

某超高层结构加强层抗震性能分析与设计

吴任鹏¹, 朱立刚², 魏强¹

(1 山东同圆设计集团, 济南 250000; 2 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司, 上海 200031)

[摘要] 通过研究加强层的工作机理,并结合一个超高层结构的实例,研究和分析了带加强层结构的位移角、内外筒剪力、倾覆力矩的分配、薄弱层等基本参数。结果表明,加强层能明显提高结构刚度和抗倾覆能力,减小结构位移,但易使加强层的下一层形成薄弱层。最后,给出了加强层抗震构造措施。

[关键词] 加强层; 核心筒; 薄弱层; 抗震构造措施

中图分类号: TU398.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0010-04

Seismic behavior analysis and design of strengthened storey in a super high-rise building

Wu Renpeng¹, Zhu Ligang², Wei Qiang¹

(1 Shandong Tongyuan Design Group Co., Ltd., Jinan 250000, China;

2 Arup International Consultants(Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: The working mechanism of strengthened storey was studied. Combined with an engineering example, the basic parameters, such as storey drift, storey shear and overturn moment distributed in-out core wall, weak layer and so on, were studied and analyzed. The results show that the strengthened storey can increase the stiffness of the structure, anti-overturning moment and decrease displacement of the structure. But the storey below the strengthened one is easy to be weak. Finally, the details of seismic design in the strengthened storey were listed.

Keywords: strengthened storey; core wall; weak layer; seismic design detail

0 引言

近年来我国各地涌现出大量的超高层建筑,其功能更齐全、高度更高(超过400m)、体型更复杂。普通的框架-核心筒结构,由于外筒刚度相对较弱,剪力滞后效应明显,框筒体系抵抗侧向荷载的能力减弱,纯框架-核心筒结构体系很难满足超高层结构的刚度和位移要求。利用高层结构的建筑设备层和避难层的空间,在外框架中设置环状腰桁架和核心筒与外框架之间的伸臂桁架,可以有效地增加外框架的刚度,减小外框架剪力滞后效应,从而减小高层结构的水平侧移,提高结构抗倾覆能力,有利于超高层结构的推广和应用^[1,2]。

1 加强层的工作机理

传统框筒结构在水平荷载作用下,框架仅仅承受小部分水平剪力,而水平荷载引起的倾覆力矩绝大部分由核心筒来承担。通过在结构中设置加强层,增强核心筒和外框架的连接,克服剪力滞后效应,更有效发挥周边框架的轴向刚度作用,使结构的抗倾覆力臂增大,从而进一步有效地提高整个结构的抗倾覆能力,如图1和图2所示^[1]。同时,加强层中的腰桁架能使得外框柱协同工作,从而也能有效减小重力荷载、温度、徐变产生的竖向变形差。

虽然加强层能大大提高结构的抗侧刚度、减小结构位移、增加结构抗倾覆能力,并且在风荷载作用

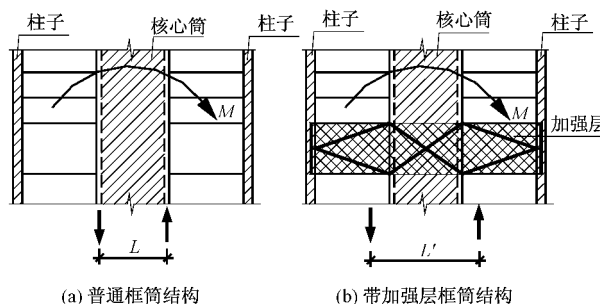


图1 结构抗侧力体系

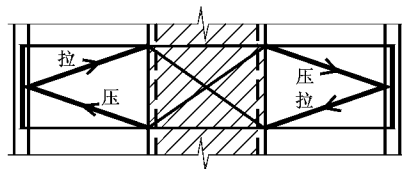


图2 加强层伸臂桁架受力机理

下,设置加强层是一种减小结构水平位移的有效方法,但在地震作用下,加强层的设置会引起结构刚度和内力突变,易形成薄弱层,给结构的抗震性能带来较大影响。因此,在抗震设计时,需要提高加强层及其相邻层的抗震措施,提高其性能目标。下面结合一个工程实例来说明加强层的工作机理,并对加强层采取抗震措施^[3]。

