

# U型钢-混凝土组合梁交叉节点抗弯性能试验研究

杨明波<sup>1</sup>, 刘畅<sup>2</sup>, 李晓阁<sup>3</sup>, 张权<sup>4</sup>, 冯树国<sup>5</sup>, 常煜存<sup>2\*</sup>

(1. 山东铁鹰建设工程有限公司, 山东 泰安 271024; 2. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061;

3. 中铁建设集团有限公司, 北京 100043; 4. 曲阜华亿重工有限公司, 山东 曲阜 273100;

5. 山东盛桥实业集团有限公司, 济南 251400)

**摘要:** 针对U型钢-混凝土组合梁交叉节点处U型钢腹板传力路径中断、节点受力复杂、现有焊接钢筋过渡节点现场焊接工作量大的难题,提出了一种基于L形连接板传递U型钢腹板内力的新型节点(简称LLTC)构造,并对该节点的抗弯性能进行了试验研究。LLTC由套筒、L形连接板和套丝钢筋组成,相较于传统梁交叉节点(简称WLTR-UCJs),其通过设置焊接式纵向过渡钢筋(简称WLTR)有效传递U型钢腹板内力,实现了节点的装配式连接。文中通过四端简支静力试验,研究了WLTR-UCJs和LLTC-UCJs的抗弯性能,明确了纵向传力构件形式、WLTR直径、LLTC套丝钢数量、LLTC套丝钢筋强度等参数对节点承载能力与变形能力的影响。试验结果表明:WLTR-UCJs的破坏模式为钢腹板屈曲和顶部纵向钢筋屈曲;LLTC-UCJs的破坏模式为U型钢翼缘屈服。与WLTR-UCJs相比,LLTC-UCJs受压区材料的屈曲程度较低,进而使其具有更高的承载力和更优的变形能力。

**关键词:** U型钢-混凝土组合梁; 交叉连接; 螺纹套筒; L形连接板; 组合结构; 塑性发展系数

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0010-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240809001

## Experimental Study on the Flexural Behavior of U-Shaped Steel-Concrete Composite Beam Cross Joints

YANG Mingbo<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, LI Xiaoge<sup>3</sup>, ZHANG Quan<sup>4</sup>, FENG Shuguo<sup>5</sup>, CHANG Yicun<sup>2\*</sup>

(1. Shandong Tiejing Construction Engineering Co., Ltd., Taian 271024, China; 2. School of Civil Engineering,

Shandong University, Jinan 250061, China; 3. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100043,

China; 4. Qufu Huayi Heavy Industry Co., Ltd., Qufu 273100, China; 5. Shandong Shengqiao

Industrial Group Co., Ltd., Jinan 251400, China)

\*Corresponding author: changyicun@sdu.edu.cn

**Abstract:** In order to solve the problems of interrupting the force transmission path of the U-shaped web at the intersection joint of the U-shaped steel-concrete composite beam, the complex force of the joint, and the large amount of on-site welding of the existing welded steel bar transition joint, a new type of joint (LLTC), which uses the L-shaped connecting plate to transmit the internal force of the steel web was proposed, and the bending performance of the joint was tested. LLTC consists of sleeves, L-shaped connection plates and threaded rebars installed on the steel web. Compared with the conventional cross joints (WLTR-UCJs) which transmit the

收稿日期: 2024-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(52078280)

作者简介:

杨明波(1975—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事钢结构和桥隧装备制造工艺技术方面的研究。E-mail: Lostindust2021@163.com。

通信作者:

常煜存(1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事钢结构方面的研究。E-mail: changyicun@sdu.edu.cn。

internal force of the steel web by welded longitudinal transition rebar (WLTR), the LLTC cross joints transfer eccentric internal force within the steel web. Through single-point loading experiments with the specimens simply supported at four ends, this paper investigated the flexural behavior of the WLTR cross joints and the LLTC cross joints. The influence of the type of longitudinal transition components, the diameter of WLTR, the number of threaded rebars of LLTC and the strength grades of threaded rebars of LLTC on the load-carrying capacity and deformability of beam cross joints was studied. Experimental results showed that the failure mode of WLTR-UCJs was the buckling of steel web and the buckling of top longitudinal rebar, while the failure mode of LLTC-UCJs was the yielding of steel flange. The LLTC cross joints had higher load-carrying capacity and better ductility than WLTR cross joints due to the less pronounced buckling of the web.

**Keywords:** U-shaped steel-concrete composite beam; cross joint; threaded sleeve; L-shaped connection plate; composite structure; plastic development coefficient

马克俭等<sup>[1]</sup>提出的空腹夹层板结构解决了多层体育场馆楼盖刚度差的问题,已在实际工程中有超过百万平米的应用。混凝土空腹夹层板结构具有下弦梁带缝工作的特点,无法用于游泳馆等高腐蚀环境中。李莉等<sup>[2]</sup>改进的U型钢-混凝土组合空腹夹层板(简称USCOSP)解决了下弦梁开裂的问题,并已将其广泛应用于展览馆、剧院、体育场馆等多层大跨度公共建筑中,其中应用工程中最高为4层,最大跨度达92.9 m。USCOSP由混凝土板、钢筋混凝土上弦梁、钢筋混凝土剪力键和U型钢-混凝土下弦梁组成(图1),下弦梁包含了横向连接钢筋、纵向传力构件、抗剪栓钉、纵向钢筋、混凝土等构件。USCOSP独特的三维空间力特性使其受力均匀且整体力学性能优异,即上弦梁和下弦梁承受弯矩、剪力键承受剪力,主要具有以下优点:(1)隔墙可自由布置,便于房间的自由分隔;(2)空腹处布置管线,能增加楼层净高;(3)大开间、大柱网设计可实现房间灵活布置,满足文体场馆的少柱设计要求;(4)U型钢不仅解决了下弦梁的裂缝问题,且在施工阶段可作为下弦梁模板,可有效克服现场混凝土浇筑对模板需求量过大的技术局限,进而缩短施工周期。

