

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.015

费盈颖, 孟二从, 余亚琳, 等. 部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱轴压试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 139-148.

部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱轴压试验

费盈颖¹, 孟二从¹, 余亚琳², 苏新¹, 袁军¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆人文科技学院 工商学院, 重庆 合川 401524

摘要: 为研究部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱的轴压性能, 以混凝土强度及系杆间距为参数, 对 1 根六边形孔蜂窝钢柱及 5 根部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱进行了轴压试验。结果表明: 相较于未加固的六边形孔蜂窝钢柱, 混凝土部分外包加固能有效提升六边形孔蜂窝钢柱的承载能力及耗能性能。对于部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱而言, 随着混凝土强度的上升, 其承载能力和延性会逐渐提高, 且能有效约束六边形孔洞周边的变形和焊缝撕裂问题。随着系杆间距的减小, 柱体承载能力逐渐变大, 但其延性和耗能会降低。轴压状态下, 部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱的孔洞应力基本呈对称分布, 孔洞周边最大应力多分布于六边形孔棱角处。

关键词: 外包混凝土; 加固; 六边形孔蜂窝钢柱;

轴压试验; 力学性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)10-0139-10

Axial Compression Test of Hexagonal Cell Honeycomb Steel Columns Reinforced by Partially Encased Concrete

FEI Yingying¹, MENG Ercong¹, YU Yalin²,
SU Xin¹, YUAN Jun¹

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Business, Chongqing College of Humanities, Science & Technology, Hechuan Chongqing 401524, China

Abstract: In order to study the axial compressive performance of hexagonal cell honeycomb steel columns

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2020B021); 西南大学 2022 年度教学研究项目(2022JY015); 重庆人文科技学院 2022 年度校级研究项目(CRKZK2022001, 21CRKXJJG02); 中国博士后科学基金资助项目(2017M623302XB).

作者简介: 费盈颖, 硕士研究生, 主要从事组合结构领域研究。

通信作者: 孟二从, 博士, 副教授。

reinforced by partially encased concrete, taking concrete strength and tie rod spacing as parameters, axial compression test were carried out on 1 hexagonal cell honeycomb steel column and 5 hexagonal cell honeycomb steel columns reinforced by partially encased concrete. The results show that compared with the unreinforced hexagonal cell honeycomb steel column, reinforce column with partially encased concrete can effectively improve the bearing capacity and energy dissipation performance. For hexagonal cell honeycomb steel columns reinforced by partially encased concrete, the bearing capacity and ductility gradually increased with the increase of concrete strength, and the deformation and weld tearing problems around the hexagonal holes can be effectively restrained. As the tie rod spacing decreasing, the bearing capacity of the column gradually increased, but its ductility and energy dissipation decreased. Under the state of axial compression, the hole stress of the hexagonal cell honeycomb steel column reinforced by partially encased concrete was basically symmetrical, and the maximum stress around the hole was mostly distributed at the corners of the hexagonal hole.

Key words: partially encased concrete; reinforce; hexagonal cell honeycomb steel; axial compression; mechanical properties

六边形孔蜂窝型钢是指在工字型钢或 H 型钢的腹板按设定的折线进行切割, 或把钢板按截面尺寸切割、焊接并将腹板按设定的折线进行切割, 再根据孔型错位焊接在一起形成的构件。该构件具有刚度高、自重轻、承载力好、经济效益大等优点, 已在工程中得到广泛应用^[1-4]。但由于腹板六边形孔洞的存在, 孔洞周边易成为薄弱区, 在荷载作用下会出现孔洞变形, 屈曲失稳等问题, 为此工程中常需对该类构件进行结构加固。

外包混凝土加固作为钢结构加固的一种常用技术形式, 目前已在工程中得到广泛使用。参照型钢部分包裹混凝土结构(partially encased concrete, PEC)的组合形式, 本文对六边形孔蜂窝钢柱采用部分外包混凝土进行结构加固, 加固后的柱子称为六边形孔蜂窝钢 PEC 柱。目前国内外关于实腹 PEC 柱的研究已有不少, 但对于六边形孔蜂窝型钢 PEC 柱的研究还较为少见。Hunaiti 等^[5]首次通过偏压试验发现设置抗剪措施对钢骨翼缘屈曲的影响不大, 但在实际工程中应设置机械抗剪键。Tremblay 等^[6-7]通过轴压试验发现, 在破坏阶段, 横向系杆间距较大的试件强度下降速度更快, 且延性更差, 提出了预测极限承载力的模型。Begum 等^[8]通过试验和数值模拟研究得出, 高强度混凝土能明显提高 PEC 组合柱的承载能力。赵根田等^[9-13]通过一系列试验研究了 PEC 柱的力学性能, 提出了该类柱体的极限承载力计算公式。方有珍等^[14-17]通过水平低周反复荷载试验研究了薄壁钢板和新型卷边钢板 PEC 组合柱弱轴和 PEC 组合柱强轴的力学性能和破坏形式。林德慧等^[18]和陈以一等^[19]对具有不同截面形式的 PEC 柱进行了试验研究和数值模拟, 提出了 PEC 柱在轴压和压弯状态下的整体稳定设计公式, 并根据混凝土单侧约束能大幅提高钢板的局部稳定临界应力, 推导出 PEC 构件中主钢件翼缘板的宽厚比限值。

