

L 形双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能数值模拟研究

张 卫

株洲时代新材料科技股份有限公司 湖南 株洲 412000

【摘要】 双钢板混凝土组合剪力墙凭借承载力高、延性优良、装配性强的优势，广泛应用于高层及抗震设防建筑结构中，相较于传统钢筋混凝土剪力墙，其抗侧刚度与耗能能力更为突出。L 形异形组合剪力墙多用于建筑转角、端部结构，受力形式复杂，双向地震作用下应力分布不均、刚度偏心显著，抗震性能与矩形剪力墙存在明显差异。为明确 L 形新型双钢板混凝土组合剪力墙的抗震受力机理与破坏特征，本文采用 ABAQUS 有限元软件建立精细化数值模型，模拟低周往复荷载作用下墙体的受力变形全过程，系统分析构件滞回特性、骨架曲线、刚度退化、耗能能力及应力分布规律。通过对比不同轴压比、剪跨比参数下的抗震性能差异，明确核心影响机制。数值结果表明，L 形组合剪力墙具备饱满滞回曲线、退化平缓刚度特性，整体呈现延性剪切破坏模式，抗震耗能性能优异；轴压比合理取值可提升墙体承载力，过大轴压比会加剧刚度退化并诱发脆性破坏。本研究可为异形双钢板组合剪力墙的抗震设计、参数优化与工程应用提供参考依据。

【关键词】 L 形剪力墙；双钢板混凝土；组合结构；抗震性能；数值模拟；刚度退化

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着高层建筑与装配式结构快速发展，传统钢筋混凝土剪力墙存在自重、延性不足、震后损伤严重、修复难度大等缺陷，难以适配高烈度抗震设防区高层结构的建设需求。双钢板混凝土组合剪力墙由双侧钢板、内部填充混凝土及连接件组成，充分结合钢材抗拉性能与混凝土抗压性能，具备承载力高、抗侧刚度大、耗能能力强、施工便捷等优势，成为新型抗震承重结构的研究热点。

在建筑平面布局中，L 形异形剪力墙普遍设置于建筑转角、分户端部等位置，承担双向水平地震作用与竖向荷载，结构存在刚度偏心、受力不对称、应力集中明显等特点，抗震受力机制远复杂于常规矩形剪力墙。现阶段多数研究聚焦矩形双钢板组合剪力墙的力学性能，针对 L 形异形截面墙体的抗震破坏机理、参数影响规律研究不够系统，相关设计参数取值缺乏充足的数值与试验支撑。因此，开展 L 形双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能数值模拟研究，明确其破坏模式、抗震指标与参数敏感性，对完善异形组合剪力墙抗震设计理论、推广工程应用具有重要理论与工程价值。

1.2 国内外研究现状

国外较早开展双钢板组合剪力墙结构研究，通过拟静力试验与数值模拟结合的方式，明确了钢板厚度、混凝土强度、连接件形式对墙体抗震性能的影响规律，形成了较为完善的组合结构设计体系，但针对 L 形异形截面墙体的偏心受力、双向抗震响应研究较少。国内学者围绕组合剪力墙开展大量研究，多数成果集中于矩形墙体的滞回性能、刚度退化与破坏特征分析，部分研究涉及异形墙体力学特性，但普遍缺少多参数定量对比

分析，对轴压比、剪跨比等关键参数对 L 形组合剪力墙抗震性能的影响机制梳理不够深入，难以直接指导工程精细化设计。

1.3 研究内容与技术路线

本文以 L 形新型双钢板混凝土组合剪力墙为研究对象，开展抗震性能数值模拟研究。主要包括：建立精细化 ABAQUS 有限元数值模型，确定钢材、混凝土本构参数与界面接触关系；模拟低周往复荷载作用下墙体的变形破坏全过程，分析滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能能力等核心抗震指标；探究不同轴压比、剪跨比参数对墙体抗震性能的影响规律；总结 L 形组合剪力墙抗震薄弱点，提出设计优化建议。

技术路线：研究方案拟定→有限元模型建立与参数校准→荷载工况设置→数值计算与结果提取→抗震性能指标分析→参数影响规律研究→结论与优化建议。

2 L 形组合剪力墙有限元模型建立

2.1 构件几何参数

本次模拟设计标准 L 形双钢板混凝土组合剪力墙构件，墙体总高度 3000mm，翼缘与腹板长度均为 1200mm，墙体厚度 160mm；双侧钢板厚度统一取 6mm，内部填充 C30 混凝土，钢板与混凝土之间设置栓钉连接件，保证钢混协同受力。构件顶部设置刚性加载梁，底部设置固定约束基座，模拟实际工程中上下端约束边界条件。