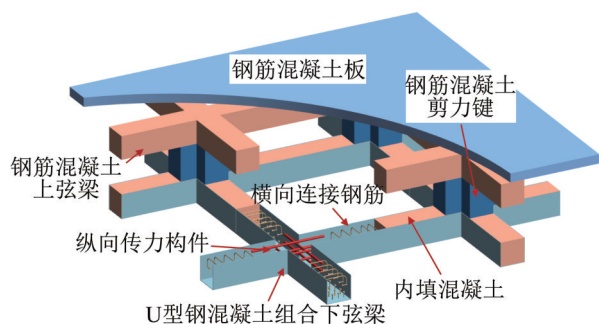


图1 USCOSP构造示意

Fig. 1 Diagram of USCOSP structure

LU等<sup>[3]</sup>通过对混凝土空腹梁开展抗弯试验研究发现,下弦梁的抗裂性能制约了大跨度空腹夹层板的建造。

WANG等<sup>[4]</sup>将下弦梁优化为外包U型钢-混凝土组合梁,开展了U型钢-混凝土组合空腹梁抗弯试验研究,发现该类构件的延性优于混凝土空腹梁的延性,且由裂缝产生的影响可忽略,这一改进为空腹夹层板在大跨度结构中的应用提供了有利支撑。胡岚等<sup>[5-6]</sup>、何奇<sup>[7]</sup>对U型钢-混凝土组合空腹夹层板的静力性能开展了试验研究和参数分析,发现增大下弦梁的刚度能够显著增大结构的垂直刚度,表明提高下弦梁承载能力,能够有效拓展空腹夹层板在更大跨度建筑中的适用范围。

上述研究表明:通过将钢筋-混凝土空腹夹层板的下弦梁替换为U型钢-混凝土组合梁,可显著提升其结构应用的最大适用跨度,并有效规避下弦梁混凝土开裂风险,表明下弦梁的力学性能是制约空腹夹层板跨度的重要因素。U型钢-混凝土组合空腹夹层板结构形式较为新颖,缺少可借鉴的设计方法和施工方案;下弦梁节点连接构件施工困难、临时支撑体系较为复杂<sup>[8]</sup>,制约了相关前沿研究成果在实际工程中的应用和推广,因此下弦梁节点的连接构造仍有较大改进空间。下弦梁节点域对结构整体性能的影响较大,其作用需在设计中予以充分考量;但现行规程尚未对空腹夹层板节点域的设计与构造做出明确规定。因此,开展空腹夹层板节点域的研究具有重要意义,需深入探究其受力特性,为工程设计与施工提供可靠的科学依据。

通过研究可知,下弦梁易在空腹夹层板弯矩最大的跨中位置发生破坏,中心受载下的梁交叉节点可等效为空腹夹层板跨中位置的下弦梁节点,不可等效为支座等其它位置的下弦梁节点,因此本研究仅适用于空腹夹层板跨中的下弦梁节点。下弦梁节点本质为中心受载的U型钢-混凝土组合梁交叉节点(简称UCJs),UCJs连接形式包括U型钢腹板的连接和U型钢翼缘的连接:

(1) U型钢腹板通过纵向传力构件实现有效连接,为确保其内力可靠传递,工程中将钢筋焊接于U型钢的内壁,称为焊接钢筋型纵向传力构件(简称WLTR),如

图2所示;对应的节点称为焊接连接型U型钢-混凝土组合梁交叉节点(简称WLTR-UCJs)。还提出了L形连接板型纵向传力构件(简称LLTC)如图3a)所示;对应的节点称为装配连接型U型钢-混凝土组合梁交叉节点(简称LLTC-UCJs),该节点构造包含了L形连接板、套丝钢筋、螺母等,并通过螺栓、套筒将套丝钢筋固定于L形连接板上,如图3b)所示。

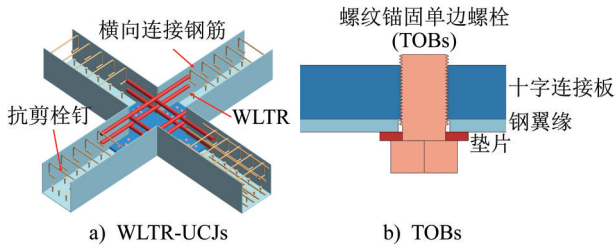


图2 WLTR-UCJs构造示意

Fig. 2 Construction diagram of WLTR-UCJs

(2) 在U型钢-混凝土空腹夹层板下弦梁中,U型钢翼缘节点通常通过高强螺栓、两块盖板相互连接,实现现场无焊接作业<sup>[9]</sup>;同时,也采用带带螺纹孔的十字连接板与螺纹锚固单边螺栓连接(简称TOBs),连接示意如图2b)所示,但现场无焊接施工较复杂,存在单人无法操作、多人不易协同等问题。

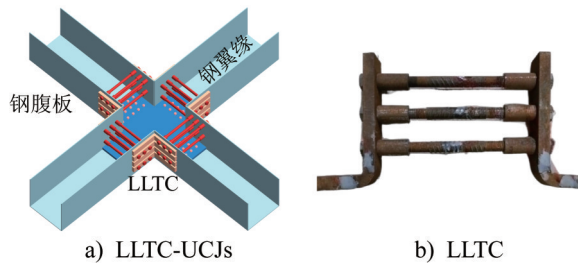


图3 LLTC-UCJs构造示意

Fig. 3 Construction diagram of LLTC-UCJs

文中还对WLTR-UCJs与LLTC-UCJs的抗弯性能开展了试验研究,确定LLTC相较于WLTR对梁节点力学性能的提升效应,揭示节点的破坏模式,明确了套丝钢筋的数量和强度、WLTR直径等对节点承载力的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文的试验研究依托山东省某市级工程项目开展,共包含5个足尺梁交叉节点试件,试件截面尺寸和跨度根据工程项目的实际构件确定。其中,编号WLTR-22和WLTR-32表示采用焊接钢筋连接作为纵向传力构件(WLTR)、且HRB400钢筋直径分别为22 mm和32 mm

