

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.01.002

HPFL 加固 RC 圆柱抗震性能试验研究

竹永恒, 蒋隆敏, 欧蔓丽, 付 华

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 在轴力恒定和水平反复荷载作用下, 对4根RC圆柱受力性能进行试验研究, 证明了用高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层(HPFL)加固RC圆柱, 可以提高其抗震性能。通过对柱混凝土危险区段横向网筋形成的强约束和对纵向网筋的锚固, 可使柱的抗震承载力和抗震延性提升, 总耗能能力增长。具体地, 对于卸轴力的一次受力加固柱, HPFL比原混凝土柱应变滞后的现象并不显著, 使柱抗震承载力明显提高; 对于不卸轴力的二次受力加固柱与不卸轴力且有震损的二次受力加固柱, 尽管HPFL应变滞后原柱混凝土的现象依次加重, 但由于加固层的延迟工作以及在塑性铰区逐步发挥作用的强约束机制使塑性铰转动能力增强, 从而使柱延性有了依次增大的改善, 而且震损加固柱已呈下降趋势的 $P-\Delta$ 骨架曲线回升, HPFL可使加固圆柱纵、横向裂缝形态明显改善。

关键词: 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层(HPFL); 抗震加固; 二次受力加固; 承载能力; 延性

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)01-0006-09

引文格式: 竹永恒, 蒋隆敏, 欧蔓丽, 等. HPFL加固RC圆柱抗震性能试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(1): 6-14.

An Experimental Study on the Seismic Behavior of RC Cylinders Strengthened by High Performance Ferrocement Laminates

ZHU Yongheng, JIANG Longmin, OU Manli, FU Hua

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: An experimental test has been conducted on the seismic behavior of four RC cylinders under the action of constant axial force and repeated horizontal loads, which verifies an improvement in the seismic performance of RC cylinders strengthened with HPFL. The seismic bearing capacity and ductility of the column can be improved and the total energy dissipation capacity can be increased by the strong constraint on the transverse reinforcement of the column concrete danger section and the anchorage of the longitudinal reinforcement. Specifically, the strain of HPFL is not significant compared with that of the original cylinders for the primary reinforcement columns under unloading axial force, which improves the seismic bearing capacity of columns significantly. For the secondary stressed columns without axial force and the secondary stressed columns without axial force and seismic damage, although the HPFL strain lags behind the original column concrete phenomenon, the delay of the reinforcement layer and the strong restraining mechanism of the plastic hinge zone gradually exerts the effect of increasing the rotation ability of the plastic hinge, so that the column ductility is improved sequentially. Meanwhile, the $P-\Delta$ skeleton curve of the damaged column

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51741804), 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(2016JJ503), 湖南省教育厅科研基金资助项目(16C0483)

作者简介: 竹永恒(1993-), 男, 河南信阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为结构加固,

E-mail: 1049429332@qq.com

通信作者: 蒋隆敏(1963-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事结构加固方面的教学与研究,

E-mail: 527943658@qq.com

shows a downward trend, with the HPFL strengthened, verifying the conclusion that HPFL can obviously improve the longitudinal and transverse crack morphology of the reinforced cylinder.

Keywords: high performance ferrocement laminates (HPFL); seismic strengthening; secondary stressed reinforcement; load-bearing capacity; ductility

0 引言

我国有 70% 的地域处于地震区, 这些地域中有大量的老旧房屋、桥梁未进行抗震设防, 因而亟待加固。众多的研究成果与工程实践经验表明, 通过对钢筋混凝土柱身的部分范围 (如塑性铰区域, 即柱端约 $1.5h$ 范围内, h 为柱截面高度或原柱截面直径) 或者整个柱身范围采用如粘贴钢板、加大截面、绕铅丝或者粘贴纤维材料等围箍式加固所形成的外部约束, 能明显增强柱子的承载力并改善其延性^[1-6]。由钢筋网增强的高性能水泥复合砂浆薄层 (high performance ferrocement laminates, HPFL)^[7] 加固 RC 结构的方法具有诸多优势, 如加固效果较好、施工较为简单、低造较价、耐火耐高温、与原构件混凝土的相容性和协调性较好、构件截面增大不明显等, 且至今已经获得了较为系统的研究成果^[8-16], 因而在国内得到了很好的推广和运用^[17]。

现有的混凝土结构中, 多高层房屋的框架柱及桥柱大量采用方形截面或圆形截面。文献 [9] 对 HPFL 加固 RC 方柱的抗震性能进行了研究, 由其可知研究 HPFL 加固 RC 圆柱的抗震性能同样具有重要意义,

对补充和完善已有的研究成果具有较大帮助。因此, 本文拟采用 HPFL 材料, 加固 4 根一次受力、二次受力以及震损条件下的 RC 圆柱, 对其抗震性能进行研究, 以期 HPFL 加固 RC 柱技术应用于实际工程中提供参考依据。

1 试验

1.1 基本试件与试验方案

本研究试件制作同文献 [9], 即使用倒 T 型试件, 共制作 4 根倒 T 型试件。制作的悬臂柱试件的直径为 375 mm, 柱高 1 500 mm, 基座上上部到侧向水平加载点的间距为 1 500 mm, 柱纵筋采用 HRB335 螺纹钢 (实测其屈服强度 $f_y=358$ MPa), 柱箍筋采用 HPB235 光圆钢 (实测其屈服强度 $f_y=281$ MPa)。试件底部构造为 2 000 mm × 700 mm × 420 mm 的基座。设计试件的尺寸及配筋详见图 1。混凝土强度等级为 C35, 为便于测试试验中混凝土的强度, 各试件都留有相同情形下养护的立方体试块, 实测试件的主要参数值详见表 1。

