

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.093



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



装配式混凝土梁柱半刚性节点的抗震性能

李正英¹, 黄延铮^{1,2}, 鲁万卿², 何欢¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 郑州 450004)

摘要:为研究装配式混凝土框架节点的抗震性能,提出一种端板螺栓连接梁柱节点形式,设计节点试件并对其进行拟静力试验研究,与现浇混凝土框架节点试验进行对比,考察试验节点的破坏形式、承载能力以及耗能能力和位移延性等抗震性能指标;采用有限元程序模拟试验节点试件的受力性能,验证模型的准确性。结果表明:现浇节点试件以梁端截面形成塑性铰耗能,破坏时梁端截面发生弯剪破坏,柱和节点均出现裂缝;端板螺栓连接半刚性节点试件主要以梁柱之间发生相对转角耗能,最终由于梁端截面混凝土材料强度不足而发生破坏,而柱保持完好,可通过更换高强螺栓和预埋梁快速修复节点;提出的端板螺栓连接节点可以满足钢筋混凝土结构的耗能和延性要求,梁内钢筋、预埋的端板和混凝土是否能够协同工作对节点的受力性能有较大影响。

关键词:装配式;混凝土框架;梁柱节点;拟静力试验;抗震性能

中图分类号: TU398.2; TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)03-0055-10

Seismic behavior of semi-rigid joints of precast concrete beam and column

LI Zhengying¹, HUANG Yanzheng^{1,2}, LU Wanqing², HE Huan¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Construction Seventh Engineering Division. Co., Ltd., Zhengzhou 450004, P. R. China)

Abstract: To examine the seismic behavior of semi-rigid joint of the precast concrete frame, a type of beam-column joint connected by end-plate and bolts is proposed. The joints are designed and the quasi-static test is carried out, and compared with the test of cast-in-place concrete frame joint. The failure mode, bearing capacity, energy dissipation capacity and displacement ductility of the joints are investigated. The finite element program is used to simulate the mechanical performance of test joints, and the accuracy of the model is verified. The results show that the cast-in-place joints dissipate energy by the plastic hinge at the end of the beam, and the section at the end of the beam is damaged by bending and shearing. The cracks are found in both the column and the beam. The semi-rigid joint connected by end-plate and bolts mainly dissipates energy through the relative rotation between the beam and the column. Its failure is due to the insufficient strength of the concrete at the end of beam, but the column and its internal reinforcement remain intact. Consequently, the joint can be

收稿日期: 2021-02-03

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0001)

作者简介: 李正英(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要从事结构工程研究, E-mail: lizhengy@cqu.edu.cn.

Received: 2021-02-03

Foundation item: Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2018jcyjAX0001)

Author brief: LI Zhengying (1975-), PhD, associate professor, main research interest: structural engineering, E-mail: lizhengy@cqu.edu.cn.

quickly repaired by replacing high-strength bolts and precast beam. The joint connected by end-plate and bolts can meet the requirements of energy dissipation and ductility of reinforced concrete structure. Whether the reinforcement and embedded end-plate in the beam can work together with concrete has great influence on the mechanical performance of the joint.

Keywords: precast construction; concrete frame; beam-column joints; pseudo-static test; seismic behavior

低多层住宅是较适宜的住宅形式,在中国中小城市和乡镇建设中占据着重要地位。依据《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T 51231—2016)^[1]和《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)^[2],中国的装配式混凝土建筑多采用“等同现浇”原则进行设计,对节点构造施工的要求较高,施工过程烦琐,低多层装配式建筑故难以在农村、城镇等地区大范围推广。另一方面,低多层建筑在竖向和水平作用下的内力和位移小,对节点受力的要求可以适当降低。在此背景下,笔者以低多层装配式建筑为切入点,在“等同现浇”的要求之外寻求突破,通过采用螺栓连接的干式连接形式,提出全装配式钢筋混凝土半刚性连接节点形式,以期简化节点的连接形式和现场节点安装的复杂程度。

