

DOI:10.11918/202407018

液压蓄能竖向隔震系统力学特性研究

汪磊¹, 鲁亮^{1,2}, 夏婉秋¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 土木工程防灾减灾全国重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘要: 为解决现有隔震装置普遍侧重水平向而竖向控制薄弱的问题, 本文提出一种新型液压蓄能竖向隔震体系, 以有效抑制结构的竖向地震响应。首先, 分析了系统的刚度特性, 通过静力试验验证了隔震系统的力学性能和阻尼耗能能力。其次, 建立了隔震系统动力学模型, 采用谐波平衡法求解系统的幅频响应和位移传递率, 分析了振动幅值、阻尼比和蓄能器体积压缩系数对位移传递率的影响。最后, 建立了液压蓄能竖向隔震混凝土框架结构和未隔震框架结构的有限元模型, 对上述模型进行了地震动力时程分析, 对比分析了两种框架的地震响应结果。研究表明: 液压蓄能竖向隔震混凝土框架结构的竖向加速度响应与地面输入相比平均降低了 59%, 竖向隔震效果明显。

关键词: 竖向隔震; 液压系统; 谐波平衡法; 数值分析; 位移传递率

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)01-0151-10

Study on the mechanical characteristics of vertical seismic isolation system employing hydraulic apparatus

WANG Lei¹, LU Liang^{1,2}, XIA Wanqiu¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering(Tongji University), Shanghai 200092, China)

Abstract: To address the limitation that existing seismic isolation devices mainly focus on horizontal directions while providing insufficient vertical control, a novel hydraulic accumulator-based vertical seismic isolation system was proposed to mitigate the vertical seismic response of the structures. The system's stiffness characteristics were analyzed, followed by experimental validation to assess its mechanical performance and energy dissipation capability. A dynamic model of the isolation system was then established, and the harmonic balance method was employed to determine the system's amplitude-frequency response and displacement transmissibility. The effects of vibration amplitude, damping ratio, and accumulator volumetric compression coefficient on the displacement transmissibility were analyzed. Finally, finite element models for both the vertical seismic isolation structure and a conventional frame were established and subjected to seismic time history analysis, and the seismic response results of the two frameworks were compared. The analysis results show that the vertical acceleration response of VSI-HCA structures is reduced by an average of 59% compared to the ground input, indicating a significant vertical isolation effect.

Keywords: vertical isolation; hydraulic system; harmonic balance method; numerical analysis; displacement transmissibility

隔震系统可以有效减轻建筑结构中水平地震动作用, 从而减少地震期间和震后的结构和非结构损伤。常见的隔震装置仅在水平方向上隔离地震作用, 竖向地震作用并未得到很好控制。近期的研究表明, 竖向地震动作用可以引起高强度振动, 导致非结构构件损伤和结构破坏^[1-4]。因此有必要研究竖向地震作用及竖向隔震技术, 以减轻竖向冲击对上部结构的破坏。

隔震的基本原理是延长结构自振周期, 使结构

自振周期远离地震动的卓越周期, 从而降低结构的地震反应。传统的水平隔震支座包括橡胶支座和摩擦摆支座等, 已在工程实践中得到了广泛的应用。相比水平向隔震, 在建筑结构的三维隔震方向, 已有一些研究者进行了尝试, 但进展缓慢, 难以解决竖向隔震中的周期延长需求和建筑结构重力承载需求之间的矛盾^[5-7]。为了解决上述矛盾, 三维隔震的概念被提出和发展, 研究最多的三维隔震装置包括厚橡胶支座、碟形弹簧、空气弹簧和液压弹簧等^[8]。

收稿日期: 2024-07-05; 录用日期: 2024-08-21; 网络首发日期: 2025-10-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251009.0928.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51678453)

作者简介: 汪磊(1996—), 男, 博士研究生; 鲁亮(1969—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 鲁亮, 95010@tongji.edu.cn

在气压和液压三维隔震领域的发展历程中,1995年,Tokuda等^[9]首次将叠层橡胶支座与高压空气弹簧结合,形成了一种新型的三维隔震系统,并将其成功应用于快中子增殖反应堆(fast breeder reactor, FBR)建筑物。随后,1999年 Tanigaki等^[10]提出了气室三维隔震的概念,该概念将单个或多个气室作为隔震层,应用于基础位置,为结构提供了有效的隔震保护。2002年,Kaji等^[11]提出了液压缸三维隔震系统,通过使用多达170个液压竖向隔震支座来支撑核电站厂房,进一步拓展了隔震技术的应用范围。同年,Kashiwazaki等^[12]提出了组合式液压三维隔震支座,采用储蓄单元间节流孔作为阻尼装置,但随着节流孔直径减小或空气流速增大,竖向刚度显著增加,影响隔震效果。2004年,Shimada等^[13]在上述研究的基础上提出液压抗摇摆三维隔震支座,但由于支座气室体积较大,承载力较低,因此需要多达270个液压竖向隔震支座来支撑核电站。尽管液压技术在结构竖向隔震领域已有一定的发展,但依然存在包括竖向承载力不足、隔震性能尚未达到理想状态或成本较高等问题。同时,目前对于液压三维隔震系统中的工作机理的研究主要停留在线性刚度假设的阶段,未充分考虑利用液压系统的非线性和阻尼耗能特性。此外,现有的研究成果主要应用于核电站等特殊构筑物,尚未广泛应用于建筑结构。因此,有必要进一步深入研究液压系统在结构竖向隔震中的工作机理,以提高其隔震性能。

本文提出了一种新型的液压蓄能竖向隔震(vertical seismic isolation with hydraulic jack and accumulator, VSI-HCA)系统,应用于建筑物竖向隔震。该系统采用液压油缸提供竖向承载力,利用蓄能器调节竖向刚度,并利用黏滞流体流动来提供结构竖向运动的阻尼力。这一新型液压蓄能隔震体系具有以下优点:1)该系统静态下具备较大的竖向承载力,足以满足上部结构的重力承载需求;2)系统具备非线性刚度特征,具有较低的起始隔振频率,提高了竖向隔震性能;3)该系统利用黏滞流体在管道内流动产生的摩擦阻力阻尼特性,有效地消耗地震能量。

本文基于现有液压蓄能竖向隔震系统,拓展其功能至三维隔震,通过试验验证其竖向承载能力和阻尼耗能性能;建立动力学模型,通过定义位移传递率,对结构的隔振效果进行理论分析和评价,研究体积压缩系数对系统隔振性能的影响;通过建立三层框架有限元模型,分析隔震系统在竖向地震作用下的隔震性能,并验证非线性动力学理论中体积压缩系数对于装置设计的指导作用。

