

高层建筑结构设计中平面不规则问题与抗震措施探讨

文 / 罗渊捷 华润(深圳)有限公司

陈冠宇 华润(深圳)有限公司

蔡建邦 华润(深圳)有限公司

摘要: 高层建筑结构设计中平面不规则现象日益普遍,对建筑抗震性能产生重要影响。本文系统分析了平面扭转不规则、平面凹凸不规则、楼板局部不连续等典型不规则类型的判定标准与形成机理,探讨了基于性能化的抗震设防目标制定、偏心距调控与扭转效应优化、弹塑性时程分析等计算方法。结合工程实践,提出了关键构件抗震等级提升、新型阻尼器系统选配、薄弱楼层局部刚度补强等抗震加强措施。研究表明,采用多软件对比验证、合理设置加强部位、优化结构布置等综合措施,能够有效提升不规则高层建筑的抗震性能。

关键词: 高层建筑; 平面不规则; 抗震设计; 扭转效应; 性能化设计; 阻尼器

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.104

引言

地震作用下,平面不规则建筑容易产生扭转效应,应力集中现象明显,薄弱部位易率先破坏,严重威胁结构整体安全。近年来多次破坏性地震表明,平面不规则建筑的震害程度往往高于规则建筑。因此,深入研究平面不规则高层建筑的抗震设计理论与方法,制定科学合理的抗震加强措施,对保障建筑结构安全具有重要的理论价值和工程意义,是结构工程领域亟待解决的关键技术问题。

一、高层建筑平面不规则的类型识别与特征分析

(一) 平面扭转不规则的判定标准与形成机理

平面扭转不规则是高层建筑最常见的不规则类型,当楼层最大弹性水平位移(或层间位移)大于该楼层两端弹性水平位移(或层间位移)平均值的1.2倍时即判定为扭转不规则。这种不规则性源于建筑平面布置的不对称性,当抗侧力构件分布不均匀或建筑平面呈L型、T型等非对称形态时,结构的刚度中心会偏离质量中心,地震作用下惯性力作用于质量中心而抗力通过刚度中心传递,两者的偏离产生扭矩引起结构扭转振动,导致远端构件内力增大、位移放大,角部柱和边框框架等部位尤其容易出现应力集中^[1]。实际工程中楼板开洞、局部夹层设置、竖向构件截面突变等因素都会加剧扭转效应,某21层L型高层建筑在考虑偶然偏心情况下扭转位移比达到1.36,远超1.2的限值,这种显著的扭转不规则性要求设计中必须采取特殊的抗震加强措施以确保结构安全。

(二) 平面凹凸不规则的设计特点与尺寸控制

平面凹凸不规则指建筑平面凹进或凸出的尺寸大于相应投影方向总尺寸的30%,这类不规则形态虽然满足了建筑采光、通风、景观等功能需求,但改变了水平力的传递路径,在凹角处产生应力集中,凸出部分则形成鞭梢效应。地震作用下凹角处的楼板和连接构件承受较大拉压应力容易发生局部破坏,凸出部分由于刚度相对

较小、变形较大,与主体结构的协调变形能力较差,某高层建筑标准层最大偏心率达0.23超过0.15的规范限值,属于典型的平面凹凸不规则结构。控制此类不规则的关键在于合理限制凹凸尺寸,建筑设计阶段应尽量减小凹凸程度,必要时通过设置变形缝将复杂平面分解为相对规则的独立单元,结构设计中需要加强凹角处的构造措施,包括增加楼板厚度、提高配筋率、设置斜向加强筋等,凸出部分则应适当增加抗侧刚度以确保与主体结构的变形协调,从而提高整体抗震性能^[2]。

