

模块墙装配式建筑T形轻钢混凝土组合异形柱 偏压受力性能研究

张胜利¹, 张哲畅², 柴方华¹, 刘园园¹, 刘浩文², 乔文涛^{2*}

(1. 中铁十六局集团第四工程有限公司, 北京 101400; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要: 新型模块墙装配式建筑具有保温性能好、装配效率高、经济成本低、施工效率高等优点, T形轻钢混凝土组合异形柱是该建筑结构中的一种柱式, 为了研究其偏压受力性能, 文中通过试验检测与数值模拟相结合的方式对其进行研究。试验发现: 试件在受压过程中, 混凝土与内部型钢的协同工作性能良好, 试件破坏时呈现弯曲破坏的破坏特征, 其主要是由于受压区混凝土被压溃、型钢被压屈所导致的。还对其开展了有限元变参数分析, 研究偏心角度、偏心距、型钢厚度及长细比四种因素对T形轻钢混凝土组合异形柱偏压性能的影响。结果表明: 试件的偏压承载力随偏心距、长细比和偏心角的增大而减小, 随型钢厚度的增大而增大; 试件初始刚度随偏心距和长细比的增大而减小; 试件延性性能随偏心距、型钢厚度和长细比的增大而增强。

关键词: 装配式建筑; T形轻钢混凝土组合异形柱; 有限元分析; 偏压性能; 试验研究; 变参数分析

中图分类号: TU398⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)09-0083-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240331001

Eccentric Compression Behavior of T-Shaped Light Steel- Concrete Composite Column in Modular Wall Prefabricated Buildings

ZHANG Shengli¹, ZHANG Zhechang², CHAI Fanghua¹, LIU Yuanyuan¹,
LIU Haowen², QIAO Wentao^{2*}

(1. China Railway 16th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Beijing 101400, China; 2. School of Civil
Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

*Corresponding author: qwt@stdu.edu.cn

Abstract: The light steel-concrete composite T-shaped column is one of the column types in new modular wall prefabricated building structure, which has the advantages of thermal insulation, energy efficiency, easy assembly, rapid construction and cost-effectiveness. In order to investigate the mechanical behavior under eccentric compression loading, experimental study and finite element analysis (FEA) were conducted in this paper. The experiment results revealed that the concrete and the internal steel worked well and exhibited the bending failure characteristics. The failure of specimens was mainly caused by the crushing of concrete and the buckling of profiled steel. Refined finite element models were established to carry out a multi-parameter analysis, considering four parameters: eccentric

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 河北省杰出青年科学基金 (E2022210084)

作者简介:

张胜利 (1980—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事房屋建筑工程方面的研究。E-mail: 784844529@qq.com。

张哲畅 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事创新结构与智能建造方面的研究。

通信作者:

乔文涛 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事创新结构与智能建造方面的研究。E-mail: qwt@stdu.edu.cn。

angle, eccentric distance, steel thickness, and slenderness ratio. The results show that the eccentric compressive bearing capacity increases as the steel thickness increases and eccentricity, slenderness ratio and eccentric angle decrease. The initial stiffness decreases as eccentricity and slenderness ratio increase. The ductility increases with eccentricity, steel thickness and slenderness ratio increase.

Keywords: prefabricated building; T-shaped light steel-concrete composite column; finite element analysis; eccentric compression performance; experimental study; variable parametric analysis

近年来,保温结构一体化的模块建筑结构形式逐渐成为装配式建筑的主流,实践证明模块化建筑和相应施工技术的出现能大大提高生产效率和标准化程度。在装配式建筑中使用传统的钢筋混凝土结构柱会限制空间的使用,从而降低装配率,而轻钢混凝土组合结构不仅可以充分发挥钢材高强度的优势,还可通过多种型钢的拼接来满足不同截面形式的适配要求。

诸多学者对冷弯薄壁型钢组合柱进行了大量研究。李艳春等^[1]以截面类型和长细比为参数,研究了27根冷弯薄壁型钢组合柱的受力性能,结果表明:组合柱的极限承载力相比拼合柱的极限承载力提高了1.4倍,并在试验和数值仿真的基础上提出了组合柱轴压承载力的公式。纪梦为^[2]、李治^[3]对冷弯薄壁型钢组合柱的轴压性能进行了试验研究,并提出了极限承载力计算公式,结果表明:该试件具有较好的稳定性能与极限承载力,且计算公式结果与试验结果相接近。WHITTLE等^[4]针对采用中间焊接连接的双肢C型钢箱形组合柱开展了试验研究,结果表明:合理的焊接间距可以有效避免试件失稳破坏。ISLAM等^[5]针对不同截面的CFST柱进行了轴压试验,研究发现当CFST柱发生破坏时均表现为内填混凝土被压碎且型钢被压屈。QIAO等^[6-7]研究了多肢冷弯薄壁型钢组合柱的轴向受压性能,结果表明:多肢组合截面柱的承载力远大于单肢截面柱的承载力,还建立了大量的有限元模型,并通过直接强度法推导了冷弯薄壁型钢多肢组合柱的轴向承载力公式。

