

钢管混凝土键连接框架梁和剪力墙的受剪性能

李明,刘栩邑,吴潜,吴欣禹,吴永新

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究钢管混凝土键连接框架梁和剪力墙的受剪性能,为工程应用提供设计依据。方法 应用有限元分析软件 ABAQUS 对比钢管混凝土键连接与现浇连接梁墙的结构受剪性能,分析前者受剪机理及不同因素对受剪性能的影响。结果 钢管混凝土键连接梁墙的结构承载力和延性系数较现浇结构分别提高约 10% 和 34%;钢材强度从 Q235 到 Q390,初始刚度增加 8.44%;截面高度从 100 mm 到 120 mm,延性系数提高 17.73%;截面厚度每增加 2 mm,承载力提高约 15%;截面长度和混凝土强度等级对承载力、初始刚度和延性系数的影响均小于 15%,纵向距离对其受剪性能几乎无影响。结论 采用钢管混凝土键连接梁墙的结构总体受剪性能优于现浇结构;钢材强度和截面厚度分别是影响初始刚度和承载力的主要因素。

关键词 钢管混凝土键;框架-剪力墙结构;梁墙试件;抗剪性能;有限元分析

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:李明,刘栩邑,吴潜,等. 钢管混凝土键连接框架梁和剪力墙的受剪性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):38-46. (LI Ming, LIU Xuyi, WU Qian, et al. Shear performance of frame beam and shear wall connected by concrete filled steel tubular keys[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024,40(1):38-46.)

Shear Performance of Frame Beam and Shear Wall Connected by Concrete Filled Steel Tubular Keys

LI Ming, LIU Xuyi, WU Qian, WU Xinyu, WU Yongxin

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper was proposed to study the shear performance of frame beam and shear wall connected by concrete filled steel tubular keys (CFSTK) and provide design basis for engineering applications. ABAQUS was applied to compare the shear performance of the beam-wall structure connected by CFSTK and cast-in-site (CS). Former's shear mechanism and performance influencing factors were analyzed. The results show that: the bearing capacity and ductility factor of the beam-wall structure connected by CFSTK increased by about 10% and 34% respectively compared with CS. The initial stiffness is increased by 8.44% from Q235 to Q390. The ductility

收稿日期:2022-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅基金面上项目(LJKZ0561)

作者简介:李明(1979—),男,副教授,博士,主要从事装配式混凝土结构等方面研究。

factor is increased by 17.73% from 100mm to 120mm in section height. The bearing capacity is increased by about 15% for every 2mm increased in section thickness. The influence of section length and concrete strength grade on load capacity, initial stiffness and ductility factor are all less than 15%. The longitudinal distance has almost no effect on its shear performance. It can be concluded: the shear performance of the beam-wall structure connected by CFSTK is better than CS. The steel strength and section thickness are the main factors affecting the initial stiffness and bearing capacity, respectively.

Key words: concrete filled steel tubular keys (CFSTK); frame-shear wall structure; beam-wall specimen; shear behavior; FEM

框剪结构是装配式建筑的主要结构形式之一,其装配构件连接包括墙柱连接、梁墙连接、梁柱连接等。装配构件间连接的可靠性是决定装配式建筑整体受力性能的关键要点之一。为此,国内外学者以装配式框架结构^[1-3]和剪力墙结构^[4-6]构件的连接研究成果为基础,开展了对装配式框剪结构的研究。

国内学者在装配式框剪结构方面取得较多研究成果:吴潜等^[7-9]将剪力墙和框架梁、柱预制成一个整体单元,不涉及单片墙和梁的连接问题,适用于预制单元较小的工况;赵唯坚等^[10-11]将墙和框架梁、柱拆分成独立的单元,装配时在施工现场完成各个部件的装配。国外针对装配式框剪结构的研究很少,H. Buddika 等^[12-13]将剪力墙贴于框架梁的外边缘,实现了剪力墙与框架梁的连接。针对将墙和框架梁、柱拆分成独立单元的工况,对梁墙的连接研究方面,佟佳鑫等^[14]通过压剪试验,研究了梁墙分别采用双排直筋/等代钢筋贯通现浇和等代钢筋套筒 3 种连接结构的受剪性能,结果表明,采用等代钢筋贯通现浇连接方式的承载能力最高。司晓波等^[15]利用有限元模拟,研究了梁墙连接区抗剪强度与钢筋强度、键槽深度、轴压比等的关系,结果表明,轴压比是影响其抗剪性能的主要因素,并基于分析结果给出了抗剪设计方法。李松佶等^[16]提出连梁内置连接筋与墙肢后穿连接法并进行抗震性能试验,研究表明,该连接结构弹性阶段连接性能可靠,弹塑性阶段耗能作用较好,具有良好的抗震性能。

