

文章编号: 1673-2049(2014)04-0023-06

GFRP 筋混凝土短柱偏压性能试验研究

孙 丽, 王世光, 侯 娜, 张 娜

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:进行了 3 组玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋混凝土短柱偏心受压破坏试验,对 GFRP 筋混凝土偏心受压柱的破坏形态、侧向挠度、内部筋体应变与混凝土表面的应变等试验结果进行了分析。结果表明:GFRP 筋混凝土柱的破坏形式为受压破坏,随着初始偏心距的减小,GFRP 筋混凝土柱的承载力有增大趋势;GFRP 筋作为受压筋与混凝土的协同作用良好,且试件加载时的初始偏心距越小,混凝土与 GFRP 筋的协同作用越好;GFRP 筋有较好的抗压性能,作为受力筋应用到混凝土受压构件中有很大的优越性。

关键词:GFRP 筋;混凝土短柱;偏心距;破坏形态;承载力;侧向挠度

中图分类号:TU377.9 **文献标志码:**A

Experiment Research on Mechanical Behavior of Eccentrically Loaded Short Concrete Column Reinforced with GFRP Bars

SUN Li, WANG Shi-guang, HOU Na, ZHANG Na

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: Three groups of compressive failure experiments on eccentrically loaded short concrete column reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars were carried out. The failure pattern, lateral deflection, internal reinforcement strain and concrete surface strain of the compressed columns were analyzed. The results show that the failure pattern of the concrete column reinforced with GFRP bars is compressive damage, and the bearing capacity of concrete columns reinforced GFRP bars tends to increase as the initial eccentricity decreases. Meanwhile, GFRP bar working with concrete performs well as the compression bar, and it works better with concrete under the smaller initial eccentricity. GFRP bar acting as compressive bar in concrete is of great superiority due to its good compressive capacity.

Key words: GFRP bar; short concrete column; eccentricity; failure pattern; bearing capacity; lateral deflection

0 引 言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)筋取代钢筋用于增强混凝土结构是解决钢筋锈蚀行之有效的方法之一^[1]。作为一种新型材料,

玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)与传统钢筋相比具有低密度、高强度、电磁中性和强耐腐蚀能力等优良性能。

各国很多学者对 FRP 筋的性能做了大量研究。詹界东等^[2-3]采用应变折减的方法推导了体外预应

收稿日期: 2014-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178277); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2012018); 沈阳市科技计划项目(F14-192-4-00)

作者简介: 孙 丽(1974-), 女, 辽宁营口人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: sunli2009@163.com。

力 FRP 筋混凝土梁承载力的计算方法,并将计算结果与 3 组其他学者的试验数据进行对比,得出将此计算方法作为体外预应力 FRP 筋混凝土梁承载力的计算公式是可行的,在此基础上用有限元软件 ANSYS 对预应力 FRP 筋混凝土梁进行建模,得到了与试验相类似的结果。宋江等^[4]采用一种相对外贴加固具有明显优势的新型 FRP 筋加固混凝土结构的方法——嵌入式(NSM)加固法,研究了预应力 FRP 筋嵌入式加固钢筋混凝土梁的跨中正截面受弯承载力,给出了加固后的计算公式,并根据受压区高度对预应力 FRP 筋嵌入式加固钢筋混凝土梁破坏模式进行了判别。徐新生等^[5]通过对 10 根 FRP 筋混凝土梁的弯曲试验研究,推导了 FRP 筋混凝土梁挠度的计算公式。薛伟辰等^[6]通过系统研究各国 FRP 筋混凝土梁的试验结果,指出 FRP 筋混凝土梁基本有 3 种破坏模式,分别是受拉破坏、平衡破坏和受压破坏,且推导出 FRP 筋混凝土梁的正截面抗弯承载力设计的计算公式。Baena 等^[7]进行了 GFRP 筋加固混凝土试件的拉伸试验,结果表明,GFRP 筋混凝土结构的配筋率对结构在试验过程中的裂缝开展和变形情况有影响,其他因素对 GFRP 筋加强混凝土结构拉伸性能的影响是值得分析和探讨的。Nawy 等^[8]研究了 FRP 筋简支梁和连续梁,分析了 FRP 筋混凝土梁的挠度特性,得出同等受力情况下 FRP 筋混凝土梁产生的挠度要大于钢筋混凝土梁的结论。

