

# 装配式混凝土柱连接节点力学性能研究 及有限元分析

程东辉,高佩罡,任曼妮

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要** 目的 研究装配式混凝土钢筋套筒灌浆连接柱在轴心压力下的力学性能。

**方法** 对2根装配式混凝土柱(1根套筒灌浆连接节点形式试验柱,1根套筒灌浆+对拉钢板的连接节点形式试验柱)进行轴心受压试验,通过静载试验获得各试件受压极限承载力、材料的应力变化等试验数据;在试验基础上,对装配式混凝土柱的节点进行改进,通过ABAQUS有限元软件对改进后的17根装配式混凝土柱的极限承载力进行分析。**结果** 有限元结果表明:两种连接节点模拟柱随钢筋直径的增大,极限承载力增大且增幅相似;随混凝土强度等级的增加,对拉钢板连接节点模拟柱的承载力增幅比套筒灌浆连接节点模拟柱小;增大螺栓预紧力能够增加钢板对内部混凝土的约束,明显提高对拉钢板模拟柱的极限承载力。**结论** 两种连接节点形式的装配式混凝土柱均具有良好的力学性能,能够满足承载力的需求。

**关键词** 装配式混凝土柱;对拉钢板连接节点;极限承载力;有限元

中图分类号 TU317

文献标志码 A

## Experimental Study and Finite Element Analysis on Joints of Fabricated Concrete Columns

CHENG Donghui, GAO Peigang, REN Manni

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of prefabricated concrete reinforced sleeve grouting connection columns under axial pressure, axial compression test was carried out on 2 prefabricated concrete columns (1 test column in the form of sleeve grouting connection node, and 1 test column in the form of sleeve grouting + connection node of the tension steel plate), test data such as the ultimate compressive bearing capacity of each specimen and the stress change of materials are obtained through static load test. On the basis of experiments, the joints of prefabricated concrete columns are improved, the ultimate bearing capacity of the improved 17

收稿日期:2020-08-28

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971—),男,教授,博士,主要从事预应力混凝土方面研究。

prefabricated concrete columns was analyzed by ABAQUS finite element software. The finite element results show: With the increase of the diameter of the reinforcement, the ultimate bearing capacity of the simulated columns of the two connection nodes increases and the increase is similar; With the increase of the concrete strength grade, the increase in the bearing capacity of the simulated column of the tensioned steel plate connection node is smaller than that of the sleeve grouting connection node; Increasing the pre-tightening force of the bolt can increase the restraint of the steel plate on the internal concrete, and significantly improve the ultimate bearing capacity of the tensile steel plate simulation column; The prefabricated concrete columns with two types of connection nodes have good mechanical properties and can meet the requirements of bearing capacity.

**Key words:** precast concrete column; double pretension steels; bearing capacity; finite element

建筑行业的迅速发展在推动城市化进程的同时,也造成了诸如资源浪费、污染环境以及质量不可控等一系列问题,为了解决以上问题并响应可持续发展战略的需求,国家开始逐步推行建筑工业化,预制装配式混凝土结构是其中较为常见的一种方式。与传统建造方式相比,装配式混凝土结构具有保温性好、可满足个性化需求、工期短、促进工业化发展、能源损耗小以及保护环境等优点,已经广泛应用于世界各国<sup>[1-7]</sup>。

装配式混凝土结构与现浇结构的根本区分是构件节点的连接方式,并存在整体性不足的劣势,保证各个预制构件之间的有效连接是解决整体性的关键。所以找到一种既满足装配式柱受力要求又能使操作简单、成本低的竖向连接方式尤为关键。钢筋灌浆连接是装配式混凝土结构较为常见的竖向连接方式。近些年来,国内外学者通过试验,对装配式结构中采用灌浆套筒方式进行研究并取得一系列的成果<sup>[8-13]</sup>。李锐等<sup>[14]</sup>开展了 500 MPa 钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱的抗震性能试验研究,结果表明:预制装配式混凝土柱的耗能情况、位移延性以及极限承载力均与现浇混凝土柱相近;预制柱在套筒区形成刚域,破坏最为严重的地方发生在套筒顶部;对于轴压比较小的预制柱,其柱底部灌浆层结合面会发生破坏,且滞回曲线会出现捏拢。钱稼茹等<sup>[15]</sup>对 1 个现浇墙试件以及竖向钢筋选用不同连接方法的 4 个预制墙进

