

新型轻钢-混凝土组合框架结构抗震性能研究

闫盼盼 李建雄 王铎

内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古呼和浩特, 010051;

摘要: 为探讨一种高效、节能、便于装配建造的新型建筑结构体系, 在前续节点和构件研究的基础上, 设计制作了一榀轻钢-混凝土组合框架, 经过低周水平往复加载试验研究了其抗震性能。试验得到了其破坏形态、荷载-位移滞回曲线、骨架曲线、关键点的荷载与位移数据, 以及抗震性能评估指标等关键信息。结果表明: 该体系整体性能良好, 混凝土和型钢的协调变形能力较强, 具有出色的抗震和耗能性能, 但梁柱节点连接相对较弱, 尚需进一步优化设计。

关键词: 装配式; 轻钢-混凝土组合框架; 耗能能力; 抗震性能

DOI: 10.69979/3029-2727.24.11.043

引言

在乡村振兴和双碳目标的大背景下, 我国城镇建设蓬勃发展^[1]。型钢-混凝土组合结构体系在高层和超高层建筑中得到广泛应用, 在新农村及美丽乡村建设浪潮推动下, 探讨和研究一种高校节能, 便于工业化装配建造, 尤其适用于村镇低层建筑集中统一规划建设新型轻钢-混凝土建筑结构体系势在必行^[2]。

本课题组在前期对于方钢混凝土柱、C型钢混凝土梁及其节点连接研究的基础上^[3-4], 为了进一步完善轻钢-混凝土组合结构体系的设计, 本次研究设计制作了一榀轻钢-混凝土组合框架(LSCC), 并对其进行了低周水平往复加载实验, 研究其受力变形及承载能力。

1 试验方案

1.1 试件设计

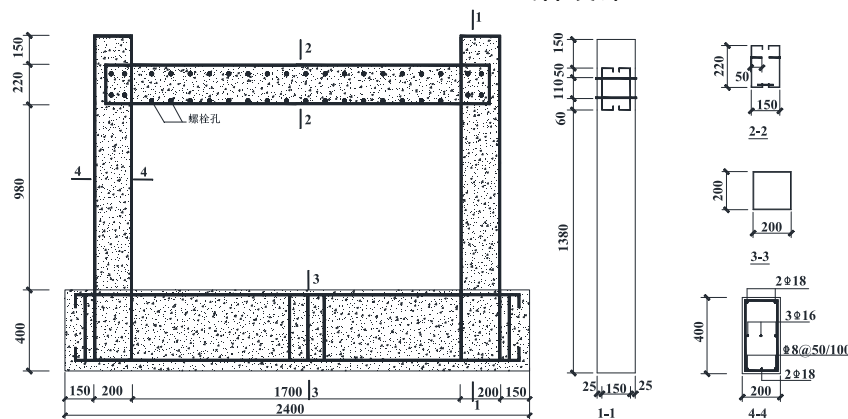


图1 LSCC试件设计尺寸及构造

试件设计为一个1/3缩尺的单层、单跨轻钢-混凝土组合框架(LSCC)模型, 试件几何尺寸及连接构造如图1所示, 轻钢-混凝土框架由对口双肢C型钢对拉形成“[]”状梁和方钢管柱骨架内浇注混凝土组成。C型钢尺寸为220mm×60mm×20mm×2.5mm; 框架梁腹部对拉螺栓均采用M6*1.0*50, 梁底螺栓采用M6*1.0*80, C型钢腹板上的锚栓是为了加强型钢与混凝土的粘结防止滑移; 梁贯穿柱节点在焊接的基础上各选取4根M8*1.0*50型贯通对拉螺栓进行加强连接; 柱方钢管尺寸

为200mm×200mm×3.5mm; 固定基础地梁尺寸为2400mm×400mm×200mm。

1.2 材料力学性能试验

试验中使用的钢材均为Q235B级别, 并按照国家标准《金属材料拉伸试验》^[8]的规定进行了标准的单轴拉伸试验。此外, C型钢梁和方管柱内浇注混凝土的设计强度等级都为C30。试验时同条件下养护的混凝土试块实测抗压强度的平均值为34.2MPa。有关主要材料力学性能的实测结果见表1。

