

轻钢-混凝土组合框架力学性能试验研究

李建雄¹ 刘旭东¹ 霍兵²

1 内蒙古工业大学土木工程学院，内蒙古呼和浩特，010000；

2 国家粮食和物资储备局山东局三七二处，山东淄博，255000；

摘要：目前，钢-混组合构件的研究主要集中于单一结构，钢-混组合框架的研究较少，而组合构件相比于单一构件可以更好的反应结构在实际工况下的受力。基于此，设计并制作了一榀3:1缩尺单层单跨组合框架。首先，对一榀一跨一层组合框架进行竖向加载试验，分析其在受竖向荷载作用下的力学性能及破坏机理。试验结果表明：组合框架的承载能力突出，在破坏时出现典型的“三铰破坏”，有利于组合框架的内力重分布；节点处的贯穿锚栓，改变了传力机制，增强节点的承载能力；LSCC框架的延性好，有较好安全储备能力。

关键词：钢管混凝土柱；C型钢混凝土梁；静力性能试验

DOI: 10.69979/3041-0673.24.11.029

引言

随着我国建筑业的不断发展，装配式建筑由之前的低层逐渐开始向高层开始迈进，现有的单一装配式构件并不能满足实际工程需要。随着实际工程的需要，越来越多的科研人员将目光集中于钢混组合框架的研究上。综上，本文借鉴此前研究成果^[1-2]，将冷弯薄壁C型钢组合梁以节点贯穿的形式与钢管混凝土柱相连接，对其整体力学性能就行探究。

1 试验方案设计

1.1 试件设计制作

为探究此种组合结构在静力作用下的整体力学性能，所以设计并制作了一榀跨度为5.76m，层高为3m的3:1等比例缩尺单层单跨框架试件。参考《混凝土结构设计规范》^[3]以及民用建筑通用规范^[4]要求，根据跨高比及轴压比确定组合梁柱的截面尺寸。框架层高980mm，跨度1920mm，框架梁截面尺寸为150mm×220mm，柱截面尺寸为200mm×200mm，支座地梁为350mm×400mm。框架梁使用双肢C型钢形成“[]”箱型截面，C型钢规格尺寸为220mm×60mm×20mm×2.5mm，方钢柱截面厚度3.5mm，梁柱内均浇灌混凝土，组合框架构造形式如图1(a)所示；为了增强梁及框架的整体力学性能，在C型钢上下卷边处设置了孔距100mm的M6×1.0×80对拉螺栓，C型腹板上部通长设置间距100mm的M6×1.0×50锚栓，在梁端节点处分别设置4道M8×1.0×220贯穿对拉长螺栓，组合梁、柱及地梁的构造如图1(b)、

(c) 所示。

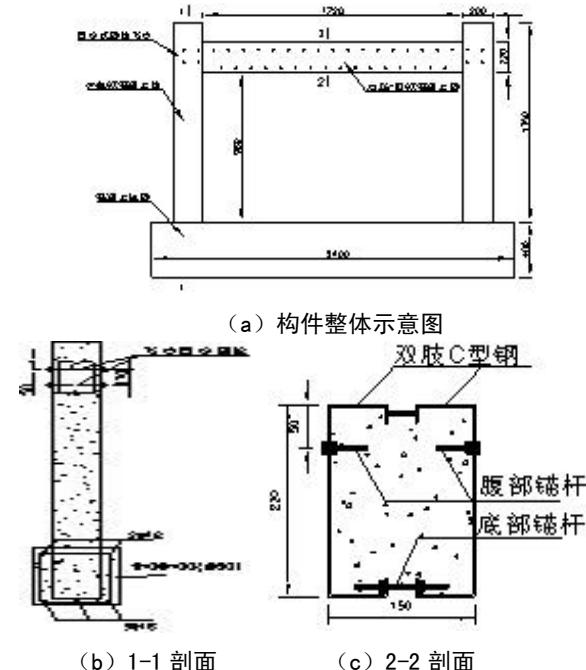


图1 构件设计图

Fig. 1 component design drawing

试件采用普通C30混凝土浇筑，水灰比为0.6，水泥采用P.042.5普通硅酸盐水泥。

1.2 试验加载方法

为模拟此构件在实际工况下的受力，确保试验方案的可行性及实验结果的准确性，试验采用三分点集中力轴向拟静力逐级加载方法，加载制度参考《混凝土结构试验方法标准》(GBT20152-2012)^[5]。

