

DOI: 10.7672/sgjs2026030027

基于复合隔震控制系统的大型展品地震响应控制研究*

李德超¹, 吉峰², 田坤², 刘怀斌¹

(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] 隔震技术可有效控制结构在地震作用下的动力响应,在实际工程中得到了大量推广应用,但目前针对隔震技术的研究与应用多集中于整体建筑结构中,在大型展品中的应用较少。针对户外展出的大型展品,采用复合隔震控制系统对其进行隔震设计,控制结构在地震作用下的动力响应。通过有限元分析软件分别建立设有复合隔震控制系统的隔震结构(ISO结构)模型和常规固定安装的非隔震结构(FIX结构)模型,通过非线性时程分析对2个模型动力响应特性进行对比研究。研究表明,采用复合隔震控制系统后展品主杆顶部与底部相对水平位移在 $PGA=0.035g, 0.220g$ 工况下相对于FIX结构最大减小幅度分别为55.2%,76.7%,主杆顶部水平加速度峰值最大减小幅度分别为45.0%,77.1%,底座节点竖向力最大减小幅度分别为72.8%,82.3%。采用复合隔震控制系统可有效减小结构动力响应,减小幅度在输入地震动峰值加速度较大的工况下更明显,结构整体稳定性得到提升。

[关键词] 大型展品;阻尼器;隔震;地震响应;数值模拟

[中图分类号] TU352

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0027-08

Research on Seismic Response Control of Large-scale Exhibits Based on Composite Isolation Control System

LI Dechao¹, JI Feng², TIAN Kun², LIU Huaibin¹

(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: Seismic isolation technology can effectively control the dynamic response of structures under earthquake, and has been widely applied in practical engineering. But at present, the research and application of seismic isolation technology are mostly concentrated in the whole building structure, and the application in large-scale exhibits is less. For large-scale outdoor exhibits, a composite isolation control system is used to isolate them and control the dynamic response of the structure under earthquake action. An isolated structure model with composite isolation control system and a non-isolated structure model with conventional fixed installation were established by finite element analysis software, and the dynamic response characteristics of the two models were compared by nonlinear time history analysis. The research results show that the maximum reduction of the relative horizontal displacement of the top and bottom of the main pole of the exhibits under the condition of $PGA=0.035g$ and $PGA=0.220g$ relative to the FIX structure is 55.2% and 76.7% respectively, the maximum reduction of the horizontal acceleration peak at the top of the main pole is 45.0% and 77.1% respectively, and the maximum reduction of the vertical force of the base node is 72.8% and 82.3% respectively. The adoption of a composite isolation control system can effectively reduce the dynamic response of the structure. The reduction in amplitude is particularly significant under conditions with a larger peak acceleration, and the overall structural stability is significantly enhanced.

Keywords: large-scale exhibits; dampers; isolation; seismic response; simulation

*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] 李德超,高级工程师,E-mail:187179387@qq.com

[通信作者] 田坤,高级工程师,E-mail:longer1992tk@126.com

[收稿日期] 2025-10-15

0 引言

地震作为最具有破坏性的自然灾害,造成了巨大的人员伤亡与经济损失。隔震技术作为结构被动控制技术,其原理是通过在结构底部设置刚度较小的隔震层,以延长结构自振周期,进而控制结构在地震作用下的动力响应。1969年,世界上首座采用现代隔震概念设计的隔震建筑建成,该建筑采用橡胶块作为隔震装置,但橡胶块在结构自重作用下产生了较大的压缩变形,且横向变形明显。为提高支座竖向刚度并限制横向变形,法国设计师在纯橡胶块中加入多层钢板,由此形成了目前隔震结构中广泛应用的叠层橡胶隔震支座,并随后在朗贝斯库学校和库鲁阿斯核电站建设中进行了应用。国内外诸多学者对叠层橡胶隔震支座进行了系统研究,并在实际工程中进行了推广应用。当前,隔震技术在建筑结构中的应用较普遍,然而在户外大型景观展品中的应用相对较少。

户外大型景观展品通常布置于公园、步行街、旅游景点等人员密集场所,展品周围可能聚集大量人员,一旦在地震作用下发生破坏甚至倒塌,可能造成大量人员伤亡,引发严重后果。针对上述问题,本文提出复合隔震控制系统,并将其应用于大型景观展品,旨在减小地震作用下结构动力响应。通过数值分析方法,对采用复合隔震控制系统的隔震展品结构与常规非隔震固定展品结构动力响应特性进行了对比分析。

1 大型景观展品结构组成

该大型景观展品整体为钢结构,直径 16m,高度 8m。展品中间设有 1 根主杆,主杆周围均匀布置 16 根拱形主枝干,每根主枝干下部设有 2 根拱形斜撑,为进一步提高结构整体性,主枝干顶部设有环形支撑,且主枝干之间设有斜杆。各构件均采用圆形钢管,其中主杆截面尺寸为 $\phi 426 \times 20$,拱形主枝干截面尺寸包括 $\phi 102 \times 12$, $\phi 83 \times 10$, $\phi 60 \times 8$,拱形斜撑截面尺寸包括 $\phi 83 \times 10$, $\phi 60 \times 6$,环形支撑截面尺寸为 $\phi 30 \times 4$,斜杆截面尺寸为 $\phi 25 \times 3$ 。