表 1 钢材力学性能实测值

| 钢材类型 | 屈服强度 f_y /MPa | 极限强度 f_u /MPa | 弹性模量 E /MPa |
|------|--------------------|--------------------|------------------|
| C 型钢 | 300.8 | 423.84 | 198965 |
| 方钢管 | 320.3 | 446.71 | 210211 |

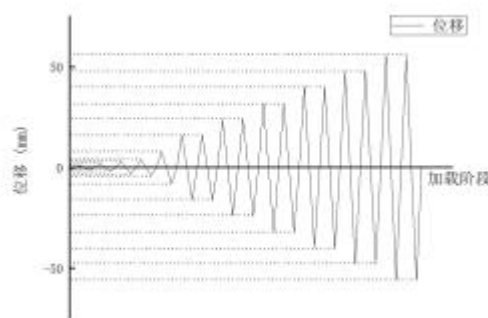
1.3 试验加载及测量

试验采用低周反复加载方式，加载装置示于图 2a。



(a) 加载装置

竖向加载阶段，通过压千斤顶和分配梁，在 LSCC 试验模型框架梁的上部 1/3 跨处区域施加 20kN 的竖向均布荷载^[6]。在加载过程中，随时进行调整，确保竖向千斤顶传感数值稳定，以保证试验框架受力特征与实际工况相符。水平加载阶段，根据有限元拟定该框架在水平加载过程中的极限位移约为 56mm。试验全程采用位移控制的加载方式，加载制度的详细信息见图 2b。



(b) 加载制度

图 2 加载装置和加载制度

1.4 测点布置

测点布置主要测量内容如下：①框架水平位移；②框架梁跨中竖向位移；③地梁钢筋应变；④方钢管柱内外表面应变；⑤螺栓应变；⑥C 型钢内外表面应变；⑦框架水平荷载；⑧裂缝分布及宽度。

2 试验现象与破坏形态

试件的试验现象及破坏形态如图 3 所示。在加载初期阶段，框架主要处于弹性受力状态，未能观测到明显变化；随着加载的持续，加载至位移 $\Delta=16\text{mm}$ 级过程中，梁柱节点处的钢板发出明显的挤压声响，节点焊接处的

表皮开始脱落，显露出焊缝（图 3a），钢管柱底部表皮开始脱落，柱底处的地梁上出现裂缝（图 3b）；加载至 $\Delta=24\text{mm}$ 级过程中，梁柱节点处响声异常明显，柱底表皮继续脱落（图 3c），地梁两端裂缝增多加宽，且裂缝与柱底漆皮表皮开裂处交汇（图 3d）；加载至 $\Delta=40\text{mm}$ 级过程中，梁柱节点处响声巨大，节点内混凝土与螺栓钢板有明显滑移，柱底钢管屈曲鼓包（图 3e），地梁处混凝土开裂剥落（图 3f）；加载至 $\Delta=56\text{mm}$ 级过程中，梁上下侧混凝土同时碎裂（图 3g&h），梁端混凝土破坏，试验结束。

