

低频隔振基台地震水平变形控制研究

黄 伟

国机集团科学技术研究院有限公司国机集团工程振动控制技术研究中心, 北京

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月22日; 发布日期: 2023年3月31日

摘 要

低频隔振基台在超精密工程振动控制中应用广泛, 研究其地震作用下的水平变形控制具有重要意义。本文先开展了不同阻尼比条件下的地震水平变形研究, 结果显示阻尼比的大幅增加并不能显著降低地震水平变形; 为此, 考虑在隔振基台附加双向水平粘滞阻尼器, 结果显示双向粘滞阻尼器可以显著降低地震水平变形, 阻尼器出力曲线饱满, 能够较好地发挥控制作用。本研究对于低频隔振基台的地震水平变位控制具有一定的指导作用。

关键词

低频隔振基台, 地震水平变形, 粘滞阻尼器

Research on Seismic Horizontal Deformation Control of Low-Frequency Vibration Isolation Platform

Wei Huang

SINOMACH Technology Research Center of Engineering Vibration Control, SINOMACH Academy of Science and Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 22nd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

Low-frequency vibration isolation platform is widely used in the vibration control of ultra-precision engineering. It is of great significance to study the horizontal deformation control excited by earthquake action. In this paper, the seismic horizontal deformation with different damping ratios is investigated firstly. The results show that