

含 FRP 约束竖向钢筋搭接连接的预制 剪力墙抗震性能试验

金 峤¹,曲秀鹏²,李京龙³,胡嘉飞¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 上海中梁地产集团有限公司,云南 昆明 650100;
3. 上海中梁地产集团有限公司,辽宁 沈阳 110000)

摘 要 目的 研究 FRP 约束的装配式剪力墙结构竖向连接的可靠性. 方法 在采用该种连接方式的钢筋锚固性能试验和搭接性能试验的基础上,完成了 3 个包含该种连接方式的剪力墙试件的拟静力试验,分析钢筋直径、搭接长度、等代关系等参数对剪力墙抗震性能的影响. 结果 在搭接长度 $l_c = 1.04 l_a$ 情况下,剪力墙试件以压弯破坏为主,且与现浇试件的破坏形态相同;试件滞回曲线的滞回环饱满,耗能性能较好;试件延性系数分别为 4.3、3.9、4.6,极限位移角均不小于 $1/56$,表明试件延性性能较好. 结论 研究证明装配式剪力墙结构的“含 FRP 约束环的钢筋搭接连接”方法是可靠的,能够保证剪力墙装配节点区域内竖向钢筋的有效应力传递.

关键词 装配式混凝土结构;钢筋搭接;纤维增强聚合物(FRP);拟静力试验;抗震性能

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Seismic Performance Tests of Prefabricated Shear Walls with FRP-Confined Lap Connections of Vertical Reinforcements

JIN Qiao¹, QU Xiupeng², LI Jinglong³, HU Jiafei¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shanghai Zhongliang Real Estate Group Co. Ltd., Kunming, China, 650100; 3. Shanghai Zhongliang Real Estate Group Co. Ltd., Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the reliability of the vertical connection mode of prefabricated shear wall structure with FRP constraints, seismic behavior of three shear wall specimens using the proposed reinforcement connection method was studied by the pseudo-static test on the basis of the reinforcement anchoring test and the reinforcement lap performance test. In the test study, the effect of parameters, such as diameters, lap lengths and equivalent replacing relation of reinforcement, on the seismic performance of the shear wall were considered. The test results show: (1) all the shear

收稿日期:2020-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51878420);住房和城乡建设部科技攻关项目(2017-K9-057)

作者简介:金峤(1975—),男,副教授,博士,主要从事装配式剪力墙等方面研究.

wall specimens share the same compression bending failure as the conventional cast-in-situ specimens do, when the lap length equals to 1.04 (is the lap length specified by the Chinese Code); (2) the hysteretic loops of the specimens are full, and the energy dissipation performance is good; (3) the ductility coefficients of specimens are 4.3, 3.9 and 4.6, respectively, and the ultimate displacement angles of all the shear wall specimens are not less than $1/56$, both of which prove that the ductility of the specimens is excellent. The study indicates that the method of "lap connection of steel bars with FRP-restrained rings" for prefabricated shear wall structures is reliable, and can ensure the effective stress transfer between vertical reinforcements in the assembling joint area of shear walls.

Key words: prefabricated concrete structure; reinforcement lap; fiber reinforced polymer (FRP); pseudo-static test; seismic performance