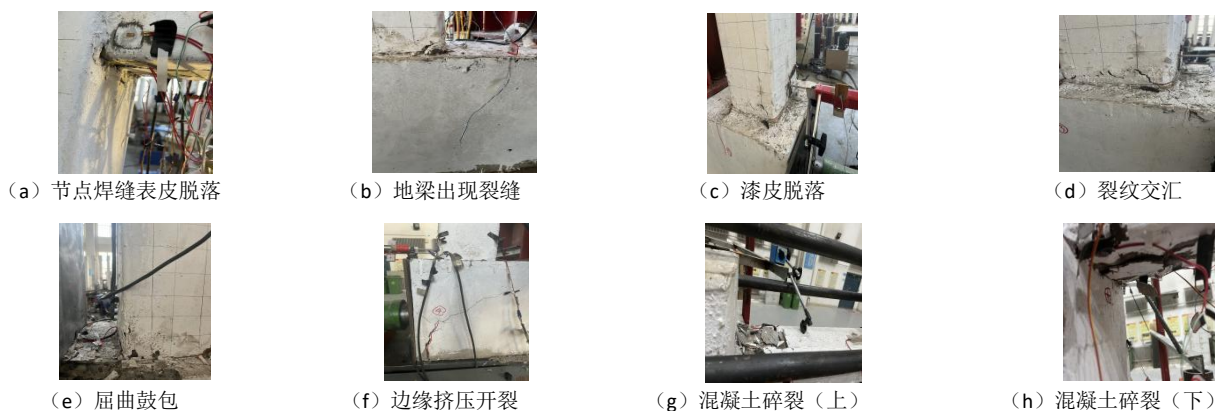


图 3 试件试验现象和破坏形态

3 试验结果分析

3.1 滞回性能

实测试件荷载-位移 ($F-\Delta$) 滞回曲线如图 4 所示。

加载前期, 滞回环向中间呈现线性捏拢, 环形狭窄耗能能力较差, 结构处于弹性工作阶段; 加载中期, 梁端、柱端产生贯穿裂缝, 滞回环内侧捏拢, 外侧扩张, 逐渐向弓形发展, 耗能能力有所提升; 加载后期, 滞回环逐渐饱满, 呈现明显反 S 型。

图 5 是利用试验数据绘制出的试件荷载-位移 ($F-\Delta$) 骨架曲线。从图中可以观察到, 试验的初始阶段骨架曲线随着位移荷载的增加呈现出高斜率的线性发展趋势, 前期曲线相对较陡, 这表明 LSCC 框架具有出色的初始刚度。然而, 随着控制位移等级的逐渐增大, 荷载的增速开始逐渐减小, 骨架曲线呈现出了逐渐

弯曲的趋势, 表明试件已进入屈服阶段。在加载后期, 达到峰值点后下降速率较为缓慢, 这是因为框架外部轻钢仍然具备一定的抗侧能力, 结构塑性铰的传递速度相对较慢。根据骨架曲线和《建筑抗震试验规程》^[7]采用几何作图法所确定的试件主要力学性能如表 2 所示。

利用位移延性系数 $\mu = \Delta u / \Delta y$, 即屈服位移与极限位移的比值, 来评估结构的延性特性。由表 2 可知, 根据《建筑抗震设计规范》^[8]中通常要求的延性系数 >3 , 本文所研究的 LSCC 框架延性系数平均为 3.34, 说明该试件具有良好的抗震延性。

表 2 试件特征点荷载与位移值

| 加载方向 | 屈服点 | | 极限点 | | 破坏点 | | 延性系数 μ |
|------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|------------|
| | Vy/kN | $\Delta y/mm$ | Vm/kN | $\Delta m/mm$ | Vu/kN | $\Delta u/mm$ | |
| 受拉 | 141.19 | 17.58 | 177.27 | 33.67 | 160.24 | 56.13 | 3.19 |
| 受压 | 135.48 | 16.21 | 192.21 | 46.67 | 164.73 | 56.4 | 3.48 |
| 平均值 | 138.34 | 16.9 | 184.74 | 40.17 | 162.49 | 56.27 | 3.34 |

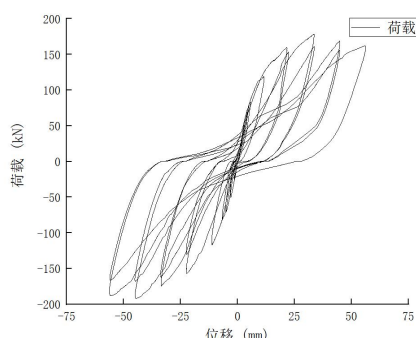


图 4 滞回曲线

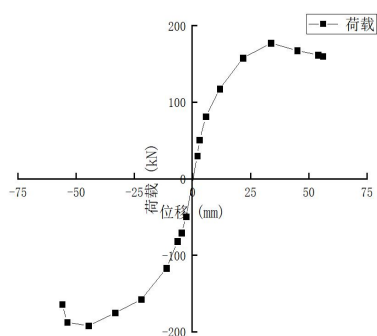


图 5 骨架曲线

3.2 耗能能力

地震中的能量主要通过结构的塑性变形来吸收和消散。在低周往复加载的条件下, 试件形成的滞回环面积直观地反映了其耗散地震能量的能力和结构的损伤状态^[9]。通常混凝土结构试验模型的耗能能力可由等效

