

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.129



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 装配式混凝土 U 型钢筋环扣的连接长度

陈宜虎<sup>1,2</sup>, 陆鹏远<sup>1</sup>, 张敏<sup>1</sup>, 卢旦<sup>3</sup>, 刘丰收<sup>4</sup>, 秦稳<sup>1,5</sup>

(1. 桂林理工大学, 广西 桂林 541000; 2. 贺州学院, 广西 贺州 542800; 3. 华东建筑设计研究有限公司, 上海 200001; 4. 贺州通号装配式建筑有限公司, 广西 贺州 542800; 5. 中建五局山东公司, 济南 250000)

**摘要:**为研究装配式混凝土 U 型钢筋环扣连接的搭接长度, 制作了 1 个现浇梁柱节点试件和 3 个不同搭接长度的 U 型钢筋环扣连接节点对比试件, 进行低周反复拟静力试验, 观察各试件的破坏模式, 研究其滞回性能、承载力、变形能力及钢筋的应力发展过程, 分析装配式混凝土 U 型钢筋环扣连接的合理搭接长度。结果表明: 装配式节点试件承载力高于现浇节点试件; 不同搭接长度试件的延性及耗能能力有所不同, 搭接长度的增长有利于试件承载力、延性和耗能能力等抗震性能的提升; 基于试验结果, 拟合回归了 U 型钢筋环扣连接的合理搭接长度, 对装配式混凝土 U 型钢筋环扣连接节点的优化设计提出了建议。

**关键词:** 装配式结构; 混凝土结构; U 型钢筋环扣连接; 拟静力试验; 搭接长度

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)02-0131-10

## Lap splice length of U-shaped rebar loop in precast concrete structure

CHEN Yihu<sup>1,2</sup>, LU Pengyuan<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, LU Dan<sup>3</sup>, LIU Fengshou<sup>4</sup>, QIN Wen<sup>1,5</sup>

(1. Guilin University of Technology, Guilin 541000, Guangxi, P. R. China; 2. Hezhou University, Hezhou 542800, Guangxi, P. R. China; 3. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200041, P. R. China; 4. Hezhou Tonghao Prefabricated Construction Co., Ltd., Hezhou 542800, Guangxi, P. R. China; 5. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd. Shandong Branch, Jinan 250000, P. R. China)

**Abstract:** To study the lap splice length of U-shaped rebar loop in precast concrete structure, three fabricated specimens with different lap splice length and one cast-in-place beam-column joint comparison specimen were carried out for low-cycle repeated quasi-static tests. By observing the failure modes of each specimen, the corresponding hysteretic behavior, bearing capacity, deformation capacity, and the stress development process of reinforcement were studied, and then the reasonable lap splice length of U-shaped rebar loop in precast

**收稿日期:** 2021-02-21

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0701902-4); 广西自然科学基金(2018GXNSFAA050145); 贺州市新驱动发展专项(贺科创 ZX1907002, PT1907009)

**作者简介:** 陈宜虎(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事装配式建筑研究, E-mail: yihu.chen@outlook.com。

张敏(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: emailzm@126.com。

**Received:** 2021-02-21

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0701902-4); Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2018GXNSFAA050145); New Drive Development Project of Hezhou (No. ZX1907002, PT1907009)

**Author brief:** CHEN Yihu (1979-), PhD, professor, main research interest: prefabricated concrete structure, E-mail: yihu.chen@outlook.com.

ZHANG Min (corresponding author), PhD, professor, E-mail: emailzm@126.com.

concrete structure was analyzed. The results show, (1) the bearing capacity of fabricated joints is higher than that of cast-in-place joints; (2) the ductility and energy dissipation capacity of specimens with different lap splice length are different; (3) the increase of lap splice length is conducive to the improvement of the bearing capacity, ductility, and energy dissipation capacity of specimens. Finally, based on the test results, the reasonable lap splice length of U-shaped rebar loop is fitted and regressed, and then the suggestions for the optimal design of the joint of the lap splice length of U-shaped rebar loop in precast concrete structure are putting forward.

**Keywords:** prefabricated structure; concrete structure; U-shaped rebar loop; quasi-static test; lap splice length

地震灾害调查报告研究表明,地震中预制构件本身的破坏较轻,但连接部位的破坏较严重,导致结构丧失承载力。因此,连接节点是装配式建筑研究的重点之一<sup>[1-2]</sup>。

目前,关于装配式连接节点的连接方式有:后浇整体式连接、灌浆套筒连接、装配式延性连接、预应力连接、新型搭接连接等。后浇整体式连接遵循“等同现浇”设计原则<sup>[3-4]</sup>,但“强节点”的设计要求会导致在施工时节点容易出现钢筋绑扎困难的现象,造成施工效率低下、节点浇筑不密实等问题。针对灌浆套筒在节点中的应用,学者们做了许多研究<sup>[5-7]</sup>,探究了套筒内部构造对其性能的影响,提出了钢筋在套筒内锚固长度的相关计算方法,并验证了灌浆套筒在墙柱构件中均能发挥良好的作用。关于装配式延性连接,学者们<sup>[8-11]</sup>研究了多种形式的延性连接节点,结果表明,其具有较现浇节点更好的延性和耗能能力,并且验证了采用延性节点连接设计的合理性和可行性。预应力连接方面,学者们<sup>[12-13]</sup>对预应力自主复位的梁柱连接方式进行了研究,证明了其具有震后实现自复位的能力。杨辉等<sup>[14]</sup>提出了一种新型干湿混合式局部后张预应力装配式混凝土框架节点,其延性与现浇节点相当,极限变形能力较强。关于新型搭接连接方式,学者们<sup>[15-20]</sup>以世构体系为基础,设计了几种不同的连接构造,均达到预期设计效果且耗能能力良好,并且提出了拉-压综合塑性铰长度概念,修正了塑性铰长度模型。对于钢筋的锚固长度,研究<sup>[21-23]</sup>表明,受力钢筋的锚固长度对钢筋滑移影响很大,且影响节点的受力性能。

