

文章编号: 1000-4750(2020)10-0179-13

部分预制装配型钢混凝土短柱抗震性能试验研究

张树琛¹, 杨 勇^{1,2}, 薛亦聪¹, 于云龙^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055; 2. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055)

摘 要: 为了充分发挥预制装配结构在施工性能及型钢混凝土结构在抗震性能方面的优势, 提出了部分预制装配型钢混凝土柱 (PPSRC 柱) 及预制装配型钢混凝土空心柱 (HPSRC 柱)。PPSRC 柱由高性能混凝土预制部分与普通强度混凝土现浇部分组成; 为进一步减轻柱自重, HPSRC 柱保持柱横截面空心。结合 2 个系列 10 个试件的拟静力试验, 对 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的抗震性能进行了研究。通过对试件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、变形及耗能能力的研究, 对柱截面形式、现浇混凝土强度、轴压力、配筋率及配箍率对 PPSRC 短柱和 HPSRC 短柱滞回性能的影响进行了分析。研究结果表明: 配筋率较低的 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的最终破坏形态为弯剪破坏, 其余配筋率较高的试件均发生剪切破坏; 所提出的预制高性能混凝土外壳、型钢及现浇混凝土能较好地协同工作, 试件柱身未发现明显的纵向黏结裂缝; 由于柱芯混凝土的存在, PPSRC 短柱比 HPSRC 短柱表现出更好的耗能及变形能力; 轴压力较低、配箍率较大、现浇混凝土强度较高的试件表现出更好的耗能及变形能力。基于试验结果和现行规范, 提出了 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的受剪承载力计算式, 其计算值与试验值吻合较好。

关键词: 型钢混凝土柱; 预制装配结构; 抗震性能; 拟静力试验; 受剪承载力

中图分类号: TU398.9; TU352.11 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0702

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE OF PARTIALLY PRECAST STEEL REINFORCED CONCRETE SHORT COLUMNS

ZHANG Shu-chen¹, YANG Yong^{1,2}, XUE Yi-cong¹, YU Yun-long^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to combine the advantage of constructional performance in prefabricated structures and that of seismic performance in steel reinforced concrete structures, this paper presents two novel precast steel reinforced columns, namely the partially precast steel reinforced concrete (PPSRC) column and the hollow precast steel reinforced concrete (HPSRC) column. The PPSRC column consisted of a precast high-performance concrete outer part and a cast-in-place conventional concrete inner-part, and the HPSRC column kept the column core hollow to further reduce the column deadweight. With the aim to investigate the seismic behavior of PPSRC and HPSRC short columns, quasi-static tests of ten short column specimens were conducted. The failure patterns, hysteretic loops, skeleton curves, stiffness degradation, deformability and energy dissipation of the test specimens were analyzed and the effects of the section shape, concrete strength of inner-part, axial compression and longitudinal and transverse reinforcement ratio on the cyclic behavior of PPSRC and HPSRC short columns, were then critically investigated. The test results indicated that the PPSRC and HPSRC short columns with lower longitudinal reinforcement ratios failed in flexural-shear mode and the rest specimens all suffered typical shear failure. Meanwhile, no obvious longitudinal bond cracks were found on the column specimens, indicating the

收稿日期: 2019-11-26; 修改日期: 2020-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578443); 国家重点研发计划项目(2017YFC0703404)

通讯作者: 薛亦聪 (1992—), 男, 陕西人, 副教授, 博士, 从事钢-混凝土组合结构研究 (E-mail: xjdxyc@foxmail.com).

作者简介: 张树琛 (1996—), 男, 陕西人, 硕士生, 从事钢-混凝土组合结构研究 (E-mail: 18291927831@163.com);

杨 勇 (1976—), 男, 江西人, 教授, 博士, 博导, 从事钢-混凝土组合结构研究 (E-mail: yyhhp2004@163.com);

于云龙 (1989—), 男, 陕西人, 工程师, 博士, 从事钢-混凝土组合结构研究 (E-mail: yyllyp126@sina.com).

precast high-performance concrete outer-part could work compatibly with steel shape and cast-in-place part. Due to the solid column core, the PPSRC columns exhibited more favorable deformability and energy dissipation capacity than the HPSRC columns. Better cyclic performance can be found in the specimens with lower axial compression, higher stirrup ratio or higher concrete strength of cast-in-place inner-part. Based on the test results and current design codes, formulas to calculate the shear capacity of PPSRC and HPSRC short columns were proposed, and the predicted shear strengths of the specimens agreed well with the test results.

Key words: steel reinforced concrete column; prefabricated structure; seismic performance; quasi-static test; shear capacity

型钢混凝土 (Steel reinforced concrete, SRC) 结构, 因其较高的承载能力及优越的抗震性能, 广泛应用于超高层及重载建筑中。但因其现场施工工序较为复杂, 故较少应用于量大面广的多高层建筑中^[1-2]。与此同时, 预制混凝土结构因其现场施工便捷的特点而受到广泛关注^[3-4]。通过结合预制混凝土结构和型钢混凝土结构的优点, 国内外学者提出了全预制 SRC 结构及钢梁-全预制 SRC 柱混合结构^[5-7]。程万鹏等^[6-7]提出了在梁柱节点区采用型钢连接的预制装配部分钢骨混凝土框架体系。张雪松等^[8]提出了梁端采用狗骨式连接的装配整体式钢骨混凝土框架体系。日本社团法人预制建筑协会和日本藤田公司提出了可供多高层建筑使用的 Steel Reinforced Precast Concrete (SR-PC) 工法及 Fujita Steel Reinforced Precast Concrete (FSRPC) 工法^[5]。在 SR-PC 工法中, 主要结构构件采用预制 SRC 梁与现浇 SRC 柱; 而在 FSRPC 工法中, 主要结构构件采用全预制 SRC 柱与钢梁。上述研究多属于全预制装配 SRC 结构, 其抗震性

能及结构整体性方面与现浇 SRC 结构相比仍存在一定差距, 且在全预制 SRC 结构中, 各结构构件间的连接方式多使用部分后浇或仅使用钢连接件, 其连接部位存在刚度或者承载力突变, 不利于现行抗震设计, 且其结构构件自重较大, 不利于运输与施工现场吊装。

为了增强 SRC 结构的工程应用同时推进建筑产业化发展, 课题组提出了部分预制装配型钢混凝土 (Partially Precast Steel Reinforced Concrete, PPSRC) 结构。课题组先期完成了 PPSRC 梁、柱构件的预制截面选型, 并通过试验研究证明了 PPSRC 梁构件具有优良的受力性能, 并提出了 PPSRC 梁构件在施工及正常使用两阶段的设计方法^[9-11]。为了进一步推进 PPSRC 结构的发展及应用, 作者提出了 PPSRC 柱及预制装配型钢混凝土空心 (Hollow Precast Steel Reinforced Concrete, HPSRC) 柱。如图 1 所示, PPSRC 柱由高性能混凝土预制部分及普通混凝土现浇部分组成, 预制部分由十字型钢、纵筋、矩形螺旋箍筋及高性能

