文章编号:1674-2974(2024)11-0115-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024113

装配式型钢混凝土复合墙抗震性能研究

黄炜[1],刘刚[1†],苗欣蔚[2],王伟[1],张晨龙[1],张皓[1]
(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 西安建筑科技大学 理学院,陕西 西安 710055)

摘 要:为研究铸钢节点连接装配式型钢混凝土复合墙的破坏机理和抗震性能,对1∶2缩尺的型钢混凝土复合墙试件进行了拟静力试验,通过改变墙体的内置型钢类型,对比分析其在低周往复荷载作用下的破坏过程、破坏模式、滞回特性、抗剪承载力、变形能力、墙体损伤以及耗能能力等,试验结果表明:焊接结构用铸钢节点强度和刚度大、安全性高,可以应用于型钢混凝土复合墙的现场装配式连接中;型钢混凝土复合墙均发生整体剪切破坏,其抗剪承载力、耗能和变形能力较钢筋混凝土复合墙均有较大程度的提高. 结合工程实际,给出了型钢混凝土复合墙的现场装配方案.

关键词:铸钢节点;型钢混凝土复合墙;拟静力试验;抗震性能;装配方案
中图分类号:TU398.9;TU317.1 **文献标志码**:A

Research on Seismic Performance of Prefabricated Steel Reinforced Concrete Composite Walls

HUANG Wei[1], LIU Gang[1†], MIAO Xinwei[2], WANG Wei[1], ZHANG Chenlong[1], ZHANG Hao[1]
(1. Colledge of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To study the failure mechanism and seismic performance of prefabricated steel reinforced concrete composite walls with steel castings, quasi-static tests were carried out on steel reinforced concrete composite walls with a scale of 1∶2. The steel reinforced concrete composite walls under low cycle reciprocating loads were contrastively analyzed on failure processes, failure modes, hysteretic characteristics, shear capacity, deformation capacity, wall damage and energy dissipation capacity by changing their built-in steel types. The experimental results showed that the steel castings used for welded structures have high strength, stiffness and safety, and can be applied to the on-site prefabricated connections of steel reinforced concrete composite walls. The overall shear failure occurred in steel reinforced concrete composite walls, and their shear capacity, energy dissipation and deformation capacities were greatly improved compared with those of reinforced concrete composite walls. In

* **收稿日期**:2023-12-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978566),National Natural Science Foundation of China(51978566);陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY06-04,2021ZDLSF05-11),Key Research and Development Programs of Shaanxi Province (2020ZDLNY06-04, 2021ZDLSF05-11);陕西省教育厅科研计划项目(19JC024),Scientific Research Planning Project of Education Department of Shaanxi Province(19JC024);陕西省杰出青年科学基金项目(2018JC-025),Outstanding Youth Science Foundation of Shaanxi Province(2018JC-025)
作者简介:黄炜(1976—),男,陕西西安人,西安建筑科技大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: 8891805@qq.com

combination with engineering practice, an on-site assembly scheme for steel reinforced concrete composite walls was given.

Key words: steel castings; steel reinforced concrete composite walls; quasi-static tests; seismic performance; assembly scheme

装配式建筑结构体系具有绿色环保、标准化和工业化程度高、工期短、成本较低、抗震性能优良等特点,常见的有CL(复合轻质)建筑结构体系、ALC(蒸压轻质混凝土)-轻钢龙骨复合墙建筑结构体系、预制夹心保温墙建筑结构体系以及密肋复合墙建筑结构体系等,对于密肋复合墙结构,姚谦峰等[1]、黄炜等[2-3]、贾英杰[4]、王爱民[5]、Sun等[6-7]和苗欣蔚等[8-9]等进行了系统的研究,为装配式密肋复合墙结构体系的发展提供了理论基础.

然而,贾英杰[4]所做的10层1∶3比例缩尺模型的拟动力试验以及王爱民[5]对12层密肋复合墙结构底部两层的1∶2比例缩尺模型的拟静力试验结果表明,密肋复合墙体用于中高层建筑时,倘若设计不当,结构整体在弯矩作用下,边框柱脚会发生受拉或受压破坏,即墙板发生弯曲破坏而非剪切破坏,密肋复合墙结构的抗震性能难以充分发挥.

相较于传统密肋复合墙,轻钢龙骨密肋复合墙的受力性能有了明显改善,刘佩等[10]对角钢龙骨密肋复合墙进行了试验研究,结果表明:框格中以轻钢龙骨代替钢筋龙骨,虽然总用钢量有一定的增加,但承载力、刚度及耗能能力得到大幅提升,并表现出良好的抗倒塌性能.何明胜[11]对槽钢混凝土边框柱密肋复合墙体进行了低周往复加载试验,发现槽钢边框柱密肋复合墙能显著提高墙体的承载力和耗能能力;该类复合墙随高宽比的增大,耗能能力增强,但抗剪承载力和延性明显降低.袁泉等[12]对圆钢管密肋复合墙进行试验,研究表明:使用钢管骨架代替钢筋骨架,既能提高密肋复合墙体的轴压比,又能增大墙体的受剪承载力和后期抗侧刚度,提高墙体的变形、耗能能力和抗震性能.Liu等[13]对H型钢混凝土复合墙进行了拟静力试验,试验结果表明:H型钢混凝土复合墙的抗剪承载力、耗能及变形能力均明显高于钢筋混凝土复合墙;大高宽比H型钢混凝土复合墙滞回曲线饱满,具有较高的耗能能力和抗剪承载力、较好的延性,可应用于中高层建筑.

文献[10-13]针对配置型钢的密肋复合墙进行了研究,为后续研究奠定了一定基础,但其研究不够系统,且装配式型钢混凝土复合墙的连接技术不够完善,而复合墙的连接技术对其抗震性能至关重要.本文在前期研究的基础上,对基于铸钢节点连接的装配式型钢混凝土复合墙进行低周往复加载试验,研究分析并给出其现场装配方案.

1 试验概况

1.1 试件设计

为研究装配式型钢混凝土复合墙的抗震性能,设计了3个1∶2比例的试件,其名称分别为SCW1~SCW3(试件SCW3参见文献[13]),各试件的详细参数见表1.