黏滞阻尼系数和能量耗散系数来描述^[10]。本次试验模型的等效粘滞阻尼系数如表 3 所示。如表所示, 随着加载位移增大, 试件的等效粘滞阻尼系数和能量耗散系数也随之增加。当加载位移 ΔL 为 56mm 时, 试件的 ζ_{eq} 和 E 值均达到屈服点处该值的 1.67 倍, 说明该试件框架结构具有较为良好的抗震性能。

表 3 LSCC 框架阶段耗能参数

| 位移 ΔL (mm) | 等效粘滞阻尼系数 | 能量耗散系数 E |
|--------------------|--------------|----------|
| | ζ_{eq} | |
| 4 | 0.07 | 0.44 |
| 16 | 0.081 | 0.059 |
| 32 | 0.119 | 0.747 |
| 48 | 0.104 | 0.653 |
| 56 | 0.135 | 0.848 |

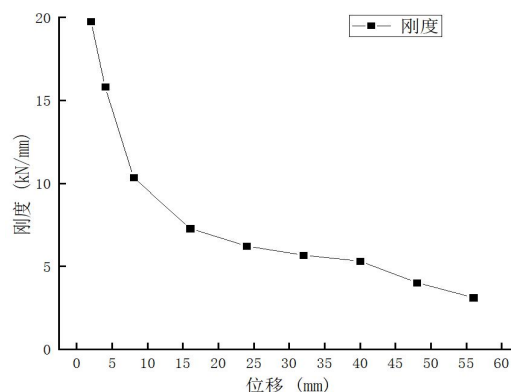


图 6 刚度退化曲线

3.3 刚度退化

刚度退化是指同一位移幅值下多次循环加载后,平均割线刚度 K_l 随加载级别增加而降低的现象^[11],试件加载过程中刚度退化曲线如图 6 所示。在加载过程中,试件的刚度在加载过程中逐渐减弱。在加载初期,由于节点间的微小错动和滑移,导致了结构刚度的迅速下降;试件进入屈服阶段后,下降速度较为缓慢,曲线逐渐趋于平缓;进入强度退化阶段后,刚度持续下降,试件逐渐趋于破坏。

3.4 应变分析

由图 7 (a&d) 可知,框架梁端上下两侧钢板相对位置的应变随着位移的变化而具有相反的变化规律,说明

在低周往复加载过程中,框架梁外部 C 型钢板上下腹板在实验过程中协同受力,共同抵抗荷载。图 7 (c&d) 中在 25mm 位移附近出现的跨横轴正负应变为水平往复过程中,钢板处于屈服阶段未及时消除的残余应力引起的残余应变。图 7 (e&f) 为梁端两侧中心相对位置前后 C 型钢的应变,可以看出两处测点的应变发展趋势相同,应变值随位移增大而增大;应变值上升过程中均有下降阶段,此时框架梁两侧 C 型钢测点处均进入屈服阶段。两侧钢板有着近似的应变变化趋势,说明框架梁两侧的 C 型钢能较好地共同协调工作,拉结螺栓的设置对于框架梁 C 型钢的契合有显著作用,降低了框架梁中混凝土与 C 型钢相对滑移的可能性,使框架梁有良好的整体性。