装配式建筑符合我国建筑行业的发展趋势,并且在解放劳动力、节约资源等很多方面都具有优势,而发展装配式建造方式的关键技术在于构件节点连接的安全可靠性。近年来,国外学者对已有连接技术的设计、施工、储运和现场装配方法进行了深入总结^[1-3],并持续对一些新的连接方法开展了基于试验或数值分析方面的研究^[4-8]。在国内,钱稼茹等^[9]对竖向钢筋采用套筒浆锚连接方式和套箍后浇带连接方式的剪力墙试件进行了拟静力试验,通过对预制剪力墙构件的破坏形式以及耗能能力情况的对比分析,证明了套筒浆锚连接能有效传递竖向钢筋应力,是一种适合装配式剪力墙结构工程实践的有效受力钢筋连接形式;钱稼茹等^[10]对采用灌浆套筒连接的三层装配式剪力墙结构进行了结构足尺模型拟动力试验,发现该模型结构的破坏主要集中于窗下墙和连梁;焦安亮等^[11]提出一种环钢扣合锚接连接的新型装配式剪力墙结构连接方式,并对此种连接方式的剪力墙开展了墙体抗震性能等研究工作;邵晓峰等^[12]对约束浆锚连接的预制剪力墙试件进行了拟静力试验,证明了采用该种连接方式的预制装配式剪力墙结构的抗震性能基本等同于现浇式剪力墙结构;薛伟辰等^[13]对竖向采用螺栓连接装配式混凝土剪力墙进行了低周往复加载试验,验证了该种连接方式的有效性。

近年来,兼顾工程经济性和结构安全性,

国内已形成了以灌浆套筒连接和约束浆锚连接为行业重点推荐技术、其他多种新型连接技术不断涌现的发展态势。然而,已投入工程实践的各种主流连接技术在国内仍然存在很多问题。例如灌浆套筒连接对施工安装精度要求高,现场经常出现对中偏差的钢筋,造成构件装配困难;约束浆锚连接方式存在容易塌孔的弊端,对成孔质量的控制仍然是一个技术难题;后浇带连接方式的耗能能力差,接缝处混凝土容易产生错动;套筒挤压连接的造价高、延性较小,安装占用时间较长;螺栓连接装配时对精度要求较高,装配后螺栓可能会出现松动、脱落等问题。为了更好地推进装配式混凝土结构关键连接技术的实施和发展,切实做到“安全适用、技术先进、经济合理、确保质量”的技术创新原则,笔者提出了一种装配式剪力墙竖向钢筋新型连接方法,即“含 FRP 约束环的钢筋搭接连接”。在考虑钢筋直径、搭接长度、等代关系等参数基础上,设计并制作了 3 个剪力墙试件,并相继进行了拟静力试验,用以验证该种新型连接方式的有效性。

1 试验

1.1 试件设计

根据 FRP 约束环长度、连接钢筋直径以及相应钢筋等代关系等墙体节点参数的不同,本次试验共设计了 3 个装配式剪力墙试件,边缘构件竖向钢筋分布间距均为

105 mm,其他参数见表 1.

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of test specimen mm

试件编号	竖向钢筋直径	竖向搭接长度	中间部分竖向钢筋分布间距
FSW1	12	386	240
FSW2	14	451	300
FSW3	16	515	400

试件由加载顶梁、剪力墙和地梁 3 部分组成. 加载梁和墙整体浇筑,地梁单独浇筑. 剪力墙试件与地梁采用 FRP 约束环灌浆连接(简称 FRP 约束连接),地梁与墙连接的表

面凿毛,露出粗骨料. 在剪力墙与地梁之间采用 FRP 约束环的方式进行连接,在钢筋锚固和钢筋搭接等两组基础性试验之上^[14-15],通过计算失效概率并对比可靠指标^[16],在满足结构可靠度要求的前提下,计算出钢筋搭接长度为 l_1 (l_a 为规范要求的搭接长度). 3 个试件竖向等代钢筋直径分别为 12 mm、14 mm、16 mm,混凝土采用 C40,轴压比设计值为 0.25. 所有剪力墙试件的几何尺寸相同(见图 1). 试件在设计过程当中遵循强剪弱弯规则,满足现行规范要求^[17].

