

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.008

某 RC 框架结构学生宿舍楼消能减震设计与分析

张睿哲¹, 王林建^{1,2}, 程美涛³

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650024;

3. 上海建工五建集团有限公司, 上海 200333)

摘要: 为提高人员密集型宿舍建筑在地震作用下的安全性与震后功能恢复能力, 以抗震设防烈度为 7 度(0.15g)的某六层钢筋混凝土框架结构学生宿舍楼为研究对象, 采用墙式黏滞阻尼器(VFD)进行消能减震设计与应用。采用有限元软件建立结构模型, 选取 5 条天然地震波和 2 条人工地震波, 采用弹性时程分析与弹塑性时程分析相结合的方法, 对结构在小震、中震及大震下的动力响应、阻尼器耗能性能及结构损伤状态进行研究与分析。结果表明: 采用 VFD 减震后, 结构在小震、中震及大震下的最大层间位移角均满足规范及性能目标要求; 小震和中震下, 结构 X、Y 方向平均附加阻尼比分别达到 4.51%、4.47% 和 3.90%、3.84%, 阻尼器能够有效耗散输入地震能量, 显著降低结构地震响应。大震下, 阻尼器滞回曲线饱满, 耗能效果显著, 结构整体塑性发展较小, 仅部分框架梁及少量框架柱进入 IO 阶段, 主体结构基本保持完好。经综合分析, 墙式 VFD 减震能够有效提升 RC 框架学生宿舍楼的抗震性能与结构安全储备。

关键词: 宿舍建筑; 框架结构; 减震加固; 黏滞阻尼器

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0056-06

Seismic Energy Dissipation and Vibration Reduction Design and Analysis of a Student Dormitory Building with RC Frame Structure

ZHANG Ruizhe¹, WANG Linjian^{1,2}, CHENG Meitao³

(1. Institute of Disaster Prevention Technology, Sanhe, Hebei 065201, China;

2. Yunnan Earthquake Administration, Kunming, Yunnan 650024, China;

3. Shanghai Construction Fifth Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: In order to enhance the safety and post-earthquake functional recovery capacity of densely populated dormitory buildings, a six-story reinforced concrete frame structure student dormitory building under the 7-degree (0.15g) seismic action was selected as the research object. Wall-type viscous fluid damper (VFD) were adopted for energy dissipation and seismic design and application. The structural model was established using finite element software, five natural seismic waves and two artificial seismic waves were selected. The elastic time-history analysis and elastoplastic time-history analysis methods were combined to analyze the dynamic response, damper energy dissipation performance, and structural damage state of the structure under small, moderate, and large earthquakes. The results show that after using VFD for damping, the maximum inter-story displacement angles of the structure under small, moderate, and large earthquakes all meet the specifications and performance target requirements. Under small and moderate earthquakes, the average additional damping ratios in the X and Y directions of the structure are 4.51%, 4.47%, 3.90%, and 3.84% respectively, and the dampers can effectively dissipate the input seismic energy, significantly reducing the seismic response of the structure. Under large earthquakes, the VFD hysteresis curve is full, the energy dissipation effect is significant, the overall plastic development of the structure is small, only some frame beams and a few frame columns enter the IO stage, and

收稿日期: 2026-01-25

修稿日期: 2026-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778149)

作者简介: 张睿哲(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为结构抗震与减隔震。E-mail: 1035502966@qq.com

通讯作者: 王林建(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事结构减隔震理论与工程应用等方面工作。E-mail: 309688476@qq.com

the main structure remains basically intact. Through comprehensive analysis, the wall-type VFD can effectively improve the seismic performance and structural safety reserve of the RC frame student dormitory building.

