

预制外包钢混凝土梁柱节点受力性能研究

王连广¹, 许刚¹, 刘姝¹, 黄志武²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中建二局第四建筑工程有限公司, 天津 300457)

摘要 目的 解决传统钢筋混凝土梁柱节点施工复杂、延性不足等问题。方法 提出3种预制外包钢混凝土梁柱连接节点, 选取外法兰盘节点, 建立 ABAQUS 有限元模型, 分析梁柱连接节点的荷载-位移曲线, 研究法兰盘、高强螺栓对节点刚度、承载力的影响。结果 预制节点承载力略低于现浇外包钢混凝土梁柱节点; 法兰盘与螺栓为主要受力部件, 当达到极限荷载的85%时, 钢骨架首先屈服, 破坏后便于修复; 法兰盘厚度由16 mm增加到40 mm, 屈服荷载增加17.33%, 极限荷载增加18.34%; 高强螺栓直径由M20增加到M30, 屈服荷载增加40.43%, 极限荷载增加35.38%; 数量由6个增加到18个, 屈服荷载增加18.31%, 极限荷载增加9.65%。结论 在实际工程中, 建议法兰盘厚度取30 mm, 配置12个M27高强螺栓。

关键词 预制外包钢混凝土梁; 外法兰盘; 钢板套筒; 屈服荷载; 极限荷载

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Study on Mechanical Behavior of Precast Steel-encased Concrete Beam-column Joints

WANG Lianguang¹, XU Gang¹, LIU Shu¹, HUANG Zhiwu²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110819; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

Abstract: In order to ease the construction difficulty and enhance the ductility of traditional reinforced concrete joint, three kinds of precast steel-encased concrete beam-column joints were presented. The load-deformation curve of external flange plate joint was analyzed by ABAQUS. The influence of flange plate and high-strength bolt on joint stiffness and bearing capacity were also analyzed. The results indicated that the load bearing capacity of precast joint were slightly smaller than those of cast-in-site joint. The flange plate and bolts were the main force-bearing parts. When the ultimate load reached 85%, the steel skeleton yield first, which were easy to repair after damage. The flange plate thickness increased from 16 mm to 40 mm, the yield load and ultimate load increased by 17.33% and 18.34%. The diameter of high strength bolts increased

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808100); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0004); 辽宁省自然科学基金项目(20170540303)

作者简介: 王连广(1964—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事预应力组合结构设计与理论计算等方面研究。

from M20 to M30, the yield load and ultimate load increased by 40.43% and 35.38%. The number of high strength bolts increased from 6 to 18, the yield load and ultimate load increased by 18.31% and 9.65%. In engineering practice, it is suggested that the thickness of flange plate should be 30 mm, with 12 M27 high-strength bolts.

Key words: precast steel-encased concrete beam; external flange plate; steel plate sleeve; yield load; ultimate load

外包钢混凝土梁柱是在外部配置角钢、钢板等型钢,通过横向箍筋连接成钢骨架,再浇筑混凝土而形成的结构,具有自重轻、截面尺寸小、延性好的优点^[1-3]。J. Liu^[4]提出一种新型 U 型钢-预应力钢筋混凝土梁,通过剪力钉连接,承载力较钢筋混凝土梁提高了 5%~10%。H. Kim^[5]对采用螺栓连接的角钢组合柱进行偏心加载试验,结果表明其轴向强度和延性均大于传统型钢混凝土组合柱。对于梁柱节点,其构造形式直接关系到结构的可靠性,为解决传统节点施工复杂、延性不足等问题,国内外学者在节点设计^[6-8]、性能优化^[9-10]、理论推导^[11-12]方面进行了广泛研究。吴峰^[13]通过研究得出现浇钢纤维混凝土梁柱节点较普通混凝土梁柱节点在刚度、抗裂强度及剪切延性方面均有增加,但核心区域剪切变形较大,导致耗能指标出现下降。B. Mou^[14]通过循环加载试验,研究了由外环加劲肋加固的钢-混凝土组合梁柱节点的抗震性能,分析其剪切能力、滞后行为、变形能力和失效模式。H. Hwang^[15]对现浇 U 型钢混凝土梁与外包角钢混凝土柱节点进行循环荷载试验,研究其承载、变形能力及破坏模式。C. Wu^[16]研究了 H 型钢钢筋混凝土柱-钢梁节点在低周往复载荷作用下的失效过程及特点,其荷载-位移曲线较为饱满,承载力高,耗能强,但加工时须保证节点处焊接强度。S. Yu^[17]通过拟静力试验研究了不同连接方式下钢-混凝土梁柱节点受力特性,分析了接头盖板的长度、法兰盘厚度和焊缝长度对节点抗震性能的影响,并利用 ABAQUS 验证其可靠性。B. Dong^[18]和 D. Ma^[19]研究了钢筋混凝土(RC)梁-钢管混

