

双面叠合装配式管廊侧墙面外抗震性能试验

赵 密, 石少华, 李广帆, 程小卫, 钟紫蓝

(北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 为研究采用螺旋箍筋套筒底节点连接的预制双面叠合式管廊侧墙在面外荷载作用下的受力变形性能,对 2 个采用该节点连接的足尺侧墙试件进行了不同轴压比下低周往复加载试验,并与对应 2 个现浇试件作对比,初步揭示了螺旋箍筋套筒底节点和竖向轴压比对管廊侧墙面外抗震受力变形性能的影响。试验结果表明:两种试件滞回曲线均较为饱满,具有良好的抗震耗能能力,满足装配式结构抗震变形设计要求;叠合装配式试件上部区域剪切变形均高于现浇试件,且裂缝遍布整个墙体高度范围,具有良好的面外变形能力。

关键词: 双面叠合侧墙;综合管廊;拟静力试验;面外加载;螺旋箍筋套筒底节点

中图分类号: TU924;TU317. +1

文献标志码: A

Out-of-Plane Pseudo-Static Test on Double-Sided Laminated Side Wall of Utility Tunnel

ZHAO Mi, SHI Shaohua, LI Guangfan, CHENG Xiaowei, ZHONG Zilan

(Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the mechanical deformation performance of prefabricated double-sided superimposed utility tunnel side wall connected by spiral stirrup sleeve bottom joint under out of plane load, two full-scale side wall specimens connected by this joint were tested under low cyclic reciprocating loading at different axial compression ratios, and compared with two cast-in-situ specimens, The effects of the bottom joint of the spiral stirrup sleeve and the vertical axial compression ratio on the seismic deformation performance of the side wall of the utility tunnel were preliminarily revealed. The test results show that the hysteretic curves of composite precast specimens and cast-in-situ specimens are

relatively full, and have a good seismic energy dissipation capacity; which meet the seismic deformation design requirements of the fabricated structure; The shear deformation of the upper area of the composite assembly specimens are higher than that of the cast-in-situ specimens, and the cracks are all over the whole height range of the wall, which has good out of plane deformation ability

Keywords: double sided laminated side wall; utility tunnel; quasi static test; out of plane loading; spiral stirrup sleeve bottom joint

近年来,为了加快城市现代化基础设施的建设步伐,预制混凝土装配式综合管廊^[1]得到了广泛推广和应用。其中,叠合板式管廊^[2]采用了预制的板式构件作为墙体中心后浇部分的模板,这种构件的运输和拼装都十分便利,不仅可以缩短工期,还具有环保优势。此外,叠合板式管廊的技术要求相对较低,可以适用于多舱、大截面的综合管廊,其整体性和防水性能均优于其他预制管廊形式。因此,叠合板式管廊是一种具有良好发展前景的预制混凝土综合管廊建造形式。

在 20 世纪 70 年代,德国^[3]率先出现了装配叠合式结构,随后这种结构逐渐在欧洲、日本和中国得到广泛的应用。在国外,装配叠合式结构一般被用作非承重结构,例如内隔墙或外墙等,其中叠合板中间的填充物大多采用保温材料^[4]。Preinstorfer 和 Kollegger 等^[5]进行了大量研究,证明了在单调荷载条件下,装配叠合式钢筋混凝土剪力墙可以视为实心墙。此外,Chong 等^[6]通过增加预留插筋数量,加强了双面叠合剪力墙接缝处的非弹性变形能力,将非弹性变形以塑性铰的形式从接缝处转移到墙板的

收稿日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978020); 国家自然科学基金联合基金项目(U1839201)

第一作者: 赵 密,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为土结构相互作用。E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn

通信作者: 钟紫蓝,副研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为地下结构抗震。

E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn



论文
拓展
介绍

上部区域,从而改善了双面叠合剪力墙的抗震性能。

目前,我国学者已就叠合板式管廊受力变形特性进行了系列研究^[7]。田子玄^[8]通过预制叠合板方式设计综合管廊结构试验,对不同部位螺旋箍筋连接节点及管廊整体结构进行了面外单向静力试验,验证了叠合板式综合管廊节点连接方法的可靠性;郭福能^[9]、颜良等^[10]进行了一系列叠合板管廊环锚搭接边节点试件的单向静力实验,研究了带桁架钢筋组合墙边节点在压弯组合作用下的受力性能规律,并对采用该节点的管廊受腋角影响进行了数值分析。魏奇科等^[11]针对插筋搭接节点体积配箍率和纵筋锚固长度分别对叠合板管廊边节点及中节点进行了面内低周反复荷载试验研究,给出了节点区最优配箍率的建议,并提出将节点外侧纵筋锚固长度增加至抗震锚固长度可有效防止节点锚固破坏。薛伟辰等^[12]进行了叠合板式管廊侧墙和中壁插筋搭接节点试件的面外低周反复荷载试验,并对现行装配式混凝土结构技术规程提出了适当缩减安全余量的建议。

螺旋箍筋套筒连接方法是我国首创的一种应用于住宅产业化生产的预制混凝土结构的钢筋连接方法^[13]。通过大量的节点单向拉伸试验,姜洪斌等^[14]研究了箍筋搭接长度对节点区域搭接钢筋及混凝土的拉伸破坏规律;钱稼茹等^[15]通过对比浆锚搭接节点装配剪力墙试件与现浇剪力墙试件的面内低周反复荷载试验,发现装配式与现浇剪力墙试件的面内破坏形态基本相同,同时证明了留洞浆锚形式具有更好的连接性能;Xiao等^[16]研究了螺旋箍筋底节点的双面叠合剪力墙的面内力学性能,发现预制板和内部现浇混凝土协同较好;薛伟辰等^[17]研究了竖向钢筋采用单排螺旋箍筋套筒连接节点对剪力墙抗震性能的影响,发现其与双排构造筋剪力墙相比在达到峰值后刚度退化变快。Mohammadamin等^[18]采用新型的扭转对向矩形螺旋箍筋进行了抗剪加固梁柱节点的试验和数值研究,发现该新型连接节点形式可一定程度上提高节点的耗能能力和延性。综上所述,已有的关于螺旋箍筋套筒连接节点的研究主要集中在面内滞回荷载下试件抗震力学性能,大多考虑地上框架结构剪力墙提供面内抗水平剪切的受力状态,一般设计墙厚为200 mm。地下管廊作为地下结构,侧墙设计厚度一般较大,为采用螺旋箍筋套筒制作预制构件提供了空间便利,并且此种连接方式造价相对灌浆套筒连接较低,是一种经济效益良好的节点连接方式。

