

新型预制装配式梁节点抗剪性能研究

贺文龙¹, 申娟娟¹, 李雅婧¹, 张 博²

(1. 焦作工贸职业学院 建筑工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 根特大学, 东弗兰德 9000)

摘要:为提高预制装配式梁的抗剪性能,需对新型预制装配式梁节点进行进一步研究,这对于提升结构整体性能及使用寿命至关重要。文章通过试验验证新型装配式梁节点的抗剪性能,以节点连接处钢板截面占比为参数,采用反对称的加载方式进行试验。结果表明:1)新型节点连接方式未改变结构内力的传递方式,荷载可有效传递;2)截面钢板占比越大,预制装配式梁的抗剪性能越好,与普通钢筋混凝土梁相比,承载能力提升17.3%,延性提升了76.1%,耗能能力提升71%;3)节点连接处的钢板应变均小于350微应变,处于弹性阶段,可满足后续拆卸更换需求。本文成果可为预制装配式结构的设计和施工提供一定的参考。

关键词:节点连接; 装配式; 抗剪性能

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)06-0047-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.06.074

Study on the shear performance of new type precast beam joint

HE Wenlong¹, SHEN Juanjuan¹, LI Yajing¹, ZHANG Bo²

(1. Jiaozuo College of Industry and Trade, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. Gent University, East Flanders 9000, Belgium)

Abstract: To improve the shear performance of precast assembled beams, this paper proposes a novel prefabricated beam joint, which is crucial for enhancing structural integrity and service life. The study experimentally verifies the shear performance of the novel prefabricated beam joint by testing four beams, with the steel plate cross-sectional area ratio at the joint connection as the primary parameter. An anti-symmetric loading method was adopted to position the joint within the beam's contraflexure region, where the bending moment approaches zero and the shear force remains relatively small. This configuration reduces the risk of joint failure and facilitates disassembly and replacement. The results show that: 1) The new joint maintains original internal force transmission mechanisms, ensuring effective load transfer; 2) Increased steel plate ratio enhances shear performance, showing 17.3% improvement in bearing capacity, 76.1% increase in ductility, and 71% boost in energy dissipation capacity; 3) Steel plate strains at joints remain below 350 microstrain, staying within elastic range to satisfy replaceability requirements. These findings provide valuable references for the design and construction of prefabricated structures.

Key words: joint connection; contraflexure; shear performance

装配式建筑结构是实现我国建筑工业化的重要结构形式,有利于推动我国建筑产业的转型升级和绿色可持续发展。对于预制装配式结构来说,

节点连接处的性能对整个建筑物的安全起着至关重要的作用^[1]。目前,大部分预制装配式建筑选择将连接点设置在梁柱节点内^[2-3],但由于连接

收稿日期: 2025-01-03

作者简介: 贺文龙(1992—),男,讲师,从事装配式结构方面的研究工作。

通信作者: 张 博(1991—),男,博士,从事节能建筑材料方面的研究。

质量难以保证,且处于结构关键位置,因此部分研究人员开始致力于研究梁柱节点外的连接形式^[4-5]。范夕森等^[6]设计制作了角钢连接的装配式异形柱框架结构边节点足尺模型,通过拟静力试验,研究了其破坏机理和力学性能参数。研究表明,角钢连接的装配式异形柱框架边节点与现浇节点有相同的梁铰破坏机制,装配式节点的延性和耗能能力略优于现浇节点,但刚度小于现浇节点。张健新等^[7]基于钢结构节点焊接和栓接的连接形式设计制作了不同形式的装配式梁柱节点,分析节点的破坏特征、梁端弯矩、转角、节点核心区剪力等。研究结果表明:装配式节点的梁端弯矩和节点剪力显著提高,梁端转角显著增加,节点核心区剪切变形减小,受力性能得到明显改善。但是该节点连接方式仍需浇筑混凝土,降低了施工效率。邓杨等^[8]提出了一种新型装配式销轴混凝土梁柱节点,将预制梁和预制柱通过耳板和销轴连接,分析其耗能能力与破坏模式。结果表明,新型装配式销轴梁柱节点的破坏集中于节点的梁、柱端板处,梁端混凝土发生轻微脱落,混凝土柱及远离核心区的混凝土梁无明显裂缝。新型装配式梁柱节点有效提高节点塑性损伤控制能力,节点的耗能能力较现浇梁柱节点有所提升。

