

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.05.015

预应力 FRP 筋增强 RC 梁受弯破坏模式研究

朱虹^{a,b}, 张继文^a

(东南大学 a. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室 b. 城市工程科学技术研究院, 南京 210096)

摘要:针对同时配有非预应力钢筋和有粘结预应力 FRP 筋的混凝土梁的受弯性能,分别以 CFRP 和 AFRP 作为预应力筋,研究对应于钢筋屈服和对应于 FRP 筋断裂的 2 类界限相对受压区高度大小关系的变化,进而研究 FRP 筋性能指标对受弯破坏模式的影响。研究表明,破坏模式与 2 类界限相对受压区高度大小直接相关,而 2 类界限相对受压区高度的大小又受 FRP 筋性能指标的直接影响,采用 FRP 筋短期性能指标和采用考虑了环境折减系数、徐变断裂折减系数、松弛提高系数和材料系数后的 FRP 筋长期性能设计值分别进行计算,结果存在着较大差异。4 种破坏模式中,破坏模式 I 为设计预期的正常破坏模式,破坏模式 II、III 和 IV 应在设计时予以避免。极限延伸率相对较小的 CFRP 筋的张拉控制应力不宜过高,否则会在长期使用过程中先于结构中钢筋屈服发生断裂。

关键词:FRP 筋;预应力;受弯破坏模式

中图分类号:TU389.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)05-0097-05

Analysis of Flexural Failure Mode of RC Beams Reinforced with Prestressed FRP Bars

ZHU Hong^{a,b}, ZHANG Jiwen^a

(a. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures, Ministry of Education;

b. International Institute for Urban Systems Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: The flexural performance of the beams reinforced with both non-prestressed bars and prestressed bonded FRP bars was theoretically analyzed. Both the CFRP bar and the AFRP bar were taken as the representatives in the study. Correlativity of two kinds of balanced relative depth of compressive area, respectively corresponding to the yield of steel bar and to the rupture of FRP bar, was investigated. Therefore the influence of performance parameters of FRP on the flexural failure modes was analyzed. The results indicate that failure modes and two kinds of balanced relative depth of compressive area are with direct correlation, and the latter is directly influenced by the performance of the FRP bars. Adopting the short-term performance parameters or the long-term performance parameters, which considers the environmental factor, creep fracture factor, relaxation factor and materials coefficient, would have different results. Failure mode I is the ideal one, while the others should be avoided. Prestressed control stress of CFRP bars with low-ductility should not be too high, otherwise the rupture of CFRP bars will happen before the yield of steel bars.

Key words: FRP bar; prestressing; flexural failure mode

收稿日期:2012-03-20

基金项目:国家自然科学基金(50908045);江苏省自然科学基金创新学者攀登项目(BK2010015)

作者简介:朱虹(1975-),女,副教授,博士,主要从事 FRP 在土木工程中的应用、结构加固改造与修复研究,(E-mail) seuzhuhong@gmail.com。

由于 FRP 筋(Fiber Reinforced Polymer Bar, 简称 FRP Bar)的弹性模量通常偏低^[1-4],因此 FRP 筋混凝土受弯构件的设计一般由正常使用极限状态下的变形控制,此时 FRP 筋中应力还很小。对 FRP 筋施加预应力,不但可使结构构件设计从由变形控制转变为由承载力控制,而且充分发挥了 FRP 的高强特性。此外将 FRP 用作预应力筋,代替恶劣环境中易发生应力腐蚀的高强钢丝或钢绞线^[1,5],可以提高结构的耐久性能。

然而,预应力 FRP 筋不仅仅是高强钢丝或钢绞线的一种简单的替代。由于 FRP 具有破坏前无塑性这一与钢材显著不同的特征,因此有粘结预应力 FRP 筋增强的钢筋混凝土梁(RC 梁)与有粘结预应力高强钢丝/钢绞线增强 RC 梁在受力性能上存在着许多差别^[6-7]。

关于有粘结预应力 FRP 筋增强 RC 梁的受弯破坏模式及抗弯设计方法的研究已有不少^[8-10],但很少定量分析 FRP 性能设计指标取值大小带来的受弯破坏模式的不确定性。笔者重点针对同时配有非预应力钢筋和有粘结预应力 FRP 筋增强的混凝土梁,分别以性能稳定的 Leadline 筋(一种典型的碳纤维复合筋)和 FiBRA 筋(一种典型的芳纶纤维复合筋)作为预应力筋,研究对应于钢筋屈服和对应于 FRP 筋断裂的两类界限相对受压区高度大小关系的变化,进而研究 FRP 筋性能指标对受弯破坏模式的影响。

