



某超限高层复杂建筑结构设计与创新应用 ——以全国大学生结构设计信息技术大赛特等奖作品为例

拜桂琴^{1,2}, 高忠虎¹, 高念志^{1,3}

(1. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030; 3. 中国能源建设集团广东火电工程有限公司, 广东 广州 510730)

摘要:为探究超限高层复杂建筑结构的整体性能,以第五届全国大学生结构设计信息技术大赛赛题商住楼结构模型为案例,依据行业相关规范对赛题结构典型的超限情况、抗震设计和结构选型进行探讨,基于可视化 GSCAD 平台,对模型调整结果对比分析,验证对案例建筑结构设计构思的正确性和合理性。结果表明:1)结构超限高层凹凸不规则中的局部不规则处的结构布置对结构整体的位移比影响较大,因此在结构布置时,可反向调整位置,以减小结构位移比;2)优化模型在设定的所有工况下的结构位移角、楼层剪力、弯矩均满足规范限制要求,且位移比均小于 1.5;3)各层的质量、质心和刚度中心沿楼层高度均匀分布;4) x, y 方向楼层侧向刚度比均大于 1.0。

关键词:超限高层复杂建筑; 结构设计; 结构优化; 创新应用; 学科竞赛; GSCAD

中图分类号:TD973+.31

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)09-0035-09

doi:10.13402/j.gcjs.2024.09.118

Structural design and innovative application of an excessive high-rise building

——Taking the grand Prize of national college students' structural
design information technology competition as an example

BAI Guiqin^{1,2}, GAO Zhonghu¹, GAO Nianzhi^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. School of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, Gansu, China;

3. China Energy Construction Group Guangdong Thermal Power Engineering Co, Guangzhou 510730, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the overall performance of the complex building structure of over-limit high-rise buildings, the structural model of the commercial and residential building, which is the topic of the fifth national college students' structural design information technology competition, is taken as a case study, and the typical over-limit situation, seismic design and structural selection of the topic structure are discussed according to the relevant industry norms, and the results of model adjustment are analysed comparatively based on the visualization GSCAD platform. The structural design concept of the case building is verified to be correct and reasonable. The results show that: 1) the structural arrangement at the local irregularity in the concave-convex irregularity of the structurally overloaded high-rise has a greater influence on the overall displacement ratio of the structure, so the position can be adjusted in the reverse direction when the structural arrangement

收稿日期: 2024-02-04

基金项目: 2022 年西北民族大学本科人才培养质量提高项目教育教学改革研究一般项目(2022XJJG-73); 2020 年教育部第二批新工科研究与实践项目(E-TMJZSLHY20202156); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(31920230177)

作者简介: 拜桂琴(2000—), 女, 硕士研究生, 从事结构工程、结构-桩土相互方面的研究。

通信作者: 高忠虎(1985—), 男, 副教授, 从事结构抗震与智能建造方面的研究。

is made to reduce the structural displacement ratio;2) the optimized model meets the requirements of the code limitations for the structural displacement angle, the floor shear and the bending moments at the ground floor in all the set conditions, and the displacement ratios are all less than 1.5;3) the mass, centre of mass, and the centre of stiffness of the floors are uniformly distributed along the The mass, centre of mass and centre of stiffness of each floor are uniformly distributed along the height of the floor;4) the lateral stiffness ratios of the floors in the x and y directions are all greater than 1.0.

Key words: excessive high-rise building; structural design; structural optimisation; innovative application; academic competitions; GSCAD

超限高层建筑是指超出国家现行规范中规定适用高度或结构类型的一类建筑^[1],是当前人们对功能多样、内外都独具特色的建筑一种新的追求,其特点主要表现在建筑高度高、结构体型复杂等方面。国内外众多学者对具体的超限高层建筑结构设计实例进行了研究,如林振杨等^[2-3]对带转换层的超限高层建筑进行了设计分析,分别对全埋地的多层地下室高层建筑的地下室顶板及转换层上下结构选型做出了合理解释;王昕等^[4]对某复杂超限高层建筑悬挂结构进行了设计,指出设计时需考虑悬挂结构的竖向和水平传力路径、施工顺序对拉索受力等的影响;赵建忠等^[5]对苏州龙湖某综合体超限高层进行了结构设计,且主要依据抗震性能化设计方法,根据设定的抗震性能目标对主体结构进行了小震、中震和大震性能计算;KHEIR 等^[6-8]以结构概念设计为基础、力学分析为载体、智能化建造为目标,重在超限高层建筑设计结构整体和关键部位的指标分析。

本文结合第五届全国大学生结构设计信息技术大赛高层商住楼结构模型案例,针对项目超限情况、建筑抗震设计以及结构选型进行分析探讨,对结构模型调整前后具有代表性的部分结果进行对比,旨在提升结构概念设计,解决复杂工程问题,培养创新应用方面给予参考。

1 项目概况

某商住一体的住宅楼建筑,建筑面积约为 49 300 m²,建筑高度为 98.2 m,地上 28 层,地下两层,商业层高为 4.9~6.5 m,住宅层高为 3 m。其中 1~4 层为商业(按人流不少于 5 000 人考虑),5 层为架空层,设置转换梁,6~28 层为住宅;1 层设有 12 间商铺,一道住宅大厅,共 3 个楼梯间,满足商场大人流的通行要求;2~4 层设

