

上海某重点设防类装配整体式框架结构设计与分析

文 / 张成武 上海思睿建筑工程技术咨询有限公司

摘要: 上海某教学楼采用装配整体式框架结构, 该项目为重点设防类, 采用减震技术与且为多层不规则结构。结合本项目的工程特点与难点, 在多遇地震工况下, 采用 YJK 和 ETABS 两种软件分别建立力学模型对主体结构进行反应谱分析、弹性时程分析; 在罕遇地震工况下, 采用 SAUSAGE 建立弹塑性分析模型对主体结构进行动力弹塑性时程分析。分析结果表明, 该结构在各种工况下可满足规范的相关要求。本文对同类项目的结构设计具有一定的参考和指导作用。

关键词: 重点设防; 装配整体式框架结构; 减震结构; 多层不规则

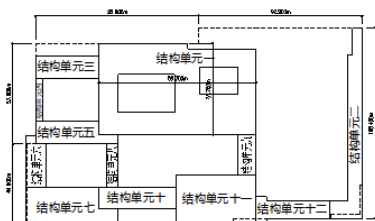
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.109

引言

在城市建设高速发展、建筑行业积极革新的当下, 装配式建筑因为建造速度快、产品质量好、节能环保以及数智化程度高等优势, 逐渐成为建筑领域的重要发展方向。重点设防类建筑关乎公共安全与社会稳定, 其结构设计不容有失。本文聚焦上海某重点设防类装配整体式框架结构, 深入开展设计与分析工作, 为同类项目的装配式设计和减震设计提供参考。

一、工程概况

本工程位于上海市徐汇区, 基地用地面积为 24749.7 平方米, 总建筑面积为 55385.7 平方米, 建设工程性质为文教建筑, 建筑功能为高中, 地上 6 层, 建筑高度 22.5m。地上各结构单元均落于整体地下室上, 地下一层, 西侧为停车库, 东侧为游泳馆、体育馆。东侧地下室顶板抬高形成局部半地下室空间。本工程一层主要功能为入口门廊、美术教室、形体教室、辅助用房、接待室等; 二层为空间活力间层; 三、四、五层主要功能为普通教室、剧场、办公辅助用房等; 六层为行政办公区。游泳馆、体育馆位于地下一层, 200 米跑道设置在半地下室体育馆屋面顶板之上; 餐厅厨房、辅助仓库、设备用房、地下停车设置在主体建筑地下一层。



结构单元分缝示意图

图 1 单元分缝与三维模型示意图

(三) 减震设计

《建设工程抗震管理条例》(国令第 744 号) 第十六条规定: 地震重点监视防御区的新建学校等建筑应当按照国家有关规定采用隔震减震等技术, 保证发生本区设防地震时能够满足正常使用要求。本工程根据结构受力及变形特点, 在结构单元 1、3、5、7、11 布置减震构件, 减震构件选择速度型阻尼器 - 黏滞阻尼器。通

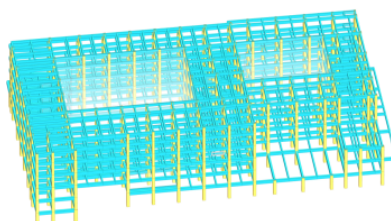
二、结构体系与布置

(一) 设计参数

本工程抗震设防烈度为 7 度, 抗震设防类别为乙类(重点设防类), 建筑场地类别为 IV 类, 特征周期为 0.9s, 场地粗糙度类别为 C 类, 基本风压为 0.55kN/m²。本项目结构设计使用年限为 50 年, 建筑结构安全等级为二级。