1 基本假定及材料的本构关系

对于同时配有非预应力钢筋和有粘结预应力 FRP 筋的混凝土梁,有如下基本假定:

1) 截面应变保持平面,包括混凝土、钢筋及预应力 FRP 筋的应变,预应力筋与混凝土间完全粘结。

2) 受拉区混凝土的作用忽略不计。

3) 混凝土、钢筋的应力-应变关系按照《混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)》选取。

4) 根据笔者研究可知,FRP 筋应力-应变关系初期存在非线性段(图 1),这与单向纤维片材完全线弹性的特征有少许差异。非线性主要源于螺纹形筋材或发辫形筋材受荷初期的几何非线性,因而不同工艺的 FRP 筋初期非线性也不相同。但由于 FRP 筋用作预应力筋时,张拉阶段基本消除了初期的非线性,因而计算中预应力 FRP 筋的弹性模量仍可取定值 E_{fp} 。

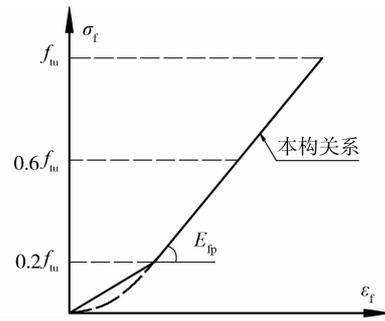


图 1 FRP 筋的应力应变关系曲线

2 预应力 FRP 筋增强 RC 梁受弯破坏特征

2.1 4 种破坏模式

根据梁破坏时混凝土、钢筋和 FRP 筋的状态不同,有粘结预应力 FRP 筋增强 RC 梁有如下 4 种可能的破坏模式:

1) 破坏模式 I:非预应力钢筋首先屈服,然后受压区混凝土压碎,预应力 FRP 筋未断裂($\epsilon_s > \epsilon_y$, $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, $\epsilon_{fp} < \epsilon_{fu}$)。

发生这一模式的破坏时,由于非预应力钢筋已经屈服,构件的裂缝和挠度很快增加,给人以明显的破坏预兆,为“适筋破坏”。

2)破坏模式 II:混凝土压碎,非预应力钢筋未屈服,预应力 FRP 筋未断裂($\epsilon_c = \epsilon_{cu}$, $\epsilon_s < \epsilon_y$, $\epsilon_{fp} < \epsilon_{fu}$)。

发生这一模式的破坏时,钢筋未屈服,破坏无预兆,为“超筋破坏”。在设计中应通过限制条件予以避免。

3)破坏模式 III:非预应力钢筋屈服,然后预应力 FRP 筋断裂,混凝土未压碎($\epsilon_s > \epsilon_y$, $\epsilon_{fp} = \epsilon_{fu}$, $\epsilon_c < \epsilon_{cu}$)。

这种破坏模式与配筋率(包括 FRP 筋)偏小有关,可能在 FRP 筋断裂后继而发生少筋破坏,延性较差。

4)破坏模式 IV:预应力 FRP 筋先断裂,然后非预应力钢筋屈服或未屈服,最后混凝土压碎($\epsilon_{fp} = \epsilon_{fu}$, $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ 或 $\epsilon_s < \epsilon_y$, $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$)。

FRP 筋的有效预应力过高时将导致这一破坏模式的发生。

4 种破坏模式中,破坏模式 I 为设计预期的正常破坏模式,破坏模式 II、III 和 IV 应在设计时予以避免。

2.2 2 类界限相对受压区高度

按照基本假定,截面应变保持平面。对应于钢

筋屈服同时受压区边缘混凝土压碎、预应力FRP筋断裂同时受压区边缘混凝土压碎的2类界限破坏的界限相对受压区高度分别如下:

1) 非预应力钢筋屈服,同时受压区边缘混凝土压碎的界限破坏如式(1)。

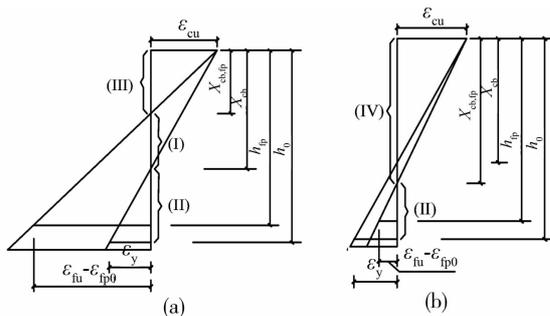
$$x_{cb} = \xi_{cb} h_0 = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + f_y/E_s} h_0 \quad (1)$$

