

装配整体式地下车站侧墙开洞结构力学性能分析*

潘清¹ 费金新² 徐军林² 邢琼² 冯帅克³

(1. 无锡地铁集团有限公司, 214023, 无锡; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

3. 东南大学土木工程学院, 211189, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘要 当前侧墙开洞的研究主要集中在地上结构开洞墙体的整体受力性能, 而对装配式地下车站侧墙开洞结构的研究还较少。综合考虑侧墙开洞结构受力及施工难易程度, 接口框架分拆为梁和柱, 节点设置在梁端。为确定侧墙开洞结构的力学性能, 对设计方案进行了力学试验与数值模拟分析。研究结果表明: 通道接口的破坏形态主要表现为洞口梁端的扭转斜裂缝, 梁的扭转破坏是侧墙开洞结构失效的主要原因; 侧墙开洞结构的刚度退化的主要原因是混凝土开裂, 而构件中钢筋屈服的影响基本上可忽略不计; 对侧墙开洞结构进行数值分析, 可得到构件的内力分布; 梁端的扭转承载力是侧墙开洞结构平面外承载力的主要部分。给出了洞口梁的扭转承载力建议公式, 为装配整体式地下车站侧墙开洞结构的设计提供了参考依据。

关键词 装配整体式地下车站; 侧墙开洞结构; 力学试验; 数值模拟分析

中图分类号 TU93; U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.015

Mechanical Performance Analysis of Side Wall Opening Structure in Assembled Monolithic Underground Station

PAN Qing, FEI Jinxin, XU Junlin, XING Qiong, FENG Shuaike

Abstract Researches on side wall opening mainly focus on the overall mechanical performance of walls with opening structure above-ground, while few studies are on side wall opening structure in assembled monolithic underground station. Comprehensively considering the force condition of the opening structure and the difficulty level of construction, the interface frame is divided into beams and columns, and the nodes are set at the beam ends. In order to elucidate the mechanical performance of side wall opening structure, mechanical tests and numerical simulation analysis are carried out. Research results show that: the destruction morphology of the passage interface is mainly manifested as the torsional oblique crack at the ends

of the beam. The torsion destruction of the beam is the main reason for side wall opening structure failure. The stiffness degradation of side wall opening structure is mainly due to concrete cracking, and effect from yield of the steel bar in component can be overlooked. By numerically analyzing side wall opening structures, internal force distribution of the components is obtained. The torsional bearing capacity at beam ends is the main factor of side wall opening structure out-of-plane bearing capacity. Recommended formula for the opening beam torsional bearing capacity is given, providing reference for the design of side wall opening structure in assembled monolithic underground station.

Key words assembled monolithic underground station; side wall opening structure; mechanical tests; numerical simulation analysis

First-author's address Wuxi Metro Group Co., Ltd., 214023, Wuxi, China

0 引言

对于地上建筑结构, 因通风采光与室内通道等使用要求, 必须对墙体进行开洞。研究者开展了开洞对承重墙体受力性能的影响研究。文献[1]对带暗梁、暗柱的开洞混凝土复合墙板进行力学性能试验, 研究开洞墙板的弯曲性能与偏心受压性能; 文献[2]等采用有限元数值模拟的方法, 对不同开洞率、开洞位置的填充框架结构平面外受力性能进行研究, 主要通过裂缝分布与层间位移角对填充墙框架结构的整体受力性能进行评价。随着装配式地上建筑结构的应用, 不少研究者开展了装配式开洞墙体的力学性能研究; 文献[3]对装配式混凝土结构开洞墙体(该墙体由预制混凝土墙板和现浇边缘构件组成)取3个相同尺寸的开洞墙体进行低周反复荷载试验, 通过对破坏模式与滞回曲线的分析得出, 装配式开洞墙体满足抗

* 江苏省住房和城乡建设厅科研项目(2019ZD001048)

震性能的要求;文献[4]对两层开洞预制剪力墙的抗震性能进行了力学试验与数值分析。以上的研究主要是针对现浇开洞承重墙体与装配式开洞承重墙体的整体力学性能,而对墙体中开洞结构力学性能的研究却较少。目前的研究主要集中在地上开洞建筑结构,而对地下车站开洞结构受力性能的研究基本上还较少涉及。