2 试验现象

2.1 试验现象

加载初期结构并无明显试验现象，随着荷载施加至90KN后，第一条混凝土拉裂缝出现在组合梁跨中下表面；随着荷载的施加（110KN左右），裂缝数量增多，并且最初的裂缝变宽；组合梁与柱子的节点处内部发出声响，应是荷载的施加导致组合梁跨中挠度不断增加，梁柱节点变形应力增大所致；荷载持续施加（130KN左右），跨中挠度不断加大，跨中下部混凝土开始剥落；此后（150KN左右），组合梁下部C型钢开始屈服，上部受压段部分也发生翘曲，同时由于钢材与混凝土的变形不协调，型钢与混凝土之间发生了滑移变形裂缝，如图2(a)所示；随着荷载不断增加（170KN左右），梁柱节点受力变形的不断增大，发生了梁从柱中拔出的现象，如图2(b)所示；荷载施加到200KN左右时，组合梁的变形越来越大，柱脚外侧地梁出明显有了裂缝，到了加载的后期（220KN左右），位移的增长并不能带来承载能力的上升，这时候表明组合梁完全进入塑性阶段，这时候组合梁梁端附近下表面的C型钢已生了鼓曲，跨中部分下表面的C型钢有了颈缩的现象。直至下部C型钢发生断裂如图2(c)所示，试验停止。

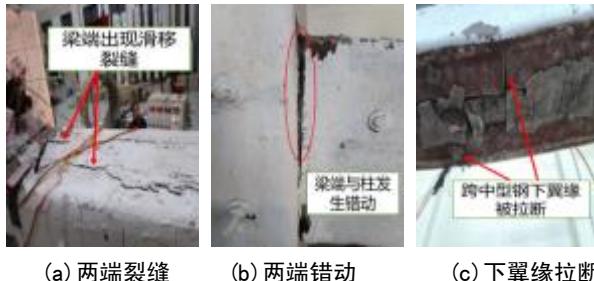


图2 各阶段试验现象公式章（下一章）节1

Fig. 2 Phenomenon of testing at various stages

3 试验结果分析

3.1 荷载-挠度试验结果分析

由试验所测得的荷载和挠度变形值，绘制出框架梁的荷载-位移曲线如图3所示。可见，加载初期（0~90KN）属于结构的弹性变形阶段，结构变形小（<3mm），将荷载撤掉，变形可恢复至原状，期间跨中虽有混凝土微小开裂，但裂缝并没有继续发展，这是由于外包钢的存在，很大程度的约束混凝土并承担了主要的拉应力，使结构具有较好的初始刚度满足使用要求。

随着荷载的不断施加（90~150KN），结构进入了弹性变形阶段。由曲线图3可见曲线斜率在不断的下降，

表明构件的刚度也在不断地下降，这是因为随着荷载不断施加，梁跨中下部钢材受拉变形增大而逐渐屈服，跨中区域形成塑性铰，同时，梁端上部受拉区的钢材也发生了屈服，此时梁的三个塑性铰都已形成，结构的刚度降低，并体现出了“强柱弱梁”的设计理念^[6]。

曲线的平缓段，标志着结构进入到破坏后期，即塑性变形阶段。此阶段，结构持载能力较低，位移持续增长，此时结构受拉区钢材已经进入强化阶段，随着荷载的继续施加钢材会发生颈缩继而断裂；而受压区的混凝土已经相继被压碎，但是由于外包钢对混凝土的束缚，混凝土破坏不会有大量的剥落；直至荷载施加至226.5KN时，继续加载只有挠度增加，荷载却开始下降，随着位移的继续增加，跨中下部钢材断裂，框架梁失效组合体系破坏。

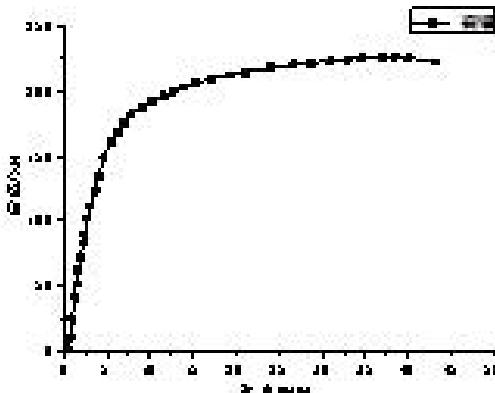


图3 荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve

总体来看，在加载前期即组合结构的弹性变形阶段，曲线基本呈直线状，这表明组合结构的刚度基本不变，随着荷载的施加，曲线逐渐趋于平缓，曲线整体没有任何的突变，表明型钢与混凝土能有效的协同工作，且构件具有充分的塑性发展阶段，结构的延性较好，结构的安全储备较好。