基于上述背景, 本文对部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢柱的轴压性能^[20]进行了试验研究, 观察其破坏过程及形态, 并对其承载能力、延性系数、耗能性能等指标进行分析, 旨在为六边形孔蜂窝钢柱的结构加固提供参考。

1 试件概况

1.1 试件设计

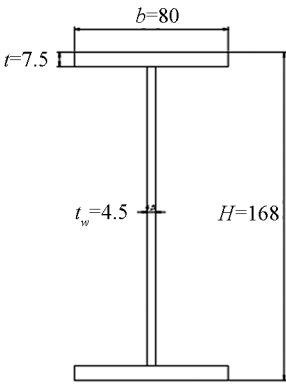
本试验根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017)^[21]、《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[22]等规

范, 设计制作了 1 根六边形孔蜂窝钢短柱和 5 根六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱试件. 六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱试件以混凝土强度等级和系杆间距为变化参数, 并与六边形孔蜂窝钢短柱试件进行对比, 进一步研究探讨混凝土强度等级和系杆间距对部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝型钢轴压受力性能的影响. 试件的具体设计参数如表 1 所示, 六边形孔蜂窝钢短柱和六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱的截面形式如图 1 所示.

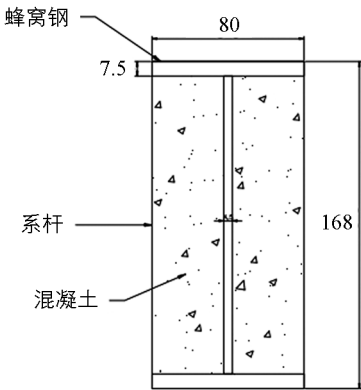
表 1 试件设计参数表

试件编号	截面尺寸	系杆间距/ mm	翼缘宽度/ mm	扩张比	孔洞形状	混凝土强度 等级
	$H \times b \times t_w \times t / \text{mm}$					
ZL0	$168 \times 80 \times 4.5 \times 7.5$	—	80	1.4	六边形	—
ZL1	$168 \times 80 \times 4.5 \times 7.5$	100	80	1.4	六边形	C30
ZL2	$168 \times 80 \times 4.5 \times 7.5$	100	80	1.4	六边形	C40
ZL3	$168 \times 80 \times 4.5 \times 7.5$	100	80	1.4	六边形	C50
ZL4	$168 \times 80 \times 4.5 \times 7.5$	80	80	1.4	六边形	C30
ZL5	$168 \times 80 \times 4.5 \times 7.5$	120	80	1.4	六边形	C30

注: Z 表示轴压, L 表示六边形, 数字表示编号; H 表示截面高度; b 表示截面宽度; t_w 表示腹板厚度; t 表示翼缘厚度.



a. 六边形孔蜂窝钢短柱截面



b. 六边形孔蜂窝型钢PEC短柱截面

图 1 试件截面形式

试验蜂窝型钢采用 Q235 级钢板加工制作, 腹板由 4.5 mm 厚钢板切割而成, 翼缘由 7.5 mm 厚钢板切割而成. 本试验蜂窝型钢扩张比取 1.4, 即扩张后的蜂窝型钢截面高度为 168 mm, 翼缘截面尺寸为 80 mm×7.5 mm, 腹板高厚比 h_w/t_w 为 37.33, 翼缘宽厚比 b_f/t_f 为 10.67, 均符合《组合结构设计规范》(JGJ 138-2016)^[23] 的规定. 系杆由 2.5 mm 厚扁钢切割而成, 截面尺寸为 25 mm×2.5 mm.

1.2 试件加工制作

蜂窝钢构件是将腹板按一定曲线切割后错位焊接而成的, 试验中将 Q235 级钢板加工成 6 根蜂窝型钢, 根据文献[4]提出的蜂窝钢构件相关制作参数 a 进行设计, 六边形孔蜂窝钢梁桥高度 a 的合理取值为 0.3 h (h 为原 H 型钢截面高度), 考虑实验室的加工条件, 取 a = 30 mm, 并由此确定腹板切割轨迹的其他尺寸. H 型钢腹板经切割后将分成两部分, 把这两部分的突出边对齐后焊接, 并将端头空腹部分补焊平齐, 即可形成空腹的钢腹板. 开六边形孔蜂窝钢柱的腹板切割示意图如图 2 所示.

1.3 材料的力学性能试验

本试验采用 Q235 级钢板, 钢板和扁钢试样材料试验按照《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T2975-2018)^[24] 的规定取样. 根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分 室温试验方法》(GB/T228.1-2010)^[25] 的规定分别制作 7.5 mm 厚钢板、4.5 mm 厚钢板及 2.5 mm 厚扁钢各 3 个标准试件, 每个试件在中部纵横两个方向布置应变片测点, 并进行单向拉伸试验, 获取试验用钢材的相关力学性能指标. 材性试

验得到的钢材各力学性能指标, 结果见表 2.