近年来,在国家“碳中和、碳达峰”的政策引领下,装配式建筑结构的环保节能优点凸显。住房和城乡建设部发布了《绿色建造技术导则(试行)》通知,明确鼓励装配式建筑产业的发展。近年来装配式结构逐步在地下结构中得到应用。国内已建成的装配式地下车站,采用全装配式结构和干式节点连接。干式节点的防水性能有限,难以在南方富水地区推广应用。现开展装配整体式叠合有柱地下车站结构体系,车站内侧采用预制构件,近土侧采用现浇混凝土,防水性能优良,可在南方富水地区推广。该结构体系为国内首创,在设置连接通道时,需在侧墙开洞,且开洞尺寸较大,侧墙的结构承载力受到较大削弱。为改善侧墙及其开洞结构的受力性能,需在开洞处设置接口框架。本文采用力学性能试验与数值模拟的分析方式,对装配整体式侧墙开洞结构受力性能进行力学试验与数值模拟分析,研究其破坏形态与力学性能,为装配式地下车站侧墙开洞结构的设计提供理论依据。

1 装配整体式地下车站结构的概况

某地铁车站为标准地下两层车站,为单柱双跨箱型结构。车站结构底板采用现浇形式,中柱为钢管柱,纵梁采用型钢混凝土叠合梁,中板、顶板及侧墙均采用叠合结构形式。其中:中板和顶板采用预制预应力板叠合现浇混凝土面层形成装配整体式钢筋混凝土楼板结构;侧墙由内侧预制墙板和外侧现浇混凝土形成叠合整体式墙板结构。装配整体式地下车站结构剖面见图1。

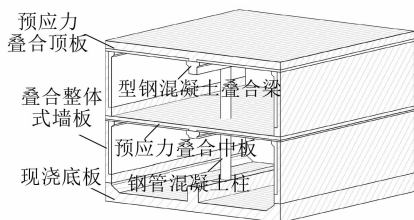


图1 装配整体式地下车站结构剖面图

Fig.1 Section of assembled monolithic underground station structure

当地铁车站出入口通道接入车站时,侧墙开洞尺寸为7.00 m(宽)×4.85 m(高)。侧墙开洞位置整体受力情况较为复杂,需在开洞位置设置相应的接口框架预制结构。侧墙开洞结构由与半预制叠合侧墙连接的型钢混凝土梁、型钢混凝土柱等组成。

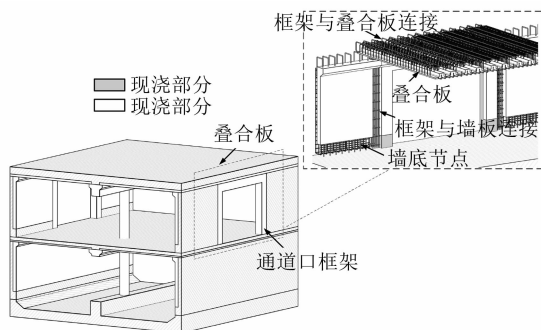


图2 侧墙开洞结构示意图

Fig.2 Diagram of side wall with opening structures

2 侧墙开洞接口框架设计方案研究

侧墙开洞接口框架设计方案的研究主要集中在节点位置与构件重量对施工难易程度的影响,主要方案有以下几种:

1) 将接口门式框架梁、柱整体预制后,直接与相邻叠合墙板进行湿节点连接浇筑。该方案的结构整体性好,现场拼接安装工程量少,施工速度快,但是整个接口框架较重(约30 t),对吊装器械要求高,施工难度较大。

2) 将接口处的门式框架分成两块“7”型的构件,在梁正中间进行分段,拼装后通过湿节点连接,再与相邻叠合板墙进行连接。该方案单个预制构件重量约15 t,吊装施工难度稍大,现场需进行一次拼装施工,而拼装点位于正弯矩最大位置,对结构受力稍有影响。

3) 将接口处的门式框架梁、柱全部拆分成单个构件,各构件之间进行拼装。单个构件的重量均小于10 t,吊装施工较为方便。该方案拼装湿节点稍多,但湿节点的位置可设于梁受力较小的1/3跨的位置,对整个结构受力影响较小,施工难度也相对较小。