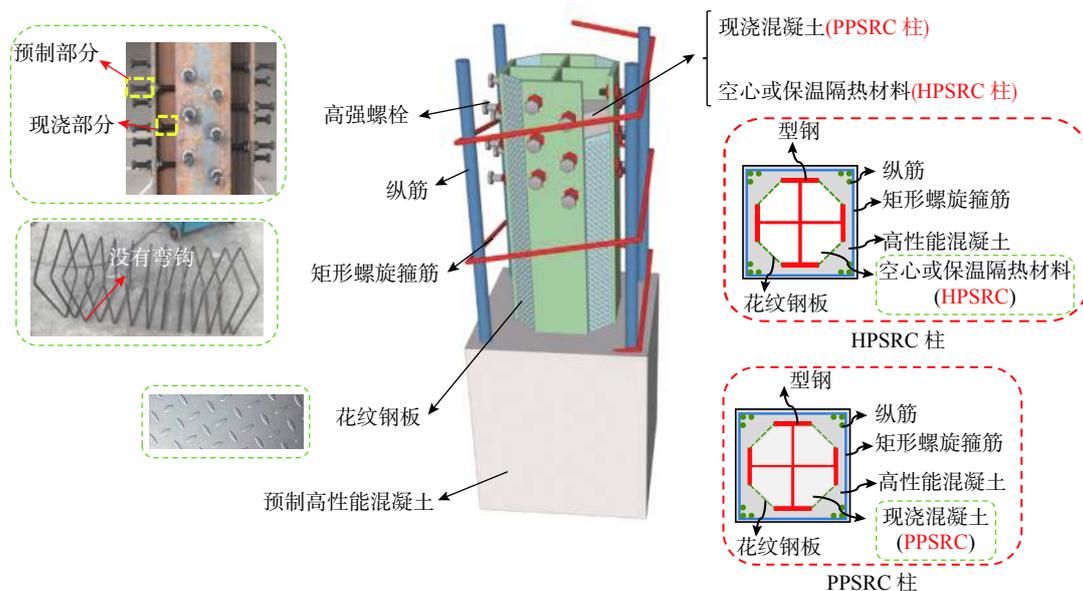


图 1 PPSRC 与 HPSRC 柱示意图

Fig. 1 Diagram of PPSRC and HPSRC columns

混凝土组成,并在预制工厂制作养护。现浇部分由普通混凝土浇筑并可与PPSRC梁芯及楼板同时浇筑以保证结构的整体性。为了进一步减轻构件自重,HPSRC柱保持截面空心。HPSRC柱可与PPSRC柱在同一结构中竖向混合使用,PPSRC柱可作为底层重载柱使用,而HPSRC柱可应用于上层对轴压比需求较低的柱构件中,结构竖向柱截面高度可保持一致,可有效避免柱变截面处的刚度及承载力突变问题。

课题组先期研究了剪跨比大于3.0并由弯曲破坏控制的PPSRC柱及HPSRC柱的抗震性能^[12],在此基础上,为研究由剪切破坏控制的PPSRC短柱及HPSRC短柱的抗震性能,对6个PPSRC短柱和4个HPSRC短柱进行了拟静力试验。研究了两类试件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化特征、耗能能力及变形能力,以及柱截面形式、轴压力、配筋率、配箍率和现浇混凝土强度对PPSRC短柱和HPSRC短柱抗震性能的影响。基于试验结果与现行规范,提出了两种柱构件的受剪承载力计算方法,以期能为工程设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

本试验共设计制作了6个PPSRC短柱试件和4个HPSRC短柱试件,均设计为倒T型试件。试件主体尺寸均为300 mm×300 mm×600 mm;试件地梁尺寸均为550 mm×500 mm×1200 mm。各试件

中型钢均为十字形钢,由2个规格为HN175×90×5×8的Q235级轧制型钢切割并焊接而成,配钢率为5.0%。为了提升试件预制部分的抗震性能,采用活性粉末混凝土(Reactive powder concrete, RPC)浇筑试件的高性能混凝土外壳^[13],内部现浇混凝土按C30级、C60级混凝土和RPC制备。依据试验参数设计,各试件中配置纵筋12Φ18或12Φ28,配筋率 ρ_s 为3.4%或8.2%;配置箍筋Φ8@40或Φ8@65,体积配箍率 ρ_{ts} 为2.00%或1.26%。如图1所示,为了保证型钢与混凝土之间的组合作用,制作型钢骨架时分别在柱顶及柱底处型钢翼缘钻孔,并按间距70 mm梅花状布置3排8.8级高强螺栓^[14]。为了便于预制混凝土浇筑,将厚3 mm的扁豆型花纹钢板点焊于相邻型钢翼缘间,在作为内模板的同时可进一步增强预制及现浇混凝土黏结性能。因花纹钢板厚度较小且仅通过点焊与型钢翼缘连接,故可忽略其对各试件承载力及刚度的贡献。各试件的主要设计参数见表1,试件截面尺寸见图2。

PPSRC短柱试件的制作分为两步:第一步,焊接型钢并绑扎钢筋骨架后浇筑预制高性能混凝土,待预制高性能混凝土养护完成后;第二步,浇筑内部现浇混凝土以形成完整的PPSRC短柱试件。HPSRC短柱试件的制作过程与PPSRC短柱试件制作的第一步相同,但待预制高性能混凝土养护完成后即形成完整的HPSRC短柱试件。在实际工程应用中,用于高层柱构件的HPSRC柱柱芯可填充保温隔热材料或隔音材料以进一步提升PPSRC结构的性能。

表1 试件设计参数

Table 1 Parameters of test specimens

试件编号	λ	截面形式	N/kN	$f_{cu,o}/MPa$	$f_{cu,i}/MPa$	型钢		钢筋	
						型钢型号	$\rho_{ss}/(\%)$	纵筋(ρ_s)	箍筋(ρ_{ts})
HPSRC-1	1.5	空心	1200	92.3	—	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ18 (3.4%)	Φ8@65 (1.26%)
HPSRC-2	1.5	空心	1200	92.3	—	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@65 (1.26%)
HPSRC-3	1.5	空心	1500	92.3	—	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@65 (1.26%)
HPSRC-4	1.5	空心	1500	92.3	—	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@40 (2.00%)
PPSRC-1	1.5	实心	1200	92.3	31.97	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ18 (3.4%)	Φ8@65 (1.26%)
PPSRC-2	1.5	实心	1200	92.3	31.97	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@65 (1.26%)
PPSRC-3	1.5	实心	1500	92.3	31.97	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@65 (1.26%)
PPSRC-4	1.5	实心	1500	92.3	62.63	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@65 (1.26%)
PPSRC-5	1.5	实心	1500	92.3	31.97	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@40 (2.00%)
PPSRC-6	1.5	实心	1500	92.3	92.30	2(HN175×90×5×8)	5.0	12Φ28 (8.2%)	Φ8@65 (1.26%)

注: λ 为剪跨比; N 为轴压力; $f_{cu,o}$ 为预制混凝土立方体强度; $f_{cu,i}$ 为现浇混凝土立方体强度; ρ_{ss} 为型钢配钢率; ρ_s 为配筋率; ρ_{ts} 为体积配箍率。

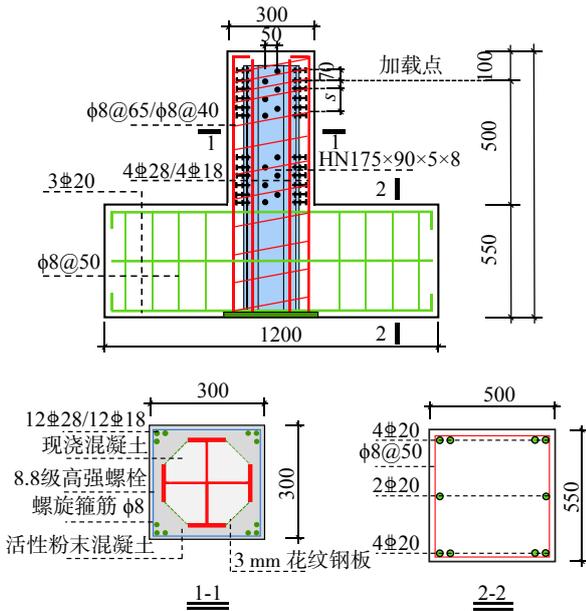


图2 试件设计 /mm
Fig. 2 Specimen design

1.2 材料力学性能

本试验采用的RPC由水泥、硅灰、粉煤灰、矿渣、石英砂、高性能减水剂及钢纤维拌制而成，钢纤维的体积掺量为1.5%，其配合比见表2。RPC中使用的钢纤维为直径0.2mm、长度13.0mm的镀铜平直纤维，其抗拉强度为2850MPa。所有试件均为同批浇筑，自然养护，试验前对预留的标准立方体试块进行测试^[15]，测得RPC的立方体抗压强度平均值 $f_{cu,0}=92.3$ MPa，受拉强度平均值 $f_{t,0}=5.76$ MPa。内部现浇混凝土实测混凝土立方体抗压强度平均值分别为31.97MPa、62.63MPa和92.3MPa。依据《金属材料拉伸试验：第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)，对钢筋及型钢进行材性试验，具体实测结果见表3。

