

青岛海天中心加强层伸臂桁架和腰桁架方案研究

杨俊芬^{1*}, 杨 巽¹, 郭凯源¹, 杨想兵²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 悉地国际设计顾问(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了探讨较大长宽比的超高层框-筒结构加强层数量的确定以及加强层构件的布置, 并得到既满足结构需要, 又能尽量降低加强层引起的结构竖向刚度和内力突变所带来的不利影响的加强层设置方案, 以青岛海天中心 T2 塔楼作为研究对象, 基于 ETABS 软件建立三维结构模型进行分析。在对比了按照传统原则设置的加强层方案和改进方案后, 提出了基于该结构的一种较大长宽比超高层框筒结构加强层的设置原则: 在刚度较小的方向上布置伸臂桁架和腰桁架, 在刚度较大的方向上不布置伸臂桁架, 只在两端跨内布置腰桁架, 这样既能满足结构对侧移和层间位移角的需求, 又能使层间位移角突变和内力突变降低, 同时减小加强层处两个主轴方向的刚度差异, 对结构最有利。

关键词: 大长宽比; 超高层结构; 框架核心筒结构; 加强层; 伸臂桁架; 腰桁架; 内力突变

中图分类号: TU973

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0100-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20231104001

Schematic Study of Outrigger and Waist Truss in Strengthened Stories of Qingdao Haitian Center

YANG Junfen^{1*}, YANG Xun¹, GUO Kaiyuan¹, YANG Xiangbing²

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. China Construction Design International Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

*Corresponding author: yangjfgm@xauat.edu.cn

Abstract: In order to explore the determination of the number of strengthened stories and the arrangement of strengthened story components for super high-rise frame-tube structures with large aspect ratios, and to obtain a strengthened story layout plan that can meet the structural needs while minimizing the adverse effects of vertical stiffness and internal force mutations caused by the strengthened story, the T2 tower of Qingdao Haitian Center is taken as the research object, and a three-dimensional structural model is established based on ETABS software for analysis. After comparing the traditional scheme of arranging strengthened stories with improved schemes, a setting principle of strengthened story of super high-rise frame-tube structure with large aspect ratio based on this structure is proposed. The outrigger trusses and waist trusses are arranged in the direction with low stiffness, while the outrigger trusses are not arranged in the direction with high stiffness, and waist trusses are only set within the end spans. This approach not only can meet the structural demands of lateral displacement and inter-story drift, but also can reduce the abrupt change of inter-story drift and internal force. At the same time, the stiffness difference between the two main axes at the strengthened story is reduced, which is most beneficial to the structure.

Keywords: large aspect ratio; super high-rise structure; frame-core tube structure; strengthened story; outrigger truss; waist truss; sudden change of internal force

收稿日期: 2023-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(52378188)

作者简介:

杨俊芬(1979—), 女, 博士, 教授, 主要从事装配式钢结构建筑、输变电钢结构工程、新型钢结构体系等方面的研究。

E-mail: yangjfgm@xauat.edu.cn。(通信作者)

杨 巽(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式钢结构建筑及结构抗震方面的研究。

超高层建筑对经济、社会的发展起到了积极的促进作用^[1]。与一般建筑不同,超高层建筑的侧向荷载成为了控制因素,抗侧力构件的计算和分析变得十分重要。因此,超高层建筑一直是结构工程研究领域研究的重点^[2]。建筑高度和层数的不断增高为结构设计带来了两大问题:侧向位移过大和核心筒剪力墙承受的弯矩过大^[3]。设置水平加强层是减小高层建筑结构侧移和提高其抗侧移刚度的一种既有效又经济的方法。但是,由于加强层的刚度较大,比其他水平构件的刚度高数十倍^[4],这种不连续的刚度会导致结构沿高度方向的刚度突变,对其抗震性能不利^[5]。

随着对加强层研究的深入,有学者提出用有限刚度加强层来减小结构刚度突变引起的内力突变^[6-7],对加强层的研究逐渐进入了有限刚度领域。近年来,高层建筑结构加强层一般采用钢桁架形式,主要原因是钢桁架加强层在控制结构侧移和减小水平抗侧刚度沿竖向的突变方面具有明显优势^[8]。国内外已就加强层的设置位置与数量进行了广泛研究,并取得了一系列研究成果。1962年,SMITH等^[9-10]首次提出了加强层的概念。BOGGS等^[11]对带加强层的框-筒结构的内力和位移进行了分析,得到了设置一道加强层时的加强层最优位置。彭磊^[12]以深圳某实际工程为基础,通过工程软件的计算分析得到了设置一道和两道加强层时的优化设置位置。

目前国内外学者对带加强层的框架-核心筒结构进行了大量研究,得到了比较完善的研究成果,但仍存在一些不足:现有研究成果大都基于建筑平面长宽比为1:1的结构得出,对于长宽比较大的带加强层的框架-核心筒结构的研究相对较少;对于加强层刚度变化对结构的影响研究,大多通过改变加强层构件的尺寸来实现,而对于改变加强层构件数量引起的刚度变化对结构的影响研究较少。