行拟静力试验,结果表明:预制试件的破坏形式与现浇试件基本相同,灌浆套筒连接方式可以使钢筋应力有效传递。

在试验研究的基础上,有限元法作为一种有效的补充可以进一步扩大研究参数的范围。ABAQUS 中的材料模型和稳定的计算能力使其在应用中更可靠、实用,因此利用 ABAQUS 软件对预制装配式混凝土柱节点连接进行模拟分析具有一定的推广价值。基于上述分析,笔者在试验的基础上,以节点连接形式等参数为变量,进行进一步的拓展分析,结果表明:改进后的对拉钢板连接形式、套筒灌浆形式均具有良好的力学性能,增大混凝土强度等级以及钢筋直径均能有效提高承载能力。

# 1 试验方案设计

## 1.1 试件设计

试验共制作了 2 根预制装配式混凝土柱,其中 1 根为连接节点采用对拉钢板连接形式(套筒灌浆 + 对拉钢板)的 PC-1,另 1 根为连接节点采用套筒灌浆连接形式的 PC-2。本次试验以长细比为 6 的短柱进行研究,试验柱截面长 × 宽均为 300 mm × 200 mm,柱高为 1 200 mm。混凝土强度等级为 C40,截面配置了 4  $\Phi$  20 纵向受力钢筋,箍筋为  $\Phi$  8@100,钢筋强度等级分别为 HRB400、HPB300。试件配筋示意图如图 1 所示,钢材的力学性能指标见表 1,混凝土及灌浆料的力学性能指标如表 2 所示。

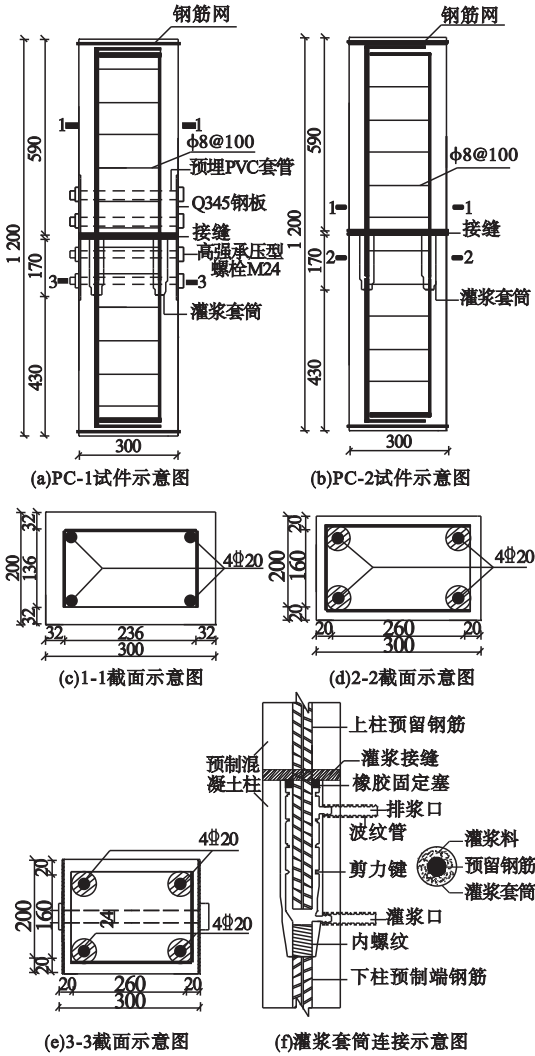


图1 试件配筋示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen reinforcement

表1 钢材力学性能指标

Table 1 Mechanical properties of steel			
钢材类别	直径(厚度)/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	20	412	593
HPB300	8	405.45	542.16
Q345 钢板	6	387.28	532.51

