

亚健康公路混凝土梁式桥的限载方法研究*

刘爱荣¹, 张俊平¹, 禹奇才¹, 吴刚²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;
2. 中铁四院集团广州设计院有限公司, 广东 广州 510080)

摘要: 为合理适度地利用亚健康公路梁式桥的通行能力, 引入了亚健康公路梁式桥的使用承载能力的概念, 基于工程可靠度的分析方法, 结合实际现役亚健康公路梁式桥的外观检查、荷载试验及有限元分析结果, 以混凝土梁式桥的裂缝宽度作为广义抗力, 综合考虑了运营荷载、钢筋锈蚀等随机因素, 探讨了亚健康公路混凝土桥梁使用承载能力的可靠度分析方法, 结合工程实例提出了亚健康桥梁的限载方法, 为现役亚健康公路桥梁的科学限载及合理使用提供了理论依据。

关键词: 亚健康; 混凝土梁式桥; 使用承载能力; 限载

中图分类号: U445.7; TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)05-0042-05

Research on the Load Limit Method for Sub-health Highway Concrete Beam Bridge

LIU Airon¹, ZHANG Junping¹, YU Qicai¹, WU Gang²

(1. School of Civil Engineering of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)
(2. Forth Ground Guangzhou Design Institute Co., LTD. of CRCC, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to make use of the load-carrying capacity reasonably and moderately, the concept of serviceability bearing capacity is introduced in this paper. Based on the reliability analysis method, combining the result of appearance investment of existing highway sub-health bridge with load test and FE analysis, further, consider random factors such as carrying load and corrosion of reinforcement, take the crack width of concrete beam as generalized resistance force, the reliability analysis method of the serviceability capacity of sub-health highway concrete beam bridge is discussed, and the corresponding vehicular load limit method is put forward. The research result of this paper can be used to provide the academic reference for reasonable and scientific usage of sub-health highway bridges.

Key words: sub-health; concrete beam bridge; serviceability carrying capacity; load limit

亚健康桥梁是指桥梁结构安全性能曾经满足设计及运营荷载的要求, 但由于实际运营荷载的超载、外部不良环境侵蚀以及内部缺陷发展等因素影响结构病害发展而导致结构不适用、耐久性差, 存在潜在安全风险的桥梁。亚健康桥梁结构处于带损伤状态, 不满足设计活载的通行要求, 但通过限载等措施降低通行荷载等级, 在加固改造之前短时间内结构损伤不会进一步恶化。

在我国以及欧洲、北美等发达国家和地区, 亚

健康桥梁数量十分巨大, 由于亚健康公路桥梁提级改造涉及面广、风险尚未完全彰显, 在交通基础设施维护资金有限的情况下, 人们往往主要关注病危桥梁的加固改造, 尚顾及不到亚健康公路桥梁的安全、科学、合理的使用问题, 导致在桥梁运营荷载限制的实施过程中经常存在以下两种偏差: 一种是不加限制的使用, 以至小病害发展成大问题, 加固改造费用成倍增加, 甚至在某些情况下演变成为重大的结构安全事故; 另一种是非常保守地进行限

* 收稿日期: 2009-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878059); 广东省自然科学基金资助项目(7001897)

作者简介: 刘爱荣(1972年生), 女, 博士, 教授; E-mail: Liu-a-r@163.com

载,导致区域交通路网的功能严重削弱乃至瘫痪。以上两种运营荷载限制方式要么存在巨大的安全风险,要么导致社会资源产生极大的浪费。因此,科学合理地确定运营荷载限值已经成为亚健康桥梁管理养护的当务之急,以便既安全、适度地发挥亚健康桥梁在交通路网中的作用,又防止亚健康桥梁在继续使用过程中既有病害恶化或产生新的病害,造成重大安全事故^[1-2]。

目前已有学者针对新建桥梁以及服役期间桥梁的承载能力极限状态和正常使用极限状态的可靠度进行了广泛研究,部分研究成果已被纳入了相关设计规范,然而通过研究亚健康公路桥梁的使用承载能力可靠度从而确定其运行荷载的限值尚未见相关正式报道^[3-7]。为科学评定亚健康桥梁的使用状况,本文引入了桥梁使用承载能力的概念^[1-2],并通过对亚健康公路混凝土梁式桥的使用承载能力的可靠度研究,提出了确定其合理限载值的方法。

