

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.011

某门诊住院楼消能减震加固设计与抗震性能分析

谢汪洋¹, 陈道政^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:对于某工业厂房改造为医院门诊住院楼项目,文章采用基于消能减震技术的抗震加固方案进行分析设计,结合项目情况确定加固方案,在合理位置布置适当数量的黏滞阻尼器,采用 ETABS 有限元软件建立减震前后分析模型;分别在多遇地震下进行反应谱分析、弹性时程分析,对比减震前后模型层间剪力和层间位移角变化,并采用能量法计算附加阻尼比;提出在罕遇地震下预期抗震性能目标,通过动力弹塑性时程分析,对比层间位移角变化,并对建筑物进行性能评价。研究表明:与原结构相比,减震结构地震响应明显降低,塑性变形和损伤破坏满足抗震目标要求,黏滞阻尼器起到良好的耗能作用,减震设计效果显著。

关键词:框架-剪力墙结构;加固改造;消能减震;黏滞阻尼器;时程分析;性能化设计

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2023)03-0352-07

Energy dissipation and seismic reinforcement design and seismic performance analysis of an outpatient and inpatient building

XIE Wangyang¹, CHEN Daozheng^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: In view of a project to transform an industrial plant into an outpatient and inpatient building of a hospital, the seismic reinforcement scheme based on energy dissipation and vibration reduction technology is designed. The reinforcement scheme is determined based on the project characteristic, the appropriate number of viscous dampers is arranged at a reasonable location, and the ETABS finite element software is used to establish the analysis model before and after the seismic reduction. The response spectrum analysis and the elastic time history analysis are carried out under frequent earthquakes, the inter-story shear force and displacement angle changes before and after the seismic reduction are compared, and the additional damping ratio is calculated by the energy method. The expected seismic performance target under rare earthquakes is proposed, and the dynamic elasto-plastic time history analysis is used to compare the inter-story displacement angle changes. The performance evaluation on the building is conducted. The research results show that compared with the original structure, the seismic response of the damping structure is significantly reduced, the plastic deformation and damage meet the requirements of the seismic target, the viscous damper plays a good role in energy dissipation, and the damping effect is remarkable.

Key words: frame-shear wall structure; reinforcement and reconstruction; energy dissipation and vibration reduction; viscous damper; time history analysis; performance-based design

收稿日期: 2021-03-10; **修回日期:** 2021-04-15

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本业务费专项资助项目(2020EEVL0417)

作者简介: 谢汪洋(1996—),男,安徽凤台人,合肥工业大学硕士生;

陈道政(1964—),男,安徽肥东人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

传统的结构抗震加固设计方法,是通过增加结构抗侧刚度来提高建筑整体抗震性能;而消能减震技术是一种新型结构抗震技术,它是通过在主体结构某些部位设置阻尼器来转移和消耗地震输入能量,控制结构在地震作用下的振动响应,从而保证建筑安全。对既有建筑结构采用消能减震技术进行抗震加固可解决施工难度大、加固费用高等问题,并能有效提高结构的抗震性能^[1]。近年来,随着减震控制理论的完善和减震技术的成熟,越来越多的加固改造项目采用减震方案进行抗震设计^[2-4],相关工程经验也证明了减震技术的实用性、经济性。

某工程项目由于使用功能的改变造成原结构抗震构造措施不满足相关规范要求,需要重新进行抗震设计加固。本文通过对原结构和设置黏滞阻尼器的减震结构进行抗震分析,对比线性和非线性条件下结构层间位移角、层间剪力、塑性发展等指标,并引入性能概念作为衡量标准,确定性能目标,校核结构抗震性能和减震效果。

1 工程概况与加固方案

安徽省合肥市某高层厂房(未竣工验收)改建为医院门诊住院楼,该结构地上为15层,高度为60.5 m,其中底层层高为4.5 m,第2层至第15层层高为4.0 m,为框架-剪力墙结构。该项目属于改建医院医疗建筑,抗震设防类别从标准设防提升至重点设防,根据文献^[5-6]规定,应高于该地区抗震设防烈度1度加强抗震措施,在设计基本地震加速度(0.10g)基础上提高1档取值(0.15g)计算地震作用;同时,按照文献^[7]相关要求,该工程抗震分析与计算需计入竖向地震的影响。加固前后设计标准和相关参数对比见表1所列。