上述方法主要通过钢筋及在连接区域浇筑混凝土实现梁墙连接,施工过程较为繁琐。鉴于此,笔者提出了一种采用钢管混凝土键(Concrete Filled Steel Tubular Keys, CFSTK)连接梁墙的新型连接方式^[17],通过有限元模拟,对比其与现浇结构受剪性能,分析其受剪机理,研究钢材强度、截面厚度、截面长度等因素对其受剪性能的影响;研究表明:采用该连接方式结构总体受剪性能优于现浇结构,钢材强度和截面厚度分别是影响初始刚度和承载力的主要因素。

1 CFSTK 连接梁墙结构

CFSTK 连接的梁墙结构如图 1 所示。其中,框架梁预埋件由焊接于矩形钢板的预埋钢板和矩形钢管混凝土(Concrete Filled Steel Tubular, CFST)组成(见图 1(a)),其预埋于框架梁的上/下箍筋外表面。剪力墙预埋件由带孔矩形钢板和 CFSTK 组成(见图 1(b)),其矩形钢板设有孔洞,剪力墙的竖向

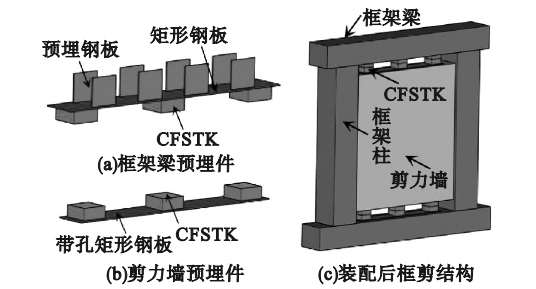


图 1 CFSTK 连接梁墙结构

Fig. 1 The structure of frame beam and shear wall connected by CFSTK

钢筋穿过该孔洞并与其焊接。剪力墙和预制梁的CFSTK通过焊接连接(见图1(c)),连接空隙灌注混凝土。该连接通过CFSTK及键间的混凝土实现梁墙间的剪力传递,通过CFSTK的钢管实现梁墙间的拉应力传递。

2 有限元模拟方法及验证

模拟前,笔者采用文献[12]中的梁墙试验对模拟方法进行验证。试验试件的连接面选取原理如图2所示。选取的研究对象包括梁试件、墙试件和连接区。试件编号为CCBW-1,具体尺寸与配筋见图3。

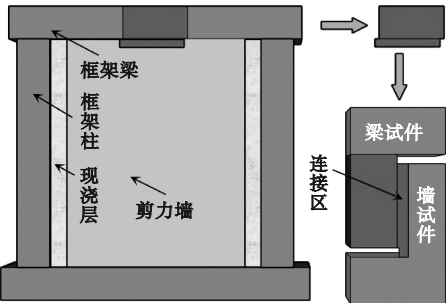


图2 试件选取原理

Fig. 2 The selection principle of specimen

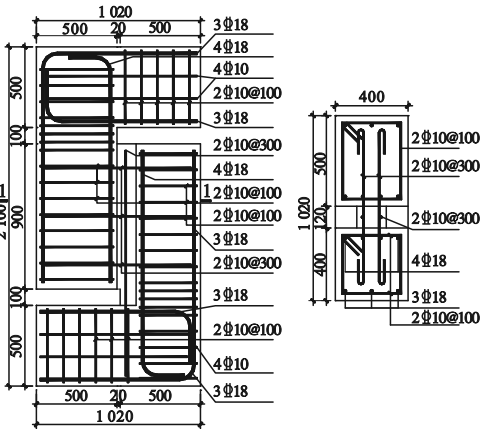


图3 试件CCBW-1几何尺寸及配筋

Fig. 3 The geometric sizes and reinforcement of CCBW-1 specimen

有限元建模时,矩形钢板与剪力墙内竖向钢筋、预埋钢板与矩形钢板、预埋钢板与CFSTK外周的矩形钢管之间均采用绑定(Tie)连接,预埋钢板与混凝土之间设置为内

置区域,钢板与混凝土之间设置为摩擦接触,摩擦系数为0.25。边界条件:约束试件底部所有方向的平动与转动。加载方式:采用单向单调位移加载与力循环加载。其中,力循环加载与试验相同,但模拟过程较繁琐,因此增设了单向单调位移加载,探讨其是否可替代力循环加载。将试件顶部上表面耦合(Coupling)约束于上表面的中心点,并在该点加载。本构及单元类型:混凝土选用CDP模型和C3D8R单元,泊松比为0.2;钢筋选用三折线模型和T3D2单元;本构中的材料参数依据材性试验结果确定,其中混凝土型号为C30,轴心抗压强度为24.6 MPa,轴心抗拉强度为2.5 MPa,弹性模量为31 820 MPa;钢筋的屈服强度为414 MPa,极限强度为576 MPa,弹性模量为 2.03×10^5 MPa。

