

全预制拼接槽形 UHPC 梁抗弯抗剪性能试验研究

周云^{1,2}, 聂晶鑫^{1†}, 张保证¹, 胡锦涛¹, 朱正荣¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082)

摘要:为实现 UHPC 结构在房屋建筑中的应用,提出了一种全预制拼接槽形 UHPC 梁,该梁截面呈槽形,带螺栓肋且肋上设贯通螺栓孔,梁柱可由两片槽形带肋梁正拼接和反拼接形成工字形和回字形两种梁、柱全装配式组合连接模式.为研究全预制拼接槽形 UHPC 梁的抗弯抗剪性能,共完成 3 根梁抗弯试验,分别为现浇工字形梁、回字形拼接梁、工字形拼接梁.通过抗弯试验发现,拼接梁的刚度略高于现浇梁,而反接槽形拼接梁的抗弯承载力高于现浇梁,以此证明 UHPC 拼接梁的抗弯性能优于 UHPC 现浇梁.为研究工字形拼接梁的抗剪性能,设置了不同剪跨比和箍筋间距,通过正交试验设计完成了 9 根反拼接槽形拼接梁的抗剪试验研究,获得开裂和破坏荷载、变形和裂缝分布规律等.通过抗剪试验发现,在箍筋间距相同时,工字形拼接梁随剪跨比由 1 增大为 2、3,破坏模式由斜压破坏转变为剪压破坏;对于有腹筋梁,箍筋间距相同时,剪跨比越大,槽形拼接梁承载力越低,延性越大,且有腹筋梁的箍筋对主裂缝的发展具有有效的约束作用.

关键词:预制拼接槽形 UHPC 梁;剪跨比;配箍率;抗弯承载力;抗剪承载力

中图分类号:U448.35 **文献标志码:**A

Experimental Study on Flexural and Shear Behavior of Full Precast Splicing Channel-shaped UHPC Beams

ZHOU Yun^{1,2}, NIE Jingxin^{1†}, ZHANG Baozheng¹, HU Jinnan¹, ZHU Zhengrong¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures (Hunan University), Changsha 410082, China)

Abstract: To apply the UHPC elements in building construction, this paper proposes a fully prefabricated spliced channel-shaped section UHPC beam. The beam is designed with bolt ribs that have through bolt holes. Two ribbed channel-shaped section beams are installed through forward and reverse splicing to form two kinds of fully assembled combination connection modes of beams and columns, i.e., I-type and box-type. To study the bending and shear resistance of the spliced UHPC beams, three beam bending experiments were conducted, including cast-in-place I-beam, box-type spliced beam, and I-type spliced beam. Through the bending test, it was found that the

* 收稿日期:2022-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878264, 52278306), National Natural Science Foundation of China(51878264, 52278306);湖南省重点研发计划项目(2022SK2096), Key Research and Development Program of Hunan Province(2022SK2096);湖南省交通厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of the Department of Transportation of Hunan Province(201912)

作者简介:周云(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: NieJX98@hnu.edu.cn

stiffness of the spliced beam was slightly higher than that of the cast-in-place beam, and the bending capacity of the I-type spliced beam was higher than that of the cast-in-place beam, thus proving that the bending resistance of the UHPC spliced beam was better than that of the UHPC cast-in-place beam. To study the shear resistance of the I-type spliced beams, shear tests of nine I-type spliced beams were completed by setting different shear-to-span ratios and stirrup spacing through orthogonal test design. The cracking load, failure loads, deformation, and crack distribution laws were obtained. The shear test revealed that, with the same stirrup spacing, the failure mode of the I-type spliced beam was diagonal-compression and shear-compression failure, respectively, as the shear-span ratio was increased from 1 to 2 or 3. For the beam with stirrups and the same stirrup spacing, the larger the shear-span ratio, the lower the load-carrying capacity and the better the ductility of the channel-spliced beam. Moreover, the stirrups in the beams had a restraining effect on the development of the main cracks.

Key words: prefabricated splicing groove UHPC beam; shear span-to-depth ratio; stirrup ratio; bending strength; shear strength

超高性能混凝土(UHPC)最早由法国学者 De Larrard 等提出^[1],通过在混凝土材料中掺入钢纤维,高效地增强了材料的抗拉性能和弯曲韧性,并实现了应变硬化. UHPC 在结构中应用时具有可大幅度减小截面尺寸、减轻结构重量的明显优势. 2005年,首次将超高性能混凝土(C140)应用于工业厂房梁板的制作中,之后 UHPC 开始广泛应用于建筑和桥梁领域^[2-4].

在抗弯性能研究方面,对于 UHPC 现浇整体梁和节点连接梁极限承载力、破坏模式和开裂特征方面的研究较多,初步证明了目前极限承载力计算方法在一定程度上的可行性,并对 UHPC 梁的弯曲破坏形态有了一定认知,但尚未进行全预制拼接梁抗弯性能方面的研究. Yang 等^[5]通过 14 根矩形截面 UHPC 梁,从配筋率和浇筑方法两方面对梁的抗弯性能进行了试验研究,结果表明钢纤维的排列和取向受超高性能混凝土浇筑方式的影响. 杨松霖等^[6]通过 12 根混合纤维 UHPC 梁的静载试验,研究了钢纤维体积分数为 2.0% 和 2.5% 时超高性能纤维混凝土梁的力学性能,发现梁的承载力随纤维体积分数增加而提高. Yoo 等^[7]制作了 10 根 UHPC 梁,以 UHPC 中掺入钢纤维的类型为主要变量,对 UHPC 梁弯曲性能进行了试验研究. Shafieifar 等^[8]对 12 根不同纵筋配筋率和梁高的小型 UHPC 梁进行了试验研究,并对现有 UHPC 梁计算极限弯矩承载力的方法进行了评估. Niu 等^[9]评估了用不同长度直钢纤维制备

UHPC 梁的裂纹扩展行为,并提出了描述裂纹起始应变和裂纹发展长度变化的方法. Kadhim 等^[10]建立了 UHPC 梁受弯试验的有限元模型,利用该模型评估了由 UHPC 和普通混凝土(NC)组成混合钢筋混凝土梁的可行性,并提出了 UHPC-NC 混合梁极限承载力的预测方法. Qiu 等^[11]对足尺连接的矩形和 T 形超高性能混凝土预制桥面板节点的抗弯性能进行了破坏模式、荷载-位移响应、延性性能和开裂特征的试验和讨论.

