

# 预制混凝土梁端预埋槽钢节点静力性能试验

郭小农, 高舒羽, 裴进玉, 罗晓群

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 预制混凝土梁端预埋槽钢节点是一种用于装配式耗能减震结构体系的新型节点. 完成了 12 根两端预埋槽钢的预制混凝土梁静力承载力试验, 考虑了槽钢预埋深度、梁端箍筋间距、梁跨中空腔和槽钢偏心等因素对节点承载力的影响. 试验得到了槽钢撬出破坏和梁端部混凝土压碎两种破坏模式. 试验结果表明, 节点承载力随着槽钢预埋深度的增加而增加; 梁端部箍筋间距加密能明显提高节点承载力和变形能力; 梁跨中设置空腔对的节点承载力和变形能力影响较小; 槽钢偏心对梁产生额外的扭矩, 降低了节点的承载力和变形能力. 建立了数值分析模型, 将数值分析结果和试验结果进行了对比, 二者吻合良好, 验证了数值模型的有效性, 为后续研究奠定了基础.

**关键词:** 装配式结构; 预制混凝土梁; 梁端节点; 预埋槽钢  
**中图分类号:** TU512.4 **文献标志码:** A

## Experimental Study on Static Performance of Embedded Channel Joints of Precast Concrete Beams

GUO Xiaonong, GAO Shuyu, BUI Tiennoc, LUO Xiaoqun  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Embedded channel joint of precast concrete beam is a new type of joint system which can be applied to prefabricated energy dissipation and seismic reduction systems. Static bearing tests of 12 specimens were carried out, which considered the influence of the length of the embedded channel steel, the stirrup spacing, the cavity in the midspan of the beam, and the eccentricity of the channel steel. Two kinds of failure modes were obtained: the lever-out of the channel steel and the crushing of the beam-end concrete. The test results revealed the following: the bearing capacity of the joint increased with the increase of the length of the embedded channel steel; stirrup densification could significantly improve the bearing and deformation capacity;

the cavity in the midspan of the beam had little influence on the bearing and deformation capacity of the joint; the eccentricity of the channel steel led to the additional torsion, which lowered the capacity of the joint. Finite element models (FEM) were established, and they were verified by comparing the test results and the FEM results, which has built a solid foundation for further research.

**Key words:** prefabricated structure; precast concrete beam; beam-end-joint; embedded channel steel

由于具有绿色环保、建造周期短、建造效率高和建筑质量易于保证等诸多特点, 装配式建筑在我国得到了大力推广, 其应用越来越广泛<sup>[1-4]</sup>. 装配式耗能减震结构体系是近年来提出的一种新型装配式结构体系; 该体系中, 柱采用预制型钢混凝土, 梁采用预制钢筋混凝土梁; 梁柱之间均为铰接; 结构的抗侧刚度通过防屈曲约束支撑或剪力墙来提供. 针对这种结构体系, 研发了一种预制混凝土梁端预埋槽钢节点. 在预制钢筋混凝土梁端预埋一截槽钢, 同时在预制钢骨混凝土柱上预留一截槽钢, 通过高强螺栓将预制梁、柱连接起来. 这种节点施工速度快、施工质量好, 对我国目前大力推广工业化建筑具有较大意义.

装配式结构的构件类型丰富, 很多学者研发了与之相应的节点. 汪青杰等<sup>[5]</sup>对钢管混凝土柱与型钢梁装配式节点进行了抗震分析. 李向民等<sup>[6]</sup>设计并试验了一种新型预制装配式混凝土框架高效延性节点. 高杰等<sup>[7]</sup>实验研究了装配式梁-柱-叠合楼板中节点的抗震性能. 徐姝亚等<sup>[8]</sup>对装配式套筒连接 CFST 柱-RC 梁节点的抗震性能进行了研究. 张爱林等<sup>[9]</sup>设计了装配式方钢管柱桁架梁节点并进行单调加载试验研究.