本文以青岛海天中心T2塔楼作为研究对象,结合工程背景,将有限元分析软件ETABS作为研究工具,通过改变加强层伸臂桁架和腰桁架构件的数量,探讨较大长宽比的超高层框-筒结构加强层数量的确定以及加强层构件的布置,为其他较大长宽比的超高层框架-核心筒结

构体系在加强层的设计和使用时提供参考依据。

1 工程概述

青岛海天中心项目包括3幢超高层塔楼、裙房及5层地下室,-5.700 m标高楼面开洞较少,整体性好,作为上部结构计算的嵌固端,整个项目建筑效果如图1所示。本文所研究的T2塔楼结构高度为369 m,地下5层,地上73层。结构长宽比接近2.0,结构中设置了加强层,采用钢管混凝土框架-混凝土核心筒结构。



图1 T2塔楼建筑效果图

Fig. 1 Architectural rendering of T2 tower

2 结构数值模型

为了得到较大长宽比的超高层框筒结构设置加强层的要点与方法,以青岛海天中心T2塔楼超高层建筑作为研究对象,建立三维结构数值模型。

2.1 模型建立

该塔楼平面形状为南北切角矩形,长边(南北方向, x 向)约为70 m,短边(东西方向, y 向)约为37 m,长宽比约为1.9,结构内筒亦为矩形,尺寸约为38.00 m \times 15.85 m(长度 \times 宽度),内筒长宽比约为2.4;主体结构高度约为330.7 m,整体结构高宽比约为8.9,内筒高宽比则约为20.9。

塔楼结构的数值模型由劲性钢筋混凝土核心筒、外框架和楼面布置组成,如图2所示。

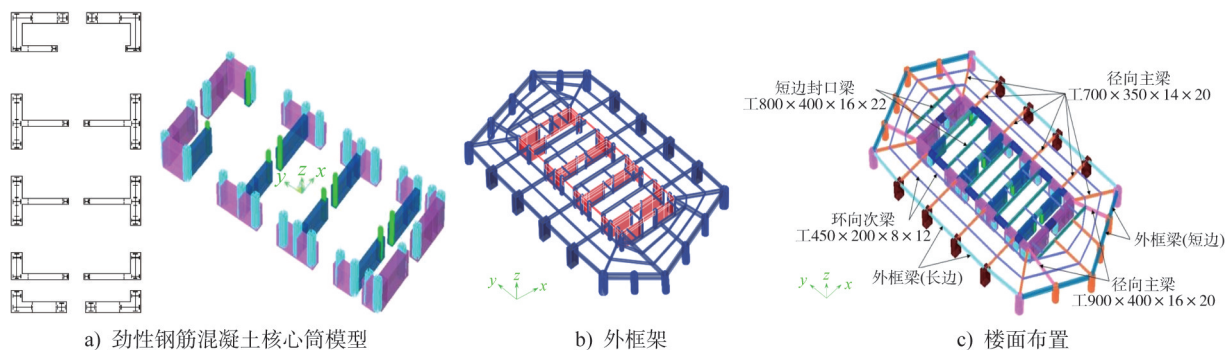


图2 结构数值模型组成

Fig. 2 Composition of structural numerical model

结合实际情况,在保证模拟精度的前提下,为了方便建模和计算,对结构模型进行了合理简化,以提高计算效率。

整体结构模态分析、宏观控制指标均采用刚性楼板假定,结构内力和位移计算采用弹性楼板;将填充墙等非承重构件折算为线荷载计入结构分析,未考虑其对结构刚度的影响;底部柱、剪力墙均视为与地面固接,从受力模型的角度来看,整个结构可视为嵌固于基础上且受侧向荷载作用的悬臂梁。50层以下楼面钢梁与内筒、外框之间铰接;50层及以上东西方向(y 向)楼面钢梁与内筒铰接、外框刚接,南北方向(x 向)楼面钢梁与内筒、外框均铰接。

2.2 结构单元参数

核心筒采用端部内置型钢的劲性钢筋混凝土剪力墙,剪力墙的混凝土等级和厚度如表1所示。其中,T2塔楼69层以上为塔冠,其结构造型特殊,且结构体系与69层以下主体结构体系不同,故未将其列出。

表1 剪力墙的混凝土等级和厚度

楼层	剪力墙厚度/mm	混凝土强度等级	
-5.7 m~7层	外墙	1 400	C60
	内墙	800	
8~19层	外墙	1 200	C60
	内墙	700	
20~29层	外墙	1 000	C60
	内墙	600	
30~39层	外墙	800	C60
	内墙	450	
40~52层	外墙	650	C50
	内墙	400	
53~69层	外墙	500	C40
	内墙	350	

外框架东西两侧框架柱采用矩形钢管混凝土柱,南北两侧框架柱采用圆钢管混凝土斜柱。东西两侧除角柱为圆钢管混凝土柱外,其他均为方钢管混凝土柱,柱间距为10 m,混凝土材料等级为C60,钢材材质采用Q345B,方钢管混凝土柱截面信息如表2所示。南北两侧圆钢管混凝土柱截面信息沿结构竖向高度的变化如表3所示。

