

L形钢管柱灌浆套管连接弯剪性能研究

张文浩¹, 王存圳¹, 李涛^{1*}, 黄振宇^{2,3}

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 暨南大学 力学与建筑工程学院, 广州 510632;
3. 深圳大学 广东省滨海土木工程耐久重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 文中提出了一种适用于模块装配式钢结构建筑梁柱节点的L形柱灌浆套管连接形式, 并对该连接的抗弯剪性能展开了研究。设计并制作了6个L形柱灌浆套管连接试件, 对其分别开展了三点和四点抗弯试验研究, 随后还进行了有限元参数分析, 主要研究了不同内套管长度下该连接的弯剪承载力与纯弯曲承载力特性。试验结果表明: 在试验所验证的内套管长度范围内, 增加内套管长度可显著提升连接的弯剪、纯弯曲承载力及延性; 同尺寸灌浆连接的弯剪承载力和纯弯曲承载力基本一致。有限元分析结果表明: 当内套管长度超过一定范围后, 继续增加长度对连接的弯剪和纯弯承载力影响较小; 增加内套管长度可改善L形柱身轴向焊缝处的应力状态; 灌浆连接的弯剪和纯弯曲承载力由灌浆料与内套管截面的抗失效能力共同决定, 其中灌浆夹层的抗失效能力受内套管长度影响, 而内套管截面的抗失效能力受内套管正截面抵抗矩的影响; 此外, L形柱灌浆连接的抗弯承载力随弯矩方向变化而不同, 在弱轴正向受弯时抗弯承载力最低。

关键词: 模块装配式钢结构; 梁柱节点; 灌浆套管连接; L形柱; 抗弯剪性能; 有限元参数分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)03-0027-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20250512001

Study on Bending-Shear Performance of L-Shaped Column Grouted Sleeve Connections

ZHANG Wenhao¹, WANG Cunzhen¹, LI Tao^{1*}, HUANG Zhenyu^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Mechanics and Construction Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Civil Engineering,

Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

*Corresponding author: scealitao@whut.edu.cn

Abstract: This paper proposes an L-shaped column grouted sleeve connection for beam-column joints in modular prefabricated steel structures and investigates its bending-shear performance. Six L-shaped column grouted sleeve connection specimens were designed and fabricated. Three-point and four-point bending tests were conducted, followed by finite element parametric analysis. The study primarily examines the combined bending-shear capacity and pure bending capacity of the connection under different inner sleeve lengths. Experimental results indicate that within the tested range of inner sleeve lengths, increasing the inner sleeve length significantly enhances the connection's combined

收稿日期: 2025-05-12

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3100800), 国家自然科学基金(51908437)

作者简介:

张文浩(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事模块化装配式钢结构建筑节点连接方面的研究。E-mail: 348248680@qq.com。

通信作者:

李涛(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构的疲劳断裂性能和装配式钢-混凝土组合结构方面的研究。

E-mail: scealitao@whut.edu.cn。

bending-shear capacity, pure bending capacity and ductility. For grouted connections with identical dimensions, the combined bending-shear capacity and pure bending capacity are nearly equivalent. Finite element analysis reveals that when the inner sleeve length exceeds a specific threshold, further increases in inner sleeve length have limited effects on the connection's bending-shear and pure bending capacities. Increasing the inner sleeve length improves the stress state at the axial weld of the L-shaped column body. The combined bending-shear capacity and pure bending capacity of the grouted connection are jointly governed by the failure resistance of the grout material and the inner sleeve cross-section. Specifically, the anti-failure capacity of the grout interlayer is influenced by the inner sleeve length, while that of the inner sleeve cross-section depends on its resistance moment of the normal section. Additionally, the bending capacity of the L-shaped column grouted connection varies with the direction of the bending moment, reaching its minimum value under weak-axis positive bending.

Keywords: modular prefabricated steel structure; beam-column joint; grouted sleeve connection; L-shaped column; bending-shear performance; finite element parametric analysis

模块化装配式建筑是装配式建筑高度工业化的产物,模块间的连接性能对整个结构的安全性及可靠性起着关键作用^[1]。模块间的连接多集中于梁柱节点部位,诸多学者对该节点提出了不同的构造形式。

模块化装配式钢结构建筑的梁柱节点形式多样,主要包括自锁装置连接节点^[2]、内螺栓连接节点^[3-4]、外螺栓连接节点^[5]、预应力拉杆连接节点^[6]、内套管承插式连接节点^[7-8]等。自锁装置连接节点的自锁装置设于上下柱端,内部配有弹簧和滑块,可实现插接自锁;内螺栓连接节点在柱端内部通过单个或多个螺栓连接上下柱,部分柱端会制作成角件,并在侧面开孔以拧紧螺栓;外螺栓连接节点通过在柱端焊接带螺栓孔的水平外环板连接上下柱端口,或利用带有螺栓孔的竖直板连接上下柱壁,或利用上下梁之间的螺栓连接间接实现上下柱的连接;预应力拉杆连接节点在柱内通过拉杆施加预应力,以此连接上下柱;内套管承插式连接主要依靠内套管连接上下柱,内套管与柱体之间通过螺栓、灌浆等方式固定。

在上述连接方式中,带内套管的灌浆连接相较于螺栓连接,对施工精度的要求更低;相较于焊接连接,对工人的技术要求更低;相较于自锁装置连接,节点构造简单且抗侧刚度更高。基于灌浆连接形式,同时考虑到现有研究多集中于方钢管柱^[4-8],而L形柱常见于钢筋混凝土结构,且在提高建筑空间利用率、满足建筑美观与功能需求方面具有显著优势,本文提出L形柱灌浆套管连接形式,将其应用于模块装配式钢结构建筑的梁柱节点,可进一步提升模块装配式建筑的空间利用率。模块化装配式建筑的抗侧性能也是当前研究的热点,大部分研究集中于钢板剪力墙的配置设计^[9-10],而节点的抗弯性能与结构的抗侧性能密切相关。基于此,本文对模块化装配式钢结构L形柱灌浆连接节点的弯剪和纯弯性能展开系统研究。

