

# 玄武岩纤维与碳纤维加固短柱抗震试验研究

欧阳利军<sup>1,2</sup>, 丁斌<sup>3</sup>, 陆洲导<sup>2</sup>, 余江滔<sup>2</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 温州职业技术学院 建筑工程系, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 对5根采用玄武岩纤维布和碳纤维布加固的混凝土短柱和1根对比柱进行了低周反复荷载试验。试验表明, 玄武岩纤维布环向包裹加固能显著改变混凝土短柱的破坏形态, 提高混凝土短柱的抗剪承载力、延性和耗能能力。相同工况下, 玄武岩纤维布加固短柱的抗震性能与碳纤维布加固的短柱相近。玄武岩纤维布因低廉的价格和较好的综合力学性能, 在抗震加固领域将有较好的应用前景。

**关键词:** 混凝土; 短柱; 抗震性能; 玄武岩纤维; 碳纤维

**中图分类号:** TU 375.3

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Seismic Performance of Short Columns Strengthened with BFRP and CFRP

OUYANG Lijun<sup>1,2</sup>, DING Bin<sup>3</sup>, LU Zhoudao<sup>2</sup>, YU Jiangtao<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** Low cyclic loading test is conducted on one comparative short column and five reinforced concrete (RC) short columns strengthened with basalt fiber reinforced plastic (BFRP) and carbon fiber reinforced plastic (CFRP). The tests show that failure modes, shear strength, ductility and energy dissipation are improved and increased for specimens strengthened with BFRP. On the same condition, various short columns strengthened with BFRP and CFRP give similar seismic performance. But BFRP has a good perspective for its low cost and good comprehensive mechanical properties in seismic strengthening field.

**Key words:** concrete; short column; seismic performance; carbon fiber reinforced plastic (CFRP); basalt fiber reinforced plastic (BFRP)

混凝土短柱越来越多地出现在实际工程中, 高层建筑底层、地下室、大开窗处、桥梁等都会涉及到短柱。然而, 短柱刚度大、延性差, 在地震作用下呈现脆性剪切破坏的特征, 这对于混凝土结构抗震非常不利。改善短柱的抗震性能、提高短柱的抗剪承载力, 成为了一个重要研究课题。采用纤维复合材料环向包裹混凝土短柱, 其作用类似于箍筋的约束, 某种程度上包裹加固的短柱相当于增加了配箍率, 短柱斜截面抗剪承载力得到直接提高, 加固后的短柱在受载过程中混凝土的开裂也得到抑制, 从而短柱的抗震性能得到了改善。研究证实<sup>[1-5]</sup>, 纤维复合材料对短柱进行环向包裹加固对提高短柱的抗震性能是一种行之有效的方法。玄武岩纤维复合材料 (BFRP) 是一种新型纤维复合材料, 其延性好、耐高温、耐腐蚀、价格低廉 (仅为碳纤维 (CFRP) 价格的 1/6 ~ 1/5)、抗拉强度较高<sup>[6-9]</sup>。本文进行了玄武岩纤维布与碳纤维布加固混凝土短柱的抗震性能试验研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试件尺寸和配筋

试验设计了6根方形截面混凝土短柱, 所有试件均采用C30混凝土和相同的配筋形式。柱试验段净高为1000 mm, 截面尺寸均为300 mm × 300 mm, 上、下柱墩高为350 mm, 上部柱墩宽500 mm、长800 mm, 下部柱墩宽500 mm、长1400 mm。试件设计为剪切破坏, 试验段箍筋配置为 $\phi 6 @ 150$ , 纵筋配置为8 $\phi 18$ , 试件呈工字形。为防止试验时, 柱两端与柱墩交接处发生应力集中而过早破坏, 柱上下端根部150 mm范围内箍筋进行了加密, 加密段箍筋配置为 $\phi 6 @ 50$ 。短柱试件尺寸、配筋示意图如图1所示。纤维布材性指标如表1所示。