1 亚健康公路桥梁的使用承载能力

结构在损伤极限状态下对应的承载能力,它既不是结构的极限承载能力,也不是对应于正常使用状态的承载能力,而是部分指标满足正常使用要求、有实际利用价值的桥梁承载力,是亚健康桥梁在加固改造之前、介于正常使用极限状态与承载能力极限状态中间过渡状态的承载力。

亚健康桥梁使用承载力^[1-2],既不是桥梁结构极限承载能力,也不等同于新建桥梁正常使用承载能力,而是部分指标满足正常使用要求、有实际使用意义的桥梁承载力,运营车辆荷载效应在该承载力范围内,既可安全、适度地发挥亚健康桥梁的作用,又可防止亚健康桥梁在继续使用过程中原有病害恶化或产生新的病害,是亚健康桥梁在加固改造之前、介于正常使用极限状态与承载能力极限状态中间过渡状态的承载力。与新建桥梁及正常使用满足设计要求的现役桥梁比,亚健康桥梁使用基准期相对较短,本文暂定为1年。

以普通钢筋混凝土简支梁受弯行为例,如图1,图中 P_r 为结构极限承载能力, P_s 为正常使用承载能力, P_{is} 处于 P_r 和 P_s 之间,即结构能完全满足承载能力极限状态的设计要求,但部分正常使用性能指标已失效,结构虽然处于带损伤状态,但仍然具备一定的承载能力,通过限载等措施,在加固改造前尚可以通行,不至引起结构损伤的进一步恶化。接近于加拿大1980年规范、前苏联规范所定义的损伤极限状态或裂缝极限状态所对应的结构承

载能力。

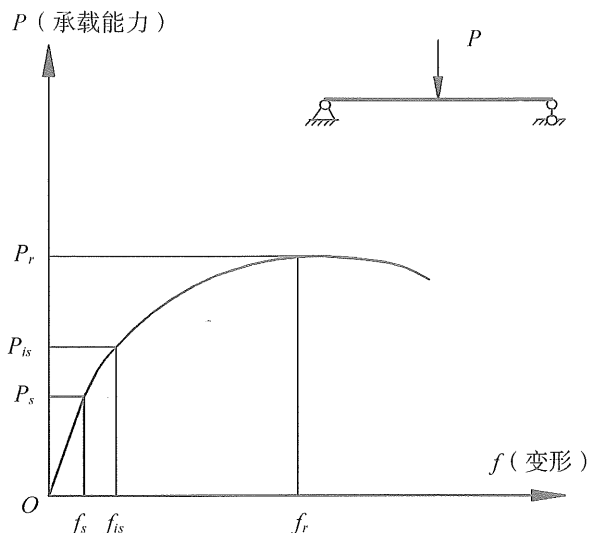


图1 桥梁使用承载能力、
极限承载能力和正常使用承载能力的关系

Fig. 1 The relationship of serviceability carrying capacity, limit carrying capacity and normal serviceability carrying capacity of bridge

亚健康桥梁使用承载力的确定比较复杂,既要考虑原设计荷载标准、材料性能、支承约束等设计计算参数的变异,又要考虑结构各类缺陷病害、裂缝发展变化、铺装层参与受力等不确定因素对桥梁承载能力的影响,目前,多借助于基于桥梁实际状况的检算、仿真分析计算、荷载试验评估等手段来确定亚健康桥梁使用承载力,但前两种方法难以全面考虑各种因素对承载力的影响,得出结果的可信度也不能令人满意。与桥梁结构的承载能力极限状态和正常使用承载能力相比,使用承载能力的失效准则更具有随机性和模糊性。

2 亚健康桥梁的模糊随机可靠度分析

对于正常设计、正常维护,但由超载引起混凝土开裂,且裂缝宽度超出规范规定的正常使用极限状态最大裂缝控制值的亚健康混凝土桥梁,要求其在加固改造基准期内,尚能满足一定的通行能力,综合其当前技术状况和环境影响因素,用于反应其 t 时刻状态的功能函数可表示为:

$$Z(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

式中, $R(t)$ 为 t 时刻亚健康桥梁状态修正随机抗力,包括结构强度、裂缝宽度、刚度等; $S(t)$ 为 t 时刻亚健康桥梁承受随机荷载作用效应,包括恒载、通行荷载等等。当 $Z(t) > 0$ 时表示抗力 R