the large increase of damping ratio cannot significantly reduce the seismic horizontal deformation. For this reason, bidirectional horizontal viscous dampers attached to the vibration isolation platform are adopted here. The results show that the bidirectional viscous dampers can significantly reduce the horizontal deformation excited by the

seismic vibration, and the output curve of the damper is plump, and it indicates that the dampers can play a better control role. This study has a certain guiding role for the seismic horizontal displacement control of low-frequency vibration isolation base platform.

Keywords

Low Frequency Vibration Isolation Platform, Seismic Horizontal Deformation, Viscous Damper

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

低频隔振系统一般指固有频率在 2 Hz 以下，主要实现方式有气浮振动控制系统[1] [2]、准零刚度振动控制系统[3] [4] [5]等，在超精密工程微振动控制等领域中发挥了重要作用。

低频隔振系统的振动控制效果较好，但由于体系较柔，当面临地震作用时，将产生较大的水平变形，会造成隔振基台大变形甩出、隔振器破坏以及隔振基台上的精密装备损坏，需要采取措施控制其地震作用变形。

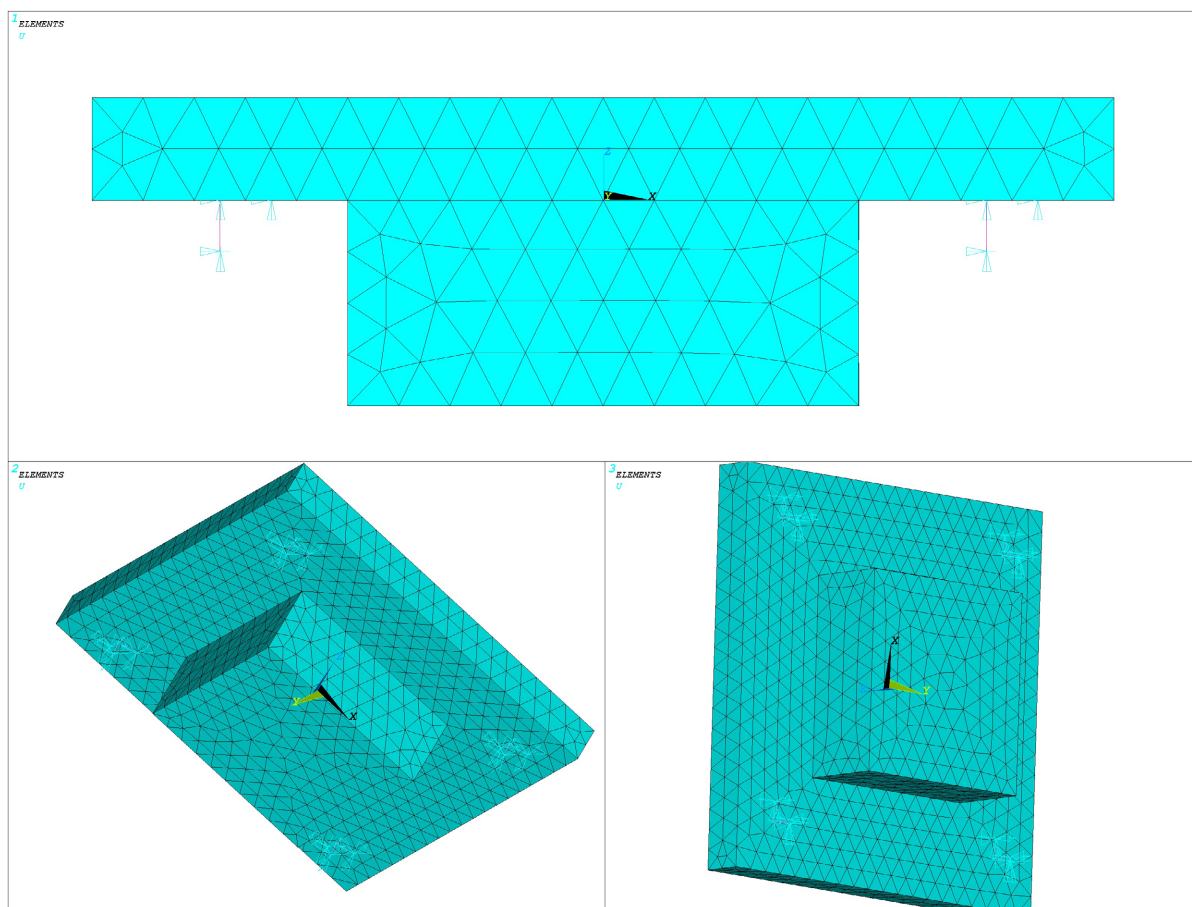
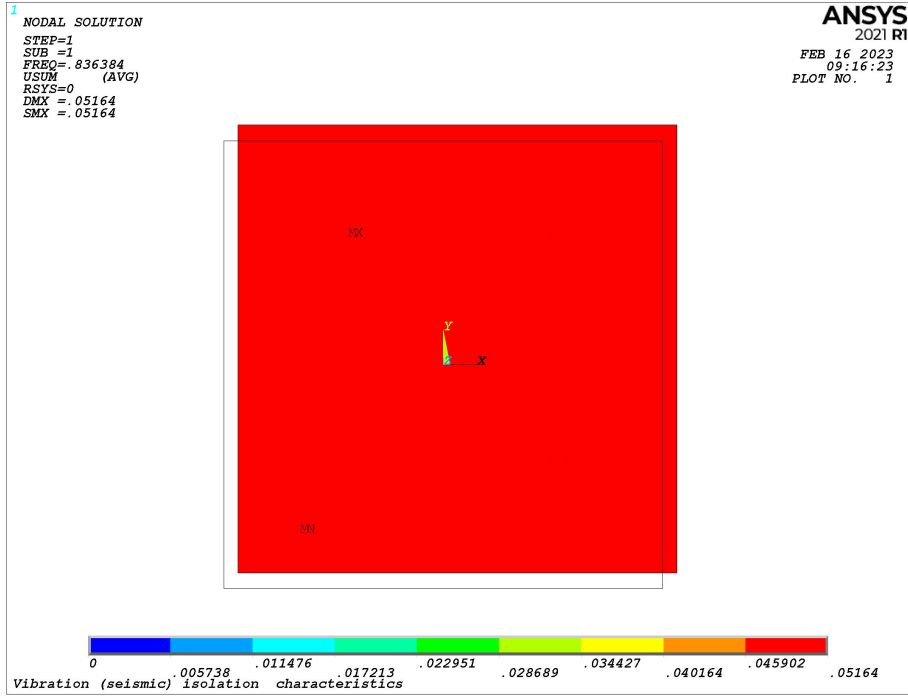


