

复杂荷载作用下建筑结构设计优化研究

年跟步

广东白云学院, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ADA.2026010013

摘 要： 建筑高层化与功能复合化使结构承受超高层耦合荷载、风荷载、屋顶花园复合荷载等多源复杂作用，传统单一工况设计难以适配受力规律。研究依托数值模拟与工程实践，构建覆盖结构布局、构件设计、减振监测的三维优化体系，明确精细化实施路径。经丽泽 SOHO 基坑、高层抗风、屋顶花园等工程验证，方案可有效控制结构变形与内力，提升安全与经济性。成果可为复杂荷载下结构设计与施工控制提供技术支撑，推动设计向多场耦合适配方向升级。

关 键 词： 复杂荷载；建筑结构；设计优化

Research on Design Optimization of Building Structures under Complex Loads

Nian Genbu

Guangdong Baiyun University, Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract： The high-rise development and functional compounding of buildings have caused structures to bear multi-source complex effects such as super high-rise coupled loads, wind loads, and roof garden composite loads. Traditional single-condition design is difficult to adapt to the stress distribution laws. Based on numerical simulation and engineering practice, this study constructs a three-dimensional optimization system covering structural layout, component design, and vibration reduction monitoring, and clarifies the refined implementation paths. Verified by engineering cases including the Lize SOHO foundation pit, high-rise wind resistance, and roof garden projects, the scheme can effectively control structural deformation and internal force, and improve safety and economic efficiency. The results can provide technical support for structural design and construction control under complex loads, and promote the upgrading of design to multi-field coupling adaptation.

Keywords： complex loads; building structures; design optimization

引言

城市化推动建筑向高空与地下延伸，超高层、地铁配套、屋顶绿化等工程增多，结构受力形成竖向荷载、风荷载、基坑卸荷、屋面可变荷载叠加的复杂体系。传统设计以单一荷载为控制工况，采用等效静载简化分析，忽略耦合效应与时空变异，易引发应力集中、变形超限、周边扰动等问题。复杂荷载作用下结构呈非线性受力特征，传统方法难以匹配实际状态。基于典型工程场景拆解荷载机理，提炼设计优化要点，形成可落地方案，可提升结构受力性能与安全储备，为同类工程提供实践参考。

一、复杂荷载对建筑结构的作用机制解析

（一）超高层耦合荷载作用机制

超高层建筑自重荷载大、传递路径长，经框架柱、核心筒传至基础并形成土体高应力区。邻近地铁基坑开挖引发土体卸荷，打破原有应力平衡，造成坑底回弹、围护结构内移，带动周边土体与建筑基础协同变形。当超高层基础与基坑间距紧凑时，自重与卸荷形成双向耦合，引发基础不均匀沉降与水平位移，变形向上传递使上部构件产生附加内力，易出现开裂、倾斜等病害^[1]。超高层结构对差异沉降高度敏感，超限沉降差会改变结构受力分

布，降低整体安全性与耐久性。

（二）高空风荷载动力作用机制

风荷载是高层与超高层结构的关键水平荷载，作用效应随高度呈非线性增长。风场在建筑表面形成静动压耦合作用，静压引发结构侧移，动压诱发顺风向与横风向振动，接近自振频率时易产生共振，显著放大结构变形与内力。建筑外形与周边环境影响风荷载体型系数，矩形角部等位置易形成风荷载集中与局部高应力区（见表1）。层间位移角与顶点水平位移为结构控制指标，超限将影响非结构构件使用，长期往复荷载引发结构疲劳损伤，缩短使用寿命。

作者简介：年跟步（1979.02-），男，汉族，本科，高级工程师，研究方向：建筑结构设计。

表1 不同高度风荷载标准值

计算高度 (m)	10	50	100	150	180
风荷载标准值 (kN/m ²)	0.58	0.957	1.267	1.509	1.627

(三) 屋顶花园复合荷载作用机制

屋顶花园荷载由恒载与活载组合而成, 具有非均匀、动态变化特征。种植介质、植被等构成恒载, 含水率随降雨、灌溉波动导致荷载值变化。人员活动、设施布设形成可变活载, 分布随使用功能动态调整^[2]。温湿度等环境因素长期改变材料性能与传力路径, 复合荷载持续作用使屋顶梁板产生挠曲变形, 节点与接缝处应力反复变化, 易引发裂缝开展、防水层破损。传统均匀荷载设计忽略时空变异, 与实际受力状态不匹配, 存在局部过载与应力集中风险。

