

装配式钢筋混凝土柱轴心受压力学性能试验研究

殷帅帅*, 代明江, 吕媛媛, 吴健

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2022年6月24日; 录用日期: 2022年7月21日; 发布日期: 2022年7月29日

摘要

进行了装配式钢筋混凝土柱和现浇钢筋混凝土柱的轴心受压力学性能试验研究。通过研究内部混凝土强度和装配式外壳等参数对其破坏形态、荷载-位移曲线、轴向承载力、柱侧混凝土应变及钢筋应变的影响, 深入分析了装配式外壳对混凝土柱承载力的效应。试验结果表明: 装配式外壳与现浇混凝土之间共同作用良好; 装配式钢筋混凝土柱满足承载力需求, 且具有较高的安全性能; 装配式钢筋混凝土柱与现浇钢筋混凝土柱的破坏形态相近, 破坏时均在柱中部呈现混凝土的压溃脱落现象; 最后, 采用Abaqus有限元分析程序模拟装配式混凝土柱和普通钢筋混凝土轴压受力过程, 为其在实际工程中的推广应用提供理论依据。

关键词

装配式钢筋混凝土柱, 轴压性能, 破坏形态, 有限元分析

Experimental Study on Mechanical Properties of Prefabricated Reinforced Concrete Columns under Axial Compression

Shuaishuai Yin*, Mingjiang Dai, Yuanyuan Lv, Jian Wu

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 24th, 2022; accepted: Jul. 21st, 2022; published: Jul. 29th, 2022

Abstract

The mechanical properties of prefabricated reinforced concrete columns and cast-in-place rein-

*通讯作者。

forced concrete columns under axial compression were studied. The effects of parameters, such as internal concrete strength and prefabricated shell on its failure form, load-displacement curve, axial bearing capacity, the concrete strain on the column side and steel bar strain were studied so that the effect of prefabricated shell on the bearing capacity of concrete columns was deeply analyzed. The test results show that the prefabricated shell and the cast-in-place concrete work well together; the prefabricated reinforced concrete column meets the bearing capacity requirements and has high safety performance; the prefabricated reinforced concrete column and the cast-in-place reinforced concrete column have similar failure patterns, which the concrete collapses and falls off in the middle of the column. Finally, the Abaqus finite element analysis program is used to simulate the axial compression process of the fabricated concrete column and the ordinary reinforced concrete, which provides a theoretical basis for its popularization and application in practical engineering.

Keywords

Prefabricated Reinforced Concrete Column, Axial Compression Performance, Failure Shaped, Finite Element Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着节能减排的呼声越来越高, 中国为实现建筑行业的可持续性发展, 减小建筑领域对环境造成的压力, 装配式混凝土结构成为行业研究的热点。其中, 装配式混凝土柱作为基本的竖向受力构件显得格外重要。

在钢筋混凝土结构施工中, 模板工程约为总工期的 50%, 造价约为施工总价的 1/5~1/3 [1] [2] [3] [4]。目前, 广泛应用的模板有胶合板、塑料板和钢模板等[5] [6]。木胶合板模板和钢模板的使用频率较高, 但是木模板会降低混凝土中的水分, 容易涨模, 对工程质量有一定影响。钢模板的热胀冷缩系数小, 使用寿命长, 但很难符合结构复杂混凝土构件的模具要求, 其拼装费时费力, 成本较高[7] [8]。

本研究主要针对以上缺点, 提出一种加快施工进度、提升工程质量, 具有重要的实际应用意义的预制混凝土外壳模板, 将其组装, 形成装配式柱的永久性模板, 通过试验与模拟结果的对比分析, 对装配式钢筋混凝土柱与现浇钢筋混凝土柱展开轴心受压力学性能研究。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

试件包括 1 根装配式柱和 1 根现浇柱。装配式钢筋混凝土柱采用预制 C40 细石混凝土外壳(见图 1, 单位为 mm), 内部混凝土强度等级为 C30, 现浇钢筋混凝土柱采用 C30 混凝土浇筑, 保护层厚度为 20 mm, 试件具体尺寸及配筋如图 2 所示, 单位为 mm。

