

预制型钢混凝土柱拼接及节点受力数值模拟

陈百玲,黄小斌,倪磊,王连广

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要 目的 研究预制柱的拼接方式和拼接节点的力学性能,为预制型钢混凝土结构的设计和工程应用提供参考。方法 设计了3种预制型钢混凝土柱-柱拼接方式,通过ABAQUS软件对法兰板螺栓-钢筋连接器拼接节点模型和现浇模型进行数值模拟,分析混凝土强度、螺栓数目、法兰板厚度及轴压比对预制节点受力性能的影响。结果 预制节点模型与现浇模型受力性能基本一致,且预制节点的承载力随着设计参数的增大而提高。但是当螺栓数目超过12个或法兰板厚度超过30 mm时,此时增大螺栓数目或法兰板厚度对承载力的提升基本无影响。结论 法兰板螺栓-钢筋连接器拼接节点构造合理,满足承载力需求。

关键词 预制型钢混凝土;法兰板;拼接节点;数值模拟

中图分类号 TU398 文献标志码 A

Splicing of Prefabricated Steel Reinforced Concrete Column and Numerical Simulation of Joint Mechanical Performance

CHEN Bailing, HUANG Xiaobin, NI Lei, WANG Lianguang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110819)

Abstract: The study on the splicing mode of prefabricated columns and the mechanical properties of splicing joints provides reference for the design and engineering application of prefabricated steel concrete structures. In this study, three kinds of splicing methods of prefabricated steel reinforced concrete columns were designed, and numerical simulation analysis was carried out on the flanged bolt-reinforcement connector splicing joint model and cast-in-place model by using ABAQUS software. The influences of concrete strength, number of bolts, flange plate thickness and axial compression ratio on the mechanical properties of prefabricated members were analyzed. The results show that the mechanical performance of prefabricated joint model is basically the same as that of cast-in-place model, and the bearing capacity of prefabricated joint increases with the increase of design parameters. However, when the number of bolts exceeds 12 or the thickness of

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:陈百玲(1972—),女,副教授,博士,主要从事钢与混凝土结构等方面研究。

flange plate exceeds 30 mm, the increase of these two parameters has no effect on the improvement of bearing capacity basically. The structure of flange plate bolt- steel connector splicing joint is reasonable and meets the requirements of bearing capacity.

Key words: prefabricated steel reinforced concrete; flange plate; spliced joint; numerical simulation

预制装配式结构由于施工周期短、节能减排、绿色环保等优势,是近些年国家大力推广的一种结构形式^[1-2],对预制装配式混凝土结构的研究关键在于预制构件连接技术。戎贤^[3]研究了装配式钢管混凝土柱梁下栓上焊节点的抗震性能。L. Xu^[4]提出了一种带有灌浆套筒连接的预制 RC/ECC 组合柱。G. Wang^[5]研究了使用混合螺栓拼接预制混凝土柱的抗震性能。V. Popa 等^[6]进行了使用灌浆波纹钢套管连接预制柱的试验。张晋元^[7]提出一种与现浇柱性能相当的装配式混凝土柱-柱节点,该节点的特殊之处是拼接位置的锁具-锁和截面齿槽状构造。K. H. Yang 等^[8]提出在柱与梁中各预埋一段 H 型钢,用螺栓连接外伸型钢的节点连接方式。程东辉等^[9]研究了轴心受压下灌浆套筒连接装配式混凝土柱力学性能。

鉴于预制型钢混凝土构件优良的力学性能,有学者对预制装配式型钢混凝土构件进行了研究^[10-12]。C. Wu^[13-15]提出了由预制节点核心区模块通过干式连接组成的预制装配式型钢混凝土柱-钢梁连接节点。郭小农^[16]提出在梁端预埋槽钢连接预制混凝土和型钢混凝土柱,并分析该节点承载力及其影响因素。刘震^[17]介绍了由方钢管、加劲板与节点盖板焊接而成的节点模块拼接预制钢骨混凝土柱的连接方式。