本文以L形柱灌浆连接梁柱节点的主要连接部分,即具有灌浆连接的上下柱(忽略梁)为研究对象,对其进

行抗弯试验加载,建立相应的有限元模型并开展分析,最后基于验证的有限元模型进行参数化分析。

1 试验方案

1.1 L形钢管柱灌浆连接

文中所提出的L形柱灌浆套管连接整体构造形式如图1a)所示,该连接主要由四个组成部分,如图1b)~e)所示,分别为带抗剪键的上L形柱、带密封板和抗剪键的下L形柱、带外环板和抗剪键的L形内套管和灌浆。内套管内部的灌浆施工提前完成,实际施工中,待相关模块吊装就位后,可通过柱身预留孔完成柱身和内套管之间的灌浆作业。

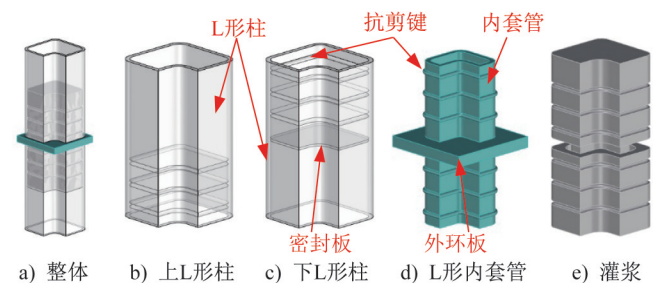


图1 L形柱灌浆套管连接及其组成

Fig. 1 L-shaped column grouted sleeve connection and its components

1.2 试件设计

本次试验共设计制作6个试件,每两个试件采用相同的灌浆连接段长度,分别用于三点和四点弯曲加载试验。本试验为非标准的三点弯曲试验,试件均采用足尺设计。内套管设计长度分别为100 mm、140 mm、220 mm,对应的L形柱内表面的抗剪键数量分别为2道、3道、5道。抗剪键尺寸参考APIRP2A-WSD-S2^[11]设计,宽度为9 mm,高度为4 mm。试件具体设计信息如表1所示。图2分别为三点弯曲试件和四点弯曲试件的正视图,其中灌浆连接段的剖视图如图3所示。内套管和L形柱正截面尺寸参

数如图4和图5所示。试件编号中三点和四点弯曲加载分别缩写为3p和4p,抗剪键缩写为w。例如试件编号2w3p代表2道抗剪键(上柱和下柱分别2道)3点弯曲加载试件,2w系列试件则表示所有具有2道抗剪键的试件。

表1 试件信息

Table 1 Information of specimens

试件编号	抗剪键数量/道	加载方式	单侧灌浆连接段长度/mm	内管长度/mm
2w3p	2	三点加载	100	220
2w4p	2	四点加载	100	220
3w3p	3	三点加载	140	300
3w4p	3	四点加载	140	300
5w3p	5	三点加载	220	460
5w4p	5	四点加载	220	460

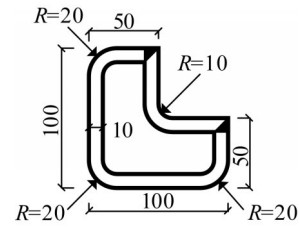


图4 内套管正截面(单位:mm)

Fig. 4 Inner tube cross section (unit: mm)

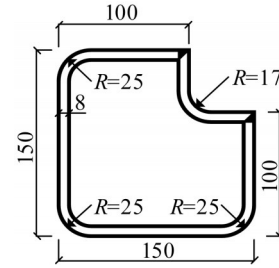


图5 L形柱正截面(单位:mm)

Fig. 5 L-shaped column cross section (unit: mm)

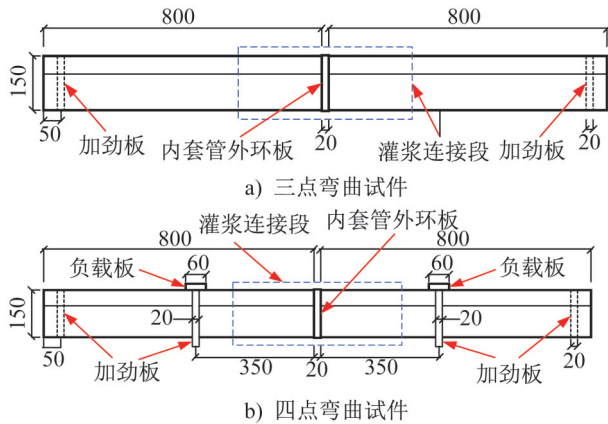


图2 试件设计(单位:mm)

Fig. 2 Specimen design (unit: mm)

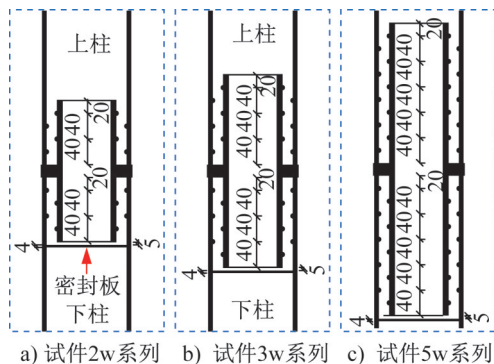


图3 灌浆连接段剖视图(单位:mm)

Fig. 3 Sectional-view of the grouted sleeve connection (unit: mm)

