

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202212036



加强层对框架-核心筒结构的经济性和碳排放量影响分析

吴琼¹, 胡红松^{1,2}, 陈跃辉³

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 厦门合立道工程设计集团股份有限公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 为考察加强层的形式、数量和位置对超高层框架-核心筒结构的影响,在设防烈度为 8 度的条件下,建立 1 个建筑高度为 210 m 的办公楼基础模型,分别加入不同数量和位置的环带桁架加强层和伸臂-环带桁架加强层,对比分析各模型构件的主要控制指标、结构受力性能、结构经济性和碳排放。结果表明:模型的经济性随加强层数量的增加和楼面售价的提高而增大,碳排放量随加强层数量的增加而减少;伸臂-环带桁架加强层在增大经济性和减少碳排放方面的效果均比环带桁架加强层好。

关键词: 超高层; 框架-核心筒结构; 加强层; 控制指标; 经济性; 碳排放量

中图分类号: TU 973

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)04-0460-09

Influence of Stiffened Storey on Economy and Carbon Emission of Frame-Core Tube Structures

WU Qiong¹, HU Hongsong^{1,2}, CHEN Yuehui³

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021;
2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021;
3. Xiamen Hordor Architecture and Engineering Design Group Limited Company, Xiamen 361006)

Abstract: In order to investigate the influence of the form, number and location of the stiffened storey on the super high-rise frame-core wall structure, under the condition of fortification intensity of 8 degree, a foundation model of 210m high office building is established, and the belt truss stiffened storeys and outrigger-belt truss stiffened storeys with different numbers and positions are added respectively. The main control indexes, structural mechanical performance, structural economy and carbon emission of each model component are compared and analyzed. The results show that the economy of the model increases with the increase of the number of stiffened storeys and the floor price, and the carbon emission decreases with the increase of the number of stiffened storeys. The effect of the outrigger-belt truss stiffened storeys on increasing economy and reducing carbon emission is better than the belt truss stiffened storeys.

Keywords: super high-rise building; frame-core wall structure; stiffened story; control index; economy; carbon emission

框架-核心筒结构是超高层建筑运用较多的一种结构形式。在框架-核心筒结构中合理地设置加强

收稿日期: 2022-12-29

通信作者: 胡红松(1986-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事钢-混凝土组合结构的研究。E-mail: huhs@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278183, 51878303);福建省厦门市建设局建设科技项目(XJK2022-1-17)

层,可以大大增加结构抗侧刚度,改善结构的受力状态^[1-2],实现较好的综合经济效益.但在实际工程中,设计带加强层的框架-核心筒结构时,一些起主要控制作用的问题往往由设计人员根据经验确定.所以,建立更加合理的分析模型,总结带加强层结构的受力特点和具有指导意义的结构方案是十分必要的.

Taranath^[3]建立了带加强层的框架-核心筒结构的平面分析简化模型,分析得出风荷载作用下,在 0.545 倍结构高度处设置加强层时,该结构的受力性能最好. McNabb 等^[4]在文献[3]简化模型和假定条件的基础上,对带两道加强层的框架-核心筒结构进行力学分析,确定了使结构受力性能最佳的加强层位置.此后,学者们对模型进行改进,并提出了加强层布设的最佳位置^[5-8].也有学者利用各类简化模型进行模拟分析,或提出结构优化方法,对加强层的位置进行研究^[9-11].但较少有针对不同加强层数量、位置及形式的超高层模型进行综合对比分析的研究.

为了考察加强层形式、数量和位置对超高层框架-核心筒结构的影响,本文在一个高度为 210 m、设防烈度为 8 度的超高层模型的基础上,分别加入不同数量和位置的环带桁架加强层和伸臂-环带桁架加强层,共设计 8 个计算模型,探究各模型优化设计时的主要控制指标,并对各优化后的模型进行经济性分析,从而确定出较为经济合理的设计方案.

1 结构模型设计

1.1 设计条件

在广东省某 8 度设防区建立 1 个超高层建筑,该建筑地上 50 层,层高 4.2 m,总高 210 m.结构平面布置图,如图 1 所示.总平面尺寸为 45 m×45 m,核心筒尺寸为 22 m×22 m,框架柱间距为 9 m,结构高宽比为 4.67.

为保证结构具有一定的延性,在结构模型计算过程中,根据结构构件的重要程度,在“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标下,设置主要构件的抗震性能指标,如表 1 所示.