1 液压蓄能竖向隔震系统的静力学分析

1.1 液压蓄能竖向隔震系统的工作机理

液压蓄能竖向隔震系统由液压油缸、油管、蓄能器和阻尼调节阀组成,如图1所示。液压油缸及油管内充盈液压油,蓄能器气室预充氮气;液压油缸通过油管与蓄能器连通,形成封闭的液压回路。无地震状态下,液压油缸提供竖向承载力,压缩蓄能器内氮气,实现重力平衡。地震作用下,液压油缸活塞往复运动,液体流动导致蓄能器内气体压缩和膨胀,产生摩擦阻尼力并耗散能量。地震结束后,系统恢复至初始平衡状态。

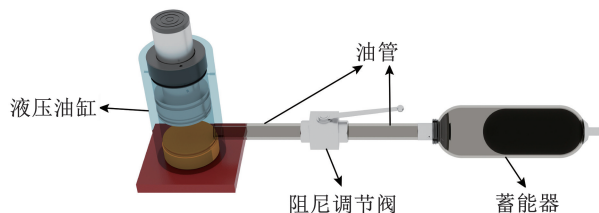


图1 液压蓄能竖向隔震系统

Fig. 1 Vertical seismic isolation system employing hydraulic apparatus

液压蓄能竖向隔震系统可与铅芯橡胶支座组成三维液压蓄能型隔震系统,放置在框架柱下形成三维隔震层,如图2所示。铅芯橡胶支座用于隔离水平向的地震作用,液压蓄能竖向隔震系统用于隔离竖向地震作用,两者工作时可以互相解耦。为了清晰地考察竖向隔震系统的力学特性,本文仅对液压蓄能竖向隔震系统的竖向性能进行研究。

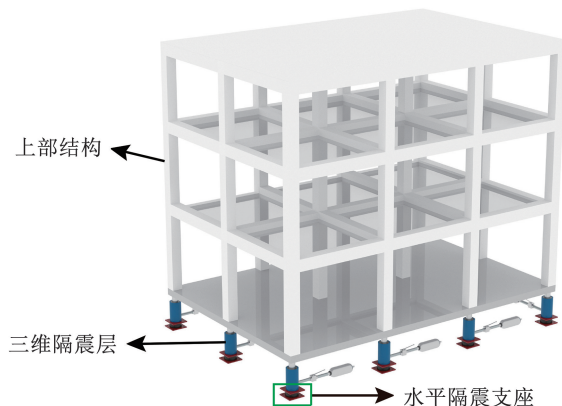


图2 三维液压蓄能型隔震系统示意^[14]

Fig. 2 Schematic diagram of the three-dimensional isolation system with VSI-HCA^[14]

1.2 竖向力与位移关系

在静力平衡状态下,蓄能器初始气体体积为 V_0 ,液压油缸活塞截面积为 A_c ,竖向重力为 G 。建筑物重力与液压油缸支撑力平衡时,液体压强 $P_0 = G/A_c$,与蓄能器气体压强 P_g 大小相等。忽略液体自重,假

设地震作用下活塞向下位移 x , 蓄能器气体体积变为 V_x , 系统压强变为 P_x 。根据文献[14]: 当位移为 x 时, 系统恢复力 F_x 与位移 x 的关系为

$$F_x = A_c P_x = \frac{A_c P_0 V_0}{V_0 - A_c x} \quad (1)$$

系统的竖向刚度为

$$K_x = \frac{dF_x}{dx} = \frac{A_c^2 P_0 V_0}{(V_0 - A_c x)^2} \quad (2)$$

设定上部单个柱子传递的荷载为 225 kN, 液压油缸活塞面积为 0.038 m^2 , 取蓄能器初始气体体积 V_0 的变化区间为 $10 \sim 80 \text{ L}$, 竖向位移 x 的变化范围为 $-100 \sim 100 \text{ mm}$, 根据式(2)得到的系统竖向刚度随竖向位移和气体初始体积变化的关系如图 3 所示。由图 3 可以看到: 随着蓄能器初始气体体积 V_0 增加, 系统竖向刚度逐渐减小; 随着竖向位移增大, 系统的竖向刚度逐渐增大, 表现出明显的非线性。

1.3 竖向隔震装置力学性能拟静力试验验证

1.3.1 试验装置^[14]

针对由液压油缸和蓄能器组成的液压蓄能竖向隔震系统, 设计实施竖向静力加载试验, 研究系统的

可行性和理论模型的正确性。本试验的研究对象为图 2 所示的原型 3 层框架, 柱间距为 6.0 m , 中柱的从属荷载面积为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 竖向荷载约为 $1\,800 \text{ kN}$, 试验模型与原型长度相似比设计为 $1/2$, 单根柱子传递的重力荷载代表值为 225 kN , 设计制作了液压蓄能竖向隔震系统试验装置。静力平衡时的装置等效竖向刚度为 855 kN/m , 试验装置参数见表 1。

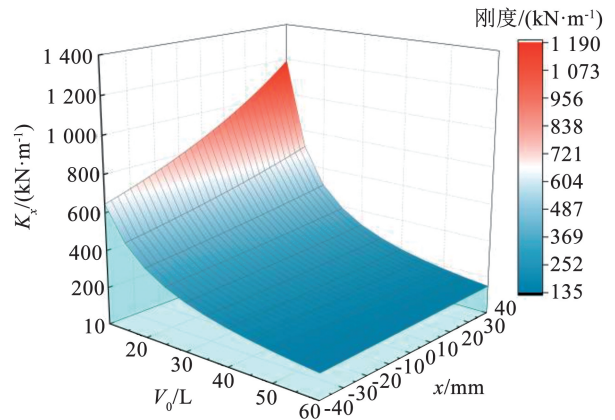


图 3 系统竖向刚度变化

Fig. 3 Vertical stiffness variation diagram of the isolation system

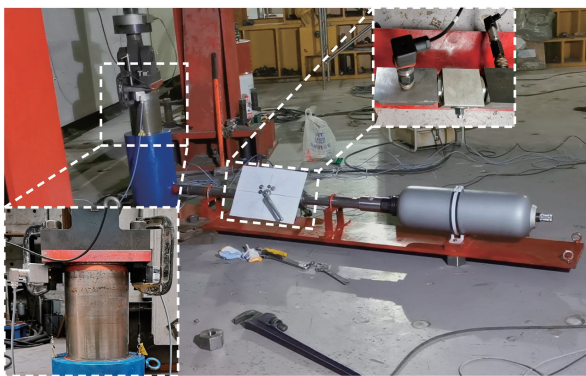
表 1 试验装置的物理参数^[14]

Tab. 1 Parameters of the device

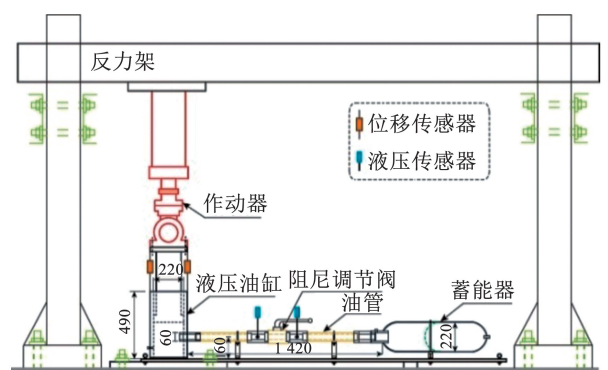
液压油缸直径 d_c/mm	液压油缸截面积 A_c/m^2	初始压强 P_0/MPa	初始体积 V_0/L	竖向等效刚度 $K_x/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	液压油缸行程/ mm
220	0.038	5.92	10	855	± 300

