

矩形钢管混凝土键连接剪力墙框架柱的力学性能研究

吴 潜^{1,2}, 李帼昌^{1,2}, 罗元伟², 李 明²

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究矩形钢管混凝土键连接装配式混凝土结构框架柱和剪力墙的力学性能, 分析不同参数对其影响, 为该类结构连接提供设计依据. 方法 设计了19个采用矩形钢管混凝土键连接的墙柱试件, 利用有限元方法模拟各试件在单调荷载加载下的受力过程, 分析不同参数对荷载-位移曲线的影响. 结果 矩形钢管混凝土键连接墙柱的构件与现浇构件相比, 延性很高, 最大承载力较高, 屈服荷载偏低; 键的截面高度增加, 构件承载力增加, 初始刚度增加, 延性系数不变; 截面宽度增加, 承载力增加, 初始刚度不变, 延性系数减小; 键的长度增加, 承载力基本不变, 初始刚度减小, 延性系数增加; 混凝土强度对构件的抗剪承载力和初始刚度影响很小; 键的纵向间距对构件的荷载-位移曲线几乎没有影响. 结论 矩形钢管混凝土键的截面高度是影响承载力的主要因素、长度是影响延性的主要因素.

关键词 装配式混凝土结构; 框架柱; 剪力墙; 矩形钢管混凝土

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Study on Mechanical Properties of Shear Wall and Frame Column Connected with CFRSTS Keys

WU Qian^{1,2}, LI Guochang^{1,2}, LUO Yuanwei², LI Ming²

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the mechanical properties of prefabricated concrete column and shear wall connected with concrete rectangular filled steel tube (CFRST) keys and provide reference for designing, how the different factors influencing the load-displacement curves are analyzed and the main factors affecting the shear performance of such members are found out. 19 such specimens are designed. Finite element method is used to simulate the load-bearing process of these specimens under monotonic load. The influence of different parameters on the load-displacement skeleton curves is analyzed. It shows that compared with cast-in-place member, prefabricated concrete frame

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703805); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180550288); 沈阳市科技支撑计划项目(18-013-0-29)

作者简介: 吴潜(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事结构工程方面研究.

column and shear wall connected with CFRST keys has high ductility,high maximum bearing capacity and low yield load. With the increasing of the section height of the keys,the bearing capacity and the initial stiffness of the member increases,but the ductility coefficient is not varied. With the increasing of the section width,the bearing capacity increases,and the initial stiffness does not change,yet the ductility coefficient decreases. With the increasing of the connection length,the bearing capacity is basically unchanged,and the initial stiffness decreases,yet the ductility coefficient increases. The concrete strength has little effect on the shear capacity and the initial stiffness of the member. The vertical spacing of the keys has little effect on the load-displacement skeleton curve. It can be concluded that the section height of the CFRST keys is the main factor affecting the bearing capacity,and the length of them is the main factor affecting the ductility.

Key words: prefabricated concrete structure; frame column; shear wall; rectangular concrete filled steel tube

经过近 10 年的研究,国内装配式混凝土建筑取得了举世瞩目的成就. 框剪结构、剪力墙结构和框架剪力墙结构是我国应用最多的三种基础结构形式. 有关装配式混凝土结构中,针对前两种结构形式开展的研究较多,钱稼茹等^[1-5]研究了框架结构中梁柱节点的抗震性能及剪力墙结构中剪力墙的竖向连接技术,而针对第三种结构形式的研究较少. 为此,笔者所在的课题组对框架剪力墙结构开展了研究,完成了其中剪力墙与框架柱、剪力墙与框架梁、剪力墙与连梁等方面的连接技术研发工作^[6-10]. 总结国内外学者在装配式混凝土结构方面的研发成果可看出,虽然不同学者提出了不同的连接方案,但这些方案所采用的思想几乎均是先连接预制构件的受力筋,然后在连接的空白区域浇筑混凝土,完成装配. 连接部位需要较多的湿作业. 在上述方案的基础上,有些学者提出将钢结构的连接思想引进到混凝土构件的连接,以此提高工业化水平^[11]. 基于此,笔者提出钢构件连接装配式混凝土预制构件的方法,基于有限元模拟方法,对采用矩形钢管混凝土键连接预制框架柱和预制剪力墙的连接技术进行分析,为该种连接技术的应用提供设计依据.

1 装配结构及装配方法

矩形钢管混凝土键连接框架柱和剪力墙

的结构及装配方法如图 1 所示.