(t) 大于荷载效应 $S(t)$, 结构处于可靠状态, 即亚健康桥梁满足使用承载能力的要求, 结构受损状态不会进一步恶化; 当 $Z(t) < 0$ 时表示抗力 $R(t)$ 小于荷载效应 $S(t)$, 结构处于失效状态, 即不满足使用承载能力的要求, 桥梁受损状态会进一步恶化; 当 $Z(t) = 0$ 时表示抗力 $R(t)$ 等于荷载效应 $S(t)$, 结构刚好满足使用承载能力的要求。亚健康公路梁式桥的使用可靠度指标 β 可表示为,

$$\beta = \Phi^{-1}(P_R) = \Phi^{-1}(1 - P_f) = \Phi^{-1} \left| 1 - \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ \right| \quad (2)$$

式中 P_R 为使用可靠概率, $f(Z)$ 为失效概率功率密度函数, P_f 为使用失效概率。

由于亚健康公路梁式桥的广义抗力 R 为模糊随机变量, 广义荷载效应 S 为随机事件, 引入模糊数学的可靠度分析概念, 若 R 和 S 在统计上相互独立, 则 P_f 具体可表示为^[6],

$$P_f = \int_0^{\infty} f(Z) dZ = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_R(r) f_S(s) A_R(r, s) dr ds \quad (3)$$

式中 $f_R(r)$ 为 R 的概率密度函数; 和 $f_S(s)$ 为 S 的概率密度函数; $A_R(s)$ 为模糊随机失效事件的隶属函数。假设亚健康公路梁式桥的抗力 R 以最大裂缝的宽度为限值, 则 R 的确定具有主观性和模糊性, 所以仅将抗力 R 作为模糊随机事件, 则

$$P_f = \int_0^{\infty} f_S(s) A_R(s) ds \quad (4)$$

通常可依据模糊统计试验确定, 若缺乏统计数据, 可凭经验假定为升半梯形隶属函数^[7],

$$A_R(s) = \begin{cases} 0 & 0 \leq s \leq r_1 \\ (s - r_1)/(r_2 - r_1) & r_1 \leq s \leq r_2 \\ 1 & r_s < s \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 则有

$$P_f = \int_0^{\infty} f_S(s) A_R(s) ds = \int_{r_1}^{r_2} \frac{s - r_1}{r_2 - r_1} f_S(s) ds + \int_{r_2}^{\infty} f_S(s) ds \quad (6)$$

3 亚健康混凝土梁式桥的广义抗力

混凝土的开裂是影响桥梁结构使用性和耐久性的重要因素, 会引起钢筋锈蚀, 梁截面刚度的削减, 最终导致结构承载能力的降低, 所以亚健康混凝土桥梁健康状态即使用承载能力的最直观、且被人接受的参数指标就是混凝土的裂缝宽度, 从裂缝宽度大小可以反推出使用承载能力的大小, 文献^[8]详细研究了亚健康混凝土桥梁的使用承载能

力与裂缝宽度间的关系。本文以混凝土梁式桥模糊最大受力裂缝宽度作为亚健康公路混凝土梁式桥的可靠度分析的广义抗力 R , 裂缝宽度 $W_{\max}$ 可按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004) 规定公式计算^[9], 即,

$$W_{ik} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{30 + d}{0.28 + 10\rho} \right) \quad (7)$$

$$\rho = \frac{A_s + A_p}{bh_0 + (b_f - b)h_f} \quad (8)$$

式中, C_1 为钢筋表面形状系数, 光面钢筋为 1.4, 带肋钢筋为 1.0; $C_2 = 1 + 0.5(N_l/N_s)$, 为作用长期效应影响系数, N_l 和 N_s 分别为按作用长期效应组合和短期效应组合计算的内力值; C_3 为与构件受力性质有关的系数, 当为钢筋混凝土板式受弯构件时 $C_3 = 1.15$, 其它受弯构件 $C_3 = 1.0$; σ_{ss} 为钢筋应力; d 为纵向受拉钢筋直径; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率; b_f 为构件受拉翼缘宽度; h_f 为受拉翼缘厚度。