前人对预制装配式结构的节点连接处性能展开了大量研究,主要集中在梁柱节点处的连接形式及力学性能分析,但现有研究多需额外浇筑混凝土,且对节点拆卸更换的便捷性关注不足。本文将在前人研究基础上,提出一种创新的钢板-混凝土组合

结构节点连接方式,将预制梁中的钢板与纵筋相连,采用螺栓或焊接实现快速高效连接。该连接方式不仅能充分保障荷载在结构中的有效传递,还将显著提升施工效率,降低劳动成本和资源消耗。同时,本文将通过反对称加载方式使节点处于梁的反弯点区域,利用该区域弯矩接近零、剪力较小的特点,满足“强节点,弱构件”设计原则,为构件的便捷拆卸与重复利用提供可能。研究将针对 4 根梁展开,深入分析试件的破坏形态、荷载-位移关系、延性及能量耗散等特性,旨在为预制装配式梁的抗剪性能提升提供参考。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验共设计 4 根抗剪梁,参数如图 1 所示。字母 U、H 和 W 分别代表预制装配式梁的节点连接类型,R 代表普通钢筋混凝土对比梁。梁的尺寸均为 1 500 mm × 150 mm × 250 mm,纵筋直径为 18 mm,箍筋直径为 6 mm,箍筋间距为 50 mm,混凝土强度等级为 C40。节点连接处钢板的强度等级为 Q235,并用焊条进行手工焊接。

1.2 材料性能

在浇筑混凝土梁的同时制备混凝土立方体标准试块,与试件在相同环境下养护 28 d,测得试块抗压强度为 42.36 MPa。试验所用的钢筋、钢板和螺栓均为同一批材料,为获得材料的拉伸性能,采用实验室的 3 000 kN 液压伺服 MTS 拉力机进行拉伸试验。测得数据如表 2 所示。