预制柱作为重要的竖向传力构件,其力学性能和整体性必须要得到保证。基于此,笔者设计了3种新型的拼接方式应用于预制型钢混凝土柱-柱之间,并应用 ABAQUS 软件对法兰板螺栓-钢筋连接器拼接节点进行模拟。建立了预制构件与现浇构件的有限元模型,比较二者受力性能的差异,研究混凝土

强度、节点处螺栓的数目、法兰板厚度和轴压比等参数对预制构件整体受力性能的影响,从而优化节点拼接构造。

1 预制型钢混凝土柱拼接方式

1.1 法兰板-外置螺栓拼接

将柱内钢筋和型钢与法兰板焊接,使上下两段柱的法兰板紧密贴合,并使用螺栓固定,拼接方式见图1。

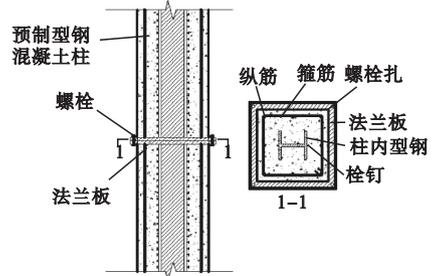


图1 法兰板-外置螺栓拼接

Fig. 1 Flanged plate-external bolt splicing

1.2 法兰板-内置螺栓拼接

与外置螺栓拼接类似,法兰板-内置螺栓拼接也是利用螺栓连接上下法兰板,从而将上下预制柱拼接成整体。不同的是,此种拼接是将螺栓置于预制柱内部,保证了上下柱的一体性,使得柱的外形更加美观。拼接方式见图2。

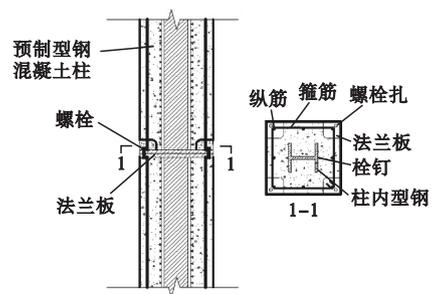


图2 法兰板-内置螺栓拼接

Fig. 2 Flange plate-built-in bolt splicing

1.3 法兰板螺栓-钢筋连接器拼接

该拼接方式是在法兰板-内置螺栓拼接的基础上,对预制柱纵筋采用直螺纹套筒或者灌浆套筒连接,相比于将纵筋焊接在法兰板上更加可靠。拼接方式见图3。

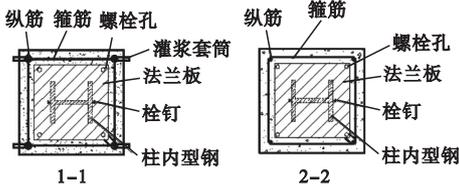
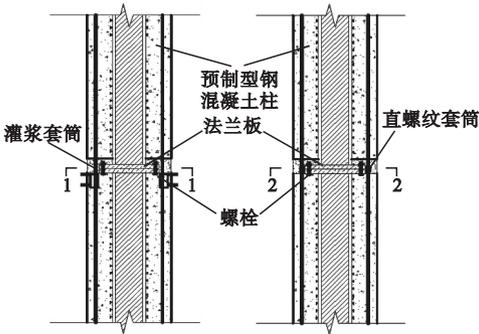


图3 法兰板螺栓-钢筋连接器拼接

Fig. 3 Flange plate bolt-reinforcement connector splicing

2 法兰板螺栓-钢筋连接器拼接节点受力数值模拟

2.1 本构模型

2.1.1 混凝土

混凝土选取损伤塑性模型,其单轴应力-应变曲线见图4。

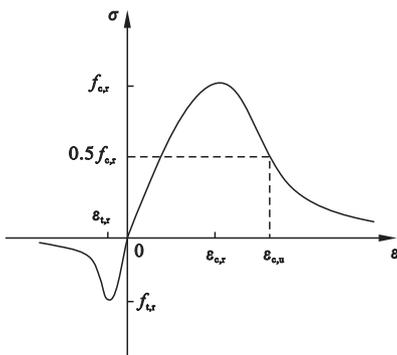


图4 混凝土单轴应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial stress-strain curve of concrete

