

文章编号:1671-6833(2011)02-0080-04

## FRP 加固桥梁受弯构件的可靠性分析

闫磊,任伟

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**利用可靠度方法对 JTG/T J22—2008《公路桥梁加固设计规范》中矩形截面受弯构件的 FRP 加固进行了研究,通过 Monte-Carlo 法获得了加固后构件抗力的统计参数:均值为 1.713、标准差为 0.545、变异系数为 0.318.考虑不同  $\rho$  值及汽车运行状态,研究了加固后构件可靠指标的分布规律.结果表明:受抗力变异性增大的影响,构件可靠指标略低于规范的标准,加固规范对汽车荷载提级增幅较大的构件安全设置水准较大.

**关键词:**桥梁工程;受弯构件;FRP;加固;可靠度

**中图分类号:** U448.1 **文献标志码:** A

### 0 引言

随着可靠度理论的日趋成熟及桥梁加固技术的广泛应用,对加固后桥梁构件的可靠度研究逐渐成为研究热点.文献[1]利用可靠度方法对碳纤维加固后桥梁的耐久性进行了研究,得到了计算模式不定性系数的统计参数,并提出加固后构件承载力分析可不考虑片材与构件粘结界面退化的影响;文献[2]基于可靠度理论给出了 FRP 筋材料在加固计算中的材料分项系数;文献[3]基于可靠度的概念给出了 RC 梁抗弯加固安全系数的建议值为 1.25;文献[4]给出了 FRP 加固后构件的抗弯抗力模型,并提出片材变异系数较小使得加固后构件可靠度增大的结论.文献[5]通过考虑材料的变异性,对 FRP 加固桥面板的可靠度进行了分析.综合现有的研究成果,均是考虑单个构件或对可靠度分析的单因素进行了研究,笔者以 JTG/T J22—2008《公路桥梁加固设计规范》中矩形截面 RC 受弯构件的加固计算方法为研究对象,利用可靠度理论对不同状况下的加固后可靠指标的分布规律进行研究,以供加固规范修订或对服役构件加固设计时参考.

### 1 加固后构件抗力概率模型

受弯构件加固后抗力概率模型为:

$$R_M = f_{cu,k}bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_{sk}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{sk}A'_s + f_{cu,k}bx - f_{sk}A_s a_s) \quad (1)$$

$$x = \frac{0.8\varepsilon_{cu}h}{\varepsilon_{cu} + [\varepsilon_f] + \varepsilon_1} \quad (2)$$

式中: $R_M$  为构件抗弯抗力随机变量; $f_{cu,k}$  为混凝土抗压强度标准值; $b, h_0$  为分别为构件截面宽度和有效高度,为随机变量; $x$  为混凝土受压区高度; $f_{sk}, A_s, a_s$  分别为受拉区钢筋的标准强度、面积、钢筋合力点至受拉区边缘的距离,为随机变量; $f'_{sk}, A'_s, a'_s$  分别为受压区钢筋的标准强度、面积、钢筋合力点至受压区边缘的距离,为随机变量; $[\varepsilon_f]$  为 FRP 的极限应变; $\varepsilon_1$  为截面受拉边缘混凝土的初始应变; $\varepsilon_{cu}$  为混凝土极限压应变; $h$  为构件截面高度,为随机变量.

加固规范在给定纤维布加固设计表达式时,对纤维加固后的破坏形态进行了讨论,实际上状况三或状况四可通过设计及构造措施来避免,而状况一及状况二均是基于受拉钢筋屈服后,分情况对混凝土与碳纤维失效的先后次序进行了讨论,其表达式是关于受压区高度  $x$  与纤维应变  $\varepsilon_f$  的复合函数.以体系失效树的观点来看,在受拉钢筋屈服后认为构件已经失去承载能力,即发生失效.故笔者以此失效准则为依据对构件加固后抗力概率模型进行分析.

收稿日期:2010-10-10;修订日期:2010-11-16

基金项目:西部交通建设科技资助项目(200731882231);中央高校基础研究资助项目(CHD2009JC017)

作者简介:闫磊(1979-),男,山西运城人,长安大学讲师,博士研究生,主要从事桥梁结构可靠性研究.