半刚性连接节点介于刚接节点与铰接节点之间,能够传递剪力和弯矩,同时在梁柱之间会发生相对转角,具有一定的转动能力。与现浇结构通过梁端塑性铰耗能不同,半刚性节点可通过梁柱产生相对转角进行耗能。近年来,已开展了一些连接节点和整体结构的研究工作,对预制构件及其连接方式进行了较多的试验研究和分析。对于全装配式节点,Ghayeb等^[3]提出了一种组合节点形式,预制构件均为钢筋混凝土材料,在节点处采用钢板和钢管进行螺栓连接,试验结果表明,该节点延性好,抗弯能力和初始裂缝发展有显著改善,但是节点构造复杂,节点接头处刚度突变,承载力较低,滞回曲线呈反“S”型。Nzabonimpa等^[4]根据端板连接形式提出了一种新型钢-混凝土组合结构节点,在柱内设置U形锚固钢筋,通过螺纹钢、高强螺栓及钢套筒将梁柱连接在一起,试验研究表明,该节点具有较好的耗能能力,但节点形式较复杂。范力^[5]进行了橡胶垫螺栓连接节点的拟静力试验,结果表明,橡胶垫螺栓连接节点弹性变形能力大,残余变形较小,滞回曲线呈非线性弹性特征,节点耗能能力和延性较差。刘建华^[6]提出一种新型装配式半刚性节点,在

梁柱内预留孔洞,用高强螺栓将预制梁固定在牛腿柱上,试验表明,该节点具有较高的承载力,具有良好的耗能性能,由于将钢绞线锚入节点,破坏主要集中在梁端和高强螺栓上,预制柱及牛腿损伤复杂。对于装配整体式节点,于建兵等^[7]提出了在节点核心区增设钢筋,加强其强度,其破坏为梁铰机制,受力性能较好;赵斌等^[8]对预制高强钢纤维混凝土后浇整体式节点的试验研究表明,采用高强钢纤维混凝土具有良好的耗能能力和延性;Choi等^[9]在梁柱节点区域浇筑ECC材料,能有效传递荷载,连接承载力大,具有良好的耗能能力;Lacerda等^[10]在暗牛腿节点的梁和牛腿之间设置栓钉连接,在竖直接缝内灌浆填充,抗弯刚度与强度得到改善。对于以上装配整体式节点,其受力性能均较好,但存在二次浇筑,且由于工艺复杂或者采用新型材料,都较难推广。

综合对装配式连接节点的研究发现,现有连接节点还存在设计复杂且传力不直接、装配式节点配件繁琐、拆换不易、造价较高等问题。笔者以低多层全装配式建筑为切入点,结合半刚性连接的特性,将端板连接形式应用于全装配式混凝土结构,提出一种端板螺栓连接节点形式,设计了一组节点试件,对试件进行低周往复荷载下的拟静力试验,系统研究端板螺栓连接节点试件的破坏形态、滞回曲线,以及耗能能力、位移延性等受力性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

从某多层框架结构中选取一榀框架中间层边节点进行足尺模型试验。试件节点从框架梁柱反弯点取出,以模拟真实边界条件,分别设计2个端板螺栓连接和1个现浇连接节点试件,以便对比分析。端板连接节点是在柱内预留螺栓孔洞,采用高强度螺栓与端板组件连接成整体;与端板焊接的水平钢板上预留条孔,可以使梁内钢筋穿过条孔进行弯

1.2 材料性能

梁柱节点所有连接钢材均采用 Q355 碳素结构钢, 梁柱内钢筋采用 HRB400, 钢筋强度由标准拉伸试验测定, 钢筋的屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 和弹性模量 E_s 如表 2 所示。

预制构件混凝土强度等级为 C40, 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 为 39.41 N/mm², 轴心抗压强度标准值 f_{ck} 为 26.36 N/mm², 轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 为 2.28 N/mm², 弹性模量 E_c 为 32 461.17 N/mm²。

表 2 试件钢筋力学性能

规格	$f_y/(N \cdot mm^{-2})$	$f_u/(N \cdot mm^{-2})$	$E_s/(N \cdot mm^{-2})$
6	324.00	517.43	193 360.81
8	460.19	638.57	190 714.75
10	487.08	645.67	217 641.50
12	434.19	641.38	197 601.00
18	440.82	625.44	193 083.19
22	453.57	639.46	203 543.92

1.3 试验装置和加载制度

试验加载装置如图 2 所示, 采用卧位加载, 柱子下端设有转动支座, 保证柱端的自由转动; 梁端做扩大头预留安装孔与水平作动器相连。柱顶设置 150 t 液压千斤顶, 分级施加轴力至设计轴力值, 柱的竖向荷载为 1 000 kN, 轴压比为 0.3; 梁端设置 50 t 拉压千斤顶, 固定在反力架上, 施加水平往复荷载。