(二) 结构单元划分

本工程地上部分高度小于 24m, 为多层结构, 乙类建筑。地下一层, 采用钢筋混凝土框架结构, 上部结构嵌固端位于地下室顶面。结合建筑形态特点与结构受力合理性, 将建筑地上部分划分为 12 个结构单元。其中结构单元 2、4 为单跨框架, 结构单元 8、10 为大跨度连廊, 均采用钢框架结构; 其余单元采用装配式整体式钢筋混凝土框架结构。各结构单元间设抗震缝脱开。根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 要求, 混凝土框架的抗震等级为二级, 局部(大跨度位置、楼梯周边构件)抗震等级提高一级至一级。钢框架抗震等级三级, 对于局部大跨度框架、单跨钢框架情况, 钢框架等级提高至二级。本文主要以典型结构单元 1 为例, 介绍该项目的结构设计。



单元 1 三维模型示意图

过增设黏滞阻尼器, 地震作用下可起到耗能作用, 达到保护主体结构的作用。本项目采用的粘滞阻尼器主要参数: 粘滞速度指数 α 为 0.3, 阻尼系数 $C500kN/(m/s)^\alpha$, 最大阻尼力为 250kN, 最大行程为 $\pm 50mm$ 。

本工程结构单元 1、3、5、7、11 消能器在建筑楼层平面按照“均匀、分散、对称、周边”的原则进行布置。结构单元 2、4、6、8、9、10、12 因建筑平面尺寸较小和造型要求, 设置阻尼器较为困难, 所以

对该部分单体未设置阻尼器，对单体采用性能化设计。

三、超限情况与抗震性能目标

(一) 超限情况

依据《全国超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》(建质[2010]109号)相关规定对各单体进行超

限判定，判定结果如下：本项目结构单元1、单元2、单元8、单元10、单元11存在不同程度的结构不规则，存在多层超限情况。应进行多层不规则专项研究和论证，采取相应的加强措施。

表1 各结构单元超限情况汇总表

结构单元编号	超限判别	超限情况说明
结构单元1	超限	特别不规则项：有效楼板宽度偏窄，连续三层有效楼板宽度小于典型宽度40%
结构单元2	超限	特别不规则项：平面凹进深度大于相应总尺寸的50%； 一般不规则：局部有效宽度小于50%
结构单元8	超限	特别不规则项：层刚度偏小，本层侧向刚度小于相邻上层的50%
结构单元10	超限	特别不规则项：层刚度偏小，本层侧向刚度小于相邻上层的50% 一般不规则：相邻层受剪承载力变化大于80%
结构单元11	超限	特别不规则项：有效楼板宽度偏窄，连续三层有效楼板宽度小于典型宽度40% 一般不规则：考虑偶然偏心的扭转位移比大于1.2。

(二) 性能目标

在多遇地震作用下，本工程主体结构须保持弹性，且非结构构件无明显损坏。在设防烈度地震作用下，各构件满足《基于保持建筑正常使用功能的抗震技术导则》

(下文简称“导则”)中建筑正常使用的性能目标。在罕遇地震作用下，各构件满足《导则》中弹塑性变形要求，消能器悬臂墙保持弹性，减震消能器系统仍能正常发挥功能；消能子结构满足“不屈服”要求。

表2 本项目结构抗震性能目标

减震目标			
结构类别	分项	规范要求	
钢筋混凝土框架结构	层间位移角	多遇	1/550
		设防	1/300
		罕遇	1/100
性能目标			
名称	项目	性能目标	设计方法
主体结构	多遇地震	全楼完全弹性	工况组合采用考虑各种系数的设计组合，材料强度采用设计值
	设防地震	正常使用	满足《建设工程抗震管理条例》中震下正常使用的要求
消能部件	消能器悬臂墙	大震弹性	以大震下构件的弹性内力进行截面设计和稳定性验算，材料强度采用设计值
消能子结构	周围框架及节点	满足极限要求	以大震下构件的内力进行配筋，材料强度采用极限值；与之相邻的框架梁柱根据“强柱弱梁”原则进行设计；并验算节点。

四、装配式设计

根据《上海市装配式建筑单体预制率和装配率计算细则》765号及《沪建建材(2019)97号文》本项目需满足装配式要求：建筑单体预制率不低于40%或单体装配率不低于60%。由于本项目预制率要求高，预制构件比例大，经过多方案对比分析，本项目预制构件选型与应用范围如下：