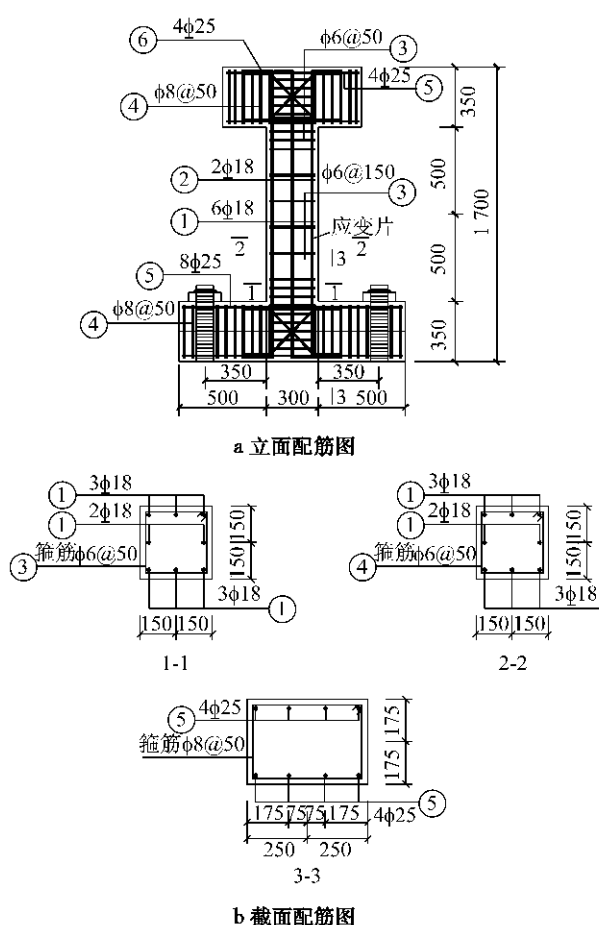


图1 试件配筋图(尺寸单位:mm)

Fig.1 Specimen and arrangement of reinforcement

表1 纤维布材性指标

Tab.1 Properties of FRP

型号	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	厚度/mm
BFRP(BUF7-300)	2 100	91	2.6	0.170
CFRP(XEC-300)	3 500	210	1.5	0.167

## 1.2 加固方案及加载制度

加固短柱均采用纤维布全柱段内环向包裹加固.加载时采用荷载—变形混合控制.竖向恒定荷载为 600 kN,试验轴压比均为 0.27.各试件基本参数见表 2.

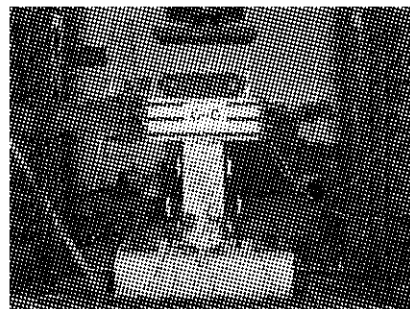
表2 各试件基本参数

Tab.2 Details of the test specimens

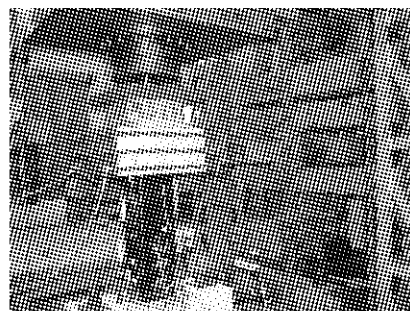
柱号	加固方式	竖向荷载/kN	试验轴压比
C-0	未加固	600	0.27
C-C2	2层 CFRP 布	600	0.27
C-C3	3层 CFRP 布	600	0.27
C-B2	2层 BFRP 布	600	0.27
C-B3	3层 BFRP 布	600	0.27
C-BC	1层 CFRP 布和 1层 BFRP 布	600	0.27

水平力加卸载过程中,短柱纵筋屈服之前采用荷载控制并分级加载,控制荷载为每级 20 kN,每级

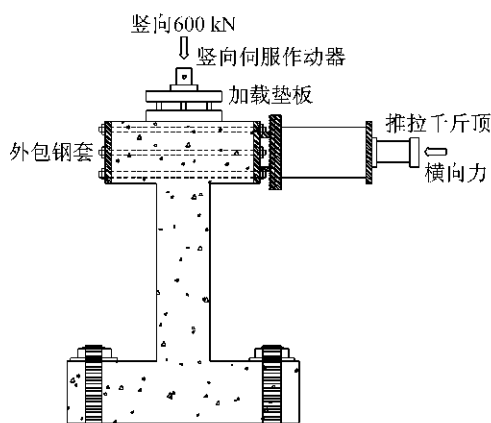
荷载施加完成后稳定 3 min 测量数据.每级正向加载、卸载并反向加载、卸载为 1 次循环.当柱内纵筋屈服后,即采用变形控制,以屈服位移  $\Delta_y$  的 0.5 倍作为控制条件进行加载.变形控制加载每级反复循环 3 次,直至短柱水平承载力下降到峰值水平承载力的 85%时认为短柱破坏<sup>[10-12]</sup>.试验装置如图 2 所示.