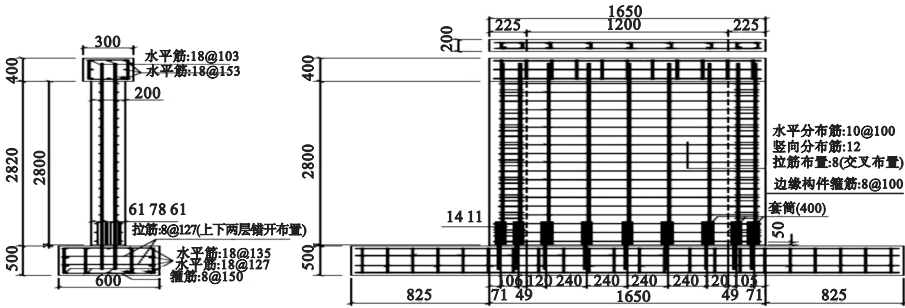


图 1 试件 FSW1 配筋图

Fig. 1 Reinforcement diagram of specimens FSW1

1.2 FRP 约束环的制作与现场施工流程

FRP 约束环为纤维增强聚合物材料,采用往复缠绕法制作而成(见图 2). FRP 约束环的内外径分别为 53 mm 和 56 mm,壁厚为 3 mm. 为增大与内外混凝土的粘结力,在约束环壁设置有螺旋形的内肋和外肋. 内外肋条的宽度 20 mm,高 3 mm,相邻肋条之间的间距 10 mm,肋条与约束环壁之间以 15° 倾角进行环绕.

FRP 约束连接方法见图 3. 在上层预制构件底部安装 FRP 约束环,并将预埋钢筋提前置于约束环内,在进行拼接时,将下层预制构件的外深连接钢筋插入约束环中进行搭接连接. 此种连接方式不仅减小了钢筋的搭接长度,还提供了一定搭接范围的空间来降低施工难度. 相对于以往“套筒灌浆连接”的方式更加便宜、经济,且解决了成孔问题.

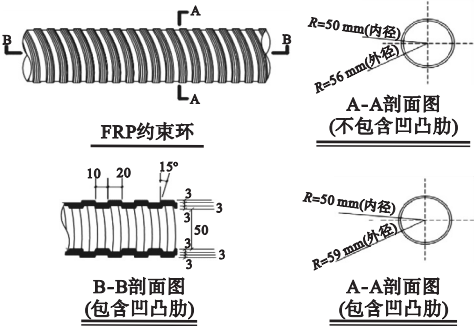


图 2 FRP 约束环示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FRP constraint rings

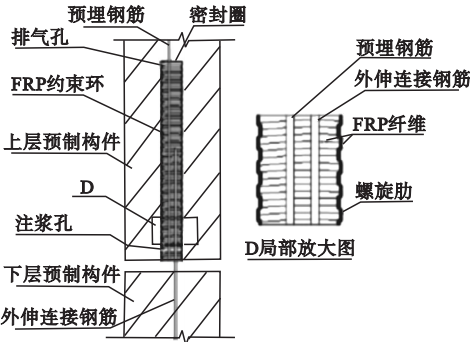


图 3 FRP 约束环搭接及连接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bond and connection of FRP constraint rings

FRP 约束连接方法的现场施工流程简单实用,安装精度要求不高(见图4). 首先将FRP 套筒与钢筋笼一同固定于模板上,浇筑形成预制剪力墙试件;待试件养护后进行剪力墙体与地梁的拼接;拼接完成之后,采用由水泥、混凝土外加剂、细骨料和其他辅助材料

按照一定比例配合而成的高强度灌浆料进行灌浆连接. 在进行灌浆时,利用灌浆机从剪力墙一边的底部注入灌浆料,当顶部的排气孔有灌浆料流出时,用木塞将排气口塞住,等灌浆料形成强度之后,则剪力墙与地梁部分就装配安装完成,形成了一个整体结构.