在抗剪性能研究方面,目前对工字形、T 字形、矩形截面 UHPC 整体现浇梁抗剪承载力和破坏特征方面进行了大量试验研究与参数分析,并提出了一系列抗剪承载力计算方法. Voo 等^[12-13]先后进行了 15 根预应力工字形梁的剪切试验,试验以剪跨比、钢纤维掺量和类型为变化参数,并基于塑性理论提出了 PSM-VEM 模型用于计算无腹筋预应力 UHPC 梁的抗剪承载力. 徐海滨等^[14]设计了 9 根超高性能混凝土 T 形梁的抗剪试验,研究了箍筋数量、剪跨比、张拉应力大小、钢纤维等参数对结构抗剪性能的影响. Zagon 等^[15]研究了腹板开孔、单斜剪连杆和箍筋对钢纤维增强超高性能混凝土(SFR-UHPC)工字形梁抗剪性能的影响,结果表明,相较于无开孔梁,腹板开孔单斜剪杆梁对抗剪强度的降低要低于腹板开孔无斜剪杆梁. Kodur 等^[16]分析了超高性能纤维混凝土梁在弯曲和剪切荷载作用下的破坏特征. 梁兴文等^[17]从剪跨比、纵筋配筋率、配箍率、钢纤维掺量等方面,对 7 根 UHPC 梁进行了抗剪性能试验,并提出

了 UHPC 有腹筋梁抗剪承载力计算模型. Pourbaba 等^[18]对 5 根超高性能纤维混凝土梁的抗弯和抗剪性能进行了试验研究,并与 5 根普通混凝土梁进行了对比,发现大多数抗弯抗剪承载力公式低估了实际承载力.

前述研究通过试验以及参数、有限元分析对整体现浇梁和 UHPC 节点连接梁的受弯和受剪性能进行了探索,并在一定程度上对已有的抗弯抗剪承载力计算方法进行了评估. UHPC 虽已广泛应用于桥梁结构,但考虑到 UHPC 梁养护条件要求高、施工过程复杂以及对施工设备的要求较高,且房屋建筑结构具有结构构件复杂密集的特点,其在房屋建筑方面的应用还较少. 本文提出一种全预制拼接槽形 UHPC 梁,以此为 UHPC 在房屋建筑中的应用提供一条新的思路. 相较于整体现浇 UHPC 梁,本文提出的单片槽形 UHPC 拼接梁可较大程度地提高预制及养护过程的便利性,且单片槽形 UHPC 拼接梁通过正、反拼接可分别得到整体梁、柱,进而可以实现房屋建筑的系统化施工,以达到在方便施工和节省材料的同时,最大限度地利用其优异的抗压强度和持续的开裂后抗拉强度的目的.

为进一步探究超高性能混凝土拼接方式[现浇工字形梁、正接(回字形)拼接梁、反接(工字形)拼接梁]为变量,对于梁的抗弯、抗剪承载力以及延性的影响,深入分析其在多个影响因素下的抗弯抗剪性能演化规律,本文根据试验梁的拼接方式不同对 UHPC 拼接梁的抗弯性能进行了试验研究,并以剪跨比、箍筋间距为变量设计制作了 9 根槽形拼接梁,对所提出的新型全装配式 UHPC 梁进行了抗剪性能试验研究.

1 试验简介

为充分研究全预制拼接槽形 UHPC 梁的静力性能,本文进行了全预制拼接槽形 UHPC 梁的抗弯性能和抗剪性能试验研究. 纵筋、构造筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋,螺栓肋上预留有螺栓孔与螺帽孔,孔边预埋硬泡沫,孔内预埋 PVC 管,螺栓杆采用 18 mm8.8 级高强螺栓杆.

1.1 槽形 UHPC 梁的设计

本文所提出的全预制拼接槽形 UHPC 梁(图 1)通过在螺栓肋处的螺栓孔穿插高强螺杆将两个单片槽形梁连接而成,如图 2 所示. 单片槽形梁的腹板设置有螺栓肋,并在其中预留螺栓孔,螺栓杆置于螺栓

孔中,全预制槽形梁螺栓连接过程见图 1(中间圆柱体为螺栓). 在所述螺栓肋或螺栓孔对应位置上预留螺帽与对应施工空间(如图 2、图 3 所示,螺栓孔处通过预埋 PVC 套管预留 2 mm 的施工空间),螺栓连接后灌浆填满,保证所述槽形 UHPC 构件表面平整,无突起的螺栓. 两个单片槽形梁的连接分为空腔相向(回字形)和空腔相背(工字形)两种有效的拼接方式.

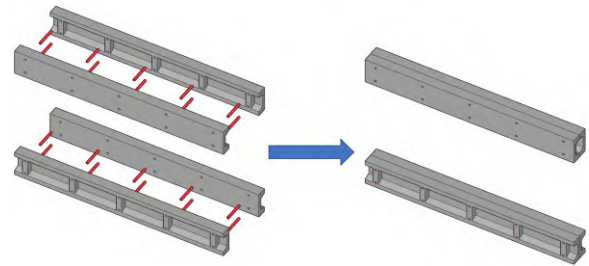


图 1 全预制槽形梁拼接概念图

Fig.1 Full prefabricated slot beam splicing concept map

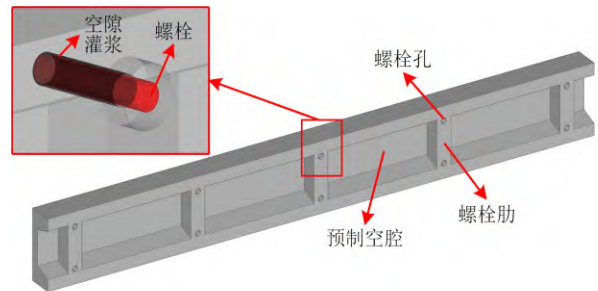


图 2 单片槽形梁

Fig.2 Single grooved beam

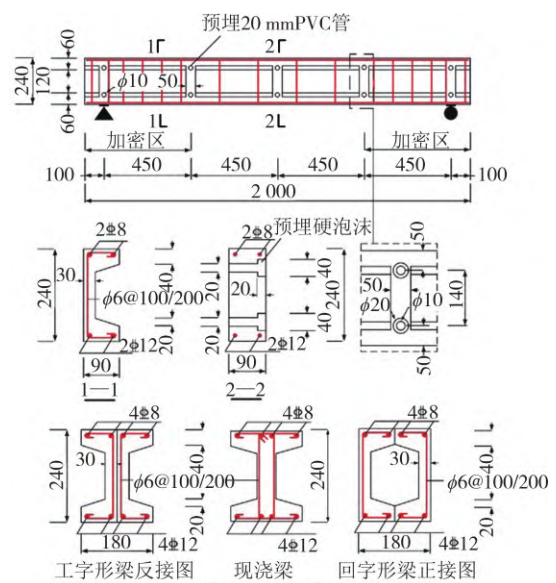


图 3 抗弯试件尺寸详图和配筋方案

Fig.3 Dimensions and reinforcement details of bending specimens

1.2 材料性能

本次试验采用的UHPC材料含有2%(体积分数)的直钢纤维,直钢纤维的直径和长度分别为0.2 mm和13.0 mm,其配合比见表1.试块与试验梁同批浇筑且在相同条件下养护,养护过程分为静养(3 d)、升温养护(3d)及自然养护(3 d)三个阶段.升温养护采用蒸气养护,保持恒温($90\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)48 h直至同条件养护试件的抗压强度达到设计值.