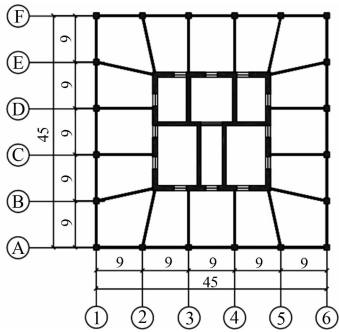


图 1 结构平面布置图(单位:m)

Fig.1 Structural layout plan (unit: m)

表 1 主要构件的抗震性能指标

Tab.1 Seismic performance indexes of main components

性能指标	抗震烈度		
	多遇地震	设防地震	罕遇地震
水准定性描述	完好无损坏	轻微损坏,可修	中度损坏,不倒塌
层间位移角限值	1/620	—	1/100
外框柱的力学性能	弹性	抗弯不屈服、抗剪弹性	满足抗剪截面控制条件
外框梁的力学性能	弹性	允许进入塑性	允许进入塑性
核心筒墙的力学性能	弹性	抗弯不屈服、抗剪弹性	满足抗剪截面控制条件
核心筒连梁的力学性能	弹性(考虑刚度折减)	允许进入塑性	允许进入塑性

1.2 结构设计

为了考察环带桁架加强层和伸臂-环带桁架加强层对超高层框架-核心筒结构的影响,先建立一个不带加强层的超高层框架-核心筒办公楼基础模型,然后分别加上不同数量的环带桁架加强层和伸臂-环带桁架加强层,共建立 8 个结构模型.加强层的布置方案,如表 2 所示.根据 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》^[12]和 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[13]的规定,该建筑的抗震设防类别为重点设防类,并且按超 B 级建筑设计.

表 2 加强层的布置方案

Tab.2 Layout of stiffened storeys

模型编号	加强层布置方案	模型编号	加强层布置方案
A	不加强基础模型	E	3 道环带桁架(12,24,36 层)
B	1 道环带桁架(24 层)	F	3 道环带桁架(12,24,36 层),1 道伸臂桁架(24 层)
C	2 道环带桁架(12,36 层)	G	3 道环带桁架(12,24,36 层),2 道伸臂桁架(24,36 层)
D	2 道环带桁架(24,36 层)	H	3 道环带桁架(12,24,36 层),3 道伸臂桁架(12,24,36 层)

模型采用框架-核心筒结构体系;框架柱采用钢管混凝土柱;柱间框架梁、核心筒与外围框架之间的楼面梁均采用钢梁;剪力墙采用钢筋混凝土墙;在有较大抗剪需求处采用内置钢板混凝土墙;核心筒剪力墙之间的连梁采用钢筋混凝土梁;楼盖为现浇钢筋混凝土楼板.在模型计算时,定义模型边界条件如下:结构底部一层单元底端与地面刚接,释放核心筒与外框架之间楼面梁的梁端约束,连接方式为铰接.

1.3 设计结果

1.3.1 构件设计的主要控制指标 各结构模型墙柱构件的主要控制指标,如表 3 所示.由于在结构周围设置桁架可以提高外框架抗倾覆力矩的能力,进而减小内核心筒所需承担的倾覆力矩,模型计算时发现,加入加强层均可有效减小墙截面.由表 3 可知:加入加强层模型的剪力墙的主要控制指标与基础模型一致,外墙的主要控制指标为剪压比和层间位移角,内墙的主要控制指标为剪压比.在此条件下,基础模型中加入环带桁架加强层和伸臂-环带桁架加强层时,剪力墙设计时的主要控制指标不发生改变.

表 3 墙柱构件的主要控制指标
Tab. 3 Main control indexes of wall column components

模型 编号	框架柱	框架梁	剪力墙		核心筒	
			外墙	内墙	外墙连梁	内墙连梁
A	1~30 层:轴压比、压弯承载力 31~50 层:“强柱弱梁”节点验算要求	整体稳定性、局部稳定性	1~30 层:剪压比 31~50 层:层间位移角	剪压比	剪压比、纵筋配筋率	纵筋配筋率
B,C,D,E	轴压比、压弯承载力	整体稳定性、局部稳定性	剪压比、层间位移角	剪压比	剪压比	纵筋配筋率
F,G,H	轴压比、压弯承载力	整体稳定性、局部稳定性	剪压比、层间位移角、整体稳定验算	剪压比	剪压比	纵筋配筋率

框架柱作为压弯构件,若柱截面过小,则无法满足承载力和最大轴压比的要求,从而无法保证结构的安全性.在结构抗震设计中,需遵循“强柱弱梁”和“强剪弱弯”的设计原则,对框架柱节点处的梁柱承载力进行验算.由表 3 可知:加入加强层模型的框架柱截面尺寸的主要控制指标均为轴压比和压弯承载力,而基础模型除了受这两个指标控制,还受“强柱弱梁”节点验算要求控制.

核心筒外墙连梁采用插钢板的钢筋混凝土梁来满足斜截面抗剪验算中的剪压比要求.结构框架梁采用钢梁,其主要控制指标均为钢构件的整体稳定性和局部稳定性;核心筒内墙连梁采用矩形钢筋混凝土梁,核心筒内墙连梁梁高的主要控制指标为纵筋配筋率.由表 3 可知:加入加强层对核心筒连梁设计时的控制指标影响不大,但在带加强层模型的外墙连梁设计时,纵筋配筋率不再成为其主要控制指标.

