

改性纤维编织网增强混凝土加固钢筋 混凝土柱抗震性能

尹世平^{1,2}, 李 耀², 刘 鸣², 杨 扬²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为研究掺入聚乙烯醇(PVA)纤维的纤维编织网增强混凝土(TRC)对加固钢筋混凝土(RC)柱抗震性能的影响,共制作了 7 根钢筋混凝土柱。其中,1 根为对比柱,4 根方形柱,1 根圆柱,1 根矩形柱。除对比柱外,其余 6 根钢筋混凝土柱均采用 TRC 加固。通过对 7 根试件进行低周往复加载试验,分析了不同 PVA 纤维掺量和截面形式下各试件的抗震性能指标。结果表明:TRC 能够有效约束 RC 柱核心混凝土,掺入一定体积掺量的 PVA 纤维后,TRC 的限裂效果进一步增强,提高了加固柱的开裂荷载和峰值荷载;PVA 纤维体积掺量在 0.5% 以内时,加固柱的延性得到改善,刚度退化速率减慢,耗能能力增强,但随着体积掺量继续增大,延性和耗能能力均有所降低,刚度退化速率增大;TRC 加固圆柱的承载能力较低,但延性、刚度退化以及耗能能力均优于其他两种截面形式的 TRC 加固柱。PVA 纤维体积掺量在 0.5% 以内较为合理,且 TRC 加固后圆柱的抗震性能更好。

关键词: 抗震性能; 纤维编织网增强混凝土; 钢筋混凝土柱; 聚乙烯醇纤维; 截面形式; 低周往复加载试验

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Textile Reinforced Concrete Added Polyvinyl Alcohol Fiber

YIN Shiping^{1,2}, LI Yao², LIU Ming², YANG Yang²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To investigate the seismic behavior of RC columns strengthened with textile reinforced concrete (TRC) added PVA fiber, seven reinforced concrete (RC) columns were designed, one of which was used as the control column, (Four

of the columns were square, one was circular, and the rest were rectangular.) and six of which were strengthened with TRC. The low-frequency cyclic loading test was conducted by considering the volume quantities of PVA fiber and section forms of columns. The experimental results show that TRC can constraint the core area of concrete, restrict the development of concrete cracks effectively by adding a moderate PVA fiber, and the cracking loads and peak loads of the columns increase. When the volume quantities are within 0.5%, the ductility of the strengthened columns is improved, the stiffness degradation rate is small, and the energy dissipation increases. With the increase in volume quantities, the strengthened columns perform poorly in ductility, energy dissipation, and stiffness degradation. The circular column strengthened with TRC has a low bearing capacity, but it is superior to other cross section columns in ductility, stiffness degradation, and energy dissipation. The reasonable volume of PVA fiber should be less than 0.5%, and the strengthened circular column performs better in seismic behavior.

Key words: seismic behavior; textile reinforced concrete; reinforced concrete column; polyvinyl alcohol (PVA) fiber; section forms; low-frequency cyclic loading test

纤维编织网增强混凝土(textile reinforced concrete, TRC)由碳玻混编纤维编织网和细粒混凝土组成,是一种新型的水泥基复合材料。TRC 具有限裂效果好、承载能力高等优点^[1-2],且在用于修复加固时基本不改变构件的尺寸^[3-5],因此国内外学者对其加固性能展开了一系列的相关研究。

Ortlepp 等^[6]研究了柱截面对 TRC 加固钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)柱的约束效果的影响,试验结果表明,随着柱截面越接近圆形,TRC 加

固柱的轴心受压承载能力提高越高. Bournas 等^[7]通过试验研究了 TRM(textile reinforced mortar, 织物增强砂浆) 加固承载力不足的钢筋混凝土柱的抗震性能, 结果表明, TRM 通过延缓塑性铰区钢筋的屈服并减少搭接钢筋的黏结滑移, 可以大幅度提高柱的变形能力和耗能能力. Al-Salloum 等^[8]对 5 个抗震不足的梁柱边节点进行水平往复荷载作用下的拟静力试验, 试验结果表明, TRM 加固可以有效地提高抗震不足的梁柱节点的抗剪强度和延性, 其效果与 FRP(fiber reinforced polymer/plastic, 纤维增强复合材料) 相当, 并且具有较好的耗能能力. Alhaddad 等^[9]对 TRC 加固的外部梁柱节点在模拟地震荷载下进行了试验, 并与基于非线性有限元分析提出的预测模型进行对比, 结果表明, 文中提出的模型能够很好地预测出 TRC 加固试件在地震荷载作用下的反应. Yin 等^[10]研究了加固锈蚀后的 RC 柱的抗震性能, 结果表明, 不同锈蚀环境下, TRC 对锈蚀率大的试件约束效率更高; 先加固后锈蚀的加固方式要优于先锈蚀后加固的加固方式; TRC 加固能够比较有效地提高锈蚀环境下 RC 柱的抗震能力.

此外, 梁兴文等^[11]、Shafiq 等^[12]和韩建平^[13]研究表明, 在混凝土中掺入体积适量的短切纤维后, 混凝土的延性得到提高. 这是目前改善混凝土结构构件抗震性能的可选措施之一.