(三) 楼板局部不连续的分布规律与刚度影响

楼板局部不连续主要表现为楼板开洞、错层、局部缺失等形式,当楼板有效宽度小于该楼层典型宽度的50%或开洞面积大于该楼层楼面面积的30%时即构成楼板局部不连续,这种不规则性破坏了楼板的整体性,削弱了其协调各抗侧力构件共同工作的能力。楼板作为水平抗侧力体系的重要组成部分承担着传递水平荷载、协调竖向构件变形的作用,不连续区域无法有效传递水平剪力导致应力重分布,周边构件内力增大,大开洞周边楼板应力集中明显,在反复荷载作用下容易产生裂缝,错层结构中错层处的短柱刚度大、延性差,地震时容易发生脆性破坏。



二、不规则高层建筑结构抗震设计理论与计算方法

(一) 基于性能化的抗震设防目标制定与等级划分

性能化抗震设计突破了传统“三水准两阶段”设计方法的局限,针对不规则高层建筑的特殊性制定更为严格和细化的性能目标,根据建筑重要性、不规则程度、场地条件等因素实施差异化设防^[3]。超限高层建筑通常将性能目标设定为C级或更高,具体分解为小震下所有构件满足弹性承载力要求且结构层间位移角不超过1/800,中震下竖向构件不屈服且弹性层间位移角不超过1/400,大震下关键构件不屈服或可修复且弹塑性层间位移角不超过1/100,这种分级设防策略确保了结构在不同地震水平下的安全性能。抗震等级的确定综合考虑结构体系、高度、不规则程度等多重因素,平面不规则结构的抗震等级通常需要提高一级,如某7幢区A级高层建筑因存在扭转不规则、平面凹凸不规则、竖向尺寸突变等多项不规则,将底部加强区的抗震等级从二级提升至一级,关键部位的框架柱提升至特一级,这种差异化的抗震等级设置充分体现了“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”的抗震设计理念,为结构安全提供了多重保障。

(二) 偏心距调控与扭转效应的协同优化策略

控制偏心距是减小扭转效应的根本措施,结构设计中通过增加周边构件刚度、调整核心筒位置、优化剪力墙布置等方式,使刚度中心尽量接近质量中心,从而有效控制结构的扭转响应。偏心距与扭转效应之间存在近似线性关系,某L型高层建筑通过在平面远端增设剪力墙,成功将扭转位移比从1.45降至1.28,但过度追求减小偏心距可能导致结构刚度分布不均产生新的薄弱部位,因此需要在整体刚度、扭转刚度、抗侧刚度之间寻求最优平衡。协同优化策略强调结构整体性能的提升,通过参数化分析确定最优的构件布置方案,优化目标不仅包括扭转位移比,还综合考虑周期比、刚度比、层间位移角等多项指标,采用遗传算法、神经网络等智能优化方法能够在复杂的设计空间中搜索到较优解,实践表明经过协同优化的结构方案不仅满足规范要求,还能节约10%~15%的材料用量,实现了安全性与经济性的双重目标^[4]。

(三) 弹塑性时程分析与静力弹塑性分析推覆验算技术

弹塑性分析是评估不规则高层建筑抗震性能的重要手段,动力弹塑性时程分析能够真实反映结构在地震作用下的非线性响应但计算量大且参数敏感性强,而静力弹塑性分析则提供了一种相对简化但仍能有效反映结构非线性特性的实用方法。静力弹塑性分析通过施加单调

递增的水平荷载推覆结构直至达到目标位移或结构失稳,分析过程中详细记录塑性铰的开展顺序、分布位置及结构的能力曲线等关键信息,某不规则高层建筑的静力弹塑性分析显示X向推覆时第11步在5层连梁首先出铰、第42步达到性能点,Y向推覆时第33步达到性能点,塑性铰的分布规律清晰揭示了结构的薄弱部位为抗震加强提供了科学依据。需要注意的是加载模式的选择对结果影响较大,单一加载模式难以反映高阶振型的影响,对于不规则结构建议采用多种加载模式进行包络设计,考虑到平面不规则结构的方向性还应进行斜向推覆分析,某工程分别进行了0°、45°、90°、135°四个方向的推覆分析,结果表明45°方向为最不利工况且性能点对应的基底剪力比主轴方向低12%,充分说明了多角度分析的必要性。