1.3.2 材料强度和截面尺寸 在多遇地震条件下,对各结构模型进行小震弹性设计,全楼钢梁和柱外钢管均采用 Q355 钢材;核心筒剪力墙及连梁钢筋均采用 HRB400 钢筋;考虑材料的经济性,框架柱、核心筒剪力墙及核心筒连梁的混凝土材料强度自下而上逐渐减小,这些构件下部楼层(1~20 层)采用 C60 高强混凝土,中部楼层(21~40 层)采用 C50 混凝土,上部楼层(41~50 层)采用 C40 强度混凝土.

表 4 为各模型主要构件的截面尺寸.考虑建筑的经济性,柱、墙的截面尺寸自下而上逐渐减小.框架梁为 H800 mm×400 mm×15 mm×30 mm 的钢梁,楼面梁为 H858 mm×301 mm×17 mm×31 mm

表 4 各模型主要构件的截面尺寸
Tab. 4 Sectional dimensions of main components of each model

模型 编号	框架柱尺寸/mm×mm	核心筒外墙 厚度/mm	核心筒内墙 厚度/mm	环带桁架尺寸/ mm×mm×mm×mm	伸臂桁架尺寸/ mm×mm×mm×mm
A	700×700~900×900	600~900	300~550	—	—
B	700×700~900×900	500~900	200~500	24 层:H1 000×750×40×40	—
C	700×700~950×950	350~750	200~550	36 层:H950×700×60×60 12 层:H900×550×50×50	—
D	700×700~900×900	450~750	200~550	36 层:H850×550×30×30 24 层:H800×500×30×30	—
E	700×700~950×950	400~700	200~500	36 层:H900×650×50×40 24 层:H1 000×700×40×40 12 层:H950×550×50×50	—
F	750×750~1 000×1 000	300~750	200~500	36 层:H800×500×30×30 24 层:H800×500×30×40 12 层:H600×400×20×20	24 层:□700×700×50×50

续表

Continue table

模型 编号	框架柱尺寸/mm×mm	核心筒外墙 厚度/mm	核心筒内墙 厚度/mm	环带桁架尺寸/ mm×mm×mm×mm	伸臂桁架尺寸/ mm×mm×mm×mm
G	800×800~1 000×1 000	300~750	200~500	36 层:H800×500×30×30	36 层:□600×600×30×30
				24 层:H800×500×30×40	24 层:□700×700×50×50
				12 层:H600×350×20×20	
H	800×800~1 050×1 050	300~750	200~500	36 层:H600×350×30×30	36 层:□600×600×30×30
				24 层:H700×400×30×40	24 层:□700×700×50×50
				12 层:H600×350×30×30	12 层:□350×350×20×20

的钢梁,核心筒外墙连梁采用内置钢板矩形钢筋混凝土梁,内墙连梁采用矩形钢筋混凝土梁。

2 结构受力性能比较

2.1 结构动力特性

振动周期是结构动力特性的反映,各模型的自振周期,如表 5 所示。表 5 中: T_1 为基本自振周期(平动); T_2 为第 2 阶自振周期(平动); T_3 为第 3 阶自振周期(扭转)。由表 5 可知:带加强层模型的基本自振周期均比基础模型小,说明布置加强层后,虽然墙厚减小了,但结构的整体刚度有所增大,且布置 3 道伸臂-环带桁架加强层时,结构整体刚度最大。

表 5 各模型的自振周期

Tab. 5 Natural vibration period of each model

模型编号	T_1 /s	T_2 /s	T_3 /s	模型编号	T_1 /s	T_2 /s	T_3 /s
A	4.52	4.06	2.88	E	4.27	3.83	3.00
B	4.06	3.90	2.87	F	4.08	3.61	3.09
C	4.29	3.82	3.01	G	4.03	3.52	3.14
D	4.35	3.87	3.08	H	3.98	3.49	3.14

以扭转为主的第一自振周期与以平动为主的第一自振周期之比是判断结构扭转效应的重要指标之一,是概念设计中加强抗扭刚度的基本要求,也是保证“大震不倒”的设计原则之一,显示了结构布置的合理性及结构抗震性能的好坏。各模型的自振周期比(T_3/T_1),如图 2 所示。由图 2 可知:模型加入加强层后,其以扭转为主的第一自振周期与以平动为主的第一自振周期的比值高于基础模型的比值,其中,加入环带-伸臂桁架加强层模型的比值相对较大,说明加强层对抗侧刚度的提高作用比对抗扭刚度的提高作用更明显,但在同种加强层形式下,加强层布置的位置和数量对该比值的影响不大。

2.2 结构变形

结构侧移控制是超高层结构设计时非常重要的环节,应避免因过大的结构变形造成的严重后果。各模型的最大层间位移角(δ_{\max}),如图 3 所示。由图 3 可知:模型的层间位移角主要由 X 向地震作用控制,而层间位移角是基础模型和大部分带加强层模型的剪力墙构件设计时的主要控制指标;在 X 向地震作用下,基础模型、加入环带桁架加强层模型及加入 1 道伸臂-环带桁架加强层模型的最大层间位移角相差不大,均接近规范限值,而加入 2 道和 3 道伸臂-环带桁架加强层模型的最大层间位移角有所减小。