外框周边采用宽翼缘工字钢梁,与外框柱刚接,钢材材质采用Q345B,具体截面尺寸如表4所示。

表2 方钢管混凝土柱截面信息

Table 2 Cross section information of concrete-filled square steel tubular columns

楼层	截面尺寸/mm	钢管壁厚/mm	含钢率/%
-5.7 m~10层	1 400×2 200	45	10.3
11~21层	1 200×2 000	40	10.4
22~31层	1 000×1 800	35	10.6
32~69层	800×1 600	30	11.0

注:方钢管混凝土柱截面尺寸为截面总宽度×截面总高度。

表3 圆钢管混凝土柱截面信息

Table 3 Cross section information of concrete-filled circular steel tubular columns

楼层	截面尺寸/mm	含钢率/%	
-5.7 m~10层	角柱	2 000×50	9.75
	翼缘柱	1 600×35	8.60
11~28层	角柱	1 900×50	10.20
	翼缘柱	1 400×30	8.40
29~39层	角柱	1 600×40	9.75
	翼缘柱	1 200×25	8.20
40~50层	角柱	1 400×35	9.75
	翼缘柱	1 000×20	7.80
51~58层	角柱	1 200×30	9.75
	翼缘柱	1 000×20	7.80
59~69层	角柱	1 200×30	9.75
	翼缘柱	800×15	

注:圆钢管混凝土柱截面尺寸为直径×壁厚。

表4 外框梁截面尺寸

Table 4 Cross section dimensions of outer frame beam

楼层	截面尺寸/mm	
-5.7 m~25层	短边	1 100×600×20×40
	长边	700×400×14×28
26~69层	短边	900×600×16×40
	长边	700×400×14×28

注:外框梁截面尺寸为截面总高度×截面总宽度×腹板厚度×翼缘厚度。

楼面采用径向主钢梁+环向次钢梁+现浇混凝土楼板的组合楼盖体系,钢材材质均采用Q345B,楼板采用120 mm厚的钢筋混凝土楼板,材料等级为C30,楼面主次梁截面尺寸如表5所示。

表5 楼面主次梁截面尺寸

Table 5 Cross section dimensions of primary and secondary floor beams

楼层	截面尺寸/mm	
-5.7 m~50层	短边主梁	700×300×14×28
	长边主梁	900×400×20×28
	环向次梁	550×200×8×14
51~69层	短边主梁	900×500×20×35
	长边主梁	700×300×14×28
	环向次梁	550×200×12×16

注:楼面主次梁截面尺寸为截面总高度×截面总宽度×腹板厚度×翼缘厚度。

2.3 结构单元选择

ETABS软件可根据分析目的针对不同构件选择不同的单元类型:“Frame单元”用于模拟框架,包括主梁、次梁、柱和支撑等,“Shell壳元”用于模拟剪力墙,“Membrane膜元”用于模拟楼板。

3 传统原则设置加强层

传统原则设置即在加强层全楼层平面内双向对称设置。在青岛海天中心T2塔楼三维结构分析模型的基础上,采用伸臂桁架和腰桁架相结合的形式,按传统原则在适当位置设置加强层。通过对5种方案模型进行模态分析和多遇地震下的振型分解反应谱分析,研究了按传统原则设置不同数量的加强层对结构周期和变形的影响,以及竖向刚度突变对结构内力的影响。通过对上述数据的综合处理与对比分析,确定该结构最适宜布置的加强层数量,并揭示较大长宽比的超高层框筒结构在按传统原则设置加强层时存在的不足。

3.1 加强层方案的确定

对于一幢建筑物需设置多少道加强层为宜,规范并未给出明确的规定。结合建筑避难层的位置(5、16、27、38、49&49M、57、69层为避难层)以及建筑功能的最大化利用,确定了5种不同数量的加强层设置方案,如表6所示。

3.2 加强层最适宜数量的确定

在ETABS软件中对方案1~方案5的结构模型进行分析,得到如下结论。

(1) 周期:如图3所示,设置加强层使结构自振周期减小,对低阶振型影响较大,对高阶振型影响较小,对周期的影响效果随着加强层数量的增加逐渐减弱,第1道加强层的周期减小效果最为显著。

(2) 变形:如图4~7所示,设置加强层能够显著减小

表6 加强层设置方案

Table 6 Setting schemes of strengthened story

方案	加强层数量	加强层位置	加强层形式
1	0	无	无
2	1	38层	
3	2	27层、49&49M层	伸臂桁架和腰桁架
4	3	27层、38层、49&49M层	腰桁架
5	4	27层、38层、49&49M层、57层	

注:49&49M层构成双层加强层,指同一加强层体系的上下层。

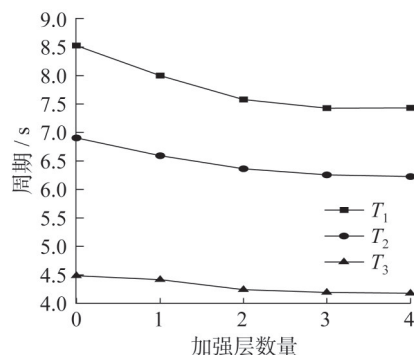


图3 加强层数量对结构前3阶自振周期的影响

Fig. 3 Influence of the number of strengthened stories on the first three natural vibration periods