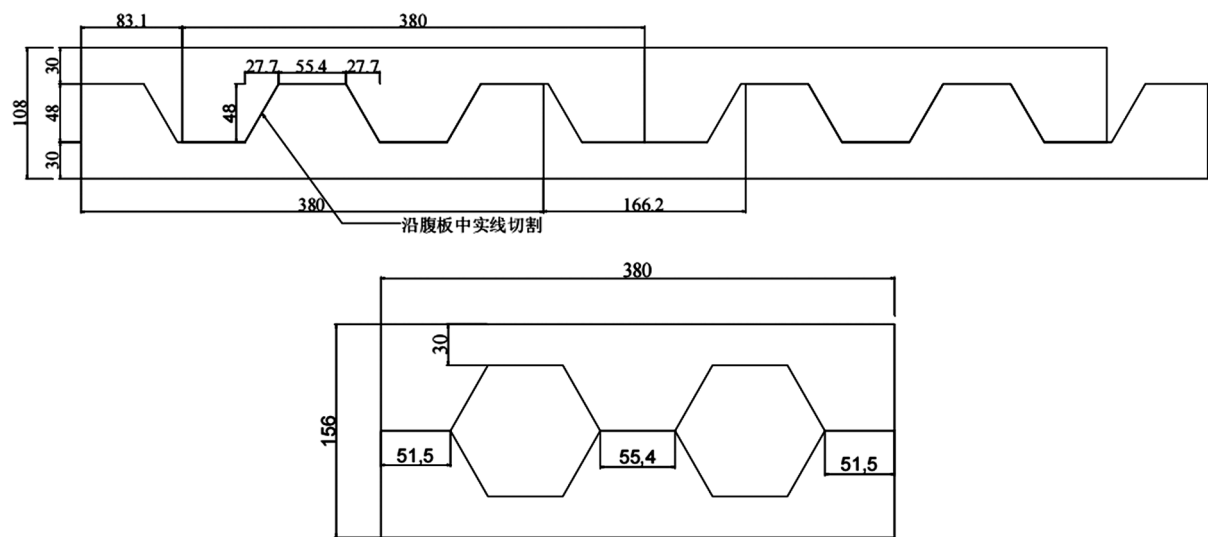


图 2 六边形孔蜂窝钢腹板切割示意图

表 2 钢材材料性能

材料名称	伸长率/ %	屈服应变 ϵ_y / $\times 10^{-6}$	屈服强度 f_y / MPa	极限强度 f_u / MPa	弹性模量 E_s / $\times 10^5$ MPa	泊松比 μ
4.5 mm 厚钢板	28.55	1 507.0	308.34	423.87	2.05	0.28
7.5 mm 厚钢板	28.4	1 565.5	281.87	418.39	1.80	0.28
2.5 mm 厚扁钢	33.2	1 941.5	318.27	385.99	1.67	0.28

1.4 试验加载方案

试验采用的加载装置为 2 000 kN 的电液伺服液压万能试验机, 具体加载装置如图 3 所示. 本试验采用荷载控制的加载方式, 以 0.5 kN/s 的加载速度增加, 加载至极限荷载后, 再下降至极限荷载的 85% 时, 认为试件已破坏, 终止试验.

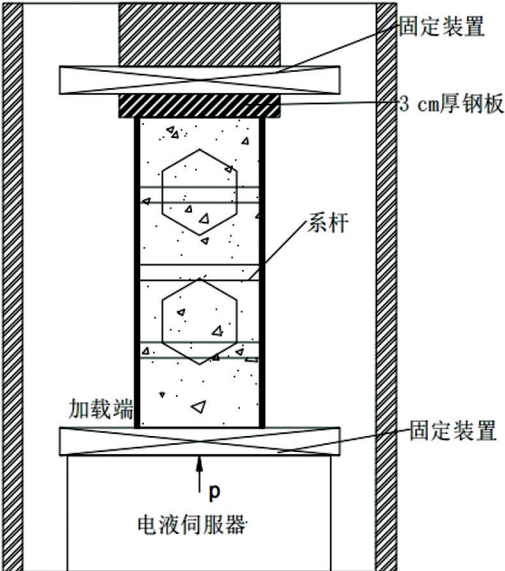


图 3 试验加载装置

1.5 试验测量方案

为研究加载过程中蜂窝型钢 PEC 短柱及蜂窝孔周的应力应变分布及发展规律, 在加载端孔洞周边粘贴应变花(如图 4 所示), 六边形孔周边粘贴 6 个应变花, 在翼缘中部粘贴“T”字形应变片, 中间系杆中部粘贴单向应变片, 应变数据由 CM-2B-64 静态应变测量仪及其分析系统测量获得. 测点的布设形式如图 4 所示.

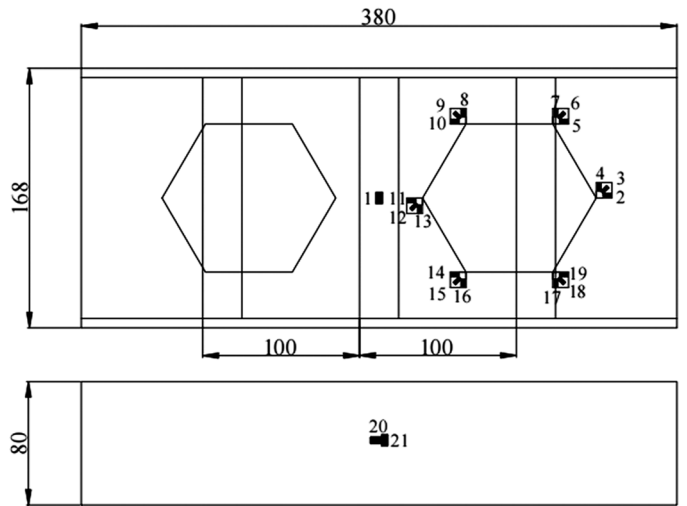


图 4 应变片布置图

2 试验结果

2.1 破坏过程及形态

六边形孔蜂窝钢短柱试件 ZL0 加载初期没有明显变形, 试件处于弹性阶段, 当荷载达到 450 kN 时, 蜂窝型钢上部孔洞附近翼缘发生向外屈曲变形, 试件承载力开始下降, 加载结束.

