方志昊,熊峰,顾盛,等.竖向受拉工况下灌浆套筒装配式混凝土剪力墙抗震试验研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1369-1377.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250318001

Fang Zhihao, Xiong Feng, Gu Sheng, et al. Experimental study on the seismic performance of prefabricated concrete shear walls with grouted sleeve connections under vertical tension[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1369-1377. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250318001

竖向受拉工况下灌浆套筒装配式混凝土剪力墙抗震试验研究

方志昊[1], 熊 峰[2], 顾 盛[3], 刘学春[1], 方有珍[2]

(1. 北京工业大学 北京市高层与大跨度预应力钢结构工程技术中心,北京 100124;
2. 苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011;
3. 苏州昆山建设工程质量检测中心,江苏 苏州 215011)

摘要: 灌浆套筒连接是装配式混凝土剪力墙的主要装配连接形式之一。然而,在强震和飓风引起的极端条件下,部分剪力墙体可能处于竖向受拉状态,目前对此类工况下剪力墙结构的抗震性能研究较为匮乏,相应机理尚不完善。为系统研究灌浆套筒装配式混凝土剪力墙的抗震机理,设计并制作现浇混凝土剪力墙试件XSW和灌浆套筒连接装配式混凝土剪力墙试件TSW,开展竖向受拉工况下的抗震试验。根据试验结果,分析其滞回特征、刚度、滞回耗能、延性系数和侧移变形模式等的变化规律。研究结果表明:试件XSW和TSW的极限承载力差异较小,但前者的变形能力更优。二者的等效黏滞阻尼系数在加载前期发展规律基本一致,但在加载后期,TSW因连接面纵筋产生低周疲劳断裂而增大。XSW的位移变形模式由理想倒三角弯剪型转化为剪切型;TSW因装配连接面灌浆压溃脱落而产生明显滑移,使得墙体近似刚体转动,呈倒三角形态。XSW的破坏模式表现为剪力墙体角部偏上部混凝土压溃,以及根部以上贯通主裂缝边缘混凝土的受压酥松脱落;TSW的破坏模式则为预制墙体装配连接面灌浆层明显压溃脱开,且套筒连接纵筋出现低周疲劳断裂。

关键词: 装配式混凝土剪力墙;灌浆套筒连接;竖向受拉工况;抗震机理;试验研究

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2026)06-1369-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250318001

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178149);江苏省教育厅重大科研项目(18KJA560003)

第一作者简介: 方志昊(2000-),男,硕士研究生,主要从事组合结构抗震性能研究。E-mail:1143138202@qq.com。

通信作者: 方有珍(1972-),男,博士,教授,主要从事钢结构、组合结构抗震研究。E-mail:Fyz72@mail.usts.edu.cn。

Experimental study on the seismic performance of prefabricated concrete shear walls with grouted sleeve connections under vertical tension

Fang Zhihao[1], Xiong Feng[2], Gu Sheng[3], Liu Xuechun[1], Fang Youzhen[2]

(*1.Beijing Engineering Research Center of High-rise and Large-span Prestressed Steel Structures, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*
2.College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China;
3.Kunshan Construct Engineering Quality Testing Center, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: Grouted sleeve connection is one of the primary connection methods for prefabricated concrete shear walls. However, research on the seismic performance of these walls under vertical tension induced by severe earthquakes and hurricanes remains limited, and the corresponding seismic mechanism is not yet fully understood. To systematically investigate the seismic mechanism of prefabricated concrete shear walls with grouted sleeve connections, a cast-in-place shear wall specimen (XSW) and a prefabricated concrete shear wall specimen with grouted sleeve connections (TSW) were designed and fabricated, and seismic tests were conducted under vertical tension. Based on the test results, hysteretic characteristics, stiffness, hysteretic energy dissipation, ductility coefficient, and lateral deformation mode were analyzed. The results indicate that the ultimate bearing capacities of specimens XSW and TSW differ only slightly, but specimen XSW exhibits superior deformability. The equivalent viscous damping coefficients of both specimens follow consistent development trends during the initial loading stage; however, the coefficient for TSW increases at the later stage owing to low-cycle fatigue fracture of the longitudinal reinforcement at the connection interface. The deformation mode of specimen XSW transitions from an ideal inverted triangle pattern (flexural-shear type) to a shear type, whereas specimen TSW maintains an inverted triangle pattern throughout, attributed to crushing and detachment of the grout layer at the prefabricated connection interface, accompanied by considerable slippage that leads to approximate rigid-body rotation of the wall. Specimen XSW fails through concrete crushing at the upper part of the wall corners and loosening and spalling of concrete at the edges of through cracks above the wall base, while specimen TSW fails through extensive crushing and detachment of the grout layer at the prefabricated connection interface, accompanied by low-cycle fatigue fracture of the longitudinal reinforcement within the sleeves.