根据文献[19]在湖南大学材料性能实验室微型控制恒加载压力试验机(TYA-2000E)上测试UHPC立方体抗压强度 f_c 与弹性模量 E_c .利用实验室电液伺服万能试验机(WAW-E600C)测得钢筋的屈服强度、极限强度,UHPC和HRB400级、HPB300级钢筋力学性能测定结果分别见表2和表3.本文所用螺栓为8.8级高强螺栓.

表1 UHPC基体配合比

Tab.1 Proportion of UHPC matrix

成分	水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	水
用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	868.0	217.0	954.8	260.4	16.492	173.6

表2 UHPC性能参数

Tab.2 Properties of UHPC

试验类型	f_c/MPa	E_c/GPa
抗弯	167.8	48.0
抗剪	154.6	47.2

表3 钢筋性能参数

Tab.3 Properties of steel bar

钢筋类别	直径/mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ GPa
箍筋	6	412.67	609.33	202.5
	8	422.67	570.00	203.2
纵筋	12	424.67	631.67	203.3
	22	416.23	613.58	203.2

1.3 抗弯性能试验

抗弯性能试验的构件详细信息和配筋如图3和表4所示,其中现浇梁不含加劲肋.因工字形梁使得全部厚度的腹板在同一位置集中受力,而回字形梁使得同一厚度的腹板在两侧各自受力,因此一般情况下工字形梁的受力性能优于回字形梁.预制槽形拼接梁在螺栓连接造成的截面削弱处增设加劲肋,增设加劲肋可方便两个槽形梁之间螺栓连接的张拉以满足拼接的构造要求,而螺栓孔造成的截面削弱与加劲肋对梁刚度加强的影响难以从理论方面判定,因此采用2根不同拼接方式的槽形拼接梁和1

表4 抗弯试验梁设计参数

Tab.4 Design parameters of flexural test beam

试件编号	L0	L1	L2	
试件尺寸	梁高×梁宽 ($b\times h$)/mm	180×240	180×240	180×240
	梁净跨径 L / mm	1 800	1 800	1 800
	肋间距/mm	—	450	450
钢筋	梁纵向筋	4 Φ 12+4 Φ 8	4 Φ 12+4 Φ 8	4 Φ 12+4 Φ 8
	梁箍筋	Φ 6@100/200	Φ 6@100/200	Φ 6@100/200
试验参数	剪跨比	2.06	2.06	2.06
	拼接方式	工字形整体	回字形拼装	工字形拼装

注:表中 Φ 12表示直径为12 mm的HRB400级钢筋, Φ 6表示直径为6 mm的HPB300级钢筋.

根UHPC整体浇筑梁作为对照组进行抗弯性能试验.试验梁弹性阶段采用力控制缓慢加载,当试验梁进入塑性阶段后采用位移控制缓慢加载.

在UHPC梁螺栓肋位置采取两点对称单调加载方式进行抗弯性能试验.在千斤顶与梁之间设置分配梁,加载点处支座宽10 mm,UHPC梁底部支座宽12 mm,以防止局部受力.梁跨中和加载点底部以及梁支座顶面布置位移计.梁顶面同一截面位置平行布置混凝土应变片,距离边缘15 mm,每个应变片间隔50 mm,共4个;梁侧面布置混凝土应变片,距离边缘20 mm,每个应变片间隔50 mm,共5个;在梁跨中以及加载点处纵筋上各布置一个钢筋应变片,共12个,如图4所示.

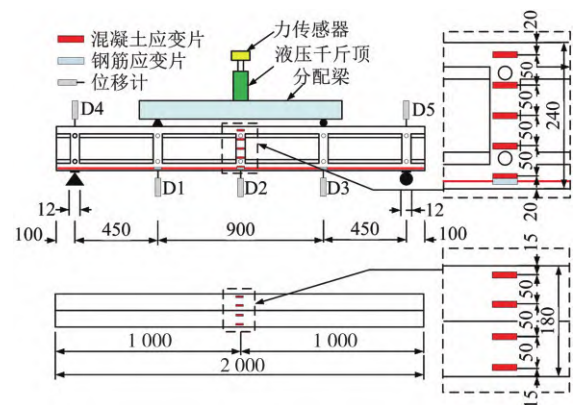


图4 抗弯试验加载方案及测点布置

Fig.4 Flexural test loading scheme and measurement point arrangement

1.4 抗剪性能试验

本文从剪跨比、配箍率两个方面对9根反拼接(工字形)槽形拼接梁进行了抗剪试验以研究其抗剪性能.抗剪试验梁构件信息及详细钢筋配置见表5

和图 5,详细参数设置如下:

表 5 抗剪试验梁设计参数

Tab.5 Design parameters of shear test beam

试件编号	剪跨比	箍筋配置	梁净跨径/mm	纵筋
SSR1-SS0	1.056	—	1 800	
SSR1-SS200	1.056	$\phi 6@200$	1 800	
SSR1-SS100	1.056	$\phi 6@100$	1 800	
SSR2-SS0	2.113	—	1 800	
SSR2-SS200	2.113	$\phi 6@200$	1 800	4 $\Phi 22$
SSR2-SS100	2.113	$\phi 6@100$	1 800	
SSR3-SS0	3.169	—	1 800	
SSR3-SS200	3.169	$\phi 6@200$	1 800	
SSR3-SS100	3.169	$\phi 6@100$	1 800	

注:试件编号 SSRX-SSY 中,X 表示剪跨比,Y 表示箍筋间距,例如,SSR2-SS200 表示剪跨比为 2,箍筋间距为 200 mm; $\Phi 22$ 表示直径为 22 mm 的 HRB400 级钢筋, $\phi 6$ 表示直径为 6 mm 的 HPB300 级钢筋。

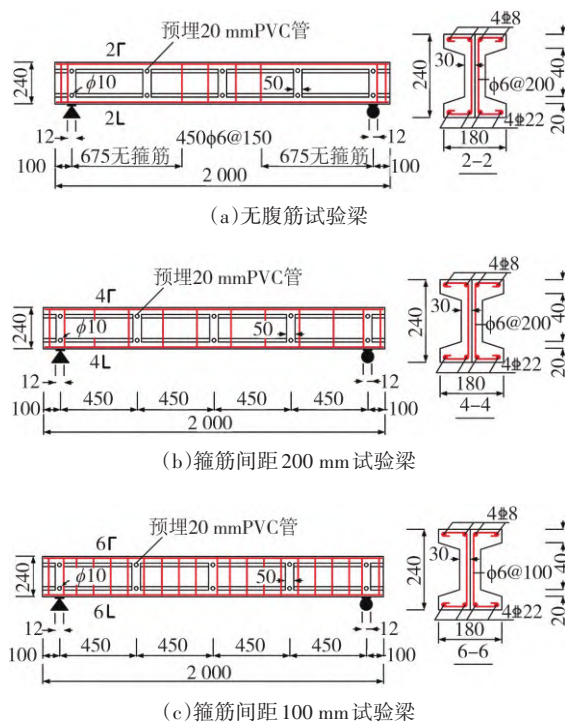


图 5 抗剪试件尺寸详图和配筋方案(单位:mm)