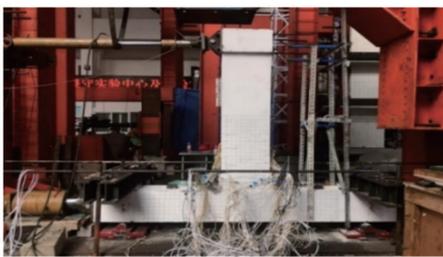


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading devices

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015)^[11], 试验加载分为预加载和正式加载。预加载荷载大小为 10 kN, 用以确保试件各部分紧密接触、测量仪器正常工作。正式加载时, 从梁端位移为 0 开始, 以步长为 2 mm 进行循环加载, 每级循环一次; 以钢筋或钢材达到或超过屈服应变时作为屈服位移, 每级位移增量改为屈服位移值的 0.5 倍, 循环

次数改为 2 次。加载制度见图 3。试验过程中, 主要量测梁自由端加载点往复荷载及位移、节点核心区

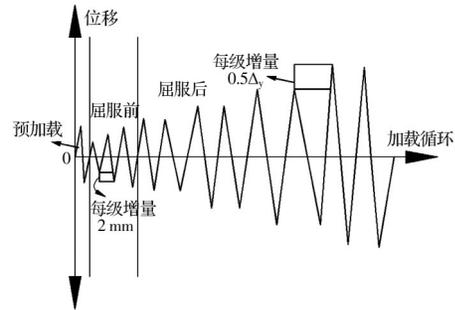


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading scheme

附近钢筋、型钢的应变分布、裂缝开展情况和梁柱相对转角。位移计布置如图 4 所示。

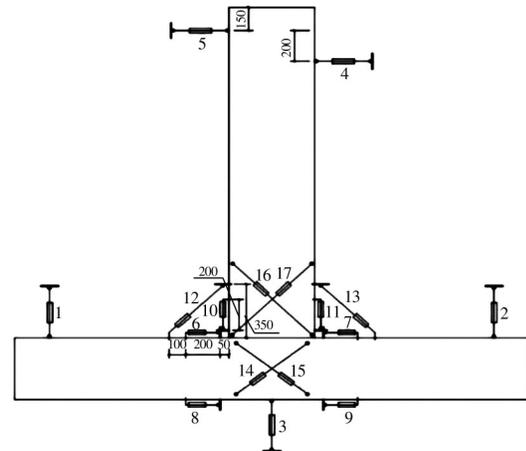


图 4 试件位移计布置图

Fig. 4 Layout of displacement meter for specimen

2 试验过程及破坏特征

试件 DB-T20 和 DB-T16 破坏过程及特征如图 5(a)、(b) 所示。加载初期, 梁端水平力较小, 试件处于弹性受力阶段。随着荷载的增加, 靠近节点核心区的梁端出现水平裂缝, 开裂时, 试件 DB-T20 的梁端荷载为 37.9 kN, 试件 DB-T16 的梁端荷载为 41 kN; 随着荷载的增加, 裂缝逐渐增多, 从梁端向梁中部发展, 并出现斜裂缝, 梁内钢筋的应变逐渐增大, 但均处于弹性状态, 连接梁柱的型钢构件应变均较小; 梁端荷载达到 58.5 kN 时, 试件 DB-T20 梁内钢筋开始屈服, 试件 DB-T16 梁内钢筋在加载到 53.7 kN 时开始屈服。当梁端荷载达到 78 kN 时, 试件 DB-T20 内的水平焊接钢板开始屈服; 当梁

端荷载达到105 kN时,试件DB-T16内的水平焊接钢板开始屈服,且在试件梁端荷载达到峰值后,加劲肋出现屈服。

加载后期,梁端混凝土裂缝宽度快速增大,钢筋的应变持续的增加,型钢连接件局部位置也开始出现屈服;随着荷载增加,梁端混凝土沿着斜裂缝逐渐向外鼓出、爆开,由于混凝土与加劲肋之间相互挤压,梁端的角部混凝土在拉压作用下破碎脱落,梁内纵筋暴露,试件破坏,其破坏形式为梁端截面局部压碎破坏。破坏时,试件DB-T20梁内每根纵筋上的屈服位置只有1处,而试件DB-T16均有2处以上,说明试件DB-T16中纵筋的应力分布更加均匀,且试件DB-T20中钢筋的应变值也比试件DB-T16小,主要是因为试件DB-T16中的纵筋和水平钢板焊接,使得梁内钢筋和节点连接的协同工作性更强。对比型钢连接件中的应变,试件DB-T20仅有梁内预埋的2块水平焊接钢板根部处达到屈服,而试件DB-T16中除焊接钢板达到屈服外,加劲肋也达到了屈服。以上现象说明试件DB-T16可以更好地发挥各材料性能,使试件受力更好。

