

引用格式:邵莹,胡双平.地下车站装配式型钢混凝土外侧墙底部节点抗震性能试验研究[J].工业建筑,2026,56(2):208-214. SHAO Ying, HU Shuangping. Experimental Research on Seismic Performance of Bottom Joints in Prefabricated Steel-Reinforced Concrete Outer Walls of Underground Metro Stations[J]. Industrial Construction, 2026, 56(2): 208-214 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG25091002

地下车站装配式型钢混凝土外侧墙底部节点 抗震性能试验研究*

邵 莹 胡双平

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,西安 710043)

摘 要 提出了适用于无柱式地下车站的装配式型钢混凝土结构方案,通过3个外侧墙底部节点1/3缩尺模型(包括实心侧壁构造和叠合侧壁构造装配式型钢混凝土试件各1个,以及1个现浇对比试件)的低周反复荷载试验对其抗震性能进行了研究。结果表明:采用实心侧壁构造和叠合侧壁构造的装配式型钢混凝土外侧墙底部节点均具有良好的整体性,承载力与现浇对比试件接近;实心侧壁构造和叠合侧壁构造试件的延性系数分别为3.1和3.0,均高于相应的现浇对比试件(分别高约7.0%和3.4%);2个装配式型钢混凝土试件的耗能能力和刚度退化规律总体上与现浇对比试件相近。

关键词 地下车站;装配式型钢混凝土结构;外侧墙底部节点;低周反复荷载试验;抗震性能

Experimental Research on Seismic Performance of Bottom Joints in Prefabricated Steel-Reinforced Concrete Outer Walls of Underground Metro Stations

SHAO Ying HU Shuangping

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: A prefabricated steel-reinforced concrete structure for column-free underground metro stations was proposed. The seismic performance of the bottom joints of outer walls was studied by quasi-static loading tests on three 1/3-scale specimens, including one specimen with concrete solid sidewalls, one specimen with concrete composite sidewalls, and one cast-in-place specimen. The results showed that the bottom joints of the prefabricated steel-reinforced concrete outer walls with solid sidewall and composite sidewall configurations all exhibited excellent structural integrity, with their bearing capacities close to that of the cast-in-place specimen. The ductility coefficients of the specimens with solid concrete sidewalls and composite concrete sidewalls were 3.1 and 3.0, respectively, which were 7.0% and 3.4% higher than those of the corresponding cast-in-place specimen. The energy dissipation capacity and stiffness degradation characteristics of the two prefabricated steel-reinforced concrete specimens were similar to those of the cast-in-place specimen.

Keywords: underground metro station; prefabricated steel-reinforced concrete structure; bottom joint of outer wall; quasi-static loading test; seismic performance

* 国家自然科学基金项目(51878478);中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(院科20-25)。

第一作者:邵莹,正高级工程师,主要从事轨道交通工程复杂结构技术研究。

电子信箱:30211252@qq.com

收稿日期:2025-09-10

地下车站是城市地铁交通网络的重要节点和枢纽,也是地铁工程建设的重要组成部分。地下车站一般采用明开挖方式建造,与采用盾构掘进方式建造的地铁区间隧道相比,地下车站的建设对周围环境和交通的影响更大。因此,进一步提升地下车站的建造效率、质量和绿色化水平是当前工程界面临的重要问题之一。从工程建设领域的技术发展趋势以及已有的实践经验来看,在地下车站建设中引入装配式混凝土结构方案是解决上述问题的有效途径之一^[1-2]。

从系统查阅的文献资料来看,国外已有地下车站装配式混凝土结构的工程应用^[3-4],但相关研究几乎为空白。我国在地下车站装配式混凝土结构方面的研究与应用起步较晚,但已取得了阶段性成果。文献[5]提出了一种采用榫槽注浆式接头的全装配式混凝土结构方案,并开展了系统的接头力学性能研究^[6-8]与整体结构抗震性能研究^[9],相关成果在长春地铁2号线袁家店站和深圳地铁16号线龙兴站中得到示范应用。叠合式混凝土结构方案也是目前我国研究较多的一种地下车站装配式混凝土结构方案,相关学者针对其外侧墙底部和顶部节点^[10-13]、纵横向梁板柱节点^[14-15]以及整体结构^[16]的抗震性能进行了一系列研究,相关成果为北京地铁6号线金安桥站和哈尔滨地铁3号线丁香公园站的建设提供了支撑。