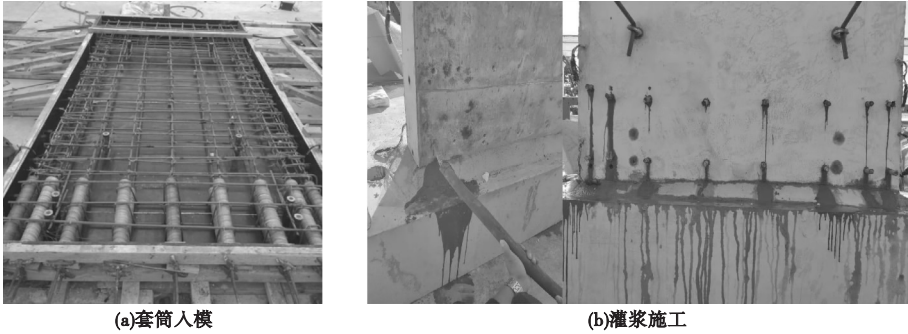


图4 FRP 套筒入模及其灌浆

Fig. 4 FRP sleeves into mold and grouting rings

1.3 材料性能

实测钢筋屈服强度 f_y 和极限强度 f_u 结果见表2(取同一直径3根钢筋材性试验的平均值). 采用钻芯取样法^[18]测得混凝土的抗压强度,FSW1 为43.42 MPa,FSW2 为42.31MPa,FSW3 为41.65 MPa. 经过实测,灌浆料的抗压强度平均值为88.6 MPa. FRP 约束环的主要材料为玻璃纤维,其极限拉伸强度为1 400 MPa,弹性模量为70 GPa,其他参数见表3.

验的过程当中始终利用千斤顶对刚性分配梁加载1 313 kN的竖向荷载,同时利用作动器对试件加载梁施加水平荷载,在施加水平荷载的过程当中首先采用力加载形式进行控制,当试件屈服后,再采用位移加载形式进行控制. 力加载控制时,每级循环一次,位移加载控制时,每级循环三次,逐级增大且往复进行. 当水平力下降到极限荷载的85%或者水平位移达到设计值时,则完成了加载的过程.

表2 钢筋强度实测值

Table 2 Measured strength of steel bars		
钢筋直径/mm	f_y /MPa	f_u /MPa
12	456	609
14	414	626
16	436	606

表3 FRP 约束环材料参数

Table 3 Material table of FRP restraint rings			
抗拉强度/ MPa	环向强度/ MPa	断裂伸长率/ %	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
100	350	3.5	1.8

1.4 加载制度与测量内容

加载装置示意图如图5所示. 在整个试

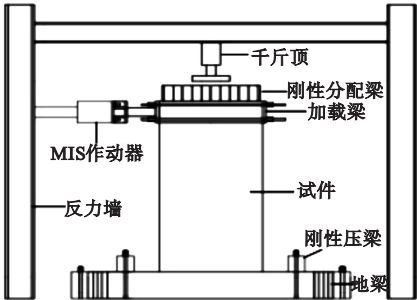


图5 加载装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of loading device

试验测量的主要内容包括顶梁加载点的水平力和水平位移、剪力墙中搭接的竖向钢筋应片、FRP 应变以及混凝土应变. 3个剪力墙试件均布置水平位移计和竖向位移计,且布置位置相同(见图6). 共布置5个水平位

移计,编号为W1~W5.其中W1用来测量顶梁高度中心处的水平位移;W2、W3及W4用来测量墙体的水平位移;W5用来测量地梁的水平错动值.竖向位移计共布置4个,编号为W6~W9,W6和W7用来测量地梁在试验过程中的翘曲值,W8和W9用于测量剪力墙根部与地梁间的相对转动位移.