综合各国众多学者的研究现状分析可知,目前对 GFRP 筋的研究主要集中在 GFRP 筋的抗拉性能方面,在抗压方面所做的研究相对较少,尤其是 GFRP 筋与混凝土结构结合作为受压构件的研究更少。随着 GFRP 筋在混凝土结构中的应用越来越

广泛,GFRP 筋应用于承载构件时不可避免地将会承受压应力。为了使 GFRP 筋更广泛地应用到工程实际中,充分发挥其优越的性能,更好地保证其与混凝土结构使用过程中结构的耐久性和安全性,全面系统地研究 GFRP 筋混凝土的受压力学性能显得尤为必要。本文中笔者对 GFRP 筋混凝土短柱偏压性能进行试验研究,分析其破坏形态、侧向挠度等的变化规律。

1 试验概况

1.1 GFRP 筋材料试验

本文试验中,纵筋采用 GFRP 筋,其中玻璃纤维的体积分数为 70%,树脂基体的体积分数为 30%,其直径为 10 mm。为提高 GFRP 筋与混凝土间的粘结性能,选择表面带肋的 GFRP 筋,见图 1。

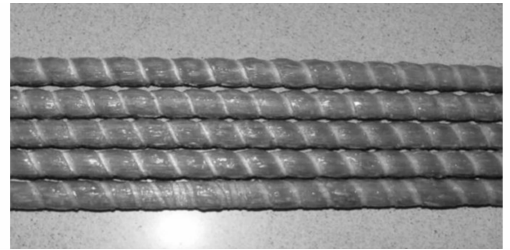


图 1 GFRP 筋

Fig. 1 GFRP Bars

首先进行受压性能测试。将 GFRP 筋截成长细比为 2.5 的小试件,在 300 kN 液压试验机上进行手动加载。随后进行受拉性能测试,将 GFRP 筋截成长度为 30 cm 的试件,在 30 t 液压试验机上进行手动加载,应用 IMC 应变采集系统对筋体纵向应变进行采集。GFRP 筋的抗压与抗拉性能测试结果如表 1 所示。

表 1 GFRP 筋实测力学性能

Tab. 1 Measured Mechanical Behaviors of GFRP Bars

| 直径/mm | 受压破坏荷载/kN | 抗压强度/MPa | 受压弹性模量/GPa | 受拉破坏荷载/kN | 抗拉强度/MPa | 受拉弹性模量/GPa |
|-------|-----------|----------|------------|-----------|----------|------------|
| 10 | 54.10 | 689.23 | 60.22 | 57.48 | 1 103.18 | 92.38 |

1.2 GFRP 筋混凝土偏心受压柱试件设计与制作

表 2 混凝土配合比

1.2.1 混凝土配合比与强度设计

混凝土的强度等级为 C30,采用容量为 0.6 m³ 的搅拌机进行搅拌,具体配合比见表 2。

Tab. 2 Mixing Ratio of Concrete

| 混凝土强度等级 | 水灰比 | 各材料用量/(kg·m ⁻³) | | | |
|---------|------|-----------------------------|-----|-----|-----|
| | | 水泥 | 水 | 砂 | 石 |
| C30 | 0.38 | 105 | 277 | 307 | 751 |

1.2.2 混凝土试件设计、制作与应变片粘贴

本文对 9 根 GFRP 筋混凝土柱进行偏心受压试验,偏心受压柱试件参数见表 3。试件采用对称配筋,受压侧与受拉侧各配置 3 根直径为 10 mm 的 GFRP 筋作为纵筋。在柱身处均匀布置 3 根直径为

4 mm 的钢筋作为箍筋,间距为 50 mm。采用牛腿状柱头,每个柱头配置 3 根直径为 16 mm 的拉结钢筋,均匀布置 5 根直径为 6 mm、间距为 50 mm 的箍筋。试件截面尺寸及配筋见图 2。

表 3 偏心受压柱试件参数

Tab.3 Parameters of Eccentrically Loaded Column Specimens

| 试件编号 | 柱宽/mm | 柱长/mm | 柱高/mm | 偏心距/mm |
|--------|-------|-------|-------|--------|
| Z175-1 | 180 | 250 | 1 000 | 175 |
| Z175-2 | 180 | 250 | 1 000 | 175 |
| Z175-3 | 180 | 250 | 1 000 | 175 |
| Z125-1 | 180 | 250 | 1 000 | 125 |
| Z125-2 | 180 | 250 | 1 000 | 125 |
| Z125-3 | 180 | 250 | 1 000 | 125 |
| Z75-1 | 180 | 250 | 1 000 | 75 |
| Z75-2 | 180 | 250 | 1 000 | 75 |
| Z75-3 | 180 | 250 | 1 000 | 75 |