Fig.5 Dimensions and reinforcement details of shear specimens(unit: mm)

1) 剪跨比:本次试验根据荷载作用点与螺栓肋位置关系考虑三种剪跨比 λ 分别等于 1、2、3,分别对作用点在相邻肋中间且作用点与支座之间无肋、作用点在肋位置、作用点在相邻肋中间且作用点与支座之间有肋三种工况。

2) 配箍率:本次试验设计了三种配箍方式,即无腹筋与配置 $\phi 6@100$ 、 $\phi 6@200$,分别对应三种配箍

率 ρ_{sv} :0%,0.47%,0.94%。

采取两点对称单调加载方式进行抗剪试验梁的加载,并通过控制分配梁下加载点的位置实现不同剪跨比下的试验,采用与抗弯试验同样的加载过程控制方案.在跨中和加载点位置对应的梁底部布置位移计,并在梁支座顶面布置位移计,如图 6 所示.腹板上垂直于加载点和支座连线布置混凝土应变片,梁最大弯矩点处纵筋上布置钢筋应变片,与加载点和支座连线相交的每个箍筋上布置钢筋应变片.其中,cj 表示剪跨段腹板混凝土应变片,从上至下距梁顶面 70 mm、120 mm、170 mm 依次编号为 1、2、3;gj 表示剪跨段钢筋应变片,从支座至加载点依次编号为 1、2、3,具体箍筋位置见试验照片;lg 表示加载点/剪跨段螺杆应变片,螺栓肋处螺杆应变片编号从上至下依次为 1、3、2、4。

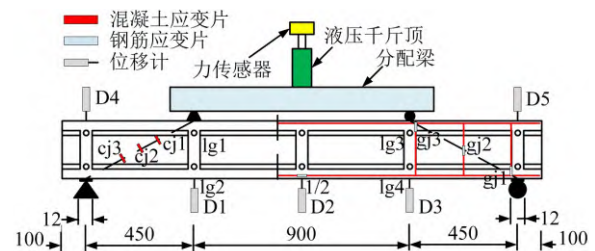


图 6 抗剪试验加载方案及测点布置(SSR2 工况)

Fig.6 Shear test loading scheme and measurement point arrangement (SSR2 working condition)

2 抗弯性能试验结果与分析

2.1 试验全过程

各试件的荷载-挠度曲线如图 7 所示,从图 7 可以发现,拼接梁 L1、L2 刚度略大于现浇梁 L0,说明螺栓肋的存在增大了梁的刚度,而 UHPC 开裂后曲线看不到明显的斜率降低,同时加载过程中可听到钢纤维拔出的声音,说明钢纤维的存在可以增大 UHPC 开裂后的刚度,从一定程度上抑制了因裂缝发展而产生的刚度降低现象. L2 的承载力略优于 L0, L1 的承载力最低,从图 7 来看, L1 纵筋屈服早于 L0 与 L2,说明 L1 截面有效高度低于 L0 与 L2,从试验现象来看, L1 梁裂缝发展较为迅速,说明此根试验梁抗裂性能较差。

2.2 破坏形态及试验现象

图 8 所示为 3 根 UHPC 梁抗弯性能试验的最终破坏形态,虚线框框选位置为梁上部混凝土压碎位

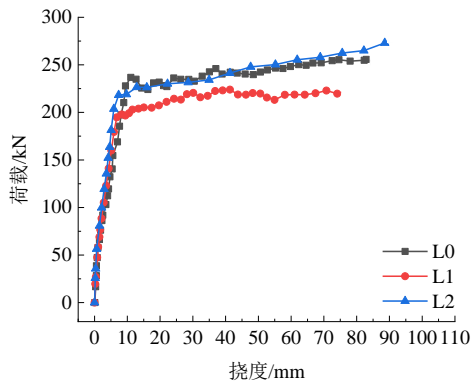


图7 荷载-挠度曲线

Fig.7 Curves of load-deflection

置,图中E、W表示试验梁东、西侧.以受拉钢筋屈服后,受压区混凝土压碎为试验结束标志.与普通混凝土相比,本文试验梁混凝土压碎面积积极小,并且被钢筋纤维所连接,压碎而不压溃,承载力未出现降低的现象,而普通混凝土一般压溃面积较大,并且承载力突然降低.试验结果见表6. L0、L1、L2梁在试验初期均处于弹性阶段,其梁长各个位置的挠度随荷载变化速率基本一致.

根据《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)^[20]计算抗弯极限荷载理论值,见表6.首先计算受压区混凝土等效矩形应力图高度:

$$x = \frac{f_y A_s}{\alpha_1 f_c b'_i} \quad (1)$$

式中: x 为受压区混凝土等效矩形应力图的高度; f_y

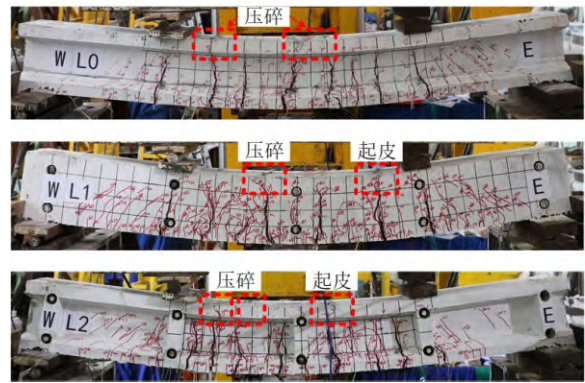


图8 抗弯试件最终破坏形态

Fig.8 Final failure mode of bending specimen

为普通钢筋抗拉强度设计值(在本文指代实测值); A_s 为受拉区纵向普通钢筋的截面面积; α_1 为等效矩形应力系数; f_c 为UHPC混凝土轴心抗压强度设计值(在本文指代实测值); b'_i 为工字形截面受压翼缘计算宽度.根据本文实测材料强度,计算可得 $x < h'_i$, h'_i 为工字形截面受压区混凝土翼缘高度,因此,截面抗弯极限弯矩可按矩形截面计算公式计算:

$$M = f_y A_s (h_0 - x/2) \quad (2)$$

式中: M 为截面抗弯极限弯矩; h_0 为截面有效高度.

根据两点对称单调加载的加载方式,抗弯极限荷载理论值计算公式如下:

$$F = \frac{2M}{l} \quad (3)$$

式中: F 为抗弯极限荷载理论值; l 为分配梁支座力臂.