为减小构件重量,降低施工难度与施工成本,同时匹配整个预制车站单个构件均小于10 t的要求。该地铁车站项目采用方案3,将接口处的门式框架梁和柱全部拆分成单个构件,各构件分别进行

拼装施工。接口框架构件分拆与节点位置见图 3、图 4。

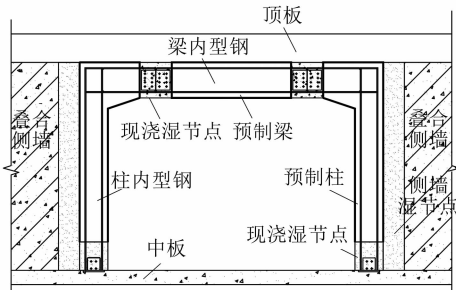


图 3 接口框架立面图

Fig. 3 Elevation of interface framework

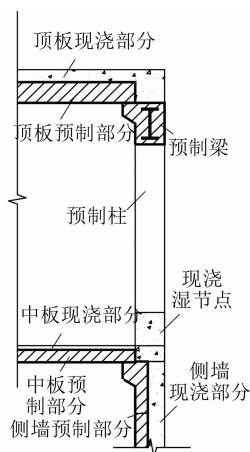


图 4 接口框架剖面

Fig. 4 Cross-section of interface framework

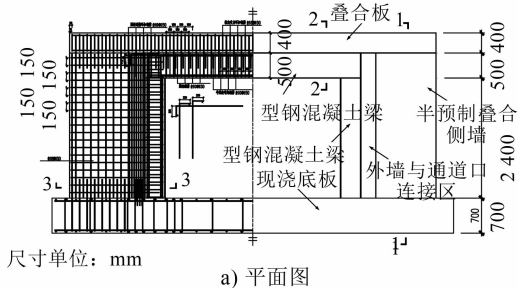
该地下车站接口框架结构的预制框架梁、柱构件均采用型钢混凝土结构,拼装阶段通过型钢连接,使施工阶段的荷载均由型钢承担;拼装完成后通过现浇混凝土湿节点连接形成整体框架;使用阶段由型钢混凝土梁与型钢混凝土柱共同承载。整个接口框架与相邻侧墙及板亦通过现浇混凝土湿节点进行连接,使整个接口框架与侧墙连成整体,形成可靠的整体受力体系。该方案施工便捷,在施工阶段与正常使用阶段结构受力可靠。

3 侧墙开洞结构力学试验

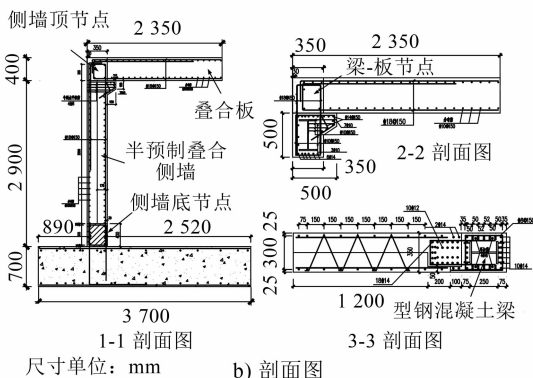
3.1 试件参数

试验只设计了一组试件,试件尺寸如图 5 所示。试件整体宽度为 7.3 m (外墙侧边距离),高度为 4 m。试件由通道口型钢混凝土框架、半预制叠合侧墙、叠合顶板和现浇底板等组成。整个试件为 1:2 缩尺模型。试件主受力钢筋按照与实际工程构

