

多螺旋箍筋增强装配式混凝土梁柱 节点抗震性能试验研究

裘煜¹, 邹小舟¹, 罗运海¹, 李丽娟², 武念铎³, 熊哲², 谢龙盼²

(1. 广东翔顺建设集团有限公司, 广东 云浮 527400; 2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006;
3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

摘要:和普通复合箍筋相比,多螺旋箍筋对混凝土不仅具有更加优异的约束效果,同时还能节约钢材。提出在装配式混凝土结构中采用多螺旋箍筋进行加强。考虑节点约束强弱、节点位置、施工方式以及箍筋形式的影响,共设计 2 组足尺混凝土梁柱节点试件。通过低周往复荷载试验,对节点的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、延性以及强度退化等抗震指标展开讨论。结果表明强节点试件在梁端发生弯曲破坏,弱节点试件在节点发生剪切破坏。这些节点试件中,装配式中间节点破坏位移较小,滞回曲线更加饱满,延性系数更高,承载力更好。装配式边节点的破坏位移、延性系数、强度、刚度优于现浇节点。此外,多螺旋箍筋增强装配式梁柱节点承载力试验值均大于理论值,符合国家标准要求,并具备较好的安全冗余。

关键词:多螺旋箍筋;装配式混凝土;梁柱节点;抗震性能

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0687-10

Experimental studies on seismic behaviour of precast concrete beam-column joints reinforced with multi spiral stirrups

QIU Yu¹, ZOU Xiaozhou¹, LUO Yunhai¹, LI Lijuan², WU Nianduo³, XIONG Zhe², XIE Longpan²

(1. Guangdong Xiangshun Construction Group Co., Ltd, Yunfu, 527400, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China;

3. China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd, Shanghai, 200122, China)

Abstract: Compared with ordinary composite stirrups, multi spiral stirrups not only have better restraint effect on concrete, but also save steel, so it is proposed to use multi-spiral stirrup to strengthen precast concrete structures. Considering the influence of joint constraint strength, joint position, construction method and stirrup form, two sets of full-scale concrete beam-column joint specimens are designed. The failure mode, hysteretic curve, skeleton curve, ductility and strength degradation of the joint are discussed through low cycle reciprocating load test. It is found that the bending failure of the strong joint specimen occurs at the beam end, and the shear failure of the weak joint specimen occurs at the joint zone. Among these joint specimens, the failure displacement of the precast intermediate joints is smaller, the hysteretic curve is fuller, the ductility coefficient is higher, and the bearing capacity is better. The failure displacement, ductility coefficient, strength and stiffness of the precast side joints are better than those of cast-in-situ joints. In addition, the tested bearing capacity of the precast beam-column joints reinforced with multi spiral stirrups are greater than their theoretical bearing capacity, implying that the innovative precast beam-column joints can meet the requirements of the national standards and have good safety redundancy.

Key words: multi spiral stirrup; precast concrete; beam-column joint; seismic behaviour

传统建筑施工方式所带来的高能耗、高污染的弊端已经严重制约了建筑业的发展。装配式结构作为当前产业升级的主要方向,已成为建筑行

业研究的热点^[1]。然而,装配式结构存在一些致命弱点,如节点性能薄弱^[2-3]。如何改善节点的抗震能力,已成为各国装配式结构推广发展的关键。

收稿日期: 2022-05-15

修回日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(12032009, 12002091); 广东省企业科技特派员专项(GDKTP2021004500)

第一作者: 裘煜(1979—),男,本科,高级工程师,主要从事结构施工和结构分析方面研究, E-mail: 116204070@qq.com

通信作者: 熊哲(1989—),男,博士,副教授,主要研究方向为结构抗震和高性能材料。 E-mail: gdgyxz263@gdut.edu.cn

针对上述问题,已有学者从混凝土材料、梁柱钢筋以及节点耗能件等方面展开相关研究,以期改善节点的抗震性能。Maya 等^[4]考虑节点区混凝土受力复杂,采用纤维增强混凝土和低收缩工程水泥基复合材料进行混凝土二次浇筑。高向玲等^[5]采用型钢,戎贤团队^[6]提出采用高强钢筋完成节点纵筋连接。杨辉等^[7]提出了一种高强底筋锚入式预制装配混凝土框架梁柱节点,并对节点试件进行了低周反复荷载试验。此外,刘烨等^[8]提出了一种新型全钢耗能杆,并开展了耗能杆增强预应力装配式混凝土框架节点的试验研究。试验结果显示,采用高性能混凝土、高强钢以及延性较大的耗能杆件可以较大程度地提高装配式节点的抗震性能。然而,高性能材料价格较高,在结构中大范围使用将导致工程造价较高。此外,采用耗能杆件或者改变节点钢筋构造,会带来节点连接中现场施工复杂、浇筑混凝土困难等诸多问题。因此,有必要探究可行性更高的新型装配式混凝土梁柱节点。

综上所述,本文提出在装配式结构中应用多螺旋箍筋。与普通箍筋相比,多螺旋箍筋的连续性和约束效果优异^[9,10],节省钢筋用量,且可以方便地在工厂预制。在柱的试验中,多螺旋箍筋已表现出良好的承载力和约束效果^[11]。因此,采用多螺旋箍筋应用于梁柱节点有望提升装配式结构的抗震性能,为此对其开展足尺模型试验,并对节点的抗震指标进行分析,其结果可供装配式结构设计参考。

1 试验设计

1.1 节点设计

试件原形为某装配式混凝土框架梁柱节点,依

据节点梁端约束强弱、节点位置、施工方法以及箍筋的不同,共设计混凝土梁柱节点试件 6 个。节点设计中,依据梁端约束强弱,主要有强节点试件(用“S”表示)和弱节点试件(用“W”表示);依据节点位置不同,主要有中间节点(用“I”表示)和边节点(用“E”表示);依据施工方法和箍筋形式不同,主要有多螺旋箍筋装配式节点(用“F”表示)和普通箍筋现浇节点(用“C”表示)。节点分组如表 1 所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件分组	试件编号	箍筋形式		
		核心区	柱	梁
强节点组(S)	SI-F	多螺旋箍筋	多螺旋箍筋	双臂箍筋
	SE-F	多螺旋箍筋	多螺旋箍筋	
	SE-C	复合箍筋	复合箍筋	
弱节点组(W)	WI-F	多螺旋箍筋	多螺旋箍筋	双臂箍筋
	WE-F	多螺旋箍筋	多螺旋箍筋	
	WE-C	复合箍筋	复合箍筋	