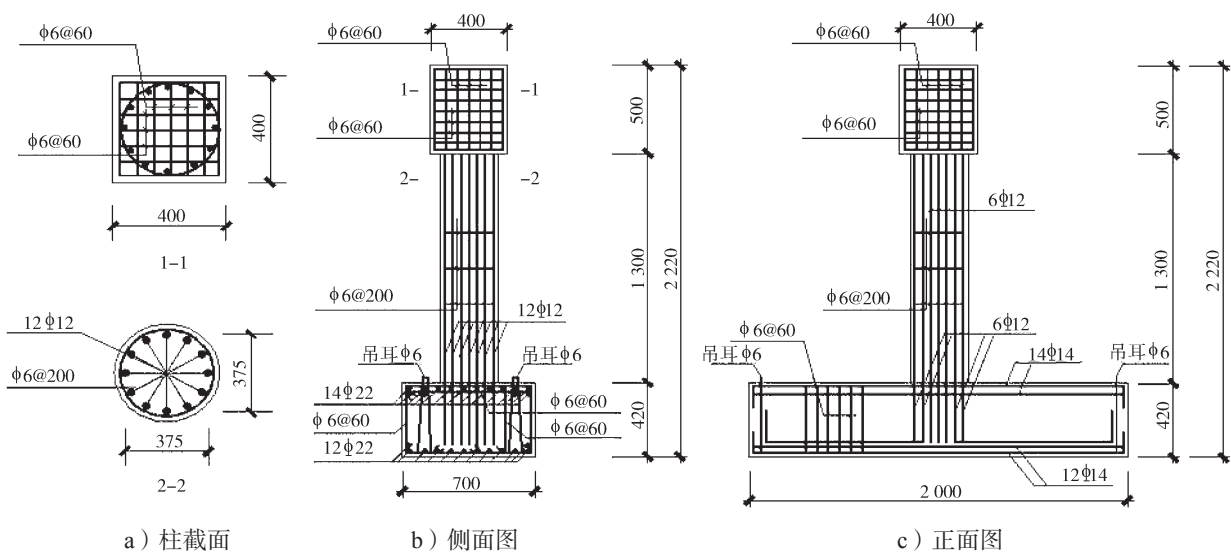


图 1 基本试件尺寸及配筋详图

Fig. 1 Detailed drawing of basic specimens

4 根悬臂柱按照实际施加的轴向荷载与实测混

凝土抗压强度以及原柱截面尺寸确定的轴压比均为

$n=0.42$ 。其中柱 R-1 为不加固的对比柱；R-2 为一次受力加固柱，即采用“加固→施加轴力→施加低周水平荷载”的试验方案，用以模拟框架柱在不卸荷载或不能全部卸除荷载情况下的抗震加固；R-3 为不卸轴力的二次加固柱，即采用“施加轴力→加固→施加低周水平荷载”的试验方案，用以模拟框架柱在不卸使用荷载或不能完全卸除使用荷载情况下的抗震加固；R-4 为不卸轴力且推到屈服后的二次受力加固柱，即采用“施加轴力→施加低周水平荷载直至相关测点处或原柱纵筋屈服→加固→施加低周水平荷载”的试验方案，用以模拟已有地震损伤但还可修复和加固的框架柱在不卸除使用荷载或部分卸除使用荷载情况下的抗震加固。

表 1 试件主要参数

Table 1 Major parameters of test specimens

试件编号	主筋配筋率 / %	混凝土强度 f_{cu} / MPa	实际轴压比 n	加固方案	加固时原柱条件
R-1	1.228	35.95	0.42	未加固	-
R-2	1.228	36.24	0.42	加固	卸轴力
R-3	1.228	37.82	0.42	加固	不卸轴力
R-4	1.228	36.66	0.42	加固	不卸轴力且已震损

为了防止柱顶到达较大侧向水平位移时加固层下端因纵向网筋直接抵触基座顶面而导致的不良破坏模式，在各柱的加固层下端与基座之间留有 15 mm 的间隙。对各柱实行围箍式加固，但在柱底可能的塑性铰部位（柱端约 $1.5h$ 内）将 HPFL 中的横向网筋加密 1 倍，用以增强对该部位混凝土的约束及对纵向网筋的锚固。

1.2 加固方法与步骤

HPFL 加固层材料与构造同文献 [9]。即 HPFL 的增强相采用直径 $\phi 6.45$ 的冷轧带肋钢筋网，非塑性铰区网格尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ，塑性铰区域网格尺寸为 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。

1) 先将各柱除根部 15 mm 高范围以外的柱身侧面凿毛，直至露出粗骨料。

2) 用压力水冲洗柱身的毛面，冲刷，同时用钢刷去除松动粉层。

3) 风干试件，待混凝土毛面的颜色变为深灰色，以毛刷将事先调做糊状的少许界面剂涂刷在混凝土毛面上。

4) 在基座顶面处，先放好厚度为 15 mm 且紧靠柱身的塑料泡沫板。将事先准备好的尺寸比较精确的纵向网筋和横向网筋按网格尺寸为 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ （从泡沫板表面往上 500 mm 高的范围）和 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ （继续往上的范围）绑扎定位。内层放

置纵向网筋，外层放置横向网筋，然后在网点交叉处施以电焊，使其成为紧靠原柱的围箍式网笼。

5) 将拌和的复合砂浆分两层涂抹到原柱侧面，涂抹第一层后用力捻压，以保证砂浆、混凝土及钢筋网三者紧密结合，且控制 HPFL 的厚度为 20 mm 左右。

6) 将制备的各试件放置在常温、潮湿环境中养护 28 d。

1.3 试验装置及测试内容

本研究的试验装置与加载制度同文献 [9]，即采用电动液压伺服作动器加载系统与变位移控制的加载制度，试验装置如图 2 所示。对于不卸轴力的二次受力加固柱，由于早强剂的作用以及良好的养护条件，加固层中的复合砂浆在 3~4 d 内就达到了设计强度，在这一期间，通过液压系统稳压操作维持柱的轴向荷载不变。

