

文章编号: 1000-4750(2008)09-0214-10

基于可靠度的 FRP 筋材料分项系数的确定

*何 政¹, 李 光²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 基于中国混凝土结构设计资料以及构件几何尺寸与材料力学性能的概率统计参数, 建立了 FRP 筋混凝土梁受弯正截面承载力的计算公式, 并采用验算点法计算了在六种荷载效应比情况下的受弯承载力可靠指标平均值, 最后在考察 FRP 筋材料分项系数对可靠指标平均值影响的基础上, 建议 GFRP 筋和 CFRP 筋的材料分项系数统一取为 1.25。可靠度分析表明: 过于保守的 FRP 筋材料分项系数只能使得截面发生混凝土破坏模式的概率增大, 而这种破坏模式对应的可靠度水平基本与 FRP 筋材料分项系数无关, 因此只能造成巨大的材料浪费。截面的设计破坏模式与实际破坏模式不完全一致, 这种不一致现象存在的范围随着 FRP 筋材料分项系数的增大而扩大。

关键词: FRP 筋; 混凝土; 受弯承载力; 材料分项系数; 可靠指标

中图分类号: TU377.9; TU312 **文献标识码:** A

RELIABILITY-BASED CALIBRATION OF MATERIAL PARTIAL FACTOR OF FIBER REINFORCED POLYMER (FRP) ROD

*HE Zheng¹, LI Guang²

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on the data for designing concrete structures as well as the statistics of sectional geometry and the mechanical properties of the materials involved, the design formulae for determining flexural capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers (FRP) rods are proposed firstly. Then, the Rackwitz-Fiessler method is applied to calculate the averaged reliability index of six load effect ratios for flexural capacity. After the study of the effect of the partial factors of FRP rods on the averaged index, the partial factors of 1.25 for GFRP rod and CFRP rod are suggested in the end. The reliability analysis indicates that the over-conservative partial factors of FRP rods can only result in concrete crushing in high possibility. The application of those factors would cause a great waste because the reliability level corresponding to that failure mode is almost independent of the partial factors of FRP rods. Design failure mode and actual failure mode do not always occur in unison. The range of their potential unison would increase as the partial factor of FRP rod increases.

Key words: fiber reinforced polymer rod; concrete; flexural capacity; material partial factor; reliability index

由于具备高强、轻质、耐腐蚀性等优良力学特性, 纤维增强塑料(简称 FRP)在土木工程结构, 尤其是在混凝土结构中的应用越来越广泛, 其中的棒材形式——FRP 筋可以做成普通钢筋形状, 在某些

情况下可以代替传统钢筋来使用^[1], 比如在酸碱腐蚀性强的使用环境中, 将易受腐蚀的钢筋替换为 FRP 筋, 既可以发挥 FRP 筋抗拉强度高的特点, 又可以大大延长构件的使用寿命。在工程实践和研究

收稿日期: 2007-01-31; 修改日期: 2007-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50208007); 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: *何政(1971—), 男, 安徽巢湖人, 教授, 博士, 从事 FRP 配筋混凝土结构和基于性能的抗震设计研究(E-mail: hezheng1971@gmail.com);

李光(1981—), 男, 河南遂平人, 硕士生, 从事 FRP 配筋混凝土结构性能研究(E-mail: dongxuli1981@163.com)。

的过程中,国内外也涌现了一些有关 FRP 筋混凝土构件的设计指南^[2-5],中国目前也正积极地制定《纤维增强复合材料土木工程应用技术规范》^[6]。这些设计指南或规范无疑极大地推动了 FRP 筋在土木工程中的应用进程。然而,FRP 材料大多是一种线弹性材料,力学性能上具有高强、低弹模和各向异性,将这种复合材料引入到混凝土构件中所产生的不确定性和潜在风险,目前还没有被充分认识或研究,如 FRP 对超静定结构体系内力重分布的影响以及结构体系可靠度水平的影响。现有相关的设计指南或规范中设计公式大多经验色彩浓厚,如其中的抗力折减系数或材料强度折减(分项)系数大多由混凝土结构设计规范中相应系数简单修订或是完全凭借经验来指定,并没有从可靠度的角度来给出一个更为合理的评估。这些系数大多过于保守^[7]。

针对 FRP 筋混凝土构件的可靠度研究是始于 1995 年 Plevris 等人^[8]对 CFRP 加固混凝土梁的可靠度研究,到现在已十多年了,体系仍然不够成熟,而且主要研究工作集中在 FRP 片材加固混凝土构件方面^[9-18]。已有的研究表明^[19-23]:规范中保守的材料分项系数或强度折减系数只能使混凝土压碎破坏模式发生的概率更高,导致材料的大量浪费,并不能很好地保证梁的可靠度。破坏模式不仅仅受到材料分项系数的影响,配筋率、混凝土强度以及荷载也是影响可靠度最重要的因素。

本文在建立 FRP 筋混凝土梁受弯正截面承载力计算公式的基础上,从可靠度角度确定设计公式中 FRP 筋的材料分项系数。为与现行《混凝土结构设计规范》^[24]更好地衔接,设计公式在形式上大体与钢筋混凝土梁的正截面承载力计算公式相似。

1 受弯承载力计算

这里仅考虑矩形截面和截面内布置单排单种 FRP 筋的情况。除了平截面假定、混凝土极限压应变 ε_{cu} 取为 0.0033^[24]及忽略混凝土抗拉强度假设条件之外,还采用假定:1) FRP 筋在达到破坏前本构关系为线弹性应力-应变关系;2) 混凝土与 FRP 筋间具有良好的粘接。在这些假定下,FRP 筋混凝土梁的正截面破坏模式有三种:受拉破坏、受压破坏以及界限破坏。当 FRP 配筋率 $\rho_f < \rho_b$ 或相对受压区高度 $\xi < \xi_b$ 时,截面将发生 FRP 筋拉断破坏(简称受拉破坏)。FRP 筋达到极限拉应变 ε_{fu} 时,受压区边缘混凝土未达到极限压应变 ε_{cu} ;当 $\rho_f > \rho_b$ 或 $\xi > \xi_b$

时,截面将发生混凝土压碎破坏(简称受压破坏)。受压区边缘混凝土达到极限压应变 ε_{cu} 时,FRP 筋尚未达到其极限拉应变 ε_{fu} ;当 $\rho_f = \rho_b$ 或 $\xi = \xi_b$ 时,FRP 筋混凝土受弯构件处于界限破坏状态,FRP 筋的应变达到 ε_{fu} ,同时受压区混凝土被压碎。所有破坏模式在破坏性质上均属于脆性破坏,但相对于 FRP 拉断破坏模式来说,混凝土压碎破坏模式的变形能力大一些,是 FRP 筋混凝土梁受弯正截面设计中期望的破坏模式。界限配筋率 ρ_b 和界限相对受压区高度 ξ_b 可分别由式(1)和式(2)来确定(如图 1 所示):

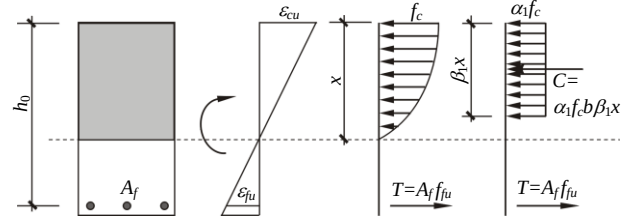


图 1 界限破坏状态的应力及应变分布

Fig.1 Stress and strain distribution in balanced failure mode

$$\rho_b = \frac{\alpha_1 \beta_1 f_c}{E_f \varepsilon_{fu}} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \quad (1)$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \varepsilon_{fu} / \varepsilon_{cu}} = \frac{\rho_b E_f \varepsilon_{fu}}{\alpha_1 f_c} \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土棱柱体抗压强度设计值,它等于混凝土棱柱体抗压强度标准值 $f_{c,k}$ 除以混凝土材料分项系数 1.4, $f_{c,k}$ 具有 95%的保证率; b 和 h_0 分别为截面宽度和有效高度; α_1 和 β_1 为混凝土受压区等效矩形应力图形系数,混凝土受压应力-应变关系来自《混凝土结构设计规范》^[24]; ε_{fu} 为 FRP 筋的极限拉应变, $\varepsilon_{fu} = f_{fu} / E_f$; E_f 为 FRP 筋的弹性模量; f_{fu} 为 FRP 筋的抗拉强度设计值,参考《建筑结构可靠度设计统一标准》(以下简称《设计标准》)^[25]有关材料设计强度的规定,FRP 筋的强度设计值 f_{fu} 确定为:

$$f_{fu} = f_{fu,k} / \gamma_f \quad (3)$$

式中 $f_{fu,k}$ 为 FRP 筋强度标准值,本文中取 $f_{fu,k} = f_{fu,m} - 1.645 \sigma_f$; $f_{fu,m}$ 和 σ_f 分别为 FRP 筋强度统计均值和均方差; γ_f 为 FRP 筋的材料分项系数,将由下面的可靠度分析确定。

受拉破坏时($\rho_f = A_f / b h_0 \leq \rho_b$, A_f 为 FRP 筋的截面面积),截面的受弯承载力按下式来计算:

$$M = \rho_f E_f \varepsilon_{fu} \left(1 - 0.5 \frac{\beta_1 \varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{fu}} \right) b h_0^2 \quad (4)$$

式中: ξ 为混凝土相对受压区高度。由于在受拉破坏时,受压区边缘混凝土应变 ε_c 尚未达到其极限压

应变 ε_{cu} , 等效矩形应力图形系数 α_1 和 β_1 的数值大小取决于应变比 $\varepsilon_c/\varepsilon_{cu}$, 需经数学积分和迭代确定, 迭代方法可采用割线法、切线法等方法。对于混凝土强度等级不大于 C50 的情况, α_1 和 β_1 的迭代结果如表 1 所列, 对于 $f_{cu,k}>50\text{MPa}$ 情况, 可参考文献[26]。

表 1 受压区混凝土等效矩形应力图形系数 α_1 和 β_1

Table 1 Equivalent strain-block factors α_1 and β_1 of

compressive concrete

$\varepsilon_c/\varepsilon_{cu}$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
α_1	0.231	0.427	0.591	0.721	0.819	0.886	0.924	0.946	0.960	0.969
β_1	0.676	0.687	0.700	0.714	0.730	0.749	0.770	0.790	0.808	0.824

受压破坏($\rho_f > \rho_b$)时, FRP 筋没有达到抗拉强度, 仍处于线弹性阶段, 受压区边缘混凝土达到极限压应变。截面的受弯承载力按式(5)来计算:

$$M = \alpha_1 \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} \left(1 - 0.5 \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} \right) f_c b h_0^2 \quad (5)$$

式中 FRP 筋的应变 ε_f 由截面内力平衡条件来确定:

$$\varepsilon_f = -0.5\varepsilon_{cu} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{cu}^2}{4} + \frac{\alpha_1 f_c \beta_1 \varepsilon_{cu}}{\rho_f E_f}} \quad (6)$$

对于FRP筋混凝土受弯梁, 抗弯设计准则为^[25]:

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

式中: γ_0 为构件的重要性系数, 本文分析中取 $\gamma_0=1$; S_d 为荷载效应设计值; R_d 为截面抗力设计值。

在多数情况下, 混凝土受弯梁的设计受恒荷效应和楼(屋)面使用活载效应简单组合控制。根据《设计标准》^[25], 在设计中 S_d 取下两式中的大值。

$$S_d = \gamma_{G1} S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk}, \quad S_d \text{由活荷控制} \quad (8)$$

$$S_d = \gamma_{G2} S_{Gk} + \gamma_Q \psi_c S_{Qk}, \quad S_d \text{由恒荷控制} \quad (9)$$

上两式中 S_{Gk} 和 S_{Qk} 分别为恒荷和活荷效应的标准值; γ_{G1} 为恒荷分项系数, $\gamma_{G1}=1.2$, $\gamma_{G2}=1.35$; γ_Q 为活荷分项系数, $\gamma_Q=1.4$; ψ_c 为组合值系数, $\psi_c=0.7$ 。表2列出了恒荷和活荷的统计参数^[27], 办公楼和住宅的楼(屋)面使用活荷的统计参数存在较为明显的差别, 下面的可靠度分析工作将分别进行。

表 2 恒荷和活荷的统计参数

Table 2 Statistical parameters of dead load and

floor (or roof) load

荷载类别	名义值/kPa	均值/名义值, κ	变异系数 (C.O.V.), δ	概率分布类型
恒荷	—	1.06	0.07	正态
楼(屋)面	办公楼	2.0	0.524	0.288
活荷	住宅	2.0	0.644	0.233

2 随机变量的统计参数

2.1 计算模式不确定性系数

结构构件计算模式的不定性是指抗力计算所采用的基本假定和计算公式不精确等引起的变异性。一般可通过与精确模式的计算结果比较, 或与试验结果比较来确定。结构计算模式的不定性可采用随机变量 Ω_p 表达^[25]:

$$\Omega_p = R^0 / R^c \quad (10)$$

式中: R^0 为构件的实际抗力值, 可取试验值或精确计算值; R^c 为构件按式(4)或式(5)计算的抗力值。表 3 列出了本文对国内外学者进行的 117 根FRP筋混凝土梁试验数据的统计系数 Ω_p 的均值为 0.980, 变异系数 δ_p 为 0.105。参考我国钢筋混凝土结构设计的做法, 假定随机变量 Ω_p 的概率颁布类型为正态分布。

表 3 计算模式不确定性统计参数

Table 3 Statistical parameters of computational modeling uncertainty factor

数据来源	根数	试验值/计算值		
		均值 μ	均方差 σ	变异系数 δ_{f_c}
文献[28]	3	0.861	0.164	0.190
文献[29]	6	0.890	0.056	0.062
文献[30]	14	0.830	0.119	0.144
文献[31]	6	0.874	0.115	0.131
文献[32]	4	0.949	0.030	0.031
文献[33]	4	1.011	0.108	0.107
文献[34]	9	1.078	0.162	0.150
文献[35]	4	0.955	0.084	0.088
文献[36]	9	0.897	0.106	0.118
文献[37]	6	0.936	0.098	0.104
文献[38]	9	1.071	0.099	0.093
文献[39]	5	0.891	0.120	0.134
文献[40]	3	1.021	0.095	0.093
文献[41]	6	0.902	0.119	0.132
文献[42]	4	1.165	0.037	0.032
文献[43]	14	1.014	0.155	0.152
文献[44]	5	1.163	0.069	0.059
文献[45]	6	1.133	0.125	0.110
合计	117	0.980	0.103	0.105

2.2 混凝土抗压强度统计参数

结构构件中混凝土强度与棱柱试件强度有差别, 受尺寸、养护条件、荷速度等因素的影响, 这些因素统称为 Ω_0 , 其均值 μ_{Ω_0} 为 0.88, 变异系数 δ_{Ω_0} 为 0.1^[46]。结构构件中混凝土强度的变异系数 δ_{f_c} 由下式确定^[46]:

$$\delta_{f_c} = \sqrt{\delta_{f_{cu}}^2 + \delta_{\Omega_0}^2} \quad (11)$$

混凝土棱柱体抗压强度平均值由下式计算^[46]:

$$f_{c,m} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,m} \quad (12)$$

式(11)和式(12)中的 δ_{f_c} 和 $\delta_{f_{cu}}$ 分别为混凝土棱柱体抗压强度变异系数和立方体抗压强度变异系数; $f_{c,m}$ 为混凝土棱柱体抗压强度平均值; $f_{cu,m}$ 为混凝土立方体抗压强度平均值; α_{c1} 为混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度比值; α_{c2} 为混凝土脆性折减系数。根据文献[24]中给出的 f_{cu} 、 $\delta_{f_{cu}}$ 、 α_{c1} 和 α_{c2} 数值,表4列出了C15—C80级混凝土的统计参数。

2.3 设计变量的统计参数

由式(4)和式(5)知,受弯承载力 M 取决于截面

宽度 b 、截面有效高度 h_0 、混凝土强度 f_c 、FRP 筋强度 f_{fu} 、FRP 筋配筋率 ρ_f 以及弹性模量 E_f 。在本文的可靠度分析中将 ρ_f 和 E_f 视为确定性变量,其余各设计变量均被视为随机变量。采用验算点法^[47]计算可靠指标,为使计算结果具有普遍性和代表性,各随机变量均考虑选取一个较小值(A组)和一个较大值(B组)。各设计变量的统计参数详见表5,表5中 b 、 h 、 h_0 取自文献[48],混凝土抗压强度统计参数摘自表4,A组FRP筋强度取自文献[20],B组FRP筋强度取自文献[44]。

表4 混凝土强度统计参数

Table 4 Statistical parameters of concrete strength

强度等级	α_{c1}	α_{c2}	立方体抗压强度 f_{cu}		棱柱体抗压强度 f_c		平均值/设计值
			平均值/MPa	变异系数	平均值/MPa	变异系数	
C15	0.76	1.0	22.9	0.21	15.3	0.23	2.125
C20	0.76	1.0	28.4	0.18	19.0	0.21	1.979
C25	0.76	1.0	33.9	0.16	22.7	0.19	1.908
C30	0.76	1.0	39.0	0.14	26.1	0.17	1.825
C35	0.76	1.0	44.5	0.13	29.8	0.16	1.784
C40	0.76	1.0	49.8	0.12	33.4	0.16	1.749
C45	0.76	0.984	56.1	0.12	36.9	0.16	1.749
C50	0.76	0.968	61.0	0.11	39.5	0.15	1.710
C55	0.77	0.951	67.2	0.11	43.3	0.15	1.711
C60	0.78	0.935	71.8	0.1	46.1	0.14	1.676
C65	0.79	0.919	77.8	0.1	49.7	0.14	1.673
C70	0.80	0.903	83.8	0.1	53.2	0.14	1.673
C75	0.81	0.886	89.8	0.1	56.7	0.14	1.678
C80	0.82	0.870	95.8	0.1	60.1	0.14	1.674

表5 抗力设计变量的统计参数和概率分布

Table 5 Statistical parameters and probabilistic distributions of design variables of resistance

设计变量	A组	均值/名义值 κ , 变异系数 δ	B组	均值/名义值 κ , 变异系数 δ	概率分布类型
宽度 b /mm	0.2	$\kappa=1.00$, $\delta=0.01$	0.5	$\kappa=1.00$, $\delta=0.01$	正态
高度 h /mm	1.5 b	$\kappa=1.00$, $\delta=0.01$	3.0 b	$\kappa=1.00$, $\delta=0.01$	正态
有效高度 h_0 /mm	0.8 h	$\kappa=1.00$, $\delta=0.02$	0.95 h	$\kappa=1.00$, $\delta=0.02$	正态
混凝土强度 f_c /MPa	9.6 (C20)	$\kappa=1.979$, $\delta=0.21$	23.1 (C50)	$\kappa=1.710$, $\delta=0.15$	正态
CFRP 强度 f_{fu} /MPa ^a	1266.5	$\kappa=1.090$, $\delta=0.050$	1982.4	$\kappa=1.126$, $\delta=0.068$	正态
GFRP 强度 f_{fu} /MPa ^b	743.4	$\kappa=1.090$, $\delta=0.050$	1146.9	$\kappa=1.065$, $\delta=0.037$	正态

注: ^a A组, $E_f=115\text{GPa}$; B组, $E_f=119.2\text{GPa}$; ^b A组, $E_f=45\text{GPa}$; B组, $E_f=51\text{GPa}$ 。

3 极限状态功能函数

当FRP筋受拉破坏时,极限状态情况下构件受弯承载力功能函数 Z 为:

$$Z = \Omega_p \rho_f f_{fu} \left(1 - 0.5 \frac{\rho_f f_{fu}}{\alpha_1 f_c} \right) b h_0^2 - S_G - S_Q \quad (13)$$

式中 Ω_p 为计算模式不定性系数。

当混凝土受压破坏时,极限状态情况下构件受

弯承载力功能函数为:

$$Z = \Omega_p \alpha_1 f_c b \beta_1 x (h_0 - 0.5 \beta_1 x) - S_G - S_Q \quad (14)$$

式中 x 为混凝土换算受压区高度按下式计算:

$$x = 0.5 h_0 \left[-\frac{\rho_f E_f \varepsilon_{cu}}{\alpha_1 f_c \beta_1} + \sqrt{\left(\frac{\rho_f E_f \varepsilon_{cu}}{\alpha_1 f_c \beta_1} \right)^2 + 4 \frac{\rho_f E_f \varepsilon_{cu}}{\alpha_1 f_c \beta_1}} \right] \quad (15)$$

4 FRP 筋材料分项系数

我国在研究钢筋混凝土构件的可靠指标时,荷载效应比 $\alpha(\alpha=S_{Qk}/S_{Gk})$ 取 0.1、0.25、0.5、1.0、2.0 五种^[49]。FRP 筋的强度更高, α 可以适当高一点,本文中增加了 $\alpha=2.5$ 。在计算设计抗力和实际抗力时,保持 FRP 的配筋率不变。为了确定 FRP 筋的材料分项系数,在分析中 γ_f 将在 1.1 和 2.0 之间变化,共取 19 个数值。在计算平均值可靠指标中,随机设计变量 b 、 h 、 h_0 、 f_c 和 f_{tu} 取 A 组和 B 组值, ρ_f / ρ_{fb} 取 0.1—0.9、1.5、2.0、2.5,共 12 个数值。对于每一种 FRP 筋和每一个 γ_f ,由 $2^5 \times 12 = 384$ 个设计点得到 $384 \times 6 = 2304$ 个可靠指标,按 ρ_f / ρ_{fb} 分为 12 组,对每组的可靠指标求平均,共得到 $19 \times 12 = 228$ 个可靠指标均值,分别列于表 6—表 9 中。由表 6—表 9 可以看出,混凝土受压破坏时(表中粗体所示),可靠指标均值几乎不受 ρ_f / ρ_{fb} 的影响。而对于 $\rho_f / \rho_{fb} \leq 1.0$ 的情况,由于材料强度取值的不同,在某个区间内,截面的设计破坏模式与实际破坏模式在判别上不完全一致,且这种不一致现象存在的范围随着 γ_f 的增大而增大(表中斜体所示)。如只考虑设计受拉破坏模式与实际受拉破坏模式一致的区域(表中其余部分),得出的可靠指标均值 β 与 γ_f 的关系如图 2 所示。从图 2 中发现,在 FRP

筋受拉破坏情况下可靠指标 β 随着 γ_f 的增大而增大;混凝土受压破坏时,可靠指标均值 β 几乎不受 γ_f 的影响。从概率意义上来说,若 FRP 筋的分项系数 γ_f 取值过于保守,截面将可能发生混凝土受压破坏模式的概率更大,对提高可靠度水平意义不大。图 2 中两种不同破坏模式的关系曲线相交于一点,令该点对应的 FRP 筋分项系数为 γ_b , γ_b 在 1.09—1.13 之间微幅变化。当 $\gamma_f = \gamma_b$ 时,受拉破坏和受压破坏的可靠指标相等;当 $\gamma_f < \gamma_b$ 时,受拉破坏的可靠指标均值小于受压破坏相对应的可靠指标;当 $\gamma_f > \gamma_b$ 时,受拉破坏的可靠指标均值大于受压破坏相对应的可靠指标。图 2 中还给出了对 FRP 筋拉断模式下关系曲线的多项式拟合结果。根据《设计标准》^[25]对二级构件目标可靠指标的要求以及图 2 中的拟合曲线,对于 FRP 筋无论 GFRP 筋还是 CFRP 筋,其材料分项系数 γ_f 均可建议取为 1.25。在此分项系数下,受拉破坏时均可满足目标可靠指标的要求($\beta \geq \beta_T = 3.7$),混凝土受压破坏时虽然可靠指标均值均略低于 3.7,但最大差别在 10%以内,这种微小差别是可以接受的。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,满足可靠度设计的基本原则要求。

表 6 CFRP 筋材料分项系数 γ_f 对可靠指标均值的影响(住宅)

Table 6 Effect of the partial factor of CFRP rod on average reliability index (residential building)

γ_f	ρ_f / ρ_{fb}											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	2.0	2.5
1.10	3.21	3.22	3.23	3.24	3.26	3.27	3.29	3.31	3.32	3.36	3.36	3.36
1.15	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.49	3.50	3.52	3.54	3.36	3.36	3.36
1.20	3.63	3.64	3.66	3.67	3.68	3.69	3.71	3.72	3.74	3.36	3.36	3.36
1.25	3.83	3.84	3.85	3.86	3.87	3.88	3.90	3.91	3.92	3.36	3.36	3.36
1.30	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05	4.06	4.07	4.08	4.01	3.36	3.36	3.36
1.35	4.18	4.19	4.20	4.21	4.22	4.23	4.24	4.18	4.01	3.36	3.36	3.36
1.40	4.35	4.36	4.37	4.38	4.38	4.39	4.40	4.30	3.82	3.36	3.36	3.36
1.45	4.50	4.51	4.52	4.53	4.54	4.54	4.55	4.29	3.55	3.36	3.36	3.36
1.50	4.65	4.66	4.67	4.68	4.68	4.68	4.59	4.05	3.55	3.36	3.36	3.36
1.55	4.79	4.80	4.81	4.81	4.82	4.82	4.56	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.60	4.93	4.94	4.94	4.95	4.95	4.86	4.30	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.65	5.05	5.06	5.07	5.07	5.07	4.95	3.96	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.70	5.18	5.19	5.19	5.19	5.19	4.91	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36
1.75	5.29	5.30	5.31	5.30	5.30	4.58	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36
1.80	5.41	5.41	5.42	5.41	5.30	4.31	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36
1.85	5.51	5.52	5.52	5.52	5.38	4.20	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36
1.90	5.62	5.62	5.62	5.62	5.30	4.20	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36
1.95	5.72	5.72	5.72	5.71	4.91	4.20	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36
2.00	5.81	5.82	5.81	5.80	4.93	4.20	3.96	3.74	3.54	3.36	3.36	3.36

表 7 GFRP 筋材料分项系数 γ_f 对可靠指标均值的影响(住宅)

Table 7 Effect of the partial factor of GFRP rod on average reliability index (residential building)

γ_f	ρ_f/ρ_b											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	2.0	2.5
1.10	3.13	3.14	3.15	3.16	3.17	3.18	3.20	3.21	3.22	3.36	3.36	3.36
1.15	3.36	3.37	3.38	3.38	3.39	3.41	3.42	3.43	3.44	3.36	3.36	3.36
1.20	3.57	3.58	3.59	3.59	3.60	3.61	3.62	3.64	3.65	3.36	3.36	3.36
1.25	3.77	3.78	3.78	3.79	3.80	3.81	3.82	3.83	3.84	3.36	3.36	3.36
1.30	3.95	3.96	3.97	3.98	3.98	3.99	4.00	4.01	4.02	3.36	3.36	3.36
1.35	4.13	4.14	4.15	4.15	4.16	4.17	4.17	4.18	3.96	3.36	3.36	3.36
1.40	4.30	4.30	4.31	4.32	4.32	4.33	4.33	4.25	4.04	3.36	3.36	3.36
1.45	4.45	4.46	4.47	4.47	4.48	4.48	4.49	4.24	3.55	3.36	3.36	3.36
1.50	4.60	4.61	4.62	4.62	4.63	4.63	4.63	4.32	3.55	3.36	3.36	3.36
1.55	4.75	4.76	4.76	4.76	4.77	4.77	4.53	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.60	4.88	4.89	4.90	4.90	4.90	4.90	4.59	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.65	5.01	5.02	5.02	5.03	5.02	4.92	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.70	5.14	5.14	5.15	5.15	5.14	4.88	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.75	5.26	5.26	5.26	5.26	5.26	4.93	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.80	5.37	5.37	5.38	5.37	5.37	4.21	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.85	5.48	5.48	5.48	5.48	5.23	4.21	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.90	5.58	5.59	5.59	5.58	5.28	4.21	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
1.95	5.68	5.69	5.68	5.67	5.33	4.21	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36
2.00	5.78	5.78	5.78	5.77	4.47	4.21	3.97	3.75	3.55	3.36	3.36	3.36

表 8 CFRP 筋材料分项系数 γ_f 对可靠指标均值的影响(办公楼)

Table 8 Effect of the partial factor of CFRP rod on average reliability index (office building)

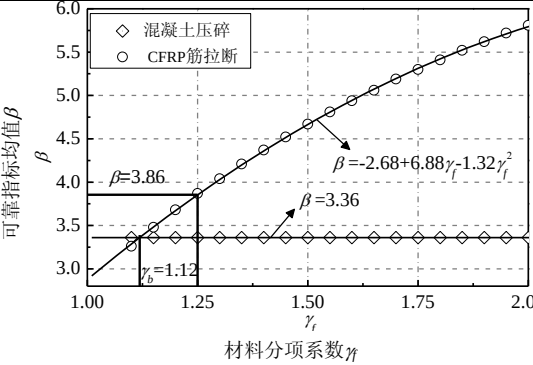
γ_f	ρ_f/ρ_b											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	2.0	2.5
1.10	3.40	3.41	3.42	3.45	3.45	3.46	3.48	3.50	3.51	3.51	3.51	3.51
1.15	3.61	3.62	3.63	3.65	3.66	3.67	3.69	3.70	3.72	3.51	3.51	3.51
1.20	3.81	3.82	3.83	3.84	3.86	3.87	3.88	3.90	3.91	3.51	3.51	3.51
1.25	4.00	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05	4.07	4.08	4.09	3.51	3.51	3.51
1.30	4.18	4.19	4.20	4.21	4.22	4.23	4.24	4.25	4.17	3.51	3.51	3.50
1.35	4.34	4.36	4.37	4.37	4.38	4.39	4.40	4.35	4.17	3.51	3.51	3.50
1.40	4.50	4.51	4.52	4.53	4.54	4.55	4.55	4.46	3.97	3.51	3.51	3.50
1.45	4.66	4.67	4.67	4.68	4.69	4.69	4.70	4.44	3.69	3.51	3.51	3.50
1.50	4.80	4.81	4.82	4.82	4.83	4.83	4.73	4.20	3.69	3.51	3.50	3.50
1.55	4.94	4.95	4.95	4.96	4.96	4.96	4.71	3.88	3.69	3.51	3.50	3.50
1.60	5.07	5.08	5.08	5.09	5.09	5.00	4.43	3.88	3.69	3.51	3.50	3.50
1.65	5.19	5.20	5.21	5.21	5.21	5.09	4.08	3.88	3.68	3.51	3.50	3.50
1.70	5.31	5.32	5.33	5.33	5.32	5.04	4.08	3.87	3.68	3.51	3.50	3.50
1.75	5.43	5.44	5.44	5.44	5.43	4.71	4.08	3.87	3.68	3.50	3.50	3.50
1.80	5.54	5.54	5.55	5.54	5.43	4.36	4.08	3.87	3.68	3.50	3.50	3.50
1.85	5.64	5.65	5.65	5.65	5.50	4.31	4.08	3.87	3.68	3.50	3.50	3.50
1.90	5.74	5.75	5.75	5.74	5.43	4.31	4.08	3.87	3.68	3.50	3.50	3.50
1.95	5.84	5.85	5.84	5.83	5.02	4.31	4.08	3.87	3.68	3.50	3.50	3.49
2.00	5.93	5.94	5.93	5.92	5.04	4.30	4.08	3.87	3.68	3.50	3.50	3.49

表 9 GFRP 筋材料分项系数 γ_f 对可靠指标均值的影响(办公楼)

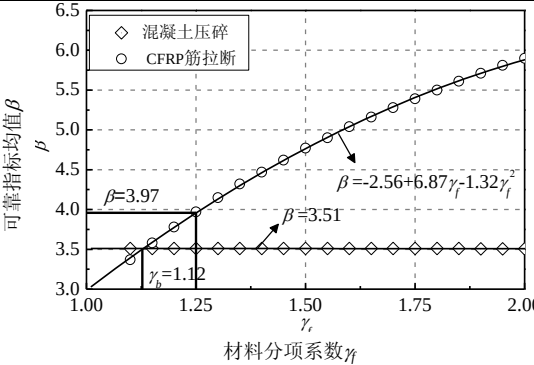
Table 9 Effect of the partial factor of GFRP rod on average reliability index (office building)

γ_f	ρ_f/ρ_b											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	2.0	2.5
1.10	3.33	3.34	3.35	3.33	3.37	3.38	3.39	3.40	3.42	3.51	3.51	3.51
1.15	3.55	3.56	3.56	3.55	3.58	3.59	3.60	3.62	3.63	3.51	3.51	3.51
1.20	3.75	3.76	3.77	3.75	3.78	3.79	3.80	3.82	3.83	3.51	3.51	3.51
1.25	3.94	3.95	3.96	3.94	3.97	3.98	3.99	4.00	4.01	3.51	3.51	3.51

η	ρ_f/ρ_b											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.5	2.0	2.5
1.30	4.12	4.13	4.14	4.15	4.15	4.16	4.17	4.18	4.19	3.51	3.51	3.51
1.35	4.29	4.30	4.31	4.29	4.32	4.33	4.34	4.34	4.13	3.51	3.51	3.51
1.40	4.46	4.46	4.47	4.46	4.48	4.49	4.49	4.41	4.21	3.51	3.51	3.51
1.45	4.61	4.62	4.62	4.61	4.63	4.64	4.64	4.40	3.69	3.51	3.51	3.51
1.50	4.76	4.76	4.77	4.76	4.78	4.78	4.78	4.47	3.69	3.51	3.51	3.51
1.55	4.89	4.90	4.91	4.89	4.91	4.91	4.68	3.89	3.69	3.51	3.51	3.51
1.60	5.03	5.03	5.04	5.03	5.04	5.04	4.74	3.89	3.69	3.51	3.51	3.51
1.65	5.15	5.16	5.16	5.15	5.16	5.06	4.10	3.89	3.69	3.51	3.51	3.51
1.70	5.27	5.28	5.28	5.27	5.28	5.02	4.10	3.89	3.69	3.51	3.51	3.51
1.75	5.39	5.40	5.40	5.39	5.39	5.07	4.09	3.88	3.69	3.51	3.51	3.51
1.80	5.50	5.51	5.51	5.50	5.50	4.32	4.09	3.88	3.69	3.51	3.51	3.51
1.85	5.61	5.61	5.61	5.61	5.36	4.32	4.09	3.88	3.69	3.51	3.51	3.51
1.90	5.71	5.71	5.71	5.71	5.41	4.32	4.09	3.88	3.69	3.51	3.51	3.50
1.95	5.81	5.81	5.81	5.81	5.45	4.32	4.09	3.88	3.69	3.51	3.51	3.50
2.00	5.90	5.90	5.90	5.90	4.57	4.32	4.09	3.88	3.69	3.51	3.51	3.50

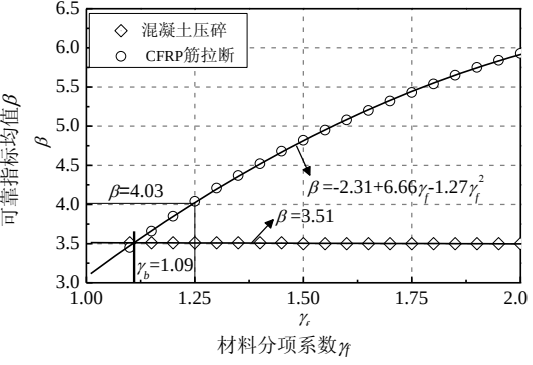


(a) 住宅(CFRP 筋)

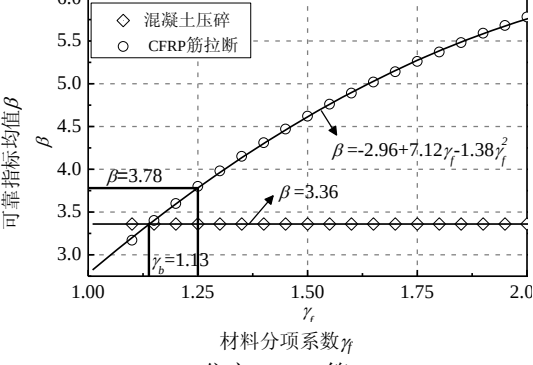


(d) 办公楼(GFRP 筋)

图 2 FRP 筋材料分项系数 η_f 对可靠指标均值的影响
Fig.2 Effect of partial factors of FRP rods on average reliability index



(b) 办公楼(CFRP 筋)



(c) 住宅(GFRP 筋)

5 结论

本文基于目前中国混凝土结构的设计理论以及相关可靠度分析背景资料,建立了 FRP 筋混凝土梁受弯正截面承载力的计算公式,对其中的 FRP 筋材料分项系数 η_f 采用验算点法进行了确定。通过对国内外学者进行的 117 根 FRP 筋混凝土梁试验数据的统计分析,得到计算模式不定性系数 Ω_p 的均值和变异系数,分别为 0.980 和 0.105。对不同 FRP 筋分项系数 γ_f 下可靠指标平均值的计算结果表明:当混凝土受压破坏时,可靠指标均值几乎不受相对配筋率 ρ_f/ρ_b 的影响;对于 $\rho_f/\rho_b \leq 1.0$ 的情况,由于材料强度取值的不同,在某个区间内,截面的设计破坏模式与实际破坏模式在判别上不完全一致,且这种不一致现象存在的范围随着 η_f 的增大而增大。无论对于 GFRP 筋还是 CFRP 筋,FRP 筋的材料分项系数均可取值 1.25,这样既可满足《设计标准》^[25]

对目标可靠指标的要求,又可以避免造成不必要的浪费。过于保守的 FRP 筋分项系数 γ_f 只能导致材料的浪费,对于提高可靠度水平的意义不大。

参考文献:

- [1] ACI Committee 440. State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures [R]. Report No. ACI 440R-96, American Concrete Institute. Detroit, Michigan, USA, 1996.
- [2] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars [R]. Report No. ACI 440.1R-03, American Concrete Institute. Detroit, Michigan, USA, 2003.
- [3] Canadian Standards Association International (CSA). Design and construction of building components with fiber reinforced polymers [S]. Report No. CSA-S806-02, Canadian Standards Association. Toronto, Ontario, Canada, 2002.
- [4] ISIS Canada Corporation. Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers [R]. Design Manual No.3, ISIS Canada Corporation. Winnipeg, Manitoba, Canada, 2001.
- [5] Japan Society of Civil Engineers. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforced materials [R]. Concrete Engineering Series No.23. Tokyo, Japan, 1997.
- [6] 《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.
Task Group on the Technical Code. The technical code for the application of fiber reinforced plastics in civil engineering [S] (Draft). Beijing, 2006. (in Chinese)
- [7] He Z, Ou J P. Probability-based design for FRP reinforced concrete structures: A critical review and research needs [C]// GangaRao H, Karbhari V. Proceedings of the 50th SAMPE Symposium. Long Beach, California, USA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2005, Paper ID: 083.
- [8] Plevris N, Triantafillou T C, Veneziano D. Reliability of RC members strengthened with CFRP laminates [J]. Journal of Structural Engineering. ASCE, 1995, 121(7): 1037—1044.
- [9] Monti G, Santini S. Reliability-based calibration of partial safety coefficients for fiber-reinforced plastic [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2002, 6(3): 162—167.
- [10] Okeil A M, El-Tawil S, Shahawy M. Flexural reliability of reinforced concrete bridge girders strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2002, 7(5): 290—299.
- [11] Val D V. Reliability of fiber-reinforced polymer-confined reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(8): 1122—1130.
- [12] Triantafillou T C. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(2): 107—115.
- [13] Khalifa A. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1998, 2(4): 195—202.
- [14] 董旭峰. 智能 CFRP 加固钢筋混凝土结构荷载效应与可靠度模拟测评[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
Dong Xufeng. Load effect and reliability simulation assessment of reinforced concrete structures strengthened with smart CFRP [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
- [15] 向志虎. 碳纤维布加固构件的可靠度与全过程质量控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
Xiang Zhihu. Research on the reliability and whole process quality control of the CFRP-reinforced structures [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [16] 朱剑俊. 碳纤维加固钢筋混凝土受弯构件研究及其可靠性分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2003.
Zhu Jianjun. The research of the reliability for the reinforced concrete flexural member strengthened with CFRP [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [17] 赵军. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁可靠性研究[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(2): 166—168.
Zhao Jun. Reliability analysis of the prestressing force CFRP strengthening RC beams [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2005, 25(2): 166—168. (in Chinese)
- [18] 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 Xiaoyan, Huang Chengkui, Sun Baoshu. Time-dependent reliability analysis of existing bridges strengthened with FRP laminates [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Series), 2005, 35(3): 427—432. (in Chinese)
- [19] Neocleous K, Pilakoutas K, Waldron P. Structural reliability for fiber reinforced polymer reinforced concrete structures [C]// Dolan C W, Rizkalla S H, Nanni A. Proceeding of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforced for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-4). Baltimore, Maryland, USA: American Concrete Institute, 1999: 65—74.
- [20] Pilakoutas K, Neocleous K, Guadagnini M. Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2002, 6(3): 154—161.
- [21] Benmokrane B, Chaallal O, Masmoudi R. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(1): 46—55.
- [22] 何政, 黄永春. FRP 加筋混凝土受弯正截面承载力可靠度评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 650—655.

- He Zheng, Huang Yongchun. Reliability assessment of flexural capacity of concrete reinforced with FRP rebars [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 650—655. (in Chinese)
- [23] 何政, 黄永春. FRP 加筋混凝土受弯正截面承载力可靠度参数研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(8): 1191—1195.
- He Zheng, Huang Yongchun. Parametric study on the reliability of flexural capacity of concrete reinforced with FRP rebars [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(8): 1191—1195. (in Chinese)
- [24] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- GB50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [25] GB50068-2001, 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.
- GB50068-2001, Unified standard for reliability design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [26] 李光. FRP 筋混凝土受弯构件可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- Li Guang. Reliability analysis of flexural concrete members reinforced with FRP rods [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [27] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- GB50009-2001, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [28] Nawy E W, Neuwerth A M, Philips C J. Behavior of fiber glass reinforced concrete beams [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1971, 97(ST9): 2203—2215.
- [29] Nawy E W, Neuwerth A M. Fiber glass reinforced concrete beams and slabs [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1977, 103(2): 421—440.
- [30] GangaRao H V A, Faza S S. Bending and bond behavior and design of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars [R]. Report No. CFC-92-142, WVDOH, edited by Charleston WV, USA, 1991.
- [31] Brown V L, Bartholomew C L. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(1): 34—39.
- [32] Benmokrane B, Chaallal O, Masmoudi R. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(1): 46—55.
- [33] Almusallam T H, Al-Salloum Y, Alsayed S, Amjad M. Behavior of concrete beams doubly reinforced by FRP bars [C]// Okamura H, Morita S, Uomoto T. Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3). Sapporo, Japan: Japan Concrete Institute, 1997, 2: 471—478.
- [34] Sonobe Y, Fukuyama H, Tokamoto T. Design guidelines of FRP reinforced concrete building structures [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1997, 1(3): 90—115.
- [35] Zhao W, Pilakoutas K, Waldron P. FRP reinforced concrete: Cracking behavior and determination [C]// Okamura H, Morita S, Uomoto T. Proceeding of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforced for Concrete Structures (FRPRCS-3). Sapporo, Japan: Japan Concrete Institute, 1997, 2: 439—446.
- [36] Gao D Y, Benmokrane B, Masmoudi R. A calculating method of flexural properties of FRP-reinforced concrete beam—Part 1: Crack width and deflection [R]. Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Quebec, Canada, 1998.
- [37] Masmoudi R, Theriault M, Benmokrane B. Flexural behavior of concrete beams reinforced with deformed fiber reinforced plastic reinforcing rods [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(6): 665—676.
- [38] Theriault M, Benmokrane B. Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1998, 2(1): 7—16.
- [39] 薛伟辰, 康清梁. 纤维塑料筋混凝土梁受力性能的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(12): 8—10.
- Xue Weicheng, Kang Qingliang. Experimental study on behaviors of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastics bars [J]. Industrial Construction, 1999, 29(12): 8—10. (in Chinese)
- [40] Aiello M A, Ombres L. Load-deflection analysis of FRP reinforced concrete flexural members [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000, 4(4): 164—171.
- [41] Alsayed S H, Al-Salloum Y, Almusallam T H. Performance of GFRP bars as a reinforcing material for concrete structures [J]. Composites Part B: Engineering, Elsevier, 2000, 31(6/7): 555—567.
- [42] Toutanji H A, Saafi M. Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(5): 712—719.
- [43] 高丹盈, Benmokrane B. 玻璃纤维聚合物筋混凝土梁正截面承载力的计算方法[J]. 水利学报, 2001, 32(9): 73—80.
- Gao Danying, Benmokrane B. Calculation method of flexural capacity of GFRP-reinforced concrete beam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(9): 70—78. (in Chinese)
- [44] 何政. 基于损伤性能的结构抗震设计与 FRP 筋及配筋混凝土构件基本力学性能研究[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- He Zheng. Damage-performance-based structural seismic design and basic mechanical properties of FRP rebars and their reinforced concrete members [R]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003. (in Chinese)

- [45] 张作诚. 碳纤维筋增强混凝土的试验研究及力学性能分析[D]. 南京: 河海大学, 2005.
Zhang Zuocheng. The experimental research and analysis of mechanics properties on CFRP tendons reinforced concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [46] 胡德炘, 马坤贞. 钢筋混凝土结构可靠度的研究[J]. 建筑结构学报, 1987, 8(3): 18—24.
Hu Dexin, Ma Kunzhen. A study on reliability of reinforced concrete structure [J]. Journal of Building Structures, 1987, 8(3): 18—24. (in Chinese)
- [47] Rackwitz R, Fiessler B. Structure reliability under combined random sequences [J]. Computers & Structures, Elsevier, 1978, 9: 489—494.
- [48] 史志华, 胡德炘, 陈基发. 钢筋混凝土结构安全度水准修订评估[J]. 建筑科学, 2002, 18(增刊 2): 50—57.
Shi Zhihua, Hu Dexin, Chen Jifa. Evaluation on the levels of modified degree of safety for reinforced concrete structures [J]. Building Science, 2002, 18 (Supplement2): 50—57. (in Chinese)
- [49] 李继华, 林忠民. 建筑结构概率极限状态[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
Li Jihua, Lin Zhongmin. Probabilistic ultimate states of building structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990. (in Chinese)

(上接第 213 页)

参考文献:

- [1] Chen L, Tao X M, Choy C L. Mechanical analysis of 3D braided composites by the finite multiphase element method [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(16): 2383—2391.
- [2] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials, Part III: Nonlinear finite element deformation analysis [J]. Composite Structures, 2001, 51(4): 451—457.
- [3] 庞宝君, 曾涛, 杜善义. 三维多向编织复合材料有效弹性模量的细观计算力学分析[J]. 计算力学学报, 2001, 18(2): 231—234.
Pang Baojun, Zeng Tao, Du Shanyi. Meso-scopic computing mechanics analysis of three-dimensional multi-directional braided composites [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(2): 231—234. (in Chinese)
- [4] 杨振宇, 卢子兴, 刘振国, 李仲平. 三维四向编织复合材料力学性能的有限元分析[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 155—161.
Yang Zhenyu, Lu Zixing, Liu Zhenguo, Li Zhongping. Finite element analysis of the mechanical properties of 3D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 155—161. (in Chinese)
- [5] 王迎娜, 王玉林, 万怡灶. 三维四向编织复合材料胞模型的修正[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 128—133.
Wang Yingna, Wang Yulin, Wan Yizao. Modifying of global-cell model of 3D and 4-step braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 128—133. (in Chinese)
- [6] Zeng Tao, Fang Daining, Lu Tianjian. Dynamic crashing and impact energy absorption of 3D braided composite tubes [J]. Materials Letters, 2005, 59(12): 1491—1496.
- [7] Jenq S T, Kuo J T, Sheu L T. Ballistic impact response of 3-D four step braided glass/epoxy composites [J]. Key Engineering Materials, 1998, 141-143: 349—366.
- [8] Ochola R O, Marcus K, Nurick G N, Franz T. Mechanic behaviour of glass and carbon fiber reinforced composites at varying strain rates [J]. Composite Structures, 2004, 63(3-4): 455—467.
- [9] Hosur M V, Alexander J, Vaidya U K, Jeelani S. High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites [J]. Composite Structures, 2001, 52(3-4): 405—417.
- [10] Hosur M V, Alexander J, Vaidya U K, Jeelani S, Mayer A. Studies on the off-axis high strain rate compression loading of satin weave carbon/epoxy composites [J]. Composites Structures, 2004, 63(1): 75—85.
- [11] El-Habak A M A. Compressive resistance of unidirectional GFRP under high strain rate of loading [J]. Journal of Composites Technology, 1993, 15(4): 311—317.
- [12] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
Wang Lili. Foundation of stress wave [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [13] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(1): 93—106.
- [14] Cowper G R, Symonds P S. Strain hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams [R]. Brown University, Division of Applied Mathematics Report No. 28, 1957.