17 间商铺,两个楼梯间以及 1 台自动扶梯;6~27 层为住宅塔楼,长度为 42.5 m,宽度为 24.4 m。重要性等级为一级,场地类别为Ⅲ类,抗震设防烈度为 7 度,设计地震分组为第一组,特征周期为 0.45 s,基本风压为 0.6 kN/m²,舒适度基本风压为 0.3 kN/m²,地面粗糙度为 C 类。结构三维模型如图 1 所示。

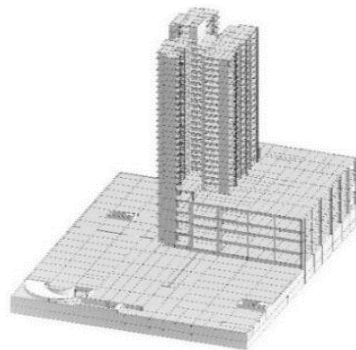


图 1 结构三维模型

2 项目超限情况

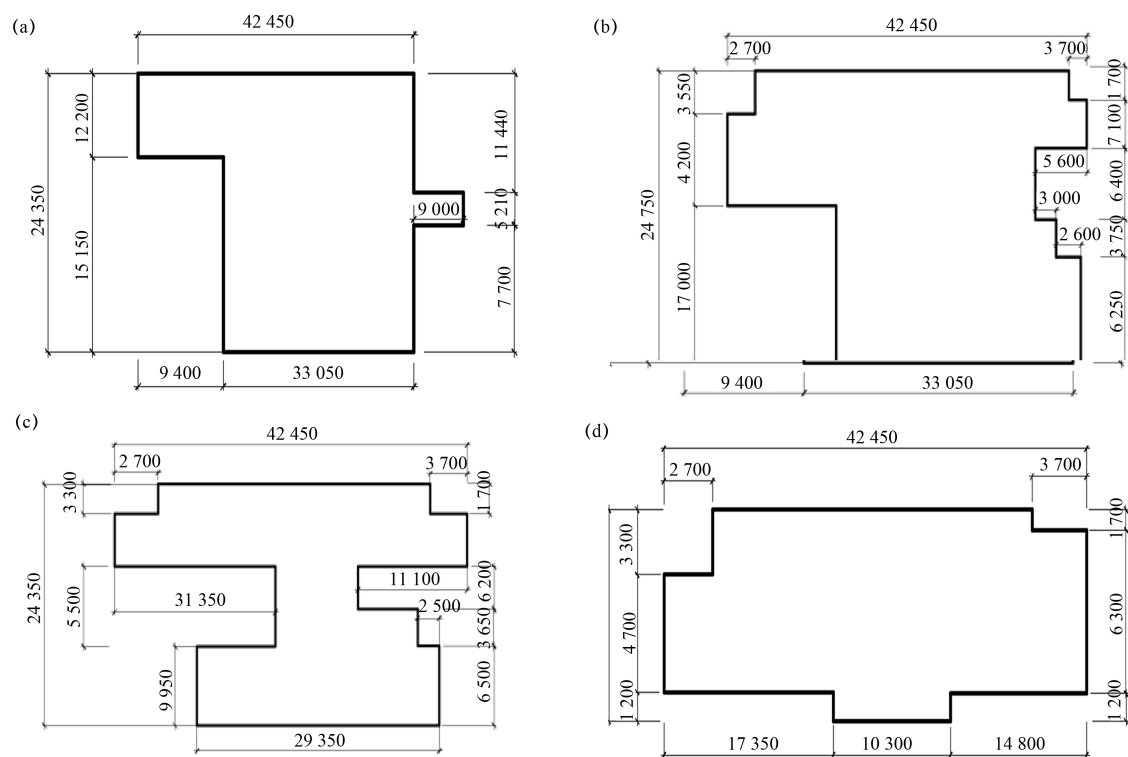
参照《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》中的超限指标对整个结构的超限情况进行判断。

(1) 凹凸不规则:平面凹凸尺寸大于相应边长 30%,在建筑 5、6 层、7~27 层、屋面层存在不同程度的凹凸不规则超限。各层平面简图如图 2 所示,判断公式如式(1)所示。根据计算公式得出结果,如表 1 所示。

$$\sigma = \frac{l}{B_{\max}} < [\sigma_{0.3}] \quad (1)$$

式中: σ 为凹凸不规则判断值; l 为平面凹进尺寸,mm; $B_{\max}$ 为相应投影方向的总尺寸,mm; $[\sigma_{0.3}]$ 为规范规定的限制。

