

立面大开洞超限高层建筑结构设计分析

姜玲玲¹, 赵占国²

(1. 山东鲁新设计工程股份有限公司, 山东 济南 250013;

2. 山东省环能设计院股份有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 随着城市化进程的加快和建筑技术的进步, 立面大开洞超限高层建筑日益增多。大开洞设计虽然满足了建筑功能与审美需求, 彰显了设计创新, 但也给结构设计带来了巨大挑战。本文分析了立面大开洞超限高层建筑结构设计的重要意义, 剖析了诸如洞口尺寸位置不合理、洞口区域结构布置欠妥、洞口边缘构件设计不足、结构分析计算不全面等问题, 提出了合理控制洞口尺寸与优化布置位置、加强洞口区域结构布置、细化洞口边缘构件设计、开展全面结构分析计算等优化设计策略, 旨在为立面大开洞超限高层建筑结构设计提供科学且有效的参考。

关键词 超限高层建筑; 立面大开洞; 结构设计

中图分类号: TU972

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.12.038

0 引言

建筑立面开大洞, 旨在营造通透开放的空间形态, 满足采光、通风、视野等使用需求, 塑造个性鲜明的建筑形象, 已成为一种新的建筑设计趋势。然而, 立面开大洞势必削弱结构竖向构件, 破坏水平楼板连续性, 引起较大应力和变形集中, 给高层建筑设计带来严峻挑战, 如何在满足建筑设计要求的同时, 确保结构安全可靠, 是工程界亟需破解的难题。

1 立面大开洞超限高层建筑设计的重要意义

1.1 满足建筑功能和审美需求

由于高层建筑平面布局的限制, 立面开大洞往往是满足采光、通风、视野、交通等使用功能的需要, 中庭、天井等敞开空间能够增加室内外空气、光线交换, 营造出内外通透、视野开阔的建筑空间, 立面大开洞还能打破高层建筑立面单调呆板的视觉感受, 创造丰富多变的光影效果, 提升建筑的艺术审美品位。

1.2 彰显设计创新和技术水平

随着高层建筑向超高、绿色、智能方向发展, 建筑创新设计与前沿技术应用日益受到重视, 立面大开洞设计突破常规高层建筑立面的封闭形式, 通过虚实结合、疏密有致的洞口布置, 创造出简洁、雕塑感强的建筑形体, 为高层建筑的造型创新提供了广阔空间, 洞口尺寸与建筑总高的比例, 以及洞口在立面上的分布位置、组合方式, 成为设计师发挥创意、彰显个性的舞台。大开洞结构设计对工程技术提出了更高要求, 需要设计人员掌握深厚的力学理论知识和丰富的工程

实践经验, 综合运用新材料、新工艺、新技术, 在确保结构安全的基础上, 实现建筑设计意图, 一个精心设计的大开洞立面, 不仅能彰显设计的独创性, 也能体现工程技术的先进性, 对于推动高层建筑设计理念和工程建造水平的进步具有积极作用^[1]。

1.3 促进超限高层建筑的发展

近年来, 在城市快速发展和土地日益紧缺的双重压力下, 超限高层建筑不断涌现, 高度竞赛愈演愈烈, 在此背景下, 立面大开洞设计成为建筑师在超高层建筑领域进行形态创新、彰显建筑个性的重要手段。诸多超高层地标建筑, 如上海中心大厦、广州周大福金融中心等, 无不通过立面开洞大幅提升了城市形象和品位, 从结构工程角度看, 立面开大洞虽然对超限高层结构设计提出了更高的难度, 但也倒逼工程技术创新, 推动结构体系、施工工艺的进步, 大开洞的存在对改善高层建筑风振性能、提高结构抗震韧性也具有积极作用。

2 立面大开洞超限高层建筑设计存在的问题

2.1 洞口尺寸和位置的不合理设置

在立面大开洞的设计中, 洞口尺寸的选择、洞口位置的布置往往是设计师根据自身经验或从建筑功能、形态角度出发, 缺乏必要的结构分析验算和论证, 盲目放大洞口尺寸, 将洞口布置在结构受力薄弱区域如边跨、端跨等, 极易引起严重的应力集中, 导致洞口周边梁、柱、剪力墙等主体结构构件截面和配筋明显加大, 既影响结构的经济性, 也给构件施工带来困难。

2.2 洞口区域结构布置欠妥

立面开大洞意味着高层建筑局部结构的不连续,洞口上下区域结构的连接方式对洞口及周边结构的受力性能影响巨大,目前洞口区域结构布置往往存在缺乏系统性考虑、构造措施不到位等问题。比如:洞口上部结构直接搁置在洞口下部结构上,忽视二者刚度、变形协调;洞口跨度较大时未设置有效的水平传力措施,洞口边缘柱无法形成有效的框架机制,难以保证结构的整体性;洞口区域未合理布置斜撑、支撑等传力构件,结构空间受力路径不合理,易产生应力集中^[2]。