现有研究中关于冷弯薄壁型钢多肢组合异形柱的研究较少,本文所研究的多肢拼合冷弯薄壁型钢混凝土组合异形柱是一种新型模块墙装配式建筑中的柱式^[8],该模块墙装配式建筑具有保温隔热性能好、装配率高、施工快捷、成本经济等优点。本文以其中的T形轻钢混凝土组合异形柱为研究对象,为探究其在偏心荷载作用下的破坏模式并明确其偏心承载力的影响因素,采用试验与有限元模拟方法对其开展了双向偏压性能研究,为低能耗的框架型模块墙装配式建筑体系的研究提供了理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计制作了1个T形轻钢混凝土组合异形柱双向偏

心受压试件,编号为TSRC。试件主要由内置T形截面型钢立柱和混凝土截面两部分组成,内置T形截面型钢立柱是由9根单肢冷弯薄壁C型钢,通过自攻螺钉拼合连接构成型钢骨架,且在阴角位置焊接了角钢及抗剪栓钉,随后浇筑混凝土构成的,试件截面形式及构造如图1所示。试件采用Q235钢材制作,长度为2400 mm,截面尺寸为420 mm×280 mm,混凝土保护层厚度为30 mm,其它设计参数如表1所示。

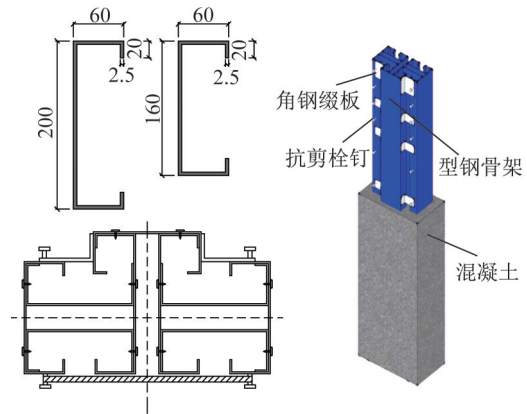


图1 T形轻钢混凝土组合异形柱截面形式及构造(单位:mm)

Fig. 1 T-shaped light steel-concrete composite column cross-section and construction (unit: mm)

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimen

试件编号	偏心角/ $^{\circ}$	型钢厚度/ mm	偏心距/ mm	混凝土强度等级
TSRC	15	2.5	80	C30

注:0°偏心角位于截面横向形心轴上。

1.2 试验加载及测试方法

本试验采用静力加载试验法,试验采用1000 t反力框架-压力试验机进行加载,加载装置如图2所示。试件立柱两端采用铰接方式连接,为实现点荷载铰接连接,在试件两端设置了球铰支座。加载前先施加100 kN的预加载,目的是消除支座间隙并完成对正操作。随后卸去预加载并归零后对试件进行单调位移加载,加载速率为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,当承载力下降至85%峰值荷载时或试件因变形过大而无法继续加载时停止试验。

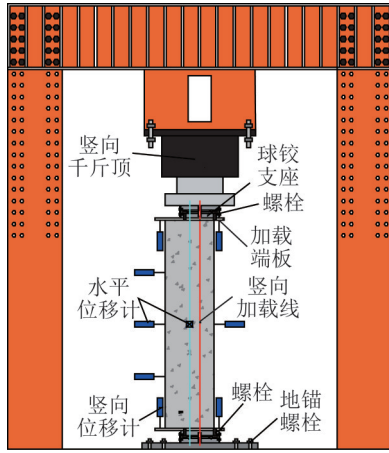


图2 加载装置

Fig. 2 Loading setup

试验过程中测量的内容主要包括T形轻钢混凝土组合异形柱竖向承载力、试件竖向位移、试件水平位移、型钢纵向应变、混凝土应变等内容。试件的位移计及应变片测点布置如图3所示,其中D1-D12为位移计,分别用于测量试件不同高度处的竖向与侧向位移;C1-C7及F1-F21为应变片,分别用于测量混凝土表面及型钢关键部位的纵向应变分布。