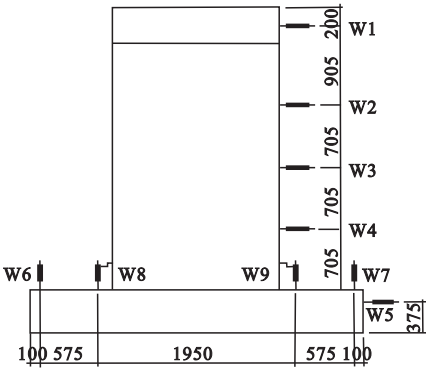


图 6 位移计布置图

Fig. 6 Displacement meter layout

2 破坏过程与破坏形态

剪力墙试件的最终破坏形态及裂缝形成状况见图7.从图中可以看出,3个试件的破坏过程较为相似,笔者以试件FSW2为例分析其破坏过程.当加载到240 kN时,墙体与地梁之间的接缝形成裂缝;当加载到300 kN时,剪力墙体约430 mm处出现首条墙体裂

缝,此位置不在预埋FRP约束环的范围之内.当加载到360 kN时,墙体首条裂缝进行开展延伸,且并没有新的裂缝产生.当加载到420 kN时,在首条裂缝的上部出现第2条裂缝.当加载到480 kN时,在第2条裂缝的上端又出现3条新裂缝;此时构件进入了屈服阶段,开始位移加载控制过程.采用 $\Delta=7\text{ mm}$ 的位移控制进行加载,在1 Δ 加载循环时,原有的裂缝已经延伸接近墙体1400 mm的高度;在2 Δ 加载循环时,在墙体底部两端处出现了新的裂缝,原有裂缝的周围也延伸出一些分支裂缝;在3 Δ 加载循环时,出现多条新的裂缝,原有裂缝不断进行延伸交叉,此时最高裂缝处已经达到了墙体1400 mm的高度;在5 Δ 加载循环时,裂缝继续斜向上开展延伸,不断有新的裂缝在墙体两侧产生,且高度超过了1400 mm,在此过程中出现了较大的脆性响声;在7 Δ 加载循环时,剪力墙不再产生新裂缝,已有斜裂缝继续斜向上延伸,向下已经到达墙体的底部,相互交错的裂缝之间也出现了竖向贯通裂缝,在此期间一直伴有较大的声响,在墙体下部两端混凝土出现大块开裂并脱落现象;在8 Δ 循环加载时,部分斜裂缝继续延伸,剪力墙根部与地梁接缝处产生明显的分离裂缝,此级三圈循环加载完后,外侧竖向钢筋被拉断.

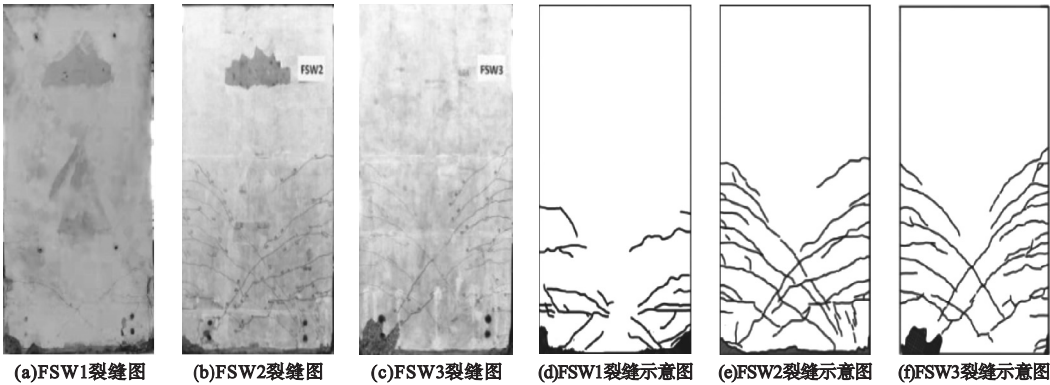


图 7 试件最终破坏图

Fig. 7 Final failure diagrams of specimen

当试验加载结束后,虽然墙体两侧根部混凝土发生了严重破坏(见图8),但所露出的FRP约束环螺旋凹凸肋基本完整,未发生解离断丝的现象,且相对于内部灌浆料与外

部混凝土之间没有出现明显的粘结滑移现象,仍然能对内部灌浆料起到约束作用,说明该种钢筋连接方式在整个试验中能够持续地保障竖向钢筋的连接性能,从而能够规避整体剪力墙抗震性能的提前失效。