(2) 组合平面:细腰形或角部重叠形,6~27 层为细腰形建筑平面,如图 3 所示。

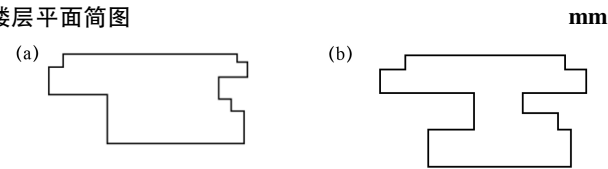


楼层号：(a) 5；(b) 6；(c) 7~27；(d) 屋面层

图 2 凹凸不规则楼层平面简图

表 1 凹凸不规则超限计算结果

楼层号	计算数据	计算结果	超限判断结果
5 层	15 150/23 450	0.62	>0.3
	11 440/23 450	0.47	>0.3
	7 700/23 450	0.32	>0.3
6 层	3 550/24 750	0.14	<0.3
	1 700/24 750	0.07	<0.3
	6 400/24 750	0.26	<0.3
	3 750/24 750	0.15	<0.3
	6 250/24 750	0.25	<0.3
	17 000/24 750	0.69	>0.3
7~27 层	1 700/23 450	0.07	<0.3
	6 200/23 450	0.25	<0.3
	3 650/23 450	0.15	<0.3
	6 500/23 450	0.27	<0.3
	9 950/23 450	0.41	>0.3
	3 300/23 450	0.14	<0.3
屋面层	7 700/23 450	0.18	<0.3
	7 700/23 450	0.13	<0.3
	7 700/23 450	0.36	>0.3



楼层号：(a) 6；(b) 7~27

图 3 组合平面超限判断简图

3 基本计算参数取值及建筑抗震设计

3.1 基本计算参数

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2015)、《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)等确定基本计算参数的取值。其中，混凝土容重为 25 kN/m³，钢容重为 78 kN/m³，结构重要性系数为 1.0，地震及风荷载结构阻尼比为 0.05，计算舒适度结构阻尼比为 0.02，周期折减系数为 0.90；中梁梁截面高度小于 800 mm 时的刚度放大系数为 2.0，大于等于 800 mm 的刚度放大系数为 1.5；恒荷载系数为 1.3，活荷载系数为 1.5。

3.2 结构抗震设计

建筑结构的抗震等级直接影响钢筋混凝土结构构件的内力、轴压比以及配筋率等参数^[9]。因此在

确定抗震等级时,先根据《建筑工程抗震设防分类标准》确定抗震设防类别,再结合《高层建筑混凝土结构技术规程》和《建筑抗震设计规范》确定不同层构件的抗震等级。负 2~4 层主体结构部分为重点设防区域,人流量大于 5 000,为乙类抗震设防,其余部分按丙类。抗震等级判断时,负 1~2 层非主体结构部分为非加强层,按二级抗震设防;主体结构负二层为加强层,按一级抗震设防;主体结构负 1~4 层为结构加强层,按特一级抗震设防;5~7 层为转换部位加强层,按一级抗震设防,其于部分按为非加强区域,按二级抗震设防。具体工程建筑抗震设防分类及抗震等级示意如图 4 所示。

4 结构选型及控制指标分析

4.1 结构选型分析

高层建筑结构体系的选择不仅要充分考虑建筑的使用功能,还应考虑建筑的安全性以及规范的相关要求。常见的建筑结构体系有框架、框剪、框架支撑、剪力墙、筒体、部分框支剪力墙、板柱剪力墙等。选择结构体系时,需充分结合规范的限制条件及建筑功能的限制条件^[10-11]。

项目建筑布置较为复杂,地下停车场及商业功

能区需要满足较大建筑空间的要求,而上部结构为住宅楼,对建筑空间要求较小,且其柱网尺寸有一定的变化,故上下部结构需设转换构件过渡。下部结构空间大,宜设置为框架结构,但全部设置为框架结构,为托起上部结构,在转换层需设置较多的转换构件,进而使转换层重量增加、建筑整体质心上移,甚至导致转换层上下刚度比出现不满足规范要求的情况。同时,建筑高度较高,若使用纯框架结构,结构的抗震性能及承载能力有限,所以下部结构需增加部分剪力墙结构^[12]。

将剪力墙均匀布置且中心区域剪力墙落地贯通形成核心筒的形式,并将建筑质心向中心偏移以提升建筑整体的稳定性。转换层以下结构选择巨型柱支撑且布置规则要求有效减小结构扭转位移比。考虑到较多的竖向构件需要放在转换构件上,转换层以上结构采用剪力墙结构,不仅能有效解决受剪破坏问题,还能增加结构整体的侧向刚度,从而更好地抵抗地震作用。综合考虑,结构体系选型为部分框支剪力墙结构,结构采用整体现浇^[13-15]。转换层下部结构,标准层平面及转换层上部结构平面示意如图 5~7 所示。

