

高层建筑结构在竖向荷载作用下楼板面内应力分析和工程实例

杨仁孟^{1,2}, 陈兆荣^{1,2}, 王森^{1,2}, 魏琰^{1,2}

(1 深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034;

2 深圳市力鹏建筑设计事务所, 深圳 518034)

[摘要] 对于带斜柱、斜撑、转换桁架等的高层建筑结构, 在竖向荷载作用下由于倾斜构件在水平向的分力导致楼板产生较大的平面内拉力, 而高层建筑结构楼板设计时, 并没有考虑竖向荷载引起的楼板平面内拉力的影响。结合深圳某带斜撑巨柱框架-钢筋混凝土核心筒高层结构, 分析了在自重作用下楼板产生较大拉应力的原因, 给出了“放”和“抗”相结合的应对措施和设计建议。

[关键词] 平面内拉力; 竖向荷载; “放”和“抗”结合措施

中图分类号: TU375, TU973 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2017)01-0017-06

In-plane stress analysis and engineering example of high-rise building under vertical load

Yang Renmeng^{1,2}, Chen Zhaorong^{1,2}, Wang Sen^{1,2}, Wei Lian^{1,2}

(1 Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China;

2 Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China)

Abstract: For high-rise building structures with inclined columns, braces and conversion truss, tilt components lead to great tension in the plane of the floor in horizontal direction under vertical load. However, in the floor design of high-rise building structure, effect of vertical load on in-plane tension of the floor is not considered. A frame with mega columns and tilt bracings and reinforced concrete corewall high-rise structure in Shenzhen was used to analyze the reason of great tensile stress on floor under the gravity action, and the combined measure of “release” and “resistant” was provided as well as design suggestions.

Keywords: in-plane tension; vertical load; combined measure of “release” and “resistant”

0 前言

对于高层建筑结构, 需由水平和竖向构件组成的结构体系抵抗和传递竖向力。楼板作为主要水平构件, 在竖向荷载作用下, 通常仅产生平面外弯矩, 根据平截面假定, 此时楼板中面的拉压力为零。当有斜柱、斜撑、转换桁架等构件时, 在竖向荷载作用下, 由于需抵抗倾斜构件外推, 楼板将产生平面内的拉力, 协调各抗侧力构件之间的变形。

随着高层建筑结构的迅速发展, 带倾斜构件的结构纷纷涌现, 此类结构楼板在竖向荷载作用下将产生较大的楼板平面内拉力、剪力以及面外附加弯矩, 在结构设计中必须加以考虑。基于现行计算程序和规范未涵盖结构在竖向荷载作用下水平分力对楼板的作用, 本文就此展开讨论, 提出相应的设计建议, 并结合实际工程对方法的应用进行了说明。

1 竖向荷载作用下楼板应力的主要形式与意义

1.1 楼板面内受力的应力形式

竖向荷载作用下, 由于带倾斜构件在水平向分力的作用, 楼板可能全截面承受拉力或压力。令楼板轴向正应力为 σ_N , 其应力分布如图 1 所示。

对于带倾斜构件结构, 楼板主拉应力的方向和大小受地震作用、风荷载和竖向力的水平分力共同作用控制, 其主要作用在于定性判断楼板裂缝开展情况, 并根据主拉应力云图判断需要采取加强措施的薄弱位置。由于主拉应力方向不一致, 一般不宜根据主拉应力迹线的走势进行楼板配筋设计, 宜按照轴向应力方向进行。

1.2 楼板面外受力的应力形式

带倾斜构件在水平向分力的作用下, 楼板除了全截面承受拉力或压力, 楼板面外还会产生一定的弯矩, 此时楼板受力特征与受弯梁相似。楼板上表面的弯曲正应力 σ_M^T 与下表面的弯曲正应力 σ_M^B 形成抵抗力矩, 在满足平截面假定的情形下, 其应力分布呈现以截面中性轴为界, 楼板上下表面一侧受拉、一侧受压, 楼板中性轴所在面应力为 0 的情形, 见图 2。

