

DOI: 10. 19701/j. jzjg. HDY2243

上海城市规划展示馆改扩建项目减震结构设计*

郁晓铭, 周建龙, 江晓峰

(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 消能减震技术的应用是结构改扩建抗震设计的一种新手段。以上海城市规划展示馆改扩建项目为例,介绍了带黏滞阻尼器改扩建高层建筑混合结构设计的关键问题,包括地震动参数新旧对比、原结构的诊断和判定、改建后结构的验算和改造基本参数的确定,以及减震方案的选择、阻尼器选型、参数、布置方式及构造、附加阻尼比的初步确定、整体结构性能指标以及阻尼器耗能效果。对减震结构和非减震结构方案的整体指标、抗震性能和经济性指标的对比,说明减震结构方案的优越性。对结构进行了小震、中震、大震作用下的结构非线性时程分析、楼板应力和节点专项分析,以及采用规范算法和能量法确定附加有效阻尼比,验证减震结构达到了预定目标,并总结了改扩建类高层混合结构采用减震加固的有效性和必要性。

关键词: 消能减震技术; 结构加固; 结构改扩建; 黏滞阻尼器

中图分类号: TU352. 1 文献标志码: A 文章编号: 1002-848X(2022)09-0125-07

[引用本文] 郁晓铭,周建龙,江晓峰. 上海城市规划展示馆改扩建项目减震结构设计[J]. 建筑结构,2022,52(9):125-131. YU Xiaoming,ZHOU Jianlong,JIANG Xiaofeng. Energy dissipation structural design for reconstruction and expansion project of Shanghai Urban Planning Exhibition Hall[J]. Building Structure,2022,52(9):125-131.

Energy dissipation structural design for reconstruction and expansion project of Shanghai Urban Planning Exhibition Hall

YU Xiaoming, ZHOU Jianlong, JIANG Xiaofeng

(East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Energy dissipation technology is a new method of seismic design for structural reconstruction and expansion. The reconstruction and expansion project of Shanghai Urban Planning Exhibition Hall was taken as an example. The key issues in the design of the hybrid structure on the high-rise building with viscous dampers were introduced, including comparison between new and old ground motion parameters, diagnosis and determination of original structure, checking calculation of reconstructed structure, determination of basic parameters of reconstruction, and the selection of damping scheme, type selection, parameters, layout and structure of damper, preliminary determination of additional damping ratio, overall structural performance index and energy dissipation effect of damper. The comparison of the overall index, seismic performance and economic index between the damping structure and the aseismic structure scheme show the superiority of the damping structure scheme. The non-linear time history analysis, floor stress and joint special analysis of the structure under frequent earthquakes, fortification earthquakes and rare earthquakes were carried out, and the effective additional damping ratio were calculated through standard algorithm and energy method, the damping structure were verified that has reached the predetermined goal. And the effectiveness and necessity of seismic reinforcement for reconstruction and expansion of high-rise hybrid structures were summarized.

Keywords: energy dissipation technology; structure reinforcement; structural reconstruction and expansion; viscous damper

1 工程概况

上海城市规划展示馆(简称展示馆)位于上海市人民大道 100 号,该项目于 1999 年竣工投入使用,是国内首家以展示城市规划与城市发展为主题的专业性场馆。由于该项目原有面积及功能与现在实际使用需求不匹配,需要以全新的理念对其进

行改造升级,同时在地上 4 层展陈的基础上扩容加层至地上 6 层。因项目位于上海市人民广场风貌保护区,需要最大化程度地保持建筑的形式、高度不变。

改扩建前结构^[1-2](简称原结构)建筑高度 43.3m,主体结构大屋面高度 26.95m,地上建筑面

*上海市青年科技启明星计划资助项目(19QB1400600)。

第一作者:郁晓铭,硕士,一级注册结构工程师,主要从事复杂高层和空间结构设计研究,Email:xiaoming_yu@ecadi.com。

通信作者:江晓峰,博士,高级工程师,一级注册结构工程师,主要从事超高层结构设计研究,Email:jxf11460@ecadi.com。

积 1.24 万 m², 地下 2 层、地上 5 层, 基础埋深约 12.5m; 改扩建后结构 (简称现结构) 建筑高度不变, 平面尺寸不变, 大屋面高度约 35.5m, 地下 2 层、地上 6 层, 地上建筑面积 1.51 万 m²。原结构、现结构竣工实景图分别如图 1、图 2 所示。现结构的结构体系不变, 采用钢框架-混凝土剪力墙结构。建筑剖面图功能划分如图 3 所示, 地上 1 层、地上 1 层夹层层高均为 4.5m, 地上 2~4 层层高均为 6m, 地上 5、6 层为扩建部分, 层高均为 4.3m。