作者简介: 吴任鹏,一级注册结构工程师,Email: wurpedu@163.com。

2 工程概况

某超高层结构位于重庆市,98 层,结构高度 440m,总建筑面积约 25 万 m^2 ,平面近似为椭圆形。结构采用框架-核心筒+伸臂桁架+腰桁架体系。外框柱采用钢管混凝土柱,截面从低区 $2\,800 \times 2\,800$ 变到高区 $1\,600 \times 1\,600$,混凝土强度等级从 C80 变到 C70,楼面采用钢梁和压型钢板组合楼面体系;核心筒采用钢板剪力墙,混凝土强度等级为 C60。抗震设防烈度 6 度,场地类别 II 类,地震分组第一组,100 年风荷载 0.45m/s^2 。共设 6 道加强层,加强层构件典型截面为 $\text{W}1\,092 \times 424 \times 45.5 \times 82$,加强层的平面、立面布置如图 3~4 所示。

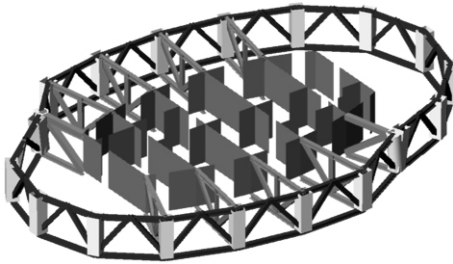


图 3 加强层的平面布置

3 结构的弹性分析

3.1 小震下结构的位移角

图 5 给出了风载作用下 X, Y 向结构的层间位移角。从图中可以看出,在每一道加强层,结构的位移角都有明显的减小,从而说明加强层有效地改善了结构的侧向变形,使位移角满足规范的要求。

3.2 楼层的剪力和倾覆力矩分配

图 6 给出了小震和风载作用下 X, Y 向地震剪力在外框筒和核心筒之间的分配。表 1 给出了第三道加强层(48 层) X, Y 向地震剪力在外框筒和核心筒之间的分配比较。从图 6 和表 1 可以看出,在普通楼层,外框筒所占地震剪力不到总地震剪力的 10%,这也说明,普通楼层地震剪力绝大部分由核心筒来承担。但在加强层所在楼层,外框筒的剪力会有一个突变,为普通楼层的 28.85 倍,而核心筒的剪

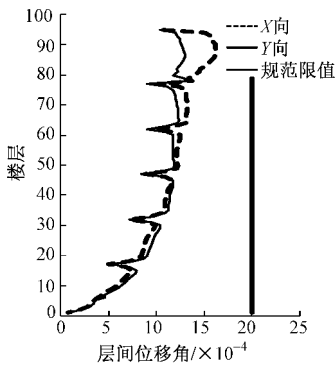


图 5 风载下层间位移角

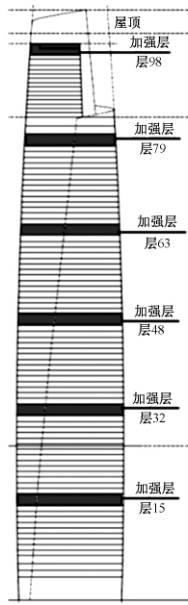
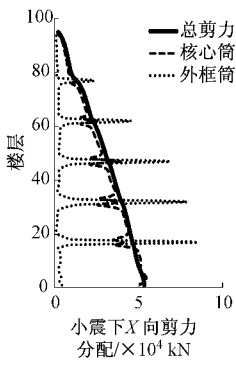


图 4 加强层的立面布置

力会有所减小,甚至反号,这是因为核心筒的剪力推到外框筒的缘故。同时,加强层相邻上下各两层剪力也会有不同程度的增加,从而也说明加强层会导致结构相邻楼层的内力变化,这也是加强层相邻层需要加强的原因。

图 7 给出了小震和风载作用下 X, Y 向倾覆力矩在外框筒和核心筒之间的分配。表 2 给出了第三道加强层(48 层) X, Y 向地震倾覆力矩在外框筒和核心筒之间的分配比较。从图 7 可以看出,从上而下,每经过一道加强层,外框筒承担的倾覆力矩都会有一个较大幅度的增加,在 48 层,外框筒的倾覆力矩增大 56.25%,同时,核心筒的倾覆力矩有所减小,这是因为设置了加强层,核心筒承担的倾覆力矩通过伸臂桁架传给了外框筒。因此,加强层的设置提高了外框筒承担的倾覆力矩,提升了外框筒对结构整体刚度的贡献率,从而提高了结构的整体抗倾覆的能力。