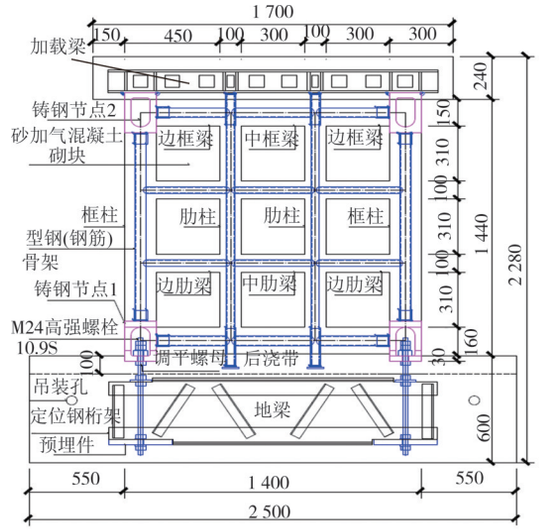
表1 试件主要设计参数

Tab.1 Design parameters of specimens

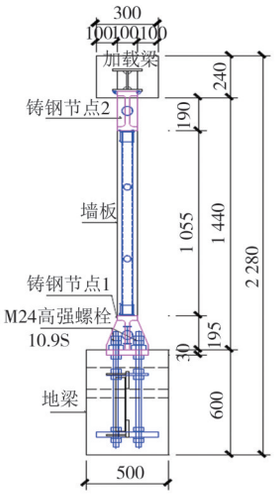
试件名称	内置钢骨架类型	外框、肋格横截面示意图
SCW1	圆钢管骨架	
SCW2	矩形钢管骨架	
SCW3	钢筋骨架	

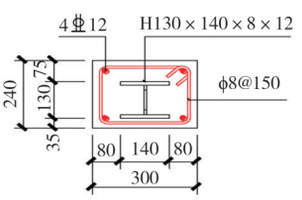
各试件实测轴压比均为0.2.试件SCW1、SCW2的边框(包含框柱、框梁)和肋格(包含肋柱、肋梁)均为型钢混凝土.为增强混凝土的整体性,在型钢外围设置直径为2 mm的构造钢筋.各试件边框或肋格内型钢构件的净截面面积相同,且试件墙体内填砂加气混凝土砌块,称该类墙体为型钢混凝土复合墙;试件SCW3的边框和肋格均为钢筋混凝土,内填砂加气混凝土砌块,将其称为钢筋混凝土复合墙.试件SCW1采用圆钢管骨架,在其焊接为钢管骨架整体前,需在圆钢管内填素混凝土;试件SCW2则采用焊接矩形钢管骨架,需在矩形钢管腹板开设一定数量

的椭圆孔,这是因为制作试件时,矩形钢管骨架是水平放置的,开设椭圆孔便于浇筑混凝土;试件SCW3采用焊接钢筋骨架.上述所有试件的钢管(或钢筋)骨架由钢管(或钢筋)构件与铸钢节点在工厂采用焊缝焊接而成.矩形钢管椭圆孔避开框柱(肋柱)和框梁(肋梁)的节点域.为避免椭圆孔对矩形钢管造成过度的削弱,依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[14]第6.5节对其进行设计.试件制作时,复合墙和地梁先分别制作,后期通过预埋在地梁中的高强螺栓连接为整体.先浇筑复合墙混凝土,待其达到规范规定的强度后再浇筑加载梁混凝土.各试件设计详图如图1所示.

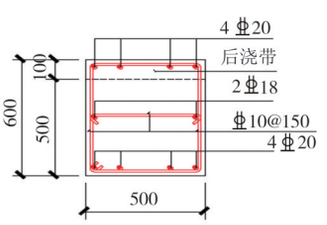


(a) 试件SCW1(试件SCW2、SCW3尺寸参见本图)