表1 加固前后设计标准及参数对比

参数与指标	加固前设计标准	加固后设计标准
设计使用年限/a	50	70
抗震设防类别	标准设防	重点设防
地震作用强度	7度 0.10g	7度 0.15g
设计地震分组	第一组	第一组
场地类别	II	II
特征周期/s	0.35	0.35
框架抗震等级	二级	一级
剪力墙抗震等级	二级	一级

根据原结构构件信息及相关参数,采用ETABS软件建立该工程有限元分析模型,如图1所示。

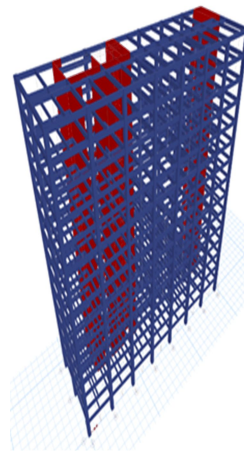


图1 ETABS软件分析住院楼有限元模型

采用ETABS软件和YJK软件对原结构进行初步分析计算,得到有限元模型模态周期、结构质量和基底剪力3个抗震指标结果,见表2所列。由于ETABS软件模型中连梁采用墙元模拟,而YJK软件模型直接采用梁杆件建模,且2个软件在截面剖分尺寸和软件计算规则上不同,造成计算结果稍有区别,但3个指标的相对误差均在5%允许范围内,可认为2个软件的模型较为一致,ETABS模型可用于消能减震分析,并能反映结构基本特性。

表2 ETABS软件、YJK软件模型3个抗震指标对比

指标	ETABS软件	YJK软件	相对误差/%	
模态周期/s	T_1	1.360	1.392	2.3
	T_2	1.340	1.342	0.1
	T_3	1.181	1.163	1.5
结构质量/t	21 755.06	22 093.16	1.5	
基底剪力/kN	X向	8 231.07	8 230.34	0.1
	Y向	8 063.64	8 318.16	3.1

传统加固设计理念往往以既定设防烈度为依据,通过提高构件本身强度、刚度、延性来抵御地震作用,达到抗震设防目标的要求。常用的方法有增大截面法、外包型钢法、粘贴复合材料纤维布法、增设剪力墙法等^[8]。该项目由于建筑功能改变造成设防类别由丙类升至乙类,框架及剪力墙抗震等级由二级提高至一级,传统加固方法很难满足新的抗震构造措施要求;同时,设计基本地震加速度值由0.10g提升至0.15g,地震作用强度显著增大,传统加固方法工程量大,加固范围广、工期长,很难达到经济性目标。

现采用基于消能减震技术的抗震加固方案,结合建筑功能在合适位置布置阻尼器,控制结构在地震作用下的振动响应,提高结构抗震性能,降低主体结构的抗震构造要求。

2 减震装置选择和布置

该工程选择墙式黏滞阻尼器,其构造如图 2 所示。图 2 中: d 为钢筋直径; h 为梁高; H 为层高; AZ 表示暗柱。标准层黏滞阻尼器布置如图 3

所示。黏滞阻尼器是一种速度相关型阻尼器,由缸体、活塞和黏滞液体组成,在地震作用下,活塞在缸体中反复运动,挤压液体从小孔流出,与缸体存在相对运动,产生阻尼,来消耗振动能量,减小结构反应^[9]。

