某办公楼增设夹层方案对比分析

□ 郭霄伟

[摘　要] 以在某框架—剪力墙结构办公楼增设后置夹层为例，借助有限元计算软件，通过对两种后置夹层方案的对比，并结合原有的设计方案，分析不同方案对结构整体性能的影响，探讨选择各方案所需采取的相应措施，以供同类型工程参考。

[关键词] 后置夹层；框架—剪力墙结构；有限元计算；结构性能；应力分析

[文献标识号] B　**[中图分类号]** TU318　**[文章编号]** 1672-7045（2020）12-078-04

1 引言

近些年，带有挑高空间的办公楼（SOHO）逐渐进入房地产市场，虽然SOHO办公楼销售时按单层的建筑面积计算，但在增加夹层后其实际使用面积是销售面积的近2倍，极高的得房率、相对较低的单价使SOHO办公楼受到市场的追捧。但在结构分析上，后期增设的夹层会对原主体结构产生影响：沿竖向增设的夹层不均匀可能会造成结构竖向刚度突变；夹层抗侧力构件与主体结构刚性连接可能增大结构的抗侧刚度，放大结构的地震作用效应。如何既提高建筑的空间利用率，又尽可能地减小增设夹层对原有结构造成的不利影响，满足结构的安全性能，成为值得研究的问题[1,2]。本文以某高层办公楼为例，结合原有未增设夹层的设计方案，主要对主体结构增设混凝土夹层与钢结构夹层两种结构方案进行对比，重点分析两种方案的优缺点。

2 工程概况

2.1 基本信息

某高层办公楼，位于抗震设防烈度7度区，设计基本地震加速度值0.15g，场地设计地震分组为第二组，建筑场地类别为Ⅲ类，50年一遇的基本风压为0.8kN/㎡。该工程地上21层，地下1层，建筑高度为94.5m，属于A类高层建筑。

2.2 结构形式

办公楼主体结构采用现浇钢筋混凝土框架—剪力墙结构，上部结构嵌固端为地下室顶板，±0.00以上各层层高均为4.5m，结构高宽比3.61，平面布置均匀对称。主要外框架柱截面沿高度为1000㎜×1200㎜～800㎜×800㎜；外围框架梁截面为400㎜×850㎜；沿Y向主要框架梁截面为600㎜×900㎜；框架柱和剪力墙抗震等级为二级，标准层结构平面布置见图1。

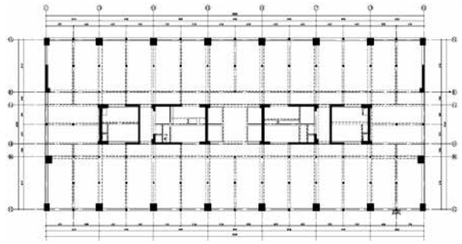


图1 标准层平面布置示意图

3 分析要点

设计阶段已充分考虑增加夹层后的荷载（楼板自重取100㎜混凝土楼板，附加恒载取1.5kN/㎡，活荷载取2.0kN/㎡），夹层从3层至21层沿竖向均匀布置，增设夹层范围见图2阴影区域。夹层与主体结构的连接有刚接和铰接两种方式，本文主要对与主体结构刚接的混凝土梁板式夹层（方案1）和与主体结构铰接的压型钢板组合楼板+钢梁夹层（方案2）进行分析，探讨除了原有的设计方案（方案3）外，其他两种方案的可行性及其对主体结构的影响。

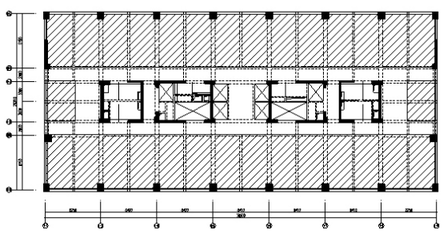


图2 夹层平面布置示意图

（1）方案1采用混凝土梁板式夹层，夹层均采用标号C30混凝土，在标准层各房间隔墙梁位设置200㎜×300㎜的梁上小柱，对混凝土夹层梁与梁上小柱及框架柱采取整浇，夹层楼板与夹层梁整浇，夹层板荷载通过夹层梁传至梁上柱及框架柱。由于夹层面积相对标准层面积占比较大（65.8%）且夹层板与原结构刚性连接，刚接夹层板对主体结构刚度的影响不能忽略，夹层按实际楼层考虑，计算建模时将各夹层作为单独的计算层参与整体结构计算。