凝土(CFST)叠合柱节点的抗震性能,增加节点处配筋率和梁柱的截面尺寸能够提高结构的承载能力、延性。

目前对于外包钢混凝土构件的连接研究主要集中在现浇节点,施工中须严格控制核心区混凝土的浇筑质量,而预制构件具有施工质量高、施工方便等优点^[20]。因此,笔者提出了 3 种采用螺栓连接的预制外包钢混凝土梁柱节点构造,选取外法兰盘节点建立 ABAQUS 有限元模型,并与现浇节点进行对比,研究其荷载-位移曲线以及法兰盘、高强螺栓对节点刚度、承载力的影响,以优化节点构造。

1 节点设计

1.1 外法兰盘连接节点

根据法兰盘与高强螺栓刚度大、延性好的特点,设计一种预制外法兰盘连接梁柱节点(见图 1),该连接节点具有自重轻、受力方式清晰、施工方便的特点,适用于高层、超高层建筑。

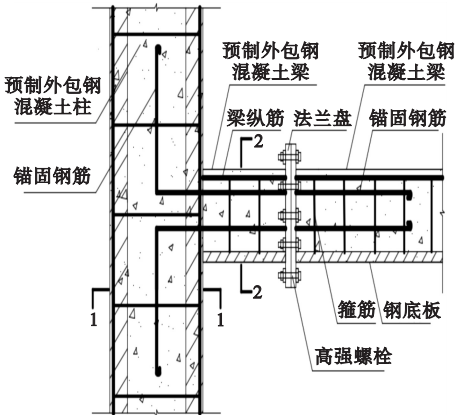


图 1 外法兰盘连接节点示意图

Fig. 1 Schematic of external flange connection joint

绑扎预制柱钢筋与角钢,并在柱上延伸出一段预埋梁,绑扎好预埋梁上的纵筋、钢底板,将弯曲锚固钢筋焊接在法兰盘上,法兰盘焊接在钢底板与纵筋上,浇筑混凝土,完成预制柱制作,截面示意图见图2(a),外包钢混凝土梁做法同预埋梁,截面示意图见图2(b)。将两者螺栓孔对齐,在梁上完成法兰盘与螺栓连接。

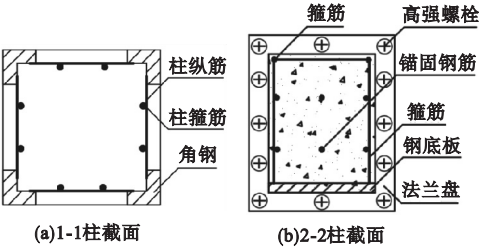


图2 截面示意图

Fig. 2 Schematic section

1.2 环向钢板套筒连接节点

为避免柱上预埋梁制作,设计一种环向钢板套筒梁柱连接节点(见图3),将上述预制外包钢柱的一段外包角钢替换为环向钢板套筒,可增强梁柱连接节点的刚度,运输和施工更加方便,适用于高层、超高层等建筑以及对抗震设防烈度要求较高的区域。环向钢板套筒见图4,在钢板套筒上焊接锚固钢筋,用于加固钢板套筒与外包钢混凝土柱,并预留螺栓孔,将高强螺栓一端预埋在螺栓孔内,浇筑混凝土。将上述外包钢混凝土梁端法兰盘与环向钢板套筒柱通过螺栓相连,节点见图5。