随着我国社会经济的不断发展,地铁工程建设也面临着更高的要求和挑战,无柱式地下车站因其具有场地适应性强、站内空间布置灵活、视觉效果好等优点而受到越来越广泛的关注。本文针对无柱式地下车站,提出了一种装配式型钢混凝土结构方案,如图1所示。该结构方案由预制或现浇混凝土底板、装配式型钢混凝土外侧墙、型钢混凝土叠合顶板和中板组成,各预制构件之间可通过内埋型钢螺栓连接实现快速拼装成型,从而大幅提高拼装效率、减少临时支撑。此外,当装配式型钢混凝土外侧墙采用叠合侧壁构造时,其预制构件的自重可比采用实心侧壁构造的预制构件自重减轻约50%,从而显著降低对运输和吊装的要求,节约建造成本。为了研究该结构方案的安全性,本文针对其关键受力部位——外侧墙底部节点开展了抗震性能试验研究,相关研究成果将为该结构方案的推广应用提供依据。

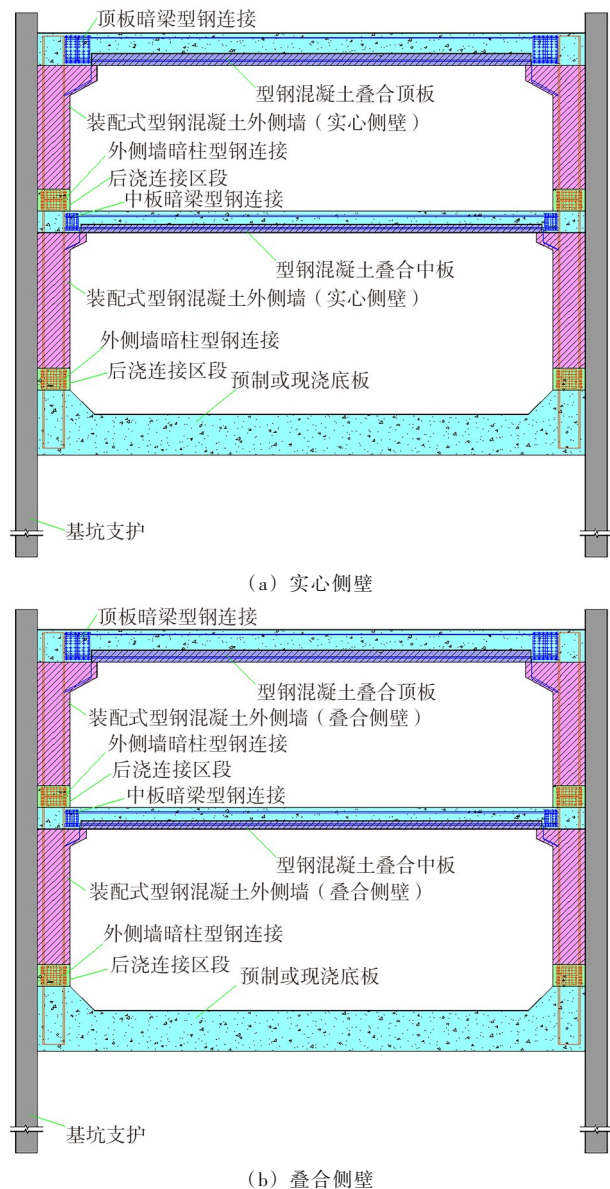


图1 地下车站装配式型钢混凝土结构方案示意

Fig. 1 Schematic diagrams of prefabricated steel-reinforced concrete structures for underground metro stations