1.3 材料属性

依据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[12]开展钢材标准拉伸试验,测得钢

材的力学性能指标如表2所示。根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[13]进行边长为100 mm的混凝土立方体试块抗压试验,同时根据BS EN 12390^[14-17]开展直径为100 mm、高为200 mm圆柱体试块抗压试验,测得混凝土的力学性能指标如表3所示。

表2 钢材材料性能

Table 2 Material properties of steel

钢材	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	屈服 应变/%
内管	569.6	670.4	206 506	0.47
外管	452.9	561.6	209 284	0.43

表3 混凝土材料性能

Table 3 Material properties of concrete

混凝土	立方体抗压 强度/MPa	圆柱体抗压 强度/MPa	弹性模量/ MPa	峰值 压应变/%
HPC	100.3	78.1	39 350	0.24

1.4 加载方案与数据采集方案

1.4.1 加载方案

本次试验的加载方案分为三点弯曲加载与四点弯曲加载,试件均采用简支支座形式,如图6所示。试验在50 t反力架上进行,采用位移控制加载方式,当加载点与支座处的转角达到0.1 rad,或荷载降至峰值荷载的80%时停

止加载。加载过程中,未达到峰值荷载时加载速率为 $0.4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;达到峰值荷载后加载速率为 $1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;卸载阶段卸载速率为 $2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

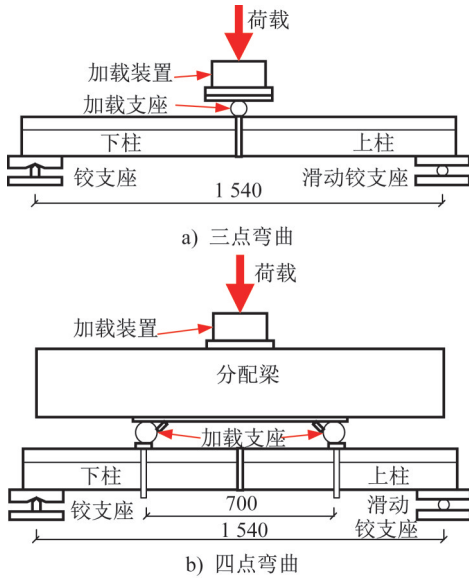


图6 试验加载设置(单位:mm)

Fig. 6 Test loading setup (unit: mm)

1.4.2 数据采集方案

位移计(LVDT)的测点布置如图7所示,针对2w、3w和5w系列的试件,中间3个位移计之间的间距 d 分别取 100 mm 、 140 mm 、 220 mm 。

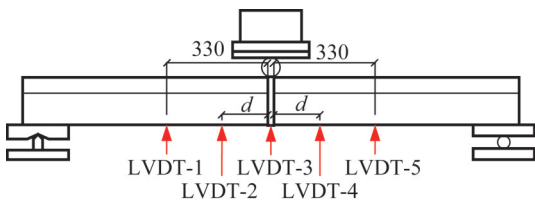


图7 位移计布置(单位:mm)

Fig. 7 Arrangement of displacement meters (unit: mm)

应变片布置于灌浆连接段下柱的表面,具体布置如图8、9、10所示。图9为下柱柱顶端剖视图,标注了应变片在截面上的位置分布,相同字母代表截面上处于同一投影位置的应变片。图10中左列数字与下行字母为应变片的定位坐标,主要采集的应变分组有:

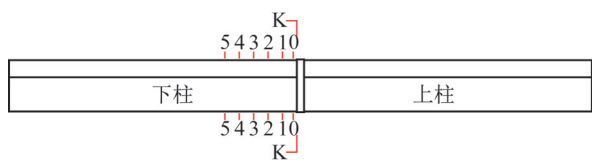


图8 应变片位置坐标与K-K截面

Fig. 8 Strain gauge position coordinates and K-K section

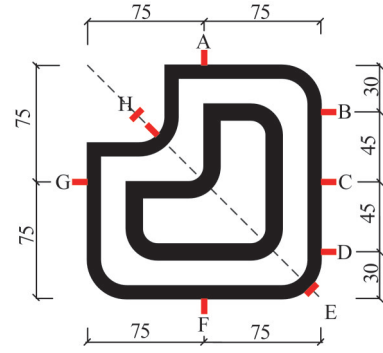


图9 柱端截面K-K应变片位置(单位:mm)

Fig. 9 Positions of strain gauges in column end section K-K (unit: mm)

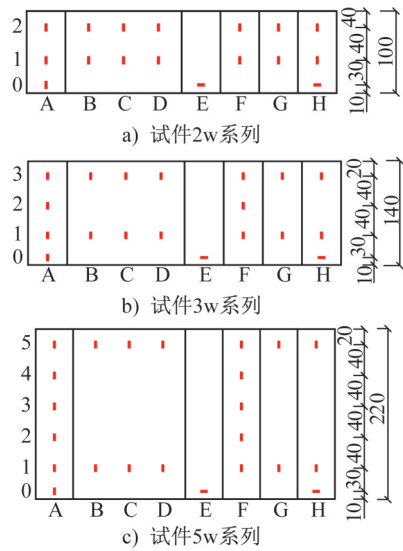


图10 柱长方向应变片位置(单位:mm)

Fig. 10 Positions of strain gauges in column length direction (unit: mm)

(1) 灌浆段的始端和末端的柱表面纵向应变,对应测点位置1和位置2(或3、5);(2) 柱的长度方向上,受拉上表面与受压下表面的纵向应变,测点设于每条抗剪键中间位置,对应测点位置A和F;(3) 柱端凹角侧与对应凸角侧外表面环向应变,对应测点位置H0和E0,见图10。