2.3 洞口处边缘构件设计不足

洞口周边往往发生较大的应力集中和变形,对洞口边缘梁、柱等构件的承载能力、变形性能要求很高,然而目前洞口处边缘构件设计往往存在以下不足:截面尺寸偏小,配筋率不足,难以承担较大的弯矩、剪力和轴力。纵、横向配筋未按洞口应力走向合理布置,约束箍筋设置不足,难以保证塑性变形能力,仅对洞口边缘柱进行加强,忽视了洞口楼板的配筋加密,柱板刚度不匹配,易产生应力突变,受力钢筋的锚固长度不足,影响延性发挥。

2.4 结构分析计算考虑不全面

立面大开洞显著改变了高层建筑的结构体系,引起结构动力特性的改变,在结构分析计算中需要给予特殊考虑,然而目前大开洞高层结构设计往往存在分析计算考虑不全面、不细致的问题:简化的结构计算模型对洞口的模拟粗糙,未能准确反映洞口区域的刚度、质量分布;对洞口引起的刚度、质量突变,扭转中心迁移等影响考虑不足;未开展大开洞结构的弹塑性时程分析,难以反映开洞后结构的真实地震反应;参数分析、敏感性分析深度不够,对结构抗震性能的评价缺乏全面性。设计中缺乏专门的风振、温度效应分析,对洞口区域的二次效应考虑简单化,结构裂缝、长期变形验算不细致,也影响结构分析的可靠性^[3]。

3 立面大开洞超限高层建筑结构优化设计策略

3.1 合理控制洞口尺寸和优化布置位置

大开洞尺寸和布置位置是影响结构体系效率和经济性的关键因素,应在充分考虑建筑功能、外观造型需求的基础上,从结构角度进行优化,洞口跨高比应根据高宽比、体型特点等合理控制,一般宜小于 1/3,对扭矩较大的不规则结构,跨高比不宜超过 1/4,过大的洞口跨高比会显著削弱结构侧向刚度,加剧扭转效应。洞口位置要尽量布置在结构刚度较大、地震力和

风荷载较小的区域,宜对称布置于平面、立面的中央区域,避免布置于建筑端部、边跨等薄弱部位,减小扭转效应,洞口布置要尽可能规则、对称,减少平面、立面的不规则性,对于高宽比较大的塔式超高层建筑,可布置竖向贯通的大型中庭或多个小型错层中庭,形成通畅的竖向空间;而对于高宽比小、体量大的裙房塔楼结构,可在裙房和塔楼连接处布置面积较大的贯通空间,丰富空间层次^[4]。

3.2 加强洞口区域结构布置

针对洞口开设引起的结构不连续问题,要采取有效的洞口加强措施,理顺洞口区域传力路径,洞口上部结构与下部结构交接处,宜设置环梁或转换梁,增强节点刚度,平衡上部结构传递的剪力和弯矩,环梁或转换梁应具有足够的承载力和刚度,其截面尺寸和配筋应根据内力分析确定。对规则平面的开洞结构,洞口上部结构可通过设置必要的剪力墙、框架等竖向构件,将荷载直接传递至地基;洞口区也可通过设置斜撑、桁架等水平构件,将荷载传递至洞口两侧的竖向构件,以减小洞口跨度。斜撑、桁架的布置要合理顺应建筑平面形式,避免破坏使用功能,对不规则平面开洞结构,由于空间受力的复杂性,可采用型钢混凝土组合梁或巨型桁架等强有力的水平传力构件,或在洞口上部设置由柱或墙组成的竖向桁架,引导力沿最优路径流动,避免洞口区域应力过于集中。洞口上部可设置必要的伸臂桁架或悬挑结构,将洞口两侧竖向构件连成整体,提高洞口区域整体刚度,同时要优化洞口区域楼板布置,楼板洞口边缘应避免开柱,洞口楼板与柱应可靠连接,洞口处楼板可采取必要的加厚或配置双层钢筋等补强措施,提高楼板的承载力和刚度,改善板柱节点受力性能。

3.3 细化洞口处边缘构件设计

洞口边缘梁、柱是大开洞结构的关键受力构件,直接关系到洞口区域的安全性与耐久性,应进行专门的补强设计,优化洞口边缘梁柱截面形式,根据应力特点采用工字形、十字形、L 形等异形截面,提高截面抗弯、抗扭刚度。工字形截面可增大翼缘,提高抗弯刚度;十字形截面双向对称,抗扭刚度强;L 形截面可灵活布置,适应不同方向的受力需求。加大洞口边缘梁柱配筋,提高纵向受力钢筋配筋率,按应力走向合理布置钢筋,重点加密洞口拐角处的斜向箍筋,提高配筋构造的延性、韧性,梁柱纵向钢筋宜采用高强钢筋,箍筋宜小直径、密间距布置,并严格锚固、搭接构造,加强洞口楼板配筋设计,洞口周边楼板采用双向配筋,