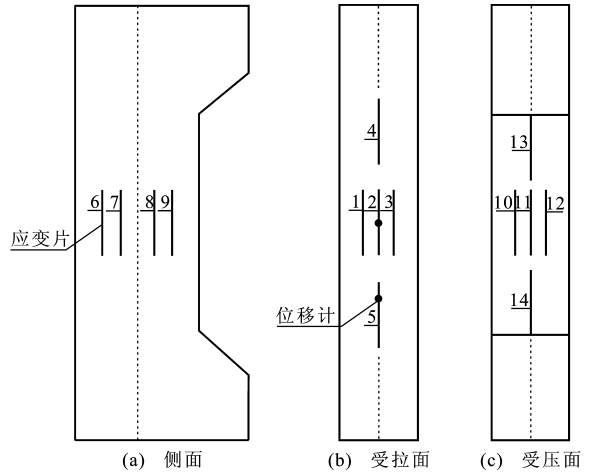


图 3 应变测点布置

Fig. 3 Locations of Strain Measuring Point

试验前需要在试件上、下两端的钢板上焊接角钢来固定刀铰,并在 500 kN 压力机上安装刀铰,应用 IMC 数据采集系统对试件加载及持载过程进行数据采集。试验加载装置见图 4。

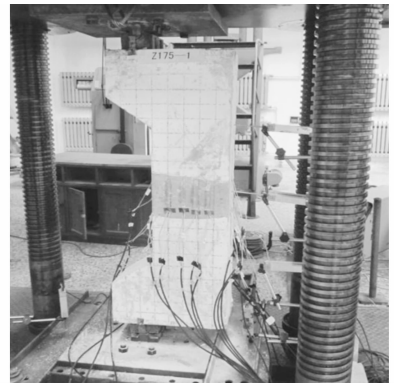


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Experiment Loading Equipment

本文中试验采用手动持续加载方案,试验正式开始时,首先施加少量荷载,构件采集数据稳定后,荷载以 $20 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度匀速加载。当荷载接近开裂荷载和极限荷载时,加载速度适当减小,以 $10 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度匀速加载。试验过程中应用裂缝观测仪测量裂缝宽度,并记录对应的荷载值。

2 试验现象与结果分析

图 5 为试件破坏形态。根据试验中 9 根 GFRP 筋混凝土柱的极限荷载,绘制出 GFRP 筋混凝土偏心受压柱的极限荷载柱形图,见图 6。由图 6 可知,GFRP 筋混凝土偏心受压柱与钢筋混凝土偏心受压柱一样,随着初始偏心距的减小,GFRP 筋混凝土柱的承载力有增大趋势。

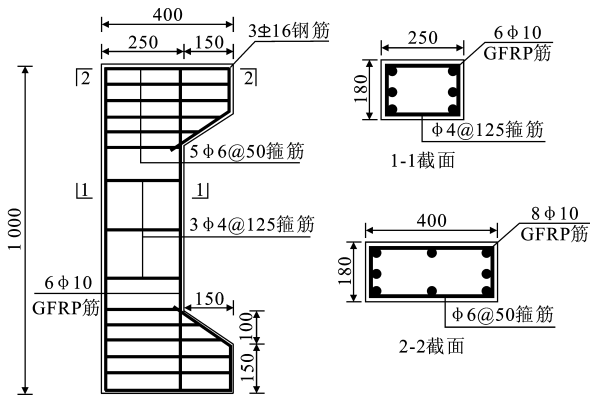


图 2 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 2 Section Dimensions and Reinforcements of Specimens (Unit:mm)