已有研究充分证明了地上螺旋箍筋套筒剪力墙

作为面内受力构件可以等同现浇,但不同于地上建筑,管廊作为长线性结构,侧墙的抗震安全设计主要关注面外的受力及变形特性,且管廊埋置深度一般为1~5 m,侧墙承受轴压力远低于地上结构。针对此节点应用于综合管廊侧墙在面外反复荷载作用下的力学特性和损伤发展尚未有系统深入的研究,本文设计了2个足尺预制叠合式管廊侧墙试件在0.05和0.10试验轴压比下的低周往复荷载试验,并与对应2个现浇试件进行对比。对比研究采用螺旋箍筋套筒加强搭接连接节点的叠合装配式管廊侧墙试件与现浇试件在不同低轴压力下的滞回力学特性及损伤破坏模式,以促进叠合板式综合管廊的发展和推广,同时也为叠合装配式管廊侧墙抗震设计提供研究参考。

1 试验概况

1.1 试验方案

本文针对某城市地下综合管廊工程,参考相关标准规范^[19],设计了4组地下管廊侧墙底节点足尺构件面外拟静力加载试验,包括2组预制式管廊侧墙试件(precast wall, PCW1、PCW2)和2组现浇侧墙试件(RCW1、RCW2)作为对照。考虑管廊在横断面受地震力作用下侧墙面外受力变形特性、路面动态荷载及地震瞬时竖向惯性力引起的轴压变化等因素,将RCW1和PCW1轴压比设计为0.05,RCW2和PCW2轴压比设计为0.1。试件的几何尺寸及钢筋布置如图1所示,每个试件均由加载梁、墙体和地梁三部分组成,墙体高宽比均为1。螺旋箍筋套筒连接节点构造如图2所示,除连接节点外,现浇试件的钢筋配筋与结构形式与预制试件完全一致。试件墙体设计总厚450 mm,两侧叠合板各厚100 mm,为螺旋箍筋套筒的预留和安装提供充足作业空间。

1.2 材料性能

4个侧墙试件均采用C40混凝土和HRB400钢筋,装配试件的套筒内部和拼接缝区域采用C60灌浆料。混凝土和钢筋的强度参数试验值分别见表1和表2。

1.3 加载方案

本次试验在北京工业大学防灾减灾及防护工程实验室进行,研究墙体底节点在面外往复荷载作用下的破坏模式。如图3所示,试件顶部通过加载梁中部两个螺栓与水平作动器紧密连接,底部通过4个竖向螺栓与地基梁锚固。试验在加载梁顶部施加

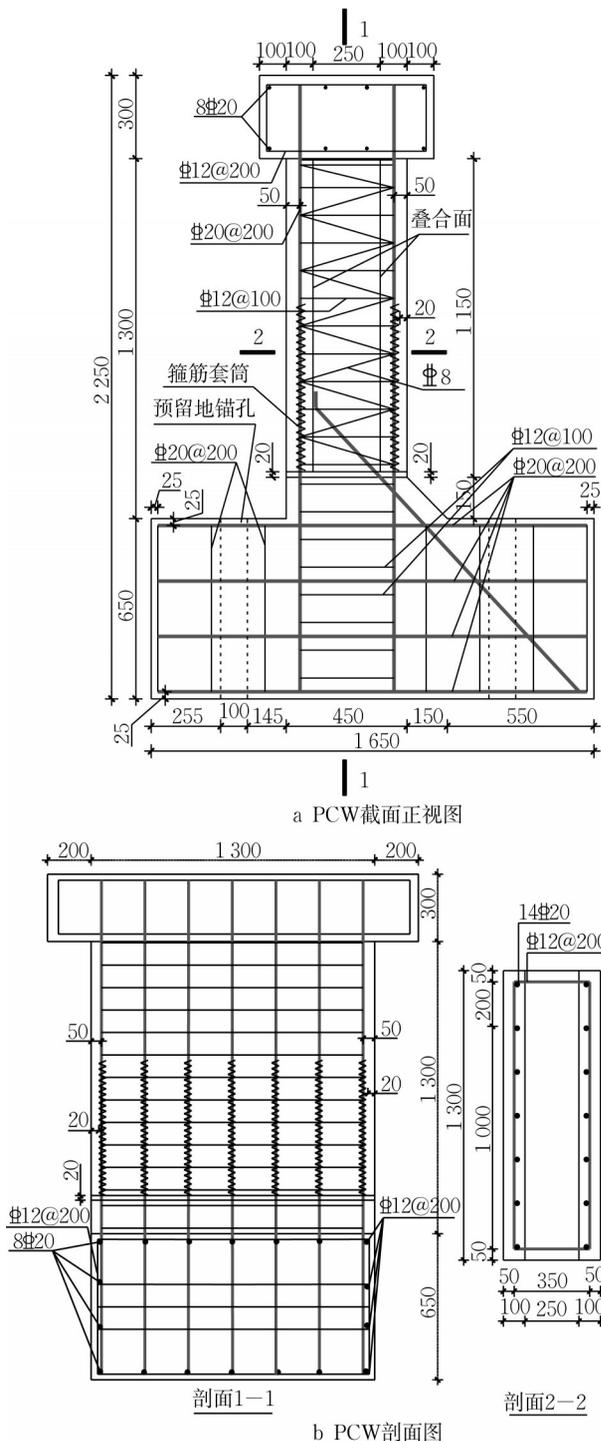


图 1 双面叠合试件施工图(单位:mm)

Fig. 1 Construction drawing of double-sided laminated specimen(unit: mm)

竖向恒定荷载,并在加载梁中部进行水平循环加载。如图 4 所示,通过水平位移计监测墙体的真实水平位移,以及与作动器直接相连的通道监测轴压力水平及加载梁处的水平反力。拉线式位移计负责监测与剪切变形计算有关的位移值和水平接缝区域的裂缝张开量水平。规定水平作动器向右推为正向加

