

地铁车辆段检修库装配式混凝土空心柱抗震性能研究

Seismic Performance of Hollow Precast Concrete Columns used in the Metro Overhauling Depot

陈俊玮, 刘汉赋, 袁焕鑫, 胡晓斌

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对用于地铁车辆段检修库的新型装配式混凝土空心检修柱, 分别制作预制混凝土空心柱、预制混凝土实心柱及现浇混凝土空心柱试件, 采用拟静力试验及有限元数值模拟, 对其抗震性能进行对比研究。结果表明: 试件破坏形态均为剪弯破坏, 承载能力及退化性能较为接近, 变形能力好, 但装配式空心试件耗能能力及延性略差; 对于装配式混凝土空心检修柱, 可以将其截面简化成工字形, 采用规范中的公式来计算承载力; 与装配式混凝土实心柱相比, 装配式混凝土空心柱可以大幅度节约材料, 且基本上实现了“等同现浇”; 当轴压比变大时, 装配式混凝土空心柱水平承载力先变大后变小, 耗能能力变差。

关键词: 装配式混凝土空心柱; 拟静力试验; 抗震性能; 数值模拟

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0113-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.022

CHEN Junwei, LIU Hanfu, YUAN Huanxin, HU Xiaobin

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To study seismic performance of the hollow precast concrete column used in the metro overhauling depot, three specimens including a hollow precast concrete column, a solid precast concrete column and a hollow cast-in-situ concrete column were constructed and investigated through pseudo-static test and finite element simulation. The results show that the failure modes of the specimens are all flexure-shear type. In addition, the bearing capacity and degradation performance are similar, and the deformation ability is good. However, the energy dissipation capacity and ductility of the hollow precast specimen is relatively poorer. For the hollow precast concrete column, the section can be simplified into an I-shaped one to compute the bearing capacity using the formulas in the code. Compared with the solid precast concrete column, the hollow one has a great advantage of saving materials while emulating the cast-in-situ one. As the axial compressive ratio increases, the bearing capacity of the hollow precast concrete column rises first and then drops while the energy dissipation capacity decreases.

Keywords: hollow precast concrete column; pseudo-static test; seismic performance; numerical simulation

0 引言

目前, 现浇作业是我国建造混凝土结构的主要

施工方法, 这种方法存在施工效率慢、材料使用率低、对自然环境不友好等诸多缺点^[1]。与现浇结构相比, 装配式混凝土结构具有现场操作方便、施工效率高、建筑环保性能好、施工安全的优点^[2]。但是, 由于预制构件众多, 装配式混凝土结构整体性稍差且在构件连接部位可能存在薄弱环节^[3]。不同连接方式对装配式混凝土结构的受力性能影响不同, 有效可靠的连接方式是装配式混凝土结构研究的重要方向^[4-6], 装配式混凝土结构或构件的抗震性能也成为关注重点。

作者简介: 陈俊玮 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 结构抗震。

通信作者: 胡晓斌 (1979—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 结构抗震。

收稿日期: 2022-12-31

建筑结构

地铁车辆段检修柱作为车辆段中的重要功能构件，负责将柱顶部车辆荷载传递给柱底部连接梁^[7]。列车铺轨运行后，检修柱需承受重力荷载、横向水平荷载及列车制动导致的纵向水平荷载。目前检修柱一般采用现浇施工，但存在施工困难、返工量大等问题^[8]。针对此问题，在工程上出现了一种新型的装配式混凝土空心检修柱，立柱部分采用预制混凝土空心柱，通过直螺纹套筒与连接梁连接。相较现浇检修柱，预制检修柱减重约42%，可以大幅度节约材料，降低能耗，且现场运输和安装方便。

近年来，针对地铁车辆段上盖建筑抗震性能，国内外已有大量学者取得了丰硕的成果^[9-10]，但对车辆段检修库的相关研究较少。为进一步研究该新型检修柱的抗震性能，分别制作预制混凝土空心柱、预制混凝土实心柱及现浇混凝土空心柱试件，通过拟静力试验及有限元数值模拟，对其抗震性能进行对比研究，从而为装配式混凝土空心柱在地铁车辆