(四) 多软件对比验证的结构计算可靠性保障

鉴于不规则高层建筑受力的复杂性,采用多个软件进行对比分析已成为确保设计可靠性的工程共识,不同软件在力学模型、单元类型、求解算法等方面的差异使得对比验证能够相互补充、取长补短^[5]。常用的结构分析软件包括SATWE、ETABS、MIDAS等,各软件的计算假定存在差异,如SATWE采用薄壁杆件理论模拟剪力墙而ETABS采用壳单元,在楼板刚度假定、梁柱节点处理、地震作用计算等方面也各有特点,某不规则高层建筑采用SATWE和GSSAP两种软件进行分析,虽然具体数值有所差异但在周期、位移、内力等关键指标的变化规律上保持一致,底部剪力相差不超过5%,相互印证了计算结果的可靠性。

三、平面不规则高层建筑抗震加强措施与工程实践

(一) 关键构件抗震等级提升与特殊加强部位设置

平面不规则高层建筑的抗震加强应突出重点、分级处理,关键构件包括底部加强区的墙柱、平面凸角处的边柱、大开洞周边的框架梁柱等,这些构件在地震作用下承受较大内力,是保证结构整体安全的关键所在。抗震等级的提升需根据构件的重要性和受力特点确定,底部加强区高度通常取墙体总高度的1/8且不小于两层,该区域内的墙柱抗震等级提高一级,平面凸出部位的角柱由于双向受力、扭转效应明显,建议按特一级进行设计,如某工程3-4层的框架柱位于体型收进部位,按特一级抗震设计后轴压比限值从0.65降至0.55,箍筋加密区范围从柱净高的1/6增加至1/3。特殊加强部位的设置需要结合受力分析确定,楼板削弱部位、平面凹角处、刚度突变层等都需要采取增加板厚、提高配筋率、设置暗梁等加强措施,某L型建筑在5层平面凹角处将楼板厚度从120mm增加至150mm并采用双层双向配筋,配筋

率不小于 0.25%，实践证明这些局部加强措施能够有效改善应力集中现象，显著提高结构的整体性和抗震性能。

（二）新型阻尼器系统的选配方案与减震技术应用

消能减震技术为不规则高层建筑的抗震设计提供了新的解决方案，阻尼器通过耗散地震输入能量减小结构的地震响应，常用类型包括粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器、金属屈服阻尼器等，各有其适用范围和特点。阻尼器的选型需要综合考虑结构特性、预期性能目标、经济性等因素，粘滞阻尼器具有良好的耗能能力且对温度不敏感适用于各类结构，金属屈服阻尼器造价相对较低但存在震后需要更换的问题，粘弹性阻尼器兼具刚度和阻尼特性但性能受温度影响较大，某不规则高层建筑采用粘滞阻尼器在 5-15 层设置了 48 个阻尼器，阻尼系数为 $800\text{kN}\cdot(\text{s}/\text{m})$ ，速度指数为 0.3。阻尼器的布置策略直接影响减震效果，优化布置应遵循“均匀分布、重点加强”的原则，在层间位移较大的楼层、平面薄弱部位优先布置，对于扭转不规则结构宜在周边布置阻尼器以增加抗扭刚度，某工程安装阻尼器后顶点位移减小了 25%，基底剪力降低了 20%，扭转位移比从 1.35 降至 1.18，充分证明了消能减震技术在改善不规则高层建筑抗震性能方面的显著效果。

