

高层住宅剪力墙结构抗震设计优化与数值模拟分析

邱于川

重庆市地质矿产勘查开发集团检验检测有限公司 重庆 400000

【摘要】：针对高层住宅联肢剪力墙底层墙肢在强震作用下承受交替轴向拉压并发生剪切失效的工程问题，以剪切破坏控制型 RC 剪力墙为研究载体，开展低周往复加载试验与非线性有限元数值仿真研究。选取适配复合受力工况的材料本构关系完成精细化模型搭建，依托试验观测结果完成仿真模型精度校核。通过多维度参数分析明确各类构造参数对墙体抗震承载性能的作用规律，发现联肢墙单侧墙肢受拉时受压墙肢内力增幅超出现行规程取值标准，据此从边缘约束构件、腹板分布筋、墙肢内力计算三方面提出针对性抗震优化方案，可为同类高层住宅剪力墙抗震设计提供理论支撑。

【关键词】：高层住宅剪力墙；交替轴向拉压；数值模拟；抗震优化；剪切破坏

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.019

高层住宅广泛采用 RC 剪力墙体系抵御水平地震作用，联肢剪力墙底部墙肢在强震往复作用下会形成交替拉剪、压剪复合受力状态。现有抗震设计研究多围绕单一轴力工况开展，难以还原墙体真实受力损伤演化特征，现行规程抗剪承载力计算公式与墙肢内力放大系数存在适用局限。为厘清变轴力作用下剪力墙剪切破坏内在机理，依托拟静力试验与非线性有限元仿真开展系统性分析，探究不同构造配置对墙体抗震性能的调控效果，形成适配高层住宅工程场景的抗震优化策略，完善变轴力条件下剪力墙精细化抗震设计理论。

1 高层住宅剪力墙地震损伤机理研究

高层住宅联肢剪力墙体系在强地震往复作用下底层墙肢会持续承受交替轴向拉压复合作用，墙体截面同步耦合剪切与弯曲效应，墙体内部混凝土、钢筋协同受力状态随水平位移加载进程持续演变。依托大尺寸剪力墙试件低周往复加载试验体系，采用 DIC 数字散斑全场观测技术捕捉墙体裂缝萌生、延展、贯通全过程，量化不同目标轴拉力作用下裂缝分布范围与裂缝宽度演化特征，区分拉剪受力状态与压剪受力状态下差异化损伤发展路径。通过采集各级加载位移对应的滞回响应数据，量化轴拉力幅值对墙体受剪承载力、侧向刚度、变形能力的影响规律，厘清剪切破坏作为墙体主导失效模式的演化路径，对比单向恒定轴力加载工况与交替拉压加载工况下墙体损伤形态的差异特征^[1]。该层面研究能够精准揭示现有高层建筑结构设计规程抗剪承载力计算公式存在的适用局限，量化双肢剪力墙两侧墙肢内力重分配的变化特征，为有限元仿真模型材料本构参数标定、后续抗震构造优化方案制定提供完整且量化的底层力学依据，完善高层住宅剪力墙变轴力地震损伤基础理论体系。

2 高层住宅剪力墙抗震数值模拟建模

(1) 剪力墙有限元材料本构参数选取：数值仿真体系选

用断裂-塑性耦合本构模型描述混凝土力学响应，模型融合 Rankine 受拉失效准则与 Menétrey-Willam 受压塑性准则匹配墙体往复拉剪受力特征，试件实测立方体抗压强度区间 41.86MPa~44.62MPa，对应圆柱体抗压强度 33.43MPa~35.11MPa。HRB400 纵筋直径 25mm 屈服强度 425.85MPa，极限强度 576.49MPa；水平、竖向分布筋直径 6mm 屈服强度 466.28MPa，极限强度 614.90MPa，弹性模量统一取 2.08×10^5 MPa~ 2.12×10^5 MPa。钢筋与混凝土界面引入 CEB-FIP 粘结滑移模型，设定界面极限剪应力 $2.0f_c$ ，滑移特征位移 S1、S2 取 0.6mm，S3 取 1.0mm。整套材料参数体系适配高层剪力墙交替拉压复合受力工况，弥补常规单一轴力本构模型的计算偏差，为变轴力作用下墙体损伤演化全过程数值复现提供精准材料力学基础。

(2) 剪力墙整体有限元模型搭建：模型采用二维分离式单元完成墙体结构离散处理，墙体有效计算尺寸 1400mm×1400mm，墙体厚度 150mm，剪跨比控制为 2.16。墙体核心受力区域网格尺寸控制为 50 毫米，加载梁与底部地梁网格放大至 100 毫米，边缘暗柱配置 8 根直径 25mm 纵筋，箍筋直径 6mm、间距 50mm，腹板分布筋直径 6mm、间距 100mm。构件相邻边界采用线固定接触完成单元绑定，模型底部施加全自由度固定约束，顶部加载点位同步施加最高 2800kN 轴向拉力、4200kN 轴向压力，平衡点基准轴压力 700kN。网格尺寸分级划分方案平衡计算精度与运算效率，完整还原高层底层剪力墙几何构造与加载约束条件，实现联肢墙单片墙肢精细化数值建模。