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0701603)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空间钢结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 罗晓群(1976—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为空间钢结构. E-mail: luoxiaoqun@tongji.edu.cn

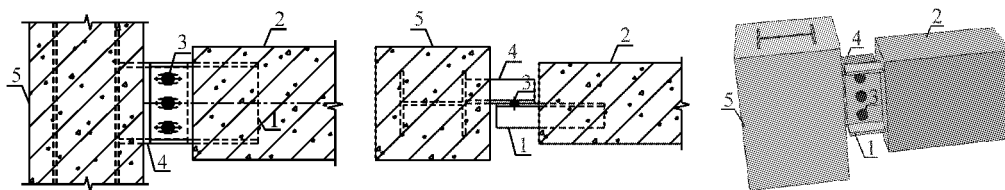
然而,由于预制混凝土梁端预埋槽钢节点,形式较新,目前研究较少,仅郭小农等<sup>[10]</sup>进行了有限元模拟,但缺乏相应的试验研究与理论分析.为探究预制混凝土梁端预埋槽钢节点的破坏模式和节点承载力,本文对 12 根预制混凝土梁的承载力性能进行试验研究,为该节点后续的设计与应用提供了参考.

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

预埋槽钢节点的典型示意图见图 1,通过高强螺

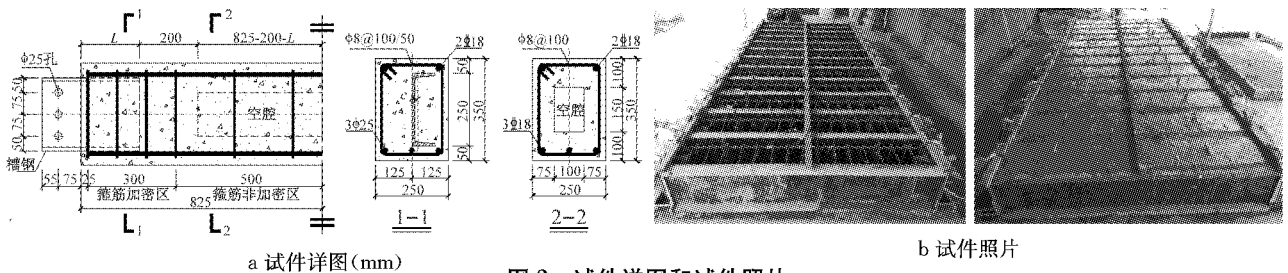
栓将预埋于预制混凝土梁中的槽钢和预埋于预制钢筋混凝土柱中的槽钢连接起来.设计了 12 根预制混凝土梁试件,试件详图和试件浇筑过程见图 2.所有梁截面尺寸均为 250 mm×350 mm、跨度为 1.65 m;混凝土强度等级为 C30;纵向钢筋采用直径为 18 mm 的 HRB400;箍筋采直径为 8 mm 的 HRB300;预埋槽钢型号采用普通槽钢 25b 和 25a,钢材牌号为 Q235B;预制混凝土梁端预埋槽钢外伸长度 130 mm;梁端槽钢与柱端端板采用 3 个 10.9 级的 M24 高强螺栓进行连接.



1—预埋槽钢;2—预制钢筋混凝土梁;3—高强螺栓;4—连接槽钢;5—型钢混凝土柱

图 1 预埋槽钢节点示意<sup>[10]</sup>

Fig.1 Embedded channel joint configurations



a 试件详图(mm)

b 试件照片

图 2 试件详图和试件照片

Fig.2 Details and pictures of specimens

所有试件根据槽钢预埋深度、梁端箍筋间距、梁跨中空腔和槽钢偏心的不同共分为 4 个系列. A 系列试件考虑槽钢预埋深度的不同分为 100 mm、200 mm 和 300 mm 三种情况; B 系列试件考虑梁端箍筋间距的不同分为 100 mm 和 50 mm 两种情况; C 系列试件考虑梁跨中空腔的影响分为有空腔和无空腔两种情况; D 系列试件研究槽钢偏心的影响分为偏心距 0 和 20 mm 两种情况. 表 1 给出所有试件的具体信息.