在 X 向地震作用下,各模型的层间位移角(δ_x),如图 4 所示。由图 4 可知:各模型的最大层间位移角均位于 40~50 层之间,层间位移角小于限值 1/620 且均控制在限值附近。在减小结构构件截面的情况下,加强层布设处及其附近的局部楼层出现层间位移角明显减小的现象,其中,布置伸臂-环带桁架加强层对层间位移角的减小效果比布置环带桁架加强层对层间位移角的减小效果更明显,说明环带桁架和伸臂桁架都有提高结构抗侧刚度的作用,而伸臂桁架的设置可以更显著地提高结构侧向刚度,从而减小结构层间位移角。但伸臂桁架在提高侧向刚度的同时,也会带来竖向层间刚度突变,导致竖向刚度不均匀,容易形成薄弱层的问题。加入环带桁架加强层既可以较大程度地减小对建筑使用空间的影响,又

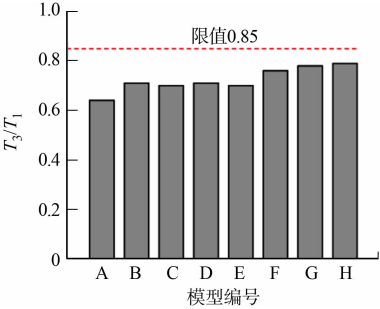


图 2 各模型自振周期比

Fig. 2 Ratio of natural vibration period of each model

可改善加强层附近结构内力及结构刚度的突变程度。

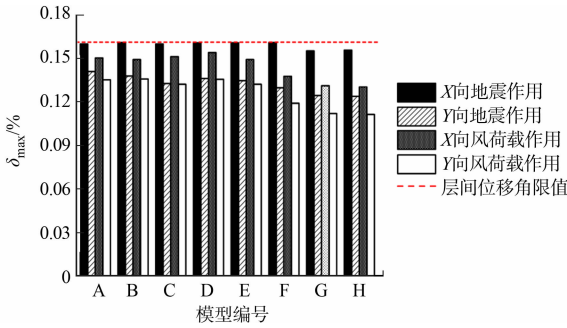
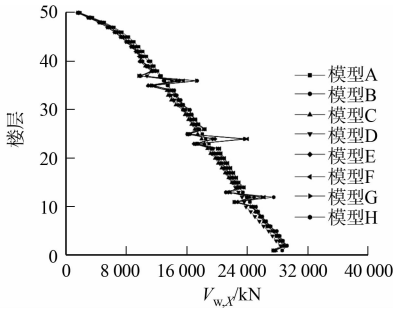


图 3 各模型的最大层间位移角
Fig. 3 Maximum inter-storey displacement angle of each model

X 向地震作用下,各模型的楼层位移(Δ),如图 5 所示。由图 5 可知:加入加强层模型的最大楼层位移均小于基础模型的最大楼层位移,但不同加强层形式对楼层位移的影响不是很大。当层间位移角相差不大时,在地震和风荷载作用下,加入加强层的模型的最大楼层位移比基础模型的最大楼层位移小,模型在减小构件截面尺寸的情况下,结构仍能减小最大楼层位移,说明加入加强层,尤其是加入伸臂-环带桁架加强层能提高结构在地震作用下的抗侧能力。

2.3 结构内力

在 X,Y 向地震作用下,各模型的剪力墙剪力,如图 6 所示。图 6 中: $V_{w,X}$, $V_{w,Y}$ 分别为 X,Y 向地震作用下,各模型的剪力墙剪力。由图 6 可知:尖点说明结构的剪力墙剪力在加强层处发生突变,这是由于设置加强层引起的内力重分布,而且加入伸臂-环带桁架结构的剪力突变值比只加入环带桁架结构的剪力突变值大,进一步说明环带桁架可改善加强层附近结构内力及结构刚度的突变程度。



(a) X 向地震作用下

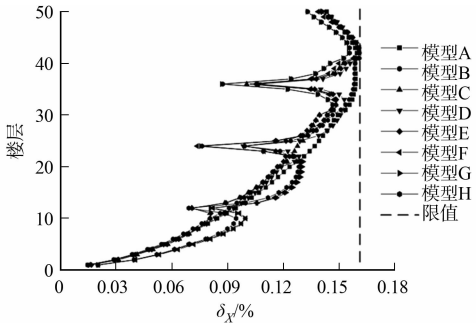


图 4 各模型的层间位移角
Fig. 4 Inter-storey displacement angle of each model

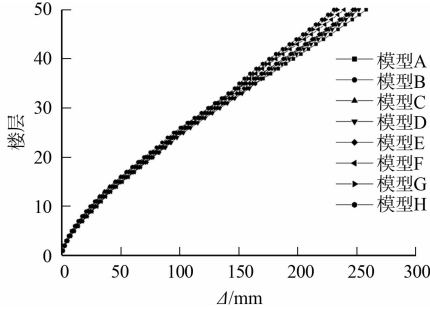
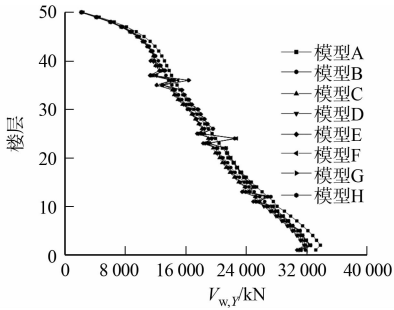