Keywords: prefabricated concrete shear wall; grouted sleeve connection; vertical tension; seismic mechanism; experimental study

0 引言

保护环境、节约资源是我国的基本国策。国务院办公厅于2016年发布了《关于大力发展装配式建筑的指导意见》,明确提出要多层面、多角度发展装配式建筑行业。2022年发布的《关于推进以县城为重要载体的城镇化建设的意见》,则提出要大力发展绿色建筑,推广装配式建筑及全面推行绿色施工。在此背景下,装配式结构抗震性能研究成为当前研究热点之一。

迄今为止,国内外学者已对装配式混凝土剪力墙进行了一系列研究。Han[1]探讨了水平接缝对装配式剪力墙抗震性能的影响,提出改进水平接缝的连接方式以增强剪力墙的整体性和抗震性能。Herfelt等[2]提出一种用于模拟复杂节点受力行为的新型等效单元,并通过子结构分析与试验的对比验

证,证实了该单元的有效性。Sørensen等[3-4]提出一种新型预制装配式剪力墙连接方式并进行了试验研究,结果表明该新型连接方式具有良好的延性,其中较小长度的抗剪键导致凸肋局部混凝土压溃破坏,而较大长度的抗剪键则使试件发生剪切破坏。朱张峰等[5]对不同预应力筋配筋的新型混合装配式混凝土剪力墙进行了拟静力试验,结果表明其延性和耗能能力与现浇剪力墙相近,而其承载力和刚度则明显高于现浇剪力墙。吴东岳等[6]对浆锚连接装配式剪力墙进行了拟静力试验,结果显示浆锚连接剪力墙的裂缝明显受到拼接缝影响而延迟开展,且破坏前浆锚连接仍具有可靠的连接性能。张壮南等[7]对不同接缝形式的装配式剪力墙进行了拟静力试验,结果表明现浇剪力墙的极限位移略高于装配式剪力墙,所有剪力墙的破坏模式均为受弯破坏,其中采用水平接缝的试件承载力下降速率较大,采用竖向接缝的试件延性略低。李然等[8]对采用竖向接缝钢锚环灌浆连接的预制多层剪力墙结构进行研究,提出了水平接缝采用单排钢筋浆锚、竖向接缝采用钢锚环灌浆的连接方式,并通过直剪试验研究了钢锚环灌浆接缝的连接性能;同时进行了低周反复荷载试验,结果证实采用钢锚环灌浆连接能够保证剪力墙具有较高的刚度和承载力。潘广斌等[9]对采用冷挤压套筒钢筋连接的装配剪力墙抗震性能进行了拟静力试验研究,结果显示所有试件的破坏模式均为压弯破坏,采用冷挤压套筒连接能有效传递钢筋应力并保证结构的整体性。肖顺等[10]为研究装配式剪力墙套筒灌浆存在的缺陷问题,进行了拟静力试验,结果表明:套筒灌浆缺陷导致套筒连接区域发生破坏,而加固后的剪力墙试件和无缺陷试件均在墙底截面发生破坏,且加固后的剪力墙试件各项抗震性能基本恢复至无灌浆缺陷时的水平。

综上,目前对装配式混凝土剪力墙抗震性能的研究较少涉及竖向受拉不利工况,而实际工程中剪力墙结构在强震和飓风作用下会产生倾覆弯矩,导致部分墙体处于竖向受拉的不利工况。鉴于此,本研究针对灌浆套筒连接装配式混凝土剪力墙在竖向受拉工况下的抗震性能进行试验研究,揭示其抗震机理,以期为工程应用提供理论参考。

1　试验概况

1.1　试件设计

为研究灌浆套筒连接装配式混凝土剪力墙在强震和飓风引起的竖向受拉工况下的抗震机理,设计并制作了现浇混凝土剪力墙试件XSW和灌浆套筒连接装配式混凝土剪力墙试件TSW。两试件外形尺寸相同:地梁尺寸为2 700 mm(长)×500 mm(宽)×500 mm(高),墙体尺寸为2 920 mm(高)×1 700 mm(宽)×200 mm(厚),加载梁尺寸为1 700 mm(长)×600 mm(宽)×300 mm(高)。XSW采用一次整体浇筑,墙体所有竖向钢筋均锚固于地梁;TSW则为预制墙体,其边缘竖向钢筋较XSW有所增大(6Φ12),中间墙面每边由4Φ10变为2Φ14与2Φ8间隔布置,其中边缘构件6Φ12及墙面中间2Φ14均采用灌浆套筒连接,并锚固于地梁。TSW的地梁与墙体分开预制,通过灌浆套筒连接装配成整体(图1)。试件采用C40混凝土,墙体配筋采用HRB400级钢筋。根据《混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)》(2015年版)[11],对试件混凝土及钢筋的材料性能进行测试,结果列于表1。