件相同配筋率的原则进行配置,所有试件预制段混凝土等级均为 C50,现浇混凝土等级为 C40。



a) 平面图



b) 剖面图

图 5 模型试件尺寸图

Fig. 5 Dimensions of testing models

该组试件中,型钢混凝土框架的平面尺寸为 4.3 m (宽)×2.9 m (高),型钢混凝土梁截面尺寸为 350 mm×500 mm,型钢规格为 H 350 mm×200 mm×12 mm×14 mm,型钢上、下翼缘均设置直径 16 mm、长度 30 mm 的纵向抗剪栓钉,以防止与混凝土接触间的剪切滑移。梁上和梁下各设置 6 根直径为 14 mm 的 HRB400 级受力钢筋。箍筋采用 HRB400 级钢筋,直径 10 mm,间距 150 mm,如图 5 b) 2-2 剖面所示。型钢混凝土柱截面尺寸为 350 mm×400 mm,型钢规格为 H 250 mm×200 mm×12 mm×14 mm。柱截面平面外受力方向两侧对称布置 12 根直径为 14 mm 的 HRB400 级受力钢筋,箍筋采用 HRB400 级钢筋,直径为 10 mm,间距为 150 mm,如图 5 b) 3-3 剖面所示。框架两侧均连接 1.5 m 宽的半预制叠合侧墙,侧墙牛腿顶面与梁牛腿顶板面齐平,单侧预制墙板上下端均伸出 U 形受力钢筋,用于和顶板及底板的搭接连接,U 形受力钢筋采用直径为 18 mm 的 HRB400 级受力钢筋,如图 5 b) 1-1 剖面所示。叠合顶板宽度为 7.3 m,叠合板端部外伸 U 形受力钢筋与墙及梁顶面外伸的 U 形钢筋搭接连接,U 形受力钢筋采用直径为 18 mm 的 HRB400 级受力钢筋,间距为 150 mm。试件加工图见图 6。