试验采用 HTS-350 kN 液压伺服作动器加载, 生产厂家为无锡海航电液伺服系统股份有限公司, 装置如图 4 所示。由图 4 可以看到, 液压油缸上方连接作动器以提供竖向力, 并配备两个位移传感器测量竖向位移。传感器采取对称布置, 其测量精度可

以满足静力试验的需求。液压油缸与蓄能器通过油管连接, 阻尼调节阀两侧连接液压传感器, 用以测量管道内液体压强。试验初始时, 液压油缸活塞处于静力平衡位置 ($x = 0 \text{ mm}$), 加载系统从该位置进行竖向往复加卸载。



(a) 试验细节照片



(b) 加载装置

图 4 试验装置

Fig. 4 Test setup

1.3.2 隔震支座静载力学性能

从重力平衡位置开始, 按照位移控制模式, 并以 0.5 mm/s 的速度加载作动器, 逐级加载至 $\pm 40 \text{ mm}$ 处, 每级加载 10 mm , 连续进行 3 次分级加载, 每一

级位移加载结束后, 记录作动器作用力与液压传感器稳定读数。经 3 次连续加载和卸载后, 获得的荷载-位移试验曲线见图 5。设试验实测荷载记为 F_{test} , 理论荷载记为 F_{theory} 。对比结果表明, 所有实测

数据均满足 $F_{\text{test}} \in [0.97F_{\text{theory}}, 1.03F_{\text{theory}}]$, 试验结果与理论预测具有良好的 consistency。

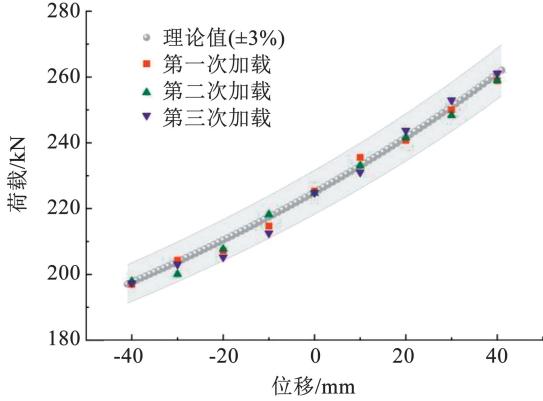


图 5 静力加载下的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves under static loading

将阻尼调节阀的过流面积从其最大值调整至 60%, 以评估液压蓄能竖向隔震系统的阻尼特性。在试验中, 采用位移控制加载模式, 进行了正弦波加载 5 次, 其中位移幅值为 20 mm, 加载频率为 1.00 Hz。图 6 展示了所得第 3 圈的荷载-位移曲线, 其中荷载值已扣除了重力荷载部分。等效阻尼比通过计算滞回曲线所包围的面积与对应弹性势能面积的比值得到, 该滞回曲线的阻尼比为 0.143, 表明所测试的系统具备较高的阻尼能力, 可有效耗散能量。

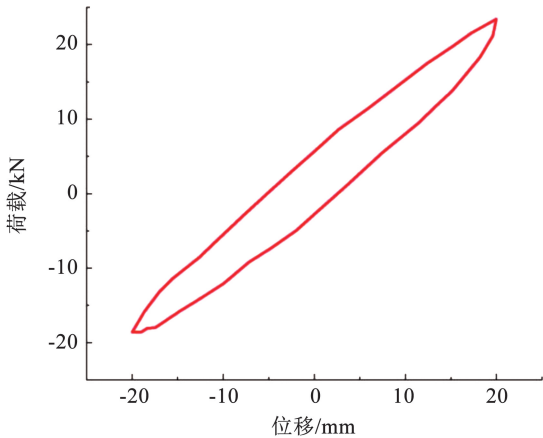


图 6 循环加载下荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve under cyclic loading

2 液压蓄能竖向隔震系统动力特性分析

基于前述分析, 可知液压蓄能竖向隔震系统呈现显著的非线性刚度特性。为深入探究其隔震性能, 本节对液压蓄能竖向隔震系统动力特性进行参数分析。

2.1 自由振动分析

单个隔震装置支撑的上部结构质量为 m , 由于上部结构的竖向振动刚度很大, 初步分析可以按单自由度质点考虑。考虑重力影响后, 单自由度液压

蓄能竖向隔震系统运动自由振动方程可以写为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F_x - mg = 0 \quad (3)$$

式中: m 为系统质量, c 为阻尼系数。

由于式(1)中的液压恢复力函数 F_x 在 $x=0$ 处连续, 将恢复力 F_x 在静平衡位置 $x=0$ 处进行三阶泰勒展开, 舍去高阶小量 $o(x^3)$ 得到

$$F_x = A_c P_0 + A_c P_0 \frac{A_c}{V_0} x + A_c P_0 \left(\frac{A_c}{V_0} \right)^2 x^2 + A_c P_0 \left(\frac{A_c}{V_0} \right)^3 x^3 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 得到的自由振动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + A_c P_0 + A_c P_0 \frac{A_c}{V_0} x + A_c P_0 \left(\frac{A_c}{V_0} \right)^2 x^2 + A_c P_0 \left(\frac{A_c}{V_0} \right)^3 x^3 - mg = 0 \quad (5)$$

其中, P_0 为系统重力平衡时液体压强, 有 $A_c P_0 = mg$, 故将方程两端同时除以质量 m 后得到

$$\ddot{x} + 2\omega_n \xi \dot{x} + g(\alpha x + \alpha^2 x^2 + \alpha^3 x^3) = 0 \quad (6)$$

式中: ω_n 为等效线性频率, $\omega_n = \sqrt{gA_c/V_0}$; ξ 为阻尼比, $\xi = c/(2m\omega_n)$; α 定义为蓄能器体积压缩系数, $\alpha = A_c/V_0$, 单位为 m^{-1} 。

2.2 受迫振动分析

为深入探讨该系统的动态响应特性, 本文在无量纲幅值为 Z 的位移谐波激励作用下, 推导了系统的运动方程。图 7 展示了液压蓄能式竖向隔震系统的单自由度简化力学模型。

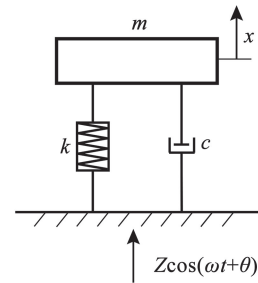


图 7 单自由度动力学模型

Fig. 7 Dynamic model of single-degree-of-freedom system

系统运动方程为

$$\ddot{x} + 2\omega_n \xi \dot{x} + g(\alpha x + \alpha^2 x^2 + \alpha^3 x^3) = \omega^2 Z \cos(\omega t + \theta) \quad (7)$$