的试件;编号LLTC-3-400和LLTC-2-400表示采用L形连接板作为纵向传力构件(LLTC)、且HRB400钢筋数量分别为3根和2根的试件,编号LLTC-3-500表示具有3根HRB500套丝钢筋的LLTC试件。为保证试验边界条件可单向等效为“固支+铰支”组合约束,试件梁的边界选取空腹夹层板节间梁中点(即反弯点)。5个足尺试件的单向跨度( $L$ )为2 600 mm,单向有效跨度( $L_0$ )为2 400 mm,单梁有效跨度( $L_u$ )为1 119 mm,U型钢壁厚( $t$ )为6 mm,十字连接板厚度( $t_x$ )为25 mm,混凝土宽度( $b$ )和厚度( $h$ )均为350 mm。试件均满足《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[10]</sup>和《钢结构螺纹锚固单边螺栓连接技术规程》(DB37/T 5195—2021)<sup>[11]</sup>的相关要求。

钢翼缘采用内钻螺纹的十字连接板与螺纹锚固单边螺栓连接,按照《钢结构螺纹锚固单边螺栓连接技术规程》(DB37/T 5195—2021)<sup>[11]</sup>进行设计。纵向钢筋、栓钉、LLTC和WLTR的布置等其余设计细节如图4所示,L形连接板尺寸设计如图4e)所示。其中,纵向过渡构件应当满足许用应力要求:

$$f_{sy} A_s \geq f_{wy} A_w \quad (1)$$

式中: $f_{sy}$ 为纵向传力构件中钢筋的屈服强度; $A_s$ 为纵向传力构件沿单个钢腹板的钢筋面积; $f_{wy}$ 为钢腹板的屈服强度; $A_w$ 为单个钢腹板的面积。

5个足尺梁交叉节点试件的参数如表1所示。其中, $S_d$ 表示WLTR和LLTC的钢筋直径, $L_L$ 表示LLTC中L形连接板的长度,“数量”表示沿单个L形连接板中的套丝钢筋数量,“强度等级”表示WLTR和LLTC中钢筋强度等级。

通过对比试件WLTR-32与WLTR-22的试验结果,研究焊接钢筋直径对节点性能的影响;对比试件LLTC-3-400与LLTC-2-400的试验结果,研究套丝钢筋数量( $N$ )对节点性能的影响。由于L形连接板与套丝钢筋数量间存在几何约束关系,为综合评估二者对节点性能的影响,将试件LLTC-3-400与LLTC-2-400的L形连接板的长度( $L_L$ )和套丝钢筋数量差异设置。L形连接板的主要作用是将套丝钢筋固定于U型钢腹板,套丝钢筋的作用是传递钢翼缘的内力,因此套丝钢筋数量为关键参数。对比试件LLTC-3-400与LLTC-3-500的试验结果,研究套丝钢筋强度( $S$ )对节点性能的影响。

### 1.2 试件制作

试件制作主要分为工厂预制与现场装配两个阶段。工厂预制阶段主要完成:预留有螺栓孔及内螺纹的L形连接板和十字连接板,U型钢腹板焊接抗剪栓钉及横向连接钢筋;对于试件LLTC-UCJs,将L形连接板抗剪端

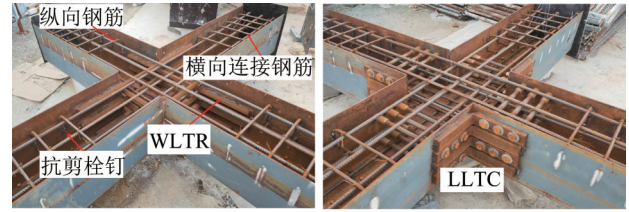


表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	传力构件	$L_0$ / mm	$S_d$ / mm	$L_L$ / mm	数量/ 根	强度等级
WLTR-22	WLTR	2 400	22	—	2	HRB400
WLTR-32	WLTR	2 400	32	—	2	HRB400
LLTC-3-400	LLTC	2 400	22	257	3	HRB400
LLTC-2-400	LLTC	2 400	22	192	2	HRB400
LLTC-3-500	LLTC	2 400	22	257	3	HRB500

验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[13]</sup>进行3组钢材拉伸试验,以确定钢材屈服强度、抗拉强度和弹性模量。根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[14]</sup>,测量了C30和C45两种强度等级混凝土试件的28 d抗压强度和弹性模量,每组包含3



a) 试件WLTR-UCJs b) 试件LLTC-UCJs

图5 试件制作过程

Fig. 5 Production process of specimens

个边长为150 mm的立方体试件,强度等级为C30的立方体混凝土试件的极限强度实测结果分别为37.2 MPa、42.9 MPa、38.7 MPa,均值为39.6 MPa;强度等级为C45的立方体混凝土试件的极限强度实测结果分别为54.8 MPa、59.1 MPa、63.3 MPa,均值为59.1 MPa。材性试验的结果如表2所示。

表2 材料特性

Table 2 Material properties

材料	直径/厚度/mm	强度等级/钢材牌号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
钢筋	12	HRB400	467	581.0	204 715
	16	HRB400	454	589.0	203 676
	22	HRB400	558	660.0	198 704
	22	HRB500	632	752.0	200 659
	32	HRB400	534	621.0	199 561
钢	6	Q355B	402	528.0	204 562
	25	Q355B	398	503.0	203 689
混凝土	—	C30	—	39.6	34 576
	—	C45	—	59.1	32 373
螺栓	22	S8.8	640	800.0	205 730
内螺纹套筒	—	Q355B	354	432.0	205 980