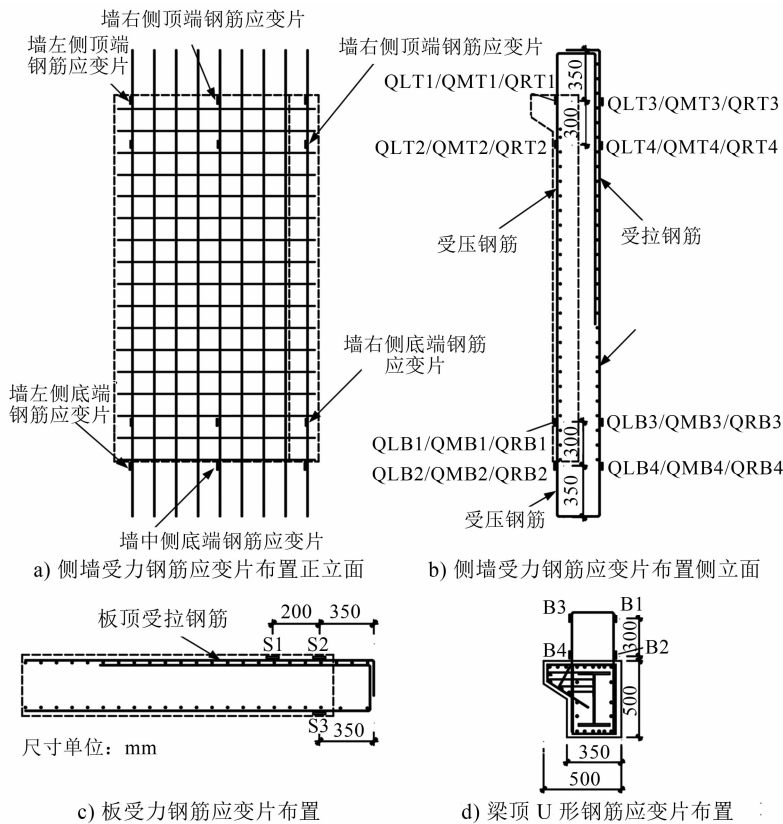


图 9 钢筋应变片布置示意图

Fig. 9 Diagram of steel bar reinforcement strain gauge arrangement

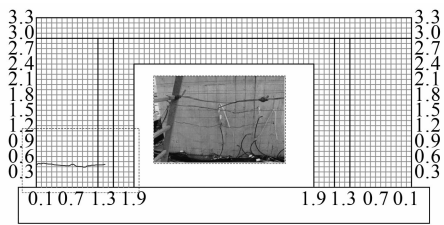


图 10 裂缝出现阶段

Fig. 10 Phase of cracks appearing

时,洞口右上角(梁柱连接位置)出现水平裂缝,长约 35 cm、宽约 0.03 mm,如图 11 所示。在板顶荷载加载至 264 kN 时,洞口右上角水平裂缝向侧墙截面发展,裂缝宽度达到 0.2 mm,部分侧墙受拉面裂缝发展进入柱截面。在板顶荷载加载至 308 kN 时,型钢混凝土柱上出现多处水平裂缝,开洞角部出现约 45°的斜裂缝。同时,板顶面靠近外侧墙一端的左右两侧均出现水平裂缝。随着荷载的增加洞口角部出现多条斜裂缝,在板顶荷载加载至 484 kN 时,斜裂缝宽度达到 0.25 mm,此时墙身裂缝基本出齐并与柱上裂缝相连形成通长的水平裂缝,裂缝宽度可达到 0.6 mm。随着荷载的继续增加,裂缝宽度继续

增加,试件侧墙发生明显的弯曲变形,在板顶荷载达到 897.6 kN,洞口右上角最初的水平裂缝宽度超过 2 mm,右上角部分混凝土开始剥落露出 U 形钢筋的末端,当即停止加载。图 12 给出了试件在最后一级加载时的裂缝分布。

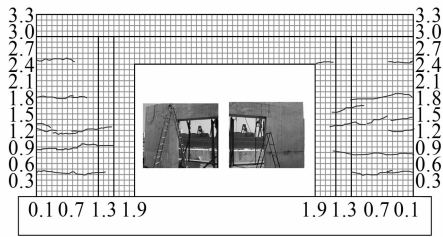


图 11 裂缝发展阶段

Fig. 11 Phase of cracks developing

梁上裂缝并不出现在梁底受拉面,多集中于梁两端及洞口的角部。除最早出现的水平裂缝外,其余裂缝均为近 45°的斜裂缝,且在梁内侧观察面对应出现反对称斜裂缝。这说明试件最终破坏是型钢混凝土梁的扭转破坏,斜裂缝是由梁的受扭产生的,在加载后期扭转斜裂缝的宽度开展明显加快。

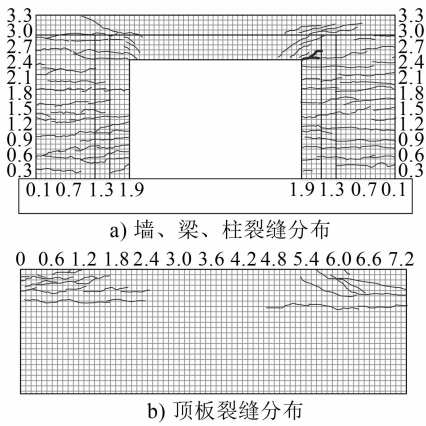


图 12 最后加载级裂缝分布

Fig. 12 Distribution of cracks at the final loading stage

梁的扭转造成梁柱相交处混凝土出现大量斜裂缝,斜裂缝的发展降低了混凝土对顶部 U 形钢筋的约束,造成 U 形钢筋末端出现粘结开裂破坏,附近混凝土出现剥落。因此,洞口上方型钢混凝土梁端扭转裂缝的发展是造成试件失效的主要原因。

4.2 荷载-位移曲线与试件应变分析

板顶荷载-板端竖向位移曲线见图 13。从图 13 中可以看出,加载初期试件刚度较大,在板顶荷载达到 176 kN、板端弯矩达到 340 kN·m 后,刚度开始退化;随着荷载的增大,荷载-位移曲线的斜率基本保持不变,说明试件整体刚度基本不变。

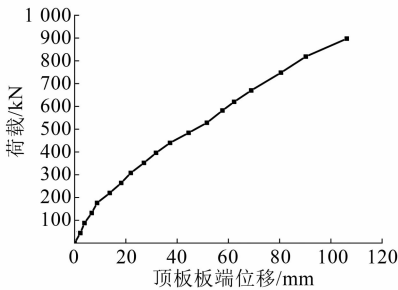


图 13 荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curve

墙内受拉侧与受压侧受力钢筋的应变变化如图 14 所示。图 14 展现了同一侧叠合墙板的左端、中部、右端 3 个不同位置的受力钢筋在靠近上下 U 形环扣位置的应变变化,根据型钢材性试验的结果,可以计算出受力纵筋(直径为 18 mm,HRB400)的屈服应变为 0.002 2。在加载弯矩达到 1 200 kN·m 时,侧墙部分受拉钢筋屈服,整个加载过程中侧墙受压纵筋未屈服。顶板受拉钢筋在靠近 U 形环扣位置的应变变化通过应变片 S1、S2 测得(见图