图 1 改造前实景图



图 2 改造后实景图

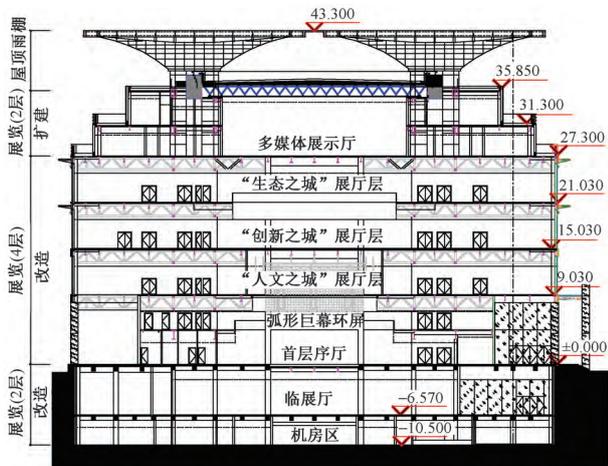


图 3 建筑剖面功能划分

原结构标准层典型平面布置见图 4。平面尺寸

为 63m×45m, 典型柱尺寸直径为 720、630mm 的钢管混凝土柱, 典型钢框架梁高为 800、1 000mm, 典型钢次梁高为 630mm, 典型钢桁架高度为 1 800mm, 剪力墙外墙厚为 450mm, 内墙厚为 200、250mm, 典型楼板厚为 100mm。钢结构材质为 Q345B。

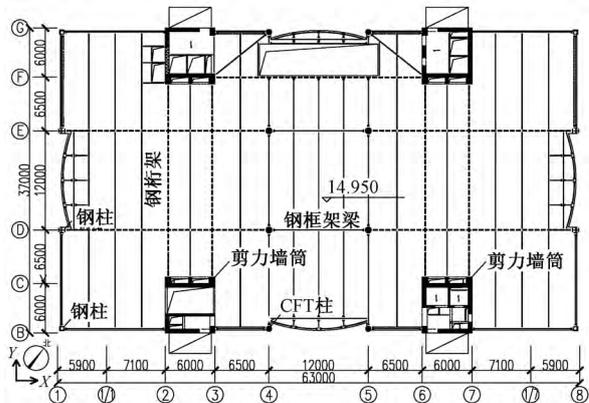


图 4 原结构标准层平面布置

原结构基础采用钻孔灌注桩, 有 650、800、900mm 三种直径, 持力层为粉砂层。基础底板厚度为 1 500mm, 地下室底板采用 C30 混凝土, 地下室外墙采用水下 C30 混凝土, 钢管混凝土柱内混凝土强度等级为 C60, 其他位置采用 C40 混凝土。现结构基础仍能满足后续使用要求, 不需要加固。

因地上 5、6 层为扩建楼层, 综合考虑本建筑重要性, 按上海加固规程^[3]及抗震鉴定标准^[4]规定, 后续使用年限按 50 年标准, 采用 C 类建筑抗震鉴定方法设计, 根据相应标准规范^[5-7]结构基本参数取值见表 1。现结构构件承载力调整系数为 1.0 (C 类), C 类建筑不考虑整体构造影响系数和局部构造影响系数调整。

表 1 原结构、现结构基本参数取值对比

设计参数		原结构	现结构
建筑结构安全等级		二级	一级
设计基准期		50 年	50 年
(改造)设计使用年限		50 年	50 年(C 类)
抗震设防类别		标准设防类	重点设防类
小震阻尼比		0.045	0.045
周期折减系数		—	0.80
最小剪重比		—	1.6%
嵌固位置		首层(地下室顶面)	
抗震等级	钢框架	二级	二级 (地上 5 层桁架: 一级)
	剪力墙	二级	一级
最大层间位移角控制指标	多遇地震作用	1/800	1/800
	风荷载作用	1/800	1/800

主要改造、扩建内容:1)各层电梯、扶梯升级改造,4个芯筒剪力墙墙肢、芯筒内楼盖相应拆除、加固,地上2~4层北侧新增机房,相应增加结构夹层;2)地上1层、地上1层夹层东侧局部增加文创、展示区,相应增加结构楼盖;3)地上2层中心区新增吊挂弧形机械式可动环屏结构、地上3层中心区新增数字沙盘巨幕5D环屏,相应结构加固改造;4)增加地上5、6层作为展厅使用,结构相应进行扩建并对支承地上5、6层的桁架及框架梁柱进行相应加固;5)现结构重量增加、地震力增加,采取相应的减震加固措施。