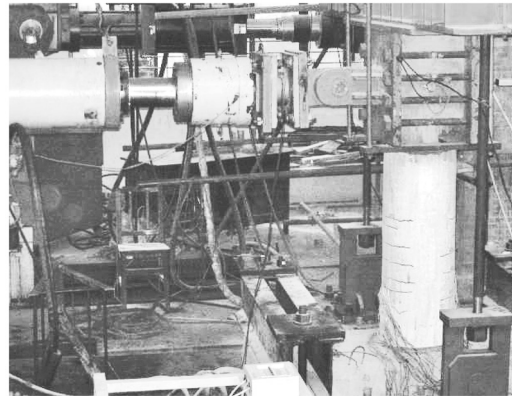


图 2 试验装置

Fig. 2 Test set-up

本研究的测试内容主要包括：

1) 各悬臂柱的 $P-\Delta$ 滞回曲线。 P 为作用在柱顶的侧向水平推力、拉力，由作动器上的加载压力盒和安装在数控电动液压伺服作动器系统和柱头之间的量程为 850 kN 的双向力传感器记录； Δ 为柱顶 P 作用点处的水平位移，由作动器上的传感器测量。 P 和 Δ 的实测值均由相应的电脑程序系统自动采集、储存，并同步绘出各加载步长下的 $P-\Delta$ 滞回曲线。

2) 塑性铰区域各构造层的控制部位在每一加载步长下的应变值。各构造层测点布局详见图 3。图中括号内、外的编号分别代表测点竖向、横向贴的应变片。由两台信号测试仪和计算机自动采集每一加载步长下的应变值。

3) 裂缝观测。监控和观测在各加载步长下各悬臂柱的裂缝出现时间、裂缝形态及开展情况。

4) 柱上端转角测量。用固定在水平侧向力作用线与柱轴线交点处的倾角仪，直接量测各加载步长下的柱上端转角。

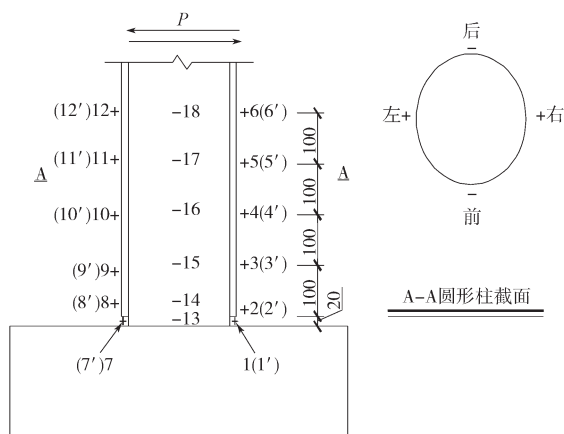


图 3 应变测点布置示意图

Fig. 3 Layout diagram of test strain points

2 结果与分析

2.1 承载力及延性试验结果

各悬臂柱承载力及延性等试验结果见表 2。

表 2 主要试验结果

Table 2 Main testing results of all specimens

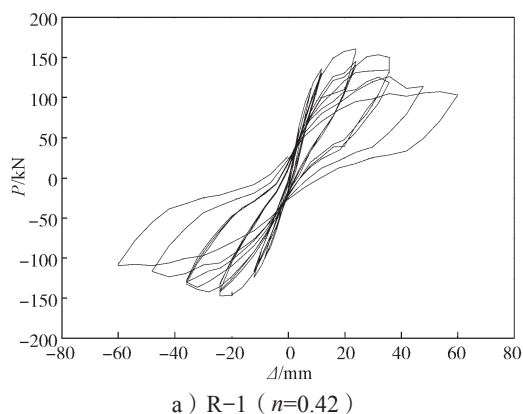
试件 编号	开裂荷载 / kN	极限抗弯承载力		位移延性系数	
		试验值 / (kN·m)	提高率 / %	试验值 / (kN·m)	提高率 / %
R-1	111.05	230.23	-	3.17	-
R-2	118.25	277.76	20.64	6.95	119.24
R-3	107.75	239.31	3.94	7.84	147.32
R-4	110.37	242.81	5.46	9.44	197.79

由表 2 可知, 一次受力加固柱正截面承载力提高幅度较二次受力加固柱正截面承载力更明显; 无论是一次受力加固还是二次受力加固, 沿柱高在圆柱侧面围套钢筋网砂浆并在塑性铰区域使加固层进一步增强的加固方式, 对提高圆柱的延性非常有效。

