

文章编号:1673-2049(2007)04-0039-06

FRP 网格约束混凝土圆柱的抗震性能

吴 刚^{1,2}, 吴智深^{1,2}, 罗云标¹, 蒋剑彪³

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 城市工程科学国际研究中心, 江苏 南京 210096; 3. 北京特希达科技集团 南京研发中心, 江苏 南京 210018)

摘要:对纤维增强聚合物(FRP)网格约束混凝土圆柱进行了轴压荷载试验;给出了 FRP 网格侧向约束强度和侧向约束刚度计算公式及 FRP 网格约束混凝土圆柱的应力-应变关系模型确定方法。在此基础上,进一步完成了 FRP 网格加固钢筋混凝土圆柱在低周反复荷载作用下的试验,重点探讨了 FRP 网格加固用量及 FRP 网格中纵筋是否锚入柱底座对试件承载力和变形能力的影响。结果表明,FRP 网格约束后混凝土圆柱的强度和延性有明显提高,约束后的应力-应变关系曲线有无软化段主要与 FRP 约束量有关,FRP 网格加固能明显提高钢筋混凝土结构的承载力和延性等抗震性能。

关键词:FRP 网格;约束;抗震性能;混凝土圆柱

中图分类号:TU378.3 **文献标志码:**A

Aseismic Performance of Circular Concrete Columns Confined with FRP Grids

WU Gang^{1,2}, WU Zhi-shen^{1,2}, LUO Yun-biao¹, JIANG Jian-biao³

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. International Research Center of Urban Engineering Science, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Nanjing Research and Design Center, Beijing Texida Technology Group Corporation, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: A series of axial compression load tests of circular concrete columns confined with FRP grids were carried out. The equations for calculating the lateral confinement strength, lateral confinement modulus, as well as the stress and strain relation models of circular concrete columns confined with FRP grids were suggested. Based on this, the circular RC columns strengthened with FRP grids were tested under constant axial load and reversed cyclic lateral load. The parameters including the confinement strength and modulus of FRP which the bearing capacity and deformability of specimens for the anchorage types of FRP grids at the bottom were mainly discussed. The results show that FRP grids can significantly improve the strength and ductility of circular concrete columns. The stress and strain relation curves of circular concrete columns confined with FRP grids may be with strain-softening response or not, which is strongly related to the confinement strength and modulus of FRP. The strengthening of FRP grids can obviously improve the aseismic performance including the capacity and ductility of RC structures.

Key words: fiber reinforced polymer grid; confinement; aseismic performance; circular concrete column

收稿日期:2007-10-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2007CB714200);国家自然科学基金项目(50608015);
青海省科技厅攻关项目(2005G155)

作者简介:吴 刚(1976-),男,浙江东阳人,副教授,工学博士,E-mail:g.wu@seu.edu.cn。

0 引言

钢筋混凝土柱(桥墩)是结构物中重要的受力构件,在地震作用下柱的破坏会导致结构物的倒塌,造成重大的损失。纤维增强聚合物 FRP 片材由于其轻质高强,易施工,非常适合用于抗震加固钢筋混凝土圆柱,各国不少学者对此进行了深入系统的研究^[1-6]。但 FRP 片材在潮湿环境下的结构中使用界面性能很难保证,对水下的桥墩结构也无法进行有效加固,鉴于此,吴智深等开发了 FRP 网格加固水下结构新技术^[7]。为验证该新技术的抗震加固有效性,笔者对 FRP 网格约束混凝土及其抗震性能进行了试验研究。

1 FRP 网格约束混凝土圆柱

1.1 试验方案

混凝土圆柱体尺寸为 150 mm×300 mm,混凝土压缩强度为 25 MPa。FRP 网格为日本新日铁公司提供的 FORCA 网格,网格中每片 FRP 筋截面积为 4.4 mm²,抗拉强度为 1 400 MPa,弹性模量为 100 GPa。对 5 组不同参数的圆柱试件进行轴压试

验,每组 2 个试件,见表 1。黏贴工艺严格按照相关规定进行^[8-9],FRP 网格接头长 100 mm,如图 1 所示。试验在 2 000 kN 压缩试验机上进行,以 10 kN·min⁻¹的加载速度轴向加载直至试件破坏。试件轴向位移由 2 个对称布置的位移计测得。在试件中部分别沿周向和轴向布置应变片用以测量周向应变和轴向应变。荷载、位移及应变等相关数据均由