表 1　试件材料力学性能

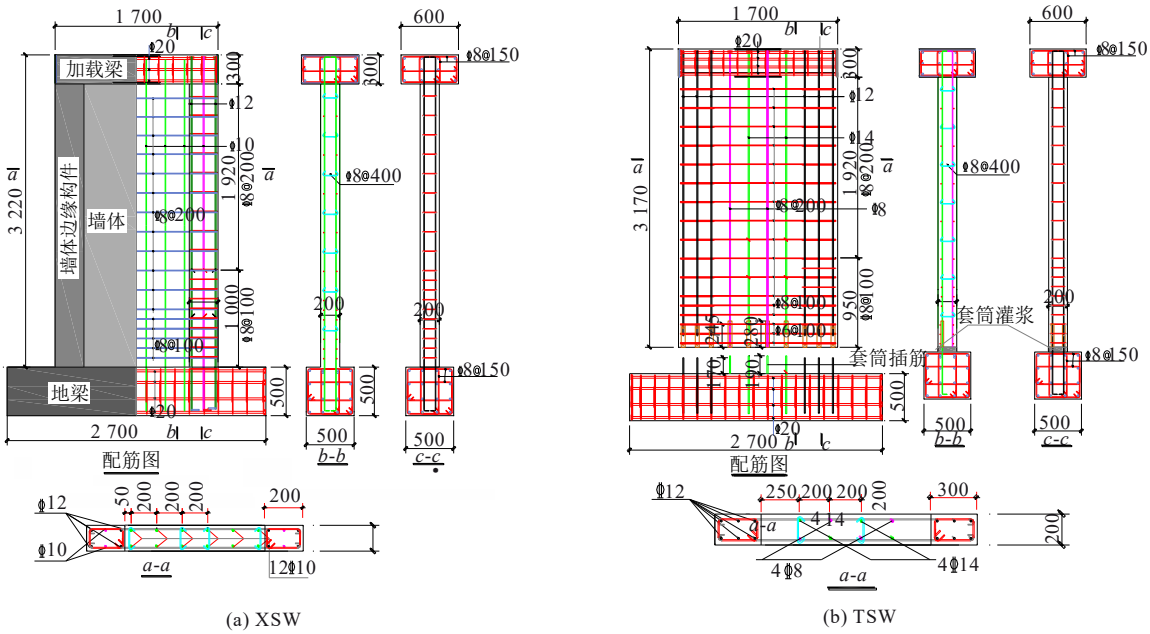
Table 1　Material properties of specimen materials

钢筋					混凝土
直径/mm	等级	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%	实测强度平均值/MPa
6	HRB400	4 560.9	598.7	25.1	47.3
8		456.4	617.3	25.6	
10		443.2	587.2	25.2	
12		453.1	563.7	24.1	
14		438.1	549.6	23.8	
20		450.6	571.4	24.7	

1.2　试验加载装置与测点布置

试件墙体下部地梁通过压梁进行竖向限位,端部利用千斤顶和地锚进行水平限位;试件顶部加载梁与作动器连接,竖向拉力采用液压千斤顶和辅助加载架拉杆施加,加载顶梁侧设置平面外支撑以保证面内受力。具体加载装置如图2(a)所示。

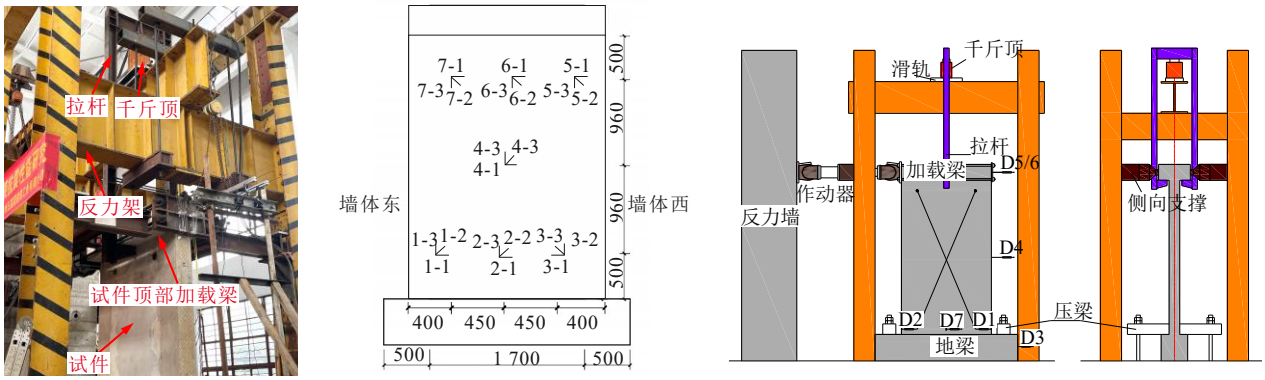
根据试验研究目标,测试内容包括:(1)墙体剪切应变和裂缝开展情况:沿墙宽于距地梁顶面360 mm和2 550 mm处均匀布置应变花[图2(b)];(2)侧移变形模式发展进程:沿墙体高度布置位移