段检修库的应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

装配式混凝土空心检修柱如图1所示。共设计3个试件，试件配筋如图2所示。LZ1、LZ2分别为装

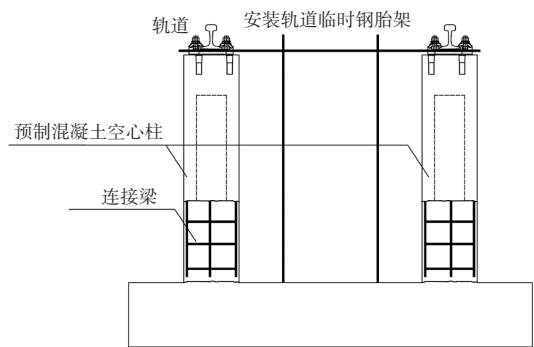


图1 装配式混凝土空心检修柱示意图
Fig. 1 Profile of the hollow precast concrete overhauling column

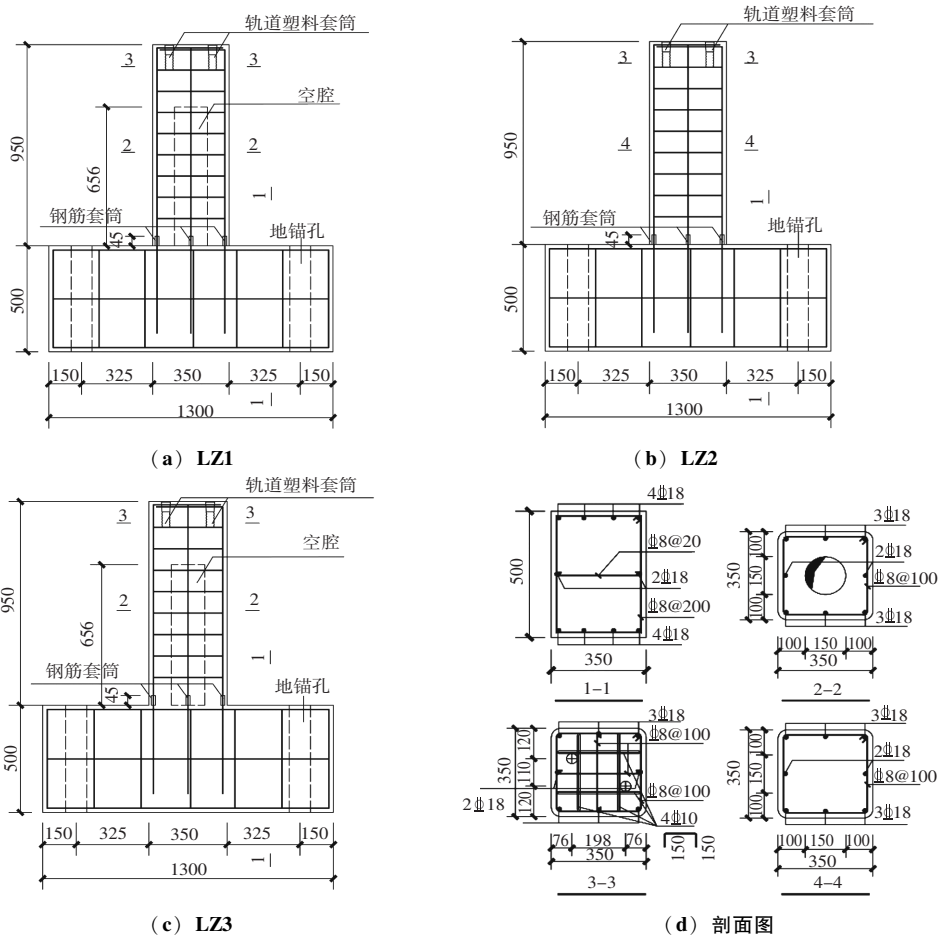


图2 试件尺寸及配筋/mm
Fig. 2 Specimen size and reinforcement

配式空心及实心试件, LZ3 为对比用的现浇空心试件。试件高度均为 950 mm, 截面尺寸为 350 mm × 350 mm; 对于空心试件, 空腔尺寸为 150 mm × 656 mm (直径 × 高度)。3 个试件剪跨比约为 2.97。所有试件纵筋与基础梁中钢筋通过直螺纹套筒连接。

