

DOI:10.11918/202109018

高延性 FRP 加固 RC 矩形柱抗震性能

白玉磊¹, 杨凯¹, 韩强¹, 于辉², 张玉峰¹, 孟庆利³

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124;

2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056004; 3. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了研究地震作用下高延性纤维增强复合材料(large-rupture-strain fiber reinforced polymer, LRS FRP)加固非延性钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)方柱的抗震性能, 对7个FRP加固RC方柱进行了拟静力试验。试验试件包括1根对比柱, 1根碳纤维(carbon FRP, CFRP)加固柱和5根高延性(LRS)FRP加固柱。通过分析不同试件的破坏形态、抗震性能参数、FRP应变, 研究了FRP种类和加固层数对其破坏形态和抗震性能的影响。试验结果表明: 在轴压荷载与水平往复荷载作用下, 未加固柱的破坏形式为塑性铰区混凝土保护层发生剥落并被压碎, 纵筋发生严重屈曲, 而FRP加固柱均未产生混凝土的剥落, FRP布也未断裂, 表明FRP加固改变了非延性柱的破坏形态; 与未加固柱相比, FRP加固显著提高了RC柱的延性和耗能能力, 但对其最大水平承载力的提高程度较小; FRP加固减小了纵筋和箍筋的应变, 抑制了纵筋屈曲现象; 相比于CFRP加固柱, LRS FRP的高延性优势在试验中并不明显, 主要原因是本论文墩柱的轴压比较小和长细比较大, 塑性铰区FRP约束混凝土的受压区面积较小。基于在OpenSees软件平台中二次开发的高延性FRP约束混凝土应力应变模型对试验结果进行模拟, 模拟曲线与试验曲线较为吻合, 验证了该模型在FRP加固墩柱抗震分析中的准确性和可靠性。

关键词: FRP加固; 拟静力试验; 高延性FRP; 抗震性能; 钢筋屈曲

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)04-0082-10

Seismic behavior of RC square columns strengthened with large-rupture-strain FRP

BAI Yulei¹, YANG Kai¹, HAN Qiang¹, YU Hui², ZHANG Yufeng¹, MENG Qingli³

(1. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056004, Hebei, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: In order to evaluate the seismic performance of large-rupture-strain fiber reinforced polymer (LRS FRP) confined non-ductile reinforced concrete (RC) square columns under earthquake action, quasi-static experiments were carried out on seven FRP-strengthened RC square columns, including a reference column, a carbon FRP (CFRP)-strengthened column, and five LRS FRP-strengthened columns. The failure modes, seismic performance parameters, and FRP strain of specimens were analyzed, and the effects of FRP types and fiber thicknesses on the failure modes and seismic performance of different specimens were studied. Results show that under axial load and cyclic lateral load, the cover concrete of the reference column in the plastic hinge zone was peeled off and crushed, and the longitudinal bars were severely buckled, while the FRP-strengthened columns did not experience concrete spalling or FRP rupture, indicating that FRP reinforcement changes the failure mode of non-ductile column. Compared with the reference column, the application of FRP significantly improved the ductility and energy dissipation capacity of the RC columns, while the increase in the maximum horizontal bearing capacity was marginal. FRP reinforcement decreased the strain of the longitudinal bars and stirrups, and prevented the buckling of the longitudinal bars. Compared with the CFRP-strengthened column, the large-rupture-strain advantage of LRS FRP was not obvious. The main reason was that the axial load ratio was low and the slenderness ratio was high in this study, so that the compressive area of the FRP confined concrete in the plastic hinge zone was small. Based on the stress-strain model of LRS FRP-confined concrete developed on OpenSees software platform, the experimental results were simulated, and the simulated curve agreed well with the experimental curve, which verified the accuracy and reliability of the model in the seismic analysis of FRP reinforced columns.

Keywords: FRP strengthening; quasi-static experiment; large-rupture-strain fiber reinforced polymer (LRS FRP); seismic performance; steel bar buckling

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 北京市自然科学基金(8212003);

国家自然科学基金(51778019, 51978017);

北京市科技新星(Z201100006820095)

作者简介: 白玉磊(1985—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 韩强, qhan@bjut.edu.cn

钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构广泛应用于桥梁、建筑、隧道等基础设施建设领域。在地震灾害下, 大量的钢筋混凝土结构因为缺乏足够的耗能能力及延性而产生严重破坏甚至发生倒塌。

这些发生破坏的 RC 结构大多采用旧规范进行设计建造,其箍筋配筋率较小,抗剪切能力及延性较差,抗震性能明显不足,加上自然和荷载作用下结构的劣化,使结构抗震性能已不能满足现行规范抗震要求,亟需进行抗震加固。