顶点侧移,减小幅度约为20%,第1道加强层的减小效果最为显著;加强层的设置也能有效减小层间位移角,其中加强层处的减小量最大;但在加强层处及其附近会引起层间位移角的突变,这对结构很不利;随着加强层数量的增加,顶点侧移和层间位移角的减小效果逐渐减弱,层间位移角的突变现象也有所缓解。

(3) 较大长宽比的超高层框筒结构按传统原则设置加强层时存在的不足:会使加强层处 x 、 y 向的侧向刚度差异进一步扩大;刚度较大的加强层会引起结构竖向刚度的突变,使地震作用下加强层附近的层间位移角产生较大的突变,虽然加强层数量的增加可以减小这种突变,但程度有限。

(4) 本结构加强层数量的确定:设置4道加强层与设置3道加强层相比,结构的周期、顶点侧移、层间位移角的降幅很小,甚至出现增大的情况,因此,本结构设置3道加强层为宜。

综上,青岛海天中心T2塔楼设置3道加强层为宜,但按传统原则设置会使结构层间位移角产生较大的突变,对抗震不利,容易造成弱柱强梁的塑性破坏机制。

4 传统原则方案与改进方案对比

在按照传统原则设置3道加强层(方案4)的基础上,

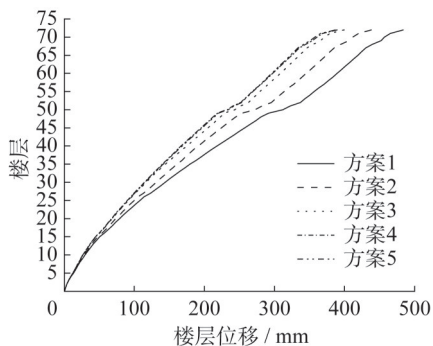


图4 xy向地震作用下楼层位移

Fig. 4 Floor displacement under xy-direction earthquake action

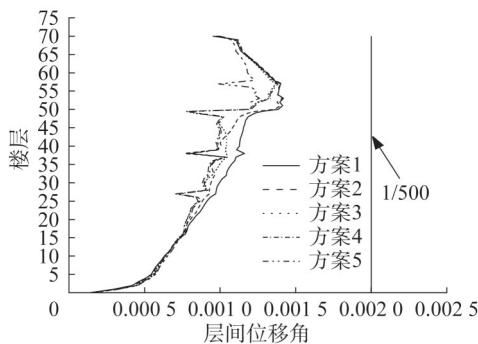


图7 yx向地震作用下层间位移角

Fig. 7 Inter-story drift under yx-direction earthquake action

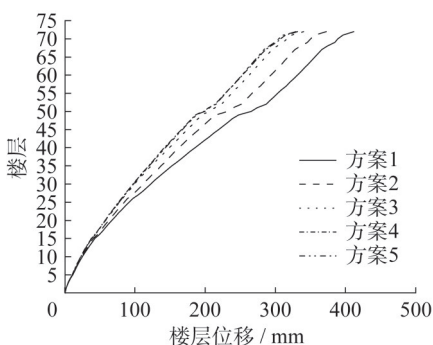


图5 yx向地震作用下楼层位移

Fig. 5 Floor displacement under yx-direction earthquake action

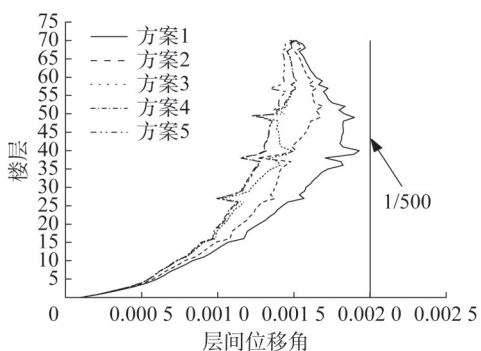
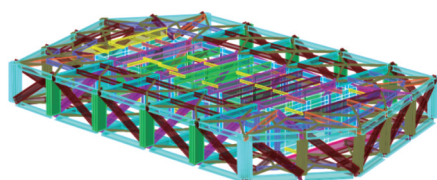


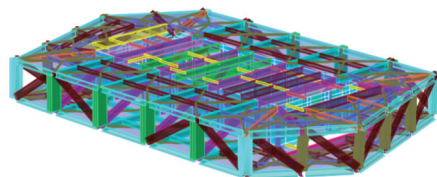
图6 xy向地震作用下层间位移角

Fig. 6 Inter-story drift under xy-direction earthquake action

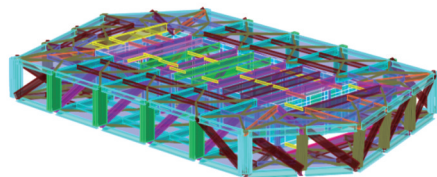
础上,得到4种改进方案,如图8所示。



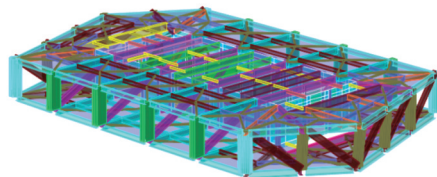
a) 方案6(仅去除y向伸臂桁架, y向腰桁架满跨布置)



b) 方案7(去除y向伸臂桁架、y向中间跨腰桁架)



c) 方案8(去除y向伸臂桁架、y向中间3跨腰桁架)



d) 方案9(不布置y向伸臂桁架和腰桁架)