Figure 1. Numerical model of vibration isolation platform

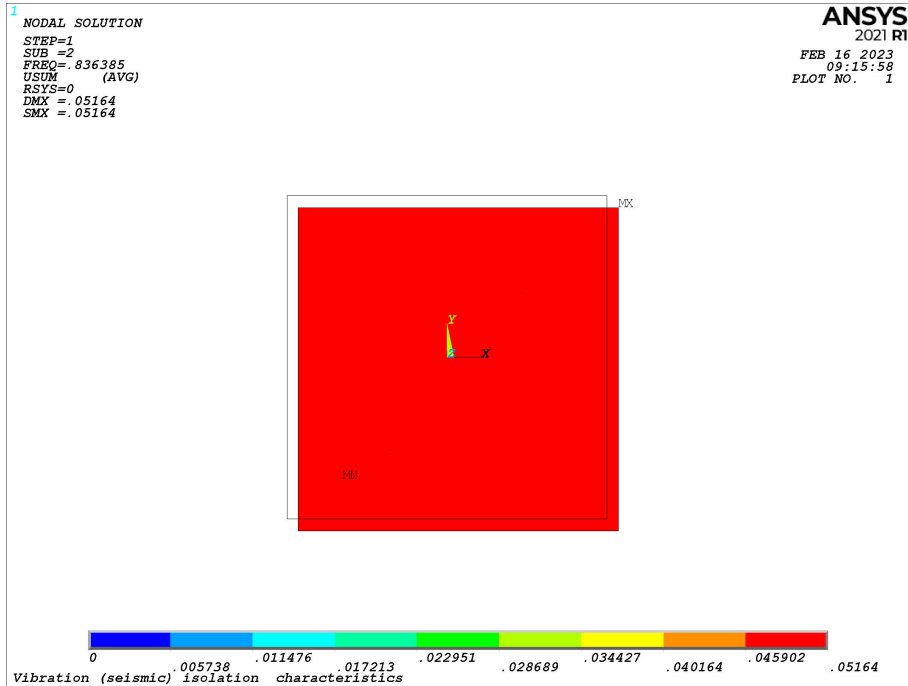
图 1. 隔振基台数值计算模型

2. 低频隔振基台

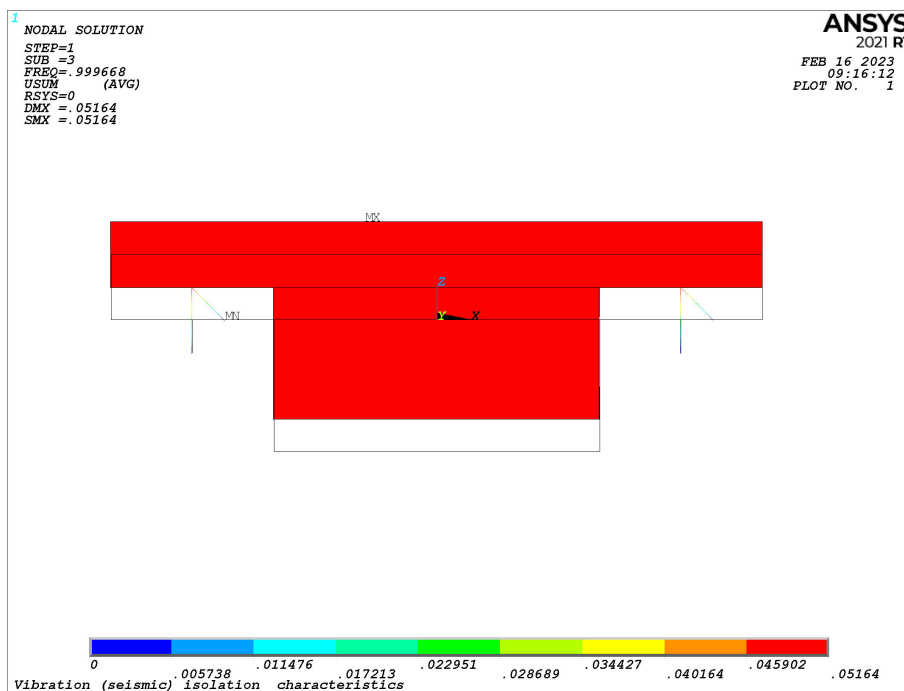
如图 1 所示的钢筋混凝土隔振基台，考虑了基于质刚重合的自由度解耦，台板尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ ，下挂尺寸为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ ，体系的竖向设计频率为 1.0 Hz ，水平刚度为竖向的 0.7 倍。ANSYS 环境下，基台用 solid65 单元模拟，隔振器采用 combin14 单元模拟[6]。图 2 给出了体系的水平及竖向模态。



(a) 沿 x 向平动(0.84 Hz)



(b) 沿 y 向平动(0.84 Hz)



(c) 沿 z 向平动(1.0 Hz)

Figure 2. Horizontal and vertical modes of vibration isolation platform
图 2. 隔振基台水平及竖向模态

考虑如图 3 所示的三向地震加速度输入, 图 4 给出了台面中部某点在地震作用下的水平变位(不考虑体系阻尼比), 可见台面最大水平变形达到了 4 cm。

3. 体系阻尼比对地震水平变形影响研究

实际工程中, 对于气浮振动控制等低频隔振系统, 一般具有较大的阻尼比, 图 5 给出了体系阻尼比 $\zeta=0$, $\zeta=0.1$ 及 $\zeta=0.2$ 下体系的地震水平变形, 可见阻尼比的增加不能显著降低水平向变形, 即使阻尼比增加到 0.2, 其 x、y 向最大水平变形也达到了 3.5 cm、3 cm。

4. 附加双向水平粘滞阻尼器

粘滞阻尼器在桥梁[7][8]、建筑结构[9][10]振动控制中已经广泛应用, 在工业装备[11]中也进行了应用, 为此, 考虑将粘滞阻尼器引入, 开展变形控制研究, 附加双向水平粘滞阻尼器的隔振基台如图 6 所示, 为不影响隔振基台的竖向隔振性能, 实际工程中, 粘滞阻尼器与隔振基台可采用滑轨式连接等方式, 具体不在本研究中阐述。

典型的速度型粘滞阻尼器力学模型如下:

$$F = C|v|^n \operatorname{sgn}(v) \quad (1)$$

其中, F 为阻尼力, C 为阻尼系数, v 为相对速度, n 为速度指数, 其范围一般为 0.1~2.0。

ANSYS 中的 combin37 单元可以通过较为繁琐的参数设置后, 模拟式(1)力学模型的速度型粘滞阻尼器[3][4]。combin37 单元为非线性一维单元, 由 2 个单元活动节点和可选的 2 个控制节点组成, 整个单元的复杂非线性行为主要由控制节点产生, 如果不设置控制节点, 该单元与一般的弹簧阻尼器单元相同, combin37 的力学原理如图 7 所示。