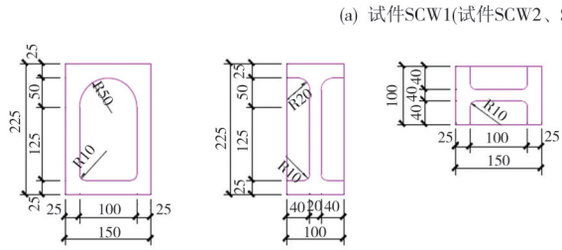




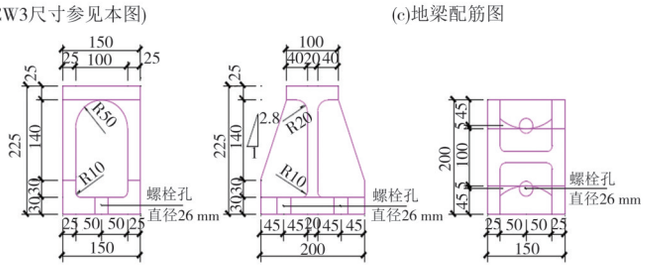
(b)加载梁配钢图



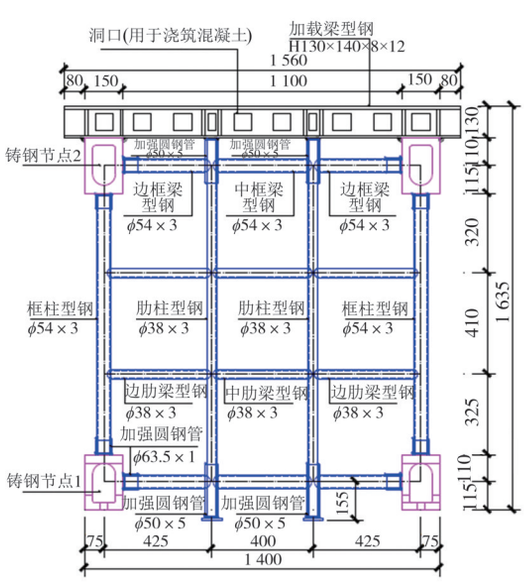
(c)地梁配筋图



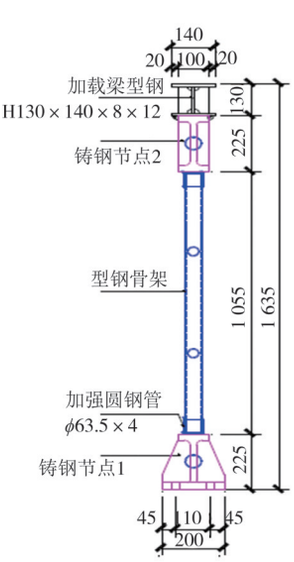
(d) 铸钢节点2正立面、侧立面、平面图

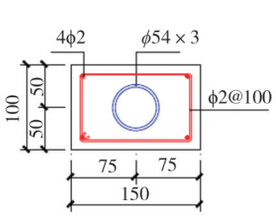


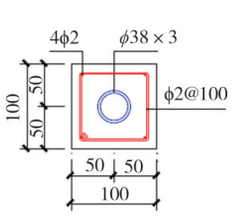
(e) 铸钢节点1正立面、侧立面、平面图



(f) 试件SCW1型钢骨架详图







(g) 试件SCW1边框、肋格配钢图

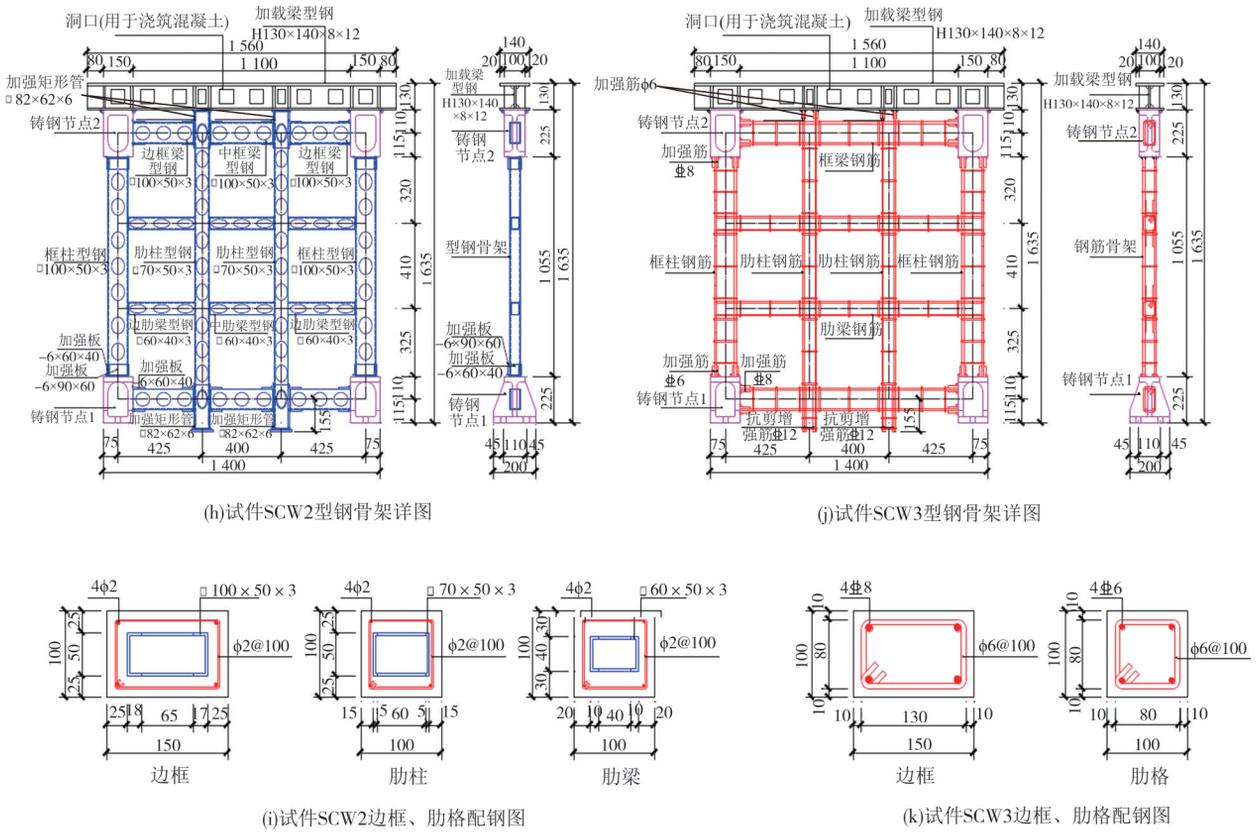


图 1 各试件设计详图(单位:mm)

Fig.1 Design drawings of specimens(unit:mm)

1.2 材料性能

根据规范《金属材料 拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[15]对钢管进行材料性能试验,试验结果如表 2 所示.

表 2 钢材的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of steel

钢材	规格	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
圆钢管	ϕ63.5×4	339.8	480.1	2.17×10^5
	ϕ54×3	312.1	443.7	2.18×10^5
	ϕ50×5	320.5	464.3	2.17×10^5
	ϕ38×3	347.1	490.3	2.21×10^5
矩形钢管	□100×50×3	330.7	489.5	1.90×10^5
	□70×50×3	327.6	470.4	1.87×10^5
	□60×40×3	343.8	478.9	1.91×10^5

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[16]、《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020)[17]测得混凝土立方体、砌块立方体抗压强度分别为 24.5 MPa、2.2 MPa,弹性模量分别为 2.8×10^4 MPa、0.2×10^4 MPa.

1.3 试验装置与加载制度

本次试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室完成,竖向荷载通过钢大梁上的液压千斤顶传递到分配钢梁上,再通过分配钢梁将荷载转变为均布荷载作用于加载梁上(需在加载梁顶部铺设细砂,以保证加载梁顶部的压力均匀).水平荷载采用 1 000 kN 的 MTS 电液伺服作动器,作动器加载点与加载梁重合,用以施加水平荷载.正式加载之前先进行竖向预加载(50 kN),卸载后正式加载,竖向荷载一次性加载至 250 kN(保持恒定),接着在水平方向施加低周往复荷载,采用力-位移混合控制的加载制度,以墙体屈服为分界点,以水平作动器推力方向为正向.力控制加载时,加载等级为 20 kN,每级循环 1 次,直至墙体屈服.墙体屈服后采用位移控制加载,并以级差为 $0.5\Delta_y$ 进行,每级循环 3 次.加载至下降段荷载为峰值荷载的 85%(或试件破坏严重而无法继续加载)时,停止加载.试验现场加载照片及加载方式分别如图 2、图 3 所示.