图8 改进后方案布置

Fig. 8 Layout of improved schemes

通过减少加强层构件数量来改变刚度,得到4种改进方案。对4种改进方案进行模态分析和地震作用下的反应谱分析,提取不同方案下的振型周期、楼层侧移、层间位移角及其突变、楼层剪力、倾覆力矩等数据,并与方案4数据进行对比。

4.1 改进方案的提出

为了减小该塔楼加强层引起的突变,在方案4的基

4.2 动力特性对比

在ETABS软件中对改进后方案6~方案9的结构模型进行模态分析,对比各方案结构动力特性,从减小自振周期的角度分析结构的最优加强层布置方案。

4.2.1 结构自振周期和振型

通过结构的振型质量参与系数,合理选择振型数量,

确保计算结果可靠。由模态分析得到结构前30阶振型, x 向平动、 y 向平动以及 z 向扭转的累积质量参与系数均大于90%, 满足规范中规定的振型质量参与系数大于90%的要求。

4种改进方案以及方案4的前3阶振型一致, 表明减少刚度较大方向(y 向)的伸臂桁架和腰桁架的布置数量, 不会改变结构的振动类型。这是因为加强层采用桁架形式, 对整体结构质量和刚度的影响很有限。

比较方案4和改进后方案6~方案9的结构自振周期可知, 与按照传统原则设置加强层的方案4相比, 改进后方案6~方案9的结构各阶振型周期有所增加, 但增量不大。低阶振型增量明显高于高阶振型增量, 从前两阶振型看, y 向平动的第2阶振型周期增量大于 x 向平动的第1阶振型周期增量。以变化量最大的方案9为例, 去除 y 向的伸臂桁架和腰桁架, 使结构的第1阶自振周期增大了0.09 s(1.21%), 而结构的第2阶自振周期增大了0.541 s(8.65%), 这是由于去除 y 向的伸臂桁架和腰桁架主要使结构的 y 向刚度减小, 对 x 向刚度影响较小; 此外, 随着 y 向腰桁架的减少, 结构 y 向刚度越来越小, 各阶自振周期逐渐增大。

4.2.2 周期比

周期比是以扭转为主的第1自振周期与以平动为主的第1自振周期的比值, 若该值控制不当, 表明结构的抗扭刚度太弱。经计算, 方案6~方案9的结构体系周期比

分别为0.558、0.565、0.579和0.584, 均小于0.850, 满足规范要求, 表明该结构平面布置合理, 扭转效应在控制范围内。

4.3 楼层侧向刚度对比

对于框架-核心筒结构, 根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[13]第3.5.2条, 楼层侧向刚度可以按地震作用下的剪力与层间位移的比值计算:

$$K_i = \frac{V_i}{\Delta_i} \quad (1)$$

式中: K_i 为第 i 层的楼层侧向刚度; V_i 为第 i 层的地震剪力标准值(kN); Δ_i 为第 i 层的层间位移(m)。

通过计算得到改进后的4种方案在水平地震作用下加强层处两个主轴方向的楼层侧向刚度, 如表7和表8所示。改进后方案6~方案9的刚度比(y 向刚度与 x 向刚度的比值)均比方案4的刚度比小, 表明方案6~方案9均减小了加强层处两个主轴方向上的刚度差异, 对结构抗震更有利。这是由于仅在自身刚度较小的 x 向布置伸臂桁架, 去除了刚度较大方向(y 向)的伸臂桁架, 并减少了 y 向腰桁架的布置, 共同实现了减小两个主轴方向刚度差异的效果。此外, 随着腰桁架在 y 向(长边)布置的减少, 刚度比逐渐降低, 表明减小两个主轴方向上刚度差异的效果越好, x 向和 y 向刚度越接近, 其中, y 向未设置腰桁架的方案9的差异减小效果最好, 每一层的刚度比均小于1.1, x 向和 y 向刚度很接近, 有助于降低结构扭转效应。

表7 不同方案 xy 向地震作用下两个主轴方向的侧向刚度差异

Table 7 Lateral stiffness differences in two main-axis directions of different schemes under xy -direction earthquake action

加强层位置	参数	方案4	方案6	方案7	方案8	方案9
49M层	x 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	2 653 229	2 607 012	2 593 420	2 595 989	2 582 527
	y 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	4 281 573	3 649 240	3 420 260	3 017 566	2 670 024
	刚度比	1.613 7	1.399 8	1.318 8	1.162 4	1.033 9
49层	x 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	2 694 281	2 604 661	2 605 712	2 606 633	2 607 036
	y 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	4 269 064	3 781 766	3 550 895	3 150 810	2 751 692
	刚度比	1.584 5	1.451 9	1.362 7	1.208 8	1.055 5
38层	x 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	3 713 050	3 551 155	3 552 480	3 553 688	3 560 823
	y 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	5 730 552	4 728 486	4 532 552	4 219 610	3 790 964
	刚度比	1.543 4	1.331 5	1.275 9	1.187 4	1.064 6
27层	x 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	5 010 348	4 710 145	4 699 616	4 700 623	4 705 819
	y 向侧向刚度/(kN·m ⁻¹)	7 643 605	6 205 480	5 961 541	5 561 512	5 042 919
	刚度比	1.525 6	1.317 5	1.268 5	1.183 1	1.071 6