陈宜虎等<sup>[24]</sup>提出了一种新型装配式混凝土U型钢筋环扣连接技术,经试验研究,该节点实现了预期的破坏形态,其承载力和刚度可达到等同现浇的效果。笔者通过对1个现浇梁柱节点试件和3个不同搭接长度的U型钢筋环扣连接节点对比试件进行拟静力试验,分析钢筋搭接长度对试件受力性能的影响,研究4个节点试件的承载力、变形能力、滞回特性等,提出U型连接节点的合理搭接长度。

## 1 试验介绍

### 1.1 节点构造

U型钢筋环扣连接节点构造如图1所示。在预制柱外伸出环形搭接钢筋,预制梁的梁端底部预留出U型钢筋,预制梁的上部受力钢筋仍为通长钢筋,伸入柱内,在搭接节点处进行现场浇筑。在环扣区域的连接段加密箍筋,且将4根短筋穿入搭接环扣区域的4个角部。

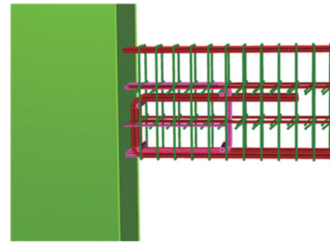


图1 U型钢筋环扣连接节点

Fig. 1 Joint of ring buckle connection with U-shaped steel

### 1.2 试件设计及制作

依据规范<sup>[25-27]</sup>,试验设计了1组共4个节点试件用于拟静力试验,试件SJ-1为现浇节点试件,试件SJ-2、SJ-3、SJ-4为3个搭接长度不同的U型钢筋环扣连接节点试件。4个试件均呈倒T型,梁段长为2 500 mm,截面尺寸为300 mm×700 mm,柱段长为3 000 mm,截面尺寸为650 mm×400 mm,柱内纵筋均为20C22,箍筋均为C8@100。梁、柱混凝土保护层厚度均为35 mm,混凝土强度等级为C30。各试件主要设计参数列于表1中。

SJ-1试件除纵筋外,梁两侧分别配置腰筋2C8,梁内箍筋和拉筋均为C8@100,试件构造如图2(a)所示。

SJ-2试件下部纵筋采用U型钢筋,在梁柱节点区与环形钢筋搭接,搭接长度为275 mm,约为 $0.23L_{IE}$ 。并在环形钢筋的四角布置4C22插筋。

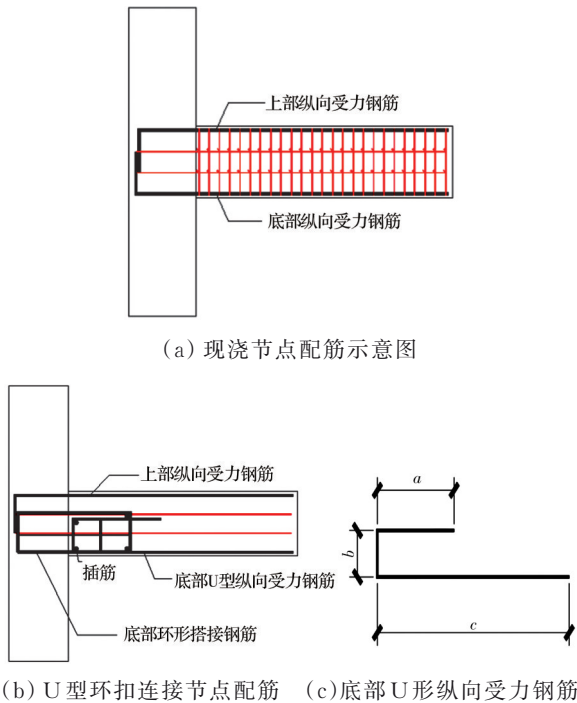
试件SJ-3、SJ-4配筋与试件SJ-2相同,但底部U型纵筋、环形钢筋的尺寸及搭接长度略有区别。SJ-3试件搭接长度为550 mm,约 $0.45L_{IE}$ ,试件SJ-4

表 1 试件编号及主要设计参数

Table 1 Specimen number and main design parameters

试验内容	节点形式	试件编号	纵筋形式	纵筋参数/mm			纵筋构造要求	搭接钢筋形式	搭接钢筋构造要求	搭接长度/mm
				a	b	c				
往复加载	现浇节点	SJ-1			360	2 400	4C22			
	装配式节点	SJ-2		660	360	2 400	4C22		3C25	275, 约为 0.23L <sub>1E</sub>
		SJ-3		962	360	2 400	4C22		3C25	550, 约为 0.45L <sub>1E</sub>
		SJ-4		1 260	360	2 400	4C22		3C25	825, 约为 0.69L <sub>1E</sub>