1 试验方案

1.1 试件设计

以某无柱式地下车站工程为背景,共设计了3个外侧墙底部节点试件,如表1所示。其中,PCJ1和PCJ2分别为侧壁采用实心构造和叠合构造的装配式型钢混凝土外侧墙底部节点试件,RCJ为相应

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

编号	试件类型	主要参数
RCJ	现浇	现浇侧壁
PCJ1	装配式	预制实心侧壁
PCJ2	装配式	叠合侧壁

的现浇对比试件。3个试件的配筋示意图如图2所示。其中,2个装配式型钢混凝土试件PCJ1和PCJ2的节点连接构造进一步说明如下:1)实心侧壁和叠合侧壁的下部均设置混凝土后浇区段,型钢和竖向钢筋均在该区段内连接,待连接完成后再进行后浇区段的混凝土浇筑。该后浇区段的高度根据型钢与竖向钢筋连接的构造和操作要求确定。2)实心侧壁

和叠合侧壁中预埋的型钢与底板中伸出的型钢在侧壁下部进行等强连接,即型钢的翼缘和腹板均采用摩擦型高强度螺栓附加连接板的方式进行连接,连接强度不低于型钢原截面强度。3)实心侧壁中的竖向钢筋以及叠合侧壁内叶预制板中的竖向钢筋与底板中伸出的竖向钢筋在侧壁下部的后浇区段形成搭接连接,搭接构造满足现行规范的相关规定。