#### 1.4 测量方案

试验加载阶段,采用400 t液压千斤顶对试件的节点区域施加荷载,同时通过支座对试件四端进行约束,如图6所示。在加载过程中将荷载变化速率始终控制为 $3.0 \text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$ ,当荷载下降至峰值荷载的85%时,认为试件破坏,试验结束。为模拟空腹夹层板反弯点的受力状态,将梁交叉节点的边界条件设置为固定铰支座与滑动铰支座;为模拟固定铰支座,将钢圆柱体焊接于钢板处,可为试件提供垂直支撑并限制试件水平移动;为模拟滑动铰支座,将钢圆柱体放置于带圆弧凹槽的钢板出,可为试件提供垂直支撑并允许试件水平移动,如图7所示。

在每个试件中布置9个LVDT(直线位移传感器)用

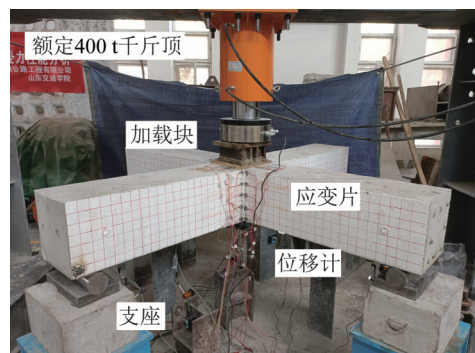


图6 加载装置

Fig. 6 Loading setup

于测量底梁连接处的挠度,记为V1~V9,其中,V1~V5用于测量试件的挠度,V6~V9用于测量支座沉降,如图

7a)和图7b)所示。应变片均布置于梁端截面的均分点处,例如,十字连接板底面处的应变片布置于四边中点与板中心处,布置如图7a)和图7b)中红方块所示。应变片的布置是为:(1)在十字连接板底面布置的应变片用于验证螺纹锚固单边螺栓连接的有效性;(2)在L形连接板附近布置的应变片用于测量L形连接板局部加固效果,如图7c)所示;(3)在钢腹板布置的应变片用于测量沿深度的纵向变形分布;(4)在混凝土顶部布置的应变片用于测量混凝土变形。

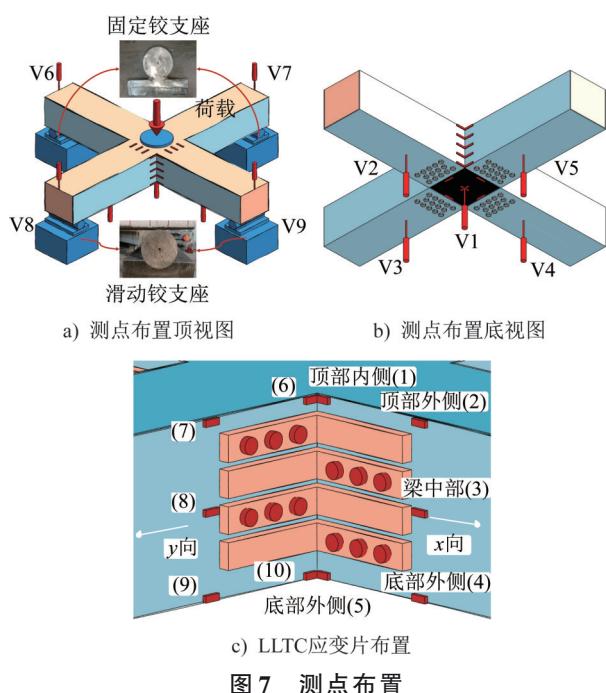


图7 测点布置

Fig. 7 Arrangement of measuring points

## 2 试验结果

### 2.1 破坏模式

试验过程中节点试件的两个相邻梁发生严重破坏,其余两梁仅出现轻微破坏,如图8a)所示。试件WLTR-22发生破坏的原因为:梁端区域U型钢腹板发生屈曲变形,导致截面有效截面积削弱,进而引发结构内部应力重分布,使得顶部纵向钢筋承受的荷载增大,最终发生屈曲失稳,试件破坏时混凝土保护层表现为翘起的特征。试件WLTR-32发生破坏的原因为:顶部纵向钢筋屈曲,引发应力重分布后梁端区域U型钢腹板发生屈曲变形(图8b)),且受压区出现严重破坏后,各材料内力均增大,在距离梁端最远排的螺栓孔处发生了断裂(图8c))。U型钢翼缘断裂处正截面的弯矩低于梁端和节点区域的弯矩,由于十字连接板的局部加强作用,试件未加强区域首先发生破坏,因此,计算节点的极限承载力时应考虑变截面的影响。各试件WLTR-UCJs发生不同破坏模式的原因为:钢腹板屈曲或顶部纵筋屈曲。试件LLTC-UCJs的

破坏模式与试件WLTR-UCJs的破坏模式不同,对于受压区具有足够抗屈曲能力的U型钢-混凝土组合梁交叉节点,U型钢翼缘的受拉屈服会导致构件发生破坏,该现象与组合梁抗弯试验破坏模式相似<sup>[15]</sup>。对于试件LLTC-2-400,L形连接板对钢腹板起到局部加强作用,因此U型钢腹板未在LLTC范围内发生屈曲,如图9a)所示,表明LLTC比WLTR更能显著提高U型钢腹板的抗屈曲性能。试验加载全过程中,试件LLTC-3-500顶部纵向受力钢筋未出现明显屈曲失稳现象,仅U型钢腹板产生极轻微屈曲变形。除上述破坏现象外,在试验中还观察到其它3个现象:

(1)十字连接板与钢翼缘连接未发生破坏,表明《钢结构螺纹锚固单边螺栓连接技术规程》(DB37/T 5195—2021)<sup>[11]</sup>适用于U型钢-混凝土组合交叉梁底板与十字连接板的连接;

(2)钢板与混凝土间仅发生微小滑移,计算节点承载力时可假设为完全抗剪连接;

(3)U型钢与混凝土间未发生滑移,故混凝土与U型钢具有相同的中性轴。



a) 钢腹板破坏(试件WLTR-32) b) 钢腹板破坏(试件WLTR-32)



c) 钢翼缘断裂(试件WLTR-32)