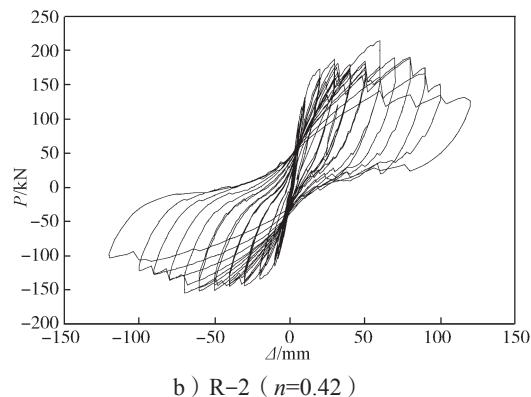
2.2 主要破坏特征及分析

本组试验的 4 根悬臂柱最终均为大偏压破坏。表中位移延性系数仍采用文献 [9] 中的公式计算得出。

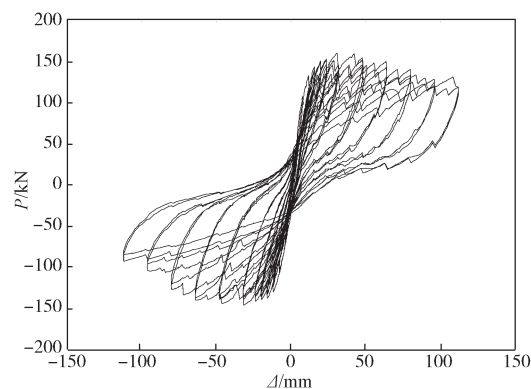
图 4 所示为各悬臂柱的 $P-\Delta$ 试验滞回曲线。



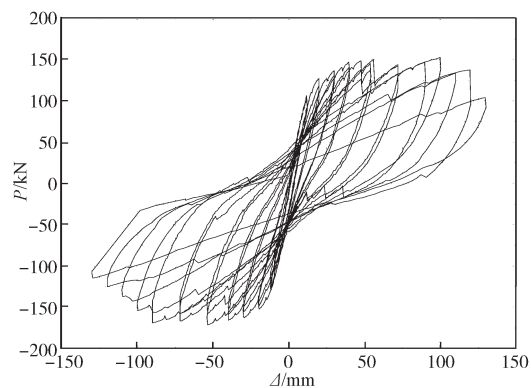
a) R-1 ($n=0.42$)



b) R-2 ($n=0.42$)



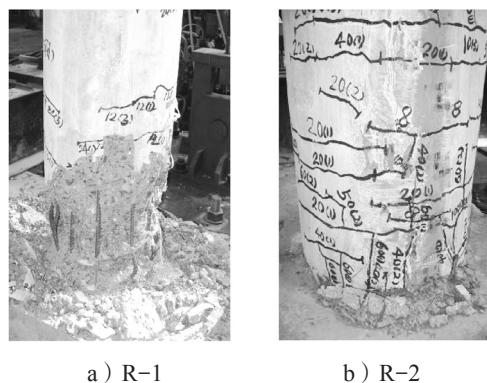
c) R-3 ($n=0.42$)



d) R-4 ($n=0.42$)

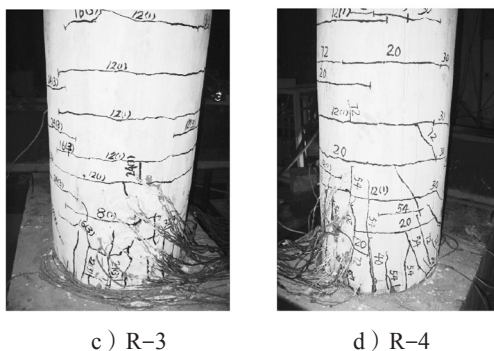
图 4 $P-\Delta$ 试验滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic loops of lateral load-displacement responses
本组试验后观测到的 4 根悬臂柱的损坏形态如图 5 所示。



a) R-1

b) R-2



c) R-3 d) R-4
图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure mode of specimens

各悬臂柱的破坏过程概述如下。

1) 未加固的对比柱 R-1。在悬臂柱下部测点(1')或(7')处的受拉纵筋屈服前,悬臂柱的 $P-\Delta$ 滞回曲线呈线性变化。当侧移量达到约 8 mm 时,受拉侧紧靠底座的根部及其往上的邻近区域共出现 6 条可见的水平裂缝(受拉裂缝),裂缝间距为 10~30 cm,且从根部往上,裂缝间距由密变稀。随着水平侧移量的继续增大,各条裂缝不同程度地均延伸至两侧面而逐渐演变成为具有一定倾斜度的弯剪斜裂缝。当塑性铰区域受压混凝土迅速膨胀且成块脱落时,构件的承载力达最大值。此后,柱下部纵筋拉应变开展迅速,承载力急剧下降,柱下部纵筋鼓出,如图 5a 所示。最后,因核心混凝土被进一步碾碎,柱身下塌,试验即告停止。

2) 一次受力加固的圆柱 R-2。在 HPFL 下端间隙测点(1')处的原柱纵筋受拉屈服前,柱 R-2 的 $P-\Delta$ 滞回曲线大致呈现为线性变化。当侧移量达到约 8 mm 时,该间隙位置以及 HPFL 横向网筋加密处与向上非加密区的交界处首先出现水平裂缝。当(1')处纵筋受拉屈服后,水平裂缝持续向上方增加、水平增长、间距加密,其中延伸到了柱两侧面的裂缝,其延伸的长度沿柱高从下至上变短。当侧向水平位移达到 40 mm 时,塑性铰区域受压混凝土横向形变增加,出现由 HPFL 底部开始的竖向裂缝。且 HPFL 横向应变增加速度变快,当有零星碎状混凝土从柱根部间隙处弹出时,构件承载力达最大值。如图 5b 可以看出,当达到最大承载力时,悬臂柱的承载力突增。这说明对于一次受力加固的悬臂柱,在临近加载中期才开始工作的 HPFL 对提高柱承载力有明显的贡献。试验完毕,去除柱下部的 HPFL 砂浆,发现柱底的 4 根横向网筋被拉断,内部被压碎的混凝土可以被轻易取出,未出现混凝土大块脱落现象。