2 改建结构需求变化及减震方案选择

2.1 抗震设计参数对比

本项目位于7度区,虽不是高烈度区,但原结构于1999年竣工,当时抗震设计采用《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)^[5](简称89抗规),与《建筑抗震设计规程》(DGJ 08-9—2013)^[7](简称上海抗规)差异较大,且改扩建要在地上4层上方加盖两层,地上部分建筑面积增加较多,结构大屋面高度由29.95m增加到现在的35.5m,结构质量也有较大增加,需要对原结构进行验算,并验证采用减震方案的必要性、对减震方案进行优选。89抗规与上海抗规地震动参数对比见表2。

表2 89抗规与上海抗规地震动参数对比

地震动参数		89抗规	上海抗规
抗震设防烈度		7度	7度
基本地震加速度		0.10g	0.10g
水平地震影响系数最大值	小震	0.08	0.08
	中震	—	0.23
	大震	0.50	0.45
震源远近或设计地震分组		近震	第二组
场地类别		IV类	IV类
特征周期 T_g/s	近震或小震	0.65	0.90
	大震	0.85	1.10

原结构、现结构除周期略有变化外(表3),新旧抗规的地震影响系数变化值=(上海抗规 $T_g/89$ 抗规 T_g)^{0.9}=(0.90/0.65)^{0.9}=1.34,因此,现行规范的地震作用比原设计规范的地震作用放大了约1.34倍。

2.2 改扩建前后结构验算

原结构主要结构参数信息见表1,标准层布置见图4。采用YJK和ETABS进行计算分析,现结构模型见图5。对原结构、现结构分别按上海抗规进行小震弹性分析验算,主要验算结果见表3。

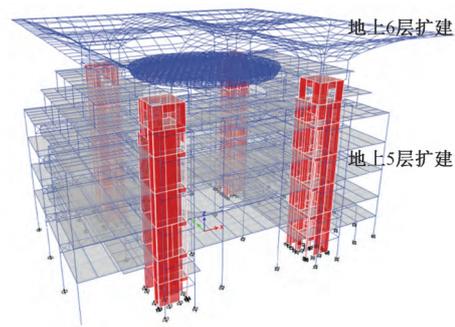


图5 现结构 ETABS 模型

表3 原结构、现结构弹性分析结果(按上海抗规)

参数		原结构	现结构(无减震)
上部重力荷载代表值/kN		153 550	188 710(22.9%)
自振周期/s	T_1 (Y向平动)	1.019	0.973(17.8%)
	T_2 (X向平动)	0.826	0.952(6.6%)
	T_3 (扭转)	0.742	0.818(10.2%)
基底剪力/kN	X向	9 570	12 137(26.8%)
	Y向	8 277	11 754(42.0%)
基底倾覆力矩/(MN·m)	X向	248.8	327.5(31.6%)
	Y向	210.6	314.3(49.3%)
最大层间位移角	X向	1/1 329	1/977
	Y向	1/679	1/934
扭转位移比	X向	1.27	1.21
	Y向	1.52	1.26

注:1)风荷载下整体指标相比地震作用较小,不起控制作用,未列入表中;有效质量系数、最小楼层抗剪承载力比、剪重比、刚重比均满足规范要求,未列入表中。2)现结构中括号内数值为(现结构/原结构-1)×100%。3)最大层间位移角限值为1/800。4)扭转位移比限值为1.5。

由表3可知,原结构满足89抗规但不满足上海抗规层间位移角和扭转位移比指标要求。经分析主要由于东、西侧芯筒刚度不均导致。结合建筑需要在剪力墙根据建筑改造要求进行局部割除后,有针对性地刚度较弱的西北角剪力墙筒进行加强,在建筑允许位置增设了剪力墙(图6)。

