

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201903024

轻型装配式框架 - 变形可控地聚物墙抗震性能

周中一, 王涛, 滕睿, 岳哲萌, 王津

(地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080)

摘要:为研究轻型装配式框架 - 变形可控地聚物混凝土墙的抗震性能,进行了1个轻型装配式框架和3个不同连接方式的轻型装配式框架 - 地聚物混凝土墙足尺模型的低周反复荷载试验,主要研究连接方式对结构承载力、延性、耗能、破坏特征、损伤演化规律等的影响,验证各装配化部件间连接效果.研究表明:轻型装配式框架各部件间连接可靠,具有良好的抗震性能;地聚物混凝土墙具有与普通混凝土墙相似的损伤演化规律;地聚物混凝土墙与框架间通过变形可控连接,提高了框架 - 地聚物混凝土墙的变形能力和延性;地震作用下轻型装配式框架 - 变形可控型地聚物混凝土墙具有多道抗震防线,可满足地震区低多层建筑的抗震设防要求.

关键词: 装配式; 轻型框架; 变形可控; 地聚物混凝土; 抗震性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2019)12 - 0046 - 09

Seismic performance of assembled lightweight steel frame with deformation controllable connection of geopolymer wall

ZHOU Zhongyi, WANG Tao, TENG Rui, YUE Zhemeng, WANG Jin

(Key Lab of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics, CEA), Harbin 150080, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of assembled lightweight steel frame with deformation controllable connection of geopolymer concrete wall, one assembled lightweight steel frame and three assembled lightweight steel frame specimens of different types of connection with geopolymer concrete wall were constructed and tested under cyclic loading. The main purpose of this study is to analyze the effect of the connection type on the load bearing capacity, ductility, energy dissipation ability, damage characteristics, and damage evolution law of the structure and to verify the reliability of the deformation controllable connection among the assembled components. Test and analysis results show that the connections among the components of the lightweight steel frame were reliable, and the assembled lightweight steel frame with deformation controllable connection geopolymer concrete wall exhibited good seismic performance. Geopolymer concrete wall had similar damage evolution law with common concrete walls. The relative displacement due to the deformation controllable connection between the wall and frame improved the ductility and deformability significantly, and prevented geopolymer concrete wall from cracking under frequent or moderate earthquakes. Assembled lightweight frame with deformation control connection geopolymer concrete wall have multiple seismic resistant measures, which can meet the seismic resistant requirements in earthquake-prone area.

Keywords: assembled; lightweight frame; deformation controllable; geopolymer concrete; seismic performance

历次地震中,村镇低多层房屋损毁严重,研发施工简便、抗震性能好的村镇建筑,是解决农房抗地震倒塌的根本措施.文献[1]研发了低成本村镇建筑抗震与隔震结构;文献[2]提出了适应于村镇既有砌体结构的后张预应力加固技术;文献[3]提出了适合村镇建筑的抗震设防标准;文献[4]提出了村

镇木结构房屋节点和抗侧加固措施;文献[5]研发了一种装配整体式圈梁构造柱技术;文献[6]研发了一种轻钢轻混凝土结构;文献[7-8]研发了一种装配式钢框架 - 单排配筋薄墙板组合结构.目前,尚缺少适宜村镇建筑的轻型装配式结构体系.

水泥原料开采,破坏生态,污染环境.碱性溶液激发粉煤灰、矿粉中的活性成分,生成的地聚物胶凝材料,是一种环境友好型建筑材料.文献[9]指出与普通混凝土相比,地聚物混凝土的二氧化碳排放量减小64%左右;文献[10]指出可用文献[11-13]进行地聚物 - 钢筋间的黏结滑移设计;文献[14]指出

收稿日期: 2019 - 03 - 04

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(19518304, 2016A06);

黑龙江省博士后科研启动基金(LBH - Q15146)

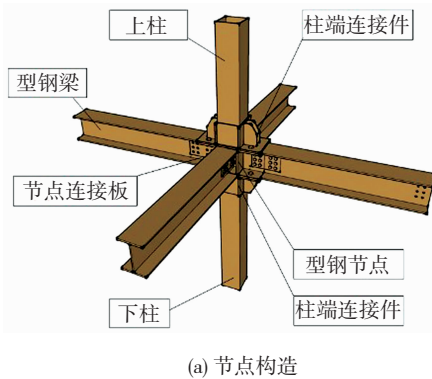
作者简介: 周中一(1980—),男,副研究员,硕士生导师;

王涛(1977—),男,研究员,博士生导师

通信作者: 王涛, wangtao@iem.ac.cn

地聚物混凝土梁的受弯破坏机理与普通水泥基混凝土梁相似;但是,文献[15]研究发现地聚物混凝土梁在峰值荷载后的延性较差;文献[16]指出与普通混凝土相比,地聚物混凝土受压时易出现脆性破坏;文献[17]研究表明与普通混凝土相比,地聚物混凝土梁的开裂荷载、跨中极限曲率和极限荷载均较相应普通混凝土梁大;文献[18]研究表明与普通混凝土柱相比,粉煤灰基地聚物混凝土柱的受压承载力和刚度提高了 34%。上述研究表明地聚物混凝土具有与普通混凝土相近的力学特性。