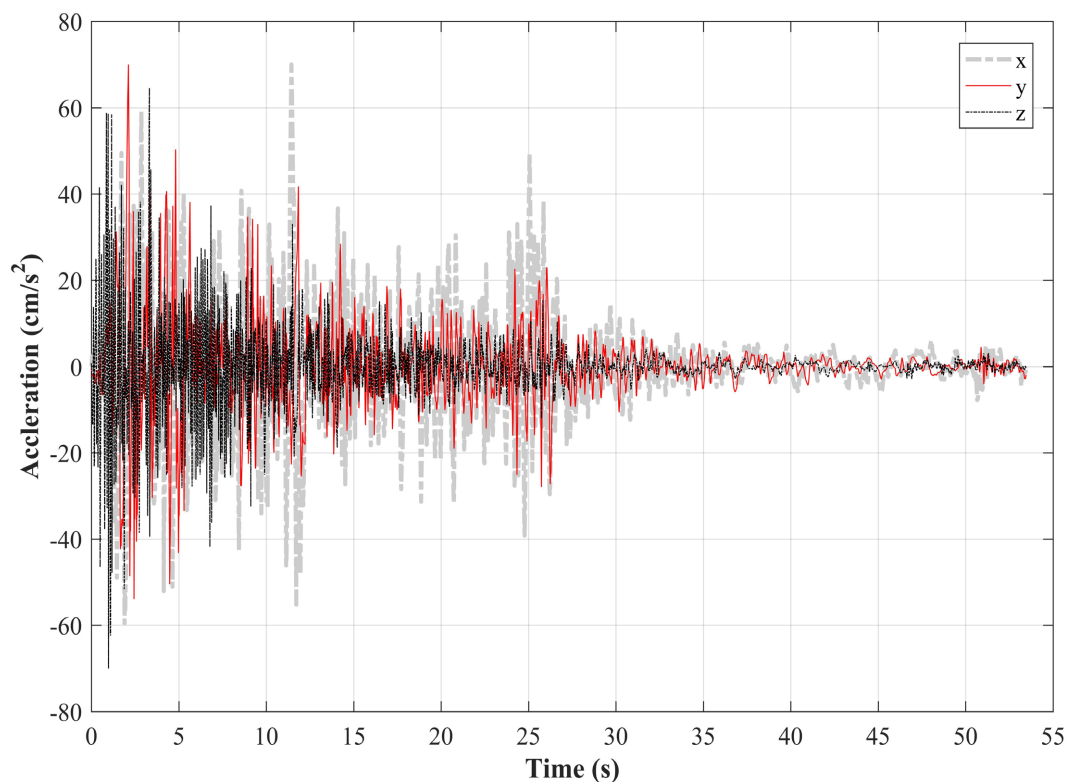


Figure 3. Seismic acceleration input

图3. 地震加速度输入

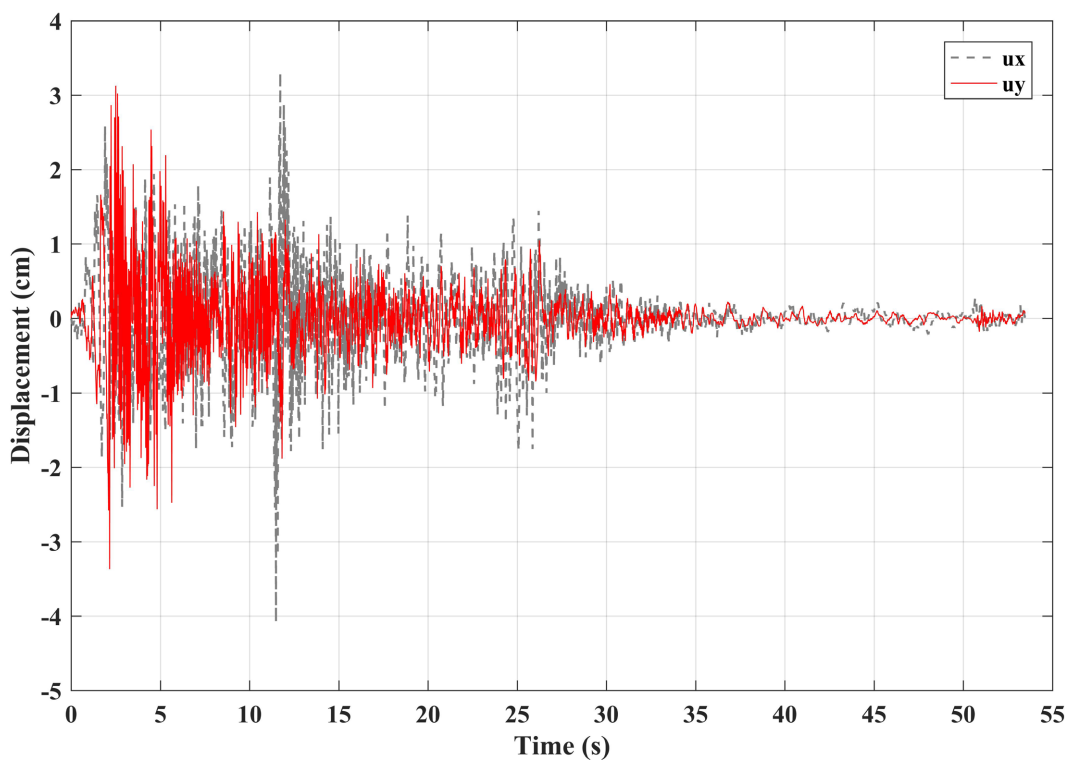
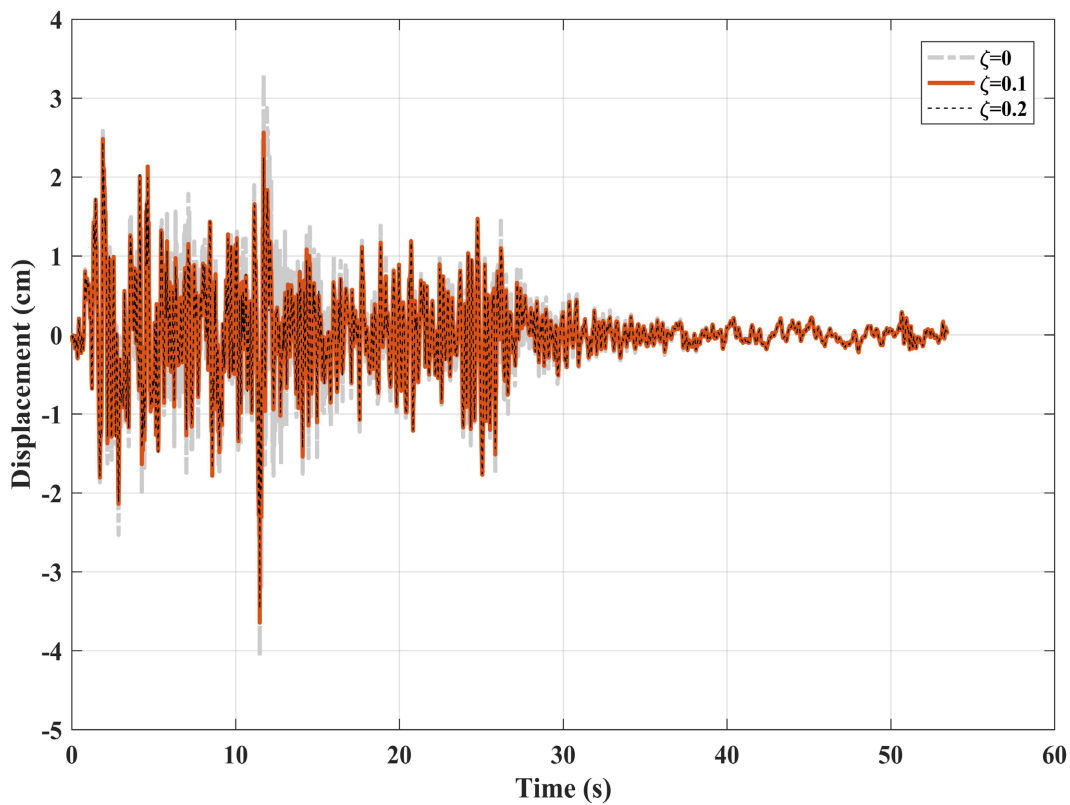
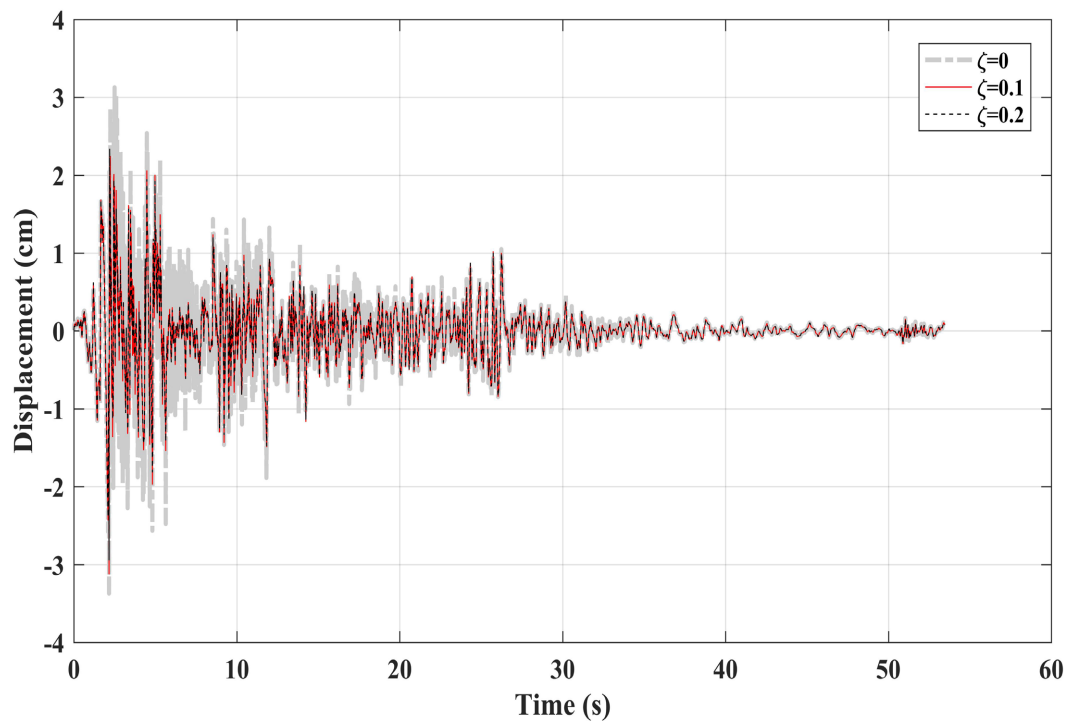


Figure 4. Seismic horizontal deformation of a point in the middle of the platform

图4. 台面中部某点的地震水平双向变形



(a) x 向



(b) y 向

Figure 5. Impact on seismic horizontal deformation with the change of damping ratio