试验采用标距为 1 mm 的电阻应变片测量柱内部筋体的纵向应变,每根 GFRP 纵筋中部布置 1 个电阻应变片,焊接完毕后,再用纱布浸渍环氧树脂包裹。

试验采用标距为 80 mm 的应变片测量 GFRP 筋混凝土柱混凝土表面的纵向、横向应变。测量横向应变的应变片均布置在混凝土柱试件的纵向中间部位,受拉侧与受压侧以 35 mm 的间距各布置 3 个,标记为 1,2,3 和 10,11,12。侧面以 42 mm 的间距布置 4 个,标记为 6,7,8,9。在试件受压侧与受拉侧位于中间位置的电阻应变片的上、下位置各再粘贴 1 个电阻应变片,用来测量混凝土的纵向应变,标记为 4,5 和 13,14。混凝土柱表面粘贴电阻应变片的情况见图 3。在粘贴电阻应变片前,将粘贴位置的表面先用清水清洗干净,再用酒精擦拭,以使应变片更好地和混凝土粘贴,减小误差。

1.3 加载方案

采用沈阳建筑大学结构工程实验室的 500 t 压力试验机进行手动加载。混凝土试件为偏心受压,

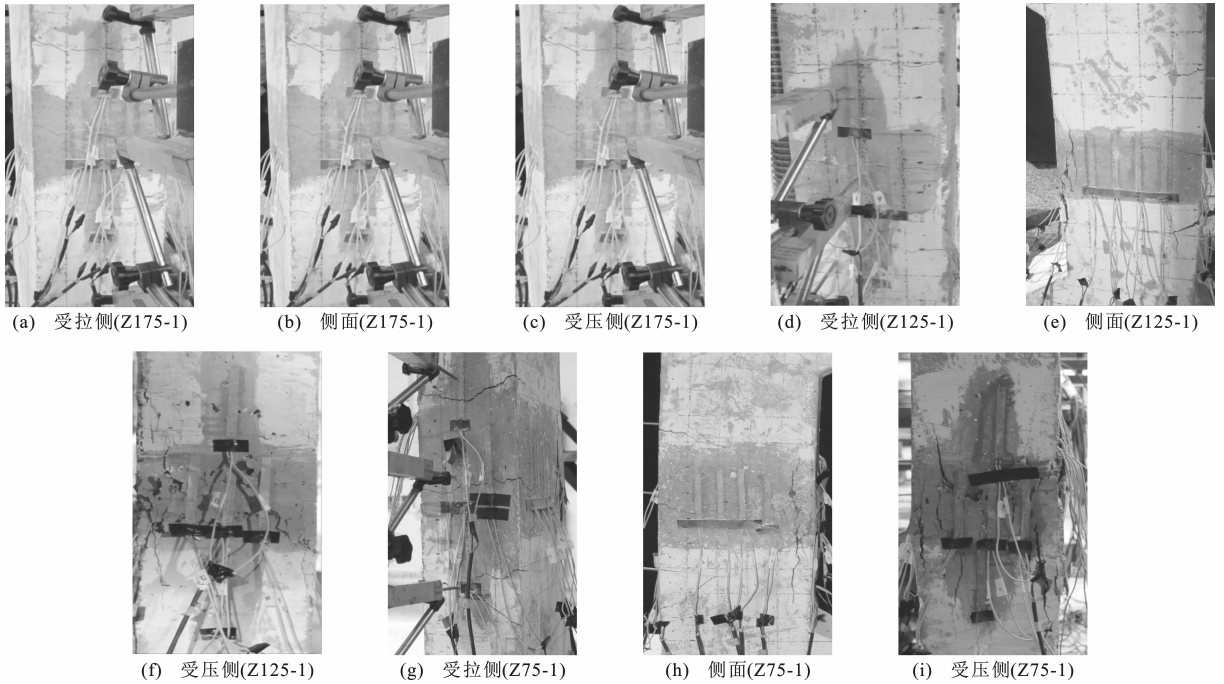


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure Patterns of Specimens

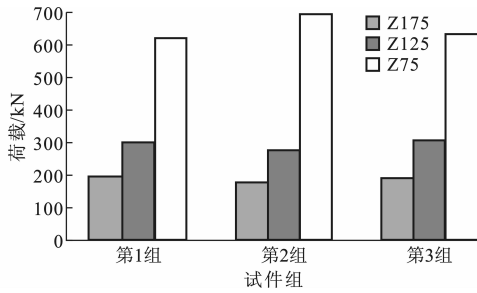


图 6 承载力试验结果

Fig. 6 Experiment Results of Bearing Capacity

本次试验 GFRP 筋混凝土试件的受压破坏结果见表 4。由表 4 可以看出, GFRP 筋混凝土试件以受压区混凝土劈裂破坏为主。试件中大部分的纵筋未发生断裂, 仅个别纵筋发生剪切破坏, 可见, GFRP