当混凝土受拉时:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon. \tag{1}$$

当混凝土受压时:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon. \tag{2}$$

式中: σ 、 ε 分别为混凝土应力和应变; E_c 为混凝土弹性模量; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

2.1.2 钢筋和型钢

钢材采用弹塑性模型,应力-应变曲线见图5。图中 $f_{st,r}$ 、 $f_{y,r}$ 分别为钢材极限强度代表值和钢材屈服强度代表值; ε_u 、 ε_y 分别为对应的钢材峰值应变和钢材应变; k 为钢材硬化段斜率,取0.01。

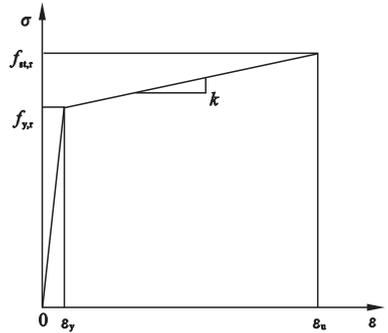


图5 钢材应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of steel

2.2 模型参数

设定现浇和预制型钢混凝土柱截面宽高均为600 mm×600 mm,长为4 m;柱内置型钢采用Q355厚度为12 mm的钢材;柱箍筋为Φ8@200 mm,所配纵筋为8Φ22。法兰板长宽为450 mm×450 mm,选用Q235型钢;高强螺栓直径为30 mm,直螺纹套筒与柱纵筋尺寸相适应,内直径为22 mm。各节点参数见表1。

2.3 单元选取和材料属性定义

混凝土单元、内置型钢、法兰板以及螺栓单元采用C3D8R单元,而柱内钢筋以及箍筋采用T3D2单元。模型中混凝土与钢材的力学性能指标见表2和表3。

表1 各节点参数

Table 1 Parameters of each joint

柱编号	法兰板厚度/ mm	螺栓/ 个	混凝土强 度等级	轴压比
XJ	—	—	C50	0.1
YZ	30	12	C50	0.1
FL-25	25	12	C50	0.1
FL-20	20	12	C50	0.1
FL-15	15	12	C50	0.1
FL-40	40	12	C50	0.1
LS-16	30	16	C50	0.1
LS-8	30	8	C50	0.1
LS-4	30	4	C50	0.1
C-C35	30	12	C35	0.1
C-C40	30	12	C40	0.1
C-C45	30	12	C45	0.1
ZY-0.1	30	12	C60	0.1
ZY-0.3	30	12	C50	0.3
ZY-0.5	30	12	C50	0.5
ZY-0.7	30	12	C50	0.7

表2 混凝土力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of concrete

强度等级	轴心抗拉强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
C35	2.20	23.4	31 500	0.2
C40	2.39	26.8	32 500	0.2
C45	2.51	29.6	33 500	0.2
C50	2.64	32.4	34 500	0.2
C60	2.85	38.5	36 000	0.2

表3 钢材力学性能指标

Table 3 Mechanical properties of steel

型号	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比
HPB300	300	420	210 000	0.3
HRB400	400	540	200 000	0.3
Q235	235	440	206 000	0.3
Q355	355	630	206 000	0.3