1.3 加载制度及量测方案

如图3所示，试验加载方式为悬臂式，水平荷载通过2500kN电液伺服作动器施加，轴向荷载通过在刚性大梁上可水平滑动的5000kN油压千斤顶施加于柱顶。试验正式加载时，首先由油

表2 活性粉末混凝土配合比
Table 2 Designed mix proportions of RPC

52.5级水泥	粉煤灰	硅灰	矿粉
1	0.2	0.15	0.1
石英砂	高效减水剂	钢纤维	水灰比
1.3	0.003	0.15	0.22

注：钢纤维掺量为体积比，其余组分均为质量比。

表3 钢材力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel reinforcements

钢材	类别	钢材牌号	f_y /MPa	f_u /MPa
型钢	翼缘	Q235	311.7	438.3
	腹板	Q235	272.5	520.0
纵筋	Φ18	HRB400	443.5	598.0
	Φ28	HRB400	487.6	603.4
箍筋	Φ8	HPB300	393.2	562.3

注： f_y 为钢材屈服强度； f_u 为钢材抗拉强度。

压千斤顶在柱顶施加目标轴向压力，然后利用电液伺服作动器在柱顶加载点施加水平低周反复荷载。水平低周反复荷载采用位移控制加载，前5级荷载的目标位移角分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%，每级循环1次；此后每级位移角的增量为0.5%，每级循环3次，当水平荷载下降至最大荷载的80%以下时停止加载，具体加载制度如图4所示，其中， Δ 为加载点位移， n 为加载步。

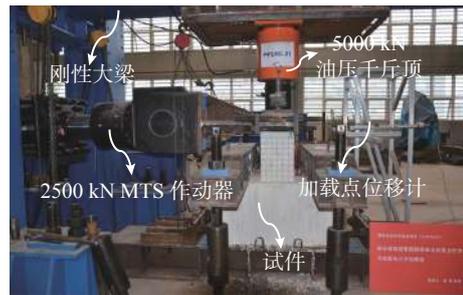


图3 加载装置
Fig. 3 Loading device

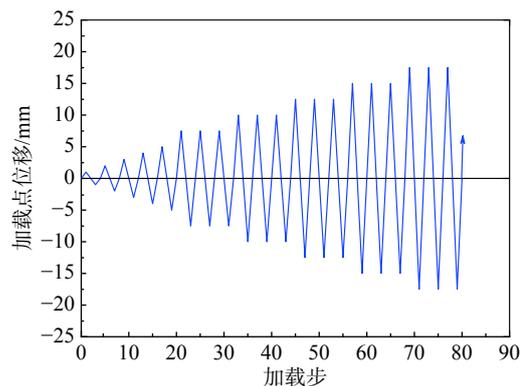


图4 加载制度
Fig. 4 Loading protocol

试验过程中主要测点布置如下：在柱顶加载点处布置电子位移计测定水平位移；在地梁中部布置电子位移计观测柱底滑移；在柱根300mm范围内布置交叉百分表以观察混凝土应变，位移计与应变测点布置见图5。其中S1~S3为箍筋轴向应

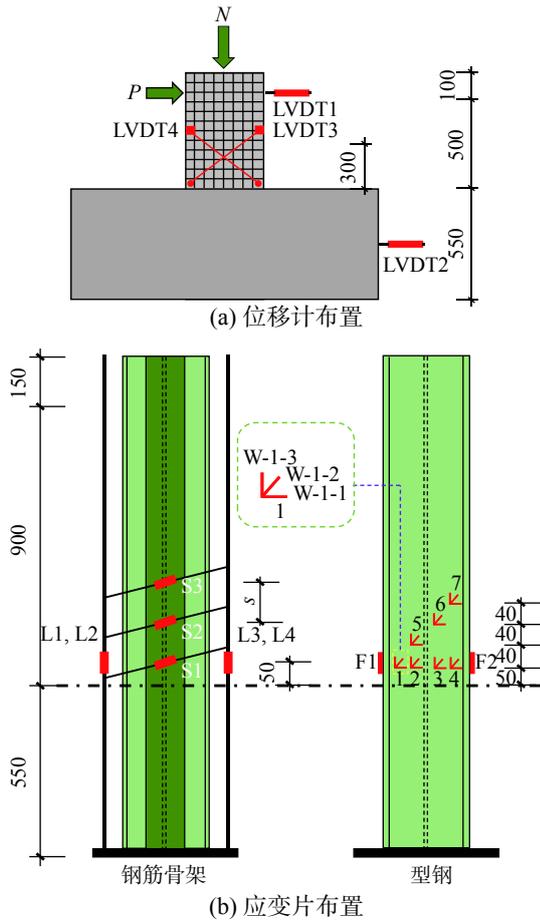


图 5 测点布置 /mm
Fig. 5 Layout of LVDTs and strain gauges

变片, L1~L4 为纵筋轴向应变片, W1~W7 为型钢腹板三向应变片, F1 与 F2 为型钢翼缘轴向应变片。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

试件的破坏形态如图 6 所示, 主要试验结果如表 4 所示。与参考文献 [12] 中记载的 PPSRC 与 HPSRC 长柱试件发生弯曲破坏或弯曲控制的弯剪破坏不同, 本文试验中剪跨比较小的 PPSRC 与 HPSRC 短柱试件的破坏形态分为弯剪破坏 (F-S) 和剪切破坏两种 (S)。纵筋配筋率较小的试件发生弯剪破坏, 即加载初期柱两侧出现水平弯曲裂缝, 并随着加载位移增大而在水平向发展。接近峰值荷载后, 部分水平裂缝开始沿斜向发展, 最终破坏时纵筋、型钢翼缘与箍筋均发生屈服, 水平弯曲裂缝与斜向剪切裂缝均有不同程度的加宽, 即试件最终的破坏形态表现为弯曲破坏与剪切破坏共同控制的复合破坏形态。

如图 6(a)、图 6(e) 所示, 相比于高配筋率的试件, 最终破坏时低配筋率的 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的水平弯曲裂缝数量更多且发展更为充分, 同时因往复加载而导致的剪切裂缝处的混凝土脱落程度更低, 表明低配筋率的试件因弯曲承载力