2.2. 材性试验

混凝土试块强度等级 C30, 同条件养护 28 d 后, 实测抗压强度如表 1 所示。纵筋直径为 16 mm 的 HRB400 钢筋, 箍筋直径为 6 mm 的 HPB300 钢筋, 实测的钢材性能如表 2 所示。

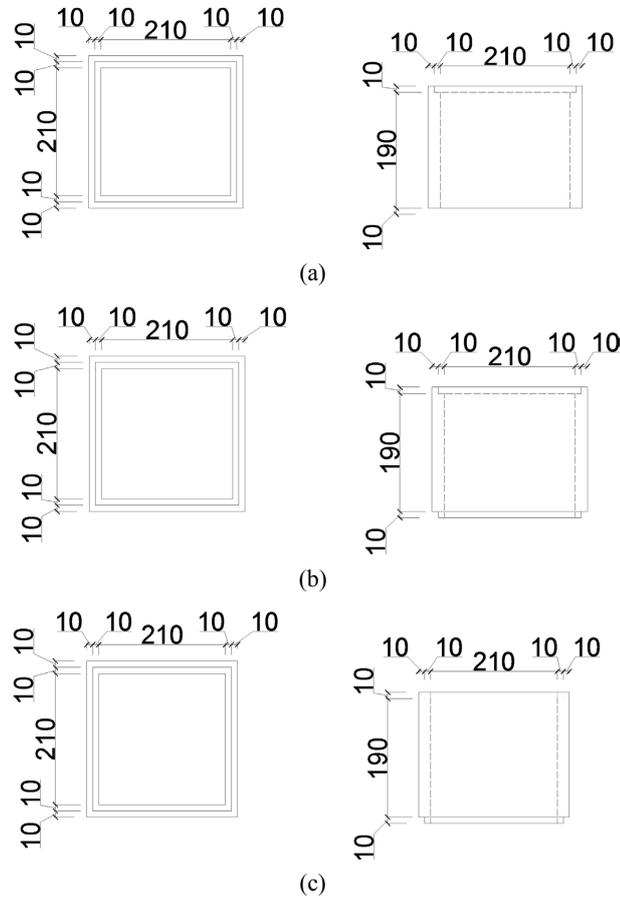


Figure 1. Schematic diagram of prefabricated structure
图 1. 装配式外壳示意图

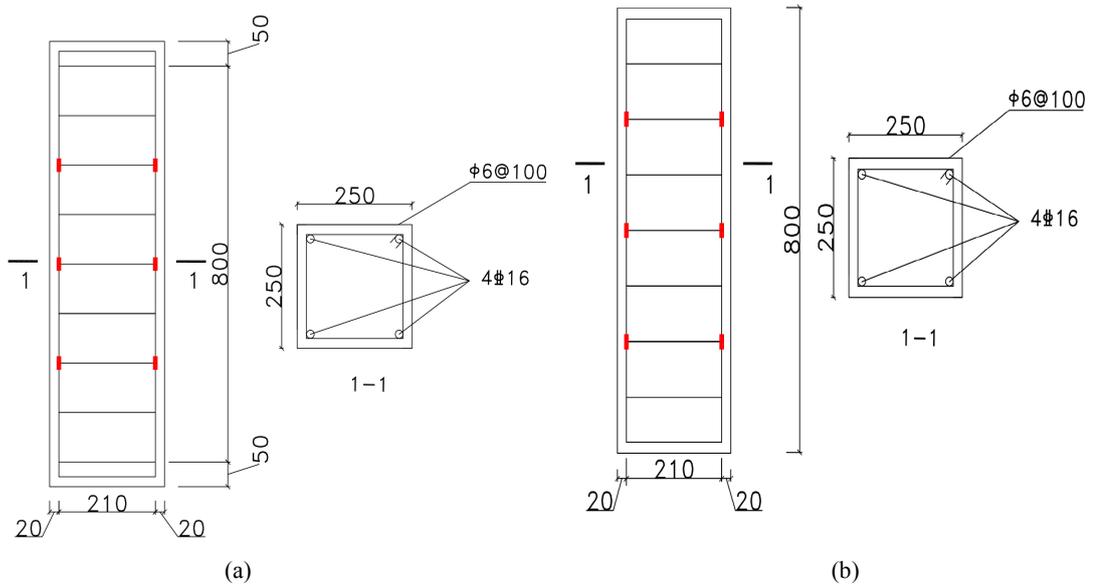


Figure 2. Section diagram of specimen; (a) Prefabricated reinforced concrete column; (b) Cast-in-place reinforced concrete columns

