

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.006

碳纤维约束与箍筋约束混凝土轴压性能对比

惠宽堂, 王 南, 史庆轩

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘 要: 针对箍筋约束与碳纤维约束混凝土轴心受压力学性能, 基于大量的轴心受压试验数据, 分析了约束混凝土轴心受压力学性能的主要影响因素, 分别建立了箍筋约束与碳纤维约束混凝土轴心受压时的峰值应力、峰值应变和极限应变的计算公式; 对比分析结果表明, 箍筋约束混凝土优势在于低特征值段, 碳纤维约束混凝土的性能在高特征值时将超过箍筋约束混凝土。

关键词: 约束混凝土; 轴压性能; 配箍特征值; 含纤特征值

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)04-0032-06

Contrast Analysis of Mechanical Behavior of Confined Concrete with Stirrups and CFRP Under Axial Compression

Xi Kuantang, Wang Nan, Shi Qingxuan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Aiming at confined concrete with stirrups and carbon fiber reinforced plastic(CFRP) respectively, the major influence factors of mechanical behavior of confined concrete under axial compression were studied based on reported experimental data. The equations for calculating the peak stress, peak strain and ultimate strain were proposed respectively for confined concrete with stirrups and CFRP. Contrastive analysis shows that the behavior of confined concrete with stirrups is better than confined concrete with CFRP in low characteristic value, whereas the conclusion is contrary in high characteristic value.

Key words: confined concrete; axial compression; stirrups characteristic value; CFRP characteristic value

采用约束材料对混凝土施加约束可以有效提高混凝土强度和变形能力, 提高构件的延性, 改善其抗震性能。箍筋约束与碳纤维(CFRP)约束混凝土是工程中常见的 2 种形式, 各国学者已对其轴心受压力学性能进行了大量试验研究。研究表明, 不同约束形式对混凝土的约束效果各不相同, 文献[1]对箍筋约束混凝土的受力机理进行了研究, 提出了考虑箍筋约束效应的方法, 文献[2, 4, 5-7]根据轴心受压试验结果分别建议了箍筋约束与碳纤维约束混凝土本构模型, 文献[8]根据约束效果的不同, 提出了 FRP 约束混凝土分为强、弱约束的判别方法。目前, 已有研究大多针对二者各自的轴压性能, 没有将

2 种材料对混凝土的约束效果进行对比分析。笔者在大量试验数据基础上, 通过理论分析对比了箍筋约束与碳纤维约束混凝土的轴心受压力学性能, 并评价了 2 种材料对混凝土的约束效果。

1 箍筋约束与碳纤维约束的不同特点

1.1 材料材性

碳纤维是一种脆性材料, 弹性模量与钢材相差不多; 但其抗拉强度较高, 一般约为普通强度箍筋的 5~8 倍。由于二者材料自身特性和构造方式的差异, 造成箍筋约束与碳纤维约束混凝土的力学性能和约束效果各有其特点。

收稿日期: 2012-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178380); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20116012011004)

作者简介: 惠宽堂(1962-), 男, 副教授, 主要从事钢结构稳定与抗震研究, (E-mail) xasxzg@163.com.

1.2 约束混凝土受力性能和机理

箍筋配置在混凝土内部,可为单个箍筋,也可为各种形式的复合箍筋,除保护层混凝土不受约束外,箍筋所包围的混凝土均受有不同程度的约束。碳纤维一般将混凝土包裹在内,包裹可以为单层或多层的连续包裹,也可为每隔一定间距包裹,包裹内的混凝土均受有不同程度的约束。图1为箍筋约束与碳纤维约束混凝土轴心受压应力-应变关系的曲线^[2,4-5,9],由图可知,约束能明显改善混凝土的受力性能,特别是应力-应变曲线峰值点后的性能,且随约束水平的提高下降段变得平缓;当约束水平很高时,曲线还会表现出一定的硬化现象。