Keywords: dormitory building; frame structure; damping reinforcement; viscous fluid damper

地震灾害具有突发性强、破坏性大、波及范围广等特点,对我国人民生命财产安全构成长期且严重的威胁。学生宿舍楼作为人员密集且需在地震发生后承担临时避难功能的建筑,其地震安全需求高。然而,按现行抗震规范设计的新建RC框架结构,在大震下往往产生较大的残余层间变形与节点损伤,难以保证震后快速恢复使用功能,且修复成本高昂。为此,引入消能减震技术成为提升新建宿舍楼抗震性能的有效途径^[1-2]。

黏滞阻尼器(Viscous Fluid Damper, VFD)作为消能减震技术中常用的阻尼器,已得到广泛研究。周云等^[3]、杜东升等^[4]提出了VFD的附加阻尼比简化计算方法,并分别以RC框架结构为算例,证明了该方法的准确性。邵冰等^[5]对VFD在某中心支撑框架结构的减震效果进行了多因素分析,指出VFD效果与场地特征周期及结构基本周期有关,且附加阻尼比越大减震效果越好。兰香等^[6]探讨了框架结构中VFD参数对减震率的影响,并基于实际工程证明了所提出的VFD参数优化设计方法有效性。同时,VFD也已得到广泛的应用,王军辉等^[7]对某五层框架结构幼儿园工程进行VFD减震设计,结果表明,布置VFD后,结构可以满足设计要求。李丽

媛等^[8]对比了防屈曲支撑(Buckling-Restrained Brace, BRB)和VFD在框架结构的减震效果,指出VFD在减小层间剪力、提高附加阻尼比和控制楼面水平加速度方面更有效。翁志英等^[9]、商昊江等^[10]对既有框架结构采用BRB+VFD的混合减震方案,结果表明,该方案能充分发挥减震效果,降低结构的最大层间位移角,保障结构安全。

综上,VFD减震技术可有效降低结构地震响应。为进一步分析其在宿舍楼这类人员密集结构的减震效果及其可靠性,本文以某RC框架学生宿舍楼为研究对象,分析探讨其在小震、中震及大震作用下的响应,验证VFD减震方案的有效性。研究成果可为此类宿舍楼建筑的减震设计提供参考。

1 计算模型

1.1 工程设计方案

以国内某RC框架结构学生宿舍楼为案例,建筑结构按常规设计。结构首层层高为4.50 m,2~5层层高为3.60 m,局部出屋面高4.90 m,建筑总计算高度为23.80 m。建筑X向总长度为51.00 m,Y向总长度为19.50 m,建筑高宽比1.21,总建筑面积为4 884 m²。建筑底层平面布置如图1所示。

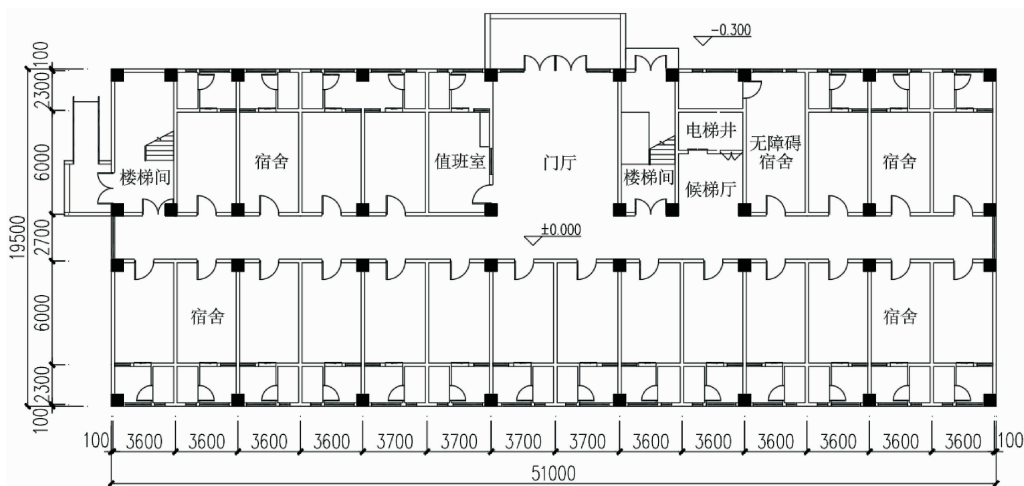


图1 建筑底层平面

建筑抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.15g,设计地震分组为第二组,场地类别Ⅲ类,特征周期0.55 s,抗震设防类别为乙类。结构依照国家标准《建筑抗震设计规范》进行设计^[11],采用

的混凝土强度等级为C30—C35,纵筋采用HRB335级钢筋,箍筋采用HPB235级钢筋。结构主要构件截面尺寸为:框架柱550 mm×550 mm—450 mm×450 mm;框架梁250 mm×700 mm~600 mm;楼板厚