近年来,纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 由于其耐腐蚀性能好、轻质高强、耐疲劳性能好、施工方便等优点,在 RC 结构加固领域得到了广泛的应用。其中外包 FRP 加固方法因其施工简单和快速高效、加固后几乎不对结构产生附加荷载、不影响结构外观等特点,被认为是 RC 结构进行抗震修复的一种经济高效的措施^[1-3]。传统的 FRP 材料包括碳纤维 (carbon FRP, CFRP), 玻璃纤维 (glass FRP, GFRP), 芳纶纤维 (aramid FRP, AFRP) 等,是一种低断裂应变 (1.5% ~ 2%) 的线弹性材料,耗能能力低且破坏时没有明显预兆,在常见的矩形柱的抗震加固中效果不理想,甚至发生脆性破坏。近年,出现了一种由聚萘二甲酸乙二醇酯 (polyethylene naphthalate, PEN) 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 纤维制成的新型高延性 FRP (large-rupture-strain FRP, LRS FRP), 这种材料具有较大的拉伸断裂应变 (5% 以上)^[4-5]。已有研究表明,由于高延性的特性, LRS FRP 加固的桥墩在获得很大延性的情况下 (大于 10 倍屈服位移), 尽管塑性铰区混凝土鼓胀和钢筋屈曲明显, LRS FRP 仍然没有断裂,避免了脆性破坏发生的可能性,在抗震修复中具有极大的优越性^[6-12]。目前国内外学者已经对传统的 FRP 加固钢筋混凝土墩柱进行了大量的试验和理论研究,但对高延性 FRP 约束墩柱的抗震性能研究较少。其中, Anggawidjaja 等^[13]对 LRS FRP 约束 RC 方柱进行了抗震性能试验,发现 LRS FRP 在柱的极限状态下没有破裂,展示了高延性 FRP 在抗震加固中不易发生脆性断裂破坏的优势。Dai 等^[14]也在试验中证明了这一点。郑松彬^[15]将高延性 FRP 与纤维水泥基复合材料 (engineered cementitious composites, ECC) 两者结合进行了抗震试验研究,结果表明,与普通钢筋混凝土柱相比, FRP 约束塑性铰区 ECC 结构柱在抗震性能上有十分显著的提升。此外一些学者也对高延性 FRP 加固锈蚀钢筋混凝土墩柱进行了一系列的抗震试验研究^[16-20]。以上研究大多都集中于高延性 FRP 对普通或锈蚀钢筋混凝土柱的抗震加固上,对高延性 FRP 加固箍筋配筋率较小的老旧非延性 RC 方柱的抗震性能研究较少。因此,研究高延性 FRP 加固非延性 RC 柱的抗震性能具有重要的意义。

本文对 6 个 FRP 加固 RC 方柱和 1 个对比柱进行了拟静力试验。通过分析试件的破坏形态、抗震性能参数和 FRP 应变,研究了 FRP 种类和加固层数对其破坏形态和抗震性能的影响,并通过 OpenSees 有限元分析对试验结果进行了模拟,验证了课题组前期发展的高延性 FRP 约束混凝土模型的适用性。

1 试验方案

1.1 试件设计及制作

以 FRP 种类、FRP 加固层数等为研究参数共设计了 7 根钢筋混凝土方柱,其中包括 1 根对比柱, 1 根 CFRP 加固柱, 2 根 PEN FRP 加固柱和 3 根 PET FRP 加固柱。柱截面尺寸为 250 mm × 250 mm, 并在角部设置了 20 mm 的圆形倒角。纵筋布置为 4 Φ 16, 塑性铰区箍筋布置为 Φ 8@230, 剩余箍筋布置为 Φ 8@100。试件的几何尺寸和截面配筋见图 1。FRP 加固方案见图 2。

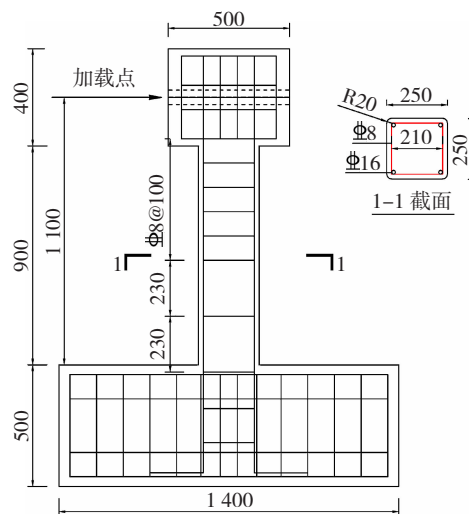


图1 墩柱配筋 (mm)

Fig. 1 Reinforcement of column specimens (mm)

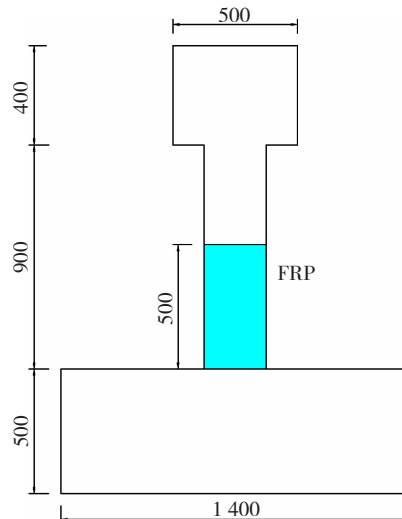


图2 FRP 加固方案 (mm)

Fig. 2 FRP reinforcement scheme (mm)

对试件进行 FRP 加固的过程严格按照 CECS 146:2003《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[21] 完成。加固柱 FRP 设置 500 mm(柱周长的一半)的重叠区,试件基本参数见表 1。

表 1 试件参数详情

Tab. 1 Details of specimens

试件编号	FRP 层数	FRP 厚度/mm	加固高度/mm	轴压比
FRP-0	—	—	—	0.2
PEN-1	1	1.272	500	0.2
PEN-2	2	2.544	500	0.2
PET-1	1	0.841	500	0.2
PET-2	2	1.682	500	0.2
PET-3	3	2.523	500	0.2
CFRP-1	1	0.167	500	0.2

注:编号中的数字代表 FRP 的层数。

1.2 材料特性

1.2.1 混凝土和钢筋

混凝土立方体 28 d 抗压强度为 32.0 MPa。其中试件纵筋和箍筋均为 HRB400,材料力学性能参数见表 2。

表 2 钢筋力学性能参数

Tab. 2 Mechanical parameters of steel bar

直径	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
Φ16	445	625	215	19.60
Φ8	431	609	212	12.76

1.2.2 FRP

试验中所用 FRP 布种类有 CFRP、PEN FRP 和 PET FRP。CFRP 由北京卡本工程有限公司生产, PEN FRP 和 PET FRP 由日本 Maeda Kosen 公司生产。采用的胶体由上海三悠树脂有限公司生产。由 ASTM 标准(ASTM D3039/D3039M-14)^[22],对 CFRP、PEN FRP 和 PET FRP 进行了平板拉伸试验。材料力学性能见表 3。不同 FRP 的本构关系曲线见图 3。