式中: ω 为激励频率, θ 为相位差。

将式(7)方程右端项进行展开, 可得

$$\omega^2 Z \cos(\omega t + \theta) = A_1 \cos \omega t - B_1 \sin \omega t \quad (8)$$

式中: $A_1 = \omega^2 Z \cos \theta$, $B_1 = \omega^2 Z \sin \theta$, $\tan \theta = B_1/A_1$ 。

采用谐波平衡法进行求解, 忽略高次谐波项, 设系统的解为一阶谐波函数 $x = a_0 \cos \omega t = A_0 \cos \omega t + B_0 \sin \omega t$, 其中 a_0 为无量纲响应幅值。

将式(7)左端展开, 基于各谐波系数相等, 可以

得到:

$$\begin{cases} 3A_0^3 g \alpha^3 + 8B_0 \frac{\xi}{\omega_n} \omega + A_0 (4g\alpha + 3B_0^2 g \alpha^3 - 4\omega^2) = 4A_1 \\ 4B_0 g \alpha + 3A_0^2 B_0 g \alpha + 3B_0^3 g \alpha^3 - 8A_0 \frac{\xi}{\omega_n} \omega - 4B_0 \omega^2 = 4B_1 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)中的两个等式分别对左、右两项取平方, 并将结果相加, 可以得到系统的振动幅频响应函数为

$$a_0^2 \left[\omega_n^2 \omega^2 \xi^2 + \left(g\alpha + \frac{3}{4} a_0^2 g \alpha^2 - \omega^2 \right)^2 \right] = Z^2 \omega^4 \quad (10)$$

采用 MATLAB 中变步长的四阶龙格库塔 (ode45) 函数对给定的运动方程(8)进行求解, 并将所得结果与理论近似解式(10)进行比较。在数值实验中, 将初始激励幅值设定为 $Z = 0.5$, 阻尼比 ξ 为 0.05, 蓄能器体积压缩系数 α 为 1.0。通过采用数值扫频法并借助 MATLAB 进行仿真, 得到了系统的频率响应图像。图 8 展示了理论解幅频曲线与数值解幅频曲线的对比。从图 8 可以清晰地观察到数值解与理论近似解之间的高度一致性, 这表明利用谐波平衡法所得到的一阶近似解具有较高的精确度。

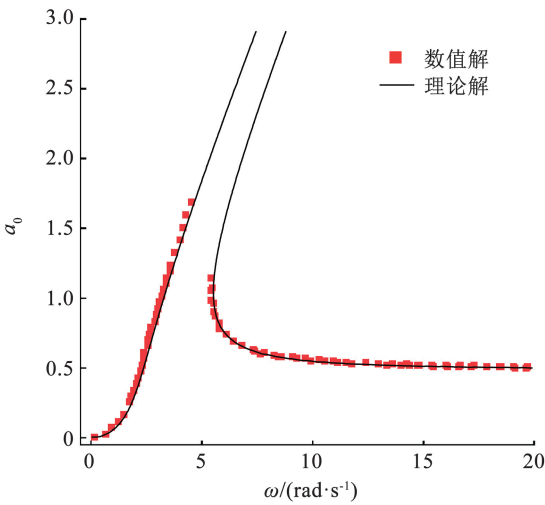


图 8 解析解与龙格库塔法所得数值解对比

Fig. 8 Comparison of amplitude-frequency response curves between analytical solution and numerical solution

2.3 位移传递率

隔震结构响应的绝对位移幅值与激励的位移幅值 Z 之比定义为位移传递率, 通常用位移传递率评估系统位移响应的振动隔离情况, 同时反映隔震系统的动力特性。液压蓄能竖向隔震系统的位移传递率定义为

$$T_R = \frac{|x + Z|_{\max}}{Z} = \frac{|a_0 \cos \omega t + Z \cos(\omega t + \theta)|_{\max}}{Z} = \frac{\sqrt{a_0^2 + Z^2 + 2a_0 Z \cos \theta}}{Z} \quad (11)$$

同时, 位移响应的相位信息可由式(9)得到,

$$\cos \theta = \frac{a_0 (4g\alpha + 3a_0 g \alpha^3 - 4\omega^2)}{4\omega^2 Z} \quad (12)$$

代入式(11)后得到位移传递率的表达式为

$$T_R = \left[1 + \frac{a_0^2}{Z^2} + \frac{2g\alpha a_0^2 + 3g\alpha^3 a_0^3 / 2 - 2a_0^2 \omega^2}{\omega^2 Z^2} \right]^{1/2} \quad (13)$$

2.4 基于传递率的隔震效果评价

基于幅频响应函数式(10)和位移传递率表达式(13), 分别对液压蓄能竖向隔震系统在不同振动幅值 Z 、阻尼比 ξ 和蓄能器体积压缩系数 α 条件下的位移传递率进行求解, 并将位移传递率值开始小于 1.0 时对应的频率定义为起始隔振频率。将 Z 分别取 0.05、0.10、0.20 和 0.30, ξ 取 0.01、0.10、0.20 和 0.30, α 取 1.0、1.5、2.0 和 2.5, 计算位移传递率曲线, 并分析 Z 、 ξ 、 α 对系统动力特性的影响。

1) 当液压蓄能竖向隔震系统参数 $\xi = 0.10$, $\alpha = 2.0$ 固定, 位移激励幅值取 0.05、0.10、0.20 和 0.30 时, 计算得到的位移传递率如图 9 所示。液压蓄能竖向隔震系统的位移传递率受振动幅值 Z 影响较大。随着 Z 增大, 幅频跳跃现象越明显, 系统的等效自振频率越高, 起始隔振频率越大。与等效线性系统相比, 液压蓄能竖向隔震系统属于非线性弹簧系统, 幅频曲线右上方部分分支为不稳定解, 仅在数学上成立。从图 9 可以看出, 液压蓄能竖向隔震系统与等效线性系统相比, 起始隔振频率更低, 且在有效隔振频率区间的位移传递率明显更小, 隔振性能更好。

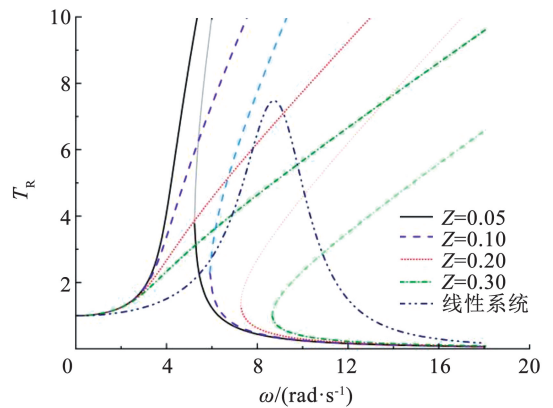


图 9 激励幅值对位移传递率的影响

Fig. 9 Displacement transmissibility under different excitation amplitudes

2) 当液压蓄能竖向隔震系统参数 $Z = 0.30$, $\alpha = 2.0$ 固定, 阻尼比 ξ 取 0.01、0.10、0.20 和 0.30 时, 计算得到的位移传递率结果如图 10 所示, 可以看到, 系统特性受阻尼水平影响并不显著, 随着阻尼比增加, 位移传递率有减小的趋势。在过大阻尼比的情况下, 系统的幅频跳跃现象消失, 响应与线性系统相似。