图8 试件WLTR-UCJs破坏模式

Fig. 8 Failure modes of specimen WLTR-UCJs

### 2.2 荷载-位移曲线

U型钢-混凝土组合梁交叉节点的承载能力和变形能力通过荷载-位移曲线与位移延性系数评估。将测得各试件的荷载和位移进行均值处理,绘制如图10a)所示各试件的荷载-位移曲线。试件WLTR-UCJs发生破坏时,节点区域的平均挠度为 $12L_0/1000$ ,为正常使用限值(即 $L_0/250$ )的3倍<sup>[10]</sup>;试件LLTC-UCJs发生破坏时,节点区域的平均挠度达到了 $19L_0/1000$ ,为正常使用限值(即 $L_0/250$ )的5倍,表明试件LLTC-UCJs的承载能力和

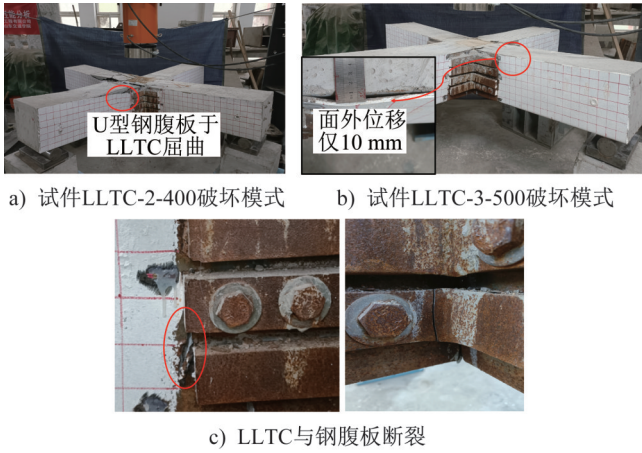


图9 试件LLTC-UCJs破坏模式

Fig. 9 Failure modes of specimen LLTC-UCJs

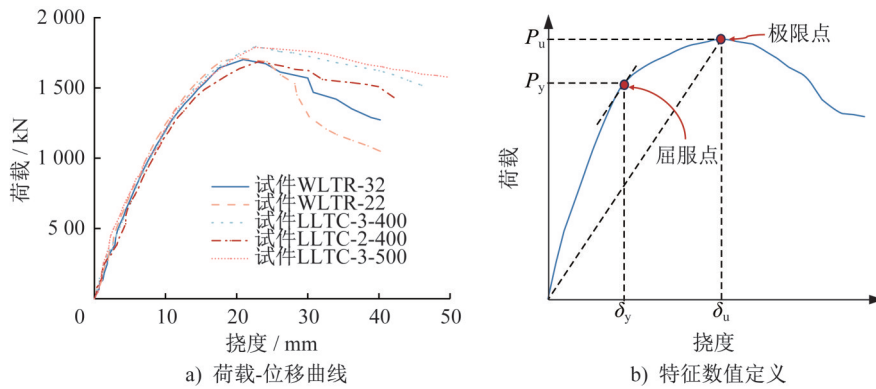


图10 试件荷载-位移曲线与特征数值定义

Fig. 10 Load-displacement curves of specimens and definition of characteristic values

表3 静力性能特征值

Table 3 Characteristic values of static behavior

试件编号	$P_y/kN$	$P_u/kN$	$\gamma_p$	$\delta_y/mm$	$\delta_t/mm$	$\mu$
WLTR-22	1 243.0	1 701.5	1.37	10.60	28.47	2.68
WLTR-32	1 234.9	1 711.8	1.39	10.50	31.75	3.02
LLTC-3-400	1 241.9	1 795.1	1.45	10.65	45.92	4.31
LLTC-2-400	1 244.0	1 687.3	1.36	11.09	42.17	3.80
LLTC-3-500	1 251.8	1 788.9	1.43	10.52	54.49	5.18

各试件屈服前的荷载-位移曲线整体趋势相似,表明纵向传力构件的类型对节点屈服荷载无显著影响。在弹塑性阶段,试件 LLTC-UCJs 的刚度降低速度比试件 WLTR-UCJs 的刚度降低速度慢,试件 LLTC-UCJs 的峰值荷载略高于试件 WLTR-UCJs 的峰值荷载,这是由于 L 形连接板对横截面的局部加固作用大幅降低了钢腹板的屈曲程度,计算节点极限承载力时应考虑 L 形连接板的加固作用。

在满足许用应力的前提下,减小 WLTR 的直径不会

变形能力优于试件 WLTR-UCJs 的相应值。

为定量评估试件的承载能力,根据图 10b) 定义特征值。首先采用最远点法确定试件的屈服点<sup>[16]</sup>,即将原点与峰值荷载点连线,再将连线向原点处平移,平移后的连线与荷载-位移曲线的最远交点为屈服点,该屈服点对应的荷载和挠度分别为屈服荷载( $P_y$ )和屈服挠度( $\delta_y$ )。节点试件达到屈服点的原因是:U 型钢腹板屈曲、顶部纵向钢筋屈曲或 U 型钢翼缘屈服。此外,试件荷载-位移曲线的最高点为峰值点,峰值点对应的荷载和挠度分别为峰值荷载( $P_u$ )和峰值挠度( $\delta_u$ );取荷载-位移曲线下降段中 85% 峰值荷载对应的荷载和挠度,将其定义为破坏荷载( $P_f$ )和破坏挠度( $\delta_f$ )。各试件的屈服荷载、峰值荷载、屈服挠度、峰值挠度如表 3 所示。

降低节点的承载能力,但会降低其延性。针对 LLTC,由于 L 形连接板对节点横截面形成局部增强效应,因此减少其套丝钢筋数量会降低节点的承载能力和延性;而增加套丝钢筋数量不会提高节点的承载能力,但可有效抑制钢腹板的屈曲变形,延缓受压区的突发性破坏,进而显著提高节点延性。