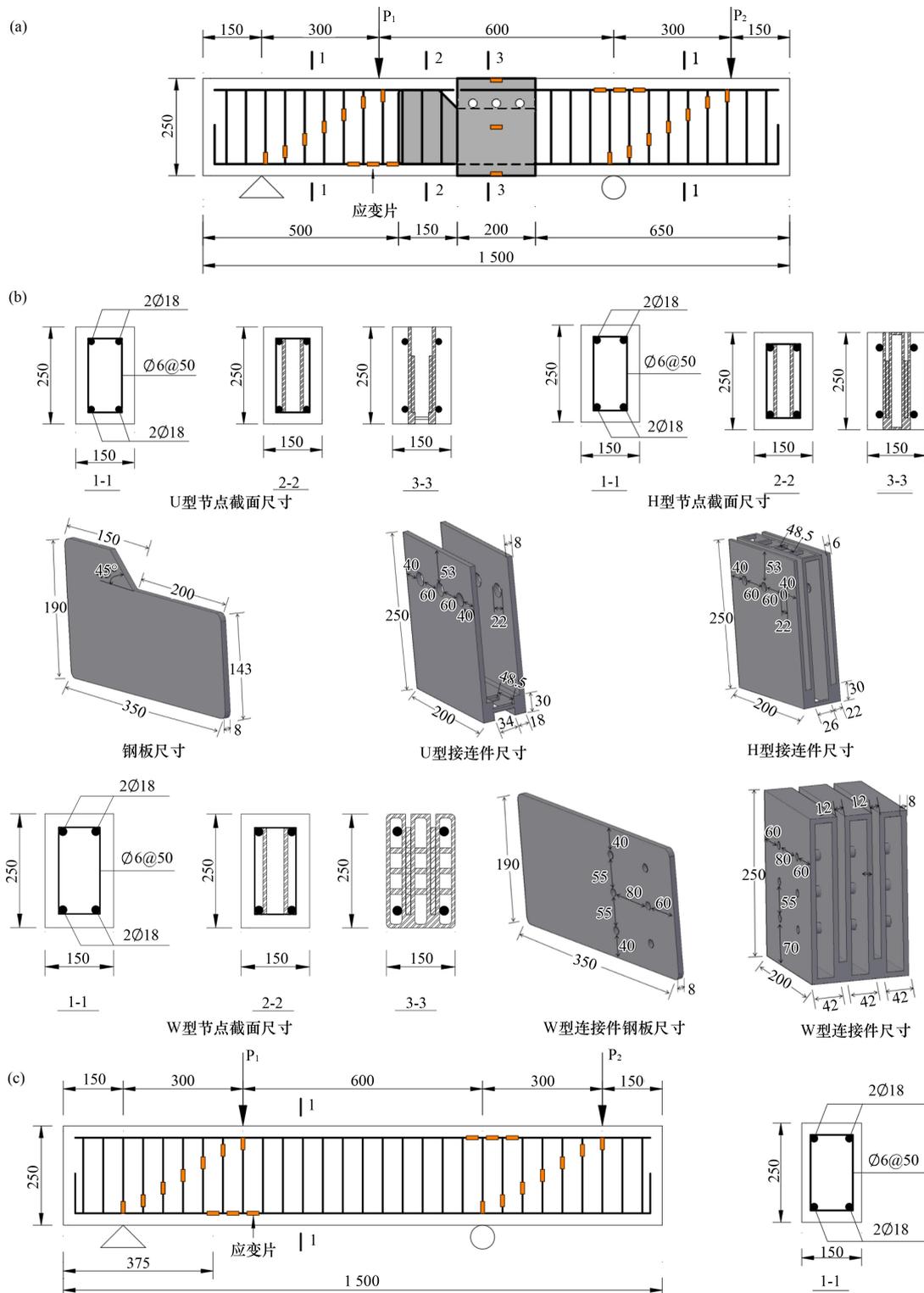
表 1 试件参数

试件名称	混凝土强度等级	纵筋配筋率/%	箍筋配筋率/%	截面钢板占比/%	连接方式
U-S	C40	1.60	0.76	15.6	焊接
H-S	C40	1.60	0.76	20.7	焊接
W-S	C40	1.60	0.76	36.9	螺栓
R-S	C40	1.60	0.76	—	—

表 2 材料性能

材料名称	直径/mm ^a	屈服强度/MPa	屈服应变	弹性模量/GPa	极限强度/MPa
钢筋	8	368.14	2 009.57	207.58	546.02
	16	352.36	2 348.25	198.17	522.43
螺栓	16	439.43	2 165.21	202.95	519.58
钢板	4	264.92	1 275.70	199.83	384.83

注: a 表示钢筋和螺栓的直径或者钢板的厚度。



(a) 钢筋笼尺寸; (b) 装配式梁尺寸; (c) 普通钢筋混凝土对比梁尺寸

图1 构件尺寸

mm

1.3 加载方案和测点布置

试验通过反对称加载的方式进行, 加载仪器采用液压长柱试验机进行加载。为确保仪器和设备的正常工作, 在开始试验之前, 先进行预加载,

检查各仪器设备正常工作后, 正式开始试验。试验采用位移控制的加载方式, 加载速率为 0.5 mm/min, 加载至试验梁破坏为止。加载方案如图 2 所示。

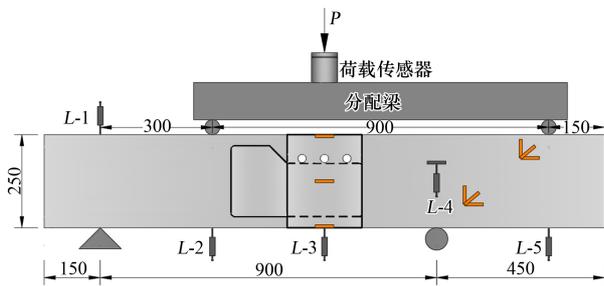


图 2 加载装置和测点布置示意 mm

试验采用力传感器来测量实时荷载；在支座、加载位置和拐点处共布置了 5 个位移计来测量加载过程中试验梁的位移情况，如图 2 所示。采用电阻式应变片测量各部分的应变，沿反弯点处的混凝土表面从上到下布置 3 个应变片，用来验证反弯点处弯矩的分布情况。钢筋的应变片分别布置在弯矩最大处的纵筋上和剪跨区的箍筋上。采用数字图像全场应变测量系统 (DIC) 用于测量混凝土表面的应变场，如图 3 所示。DIC 系统已被证明对于连续捕获混凝土梁表面的应变场和裂纹发展非常有效且准确。