$R_M$  的统计参数为:

$$\mu_{R_M} = \mu_{f_{cu,k}} \mu_b \mu_x \left( \mu_{h_0} - \frac{\mu_x}{2} \right) \mu_{f_{sk}} \mu_{A_s'} (\mu_{h_0} - \mu_{a_s'}) + (\mu_{f_{sk}} \mu_{A_s'} + \mu_{f_{cu,k}} \mu_b \mu_x - \mu_{f_{sk}} \mu_{A_s'}) \mu_{a_s'} \quad (3)$$

$$\mu_x = \frac{0.8 \varepsilon_{cu} \mu_h}{\varepsilon_{cu} + [\varepsilon_f] + \varepsilon_1} \quad (4)$$

$$\sigma_{R_M} = \sqrt{\sum_{i=1}^9 \left( \frac{\partial R_M}{\partial X_i} \Big|_{\mu} \sigma_{X_i} \right)^2} \quad (5)$$

式中: $\mu$  为各随机变量均值之意; $\frac{\partial R_M}{\partial X_i} \Big|_{\mu}$  为  $R_M$  对  $X_i$  的偏导数,并且各个随机变量在其平均值处取值, $\sigma_{X_i}$  为随机变量  $X_i$  的标准差.

表 1 荷载效应统计参数

Tab. 1 Statistical parameter of load effect

荷载类型	分布类型	设计基准期最大值概率分布参数		
		均值	标准差	变异系数
恒载效应	正态分布	1.014 8	0.043 7	0.043 1
汽车荷载效应 (一般运行状态/弯矩)	极值 I 型分布	0.686 1	0.107 6	0.156 9
汽车荷载效应 (密集运行状态/弯矩)	极值 I 型分布	0.799 5	0.068 9	0.086 2

表 2 材料强度统计参数

Tab. 2 Statistical parameter of material strength

类型	分布类型	均值	标准差	变异系数
截面高度 $h$	正态分布	1.006 4	0.025 7	0.025 5
截面宽度 $b$	正态分布	1.001 3	0.008 1	0.008 1
截面有效高度 $h_0$	正态分布	1.012 4	0.023 2	0.022 9
混凝土强度 $f_c$	正态分布	1.387 7	0.190 7	0.137 4
钢筋面积 $A$	正态分布	1.000 0	0.035 0	0.035 0
钢筋强度 $f_s$	正态分布	1.082 1	0.131 0	0.121 1

### 3 可靠度计算

JTG D62—2004 与 JTG 023—85《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》是选用“校准法”保持可靠度的衔接性,从设计角度讲抗力与荷载效应的相对关系仍维持在同一水平. GB/T 50283—1999《公路工程可靠度设计规范》采用的抗力表达式为:

$$R_k = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 (\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{QK}) \quad (6)$$

式中:恒载分项系数  $\gamma_G$  取 1.2;汽车荷载分项系数  $\gamma_Q$  取 1.4; $\gamma_1$  为构件工作条件系数; $\gamma_2$  为材料性能分项系数; $\gamma_3$  为车辆荷载效应分项系数的调整系数.若汽车荷载效应与恒载效应的比值  $\rho = S_{QK}/S_{GK}$ ,那么有:

$$R_k = (1.5 + 1.75\rho) \gamma_3 S_{GK} \quad (7)$$

### 2 抗力与荷载效应的概率分布及统计参数

加固前构件抗力服从对数正态分布,加固后的  $\Delta R$  仍为几个正态分布随机变量乘积的形式,由中心极限定理可知  $\Delta R$  亦近似服从对数正态分布.

作用于桥梁上的荷载有多种,在笔者的研究中仅讨论恒载与汽车荷载的基本组合,关于材料不定性参数及荷载统计参数的选取,参考相关文献[6-9]列于表 1~2.

由于构件的可靠度  $\beta$  只与汽车荷载效应与恒载效应的比值  $\rho$  有关,取  $\rho = 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5$  进行讨论,可靠度由映射变换法求得.令  $\rho = S_{QK1}/S_{GK1}$ ,加固后与加固前汽车荷载比  $\omega_1 = S_{QK}/S_{QK1}$ ,加固后与加固前恒载效应比  $\omega_2 = S_{GK}/S_{GK1}$ , $S_{QK1}$  和  $S_{GK1}$  分别为加固前汽车荷载效应与恒载效应, $S_{QK}$  和  $S_{GK}$  分别为加固后汽车荷载效应与恒载效应,即目标抗力的参考值,取  $\omega_1 = 1.2 \sim 2$ ,  $\omega_2 = 1 \sim 1.2$ ,分别与  $\rho$  进行组合后讨论.