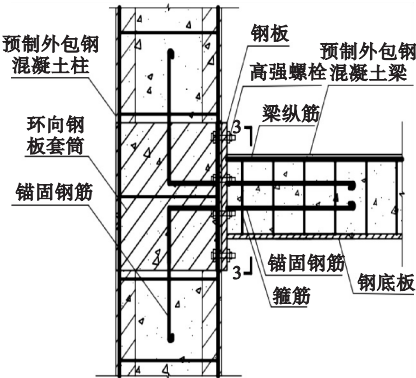


图3 环向钢板套筒连接节点示意图
Fig. 3 Schematic of circumferential steel sleeve connection joint

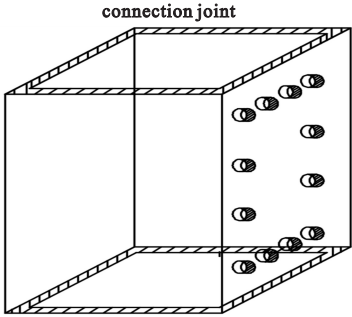


图4 环向钢板套筒

Fig. 4 Schematic of steel sleeve

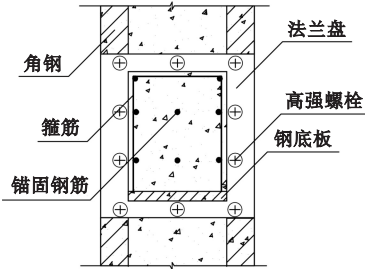


图5 环向钢板套筒连接节点3-3截面示意图

Fig. 5 Schematic of section 3-3 of circumferential steel sleeve connection joint

1.3 牛腿连接节点

牛腿具有传力明确、施工效率高、工序简单的优势,适用于厂房内结构的节点连接。笔者设计了一种牛腿连接梁柱节点(见图6),绑扎柱上牛腿锚固钢筋,在牛腿上预埋高强螺栓,浇筑混凝土完成预制柱制作。在外包混凝土梁的连接处预留出螺栓孔,将柱上预埋高强螺栓穿过梁上的螺栓孔,完成现场装配连接,节点处示意图见图7。

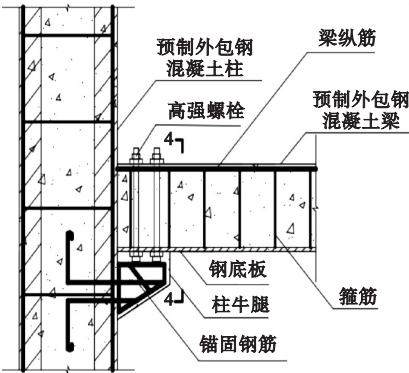


图6 牛腿连接节点示意图

Fig. 6 Corbel connection joint schematic

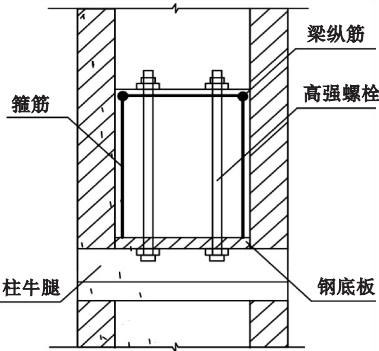


图7 牛腿连接节点4-4截面示意图

Fig. 7 Schematic of section 4-4 of corbel connection joint

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

选取上述三种节点中的外法兰盘连接节

表1 力学性能指标

Table 1 Mechanical properties

材料	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
C40 混凝土	2. 39	26. 8	—	32. 5	2 400	0. 3
HPB300 钢筋	—	—	300	200	7 800	0. 3
HRB400 钢筋	—	—	400	206	7 800	0. 3
Q235B 钢板	—	—	235	206	7 900	0. 3
Q355B 钢板	—	—	355	206	7 900	0. 3