3) 不卸轴力的二次受力加固圆柱 R-3。R-3 的破坏过程及破坏形态与 R-2 基本类似,但是由于 R-3

为不卸轴力的加固方式,其破坏特征与 R-2 相比有如下区别:

i) R-3 的 HPFL 出现应变滞后,因在施加水平荷载前,R-2 的 HPFL 已经获得了一定的横向拉应变,而 R-3 的 HPFL 应变为 0。

ii) 当悬臂柱侧移量达 20 mm 时,R-3 在平行水平力作用方向的两侧各出现了 1 根长约 15 cm 的单向剪切斜裂缝,但再往后,斜裂缝不再发展,这说明类似于 R-1 的剪压破坏效应受到了 HPFL 的抑制。

ii) 在构件达到峰值点荷载对应的侧移之后,受压侧 HPFL 才出现由底部开始的竖向裂缝,这进一步说明二次受力加固柱的 HPFL 应变滞后现象明显。

iv) R-3 的水平裂缝分布在几乎全柱高范围内,而 R-2 的水平裂缝分布在下半柱高范围内,这是由于前者已产生较大横向变形的混凝土受到应变滞后的 HPFL 的强约束作用后使塑性铰范围向上延伸,应力重分布的范围扩大。

试验完毕,去除柱下部的 HPFL 砂浆层,未发现有拉断的横向网筋,但压碎的原柱混凝土的区域更高。最终破坏仍然源于受压区混凝土压碎所致,如图 5c 所示。

4) 不卸轴力且推到屈服的二次受力加固圆柱 R-4。从加载到测点(1')处纵筋屈服前的过程中,柱 R-4 与柱 R-1 有相同的表现。在卸载回至平衡位置且加固后,再加载至屈服侧移 Δy 时,在横向网筋加密区的上部,沿柱高方向共出现 7 条间距逐渐增大且长度逐渐变小的水平裂缝。随着柱侧移量的增大,竖向裂缝和单向剪切斜裂缝的数量和长度随之增大,直到柱侧移量达 72 mm (约 6 倍屈服侧移)时,单向斜裂缝才停止发展,但受压区竖向裂缝持续伸长且数量增加。说明在这一加载期间,柱下部剪压破坏效应明显,这可能是 R-4 的 HPFL 应变比 R-3 的更加滞后,即 HPFL 更晚发挥作用,使柱破坏趋势与对比柱相同。再往后的加载过程中,受压混凝土急剧膨胀,使竖向裂缝向上延伸长度超过了柱 R-2 和 R-3,这是 HPFL 延迟工作的真实表现,而且使已呈下降趋势的承载力出现了回升,如图 5d 所示。试验结束后,柱 R-4 的状态与柱 R-3 相同,但塑性铰区的中部有 2 根横向网筋被拉断。

2.3 骨架曲线

图 6 所示为各悬臂柱的骨架曲线,即各柱滞回曲线中的每一级荷载下第一次循环的峰值点所连成的包络曲线,其体现了各悬臂柱加载过程中的强度变化和延性特征。

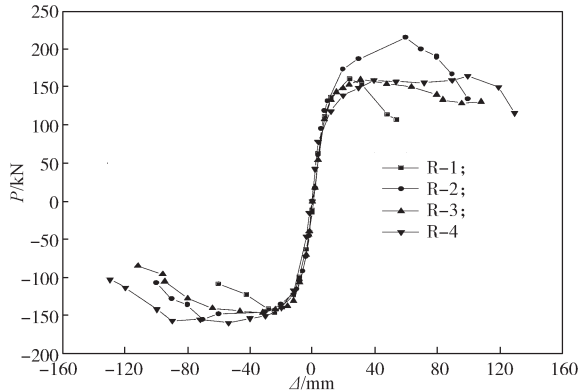


图 6 各悬臂柱的骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of cantilever columns

2.4 承载力与延性改善机理分析

将正、反向最大荷载的平均值作为各悬臂柱的最大荷载。由表 2 可知，一次受力加固柱 R-2 的正截面承载力比二次受力加固柱 R-3、R-4 的正截面承载力提高幅度明显。

与抗震加固方柱^[9]类似，HPFL 的纵向网筋不能直接抵抗柱根部的弯曲拉应力、压应力，但与横向网筋形成的钢筋网对塑性铰部位施加了更加均匀有效的约束作用，改良了混凝土的受力形态。与方柱相比，圆柱的这种约束作用更加有效。一次受力加固柱 R-2 的承载力提高率在 20% 以上，这是由于具有与原柱混凝土基本同步的横向变形的 HPFL 的强约束作用，使混凝土的抗压强度和峰值压应变有了显著提升。对于二次受力加固柱 R-3 和 R-4，因其 HPFL 在受压区混凝土即将压碎时才开始工作，尽管在一定程度上抑制了受压混凝土微裂缝的发展，从而使已呈下降趋势的承载力有一定的回升，但回升幅度不明显。所以这种纵向网筋没有锚入基座分担柱根部拉应力、压应力而仅能提供侧向约束作用的不卸轴力的加固方法，不能明显提高大偏压破坏柱的抗震承载力。

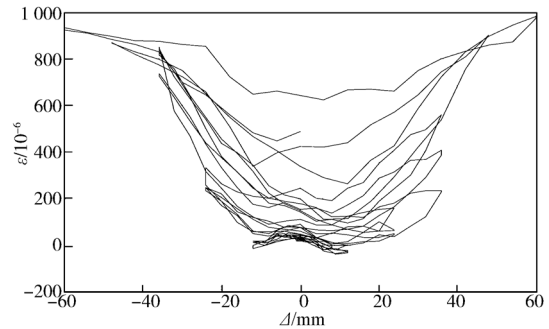
从表 2 所示试验结果可以看出，无论卸轴力加固还是不卸轴力加固，这种在柱四周围套钢筋网复合砂浆薄层并在柱塑性铰区域使横向网筋加密的加固方法，对提高圆柱的延性同样是行之有效的。卸轴力加固的 R-2 具有与文献 [9] 所述被加固方柱相同的“两阶段”约束机制。不卸轴力加固柱 R-3 的 HPFL 的“第二阶段”约束作用尽管被一定程度地延后，但是在塑性铰转动的过程中，由于 HPFL 的环向拉应变发展迅速，逐步挽回了其应变落后原柱的落差，从而显示出了远超 R-2 的延性。具有一定震损（柱根部混凝土已出现水平裂缝与竖向裂缝，原柱纵筋已受拉屈服）的不卸轴力加固柱 R-4，在加固前弯曲刚度已有一定程度的降低，混凝土的横向变形已有了明显的发展，这都使 HPFL 的“第二阶段”约束作用被更大程度地延后。