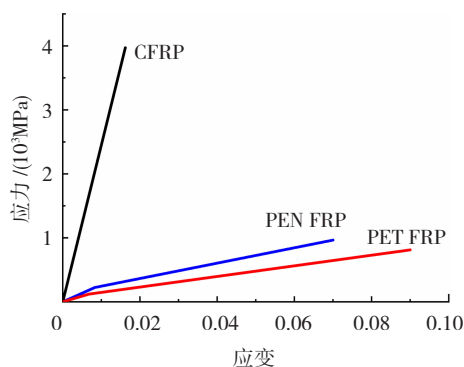


图 3 FRP 拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of FRP

表 3 纤维布力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of FRP

FRP 种类	单层厚度/mm	抗拉强度/MPa	$E_{frp1}/$ GPa	$E_{frp2}/$ GPa	ε_{frp0}	伸长率/%
CFRP	0.167	3 972	245.50	—	—	1.62
PEN	1.272	790	27.00	12.00	0.008 3	6.20
PET	0.841	740	17.90	8.30	0.006 8	8.15

注: E_{frp1} 为高延性 FRP 应力-应变曲线中第一线性段的弹性模量, E_{frp2} 为高延性 FRP 第二线性段的弹性模量, ε_{frp0} 为两线性段交点处的应变。

1.3 加载制度与测点布置

1.3.1 加载制度

试验在北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室进行,其中轴向荷载通过 1 000 kN 的液压千斤顶施加,水平荷载通过 500 kN 的水平液压千斤顶施加。每个试件在试验开始前均要预先施加轴压比大小为 0.2 的轴压荷载并保持恒定。采用力、位移混合控制加载方法,进行分级加载,每级循环 1 次。在试验开始时先采用荷载控制来确定加载试件的纵筋屈服时的位移 Δ_y ;试件屈服后采用控制位移的方式按屈服位移的倍数进行逐级加载,直至试件完全破坏,或其水平承载力下降到极限承载力的 85%,试验结束。加载装置见图 4。

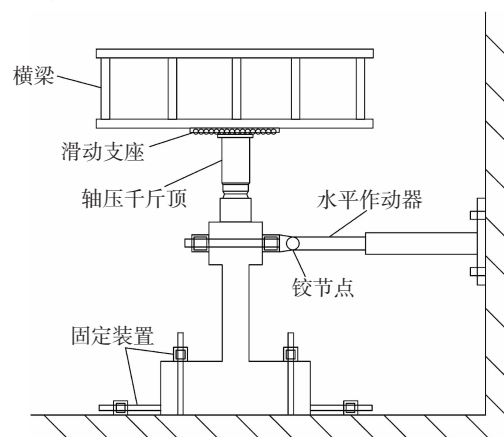


图 4 加载装置

Fig. 4 Loading device

1.3.2 测点布置

在水平位移加载点处布置拉线位移计来测量试件的水平位移。浇筑混凝土前在距离墩底 150、300、450 mm 高度处提前预埋螺杆,用来架设位移计以测量试件的曲率。在塑性铰区两个箍筋中间高度的纵筋内、外各贴 1 个应变片,并在箍筋上布置 2 个应变片,记录钢筋在加载过程中的应变发展。在 FRP 上距柱底 100 mm 高度环向粘贴了 6 个应变片,与 FRP 重叠区的距离依次为 0、125、208、291、375、500 mm。具体布置见图 5。

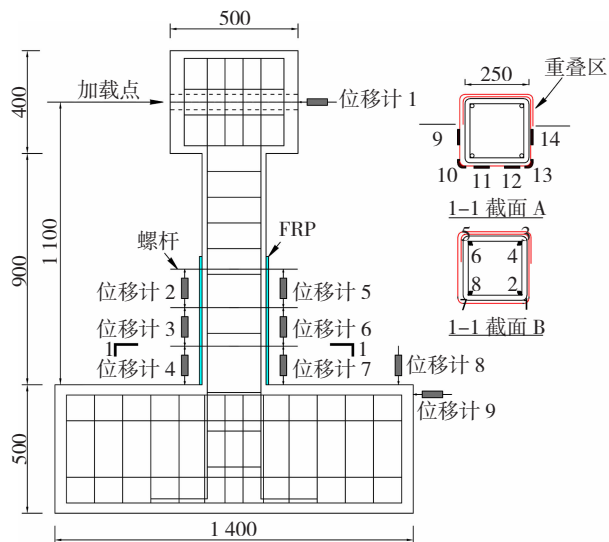


图5 FRP布及钢筋应变测点布置(mm)

Fig. 5 Strain gauge layout of FRP and steel bar (mm)

2 试验结果

2.1 破坏形态

对于未加固柱 (FRP-0), 其破坏形式如下: 试件屈服前, 当水平荷载到达 30 kN 时, 在试件距离墩底大约 30 mm 高度处出现横向微裂缝; 水平位移到达 $1\Delta_y$ (位移 9.8 mm) 时, 在 150 mm 高度处产生水平裂缝, 随着试件侧向位移的持续增加, 原有裂缝逐渐加宽; 试件侧向位移到达 $3\Delta_y$ (位移 29.4 mm) 时, 在距离柱子根部 50 mm 范围左右产生了宽达 1 mm 左右的裂缝, 柱体塑性铰区混凝土保护层受压破坏、纵筋外露, 见图 6(a); 试件侧向位移到达 $6\Delta_y$ (位移 58.8 mm) 时, 塑性铰区 200 mm 高度内的核心混凝土发生破坏, 纵筋也发生了明显的屈曲。承载力急剧下降, 试验停止, 见图 6(b)。



(a) 保护层发生破坏剥落 (b) 塑性铰纵筋屈曲

图6 试件 FRP-0 破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimen FRP-0

对于 FRP 加固柱, 其破坏形式基本一致。以 PET-1 为例, 试件屈服前, 当水平荷载到达 30 kN 时, 试件无明显现象; 水平位移到达 $1\Delta_y$ (位移 9.1 mm) 时, 在加固区域以上 100 mm 高度内有水平裂缝出