注:Q235B 钢材极限强度取值为 440 MPa;Q355B 钢材极限强度取值为 600 MPa。

预制模型中高强螺栓、外包角钢、混凝土、法兰盘采用 C3D8R 单元,纵向钢筋与箍筋采用 T3D2 单元。箍筋、纵筋与混凝土梁柱之间施加“内置”约束,外包角钢与混凝土柱、外包钢底板与混凝土梁、法兰盘与混凝土梁、外包钢底板、纵筋之间均施加“绑定”约束。法兰盘之间利用“罚”摩擦公式,螺母与法兰盘间定义为硬接触。柱底端完全固定,轴压比取 0. 3,即柱顶端施加 2 062. 8 kN 的竖向轴力。梁最外端上部向下施加竖向位移 260 mm。建立两个分析步进行加载,在第一个分析步中,施加柱顶轴向压力,在第二个分析步中,采用位移加载方式在梁端施加位移荷载。除无高强螺栓、法兰盘部件,现浇节点的建模方法与上述预制节点相同。

点,建立 ABAQUS 有限元模型。柱高为 6 000 mm,截面宽×高为 600 mm×600 mm;截面配置 4 根 22 纵向受力钢筋,箍筋为 8@200,钢筋强度等级分别为 HRB400、HPB300;外包角钢为 Q355B,规格为 L 90 mm×90 mm×10 mm。

预制外包钢混凝土梁长 4 500 mm,截面宽×高为 300 mm×700 mm,柱上预埋梁长 2 250 mm;梁上部和腰部均配置 4 根 22 纵向钢筋,箍筋为 8@200,钢筋强度等级分别为 HRB400、HPB300;保护层厚度为 70 mm,外包钢底板为 Q355B,厚 10 mm。现浇混凝土采用强度等级为 C40。

法兰盘为 Q235B,厚 30 mm,截面长×宽为 460 mm×860 mm,布置 12 个 8. 8 级 M27 高强螺栓。材料力学性能指标见表 1。

2.2 预制与现浇外包钢混凝土梁柱节点对比

预制与现浇外包钢混凝土梁柱连接构件基于梁端加载点竖向的荷载-位移曲线如图 8 所示。

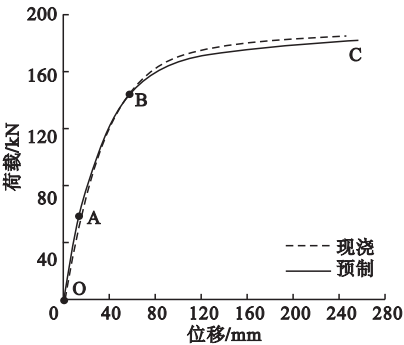


图8 梁柱连接构件荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-deflection curves of beam-column members

从图 8 可以看出,曲线分 OA 弹性阶段、AB 弹塑性阶段与 BC 强化阶段 3 个阶段。对于预制连接节点,在 OA 弹性受力阶段,曲线呈线性增长,预制连接构件应力云图见图 9。在此阶段,钢骨架与混凝土协同受力。混凝土和钢骨架应力整体处于一个比较低的水平,钢骨架应力比混凝土应力大,说明相较于混凝土,钢骨架是主要受力构件。梁上部对应的法兰盘及螺栓应力较大,预埋梁较另一段梁的应力大,说明法兰盘和螺栓的刚度较大,可以将外部荷载产生的应力转移到梁端的接头附近。