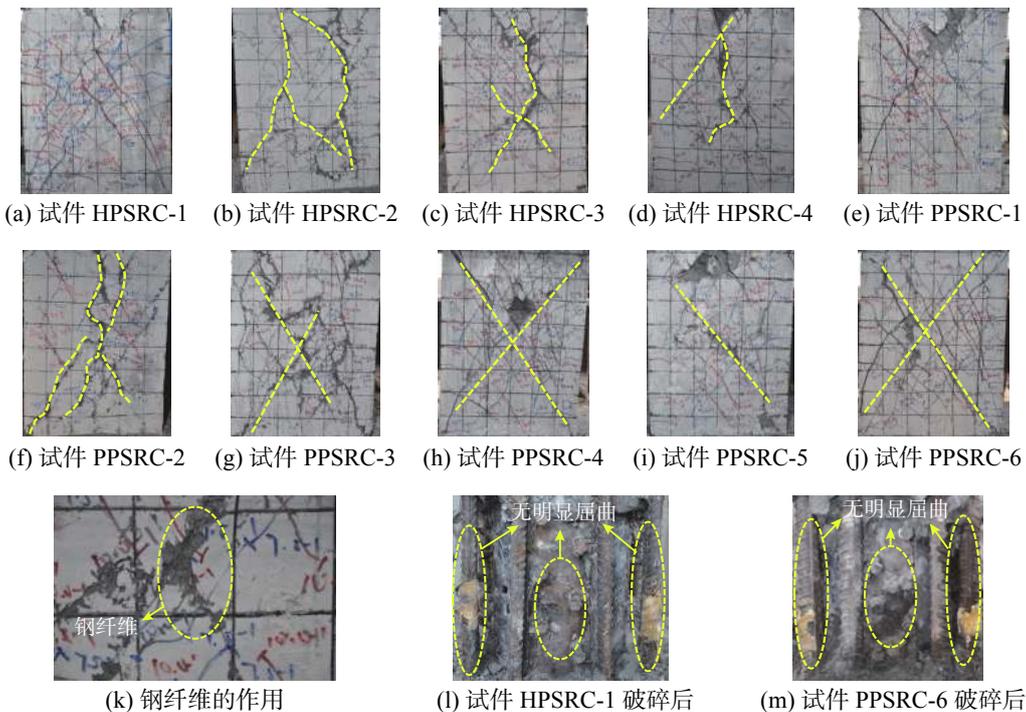


图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of test specimens

较低而导致剪切破坏的发展不够充分。相比于空心试件 HPSRC-1, 实心试件 PPSRC-1 短柱柱身裂缝数量更少, 表明现浇混凝土的存在能有效降低预制部分混凝土在往复荷载下的损伤。如图 6(b)、图 6(c)、图 6(d)、图 6(f)、图 6(g)、图 6(h) 与图 6(j) 所示, 除去试件 HPSRC-1 与 PPSRC-1, 其余试件均发生典型的剪切破坏, 即加载初期柱两侧出现水平弯曲裂缝, 但随加载位移增大水平裂缝的发展受到有效抑制, 同时在柱身出现多条斜向腹剪裂缝, 裂缝数量与长度并随着加载历程不断增多与发展。相比于其余试件, 配箍率较大的试件 HPSRC-4 与 PPSRC-5 柱身斜裂缝发展程度最小, 且在加载结束时也未出现裂缝宽度较大的主斜裂缝, 说明配箍率的增加可以有效抑制斜裂缝的开展。同时轴压力较大的试件 HPSRC-3 与 PPSRC-3 的柱身混凝土局部剥落情况比轴压力较小的试件 HPSRC-2 与 PPSRC-2 更严重, 说明轴压力的增加会加重往复荷载作用下试件预制部分的损伤。

在加载过程中, 各试件表面均未发展明显的纵向黏结裂缝, 说明高强螺栓连接件可保证预制混凝土、型钢及现浇混凝土的共同工作性能。如图 6(k) 所示, 相比于型钢超高强混凝土短柱, 由

于 PPSRC 短柱试件与 HPSRC 短柱试件的预制外壳均采用配置钢纤维的 RPC 浇筑, 钢纤维的桥联作用能有效抑制裂缝的产生与发展, 且各试件在加载过程中均未出现明显的混凝土剥落现象^[16]。如图 6(l)、图 6(m) 所示, 加载结束后, 部分试件被破碎以观察内部纵筋、型钢及混凝土的损伤情况, 结果表明各试件中型钢与受力纵筋均未发生明显的屈曲, 表明各试件的高性能混凝土外壳均可有效约束其内部的型钢与纵筋。

2.2 应变分析

图 7 记录了部分试件中应变片实测箍筋及纵筋的应变发展情况。箍筋的应变发展可以直观地体现斜裂缝的发展趋势, 由图 7(a)、图 7(b) 及图 7(c) 可以看出, 在试件最终破坏时, PPSRC 短柱试件与 HPSRC 短柱试件中的箍筋均已受拉屈服, 说明两类试件中的斜裂缝发展较为显著。由图 7(a) 可以看出, 空心试件 HPSRC-1 在达到其峰值荷载时箍筋的应变出现了明显的平台段, 说明在此荷载水平下裂缝突然加宽, 而实心试件 PPSRC-4 与 PPSRC-6 的箍筋应变均未出现明显的平台段, 说明型钢内部混凝土有效地分担了部分水平荷载, 从而有效控制了预制 RPC 外壳的斜裂缝发展。

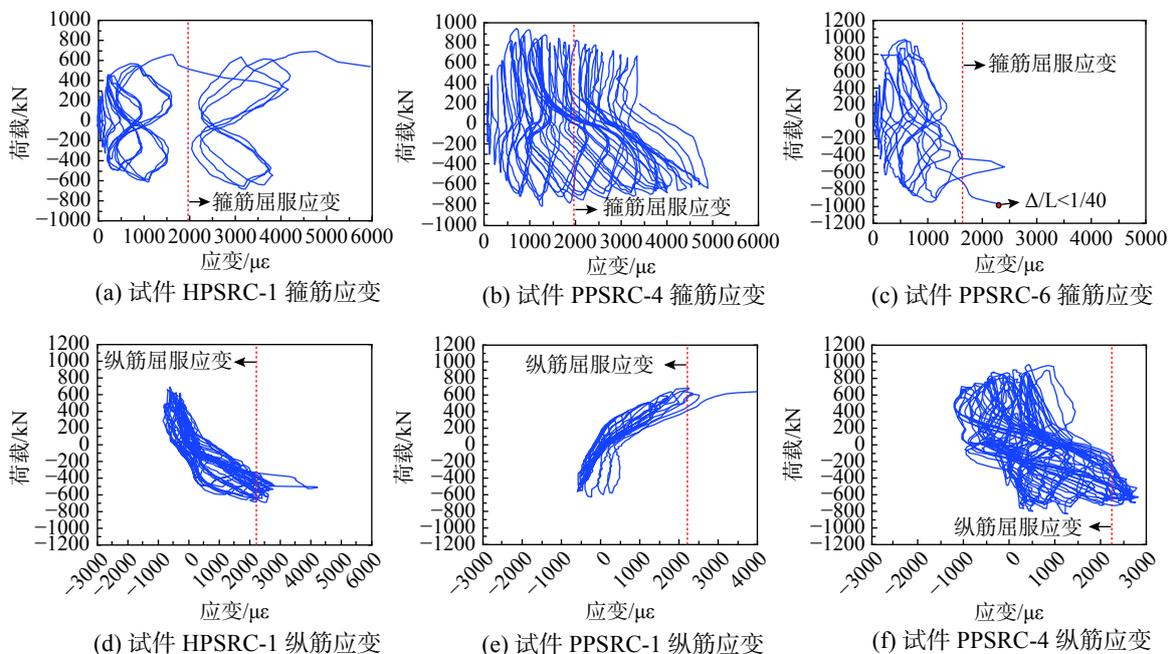


图 7 应变分析

Fig. 7 Strain analysis

纵筋的应变发展可以直观地体现试件的破坏形态, 如图 7(d)、图 7(e) 及图 7(f) 可以看出, 在

达到试件峰值荷载时, 试件 HPSRC-1 与 PPSRC-1 的纵筋均已屈服, 结合之前分析中试件 HPSRC-1

与 PPSRC-1 到达其峰值荷载前箍筋也均已屈服的情况可以看出配筋率较小的试件均发生弯剪破坏,这与前述的试件破坏形态相吻合。如图 7(f)所示,在加载结束时试件 PPSRC-4 的纵筋虽亦受拉屈服,但其实测应变仅小幅度超越纵筋受拉屈服应变,说明高配筋率的试件在受力过程中纵筋基本处于弹性受力阶段,试件未到达其弯曲承载力,故其破坏形态主要由剪切破坏控制。

2.3 滞回曲线

滞回曲线是结构构件在低周往复荷载作用下水平荷载与水平位移之间的关系,是结构构件抗震性能的综合体现。图 8 为各试件的荷载-位移滞回曲线,其中, Δ 为加载点位移, P 为加载点水平荷载,对比各试件的滞回曲线可知:

1) 在试件加载初期,荷载和位移近似呈线性关系,滞回曲线包围的面积很小,试件刚度退化不明显,残余变形很小,试件处于弹性工作状态。试件出现首条裂缝的侧移角为约为 1.0%,大于未掺杂钢纤维的型钢高强混凝土柱^[16-17],说明钢纤维较好地起到了阻裂的作用。随着水平位移的增加,试件表面裂缝不断产生并发展,滞回环包围的面积不断变大,试件进入弹塑性工作状态。由于内部型钢的存在,PPSRC 短柱试件与 HPSRC 短柱试件的滞回曲线均呈稳定的梭形,且未出现明显的捏拢。

2) 为了保证型钢翼缘的保护层厚度进而确保型钢与混凝土间的组合作用^[18],同时为了形成型钢内筒以便于现浇混凝土的浇筑,各试件中型钢均为十字型钢且配钢率偏小(5%),故滞回曲线的饱满程度相对于大配钢率型钢高强混凝土柱较弱^[17]。但在实际工程应用中,足尺的 PPSRC 短柱及 HPSRC 短柱可通过增大型钢配钢率来进一步提升耗能能力^[19]。