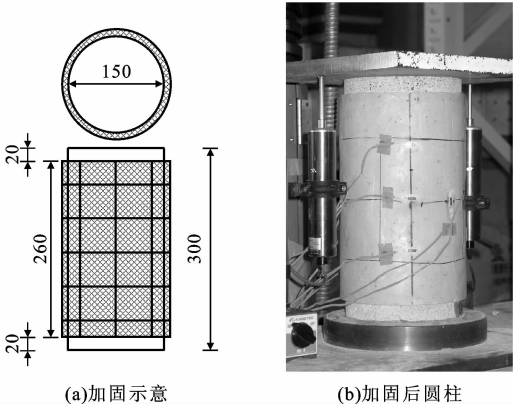


图 1 FRP 网格约束混凝土圆柱(单位:mm)
Fig. 1 FRP Grids Confined Circular Concrete Column(Unit:mm)

表 1 轴压试验结果

Tab. 1 Results of Axial Compression Test

| 试件组 编号 | FRP 网格 型号 | 网格间距/ mm | 试件 个数 | 层数 | $\rho_t/$ (g·mm ⁻²) | 有软化段 | | | | 无软化段 | | 破坏 特征 |
|-----------|--------------|-------------|----------|----|------------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------|
| | | | | | | f_{cp}/MPa | $\epsilon_{cp}/10^{-6}$ | f_u/MPa | $\epsilon_{cu}/10^{-6}$ | f'_{cc}/MPa | $\epsilon_{cc}/10^{-6}$ | |
| 1 | 未加固 | | 2 | 1 | | 25.1 | 3 827 | 21.4 | 4 483 | | | C |
| 2 | CR3-30 | 30 | 2 | 1 | 114 | | | | | 27.8 | 11 341 | R、C |
| 3 | CR3-50 | 50 | 2 | 1 | 68 | 27.4 | 4 567 | 23.3 | 9 675 | | | R、C |
| 4 | CR3-60 | 60 | 2 | 1 | 57 | 26.2 | 3 991 | 22.3 | 9 292 | | | R、C |
| 5 | CR3-30 | 30 | 2 | 2 | 228 | | | | | 37.2 | 14 933 | R、C |

注: ρ_t 为周向纤维面密度; f_{cp} 、 ϵ_{cp} 、 f_u 、 ϵ_{cu} 分别为混凝土应力-应变关系有软化段时的峰值应力、峰值应变、极限应力和极限应变; f'_{cc} 、 ϵ_{cc} 分别为混凝土应力-应变关系无软化段时的极限应力和极限应变;C为混凝土土压破坏;R、C为发生 FRP 网格断裂后混凝土土压破坏。

计算机直接自动采集,并绘制出荷载-位移关系曲线。

1.2 试验结果分析

试件组 1~5 的应力-应变关系曲线见图 2。定义应力下降至最大应力的 85%时为极限点或 FRP 断裂点为极限点。在到达极限点以前,曲线是单调上升的,称为应力-应变关系无软化段(强约束),如试件组 5;曲线在达到峰值后是下降的,称为应力-应变关系有软化段(弱约束),如试件组 2。

由表 1 和图 2 可知:

(1)对无约束混凝土,应力达到峰值后很快下降,延性较差;FRP 网格约束的混凝土,在初始阶段 FRP 发挥的作用有限,应力-应变关系曲线类似于无约束混凝土,但当应力接近无约束混凝土强度时,微

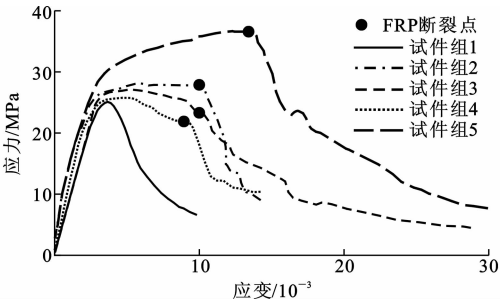


图 2 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress and Strain Curves

裂缝迅速发展,混凝土侧向膨胀明显,此时会产生一较急剧的软化和过渡区域,FRP 约束作用不断被“激活”,FRP 约束力也不断增大,直至 FRP 断裂破

坏。FRP对核芯混凝土的反作用应力使其处于三轴受压状态,故可提高其纵向抗压强度和延性;然而,FRP约束与箍筋及钢管等约束是有区别的,因为后两者在屈服后其约束应力几乎保持不变。