（2）方案2采用压型钢板组合楼板+钢梁夹层，同样在标准层各房间隔墙梁位设置200㎜×300㎜的梁上小柱，梁上小柱和框架柱均预埋连接板，为避免夹层结构对主体结构产生过大影响，夹层钢梁与柱采用高强螺栓铰接连接。夹层梁仅传递竖向荷载，夹层不作为实际楼层考虑，计算建模时将夹层荷载作为节点荷载输入标准层模型相应位置。

（3）方案3为不增加夹层的原有设计，本文不作重点阐述。

4 计算与分析

4.1 结构分析对比

采用“YJK 2.0.1”对方案1、方案2及未增设夹层的方案3进行对比分析，结构整体指标（如周期、位移、扭转位移比、层间刚度比、倾覆力矩比等）采用刚性楼板假定，相关指标对比结果见表1，地震作用下楼层最大层间位移角对比详见图3、图4，层间刚度对比详见图5、图6。根据以上数据对比可得出：

表1 整体指标对比结果

指标项		方案1	方案2	方案3
总质量(t)		73987	73117	61453
地震作用下结构底部剪力效应(kN)	X向	27176	25510	22995
	Y向	26081	24974	22257
结构自振周期(s)		T1 = 2.3685(Y)	T1 = 2.4257(Y)	T1 = 2.2164(Y)
		T2 = 2.1542(Y)	T2 = 2.3540(X)	T2 = 2.1418(X)
		T3 = 1.9501(T)	T3 = 2.0401(T)	T3 = 1.8575(T)
周期比		0.82	0.84	0.84
地震作用下最小楼层受剪承载力比值	X向	0.66 <[0.80] (3层 1塔)	1.0 > [0.80] (22层 1塔)	1.0 > [0.80] (22层 1塔)
	Y向	0.67 <[0.80] (3层 1塔)	1.0 > [0.80] (22层 1塔)	1.0 > [0.80] (22层 1塔)
最小刚度比	X向	1.00 ≥ [1.00] (41层 1塔)	1.0 ≥ [1.00] (22层 1塔)	1.0 ≥ [1.00] (22层 1塔)
	Y向	1.00 ≥ [1.00] (41层 1塔)	1.0 ≥ [1.00] (22层 1塔)	1.0 ≥ [1.00] (22层 1塔)
最小剪重比	X向	3.96% > [2.40%] (2层 1塔)	3.83% > [2.40%] (2层 1塔)	4.11% > [2.40%] (2层 1塔)
	Y向	3.80% > [2.40%] (2层 1塔)	3.75% > [2.40%] (2层 1塔)	3.98% > [2.40%] (2层 1塔)
最大层间位移角	X向	1/846 <[1/800] (12层 1塔)	1/849 <[1/800] (7层 1塔)	1/944 <[1/800] (7层 1塔)
	Y向	1/839 <[1/800] (24层 1塔)	1/844 <[1/800] (12层 1塔)	1/935 <[1/800] (12层 1塔)
最大位移比	X向	1.07 <[1.50] (2层 1塔)	1.05 <[1.50] (2层 1塔)	1.05 <[1.50] (22层 1塔)
	Y向	1.19 <[1.50] (2层 1塔)	1.18<[1.50] (2层 1塔)	1.20 <[1.50] (2层 1塔)
最大层间位移比	X向	1.07 <[1.50] (41层 1塔)	1.07 <[1.50] (22层 1塔)	1.07 <[1.50] (22层 1塔)
	Y向	1.18 <[1.50] (2层 1塔)	1.19 <[1.50] (2层 1塔)	1.20 <[1.50] (2层 1塔)

（1）增设夹层后，由于结构质量增加（增幅约20%），方案2相比方案3，地震作用下的结构底部剪力效应约增加12%。同时对比方案1与方案3，方案1结构底部剪力效应约增加18%。相比方案2，方案1结构自振周期略微减小，剪重比、最大层间位移角略微增大，变化幅度均在3%以内，而方案3的各指标项与方案1、方案2对比，变化幅度约为10%。这说明在本工程中，夹层刚度对结构总体刚度及地震作用效应的影响远小于结构质量增加的影响，这可能是由于夹层梁柱截面尺寸相比原结构截面尺寸过小，且夹层开洞面积较大，夹层梁均未与核心筒剪力墙连接，导致夹层对结构总体刚度的贡献有限。

