

上海中心大厦巨型悬挂式幕墙系统结构设计与思考

丁洁民, 何志军, 李久鹏

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 上海中心大厦外幕墙系统采用了分区悬挂的巨型柔性悬挂式幕墙支撑结构体系。该体系远离主体结构、几何造型扭曲、分区悬挂重量大、悬挂高度高、竖向支承刚度柔且不均匀, 整个幕墙结构体系构成及传力较为特殊导致其与主体结构协同工作复杂, 给结构设计带来许多前所未有的技术挑战。从方案到施工图设计过程, 无论是结构体系还是节点构造均经历了多轮的反复论证分析与优化。尤其是采用整体模型协同分析, 对水平和竖向荷载下幕墙支撑结构与主体结构协同工作性能、竖向地震反应、以及施工过程中幕墙支撑结构的受力特性等问题进行了深入地分析和研究。确保了工程建设的顺利实施, 实际安装施工也验证了该结构设计的可靠性。上海中心幕墙支撑结构设计经历了艰辛的设计历程, 其相关设计方法和成果是对现有高层建筑幕墙结构设计理念和方法的丰富和完善, 同时也引发了对高层建筑复杂幕墙系统结构设计的新的思考。

关键词: 悬挂式幕墙支撑结构; 结构选型; 节点设计; 协同工作分析; 竖向地震反应分析; 施工过程分析

中图分类号: TP1

文献标志码: A

of analysis, proof and optimization. Especially, By means of cooperative analysis of integrated model including CWSS and main structure, the properties of cooperative work of CWSS under horizontal and vertical loads, vertical seismic response, mechanical properties of CWSS in construction were analyzed in detail. These work ensured the successful implementation of the project construction. The actual installation and construction have proved the reliability of the design of this system. The structural design process of CWSS is tough, and its design method and achievement also enrich and improve the existing design method and concept of curtain wall systems of high buildings. Meanwhile, it encourages a lot of new studies in structural design of complex curtain wall systems of high buildings.

Key words: suspend curtain wall support structure; structure selection; connection design; cooperative work analysis; vertical seismic response analysis; construction simulation analysis

Design and Study of Super Suspend Curtain Wall Support Structure of Shanghai Tower

DING Jiemin, HE Zhijun, LI Jiupeng

(Architectural Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A unique flexible suspend curtain wall support structure (CWSS) was ultimately developed to suit exterior curtain wall system of Shanghai Tower. Its characteristics of the deviation from main structure, the twisted geometry, the heavy weight, the high suspension height, the weak & nonuniform support stiffness led to the complicated cooperation properties with main structure, and a number of unprecedented challenge for the analysis and design arose. From the scheme design to the construction drawing design, structural system and joint details underwent repeated rounds

传统的幕墙系统一般采用横梁立柱支撑并逐层悬挂在主体结构之上^[1]。近年来,随着建筑技术的提高,外幕墙向着尺度更大、形态更复杂的方向发展。对于这类大尺度、复杂形态的外幕墙,往往需要为其设置独立的幕墙支撑结构,以实现外幕墙复杂的表皮形态或跨越较大的跨度,并协调外幕墙与主体结构的几何关系。如,近年来建成的北京新保利大厦,上海东方艺术中心,中国航海博物馆等以幕墙设计而知名的建筑,都具有其独特的幕墙支撑结构^[2-4]。大尺度、复杂形态幕墙系统的支撑结构往往结构体系及受力性态复杂,使得其结构分析和设计难度较高,为此许多学者结合实际工程对其与主体结构的相互作用、抗震、抗风分析方法、节点构造等相关问题进行了深入的研究^[5-9],促进了该类幕墙系统的工程应用。

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 上海市科技攻关计划项目(09dz1207704)

第一作者: 丁洁民(1957—),男,教授,工学博士,主要研究方向为超高层建筑,空间结构等。E-mail: djm@tjadri.com

通讯作者: 何志军(1972—),男,教授级高级工程师,工学博士,主要研究方向为超高层建筑,大跨度钢结构等。E-mail: 8hzj@tjadri.com

尽管近年来具有复杂形态的大尺度幕墙系统的建筑逐渐增多,但往往应用于高度较低的多高层建筑,鲜有在超高层建筑中的应用案例。客观上,若将复杂形态的大尺度幕墙系统应用于超高层建筑,超高层建筑作为幕墙系统的弹性支撑边界在各类荷载及非荷载效应下的变形复杂,由于尺寸的累积效应会对幕墙系统产生不可忽视的影响,且幕墙结构与主体间的连接界面构造复杂等因素导致其在超高层建筑中的应用难度较多层建筑更高,从而限制了其在超高层建筑中的应用。上海中心大厦第一次将复杂几何形态的大尺度玻璃幕墙系统应用于超高层建筑,是复杂几何形态的大尺度幕墙系统应用方面的一次大胆的探索,本文以该项目为研究背景对复杂形态的大尺度幕墙系统在超高层建筑上应用进行了研究,对其支撑结构设计所面临的挑战及应对策略进行了介绍。

