

引文格式:张敏,金志超,陈宜虎,等.基于卡槽连接的装配式梁柱节点抗震性能分析[J].建筑科学与工程学报,2025,42(2):16-26.
ZHANG Min, JIN Zhichao, CHEN Yihu, et al. Seismic performance analysis of prefabricated beam-column joints based on slot connections [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(2): 16-26.

DOI:10.19815/j.jace.2023.08061

基于卡槽连接的装配式梁柱节点抗震性能分析

张敏^{1,2},金志超²,陈宜虎³,蒋鸿民⁴,卢旦⁵

(1. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室,广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 土木工程学院,广西 桂林 541004; 3. 贺州学院 建筑与电气工程学院,广西 贺州 542899;

4. 广西建设职业技术学院 土木工程学院,广西 南宁 530007; 5. 华东建筑集团股份有限公司,上海 200002)

摘要:为简化节点构造,防止由于节点区钢筋过密而影响混凝土的浇筑,提出一种卡槽连接的梁柱节点。通过低周反复加载试验,将一个现浇节点与两个卡槽连接节点进行对比,研究了各节点试件的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能能力等抗震性能指标。在试验基础上,用ABAQUS软件对各试件进行有限元分析,并对卡槽上部端板厚度进行参数拓展分析。结果表明:使用C30混凝土灌注的卡槽连接节点承载力接近现浇节点,但由于卡槽上部端板出现应力集中而发生起拱,导致卡槽周围混凝土破坏,增加了钢筋与混凝土之间的滑移,最终导致滞回曲线的捏缩现象明显,且刚度、耗能等指标也不如现浇节点;使用高强灌浆料的卡槽连接节点时,由于灌浆料的抗压强度较高,且灌浆料在卡槽内处于三向受压状态,随着围压的增加,其极限抗压强度会得到明显的增强,由卡槽上部端板变形产生的对灌浆料的破坏作用有所减小,保证了钢筋和灌浆料之间的协同工作,其滞回曲线相对饱满,刚度及耗能也得到改善,抗震性能与现浇节点相当,能够满足实际工程的需求;模拟的骨架曲线及试件破坏特征与试验结果吻合较好,卡槽上部端板的厚度会影响试件的初始刚度及承载力。

关键词:卡槽连接;装配式梁柱节点;抗震性能;试验研究

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)02-0016-11

Seismic performance analysis of prefabricated beam-column joints based on slot connections

ZHANG Min^{1,2}, JIN Zhichao², CHEN Yihu³, JIANG Hongmin⁴, LU Dan⁵

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. School of Architecture and Electrical Engineering, Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, China; 4. School of Civil Engineering, Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning 530007, Guangxi, China; 5. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: In order to simplify joint construction and prevent concrete pouring from being affected by excessive steel reinforcement in the joint area, a beam-column joint with slot connection was

收稿日期:2023-08-18

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(51868014);广西重点研发计划项目(桂科 AB22036001);广西重点实验室基金项目(桂科能 17-J-21-9)

作者简介:张敏(1980-),男,工学博士,教授,E-mail:emailzm@126.com。

通信作者:卢旦(1978-),男,工学博士,教授级高级工程师,E-mail:dan_lu@arcplus.com.cn。

proposed. By conducting low cycle repeated loading tests, a cast-in-place joint was compared with two slot connection joints to study the seismic performance indicators such as hysteresis curve, skeleton curve, stiffness degradation, and energy dissipation capacity of each joint specimen. Based on the experiment, finite element analysis was conducted on each specimen using ABAQUS software, and parameter expansion analysis was performed on the thickness of the upper end plate of slot. The results show that the bearing capacity of the joint connected by C30 concrete pouring is close to that of the cast-in-place joint, but due to stress concentration on the upper end plate of the joint, arching occurs, causing damage to the concrete around the joint and increasing the slip between the steel bars and the concrete. Ultimately, this leads to significant shrinkage of the hysteresis curve, and the stiffness, energy dissipation, and other indicators are not as good as those of the cast-in-place joint. Due to the high compressive strength of the grouting material and the grouting material is in a triaxial compression state inside the slot, the ultimate compressive strength of the slot connection joint using high-strength grouting material will be significantly enhanced with the increase of confining pressure. The destructive effect on the grouting material caused by the deformation of the upper end plate of the slot is reduced, ensuring the coordinated work between the steel bars and grouting material. Its hysteresis curve is relatively full, and its stiffness and energy dissipation are also improved. Its seismic performance is comparable to that of cast-in-place joints, which can meet the needs of practical engineering. The simulated skeleton curve and the failure characteristics of the specimen are in good agreement with the experimental results. The thickness of the upper end plate of the slot can affect the initial stiffness and bearing capacity of the specimen.

Key words: slot connection; prefabricated beam-column joint; seismic performance; experimental research

Author resumes: ZHANG Min(1980-), male, PhD, professor, E-mail: emailzm@126.com;

LU Dan(1978-), male, PhD, senior engineer, E-mail: dan_lu@arcplus.com.cn.

0 引言

装配式建筑具有低碳环保、节约成本、节约劳动力等优点^[1]。在“双碳”背景下,中国推广装配式建筑的政策目标已经从积极使用装配式构件以促进建筑工业化转型的孕育阶段,发展到结合绿色和可持续原则加快推进装配式建筑的推广阶段^[2-3]。在土木工程领域,抗震性能是装配式混凝土框架结构的研究热点^[2]。装配式框架结构的抗震性能与结构内部的连接节点密切相关,因此,通过对节点连接性能的研究可以在很大程度上促进装配式混凝土框架结构的发展^[4-7]。

目前中国的装配式建筑在节点抗震性能研究中还有很多有待提高的地方,并且在实际运用时其整体施工工艺还不够成熟,导致建筑施工中存在较多的质量缺陷^[8-9]。例如,现阶段中国预制装配式框架结构的梁柱节点区域大部分都以混凝土现浇为主,节点的构造及布筋十分复杂,不仅施工效率低,而且

质量难以保证^[10-11]。因此,提出一种施工方便、安全可靠连接节点对于装配式建筑的推广有至关重要的作用。

众多学者已经对装配式混凝土框架结构体系进行了广泛的研究与总结^[12-16]。尹昌磊^[17]对装配式混凝土梁柱 L 型筋连接节点进行了研究,该节点构造将预制梁底筋向上弯折 90°,并在节点后浇区浇筑混凝土来实现梁柱之间的装配,结果表明该连接方式符合“强节点弱构件”的抗震设计原则,且增加 L 型钢筋长度可改善节点的抗震性能。Ha 等^[18]提出一种带有 U 型钢绞线的装配式梁柱节点,研究不同股数的 U 型钢绞线以及是否配置横向钢筋对梁柱节点抗震性能的影响,结果表明在梁端同时配置 U 型钢绞线以及横向钢筋时,其抗震性能等同现浇。Yan 等^[19]提出了一种新型的装配式混凝土梁柱连接构造,梁内钢筋由全灌浆套管连接,柱内钢筋采用半灌浆套筒连接,它为装配式梁柱节点提供了更多的预制连接选择。Lu 等^[20]设计了一种双灌浆