综上所述, TRC 加固 RC 柱抗震性能的研究较少, 且短切纤维对结构构件抗震性能有良好的改善作用. 因此, 本文从不同 PVA(polyvinyl alcohol, 聚乙烯醇) 纤维掺量和截面形式两个方面, 展开 TRC 加固 RC 柱抗震性能的研究.

1 试验概况

1.1 试验设计

试验中共设计制作 7 根钢筋混凝土柱. 其中, 1 根未加固方柱作为对比柱, 1 根圆柱, 1 根矩形柱, 其余 4 根均为方柱. 试件中圆柱直径 300 mm, 矩形柱截面尺寸为 250 mm×300 mm, 其余方柱柱身截面尺寸均为 300 mm×300 mm, 所有柱的剪跨比均为 3.8, 柱的总高度为 1 740 mm. 选用纵筋直径为 14 mm, 选用箍筋直径为 8 mm. 为防止试验过程中柱根部与底座交界处因变形过于集中, 导致试件过早发生破坏并影响理论分析, 距柱根部 100 mm 范围内采取箍筋加密, 间距为 50 mm. 试件具体几何尺寸及

配筋如图 1 所示. 试件基本参数见表 1, 表中 C1 为文献^[3]中的试件.

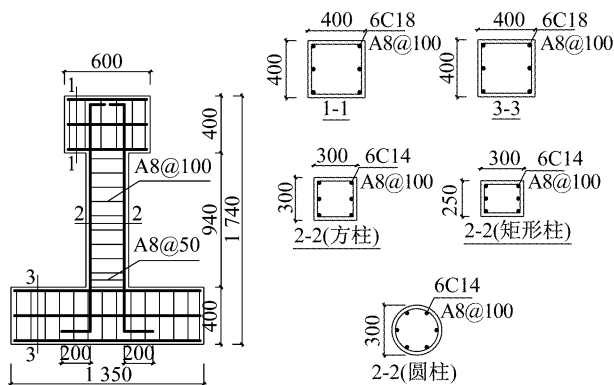


图 1 试件尺寸及配筋详图(单位: mm)

Fig.1 Specimen size and reinforcement detailings (unit: mm)

表 1 试件基本参数

Tab.1 Basic parameters of specimens

试件编号	混凝土强度等级	加固层数	轴压比	截面形式	PVA 纤维体积掺量/%
C1	C40	0	0.25	方柱	
C2	C40	2	0.30	方柱	0
C3	C40	2	0.30	方柱	0.5
C4	C40	2	0.30	方柱	1.0
C5	C40	2	0.30	方柱	1.5
C6	C40	2	0.30	圆柱	0.5
C7	C40	2	0.30	矩形柱	0.5

1.2 加固方案

首先, 对柱根部高度 600 mm 范围的柱身进行人工凿毛处理; 其次, 用水湿润柱身, 并清洗表面浮灰及杂质; 再次, 在加固区域柱身表面均匀涂抹细粒混凝土 2~3 mm, 细粒混凝土在搅拌过程中已掺入 PVA 纤维; 然后, 将浸过水泥净浆的纤维编织网环裹在柱身表面, 保持纤维编织网碳纤维束与径向平行; 最后, 在纤维编织网表面均匀涂抹 1 层细粒混凝土, 完成 1 层加固. 重复以上步骤完成 2 层加固.

1.3 材料选用

1.3.1 混凝土

试验中试件浇筑均采用商品混凝土, 设计强度等级为 C40, 养护 28 d 后测得标准立方体试块抗压强度为 42.1 MPa.

1.3.2 钢筋

试验中钢筋采用 C14 和 A8, 并对钢筋的屈服强度、抗拉强度及延伸率进行测试, 其主要力学性能指标见表 2. 表中, f_y 为钢筋屈服强度; f_u 为钢筋抗拉强度; δ 为钢筋伸长率.

1.3.3 纤维编织网

纤维编织网由碳纤维束混编而成, 其中碳纤

表 2 钢筋力学性能指标

Tab.2 Mechanical properties of steel bars

钢筋种类	f_y/MPa	f_u/MPa	$\delta/\%$
C14	463	597	28.10
A8	345	468	31.25

维束用于增强方向,玻璃纤维束默认只起固定作用,纤维束的尺寸间距为 10 mm×10 mm,纤维编织网具体见图 2,其力学性能见表 3.

1.3.4 细粒混凝土

TRC 基体中使用的细粒混凝土主要由水泥、粉煤灰、硅灰和细骨料组成,其实验室配合比见表 4. 细

表 3 纤维编织网力学性能

Tab.3 Mechanical properties of textiles

纤维类型	每束纤维根数	单丝纤维抗拉强度/MPa	单丝纤维弹性模量/GPa	单丝纤维断裂伸长/%	纤维束线密度/(g·km ⁻¹)	纤维束密度/(g·cm ⁻³)
T700S	12 000	4 660	231	2.0	801	1.78
E-glass	4 000	3 200	65	4.5	600	2.58

粒混凝土养护 28 d 后测得抗压强度为 52.5 MPa.

1.3.5 PVA 纤维

试验中采用的 PVA 纤维由日本可乐丽公司生产,其力学性能见表 5.