（三）薄弱楼层识别与局部刚度补强的构造措施

薄弱楼层是结构抗震的关键控制部位，准确识别并采取针对性的加强措施至关重要，薄弱楼层的判定依据包括楼层侧向刚度小于上一层的 70% 或小于其上相邻三层平均值的 80%、楼层抗剪承载力小于上一层的 80%、楼层屈服强度系数小于 0.5 等。某不规则高层建筑的分析显示，由于 5-6 层发生体型收缩，6 层的水平尺寸缩进达到 60% 形成明显的薄弱层，该层刚度仅为上层的 79%，需要采取特殊的加强措施包括增大该层墙柱截面、提高混凝土强度等级从 C40 提升至 C50、增设支撑或剪力墙改善刚度分布、加强该层及相邻层的构造措施如增加箍筋配置和设置型钢等。局部刚度补强还应注意避免形成新的薄弱部位，刚度的调整应该渐近均匀避免突变，某工程在加强 6 层刚度时同步对 5 层和 7 层进行了适度加强，使刚度沿高度的变化更加平缓，补强后的计算表明 6 层的层间位移角降低了 15% 且不超过 5 层的 1.15 倍，成功满足了性能目标要求，为薄弱楼层的识别和加强提供了有效的技术路径。

（四）基于工程案例的抗震设计优化与效果评价

工程实践是检验抗震设计理论的试金石，某 21 层 L 型不规则高层建筑的抗震设计优化过程具有代表性，该工程存在扭转不规则、平面凹凸不规则、竖向刚度突变等多项不规则属于超限高层建筑。初始设计方案的扭转

位移比达到 1.45，部分楼层的层间位移角接近限值，优化过程采用了综合措施：调整结构布置在平面远端增设剪力墙将扭转位移比降至 1.28，提升关键构件的抗震等级底部加强区按一级抗震设计特殊部位按特一级设计，在薄弱楼层设置阻尼器改善结构的耗能能力，加强局部构造措施凹角处楼板加厚至 150mm 采用双层双向配筋。优化后的结构性能得到显著改善，小震弹性分析表明最大层间位移角从 1/750 降至 1/850，中震不屈服验算显示所有竖向构件均满足性能目标，大震弹塑性分析表明结构能够实现“大震不倒”的设防目标最大弹塑性层间位移角为 1/125，工程造价仅增加约 3% 但抗震性能提升明显，体现了智能化设计的优势。长期监测数据为评价抗震设计效果提供了依据，该建筑投入使用 5 年来经历了两次 5 级地震，结构响应正常，实测加速度响应与设计预期基本吻合，验证了针对不规则高层建筑采取的抗震加强措施的有效性，为类似工程提供了宝贵经验和参考。

结语

平面不规则高层建筑的抗震设计是涉及概念设计、计算分析、构造措施等多层面的系统工程。通过深入分析扭转不规则、凹凸不规则、楼板不连续等问题的形成机理和判定标准，基于性能化设计理念制定抗震设防目标、优化偏心距调控、进行弹塑性分析，可有效提升结构抗震性能。工程实践证明，提升关键构件抗震等级、合理选配阻尼器系统、识别并加强薄弱楼层等综合措施效果显著，多软件对比验证确保了计算可靠性。

参考文献

- [1] 蒙之游. 平面不规则高层建筑结构设计研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2025 (7): 051-055.
- [2] 吴寒. 高层建筑结构设计中不规则问题与抗震策略研究 [J]. 科技资讯, 2025, (4): 143-145.
- [3] 施尽波, 黄桂新, 练有为, 邱伟亮. 某平面凹凸不规则且带错层和通高墙的超限高层建筑结构设计 [J]. 山西建筑, 2025, (3): 61-66.
- [4] 李志强, 王铁龙, 徐振文. 平面不规则超限高层建筑的抗震设计 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (3): 29-32.
- [5] 侯希明, 水淼, 汤海燕. 高层建筑结构设计中不规则问题与抗震措施分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024 (1): 0120-0122.

作者简介：罗渊捷，1988-04，男，汉族，广东省湛江市，大学本科，中级职称，（建筑结构）房地产设计管理。