套筒连接的装配式梁柱节点,通过往复加载研究其抗震性能,结果表明所有试件的注浆套筒接头均未发生黏结滑移或断裂破坏,预制试件的初始刚度大于现浇试件,承载力与现浇试件接近,但变形能力较差。蔡建国等^[21]通过低周反复加载,对不同键槽长度的世构体系梁柱节点的抗震性能进行研究分析,结果表明节点的滞回性能及耗能能力良好,且设计的键槽长度能够满足抗震设计的需要。

虽然上述研究成果都满足《装配式混凝土结构技术规程》^[22]的构造要求及抗震设计要求,但其构造都不可避免地会使梁柱外伸钢筋在节点区相互拥塞,该问题在双向框架结构[图 1(a)]的施工中尤为突出,不仅构件安装和施工困难,也会导致混凝土难以浇筑密实而产生结构安全问题。此外,世构体系虽然能够避免后浇区钢筋密集的问题,但它对 U 型钢筋的施工质量要求较高,且由于梁端钢筋搭接长度较长,需要较长的键槽,而键槽壁不仅在吊装时容易损坏,而且钢筋与混凝土之间的黏结性能也会受到影响^[23]。

因此,本文提出一种卡槽连接的梁柱节点构造,如图 1(b)、(c)所示,该连接方式的特点是预制梁的纵筋端头与锚固板焊接,且纵筋的端头只需锚固在梁端的卡槽内,无需深入梁柱节点区域,从而避免了节点区钢筋密集的情况,能够提高施工效率。在试验的基础上,通过 ABAQUS 有限元分析软件研究其抗震性能,为装配式结构的优化设计及工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共设计了 3 个卧式放置的试件,分别为 1 个现浇梁柱节点(XJ-1)和 2 个卡槽连接的装配式梁柱节点(KC-1、KC-2)。其中 XJ-1 与 KC-1 均采用 C30 混凝土浇筑,KC-2 在卡槽连接处采用高强灌浆料浇筑,其余部位也采用 C30 混凝土浇筑。试件的编号、浇筑材料等信息如表 1 所示。卡槽的实物图、钢筋和卡槽的连接示意图以及卡槽尺寸图如图 2 所示,试件的尺寸、配筋如图 3 所示。卡槽连接试件安装时,首先将卡槽固定在柱的钢筋笼上,随后将带有锚固板的纵筋的一端插入卡槽 U 型开口内,最后在卡槽区域灌注灌浆料,以此来实现梁底部纵筋与卡槽的连接。梁的上部纵筋仅需伸入梁柱节点核心区,并做 90°弯折处理即可。试件浇筑时,先进行柱身及部分梁身的浇筑,待其硬化后再完成梁端

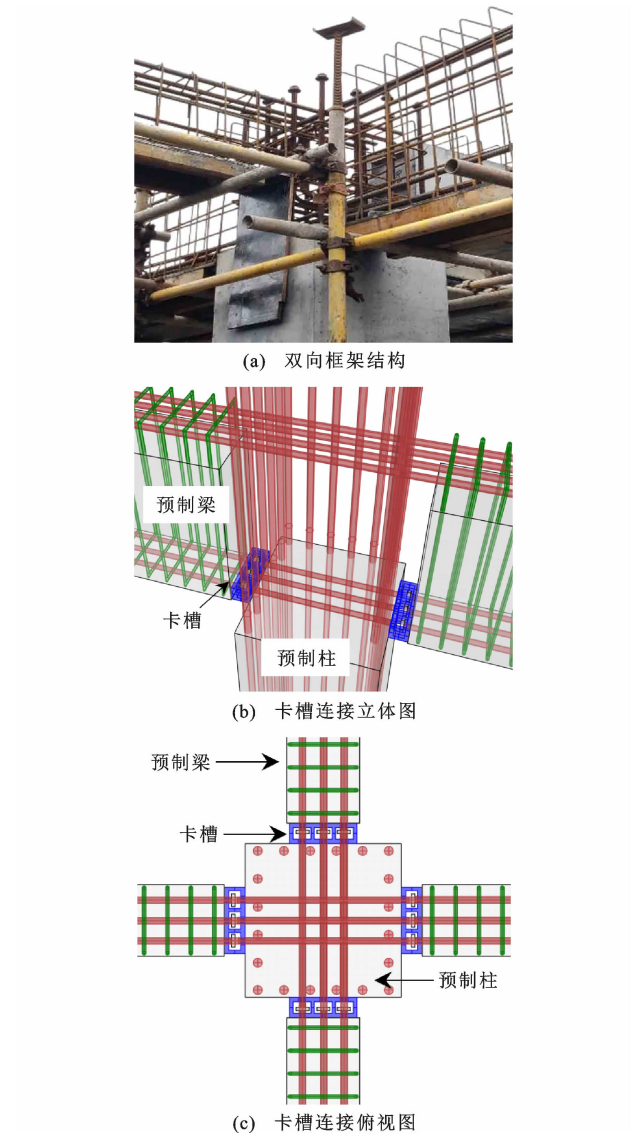


图 1 双向框架结构及卡槽连接示意图
Fig. 1 Schematic diagram of bidirectional frame structure and slot connection

表 1 试件信息		
Table 1 Information of specimens		
试件编号	连接方式	后浇区浇筑材料
XJ-1	现浇	
KC-1	卡槽连接	混凝土(抗压强度 30 MPa)
KC-2	卡槽连接	灌浆料(抗压强度 80 MPa)

卡槽部分的浇筑。

1.2 材料性能

混凝土的立方体轴心抗压强度 $f_{cu,k}$ 为 34.6 MPa,弹性模量 $E_s=3.4\times10^4$ MPa。高强灌浆料的抗压强度为 80.7 MPa 弹性模量 $E_s=3.8\times10^4$ MPa。卡槽采用 Q235 普通碳素结构钢,本试验使用的钢筋均为 HRB400 级钢筋,钢筋的力学性能如表 2 所示。