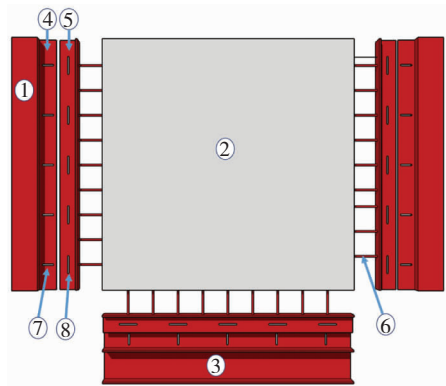
为研究轻型装配式框架-变形可控型地聚物混凝土墙的抗震性能,进行了 4 个足尺模型低周反复荷载试验,分析了该结构的承载力、延性、耗能、破坏特征、损伤演化规律等,对比分析了连接方式对轻型装配式钢框架-变形可控型地聚物混凝土墙抗震性能的影响。



(a) 节点构造

1 轻型装配式钢框架-变形可控型地聚物混凝土墙

轻型装配式框架由钢管混凝土柱、地聚物混凝土墙、型钢梁、型钢节点和柱端连接件等构成,如图 1(a)所示,型钢梁与型钢节点间通过节点连接板用螺栓连接,钢管混凝土柱与型钢节点间通过柱端连接件焊接。如图 1(b)所示,钢管混凝土柱 1 与柱连接板 4 焊接,填充墙 2 的水平钢筋和竖向钢筋与填充墙四周的 T 形连接板 5 焊接,填充墙 2 与钢管混凝土柱 1 间通过柱连接板 4 和填充墙 T 形连接板 5 连接,连接钢板 4 的连接槽 7 和 T 形连接板 5 的连接槽 8 正交,螺栓位于两个连接槽中心点处。连接槽 7 和连接槽 8 为长圆孔,连接螺栓可在正交的连接槽 7 和连接槽 8 的长圆孔内滑动,实现了变形可控连接(见图 1(b))。



(b) 轻型装配式框架-地聚物混凝土填充墙构造

注:1 为钢管混凝土柱,2 为填充墙,3 为型钢梁,4 为柱连接板,5 为填充墙 T 形连接板,6 为单排钢筋网片,7 为水平连接槽,8 为竖向连接槽。

图 1 连接构造

Fig. 1 Construction detail of the connection

2 试验概况

2.1 模型设计

设计了 4 个轻型装配式框架-变形可控地聚物混凝土墙体试件,包括 1 个轻型装配式框架,编号 LSFR-1,1 个轻型装配式框架-强连接地聚物混凝土墙,编号 LSFR-2,1 个轻型装配式框架-四周变形可控连接地聚物混凝土墙,编号 LSFR-3 和 1 个轻型装配式框架-上下变形可控连接地聚物混凝土墙,编号 LSFR-4,几何尺寸见图 2。边框柱为截面 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 轻型钢管,钢管内填充 C40 地聚物混凝土;型钢梁为 $\text{HM } 200\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 工字钢,型钢节点为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 工字钢,见图 3(a),柱端连接件为 10 mm 厚钢板围焊而成,见图 3(b)。

2.2 模型制作

轻型装配式框架施工按以下步骤进行:1) 将型钢下节点用 M20 高强螺栓固定在基础上,并将柱端连接件与型钢节点连接,见图 4(a);2) 将钢管柱下端插入柱端连接件的柱帽中,并四周围焊,图 4(b);3) 将型钢下梁与型钢节点用节点连接板和螺栓连接,见图 4(c);4) 钢管柱内灌注 C40 混凝土,形成钢管混凝土柱边框;5) 在钢管柱上端安装型钢节点,并四周围焊;6) 将型钢上梁与型钢节点用节点连接板和螺栓连接,形成轻型装配式钢框架。

2.3 材料特性

实测试验用钢材力学特性见表 1。试验用地聚物混凝土成分包括粉煤灰、矿粉、石子、砂子、水玻璃、氢氧化钠、水、减水剂和缓凝剂。粉煤灰和矿粉化学成分见表 2。砂子为河砂,石子为普通细石,外加剂采用 JFL-5 型高效减水剂,水玻璃溶液模数为 1.2。

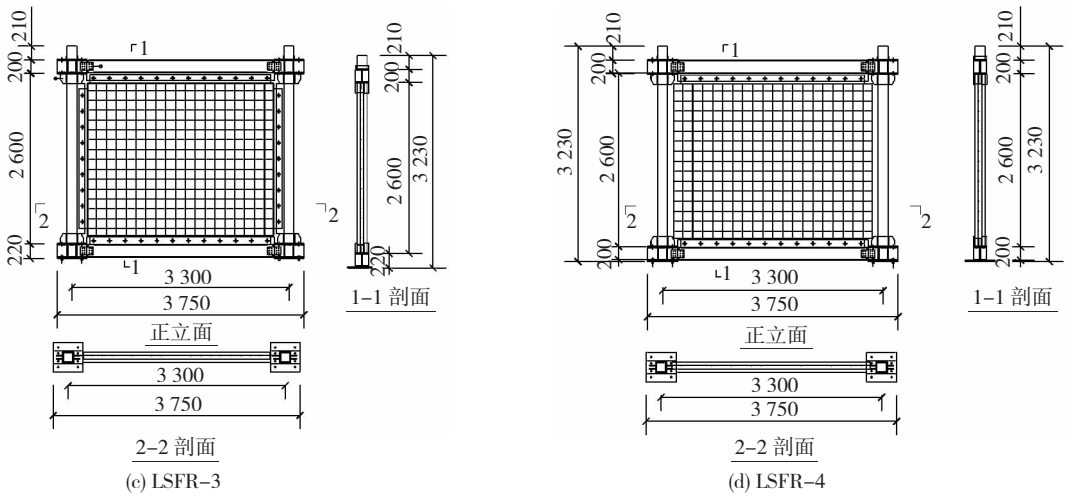
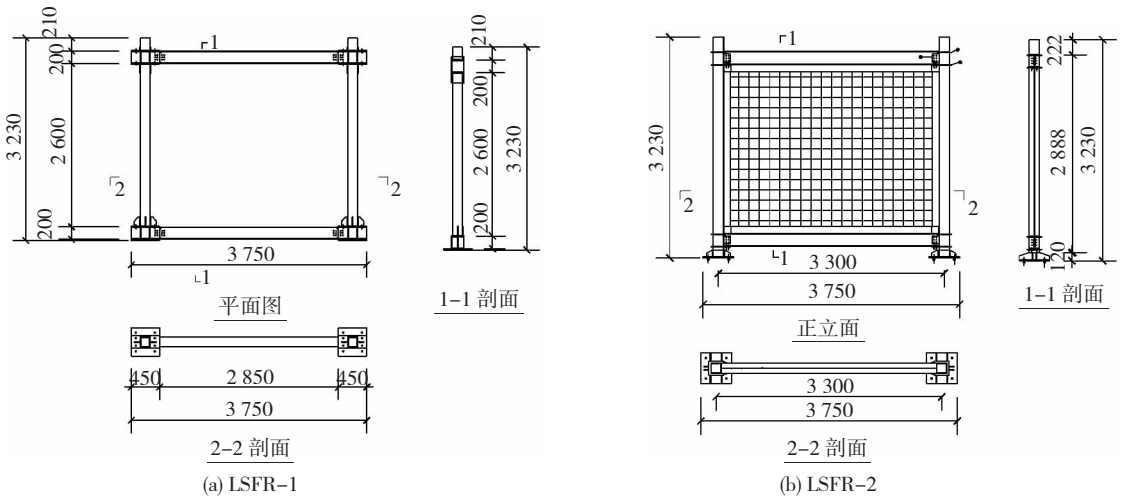


