

混凝土框架-门式钢架新型结构体系结构性能研究与应用

王仪萍 王颖 李淦民

重庆建筑科技职业学院 重庆 400030

DOI:10.32629/ems.v8i6.20618

[摘要] 针对传统单一结构体系在大跨度、多用途建筑中存在的承载效率低、施工周期长、经济性欠佳等问题,本文结合多式联运示范基地项目实践,提出混凝土框架-门式钢架新型混合结构体系。该体系结合混凝土框架的刚度优势与门式钢架的大跨度适配性,通过合理的节点连接设计,实现两种结构形式的协同工作。本文采用数值模拟与工程应用验证相结合的方法,系统分析该新型体系的静力性能、抗震性能及稳定性能,明确其受力机理与破坏特征,提出针对性的设计优化建议,并结合实际工程案例说明其应用效果。研究表明,该新型结构体系具有承载能力强、抗震性能优良、经济性突出、施工便捷等优势,能有效满足物流仓库等大跨度建筑需求,为同类结构设计与应用提供理论依据和工程参考。

[关键词] 混凝土框架; 门式钢架; 混合结构体系; 结构性能; 工程应用

1. 引言

随着我国建筑行业快速发展,物流仓储、工业厂房等建筑对结构跨度、承载能力、空间灵活性及经济性的要求日益提高。传统单一结构体系存在明显缺陷:纯混凝土框架结构刚度大、耐久性好,但大跨度下构件截面过大,增加造价且限制空间利用,施工周期长;纯门式钢架结构轻量化、施工便捷,但整体刚度不足,抗侧移能力弱,后期维护成本高。

在此背景下,混凝土框架-门式钢架新型混合结构体系应运而生,其将混凝土框架用于下部楼层提供稳定支撑,门式钢架用于上部实现大跨度空间,通过节点协同受力,弥补单一结构不足。多式联运示范基地项目中,该体系成功应用于集拼仓库,既满足大跨度仓储需求,又保证结构安全经济,验证了其实用性。开展该体系研究,可丰富混合结构理论,为工程实践提供高效解决方案,推动建筑结构向轻量化、大跨度方向发展,具有重要理论与工程价值^[1]。

2. 混凝土框架-门式钢架新型结构体系的组成与受力机理

2.1 体系组成形式

该体系主要由下部混凝土框架、上部门式钢架、节点连接构件及辅助支撑体系组成,核心是通过合理布置与节点设计实现协同工作,结合多式联运示范基地项目实践,具体组成如下:

(1) 下部混凝土框架:采用钢筋混凝土框架,布置于底层,承担竖向与水平荷载,为上部提供稳定支撑。如项目集拼仓库一层采用混凝土框架,柱跨 $12\text{m}\times 11.1\text{m}$,一层屋面室内荷载 $25\text{kN}/\text{m}^2$ 、室外荷载 $40\text{kN}/\text{m}^2$,柱梁截面根据荷载确定,柱底固定,确保整体稳定。此类结构形式在同类工业项目中

也有应用,其厂房部分同样采用钢筋混凝土框架作为下部支撑结构,保障了上部空间的稳定可靠。

(2) 上部门式钢架:采用钢结构,布置于混凝土框架顶部,实现大跨度空间。项目二层采用双跨门式刚架,柱距 12m ,跨度 $33.3\text{m}+33.3\text{m}$,货车出入口雨篷悬挑 8m ,钢柱钢梁采用H型钢,钢梁与钢柱刚接或铰接,设置支撑提升刚度与稳定性。

(3) 节点连接构件:核心为预埋钢件+高强度螺栓连接,混凝土柱顶预埋钢垫板、锚栓及加劲肋,门式钢架钢柱底部设法兰盘,通过螺栓连接,设置加劲肋增强刚度,锚栓孔采用长圆孔预留位移空间,节点密封提升防水防腐性能。项目中通过该节点设计,实现刚架与混凝土柱可靠传力,设置抗剪键防止水平滑移^[2]。

(4) 辅助支撑体系:包括屋面、柱间及水平支撑,项目门式钢架侧面因门洞较多,采用八字型支撑替代交叉支撑,避免影响车辆进出,屋面边跨设置纵横向水平支撑形成闭环,柱顶设通长刚性系杆,提升整体稳定性。

2.2 协同受力机理

体系协同受力核心为“下部约束、上部协同,节点传力、整体抗侧”:

(1) 竖向荷载传递:门式钢架承受的屋面荷载通过钢柱、节点传递至混凝土框架柱,最终传至基础。混凝土框架刚度大,承担主要竖向荷载,减少门式钢架变形,确保竖向稳定。

(2) 水平荷载传递:水平荷载作用下,混凝土框架承担大部分荷载,通过节点将部分荷载传递给门式钢架,两者协同抵抗水平力,减少混凝土框架水平位移,锚栓长圆孔设计

适应位移差异,避免节点损坏。

(3) 节点协同作用:节点不仅传递荷载,还协调两者变形,优化后的节点具有足够刚度与延性,传递剪力、弯矩与轴力,避免脆性破坏,同时通过弹性设计消耗地震能量,提升抗震性能。