2 有限元模型建立

常规非隔震展品结构底部设有由 H 型钢焊接而成的六边形底座,底座最大平面尺寸为 2m,上部展品主体结构通过该底座与地面固定连接,建立的模型如图 1a 所示,为便于表述,后文用 FIX 结构表示。

为减小上部展品结构在地震作用下的动力响应,在六边形底座与地面之间增设复合隔震控制系统,形成复合隔震展品结构模型,如图 1b 所示,为便

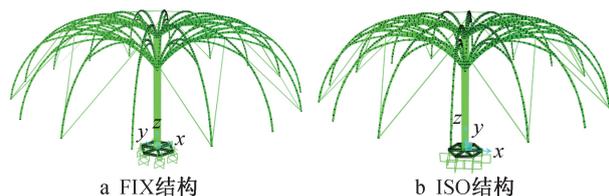


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element models

于表述,后文用 ISO 结构表示。复合隔震控制系统主要由铅芯叠层橡胶隔震支座、摩擦滑移支座和黏滞阻尼器组成,通过铅芯叠层橡胶隔震支座为隔震层提供较小的水平刚度、耗能能力与承载力,通过摩擦滑移支座可在不影响隔震周期的前提下提供竖向承载力,黏滞阻尼器可提供耗能能力。

3 分析工况设置

为研究 FIX 结构和 ISO 结构在不同地面峰值加速度 PGA 下的动力响应特性,分别设置 PGA 为 $0.035g$ 和 $0.220g$,开展非线性时程分析。加载方式采用水平双向加载, x, y 向加速度峰值输入比例为 $1:0.85$ 。共选用 6 条地震波,归一化地震波时程曲线如图 2 所示,加速度反应谱如图 3 所示。

4 结构位移响应分析

不同工况下展品结构主杆处整体水平位移分别如图 4,5 所示。由图 4,5 可知, FIX 结构主杆底部与底座固定连接,因此主杆底部不发生水平位移,因底座与地面采用固定连接方式,导致上部结构所受水平地震作用较大,主杆顶部与底部产生的相对水平位移大于 ISO 结构; ISO 结构底座在地震作用下可发生较大的水平位移,因此主杆底部位移相对于 FIX 结构增大,但复合隔震控制系统可有效减小上部结构地震作用, ISO 结构主杆顶部与底部相对水平位移相对于 FIX 结构明显减小。

当 $PGA = 0.035g$ 时, ISO 结构主杆顶部与底部 x, y 向相对水平位移最大减小幅度分别为 39.9% , 55.2% ; 当 $PGA = 0.220g$ 时, ISO 结构主杆顶部与底部 x, y 向相对水平位移最大减小幅度分别为 68.8% , 76.7% 。这表明 ISO 结构主杆顶部与底部相对水平位移减小幅度随着输入地震动峰值加速度的增大而增大,采用复合隔震控制系统可有效减小主杆相对水平位移。

5 结构加速度响应分析

取展品结构中主杆顶部加速度最大值为加速度响应代表值,不同工况下 FIX, ISO 结构加速度响应对比如图 6,7 所示。由图 6,7 可知,当 $PGA = 0.035g$ 时,主杆顶部 x, y 向加速度峰值最大减小幅