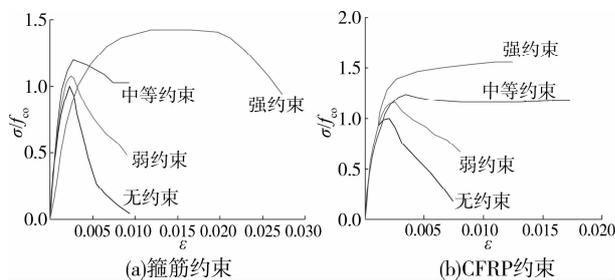


图1 约束混凝土应力-应变曲线

箍筋与碳纤维约束混凝土的受力机理类似^[1],由于拱效应(图2)的存在,截面可分为弱约束区和强约束区2部分。约束效果与箍筋形式、间距、配箍率以及CFRP的包裹形式、层数、用量等有关。由于箍筋较碳纤维片材刚度大,沿横截面箍筋的约束效果高于条带碳纤维约束;全包碳纤维的试件沿纵向不存在弱约束区。

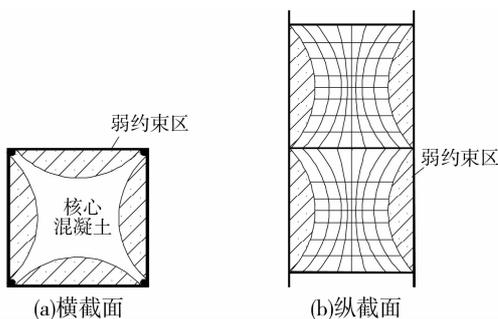


图2 约束混凝土的拱效应

2 约束混凝土轴心受压力学性能的主要影响因素

试验数据取自各国箍筋和碳纤维约束混凝土轴心受压的试验研究数据^[2-20],试件数量共计126个,其中箍筋约束混凝土试件90个,碳纤维约束混凝土试件36个,所选的试验数据不包括有预加轴力和部分参数不明确的试件。箍筋约束混凝土的主要影响

因素包括箍筋强度、箍筋体积配箍率和混凝土强度。文献[2,9,11,13]试件的参数考虑了上述3种因素的影响,箍筋形式包括矩形箍、菱形箍、井字箍、八角箍。文献[3-4,16-18]试件考虑了箍筋体积配箍率、箍筋形式的影响,箍筋形式包括矩形箍、菱形箍、井字箍、十字箍、八角箍。混凝土强度等级的范围为C20~C80,箍筋屈服强度的范围为231~770 MPa;箍筋体积配箍率的范围为0.88%~5.53%;配箍特征值的范围为0.0219~1.264。碳纤维约束混凝土的主要影响因素包括纤维强度、体积含纤率和混凝土强度。所有文献的试件均考虑了体积含纤率的影响,文献[6-7,10]试件包裹方式为全包,其他文献中含有条带包裹的形式;文献[8]试件考虑了不同混凝土强度的影响。混凝土强度等级的范围为C20~C80,CFRP抗拉强度的范围为1800~4810 MPa,弹性模量的范围为220~241 GPa,体积含纤率的范围为0.11%~1.45%,含纤特征值的范围为0.052~1.038。

2.1 体积配箍率和含纤率

约束材料的用量对约束混凝土的力学性能有重要影响,笔者采用体积配箍率 ρ_v 和体积含纤率 ρ_f 来表征材料用量的大小。图3为不同体积配箍率和含纤率对约束混凝土应力-应变曲线的影响^[3-4,5,10]。文献[3-4]所用试件的混凝土强度等级分别为C80和C50,考虑了体积配箍率和箍筋形式的影响;文献[5,10]试件的混凝土强度等级分别为C30和C20,主要变化参数为纤维用量。由图3可见,无论采用箍筋还是碳纤维作为约束材料,增加约束材料用量能够较好的改善约束混凝土的强度和变形性能。随着体积含箍(纤)率的增加,应力-应变曲线后期软化趋势得到明显改善,特别是对碳纤维约束混凝土,随含纤率的增加,约束效果更明显。