现, FRP 布表面没有发现任何变化; 继续进行加载, 试件水平位移增大, 裂缝逐步向侧面延伸; 水平位移到达 $3\Delta_y$ (位移 27.3 mm) 时, 未约束区域的裂缝向斜下方发展; 水平位移到达 $6\Delta_y$ (位移 54.6 mm) 时, 加载柱根部 50 mm 高度范围内 FRP 布受压出现鼓胀, 随着水平位移的增加, 有环氧树脂胶与混凝土剥离时的清脆响声, 柱子根部产生裂缝, 见图 7(a); 试件侧向位移到达 $13\Delta_y$ (位移 118.3 mm) 后, FRP 布仍基本完好, FRP 布表面出现拉裂现象, 柱脚部分与基础发生分离, 直至承载力下降到最大承载力 85% 以下, 试验结束。破坏状态见图 7(b)。



(a) 柱根部受拉一侧产生裂缝

(b) 柱脚部分与基础脱离

图7 试件 PET-1 破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimen PET-1

综上所述, 在较低轴压比 (0.2) 和水平往复荷载的共同作用下, 未加固柱的破坏形态是, 试验过程中柱体表面产生交叉裂缝, 塑性铰区核心混凝土破坏掉落, 纵筋也出现了明显的屈曲行为; FRP 加固柱的破坏形态是, 试件在达到较大侧向位移时, 在加固区域上部产生细小的裂缝, 混凝土裂缝的分布明显上移, 在较大侧向位移时混凝土保护层基本完好, 试件柱脚部分与基础分离, FRP 表面基本完好。破坏形式的改变说明了试件在荷载作用下, 混凝土内部发生破坏, 引起外包的 FRP 产生环向拉应力, 对试件核心混凝土产生环向约束力, 对混凝土的变形有一定的抑制作用。进行到试验后期, 试件达到较大的侧向位移时, 柱子受拉一侧的 FRP 出现了水平裂缝。

2.2 滞回曲线

各试件的滞回曲线见图 8(a)~(g)。图 8(h)~(k) 展示了不同工况组合时滞回曲线的对比。由图 8 可知, 未加固柱的滞回曲线呈现为弓形, 但饱满程度较低, 可以观察到有明显的“捏缩”效应。与未加固柱相比, FRP 加固柱的滞回曲线更为饱满, 达到峰值荷载以后承载力下降较为平缓。加固件的极限水平位移与未加固件相比也有较大的提高, 说明加固后试

件的延性有所增强。加固柱的极限承载力相比于未加固件也均有提高。从对比图中可以看出,1 层 CFRP 与 1 层 PEN FRP 的滞回曲线十分接近,这是因为两者的约束刚度数值(FRP 约束刚度大小为厚

度与弹性模量的乘积)十分接近。曲线没有体现出 PEN FRP 的高延性优势,这可能是因为较低轴压比作用下,塑性铰区截面的受压面积较小,导致 FRP 的约束效果并没有很好地发挥出来。