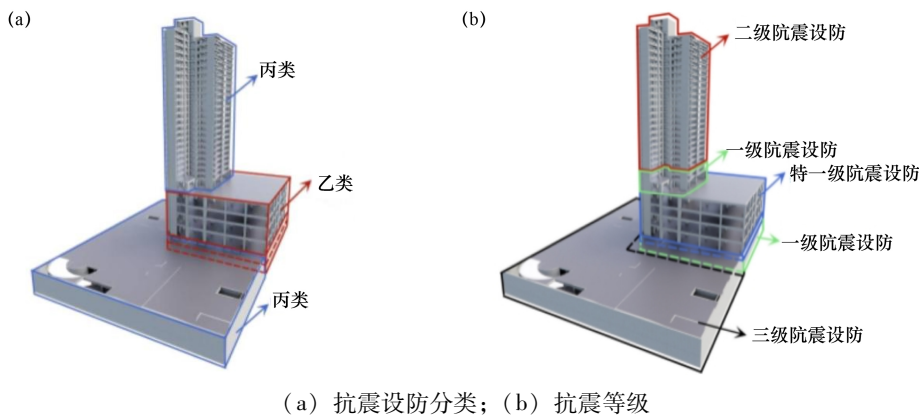


图 4 建筑抗震设防分类及抗震等级示意

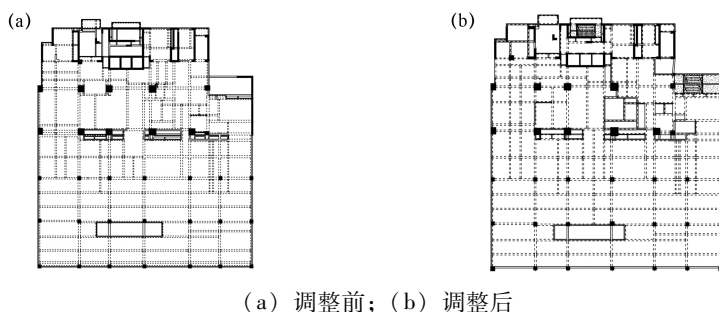


图 5 转换层下部平面

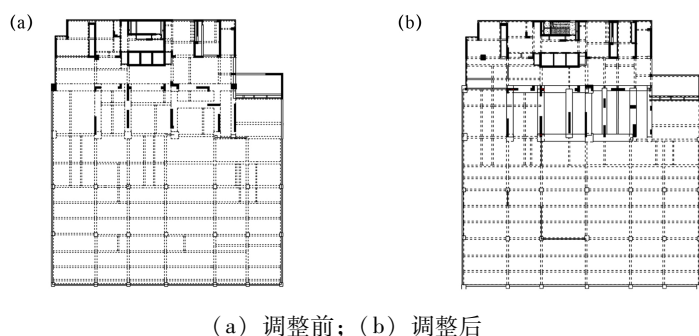


图 6 转换层平面

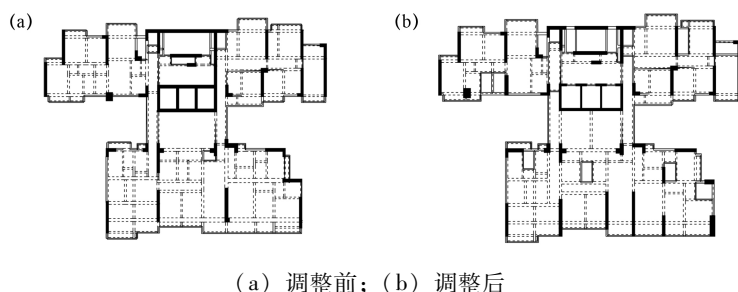


图 7 转换层上部平面

4.2 控制指标分析及解决方法

4.2.1 指标控制

基于结构设计软件 GSCAD 对主要指标进行控制和调整, 以保证各项指标满足规范要求。设计主要控制参数: 1) 楼层重量、单位面积重量用于检查荷载是否存在整体错漏, 或用于判断结构的合理性; 2) 质心、刚心、周期比、位移比、偏心率表征结构的扭转; 3) 侧向刚度比、楼层承载力比值表征结构竖向布置的均匀性; 4) 结构位移、位移角表征结构侧向刚度, 控制水平力作用下的位移; 5) 轴压比表征结构构件的延性; 6) 刚重比、剪重比表征结构整体稳定性。

4.2.2 解决方法

(1) 为营造大跨度大空间建筑, 采用井字梁搭接的方法减小梁高^[16]。针对较短梁和跨高比小于 5 的梁超限, 应减小梁两侧结构的刚度或尽量避免出现或保证梁截面足够的情况下减小梁的高宽比。当框架梁梁高与梁宽已按经验值取值, 但板上荷载较大导致梁超限时, 应优化板上荷载的传力路径, 减少传递至超限梁上, 即优化板的划分情况或在不影响建筑使用功能的情况下增大梁高与梁宽。

(2) 为避免影响建筑使用功能, 宜采用梁托墙的转换形式或使用型钢混凝土转换梁, 优化转换梁上下的结构布置, 使上荷载的传力途径尽量

传到落地竖向构件上或优化转换梁上部结构的布置使得转换梁不会出现较多的集中力。当结构位移角、位移比超过规范限值时, 优化上下结构布置情况, 尽量保证结构上下质量、刚度突变不会过大, 缩小上下层的质心、刚心、偏心距, 使得结构整体布置较均匀或通过 GSCAD - GASSP 图形方式查看位移较大的位置并加强相应位置的构件。

5 结构计算分析

为分析结构在各工况下的响应指标, 工况设定及分类情况如下。

(1) 恒荷载: 重力类恒荷载为结构自重、装修等计入质量的恒荷载; 重力类恒载为预应力荷载等不计入质量的恒荷载; 非重力类恒载为土侧压力、水侧压力和水浮力荷载等不计入质量的恒荷载。