3) 在其余设计参数相同时,PPSRC 短柱试件的滞回曲线比 HPSRC 短柱试件的更为饱满,说明内部现浇混凝土的存在能大幅增加 PPSRC 短柱的耗能及变形能力。这是因为柱芯现浇混凝土受到型钢的有效约束,拥有较高的强度及变形性能。

2.4 骨架曲线

试件的骨架曲线是指荷载-位移滞回曲线中的每一级荷载的第一次循环的峰值点所连成的外包络曲线。各试件的骨架曲线如图 9 所示,对比各试件的骨架曲线可知:

1) 各试件的骨架曲线均可分为上升段、强化段及下降段。由图 9(a)可以看出,HPSRC 短柱试件中,配箍率最高的试件 HPSRC-4 具有最高的初始刚度及峰值承载力,而配筋率最低的试件 HPSRC-1 具有最低的初始刚度及峰值承载力。这是因为试件 HPSRC-1 的弯曲承载力相对于其余高配筋率的试件较低,破坏形态为体现出一部分弯曲破坏特征的弯剪破坏,故其峰值承载力受到一定程度的制约;而试件 HPSRC-4 因其配箍率较高,对内部混凝土的约束更强,破坏时有更多的箍筋可参与受剪,故体现出最好的滞回性能。相对于试件 HPSRC-2,承受轴压力更高的试件 HPSRC-3 的骨架曲线波动程度更大,曲线下降程度更剧烈,说明增加轴压力对 HPSRC 短柱试件的滞回性能有不利影响。

2) 由图 9(b)可以看出,PPSRC 短柱试件中,现浇 RPC 的试件 PPSRC-6 具有最高的初始刚度及峰值承载力,与 HPSRC 短柱试件相似,配筋率最低的试件 PPSRC-1 具有最低的初始刚度及峰值承载力。对比试件 PPSRC-2 与 PPSRC-3 的骨架曲线可知,承受轴压力更大的试件 PPSRC-3 的峰值承载力更高但骨架曲线下降段更陡峭,说明增加轴压力可提升 PPSRC 短柱试件的受剪承载力但会降低其变形性能。对比试件 PPSRC-3 与 PPSRC-5 的骨架曲线可知,提升体积配箍率可显著提高 PPSRC 短柱试件的承载与变形能力。对比试件 PPSRC-3、PPSRC-4 与 PPSRC-6 的骨架曲线可知,内部现浇混凝土强度的提升可大幅提高 PPSRC 短柱试件的受剪承载力与变形能力。值得注意的是,除峰值承载力外,内浇 C60 级混凝土的试件 PPSRC-4 与内浇 RPC 的试件 PPSRC-6 的骨架曲线下降段均较为平缓,说明适量提高内部现浇混凝土强度可有效提升 PPSRC 短柱的滞回性能。

2.5 刚度退化

试验过程中,由于试件的累积损伤,导致试件的割线刚度随位移加载循环的增加而逐渐减小,这种现象称为刚度退化。试件的割线刚度为每次循环的正向或负向最大荷载与相应位移的比值,其表达式为:

$$K_{i+} = \frac{+P_i}{+\Delta_i} \quad (1)$$

$$K_{i-} = \frac{-P_i}{-\Delta_i} \quad (2)$$

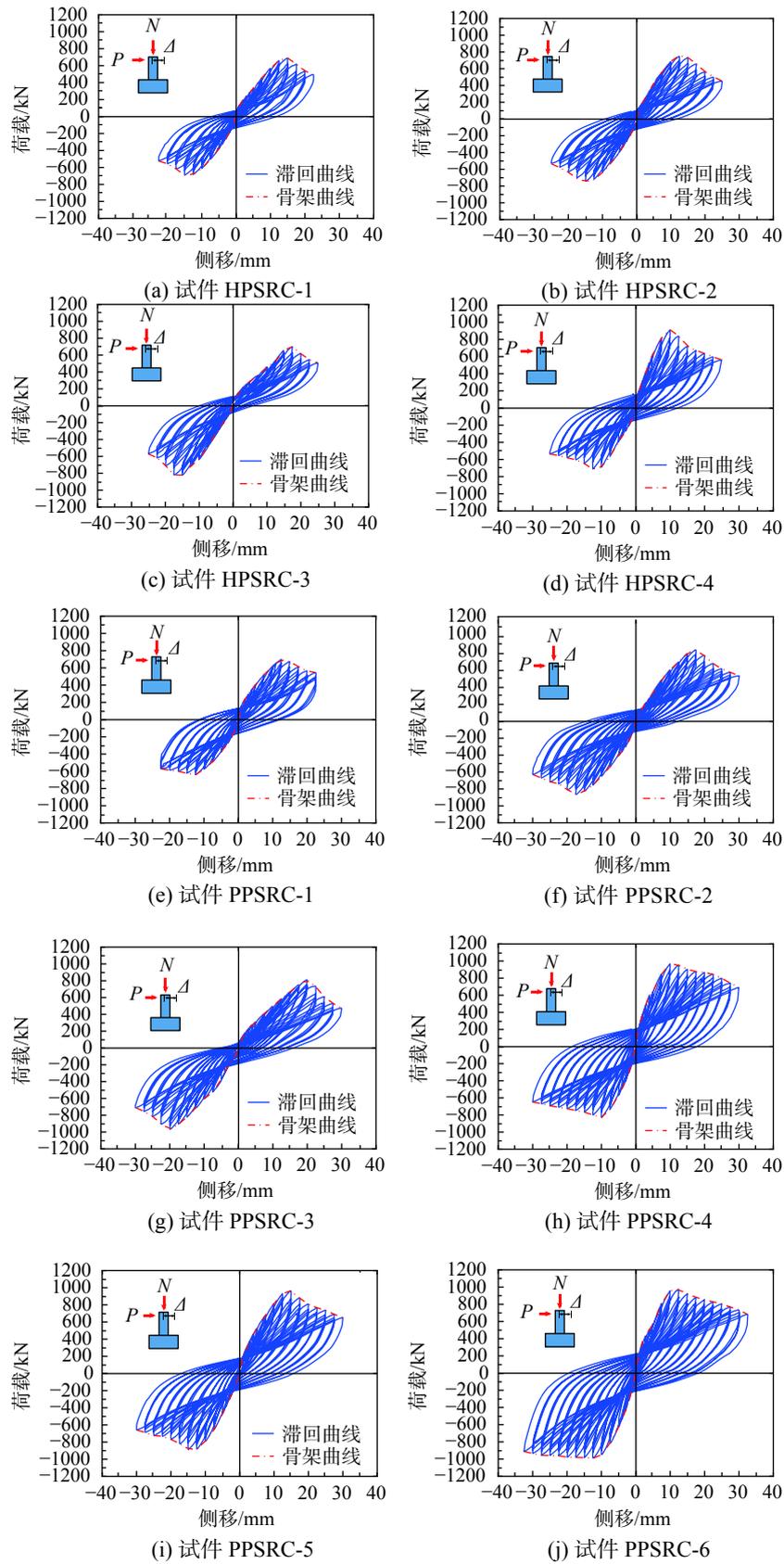
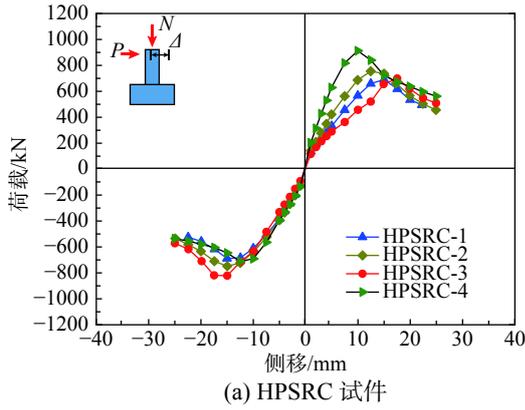