(3) 数值模拟模型试验结果校核：依托低周往复加载拟静力试验完整采集墙体滞回曲线、裂缝开展分布两类核心实测数据用于有限元模型系统性校准工作，分别提取位移角 0.2% 加载阶段、结构峰值荷载对应位移工况下仿真计算剪力峰值与

实体试件实测剪力开展定量误差比对,整套工况下峰值荷载整体计算误差稳定维持在5%以内。模型压剪承载力仿真数值与试验实测数值比值分布区间为1.34~1.53,拉剪承载力仿真与实测比值最低可至0.98。依托DIC数字散斑观测系统采集墙体全场应变云图,逐段对照数值仿真内部裂缝延展路径,同步校核试件加载结束后的剪切失效形态,校核指标完整覆盖0.4%~2.68%极限位移角范围内结构刚度退化全过程。完成多维度校准修正后的有限元模型能够精准还原交替轴向拉压复合受力工况下剪力墙全部力学响应特征,为后续多变量参数拓展分析搭建稳定可靠的数值计算载体。

3 高层住宅剪力墙抗震构造优化设计

3.1 剪力墙边缘约束构件优化设计

边缘约束构件作为抵抗交替拉压荷载的核心受力区域,通过调整暗柱截面宽度与内部纵筋配筋量改变墙体截面约束效应,暗柱截面尺寸扩大会提升混凝土侧向约束能力,降低压剪作用下混凝土局部压溃发展速度。暗柱纵筋配筋密度提升能够同步强化墙体拉剪、压剪受力阶段的受剪承载力,削弱高幅值轴拉力带来的刚度衰减幅度^[2]。调整后的边缘构件构造可缩小墙体裂缝延伸区间,抑制临界剪切裂缝快速贯通形成失效面,完善现有高层住宅剪力墙边缘构件常规配筋设计体系,为大震工况下承受变轴力的底部墙肢构造设计提供量化调整依据,填补高拉应力墙肢边缘构件精细化设计的技术空白。见图1。

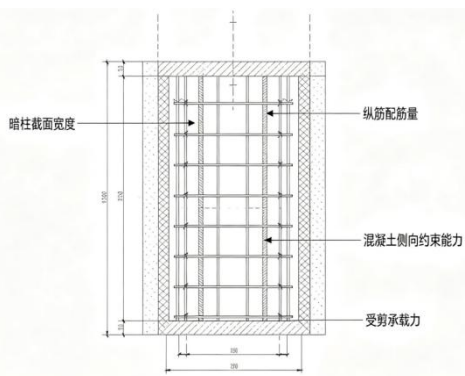


图1 高层住宅剪力墙约束边缘暗柱截面构造示意

参考文献:

- [1] 朱成发,于泽明,马国儒,等.考虑初始随机缺陷的钢筋混凝土剪力墙建模方法及抗震性能[J].工业建筑,2025,55(7):21-29.
- [2] 陈晖,黄勇谋,丁雅博,等.交替轴向拉压荷载作用下剪切破坏控制的RC剪力墙抗震性能研究[J].建筑结构学报,2025,46(5):98-112.
- [3] 赵凯选,李慧.高层建筑施工剪力墙结构连梁节点受力数值模拟[J].粉煤灰综合利用,2024,38(2):111-116.

3.2 剪力墙墙体分布钢筋配置优化

竖向分布筋与水平分布筋承担差异化抗剪分担作用,竖向分布筋配筋率提升可显著改善墙体拉剪受力状态下的承载能力,抑制轴向拉力作用下水平滑移裂缝持续扩张^[3]。水平分布筋配筋量调整仅对压剪受力阶段的抗剪性能产生正向增益,无法改善墙体受拉侧损伤发展。依据交替拉压下墙体损伤分布特征调整两类钢筋配比,弱化单一配筋形式带来的受力短板,均衡墙体双向受力阶段的刚度保持能力,优化方案适配高层住宅联肢墙底层墙肢受力特征,细化不同轴拉力工况下墙体分布筋差异化配置标准,丰富剪力墙腹板配筋精细化设计理论。

3.3 联肢剪力墙墙肢内力取值优化

联肢剪力墙单侧墙肢进入偏心受拉状态后,两侧墙肢刚度差异引发内力重新分配,受压墙肢承担的剪力与弯矩数值出现明显上浮,现有规范统一1.25倍放大系数无法匹配高轴拉力下内力增幅。依托变轴力仿真数据标定不同名义拉应力对应的内力放大区间,区分不同剪跨比、轴拉力幅值对应的弯矩与剪力增大取值,修正固定放大系数带来的设计安全储备不足问题。优化后的内力取值标准贴合高层住宅联肢墙真实地震内力传递规律,完善联肢剪力墙底部墙肢内力计算细则,提升高层建筑剪力墙抗震计算结果的安全冗余。

4 结语

高层住宅剪力墙在地震往复交替拉压作用下的剪切损伤规律可通过试验观测与非线性仿真完整复现,墙体受力损伤差异直接由边缘约束、分布筋配置形式决定。联肢墙墙肢内力重分配现象会放大受压侧构件受力需求,原有固定放大系数无法覆盖高拉力工况安全储备。各类构造调整手段能够针对性改善墙体拉剪、压剪阶段承载能力,修正现有设计存在的安全短板。相关构造优化思路可为高层住宅剪力墙施工图设计提供细化参考,也为变轴力下剪力墙抗震计算体系完善提供理论支撑。