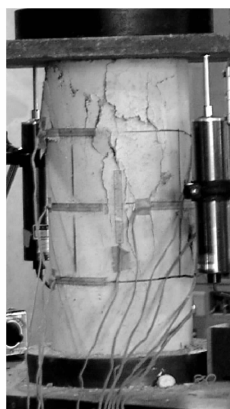
(2)FRP网格约束后混凝土圆柱的强度和延性都得到明显提高,其应力-应变关系曲线可能有下降段,也可能没有下降段,这主要与侧向约束量有关。试件组3和试件组4的FRP约束量比较少,应力-应变关系有明显的软化段;试件组2的约束量较大,应力-应变关系在达到峰值点后表现出较为理想的塑性特性;试件组5的FRP约束量大,应力-应变关系曲线在FRP断裂前均无软化段。

(3)无约束混凝土试件组1的峰值应力为25.1 MPa,峰值应变为 3.827×10^{-3} 。1层CR3-50约束的试件组3的峰值应力为27.4 MPa,比无约束混凝土提高9.2%,峰值应变为 4.567×10^{-3} ,比无约束混凝土提高19.3%。1层CR3-60约束的试件组4的峰值应力为26.2 MPa,比无约束混凝土提高4.4%,峰值应变为 3.991×10^{-3} ,比无约束混凝土提高4.3%。无约束混凝土试件的极限应力和极限应变分别为21.4 MPa和 4.883×10^{-3} ,1层CR3-60约束的试件组4的极限应力和极限应变分别为22.3 MPa和 9.292×10^{-3} ,与未加固圆柱相比分别提高4.2%和90.3%。1层CR3-30约束试件组2的极限应力和极限应变分别为27.8 MPa和 11.341×10^{-3} ,与未加固圆柱相比分别提高30%和132%。2层CR3-30约束的试件组5的极限应力和极限应变分别为37.2 MPa和 14.933×10^{-3} ,与未加固圆柱相比分别提高73.8%和206%。由此可见:与未加固试件组1比较,FRP网格加固的各试件组的峰值应力、峰值应变、极限应力及极限应变等均有明显的增加。对于约束量比较少的试件,约束后曲线有软化段,其峰值应力和极限应力提高有限,但极限应变提高却很明显;对于约束量比较大的试件,约束后曲线无软化段,其最大应力和极限应变提高都非常明显。

(4)试件组1发生混凝土压坏破坏,试件组2~5发生FRP网格断裂后混凝土压坏破坏。试件破坏形状如图3所示。

1.3 FRP网格约束混凝土模型

根据文献[1]~[3]及本文试验,侧向约束刚度和侧向约束强度是影响FRP网格约束混凝土圆柱性能的2个重要参数。由于FRP是线弹性材料,根据力的平衡及应变相容原理,可得FRP网格约束混凝土圆柱的侧向约束刚度和侧向约束强度计算公式



(a)未加固试件



(b)FRP网格加固

图3 试件破坏情况

Fig. 3 Failure Conditions of Specimens

分别为:

侧向约束刚度

$$E_l = \frac{2E_f A_f}{D s_f} \quad (1)$$

侧向约束强度

$$f_l = \frac{2f_f A_f}{D s_f} \quad (2)$$

式中: E_f 、 f_f 分别为FRP的弹性模量和极限抗拉强度; A_f 为FRP网格中每片FRP筋的横截面面积; D 为混凝土圆柱直径; s_f 为各相邻FRP网格筋之间的间距。

在目前FRP网格约束混凝土圆柱试验结果还比较少的情况下,笔者建议选用FRP布约束混凝土圆柱的方法进行计算:①计算FRP网格约束混凝土圆柱的侧向约束强度和侧向约束刚度;②判断FRP网格约束的混凝土应力-应变关系曲线有无软化段,界限值可根据文献[2]选取;③根据判断结果,选用不同公式计算峰值应力、峰值应变、极限应力、极限应变及选用不同的模型来确定其应力-应变关系。各步骤中相关公式及模型可参照文献[1]~[3]。