图 8 试件滞回曲线

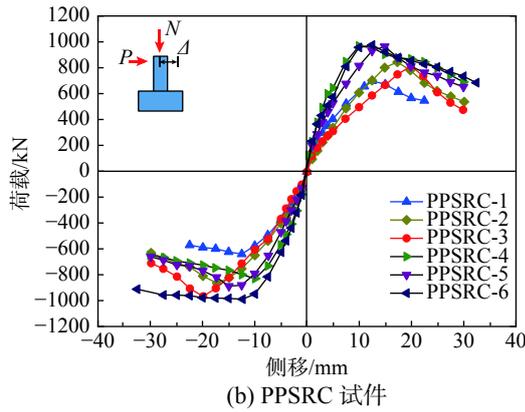
Fig. 8 Hysteretic loops of test specimens

式中： K_{i+} 和 K_{i-} 为第*i*级加载下正、反加载的刚度； $+\Delta_i$ 和 $-\Delta_i$ 分别为第*i*级加载下正、反向水平

峰值荷载对应的侧移； $+P_i$ 和 $-P_i$ 分别为第*i*级加载第1次循环的正、反向水平峰值荷载值。



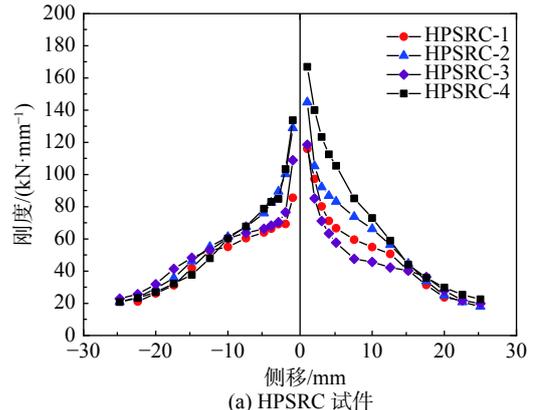
(a) HPSRC 试件



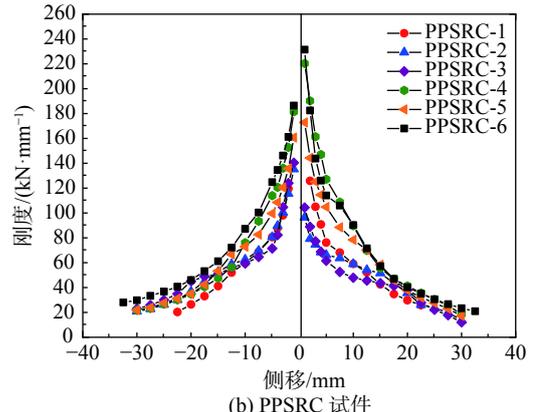
(b) PPSRC 试件

图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of test specimens



(a) HPSRC 试件



(b) PPSRC 试件

图 10 试件刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation of test specimens

各试件刚度退化曲线汇总见图 10。由图 10 可以看出，因为内部现浇混凝土的存在，PPSRC 短柱试件的初始刚度均高于 HPSRC 短柱试件的。内部现浇 RPC 的试件 PPSRC-6 表现出最高的初始刚度，发生弯剪破坏的试件 HPSRC-1 与 PPSRC-1 表现出最低的初始刚度。总体来说，PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱试件的刚度均随侧移的增加而逐渐降低，但由于各试件均配置了高性能混凝土外壳，在两类试件中均未发现刚度的突然退化。由图 10(a) 可知，HPSRC 短柱试件中，配箍率最大的试件 HPSRC-4 体现出最稳定的承载力退化；同时由图 10(b) 可知，增大配箍率及内部现浇混凝土强度可有效缓解 PPSRC 短柱试件不稳定的刚度退化，轴压力对 PPSRC 短柱的刚度退化影响较小。

2.6 位移延性

试验实测各试件的承载力、位移及位移延性系数如表 4 所示。其中，各试件的屈服荷载 P_y 及屈服位移 Δ_y 使用作图法确定^[20]，定义试件的水平荷载下降至峰值荷载 80% 时对应的加载点侧移为极限位移 Δ_u ，位移延性系数 μ 取 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 。试件的屈服点具体定义方法如图 11 所示，过坐标轴原点

O 做骨架曲线的切线并与过骨架曲线峰值点的水平线相交于点 A ，点 B 为点 A 在骨架曲线上的垂直投影，之后连接 OB 并延伸与过骨架曲线峰值点的水平线交于点 C ，则点 C 在骨架曲线上的垂直投影即为试件屈服点。

由表 4 可以看出，由于内部混凝土的存在，PPSRC 短柱试件相对于 HPSRC 短柱试件表现出更高的位移延性系数，说明内部混凝土可有效提升 PPSRC 短柱的变形能力。对比试件 PPSRC-1 与 PPSRC-2 及试件 HPSRC-1 与 HPSRC-2 的位移延性系数可知，发生弯剪破坏的试件表现出略高的位移延性；由表 4 可知，低轴压力的试件 HPSRC-2 与 PPSRC-2 的位移延性系数均为高轴压力的试件 HPSRC-3 与 PPSRC-3 的 1.20 倍，说明提高轴压力会降低两类试件的变形能力；高配箍率的试件 HPSRC-4 与 PPSRC-5 的位移延性系数为低配箍率的试件 HPSRC-3 与 PPSRC-3 的 1.58 倍及 1.52 倍，说明提高配箍率可有效提升两类试件的位移延性。

值得注意的是，内部现浇 C60 级混凝土的试件 PPSRC-4 与内部现浇 RPC 的试件 PPSRC-6 的

表 4 试验结果汇总
Table 4 Summary of test results

试件编号	破坏形态	加载方向	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_u /mm	P_m /kN	\bar{P}_m /kN	$E_{sum}/(kN\cdot m)$	μ	$\bar{\mu}$
HPSRC-1	弯剪破坏	正向	10.04	572.33	22.50	690.91	690.03	91.40	2.24	2.31
		负向	9.44	579.06	22.48	689.14			2.38	
HPSRC-2	剪切破坏	正向	9.03	640.13	21.67	754.83	751.49	126.14	2.40	2.31
		负向	9.93	637.10	21.95	748.14			2.21	
HPSRC-3	剪切破坏	正向	13.17	558.41	24.90	698.76	760.07	107.91	1.89	1.92
		负向	12.82	733.37	25.00	821.37			1.95	
HPSRC-4	剪切破坏	正向	7.08	790.34	23.58	912.31	811.68	144.15	3.33	3.03
		负向	9.14	646.42	24.95	711.05			2.73	
PPSRC-1	弯剪破坏	正向	8.13	548.98	22.49	698.49	669.56	123.53	2.77	2.67
		负向	8.74	534.83	22.46	640.63			2.57	
PPSRC-2	剪切破坏	正向	13.23	733.37	30.00	843.58	854.19	208.26	2.27	2.47
		负向	11.21	699.97	29.82	864.79			2.66	
PPSRC-3	剪切破坏	正向	14.05	636.75	29.79	812.76	889.93	201.80	2.12	2.05
		负向	15.15	830.76	30.00	967.09			1.98	
PPSRC-4	剪切破坏	正向	6.11	739.90	30.00	967.55	898.60	317.59	4.91	4.43
		负向	7.53	734.98	29.74	829.64			3.95	
PPSRC-5	剪切破坏	正向	9.29	774.28	30.01	964.09	926.29	288.05	3.23	3.12
		负向	9.95	789.01	29.85	888.49			3.00	
PPSRC-6	剪切破坏	正向	7.86	828.30	30.28	975.34	982.17	386.50	3.85	3.89
		负向	8.14	847.61	32.00	988.99			3.93	

注: Δ_y 为试件屈服位移; Δ_u 为试件极限位移; P_y 为试件屈服荷载; P_m 为试件峰值荷载; E_{sum} 为试件累积耗能; μ 为试件位移延性系数。