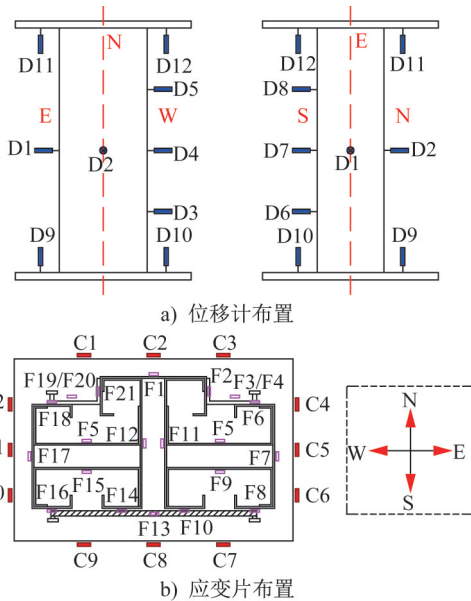


图3 试件位移与应变测点布置

Fig. 3 Arrangement of specimen displacement and strain measurement points

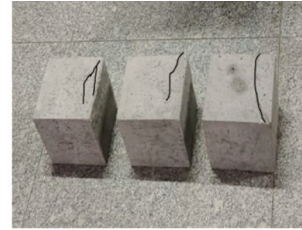
1.3 材性试验

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[9]对浇筑过程中预留的混凝土试块进行抗压强度试验,混凝土材性试验装置及试块如图4a)、b)所示,测试结果如表2所示;依据中国标准《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[10]

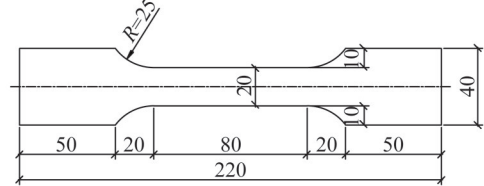
和《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[11]对2.5 mm厚的冷弯薄壁型钢进行拉伸试验,共进行了3个标准试件的拉伸试验,编号分别为T-1、T-2和T-3,标准试件尺寸、试验装置及试样如图4c)、d)、e)所示,钢材应力-应变曲线如图5所示,测试结果如表3所示。



a) 混凝土材性试验装置



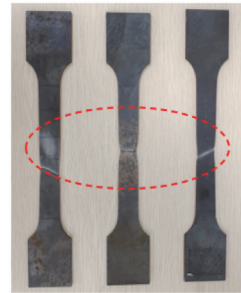
b) 混凝土立方体试块



c) 钢材材性试验标准构件尺寸(单位: mm)



d) 钢材材性试验装置



e) 钢材拉伸试样

图4 材性试验装置及试样

Fig. 4 Material property testing setup and specimens

表2 混凝土材性试验结果

Table 2 Concrete material property test results

混凝土等级	抗压强度/MPa	弹性模量/ 10^4 MPa
	32.1	3.06
C30	29.7	3.12
	34.8	3.24
平均值	34.4	3.14

2 试验结果

2.1 试验现象与破坏特征

正式加载初期,试件无明显变形,整体处于弹性阶段。当荷载增加至极限荷载的40%左右时,试件开始发出响声,上端受压区混凝土出现竖向裂缝;当荷载增加至极限荷载的50%左右时,试件竖向裂缝增多,受拉区出现细微横向裂缝;当荷载增加至极限荷载的85%左右

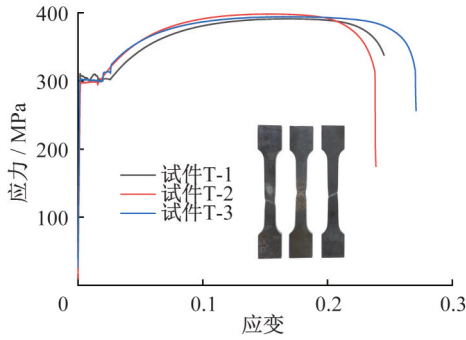


图5 钢材应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of steel

时,试件进入屈服阶段,竖向裂缝向下发展并开始扩散变大,裂缝数量明显增加;当荷载增加至极限荷载时,试件混凝土的劈裂响声明显加剧,受拉区横向裂缝明显增加;

表3 钢材材性试验结果

Table 3 Steel material property test results

试件名称	厚度 t/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/10 ⁵ MPa	伸长率/%
T-1	2.5	301.5	391.9	2.05	36.1
T-2		298.1	398.3	1.97	35.0
T-3		303.1	394.4	2.04	34.2
平均值		300.9	394.8	2.02	35.1