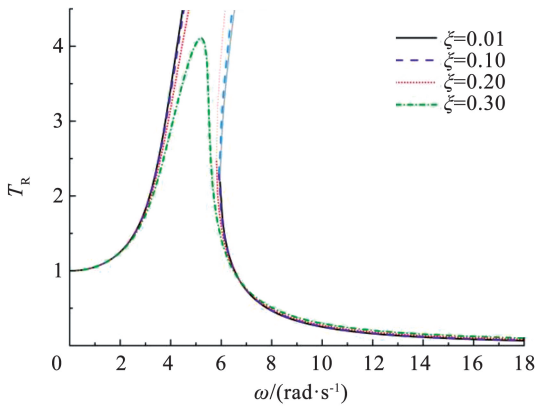


图 10 阻尼对位移传递率的影响

Fig. 10 Effect of damping on displacement transmissibility

3) 当液压蓄能竖向隔震系统参数 $Z = 0.30$, $\xi = 0.10$ 固定, 体积压缩系数 α 取 1.0、1.5、2.0 和 2.5 时, 计算得到的位移传递率结果如图 11 所示, 可以看到, 液压蓄能竖向隔震系统的传递率受蓄能器体积压缩系数 α 影响较大。蓄能器体积压缩系数 α 越大, 系统的等效自振频率越高, 起始隔振频率越大。

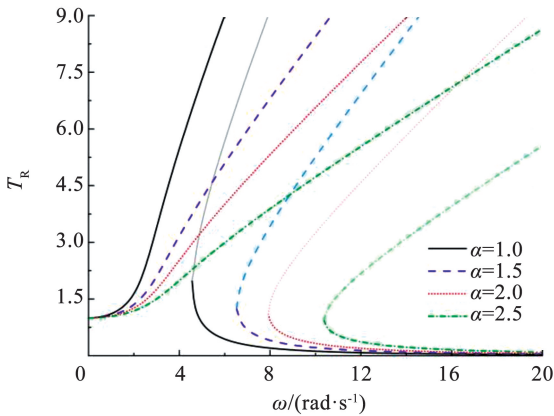


图 11 蓄能器体积压缩系数对传递率的影响

Fig. 11 Effect of accumulator volumetric compression coefficient on transmissibility

3 竖向隔震结构地震响应数值模拟

3.1 模型概况

原型为一个 3 层钢筋混凝土纯框架结构, 每层层高 3.6 m; 纵向共 5 跨, 跨度 4.5 m; 横向共 3 跨, 跨度 3.6 m, 见图 12。柱截面尺寸为 450 mm × 450 mm, 梁截面尺寸为 300 mm × 450 mm, 板厚 120 mm, 建筑所在地区抗震设防烈度为 8 度, 结构截面和配筋设计满足 GB 50011—2010 (2016 版)《建筑抗震设计规范》^[15] 的相关要求。

参考文献 [16] 中对当前三维隔震装置竖向自振周期的总结, 初步设定液压蓄能竖向隔震结构的竖向周期为 1.6 s。根据《建筑抗震设计规范》中的反应谱法, 可计算得到上部结构在罕遇地震作用下

的位移为 120.69 mm, 取约 2 倍计算值 255 mm 作为最大设计行程。同时, 参考 GB/T51408—2021《建筑隔震设计标准》^[17] 第 4.6.6 条中对隔震支座水平位移的要求, 设立了 VSI-HCA 装置的竖向位移控制目标: 在罕遇地震下, VSI-HCA 装置的竖向位移限值不大于其产品的竖向极限位移的 0.85 倍。VSI-HCA 装置的行程为 ±300 mm, 结构的竖向最大位移设定为 $Z = 300 \times 0.85 = 0.255$ m, 此时竖向隔震结构处于最不利状态。常见竖向地震动的卓越频率为 8 ~ 20 Hz^[18], 对应的角频率为 50.26 ~ 125.66 rad/s。设定结构的目标位移传递率为 $T_R = 0.5$, 根据图 11 的结果, 当蓄能器体积压缩系数为 $\alpha = 1.5 \text{ m}^{-1}$ 时, 可满足位移传递率要求。

基于以上结构参数, 采用 ABAQUS 分别建立了未隔震竖向隔震钢筋混凝土框架 (reinforced concrete frame, RCF) 结构和液压蓄能竖向隔震结构的有限元模型。液压蓄能竖向隔震结构与 RCF 结构的主要差异在于, 液压蓄能竖向隔震结构在底层柱下, 根据荷载分布情况配置了 3 种不同等效刚度的液压竖向隔震装置, 装置的液压油缸截面积为 0.038 m², 初始体积为 25.3 L, 具体配置如表 2 所示。

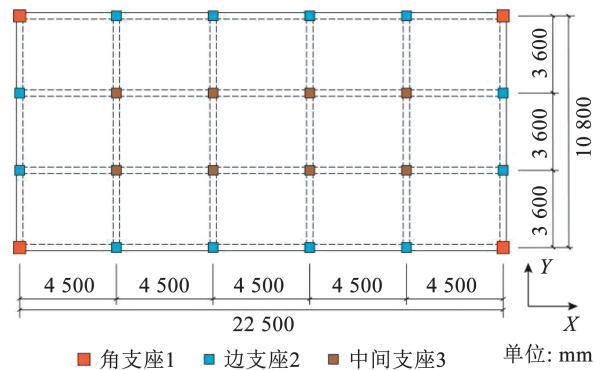


图 12 框架平面

Fig. 12 Structural framework plan

表 2 隔震装置的力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of the VSI-HCA devices

装置位置	等效刚度/ (kN·m ⁻¹)	体积压缩 系数/(m ⁻¹)	初始体 积/L	初始压强/ MPa	数量
角支座 1	210.7	1.5	25.3	5.54	4
边支座 2	338.9	1.5	25.3	8.92	12
中间支座 3	537.5	1.5	25.3	14.14	8

为了在有限元模型中实现液压蓄能竖向隔震系统的力-位移关系, 采用 ABAQUS 的 Cartesian 单元, 将装置模拟为非线性弹簧。弹簧的非线性竖向刚度通过输入恢复力与结构位移关系曲线得到, 采用图 5 所示本构模型描述其变刚度特性。隔震装置阻