二、复杂荷载作用下建筑结构设计优化实施体系

(一) 结构布局优化实施

结构布局优化以复杂荷载传递路径优化为核心, 通过平面与竖向双向调控, 实现荷载均匀分布、结构刚度协同匹配。平面布局遵循双向抗侧力原则, 剪力墙、框架柱沿建筑主轴均匀布设, 使结构刚度中心与质量中心重合, 降低扭转效应。超高层结构将核心筒布设至平面中心区域, 形成稳定抗侧核心, 角部框架柱适当加大截面, 提升局部抗扭与抗弯能力, 弱化风荷载与基坑卸荷引发的偏心作用。基坑邻近超高层结构采用共用围护体系, 减少基坑开挖对既有建筑基础的扰动, 缩短荷载传递距离, 提升结构整体稳定性^[3]。屋顶结构采用梁板双向受力体系, 依据种植区域与荷载分布密度调整梁板间距, 使可变荷载均匀传递至竖向承重构件, 避免局部集中荷载引发的变形超限。

竖向布局坚持刚度连续渐变原则, 剪力墙、框架柱自基础至顶部连续贯通, 不出现刚度突变与竖向中断。超高层结构底部楼层承受竖向荷载与水平荷载协同作用, 适当加大构件截面与混凝土强度等级, 提升底部刚度。上部楼层荷载逐步减小, 构件截面与强度等级平缓降低, 保持竖向刚度均匀变化 (见表2)。设置转换层时, 采用梁式转换或厚板转换形式, 强化转换层与相邻楼层的构造措施, 保证竖向荷载顺畅传递, 避免转换层成为结构薄弱部位。屋顶结构采用分层受力设计, 上部种植层与下部结构层之间设置缓冲构造, 分散局部集中荷载, 降低环境荷载对主体结构的直接作用。

表2 不同建筑高度转换层设置建议

建筑高度 (m)	转换层适宜位置	转换层形式建议
60~80	较低楼层 (3~5层)	梁式转换
80~100	中间楼层 (5~8层)	厚板 / 梁式转换
100以上	中间楼层 (5~8层)	厚板 / 梁式转换

(二) 构件设计优化实施

构件设计优化以材料性能、截面尺寸、节点构造协同提升为路径, 增强构件在复杂荷载下的承载能力与变形适应能力。竖向承重构件优先选用高强度混凝土, 提升构件抗压强度与弹性模量, 在满足承载要求的前提下减小截面尺寸, 降低结构自重, 间接减轻风荷载与自重荷载的耦合效应。剪力墙墙肢厚度满足最小

构造要求, 底部加强部位适当增厚, 提升抗剪与抗弯性能。墙肢两端与洞口边缘设置约束边缘构件, 提高墙肢延性, 避免水平荷载作用下过早破坏。框架柱根据受力大小差异化设计截面, 角部与边缘柱采用较大截面, 内部柱适度减小截面, 实现受力与经济性平衡。

水平受力构件依据荷载分布特征优化截面与配筋, 屋顶梁板采用变截面设计, 荷载较大区域加大梁高与板厚, 配置足够受力钢筋, 抵御复合荷载产生的弯曲与剪切作用。连梁作为剪力墙协同工作的关键构件, 控制跨高比与截面尺寸, 采用交叉斜筋配筋方式, 提升延性与抗剪性能, 适应水平荷载往复作用。节点构造设计强化传力可靠性, 框架柱与核心筒连接节点增设加强钢板, 框架梁柱节点加密箍筋配置, 提升节点核心区抗剪能力, 保证复杂荷载作用下力传递连续顺畅^[4]。防水构件选用高柔韧性材料, 适配结构变形, 避免荷载作用下防水层开裂失效。

(三) 减振与监测控制实施

减振控制针对风荷载动力效应实施, 通过被动减振装置优化结构动力响应, 降低振动对结构及使用功能的影响。在高层建筑顶部与薄弱楼层布设摩擦型阻尼器、液体阻尼器, 合理调整阻尼器数量与布设位置, 增加结构阻尼比, 耗散风荷载产生的振动能量, 减小顶点水平位移与层间位移角。对于超高层结构, 可结合主体刚度优化, 形成刚度与阻尼协同控制体系, 全面抑制风致振动。针对基坑卸荷引发的结构变形, 采用分层分段开挖、及时施加支撑预应力的方式, 利用土体时空效应控制变形发展, 弱化卸荷对超高层结构的扰动。

监测控制实现结构受力与变形的实时感知与动态调控, 在超高层基础、框架柱、剪力墙关键部位布设应力与位移监测设备, 实时采集内力与变形数据。在屋顶花园布设荷载传感器与湿度监测设备, 跟踪介质含水率与荷载分布变化。监测数据实时传输至控制平台, 通过数据分析判断结构受力状态, 当变形与应力接近控制限值时, 及时调整施工工序或使用条件。基坑工程实施信息化施工, 依据监测数据动态调整开挖深度、长度与支撑施加时间, 形成监测-分析-调控的闭环管理体系, 确保结构始终处于安全受力状态。