### 1.2 加载方案

试验主要考察预制混凝土梁端预埋槽钢节点的受剪承载性能. 为保证试验的可控性和对场地的适应性,设计了自平衡反力架,如图 3 所示. 反力架的立柱上设置端板,端板和反力架刚性连接. 连接槽钢焊于端板上,并设置加劲肋加固. 为方便试件安装,在连接槽钢上开长圆孔. 预制混凝土梁端预埋槽钢与反力架立柱上的连接槽钢采用 3M24 高强螺栓连

表 1 试件信息表

Tab.1 Information of Specimens

试件编号	高强螺栓	槽钢型号	槽钢预埋长度 L/mm	槽钢偏心 c/mm	箍筋间距 s/mm	跨中空腔
A100-1	3M24	普槽 25b	100	0	100	无
A100-2	3M24	普槽 25b	100	0	100	无
A200-1	3M24	普槽 25b	200	0	100	无
A200-2	3M24	普槽 25b	200	0	100	无
A300-1	3M24	普槽 25b	300	0	100	无
A300-2	3M24	普槽 25a	300	0	100	无
B200-1	3M24	普槽 25b	200	0	50	无
B200-2	3M24	普槽 25b	200	0	50	无
C200-1	3M24	普槽 25b	200	0	100	有
C200-2	3M24	普槽 25b	200	0	100	有
D200-1	3M24	普槽 25b	200	20	100	无
D200-2	3M24	普槽 25b	200	20	100	无

接. 100 t 千斤顶放置于梁跨中,并进行竖向加载. 初期采用力控制进行加载,每一个加载等级为 10 kN.

当荷载-位移曲线呈现出塑性特征时,采用位移控制进行加载.为了得到试件的完整试验响应,每级荷载加载完后持续 5 min.

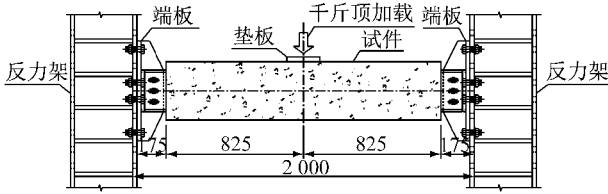


图 3 试验加载装置示意图(mm)  
Fig.3 Loading system (mm)

### 1.3 测点布置

所有试件采用相同的测点布置方案.图 4 给出试件的位移测点布置方案.位移计 D1~D8 用于测量梁端截面的相对转角;位移计 D9~D10 用于测量梁的跨中侧向位移;位移计 D11 用于测量梁跨中竖向位移.为了监测在加载过程中槽钢,在槽钢腹板表面布置了 1 个应变花 H1,在槽钢上下翼缘布置了 2 个纵向应变片 P1 和 P2,如图 5 所示.为了监测纵向钢筋上的应变发展情况,在负钢筋的上表面布置了纵向应变片 P5、P7 和 P9;在正钢筋的下表面布置了纵向应变片 P6、P8 和 P10,如图 6 所示.

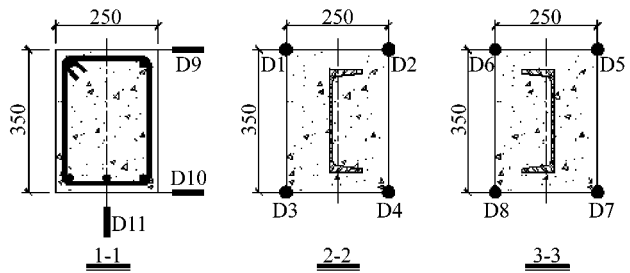
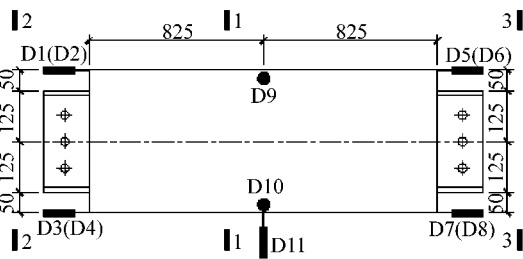


图 4 位移测点布置图(mm)

Fig.4 Displacement arrangement (mm)

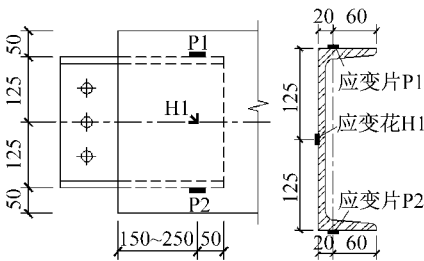


图 5 槽钢应变片布置(mm)

Fig.5 Strain arrangement of channel steel (mm)