竖向荷载作用下, 楼板竖向荷载产生的弯曲应力和其斜构件水平分力产生的弯曲应力共同形成楼板面外弯矩, 此时楼板的受弯配筋设计受其控制。

作者简介: 杨仁孟, 硕士, 中级工程师, 一级注册结构工程师, Email: 52740047@qq.com。

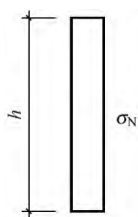


图1 平面内轴向受力
应力分布

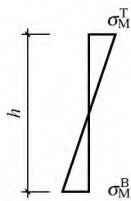


图2 组成平面外弯矩的
弯曲应力分布

2 常用程序关于楼板应力分析与设计的应用

现行程序主要输出的是楼板上下表面的应力结果,而楼板面内应力分析时需要的是楼板中面的应力。如果程序不能直接提供楼板中面的应力,在使用计算结果时,需加以处理。目前楼板应力分析的程序主要有 ETABS 和 MIDAS/Gen,两个程序提取楼板中面应力的方法分别如下:

ETABS 程序可以通过以下两种方式来实现:一是通过对楼板顶面和底面的正应力结果取平均值来获得,然而由于复杂高层建筑结构需要分析的楼板数量较多,采用此方法效率较低;二是通过设置一个较小的楼板弯曲厚度,即忽略楼板平面外的刚度,此时 ETABS 输出的楼板顶面和底面的正应力结果与实际的楼板轴向正应力接近,此方法的优点在于可以直接从程序输出的结果中获得楼板的轴向应力,直观且方便快捷。

MIDAS/Gen 程序是在原有的楼板中间部位添加一层面内、面外厚度较小的薄膜,虽然此时薄膜的面内厚度较小,但由于共节点的原因,此薄膜在平面内的位移与原楼板一致,故此时薄膜的顶面和底面的正应力结果与实际的楼板中面正应力接近。

为确保楼板应力分析结果的可靠性和准确性,建议采用反应谱分析法根据两个不同的程序分析校核楼板应力。尚可采用同一程序,应用弹性时程分析法和反应谱分析法进行楼板应力校核。

3 工程实例

3.1 工程概况

深圳华侨城项目位于华侨城片区内,总建筑面积约 202 983m²。建筑地面以上 60 层,塔楼屋顶高度 277.4 m,屋顶以上构架最高处高约 300m。项目设有 5 层地下室,地下 5 层深约 21.05m。地面以上设有 3 层商业裙房,建筑效果见图 3。

结构平面近似菱形,定义东西向为 X 向,南北向为 Y 向。Y 向宽 52m, X 向宽度不等,底部宽 75m,中部最大宽度 87m,顶部宽 71m。由于 X 向宽度不等,造成东西侧柱倾斜并且转折,其北立面及典型层平面图分别见图 4、5。

3.2 结构体系

工程结构体系为带斜撑巨柱框架-钢筋混凝土核心筒混合结构,简称“带斜撑巨柱框架-核心筒结构”。塔楼竖向构件包括混凝土核心筒、型钢混凝土巨柱、周边柱及斜撑,水平构件包括腰桁架、核心筒内的钢筋混凝土梁板楼盖、核心筒外的钢梁+钢筋桁架楼板形成的组合楼盖。

核心筒:呈不规则六边形, X 向最长约 33.8m, Y 向最长约 27m,在筒体右侧角隅区设置型钢柱。核心筒厚度为从下至上 1.5~0.8m。

巨柱:标准层平面共布置 6 根钢骨混凝土巨柱,位于平面四个角部,南北侧两根巨柱从下至上垂直布置,而东侧两根和西侧两根巨柱从下至上有倾斜转折。南北侧巨柱为不规则五边形,边长为底部 4.5m,顶部 2.1m。东侧巨柱在 29 层由两根合并为一根,并在 31 层再次分离成两根,立面呈 X 形。西侧巨柱与之类似,在 29 层由两根合并为一根,在 46 层又分成为两根柱。