2 试验结果

2.1 破坏模式

内套管长度为 100 mm 的试件(试件2w3p、2w4p)破坏形态如图11a)、b)所示,该类试件的失效由灌浆破坏主导,L形柱未出现明显的塑性变形。内套管长度为 140 mm 的试件(试件3w3p、3w4p)破坏形态如图11c)、d)所示,该类试件的失效由灌浆与L形柱共同控制,表现为L形柱上翼缘压屈,混凝土开裂及柱身轴向焊缝撕裂,其中焊缝撕裂发生在极限荷载之后,灌浆料率先发生破坏,随后柱端截面转角增大,柱端扩张,最终引发柱身轴

向焊缝撕裂。内套管长度为220 mm的试件(试件5w3p、5w4p)破坏形态如图11e)、f)所示,加载过程中柱身出现明显的塑性变形,延性表现较好。由柱端与内套管外环板的间隙可推断,内套管产生残余弯曲变形,已进入塑性阶段,且灌浆料已发生破坏(试件5w3p)。试件5w3p柱身轴向焊缝在柱端口处存在未熔合缺陷,但未发生焊缝撕裂现象。

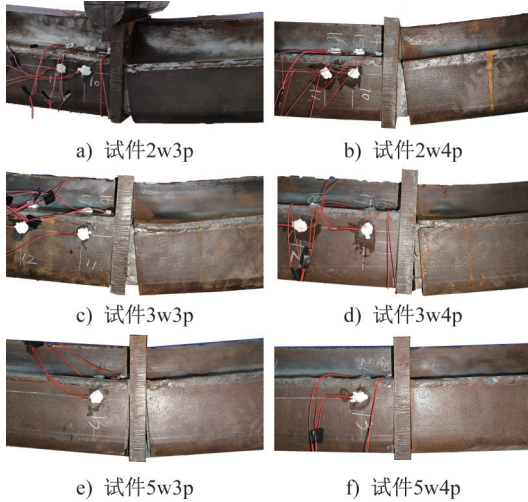


图11 试件破坏模式

Fig. 11 Failure modes of specimens

综上,当内套管长度较短时,试件破坏以灌浆破坏为主,且柱身轴向焊缝无撕裂现象;内套管长度适中时,试件易发生灌浆破坏、柱身轴向焊缝撕裂,同样伴随柱身小范围屈服;当内套管长度较长时,试件主要表现为内套管与柱体的弯曲塑性破坏,柱身轴向焊缝无撕裂,灌浆发生轻微破坏。

2.2 弯矩-转角曲线

试件的弯矩-转角曲线如图12所示,其中弯矩为柱端截面K-K的弯矩,转角为灌浆连接段的转角,由LVDT-2与LVDT-3的位移差绝对值的反正弦值计算得到。试件2w3p加载至11 kN时即发生破坏,试验数据无参考价值,因此未纳入曲线绘制。由图12可知:在灌浆段长220 mm范围内,内套管长度对于L形柱灌浆连接的抗弯性能影响较大,但随着内套管长度的不断增加,其对试件抗弯承载力的提升幅度呈减小趋势,同时内套管长度会影响试件屈服后荷载-位移曲线的走势,增加内套管长度有助于提升试件的延性。受加载位移量程限制,试件5w4p均未加载至极限破坏状态,因此其转角值相对较小。

此外,由图12可知:相同构造与尺寸的试件,在纯弯曲与弯剪耦合作用下的抗弯承载力基本接近,表现出较

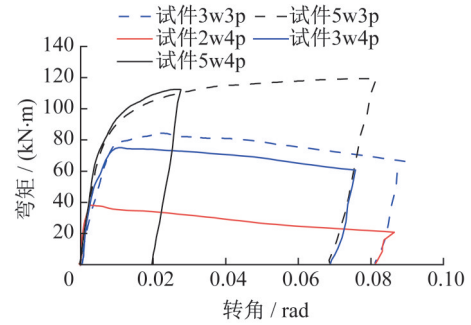


图12 试件弯矩-转角曲线

Fig. 12 Bending moment-rotation curves of specimens

弱的弯剪耦合效应。这一现象是由于内套管中同样填充了混凝土,使灌浆段形成实心截面,抗剪能力显著提升所致。

根据弯曲-转角曲线,采用最远点法^[18]确定试件的荷载特征值,结果如表4所示。对于无峰值点的荷载-位移曲线,最远点法无法适用,此类情况以加载范围内的荷载最大值作为峰值荷载。由表4可知:内套管长度增加对L形柱灌浆连接抗弯性能的提升效益随长度增加逐渐降低。

表4 试件的特征荷载

Table 4 Characteristic load of specimens

试件编号	屈服荷载/(kN·m)	峰值荷载/(kN·m)
3w3p	74.5	84.3
5w3p	97.6	119.4
2w4p	20.1	38.0
3w4p	50.6	75.0
5w4p	88.0	112.5

2.3 应变

试件达到最大荷载时刻,不同应变分组的位置-应变关系如图13、14、15所示。由图13可知:柱端处附近的应变分布极不均匀,受压区域集中于柱的上翼缘,且三点加载方式下该现象更为明显。

由图14可知:试件5w系列基本实现受压翼缘的力传递,在位置4处达到最小压应变,其余试件的柱受压翼缘均未完成充分的力传递。最大压应变出现在位置1处。

由图15可知:内套管长度对外钢管端口的受力状态影响显著。相同荷载条件下,内套管长度越长,柱端口的环向应变越小,端口的受力状态越优,间接改善了焊缝处的受力情况,延缓了焊缝撕裂的发生。当试件即将达到最大承载能力时,凹角位置的环向应变会急剧上升。

以表2中外管钢材的屈服应变0.47%(即4700 με)