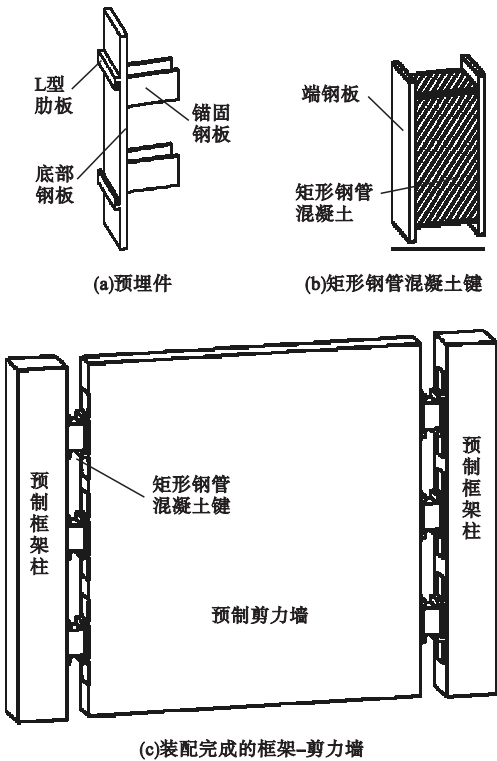


图 1 矩形钢管混凝土键连接剪力墙和框架柱装配图

Fig. 1 Assembly drawing of shear wall and frame column connected by CFRST keys

框架柱的预制过程:首先制作预埋件,预埋件由焊接于底部钢板的锚固钢板和 L 型肋板组成(见图 1(a)),然后绑扎框柱架的钢筋,将预埋件竖向均匀布置在柱的钢筋骨架一侧,锚固钢板与柱钢筋焊接;最后支模

板,浇筑混凝土,形成带预埋件的框架柱.剪力墙的制作过程与框架柱相同.矩形钢管混凝土键制作过程:首先将混凝土注入矩形钢管内并振捣密实,养护到预期强度后在矩形钢管端部两侧焊接端钢板(见图1(b)).装配时,先将剪力墙和框架柱吊装于预定位置,并临时固定,然后在剪力墙和框架柱的L型肋板内插入矩形钢管混凝土键,并焊接牢固(见图1(c)).连接完成后,在矩形钢管混凝土键、柱与墙体之间的空隙处加入砌块或挤塑板等材料填充.该种连接方式通过矩形钢管混凝土键传递构件间的内力,传力路径明确,无需现场湿作业,并且不含类似灌浆的隐蔽施工,施工质量越容易保证.

2 有限元模拟方法及验证

模拟前,笔者参照文献[5]中的墙柱试验,对模拟方法进行验证.原试验中,为研究框剪结构中预制柱与预制墙之间的抗剪力学性能,选取的研究对象为部分框架柱、部分预制墙和部分连接区域,并增加设置了加载梁和加强柱,形成试验试件(见图2).在验证有限元模拟方法时,选用的试件预制柱和预制墙采用现浇方式连接,试件编号为XJBZ.试件的尺寸和配筋如图3所示.在水平荷载作用时,剪力墙和框架柱在竖向存在相互错位引起的剪力,因此试验加载方式采用单向循环轴心加载,研究连接区域的抗剪性能.

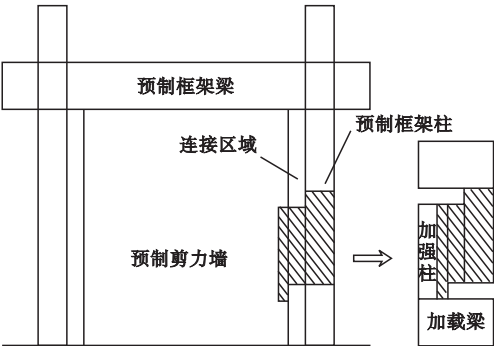


图2 试件在框架结构中位置

Fig. 2 Location of the specimen in the frame-shear wall structure

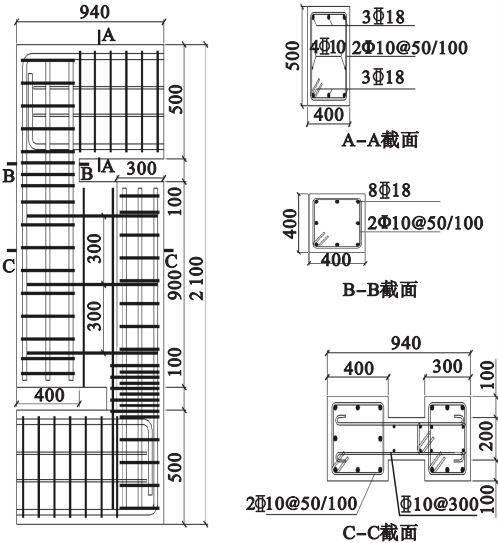


图3 试件XJBZ配筋

Fig. 3 Reinforcement detail of the specimen named XJBZ

有限元建模时,采用与试验高度相近的理论边界条件和加载方式^[5],有限元模型见图4.加载方式为在试件的一端设置一个参考点 R ,然后将 R 与加载钢板中心耦合(Coupling)约束,在参考点上施加 Z 轴方向的位移^[12].边界条件为下部钢板约束竖直和水平位移,上部自由.混凝土本构关系采用塑性损伤模型(CDP模型),混凝土单元类型为C3D8R^[13-14],泊松比为0.2,立方体抗压强度实验值为26.8 MPa^[5].钢筋采用简化三折线模型,泊松比为0.3,直径10 mm和18 mm的钢筋实测屈服强度分别为222 MPa和416 MPa,实测抗拉强度分别为287 MPa和575 MPa^[5],钢筋的单元类型为T3D2^[15-16].