3.2 节点受力分析

梁柱节点的整体性（抗变形能力）对组合框架的承载能力也有十分重要的作用，为此，有必要对梁柱节点试验现象及其受力变形进行探究。该体系梁柱节点受力较为集中且复杂，梁的受力最终是通过节点转移到柱子，分析节点的受力变形状态，对于明确该体系的承载能力具有重要意义。

依据弹性力学计算理论公式，结合试验测数据，整理出如图4所示的节点等效应力变化曲线，在构件的弹

性阶段内，节点处的应力随着荷载的增加呈近似线性变化，在荷载施加至150kN附近时，曲线开始变化。

由图可知，节点处的等效应力并不大，并没有超过钢材的屈服强度。由节点的力的传导机制可知：梁因竖向荷载产生的位移，会在节点处引起转动以及拉拔滑动，这两种变形产生的力大部分由节点处对拉高强螺栓承担，而高强螺栓又会将其传导至外包钢以及内部混凝土，由于混凝土之间相互挤压，再加上外包钢的约束包裹，混凝土会承担大部分的变形力，只有一小部分由外包钢承担，故节点处强度应该主要取决于混凝土的强度。

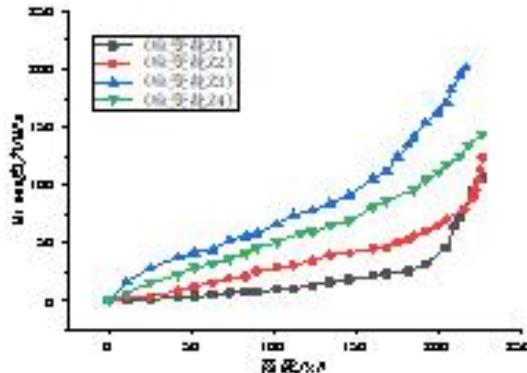


图4 节点应力曲线

Fig. 4 Nodal stress curve

3.3 结构延性分析

同时，延性也是反映结构构件在屈服后直至其达到极限荷载破坏前的抗变形能力，延性好的结构破坏过程较为缓慢，并且有着明显的破坏预兆，因而具有良好的安全储备。结构构件的延性通常用延性系数来衡量，直观的用其反应结构消耗能量的能力^[7]，延性系数用 μ 表示，通过计算本构建的延性系数为7.36。其延性系数远大于现行规范对于结构要求的延性系数3。说明此种形式的组合框架具有较好的延性。

4 结论

本文设计制作的一种轻钢-混凝土新型组合框架，

通过静力性能试验研究，得到以下结论：

(1) 从组合框架的破坏机制来看，该结构体系破坏形式为塑性破坏，结构延性系数为7.36，表明组合框架有着良好的受力变形能力；

(2) 结构在集中力作用下，钢材与混凝土之间的协调变形能力较好，梁端转角小，对称性好，结构的承载性能较可靠；

参考文献

- [1] 卢振方, 李建雄, 孟斐, 等. 冷弯薄壁型钢轻质混凝土组合墙体抗震性能试验研究 [J]. 土木工程, 2020(5): 382-394.
 - [2] 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(5): 395-406.
 - [3] GB50010-2015 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
 - [4] GB55031-2022 民用建筑通用规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
 - [5] GB/T50152-2012 混凝土结构试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑出版社.
 - [6] 胡吉, 石启印, 蔡万军. 低周反复荷载下新型组合框架结构受力性能的试验 [J]. 四川建筑科学研究, 2006(06): 59-62+66.
 - [7] 梁松. 型钢混凝土叠合梁的滞回性能与恢复力模型研究 [D]. 苏州科技大学, 2018.
- 作者简介: 李建雄 (1966.11.01—), 男, 汉族, 内蒙古呼和浩特市, 副教授, 硕士研究生, 研究方向: 土木工程新材料、新结构施工新技术应用研究。
刘旭东 (1999.11.06—), 男, 汉族, 内蒙古巴彦淖尔市, 硕士研究生, 研究方向: 土木工程新材料、新结构施工新技术应用研究。