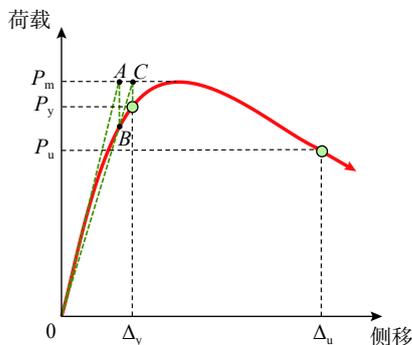


图 11 试件屈服点的定义

Fig. 11 Determination of yield point of specimens

位移延性系数为内部现浇 C30 级混凝土的试件 PPSRC-3 的 2.16 倍与 1.90 倍, 说明提高内部现浇混凝土强度可大幅度提升 PPSRC 短柱的变形性能。其主要原因是内部填充 C30 级混凝土的试件中型钢与内部混凝土的承载力与变形能力远低于型钢外部的预制 RPC 外壳, 因而造成内外部承载力与刚度的不协调, 而被型钢约束的 C60 级混凝土及 RPC 可大幅提升 PPSRC 柱内部的承载力与变形能力, 从而大幅提升了其位移延性。同时从表 4 可以看出, 部分发生剪切破坏的试件 (试件 HPSRC-4、PPSRC-4、PPSRC-5 与 PPSRC-6) 的位移延性

系数大于发生弯剪破坏的试件 (试件 HPSRC-1 与 PPSRC-1), 说明增加配箍率与适度提升内部现浇混凝土强度可有效改善两类试件发生剪切破坏时的位移延性, 可将 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的脆性破坏模式 ($\mu < 2.0$) 转化为高延性破坏模式 ($\mu > 3.0$)^[21]。

2.7 耗能能力

结构或构件的累积耗能 E_{sum} 是指荷载-位移曲线中所有滞回环包围面积的总和, 详见表 4 与图 12。与位移延性表现出的特征类似, PPSRC 短柱试件的累积耗能远高于 HPSRC 短柱试件的, 其中高配箍率试件 PPSRC-5 的累积耗能是试件 HPSRC-4 的 200.13%, 内部现浇 RPC 的试件 PPSRC-6 的累积耗能是试件 HPSRC-4 的 268.12%, 说明 PPSRC 短柱的滞回性能明显优于 HPSRC 短柱的。高轴压力的试件 HPSRC-3 破坏时的累计耗能相对于低轴压力的试件 HPSRC-2 降低了 16.89%, 同时高轴压力的试件 PPSRC-3 破坏时的累计耗能相对于低轴压力的试件 PPSRC-2 仅降低了 3.20%, 说明轴压力的提高会降低 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的耗能能力, 但 PPSRC 短柱的降低幅度远低于 HPSRC

短柱的。主要原因是试件型钢外侧的 RC 部分容易受到轴压力的影响，而 PPSRC 短柱因内部混凝土的存在其型钢外侧 RC 部分承担的轴压力相对于 HPSRC 短柱中型钢外侧 RC 部分较低。

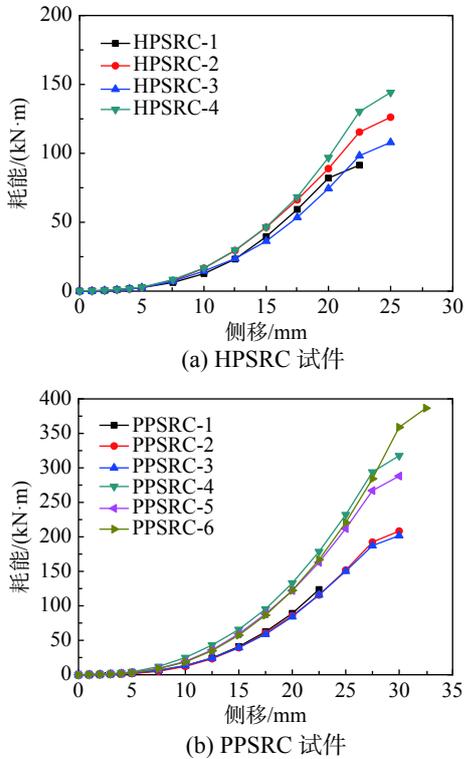


图 12 试件累积耗能曲线

Fig. 12 Cumulative energy dissipation of test specimens

值得注意的是，内部现浇 C60 级混凝土的试件 PPSRC-4 与内部现浇 RPC 的试件 PPSRC-6 的累积耗能为内部现浇 C30 级混凝土的试件 PPSRC-3 的 1.57 倍与 1.91 倍，说明提高现浇混凝土强度可大幅度提升 PPSRC 短柱的耗能性能。综上所述，适当提升内部混凝土强度可以同时提升 PPSRC 短柱的刚度退化特性、位移延性与耗能能力，故在实际工程应用中，可以使用造价相对 RPC 较低的高强混凝土浇筑 PPSRC 柱柱芯以在保证抗震性能的前提下降低造价。

3 受剪承载力

PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的受剪承载力计算简图如图 13 所示，因为两类试件均采用十字型钢，故可认为沿水平力加载方向的型钢腹板与型钢翼缘均可直接参与试件的受剪行为。基于现行《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[18] 与《钢筋混凝土结构技术规程》(YB9082—2006)^[22]，结合

PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱试件的特点对其受剪承载力公式进行改进。考虑到 PPSRC 短柱同一截面中存在两种不同强度的混凝土，采用面积加权法可得到换算混凝土受拉强度：

$$f_{t,com} = \frac{A_{cp}}{A_{cp} + A_{cc}} f_{t,o} + \frac{A_{cc}}{A_{cp} + A_{cc}} f_{t,i} \quad (3)$$

式中： $f_{t,com}$ 为换算混凝土受拉强度； A_{cc} 为现浇混凝土面积； A_{cp} 为预制混凝土面积； $f_{t,o}$ 为预制混凝土受拉强度； $f_{t,i}$ 为现浇混凝土受拉强度。

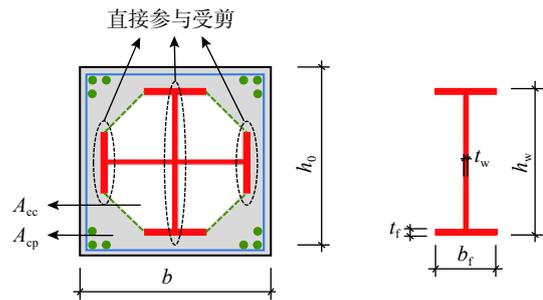


图 13 计算简图

Fig. 13 Calculation sketch

PPSRC 短柱受剪承载力计算公式为：

$$V_{c,PPSRC} = \frac{1.05}{\lambda + 1} f_{t,com} b_c h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} (f_{yw} A_w + 2 f_{yf} A_f) + 0.056 N \quad (4)$$

式中： $V_{c,PPSRC}$ 为 PPSRC 短柱试件的受剪承载力； λ 为试验剪跨比； b_c 为柱宽； h_0 为有效柱高，取柱受拉边缘至受拉钢筋形心的距离； f_{yv} 为箍筋屈服强度； A_{sv} 为同一截面位置箍筋各肢面积之和； s 为箍筋间距； f_{yw} 为型钢腹板屈服强度； A_w 为型钢腹板截面面积； f_{yf} 为型钢翼缘屈服强度； A_f 为型钢翼缘截面面积； N 为轴压力。

HPSRC 短柱受剪承载力计算公式为：

$$V_{c,HPSRC} = \frac{1.05}{\lambda + 1} f_{t,o} (b_c - h_w) h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} (f_{yw} A_w + 2 f_{yf} A_f) + 0.056 N \quad (5)$$

式中： $V_{c,HPSRC}$ 为 HPSRC 短柱试件的受剪承载力； h_w 为型钢腹板高度，其他符号意义同上。

根据上述方法计算出的 PPSRC 短柱试件与 HPSRC 短柱试件的受剪承载力见表 5。由表 5 可知，式 (4) 与式 (5) 的计算值高估了试件 PPSRC-1 与 HPSRC-1 的受剪承载力，这是因为试件 PPSRC-1 与 HPSRC-1 均发生弯剪破坏，从而限制了其受剪

性能的充分发挥。在其余发生剪切破坏的试件中,使用本文提出的计算公式计算出的受剪承载力均与试验值吻合良好,计算承载力与试验承载力比值均值为 0.94,变异系数为 0.10。证明本文提出的受剪承载力计算公式行之有效,可供实际工程参考。与此同时,为了进一步保证实际设计时的安全与方便性,本文将式(4)与式(5)中的换算混凝土受拉强度替换为内、外混凝土受拉强度的较小值对本文试件受剪承载力进行了计算。如表 5 所示,计算承载力与试验承载力比值均值为 0.91,变异系数为 0.10,计算结果表明在不计预制 RPC 的受拉承载力时,采用内、外混凝土受拉强度的较小值计算得到的 PPSRC 柱受剪承载力被明显低估了,而当预制混凝土采用普通高强混凝土浇筑时,该简化方法则可以在简化计算方法的同时得到较为安全的结果。