图8 FSW2 试件墙根处破坏图

Fig. 8 Close-up of failure at the wall root of FSW2 specimen

3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线

试件滞回曲线见图9。横向水平位移选取试件加载顶梁中点处,距离地梁顶面3 020 mm,曲线的正值为构件的正向推加载,负值为构件的反向拉加载。分析滞回曲线可以看出,该新型连接方法能够保证竖向钢筋的应力传递,从而使得剪力墙滞回曲线的滞回环饱满,保证墙体具有较好的耗能性能。

3.2 骨架曲线

试件骨架曲线见图10。从图中可以看出,随着加载的不断加大,构件历经了弹性阶段、弹塑性变形阶段以及强度退化阶段。在力控制加载阶段,骨架曲线处于弹性阶段,三条曲线基本重合,表明三个试件的初始刚度基

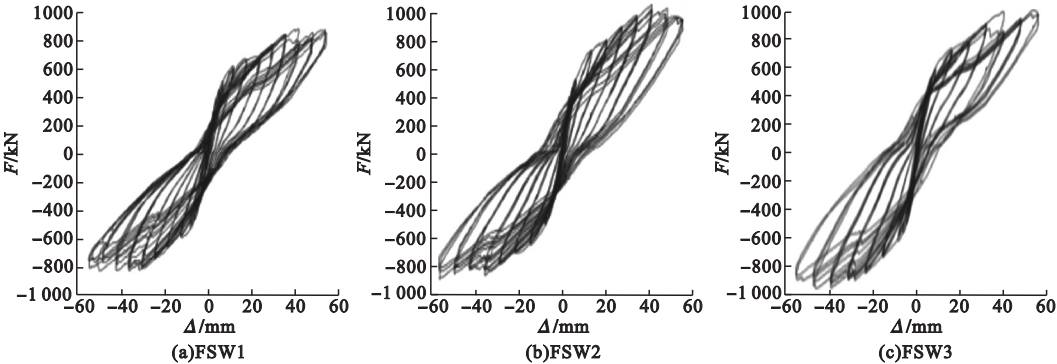


图9 滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curves of specimens

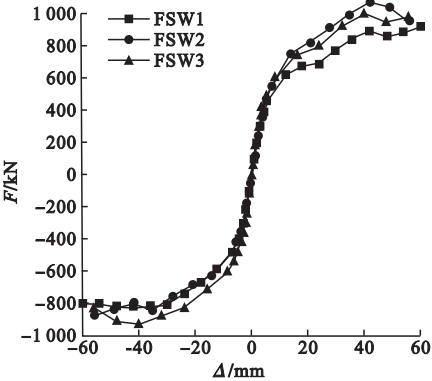


图10 骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of specimen

本相同;随着荷载的增加,三个试件的斜率逐渐降低,其中试件 FSW1 曲线斜率下降得最快,试件都进入了弹塑性阶段;当采用位移加载进行控制时,三条曲线都表现出了较为明显的刚度退化现象;当曲线经历了峰值后,试件 FSW1 和试件 FSW3 的曲线方向出现波动,曲线先下降后上升,试件 FSW3 的骨架曲线负方向出现波动,同样曲线先下降后上升,此时骨架曲线所对应的另一方向力均呈现下降趋势。

3.3 刚度退化分析

在试件滞回曲线中,每级循环中最大位

移的割线刚度定义为等效刚度. 图 11 为试件在循环往复荷载作用下的刚度退化曲线. 综合分析 3 个试件的刚度退化曲线可知, 曲线的变化规律十分相似. 当剪力墙表面产生裂缝后, 结构的刚度开始下降, 在加载前期, 刚度退化曲线的斜率变化率较大, 随着荷载不断加大, 试件刚度退化曲线的斜率变化率逐渐减小, 最后斜率趋近于零.