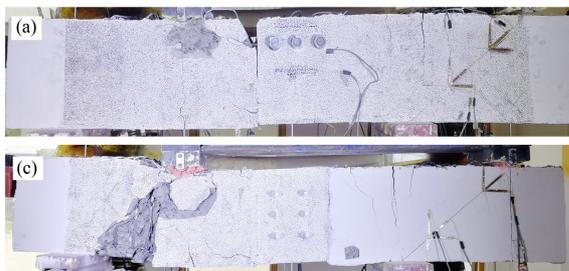
图 3 测试设备

2 试验结果与分析

2.1 各试件破坏现象

2.1.1 U-S

试件 U-S 为预制装配式梁，采用螺栓进行连



接。试件的荷载加载至 72 kN 左右的时候，试件沿着左加载点界面出现第一条裂缝。随着荷载的不断增大，梁中开始出现斜裂缝，沿着左加载点和左支座方向分布，并且沿着左加载点和右支座的连线方向上也出现了斜裂缝，箍筋的应变快速增加。当荷载增加至 361 kN 时，梁中的钢筋达到屈服，此时梁的挠度为 3.55 mm，荷载增加缓慢，裂缝不断开展并增多，挠度不断增大。当荷载增加至 426 kN 时，达到峰值荷载，此时梁的挠度为 8.29 mm，随后，荷载突然下降，左加载点处的混凝土被压碎，试件发生破坏。如图 4(a) 所示。

2.1.2 H-S

试件 H-S 为预制装配式梁，采用焊接的方式进行连接。荷载增加到 75 kN 的时候，试件沿左加载点至左支座的混凝土表面出现第一条斜裂缝，剪跨区箍筋的应变迅速增加。随着荷载的增加，斜裂缝不断增多，当荷载增加至 377 kN 的时候，梁中的纵筋屈服，随后裂缝不断扩展，应变继续增加。荷载增加到 424 kN 时，达到峰值荷载，此时梁的挠度为 7.33 mm。随后荷载开始下降，直至荷载下降到峰值的 85%，试件达到破坏。如图 4(b) 所示。

2.1.3 W-S

试件 W-S 为预制装配式梁，采用螺栓进行连接。荷载达到 62 kN 的时候，试件在右支座处梁顶端出现第一条竖向裂缝。随着荷载的增加，试件开始出现斜裂缝，并沿着左支座和左加载点的连线上形成一条主裂缝。荷载增加到 395 kN 的时候，纵筋达到屈服，剪跨区的部分箍筋也开始屈服，此时梁的挠度为 2.48 mm。荷载增加至 480 kN 时，达到峰值荷载。随后荷载缓慢降低，斜裂缝不断扩展，当达到破坏条件时，此时极限荷载和极



试件：(a) U-S；(b) H-S；(c) W-S；(d) R-S

图 4 各试件破坏模式

限挠度分别412 kN和17.19 mm。如图4(c)所示。

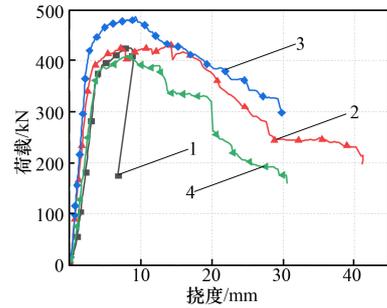
2.1.4 R-S

试件R-S为普通混凝土对比梁。荷载增加到73 kN的时候,试件在左加载点和右支座处分别出现一条裂缝。荷载持续增加,混凝土表面开始出现斜裂缝,沿左加载点和右支座的中间区域发展,并不断增多和扩大。荷载增加到345 kN时,试件达到屈服荷载,此时梁的挠度为3.45 mm。荷载增加至409 kN时达到峰值荷载,此时试件的挠度为8.18 mm。之后荷载开始下降,直至试件破坏。如图4(d)所示。