搭接长度为 825 mm, 约 0.69L<sub>1E</sub>。装配式试件构造如图 2(b)所示, 底部 U 型纵向受力钢筋尺寸示意图如图 2(c)所示。



(a) 现浇节点配筋示意图

(b) U 型环扣连接节点配筋 (c) 底部 U 形纵向受力钢筋

图 2 试件构造及参数示意图

Fig. 2 Geometric dimensions and details of specimens

1.3 材料性能

如上所述试件, SJ-1 一次浇筑完成, 试件 SJ-2、SJ-3、SJ-4 分两批次浇筑。每次浇筑混凝土时预留 3 个边长尺寸为 150 mm 的立方体试块。待养护期结束后实测混凝土立方体的抗压强度, 混凝土性能参数列于表 2 中。梁柱钢筋等级均为 HRB400, 钢筋性能参数见表 3。

1.4 加载方案及测量

试件为倒 T 形, 对于一般的梁柱节点拟静力试验, 有柱端施加水平力和梁悬臂端施加竖向力两种加载方式, 前者加载装置较为复杂, 但梁、柱受力状

表 2 混凝土性能参数

Table 2 Performance parameters of concrete

浇筑批次	混凝土等级	f <sub>cu,m</sub> /MPa	E <sub>c</sub> /MPa
第 1 批次	C30	34.6	3.2 × 10 <sup>4</sup>
第 2 批次	C30	33.4	3.1 × 10 <sup>4</sup>

表 3 钢筋性能参数

Table 3 Performance parameters of reinforcement

钢筋等级	钢筋直径/mm	f <sub>y</sub> /MPa	f <sub>u</sub> /MPa	E <sub>s</sub> /MPa
HRB400	8	421	586	2.1 × 10 <sup>5</sup>
HRB400	22	453	603	2.1 × 10 <sup>5</sup>
HRB400	25	464	610	2.2 × 10 <sup>5</sup>

态更符合实际的受力状态, 后者忽略了柱发生水平位移时轴压所产生的 P-Δ 效应。由于试验主要研究对象为梁端破坏, 而非梁柱节点核心区破坏, 无需考虑 P-Δ 效应对连接受力性能的影响。因此, 试验采取梁悬臂端加载的方式, 并将柱固定, 使柱成为梁端的刚性约束, 梁悬臂端施加水平力和往复力。试验加载装置如图 3 所示。

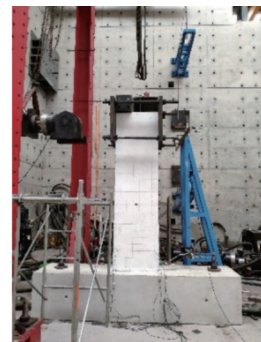


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup and layout of displacement transducer

测量内容包括梁端水平推力、位移、搭接钢筋应变等。测控系统包括 MAX 加载系统、UT 应变采集系统和 HY 位移采集系统 3 个部分。MAX 提供



加载力和位移,加载采取全位移控制,加载制度曲线如图 4 所示。钢筋应变片选用 BE120-3AA 免焊应变片,装配式节点试件钢筋的应变片分别布置在梁内 4 根纵向钢筋和 2 根环型搭接钢筋的内筋表面,应变片粘贴部位如图 5 所示。规定搭接侧受拉时(位移值为正)为正向加载,搭接侧受压时(位移值为负)为反向加载。

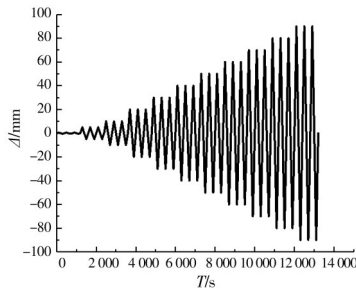
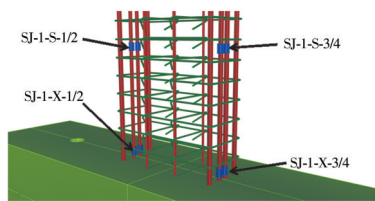
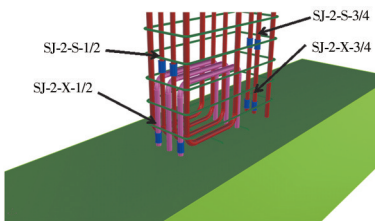


图 4 拟静力试验加载制度曲线

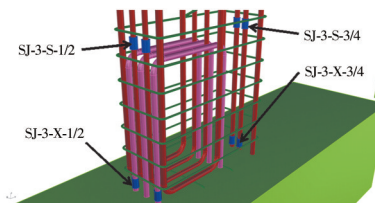
Fig. 4 Loading system curve of quasi-static test



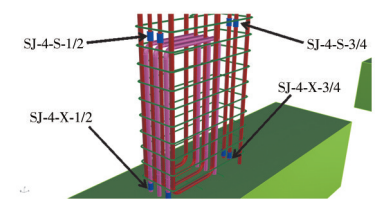
(a) 现浇节点钢筋应变片(试件 SJ-1)



(b) U型连接钢筋应变片(试件 SJ-2)



(c) U型连接钢筋应变片(试件 SJ-3)



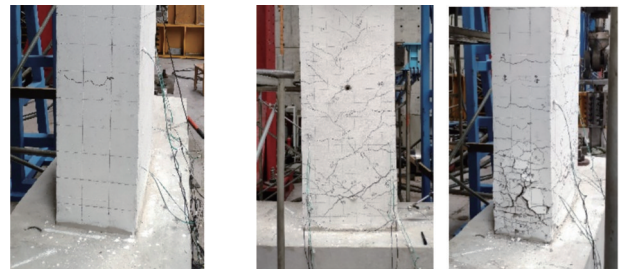
(d) U型连接钢筋应变片(试件 SJ-4)