图 5. 体系阻尼比变化对地震水平变形影响

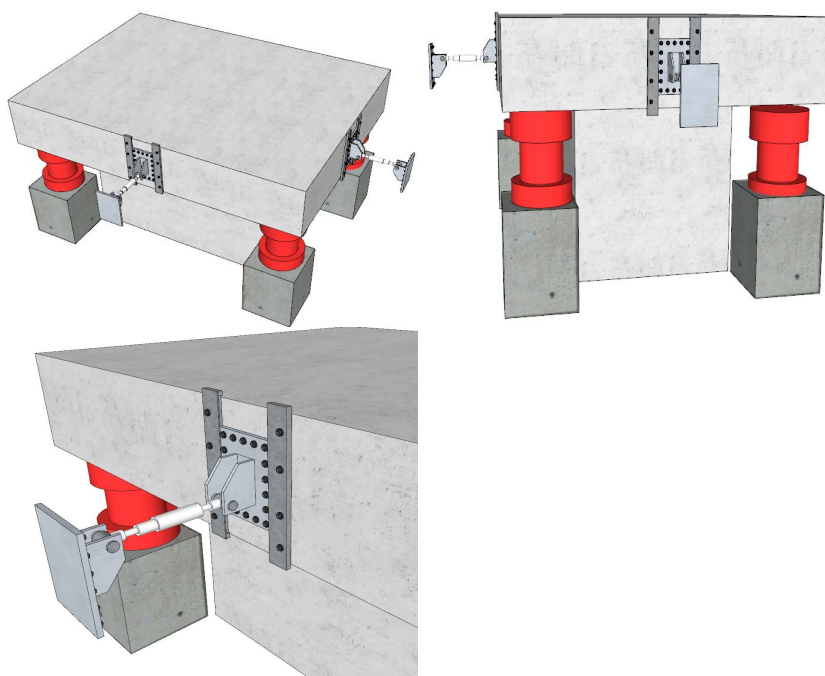


Figure 6. Vibration isolation platform with bidirectional horizontal viscous dampers
图 6. 附加双向水平粘滞阻尼器的隔振基台

为了实现粘滞阻尼器特性，该单元选项定义如下：

KEYOPT(1) = 2;

KEYOPT(2) = 1;

KEYOPT(3) = 1 或 2 (1 代表施加 x 方向阻尼器，2 代表施加 y 方向阻尼器)；

KEYOPT(4) = 1;

KEYOPT(5) = 1;