2.4 建立模型和网格划分

现浇及预制构件模型见图6。

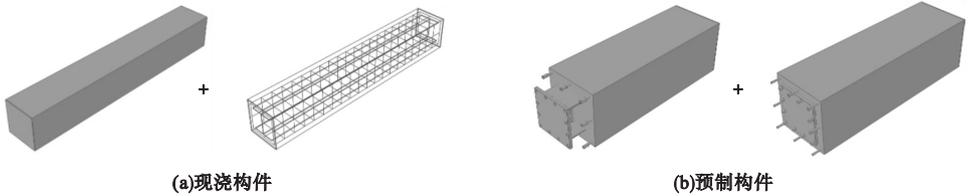


图6 模型图

Fig. 6 Model diagram

为了防止出现应力集中现象,在柱的上下两端设置两块厚度为12 mm、材质为Q235的钢垫板;忽略后浇混凝土与柱之间的作用及直螺纹套筒对钢筋的拼接作用。

对模型进行网格划分,混凝土、柱内置型钢和柱两端的刚垫板单元采用扫掠网格中性轴算法进行划分,螺栓采用四面体网格划分,其他部件采用扫掠网格进阶算法进行划分。

2.5 约束边界条件及加载方式

将预制柱底端完全固定,顶端自由。钢筋骨架和内置型钢“内置”于“整个模型”;法兰板与法兰板、螺栓与法兰板之间采用硬接触来模拟两者的法向接触,罚函数来模拟切

向接触;内置型钢与法兰板、钢垫板与柱之间采用tie约束。

设置两个分析步:第一步,在柱顶钢垫板上施加轴向压力;第二步,在柱顶钢垫板上采用位移加载的方式施加水平位移。

3 受力全过程分析

在ABAQUS有限元模拟软件中建立预制构件的计算模型,以YZ模型为例,加载点荷载-变形($P-\Delta$)关系曲线见图7。图中OA段为弹性阶段、AB段为弹塑性阶段、BC段为强化阶段。分析各点对应的型钢骨架和法兰板的应力,进而研究节点受力机理。

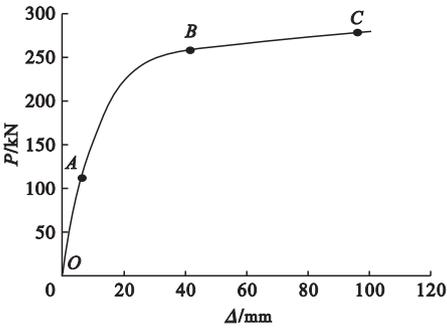


图7 荷载-变形曲线

Fig. 7 Load-deformation curve

3.1 型钢

型钢应力云图见图8。从图中可以看出, A 点型钢端部翼缘板出现一定程度屈服。 B 点型钢靠近柱底受力较大的一侧已屈服, 发生应力重分布, 而受力较小一侧仍然处于弹性阶段。 C 点型钢屈服范围进一步扩大, 逐渐失去承载能力。

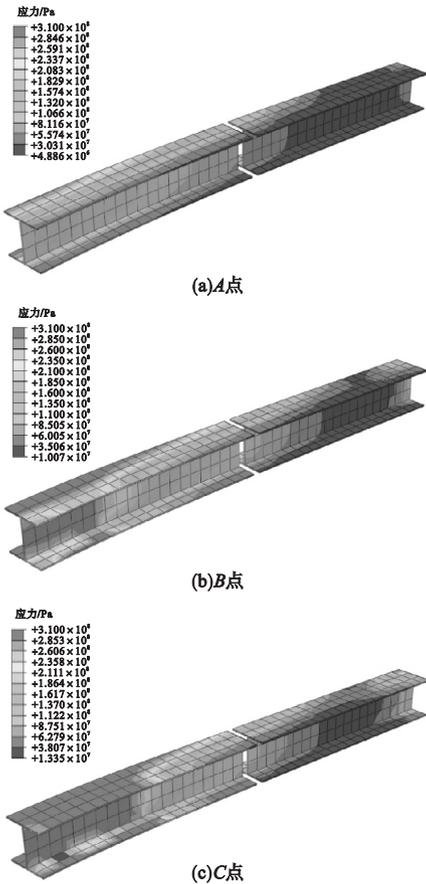


图8 型钢应力云图

Fig. 8 Stress plots of steel

3.2 法兰板

法兰板应力云图见图9。从图中可以看出, A 点法兰板尚未屈服。 B 点法兰板应力增大, 但仍未屈服, 还可继续承载。 C 点法兰板在螺栓孔处和边缘处发生屈服, 此时节点达到极限承载力, 构件发生破坏。