各试件的配筋详图见图 1。相同位置试件尺寸一致,同组试件梁柱配筋相同。试件柱高 3.25 m,梁全长 3.40 m,柱和梁的截面大小分别为 450 mm × 450 mm、250 mm × 450 mm。柱纵筋直径 22 mm,配置 12 根。现浇节点箍筋采用直径 10 mm、间距 100 mm 的普通复合箍筋,节点区域箍筋加密至 60 mm;装配式节点采用多螺旋箍筋,大螺旋、小螺旋直径分别为 12 mm、6.5 mm,间距均为 100 mm,节点区箍筋间距加密至 60 mm。对于梁的配筋,强节点试件纵筋直径为 20 mm,上下各配置 2 根;弱节点试件纵筋直径为 22 mm,上下各配置 3 根;梁箍筋配筋均相同,采用直径 10 mm、间距 100 mm 的普通双臂箍筋。

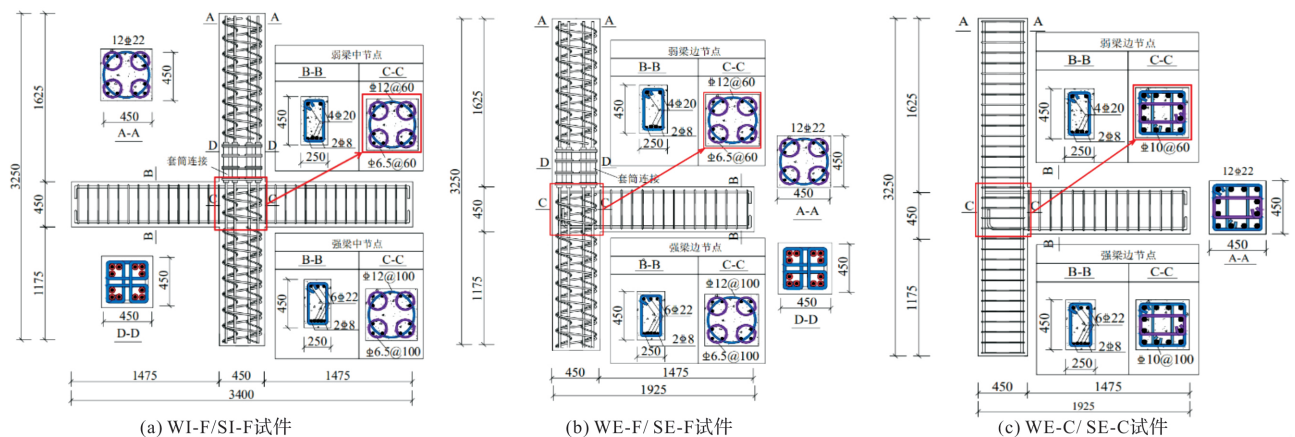


图 1 梁柱节点配筋详图

Fig. 1 Reinforced detail of beam-column connection

1.2 节点制作

多螺旋箍筋装配式梁柱节点主要由预制柱、叠合梁通过后浇节点完成连接，主要包含以下几个过程，如图 2 所示。(1)完成预制柱、预制梁的钢筋绑扎，其中，预制柱采用多螺旋箍筋，以增强混凝土约束效果；(2)完成预制柱和预制梁下部混凝土的浇筑，在梁上部预留 150 mm 厚进行后期叠合层浇筑，同时在预制上柱底部埋设灌浆套管；(3)装配预制下柱和预制梁，在节点区域及梁叠合层部位完成混凝土二次浇筑；(4)预制上柱、下柱纵向钢筋的连接主要通过灌浆套筒完成，当灌浆材料达到设计强度时，即可开展抗震试验。现浇混凝土梁柱节点按照普通施工方式浇筑完成。

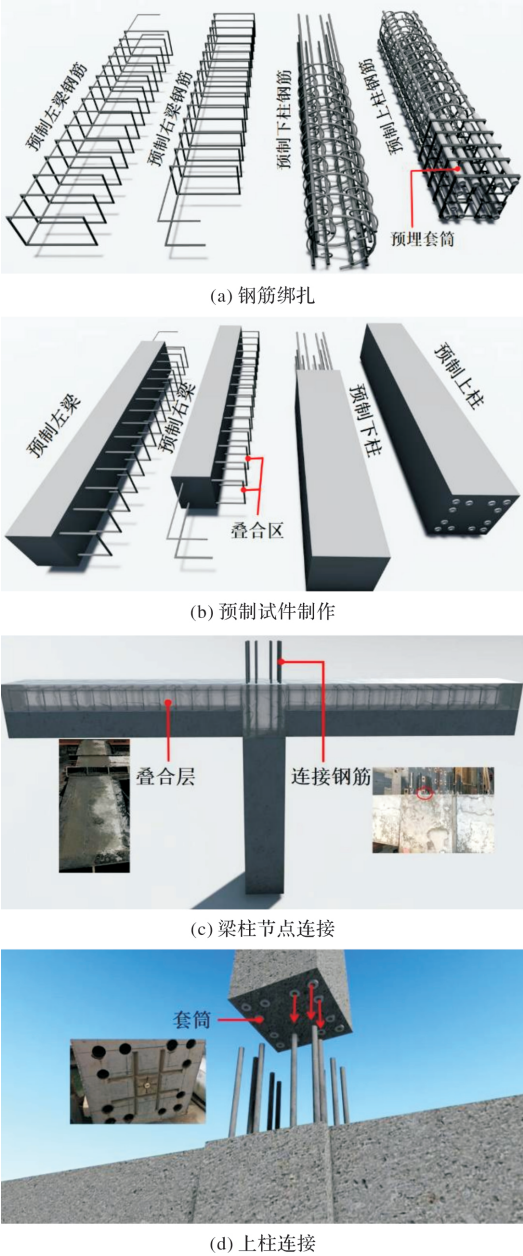


图 2 装配式节点制作过程
Fig. 2 Fabrication process of precast connection

1.3 材性试验

混凝土强度设计为 C30。梁和柱纵筋主要有 20 mm 和 22 mm 两种，均为 HRB400 级钢筋。箍筋主要有 12 mm、10 mm 和 6.5 mm 三种，其中直径 6.5 mm 小螺旋箍筋为 HRB335 级钢筋，其余箍筋均为 HRB400 级钢筋。灌浆套筒长度和外径分别为 410 mm 和 55 mm，采用超高强无收缩灌浆料完成节点柱的连接。每个节点试件对应浇筑 6 个 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体，并在 20±2 ℃ 的温度和 >95% 的相对湿度下养护。按照混凝土试验标准^[12]测试混凝土立方体试件的抗压强度。依据试验标准^[13]测试钢筋原材料的力学性能。参考规范^[14-16]，进行灌浆套筒的单向拉伸和反复拉压试验。混凝土强度和套筒力学试验见图 3，材料性能指标见表 2、表 3、表 4。