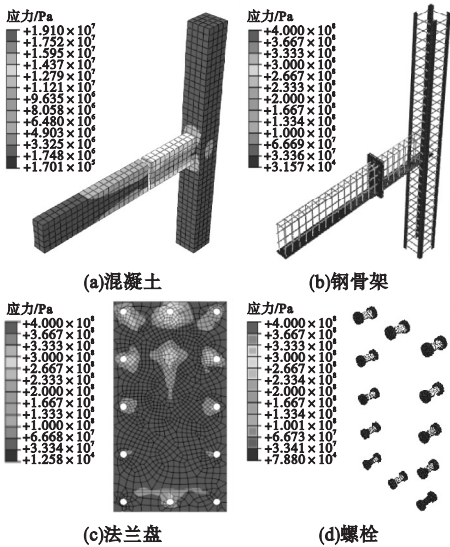


图 9 弹性阶段预制构件应力云图

Fig. 9 The stress plots of precast components in elastic stage

在 AB 弹塑性受力阶段,预制外包钢混凝土梁柱节点应力云图见图 10。在此阶段,曲线呈非线性增长,预制梁受拉区混凝土达到抗拉强度,外包钢底板与钢筋的应力增大,钢骨架承担大部分拉力。当荷载达到极限荷载的 85% 左右即 B 点时,受拉区钢筋出现部分屈服,梁端受压区混凝土已有塑性变形,但不充分,可继续承载。法兰盘上应力增大,螺栓孔周围应力增加,受拉区螺栓应力随荷载增加明显,但连接节点未屈服,仍可继续承载。

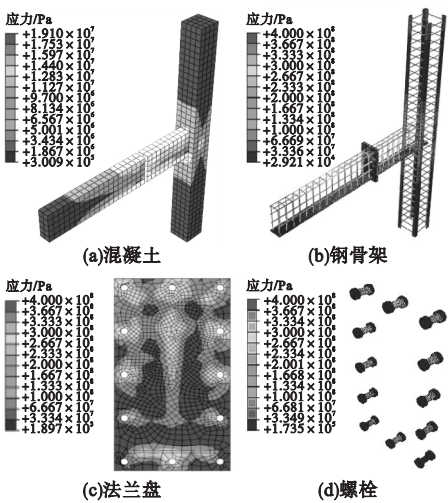


图 10 弹塑性阶段预制构件应力云图

Fig. 10 The stress plots of precast components in elastic-plastic stage

在 BC 强化阶段,预制外包钢混凝土梁柱节点应力云图见图 11。在此阶段,梁端与柱相连接处的钢骨架屈服面积增大,达到屈服强度,拉应力为 400 MPa。梁端受压区混凝土应力增大,构件塑性变化更为明显。荷载继续增加,受压区混凝土被压碎,构件破坏,构件极限承载力为 182.72 kN。法兰盘出现屈服,栓孔周围应力值最大。梁受拉区螺栓与受压区螺栓均开始产生不同程度的屈服。

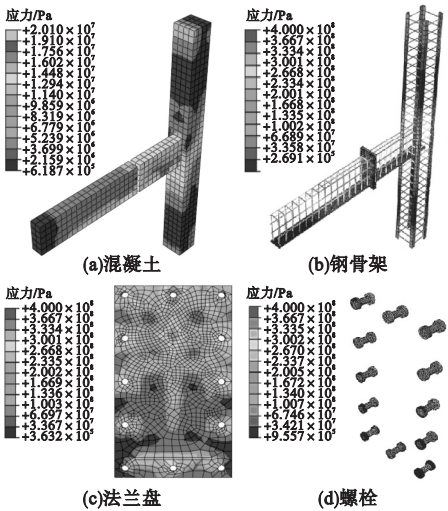


图 11 强化阶段预制构件应力云图

Fig. 11 The stress plots of precast components in hardening stage

对于现浇连接节点,在 OA 弹性阶段,构件的变形主要取决于混凝土材料性质,因此两者的荷载 - 位移曲线变化趋势基本相同。进入 AB 弹塑性阶段后,因预制连接节点通过法兰盘和螺栓连接,二者的荷载 - 位移曲线略有差别,但总体趋势不变。强化阶段,现浇、预制连接节点的受力特性基本相同,现浇连接构件极限承载力为 187.85 kN。预制外包钢混凝土梁柱连接构件与现浇外包钢混凝土梁柱连接构件承载力基本相同,可应用于实际工程之中。

2.3 参数分析

连接板厚度及高强螺栓对梁柱节点的变形有一定影响^[21]。为研究法兰盘厚度与高强螺栓对预制外包钢混凝土梁柱连接节点承载力及受力性能的影响,笔者共设计了 10 个节点模型,参数见表 2。