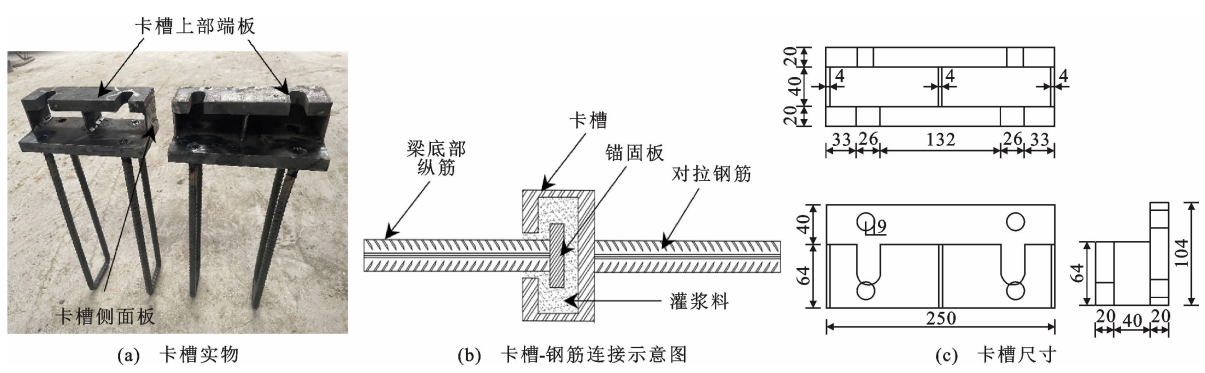


图 2 卡槽和连接详图(单位:mm)
Fig. 2 Details of slot and joint (unit: mm)

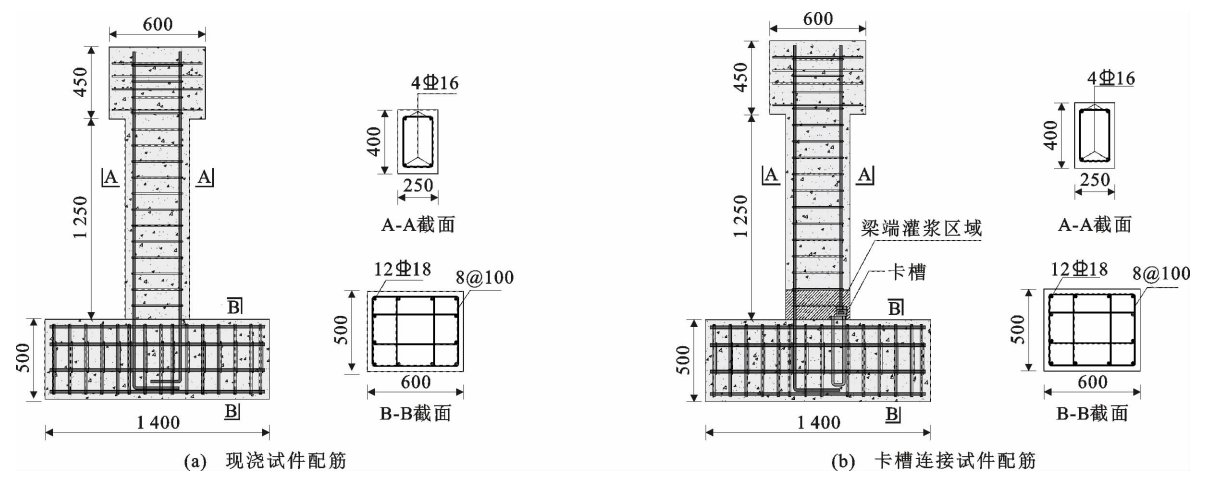


图 3 试件配筋(单位:mm)
Fig. 3 Reinforcement of specimen (unit: mm)

表 2 钢筋力学性能				
Table 2 Mechanical properties of steel bars				
钢筋类别	直径/mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa
HRB400	8	420.5	630.7	201 000
HRB400	16	415.5	619.5	206 000
HRB400	18	417.7	625.5	202 000

1.3 试件加载与测量

本试验的加载方式参考 ACI 推荐的位移角控制的加载方法^[24]。加载时,试件卧式放置,加载至节点破坏严重而无法承受荷载时停止试验,加载制度如图 4 所示(Δ 为位移),试件的加载示意图及位移计布置如图 5 所示。

2 试验现象及破坏特征

随着荷载的不断施加,3 个试件都从弹性阶段不断发展至屈服状态,且最终都是由于梁柱交界处的混凝土压碎而发生破坏。各试件的破坏情况如图 6 所示。

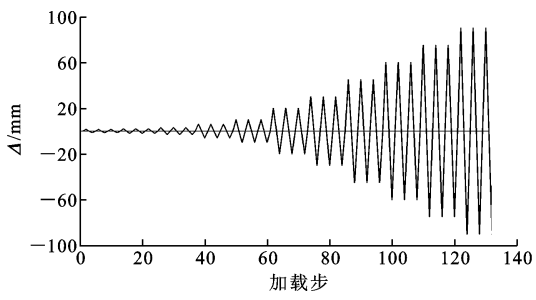


图 4 加载制度
Fig. 4 Loading system

为试件 XJ-1 的位移达到 1.5 mm 时,距梁端部 30 cm 处产生第 1 条水平裂缝,加载至 3~6 mm 时,梁端产生了第 1 条斜裂缝,且水平裂缝的数量不断增加。随着不断加载,靠近梁根部侧面的裂缝贯通。当加载位移达到 45 mm 时,梁底的混凝土局部脱落,斜裂缝不断发展,分布在梁身左右两边的裂缝向中间延伸,混凝土也不断脱落。当加载至破坏阶段时,梁端两侧的混凝土破坏严重,同时核心区 的钢筋外露,且已屈服。

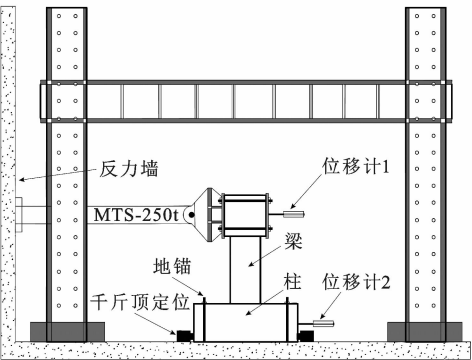
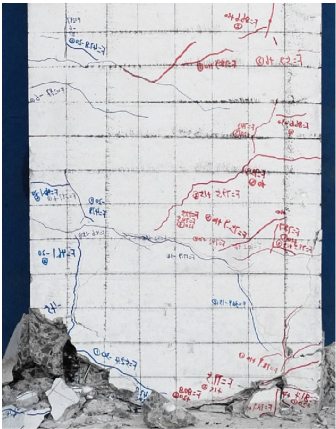