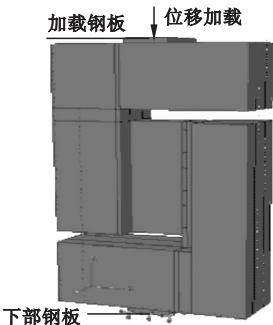


图4 有限元模型

Fig. 4 Finited element model

采用上述有限元模拟方法,计算提取试件的荷载-位移曲线,并与试验结果进行对比,结果如图5所示。从图中可以看出,曲线到达最大荷载前,模拟与试验所得的单向循环加载曲线基本吻合,偏差较小;到达最大荷载后,两曲线发展趋势基本一致;模拟最大荷载为520.46 kN,试验最大荷载559.3 kN。

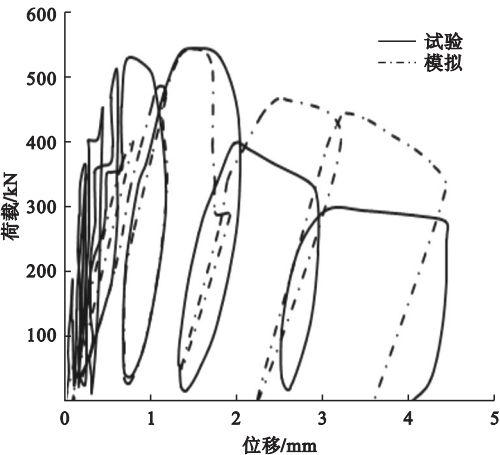


图5 模拟与试验荷载-位移曲线对比

Fig. 5 Comparison between simulation and test curves

模拟最大主拉塑性应变云图(反应裂缝发展规律)与试验裂缝对比如图6所示。从图中可以看出,试验斜裂缝主要集中在构件的现浇区内,并最终贯通整个试验区,模拟塑性应变与试验吻合良好。综上可以看出,模拟结果与试验结果误差较小,具有较高的可靠性。

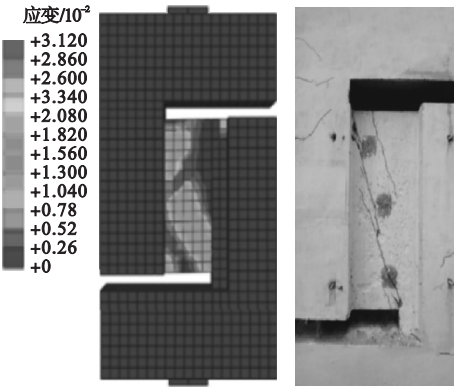


图6 模拟与试验裂缝对比

Fig. 6 Comparison of simulation and test cracks

另外,文献[6]对比了单调循环加载和单调位移加载条件下,试件的塑性主拉应变

云图和荷载位移曲线,结果表明在两种加载方式下,构件的裂缝发展趋势、破坏位置和破坏程度基本一致,位移相同时荷载差值均在5%以内,因此后续研究采用单调加载。

3 装配与现浇试件力学性能对比

为研究矩形钢管混凝土键连接墙柱的力学性能,参考上述墙柱试验,设计了墙柱采用钢管混凝土键连接的试件,编号为PCBZ(见图7(a)). 由于主要目的是研究钢管混凝土键的力学性能,因此对图1中的钢管混凝土键和预埋件连接进行简化,简化方式为将预埋件的底部钢板和矩形钢管混凝土键的端板合并为钢管混凝土键的新端钢板(见图7(b)). 为便于描述,以下将此合并后的整体称为矩形钢管混凝土连接件。其中,新端钢板的边缘与矩形钢管混凝土键的侧面对齐,抗剪钢板固结于新端钢板的一侧。PCBZ的连接区域以外的尺寸和配筋与试件XJBZ相同。钢管厚度为4 mm,两侧厚钢板厚度为20 mm,锚固钢板厚度为10 mm,矩形钢管混凝土键长度为240 mm,矩形钢管混凝土连接件竖直间距为150 mm,钢材均为Q235钢。模拟时,钢板采用双折线模型。