图 2 试件几何尺寸 (mm)

Fig. 2 Geometric dimensions of the specimens(mm)

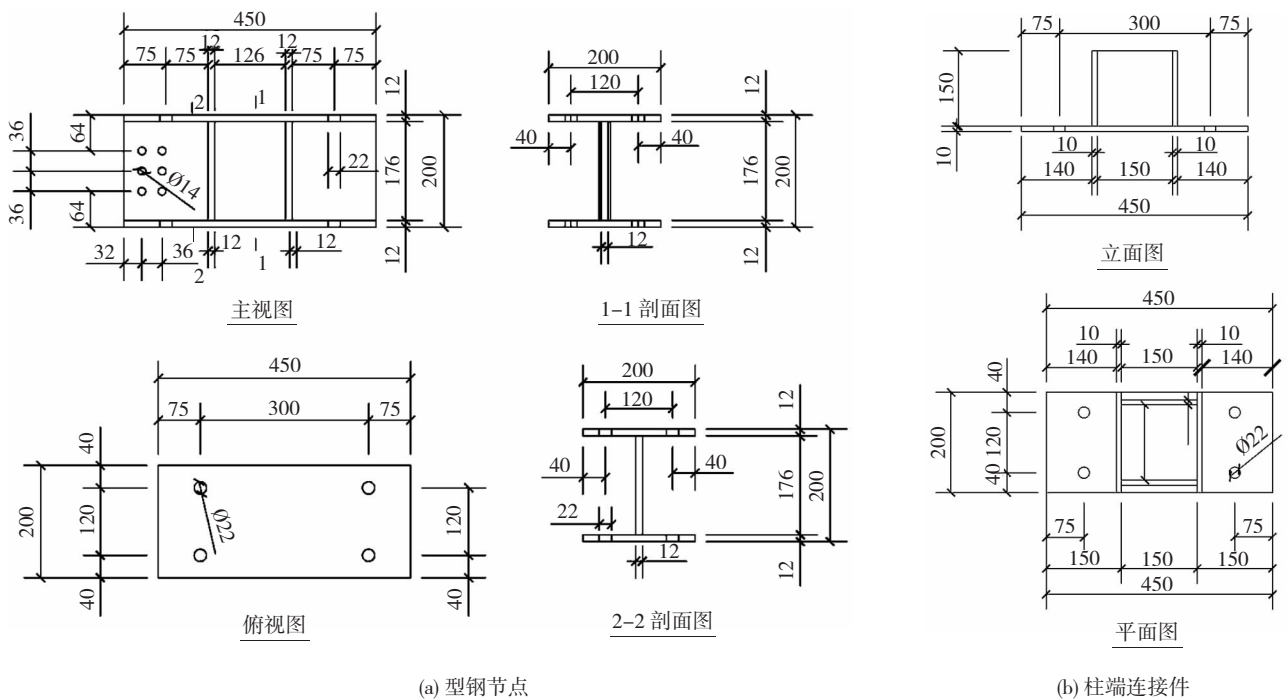


图 3 轻型装配化部件 (mm)

Fig. 3 Geometric dimensions of assembled lightweight parts (mm)