为了获取 FRP 加固后抗力计算的统计参数  $K_R$ ,依据式(3)~(5)的计算原理及表 2 的统计参数,利用 Monte-Carlo 法可得  $K_R$  的统计结果为: $\mu_{K_R} = 1.560, \sigma_{K_R} = 0.305, \delta_{K_R} = 0.196$ .借鉴现有研究成果,取  $\mu_{K_p} = 1.098, \sigma_{K_p} = 0.275, \delta_{K_p} = 0.251$ ,那么 FRP 加固后抗弯抗力综合统计参数为:

$$\mu_{K_{R,N}} = 1.713, \sigma_{K_{R,N}} = 0.545, \delta_{K_{R,N}} = 0.318.$$

加固后构件可靠度  $\beta$  的分布规律如图 1 所示,为了节省篇幅这里仅给出  $\rho = 0.1, 1.0$  及 2.5 时可靠指标的状况.

若恒载效应不变,汽车荷载效应变化时, $\rho$  与  $\beta$  变化的相对关系如图 2 所示.

由图 1 总体分布可见,加固后构件的可靠指标随  $\omega_1$  的增大呈线性增长,这一规律说明小跨径

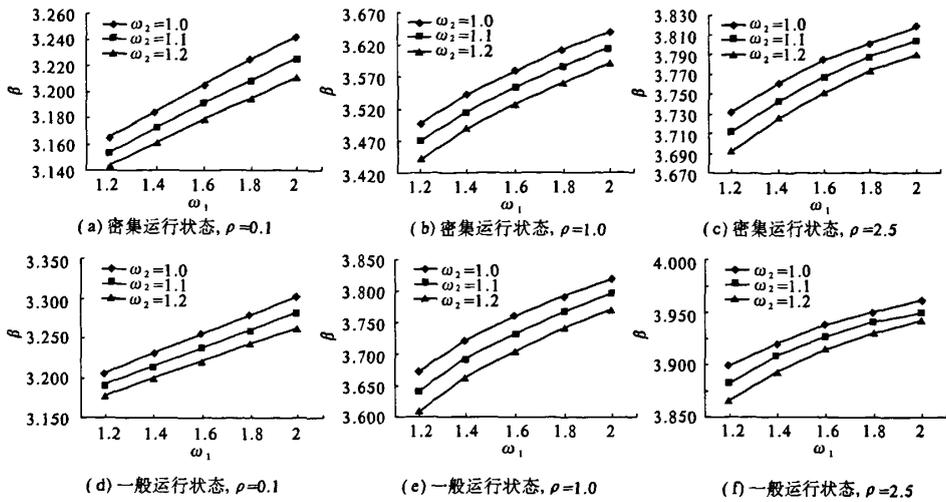


图1 \$\rho = 0.1, 1.1, 2.5\$ 时 \$\omega\_1 - \beta\$ 关系曲线

Fig.1 Curves about \$\omega\_1 - \beta\$ when \$\rho = 0.1, 1.1, 2.5\$

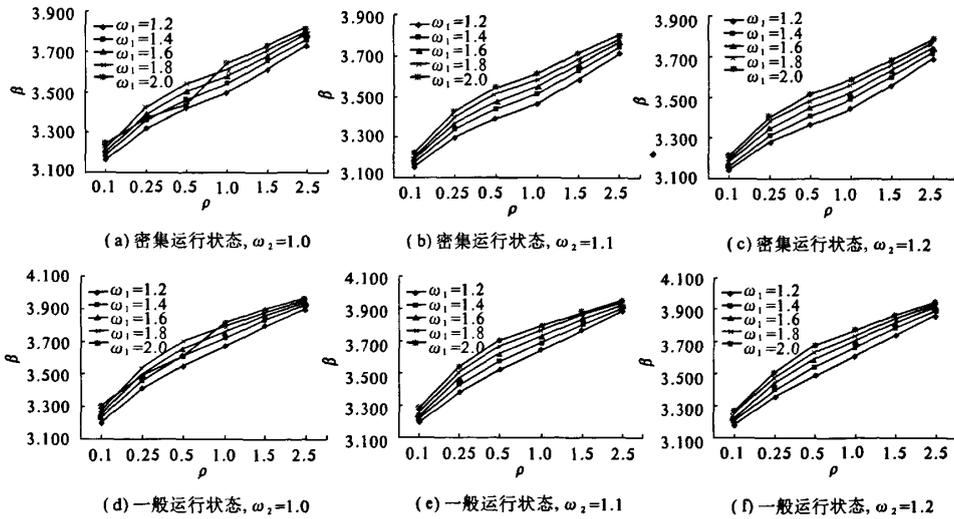


图2 \$\omega\_2 = 1.0, 1.1, 1.2\$ 时 \$\rho - \beta\$ 关系曲线

Fig.2 Curves about \$\rho - \beta\$ when \$\omega\_2 = 1.1, 1.1, 1.2\$

及大跨径桥梁随着汽车荷载等级的提高其安全度不断增大.但可靠指标总体略低于可靠度规范的标准,这与加固后构件计算的变异系数的增大有关.当 \$\omega\_1 = \omega\_2 = 1.2\$ 时,各个构件的可靠指标最小,而当 \$\omega\_1 = 2, \omega\_2 = 1\$ 时,可靠指标最大,说明加固计算方法对提级增幅较大的构件安全设置水准较大,当 \$\rho > 1\$ 时,已大于延性破坏的最低水平3.7.

对于不同构件,若 \$\omega\_2\$ 保持不变,随着 \$\omega\_1\$ 的增大,对于不同的 \$\rho\$ 值,构件的可靠指标增大的趋势基本相同,汽车运行状态对结构可靠指标的变化规律的影响很小,相同条件下,密集运行状态较一般运行状态的可靠度指标小约10%左右,且 \$\rho\$ 越

大,两种运行状态的可靠指标差值越大,说明汽车运行状态对中小跨径桥梁可靠度的影响不可忽视.

图2是恒载效应提高系数 \$\omega\_2\$ 为定值时,不同类型桥梁随着 \$\omega\_1\$ 变化时的可靠指标的变化规律,总体上看均是呈增大的趋势,在 \$\rho = 0.1\$ 及 \$2.5\$ 时可靠指标分布较集中,相对差异最大为3.7%,其余状况较离散,可靠指标的相对差异最大为5.3%.反映了大跨径桥梁及小跨径桥梁可靠度对提级加固不敏感;而中等跨径桥梁,尤其是 \$\rho = 1.0, 0.5\$ 时,构件对加固后汽车荷载效应的变化较敏感, \$\omega\_1\$ 越高, \$\beta\$ 越大.

## 4 结论

(1)依据加固规范给出了加固后构件抗力概率模型,以可靠度规范为依据利用 Monte-Carlo 法模拟随机样本,通过统计分析得到了 FRP 加固后的统计参数为: $\mu_{K_{R,M}} = 1.713$ ,  $\sigma_{K_{R,M}} = 0.545$ ,  $\delta_{K_{R,M}} = 0.318$ .

(2)针对不同类型的构件,以恒载及活载效应提高系数的不同组合为基础研究了 FRP 加固受弯构件的可靠度,结果表明:加固后可靠指标略低于可靠度规范的标准.

(3)汽车运行状态对桥梁可靠度影响较大,从设计角度讲桥梁构件随着汽车荷载等级的提高其安全度不断增大.