对比试件 WLTR-22 与 WLTR-32 的荷载-位移曲线,由于测量误差等影响,试件 WLTR-22 的初始刚度、屈服荷载均高于试件 WLTR-32 的相应值;消除误差影响后,试件 WLTR-22 的屈服荷载明显低于其它 4 个试件的屈服荷载。试件 WLTR-22 达到峰值荷载后其承载力下降较快,表明试件 WLTR-22 的纵向传力构件直径较小,难以有效抑制钢侧板的屈曲变形,最终导致节点呈现类似屈曲破坏模式。试件 WLTR-32、LLTC-3-400、LLTC-2-400、LLTC-3-500 的屈服荷载均相似,表明上述 4 个试件的纵向传力构件可有效抑制钢侧板的屈曲变形,节点发生受弯破坏。上述 4 个节点试件的材料强度、钢筋布置、试件尺寸均相同,屈服荷载也相似。

根据试件的刚度变化,可将节点试件的加载过程分

为弹性阶段、后屈曲阶段和破坏阶段:

(1) 弹性阶段:该阶段的特征为荷载与节点区域挠度呈线性增长关系,所有材料均处于弹性范围内,因混凝土、外包U型钢和纵向钢筋的组合作用良好,故该阶段未出现混凝土翘起、钢腹板、纵向钢筋屈曲等现象。

(2) 后屈曲阶段:该阶段开始的标志是U型钢腹板或顶部纵向钢筋发生屈曲,对于WLTR直径较小的试件,如试件WLTR-22,在该阶段开始时,试件的U型钢腹板出现屈曲变形,且钢腹板与混凝土发生分离,节点达到了屈服临界状态;尽管钢腹板顶部边缘未达到屈服强度,但已发生局部屈曲,进而导致试件刚度显著退化。对于WLTR直径较大的试件,如试件WLTR-32,该阶段开始即出现顶部纵向钢筋屈曲现象,这是由于直径较大的纵向传力构件可对钢腹板形成充足抗屈曲约束,使得U型钢腹板的屈曲临界荷载大于顶部纵筋的屈曲临界荷载。对于像试件LLTC-3-500等抗压区具有足够抗屈曲能力的试件,该阶段开始即出现U型钢翼缘屈服现象。此阶段试件的刚度发生大幅度降低,直至为0,构件达到峰值荷载。

(3) 破坏阶段:此阶段钢腹板屈曲、纵筋屈曲、受压钢翼缘屈服造成试件承载能力下降,直至钢翼缘发生断裂,U型钢-混凝土组合梁交叉节点的承载能力大幅下降,试件破坏。

为定量的评估各试件的力学性能,采用塑性发展系数与位移延性系数来评估试件的塑性发展能力与延性。塑性发展系数( $\gamma_p$ )主要用于表征试件从屈服荷载到极限荷载间的塑性发展能力,可按式(2)确定。位移延性系数( $\mu$ )是衡量结构变形的重要参数,表征在结构损坏事件中的逃逸时间,可按式(3)确定。

$$\gamma_p = \frac{P_u}{P_f} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\delta_f}{\delta_y} \quad (3)$$

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[17]</sup>中对 $\gamma_p$ 的建议值为1.15~1.20,罗邦富<sup>[18]</sup>研究发现空心钢箱形截面的 $\gamma_p$ 为1.225,聂建国<sup>[19]</sup>研究发现完全抗剪连接的传统型钢-混凝土组合梁的 $\gamma_p$ 为1.43。LIU等<sup>[20]</sup>发现U型钢-混凝土组合梁的 $\gamma_p$ 为1.35。表3对比了试件WLTR-UCJs与LLTC-UCJs的塑性发展系数,从表中可以看出:5个节点试件的 $\gamma_p$ 为1.36~1.45,延续了U型钢-混凝土组合梁较强的塑性发展能力,此外,纵向传力构件经过装配化改进形成LLTC后,节点塑性发展系数未发生显著降低。因施工空间限制,试件WLTR-UCJs无法通过增大钢筋直径以增强试件的塑性发展能力,但试件LLTC-

UCJs可通过增加套丝钢筋数量以提升其塑性发展能力,具有更好的应用前景。

表3对比了试件WLTR-UCJs与LLTC-UCJs的位移延性系数。从表中可以看出:试件WLTR-UCJs的 $\mu$ 约为3,而传统型钢-混凝土组合梁 $\mu$ 的范围为3.50~4.95<sup>[19]</sup>,表明试件WLTR-UCJs易发生脆性断裂。试件LLTC-UCJs其 $\mu$ 的范围为3.80~5.35。相较于试件WLTR-22,试件WLTR-32的WLTR钢筋面积增幅达111.57%,其延性较试件WLTR-22的延性提升12.69%。因此,增加WLTR钢筋面积无法有效提高试件WLTR-UCJs的延性。相较于试件LLTC-4-400,试件LLTC-6-400中套丝钢筋的数量增加了50.00%,其延性提高了13.42%。相较于试件LLTC-6-400,试件LLTC-6-500中螺纹钢筋的屈服强度增加了13.26%,其延性提高了20.18%。对于试件LLTC-UCJs,相较于增加套丝钢筋数量,增强套丝钢筋强度可更有效增强节点的变形能力。

### 2.3 顶部和底部边缘应变

由于U型钢翼缘未布置应变片,故采用钢腹板受拉区边缘纤维应变近似表征节点受拉区钢板应变,但该边缘纤维应变小于钢翼缘应变。图11给出了混凝土顶部边缘应变和U型钢腹板底部边缘应变随荷载变化的曲线,其中,混凝土应变取均值。以试件WLTR-UCJs为例,当达到峰值荷载时,试件的混凝土顶部边缘应变接近或达到峰值应变2041 $\mu\epsilon$ ,U型钢腹板底部应变达到屈服应变1965 $\mu\epsilon$ ,混凝土和U型钢腹板均达到屈服应变。