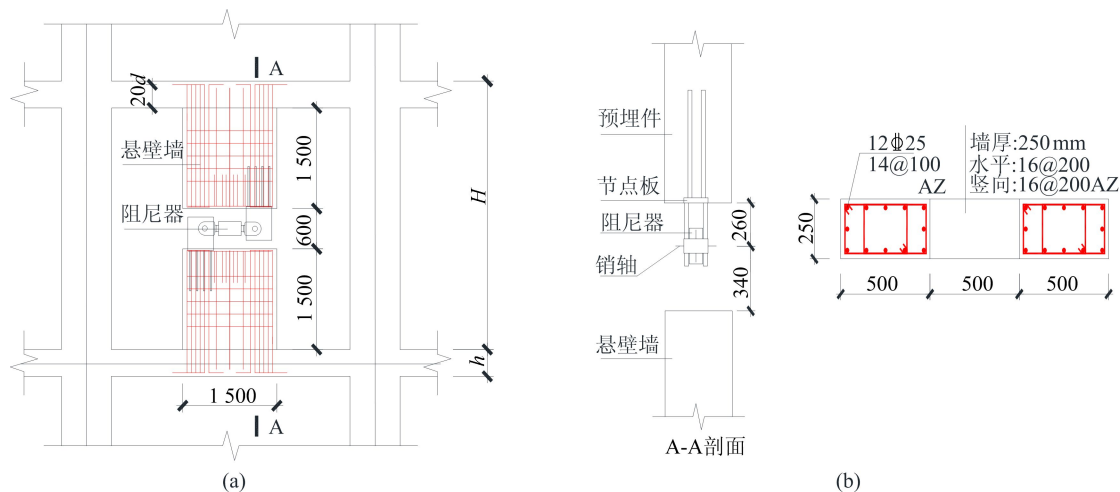


图 2 采用墙式连接的黏滞阻尼器构造

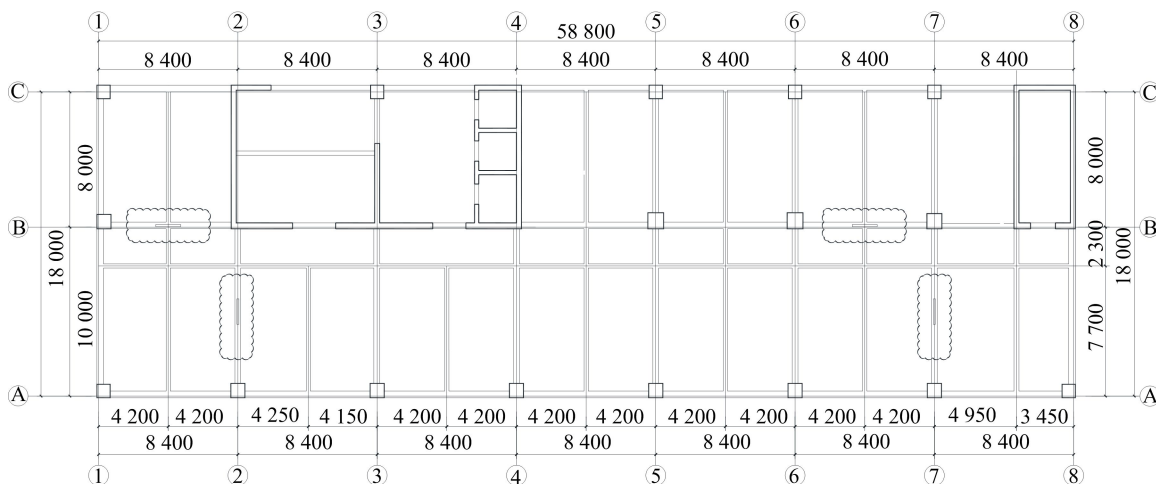


图 3 标准层黏滞阻尼器布置

黏滞阻尼器的力学原理为:

$$F = Cv^\alpha$$

其中: F 为黏滞阻尼器阻尼力; C 为阻尼系数; v 为活塞运动速度; α 为阻尼指数。在 ETABS 软件中使用基于 Maxwell 模型的 Damper 连接单元模拟。

结构改造后,黏滞阻尼器在不改变原结构刚度的条件下,能够提供较大的附加阻尼比,以适应地震作用强度增大;同时,医院医疗项目建筑隔墙和门洞较多,黏滞阻尼器以墙式连接安装在原结构中,占用立面空间小,施工难度低,且易于维护;此外,针对不满足承载力要求的消能子结构,采用粘贴碳纤维布的方法进行补强。

按照均匀、分散、周边、对称的原则,结合建筑条件,该工程在 1~15 层共布置 60 套黏滞阻尼器, C 取为 $1\,500\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{m}$, α 取为 0.3。