表6 抗弯试验梁主要特征

Tab.6 Principal character of bending test beams

试件编号	L0	L1	L2	
开裂阶段	开裂荷载/kN	91.9	88.5	80.8
	位置	跨中	跨中、东加载点偏西	跨中与西加载点中间
	类型	抗弯裂缝	抗弯裂缝	抗弯裂缝
	宽度/mm	0.09	0.04	0.035
裂缝发展阶段	现象描述	出现钢筋纤维拔出和断裂的“嘶嘶”声	裂缝的发展较为迅速而且数量较多	裂缝主要在梁腹,螺栓肋基本无裂缝
屈服阶段	屈服荷载/kN	236.8	194.8	218.2
	现象描述	跨中出现第二条主裂缝	无	跨中出现第一条主裂缝
位移控制阶段	现象描述	陆续出现若干条主裂缝	梁顶面混凝土出现起皮	梁顶面混凝土出现起皮
	现象描述	受压区混凝土压碎	受压区混凝土压碎	受压区混凝土压碎
	峰值荷载/kN	255.7	223.9	273
试验终止	跨中挠度/mm	82.96	74.09	88.59
	主裂缝条数	8	7	7
	裂缝宽度/mm	8.2	7.6	8.5
极限荷载理论值/kN	258		258	

综上所述,L0、L1、L2梁的开裂荷载逐渐减小,屈服荷载为L0最大、L1最小,峰值荷载与最终跨中挠度为L2最大、L1最小,且抗弯极限荷载理论值较试验值均偏小.L1、L0、L2梁的裂缝发展情况基本一致并且最大裂缝宽度逐渐增大,主裂缝均出现在加载点之间并呈现为垂直于梁长且对称分布在跨中两侧.与一般工字形UHPC梁L0不同的是,L0跨中与加载点处皆出现主裂缝,而L1、L2梁跨中与加载点处为螺栓肋,主裂缝皆出现在螺栓肋旁边,说明螺栓肋对槽形拼接梁刚度有明显提升作用,并且阻碍了裂缝的发展.

3 抗剪性能试验结果与分析

3.1 试验全过程

3.1.1 不同剪跨比时荷载-挠度曲线

图9为同一箍筋间距、不同剪跨比下梁的荷载-挠度曲线.相同配箍率时,梁的抗剪承载力随剪跨比的增大而减小.剪跨比为1时,梁承载力最高,且最终为斜压破坏;剪跨比为2、3时,梁呈现为剪压破坏.对于无腹筋梁,剪跨比为2时,梁延性最好;剪跨比为1时,梁延性最差.对于有腹筋梁,在配箍率相同时,剪跨比越大,槽形拼接梁延性越好.文献[13]中L1剪跨比为3.13,其主斜裂缝出现后宽度发展较快,

破坏过程迅速,为斜拉破坏.而本文SS3系列梁虽然剪跨比为3.17(破坏现象在后文进行描述),但其破坏模式为剪压破坏,并且其中两根试验梁主斜裂缝角度大于SSR2系列梁,说明螺栓肋的存在,阻碍了裂缝的发展,使得截面内力重分布,其荷载-挠度曲线与SS2系列梁相似.

3.1.2 不同箍筋间距时荷载-挠度曲线

图10为同一剪跨比、不同箍筋间距下梁的荷载-挠度曲线.在剪跨比为1和2的情况下,箍筋间距为200 mm时,箍筋对槽形拼接梁的承载力及延性贡献不大,但配有箍筋对主裂缝的发展具有有效的约束作用;箍筋间距为100 mm时,箍筋使梁的承载力提高较大但延性有所降低,箍筋间距为200 mm时,箍筋使梁的承载力提高较小,且剪跨比为2时梁的延性反而有所降低.在剪跨比为3的情况下,箍筋间距为200 mm时,箍筋使梁的承载力提高较大但延性提高较少,箍筋间距为100 mm时,箍筋使梁的承载力提高较少但延性有显著提高,原因为箍筋选用HPB300级钢筋,其对UHPC梁抗剪作用不明显,此时UHPC性能对梁的抗剪性能影响较大,分析可知,SSR3-SS100梁UHPC性能较差.由图9、图10可知,SSR3-SS100梁延性远高于其他剪切梁,说明箍筋间距为100 mm时,本文试验梁结构整体性最优;且剪跨比为3时,梁的延性可以更好地发挥.

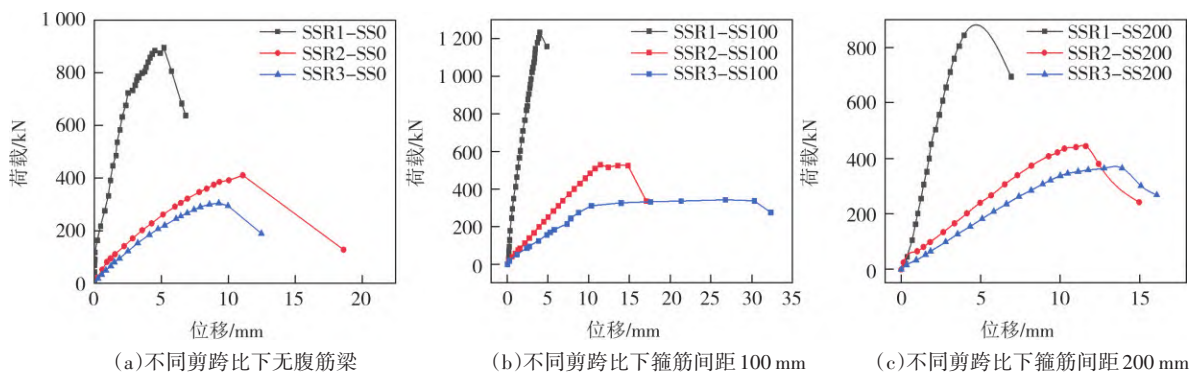


图9 不同剪跨比时荷载-挠度曲线

Fig.9 Load-displacement curves at different shear span ratios

3.2 破坏形态及试验现象

图11给出了9根工字形UHPC拼接梁抗剪性能试验的最终破坏形态,框选位置为主要斜裂缝位置,实线为破坏区域箍筋位置,以梁承载力突然下降发生斜截面脆性破坏为试验结束标志,试验结果见表7,抗剪极限荷载理论值较试验值均偏小^[20].

剪跨比为1时,试验梁剪弯段腹板出现较多细而密的平行斜裂缝,这些裂缝将梁腹板分割成若干

个倾斜的压柱体,随着荷载的增大,压柱体被压溃,进而发生斜压破坏.