文献[12]中的梁墙试验及笔者模拟得到的荷载-位移曲线见图4。

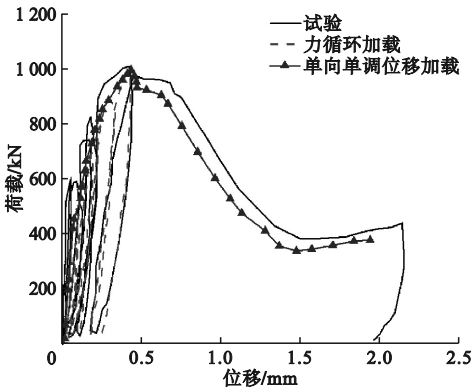


图4 模拟和试验的荷载-位移曲线对比

Fig. 4 The comparison of load-displacement curves between simulation and test

试验试件、力循环加载试件、单向单调位移加载试件的曲线发展趋势基本相同,峰值荷载分别为1 005 kN、992 kN、999 kN。模拟与试验得出的最大承载力差值小于10%,且两种加载方式得到的最大承载力仅相差0.72%。最大塑性主拉应变云图与试验对比见图5。观察裂缝开展趋势可看出,模拟和试验试件的裂缝均出现在连接区底部并沿着墙体向上发展直至贯通,破坏形态接近。由

此说明两种加载方式的模拟方法均可靠,但单向单调位移加载更简便,因此后续研究采

用该种加载方式。

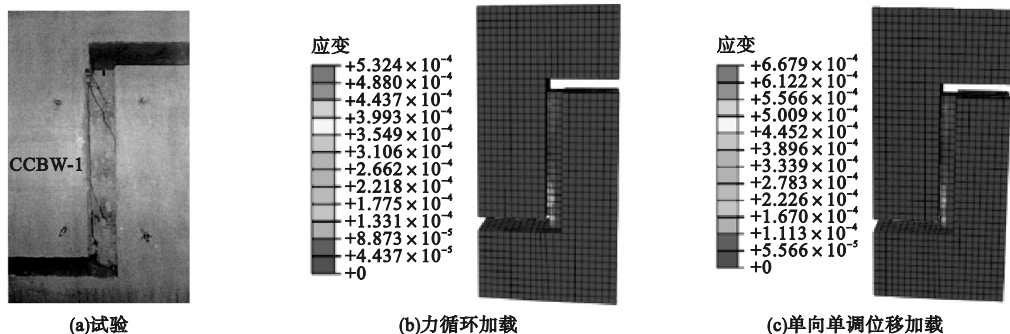


图5 模拟和试验的裂缝发展趋势对比

Fig. 5 The comparison of cracks developing trends between simulation and test

3 与现浇试件受剪性能对比

笔者设计梁墙分别采用 CFSTK 与现浇方式连接的试件,编号分别为 PCSJ 与 XJSJ。试件尺寸及配筋情况见图 6,其中 B 、 H 、 L 分别为 CFSTK 的截面宽度、高度、长度。钢材为 Q235 钢,其余材料力学性能均与上述试件 CCBW-1 相同。

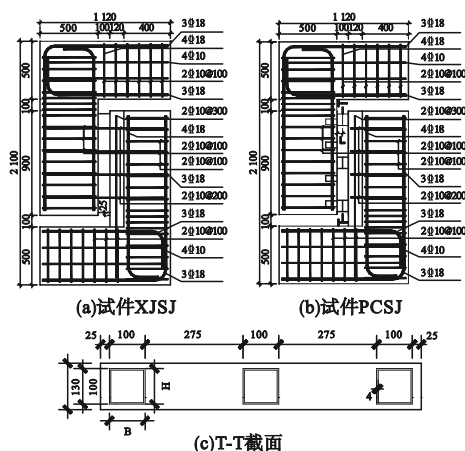


图6 试件 XJSJ 和试件 PCSJ 几何尺寸及配筋

Fig. 6 The geometric sizes and reinforcement of specimen XJSJ and PCSJ

笔者模拟试件 PCSJ 与试件 XJSJ 在单向单调位移加载下的受剪过程,荷载-位移曲线见图 7,曲线特征值见表 1。其中, P_y 为屈服荷载,通过“通用屈服弯矩法”计算; P_k 为峰值荷载; S_y 为屈服荷载对应的屈服位移; S_u 为峰值荷载降至 85% 时对应的破坏位移; K 为初始刚度,指当荷载加载至峰值荷载