表2 材料性能

Table 2 Material performance			
混凝土		灌浆料(1d/3d)	
抗压强度/MPa	弹性模量/10 <sup>4</sup> MPa	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
41.7	3.2	29.5/46.8	5.7/6.3

1.2 试验加载与数据量测

本次试验在 5 000 kN 压力机上进行加载,在正式加载前,将试件放置在压力机的底板上进行对中找平,然后将底端进行固定,调节压力机顶板与试件紧靠并对试件进行一次预加载,在计算极限荷载的 90% 之前采用荷载控制,之后转为位移控制,当荷载降至峰值荷载的 60% 时停止加载。加载装置如图 2 所示。

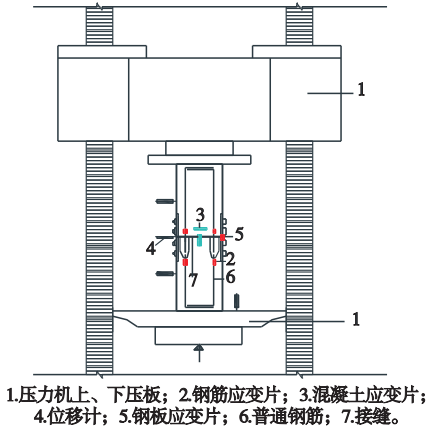


图2 加载示意图

Fig. 2 Loading diagram

2 试验结果与分析

2.1 承载力分析

2 根试件在试验过程中的屈服荷载、极限荷载实测值如表 3 所示。可以看到:采用套筒灌浆连接节点试件的极限承载力相对较高。原因是嵌入混凝土柱身两侧的钢板,在试件受到轴心压力并产生轴向压缩时,会挤压连接处的混凝土,在一定程度上削弱了受力截面。

表3 试件承载力特征值

Table 3 Characteristic value of specimen bearing capacity			
试件编号	屈服荷载/kN	屈服荷载提高幅度/%	极限荷载/kN
PC-1	2 085	1.65	2 218
PC-2	2 120		2 310

注:提高幅度是套筒灌浆连接节点试件柱承载力特征值对对拉钢板连接节点试件柱的提高程度。

2.2 钢板及钢筋协同受力分析

试件受力纵筋及钢板在荷载作用下的应变曲线实测值如图3所示。可以看出,对拉钢板连接试件钢板一直处于弹性阶段,且应力增量慢于纵筋的应力增量;对拉钢板连接

试验柱在承载力极限状态下纵向钢筋受压屈服,而受压钢板未达到屈服强度,主要因为钢板与试件间存在相对滑移,进而削弱了二者的共同受力性能。

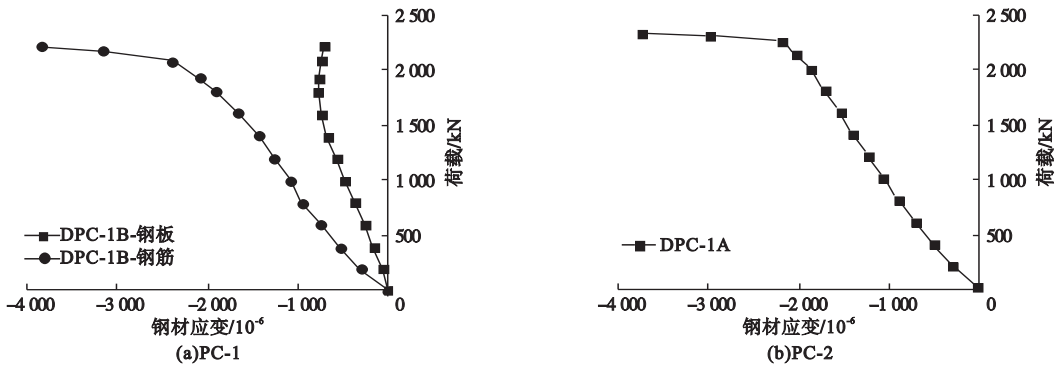


图3 荷载-钢材应变图  
Fig. 3 Load-steel strain curve

3 有限元模型对比

3.1 建立试验柱有限元模型

通过有限元软件 ABAQUS 建立分析模型,将混凝土、钢筋等构件作为不同单元分别进行处理,其中混凝土、钢板以及螺栓采用 C3D8(8 节点实体单元),受力纵筋和箍筋采用 T3D2(三维二节点桁架单元)。