图 5 各模型的楼层位移
Fig. 5 Floor displacement of each model



(b) Y 向地震作用下

图 6 X,Y 向地震作用下剪力墙剪力

Fig. 6 Shear force of shear wall under X, Y direction earthquake

3 材料用量与造价

3.1 结构质量

各模型的结构质量(m)与单位面积质量(U_p),如表 6 所示。由表 6 可知:加强层的加入可以有效减小墙截面尺寸,环带桁架加强层和伸臂-环带桁架加强层的布置均可有效减小结构单位面积质量,说明加强层的布置可以节省单位面积的材料用量。无论是布置环带桁架加强层还是伸臂-环带桁架加强层,布置 2 道或 3 道加强层的单位面积质量减小效果相对较明显,其中,布置 2 道环带桁架时,环带桁架的位置设置在 24,36 层可以达到更有效的单位面积质量的目的。两种加强层形式相比,布置伸臂-环带桁架

架加强层模型的单位面积质量显著减少,节省结构所需的材料用量,能实现更好的经济性.

表 6 各模型的结构质量与单位面积质量

Tab. 6 Structure mass and unit area mass of each model

模型编号	m/kg	$U_p/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	模型编号	m/kg	$U_p/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
A	95 495 906.00	943.17	E	88 108 727.00	870.21
B	91 157 648.00	900.32	F	87 215 633.00	861.39
C	88 560 188.00	874.67	G	85 237 391.00	841.85
D	87 733 547.00	866.50	H	85 275 891.00	842.23

3.2 钢筋与钢板

算例中各模型的框架梁、楼面梁、桁架、框架柱的外钢管及内力较大处剪力墙的内置钢板均采用 Q355 钢材,结构构件的受力钢筋及箍筋主要采用 HRB400 级钢筋.各模型构件的单位面积用钢量,如表 7 所示.表 7 中: U_{ps} , U_{pr} 分别为钢板、钢筋的单位面积用钢量; U_{all} 为总单位面积用钢量.

表 7 各模型构件的单位面积用钢量

Tab. 7 Steel consumption per unit area of each model components

模型 编号	$U_{ps}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$						$U_{pr}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$		$U_{all}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
	框架梁	楼面梁	框架柱	剪力墙	核心筒连梁	桁架	剪力墙	核心筒连梁	
A	18.0	22.5	17.1	0.6	0.6	—	24.3	3.6	86.7
B	17.9	22.5	18.9	1.2	0.6	1.5	21.8	3.3	87.6
C	17.9	22.4	20.9	1.9	0.6	3.7	20.6	3.3	91.4
D	19.0	22.4	20.4	2.1	0.6	3.2	19.6	2.7	90.0
E	17.8	22.4	22.6	2.0	0.6	4.9	18.7	2.6	91.6
F	21.3	27.2	25.2	4.4	0.6	6.1	15.9	2.5	103.2
G	21.8	28.5	25.2	4.4	0.6	6.7	14.8	2.5	104.4
H	21.8	28.5	25.2	4.4	0.6	7.0	14.7	2.5	104.7

各模型钢板和钢筋的单位面积用钢量,如图 7 所示.由图 7 可知:加强层的加入有效减小了墙厚和核心筒连梁的截面大小,剪力墙和核心筒连梁的单位面积用钢量比基础模型略微减小;但加入加强层模型的框架梁、楼面梁、框架柱的单位面积用钢量都比基础模型的单位面积用钢量大,且加强层的桁架也需用到钢材,故基础模型中加入加强层后,整体结构单位面积用钢量会增加,且加入伸臂-环带桁架加强层模型的单位面积用钢量比加入环带桁架加强层模型的单位面积用钢量大;当加强层形式一定时,加强层数量和位置对整体结构单位面积用钢量影响不大.

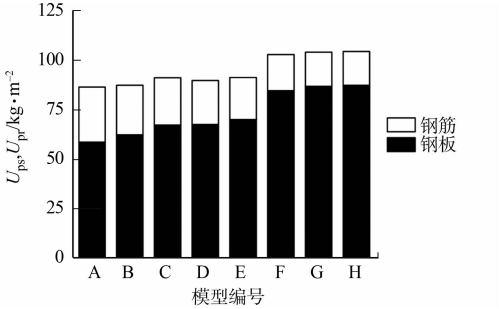


图 7 各模型钢板和钢筋的单位面积用钢量

Fig. 7 Steel plate and reinforcement consumption per unit area of each model

3.3 混凝土用量

各模型构件的单位面积混凝土用量(V_p),如表 8 所示.表 8 中: V_{all} 为单位面积混凝土总用量.