表 4 细粒混凝土配合比

Tab.4 Mixing proportions of fine grained concrete

材料	水泥	粉煤灰	硅灰	水	细砂	粗砂	减水剂
用量	475	168	35	262	460	920	9.1

表 5 PVA 纤维的力学及几何参数

Tab.5 Properties and geometric parameters of PVA

长度/mm	直径/ μm	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)
12	40	1 600	42	1.3

1.4 加载方案及测试内容

本试验采用 MTS 电液伺服加载系统进行加载. 水平方向采用 100 t 水平作动器加载,竖向轴力采用带有导轨的 100 t 作动器施加,保证了试验过程中施加的轴向力基本不变. 试验装置如图 3 所示.

在施加低周往复荷载前,先施加一定轴向力进行试压以消除试验误差,然后再将轴向力施加至预定值,待施加轴力经过一定时间保持不变后开始试验. 试验过程中采用力-位移混合加载机制^[14],试件屈服前采用力控制,循环 1 次. 试件屈服后改为位移控制,每级位移增加 1 倍的屈服位移,循环 3 次. 当试件的水平荷载下降至峰值荷载的 85% 时,试验结束.

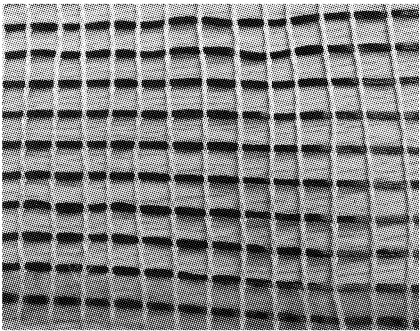


图 2 纤维编织网
Fig.2 Textiles

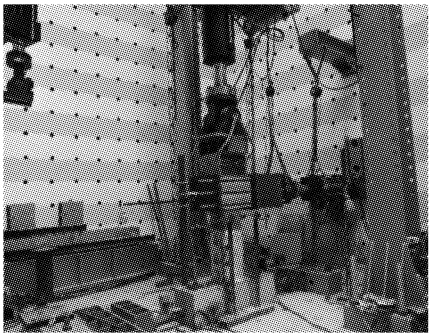


图 3 试验加载装置
Fig.3 Test setup

试验中主要测试柱加载点处水平力、水平位移、柱底座水平位移以及柱根部附近纵筋应变. 位移计编号为 1~2,应变片测点编号为 S1~S12,详见图 4. 以上数据采用 DH3816 静态设备实时采集,裂缝发展使用裂缝宽度观测仪观测,精度为 0.02 mm.

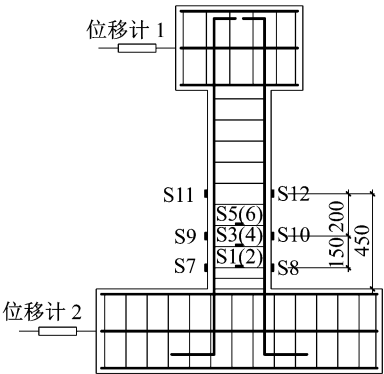


图 4 测点布置图
Fig.4 Layout of measuring point

2 试验结果与分析

2.1 破坏过程

2.1.1 试件 C1

试件 C1 在水平荷载 $P = 36 \text{ kN}$ 时,距柱根部约 260 mm 和 420 mm 处产生水平裂缝,长度约为 200 mm,缝宽 0.04 mm. 当 $P = 92 \text{ kN}$ 时,柱根部 200 mm 高度内的钢筋应变达到屈服应变,水平裂缝沿整个截面发生贯通现象,最大缝宽 0.54 mm,试件进入位移控制阶段. 当加载至 $2\Delta_y$ (Δ_y 为试件的屈服位移)的第 1 次循环时,水平荷载达到峰值点,裂缝数量增多,缝宽增大,混凝土保护层剥落,尤其是柱根部混凝土发生大面积压碎现象. 最后加载至 $3\Delta_y$ 时,柱身塑性铰区域的混凝土压碎,箍筋外鼓,承载力迅速下降,试验结束.

2.1.2 试件 C2

在水平荷载 $P = 72 \text{ kN}$ 时,距柱根部 250 mm 范围内,柱角两侧出现了多条水平裂缝,缝宽 0.02 mm,裂缝最大长度约 50 mm,与未加固试件 C1 相比,试件 C2 的开裂荷载明显提高. 继续施加荷载,原有裂缝继续发展,几乎没有新的水平裂缝产生. 在水平荷载达到 108 kN 时,水平裂缝增多,并出现沿柱面的贯通裂缝,试件屈服. 位移加载控制后,水平裂缝继续发展,数量增多,TRC 加固层表面有少量剥落,并伴有纤维编织网轻微断裂声. 最后加载至 $4\Delta_y$ 时,柱塑性铰区部分 TRC 加固层与老混凝土剥离,内部混凝土有轻微压碎现象,试件承载力下降至峰值荷载的 85%,试验结束.