表 2 梁柱节点参数

Table 2 Beam-column node parameters			
编号	法兰盘厚度/mm	螺栓数量/个	螺栓规格
YZL1	30	12	M27
YZL2	16	12	M27
YZL3	22	12	M27
YZL4	32	12	M27
YZL5	40	12	M27
YZL6	30	6	M27
YZL7	30	18	M27
YZL8	30	12	M20
YZL9	30	12	M22
YZL10	30	12	M30

注:YZL 表示预制外包钢混凝土梁。

2.3.1 法兰盘厚度的影响

建立 5 种预制外包钢混凝土梁柱节点模型,法兰盘厚度分别为 16 mm、22 mm、30 mm、32 mm、40 mm,其余参数相同,各模型的荷载 - 位移曲线见图 12。

从图 12 可以看出,在弹性阶段,法兰盘较薄的构件曲线斜率较小,说明法兰盘厚度对构件刚度的影响呈正相关,主要是因为厚

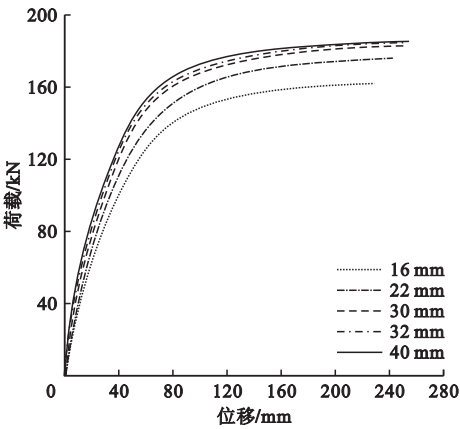


图 12 不同法兰盘厚度下的荷载 - 位移曲线
Fig. 12 Load-deflection curves under different flange thickness

度增加,法兰盘截面受力面积增大。法兰盘为 30 mm 厚时,屈服荷载较法兰盘厚度为 16 mm 的构件提高了 14.77%,极限荷载提高了 16.89%。法兰盘为 40 mm 厚时,屈服荷载较法兰盘厚度为 30 mm 的构件提高了 2.56%,极限荷载提高了 1.45%,因此采用厚度为 30 mm 的法兰盘较为合理。

2.3.2 螺栓直径的影响

建立 4 种预制外包钢混凝土梁柱节点模型,螺栓直径分别为 M20、M22、M27、M30,其余参数相同,各模型荷载 - 位移曲线见图 13。

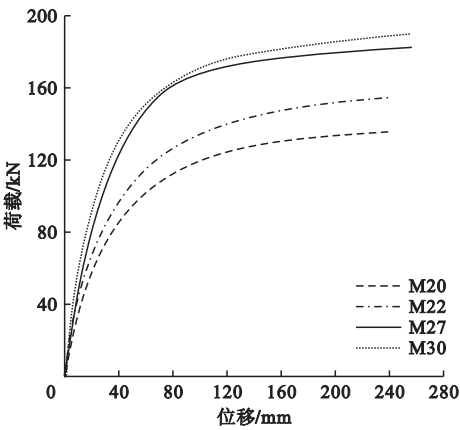


图 13 不同螺栓直径下的荷载 - 位移曲线
Fig. 13 Load-deflection curves under different diameters of bolts

从图 13 可以看出,在弹性阶段,螺栓直径对构件刚度的影响呈正相关,主要是因为直径增加,螺栓杆截面受力面积增大。采用 M27 螺栓较 M20 螺栓屈服荷载提高 39.34%,极限荷载提高 32.40%。采用 M30 螺栓较 M27 螺栓屈服荷载提高 1.09%,极限荷载提高 2.98%。因此采用 M27 的高强螺栓较为合理。