图 2. 试件截面示意图; (a) 装配式钢筋混凝土柱; (b) 现浇钢筋混凝土柱

Table 1. Material performance
表 1. 材料性能

材料类别	混凝土强度等级	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa	E_c/MPa
普通混凝土	C30	37.5	25.28	3.32	3.12×10^4
细石混凝土	C40	42.5	30.42	3.97	3.31×10^4

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_c 为轴心抗压强度; f_t 为轴心抗拉强度; E_c 为弹性模量。

Table 2. The mechanical properties of steel bar
表 2. 钢筋力学性能指标

钢筋	钢筋牌号	直径	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa
纵筋	HRB400	16	468	656	2.07×10^5
箍筋	HPB300	6	365	516	2.03×10^5

注: f_y 为屈服压强度; f_u 为极限强度; E_s 为弹性模量。

2.3. 加载制度、加载装置和测量方案

试验在 5000 KN 微机控制电液伺服压剪试验机进行, 试验加载装置如图 3 所示。正式加载前, 对试验装置进行几何对中, 预加载至极限承载力估算值的 1/10, 检验仪器仪表工作正常后卸载, 隔 3~5 分钟

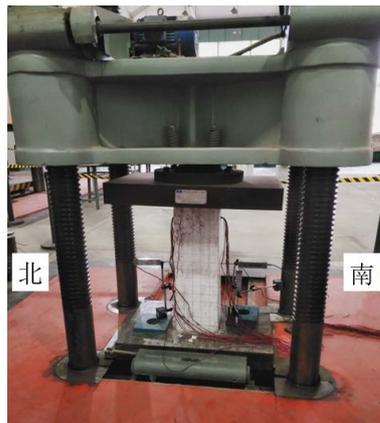


Figure 3. Loading equipment
图 3. 试验加载装置

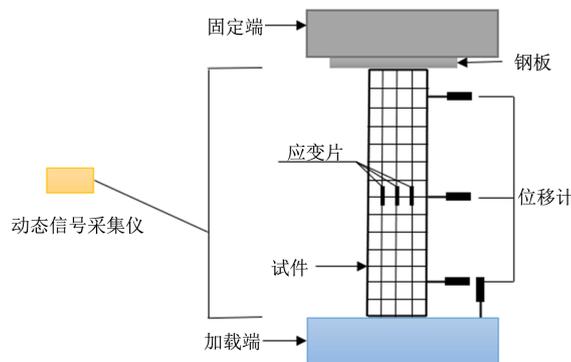


Figure 4. Diagram of loading instrument
图 4. 加载装置示意图

后进行正式加载。加载方式采取位移加载，按照 0.4 mm/min 加载，加载至预测极限荷载的 80%后，按照 0.2 mm/min 进行加载，当荷载下降至极限荷载的 75%以下时，试验停止。位移计、混凝土应变片和钢筋应变片的布置如图 4，图 5 所示。