a 加载装置图



b 水平和竖向加载装置



c 试验装置设计图

图2 加载装置

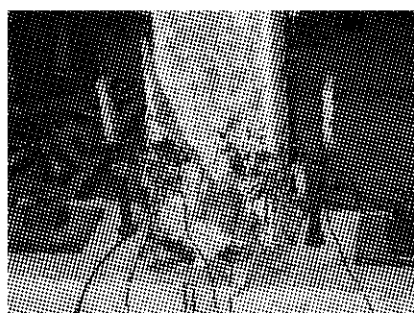
Fig.2 Test set-up

## 2 试验现象及试验结果分析

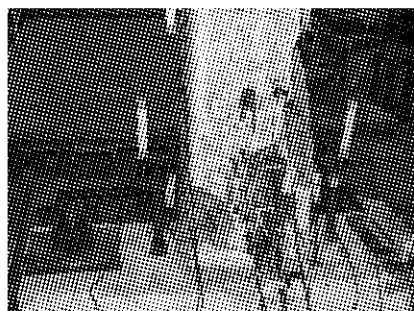
### 2.1 破坏形态

C-0 为未加固试件,水平力增至 120 kN 时,柱底纵筋进入屈服阶段.柱正面和背面均出现交叉斜裂缝,斜裂缝与柱竖轴线约为  $45^\circ$ ,斜裂缝向下延伸至柱边角,并在柱底加密区以上结束.位移控制加载阶段,8 mm 控制位移时,柱背面柱脚处开裂,同时背

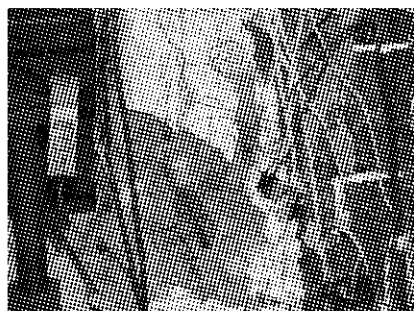
面的交叉斜裂缝扩展、变宽,柱正面角部混凝土压碎开裂;8 mm 控制位移循环结束时,柱底四周均出现水平裂缝.16 mm 控制位移时,柱中部出现贯通水平裂缝,且3条主要水平裂缝间距在150 mm左右,交叉斜裂缝继续开展,柱正面、角部混凝土局部压碎.20 mm 控制位移时,柱正面角部混凝土大面积压碎、脱落并伴较大的开裂声.24 mm 控制位移时,短柱沿斜裂缝方向突然发生破坏,此时柱纵筋压曲,同时箍筋拉断.C-0 试件发生剪切破坏,此时水平力为155 kN,破坏状况如图3.