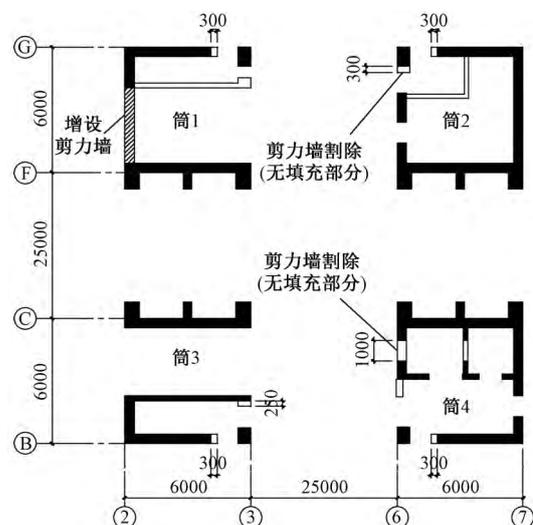


图6 剪力墙割除范围、新增范围

由表3可知,现结构整体指标虽满足上海抗规要求,但由于局部扩建及功能变化引起上部结构重量增加22.9%,导致基底剪力相比原结构(按上海规范)增加了26.8%(X向)和42.0%(Y向),比原结构(按89规范)地震内力增加了约70%(X向)和90%(Y向);基底倾覆力矩相比原结构(按上海规范)增加了31.6%(X向)和49.3%(Y向);剪力墙和钢框架构件的地震内力均有较大增加。如不采取减震措施,结构的直接加固量大、且钢结构易损伤,需要在不增加结构刚度的前提下减少地震内力。经比选,采用速度型阻尼器-筒式黏滞阻尼器进行减震加固。

2.3 减震方案及思路

本项目高度不大,自振周期较短,结构刚度已满足上海抗规要求,经比选采用不提供附加刚度的黏滞阻尼器减震方案进行间接加固。现结构重量增加22.9%,抗规变化引起地震影响系数放大1.34倍;通过试算,采用消能减震加固方案时,需要将结构小震阻尼比增大到9%,即阻尼器贡献的等效附加阻尼比取4.5%,才可将现结构所受地震作用降低至原结构水平(上海抗规),实现间接加固的目的。

结合建筑功能及结构需求布置筒式黏滞阻尼器,阻尼器布置位置见图7。地上2~4层的每层4个芯筒旁外框位置布置X向筒式黏滞阻尼器(图7中A~D),在每层东北侧、西北侧外框位置布置Y向筒式黏滞阻尼器(图7中E~G),即每层设置8个、共设置24个筒式黏滞阻尼器。X向筒式黏滞阻尼器采用单斜杆布置,Y向筒式黏滞阻尼器采用人字形布置,筒式黏滞阻尼器的产品参数见表4。

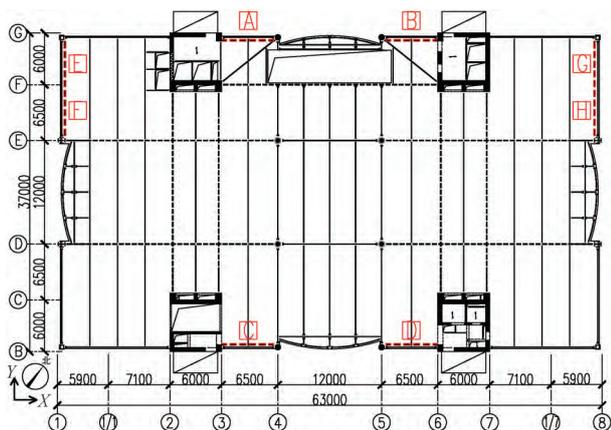


图7 筒式黏滞阻尼器布置位置

表4 筒式黏滞阻尼器参数

平面中 编号	阻尼系数 $C/(kN \cdot s/m)$	速度 指数 α	阻尼力 F/kN	最大冲程 /mm
A~D	800	0.25	600	100
E~G	1300	0.25	900	150

3 结构消能减震分析

对该结构分别进行小震、中震、大震作用下的消能减震分析。小震、中震弹性时程分析采用ETABS和YJK软件完成。由于黏滞阻尼器的速度相关性,计算中对地震作用除了采用弹性反应谱和直接积分时程分析方法外,主要采用弹塑性时程分析方法。时程波从上海抗规指定的14组地震波shw1~14中选取。小震、中震时程波为shw1~7,其中2组人工波shw1、shw2,其余为天然波;大震时程波为shw8、shw10、shw12,其中shw8为人工波,另外2组为天然波。采用YJK-EP进行大震弹塑性时程分析。小震、中震、大震下加速度峰值分别为为35、100、200gal。

3.1 小震作用下附加阻尼比计算

阻尼器采用Maxwell力学模型,采用ETABS和YJK分别进行直接积分法时程分析,计算附加有效阻尼比。减震模型采用目标模型和真实模型^[8],并分别采用《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[9]中算法和能量曲线法进行等效附加阻尼比的验算。

目标模型为将结构固有阻尼比设为9%、无阻尼器的结构计算模型;真实模型为将固有阻尼比设为4.5%、黏滞阻尼器采用Maxwell模型真实模拟的计算模型,非减震模型为结构固有阻尼比4.5%、无阻尼器的计算模型。计算在7条时程波作用下结构承担的各楼层剪力及7条波的平均值。非减震模型、目标模型和真实模型在7组时程波下的楼层剪力和剪力平均值对比见图8。