图 5 试件应变测点布置

Fig. 5 Layout of strain gauges of specimens

## 2 试验现象及破坏形态

对于现浇试件 SJ-1,位移量在 0~20 mm 之间处于弹性阶段,当加载至 5 mm 位移量时,试件侧面出现第 1 条水平裂缝;位移量达到 20 mm 以后,试件处于带裂缝工作阶段,水平裂缝和斜裂缝逐渐发展;位移量达到 50 mm 时,梁端底部处已出现明显开裂;当加载至 60 mm 时,底部混凝土已出现少许脱落现象;从 60 mm 加载至 90 mm 阶段,试件开始由屈服阶段进入破坏阶段;70 mm 时梁底部两侧混凝土已出现压碎脱落现象;位移量达到 80 mm 后,底部两侧混凝土完全压碎脱落,钢筋外露;当位移量达到 90 mm 时,钢筋已经屈服,试件丧失承载能力,试件正面混凝土呈 X 型裂缝破坏,破坏形态为剪弯破坏,裂缝开展情况如图 6 所示。



(a) 弹性阶段

(b) 带裂缝阶段



(c) 屈服阶段

(d) 破坏阶段

图 6 现浇试件 SJ-1 裂缝开展情况

Fig. 6 Crack development of cast-in-place specimen SJ-1

对于 U 型连接试件 SJ-2,弹性阶段与现浇试件 SJ-1 相似;当正向位移量在 40~60 mm 阶段时,竖向裂缝和水平裂缝大量发展;正向位移量达 70 mm 时,搭接侧根部混凝土出现局部压碎脱落现象,正面斜裂缝发展明显,随后搭接侧根部混凝土大面积压碎脱落,裂缝呈水平环向状;当正向位移量加载至 90 mm 时,搭接侧梁端部混凝土脱落,钢筋外露且屈服,而非搭接侧混凝土仅有少许脱落,试件破坏,裂缝呈 C 型,如图 7 所示。

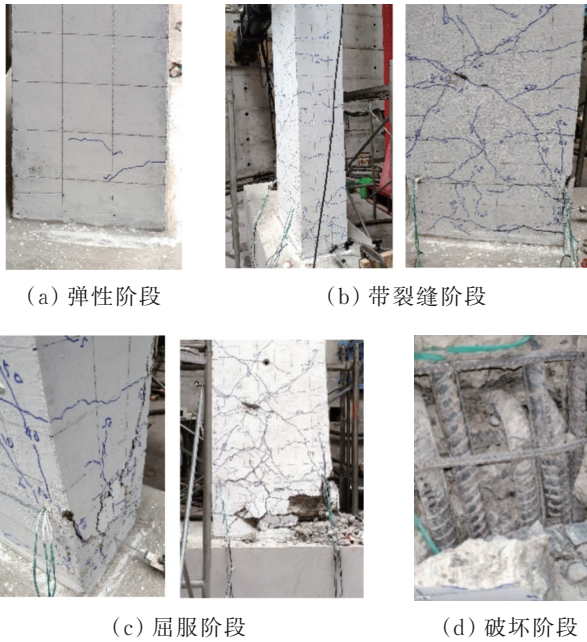


图 7 试件 SJ-2 裂缝开展情况

Fig. 7 Crack development of specimen SJ-2

试件 SJ-3、SJ-4 的裂缝开展过程与试件 SJ-2 情况相似,但最终破坏状态不同。试件 SJ-3 搭接区表面混凝土完全脱落,脱落面积较试件 SJ-2 明显增大,如图 8 所示。试件 SJ-4 则是搭接侧裂缝发展较试件 SJ-2、SJ-3 要明显更长一些,且搭接区混凝土脱落面积较试件 SJ-2、SJ-3 更大,而非搭接侧也有大量混凝土脱落,如图 9 所示。



图 8 试件 SJ-3 破坏情况

Fig. 8 Failure state of specimen SJ-3



图 9 试件 SJ-4 破坏情况

Fig. 9 Failure state of specimen SJ-4

现浇试件的裂缝在梁端较多,正面裂缝呈 X 型,侧面以水平裂缝为主;装配式节点试件的裂缝集中在 U 型环扣的边界,正面裂缝有 X 型裂缝也有水平裂缝,侧面既有水平裂缝,也有竖向裂缝。靠近梁根部 U 型环扣边缘的裂缝宽度最大,U 型环扣内的核心区受拉边缘的裂缝细而短,当达到 U 型环扣边界即停止发展。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 滞回曲线

滞回曲线是一种在力循环往复作用下得到的荷载-位移曲线,能反映结构在反复受力中的承载能力、变形特征、刚度退化等性能,是了解结构力学性能和抗震性能的依据。

各试件滞回曲线如图 10 所示。从图像形状来看,与现浇试件 SJ-1 相比,3 个装配式节点试件的滞回曲线均存在明显“捏缩”现象,说明 U 型环扣连接区的钢筋有明显的滑移产生,但搭接长度的增加有利于减缓钢筋滑移程度;试件 SJ-2、SJ-3 的滞回曲线存在非对称现象,在正向加载(搭接区受拉)时,在荷载达到峰值荷载后,试件承载力快速下降,但随着搭接长度的增加,承载力下降速率降低,说明搭接长度的增加有利于缓解混凝土局部损伤。