2) 预应力FRP筋断裂,同时受压区边缘混凝土压碎的界限破坏如式(2)。

$$x_{cb,fp} = \xi_{cb,fp} h_{fp} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + (f_{fu} - \sigma_{fp0})/E_{fp}} h_{fp} \quad (2)$$

式中: ξ_{cb} 和 $\xi_{cb,fp}$ 分别为相应的界限相对受压区高度; ϵ_{cu} 为混凝土的极限应变,取 0.0033; f_y 和 E_s 分别为钢筋的屈服强度和弹性模量; f_{fu} 和 σ_{fp0} 分别为FRP筋的极限抗拉强度设计值和预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力FRP筋应力; E_{fp} 为FRP筋的弹性模量; h_0 和 h_{fp} 分别为钢筋的有效高度和FRP筋的有效高度。

2类界限相对受压区高度之间的关系受到预应力大小的影响。当预应力相对较小而FRP筋的极限延伸率相对较高时,界限相对受压区高度 $x_{cb,fp}$ 小于 x_{cb} (如图2(a)),FRP筋断裂发生在钢筋屈服之后;当预应力较大而FRP筋的极限延伸率又较低时,界限相对受压区高度 $x_{cb,fp}$ 大于 x_{cb} (如图2(b)),FRP筋断裂发生在钢筋屈服之前。



注:括号中的I、II、III、IV代表4种破坏模式

图2 2类界限相对受压区高度

3 FRP筋性能指标取值对受弯破坏模式的影响

无论是CFRP筋、AFRP筋还是GFRP筋,极限强度、弹性模量均在一个较大的范围内变化,因而FRP筋的2类界限相对受压区高度的关系是不确定的。下面选择国际上常用的、已商业化生产的Leadline和FiBRA分别作为碳纤维复合筋(Carbon Fiber Reinforced Polymer Bar,简称CFRP筋)和芳纶纤维复合筋(Aramid Fiber Reinforced Polymer Bar,简称AFRP筋)的代表进行分析。

从式(2)可知, f_{fu} 、 σ_{fp0} 和 E_{fp} 是影响 $\xi_{cb,fp}$ 的主要因素。而FRP筋的短期性能和长期性能差异较大,直接影响到 f_{fu} 的具体取值。笔者采用FRP筋短期性能指标(表1)和采用考虑了环境折减系数、徐变断裂折减系数、松弛提高系数和材料系数后的FRP筋长期性能指标(表2)进行计算对比分析。

表1 短期指标

FRP筋型号	f_{fuk} / MPa	$f_{fu} = f_{fuk} / \sigma_{con,max}$ / MPa	$\sigma_{fp0,max}$ / MPa	弹性模量 / GPa
Leadline	2 300	2 300	1 725	160
FiBRA	1 400	1 400	1 050	84

表1中, f_{fuk} 为短期极限抗拉强度; $\sigma_{con,max}$ 为张拉控制应力上限值,采用与钢绞线相同的数值 $0.75 f_{fuk}$; $\sigma_{fp0,max}$ 为最大张拉控制应力时预应力筋合力点处混凝土法向应力等于0时的预应力钢筋应力,考虑短期预应力损失,近似取 $0.9 \sigma_{con,max}$ 。FiBRA的弹性模量取稳定值 $84 \text{ GPa}^{[7]}$ 。

然而,FRP筋的长期性能与短期性能有较大不同,通常需要考虑环境折减系数 C_E 、徐变断裂折减系数 C_c 、松弛提高系数 C_r 和FRP筋材料系数 γ_{mf} 。虽然国际上对不同FRP的这些系数取值不一样^[1, 11-12],但总体规律是基本一致的,此处分别选择Leadline的环境折减系数 C_E 为 0.85、FiBRA的 C_E 为 0.85 和 0.45 (恶劣环境下,FiBRA劣化较Leadline严重许多)的3种情况进行分析,其它系数取值如表2所示。

表2 长期指标设计值

FRP筋型号	系数				极限强度/MPa			$\sigma_{con,max}$ / MPa	$\sigma_{fp0,max}$ / MPa	弹性模量 / GPa
	C_E	C_c	C_r	γ_{mf}	f_{fuk}	$f_{fuk,l}$	f_{fu}			
Leadline	0.85	0.8	1.05	1.3	2 300	1 955	1 500	1 642	1 314	160
FiBRA	0.85	0.6	1.15	1.3	1 400	1 190	915	821	534	84
FiBRA	0.45	0.6	1.15	1.3	1 400	630	485	435	283	84