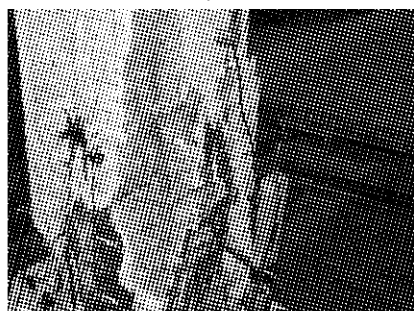
a 混凝土沿斜裂缝方向破坏



b 混凝土角部压碎、脱落



c 纵筋压曲

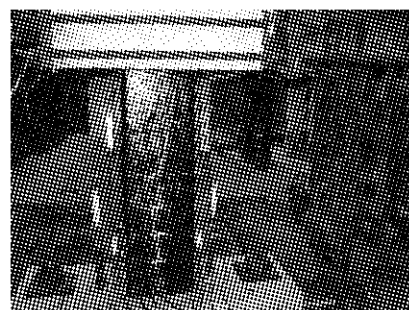


d 箍筋拉断

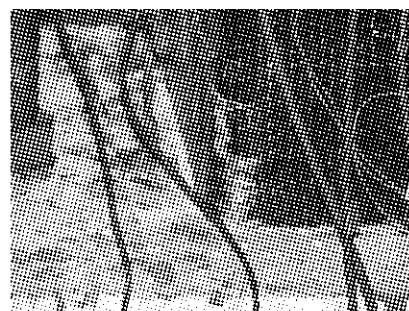
图3 C-0 破坏时试验现象

Fig.3 Pictures of C-0 at failure

C-B2 为环向包裹2层玄武岩纤维布的试件.柱顶水平力增至160 kN时,柱底纵筋进入屈服阶段,屈服位移为10 mm.20 mm 控制位移时,柱角部纤维布开始出现裂痕,由于方形截面混凝土柱在竖向荷载和纤维约束作用下的侧向膨胀变形不均匀,柱底侧边的纤维布和混凝土一起向外侧鼓起,而柱角部混凝土由于拱作用而受到有效的约束,未发现角部混凝土出现明显变形(图4c).25 mm 控制位移时,柱体发生明显弯曲.35 mm 控制位移后,荷载在第1个循环后不易施加,此时沿柱四周均出现纤维与胶体沿水平方向的裂纹.37 mm 控制位移后,柱底角部发生应力集中,玄武岩纤维布局部拉裂,承载力突然下降,试件破坏.试件的破坏状况如图4.



a C-B2 加载初期



b 接近破坏时柱底角部纤维布拉裂



c 柱脚侧面纤维布鼓起

图4 C-B2 破坏时试验现象

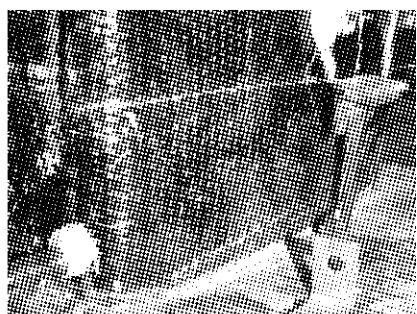
Fig.4 Pictures of C-B2 at failure

C-B3 为环向包裹3层玄武岩纤维布的试件.C-B3 试验现象与C-B2类似.柱顶水平力增至160 kN时,柱底纵筋进入屈服阶段,屈服位移为8 mm.32 mm 控制位移后,柱底出现多条纤维布与胶体的水

平裂纹,柱底部纤维布与胶体出现水平裂纹,开裂处局部混凝土压酥外露,柱底部玄武岩纤维布出现了明显的应力集中,但纤维布未拉裂.当位移增至 38 mm 后,柱底部纤维与胶体水平裂纹进一步增大,承载力突然下降,试件破坏.试件的破坏状况如图 5.



a 接近破坏时柱底部纤维



b 柱底侧面纤维布鼓起

图 5 C-B3 破坏时试验现象

Fig.5 Pictures of C-B3 at failure

C-BC 为里层包裹 1 层玄武岩纤维布,外层包裹 1 层碳纤维布的试件. C-BC 试验现象与 C-B2, C-B3 类似.柱顶水平力增至 155 kN 时,柱底纵筋进入屈服阶段,屈服位移为 10 mm.水平推拉位移增至 45 mm 时,柱体左侧主要水平裂缝开展,局部混凝土压酥并外露,柱底部纤维布出现明显的应力集中,水平承载力突然下降,试件破坏.破坏时柱底部纤维布拉裂,如图 6.

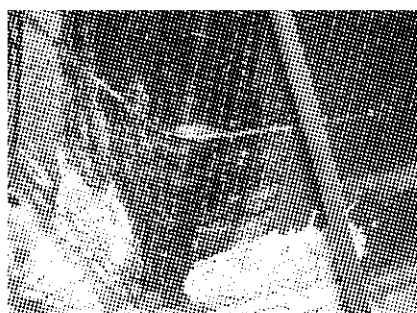


图 6 C-BC 破坏时试验现象

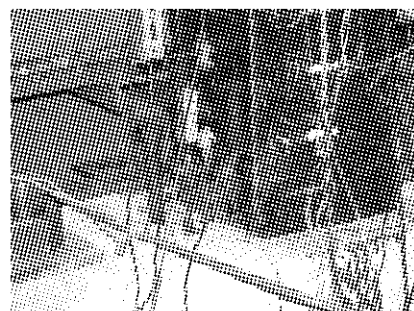
Fig.6 Picture of C-BC at failure

C-C2 为环向包裹 2 层碳纤维布的试件.柱顶水

平力增至 155 kN 时,柱底纵筋进入屈服阶段,12.5 mm 控制位移时,由于方形截面混凝土在约束作用下的侧向膨胀变形不均匀,粘贴在柱底侧面的玄武岩纤维布和混凝土向外鼓起.37.3 mm 控制位移时,承载力下降至 137 kN.43.8 mm 控制位移时,柱体正面下部出现碳纤维布与胶体的水平裂缝,柱底部碳纤维布出现明显的应力集中,承载力下降至 130 kN,试件破坏.试件的破坏状况如图 7.



a 柱底侧面碳纤维布鼓起



b 柱底部应力集中现象

图 7 C-C2 破坏时试验现象

Fig.7 Pictures of C-C2 at failure

C-C3 为环向包裹 3 层碳纤维布的试件.当柱顶水平力增至 160 kN 时柱底纵筋进入屈服阶段,屈服位移为 11 mm.当达到 44 mm 控制位移时,柱体正面底部纤维布与胶体的水平裂缝增多,柱底部碳纤维布出现明显的应力集中现象,但未见柱底纤维布拉裂,随后水平承载力突然下降至 132 kN,试件破坏,如图 8 所示.各试件试验结果及破坏形态如表 3 所示.