的 20% 时对应的荷载与位移的比值; μ 为延性系数, 指破坏位移与屈服位移的比值。

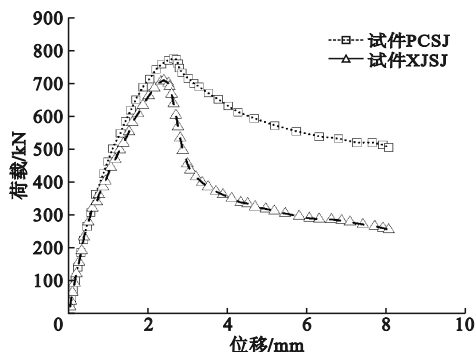


图 7 试件 XJSJ 和试件 PCSJ 荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves between specimen XJSJ and PCSJ

表1 各试件荷载-位移曲线特征值对比

Table 1 The comparison of eigenvalues in load-displacement curves of each specimen

试件 编号	荷载/kN		位移/mm		$K/$ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	μ
	P_y	P_k	S_y	S_u		
XJSJ	610.6	709.6	1.8	2.7	622.0	1.5
PCSJ	671.4	773.4	1.8	3.7	615.7	2.0

从图 7 可看出,两条曲线上升趋势相似,试件 XJSJ 达到峰值荷载时对应位移略小于试件 PCSJ;曲线进入下降段后,试件 PCSJ 表现出了良好的塑性性能,承载力明显高于试件 XJSJ。从表 1 可看出,试件 PCSJ 与试件 XJSJ 相比,屈服荷载提高了 10%,峰值荷载提高了 9%,延性系数提高了 34.43%,初始刚度几乎相同。由此说明,采用 CFSTK 连接梁墙的结构总体受剪性能优于现浇连接梁墙的结构。