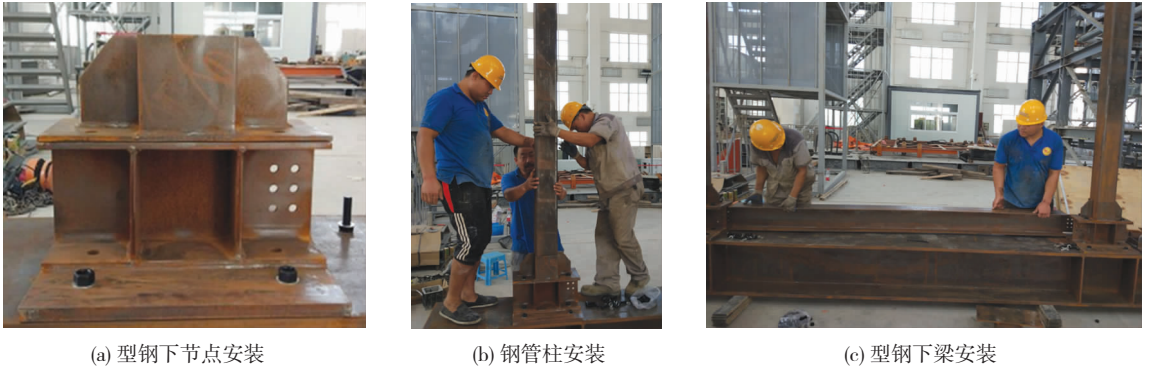


图 4 轻型装配式钢框架安装

Fig. 4 Construction process of lightweight assembled steel frame

地聚物混凝土配合比(质量比)为,粉煤灰:矿粉:砂:石:水:碱溶液 = 1:1:3:6.33:0.56:1,此处用水量未计入碱溶液中的水,实际用水量为两者之和.地聚物混凝土实测立方体抗压强度为 42.50 MPa,弹性模量为 3.26×10^4 MPa.

表 1 钢材力学特性

Tab. 1 Mechanical properties of steel plate

钢板规格/mm	极限强度 f_u /MPa	屈服强度 f_y /MPa	屈强比 f_y/f_u	弹性模量 $E_s/10^5$ MPa
6	446.00	338.33	0.76	2.16
10	466.67	355.00	0.76	1.75
12	416.67	276.67	0.66	2.02
20	546.67	380.00	0.70	2.12

表 2 粉煤灰与矿粉成分(质量百分数)

Tab. 2 Composition of fly ash and slag %

类别	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	SO ₃	MgO	SiO ₃
粉煤灰	50.30	30.18	8.03	5.82	0.13	0.41	—	—
矿粉	30.20	20.27	3.18	36.85	—	—	9.36	3.59

2.4 试验加载与测点布置

试验时在框架柱顶分别施加 300 kN 竖向荷载,并保持恒定;在型钢梁中心点处施加低周反复水平荷载,采用位移控制加载,1% 位移角之前,每级位移增量为 3.6 mm,1% 位移角之后,每级位移增量约为 7.2 mm,每级循环两次.框架梁两侧设置侧向支撑,以增强试验装置平面外刚度,加载装置见图 5.

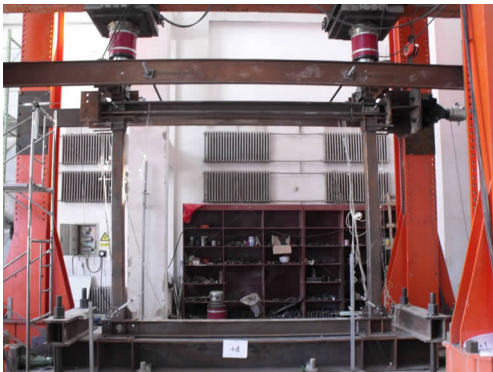


图 5 试验加载装置

Fig. 5 Testing set-up

加载梁中心点处,框架柱底、基础梁底部布置水平位移计,以测量相应测点水平方向变形,沿框架对角线布置斜向位移计,测量框架平面内变形;在框架节点、框架柱和墙体纵向钢筋底部、与墙体对角线相交的纵横钢筋处均布置应变片,测点布置见图 6.

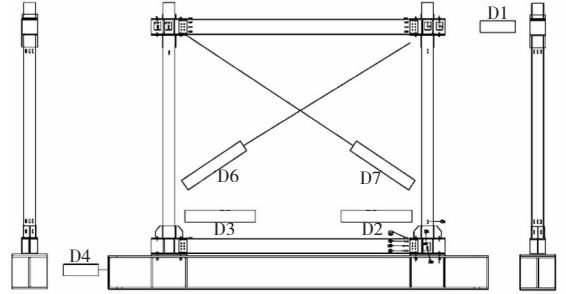


图 6 轻型装配式钢框架测点布置

Fig. 6 Arrangement of the measure point

3 结果分析

3.1 试验现象

3.1.1 轻型装配式钢框架(LSFR-1)

1/57 位移角(加载点水平位移 51.1 mm)前,框架基本完好,1/57 位移角时,框架整体变形明显,钢管柱底部、柱端连接件上边缘处屈曲,柱端连接件加强了钢管柱根部,柱底屈曲得以上移;之后随着位移加载幅值增大,结构变形逐渐明显,加载至 1/20 位移角(加载点水平位移达 146 mm)时,顶层柱端连接件肋板与柱连接处开裂,试验停止,结构整体变形见图 7(a),顶部柱端连接件损伤见图 7(b),柱底屈曲见图 7(c).