1 工程概况

上海中心大厦位于上海陆家嘴金融区,见图1。总建筑面积约58万 m^2 ,结构高度580 m,建筑总高度632 m。该项目首次在超高层建筑中大规模使用了双层独立玻璃幕墙系统,其中远离主体结构且扭曲收缩的外幕墙系统是整栋建筑区别于其他高层建筑的显著特点,也是其设计难点之一。



图1 上海中心大厦
Fig.1 Shanghai Tower

1.1 外幕墙建筑设计特点

内幕墙沿着楼板边界呈圆柱形布置(图2)。外幕墙平面形状呈一三边鼓曲、三角倒角的等边三角形(图2),在高度方向,绕着圆柱体楼面逐层旋转、收缩向上,标准段共旋转 120° ,收缩55%,由此导致内外幕墙空间上分离。整个外幕墙系统面积达14万

m^2 ,被设备层在垂直方向上分成相对独立的9个区域(9区为塔冠区),每个区在内外幕墙之间形成12—15层,高约55~66 m高的流线形中庭空间(图3),同时使休闲层被充分利用成“空中大堂”,可以就“近”为空中大堂所连接的12—15层的人们提供餐厅、银行、商店等基本的配套服务。

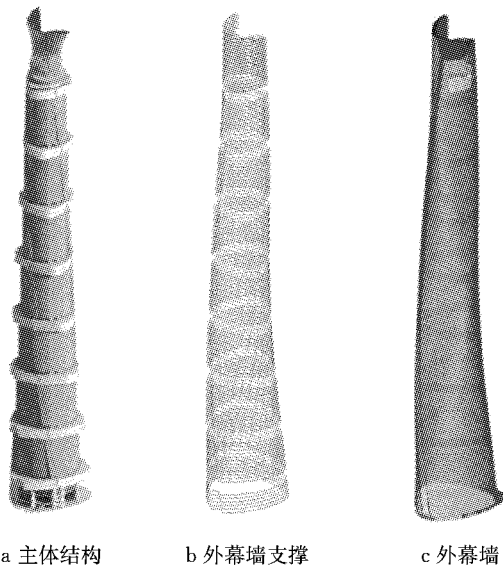


图2 幕墙系统与主体结构的关系

Fig.2 Curtain wall system and main structure

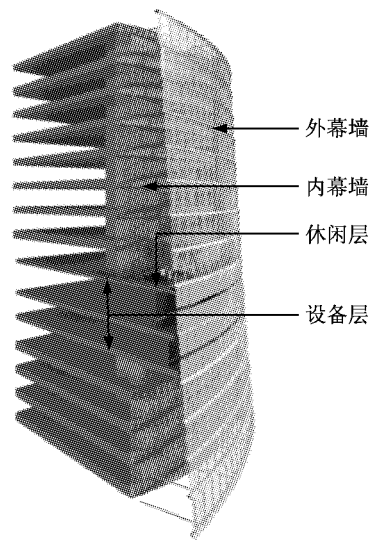


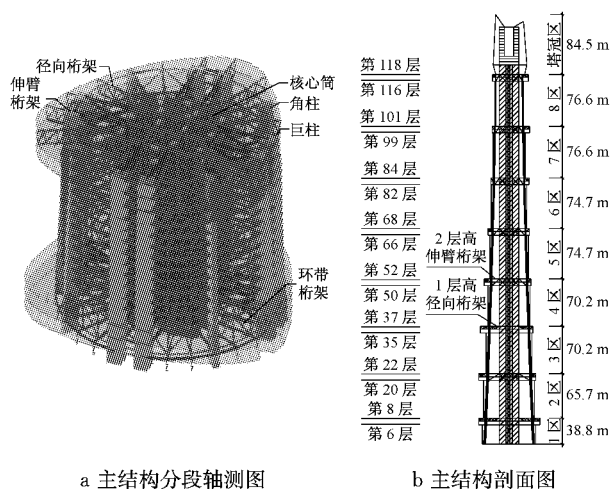
图3 典型幕墙剖面透视图

Fig.3 Perspective view of typical curtain wall

这样分离式的设计,使外幕墙造型设计相对独立于主体结构,在保持主体建筑造型简洁高效的同时,增加了表皮几何造型设计的自由度,进而为通过改变建筑几何造型来降低整个建筑的横风向风振效应提供了可能性。风洞试验表明,上海中心的几何造型较常规的正方形截面锥体造型可减少24%的风力,节省结构造价约3.5亿。