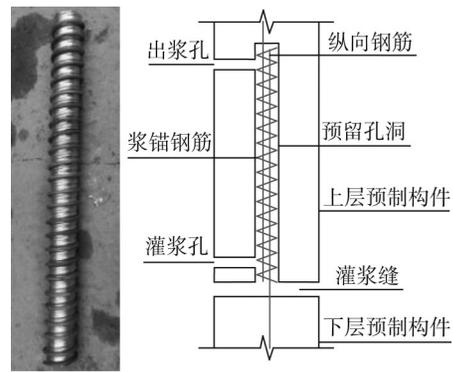


图 2 箍筋套筒节点示意图

Fig. 2 Details of lap joint

表 1 混凝土力学性能指标

Tab. 1 Mechanical property index of concrete

试件		$f_{cu,k}/\text{MPa}$	f_{tk}/MPa	$E_c/10^4\text{MPa}$
RCW1、	基座	42.9	2.5	3.3
RCW2	墙体及加载梁	44.1	2.5	3.3
	基座	42.9	2.5	3.3
PCW1、	预制板	44.1	2.5	3.3
PCW2	后浇区域	47.9	2.6	3.4
	灌浆料	61.5	3.1	3.6

表 2 钢筋力学性能指标

Tab. 2 Mechanical property index of reinforcement

直径/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	$E_s/10^4\text{MPa}$	延伸率/%
8	434.1	650.8	20.0	14.0
12	428.6	649.5	20.0	15.0
20	421.3	600.8	19.9	19.0

载,向左拉为负向加载,并通过预留的钢筋应变片监测搭接区域上下钢筋应变发展。

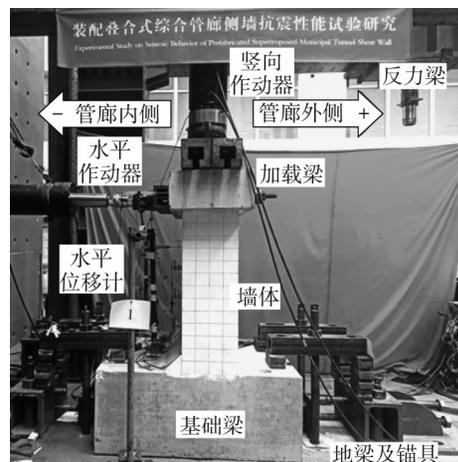


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading devices

本次试验采用力-位移联合加载,首先循环加载 5 次至 300 kN 以压密缝隙并确保仪器正常工作,每级循环一次。随后以墙体纵向钢筋屈服时的整数倍

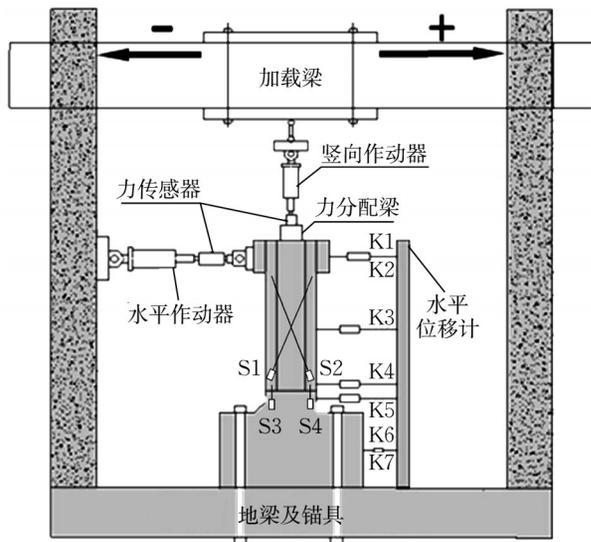


图4 传感器布置

Fig. 4 Sensor arrangement

位移进行循环加载,每级循环两次,加载制度如图5所示,图中, P_y 为极限载荷, P_c 为开裂载荷。

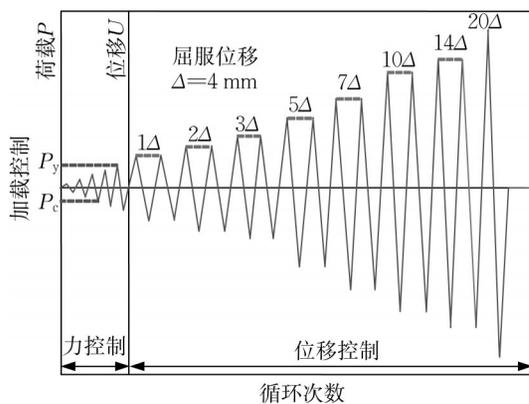


图5 试验加载制度

Fig. 5 Test loading system

2 裂缝发展及破坏形态

2.1 现浇试件

0.05轴压比下,现浇侧墙试件RCW1最终破坏形态如图6a所示,自下而上800 mm高度范围内多条横向贯穿裂缝、管廊内侧节点区($h=0\sim 150$ mm高度范围)混凝土局部压溃脱落,节点区外侧混凝土自400 mm高度处斜向左下发展的剪切裂缝与水平裂缝包围的“三角形区域”出现局部与整体分离趋势,最终节点区外侧混凝土产生“带状”剥落,破坏模式为节点区外侧斜拉破坏。