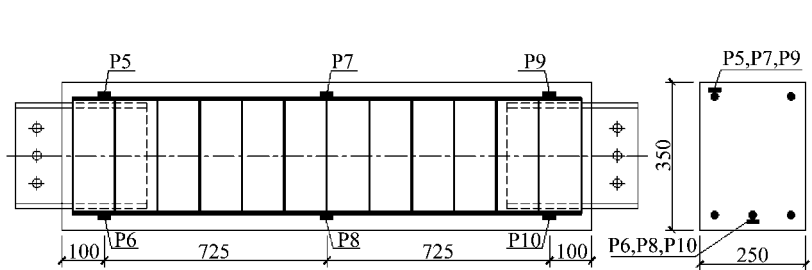


图 6 纵向钢筋应变片布置

Fig.6 Strain arrangement of steel reinforcement

## 2 试验结果及分析

### 2.1 材性试验

首先进行材性试验.混凝土试块按《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行制作,通过混凝土抗压强度和受压弹性模量试验,测得混凝土的立方体试块抗压强度平均值为 29.10 MPa,弹性模量平均值为 33 776 MPa,如表 2 所示.钢材拉伸试样分别在同批次槽钢、纵筋和箍筋上取样,共制作 7 个.钢材拉伸试验结果平均值如表 2 所示.拉伸试样拉断后的照片如图 7 所示.

### 2.2 试验现象简述

根据试验过程中混凝土的裂缝发展情况,可将

表 2 材性试验结果

Tab.2 Material properties

类型	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa
槽钢	325.57	558.80	/	205 715
纵筋	475.01	680.17	/	202 218
箍筋	540.14	756.48	/	216 440
混凝土	/	/	29.10	33 776

试件的变形过程大致分为 4 个阶段.第 1 阶段,当荷载达到 P1 时,梁跨中出现第一条垂直裂缝,随着荷载的增加,梁上裂缝的数量、长度和宽度都有发展,裂缝分布的范围向梁两端扩展,裂缝的延伸从开始的垂直方向变为向加载点略有倾斜;第 2 阶段,当荷载达到 P2 时,梁端槽钢下面混凝土出现裂缝,并迅速向梁侧表面发展;第 3 阶段,当荷载达到 P3 时,梁

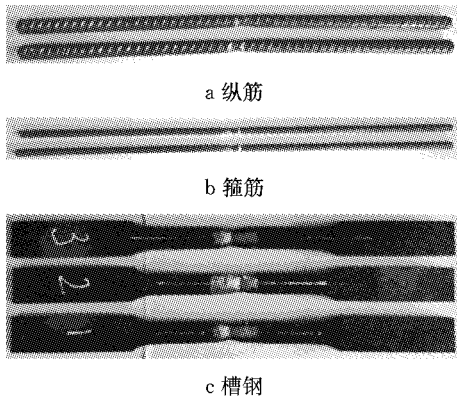


图 7 破坏的拉伸试样

Fig.7 Failure modes of tensile sample

跨内混凝土裂缝数量已不再增加,而随着荷载增大,裂缝宽度和长度不断增大;第 4 阶段,荷载达到试件极限承载力  $P_u$  发生破坏.试件的最终破坏模式有槽钢撬出破坏、梁端部混凝土压碎和跨中受拉钢筋屈服 3 种.表 3 给出了所有节点试件破坏模式、不同变形阶段对应的荷载以及最终挠度  $D_u$  (即图 4 中 D11 的读数).图 8 给出了部分试件破坏的照片.