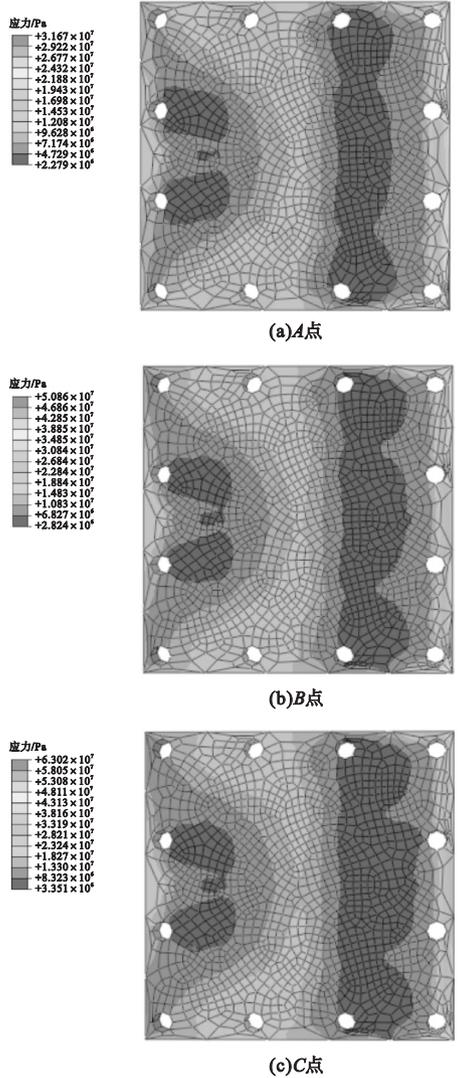


图9 法兰板应力云图

Fig. 9 Stress plots of flange plate

4 数值模拟结果分析

4.1 现浇与预制构件受力对比

利用 ABAQUS 软件, 通过对两种构件设置相同的边界、加载条件, 得到荷载-变形 ($P-\Delta$) 关系曲线见图10。

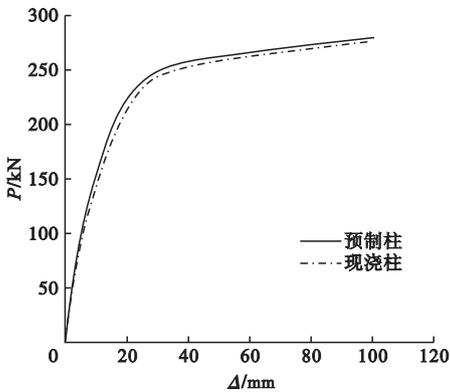


图 10 现浇与预制构件荷载-变形曲线

Fig. 10 Load deformation curves of cast-in-place and prefabricated components

从图 10 可以看出,现浇构件模型与预制构件模型的曲线基本重合,两种构件在刚度、屈服荷载、极限荷载、延性等方面是基本一致的,柱顶水平荷载极限值(即曲线峰值)均为 260 kN 左右。说明在法兰板螺栓-钢筋连接器拼接下的预制型钢混凝土柱的受力性能是可靠的,与现浇形式相比基本上没有差别。