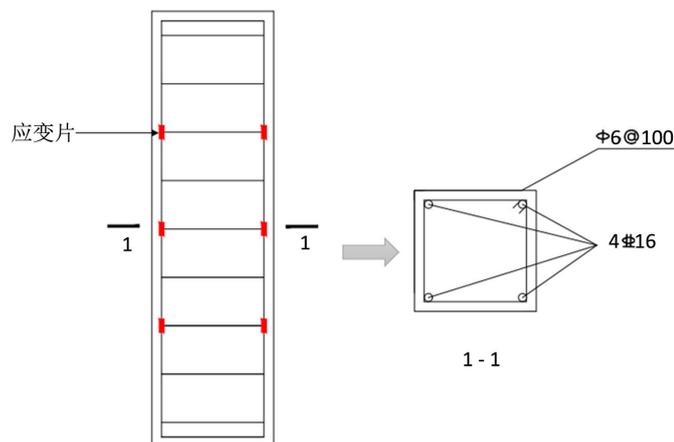


Figure 5. Layout of steel bar measuring point

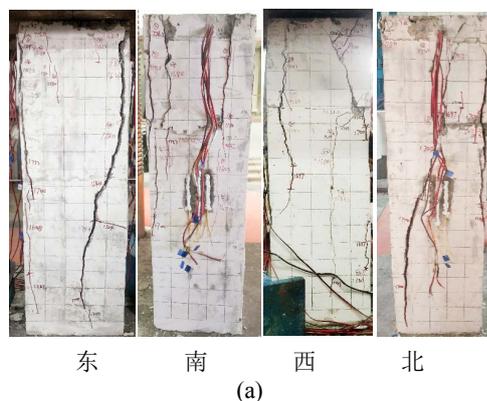
图 5. 钢筋测点布置

3. 试验结果分析

3.1. 破坏形态

试件的破坏形态如图 6 所示，其中图 6(a)为装配式钢筋混凝土柱，图 6(b)为现浇钢筋混凝土柱。在加载初期，装配式混凝土柱的位移与荷载的关系是呈线性增长，加载至 776.2 kN，装配式混凝土柱的中部偏上出现第一条纵向微裂缝。继续加载，第一条纵向裂缝不断的向柱中部延伸发展，宽度不断增加。当荷载达到极限荷载时，试件破坏严重，柱承载能力降低。极限荷载后，由于混凝土外壳与内部混凝土的强度不同，对试件的变形起到约束作用，使试件在加载后期仍具有一定的强度和刚度。

现浇混凝土柱在加载至 1/3 极限荷载前，外观无明显变化。当加载至 551 kN 时，柱南侧开始出现第一条纵向微小裂缝。随着荷载的增加，竖向裂缝向下延伸发展，此时荷载为 978.2 kN，现浇混凝土柱北侧上端不断有细小微裂缝产生。在压力的作用下，细小微裂缝逐渐竖向延伸相连发展为主裂缝，此时荷载达到 1503.6 kN。荷载继续增加，现浇混凝土柱东侧和西侧也出现纵向裂缝，然后竖向发展为主裂缝，此时，主裂缝不断加宽加深，在柱南侧和西侧上部保护层出现成片脱落，试件的承载力下降，荷载达到最大值，为 1971.4 kN。



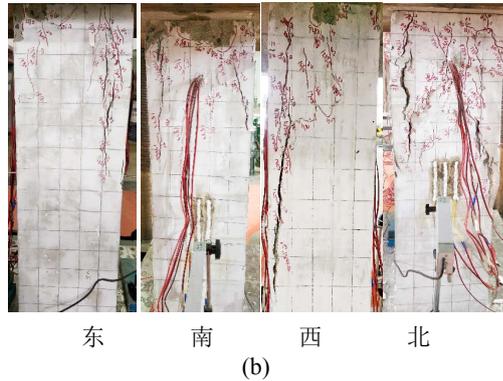


Figure 6. Failure shaped: (a) Prefabricated concrete axial compression column; (b) Cast-in-place concrete axial compression column

图 6. 破坏形态: (a) 装配式混凝土轴心受压柱; (b) 现浇混凝土轴心受压柱

3.2. 荷载位移曲线

图 7 为装配式混凝土柱与现浇混凝土柱的荷载 - 位移曲线。由图 7 可见，装配式混凝土柱的峰值荷载与普通钢筋混凝土柱的峰值荷载基本相同，这说明了装配式外壳的对柱内部的混凝土具有约束作用，提供横向力，使柱内混凝土处于三向受力状态。装配式混凝土柱在承载力下降之后承载力下降平缓，表明该柱具有良好的变形能力，这与现浇普通混凝土柱的受压力学性能基本一致。