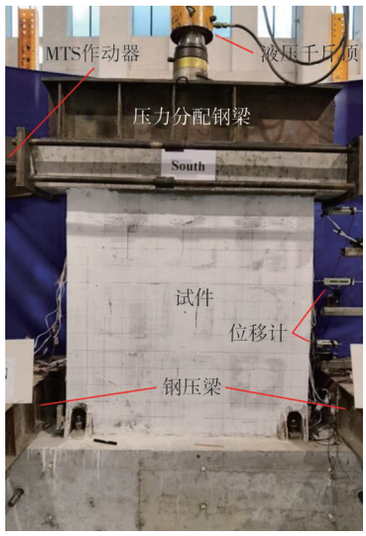


图 2　加载过程照片

Fig.2　Images of test processes

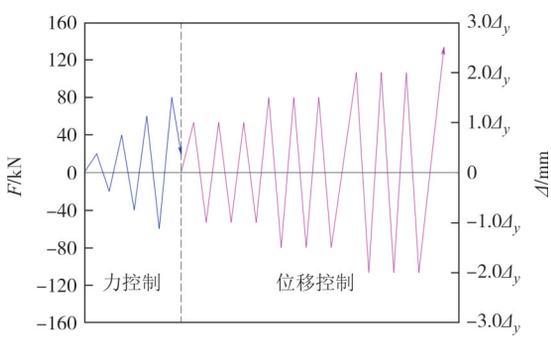
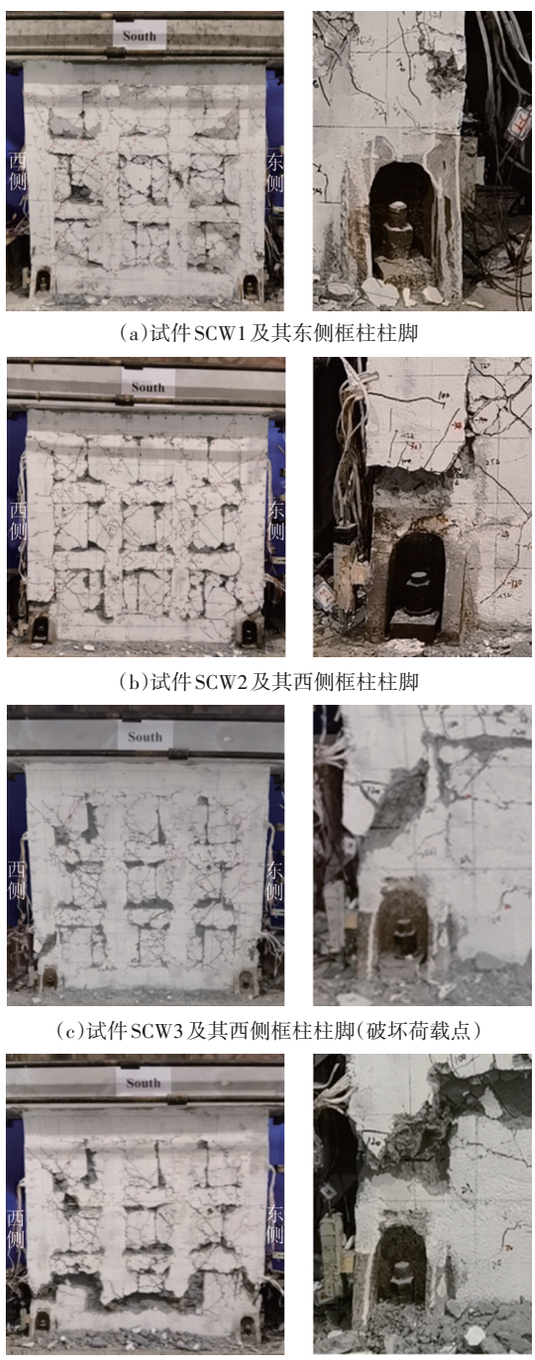


图 3　加载制度

Fig.3　Loading protocols

2　试验现象及破坏模式

型钢混凝土复合墙内填砂加气混凝土砌块为脆性材料,认为砌块出现明显裂缝之前为弹性阶段,此过程试件的荷载-位移曲线斜率变化不大.当试件荷载-位移曲线出现比较明显的弯折时,试件进入弹塑性阶段.峰值荷载过后,荷载逐级减小,试件进入塑性阶段.3 个试件均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和塑性(破坏)阶段.加载初期,墙体中部区域首先形成 Y 形或 X 形交叉裂缝,但裂缝总体上宽度都比较小.在弹塑性阶段,各试件中部区域的砌块从其接缝端部开始缓慢粉碎性脱落,墙体裂缝继续扩展,并发出轻微的“飒飒”声.进入破坏阶段后,墙体裂缝变多,旧有裂缝变宽,砌块脱落越发严重.加大位移水平,受压侧框柱下端被压溃而有块状或条状混凝土脱落.试件 SCW1、SCW2 荷载降至峰值荷载的 85% 后便停止加载,试件 SCW3 荷载降至峰值荷载的 85% 后,仍加载至水平位移 Δ=±50 mm,但当 Δ 处于(0,−50 mm)时,试件 SCW3 突然侧向失稳而停止加载.试件的破坏模式如图 4 所示.



(a)试件 SCW1 及其东侧框柱柱脚

(b)试件 SCW2 及其西侧框柱柱脚

(c)试件 SCW3 及其西侧框柱柱脚(破坏荷载点)

(d)试件 SCW3 及其西侧框柱柱脚(停止加载点)

图 4　试件破坏模式

Fig.4　Failure modes of specimens

依据裂缝发展情况和破坏现象可以判定,所有试件均为剪切破坏,各试件铸钢节点在整个加载过程中均未发生破坏,充分展现出其高可靠性.

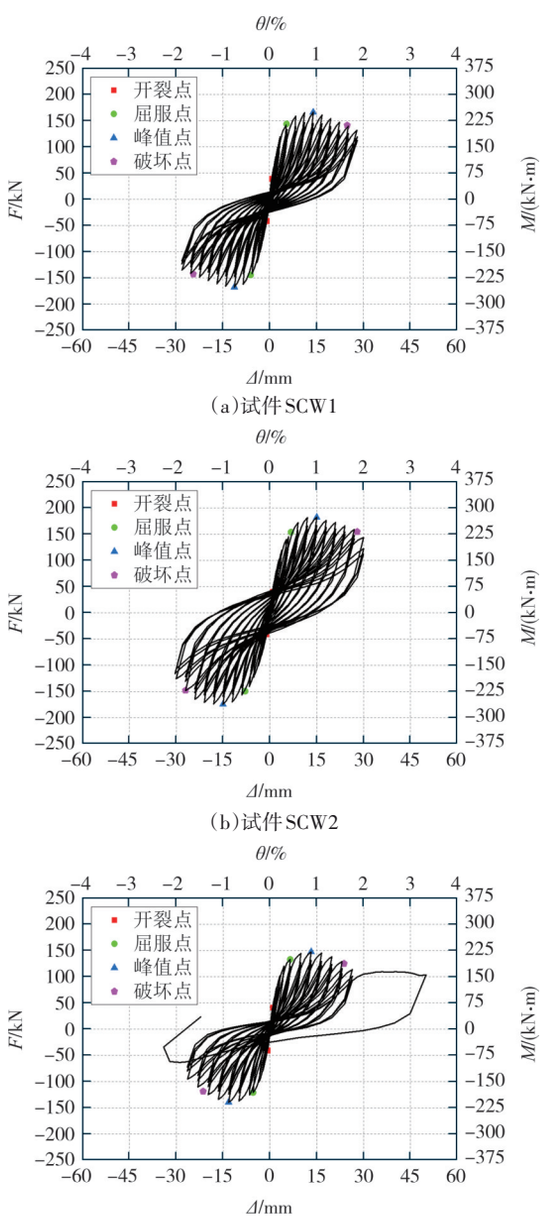
3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

图5给出了各试件的滞回曲线,图中F、Δ分别为试件顶部的水平荷载及与之对应的位移,M、θ分别为试件墙体下端弯矩及层间位移角.试件的层间位移角θ可由下式计算:

$$\theta = \frac{\Delta}{H} \tag{1}$$

式中:H为试件墙体高度.