4.2 设计参数分析

4.2.1 法兰板厚度的影响

笔者建立了 YZ、FL-15、FL-20、FL-25 和 FL-40 模型,得到荷载-变形($P-\Delta$)关系曲线见图 11。

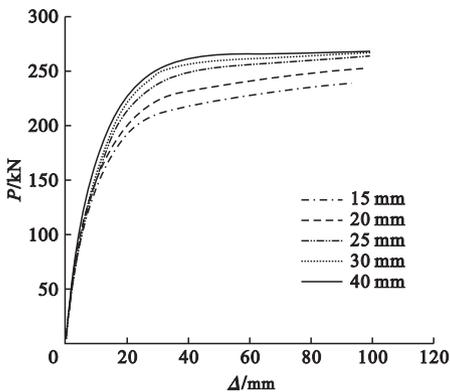


图 11 不同法兰板厚度下荷载-变形曲线

Fig. 11 Load-deformation curves of different flange plate thickness

从图 11 可以看出,在弹性阶段,同一荷载下,法兰板厚度为 20 mm、25 mm、30 mm 和 40 mm 的构件比 15 mm 的构件的刚度分

别提高了 4.7%、6.4%、8.2% 和 10.3%。说明构件的刚度随着法兰板厚度的增加而增大;在相同变形处,法兰板厚度大的构件荷载大于法兰板厚度小的构件。直线强化段内,法兰板厚度为 20 mm、25 mm、30 mm 和 40 mm 的柱顶水平荷载极限值比 15 mm 的构件分别提高了 10.7%、18.9%、20.7% 和 21.1%,说明构件水平荷载峰值随着法兰板厚度的增加而提高。但是,随着法兰板厚度的增大,承载力的提高程度在下降,法兰板厚度为 40 mm 和 30 mm 的构件极限承载力差别不大,说明当法兰板厚度超过 30 mm 时对预制构件水平荷载峰值的提高影响不大。建议法兰板厚度取 30 mm。

4.2.2 螺栓数目的影响

笔者建立了 YZ、LS-4、LS-8 和 LS-16 模型,得到荷载-变形($P-\Delta$)关系曲线见图 12。

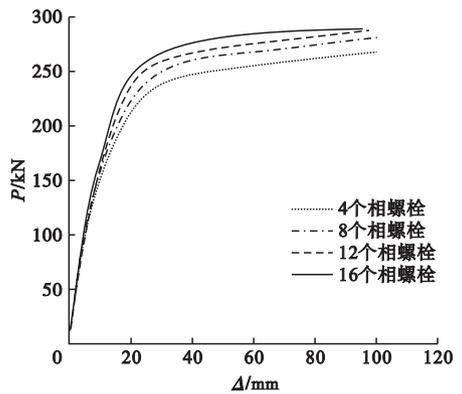


图 12 不同螺栓数目下荷载-变形曲线

Fig. 12 Load-deformation curves of different the bolts' number

从图 12 可以看出,在弹性阶段,同一荷载下,螺栓个数为 8 个、12 个和 16 个的构件刚度比 4 个的构件分别提高了 2.5%、4.2% 和 6.1%,说明构件的刚度随着螺栓个数的增加而增大;相同变形处,螺栓较多的构件水平荷载值大于螺栓较少的构件。直线强化段内,螺栓个数为 8 个、12 个和 16 个的柱顶水平荷载峰值比 4 个的构件分别提高了 7.1%、14.8% 和 15.2%,说明构件的承载力随着螺栓数目的增加而提高。但是,螺栓个