2 抗震性能分析

2.1 试验概况

该试验共制作了6个钢筋混凝土圆柱,圆柱直径为300 mm,总高度为1450 mm,纵筋为12 Φ 19,屈服强度为400 MPa,配箍量为 Φ 6@80,箍筋屈服强度为350 MPa,见图4(a),混凝土抗压强度为30 MPa。FRP网格型号为CR3-50,FRP网格接头长度为100 mm,黏贴工艺严格按照相关规定进行。

各柱加固方式如表2所示,其中C-Grid-1B、C-Grid-2B试件中的FRP网格纵向FRP筋锚入柱

底座内,如图 4(b)所示,锚入长度为150 mm。

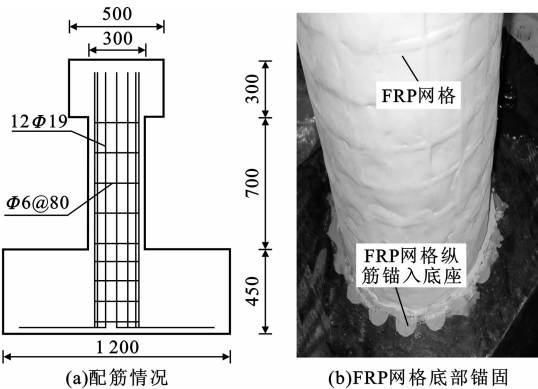


图 4 FRP 网格加固混凝土柱(单位:mm)

Fig. 4 FRP Grids Strengthening Concrete Columns(Unit:mm)

表 2 柱加固方式

Tab. 2 Strengthening Pattern of Columns

| 柱编号 | 加固方式 |
|-----------|--------------------------|
| C-0 | 未加固 |
| C-Grid-1 | 1 层 FRP 网格加固 |
| C-Grid-2 | 2 层 FRP 网格加固 |
| C-Grid-1B | 1 层 FRP 网格,加纵向 FRP 筋锚入底座 |
| C-Grid-2B | 2 层 FRP 网格,加纵向 FRP 筋锚入底座 |

试验时,首先在轴向施加100 kN的荷载并保持恒定,水平向施加低周反复荷载,加载方法按照日本规范方法由柱顶位移控制:第 1 阶段取柱顶位移为 $L/800$ 、 $L/400$ 各循环 1 次;第 2 阶段取柱顶位移为 $L/200$ 、 $L/100$ 、 $L/50$ 、 $L/25$ 、 $L/20$ 各循环 2 次;第 3 阶段一直单向加载至试件破坏,其中 L 为侧向荷载加载点中心离柱底距离,该试验中 L 值为850 mm。测量数据包括荷载、柱顶位移、纵筋、箍筋及 FRP 网格应变值等,均由计算机自动采集。

2.2 试验结果

2.2.1 破坏过程

对于未加固的对比柱 C-0,当荷载增大至 43.7 kN时柱根部出现第1条水平弯曲裂缝;当荷

载增大至63.3 kN时柱身中部出现交叉斜裂缝;随着荷载的增加,旧裂缝不断开展,新裂缝不断出现;当荷载增大至91.5 kN时,最外侧纵向钢筋屈服,在 $L/20$ 第 2 次循环加载时,混凝土大块剥落,钢筋外露,纵筋屈曲,箍筋断裂,侧向承载力迅速下降,试件破坏,图5(a)属于典型的弯剪破坏。

柱 C-Grid-1 采用 1 层 FRP 网格加固,在位移控制值为 $L/100$ 的循环加载时,外侧主筋屈服;在位移控制值为 $L/20$ 的循环加载过程中,间断听到纤维丝断裂的声响;在 $L/20$ 循环结束后进行单向加载过程时,开始阶段承载力继续增大,但在侧向位移达到120 mm时,不断有受压区混凝土压碎脱落,且柱底部纤维发生断裂,承载力持续下降,直至构件破坏,图 5(b)呈现弯曲破坏的特征。

柱 C-Grid-2 破坏过程与柱 C-Grid-1 大致相同,然而,破坏更集中在底部区域,柱身位置 FRP 基本完好,如图 5(c)所示。

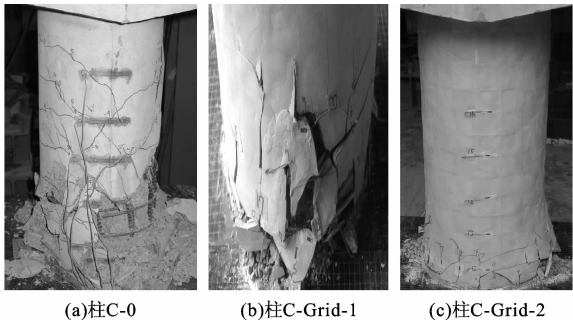


图 5 部分柱破坏情况

Fig. 5 Failure Conditions of Some Columns

2.2.2 承载力及荷载-位移关系曲线

各柱在典型位移时的承载力比较见表 3。各柱的荷载-位移滞回关系曲线见图 6。结合表 3 及图 6,各柱的承载力和荷载-位移滞回特征比较如下:

(1)未加固柱 C-0 的荷载-位移关系曲线见图 6(a)。当侧向位移为 $L/50$ 时,荷载为107 kN;当侧向位移为 $L/20$ 时,荷载为104.7 kN,比侧向位移为

表 3 典型位移时柱的承载力比较及破坏模式

Tab. 3 Comparisons of Bearing Capacity at Typical Displacement and Failure Modes of Columns

| 柱编号 | 荷载/kN | | | | | | | 破坏特征及模式 |
|-----------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|------------|----------------------------|
| | 柱顶侧向位移为 $L/50$ | | | 柱顶侧向位移为 $L/20$ | | | 侧向位移为90 mm | |
| | 正向 | 反向 | 平均 | 正向 | 反向 | 平均 | 正向 | |
| C-0 | 107.2 | 106.7 | 107.0 | 115.2 | 94.1 | 104.7 | 破坏 | 钢筋屈服,箍筋断裂,混凝土脱落,弯剪破坏 |
| C-Grid-1 | 106.7 | 125.1 | 116.0 | 128.1 | 133.1 | 130.6 | 138.2 | 钢筋屈服,横向 FRP 断裂,混凝土脱落,弯曲破坏 |
| C-Grid-2 | 115.0 | 110.5 | 112.8 | 136.2 | 121.6 | 128.9 | 168.8 | 钢筋屈服,纵横向 FRP 断裂,混凝土脱落,弯曲破坏 |
| C-Grid-1B | 122.5 | 122.4 | 122.5 | 131.8 | 134.6 | 133.2 | 165.0 | 钢筋屈服,横向 FRP 断裂,混凝土脱落,弯曲破坏 |
| C-Grid-2B | 132.5 | 130.3 | 131.4 | 142.2 | 136.7 | 139.5 | 175.4 | 钢筋屈服,纵横向 FRP 断裂,混凝土脱落,弯曲破坏 |