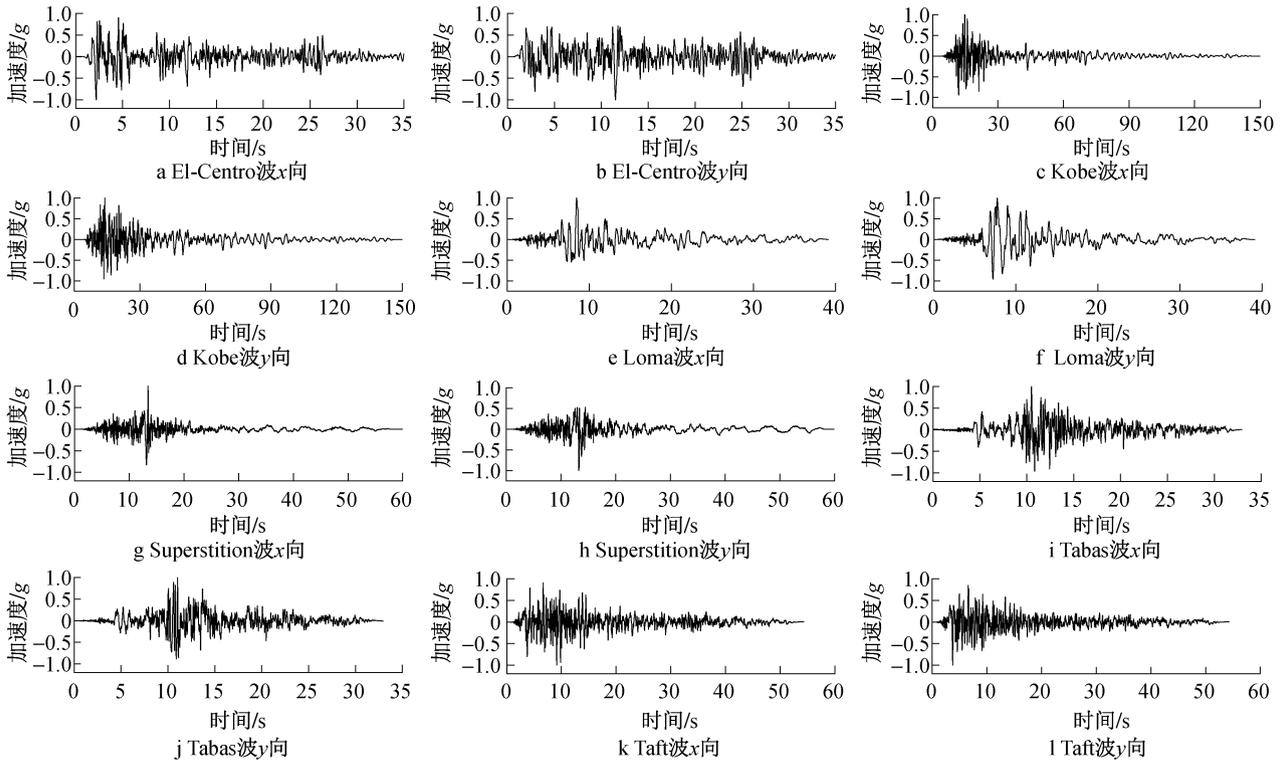


图2 地震波时程曲线

Fig. 2 Time history curves of seismic waves

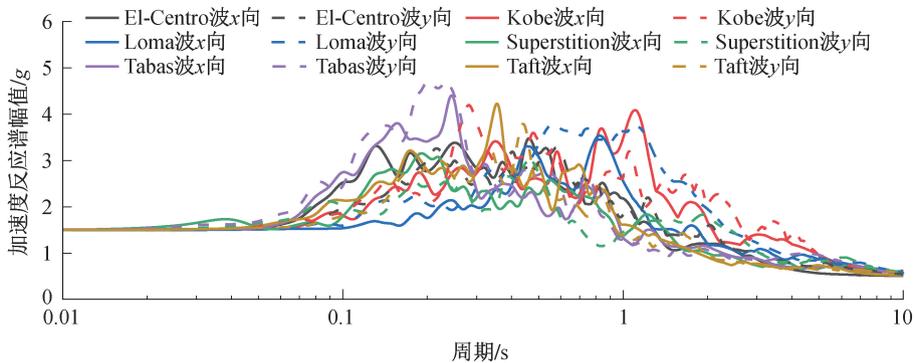


图3 地震波加速度反应谱

Fig. 3 Response spectrum curves of seismic waves

度分别为 30.9%, 45.0%; 当 $PGA = 0.220g$ 时, 主杆顶部 x, y 向加速度峰值最大减小幅度分别为 72.7%, 77.1%。隔震层上部结构加速度响应控制规律与位移响应类似, ISO 结构加速度响应相对于 FIX 结构明显减小, 减小幅度随着输入地震动峰值加速度的增大而增大, 可知复合隔震控制系统可有效减小隔震层上部结构加速度响应。

6 倾覆稳定性分析

为研究上部结构在地震作用下的倾覆稳定性, 分别分析底座左、右节点(见图 8)竖向力, 结果如图 9~12 所示。由图 9, 10 可知, ISO 结构左、右节点竖向力峰值相对于 FIX 结构明显减小, 当 $PGA =$

$0.035g$ 时 ISO 结构节点竖向力峰值最大减小幅度为 72.8%, 当 $PGA = 0.220g$ 时 ISO 结构节点竖向力峰值最大减小幅度为 82.3%, 可知随着输入地震动峰值加速度的增大, 复合隔震控制系统发生较大变形, 充分发挥隔震耗能作用, 以降低上部结构地震响应, 减小水平地震作用下产生的倾覆效应, 提高结构稳定性。

由图 11, 12 可知, ISO 结构左、右节点竖向力全程较 FIX 结构明显减小; ISO 结构左节点竖向力全程为负值(受压), 这是由于左节点采用摩擦滑动支座, 仅可承受压力, 不可承受拉力; ISO 结构右节点竖向力全程有正(受拉)有负(受压), 这是因为右节