3.1.2 轻型装配式框架-强连接地聚物混凝土墙(LSFR-2)

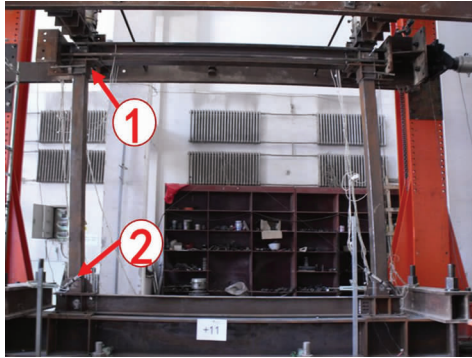
加载至 1/800 位移角时,墙体右下角出现第一条斜向裂缝,之后随着水平位移增大,墙体底部与型钢梁连接处斜向裂缝逐渐增多;当加载至 1/200 位移角时,沿墙体对角线出现贯通交叉斜裂缝;加载至 1/80 位移角时,墙体布满细而密的裂缝,裂缝基本平行于对角线方向;之后裂缝宽度逐渐增大,墙体左下角和右下角混凝土大面积脱落,钢筋骨架屈曲严

重,见图 8(a),柱脚底部钢管撕裂,见图 8(b)。由图 8 可见:试验加载初期,墙体为结构的第一道防线,裂缝逐渐发展,耗散了大部分地震能量;墙体损伤严重后,退出工作,钢管混凝土边框作为第二道防线,抵抗水平地震作用,并充分发挥其变形能力强的优势,结构整体具有一定的弹塑性变形能力。

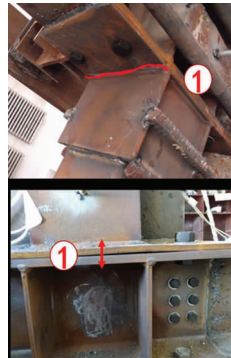
3.1.3 轻型装配式框架 - 四周变形可控连接地聚物混凝土墙 (LSFR - 3)

加载初期,主要靠框架变形、变形可控连接钢板

间摩擦耗散地震能量,当加载至 1/100 位移角时,连接钢板间错动约为 10 mm;当加载至 1/50 位移角时,变形可控连接钢板间错动超过了连接孔长度,部分连接螺栓被连接孔卡住,结构演变为抗震体系,墙体参与工作;加载至 1/36 位移角时,墙体右上角出现第一条斜向裂缝,见图 9(a);之后随着加载幅值增大,墙体逐渐损伤、开裂直至完全退出工作,结构转化成框架结构,钢管混凝土柱底部与柱端连接件连接处焊缝撕裂,见图 9(b)。



(a) 结构整体变形



(b) 顶部连接件损伤



(c) 柱底屈曲

图 7 轻型装配式钢框架 (LSFR - 1) 变形与损伤

Fig. 7 Deformation and damage of specimen LSFR - 1



(a) 地聚物混凝土墙体损伤(1/40)



(b) 柱脚损伤

图 8 强连接试验模型 (LSFR - 2) 损伤状态

Fig. 8 Damage state of specimen LSFR - 2



(a) 地聚物混凝土墙体开裂(1/36 位移角)



(b) 地聚物混凝土墙体及柱脚损伤(1/26 位移角)



图 9 四周变形可控连接试验模型 (LSFR - 3) 损伤状态

Fig. 9 Damage state of specimen LSFR - 3

试验中,型钢节点损伤较轻,满足了强节点的抗震设防需求;型钢梁端部翼缘屈曲严重,但型钢梁腹板与型钢节点连接牢固,节点连接板剪切变形较大,但未出现撕裂等严重破坏,保证了型钢节点和型钢梁连接牢固,见图 10(a);柱端连接件对钢管混凝土柱端部进行了适当加强,提高了框架柱的抗侧移能

力;墙体与框架间的变形可控连接保证了其在 1/50 位移角前不损伤,框架-墙体相对变形超过连接孔长度时,连接螺栓是墙体和框架间主要传力部件,试验中墙体裂缝发展方向基本沿着连接螺栓的连线方向,相对变形较大时,少数连接螺栓被剪断,见图 10(b)。



图 10 轻型装配化部件损伤

Fig. 10 Damage state of the assembled components

3.1.4 轻型装配式框架-上下变形可控连接地聚物混凝土墙(LSFR-4)

1/800 位移角时,墙体与钢管混凝土柱间的加气混凝土砌块开裂;1/400 位移角时,墙体右下角出现第一条斜裂缝,之后墙体与砌块间脱离,墙体未再出现新裂缝;1/66 位移角时,墙体上形成两条主斜裂缝;1/57 位移角时,一条自左上至右下,平行于墙体对角线的裂缝出现;1/50 位移角时,右侧加气混

凝土砌块基本完全脱落;1/40 位移角时,试件左侧加气混凝土砌块基本完全脱落,墙体变形空间增大;之后随着加载幅值增大,墙体上的裂缝逐渐增多,直至 1/28 位移角,墙体裂缝发展充分,1/25 位移角时,墙体损伤严重,见图 11(a),钢管混凝土柱底部屈曲,见图 11(b);试验过程中墙体与框架间连接可靠,仅有少部分连接螺栓被剪断。

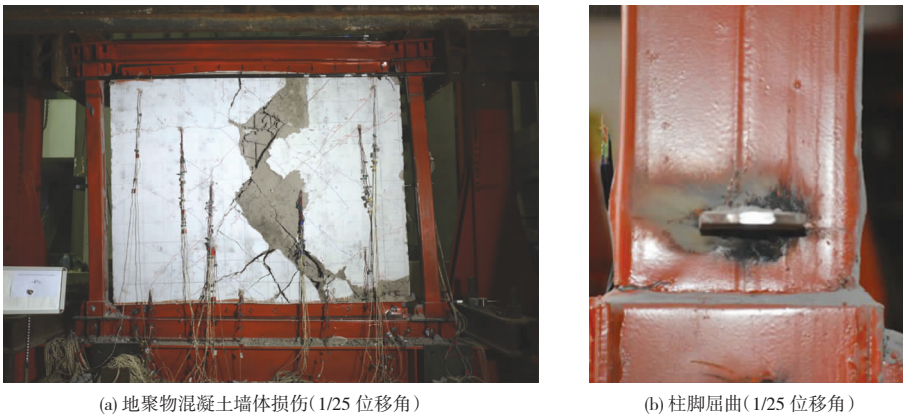


图 11 上下变形可控连接试验模型(LSFR-4)损伤状态

Fig. 11 Damage state of specimen LSFR-4

综上所述:1) 轻型装配式钢框架整体损伤较轻,损伤主要集中在柱底和顶部柱端连接件根部,各部件间连接可靠,结构具有较强的弹塑性变形能力;2) 强连接试件 LSFR-2 的墙体裂缝逐渐发展,耗散了大部分地震能量;墙体损伤严重后,退出工作,钢管混凝土边框作为第二道防线,抵抗水平地震作用,并充分发挥其变形能力强的优势,结构整体具有较强的弹塑性变形能力;3) 地聚物混凝土墙体具有与普通混凝土墙相似的开裂、损伤发展过程;4) 变形