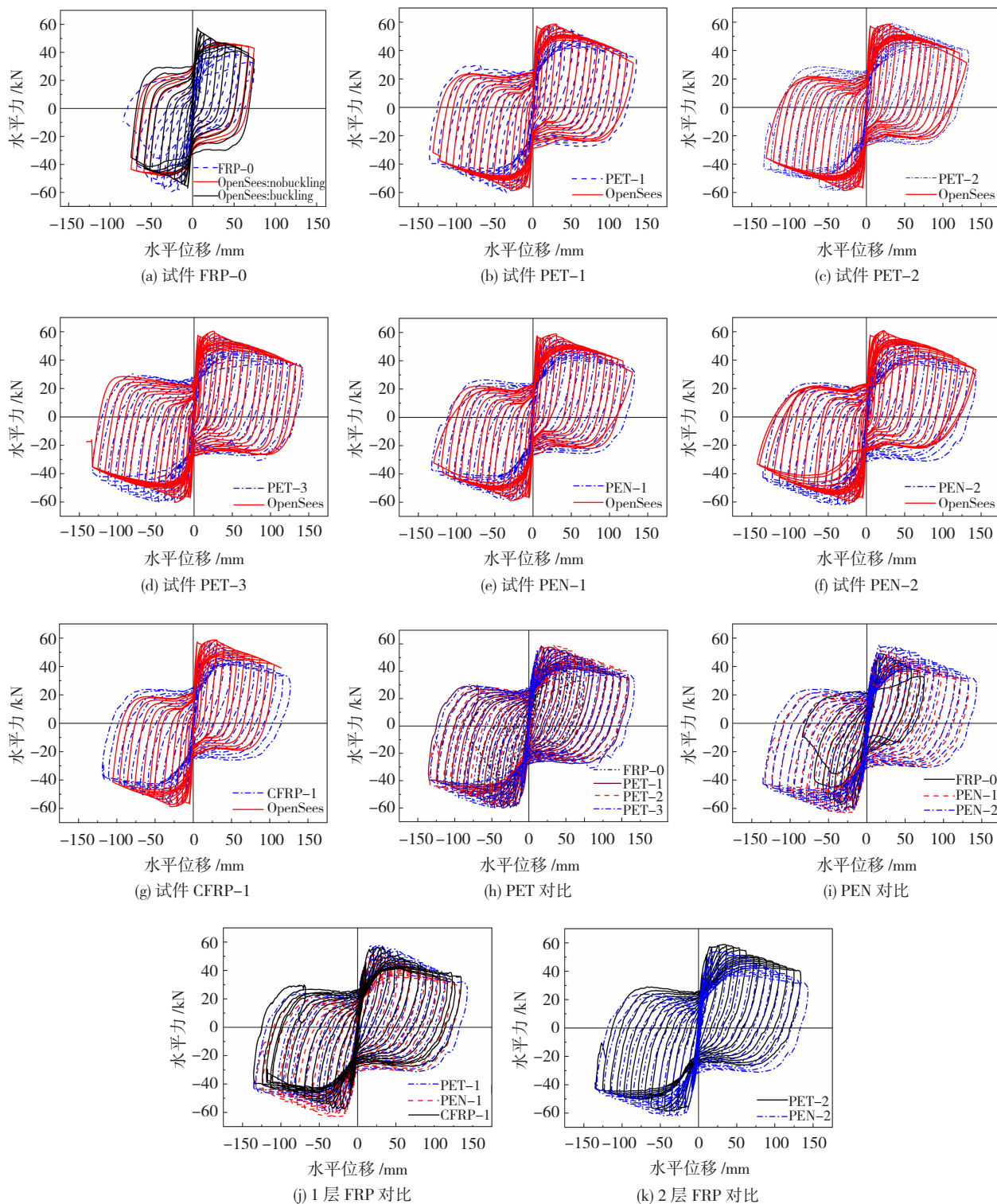


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of specimens

2.3 骨架曲线与延性分析

表 4 为试件的部分试验结果。由于试验过程中除未加固柱外,其他加固柱均未发生严重破坏,所以

取承载力下降至峰值荷载的 85% 作为极限荷载。各试件的骨架曲线见图 9。结合表 4 及图 9 可知:随着 FRP 层数的增加,试件的峰值荷载和极限位移

均有所增加。加固件 PET-1、PET-2、PET-3、PEN-1、PEN-2、CFRP-1 的峰值荷载提高幅度分别为 9.1%、8.2%、8.3%、5.5%、8.3%、5.0%；极限位移分别提高了 38.4%、62.5%、67.5%、47.6%、57.7%、36.4%，位移延性系数分别提高了 57.9%、94.1%、63.0%、73.4%、94.0%、44.2%，由此可以看出 FRP 加固会明显改善结构的抗震性能。

表 4 试验结果
Tab.4 Experimental results

试件	加载方向	屈服荷载 F_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 F_m/kN	峰值位移 Δ_m/mm	极限荷载 F_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	累计耗能/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}$)	位移延性 系数 μ
FRP-0	推	33.58	9.85	49.12	17.39	40.39	52.13	28 438	5.29
	拉	45.57	11.07	59.48	25.22	48.93	55.10		4.71
	平均值	39.58	10.46	54.30	21.31	44.66	53.62		5.13
PET-1	推	41.90	8.71	58.48	16.97	49.76	70.70	85 476	8.11
	拉	32.60	9.60	60.01	36.02	51.48	77.76		8.10
	平均值	37.25	9.16	59.25	26.50	50.62	74.23		8.10
PET-2	推	44.87	9.33	58.87	31.58	49.95	78.23	93 879	8.38
	拉	44.10	8.17	58.68	43.56	51.39	96.06		11.76
	平均值	44.49	8.75	58.78	37.57	50.67	87.15		9.96
PET-3	推	45.93	12.02	56.58	18.53	47.09	85.06	106 412	7.08
	拉	48.99	9.47	61.01	36.45	52.53	94.59		9.99
	平均值	47.46	10.75	58.80	27.49	49.81	89.83		8.36
PEN-1	推	37.11	9.28	55.91	22.32	46.99	74.55	88 117	8.03
	拉	45.45	8.50	58.57	22.21	48.98	83.73		9.85
	平均值	41.28	8.89	57.24	22.27	47.99	79.14		8.90
PEN-2	推	34.23	8.86	55.42	16.06	47.75	68.71	102 228	7.56
	拉	43.72	8.14	62.23	28.45	51.68	100.45		12.34
	平均值	38.98	8.50	58.83	22.26	49.71	84.58		9.95
CFRP-1	推	42.98	10.18	56.60	26.40	46.53	67.25	73 778	6.61
	拉	44.42	9.57	57.46	17.20	47.30	79.07		8.26
	平均值	43.70	9.88	57.03	21.80	46.92	73.16		7.40

注： $\mu = \Delta_u/\Delta_y$ ，其中极限位移 Δ_u 为试件水平承载力下降至 85% 时对应的水平位移，屈服位移 Δ_y 为纵向钢筋受拉屈服时对应的水平位移。

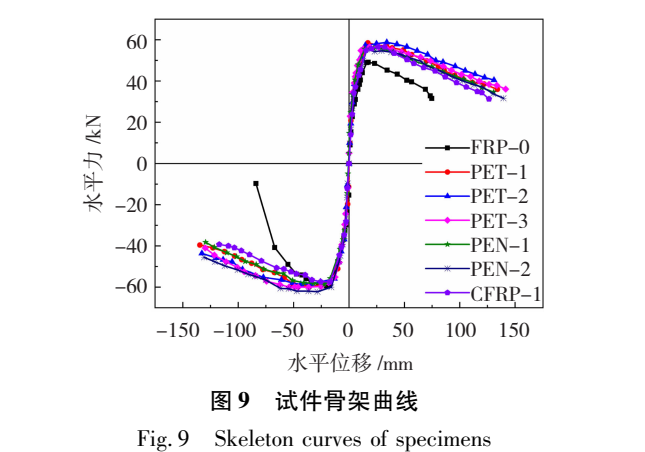


图 9 试件骨架曲线
Fig.9 Skeleton curves of specimens

2.4 耗能

由图 10 可知,FRP 加固试件最终破坏时消耗的

总能量均远远超过了未加固柱消耗的总能量,这是因为相比于未加固柱,FRP 加固柱的极限位移明显提高,延性得到了明显改善。在累积了相同级别的屈服位移圈数时 FRP 加固柱累积耗能也依旧大于未加固的试件。