斜撑:在东南、西南、东北、西北四个立面布置,斜撑分别在三道腰桁架的下弦层及 42 层处转折,转折点均在四周的巨柱上。斜撑截面为矩形方钢管,腹板高度为 1~1.6m,厚度为 0.1m;翼缘宽 0.35m,厚度 0.02m。



图3 建筑效果图

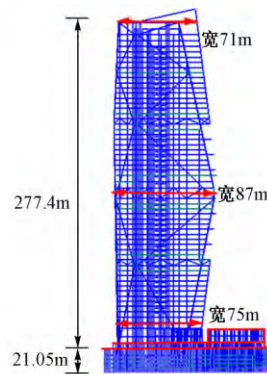


图4 北立面图

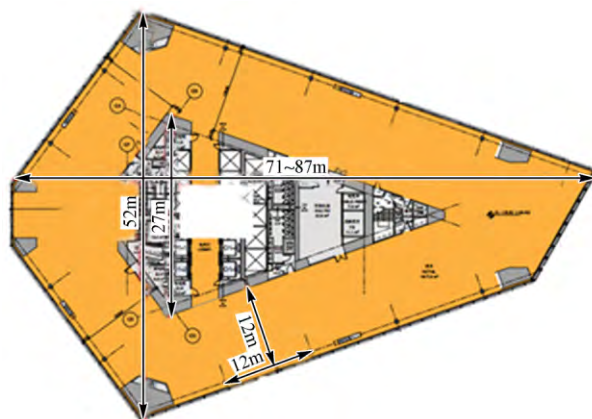


图5 典型层平面图

腰桁架: 结构沿高设有三道腰桁架, 第一道腰桁架位于 1 区 16 ~ 17 层; 第二道腰桁架位于 2 区 29 ~ 31 层; 第三道腰桁架位于 3 区 43 ~ 44 层。其中第一道腰桁架和第三道腰桁架为一层高, 第二道腰桁架为两层高。腰桁架截面为矩形方钢管, 上、下斜杆的腹板高度为 0.9m, 厚度为 0.04m, 斜腹杆的腹板高度为 0.7m, 厚度为 0.03m。翼缘尺寸均为宽 0.35m, 厚度 0.02m。

周边柱: 在外框平面内布置, 标准柱跨为 12m。有的周边柱是全楼上下连续, 有的是从中间某一楼层开始, 有的到中间某一楼层结束。周边柱与三道腰桁架、外框梁及斜撑刚接。周边柱截面为矩形钢管, 尺寸为 0.5m × 0.5m, 上下翼缘厚度为 0.03 ~ 0.1m, 左右腹板厚度为 0.02m。

塔楼核心筒、巨柱在抵抗竖向荷载和抗侧方面均起着非常重要的作用; 斜撑在抵抗竖向荷载时仅起到分担一部分周边柱荷载的作用, 但其对结构抗侧起着十分重要的作用; 腰桁架及其相关楼盖结构在协调斜撑抵抗竖向荷载和抗侧时起着重要的作用; 周边柱主要传递一定范围内楼层的竖向荷载, 其传递的荷载有的落在腰桁架上, 有的落在斜撑上, 均传至底部落在基础上。

3.3 竖向荷载楼板面内应力分析

核心筒与周边柱之间全部楼板采用钢筋桁架组合楼板, 普通楼层楼板厚度为 110mm, 核心筒内为普通混凝土楼板, 板厚 150mm。设备层位于 16 ~ 17 层、29 ~ 31 层和 43 ~ 44 层, 板厚为 200mm, 核心筒内为普通钢筋混凝土楼板, 板厚为 200mm。楼板混凝土强度等级为 C35, 抗剪栓钉直径 19mm、长 100mm。由于结构最外凸的楼层在第二道腰桁架的下弦 29 层, 巨柱与斜撑均在此层转折, 故在自重作用下楼板的拉应力最大, 现选取 29 层楼板进行应力分析。