剪跨比为2时,裂缝形态与剪跨比为1时相似,当产生主斜裂缝后,新裂缝基本停止出现,随着荷载的增大,主斜裂缝逐渐变大,箍筋发生屈服;同时试验梁在支座附近梁底部沿纵筋产生纵向水平裂缝,说明试验梁翼缘截面相对较小,而且梁支座外伸出部分不够,造成其抗剪能力不足.试验梁破坏时,主

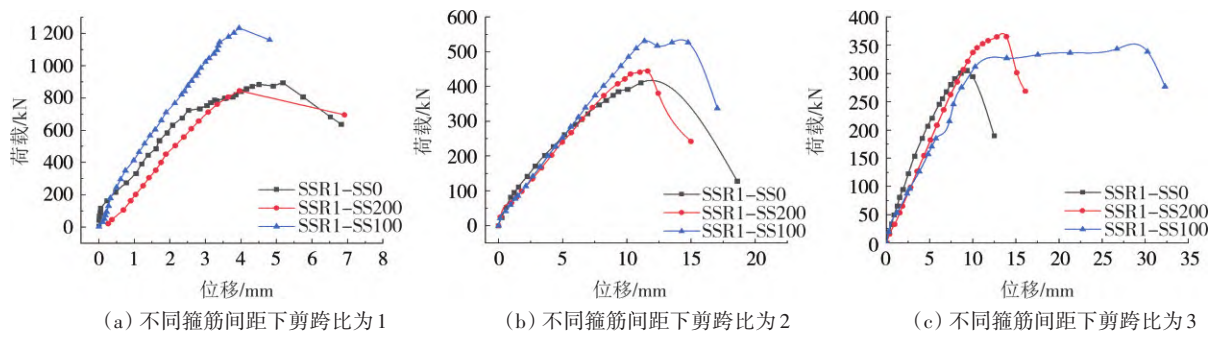


图10 不同箍筋间距时荷载-挠度曲线

Fig.10 Load-displacement curves at different stirrup spacings

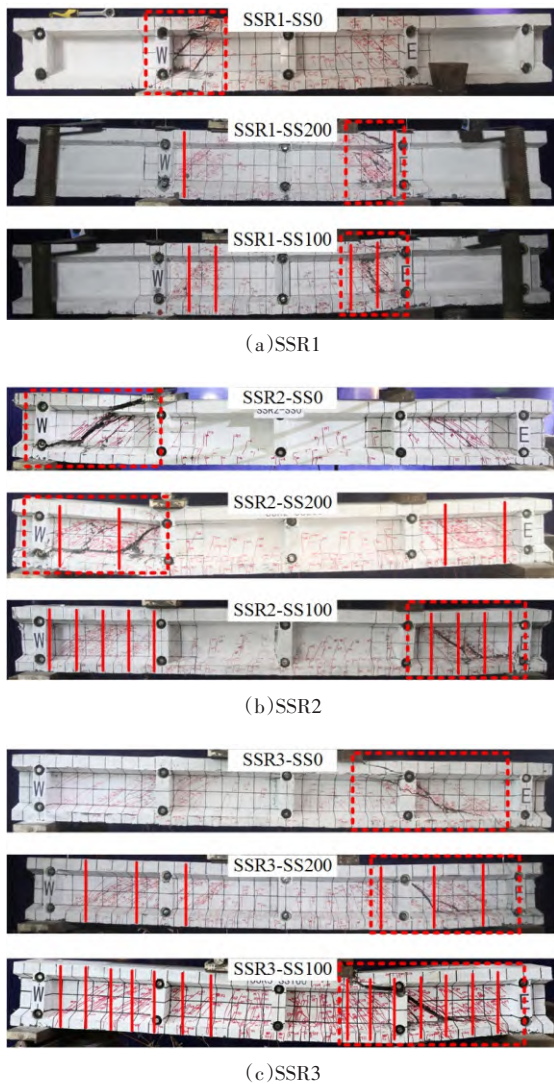


图11 抗剪试件最终破坏形态

Fig.11 Final failure mode of shear specimen

斜裂缝间钢纤维连续、急剧地拔出和断裂,箍筋断裂,为剪压破坏。

剪跨比为3时,裂缝的形态与发展与剪跨比为2时相似,随着主斜裂缝的扩大,箍筋发生屈服,试验梁破坏时,主斜裂缝间钢纤维连续、急剧地拔出、断

裂,加载点处混凝土被压溃,斜裂缝处箍筋断裂,为剪压破坏.与一般UHPC梁不同的是,SSR3系列梁主斜裂缝角度出现大于SSR2系列梁的情况,说明螺栓肋阻碍了裂缝的发展,在螺栓肋位置主斜裂缝出现转角现象,因此此处梁截面发生了内力重分布现象。

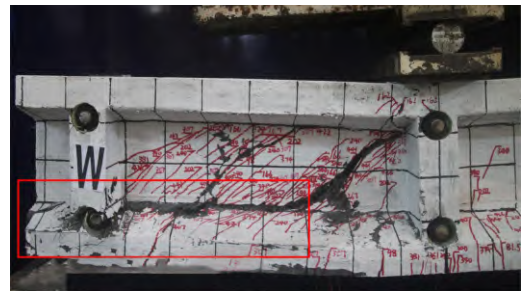


图12 翼缘与腹板间剪切破坏

Fig.12 Shear failure between flange and web

根据《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)^[20]计算抗剪极限荷载理论值,见表7,计算公式如下:

$$V = V_{fc} + V_s, \quad (4)$$

$$V_{fc} = \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0, \quad (5)$$

$$V_s = f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0, \quad (6)$$

$$\lambda_f = \frac{\rho_f l_f}{d_f}. \quad (7)$$

式中: V 为构件斜截面上的最大剪力理论值; V_{fc} 为UHPC所提供的抗剪承载力; V_s 为箍筋所提供的抗剪承载力; α_{cv} 为斜截面活性粉末混凝土抗剪承载力系数; f_{t0} 为UHPC轴心抗拉初裂强度设计值; β_v 为钢纤维对活性粉末混凝土抗剪强度的影响系数,可取 $\beta_v = 0.6$; λ_f 为钢纤维含量特征参数; ρ_f 为钢纤维体积分数; l_f 为钢纤维长度; d_f 为钢纤维的等效直径; f_{yv} 为箍筋的抗拉强度设计值(本文为实测值); A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为沿构件长度方向的箍筋间距。

根据两点对称单调加载的加载方式计算抗剪极限荷载理论值 V_m :

$$V_m = 2V. \tag{8}$$

由表 7 可见,随着剪跨比的增大,拼接梁的抗剪承载力逐渐减小;随着配箍率的增大,拼接梁的抗剪承载力逐渐增大.其中,配置箍筋 SSR1-SS200 梁,在破坏前加载点处翼缘出现了脆性的局部斜拉破坏,斜压杆受到冲击荷载,导致其抗剪承载力小于未配箍筋 SSR1-SS0 梁.配箍率低的 SSR3-SS200 梁承载力大于配箍率高的 SSR3-SS100 梁,说明 HPB300 级箍筋对 UHPC 梁抗剪作用的影响不明显,导致混凝土性能对梁的抗剪性能影响较大,从而得出 SSR3-SS100 梁混

凝土的性能与 SSR3-SS200 梁相比较差的结论. SSR1 系列梁的抗剪极限荷载试验值明显大于理论值.试验梁剪弯段长度为 225 mm,而加载点与梁、支座与梁的接触分别为 100 mm、120 mm 宽的垫板,此时应该按照面荷载的方式来理解加载点与支座,从试验现象来看,该系列梁斜裂缝方向近似是从加载点垫板内边缘指向支座垫板外边缘,抑或是从加载点垫板外边缘指向支座垫板内边缘,说明垫板外侧宽度将剪弯段增长了 48.9%,使得出现更多斜压杆来承担斜向压力,造成试验值明显大于理论值.因此用 DBJ 43/T 325—2017 进行 UHPC 梁的抗剪设计更安全.