2.5 刚度退化

图 11 为各试件的刚度退化曲线,表 5 为初始刚度计算值。由图 11 和表 5 可知:采用 FRP 进行加固的墩柱和对比柱的刚度变化规律基本一致,即随着位移的增加试件刚度下降,且在达到其峰值荷载前变化速率快,达到峰值荷载后变化速率慢;FRP 加固柱的初始刚度均有所提高,且随着 FRP 层数的增大初始刚度也随之增大。

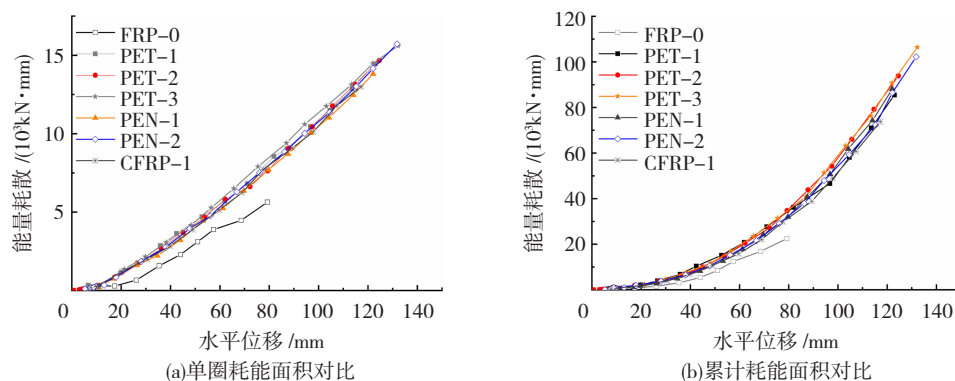


图 10 耗能面积对比

Fig. 10 Comparison of energy dissipation area

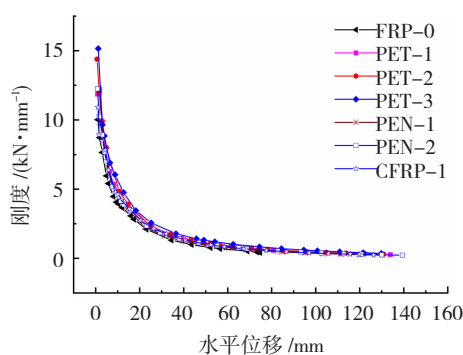


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degeneration curves

2.6 曲率

图 12 给出了试件在不同屈服位移倍数 (即 $1\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $5\delta_y$ 、 $7\delta_y$ 、 $9\delta_y$ 、 $11\delta_y$ 和 δ_u) 下沿柱高的曲率分布变化。和预期相同, 由于 RC 柱的旋转, 试件在柱底出现了较大的曲率。观察到的塑性铰区高度约

为 300 mm, 略大于钢筋混凝土柱的边长。其中未加固柱在 250 mm 处的曲率略大于其他加固柱, 这是因为未加固柱在试验后期发生了严重的混凝土保护层剥落和钢筋屈曲, 导致位移计读数增大。试件 PEN-1 由于位移计在试验过程中意外卡住, 未能得到其曲率图。

表 5 计算刚度

Tab. 5 Stiffness calculation

试件编号	$K_0 / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	提高程度/%
FRP-0	10.02	—
PET-1	11.87	18.46
PET-2	14.39	43.61
PET-3	15.15	51.20
PEN-1	12.04	20.16
PEN-2	12.25	22.26
CFRP-1	10.92	8.98