按上述阻尼器设置方案,7条小震时程波下真实模型各层剪力均要比目标模型小,说明现结构中阻尼器在小震下的等效附加阻尼比达到了4.5%,实现了间接加固的目的。

采用《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)中的规范算法和能量曲线法,分别计算shw1~7作用下的结构附加有效阻尼比以及平均值,进一步验证黏滞阻尼器的减震效果,验算结果见表5、6。规范算法下X向附加有效阻尼比为5.05%,能量曲线法下X向附加有效阻尼比为5.96%;规范算法下Y向附加有效阻尼比为4.71%,能量曲线法下Y向附加有效阻尼比为4.66%;考虑阻尼器有可能的安装误差等影响,小震作用下采用4.5%的附加阻尼比进行弹性分析设计和构件验算。

综上,按上述阻尼器设置方案,可实现真实模型各层剪力均要比目标模型小,按规范算法和能量曲线法小震下附加有效阻尼比也均达到了

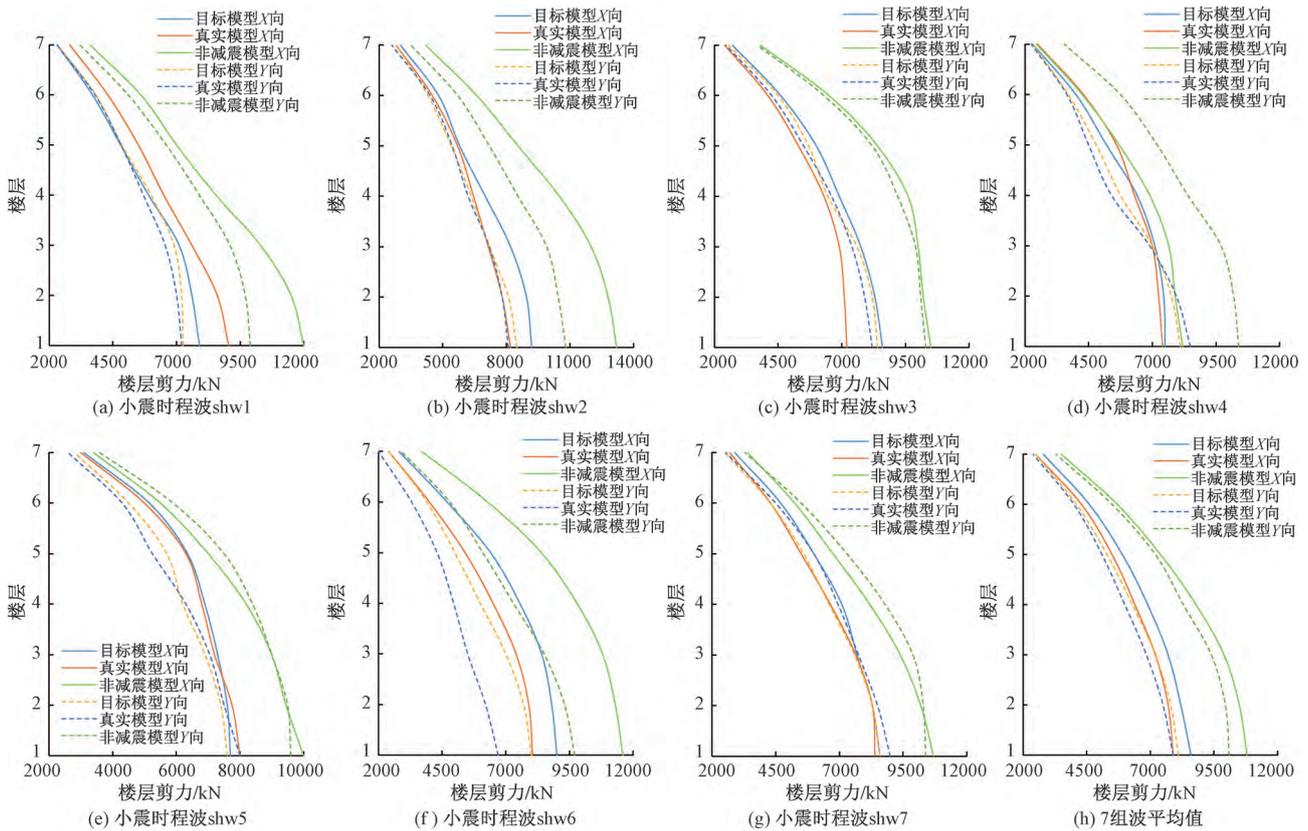


图 8 3 个模型下的楼层剪力曲线

4.5%, 实现了间接加固的目的。因此在结构和构件设计中,按结构阻尼比为 9%(即附加阻尼比 4.5%)进行计算分析。

表 5 X 向小震下附加有效阻尼比验算/%

地震波	规范算法		能量曲线法	
	YJK	ETABS	YJK	ETABS
shw1	5.95	5.46	5.55	5.79
shw2	5.26	5.42	7.78	5.74
shw3	4.70	4.61	5.93	6.57
shw4	4.78	4.80	4.79	6.80
shw5	4.86	4.38	5.46	5.57
shw6	4.91	5.46	6.44	6.00
shw7	4.91	4.57	5.79	6.09
平均值	5.05	4.96	5.96	6.08