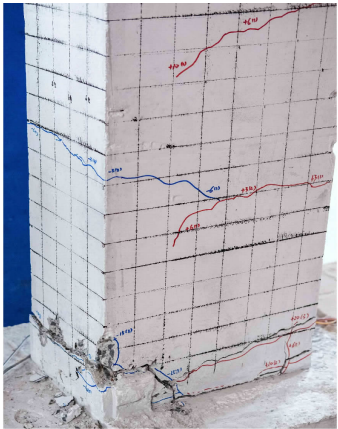
图 5 试件加载示意图

Fig. 5 Loading diagram of specimen

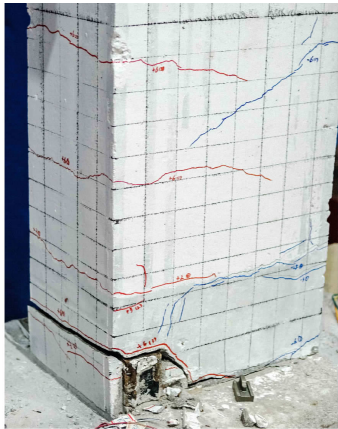
试件 KC-1 的位移达到 1.5 mm 时,由于卡槽的表面较光滑,没有与混凝土建立较强的黏结,导致卡槽连接处出现了一条斜裂缝,随着不断加载,梁端右侧出现了 4 条斜裂缝。加载至 10 mm 以上时,卡槽周围裂缝的宽度慢慢变大。当加载至破坏阶段时,卡槽连接处的混凝土断裂,节点核心区的混凝土部分脱落,梁柱交界处的水平裂缝逐渐贯通。试件 KC-2 的位移达到 1.5 mm 时,梁根部高强灌浆料与混凝土的交界处首先出现长度约 30 cm 的水平裂缝,其原因是灌浆料与混凝土并未同时浇筑,导致接触面之间黏结不充分,从而在交界处先产生了长裂缝。当位移加载到 6 mm 时,卡槽周围只出现了几



(a) XJ-1



(b) KC-1



(c) KC-2

图 6 试件破坏特征

Fig. 6 Damage characteristics of specimens

条微裂缝。随着不断加载,卡槽周围的裂缝以及灌浆料与混凝土交界处裂缝的宽度也随之增加和延伸。当加载至破坏阶段时,灌浆料与卡槽分离,卡槽附近的灌浆料也发生脱落,梁柱交界面的水平裂缝逐渐贯通。

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

图 7 为根据试验数据所绘制的各试件滞回曲线(卡槽侧受拉时为正向加载, F 为荷载)。由图 7 可知:3 个试件滞回曲线的演变情况大致相同,在开裂前刚度均无明显变化,残余变形较小,形成的滞回环不明显。从混凝土开裂到钢筋屈服,3 个试件的滞回曲线介于梭形与反 S 形之间,且滞回环的面积不断增大,曲线出现明显的捏缩现象。在达到峰值荷载后,试件的刚度退化加快,同时钢筋产生较大的滑移,导致捏缩现象更加明显,滞回曲线呈反 S 形。对比节点 XJ-1 和 KC-1 可知,两个试件的承载力相

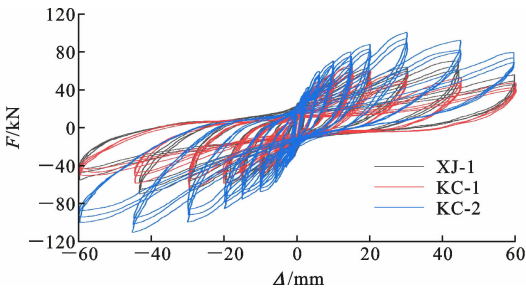


图 7 试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of specimens

近,但 XJ-1 节点的滞回曲线更均匀饱满,其原因是在破坏前节点 KC-1 卡槽附近混凝土裂缝开展较大,且周围混凝土被压碎,使钢筋产生了较大的滑移。相比于 KC-1,KC-2 节点的承载力更高,滞回曲线包含的面积更大,具有更好的耗能能力,原因是提高灌浆料强度后,纵筋握裹区域内的灌浆料劈裂破坏状况有所缓解,提高了钢筋与混凝土的黏结强度,最终提高了其耗能能力。

3.2 骨架曲线

对3个试件的骨架曲线(图8)进行对比分析可知:在弹性阶段,各试件从开始正向加载到节点开裂的斜率基本相同。随着试件的开裂,XJ-1和KC-1曲线斜率的减小程度大于试件KC-2,说明它们刚度退化更加明显。进入破坏阶段后,3个试件刚度的退化更为明显,其中现浇试件在进入破坏阶段后的曲线斜率较缓,具有较好的延性。相比XJ-1,由于KC-1在加载过程中卡槽上部端板会发生应力集中,产生起拱的现象,且卡槽内的混凝土强度较低,导致其承载力在加载位移较小时就开始下降。相比于KC-1,KC-2的峰值荷载较高,提高约42.0 kN,且位移相同时,试件KC-2的峰值荷载均高于XJ-1和KC-1,承载能力突出,说明加入高强灌浆料有利于提高连接的强度。

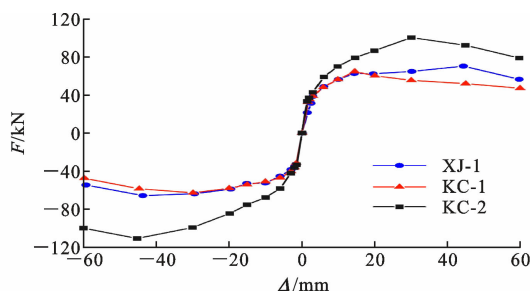


图8 试件的骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves of specimens

3.3 刚度退化

在往复荷载作用下,由于累积损耗,结构会发生刚度退化的现象。各试件的刚度退化曲线如图9所示,其中 K 为刚度。观察曲线可知:各试件刚度退化的发展态势总体相同:在弹性阶段3个试件的刚度退化较快,进入屈服阶段后,随着加载位移的增加,刚度退化曲线逐渐平缓,最终刚度趋于相等。对比试件XJ-1与KC-1可知,在弹性阶段,由于试件KC-1存在新老混凝土结合问题,故其刚度不如现浇节点。当加载位移达到6 mm后,随着加载的推进,由于卡槽内的混凝土强度较低而被压碎,使梁内纵筋发生了滑移,导致了KC-1刚度下降较快。对比试件KC-2与KC-1可知,加入了高强灌浆料的试件KC-2的初始刚度高于KC-1,且刚度退化较慢,说明使用高强灌浆料对试件的刚度有一定贡献。