表 8 各模型构件的混凝土单位面积用量

Tab. 8 Concrete consumption of per unit area of each model components

模型 编号	$V_p(\text{楼板})/\text{m}^3$	$V_p(\text{框架柱})/\text{m}^3$			$V_p(\text{剪力墙})/\text{m}^3$			$V_p(\text{核心筒连梁})/\text{m}^3$			V_{all}/m^3			
	C30	C40	C50	C60	C40	C50	C60	C40	C50	C60	C30	C40	C50	C60
A	0.114	0.004	0.008	0.010	0.024	0.054	0.064	0.001	0.003	0.004	0.114	0.030	0.065	0.078
B	0.115	0.004	0.009	0.010	0.019	0.044	0.063	0.001	0.003	0.004	0.115	0.025	0.055	0.078
C	0.115	0.004	0.010	0.012	0.015	0.038	0.060	0.001	0.002	0.003	0.115	0.020	0.050	0.075
D	0.115	0.005	0.009	0.011	0.018	0.038	0.059	0.001	0.002	0.003	0.115	0.024	0.050	0.073
E	0.116	0.004	0.011	0.012	0.016	0.037	0.055	0.001	0.002	0.003	0.116	0.021	0.050	0.071
F	0.116	0.005	0.012	0.014	0.013	0.038	0.045	0.001	0.002	0.003	0.116	0.018	0.053	0.061
G	0.116	0.005	0.012	0.014	0.012	0.032	0.043	0.001	0.002	0.003	0.116	0.018	0.047	0.059
H	0.114	0.004	0.008	0.010	0.024	0.054	0.064	0.001	0.003	0.004	0.114	0.030	0.065	0.078

由表 8 可知:大部分混凝土材料用于剪力墙、框架柱这类竖向构件中,竖向构件的混凝土用量占 90% 以上;带加强层模型的剪力墙和核心筒连梁的混凝土用量减少,而框架柱的混凝土用量有所提高。

由于不同强度等级混凝土的价格有所差异,计算各模型不同等级混凝土的单位面积折算厚度(D_p),如图 8 所示. 由图 8 可知:在结构中加入加强层后,用于楼板的强度等级为 C30 的混凝土用量变化不大,其余各强度等级的混凝土用量均有所减小. 综合计算所有强度等级的混凝土用量可以看出,加入加强层模型的混凝土用量明显减少,其中,带伸臂-环带桁架加强层模型的混凝土用量比带环带桁架加强层模型的混凝土用量少,且在加强层形式一定的情况下,随着加强层数量的增加,混凝土用量基本呈减少趋势。

3.4 结构综合造价

由于加入加强层后模型的墙、柱构件截面尺寸发生了变化,使建筑使用面积也相应改变,总体而言,加强层的加入增大了建筑使用面积,可能实现更大的经济效益. 定义相对使用面积为带加强层模型的建筑使用面积与基础模型的建筑使用面积的差值,计算得到各模型的相对使用面积(S_r),如图 9 所示. 由图 9 可知:在基础模型中加入伸臂-环带桁架加强层比加入环带桁架加强层更能有效增大建筑的使用面积,其中,加入 2 道或 3 道伸臂-环带桁架加强层时,建筑的相对使用面积最大,表明加入加强层可以实现更大的楼面利用率。

根据市场价格行情,C30,C40,C50,C60 混凝土含税价格分别为 370,390,480,500 元 \cdot m⁻³,钢筋价格为 5 350 元 \cdot t⁻¹,钢板价格为 10 000 元 \cdot t⁻¹. 根据各模型的材料用量计算成本,以基础模型的材料成本为参照,定义相对材料成本为带加强层模型的材料成本与基础模型的材料成本的差值,相对盈利通过带加强层模型的相对使用面积与楼面售价的乘积扣除相对材料成本计算得到,采用相对盈利来考察带加强层模型相对于基础模型的综合造价变化量. 以楼面售价为自变量,相对盈利为因变量建立函数,得到各模型在不同楼面售价下的相对盈利,如图 10 所示. 图 10 中: w 为楼面售价; p_r 为相对盈利。

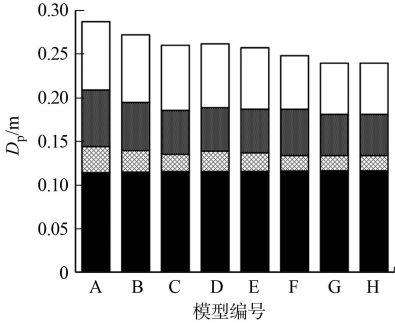


图 8 各模型不同等级混凝土的单位面积折算厚度

Fig. 8 Converted concrete thickness per unit area of each model with different grades