注: K_0 为初始刚度。

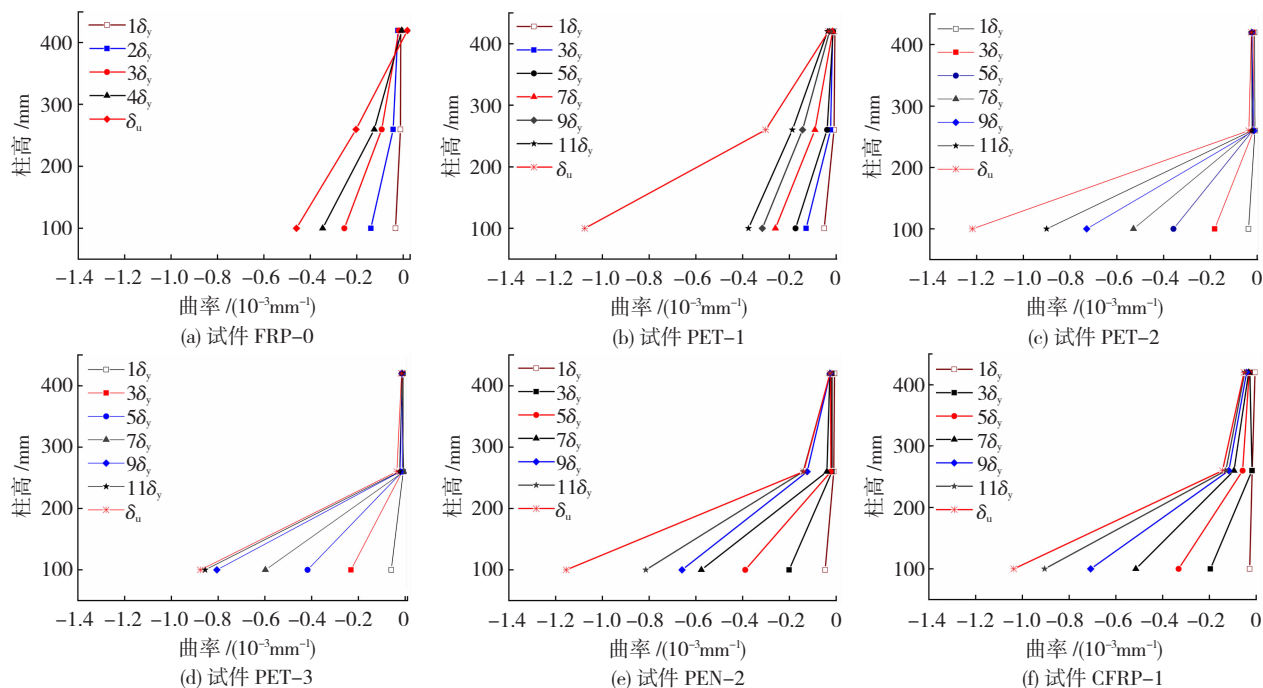


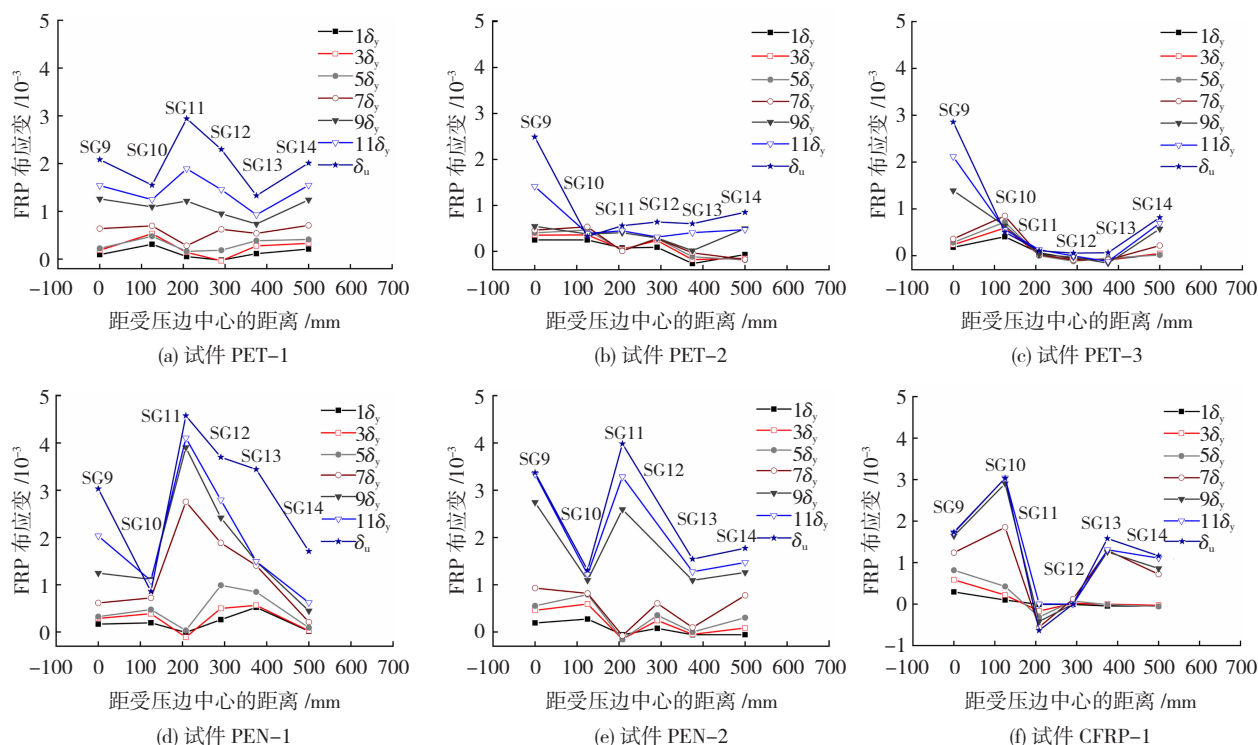
图 12 试件曲率分布

Fig. 12 Curvature distribution of specimens

2.7 FRP 布应变

图 13 给出了试件加载过程中 FRP 的环向应变分布。其中 SG9 即代表应变片 9,应变片分布见图 5。从图 13 可看出,试验过程中 FRP 基本表现为受拉状态,且随着水平位移的增加,6 个试件的 FRP 应变都逐渐增大;试件达到极限位移时 6 个加固柱

的 FRP 环向应变都比较小,其中 CFRP 为 0.32%,PET FRP 为 0.3%,PEN FRP 为 0.45%,远未达到其在轴压试验中的断裂应变(CFRP 为 0.59%^[23],PET 为 7.24%,PEN 为 3.83%^[24])。这是由于柱子的轴压比较小,柱截面受压程度较弱,使得 FRP 发挥作用较小。



4 结 语

对 7 个 FRP 加固钢筋混凝土方柱进行了拟静力试验,分析并讨论了不同加固参数下试件的破坏现象及抗震性能参数,主要结论如下:

1) 在轴向荷载及水平往复荷载共同作用下,未加固柱的破坏现象是核心混凝土压坏破碎,纵筋也发生了明显的屈曲;FRP 加固柱的试验现象是根部加载面产生拉裂缝,混凝土表面裂缝上移,混凝土保护层没有产生明显破坏,FRP 出现水平分层裂缝,整体基本完好。采用 FRP 对结构进行加固后成功改变了其破坏形态和破坏位置。

2) 试验中 FRP 应变均较小,远未达到其在轴压试验中的断裂应变,说明其对混凝土强度的提升程度不大,但 FRP 加固显著提高了钢筋混凝土方柱的延性和耗能,并且有效防止了塑性铰区混凝土的剥落。结合其断裂应变大、弹性模量低的特点,高延性 FRP 更适用于那些亟需提高抗震延性的结构。

3) 与未加固柱相比,FRP 加固为试件提供了额外的环向约束,当纵筋发生侧向屈曲时,就会激活 FRP 的约束作用,减缓纵筋应变的发展,抑制纵筋的屈曲,极大地改善了结构的抗震性能。