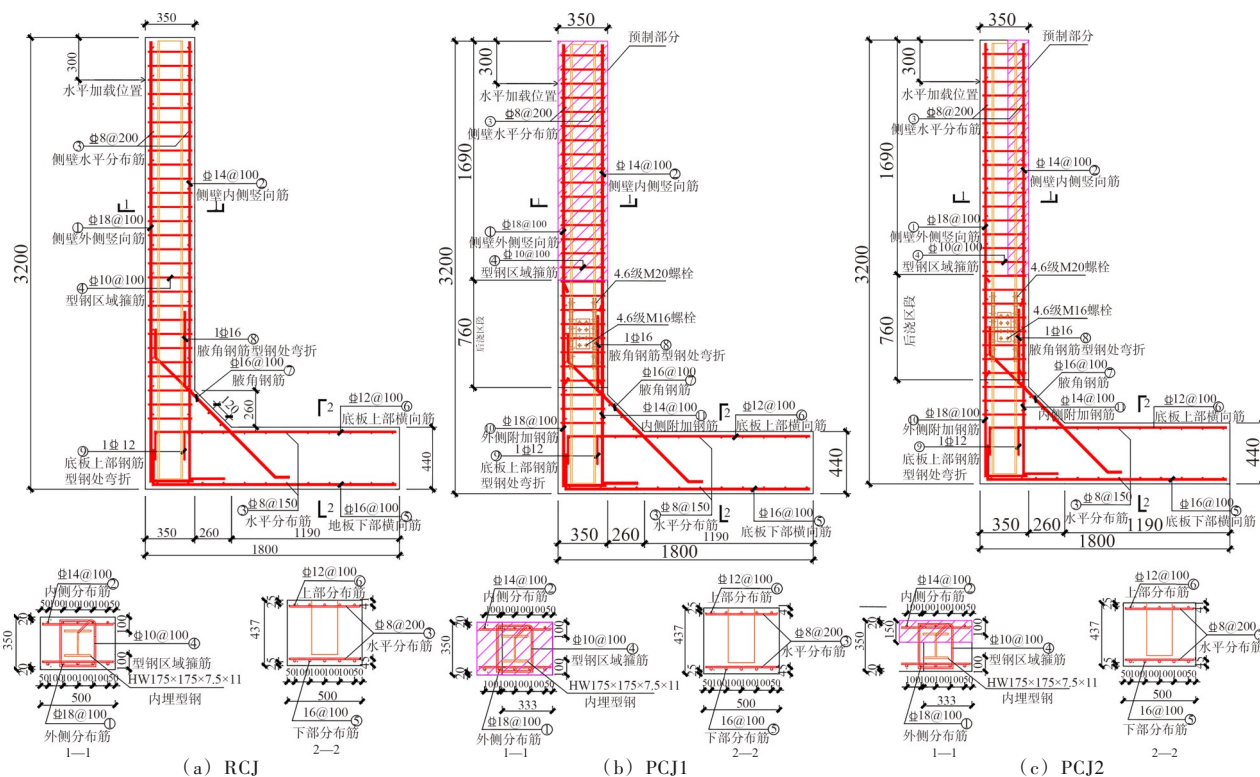


图2 试件配筋示意 mm
Fig. 2 Schematic diagram of reinforcement for the specimens

受试验条件限制,3个试件均设计为1/3缩尺模型。3个试件均采用HRB400钢筋、Q355H型钢和C40混凝土在预制构件工厂制作。其中,2个装配式型钢混凝土试件模拟了实际工程的制作与装配过程,具体如下:1)预制构件制作。首先进行预制构件(包括预制实心侧壁和叠合侧壁预制部分)钢筋笼绑扎与安装、内埋型钢安装以及模板安装,然后进行预制构件混凝土浇筑,待混凝土初凝后,采用专用工具对预制构件的拼缝面进行拉毛处理。2)后浇部分钢筋与内埋型钢施工。在预制构件制作与混凝土养护过程中,同步进行后浇部分钢筋笼绑扎与安装以及内埋型钢安装。3)预制构件吊装与拼装。预制构件混凝土养护达到目标强度后,吊装至设计位置,并采用螺栓连接方式将预制构件内埋型钢与后浇部分内埋型钢进行可靠连接。此时,

预制构件已具有自支承能力,可进一步进行竖向钢筋搭接连接。对于叠合侧壁试件,尚需进行侧壁后浇叠合部分的钢筋绑扎。4)后浇叠合部分混凝土浇筑。在上述预制构件吊装与拼装工序完成后,进行后浇部分模板安装,然后进行后浇部分混凝土浇筑,并养护至设计强度。

1.2 加载方案

在实际工程中,地震对地下车站的作用主要发生在横断面方向,此时外侧墙处于平面外受力状态。因此,本试验通过在试件侧壁顶部施加平面外水平反复荷载的方式加以模拟。此外,为了反映结构自重的影响,施加水平荷载前在试件顶部施加了竖向荷载,并在平面外施加水平反复荷载全过程中保持恒定。竖向恒定荷载的数值按照轴压比0.1计算得到。3个试件均采用如图3所示的加载装置,试

件的底板采用压梁方式固定于刚性底座上。

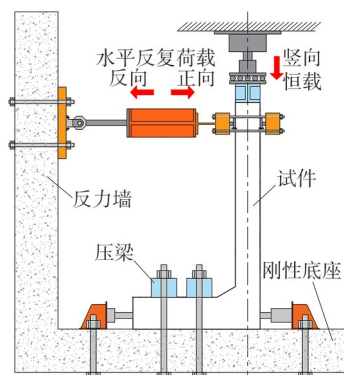


图3 试件加载示意
Fig. 3 Loading setup

试验的水平反复荷载按照我国现行标准 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》中规定的荷载-位移混合控制法施加,具体步骤为:1)试件开裂前按照荷载控制加载;2)试件开裂后按照位移角控制逐级递增加载,每一级加载的位移角增量 $\Delta\delta=0.5\%$,循环3次;3)试验加载后期,当顶部水平荷载下降至最大荷载的85%以下或水平位移超过加载设备极限时,试验结束。