3.4 耗能能力

图10和图11分别为3个节点试件的单周耗能和累积耗能曲线,通过对比分析可知:在位移加载初期,各试件滞回环的差异并不明显,耗能曲线基本重

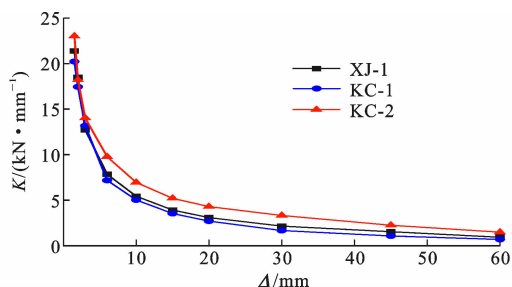


图9 刚度退化曲线

Fig. 9 Curves of stiffness degradation

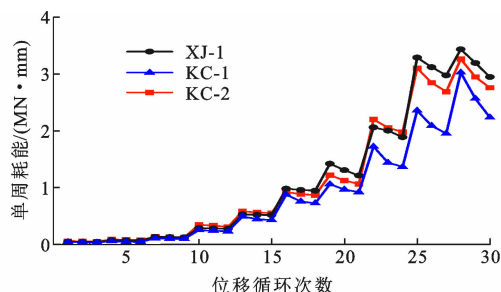


图10 单周耗能曲线

Fig. 10 Curves of single-circle energy dissipation

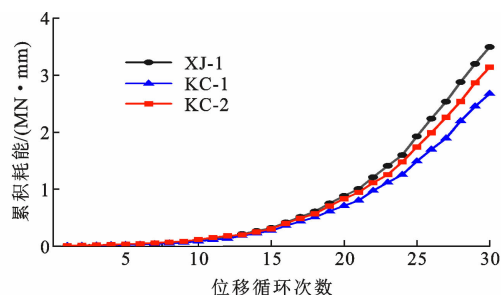


图11 累积耗能曲线

Fig. 11 Curves of cumulative energy dissipation

合。随着不断加载,试件KC-1卡槽内的混凝土被压碎,钢筋发生滑移,使试件XJ-1的耗能逐渐高于KC-1。在累积耗能上,试件KC-1比XJ-1低约22%,对比KC-1与KC-2可知,试件KC-2的耗能比KC-1高约17%,说明提高灌浆料强度对试件耗能能力的提升较为显著。

4 有限元分析

4.1 有限元模型的建立

使用ABAQUS有限元分析软件建立3个试件的模型,各试件的网格划分模型如图12所示。在单元选取时,混凝土采用C3D8R单元,钢筋采用T3D2单元。混凝土的本构关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[25]附录推荐的公式计算,本构模型采用塑性损伤(CDP)模型,该模型具有

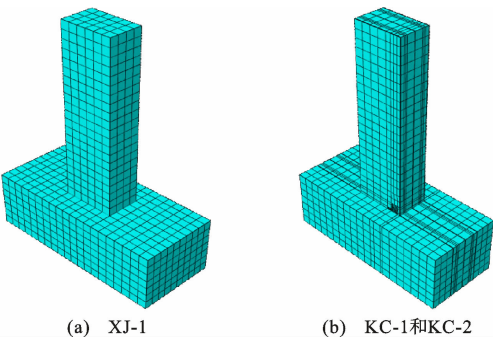


图 12 网格划分模型

Fig. 12 Meshing model of specimens

较好的收敛性^[26-27]。梁身模型建立时,需对梁端灌浆区域和其上部混凝土区域进行拆分,并在装配模块中切割灌浆区,以此在灌浆区留出卡槽的位置。考虑到目前尚无完善的灌浆料应力-应变模型,并且灌浆料和高强混凝土的力学性能相似,故采用相同抗压强度下的混凝土本构关系作为灌浆料的本构关系。钢筋及卡槽的本构关系采用双折线弹塑性模型^[28],本构模型采用 ABAQUS 自带的自动强化模型。通过嵌入命令来定义钢筋笼与混凝土之间的约束。由于卡槽在实际受力时会与灌浆料剥离,因此将卡槽与灌浆料的接触面设置为面与面接触,并允许接触后分离,卡槽与混凝土的接触面上使用切向库仑摩擦。插入卡槽的纵筋嵌入在混凝土及灌浆料中,并将其端部与锚固板绑定。在梁端设置加载参考点,并与加载面耦合,用幅值命令来建立往复加载

制度后,通过加载参考点对试件进行位移控制加载。

4.2 有限元模拟结果分析

4.2.1 滞回曲线及骨架曲线对比

图 13、14 分别为滞回曲线及骨架曲线模拟结果与试验结果的对比(Ex、Si 分别表示试验数据与模拟数据,卡槽侧受拉时为正向加载)。观察滞回曲线可知,有限元模拟能够较好地模拟出试件加载时的弹性、屈服、破坏三个阶段,且试件加载初期的刚度比较吻合,但在加载后期,试件的刚度退化较慢,导致滞回曲线没有明显的捏缩效应而过于饱满。由骨架曲线对比可知,模拟状态下的骨架曲线与试验结果在加载初期的发展趋势基本一致,但在混凝土开裂后,模拟所得相同位移下的荷载值大多高于试验值,且在破坏阶段时,模拟的骨架曲线下降缓慢,延性更高。骨架曲线相对误差最大处为试件 KC-2 在正向加载位移为 60 mm 时的误差,达到了 18.4%。导致试验与模拟结果存在差异的原因在于:ABAQUS 软件没有钢筋的滑移单元可供选择,且在建模时钢筋均嵌入于混凝土中,导致在混凝土开裂后,无法有效地模拟出钢筋与混凝土之间的滑移,在滞回曲线及骨架曲线中具体表现为试件在加载后期承载力偏高且刚度退化较慢,没有明显的捏缩现象。在整体上,各试件试验与模拟的发展趋势接近,误差范围较小,该有限元模型对于试验过程的模拟情况较为吻合,具有一定的参考价值。