本工程使用 MIADS/Gen 软件建立全楼弹性楼板模型, 计算楼板在竖向荷载及水平荷载作用下的应力。楼板的性能目标见表 1。

楼板性能目标		表 1
工况	性能指标	
小震/100 年风荷载	楼板弹性, 混凝土不开裂	
中震	抗拉钢筋不屈服	
大震	抗拉钢筋不屈服、抗剪不屈服	

(1) 楼板拉应力过大的原因分析

由图 4 北立面可知, 本工程立面外凸, 从 1 ~ 29 层东侧斜柱逐渐往东倾斜, 29 ~ 屋面层东侧斜柱反过来逐渐往西倾斜, 导致自重作用下, 斜柱水平向分力外推使得楼板受拉, 产生较大的楼板拉应力。立

面斜撑交汇处产生的外推力也会使楼板局部产生较大的楼板拉应力。东侧斜柱转折处的楼层为第二道腰桁架的下弦层, 即 29 层受斜柱外推力最大, 29 层在自重作用下的楼板最大主应力见图 6。

由图 6 可见, 在自重 $D+L$ 作用下, 29 层最大主应力大的位置集中在四个角部, 受东侧斜柱外推的影响, 东侧大范围楼板应力在 3.3MPa 左右, 大于 C35 混凝土轴心抗拉强度标准值 2.2MPa, 即在自重作用下东侧楼板就会开裂, 而其余部位楼板应力不大, 核心筒内楼板应力也不大。四个角部巨柱局部范围内应力集中, 这些局部楼板位于巨柱之内, 并非真实楼板, 在设计中可以忽略。

(2) 楼板应力分布情况

在自重 $D+L$ 作用下, 楼板拉应力比较大的楼层集中在第一、二道腰桁架的楼层及相邻往下一层, 即 15 ~ 17, 28, 29, 31 层。其中拉应力主要集中在四个角部, 其中南北角部、西侧角部一般都是小范围内应力集中, 而 15, 16, 29 层东侧角部大面积受拉。

第三道腰桁架楼层、其他普通楼层除了斜撑与楼板交汇处应力集中外, 其余部分楼板应力都小于 1MPa。

楼板应力分析表明, 楼板存在局部应力集中的现象, 特别是斜撑与楼板交汇处, 现对局部应力集中处进行分析。取 19 层南侧支撑与楼板交汇处的单元进行分析, 该单元的应力最大, 为 8.3MPa, 见图 7。由于网格尺寸为 3m, 对网格进行了细分, 将其局部划成 1m 的网格, 其南侧支撑与楼板交汇处应力见图 8, 其局部最大应力为 10.9MPa, 取此单元内力积分出的拉力为 239kN, 手算其应力为 2MPa。所以楼板应力分析并不仅需关注局部应力集中处的应力, 还需关注应力大、分布广的楼板区域。楼板主应力分布情况见表 2。

$D+L$ 作用下楼板主应力分布 /MPa				表 2
层数	西侧角部	东侧角部	南北侧角部	
15	0.3	2.8(大范围)	3.0	
16	2.3	3.5(大范围)	4.4	
17	0.2	4.4	2.5	
28	1.8	2.9	1.3	
29	2.6	3.5(大范围)	2.0	
31	0.6	3.0	3.6	

由表 2 楼板应力分布数据可知, 在自重作用下, 有些楼层楼板局部应力大于 C35 混凝土抗拉强度标准值 2.2MPa, 当楼板应力超出较多且范围大时, 在正常使用条件下楼板就会出现裂缝。