2.3 试验结果分析

图 9 给出了 A 系列试件跨中竖向荷载-位移曲线(D11).由图 9 和表 3 可知:试件的极限承载力随着槽钢预埋深度的增加而增加,但增加幅度逐渐变

表 3 试验结果汇总

Tab.3 Test results

试件编号	破坏模式	$P_1$ /kN	$P_2$ /kN	$P_3$ /kN	$P_u$ /kN	$D_u$ /mm
A100-1	梁右端混凝土压碎,槽钢撬出	100	150	180	232.7	18.79
A100-2	梁右端混凝土压碎,槽钢撬出	100	150	190	234.3	22.86
A200-1	梁右端混凝土压碎,槽钢有较明显的转动	80	230	260	291.7	38.83
A200-2	梁右端混凝土压碎,槽钢有较明显的转动	80	230	260	293.3	34.53
A300-1	梁右端混凝土压碎,槽钢有明显的转动	100	260	290	331.5	27.52
A300-2	梁两端混凝土压碎、右端更为严重,槽钢有明显的转动	100	250	280	318.0	44.94
B200-1	梁右端混凝土剪压破坏,槽钢有明显的转动	80	350	—	419.5	42.92
B200-2	梁右端混凝土剪压破坏,槽钢有明显的转动	80	340	—	422.2	44.86
C200-1	梁左端混凝土压碎,槽钢有较明显的转动	80	260	—	279.7	29.60
C200-2	梁左端混凝土压碎,槽钢有较明显的转动	80	250	—	280.1	26.67
D200-1	梁左端混凝土压碎,槽钢有较明显的转动	90	240	270	283.4	25.87
D200-2	梁左端混凝土压碎,槽钢有较明显的转动	90	250	270	282.3	23.49

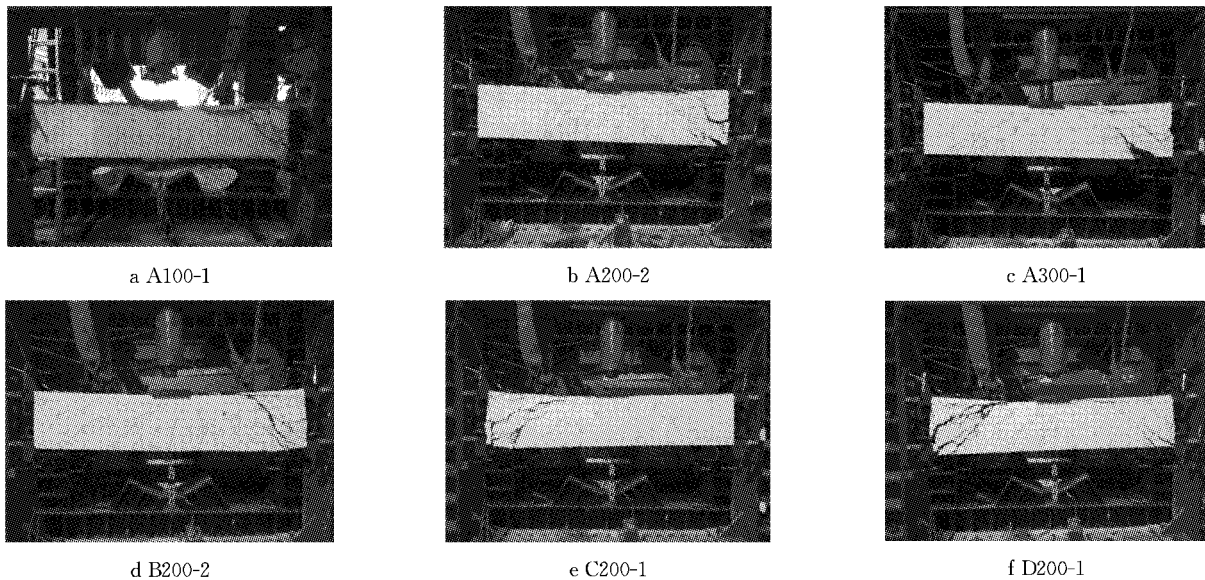


图 8 部分试件破坏模式

Fig.8 Failure modes

小.当槽钢预埋深度从 100 mm 变成 200 mm 时,极限承载力提高 24.50%;当槽钢预埋深度从 200 mm 变成 300 mm 时,极限承载力提高了 13.02%;当槽

钢预埋深度为 200 mm 时,试件的极限变形最大;和普槽 25b 试件 A300-1 相比,普槽 25a 试件 A300-2 的极限承载力降低了 4.25%,但极限变形提高了

63.30%。

箍筋起着约束混凝土使两者共同工作,并提供斜截面抗剪作用.图 10 给出了 B 系列试件跨中竖向荷载-位移曲线.由图 10 和表 3 可知,当梁端部箍筋间距加密一倍时,试件 B200-1 比试件 A200-1 的极限承载力提高了 43.03%,极限变形也提高了 24.30%.主要原因在于,箍筋间距加密对梁端部混凝土的约束加强,使得试件端部预埋槽钢与其周围的混凝土能充分发挥材料性能.