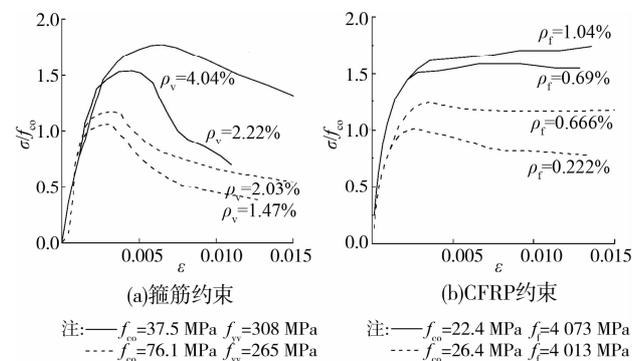


图3 体积配箍率和含纤率对应力-应变曲线的影响

2.2 约束材料强度

图4为不同材料强度对箍筋(碳纤维)约束混凝土应力-应变曲线的影响^[2,5-7,11-12]。文献[11]试件的

混凝土强度等级为 C80, 考虑了箍筋强度和箍筋形式的影响; 文献[5-7, 12]中的试件具有相近的混凝土强度和纤维用量, 可比较不同纤维强度的影响。由图 4 可知, 增加箍筋或碳纤维约束材料的强度能在一定程度上改善约束混凝土的受力性能, 但提高效果不及增加材料用量明显。实际上, 高强度材料优势的发挥依赖于材料用量的大小, 在保证合理的体积配箍率或含纤率的前提下, 提高材料强度会有有效的提高约束混凝土的力学性能。

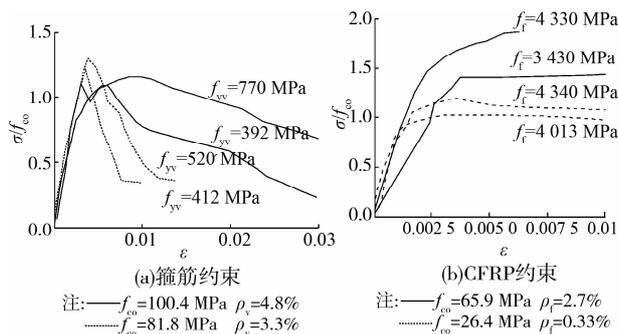


图 4 约束材料强度对应力-应变曲线的影响

3.3 混凝土强度

图 5 为不同混凝土强度对箍筋(碳纤维)约束混凝土应力-应变曲线的影响^[8-9, 13-15]。文献[9, 13]试件箍筋的强度分别为 245、445 MPa, 考虑了箍筋用量和混凝土强度的影响; 文献[8, 14-15]试件碳纤维的强度分别为 4 030、1 800 MPa, 纤维用量和混凝土强度为主要参数。由图 5 可知, 随着混凝土等级的提高, 约束效果变弱, 约束混凝土的强度和延性均有所降低。实际应用中对于强度等级较高的混凝土, 必须同时增大材料用量和约束材料强度, 才能保证达到理想的约束效果。

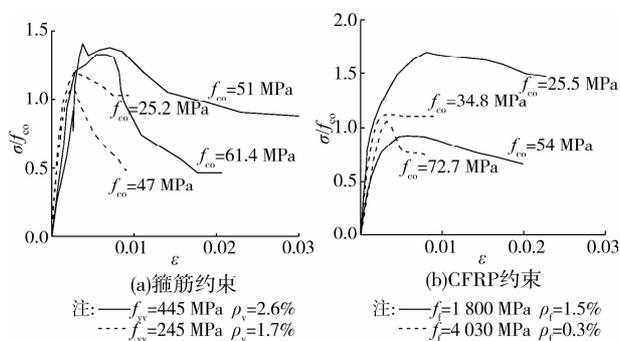


图 5 混凝土强度对应力-应变曲线的影响

上述分析表明, 箍筋和碳纤维用量、强度和混凝土强度等均对约束混凝土的受力性能有较大的影响。为反映上述 3 个因素对于约束混凝土的综合影响, 对箍筋约束混凝土, 通常采用配箍特征值 $\lambda_v =$