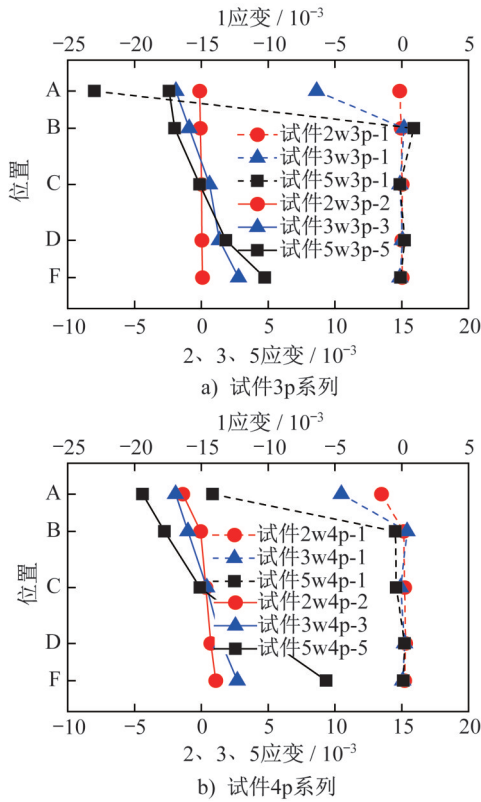


图13 灌浆始末端柱表面应变分组I

Fig. 13 Column surface strain group I at the beginning and end of the grouted region

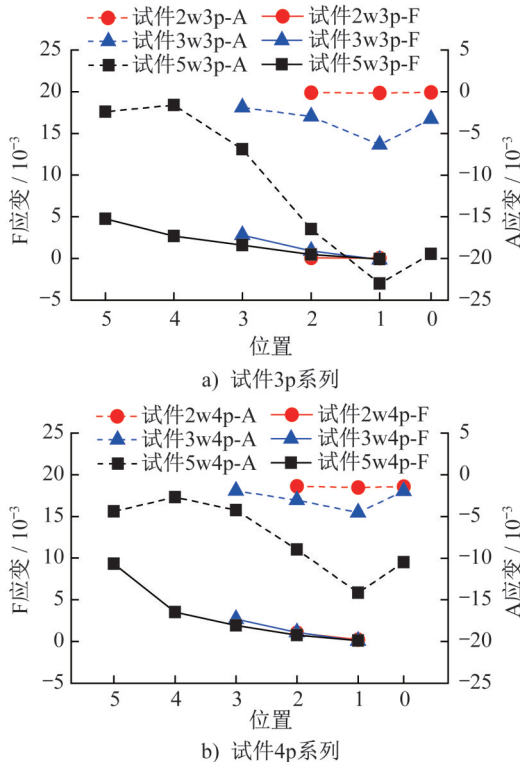


图14 灌浆长度方向柱表面应变分组II

Fig. 14 Column surface strain group II in grouting length direction

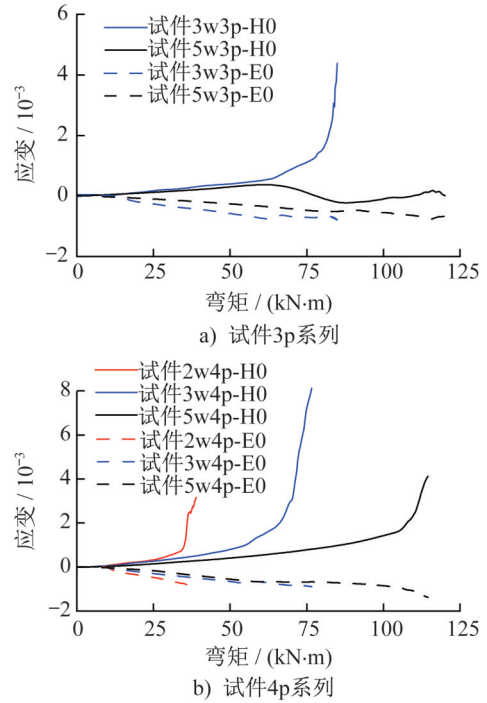


图15 柱端环向应变变化

Fig. 15 Variation of hoop strain at the end of the column

作为塑性屈服的判定标准,当测得微应变最小值小于-4 700或最大值大于4 700时,判定应变片测量区域发生应变屈服。各试件应变片采集区域的屈服情况统计表5所示。由表5可知:随着内套管长度的增加,L形柱进入塑性屈服的区域逐渐扩大;在三点与四点两种加载方式下,L形柱的屈服区域基本一致。

表5 屈服区域对比

Table 5 Comparison of yield regions

试件编号	屈服区域
2w3p	无
2w4p	无
3w3p	A1、H0
3w4p	A1、H0
5w3p	A0、A1、A2、A3、F5、H1
5w4p	A0、A1、A2、A3、A5、D5、F5

3 有限元模拟分析

3.1 有限元模型的建立

3.1.1 钢材本构模型

钢材本构模型通过理论公式^[19]与有限元模拟迭代钢材拉伸试验的方式确定。钢材的真实应力-塑性应变曲线如图16所示,弹性模量取值见表2,泊松比取0.3。

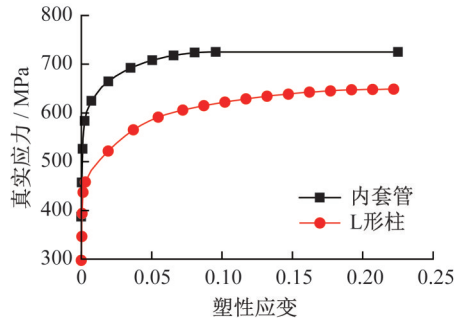


图 16 钢材真实应力-塑性应变曲线

Fig. 16 True stress-plastic strain curves of steels

3.1.2 混凝土本构模型

混凝土采用CDP塑性模型,模型参数取值汇总如表6所示,混凝土受压本构根据Mander理论^[20]与混凝土材性试验确定,受拉本构采用基于断裂能的拉伸行为模型,根据CEB-FIP(2010)^[21]确定。