KEYOPT(6) = 2;

KEYOPT(9) = 0.

本研究中在隔振基台 x 和 y 方向分别施加一个粘滞阻尼器，其阻尼系数为 $1 \times 10^5 \text{ N/(s}\cdot\text{m)}$ ，指数常数为 0.4。图 8 给出了粘滞阻尼器的位移—阻力滞回曲线。由图 9 可见，附加粘滞阻尼器后，可以有效降低隔振基台的地震水平变形。

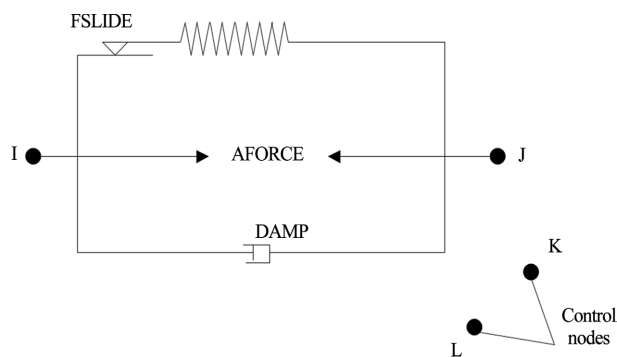
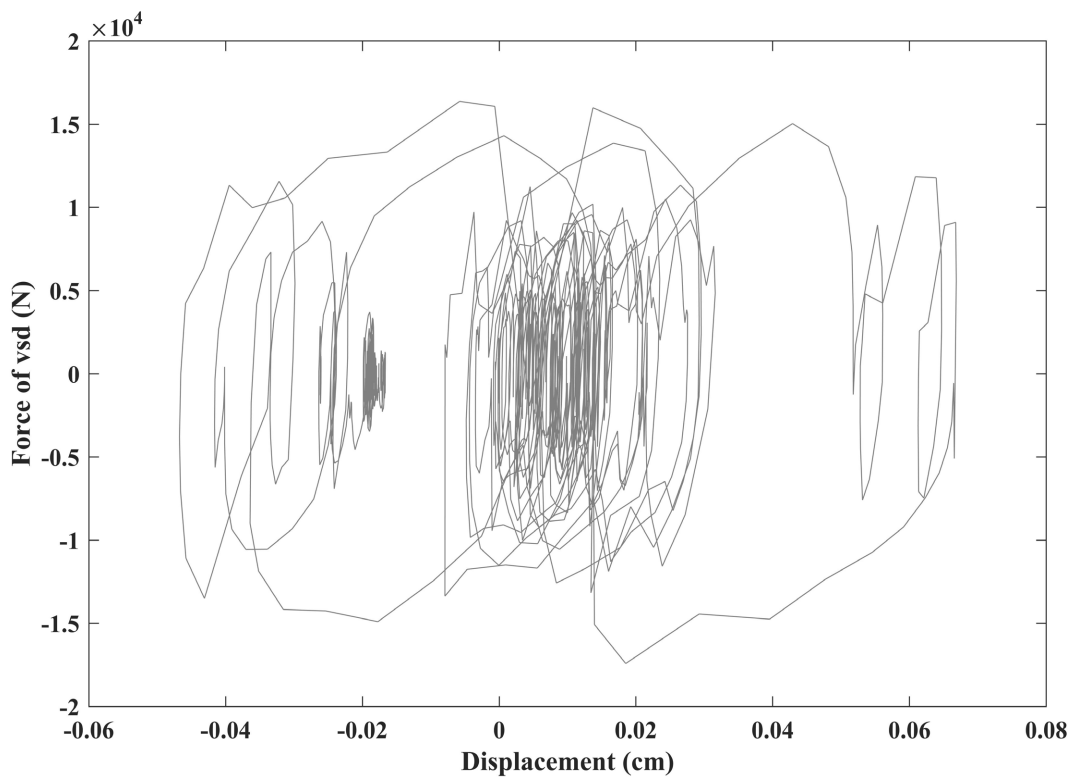
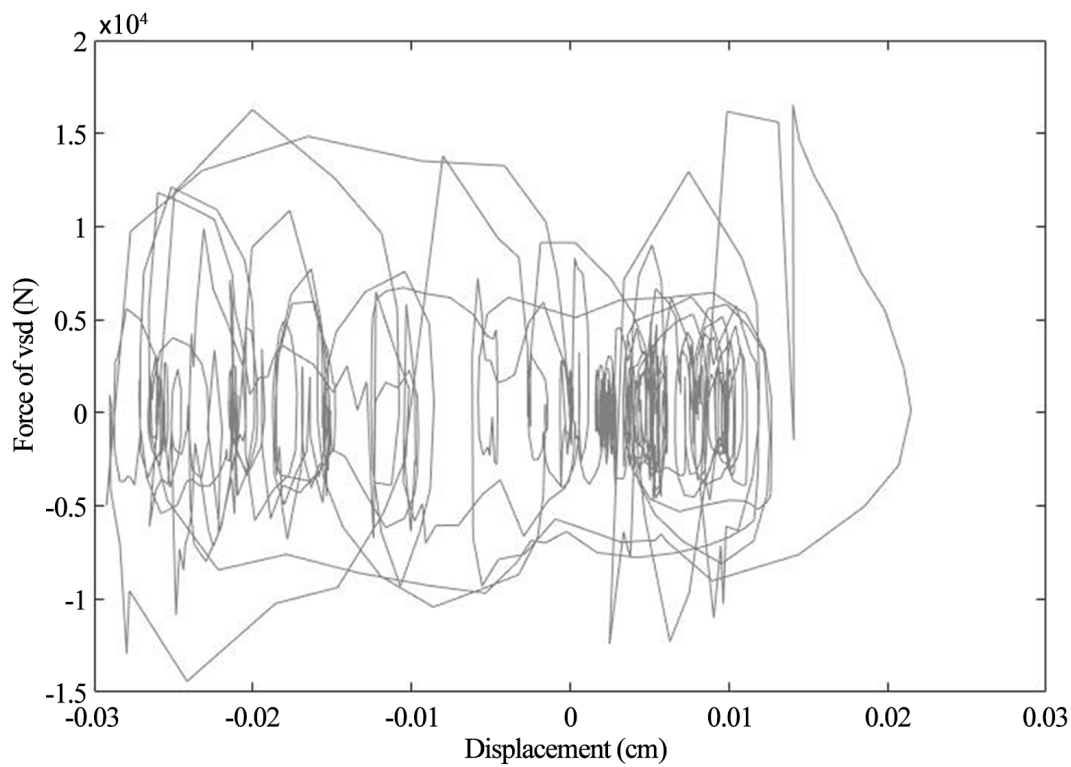