可控连接框架-地聚物混凝土墙体(LSFR-3、LSFR-4)小震时框架承担大部分水平地震作用,避免了墙体小震即开裂;中震和大震时墙体和框架共同抵抗地震作用,墙体经历了开裂-损伤-退出工作的损伤演化过程,消耗了大部分地震能量;各轻型装配式部件间连接可靠,结构整体性强,具有良好的抗震性能。

3.2 承载力

实测各试件峰值点荷载、极限点荷载、破坏点荷

载见表 3,表中 F_p 为峰值点荷载, F_u 为极限点荷载即承载力下降到峰值荷载 85% 时的荷载, F 为破坏点荷载即框架变形较大,柱脚屈曲严重,试验终止时的荷载.

表 3 实测各试件峰值点荷载、极限点荷载和破坏点荷载

Tab. 3 Experimental results of characteristic point load kN

试件编号	峰值承载力		极限承载力		破坏点荷载	
	F_p^+	F_p^-	F_u^+	F_u^-	F^+	F^-
LSFR-1	92.50	-73.00	78.60	-62.50	61.56	-60.23
LSFR-2	887.64	-864.17	754.64	-734.68	268.94	-300.22
LSFR-3	484.50	-401.13	411.68	-340.76	191.91	-286.20
LSFR-4	434.54	-361.33	369.52	-307.40	272.72	-227.07

由表 3 可见:1)与强连接试件(LSFR-2)相比,四周变形可控连接试件 LSFR-3 和上下变形可控连接试件 LSFR-4 的峰值荷载、极限荷载和破坏荷载较低;2)四周变形可控连接试件 LSFR-3 和上下变形可控连接试件 LSFR-4 的峰值荷载、极限荷载和破坏荷载相差不大;3)与空框架(LSFR-1)相比,轻型装配式框架-地聚物混凝土墙体组合结构的承载力均有大幅提高.

3.3 位移及延性

实测各试件峰值点位移、极限点位移、破坏点位移见表 4,表中 Δ_p , Δ_u 和 Δ 分别是各试件的峰值位移、极限位移和破坏点位移.

由表 4 可见:1)与强连接试件 LSFR-2 相比,轻型装配式框架试件 LSFR-1 和轻型装配式框架-地聚物混凝土墙(LSFR-3、LSFR-4)均具有较强的弹性变形能力;2)变形可控连接试件的峰值位移、极限位移和破坏点位移均远大于强连接试件,说明变形可控连接可充分发挥框架自身的变形能力;3)各试件破坏点时,强连接试件 LSFR-2 的位移角为 1/40,四周变形可控连接试件 LSFR-3 的位移角为 1/26,上下变形可控连接试件 LSFR-4 的位移角为 1/25,表明变形可控连接试件的弹塑性变形能力接近纯框架,但其承载能力是纯框架的 5 倍.

表 4 实测各试件峰值点位移、极限点位移和破坏点位移

Tab. 4 Experimental results of characteristic point displacement mm

试件编号	峰值位移		极限位移		破坏点位移	
	Δ_p^+	Δ_p^-	Δ_u^+	Δ_u^-	Δ^+	Δ^-
LSFR-1	73.14	-129.26	116.46	-136.73	146.83	-145.57
LSFR-2	19.56	-28.45	41.59	-42.08	53.91	-66.34
LSFR-3	78.30	-77.99	83.91	-82.39	112.61	-106.18
LSFR-4	94.44	-93.84	105.59	-104.66	118.59	-115.30

3.4 滞回及耗能

3.4.1 滞回性能

试验实测各试件水平荷载 F - 加载点水平位移 U 滞回曲线见图 12.