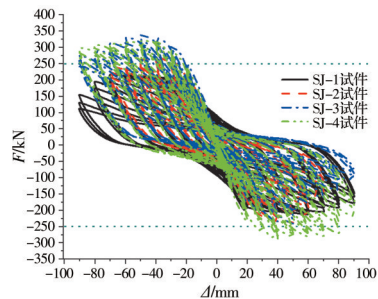


图 10 各试件滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic loops of specimen

#### 3.2 骨架曲线及变形能力

由滞回曲线上同向(拉或压)各次加载的荷载极值点依次相连得到的包络曲线即为骨架曲线,骨架曲线可反映出不同阶段试件的受力与变形情况以及强度、刚度、延性、耗能、抗倒塌能力等特性,图 11 所示为各试件的骨架曲线。采用等效刚度法确定屈服点,采用结构的破坏位移与结构屈服位移之比确定结构延性。当试件的承载力下降至荷载峰值的 85% 时,视为试件破坏,若试件破坏时承载力



仍未下降至荷载峰值的85%,则取试件破坏时的位移为破坏位移。试验结果如表4、表5所示。

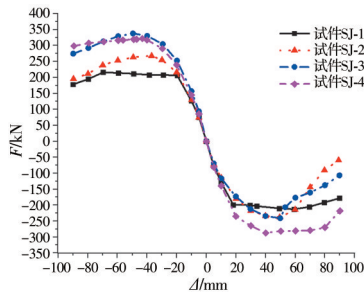


图 11 骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of specimen

表 4 正向加载下节点的承载力和变形

Table 4 The carrying capacity and deformation of the node under the positive load

试件编号	屈服荷载/kN	破坏荷载/kN	屈服位移/mm	破坏位移/mm	结构延性 $\mu$
SJ-1	-198.99	-180.93	20.03	89.93	4.49
SJ-2	-179.97	-202.29	20.09	62.23	3.01
SJ-3	-173.04	-204.93	19.87	51.86	2.61
SJ-4	-235.44	-244.11	19.79	84.51	4.27

表 5 反向加载下节点的承载力和变形

Table 5 The carrying capacity and deformation of the node under the reverse load

试件编号	屈服荷载/kN	破坏荷载/kN	屈服位移/mm	破坏位移/mm	结构延性 $\mu$
SJ-1	206.95	183.82	-20.06	-90.00	4.49
SJ-2	216.09	227.60	-20.05	-71.59	3.57
SJ-3	252.46	287.40	-19.70	-83.75	4.25
SJ-4	238.96	271.86	-20.06	-89.36	4.45

由骨架曲线(图11)可知,从承载能力方面来看,在反向加载时,试件SJ-3、SJ-4的承载力较高,3个装配式节点试件承载力均明显高于现浇试件。在正向加载时,试件SJ-1、SJ-2、SJ-3的承载力相近,均明显低于试件SJ-4。

从塑性变形能力来看,试件SJ-1、SJ-4的骨架曲线有较长的屈服平台,塑性变形能力较好。试件SJ-2、SJ-3没有明显的屈服平台,试件的塑性变形能力与试件SJ-1、SJ-4相比较差。在正向加载时,试件SJ-2、SJ-3均在荷载达到峰值后出现明显的荷载迅速降低现象,试件SJ-2的下降速率较试件SJ-3更快。而在荷载达到峰值以后,试件SJ-1、SJ-4可以在一定位移范围内基本维持荷载不变。

由表4、表5可得,试件SJ-1结构延性最大,试

件SJ-4结构延性略低于试件SJ-1,但优于试件SJ-3,试件SJ-2结构延性最低。说明搭接长度的增加有利于节点结构延性的优化,且当采用合理搭接长度时,装配式节点的结构延性可以与现浇节点相当。

### 3.3 耗能能力

耗能能力指试件在地震反复荷载作用下吸收能量的能力,以滞回曲线包围的面积来衡量,并可由面积比值求得等效黏滞阻尼系数 $\zeta_{eq}$ 或能量耗散系数 $E$ 来评价。选用等效黏滞阻尼系数 $\zeta_{eq}$ 来评价,如图12所示,具体计算公式为

$$\zeta_{eq} = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{2\pi \times S_{(OBE+ODF)}} \quad (1)$$

式中: $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线所包围的面积; $S_{(OBE+ODF)}$ 为三角形OBE与ODF的面积之和。

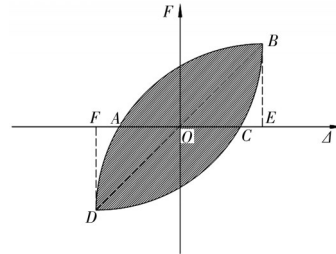


图 12 等效黏滞阻尼系数计算

Fig. 12 Calculate the equivalent viscous damping coefficient

取每级加载的第1次滞回环包围面积计算等效黏滞阻尼系数,计算结果如图13所示。在10~40 mm位移阶段时,试件SJ-1系数迅速增长;在40~60 mm阶段,系数趋于水平,随后快速回落。在10~50 mm位移阶段时,试件SJ-2、SJ-3、SJ-4系数随位移量的增大而稳定增长,随后随位移量的增加略有下降或基本维持不变,趋于稳定。从耗能能力上来看,现浇试件SJ-1的耗能能力优于装配式节点试件,试件SJ-4的耗能能力优于试件SJ-3,试件SJ-3的耗能能力优于试件SJ-2。说明搭接长度的增加有利于节点耗能能力的提升。从耗能稳定性的角度来看,现浇试件耗能能力在后期迅速下降,而U型环扣连接节点试件则没有明显的下降趋势,耗能能力一直比较稳定。