2.1.3 试件 C3

试件 C3 的开裂荷载为 96 kN,与试件 C2 相比,亦有明显提高. 首条水平裂缝距柱根部约 170 mm,裂缝宽度 0.04 mm,裂缝长度约 50 mm. 继续增加荷载,裂缝发展缓慢. 在水平荷载达到 112 kN 时,试件屈服,进入位移控制阶段. 当加载至 $2\Delta_y$ 时,柱两侧面出现大量细微斜裂缝,原有水平裂缝进一步发展,同时柱角附近出现少量竖向裂缝;继续加载,柱面产生少量细小微裂缝,原有竖向裂缝继续发展. 加载至 $4\Delta_y$ 时,试件承载力下降,试验结束.

2.1.4 试件 C4

在水平荷载 $P = 94 \text{ kN}$ 时,在距柱根部 140 mm 和 150 mm 处各出现 1 条水平裂缝,缝宽均为 0.04 mm;水平荷载为 96 kN 时,在 140 mm 高度处水平裂缝沿柱面贯通. 随着荷载的增加,柱面出现少量细

微裂缝,原有裂缝继续发展,裂缝宽度增加. 当水平荷载 $P = 116 \text{ kN}$ 时,试件屈服,试验加载进入位移控制. 当加载至 $2\Delta_y$ 时,能够听到轻微的纤维编织网断裂的声音,柱面不再产生新的裂缝,原有裂缝继续发展;当加载至 $4\Delta_y$ 时,柱角处纤维网断裂,TRC 加固层与老混凝土剥离,内部混凝土被压碎,试件承载力降至峰值荷载的 85%,试验结束.

2.1.5 试件 C5

在水平荷载 $P = 92 \text{ kN}$ 时,出现首条水平裂缝,裂缝宽度 0.10 mm,高度约 120 mm. 随着继续加载,裂缝数量明显增加,且裂缝长度均较长,原有裂缝继续发展. 当水平荷载 $P = 100 \text{ kN}$ 时,柱面出现大量微裂缝,后期加载过程中也不会继续发展;同时,试件屈服,试验进入位移控制阶段. 当加载至 Δ_y 时,荷载控制阶段产生的不连续裂缝逐渐连接起来形成了主裂缝;加载至 $2\Delta_y$ 时,柱面出现大量裂缝且长度较长,甚至产生贯通柱面的水平裂缝,柱根部也产生少量竖向细微裂缝. 最后加载至 $4\Delta_y$ 时,试件 TRC 加固层起皮,有被压溃的趋势,试件水平荷载承载力下降较快,试验结束.

2.1.6 试件 C6

当水平荷载 $P = 68 \text{ kN}$ 时,试件 C6 在距柱根部 70 mm 处出现首条裂缝,缝宽 0.04 mm,同时试件屈服. 随着加载位移增大,圆柱面形成多条环形裂缝. 与试件 C3 相比,试件 C6 裂缝位置较高,破坏范围较大. 当加载至 $4\Delta_y$ 时,细小裂纹逐渐发展形成大面积的表层砂浆剥落,能够听到轻微纤维编织网断裂的声音,此时试件承载力达到最大值. 位移循环至 $8\Delta_y$ 时,承载力降低至峰值荷载的 85% 以下,试验结束.

2.1.7 试件 C7

在水平荷载 $P = 64 \text{ kN}$ 时,在距柱根部 140 mm 和 210 mm 处同时出现 2 条裂缝,裂缝产生位置也高于试件 C3. 当水平荷载 $P = 104 \text{ kN}$ 时,钢筋屈服,由于 TRC 加固层的约束作用,当加载至 $2\Delta_y$ 的第 1 次循环时才开始出现贯通裂缝,同时柱根部边缘处出现少量竖向裂缝. 当位移循环达到 $3\Delta_y$ 时,试件承载力开始下降,柱两侧开始出现斜向裂缝,纤维网断裂声响也逐渐变多. 在 $4\Delta_y$ 的第 1 次循环时,距柱根部 170 mm 处纤维网断裂,加固层严重外鼓,柱根部混凝土压碎,此时试件承载力下降明显. 当试验加载至 $5\Delta_y$ 时,柱根部 TRC 加固层与老混凝土分离,试件破坏.

2.2 破坏形态分析

各试件的破坏形态如图 5 所示. 由图可知,各试件破坏均为弯曲破坏. 与未加固柱 C1 相比,加固柱

破坏程度明显较轻,内部混凝土并没有大范围的压碎现象,TRC 有效地约束了内部混凝土,且加固柱的塑性铰区高度降低。

对于掺入不同体积掺量的加固柱,在加载过程中随着主裂缝的形成,在主裂缝附近会生成许多细微裂缝,但随着纤维掺量的增加,生成微裂缝的情况也不尽相同。总体来看,在 PVA 纤维体积掺量为 0.5% 时裂缝宽度相对较小,且适当体积掺量的

PVA 短切纤维可以推迟裂缝出现的时间,改善 TRC 加固柱的裂缝发展。

对比不同截面形式的加固柱发现,圆形加固柱表面形成多条环形裂缝,无明显斜裂缝产生,而矩形加固柱侧面出现明显斜向裂缝,这说明 TRC 加固圆柱具有良好的弯曲破坏特征,而矩形加固柱的破坏形态不如加固圆柱和方柱。