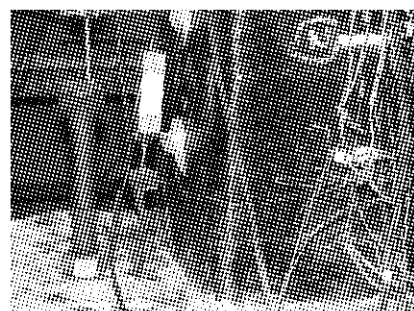


图 8 C-C3 破坏时试验现象

Fig.8 Picture of C-C3 at failure

表3 试验结果和破坏形态

Tab.3 Failure modes and test results

试件 编号	屈服位 移/mm	屈服荷 载/kN	极限位 移/mm	极限荷 载/kN	延性 系数	承载力 提高/%	破坏 形态
C-0	8.0	120	24.0	155	3.0		剪切破坏
C-B2	10.0	160	37.0	169	3.7	9.0	弯曲破坏
C-B3	8.0	160	38.0	174	4.8	12.3	弯曲破坏
C-BC	10.0	155	45.0	171	4.5	10.3	弯曲破坏
C-C2	12.5	155	44.0	164	3.5	5.8	弯曲破坏
C-C3	11.0	160	44.0	170	4.0	9.7	弯曲破坏

## 2.2 滞回曲线与骨架曲线

图9为各试件的荷载—位移滞回曲线,位移为柱顶水平位移,荷载为柱顶施加的水平力.由图9可

以看出:各试件屈服前,每次循环的残余变形非常小,屈服后,随着循环次数的增加,残余变形比较明显,对加固短柱而言,这种特征更加明显,纤维布加固后,短柱延性得到了较大程度的提高;相比未加固柱C-0,加固柱达到峰值荷载后,承载能力退化的趋势变缓;未加固柱C-0较早就发生了剪切破坏,荷载—位移滞回曲线扁平,极限位移和滞回环面积均非常小,这表明未加固柱的耗能能力较差.纤维布加固后的柱荷载—位移滞回曲线均呈饱满梭形,除C-C2试件的荷载—位移滞回曲线稍饱满外,其他加固柱滞回曲线差别并不明显.