$\rho_v f_{yv} / f_c$ 来体现约束混凝土的受力性能。图 6 为不同配箍特征值下约束混凝土应力-应变曲线^[5, 9], 可见在箍筋直径和强度不变的情况下, 随着配箍特征值的提高, 约束混凝土的强度和变形都有相应的提高。为便于比较, 对于碳纤维约束混凝土, 引入一个与配箍特征值相类似的无量纲量参量——含纤特征值 λ_f , 用以反映碳纤维的用量、强度和混凝土强度的影响。由图 6 可知, 增大含纤特征值 λ_f 能明显改善纤维约束混凝土的受力性能。

$$\lambda_f = \rho_f f'_{cfs} / f_{cu} \quad (1)$$

式中: f'_{cfs} 为碳纤维的折减抗拉强度, 考虑到约束混凝土在达到极限强度时, 实测碳纤维的应变仅为其极限应变的 2/3 左右, 故取 $f'_{cfs} = \frac{2}{3} f_t$, 将实际抗拉强度进行折减; ρ_f 为碳纤维的体积含纤率; f_{cu} 为混凝土的立方体抗压强度。

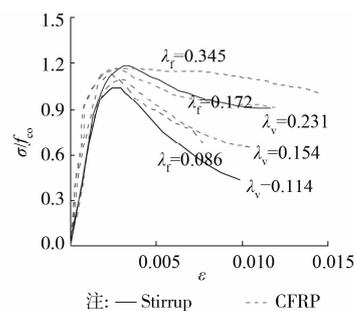


图 6 配箍或含纤特征值对应力-应变曲线的影响

3 约束混凝土的强度和变形计算

3.1 抗压强度

大量试验表明, 约束混凝土的峰值应力与配箍特征值或含纤特征值密切相关。因此, 采用最小二乘法原理, 对现有试验数据进行回归分析, 分别建立了箍筋与碳纤维约束混凝土抗压强度(即峰值应力)的计算公式。

箍筋约束混凝土:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 0.77\lambda_v^{0.6} \quad (2)$$

碳纤维约束混凝土:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 0.89\lambda_f^{0.95} \quad (3)$$

式中: f_{cc} 为约束混凝土的抗压强度; f_{co} 为无约束混凝土的抗压强度。

按式(2)和式(3)计算的约束混凝土峰值应力计算值与试验值的对比如图 7(a)所示, 计算值与试验值之比的均值分别为 1.02 和 1.04, 变异系数分别为 0.01 和 0.05。按文献[19, 21]提出的公式计算

的约束混凝土峰值应力计算值与试验值的对比如图7(b)所示,计算值与试验值之比的均值分别为1.07和0.99,变异系数分别为0.02和0.05。由此可知,笔者计算结果与文献[19,21]相差不多。

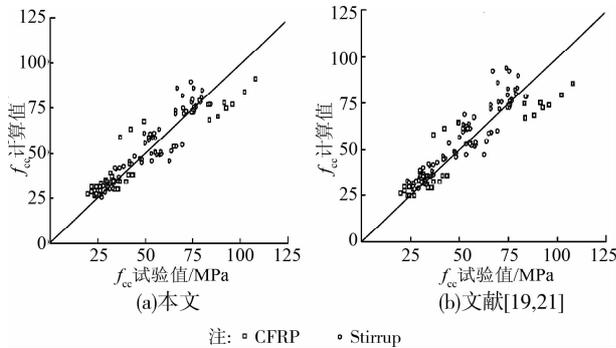


图7 抗压强度计算值与试验值的对比

3.2 峰值应变和极限应变

试验研究表明,对混凝土施加横向约束可以有效提高混凝土变形能力。随着特征值的增大,与抗压强度对应的峰值应变呈非线性提高,且约束混凝土峰值应变随着特征值的增加趋势较强度增加更为明显。通过试验数据的回归分析,分别建立了约束混凝土峰值应变与 λ_v 、 λ_f 之间的关系。