整个试验过程中,两试件的柱没有产生裂缝,柱内钢筋处于弹性状态,可见,采用这种装配式节点可以通过更换有损伤的梁实现柱构件的再次利用。试验结束后,连接螺栓几乎没有伸长,难以用肉眼观察到变形,高强螺栓承载力达到要求,不会发生提前破坏。

在加载过程中,XJ现浇节点区附近的梁端首先出现细小裂缝,开裂荷载为108 kN,此时钢筋开始屈服;随着荷载的增加,梁上裂缝越来越多,且分布均匀,当荷载增加至138 kN时,柱上节点区出现两条对称的交叉斜裂缝。加载后期,节点附近梁端的斜裂缝迅速发展,宽度持续增大并产生塑性铰,柱上的节点区交叉斜裂缝宽度增大至2 mm。破坏时,梁内节点附近的纵向钢筋及箍筋全部屈服;柱内大部分纵向钢筋和节点区箍筋均达到屈服。节点破坏形式为梁端截面弯剪破坏,如图5(c)所示。

3 试验结果与分析

3.1 节点屈服和破坏荷载

通过测量梁端水平作用力和位移,得到节点试件的屈服和破坏荷载等参数,结果见表3。

试验结果表明,在梁柱截面配筋相同的情况



(a) 试件DB-T20



(b) 试件DB-T16



(c) 试件XJ

图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure pattern of specimens

下,由于梁柱节点是刚性连接,XJ现浇节点所能承受的极限荷载大于半刚性节点。而通过端板螺栓连接的半刚性连接节点DB-T20和DB-T16受力机理不同于现浇节点,极限承载力会小于相应的现浇节点。除此之外,由于连接端板与混凝土端部截面相交处,两个装配式节点梁端混凝土会受到端板局部挤压,当端板刚度较大时,梁端截面混凝土会发生局部受压而提前破坏。

对比节点DB-T20和DB-T16,节点试件DB-T16的屈服和破坏荷载以及对应的位移值大于DB-T20,主要原因为:设计时,将试件DB-T16中部的纵向受力钢筋与水平钢板进行了焊接,使得梁内钢筋与混凝土及节点端板协调工作性更好,节点试件的受力性能得到提高;试件DB-T20的连接端板厚度较大,刚性更大,因此,对梁端混凝土截面的局部挤压力也越大,使得混凝土截面在端板的挤压下提前发生局部受压破坏,极限荷载反而小于试件DB-T16。

从上述分析可以看出,该种连接方式中,端板的厚度对节点的承载力有较大影响,设计时要结合

表 3 节点试件承载力及位移

Table 3 Bearing capacity and displacement of the joint specimens

试件编号	屈服荷载 P_y /kN	屈服位移 Δ_y /mm	峰值荷载 P_{max} /kN	峰值位移 Δ_{max} /mm	破坏位移 Δ_u /mm
DB-T20(+)	68.64	9.37	84.83	17.05	27.31
DB-T20(-)	63.27	9.21	79.00	16.48	21.65
DB-T16(+)	78.10	9.75	100.76	28.76	32.22
DB-T16(-)	83.70	13.30	111.89	29.96	33.34
XJ(+)	120.25	16.78	155.29	78.57	89.38
XJ(-)	111.01	14.77	146.61	69.50	86.75

注:(+)表示千斤顶拉的方向;(-)表示千斤顶推的方向。

节点连接刚度和承载力及梁端截面承载力综合分析,才能使这种半刚性节点有合理的破坏形式和较好的承载力。另一方面,保证梁内纵筋和节点连接件之间有良好的连接和锚固,可以使得梁内钢筋更好地参与共同工作,使节点各组件之间协同工作,提高节点的整体性能,从而提高梁柱节点的受力性能。

3.2 滞回曲线及耗能能力

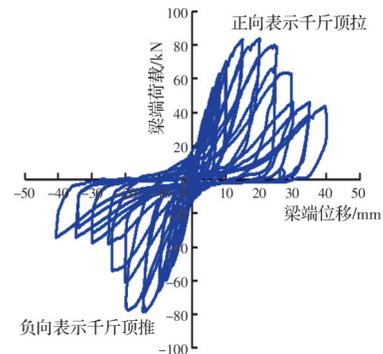
各试件的梁端荷载-位移滞回曲线如图 6 所示。采用荷载-位移等效黏滞阻尼系数和能量耗散系数作为节点耗能能力的评价指标,其结果见表 4。