表 5 试验值与计算值比较
Table 5 Comparison of test and predicted results

试件编号	截面形式	V_e /kN	V_{e-1} /kN	V_{e-1}/V_e	V_{e-2} /kN	V_{e-2}/V_e
HPSRC-1	空心	690.03	699.44	1.01	699.44	1.01
HPSRC-2	空心	751.49	694.23	0.92	694.23	0.92
HPSRC-3	空心	760.07	711.03	0.94	711.03	0.94
HPSRC-4	空心	811.68	810.96	1.00	810.96	1.00
PPSRC-1	实心	669.56	769.39	1.15	707.00	1.06
PPSRC-2	实心	854.19	760.48	0.89	701.56	0.82
PPSRC-3	实心	889.93	777.28	0.87	718.36	0.81
PPSRC-4	实心	898.60	788.65	0.88	752.30	0.84
PPSRC-5	实心	926.29	877.21	0.95	818.29	0.88
PPSRC-6	实心	982.17	806.95	0.82	806.95	0.82
平均值				0.94	0.91	
变异系数				0.10	0.10	

注: V_e 为实测试件峰值承载力; V_{e-1} 为采用换算混凝土受拉强度计算的试件受剪承载力; V_{e-2} 为采用内、外混凝土受拉强度较小值计算的试件受剪承载力。

4 结论

通过对 4 个 HPSRC 短柱试件及 6 个 PPSRC 短柱试件的拟静力试验及分析,可以得到以下结论:

(1) PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱中的预制高性能混凝土、型钢与现浇混凝土有较好的共同工作性能,破坏时各试件中均未发现明显的纵向黏结裂缝,高强螺栓连接件可较好地保证各试件的组合作用。在各试件中,纵筋配筋率较小的试件发生弯剪破坏,其余试件均发生剪切破坏。同时各试件中配置钢纤维的 RPC 外壳可有效避免因往复

加载而导致的混凝土脱落及裂缝开展。

(2) PPSRC 短柱相比于 HPSRC 短柱拥有更好的滞回性能、承载能力及耗能能力。其他设计参数相同时,内部混凝土强度较高、轴压力较大、配筋率及配箍率较大的试件受剪承载力较高;内部混凝土强度较低,轴压力较大及配箍率较小的试件位移延性及耗能能力相对较差。适当提升内部混凝土强度和配箍率可大幅提高 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱试件的耗能及变形能力,同时可将 PPSRC 短柱的破坏模式由脆性破坏 ($\mu < 2.0$) 转变为延性破坏 ($\mu > 3.0$)。

(3) 因为柱芯混凝土的存在,PPSRC 短柱试件的初始刚度高于 HPSRC 短柱试件的,同时在两类试件中均未发现刚度的突然退化。内部现浇混凝土强度较高、轴压力较低及配箍率较大的试件体现出更稳定的刚度退化趋势。在实际应用中,PPSRC 短柱可用于结构底层重载柱以提升整个结构的抗震性能,而 HPSRC 短柱虽滞回性能相比于 PPSRC 短柱较弱,但用于高层结构柱时仍可提供充足的承载能力与耗能能力,并可降低整个结构的自重。

(4) 基于试验结果及现行规范提出了 PPSRC 短柱与 HPSRC 短柱的受剪承载力计算方法,结果表明计算结果与试验结果吻合较好,可供实际工程参考使用。

参考文献:

- [1] 薛建阳. 组合结构设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 99 - 101.
Xue Jianyang. Design principles of composite structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 99 - 101. (in Chinese)
- [2] Haijar J F. Composite steel and concrete structural systems for seismic engineering [J]. Steel Construction, 2008, 58(5): 703 - 723.
- [3] Kurama Y C, Sritharan S, Fleischman R B, et al. Seismic-resistant precast concrete structures: state of the art [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4): 1 - 18.
- [4] 王俊, 赵基达, 胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 1 - 8.
Wang Jun, Zhao Jida, Hu Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1 - 8. (in Chinese)
- [5] 社团法人预制建筑协会. 预制建筑总论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 25 - 31.
Association of Prefabricated Building. Introduction of the

- prefabricated structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 25—31. (in Chinese)
- [6] 程万鹏, 宋玉普, 王军. 预制装配式部分钢骨混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2015, 55(2): 171—178.
Cheng Wanpeng, Song Yupu, Wang Jun. Experimental study of seismic performance for interior beam-column joints of precast and discontinuous steel reinforced concrete [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2015, 55(2): 171—178. (in Chinese)
- [7] 程万鹏, 宋玉普, 张秀娟. 预制装配式部分钢骨混凝土框架梁柱节点承载能力的试验研究[J]. *大连交通大学学报*, 2014, 35(4): 52—55.
Cheng Wanpeng, Song Yupu, Zhang Xiujuan. Experiment study of bearing capacity for beam and column joints of precast and discontinuous steel reinforced concrete [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2014, 35(4): 52—55. (in Chinese)
- [8] 张雪松, 李忠献. 低周反复循环荷载作用下装配整体式钢骨混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(增刊 1): 1—4.
Zhang Xuesong, Li Zhongxian. Seismic behavior of joints of prefabricated steel reinforced concrete integral frame under low cyclic and reciprocal loading [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2005, 35(Suppl 1): 1—4. (in Chinese)
- [9] 杨勇, 薛亦聪, 于云龙, 等. 部分预制装配型钢混凝土梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(9): 46—53.
Yang Yong, Xue Yicong, Yu Yunlong, et al. Experimental study of partially precast steel reinforced concrete beams under positive bending [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(9): 46—53. (in Chinese)
- [10] 杨勇, 于云龙, 杨洋, 等. 部分预制装配型钢混凝土梁受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(6): 53—60.
Yang Yong, Yu Yunlong, Yang Yang, et al. Experimental study on shear performance of partially precast steel reinforced concrete beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6): 53—60. (in Chinese)
- [11] 于云龙. 部分预制装配型钢混凝土梁基本性能及设计方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018: 23—128.
Yu Yunlong. Study on mechanical performance and design method on partially precast steel reinforced concrete beams [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 23—128. (in Chinese)
- [12] 杨勇, 薛亦聪, 于云龙, 等. 部分预制装配型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(8): 42—50.
Yang Yong, Xue Yicong, Yu Yunlong, et al. Study on seismic behavior of partially precast steel reinforced concrete columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(8): 42—50. (in Chinese)
- [13] 郑文忠, 吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(10): 44—58.
Zheng Wenzhong, Lü Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(10): 44—58. (in Chinese)
- [14] 冯宏. 型钢高强混凝土框架柱抗震性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 115—132.
Feng Hong. Study on seismic behavior of HSRC frame column [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 115—132. (in Chinese)
- [15] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
GB/T 50081—2002, Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [16] Zhu W, Jia J, Zhang J. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced high-strength concrete short columns [J]. *Steel & Composite Structures*, 2017, 25(5): 603—615.
- [17] 李俊华, 王新堂, 薛建阳, 等. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(7): 11—18.
Li Junhua, Wang Xintang, Xue Jianyang, et al. Experimental study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(7): 11—18. (in Chinese)
- [18] JGJ 138—2016, 组合结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
JGJ 138—2016, Code for design of composite structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016. (in Chinese)
- [19] 殷小澍, 吕西林, 卢文胜. 大比尺高含钢率型钢混凝土柱滞回性能试验[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(12): 91—98.
Yin Xiaowei, Lü Xilin, Lu Wensheng. Experimental study on hysteretic properties of large-size SRC columns with high ratio of encased steel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(12): 91—98. (in Chinese)
- [20] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 163—337.
Guo Zhenhai, Shi Xudong. Theory and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 163—337. (in Chinese)
- [21] ASCE/SEI 41-13, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2013.
- [22] YB 9082—2006, 钢骨混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
YB 9082—2006, Technical specification of steel reinforced concrete structures [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese)