

## 预制混凝土梁柱型钢连接节点抗震性能有限元分析

李绍杰<sup>1</sup>, 郁有升<sup>1,\*</sup>, 陈述刚<sup>2</sup>, 安琦<sup>1</sup>, 李尊强<sup>3</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中海发展胶东公司, 青岛 266034; 3. 青岛华联装饰工程有限公司, 青岛 266042)

**摘要:**目前预制混凝土结构钢筋的连接方式大多为灌浆套筒连接, 现场施工复杂且灌浆质量不易保证。因此, 设计了一种预制混凝土梁柱型钢连接节点。为了研究该节点的抗震性能, 采用有限元软件建立了 7 个节点模型, 其中 1 个为现浇节点模型, 6 个为型钢连接节点模型, 通过在梁端施加低周往复荷载, 分析了节点的滞回曲线、骨架曲线、刚度等指标, 探究了梁的型钢含钢率、梁中型钢预埋长度变化对节点抗震性能的影响规律。结果表明: 与同等配筋的现浇结构相比, 型钢连接节点承载力更高; 梁的型钢含钢率为 2.65%~3.28% 时, 增加梁的型钢含钢率, 会提高节点极限承载力、刚度和延性; 梁中型钢预埋长度为 2~3.2 倍的梁中型钢截面高度时, 节点延性随着型钢预埋长度的增加而增加。

**关键词:** 预制混凝土结构; 型钢连接; 梁柱节点; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)03-0017-10

## Finite element analysis of the seismic performance of precast concrete beam-column joints connected by steel

LI Shaojie<sup>1</sup>, YU Yousheng<sup>1,\*</sup>, CHEN Shugang<sup>2</sup>, AN Qi<sup>1</sup>, LI Zunqiang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Jiaodong China Shipping Develop Co., Ltd., Qingdao 266034, China;

3. Qingdao Hualian Decoration Engineering Co., Ltd., Qingdao 266042, China)

**Abstract:** The precast concrete structures are mostly connected by sleeve grouting currently, which leads to complicated on-site construction and difficulties in ensuring the quality of grouting. Therefore, a precast concrete beam-column joint connected by steel is designed. In order to investigate the seismic performance of the joint, the finite element analysis software is utilized to establish seven joint models, including one cast-in-place joint model and six joint models connected by section steel, and indexes such as hysteretic curve, skeleton curve and stiffness of the joints are analyzed by applying low cyclic loads to the end of the beam. Additionally, the influence of both the section steel ratio of the beam and the embedded section steel length in the beam on the seismic performance of these joints is studied. The results show that compared with the cast-in-place structures of the same reinforcement level, the bearing capacity of the joint connected by section steel is higher; when the section steel ratio of the beam ranges from 2.65% to 3.28%, the ultimate bearing capacity, stiffness and

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020QE243)

作者简介: 李绍杰(1998—), 男, 山东滨州人。硕士, 研究方向为结构工程。E-mail: lsjsdut@163.com。

\* 通信作者: 郁有升(1976—), 男, 山东临沂人。博士, 教授, 主要从事钢结构方面的研究。E-mail: yuyousheng@126.com。

ductility of the joint will be improved by increasing the section steel ratio of the beam; when the embedded section steel length in the beam ranges from 2 to 3.2 times of the height of the section steel, the ductility of the joint increases with the increase of the embedded section steel length.

**Key words:** precast concrete structure; section steel connection; beam-column joint; seismic performance; finite element analysis

装配式混凝土结构建筑具有绿色低碳、质量可靠和施工效率高等优势,近几年得到了大力发展<sup>[1-3]</sup>。装配式混凝土结构梁柱节点的连接形式是影响结构抗震能力强弱的因素之一,目前其连接方式大多为灌浆套筒连接,虽然能达到等同现浇的水平,但也存在灌浆质量不易保证、施工复杂等问题<sup>[4-6]</sup>。通过型钢连接件过渡连接的装配式混凝土梁柱节点,具有质量可控、承载力高和耗能能力强等优势。因此,研究型钢连接节点对改善装配式混凝土结构的抗震性能有重要意义<sup>[7]</sup>。

近年来,国内外学者针对预制混凝土梁柱型钢连接节点进行了试验和有限元研究,并取得了一定的成果<sup>[8-11]</sup>。高向玲等<sup>[12]</sup>研究了一种采用型钢及外包混凝土连接的预制混凝土梁柱连接节点的抗震性能,比同样配筋的现浇结构有更高的承载力和刚度,滞回曲线更为饱满,改善了钢-混凝土组合梁柱节点的施工条件。程蓓等<sup>[13]</sup>研究了一种型钢间通过拼接板组合的型钢混凝土梁柱节点的抗震性能,发现装配式节点的承载能力大于现浇节点,但延性系数小于现浇节点。胡习兵等<sup>[14]</sup>采用钢结构连接方式实现了预制混凝土构件间的可靠连接,研究了混凝土和钢材强度等级等参数对节点静力力学性能的影响。郭小农等<sup>[15]</sup>设计了一种预制混凝土梁端预埋槽钢的梁柱连接节点,通过试验和数值分析研究了其承载力的影响因素,发现在一定范围内提高槽钢的预埋长度,可以明显提高节点的承载力。

国内外学者对预制混凝土型钢连接梁柱节点做了大量的研究,但鲜有学者对梁型钢含钢率、型钢预埋长度参数进行分析。为此,本文设计了一种通过型钢连接的预制混凝土梁柱节点,对7个节点模型进行有限元分析,与现浇节点模型进行对比,并探究了混凝土梁的型钢含钢率、梁的型钢预埋长度变化对节点的破坏模式、滞回性能等力学性能的影响。

## 1 节点形式

本文设计的预制混凝土梁柱型钢连接节点的形式如图1所示,由预制混凝土柱、预制混凝土梁、预埋H型钢及拼接板组成。具体组合方式为:在混凝土柱和梁中埋入H型钢,型钢翼缘和腹板处安装螺栓和拼接板相连,在型钢翼缘外侧设置抗剪栓钉增加型钢与混凝土的黏结力。该连接方式通过型钢连接件实现了构件间的螺栓连接,质量可控,提高了施工效率。

## 2 有限元模型建立

### 2.1 模型设计

本文依据《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[16]</sup>、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[17]</sup>和《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[18]</sup>,通过等强设计方法进行了试件设计。采用ABAQUS有限元软件建立了7个梁柱节点模型,包括1个现浇节点模型和6个型钢连接节点模型,混凝土柱截面尺寸

为700 mm×700 mm,长度为4000 mm;混凝土梁截面尺寸为400 mm×800 mm,长度为2000 mm;柱中型钢截面尺寸为HW300×300×10×15,长度为2000 mm;梁中型钢截面尺寸为H500×240×10×16,

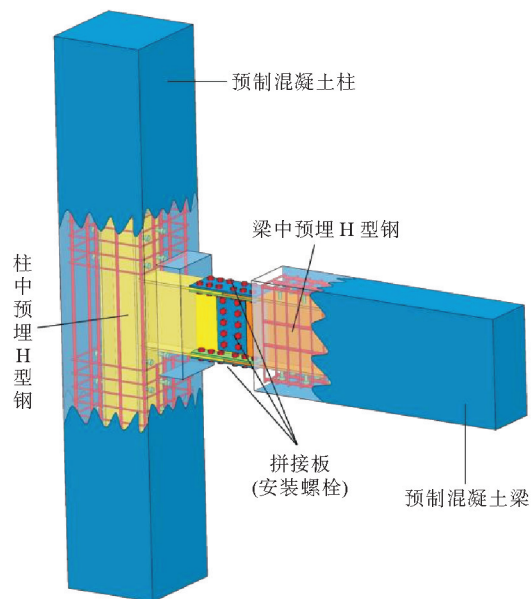


图1 节点构造

长度为 590 和 1290 mm;腹板拼接板尺寸为 420 mm×240 mm×8 mm;外侧和内侧翼缘拼接板尺寸分别为 550 mm×240 mm×12 mm 和 550 mm×100 mm×14 mm;型钢强度等级为 Q355,混凝土强度等级为 C40,纵筋、箍筋强度等级分别为 HRB400 和 HPB300,柱、梁纵筋配筋率为 1.20%和 0.91%。标准模型 ZP-1 几何尺寸构造如图 2 所示,以此为基本模型,拓展参数范围,进一步研究梁型钢含钢率、梁型钢预埋长度对节点抗震性能的影响,试件主要参数见表 1。

### 2.2 材料本构

模型中型钢本构采用三折线模型,钢筋、螺栓采用二折线模型。部分钢材力学性能参考文献[19]汇总于表 2。混凝土本构采用 ABAQUS 损伤塑性模型,其应力-应变曲线采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[17]</sup>附录 C.2 的本构关系,混凝土材料性能参数见表 3 所示。

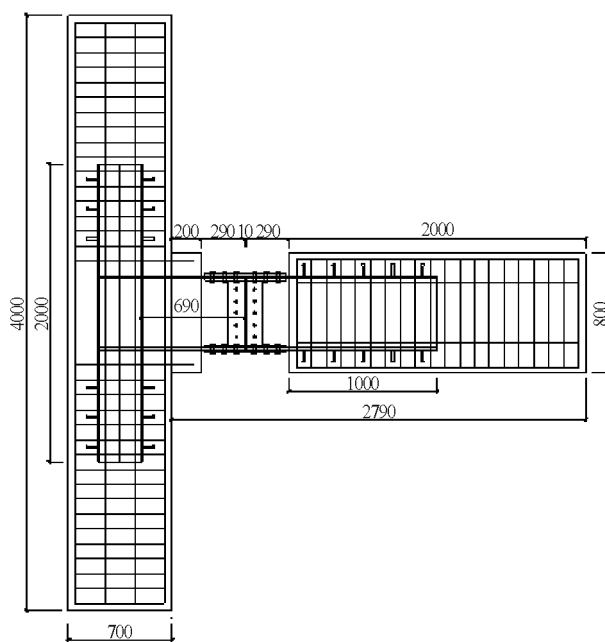


图 2 试件 ZP-1 尺寸(单位:mm)

表 1 有限元模型参数

试件编号	梁中型钢预埋长度/mm	梁中型钢截面尺寸/mm	型钢含钢率/%
XJ	—	—	—
ZP-1	1000	H500×240×10×16	2.96
ZP-2	1000	H500×200×10×16	2.71
ZP-3	1000	H400×240×10×16	2.65
ZP-4	1000	H600×240×10×16	3.28
ZP-5	1300	H500×240×10×16	2.96
ZP-6	1600	H500×240×10×16	2.96

表 2 钢材材料性能参数

材料名称	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	屈服应变/10 <sup>-2</sup>	极限应变/10 <sup>-2</sup>
型钢	360	554	17.50	25.00
螺栓	980	1100	0.48	1.36
纵筋	400	540	1.00	10.00
箍筋	300	420	1.00	10.00
拼接板	360	554	17.50	25.00

表 3 混凝土材料性能参数

强度等级	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
C40	26.80	2.39	32 500	0.20

### 2.3 单元类型及网格划分

模型中钢筋采用三维两节点桁架单元(T3D2),混凝土、型钢、螺栓以及拼接板均采用三维八节点缩减积分实体单元(C3D8R)。H 型钢网格尺寸取 20 mm,在翼缘和腹板厚度方向均匀划分两层网格;拼接板、

栓钉网格尺寸取 10 mm;混凝土网格尺寸分别取 100 (柱)和 50 mm(梁);钢筋网格尺寸为 100 mm;螺栓网格尺寸为 5 mm。

2.4 相互作用、边界条件及加载制度

H 型钢和钢筋采用“embedded”嵌入到混凝土之中,型钢和板、螺栓和拼接板之间采用面接触。在混凝土柱底、柱顶、梁端中心分别建立 3 个耦合点(RP-1、RP-2、RP-3),并将约束和荷载分别施加到耦合点上。加载制度参考美国抗震规范<sup>[20]</sup>,以位移控制加载,加载制度见表 4,模型加载方式如图 3 所示。

表 4 加载制度

荷载级别	位移幅值/mm	循环次数/次
1	±10.5	2
2	±14.0	2
3	±21.0	2
4	±28.0	2
5	±42.0	2
6	±56.0	2
7	±84.0	2
8	±112.0	2
9	±140.0	2
10	±168.0	2
11	±196.0	2

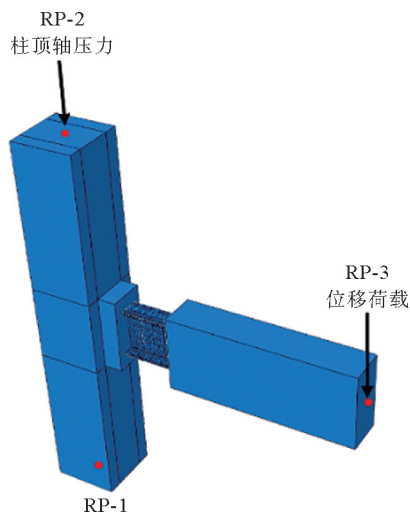


图 3 边界条件及加载

2.5 模型验证

为验证上述有限元模型建立的准确性,以文献[21]中的试件 JD-3(试验)作为本文有限元模型对比,具体尺寸、材料性能参数、边界条件等均按照文献中的设定,本文模型与原文献中 JD-3 的曲线对比如图 4 所示。图 4(a)为试验和有限元模拟的荷载-位移(F-Δ)滞回曲线对比,由图可知,有限元模拟与试验的滞回曲线吻合较好,有限元和 JD-3 得到的极限承载力分别为 102.7 和 110.3 kN,相差 6.9%。有限元滞回曲线的“捏缩”效应不明显,这是因为模型未考虑钢筋和混凝土、型钢和混凝土之间的黏结滑移。由图 4 (b)可知,两者均有弹性、弹塑性、破坏阶段。综上所述,采用本文方法建立的有限元模型是可行的,能较好地模拟节点的抗震性能。

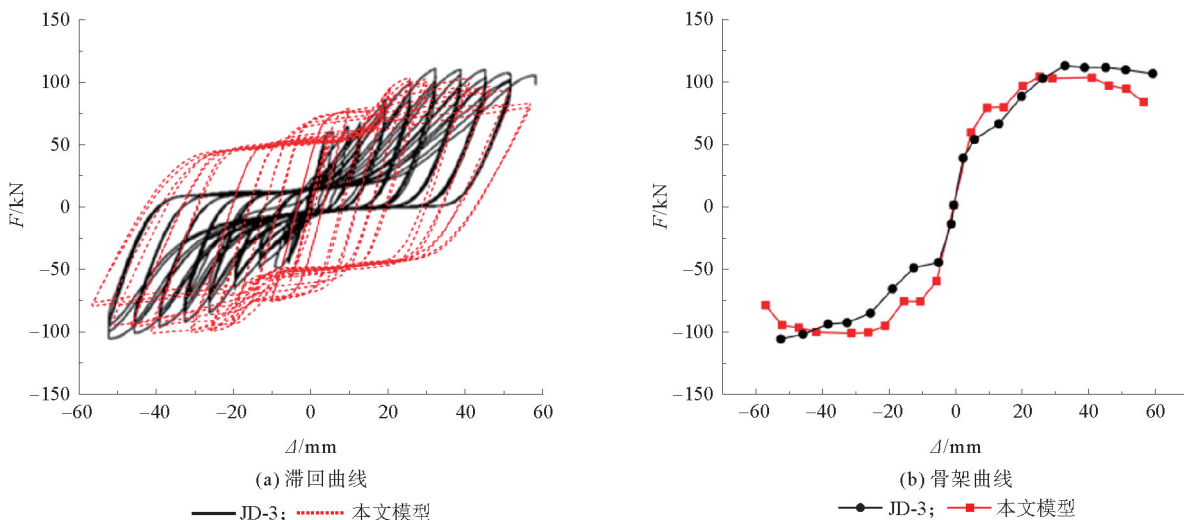


图 4 JD-3 与本文模型曲线对比

### 3 有限元结果分析

#### 3.1 型钢连接节点和现浇节点结果对比

图 5 为现浇节点(XJ)和型钢连接节点(ZP-1)的荷载-位移滞回曲线对比,图 6 为试件骨架曲线对比,可以看出,型钢连接节点的极限承载力高于现浇节点,其中正向加载提高了约 133%,反向加载提高了约 75%。表 5 为通过骨架曲线求得的 2 个试件的位移特征值,屈服位移采用 park<sup>[22]</sup>法确定,试件 ZP-1 的屈服位移和极限位移远大于现浇节点,说明型钢连接节点具有良好的抗震性能。

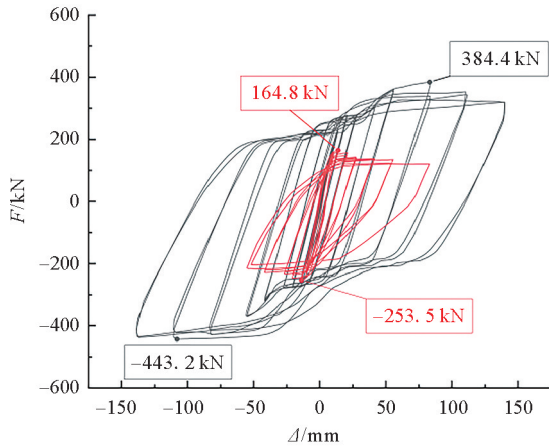


图 5 试件 ZP-1 与 XJ 的荷载-位移滞回曲线对比  
— ZP-1; — XJ

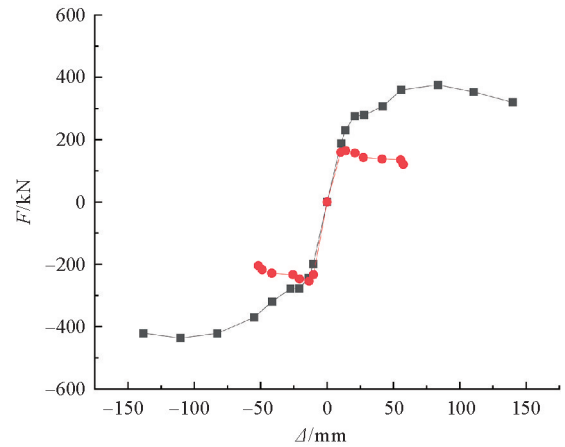
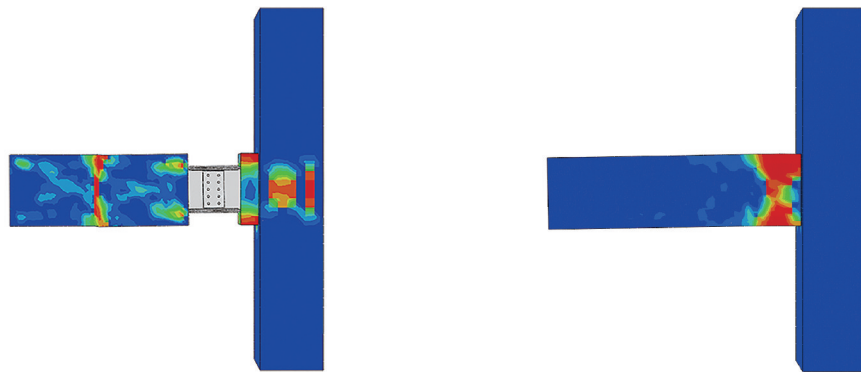


图 6 试件 ZP-1 与 XJ 的骨架曲线对比  
—■ ZP-1; —● XJ

图 7 为 2 种节点破坏形态对比,破坏模式均为部分混凝土达到抗压强度而失去承载能力,但破坏位置不同,试件 ZP-1 的混凝土破坏位置主要集中在节点核心区和混凝土梁中预埋型钢端部,而试件 XJ 主要集中在柱端。因试件 ZP-1 柱中型钢参与受力,在柱中心部位的混凝土也发生了较小的破坏。从破坏位置离柱端距离来看,试件 XJ 混凝土梁破坏位置在距离柱端处 500 mm,而试件 ZP-1 在距离柱端处 1500 mm。

表 5 位移特征值

试件	加载方向	屈服位移/mm	极限位移/mm
XJ	+	10.61	35.50
	-	-11.24	-49.21
ZP-1	+	38.96	139.86
	-	-50.13	-138.56



(a) 型钢连接节点

(b) 现浇节点

图 7 破坏形态对比

### 3.2 梁型钢含钢率的影响

试件 ZP-1—ZP-4 梁端的荷载-位移滞回曲线如图 8 所示,其型钢含钢率见表 1。从图 8 中可以看出,4 个试件的滞回曲线形状大致相同,曲线较为饱满;随着梁型钢含钢率的增加,滞回环面积有所增大。

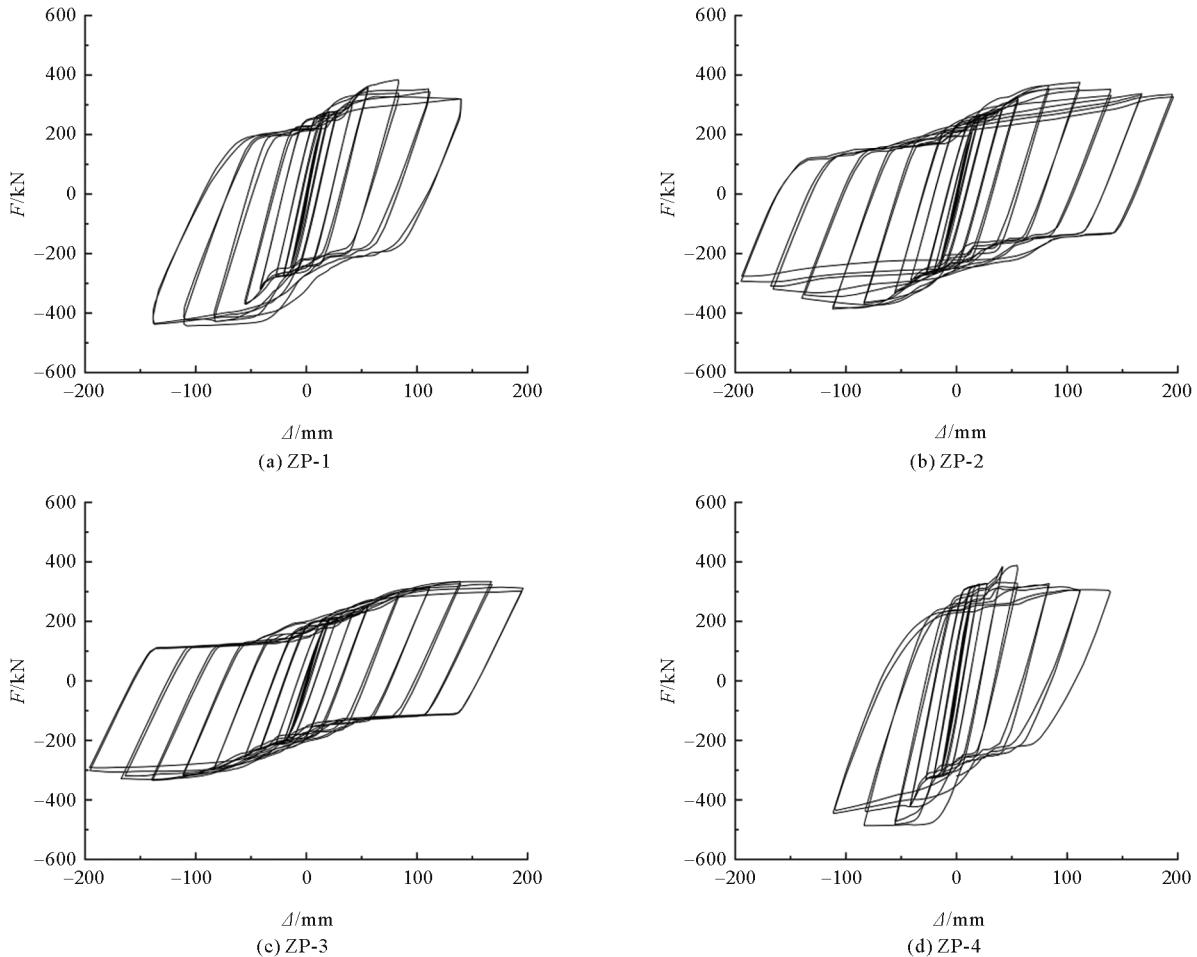


图 8 试件 ZP-1—ZP-4 的滞回曲线

试件 ZP-1—ZP-4 的骨架曲线如图 9 所示,可以看出,4 条曲线均为 S 形。在加载初期,荷载和位移呈线性关系,4 条曲线斜率相差不大;随着位移的增加,骨架曲线斜率不断减小;试件屈服后,曲线斜率进一步变小;达到峰值荷载之后,随着梁端位移不断增加,斜率变为负值,节点的承载力不断下降,直到试件破坏。通过骨架曲线可以看出,梁的型钢含钢率越大,节点的峰值荷载越大,峰值位移越小。

试件特征点的计算结果见表 6,其中:极限荷载为峰值荷载的 85%,极限位移为极限荷载对应的位移,延性系数为极限位移和屈服位移比值。从表中可以看出,试件 ZP-4 的极限承载力(峰值荷载,为正方向和负向加载下的平均值)比 ZP-3 增

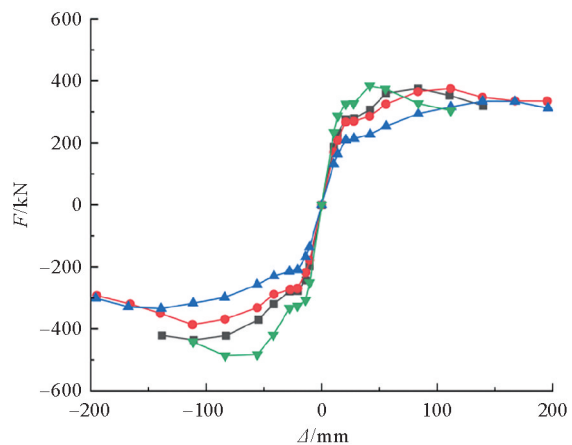


图 9 试件 ZP-1—ZP-4 的骨架曲线

—■— ZP-1; —●— ZP-2; —▲— ZP-3; —▼— ZP-4

加了 101.03 kN。梁的型钢含钢率从 2.65% 增加到 3.28%，节点的极限承载力提高了 30.23%。4 个试件的延性系数均大于 2，说明试件有良好的变形能力和抗震性能，且梁的型钢含钢率越大，试件延性越好。

表 6 试件特征值

试件编号	加载方向	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	峰值位移/mm	峰值荷载/kN	极限位移/mm	极限荷载/kN	延性系数
ZP-1	+	38.96	300.87	83.46	375.51	139.86	319.40	3.18
	-	-50.13	-376.41	-110.69	-436.73	-138.56	-421.44	
ZP-2	+	50.47	310.46	111.53	375.13	195.15	334.96	3.09
	-	-55.57	-330.79	-111.92	-386.29	-158.28	-328.34	
ZP-3	+	72.24	277.66	139.22	334.04	195.95	311.76	2.75
	-	-69.92	-278.02	-139.03	-334.47	-195.59	-301.10	
ZP-4	+	18.86	314.34	41.65	383.95	84.03	326.36	3.50
	-	-43.92	-429.39	-83.57	-486.62	-111.32	-442.25	

试件的刚度退化曲线如图 10 所示，在往复荷载作用下，各组试件的刚度均有明显的退化现象。通过对比可知，在加载前期，含钢率越大的试件刚度越大，加载后期 4 个试件的刚度相差不大。试件 ZP-4 初始刚度为 23.22 kN/mm，试件 ZP-3 初始刚度为 12.83 kN/mm，相差 10.39 kN/mm，梁的型钢含钢率增加 0.63%，试件的初始刚度增加了约 81%。增加梁的含钢率可以提高试件的初始刚度。

耗能能力是反映结构抗震能力的重要因素，图 11 为 4 个试件的耗能系数-循环次数曲线，体现了节点在加载过程中的耗能能力。随着循环次数的增加，含钢率不同的试件，耗能系数整体上呈阶梯型增长的变化趋势，在试件破坏之前，试件 ZP-4 的单个耗能系数始终高于其他 3 个试件。通过对比，在同一循环次数条件下，试件 ZP-4 的耗能能力最强，试件 ZP-3 的耗能能力最弱，型钢含钢率越大的试件其耗能能力越强。