图 3 材料性能试验
Fig. 3 Material characteristics test

表 2 混凝土立方体抗压强度
Tab. 2 Cubic compressive strength of concrete

试件	SI-F	SE-F	SE-C	WI-F	WE-F	WE-C
$f_{cu,k}/\text{MPa}$	35.0	33.2	35.9	34.1	33.0	34.9

表 3 钢筋力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of rebars

钢筋型号	钢筋直径 d/mm	屈服强度 f_y/MPa	峰值强度 f_u/MPa	弹性模量 E/MPa
HRB335	6.5	382.7	551.9	2.04×10^5
HRB400	10	436.1	574.6	2.04×10^5
HRB400	12	454.7	602.4	2.07×10^5
HRB400	20	442.3	576.2	2.00×10^5
HRB400	22	429.1	576.0	2.01×10^5

表 4 灌浆套筒力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of grouted sleeve

屈服强度	极限强度	总伸长率	残余变形	残余变形	残余变形	残余变形
f_y/MPa	f_m/MPa	$A_{sgt}/\%$	u_0/mm	u_4/mm	u_8/mm	u_{20}/mm
452.12	598.75	11.15	0.045	0.13	0.33	0.015

注： f_y 、 f_m 为单轴拉伸试验屈服强度和极限强度； A_{sgt} 、 u_0 为单轴拉伸试验伸长率和残余变形； u_4 、 u_8 为大变形反复拉压试验 4 次和 8 次残余变形； u_{20} 为高应力反复拉压试验 20 次残余变形。

1.4 加载装置及加载制度

梁柱节点试件采用拟静力试验加载方案，试验加载装置见图 4。试件安装完成后，在柱上端安装 MTS 作动器，施加水平向往复荷载，在柱顶安装液压千斤顶，施加轴向荷载，轴压比控制为 0.1。柱脚与支座采用铰支撑连接，梁端设置竖向支撑，加载千斤顶与反力架之间放置辊轴，模拟试件在地震作用下的约束条件。

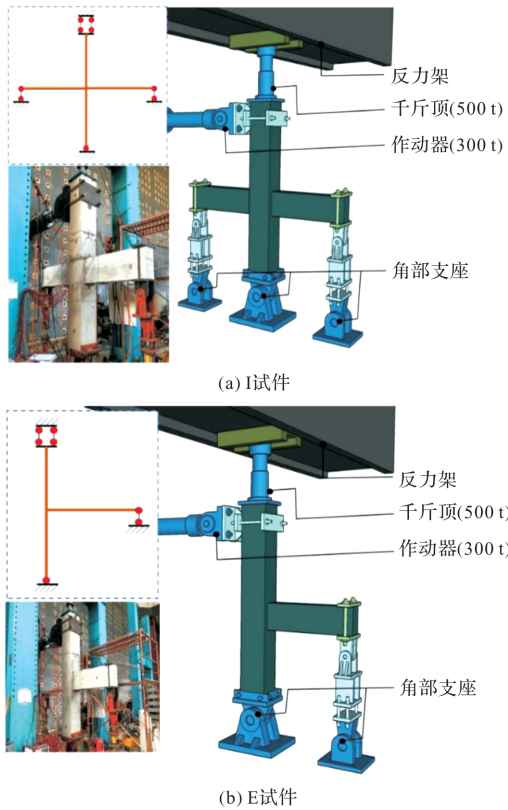


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Setup of loading test

试验加载系统采用全程位移控制。加载初期，位移加载分别为 2.5、5、7.5 和 10 mm，每级加载循环 1 次。之后，以 10 mm 为级差逐渐增加荷载，每级加载循环 3 次。达到峰值荷载后，当荷载试验值下降到峰值荷载的 85% 时，可以终止试验。加载制度见图 5。

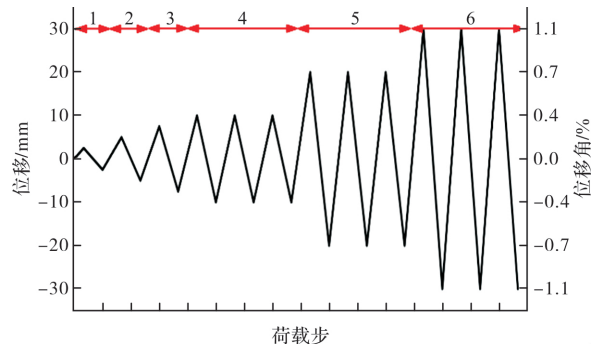


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading law

2 试验结果及分析

2.1 试验过程及破坏特征

强节点试件 SI-F、SE-F 和 SE-C 发生了梁端弯曲破坏，破坏情况见图 6(a)、(b)和(c)。在水平位移为 5 mm 时，边节点 SE-F、SE-C 在节点边缘梁端底部出现第一条裂缝，中间节点 SI-F 梁端出现初始裂纹滞后到 7.5 mm。这一现象主要与边节点单梁约束有关，梁端承载力更大，开裂更早。当位移加载到 20 mm 时，SI-F、SE-F、SE-C 节点梁端侧面均产生多条弯剪斜裂缝，并逐渐发展成贯通裂缝，加载过程钢筋出现“劈啪”的滑移响声。当水平位移加载到 60 mm 时，节点 SI-F 荷载达到最大，并且梁上新增少量微小裂缝，SE-F、SE-C 节点荷载达到最大值时位移滞后到 90 mm 左右。SI-F、SE-F 和 SE-C 节点荷载达到峰值时加载位移（取均值，下同）分别为 60.0、86.7 和 89.4 mm。继续加载时，SI-F、SE-F 和 SE-C 节点在梁端部受压区出现混凝土剥落，梁纵筋有外露现象，同时在节点区域也会出现少量微裂纹。当试验荷载值低于峰值荷载 85% 时，停止试验。从强节点试件的加载过程可以看出，试件的破坏主要发生在梁端。初裂时中间节点 SI-F 加载位移最大（约 7.5 mm），从梁端产生斜裂缝至试件破坏，边节点 SE-F 和 SE-C 峰值位移较大，中间节点 SI-F 峰值位移相对较小，主要是边节点单梁约束较弱，变形能力更大。峰值荷载下，装配式边节点 SE-F 破坏位