试件的破坏模式如图4所示。基于对试件破坏的照片进行观察和分析以及DIC监测的第一主应变场识别出所有试件为剪切破坏,其特征是连接加载点和支座的临界剪切斜裂缝近似为一条直线。虽然对比梁R-S也是剪切破坏,但是,不同的是预制组在左侧的剪跨区发生破坏,而对比梁则在P1和右侧支座之间的剪跨区发生破坏。根据现有知识,预制组的破坏模式可以进一步定义为沿受压混凝土对角的混凝土柱体压碎,这是深梁的典型破坏模式^[11]。当剪跨比 a/d 的值较大时,对比梁R-S的破坏模式可以被认为是剪切压缩或弯曲拉伸破坏,这是当剪跨比 a/d 大于2.5时的梁的典型破坏模式^[12]。

2.2 荷载挠度曲线、裂缝宽度和关键点分析

所有试件的荷载-挠度曲线如图5所示。由图5可知,预制装配式梁的抗剪承载力相对于对比梁均有提高。试件U-S的初始刚度在预制构件中最小,但接近于普通钢筋混凝土R-S的刚度。这可能是由于螺栓只能约束节点连接处的垂直位移,而节点连接处在挠度较大的位置处发生了轻微的水平相对滑动,从而导致了初始刚度变小。从荷载-挠度曲线中可以明显看出,构件的抗剪强度和刚度都随着钢板截面占比的增加而增加。



1—U-S; 2—H-S; 3—W-S; 4—R-S。

图5 荷载-挠度曲线

随着试件U-S的钢板截面占比由15.6%提高到试件W-S的36.9%,构件的抗剪强度提高了12.8%,构件的刚度也发生了明显的提高。试件U-S的突然破坏的原因是由于受压区混凝土的压碎。

试件的特征点和延性系数如表3所示。由表3可知:装配式梁的屈服荷载和峰值荷载相对于对比梁都有提升,并且随着截面钢板面积的增加而增大;试件W-S的截面钢板占比最高,荷载提升也最大,屈服荷载相对提升了14.5%,峰值荷载提升了17.3%。

预制装配式梁的延性系数如图6所示。由图6可知:预制梁的延性系数比普通钢筋混凝土梁的延性系数大,且都满足大于3的要求,但在荷载点P1作用下,由于混凝土的突然压碎而破坏的U-S除外;试件H-S和W-S的延性系数分别比R-S试件提升71%和76%,说明随着截面钢板占比的增加,试件的延性在提高。

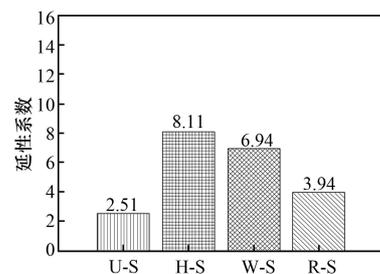


图6 延性系数

表3 试验梁的特征点和延性系数

试件名称	屈服荷载/kN	屈服挠度/mm	峰值荷载/kN	峰值挠度/mm	极限荷载/kN	极限挠度/mm	延性系数
U-S	361.31	3.55	426.19	8.29	394.48	8.92	2.51
H-S	377.08	3.07	424.89	7.33	360.30	20.73	6.75
W-S	395.51	2.48	480.61	8.36	412.37	17.19	6.94
R-S	345.31	3.45	409.78	8.18	354.25	13.59	3.94

耗能的大小由荷载 - 挠度曲线和 X 轴所包围的面积(极限点定义为峰值荷载的 85%) 确定。图 7 为各试件的能量耗散能力。

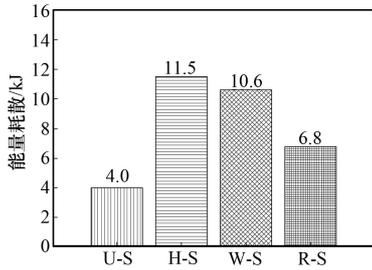


图 7 能量消耗

由图 7 可知, 预制装配式梁的耗能能力均大于普通钢筋混凝土梁, 但试件 U-S 除外, 试件 H-S 和 W-S 的耗能能力分别比试件 R-S 提升了 71% 和 56%, 这是由于装配式梁内钢板的存在, 提升了构件的承载能力和延性。