0.10轴压比下,现浇侧墙试件RCW2最终破坏形态为图6b,与RCW1类似,但裂缝密度更低,腋角

上部横向裂缝更宽,在边缘部位发生局部压溃剥落,破坏模式为腋角上部横向剪切破坏与斜剪破坏。

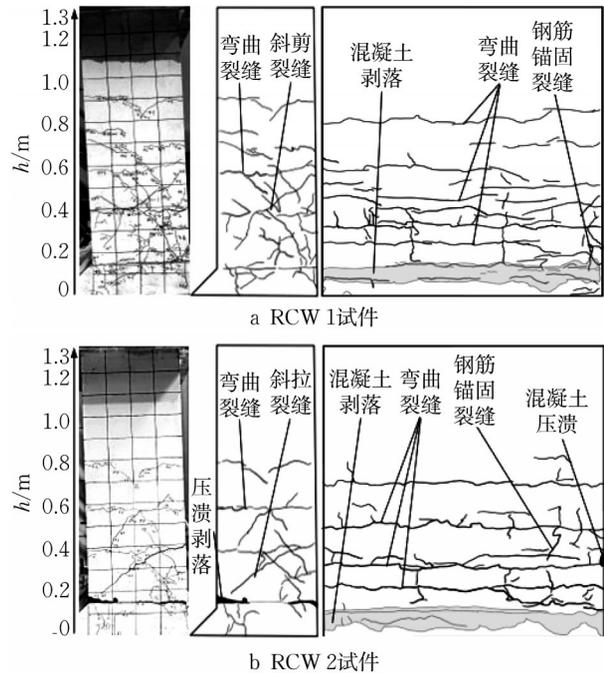


图6 现浇试件最终破坏形态及裂缝分布

Fig. 6 Final failure mode and crack distribution of cast-in-situ specimens

2.2 叠合装配试件

在0.05轴压比下,箍筋套筒连接试件PCW1的最终破坏模式如图7a所示,墙体外侧产生多条横向贯穿裂缝和轻微竖向钢筋锚固裂缝;墙体截面处的裂缝布满整面墙体,两侧叠合板为自上而下发展的横向受拉裂缝,核心区混凝土为自上而下发展的斜向剪切裂缝。最终墙体内侧拼接缝处产局部压溃剥落和段状松动,横向拼接缝未产生明显切向滑移,两侧叠合板与核心区混凝土竖向拼接缝产生轻微切向滑移,且外侧滑移略大。试件的最终破坏模式为管廊根部拉压破坏及核心区混凝土斜剪破坏。

0.10轴压比下,箍筋套筒连接试件PCW2的最终破坏模式如图7b所示,随着荷载等级提高,墙体外侧产生多条水平贯穿受拉裂缝,全高1300mm范围均有分布。与试件PCW1区别如下:PCW2在正向加载时,墙体外侧上部区域产生部分受拉裂缝及竖向锚固裂缝;PCW2墙体截面处裂缝分布范围与PCW1有明显差异,核心区混凝土中部一定范围内无裂缝;PCW2两侧叠合板自上而下的受拉裂缝呈30°倾斜发展,并与核心区混凝土的斜向裂缝衔接过渡。加载中期,PCW2两侧叠合板的受拉裂缝向上发展,但核心区混凝土裂缝并未继续向上发展,只是

底部裂缝逐渐加密。最终两侧叠合板受拉裂缝发展到墙体顶部并逐步向核心区混凝土发展,在核心区混凝土中部及以上一定区域内始终未发现明显裂缝。横向拼接缝部位未产生明显切向滑移,两侧叠合板与核心区混凝土竖向拼接缝在中上高度范围内产生轻微错动,且外侧错动较大,达到1.5 mm,内侧错动在0.5 mm左右。试件的最终破坏模式为拼接缝受拉破坏、墙体斜剪破坏及竖向拼接缝错动。

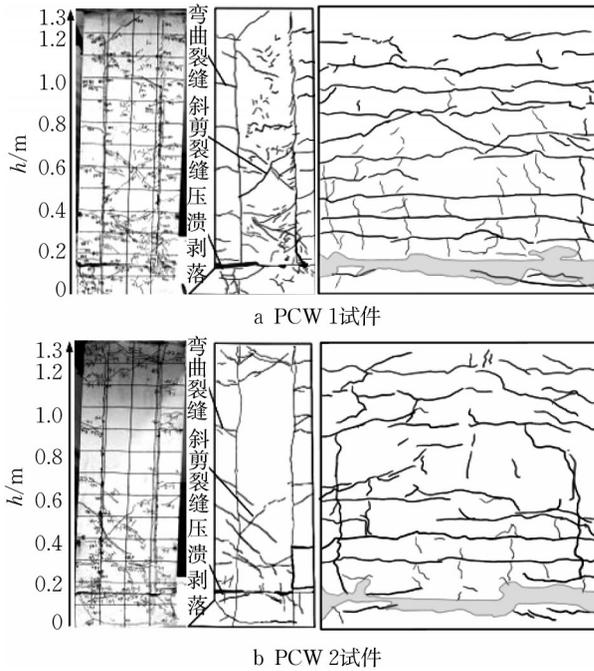


图7 预制叠合试件最终破坏形态及裂缝分布

Fig. 7 Final failure mode and crack distribution of prefabricated composite specimens

2.3 小结

综合分析试件裂缝发展和破坏模式,发现两种试件的裂缝发展规律相似,最终破坏都以侧墙角部破坏为主,且墙体角部外侧裂缝比内侧密集。现浇试件裂缝主要集中在距墙底800 mm高度范围内,底部更密集;预制试件墙体外侧裂缝遍布整面墙体,上下分布均匀。在墙体断面处,现浇试件以水平裂缝为主,预制试件以斜裂缝为主,这可能是因为螺旋箍筋套筒提高了内外侧预制板的受拉强度,减缓了拉应力向核心区混凝土的发展,导致核心区混凝土多表现为受剪破坏。

3 试验结果及分析

3.1 水平侧向荷载-位移滞回曲线

图8为现浇整体试件RCW1、RCW2和预制试

件PCW1、PCW2在面外低周循环拟静力荷载作用下的水平荷载(F)-变形(Δ)关系曲线,横轴表示加载梁中部的水平位移控制荷载,纵轴表示对应的的水平承载力。

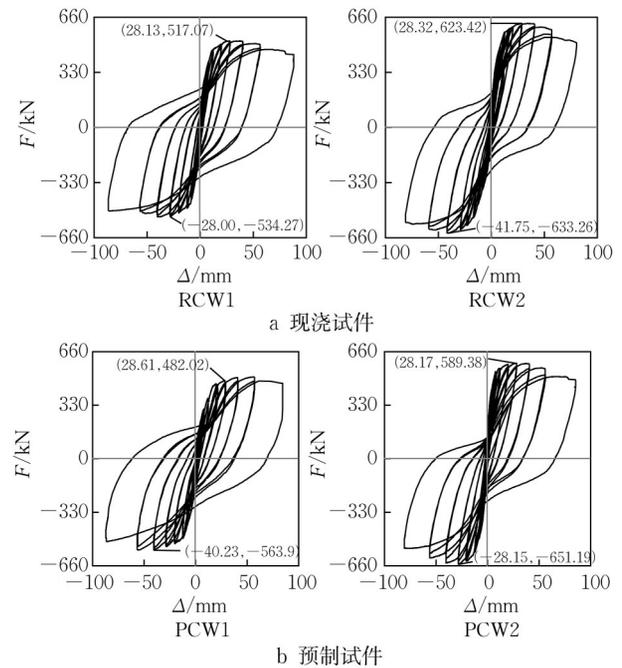


图8 试件水平荷载-位移关系曲线

Fig. 8 Curve of horizontal load-displacement of specimens

由图8可得到以下几点认识:

(1) 4个试件的滞回曲线均较为饱满,反复加载时基本与第一次加载曲线重合,不同类型试件同轴压比下滞回曲线变化趋势基本一致;4个试件滞回环形状整体相似,4条曲线均呈反“S”形,现浇节点试件的峰值荷载比装配式试件高3%,预制试件与现浇试件对比无明显捏缩现象,说明搭接钢筋锚固良好。

(2) 分别对比试件RCW1和RCW2、试件PCW1和PCW2的滞回曲线可以发现,同一类型的试件在较高轴压比下,峰值承载能力提高了15%左右,在超过峰值荷载点后,滞回曲线斜率下降较快;

(3) 箍筋套筒预制试件对比同等轴压比下现浇试件水平承载能力均略低,这主要是由叠合板与后浇混凝土的连接界面轻微滑移使部分核心区混凝土分担弯曲应力减少导致的,同时两侧叠合板对比同等轴压比下现浇试件分担弯曲应力增加,加速了水平拼接缝附近裂缝发展。

将荷载-变形曲线中的水平承载力峰值点连起来,得到4个试件的骨架曲线,如图9所示。

由图9可以更加直观地看出:

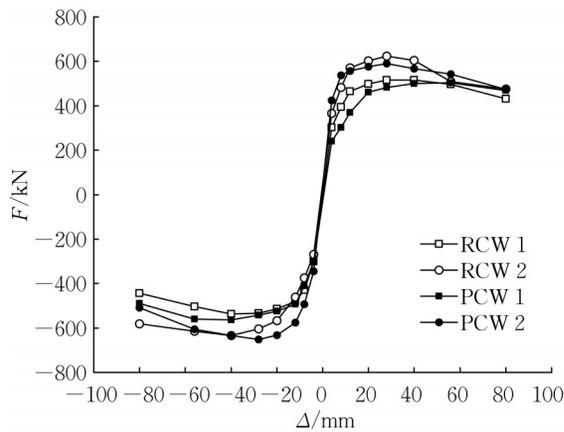


图9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

(1) 在开裂阶段和峰值后阶段,两种试件的骨架曲线在相同轴压比下基本重合,表明采用螺旋箍筋套筒连接节点的侧墙试件的承载能力水平与现浇试件接近。

(2) 轴压比0.05下,PCW1试件在屈服后阶段正向加载时略微低于现浇试件,在负向加载时则基本重合,这是由于墙体内侧腋角在负向加载时能有一定的抗压储备,进而提高了负向加载的整体强度。

(3) 轴压比0.10下,PCW2试件在屈服后阶段正向加载时与现浇试件基本重合,在负向加载时则超过了现浇试件,说明提高轴压比对螺旋箍筋套筒试件的承载力提高效果要优于现浇试件。

3.2 延性与变形

位移延性系数 μ 是指构件的极限位移 Δ_u 与构件屈服位移 Δ_y 的比值,采用位移延性系数这一指标可以间接评价墙体的变形能力。本次采用通用屈服弯矩法计算构件的屈服位移,构件的极限位移采用水平承载能力下降到峰值承载力85%时的位移,构件的峰值荷载 F_p 是试件每次加载时所能达到最大荷载,此时对应的位移为峰值位移 Δ_p 。4个试件各特征点的荷载与位移,以及延性系数如表3所示。

表3 试件特征值及延性

Tab. 3 Characteristic values and ductility of specimens

试件	加载方向	屈服荷载 F_y/kN	峰值荷载 F_p/kN	极限荷载 F_u/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值位移 Δ_p/mm	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ
RCW1	正向	434.87	517.38	439.65	9.93	37.31	80.62	8.12
	负向	458.13	537.14	456.21	9.06	39.61	86.75	9.56
	均值	446.50	527.26	447.93	9.50	38.49	83.69	8.81
PCW1	正向	372.43	498.91	423.72	12.02	39.26	84.72	7.05
	负向	451.76	563.90	479.47	9.73	40.23	87.00	8.94
	均值	412.10	531.41	451.60	10.88	39.75	85.86	7.89
RCW2	正向	479.10	623.40	529.12	8.00	28.85	67.50	8.44
	负向	461.91	612.97	520.52	12.45	28.48	81.01	6.51
	均值	470.51	618.19	524.82	10.23	28.67	73.76	7.21
PCW2	正向	537.46	589.38	504.64	8.03	28.02	70.12	8.73
	负向	528.85	651.38	553.67	9.95	28.19	73.74	7.41
	均值	533.16	620.39	529.16	8.99	28.11	71.93	8.00

由表3可以看出:

(1) 4个试件的延性系数在6.51~8.94之间,表现出良好的延性。

(2) 正向加载和负向加载下的延性系数略有不同,0.05轴压比下正向加载较小,0.10轴压比下正向加载较大。极限位移随轴压增大而降低,导致延性系数计算值变小,这可能是轴压增大加速了墙体外侧拼接缝周围的混凝土溃坏导致的。

(3) 不同类型试件相同轴压比下的延性系数均值,0.05轴压比下现浇试件更高,0.10轴压比下箍筋套筒试件更高。0.05轴压比下箍筋套筒试件屈服位移更大,可能是因为拼接缝未失去工作、搭接钢筋及螺旋箍筋套筒等钢材的加入提高了整体强度,从而使屈服位移增大、延性系数偏小。0.10轴压比下,

