

医院建筑楼板不连续结构的抗震性能优化设计研究

曹鑫钰

西安市第九医院 陕西 西安 710054

摘要: 医院建筑多存在楼板开洞、缺失、错层等不连续问题,易形成抗震薄弱环节,威胁建筑地震安全。本文依托典型医院框架-剪力墙建筑案例,通过 PKPM 与 ABAQUS 数值模拟,分析楼板不连续结构的失效机理与抗震缺陷。从楼板补强、构件强化、体系优化、减震加固四方面制定优化方案。结果表明,优化后结构刚度、变形及应力指标显著改善,有效消除抗震短板,可为同类医院建筑抗震设计提供参考。

关键词: 医院建筑楼板;不连续结构;抗震性能;优化设计

引言: 医院建筑作为重点设防类工程,抗震安全直接关系公共应急保障能力。现代医院为适配医疗功能,普遍存在楼板开洞、错层、局部缺失等不连续构造,易引发应力集中、传力中断、刚度突变等问题,大幅降低结构抗震性能。为解决常规设计的局限性,本文结合规范要求与工程实例,通过数值模拟剖析结构抗震薄弱环节,针对性提出多维度优化策略,旨在提升医院建筑地震抵御能力,规避结构连锁破坏风险。

1 医院建筑楼板不连续结构抗震设计基础理论

1.1 楼板不连续结构界定与分类

(1) 规范界定。依据《建筑抗震设计标准》(GB/T50011-2010, 2024 年版),有效楼板宽度不宜小于该层楼板典型宽度的 50%,或楼板开洞面积不宜大于该层楼面面积的 30%,或存在较大的楼层错层时,属于楼板局部不连续的平面不规则。(2) 医院常见类型。① 局部开洞(电梯井、管道井、中庭);② 楼板缺失(门厅、报告厅通高区域);③ 错层楼板(功能区层高差异);④ 刚度突变(设备层、架空层致侧向刚度骤变)。(3) 受力特征差异。局部开洞引发洞口周边应力集中;楼板缺失中断传力路径,相邻构件剪力剧增;错层产生附加扭矩与变形集中;刚度突变使地震剪力在该层集中,形成薄弱部位。

1.2 医院建筑抗震设计核心规范要求

(1) 医院建筑重点设防类抗震设防标准。医院建筑按重点设防类(乙类)设计,地震作用按设防烈度计算,抗震措施按高于设防烈度一度的要求确定,9 度时按更高要求执行。(2) 水平不规则结构抗震设计强制性条文。存在楼板不连续时,应采用弹性时程分析法进行多遇地震补充计算,控制楼层剪力差不超过 30%,并对

薄弱部位进行罕遇地震下弹塑性变形验算^[1]。(3) 楼板传递水平地震作用的刚度与承载力设计要求。楼板按平面内无限刚性假定进行整体分析,同时对开洞边缘等削弱部位进行局部应力分析,确保楼板截面剪力不超过抗剪承载力,配筋满足强剪弱弯要求。

1.3 楼板不连续结构抗震失效机理

(1) 地震作用下楼板应力集中与刚度突变。楼板削弱使传力截面骤减,地震剪力在洞口边缘产生高度应力集中(本工程有限元分析显示应力集中系数为 2.8~3.2);刚度突变导致地震响应分配不均,应力集中区先行进入塑性。(2) 水平力传递路径中断对抗侧整体性的影响。楼板不连续使地震剪力无法按刚度有效分配至各抗侧力构件,部分框架柱剪力骤增而先期破坏,结构扭转效应加剧,整体抗侧刚度加速退化,严重时致失稳^[2]。(3) 薄弱区楼板、梁柱构件的连锁破坏。削弱区边缘楼板开裂后有效截面递减,内力重分布使相邻梁端弯矩剪力增大,梁端塑性铰提前出现,最终引发梁柱节点破坏,形成“楼板开裂→梁端破坏→柱端屈服”的连锁失效链条。

2 医院建筑楼板不连续结构抗震性能数值模拟与缺陷分析

2.1 有限元模型构建

(1) 依托典型医院建筑工程案例确定模型参数。选取某二级甲等综合医院住院楼为对象,框架-剪力墙结构,地上 12 层,设防烈度 8 度(0.20g),场地类别 II 类。楼板不连续特征包括:2 层门厅楼板缺失(面积占比 35%)、5~8 层电梯井四角开洞、10 层设备层错层 300mm。混凝土强度 C30~C50,钢筋 HRB400,楼板厚度 120mm(局部加强区 150mm)。(2) 基于 PKPM、

ABAQUS 的结构模型搭建与参数设定。PKPM 用于整体弹性设计和反应谱分析, ABAQUS 用于精细化弹塑性时程分析。梁柱采用 B31 梁单元模拟, 楼板采用 S4R 壳单元, 剪力墙采用分层壳单元。不连续区域网格尺寸加密至 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$, 常规区域为 $500\text{mm}\times 500\text{mm}$ 。时程分析采用瑞利阻尼, 阻尼比取 5%。(3) 材料属性、边界条件与地震荷载工况设置。混凝土采用塑性损伤模型 (CDP), 钢筋采用双线性随动硬化模型。底部固端约束, 楼板与梁柱采用 Tie 约束。地震输入选用三条波 (ELCentro、Taft 及人工波), 按 8 度多遇 (70gal) 和罕遇 (400gal) 调幅, 采用双向或三向地震输入, 持时 20s, 步长 0.02s。