(2) 可变荷载: 重力活载为规范定义的楼面活荷载, 计入质量; 吊车荷载、雪荷载计入质量; 风荷载可考虑 8 个水平方向; 温度分为升温 and 降温。

(3) 地震作用: 可考虑 8 个水平方向和一个竖向; 偶然偏心地震作用可考虑 8 个水平方向。

(4) 人防荷载: 人防等效静力荷载。

(5) 施工荷载: 施工等效静力荷载。

(6) 消防荷载: 消防等效静力荷载。

(7) 各荷载组合系数参照 GB 50009—2012 中的规定。

5.1 位移角

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)第 5.5.1 条和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)第 3.7.3 条规定,当高度不大于 150 m 时,对于框架-剪力墙结构而言,楼层层间最大位移与层高之比的限值取 1/800,剪力墙取 1/100,除框架结构外的转换层取 1/1 000。地震作用下的位移角曲线如图 8 所示。由图 8 可知:项目调整后,所有工况下的最大层间位移角均满足规范要求。

5.2 位移比

根据 GB 50011—2010 第 3.4.3 条可知,位移

比大于 1.2 为扭转不规则。根据 JGJ 3—2010 第 3.4.5 条可知,考虑偶然偏心影响的规定水平地震力作用下,A 级高度高层建筑位移比不宜取 1.2,且不应大于 1.5。地震作用和风荷载作用下的位移比曲线如图 9 所示。由图 9 可知:项目调整后,所有工况下的位移比均满足规范要求。

5.3 质量、质心和刚度中心

(1) 根据 GB 50011—2010 第 3.5.6 条的规定,楼层质量应沿高度均匀分布,楼层质量不宜大于相邻下部楼层的 1.5 倍。楼层质量比曲线对比如图 10 所示。由图 10 可知:项目在调整后的整体楼层质量比满足相关规范要求。