度均为 120 mm。

1.2 阻尼器选取及布置

在钢筋混凝土框架结构减震设计中,采用防屈曲支撑 BRB 和粘滞阻尼器 VFD 为其中常见的方案,参考文献[12],针对不同的形式进行了多种方案优缺点对比,详见表 1。

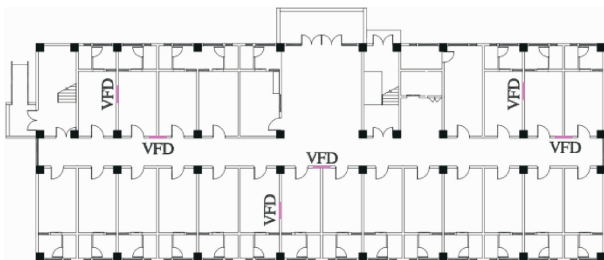
表 1 不同减震方案优缺点对比

减震方案	优点	缺点
防屈曲支撑方案 BRB	抗侧效率高	附加阻尼比低,影响建筑功能,节点板和预埋件综合费用高
支撑式 VFD 阻尼器	单个阻尼器效率高	影响建筑功能,辅助钢支撑、节点板和埋件综合费用高
墙式 VFD 阻尼器	不影响建筑功能,综合成本低	适用于小吨位阻尼器

由表 1 可知,防屈曲支撑 BRB 方案和支撑式 VFD 阻尼器方案会影响建筑功能,且造价高,而墙式 VFD 阻尼器方案布置灵活,建筑功能影响小,成本低。经综合分析,本工程采用墙式 VFD 阻尼器方案。基于“均匀、分散、对称”的阻尼器布置原则^[13],选取的阻尼器参数如表 2 所示,墙式 VFD 阻尼器的布置方案及现场布置安装示意如图 2 所示。

表 2 VFD 主要参数

阻尼指数 α	阻尼系数 $/(kN \cdot mm^{-\alpha} \cdot s^{\alpha})$	设计阻尼力 $/kN$	设计速度 $/(mm \cdot s^{-1})$	设计容许位移 $/mm$
0.40	30	300	625	± 50



(a) 阻尼器布置方案



(b) 阻尼器现场布置安装

图 2 阻尼器布置

1.3 模型建立及校核

采用国内常用结构设计软件 PKPM 完成结构建模,并基于该模型开展反应谱分析,得到结构在小震及中震下的层间位移角、阻尼器变形及受力、附加阻尼比等地震响应结果。后续有限元分析阶段,借助 ETABS 软件灵活高效的建模能力及强大的线性和非线性动力分析功能,将 PKPM 模型导入 ETABS,依次进行弹性时程分析与弹塑性时程分析,以详细分析结构损伤。弹性分析时,梁柱构件采用弹性杆系模型;弹塑性分析时,为区分塑性区与弹性区,对梁柱设置塑性铰,其中塑性区采用纤维截面模拟。具体地,柱构件选用 P-M2-M3 铰,以反映轴力-弯矩耦合作用下的塑性发展行为;梁构件采用 M3 铰,模拟弯矩主导的塑性区域。楼板仅承担荷载传递作用,不考虑其自身受力变形,故采用壳单元以兼顾计算精度与效率。

材料本构方面:混凝土采用 Mander 滞回模型,钢筋选用双折线弹塑性硬化模型;P-M2-M3 铰与 M3 铰均采用各向同性滞回模型。黏滞流体阻尼器(VFD)通过 ETABS 中的非线性单元 Damper-Exponential 模拟,并设置高刚度以屏蔽弹簧单元的作用^[14]。上述设置可满足结构数值分析的基本需求,最终建立的结构模型如图 3 所示。

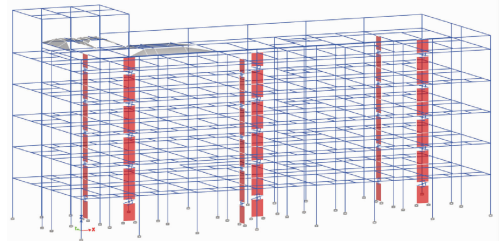


图 3 三维结构模型

为了校核所建立的结构模型的准确性,将 ETABS 和 PKPM 建立的非减震结构模型计算得到的质量、周期和基底剪力进行对比,如表 3 所示。表中差值为: $(|ETABS - PKPM|/PKPM) \times 100\%$ 。验证结果表明,各数据误差均小于 5%,可认为所建立的有限元模型准确性较好。