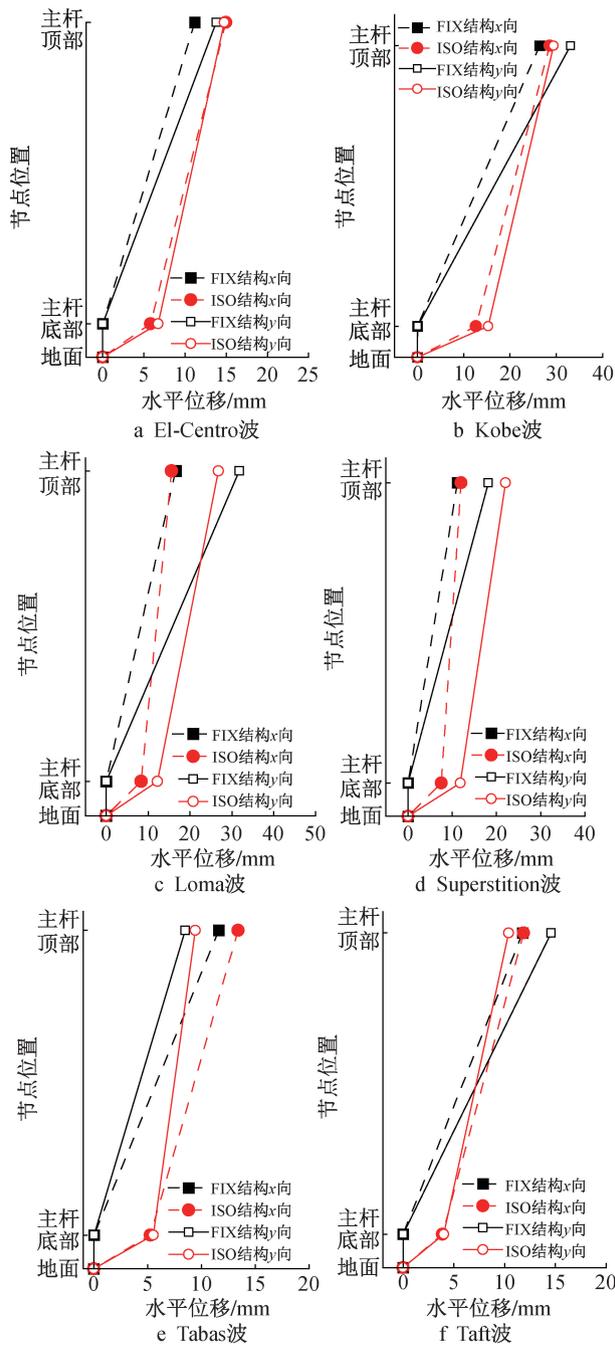


图 4 $PGA = 0.035g$ 时结构整体水平位移

Fig. 4 Overall horizontal displacement of structure under the condition of $PGA = 0.035g$

点采用铅芯叠层橡胶隔震支座,可同时承受拉力和压力。

7 隔震层响应分析

7.1 铅芯叠层橡胶隔震支座

ISO 结构复合隔震控制系统中铅芯叠层橡胶隔震支座在不同工况下的典型滞回曲线分别如图 13, 14 所示。由图 13, 14 可知,当 $PGA = 0.035g$ 时铅芯叠层橡胶隔震支座铅芯未发生屈服,滞回曲线呈斜线状态,该工况下耗能极为有限;随着输入地震动

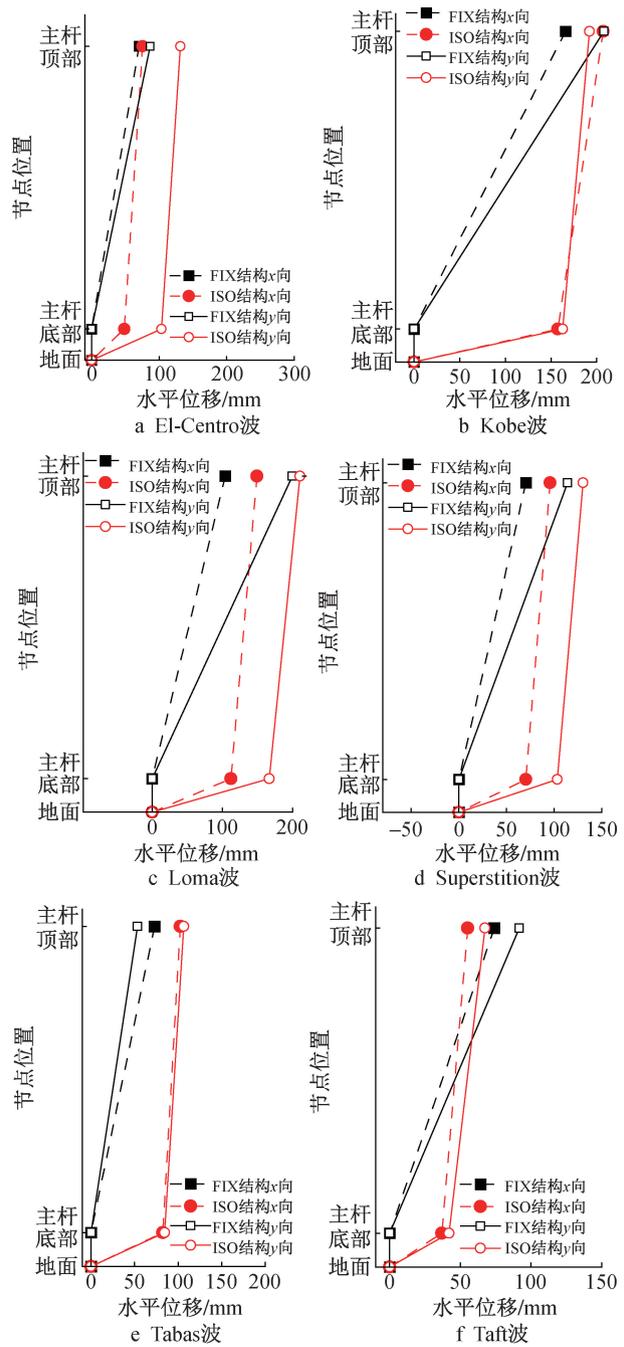


图 5 $PGA = 0.220g$ 时结构整体水平位移

Fig. 5 Overall horizontal displacement of structure under the condition of $PGA = 0.220g$