1.2 试件制作

对于装配式试件, 首先制作完成预制柱, 随后将预制柱安装悬挂在临时钢胎架上, 利用直螺纹套筒将其纵向钢筋与基础梁钢筋机械连接, 然后绑扎基础梁钢筋, 最后支模浇筑混凝土。对于现浇试件, 首先分别绑扎柱及基础梁钢筋, 柱纵筋与基础梁钢筋仍然通过直螺纹套筒连接, 然后整体支模浇筑混凝土。其中试件空腔通过预埋圆柱模具实现。

1.3 试验材料

制备 6 个混凝土试块, 其中与柱同一批浇筑的试块 3 个, 混凝土等级为 C60, 抗压强度平均值为 54.49 MPa, 弹性模量为 35 GPa; 与基础梁同一批浇筑的试块 3 个, 混凝土等级为 C60, 抗压强度平均值为 55.10 MPa, 弹性模量为 34 GPa。此外, 钢筋材料力学性能试验结果见表 1, 其中 σ_y 、 σ_u 分别表示屈服强度、极限强度。

表 1 纵筋材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel

类别	强度等级	E/GPa	σ_y/MPa	σ_u/MPa
纵筋	HRB400	200	395.62	590.39
箍筋	HRB400	201	467.71	534.40

1.4 试验加载

考虑检修柱所受竖向荷载较小, 试验时未施加竖向力。采用 600 kN 伺服作动器施加水平荷载, 作动器一端通过钢连接件连接至反力墙, 另一端利用钢制夹具夹紧试件顶端。利用基础梁中的地锚孔, 通过 2 根长螺杆将基础梁锚固在试验室地面。

采用荷载 - 位移双控方法施加水平力, 以受推为正, 加载制度如下^[11]: 施加正向荷载至 65 kN, 随后卸载至 0, 施加反向荷载 65 kN, 再次卸载至 0, 循环 3 次; 施加正向荷载至试件达到屈服位移 Δ , 随后卸载至 0, 施加反向荷载至屈服位移, 再次卸载至 0, 循环 3 次; 通过位移控制逐级施加往复水平荷载, 位移幅值增量为 Δ , 每级循环 3 次。加载速率为 0.1 mm/min, 在试件承载力下降至最大荷载 85% 或产生显著破坏时停止加载。加载制度如图 3

所示。

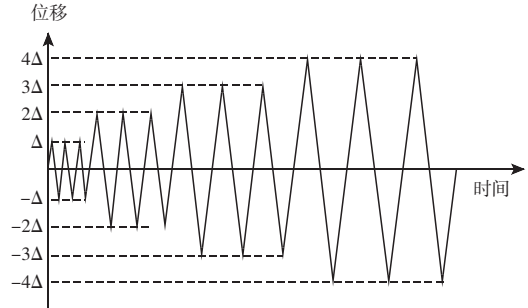


图 3 水平加载制度

Fig. 3 Lateral loading scheme

1.5 测点布置

试件 LZ1 测点布置如图 4 所示。共布置 4 个混凝土应变片和 10 个钢筋应变片, 其中在柱底垂直受力方向的 2 个表面各布置 2 个混凝土应变片, 柱底截面纵筋上布置 4 个钢筋应变片, 沿柱底向上 3 根箍筋共布置 6 个钢筋应变片。此外, 在柱顶和基础梁顶各布置 1 个位移计。其他试件测点布置与 LZ1 相同。