X 向地震作用下部分楼层剪力分配/kN 表 1

楼层	总剪力	核心筒	外框筒	总剪力增加/%	核心筒增加/%	外框筒增加/%
上三层	29 942	27 846	2 307	0	0	0
上两层	30 433	26 188	4 473	1.64	-5.95	93.90
上一层	30 909	21 108	10 306	3.23	-24.20	346.75
加强层	31 651	38 705	68 861	5.71	39.00	2 885.11
下一层	32 492	21 132	11 873	8.52	-24.11	414.67
下二层	33 057	28 192	5 065	10.41	1.24	119.56
下三层	33 555	31 072	2 646	12.07	11.58	14.70

3.3 结构的薄弱层

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010) [3] 3.5.2 条规定,框架-核心筒结构,楼层与其

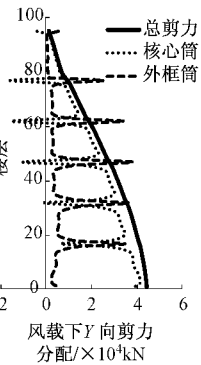
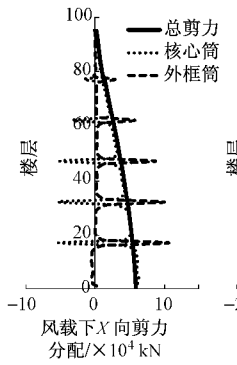
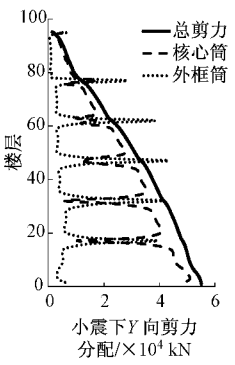
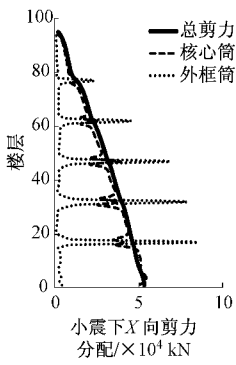


图 6 地震和风作用下剪力分配

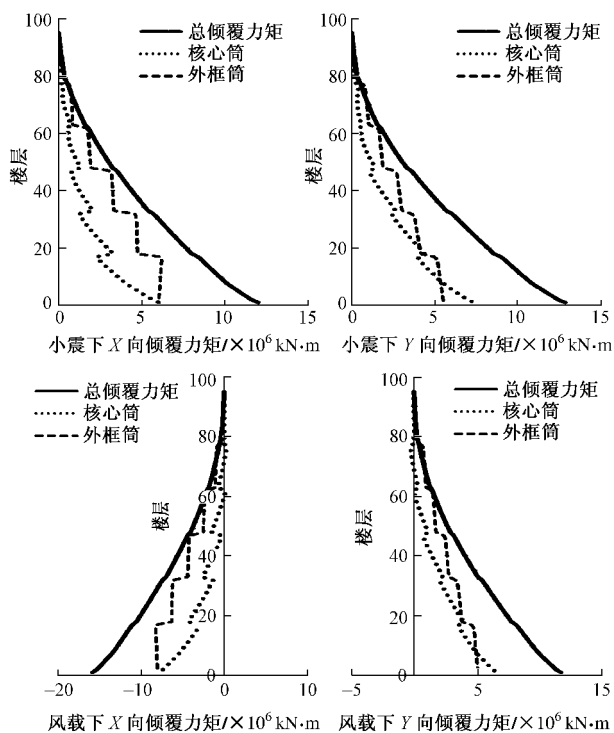


图7 地震和风作用下倾覆力矩分配

X向地震作用下部分楼层倾覆力矩分配/MN·m 表2

楼层	总倾覆力矩	核心筒	外框筒	总倾覆力矩增加/%	核心筒增加/%	外框筒增加/%
上三层	3 011	1 145	1 910	0	0	0
上两层	3 127	1 235	1 930	3.8	7.9	1.0
上一层	3 244	1 308	1 973	7.7	14.3	3.3
加强层	3 485	823	2 984	15.7	-28.1	56.3
下一层	3 628	822	3 170	20.5	-28.2	66.0
下两层	3 754	856	3 193	24.7	-25.2	67.2
下三层	3 881	908	3 200	28.9	-20.7	67.6