峰值加速度的增大,在 $PGA = 0.220g$ 工况下铅芯叠层橡胶隔震支座铅芯发生屈服,滞回曲线呈典型的双线性特性,该工况下支座不仅可有效发挥隔震功能,且可在变形过程中大量耗散地震能量。

7.2 摩擦滑移支座

ISO 结构复合隔震控制系统中摩擦滑移支座在不同工况下的典型滞回曲线分别如图 15, 16 所示。由图 15, 16 可知,摩擦滑移支座与铅芯叠层橡胶隔震支座变形幅值基本相同。在 $PGA = 0.035g$ 工况

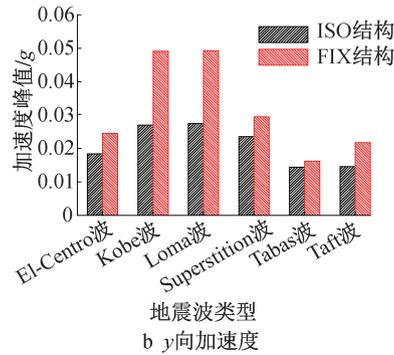
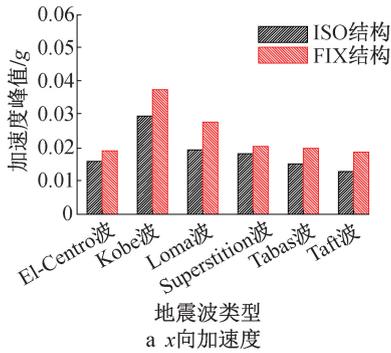


图6 PGA=0.035g时主杆顶部加速度

Fig. 6 Horizontal acceleration at the top of the main pole under the condition of PGA=0.035g

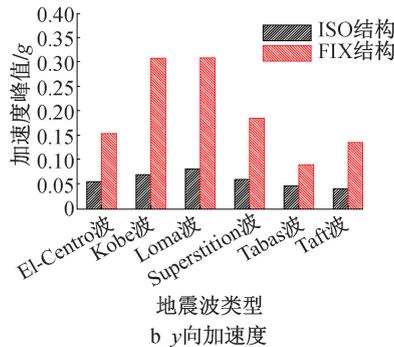
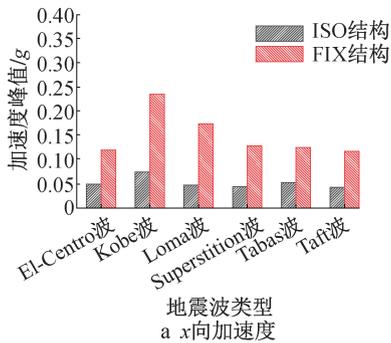


图7 PGA=0.220g时主杆顶部加速度

Fig. 7 Horizontal acceleration at the top of the main pole under the condition of PGA=0.220g

下摩擦滑移支座滞回曲线包络面积较小,摩擦耗能较少;随着输入地震动峰值加速度的增大,在PGA=0.220g工况下摩擦滑移支座滞回曲线包络面积明显增大,耗散的地震能量提升。

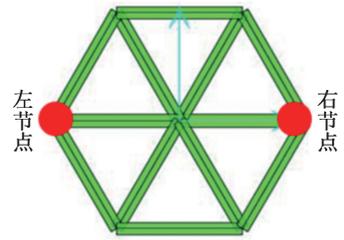


图8 节点位置示意

Fig. 8 Node position

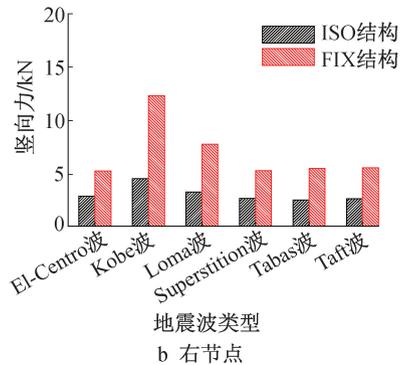
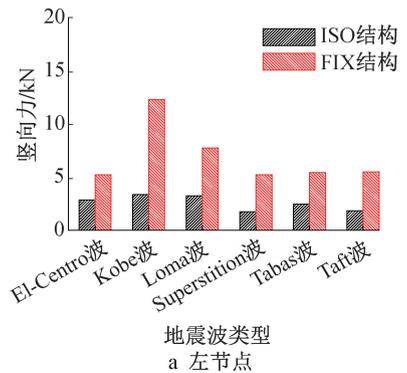


图9 PGA=0.035g时节点竖向力峰值

Fig. 9 Peak vertical force of the node under the condition of PGA=0.035g

7.3 黏滞阻尼器

ISO结构复合隔震控制系统中黏滞阻尼器在不同工况下的典型滞回曲线如图17所示。由图17可知,黏滞阻尼器在PGA=0.035g工况下即可发挥耗能作用,随着输入地震动峰值加速度的增大,黏滞阻尼器变形速度与幅值增大,最大阻尼力随着黏滞阻尼器变形速度的增大呈增大趋势,使其耗散地震能量明显提升,增强上部结构地震响应控制效果。