9),结果如图 15 所示。顶板受拉钢筋在加载过程中并未出现屈服。为研究型钢混凝土柱中钢材的应变,在型钢混凝土柱外侧受拉钢筋及型钢布置应变计,应变分布如图 16 所示。

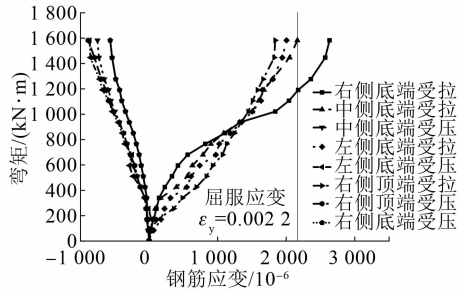


图 14 侧墙受力钢筋应变变化

Fig. 14 Strain change of the reinforced steel bars in the side wall

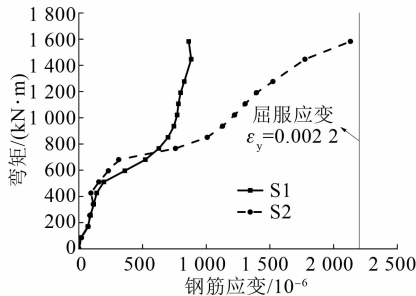


图 15 顶板受拉钢筋应变变化

Fig. 15 Strain change of the reinforced steel bars in the top plate

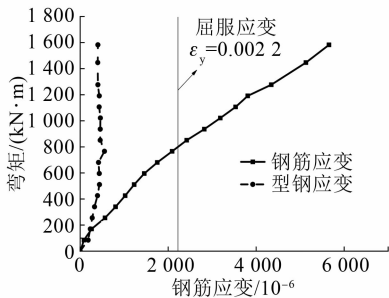


图 16 柱内型钢钢材应变变化

Fig. 16 Strain change of the section steel in the column

由图 16 可以看出,柱最外层受拉钢筋在弯矩 800 kN·m 时开始屈服,但整个加载过程中,柱内型钢钢材并未屈服。

从以上分析中得出,在加载过程中顶板钢筋没有发生屈服破坏。侧墙开洞结构在加载前期发生刚度退化,而侧墙与柱内钢筋的屈服荷载均比侧墙开洞结构刚度退化的荷载大,由此表明接口框架刚度退化主要因为混凝土开裂造成的。在加载后期,

侧墙开洞结构平面外刚度基本不变,而侧墙与柱的钢筋发生屈服破坏,说明侧墙与柱的材料屈服强度对侧墙开洞结构平面外刚度影响可忽略不计。

5 数值模拟分析

5.1 数值模拟建模

在试验研究的基础上,采用 ABAQUS 有限元计算软件建立与试件同尺寸的有限元模型进行分析研究。钢筋采用 3 维 2 节点桁架单元(T3D2),混凝土及型钢采用 3 维 8 节点 6 面体一阶线性减缩积分单元(C3D8R)。模型建立时假定混凝土、钢筋与型钢之间,预制与现浇混凝土之间均无相对滑移,钢筋与型钢嵌入混凝土中,同时忽略混凝土的收缩、徐变等效应,仅限于短期荷载作用下对模型进行分析。混凝土材料本构关系采用塑性损伤模型,钢材采用理想弹塑性模型。模型的边界条件与试验试件一致,在数值模型中对侧墙底与柱底施加位移约束,试件模型板端施加位移荷载,如图 17 所示。