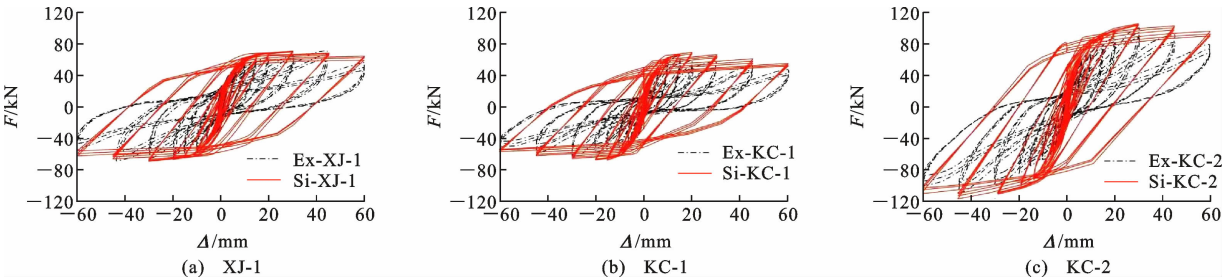


图 13 滞回曲线对比

Fig. 13 Comparison of hysteresis curves

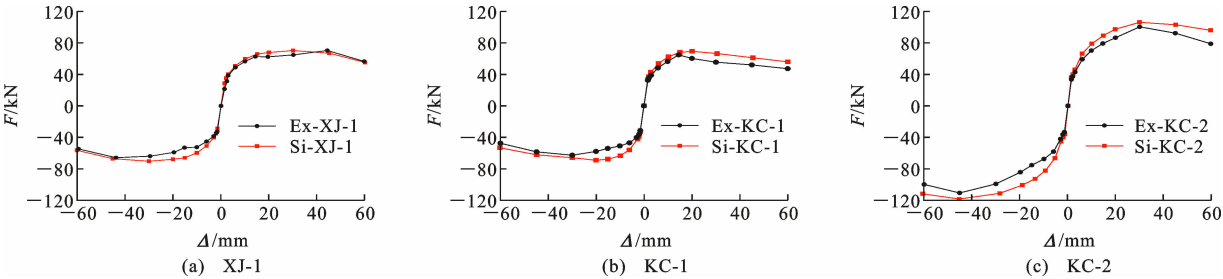


图 14 骨架曲线对比

Fig. 14 Comparison of skeleton curves

4.2.2 试件损伤对比

图 15 为各试件模拟所得的受压损伤云图与试验破坏情况对比,损伤因子从 0 到 1 代表混凝土无损伤至完全损伤。混凝土损伤因子较大处均为试件产生较大裂缝及破坏的区域,现浇节点的破坏区域主要集中在梁柱交界处梁端的两侧,而卡槽连接节

点的破坏区域主要集中在卡槽附近。将模拟云图与各试件试验破坏情况进行对比可知,有限元模拟的试件损伤情况与试验现象吻合良好,该模拟结果对试件破坏区域的预测有一定的参考价值。此外,各试件柱子的变形及开裂程度均处于较小的水平,说明该梁柱节点符合强柱弱梁的设计要求。

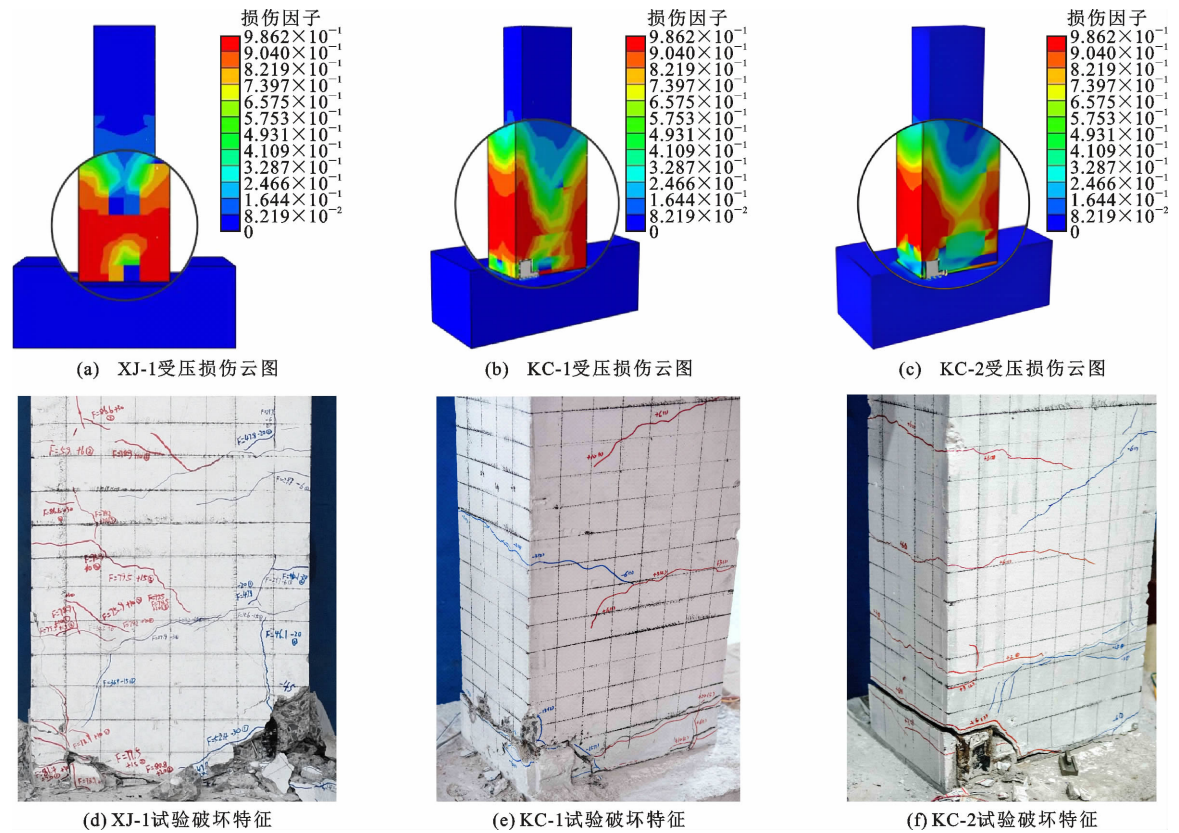


图 15 试件受压损伤云图与试验破坏特征对比

Fig. 15 Comparison of compression damage nephogram and test failure characteristics of specimens

4.2.3 节点应力分析

对卡槽的受力性能进行模拟分析,其结果如图 16 所示。由图 16 可知:卡槽的最大应力集中在上部端板,达到了 617.0 MPa;而卡槽内的混凝土及灌浆料最大应力仅为 107.0 MPa 和 116.4 MPa,由于卡槽内的混凝土或灌浆料的实际受力情况是三向受压状态,随着围压的增高,其极限抗压强度会明显增强;KC-1 卡槽内的混凝土强度仅为 34.6 MPa,即使抗压强度有所提高,但仍不足以抵抗卡槽变形而受到的压力,而试件 KC-2 卡槽的灌浆料强度为 80.7 MPa,三向受力后的抗压强度较高,保证了试件的承载能力。由此可见,若要提高节点的承载力,不仅需要保证卡槽的强度,提高卡槽内灌浆料的强度也尤为重要,防止由于内部灌浆料强度较低而被压溃,卡槽上端开口处所承受的力过大而发生构件破坏。此外,观察图 15(a)、(b)可知,在加载过程中,卡槽的