8 结语

1)采用复合隔震控制系统在不同输入地震动峰值加速度工况下均可有效减小隔震层上部大型展品位移响应,ISO结构主杆顶部与底部相对水平位移在PGA=0.035g,0.220g工况下相对于FIX结构最大减小幅度分别为55.2%,76.7%。

2)复合隔震控制系统对隔震层上部大型展品

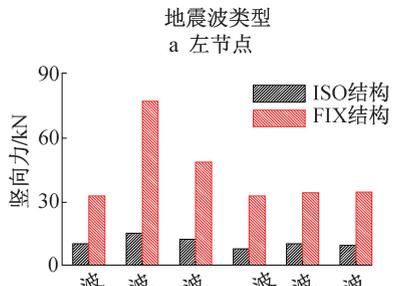
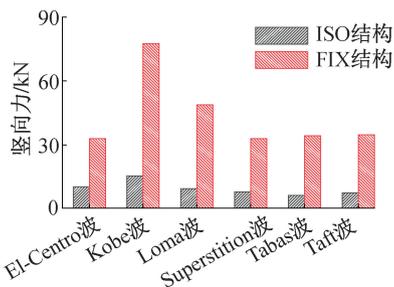


图 10 $PGA=0.220g$ 时节点竖向力峰值

Fig. 10 Peak vertical force of the node under the condition of $PGA=0.220g$

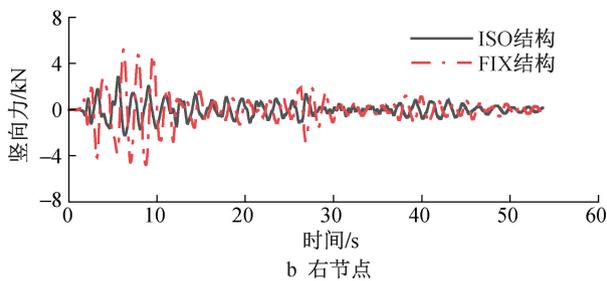
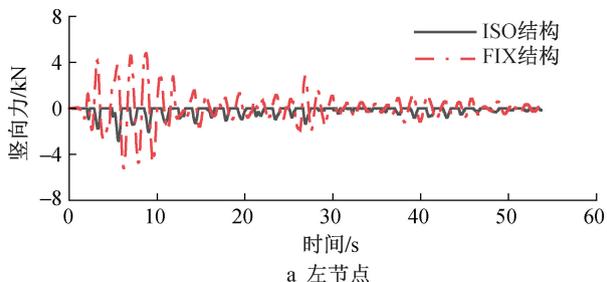


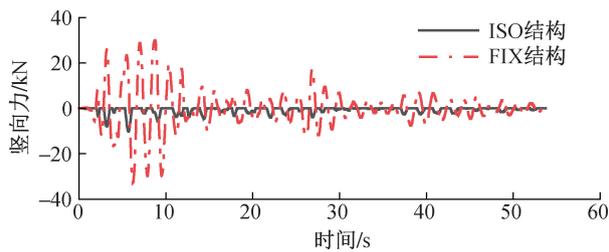
图 11 $PGA=0.035g$ 时节点竖向力时程曲线

(El-Centro 波作用下)

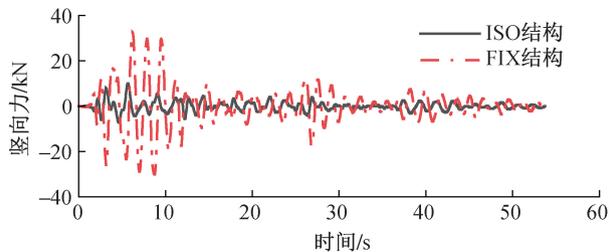
Fig. 11 History curves for the vertical force of the node under the condition of $PGA=0.035g$ (El-Centro wave)

加速度响应控制规律与位移响应类似,ISO 结构主杆顶部水平加速度峰值在 $PGA=0.035g,0.220g$ 工况下相对于 FIX 结构最大减小幅度分别为 45.0%,77.1%。

3) 复合隔震控制系统可显著减小结构底座节点处竖向力, $PGA=0.035g,0.220g$ 工况下 ISO 结构



a 左节点

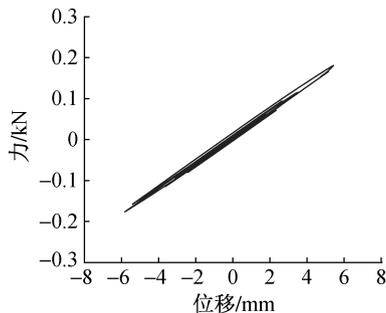


b 右节点

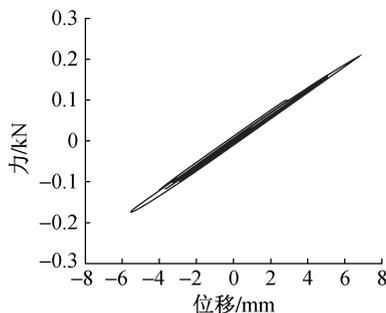
图 12 $PGA=0.220g$ 时节点竖向力时程曲线

(El-Centro 波作用下)

Fig. 12 History curves for the vertical force of the node under the condition of $PGA=0.220g$ (El-Centro wave)



a x向滞回曲线



b y向滞回曲线

图 13 $PGA=0.035g$ 时铅芯叠层橡胶隔震支座

滞回曲线(El-Centro 波作用下)