移与现浇边节点 SE-C 破坏位移基本相当,相差幅度为 3.0%,说明采用多螺旋箍筋后,装配式节点能达到现浇节点的变形要求。

弱节点试件 WI-F、WE-F 和 WE-C 发生了节点剪切破坏,破坏情况见图 6(d)、(e)和(f)。在水平加载为 5 mm 时, WI-F、WE-F、WE-C 节点均在梁端底部率先开裂,不同于强节点试件开裂顺序,主要原因是弱节点试件梁端配筋更多,刚度更大。当位移加载到 20 mm 时,装配式节点 WI-F、WE-F 梁端裂缝发展成垂直裂缝,同时节点区域也产生一些斜裂缝, WE-C 节点区域产生斜裂缝滞后到 30 mm,这一现象主要是弱节点现浇

试件整体性更好。当位移加载到 60 mm 时, WI-F 节点区域多条裂缝在对角线处发展成两条主斜裂纹,水平承载力达到最大值, WE-F 和 WE-C 节点达到最大荷载值位移滞后到 80 mm 左右。 WI-F、WE-F 和 WE-C 节点荷载达到峰值时加载位移分别为 58.8、75.1 和 82.1 mm。继续加载,各节点试件相继破坏。从弱节点试件的加载过程可以看出,试件的破坏主要发生在节点区域。初裂时 3 个试件加载位移相近(均为 5 mm),从节点核心区产生斜裂缝到试件破坏,边节点 WE-F 和 WE-C 水平位移加载更大,中间节点 WI-F 峰值位移较小,结论与强节点试件相同。

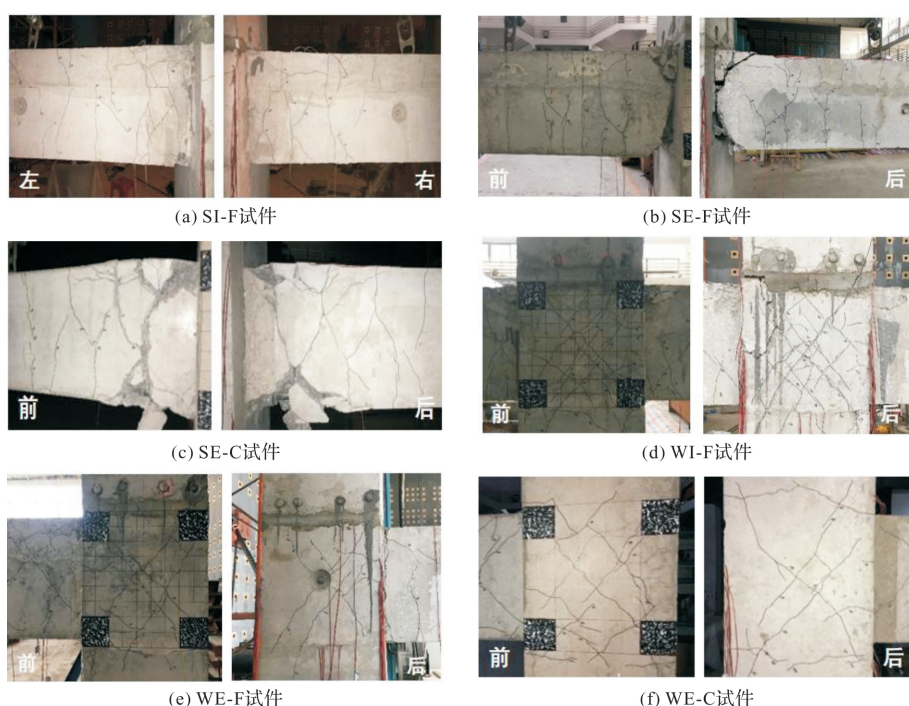


图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure pattern of specimens

2.2 滞回曲线

各试件荷载-位移曲线如图 7 所示。所有试件正反向滞回曲线曲线基本对称,中间节点滞回曲线对称性更好,主要与中间节点两侧梁的约束有关,在水平往复荷载下,能更均衡地发挥抗力作用。全程加载中,强节点试件滞回曲线饱满程度更佳,弱节点试件滞回曲线则表现出明显的捏缩效应,并且边节点由于单梁约束,配筋更多,试件破坏时承载力更高,滞回曲线出现明显的滑移现象。此外,滞回曲线中多螺旋箍筋中间节点 SI-F 的饱满程度最好,装配式边节点 SE-F 和 WE-F 的滞回曲线均优于同组现浇边节点 SE-C 和 WE-C,反映出装配式节点由于多螺旋箍筋的约束作用增强,其耗能能力均达到相应的现浇节点要求。

2.3 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 8 所示。整个加载过程,2 组试件骨架曲线变化规律较为一致,在加载前期,2 组骨架曲线均展现出相近的上升趋势,多螺旋箍筋装配式节点与同组现浇节点骨架曲线基本重合,表现出装配等同现浇的承载能力。此外,弱节点试件由于梁端约束更强,节点破坏时施加的荷载值更大,在加载后期,边节点 WE-F 和 WE-C 均出现明显的钢筋滑移现象,且现浇节点 WE-C 滑移更明显,与滞回曲线图 7(e)、(f)吻合。整个加载环节,中间节点初始刚度、峰值承载力均明显大于同组边节点,产生这一现象主要与节点两端梁的约束有关。