(2) 根据 JGJ—2010 第 3.4.3 条规定,该层

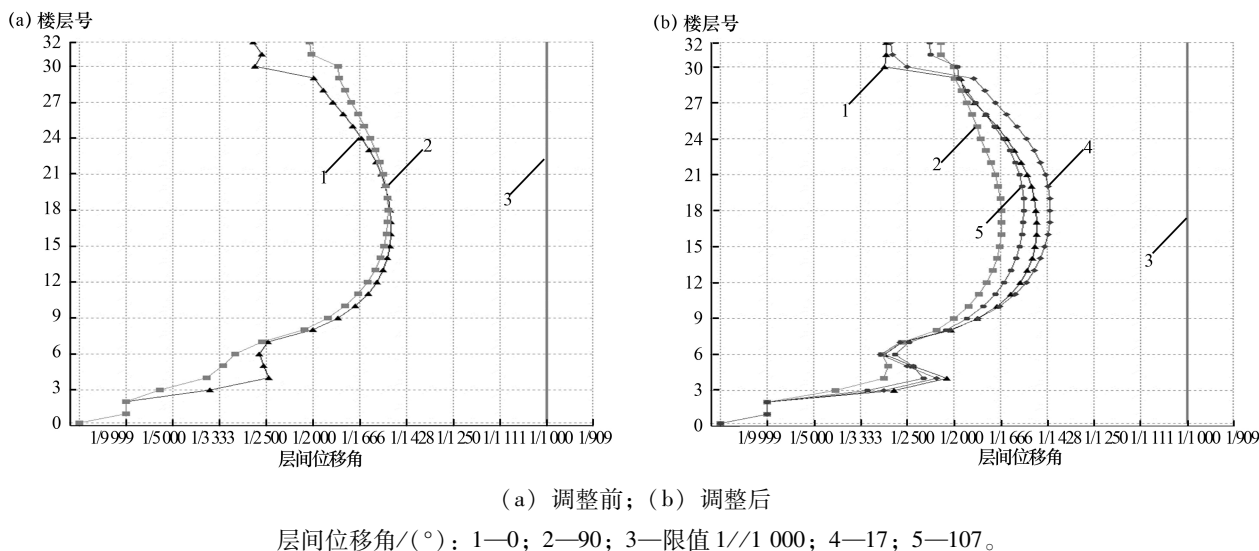


图 8 地震作用下的层间位移角曲线

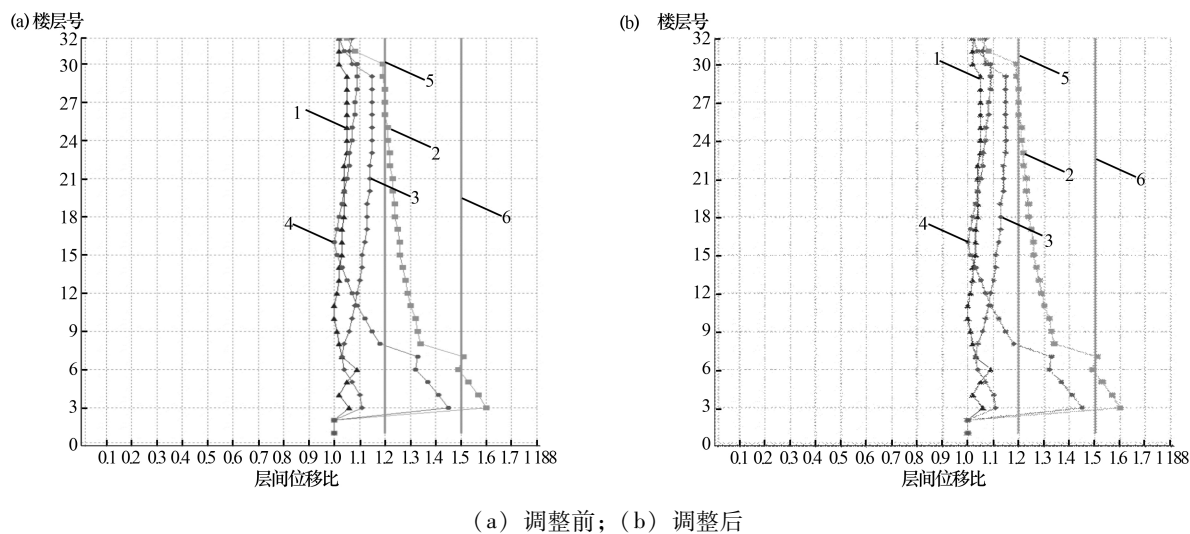


图 9 结构层间位移比曲线

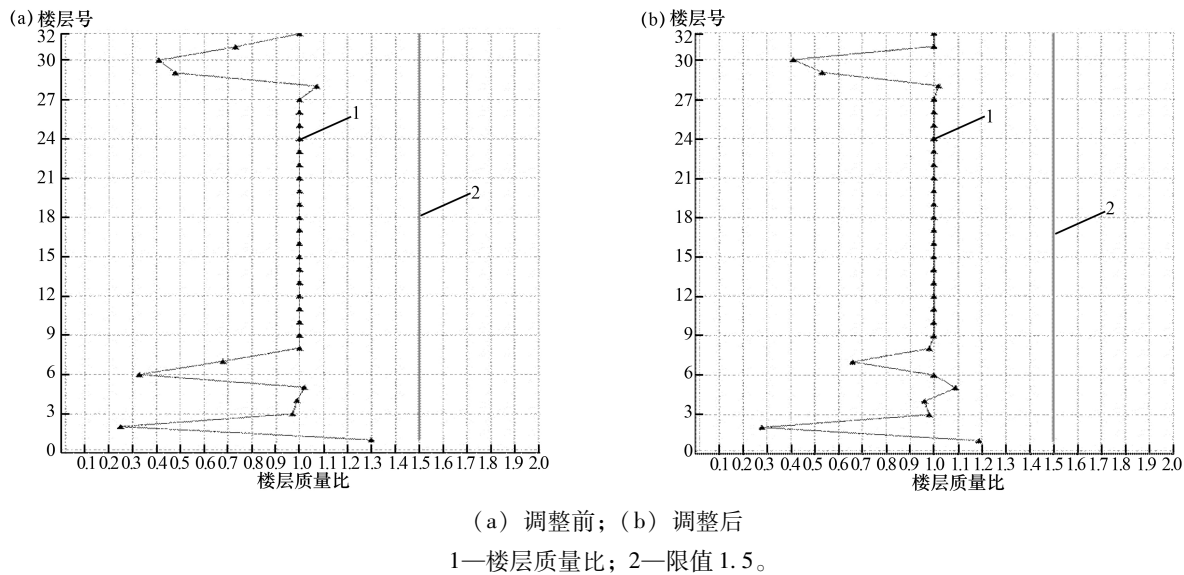


图 10 楼层质量比曲线对比

的侧向刚度小于相邻上一层的 70%，或小于其上相邻 3 个楼层侧向刚度平均值的 80% 时，为侧向刚度不规则。GB 50011—2010 第 3.5.2 条规定，对框架结构，其楼层与相邻上层的侧向刚度比值不宜小于 0.7，与相邻上部 3 层刚度平均值的比值不宜小于 0.8。楼层侧向刚度比曲线对比如图 11 所示。由图 11 可知：项目调整后，楼层侧向刚度比满足规范要求。

(3) 根据 GB 50011—2010 第 5.2.5 条要求，0°、90°方向楼层最小剪重比分别为 1.60、1.84。楼层剪重比曲线对比如图 12 所示，地震二次项组合方法(Complete quadratic combination, CQC)下的

层剪力及弯矩曲线对比分别如图 13、14 所示。由图11~13 可知：项目调整后，楼层剪重比满足要求。

6 结 论

(1) 当高层建筑结构复杂且超限情况较多时，可通过超限情况的定量分析并结合结构抗震整体设计优化结构的各项指标。结构超限高层凹凸不规则中的局部不规则处的结构布置对结构整体的位移比影响较大，因此在结构布置时，可反向调整位置，以减小结构位移比。