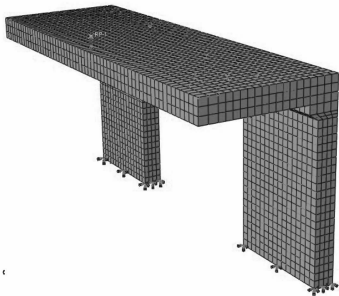


图 17 出入口部分有限元模型

Fig. 17 Finite element model of part of the entrance and exit

5.2 数值模拟结果

图 18 为侧墙开洞结构的数值模拟结果和试验结果的荷载-位移对比曲线。可以看出,数值模拟的试件初始阶段刚度略大于试验结果,屈服阶段模拟结果趋近于试验结果。图 19 给出试件的应力云图反应了试件裂缝的开展情况,与试验情况基本一致。总体来说,有限元模拟结果显示效果较好,试验曲线和拟合曲线吻合较高,选取的计算模型较为准确地模拟了出入口试件的整个受力过程。

图 20 给出了试件的最大塑性应变云图,通过塑性应变的演化情况,可以追踪试件混凝土的开裂过程。由图 20 a) 可知,在试件侧墙中部与顶部位置混凝土受拉开始屈服损伤,对应为初始裂缝产生阶段。随后,侧墙混凝土受拉屈服区域逐渐增加,并逐渐向柱截面内发展,如图 20 b) 所示。在数值模

拟分析的后期(见图 20 c)),侧墙与柱表面基本已无新裂缝产生,此时混凝土的最大应变出现在顶板与侧墙及梁端与侧墙的交界处,与试验加载后期裂

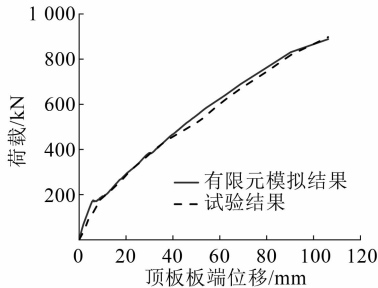


图 18 有限元数值模拟与试验的荷载-位移曲线对比
Fig. 18 Load-displacement curve comparison between finite element numerical simulation and tests

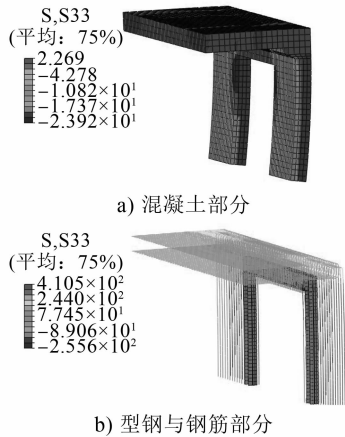


图 19 混凝土、型钢与钢筋的应力云图
Fig. 19 Stress nephogram of concrete, section steel and steel bar

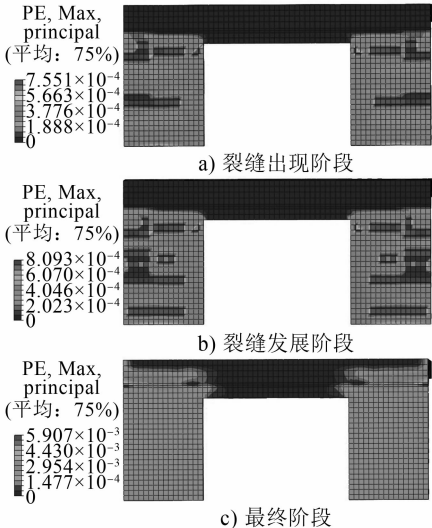


图 20 试件破坏形态模拟值
Fig. 20 Simulation value of the demolished status of specimen

缝集中出现的位置基本相同,证明了选取的有限元模型是正确的。

6 承载力分析

从以上分析中表明,侧墙开洞结构的主要破坏特征是洞口梁端的扭转破坏;从构件应变分析得出,侧墙与柱的钢筋屈服强度对接口框架的平面外刚度影响很小;因此得出结论,出入口上方型钢混凝土梁扭转裂缝的发展造成试件失效,对侧墙开洞结构平面外承载力起决定作用的是接口框架梁的抗扭承载力。

对数值模拟分析结果进行整理分析,得到后期板端荷载 P 作用下的梁端扭矩 T 、墙底弯矩 M_q 及柱底弯矩 M_c (见表 3)。

表 3 接口框架构件荷载与内力

Tab.3 Load and internal force of interface frame component

P/kN	$T/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_q/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_c/\text{kN}\cdot\text{m}$
620.0	80.8	520.6	94.1
670.0	86.8	559.1	101.0
748.0	95.8	615.6	111.3
818.4	104.8	673.0	121.6
897.6	116.7	749.3	135.3