（2）三种方案的结构周期比、位移比、层间最小刚度比等指标均未发生明显的变化且均在规范限值范围内。方案1考虑夹层板参与整体计算后，由于夹层梁在X、Y向未与核心筒连接且夹层与标准层的质量存在变化，各夹层与标准层间的层刚度比、最大层间位移角均存在突变，在竖向沿高度呈有规律的锯齿形分布，虽均未超过规范限值，但结构沿高度方向出现刚度反复突变从结构概念上显然是不利的。

（3）方案1在第3计算层出现软弱层，地震作用下楼层受剪承载力比值X向为0.66，Y向为0.67，已接近《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2010）[3]3.5.3条的限值要求，主要是由于自第4计算

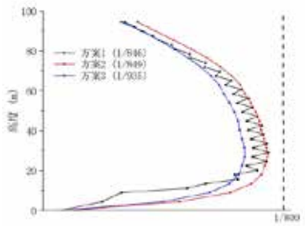


图3 X向地震作用最大层间位移角对比曲线

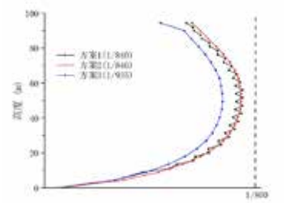


图4 Y向地震作用最大层间位移角对比曲线

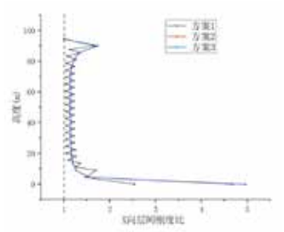


图5 X向层间刚度比对比曲线

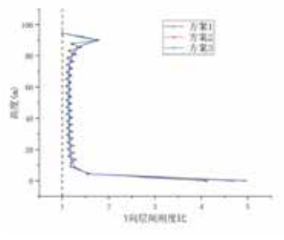


图6 Y向层间刚度比对比曲线

层层高由4.50m减小至2.20m，且3、4计算层竖向构件截面尺寸完全相同，导致第3计算层的受剪承载力较第4计算层有较大削弱，在内力分析时根据规范要求对第3计算层的地震作用剪力标准值须乘以1.25的增大系数。

（4）根据《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）[4]3.4.3条的要求，方案1在楼层高度突变处出现软弱层，属于楼层承载力突变；各夹层开洞面积大于该层楼板面积的30%，属于楼板局部不连续，其余各项指标满足规范要求，共存在2项不规则。而方案2、方案3各项整体指标均满足《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）的相关要求。

（5）采用方案1或方案2，结构整体指标均能满足相关规范的要求，但方案1地震作用效应略大于方案2，方案1模型在核对配筋时应对软弱层的地震效应进行放大，对夹层楼板的薄弱连接处进行分析，如有必要应采取措施予以相应加强。

（6）将夹层定义为弹性膜，核对原设计配筋，方案1与方案2两版模型的配筋计算值均满足规范要求。方案1设置刚接夹层导致层高减小，结构周圈框架柱均形成短柱，复核原设计配筋所有柱箍筋均已全长加密，且体积配箍率均大于1.2%。

4.2 夹层刚接楼板应力分析

方案1夹层板与主体结构刚性连接，除了承担竖向荷载，在地震作用下，楼板还起到传递水平力的作用，由于夹层开洞区域较大，在计算内力配筋时考虑楼板的平面内刚度，需将夹层楼板定义为弹性膜[5]。同时考虑夹层梁板均未与核心筒连接，此时夹层楼板对保证地震作用下夹层的抗侧力构件能否协同工作至关重要，本工程采用“YJK 2.0.1”对夹层楼板进行应力分析。小震下的性能目标为控制楼板的拉应力不超过混凝土抗拉强度标准值（f_{tk}=2.01MPa），中震下的性能目标为允许楼板出现裂缝，但楼板的拉应力不应超过钢筋抗拉强度设计值（f_y=360MPa），小震及中震下楼板应力计算结果见图7至图10。