箍筋约束混凝土:

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + 7.59\lambda_v^{1.1} \quad (4)$$

碳纤维约束混凝土:

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + 8.66\lambda_f^{1.65} \quad (5)$$

式中: ϵ_{cc} 为与约束混凝土抗压强度对应的峰值应变; ϵ_{co} 为无约束混凝土的峰值应变。

图8(a)为按式(4)和式(5)计算的约束混凝土峰值应变计算值与试验值的对比。计算值与试验值之比的均值分别为1.02和1.06,变异系数分别为0.15和0.14。图8(b)为按文献[19,21]提出的公式计算的约束混凝土峰值应变计算值与试验值的对比。计算值与试验值之比的均值分别为0.97和0.73,变异系数分别为0.11和0.08。由此可知,笔者峰值应变计算值与试验值更为接近,文献[19]计算的纤维约束混凝土的峰值应变结果偏低。

针对实际中约束混凝土的应力-应变关系多存在软化现象,文中的极限应变是指应力下降到85%峰值应力时对应的应变。极限应变是衡量约束混凝土延性的重要指标,约束混凝土的极限应变随着特征值的增大而提高。通过对试验数据的回归分析,分别建立了箍筋约束与碳纤维约束混凝土极限应变的计算公式。

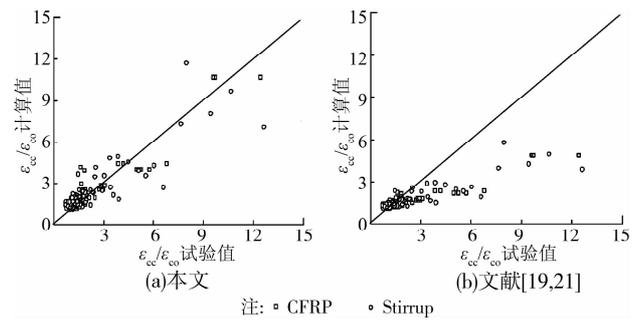


图8 峰值应变计算值与试验值的对比

箍筋约束混凝土:

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cuo}} = 1 + 9.9\lambda_v^{1.39} \quad (6)$$

碳纤维约束混凝土:

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cuo}} = 1 + 10\lambda_f^{1.45} \quad (7)$$

式中: ϵ_{cuo} 为无约束混凝土的极限应变。

图9(a)为按式(6)和式(7)计算的约束混凝土极限应变计算值与试验值的对比,计算值与试验值之比的均值分别为1.05和1.03,变异系数分别为0.22和0.17。按文献[19,21]提出的公式计算的约束混凝土极限应变计算值与试验值的对比如图9(b)所示,计算值与试验值之比的均值分别为0.86和1.03,变异系数分别为0.27和0.29。由此可知,笔者极限应变计算值接近于试验值,文献[21]计算的箍筋约束混凝土的峰值应变结果偏低。

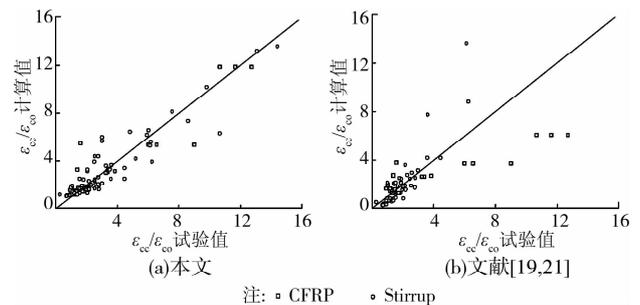


图9 极限应变计算值与试验值的对比

4 约束效果的对比分析

按箍筋屈服强度计算的配箍特征值与按碳纤维的折减抗拉强度计算的含纤特征值,两者都是无量纲量且在物理意义上是一致的。因此,可以特征值为参数对箍筋约束与碳纤维约束混凝土的受力性能进行对比分析。