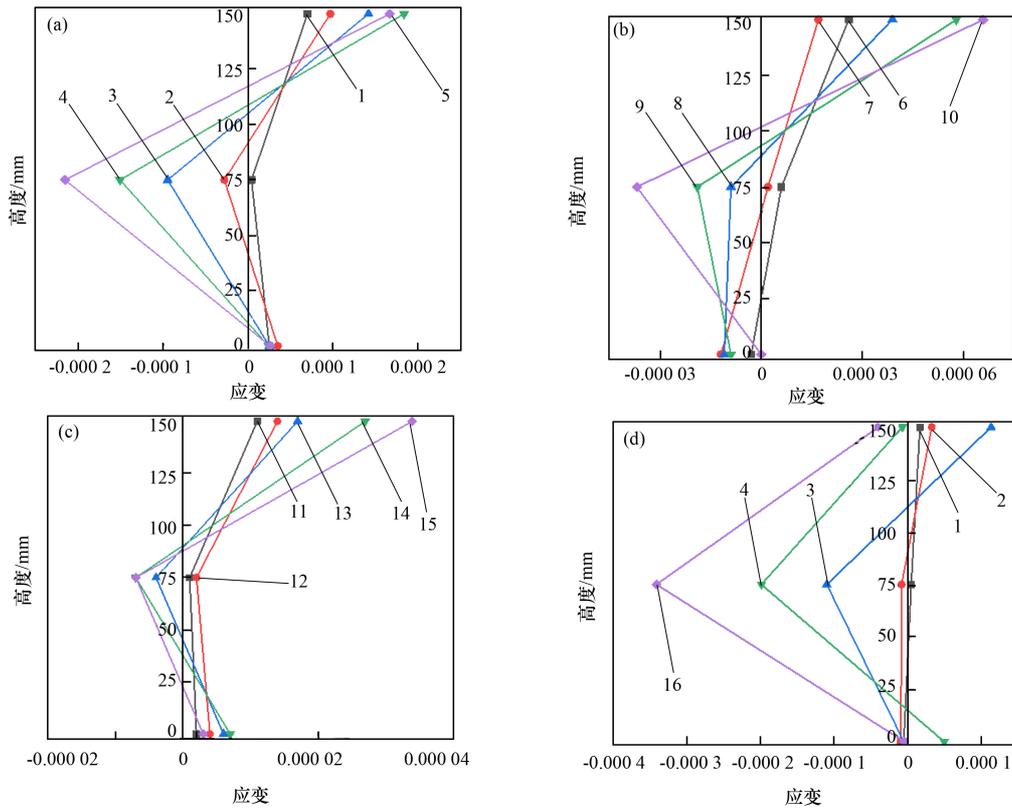
图 8 给出了所有试件反弯点处沿截面高度各荷载级别下的应变变化。由图 8 可知, 在各荷载

级别下, 所有试件在反弯点处的混凝土应变值都非常小, 基本都小于 350(微应变), 这说明正常加载的情况下, 该新型预制装配式节点连接方式并没有改变结构内部弯矩的变化, 应变仍然接近于理论值。并且可以说明节点连接处基本没有发生破坏, 钢板仍然处于弹性阶段, 这为后续的拆卸更换工作提供了可能性。

图 9 给出了各截面中间高度的应变值。由图 9 可知, 除试件 R-S 以外, 所有试件的应变均小于 350(微应变), 测得的应变值接近于理论值。另外, 普通混凝土梁的应变最大, 而预制装配式混凝土梁的应变则相对较小并随着节点连接处钢板截面积的增加而降低, 这是由于钢板的存在, 提升了反弯点处的刚度, 减小了变形。