尼使用连接单元 Cartesian 单元模拟,通过笛卡尔连接器中的阻尼属性定义其力-速度曲线的关键点,阻尼力模型见文献[14]。

上部结构采用 B31 单元来模拟梁和柱,并采用

S4R 单元来模拟楼板。在对 RCF 结构中混凝土与钢筋进行建模时,选择 Kent-Park 模型模拟混凝土材料,并采用双线性结构模型模拟钢筋在地震荷载下的非线性行为,模型示意见图 13。

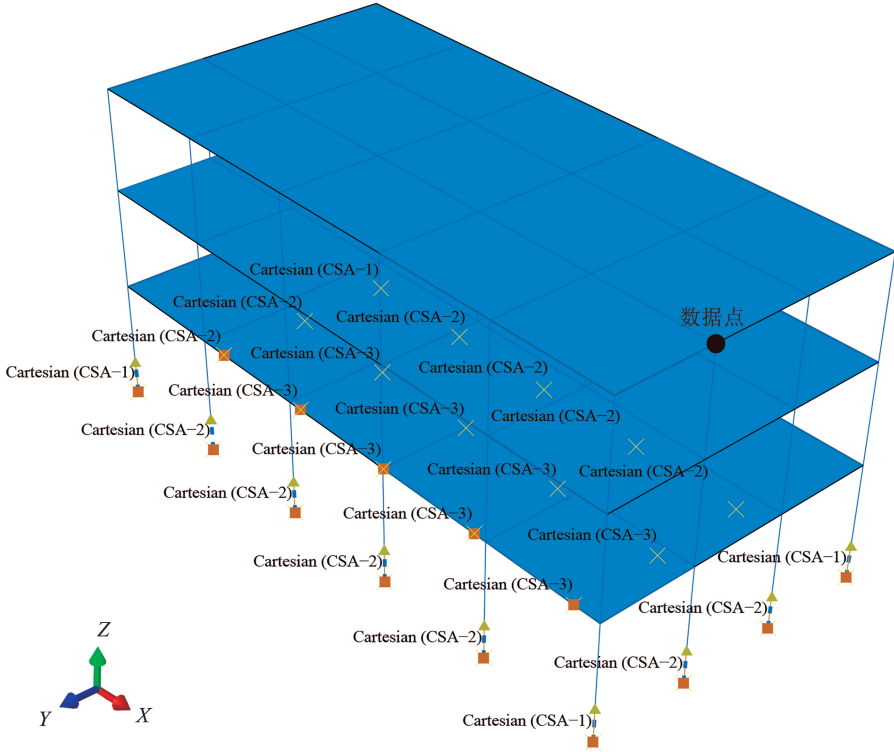


图 13 液压蓄能竖向隔震结构有限元模型

Fig. 13 The finite element model of the VSI-HCA structure

3.2 地震波选取

针对 RCF 结构和液压蓄能竖向隔震结构,仅进行竖向地震动输入,以验证液压蓄能竖向隔震系统的竖向隔震效果。采用 El Centro-UD、Taft-UD、Kobe-UD 的竖向地震波作为输入地震波,当水平加速度峰值分别取 0.2 和 0.4 g,分别对应于 8 度抗震设防烈度下的中震和大震两种工况。根据 GB50011—2010(2016 版)《建筑抗震设计规范》^[15] 5.1.2 节条文说明中规定,对竖向峰值加速度取 0.65 的折减系数,3 种地震波反应谱见图 14,地震波参数见表 3。

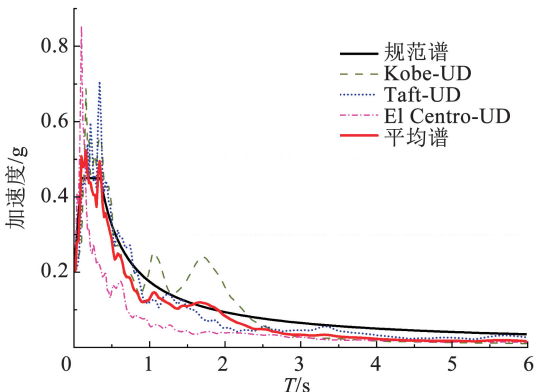


图 14 地震反应谱

Fig. 14 Seismic response spectra

表 3 地震波信息

Tab. 3 Information of selected earthquake records

地震波	震级	发生年份	PGA/g	持时/s	场地
El Centro-UD	7.1	1940	0.210	53.80	II
Kobe-UD	6.9	1995	0.272	42.10	II
Taft-UD	7.7	1957	0.113	54.25	III

3.3 竖向地震响应

将各层竖向加速度响应与输入加速度响应最大值的比值定义为动力放大系数 K 。竖向地震作用下 RCF 结构和液压蓄能竖向隔震结构的 3 层边柱竖向加速度响应峰值 a_{max} 和动力放大系数 K 见表 4,测点选取为 3 层边柱(见图 13)。图 15 和图 16 给出了液压蓄能竖向隔震结构在 3 种地震波不同峰值加速度输入下,楼面竖向加速度与输入加速度的对比。

表 4 不同地震作用下结构加速度响应

Tab. 4 Acceleration responses of structures under different ground motions

地震波	PGA/g	隔震结构		RCF	
		a/g	K	a/g	K
El Centro-UD	0.2	0.021	0.16	0.394	2.97
	0.4	0.043	0.16	0.713	2.69
Taft-UD	0.2	0.043	0.32	0.386	2.91
	0.4	0.081	0.30	0.535	2.02
Kobe-UD	0.2	0.099	0.75	0.356	2.68
	0.4	0.206	0.77	0.736	2.77

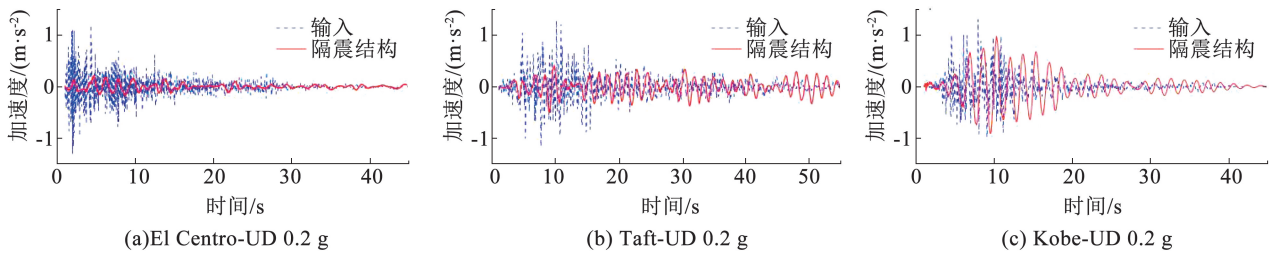


图 15 设防地震下液压蓄能竖向隔震结构层顶加速度响应

Fig. 15 Roof acceleration responses of VSI-HCA structures under moderate earthquake