2.3 体系优势分析

与传统单一结构相比,该体系优势显著:

(1) 受力合理,承载能力强,协同发挥两种结构优势,适应大荷载需求;

(2) 空间灵活,下部可划分办公、设备用房,上部实现无柱大空间,适配物流仓储、工业厂房等需求,同类工业项目中该体系的应用也充分体现了这一优势,其厂房与化学品库建设通过该体系实现了功能分区与空间利用的优化;

(3) 经济性突出,减少材料用量与维护成本,缩短工期,同类工业项目通过该体系应用,实现了主体施工高效推进,部分生产线提前投入试生产;

(4) 施工便捷,下部现浇、上部工厂预制现场拼装,提升效率,项目应用中大幅缩短了施工周期。

3. 混凝土框架-门式钢架新型结构体系数值模拟研究

3.1 数值模型建立

采用 ABAQUS 软件建立三维数值模型,结合多式联运示范基地项目实际参数,确保模型与工程实际一致,用于模拟结构的静力性能、抗震性能及稳定性能,为结构设计与参数优化提供依据。

3.1.1 构件单元选择

混凝土框架梁、柱采用 C3D8R 实体单元,该单元具有良好的力学性能,能够准确模拟混凝土的开裂、屈服与破坏过程;门式钢架钢柱、钢梁及节点连接构件采用 S4R 壳单元,适用于模拟钢结构构件的受力与变形,能够准确反映钢材的塑性变形与局部屈曲;高强度螺栓采用 B31 梁单元,模拟螺栓的受力与变形,确保节点连接的可靠性。

3.1.2 材料本构模型

混凝土采用塑性损伤模型,能够准确模拟混凝土在单调荷载与反复荷载作用下的开裂、塑性变形与损伤过程,C30 混凝土的轴心抗压强度取 30MPa,轴心抗拉强度取 2.01MPa,弹性模量取 3.0×10^4 MPa,泊松比取 0.2;钢材采用理想弹塑性模型,Q355B 钢材的屈服强度取 355MPa,抗拉强度取 370MPa,弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比取 0.3;钢筋采用理想弹塑性模型,HRB400E 级钢筋的屈服强度取 400MPa,

抗拉强度取 540MPa,弹性模量取 2.0×10^5 MPa,泊松比取 0.3。

边界条件与荷载施加:边界条件与工程实际一致,混凝土框架柱底采用固定端约束,限制 X、Y、Z 三个方向的位移与转动;门式钢架钢柱与混凝土框架节点处采用绑定约束,模拟高强度螺栓连接的牢固性,同时在钢柱柱脚与预埋钢垫板之间设置接触约束,模拟两者的相对位移;加载方式结合工程荷载要求,竖向荷载施加在门式钢架钢梁顶部,采用分级加载;水平低周反复荷载施加在门式钢架钢柱顶部,采用位移控制加载,模拟地震作用下的水平往复荷载。

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 静力性能模拟分析

数值模拟结果显示,结构竖向荷载-位移曲线光滑,无明显突变,分为弹性、弹塑性与破坏三个阶段。弹性阶段,荷载与位移呈线性关系,结构无明显变形与损伤,应力分布均匀,节点连接可靠;弹塑性阶段,混凝土框架梁端、柱底出现细微裂缝,应力集中明显,门式钢架钢柱、钢梁出现轻微塑性变形,应力达到钢材屈服强度,结构位移增长速度加快;破坏阶段,混凝土裂缝急剧扩展,出现剥落现象,门式钢架钢柱底部出现局部屈曲,结构荷载下降至极限荷载的 85% 以下,失去承载能力。模拟得出结构竖向极限承载能力为 295kN,满足项目设计要求,验证了体系静力性能的可靠性。

3.2.2 抗震性能模拟分析

通过分析滞回曲线、骨架曲线、延性系数、耗能能力等指标,评价体系抗震性能。模拟得到的滞回曲线呈饱满的“梭形”,无明显捏缩现象,说明结构具有良好的塑性变形能力与耗能能力;骨架曲线分为弹性段、弹塑性段与下降段,弹性段斜率较大,表明结构刚度较大,弹塑性段斜率逐渐减小,承载能力缓慢增长,下降段荷载下降、塑性变形继续增大,体现了良好的延性;模拟测得屈服位移为 11.8mm,极限位移为 47.5mm,延性系数为 4.02,大于规范要求的 3.0,说明体系延性良好,能够通过塑性变形消耗地震能量;破坏形态集中在混凝土框架梁端、柱底及门式钢架钢柱底部,节点连接构件未发生破坏,符合“强节点、弱构件”的抗震设计原则,验证了体系优良的抗震性能。

