

CFRP 布加固钢筋混凝土梁可靠性分析

高仲学^a, 杨 威^b

(东南大学 a. 建筑设计研究院; b. 交通学院, 南京 210018)

摘要:进行了 CFRP 布抗拉强度单向拉伸试验, 对其概率分布进行了统计分析。试验结果表明, CFRP 布的单向抗拉强度符合三参数 Weibull 分布。建立了 CFRP 布加固钢筋混凝土梁受弯承载力计算公式, 应用 Monte Carlo 方法对 CFRP 加固钢筋混凝土梁的抗力进行了模拟。在得到抗力的统计参数以后, 采用 JC 法对可靠指标进行了计算。计算结果表明, 当 CFRP 布分项系数为 1.25 时, 所有设计点的可靠指标在整体上与目标可靠指标最为接近, 3 种受弯破坏模式的可靠指标均值均大于目标可靠指标, 满足可靠度设计的要求。

关键词:CFRP 布; 材料性能; 统计; 材料分项系数; 可靠指标

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)06-0036-08

Reliability Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets

GAO Zhong-xue^a, YANG Wei^b

(a. Architectural Design and Research Institute; b. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210018, P. R. China)

Abstract: The uniaxial load tests were conducted to investigate the material behavior of CFRP sheets. The results show that the probability distribution of CFRP tensile strength can be described by the three-parameter Weibull distribution. The design formulae for determining flexural capacity of reinforced concrete strengthened with CFRP sheet are proposed. The Monte Carlo procedure was applied to simulate the flexural capacity of reinforced concrete strengthened with CFRP sheet. By using the JC method, the reliability index was calculated based on the statistics of flexural capacity and load effect. After the analysis of the effect of the partial factor of CFRP sheet on the reliability index, the results reveal that the reliability index of all design points are the most close to target reliability index overall when the partial factor of CFRP sheet is 1.25, and in this condition the reliability index of three flexural failure modes achieve the target reliability index respectively. Therefore, the partial factor is suggested to be 1.25, which meets the requirement of reliability design.

Key words: CFRP sheet; material behavior; statistics; material partial factor; reliability index

CFRP 布以其简便、快速、高效、高强和耐久性好等特点, 在混凝土结构加固中的应用日益普及^[1-2]。近年来, 国内外出版了一些有关 FRP 片材加固混凝土构件的设计规范和指南^[3-9]。然而, 现有的设计指南或规范中 FRP 材料分项(强度)折减系数并没有依据可靠度的方法确定其合理的取值范

围, 因而有必要采用统计分析方法, 应用可靠度理论确定设计公式中 CFRP 布的材料分项系数。

Plevris 等早在 1995 年就对 CFRP 加固钢筋混凝土梁的可靠度进行了分析, 建议了 2 套强度折减系数和材料折减系数^[10]。Okeil 等人考虑了二阶段受力特点, 分析了 CFRP 加固受损桥梁可靠度^[11]。

收稿日期:2011-04-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078079); 住房和城乡建设部科技开发项目(2008-K4-16); 江苏省科技交通项目(07Y015)

作者简介:高仲学(1973-), 男, 博士, 主要从事混凝土结构的减灾防灾研究, (E-mail)gaozhongxue@126.com。

其后, Monti 和 Santini 给出了 FRP 片材加固混凝土梁可靠度通用设计方法^[12]。中国学者对 FRP 加固混凝土构件或 FRP 筋混凝土梁可靠性分析相对滞后,但是近年来开展了一系列研究,其中比较有代表性的是孙晓燕、何政、黄春永、杜斌等的研究工作^[13-17]。

该文首先进行了 CFRP 布单向拉伸试验,对其力学性能进行了统计分析,然后推导了 CFRP 布加固钢筋混凝土梁抗弯承载力计算公式。在此基础上,采用 JC 法和 Monte Carlo 法对 CFRP 布加固钢筋混凝土梁受弯构件进行了可靠性分析,确定了设计公式中 CFRP 布的材料分项系数。

1 材料性能试验

1.1 试件简介

试验选用 HITEX-C30-CFRP 布进行单向 CFRP

片材的强度和变形性能研究。一组为 CFRP 布采用手糊法制作的德国进口 Fisher 胶浸渍的片材试件,共 20 个试样,编号为 HITEX-C30-CFRP-F;另一组为 HITEX-C30-CFRP 干布,共 5 个试样,编号为 HITEX-C30-CFRP-D,表 1 为试件设计表。试件制作参照规范《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法(GB 3354—1999)》进行^[18],并根据试验条件和纤维片材中每股纤维束的实际宽度确定试样的形状和尺寸,如图 1 所示。