限于篇幅, 本文仅仅将亚健康混凝土梁式桥裂缝模糊最大宽度作为广义抗力, 未涉及到裂缝的分布密度、长度、深度以及分布态势和成因, 然而以上因素对桥梁的耐久性和使用承载能力也有直接的影响。

4 亚健康混凝土梁式桥广义抗力影响因素

影响亚健康混凝土梁式桥广义抗力, 即裂缝宽度的影响因素很多, 如车辆随机荷载、钢筋锈蚀、截面刚度、混凝土碳化深度、结构几何参数、混凝土材料强度、计算模式等, 由于以上影响因素均具有很大的随机性和不确定性, 如果将各种不确定因素均作为影响广义抗力的随机变量, 会导致可靠度求解变得非常复杂, 为简化计算分析, 本文选取车辆随机荷载和钢筋锈蚀量作为广义抗力随机变量。

4.1 随机车辆活载

通常可将车辆运行状态划分为一般运行状态和密集运行状态(车辆堵塞状态)。一般运行状态的车重随机过程可用滤过泊松过程描述, 车重荷载随机过程最大值分布为极值 I 型分布^[2]。

$$F_T(x) = \exp\{-\exp(-(x - \alpha)/\beta)\} \quad (9)$$

式中 α 和 β 为分布函数, 其最大似然估计为: $\bar{\alpha} = 126.1763$, $\bar{\beta} = 28.9317$ 。

密集运行状态下的车重荷载随机过程可用滤过 Weibull 过程描述, 在设计基准期内的最大值分布为 Weibull 分布。

$$F_T(x) = \exp\{-\exp(-(x/\eta)^m)\} \quad x \geq 0 \quad (10)$$

式中 η 和 m 采用极大似然估计法得: $\bar{\eta} = 343.179$
2, $\bar{m} = 12.2263$ 。

4.2 钢筋锈蚀

混凝土钢筋锈蚀会引起钢筋截面减小、体积胀大、混凝土顺筋开裂、保护层脱落、钢筋与混凝土间的黏结力下降。锈蚀量可由分段函数表示^[10]:

$$W_t = 2.35 P_{RH} D_0 (R/K_c^2) \cdot [\sqrt{R^2 - (R + c - K_c \sqrt{t})^2} - (R + c - K_c \sqrt{t})] \cdot \arccos \frac{R + c - K_c \sqrt{t}}{R} (t_p \leq t \leq t_{cr})$$

$$W_t = W_{cr} + 1.173 P_{RH} D_0 (t - t_{cr}) (t \geq t_{cr})$$

式中, $K_c = K_{et} K_{ei} K_{ti} \left(\frac{24.48}{\sqrt{f_{ck}}} - 2.74 \right)$, $t_p = c/K_2^2$,

$W_{cr} = 1.204 R (1 + c/R)^{0.85} \times 10^{-3}$,

$D_0 = 0.011 \left(\frac{32.15}{f_{cu}} - 0.44 \right)$ 。

式中, K_c 为混凝土碳化系数; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值; K_{et} 为地区影响系数; K_{ei} 为室内外影响系数; K_{ti} 为养护时间影响系数; t_p 为锈蚀开始时间; c 为混凝土保护层厚度; P_{RH} 为空气相对湿度大于 65% 的概率; W_{cr} 为混凝土保护层开裂时的锈蚀量; D_0 为氧气在混凝土中的扩散系数。