### 参考文献:

- [1] 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(5):427-432.
- [2] 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.
- [3] GIORGIO M, SILVIA S. Reliability-based calibration of partial safety coefficients for fiber-reinforced plastic [J]. Journal of composites for construction, 2002, 6(8):162-167.
- [4] AYMAN M, SHERIF E, MOHSEN 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.
- [5] REBECCA A, LUKE L, VISTASP M, et al. Consideration of material variability in reliability analysis of FRP strengthened bridge decks [J]. Composite Structures, 2005, 70(4):430-443.
- [6] 闫磊,吕颖钊,贺拴海,等. 在役混凝土桥梁构件可靠性实用评估方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5):13-19.
- [7] 王华琪,赵鸣,李杰,等. 混凝土强度统计数据的应用与分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(7):861-865.
- [8] 杨勇新. 碳纤维布加固混凝土梁的可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2008(S1):88-91.
- [9] 段成晓,刘小玲,徐德新,等. 既有桥梁外贴 CFRP 加固后剩余使用寿命预测[J]. 武汉大学学报:工学版, 2008, 41(6):70-74.

## Reliability Analysis of Bridge Bending Component Strengthened with FRP

YAN Lei, REN Wei

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** This paper studied the bending component strengthened with fibre reinforced polymer (FRP) based on the Specifications for Strengthening Design of Highway Bridge (JTG/T J22—2008) with reliability method. The statistics parameters were achieved by means of Monte-Carlo method, the average value was 1.713, the standard deviation was 0.545 and the variation coefficient was 0.318. The distributing law of reliability index considering  $\rho$  and vehicle operation state was studied. The result showed that the reliability of strengthened component was slightly lower than the code. The safety reservations of components were greater for reinforcement of larger increase amplitude load effect.

**Key words:** bridge engineering; bending component; FRP; strengthening; reliability