Fig. 13 Hysteresis curves of lead-core laminated rubber isolation bearing under the condition of $PGA=0.035g$

(El-Centro wave)

相对于 FIX 结构节点竖向力最大减小幅度分别达 72.8%,82.3%,可有效减小因水平地震作用导致的结构倾覆效应,提高结构整体稳定性。

4) 在 $PGA=0.035g$ 工况下,复合隔震控制系统

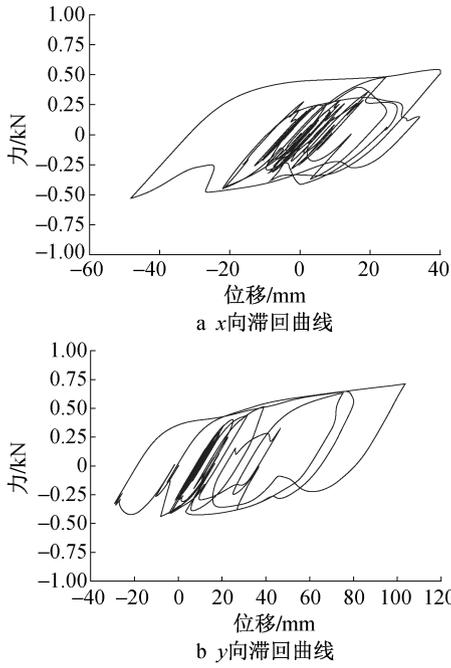


图 14 $PGA=0.220g$ 时铅芯叠层橡胶隔震支座滞回曲线 (El-Centro 波作用下)

Fig. 14 Hysteresis curves of lead-core laminated rubber isolation bearing under the condition of $PGA=0.220g$ (El-Centro wave)

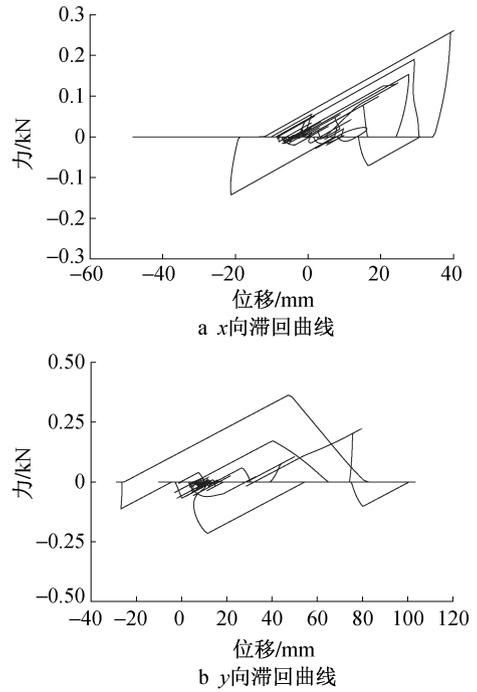


图 16 $PGA=0.220g$ 时摩擦滑移支座滞回曲线 (El-Centro 波作用下)

Fig. 16 Hysteresis curves of friction-slip bearing under the condition of $PGA=0.220g$ (El-Centro wave)

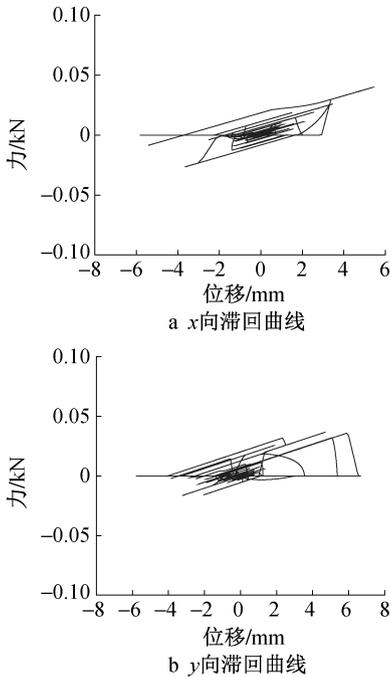


图 15 $PGA=0.035g$ 时摩擦滑移支座滞回曲线 (El-Centro 波作用下)

Fig. 15 Hysteresis curves of friction-slip bearing under the condition of $PGA=0.035g$ (El-Centro wave)

中铅芯叠层橡胶隔震支座铅芯未发生屈服,滞回曲线呈线性特性,耗散的地震能量少;摩擦滑移支座

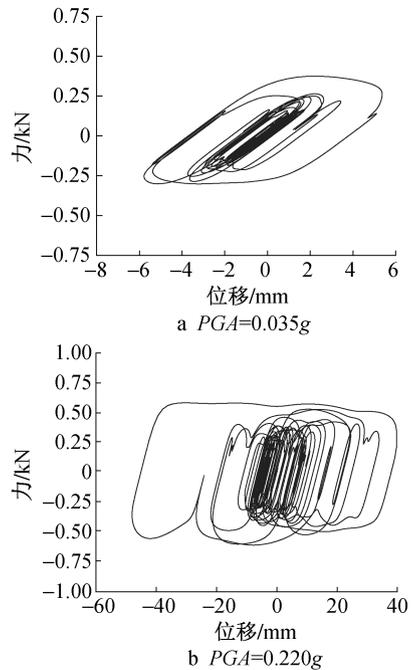


图 17 不同工况下黏滞阻尼器滞回曲线 (El-Centro 波作用下)
Fig. 17 Hysteresis curves of viscous damper under different conditions (El-Centro wave)