4 受剪机理及影响因素分析

4.1 受剪机理分析

图8为试件 PCSJ 的混凝土部分在不同

荷载点时的等效塑性应变云图(PEEQ),图9和图10分别为试件 PCSJ 的预埋件和钢筋在不同荷载点时的应力云图。

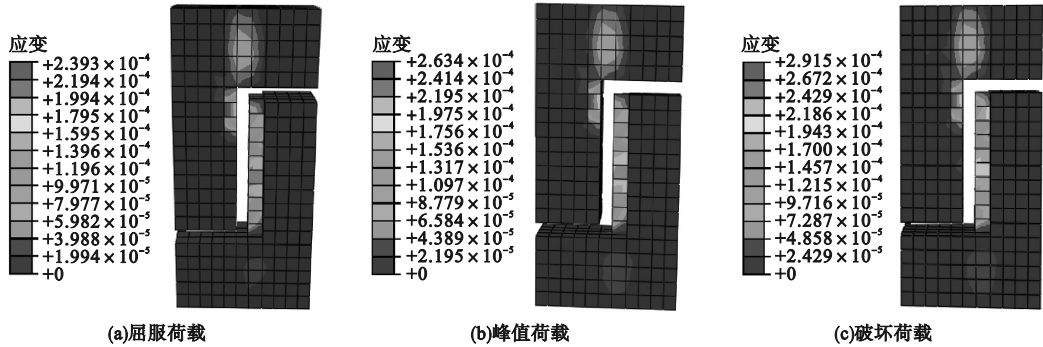


图8 不同荷载下混凝土部分的 PEEQ 云图

Fig.8 The PEEQ nephograms of concrete sections under different loads

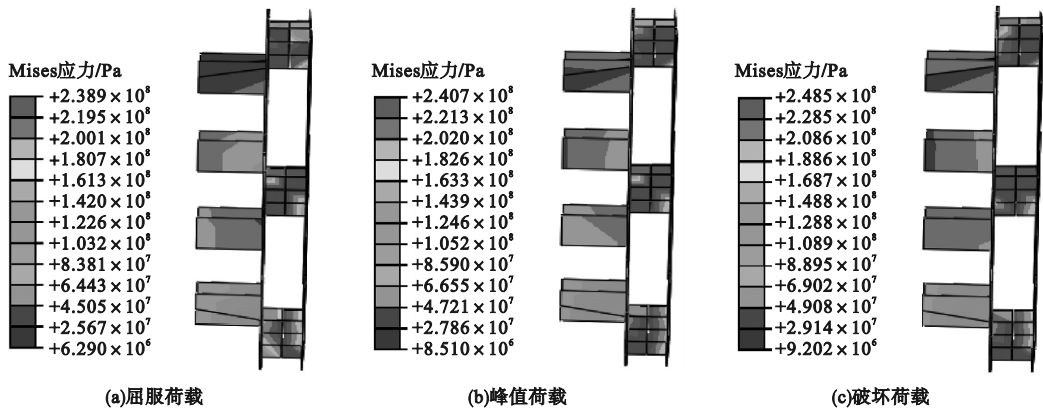


图9 不同荷载下预埋件的 Mises 应力云图

Fig.9 The Mises nephograms of embedded parts under different loads

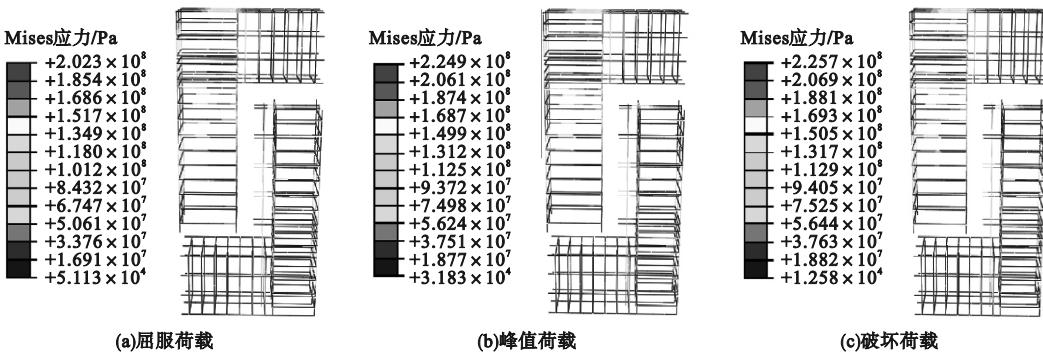


图10 不同荷载下钢筋的 Mises 应力云图

Fig.10 The Mises nephograms of reinforcement under different loads

从图8可看出,屈服荷载时,混凝土的等效塑性应变最大值为 2.393×10^{-4} 。表明墙中部已经出现裂缝;峰值荷载时,裂缝持续向

两边开展;破坏荷载时,裂缝在原有破坏位置继续开展,等效塑性应变较峰值荷载时有少量增加,最大值为 2.915×10^{-4} 。从图9可

看出,屈服荷载时,预埋件 CFSTK 的矩形钢管已屈服,最大应力为 238.9 MPa;峰值荷载时,CFSTK 应力继续增大呈对称分布;破坏荷载时,CFSTK 承担大部分剪力,最大应力达到 248.5 MPa,产生较大变形,失去承载力;预埋钢板应力始终较小,其尺寸可减小。从图 10 可看出,钢筋应力随着荷载的增大而缓慢增加,但最大应力仅 225.7 MPa,始终小于预埋件。

由此说明,在试件 PCSJ 的受剪过程中:CFSTK 的侧向钢板产生较大应力,是承担剪力的主要部位,设计时应主要考虑;混凝土 PEEQ 值、钢筋和预埋钢板应力值均较小,破

坏程度较轻,可有效锚固预埋件,保障预埋件的有效传力。

4.2 受剪性能影响因素分析

为研究不同参数对 CFSTK 连接的梁墙结构受剪性能的影响,笔者基于试件 PCSJ 设计了 6 组共 18 个不同参数的试件。改变的参数包括混凝土强度等级(f_{cu})、钢材强度(f_y)、CFSTK 钢管壁厚(D)、截面高度(H)、截面长度(L)和 CFSTK 间的纵向距离(S)。根据模拟得到各试件的荷载-位移曲线,计算了 P_y 、 P_k 、 K 和 μ 。试件参数及计算结果见表 2。

表 2 试件参数及计算结果表

Table 2 The parameters and calculation results of specimens

试件 编号	$f_{cu}/$ MPa	$f_y/$ MPa	$D/$ mm	$H/$ mm	$L/$ mm	$S/$ mm	$P_y/$ kN	$P_k/$ kN	$K/$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	μ
C-1	C30	Q235	4	100	100	275	671.38	773.42	615.76	2.03
C-2	C40	Q235	4	100	100	275	722.15	831.57	622.18	2.01
C-3	C50	Q235	4	100	100	275	754.14	878.24	628.21	1.99
Y-1	C30	Q235	4	100	100	275	671.38	773.42	615.76	2.03
Y-2	C30	Q345	4	100	100	275	817.84	939.47	638.21	2.01
Y-3	C30	Q390	4	100	100	275	894.32	1 027.99	667.71	1.99
D-1	C30	Q235	4	100	100	275	671.38	773.42	615.76	2.03
D-2	C30	Q235	6	100	100	275	786.21	891.83	616.77	1.91
D-3	C30	Q235	8	100	100	275	849.28	1 009.80	618.18	1.88
H-1	C30	Q235	4	100	100	275	671.38	773.42	615.76	2.03
H-2	C30	Q235	4	110	100	275	734.73	840.37	640.26	1.99
H-3	C30	Q235	4	120	100	275	762.51	881.39	647.13	1.96
L-1	C30	Q235	4	100	100	275	671.38	773.42	615.76	2.03
L-2	C30	Q235	4	100	120	275	692.53	802.92	614.54	2.25
L-3	C30	Q235	4	100	140	275	745.02	857.41	613.15	2.39
S-1	C30	Q235	4	100	100	200	653.10	752.36	614.91	2.04
S-2	C30	Q235	4	100	100	225	661.47	762.00	615.26	2.04
S-3	C30	Q235	4	100	100	275	671.38	773.42	615.76	2.03