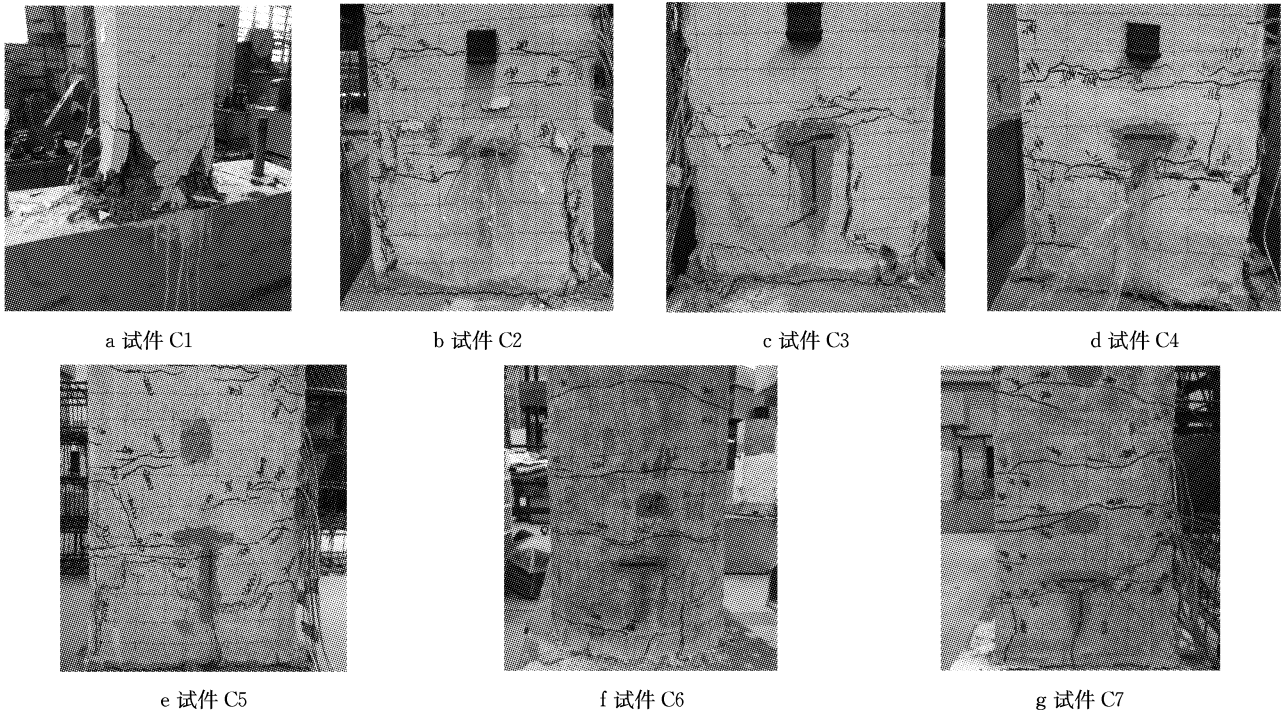


图 5 试件 C1~C7 破坏形态
Fig.5 Failure modes of specimen C1 to C7

2.3 滞回曲线

各试件主要试验结果见表 6。表中, P_y 为试件屈

服时的水平荷载, Δ_y 为与屈服荷载对应的水平位移, P_m 为试件所能承受的最大水平荷载, Δ_m 为与峰

表 6 各试件试验结果

Tab.6 Test results of columns

试件编号	加载方向	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数	累积耗能 $E/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm		
C1	正向	111.96	18.91	119.89	26.23	101.88	60.31	3.17	36.67
	负向	103.33	18.75	114.85	28.81	97.62	59.27		
C2	正向	113.37	7.26	131.50	21.99	111.78	35.09	3.47	49.34
	负向	103.14	12.47	108.00	16.29	91.80	33.43		
C3	正向	115.63	6.95	138.20	21.32	117.47	36.10	3.83	49.70
	负向	111.77	11.08	126.80	21.23	107.78	32.96		
C4	正向	116.46	7.27	135.00	13.63	114.75	29.77	3.26	39.81
	负向	113.06	13.91	116.00	20.22	98.60	39.22		
C5	正向	102.81	5.76	129.30	18.27	109.91	30.44	3.30	38.19
	负向	102.76	14.15	114.60	18.27	97.41	35.33		
C6	正向	65.21	4.88	72.20	20.23	61.37	38.27	7.19	45.42
	负向	65.56	4.83	68.00	5.04	57.80	31.62		
C7	正向	104.09	6.21	109.20	12.70	92.82	25.13	3.93	33.21
	负向	96.35	6.62	102.00	12.55	86.70	25.31		

值点荷载对应的水平位移, P_u 为试件的破坏荷载, Δ_u 为与破坏荷载对应的水平位移. 其中, 屈服点的位置按 Park 法^[15]确定, 峰值荷载为整个加载过程的

最大水平荷载, 极限荷载为水平荷载下降至 0.85 倍峰值荷载时所对应的荷载. 各试件滞回曲线关系见图 6.