表 2 中: $f_{fuk,1}$ 为长期极限抗拉强度标准值, 等于 $C_E f_{fuk}$; f_{fu} 为长期极限抗拉强度设计值, 等于 $f_{fuk,1}/\gamma_{mf}$; $\sigma_{con,max}$ 为张拉控制应力上限值, 其具体数值的确定与 FRP 筋的徐变断裂特性密切相关, 此外, 考虑到 FRP 筋在应力作用下发生松弛损失后应力有所降低, 张拉控制应力可作适当提高^[1], 因此在 $f_{fuk,1}$ 的基础上考虑徐变断裂折减系数和松弛提高系数, 即 $C_E C_C C_r f_{fuk}$ 。综合考虑锚固损失、孔道摩擦损失和应力松弛等损失, Leadline 筋和 FiBRA 筋的 $\sigma_{fp0,max}$ 分别取 $0.8 \sigma_{con,max}$ 、 $0.65 \sigma_{con,max}$ 来进行计算。

图 3 反映了 σ_{fp0} 从 0 增加至 $\sigma_{fp0,max}$ 的过程中 $\xi_{cb,fp}$ 和 ξ_{cb} 之间的相对关系。为了便于比较, 忽略 h_0 和 h_{fp} 的差别, 认为 $\xi_{cb,fp}$ 和 ξ_{cb} 的相互关系就代表了 $x_{cb,fp}$ 和 x_{cb} 之间的关系。虽然当梁高度较小, h_0 和 h_{fp} 差别较大, 两者是有所区别的。

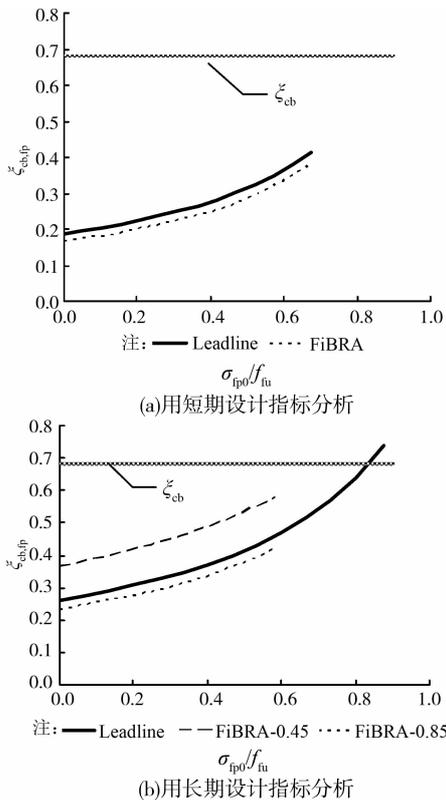


图 3 $\xi_{cb,fp}$ 随 σ_{fp0}/f_{iu} 的变化规律

从图 3(a) 可见, $\xi_{cb,fp}$ 始终小于 ξ_{cb} , 表明 Leadline 筋和 FiBRA 筋断裂均在钢筋屈服后发生, 此时截面的应变关系如图 2(a) 所示。当 σ_{fp0} 比较小时, $\xi_{cb,fp}$ 也比较小, $\xi_{cb,fp}$ 与 ξ_{cb} 之间的距离较大。随着 σ_{fp0} 的增大, $\xi_{cb,fp}$ 与 ξ_{cb} 慢慢接近。

用长期设计指标分析, Leadline 筋和 FiBRA 筋的 $\xi_{cb,fp}$ 随 σ_{fp0}/f_{iu} 变化如图 3(b) 所示。Leadline 筋的曲线 $\xi_{cb,fp}$ 和直线 ξ_{cb} 有交点, 表明 Leadline 筋的断

裂可能发生于钢筋屈服后(图 2(a)), 也可能是 FRP 筋断裂发生于钢筋屈服前(图 2(b)); 而 FiBRA 筋的 $\xi_{cb,fp}$ 始终都在 ξ_{cb} 之下, 曲线与水平线间还具有一定的距离, 表明发生 FiBRA 筋断裂先于钢筋屈服的模式 IV 破坏的概率较小。