部分外包混凝土加固的六边形孔蜂窝钢短柱试件的破坏形态大致相同. 当荷载较小时, 蜂窝型钢和混凝土都处于弹性阶段, 随位移的增加, 荷载呈线性增长, 当荷载达到 $0.04 \sim 0.16 P_m$ 时, P_m 为极限荷载, 柱端部或系杆附近出现细小的裂缝, 随着荷载的增大, 原有裂缝不断延伸、扩展, 并不断有新的裂缝出现; 在荷载达到 $0.75 \sim 0.88 P_m$ 前, 蜂窝型钢与混凝土(再生混凝土)共同工作. 此时试件所承受的荷载称为屈服荷载 P_y , 相对应的位移称为屈服位移 Δ_y . 当荷载达到试件屈服点后, 由于蜂窝型钢的存在, 随位移的增加, 荷载缓慢增长, 趋于平缓, 此时混凝土表面裂缝继续发展, 并出现小面积脱落; 蜂窝型钢端部及孔洞附近翼缘发生屈曲变形; 孔洞上方系杆(横向扁钢)受拉, 系杆(横向扁钢)上方混凝土表面出现横向裂缝; 同时混凝土与蜂窝型钢翼缘交界处附近裂缝继续发展, 出现脱落趋势. 直至荷载达到试件的极值点, 此时试件所承受的荷载称为极限荷载 P_m , 相对应的位移称为极限位移 Δ_m . 荷载达到试件极值点后, 随位移的增加, 荷载缓慢下降, 混凝土表面裂缝迅速发展, 被逐渐压碎并出现大面积脱落; 蜂窝型钢翼缘完全屈曲, 上部系杆(横向扁钢)受拉达到极限, 与蜂窝型钢翼缘焊接处发生断裂; 混凝土与蜂窝型钢翼缘交界处完全脱离, 此时荷载主要由蜂窝型钢承受, 导致焊缝撕裂. 待荷载下降到 $0.85 P_m$ 时, 停止加载, 此时试件所承受的荷载称为破坏荷载 P_u , 相对应的位移称为破坏位移 Δ_u . 图 5 为六边形孔蜂窝钢短柱及六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱的典型破坏形态.

2.2 荷载-位移曲线

图 6 为 6 个试件的荷载-位移曲线. 六边形孔蜂窝钢短柱的荷载-位移曲线形态分为 3 个阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段. 弹性阶段曲线呈线性增长, 且随着位移增大荷载迅速增长, 待荷载达到屈服荷载附近, 进入弹塑性阶段, 此阶段荷载仍随着位移的增大而增长, 但增速趋于平缓, 达到峰值荷载后进入破坏阶段, 荷载呈下降趋势, 最后在达到破坏荷载前下降趋势变缓.

六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱则出现了一些与前者不同的特点: 弹性阶段都会有一段较短的平台段, 当荷载上升到平台段时, 加固的部分外包混凝土表面多出现较大裂缝, 随后荷载继续上升至屈服荷载附近; 进入弹塑性阶段后, 由于部分外包混凝土的加固, 试件荷载先保持基本不变, 然后开始屈服, 发生变形, 混

凝土大面积脱落,荷载继续缓慢上升至峰值;进入破坏阶段后,部分外包混凝土基本失效,系杆断裂,翼缘屈曲,荷载缓慢下降至破坏荷载,试验结束.