1.3 测试方案

试验的主要测试内容包括:1)试件顶部水平加载点处的侧移和荷载;2)试件底板的水平侧移;3)试件关键截面处钢筋、型钢与混凝土应变;4)试件的裂缝发展情况等。

2 主要试验结果与分析

2.1 受力过程与破坏形态

装配式型钢混凝土试件的受力过程总体上与现浇对比试件相近,均经历了开裂、屈服、达到荷载峰值和破坏4个阶段。1)开裂阶段:实心侧壁试件 PCJ1 和叠合侧壁试件 PCJ2 的开裂荷载均为 20 kN,略小于现浇对比试件 RCJ 的开裂荷载(30 kN);3个试件的第一条裂缝均为水平方向的受弯裂缝,且均出现在侧壁底部、腋角上缘处。2)屈服阶段:当位移角增大到 2.0% 时,RCJ 的竖向钢筋发生受拉屈服。PCJ1 和 PCJ2 的竖向钢筋屈服则均发生在水平位移角达到 1.5% 时。在此过程中,3个试件均在侧壁底部、腋角上缘以上区域新增多条水平裂缝。通过裂缝描线可见,在正反向加载过程中侧壁靠下的个别内、外侧水平裂缝贯通。3)荷载峰值阶段:竖向钢筋屈服后,随着水平位移的增大,试件的顶部

水平荷载仍继续增大。RCJ、PCJ1 和 PCJ2 的水平荷载达到峰值时对应的水平位移角分别为 3.5%、3.0% 和 3.0%。在此加载过程中,3个试件侧壁底部受拉侧的裂缝不断扩展,受压侧逐步出现竖向裂缝,并开始出现起皮和压碎剥落现象。此外,腋角上、下边缘也出现裂缝,并沿斜向向角部延伸。4)极限阶段:随着水平位移的继续增大,3个试件的顶部水平荷载均开始逐渐下降。最终,3个试件均因侧壁底部内侧、腋角上缘区域的混凝土大块压碎,竖向钢筋压屈而发生极限破坏。此阶段中,2个装配式试件和现浇对比试件的侧壁底部外侧与腋角区域外侧的混凝土保护层大面积剥落,腋角表面的混凝土保护层也出现了一定程度的压碎剥落现象。

3个试件的最终破坏形态如图4所示。在整个受力过程中,3个试件的底板仅出现了少量裂缝,底板中的横向受力钢筋均远未屈服,内埋型钢也未屈服。2个装配式型钢混凝土试件未观察到明显的接缝面滑移,表明2个装配式型钢混凝土试件均具有良好的整体性。