纵向受力钢筋采用嵌入的方式植入到混凝土单元中。混凝土与灌浆料之间的接触通过 ABAQUS 中 Tie 表达。钢板与混凝土、螺母之间均采用面-面接触。

为了接近实际的试验加载条件,试件下底端采用全固定方式,加载顶端固定 X、Y 两个方向上的位移和全部转角。本次模拟中采

用位移加载,在 Z 轴方向对顶部节点施加位移荷载。有限元模型如图4所示。

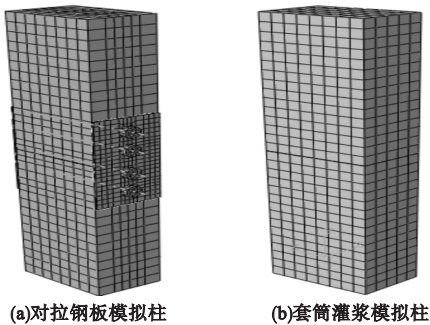


图4 模拟柱数值分析模型

Fig. 4 Numerical analysis model of simulated column

3.2 破坏模式对比

图5、图6为模拟试件与试验试件破坏形态的对比分析。

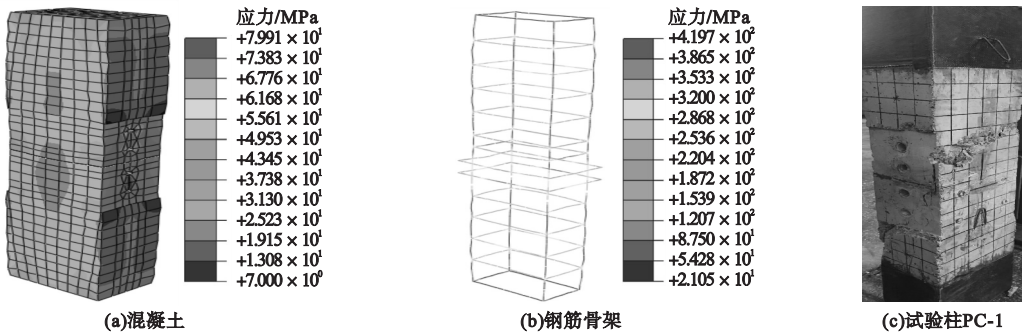


图5 PC-1 试件破坏结果对比

Fig. 5 Comparison of failure results of PC-1

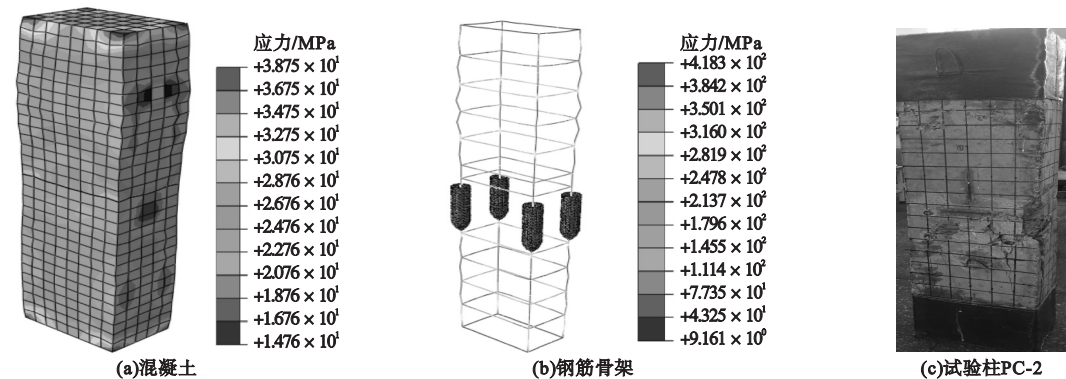


图 6 PC-2 试件破坏结果对比

Fig. 6 Comparison of failure results of PC-2

在轴心压力作用下,模拟柱 PC-2 破坏顺序与试验过程中试件破坏顺序一致,都是受力纵筋率先屈服,随后试件混凝土被压碎,并与混凝土破碎为最终破坏形态的试验现象基本吻合;模拟柱 PC-1 与模拟柱 PC-2 破坏形态很相似,不同之处在于柱身两侧的钢板对接缝处混凝土能够起到约束作用,导致其弹、塑性阶段更长,与试验柱 PC-1 试验结果一致。