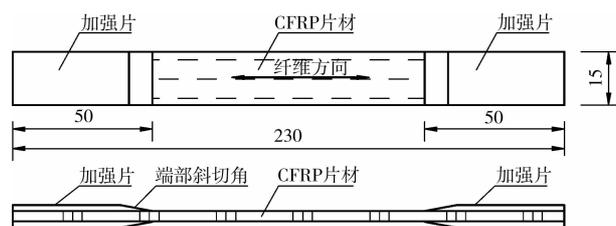


图 1 CFRP 布试件

表 1 CFRP 布试件设计和试验结果

试件编号	试样面积/mm ²	最大荷载/N	拉伸强度/MPa	弹性模量/MPa	断裂延伸率/%	破坏形态
手糊湿布						
HITEX-C30-CFRP-F1	2.458	8 756	3 562	218 017	1.634	断裂
HITEX-C30-CFRP-F2	2.452	8 604	3 509	229 196	1.531	断裂
HITEX-C30-CFRP-F3	2.338	8 307	3 553	204 900	1.734	断裂
HITEX-C30-CFRP-F4	2.590	8 907	3 439	208 042	1.653	断裂
HITEX-C30-CFRP-F5	2.428	8 219	3 385	197 507	1.714	断裂
HITEX-C30-CFRP-F6	2.522	8 908	3 532	220 215	1.604	断裂
HITEX-C30-CFRP-F7	2.438	8 431	3 458	264 393	1.308	断裂
HITEX-C30-CFRP-F8	2.675	9 693	3 624	209 581	1.729	断裂
HITEX-C30-CFRP-F9	2.483	9 331	3 758	276 537	1.359	断裂
HITEX-C30-CFRP-F10	2.514	9 579	3 810	276 496	1.378	断裂
HITEX-C30-CFRP-F11	2.634	9 193	3 490	212 806	1.640	断裂
HITEX-C30-CFRP-F12	2.508	8 895	3 547	234 258	1.514	断裂
HITEX-C30-CFRP-F13	2.489	8 789	3 531	213 228	1.656	断裂
HITEX-C30-CFRP-F14	2.395	8 753	3 655	218 591	1.672	断裂
HITEX-C30-CFRP-F15	2.537	9 093	3 584	216 052	1.659	断裂
HITEX-C30-CFRP-F16	2.438	9 184	3 767	230 399	1.635	断裂
HITEX-C30-CFRP-F17	2.505	9 178	3 664	238 837	1.534	断裂
HITEX-C30-CFRP-F18	2.605	9 137	3 508	203 811	1.721	断裂
HITEX-C30-CFRP-F19	2.413	8 599	3 564	252 735	1.410	断裂
HITEX-C30-CFRP-F20	2.608	8 950	3 432	219 572	1.563	断裂
平均值			3 480.5	258 893	1.566	
标准差			157.253	12 544.7	0.130	
标准值			3 207.78	233 803	1.305	
干布						
HITEX-C30-CFRP-D1	2.67	3 801.13	1 422.58	247 485	1.95	断裂
HITEX-C30-CFRP-D2	2.57	3 710.55	1 442.78	193 688	1.49	断裂
HITEX-C30-CFRP-D3	2.49	3 900.0	1 567.34	223 956	1.47	断裂
HITEX-C30-CFRP-D4	2.52	3 751.57	1 487.71	246 551	1.76	断裂
HITEX-C30-CFRP-D5	2.54	4 414.72	1 739.17	231 231	1.68	断裂
平均值			1 531.916	228 582.2	1.67	
标准差			128.514	21 944.34	0.199	
标准值			1 274.889	184 693.5	1.27	

1.2 试件的制作

1) 在平整桌面上铺放一块玻璃或者镜子,再铺放一层塑料薄膜,以避免浸渍树脂与玻璃粘结。为了确保制作出来的试样非常平整,可以在玻璃与塑料薄膜之间洒上少量水以粘在一起,并注意排出气泡;

2) 在塑料薄膜表面上涂刷一层浸渍树脂,并将裁剪好的 CFRP 布平整地摆放在塑料薄膜上,注意保持 CFRP 布中纤维束非常平直,然后在 CFRP 布上涂刷一层浸渍树脂;

3) 用罗拉滚压 CFRP 布表面,使浸渍树脂完全浸入纤维片材中,然后用塑料刮板刮出多余的树脂;

4) 将浸渍完毕的 CFRP 片材放置于室内自然环境中进行固化 1 d 后用裁纸刀按照规定尺寸裁出 CFRP 片条,再放在室内自然环境下固化 5~7 d;