表 3 结构模型验证

软件/参数	PKPM	ETABS	误差/%
结构质量/t	6843	6888	0.67
结构自振周期/s	1	0.7930	3.66
	2	0.7419	3.36
	3	0.6806	2.44
基底剪力/kN	X 向	6115	1.24
	Y 向	6178	0.90

1.4 地震波选取

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—1989),选取了5条实际强震记录和2条人工模拟加速度时程曲线,用于小震及中震下的反应谱分析,并选用2条实际强震和1条人工波进行大震下的时程分析计算。所选用的地震波频谱如图4所示。

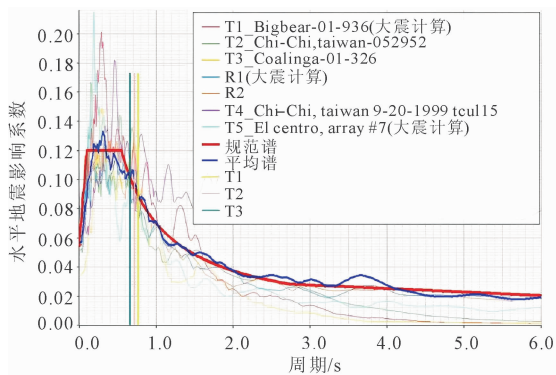


图4 地震波频谱

2 结构地震响应分析

在ETABS分析中,弹性时程分析采用软件所提供的快速非线性分析方法,即只考虑减震器的非线性、结构本身假设为线性。图5展示了小震、中震及大震下结构层间位移角。对比参照《建筑抗震设计规范(2016版)》^[11](GB 50011—2010),可见,小震工况下,结构除顶层外, X 向最大层间位移角为 $1/1132$ 、 Y 向为 $1/1237$,均远优于规范规定的弹性层间位移角限值 $1/550$,表明在小震作用下,VFD尚未充分激活,主体结构基本保持弹性,且结构自身刚度储备充足,能够有效控制侧向变形;中震工况下,结构最大层间位移角为 X 向 $1/378$ 、 Y 向 $1/390$,满足预设的性能目标 $1/300$ 。相较于小震,中震下位移角显著增大,但仍在可控范围内。此时VFD已开始进入工作状态,通过黏滞耗能机制消耗部分地震输入能量,从而延缓了主体结构塑性铰的出现;根据规范要求,大震下的计算结果取三条地震波的包络值,除去结构顶层局部出屋面外,结构 X 、 Y 向的最大层间位移角分别为 $1/187$ 和 $1/196$,均小于规范限值 $1/100$,这一结果充分说明,大震下VFD被充分激活,通过其黏滞耗能显著抑制了主体结构的累积损伤,使得层间变形控制在可接受的范围内,实现了“大震不倒”并兼顾“功能可恢复”的韧性设计目标。