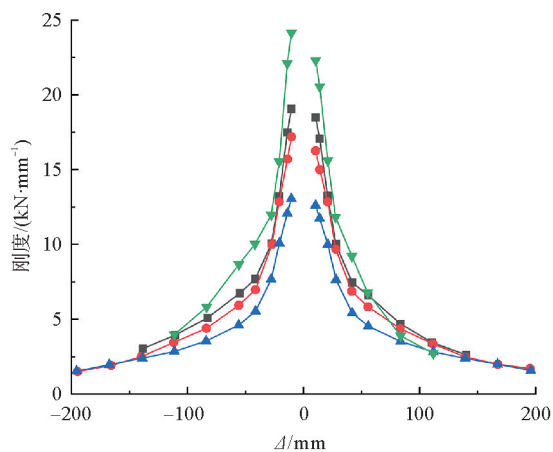


图 10 试件 ZP-1—ZP-4 的刚度退化曲线  
 —■— ZP-1; —●— ZP-2; —▲— ZP-3; —▼— ZP-4

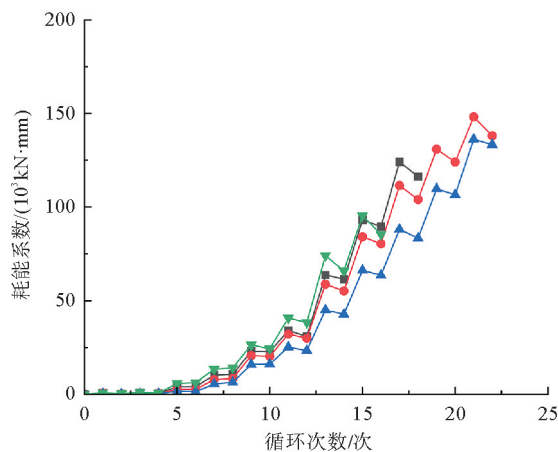


图 11 试件 ZP-1—ZP-4 的耗能系数  
 —■— ZP-1; —●— ZP-2; —▲— ZP-3; —▼— ZP-4

### 3.3 梁中型钢预埋长度的影响

图 12 为试件 ZP-1、ZP-5、ZP-6 的荷载-位移滞回曲线，其中 ZP-1 型钢预埋长度为型钢梁截面高度的 2 倍、ZP-5 为 2.6 倍、ZP-6 为 3.2 倍。从图中可以看出，试件的滞回曲线形状大致相同，在加载前期，试件均处于弹性状态，荷载随位移增加而线性增加。

试件的骨架曲线如图 13 所示，试件特征值的计算结果见表 7。型钢预埋长度从 2 倍型钢截面高度增加到 2.6 倍时，节点的峰值荷载、峰值位移、极限承载力、极限位移和延性均有大幅度的提升，其中极限承