(a) XSW (b) TSW

图 1 试件设计(单位:mm)

Fig. 1 Design of specimens (unit:mm)



(a) 试件加载现场照片 (b) 墙面应变花布置 (c) 仪表布置与加载装置

图 2 试验装置与测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Test setup and instrumentation layout (unit:mm)

计 D3~D6[图 2(c)];(3)墙体剪切变形:墙面布置对角位移计 D1、D2[图 2(c)];(4)预制墙体连接面滑移:布置位移计 D7[图 2(c)]。

1.3 加载制度

首先采用液压千斤顶和辅助加载架拉杆对试件施加 150 kN 的竖向拉力(以墙面混凝土不开裂为基准),并维持恒定,随后进行水平预加载以检查测试仪表是否正常工作,无误后进入正式加载。水平加载制度(图 3)参照文献[12-13],考虑"小震频遇、大震罕遇"的特点,采用美国联邦应急管理署推荐的全过程位移加载方式:共设置 9 级加载,位移幅值分别为 ±12 mm、±16 mm、±24 mm、±32 mm、±48 mm、±64 mm、±80 mm、±96 mm 和 ±112 mm;各级加载均在对应位移幅值下完成相应循环次数,以模拟地震作用下墙体的受力过程。

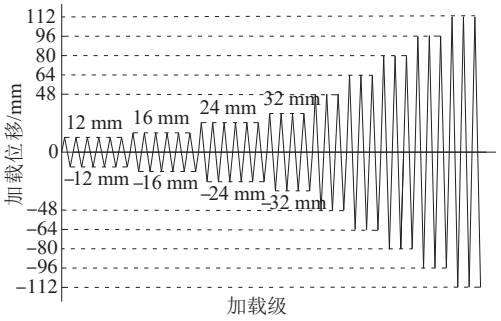


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading protocol

2　试验现象

试验记录照片（图 4）显示，试件 XSW 和 TSW 在试验过程中均经历了三个阶段：初始弹性阶段、裂缝形成与发展阶段，以及破坏阶段。

（1）试验加载初期，试件剪力墙表面无明显开裂现象，钢筋应变变化较小，试件处于弹性工作状态。

（2）加载位移达到 16 mm（侧移 0.5%）时，所有试件边缘构件下部相继出现近似水平裂缝；随着加载持续，新裂缝不断产生，既有裂缝不断向墙体中央发展且方向偏斜，表明墙体边缘构件承担弯矩、中部承担抗剪；加载位移达到 48 mm（侧移 1.5%）时，墙面裂缝充分发展；裂缝全面形成后，随作动器加载位移逐级增加，试件裂缝不断贯通，逐步形成主裂缝。其中，XSW 的主裂缝位于剪力墙体根部偏上部位；TSW 因墙体根部纵筋部分锚固，预制墙体装配连接面的灌浆层受压酥松脱落，缝隙变宽，延缓了墙面裂缝的发展进程。

（3）试验最终破坏模式：XSW 表现为剪力墙体角部偏上区域主裂缝边缘混凝土受压酥松脱落，伴随受压边缘约束构件压溃；TSW 为预制墙体装配连接面灌浆层压溃脱开，相应灌浆套筒连接纵筋发生低周疲劳断裂，试件完全丧失整体性。



(a) 墙体开裂(加载侧移 0.5%)　(b) 墙体裂缝发展(加载侧移 1.5%)　(c) 试件最终破坏模式

图 4　试件破坏现象

Fig. 4　Failure phenomena of specimens

3　试验结果分析

3.1　滞回特征

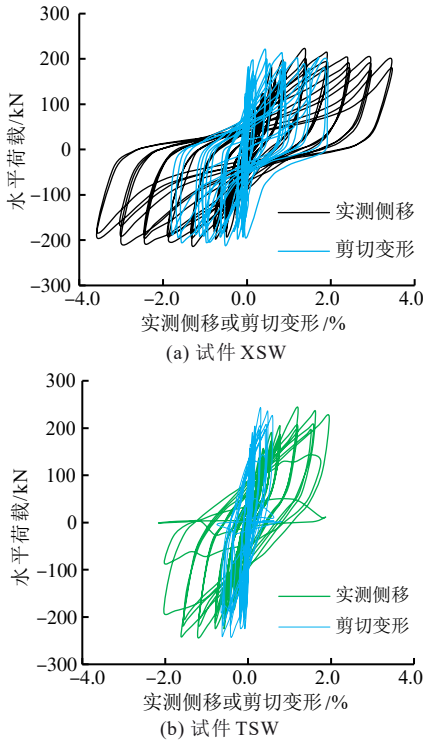
图 5 给出了 2 个试件的滞回曲线。实测侧移 δ 和实测墙体剪切变形 γ_w 分别按式（1）和式（2）计算：