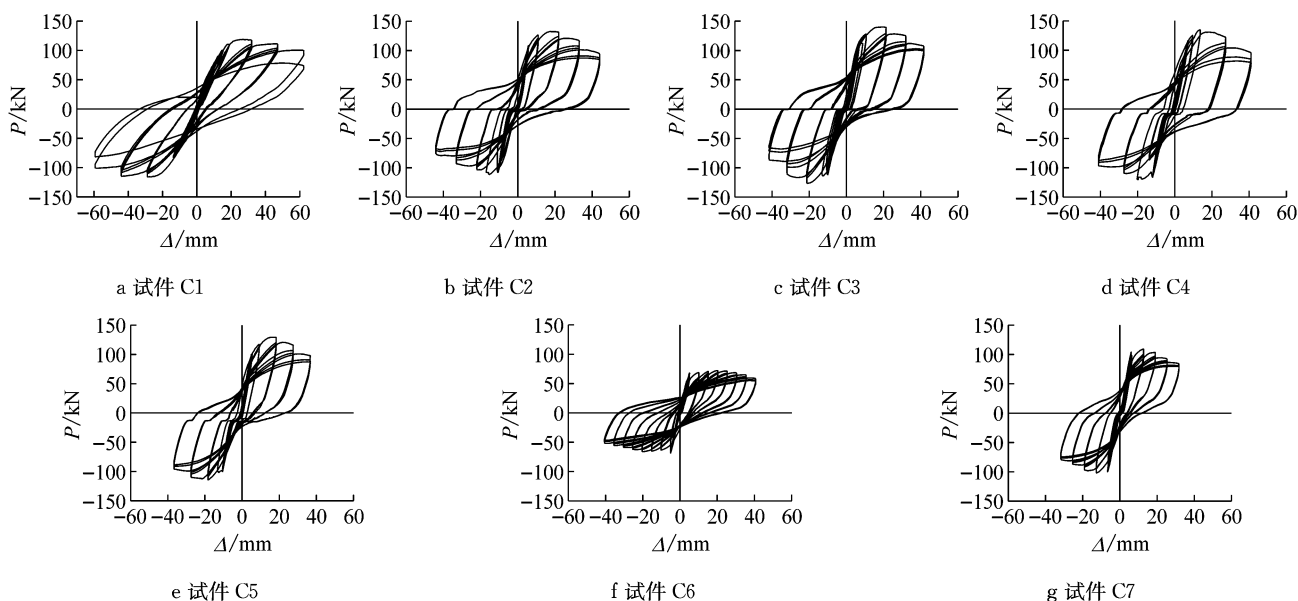


图 6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of specimens

与试件 C1 相比, 试件 C2~C7 的滞回环数量相对增多, 滞回环面积增大, 说明加固构件的耗能能力提高. 对比试件 C2~C5 发现, 试件 C2~C4 滞回曲线要比试件 C5 饱满, 试件 C5“捏缩”现象要更明显. 试件 C5 的极限位移要小于其他加固试件, 这说明当 PVA 纤维体积掺量较大时, 试件的延性会有所降低, 对试件的性能造成不利影响. 分析原因认为纤维掺量增加后, 纤维之间相互交叉的作用增强, 提高了混凝土内部的屈服剪切应力, 导致工作性能降低.

与试件 C3 和试件 C7 相比, 试件 C6 滞回环更加密集, 在位移控制阶段承载力变化幅度不大, 但具有较大的变形, 说明圆柱在反复荷载作用下具有良好的延性. 结合表 6, 由图 6 可知, 试件 C3 滞回曲线相对更加饱满, 耗能能力大于圆柱和矩形柱.

2.4 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 7 所示.

由 2.1 节可知, 与试件 C1 相比, 试件 C2~C5 的开裂荷载分别提高 100%、166.67%、161.11% 和 155.56%, 而比较 C2~C5 发现, 与试件 C2 相比, 试件 C3~C5 的开裂荷载也都有所增加, 分别提高了 33.33%、30.56% 和 27.78%. 这说明 TRC 加固能够约束 RC 柱核心混凝土, 限制裂缝的发展, 延迟裂缝出现的时间. 此外, 掺入一定量的 PVA 纤维后限制裂缝发展效果更加显著. 这是因为 PVA 纤维的体积

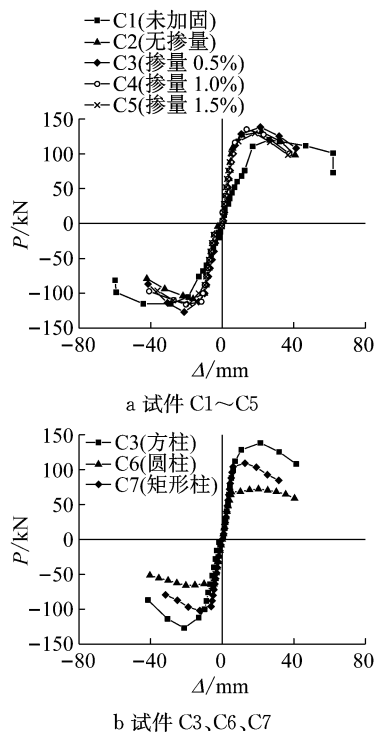


图 7 试件骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of specimens

掺量在一定范围内时, 纤维会阻断混凝土内部水分的散失通道, 使水分不易散失, 改善构件的抗裂性能. 对于屈服荷载和峰值荷载, TRC 加固构件有所提高, 但增幅有限.