(a)试件SCW1

(b)试件SCW2

(c)试件SCW3

图5 试件滞回曲线

Fig.5 Hysteresis loops of specimens

加载初期,各试件的滞回曲线大致呈直线,加载与卸载曲线基本重合,残余变形和滞回环面积均很小,试件处于弹性阶段.荷载加大后,砌块和混凝土内裂缝逐渐增多,试件的刚度也慢慢退化,荷载-位移曲线发生弯曲,表现出明显的非线性变化特征,卸载后的残余变形逐级加大.

各试件滞回环面积逐级增大,并呈现出明显的反S形.试件SCW1滞回曲线较为饱满,但存在一定的捏拢现象,试件SCW2滞回曲线较前者更为饱满,捏拢现象不明显,试件SCW3的滞回曲线捏拢现象明显,耗能效果明显低于前两者,这说明钢管骨架可以减小滞回曲线的捏拢效应,有效改善复合墙的耗能能力.峰值荷载后,各试件抗剪承载力发生了衰减现象,刚度仍继续退化,但滞回环面积继续增大,除试件SCW3外,各试件均表现出较好的延性和耗能能力.试件SCW1的滞回曲线基本对称,而试件SCW2、SCW3的滞回曲线有较大的非对称性,这主要是由试件滞回特性的慢变性[18]和加载过程中发生的平面外变形引起的.

3.2 骨架曲线

将试件滞回曲线中各级首圈荷载极值点依次相连可得到骨架曲线,试件的骨架曲线对比如图6所示.可以看出,试件的骨架曲线均呈现出明显的S形,表明在低周往复荷载作用下,各试件均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段.

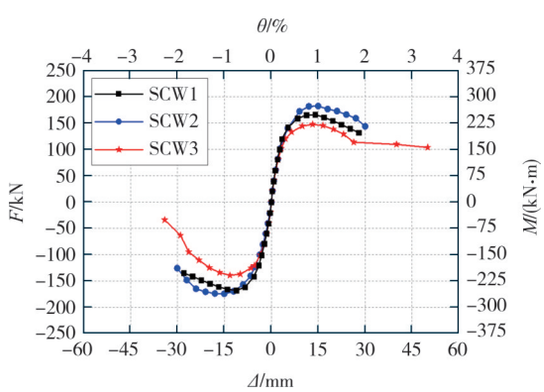


图6 试件骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves of specimens

各试件初始刚度基本一致,但屈服点之后,试件表现出了不同的刚度退化特征,此过程试件裂缝发展已非常丰富,试件SCW2的刚度退化程度最小,试件SCW1次之,试件SCW3则最大,说明钢管骨架可

以显著降低复合墙的刚度退化特性.试件SCW1、SCW2的峰值荷载均明显大于试件SCW3,证实钢管骨架能够有效提高复合墙的抗剪承载力.试件SCW2的抗剪承载力大于试件SCW1,因在钢管构件净截面面积相等时,矩形钢管横截面的惯性矩高于圆钢管,尽管两者对其内部混凝土都有约束作用,但该约束作用对于提高复合墙抗剪承载力的贡献小于钢管构件截面惯性矩的影响.峰值点过后,试件的破坏程度进一步加大,抗剪承载力均匀下降,且所有试件的下降速率亦接近,在破坏点,试件SCW2的承载力和极限位移均大于试件SCW1,而试件SCW3仍最小,但三者的位移延性系数基本一致(表3).

表3　试件水平荷载及水平位移特征值

Table 3　Lateral force and displacement eigenvalue of specimens

试件名称	加载方向	开裂点		屈服点		峰值点		破坏点		μ
		F_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	F_y/kN	Δ_y/mm	F_m/kN	Δ_m/mm	F_u/kN	Δ_u/mm	
SCW1	正向	39.24	0.70	143.93	5.47	166.13	14.02	141.21	24.88	4.53
	反向	41.02	0.90	144.61	5.98	167.73	11.22	142.57	24.38	4.08
	平均	40.13	0.80	144.27	5.73	166.93	12.62	141.89	24.63	4.31
SCW2	正向	40.30	0.80	153.83	6.73	182.27	15.00	154.93	27.95	4.15
	反向	40.73	1.10	149.55	7.90	174.44	15.03	148.27	27.05	3.42
	平均	40.52	0.95	151.69	7.32	178.36	15.02	151.60	27.50	3.79
SCW3	正向	41.25	0.85	126.73	5.44	147.47	13.23	125.29	23.74	4.34
	反向	40.38	0.80	120.76	5.36	139.55	13.20	118.96	21.37	4.01
	平均	40.82	0.83	123.75	5.40	143.51	13.22	122.13	22.56	4.18

3.3　特征荷载、位移及延性

表3给出了试件荷载及位移的特征值和位移延性系数,位移延性系数是反映墙体变形能力的重要指标,由表3可知,所有试件的位移延性系数均接近4或大于4,说明所有复合墙均具有良好的延性.

表4列出了试件各特征点的层间位移角计算结果.将出现第一条肉眼可见裂缝时的荷载定义为开裂荷载,对应的位移为开裂位移;利用能量等值法确定试件屈服位移,骨架曲线上对应的荷载为屈服荷载;峰值荷载采用实测的荷载极值点;定义骨架曲线上峰值点后荷载下降了峰值荷载值15%的点为破坏点.试件SCW1的峰值荷载为166.93 kN(平均值,余同),比试件SCW3提高了16.3%,说明圆钢管骨架可以显著提高复合墙的抗剪承载力,但试件SCW1的峰值荷载比试件SCW2(178.36 kN)低了6.4%,虽然圆钢管与矩形钢管对其内部混凝土都有一定的约束作用,但在两者净截面面积相同的条件下,前者的惯性矩小于后者,致使试件SCW1的抗剪承载力低于试件SCW2.由表4可知,试件SCW1、SCW2的极限位移角分别为1.64%、1.83%,均大于试件SCW3(1.50%),说明钢管骨架可以有效提高复合墙的极限位移,型钢混凝土复合墙具有良好的变形能力.