5) 将加强用的铝片做成与试样相同的宽度,用粘结剂粘贴在 CFRP 片材试样两端的正反面上,并加压置放于室内使之牢固粘结,试样制作完毕。

成型后的试样形状如图 2 所示。

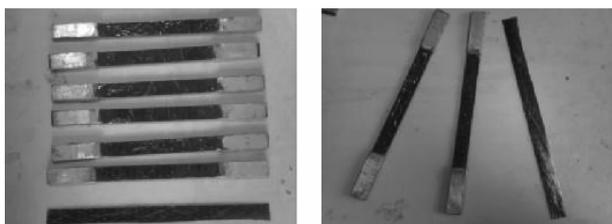


图 2 CFRP 布成型试件

1.3 试验方法

试验在瑞格尔 30 kN 微机控制电子万能试验机上按照《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法(GB/T 3354—1999)》中的有关规定进行^[18],并根据加强片夹持的需要采用改进后的专用夹头,确保试验过程中片材均匀受力,以 2 mm/min 的变形控制试样加载速率,连续加载,直至试件被拉断破坏。试验装置如图 3 所示。



图 3 实验装置

试验中主要测试内容有纤维片材的荷载(应力)-变形(应变)关系曲线、断裂荷载和断裂变形。

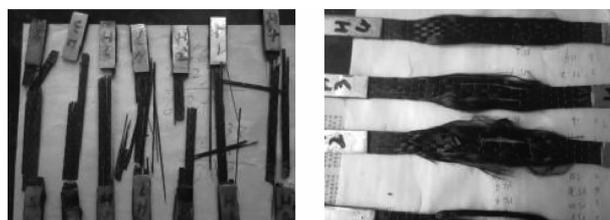
试验中注意观察试件破坏现象和破坏形态。使用引伸计测量 CFRP 片材在标段长度内的变形量,传感器监测荷载。整个试验过程中,所有数据均通过计算机自动数据采集系统采集记录。

2 试验结果

2.1 破坏形态

对于 HITEX-C30-CFRP-F 片材,加载过程中,片材在外观上没有任何异样或破坏的迹象,荷载位移曲线呈线性;接近极限荷载时出现间断而细微的“吱吱”响声,是由两端加强片处涂抹的粘结树脂拉裂或者 FRP 片材内部丝束之间的浸渍树脂出现细微拉裂引起。达到极限荷载时突然发出“嘭”的一声,声响较大,纤维脆性断裂成几部分,断裂形式多为整束纤维断裂,如图 4(a)所示。

对于 HITEX-C30-CFRP-D 布,加载过程中几乎没有发出任何声响。达到极限荷载时,突然发出“嘣”的一声,声响较小,且比较低沉。破坏后,试件没有断裂,而是在试件中点附近形成棉花状的一团,用手拉动试件两端仍然不能将其拉断,如图 4(b)所示。



(a) HITEX-C30-CFRP-F 片材 (b) HITEX-C30-CFRP-D 布

图 4 破坏形态

2.2 试验结果分析

CFRP 片材与 CFRP 干布单向拉伸应力-应变曲线如图 5 所示。拉伸强度、弹性模量及断裂伸长率如表 1 所示。从中可以看出,CFRP 片材单向拉伸应力-应变曲线呈线性,在断裂前可以认为 CFRP 片材是一种线弹性材料。同组 CFRP 片材的应力-应变曲线较为一致,弹性模量与极限强度差值较小。

CFRP 干布的基本力学性能较 CFRP 片材大幅度下降,其极限抗拉强度约为片材极限强度的 50%,而弹性模量均值基本不变,标准值有一定下降,这主要是因为干布测试结果离散性较大。由此看出,只有当 CFRP 布通过浸渍树脂,将各束束丝横向连接成整体形成片材,才能更好的保证 CFRP 各束丝共同工作,使得的 CFRP 材料高强度的特点得以显现。

2.3 CFRP 布抗拉强度分布函数拟合

Weibull 三参数概率密度函数为:

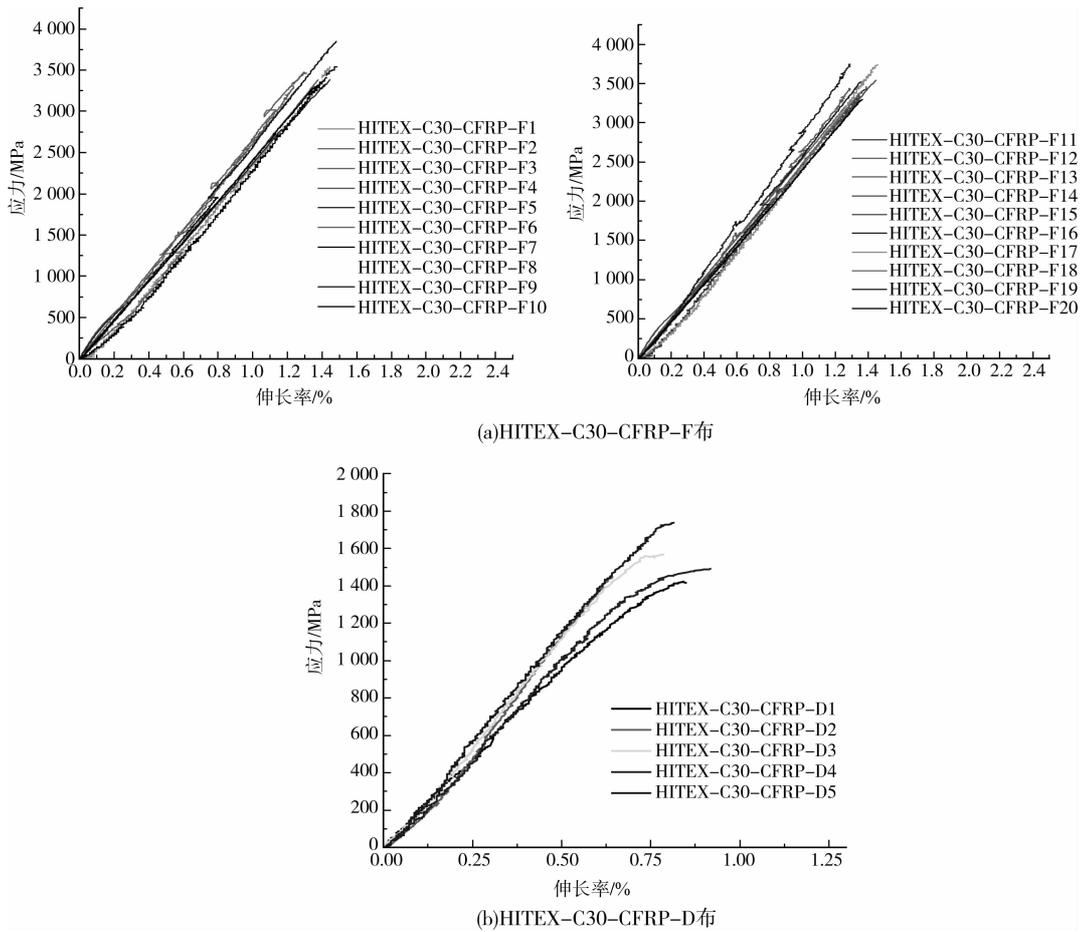


图 5 应力-应变关系曲线

$$f(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0^m} \sigma^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中, σ 为任意随机变量, σ_0 为 Weibull 分布的尺度参数, m 为形状参数, 又通称为 Weibull 模数。

图 6 给出了按三参数 Weibull 分布计算的概率密度曲线与试验值的比较。图 7 给出了二参数 Weibull 分布及三参数 Weibull 分布的概率分布与试验值的比较。从图中可以看出 CFRP 布的抗拉强度用三参数 Weibull 分布拟合效果较好。

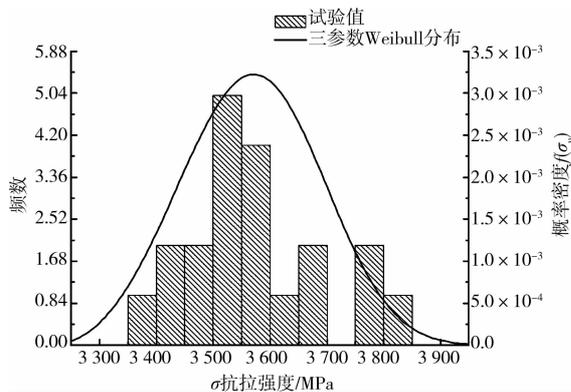


图 6 三参数 Weibull 分布概率密度曲线与试验值的比较

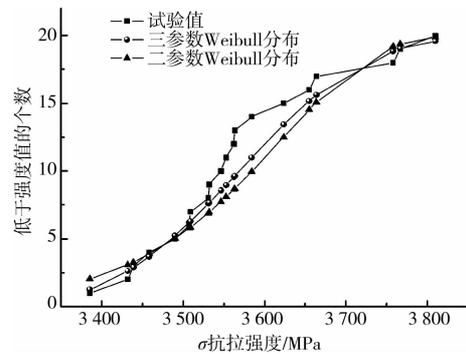


图 7 二参数 Weibull 分布及三参数 Weibull 分布的概率分布与试验值的比较

3 基于可靠度的 CFRP 布材料分项系数确定

3.1 抗弯承载力计算

假定在达到受弯承载力极限状态前, 加固材料与混凝土材料之间不致出现粘结剥离破坏, 则受弯破坏模式有 3 种: 1) 钢筋屈服前混凝土被压碎; 2) 钢筋屈服后混凝土被压碎; 3) 钢筋屈服后 CFRP 布拉断^[2]。

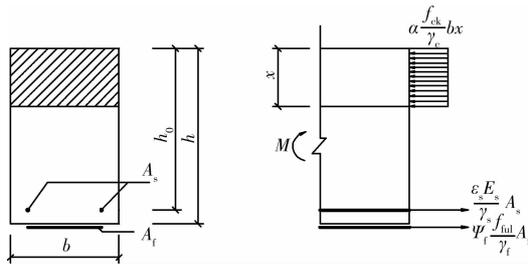


图 8 矩形截面构件正截面受弯承载力计算

如图 8 所示,受弯承载力可按下列公式确定^[5]:

$$M_u = \alpha\beta \frac{f_{ck}}{\gamma_c} bx \left(h_0 - \frac{\beta x}{2} \right) + \psi_f \frac{f_{fuk}}{\gamma_f} A_f a_s \quad (2)$$

$$\alpha\beta \frac{f_{ck}}{\gamma_c} bx = \frac{\epsilon_s E_s}{\gamma_s} A_s + \psi_f \frac{\epsilon_{fu} E_f}{\gamma_f} A_f \quad (3)$$

$$\psi_f = \frac{\frac{\epsilon_{cu}(h-x)}{x} - \epsilon_{f0}}{\epsilon_{fu}} \quad (4)$$

$$\epsilon_s = (\psi_f \epsilon_{fu} + \epsilon_{f0}) \left(\frac{h_0 - x}{h - x} \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_{sy} = \frac{f_{sk}}{E_s}; \epsilon_{fu} = \frac{f_{fuk}}{E_f} \quad (6)$$

式中: M_u 为构件加固后抗弯承载力设计值; α 和 β 为等效矩形应力图形系数; h 和 x 分别为截面高度和实际受压区高度; h_0 为构件加固前的截面有效高度; A_f 为 CFRP 布的截面面积; A_s 为受拉钢筋的截面面积; ψ_f 为考虑 CFRP 布实际抗拉强度达不到设计值而引入的强度利用系数; ϵ_{fu} 为 CFRP 布的极限拉应变; E_f 为 CFRP 布的弹性模量; ϵ_s 为钢筋应变, ϵ_{sy} 为钢筋的屈服应变; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变, 取 $\epsilon_{cu} = 0.0033$; ϵ_{f0} 为梁底部初始应变; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值, γ_c 为混凝土的分项系数, 取 1.45; f_{sk} 为受拉钢筋的抗拉强度标准值, γ_s 为钢筋的分项系数, 取 1.2; f_{fuk} 为 CFRP 布的抗拉强度标准值, 参考美国 ACI 规范^[1]有关 CFRP 材料强度的规定, 取 $f_{fuk} = f_{fum} - 3\sigma_f$, f_{fum} 和 σ_f 分别为 CFRP 布抗拉强度统计均值和均方差; γ_f 为 CFRP 布的材料分项系数, 将由下面的可靠性分析确定。

由式(3)、(4)和(5)联立求出 ψ_f 和 x , 当 $\psi_f > 1$ 时, 在满足粘结良好的情况下, 发生 CFRP 布拉断破坏模式, 即第 3 种破坏模式。此时, 取 $\psi_f = 1$, 重新由式(3)和(5)联立求出 x , 将 $\psi_f = 1$ 和 x 代入式(2), 得到构件的抗弯承载力。

当 $\psi_f < 1$ 时, 发生混凝土压碎破坏模式, 即前 2 种破坏模式:

1) 若 ϵ_s 小于钢筋的屈服应变 ϵ_{sy} 时, 则意味着发生第 1 种破坏模式。将 ψ_f 和 x 代入式(2), 得到构件的抗弯承载力。

2) 若 $\epsilon_s \geq \epsilon_{sy}$ 时, 发生第 2 种破坏模式。取 $\epsilon_s = \epsilon_{sy}$, 重新由式(3)和(4)联立求出 ψ_f 和 x , 将 ψ_f 和 x 代入式(2), 得到构件的抗弯承载力。

对于 CFRP 布加固的钢筋混凝土梁, 设计准则为:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (7)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数, S_d 为荷载效应设计值; R_d 为截面抗力设计值, 受恒荷载效应和活载效应简单组合控制。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》^[19], 在设计中 S_d 取以下 2 式中的大值。

S_d 由活荷载控制:

$$S_d = \gamma_{G1} S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk} \quad (8)$$

S_d 由恒荷载控制:

$$S_d = \gamma_{G2} S_{Gk} + \gamma_Q \psi_c S_{Qk} \quad (9)$$

以上 2 式中 S_{Gk} 和 S_{Qk} 分别为恒荷载和活荷载效应的标准值; γ_{G1} 为恒荷载分项系数, $\gamma_{G1} = 1.2$, $\gamma_{G2} = 1.35$; γ_Q 为活荷载分项系数, $\gamma_Q = 1.4$, ψ_c 为组合值系数, $\psi_c = 0.7$ 。恒荷载和活荷载的统计参数依据《建筑结构荷载规范》^[20]取值。

3.2 Monte Carlo-JC 方法

采用的 Monte Carlo-JC 法^[15, 21-22]就是将 JC 法与 Monte Carlo 随机抽样方法相结合来计算可靠指标 β 。首先根据截面抗力中各设计变量的概率分布函数及其统计参数, 借助 Matlab2008 中的统计工具箱^[23]对这些随机变量进行抽样。对抽取的随机样本由式(2)计算相应设计点下的抗力, 进而可得到该设计点下样本计算弯矩的平均值及其标准差, 然后对抗力分布类型进行假设检验。在得到抗力分布的概率分布函数及其特征参数之后, 采用 JC 法对式(8)或(9)中的可变作用效应进行当量正态化, 进而计算可靠指标。

3.3 CFRP 布材料分项系数的确定

3.3.1 设计变量 在 CFRP 布加固钢筋混凝土梁受弯承载力计算公式中, 梁宽 b 、梁高 h 、FRP 布材料拉强度 f_u 、受拉钢筋屈服强度 f_y 、受拉钢筋的截面面积 A_s 、CFRP 布的截面面积 A_f 等 9 个设计变量是抗弯承载力的影响因素。为了尽可能地包含所有的设计情况, 将计算抗弯承载力的 9 个设计变量分成较为极端的 2 组情况来考虑, 即数值较小的 A 组和数值较大的 B 组。如表 2 所列, 共有 $2^9 = 512$ 个设计点。通过灵敏度分析可知, 钢筋配筋率 ρ_s 和 CFRP 布配布率 ρ_f 对可靠指标的影响很小, 可以忽略, 故将这 2 个设计变量视为确定性量, 具体取值见表 2。

表 2 设计变量的统计资料

设计变量	标准值 A	均值 μ 标准差 σ	标准值 B	均值 μ 标准差 σ	分布类型
宽度 b/mm	200	$\mu = b + 2.54$ $\sigma = 3.658$	500	$\mu = b + 2.54$ $\sigma = 3.658$	正态分布
高度 h/mm	$1.5b$	$\mu = h - 3.05$ $\sigma = 6.35$	$2.5b$	$\mu = h - 3.05$ $\sigma = 6.35$	正态分布
有效高度 h_0/mm	$0.8h$	$\mu = h_0 - 4.7$ $\sigma = 12.7$	$0.95h$	$\mu = h_0 - 4.7$ $\sigma = 12.7$	正态分布
混凝土强度 f_{ck}/MPa	20.67	$\mu = 27.97$ $\sigma = 2.85$	41.34	$\mu = 46.16$ $\sigma = 1.94$	正态分布
CFRP 布强度 f_{fu}/MPa	1 627.4	$u = 2 433.2$ $k = 16.6$	2 773.8	$u = 3 781.6$ $k = 14.8$	Weibull 分布
钢筋配筋率 ρ_s	0.003		0.015		确定
CFRP 布配布率 ρ_f	0.005		0.020		确定
钢筋屈服强度 f_y/MPa	276	$\mu = 312$ $\sigma = 36.2$	414	$\mu = 466$ $\sigma = 45.6$	Beta 分布
梁底初始应变 ϵ_{i0}	0.000 2	$\mu = 0.000 2$ $\sigma = 0.000 05$	0.001	$\mu = 0.001$ $\sigma = 0.000 25$	正态分布

3.3.2 可靠度分析 在可靠度分析中,恒活荷载效应之比 α ($\alpha = S_{Qk}/S_{Gk}$) 对可靠度水平的影响显著,在研究钢筋混凝土构件的可靠指标时,荷载效应比 α 取 0.1、0.25、0.5、1.0 和 2.0 共 5 种^[10]。由于 CFRP 布的抗拉强度较高,文中还增加了 $\alpha = 2.5$, 这样即可对每一个设计点的随机抽样样本计算可靠指标,由 $2^9 = 512$ 个设计点得到 $512 \times 6 = 3 072$ 个可靠指标。

为了确定 CFRP 布的材料分项系数,在分析中 γ_f 在 1.05 和 2.0 之间变化,步长为 0.5,共取 20 个数值。对于每个 γ_f ,进行随机抽样的设计点为 512 个,对每个设计点随机抽取的样本数为 50 000 次,得到该设计点的 50 000 个抗弯承载力,并分别用正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布进行假设检验,对样本分布进行 Kolmogorov—Smirnov 测试^[24],显著性水平取 0.05,表 3 为测试结果。

表 3 抗力的 Kolmogorov—Smirnov 测试 P 值

概率分布	正态分布	对数正态分布	极值 I 型分布
P 值	0.692 1	0.026 7	$6.064 8 \times 10^{-109}$

可见,相对于对数正态分布和极值 I 型分布而言,正态分布的 P 值最大,说明抗力更接近服从于正态分布。图 9 给出了按正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布计算的概率密度曲线与蒙特卡洛方法模拟结果的比较。在得到抗力的概率分布函数和统计参数后,对活荷载进行当量正态化,按照结构

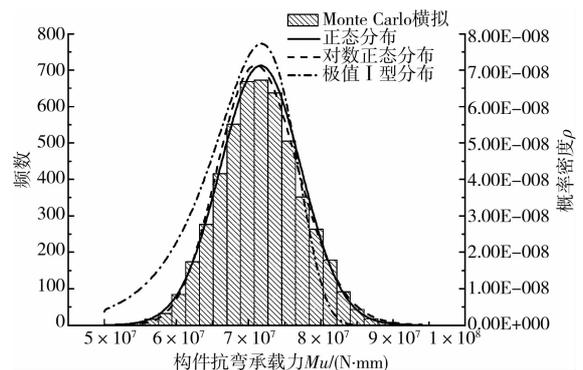


图 9 假定的构件抗弯承载力概率密度曲线与蒙特卡洛模拟结果的比较

功能函数应用 JC 方法对每个设计点求出其不同 CFRP 布分项系数对应可靠指标 β_{fi} , 并求出 $H_{\gamma} = \frac{1}{3 072} \sum_{i=1}^{3 072} (\beta_{fi} - \beta_0)$, 其中 β_0 为该设计点破坏模式对应的目标可靠指标^[25], 计算结果如图 10 所示。

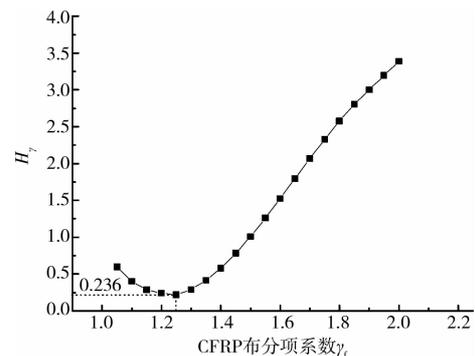


图 10 CFRP 布分项系数 γ_f 的确定

由图 10 可以看出,当 $\gamma_f = 1.25$ 时, H_γ 取得最小值 0.236。同时对每一个 γ_f 的 3 072 个可靠指标依据不同的破坏模式分组,算出每种破坏模式下的可靠指标均值 β_m ,如图 11 所示。从图中可以看出,在 CFRP 布拉断破坏模式下可靠指标均值 β_m 随着 γ_f 的增大而增大。钢筋屈服后混凝土压碎破坏模式下可靠指标均值 β_m 随着 γ_f 的增大略有减少;而钢筋屈服前混凝土压碎破坏模式下可靠均值 β_m 几乎不受 γ_f 的影响。从概率意义上来说,若 CFRP 布的分项系数 γ_f 取值过于保守,截面发生钢筋屈服前混凝土压碎破坏模式的概率更大,对提高可靠度水平意义不大。图 11 中还给出了对不同破坏模式下关系曲线的多项式拟合结果。当 $\gamma_f = 1.25$ 时,CFRP 拉断破坏模式下的可靠指标均值 β_m 为 4.05,钢筋屈服后混凝土压碎破坏模式下的可靠指标均值 β_m 为 4.16,钢筋屈服前混凝土压碎破坏模式下的可靠指标均值 β_m 为 4.31,均大于《建筑结构可靠度设计统一标准》^[19]中所规定的延性破坏和脆性破坏所对应的目标可靠指标,同时期望破坏模式对应的可靠指标低于非期望破坏模式对应的可靠指标。所以,CFRP 布的材料分项系数可取 1.25,满足可靠度设计的要求。

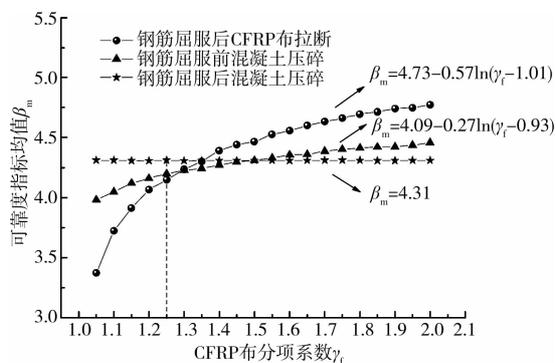


图 11 CFRP 布分项系数 γ_f 对可靠指标均值的影响

4 结论

为研究 CFRP 布单向抗拉强度的分布规律,进行了 CFRP 布单向拉伸材料性能试验。在试验结果的基础上,对 CFRP 布的单向抗拉强度进行了概率统计分析。结果表明,CFRP 布的抗拉强度概率分布函数符合三参数 Weibull 分布。

应用 Monte Carlo 方法对 CFRP 布加固钢筋混凝土梁的抗力进行了模拟,在得到结构抗力的统计参数以后,采用 JC 法对可靠指标进行了计算,确定

了设计公式中 CFRP 布的材料分项系数。计算结果表明,当 CFRP 布分项系数 $\gamma_f = 1.25$ 时,CFRP 布拉断破坏模式下的可靠指标均值 β_m 为 4.05,钢筋屈服后混凝土压碎破坏模式下的可靠指标均值 β_m 为 4.16,钢筋屈服前混凝土压碎破坏模式下的可靠指标均值 β_m 为 4.31,均大于《建筑结构可靠度设计统一标准》中所规定的结构延性破坏和脆性破坏所对应的目标可靠指标。CFRP 布的材料分项系数可取为 1.25,满足可靠度设计的要求。

参考文献:

- [1] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T. FRP strengthened RC structures. UK: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] 王文伟. FRP 加固混凝土结构及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] American Concrete Institute. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440. 2R-02 [R]. Detroit, USA: American Concrete Institute, 2002.
- [4] 《高性能纤维复合材料应用技术规范》编制组. 纤维增强复合材料土木工程应用技术规范[S](征求意见稿). 北京, 2006.
- [5] GB 50367—2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [6] Canadian Standard Association (CSA). Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers[S]. Ottawa, Canada, 2002.
- [7] ISIS Canada. Strengthening reinforced concrete structures with externally bonded fibre reinforced polymers—design manual no. 4 [S]. Winnipeg Man, Canada, 2001.
- [8] Fib Bulletin No. 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures[S]. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2001.
- [9] Japan Society of Civil Engineers(JSCE). Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fibers sheets[S]. Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers, 2001.
- [10] PLEVRIS N, TRIANTAFILLOU T C, VENEZIANO D. Reliability of RC members strengthened with CFRP laminates[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(7): 1037-1044.
- [11] OKEIL A M, EL-TAWIL S. Flexural reliability of reinforced concrete bridge girders strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates[J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(5): 290-299.

- [12] MONTI G, SANTINI S. Reliability-based calibration of partial safety coefficients for fiber-reinforced plastic [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(3): 162-167.
- [13] 孙晓燕, 黄承逵, 孙保沐. 既有桥梁外贴纤维布加固后可靠度分析[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2005, 35(3): 427-432.
- SUN XIAO-YAN, HUANG CHENG-KUI, SUN BAO-SHU. Time-dependent reliability analysis of existing bridges strengthened with FRP laminates [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2005, 35(3): 427-432.
- [14] 何政, 黄永春. 应用 Monte Carlo - JC 法评估 FRP 加固 RC 梁受弯承载力可靠度[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 117-121.
- HE ZHENG, HUANG YONG-CHUN. Application of Monte Carlo-JC method to the reliability assessment of flexural capacity of RC beams strengthened with FPR [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 117-121.
- [15] 何政, 黄永春. FRP 筋混凝土梁受弯承载力可靠度评估[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(4): 650-655.
- HE ZHENG, HUANG YONG-CHUN. Reliability assessment of flexural capacity of concrete reinforced with FRP rebars [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(4): 650-655.
- [16] 何政, 李光. 基于可靠度的 FRP 筋材料分项系数的确定[J]. *工程力学*, 2008, 25(9): 214-223.
- HE ZHENG, LI GUANG. Reliability-based calibration of material partial factor of fiber reinforced polymer (FRP) rod [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(9): 214-223.
- [17] 杜斌, 赵人达. 外贴碳纤维布加固既有桥梁的可靠度指标计算分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2010, 36(2): 125-127.
- DU BIN, ZHAO REN-DA. Reliability index calculation of existing bridges strengthened with FRP texture [J]. *Sichuan Building Science*, 2010, 36(2): 125-127.
- [18] GB 3354—1999 定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [19] GB/T 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [20] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [21] RACKWITZ R, FLESSLER B. Structure reliability under combined random sequences [J]. *Computers & Structures*, 1978, 9(5): 489-494.
- [22] MECHERS R E. *Structural Reliability Analysis and Prediction* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [23] The Math Works Inc. *Users' guide for statistics toolbox of Matlab 2008* [M]. Natick, Ma, USA: The Math Works Inc, 2004.
- [24] 贡金鑫, 魏巍巍. *工程结构可靠性设计原理* [M]. 北京: 中国机械工业出版社, 2007.
- [25] 贡金鑫, 仲伟秋, 赵国藩. 结构可靠指标的通用计算方法[J]. *计算力学学报*, 2003, (1): 11-18.
- GONG JIN-XIN, ZHONG WEI-QIU, ZHAO GUO-FAN. A general approach for computing structural reliability index [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, (1): 11-18.

(编辑 胡英奎)