2.2 模型可靠性验证

(1) 结构模态分析与自振特性校验。PKPM 与 ABAQUS 计算前六阶周期误差小于 5%, 第一周期分别为 1.05s 和 1.02s, 振型参与质量系数均超 90%。扭转周期比 0.82, 满足 ≤ 0.85 限值, 表明模型动力特性准确。(2) 规范限值对标与模型精度验证。多遇地震下 PKPM 层间位移角 1/850, ABAQUS 为 1/820, 均小于 1/800 限值, 误差 3%。各楼层剪力相对误差 $\leq 8\%$, 基底剪力与规范反应谱法误差 5.2%, 模型精度符合工程分析要求。(3) 不同地震工况下模拟合理性分析。三条波时程分析所得层间位移角包络值均未超限, 楼层剪力平均值约为反应谱法的 85%~110%, 人工波结果居中, 选波满足统计相关性要求, 模拟工况合理。

2.3 楼板不连续结构抗震性能模拟结果分析

(1) 多遇地震下结构整体变形与刚度变化特征。楼层位移曲线呈弯剪型, 位移角峰值出现在 8 层 (1/820)。楼板缺失层 (2 层) 与错层部位 (10 层) 出现明显刚度退化, 层间位移角较相邻层增大 15%~22%, 形成变形集中。(2) 楼板不连续区域应力分布与集中规律 (罕遇地震工况)。开洞角部主拉应力峰值达 3.8MPa, 超出 C30 混凝土抗拉标准值 (2.01MPa) 近 90%; 洞口长边中点应力集中系数为 2.8~3.2。楼板缺失边缘应力分布呈“双峰”形态, 集中于角柱节点区。(3) 竖向构件、连接梁柱的内力响应变化。不连续区域相邻框架柱剪力较常规柱增大 25%~35%, 弯距增大 18%~22%; 连接梁端部剪力突变显著, 错层部位短柱剪跨比小于 1.5, 呈现脆性剪坏风险。

2.4 结构抗震薄弱环节与现存问题总结

(1) 楼板开洞、缺失区域的抗震薄弱缺陷。开洞角部混凝土在主拉应力反复作用下易开裂, 有效截面持续

削弱, 一旦裂缝贯通将导致楼板退出工作, 后续地震作用下该区域将完全丧失传力功能。(2) 结构水平传力不连续导致的整体抗震短板。楼板缺失层地震剪力需经周边框架绕行传递, 传力路径增长导致剪力分配严重不均, 部分柱弹性层间位移角虽未超限但其损伤累积明显高于其他楼层, 安全冗余不足。(3) 现有常规设计方案的局限性。现行设计仅对开洞周边加强配筋, 未针对应力集中区设置抗裂措施; 错层部位未按短柱进行箍筋加密和抗剪加强; 弹塑性变形验算时未充分考虑楼板损伤后的刚度退化, 低估了薄弱层内力重分布幅度, 存在安全隐患。

3 医院建筑楼板不连续结构抗震性能优化设计与效果验证

3.1 抗震优化设计原则与思路

(1) 安全性、适用性与医院功能兼容性优化原则。优化方案须确保“大震不倒、中震可修、小震不坏”的抗震设防目标, 同时保障优化措施不影响医院医疗流程效率、设备运行安全和空间使用舒适度, 避免因结构加强而占用关键医疗功能空间^[3]。(2) 补齐刚度短板、优化传力路径、局部强化的核心思路。针对楼板不连续部位, 采取“补强楼板—加强构件—增设冗余传力通道”三位一体策略, 重点消除刚度突变和传力中断问题, 实现地震作用在各抗侧力构件间的均衡分配。(3) 优化方案不影响医院医疗功能布局的设计要求。所有加强措施限定于结构构件自身截面调整、附加构造加强或设备夹层内实施, 不动用医疗主功能空间面积, 确保手术室、ICU、门诊大厅等关键区域的开间、层高和使用功能不受影响。

3.2 多维度抗震优化设计方案

(1) 局部结构优化, 加厚薄弱区域楼板、提升双层双向配筋率。开洞周边 1.5 倍板跨范围内楼板厚度由 120mm 加厚至 160mm, 双层双向配筋率由 0.25% 提升至 0.45%; 楼板缺失边缘设置 $400\text{mm}\times 600\text{mm}$ 暗梁, 增强局部平面内刚度与传力能力。(2) 构件强化优化, 加大连接梁柱截面与配筋、增设构造加强构件。与不连续区域相邻的框架梁截面由 $300\text{mm}\times 600\text{mm}$ 加大至 $350\text{mm}\times 700\text{mm}$, 纵筋配筋率提高 30%; 角柱截面由 $600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 加大至 $650\text{mm}\times 650\text{mm}$, 体积配箍率由 1.2% 提高至 1.8%; 错层部位短柱全高加密箍筋, 间距不大于 100mm。(3) 结构体系优化, 局部增设剪力墙、优化楼板开洞布局。在楼板缺失层周边增设厚度 250mm、长度不小于 2.0m 的短肢剪力墙, 形成多道抗震防线。将原有大尺寸集中开洞拆分为多个小尺寸分散洞口, 洞间