表4　试件层间位移角

Table 4　Inter-story displacement angle of specimens

试件名称	加载方向	开裂位移角/%	屈服位移角/%	峰值位移角/%	极限位移角/%
SCW1	正向	0.05	0.36	0.93	1.66
	反向	0.06	0.40	0.75	1.63
	平均	0.05	0.38	0.84	1.64
SCW2	正向	0.05	0.45	1.00	1.86
	反向	0.07	0.53	1.00	1.80
	平均	0.06	0.49	1.00	1.83
SCW3	正向	0.06	0.36	0.88	1.58
	反向	0.05	0.36	0.88	1.42
	平均	0.06	0.36	0.88	1.50

3.4　损伤评估

在理想的非破坏性条件下,试件第i个加载循环外力所做的功被定义为W_i,在实际损伤条件下,外力的功被转换为3部分,即弹性变形能W_{ei}、塑性变形能W_{pi}和损伤耗散能W_{Di},根据能量守恒定律[19]:

$$W_i = W_{ei} + W_{pi} + W_{Di} \tag{2}$$

其中,W_i、$W_{ei}+W_{pi}$可分别按式(3)、式(4)计算.

$$W_i = K_0\Delta_i^2 \tag{3}$$

$$W_{ei} + W_{pi} = \left|\int_{-\Delta_{p(i-1)}}^{\Delta_i} F_1(\Delta)\mathrm{d}\Delta\right| + \left|\int_{-\Delta_i}^{\Delta_{pi}} F_2(\Delta)\mathrm{d}\Delta\right| \tag{4}$$

式中:K_0为构件初始刚度;Δ_i为第i个加载循环的最大位移(图7).

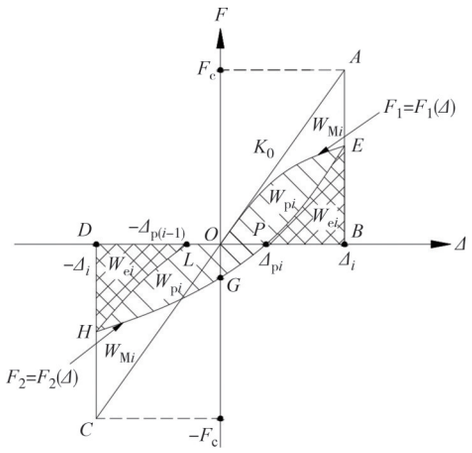


图 7 损伤指数计算图

Fig.7 Illustration of damage index

构件第 i 个加载循环的损伤指数可表达为：

$$D_i = \frac{W_{Di}}{W_i} = 1 - \frac{W_{ei} + W_{pi}}{W_i} \tag{5}$$

按照图 7 中阴影部分的面积可以计算 D_i：

$$D_i = 1 - \frac{(S_{OEPGHL} + S_{BEP} + S_{DHL})}{(S_{OAB} + S_{OCD})} \tag{6}$$

图 8 给出了根据式(6)计算得到的试件损伤指数曲线.可以看出：所有试件的损伤指数在早期加载阶段均显著增加，但随着试件的弹塑性发展，损伤指数的提高趋于平缓，在破坏阶段各试件的损伤指数仅有小幅增加.

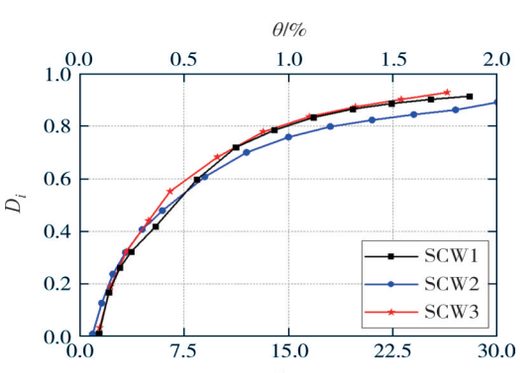


图 8 试件损伤指数曲线

Fig.8 Damage index curves of specimens

总体上，当加载位移相同时，试件 SCW2 的 D_i 值最小，说明矩形钢管对混凝土的约束作用可以明显降低复合墙在各个加载阶段的损伤指数，增强其抗损伤能力.在整个加载过程中，试件 SCW1 的 D_i 值只是略小于试件 SCW3，两者在加载早期阶段及破坏阶段是接近的，表明在复合墙抗损伤能力方面，圆钢管骨架所发挥的作用与钢筋骨架处于同一水平.

3.5 耗能能力

根据试件加载点水平荷载-位移滞回曲线可计算试件的耗能 E_d（某加载等级滞回环所包围的面积）、累积耗能 $\sum E_d$（所有滞回环所包围的面积总和），并可利用式(7)计算试件等效黏滞阻尼系数 ξ_{eq}（图 9）：

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODG}}\right) \tag{7}$$

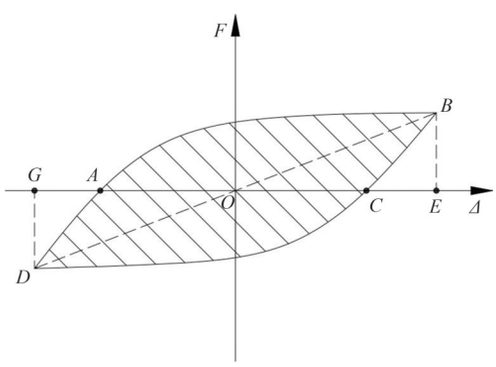
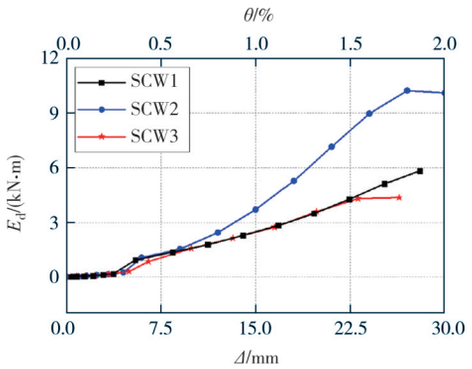