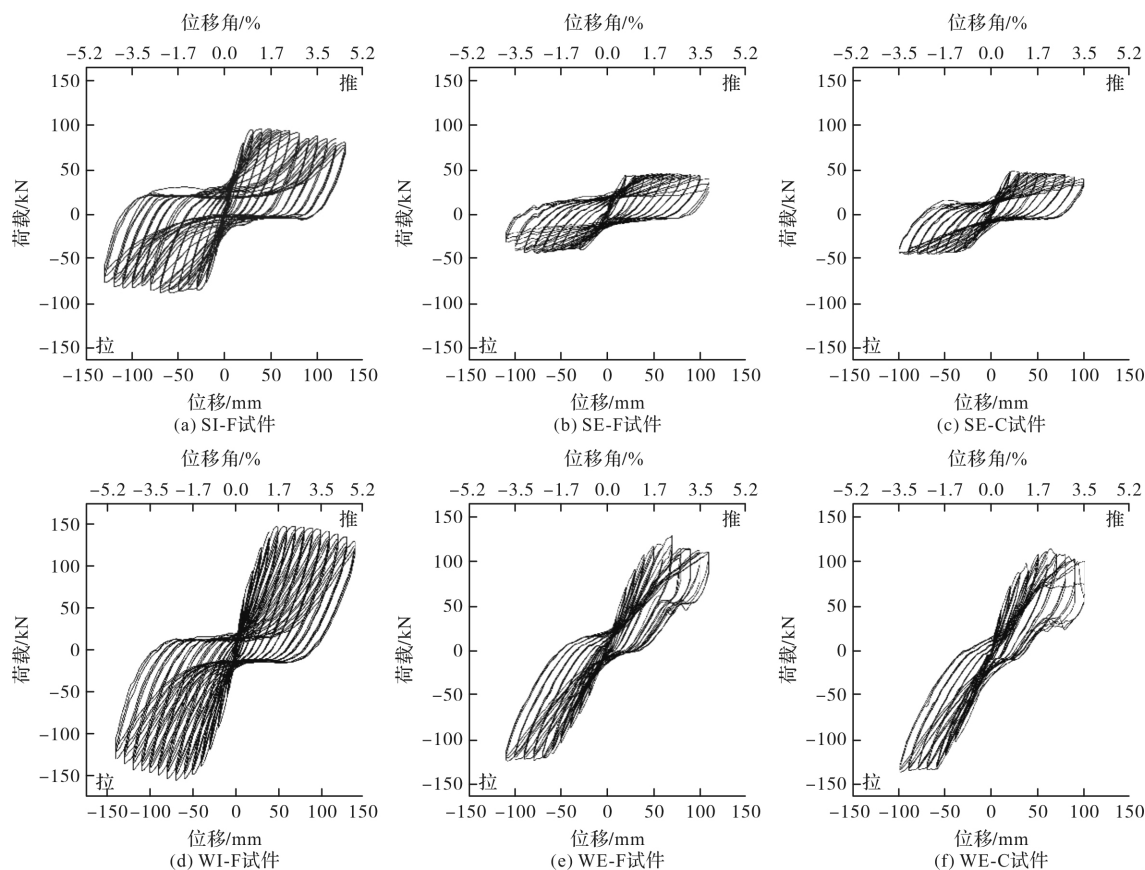


图 7 试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curve of specimens

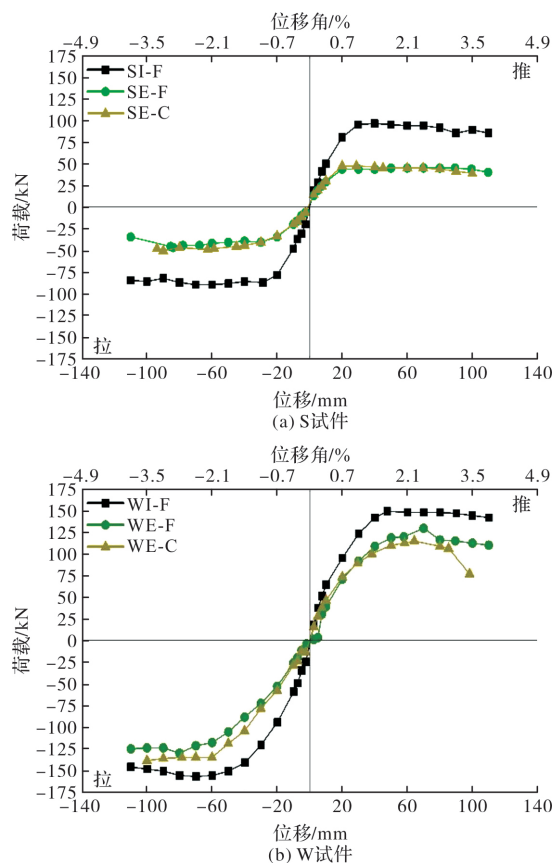


图 8 试件骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curve of specimens

2.4 延性系数

结构的塑性变形性能可以采用延性系数来表示,通常采用能量等值法计算.能量等值法使用二折线与骨架曲线相交,使得二折线和骨架曲线包围的两部分面积 S_1 与 S_2 相等,计算示意图如图 9 所示.

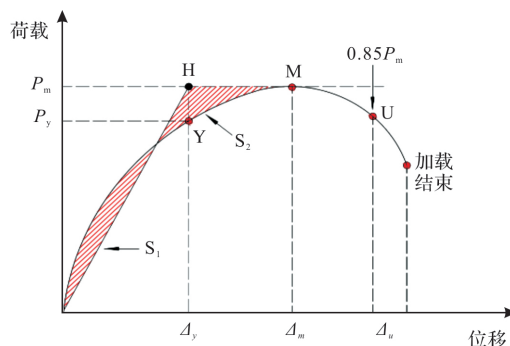


图 9 能量等值法示意图

Fig. 9 Schematic diagram of energy equivalence method

通过二折线拐点 H,作水平轴的垂线与骨架曲线相交,此交点即为试件的屈服点 $Y(\Delta_y, P_y)$.此外,当承载力降低到 $0.85P_m$ 时,此 U 点即为破坏点.不同试件的特征值计算如表 5 所示,延性系数 u 等于破坏位移 Δ_u 除以屈服位移 Δ_y .