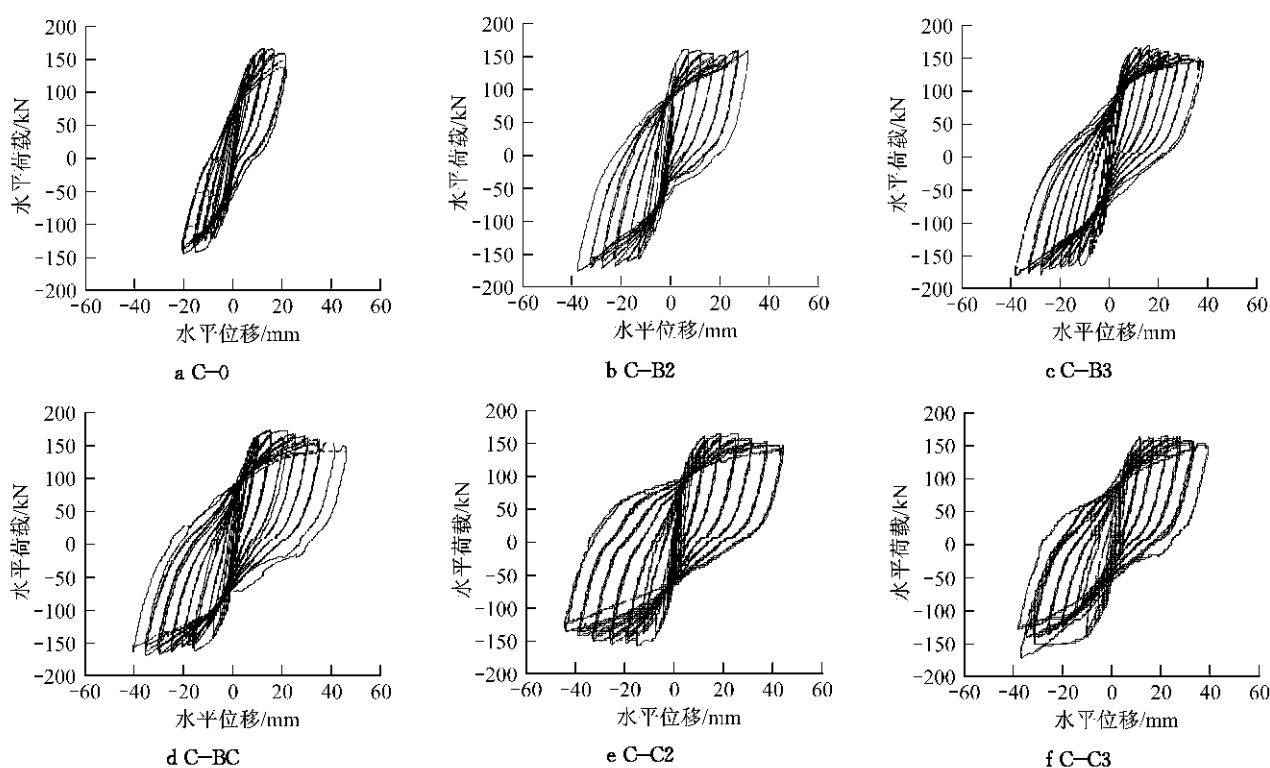


图9 各试件荷载—位移滞回曲线

Fig.9 Lateral load-displacement hysteresis loops

分析各试件的骨架曲线(图10),发现未加固试件C-0没有屈服台阶,呈明显的脆性破坏特征.而加固后的短柱都有较明显的屈服台阶,延性得到了较大程度的提高.由图10c,d可知,同等加固层数的碳纤维布和玄武岩纤维布加固短柱的骨架曲线差别较小,而对比图10d,e和f,本试验中纤维布加固层数的增加对短柱的骨架曲线影响并不大,两种纤维混合加固的试件骨架曲线与其他试件骨架曲线差别也不明显.

## 2.3 纤维布应变

图11为各加固试件距柱底175 mm处纤维布

荷载—纤维应变关系曲线.纵筋屈服前纤维布应变非常小,屈服后约束混凝土横向变形增大,纤维布应变也明显增大,因而纤维布对混凝土的约束为被动约束.两种纤维布在加载过程中应变均不超过  $2.500 \times 10^{-6}$ ,说明两种纤维布的强度并未充分发挥.由图11a,b和图11d,e可知,相比玄武岩纤维布,碳纤维布加固的试件荷载—纤维应变关系曲线呈现较明显的“K”字形,说明碳纤维布加固短柱混凝土横向塑性应变更小.卸载时纤维布应变得到了较大程度的恢复.