通过试件的荷载 - 位移曲线转化为典型的荷载 - 位移曲线，如图 8 所示，具体受力过程如下：

1) OA 段。在该段时间内，试件处于弹性阶段，轴向位移较小，位移与荷载的增长，呈现线性正相关。试件表面基本完好，无明显损坏。

2) AB 段。当装配式混凝土柱的轴心荷载达到极限荷载时，试件的中上部出现微小纵向裂缝，此时，试件轴向位移增长速率变快，曲线斜率减小。

3) BC 段。此时试件达到最大承载力，纵向钢筋达到屈服强度。试件外部装配式混凝土外壳出现部分脱落，裂缝逐渐向试件中下部纵向延伸和发展。当曲线下降至 C 点时，柱内箍筋屈服，钢筋对混凝土的核心约束作用被削弱，曲线下降速率减缓。

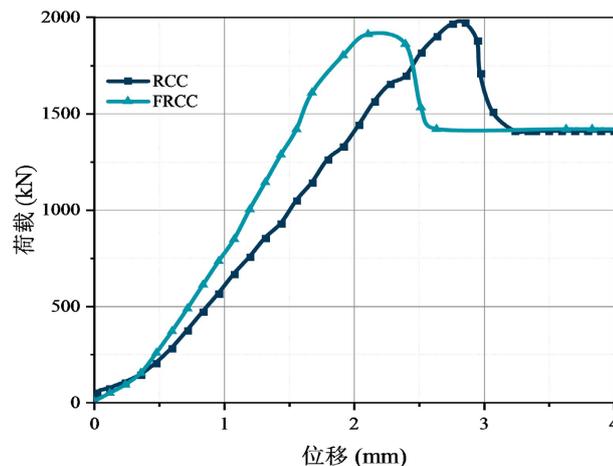


Figure 7. Load-displacement curve

图 7. 荷载 - 位移曲线

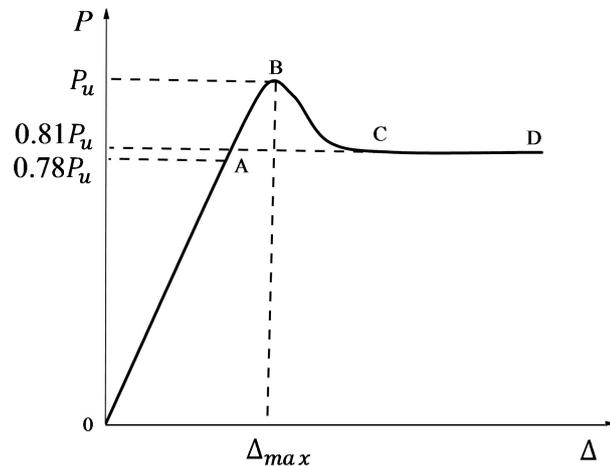


Figure 8. Typical load-displacement curves
图 8. 典型荷载 - 位移曲线

4) CD 段。试件的位移在不断的增加，而荷载趋于稳定，这表明了装配式混凝土柱达到荷载后还有一定的承载能力。此阶段试件依然具有一定的承载和变形能力。

3.3. 应变分析

3.3.1. 混凝土荷载 - 应变曲线分析

图 9 表达的是试件 1/2 处混凝土在轴压荷载下纵向应变的变化。从图中可知，混凝土荷载-应变曲线分为上升段和下降段，其中上升段曲线基本表现为正相关，下降段表现出较大的离散性。装配式混凝土柱表面的南侧纵向应变和北侧纵向应变基本相同，表现出较好的协同工作性能。普通混凝土柱的表面南侧混凝土纵向应变和北侧纵向应变表出明显不同，北侧混凝土应变大于南侧应变，这说了混凝土北侧所受局部荷载大于南侧，也有可能是北侧混凝土存在缺陷所致。