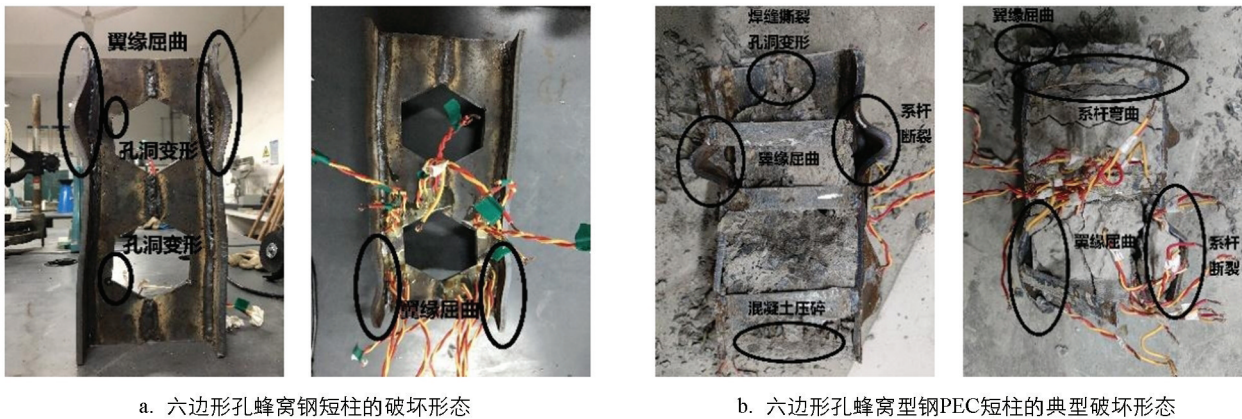


图 5 典型破坏形态

2.3 特征点参数

表 3 为各试件的特征点参数,六边形孔蜂窝钢短柱试件的屈服荷载 P_y 是其极限荷载 P_m 的 0.92 倍,而六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱试件的屈服荷载 P_y 在试件极限荷载 P_m 的 0.75~0.88 倍之间,说明部分外包混凝土的加固大大提高了六边形孔蜂窝钢柱在屈服后的安全储备.相对于六边形孔蜂窝钢短柱试件,由于外包部分混凝土的加固,六边形孔蜂窝型钢 PEC 短柱试件的极限荷载上升了 20.61%~40.96%,除试件 ZL3 外,其他试件的延性系数下降了 10.23%~42.40%,试件 ZL3 的延性系数上升了 9.86%.

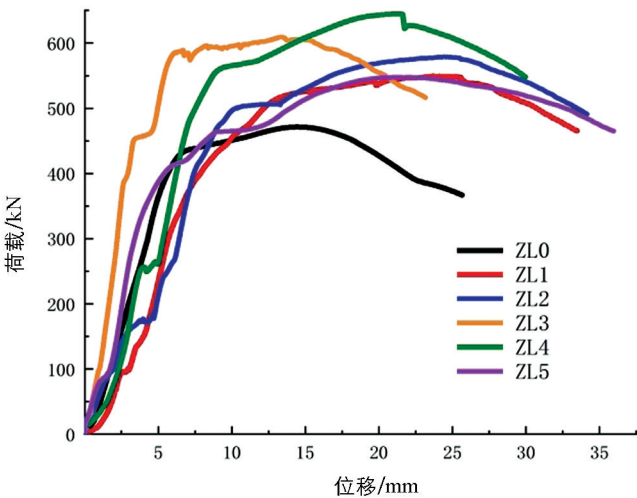


图 6 荷载-位移曲线

表 3 试件承载力

编号	屈服荷载 P_y	屈服位移 Δ_y	极限荷载 P_m	极限位移 Δ_m	破坏荷载 P_u	破坏位移 Δ_u	P_y/P_m	延性系数 μ	耗能因子 η
ZL0	416.3	4.33	454.2	12.54	386.1	21.54	0.92	4.97	0.72
ZL1	473.3	11.06	549.4	23.66	467.8	32.44	0.86	2.93	0.82
ZL2	478.3	10.89	578.9	24.48	491.0	34.15	0.83	3.14	0.79
ZL3	460.0	4.24	609.3	13.47	516.2	23.17	0.75	5.46	0.85
ZL4	567.6	10.46	644.8	21.43	547.9	29.95	0.88	2.86	0.78
ZL5	447.9	8.06	547.8	21.01	465.1	35.96	0.82	4.46	0.84

3 试验结果分析

3.1 承载能力

图 7 为不同试件的承载能力变化.由图 7a 及表 3 可知,相比于试件 ZL0,试件 ZL1 的屈服荷载提升了

13.7%，极限荷载提升了 21.0%；试件 ZL2 的屈服荷载提升了 14.9%，极限荷载提升了 27.5%；试件 ZL3 的屈服荷载提升了 10.5%，极限荷载提升了 34.1%。而相比于试件 ZL1，ZL2 的屈服荷载提升了 1.1%，极限荷载提升了 5.4%；与试件 ZL2 相比，试件 ZL3 的屈服荷载下降了 3.8%，极限荷载提升了 5.3%。由此可知，相对于六边形孔蜂窝短钢柱，六边形孔蜂窝钢 PEC 柱的屈服承载力有所提升，极限承载力大大提升。每提高一个等级的混凝土强度，极限承载力提升超过 5%，但是混凝土强度等级对屈服荷载的影响不大。这组试件的翼缘屈曲变形均在固定端至上部孔洞附近处较为明显，所以该组试件的系杆断裂都发生在固定端，这也说明了混凝土强度等级对蜂窝型钢翼缘屈曲变形和系杆断裂位置没有较大影响。同时，试件 ZL1 有明显的焊缝撕裂及孔洞变形，而试件 ZL2，ZL3 不能观察到明显的焊缝撕裂及孔洞变形，这说明混凝土强度等级可以有效改善焊缝撕裂及孔洞变形，这是因为随着混凝土强度等级的提高，粗骨料的表面积增大，砂浆用量减少，有效约束了孔洞的变形。