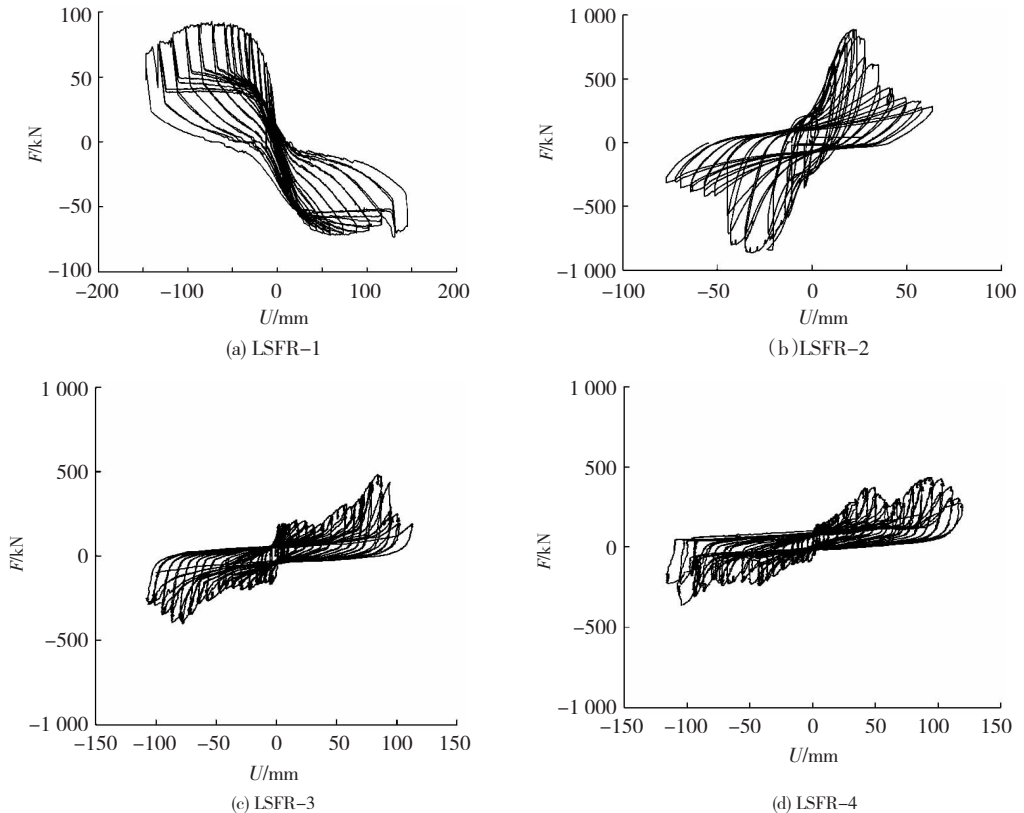


图 12 滞回曲线

Fig. 12 Load-displacement hysteretic loops of the specimens

由图 12 可见:1) 轻型装配式框架试件(LSFR-1)滞回曲线饱满,承载力下降平缓,变形能力强,具有良好的延性;2) 强连接试件(LSFR-2)地聚物混凝土墙体刚度大,承载力高,滞回曲线饱满,但承载力下降快,延性较差;3) 四周变形可控连接试件(LSFR-3),1/50 位移角前,滞回曲线饱满,试件承载力平稳,未明显下降;1/50 位移角后,承载力增长较快,达到峰值后,又下降至平缓阶段;之后随着水平位移持续增加,承载力逐渐下降,试件破坏时位移角达 1/26;4) 上下变形可控连接试件(LSFR-4),1/50 位移角之前,滞回曲线饱满,承载力增长较快,具有较高的初期刚度,1/50 位移角后,承载力明显下降,加载至 1/30 位移角时,承载力再次明显增长,达到峰值后承载力逐渐下降,试件破坏时位移角达 1/25。

3.4.2 骨架曲线

实测轻型装配式框架-地聚物混凝土墙试件 LSFR-2、LSFR-3、LSFR-4 骨架曲线对比见图 13,由图 13 可见:1) 强连接试件(LSFR-2)承载力高,刚度大,但承载力下降较快,刚度退化快,延性较差;2) 四周变形可控连接试件(LSFR-3)和上下变形可控连接试件(LSFR-4),加载初期(1/100 位移角前),两者骨架曲线基本重合,此阶段两者力学性能相似;之后试件(LSFR-4)随着加载点水平位移的增大,结构的承载力和刚度逐渐增大,至第 1 个峰值点后,承载力略有下降,之后,结构承载力和刚度再次增大,至第 2 个峰值点后,结构承载力下降较快,刚度退化加速;与上下变形可控连接试件 LSFR-4 相比,四周变形可控连接试件 LSFR-3,经历了承载力增长-变形可控连接件滑移-承载力增长-承载力下降 4 个阶段,骨架曲线上表现为增长-水平-增长-下降 4 个阶段;3) 变形可控连接,改善了结构的延性,增强了结构的整体耗能能力,有效发挥了框架变形能力强的优势,同时减轻了地聚物混凝土墙体在中小震作用下的损伤。

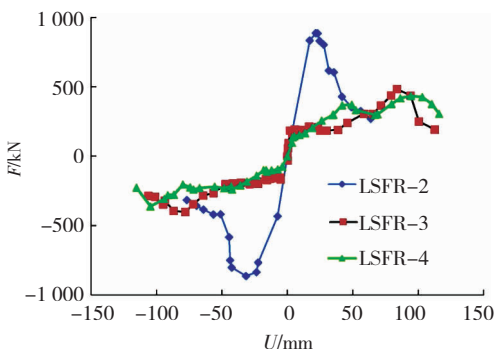


图 13 骨架曲线

Fig. 13 Load-displacement skeleton curves of the specimens

3.4.3 耗能

滞回环所包含的面积反映了结构弹塑性耗能的大小,取各滞回环包围面积的和作为比较用的耗能量。各试件实测耗能及相对值见表 5。

表 5 试件耗能实测值

Tab. 5 Measured value of the specimens' energy dissipation

试件编号	耗能 $E/(kN \cdot mm)$	相对值
LSFR-1	241 577.81	1.00
LSFR-2	602 277.59	2.49
LSFR-3	1 807 298.31	7.48
LSFR-4	2 043 044.62	8.46

由表 5 可见:1) 与试件 LSFR-1(轻型装配式钢框架)相比,试件 LSFR-2(强连接试件)的耗能提高了 149%。表明强连接地聚物混凝土墙体可显著提高框架的整体耗能能力;2) 与试件 LSFR-2(强连接试件)相比,LSFR-3(四周变形可控连接试件)的耗能提高了 200%,说明地聚物混凝土墙体与轻型装配式框架间通过变形可控连接,可显著提高结构的整体耗能能力;3) 与试件 LSFR-2(强连接试件)相比,LSFR-4(上下变形可控连接试件)的耗能提高了 239%,说明释放左右两边的连接后,地聚物混凝土墙体的自由变形空间变大,结构整体耗能能力增强。