从其骨架曲线可以看出，荷载峰值处的曲线段呈波动的水平线延伸，HPFL 约束作用的滞后特征更明显。

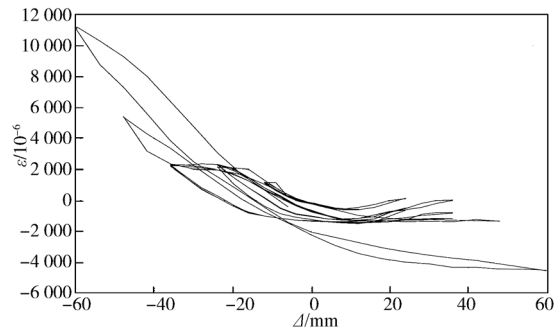
2.5 原柱钢筋与加固层网筋应变滞回性能分析

本部分通过对各悬臂柱某些关键部位的应变滞回性能进行分析，以实现对上述破坏形态的判定、加固后抗震性能得以改善原因、不同受力条件对加固效果影响、双向网筋参与工作程度等做进一步探索。

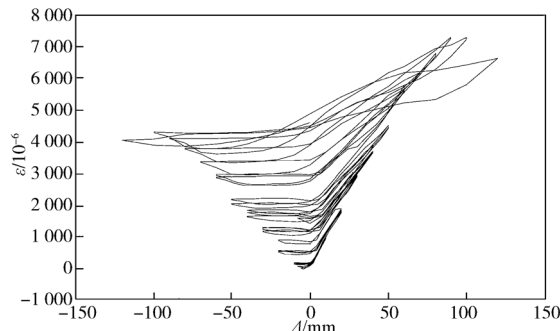
原柱钢筋与加固层网筋应变滞回曲线如图 7 所示，其中纵坐标“+”为拉应变，“-”为压应变。



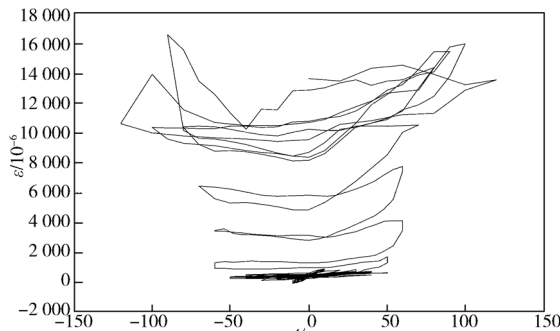
a) R-1 前侧箍筋 (测点 15)



b) R-1 右侧纵筋 (测点 1')



c) R-2 前侧横向网筋 (测点 16)



d) R-2 右侧横向网筋 (测点 4)

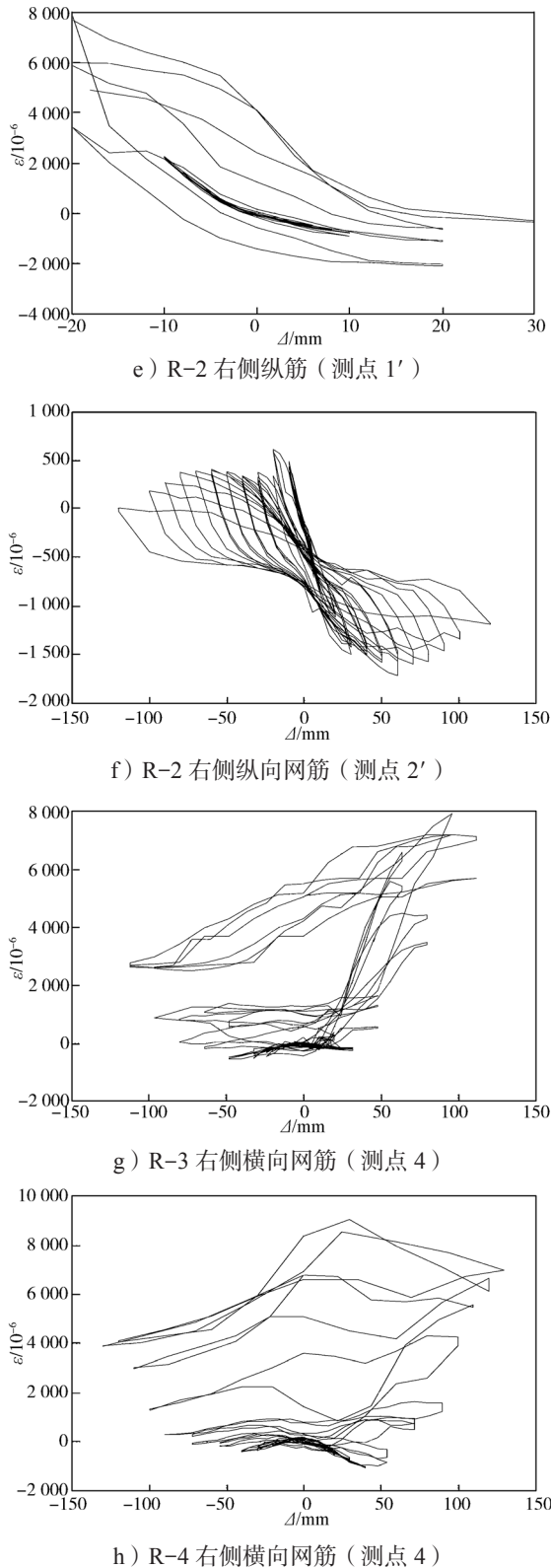


图 7 原柱钢筋与加固层网筋应变滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic loops of strain-lateral displacement response of steel bars for the original columns and the HPFL