1.2 主体结构体系

上海中心主体结构采用巨型框架-伸臂-核心筒结构体系(图4),巨型框架结构由8根巨型柱、4根角柱、8道位于设备层两个楼层高的箱形空间环带桁架组成。核心筒平面形状沿高度根据建筑平面功能做相应调整,底部平面为30 m×30 m的方形布置,中部为切角方形布置,顶部为十字形布置在塔楼的2、4—8区共设置了6道两层高的伸臂桁架。伸臂桁架将巨型柱与核心筒联系起来,既能约束核心筒的弯曲变形,又能高效地利用周围的8根巨型柱以减小结构的整体变形和层间位移。在各个分区的设备层均设置了外挑径向桁架作为外幕墙结构的重力支承系统。



a 主结构分段轴测图

b 主结构剖面图

图4 上海中心主体结构

Fig.4 Main structure of Shanghai Tower

2 分离式外幕墙的结构设计挑战

上海中心大厦外幕墙几何形态扭曲、收缩,分区体量超大且远离主体结构,给上海中心幕墙支撑结构的设计带来许多前所未有的技术挑战。

(1)外幕墙远离主体结构,中庭最宽处外幕墙距主体结构距离达13 m以上,主体结构无法直接为板块提供支撑,为此需在幕墙与主体结构之间设置在几何上能够协调内外幕墙的过度次级结构系统,为幕墙板块提供支撑,将外幕墙荷载向主体结构有效传递。

(2)由于外幕墙表皮形态不规则,支撑结构对复杂表皮几何应具有良好的适应性,能用简洁的结构系统搭建出复杂的几何形态。

(3)内外幕墙之间的中庭空间大、幕墙支撑结构的体量大,对幕墙系统的通透性影响大,因此支撑结

构构件需要做到轻巧,断面小,视觉阻碍小。

(4)建筑超高,风荷载大,风洞试验结果表明幕墙板块最大负风压达到了 $6.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ (7—8区)。相应的幕墙玻璃板片厚度也较厚,板块重量重,达到了 $1.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,单块板块达1 t重。分区幕墙吊重达2 200~3 200 t,支撑结构负荷重。

(5)外幕墙采用超白玻璃,透光率高、辐射强;同时中庭空间大、高度高、热环境复杂,夏季在日照辐射使中庭温度升高形成“温室效应”,上述两方面的综合作用导致这个幕墙结构的温度作用强。

(6)外幕墙远离主体、且分段设置,水平荷载下,主楼弯曲变形明显相邻设备层由于转角差将对外幕墙形成挤压,同时重力荷载下外幕墙也将产生相对主体结构的竖向变形,这要求相关幕墙与主体结构连接构造既要能有效的将幕墙重力、风荷载、地震作用等荷载作用传给主体结构,又要对幕墙支撑结构与主体结构的相对变形有良好的适应性。

(7)上海中心结构超高,外幕墙面积大,且远离主体结构,结构施工周期长、建造难度大,因此幕墙支撑系统应具有良好的可建造性及技术经济性。

3 结构设计对策

3.1 分离式幕墙支撑结构体系的构建

针对上述挑战,设计人员对外幕墙支撑结构体系做了详细的多方案的设计选型研究,包括刚性的三向斜交网格结构方案(图5)和柔性的吊杆-水平桁架悬挂方案(图6)。刚性结构方案的优点是结构变形小,施工难度较低,但是,该方案对建筑外立面影响较大,结构用钢量大,且对主体抗侧刚度提高有限。柔性水平桁架—吊杆方案,竖向采用吊杆,视觉通透性较好,但水平向杆件较多,严重影响中庭视觉效果。



图5 三向斜交网格结构

Fig.5 Three directional crossing grid structure

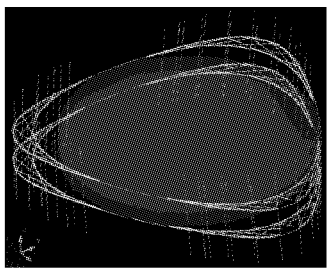


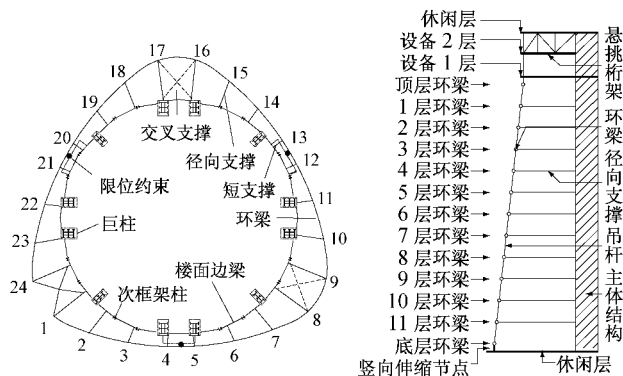
图6 水平桁架-吊杆系统

Fig.6 Horizontal truss-sag rod system

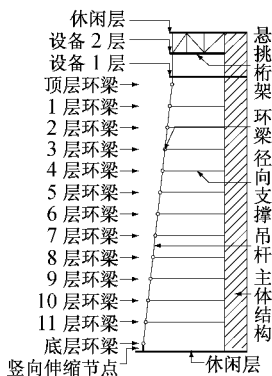
最终选择了由“吊杆-环梁-径向支撑”组成的“分区悬挂的柔性幕墙支撑结构系统”(图7). 该系统可在竖向相对主体结构自由变形,降低了幕墙支撑结构的受力水平. 因而构件截面较小,结构轻盈通透、视觉阻碍小,同时结构用钢量小,可建造性好.