不同楼层楼板应力不相同, 对于全楼来说, 在自

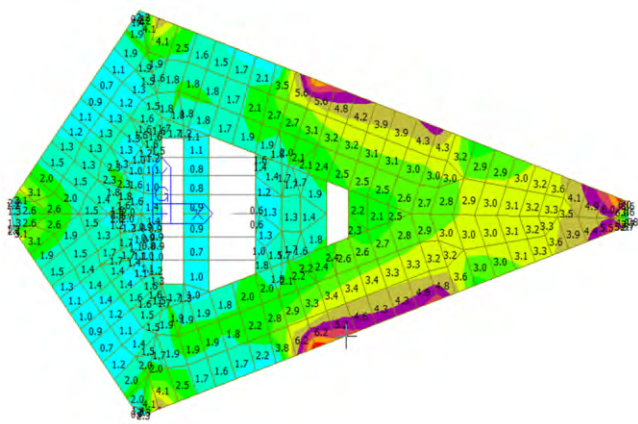


图6 D+L作用下腰桁架下弦(29层)最大主应力/MPa

重作用下拉应力大的楼层集中在第一、二道腰桁架之间的楼层及相邻几层,即16~17层、29~31层及相邻几层。其他普通楼层除与斜撑交汇处,除局部楼板应力集中外,楼板应力都不大。

同一个楼层拉应力分布也不是均匀的,拉应力大的位置主要集中在四个角部,与支撑的位置有关,且拉应力比较大的范围是局部的。

3.4 采用“放”、“抗”结合措施

由于本工程在自重作用下楼板应力较大是由斜柱外推水平力、立面斜撑交汇处的水平力引起的。经分析,仅靠加强楼面内梁的刚度或加平面支撑等“抗”的办法减小楼板拉应力的效果不明显。

经过多方案的比较分析,结合楼板应力分布的特点:不同的楼层拉应力不同,同一楼层拉应力分布不均匀,且拉应力大的部位是局部的,采用“放”、“抗”结合的措施是较为有利的。“放”的措施:即对腰桁架及相邻几层楼板应力大的部位,进行局部后浇,以释放其楼板拉应力;整体分析采用弹性楼板,分析表明,通过部分释放楼板应力对整体影响甚微,可以忽略。“抗”的措施:对其他与斜撑交汇处的楼板进行局部配筋,来抵抗局部较大的拉应力。