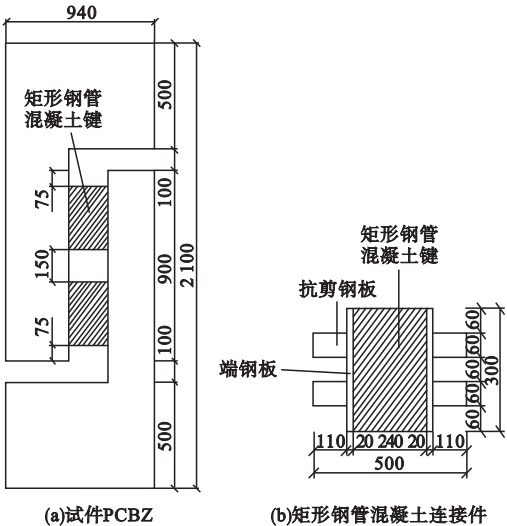


图7 矩形钢管混凝土连接件连接墙柱试件

Fig. 7 Specimen drawing of column and wall connected by CFRST keys

采用上述有限元模拟方法,模拟了试件PCBZ在单调位移荷载作用下的受力过程,并对比了其试件XJBZ的荷载-位移曲线,结果见图8.同时计算得到试件的屈服荷载、屈服位移等参数,结果见表1.表中屈服荷载的计算采用“通用屈服弯矩法”^[17-18],破坏荷载为峰值荷载的85%,位移延性系数为破坏荷载对应位移(破坏位移)与屈服位移的比值.

从图8和表1可以看出,试件PCBZ的荷载-位移曲线在总体走势上与XJBZ类似,包括明显的弹性上升段、弹塑性过渡段和塑性下降段.区别在于装配试件达到峰值荷

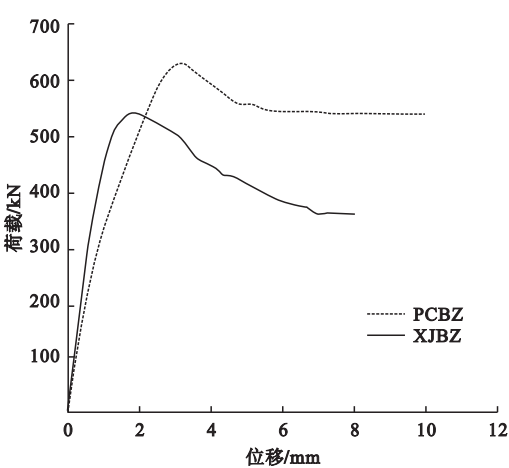


图8 装配构件与现浇构件荷载-位移曲线对比
Fig.8 Load displacement curves of cast-in-place members and assembly members

表1 计算结果

Table 1 Computational results

试件编号	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	破坏位移/mm	延性系数
PCBZ	402	1.4	629	7.1	5.19
XJBZ	487	1.2	514	3.2	2.75

载时的位移大于现浇构件,在下降段初期,曲线下降较快,当到达拐点后,曲线下降十分平缓.从表中可以得出,装配试件的延性系数高于现浇试件89%,峰值荷载高于现浇试件22%,延性系数高于现浇试件88%,但屈服荷载低于现浇试件17%.其中屈服荷载较低的原因是因为两个矩形钢管混凝土连接件未填充受力材料.由此说明采用矩形钢管混凝土连接件连接墙柱的方式具有良好的延性,较高的最大承载力,仅屈服荷载偏低,总体具有较好的力学性能.

4 装配试件受力过程及影响因素分析

4.1 受力过程分析

图9为装配试件(PCBZ)在屈服荷载、峰值荷载、破坏荷载时,矩形钢管混凝土连接件的Mises应力图.从图中可以看出,屈服荷载时,矩形钢管腹板上应力较大,最大应力出

现在腹板的左上角和右下角,顶板、底板、左、右侧新端钢板及锚固钢板应力较小,各钢板的最大应力为172.5 MPa,均未超过钢板的屈服应力;荷载达最大荷载时,矩形钢管腹板约2/3面积应力接近屈服应力,该部分应力沿腹板整体呈左上至右下斜向延伸,顶板、底板、左、右侧新端钢板的应力仍然较小,约为钢板屈服应力的一半,锚固钢板与新端钢板连接部分应力较大,接近屈服应力;荷载减小到破坏荷载时,矩形钢管腹板约3/4面积应力接近屈服应力,该部分应力沿腹板整体近似呈矩形分布,并且部分区域应力达到屈服应力,顶板、底板、左、右侧新端钢板的应力整体较小,锚固钢板部分应力较大,接近屈服应力.钢管内混凝土的应力,角部区域较大,其余部分较小.由此可以看出,采用钢管混凝土连接件连接墙柱,钢管混凝土的腹板及锚固钢板与新端钢板连接部分及混凝土角部应力较大,设计时应加强考虑,其余部分应力较小.