注:规范算法为考虑折减到 80%后的统计结果。

表 6 Y 向小震下附加有效阻尼比验算/%

地震波	规范算法		能量曲线法	
	YJK	ETABS	YJK	ETABS
shw1	5.26	5.84	4.50	5.23
shw2	4.81	5.27	4.67	5.21
shw3	4.32	4.83	4.06	5.79
shw4	4.37	5.65	4.15	5.79
shw5	4.68	5.04	5.28	5.93
shw6	4.72	6.40	4.64	7.02
shw7	4.80	5.05	5.33	7.23
平均值	4.71	5.44	4.66	6.03

3.2 中震作用下附加阻尼比计算

中震下采用 ETABS 计算的能量曲线法附加有效阻尼比计算结果见表 7。两个方向的附加有效阻尼比均大于 4.5%,验证了小震反应谱设计时可按 4.5%的附加有效阻尼比取值的有效性。

表 7 中震下能量曲线法附加有效阻尼比计算结果

地震波		附加有效阻尼比/%	地震波		附加有效阻尼比/%
shw1	X 向	5.67	shw5	X 向	4.74
	Y 向	5.69		Y 向	4.70
shw2	X 向	4.70	shw6	X 向	5.47
	Y 向	4.70		Y 向	5.74
shw3	X 向	5.21	shw7	X 向	4.73
	Y 向	5.14		Y 向	4.75
shw4	X 向	5.21	平均值	X 向	5.10
	Y 向	5.21		Y 向	5.13

3.3 大震作用下附加阻尼比计算

采用 YJK-EP 进行大震下的直接积分法弹塑性时程分析,表 8 为大震下附加有效阻尼比计算结果。由表 8 可知,大震下黏滞阻尼器提供的附加有效阻尼比可达到 2.0%。大震弹塑性分析结果显示,结构在两个方向的平均层间位移角分别为 1/416 和 1/370,最大层间位移角分别为 1/292 和 1/220,均满足限值 1/100 的限值要求。

表8 大震作用下附加有效阻尼比计算结果

时程波		耗能百分比/%				附加有效阻尼比/%
		应变能	模态耗能	非线性耗能	阻尼器耗能	
shw8	X向	12.99	42.30	22.05	22.64	2.68
	Y向	13.87	40.44	23.20	22.47	2.78
shw10	X向	13.74	36.94	25.05	24.23	3.28
	Y向	12.70	42.46	22.81	22.01	2.59
shw12	X向	24.04	46.26	8.95	20.71	2.24
	Y向	22.69	49.69	7.95	19.63	1.97

注:动能占比比较小,均在0.1%以下,本表中未列入。

3.4 减震效果分析

由表5~8可知,小、大震下附加有效阻尼比分别为4.5%、2.0%。基底剪力分别减小21%、9%,基底倾覆力矩分别减小19%、7%,层间位移角分别减小25%、10%。黏滞阻尼器在各水准地震下均发挥作用,为结构提供较大的附加有效阻尼。由于阻尼器的非线性特征,小变形下阻尼器耗能效率更高,附加有效阻尼比更大;随着地震作用加大,阻尼器耗散能量虽也同步增加,但增加幅度更小,相对耗能效率逐渐降低。

4 专项分析

4.1 楼板应力分析

地上5楼面及以下采用130mm厚开口型镀锌钢板组合楼板,地上6层和屋面层为扩建楼层,楼盖采用150mm厚钢筋桁架组合楼板。阻尼器设置于外框,楼板是保证阻尼器发挥性能的水平传力构件。对楼板进行中震不屈服组合性能目标下的应力分析。