表8 不同方案 yx 向地震作用下两个主轴方向的侧向刚度差异Table 8 Lateral stiffness differences in two main-axis directions of different schemes under yx -direction earthquake action

加强层位置	参数	方案4	方案6	方案7	方案8	方案9
49M层	x 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	2 653 229	2 607 012	2 593 420	2 595 989	2 582 527
	y 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	4 281 573	3 649 240	3 420 260	3 017 566	2 670 024
	刚度比	1.613 7	1.399 8	1.318 8	1.162 4	1.033 9
49层	x 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	2 694 281	2 604 661	2 605 712	2 606 633	2 607 036
	y 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	4 269 064	3 781 766	3 550 895	3 150 810	2 751 692
	刚度比	1.584 5	1.451 9	1.362 7	1.208 8	1.055 5
38层	x 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	3 713 050	3 551 155	3 552 480	3 553 688	3 560 823
	y 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	5 730 552	4 728 486	4 532 552	4 219 610	3 790 964
	刚度比	1.543 4	1.331 5	1.275 9	1.187 4	1.064 6
27层	x 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	5 010 348	4 710 145	4 699 616	4 700 623	4 705 819
	y 向侧向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	7 643 605	6 205 480	5 961 541	5 561 512	5 042 919
	刚度比	1.525 6	1.317 5	1.268 5	1.183 1	1.071 6

4.4 结构变形对比

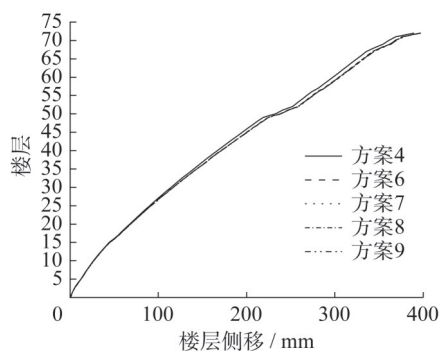
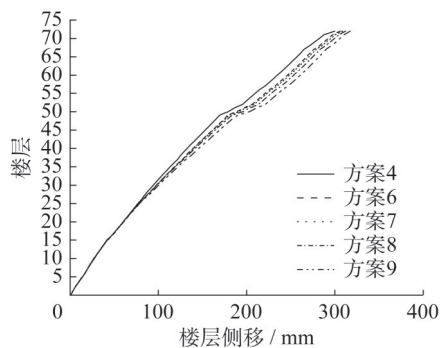
加强层设置方案不同,对结构变形的影响也不同。对改进后的方案6~方案9进行 xy 向和 yx 向多遇地震作用下的反应谱分析,并与按照传统原则设置加强层的方案4进行对比。

4.4.1 楼层侧移对比

图9和图10为两种双向地震作用下各改进方案与方案4的楼层侧移曲线对比,可以看出,在地震作用下,方案6~方案9的楼层侧移均大于方案4的楼层侧移,表明改进后的方案使楼层侧移增大,且从建筑底部至楼顶,侧移增量逐渐增大,这是由于伸臂桁架和腰桁架的减少使结构刚度减小,楼层侧移增大。在 xy 向地震作用下,方案6~方案9的楼层侧移曲线几乎重合,变化不大,从方案6到方案9,顶层侧移仅增大了1.384 mm(0.36%);在 yx 向地震作用下,方案6~方案9的楼层侧移随着 y 向腰桁架的减少而增大,变化较明显,从方案6到方案9,顶层侧移增大了11.113 mm(3.71%),这是因为 y 向腰桁架的减少对 x 向的刚度影响较小,但能使 y 向的刚度减小,进而增大楼层侧移。

4.4.2 层间位移角对比

图11和图12为两种双向地震作用下各改进方案与方案4的层间位移角曲线对比,可以看出,在地震作用下,方案6~方案9的层间位移角均大于方案4的层间位移角,表明改进后的方案使楼层层间位移角增大,从底层至加强层附近,层间位移角增量逐渐增大,而从加强层附近至顶层,层间位移角增量逐渐减小,增量主要集中在建筑中部的加强层附近,最大值在加强层处。在 xy 向地震

图9 xy 向地震作用下各方案楼层侧移对比Fig. 9 Comparison of story drifts between different schemes under xy -direction earthquake action图10 yx 向地震作用下各方案楼层侧移对比Fig. 10 Comparison of story drifts between different schemes under yx -direction earthquake action

作用下,方案6~方案9的层间位移角曲线几乎重合,变化不大,表明随着 y 向腰桁架的减少,层间位移角增量很小;在 yx 向地震作用下,方案6~方案9的层间位移角随着 y 向腰桁架的减少而增大,变化较显著。