### 3.4 刚度退化

在循环往复荷载作用下,当保持相同的峰值荷载时,峰值点位移随循环次数的增加而增大,这种现象称为刚度退化。试件的刚度可用割线刚度来表示,割线刚度 $K$ 应按式(2)、式(3)计算。

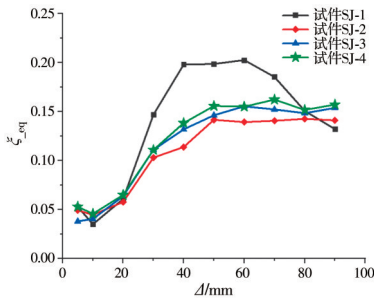


图 13 等效黏滞阻尼系数

Fig. 13 Equivalent viscous damping coefficient

$$K_{i+} = \frac{|+F_i|}{|+\Delta_i|} \quad (2)$$

$$K_{i-} = \frac{|-F_i|}{|-\Delta_i|} \quad (3)$$

式中:  $+F_i$ 、 $-F_i$  为第  $i$  次正、反向峰值点的荷载值;  $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$  为第  $i$  次正、反向峰值点的位移值。

各试件刚度退化曲线如图 14 所示,当正向加载时,试件 SJ-4 的刚度在全位移量均最大,且其刚度退化速率最缓慢,试件 SJ-1、SJ-2、SJ-3 的刚度及刚度退化速率在不同的位移量阶段各有大小。当试件反向加载时,试件 SJ-1 刚度最小,试件 SJ-2 在全位移段刚度均小于试件 SJ-3、SJ-4,在 5~70 mm 位移阶段时,试件 SJ-3 刚度大于试件 SJ-4,在 70~90 mm 位移阶段时,试件 SJ-4 刚度大于试件 SJ-3。试件 SJ-4 刚度退化速率最慢,试件 SJ-3 刚度退化速率基本与试件 SJ-2 相同,试件 SJ-1 刚度退化速率最快。

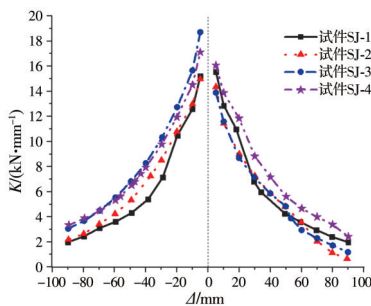


图 14 刚度退化曲线

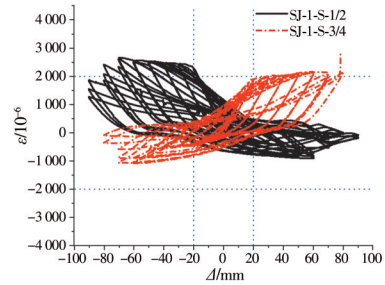
Fig. 14 The stiffness degradation curve

整体来看,U型环扣连接节点试件的刚度高于现浇试件,刚度退化速率也较现浇节点试件更缓。并且对于U型环扣连接节点,搭接长度的增加有利于试件刚度的提升及刚度退化的减缓。

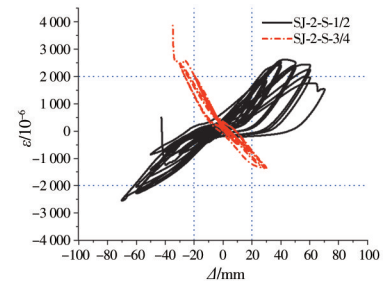
### 3.5 钢筋应变

通过各试件的钢筋布置的应变片测得的钢筋应

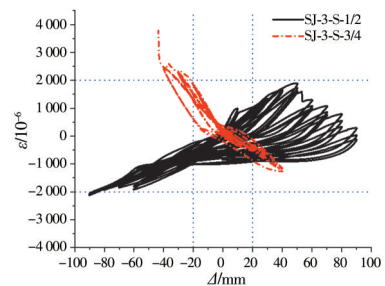
变数据,整理得到各应变片的位移-应变曲线关系图,如图 15、图 16 所示。对比各试件的位移-应变关



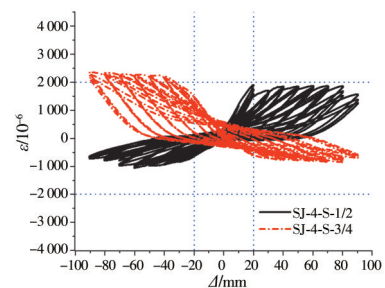
(a) 试件 SJ-1



(b) 试件 SJ-2



(c) 试件 SJ-3



(d) 试件 SJ-4

图 15 各试件钢筋上部位置位移-应变曲线

Fig. 15 The displacement-strain curve of the upper position of each test piece

系曲线,可得到结论:试件 SJ-1、SJ-2、SJ-3、SJ-4 均是底部位置的钢筋要先于上部位置的钢筋屈服,符合悬臂梁的钢筋受力特点。由图 16 可知,4 个试件底部位置钢筋均在位移量达 20 mm 左右时达到屈服,3 个装配式试件底部位置钢筋屈服状态类似。由图 15 可