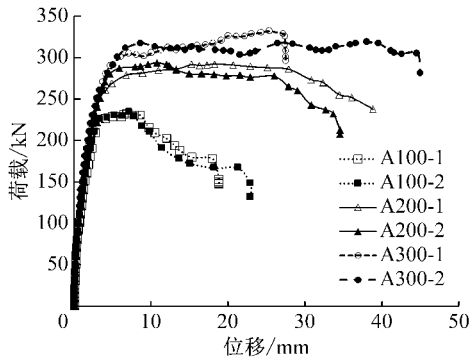


图 9 A 系列试件跨中荷载-位移曲线  
Fig.9 Load-displacement of midspan of A type specimens

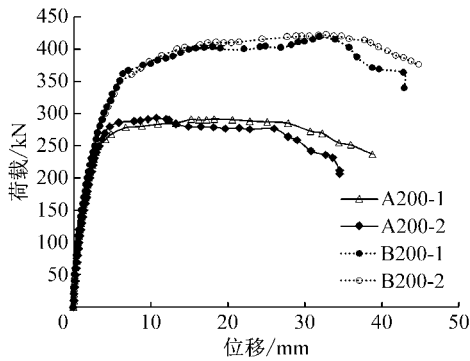


图 10 B 系列试件跨中荷载-位移曲线  
Fig.10 Load-displacement of midspan of B type specimens

图 11 给出了 C 系列试件跨中竖向荷载-位移曲线.由图 11 和表 3 可知,梁跨中设有空腔对节点初期受力影响不大,但对极限承载力和变形能力均有一定的影响.本文在梁跨中设置了尺寸为 100 mm×150 mm×850 mm 的空腔,能减轻构件 8.83% 的重量.从试验结果可知,设置空腔的试件比无空腔的试件的承载力只降低了 4.50%,极限变形降低了 23.30%.由此可见,设置空腔对承载力影响甚微.

槽钢为单轴对称截面,所以槽钢摆放位置不同会对梁承载力产生一定的影响.当槽钢形心轴偏离混凝土梁截面形心轴时将对节点产生额外的扭转作

用.图 12 给出了 D 系列试件跨中竖向荷载-位移曲线.由图 12 和表 3 可知,槽钢偏心对试件的极限承载力只降低了 3.75%,但对试件的变形能力影响较大,极限变形降低了 31.97%.主要原因在于,额外的扭转作用导致混凝土处于双向受力状态,混凝土提前退出工作,从而导致梁的极限变形减小.

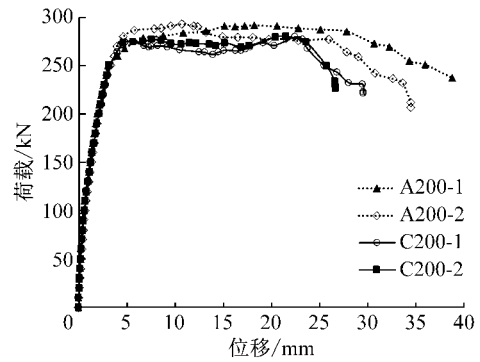


图 11 C 系列试件跨中荷载-位移曲线  
Fig.11 Load-displacement of midspan of C type specimens

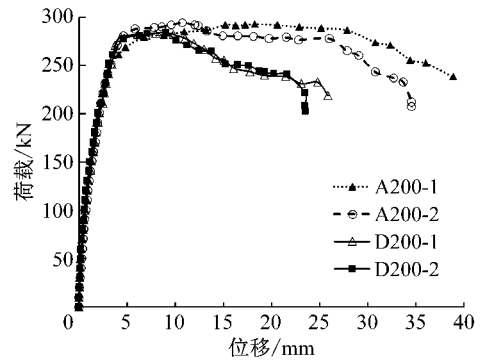


图 12 D 系列试件跨中荷载-位移曲线  
Fig.12 Load-displacement of midspan of D type specimens

图 13 给出了试件 A200-2 的荷载-纵筋应变关系曲线图,从图中可以看出,受拉纵筋应变(P6、P8

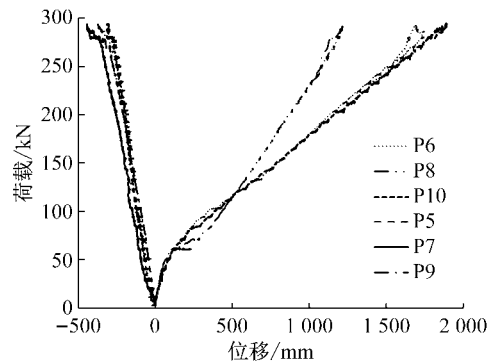


图 13 试件 A200-2 的荷载-纵筋应变关系曲线  
Fig.13 Load- portrait steel-bar strain of specimen A200-2