$$\delta=(\Delta_{5或6}-\Delta_3)或(\Delta_{5或6}-\Delta_3-\Delta_7)/H \tag{1}$$

$$\gamma_w=\frac{\Delta_1+\Delta_2}{2}\cdot\frac{\sqrt{b^2+h^2}}{bh} \tag{2}$$

式中：Δ_i 表示对应位移计测试数据；H 表示试件加载梁轴线至地梁顶面高度；b 和 h 分别表示墙面剪切变形测试位移计之间的水平、垂直距离。

由图 5 可知，试验初期所有试件均未开裂，滞回环面积很小。随着加载持续，滞回环面积逐渐增大，主要归因于水平荷载引起的倾覆弯矩导致墙体边缘构件下部开裂并耗能。随着加载等级增加，滞回环面积明显增大，形状趋于饱满，原因在于既有裂缝不断延伸、新裂缝持续产生，裂缝面边缘混凝土在循环往复荷载作用下逐步受压酥松脱落，耗能增加，同时剪力墙抗侧刚度出现退化，卸载后存在



(a) 试件 XSW

(b) 试件 TSW

图 5　滞回曲线

Fig. 5　Hysteretic curves

残余变形。当加载至侧移1.5%时，试件XSW和TSW均达到极限承载力，分别为218.0 kN(正向)和−209.39 kN(负向)、240.12 kN(正向)和−240.15 kN(负向)，其中TSW因边缘构件尺寸加大和配筋增大，极限承载力较XSW有所提高。继续加载时，XSW墙体下部贯通主裂缝边缘混凝土不断受压酥松脱落，并产生明显摩擦滑移，导致其承载力下降平缓；TSW因装配连接面不断脱开，灌浆套筒连接纵筋在往复荷载作用下出现低周疲劳断裂，试件瞬间丧失整体性和相应承载力。此外，通过墙体剪切变形与实测侧移曲线对比发现，TSW因装配连接面脱开并伴随明显滑移(图6)，延缓了墙面混凝土的开裂进程，使墙面剪切变形在总侧移中的占比减小。

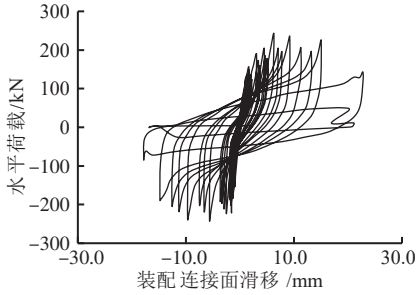


图6 试件TSW装配连接面滑移曲线

Fig. 6 Slip curves at the assembled connection interface of specimen TSW

3.2 骨架曲线

基于试验实测侧移滞回曲线，得到两试件的骨架曲线(图7)。从图中可以看出，TSW的实测变已扣除装配连接施工冷缝面滑移的影响，导致其墙面初始抗侧刚度计算值偏大。随着加载继续，墙体裂缝不断发展，装配式墙体装配面脱开并产生滑移，试件承载力不断增大。达到极限承载力后，XSW承载力衰减缓慢，延性表现相对较好；TSW承载力衰减速度快，延性相对较差。

3.3 刚度退化

随着加载持续，试件逐步出现损伤并不断发展，相应抗侧刚度出现退化。本文采用抗侧峰值割线刚度K_p表征试件刚度退化规律，其中第i个循环的割线刚度K_{pi}按下式计算：

$$K_{pi}=\frac{|P_i^+|+|P_i^-|}{|\Delta_i^+|+|\Delta_i^-|} \tag{3}$$

式中：Δ_i^+、Δ_i^-分别为滞回环正、负方向的最大水平

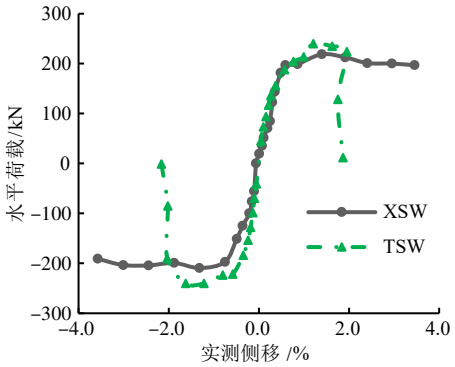


图7 骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of skeleton curves

位移；P_i^+、P_i^-分别为Δ_i^+与Δ_i^-对应的承载力。

根据试验实测滞回曲线，计算得到两试件的抗侧刚度退化曲线，如图8所示。由图可知，XSW和TSW的初始抗侧峰值割线刚度分别为13.42×10^6 N/m和17.04×10^6 N/m。由于TSW的侧移计算扣除了装配式连接面滑移，其初始抗侧峰值割线刚度大于XSW。在加载至侧移2%的过程中，两个试件的抗侧峰值割线刚度退化规律基本一致。随后继续加载，TSW因装配连接面灌浆套筒纵筋产生低周疲劳断裂，其抗侧峰值割线刚度退化显著；而XSW的退化则较为平缓。