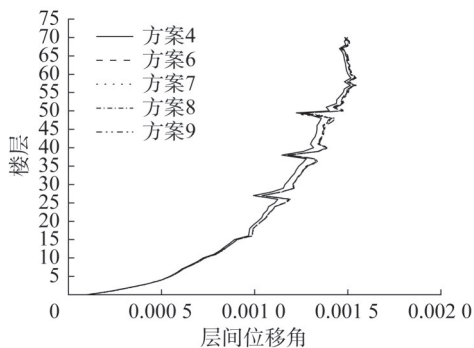


图 11 xy 向地震作用下各方案层间位移角对比

Fig. 11 Comparison of inter-story drifts between different schemes under xy-direction earthquake action

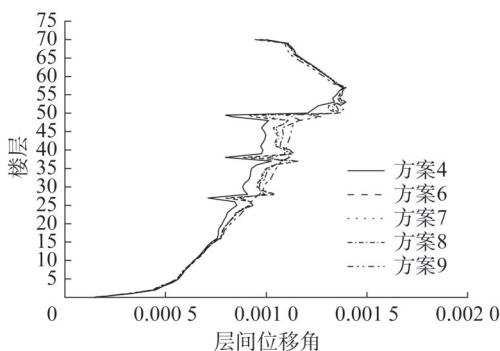


图 12 yx 向地震作用下各方案层间位移角对比

Fig. 12 Comparison of inter-story drifts between different schemes under yx-direction earthquake action

4.5 结构内力对比

加强层的设置改变了楼层的刚度,在地震作用下,刚度大的楼层会产生内力的集中和突变。水平加强层刚度的改变直接影响加强层附近楼层的框架柱和核心筒的内力。

4.5.1 楼层剪力对比

图 13 和图 14 为两种双向地震作用下各改进方案与方案 4 的楼层剪力曲线对比,可以看出,在地震作用下,方案 6~方案 9 的楼层剪力均小于方案 4 的楼层剪力,表明改进后的方案使楼层剪力减小,且从建筑顶部至底部,楼层剪力的减小量逐渐增大,这是由于伸臂桁架和腰桁架的减少使结构刚度减小。在 xy 向地震作用下,方案 6~方案 9 的楼层剪力曲线几乎重合,变化不大;在 yx 向地震作用下,方案 6~方案 9 随着 y 向腰桁架的减少,楼层剪力逐渐减小,变化较显著,这是因为 y 向腰桁架的减少对 x 向的刚度影响不大,但能使 y 向的刚度减小。

4.5.2 楼层倾覆力矩对比

图 15 和图 16 为两种双向地震作用下各改进后方案与方案 4 的楼层倾覆力矩曲线对比,可以看出,在地震作

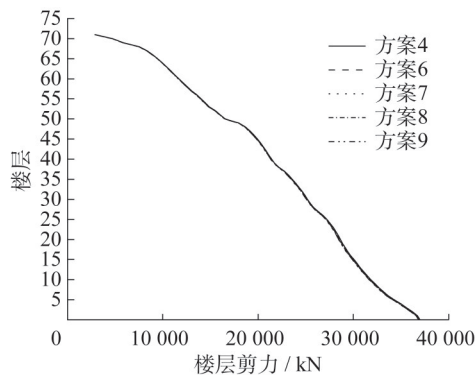


图 13 xy 向地震作用下各方案楼层剪力对比

Fig. 13 Comparison of story shear forces between different schemes under xy-direction earthquake action

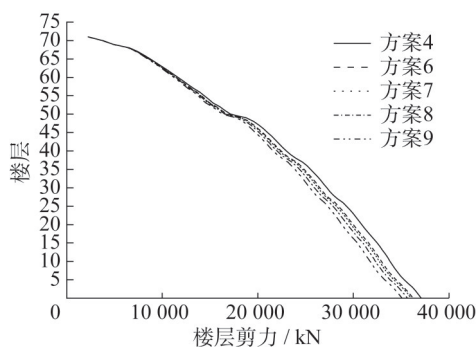


图 14 yx 向地震作用下各方案楼层剪力对比

Fig. 14 Comparison of story shear forces between different schemes under yx-direction earthquake action

用下,方案 6~方案 9 的楼层倾覆力矩均小于方案 4 的楼层倾覆力矩,表明改进后的方案使楼层倾覆力矩变小,且从建筑顶部至底部,楼层倾覆力矩减小量逐渐增大,这是因为伸臂桁架和腰桁架的减少使结构刚度减小。在 yx 向地震作用下,方案 6~方案 9 的楼层倾覆力矩曲线几乎重合,表明 y 向腰桁架的减少对楼层倾覆力矩几乎没有影响。

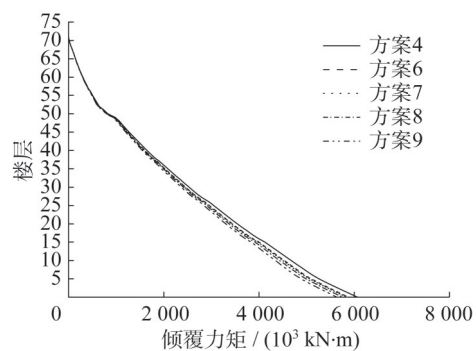


图 15 xy 向地震作用下各方案楼层倾覆力矩对比

Fig. 15 Comparison of overturning moments between different schemes under xy-direction earthquake action