Figure 7. Mechanical schematic diagram of combin37 element
图 7. combin37 力学原理图

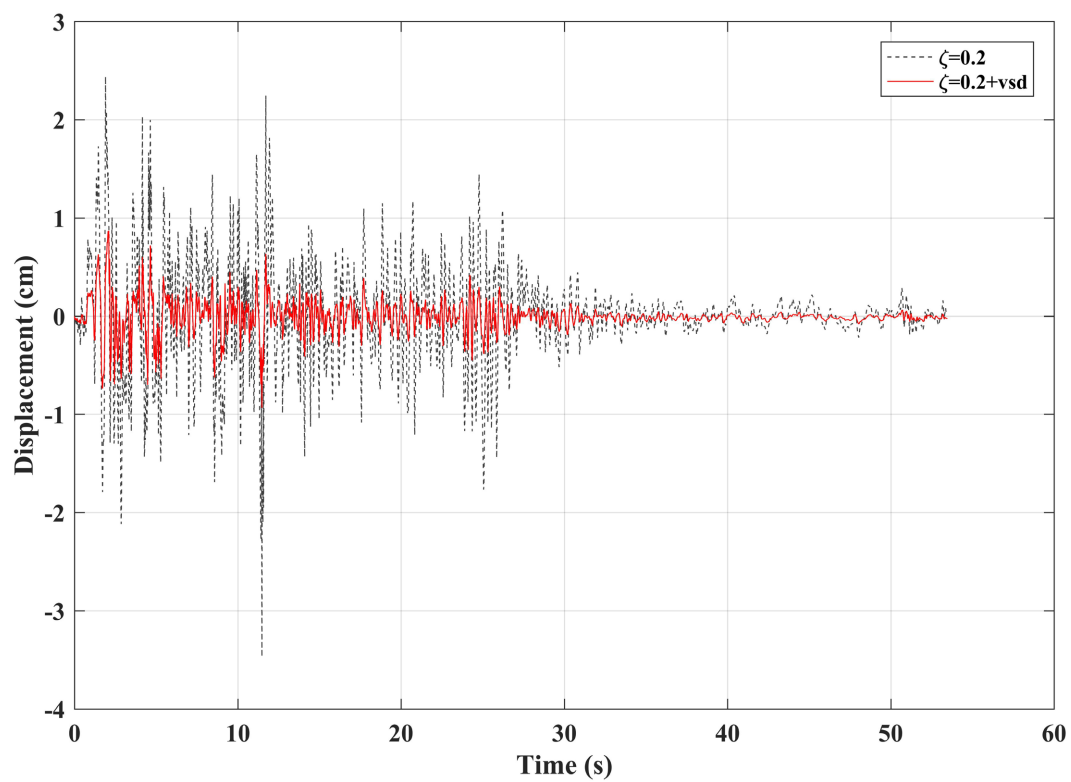


(a) x 向

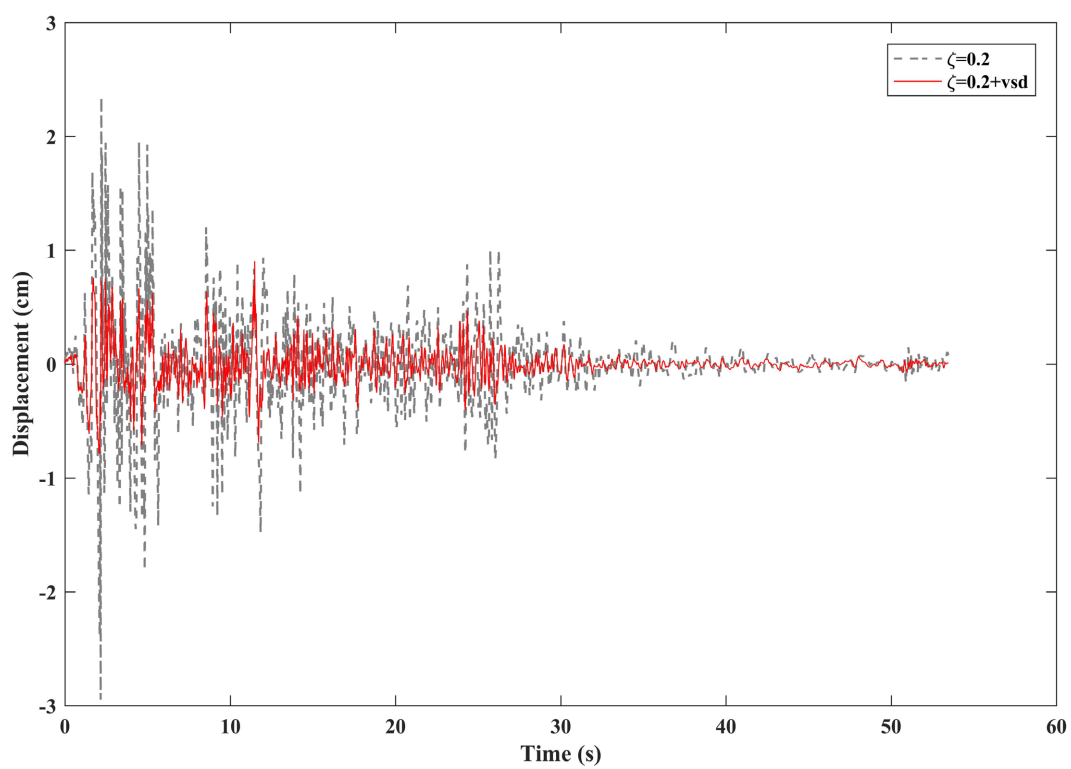


(b) y 向

Figure 8. Displacement-damping force hysteresis curve of viscous damper
图 8. 粘滞阻尼器的位移—阻尼力滞回曲线



(a) x 向



(b) y 向

Figure 9. Seismic horizontal deformation with bidirectional viscous dampers
图 9. 引入粘滞阻尼器后的地震水平变形

5. 小结

本研究对低频隔振基台的地震变形进行了研究, 并对比研究了不同体系阻尼比对地震变形的影响, 结果显示体系阻尼比的大幅增加, 不能有效降低地震水平变形。在增加体系阻尼比的基础上, 进一步考虑附加双向水平粘滞阻尼器, 可以显著降低地震水平变形, 阻尼器出力曲线也较为饱满, 能够良好地发挥控制变形的作用。

本研究对于丰富低频隔振系统的地震变形控制措施具有一定意义, 可指导实际工程应用。

基金项目

国机集团科学技术研究院有限公司青年基金项目“高层建筑实验室集群多源振害控制及运维监测关键技术研究与应用”; 中国机械工业集团青年基金重点项目“大科学工程群微纳级环境振动控制关键技术研究与应用”; 中国机械工业集团重大技术开发专项“建筑与装备工程振震双控关键技术研发及应用示范”。

参考文献

- [1] 田一夫. 基于气浮支承结构的主动减振系统研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] 徐建等. 工业工程振动控制关键技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 吴明亮, 赵晨名, 张来喜. 准零刚度振动控制系统的研究进展[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 18-26.
- [4] 郑嘉毓. 正负刚度并联隔振系统的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [5] 刘兴天, 孙靖雅, 肖锋, 华宏星. 准零刚度微振动隔振器的原理和性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 69-73.
- [6] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [7] 刘怀林, 兰海燕. ANSYS 在大跨径桥梁阻尼器选型中的应用[J]. 公路交通技术, 2011(6): 44-48.
- [8] 郑成成, 陈永祁, 郑久建, 等. 高烈度区大跨度桥梁粘滞阻尼器减震研究[J]. 世界地震工程, 2021, 37(2): 115-122.
- [9] 陶全兴. 安装粘滞阻尼器结构的地震反应分析与设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [10] 曾明. 钢框架-混凝土核心筒结构设粘滞阻尼器的减震控制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [11] 刘刚. 粘滞阻尼器在工业设备中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2003.