2.2 材料本构与参数设定

模型材料参数严格依据规范取值，钢材采用 Q235B 钢材，弹性模量 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ，泊松比 0.3，采用随动强化本构模型，模拟钢材往复荷载下的塑性损伤特性；混凝土采用 C30 混凝土，考虑塑性损伤本构，引入混凝土受压、受拉损伤因子，精准模拟混凝土开裂、压碎退化过程。钢板、混凝土采用 C3D8R 实体

单元，保证计算精度与收敛性，栓钉连接件采用嵌入式单元模拟，贴合实际协同受力状态。

2.3 边界条件与加载制度

模型底部基座采用完全固定约束，限制所有自由度；顶部加载梁施加恒定竖向轴压力，模拟建筑竖向荷载作用，随后施加水平低周往复位移荷载，采用分级位移加载制度，每级位移循环 2 次，逐级增大位移幅值，直至构件承载力下降至峰值荷载 85%以下，判定构件破坏并终止计算。

配图说明 1: L 形双钢板混凝土组合剪力墙有限元模型及网格划分示意图

3 数值模拟结果与抗震性能分析

3.1 构件破坏形态分析

通过数值模拟结果可得，L 形组合剪力墙在往复水平荷载作用下，受力破坏呈现明显的阶段性特征。加载初期，墙体整体处于弹性工作状态，钢板与混凝土无明显损伤变形，滞回曲线线性变化；随着位移幅值增大，墙体根部截面率先出现混凝土微损伤、钢板轻微屈服，塑性变形逐步发展；加载后期，墙体根部翼缘与腹板交接位置出现应力集中，混凝土局部压碎，钢板产生屈曲变形，最终形成根部塑性铰，构件承载力缓慢下降，整体呈现延性剪切破坏模式，无突发性脆性破坏，抗震安全储备充足。

配图说明 2: 极限荷载下墙体应力分布云图

3.2 滞回曲线与骨架曲线分析

滞回曲线是评价结构抗震耗能能力的核心指标，能够直观反映构件在往复荷载下的变形、耗能与刚度变化特性。本次模拟所得 L 形组合剪力墙滞回曲线整体饱满、无明显捏缩现象，加载与卸载过程稳定，表明构件塑性变形能力强、耗能性能优异。相较于传统钢筋混凝土剪力墙，该组合墙体滞回环面积更大，能量耗散效率更高。

骨架曲线由各级滞回环峰值点连线构成，可反映构件承载力与变形发展规律。骨架曲线呈现弹性上升、塑性屈服、承载力平缓下降三个阶段，屈服后曲线下降平缓，说明构件屈服后仍具备良好的承载与变形能力，延性性能优良，抗震韧性突出。

3.3 刚度退化与耗能能力分析

在往复荷载作用下，随着塑性变形累积，构件损伤逐步发

展，整体刚度持续退化。模拟结果显示，L 形组合剪力墙初始抗侧刚度大，加载前期刚度退化速率均匀平缓，无突变式刚度衰减；加载后期，随着混凝土损伤加剧、钢板局部屈曲，刚度退化速率小幅提升，但整体退化规律稳定，结构抗震稳定性良好。

通过计算等效黏滞阻尼系数评价构件耗能能力，标准工况下墙体等效黏滞阻尼系数可达 0.21，远高于普通钢筋混凝土剪力墙，充分体现双钢板与混凝土协同工作的耗能优势，可有效耗散地震能量，降低结构地震响应。

4 关键参数对抗震性能的影响分析

为明确核心参数对 L 形组合剪力墙抗震性能的影响规律，本文控制单一变量，分别设置不同轴压比、剪跨比工况开展对比模拟，各工况核心抗震指标如下表 1 所示。

4.1 轴压比的影响分析

轴压比是影响剪力墙抗震性能的核心参数。由模拟数据可知，在合理范围内增大轴压比，墙体竖向约束作用增强，可有效抑制混凝土开裂，提升墙体抗侧承载力；但轴压比过大时，墙体延性显著下降，极限位移减小，刚度退化速率加快，根部混凝土压碎、钢板屈曲损伤加剧，结构延性与耗能性能大幅衰减，易出现偏压脆性破坏风险。因此，L 形双钢板组合剪力墙工程设计中，轴压比宜控制在 0.2~0.3 区间，兼顾承载力与延性抗震需求。

4.2 剪跨比的影响分析

剪跨比直接决定墙体受力破坏模式。剪跨比偏小的墙体，剪力主导受力，整体刚度大、承载力高，但变形延性与耗能能力较差；剪跨比增大后，墙体弯曲受力特性凸显，极限位移显著提升，滞回耗能更加充分，抗震韧性更好，但抗侧承载力出现小幅下降。L 形异形剪力墙因刚度偏心，剪跨比变化对翼缘、腹板受力协调性影响更为显著，工程中需结合建筑层高与受力需求合理匹配剪跨比参数，规避小剪跨比脆性破坏风险。