由 2.1 节可知, 试件 C3、C6 和 C7 的开裂荷载

较 C1 也有较大幅度提高. 由表 6 和图 7b 可知, 与试件 C6 和 C7 相比, 试件 C3 的屈服荷载分别提高 73.88% 和 13.29%, 峰值荷载分别提高 89.02% 和 25.47%. 这说明在配置相同纵筋的情况下, TRC 加固方柱的承载能力优于圆柱和矩形柱. 对于圆柱承载能力较低, 分析原因认为, 因截面形式的原因, 圆柱混凝土受压区面积小, 受拉区纵筋少于矩形柱和方形柱, 且对比未加固柱可知, TRC 加固层会增加试件的刚度, 承担部分水平荷载, 提高加固试件的峰值荷载, 但增幅有限, 即 TRC 加固层对水平峰值荷载贡献不大.

2.5 延性

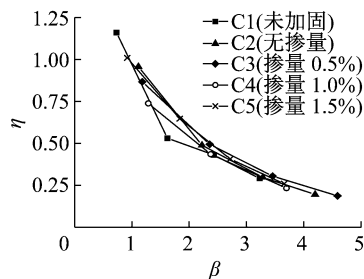
由表 6 对比发现, 与试件 C2 相比, 未加固试件 C1 的位移延性系数降低了 8.64%, 这是因为 TRC 加固层本身具有良好的延性, 加之与老混凝土之间黏结性能良好, 改善了加固柱的延性; 试件 C3 的位移延性系数提高了 10.37%, 而试件 C4 和 C5 的位移延性系数分别降低了 6.05% 和 4.90%, 这说明 PVA 纤维的体积掺量超过一定的范围会对 TRC 的力学性能产生不利影响. 分析认为, 在 TRC 基体-细粒混凝土中 PVA 纤维的体积掺量过大时, PVA 纤维不能均匀地分散在细粒混凝土中, 在掺合搅拌过程中会出现“结团”现象, 导致 PVA 纤维和 TRC 基体的整体性能降低, 进而影响 TRC 的力学性能. 此外, 经过比较计算, 试件 C6 和试件 C7 的延性系数分别比试件 C3 提高了 107.20% 和 13.26%, 说明加固圆柱的延性明显优于加固方柱, 但对于矩形加固柱, 其延性系数大于加固方柱, 这说明 TRC 能够更好地提高矩形柱的延性.

2.6 刚度退化

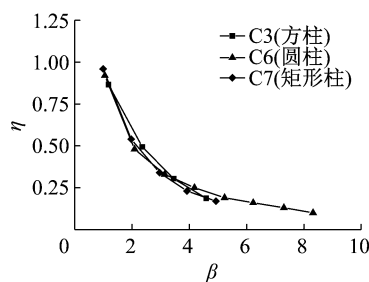
参照文献[16]中建议的折算割线刚度来分析各试件的刚度退化情况. 试件相对刚度退化曲线如图 8 所示. 其中, η 为各滞回环割线刚度与屈服刚度的比值, β 为峰值位移与屈服位移的比值.

由图 8a 可知, 对未加固柱 C1, 其刚度退化较加固柱 C2~C5 更加明显, 特别是初始刚度衰减程度更大; 而对于加固柱, TRC 加固层在试件屈服以后对 RC 柱核心混凝土有较好的约束作用, 保证了加固柱的刚度不致退化过快, 且 TRC 加固柱的退化曲线总长度也相对较长, 说明其抗震性能较好, TRC 加固 RC 柱的效果良好. 对于加固柱 C2~C5, 通过对比可以发现, 在试件屈服后, 位移控制的第 1 个循环加载过程中, 各试件的刚度也都有不同程度的衰减, 其中试件 C3 的衰减速率相对较慢, 说明在 TRC 基体中掺入适量的 PVA 纤维有助于延缓 TRC 加固柱的刚

度退化, 保证加固柱在大位移循环时能够有足够的变形能力.



a 试件 C1~C5



b 试件 C3、C6、C7

图 8 试件刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation of specimens

由图 8b 可知, 在位移循环初始阶段, 3 种截面形式的试件刚度退化都较快, 且圆柱和矩形柱退化速率大于方柱. 在达到峰值荷载后, 试件 C3 的曲线斜率要大于试件 C6 和试件 C7 的曲线斜率, 即方柱的刚度退化速率较快, 圆柱和矩形柱在位移循环后期刚度退化更加缓慢. 这说明经过 TRC 加固后圆柱和矩形柱在地震中的变形能力提高. 此外, 圆柱在临近破坏时, 曲线出现很长一段“平台”, 说明圆柱具有更好的延性.

2.7 耗能能力

试件累积耗能可通过滞回曲线所包围的面积来表示, 各试件耗能曲线如图 9 所示.