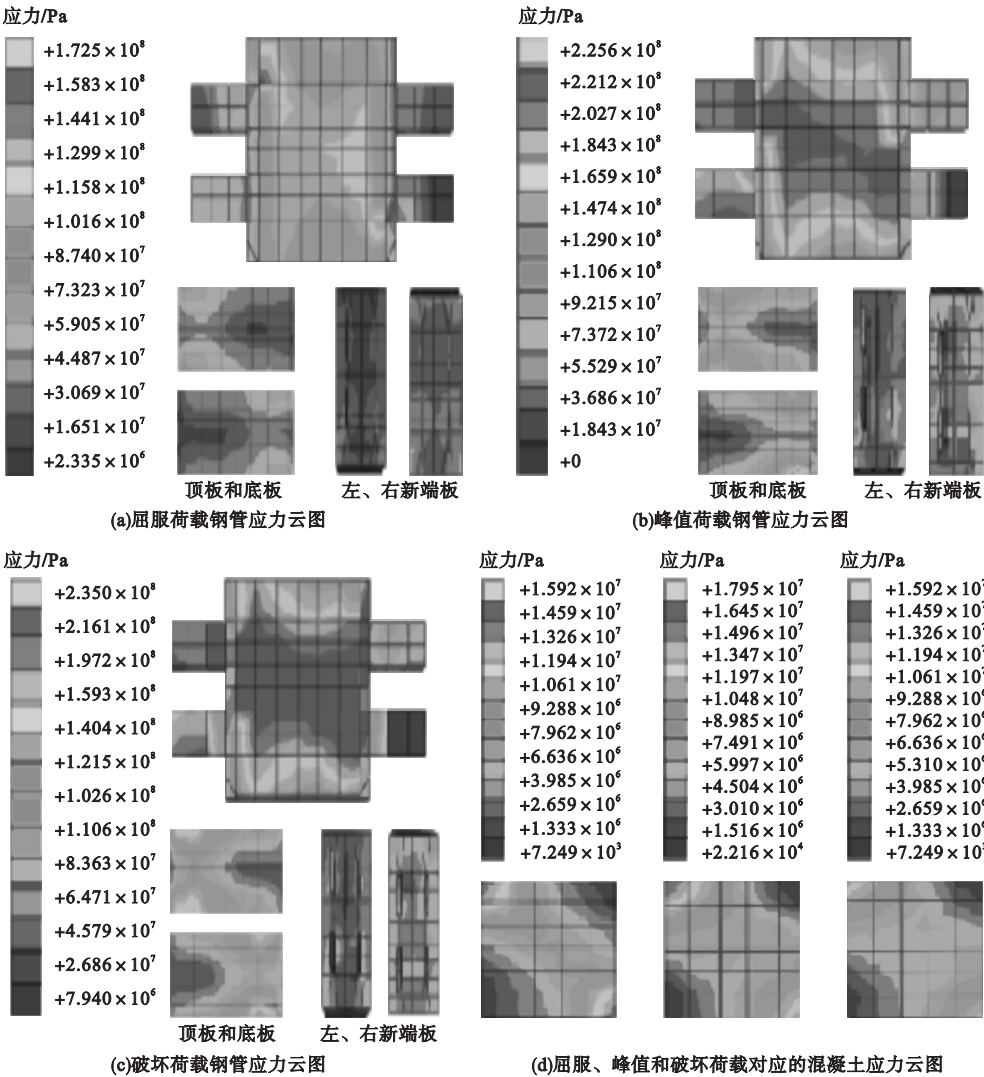


图 9 矩形钢管混凝土连接件的 Mises 应力图

Fig. 9 Mises stress map of CFRST connector

4.2 力学性能影响因素分析

为分析不同因素对矩形钢管混凝土连接件连接框剪结构力学性能的影响,笔者设计了 19 个采用该种连接的墙柱试件模型.设计时,以试件 PCBZ 为标准试件,采用控制变量法设计其他试件.改变的参数包括矩形钢管混凝土键的截面高度 h 、截面宽度 w 、矩形钢管混凝土键长度 l 、钢管内混凝土强度和矩形钢管混凝土键间的纵向间距 D .模拟得到各试件荷载-位移曲线,计算得到各试件屈服荷载 P_y 、峰值荷载 P_{max} 、延性系数 μ 和初始刚度 K ,结果见表 2.

4.2.1 矩形钢管混凝土键截面高度的影响

图 10 为其他参数不变,截面高度分别为 220 mm、260 mm、300 mm 和 320 mm 时,各试件在单调位移荷载作用下的荷载-位移曲线.从表 2 和图 10 可以看出:在弹性阶段,试件的位移-荷载曲线基本吻合,刚度接近;进入非线性变形阶段后,随着截面高度增大,试件的承载力增加,达到最大承载力时的最大位移也增大.当截面高度从 220 mm 增加到 260 mm 时,构件的最大承载力提升了 17.65%,刚度提升了 5.12%,延性系数的变化量在 1% 以内;当截面高度从 260 mm 增加

到 300 mm 时,构件的最大承载力提升了 14.13%,刚度提升了 5.00%,延性系数的变化量在 1% 以内;当截面高度从 300 mm 增加到 320 mm 时,构件的最大承载力提升了

6.60%,刚度提升了 2.73%,延性系数的变化量在 1% 以内. 由此说明,随着截面高度的提升,装配式连接构件的抗剪承载力不断增大,初始刚度略有提升,延性系数基本保持不变.