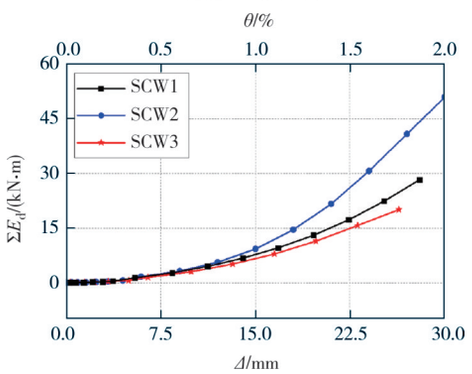
图 9 等效黏滞阻尼系数计算图

Fig.9 Illustration of equivalent viscous damping coefficient

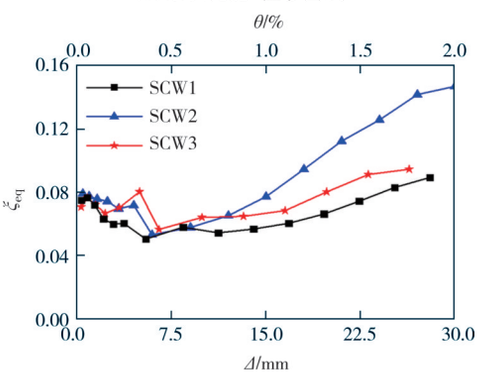
各试件的耗能能力如图 10 所示.从图 10(a)(b)可以看出，试件 SCW2 的耗能和累积耗能均最大；试件 SCW1、SCW3 的耗能基本重合，但前者的累积耗能高于后者，说明钢管骨架可以显著增强复合墙的耗能能力，但矩形钢管骨架的增强作用更加突出.试件 SCW2、SCW3 耗能的增幅在最后一个位移水平都出现了明显下降，而试件 SCW1 在进入屈服阶段后，其耗能能力非常稳定，证明圆钢管骨架在增强复合墙耗能能力的同时，还能提高复合墙的耗能稳定性.各试件等效黏滞阻尼系数[图 10(c)]在弹塑性、塑性阶段随位移的增加而增大，从总体上看，试件 SCW2 的等效黏滞阻尼系数最大，试件 SCW1 稍低于试件 SCW3.从总体上看，型钢混凝土复合墙的耗能能力高于钢筋混凝土复合墙，型钢骨架、混凝土以及砂加气混凝土砌块三者具有良好的协同工作性能，在型钢混凝土肋格的强大约束作用下，脆性材质的砌块受损后转变为大小和形状不一的小砌块，小砌块之间的挤压、摩擦作用可耗散大量能量，这是型钢混凝土复合墙耗能能力提高的重要因素.



(a)耗能-位移曲线



(b)累积耗能-位移曲线



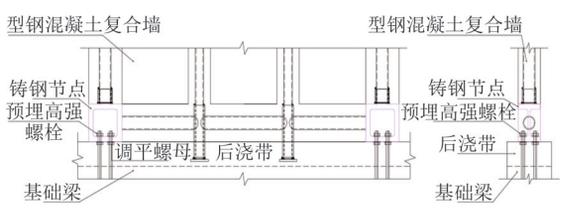
(c)等效黏滞阻尼系数变化趋势图

图 10　试件耗能能力

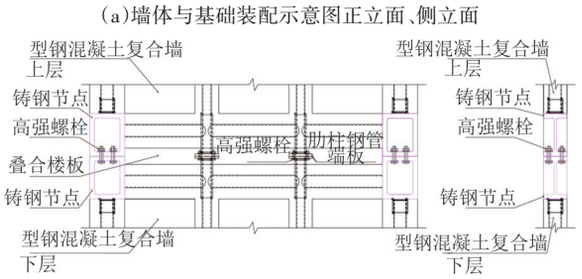
Fig.10　Energy dissipation capacity of specimens

4　型钢混凝土复合墙装配方案

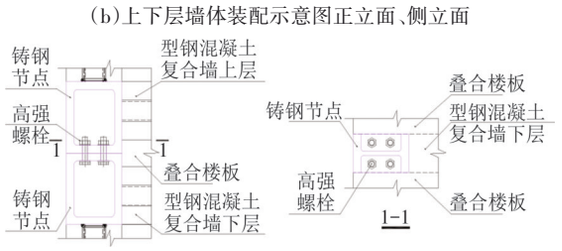
试件SCW1~SCW3原型为某小区一栋14层民用住宅楼的一层墙体,参见文献[13]关于大高宽比型钢复合墙的研究,型钢混凝土复合墙可应用于中高层建筑.当该类复合墙应用于实际工程时,墙体的连接可进一步优化,结合试件原型建筑给出了型钢混凝土复合墙的现场装配方案,见图11(以内置圆钢管骨架复合墙为例).型钢混凝土复合墙与基础通过预埋高强螺栓连接[图11(a)];上下层型钢混凝土复合墙通过铸钢节点(框柱)、端板(肋柱)和高强螺栓连接,并采用叠合楼板[图11(b)~(d)],上层墙体与叠合楼板处水平接缝宜采用坐浆料填实;复合墙竖向接缝可采用耳板高强螺栓连接,耳板设置于墙体各肋梁对应位置处[图11(e)],墙体竖向接缝的装配方法见 图11(f)~(j).墙体组装完毕后,接缝处应采用高强灌浆料填实,铸钢节点宜采用砂浆封闭.虽然内置圆钢管骨架复合墙的抗剪承载力和耗能能力低于内置矩形钢管骨架复合墙,但前者耗能能力的稳定性及变形能力均高于后者,可根据工程需求灵活选用钢管骨架.型钢混凝土复合墙的抗震性能良好,当用于中高层建筑时,相较于钢筋混凝土复合墙,其截面更小,可节省大量的混凝土、砌块,建筑总体造价与采用钢筋混凝土复合墙相当,性价比更高.