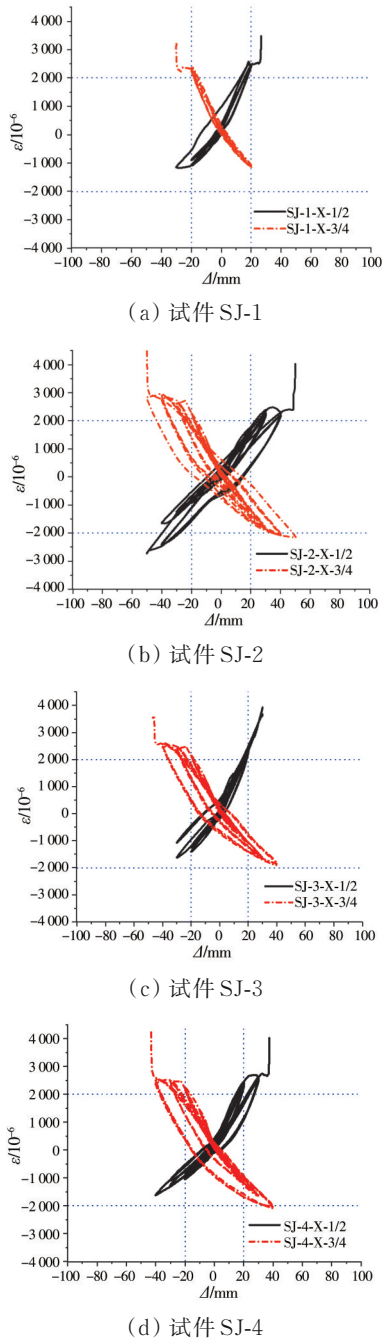


图 16 各试件钢筋下部位置位移-应变曲线  
Fig. 16 The displacement-strain curve of the lower position of each test piece

知,在位移量达到 20 mm 左右时,试件 SJ-1、SJ-2、SJ-3 上部位置钢筋达到屈服,在位移量达到 30 mm 左右位移量时,试件 SJ-4 上部钢筋达到屈服,较试件 SJ-2、SJ-3,试件 SJ-1 和试件 SJ-4 的图像明显更加饱满。从钢筋应变上看,节点现浇工况下钢筋的受力更充分,而当装配式节点的搭接长度达一定长度时,纵筋受力效果类似现浇。对于 U 型环扣连接节点,当搭接长度增加时,钢筋的受力效果更好。

### 3.6 搭接长度

耗能能力是抗震研究中的重要指标之一,故从累计耗能的角度考虑搭接长度对节点的影响。各试件累计耗能结果如图 17 所示。通过  $0.23L_{IE}$ 、 $0.45L_{IE}$ 、 $0.69L_{IE}$  3 种不同搭接长度试件的最终累计耗能与现浇试件的最终累计耗能的比值,记作该试件的相对累计耗能系数,拟合出搭接长度-相对累计耗能系数影响曲线,曲线如图 18 所示。并以相对累计耗能系数达 85% 以上作为等同现浇的条件,为满足等同现浇条件,建议最小搭接长度为  $0.6L_{IE}$ 。

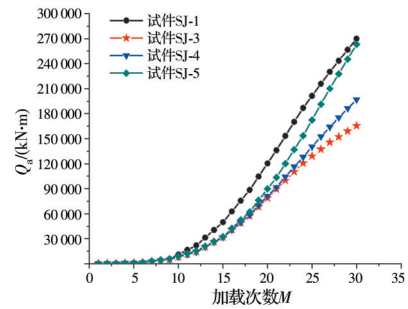


图 17 各试件累计耗能  
Fig. 17 The cumulative energy consumption of each test piece

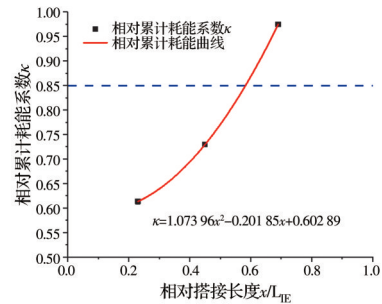


图 18 搭接长度-相对累计耗能系数影响曲线  
Fig. 18 Tie length-The relative cumulative energy consumption factor affects the curve

## 4 结论

通过对 1 个现浇节点试件和 3 个不同搭接长度的 U 型钢筋环扣连接的节点试件进行拟静力试验,根据试验现象和破坏形态,分析试验结果,得到以下结论:

1)较现浇节点、U 型环扣连接节点的承载力有显著提高,虽然 U 型环扣连接节点存在较明显的钢筋滑移现象,但搭接长度的增加可减缓钢筋滑移程度;随着搭接长度的增长,节点的承载力、延性、耗能能力及受力性能等均可得到优化,混凝土的局部损伤及钢筋的刚度退化均可得到缓和。



2)根据考虑累计耗能总值所拟合的搭接长度-相对累计耗能系数影响曲线可以得出,在满足累计耗能总值达现浇节点试件的85%条件下, $0.6L_{\text{E}}$ 搭接长度可作为建议最小搭接长度。

3)从试验结果可以判断,承载力受搭接长度区域内混凝土压碎情况的影响,在采用合理的搭接长度前提下,保证混凝土不会提前被压碎是优化设计方案的关键,建议提高节点区混凝土强度。