4.1 强度提高效果

图10为箍筋约束与碳纤维约束混凝土强度的对比曲线。由图可知,特征值在0~0.661范围内,

箍筋对混凝土的约束效果稍好于碳纤维约束;当特征值 >0.661 时,碳纤维对混凝土的约束效果明显优于箍筋约束。

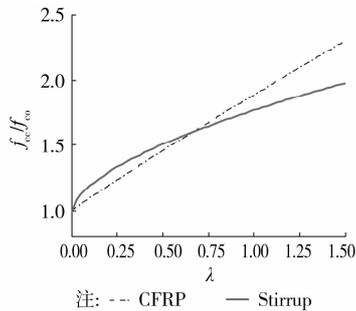


图 10 约束混凝土强度的对比

4.2 变形性能提高效果

图 11 为箍筋约束与碳纤维约束混凝土变形性能的对比曲线。由图可见,对峰值应变来说,当特征值小于 0.755 时,箍筋约束混凝土峰值应变提高值优于碳纤维约束混凝土,当特征值大于 0.755 时,纤维约束混凝土峰值应变提高效果明显超过箍筋约束混凝土。对极限应变来说,箍筋约束与碳纤维约束混凝土的约束效果二者基本相当。

通过上述对比分析可知,当特征值较低时,箍筋约束混凝土的力学性能稍高于碳纤维约束混凝土,当特征值较高时,碳纤维的约束效果明显优于箍筋约束混凝土。原因在于碳纤维抗拉强度较高,在低特征值范围内纤维用量与箍筋相差较多,影响了约束效应的发挥;在高特征值时,纤维用量提高,其约束效应得到充分发挥。

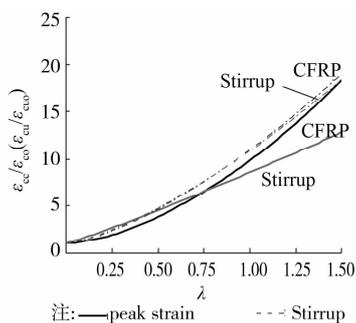


图 11 约束混凝土变形的对比

5 结 语

1) 箍筋约束和碳纤维布约束的应力-应变曲线有较多相似的方面,但由于材料特性和构造方式的差异,二者具有不同受力变形特点。

2) 箍筋约束混凝土和碳纤维约束混凝土都能很好的提高轴心受压混凝土方柱强度和变形能力,并

且强度和变形能力随着配箍特征值和含纤特征值的提高而提高。

3) 建立了箍筋约束混凝土和碳纤维约束混凝土峰值应力、峰值应变及极限应变的计算公式,公式简便、易用,可用于混凝土结构的计算分析。

4) 低特征值时箍筋约束混凝土的力学性能高于碳纤维约束混凝土,特征值增加到较高值时,碳纤维的约束效果超过箍筋约束混凝土。

参考文献:

- [1] Saatcioglu M, Razvi S R. Strength and ductility of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 118(6): 1590-1607.
- [2] Cusson D, Paultre P. High strength concrete columns confined by rectangular ties [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(3): 783-804.
- [3] 关萍,王清湘,赵国藩. 高强约束混凝土应力-应变关系的试验研究 [J]. 工业建筑, 1997, 27(11): 26-29.
Guan P, Wang Q X, Zhao G F. Study on the tests of stress strain relationship of confined high strength concrete [J]. Industrial Construction, 1997, 27(11): 26-29.
- [4] 钱稼茹,程丽荣,周梁栋. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能 [J]. 清华大学学报, 2002, 4(10): 1369-1373.
Qian J R, Cheng L R, Zhou L D. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops [J]. Journal of Tsinghua University, 2002, 42(10): 1369-1373.
- [5] 李静,钱稼茹,蒋剑彪. CFRP 约束混凝土应力-应变全曲线研究 [C]// 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料 (FRP) 应用技术学术交流会论文, 昆明, 2002: 157-162.
- [6] 刘磊. 碳纤维布约束高强混凝土柱轴压性能计算研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2006.
- [7] 郭瑞峰. 碳纤维约束钢筋混凝土圆柱及方柱本构模型 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 魏洋,吴刚,吴智深,等. FRP 约束混凝土矩形柱有软化段时的应力-应变关系研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 21-28.
Wei Y, Wu G, Wu Z S, et al. Study on the stress strain relationship for insufficient FRP confined rectangular concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 21-28.
- [9] 胡海涛,叶知满. 复合箍筋约束高强混凝土应力应变性能 [J]. 工业建筑, 1997, 27(10): 23-28.
Hu H T, Ye Z M. Stress strain behavior of high strength concrete confined by overlapping hoops [J].