(1) 预制楼梯：楼梯对预制率贡献效率较高，地上楼梯全部采用预制，标准梯段采用牛腿搁置的连接节点，非标准梯段采用预留钢筋的连接节点。

(2) 叠合楼板：本项目除公区湿区以及设备管井外，其余区域二层到屋面均采用叠合楼板。普通楼面的叠合楼板厚度采用60mm预制+70mm现浇，屋面板为保证混凝土板防水性能，采用60mm预制+100mm现浇。

(3) 预制叠合梁：选择标准跨及标准化程度高的次梁与主梁进行预制，减震子结构框架梁、斜梁、小次梁以及楼梯间框架梁采用现浇。

(4) 预制柱：除减震子结构框架柱、框架梯柱以及配筋较大的框架外，其他框架柱均选择预制，预制柱钢筋采用灌浆套筒连接。

(5) 钢结构：钢结构为天然预制构件，钢构件则直接计入预制率。

(6) 外围护墙：外围护幕墙与通高窗根据计算规则直接计入预制率，其他外墙采用砌块。

(7) 预制构件限重与限宽：本项目预制构件吊重按10吨控制，运输宽度按3m控制(含出筋)。

五、结构计算分析

(一) 弹性反应谱分析

本项目采用YJK软件进行了振型与反应谱分析，采用ETABS软件进行补充校核，主要结果见表3。结构的自振周期、结构重量、基底剪力以及层间位移角等计算结果在两种软件的计算下吻合较好，详见下表3。

表3. 单元1主要弹性分析指标汇总

指标	YJK	ETABS
自振周期/s	T1	0.7845
	T2	0.7414
	T3	0.6755
周期比	T3/T1	0.86
总重力荷载代表值 /KN	Ge	282083
设防地震作用基底剪力 /KN	X向	44081.6
	Y向	42001.6

续表 3

指标		YJK	ETABS
风荷载作用基底剪力 /KN	X 向	1363.3	1256.5
	Y 向	1830.1	1938.5
设防地震作用层间位移角	X 向	1/447	1/449
	Y 向	1/387	1/388
风荷载作用层间位移角	X 向	> 1/9999	> 1/9999
	Y 向	> 1/9999	> 1/9999

(二) 弹性时程分析

根据《基于保持建筑正常使用功能的抗震技术导则》第 4.1.2 条规定，本建筑为特别不规则多层结构，所以在设防地震工况下采用时程分析进行补充验算。地震输入采用 3 组地震波，其中 2 组天然波、1 组人工波，所选取的地震波平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符，在结构主要振型对应的周期点上，相差不超过 20%。地震波采用双向输入方式，其中主方向的加速度峰值为 100cm/s^2 ，次方向的加速度峰值为 850cm/s^2 。根据上海市《建筑抗震设计规程》(DGJ08-9-2013 第 5.1.2 条，要求弹性时程分析时每条时程曲线计算所得结构底部剪力不小于振型分解反应谱法计算结果的 65%，3 条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不小于振型分解反应谱法计算结果 80%。地震响应的分析结果采用 3 组地震波的最大值进行包络设计。

在各地震波作用下层间位移角分布可知，原结构 X、Y 向的最大层间位移角分别为 1/310、1/291，减震结构 X、Y 向的最大层间位移角分别为 1/311、1/304，结构最大层间位移角均满足《导则》设防地震层间位移角不大于 1/300 的要求。

(三) 楼板应力分析

本工程典型板厚 130mm，采用 YJK 计算软件，楼板设为弹性板 6，进行楼板应力分析。楼板性能目标：小震作用下，楼板应力不超过混凝土抗拉强度标准值；设防地震作用下，楼板配筋不屈服。在设防地震工况下，楼板采用夹心模型，钢筋强度采用标准值，楼板的主拉应力应满足以下要求：

$$\sigma_{1, \text{中震}} \leq f_{yk} \cdot A_s / h \cdot s$$

式中 $\sigma_{1, \text{中震}}$ 采用导则 4.2.4 条中震地震作用标准组合计算值；h 为楼板厚度，s 为楼板内钢筋的间距， A_s 表示在间距 s 范围内上下层水平钢筋的面积。