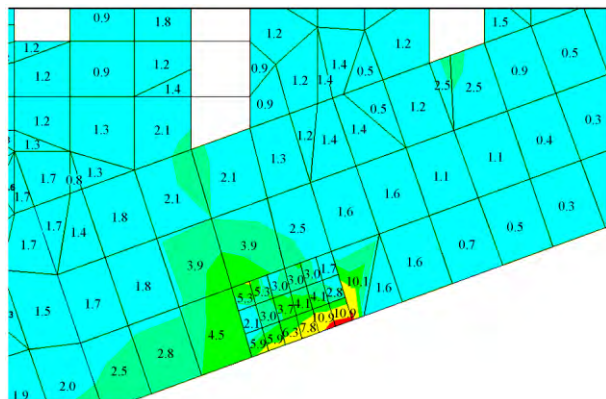


图8 19层网格细分后最大主应力/MPa

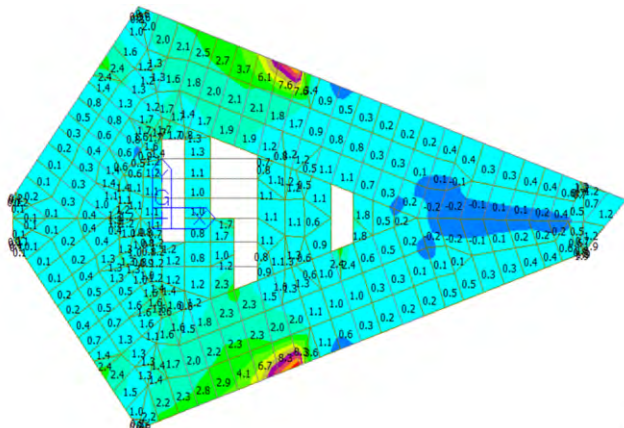


图7 19层最大主应力/MPa

(1) 楼板自重作用下局部楼板后浇层应力分析
楼板上承受的恒载分为楼板自重 $D1$ 和附加恒载 $D2$ 两部分,局部后浇的方法只能释放楼板自重 $D1$ 所产生的楼板应力,故以下列出了楼板在自重 $D1$ 作用下的最大主应力分布图。经多方案比较,确定了后浇楼层及后浇部位,后浇楼层为14~18、28、29、31层,共8层。各层楼板后浇的位置(阴影区域)见图9~11。