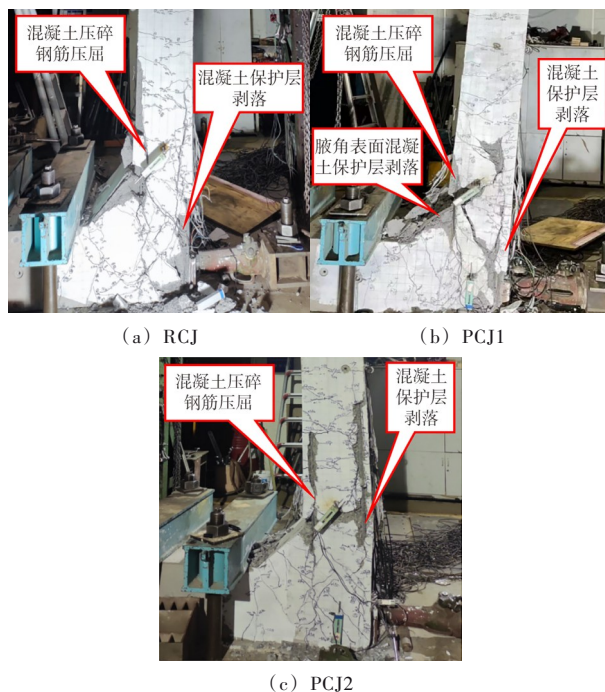


图4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of specimens

2.2 滞回曲线

基于侧壁顶部的水平荷载和位移测试结果,得到3个试件的荷载-位移滞回曲线,如图5所示。

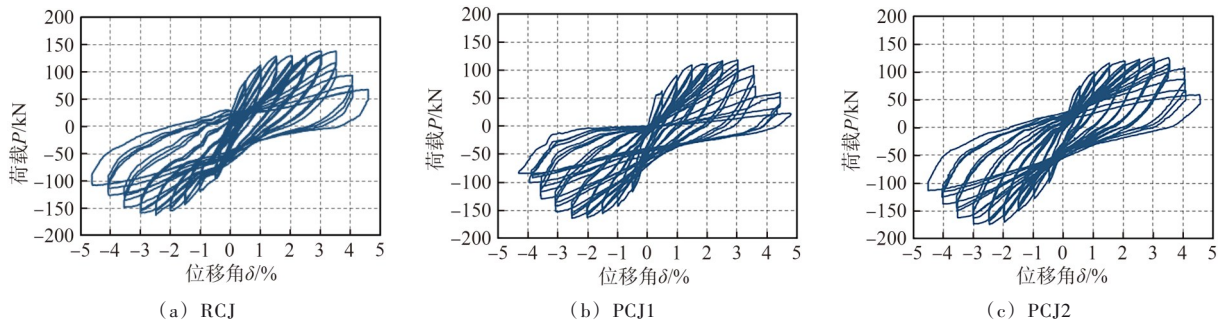


图5 试件P-δ滞回曲线
Fig. 5 P-δ hysteresis curves of specimens

由曲线分析可见:1)2个装配式型钢混凝土试件与现浇对比试件的滞回曲线形态接近,都比较饱满,表现出较好的滞回性能。2)3个试件的反向峰值荷载均明显小于正向峰值荷载,这与试件设计时侧壁内、外侧的竖向钢筋配筋差别一致,与实际工程的设计计算结果也一致。3)同一级位移下3个加载循环的水平荷载逐渐减小,这主要是由于混凝土累积损伤并导致试件强度退化。4)加载后期,3个试件的滞回曲线均有一定的捏拢现象,这主要与裂缝不断扩展、混凝土保护层剥落、钢筋黏结滑移加剧等因素有关。

2.3 骨架曲线

由滞回曲线的外包络线可得到3个试件的骨架曲线,如图6所示。表2则列出了3个试件的特征点荷载与位移角。

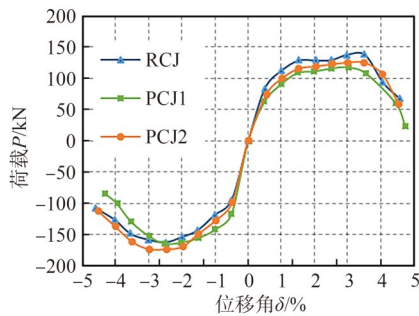


图6 试件P-δ骨架曲线
Fig. 6 P-δ skeleton curves of specimens

由图、表分析可知:1)2个装配式型钢混凝土试件与现浇对比试件的骨架曲线接近,均经历了比较明显的开裂、屈服、荷载峰值和极限破坏四个阶段,这与试件的受力过程及相关试验现象保持一致。开裂之前,所有试件的骨架曲线在正反向均近似为一条直线;开裂后,骨架曲线开始倾斜,表现出一定的刚度退化;屈服后,骨架曲线倾斜加剧,刚度退化

现象明显;达到荷载峰值之后,荷载随着位移的增大逐渐下降,表现出负刚度特性。2)2个装配式型钢混凝土试件PCJ1和PCJ2的承载力总体上与相应的现浇对比试件RCJ接近。其中,实心侧壁试件PCJ1的正向承载力比相应的RCJ低约14.6%,反向承载力高约1.0%;叠合侧壁试件PCJ2的正向承载力比相应的RCJ低约9.1%,反向承载力高约7.1%。3)侧壁构造对2个装配式型钢混凝土试件承载力的影响较小。其中,实心侧壁试件PCJ1的正向承载力比叠合侧壁试件PCJ2的低约6.0%,反向承载力低约5.7%。4)3个试件的反向承载力均明显高于正向承载力,这与3个试件的侧壁内外侧竖向钢筋的配筋设计结果一致,也与实际工程中侧壁在正常使用状况下的内力分析结果一致。