净距不小于 1.0m,降低单处应力集中程度^[4]。(4)减震优化,增设阻尼构件降低地震响应。在结构 2 层、5 层及 10 层(楼板不连续集中区域)设置总计 24 套黏滞阻尼器,每层 8 套,人字形墙式安装,设计阻尼力 300kN,阻尼指数 0.3(非线性黏滞阻尼器典型参数),基于等效线性化方法(耗能相等原则)在对应位移幅值下计算附加阻尼比约 3.0%~3.5%,有效降低地震输入能量。

3.3 优化后结构抗震性能模拟分析

(1)优化前后结构整体抗震指标对比分析。优化后结构第一周期由 1.05s 缩短至 0.94s(降幅 10.5%),扭转周期比由 0.82 降至 0.76。多遇地震下最大层间位移角由 1/820 改善至 1/1050(提升 28%),罕遇地震下最大层间位移角由 1/125 改善至 1/165(提升 32%),所有指标均大幅优于规范限值。位移角改善中,刚度增大贡献约 18%,阻尼耗能贡献约 10%。(2)薄弱区域楼板应力、变形改善效果分析。开洞角部主拉应力峰值由 3.8MPa 降至 1.9MPa,降幅 50%,低于 C30 混凝土抗拉强度标准值(2.01MPa),应力集中系数由 3.2 降至 1.6;楼板缺失边缘竖向变形由 12mm 减至 5mm,挠跨比由 1/250 改善至 1/600。(3)结构传力路径完整性与刚度均匀性提升效果。增设剪力墙和阻尼器后,楼板缺失层有效传力通道由 2 条增至 4 条,该层地震剪力分配不均匀系数由 0.42 降至 0.18;各楼层侧向刚度比由最大偏差 35%收窄至 12%,刚度突变得得到显著改善,薄弱层内力重分布幅度降低约 40%。8 层虽未直接施加加强措施,但 2、5、10 层加强后整体刚度均匀化,地震剪力分配更趋合理,8 层变形随之改善。

3.4 优化方案可行性与工程适用性分析

(1)优化方案的施工可行性与经济性分析。所有优化措施均为常规施工工艺,加厚楼板、加大截面、增配钢筋及安装阻尼器均不涉及特殊材料与复杂工序。综合造价增量约为结构总造价的 12%~18%,在可接受范围内;减震系统全生命周期维护成本较低,年检费用约

占总造价的 0.3%^[5]。(2)适配不同类型医院楼板不连续结构的通用性分析。针对局部开洞型,优先采用方案 3.2(1)(3)的组合;楼板缺失型,重点适用方案 3.2(2)(3);错层型,结合方案 3.2(2)中的短柱加强及方案 3.2(4);刚度突变型,以方案 3.2(3)(4)为主。各措施模块化程度高,可按实际不连续形式灵活组合选用。(3)工程应用注意事项与设计建议。施工阶段应严格控制开洞边缘混凝土浇筑质量,加强振捣防止蜂窝麻面;楼板加厚区与常规区交界处应设置过渡斜坡,避免刚度二次突变;阻尼器安装位置应避开医疗设备管线密集区,并预留检修通道;建议施工完成后进行环境振动测试,校验阻尼器实际出力特性与设计参数的吻合度,确保减震效果达到预期目标。

结束语

本文针对医院建筑楼板不连续结构的抗震短板,完成机理分析、数值模拟与优化设计全套研究,构建了适配医院建筑功能的抗震优化体系。经模拟验证,优化方案可有效改善结构应力与变形状态,均衡楼层刚度与内力分配,解决传统设计的安全隐患。方案施工便捷、通用性强且经济可控,可广泛应用于各类医院楼板不连续结构改造与设计,对提升医疗建筑抗震安全性具有重要工程实践价值。

参考文献

- [1] 王浩. 基于性能的楼板不连续建筑结构抗震优化设计[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(6):78-85.
- [2] 李建辉. 医疗建筑楼板开洞不规则结构地震响应与构造优化[J]. 工程抗震与加固改造,2023,45(2):102-108.
- [3] 张贤龙. 不同结构体系建筑的抗震设计及其自动优化方法研究[J]. 建筑技术开发,2024,51(5):31-33.
- [4] 林思远. 楼板不连续工况下高层医疗建筑抗震性能提升策略[J]. 城市建筑,2024,21(18):112-115.
- [5] 黄泽楷. 基于 PKPM-GZ 的楼板不连续医院结构抗震设计优化[J]. 工程建设标准化,2024,11(7):68-72.