GFRP 筋有较好的抗压性能, 作为受力筋应用到混凝土受压构件中有很大的优越性。混凝土先于 GFRP 筋发生破坏, 可见, 混凝土对 GFRP 筋起到一定的保护和约束作用。

2.1 GFRP 试件的荷载-侧向挠度变化关系

根据 9 根 GFRP 筋混凝土试件加载过程中侧面的挠度变化和对应的各级荷载, 得到试件的荷载-侧向挠度曲线, 见图 7。由图 7 可见: 试件加载时, 当所施加的竖向荷载小于试件极限荷载时, 试件的荷载与挠度呈线性关系, 说明这一阶段的混凝土试件处于弹性工作阶段; 当所施加的竖向荷载超过极限荷载时, 试件的荷载-侧向挠度关系曲线开始下降, 随着加载继续进行, 荷载迅速减少, 没有明显的

表 4 试件的受压破坏结果

Tab. 4 Compression Failure Results of Specimens

| 试件编号 | 极限荷载/kN | 开裂荷载/kN | 初始裂缝出现位置 | 试件破坏特征 | 试件内部筋体破坏情况 |
|--------|---------|---------|----------|------------------------|------------------|
| Z175-1 | 201 | 61 | 受拉侧 | 受压侧混凝土劈裂破坏 | 筋体未发生断裂 |
| Z175-2 | 179 | 53 | 受拉侧 | 受压侧混凝土劈裂破坏 | 受压侧 2 根受压筋发生剪切破坏 |
| Z175-3 | 187 | 50 | 受拉侧 | 混凝土柱接近受压侧附近混凝土劈裂, 有破裂声 | 筋体未发生断裂 |
| Z125-1 | 291 | 80 | 受拉侧 | 受压区混凝土劈裂破坏 | 筋体未发生断裂 |
| Z125-2 | 290 | 78 | 受拉侧 | 受压区混凝土劈裂破坏 | 筋体未发生断裂 |
| Z125-3 | 347 | 103 | 受拉侧 | 受压区混凝土劈裂破坏 | 筋体未发生断裂 |
| Z75-1 | 640 | 330 | 侧面 | 受压区混凝土劈裂破坏 | 受压侧 1 根筋体发生剪切破坏 |
| Z75-2 | 685 | 403 | 受拉侧 | 受压区混凝土劈裂破坏 | 筋体未发生断裂 |
| Z75-3 | 625 | 370 | 受拉侧 | 受压区混凝土劈裂破坏 | 筋体未发生断裂 |