和 P10)比受压纵筋应变(P5、P7 和 P9)大,两者尚未达到屈服应变. 图 14 给出了试件 A200-2 的荷载-梁右端部截面转角的关系曲线图,从曲线可以看出,梁端有较明显的转动,随着荷载的增大转角也逐渐增大.

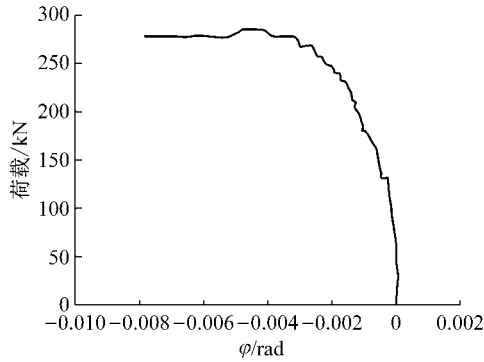


图 14 试件 A200-2 荷载-端部转角关系曲线  
Fig. 14 Load-end rotation of specimen A200-2

### 3 数值模拟

采用 ABAQUS 建立了数值分析模型, 并和试验结果进行了对比. 利用对称性, 建立了 1/2 模型, 模型中包含端板、螺栓、钢筋笼、预埋槽钢、混凝土梁和加载板等各个部分(图 15). 预埋槽钢一端通过螺栓与端板相连, 另外一端通过接触关系预埋置混凝土梁内. 钢筋笼设置于混凝土梁中. 加载板放置于混凝土梁端上表面, 用于传递荷载. 模型中钢筋笼采用三维桁架线性单元 T3D2 模拟, 其他部件均采用减缩积分实体单元 C3D8R 模拟. 有限元模型网格划分如图 15g 所示. 所有构件的力学性能指标均采用材料试验实测结果, 其中钢材本构关系采用理想弹塑性模型, 混凝土的本构关系根据《混凝土结构设计规范》<sup>[11]</sup>GB50010 附录 C. 2 的规定采用.

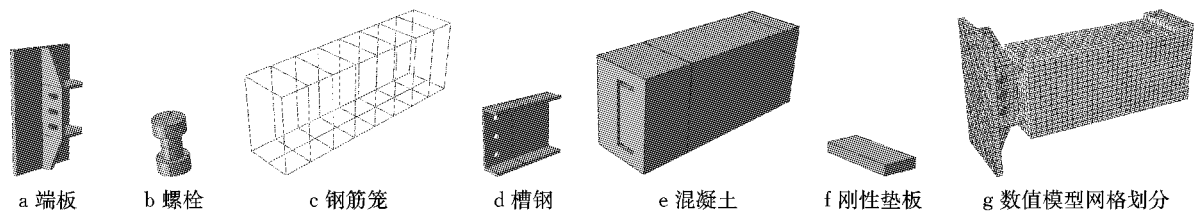


图 15 有限元模型  
Fig. 15 The finite element model

图 16 给出了部分试件荷载挠度的数值分析结果和试验结果对比情况; 图 17 给出了试验破坏模式和数值分析破坏模式的对比情况. 从图 16 和图 17 可以看出, 数值分析结果和试验结果吻合良好, 极限承载力误差在 5% 以内, 破坏模式也较为一致.