3.3 荷载 - 轴向位移对比

图 7 为模拟柱与试验柱的荷载 - 轴向位

移曲线对比结果。由图可知,从加载到纵向受力钢筋屈服前,试验结果与分析结果高度吻合,纵向受力钢筋屈服后,试验值下降趋势快,这是因为在试验中试件属于脆性破坏,破坏较突然,达到极限状态时,荷载迅速下降,同时可以看到,模拟柱极限承载力略高于试验柱,引起误差的原因主要是钢筋与混凝土之间的绑定的方式,混凝土与纵筋之间的黏结滑移以及黏磨损造成的影响没有考虑,但两根试件的试验值十分接近模拟值,验证了模型分析的准确性。

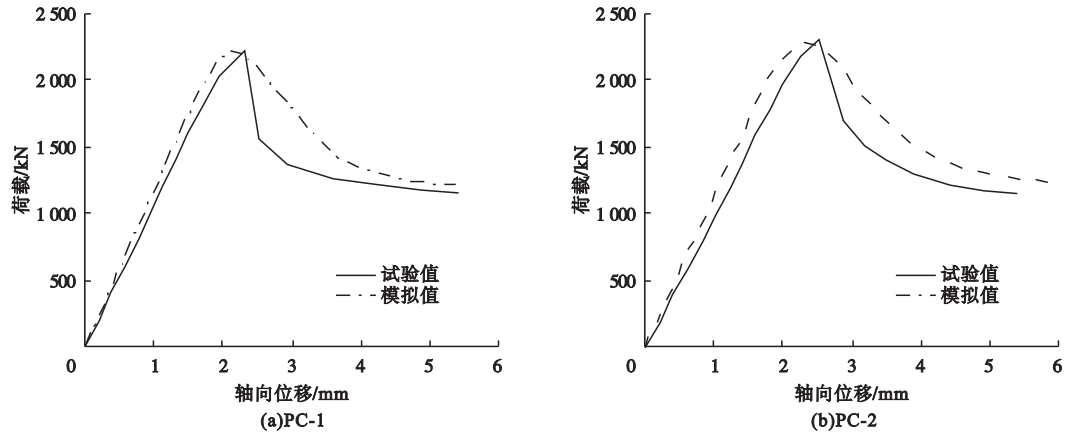


图 7 试验柱与模拟柱荷载 - 轴向位移曲线

Fig. 7 Load-axial displacement curve of test column and simulated column

4 对拉钢板装配式混凝土柱节点有限元分析

4.1 节点设计改进

根据试验结果,考虑到对拉钢板嵌于混

凝土柱身会造成试件极限承载力略微降低,因此对节点连接形式进行改进,将钢板放置在混凝土柱身外,改进之后的节点示意图如图 8 所示。



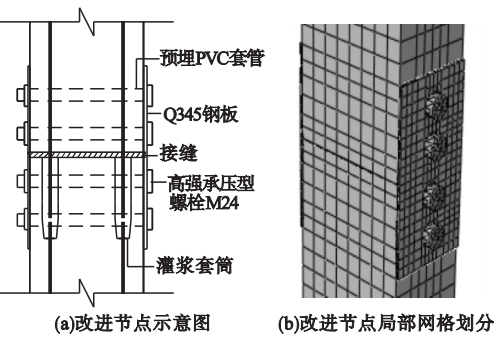


图8 改进节点示意图

Fig. 8 Diagram of improved nodes

4.2 模拟柱参数设计

在试验基础上,对改进节点装配式混凝土柱展开轴压性能有限元分析,以节点连接方式、混凝土等级、纵向钢筋直径、钢板强度等级以及螺栓预紧力为变量,设计了17根模型柱,相关参数如表4所示。