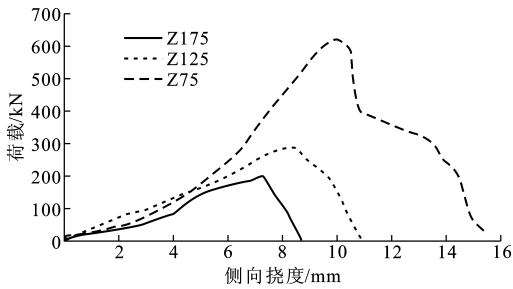


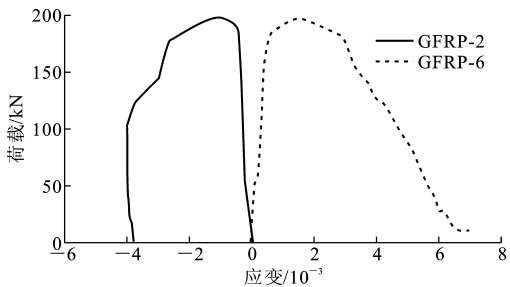
图7 荷载-侧向挠度曲线

Fig. 7 Load-lateral Deflection Curves

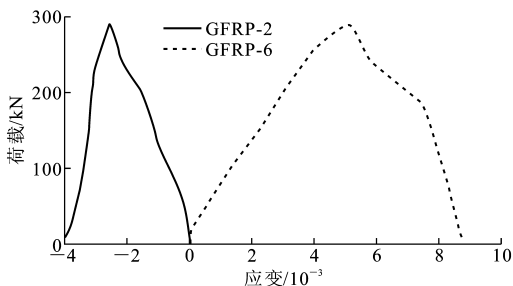
屈服阶段。由图7还可知,初始偏心距越小,极限荷载越大,承载能力越强。

2.2 试件内部筋体的荷载-应变关系

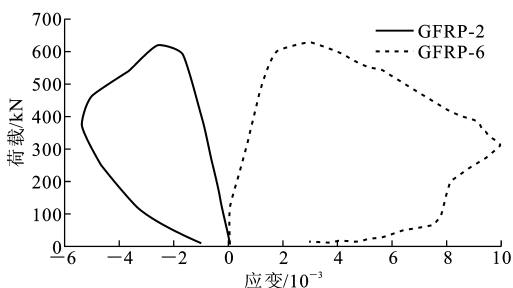
根据GFRP筋混凝土试件加载过程中受拉和受压GFRP筋的实测应变和对应的各级荷载,得到试件GFRP筋的荷载-应变曲线,见图8,其中,内部受压侧筋体试件编号为GFRP-2,受拉侧筋体试件编号为GFRP-6。本文探讨了不同的GFRP筋混凝土试件在加载时,荷载与内部筋体的应变变化情况。



(a) 试件Z175-1



(b) 试件Z125-1



(c) 试件Z75-1

图8 GFRP筋荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain Curves of GFRP Bars

由图8(a)可以看出:GFRP筋在混凝土柱内部作为受力筋时,开始时受拉侧与受压侧GFRP筋的荷载与应变呈线性关系;随着加载继续进行,达到极限荷载后,受压侧GFRP筋的荷载-应变曲线迅速下降,没有明显的屈服阶段,受拉侧GFRP筋的荷载-应变曲线下下降相对缓慢。

由图8(b)可以看出:GFRP筋在混凝土柱内部作为受力筋时,开始时受拉侧与受压侧GFRP筋的荷载-应变曲线呈线性关系,荷载-应变曲线斜率的绝对值近似相等;随着加载继续进行,达到极限荷载后,受压侧GFRP筋的荷载-应变曲线迅速下降,没有明显的屈服阶段,受拉侧GFRP筋的荷载-应变曲线下下降相对缓慢。

由图8(c)可以看出:GFRP筋在混凝土柱内部作为受力筋时,受拉侧与受压侧GFRP筋的荷载-应变曲线呈线性关系;随着荷载增加,达到极限荷载后,受压侧与受拉侧GFRP筋的荷载-应变曲线均下降,但是受拉侧GFRP筋的荷载-应变曲线下下降相对缓慢。

2.3 混凝土表面的荷载-应变关系

根据GFRP筋混凝土试件加载过程中受拉侧和受压侧混凝土表面中间纵截面上实测应变和对应的荷载,得到试件混凝土表面的荷载-应变曲线,如图9所示。

初始偏心距为175 mm的GFRP筋混凝土试件表面的荷载-应变曲线选取点为混凝土-4(数字为应变片位置,下文同)和混凝土-14,见图9(a)。初始偏心距为125 mm的GFRP筋混凝土试件表面的荷载-应变曲线选取点为混凝土-5和混凝土-14,见图9(b)。初始偏心距为75 mm的GFRP筋混凝土试件表面的荷载-应变曲线选取点为混凝土-4和混凝土-14,见图9(c)。

GFRP筋混凝土柱试件受拉侧混凝土的荷载-应变曲线近似呈线性关系,达到极限荷载后,曲线急剧下降,没有明显的屈服阶段。受压侧混凝土的荷载-应变曲线在加载初期表现出较好的线性,随着竖向荷载的增大,曲线下下降相对缓慢。

对比图8,9可知,无论是受拉侧GFRP筋应变还是受压侧GFRP筋应变,都比相应试件中受拉侧和受压侧混凝土表面的应变大,也就是说在混凝土破坏之前,GFRP筋保持完好,并能有效地发挥其良好性能。