5 损伤极限状态方程与工程算例

作为广义荷载效应的亚健康公路梁式桥的最大裂缝宽度 W_{max} 是一个随机变量, 但作为广义抗力的最大裂缝宽度 $[W_{max}]$ 具有不确定性、主观性和模糊性, 可利用模糊随机可靠度的方法确定, 所以亚健康公路桥梁的使用损伤极限状态方程可表示为:

$$Z = [W_{max}] - W_{max} \quad (11)$$

算例: 某亚健康简支装配式 T 梁桥计算跨径为 $L = 16$ m, 梁高 1.0 m, 桥宽 8 m, 单向二车道, 设计荷载等级为汽车 - 20 级。该桥已运营 30 余年, 由于常年处于超负荷运营状态, 已出现梁体开裂、混凝土保护层剥落、钢筋锈蚀等病害, 正常使用性能已不满足规范设计要求, 但尚未有即时危险, 为有效控制桥梁病害的进一步发展保证其安全运营, 同时能充分发挥其承载潜力, 建议该桥在加固前进行限载使用。本文分别按一般运行状态和密集运行状态计算该桥满足目标可靠度指标时的运营车辆荷载限值。通过模糊失效分析结合外观检查和荷载试验结构, 该桥的裂缝宽度模糊失效限值定为 0.19 ~ 0.28 mm。

建立该桥的有限元模型, 将文献^[11]通过蒙特卡罗法所模拟的随机车辆荷载作用于该桥, 得出随机车辆荷载重车与可靠度指标间的关系, 如表 1 示。所采用的随机荷载重车频率与车长频率直方图, 分别如图 2 和 3 示。从表 1 可知在两种运行状态下, 未进行运行荷载限制时, 通过的最大车质量为 60 t, 在密集运行状态可靠指标仅为 0.72 ~ 0.89, 失效概率为 40.1% ~ 30.2%, 可见在超载密集运营状态, 该桥的可靠度极低。而在设计活载, 即汽 - 20 级作用下, 其可靠度为 1.23 ~ 1.40, 相应的失效概率为 21.3% ~ 16.7%, 说明其正常使用承载能力已无法满足设计活载等级要求; 而当最大车质量为 20 t, 亦即当设计活载等级降为汽 - 15 级时, 在密集运营状态下其可靠度指标为 1.61 ~ 1.73, 相应的失效概率为 0.9% ~ 2.1%, 说明采取限载措施后, 在密集运行状态下桥梁的安全使用能得到有效的保障, 所以通过计算分析, 可限制该桥允许通过的最大单车质量为 20 t。

表 1 运营车辆荷载限值和可靠度指标 β 间的关系

Table 1 The relationship of of vehicle load limit and reliability index β

最大车 质量/t	对应规范 荷载等级	密集运行 状态可靠 度指标	一般运行 状态可靠 度指标
60		0.72 ~ 0.89	0.85 ~ 0.92
55	汽 - 超 20	0.80 ~ 0.91	0.91 ~ 1.02
30	汽 - 20	1.23 ~ 1.40	1.43 ~ 1.52
20	汽 - 15	1.61 ~ 1.73	1.75 ~ 1.86
15	汽 - 10	1.87 ~ 1.99	1.90 ~ 2.06