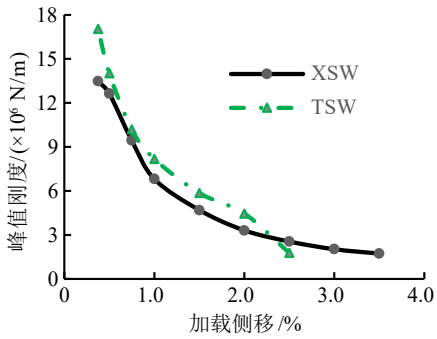


图8 抗侧刚度退化曲线

Fig. 8 Lateral stiffness degradation curves

3.4 滞回耗能

地震作用下，结构通过塑性损伤的发展来耗散地震能量，进而减小地震响应。因此，结构的能量耗散能力是评价其抗震性能的关键指标。本文采用等效黏滞阻尼系数和累积耗能两个指标，对试件的滞回耗能特征进行分析。

(1) 等效黏滞阻尼系数

等效黏滞阻尼系数可反映结构的塑性损伤进程，计算公式如下：

$$\zeta_{eq}=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{(S_{ABC}+S_{CDE})}{(S_{\Delta OBF}+S_{\Delta ODG})} \tag{4}$$

式中：S_{ABC}、S_{CDE}分别为上、下半滞回环面积；$S_{\Delta OBF}$、$S_{\Delta ODG}$分别为三角形 OBF 和 ODG 的面积。计算简图如图 9 所示。

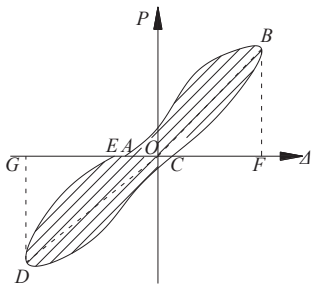


图 9　滞回环计算简图

Fig. 9　Calculation diagram of hysteretic loop

基于滞回曲线，计算得到两试件的等效黏滞阻尼系数发展规律，如图 10 所示。由图 10 可知：(1) 加载初期，两试件基本处于弹性状态，等效黏滞阻尼系数 ζ_{eq} 接近现行《混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)》(2015 年版)[11]推荐的 0.05。(2) 加载至侧移 2% 的过程中，两试件墙面损伤不断加剧，等效黏滞阻尼系数呈增大趋势。(3) 加载至侧移 2% 时，XSW 墙体角部区域混凝土出现压溃，随后墙体主裂缝面发生滑移摩擦，伴随混凝土局部受压酥松脱落，延缓了压溃进程，等效黏滞阻尼系数随之呈下降趋势；而 TSW 因装配连接面灌浆套筒纵筋发生低周疲劳断裂，等效黏滞阻尼系数仍继续增长。

(2) 累积耗能

滞回环面积反映试件吸收和耗散能量的能力：滞回环面积越大，耗能能力越强；反之则越弱。根据滞回曲线，计算得到两试件的累积耗能发展曲线，如图 11 所示。由图可知，两试件的累积耗能均呈增大趋势；加载至侧移 2.5% 时，TSW 因装配连接面灌浆套筒的纵筋发生低周疲劳断裂而破坏，此

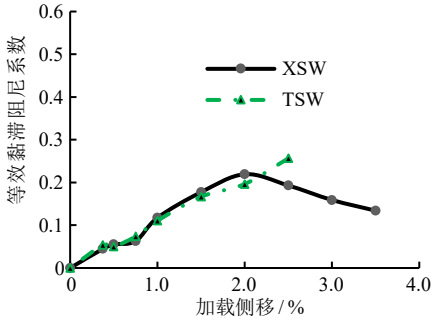


图 10　试件等效黏滞阻尼系数

Fig. 10　Equivalent viscous damping coefficients of specimens

时 XSW 的累积耗能仍继续增大；加载至侧移 3.0% 后，XSW 的累积耗能增长趋势趋于平缓。此外，TSW 的累积耗能仅为 XSW 的 50%，主要原因在于灌浆套筒连接面纵筋发生低周疲劳断裂，导致试件丧失整体性，耗能过程终止。