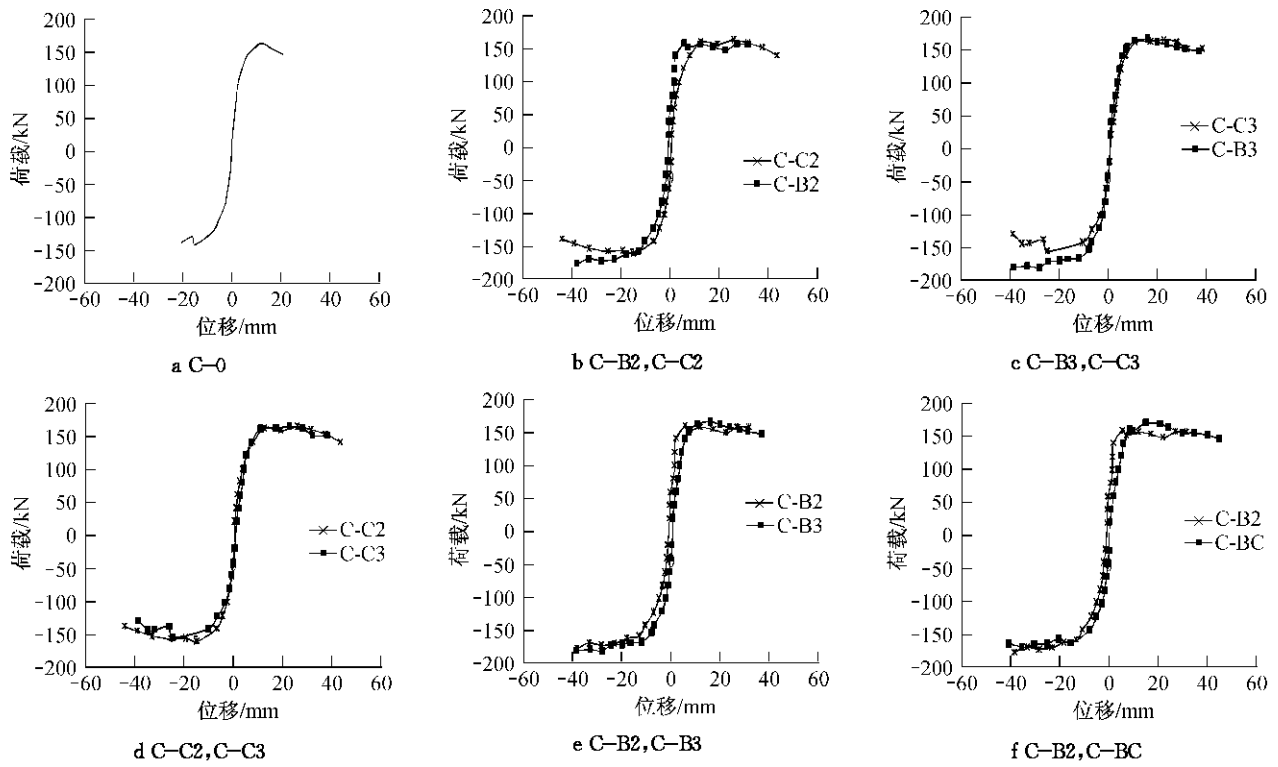


图 10 各试件骨架曲线对比

Fig. 10 Comparison of skeleton curves of different specimens

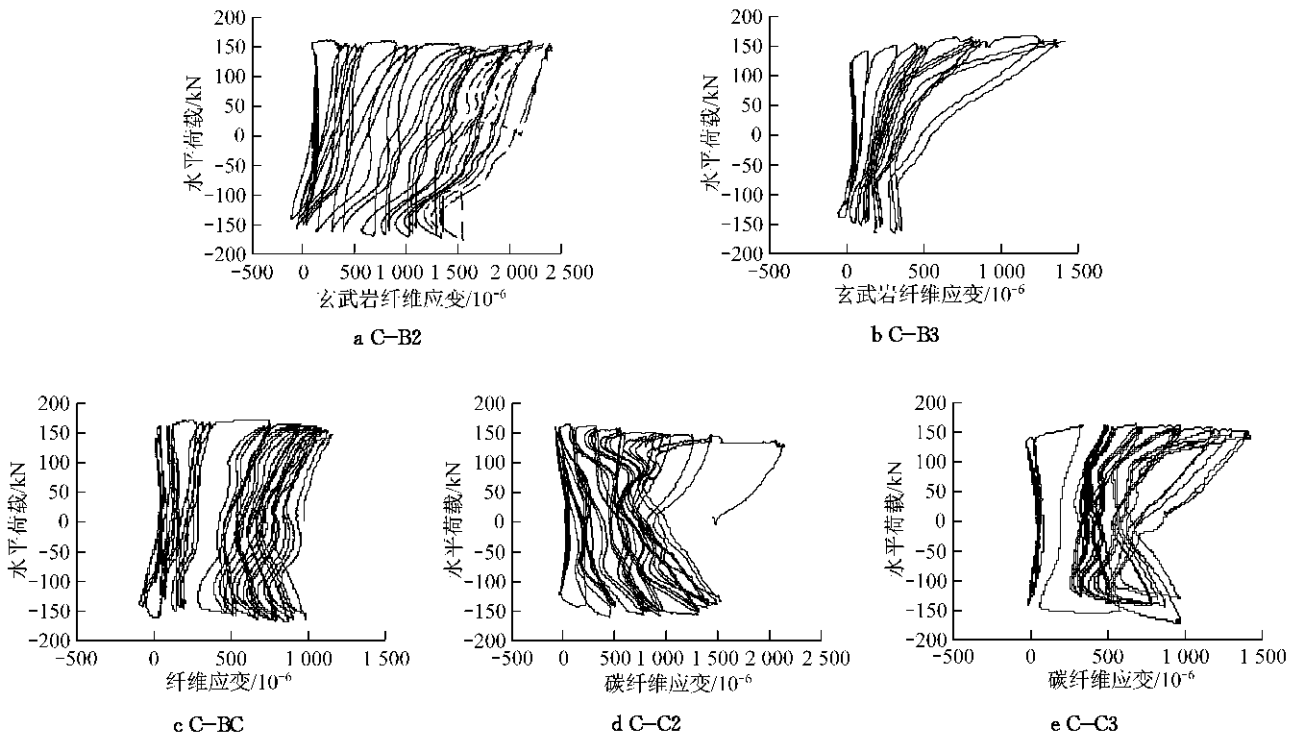


图 11 荷载—纤维布应变曲线

Fig. 11 Lateral load-strain response envelopes

### 3 结论

(1)玄武岩纤维布环向包裹加固能明显改变短柱的破坏形态,使短柱由剪切破坏转变为弯曲破坏,加固后短柱的延性和承载力得到了较明显的改善和提高.本试验中,玄武岩纤维布加固短柱的极限承载力最大提高 12.3%,极限位移最大提高 58.3%;碳纤维布加固短柱的极限承载力最大提高 9.7%,极限位移最大提高 83.3%.加固试件屈服荷载提高幅度达到了 33.3%.

(2)玄武岩纤维布和碳纤维布环向包裹加固方形截面短柱在竖向荷载和纤维布的约束作用下均会出现混凝土侧向膨胀变形不均匀现象,柱底侧面混凝土鼓起,而角部混凝土由于拱作用而得到了有效约束,破坏前柱底角部均会出现明显的应力集中或拉裂现象;试验中,两种纤维布应变均小于  $2\,500 \times 10^{-6}$ ,远未达到极限拉应变,其强度未得到充分发挥.

(3)相同工况下,两种纤维布加固短柱在承载力、延性、耗能能力方面相近,但由加固柱底处纤维布应变—荷载曲线可知,碳纤维布加固短柱混凝土横向塑性应变更小,卸载时纤维布应变得到了较大程度的恢复.

(4)由于具有低廉的价格和较好的综合力学性能,玄武岩纤维复合材料在混凝土结构抗震加固领域将有较好的应用前景.

#### 参考文献:

- [1] 郝永昶,李忠献.改善钢筋混凝土短柱抗震性能的若干措施[J].建筑结构,2002,32(10):8.  
HAO Yongchang, LI Zhongxian. Several measures to improve seismic behavior of reinforced concrete short columns[J]. Building Structure, 2002, 32(10): 8.
- [2] Saadatmanesh H, Ehsani MR, Jin LL. Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(29): 206.
- [3] 朱吉顶,刘晓宁.碳纤维混凝土短柱提高桥梁承载力的研究[J].武汉理工大学学报,2008,30(11):144.  
ZHU Jiding, LIU Xiaoning. Research on carbon fiber reinforced concrete short column of the bridge[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(11):144.
- [4] 刘铁军,梁超峰,欧进萍.纤维增强钢筋混凝土柱的抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2009,29(3):32.  
LIU Tiejun, LIANG Chaofeng, OU Jinping. Research on seismic behavior of fiber reinforced concrete columns[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 32.