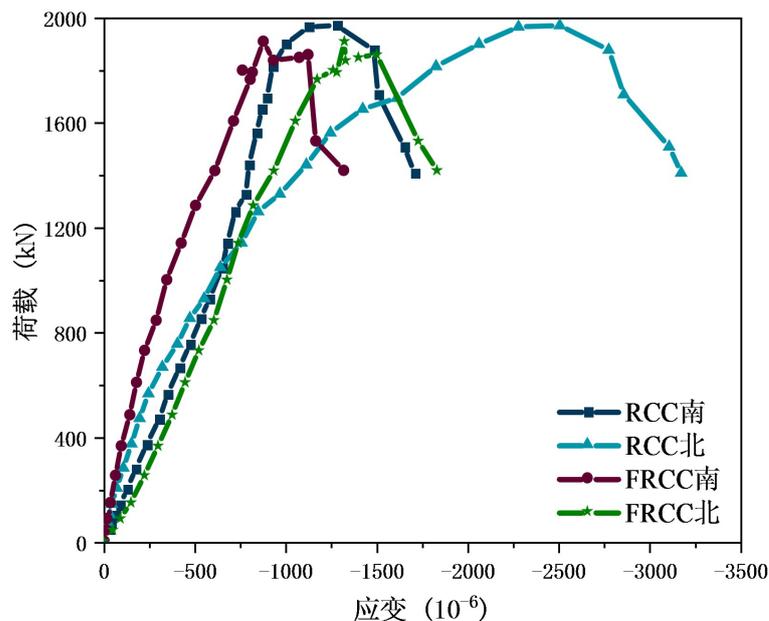


Figure 9. Load-strain curve of concrete
图 9. 混凝土荷载 - 应变曲线

3.3.2. 钢筋荷载 - 应变曲线分析

图 10 表达的是混凝土柱内钢筋在轴向应力作用下, 柱中部四根纵筋纵向应变分布情况。从图中可以看出, 普通混凝土柱同侧钢筋应变趋势基本相同, 异侧钢筋则明显不同且应变差值较大。和普通现浇混凝土柱四根纵筋纵向应变相比, 装配式混凝土柱四根纵筋纵向应变差值减小, 同侧纵向钢筋应变趋势基本相同, 异侧钢筋应变趋势也基本相同, 异侧钢筋纵向应变差值很小。

3.4. 有限元分析

3.4.1. 建立混凝土柱有限元模型

通过有限元软件 Abaqus 建立矩形截面装配式钢筋混凝土柱, 混凝土和预制外壳采用八节点缩减积分三维实体单元(C3D8R), 将预制混凝土外壳、现浇混凝土作为不同单元分别进行处理, 两者之间的摩擦系数取 1, 受力纵筋和箍筋采用 T3D2 (三维二节点桁架单元), 为了模拟相同的试验加载环境, 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, 采用位移加载, 对顶部 Z 轴方向施加位移荷载。有限元模型如图 11 所示。