## 参考文献

- [1] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074-1077.  
JIANG Q J. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad [J]. Architecture Technology, 2010, 41(12): 1074-1077. (in Chinese)
- [2] 李诗兰. 建筑的可持续发展模式: 新型建筑产业化: 由远大欲建可持续装配式世界第一高楼想到的[J]. 价值工程, 2013, 32(5): 57-58.  
LI S L. New construction industrialization: Sustainable development mode of building: Thinking of broad global group wanting to construct world's tallest fabricated building [J]. Value Engineering, 2013, 32(5): 57-58. (in Chinese)
- [3] BSSC. NEHPR (National Earthquake Hazards Reduction Program) recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings and other structures [S]. Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 2000.
- [4] 张立波. 高层建筑设计施工规范与新技术应用实务全书[M]. 北京: 海洋出版社, 2000.  
ZHANG L B. High-rise building design and construction specifications and new technology application practice book [M]. Beijing: Ocean Press, 2000. (in Chinese)
- [5] ZING J H, RAHMAN A B A, MIRASA A K, et al. Performance of CS-sleeve under direct tensile load: Part H: Structural performance [J]. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2008.
- [6] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154-162.
- [7] BELLERI A, RIVA P. Seismic performance and retrofit of precast concrete grouted sleeve connections [J]. PCI Journal, 2012, 57(1): 97-109.
- [8] 李向民, 高润东, 许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3453-3463.  
LI X M, GAO R D, XU Q F. Experimental study on high ductile joints for precast RC frame [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3453-3463. (in Chinese)
- [9] 伏焕昌, 吴从晓, 张玉凤, 等. 预制装配式混凝土框架结构金属消能减震连接体系抗震性能分析研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(1): 89-97.  
FU H C, WU C X, ZHANG Y F, et al. Seismic performance study on connection system of prefabricated concrete structure with metallic damper [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(1): 89-97. (in Chinese)
- [10] 曹杨, 孙千伟, 宫文军, 等. 新型装配式混凝土框架型钢节点试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(2): 15-23.  
CAO Y, SUN Q W, GONG W J, et al. Experiment on new section steel joints for prefabricated concrete frame [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 15-23. (in Chinese)
- [11] 林宗凡, E. I. Sagan, M. E. Kreger. 装配式抗震框架延性节点的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(2): 134-138.  
LIN Z F, SAGAN E I, KREGER M E. Study on the ductile connections for precast aseismic frame [J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(2): 134-138. (in Chinese)
- [12] 刘航, 王胜, 王海深, 等. 预应力自复位装配式混凝土框架节点抗震性能研究[J]. 建筑技术, 2018, 49(1): 50-53.  
LIU H, WANG S, WANG H S, et al. Research on seismic behavior of self-centering prefabricated rc frame joint with prestressed tendons [J]. Architecture Technology, 2018, 49(1): 50-53. (in Chinese)
- [13] 邹昀, 林晖, 马卫强. 具有自复位功能装配式框架节点抗震性能的影响因素分析[J]. 工程力学, 2015, 32(Sup1): 72-77.  
ZOU Y, LIN H, MA W Q. Influence factors analysis on aseismic behavior of prefabricated frame joints with capacity of self-centering [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Sup1): 72-77. (in Chinese)
- [14] 杨辉, 郭正兴, 许傲逸, 等. 局部后张预应力装配式混凝土框架梁柱节点抗震试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1101-1108.  
YANG H, GUO Z X, XU A Y, et al. Experimental study on seismic behavior of local post-tensioned precast concrete beam-to-column connections [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(6): 1101-1108. (in Chinese)
- [15] 蔡建国, 冯健, 王赞, 等. 预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),

- 2009, 48(2): 136-140.
- CAI J G, FENG J, WANG Z, et al. Seismic behavior of frame comprised of precast prestressed concrete components [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(2): 136-140. (in Chinese)
- [16] 朱洪进. 预制预应力混凝土装配整体式框架结构(世构体系)节点试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- ZHU H J. Seismic research by experiment for the joint of framed structures comprised of precast prestressed concrete components(scope system) [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [17] GUAN D Z, GUO Z X, XIAO Q D, et al. Experimental study of a new beam-to-column connection for precast concrete frames under reversal cyclic loading [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(3): 529-545.
- [18] 管东芝. 梁端底筋锚入式预制梁柱连接节点抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- GUAN D Z. Research on seismic performance of precast concrete beam-to-column connections with anchored bottom longitudinal bars in precast beams [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [19] 管东芝, 郭正兴, 杨森, 等. 带键槽梁底筋锚入式预制梁柱连接塑性铰长度研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(9): 140-147.
- GUAN D Z, GUO Z X, YANG S, et al. Plastic hinge length of precast beam-column connections with U-shaped shells and anchored bottom longitudinal bars in beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(9): 140-147. (in Chinese)
- [20] 于建兵. 钢绞线锚入式装配混凝土框架节点抗震试验与理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- YU J B. Seismic experimental and theoretical study on A new precast concrete connection which strand anchored into core area [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [21] BLANDÓN J J, RODRÍGUEZ M E. Behavior of connections and floor diaphragms in seismic-resisting precast concrete buildings [J]. *PCI Journal*, 2005, 50(2): 56-75.
- [22] IM H J, PARK H G, EOM T S. Cyclic loading test for reinforced-concrete-emulated beam-column connection of precast concrete moment frame [J]. *ACI Structural Journal*, 2013, 110(1): 115-126.
- [23] MAYA L F, ZANUY C, ALBAJAR L, et al. Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fibre reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 173-186.
- [24] 陈宜虎, 卢旦, 张敏, 等. 装配式混凝土梁柱节点U型钢筋环扣连接性能研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(6): 1552-1561.
- CHEN Y H, LU D, ZHANG M, et al. Study on ring buckle connection with U-shaped steel in precast concrete beam-column joints [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(6): 1552-1561. (in Chinese)
- [25] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [26] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [27] 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1-2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Technical specification for precast concrete structures. JGJ 1-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

(编辑 胡玲)