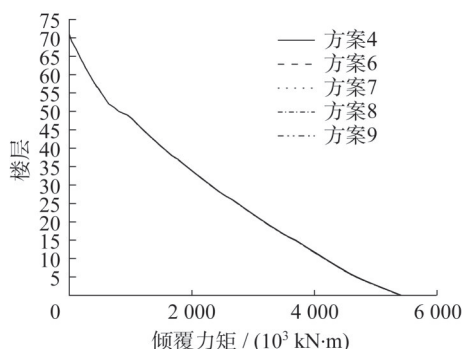


图16 yx向地震作用下各方案楼层倾覆力矩对比

Fig. 16 Comparison of overturning moments between different schemes under yx-direction earthquake action

5 结论

本文基于青岛海天中心T2塔楼,对较大长宽比的超高层框-筒结构加强层数量的确定进行了研究,主要结论如下:

(1) 在框架核心筒结构中,设置水平桁架加强层后结构的特点为:对于本文研究的较大长宽比框-筒结构,按照传统原则设置加强层会使加强层处 x 向和 y 向的侧向刚度差异进一步扩大。结构的周期、顶层侧移和层间位移角减小,楼层剪力和倾覆弯矩增大,其中第1道加强层的变化幅度最为显著,随着加强层数量的增加,变化幅度逐渐减小;加强层处的层间位移角、外框柱内力和核心筒剪力墙内力发生突变,随着加强层数量的增加,突变幅度有所减小。

(2) 提供了一种确定加强层数量的方法:当加强层增加到 n 道之后,结构周期、顶点侧移和层间位移角的降幅很小,甚至出现增大的现象,楼层剪力和倾覆弯矩的增幅也很小,加强层处的层间位移角以及内力突变也不会再降低, x 向和 y 向侧向刚度的差异不再变化,由此可以确定加强层最佳数量为 $n-1$ 道。

(3) 基于本文研究结构,提出一种较大长宽比超高层框筒结构加强层的设置原则:在刚度较小的方向上布置伸臂桁架和腰桁架,在刚度较大的方向上不布置伸臂桁架,只在两端跨内布置腰桁架,这样既能满足结构对侧移和层间位移角的需求,还能使层间位移角和内力的突变降低,同时减小了加强层处两个主轴方向的刚度差异,对结构最有利。

(4) 由于论文篇幅的限制,本文仅在多遇地震作用下对结构进行了振型分解反应谱分析,大震作用下的时程分析仍有待进一步研究。

参考文献:

[1] 虞虎. 低烈度区某超高层结构加强层设置方案研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
YU Hu. Study on the setting scheme of reinforcement floor of

a super high-rise structure in low intensity zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

[2] 熊政超. 加强层的设置参数对钢框-筒结构受力性能的影响[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
XIONG Zhengchao. Effects of strengthened story's parameters on steel frame-tube structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[3] 梁平. 框架-核心筒结构水平伸臂钢桁架加强层设置及有限刚度研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
LIANG Ping. Study on the strengthened story and limited stiffness of the frame-core with horizontal steel trusses [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[4] 苏志彬. 大连国贸大厦中设置加强层问题的研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
SU Zhibin. The problems study on Dalian International Trade Center using strengthened stories [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)

[5] 王文涛, 谭伟. 高层混合结构加强层设置方案对比分析[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(3): 54-59.
WANG Wentao, TAN Wei. Comparison analysis of strengthened story scheme of high-rise hybrid structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(3): 54-59. (in Chinese)

[6] 阮永辉, 吕西林. 带水平加强层的超高层结构的力学性能分析[J]. 结构工程师, 2000(4): 12-16. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2000.04.003.
RUAN Yonghui, LYU Xilin. Structural analysis for super high-rise structure with strengthened storey [J]. Structural Engineers, 2000(4): 12-16. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2000.04.003. (in Chinese)

[7] 徐培福, 黄吉锋, 肖从真, 等. 带加强层的框架-核心筒结构抗震设计中的几个问题[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(4): 2-10. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1999.04.001.
XU Peifu, HUANG Jifeng, XIAO Congzhen, et al. Some problems in aseismic design of frame-core wall structures with strengthened storeys [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(4): 2-10. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1999.04.001. (in Chinese)

[8] HOENDERKAMP J C D, SNIJDER H H. Preliminary analysis of high-rise braced frames with facade riggers [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 640-647. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:5(640).

[9] SMITH B S, SALIM I. Parameter study of outrigger-braced tall building structures [J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(10): 2001-2014. DOI: 10.1061/jsdeag.0005798.

[10] 史密斯 B S, 库尔 A. 高层建筑结构分析与设计 [M]. 陈瑜, 龚炳年, 译. 北京:地震出版社, 1993: 407-413.
SMITH B S, COULL A. Tall building structures analysis and design [M]. CHEN Yu, GONG Bingnian, translated. Beijing: Seismological Press, 1993: 407-413. (in Chinese)