数为12个和16个的构件水平荷载峰值差别不大。说明当螺栓个数超过12个时对预制构件承载力的提升基本没有作用。建议螺栓数目设置为12个。

4.2.3 混凝土强度等级的影响

笔者建立了YZ、C-C35、C-C40、C-C45和C-C60模型,得到荷载-变形($P-\Delta$)关系曲线见图13。

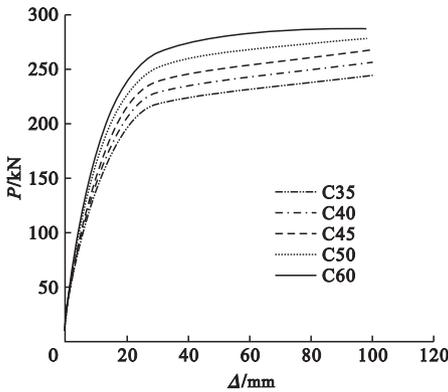


图13 不同混凝土强度等级下荷载-变形曲线

Fig. 13 Load-deformation curves of different concrete strength

从图13可以看出,在弹性阶段,同一荷载下,混凝土强度等级为C40、C45、C50和C60的构件刚度比C35的构件分别提高了3.4%、5.5%、7.8%和10.5%,说明构件的刚度随着混凝土强度的增大而增大;而在相同的变形处,混凝土强度越高,构件的荷载值越大。直线强化段内,混凝土等级由C35提高到C40、C45、C50和C60时,柱顶水平荷载峰值随之提高了5.9%、11.2%、16.8%和23.6%,且混凝土强度每提高一个等级,峰值可提高15kN左右。预制构件的承载能力随着混凝土强度等级的提高而提高。但是,当混凝土强度等级达到C60时,会造成预制构件的延性有所下降。

4.2.4 轴压比的影响

笔者建立了YZ、ZY-0.3、ZY-0.5和ZY-0.7模型,得到荷载-变形($P-\Delta$)关系曲线见图14。

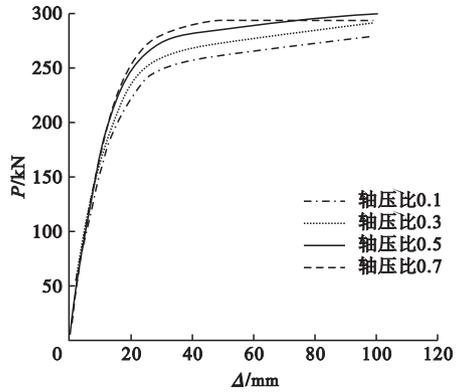


图14 不同轴压比下荷载-变形曲线

Fig. 14 Load deformation curves of different axial compression ratio

从图14可以看出,在弹性阶段,轴压比为0.3、0.5和0.7的构件刚度比轴压比为0.1的构件分别提高了2.1%、4.5%和5.9%,说明构件的刚度随着轴压比的增加而略有增大;相同变形处,轴压比较大的构件的荷载值较轴压比较小的构件大。直线强化段内,轴压比为0.3、0.5和0.7的模型柱顶水平荷载峰值较轴压比为0.1的模型的分别提高了5.9%、12.3%和17.1%,说明构件的承载力随着轴压比的提高而提高。分析原因是由于轴压比对预制构件核心区混凝土的开裂有一定的抑制作用,开裂前对核心混凝土的抗剪承载力有一定的提高。但当轴压比为0.7时,预制柱的延性有所下降。这是由于增大轴压比对型钢腹板的抗剪有不利影响,且高轴压比下的试件破坏类型为脆性破坏。因此,轴压比为0.5对本预制构件的受力性能最为有利。

5 结论

(1)设计了法兰板-外置螺栓拼接、法兰板-内置螺栓拼接和法兰板螺栓-钢筋连接器拼接3种新型拼接方式应用于预制型钢混凝土柱-柱之间;通过对比分析可知,法兰板螺栓-钢筋连接器拼接方式下预制构件的受力性能与现浇构件相当。

(2)预制构件在加载后的破坏截面出现

在柱底位置,符合“强节点,弱构件”设计要求。

(3) 法兰板螺栓-钢筋连接器拼接节点的承载力随着混凝土强度等级的提高、螺栓数量的增多、法兰板厚度的增大及轴压比的增大而增加,但对承载力提升的影响却越来越小;混凝土强度等级为 C50、螺栓为 12 个、法兰板厚度取 30 mm、轴压比为 0.5 时,最适合该预制拼接节点。