从图 6 可以看出,节点试件 DB-T20 和 DB-T16 滞回曲线比较相似,加载初期,试件处于弹性状态,总体变形很小,卸载后残余变形也很小,形成的滞回环不明显。随着循环位移荷载的增加,节点试件开始屈服,滞回环开始变得饱满,其面积增加;加载到后期,钢筋和混凝土之间产生滑移,端板和混凝土之间发生挤压破坏,试件侧向变形增长迅速,荷载快速下降,滞回环有较明显的捏缩效应。

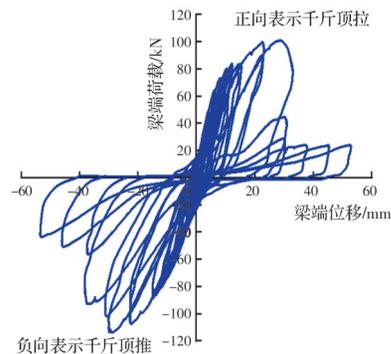
与试件 DB-T20 和 DB-T16 相比,从滞回曲线和能量耗散系数来看,现浇节点 XJ 的耗能能力相对更好。但试件 DB-T20 和 DB-T16 的等效黏滞阻尼系数均大于 0.1,而普通钢筋混凝土节点的阻尼系数在 0.1 左右^[12],说明该装配式节点试件有较好的耗能能力,以该试验为基础,后期通过优化设计,有望进一步提高该类节点试件的耗能和延性性能。

3.3 梁柱相对转角及节点刚性分析

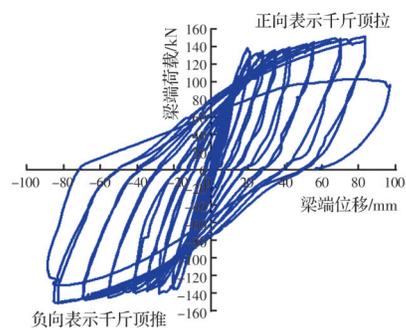
在地震作用下,现浇节点主要利用梁端产生塑性铰耗能,而半刚性连接节点可利用梁柱产生相对转角进行耗能。按照 EC3 规范^[13]的分类方法,对于无支撑结构,初始转动刚度 $S_{j,ini} \geq 25EI_b/L_b$ 时为刚性节点; $S_{j,ini} < 0.5EI_b/L_b$ 时为铰接节点,初始转动



(a) 试件 DB-T20



(b) 试件 DB-T16



(c) 试件 XJ

图 6 试件荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement hysteresis curve of the specimens

刚度在二者之间时为半刚性节点, EI_b/L_b 为梁的线

表 4 节点试件的耗能指标

Table 4 Energy dissipation coefficients of joint specimens

试件编号	等效黏滞阻尼系数 h_e	能量耗散系数 E
DB-T20	0.15	0.92
DB-T16	0.16	0.98
XJ	0.26	1.65

刚度。根据试验结果绘出两个装配式节点的弯矩-相对转角曲线,如图 7 所示,横坐标表示梁柱相对转角,纵坐标表示节点弯矩(因梁柱之间是刚性连接,现浇节点没有相对转角)。

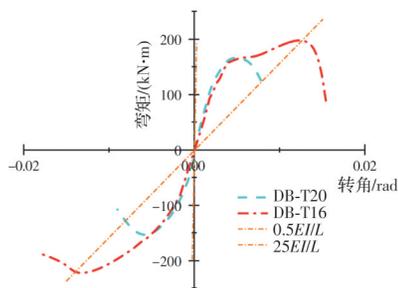
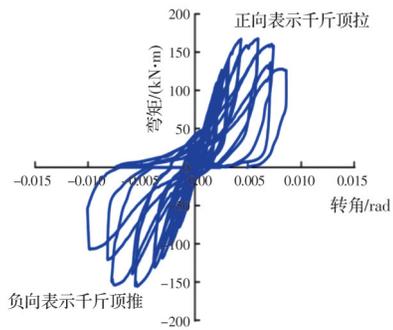
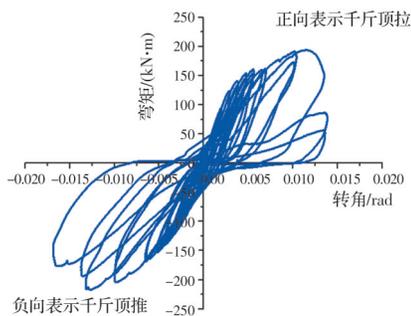