a 效果图



b 平面布置图



c 剖面图

图7 幕墙支撑结构体系构成

Fig.7 Curtain wall structure system

支撑板块的环梁逐层设置其几何与外幕墙造型高度匹配,随着楼层升高,环梁绕着圆柱体楼面逐层旋转、收缩. 考虑成型能力和建筑造型效果,环梁采用直径 356 mm 钢管,沿环向每 8~10 m 设置一道水平径向钢管支撑($\Phi 219 \times 13$, $\Phi 273 \times 13$)共 25 根径向支撑将其与主体楼面结构连接,将幕墙承受的水平风荷载向楼面传递. 径向支撑与环梁刚接连接,以承担板块偏心悬挂产生的扭矩. 与楼面边梁采用

铰接连接以允许外幕墙可相对于主体上下运动.

在环梁和径向钢管支撑相交的位置设置两根屈服强度 460MPa 的高强度钢吊杆($\Phi 60 \sim \Phi 80$)将每区的所有水平环梁串联吊挂至上部机电层辐射桁架的悬挑端. 双吊杆设计提高了结构承重冗余度,保证了其中一根吊杆失效时结构的安全性.

为约束幕墙相对主体的扭转,在每层环梁与圆柱体楼面相切的位置布置了三个限位约束,在角部设置了 $\Phi 60$ 的拉杆交叉支撑.

每区最下方底环梁位于休闲层楼板上且距楼板 360 mm,无法在这一层设置径向支撑为其提供水平支撑. 因此在每区下方的休闲层楼面梁上设置连接立柱,并插入底环梁连接. 这样的连接方式为底环梁提供了侧向支撑,并允许其相对主体结构竖向自由.

3.2 超长环梁选型设计

幕墙支撑结构为封闭的环形结构,环向总周长最长接近 300 m,放射状布置的径向支撑的限制了环梁的自由伸缩变形,在结构内部产生较大温度应力. 设计中,曾考虑在幕墙环梁中设置伸缩缝(图8),释放环梁的温度应力.

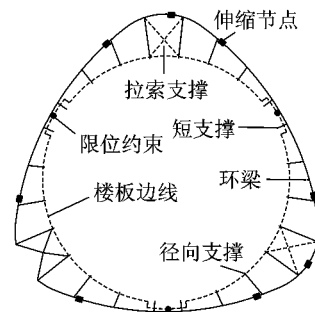


图8 有伸缩缝的幕墙支撑结构典型平面布置

Fig.8 Curtain wall structure system with expansion joints

但设置伸缩缝也同时带来的一些无法克服的问题:①温度作用下,伸缩缝位移达到 30 mm,幕墙板块插接构造难以吸收该位移;同时板块安装过程中,由于环境温度变化,伸缩缝变形使幕墙连接件发生位移,导致幕墙板块安装定位困难;②环梁轴向刚度不连续、整体性削弱,抗扭性能变差;③伸缩缝构造复杂,加工难度大、深化、采购,对结构正常的施工过程与进度影响很大^[11].

基于上述原因最终取消了水平伸缩节点,采用连续布置的环梁系统,并通过精细的温度效应分析保证结构受力安全.

3.3 抗扭体系选型设计

幕墙板块远离主体结构且几何造型扭转,在重力、风荷载、水平地震作用下,环梁系统存在绕主楼扭转趋势。为控制环梁扭转变形,防止环梁水平变形过大引起玻璃板块破坏,结构选型时考虑了仅限位约束、仅交叉支撑、限位约束+交叉支撑,3种抗扭转结构方案(图7),并通过对环梁在最不利的风荷载工况下^[10],各点的切向变形(图9)进行分析,以确定最优的抗扭方案。

分析表明:仅限位约束与限位约束+交叉支撑方案环梁扭转变形接近且明显小于仅交叉支撑方案,说明限位约束为结构提供的抗扭刚度明显优于拉杆支撑,当同时布置限位约束与交叉拉杆时,交叉支撑对于改善环梁抗扭刚度作用并不显著。

尽管分析表明仅设置限位约束已可以为环梁提供足够的抗扭约束,最终的抗扭构造方案,仍然选择了限位约束+拉索支撑的“双重抗扭”方案,以提高幕墙支撑结构抗扭转的冗余度^[10]。