三、优化方案工程实证

(一) 超高层邻近基坑工程优化实证

北京地铁14号线丽泽商务区站基坑邻近丽泽 SOHO 超高层结构, 该建筑地上45层, 结构高度191.5m, 采用框架核心筒结构, 基础为桩筏基础, 与地铁基坑水平距离最小为3.6m, 竖向距离1.5m, 属于一级风险源。设计阶段采用 YJK 与 Midas-gen 建立数值模型, 在临近基坑侧基础施加竖向强制位移, 模拟基坑开挖引发的沉降效应, 确定结构安全控制指标。基础竖向变形控制在10mm 以内, 差异竖向变形不超过6mm, 变形速率控制在1mm/d, 既有围护桩桩顶水平位移不大于20mm。

施工阶段采用围护桩加锚索支护体系, 按锚索分层拉槽开挖, 严格控制单步开挖参数, 及时施加锚索预应力^[5]。现场监测

结果表明（见表3），建筑基础最大竖向变形为9.91mm，最大差异变形为3mm，围护桩桩顶最大水平位移为14.8mm，各项指标均处于控制范围内。结构布局优化与施工工序调控协同作用，有效抵御自重荷载与基坑卸荷的耦合作用，保障超高层结构与地铁基坑施工双安全。

表3 丽泽 SOHO 基础与围护结构监测结果

监测项目	控制指标	实测最大值	是否达标
基础竖向变形	≤ 10mm	9.91mm	是
差异竖向变形	≤ 6mm	3mm	是
围护桩顶水平位移	≤ 20mm	14.8mm	是

（二）高层建筑风荷载优化实证

某180m 高层建筑采用框架核心筒结构，基本风压0.5kN/m²，地面粗糙度为 C 类。原设计结构顶点水平位移与层间位移角接近规范限值，角部柱与核心筒连接区域应力集中显著。优化阶段调整结构布局，角部框架柱截面扩大，核心筒居中布置，优化墙体厚度。构件设计提升混凝土强度等级，强化关键节点构造。增设阻尼器系统抑制风致振动。

由优化前后对比可知（见表4），优化后结构顶点水平位移显著降低，最大层间位移角满足规范要求，角部柱内力明显减小，应力集中现象得到有效缓解。混凝土与钢材用量合理降低，结构抗风性能与经济性同步提升，非结构构件破损风险降低，长期使用安全性与舒适度得到保障。

表4 风荷载优化前后结构位移对比

项目	优化前	优化后	规范限值	优化效果
顶点水平位移（mm）	150	120	≤ 327.27	减少 20%
最大层间位移角	1/600	1/800	≤ 1/550	减小 25%

（三）屋顶花园结构优化实证

屋顶花园结构承受种植介质、植被、人员活动等复合荷载，传统设计易出现局部变形过大、防水层破损等问题。优化实施轻质化设计，选用轻质种植基质降低恒载数值，采用模块化种植系统均衡荷载分布。结构层与防水层协同设计，选用高柔韧性防水材料，适配结构变形^[6]。布设荷载与环境监测设备，实时调控介质含水率，避免瞬时过载。

监测数据显示，复合荷载作用下结构最大应力、变形与挠度均控制在安全范围，局部应力集中现象得到弱化，防水层耐久性提升，动态监测系统有效保障荷载处于安全区间，结构长期稳定性满足使用要求。

四、结论

复杂荷载结构设计需突破单一工况局限，构建多场耦合全维度优化体系。结构布局优化理顺传力路径、均衡刚度分布，构件设计强化承载与变形适配能力，减振监测实现动态响应调控，三者协同构成完整安全保障机制。多项工程实证表明，该体系可精准匹配复杂荷载作用机理，有效控制变形与内力，兼顾安全、适用与经济要求。后续应深化荷载耦合机理研究，细化设计参数，结合新材料与智能监测技术，提升复杂荷载结构设计的精细化与智能化水平。

参考文献

[1]王德才 . 建筑结构设计 中 剪力 墙 结构 设计 要 点 分 析 [J]. 城 市 建 设 , 2025, (09): 98–100.
[2]张振唯 . 某 高 层 建 筑 结 构 设 计 风 荷 载 及 其 优 化 设 计 分 析 [J]. 中 国 建 筑 金 属 结 构 , 2026, 25(01): 19–21.
[3]冷玉霞 . 现 代 高 层 建 筑 结 构 设 计 中 的 风 荷 载 分 析 与 优 化 设 计 研 究 [J]. 中 国 建 筑 金 属 结 构 , 2025, 24(11): 31–33.
[4]韦景珊 , 成 威 . 屋 顶 花 园 荷 载 作 用 下 结 构 设 计 优 化 研 究 [J]. 石 材 , 2025, (06): 63–65.
[5]王伟 . 建 筑 结 构 设 计 中 的 荷 载 传 递 优 化 方 法 研 究 [J]. 门 窗 , 2025(5): 133–135
[6] 彭 海 中 . 超 高 层 建 筑 荷 载 作 用 下 复 杂 地 铁 基 坑 开 挖 技 术 研 究 [J]. 山 西 建 筑 , 2022, 48(08): 88–92.