表4 模型柱参数表

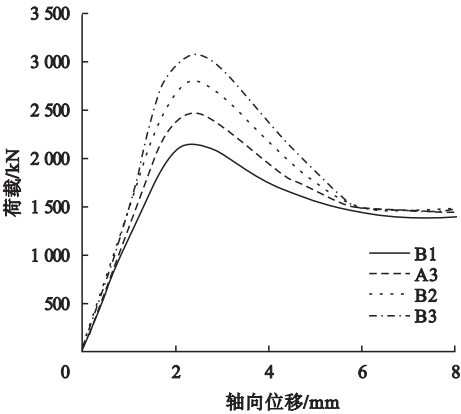
Table 4 Column model parameters

模型柱 编号	截面 配筋	混凝土 强度等级	螺栓预紧 力/kN	钢板强 度等级	节点 形式
A1	2Φ16	C40	225	Q345	对拉钢板
A2	2Φ18	C40	225	Q345	对拉钢板
A3	2Φ20	C40	225	Q345	对拉钢板
A4	2Φ22	C40	225	Q345	对拉钢板
B1	2Φ20	C30	225	Q345	对拉钢板
B2	2Φ20	C50	225	Q345	对拉钢板
B3	2Φ20	C60	225	Q345	对拉钢板
C1	2Φ20	C40	95	Q345	对拉钢板
C2	2Φ20	C40	160	Q345	对拉钢板
C3	2Φ20	C40	290	Q345	对拉钢板
E1	2Φ16	C40	—	—	套筒灌浆
E2	2Φ18	C40	—	—	套筒灌浆
E3	2Φ20	C40	—	—	套筒灌浆
E4	2Φ22	C40	—	—	套筒灌浆
F1	2Φ20	C30	—	—	套筒灌浆
F2	2Φ20	C50	—	—	套筒灌浆
F3	2Φ20	C60	—	—	套筒灌浆

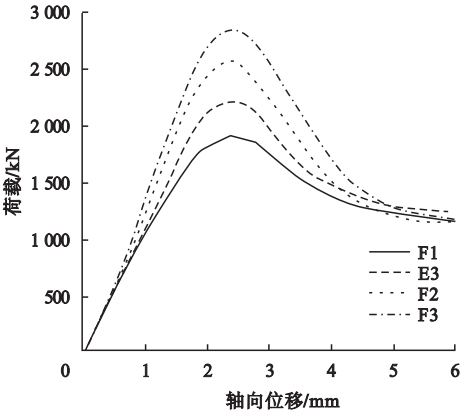
4.3 混凝土强度等级影响

图9为两种连接节点模拟柱在不同混凝土强度等级下荷载-轴向位移曲线。由图可

知,随混凝土强度等级的增加,模拟柱的轴向刚度逐渐增大,两种连接节点模拟柱的极限承载力均有效提高,而对拉钢板连接节点模拟柱的极限承载力增幅比套筒灌浆连接节点模拟柱小,主要是因为随着混凝土强度等级的增大,混凝土内部的空隙变小,使对拉钢板约束效果减弱。在相同混凝土强度等级下,对拉钢板连接节点模拟柱比套筒灌浆连接节点模拟柱极限承载力提高5.8%~10.3%。



(a)对拉钢板连接形式模拟柱



(b)套筒灌浆连接形式模拟柱

图9 混凝土不同强度等级下荷载-轴向位移曲线  
Fig. 9 Load-axial displacement curves under different concrete strength grades

4.4 纵向钢筋直径大小影响

为了研究钢筋直径大小对轴心受压混凝土柱承载力的影响,在其他变量一定时,对比分析了荷载作用下两种连接节点模拟柱在不同钢筋直径下轴向位移曲线,如图10所示。由图可知,随配筋率的增加,两种连接节点模拟柱极限承载力增大且增幅相似;钢筋直径