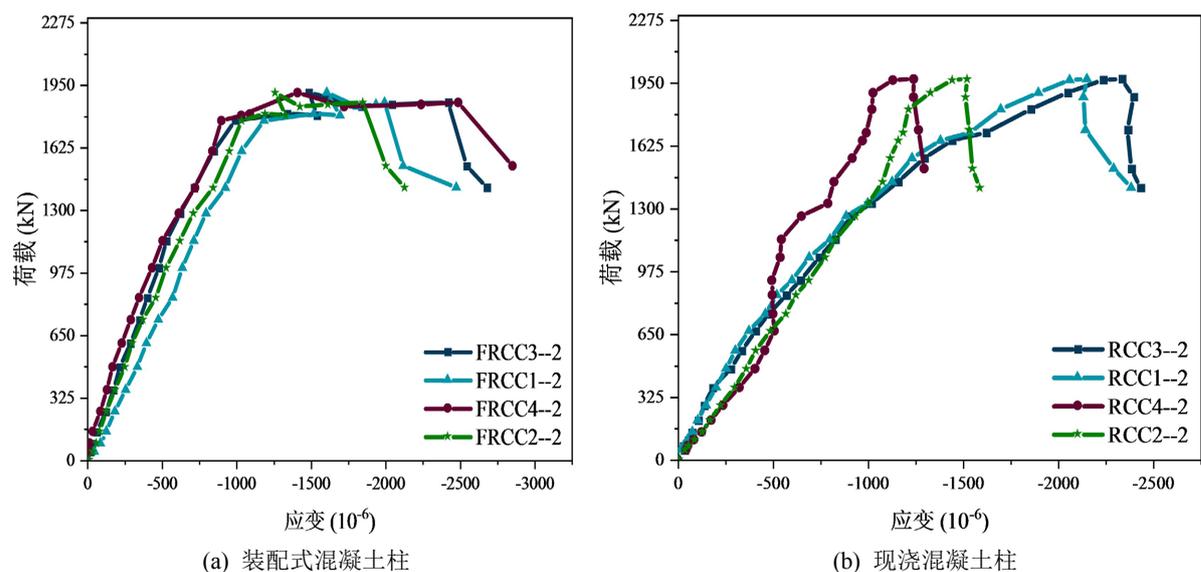


Figure 10. Load-strain curve of steel bar

图 10. 钢筋荷载 - 应变曲线

3.4.2. 计算结果分析

混凝土柱达到承载力极限状态下的代表性应力云图如图 11 所示, 现浇柱的应力主要集中在柱 1/2 处, 装配式柱的应力集中在预制外壳接缝处, 与图 11(b)现浇柱相比, 装配柱的应力发生了转移, 受力更为均匀。图 12 表达的是混凝土柱的真实荷载和模拟荷载对比情况。从图 12 可以看出, 模拟柱的极限荷载值比试验柱的值略微偏高, 但是两者最大误差未超过 10%, 总体而言, 模拟分析结果与试验结果吻合较好。

4. 结论

本研究通过对装配式现浇混凝土柱和普通钢筋混凝土柱进行轴心抗压后, 得到如下结论:

1) 在静力加载下, 装配式钢筋混凝土柱受力破坏机制和形态和现浇钢筋混凝土柱基本相似, 均为受压破坏, 同时, 两者的极限位移、荷载 - 位移曲线相似。

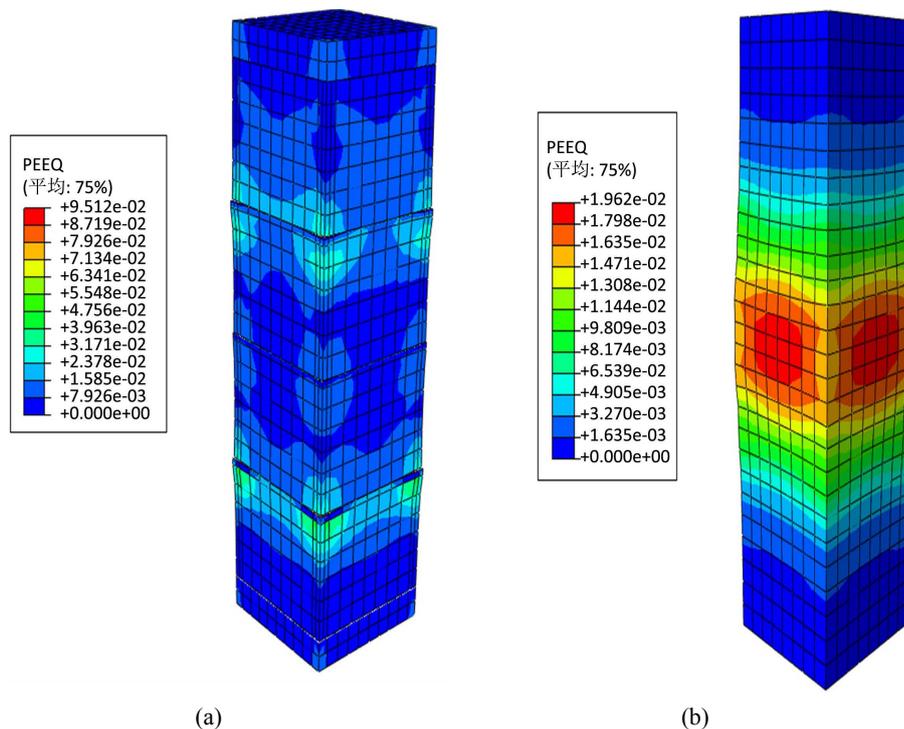


Figure 11. Comparison of failure results of specimens; (a) Prefabricated concrete column; (b) Cast-in-place concrete column