表5 节点延性系数表

Tab.5 Ductility coefficient of joints

试件 编号	P_y /kN	Δ_y /mm	P_m /kN	Δ_m /mm	P_u /kN	Δ_u /mm	u
SI-F	82.1	22.4	91.6	60.0	77.8	129.3	5.7
SE-F	39.9	24.5	45.8	86.7	38.9	104.1	4.2
SE-C	41.3	25.4	48.8	89.4	41.5	97.2	3.8
WI-F	132.9	35.0	152.6	58.8	129.7	138.5	4.0
WE-F	116.3	53.4	129.4	75.1	110.0	110.0	2.1
WE-C	110.7	44.8	126.3	82.1	107.4	94.6	2.1

从表5可以看出,强节点试件的延性系数较大,反映出结构设计中“强节点,弱构件”的设计要求.每组试件中,中间节点相比边节点,延性性能更优,反映出中间节点梁端约束更均衡,塑性性能更好.此外边节点中,多螺旋箍筋边节点的延性系数不小于现浇边节点.其中,强边节点SE-F延性系数比现浇节点SE-C高10.5%,弱边节点WE-F节点与现浇节点WE-C延性系数相等,反映出多螺旋箍筋装配式节点具备较好的延性性能.

2.5 耗能分析

等效粘滞阻尼系数 h_e 通常用于表示结构在地震荷载下的耗能能力,计算的主要依据是等效弹性体发生相同位移时,输入的能量比上耗散的能量^[17].计算公式与示意图分别于下式(1)与图10,计算结果如图11所示.

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S(ABCD)}{S(\Delta OEA + \Delta OFC)} \quad (1)$$

式中: $S(ABCD)$ 表示ABCD包围的滞回曲线面积; $S(OEA)$ 、 $S(OFC)$ 分别为正、反向加载时,峰值点与水平轴包围的图形面积.

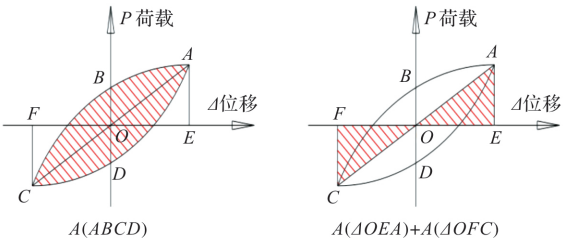


图10 等效粘滞阻尼系数计算简图

Fig.10 Diagram of equivalent adhesive damper coefficient

从图11可以看出,每个试件在加载初始阶段,耗能能力均较小,这主要与试件处于线弹性应力阶段有关.当位移加载到20 mm后,强节点试件等效粘滞阻尼系数提升幅度明显,变化幅度在0.056~0.258之间,弱节点试件等效粘滞阻尼系数变化不大,变化幅度在0.052~0.119之间,耗

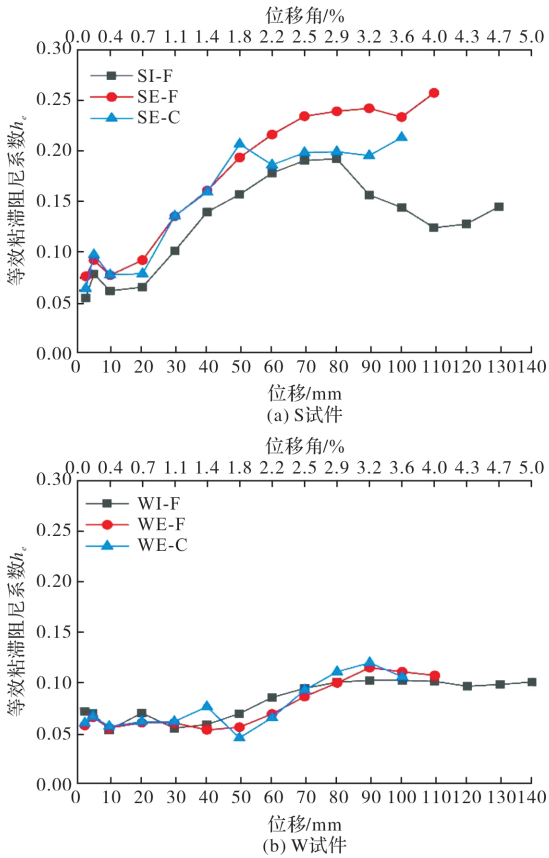


图11 节点等效粘滞阻尼系数

Fig.11 Equivalent adhesive damper coefficient of joints

能能力相对较弱.此外,强节点试件在初始加载阶段,装配式边节点SE-F等效粘滞阻尼系数与现浇边节点SE-C等效粘滞阻尼系数相近,加载后期边节点SE-F等效粘滞阻尼系数值更大,主要与多螺旋箍筋对节点的延性性能增强有关;弱节点试件WI-F、WE-F和WE-C由于发生节点剪切破坏,试件屈服后,等效粘滞阻尼系数略有增加,并且三者加载后期,等效粘滞阻尼系数趋于一致.

2.6 强度退化

梁柱节点在荷载作用下承载力的下降情况,可以用强度退化系数 α_i^j 来表示.各试件在不同荷载下强度退化系数 α_i^j 如图12所示, α_2^j 和 α_3^j 表示第二次循环荷载和第三次循环荷载的强度退化系数.强度退化系数越大,试件性能越好,承载力下降越慢.

图12可以看出,所有试件随位移加载增大,强度退化系数 α_2^j 和 α_3^j 总体上呈下降的趋势,在位移级为60~90 mm阶段,强度退化系数下降明显,其原因是此阶段试件发生破坏,各节点损伤较为严重.强节点试件中,多螺旋箍筋装配式中间节点SI-F强度退化系数较大,表现出较好的承载能力;边节点SE-F强度退化系数 α_2^j 和 α_3^j 大于相应

现浇边节点 SE-C, 体现出采用多螺旋箍筋设计后, 装配式节点具备等同现浇的承载能力. 弱节点试

件中, 三者强度退化系数 α_2' 和 α_3' 基本相近, 表现出与强节点相似的强度变化.