表 7 抗剪试验梁主要特征

Tab.7 Principal character of shear test beams

试件编号	SSR1			SSR2			SSR3			
	SS0	SS200	SS100	SS0	SS200	SS100	SS0	SS200	SS100	
开裂荷载/kN	119.3	46.4	131.3	82.1	98.9	86.0	95.1	65.4	96.3	
裂缝发展阶段	相同现象	出现较细而密的斜裂缝,有腹筋梁斜裂缝发展比无腹筋梁多								
	不同现象	梁西侧腹板下端混凝土表面出现起皮剥落现象			支座附近梁底部沿纵筋产生纵向水平裂缝			支座附近梁底部沿纵筋产生纵向水平裂缝		
试验终止	现象描述	被斜裂缝分割形成的若干斜压杆被压溃,其中有腹筋梁加载点处翼缘首先出现局部斜拉破坏			斜裂缝间钢筋纤维连续、急剧地拔出和断裂,随后主斜裂缝突然贯穿,箍筋断裂,裂缝宽度瞬间增大			加载点混凝土压溃,箍筋断裂		
	极限荷载/kN	885.7	845.6	1 235	411.2	445.2	531.5	305.7	365.6	343.9
最大裂缝宽度/mm	主斜裂缝角度/(°)	45.5	19.6(y)	17.4(y)	39.8	36.9	36.4	40.3	47.1	35.6
			46.0(f)	46.8(f)						
破坏形态	斜压破坏			剪压破坏			剪压破坏			
极限荷载理论值/kN	418	470	520	334	386	436	262	312	364	

注:表中 y 表示翼缘, f 表示腹板.

3.3 荷载-腹板 UHPC 应变分析

图 13、图 14 为同一箍筋间距下不同剪跨比和同一剪跨比不同箍筋间距下荷载-腹板 UHPC 应变曲线,其中, W、E 分别表示梁西侧、梁东侧.在弹性阶段,荷载-应变曲线均呈线性变化,随后曲线产生突变,呈现非线性.这说明随着加载的继续,腹板出现斜裂缝,截面发生应力重分布.

当箍筋间距为 0 mm、100 mm 时,相对于不同剪跨比,拼接槽形梁斜压破坏(剪跨比为 1)下,梁的承载力最大且腹板 UHPC 拉应变最大, UHPC 的抗拉性能和弯曲韧性发挥最充分;拼接槽形梁剪压破坏(剪跨比为 2、3)下,剪跨比增大时,箍筋间距 0 mm、100 mm 下梁的承载力分别增强和减弱,靠近加载点位置 UHPC 拉应变分别减小和增大,腹板和靠近支座位置 UHPC 拉应变均减小.

当箍筋间距为 200 mm 时,拼接槽形梁斜压破坏(剪跨比为 1)下,靠近支座和加载点位置 UHPC 拉应变首先出现非线性,随后剪跨比为 3 的梁 UHPC 腹板中心和剪跨比为 2 的梁靠近加载点位置拉应变出现非线性,加载前期剪跨比为 1 的梁 UHPC 拉应变最大,而加载后期剪跨比为 2 的梁 UHPC 拉应变最大.

当剪跨比为 1 时,箍筋间距 100 mm 下梁的承载力最大,腹板 UHPC 拉应变最大,箍筋间距 200 mm 下梁腹板 UHPC 拉应变最小;箍筋间距为 100 mm 时,前期靠近支座处拉应变最小,后期靠近加载点处拉应变最小;无箍筋时,靠近加载点处拉应变最小,靠近支座处拉应变最大;箍筋间距为 200 mm 时,在加载后期靠近加载点位置 UHPC 拉应变最大.