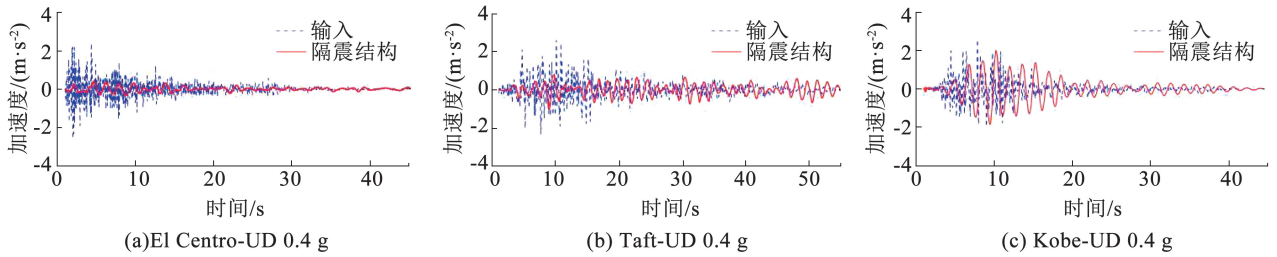


图 16 罕遇地震下液压蓄能竖向隔震结构层顶加速度响应

Fig. 16 Roof acceleration responses of VSI-HCA structures under rare earthquake

结合表 4 和图 15、图 16 可知:在竖向加速度峰值为 0.2 和 0.4 g 的 3 种地震动输入下,液压蓄能竖向隔震的竖向加速度峰值比输入加速度峰值平均减小了 59%,而 RCF 结构的竖向加速度峰值被放大。在 3 种不同的地震作用下,隔震结构的竖向加速度动力放大系数均较 RCF 结构明显减小。以 Taft-UD 波罕遇地震作用下为例,隔震结构楼面边柱的竖向加速度动力放大系数为 0.32,RCF 结构相同位置的竖向加速度动力放大系数为 2.02,减小了 84%,隔震效果明显。隔震有限元模型的竖向周期计算结果为 1.62 s,从反应谱上可以看出,在结构周

期 T 为 1 ~ 2 s 时,Kobe-UD 波的加速度反应谱值明显大于其他两条波,与图 14 中 Kobe-UD 波对加速度响应减小程度较弱的结果一致。结合加速度反应谱可以看出,布置液压蓄能竖向隔震装置使结构自振周期偏离地震动的卓越周期,竖向隔震效果明显。

图 17 为液压蓄能竖向隔震结构的各层最大加速度响应图。由图 17 可知,隔震结构的各层最大加速度响应基本一致,表明上部结构各层类似于做刚体运动,主要原因在于隔震层的竖向刚度远小于上部结构各层的竖向刚度。

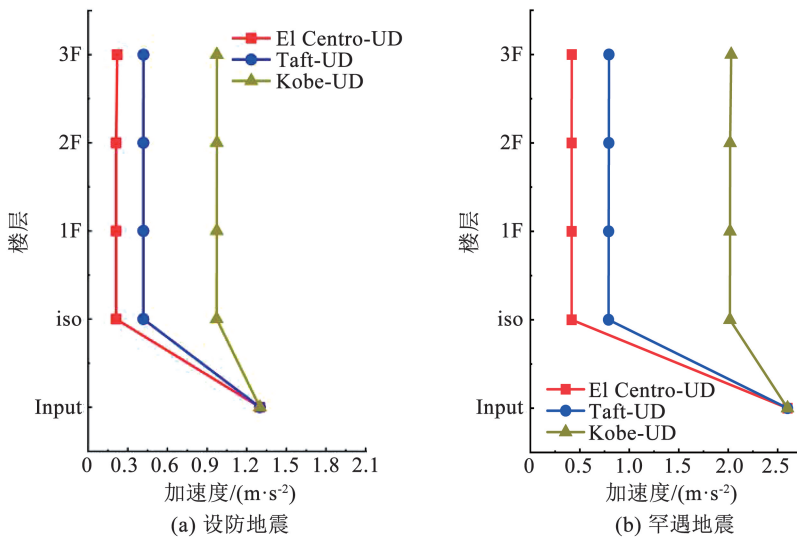


图 17 结构竖向楼层最大加速度响应

Fig. 17 The maximum vertical acceleration response

图 18 和图 19 给出了液压蓄能竖向隔震结构在 3 种地震波不同峰值加速度输入下, 上部结构竖向位移反应时程和最大竖向位移反应。从图 19 可以看出, 不同地震波作用下, 结构的竖向位移峰值有所

差异, 其中 Kobe-UD 的位移响应大于其他两条波, 这与加速度响应的结果一致。罕遇地震作用下结构的最大竖向位移反应均小于 255 mm, 满足结构竖向位移设定要求。

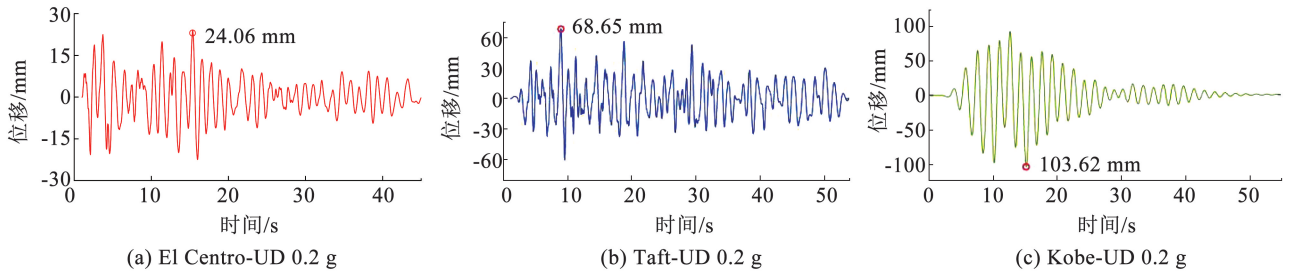


图 18 设防地震下液压蓄能竖向隔震结构层顶位移响应

Fig. 18 Roof displacement responses of VSI-HCA structures under moderate earthquake

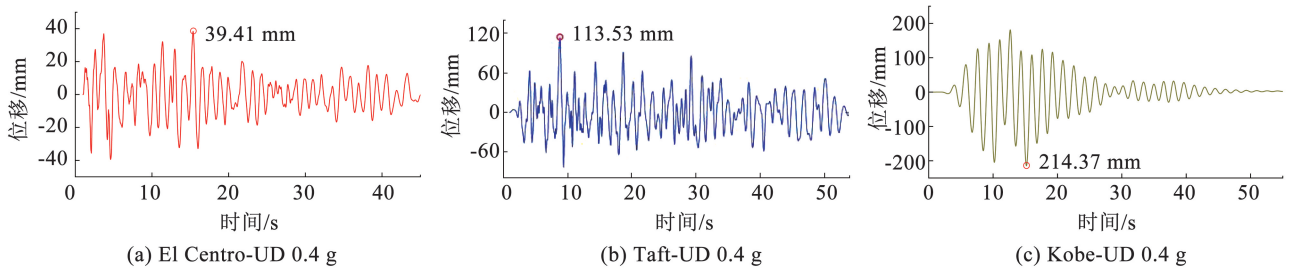


图 19 罕遇地震下液压蓄能竖向隔震结构层顶位移响应

Fig. 19 Roof displacement responses of VSI-HCA structures under rare earthquake

图 20 为角支座 1 在 Taft-UD 波作用的竖向滞回曲线, 其中竖向恢复力消除了重力的影响。装置的滞回曲线呈现典型的纺锤形, 与静力试验结果中的曲线形状相似, 表明液压蓄能竖向隔震结构在地震作用下存在明显的耗能效果。根据滞回曲线拟合的装置竖向刚度为 $215.07 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 与理论计算结果的误差为 2.07%, 验证了有限元建模方法的准确性。