应力及变形主要集中在卡槽上部端板,且不断向上发生变形,而卡槽的侧面板由于面积较大,因此所受的拉应力及变形较小,这与试件在加载的过程中裂缝主要从卡槽上部开展并且不断延伸的破坏特征相吻合。

4.2.4 参数拓展分析

在往复加载的过程中,卡槽的应力主要集中在卡槽的上部端板,并且由于卡槽的上部端板是受弯状态,所以随着荷载的增加,端板会不断向上发生弯曲变形,导致其上部的混凝土或灌浆料被压溃,影响了试件的承载能力。因此,为进一步分析卡槽上部端板厚度对节点承载力的影响,对 3 种不同端板厚度的试件进行了数值模拟分析(KC-2、KC-3、KC-4 分别表示卡槽上部端板厚度为 20、25、30 mm 的工况),数值模拟后得到的骨架曲线如图 17 所示。由图 17 可知,随着端板厚度的增加,试件加载初期的

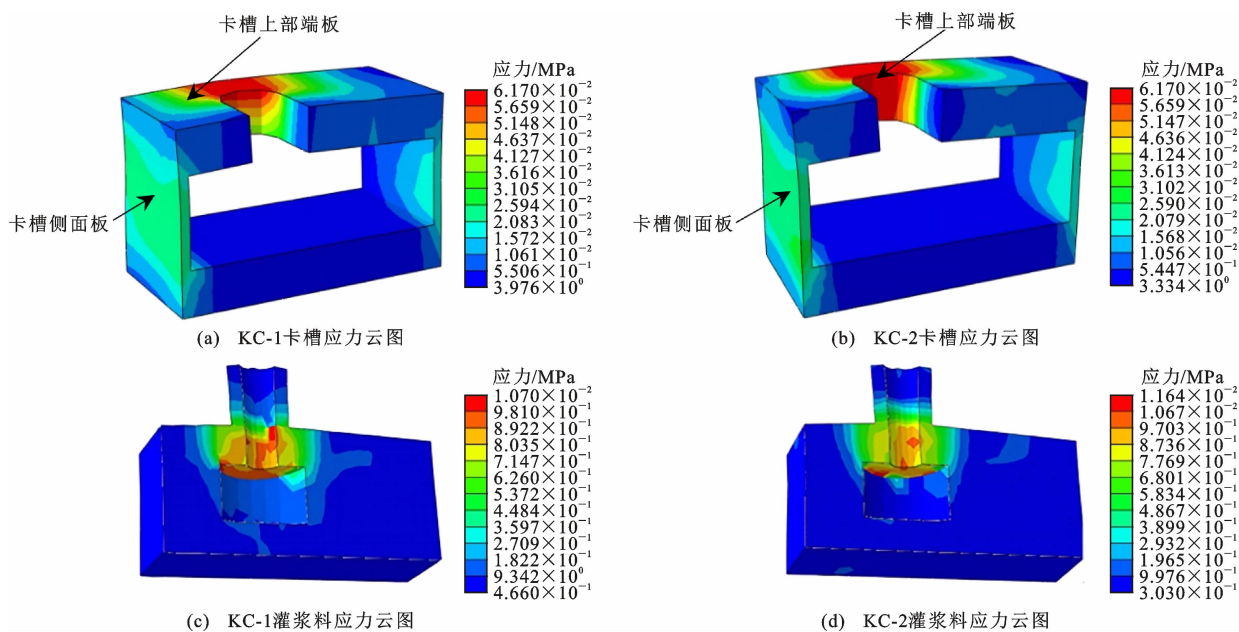


图 16 卡槽与灌浆料应力云图

Fig. 16 Stress nephogram of slot and grouting material

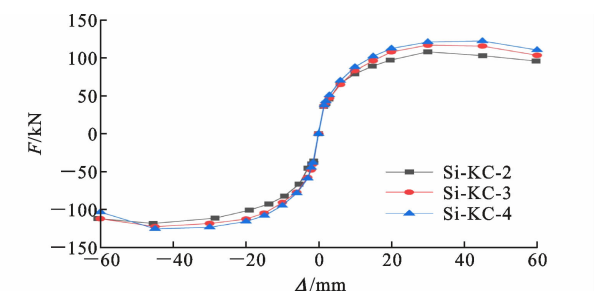


图 17 不同端板厚度的骨架曲线

Fig. 17 Skeleton curves with different end plate thicknesses

初始刚度也逐渐增加,且正向加载时,端板厚度对初始刚度的影响更为明显。这是由于正向加载时,位移加载的方向是由卡槽端推向另一端,随着卡槽端板厚度的增加,其塑性变形逐渐减小,从而增加了卡槽端的刚度。对比 3 个试件的峰值荷载可知,端板厚度从 20 mm 增加至 25 mm 和 30 mm 时,试件正向加载时的承载力从 110.0 kN 提高到了 117.0 kN 和 122.4 kN,分别提高了 6.4% 及 11.3%,说明端板刚度增加后,对灌浆料的破坏作用有所减小,最终提升了试件的承载力。

5 结 语

(1)本文提出的卡槽连接方式简化了梁柱节点构造,避免了节点区布筋复杂的状况,方便了节点区混凝土的浇筑。使用高强灌浆料浇筑的试件 KC-2 抗震性能与现浇试件相当,该连接方式能够较好应用于实际工程。

(2)节点 KC-1 的承载力与 XJ-1 相当,但由于 KC-1 卡槽内的混凝土强度较低,混凝土被压碎后,滞回曲线受到了钢筋滑移的影响,出现了明显的“捏缩”现象,节点刚度退化与耗能也不如现浇节点。

(3)相比于 XJ-1 和 KC-1,试件 KC-2 的承载力、耗能能力更好,在同级加载条件下的滞回曲线也更饱满,说明在卡槽内加入高强灌浆料后,其较高的强度以及较好的灌注密实度提升了节点的抗震性能。

(4)要提高节点的承载力,不仅要提高卡槽的强度,更需提高卡槽内灌浆料的强度;增加卡槽上部端板的厚度能够减小端板的应力集中及塑性变形,从而防止其上部混凝土或灌浆料被过早压溃,使试件的初始刚度及承载力得到一定的提高,设计时也可以通过在上部端板处加肋的方法来优化卡槽。与优化卡槽相比,提高节点区浇筑材料的强度对试件的抗震性能提升更为明显。

(5)由于 ABAQUS 软件对钢筋与混凝土两种材料之间的黏结滑移模拟效果较差,导致模拟结果中试件的承载力与耗能能力偏高,且加载后期滞回曲线没有明显的捏缩效应,但在骨架曲线以及试件破坏情况方面与试验结果吻合良好,整体上 ABAQUS 的模拟结果具有一定的参考价值。

参考文献:

References:

[1] 韩同银,杜命刚,尚艳亮,等. 产业化趋势下装配式建

- 筑发展策略研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(7): 106-112.
- HAN Tongyin, DU Minggang, SHANG Yanliang, et al. Research on the development strategy of prefabricated construction under industrialization trend[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(7): 106-112.
- [2] SUN H C, FANG Y W, YIN M G, et al. Research on the restrictive factors of vigorous promotion of prefabricated buildings in Yancheng under the background of "Double Carbon"[J]. Sustainability, 2023, 15(2): 1737.
- [3] LUO T, XUE X L, WANG Y N, et al. A systematic overview of prefabricated construction policies in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124371.
- [4] 王会, 方金强, 张兵. 国内装配式建筑研究热点与演进趋势: 基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. 科技和产业, 2022, 22(5): 208-217.
- WANG Hui, FANG Jinqiang, ZHANG Bing. Domestic prefabricated building research hotspot and evolution trend: visual analysis based on CiteSpace[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(5): 208-217.
- [5] 王昊, 周华, 任庆成, 等. 装配式结构连接技术研究动态与创新型节点连接[J]. 科学技术创新, 2023(15): 167-170.
- WANG Hao, ZHOU Hua, REN Qingcheng, et al. Research trends of prefabricated structural connection technology and innovative joint connection[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(15): 167-170.
- [6] 邢国华, 王志萌, 秦拥军, 等. 新型装配式混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 56(2): 23-33.
- XING Guohua, WANG Zhimeng, QIN Yongjun, et al. Experimental study on seismic behavior of new fabricated concrete beam-column joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 56(2): 23-33.
- [7] 张敏, 刘艳萍, 邱秀丽, 等. 装配式混凝土 U 型钢筋环扣连接技术应用研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 14-24.
- ZHANG Min, LIU Yanping, QIU Xiuli, et al. Application Research on Prefabricated Concrete U-shaped Reinforcement Buckle Connection Technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 14-24.
- [8] 龚诗雨, 陈楠, 蒋志桢, 等. 装配式建筑节点抗震性能研究[J]. 建材发展导向, 2022, 20(12): 88-90.
- GONG Shiyu, CHEN Nan, JIANG Zhizhen, et al. Research on seismic performance of prefabricated building joints[J]. Development Guide to Building Materials, 2022, 20(12): 88-90.
- [9] 赵娟, 焦丽明. 装配式建筑产业发展现状及对策[J]. 建筑科学, 2024, 40(6): 116-122.
- ZHAO Juan, JIAO Liming. Current situation and countermeasures of prefabricated building industry[J]. Building Science, 2024, 40(6): 116-122.
- [10] 孙业珍. 我国预制装配式建筑的现状与发展[J]. 工程与建设, 2022, 36(2): 285-286.
- SUN Yezhen. Present situation and development of prefabricated buildings in China[J]. Engineering and Construction, 2022, 36(2): 285-286.
- [11] 张锡治, 章少华. 基于构件标准化的装配式混合框架结构体系研发与应用[J]. 混凝土世界, 2021(5): 28-33.
- ZHANG Xizhi, ZHANG Shaohua. Research and application of prefabricated hybrid frame structure system based on component standardization[J]. China Concrete, 2021(5): 28-33.
- [12] 崔洪军, 朱嘉锋, 姚胜, 等. 装配式建筑框架节点研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 1-12.
- CUI Hongjun, ZHU Jiafeng, YAO Sheng, et al. Review of research on assembled building frame joints[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 1-12.
- [13] 顾鹏程. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 砖瓦, 2020(7): 66.
- GU Pengcheng. Research progress on basic performance of fabricated concrete frame joints[J]. Bricktile, 2020(7): 66.
- [14] 薛伟辰, 胡翔. 预制混凝土框架结构体系研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1241-1255.
- XUE Weichen, HU Xiang. Research progress on precast concrete frame structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(9): 1241-1255.
- [15] 高培楠, 邓扬, 李爱群, 等. 装配式混凝土框架结构连接节点抗震性能研究进展[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 171-185, 152.
- GAO Peinan, DENG Yang, LI Aiqun, et al. Review on seismic performance of connection joints of prefabricated concrete frame structures[J]. Industrial Construction, 2021, 51(2): 171-185, 152.
- [16] 卢义, 孟书灵, 张平, 等. 装配式混凝土框架节点

- 抗震研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(8): 65-70.
- LU Yi, MENG Shuling, ZHANG Ping, et al. Research progress on seismic performance of prefabricated concrete frame joints[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(8): 65-70.
- [17] 尹昌磊. 新型装配式混凝土梁柱 L 型筋连接节点抗震性能试验研究[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- YIN Changlei. Experimental study on seismic performance of new type of assembled concrete beam-column L-shaped steel joint[D]. Jinan: University of Jinan, 2021.
- [18] HA S S, KIM S H, LEE M S, et al. Performance evaluation of semi precast concrete beam-column connections with U-shaped strands [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(11): 1585-1600.
- [19] YAN Q S, CHEN T Y, XIE Z Y. Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves [J]. Engineering Structures, 2018, 155: 330-344.
- [20] LU Z W, HUANG J, DAI S B, et al. Experimental study on a precast beam-column joint with double grouted splice sleeves [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109589.
- [21] 蔡建国, 朱洪进, 冯 健, 等. 世构体系框架中节点抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1894-1901.
- CAI Jianguo, ZHU Hongjin, FENG Jian, et al. Experimental study on seismic behavior of middle joints of SCOPE system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(5): 1894-1901.
- [22] 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.
- [23] 黄灿灵. 预制预应力混凝土装配整体式框架结构(世构体系)抗震性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- HUANG Canling. Study on seismic behavior of pre-fabricated prestressed assembled monolithic concrete frame structure (scope system)[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [24] Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary: ACI 374.1-05 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [25] 混凝土结构设计规: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Technical specification for precast concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [26] 程学斌, 马 颖, 袁子淇. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土柱抗震数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(6): 146-152.
- CHENG Xuebin, MA Ying, YUAN Ziqi. Seismic numerical simulation analysis of reinforced concrete columns based on ABAQUS[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(6): 146-152.
- [27] 姚方宝, 关 群, 王浦东. 基于 ABAQUS 塑性损伤模型损伤因子的仿真分析[J]. 结构工程师, 2019, 35(5): 76-81.
- YAO Fangbao, GUAN Qun, WANG Pudong. Simulation analysis of damage factor based on ABAQUS damaged plasticity model[J]. Structural Engineers, 2019, 35(5): 76-81.
- [28] 刘晓旭. 装配式结构新型节点建模方法及耗能性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
- LIU Xiaoxu. Research on the modeling method and energy dissipation performance of new Joint in fabricated structure [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.