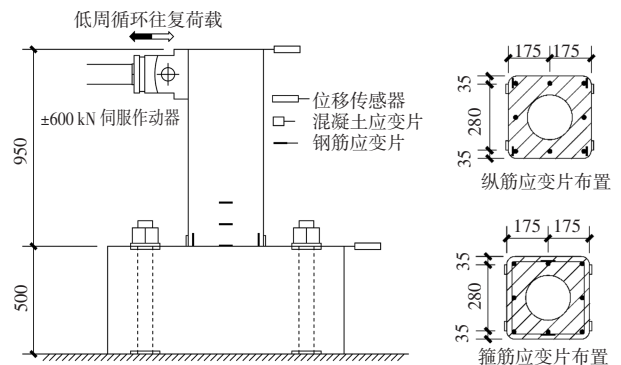


图 4 试件 LZ1 测点布置图/mm

Fig. 4 Measurement points of specimen LZ1

2 试验结果

2.1 荷载 - 位移曲线

荷载 - 位移曲线如图 5 所示, 相应骨架曲线如图 6 所示。从图 5 可以看出, 在加载的初级阶段, 试件滞回曲线较饱满, 呈梭型; 随着位移值不断增加, 试件底部裂缝逐渐扩展, 直至混凝土被压溃, 混凝土和钢筋之间产生滑移, 3 条曲线均呈现出明显的捏拢效应。从图 6 可以看出, 3 条骨架曲线整体趋势较为接近; 3 个试件承载力比较接近, 相对于装配式实心试件及现浇空心试件, 装配式空心试件极限承载力没有明显降低, 且远大于工作荷载。

建筑结构

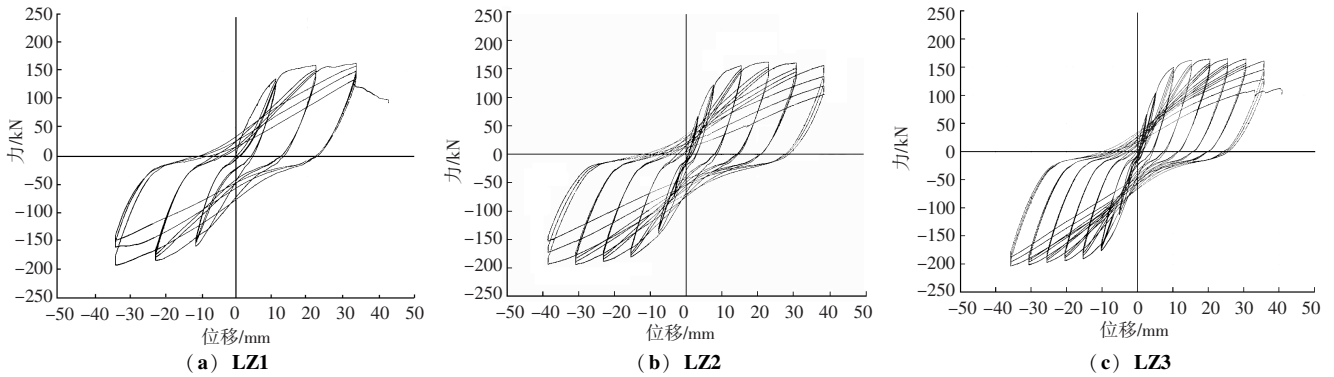


图5 荷载-位移曲线
Fig. 5 Load - displacement curves

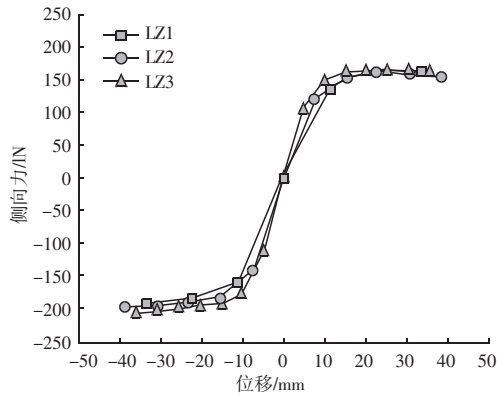


图6 骨架曲线
Fig. 6 Skeleton curve

2.2 变形与承载能力

极限位移角、位移延性见表2。由表2可以看出，3个试件延性逐步变大，其中装配式空心试件屈服位移最大，延性最小；现浇空心试件 LZ3 屈服位移最小，延性最大；3个试件极限位移角均远大于GB50011—2010《建筑抗震设计规范》^[12]中所规定的弹塑性层间位移角限值（1/50）。

对于空心截面试件，可根据面积及惯性矩等效的原则，将圆等效成2个矩形，从而将其截面简化成工字形截面，如图7所示，其中D表示原截面空心部分的直径， h_k 、 b_k 分别为等效截面空心部分的高度及总宽。根据规范^[13-14]计算试件的承载力见表3。

表2 试件变形能力

Table 2 Deformation capacity of specimens

试件	屈服位移/mm		极限位移/mm		极限位移角/rad			延性		
	正向	反向	正向	反向	正向	反向	平均	正向	反向	平均
LZ1	15.39	16.01	32.78	33.63	0.035	0.035	0.035	2.13	2.10	2.12
LZ2	12.16	14.58	38.32	38.50	0.040	0.041	0.040	3.15	2.64	2.90
LZ3	9.95	13.51	40.24	35.71	0.042	0.038	0.040	4.04	2.64	3.34