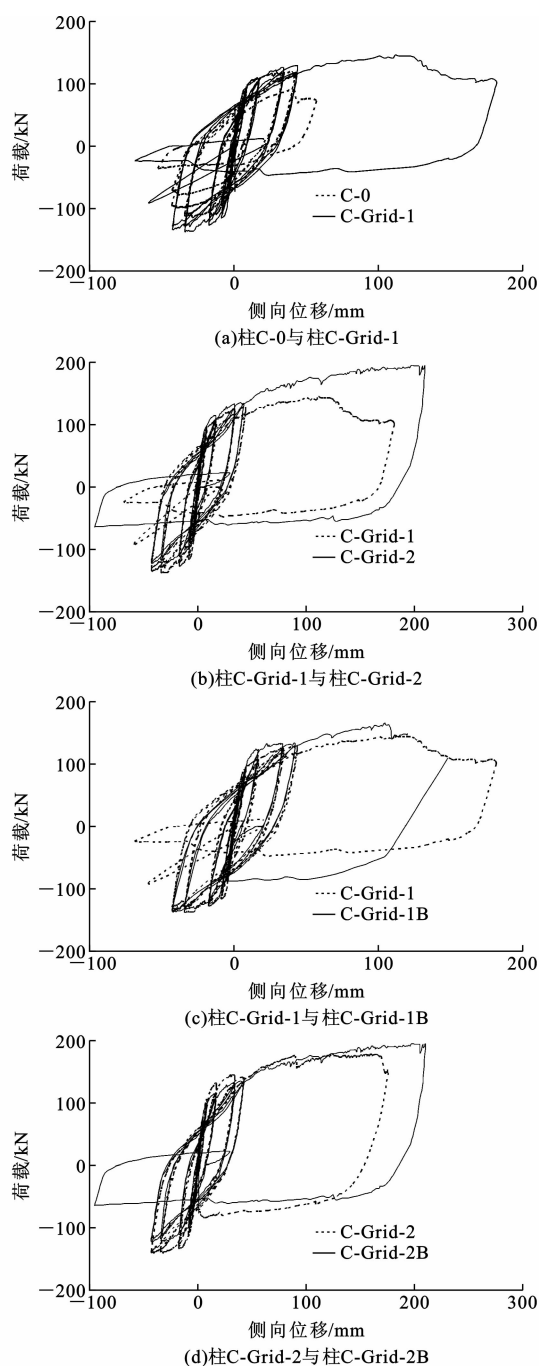


图6 柱荷载-位移关系曲线比较

Fig. 6 Comparison of Load and Displacement Relation Curves of Columns

$L/50$ 时荷载有所下降,表明此时柱损伤已经比较严重;荷载-位移关系曲线也表明,在侧向位移为 $L/20$ 第2次循环时柱已经破坏。1层FRP网格加固柱C-Grid-1的荷载-位移关系曲线见图6(a)。当侧向位移为 $L/20$ 时,荷载为130.6 kN,比未加固柱C-0提高25.9%,FRP网格发挥了较大的作用;当侧向位移为90 mm时,荷载为138.2 kN,而此时对应的未加固柱C-0早已破坏,由此可见,FRP网格约束

加固混凝土柱作用明显。随着加载的继续,当侧向位移为150.2 mm时,FRP断裂,试件承载力开始下降,并逐渐破坏。

(2)2层FRP网格加固柱C-Grid-2的荷载-位移关系曲线见图6(b)。当侧向位移为 $L/20$ 时,荷载为128.9 kN,比未加固柱C-0提高23.1%;当侧向位移为90 mm时,荷载为168.8 kN,此时FRP的作用极为明显;随着加载的继续,当侧向位移为208.3 mm时,FRP断裂,试件承载力突然大幅度下降,试件破坏,停止加载。

图6(b)为柱C-Grid-1、C-Grid-2的荷载-位移关系曲线比较。当侧向位移为 $L/20$ 时,柱C-Grid-1、C-Grid-2荷载分别为130.6、128.9 kN,荷载相差不大,甚至柱C-Grid-2荷载还略低,说明此时FRP发挥的作用还很小;当侧向位移为90 mm时,柱C-Grid-1、C-Grid-2荷载分别为138.2、168.8 kN,后者是前者的1.22倍,说明此时FRP发挥了较大的作用,两柱承载力之间的差别也逐渐明显;当侧向位移为123.6 mm时,柱C-Grid-1的FRP开始断裂,试件承载力逐渐降低,而柱C-Grid-2由于FRP加固量更大,能继续加载,直至最大荷载为189.2 kN、最大位移为213 mm时,FRP断裂,试件破坏。

图6(c)为柱C-Grid-1、C-Grid-1B的荷载-位移关系曲线。当侧向位移为 $L/20$ 时,柱C-Grid-1、C-Grid-1B荷载分别为130.6、133.2 kN,相差不大,说明此时FRP发挥的作用还很小;当侧向位移为90 mm时,柱C-Grid-1、C-Grid-1B荷载分别为138.2、165.0 kN,后者是前者的1.2倍,说明此时FRP发挥了较大的作用,而且由于锚入底部的FRP筋所起的抗拉作用,柱C-Grid-1B的承载力更大。随着加载的继续,当侧向位移达到149.2 mm时,C-Grid-1B锚入柱底的FRP筋超过其极限拉伸应变而断裂,断裂后最大承载力降低至接近柱C-Grid-1的值。

图6(d)为柱C-Grid-2、C-Grid-2B的荷载-位移关系曲线。由图6(d)可以看出:在纵向FRP筋断裂前的相同侧移下,锚入柱底的FRP筋对柱的抗弯承载力的提高有较大作用。

综上所述可知:①FRP网格环向加固能显著提高试件的抗震性能;②随着FRP加固用量的增加,柱的破坏形态从未加固时延性较差的弯剪破坏逐渐过渡到延性很好的弯曲破坏;③FRP网格用量的增加与承载力及延性的增加不成线性关系,特别是加固量大到一定程度后,加固柱的承载力和延性提高

幅度是有限度的;④FRP 网格加固时,纵向加强筋锚入底部能够有效增大所加固柱的承载力和延性,在该试验中由于是对圆柱加固,故布置在受拉区的 FRP 纵筋数量有限,若对矩形柱加固,则能在受拉区一侧锚固的 FRP 纵筋数量较多,提高作用会更加明显。