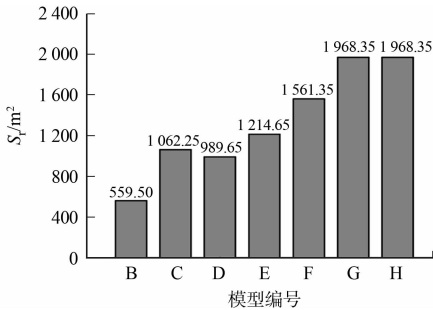


图 9 各模型的相对使用面积

Fig. 9 Relative usable area of each model

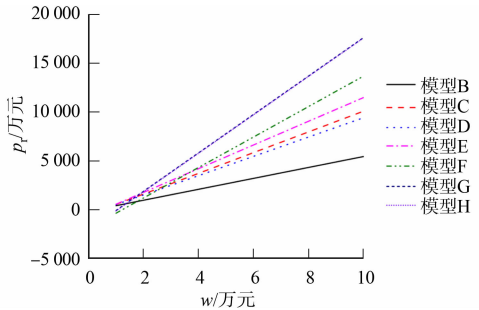


图 10 各模型在不同楼面售价下的相对盈利

Fig. 10 Relative profit of each model under different floor prices

由图 10 可知:当楼面售价较低时,部分模型的相对盈利小于零,说明在楼面售价较低时,加入加强层的模型由于建筑材料成本太高,盈利小于基础模型;当楼面售价高于 2 万元时,带加强层模型的相对盈利均大于零,说明加入加强层模型具有更高的经济性;在此之后,楼面售价越高,相对盈利呈线性增长,且不同加强层形式的模型的相对盈利差距越大,伸臂-环带桁架加强层模型的经济性更加凸显;无论是加入环带桁架加强层还是伸臂-环带桁架加强层,相对盈利随加强层数量的增多呈增长趋势. 对于加入环带桁架加强层的模型,布置 2 道或 3 道环带桁架加强层比只布置 1 道环带桁架加强层的相对盈利明显增加;而对于加入伸臂-环带桁架加强层的模型,布置 2 道或 3 道加强层对建筑相对盈利的影响不大,但明显高于只布置 1 道伸臂-环带桁架加强层的相对盈利。

4 建筑建造阶段碳排放测算

4.1 建筑材料碳排放因子

GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[14]中指出,建材碳排放应包含建材生产阶段及运输阶段的碳排放。建材生产阶段和建材运输阶段均需要确定碳排放因子。

4.1.1 混凝土 由于《建筑碳排放计算标准》未对各类等级强度的混凝土碳排放因子进行规定,根据俞海勇等^[15]对基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型的研究,依据混凝土配合比计算单位混凝土的引入碳排放、单位混凝土生产能耗导致的碳排放及单位混凝土运输油耗导致的碳排放,确定单位预拌混凝土的碳排放量,即混凝土生产阶段的碳排放因子。原材料运输碳排放根据《建筑碳排放计算标准》另行计算,不计原材料运输碳排放的混凝土碳排放因子,如表 9 所示。

表 9 混凝土碳排放因子
Tab. 9 Carbon emission factors of concrete

钢筋的 强度等级	原材料引入碳排放因子/kgCO ₂ ·m ⁻³		生产能耗碳排放 因子/kgCO ₂ ·m ⁻³	运输油耗碳排放 因子/kgCO ₂ ·m ⁻³	总碳排放因子/ kgCO ₂ ·m ⁻³
	内含碳排放	运输碳排放			
C30	303.89	37.66	2.89	2.51	309.29
C40	388.14	38.75	2.89	2.51	393.54
C50	508.05	50.44	2.89	2.51	513.45
C60	586.53	52.92	2.89	2.51	591.93

4.1.2 钢材 根据《建筑碳排放计算标准》确定模型所用钢材的碳排放因子,其中,热轧碳钢钢筋的碳排放因子为 2 340 kgCO₂·t⁻¹,热轧碳钢钢板的碳排放因子为 2 400 kgCO₂·t⁻¹。

4.2 碳排放总量计算

综合材料使用碳排放量和材料运输能耗碳排放量,建材碳排放总量(C)为材料使用碳排放量和建材运输能耗碳排放量总和,其计算式为

$$C = \sum_{i=1}^n a_i A_i + \sum_{i=1}^n b_i B_i d_i. \tag{1}$$

式(1)中: a_i 为建造阶段第 i 种主要建材的消耗量; A_i 为第 i 种主要建材的碳排放因子; b_i 为运输阶段第 i 种主要建材的消耗量; B_i 为第 i 种建材单位质量运输距离的碳排放因子; d_i 为第 i 种主要建材的平均运输距离。