大小相同时,相对于套筒灌浆连接节点模拟柱,对拉钢板连接节点模拟柱极限承载力平均提高 7%,这表明对拉钢板对接缝处的混

凝土起到一定的约束作用,有效提高装配式混凝土柱的极限承载力。

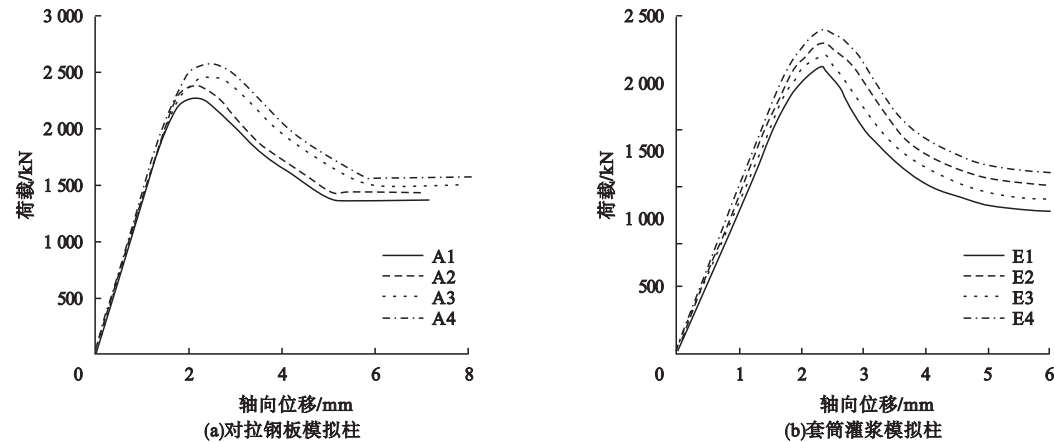


图 10 不同配筋率下荷载-轴向位移曲线  
Fig. 10 Load-axial displacement curve under different reinforcement ratios

4.5 螺栓预紧力

图 11 为模拟柱在不同螺栓预紧力下的荷载-轴向位移曲线。

一定程度上的约束作用,且约束效果随螺栓预紧力的增大而提高。而增大相同预紧力时,承载力增大分别为 3.4%、3.1% 和 2.3%,这是因为接触面之间切向力需要克服的摩擦力在预紧力增大到一定程度时基本保持不变。

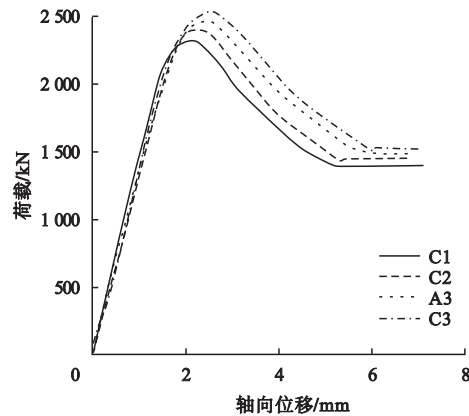


图 11 不同螺栓预紧力下荷载-轴向位移曲线  
Fig. 11 Load-axial displacement curve under different bolt preload

由图可知,预紧力分别为 160 kN、225 kN 以及 290 kN 时,与预紧力为 95 kN 时相比,有限元模拟柱的承载力分别提高了 3.4%、6.5% 和 8.8%,可见模拟柱的极限承载力受螺栓预紧力影响较大。这是由于试件在受荷过程中,随着荷载的增加,混凝土内部裂缝逐渐发展,构件发生横向膨胀,此时柱身两侧钢板能够对混凝土产生的横向变形起到