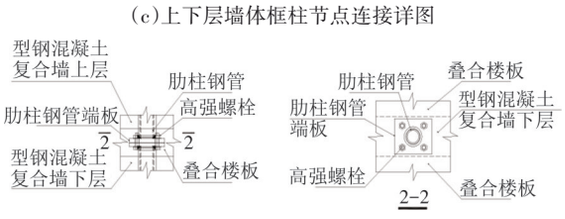
(a)墙体与基础装配示意图正立面、侧立面



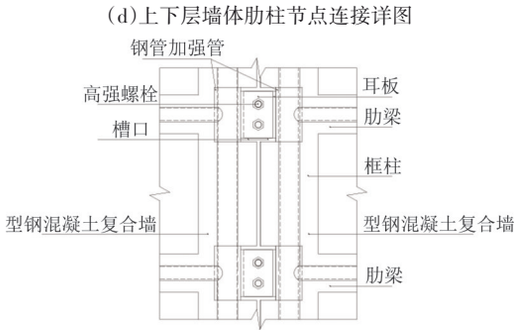
(b)上下层墙体装配示意图正立面、侧立面



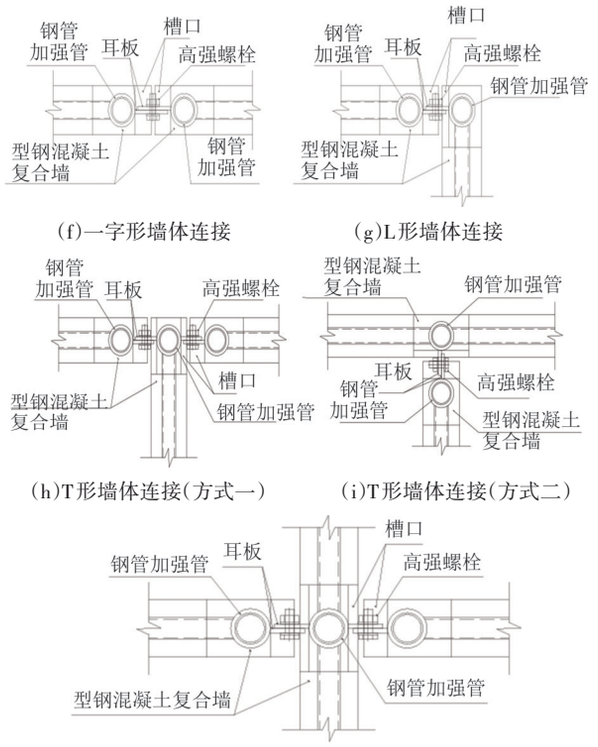
(c)上下层墙体框柱节点连接详图



(d)上下层墙体肋柱节点连接详图



(e)墙体竖向接缝耳板布置图



(f)一字形墙体连接 (g)L形墙体连接

(h)T形墙体连接(方式一) (i)T形墙体连接(方式二)

(j)十字形墙体连接

图 11 型钢混凝土复合墙的装配

Fig.11 Assembly of steel reinforced concrete composite walls

5 结 论

1)基于试件的破坏过程和破坏形态,判断型钢混凝土复合墙最终呈剪切型破坏,其破坏过程经历了三个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和塑性(破坏)阶段.

2)相较于钢筋混凝土复合墙,型钢混凝土复合墙的滞回曲线更饱满,证明使用圆钢管或矩形钢管代替钢筋可有效改善复合墙的滞回性能,提高其抗震能力.内置矩形钢管骨架复合墙的耗能能力高于内置圆钢管骨架复合墙,但后者的耗能稳定性优于前者.

3)相较于钢筋混凝土复合墙,在变形能力和延性大致相当的基础上,型钢骨架可明显提高复合墙的抗剪承载力.型钢骨架能够增强复合墙在塑性阶段的抗损伤能力.

4)型钢混凝土复合墙可利用铸钢节点、端板、耳板及高强螺栓实现墙体与基础、各层墙体间及同层内各墙体的装配,连接安全可靠,装配效率高.

参考文献

[1] 姚谦峰,黄炜,田洁, 等. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 67-74.
YAO Q F, HUANG W, TIAN J, et al. Experimental analyses of mechanical characteristics and seismic performance of multi-ribbed panel wall[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(6): 67-74.(in Chinese)

[2] 黄炜, 姚谦峰, 章宇明, 等. 内填砌体的密肋复合墙体极限承载力计算[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 68-75.
HUANG W, YAO Q F, ZHANG Y M, et al. Calculation on ultimate bearing capacity of multi-ribbed composite walls infilled with blocks[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 68-75.(in Chinese)

[3] HUANG W, MIAO X W, HU G X, et al. Experimental and shear bearing capacity studies of the assembled composite wall with bolted connections[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2020, 29(6): e1722.

[4] 贾英杰. 中高层密肋壁板结构计算理论及设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2004: 20-25.
JIA Y J. Research on computational theory and design method of moderate high-rise multi-ribbed slab structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004: 20-25.(in Chinese)

[5] 王爱民. 中高层密肋壁板结构密肋复合墙体受力性能及设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
WANG A M. Research on load-bearing performance and design method of multi-ribbed composite wall in moderate-high storied multi-ribbed slab structure [D]. Xi' an: Xi' an University of Architecture and Technology, 2006.(in Chinese)

[6] SUN J, JIA Y J, MO Y L. Evaluation of elastic properties and lateral stiffness of multi-ribbed walls based on equivalent elastic model[J]. Engineering Structures, 2014, 72: 92-101.

[7] SUN J, YUAN L, WANG P F. Residual bearing capacity of infilled frame of multi-ribbed composite wall after high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 196-206.

[8] MIAO X W, HUANG W, LING K, et al. Experimental study and numerical simulation of reinforced concrete walls with lightened blocks connected with bolts [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(9): 1960-1974.

[9] 苗欣蔚,黄炜,胡高兴,等. 水平缝螺栓连接的全装配式复合墙体受力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021, 48(5):19-28.
MIAO X W, HUANG W, HU G X, et al. Experimental study on mechanical behavior of fully assembled composite wall with bolted

connection on horizontal joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(5): 19-28.(in Chinese)

[10] 刘佩,郭猛,李挺,等. 轻钢龙骨框格密肋复合墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 128-133.
LIU P, GUO M, LI T, et al. Experimental investigation on seismic behavior of multi-grid composite wall reinforced by light steel[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 128-133.(in Chinese)

[11] 何明胜. 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体试验分析及抗震设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
HE M S. Experiment analysis and seismic design method study on the multi-ribbed composite wall with steel concrete frame column [D]. Xi' an: Xi' an University of Architecture and Technology, 2008.(in Chinese)

[12] 袁泉, 董嘉林, 朱洪磊. 装配式钢管密肋保温复合墙体抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(3): 88-98.
YUAN Q, DONG J L, ZHU H L. Experimental study on the seismic behavior of precast steel tube multi-ribbed thermal insulation composite wall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(3): 88-98.(in Chinese)

[13] LIU G, HUANG W, ZHANG C L, et al. Seismic behavior of prefabricated steel multi-ribbed composite walls connected with cast steel joints[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 165: 107730.

[14] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.(in Chinese)

[15] 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.
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)

[16] 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.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.(in Chinese)

[17] 蒸压加气混凝土性能试验方法:GB/T 11969—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
Test methods of autoclaved aerated concrete: GB/T 11969—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.(in Chinese)

[18] 韩清凯, 刘杰, 闻邦椿. 不对称滞回模型的一般形式及其参数慢变特性[J]. 振动与冲击, 2000, 19(3): 14-16.
HAN Q K, LIU J, WEN B C. General formulations of asymmetrical hysteretic models and the slowly-varying characteristics of their parameters[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3): 14-16.(in Chinese)

[19] ZHANG J W, LI X Y, CAO W L, et al. Seismic behavior of composite shear walls incorporating high-strength materials and CFST boundary elements[J]. Engineering Structures, 2020, 220: 110994.