配筋率不应低于1%，洞口角部宜布置斜向钢筋，并与相邻梁、柱可靠锚固，洞口楼板负弯矩钢筋应沿洞口边缘连续布置，并伸入梁、柱内可靠锚固。严格洞口边缘构件的抗震构造要求，提高洞口临空一侧梁柱的箍筋加密区长度，临空一侧梁底纵筋和柱筋的锚固长度应满足延性要求，增强构件的延性变形能力，梁柱纵向受力钢筋的锚固长度不应小于规范要求，必要时可采用机械连接等可靠锚固方式，优化洞口边缘构件材料性能，洞口周边梁柱混凝土强度等级和钢筋强度等级应适当提高，减小构件变形，洞口周边宜采用高性能混凝土，提高抗裂性能和耐久性能^[5]。

3.4 开展全面的结构分析计算

立面大开洞对高层建筑结构体系的影响突出，在进行结构分析计算时必须系统考虑，优选计算参数，提高分析的精细化水平，要建立精细的三维空间有限元模型，采用实体单元或壳单元对洞口区域进行精细模拟，准确描述洞口附加应力。洞口两侧应进行网格加密，并合理选取网格疏密过渡方式，针对洞口引起的刚度、质量突变，扭转中心迁移等问题，进行结构动力特性分析，优化洞口区域质量、刚度分布，应重点关注洞口开设导致的振型变化、周期突变等问题，必要时应采取调整洞口设置、增设辅助结构措施等，优化结构动力性能。由于洞口开设往往伴生侧向刚度突变，扭转耦联效应明显，需要开展大开洞结构弹塑性地震反应分析，评估洞口区的抗震薄弱部位，并通过参数敏感性分析，优化洞口尺寸、位置等参数，弹塑性分析应考虑洞口区域构件的非线性特性，并验证洞口区域变形协调性及延性、耗能能力。针对超限高层建筑的体型特点，还应进行大开洞结构风振响应分析，以及温度效应、长期变形等专项计算分析，对洞口区域进行裂缝验算，提高结构使用性能，风振分析应考虑洞口对扰流场、涡激区的影响，优化洞口尺寸和留设位置。

3.5 注重洞口处建筑细部设计

立面大开洞是建筑设计手法与结构技术的高度融合，除了协调好洞口的结构设计，建筑细部设计也应给予高度重视，二者相辅相成，才能真正实现建筑艺术性与结构安全性的统一，要处理好洞口的造型和比例关系，做到虚实结合、疏密有致，体现建筑的整体感和韵律美，洞口造型应简洁大方，避免过于复杂、零碎的几何外形，洞口应在立面上形成稳定、均衡的几何分割，与建筑主体形成呼应。要选用合适的建筑

材料，洞口可采用表现轻盈通透的玻璃、金属板等装饰材料，与主体结构材料形成对比，凸显洞口的层次感，洞口材料色彩应与主体相协调，并体现层次变化，同时应注重材料的耐久性、易维护性，在洞口细部装饰上下功夫，可采用特色构件、线脚等元素，增加洞口的趣味性和识别性。洞口细部装饰应体现简洁、精致的设计风格，装饰元素应与建筑主体风格相呼应，并与洞口结构形式相协调，同时在洞口周边适当布置绿化和照明，利用光影变化、虚实对比，营造丰富的空间层次，洞口绿化应与建筑总平面绿化相呼应，体现空间延续性，洞口照明应满足使用功能需求，并营造良好的夜景效果。洞口作为室内外空间的过渡区域，在细部设计中还应重视其环境舒适性，洞口应具有良好的采光通风条件，可适当设置遮阳构件；洞口的噪声、温度、湿度控制也应纳入建筑设计的考量范畴，并与设备专业密切配合，要优化洞口空间的采光设计，提高自然采光效果，合理设置遮阳百叶、固定遮阳板等，减少眩光，同时应采取有效的隔声、保温、调湿等措施，提高洞口区域环境品质。

4 结束语

立面大开洞是一把双刃剑，它丰富了超高层建筑的空间形式，提升了建筑品质，也给结构设计带来了巨大的挑战，加剧了结构的不确定性，如何在建筑设计和结构设计间寻求平衡，协调好功能、形态、结构的关系，是摆在工程技术人员面前的时代命题。本文分析了立面大开洞超限高层建筑设计中的共性问题，提出了洞口尺寸与位置优化、加强洞口区域构件设计、细化洞口边缘构造措施、开展精细全面的结构分析等优化设计策略，可为类似工程提供参考。

参考文献：

- [1] 钱耀华, 刘艺萍, 陈瑛, 等. 某底部设置V型分叉柱超限高层建筑设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 87-91.
- [2] 朱忠漫. 某超限高层结构抗震设计与分析[J]. 建筑与装饰, 2023(24): 7-9.
- [3] 游昕. 某大型钢结构会议中心超限结构设计探析[J]. 福建建筑, 2024(01): 57-63.
- [4] 韩艳. 短肢剪力墙在民用建筑结构设计中的运用分析[J]. 建设科技, 2024(18): 71-73.
- [5] 刘洋, 陈础, 刘永添, 等. 某科研办公楼悬挂结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 295-299.