表2 试件特征值与延性系数

Table 2 Characteristic values and ductility coefficients of specimens

试件	加载方向	屈服		峰值		极限		延性系数 μ	
		P_y/kN	$\delta_y/\%$	P_{max}/kN	$\delta_{max}/\%$	P_u/kN	$\delta_u/\%$	正反向	均值
RCJ	正向	121.5	1.3	138.4	3.5	117.6	3.8	3.0	2.9
	反向	135.5	1.4	162.4	2.5	138.0	3.8	2.8	
PCJ1	正向	103.3	1.3	118.2	3.0	100.5	3.7	2.8	3.1
	反向	141.0	1.0	164.0	2.5	139.4	3.3	3.3	
PCJ2	正向	109.5	1.3	125.8	3.0	106.9	4.1	3.1	3.0
	反向	142.4	1.3	173.9	2.5	147.8	3.8	2.8	

2.4 延性与变形能力

延性是反映结构或构件受力性能的重要指标之一,常以延性系数表示。延性系数 $\mu=\delta_u/\delta_y$,其中,屈服位移角 δ_y 一般基于骨架曲线通过能量法确定;极限位移角 δ_u 一般为荷载下降到峰值荷载的85%时对应的位移角,如荷载未下降到峰值荷载的85%,则取破坏时的位移角。3个试件的延性系数如表2所示。

从表中数据分析可见:1)3个试件的延性系数均值在2.9~3.1之间,均表现出较好的延性。2)2个装配式型钢混凝土试件的延性系数均高于相应的现浇对比试件,其中实心侧壁试件PCJ1的延性系数高约7.0%,叠合侧壁试件PCJ2的延性系数高约3.4%。3)3个试件的正反向极限位移角均达到3.3%以上,最高达到4.1%,表现出良好的变形能力。

2.5 刚度退化

刚度退化是指结构或构件在反复受力过程中刚度逐渐降低的特性,它在一定程度上反映了结构或构件的损伤程度。通常采用割线刚度 $K_j=P_j/\Delta_j$ 来表示。其中, P_j 为第 j 级加载各循环顶部水平荷载的均值, Δ_j 为第 j 级加载各循环顶部水平位移的均值。3个试件的刚度退化曲线如图7所示。

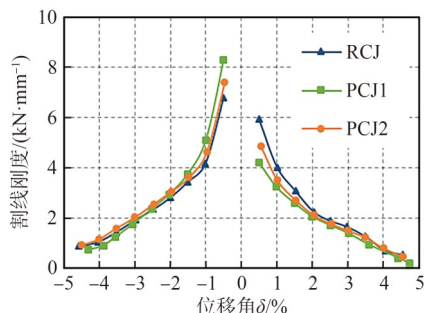


图7 试件刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curves of specimens

可见:1)2个装配式型钢混凝土试件的刚度退化规律与相应的现浇试件基本一致,在加载前期刚度下降速度较快,随着位移的增加刚度下降趋势变缓,这表明试件的刚度退化主要集中在加载前期。2)屈服后,3个试件的刚度下降均相对放缓,这主要是因为试件的刚度下降主要由混凝土裂缝的产生和发展引起,这一过程主要集中在试件屈服之前。3)在同一级位移下,3个试件的反向刚度均低于正向刚度,这主要与3个试件的侧壁内、外侧配筋差别以及腋角构造有关。