螺旋箍筋套筒试件较高的轴压及钢材含量使试件下部混凝土脆性增强、过早屈服,延性系数偏大。

(4) 现浇试件在0.05轴压比下更高,箍筋套筒试件在0.10轴压比下略高且两者差别不大。现浇试件在高轴压比下表现出略差的延性,与已有研究理论一致。

综合以上分析,箍筋套筒连接试件延性均值随轴压增加而提高,现浇试件随轴压增加,延性系数减小。因此,在地震作用下结构轴压迅速提高时,螺旋箍筋套筒连接试件可能具有更优的延性发展能力。

3.3 刚度退化分析

刚度退化^[20]反映了试件在加载过程中材料受损伤的程度,将加载位移达到每次加载最大值时的试件刚度连起来,得到如图10所示的4个试件的刚度

退化曲线。

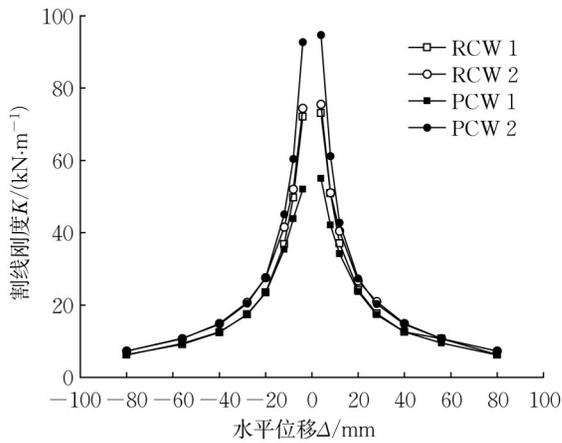


图10 试件刚度退化曲线

Fig. 10 Curves of stiffness degradation of specimens

由图10分析可见:

(1) 两种试件在屈服后阶段重合,屈服前阶段有差别。加载前期刚度下降快,后期趋于平稳。这是由于混凝土裂缝产生导致刚度下降,试件屈服前裂缝产生与发展较快,因此刚度退化速度也快,屈服后刚度退化逐渐放缓。

(2) 对于不同类型试件,在0.05轴压比下,现浇试件初始刚度更大;在0.10轴压比下,箍筋套筒试件初始刚度更大。在屈服及屈服后阶段,两种类型试件刚度变化基本一致。在达到屈服位移前,0.10轴压比下箍筋套筒试件由于箍筋和搭接钢筋重叠区域钢筋材料的加入,初始刚度更大。

(3) 同一类试件在0.10轴压比下刚度均更高,且刚度退化也略慢。这可能是由于钢筋混凝土试件在较高轴压力水平下弯曲裂缝发展较慢导致的。

3.4 耗能能力分析

试件的耗能能力^[20]由累积耗能 E 和耗能系数 e 两个定量参数描述。试件的单圈累积耗能曲线和耗能系数在不同位移等级下曲线分别如图11和图12所示。

从图11可以看出:

(1) 4个试件的累积耗能随着位移增加而增加,后期非弹性变形增大。位移小于20 mm时,试件处于弹性阶段,耗能能力较弱;位移超过20 mm时,混凝土裂缝扩展,受力钢筋屈服,累计耗能增加且速度加快。

(2) 同类型试件在0.10轴压比下累积滞回耗能略高,轴压提高对现浇试件和箍筋套筒连接试件的耗能提高具有正向作用。

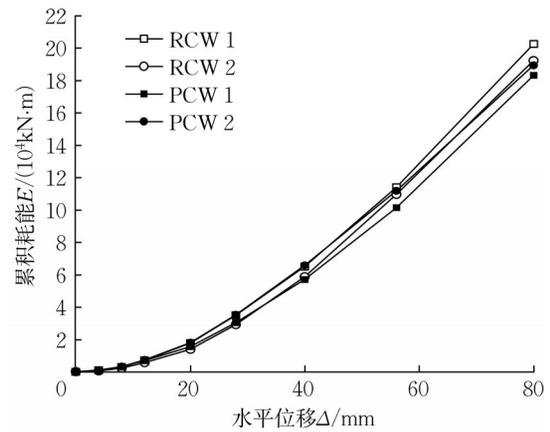


图11 试件累积滞回耗能曲线

Fig. 11 Curves of cumulative hysteretic energy dissipation of specimens

(3) 相同轴压比下,现浇试件在0.05轴压比下略高于箍筋套筒试件;0.10轴压比下箍筋套筒试件在位移较小时累积耗能较高于现浇试件而后略低于现浇试件,说明箍筋套筒试件在较高轴压下具有更好的变形耗能能力。这与图8中延性系数均值的对比中0.10轴压比下箍筋套筒表现出更好的延性相对应。

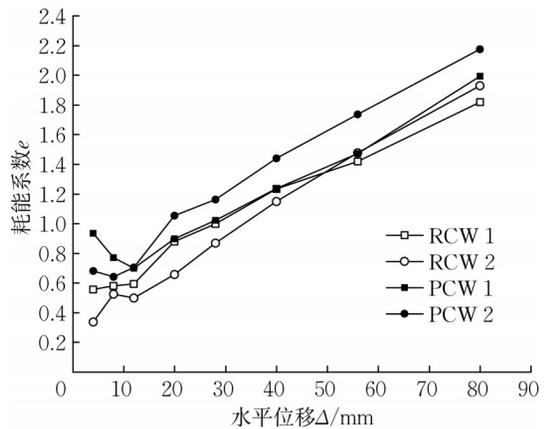


图12 试件耗能系数曲线

Fig. 12 Curves of energy dissipation coefficient of specimens

耗能系数是每个加载循环中耗散能量与等效弹性体产生相同变形时输入能量之比,反映了累积耗能曲线随位移的增长速度。从图12可以看出:

(1) 试件耗能系数整体上随位移等级提高而上升。在位移加载到12 mm之前,变化不规律,但都在0.35~0.96之间。加载前期曲线波动,可能是由于试件处于弹性阶段,变形和耗能都较小,耗能系数受微小测量误差影响较大。