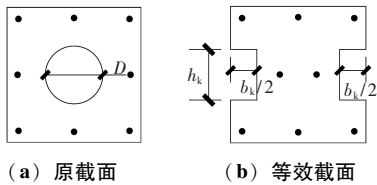


图7 空心截面简化

Fig. 7 Simplification of the hollow section

表3 试件承载力

Table 3 Specimen bearing capacity

试件	M_u / (kN·m)	V_u /kN	\bar{V}_u /kN	P_u /kN	试验值 /kN	误差值 /%
LZ1	149.40	358.50	602.47	157.26	163.74	3.96
LZ2	150.89	555.76	602.47	158.83	161.87	1.88
LZ3	149.40	358.50	—	157.26	164.62	4.47

由表3可知，采用规范计算的水平承载力与试验值吻合较好，表明可以采用规范中的公式来计算承载力；3个试件在承受水平荷载时，底部截面抗弯起控制作用，这与试验所观察到的破坏形态是吻合的；3个试件承载力很接近，表明与装配式实心柱相比，装配式空心柱节约了材料；与现浇空心柱相比，装配式空心柱实现了“等同现浇”。

2.3 耗能能力

取每级加载的第3次循环来计算累积滞回耗能及等效黏滞阻尼比^[11]，结果如图8、图9所示。随着位移幅值的增加，累积滞回耗能及等效黏滞阻尼比在总体上单调增加；在总体上，LZ2与LZ3试件累积

滞回耗能及等效黏滞阻尼比曲线基本上重合，且高于 LZ1，表明相对于装配式实心试件及现浇空心试件，装配式空心试件耗能能力略差。

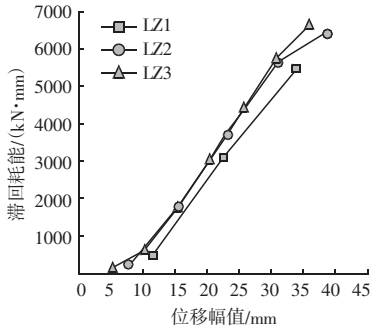


图 8 滞回耗能曲线
Fig. 8 Energy dissipation curve

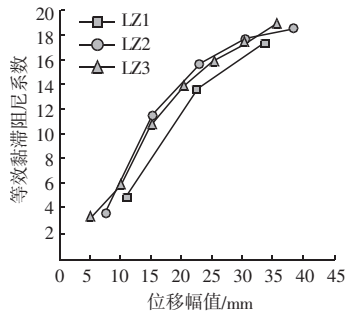


图 9 等效黏滞阻尼系数曲线
Fig. 9 Equivalent viscous damping ratio curve

2.4 退化性能

取第 3 次循环峰值点计算试件等效刚度，得到试件刚度退化曲线，如图 10 所示。在加载初级阶段，试件刚度退化较快，随着位移增大，刚度退化速度变慢；当位移幅值较大时，三个试件刚度退化曲线趋于重合，表明装配式试件具有与现浇试件相当的刚度退化性能。

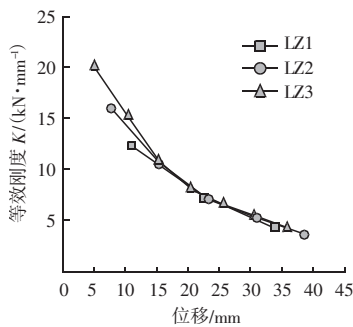


图 10 等效刚度曲线
Fig. 10 Effective stiffness curve

计算所得各试件强度退化系数曲线如图 11、图 12 所示。在加载初期，3 个试件强度退化系数均在

0.94 ~ 1.0 之间，说明强度退化程度较小；随着位移幅值的增加，3 个试件强度退化系数在总体上减小，说明强度退化程度变大；3 个试件强度退化系数曲线存在一定的波动，但当位移不太大时在总体上较为接近，表明装配式试件具有与现浇试件相当的强度退化性能。