2.3 分析与讨论

如图 10 所示, DIC 测量系统与试验结束时拍摄的梁的破坏模式的照片一致。

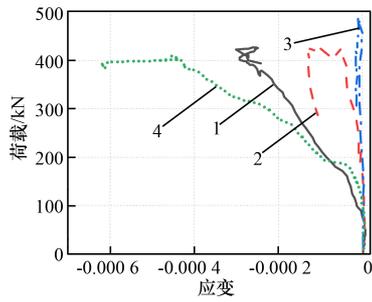


(a) U-S; (b) H-S; (c) W-S; (d) R-S

荷载/kN: 1—70; 2—140; 3—210; 4—280; 5—360; 6—75; 7—150;

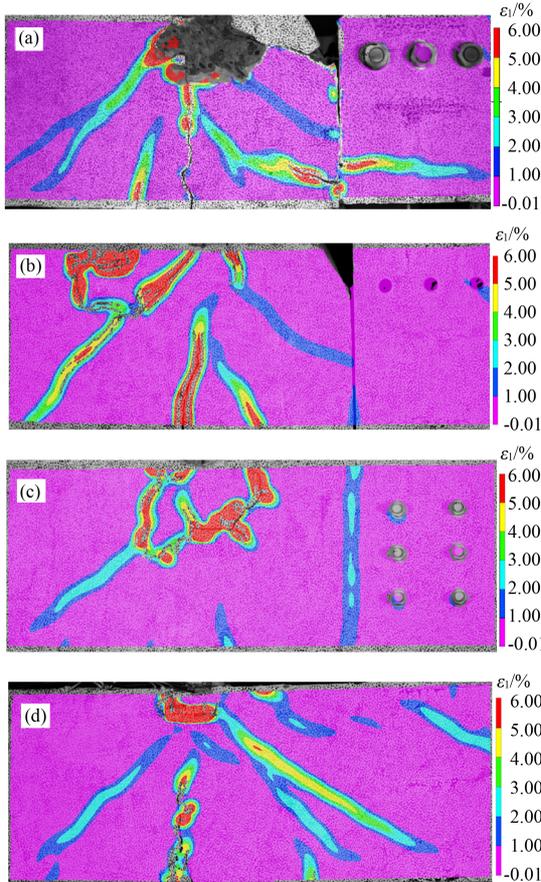
8—225; 9—300; 10—377; 11—80; 12—160; 13—240; 14—320; 15—395; 16—345。

图 8 反弯点处沿梁截面高度各荷载级别下的应变变化



1—U-S; 2—H-S; 3—W-S; 4—R-S。

图 9 反弯点处截面中间位置的荷载-应变曲线



(a) U-S; (b) H-S; (c) W-S; (d) R-S

图 10 DIC 应变云图

从图 10 中可以看出, 加载点 P1 和右支座之间的剪跨区内的剪切裂缝的宽度随着节点连接处的截面钢板占比的增加而加大, 并且发展到了加载点 P1 下的受压区混凝土中, 这一点已经被前面给出的荷载-挠度曲线所证实。试件 R-S 的剪跨区出现的临界斜裂缝与预制构件的不同, 在较大的剪跨比(2.8)区域内发生破坏, 临界斜裂缝不断发展并扩展到受压区混凝土中, 最后, 加载点附近混凝土被压碎。正是由于主应力的大小超过了

混凝土材料的抗拉强度, 才导致了临界斜裂缝的形成和扩展, 最终使构件发生破坏。然而, 对于预制构件来说, 由于连接区的钢板提供了较大的横向抗力, 较大剪跨比(2.8)处(如 R-S 发生的情况)的剪切破坏转移到了左侧较小的剪跨比(1.4)处。因此, 正是由于混凝土沿混凝土斜压柱体的压碎引起了梁的破坏, 在这种情况下, 大部分荷载直接从加载点转移到支座处。预制接头的存在限制了左加载点 P1 和右支座之间的斜向裂缝扩展到受压区混凝土中, 这种结果在预制连接接头强度更高或刚度更大时更加明显, 这反过来也大大降低了构件在加载点 P1 下的混凝土的损伤, 从而提高了构件的抗剪强度。