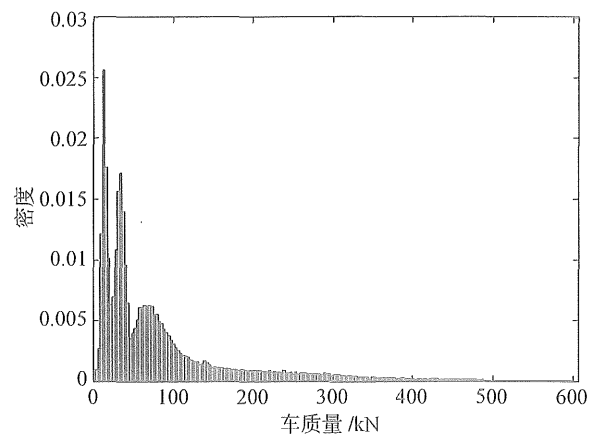


图 2 车质量频率直方图

Fig. 2 Frequency histogram of vehicle weight

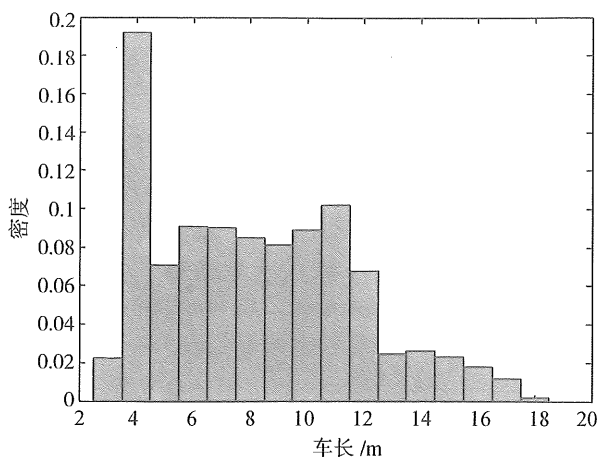


图3 车长频率直方图

Fig. 3 Frequency histogram of vehicle length

6 结 论

(1) 本文以反应亚健康混凝土梁式桥使用承载能力的参数,即裂缝宽度作为广义抗力,将随机车辆荷载和钢筋锈蚀量作为随机变量,建立了亚健康公路梁式桥的使用可靠度模型,提出了亚健康混凝土梁式桥的限载方法,为公路桥梁的合理适度使用提供了一条新思路。

(2) 亚健康公路混凝土梁式桥的使用承载能力可通过桥梁裂缝宽度来反映,随机车辆荷载中的重车与亚健康公路混凝土梁式桥的可靠度指标密切相关,将裂缝宽度作为广义抗力得到桥梁使用承载能力可靠度指标与失效概率可作为桥梁限载依据。

(3) 限于篇幅,本文仅仅以裂缝的宽度作为广义抗力,对裂缝长度、深度、分布形式、密度以及性态对结构的可靠度影响均未加考虑,这对于综合评估亚健康混凝土桥式梁的使用承载能力可靠度显然是不全面的,笔者将在接下来的研究中将通过建立影响因素权向量的方法得出亚健康梁式桥的使用承载能力极限状态的综合抗力。

参考文献:

[1] 张俊平,刘爱荣. 如何拯救亚健康桥梁[J]. 桥梁, 2008,26(6):80-83.
ZHANG Junping, LIU Airong. How to rescue sub-health bridge[J]. Bridge, 2008, 26(6):80-83.
[2] 吴刚. 现役亚健康公路混凝土梁桥限载方法研究[D]. 广州大学,2008.

[3] 张建仁,王磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报,2006,19(2):49-55.
ZHANG Jianren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2):49-55.
[4] 张建仁,秦权. 现有混凝土桥梁的时变可靠度分析[J]. 工程力学,2005,22(4):90-95.
ZHANG Jianren, QIN Quan. Time dependent reliability analysis of existing concrete bridges[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(4):90-95.
[5] 赵羽羽,金伟良. 正常使用极限状态下混凝土结构构件可靠度的分析方法[J]. 浙江大学学报,2002,36(6):674-679.
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Methods of reliability based on serviceability limited state for concrete structural members[J]. Journal of Zhejiang University, 2002,36(6):674-679.
[6] 禹智涛,韩大建. 既有钢筋混凝土桥梁正常使用极限状态的可靠度分析方法[J]. 中南公路工程,2003,28(11):19-22.
YU Zhitao, HAN Dajian. Methods of reliability analysis on serviceability limited state for existing reinforced concrete bridges[J]. Central South Highway Engineering, 2003,28(11):19-22.
[7] 赵国藩,李云贵. 混凝土结构正常使用极限状态可靠度模糊概率分析[J]. 大连理工大学学报,1990,30(2):177-184.
ZHAO Guofan, LI Yungui. Fuzzy probability analysis of reliability at serviceability limit states of reinforced concrete structures. Journal of Dalian University of Technology, 1990,30(2):177-184.
[8] 张士金. 基于荷载试验的桥梁承载能力评估方法[D]. 广州大学,2009.
[9] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D62-2004)[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
[10] 王钧利. 在役桥梁检测、可靠性分析与寿命预测[M]. 中国水利水电出版社,2006.
[11] 张俊平,刘爱荣,吴刚. 亚健康梁桥运营荷载限制的可靠度分析[J]. 广州大学学报,2009,8(4):70-74.
ZHANG Junping, LIU Airong. Analysis on the reliability of the operating load limit of sub-health beam bridges[J]. Journal of Guangzhou University, 2009,8(4):70-74.