当荷载降至极限荷载的85%时,试件上部混凝土被压溃,挠曲变形更加明显,试件停止加载。试件最终破坏时内部型钢破坏以局部屈曲破坏为主,试件的破坏形态如图6所示。

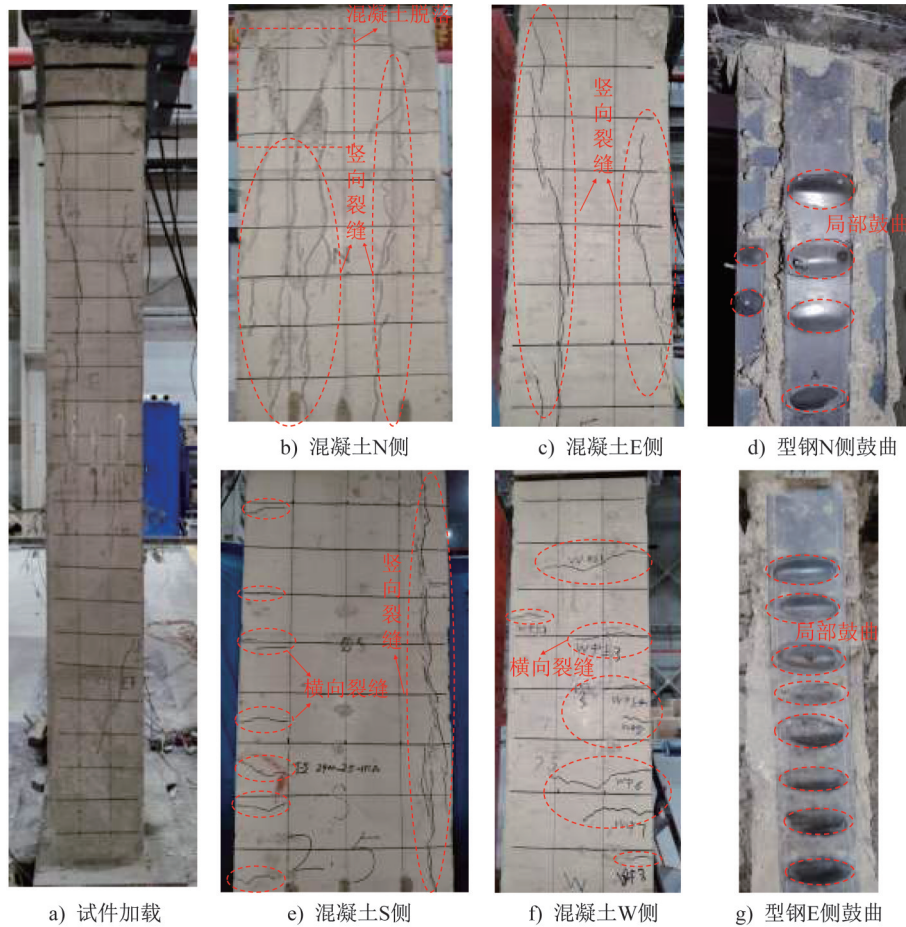


图6 试件TSRC破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimen TSRC

2.2 荷载-位移曲线

位移荷载加载初期,试件刚度保持不变,型钢与填充混凝土能够共同工作、协调变形,荷载-位移曲线呈线性分布;随着位移荷载的持续增加,试件进入弹塑性阶段,刚度逐渐降低,荷载-位移曲线呈非线性增长的趋势;当

荷载达到极限荷载后荷载-位移曲线呈平缓下降的趋势,试件变形良好,表明试件具有较好的延性能力。将试验所测的荷载和位移进行均值处理,并绘制试件的荷载-位移曲线如图7所示。

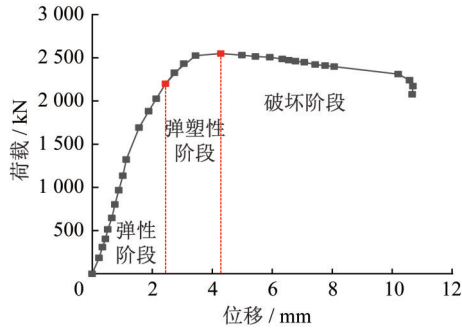
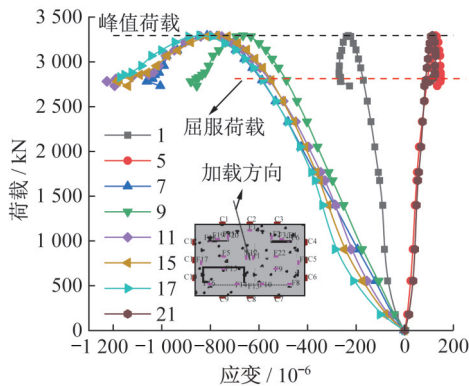