4.2.1 混凝土强度等级的影响

图 11 为试件 C-1、C-2、C-3 的荷载-位移曲线。从图 11 和表 2 可看出,随混凝土强度等级增加,试件初始刚度和峰值荷载均增

大,延性系数减小。试件 C-1 的初始刚度最小,试件 C-3 的初始刚度最大,但数值相差不足 2.1%;试件 C-1 的延性系数最大,试件 C-3 的延性系数最小,但数值相差不足 2%;试件

C-1 的峰值荷载最低,试件 C-2、C-3 的峰值荷载分别较其提高 7.52%、13.56%。由此说明,混凝土强度等级的提高能够增大试件最大承载力,但对试件初始刚度和延性系数影响较小。

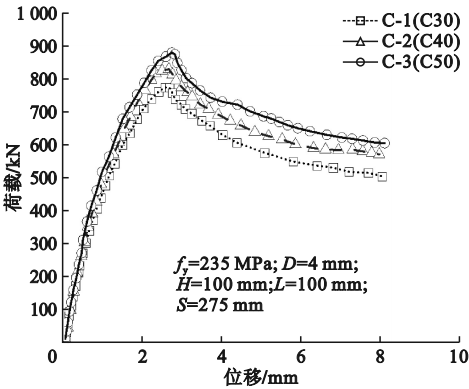


图 11 C-1、C-2、C-3 的荷载-位移曲线
Fig. 11 The load-displacement curves of C-1, C-2, C-3

4.2.2 钢材强度的影响

图 12 为试件 Y-1、Y-2、Y-3 的荷载-位移曲线。从图 12 和表 2 可看出,随钢材强度增加,试件初始刚度和峰值荷载均增大,延性系数减小。试件 Y-1 的初始刚度最小,试件 Y-2 的初始刚度较其提高 3.64%,试件 Y-3 的初始刚度较其提高 8.44%;试件 Y-1 的峰值荷载最低,试件 Y-2、Y-3 的峰值荷载分别较其提高 21.47%、32.91%;试件 Y-1 的延性系数最大,试件Y-3的延性系数最小,但数

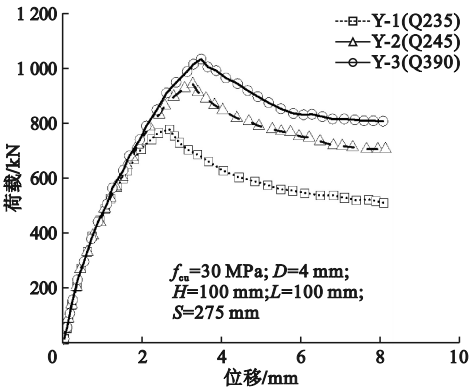


图 12 Y-1、Y-2、Y-3 的荷载-位移曲线
Fig. 12 The load-displacement curves of Y-1, Y-2, Y-3

值相差不足 2%。由此说明,钢材强度的提高能够增大试件最大承载力和初始刚度,但对试件抵抗塑性变形的能力影响较小。

4.2.3 CFSTK 钢管壁厚的影响

图 13 为试件 D-1、D-2、D-3 的荷载-位移曲线。从图 13 和表 2 可看出,随钢管壁厚增加,试件初始刚度和峰值荷载均增大,延性系数减小。试件 D-1 的初始刚度最小,试件 D-3 的初始刚度最大,但数值相差不足 1%;试件 D-1 的峰值荷载最低,试件 D-2、D-3 的峰值荷载分别较其提高 15.31%、30.56%;试件 D-1 的延性系数最大,试件 D-2、D-3 的延性系数分别较其降低 5.91%、7.39%。由此说明,增加截面厚度能够增大试件最大承载力,但同时会降低试件延性,对试件初始刚度影响较小。