- Industrial Construction, 1997, 27(10): 23-28.
- [10] 李玉鹏, 顾祥林, 张伟, 等. 碳纤维约束混凝土方柱的轴心受压性能[J]. 结构工程师, 2006, 22(4): 60-65.
Li Y P, Gu X L, Zhang W, et al. Axial compression performance of concrete prisms confined by carbon fiber composite sheets [J]. Structural Engineers, 2006, 22(4): 60-65.
- [11] Umesh K, Harma S, Pradeep B, et al. Behavior of confined high strength concrete columns under axial compression [J]. Journal of Advance Concrete Technology, 2005, 3(2): 267-281.
- [12] 王震宇, 李洪鹏. 重复荷载作用下碳纤维约束混凝土加卸载准则[J]. 建筑结构, 2009, 39(7): 100-103.
Wang Z Y, Li H P. Loading and unloading criteria of FRP confined concrete under cyclic compression [J]. Building Structures, 2009, 39(7): 100-103.
- [13] Bing L, Park R, Tanaka H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high and normal-strength transverse reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 395-406.
- [14] 赵彤, 谢剑, 戴志强. 碳纤维布约束混凝土应力应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 40-43.
Zhao T, Xie J, Dai Z Q. Experimental study on stress-strain relationship of CFRP confined concrete [J]. Building Structures, 2000, 30(7): 40-43.
- [15] 赵彤, 谢剑, 刘明国, 等. 碳纤维布改善高强混凝土性能的研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(3): 42-44.
Zhao T, Xie J, Liu M G. Research on new method of improving properties of high strength concrete by using continuous carbon fiber sheet [J]. Industrial Construction, 2001, 31(3): 42-44.
- [16] 林大炎, 王传志. 矩形箍筋约束的混凝土应力-应变全曲线性能研究[R]. 清华大学抗震抗爆工程研究室科学研究报告集. 北京: 清华大学出版社, 1980: 19-37.
- [17] 支运芳, 牛绍仁, 张义琢. 箍筋约束高强混凝土短柱受力性能的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(2): 53-60.
Zhi Y F, Niu S R, Zhang Y Z. Experimental research on mechanical behavior of high-strength concrete short columns confined with stirrups [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(2): 53-60.
- [18] 李立仁, 余瑜, 陈永庆. 不同配箍方式的轴压高强混凝土短柱承载力及延性试验研究[J]. 施工技术, 2005, 34(Sup): 54-57.
Li L R, Yu Y, Chen Y Q. Study on bearing capacity of short column and ductility of high-strength concrete constrained with axial load [J]. Construction Technology, 2005, 34(Sup): 54-57.
- [19] 刘明学. 碳纤维布提高剪力墙延性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [20] 王苏岩, 韩克双, 王吉忠, 等. CFRP 约束高强混凝土方柱应力-应变关系分析模型[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(2): 257-261.
Wang S Y, Han K S, Wang J Z. Analytic models for high-strength concrete square columns confined by carbon fiber reinforced polymer [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition, 2006, 22(2): 257-261.
- [21] 齐虎, 李云贵, 吕西林. 箍筋约束混凝土的单轴力学性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(1): 79-82.
Qi H, Li Y G, Lyu X L. Study of uniaxial mechanical behavior of concrete confined with hoops [J]. Building Structure, 2011, 41(1): 79-82.

(编辑 胡英奎)