图7 试件荷载-位移曲线

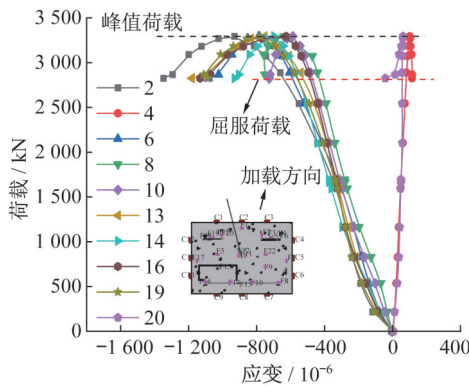
Fig. 7 Load-displacement curve of specimen

2.3 荷载-应变曲线

在试验加载初期,荷载-应变曲线呈线性增长趋势,靠近受压区一侧应变均为负值,受拉区应变基本为正值。当荷载继续增加至1750 kN时,荷载-应变曲线斜率减缓呈非线性增长趋势,受压区部分型钢、翼缘开始屈服且出现局部屈曲现象。当荷载继续增至极限荷载时,部分应变出现反向增长的现象,这一特征表明力中和轴朝着加载点方向移动,T字型钢骨架左侧的单肢型钢从受压状态转变为受拉状态,且靠近受压区一侧翼缘、型钢发生屈曲破坏,试件弯曲变形持续增大最终发生破坏。将每组试件应变值进行均值处理,绘制试件荷载-应变曲线如图8所示。



a) 试件TSRC型钢腹板纵向应变



b) 试件TSRC型钢翼缘纵向应变

图8 试件荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of specimen

注:1-21代表型钢应变片的编号,对应图3b)中F1-F21测点位置

3 有限元分析

3.1 模型建立

采用有限元软件ABAQUS进行T形轻钢混凝土组合异形柱偏压性能数值模拟时,单肢冷弯薄壁型钢及角钢选用S4R壳单元模拟,混凝土、柱两端钢板选用C3D8R实体单元模拟。并采用了混凝土塑性损伤模型来模拟混凝土在静力荷载作用下的性能,混凝土本构关系采用基于《混凝土结构设计规范》(GB/T 50010—2010)^[12]建立的混凝土本构塑性损伤模型,冷弯薄壁型钢及角钢缀板均采用ABDEL-RAHMAN等^[13]提出的线性强化折线模型。

试件内部冷弯薄壁型钢之间采用“绑定”约束进行模拟;角钢缀板与型钢间采用“绑定”约束进行模拟焊接;内部型钢采用“内置嵌入”的方式嵌入到混凝土内;钢垫板与混凝土之间采用“绑定”约束,而钢垫板与型钢之间则设置固-壳“耦合”约束。进行有限元模拟时应保证边界条件与试验的边界条件保持一致,根据偏心角度及偏心距,在试件对应加载点位置设置参考点(R_{P1} 、 R_{P2}),并对试件上下端钢垫板平面实施“耦合”约束。为实现铰接连接,在柱顶参考点处约束(U_1 、 U_2 、 U_{R3})自由度,在柱底参考点处约束(U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_{R3})自由度,并对柱顶耦合点进行位移加载。结合模型自身特性对网格进行精细化划分:对二维平面的冷弯薄壁型钢,采用自由网格划分方式;其余部分则采用结构网格划分方式。通过反复比较计算,确定了混凝土、型钢、角钢缀板以及端板的全局网格尺寸分别为40 mm、30 mm、10 mm和10 mm。建立的有限元模型如图9所示。

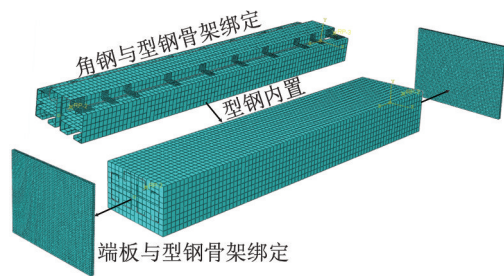


图9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

3.2 有限元结果验证

3.2.1 荷载-位移曲线对比

有限元模拟与试验测得的试件荷载-位移曲线对比如图10所示。由图可知,有限元模拟结果与试验结果基本吻合,但在加载前期有限元模型的曲线刚度比试验的曲线刚度大,其主要原因是:(1)在有限元模拟过程中,所建立的计算模型忽略了加载阶段型钢与混凝土之间的滑移作用,并对模型进行了部分简化;(2)有限元模拟