表 6 CDP 塑性参数

Table 6 CDP plastic parameters

剪胀角 $\psi/(^\circ)$	偏心率 ϵ	f_{bo}/f_{co}	K	黏性参数
38	0.1	1.16	0.666 7	0.005

3.1.3 几何模型建立

为提高计算效率,试件采用半模型建模,忽略柱内部起构造作用的密封板;简支支座简化为对称的理想链杆,加载支座简化为刚性圆弧壳面,装配几何模型如图17所示。

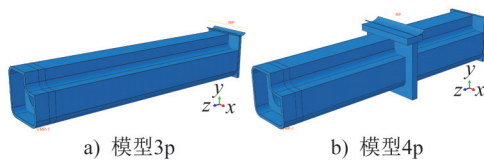


图 17 装配体几何模型

Fig. 17 Assembly geometry model

模型接触关系采用通用接触,法向行为设为硬接触,切向行为设为摩擦接触。通用接触的摩擦系数参考了相关文献[22-24]并结合实际表面处理情况取0.4。四点加载试验中,加载支座表面与试件负载板表面存在相对滑动,且试验中该接触面涂抹有润滑油,因此该接触的摩擦系数参考文献[25]取为0.15。

试件有限元模型的边界约束条件设置如下:有限元模型对称面施加对称约束;试件与支座接触的表面耦合至一点,并对该点施加理想链杆约束;加载支座的表面耦合至一点并固定,在第一个分析步中对该店施加 U_2 方向的位移,三点加载时 $U_2 = -70$ mm,四点加载时 $U_2 = -40$ mm。

模型网格大小综合考虑计算效率与计算精度确定。各部件的全局单元尺寸如表7所示,网格划分结果如图18所示。其中四点加载的支座与负载面存在相对滑动,对该区域进行网格划分,以准确模拟摩擦行为;管壁均划分为3层单元。

表 7 部件单元尺寸汇总

Table 7 Summary of element size of different parts

部件	单元尺寸/mm	单元类型
内套管	12	C3D8R, C3D6
灌浆区域	5(夹层),10(内套管内部)	C3D8R, C3D6
L形柱	14	C3D8R, C3D6
加载支座	10(3p),5(4p)	S4R

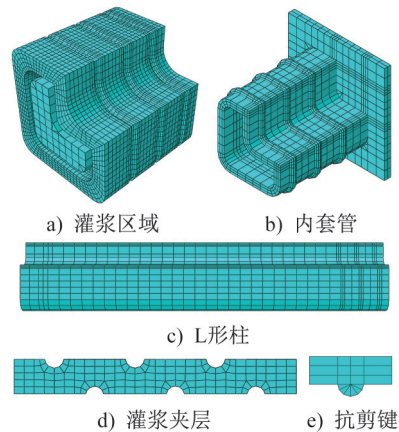


图 18 网格划分

Fig. 18 Mesh generation

3.2 有限元模型验证

3.2.1 破坏模式

各模型在最终位移下的有限元模拟的破坏模式如图19所示,柱屈服应力取455 MPa。由图19可知:随着内套管长度的增加,L形柱进入塑性屈服的区域逐渐扩大,与表5中的试验屈服规律相符。在对应L形柱身轴向焊缝撕裂的位置,模型3w系列的Mises应力更大,且进入屈服的焊缝长度最长;模型5w3p进入屈服的焊缝长度则较短。

3.2.2 荷载-位移曲线对比

有限元模拟与试验测得的荷载-位移曲线对比如图20所示,部分曲线中,因混凝土单元产生严重变形,导致有限元分析提前中断。

3.3 有限元云图分析

3.3.1 灌浆最终损伤分布

如图21所示为内外管之间夹层灌浆的最终损伤分

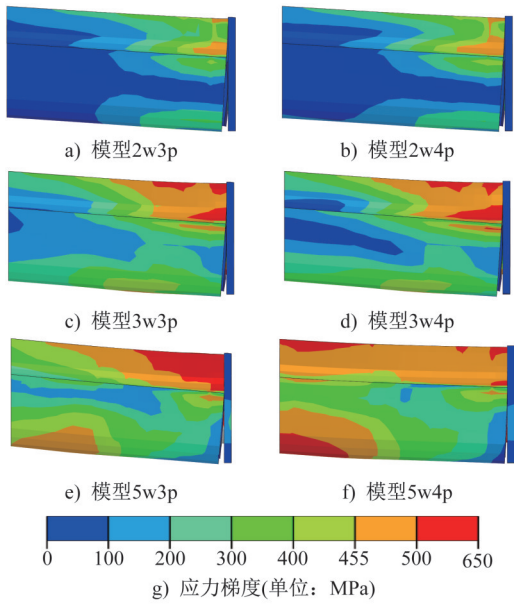


图 19 各模型破坏模式

Fig. 19 Failure modes of models

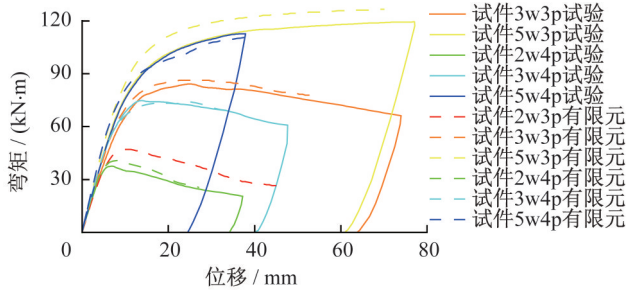


图 20 有限元与试验荷载-位移曲线对比

Fig. 20 Comparison of load-displacement curves between finite element and test results

布状态,模型中下侧为受拉侧,上侧为受压侧。由图可知:柱受拉侧灌浆的损伤更为严重,在模型2w和3w系列中,柱受拉侧灌浆均形成了相对完整的滑移面,这与试验中观察到的内套管与L形柱之间存在较大相对错动的现象相吻合。