图 7a 为未加固柱 R-1 测点 15 (见图 3) 处箍筋应变与柱侧移滞回关系曲线。由图可知, 在柱达到最大承载力时 (对应柱侧移为 24 mm), 箍筋未屈服 (屈

服应变为 1 120), 说明其为非剪切破坏形态。图 7b 为该柱根部测点 (1') 处原柱纵筋应变与柱侧移的滞回关系曲线。由图可知, 柱达到最大承载力时, 测点 (1') 处纵筋应变已达 2 340 (屈服应变为 1 670), 而且后期应变飞速增长, 这进一步说明最终的破坏形式为大偏压弯曲破坏。

图 7c 为一次受力加固柱 R-2 测点 16 处横向网筋应变与柱侧移滞回关系曲线; 图 7d 为该柱右侧同一高度处即测点 4 处, 横向网筋应变与柱侧移滞回关系曲线。由这两图可知, 在加载中后期, 测点 4 明显比测点 16 的应变发展速度快, 这说明横向网筋的应变主要是由柱弯曲变形约束受压混凝土的横向变形引起的。最终的破坏形态为比对比柱 R-1 延性更好的大偏压弯曲破坏。

图 7e 和图 7f 分别为一次受力加固圆柱 R-2 测点 (1') 的原柱纵筋和测点 (2') 处的纵向网筋的应变与柱侧移的滞回关系曲线。由图可知, 承受最大拉应力的纵筋测点 (1') 处的拉应变发展很快, 如在柱侧移仅达 20~30 mm 时其拉应变约高达 8 000, 而与其紧邻的测点 (2') 处的纵向网筋的拉应变因柱根部间隙处水平裂缝的发展呈现出由迅速增长转变成缓慢增长的现象。尽管如此, 还是能看出纵向网筋因横向网筋的锚固作用, 使其协助受压混凝土承担了一定的压应力。

图 7g 为不卸轴力的二次受力加固圆柱 R-3 测点 4 处横向网筋的应变与柱侧移滞回关系曲线, 图 7h 为有震损且不卸轴力的二次受力加固圆柱 R-4 的测点 4 处的横向网筋应变与柱侧移滞回关系曲线。比较图 7d、g、h 可以得知, 3 种受力条件下加固柱的同一位置处横向网筋应变发展存在明显不同步现象, 具体应变比较见表 3。

表 3 加固柱观测点 4 处横向网筋应变比较

Table 3 Strain contrast of transverse steel bars of four observation points of reinforced columns

试件 编号	达到 4Δ _y 时		达到 P _{max} 时		下降到 85%P _{max} 时	
	侧移 / mm	应变 / με	侧移 / mm	应变 / με	侧移 / mm	应变 / με
R-2	48	1 000	60	4000	80	11 000
R-3	48	560	36	250	82	4 550
R-4	48	350	100	0 (第 1 峰点) 4 000 (第 2 峰点)	120	6 650

分析表 3 中数据可知, 在同一侧移条件下, R-3 滞后于 R-2, 而 R-4 又滞后于 R-3。在各悬臂柱分别达到各自的最大峰值荷载 P_{max} 时, R-3 明显滞后于 R-2, 而 R-4 甚至还没有任何反应。R-4 加固层后期应变发展迅速, 使本已滑落的荷载出现回升现

象, 由于混凝土微裂缝发展已较为严重, 承载力回升幅度较小(第2个峰点比第1个峰点的 P_{max} 提高约4%), 但是两峰点对应的测点4处横向网筋的应变相差4000, 这使其延性有了显著改善, 详见图5d和图7。在荷载下降至85% P_{max} 时, 由各柱测点4处横向网筋的应变可以看出, R-2加固层参与工作较早, 总应变较大; R-3与R-4的后期应变发展迅速, 使柱承载力回退缓慢, 大幅度提高了悬臂柱的延性, 柱R-4的这一特征尤为明显。

3 结论

1) 使用高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层围套加固钢筋混凝土柱, 对改善其抗震性能是行之有效的。通过对柱混凝土危险区段加密横向网筋形成的强约束作用, 可以使其塑性铰转动能力增强, 从而使柱延性得到大幅改善。同时, 柱端密置的横向网筋也对纵向网筋形成了锚固作用, 迫使纵向网筋分担了柱的轴向拉应力、压应力, 进而使其抗弯承载力得到提升, 这种锚固作用还在很大程度上阻止了加固层的剥离破坏作用。

2) 卸轴力的一次受力加固柱, 其加固层与原柱混凝土应变发展比较同步, 使柱抗震荷载有大幅度增加。更符合工程实际情况的不卸轴力的二次受力加固与不卸轴力且有震损的二次受力加固, 加固层应变滞后原柱混凝土的现象依次加重, 加固层发挥作用依次延后, 但其延性改善幅度依次增大, 甚至使已经呈现下降趋势的 $P-\Delta$ 骨架曲线回升, 且回升后的峰点荷载超出了前一峰点荷载。

3) 对于二次受力加固柱, 塑性铰区已获得了较大横向变形的受压混凝土受到应变滞后的HPFL强约束作用后, 使塑性铰范围沿柱向上延伸, 即应力重分布范围扩大, 使柱受力更加均匀。

4) 由钢筋网加强的纤维复合砂浆可使加固柱纵、横向裂缝形式及分布模式得到明显改善。

5) 经过对柱端塑性铰区域横向网筋的配筋率和配筋形式采取有效合理地规划, 就能达到预计的加固效果。

6) 将纵向网筋锚入基座即锚入框架节点, 将是一种加固效果更加良好的压弯构件抗震加固形式, 这将作为本文的后续研究工作。

参考文献:

[1] 袁万城, SIMSCH G. 反复荷载作用下高强约束混凝土柱的弯曲延性[J]. 土木工程学报, 1995, 28(5): 55-

61.