4 结 论

1) 地聚物混凝土墙体与框架间通过变形可控连接,使得小震时地聚物混凝土墙体不参与工作,避免地聚物混凝土墙体小震即裂;中震和大震时,地聚物混凝土墙体-框架间连接螺栓被卡住,两者共同抵抗水平荷载,结构抗震能力较强,当地聚物墙体损伤严重退出工作后,结构承载力下降明显,但轻型装配式钢管混凝土框架仍具有一定的承载能力。

2) 与强连接试件(LSFR-2)相比,变形可控连接试件(LSFR-3、LSFR-4)的承载力下降较多,但弹塑性变形能力增强,整体耗能能力分别提高了 2 倍和 2.39 倍;与纯框架试件(LSFR-1)相比,框架-地聚物混凝土墙体间通过变形可控连接试件(LSFR-3、LSFR-4)的承载力分别提高了 4.49 倍和 3.95 倍,耗能能力分别提高了 6.48 倍和 7.46 倍。

3) 轻型装配式框架各装配部件间连接可靠,框架整体性好,弹塑性变形能力强,滞回曲线饱满,耗能能力强,具有良好的抗震性能,各装配部件自重较轻,施工简便,便于在机械化程度较低的村镇地区推广应用。

参考文献

- [1] 曹万林,张勇波,董宏英,等. 村镇建筑抗震节能结构体系研究与应用[J]. 工程力学,2015,32(12):1
CAO Wanlin, ZHANG Yongbo, DONG Hongying, et al. Research and application on aseismic energy-saving structural system for rural buildings[J]. Journal of Building Structures, 2015, 32(12):1. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.ST01
- [2] 刘航,兰春光,华少锋. 村镇既有砌体结构抗震加固新技术研发与示范[J]. 世界地震工程,2014(3):156
LIU Hang, LAN Chunguang, HUA Shaofeng. Research and application of seismic strengthening technology to existing masonry structures in villages and small towns [J]. World Earthquake Engineering, 2014,30(3):156
- [3] 陈小飞,马玉宏. 村镇建筑基于性能的抗震设防标准研究[J]. 土木工程学报,2012,45(增刊1):307
CHEN Xiaofei, MA Yuhong. Research on performance-based seismic design criteria for rural buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S1):307. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.s1.052
- [4] 鲁旭光. 村镇木结构住宅抗震加固试验研究[D]. 西安:长安大学,2011
LU Xuguang. Experimental study on seismic strengthening of the timber residence in villages and small towns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011
- [5] 张驰. 装配式整体圈梁构造柱村镇民用建筑抗震性能研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2017
ZHANG Chi. Study on seismic performance of masonry concrete prefabricated square steel ring beams and constructional columns [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017
- [6] 黄强,李东彬,王建军,等. 轻钢轻混凝土结构体系研究与开发[J]. 建筑结构学报,2016,37(4):1
HUANG Qiang, LI Dongbin, WANG Jianjun, et al. Study on lightweight steel and lightweight concrete structures system [J]. Journal of Building Structures,2016,37(4):1. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.04.001
- [7] 贾穗子,曹万林,任乐乐. 装配式轻钢框架-带暗支撑轻墙体组合结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(11):48
JIA Suizi, CAO Wanlin, REN Lele. Experimental study on seismic performance of fabricated composite structure of lightweight steel frame-lightweight wall with concealed support [J]. Journal of Building Structures,2018,39(11):48. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.11.006
- [8] 贾穗子,曹万林,王如伟,等. 适于低层农房的装配式轻钢边框薄墙板组合结构抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2018,48(2):323
JIA Suizi, CAO Wanlin, WANG Ruwei, et al. Experimental study on seismic performance of fabricated composite structure of thin slab with lightweight steel frame for low-rise housing [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(2):323. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2018.02.021
- [9] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(9/10):1080. DOI:10.1016/j.jclepro.2011.02.010
- [10] SOFI M, DEVENTER J S J V, MENDIS P A, et al. Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC) [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(9):3107. DOI:10.1007/s10853-006-0534-5
- [11] Standards Australia. Concrete structures: Australian standard association 3600 [S]. Sydney: Standards Australia International, 2004
- [12] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete: ACI 318-14 [S]. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute, 2002
- [13] European Committee for Standardization. Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings; Euro code 2 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [14] SUMAJOUW D M J, HARDJITO D, WALLAH S E, et al. Behavior and strength of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams [J]. Civil Engineering Dimension, 2005, 6(2):1020
- [15] DATTATREYA J K, RAJAMANE N P, SABITHA D, et al. Flexural behavior of reinforced geopolymer concrete beams [J]. International Journal for Computational Civil & Structural Engineering, 2012, 2(1):138
- [16] YOST J R, RADLINSKA A, ERNST S, et al. Structural behavior of alkali activated fly ash concrete. Part 2: structural testing and experimental findings [J]. Materials and Structures, 2013, 46(3):449. DOI 10.1617/s11527-012-9985-0
- [17] JEYASEHAR C A, SARAVANAN G, SALAHUDDIN M, et al. Development of fly ash based geopolymer precast concrete elements [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2013, 14(4):605
- [18] SUJATHA T, KANNAPIRAN K, NAGAN S. Strength assessment of heat cured geopolymer concrete slender column [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2012, 13(5):635

(编辑 赵丽莹)