2.3.3 螺栓个数的影响

建立 3 种预制外包钢筋混凝土梁柱连接节点模型,螺栓个数分别为 6 个、12 个、18 个,其余参数相同,各模型的荷载-位移曲线见图 14。

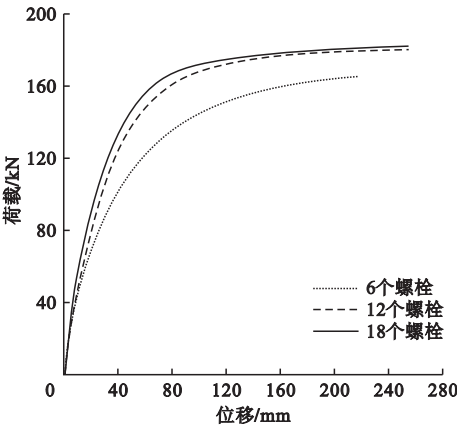


图 14 不同螺栓个数下的荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-deflection curves under different numbers of bolts

从图 14 可以看出,加载初期,荷载-位移曲线斜率随着螺栓个数的增加略有增加。弹塑性阶段,各预制连接节点的荷载-位移曲线斜率相差增大,采用 6 个螺栓的连接节点的曲线斜率明显小于采用 12 个与 18 个螺栓连接节点的曲线斜率,说明弹塑性阶段,螺栓个数对节点刚度影响较大。

对于承载力,采用 12 个螺栓的连接节点屈服荷载较采用 6 个螺栓的屈服荷载提高了 14.78%,极限荷载提高了 8.35%。采用 18 个螺栓的连接节点屈服荷载较 12 个螺栓的屈服荷载提高了 3.52%,极限荷载提高了 1.30%。相较于 6 个螺栓,采用 12 个螺栓的

法兰盘分别在受拉区与受压区各多设置一排受拉与受压螺栓,承载力提高较多。而采用 18 个螺栓时,法兰盘上螺栓孔总面积较大,法兰盘强度降低,承载力增加幅度较小,因此配置 12 个螺栓较为合理。

3 结 论

(1) 预制外法兰盘梁柱连接节点的承载力略低于现浇外包钢筋混凝土梁柱节点。法兰盘与螺栓为主要受力部件,当达到极限荷载的 85% 时,钢骨架首先屈服,破坏后便于修复。

(2) 法兰盘厚度由 16 mm 增加到 40 mm,屈服荷载增加 17.33%,极限荷载增加 18.34%;高强螺栓直径由 M20 增加到 M30,屈服荷载增加 40.43%,极限荷载增加 35.38%;数量由 6 个增加到 18 个,屈服荷载增加 18.31%,极限荷载增加 9.65%。

(3) 在实际工程中,法兰盘厚度取 30 mm、配置 12 个 M27 高强螺栓较为合理。

参考文献

[1] 张婧,胡夏闽,张冰,等. 拉力作用下部分外包钢-混凝土组合构件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(增刊1):349-354. (ZHANG Jing, HU Xiamin, ZHANG Bing, et al. Shear behavior of partially encased steel-concrete composite specimens under tension [J]. Journal of building structures, 2017, 38 (S1):349-354.)

[2] 徐铨彪,干钢,陈刚. 外包钢加固钢筋混凝土框架梁受力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2016,37(12):136-143. (XU Quانبiao, GAN Gang, CHEN Gang. Analysis on mechanical behavior of RC frame beams encased with steel plate [J]. Journal of building structures, 2016,37(12):136-143.)

[3] KIM C, PARK H, LEE H, et al. Eccentric axial load test for high-strength composite columns of various sectional configurations [J]. Journal of structural engineering, 2017, 143 (8): 4017075.

[4] LIU J, CHEN G, CHEN Y F, et al. Experimental study on the flexural behavior of cold-formed U-shaped steel-encased confined prestressed RC beam [J]. Journal of constructional steel research, 2021, 182:106656.