验进行了验证。试验结果表明, 液压蓄能竖向隔震系统的理论力学特性与试验吻合良好, 系统刚度非线性效应明显。

2) 采用谐波平衡法求解了液压蓄能竖向隔震系统的幅频响应曲线, 进行了变参数的位移传递率分析。结果表明, 系统的动力特性受激励幅值和蓄能器体积压缩系数影响较大, 而受阻尼影响并不显著。针对液压蓄能竖向隔震系统和等效线性系统的位移传递率对比分析表明, 液压蓄能竖向隔震系统具有更低的起始隔振频率, 且在有效隔振频率区间的传递率明显小于线性系统。

3) 液压蓄能竖向隔震结构和 RCF 结构竖向地震响应有限元分析结果表明: 液压蓄能竖向隔震系统能够有效降低上部结构的竖向加速度响应, 分析案例的竖向加速度峰值比输入加速度峰值平均减小了 59%。

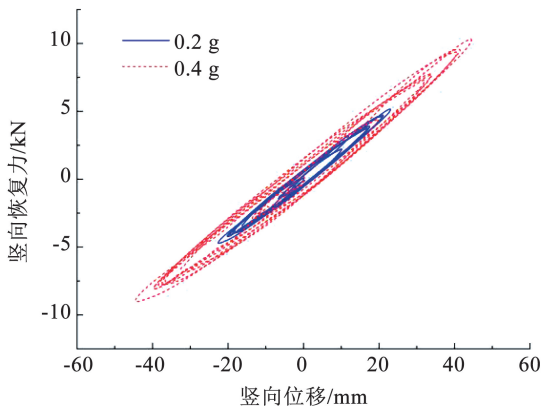


图 20 液压蓄能竖向隔震装置的竖向滞回曲线

Fig. 20 Vertical hysteretic curves of the VSI-HCA

4 结 论

1) 本文设计了一种新型液压蓄能竖向隔震系统, 分析了系统的非线性刚度特性, 并通过静力学试

参 考 文 献

[1] AMBRASEYS N N, DOUGLAS J. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(1): 5. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00153-7

[2] SALAZAR A R, HALDAR A. Structural responses considering the vertical component of earthquakes [J]. Computers & Structures, 2000, 74(2): 131. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00031-0

- [3] PAPAZOGLU A J, ELNASHAI A S. Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 25 (10): 1109. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199610)25:10<1109::AID-EQE604>3.0.CO;2-0
- [4] 吴香香, 李宏男. 竖向地震动对基础隔震结构高宽比限值的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(1): 10
WU Xiangxiang, LI Hongnan. Effect of vertical motion on limit ratio of height to width for isolated structure [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2004, 32(1): 10. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2004.01.003
- [5] 朱林, 徐略勤, 皮水萌. 竖向地震对板式橡胶支座滑移效应的影响[J]. *结构工程师*, 2020, 36(3): 71
ZHU Lin, XU Lueqin, PI Shuimeng. Effect of vertical earthquakes on sliding performance of laminated [J]. *Structural Engineers*, 2020, 36(3): 71. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2020.03.010
- [6] 吴迪, 沈朝勇, 熊焱, 等. 三维基础隔震(振)技术与装置研究简述[J]. *华南地震*, 2020, 40(4): 101
WU Di, SHEN Chaoyong, XIONG Yan, et al. Brief review of three-dimensional base seismic (vibration) isolation technology and device [J]. *South China Journal of Seismology*, 2020, 40(4): 101. DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.014
- [7] PUJOLS J, RYAN K L. Computational simulation of slab vibration and horizontal-vertical coupling in a full-scale test bed subjected to 3D shaking at E-Defense [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018, 47(2): 438. DOI: 10.1002/eqe.2973
- [8] 邓长根, 曾苗, 徐忠根. 结构工程竖向隔震技术研究进展[J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(4): 4
DENG Changgen, ZENG Miao, XU Zhonggen. Progress of research on vertical isolation technology in structural engineering [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2019, 36(4): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2019.04.001
- [9] TOKUDA N, KASHIWAZAKO A, OMATA I. Three-dimensional base isolation system for assumed fbr reactor building [C]// *Transactions of the 13. International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Porto Alegre: Editora de Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995: 513
- [10] TANIGAKI S, MATSUURA M, HIBI K, et al. The study of floating structure isolated from earthquake motion: vertical seismic isolation utilizing pneumatic compartments [C]// *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1999: 533
- [11] KAJI S, KUNITAKE N, SAWA N, et al. Three dimensional seismic isolation system using hydraulic cylinder [C]// *Proc ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference*. Vancouver: ASME, 2002: 35. DOI:10.1115/PVP2002-1429
- [12] KASHIWAZAKI T, SHIMADA T, FUJIWAKA S, et al. Feasibility tests on a three-dimensional base isolation system incorporating hydraulic mechanism [C]// *Proc ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference*. Vancouver: ASME, 2002: 11. DOI:10.1115/PVP2002-1426
- [13] SHIMADA T, FUJIWAKA T, MORO S. Study on three-dimensional seismic isolation system for next-generation nuclear power plant: Hydraulic three-dimensional base isolation system [C]// *Proc ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference*. California: ASME, 2004: 35. DOI:10.1115/PVP2004-2931
- [14] 鲁亮, 汪磊, 夏婉秋, 等. 液压蓄能式竖向隔震装置性能试验及隔震参数分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(11): 4
LU Liang, WANG Lei, XIA Wanqiu, et al. Experimental study and parameter analysis on the performance of vertical seismic isolation device with hydraulic jack and accumulator [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2024, 51(11): 4. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2024102
- [15] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [16] 潘鹏, 曾一, 曹迎日, 等. 建筑结构隔震技术研究进展 [J]. *工程力学*, 2024, 41(5): 39
PAN Peng, ZENG Yi, CAO Yingri, et al. State-of-the-art of research on the building structure isolation technologies [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(5): 39. DOI: 1000-4750(2024)05-0039-16
- [17] 建筑隔震设计标准: GB/T51408—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021
Standard for seismic isolation design of building: GB/T51408—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021
- [18] HAN Q, JING M, LU Y. Shaking table tests on the seismic response of truss structure with air spring-FPS three-dimensional isolation bearing [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2023, 52(15): 4964. DOI: 10.1002/eqe.3

(编辑 吕雪梅)