3 多遇地震作用下消能减震分析

3.1 地震波选取

为了使分析过程能更准确地模拟结构在地震作用下的真实反应,弱化地震随机性对结构的影响,文献[10]规定,采用时程分析法时,应按建筑场地类别和设计地震分组,选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线,其中实际强震记录的数量不应少于总数的 $2/3$,并且在弹性时程分析中,每条曲线计算所得结构底部剪力均应超过

振型分解反应谱法计算结果的 65%,多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值应大于振型分解反应谱法计算结果的 80%。

该工程设计选用 2 条天然地震波(RSN178、RSN183)、1 条人工地震波 RG1,3 条地震波参数见表 3 所列。

表 3 3 条地震波参数取值

地震波	时间间隔/s	有效时长/s	峰值加速度/ (mm · s ⁻²)
RSN178	0.005	20.00	1
RSN183	0.005	20.00	1
RG1	0.010	30.00	1

在 ETABS 软件中,分别把 3 条时程曲线峰值调整到 7 度 0.15g 多遇地震加速度时程最大值 55 cm/s²,进行反应谱分析和时程分析,得到结构基底剪力,见表 4 所列。

表 4 反应谱法与时程分析法基底剪力对比

参数	作用方向	反应谱法	RSN		RG1	时程分析均值
			178	183		
基底剪力/kN	X 向	8 231	7 367	6 988	9 042	7 799
	Y 向	8 064	8 454	6 692	8 817	7 988
比例/%	X 向	100.0	89.5	84.9	109.9	94.8
	Y 向	100.0	104.8	82.9	109.3	99.1

由表 4 可知,所选地震波满足规范要求^[10],且时程分析计算的基底剪力平均值和振型分解反应谱法计算结果基本一致。

3.2 分析过程及结论

在 ETABS 软件中,将原结构定义为无控结构 ST0,附加黏滞阻尼器的减震分析模型为有控结构 ST1,在多遇地震下进行线性时程分析,对比结构层间剪力和层间位移角变化,结果如图 4、图 5 所示。

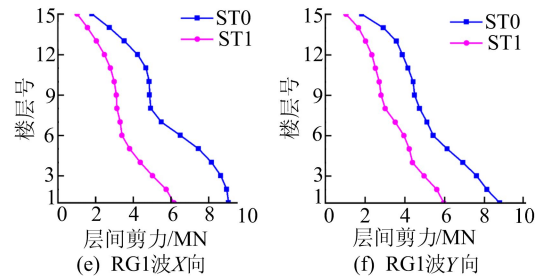
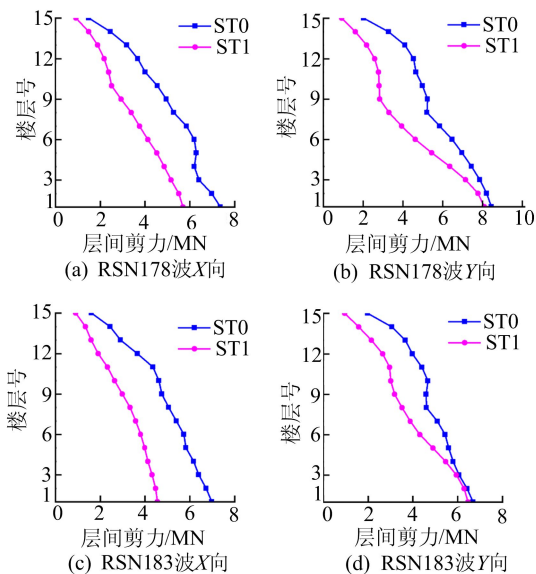