结合混凝土、钢筋及钢板的材料用量数据,根据式(1)计算各模型建造阶段的碳排放量,如表 10 所示。表 10 中: η 为影响分数。由表 10 可知:建造阶段的碳排放主要来自材料使用碳排放,建材运输碳排放量仅占少数。模型 A~H 的总碳排放量依次减少,与模型 A 相比,模型 B 的碳排放量减少了约 1/10,模型 H 的碳排放量减少了约 1/3。因此,加强层的加入能够有效减少建筑建造阶段的碳排放量,加入伸臂-环带桁架加强层的减排效果比加入环带桁架加强层的减排效果更好,且无论对于哪种形式的加强层,碳排放量随着加强层数量的增加呈减少趋势。

表 10 各模型建造阶段的碳排放量
Tab. 10 Carbon emissions at each model construction stage

模型编号	材料使用碳排放量/kgCO ₂	建材运输碳排放量/kgCO ₂	总碳排放量/kgCO ₂	η /%
A	22 857 746.71	348 877.90	23 206 624.61	—
B	20 559 788.70	341 210.76	20 900 999.46	—9.935
C	19 421 116.37	345 304.92	19 766 421.29	—14.824
D	18 593 033.14	341 674.68	18 934 707.82	—18.408
E	17 914 413.85	344 035.04	18 258 448.89	—21.322
F	15 990 417.70	372 163.77	16 362 581.47	—29.492
G	14 990 687.32	370 763.23	15 361 450.55	—33.806
H	14 976 115.53	371 770.70	15 347 886.23	—33.864

5 结论

通过算例模型,分析加强层形式、数量和位置对超高层框架-核心筒结构的主要控制指标、结构受力

性能、经济性及环境效应的影响,得出以下 4 点结论.

1) 加入加强层后,框架柱设计的主要控制指标为轴压比和压弯承载力,“强柱弱梁”节点要求的不再是柱的主要控制指标;剪力墙设计的主要控制指标为剪压比和层间位移角,加入伸臂-环带桁架后,整体稳定性也成了外墙的主要控制指标;框架梁设计的主要控制指标为整体稳定性和局部稳定;核心筒连梁设计主要控制指标为剪压比和纵筋配筋率.

2) 加入加强层能有效提高结构的抗侧能力,其中,伸臂-环带桁架提高结构抗侧能力的效果高于环带桁架,但引起结构竖向刚度的突变程度也大于环带桁架.

3) 带加强层模型的相对盈利呈线性增长的趋势. 当楼面售价高于 2 万元时,带加强层模型的盈利才能超越基础模型的盈利. 其中,加入伸臂-环带桁架加强层模型的盈利比加入环带桁架加强层模型的盈利大,且模型的相对盈利随着加强层数量的增多而增大.

4) 加强层的加入能够有效减少建造阶段的碳排放量,加入伸臂-环带桁架加强层的减排效果比加入环带桁架加强层的减排效果更好,且无论对于哪种形式的加强层,碳排放量随着加强层数量的增加呈减少趋势.

参考文献:

[1] 樊永盛,王利民,张晓辉,等. 框架-核心筒超高层建筑加强层设置方案探讨[J]. 建筑结构,2016,46(增刊 2):61-66. DOI:10.19701/j.jzjg.2016.s2.013.

[2] 马高强. 某超高层建筑不同加强层布置方案的弹性时程分析[J]. 工程建设,2019,51(3):42-47,55. DOI:10.13402/j.gcjs.2019.03.008.

[3] TARANATH B S. Optimum belt truss location for high-rise structures[J]. Structural Engineer,1975,53(8):18-21.

[4] MCNABB J W, MUVDI B B. Drift reduction factors for belted high-rise structures[J]. AISC Engineering Journal, 1975,12(3):88-91.

[5] BOGGS P C, GASPARINI D A. Lateral stiffness of core/outrigger systems[J]. AISC Engineering Journal,1983,20(4):172-180.

[6] RUTENBERG A, TAL D. Lateral load response of belted tall building structure[J]. Engineering Structure,1987,9(1):53-67. DOI:10.1016/0141-0296(87)90041-1.

[7] COULL A, LAU W H O. Outrigger braced structures subjected to static seismic load[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Tall Buildings. [S.l.]: Hong Kong and Shanghai,1988:395-401.

[8] 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.

[9] 余安东. 用水平加强层控制高层建筑结构的侧移-水平加强层的作用及其最佳位置[J]. 建筑结构学报,1988,9(6):30-38. DOI:10.14006/j.jzjgxb.1988.06.003.

[10] 朱杰江,王颖,江蓓. 带加强层框架-芯筒结构设计的若干建议[J]. 建筑结构,2001,31(11):15-17. DOI:10.19701/j.jzjg.2001.11.003.

[11] 刘建新. 超高层建筑结构水平加强层的最佳位置[J]. 工业建筑,1997,27(8):25-29. DOI:10.13204/j.gyjz199708007.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 建筑工程抗震设防分类标准: GB 50223—2008 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[15] 俞海勇,王琼,张贺,等. 基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J]. 粉煤灰,2011,23(6):42-46. DOI:10.3969/j.issn.1007-046X.2011.06.017.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)