### 2.4 沿梁高的纵向应变分布

相较于试件WLTR-22的纵向应变分布(图12a)),试件LLTC-3-500的纵向应变沿梁深呈线性分布(图12b)),在较高应力水平下仍满足平截面假定。试件LLTC-3-500的U型钢屈曲程度低于试件WLTR-22的U型钢屈曲程度,二者中性轴线最初处于同一高度,但因钢腹板的抗屈曲强度不同,导致中性轴下移程度不同;当达到峰值荷载时,试件WLTR-22的中性轴更接近U型钢腹板底部,且在应力重分布后钢腹板的应力增大。上述现象也是试件LLTC-3-500破坏阶段延迟出现且位移延性系数显著增大的原因,因此在计算不同U型钢-混凝土组合梁交叉节点承载能力时应引入折减系数以考虑U型钢腹板屈曲的影响。

### 2.5 L形连接板的局部强化效果

图13给出了试件LLTC-3-400和LLTC-3-500的U

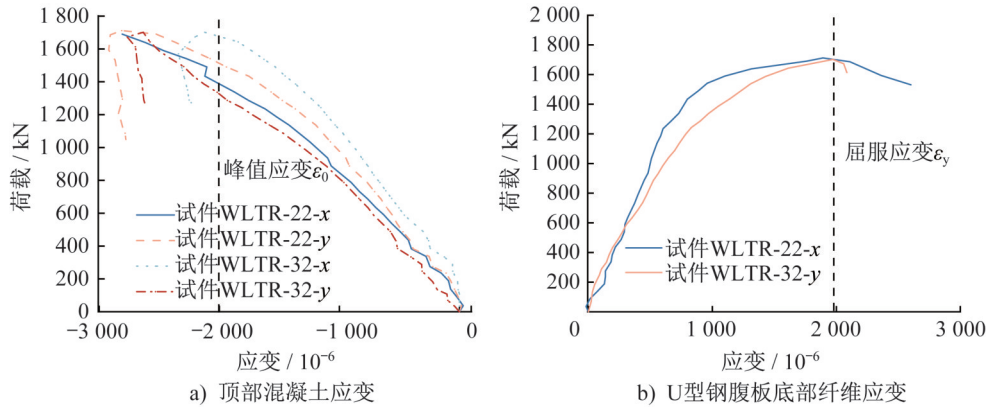


图 11 顶部、底部边缘应变  
 Fig. 11 Strains at the top and bottom edges

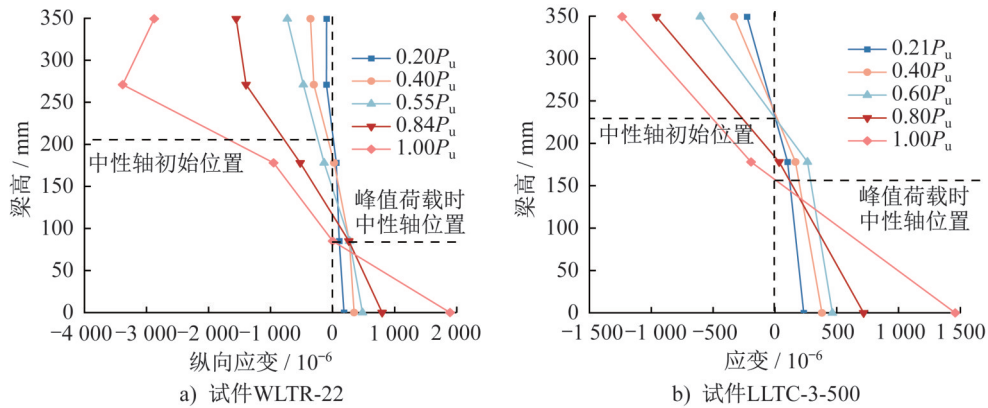


图 12 破坏梁纵向应变分布  
 Fig. 12 Longitudinal strain distribution along the beam height of damaged beam

型钢腹板在不同应变测量点的应变值,图例中各应变片的位置见图7c)。以试件LLTC-3-400为例说明LLTC对U型钢腹板应变的限制作用,当试件达到峰值荷载时,其梁端顶部应变达到 $1\,078\ \mu\epsilon$ ,低于屈服应变( $1\,954\ \mu\epsilon$ ),同一梁高LLTC范围外部应变达到 $2\,708\ \mu\epsilon$ ,超过了屈服应变,前者比后者低151.21%。上述现象在试件LLTC-UCJs中所有LLTC附近的应变测量点处均有出

现(即1号和2号、3号和4号、5号和6号、7号和8号应变片)。结果表明:L形连接板有效降低了钢腹板的应变,这是由于L形连接板与钢翼缘连接良好,提高了钢腹板的局部刚度,增加了钢腹板的厚度。上述现象解释了因LLTC范围内U型钢腹板与LLTC范围外U型钢腹板刚度不同,导致受拉区LLTC端部的U型钢腹板发生断裂。

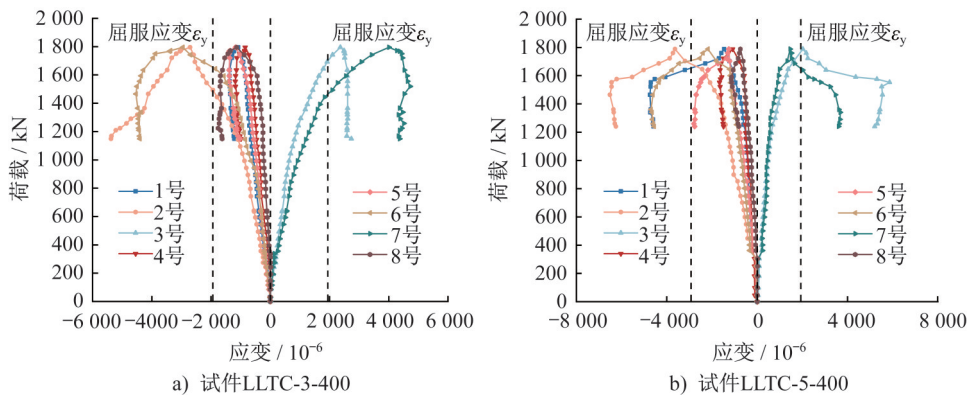


图 13 L形连接板的局部加强影响

Fig. 13 Localized strengthening effect of L-shaped connection plates

### 3 结论

(1) 通过上述试验研究发现:焊接连接型U型钢-混凝土组合梁交叉节点(WLTR-UCJs)的破坏模式为U型钢腹板屈曲、纵向钢筋屈曲;装配连接型U型钢-混凝土组合梁交叉节点(LLTC-UCJs)的破坏模式为U型钢翼缘屈服。