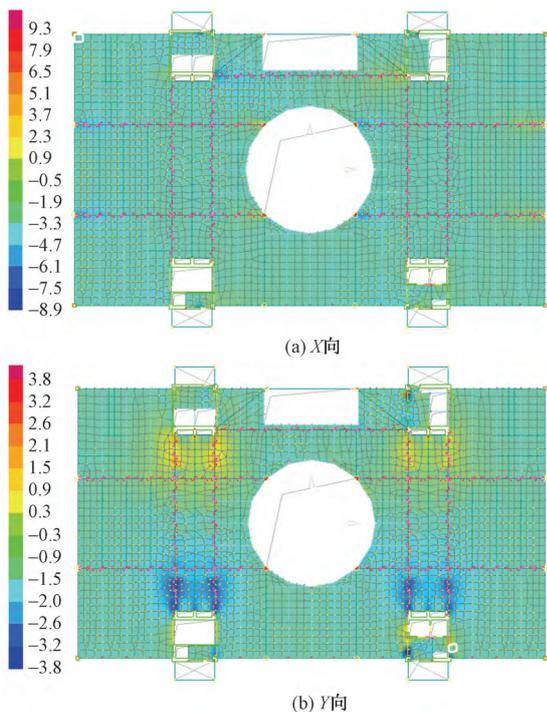


图9 地上2层中震作用下楼板应力结果/MPa

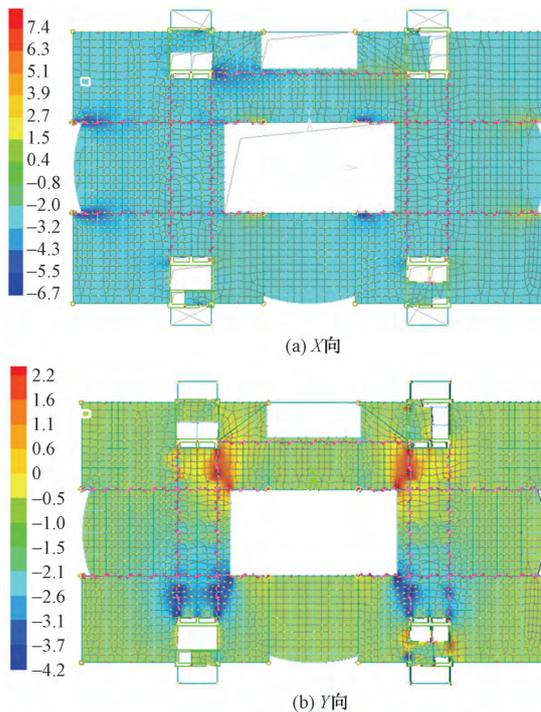


图10 地上4层中震作用下楼板应力结果/MPa

中震作用下楼板应力结果如图9、10所示。楼板X向最大平均正应力为3.9MPa,Y向为3.9MPa,主要出现在地上4层。原结构楼板配筋为 $\phi 6@200+$ 顶部 $\phi 10@150+$ 底部1.5mm厚压型钢板。中震作用下楼板内力为390kN/m,实配钢筋为2306mm²/m,楼板实配钢筋的承载力为691.8kN/m,可满足中震不屈服性能目标要求,保证阻尼器减震性能的发

4.2 关键构件节点设计

黏滞阻尼器与主体结构连接节点的可靠性是阻尼器发挥减震性能的关键,如图11~14所示。阻尼器与剪力墙、钢管混凝土柱、钢柱的连接节点做法在满足规范^[10-11]要求的同时,均考虑了减小对主体结构的直接焊接,避免对主体结构造成焊接损伤。

