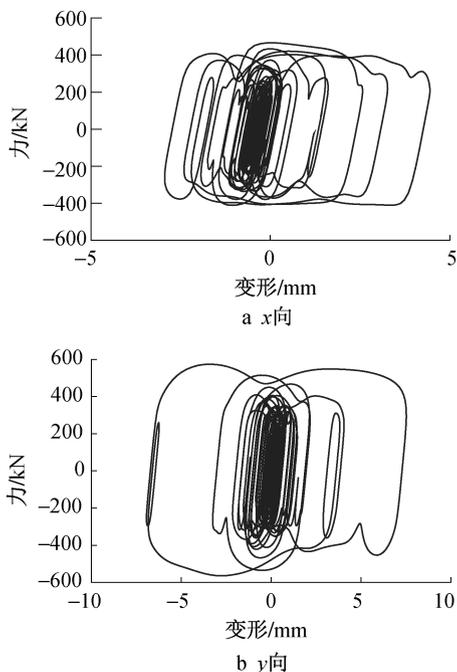


图 16 $PGA = 0.220g$ 时黏滞阻尼器典型滞回曲线
 Fig. 16 Typical hysteretic curves of damper under the condition of $PGA = 0.220g$

端转角相对于 FIX 模型分别减小了 58.85%, 37.16%; MIX 模型 x, y 向柱端弯矩相对于 FIX 模型分别减小了 41.49%, 46.84%, MIX 模型 x, y 向柱端转角相对于 FIX 模型分别减小了 62.73%, 50.19%。这表明通过采用减隔震组合技术相对于采用隔震技术可更有效地控制 1 层柱变形。

6 结语

1) ISO, MIX 模型加速度响应特性相似, 相对于 FIX 模型其加速度响应均明显减小, 且加速度响应减小幅度随着输入地震动峰值加速度的增大而增大。通过基础隔震技术可有效减小隔震层上部结构加速度响应, 在 1 层增设黏滞阻尼器对上部结构加速度响应变化规律无显著影响。

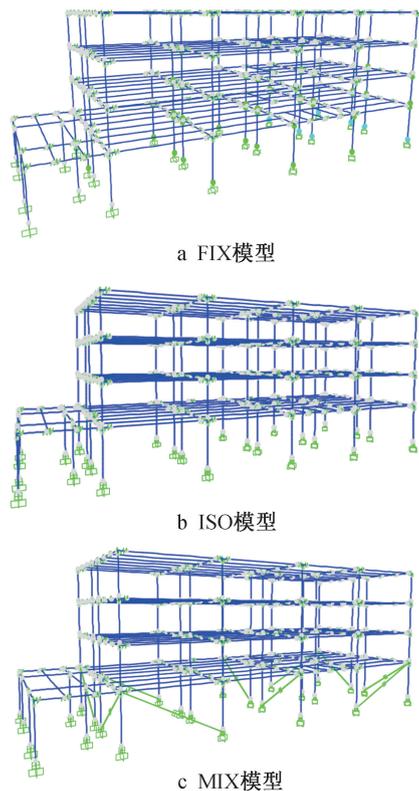


图 17 $PGA = 0.220g$ 时塑性铰状态 (Loma 波作用下)
 Fig. 17 Plastic hinge state under the condition of $PGA = 0.220g$ (Loma wave)

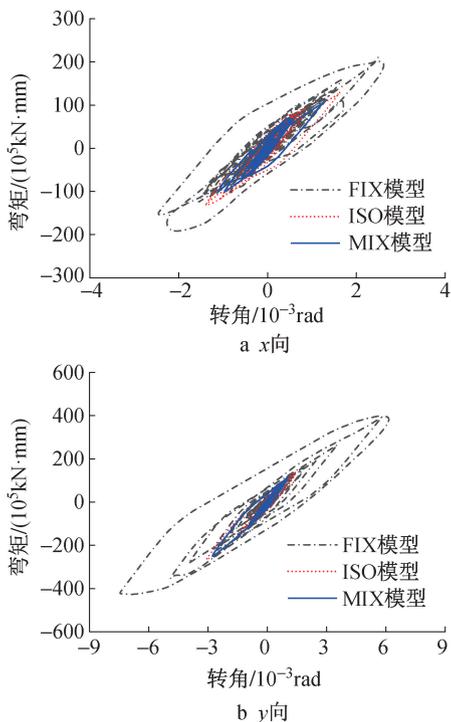


图 18 $PGA = 0.220g$ 时典型塑性铰 (Loma 波作用下)
 Fig. 18 Typical plastic hinge results under the condition of $PGA = 0.220g$ (Loma wave)

2) ISO 模型各楼层间位移角相对于 FIX 模型

明显减小,通过基础隔震技术可有效减小上部结构层间变形,但在结构薄弱层1层处,其层间变形仍明显大于其余楼层。MIX模型整体层间位移角相对于ISO模型进一步减小,薄弱层1层处层间位移角减小幅度最大,通过在薄弱层处增设黏滞阻尼器可有效减小其层间变形。