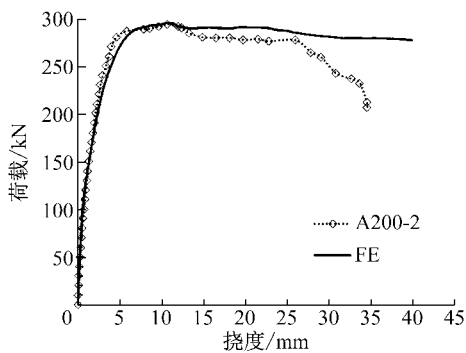


图 16 A200-2 荷载-挠度曲线对比  
Fig. 16 Comparison of load-deflection curves of A200-2

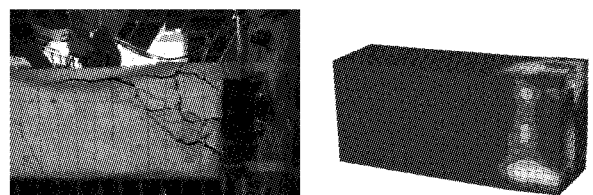


图 17 A100-2 破坏模式对比  
Fig. 17 Comparison of failure modes of A100-2

### 4 结论

本文研发了一种预制混凝土梁端预埋槽钢节点. 完成了 12 根预制混凝土梁的承载力试验, 根据试验结果得出如下结论:

(1) 试件的主要破坏模式有槽钢撬出破坏和梁端部混凝土压碎两种; 预制混凝土梁试件在加载过程中的平面外变形几乎为零.

(2) 试件的极限承载力随着槽钢预埋深度的增加而增加, 但增加幅度逐渐变小; 当槽钢预埋深度为

200 mm 时,试件的极限变形最大.梁端部箍筋间距加密能明显提高梁承载力和变形能力,并充分发挥混凝土材料性能.梁跨中设置空腔对的承载力和变形能力影响较小,但可以减轻预制混凝土梁重量,对装配式建筑具有重大意义.槽钢偏心对梁产生额外的扭矩,略微降低节点的承载力和变形能力.

(3)数值分析结果和试验结果吻合良好,表明了所建立的数值模型的有效性,为后续深入研究奠定了基础.

### 参考文献:

- [1] 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用进展[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 47.  
XUE Weichen. Progress of studies and applications of precast concrete frame structure systems [J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 47.
- [2] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004(6): 22.  
ZHAO Bin, LÜ Xilin, LIU Haifeng. Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column subassembly with cast-in-situ monolithic joint [J]. Journal of Building Structures, 2004(6): 22.
- [3] VANGEEM M. Achieving sustainability with precast concrete [J]. PCI Journal Prestressed Concrete Institute Journal, 2006, 51(1): 42.
- [4] 范力, 吕西林, 赵斌. 预制混凝土框架结构抗震性能研究综述[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 90.  
FAN Li, LÜ Xilin, ZHAO Bin. Summary of investigation on seismic behavior of precast concrete frame structures [J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 90.
- [5] 汪青杰, 张延年, 徐春一, 等. 钢管混凝土柱与型钢梁装配式节点抗震试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(3): 355.  
WANG Qingjie, ZHANG Yannian, XU Chunyi, et al. Seismic test for fabricated connection of concrete-filled steel tubular column and H-shaped steel beam [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(3): 355.
- [6] 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.  
LI Xiangmin, GAO Rundong, XU Qingfeng. Experimental study on high ductile joints for precast RC frame [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3453.
- [7] 高杰, 田春雨, 郝玮, 等. 装配式梁-柱-叠合楼板中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015(增 2): 196.  
GAO Jie, TIAN Chunyu, HAO Wei, et al. Experimental study on seismic behavior of precast concrete layered slab and beam to column interior joints [J]. Journal of Building Structures, 2015(S2): 196.
- [8] 徐姝亚, 李正良, 刘红军. 装配式套筒连接 CFST 柱-RC 梁节点抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 124.  
XU Shuya, LI Zhengliang, LIU Hongjun. Seismic behavior of precast sleeve-connected CFST column to RC beam connection [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(6): 124.
- [9] 张爱林, 赵亮, 刘学春, 等. 装配式方钢管柱桁架梁节点单调加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2014(增 2): 169.  
ZHANG Ailin, ZHAO Liang, LIU Xuechun, et al. Monotonic experimental study of prefabricated square tubular column to truss beam connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2014(S2): 169.
- [10] 郭小农, 裴进玉, 李国强, 等. 预制混凝土梁端预埋槽钢节点承载性能数值研究[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(1): 26.  
GUO Xiaonong, BUI Tienngoc, LI Guoqiang, et al. Numerical research on bearing performance of embedded channel joint of precast concrete beam [J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(1): 26.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.