图 7 节点弯矩-相对转角曲线

Fig. 7 Moment-relative rotation angle of joints



(a) 试件 DB-T20



(b) 试件 DB-T16

图 8 试件弯矩-相对转角滞回曲线

Fig. 8 Moment-relative rotation angle hysteresis curves of the specimens

在弯矩-相对转角曲线中,弹性阶段弯矩转角曲线的斜率为节点试件的初始转动刚度。由图 7 可以看出,试件 DB-T20、DB-T16 的初始转动刚度位于 $0.5EI_b/L_b$ 和 $25EI_b/L_b$ 之间,均为半刚性节点;试件 DB-T20 的初始转动刚度略大于试件 DB-T16,主要是因为试件 DB-T20 的端板厚度大于试件 DB-T16。

图 8 给出了 DB-T20 和 DB-T16 的弯矩-相对转角滞回曲线,表 5 所示为节点试件的弯矩-相对转角耗能指标和位移延性系数。可以看出,由于试件 DB-T16 的节点连接端板设计参数更合理,加之梁内纵筋和端板焊接,使得节点各组件之间协同工作性能更好,因此,其承载力、耗能和延性均优于试件 DB-T20。对比表 4 和表 5 的能量耗散系数可以看出,半刚性连接节点的耗能主要是通过梁柱之间的相对转角来实现。

表 5 装配式节点试件的耗能及延性指标

Table 5 Energy consumption and ductility index of fabricated joint specimens

试件编号	等效黏滞阻尼系数 h_e	能量耗散系数 E	延性系数 μ_0
DB-T20	0.12	0.76	2.55
DB-T16	0.15	0.94	2.69

4 数值模拟分析

由于试验研究的人力和物力成本较高,因此,有限元模拟常作为试验的一种补充方式。在验证了有限元模型的基础上,可利用有限元软件进行更多模拟分析,从而进行更详细的研究。利用有限元软件 ABAQUS 对节点建立数值模型,与试验结果对比,从而对模型进行验证,以便后期进行试件设计参数的详细研究。有限元模型中混凝土采用能考虑损伤变量因子的弹塑性损伤模型,损伤因子采用能量等价原理^[14]计算,表示为

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \epsilon}} \quad (1)$$

式中: d 为混凝土损伤因子; σ 为混凝土真实应力; ϵ 为混凝土应变; E_0 为混凝土初始弹性模量。

钢筋单轴拉压应力-应变关系采用双折线弹塑性模型^[15]。混凝土及钢连接件均采用 C3D8R 实体单元,钢筋选用 T3D2 桁架单元,采用“embed”的方式嵌入混凝土中。模型中的接触对包括:螺帽与端板以及连接钢板之间;螺栓杆与螺栓孔洞内表

面;端板与混凝土梁、柱表面之间。为考虑上述接触面之间可能存在的脱离和滑移现象,接触面采取“面面接触”,法向作用为“硬接触”;切向作用以库伦摩擦系数来表达,参考《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[16]和 Baltay 等^[17]的研究结果,系数取值为 $\mu=0.4$ 。模型中的螺栓预紧力采用“螺栓载荷”指定预紧力施加。

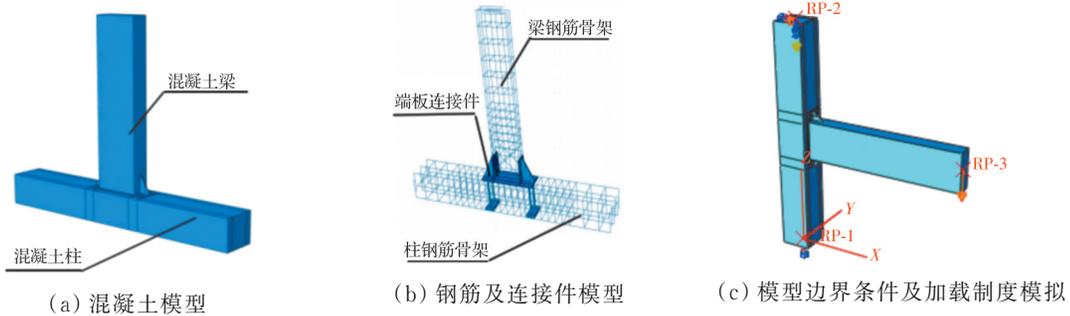


图 9 端板连接节点有限元模型

Fig. 9 Finite element model of end-plate connection joint

图 10 为试件的受拉损伤图,可以反映混凝土的裂缝分布,试件 DB-T20、DT-T16 的损伤主要集中在梁上,试件 DB-T20 沿梁长方向的裂缝分布范围比试件 DT-T16 小,现浇 XJ 节点在梁上的裂缝分布范围最大;试件 DB-T20 和 DB-T16 在混凝土柱上没有损伤破坏产生,现浇节点 XJ 在柱上的节点区出现了“X”型分布的损伤破坏,这与试验中的裂缝发展情况较为吻合。