表 2 试件参数及结果

Table 2 Parameters and result of the specimens

试件编号	h/mm	w/mm	l/mm	混凝土强度等级	D/mm	P_y/kN	P_{\max}/kN	$K/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	μ
h-22	220	160	240	C40	150	330	468	423.44	5.33
h-26	260	160	240	C40	150	358	550	445.10	5.20
h-30	300	160	240	C40	150	402	628	462.72	5.10
h-32	320	160	240	C40	150	421	670	473.68	5.17
w-12	300	120	240	C40	150	359	524	414.99	6.66
w-14	300	140	240	C40	150	374	558	453.60	5.79
w-16	300	160	240	C40	150	402	628	462.72	5.19
w-18	300	180	240	C40	150	414	662	467.95	4.84
l-20	300	160	200	C40	150	438	649	526.84	3.86
l-24	300	160	240	C40	150	402	628	462.72	5.19
l-28	300	160	280	C40	150	377	609	404.10	6.55
l-32	300	160	320	C40	150	348	581	356.58	7.89
C-30	300	160	240	C30	150	390	595	458.12	3.88
C-40	300	160	240	C40	150	402	628	462.72	5.19
C-50	300	160	240	C50	150	417	658	463.23	3.27
C-60	300	160	240	C60	150	430	687	464.76	3.22
D-75	300	160	240	C40	75	399	615	452.32	5.18
D-150	300	160	240	C40	150	402	628	462.72	5.19
D-225	300	160	240	C40	225	419	605	472.40	5.47

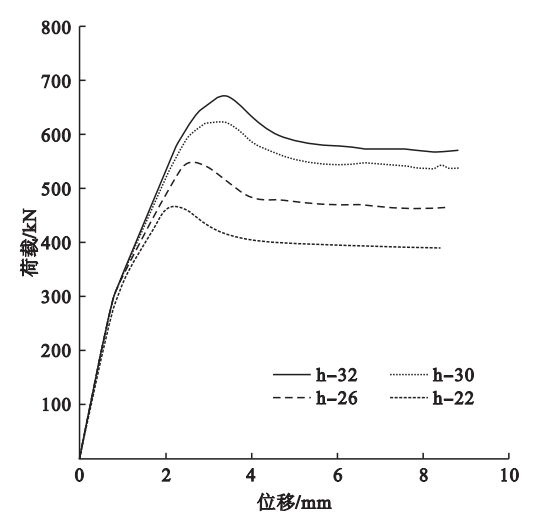


图 10 不同截面高度试件荷载 - 位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of specimens with different section height

4.2.2 矩形钢管混凝土键截面宽度的影响

图 11 为其他参数不变,截面宽度分别为 120 mm、140 mm、160 mm 和 180 mm 时,各试件在单调位移荷载作用下的荷载 - 位移曲线. 从表 2 和图 11 可以看出:在弹性阶段,试件的位移 - 荷载曲线基本吻合,刚度基本一致;进入非线性变形阶段后,截面宽度越大的试件承载力越大,但达到最大承载力时的最大位移相差不大. 当截面宽度从 120 mm 增加到 140 mm 时,构件的最大承载力提升了 6.45%,刚度提升了 9.30%,延性系数减少了 12.97%;当截面宽度从 140 mm 增加到 160 mm 时,构件的最大承载力提升了 12.64%,刚度提升了 2.00%,延性系数减少

了 10.43%;当截面宽度从 160 mm 增加到 180 mm 时,构件的最大承载力提升了 5.40%,刚度提升了 1.13%,延性系数减少了 6.80%。由此说明,随着截面宽度的提升,装配式连接构件的抗剪承载力不断增大,延性不断减小,构件的刚度基本保持不变。

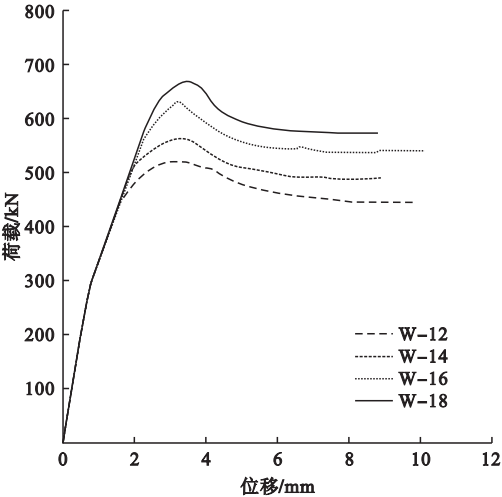


图 11 不同截面宽度试件荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of specimens with different section

4.2.3 矩形钢管混凝土键长度的影响

图 12 为其他参数不变,钢管混凝土键长度分别为 200 mm、240 mm、280 mm 和 320 mm 时,各试件在单调位移荷载作用下的荷载-位移曲线。从表 2 和图 12 可以看出:在弹性阶段,长度越小的构件承载力越大,曲线斜率越大;进入非线性变形阶段后,到达各试件最大承载力之前,长度越小的试件承载力越大,达到最大承载力时的最大位移越小;在下降段的后期,各试件承载力相差不大。当连接长度从 200 mm 增加到 240 mm 时,构件的最大承载力减少了 3.15%,刚度减少了 12.17%,延性系数增加了 34.50%;当连接长度从 240 mm 增加到 280 mm 时,构件的最大承载力减少了 3.13%,刚度减少了 12.67%,延性系数增加了 25.99%;当长度从 280 mm 增加到 320 mm 时,构件的最大承载力减少了 4.59%,初始刚度减少了