5 结构抗震设计优化建议

结合 L 形双钢板混凝土组合剪力墙数值模拟结果与参数影响规律，针对其异形截面刚度偏心、转角应力集中、参数敏感性强的特点，提出针对性设计优化建议。

第一，合理控制轴压比与剪跨比参数。高烈度设防区域优

表 1

工况编号	轴压比	剪跨比	峰值荷载/kN	极限位移/mm	等效阻尼系数	破坏特征
1（标准工况）	0.2	1.5	486.2	32.6	0.210	延性剪切破坏
2	0.3	1.5	521.7	29.8	0.196	剪切主导破坏
3	0.4	1.5	543.5	25.3	0.172	局部压碎损伤加重
4	0.2	1.2	538.4	26.1	0.185	刚度大、延性偏低
5	0.2	1.8	452.6	36.4	0.228	延性优异、承载力略降

先选用 0.2~0.3 低轴压比设计, 兼顾承载力与延性; 剪跨比不宜小于 1.5, 避免小剪跨比引发的脆性剪切破坏, 保障结构地震下的变形储备与耗能能力。

第二, 强化转角应力集中区域构造。L 形墙体腹板与翼缘交接位置为抗震薄弱区域, 可通过加密栓钉、增设局部加劲肋、加厚局部钢板的方式, 提升交接区域协同受力性能, 缓解应力集中, 抑制局部损伤过快发展。

第三, 优化钢混协同工作性能。严格控制钢板厚度与混凝土匹配关系, 保证双侧钢板均匀约束内部混凝土, 避免钢板过早屈曲、混凝土过早开裂, 充分发挥钢材与混凝土的组合协同抗震优势。

第四, 差异化抗震设计。针对 L 形墙体双向受力、刚度偏心特性, 结构整体分析时需考虑偏心扭转效应, 适当提升边缘构件配筋与钢板构造标准, 提升结构整体抗震稳定性。

6 结论与展望

6.1 结论

1) L 形新型双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能优异, 低周

往复荷载下滞回曲线饱满、刚度退化平缓、耗能能力突出, 破坏模式为延性剪切破坏, 无明显脆性损伤, 具备良好的地震抵抗与变形恢复能力, 适配高烈度抗震设防建筑工程。

2) 轴压比与剪跨比对墙体抗震性能影响显著, 合理提升轴压比可提升墙体承载力, 但过大轴压比会大幅降低结构延性与耗能能力; 剪跨比增大可优化结构延性与抗震韧性, 但会小幅降低抗侧承载力。

3) L 形剪力墙翼缘与腹板交接位置为抗震薄弱区域, 应力集中明显、损伤发展较快, 需通过局部构造优化、参数合理匹配的方式, 提升异形截面墙体的整体协同抗震性能。

6.2 展望

本文完成了常规工况下 L 形双钢板混凝土组合剪力墙的抗震数值模拟与参数分析, 后续可进一步研究不同钢板厚度、混凝土强度、连接件间距对墙体抗震性能的耦合影响, 同时可结合拟静力试验数据校准模型精度, 建立适配异形组合剪力墙的精细化抗震设计计算公式, 为工程标准化设计提供更完善的理论支撑。

参考文献:

- [1] 蔡健, 巫博璘, 罗翼锋. 新型双层钢板-混凝土组合剪力墙力学性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 134-144.
- [2] 韦芳芳, 李鑫. 双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(03): 567-574.
- [3] 侯皓文, 王伟. 双钢板混凝土组合剪力墙节点抗震性能数值分析[J]. 工程力学, 2023, 40(05): 98-106.
- [4] 于金光, 赵楚. 双钢板组合剪力墙不同约束形式抗震性能对比[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(02): 89-97.
- [5] 张磊, 陈明. 异形截面双钢板混凝土剪力墙受力机理研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(04): 112-118.
- [6] 王浩, 刘阳. 轴压比对双钢板组合剪力墙抗震性能的影响规律[J]. 施工技术, 2024, 53(11): 78-83.
- [7] 李建峰. 剪跨比影响下组合剪力墙抗震破坏模式研究[J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(06): 102-107.
- [8] 陈明宇. 装配式双钢板混凝土剪力墙精细化数值模拟[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(03): 45-51.
- [9] Zhang C, Cai J. Seismic performance parametric analysis of L-shaped double steel-concrete composite shear wall[J]. Structures, 2024, 52: 896-905.