中,材料属性与边界条件均经过理想化处理,与此同时,试件在加工过程中存在的初始缺陷、试验操作中误差等因素都会对试验结果产生一定程度的影响^[14-15]。

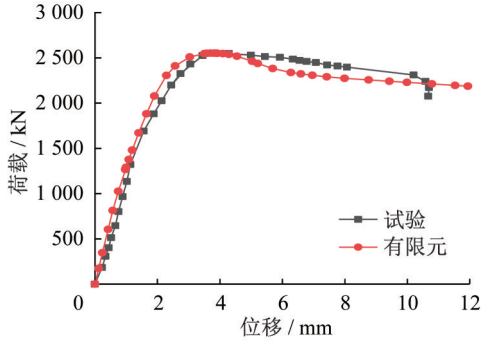


图10 有限元分析荷载-位移曲线与试验对比
Fig. 10 Comparison of load-displacement curves between FEA and test

3.2.2 破坏模式及应力对比

有限元模拟的应力云图如图11所示,其中 N_m 为试件的名义极限承载力。由图可知:当试件发生破坏时,试件两端混凝土应力较小,而靠近柱中位置的应力逐渐增大,与试验破坏形式一致;当荷载达到极限荷载时,E侧型钢承受的应力逐渐增大,而N、S侧型钢应力大小及屈服面积则逐步向受拉侧扩展。W侧受拉区跨中1/2位置的型钢已达到屈服强度,且应力强度呈现“越靠近跨中1/2截面越大”的分布特征,而柱两端型钢应力较小尚未进入屈服状态。综上可知,有限元模拟结果与试验破坏形态吻合较好。

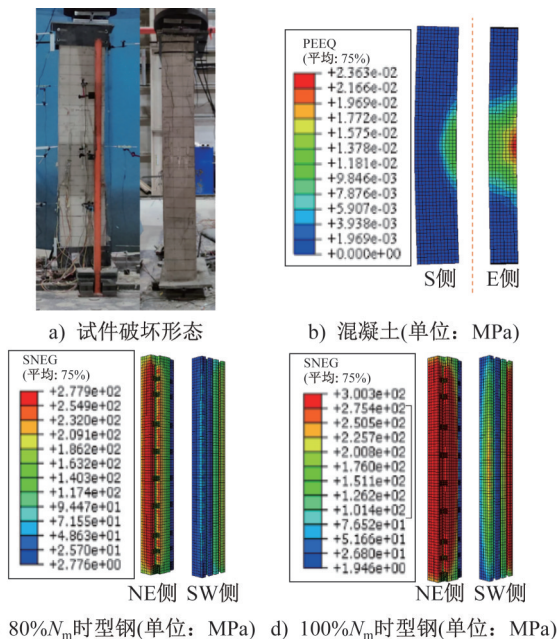


图11 试件TSRC应力云图(单位:MPa)

Fig. 11 Stress contours of specimen TSRC (unit: MPa)

3.3 有限元变参数分析

为探究加载偏心角度、加载偏心距、型钢厚度及试件长细比四种因素对T形轻钢混凝土组合异形柱的影响规律,采用单一变量分析法,通过改变单一参数而保持其余量不变的方式来研究参数变化对偏压试件承载力提高程度的影响。模型拓展分析参数如表4所示。

表4 拓展分析参数
Table 4 Expanded analysis parameters

模型编号	e/mm	t/mm	L/mm	$\theta/^\circ$
TE-40	40	2.5	2 400	15
TE-60	60	2.5	2 400	15
TE-80	80	2.5	2 400	15
TE-100	100	2.5	2 400	15
TE-120	120	2.5	2 400	15
TT-2.0	80	2.0	2 400	15
TT-2.5	80	2.5	2 400	15
TT-3.0	80	3.0	2 400	15
TT-4.0	80	4.0	2 400	15
TH-480	80	2.5	480	15
TH-1000	80	2.5	1 000	15
TH-1800	80	2.5	1 800	15
TH-2400	80	2.5	2 400	15
TH-3200	80	2.5	3 200	15
TA-15	80	80	2 400	15
TA-30	80	80	2 400	30
TA-45	80	80	2 400	45
TA-60	80	80	2 400	60
TA-90	80	80	2 400	90
TA-105	80	80	2 400	105

注:模型编号中第一个字母T表示T形轻钢混凝土组合异形柱;第二个字母E、T、H、A分别表示试件的加载偏心距、型钢厚度、柱长以及加载偏心角度;数字具体表示该参数的具体数值; e 为加载偏心距; t 为型钢厚度; L 为柱长; θ 为加载偏心角度。