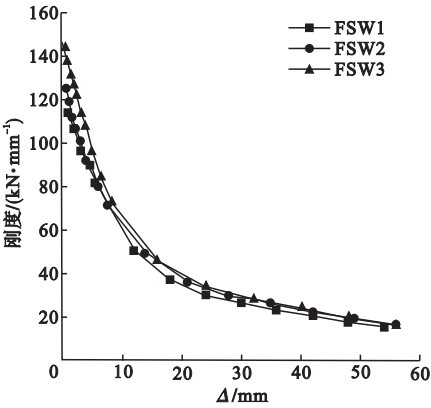


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degradation curves

3.4 延性系数和极限位移角

试件延性系数和极限位移角结果见表 4. 从表中可以看出, 试件 FSW3 的延性系数略大, 且所有剪力墙试件的延性系数均大于 3.4, 而极限位移角均不小于 1/56.

表 4 试验结果

Table 4 Ductility coefficient of components					
试件编号	方向	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数	极限位移角
FSW1	推	14.11	54	3.83	1/56
	拉	11.48	54	4.7	1/56
FSW2	推	11.42	56	3.41	1/54
	拉	12.95	56	4.32	1/54
FSW3	推	12.76	56	4.39	1/54
	拉	11.57	56	4.84	1/54

3.5 耗能能力

通过采用计算封闭滞回环面积的大小对构件进行耗能性能分析. 试件能量耗散曲线如图 12 所示, 从图中可以看出, 3 条曲线随加载位移的发展趋势相同, 展现出良好的耗能能力.

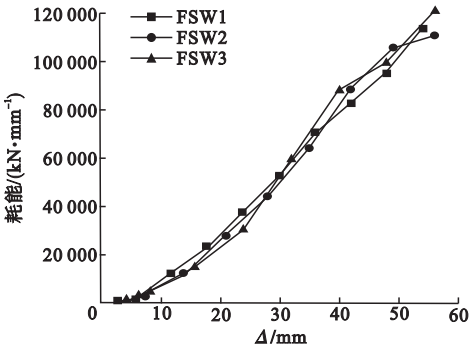


图 12 试件能量耗散曲线

Fig. 12 Energy dissipation diagram of specimens

运用等效黏滞阻尼计算公式进行相关计算, 得到 3 个试件的位移和等效黏滞阻尼系数关系曲线 (见图 13). 由图可知, 3 个试件的等效黏滞阻尼系数均在 0.10 ~ 0.27.

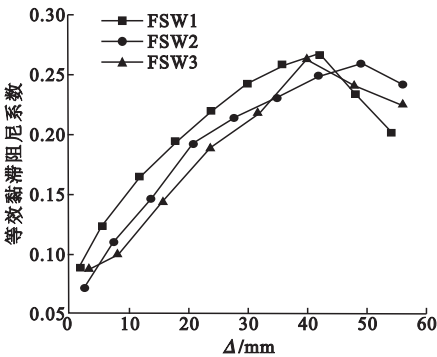


图 13 等效黏滞阻尼系数曲线

Fig. 13 Diagram of equivalent viscous damping coefficient

4 结 论

- (1)3 个墙体试件的裂缝开展过程相似, 墙体上裂缝总体分布均匀, 与现浇剪力墙试件裂缝开展规律一致. 最终破坏形式均为边缘构件处的竖向钢筋颈缩屈服后被拉断, 墙根底部处混凝土压碎后脱落.
- (2)在整个加载过程中, FRP 约束环与内部灌浆料和外部混凝土均没有产生明显的滑移, 并且无明显的破坏现象; 同时搭接区域的竖向连接钢筋亦没有出现粘结滑移, 说明 FRP 约束连接方法能够保证竖向钢筋有效传递应力.
- (3)通过对比分析抗震性能指标可知,