由图 7b 和表 3 可知，相比于试件 ZL0，试件 ZL4 的屈服荷载提升了 36.3%，极限荷载提升了 42.0%；试件 ZL5 的屈服荷载提升了 7.6%，极限荷载提升了 20.6%；与试件 ZL4 相比，试件 ZL1 的屈服荷载下降了 19.9%，极限荷载下降了 17.4%；与试件 ZL1 相比，试件 ZL5 的屈服荷载下降了 5.37%，极限荷载下降了 0.29%。由此可知，系杆间距超过 100 mm 对六边形孔蜂窝钢 PEC 柱的影响不大，但是系杆间距小于 100 mm 可明显提高短柱的承载力。试件 ZL1 翼缘屈曲变形在固定端到上部孔洞附近较为明显，试件 ZL4 翼缘屈曲变形在系杆间隔处及上部孔洞附近较为明显，试件 ZL5 翼缘屈曲变形在孔洞附近更为明显，这是因为试件受压时，混凝土向外膨胀，约束混凝土的系杆因此向外拉伸弯曲，同时使得混凝土在受力过程中纷纷剥落。在达到极限荷载时，轴向荷载主要由蜂窝型钢承担，系杆尚未屈服，但其对混凝土的约束和翼缘的拉结作用不断减弱，导致翼缘的变形不断增大。当系杆间距较小时，系杆数量增加，系杆对型钢翼缘的拉结作用增大，减缓了翼缘局部屈曲变形，随着系杆间距增大，系杆位置发生变化，同时由于孔洞存在，不能很好约束翼缘发生屈曲变形。

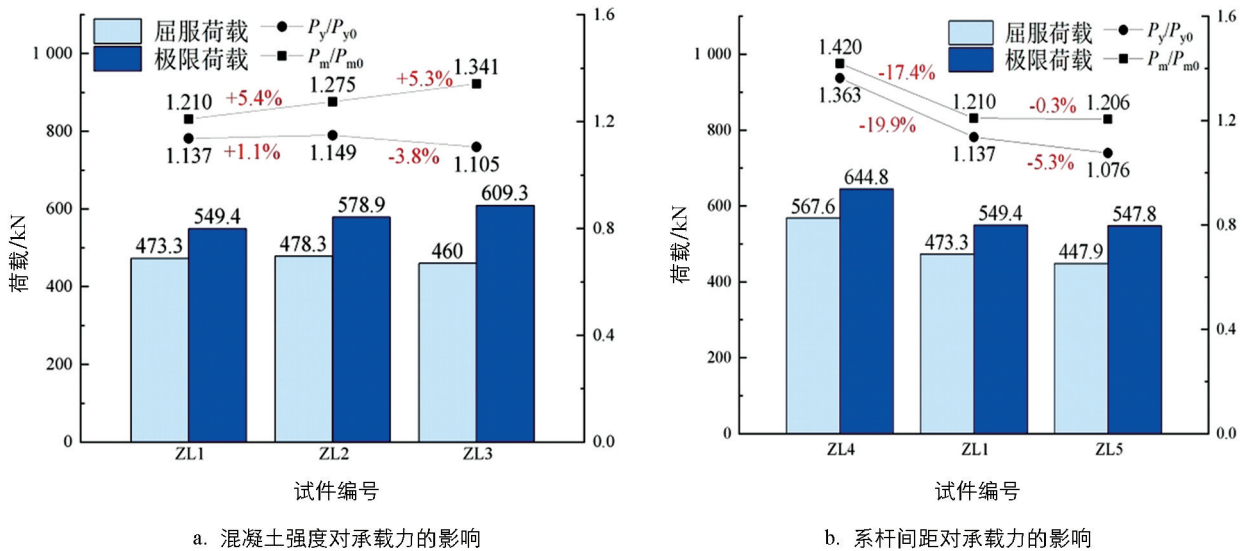


图 7 承载力对比

3.2 延性系数

延性是指构件从屈服开始到最大承载能力或到达以后而承载能力还没有明显下降期间的变形能力。材料在受力而产生破坏之前的塑性变形能力，与材料的延展性有关。本文采用能量等值法对各试件的屈服荷载、屈服位移进行计算，其延性系数如表 3 所示。

图 8 反应了 6 根短柱的延性系数差异, 与试件 ZL0 相比, 试件 ZL3 的延性系数提升了 9.9%, 试件 ZL1, ZL2, ZL4 和 ZL5 的延性系数分别降低了 41.05%, 36.8%, 42.5% 和 10.3%. 且随着混凝土强度和系杆间距的增大, 试件延性增大. 由图 6 可知, 由于混凝土和系杆的加固, 部分外包混凝土加固试件的弹性阶段和弹塑性阶段间出现明显的平台段, 导致屈服位移增大, 且破坏阶段达到破坏荷载前没有变缓趋势, 破坏位移减小. 因此试件延性随部分外包混凝土的加固而减小.

3.3 耗能性能

耗能能力反映了轴压构件本身吸收能量与耗能之间的内在联系, 试件轴压耗能因子 $\eta^{[26]}$ 可以定义为:

$$\eta=\frac{S_{\text{OPBQ}}}{P_m\Delta_u}$$

式中, S_{OPBQ} 为荷载-位移曲线与 x 轴及过终止点平行于 y 轴所包围的面积, 如图 9 所示阴影部分面积; P_m 为极限荷载; Δ_u 为破坏位移.