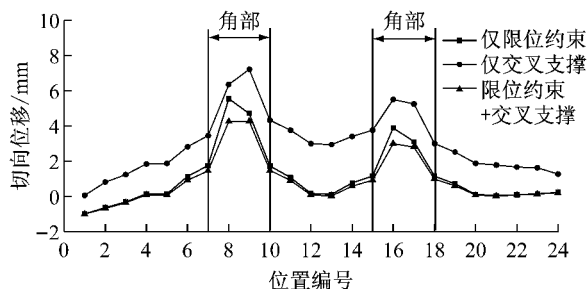


图9 风荷载作用下环梁扭转变形图

Fig.9 Torsional deformation of ring beam under wind load

3.4 特殊节点构造设计与优化

幕墙分段悬挂高度高达55~66 m、重量重,由于尺度效应,在各类水平及竖向荷载作用下,幕墙与主体结构间存在较大的竖向相对位移(图10和图11)。为保障幕墙系统的正常工作,降低支撑结构应力水平,在幕墙支撑结构与主体结构之间,设置了底环梁竖向伸缩节点、短支撑内端滑动节点、扭转限位约束等特殊的节点构造,用以吸收幕墙系统在各类荷载及非荷载效应下的相对主体结构的位移^[11]。

(1) 底环梁伸缩节点

底环梁共设有25对水平伸缩节点和竖向伸缩节点。水平伸缩节点构造如图12所示,其内部设置双滑环,可保证环梁的抗弯连续,又能沿环梁轴向滑动,释放轴向变形,防止环梁温度作用下水平伸缩变形引起竖向伸缩节点应力集中,从而影响滑动。

竖向伸缩节点的最初设计采用如图12所示刚

接方案,在竖向伸缩节点内设置减摩双滑环,双滑环固定于外套筒内壁,并与立杆管紧密接触,可为环梁提供必要的扭转约束,又能允许环梁竖向滑动。

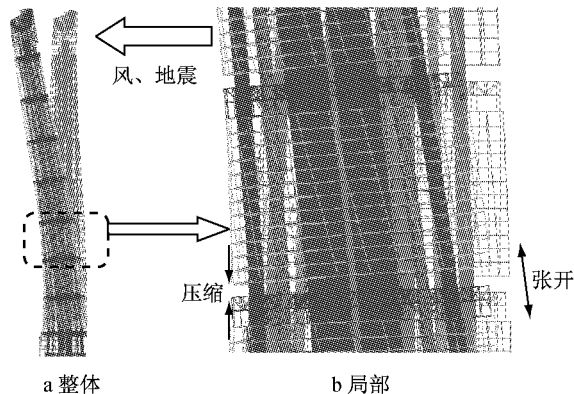


图10 侧向荷载作用下幕墙支撑结构与主体结构相对变形
Fig.10 Relative deformation between CWSS and main structure under horizontal loads

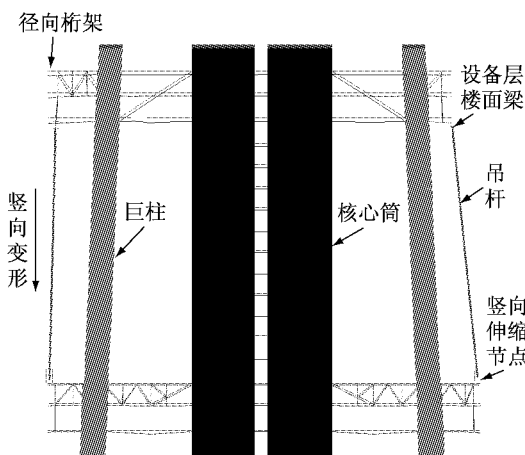


图11 竖向荷载下幕墙支撑结构变形

Fig.11 Deformation of CWSS under vertical loads

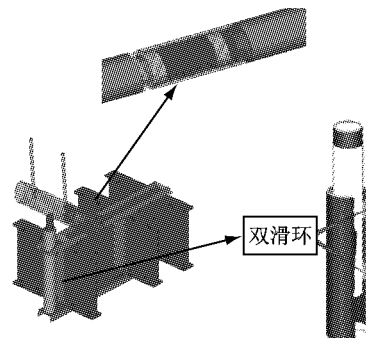


图12 方案阶段伸缩节点构造示意

Fig.12 Details of vertical sliding joint in scheme phase

但是该竖向伸缩节点存在一个主要的技术瓶颈是:节点将承受由底环梁传递来的较大弯矩和剪力(图13)。弯矩作用与剪力作用可在滑环和內衬管间产生挤压力,从而形成阻碍节点滑动的摩擦力。当摩

擦力大于驱动力(底层环梁板块重量),节点将不能滑动,导致底环梁在竖向相对塔楼无法自由变形,底层吊杆松弛、幕墙受压破坏。

节点附加内力的构成成分分析表明,引起节点不能滑动的主要附加内力是休闲层楼面变形引起的环向弯矩。设计时通过将节点构造改为铰接释放环向弯矩、节点上移减小偏心、减少节点数量、增大滑环间距等多种措施综合运用,减小滑环挤压力降低了节点摩擦力,避免了节点“自锁”。最后选定的节点构造如图14所示。