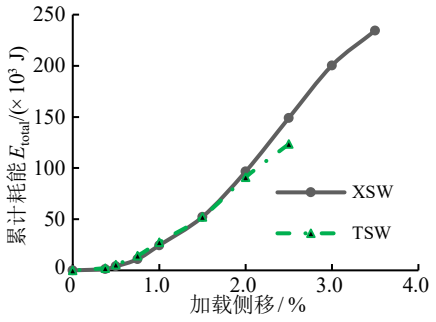


图 11　试件累积耗能曲线

Fig. 11　Cumulative energy dissipation curves of specimens

3.5　延性

根据实测骨架曲线，采用等效能量法[14]计算试件的承载力特征值，并进一步计算相应的延性系数，结果列于表 2。其中，极限侧移 δ_u 定义为骨架曲线承载力下降至极限承载力 85% 时所对应的位移；屈服侧移 δ_y 定义为骨架线对应的屈服侧移值；延性系数 $\mu=\delta_u/\delta_y$。从表 2 中可看出，XSW 的位移延性系数(正向≥5.87、负向≥7.28)明显高于 TSW(正向 3.36、负向 3.31)，表明 XSW 的延性更优。

表 2　试件试验特征值

Table 2　Characteristic values of specimens from tests

试件	屈服荷载 P_y/kN	屈服侧移 δ_y/%	峰值荷载 P_u/kN	极限侧移 δ_u/%	延性系数 μ
XSW	181.38/−190.7	0.589/−0.491	218.0/−209.39	≥3.456/≤−3.572	≥5.87/≥7.28
TSW	188.13/−221.8	0.569/−0.579	240.12/−240.15	1.912/−1.915	3.36/3.31

注：正为推，负为拉

3.6 侧移变形模式

试件的侧移变形模式是其受力机理的外在表现。基于各级加载下水平位移计的实测数据，得到两试件的侧移变形模式，如图 12 所示。

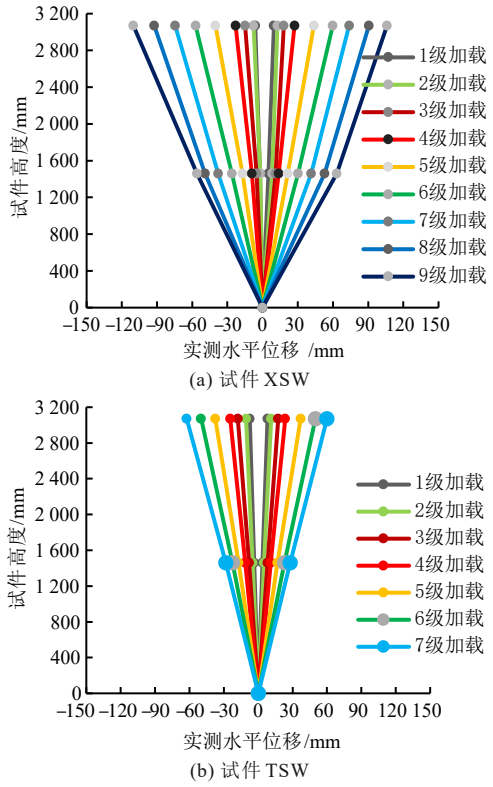


图 12 试件侧移变形模式

Fig. 12 Lateral deformation modes of specimens

对图 12 进行分析可知，在试验加载至侧移 1.5%（试件达到极限承载力）之前，两试件的墙面裂缝均处于发展阶段，侧移变形模式基本为理想弯剪型（呈倒三角形分布）。加载至侧移 2.0% 时，XSW 墙体角部偏上部位混凝土裂缝贯通形成主裂缝，同时受压边缘约束构件混凝土压溃；TSW 装配连接面灌浆层压碎，导致连接面明显脱开。随后继续加载，XSW 根部偏上主裂缝面边缘混凝土不断受压酥松脱落，并出现摩擦滑移，侧移变形模式转化为剪切型；而 TSW 因装配连接面灌浆层压溃酥松脱落、连接面脱开，同时灌浆套筒纵筋出现低周疲劳断裂，墙体近似刚体转动，呈现倒三角形侧移变形模式。

4 结论

本文通过对现浇混凝土剪力墙试件和灌浆套筒连接装配式混凝土剪力墙试件进行抗震试验，研究了其在竖向受拉不利工况下的滞回特征、刚度退化、耗能能力、延性和变形模式，得到以下结论：

（1）现浇混凝土剪力墙试件的破坏模式为墙体角部偏上区域混凝土压溃；灌浆套筒装配式混凝土剪力墙试件的破坏模式则为装配连接面脱开滑移，导致灌浆套筒纵筋发生低周疲劳断裂。