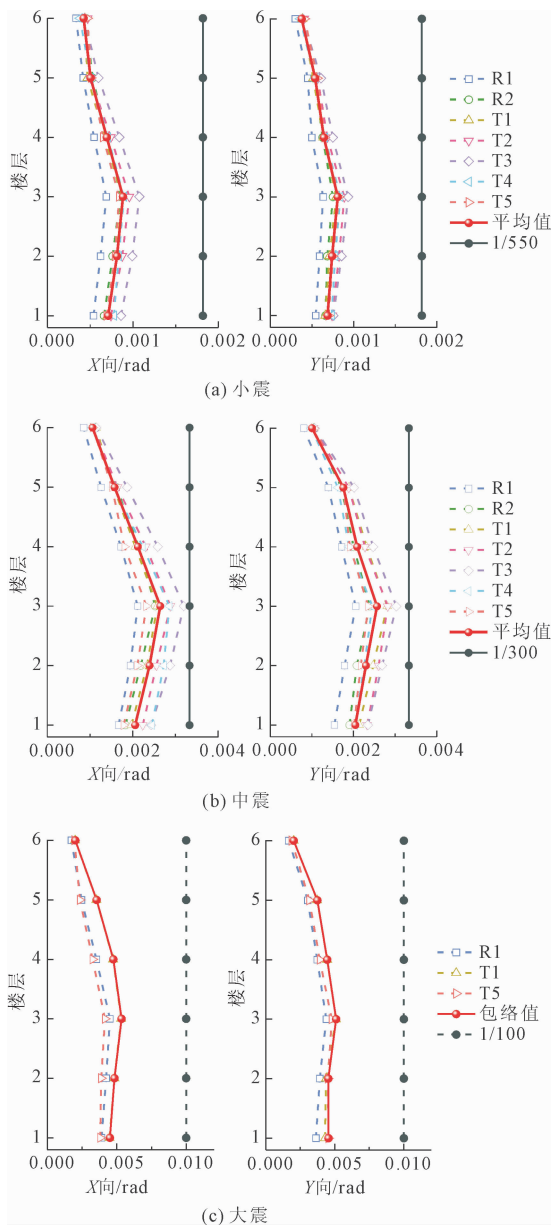


图5 结构层间位移角

3 结构抗震性能

3.1 阻尼器滞回曲线

鉴于篇幅,仅选取结构底层中受力和位移较大的 X 向VFD,在小震和中震工况下各取一个典型阻尼器进行滞回曲线分析,如图6所示。可见,小震及中震下滞回曲线饱满,近似矩形,中震工况滞回环面积显著增大,表明阻尼器具有显著的耗能效果。相比位移型阻尼器,VFD的滞回曲线不依赖往复塑性变形,无累积疲劳问题,且小震下滞回环已基本成形,无“捏缩”现象,表明VFD具备优良的低震级启动性能,适合于需同时满足小震功能不中断和中震损伤可控的新建减震宿舍楼。

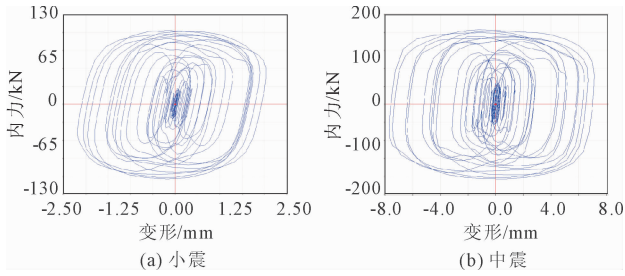


图 6 阻尼器滞回曲线(X向)

3.2 VFD 位移

图 7 为小震及中震工况下 VFD 减震器位移及出力,其中,X 向 VFD 按楼层从下到上、同层从左到右,依次编号 1~15;Y 向 VFD 同理,编号 16~30。小震下 VFD 最大位移为 3.82 mm,最大出力为 129 kN,此时 VFD 处于较小变形和较低出力水平,能够提供附加阻尼而不损伤连接构件;中震下 VFD 最大出力增至 202 kN,位移扩大至 12.48 mm,此时 VFD 可以充分发挥减震性能,有效抑制结构地震响应。小震下变形及出力分别为 VFD 设计限值(50 mm、300 kN)的 7.64% 和 43.00%,中震下占 24.96% 和 67.33%,低于设计极限,安全裕量充足。此外,随地震强度的增大,VFD 最大变形增大 3.26 倍而最大出力仅增大 1.57 倍,符合黏滞阻尼器速度指数 $\alpha < 1$ 的典型规律,有助于避免过大集中力损伤主体结构。