单元 1 各层楼板在中震作用效应组合时各层楼板最大主拉应力与配筋表，针对应力较大区域适当增大楼板厚度并增加楼板配筋，保证薄弱区域梁、板强度。

表 4 各层楼板核心层最大应力

楼板应力 (Mpa)	X 向地震作用	X 向配筋 (双层)	Y 向地震作用	Y 向配筋 (双层)
2 层	1.02	d10@200	0.71	d10@200
3 层	0.46	d10@200	0.41	d10@200
4 层	1.16	d10@200	1.24	d10@200
5 层	0.84	d10@200	0.70	d10@200
6 层	1.87	d10@200	2.04	d10@200
屋面	0.96	d10@200	0.65	d10@200

(四) 结构弹塑性计算分析

依据《建筑抗震设计规范》及《基于保持建筑正常使用功能的抗震技术导则》，对项目进行罕遇地震作用下的弹塑性验算。计算软件采用 SAUSAGE (Seismic Analysis Usage)，可以准确模拟梁、柱、支撑和楼板等结构构件的非线性性能。通过罕遇地震作用下的弹塑性计算分析，减震结构罕遇地震作用下各个地震波作用下上部结构的层间位移角最大值为 X 向 1/114，Y 向 1/116，结构最大层间位移角均满足《导则》罕遇地震弹塑性层间位移角不大于 1/100 的要求。

经过损伤统计，在罕遇地震作用下，框架柱主要破坏形式中度破坏 (89.2%)，部分构件为轻微 (0.1%) 及轻度破坏 (10.6%)；框架梁的主要破坏形式为轻度 (25.3%)、轻度 (25.7%) 及中度破坏 (48.9%)。框架梁与框架柱均未发生重度与严重程度破坏。

表 5 罕遇地震作用下单元 1 主要构件损伤情况统计

构件	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	重度损坏	严重损坏
框架柱比例 %	0.0	0.1	10.6	89.2	0.0	0.0
框架梁比例 %	0.1	25.3	25.7	48.9	0.0	0.0

减震结构的地震耗能能力主要由固有阻尼耗能、结构滞回耗能及阻尼滞回耗能三部分组成。通过罕遇地震作用下各地震波的能量时程曲线可知，地震输入最初，结构处于弹性阶段，只有固有阻尼耗能，随着地震作用变强，黏滞阻尼器滞回耗能，随后结构进入弹塑性变形阶段，出现了结构滞回耗能。地震输入能量主要由结构固有阻尼耗散，结构塑性耗能与固有阻尼比例相当黏滞阻尼器耗散了少部分地震输入能量，起到了保护了主体结构的作用。

以上结果表明，本工程结构体系符合相关规范要求，在大震作用下，减震子结构有效耗散了部分地震能量，起到了保护主体结构的目的，实现大震不倒的水准目标。

结语

本文详细介绍了某重点设防类装配整体式框架结构的设计方案与分析过程，分别对主体结构进行了振型与反应谱分析、弹性时程分析、弹塑性时程分析以及楼板应力分析，并应用 2 种软件对计算结果进行校核比较，根据分析结果针对性地对部分受力复杂位置采取了加强措施，保证了该项目整体性能合理性与适用性，整体技术体系满足规范要求、安全可行。本文对同类项目的结构设计具有一定的参考和指导作用。

参考文献

- [1] 建筑结构荷载规范：GB 50009—2012 [S].
- [2] 基于保持建筑正常使用功能的抗震技术导则：RISN-TG046-2023 [S].
- [3] 上海市建筑抗震设计规程：DGJ 08-9—2013 [S].
- [4] 建筑抗震设计规范：GB 50011—2010 (2016 版) [S].