- [5] 周长东,黄承逵.玻璃纤维聚合物加固混凝土柱抗震性能研究[J].地震工程与工程振动,2006,38(3):427.  
ZHOU Changdong, HUANG Chengkui. Investigation on seismic resistance behavior of concrete columns strengthened with GFRP[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 38(3): 427.
- [6] Sim J, Park C, Moon DY. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites: Part B, 2005, 36(6/7): 504.
- [7] 欧阳利军,丁斌,陆洲导.玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2010(3):84.  
OUYANG Lijun, DING Bin, LU Zhoudao. BFRP and its application review in structural strengthening[J]. FRP/CM, 2010(3):84.
- [8] Lopresto V, Leone C, De Iorio I. Mechanical characterisation of basalt fiber reinforced plastic [J]. Composites: Part B, 2011, 42(4): 717.
- [9] Kim Y H, Yang D H, Yoon S W. A study on the mechanical properties comparison for the composites application of basalt fibers with GFRP[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(4/5): 1633.
- [10] 姚振纲,刘祖华.建筑结构试验[M].上海:同济大学出版社,2004.  
YAO Zhengang, LIU Zhuhua. Test of building structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [11] 史庆轩,杨坤,白力更,等.高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2011,44(12):9.  
SHI Qingxuan, YANG Kun, BAI Ligeng, et al. Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 9.
- [12] 白国良,刘超,赵洪金,等.再生混凝土框架柱抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):61.  
BAI Guoliang, LIU Chao, ZHAO Hongjin, et al. Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame columns [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1):61.