参考文献

- [1] ISMAIL Z A. Improving conventional method on precast concrete building maintenance [J]. *Industrial management & data systems*, 2017, 117(7): 1485 - 1502.
- [2] SALAMA W. Design of concrete buildings for disassembly: an explorative review [J]. *International journal of sustainable built environment*, 2017, 6(2): 617 - 635.
- [3] 戎贤,陈磊,张健新. 装配式钢管混凝土柱梁下栓上焊节点抗震性能试验 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(9): 1348 - 1355.
(RONG Xian, CHEN Lei, ZHANG Jianxin. Experimental study on seismic performance of bottom flange bolted and top flange welded prefabricated CFST column to steel beam Joints [J]. *Journal of northeastern university (natural science)*, 2020, 41(9): 1348 - 1355.)
- [4] XU L, PAN J, CAI J. Seismic performance of precast RC and RC/ECC composite columns with grouted sleeve connections [J]. *Engineering structures*, 2019, 188: 104 - 110.
- [5] WANG G, LI Y, LI Z, et al. Experimental and numerical study of precast concrete columns with hybrid bolted splice connections [J]. *Structures*, 2020, 28: 17 - 36.
- [6] POPA V, PAPURCU A, COTOFANA D, et al. Experimental testing on emulative connections for precast columns using grouted corrugated steel sleeves [J]. *Bulletin of earthquake engineering*, 2015, 13(8): 2429 - 2447.
- [7] 张晋元,王昊,王金泽,等. 新型装配式混凝土柱节点理论分析与数值模拟 [J]. *工业建筑*, 2019, 49(1): 85 - 90.
(ZHANG Jinyuan, WANG Hao, WANG Jinze, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of a novel precast concrete column-column joint [J]. *Industrial construction*, 2019, 49(1): 85 - 90.)
- [8] YANG K H, SEO E A, HONG S H. Cyclic flexural tests of hybrid steel-precast concrete beams with simple connection elements [J]. *Engineering structures*, 2016, 118: 344 - 356.
- [9] 程东辉,高佩罡,任曼妮. 装配式混凝土柱连接节点力学性能研究及有限元分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(4): 602 - 609.
(CHENG Donghui, GAO Peigang, REN Mani. Experimental study and finite element analysis on joints of fabricated concrete columns [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2021, 38(4): 602 - 609.)
- [10] AHMAD S, MASRI A, ABOU S Z. Analytical and experimental investigation on the flexural behavior of partially encased composite beams [J]. *Alexandria engineering journal*, 2018, 57(3): 1693 - 1712.
- [11] ZHAO X, WEN F, CHEN Y, et al. Experimental study on the static performance of steel reinforced concrete columns with high encased steel ratios [J]. *The structural design of tall and special buildings*, 2018, 27(15): 1536.
- [12] YANG Y, CHEN Y, FENG S. Study on behavior of partially prefabricated steel reinforced concrete stub columns under axial compression [J]. *Engineering structures*, 2019, 199(3): 109630.
- [13] WU C, LIU J, SHI W. Seismic performance of composite joints between prefabricated steel-reinforced concrete columns and steel beams: experimental study [J]. *Bulletin of earthquake engineering*, 2020, 18(8): 3817 - 3841.
- [14] WU C, YU S, LIU J, et al. Development and testing of hybrid precast steel-reinforced concrete column-to-H shape steel beam connections under cyclic loading [J]. *Engineering structures*, 2020, 211(15): 110460.
- [15] WU C, LIU J, WANG Q, et al. Mechanical properties of modular prefabricated steel-concrete composite internal joints under cyclic loading [J]. *Journal of constructional steel research*, 2021, 178: 106463.
- [16] 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 - 32.
(GUO Xiaonong, PEI Jinyu, LI Guoqiang, et al. Numerical research on the ultimate load capacity of embedded channel joint of precast concrete beam [J]. *Progress in steel building structures*, 2017, 19(1): 26 - 32.)
- [17] 刘震. 预制钢骨混凝土柱节点模块连接受力性能数值模拟分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
(LIU Zhen. Study on mechanical properties of precast steel reinforced concrete column modular combinations based on numerical simulation analysis [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)