相邻上层的侧向刚度比按式(1)计算,且本层与相邻上层的比值不宜小于0.9,当本层层高大于相邻上层层高的1.5倍时,该比值不宜小于1.1。

楼层侧向刚度比定义为:

$$\gamma = \frac{V_i \Delta_{i+1} h_i}{V_{i+1} \Delta_i h_{i+1}} \quad (1)$$

式中: γ 为考虑层高修正的楼层侧向刚度比; V_i, V_{i+1} 分别为第 i 层和第 $i+1$ 层的地震剪力标准值; Δ_i, Δ_{i+1} 分别为第 i 层和第 $i+1$ 层的地震剪力标准值作用下的层间位移; h_i, h_{i+1} 分别为第 i 层和第 $i+1$ 层的层高。

工程加强层层高为8.4m,普通楼层层高4.2m,加强层高度为其相邻上层层高的2倍。从图8和表3可以看出,由于加强层的存在,结构会有一个刚度突变,加强层和相邻上一层的刚度比满足规范不宜小于1.1的要求。加强层下一层刚度不满足规范小

于0.9的要求。这是因为加强层刚度较大,会导致加强层下一层是薄弱层,需要采取相应的加强措施。

加强层及其相邻楼层侧向刚度比 表3

楼层	X向	Y向	楼层	X向	Y向
14	0.73	0.65	62	0.87	0.79
15(加强层)	1.46	1.57	63(加强层)	1.27	1.45
16	1.15	1.17	64	1.11	1.21
31	0.78	0.66	78	0.93	0.85
32(加强层)	1.35	1.53	79(加强层)	1.50	1.38
33	1.15	1.20	80	1.08	1.14
47	0.82	0.75			
48(加强层)	1.29	1.37			
49	1.12	1.17			

4 抗震构造加强措施

4.1 抗震等级和性能目标

根据前文所述,加强层的存在会导致结构存在薄弱层,根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)规定,将加强层及其上下层的抗震等级提高一级,为特一级;对薄弱层的地震剪力乘以1.25的放大系数。同时,提高加强层的性能目标,根据ATC40和FEMA273,结构的性能目标如表4所示。

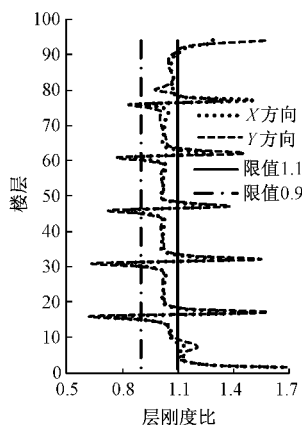


图8 楼层侧向刚度比

加强层性能目标 表4

构件	多遇地震	设防地震	罕遇地震
伸臂桁架/腰桁架	弹性	不屈服	允许屈服/屈曲,出现弹塑性变形,破坏程度可修复并保证生命安全, $\varepsilon < LS$
节点	强节点-弱构件,节点不先于构件破坏		

4.2 核心筒加强措施

根据加强层的受力及加强层相邻下一层是薄弱层的特点,核心筒墙体的主要构造措施有:增大加强层约束边缘构件中的型钢的截面和配筋率;在核心筒的楼面位置增加钢暗梁,钢暗梁在加强层上下弦的截面分别为HW1 068 × 417 × 39 × 70和H1 036 × 309 × 31 × 54,从而平衡与伸臂相连的墙肢因与伸臂不正交而带来的拉力;与伸臂桁架所处同一平面的墙肢,使型钢连续,贯穿整个墙体,并且伸臂桁架与核心筒内型钢连接节点采用铸钢节点,以保证水平力在加强层的有效传递和节点的安全性。墙体內的型钢布置如图9,10所示。

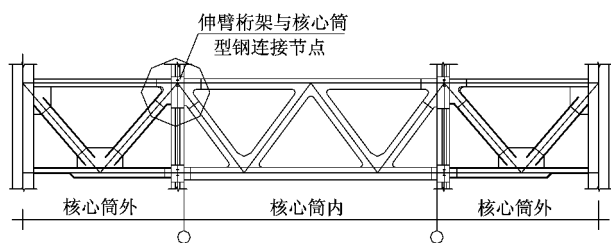


图 9 加强层核心筒内型钢布置图

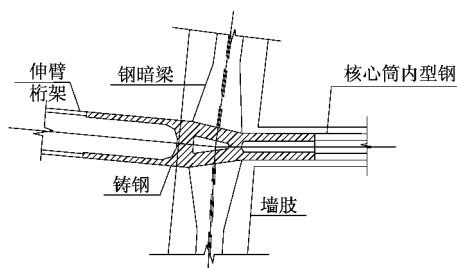


图 10 伸臂桁架与核心筒内型钢连接节点平面

4.3 板的加强措施

加强层及其相邻层楼板在内外筒水平力传递过程中占了比较重要的作用,为保证水平力的有效传递,加强层楼板加厚,取 200mm,并在加强层楼板配置水平支撑。小震下,保证楼板不开裂,加强层楼板内配置双层双向 $\Phi 18@150$ 钢筋,保证楼板内传递的水平力由钢筋承担,并同时提高加强层上下相邻