（2）现浇剪力墙试件的墙体剪切变形占比明显高于灌浆套筒装配式混凝土剪力墙试件，表明其墙面抗剪性能发挥更为充分。

（3）加载前期，两试件的刚度退化规律基本一致；达到极限承载力后，现浇混凝土剪力墙试件的刚度退化相对平缓，而灌浆套筒装配式混凝土剪力墙试件因灌浆套筒纵筋发生低周疲劳断裂，刚度完全丧失。

（4）在达到极限承载力之前，两试件的耗能发展规律基本一致。随后，现浇剪力墙试件因贯通主裂缝形成而产生摩擦滑移，等效黏滞阻尼系数有所减小；而灌浆套筒装配式混凝土剪力墙试件因装配连接面灌浆套筒纵筋发生低周疲劳断裂，试件丧失整体性，导致耗能终止，其累积耗能约为现浇试件的 50%。

（5）在试件达到极限承载力之前，两试件的侧移变形模式均表现为理想倒三角形。随后，现浇混凝土剪力墙试件转化为剪切型；而灌浆套筒装配式混凝土剪力墙试件因装配连接面灌浆层压溃酥松脱落而脱开，灌浆套筒纵筋出现低周疲劳断裂，墙体近似刚体转动，呈现倒三角形侧移变形模式。

参考文献（References）

[1] Han J. Seismic performance study of fabricated high-strength reinforced concrete shear wall horizontal connection seam [J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 51: 1093-1098.

[2] Herfelt M A, Poulsen P N, Hoang L C, et al. Lower bound equilibrium element and submodel for shear joints in precast concrete structures [J]. Engineering Structures, 2017, 135: 1-9.

[3] Sørensen J H, Hoang L C, Olesen J F, et al. Test and analysis of a new ductile shear connection design for RC shear walls [J]. Structural Concrete, 2017, 18(1): 189-204.

[4] Sørensen J H, Herfelt M A, Hoang L C, et al. Test and lower bound modeling of keyed shear connections in RC shear walls [J]. Engineering Structures, 2018, 155: 115-126.

[5] 朱张峰，郭正兴，汤磊. 新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报，2018，51(3)：36-43.
Zhu Zhangfeng, Guo Zhengxing, Tang Lei. Experimental

study and FEA on seismic performance of new hybrid precast concrete shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 36-43.

[6] 吴东岳, 梁书亭, 郭正兴, 等. 浆锚连接装配式剪力墙空间结构模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 110-116.
Wu Dongyue, Liang Shuting, Guo Zhengxing, et al. Experimental study on spatial structural model with grouted connected precast shear-wall[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 110-116.

[7] 张壮南, 王春刚, 李姗珊, 等. 接缝形式对凹槽浆锚连接装配式混凝土剪力墙抗震性能影响研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊1): 276-285.
Zhang Zhuangnan, Wang Chungang, Li Shanshan, et al. Seismic performance of prefabricated concrete shear wall with fluted grouting and anchor joint[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1): 276-285.

[8] 李然, 田春雨, 马云飞. 竖向接缝钢锚环灌浆连接装配式多层剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊2): 123-132.
Li Ran, Tian Chunyu, Ma Yunfei. Experimental study on seismic performance of precast low-rise concrete shear wall with steel anchor-ring connection[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S2): 123-132.

[9] 潘广斌, 蔡健, 杨春, 等. 冷挤压套筒连接RC装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 111-120.
Pan Guangbin, Cai Jian, Yang Chun, et al. Experimental study on seismic behavior of precast RC shear walls connected by extruding steel sleeves and rebars[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 111-120.

[10] 肖顺, 李向民, 许清风, 等. 套筒灌浆缺陷整治预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 167-176.
Xiao Shun, Li Xiangmin, Xu Qingfeng, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete shear walls with treatment of sleeve grouting defects[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(4): 167-176.

[11] GB 50010—2010(2015版) 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010 (2015 ed) Code for design of concrete structures[S].

[12] 方有珍, 马雪玉, 耿苏齐, 等. 摩擦耗能部分自复位连接组合框架边节点抗震性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 76-84.
Fang Youzhen, Ma Xueyu, Geng Suqi, et al. Experimental investigation on seismic performance of exterior joint with partial self-centering friction damped connection in composite frame[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 76-84.

[13] 方有珍, 赵帅领, 徐飞, 等. BRS板部分自复位连接新型卷边PEC柱-钢梁组合框架边节点抗震机理试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 309-316.
Fang Youzhen, Zhao Shuailing, Xu Fei, et al. Experimental study on seismic mechanism of new PEC column-steel beam joint with partial self-centering BRS connection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 309-316.

[14] Ma G, Li H, Hwang H J. Seismic behavior of low-corroded reinforced concrete short columns in an over 20-year building structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 106: 90-100.

(本文编辑:赵乘程)