4. 混凝土框架-门式钢架新型结构体系工程应用

4.1 工程概况

选取多式联运示范基地项目作为应用案例,项目总用地 346250.83m²,规划总建筑面积 261634.12m²,一期建筑面积 90804.72m²,包含集拼仓库、戊类仓库等,主要用于物流仓

储与集装箱周转,需上部大跨度空间、下部办公及设备用房,承受大荷载。工程抗震设防烈度8度,设计基本地震加速度为0.2g,结合需求采用该新型结构体系,实现安全、经济、高效的设计目标。该体系在同类工业建筑中已具备成熟应用基础,同类工业项目中,其厂房及化学品库建设也采用了钢筋混凝土框架与门式钢架相结合的结构形式,进一步验证了该体系的实用性与可靠性^[3]。



图1 项目概况

4.2 结构设计要点

结合数值模拟结果与项目实际,设计要点如下:

(1) 结构布置:一层混凝土框架柱跨 $12\text{m}\times 11.1\text{m}$,二层双跨门式钢架跨度 $33.3\text{m}+33.3\text{m}$,钢柱钢梁采用Q355BH型钢,节点采用预埋钢垫板+10.9级螺栓连接,设置八字型支撑;

(2) 荷载计算:采用PKPM软件分析竖向与水平荷载,考虑位移差异,通过长圆孔锚栓适应变形;

(3) 抗震设计:加强梁端柱底配筋,优化节点设计,确保抗震性能;

(4) 稳定设计:验算门式钢架与混凝土柱稳定性,确保节点可靠。

针对项目难点,采取针对性措施:解决刚度突变问题,加强柱脚节点;针对平面超长,进行温度应力专项分析,校核配筋;混凝土柱顶标高提高 $800\sim 1000\text{mm}$,方便埋件施工。

4.3 施工工艺与注意事项

采用“下部现浇、上部拼装”工艺:基础施工→混凝土框架施工(绑扎钢筋、预埋构件、浇筑养护)→门式钢架工厂预制、现场拼装→辅助支撑安装→节点密封→验收。该施工工艺可实现上下部结构有序施工,减少交叉作业风险,与同类工业项目采用的施工思路一致,能够有效缩短施工周期,确保施工质量。

注意事项:预埋构件定位准确,防止位移;高强度螺栓按规范控制拧紧力矩,做好防腐;门式钢架拼装控制垂直度

与水平度;混凝土及时养护;节点密封控制环境条件,确保防水防腐效果。

5. 结论

本文通过数值模拟与工程应用验证,系统研究了混凝土框架-门式钢架新型结构体系的结构性能,得出以下结论:

(1) 该体系由下部混凝土框架、上部门式钢架、节点连接构件及辅助支撑体系组成,通过节点连接实现协同受力,充分发挥两种结构优势,适用于物流仓储、工业厂房等大跨度建筑,在实际工程中已具备成熟应用案例;

(2) 数值模拟表明,该体系静力与抗震性能优良,极限承载能力强,延性与耗能能力满足规范要求,破坏形式为延性破坏,节点连接可靠^[4];

(3) ABAQUS数值模型准确可靠,最优参数组合可实现结构性能与经济性平衡;

(4) 多式联运示范基地项目应用效果良好,结合同类工业项目的应用经验,表明该体系施工便捷、造价低、实用性强,具有广泛应用前景。

[参考文献]

[1]冯世强,杨勇,薛亦聪,等.自复位装配式钢-混凝土混合框架节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(5):89-97.

[2]刘礼正,刘磊,郜子轩,等.门式刚架二次包浇混凝土钢柱脚节点性能的有限元分析[J].钢结构(中英文),2022,37(6):1-8.

[3]韩东晓.底层混凝土框架二层门式刚架结构的既有建筑的抗震鉴定[J].建筑结构,2022,52(S1):2233-2237.

[4]王玉良,赵敏,郝际平,等.基于极限平衡理论的钢与混凝土组合框架结构抗震分析[J].工程力学,2022,39(7):81-88.

基金项目:重庆市沙坪坝区2025年度技术创新项目:混凝土框架-门式钢架新型结构体系结构性能研究与应用(2025056)。

作者简介:王仪萍,女,1985.06,汉族,山东临沂人,副教授,专任教师,硕士研究生,研究方向:智慧城市、土木工程、BIM;

王颖,女,1982.06,汉族,重庆人,讲师,教学秘书,本科,研究方向:管理科学与工程;

李淦民,男,2006.03,汉族,四川达州,学生。