图 11. 试件破坏结果对比; (a) 装配式混凝土柱; (b) 现浇混凝土柱

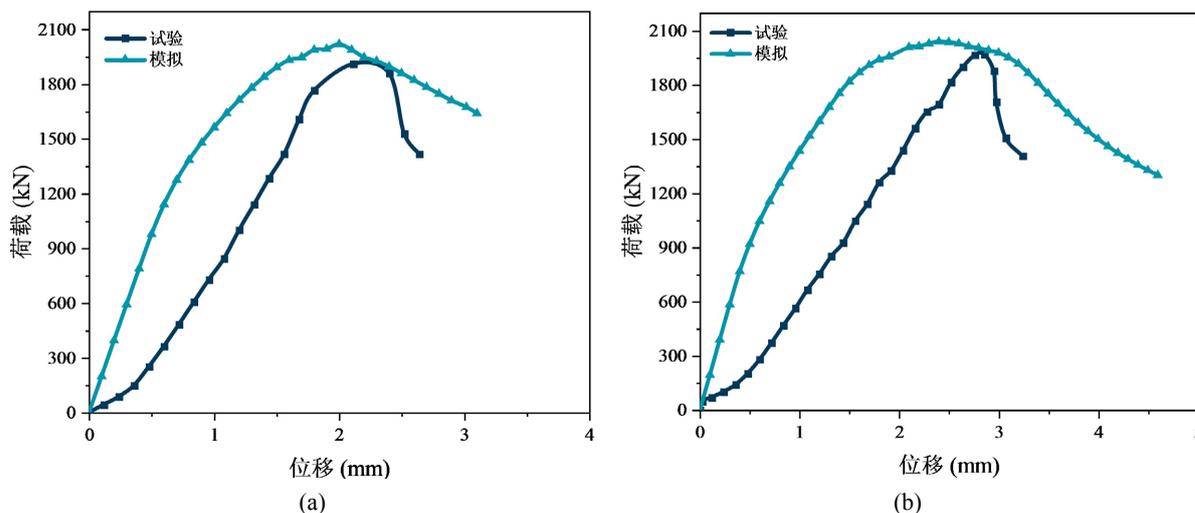


Figure 12. Load-displacement curves of test and simulated columns; (a) Prefabricated concrete column; (b) Cast-in-place concrete column

图 12. 试验柱与模拟柱荷载 - 位移曲线; (a) 装配式混凝土柱; (b) 现浇混凝土柱

2) 装配柱峰值荷载约为现浇柱的 97%，承载力有微弱降低，其主要原因是钢筋混凝土受压截面的面积不同；说明该装配柱在节约人工、加快施工进度时仍具有一定的承载能力；峰值荷载后，混凝土预制外壳可有效地约束混凝土的变形，进一步提高试件的变形能力。

3) 利用 Abaqus 有限元软件对装配混凝土柱和现浇混凝土柱进行受力全过程分析是可行的。采用本文的建模方法，计算所得的荷载 - 位移曲线、极限荷载值均与试验符合较好。

参考文献

- [1] 郭朋岗, 陈晓东, 郭敬, 阮国锋. 复杂异型清水混凝土模板施工技术应用[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 782-784.
- [2] Gasiev, A.A., Beppaev, Z.U. and Hasauov, U.M. (2015) Investigation of Dynamics and Level of Concrete Strength Development Laid in Steel Permanent Formwork. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, **6**, 70-76.
- [3] 梁兴文, 汪萍, 徐明雪, 于婧, 等. 免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土梁的受力性能及短期刚度研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 154-163.
- [4] Li, S.C. and Yin, S.P. (2021) Research on the Mechanical Properties of Assembled TRC Permanent Formwork Composite Columns. *Engineering Structures*, **247**, Article ID: 113105. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113105>
- [5] 阎西康. 土木工程施工[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
- [6] 吴刚, 冯德成, 徐照, 缪昌文. 装配式混凝土结构体系研究进展[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(4): 41-51+77.
- [7] 王彤. 永久模板与现浇混凝土叠合梁的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [8] 杨雨浓, 聂鑫, 田春雨, 李然, 马云飞, 白熙. 预制模壳混凝土柱钢筋搭接传力性能试验研究[J/OL]. 建筑结构学报: 1-12. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0664>, 2022-06-23.