3 结语

(1)GFRP筋混凝土柱的破坏形式为受压破坏,

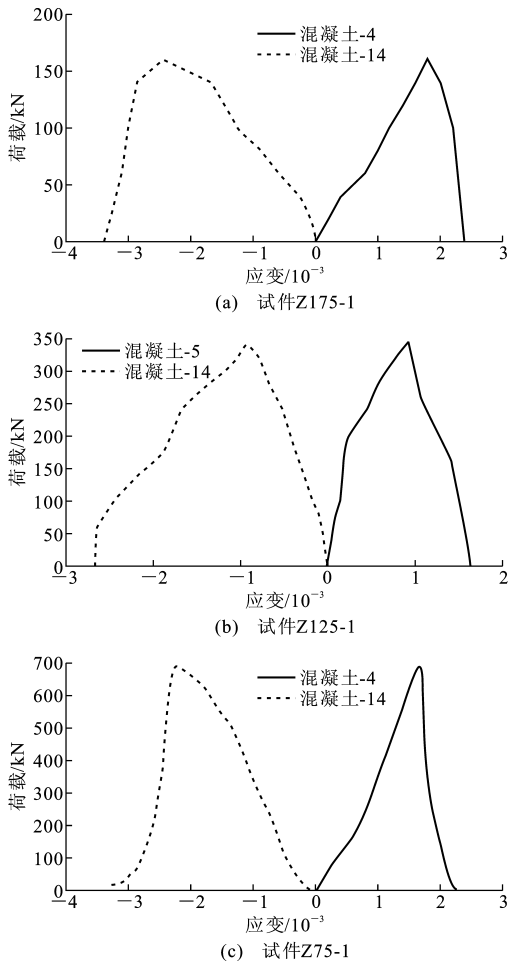


图9 混凝土表面荷载-应变曲线

Fig.9 Load-strain Curves of Concrete Surface

与钢筋混凝土柱破坏形式相同,但是GFRP筋混凝土柱的破坏表现为脆性破坏,破坏前没有明显的预兆,试件内部筋体大部分没有发生断裂,仅个别筋体发生剪切破坏。

(2)GFRP筋混凝土柱与钢筋混凝土柱偏心受压柱相同,随着初始偏心距的减小,GFRP筋混凝土柱的承载力有增大趋势。

(3)GFRP筋混凝土偏心受压柱具有较大的承载力,在混凝土破坏之前,GFRP筋保持完好,并能有效地发挥其良好性能。

参考文献:

References:

[1] 薛伟辰,康清梁.纤维塑料筋在混凝土结构中的应用[J].工业建筑,1999,29(2):19-21,28.

XUE Wei-chen,KANG Qing-liang. Application of Fiber Reinforced Plastics in Concrete Structures[J]. Industrial Construction,1999,29(2):19-21,28.

[2] 詹界东,杜修力,王作虎.体外预应力FRP筋混凝土梁承载力计算[J].科学技术与工程,2011,11(9):2130-2132.

ZHAN Jie-dong,DU Xiu-li,WANG Zuo-hu. The Ultimate Strength of External Pre-stressed Concrete Beam with FRP Tendons[J]. Science Technology and Engineering,2011,11(9):2130-2132.

[3] 詹界东,杜修力,王作虎.有粘结预应力FRP筋混凝土梁有限元分析[J].科学技术与工程,2011,11(9):2141-2144.

ZHAN Jie-dong,DU Xiu-li,WANG Zuo-hu. Nonlinear Finite Element Analysis of Pre-stressed Concrete Beam with FRP Tendons[J]. Science Technology and Engineering,2011,11(9):2141-2144.

[4] 宋江,张浩.预应力FRP筋——嵌入式加固钢筋混凝土梁的研究[J].中国水运,2009,9(10):243-244.

SONG Jiang,ZHANG Hao. Study of Prestressed FRP Reinforced—Embedded Reinforcing the Reinforced Concrete Beam[J]. China Water Transport,2009,9(10):243-244.

[5] 徐新生,纪涛,郑永峰.FRP筋混凝土梁挠度的特点及计算方法[J].工程力学,2009,26(增1):171-175.

XU Xin-sheng,JI Tao,ZHENG Yong-feng. Characteristics and Calculation Methods of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[J]. Engineering Mechanics,2009,26(S1):171-175.

[6] 薛伟辰,郑乔文,杨雨.FRP筋混凝土梁正截面抗弯承载力设计研究[J].工程力学,2009,26(1):79-85.

XUE Wei-chen,ZHENG Qiao-wen,YANG Yu. Design Recommendations on Flexural Capacity of FRP-reinforced Concrete Beams[J]. Engineering Mechanics,2009,26(1):79-85.

[7] BAENA M,TURON A,TORRES L,et al. Experimental Study and Code Predictions of Fibre Reinforced Polymer Reinforced Concrete (FRP RC) Tensile Members[J]. Composite Structures,2011,93(10):2511-2520.

[8] NAWY E G,NEUWERTH G E,PHILLIPS C J. Behavior of Fiber Glass Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of the Structural Division,1971,97(9):2203-2215.