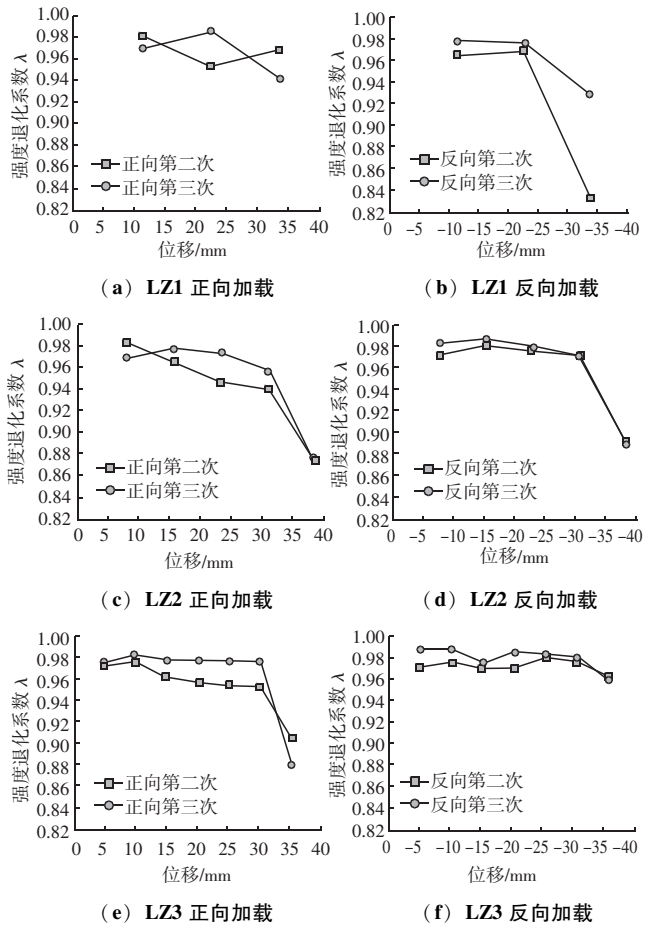


图 11 强度退化曲线

Fig. 11 Strength degradation curve

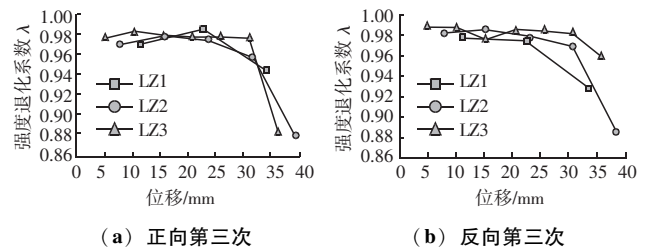


图 12 强度退化曲线对比

Fig. 12 Comparison of strength degradation curves

3 有限元变参分析

由前述试验结果可知，在不施加轴力的情况下，

建筑结构

装配式混凝土空心柱与装配式混凝土实心柱及现浇混凝土空心柱具有相当的抗震性能。针对装配式混凝土空心柱，采用 ABAQUS 建立有限元数值分析模型，进而通过变参分析研究轴力对其抗震性能的影响。

3.1 模型建立

装配式混凝土空心柱 (LZ1) 有限元模型如图 13 (a) 所示，其中混凝土采用减缩积分实体单元 (C3D8R) 模拟，钢筋采用三维桁架单元 (T3D2) 模拟，套筒采用减缩积分壳单元 (S4R) 模拟。钢筋与套筒之间通过嵌入 (Embedded) 进行约束，空心柱与基础梁间采用面面接触。基础梁底部固定，根据试验实际情况，在柱顶施加水平往复位移。

混凝土本构采用 ABAQUS 自带的塑性损伤模型。钢筋本构模型如图 13 (b) 所示，其中 f_y 、 E_s 分别为屈服强度与弹性模量， σ_m 、 E_{sr} 分别为卸载点应力及卸载模量。该模型可以近似考虑钢筋与混凝土间的黏结滑移^[15]，在 ABAQUS 中通过编写用户材料子程序实现。本构模型中的参数参考材性试验结果确定。