和黏滞阻尼器虽进入工作状态,但由于复合隔震控制系统整体变形小,导致其耗散的地震能量较少。在 $PGA=0.220g$ 工况下,随着输入地震动峰值加速度的增大,复合隔震控制系统变形逐渐增大,铅芯

叠层橡胶隔震支座铅芯发生屈服,滞回曲线呈典型的双线性特性,摩擦滑移支座和黏滞阻尼器滞回曲线更饱满,复合隔震控制系统耗散地震能量的能力进一步提升。在输入地震动峰值加速度较大的工况下,复合隔震控制系统可充分发挥隔震与耗能作用,对于隔震层上部大型展品结构地震响应控制效果明显优于输入地震动峰值加速度较小的工况。

参考文献:

- [1] 朱林,冯蔚,钱庚. 2022 年全球地震灾害概要[J]. 地震科学进展, 2023, 53(8): 351-359.
ZHU L, FENG W, QIAN G. Overview of worldwide earthquake disasters in 2022[J]. Progress in earthquake sciences, 2023, 53(8): 351-359.
- [2] NAEIM F, KELLY J M. Design of seismic isolated structures: From theory to practice[M]. 1999.
- [3] 刘文光,杨巧荣,周福霖,等. 橡胶座非线性弹性拉伸特性的理论和试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 158-167.
LIU W G, YANG Q R, ZHOU F L, et al. Theoretical and experimental researches on nonlinear elastic tension property of rubber isolators[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2004, 24(2): 158-167.
- [4] 刘文光,杨巧荣,周福霖,等. 橡胶座非线性弹性回转剪切特性的理论和试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 172-179.
LIU W G, YANG Q R, ZHOU F L, et al. Nonlinear elastic rotation and shear property theoretical and experimental research of rubber isolators[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2004, 24(1): 172-179.
- [5] 聂桂波,石宇杰,王志詠,等. 电力配电柜隔震性能振动台试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(9): 37-42.
NIE G B, SHI Y J, WANG Z Y, et al. Shaking table test study on isolation performance of power distribution cabinet[J]. Construction technology, 2025, 54(9): 37-42.
- [6] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. I: theory[J]. Journal of structural engineering, 2009, 135(12): 1440-1449.
- [7] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. II: verification of theory[J]. Journal of structural engineering, 2009, 135(12): 1450-1461.
- [8] RAVARI A K, OTHMAN I, IBRAHIM Z, et al. Variations of horizontal stiffness of laminated rubber bearings using new boundary conditions[J]. Scientific research and essays, 2011, 6(14): 3065-3071.
- [9] 李尚飞,崔少华,付素娟,等. 既有隔震建筑隔震支座无扰动更换技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(24): 134-137, 149.
LI S F, CUI S H, FU S J, et al. Disturbance-free replacement of seismic isolation bearings in existing seismically isolated buildings[J]. Construction technology, 2024, 53(24): 134-137, 149.
- [10] 陈忆前,牛松山,刘洋,等. 铅芯隔震橡胶支座关键抗震性能参数极低温效应试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2024, 50(5): 20-27, 73.
CHEN Y Q, NIU S S, LIU Y, et al. Experimental study of key seismic performance parameters of lead rubber bearing isolator under extreme low-temperature effect[J]. Sichuan building science, 2024, 50(5): 20-27, 73.
- [11] CHARMPIS D C, PHOCAS M C, KOMODROMOS P. Optimized retrofit of multi-storey buildings using seismic isolation at various elevations: Assessment for several earthquake excitations[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2015, 13(9): 2745-2768.
- [12] TSIAVOS A, MACKIE K R, VASSILIOU M F, et al. Dynamics of inelastic base-isolated structures subjected to recorded ground motions[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2017, 15(4): 1807-1830.
- [13] 王利文,章伯阳,罗振源,等. 隔震钢框架结构支座内力调整施工方法研究与应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(16): 135-139.
WANG L W, ZHANG B Y, LUO Z Y, et al. Research and application of internal force adjustment construction method of isolation steel frame structure bearing[J]. Construction technology, 2024, 53(16): 135-139.
- [14] 段先军,刘云飞,雷素素,等. 北京大兴国际机场航站楼核心区工程层间隔震支座及防火包封施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(14): 16-19, 65.
DUAN X J, LIU Y F, LEI S S, et al. Construction technology of seismic isolation bearing and fire-proof enclosure of engineering story in the core area of Beijing Daxing International Airport Terminal Building[J]. Construction technology, 2019, 48(14): 16-19, 65.
- [15] 周海涛,肖承波,吴体. 隔震加固在超限底框砌体结构加固中的应用研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020, 46(3): 29-36.
ZHOU H T, XIAO C B, WU T. Application of isolation reinforcement in reinforcement of masonry structures with ultra-limit bottom frames[J]. Sichuan building science, 2020, 46(3): 29-36.
- [16] 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.