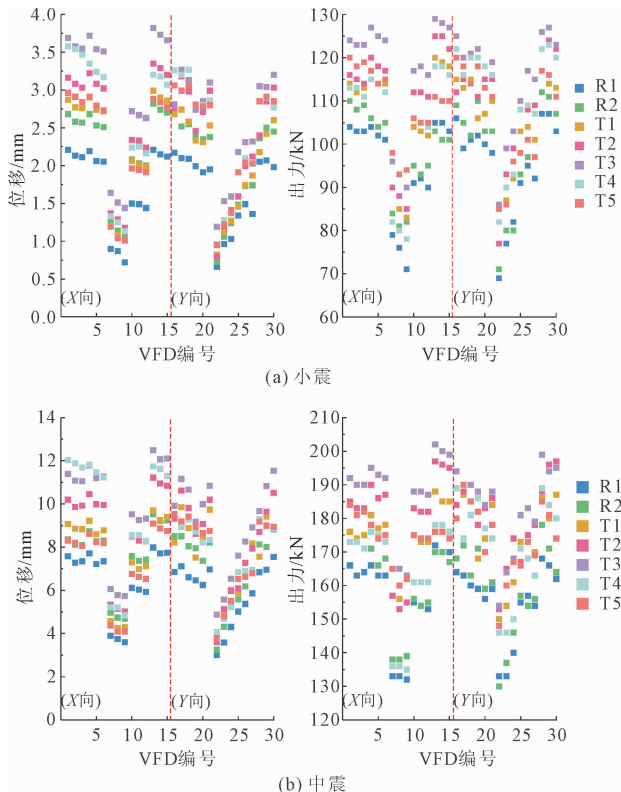


图 7 VFD 位移及出力

综上,所选 VFD 阻尼器滞回性能优良、安全储备充分,可有效保护 RC 框架主体结构。总体而言,VFD 在小震和中震工况下均表现出合理的工作状态,满足了“小震弹性、中震可消能”的减震设计目标。

3.3 附加阻尼比计算

结构的能量包含:动能、势能、固有阻尼耗能、阻尼器耗能等。固有阻尼耗能来源于结构自身的阻尼比,阻尼器耗能来源于阻尼器的滞回耗能,根据阻尼器耗能与固有阻尼耗能之间的关系可计算阻尼器的附加阻尼比:

$$\xi_a = \frac{E_C}{E_D} \xi \quad (1)$$

式中: ξ_a 为消能减震结构的附加有效阻尼比; E_C 为阻尼器耗能; E_D 为结构固有阻尼耗能; ξ 为结构固有阻尼比。

基于式(1)可分别计算小震和中震工况下计算得到的附加阻尼比。计算结果表明,小震下的附加阻尼比平均值分别为 4.51% (X 向) 和 4.47% (Y 向),在中震下分别为 3.9% (X 向) 和 3.84% (Y 向),均处于消能减震结构设计的合理区间,可将结构总阻尼比提升至接近 10%。

以中震为例,根据结构的附加阻尼比可以得到结构的累积耗能时程曲线,如图 8 所示。可见,地震动加载初期(约前 4 s),累积耗能量很小,以动能和势能为主;在强震持时阶段(4~15 s),固有阻尼耗能和 VFD 耗能快速增加,动能和势能持续保持较低强度的波动,未见梁柱塑性铰等非弹性变形导致的滞回耗能;在地震结束后(15 s 后),动能和势能振荡衰减至零,各累积耗能曲线趋于水平,终点值之和等于总输入能。因此,VFD 阻尼器所提供的附加阻尼比合理、稳定,完全满足本工程“小震弹性、中震可修、大震不倒”并兼顾功能连续性的减震设计需求。

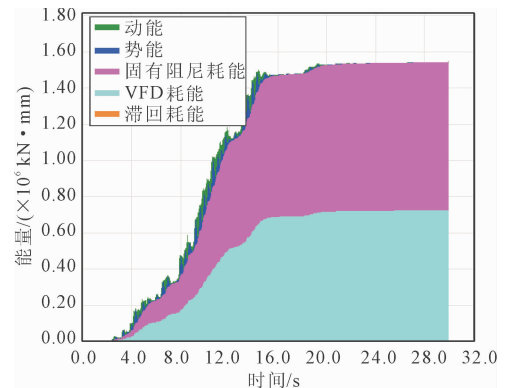


图 8 累积耗能时程曲线

3.4 结构损伤

根据小震及中震下性能目标确定的PKPM反应谱模型,在ETABS中导入设计的构件及其配筋,并以此定义主体结构框架梁、柱的塑性铰。其中,框架梁两端以承受弯矩为主,主要破坏模式为弯曲破坏,采用M3铰可有效模拟梁端在弯矩作用下的弹塑性转动行为;框架柱两端同时承受轴力与双向弯矩,其破坏模式为轴力-弯矩耦合作用下的弯曲破坏,采用P-M2-M3铰可考虑轴力与绕截面两个主轴方向弯矩的相互耦合效应,准确模拟柱构件在轴力-弯矩作用下的塑性发展过程;梁、柱中部主要承受剪力作用,因此采用V2、V3铰模拟绕构件局部剪切作用下的塑性发展。