图 4 多遇地震 3 条波作用下层间剪力对比

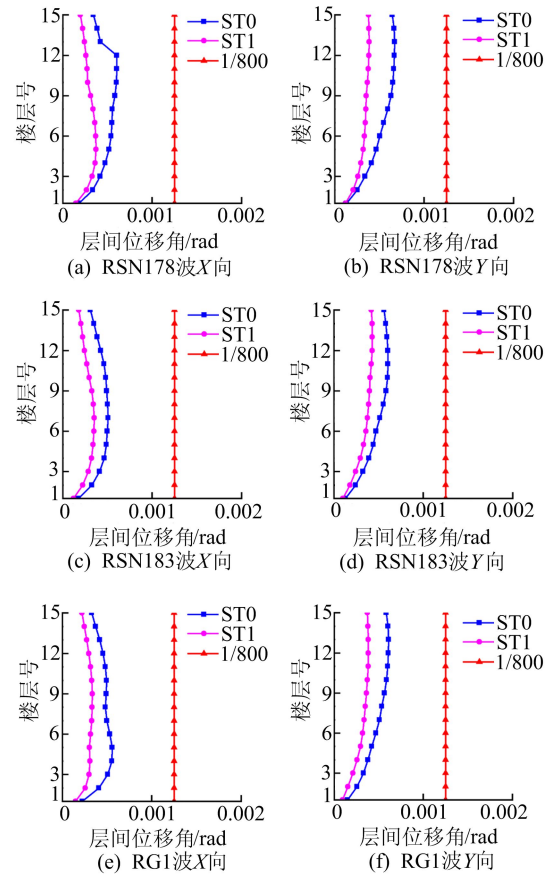


图 5 多遇地震 3 条波作用下层间位移角对比

3 条地震波作用下的结构响应变化趋势如下:

(1) 有控结构 ST1 层间剪力 X 向最大减震率分别为 45.02%、47.93%、48.99%,平均减震率分别为 33.66%、38.33%、40.86%;Y 向最大减震率分别为 54.60%、51.28%、43.49%,平均减震率分别为 31.90%、24.49%、36.35%。

(2) 层间位移角 X 向最大减震率分别为 56.81%、42.45%、45.96%,平均减震率分别为 37.31%、35.30%、36.38%;Y 向最大减震率分别为 44.00%、32.22%、39.84%,平均减震率分别为 35.03%、27.21%、35.50%;减震后 3 条波最大层间位移角均满足规范 1/800 性能要求^[10]。

综上所述,多遇地震下,相较于无控结构 ST0,有控结构 ST1 层间剪力和层间位移角均有不同程度减小,黏滞阻尼器可起到良好的耗能和降低地震响应的作用。

3.3 附加阻尼比计算

采用累积能量比值法^[10]计算消能部件对结构附加的有效阻尼比,计算公式为:

$$\xi_a = (W_d/W_1)\xi_1,$$

其中: ξ_a 为附加阻尼比; W_d 为消能减震部件总耗能; W_1 为结构模态耗能; ξ_1 为模态阻尼比,该工程取值为 0.05。

3 条地震波作用下,结构附加阻尼比计算结果见表 5 所列,取包络值,可得该工程多遇地震下阻尼器提供的附加阻尼比为 4.2%。

表 5 多遇地震下与 3 条波对应的结构附加阻尼比 %

作用方向	RSN178	RSN183	RG1	平均值
X 向	6.0	7.5	7.0	6.8
Y 向	3.5	5.0	4.0	4.2

4 罕遇地震作用下消能减震分析

4.1 性能目标确定

在消能减震加固中引入基于性能抗震思想,可以有效解决结构抗震的强度、变形和构造等问题,充分发挥消能减震加固技术的优势,文献[10-11]都对性能设计做了相关规定。通过多遇地震下的结构分析可知,原结构强度与刚度无明显退化,层间位移角与规范弹性限值^[10]相比有较大的富余度,结合该工程加固要求,需要显著提高减震结构抗震性能,降低主体结构的抗震构造要求。因此,对不同结构构件指定罕遇地震作用下的抗震性能目标如下:结构宏观损坏程度为基本完好;框架柱、剪力墙(普通竖向构件)无损坏;连梁、框架梁(耗能构件)轻度损坏;消能子结构(关键构件)无损坏;层间位移角为 1/400。其中,层间位移角目标根据文献[10]要求取为 2 倍弹性位移限值。

4.2 罕遇地震模型建立与分析

分别对无控结构 ST0、有控结构 ST1 进行罕遇地震作用下的动力弹性分析。结构弹性性主要是通过构件材料非线性行为实现的,在 ETABS 软件中,对框架梁、连梁指定默认的 M3 铰,对柱指定 P-M-M 纤维铰,对剪力墙底部加强区(第 1 层、第 2 层)采用分层壳模拟^[12]。输入与