4) 在 OpenSees 中基于前人二次开发的模型对试验结果进行了模拟,结果表明模型能较好地反映 LRS FRP 加固 RC 柱的抗震性能。

参考文献

- [1] 邓宗才,高磊,王献云. GFRP 筋混凝土柱抗震性能试验[J]. 中国公路学报,2017,30(10):53
DENG Zongcai, GAO Lei, WANG Xianyun. Experiment on seismic performance of concrete columns reinforced with GFRP bars[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 53. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.008
- [2] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 1
TENG Jinguang. New-material hybrid structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 1. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2018.12.001
- [3] 王作虎,申书洋,崔宇强,等. CFRP 加固混凝土柱轴压性能尺寸效应试验分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(8):112
WANG Zuohu, SHEN Shuyang, CUI Yuqiang, et al. Experimental analysis on size effect of axial compressive behavior for reinforced concrete columns strengthened with CFRP[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 112. DOI: 10.11918/201906169
- [4] DAI Jianguo, BAI Yulei, TENG Jinguang. Behavior and modeling of concrete confined with FRP composites of large deformability[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(6): 963. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000230
- [5] YE Yuyi, LIANG Shengda, FENG Peng, et al. Recyclable LRS FRP composites for engineering structures: current status and future

- opportunities[J]. Composites Part B, 2021, 212: 108689. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108689
- [6] BAI Yulei, DAI Jianguo, TENG Jinguang. Cyclic compressive behavior of concrete confined with large rupture strain FRP composites[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(1): 04013025. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000386
- [7] BAI Yulei, DAI Jianguo, MOHAMMADI M, et al. Stiffness-based design-oriented compressive stress-strain model for large-rupture-strain (LRS) FRP-confined concrete[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110953. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110953
- [8] ZHAO Hongchao, YE Yuyi, ZENG Junjie, et al. Polyethylene terephthalate fibre-reinforced polymer-confined concrete encased high-strength steel tube hybrid square columns: axial compression tests[J]. Structures, 2020, 28: 577. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.078
- [9] HAN Qiang, YUAN Wanying, OZBAKKALOGU T, et al. Compressive behavior for recycled aggregate concrete confined with recycled polyethylene naphthalate/terephthalate composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120498. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120498
- [10] SALEEM S, PIMANMAS A, QURESHI M I, et al. Axial behavior of PET FRP-confined reinforced concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(1): 04020079. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001092
- [11] NAIN M, ABDULAZEEZ M M, ELGAWADY M A. Behavior of high strength concrete-filled hybrid large-small rupture strains FRP tubes[J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110264. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110264
- [12] YE Zenghui, ZHAO Debo, SUI Lili, et al. Behaviors of large-rupture-strain fiber-reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams under static and impact loads[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 578749. DOI: 10.3389/FMATS.2020.578749
- [13] ANGGAWIDJAJA D, UEDA T, DAI Jianguo, et al. Deformation capacity of RC piers wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain[J]. Cement & Concrete Composites, 2006, 28: 914. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.011
- [14] DAI Jianguo, LAM L, UEDA T. Seismic retrofit of square RC columns with polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced polymer composites[J]. Construction and Building Materials, 2011, 27(1): 206. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.058
- [15] 郑松彬. FRP-ECC 延性铰钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018
ZHENG Songbin. Study on seismic behavior of reinforced concrete columns with FRP-ECC ductile hinges[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018
- [16] ZHANG Dawei, ZHAO Yuxi, JIN Weiliang, et al. Shear strengthening of corroded reinforced concrete columns using PET fiber based composites[J]. Engineering Structures, 2017, 153: 757. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.030
- [17] ZHOU Yingwu, CHEN Xuan, WANG Xiaohan, et al. Seismic performance of large rupture strain FRP retrofitted RC columns with corroded steel reinforcement[J]. Engineering Structures, 2020, 216: 110744. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110744
- [18] LIU Xiongfei, LI Yue. Experimental study of seismic behavior of partially corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened with FRP composites with large deformability[J].

- Construction and Building Materials, 2018, 191:1071. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.072
- [19] 劳泰安. 大应变 FRP 约束下锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 深圳:深圳大学,2018
- LAO Taian. Experimental study on seismic behavior of corroded reinforced concrete columns under large strain FRP[D]. Shenzhen: Shenzhen University,2018
- [20] 张闯,张大伟,赵羽习,等. PET 纤维布加固锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊2):209
- ZHANG Chuang, ZHANG Dawei, ZHAO Yuxi, et al. Experimental study on seismic behavior of corroded reinforced concrete column wrapped with PET sheet [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2):209. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.S2.031
- [21] 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程:CECS 146:2003[S]. 北京:中国计划出版社,2007
- National Industrial Building Diagnosis and Transformation Engineering Technology Research Center. Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate: CECS 146:2003[S]. Beijing: China Planning Press,2007
- [22] American Society for Testing and Materials. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/ D3039M - 14[S]. Philadelphia:ASTM International,2014
- [23] SHAN Bo, GUI Fucheng, MONTI G, et al. Effectiveness of CFRP confinement and compressive strength of square concrete columns [J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 23 (6):04019043. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000967
- [24] HAN Qiang, YUAN Wanying, BAI Yulei, et al. Compressive behavior of large rupture strain (LRS) FRP-confined square concrete columns; experimental study and model evaluation [J]. Materials and Structures, 2020, 53 (4):1149. DOI:10.1617/s11527-020-01534-4
- [25] TENG Jinguang, LAM L, LIN Guan, et al. Numerical simulation of FRP-jacketed RC columns subjected to cyclic and seismic loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(1):04015021. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000584
- [26] YASSIN M H M. Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads[D]. Berkeley: University of California, Berkeley,1994
- [27] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- [28] 白玉磊,韩强,贾俊峰,等. FRP 约束钢筋混凝土柱中钢筋屈曲行为研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(1):14
- BAI Yulei, HAN Qiang, JIA Junfeng, et al. Buckling behavior of steel rebars embedded in FRP-confined concrete [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018,38(1):14. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2018.01.003

(编辑 赵丽莹)