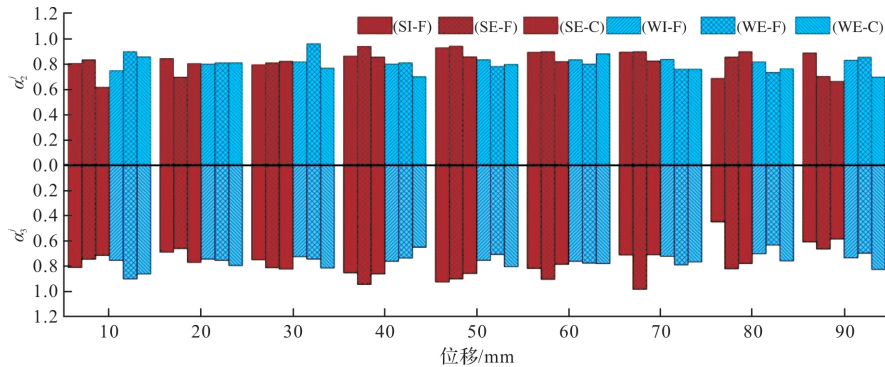


图 12 节点强度退化曲线

Fig. 12 Strength degeneration curves of joints

2.7 刚度退化

等效刚度 K_i 可以表示结构在地震荷载作用下的刚度变化情况^[18]. 本节仅计算各试件不同荷载级下的首次加载刚度 K_1 , 刚度 K_1 变化情况如图 13 所示.

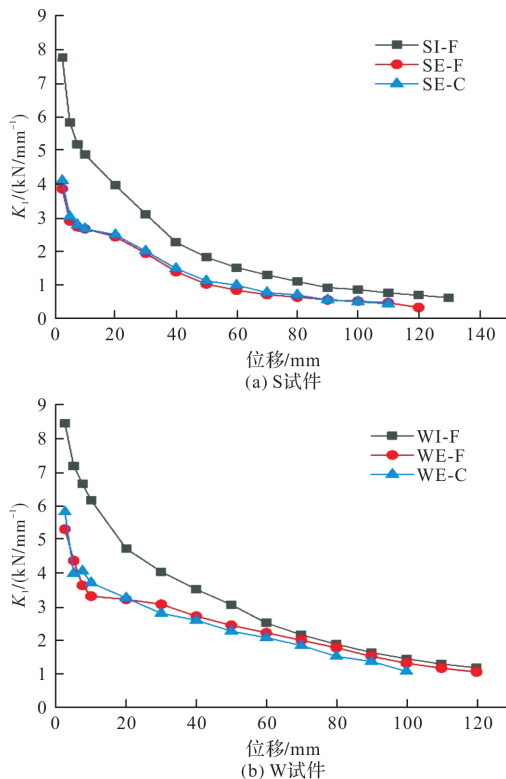


图 13 节点刚度退化曲线

Fig. 13 Rigidity degeneration curves of joints

从图 13 可以看出, 所有试件在加载前期, 刚度退化都较为明显, 主要是加载初期, 混凝土与钢筋尚未达到良好的协同效应. 在加载后期, 两组试件刚度退化均趋于缓慢下降. 整个加载中, 中间节点刚度值均优于边节点试件, 多螺旋箍筋装配式边节点 SE-F、WE-F 刚度曲线均不小于现

浇边节点 SE-C、WE-C.

3 承载力计算

强节点试件发生了梁端弯曲破坏, 因此本文对比强节点试件梁端弯矩试验值和计算值. 根据 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》, 强节点试件梁端弯矩计算值可由式(2)计算, 得

$$M_u = \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (2)$$

式中: M_u 为梁端弯矩计算值; f_c 为混凝土强度实测值; h_0 为梁截面有效高度; x 为混凝土截面受压区高度.

弱节点试件剪切破坏值可由式(3)计算:

$$V_j = \sum \frac{M_b}{h_{b0} - a'_s} \left(1 - \frac{h_{b0} - a'_s}{H_c - h_b} \right) \quad (3)$$

式中: V_j 为节点剪力破坏值; $\sum M_b$ 为节点两端梁的弯矩之和; H_c 为上柱、下柱反弯点之间的高度; h_b 、 h_{b0} 分别为梁截面高度和有效高度; a'_s 为梁受压边缘至受压钢筋作用点的距离.

现浇节点剪力计算值可由式(4)计算.

$$V_j \leq 1.1 \eta_j f_t b_j h_j + 0.05 \eta_j N \frac{b_j}{b_c} + f_{yv} A_{svj} \frac{h_{b0} - a'_s}{s} \quad (4)$$

根据 TCECS512—2018《多螺旋箍筋柱应用技术规程》, 本文对于多螺旋箍筋节点剪力计算值采用式(5)计算.

$$V_j \leq 1.1 \eta_j f_t b_j h_j + 0.05 \eta_j N \frac{b_j}{b_c} + \frac{\pi f_{yv} A_{svj}}{2s} D_1 \quad (5)$$

式中: h_j 为梁对节点受剪的影响系数, 中节点取 1.0, 边节点取 0.67; A_{svj} 为节点有效验算宽度范围的箍筋面积; s 为箍筋间距; N 为试件柱上端轴力设计值; b_j 、 h_j 分别为节点计算的截面宽度和截

面高度; b_c 为柱验算方向的截面高度; D_1 为大螺旋箍筋直径.

结合公式(2)-(5), 可以得到强节点梁端弯矩破坏值以及弱节点节点受剪承载力. 混凝土、钢

筋强度取试验实测值, 破坏荷载取双向加载平均值, b_c 、 h_j 均为 450 mm, b_j 为 250 mm, N 取 $0.1f_c b_c h_c$, H_c 为 3.2 m, a'_s 、 a_s 均为 35 mm, D_1 为 380 mm. 计算结果如表 6、7 所示.

表 6 弯矩试验值与理论值比较

Tab. 6 Comparison of experimental and theoretical values of bending moment

试件分组	试件编号	峰值荷载 P/kN	弯矩试验值 $M_{u,\text{exp}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	弯矩计算值 $M_{u,\text{cal}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$M_{u,\text{exp}}/M_{u,\text{cal}}$
强节点组(S)	SI-F	91.6	120.70	103.99	1.161
	SE-F	45.8	126.27	103.99	1.214
	SE-C	48.8	134.54	103.99	1.294

表 7 剪力试验值与理论值比较

Tab. 7 Comparison of experimental and theoretical value of shearing force

试件分组	试件编号	峰值荷载 P/kN	剪力试验值 $V_{j,\text{exp}}/\text{kN}$	剪力计算值 $V_{j,\text{cal}}/\text{kN}$	$V_{j,\text{exp}}/V_{j,\text{cal}}$
弱节点组(W)	WI-F	152.6	1 060.37	918.01	1.155
	WE-F	129.4	887.74	809.10	1.097
	WE-C	126.3	866.48	741.55	1.168

对比计算结果, 强节点试件弯矩试验值均大于理论计算值, 误差范围在 11.6%~29.4%之间, 平均误差为 22.3%. 弱节点试件剪力试验值亦大于理论计算值, 误差范围在 9.70%~16.8%之间, 平均误差为 14.0%. 由此可见, 本文提出的多螺旋箍筋装配式混凝土梁柱节点的受力性能, 可以满足标准要求, 并且具有较好的安全冗余.