不同参数下墙体抗震性能基本相同,均具有较好的承载力、延性性能和耗能能力。三个试件的极限位移角分别为 $1/56$ 、 $1/54$ 和 $1/54$, 均满足规范要求。

参考文献

- [1] PCI Industry Handbook Committee. PCI design handbook: precast and prestressed concrete [S]. Chicago: Precast Concrete Institute, 2017.
- [2] American Concrete Institute. Committee 318; ACI 318 - 14. Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 2014.
- [3] Architectural Institute of Japan. JASS10: Japanese architectural standard specification for precast concrete work [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2013.
- [4] DAL LAGO B, BIONDINI F, TONIOLO G. Seismic performance of precast concrete structures with energy dissipating cladding panel connection systems [J]. Structural concrete, 2018, 19(6): 1 - 19.
- [5] BRUNESI E, NASCIMBENE R. Experimental and numerical investigation of the seismic response of precast wall connections [J]. Bulletin of earthquake engineering, 2017, 15(12): 5511 - 5550.
- [6] ASHOK M K, THANGAM J S, GOVINDHARAJAN V. Experimental investigation of precast horizontal wall panel connection using reinforcement by push off test [J]. International journal for scientific research & development, 2016, 4(3): 2321 - 2335.
- [7] SRITHARAN S, AALETI S, HENRY R S, et al. Precast concrete wall with end columns (PreWEC) for earthquake resistant design [J]. Earthquake engineering structure dynamics, 2015, 44(12): 2075 - 2092.
- [8] ROSSLEY N, AZIZ A A, CHEW H, et al. Behaviour of vertical loop bar connection in precast wall subjected to shear load [J]. Australian journal of basic & applied sciences, 2014, 8(1): 370 - 380.
- [9] 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.)
- [10] 钱稼茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 26 - 38.
(QIAN Jiaru, HAN Wenlong, ZHAO Zuozhou, et al. Pseudo-dynamic substructure test on a 3-story full-scale model of prefabricated concrete shear wall structure with rebars splicing by grout sleeves [J]. Journal of building structures, 2017, 38(3): 26 - 38.)
- [11] 焦安亮, 张鹏, 李永辉, 等. 环筋扣合锚接连接预制剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5): 103 - 109.
(JIAO Anliang, ZHANG Peng, LI Yonghui, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with annular closed reinforcements [J]. Journal of building structures, 2015, 36(5): 103 - 109.)
- [12] 邵晓峰. 预制混凝土剪力墙抗震性能试验及约束浆锚搭接极限研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
(TAI Xiaofeng. Research on seismic performance of precast RC shear wall and limited length of overlap-joint restraint grouting-anchoring [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [13] 薛伟辰, 古徐莉, 胡翔, 等. 螺栓连接装配式混凝土剪力墙低周反复试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014(增刊2): 221 - 226.
(XUE Weichen, GU Xuli, HU Xiang, et al. Experimental study of assembled monolithic concrete shear wall with bolted connection under low reversed cycle loading [J]. China civil engineering journal, 2014(S2): 221 - 226.)
- [14] 温学彬. 含 FRP 约束环钢筋锚固性能试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(WEN Xuebin. Experimental study on anchorage performance of steel bars with FRP confined rings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [15] 高猛. 含 FRP 约束的装配式剪力墙钢筋搭接连接研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(GAO Meng. Study on the overlapping connection of reinforcements in prefabricated shear wall with FRP confined rings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [16] 李京龙. 含 FRP 约束的装配式剪力墙结构竖向连接抗震性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
(LI Jinglong. Study on seismic performance of vertical connection in precast shear wall structure with FRP constraint [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.)
- [17] 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, 2011.
(China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [18] 中国建筑科学研究院. 钻芯法检测混凝土强度规程: CECS03—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
(China Academy of Building Research. Technical specification for testing concrete strength with drilled core method: CECS03—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)