(2) 同一类型试件前期耗能系数在较低轴压比下略高;相同轴压比下箍筋套筒试件前期耗能系数略高,说明其更早产生非弹性变形。

(3) 在加载后期,现浇试件在0.05轴压比下耗能系数略高,箍筋套筒试件在不同轴压比下耗能系数前期差别不大,0.05轴压比下略高,说明较高轴压使试件耗能系数略微减小。

(4) 0.05轴压比下,箍筋套筒连接试件略低于现浇试件,0.10轴压比下,螺旋箍筋套筒连接试件前期高于现浇试件而后期略低于现浇试件。原因可能是箍筋套筒在大位移加载水平下,搭接钢筋产生微小滑移,从而滞回面积变小,耗能系数降低。

综合以上分析,箍筋套筒连接试件延性均值随轴压增大而提高,现浇试件延性系数随轴压增大而减小。因此,在地震作用下结构轴压迅速提高的情况,螺旋箍筋套筒连接试件可能具有更优的延性发展能力。

3.5 拼接缝区域裂缝张开量

如图13所示,为了监测混凝土受压裂缝的张开总量,在墙体内外两侧布置了一对位移计③、④,距离侧边缘50 mm。由于受压变形很小,拉线式位移计只能监测到一侧受拉变形,因此需要对称布置。同时,记录最大位移时的裂缝张开值,绘制内外两侧拼接缝张开总量随位移等级的变化曲线,如图14所示。

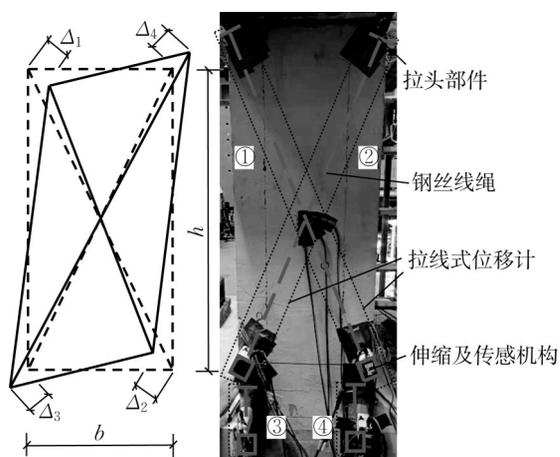


图13 拉线位移计布置

Fig. 13 Layout of stay wire displacement meters

由图14可以看出:

(1) 4种试件的接缝张开量与加载位移呈正相关,除RCW1负向加载外,同类型试件裂缝张开量基本一致。

(2) 同类型试件在不同轴压比下,现浇试件墙

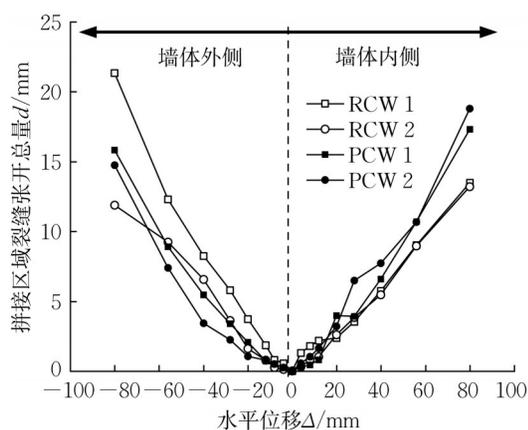


图14 拼接缝区域裂缝张开量曲线

Fig. 14 Curves of crack opening in joint area

体内侧裂缝基本重合,可能因低轴压导致墙体外侧纵筋滑移,RCW1外侧裂缝同比略大;箍筋套筒连接试件墙体内外两侧裂缝张开量差别不大,随位移增加呈抛物线增长。

(3) 同轴压比下不同类型试件中,箍筋套筒试件内侧裂缝张开量略高于现浇试件,与RCW2试件相比前期略小而后期略大,说明箍筋套筒试件有利于减缓墙趾外侧裂缝发展。

3.6 剪切变形

如图13所示,本次测量了各试件截面两条对角线的最大变形量 $\Delta_1+\Delta_2, \Delta_3+\Delta_4$,根据已有的墙体尺寸参数 h, b ,由式(1)可以计算出拼接缝上部墙体的剪切变形 γ ,如图15所示。

$$\gamma = \frac{\sqrt{h^2 + b^2}}{hb} \cdot \frac{|\Delta_1 + \Delta_2| + |\Delta_3 + \Delta_4|}{2} \quad (1)$$

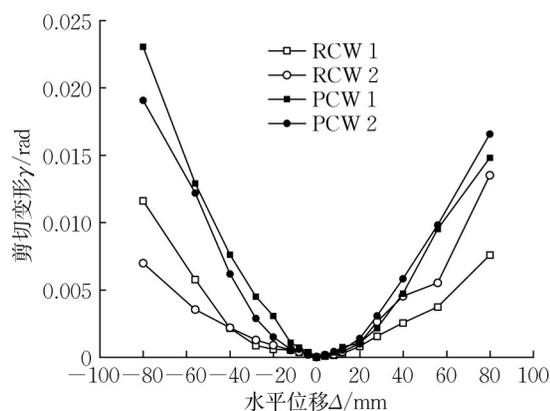


图15 试件剪切变形-位移曲线

Fig. 15 Curves of shear deformation displacement of specimens

由图15可以看出:

(1) 4种试件拼接缝上部区域的剪切变形均处于

较低水平,最高不超过2.4%。加载前期试件处于弹性阶段,变形和裂缝发展较小。加载后期,随着裂缝宽度和累计损伤增大,剪切变形的增长速率加快。

(2) 箍筋套筒连接试件上部区域剪切变形略高于现浇试件,因为箍筋套筒连接试件上部区域应力分布更均匀,而现浇试件应力集中在根部,拼接缝处横向裂缝发展更充分,导致上部区域剪切变形较低。

(3) 箍筋套筒连接试件在不同轴压比下的剪切变形基本一致,由于斜拉筋分布更多受拉应力,正向剪切变形相对负向均较小;现浇试件的剪切变形在0.05轴压比下正向略低于负向,0.10轴压比下正向略高于负向,可能是由于轴压比提高导致RCW 2墙体(图6b)内侧腋角上部过早产生压溃破坏。