多遇地震作用下相同的 3 条地震波 RSN178、RSN183、RG1,经试算,其平均地震影响系数曲线与反应谱法在统计意义上相符,满足规范要求^[10]。

罕遇地震下结构弹性层间位移角可以较好地反映结构抗震性能,3 条地震波作用下减震前后结构层间位移角变化如图 6 所示。由图 6 可知:相较于无控结构 ST0,附加黏滞阻尼器的有控结构 ST1 层间位移角均明显降低;X 向减震率分别为 13.72%、10.21%、13.17%,平均减震率为 12.72%;Y 向减震率分别为 17.16%、14.61%、7.46%,平均减震率为 13.54%;减震结构平均层间位移角最大值 X 向为 1/410,Y 向为 1/405,满足罕遇地震作用下预期性能目标 1/400 限值要求^[10]。

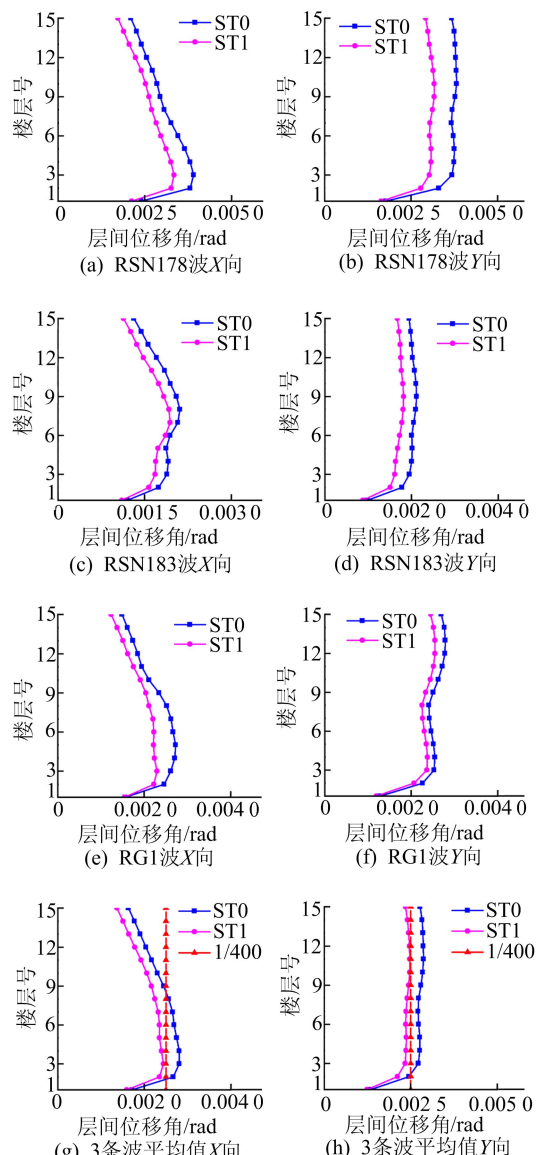


图 6 罕遇地震 3 条波作用下层间位移角对比

4.3 阻尼器耗能滞回曲线

分别提取人工波 RG1 作用下 X 向、Y 向各 1 个黏滞阻尼器在罕遇地震下的滞回曲线,如图 7 所示。由图 7 可知,阻尼器最大出力为 600 kN 左右,最大位移为 7 mm,曲线饱满,呈现“回”字型,阻尼器充分发挥作用,具有良好的耗能能力,保护主体结构安全。

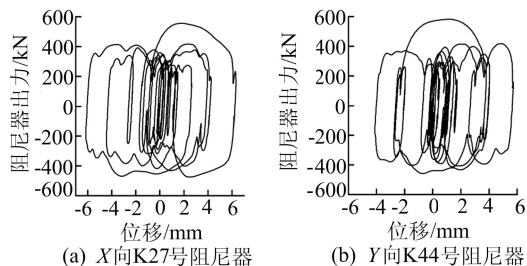


图7 罕遇地震 RG1 波作用下阻尼器滞回曲线

4.4 性能校核

在 ETABS 软件中,性能校核可以直观显示给定性能水准下各构件的需求(demand)与能力(capacity)比率(D/C), D/C 越接近 1,代表性能状态越接近给定性能水准临界值,该项目以可接受准则中 IO(immediate occupancy)状态,即轻微破坏对建筑物进行评判^[13]。罕遇地震下 3 条波 X 向包络值性能校核结果如图 8 所示。