11.76%,延性系数增加了 20.63%。由此说明,随着长度的提升,装配式连接构件的抗剪承载力基本不变,构件的刚度不断减小,延性系数不断增大,且增长幅度较大。

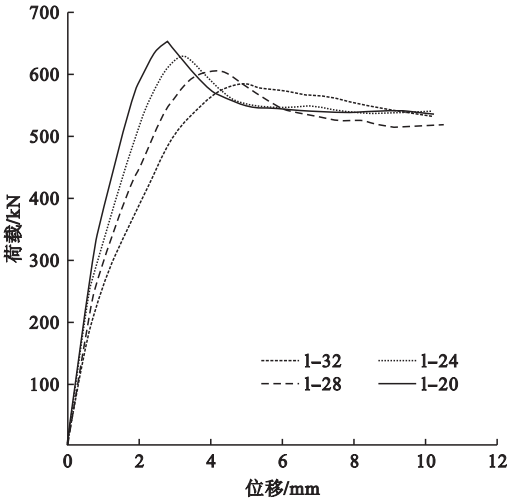


图 12 不同矩形钢管混凝土键长度试件荷载-位移曲线

Fig. 12 Load displacement curves of specimens with different length of CFRST keys

4.2.4 矩形钢管内混凝土强度的影响

图 13 为其他参数不变,混凝土强度等级分别为 C30、C40、C50 和 C60 时,各试件在单调位移荷载作用下的荷载-位移曲线。从表 2 和图 13 可以看出:各试件在初始弹性阶段曲线基本吻合,刚度基本一致。随着混凝土强度的增加,构件的最大承载力有所提升,相较于试件 C40 和试件 C30、试件 C50 和试件 C60 在到达最大承载力后曲线下落较快。当混凝土强度从 C30 增加到 C40 时,构件的最大承载力增加了 5.59%,延性系数增加了 33.73%,刚度变化数值在 1% 以内;当混凝土强度从 C40 增加到 C50 时,构件的最大承载力增加了 4.70%,延性系数减少了 37.02%,刚度变化数值在 1% 以内;当混凝土强度从 C50 增加到 C60 时,构件的最大承载力增加了 4.37%,构件的延性系数变化在 1% 以内,刚度变化数值在 1% 以内。由此说明,混凝土强度等级对构件的抗剪承载力影响较小,在 C40 左右某一数值时,构件的延

性系数达到最大值.

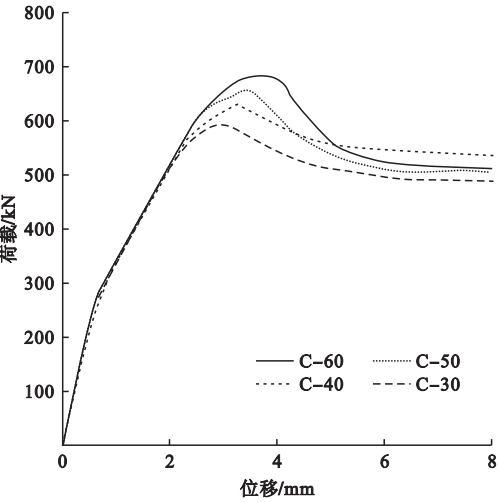


图 13 不同混凝土强度等级试件荷载 - 位移曲线
Fig. 13 Load displacement curves of specimens with different length of Concrete strength grade

4.2.5 矩形钢管混凝土键的纵向间距的影响

为了研究矩形钢管混凝土键的纵向间距对试件抗剪性能的影响,其他参数不变,纵向间距分别为 75 mm、150 mm 和 225 mm 时,试件在单调位移荷载作用下的荷载 - 位移曲线见图 14. 从表 2 和图 14 可以看出:构件的初始刚度、最大承载力和延性系数的变化范围均在 5% 以内,由此说明,矩形钢管混凝土键的纵向间距对构件的抗剪性能几乎没有影响.

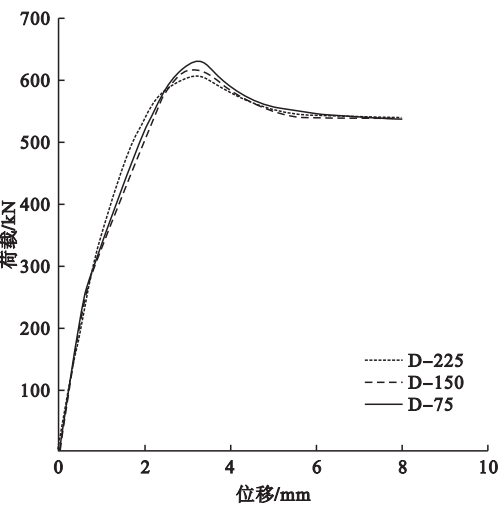


图 14 不同纵向间距试件荷载 - 位移曲线
Fig. 14 Load displacement curves of specimens with different vertical spacing

5 结 论

(1)采用矩形钢管混凝土键连接墙柱的构件与同条件现浇构件相比,前者延性远高于后者,最大承载力高于后者,屈服荷载低于后者,总体可满足工程需要.