将有限元模拟所得节点试件的荷载-位移骨架曲线与试验测得的曲线进行对比,结果见图 11。由

有限元模型及加载如图 9 所示,将柱底、柱顶和梁端分别耦合于参考点 RP1、RP2 和 RP3,限制柱底 X、Y、Z 向的平动自由度和 X、Z 向的转动自由度,限制柱顶 X、Y 向的平动自由度和 X、Z 向的转动自由度。将恒定轴压力施加在柱顶面耦合点 RP2,在梁端耦合点施加 Z 方向的往复荷载。

图 11 可以看出,在加载初期,数值模拟曲线与试验曲线处于弹性阶段,二者吻合良好,屈服后,数值模拟峰值荷载和峰值位移接近试验值;达到峰值后,随着位移的增加,模拟曲线较试验曲线更加平缓,导致二者荷载差值变大。原因可能为:1)试件在制作时存在缺陷;2)数值模拟采用的损伤模型是理想损伤模型,损伤因子比实际试验情况偏小;3)试验中产生了较大的黏结-滑移,在数值模拟时没有充分考虑。

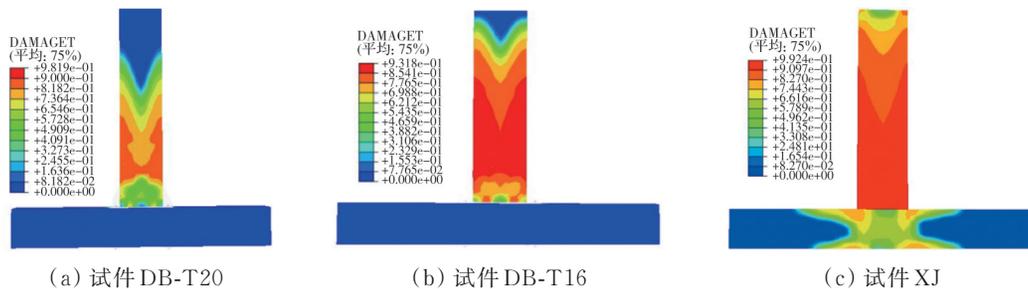


图 10 混凝土受拉损伤图

Fig. 10 Tensile damage diagram of concrete

将数值模拟所得的节点试件屈服荷载、峰值荷载和延性系数进行对比,汇总结果见表 6。从表中可以看出,虽然模拟计算值与试验值存在一定误差,但是其误差都较小,说明该数值模型能

比较准确地模拟得出试验节点试件的力学性能。

5 结论

提出一种端板螺栓连接的钢筋混凝土梁柱半

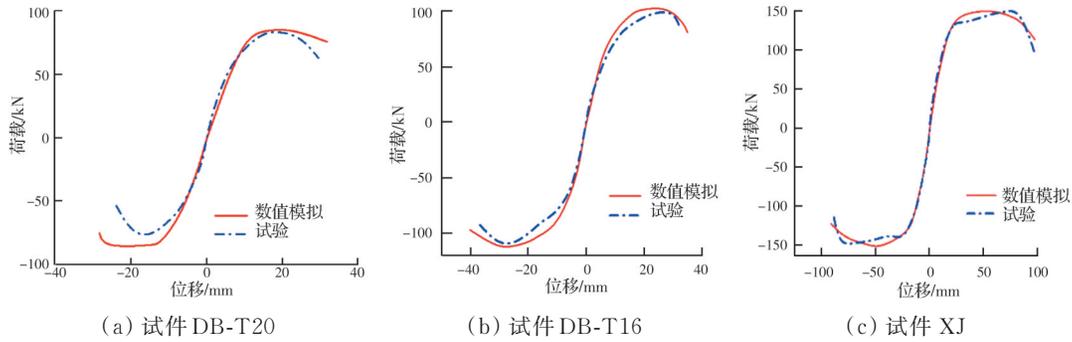


图 11 试件荷载-位移骨架曲线

Fig. 11 Load-displacement skeleton curve of specimens

表 6 数值模拟与试验力学性能的对比

Table 6 Comparison of mechanical properties between numerical simulation and experiment

试件编号	屈服荷载 P_y			峰值荷载 P_{max}			位移延性系数 u		
	试验/kN	数值模拟/kN	误差/%	试验/kN	数值模拟/kN	误差/%	试验/kN	数值模拟/kN	误差/%
DB-T20	65.96	77.33	17.2	81.93	85.56	4.4	2.63	2.76	4.9
DB-T16	80.90	90.74	12.2	106.33	107.47	1.1	2.91	2.98	2.4
XJ	115.63	125.41	8.6	150.95	149.33	1.1	4.60	4.66	1.3