3.3.1 偏心距

图12为不同偏心距下试件的荷载-位移曲线。由图可知:改变偏心距对试件的初始刚度、偏心承载力及延性性能均有较大程度的影响。当偏心距由40 mm增至120 mm时,曲线斜率依次降低,且曲线的下降速率也逐渐降低,偏心承载力由3 341.94 kN依次降至1 959.91 kN,降低了41.35%。这是因为偏心距增大时,柱端会产生更大的附加弯矩,该弯矩会加速柱端混凝土的破坏进程,最终导致试件偏心承载力下降。

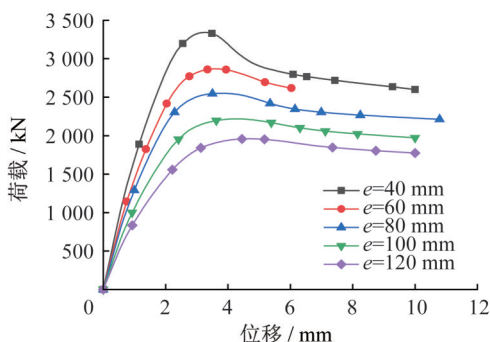


图 12 偏心距对荷载-位移曲线的影响

Fig. 12 The influence of eccentricity on the load-displacement curves

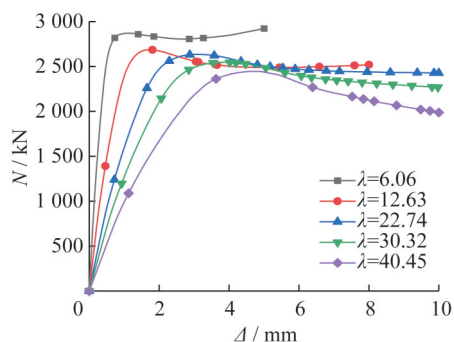


图 14 长细比对荷载-位移曲线的影响

Fig. 14 The influence of slenderness ratio on the load-displacement curves

3.3.2 型钢厚度

图 13 为不同型钢厚度下试件的荷载-位移曲线。由图可知:改变型钢厚度会对试件的偏心承载力有很大的影响,而对试件的初始刚度与延性性能影响较小。当型钢厚度由 2.0 mm 增至 4.0 mm 时,曲线斜率基本相同,曲线下降速率逐渐减小,偏心承载力由 2 257.59 kN 依次增至 3 384.59 kN,提高了 49.92%。这是因为型钢厚度的增大会显著提高核心混凝土的约束作用,导致试件的偏心承载力增大。

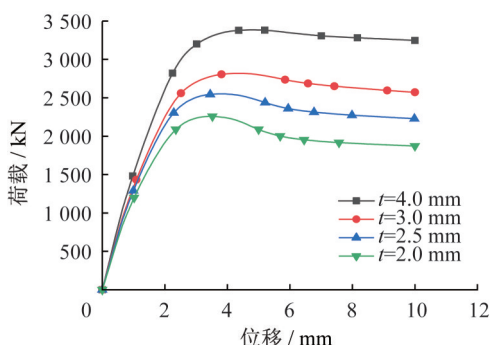


图 13 型钢厚度对荷载-位移曲线的影响

Fig. 13 The influence of steel thickness on the load-displacement curves

3.3.3 长细比

图 14 为不同长细比下试件的荷载-位移曲线。由图可知:改变长细比的大小对试件的初始刚度、偏心承载力以及延性性能均有一定的影响。当试件长细比由 6.06(480 mm)增至 40.45(3 200 mm)时,曲线斜率明显降低,且曲线的下降速率也明显减小,偏心承载力由 2 870.28 kN 依次降至 2 445.15 kN,降低了 14.81%。长细比增大时,纵向弯曲效应会逐渐凸显,该效应不断累积最终导致试件发生侧向失稳,进而引发破坏。

3.3.4 偏心角

图 15 为不同加载角度下试件的荷载-位移曲线。由

图可知:改变偏心角的大小会对试件偏心承载力有一定程度的影响,而试件的初始刚度以及延性性能无明显变化。当偏心角由 15° 依次增至 105° 时,曲线斜率基本相同,曲线下降速率基本一致,偏心承载力由 2 544.31 kN 依次降至 1 797.55 kN,降低了 29.35%。

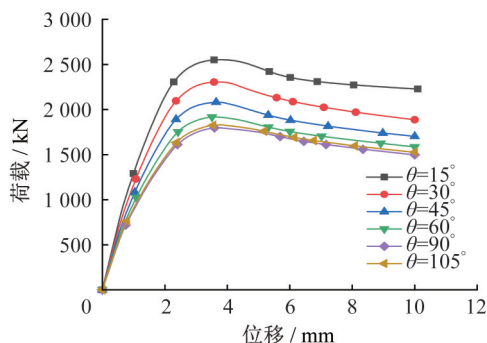


图 15 偏心角对荷载-位移曲线影响

Fig. 15 The influence of eccentricity angle on the load-displacement curves

4 结论

本文主要研究了 T 形轻钢混凝土组合异形柱在双向偏压作用下的力学性能,通过试验与有限元模拟结果的对比,验证了有限元模型的准确性,分析了不同参数对试件偏心承载力、荷载-位移曲线的影响。得到以下结论:

(1) 试验结果表明:T 形轻钢混凝土组合异形柱在双向偏心荷载下能够充分发挥型钢和混凝土的协同作用,受压区型钢先于受拉区发生屈服,试件主要发生弯曲失稳破坏,混凝土出现开裂和剥落,型钢发生鼓曲变形。

(2) 建立了 T 形轻钢混凝土组合异形柱有限元模型,并与试验结果进行对比分析,发现二者具有较高的一致性,表明有限元模型能够有效反映 T 形轻钢混凝土组合异形柱的受力性能和破坏特征。

(3) 基于有限元模型的准确性,对 T 形轻钢混凝土组合异形柱的设计参数进行了拓展分析。结果表明:随着偏心距的增加,试件的偏心承载力由 3 341.94 kN 依次降至

1 959.91 kN,降低了41.35%,其延性性能则逐步提升;随着型钢厚度的增加,偏心承载力由2 257.59 kN依次增至3 384.59 kN,提高了49.92%,其延性性能也逐渐增加;随着长细比的增大,试件的初始刚度减小,偏心承载力由2 870.28 kN依次降至2 445.15 kN,降低了14.81%;随着偏心角度的增大,试件的极限承载力由2 544.31 kN依次降至1 797.55 kN,降低了29.35%。

参考文献:

- [1] 李艳春,韩爱红,牛宏祥,等.冷弯型钢-类地聚物泡沫混凝土柱轴压性能[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(10):35-45. DOI:10.11918/202307035.
- LI Yanchun, HAN Aihong, NIU Hongxiang, et al. Axial compression performance of cold-formed steel-geopolymer foam concrete column[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 35-45. DOI: 10.11918 / 202307035. (in Chinese)
- [2] 纪梦为.拼合冷弯薄壁型钢组合柱力学性能研究[D].北京:北方工业大学,2021.
- JI Mengwei. Research on mechanical properties of split cold-formed thin-walled steel composite columns [D]. Beijing: North China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [3] 李治.新型冷弯薄壁型钢-轻质混凝土拼合截面组合柱轴压性能研究[D].北京:北方工业大学,2020.
- LI Zhi. Study on axial compression performance of new cold-formed thin-walled steel-lightweight concrete composite columns [D]. Beijing: North China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [4] WHITTLE J, RAMSEYER C. Buckling capacities of axially loaded, cold-formed, built-up C-channels [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(2): 190-201. DOI: 10.1016/j.tws.2008.05.014.
- [5] ISLAM M M, ALI R B, BEGUM M, et al. Experimental study of square concrete-filled welded cold-formed steel columns under concentric loading [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(5): 4225-4237. DOI: 10.1007/s13369-020-04797-9.
- [6] QIAO W T, WANG Y H, LI R F, et al. Research on axial bearing capacity of cold-formed thin-walled steel built-up column with 12-limb-section [J]. Steel and Composite Structures, 2023, 47(3): 437-450. DOI: 10.12989/scs.2023.47.3.437.
- [7] QIAO W T, WANG Y H, ZHU R J, et al. Experimental study on the axial bearing capacity of built-up cold-formed thin-walled steel multi-limb-section columns [J]. Steel and Composite Structures, 2021, 40(6): 781-794. DOI: 10.12989/scs.2021.40.6.781.
- [8] 乔文涛,张俊杰,王雅静,等.一种装配式建筑墙及施工方法:CN116180976A[P].2023-05-30.
- QIAO Wentao, ZHANG Junjie, WANG Yajing, et al. A prefabricated building wall and construction method: CN116180976A[P]. 2023-05-30. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [10] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [11] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T 2975—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel and Steel Products—Location and Preparation of Samples and Test Pieces for Mechanical Testing: GB/T 2975—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB/T 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] ABDEL-RAHMAN N, SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(9): 1135-1143. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:9(1135).
- [14] LIU J, ZHOU T, LEI Z Y, et al. Eccentric compression performance of slender L-shaped column composed of concrete-filled steel tubes connected by steel linking plates[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105675. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.06.012.
- [15] WANG X D, JIANG J C, LIU Y, et al. Eccentric compression behavior of L-shaped column fabricated by thin-walled square steel tubes based on self-drilling screw connections[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 202: 112063. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112063.