当剪跨比为 2 时,箍筋间距 100 mm 下,腹板

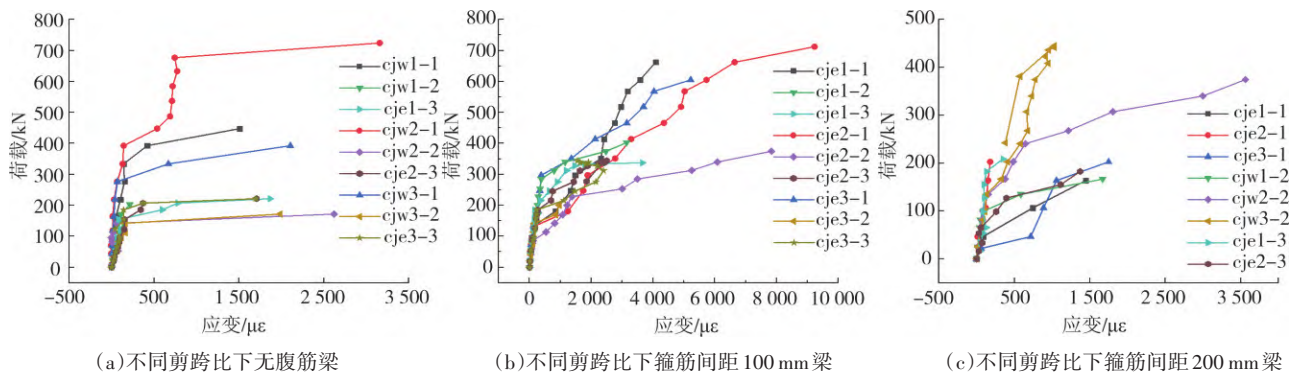


图 13 不同剪跨比时荷载-腹板 UHPC 应变曲线

Fig.13 Load-strain curves of web UHPC with different shear span ratios

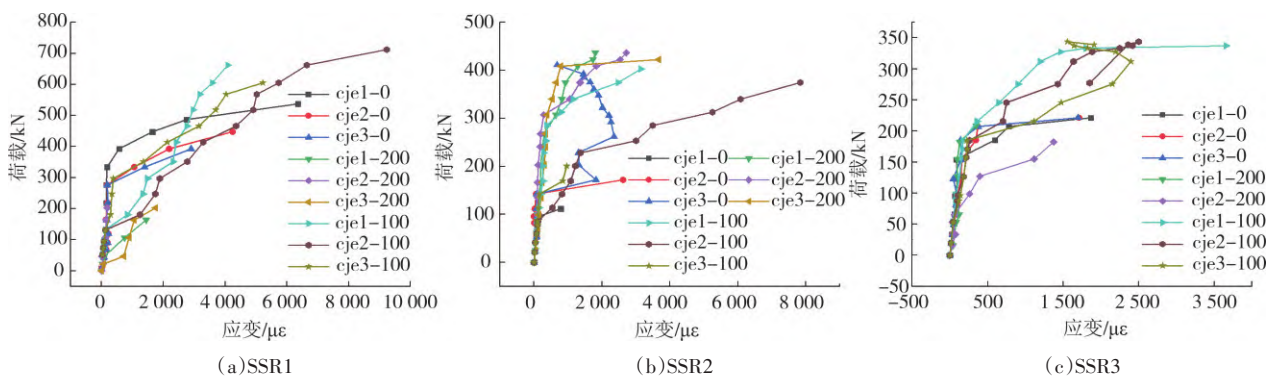


图 14 不同箍筋间距时腹板 UHPC 荷载-应变曲线

Fig.14 Load-strain curves of UHPC with different stirrup spacing webs

UHPC 拉应变最大,其抗拉性能发挥最充分,无箍筋情况下 UHPC 抗拉性能发挥程度最低.无箍筋情况下,前期靠近加载点处 UHPC 拉应变最大,后期腹板中心 UHPC 拉应变最大,后期因截面开裂 UHPC 由受拉逐渐转换为钢筋受拉使靠近支座处 UHPC 拉应变逐渐减小至 0;箍筋间距 200 mm 下,前期梁腹板中心 UHPC 拉应变最小,后期梁腹板中心 UHPC 拉应变最大,破坏时靠近支座处腹板 UHPC 拉应变最大;箍筋间距 100 mm 下,腹板中心 UHPC 拉应变始终最大,说明腹板中心裂缝最小,主要由 UHPC 抗拉.

当剪跨比为 3 时,箍筋间距 100 mm 下,腹板 UHPC 拉应变最大,其抗拉性能发挥最充分,无箍筋情况下 UHPC 抗拉性能发挥程度最低.无箍筋情况下,靠近加载点处 UHPC 拉应变最大;箍筋间距 200 mm 情况下,腹板中心 UHPC 拉应变最大,腹板中心 UHPC 抗拉性能发挥较充分;箍筋间距 100 mm 情况下,前期靠近支座处 UHPC 拉应变最大,裂缝发展主要集中于腹板中心及以上部分,后期靠近加载点位置 UHPC 拉应变突然变大,该位置裂缝突然变大,发生剪压破坏.

4 结论

本文提出了一种全预制拼接槽形 UHPC 梁,分别采用 3 根、9 根试验梁对提出的槽形拼接梁的抗弯和抗剪性能进行了试验研究,得到以下结论:

1) 现浇梁与拼接梁的受弯破坏形态为加载点间梁下部出现若干条垂直于梁长的主裂缝,上部混凝土压碎.在抗弯承载力方面,相较于 L0 梁, L1 梁降低了 12.4%, L2 梁提高了 6.8%.由此证明, L2 梁的抗弯性能要优于 L0 整体现浇梁.

2) 在 L2 拼接方式梁的抗剪性能方面,相同配箍率的情况下,抗剪承载力随剪跨比的增大而减小;在剪跨比为 1、2 下,梁的抗剪承载力随配箍率的提高而增大,剪跨比为 3 时,配置 HPB300 级箍筋对梁的抗剪承载力提升较小,此时梁的抗剪承载力受 UHPC 性能的影响较大,建议采用 HRB335 及以上级别钢筋.剪跨比为 1 时,梁破坏模式为斜压破坏;剪跨比为 2、3 时,槽形拼接梁破坏模式为剪压破坏.

3) 在 L2 拼接方式梁抗剪的延性方面,对于有腹

筋梁,箍筋间距相同时,剪跨比越大,梁延性越大,且有腹筋梁的箍筋对主裂缝的发展具有有效的约束作用。

4)螺栓肋的存在,阻碍了斜裂缝的发展,使得截面内力重分布。因此,SS3系列梁虽然剪跨比大于3,但破坏模式仍为剪压破坏。

参考文献

- [1] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6):997-1009.
- [2] BIERWAGEN D, HAWASH A A. Ultra high performance concrete highway bridge [C]//*Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, August 2005. Ames, IA, USA: Iowa State University, 2005.
- [3] 安蕊梅,段树金.韩国首尔仙游人拱桥[J].*世界桥梁*, 2006, 34(3):8-10.
AN R M, DUAN S J. Pedestrian arch bridge in Seoul, South Korea [J]. *World Bridges*, 2006, 34(3):8-10. (in Chinese)
- [4] TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. The innovation and application of UHPFRC bridges in Japan [M]//*Designing and Building with UHPFRC*. Hoboken, NJ: Wiley, 2011: 149-188.
- [5] YANG I H, JOH C, KIM B S. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11):3478-3487.
- [6] 杨松霖,刁波,叶英华.钢筋超高性能混合纤维混凝土梁力学性能试验研究[J].*建筑结构学报*, 2011, 32(2):17-23.
YANG S L, DIAO B, YE Y H. Experimental study on ultra-high performance concrete beams reinforced with steel bar and hybrid-fiber[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(2):17-23. (in Chinese)
- [7] YOO D Y, YOON Y S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102:409-423.
- [8] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZNAMINI A. A comparison of existing analytical methods to predict the flexural capacity of Ultra High Performance Concrete (UHPC) beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172:10-18.
- [9] NIU Y F, WEI J X, JIAO C J. Crack propagation behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid steel fibers under flexural loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294:123510.
- [10] KADHIM M M A, JAWDHARI A, PEIRIS A. Development of hybrid UHPC-NC beams: a numerical study [J]. *Engineering Structures*, 2021, 233:111893.
- [11] QIU M H, SHAO X D, YAN B F, et al. Flexural behavior of UHPC joints for precast UHPC deck slabs [J]. *Engineering Structures*, 2022, 251:113422.
- [12] VOO Y L, FOSTER S J, GILBERT R I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1):123-132.
- [13] VOO Y L, POON W K, FOSTER S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(11):1393-1400.
- [14] 徐海宾,邓宗才,陈春生,等.超高性能纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J].*土木工程学报*, 2014, 47(12):91-97.
XU H B, DENG Z C, CHEN C S, et al. Experimental study on shear strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(12):91-97. (in Chinese)
- [15] ZAGON R, MATTHYS S, KISS Z. Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 124:258-268.
- [16] KODUR V, SOLHMIRZAEI R, AGRAWAL A, et al. Analysis of flexural and shear resistance of ultra high performance fiber reinforced concrete beams without stirrups [J]. *Engineering Structures*, 2018, 174:873-884.
- [17] 梁兴文,王照耀,于婧,等.超高性能混凝土有腹筋梁受剪性能及受剪承载力研究[J].*土木工程学报*, 2018, 51(10):56-67.
LIANG X W, WANG Z Y, YU J, et al. Study on shear behavior and shear bearing capacity of UHPC beams with stirrups [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(10):56-67. (in Chinese)
- [18] POURBABA M, SADAGHIAN H, MIRMIRAN A. A comparative study of flexural and shear behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(7):1727-1738.
- [19] ROSSI P. Ultra high performance fibre-reinforced concretes [J]. *Concrete International*, 2001, 23(12):46-52.
- [20] 活性粉末混凝土结构技术规程:DBJ 43/T 325—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
Technical specification for reactive powder concrete structures: DBJ 43/T 325—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)