刚性连接节点形式,以用于低多层全装配式钢筋混凝土框架结构。设计了1个现浇和2个端板螺栓连接的混凝土梁柱节点,通过拟静力试验研究了试件的受力性能和破坏特征,并基于ABAQUS软件建模进行数值模拟分析,得出以下结论:

1)由于节点受力和耗能机理不同,现浇节点极限承载能力、位移延性仍优于端板螺栓连接节点。现浇节点试件以梁端截面形成塑性铰耗能,破坏时梁端截面发生弯剪破坏,柱和节点均出现裂缝;端板螺栓连接半刚性节点试件主要以梁柱之间发生相对转角耗能,最终由于梁端截面混凝土材料强度不足而发生破坏,而柱及其内部钢筋保持完好,可实现梁的可更换性。

2)端板螺栓连接节点采用预埋在预制梁内的端板将梁柱连接在一起,其螺栓数量少,无需进行二次混凝土浇筑,可以达到简化节点连接形式及易于现场施工的目的,并可通过更换高强螺栓和预制梁快速修复节点。

3)按照EC3规范的分方法,提出的端板螺栓连接节点为半刚性节点,主要通过梁柱产生相对转角进行耗能,其弯矩-转角等效黏滞阻尼系数 $h_e = 0.12 \sim 0.15$,延性系数 $\mu_0 = 2.55 \sim 2.69$,可以满足钢筋混凝土结构的耗能和延性要求。

4)对于这种端板连接梁柱节点试件,梁内钢筋、预埋的端板和混凝土是否能够协同工作对试件

的受力性能有较大影响,节点设计时需要通过优化设计选取合理的端板厚度等参数并加强端板与梁内钢筋的连接及锚固,以提高其整体受力性能。

5)通过建立有限元模型模拟节点试件受力性能,与试验结果对比,建立的精细有限元模型在破坏形态、屈服荷载、变形性能方面与试验实测结果吻合良好,能合理反映其受力性能。

参考文献

- [1] 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Technical standard for assembled buildings with concrete structure: GB/T 51231—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] GHAYEB H H, RAZAK H A, SULONG N H R. Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 258-278.
- [4] NZABONIMPA J D, HONG W K, KIM J. Experimental and non-linear numerical investigation of the novel detachable mechanical joints with laminated

- plates for composite precast beam-column joint [J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 286-303.
- [5] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- FAN L. Investigation on seismic behavior of jointed precast concrete frame structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [6] 刘建华. 新型装配式半刚性梁柱节点的抗震性能实验研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- LIU J H. Experimental study on seismic performances of a new type of fabricated semi-rigid beam-to-column connection [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018. (in Chinese)
- [7] 于建兵, 郭正兴, 郭悬. 新型装配式混凝土框架梁柱节点抗震性能[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3): 209-215.
- YU J B, GUO Z X, GUO X. Seismic behavior of a new type prefabricated concrete frame beam-column connections [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3): 209-215. (in Chinese)
- [8] 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, 25(6): 22-28.
- ZHAO B, LU X L, LIU H F. Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column subassembly with cast-in-situ monolithic joint [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(6): 22-28. (in Chinese)
- [9] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 1820-1835.
- [10] LACERDA M M S, SILVA T J D A, ALVA G M S, et al. Influence of the vertical grouting in the interface between corbel and beam in beam-to-column connections of precast concrete structures - An experimental analysis [J]. *Engineering Structures*, 2018, 172: 201-213.
- [11] 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)
- [12] 王文达, 韩林海, 陶忠. 钢管混凝土柱-钢梁平面框架抗震性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2006, 27(3): 48-58.
- WANG W D, HAN L H, TAO Z. Experimental research on seismic behavior of concrete filled CHS and SHS columns and steel beam planar frames [J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(3): 48-58. (in Chinese)
- [13] Eurocode 3: Design of Steel Structures: Part 1.8 Design of Joints: CEN: prEN1993-1-8 [S]. 2005.
- [14] SIDOROFF F. Description of anisotropic damage application to elasticity [C]//IUT AM Colloquium, Physical Nonlinearities in structural analysis, 1981: 237-244.
- [15] HAWILEH R A, RAHMAN A, TABATABAI H. Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam-column connection subjected to cyclic loads [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(9): 2562-2583.
- [16] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)
- [17] BALTAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1990, 2(1): 46-49.

(编辑 胡玲)