两层的配筋率,楼板内钢筋双层双向拉通;大震下允许楼板开裂,水平力传递主要由伸臂桁架的上下弦杆、腹杆及楼面内的水平支撑承担。

4.4 柱的加强措施

为保证加强层柱子与伸臂桁架、腰桁架连接,增强加强层的抗震性能,将加强层钢管柱的壁厚加厚,使之与相应的伸臂桁架、腰桁架的壁厚相同。

5 结论

(1) 加强层能有效地减小剪力滞后效应,提高外框筒的刚度,减小结构的位移,提高结构的抗倾覆能力。

(2) 加强层容易造成结构刚度突变,使加强层下一层形成薄弱层。

(3) 加强层的抗震等级、性能目标、楼板、节点连接都需要加强,从而改善其抗震性能。

参 考 文 献

- [1] 刘大海,杨翠如. 高层建筑结构方案优选[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [2] 徐培福,傅学怡,王翠坤,等. 复杂高层建筑结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

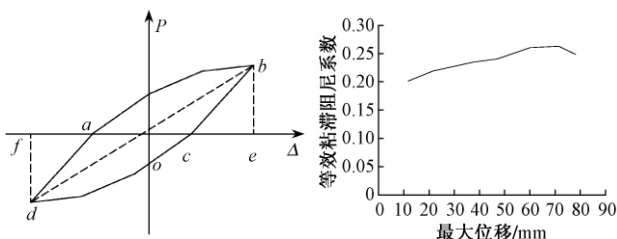
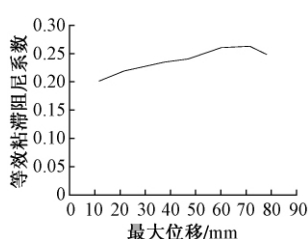
(上接第 4 页)

力,本文也采用它作为能量耗散能力的衡量指标,等效粘滞阻尼系数可按下式计算:

$$\beta = E/2\pi$$

式中: $E = (A_{abc} + A_{cda}) / (A_{obe} + A_{odf})$, 其中 A_{abc} , A_{cda} , A_{obe} , A_{odf} 分别为图 12 中 abc , cda , obe , odf 部分的面积。

试验模型的等效粘滞阻尼系数曲线见图 13。

图 12 等效粘滞
阻尼系数图 13 试验模型等效
粘滞阻尼系数曲线

综上可得: 与传统的纯框架结构相比, 框架屈曲约束支撑结构体系的骨架曲线的下降段较为平缓, 刚度退化缓慢, 延性和工作性能更好。将屈曲约束支撑加入到框架体系中, 结构的刚度和屈服力都有提高, 随着位移的增加, 支撑会进入屈服阶段(支撑

何时进入屈服阶段可根据设计决定)。屈曲约束支撑良好的滞回性能, 使得框架支撑体系在很大的位移范围内有了较强的耗能能力。

4 结语

将屈曲约束支撑构件运用到框架结构中, 能够极大提高框架结构的抗倒塌性能。试验结构顶层位移 120mm, 顶层位移角 1/30。模型结构在试验中表现出良好的抗侧刚度、抗剪强度和变形能力, 滞回曲线饱满, 具有很强的耗能能力。

当框架结构破坏后, 骨架线有一定下降, 随后由于支撑发挥作用, 骨架线不再下降, 而是走平, 保证了框架支撑结构的延性。框架屈曲约束支撑的延性系数不小于 12.25, 屈曲约束支撑框架具有很强的消耗地震能量的能力。支撑表现对框架支撑结构抗倒塌性能至关重要, 应该要求支撑不能先于框架结构破坏。安装支撑后, 与支撑相关的框架结构构件将承担支撑传来的地震作用, 设计时应考虑。

参 考 文 献

- [1] 范苏蓉. 钢支撑加固钢筋混凝土框架结构的试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2002.