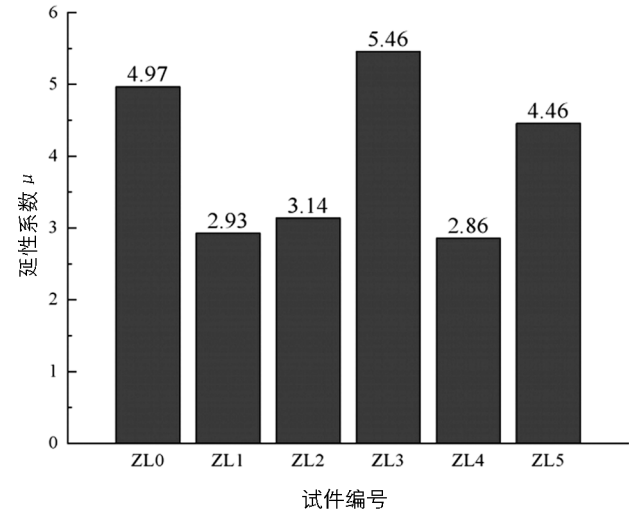


图 8 延性对比

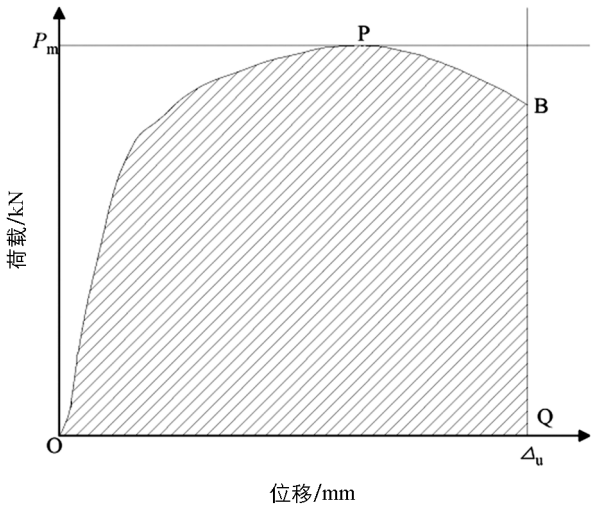


图 9 耗能计算模型

试件 ZL1 的耗能因子为 0.82, 与试件 ZL0 的耗能因子 0.72 相比, 提高了 13.9%. 试件 ZL2, ZL3 的耗能因子分别为 0.79, 0.85, 相对于试件 ZL0, 分别提高了 9.7%, 18.1%, 相对于试件 ZL1, 前者降低了 3.7%, 后者提高了 3.7%. 试件 ZL4, ZL5 的耗能因子分别为 0.78, 0.84, 相对于试件 ZL0, 分别提高了 8.3%, 16.7%, 相对于试件 ZL1, 前者降低了 4.9%, 后者提高了 2.4%. 由此可见, 经部分外包混凝土加固的六边形孔蜂窝钢短柱能有效提高试件的耗能性能, 但系杆间距的减小会降低耗能性能.

3.4 孔洞应力

本试验选择靠近试验加载端的孔洞(扩张比为 1.3)为应力测量对象, 六边形孔洞在每个角贴一个应变花, 每个试件共贴 6 个, 再按公式计算每个角的应力值和应力角度, 并用 CAD 绘制孔洞应力分布图, 本试验取试件达到 95% P_m 时的孔洞主应力来计算, 其中正值为拉应力, 负值为压应力(单位: MPa), 图 10 为各试件孔洞应力分布图. 分析各试件孔洞的应力分布情况, 得到以下结论:

- (1) 对比各试件孔洞应力分布图可以发现, 孔周应力分布基本符合对称性.
- (2) 大部分试件的孔洞应力存在最大拉应力或压应力, 且最大应力多分布在六边形的棱角处.
- (3) 孔洞应力分布大致相似, 且大部分孔洞受到的拉应力压多于压应力, 说明试件孔洞多为受拉破坏.