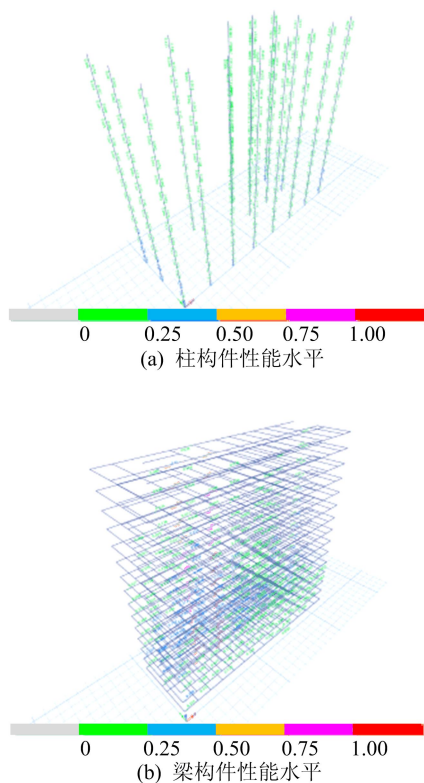


图8 罕遇地震下 3 条波 X 向包络值性能校核结果

由图 8 可知:减震结构第 9 层及以下连梁超过 IO 性能临界值,但未达到 LS(life safety)状态,为轻微破坏,同时耗散能量;大部分框架梁、框架柱 D/C 值处于 0~0.25 之间,低楼层柱该值相对较大但不超过 0.50,最大塑性状态小于 IO 性能点,其中附有阻尼器的消能子结构塑性状态均未达到极限承载力,可视为无损坏状态。整体而言,消能减震结构在罕遇地震作用下受力和变形机制合理,结构宏观损坏程度为基本完好,达到预期性能目标要求。

5 结 论

本文对某高层框架-剪力墙结构门诊住院楼采用消能减震技术进行抗震加固,采用 ETABS 软件建立无控、有控结构模型,分别进行多遇地震和罕遇地震作用下时程分析,对比减震前后结构反应,并评价建筑物状态,结果显示,布置黏滞阻尼器进行抗震加固,可有效降低结构地震响应,延缓构件在不同程度地震下的损伤,加固方案可达到良好的效果。

(1) 多遇地震下,相较于无控结构,有控结构层间剪力和层间位移角均有不同程度减小,黏滞阻尼器可提供 4.2% 的附加阻尼比,起到良好的耗能和降低地震响应的作用。

(2) 罕遇地震下有控结构弹塑性位移角显著减小,反映出有控结构拥有更好的抗震性能;黏滞阻尼器滞回曲线饱满,充分耗能,可有效缓解结构塑性破坏;性能校核结果显示,除连梁达到轻微破坏性能状态,其他结构构件均可视为无损坏,即附加阻尼器后,结构可达到规范规定的低延性构造目标^[10],构造抗震等级可按常规设计降低 1 度采用。

[参 考 文 献]

- [1] 张明彪, 仿俊. 某门诊大楼改建工程基于消能减震技术的加固设计[J]. 建筑结构, 2020, 50(9): 121-126.
- [2] 鲁松, 李爱群, 徐文希. 既有混凝土结构抗震性能提升技术的研究与应用[J]. 建筑结构, 2020, 50(24): 48-55.
- [3] 孟磊. 某养老建筑单跨框架结构的减震加固抗震分析[J]. 工程与建设, 2020, 34(3): 510-513.
- [4] 许敏超. 某医院病房楼减震加固设计分析[J]. 建筑施工, 2020, 42(7): 1280-1283.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑工程抗震设防分类标准: GB 50223—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 3-4.