3.3.2 内套管的最终应力状态

图22为不同长度内套管的最终应力状态,模型中等效屈服应力为572 MPa,由内套管的屈服应力计算真实应力所得。由图可知:仅模型5w系列的内套管进入了屈服阶段,其余模型的内套管均处于弹性阶段,说明在灌浆连接中,短长度内套管的性能未得到充分发挥。

3.4 有限元参数分析

如图23a)~d)所示,计算了不同参数下三点加载且加载位移为70 mm时,柱端截面K-K弯矩的最大值。其中模型2w系列对应内套管长度为100 mm,模型3w系列

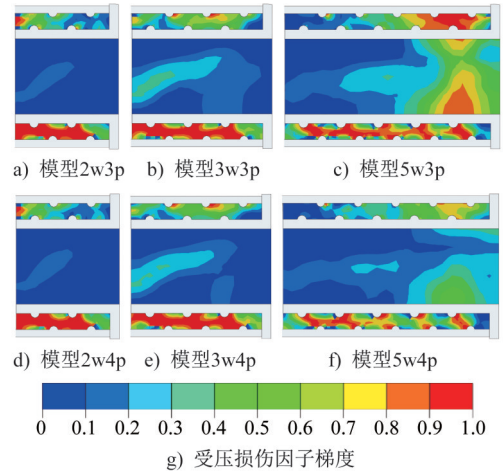


图 21 灌浆损伤分布

Fig. 21 Damage distribution of the grout

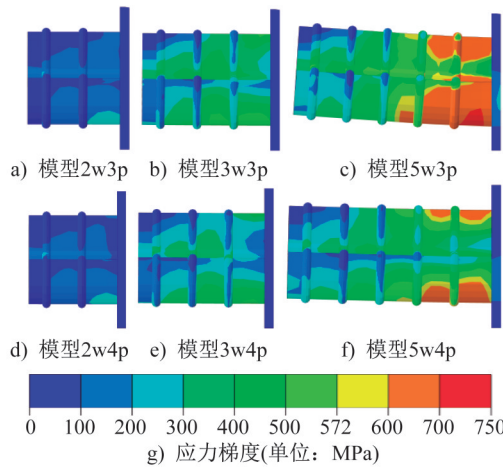


图 22 内套管应力分布

Fig. 22 Stress distribution of the inner sleeve

对应内套管长度为140 mm,其余模型以此类推。图23b)中,内套管厚度的增加采用向管壁内侧加厚的方式,保持夹层灌浆的厚度不变;图23c)中,弯矩方向的示意如图24所示,水平力通过L形柱的剪力;图23d)中,竖向力通过L形柱的形心,水平力通过L形柱的对称轴。

由图23a)可知,在一定长度范围内增加内套管长度可提升灌浆连接的抗弯承载力,但超过该范围后,抗弯承载力的提升幅度几乎为0。推测原因在于:内套管长度增加不会改变内套管正截面的特性,但会增加灌浆夹层的长度,提升灌浆夹层的抗失效能力,最终使连接的失效控制区域由灌浆夹层转移至内套管正截面。

为验证上述推测,计算了不同厚度与长度内套管试件的抵抗弯矩,结果如图23b)所示。由图可知:对于内套管长度较短的试件,增加厚度对其抗弯承载力的提升作用几乎可以忽略;当内套管长度足够长时,增加内套管厚度才能有效提升试件的抗弯承载力。

由图 23c)可知:该灌浆连接在弱轴正向受弯时抗弯承载力最低,在强轴方向受弯时抗弯承载力最高。

由图 23d)可知:内套管长度较短的灌浆连接,其抗弯承载力与轴压比呈正相关;内套管长度较长的灌浆连接,其抗弯承载力与轴压比呈负相关。

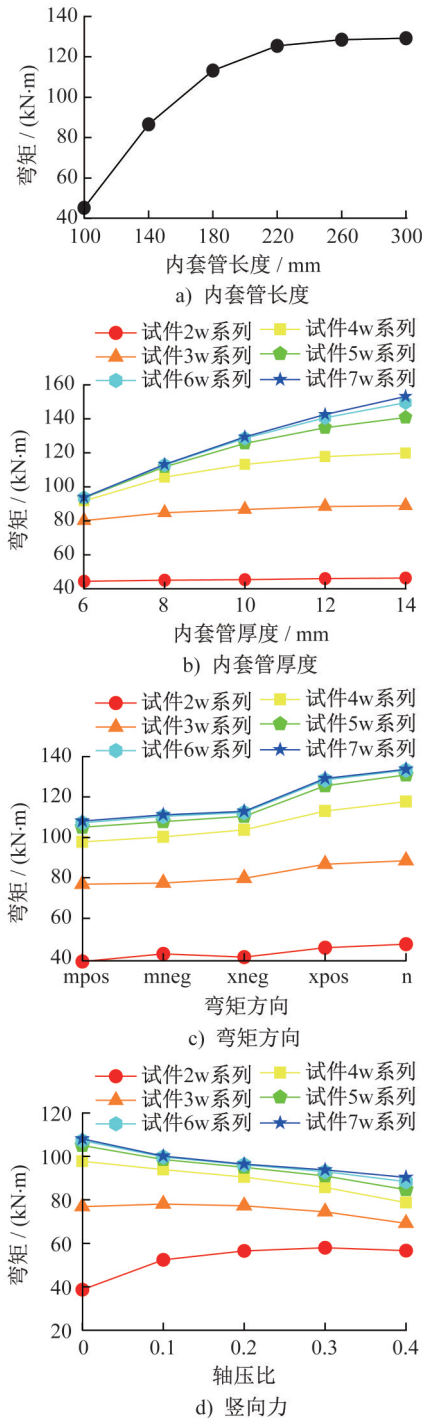


图 23 不同参数影响

Fig. 23 The influence of different parameters

4 结论

本文通过对 6 个带内套管的 L 形柱灌浆连接开展三

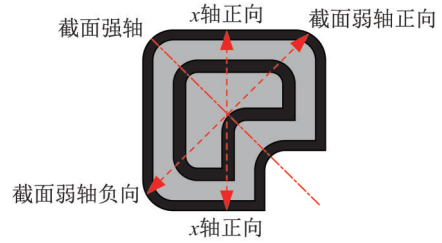


图 24 弯矩矢量方向

Fig. 24 Bending moment vector direction

点加载与四点抗弯加载试验,并结合有限元分析,得出以下主要结论:

(1) 提升 L 形柱灌浆连接的抗弯承载力时,需要同步控制内套管的长度、厚度并合理地设置抗剪键。在本文的试件尺寸条件下,灌浆段长度在 220 mm 范围内时,增加长度可有效提升连接的抗弯承载力;当灌浆段长度超出该范围后,抗弯承载力几乎不再提升,提升效果小于 3%。

(2) 由于灌浆连接段为实心截面,抗剪承载力较高,因此 L 形柱灌浆连接在纯弯曲与弯剪耦合作用下的抗弯承载力相近,二者的绝对差值不超过平均值的 13%。

(3) 轴压比对带 L 形柱灌浆连接柱体抗侧能力的影响由内套管长度决定:内套管长度较短时,柱体的抗侧能力随着轴压比增大而提升;内套管长度较长时,柱体的抗侧能力随轴压比的增大而下降。

参考文献:

[1] FARAJIAN M, SHARAFI P, KILDASHTI K. The influence of inter-module connections on the effective length of columns in multi-story modular steel frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106450. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106450.

[2] YANG N X, XIA J W, CHANG H F, et al. The flexural mechanical response of a novel plug-in self-locking inter-module connection for modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2024, 308: 118008. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118008.

[3] LIU J D, CAO X Y, YAN S C, et al. Research on seismic behavior of tapered-head bolted inter-module connection of modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2024, 304: 117586. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117586.

[4] 邓恩峰,杜有鹏,钱辉,等.模块化钢结构全装配可吊装节点受剪性能研究[J/OL]. 工程力学, 2024; 1-13(2024-02-22). https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20240221.1653.010. DENG Enfeng, DU Youpeng, QIAN Hui. Investigation on shear performance of fully prefabricated liftable connection of modular steel structures [J/OL]. Engineering Mechanics, 2024; 1-13(2024-02-22). https://link.cnki.net/urlid/11.2595.

- o3.20240221.1653.010.(in Chinese)
- [5] LIU X C, LI B Z, CHEN X S, et al. Seismic performance of bolted middle joint for modular steel structure [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 220: 108861. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108861.
- [6] LEE K, CHO B H, RASMUSSEN K J R, et al. Experimental and numerical investigation of bolt-free preloaded connection for steel-framed modular buildings [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 220: 108827. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108827.
- [7] LI T, LI Y, MUSHI W, et al. Experimental study of the static and hysteretic performance of grouted steel beam-column inter-connections for modular integrated construction [J]. *Engineering Structures*, 2024, 305: 117735. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117735.
- [8] 张忠豪, 王燕, 安琦, 等. 模块化钢框架模块间内套筒连接节点抗震性能试验研究 [J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(5): 1-11. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.001.
ZHANG Zhonghao, WANG Yan, AN Qi, et al. Seismic performance test on inner sleeve splicing joints between modules of modular steel frame [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26(5): 1-11. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.001.(in Chinese)
- [9] DENG R, YANG J D, WANG Y H, et al. Cyclic shear performance of built-up double-corrugated steel plate shear walls: Experiment and simulation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 181: 110077. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110077.
- [10] YANG S C, JIN S S, WANG Q Y. Modular corrugated steel plate shear wall: The relationship of matching with boundary column in terms of stiffness and strength [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 227: 109341. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.109341.
- [11] API RP 2A-WSD-S2 Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design [S].
- [12] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: part 1: Method of test at room temperature [S].(in Chinese)
- [13] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S].
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties [S].(in Chinese)
- [14] BS EN 12390-1: 2021 Testing hardened concrete—shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds [S].
- [15] BS EN 12390-2: 2019-TC Testing hardened concrete - making and curing specimens for strength tests [S].
- [16] BS EN 12390-13: 2021 Testing hardened concrete - determination of secant modulus of elasticity in compression [S].
- [17] BS EN 12390-3: 2019-TC Testing hardened concrete - compressive strength of test specimens [S].
- [18] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论 [J]. *工程力学*, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.(in Chinese)
- [19] Dassault Systemes. SIMULIA User Assistance 2024 [EB/OL]. https://help.3ds.com/2024/English/DSSIMULIA_Established/SIMULIA_Established_FrontmatterMap/DSDocHome.htm.
- [20] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1804-1826. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [21] CEB-FIP Model code 2010 final draft volume 1 [S].
- [22] YAN X Y, SHI S, YU J T, et al. Experimental and numerical investigation of multi-cavity concrete-filled double-skin steel tubular short column [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 227: 109357. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.109357.
- [23] KABIR M I, REHAN M S, AHMED Z, et al. Numerical and analytical evaluation of the compressive performance of Steel Tube (ST) -reinforced Concrete Filled Stainless Steel Tubular (CFSST) columns [J]. *Results in Engineering*, 2025, 25: 103904. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103904.
- [24] DAI Z Q, PANG S D, LIEW J R. Axial load resistance of grouted sleeve connection for modular construction [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106883. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106883.
- [25] DORN M, HABROVÁ K, KOUBEK R, et al. Determination of coefficients of friction for laminated veneer lumber on steel under high pressure loads [J]. *Friction*, 2021, 9(2): 367-379. DOI: 10.1007/s40544-020-0377-0.