4 小结

(1)在低周往复荷载下, 强节点试件在梁端发生弯曲破坏, 弱节点试件在节点发生剪切破坏. 多螺旋箍筋装配式梁柱节点能达到现浇混凝土梁柱节点的变形要求;

(2)强节点试件相比弱节点试件有更好的耗能和延性. 弱节点试件整体刚度更大, 具备更大的承载能力, 原因是弱节点试件梁端配筋率更高. 中间节点由于两端梁的约束均衡, 其延性性能比边节点优异;

(3)由于多螺旋箍筋的良好约束, 延迟了混凝土破碎的发生, 不同设计准则下, 多螺旋箍筋装配式梁柱节点的各方面抗震性能均不低于现浇节点. 其中, 配置多螺旋箍筋的强节点试件相比现浇节点, 延性系数、强度退化系数和节点核心区变形系数分别提高了 10.5%、7.0%和 59.9%;

(4)承载力计算中, 分别对比了强节点梁端弯矩承载力和弱节点剪切承载力. 计算结果显示, 试验值均大于理论值, 误差范围分别为 22.6%和 14.0%, 满足标准要求, 并且具有较好的安全冗余.

参考文献 References

[1] 王建刚,张清,李智军,等. 大型工业厂房钢筋混凝土柱半装配化工艺研发及应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 33-39.
WANG Jiangang,ZHANG Qing,LI Zhijun, et al. Research and application of semi assembly technology of reinforced concrete column in large industrial plant [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021,53(1): 33-39.

[2] 吴刚,冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 1-16.
WU Gang,FENG Decheng. Research progress on the basic performance of precast concrete frame joints[J]. Journal of Building Structures, 2018,39(2): 1-16.

[3] 史继创,田鹏刚,张凤亮,等. 装配式混凝土结构湿连接发展现状[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 5-12.
SHI Jichuang,TIAN Penggang,ZHANG Fengliang, et al. Development status of wet connection of precast concrete structure[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 5-12.

[4] 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.

[5] 高向玲,徐龙标,李杰,等. 预制混凝土梁柱节点试验及框架受力性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(7): 97-103.
GAO Xiangling,XU Longbiao,LI Jie, et al. Tests of precast concrete beam-column joints and analysis on-mechanical behaviour of prefabricated RC frame struc-

- tures[J]. Journal of Hu-nan University (Natural Sciences Edition), 2017, 44(7): 97-103.
- [6] 戎贤,吴海超,张建新. 反复荷载作用下高强钢筋高韧性混凝土框架中节点抗震性能研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(7): 71-77.
RONG Xian, WU Hai-chao, ZHANG Jian-xin. Experimental research on seismic performance of the joints with high strength and high toughness reinforced concrete[J]. Building Science, 2017, 33(7): 71-77.
- [7] 杨辉,郭正兴,尹航,等. 高强底筋锚入式预制装配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), 2018, 48(6): 979-986.
YANG Hui, GUO Zhengxin, YIN Hang, et al. Experimental study on seismic behavior of precast concrete-beam-to-column connections with high-strength hooked beam bottom bars[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(6): 979-986.
- [8] 刘烨,王春林,孟少平. 耗能杆增强预应力装配式混凝土框架节点性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(1): 12-15.
LIU Ye, WANG Chunlin, MENG Shaoping. Research on the performance of prestressed prefabricated concrete frame connection strengthened by energy dissipaters[J]. Industrial Construction, 2020, 50(1): 12-15.
- [9] XIONG Z, ZHENG J H, CHEN Z P, et al. Seismic behavior and design method of seawater sea-sand concrete reinforced with GFRP and five interlocking spirals[J]. Engineering Structures, 2023, 291: 1-13.
- [10] FANG S, LI L J, LUO Z P, et al. Novel FRP interlocking multi-spiral reinforced-seawater sea-sand concrete square columns with longitudinal hybrid FRP-steel bars; Monotonic and cyclic axial compressive behaviours [J]. Composite Structures, 2023, 305: 101-102.
- [11] FANG S, LI L J, LING L H, et al. FRP interlocking multi-spiral reinforced square concrete columns; A promising compression application for marine engineering[J]. Engineering Structures, 2021, 244: 1-23.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T50081-2002[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2003.
Ministry of housing and urban-rural development of the people's republic of China. General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the people's republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [13] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国标准化管理委员会. 金属材料室温拉伸试验: GB/T 228—2010[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2010.
General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the people's republic of China. Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing at ambient temperature: GB/T 228—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] 中华人民共和国城乡建设部. 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ355—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of housing and urban-rural development of the people's republic of China. Technical specification for grout sleeve splicing of rebars: JGJ355—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [15] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验: GB/T228. 1—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the people's republic of China. Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—Tensile testing: GB/T228. 1—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [16] 中华人民共和国城乡建设部. 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of housing and urban-rural development of the people's republic of China. Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing bars: JGJ 107—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [17] 张锋剑, 朱丽华, 王浩楠, 等. 强化再生骨料混凝土柱抗震性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(1): 1-10.
ZHANG Fengjian, ZHU Lihua, WANG Haonan, et al. Experimental study on seismic behavior of enhanced recycled aggregate concrete columns [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(1): 1-10.
- [18] 徐淑芳, 张弢, 索跃宁, 等. 钢筋混凝土空心剪力墙刚度退化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(5): 606-609.
XU Shufang, ZHANG Tao, SUO Yuening, et al. Study of stiffness degeneration on RC hollow shear wall[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2007, 39(5): 606-609.

(编辑 桂智刚)