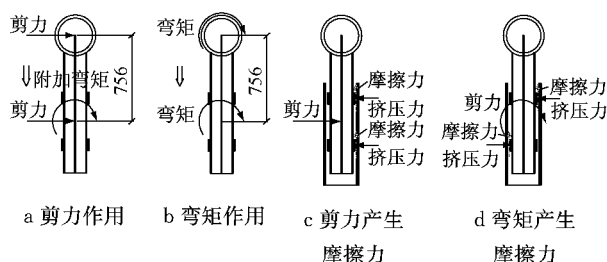


图13 竖向伸缩节点受力示意图

Fig.13 Mechanics graph of vertical sliding joint

此外,底层吊杆由于仅承受一层幕墙及环梁重量,拉力较小,极易受到扰动而发生松弛。特在底环梁增加配重,防止吊杆松弛,并增加滑动驱动力。

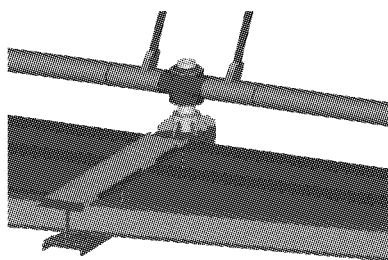


图14 竖向伸缩节点构造

Fig.14 Details of vertical sliding joint(single directional hinge)

(2)短支撑内端节点

如图10和图11所示,幕墙系统在安装和使用阶段会发生相对于主体结构的竖向位移,由于径向支撑外端与环梁刚接、内端与楼面铰接,这些位移将在支撑内产生较大的附加内力。对于长度较长的径向支撑,由于其线刚度较小,对于竖向位移不敏感,内端设置铰接构造即可有效降低支撑的附加内力。

但位于限位约束两侧长度 $<2\text{ m}$ 的径向支撑(图7),由于其线刚度大,内端节点即使采用铰接构造仍然会产生较大的附加弯矩而破坏。对于该类支撑,设计时采用了图15所示的滑动节点构造,该构造可以使短支撑内端随环梁竖向滑动,消除支撑内

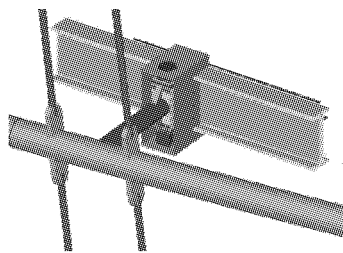


图15 短支撑内端滑动节点构造

Fig.15 Details of inner end joint of short radial strut

外端的竖向位移差,降低支撑约束刚度和支撑附加内力。

(3)扭转限位约束节点

扭转限位约束位于外幕墙与楼面的相切的位置(图7),主要作用是承受幕墙环梁的切向力,限制环梁切向位移,为外幕墙环梁提供扭转约束。

限位约束的具体构造如图16所示,在环梁对应楼层设置限位牛腿,环梁箱型牛腿伸入楼面限位牛腿中,并在环梁牛腿与楼面限位牛腿间设置橡胶垫板进行缓冲,避免环梁牛腿与楼面牛腿钢构件的硬接触。橡胶垫板与楼面限位牛腿上固定的不锈钢板组成减摩副以便于环梁相对楼面竖向、前后滑动。

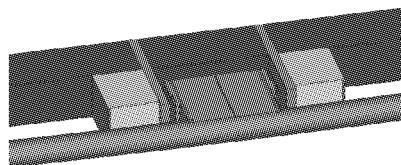


图16 限位约束构造

Fig.16 Details of limit constraints

4 若干非常规问题的分析与设计

尽管分区悬挂的幕墙体系有许多技术优势,但其独特的体系构成以及与主体结构间复杂的连接关系,使其分析和设计面临许多非常规的问题,需要专门研究。

4.1 与主体结构协同工作性能研究

常规的幕墙结构为附属于主体结构的单跨悬挂静定的结构系统,主体结构变形不会引起幕墙次结构产生附加内力,因此将其作为刚性边界条件独立的结构体系进行分析设计即可,不需与主体结构整体协同分析^[12]。

但上海中心幕墙支撑系统放射状布置的径向支撑将幕墙结构与主体结构形成超静定的传力和约束机制。支撑结构分区高度高、重量大,各吊点悬挂刚度柔且不均匀,同时主体结构超高、其竖向与水平向

变形都较大,将不可避免的引起幕墙支撑结构不均匀的竖向变形以及与主体结构的竖向相对变形和附加内力。上述体系构成和传力特点导致幕墙支撑结构与主体结构存在复杂的静动力相互作用。

为确保整个幕墙系统安全,需通过将幕墙支撑结构与主体结构整体建模,对幕墙支撑结构与主体结构的协同工作特性进行深入系统的研究,竖向荷载下协同分析表明,在幕墙悬挂重力及设备层附加恒活作用下,环梁各吊点竖向变形大且分布不均,将导致幕墙板块承受较大的竖向剪切变形、径向支撑较大的附加内力、吊杆内力发生重分布,并对伸缩节点带来不利影响。水平荷载作用下协同分析表明,主体结构侧向弯曲,导致相邻设备层之间产生转角差,幕墙支撑结构环梁悬挂于顶部设备层上,将随顶部设备层转动产生随动竖向变形,而连接径向支撑的楼面次框架支承于下区设备层环带桁架之上,由此导致环梁与楼面产生较大的相对竖向位移对伸缩节点和径向支撑均带来不利影响。