2.2.3 FRP 应变滞回曲线

图 7 为离柱底 50 mm 处 FRP 网格应变随侧向位移的变化情况。在初始阶段,FRP 发挥作用很小,随着侧向位移的增大,FRP 发挥的作用也逐渐增大,在极限阶段,FRP 应变能够达到 9.000×10^{-3} ,根据日本新日铁公司提供的数据计算得到 FRP 单向拉伸极限应变约为 14.000×10^{-3} ,故实际 FRP 有效应变约为单向极限拉伸应变的 64%。

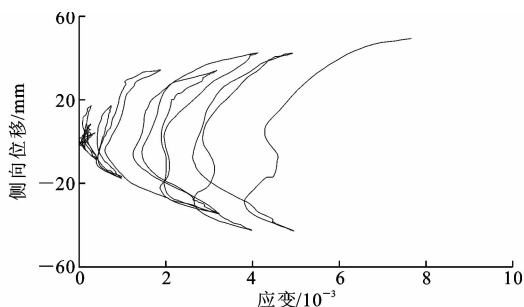


图 7 柱侧向位移与 FRP 应变关系

Fig. 7 Relationship Between Lateral Displacement of Column and FRP Strain

3 结 语

FRP 网格约束能显著提高圆柱的强度和延性,FRP 网格约束后的应力-应变关系有无软化段主要与其侧向约束强度有关,目前可参考 FRP 布约束混凝土圆柱的相关公式来确定 FRP 网格约束混凝土的应力-应变关系模型。FRP 网格中的纵向 FRP 筋锚入柱底可进一步提高加固柱的承载力,综合考虑 FRP 材料耐腐蚀、质量轻以及独特的施工工艺等优点,FRP 网格用于潮湿环境和水下混凝土结构的抗震加固有独特优势。

参考文献:

References:

- [1] 吴 刚,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(5):1-9.
- WU Gang, LU Zhi-tao. Study on the Stress-strain Re-

lationship of FRP-confined Concrete Circular Column Without a Strain-softening Response [J]. Journal of Building Structures,2003,24(5):1-9.

- [2] 吴 刚,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱有软化段时的应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报,2006,39(11):7-14.
- WU Gang, LU Zhi-tao. Study on the Stress-strain Relationship of FRP-confined Concrete Circular Column with a Strain-softening Response[J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(11):7-14.
- [3] WU G, LU Z T, WU Z S. Strength and Ductility of Concrete Cylinders Confined with FRP Composites[J]. Construction and Building Materials,2006,20(3):134-148.
- [4] TENG J G, CHEN J F. FRP: Strengthened RC Structures[M]. New York: John Wiley & Sons,2002.
- [5] 袁旭斌,贺拴海,宋一凡. 粘贴纤维布加固 RC 梁的受弯裂缝计算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(3):54-58.
- YUAN Xu-bin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Calculation Method on Bending Crack in RC Beams Strengthened with FRP [J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(3):54-58.
- [6] 孙晓燕,黄承逵. 外贴纤维布加固超载后钢筋混凝土桥梁构件抗弯性能试验[J]. 中国公路学报,2006,19(4):82-87.
- SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui. Test on Flexural Performance of RC Bridge Member After Overload Reinforced with Externally Bonded FRP[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(4):82-87.
- [7] 吴智深. FRP 粘贴结构加固中的几个关键问题和技术[J]. 建筑结构,2007,37(增 1):208-214.
- WU Zhi-shen. Some Key Issues and Techniques in Strengthening Structure with Bonded FRP Composites [J]. Building Structure,2007,37(S1):208-214.
- [8] 岳清瑞,曹 锐. 纤维网格在建筑物结构加固改造中的应用[C]//岳清瑞. 中国第二届纤维增强塑料混凝土结构学术交流会会议论文集. 北京:清华大学出版社,2002:355-361.
- YUE Qing-rui, CAO Rui. Application of FRP Grids in Strengthening Buildings[C]//YUE Qing-rui. Proceedings of the 2nd National Conference on Application of FRP in Civil Engineering. Beijing: Tsinghua University Press,2002:355-361.
- [9] H14. 3. Seismic Design Specifications of Highway Bridges: Seismic Design, Explanation[S].