4 结论及展望

本次通过对采用螺旋箍筋套筒连接的双面叠合装配式侧墙试件与现浇试件在0.05和0.10两种较低轴压比下进行的面外低周往复荷载试验,并对试验数据分别从滞回曲线、骨架曲线、延性系数和剪切变形进行对比分析,得出了以下几点结论:

(1) 与现浇试件相比,预制试件基本满足承载能力等同现浇的抗震设计要求。预制试件节点区域上部墙体剪切变形较大,有利于墙体损伤区由水平接缝区域向钢筋搭接区上部转移,进而减少底部接缝处滑移变形及墙体损伤集中问题。

(2) 预制试件和现浇试件的滞回曲线基本一致,均具有良好的抗震耗能能力。预制试件具有更高的初始刚度,且在墙体外侧受拉时峰值承载能力高于现浇试件,有利于抵抗土体侧压力。

(3) 预制试件与现浇试件均表现出良好延性,延性系数在6.51~8.94之间;4个试件的屈服位移角和极限位移角均充分满足我国规范中罕遇地震作用下的变形要求。

本研究通过2组对照试验证明了采用螺旋箍筋套筒的双面叠合预制管廊侧墙试件力学特性基本等同现浇,且预制试件裂缝发展向上部区域的转移在一定范围内可有效提高侧墙的面外变形上限。但土体侧压力分布对裂缝的发展及墙体的应力分布还不明朗,有待进一步探索。

作者贡献声明:

赵密:研究选题,提供基金指导与论文指导。

石少华:主持试验,数据处理,论文整体构思与撰写。

李广帆:参与试验。

程小卫:论文指导。

钟紫蓝:研究选题,提供基金指导与论文指导。

参考文献:

- [1] 黄剑. 预制拼装综合管廊研究和建设进展[J]. 特种结构, 2018,35(1):1.
HUANG Jian. Research and construction progress of precast assembled utility tunnel[J]. Special Structures, 2018,35(1):1.
- [2] 胡翔,白浩阳,薛伟辰,等. 叠合板式综合管廊底部节点低周反复荷载试验[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(2):200.
HU Xiang, BAI Haoyang, XUE Weichen, *et al.* Cyclic loading tests on the bottom connections of a municipal tunnel composed of composite walls and CIP bottom slabs [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021,42(2):200.
- [3] BACHMANN H, STEINLE A. Precast concrete structures [J]. Wilhelm Ernst & Sohn, 2011, 40(2):246.
- [4] BENAYOUNE A, SAMAD A A A, TRIKHA D N, *et al.* Flexural behaviour of precast concrete sandwich composite panel-experimental and theoretical investigations [J]. Construction and Building Materials, 2008,22(4):580.
- [5] PREINSTORFER P, KOLLEGER J. Double-wall elements made of UHPC [J]. Beton and Stahlbetonbau, 2017, 112(6): 346.
- [6] CHONG Xun, LINLIN X, XIANGUO Y, *et al.* Experimental study on the seismic performance of superimposed RC walls with enhanced horizontal joints [J]. Journal of Earthquake Engineer, 2017,23(1): 1.
- [7] 薛伟辰,胡翔. 预制混凝土剪力墙结构体系研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(2):44.
XUE Weichen, HU Xiang. State of the art of studies on precast concrete shear wall structures [J]. Journal of Building Structures, 2019,40(2):44.
- [8] 田子玄. 装配叠合式混凝土地下综合管廊受力性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
TIAN Zixuan, Experimental research on force performance of precast concrete underground comprehensive municipal tunnel[D]. Harbin:Harbin Institute Of Technology, 2016.
- [9] 郭福能. 预制装配整体式混凝土综合管廊构件受力性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
GUO Funeng. Performance study on members of precast monolithic concrete municipal tunnel [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [10] 颜良. 无腋角综合管廊结构足尺模型静载试验及有限元分析[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
YAN Liang. Static test and finite element analysis of full-scale model of utility tunnel structure without axillary angle [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [11] 魏奇科,王宇航,王永超,等. 叠合装配式地下综合管廊节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019,40(2):246.
WEI Qike, WANG Yuhang, WANG Yongchao, *et al.* Experiment study on seismic performance of joints in

- prefabricated sandwich structures of utility tunnels [J]. *Journal of Building Structures*, 2019,40(2):246.
- [12] XUE Weichen, LI Ya, CAI Lei, *et al.* Seismic performance of precast concrete composite shear walls with multiple boundary elements [J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2019,13(S1): 1940006.
- [13] 张海顺. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固搭接试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
ZHANG Haishun, Experimental study on plug-in filling hole for lap-joint of steel bar of PC concrete structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [14] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 等. 预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011,43(10): 18.
JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, *et al.* Experimental study on plug-in filling hole for steel bar lapping of precast concrete structure [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011,43(10):18.
- [15] 钱稼茹, 彭媛媛, 秦珩, 等. 竖向钢筋留洞浆锚间接搭接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. *建筑结构*, 2011,41(2):7.
QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, QIN Xing, *et al.* Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements grouted in holes and spliced indirectly [J]. *Building Structure*, 2011,41(2):7.
- [16] XIAO Quandong, GUO Zhengxing. Experimental study on seismic behavior of double-wall precast concrete shear wall [J]. *Advanced Materials Research*, 2014. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1812
- [17] 薛伟辰, 胡翔, 李阳. 螺旋箍筋约束浆锚搭接装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[R]. 上海:同济大学, 2016.
XUE Weichen, HU Xiang, LI Yang. Experimental study on seismic performance of precast concrete shear walls with spiral hoop restraint grouting-anchoring overlap-joint [R]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [18] MOHAMMADAMIN A, URSP A C, JOHN C M, Experimental and numerical study of cyclic performance of reinforced concrete exterior connections with rectangular-spiral reinforcement [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(3):04019219.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准:GB/T 51231—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for assembled buildings with concrete structure: GB/T 51231—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [20] 任重翠, 肖从真, 徐培福. 钢筋混凝土剪力墙拉剪性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2018,51(4):20.
REN Zhongcui, XIAO Congzhen, XU Peifu. Experimental study on the shear pulling performance of reinforced concrete shear wall [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2018,51(4):20.