鉴于该结构上述协同受力特点,对设备层刚度进行调平设计,通过调整楼面梁系布置以及楼面加强设计,降低了吊点竖向变形不均匀性保证玻璃板块使用安全;在支撑内端设置滑动构造降低附加内力水平保证支撑受力安全;对有关滑动节点滑动行程进行仔细复核,确保其在各种复杂工况下能正常滑动工作,分析表明,考虑整体协同后伸缩节点的总滑动行程最大达到了向上90 mm,向下160 mm。

4.2 幕墙系统竖向地震反应影响评估

从竖向受力来说,上海中心幕墙支撑结构为巨型的弹性串联悬挂系统,分区悬挂重量重达2 200~3 200 t,且悬挂高度高(8区达536 m),设备层悬挂点的竖向支承刚度柔,因此该结构在竖向地震作用下的响应不容忽视。且幕墙结构与主体结构的竖向振动周期较为接近,均位于地震反应谱的平台段(0.1~0.9 s),将使得幕墙结构的竖向地震响应更为突出。

为保证竖向地震作用下,幕墙支撑结构系统的安全承载,采用整体模型计入主体结构高度和弹性支承效应对幕墙结构进行详尽的竖向地震响应分析,分析表明:幕墙支撑结构地震反应随高度的增加而逐渐增大。8区底部环梁的加速度峰值已达到 $8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (0.82 g)相当于基底输入加速度的12.3倍,玻璃板块竖向地震力不容忽视。8区吊杆最大轴力达到0.65倍的重力,吊杆及相关节点设计应考虑其影响进行设计。另外,环梁竖向地震下产生很大的不均

匀竖向位移,相邻吊点位移差达到16 mm,板块变形构造设计应考虑其影响以防止地震时板块构造不能吸收过大的竖向剪切变形而破碎,产生次生灾害。幕墙竖向地震反应的详细分析见文献[13]。

4.3 施工建造对幕墙支撑结构的影响分析与控制

幕墙分区悬挂重量大,吊挂点的竖向支承刚度柔且不均匀,幕墙悬挂施工会使设备层发生不均匀的竖向变形,从而导致幕墙系统各层环梁安装完成后偏离预定的设计标高、环梁外观不平整,从而影响建筑外观及幕墙板块的安装和正常使用。

为此,对幕墙支撑结构的安装过程进行施工模拟分析,并依据分析结果对标高进行调整。分析表明,施工过程中幕墙自重、附加恒活下的吊点位移,以及吊杆伸长均对环梁最终位移有较大影响,根据模拟分析最终采取吊点预抬高和吊杆长度预调两种措施确保幕墙施工建造的顺利进行。

此外,主体结构(巨柱)压缩量大与主体结构施工顺序密切相关,主体结构超高、施工周期长,低区幕墙施工完成后,高区主体仍在施工,区间巨柱的弹性和非弹性压缩仍将继续发展,为评估幕墙悬挂后巨柱的后续变形,结合实际施工顺序,采用施工模拟的方法对结构建成后50年的巨柱包含收缩、徐变在内的总的压缩量进行了评估,分析表明:由于巨柱长度较长,巨柱区间压缩量较大达到了35~50 mm,其中收缩、徐变在巨柱区间总压缩量中占比超过70%,表明长期的荷载效应对幕墙支撑结构存在显著的影响。同样由于主体结构巨型框架与次框架组合的结构特点,巨柱压缩导致幕墙环梁与楼层产生数值较大且分布规律复杂的竖向位移差,从而使径向支撑产生附加较大的弯矩并对伸缩节点设计带来不利影响。

5 结论

上海中心外幕墙系统远离主体结构、体型扭转且采用独特的悬挂体系给幕墙支撑结构设计和施工带来了诸多技术挑战,通过本工程的设计研究,可得到以下结论:

(1)分区悬挂的柔性幕墙支撑结构,构件截面较小,轻盈通透,可建造性好,通过采取特殊构造与主体连接在竖向可相对主体结构自由变形。

(2)环梁采用连续系统有利于板块构造设计及安装、结构整体性好、且易于加工采购、节省造价。

(3)限位约束+拉杆支撑双重抗扭体系可有效控

制环梁相对主体结构水平变形,结构抗扭冗余度高。

(4)悬挂系统与主体结构的连接构造设计是系统成立的关键,超静定传力机制使得相关构造既要传力可靠又要能吸收幕墙与主体结构的相对竖向变形,以降低支撑结构内力、以保证幕墙使用安全。

(5)超高层悬挂式幕墙支撑结构在重力荷载、风荷载、地震作用以及施工建造过程中与主体结构协同受力性能复杂,需通过整体模型协同分析以及施工模拟分析以确保幕墙系统安全。