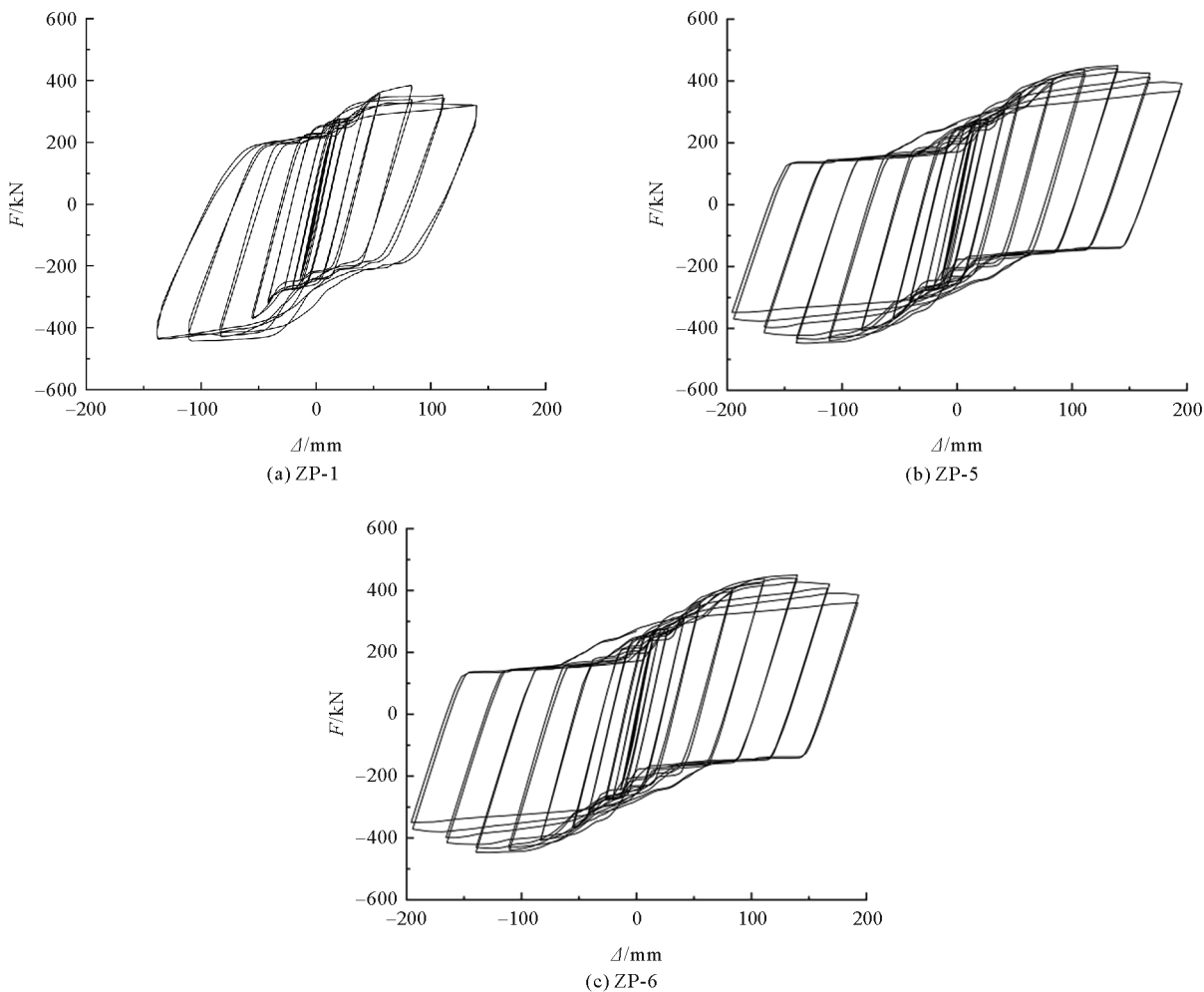


图12 试件 ZP-1、ZP-5、ZP-6 的荷载-位移滞回曲线

载力从 406.12 kN 提升至 448.28 kN, 增长约 10.37%, 主要原因是随着型钢预埋长度增加, 型钢和混凝土之间的黏结力会加强。试件 ZP-5 和 ZP-6 曲线几乎一致, 型钢预埋长度从 2.6 倍型钢截面高度增加到 3.2 倍时, 并没有给试件性能带来大幅度的提升。由图 13 可以发现, 型钢预埋长度对试件加载前期的承载力影响很小。

试件的刚度退化曲线如图 14 所示。3 条曲线趋势基本一致。计算得到的初始刚度分别为 18.77、18.74 和 18.78 kN/mm, 3 个试件的初始刚度大致相同。图 15 为 3 个试件的耗能系数-循环次数曲线, 随着循环次数的增加, 型钢预埋长度大小不同的试件耗能系数相差不大。说明在不考虑型钢和混凝土滑移作用时, 增加混凝土梁中型钢预埋长度并不能显著提高试件的耗能能力。

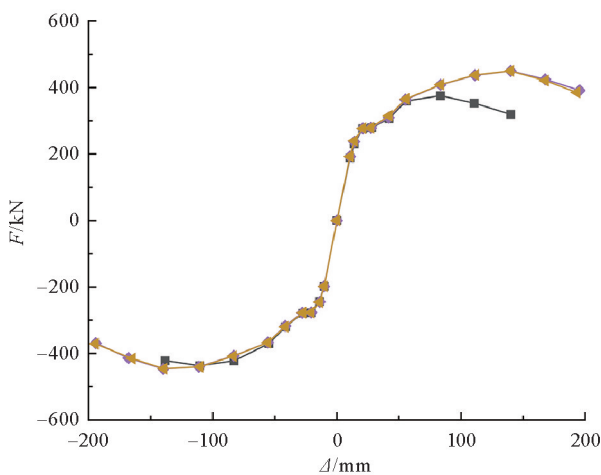


图13 试件ZP-1、ZP-5、ZP-6的骨架曲线  
—■— ZP-1; —◆— ZP-5; —▲— ZP-6

说明在不考虑型钢和混凝土滑移作用时, 增加混凝土梁中型钢预埋长度并不能显著提高试件的耗能能力。

表7 试件特征值

试件编号	加载方向	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	峰值位移/mm	峰值荷载/kN	极限位移/mm	极限荷载/kN	延性系数
ZP-1	+	38.96	300.87	83.46	375.51	139.86	319.40	2.99
	-	-58.13	-376.41	-110.69	-436.73	-138.56	-421.44	
ZP-5	+	64.84	378.84	139.86	449.83	195.52	391.44	3.03
	-	-62.07	-376.44	-139.90	-446.67	-188.09	-379.67	
ZP-6	+	64.03	378.60	139.83	450.02	193.27	385.36	3.05
	-	-61.45	-375.60	-139.55	-445.95	-189.45	-379.06	

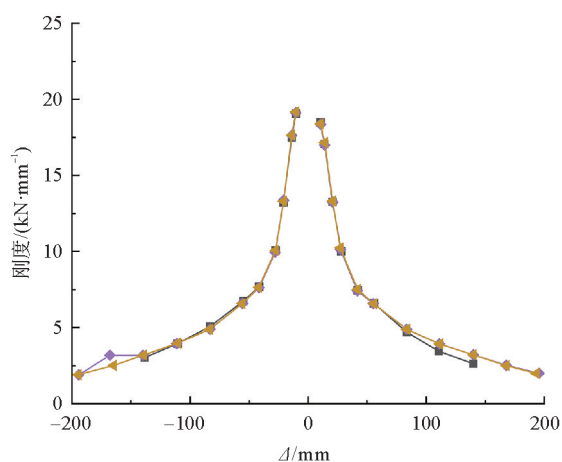


图14 试件ZP-1、ZP-5、ZP-6的刚度退化曲线

—■— ZP-1; —◆— ZP-5; —▲— ZP-6

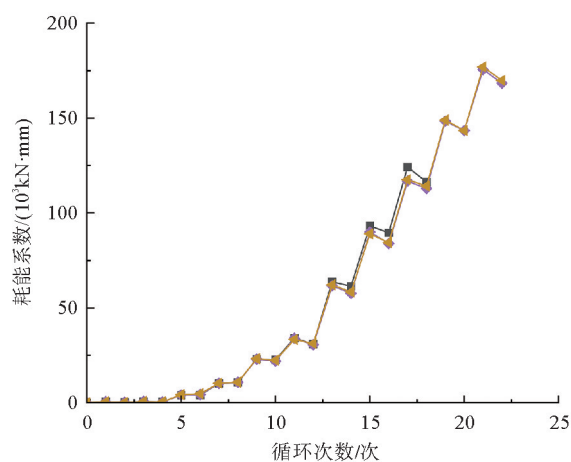


图15 试件ZP-1、ZP-5、ZP-6的耗能系数

—■— ZP-1; —◆— ZP-5; —▲— ZP-6

## 4 结论

本文设计了一种预制混凝土梁柱型钢连接节点,研究了其在低周往复荷载作用下的抗震性能,分析了破坏模式、滞回曲线、骨架曲线及刚度退化等特性,探究了不同参数对节点抗震性能的影响规律,得出主要结论如下:

1) 与同样配筋的现浇节点相比,型钢连接节点具有更高的承载力、更大的屈服位移和极限位移;在破坏位置上,型钢连接节点的破坏位置离柱端更远,能实现塑性铰的外移,显著改善了节点的抗震性能。

2) 混凝土梁的型钢含钢率从 2.65% 增加到 3.28%,节点的极限承载力提高了 30.23%,初始刚度提高了 81%,延性系数提高了 27%。增加梁的型钢含钢率会提高节点的抗震性能。

3) 梁中型钢预埋长度从梁中型钢截面高度的 2 倍增加到 2.6 倍,节点的极限承载力提高了 10.37%;型钢预埋长度从型钢截面高度的 2.6 倍增加到 3.2 倍,节点的极限承载力几乎没有变化,初始刚度和耗能系数没有明显提高。建议梁中型钢预埋长度取梁中型钢截面高度的 2.6 倍。

## 参考文献(References):

- [1] ROGAN A L, LAWSON R M, BATES-BRKLJAC N. Value and benefits assessment of modular construction[M]. London: The Steel Construction Institute, 2000.
- [2] LACEY A W, CHEN W, HAO H, et al. Structural response of modular buildings: An overview[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 16: 45-56.
- [3] 吴柯娴, 王竹君, 金伟良, 等. 装配式混凝土结构可持续成本量化分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 133-144.  
WU Kexian, WANG Zhujun, JIN Weiliang, et al. Quantitative analysis of sustainable cost of prefabricated concrete structures[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 133-144.

- [4] 郑清林,王霓,陶里,等. 套筒灌浆缺陷对装配式混凝土柱抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(5):75-83.  
ZHENG Qinglin,WANG Ni,TAO Li,et al. Experimental study on effects of sleeve grout defects on seismic performance of assembled concrete columns[J]. China Civil Engineering Journal,2018,51(5):75-83.
- [5] 李向民,高润东,许清风,等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(7):52-56.  
LI Xiangmin,GAO Rundong,XU Qingfeng,et al. Experimental study on the influence of grouting defect on joint strength of grout sleeve splicing of rebars[J]. Building Structures,2018,48(7):52-56.
- [6] 张祥辉,郁有升. 钢筋灌浆套筒连接局部失效对装配式剪力墙承载力影响的有限元研究[J]. 青岛理工大学学报,2022,43(5):35-41.  
ZHANG Xianghui,YU Yousheng. Finite element study on the influence of local failure of reinforced grouting sleeve connection on the bearing capacity of assembled shear wall[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2022,43(5):35-41.
- [7] 孙艳宁,李树忱,孙国富,等. 装配式钢-混凝土组合结构抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(5):61-66.  
SUN Yaning,LI Shuchen,SUN Guofu,et al. Experimental study on shear performance of assembled steel-concrete composite structures[J]. Building Structures,2021,51(5):61-66.
- [8] KULKARNI S A,BING L,YIP W K. Finite element analysis of precast hybrid-steel concrete connections under cyclic loading[J]. Steel Construction,2008,64(2):190-201.
- [9] NGO T T,PHAM T M,HAO H. Effects of steel fibres and prestress levels on newly proposed exterior joints using SFRC and CFRP bolts[J]. Engineering Structures,2020,205:110083.
- [10] WU C L,LIU J M,TAN W Y,et al. Seismic behavior of composite interior joints of prefabricated H-shaped steel reinforced concrete column-steel beam[J]. Structures,2020,23:558-572.
- [11] SENTURK M S,PUL S,ILKI A,et al. Development of a monolithic-like precast beam-column moment connection; Experimental and analytical investigation[J]. Engineering Structures,2020,205(C):110057.
- [12] 高向玲,徐龙标,李杰,等. 装配式混凝土梁柱节点试验及受力性能分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2016,44(10):47-52.  
GAO Xiangling,XU Longbiao,LI Jie,et al. Test and mechanical performance analysis of prefabricated concrete beam-column joints[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2016,44(10):47-52.
- [13] 程蓓,苗小燕,徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(12):94-98.  
CHENG Bei,MIAO Xiaoyan,XU Jianwei. Experimental study on a new type of column-to-beam joints in assembled reinforced concrete frame structures[J]. Industrial Construction,2015,45(12):94-98.
- [14] 胡习兵,陈瑞,曾裕林,等. 型钢连接装配式混凝土梁柱节点力学性能研究[J]. 建筑科学,2021,37(11):8-14.  
HU Xibing,CHEN Rui,ZENG Yulin,et al. Study on mechanical properties of prefabricated concrete beam-column joints connected by steel[J]. Building Science,2021,37(11):8-14.
- [15] 郭小农,高舒羽,裴进玉,等. 预制混凝土梁端预埋槽钢节点静力性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(9):1258-1264.  
GUO Xiaonong,GAO Shuyu,PEI Jinyu,et al. Experimental study on static performance test of embedded channel joints of precast concrete beams[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition),2017,45(9):1258-1264.
- [16] JGJ 138—2016,组合结构设计规范[S].  
JGJ 138—2016,Code for design of composite structures[S].
- [17] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010,Code for design of concrete structure[S].
- [18] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].  
GB 50017—2017,Introduction of specification for design of steel structure[S].
- [19] 张孝栋. 钢结构“互”型装配式刚性节点的试验及有限元研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2016.  
ZHANG Xiaodong. Experiment and finite element study of "Hu" assembly rigid connection[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2016.
- [20] ANSI/AISC 341-10,Seismic provisions for structural steel buildings[S].
- [21] 马富强. 预制混凝土梁柱型钢连接节点抗震性能研究[D]. 柳州:广西科技大学,2020.  
MA Fuqiang. Study on seismic behavior of precast concrete beam-column steel joints[D]. Liuzhou:Guangxi University of Science and Technology,2020.
- [22] ELNASHAI A S,BRODERICK B M,DOWLING P J. Earthquake-resistant composite steel/concrete structures[J]. Structural Engineer,1995,73(8):121-132.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)