[5] KIM H, HWANG H, PARK H. Eccentric-axial-load test for composite columns using bolt-

- connected steel angles [J]. Journal of structural engineering, 2020, 146(9): 4020178.
- [6] HÜSEM M, NASERY M M, OKUR F Y, et al. Experimental evaluation of damage effect on dynamic characteristics of concrete encased composite column-beam connections [J]. Engineering failure analysis, 2018, 91: 129 – 150.
- [7] XU X, CHENG R, YANG P, et al. Cyclic loading test for concrete-filled U-shaped steel beam to concrete-filled steel tube column connections [J]. International journal of steel structures, 2020, 20(6): 1859 – 1870.
- [8] YU S J, WU C, ZHOU F, et al. Experimental study and numerical simulation of a new prefabricated SRC column to steel beam composite joint [C]. New York: Structures, 2020.
- [9] BIAN Y, TIAN Y, ZHAO Y, et al. Nonlinear analysis of edge joint on T-shaped concrete-filled steel tubular column-H-shaped steel beam seismic performance based on ABAQUS [J]. Global journal of research in engineering, 2019, 19(1): 1 – 7.
- [10] 孙建鹏, 刘银涛, 孙文武, 等. 端部不等高的钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 30(2): 202 – 211.
(SUN Jianpeng, LIU Yintao, SUN Wenwu, et al. Experimental study on mechanical behavior of steel-concrete composite beams with variable height at the ends[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 30(2): 202 – 211.)
- [11] CAO D, LIU J, GE W, et al. Experimental study on the shear performance of steel-truss-reinforced concrete beam-column joints [J]. Advances in civil engineering, 2021(13): 1 – 17.
- [12] 吴波, 计明明. 薄壁 U 形外包钢再生混合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 246 – 254.
(WU Bo, JI Mingming. Flexural tests on thin-walled u-shaped steel beams filled with demolished concrete blocks and fresh concrete [J]. Journal of building structures, 2014, 35(4): 246 – 254.)
- [13] 吴峰. 高层房屋现浇钢纤维混凝土梁柱节点抗震设计[J]. 建筑技术, 2017, 48(4): 349 – 352.
(WU Feng. Anti seismic design of steel fiber reinforced concrete beam column joints of high rise building [J]. Architecture technology, 2017, 48(4): 349 – 352.)
- [14] MOU B, BAI Y. Experimental investigation on shear behavior of steel beam-to-CFST column connections with irregular panel zone [J]. Engineering structures, 2018, 168: 487 – 504.
- [15] HWANG H, EOM T, PARK H, et al. Cyclic loading test for beam-column connections of concrete-filled U-shaped steel beams and concrete-encased steel angle columns [J]. Journal of structural engineering, 2015, 141(11): 4015020.
- [16] WU C, LIU J, TAN W, et al. Seismic behavior of composite interior joints of prefabricated H-shaped steel reinforced concrete column-steel beam [C]. New York: Structures, 2020.
- [17] YU S, WU C, Zhou F, et al. Experimental study and numerical simulation of a new prefabricated SRC column to steel beam composite joint [C]. New York: Structures, 2020.
- [18] 刘用, 郭兰慧, 张素梅. 方钢管混凝土柱-外包 U 形钢混凝土组合梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 131 – 140.
(LIU Yong, GUO Lanhui, ZHANG Sumei. Cyclic loading tests of composite joints between concrete-filled square steel tubular column and composite beam with u-shaped steel girder [J]. Journal of building structures, 2018, 39(6): 131 – 140.)
- [18] DONG B, PAN J, CAI J, et al. Mechanical behaviour of a new ECC-encased CFST column to RC beam connection under cyclic loading [J]. Engineering structures, 2021, 234: 111915.
- [19] MA D Y, HAN L H, ZHAO X L. Seismic performance of the concrete-encased CFST column to RC beam joint: experiment [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 154: 134 – 148.
- [20] RAVE-ARANGO J F, BLANDÓN C A, RESTREPO J I, et al. Seismic performance of precast concrete column-to-column lap-splice connections [J]. Engineering structures, 2018, 172: 687 – 699.
- [21] 王修军, 王燕, 安琦. 装配式梁柱外环板高强螺栓连接节点抗弯承载力及节点刚度研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊2): 75 – 82.
(WANG Xiujun, WANG Yan, AN Qi. Moment resistance and stiffness of an assembled beam-column joint with high-strength bolt and external diaphragm [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2019, 52(S2): 75 – 82.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)