计算结果表明，方案1在小震及中震作用下，楼板拉、压应力集中分布区域基本一致，且呈规律性分布，均出现在和框架柱相连的楼板角部；在小震工况下，楼板拉应力最大值为1.9MPa，小于2.01MPa；在中震工况下，大部分楼板拉应力均小于2.01MPa，局部楼板拉应力较大。在设计夹层时，采取在相应区域增大楼板配筋的方式，使楼板拉应力不超过钢筋抗拉强度设计值。

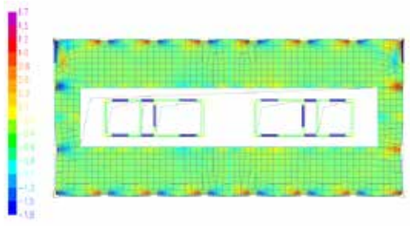


图7 第4计算层X向小震x向应力分布图（MPa）

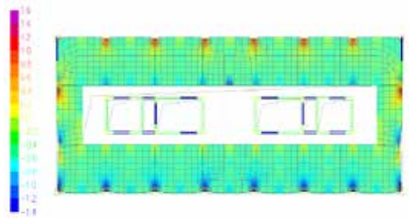


图8 第4计算层Y向小震y向应力分布图（MPa）

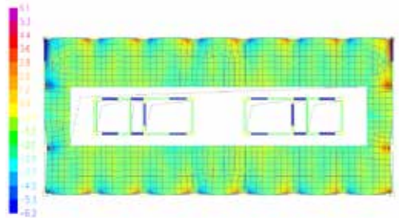


图9 第4计算层X向中震x向应力分布图（MPa）

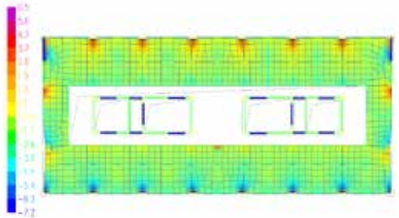


图10 第4计算层X向中震y向应力分布图（MPa）

4.3 夹层铰接楼板分析

方案2夹层板与主体结构铰接，为避免地震作用下夹层楼板传递水平力，夹层钢梁与柱连接处螺栓孔采用长槽孔，根据《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2010）第3.7.5条层间弹塑性位移角限值估算长槽孔宽度，层间位移角限值[θ]=$\frac{1}{100}$，层高取2.3m，计算可得长槽孔宽度S不应小于2300/100=23mm，综合考虑相关计算结果，钢梁与埋件间采用10.9级M22高强螺栓摩擦型连接，长槽孔尺寸取40mm×24mm。

5 结论

通过对本工程设置刚接夹层与铰接夹层的计算分析对比可知：

（1）两种夹层的设置方式均增大了主体结构的地震作用效应，设置刚接夹层对原有主体结构刚度尚有额外增加。对于本工程，设置刚接夹层对结构刚度的贡献并不显著，两种方案在地震作用下所产生的荷载效应基本相等。

（2）设置刚接夹层易使原结构出现平面或竖向不规则，在不规则项数不超过规范要求的前提下，应采取相应的加强措施，确保计算假定符合结构真实受力状况，保证结构的安全性。

（3）如采用铰接夹层，并采取必要的构造连接措施，可避免铰接夹层对结构的动力特性产生影响。该方案同时可解决设置夹层梁引起层高减小后框架柱形成短柱的问题。

[参考文献]

[1]王浩宇.高层建筑中LOFT楼层设计关键问题的研究和实践[D].邯郸:河北工程大学,2015.
[2]周永明,高超,刘建飞.后置夹层结构体系对比与分析[C]//同济大学,同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,中国建设科技集团股份有限公司,上海市建筑学会地下空间与工程专业委员会,《建筑结构》杂志社.2015年城市地下空间综合开发技术交流会论文集,上海:《建筑结构》杂志社,2015:356-360.
[3]高层建筑混凝土结构技术规范:JGJ 3—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
[4]建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
[5]钢结构设计标准:GB50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[作者简介]

郭霄伟，福建省建筑科学研究院、福建省绿色建筑技术重点实验室，工程师、一级注册结构工程师、一级建造师。