3)当输入地震动峰值加速度较小时,ISO,MIX模型中的隔震支座与黏滞阻尼器变形较小,整体耗能相对较少。随着输入地震动峰值加速度的增大,隔震支座与黏滞阻尼器变形增大,能够充分发挥隔震耗能作用,从而使结构地震响应控制效果得到进一步增强。

4)罕遇地震($PGA=0.220g$)工况下FIX模型1层柱脚处塑性铰状态普遍超过立即使用性能点,部分塑性铰状态超过生命安全性能点;ISO,MIX模型塑性铰状态均未超过立即使用性能点,塑性破坏程度明显降低。采用减隔震组合技术的MIX模型相对于采用隔震技术的ISO模型对1层柱变形控制更有效。

参考文献:

- [1] 仁爱珠,许镇,纪晓东,等. 防灾减灾工程与技术[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
REN A Z, XU Z, JI X D, et al. Disaster prevention and mitigation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [2] 丁洁民,吴宏磊. 减隔震建筑设计指南与工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
DING J M, WU H L. Design guidelines and engineering applications of building structure adopting seismic mitigation and isolation technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [3] 师娅芳,邱鹏,唐德龙,等. 2010—2022年贵州典型地震灾害情况及启示[J]. 地震科学进展,2025,55(2):88-94.
SHI Y F, QIU P, TANG D L, et al. Typical earthquake disasters in Guizhou during 2010 to 2022 and their implications [J]. Progress in earthquake sciences, 2025, 55(2): 88-94.
- [4] 潘毅,任宇,李路,等. 积石山6.2级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报,2024,45(S2):71-84.
PAN Y, REN Y, LI L, et al. Field investigation and analysis on damage of rural buildings in M_s 6.2 Jishishan earthquake [J]. Journal of building structures, 2024, 45(S2): 71-84.
- [5] 张俊,郭迅,罗若帆,等. 泸定6.8级地震典型震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动,2024,44(3):190-199.
ZHANG J, GUO X, LUO R F, et al. Seismic damage investigation and analysis of buildings in M_s 6.8 Luding earthquake [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2024, 44(3): 190-199.
- [6] 郑宇. 消能减震技术在结构抗震设计中的应用[J]. 施工技术(中英文),2024,53(14):114-117.
ZHENG Y. Application of energy dissipation technology in structural seismic design [J]. Construction technology, 2024, 53(14): 114-117.
- [7] 彭志桢,吴小宾,潘毅,等. 泸定6.8级地震城镇居住建筑典型震害及启示[J]. 建筑结构,2024,54(7):8-15,29.
PENG Z Z, WU X B, PAN Y, et al. Typical seismic damage of urban residential buildings in M_s 6.8 Luding earthquake and its enlightenment [J]. Building structure, 2024, 54(7): 8-15, 29.
- [8] CHRISTOPOULOS C, PAMPANIN S, NIGEL PRIESTLEY M J. Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations. Part I: Single-degree of freedom systems [J]. Journal of earthquake engineering, 2003, 7(1): 97-118.
- [9] BRUNEAU M, MACRAE G. Reconstructing Christchurch: a seismic shift in building structural systems [M]. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2017.
- [10] EROCHKO J, CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R, et al. Residual drift response of SMRFs and BRB frames in steel buildings designed according to ASCE 7-05 [J]. Journal of structural engineering, 2011, 137(5): 589-599.
- [11] 潘毅,高海旺,熊耀清,等. 泸定6.8级地震减隔震建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(12):122-136.
PAN Y, GAO H W, XIONG Y Q, et al. Seismic damage investigation and analysis of energy-dissipated and seismically isolated buildings in M_s 6.8 Luding earthquake [J]. Journal of building structures, 2023, 44(12): 122-136.
- [12] 兰学平,李婷婷,杨凯. 消能减震技术在某血液透析中心韧性加固中的应用[J]. 施工技术(中英文),2024,53(5):90-95.
LAN X P, LI T T, YANG K. Application of seismic energy dissipation technology in resilient reinforcement for a hemodialysis center [J]. Construction technology, 2024, 53(5): 90-95.
- [13] 刘兢兢,詹林,刘孝国,等.《建筑隔震设计标准》下高烈度地区某小学隔震设计[J]. 四川建筑科学研究,2022,48(2):1-9,16.
LIU J J, ZHAN L, LIU X G, et al. Seismic isolation design of an elementary school in a high-intensity area under the *Standard for Seismic Isolation Design of Building* [J]. Sichuan building science, 2022, 48(2): 1-9, 16.
- [14] 兰学平. 组合减震加固技术在教学楼加固中的应用[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):95-101.
LAN X P. Application of composite damping retrofitting technology of school building [J]. Construction technology, 2024, 53(9): 95-101.
- [15] 许本东,刘兢兢. 7度区某老年养护中心隔震设计及施工技术探讨[J]. 四川建筑科学研究,2023,49(4):10-19.
XU B D, LIU J J. Discussion of seismic isolation design and construction technology applied in an elder care center located in region of intensity seven [J]. Sichuan building science, 2023, 49(4): 10-19.