同时,在ETABS有限元模型中,将塑性铰性能水准值(ⅠO、ⅠS、CP)作为可接受准则输入模型,通过塑性铰状态的判定对结构抗震性能进行评价。其中,ⅠO铰对应构件处于轻度损伤状态;ⅠS铰表示构件处于中度损伤状态;CP铰表示构件处于严重损伤状态。选取中震和大震下结构损伤最为典型的状态,如图9所示。

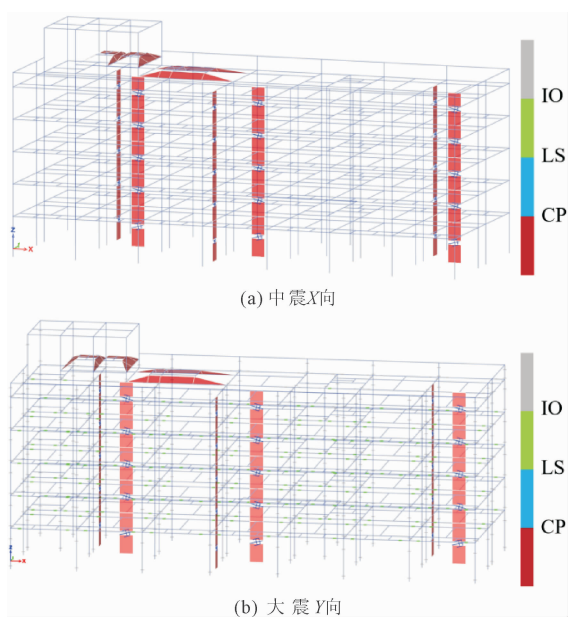


图9 结构损伤状态

根据图9分析可得,中震下梁、柱未进入塑性,均保持弹性状态,表明中震下VFD阻尼器已充分激活并通过滞回耗能吸收了大部分地震输入能量,使得主体结构免于损伤,震后无需修复即可直接投入使用,满足了预定的性能目标。大震下,部分框架梁和个别框架柱进入ⅠO阶段(基本完好),具体而言,塑性铰主要分布于结构中部楼层(2~5层)的框架

梁,数量约占全部梁构件的25%~35%,且均远未达到ⅠS阶段。由此可知,整体结构塑性程度较低,满足预定的性能目标。

4 结论

本文以某六层RC框架结构学生宿舍楼为研究对象,分析墙式VFD的减震性能,主要结论如下:

(1) 小震下,结构除顶层局部出屋面外X、Y向最大位移角分别为1/1132和1/1237,满足性能目标1/550要求;此时VFD发挥一定的耗能作用,为结构X和Y方向提供最小的附加阻尼比平均值分别为4.51%和4.47%。

(2) 中震下,结构除顶层局部出屋面外X、Y向最大位移角分别为1/378和1/390,满足性能目标1/300要求;VFD发挥较好的耗能作用,为结构X和Y方向提供最小的附加阻尼比平均值分别为3.9%和3.84%;梁、柱未进入塑性,结构构件基本保持弹性。

(3) 大震下,结构除顶层局部出屋面外X向和Y方向最大位移角分别为1/187和1/196,满足性能目标1/100要求;VFD充分发挥耗能作用,其滞回曲线饱满,能够有效耗散地震输入能量,保护主体结构;同时,大震下仅部分框架梁和个别框架柱进入ⅠO阶段(基本完好),整体结构塑性程度较低,满足预定的性能目标。

参考文献:

- [1] 周云,商城豪,张超.消能减震技术研究与应用进展[J].建筑结构,2019,49(19):33-48.
- [2] 张鑫,李书蓉,岳庆霞.基于结构体系的抗震加固方法研究综述[J].建筑结构,2023,53(19):1-12.
- [3] 周云,韩宇娴,商城豪,等.消能减震结构阻尼器有效刚度及结构等效阻尼比取值方法研究[J].建筑结构,2022,52(05):43-47,54.
- [4] 杜东升,刘言杰,徐庆阳.黏滞阻尼器考虑激励频率影响的附加阻尼比简化计算[J].振动工程学报,2021,34(01):29-37.
- [5] 邵冰,邹海涛,蔺军,等.钢管混凝土框架-中心支撑结构黏滞阻尼器减震效果研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(06):75-84,96.
- [6] 兰香,张兴仙,邵一凡,等.黏滞阻尼器参数对框架结构减震效率的影响研究[J].自然灾害学报,2024,33(05):176-187.
- [7] 王军辉,王伟,潘月辉,等.布置黏滞阻尼器框架结构的抗震分析研究[J].建筑结构,2022,52(S1):966-970.