(下转第 363 页)

平得到了较大的提升。由仿真过程也可看出,整个仿真路网,包括收费站出口、出口匝道以及交叉口的交通环境都得到了极大改善。

4 结 论

基于经典感应信号控制方法,在广州市北二环石湖收费站对本文方法计算的信号配时方案进行了验证,结果表明,该收费站出口匝道衔接交叉口的平均排队长度由 51.3 m 减少到 29.6 m,改善效果明显,而平均延误减少 6.9 s,平均停车次数下降 0.16 次,通行环境得到较大幅度的改善,由此可见本文提出的模型能够满足算法要求,并能够显著改善城区高速出口匝道与衔接交叉口的拥堵状况,提升交叉口服务水平。由于高速公路的独立性,其与城市道路分别归属不同的部门管理,国内目前关于高速公路与城市道路协调控制的研究较少。随着 ETC 车道及车辆的普及,收费站的通行能力大大提升,车辆以接近于较低车速自由流的形式通过收费站,而新形势、新背景下收费站下游路段与上游高速公路主线之间的相关协同拥堵治理更是亟待研究。本文将 ETC 普及后的高速公路与城市道路作为一个整体,进行收费站与衔接交叉口的感应控制研究,具有较高的先进性与创新性,并将创造一定的经济效益和社会价值。

[参 考 文 献]

- [1] 肖鹏飞,王秋鸿.我国高速公路交通管理现状[J].道路交通管理,2017(11):14-15.
- [2] 徐堃,柴干,李清泉,等.自动跟踪动态临界占有率的匝道协调控制方法[J].交通运输工程学报,2016,16(2):150-158.
- [3] BERG M V D, SCHUTTER B D, HELLENDORRN H. Integrated model predictive control for mixed urban and freeway networks[C]//The 83th Annual Meeting of Transportation Research Board Meeting. [S. l.: s. n.], 2004: 27-49.
- [4] 于德新,刘珩,郑黎黎,等.高速公路瓶颈区域可变限速控制方法[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(3):120-125.
- [5] 梁子君,张卫华,杨伟,等.基于时空资源优化的交叉口交通流动态控制方法研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(9):1240-1249.
- [6] 朱增辉,李卓丹.河百高速公路限速设置方法研究[J].公路,2020,65(9):218-221.
- [7] 熊健.基于遗传蚁群算法优化的高速公路匝道协调控制[J].科技传播,2015,7(6):164-165.
- [8] 史煜阳.高速公路出口收费站与衔接交叉口协调优化研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [9] LIM K G, KIM J H, SHIN E K, et al. A signal control model integrating arterial intersections and freeway of f-ramps [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(2): 385-394.
- [10] 周浩,胡坚明,张毅,等.快速路可变限速与匝道控制协同优化策略[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(2): 68-75.
- [11] ZHAO J, MA W J, XU W. Increasing the capacity of the intersection downstream of the freeway off-ramp using presignals[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(8): 674-690.
- [12] 保丽霞,杨晓光.快速路进口匝道及其衔接交叉口的协调优化控制模型[J].中国公路学报,2009,22(2):68-75.
- [13] 张腾月,翁小雄.基于收费数据的高速公路行程时间可靠性估计模型[J].广西师范大学学报(自然科学版),2016, 34(4):70-77.
- [14] 李敢,谢秉磊.基于 MPC 的快速路智能协同控制系统[J].中国公共安全(学术版),2017(3):70-73.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 357 页)

- [6] 合肥市城乡建设局.关于进一步加强全市房屋建筑工程抗震管理的通知[EB/OL].(2019-11-26)[2021-01-01].<http://cxjsj.hefei.gov.cn/zwgk/zcfg/wgfhxhrcglwj/17610437.html>.
- [7] 华南理工大学建筑设计研究院有限公司.高层建筑混凝土结构技术规程:DBJ/T 15-92—2021[S].北京:中国城市出版社,2021:22-27.
- [8] 鲁松.既有医疗建筑抗震性能提升技术及经济分析研究[D].南京:东南大学,2018.
- [9] 容绍章.钢筋混凝土框架结构的耗能减震性能化加固设计方法研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [10] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].2016 版.北京:中国建筑工业出版社,2017: 31-32.
- [11] 广州大学.建筑消能减震技术规程:JGJ 297—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:25-26.
- [12] 北京金土木软件技术有限公司.ETABS 中文版使用指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2004:7-21.
- [13] 李立.抗震性能化设计在 ETABS 中的实现[EB/OL].(2017-03-01)[2021-01-01].<http://www.cisec.cn/Information/SubscribeAndUnsubscribe.aspx>.

(责任编辑 张淑艳)