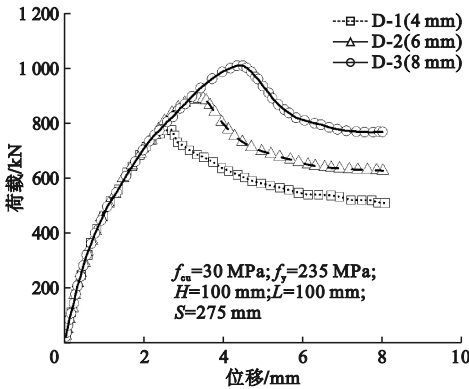


图 13 D-1、D-2、D-3 的荷载-位移曲线
Fig. 13 The load-displacement curves of D-1, D-2, D-3

4.2.4 CFSTK 截面高度的影响

图 14 为试件 H-1、H-2、H-3 的荷载-位移曲线。从图 14 和表 2 可看出,随截面高度增加,试件延性系数和峰值荷载均增大,初始刚度减小。试件 H-1 的延性系数最小,试件 H-2、H-3 的延性系数分别较其提高 10.84%、17.73%;试件 H-1 的峰值荷载最低,试件 H-2、H-3 的峰值荷载分别较其提高 3.81%、10.86%;试件 H-1 的初始刚度最大,试件 H-3 的初始刚度最小,但数值相差不足 1%。由此说明,增加截面高度能够增大试件

延性和最大承载力,但对试件初始刚度影响较小。

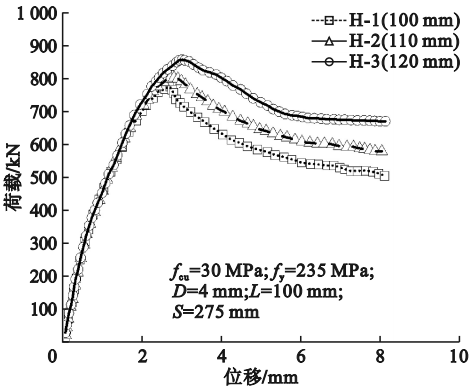


图 14 H-1、H-2、H-3 的荷载 - 位移曲线
Fig. 14 The load-displacement curves of H-1, H-2, H-3

4.2.5 CFSTK 截面长度的影响

图 15 为试件 L-1、L-2、L-3 的荷载 - 位移曲线。从图 15 和表 2 可看出,随截面长度增加,试件初始刚度和峰值荷载均增大,延性系数减小。试件 L-1 的初始刚度最小,试件 L-2、L-3 的初始刚度分别较其提高 3.98%、5.09%;试件 L-1 的峰值荷载最小,试件 L-2、L-3 的峰值荷载分别较其提高 8.66%、13.96%;试件 L-1 的延性系数最大,试件 L-2、L-3 的延性系数分别较其降低 1.97%、3.45%。由此说明,增加截面长度能够增大试件最大承载力和初始刚度,但同时会降低试件的延性。

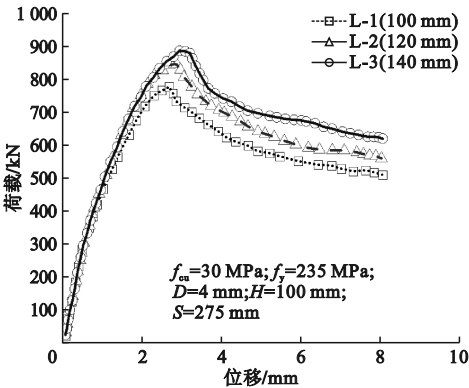


图 15 L-1、L-2、L-3 的荷载 - 位移曲线
Fig. 15 The load-displacement curves of L-1, L-2, L-3

4.2.6 CFSTK 间的纵向距离的影响

图 16 为试件 S-1、S-2、S-3 的荷载 - 位移曲线。从图 16 和表 2 可看出,随 CFSTK 间的纵向距离增加,试件初始刚度和峰值荷载均增大,延性系数减小。但变化数值均在 5% 以内。由此说明,改变 CFSTK 间的纵向距离几乎不会对试件的抗剪性能造成影响。

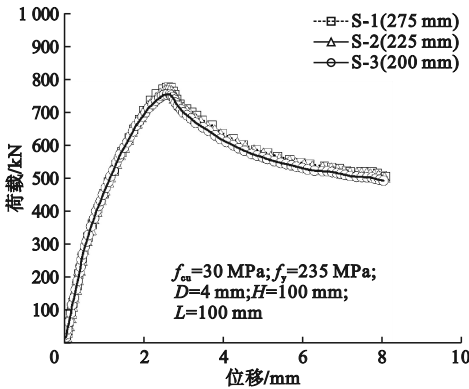


图 16 S-1、S-2、S-3 的荷载 - 位移曲线
Fig. 16 The load-displacement curves of S-1, S-2, S-3

5 结 论

(1)采用 CFSTK 连接梁墙的结构总体受剪性能优于现浇结构,其屈服荷载和峰值荷载更高,延性系数更大,抵抗塑性变形的能力更强,完全可满足梁柱间的传力需求,具有可行性。