(2) WLTR-UCJs的位移延性系数为3.02,低于H型钢-混凝土组合梁和U型钢-混凝土组合梁的延性系数。对于WLTR-UCJs,在纵向传力构件满足许用应力要求时,增大WLTR钢筋面积无法有效提高WLTR交叉节点的延性。

(3) LLTC-UCJs的塑性发展系数与WLTR-UCJ的塑性发展系数相同。LLTC-UCJs的位移延性系数介于3.80~5.35之间,表现出良好的延性水平,能有效提高钢腹板的抗屈曲能力,进而显著提高节点的变形能力。加强套丝钢筋强度比增加套丝钢筋数量能更有效地改善节点的变形能力。

### 参考文献:

- [1] 马克俭,黄勇,肖建春,等.钢筋混凝土网架与空腹夹层板空间结构的研究与应用综述[J].空间结构,1995,1(3):28-36. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.1995.03.005.  
MA Kejian, HUANG Yong, XIAO Jianchun, et al. Summary of research and application of reinforced concrete space truss and vierendeel sandwich plate space structure [J]. Spatial Structures, 1995, 1(3): 28-36. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.1995.03.005. (in Chinese)
- [2] 李莉,胡岚,张华刚.U形钢板组合下肋空腹夹层板受力性能研究[J].建筑设计管理,2009,26(6):27-29,26. DOI:10.3969/j.issn.1673-1093.2009.06.011.  
LI Li, HU Lan, ZHANG Huagang. Study on mechanical properties of ribbed hollow sandwich plate with U-shaped steel plate combination [J]. Architectural Design Management, 2009, 26(6): 27-29, 26. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1093.2009.06.011. (in Chinese)
- [3] LU H N, ZHANG H G, MA K J, et al. Experimental and numerical study of the flexural capacity of reinforced concrete Vierendeel beams [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2022, 31(3): 1-21. DOI: 10.1002/tal.1905.
- [4] WANG Y C, BAI Z Q, ZHANG H G, et al. Comparative study on overall and local static performance of steel open-web girders [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2023, 32(2): 1-20. DOI: 10.1002/tal.1991.
- [5] 胡岚. 外包U形钢板半装配式组合空腹夹层板楼盖理论与试验研究[D].长沙:湖南大学,2017.  
HU Lan. Theoretical analysis and experimental study on semi assembled composite open-web sandwich plate outsourcing U type steel plate [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [6] 胡岚,马克俭.U形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖结构研究与应用[J].建筑结构学报,2012,33(7):61-69. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2012.07.007.  
HU Lan, MA Kejian. Research and application of U-shaped steel plate-concrete composite open-web sandwich slab structure with high strength bolts [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 61-69. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.07.007. (in Chinese)
- [7] 何奇.组合空腹夹层板力学性能及关键技术研究[D].贵阳:贵州大学,2017.  
HE Qi. Research on mechanical properties and key technologies of composite hollow sandwich panels [D]. Guiyang: Guizhou University, 2017. (in Chinese)
- [8] 王兆敏.某多层大跨新型组合空腹楼盖有限元分析及现场试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
WANG Zhaomin. Study on finite element analysis and field test of new type combination vierendeel floor of a multi-layer and long span structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [9] 何奇,张华刚,姚玲,等.下肋U型钢-混凝土组合空腹夹层板的动力特性分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(6):71-76. DOI:10.15958/j.cnki.gdxbzrb.2016.06.17.  
HE Qi, ZHANG Huagang, YAO Ling, et al. Dynamic characteristics analysis of open-web sandwich plate of U-shaped steel-concrete composite on bottom ribs [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2016, 33(6): 71-76. DOI: 10.15958/j.cnki.gdxbzrb.2016.06.17. (in Chinese)
- [10] JGJ 138—2016 组合结构设计规范[S].  
JGJ 138—2016 Code for design of composite structures [S]. (in Chinese)
- [11] DB37/T 5195—2021 钢结构螺纹锚固单边螺栓连接技术规程[S].  
DB37/T 5195—2021 Technical specification for thread-fixed one-side bolted connection in steel structure [S]. (in Chinese)
- [12] GB/T 2975—2018 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备[S].  
GB/T 2975—2018 Steel and steel products-location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. (in Chinese)
- [13] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].  
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—tensile testing: part 1: method of test at room temperature [S]. (in Chinese)
- [14] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].  
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties [S]. (in Chinese)
- [15] 赵焱.新型U形钢-混凝土组合梁力学性能及设计方法[D].重庆:重庆大学,2020.

- ZHAO Yi. Mechanical behavior and design methods on novel U-shaped steel and concrete composite beams[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [16] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.
- FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192. (in Chinese)
- [17] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
- GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S]. (in Chinese)
- [18] 罗邦富. 钢构件的截面塑性发展系数[J]. 钢结构, 1991, 6(1): 25-33.
- LUO Bangfu. Section plastic development coefficient of steel members [J]. Steel Construction, 1991, 6 (1) : 25-33. (in Chinese)
- [19] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 49.
- NIE Jianguo. Steel-concrete composite beam structure: Test, theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005: 49. (in Chinese)
- [20] LIU J P, ZHAO Y, CHEN Y F, et al. Flexural behavior of rebar truss stiffened cold-formed U-shaped steel-concrete composite beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 150: 175-185. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.08.011.