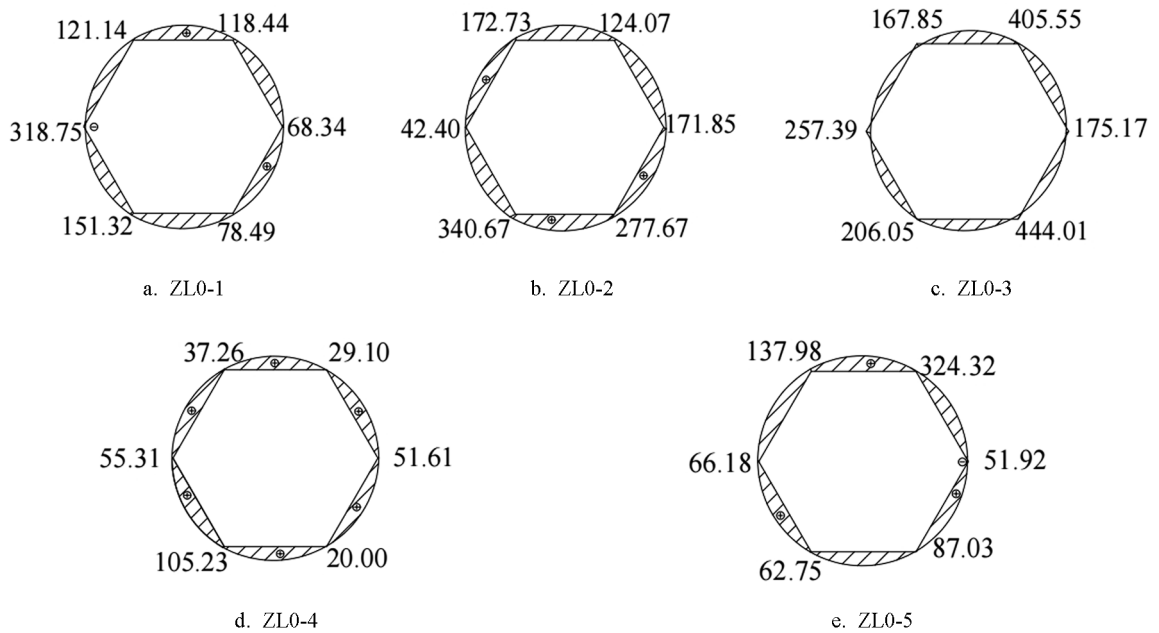


图 10 孔洞应力分布图

4 结论

(1) 部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢短柱试件的加载过程与六边形孔蜂窝钢短柱试件相似, 分为弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段, 表现为混凝土表面先出现最大裂缝, 然后翼缘发生屈曲变形, 混凝土大面积脱落, 最后混凝土被压碎, 系杆断裂, 翼缘完全屈曲.

(2) 与六边形孔蜂窝钢短柱试件相比, 部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢短柱试件承载力大大提高, 耗能也有所提高, 但延性变差.

(3) 对于部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢短柱试件, 当混凝土强度提高时, 承载力和延性都有所提高, 可以较好的约束孔洞变形和焊缝撕裂, 翼缘屈曲变形都发生在固定端到上部孔洞附近; 当系杆间距在一定范围内缩小时, 承载力大大提高, 但延性和耗能都略有下降, 对翼缘屈曲变形、孔洞变形和焊缝撕裂约束作用显著.

(4) 轴压状态下, 部分外包混凝土加固六边形孔蜂窝钢短柱试件的孔周应力呈对称分布, 最大应力多分布在六边形棱角处, 且孔周受拉多于受压.

参考文献:

[1] ELLOBODY E. Interaction of Buckling Modes in Castellated Steel Beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5): 814-825.

[2] SWEEDAN A M I, EL-SAWY K M, MARTINI M I. Identification of the Buckling Capacity of Axially Loaded Cellular Columns [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(4): 442-454.

[3] 李启良. 蜂窝轻钢门式刚架受力性能试验与有限元研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.

[4] 张雯. 蜂窝轻钢门式刚架抗震性能及整体稳定计算方法研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2014.

[5] HUNAITI Y M, ABDEL FATTAH B, FATTAH A B, et al. Design Considerations of Partially Encased Composite Columns [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 1994, 104(1): 75-82.

[6] TREMBLAY R, MASSICOTTE B, FILION I, et al. Experimental Study on the Behavior of Partially Encased Compos-

- ite Columns Made with Light Welded H Steel Shapes under Compressive Axial Loads [C]. 1998 Annual Technical Session, and Meeting, Structural Stability Research Council, 1998, 195-204.
- [7] TREMBLAY R, MASSICOTTE B, FILION I, et al. Compressive Strength of Large Scale Partially- Encased Composite Stub Columns. 2000 Annual Technical Session, and Meeting, Structural Stability Research Council, 2000, 262-271.
- [8] BEGUM, DRIVER R G, ELWI A E. Behaviour of Partially Encased Composite Columns with High Strength Concrete [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1718-1727.
- [9] 赵根田, 高志军, 张孟喜. 外包 H 型钢混凝土轴压短柱的受力性能分析 [J]. 工程建设, 2007, 39(1): 22-25.
- [10] 赵根田, 郝志强, 朱晓娟, 等. 部分包裹混凝土偏心受压短柱受力性能试验研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(2): 178-182.
- [11] 赵根田, 朱晓娟, 冯超. 部分包裹混凝土复合柱的轴心受压性能 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2012, 31(2): 200-204.
- [12] 赵根田, 周易晖. 部分包裹混凝土柱抗震性能分析 [J]. 山西农经, 2017(4): 127-128.
- [13] 赵根田, 张宇鸣, 曹芙波, 等. 焊接 H 形钢部分包裹高强混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 116-122.
- [14] 方有珍, 陆佳, 马吉, 等. 薄壁钢板组合 PEC 柱(强轴)滞回性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 48-55.
- [15] 方有珍, 顾强, 申林, 等. 薄板混凝土组合截面部分外包组合柱(弱轴)滞回性能足尺试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 113-120.
- [16] 方有珍, 马吉, 陆承铎, 等. 新型卷边钢板组合截面 PEC 柱(强轴)滞回性能试验研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(3): 181-190.
- [17] 方有珍, 顾强, 姚江峰, 等. 新型卷边钢板组合 PEC 柱-钢梁中节点抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 53-62.
- [18] 林德慧, 陈以一. 部分填充钢-混凝土组合柱整体稳定分析 [J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 71-77, 85.
- [19] 陈以一, 林俊星, 李杰. 部分包覆钢-混凝土组合构件中主钢件翼缘的局部稳定性能研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(7): 1-6.
- [20] 张旭, 袁军, 侯博宇, 等. 轴心受压预应力斜撑杆钢柱承载能力研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 85-92.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138-2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [24] 国家质量技术监督局. 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975-1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [26] 陈宗平, 杨阳. 螺旋箍筋 PVC 管联合约束混凝土轴压短柱试验研究 [J]. 建筑结构, 2019, 49(2): 43-48.