(2)采用钢管混凝土键连接墙柱,钢管混凝土的腹板及锚固钢板与端钢板连接部分及混凝土角部应力较大,设计时应加强考虑,其余部分应力较小.

(3)矩形钢管混凝土键的截面高度对构件的最大承载力影响最大,高度越大承载力越大;长度对构件的延性系数和初始刚度影响最大,长度越大延性系数越大,初始刚度越小;截面宽度越大,抗剪承载力越大,延性减小,初始刚度基本不变;混凝土强度等级对构件的力学性能影响较小;矩形钢管混凝土键的纵向间距对构件的力学性能几乎没有影响.

参考文献

[1] 钱稼茹,杨新科,秦珩,等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):51-59.
(QIAN Jiaru, YANG Xinke, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing [J]. Journal of building structures, 2011, 32(6): 51 - 59.)
[2] 孙崇芳. 新型槽口无粘结水平接缝预制剪力墙的抗震性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
(SUN Chongfang. Study on seismic performance of prefabricated shear wall with rabbet-unbonded horizontal connection [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
[3] HAIDER H G, HASHIM A R, RAMLI S. Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading [J]. Construction and building materials, 2017, 151: 258 - 278.
[4] MING L, YANG Z H. The connection form of the beam and column in prefabricated concrete structure [C]. 4th International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials (CEABM 2014). Switzerland: Trans Tech-Publications Ltd, Stafa-Zurich, 2014.
[5] 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 precast shear walls with vertical reinforcements grouted in holes and spliced indirectly [J]. Building structure, 2011, 41(2): 7-11.)
- [6] 佟佳鑫. 基于压剪试验的框架梁柱与剪力墙连接方法的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
(TONG Jiabin. Research of the connection methods between frame beam column and shear wall based on the shear test [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [7] 高健. 装配式框剪结构钢管混凝土组合键槽连接性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(GAO Jian. Study on performance of concrete filled steel tubular composite keyway connection in assembled frame-shear structures [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [8] 梁奇才. 钢连接装配混凝土连梁的力学性能与设计方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
(LIANG Qicai. Study on mechanical properties and design method of steel-connected concrete beams [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.)
- [9] 司晓波. 预制构件连接面的抗剪性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(SI Xiaobo. Research on the shear performance of prefabricated connection [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [10] 张海洋. 装配式混凝土单双连梁的力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
(ZHANG Haiyang. Study on mechanical properties of fabricated concrete single and double beams [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
- [11] 李祚华, 彭志涵, 齐一鹤, 等. 装配式RC梁柱塑性可控钢质节点抗震性能足尺试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 43-50.
(LI Zuohua, PENG Zhihan, QI Yihe, et al. Full-scale experimental study on seismic behaviors of plasticity controllable steel joint of prefabricated RC beam column [J]. Journal of building structures, 2019, 40(10): 43-50.)
- [12] 陈吉光. 双臂并联不等宽装配式连梁的力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
(CHEN Jiguang. Study on the force behavior of parallel double precast coupling beams with different width [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [13] 李明, 王浩然, 赵唯坚. 带抗剪键叠合板的力学性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 45(5): 1509-1520.
(LI Ming, WANG Haoran, ZHAO Weijian. Mechanical properties of laminated slab with shear keys [J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2019, 45(5): 1509-1520.)
- [14] 李岷昌, 闫海龙, 陈博文. 高强方钢管高强混凝土轴压短柱力学性能的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 847-855.
(LI Guochang, YAN Hailong, CHEN Bowen. Finite element analysis on mechanical behavior of the high strength concrete-filled high strength square steel tube stub column under axial compressive loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(5): 847-855.)
- [15] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures GB50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [16] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(SHI Yiping, ZHOU Yurong. Detailed explanation of ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [17] 李明, 张沛楠, 王元清, 等. 钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点弯矩-转角骨架曲线影响因素[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(1): 50-59.
(LI Ming, ZHANG Peinan, WANG Yuanqing, et al. Influencing factors on CFCST-SCBIJ moment-curvature skeleton curves [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(1): 50-59.)
- [18] 李明, 温玉婷, 赵明, 等. 外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点骨架曲线影响因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(6): 991-998.
(LI Ming, WEN Yuting, ZHAO Ming, et al. Analysis of influencing factors on skeleton curves of ATCFCST-SCBJ [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6): 991-998.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)