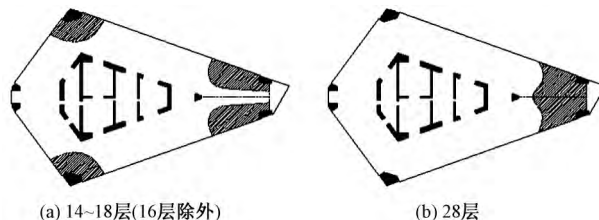


图9 14~18层(16层除外)、28层楼板后浇位置

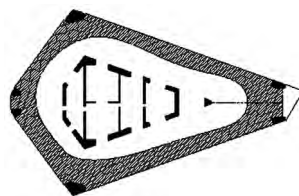


图10 16层楼板后浇位置

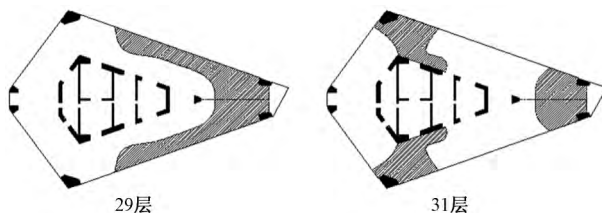


图11 29、31层楼板后浇位置

限于篇幅,下面只列出斜柱转折处第二道腰桁架下弦(29层)最大主应力图,见图12。由图12可知,楼板局部后浇后,在楼板自重 $D1$ 作用下,除小

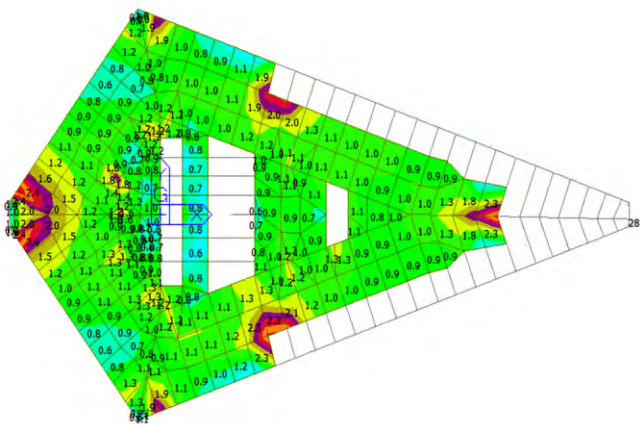


图 12 D1 作用下腰桁架下弦(29 层) 最大主应力/MPa

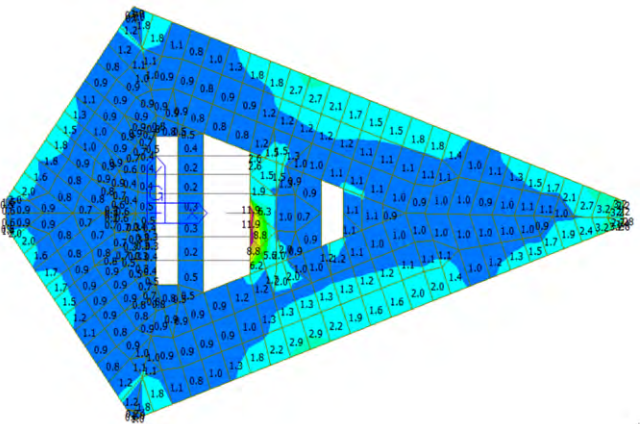


图 13 其余荷载包络作用下腰桁架下弦(29 层) 最大主应力图/MPa

范围应力集中外,绝大部分最大主应力小于 1MPa ,说明对本工程而言,楼板局部后浇的方法是合理可行的,而且较为有效。

浇筑混凝土楼板时,特定的部位可先不浇,待整体结构封顶后,再后浇空缺的楼板。计算分析时,按如下方法考虑:对去除部分楼板的模型,仅提取楼板自重 D1 作用下的楼板应力;对整体模型,读取附加恒载 D2、活载、风荷载及地震作用组合的楼板应力,然后将两者相加,即为考虑楼板后浇后楼板的应力。

(2) 小震/100 年风荷载作用下楼板应力分析

该结构在小震/100 年风荷载作用下楼板组合工况见表 3。在其余荷载组合包络作用下腰桁架下弦 29 层楼板的最大主应力分布见图 13。将恒载产生的应力与其余荷载组合的包络应力相加,部分楼层应力结果汇总于表 4。

组合工况表 3

组合工况	荷载分项系数			
	恒载 D1 + D2	活载 L	风荷载	地震作用
恒载 + 活载 + 风荷载	1.0	0.5	1.0	—
恒载 + 活载 + 地震作用	1.0	0.5	—	1.0
恒载 + 活载 + 风荷载 + 地震作用	1.0	0.5	0.2	1.0

楼板最大主应力分布/MPa表 4

层数	西侧角部	东侧角部	南北侧角部
14	0.8	0.9	1.9
15	1.3	1.2	1.7
16	2.3	1.5	1.9
17	1.2	2.1	1.9
18	0.5	1.4	1.5
28	1.7	1.5	1.5
29	1.9	2.1	1.9
31	1.4	2.3	2.8

由表 4 可知,楼板绝大部分区域的最大主应力值小于 C35 混凝土轴心抗压强度标准值 2.2MPa ,部

分楼板应力超出 2.2MPa 时,应加强配筋。

3.5 混凝土收缩徐变对楼板应力的影响

巨柱与核心筒墙混凝土的徐变,将导致周边柱与斜撑等构件内产生应力,因而于楼板内也将产生相应的水平应力。考虑收缩徐变,按施工顺序逐层生成模型。施工完成 6 年后,由巨柱、核心筒等构件的收缩徐变引起的楼板应力在东西侧角部处相对较大,但其值小于 0.3MPa。即收缩徐变使东西侧角部楼板应力增大,但增大量小于 0.3MPa,可知收缩徐变对楼板应力影响不大。

3.6 楼板配筋设计

结合上述分析和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010) [1]、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) [2] 楼板配筋设计如下:限于篇幅,现仅给出 29 层东侧楼板配筋计算结果,见图 14 中阴影部分。

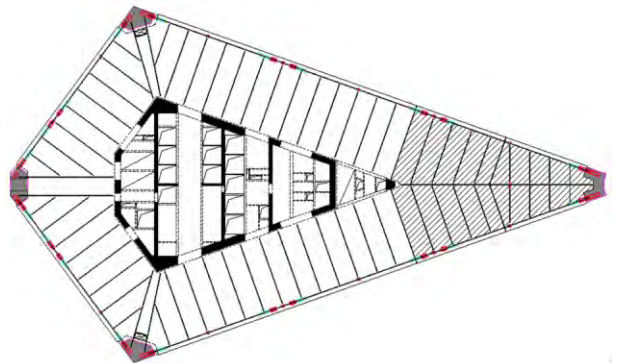


图 14 29 层东侧楼板配筋位置图

(1) 小震/风荷载作用下抗拉钢筋弹性,配筋计算结果见表 5。垂直于外框梁方向平衡轴力所需要的计算配筋为 97mm²/m,由于楼板与外框梁铰接,不考虑平衡弯矩所需要的配筋。平行于外框梁方向平衡轴力所需要的计算配筋为 1 185mm²/m,平衡弯