2.6 耗能能力

耗能能力是评价结构或构件抗震性能的重要指标之一。通过计算滞回曲线所包围的面积可以对试件的耗能进行量化分析。图8所示为3个试件的累积耗能曲线。

可见:1)开裂前,3个试件基本处于弹性状态,耗能均较小;随着位移的增大,试件逐渐进入弹塑性状态,耗能明显增大;破坏阶段,试件的水平荷载

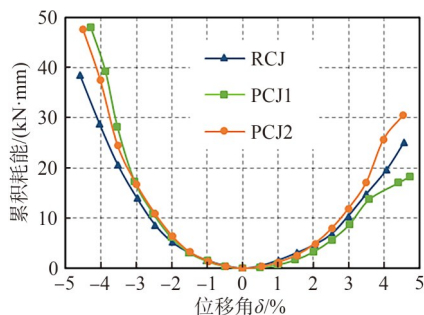


图8 试件累积耗能曲线

Fig. 8 Accumulative energy dissipation

下降,但累积耗能仍会随着位移的增大而增加。2)3个试件在同级位移下的反向耗能均大于正向耗能,这主要与侧壁的内、外侧配筋以及腋角构造导致的水平荷载差别有关。

3 结论

针对无柱式地下车站提出了装配式型钢混凝土结构方案,通过3个1/3缩尺模型的低周反复荷载试验对其关键受力部位——外侧墙底部节点的抗震性能进行研究,主要结论如下:

1)采用实心侧壁和叠合侧壁构造的装配式型钢混凝土外侧墙底部节点均具有良好的整体性,滞回曲线和骨架曲线的总体形态与相应的现浇对比试件接近。

2)装配式型钢混凝土试件PCJ1和PCJ2的承载力总体上与相应的现浇对比试件RCJ接近。其中,实心侧壁试件PCJ1的正、反向承载力分别比试件RCJ低约14.6%和高约1.0%;叠合侧壁试件PCJ2则分别低约9.1%和高约7.1%。

3)装配式型钢混凝土试件的延性系数与相应的现浇对比试件相近,均在2.9~3.1之间,表现出较好的延性。3个试件的正反向极限位移角均达到3.3%以上,表现出良好的变形能力。

4)装配式型钢混凝土试件的耗能能力和刚度退化规律总体上与现浇对比试件接近。

参考文献

- [1] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1849-1870.
- [2] 邵莹,胡双平,高志宏,等. 装配式混凝土地下车站结构应用与研究进展[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(4): 89-93.
- [3] YURKEVICH P. Developments in segmental concrete linings for subway tunnels in belarus [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995, 10(3): 353-365.
- [4] 钱七虎,戚承志. 俄罗斯地下铁道建设精要[M]. 北京:中国

- 铁道出版社, 2002.
- [5] 杨秀仁,黄美群. 地铁车站预制装配新技术研究策略[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(1): 78-85.
- [6] 杨秀仁,林放,黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榀接头抗弯刚度试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 38-43.
- [7] 杨秀仁,林放,黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榀长接头抗弯承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 111-118.
- [8] 杨秀仁,黄美群,林放. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榀短接头抗弯承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 57-64.
- [9] 李霞,杨秀仁. 水平地震作用下装配式地铁车站结构与同型现浇结构内力对比分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 147-154.
- [10] 杜修力,刘洪涛,路德春,等. 装配整体式地铁车站侧墙底部节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 38-47.
- [11] 冯帅克,郭正兴,刘毅,等. 装配式地铁车站外墙-底板节点抗震性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 259-268.
- [12] 冯帅克,郭正兴,刘毅,等. 半预制装配式地下车站侧墙底部节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(2): 190-201.
- [13] 冯帅克,郭正兴,刘毅,等. 装配式地铁车站侧墙-顶板节点抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 610-617.
- [14] 杜修力,刘洪涛,许成顺,等. 装配整体式地铁车站纵断面方向梁板柱中节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 95-103.
- [15] 杜修力,刘洪涛,许成顺,等. 装配整体式地铁车站横断面方向梁板柱中节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(8): 51-60.
- [16] 陈晋男,杜修力,许成顺,等. 基于IDA方法的矩形装配式地铁车站结构地震易损性评价[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 37-46.