从上述分析可知, 预应力 FRP 筋增强 RC 梁受弯破坏模式受到 FRP 筋性能指标尤其是强度指标的直接影 响, 而强度指标与各系数取值密切相关。在基于概率的设计体系中, 各系数的概率统计参数对构件和结构的可靠度均产生影响, 因此需要大样本空间来确定其数值。目前, 对于短期强度标准值, 美国规范取保证率为 99.87%^[1], 在中国规范中, 一般采用与混凝土等材料相同的保证率, 即 95%。而在长期性能指标的研究方面, 国际上陆续开展了一些, 但系数取值还很不统一。因此, 开展大样本的长期性能试验(研究蠕变、疲劳性能)和耐久性试验(研究腐蚀性环境下、潮湿环境下、高温环境下等性能退化规律), 建立数据库, 根据概率分布确定相关系数的概率统计参数, 进而根据结构目标可靠度指标来确定相关系数的取值, 是今后 FRP 在土木工程领域中应用研究的核心工作。

4 结 论

从同时配有非预应力钢筋和有粘结预应力 FRP 筋混凝土梁的 2 类界限相对受压区高度的关系出发, 研究了有粘结预应力 FRP 筋增强 RC 梁的常见破坏模式, 得出结论如下:

1) 同时配有非预应力钢筋和有粘结预应力 FRP 筋的混凝土梁的受弯破坏有 4 种模式, 破坏模式与两类界限相对受压区高度大小关系直接相关, 而后者则受 FRP 筋性能指标的直接影 响。破坏模式 I 为设计预期的正常破坏模式, 破坏模式 II、III 和 IV 应在设计时予以避免。

2) 高强度高弹性模量的 CFRP 筋在张拉预应力阶段伸长值相对较小因而利于张拉, 后期应力增量 大因而预应力效果明显, 但由于极限延伸率相对较小, 因此 CFRP 筋的张拉控制应力不宜过高, 否则会在长期使用过程中于结构中钢筋断裂前发生 断 裂, 这一点在设计中应进行充分考虑。

参考文献:

- [1] Reported by ACI Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars [M]. ACI440.1R-03. Copyright © 2003.

- [2] Wu G, Wu Z S, Luo Y B, et al. Mechanical properties of steel-FRP composite bar under uniaxial and cyclic tensile loads [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2010, 22(10): 1056-1066.
- [3] 张普, 朱虹, 孟少平, 等. FRP增强钢筋混凝土梁刚度计算[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(4): 87-94.
ZHANG Pu, ZHU Hong, MENG Shaoping, et al. Calculation of sectional stiffness and deflection of FRP sheets strengthened reinforced concrete beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(4): 87-94.
- [4] Thomas K. Multifunctional and robust composite material structures for sustainable construction [C]// CICE 2010-The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, September, Beijing, China.
- [5] Wang X, Wu Z S. Evaluation of FRP and hybrid FRP cables for super long-span cable-stayed bridges [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(10): 2582-2590.
- [6] 朱虹, 钱洋. 工程结构用FRP筋的力学性能[J]. *建筑科学与工程学报*, 2006, 23(3): 26-31.
ZHU Hong, QIAN Yang. Mechanics performance of FRP tendons used in engineering structure [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2006, 23(3): 26-31.
- [7] 朱虹. 新型FRP筋预应力混凝土结构的研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [8] 薛伟辰. 新型FRP筋预应力混凝土梁试验研究与有限元分析[J]. *铁道学报*, 2003, 25(5): 103-108.
XUE Weichen. Experimental studies and FEM analysis of concrete beams prestressed with new-type FRP rebars [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2003, 25(5): 103-108.
- [9] 杜修力, 王作虎, 詹界东, 等. 有黏结预应力FRP筋混凝土梁的抗弯设计[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(7): 915-920.
DU Xiuli, WANG Zuohu, ZHAN Jiedong, et al. Flexural design of prestressed concrete beams with bonded FRP tendons [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(7): 915-920.
- [10] Zhang J W, Ge W J, Dai H, et al. Study on the flexural capacity of concrete beam hybrid reinforced with FRP bars and steel bars [C]// CICE 2010-The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, September, Beijing, China.
- [11] Wu Z S, Wang X, Iwashita K, et al. Tensile fatigue behavior of FRP and hybrid FRP sheets [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(5): 396-402.
- [12] Zhu H, Lyu Z T, Zhang J W. Experimental study on relaxation performance of AFRP tendons [M]. *ISISS 2005-the 1st International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering*, Nov. 20-22, Nanjing, China, 2005.

(编辑 王秀玲)