由图 9a 可知, 随着水平位移的增加, 各试件的耗能能力明显增强, 且与未加固柱 C1 相比, 加固试件 C2~C5 的耗能速率较大, 耗能的增长幅度更大. 由表 6 可以得出, 与试件 C1 相比, 试件 C2~C5 耗能能力分别提高了 34.55%、35.53%、8.56% 和 4.15%, 说明 TRC 加固有效提高了加固构件的耗能能力, 但是随着 PVA 纤维体积掺量的增大, TRC 加固构件的总耗能呈现出先增大后减小的趋势. 这说明对于 PVA 纤维来说, 过大的体积掺量会影响 TRC 的加固效果, 降低 TRC 加固柱的抗震性能.

由图 9b 可知, 在位移加载初期, 各试件的耗能速率相差不大, 说明在试件屈服前后, 截面形式对试

件耗能无明显影响,但是由于试件屈服判别存在误差,导致试件 C3 在达到屈服时就已经耗能,初始耗能大于 C6 和 C7. 结合表 6 可知,当试件破坏时,试件 C3、C6 和 C7 的累积耗能分别为 49.70 kN·m、45.42 kN·m 和 33.21 kN·m,方柱的总耗能最大,圆柱其次,矩形柱最小. 这说明截面形式对加固柱的累积耗能有一定的影响.

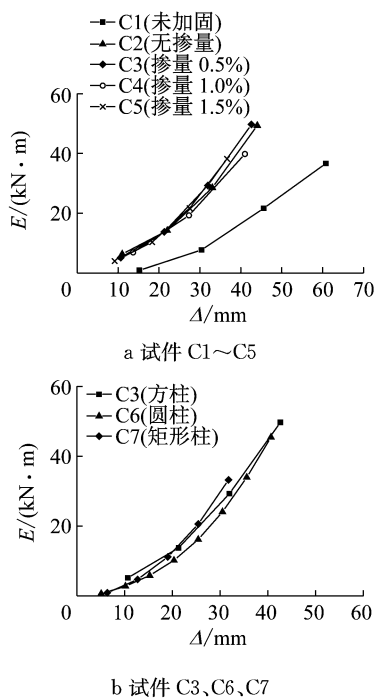


图 9 试件耗能曲线

Fig.9 Energy dissipation capacity of specimens

3 结论

通过 6 根 TRC 加固柱和 1 根对比柱的低周往复加载试验,深入分析了不同 PVA 纤维掺量和截面形式对 TRC 加固柱抗震性能的影响. 基于以上试验数据和分析,主要得到以下结论:

(1) TRC 加固能够有效约束 RC 柱核心区混凝土,限制裂缝的发展,减缓构件屈服后的刚度退化速率,降低试件塑性铰区的破坏高度,改善 RC 柱的破坏形态.

(2) 在 TRC 良好加固效果的基础上,PVA 纤维能够进一步延迟构件裂缝出现时间,限制裂缝的发展,提高加固构件的开裂荷载和峰值荷载,增强加固构件的变形能力.

(3) 当 PVA 纤维掺量在一定范围内时,会提高 TRC 的力学性能,增强 TRC 的加固效果,但是掺量过高后会对 TRC 造成不利影响. 基于本文试验数

据,PVA 纤维体积掺量在 0.5% 左右时 TRC 加固柱的抗震性能最佳,这也为后期研究侵蚀环境下 TRC 基体中掺入 PVA 纤维加固 RC 构件提供了一定的理论依据.

(4) 方形柱的承载能力最强,但总的来看,TRC 加固圆柱的延性、屈服后刚度退化以及耗能能力均优于其他两种截面形式的 TRC 加固柱,其抗震性能更好.

参考文献:

- [1] 尹世平,盛杰,贾申. 纤维束编织网增强混凝土加固钢筋混凝土梁疲劳破坏试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(4): 86.
YIN Shiping, SHENG Jie, JIA Shen. Experimental study on fatigue failure of RC beam reinforced with textile reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4):86.
- [2] BRUCKNER A, ORTLEPP R, CURBACH M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear[J]. Materials and Structures, 2006, 39(8): 741.
- [3] 尹世平,李耀,杨扬,等. 纤维编织网增强混凝土加固 RC 柱抗震性能的影响因素[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5):904.
YIN Shiping, LI Yao, YANG Yang, et al. Influencing factors of seismic performance of RC columns strengthened with textile reinforced concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5):904.
- [4] BOSCHE A, JESSE F, ORTLEPP R, et al. Textile-reinforced concrete for flexural strengthening of RC-structures—part1: structural behavior and design model [C] // Design and Applications of Textile-reinforced Concrete. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008:19-39.
- [5] 徐世焱,尹世平. 纤维编织网增强细粒混凝土加固 RC 受弯构件的正截面承载性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 1.
XU Shilang, YIN Shiping. Investigation on the bearing capacity of the normal section of RC flexural component strengthened with textile-reinforced concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1):1.
- [6] ORTLEPP R, LORENZ A, CURBACH M. Column strengthening with TRC: influences of the column geometry onto the confinement effect [J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2009. DOI:10.1155/2009/493097.
- [7] BOURNAS D A, TRIANTAFILLOU T C, ZYGOURIS K, et al. Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(5):360.
- [8] AI-SALLOUM Y A, SIDDIQUI N A, ELSANADEDY H M, et al. Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(6):920.

(下转第 626 页)