3 结论

(1) 节点连接方式改变了试件的破坏模式。新型节点连接方式的应用, 使得临界斜裂缝从普通混凝土梁的较大剪跨区转向了预制装配式梁的较小剪跨区, 从而将破坏截面进行了转移, 提高了试件的承载力。并且从反弯点处混凝土表面的应变来看, 该节点连接方式并未改变力在结构内的传递方式。

(2) 随着节点连接处刚度的增加, 预制装配式试件的抗剪承载力明显增加, 与普通的混凝土梁相比, 预制梁的延性和能量耗散能力也有所改善, 并且通过增加刚度或钢板截面面积的占比, 改善程度总体上得到了进一步提高。

(3) 由于节点的连接区域位于连续梁的反弯点附近, 所以即使预制梁发生了破坏, 节点连接处的应力也相对较低。因此, 可以移除和更换损坏的组件。

参考文献:

- [1] 李惠. 装配式建筑构件节点连接技术探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2021(1):43-44.
- [2] 林显志, 杨志忠, 蔡伟明, 等. 预制装配式梁柱节点连接施工工艺研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(20): 126-127;139.
- [3] 丁克伟, 刘文杰, 陈伟. 预制装配式螺栓连接 RC 梁柱节点的滞回性能[J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49(5):134-141.

(下转第 65 页)

- [10] 孙志远. 带锚固板半灌浆套筒连接的预制拼装桥墩力学性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [11] 乔崎云,翟宏磊,曹万林. 低负温下锚固长度对半灌浆套筒连接性能试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构,2023,53(增刊1):1223-1228.
- [12] 苏立坡,王占文,刘子业,等. 考虑钢筋偏心影响的铸造半灌浆套筒连接性能试验研究[J]. 建筑结构,2023,53(8):78-85.
- [13] 彭建和,吴韬,侯高峰,等. 灌浆缺陷对半灌浆套筒接头力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2023(11):62-66.
- [14] 周忠晨,丁桂华,李二要. 连接缺陷对半灌浆套筒连接性能的影响[J]. 中国建筑金属结构,2022(11):14-16.
- [15] 李明涛. 高温后半灌浆套筒连接力学性能试验研究[J]. 工业建筑,2022,52(7):106-112;71.
- [16] HOSSEINI S J A, RAHMAN A B A. Effects of spiral diameter on the bond stress-slip relationship in grouted sleeve connector [J]. Malaysian Construction Research Journal (MCRJ), 2015, 12(1): 1-20.
- [17] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, et al. Tensile capacity of grouted splice sleeves [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 285-296.
- [18] UUTRAUER R E, HENRY R L. Influence of normal pressure on bond strength [J]. ACI Journal Proceedings, 1965, 62(5): 577-586.

(上接第53页)

- [4] 吴成龙,王其辉,李绍辉,等. 预制钢骨混凝土柱钢梁组合节点试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(4):103-113.
- [5] 戎贤,郝君临,张健新. 基于性能的新型装配式钢节点混凝土框架结构抗震设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(6):979-988.
- [6] 范夕森,贾文启,张子健. 角钢连接的装配式异形柱框架边节点抗震性能研究[J]. 建筑结构,2023,53(19):25-32;24.
- [7] 张健新,李晨晨,戎贤,等. 不同连接形式的装配式混凝土梁柱节点受力性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(2):123-130.
- [8] 邓扬,李爱群,张昀路,等. 新型装配式销轴混凝土梁柱节点抗震性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):461-470.
- [9] 徐天鸿,王书琪,田石柱. 反弯点高度比对强梁弱柱钢框架混合试验影响分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2022,47(1):22-30.
- [10] 谢鲁齐,章锦洋,刘晨昱. 基于可更换耗能连接的装配式混凝土梁柱节点力学性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):1-8.
- [11] HU B, WU Y F. Effect of shear span-to-depth ratio on shear strength components of RC beams [J]. Engineering Structures, 2018, 168(8): 770-783.
- [12] ZHOU Y W, GUO M, SUI L L, et al. Shear strength components of adjustable hybrid bonded CFRP shear-strengthened RC beams [J]. Composites, 2019, 163(4): 36-51.