5 结 论

(1)有限元模拟柱在荷载下的轴向位移曲线、试件破坏顺序以及混凝土破坏形态与试验相一致,ABAQUS 有限元模型得到了验证,能够为实际工程指导提供准确依据。

(2)对拉钢板对节点处混凝土有约束作用,可以明显提高试件的极限承载能力;两种连接节点模拟柱随钢筋直径的增加,试件的极限承载力均增大且增幅相似。

(3)随混凝土强度等级的增加,两种连接节点模拟柱的极限承载力有效提高,对拉钢板连接节点模拟柱的承载力增幅比套筒灌浆连接节点模拟柱小。

(4)螺栓预紧力增大,能够使柱身两侧钢板对混凝土的约束明显增强,显著提高对拉钢板模拟柱的极限承载力。

## 参考文献

- [1] 吴刚,冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 1-16.  
(WU Gang, FENG Decheng. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections [J]. Journal of building structures, 2018, 39(2): 1-16.)
- [2] 朱张峰,郭正兴,汤磊. 新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 36-43.  
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei. Experimental study and FEA on seismic performance of new hybrid precast concrete shear walls [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(3): 36-43.)
- [3] 祝雯,黄石明,高梓贤. 装配式混凝土结构钢筋套筒灌浆料的研究现状及发展趋势[J]. 广州建筑, 2017, 45(3): 22-26.  
(ZHU Wen, HUANG Shiming, GAO Zixian. Research status and development trend of the rebar sleeve grouting materials for prefabricated concrete structure [J]. Guangzhou architecture, 2017, 45(3): 22-26.)
- [4] 柳旭东,王东辉,刘帅,等. 装配式梁柱边节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 45(10): 87-90.  
(LIU Xudong, WANG Donghui, LIU Shuai, et al. Experimental study on seismic behavior of prefabricated edged beam-column joint [J]. Building structure, 2016, 45(10): 87-90.)
- [5] 王俊,赵基达,胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 1-8.  
(WANG Jun, ZHAO Jida, HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(5): 1-8.)
- [6] 朱张峰,郭正兴,汤磊,等. 考虑不同预拉力的新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 2(11): 41-48.  
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei, et al. Seismic performance experiments on new hybrid precast concrete shear wall under different prestress forces [J]. Journal of Hunan university (natural science edition), 2015, 2(11): 41-48.)
- [7] 韦伟. 全预制装配式混凝土结构节点研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.  
(WEI Hui. Study on precast concrete structure joint [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.)
- [8] 孙岩波,李晨光,杨旭. 装配式混凝土框架结构梁-板-柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 23-26.  
(SUN Yanbo, LI Chenguang, YANG Xu. Experimental study on seismic behavior of beam-slab-column joints of prefabricated concrete frame structure [J]. Building structure, 2018, 48(7): 23-26.)
- [9] 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 Jianbing, GUO Zhengxing, GUO Xuan. Seismic behavior of a new type prefabricated concrete frame beam-column connections [J]. Engineering science and technology, 2018, 50(3): 209-215.)
- [10] 谢志勇,闫秋实,刘洪涛. 装配式混凝土框架浆锚中节点抗震性能试验研究[J]. 混凝土, 2018(1): 128-132.  
(XIE Zhiyong, YAN Qiushi, LIU Hongtao. Seismic experimental study on a precast concrete frame internal joint with grout sleeves [J]. Concrete, 2018(1): 128-132.)
- [11] 程东辉,王彦松,孙常海. 型钢连接节点装配式混凝土梁力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 788-797.  
(CHENG Donghui, WANG Yansong, SUN Changhai. Study on mechanical properties of fabricated concrete beams with steel section joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 788-797.)
- [12] AMELI M J, BROWN D N, PARKS J E, et al. Seismic column-to-footing connections using grouted splice sleeves [J]. ACI structural journal, 2016, 113(5): 1021-1030.
- [13] ALIAS A, ZUBIR M A, SHAHID K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure [J]. Procedia engineering, 2013, 53: 116-123.
- [14] 李锐,郑毅敏,赵勇,等. 配置500 MPa 钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 255-263.  
(LI Rui, ZHENG Yimin, ZHAO Yong, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete columns connected with 500 MPa reinforced sleeve grouting [J]. Journal of building structures, 2016, 37(5): 255-263.)
- [15] 钱稼茹,彭媛媛,张景明,等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 1-6.  
(QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, ZHANG Jingming, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements spliced by grout sleeves [J]. Building structure, 2011, 41(2): 1-6.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)