小震/风荷载作用下楼板配筋/(mm²/m) 表 5

工况		自重	小震/风荷载	合计
垂直外框梁方向	轴力	84	13	97
	弯矩	0	0	0
	总配筋			97
平行外框梁方向	轴力	1 035	150	1 185
	弯矩	69	7	76
	总配筋			1 261

矩所需要的配筋为 76mm²/m,故总配筋为 1 261 mm²/m。该区域楼板双层双向实配为 Φ 14@100 ($A_s = 1 539\text{mm}^2/\text{m}$) ,满足要求。

(2) 中震抗拉钢筋不屈服,配筋计算结果见表 6。垂直于外框梁方向平衡轴力所需要的计算配筋为 108mm²/m。平行于外框梁方向平衡轴力所需要的计算配筋为 1 199mm²/m,平衡弯矩所需要的配筋为 69mm²/m,故总配筋为 1 268mm²/m,满足要求。

中震作用下楼板配筋/(mm²/m) 表 6

工况		自重	中震	合计
垂直外框梁方向	轴力	74	34	108
	弯矩	0	0	0
	总配筋			108
平行外框梁方向	轴力	914	285	1 199
	弯矩	61	8	69
	总配筋			1 268

(3) 大震抗拉钢筋不屈服,配筋计算结果见表 7。垂直于外框梁方向平衡轴力所需要的计算配筋为 145mm²/m。平行于外框梁方向平衡轴力所需要

大震作用下楼板配筋/(mm²/m) 表 7

工况		自重	大震	合计
垂直外框梁方向	轴力	74	71	145
	弯矩	0	0	0
	总配筋			145
平行外框梁方向	轴力	914	546	1 460
	弯矩	61	16	77
	总配筋			1 537

的计算配筋为 1 460mm²/m,平衡弯矩所需要的配筋为 77mm²/m,故总配筋为 1 537mm²/m,满足要求。

3.7 楼板连接设计

核心筒周边楼板大震抗剪不屈服。核心筒周边楼板实配钢筋为 Φ 14@100 ($A_s = 1 539\text{mm}^2/\text{m}$) ,附加 Φ 10@100 ($A_s = 785\text{mm}^2/\text{m}$) ,双层双向布置。限于篇幅,仅验算东南侧核心筒附近楼板。抗剪截面验算:剪力为 770kN/m,抗剪承载力为 936kN/m,满足截面要求。配筋验算:剪力为 770kN/m,钢筋抗剪承载力为 830kN/m,抗剪钢筋满足要求。

楼板与外框梁抗剪栓钉大震抗剪不屈服。布置栓钉 Φ 19@150,限于篇幅,仅验算东南侧楼板与外框梁栓钉抗剪。栓钉抗剪验算:剪力为 376kN/m,栓钉抗剪承载力为 794kN/m,抗剪栓钉满足要求。

4 结 论

(1) 目前楼板设计时只考虑楼板本身的竖向荷载引起的面外弯矩,而对于带倾斜构件高层建筑结构,在自重作用下楼板需要承担斜构件在水平向的分力。通过上述实例配筋结果可知,由自重引起的配筋量所占的比重比较大,配筋设计时必须考虑。

(2) 结合带斜撑巨柱框架-钢筋混凝土核心筒混合结构的华侨城项目,分析了自重作用下斜撑在水平向的拉力引起的楼板应力。给出了“放”、“抗”应对措施。对受外推力最大的 29 层东侧局部楼板进行了配筋计算,并验算了东南侧核心筒周边楼板、楼板与外框梁之间大震抗剪承载力。

参 考 文 献

- [1] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2011.
- [2] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2010.