YUAN Wancheng, SIMSCH G. Flexural Ductility of Confined High Strength Concrete Columns Under Cyclic Loads[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(5): 55-61.

[2] NANNI A, NORRIS M S. FRP Jacketed Concrete Under Flexure and Combined Flexure-Compression[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(5): 273-281.

[3] JOSÉL Ramírez. Ten Concrete Column Repair Methods[J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(3): 195-202.

[4] 朱忠锋, 王文炜. FRP 编织网/ECC 复合加固钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1082-1087.

ZHU Zhongfeng, WANG Wenwei. Experimental Study on Mechanical Behavior of Circular Reinforced Concrete Columns Strengthened with FRP Textile and ECC[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2016, 46(5): 1082-1087.

[5] 叶桃, 尹世平, 赵璐, 等. 纤维编制网增强混凝土加固 RC 柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊2): 223-229.

YE Tao, YIN Shiping, ZHAO Lu, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns Strengthened with TRC[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 223-229.

[6] 张帆, 卢亦焱, 李杉, 等. CFRP-钢管混凝土加固 RC 短柱偏压性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 7-12.

ZHANG Fan, LU Yiyan, LI Shan, et al. Experimental Study on Eccentric Compression Performance of RC Short Columns Reinforced with Concrete Filled CFRP-Steel Tube[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2018, 46(7): 7-12.

[7] 蒋隆敏, 尚守平, 黄政宇. 一种适用于钢丝(筋)网水泥加固 RC 结构的纤维增强复合砂浆和界面剂[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 41-47.

JIANG Longmin, SHANG Shouping, HUANG Zhengyu. Fiber Reinforced Composite Mortar and Interfacial Adhesive for Strengthening of RC Structures with Ferrocement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 41-47.

[8] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网水泥复合砂浆加固 RC 偏心受压柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 18-25.

SHANG Shouping, JIANG Longmin, ZHANG Maoxin. Experimental Investigation into the Strengthening of Eccentric Compression RC Column Using Composite Mortar Laminate Reinforced with Mesh Reinforcement[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 18-25.

- [9] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网复合砂浆薄层加固钢筋混凝土方柱抗震性能的研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 16-22.
SHANG Shouping, JIANG Longmin, ZHANG Maoxin. Study on Seismic Behavior of RC Square Columns Strengthened Using High-Performance Composite Mortar Reinforced with Mesh Reinforcements[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(4): 16-22.
- [10] 蒋隆敏, 尚守平, 刘龙海. 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层二次受力加固 RC 偏压柱试验及承载力计算方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4): 72-79.
JIANG Longmin, SHANG Shouping, LIU Longhai. Experimental Investigation and Research on Calculation Method of Load-Carrying Capacity for Eccentrically Compressed RC Columns Strengthened by High Performance Ferrocement Laminates Under Twice Loading[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(4): 72-79.
- [11] 蒋隆敏, 尚守平, 刘方成. 钢筋网高性能水泥复合砂浆加固圆柱的轴压性能研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(1): 12-18.
JIANG Longmin, SHANG Shouping, LIU Fangcheng. Research on Axially Compressed Behavior of RC Strengthening Round Columns Using High Performance Composite Cement Mortar Reinforced with Mesh Reinforcements[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(1): 12-18.
- [12] 尚守平, 曾令宏, 戴睿. 钢丝网复合砂浆加固 RC 梁二次受力受弯试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 74-80.
SHANG Shouping, ZENG Linghong, DAI Rui. Experimental Study on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Ferrocement Under Secondary Load[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(5): 74-80.
- [13] 尚守平, 曾令宏, 彭晖. 钢丝网复合砂浆加固混凝土受弯构件非线性分析 [J]. 工程力学, 2005, 22(3): 118-125.
SHANG Shouping, ZENG Linghong, PENG Hui. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Ferrocement[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 118-125.
- [14] 曾令宏, 尚守平, 万剑平, 等. 复合砂浆钢筋网加固钢筋混凝土梁静力和疲劳性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 83-89, 111.
ZENG Linghong, SHANG Shouping, WAN Jianping, et al. Static and Fatigue Experimental Study on Reinforced Concrete Beams Strengthened with High-Performance Ferrocement[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 83-89, 111.
- [15] 孙雪阳, 蒋隆敏, 谈俊宇, 等. HPFL 加固不同受力形式下短肢剪力墙的抗震性能 [J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(1): 29-35.
SUN Xueyang, JIANG Longmin, TAN Junyu, et al. An Experimental Research of Seismic Performance of Short-Leg Shear Walls Strengthened with HPFL Under Different Stresses[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(1): 29-35.
- [16] 李鹤, 蒋隆敏, 谈俊宇, 等. HPFL 加固震损短肢剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(1): 46-51.
LI He, JIANG Longmin, TAN Junyu, et al. Study on the Seismic Performance of Earthquake-Damaged Short-Pier Shear Walls Reinforced with HPFL[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(1): 46-51.
- [17] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计施工指南 [M]. 北京: 建筑工业出版社, 2008: 16-17.
SHANG Shouping. Design and Construction Guidelines of Strengthening Concrete Structures with High Performance Ferrocement Laminates[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 16-17.

(责任编辑: 廖友媛)