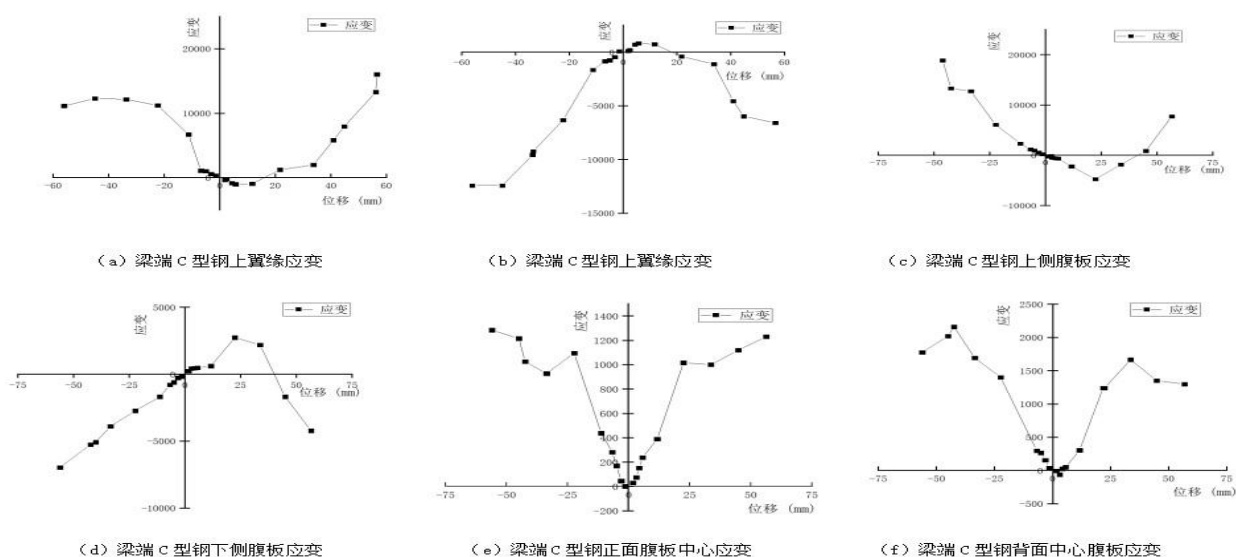


图 7 试件钢板位置应变

4 结论

1) 梁作为主要传力构件,两侧 C 型钢的应变趋势相似,能够协同抵抗荷载变形,拉结螺栓和锚栓在受力过程中发挥了至关重要的连接协调作用,LSCC 框架表现出卓越的整体性能,梁柱之间的协调变形符合典型门式框架结构的特征。

2) LSCC 框架表现出了较高的屈服承载能力和极限承载能力,初始刚度大,延性系数和等效粘滞阻尼系数均满足规范要求。表明该结构体系充分发挥了混凝土的高抗压能力和钢材的强抗拉性能,从而使其具备出色的抗震和耗能性能。

3) 试验观察到梁与柱节点处存在细微的相对滑移现象,轻钢和混凝土之间有可能存在的粘结强调不足问

题,使得 LSCC 框架试验滞回曲线出现明显的“捏缩”效应。为此,在今后的试验研究和设计应用中尚需进一步加强节点贯穿连接以及两种材料粘结强调控制。

参考文献

- [1] 陈志华,孙克肇,周婷,等. 装配式村镇住宅轻钢框架结构设计与研究[J]. 钢结构(中英文),2023,38(09): 28-36.
- [2] Z. Zhou, T. Wang, C. Hui, J. Li. Seismic performance evaluation of assembled GCFST column-section steel beam frames with geopolymer concrete walls. Structures, 2020, 28: 2537-2548.
- [3] 孟斐,李建雄,卢振方,等. 新型轻钢-混凝土组合

- 结构节点试验研究及有限元分析[J]. 土木工程, 2020, 9(5): 395-406.
- [4] 时圣占. 冷弯薄壁C型钢-混凝土组合梁受弯性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2022.
- [5] GB/T228.1-2010: 金属材料拉伸实验第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [6] 刘文超, 曹万林, 张克胜, 等. 装配式轻钢框架-复合轻墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 20-29.
- [7] JGJ/T101-2015: 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [8] GB50011-2010: 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] 方有珍, 徐晓光, 孙国华, 等. T形件螺栓连接卷边PEC柱-钢梁组合框架结构抗震试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(05): 1077-1090.
- [10] 陈明, 吉晔晨. 双肢冷弯C型钢支撑框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 55-60.
- [11] 侯皓文, 王伟, 陈越时. 双钢板混凝土组合剪力墙-钢梁单边螺栓端板连接节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 2023, 40(S1): 259-268+294.
- 作者简介: 闫盼盼(1998-), 女, 汉族, 硕士研究生在读, 主要从事轻钢-混凝土结构工程的研究。