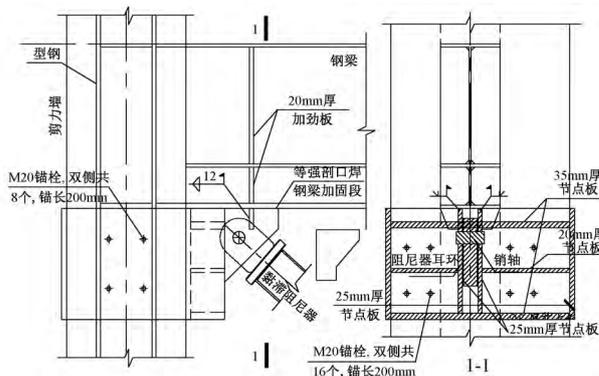


图11 黏滞阻尼器与剪力墙端柱连接节点

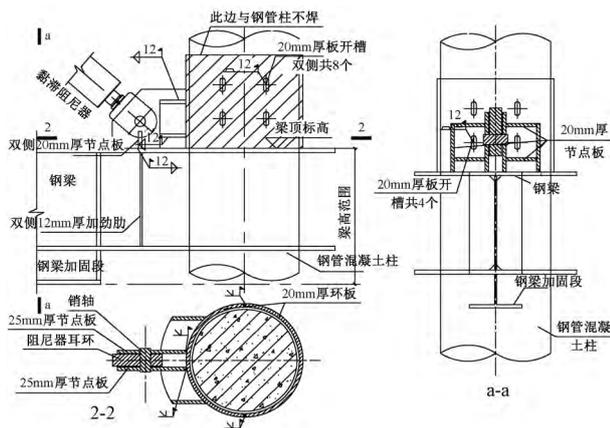


图 12 黏滞阻尼器与钢管混凝土柱连接节点

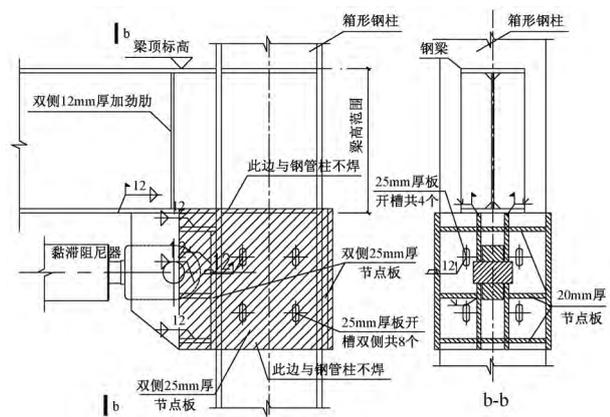


图 13 黏滞阻尼器与箱形钢柱连接节点

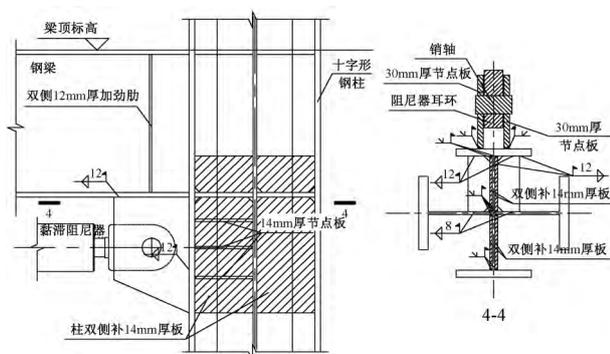


图 14 黏滞阻尼器与十字形钢柱连接节点

5 结论

(1) 上海城市规划展示馆改扩建项目为大跨混合结构下的加固改造和扩建类型高层建筑, 结构抗震设计采用消能减震技术, 结构抗震性能和加固用量明显优于传统抗震方案。

(2) 通过设置筒式黏滞阻尼器, 为结构提供附加有效阻尼, 使结构地震力减小到预定目标, 结构变形和构件内力明显减小、结构直接加固量大大减少, 降低了加固工程量及造价。

(3) 小、中、大震作用下的弹性、弹塑性直接积分时程分析结果显示, 阻尼器减震效果明显, 楼层

剪力、倾覆力矩、最大层间位移角、构件内力等均有所减小, 达到了间接加固的目的。

(4) 对结构楼板、阻尼器连接节点进行专项分析、复核, 保证了中、大震作用下阻尼器减震传力系统的有效性。阻尼器与主体结构的连接节点的精细化设计, 尽量减小焊接量、合理选取焊接位置, 避免了对主体结构造成集中损伤。

参考文献

- [1] 上海城市规划展示馆结构抗震鉴定报告[R]. 上海: 同济大学房屋质量检测站, 2018.
- [2] 上海市城市规划展示馆楼宇安全评估与咨询报告[R]. 上海: 华东都市建筑设计研究院有限公司, 2018.
- [3] 既有建筑抗震鉴定与加固规程: DGJ 08-81—2015[S]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- [4] 建筑抗震鉴定标准: GB 50023—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] 建筑抗震设计规范: GBJ 11—89[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [6] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [7] 建筑抗震设计规程: DGJ 08-9—2013[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2013.
- [8] 汪大绥, 包联进, 赵雪莲, 等. 上海世茂国际广场裙房结构减震加固设计[J]. 建筑结构, 2019, 49(7): 122-127.
- [9] 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.
- [10] 混凝土结构加固技术规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [11] 钢结构加固设计规范: CECS 77:96[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 1996.

(上接第 124 页)

参考文献

- [1] 丁洁民, 吴宏磊. 黏滞阻尼技术工程设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 王立军, 卢理杰, 余海群, 等. 中日规范下的钢框架结构设计实例对比[J]. 建筑结构, 2019, 49(1): 1-9.
- [3] 日本免震构造协会编. 建筑物隔震·减震设计手册[M]. 季晓莲, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [4] 北京迈达斯技术有限公司. Midas gen 工程应用指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 蒲武川, 张孟成, 薛耀辉. 近断层地震动下油阻尼器减震结构地震响应评估[J]. 武汉理工大学学报, 2019, 41(10): 33-39.
- [6] 陈晓强, 李宏胜, 陈焰周, 等. 山东省科技馆新馆结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(8): 106-112.
- [7] 李星荣, 秦斌. 钢结构连接节点设计手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.