(下转第96页)

- [2] 李 植. 铁路旅客站房圆柱面壳结构的地震响应分析[J]. 结构工程师, 2024, 40(04): 66-75.
- [3] 陈月平, 温 恺, 周大兴. 铁路客站装配式钢筋混凝土雨棚发展与适用性分析[J]. 施工技术, 2021, 50(10): 12-15, 21.
- [4] 方 显. Y 形站台雨棚装配式混凝土结构设计研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(04): 7-11.
- [5] 杨超望. 铁路客站板壳结构站台雨棚抗震性能分析[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(02): 137-142.
- [6] 房胜兵. 铁路站台现浇钢筋混凝土单柱雨棚结构抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(03): 121-129.
- [7] 郭隆基, 何满潮, 翟定军, 等. 基于 MIDAS Gen 的多层钢筋混凝土框架结构倒塌数值模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6139-6147.
- [8] 张令心, 王子铭, 朱柏洁. 近场地震动对我国 RC 框架结构地震响应影响分析[J]. 世界地震工程, 2024, 40(04): 39-50.
- [9] 郑山锁, 温桂峰, 董立国, 等. RC 框架结构倒塌地震易损性评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(05): 177-188.
- [10] 魏世龙, 韩建平. 基于结构等效周期选择和谐匹配方法对 RC 框架结构地震易损性分析的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 43(02): 135-142.
- [11] 艾在军. 近场脉冲型地震动与远场地震动作用下 RC 框架结构的反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(01): 10-19.
- [12] 谭 倩, 杨 杰, 张耀庭. 近场地震作用下多层 RC 框架的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(04): 165-176.
- [13] 张文明. 装配式钢筋混凝土铁路客运站雨棚结构抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2025.
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] 康 林, 崔佳伟, 严武建, 等. 基于概率地震需求模型的兰新高铁桥梁近断层地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2024, 46(03): 644-654.
- [16] 石运东, 卫旺旺, 丁 阳, 等. 三维隔震钢框架结构及内部非结构构件地震易损性研究[J]. 工程力学, 2024, 41(01): 149-159.
- [17] 聂红鑫, 曹宝珠, 于 莹, 等. PBEE 框架下基于 IDA 方法的超高层耗能结构地震易损性分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(03): 14-22.
- [18] 高和平. 近场地震下钢框架结构地震易损性分析[J]. 华南地震, 2022, 42(01): 147-152.
- [19] FEMA 695 Quantification of building seismic performance factors [S]. California, US: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [20] 马恺泽, 王彦鹏, 张少磊. 基于增量动力分析的钢框架-混凝土剪力墙结构地震易损性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 339-344.

(上接第 61 页)

- [8] 李丽媛, 孙科章. 两种减震产品在高烈度区某医疗建筑中的对比分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 820-824.
- [9] 翁志英, 刘佳欣, 吴应雄, 等. 混合减震加固底盘-塔楼框架结构易损性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(04): 46-54.
- [10] 商吴江. BRB + VFD 减震加固大底盘单塔楼多层框架结构抗震性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(03): 143-150.
- [11] GB50011—2010 建筑抗震设计规范(2016 版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [12] 曾德民, 王 斌, 刘立德, 等. 基于满足正常使用要求的钢框架医疗建筑减震对比分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(04): 113-122.
- [13] 周玉娟, 王曙光. 框架结构线性黏滞阻尼器双目标同步优化布置研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(01): 44-51.
- [14] Wen Qianxin, Xie Linlin, Yang Cantian, et al. Seismic resilience of RC frame-shear wall structure equipped with PDYBRB, BRB, and VFD[J]. Structures, 2025, 75: 108664.