上海中心复杂幕墙系统的设计经验表明:

(1)对于超高层采用分离式的幕墙系统,可增加建筑造型设计的自由度,可在保持变主体结构规则布置的同时利用外幕墙几何的改变来降低主体结构风荷载,具有较好的技术经济性。

(2)由于几何形态复杂、大体量的玻璃幕墙系统越来越多,且幕墙支撑结构多为外露结构,直接影响幕墙系统视觉效果,因此结构选型除应保证受力合理、经济适用外还应重点关注造型美观。

(3)大体量、几何复杂的幕墙系统往往与主体结构存在较强的相互作用,因此对于复杂幕墙系统应与主体结构整体建模,协同分析设计。

(4)大体量、几何复杂的幕墙支撑结构应采用柔性连接以吸收幕墙结构与主体结构的相对变形,降低支撑结构应力水平。

(5)由于玻璃材料的特殊性,对于变形敏感,因此幕墙支撑结构设计在保证结构受力安全的基础上应重点控制结构变形,以保证玻璃板块安全。

参考文献:

- [1] 赵西安. 玻璃幕墙的结构设计[J]. 建筑结构, 1996, 26(6): 44.
ZHAO Xi'an. Structural design of curtain wall [J]. Building Structures, 1996, 26(6): 44.
- [2] 武岳, 郭轶宏, 孙晓颖. 北京新保利大厦幕墙索支承结构抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(6): 63.
WU Yue, GUO Yihong, SUN Xiaoying. Seismic behavior of the cable net wall of the New Poly Plaza Building in Beijing [J]. Building Structures, 2010, 40(6): 63.
- [3] 汪大绥, 姚利民, 花更生, 等. 东方艺术中心点支式玻璃幕墙钢架—支撑—索网结构支承体系研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 113.
WANG Dasui, YAO Limin, HUA Gengsheng, et al. Study on the steel frame-brace-cabling structural support system for point supporting glass curtain wall of Oriental Art Center [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3): 113.
- [4] 刘军进, 刘枫, 朱礼敏, 等. 中国航海博物馆曲面幕墙单层索网结构设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 7.
LIU Junjin, LIU Feng, ZHU Limin, et al. Structure design of single-layer cable-net curve curtain wall of China Maritime Museum [J]. Building Structures, 2011, 41(3): 7.
- [5] 王元清, 石永久, 李少甫, 等. 点支式玻璃建筑结构体系及其应用技术研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(4): 1.
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, LI Shaofu, et al. Study on structural system of point-supported glass building and its application [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(4): 1.
- [6] 邓晓蔚, 石永久, 王元清, 等. 大跨度幕墙体系的风振分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(3): 46.
DENG Xiaowei, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, et al. Wind vibration analysis on the large-span curtain wall [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(3): 46.
- [7] 黄宝锋, 卢文胜, 曹文清. 建筑幕墙抗震性能指标探讨[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 7.
HUANG Baofeng, LU Wensheng, CAO Wenqing. Discussion on the seismic performance indices of architectural curtain walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 7.
- [8] 冯若强, 叶继红, 武岳, 等. 单层平面索网玻璃幕墙结构地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 66.
FENG Ruoqiang, YE Jihong, WU Yue, et al. Seismic response of cable net facade [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 66.
- [9] 钱鹏, 王建, 周建龙. 某工程中玻璃幕墙结构对主体结构设计的影响[J]. 结构工程师, 2010, 26(4): 26.
QIAN Peng, WANG Jian, ZHOU Jianlong. The influence of glass curtain walls on the design of key structure in a project [J]. Structural Engineers, 2010, 26(4): 26.
- [10] 丁洁民, 何志军, 李久鹏, 等. 上海中心大厦悬挂式幕墙支撑结构设计若干关键问题 [J]. 建筑结构, 2013, 43(24): 6.
DING Jiemin, HE Zhijun, LI Jiupeng, et al. Several key issues of analysis and design of suspend curtain wall support structure of Shanghai Tower [J]. Building Structures, 2013, 43(24): 6.
- [11] 丁洁民, 何志军, 李久鹏, 等. 上海中心大厦幕墙支撑结构关键节点分析设计[J]. 建筑结构, 2013, 43(24): 12.
DING Jiemin, HE Zhijun, LI Jiupeng, et al. Analysis and design of key connection of curtain wall support structure of Shanghai Tower [J]. Building Structures, 2013, 43(24): 12.
- [12] 中华人民共和国建设部. JGJ 102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. 2003 JGJ 102—2003 Technical code for glass curtain wall engineering [S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2003.
- [13] 何志军, 丁洁民, 李久鹏. 上海中心大厦悬挂式幕墙支撑结构竖向地震反应分析 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 34.
HE Zhijun, DING Jiemin, LI Jiupeng. Analysis on vertical seismic response of curtain wall support structure of Shanghai Tower [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 34.