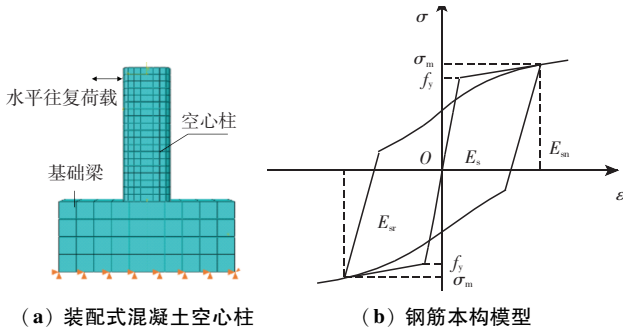


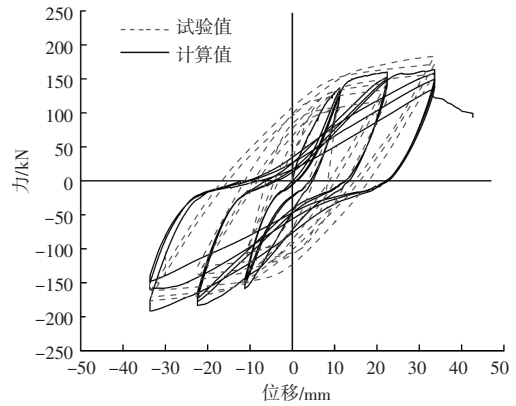
图 13 有限元模型设置
Fig. 13 Finite element model settings

3.2 计算结果

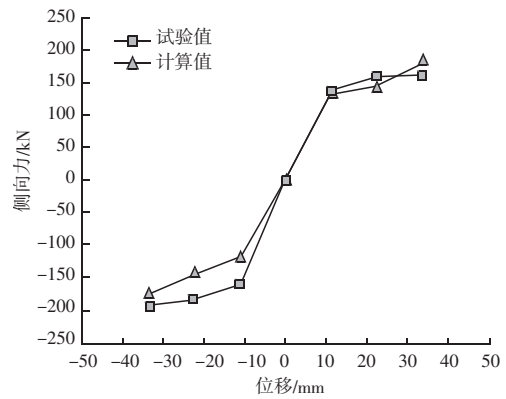
图 14 给出了有限元模型计算所得滞回曲线及骨架曲线与试验结果的对比。可以看出，计算曲线与试验曲线在整体上较为吻合，表明所建立的有限元模型具有较高的分析精度；计算所得滞回曲线比试验曲线更饱满，其原因在于荷载较大时，混凝土与钢筋之间产生了黏结滑移，而在有限元模型中仅通过修改钢筋本构模型加以近似考虑。

图 15 给出了每级加载下装配式混凝土空心柱混凝土的受压损伤。可以看出，混凝土损伤从柱中下部逐渐发展，最终遍布柱身，同时柱下部出现明显

变形，这与实际试验时的裂缝发展情况与混凝土剥落现象较为一致。

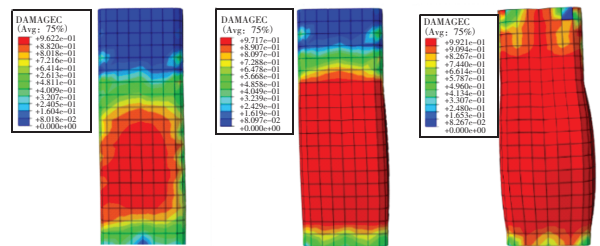


(a) 滞回曲线



(b) 骨架曲线

图 14 有限元结果与试验结果对比
Fig. 14 Comparison between the computed results and experimental ones



(a) 第 1 级加载 (b) 第 2 级加载 (c) 第 c 级加载

图 15 装配式混凝土空心柱受压损伤云图
Fig. 15 Compressive damage contour of the precast hollow concrete column