型钢混凝土梁的抗扭承载力可采用文献[5-6]提供的理论公式进行计算。经计算型钢混凝土梁的整体抗扭承载力为 $88.1\text{ kN}\cdot\text{m}$,说明试件中的型钢混凝土梁在板端荷载加载到 670 kN 至 748 kN 时发生了扭转破坏。这与试件加载过程中梁端出现大量扭转斜裂缝的荷载相对应,说明了梁的扭转破坏是造成试件失效的直接原因。

7 结语

对装配式整体式地下车站的出入口通道位置处,需设置出入口接口框架。侧墙开洞结构由型钢混凝土框架、半预制叠合墙、叠合顶板与现浇底板等组成。通过比较设计方案中节点设置位置及对施工难易程度的影响,最终确定接口框架分拆为梁、柱,节点设置在梁两端。为确定侧墙开洞结构的受力性能,进行了力学试验与数值分析,得到以下结论:

1) 侧墙开洞结构破坏形态主要表现为型钢混凝土梁端扭转裂缝的发展,因此框架梁的扭转破坏是造成通道接口破坏的主要原因。

2) 通过对侧墙开洞结构的荷载-位移曲线及构

件内钢筋应变分析,造成侧墙开洞结构平面外刚度退化的主要因素是混凝土开裂,构件中钢筋的屈服强度对侧墙通道刚度的影响很小。

3) 利用 ABAQUS 有限元模型,并与力学试验结果进行比较分析,验证了所选有限元模型的正确合理性。在此基础上,利用有限元模型分析得出构件的内力结果。梁端扭转承载力是决定侧墙开洞结构平面外承载力的主要因素,梁端扭转承载力的计算公式建议参照文献[5-6]。

参考文献

[1] 邱灿星,季可凡,侯和涛,等. 带暗梁柱的开洞混凝土复合墙板受弯和偏压性能足尺试验研究[J]. 建筑结构学报,2018(9):85.
QIU Canxing,JI Kefan,HOU Hetao,et al. Research on behaviors of composite wall panels with holes and inner frame under flexural loading and eccentric loading[J]. Journal of Building Structures,2018(9):85.

[2] 杨春侠,吴艳谋,梅艺,等. 开洞对 RC 框架填充墙平面外受弯性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2021(1):78.
YANG Chunxia,WU Yanmou,MEI Yi,et al. Effect of opening on out-of-plane mechanical behavior of RC frame infilled wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2021(1):78.

[3] 杨宝坤,王二成,刘凯,等. 低层装配式混凝土墙板结构开洞墙体抗震性能试验研究[J]. 科学技术与工程,2020(34):142.
YANG Baokun,WANG Ercheng,LIU Kai,et al. Experimental study on seismic behavior of open wall with low-rise fabricated concrete wall panel structure[J]. Science Technology and Engineering,2020(34):142.

[4] 种迅,张蓝方,万金亮,等. 两层带开洞预制剪力墙抗震性能试验研究与数值模拟分析[J]. 工程力学,2019(5):176.
CHONG Xun,ZHANG Lanfang,WAN Jinliang,et al. Experimental study and numerical simulation on seismic performance of two-story precast shear walls with opening[J]. Engineering Mechanics,2019(5):176.

[5] 邵永健,郁文,陈宗平,等. 实腹式型钢混凝土梁受扭性能试验研究[J]. 建筑结构,2013(8):58.
SHAO Yongjian,YU Wen,CHEN Zongping,et al. Experimental study on torsional behavior of solid web steel reinforced concrete beams[J]. Building Structure,2013(8):58.

[6] 陈宗平,陈宇良,钟 铭,等. 焊接栓钉型钢混凝土梁抗扭性能试验研究[J]. 土木工程学报,2018(6):72.
CHEN Zongping,CHEN Yuliang,ZHONG Ming,et al. Experimental investigation on anti-torsion performance of welded stud steel reinforced concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal,2018(6):72.

(收稿日期:2021-07-12)