(2) 抗震设防类别和抗震等级的确定对结构

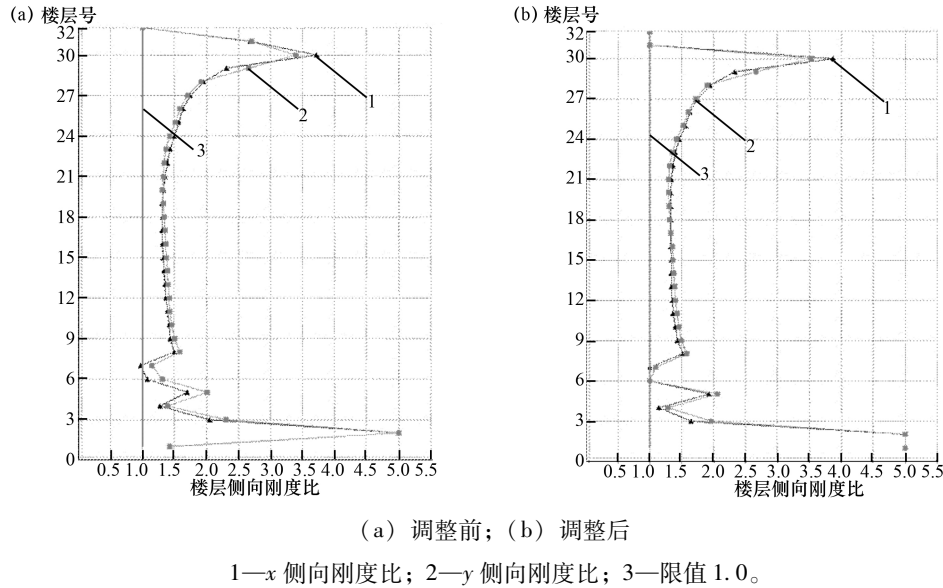
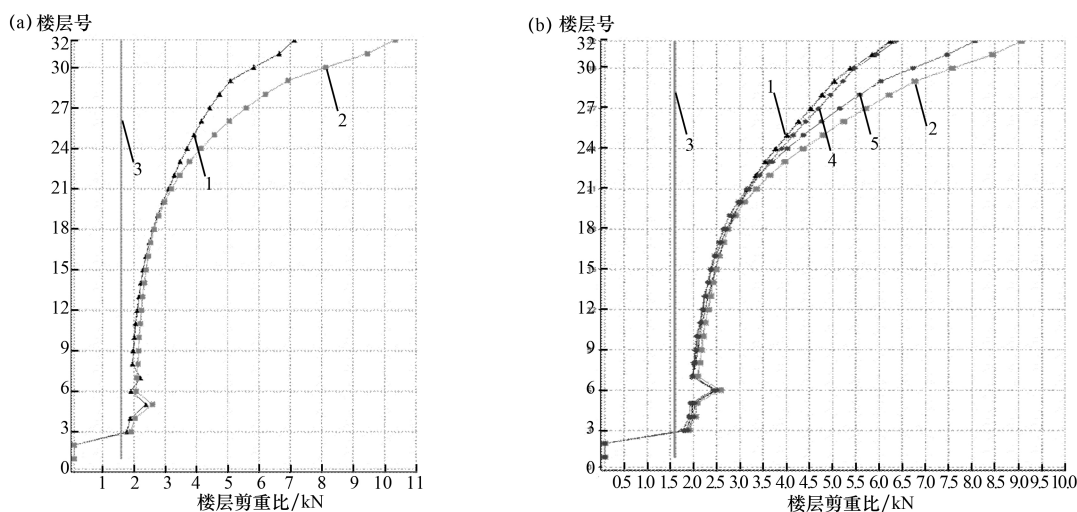