3.3 变参分析

利用前面建立的有限元分析模型，在装配式混凝土空心柱顶部施加轴向力，通过变参分析进一步研究轴压比对其抗震性能的影响。

图 16 给出了不同轴压比下计算所得的滞回曲线、骨架曲线及等效黏滞阻尼系数，其中图 16 (a) 根据

各级荷载第3次循环数据绘制。随着轴压比变大，滞回曲线形状基本不变，但水平承载力随轴压比提高先升后降，在轴压比 0.2 时达到最大；随着位移增

加，等效黏滞阻尼系数先增大后趋于平缓，且随着轴压比增加，等效黏滞阻尼系数减小，表明试件的耗能能力随着轴压比的增大而减小。

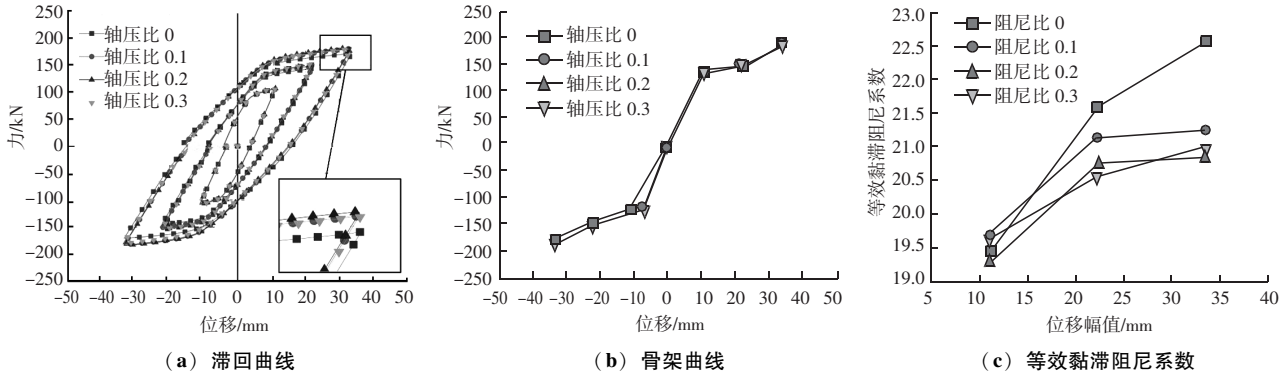


图 16 轴压比的影响

Fig. 16 Effect of the axial compression ratio

4 结论

针对用于地铁车辆段检修库的新型装配式混凝土空心检修柱，分别制作预制混凝土空心柱、预制混凝土实心柱及现浇混凝土空心柱试件，采用拟静力试验及有限元数值模拟，对其抗震性能进行了对比研究，得出如下结论：

(1) 3 个试件破坏形态均为剪弯破坏，承载能力及退化性能较为接近，变形能力好，但装配式空心试件耗能能力及延性略差。

(2) 对于装配式混凝土空心检修柱，可以将其截面简化成工字形截面，采用规范中的公式来计算承载力。

(3) 与装配式混凝土实心柱相比，装配式混凝土空心柱可以大幅度节约材料；与现浇混凝土空心柱相比，装配式混凝土空心柱基本上实现了“等同现浇”。

(4) 当轴压比变大时，装配式混凝土空心柱水平承载力先变大后变小，耗能能力变差。

参 考 文 献

[1] 宿坤. 预制预应力混凝土联肢剪力墙抗震性能试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
 [2] 黄祥海. 新型全预制装配式混凝土框架节点的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
 [3] 范力, 吕西林, 赵斌. 预制混凝土框架结构抗震性能研究综述 [J]. 结构工程师, 2007 (4): 90-97.

[4] 毛诗洋, 孙彬, 齐健, 等. 装配式混凝土结构连接技术研究综述 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (11): 49-53, 64.
 [5] EINEA A, YAMANE T, TADROS M K. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction [J]. Pci Journal, 1995, 40 (1): 82-93.
 [6] ONUR E, SEVKET O, TURAN O. Ductile Connections in precast concrete moment resisting frames [J]. Pci Journal Prestressed Concrete Institute Journal, 2006, 51: 66-76.
 [7] 李明智. 车辆段柱式检查坑架轨法施工技术应用 [J]. 山西建筑, 2021, 47 (9): 109-110.
 [8] 颌鹏, 马江涛, 罗杰, 等. 城市轨道交通停车场及车辆段库内立柱式检查坑整体道床的无轨施工工艺 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (8): 198-201.
 [9] 欧阳蓉, 余良刚, 曹薇, 等. 地铁车辆段上盖高层全框剪力墙结构模拟地震振动台试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (1): 70-77.
 [10] TAO Z, WANG Y, SANAYEI M, et al. Experimental study of train-induced vibration in over-track buildings in a metro depot [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109473.
 [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
 [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范 (2016): GB 50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范 (2015): GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1-2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
 [15] 方自虎, 甄翌, 李向鹏. 钢筋混凝土结构的钢筋滞回模型 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2018, 51 (7): 613-619.