(2)采用 CFSTK 连接梁墙的结构,CFSTK 的侧向钢板产生较大应力,是承担剪力的主要部位,设计时应重点考虑,而混凝土、钢筋和预埋钢板破坏程度较轻,可有效锚固预埋件,保障预埋件的有效传力。

(3)采用 CFSTK 连接梁墙结构的初始刚度受 CFSTK 钢材强度影响最大,其随钢材强度提高而增大;结构延性系数受截面高度影响最大,随截面高度增加而增大;结构峰值荷载受截面厚度影响最大,随截面厚度增加而增大;截面长度与混凝土强度等级的改变对结构的受剪性能影响不大;CFSTK 间的纵向距离对结构的受剪性能几乎无影响。

参考文献

- [1] HUI Yang, GUO Zhengxing, YIN Hang, et al. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections with high-strength hooked bars under cyclic loading [J]. *Advances in structural engineering*, 2019, 22 (14): 3042 – 3054.
- [2] 邢国华, 王志萌, 秦拥军, 等. 新型装配式混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(2): 23 – 33.
(XING Guohua, WANG Zhimeng, QIN Yongjun, et al. Experimental study on seismic behavior of new fabricated concrete beam-column joints [J]. *China civil engineering journal*, 2023, 56 (2): 23 – 33.)
- [3] 徐其功, 陈文东, 李娜. 装配式混凝土框架结构梁柱节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(8): 53 – 59.
(XU Qigong, CHEN Wendong, LI Na. Experimental study on seismic performance of beam-column joints of fabricated concrete frame structure [J]. *Building structure*, 2022, 52 (8): 53 – 59.)
- [4] 赵斌, 王庆吕, 吕西林. 采用全装配水平接缝的预制混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(12): 48 – 55.
(ZHAO Bin, WANG Qingyang, Lü Xilin. Research on seismic behavior of precast concrete walls with fully assembled horizontal joints [J]. *Journal of building structures*, 2018, 39(12): 48 – 55.)
- [5] CHENG Bei, CAI Yuan, DANIEL T W. Experiment and numerical study of a new bolted steel plate horizontal joints for precast concrete shear wall structures [J]. *Structures*, 2021, 32: 760 – 777.
- [6] WANG Xiaoting, CHEN Xi, WANG Tao, et al. Experimental validation on seismic performance of a monolithic precast RC shear wall structure with novel connections [J]. *Advances in structural engineering*, 2022, 25 (5): 1042 – 1056.
- [7] 吴潜. 基于CFST键连接墙柱的装配式框剪结构力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
(WU Qian. Study on mechanical properties of frame-shear wall structure with its shear wall and column connected by CFST keys [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.)
- [8] 莫创. 全装配式框架-剪力墙结构抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
(MO Chuang. Study on seismic performance of fully precast frame-shear wall structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
- [9] 马军卫. 新型全装配式混凝土框架-剪力墙结构抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
(MA Junwei. Study on seismic behavior of the new full precast concrete shear wall frame structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.)
- [10] 赵唯坚, 佟佳鑫, 袁慎明, 等. 装配式框架剪力墙结构柱-墙连接方式[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(3): 408 – 417.
(ZHAO Weijian, TONG Jiaxin, YUAN Shenming, et al. Research on the connection method of column-wall member in precast frame-shear wall structure [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2015, 31 (3): 408 – 417.)
- [11] 袁慎明. 基于不同柱墙连接方式的钢筋混凝土框-剪结构试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
(YUAN Shenming. Experimental research on frame-shear wall structure based on different column-wall connection ways [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
- [12] IOANI A, TRIPA E. Structural behavior of an innovative all-precast concrete dual system for residential buildings [J]. *PCI journal*, 2012, 57 (1): 110 – 123.
- [13] BUDDIKA H, WIJEYEWICKREMA A. Seismic performance evaluation of posttensioned hybrid precast wall-frame buildings and comparison with shear wall-frame buildings [J]. *Journal of structural engineering*, 2016, 142(1): 1 – 14.
- [14] 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, 2015.
(TONG Jiaxin. Research of the connection methods between frame beam column and shear wall based on the shear test [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [15] 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.)
- [16] 李松佶. 装配式混凝土拼接连梁剪力墙抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
(LI Songji. Experimental study on seismic behavior of prefabricated concrete splicing beam shear wall [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [17] 李明, 闫东, 殷陈亮. 一种钢管混凝土键连接剪力墙柱结构: 中国, CN209760513U [P]. 2019 – 12 – 10.
(LI Ming, YAN Dong, YIN Chenliang. A kind of concrete filled steel tube key connected shear wall column structure: China, CN20976 0513U [P]. 2019 – 12 – 10.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)