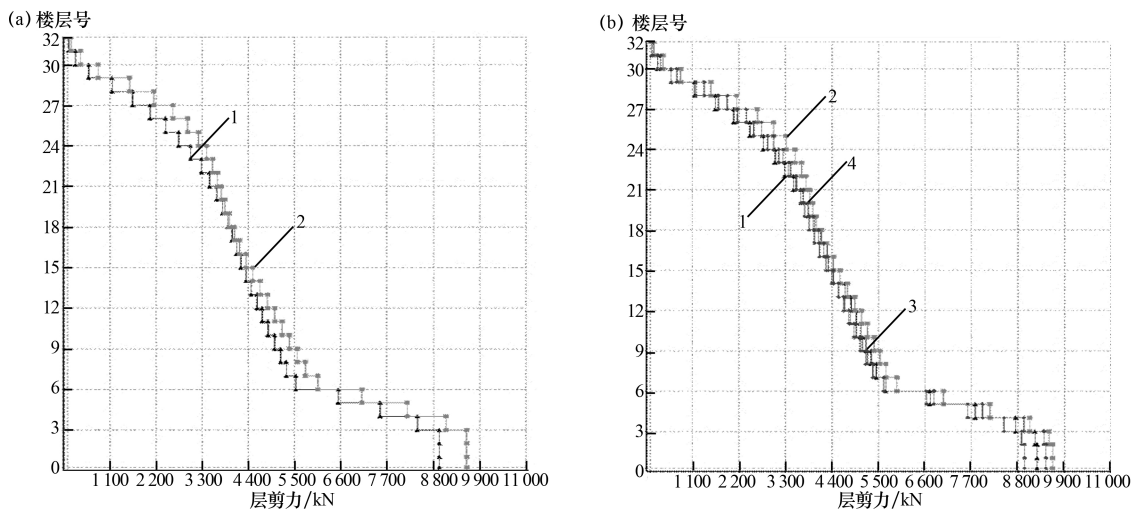
图 11 楼层侧向刚度比曲线对比



(a) 调整前; (b) 调整后

层间位移角/(°): 1—0; 2—90; 3—限值 1.60; 4—17; 5—107。

图 12 楼层剪重比曲线对比



(a) 调整前; (b) 调整后

层间位移角/(°): 1—0; 2—90; 3—17; 4—107。

图 13 地震作用层剪力曲线

整体布置、构件尺寸、配筋面积以及结构内力有较大影响。结构计算分析应严格按照规范对结构抗震设防类别、抗震等级做出合理判断,必要时,应分段分区考虑。

(3) 优化模型结构在设定的所有工况下的位移角、楼层剪力、弯矩均满足规范限制要求,且位移比均小于 1.5; 各层的质量、质心和刚度中心沿楼层高度均匀分布; x 、 y 方向楼层侧向刚度比均大于 1.0。

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,2010.

- [2] 林振杨. 某转换层位于地下室的高层建筑设计分析[J]. 建筑科学,2018,34(11):140-145.
- [3] 赵松林,朱祖敬,缪嘉荣. 某超高层建筑底部斜柱转换的结构设计与分析[J]. 建筑结构,2020,50(14):40-45.
- [4] 王昕,李保忠,叶小萍,等. 某复杂超限高层建筑悬挂结构设计[J]. 建筑结构,2022,52(19):35-40.
- [5] 赵建忠,郑志刚,王干,等. 苏州龙湖某综合体建筑超限高层结构设计[J]. 建筑结构,2019,49(1):113-119;75.
- [6] KHEIR A. The sustainability of tall building developments: A conceptual framework. buildings [J]. Buildings, 2018, 8(1):7.

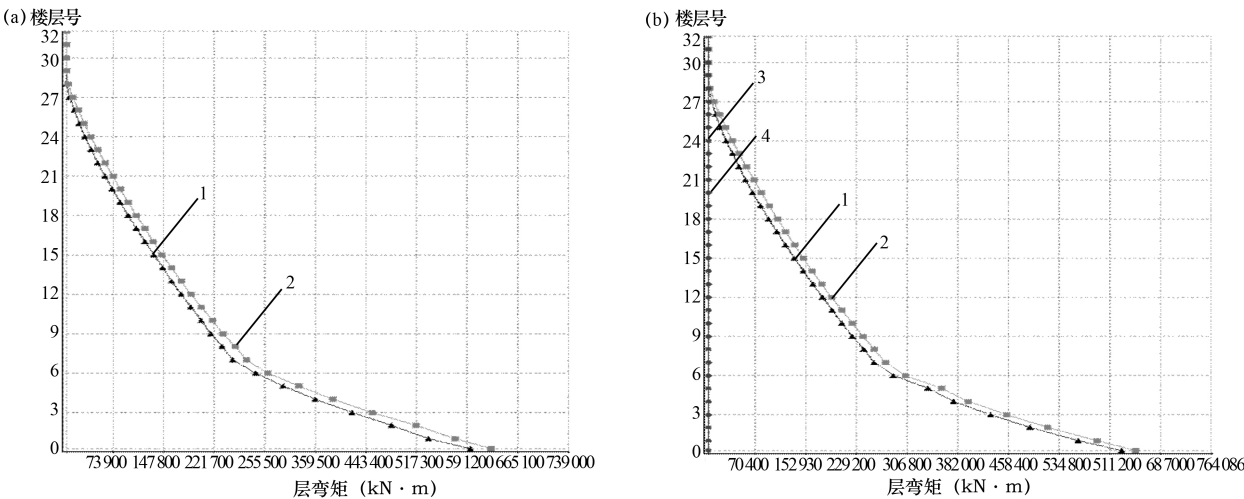


图 14 地震作用层弯矩曲线

[7] GUSAKOVA E. Development of high-rise buildings: digitalization of life cycle management[J]. E3S Web of Conferences, 2018(33):03063.

[8] AVDEEVA E, AVERINAT, KOCHETOVA L. Life quality and living standards in big cities under conditions of high-rise construction development[J]. E3S Web of Conferences, 2018(33):03013.

[9] 陈宇飞, 郝绍金, 马贵红, 等. 超限高层建筑结构抗震设计失效分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(6):175.

[10] 刘凌飞, 周德源. 短肢剪力墙结构体系研究进展[J]. 结构工程师, 2016, 32(2):176-184.

[11] 王爱和. 某复杂超限高层建筑的大跨连体结构设计

[J]. 建筑结构, 2021, 51(20):33-37.

[12] 姚琦. 高层住宅剪力墙结构的优化控制因素探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2007(6):33-37.

[13] 石小燕. 高层剪力墙结构优化设计之探讨[J]. 建筑科学, 2012, 28(7):90-92.

[14] 金雪峰, 于彦召, 方振熊, 等. 茂名金源城超限高层建筑设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(增刊2):25-28.

[15] 陈关平, 张拥军, 王金涛, 等. 竖向构件布置对梁式转换层结构刚度的影响[J]. 结构工程师, 2015, 31(4):47-53.

[16] 赵文文, 祁娜. 剪力墙构件在高层建筑带梁式转换层中的合理布置[J]. 施工技术, 2013, 42(22):94-97.